

シルカロイファイン発火対策確認試験

(核燃料サイクル開発機構契約業務成果報告書)

1999年2月

株式会社 神戸製鋼所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ
してください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,

Japan

II 核燃料サイクル機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

1999

ジルカロイファイン発火対策確認試験

小松征彦*1, 阿部 隆*1

藤田宏哉*2, 関沢浩一*2

要 旨

使用済み燃料の再処理工程でハル等廃棄物が発生しハル缶に収納されている。HWTFにおいて、これらの廃棄物を処理することを計画している。これらの廃棄物には、ハルから発生するジルカロイファインが含まれている。ジルカロイファインは発火し易く、消火は困難であると考えられている。

HWTFでの想定火災事故を模擬した消火試験を実施した。

得られた試験結果は次の通り。

- (1) 模擬ジルカロイファインの燃焼に対して、二酸化炭素消火設備が選定された。液化二酸化炭素の気化により生じた冷却と窒息の相乗効果により消火した。水はセルライニングの冷却に効果がありそうである。
- (2) 二酸化炭素消火設備で模擬ジルカロイファインを吸引した HEPA フィルタの火災を消火することができた。
- (3) 二酸化炭素消火設備で模擬ジルカロイファインが混入した可燃物の火災を消火することができた。

本報告書は（株）神戸製鋼所が核燃料サイクル開発機構の委託により実施した研究成果に関するものである。

機構担当部課室：東海事業所 再処理センター 技術部 技術開発課

*1 （株）神戸製鋼所 エンジニアリング事業部 技術センター エネルギー・原子カプラント技術部 原子カプラント室

*2 日本フェンオール（株）

Confirmation test of a measure against ignition of zircaloy-fines

Yukihiko Komatsu^{*1}, Takashi Abe^{*1}Hiroya Fujita^{*2}, Koichi Sekizawa^{*2}

Abstract

Hull wastes are produced at the reprocessing of spent fuel and are packed in Hull-Drum.

These wastes are intermixed with zircaloy-fines that generate from hulls and will be treated in Hull Waste Treatment Facility (HWTF).

The zircaloy-fines might be ignitable, and be difficult to extinguish. We performed extinguishing test under simulated fire accident condition.

The obtained results are as follows,

- (1) We selected a carbon dioxide extinguishing system for the combustion of zircaloy-fines. The combustion was extinguished by the synergistic effects of cooling function and suffocating function that was produced by evaporation of liquefied carbon dioxide. The water can be used for cooling of the cell lining effectively.
- (2) The fire from HEPA filter including zircaloy-fines was also extinguished by a carbon dioxide extinguishing system.
- (3) The fire from combustible wastes including zircaloy-fines was also extinguished by a carbon dioxide extinguishing system.

This work was performed by KOBE STEEL, LTD. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison : Technology Development Section, Technology Co-ordination
Division, Tokai Reprocessing Center, Tokai Works

*1 : Energy & Nuclear Plant Engineering Dept., KOBE STEEL, LTD.

*2 : FENWAL CONTROLS OF JAPAN, LTD.

目 次

1. はじめに	1
2. 試験の構成	2
3. 模擬ファインの性状確認	3
3.1 模擬ファインの物性	3
3.2 模擬ファインの発熱開始温度	3
3.2.1 試験装置	4
3.2.2 試験手順	4
3.2.3 試験結果	4
4. 消火方法の検討・評価	15
4.1 文献等による金属粉の消火事例の調査	15
4.2 消火剤適応性試験	16
4.2.1 消火設備の調査	16
4.2.2 消火剤適応性試験	20
5. 模擬ジルカロイファイン発火・消火特性試験	34
5.1 模擬ファインの粒径の違いによる発火及び消火特性の確認試験	34
5.1.1 発火特性試験	34
5.1.2 消火特性試験	35
5.1.3 評価	36
5.2 模擬ファインの堆積層の嵩密度の違いによる 発火及び消火特性の確認試験	37
5.2.1 発火特性試験	37
5.2.2 消火特性試験	38
5.2.3 評価	38
6. 消火剤選定試験	44
6.1 二酸化炭素消火設備による消火試験	44

6.2	スプリンクラー消火設備による消火試験	44
6.3	消火剤の選定	45
7.	消火試験	49
7.1	堆積ジルカロイファイン消火試験	49
7.1.1	試験方法・手順	49
7.1.2	試験結果	49
7.2	フィルタ堆積ジルカロイファイン消火試験	53
7.2.1	試験方法・手順	53
7.2.2	試験結果	54
7.3	まとめ	58
8.	ジルカロイファイン混入可燃・難燃物消火試験	85
8.1	消火対象物の仕様	85
8.2	試験結果	86
8.2.1	消火対象物の調整条件選定試験	86
8.2.2	スプリンクラー消火設備による消火試験	87
8.2.3	二酸化炭素消火設備による消火試験	88
8.2.4	評価	88
9.	まとめ	93
10.	参考文献	95
	自主試験-1 模擬ファインの水による冷却効果確認試験	96

- 表・図・写真目次 -

[表目次]

表 3.1-1	模擬ファイン（小粒径）の粒径分布	6
表 3.1-2	模擬ファイン（大粒径）の粒径分布	7
表 3.1-3	模擬ファイン（小粒径）の成分分析証明書	8
表 3.1-4	模擬ファイン（大粒径）の成分分析証明書	9
表 3.2-1	TG 装置の仕様	10
表 5.1-1	模擬ファインの粒径の違いによる消火特性試験結果	40
表 5.1-2	模擬ファインの嵩密度の違いによる消火特性試験結果	41
表 6.1-1	消火剤選定試験結果	47
表 7.1-1	堆積模擬ファイン消火試験結果	57
表 7.1-2	堆積ジルカロイファイン燃焼による煤塵量	57
表 7.2-1	HEPA フィルタ概要	58
表 7.2-2	フィルタ堆積ジルカロイファイン消火試験結果	59
表 7.2-3	フィルタ堆積ジルカロイファイン燃焼による煤塵量	59
表 8.2-1	ジルカロイファイン混入可燃・難燃物消火試験結果	89

[図目次]

図 3.2-1	模擬ファインの重量増加（TG）曲線	12
図 4.2-1	スプリンクラー消火設備の概要	25
図 4.2-2	Aqua Safe Water Mist System の概要	26
図 4.2-3	二酸化炭素消火設備の概要	27
図 4.2-4	FM-200 高速消火システムの概要	28
図 4.2-5	粉末消火設備の概要	29
図 4.2-6	試験施設の概要	30
図 4.2-7	FM-200, 二酸化炭素消火設備の概要	31
図 4.2-8	スプリンクラー代替散水装置の概要	31

図 5.1-1	発火特性試験用熱板の概要	42
図 5.1-2	発火特性試験の測定概要	43
図 6.2-1	散水装置による試験概要	48
図 7.1-1	ノズル圧力と二酸化炭素放出時間	60
図 7.1-2	温度上昇カーブ	61
図 7.1-3	燃焼残渣の X 線回折結果	67
図 7.1-4	堆積ファイン燃焼の表面温度	73
図 7.1-5	煤塵発生量試験装置	74
図 7.2-1	フィルタ堆積ジルカロイファイン吸引および消火試験装置	75
図 8.2-1	スプリンクラー消火試験装置	90

[写真目次]

写真 3.1-1	SEM による模擬ファイン（小粒径）の外観	11
写真 3.2-1	熱重量分析装置の全容	12
写真 3.2-2	熱重量装置試料ホルダーユニット部	13
写真 4.2-1	山状堆積ファインの着火前後の状況	32
写真 4.2-2	薄層状ファインの着火前後の状況	33
写真 7.1-1	消火後の堆積ファイン	76
写真 7.1-2	ステンレス板の損傷状況	77
写真 7.2-1	フィルタ消火試験後のフィルタ	83
写真 7.2-2	煤塵量測定試験用フィルタ	84
写真 8.2-1	燃焼前の消火対象物の状況	91
写真 8.2-2	消火前の燃焼状況	91
写真 8.2-3	スプリンクラーで消火中の状況	92
写真 8.2-4	二酸化炭素消火設備で消火後の状況	92

1. はじめに

使用済燃料の再処理溶解工程における不溶解残渣である燃料被覆管剪断片（ハル）から発生するジルカロイ細粉（ファイン）は非常に活性な金属であり、発火性を有していることが知られている。このジルカロイファインは、燃焼温度が千数百度に達し、酸素が少しでも存在すれば燃焼は継続する。また、少量の水を含むジルカロイファインが発火した場合に、水から酸素を奪い反応することから、一旦発火すると消火に困難が伴うことが予測される。

本試験では施設の設計に影響すると考えられる堆積した状態のジルカロイファイン粉じん層が万一発火した場合の消火方法及び延焼抑制方法の可能性について確認試験を行い、ハル等廃棄物処理技術開発施設（HWT F）の設計に資する。

2. 試験の構成

(1) 模擬ファインの性状確認

本試験に用いるジルコニウム粉じん（以下模擬ファインという）の形状を確認するとともに、発熱開始温度を調査し、平成8年度に実施した「ジルカロイファイン特性試験（Ⅱ）*⁽¹⁾」のジルカロイ粉じんの発熱開始温度と比較し、同程度であることを確認した。

(2) 消火方法の検討・評価

文献調査を行い、ジルカロイファインに適応可能と考えられる消火方法を調査するとともに、適応性試験を行い、ジルカロイファイン火災に適応可能な消火剤を選定した。

(3) 模擬ファインの発火・消火特性試験

ファインの粒径分布の違いによる発火・消火特性、堆積状況（嵩密度）による発火・消火特性を調査し、発火し易い条件及び消火し難い条件を選定した。

(4) 消火剤選定試験

有効性が確認された種々の消火剤を用い、消火し難いファイン堆積状況での消火試験を行い、ファイン火災に対し最も優れた消火剤を選定した。

(5) 消火試験

選定された消火剤を用い、施設内で想定される状況を模擬した堆積ジルカロイファイン及びフィルタ堆積ファインの消火試験を行い、消火剤の放出量、消火時間、セルライニングへの影響等のデータを取得した。

(6) ファイン混入可燃・難燃物消火試験

二酸化炭素消火設備及びスプリンクラー消火設備を用い、ファインが混入した可燃物の消火試験を行い、消火の可否を確認した。

3. 模擬ファインの性状確認

本試験に用いる模擬ファインの形状を確認するとともに、発熱開始温度を調査し、平成8年度に実施した「ジルカロイファイン特性試験(Ⅱ)*⁽¹⁾」のジルカロイ粉じんの発熱開始温度と比較し、同程度であることを確認する。

3.1 模擬ファインの物性

本試験では模擬ファインとして大韓民国 SE-JONG 社製のジルコニウム微粉を用いた。この微粉は水素吸蔵-粉碎-脱水素法により製造された。成分、粒径分布、形状の概要を以下に示す。

(1) 粒径分布

本試験では後述する模擬ファインの消火特性試験においてファインの粒径分布の違いによる消火特性について調査し、消火し難い粒径分布を選定することになっている。このため400メッシュ以下の小粒径と60メッシュ以下～100メッシュ以上の大粒径の二種類の模擬ファインを準備した。それぞれのファインの粒径分布の測定結果を表3.1-1～2に示す。これによると小粒径は約20 μ mに、大粒径は約200 μ mに鋭角的なピークを有する分布を示している。

(2) 成分

表3.1-3～4に成分分析の証明書を示す。これによるとジルコニウム含有量は99%以上と高純度であった。

(3) 形状

同様の粒径分布を有していても表面積が発火特性に影響を及ぼすことが知られており、SEM観察により、形状が矩形であることを確認した。写真3.1-1にSEMによる模擬ファインの外観を示す。

3.2 模擬ファインの発熱開始温度

粉じんの発熱開始温度には粒径の影響があると考えられるため、「ジルカロイファイン特性試験Ⅱ」のジルカロイファインとほぼ同様な粒径分布を有する

小粒径の模擬ファインを用い、発熱開始温度を調査した。試験方法は、「ジルカロイファイン特性試験Ⅱ」と同様に熱重量測定法を用い、粉じんを一定温度まで速やかに昇温し、一定時間保持した場合の酸化による重量増加が開始する温度（発熱開始温度）を確認した。

3.2.1 試験装置

試験装置は得られるデータの整合性を考慮し、「ジルカロイファイン特性試験Ⅱ」と同じ装置を使用した。試験装置は本体部、電気炉ユニット部、試料ホルダーユニット部及びコントローラから構成される。装置の仕様を表 3.2-1 に、装置の全容を写真 3.2-1 に、試料ホルダーユニット部を写真 3.2-2 に示す。

3.2.2 試験手順

試験は以下に示す手順によって行った。

① 基準物質

一般的に用いられる α - Al_2O_3 粉末を使用する。この α - Al_2O_3 の粉末は高純度アルミナを 1300℃以上で数時間加熱したのち粉碎し、デシケーターの中に蓄えておくことにより得る。

② 試料

試料は試料皿に適量つめる。また、試料と試料皿の熱的接触を最良にするために試料を均一に（少量なら皿の中心に）入れる。

このとき重要なことは試料は試料容器に出来るだけつめすぎず薄く均一に軽くつめるようにすることである。このため、試料を入れた試料皿（max500mg）をピンセットで数 mm 持ち上げ、テーブルの上に落す操作を 2, 3 回繰り返す。

③ 試験

試料を加熱し、酸化による重量増加を観察すると共にレコーダーに重量変化を記録する。

3.2.3 試験結果

室温から昇温速度 40°C/min で一定温度まで急速に加熱し、その後、5 時間保持した場合の重量増加 (TG) 曲線を図 3.2-1 に示す。

加熱温度は、430°C, 400°C, 330°C, 290°C, 230°C, 217°C, 207°C, 202°C である。温度が高い場合、加熱によって、試料は初め比較的急激に重量を増すが、次第に重量増加率は緩慢になる。しかし、300°C 以下の温度では、重量増加率は 3 % 程度で僅少である。207°C では、重量増加は認められなかった。この場合の最低重量増加開始温度は 207°C であり、「ジルカロイファイン特性試験 (II) * ⁽¹⁾」の結果である 220°C とほぼ同等であった。

さらに、模擬ファインの粉じん層の最低発火温度を測定した結果、層厚さ 5 mm で 260°C であり、「ジルカロイファイン特性試験 II」の結果である 270°C とほぼ同等であった。粉じん層の最低発火温度を決定する方法を定める規格としては、唯一 I E C [International Electrotechnical Commission (国際電気標準会議)] 規格に次のものがある。本試験は、この規格に準拠して実施した。

I E C 1 2 4 1 - 2 - 1

Electrical apparatus for use in the presence of combustible dust
Part 2 : Test methods Section 1 : Methods for determining the
minimum ignition temperatures of dust Methods A : Construction of
a heated surface and measurement of temperature distribution on the
surface

(可燃性粉じん大気用電気機器 第 2 部 試験方法 第 1 節 粉じんの発火温度を決定する方法 方法 A 一定温度での加熱表面上の粉じん層)

表 3.1-1 模擬ファイン (小粒径) の粒径分布

MASTER SIZER

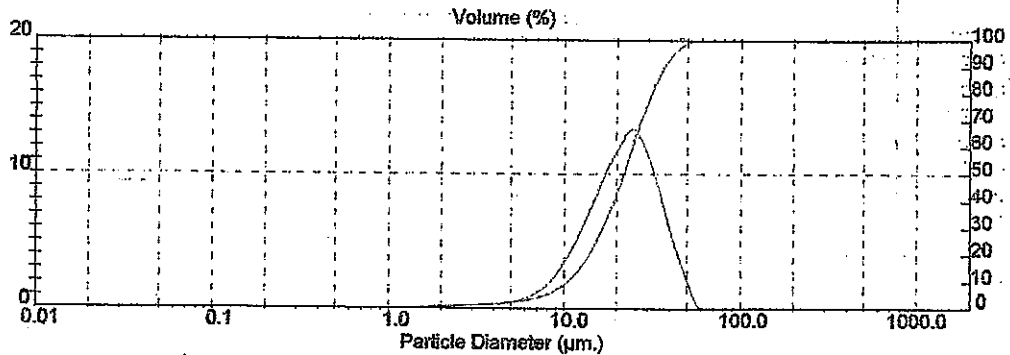
Result: Histogram Report

Sample Details		
Sample ID: ZR UNDER 400mesh	Run Number: 1	Measured: Fri Nov 20 1998 2:05PM
Sample File: ZRPHG	Record Number: 276	Analysed: Fri Nov 20 1998 2:05PM
Sample Path: C:\SIZERS\DATA\		Result Source: Analysed
Sample Notes:		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: None	Obscuration: 11.3 %
Presentation: 3THDj	[Particle R.I. = (2.5935, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 1.697 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0253 %Vol	Density = 1.000 g/cub.cm	Specific S.A. = -0.3732 sq. m / g
Mean Diameters:	D [v, 0.1] = 10.23 um	D [v, 0.5] = 21.46 um	D [v, 0.9] = 36.47 um
D [4, 3] = 22.47 um	D [3, 2] = 16.08 um	Span = 4.223E+00	Uniformity = 3.800E-01

Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %
0.055	0.00	0.635	0.00	7.31	4.65	84.15	100.00
0.061	0.00	0.700	0.01	8.06	5.72	92.79	100.00
0.067	0.00	0.772	0.01	8.89	7.14	102.3	100.00
0.074	0.00	0.851	0.02	9.80	9.02	112.8	100.00
0.082	0.00	0.936	0.04	10.81	11.46	124.4	100.00
0.090	0.00	1.03	0.06	11.91	14.57	137.2	100.00
0.099	0.00	1.14	0.09	13.14	18.44	151.3	100.00
0.109	0.00	1.26	0.13	14.49	23.14	166.8	100.00
0.121	0.00	1.39	0.19	15.97	28.68	183.9	100.00
0.133	0.00	1.53	0.25	17.62	35.04	202.8	100.00
0.147	0.00	1.69	0.34	19.42	42.13	223.6	100.00
0.162	0.00	1.86	0.43	21.42	49.83	246.6	100.00
0.178	0.00	2.05	0.55	23.62	58.19	271.9	100.00
0.196	0.00	2.26	0.69	26.04	66.77	299.8	100.00
0.217	0.00	2.49	0.84	28.72	74.75	330.6	100.00
0.239	0.00	2.75	1.01	31.66	81.80	364.6	100.00
0.263	0.00	3.03	1.19	34.82	87.75	402.0	100.00
0.290	0.00	3.34	1.40	38.50	92.44	443.3	100.00
0.320	0.00	3.69	1.62	42.45	95.91	488.8	100.00
0.353	0.00	4.07	1.86	46.81	98.26	539.0	100.00
0.389	0.00	4.48	2.12	51.62	99.60	594.3	100.00
0.429	0.00	4.94	2.43	56.92	100.00	655.4	100.00
0.473	0.00	5.45	2.80	62.76	100.00	722.7	100.00
0.522	0.00	6.01	3.25	69.21	100.00	796.9	100.00
0.575	0.00	6.63	3.86	76.32	100.00	878.7	100.00



SE-JONG Materials Ltd.

ern Instruments Ltd.
ern, UK
+44 (0)1684-892456 Fax: +44 (0)1684-892789

Masterizer S Ver. 2.15
Serial Number: 33544-220

p. 3
20 Nov 98 15:10

表 3.1-2 模擬ファイン (大粒径) の粒径分布

MASTER SIZER

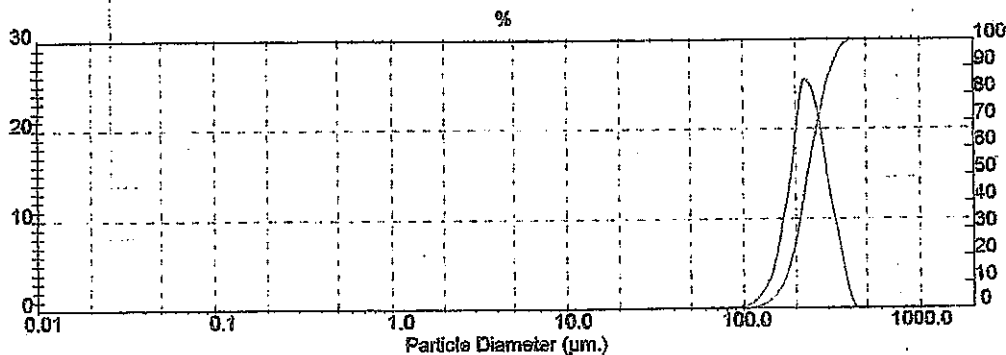
Result: Histogram Report

Sample Details		
Sample ID: Zr-NMCC 60-100	Run Number: 20	Measured: Sat Oct 10 1998 12:08PM
Sample File: ZRPHG	Record Number: 241	Analyzed: Sat Oct 10 1998 12:08PM
Sample Path: C:\SIZERS\DATA\		Result Source: Analysed
Sample Notes:		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: None	Obscuration: 1.9 %
Presentation: 3THD:	[Particle R.I. = (2.5935, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 2.876 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0590 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.0271 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 166.65 um	D (v, 0.5) = 229.57 um	D (v, 0.9) = 314.35 um
D [4, 3] = 235.24 um	D [3, 2] = 221.04 um	Span = 6.433E-01	Uniformity = 1.991E-01

Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %
0.061	0.00	0.700	0.00	8.06	0.00	92.79	0.13
0.067	0.00	0.772	0.00	8.89	0.00	102.3	0.30
0.074	0.00	0.851	0.00	9.80	0.00	112.8	0.64
0.082	0.00	0.938	0.00	10.81	0.00	124.4	1.37
0.090	0.00	1.03	0.00	11.91	0.00	137.2	2.77
0.099	0.00	1.14	0.00	13.14	0.00	150.0	4.93
0.109	0.00	1.26	0.00	14.49	0.00	151.3	5.19
0.120	0.00	1.39	0.00	15.97	0.00	166.8	10.06
0.133	0.00	1.53	0.00	17.62	0.00	183.9	18.12
0.147	0.00	1.69	0.00	19.42	0.00	202.8	29.52
0.162	0.00	1.86	0.00	21.42	0.00	223.6	45.57
0.178	0.00	2.05	0.00	23.62	0.00	246.6	61.68
0.196	0.00	2.26	0.00	26.04	0.00	271.9	75.82
0.217	0.00	2.49	0.00	28.72	0.00	299.3	86.38
0.239	0.00	2.75	0.00	31.66	0.00	330.6	93.49
0.263	0.00	3.03	0.00	34.92	0.00	364.6	98.26
0.290	0.00	3.34	0.00	38.50	0.00	402.0	99.94
0.320	0.00	3.69	0.00	42.45	0.00	443.3	100.00
0.353	0.00	4.07	0.00	46.81	0.00	488.8	100.00
0.389	0.00	4.48	0.00	51.62	0.00	539.0	100.00
0.429	0.00	4.94	0.00	56.92	0.00	594.3	100.00
0.474	0.00	5.45	0.00	62.76	0.00	655.4	100.00
0.522	0.00	6.01	0.00	69.21	0.01	722.7	100.00
0.576	0.00	6.63	0.00	76.32	0.02	796.9	100.00
0.635	0.00	7.31	0.00	84.15	0.06	878.7	100.00



SE-JONG Materials Ltd.

vern Instruments Ltd.
vern, UK
+44 (0)1684-892456 Fax: +44 (0)1684-892789

Mastersizer S Ver. 2.15
Serial Number: 33544-220

10 Oct 98 12:56

表 3.1-3 模擬ファイン（小粒径）の成分分析証明書

SE-JONG MATERIALS CO., LTD.

SE-JONG

CERTIFICATE OF ANALYSIS

Date : 1998, Nov 20

TO : NEW METALS AND CHEMICALS CO.,LTD.

4-13, SAN-CHOME, NIHONBASHI, CHUO-KU, TOKYO, 103-0027, JAPAN

- PURCHASE ORDER NO. : SEJ0603
 - LOT NO : SZPDHF01
 - DESCRIPTION : ZIRCONIUM METAL POWDER
 - PURITY : ZR 99% AND UP
 - PARTICLE SIZE : -400 MESH
 - SPECIFICATION : HYDROGEN 2000±500ppm

Analyzed Results

(Unit : ppm)

Component	Result	Component	Result
Iron (Fe)	< 500	Nickel (Ni)	< 70
Magnesium (Mg)	< 30	Molybdenum (Mo)	< 50
Silicon (Si)	< 120	Chlorine (Cl)	< 100
Hafnium (Hf)	< 100	Chromium (Cr)	< 200
Nitrogen (N)	< 230	Oxygen (O)	< 5000
Titanium (Ti)	< 50	Manganese (Mn)	< 50

* PRODUCING POWDERS ARE SCREENED BY THE ALLGAIER MACHINE.


 Exec. Managing Director.

FACTORY : 163B-12L, NAMDONG INDUSTRIAL COMPLEX, 737-11, KOJAN-DONG, NAMDONG-KU, INCHON, KOREA
 TEL : 001-82-32-612-6184, 6 FAX : 001-82-32-618-5701

表 3.1-4 模擬ファイン (大粒径) の成分分析証明書

SE - JONG MATERIALS CO., LTD.



CERTIFICATE OF ANALYSIS

DATE : 1998. OCT 10.

TO : NEW METALS AND CHEMICALS LTD.

4-13, SAN-CHOME, NIHONBASHI, CHUO-KU, TOKYO, 103-0027, JAPAN

- PURCHASE ORDER NO : SEJ-0002
- DESCRIPTION : ZIRCONIUM METAL POWDER, (DRY)
- PURITY : ZR 99% AND UP
- PARTICLE SIZE : -60 MESH ~ +100 MESH
- SPECIFICATION : H=2000 ± 500PPM

< Analyzed Results >

- LOT NO : SZPDHFRG

(Unit : wt.%)

Components	Results	components	Results
Zirconium (Zr)	Balance	Nickel (Ni)	Max 0.007
Iron (Fe)	0.044	Molybdenum (Mo)	Max 0.005
Magnesium (Mg)	0.00065	Chromium (Cr)	Max 0.02
Silicon (Si)	0.0021	Manganese (Mn)	Max 0.003
Hafnium (Hf)	Max 0.01	Oxygen (O)	0.35
Chlorine (Cl)	0.0053	Nitrogen (N)	0.027
Titanium (Ti)	Max 0.005	Hydrogen (H)	Max 0.2

★ PRODUCEING POWDERS ARE SCREENED BY THE ALLGAIER MACHINE.


Exec. Managing Director.

FACTORY: 163B - 12L, NAMDONG INDUSTRIAL COMPLEX, 737 - 11, KUJAN-DONG, NAMDONG-KU, INCHON, KOREA
TEL : 001 - 82 - 32 - 812 - 8184, 6 FAX : 001 - 82 - 32 - 810 - 5701

表 3.2-1 TG装置（理学電機株式会社製）の仕様

項 目	仕 様
<p>1. TG本体部</p> <p>(1) 形式</p> <p>(2) 制御方式</p> <p>(3) 分銅加除機構</p> <p>(4) 測定試料重量</p> <p>(5) 秤量方式</p> <ul style="list-style-type: none"> ・重量法 ・%法 ・天秤感量 <p>(6) 電氣的零点引戻量</p> <p>(7) 天秤精度</p> <p>(8) 直線性</p> <p>(9) 試料ホルダーユニット交換方式</p>	<p>型番：CN8207D2</p> <p>サスペンションバンド型上皿式皆勤天秤</p> <p>自動天秤</p> <p>P.I.D.制御による零位法</p> <p>0～1g</p> <p>秤量レンジ</p> <p>1,2,5,10,20,50,100,200,500mg/f.s.</p> <p>0.2%f.s.(試料量 500mg の場合) 以上任意</p> <p>1 μg</p> <p>±5.0mg</p> <p>フルスケールの 0.5%以内</p> <p>0.5%以内</p> <p>プラグイン方式</p>
<p>2. 電気炉ユニット</p> <p>(1) 使用温度範囲</p> <p>(2) 温度制御用熱電対</p> <p>(3) ヒータ</p>	<p>型番：IRF-2 (赤外線加熱炉：均熱筒白金製)</p> <p>R.T.～1500℃ (常用 1350℃以下)</p> <p>PtRh13%-Pt</p> <p>赤外線</p>
<p>3. 試料ホルダーユニット</p> <p>(1) 使用温度範囲</p> <p>(2) 温度検出熱電対</p> <p>(3) 雰囲気</p>	<p>型番：CN8504A2</p> <p>R.T.～1500℃</p> <p>PtRh13%-Pt</p> <p>不活性気体及び空気、酸素など</p>

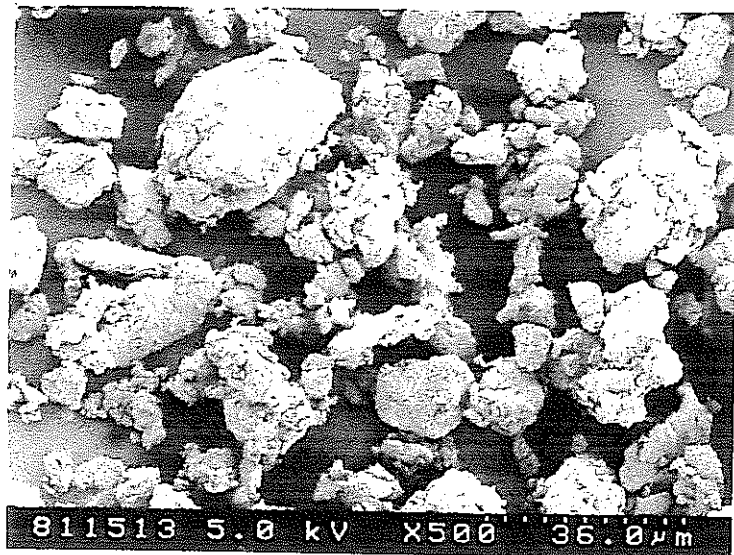
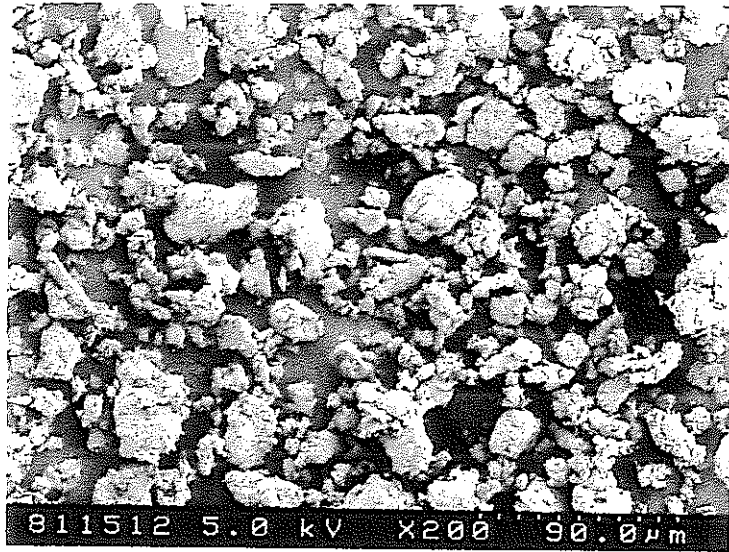


写真 3.1-1 SEM による模擬ファイン（小粒径）の外観

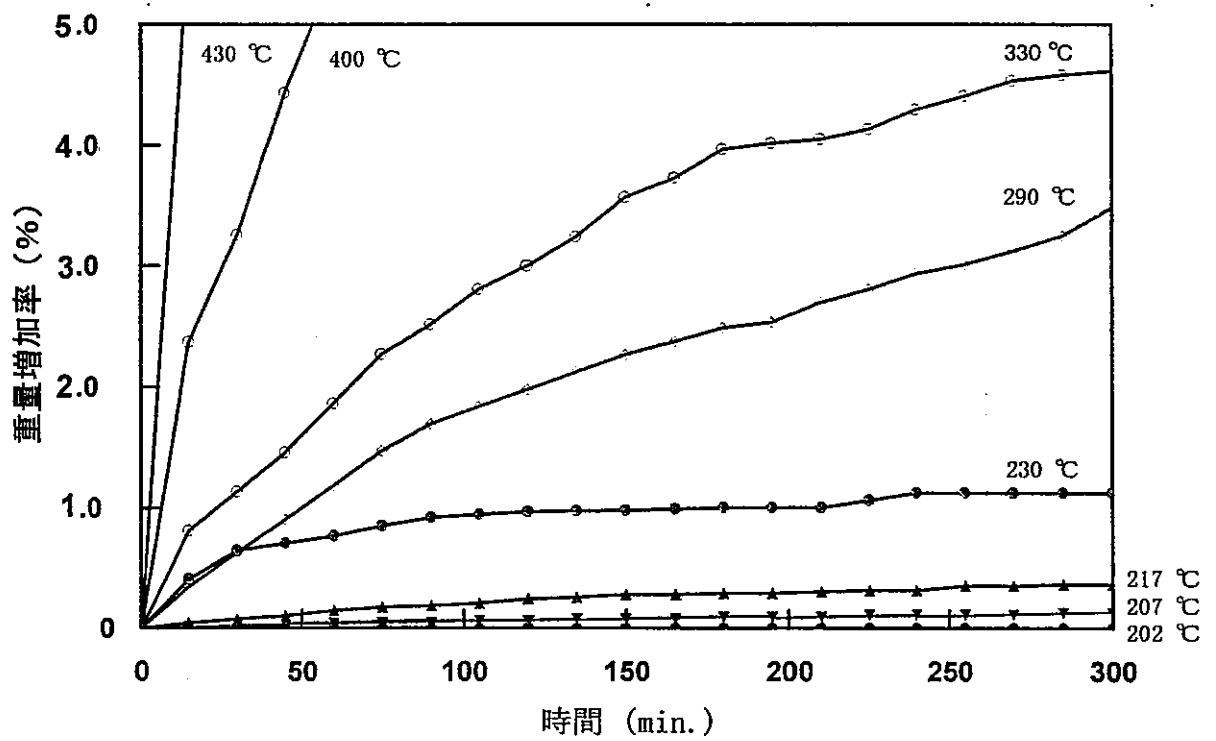


図 3.2-1 模擬ファインの重量増加 (TG) 曲線

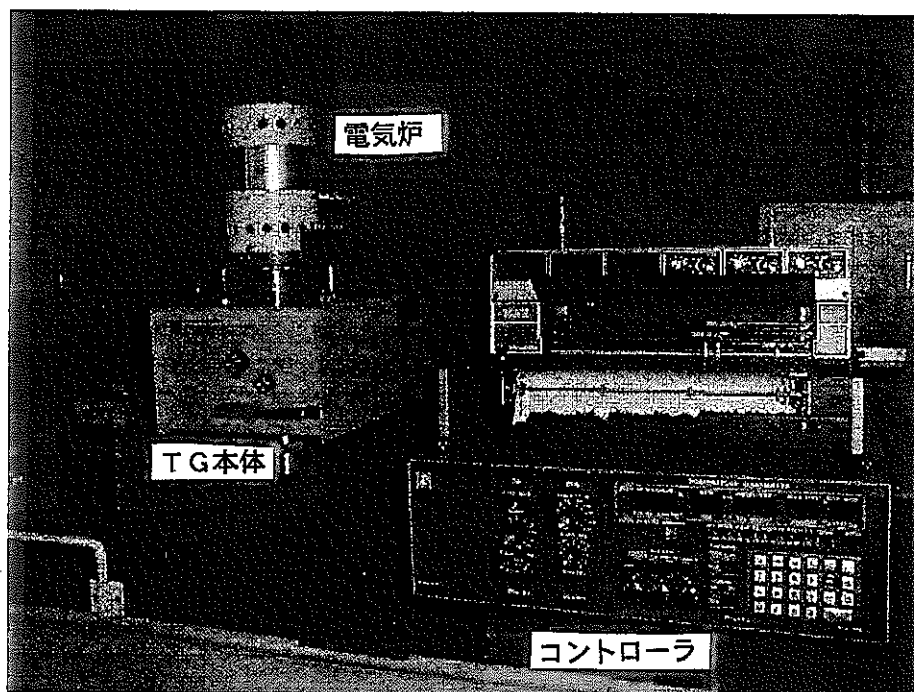


写真 3.2-1 熱重量分析装置の全容

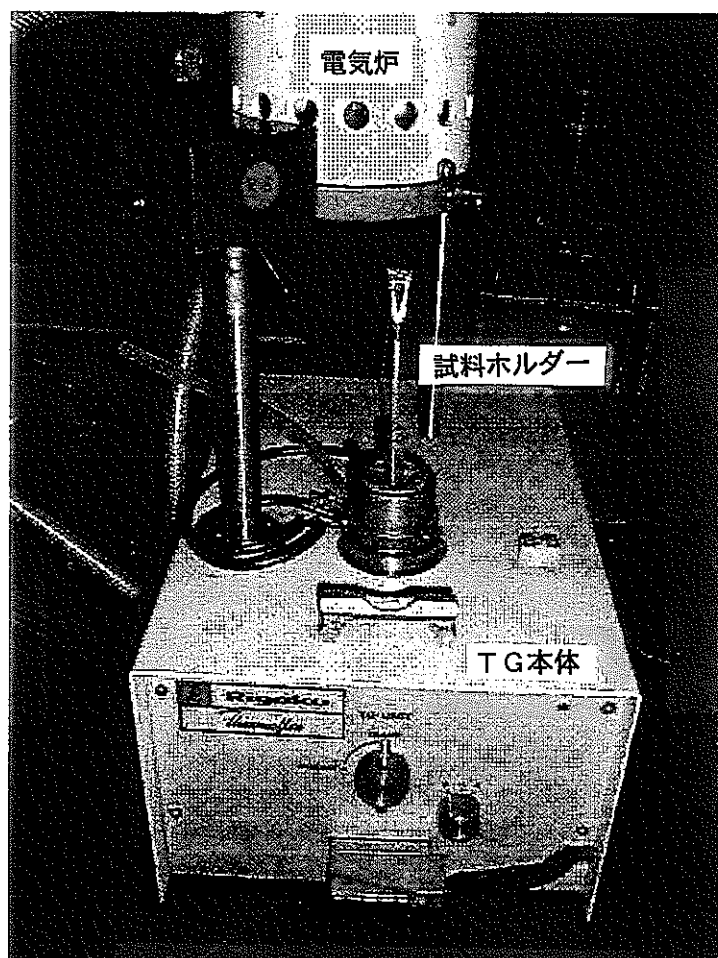


写真 3.2-2 熱重量装置試料ホルダーユニット部

4. 消火方法の検討・評価

4.1 文献等による金属粉の消火事例の調査

一般に金属は酸化されやすいが普通には火災危険の対象とされていない。これは、金属が熱の良導体であるため酸化熱が蓄積されにくいのと、酸化が表面に止まって内部までは及ばないためである。しかし、金属を細分化し、粉状とすれば、酸化表面積の増大、熱伝導率が小さくなるなどの理由により、燃えやすくなる。

一般に金属粉の消火方式としては、冷却消火、窒息消火が有効とされている。しかし、大規模な金属火災では水や泡等の消火剤は全く効果がなく、かえって火は拡大したり、あるいは爆発する危惧さえある。さらにハロゲン化炭化水素、二酸化炭素や窒素とも化学反応することが多く、消火は至難の作業である。このため、消火方法としては、砂、グラファイト等の固体で燃焼しているものを覆って空気を遮断したり、高沸点高引火点液体（使用する液体の引火性を避けるため、ハロゲン化炭化水素等を混合する）中に沈める方法等が推奨されている。^{*(2), *(5)}

金属粉じん火災の消火事例について文献等で調査した結果、乾燥砂や大量のセメント^{*(3)}、液化二酸化炭素^{*(4)}等での少数の事例が報告されているのみである。また、アルミ屑の火災を二酸化炭素消火器、水を用いて消火しようとしたが、類焼して大爆発となった事例^{*(5)}も報告されている。

このように金属粉じん火災に対する事例が少ないうえ、消火方法についても砂、セメント等を用いており、本研究で対象とするセル内での火災には到底適応できそうにない。

ただ、一口に金属粉じん火災といっても、粉じんが堆積している状況、量によっても燃焼の性状が異なるうえ^{*(6)}、材料によっては延焼方向（マグネシウムは表面延焼、アルミニウムは下方軸延焼）にも違いがあることが知られている^{*(7)}。これらのことは、消火の可否に大きな影響を及ぼすと考えられことから、ジルカロイファインの消火方法については、模擬ファインを用いた

試験を行い、適応可能な消火剤を選定する必要があるだろう。さらに、文献等で報告されている事例はマグネシウム等の非常に活性な金属火災の消火方法が多く、本試験で対象としているジルカロイファインの火災は、マグネシウムに比べ活性が劣ると思われるうえ、小規模であり、冷却消火や窒息消火との複合作用で消火できる可能性がある。

4.2 消火剤適応性試験

文献調査のみでは、ジルカロイファインに適応可能な消火剤の選定が困難なため、種々の消火剤について適応性試験を行い、ジルカロイファイン火災に対し有効に適応可能な消火剤を選定する。

4.2.1 消火設備の調査*⁽⁸⁾

消火設備は、基本的には火災を消火することを目的とするが、火災の規模によっては、公設消防隊が現場に到着するまでの間に火勢を抑えたり、ほかへの延焼を防止するためにも使用される。

消火設備には、人が直接操作することにより消火する消火器、屋内消火栓設備のようなものから、火災を自動的に感知し、かつ、消火するスプリンクラー設備のようなものがある。また、水により消火できない、または消火が困難である部分・物質等の火災に対しては、泡、二酸化炭素、ハロゲン化物、粉末等を消火剤とする消火設備を設置することとなる。

本試験の消火対象であるジルカロイファイン火災は、セル内で発生し、しかも、燃焼速度が早いことが予測される。本火災に対する消火設備の選定要件としては、火災を自動で感知し、遠隔で素早く消火できることが必須であるが、消火剤の後始末の容易性、セルの負圧管理への影響、消火時の有毒ガスの発生等の二次的な要素も考慮すべきであろう。しかし、金属火災消火が非常に難しいことを考慮すると、まずは、遠隔で素早く消せることを念頭に置くべきであろう。

一方、金属火災の消火方式としては、窒息消火、冷却消火が推奨されてい

る。しかし、これまで模擬ファインを用いた発火特性試験*⁽⁹⁾・*⁽¹⁰⁾において、粉じん雲の爆発下限酸素濃度は約2%、堆積粉じんは極希薄な酸素濃度中においても発火する可能性があることが知られている。このため窒息効果による燃焼の抑制は期待できるものの、完全な消火は望めないと考えられる。

この条件に対応できそうな消火設備の概要及び適応性を以下に示す。

(1) スプリンクラー消火設備

スプリンクラー消火設備は、天井付近に設置されたスプリンクラーヘッド、流水検知装置、消火ポンプ等により構成される。通常ヘッドまでの配管系統は加圧水により充水されており、火災が発生するとスプリンクラーヘッドの感熱部が火災の熱を受けて溶解し、ヘッドのシール機構が分解し放水が開始される。放水により配管内の圧力が低下すると、圧カスイッチが作動し、消火ポンプが起動するとともに、火災警報を発する。

このようにスプリンクラー消火設備は、火災の感知から消火までを自動的に行うとともに、出火場所付近に設置されたヘッドのうち、数少ないヘッドの作動により効率の良い消火を行うことができる。

金属と水との反応が危惧されるが、粉じんが少ないため、水の冷却効果が勝る可能性もあり、期待できる。

図 4.2-1 にスプリンクラー消火設備の概要を示す。

(2) 水噴霧消火設備

水噴霧消火設備は、基本的にはスプリンクラー消火設備と同様であるが、水噴霧ヘッドは火災感知機能を持たないため、一定の放水区画を決め、火災感知器等の作動と連動する一斉開放弁を設けたもので、水噴霧ヘッド、一斉開放弁、加圧送水装置等により構成される。

水噴霧消火設備は、スプリンクラー設備と同様に水を消火剤として使用するが、本設備に用いられる水噴霧ヘッドから放射される水は噴霧状となって放射されるため、水本来の冷却効果に加え、急速な蒸発作用により熱を奪う

とともに燃焼面を蒸気で覆い、酸素を遮断する窒息効果も期待することができる。

近年は、極少量の水で効率の良い消火が可能なシステムが開発されており、セル内消火に適していると考えられる。

図 4.2-2 に Aqua Safe Water Mist System の概要を示す。

(3) 二酸化炭素消火設備

一般にガス系消火設備と呼ばれ、消火原理は、二酸化炭素の場合は窒息と気化熱による冷却であり、後述するハロゲン化物と粉末は化学作用による燃焼の連鎖反応の抑制であると言われている。これらの設備はいずれも、貯蔵容器、配管、噴射ヘッド、起動装置、制御装置から構成されている。

二酸化炭素消火設備は不燃材料で造られた防護区画内に、適切な消火剤量を適切な時間内に放出するシステムである。設備の起動は、窒息の危険性があり、手動式とされているが、常時人のいない防火対象物、その他手動式によることが不適当な場合には自動式とすることができる。自動式起動装置は、火災感知器の作動と連動して起動する。

二酸化炭素の約 70% は液状で放出されることが知られており、その気化熱による冷却効果が優れており、窒息効果との相乗効果で少量の金属火災の消火には適応できる可能性がある。

図 4.2-3 に二酸化炭素消火設備の概要を示す。

(4) ハロゲン化物消火設備

設備構成は二酸化炭素消火設備とほぼ同様である。ハロゲン化物とは、炭化水素の一部または全部をフッ素、塩素、臭素等のハロゲン族で置換した分子構造を有するもので、ハロン 1301 (CF_3Br) が最も多く使用されていた。

消火原理は、化学作用による燃焼の連鎖反応の抑制であり、火災時の燃焼生成ガスの増加や、ハロン消火剤が熱に反応して有毒物質を生成する恐れがあることから、より早いタイミングにおける起動及び放出が要求されている。

このため二酸化炭素消火設備に比べ、消火剤濃度が低く、放出時間が短いという特徴がある。

しかし、ハロン消火剤はオゾン層保護のため現在製造が中止されており、近頃はハロン消火設備の代替としてFM-200 (CF_3CHF_2) 高速消火システムが急速に普及している。本システムは、消火剤濃度 7~9%、放出時間 10 秒であり、素早い消火が期待できる。

図 4.2-4 に FM-200 高速消火システムの概要を示す。

(5) 粉末消火設備

粉末消火設備の放出方式は、二酸化炭素消火設備とほぼ同様である。設備が起動されると、加圧用窒素ガス容器が開放し、加圧ガスが粉末貯蔵容器内を加圧するとともに、消火剤を攪拌し、一定圧力に達したのち、噴射ヘッドから放出される。

本設備は、加圧に要する時間が必要なため、二酸化炭素消火設備に比べると起動操作から消火剤放出までの時間が多少長くなるほか、同時に放出する噴射ヘッドの放射圧力が均一となるように、いわゆるトーナメント配管にしなければならない煩わしさがある。粉末には、その成分により以下に示す四つの種類があるが、炭酸水素ナトリウムは危険物の規則に関する政令の中で金属粉の消火設備として適用されており、期待できる。図 4.2-5 に粉末消火設備の概要を示す。

- ① 第一種粉末（炭酸水素ナトリウムを主成分とする）
- ② 第二種粉末（炭酸水素カリウムを主成分とする）
- ③ 第三種粉末（リン酸アンモニウムを主成分とする）
- ④ 第四種粉末（炭酸水素カリウムと尿素との反応物を主成分とする）

(6) 泡消火設備

圧送された消火水に、混合装置により泡消火薬剤を混合させ、発泡機器（泡放出口）で泡を形成させてから放出する。

火災面積が広く消火が著しく困難となる油火災の消火を目的としたものである。消火原理は主に泡による窒息効果で、薄い泡が燃焼する広い液面上を自由に移動できる特色を有している。

本設備は、広範囲の水平な表面火災を対象にしており、全く逆の特色を有する堆積粉じんの消火には適用不可能であろう。これは、オイルシェールの碎石堆積物の試験において、深部燃焼には効果がなかった⁽¹⁾ことから明確である。

4.2.2 消火剤適応性試験

(1) 消火剤の選定

消火設備の調査の結果、ジルカロイファインの消火方法として、スプリンクラー消火設備、二酸化炭素消火設備、粉末消火設備（炭酸水素ナトリウム）が有望と考えられる。また、水噴霧消火設備（Aqua Safe Water Mist System）、ハロゲン化物消火設備（FM-200 消火システム）については、セル内での消火設備として適応性が高いと考えられる。

本試験では、これらの消火設備に用いられる消火剤が、ジルカロイファインの火災に有効に適応できるかどうか、簡易な試験を行い、適応性を調査した。なお、スプリンクラー消火設備には、水のほか強化剤（炭酸カリウムを混合）の効果についても調査した。さらに、遠隔自動化については課題が残るが、金属火災に有効と考えられる粉末消火剤として、メタックス、ナトレックスについても消火性を調査した。

(2) 試験設備

試験は防災メーカーである日本フェンオール株式会社の消火試験専用施設にて実施した。試験設備の概要を次に述べるとともに、図 4.2-6 に試験施設の概要を示す。

- ① 実験室は、大きさが縦 3.6m、横 5.4m、高さ 3mで、耐火ボード二重構造となっており、消火試験を実施するための十分な安全が確保されて

いる。

- ② 実験室では、常時二酸化炭素消火設備、FM-200 高速消火システムを用いた消火試験を実施しており、閉鎖構造であり、室内に放出される消火剤の濃度を維持できる構造になっている。また、試験後の消火剤を排出するための排気設備、オフガス処理設備が設置されている。
- ③ Aqua Safe Water Mist System が常設されており、実験室中央天井に噴霧ノズルが設置され、床面には廃水設備が設けられている。また、ノズルを交換し、水供給設備を設置することにより、スプリンクラー消火設備の試験が実施可能である。さらに、排気設備を有しており、消火中には燃焼に必要な空気が供給される。
- ④ ナトレックス等の粉末消火については、消火器等で直接火炎に噴射することにより試験が可能である。
- ⑤ 実験室の3面に硝子の観測窓が設置されており、消火状況の観察が容易に行える。

写真 4.2-1 に山状ファインの着火前後の状況を、写真 4.2-2 に薄い層状ファインの着火前後の状況を示す。

(3) 試験方法・手順

- ① 小粒径模擬ファインを少量 (50g~200g) 鋼板上に山状または薄い層状に堆積させた。
- ② 点火棒を用い、模擬ファインに着火させた。
- ③ 全体に燃焼が行き渡ったことを目視にて確認し、消火を開始した。

(4) 消火試験

選定された消火剤を用いて次に示す方法により、消火試験を実施した。

- ① 二酸化炭素消火設備による消火試験：二酸化炭素ガスでホーン型ノズルを用いて、ファインの燃焼を覆うように消火し、窒息消火の可能性を調

査した。図 4.2-7 に試験の概要を示す。また、消火実験室内で既存の二酸化炭素消火設備（液化二酸化炭素が放出される）を用いて実施した。消防法の基準に従い、約 55kg（実験室容積 58.4m³、消火剤濃度 0.9kg/m³）を、1 分以内で放出した。

- ② FM-200 高速消火システム:FM-200 ガスでホーン型ノズルを用いて、ファインの燃焼を覆うようにガスを放出した。図 4.2-7 に試験の概要を示す。
- ③ スプリンクラー消火設備:スプリンクラー消火設備の代替として、シャワーノズルを用い、燃焼の状況を目視で観察しながら散水した。図 4.2-8 にスプリンクラー代替散水装置の概要を示す。
- ④ Aqua Safe Water Mist System:消火実験室内で既存の Aqua Safe Water Mist System 消火設備を用いて消火した。本設備については公的な放出量の基準がなく、メーカーの基準であるノズル 1 個あたり水量を 10L/min とし、燃焼の状況を目視で観察しながら消火した。
- ⑤ 粉末消火設備（炭酸水素ナトリウム）:粉末消火器を用いて、模擬ファインの燃焼上に消火剤を放出した。
- ⑥ その他の粉末消火剤:ナトレックスは専用消火器を用いて、模擬ファインの燃焼上に消火剤を散布した。また、メタックスは手で散布した。

(4) 消火の確認方法

消火剤の放出完了後、10 分経過しても再着火しないことを目視確認した。また、燃焼残渣をかき分け再着火しないことを目視観察した。

(5) 試験結果

試験結果の概要を以下に述べるとともに、詳細を表 4.2-1 に示す。

- ① 二酸化炭素消火設備による消火試験:二酸化炭素ガスでは、窒息による消火効果が見られなかった。また、既存の二酸化炭素消火設備では、試験後の残渣をかき混ぜたところ、若干の熾きが確認されたが、放置時間

を長くすることによりほぼ消火可能と考えられた。

- ② FM-200 高速消火システム：消火効果は全く見られなかった。
- ③ スプリンクラー消火設備：初期火炎は、水を放水すると激しさを増した。しかし、燃え残りが少なくなるにつれて、水の冷却効果が顕著に現れ、最後は消火したように見られた。このため、消火試験後水に流されずにステンレス板上に残留した物（ほとんどは水に流された）について 6 個の試料を採取し、不活性ガス融解-赤外線吸収法で酸素量を測定した結果、酸素量は 0.72~22.46% の間で大きくばらついたが、平均すると 9.28% であり、これが全て ZrO_2 になったと仮定すると、約 35% の模擬ファインしか燃焼しておらず、消火効果があったと判断される。また、強化液（炭酸カリウム）は、水と同様な挙動を示し、強化剤の効果は見られなかった。
- ④ Aqua Safe Water Mist System：消火効果は見られなかった。
- ⑤ 粉末消火設備（炭酸水素ナトリウム）：火炎に山盛りに粉末を放出したが、炎をあげながら燃え続けた。消火効果は見られなかった。
- ⑥ その他の粉末消火剤：火炎に山盛りに粉末を放出したが、消火効果は見られなかった。

(6) 評価

液化二酸化炭素の気化熱により、実験室内全体が冷却され、ドライアイスと気中の水分が霜状になるのが観察された。二酸化炭素の強力な冷却効果により消火できると推測された。また、ガス状の二酸化炭素では消火できなかったことから、予想通り窒息効果による消火は不可能であろう。

水については、酸化剤として火炎を増長する働きと、冷却による消火の働きがあり、火炎の規模と放水量の調整により、有効に消火できる可能性がある。

粉体の火災は深層火災であると思われ、粉末消火剤のような浸透性がないものでは、消火が不可能と考えられた。

表 4.2-1 消火剤適応性試験結果

消火剤の種類		ファイン 量[g]	ファインの 堆積状態	消火中の燃焼状態	消火剤 放出時間	鎮火時間	消火剤投入量	備 考
消火剤供給せず		50	山状態に堆積	着火後しばらく炎をあげながら燃焼。その後炎はなくなり 熾き状態になり、回りから酸化し最後には表面に熾き状態 はなくなった。	-	6分後燃え尽きた。	-	極き混ぜると熾きがあり、未燃のファインに 着火し燃えた
ガス系	二酸化炭素 (ガス)	50	山状態に堆積	二酸化炭素が高温の金属により還元され、燃焼が促進される ため炎が白色になる。消火剤放出を中止すると炎はまた 燃え上がった。	57秒放出 12秒停止後 20秒放出	6分40秒後に鎮火した様子だが残渣に 多少の熾きがあった。	燃焼部の消火剤濃度は 100%近いと思われる	ファイン直上100mm の位置にノズルを配置
	二酸化炭素 (液)	200	山状態に堆積	二酸化炭素放出後下火になることが確認できたが、その後 は、同等で確認できなかった。	1分以内	消火時間不明。消火剤放出完了後10 分間放置した。換気後確認した結 果、若干の熾きがあった。放置時間 を長くすれば、消火すると考えられる	55kg	完全に消火した。
	FM-200	50	山状態に堆積	消火剤放出中は多少炎は小さくなるが、炎は消えない。放 出中は分解ガスなのか蒸気のようなものが発生した。また 消火剤を放出せずに燃焼させたファインと前記以外は燃焼 状態の違いはなかった。	25秒放出 15秒停止後 10秒放出	4.5分後に鎮火した様子だが残渣に 多少の熾きがあった。極き回すと再 発火した。	同上	ファイン直上100mm の位置にノズルを配置
水系	スプリンクラー (水)	200	山状態に堆積	火花を発生しながら表面は回りから酸化した被膜に覆われ た状態となった。火花は水が高温により分解して水素によ り燃焼が促進されたものと思われる。鎮火時間はウォーター ミストより早い。	2.5分放出	2.5分 10分後極き混ぜ完全に鎮火している ことを確認	52.5L	
			薄い層状に 堆積	散水により水が当たったところは火花が発生、熾き状態に なりながら洗いがされた。火花は水が高温により分解して 水素により燃焼が促進されたものと思われる。火花はウ ォーターミストの薄い層状の時よりも激しい。	10秒放出	40秒 鎮火確認後停止	1H	ファインが平均に燃え るよう5ヶ所に着火
	スプリンクラー (炭酸ナトリウム)	200	薄い層状に 堆積	消火剤を放出した瞬間、大きな閃光を発生。消火剤放出の 勢いによりファインを巻き上げたものと思われる。その後 は火花を飛ばしながら洗い流す状態であった。	18秒放出	18秒後に鎮火した様子だが、ほとん どが洗い流された感じであった。	3L	
	Aqua Safe Water Mist System (水)	200	山状態に堆積	火花を発生しながら表面は回りから酸化した被膜に覆われ た状態となった。火花は水が高温により分解して水素によ り燃焼が促進されたものと思われる。火花は、薄い層状の 時よりも少ない。	5分放出後 試験中止	7.5分後に極き混ぜ中央部に多少の 熾きがあったが、その最中に消火し た。	50L	
薄い層状に 堆積			火花が発生し水の勢いにより四方に散った。火花は水が高 温により分解して水素により燃焼が促進されたものと思わ れる。	50秒放出	40秒後に鎮火した。その後蒸気が発 生した。ファインのほとんどが燃え きっている状態であった。	8.3L	ファインが平均に燃え るよう5ヶ所に着火	
粉末	BC粉末 (炭酸水素ナトリウム)	200	山状態に堆積	消火剤放出後、炎を上げながら燃え続けた。ファインの上 の粉末は黄色く変色した。	15秒放出	鎮火せず。表面が赤い状態が続く。 7分40秒後かきまぜると相当量の 熾きあり	1.2kg	
			薄い層状に 堆積	消火剤の勢いでファインを吹き飛ばし火花が発生。熾き状 態のファインが点々と残った。	15秒放出	7分後鎮火した模様	1.2kg	ファインが平均に燃え るよう5ヶ所に着火。 極き混ぜると再着火
	粉末消火剤 (メタックス)	200	山状態に堆積	消火剤放出後、炎を上げながら燃え続ける。炎はBC粉末 より小さい。	15秒放出	鎮火せず 7分45秒で炎鎮火	1.2kg	
	粉末消火剤 (ナトレックス)	200g	山状態に堆積	模擬ファインに多量の消火剤(堆積層は数センチメートル) を放出した。165秒後に煙が発生した。再度消火した。	-	鎮火せず 10分後熾きを確認された。	多量	消火剤量が多すぎ、消 火設備として構築する のは不可能である。

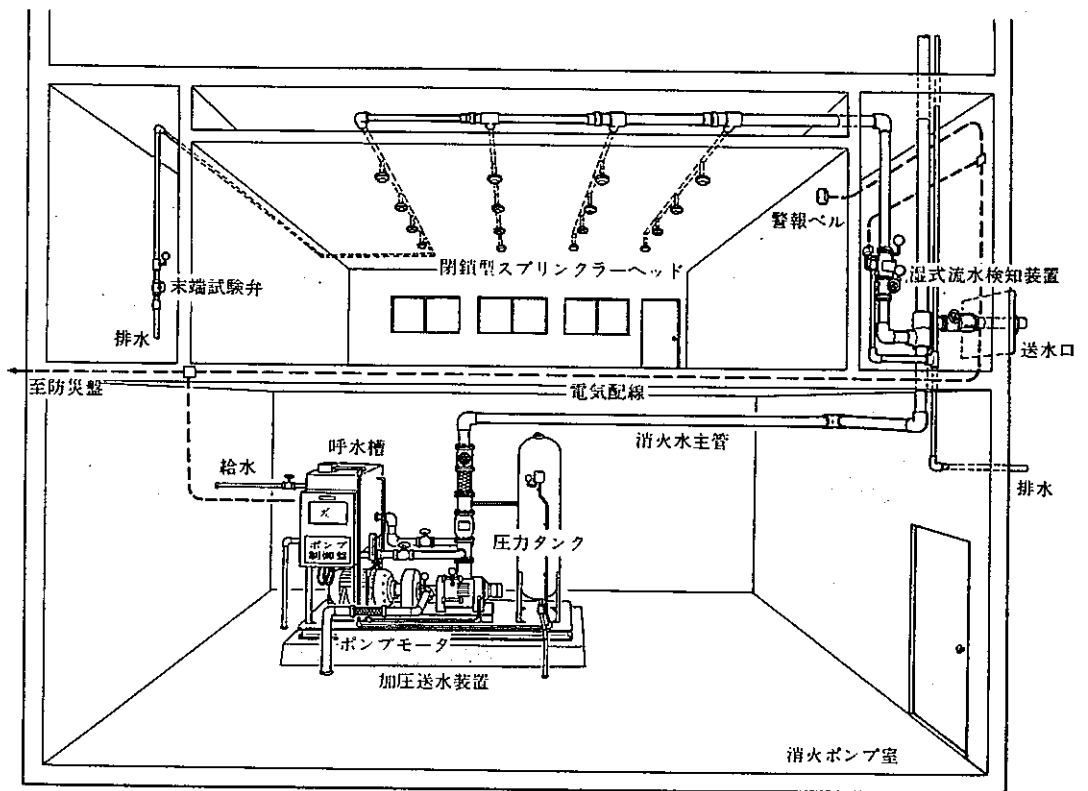


図 4.2-1 スプリンクラー消火設備の概要

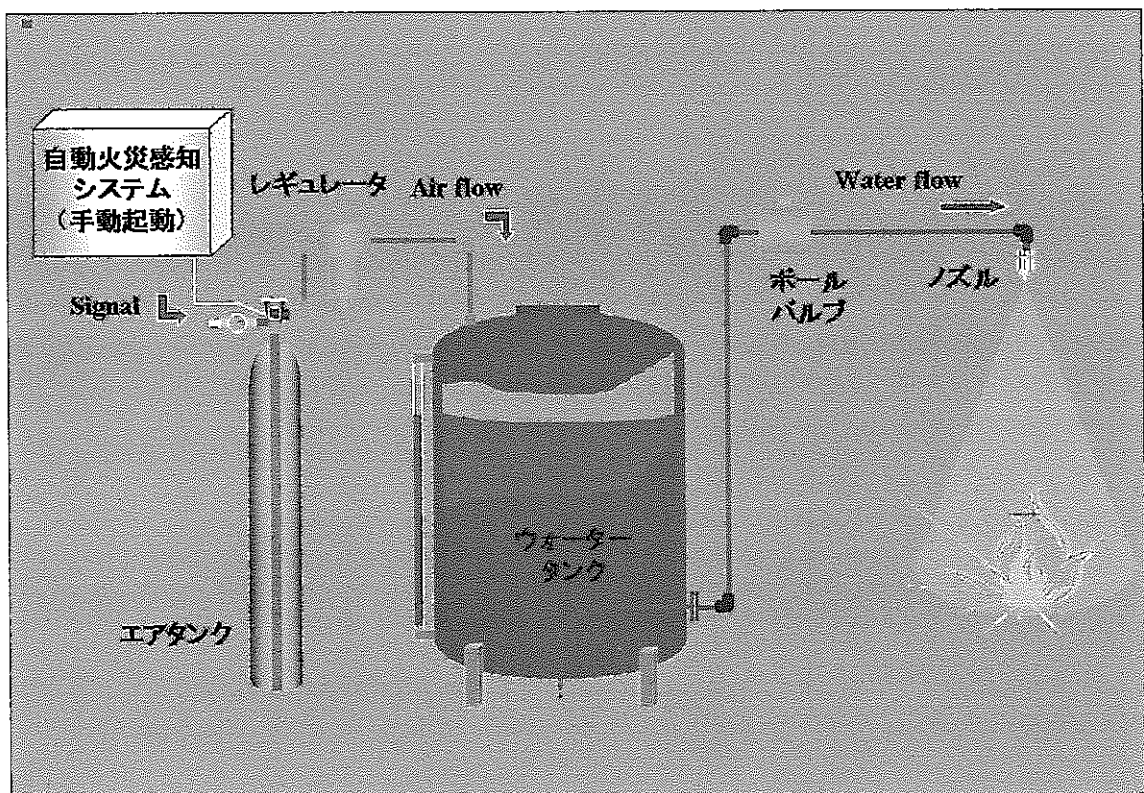


図 4.2-2 Aqua Safe Water Mist System の概要

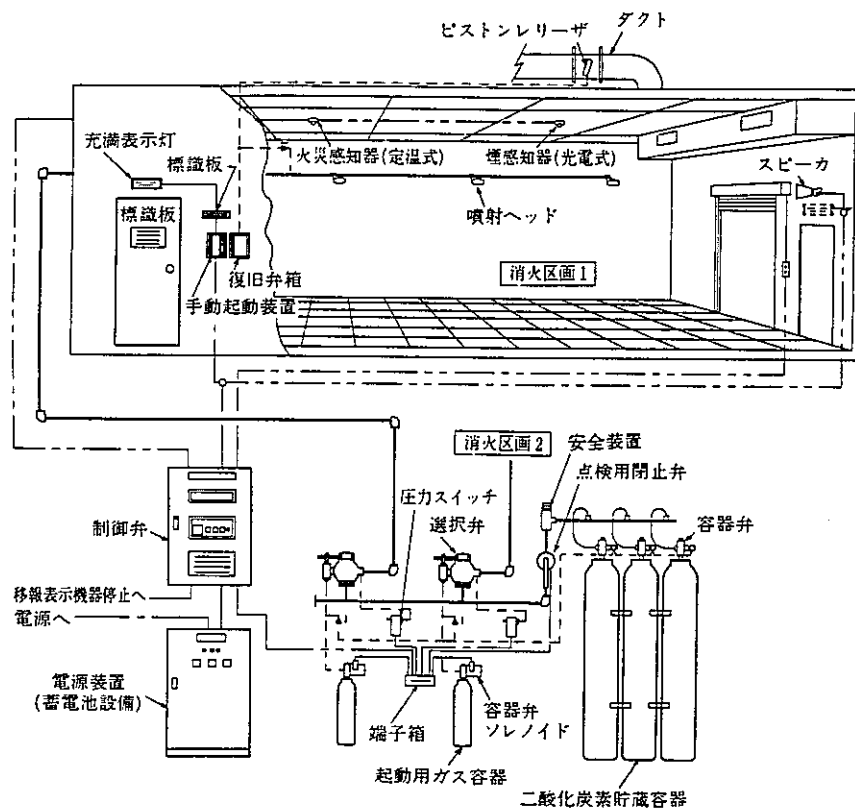


図 4.2-3 二酸化炭素消火設備の概要

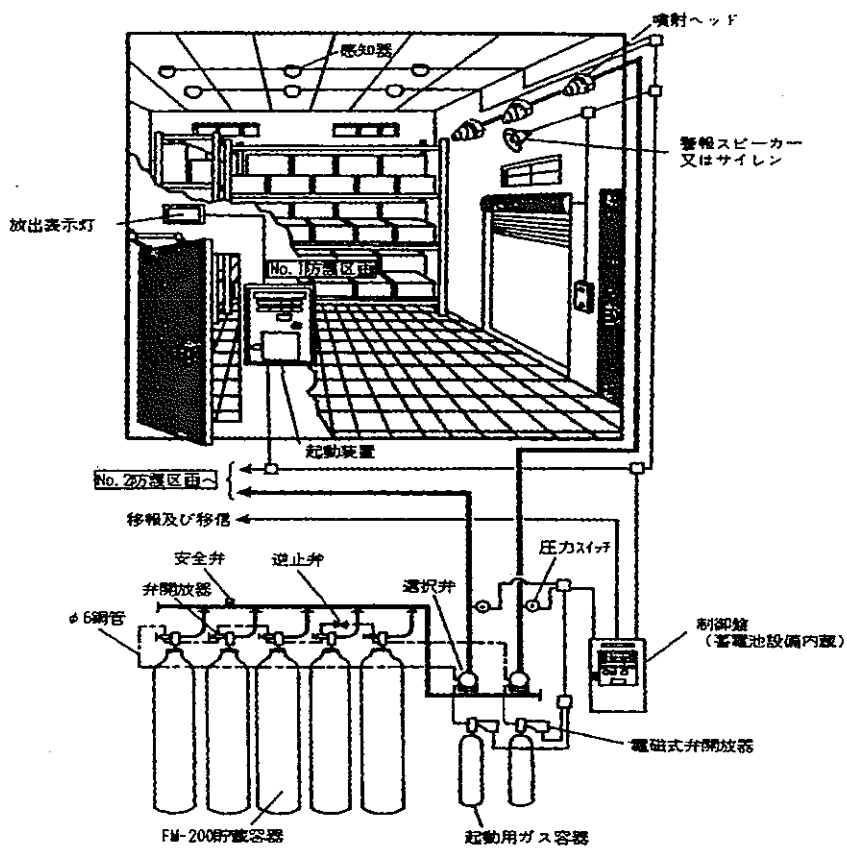


図 4.2-4 FM-200 高速消火システムの概要

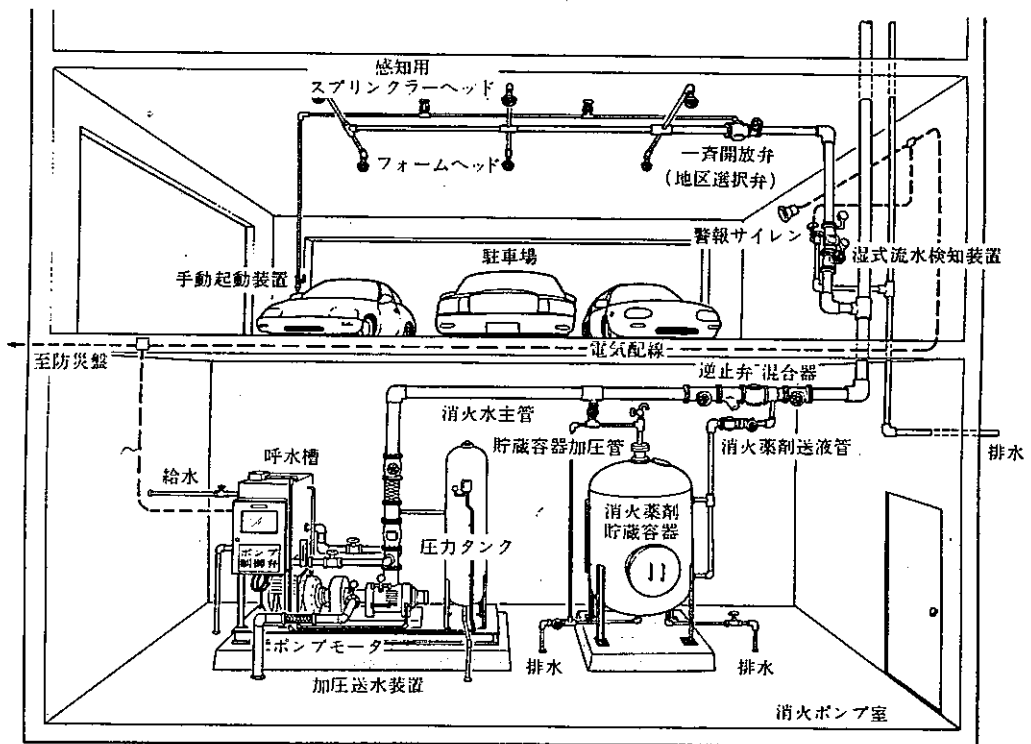
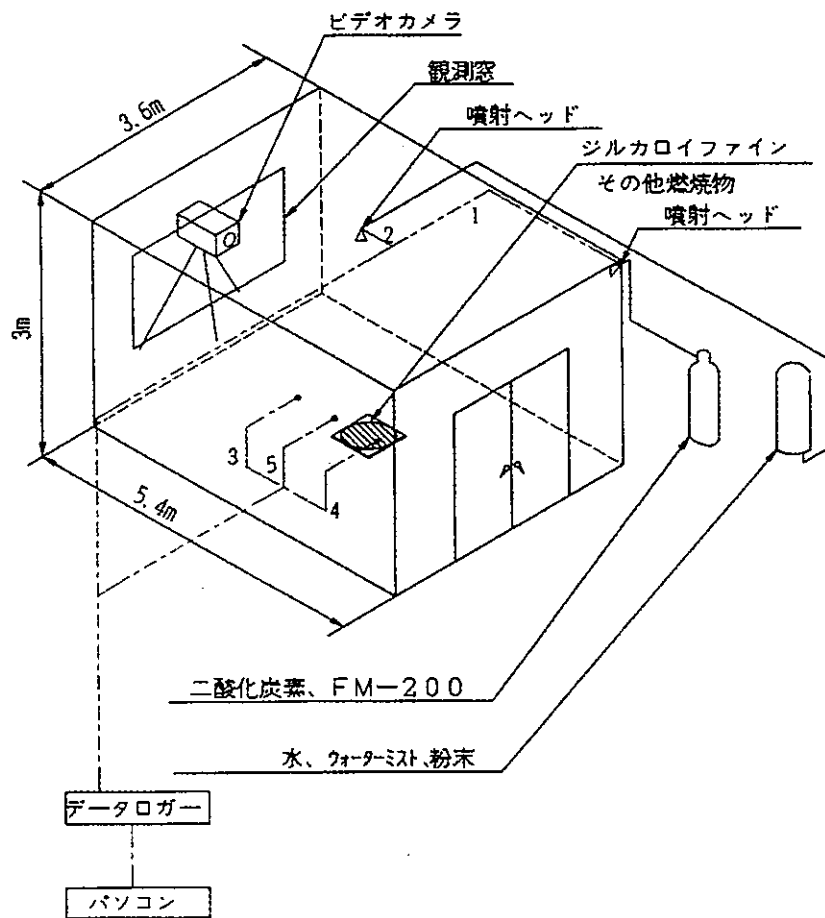


図 4.2-5 粉末消火設備の概要



データロガーで温度、圧力データ入力、
パソコンでデータ処理

入力1、2はノズル圧力（放出時間測定用）

入力3、4はジルカロイ近傍温度

入力5はジルカロイ消火確認用

図 4.2-6 試験施設の概要

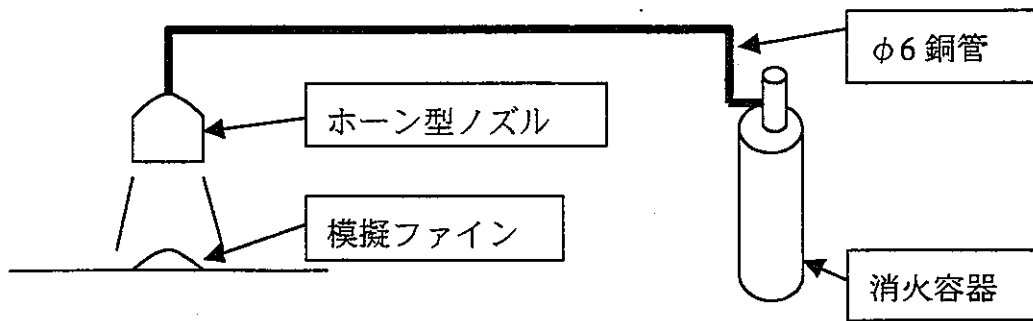


図 4.2-7 FM-200, 二酸化炭素ガス消火試験装置の概要

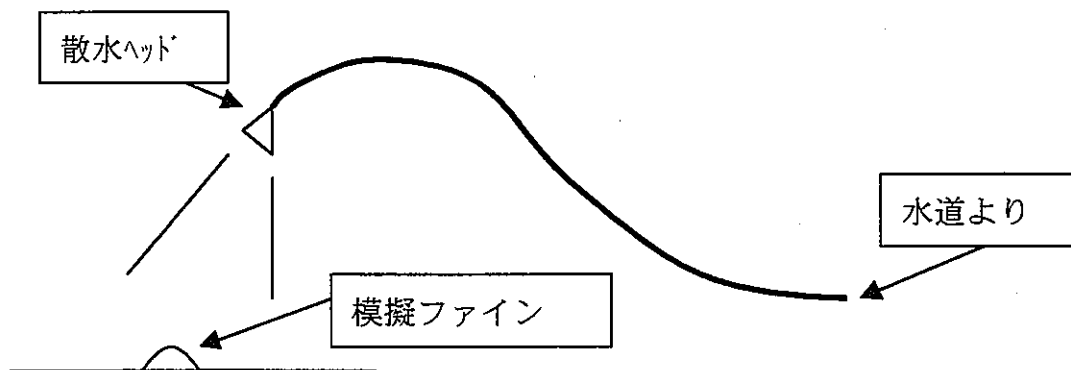
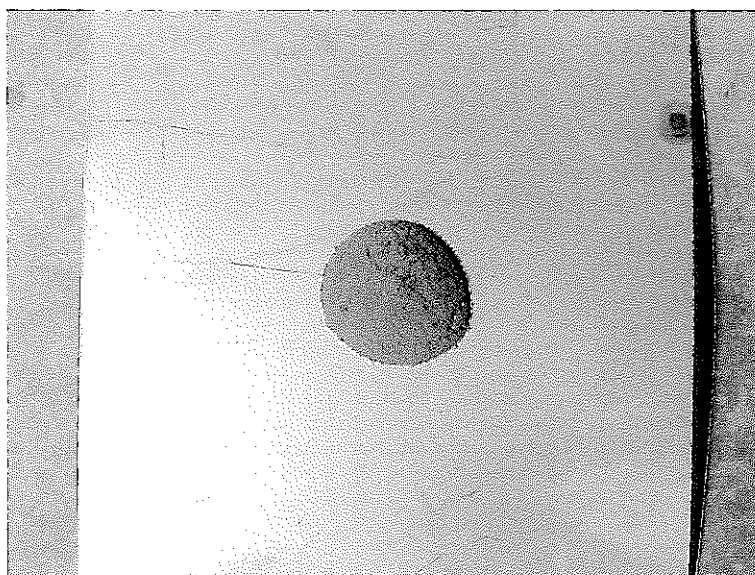
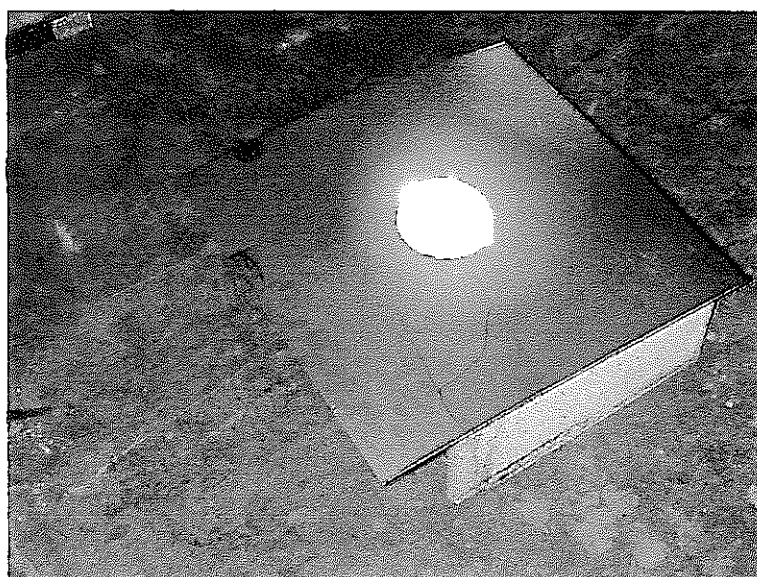


図 4.2-8 スプリンクラー代替散水装置の概要



着火前の山状堆積ファイン

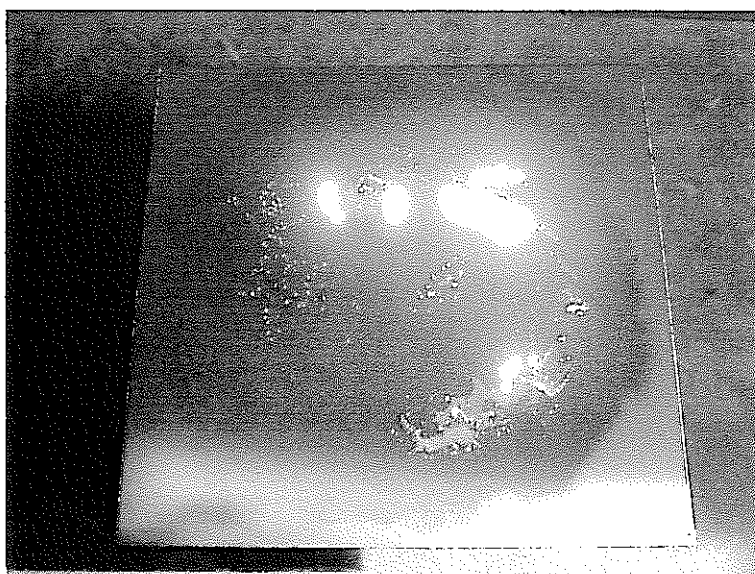


着火後の山状堆積ファイン

写真 4. 2-1 山状堆積ファインの着火前後の状況



着火前の薄層状ファイン



着火後の薄層状ファイン

写真 4.2-2 薄層状ファインの着火前後の状況

5. 模擬ファイン発火・消火特性試験

模擬ファインを用い、粒径の違いによる発火・消火特性および嵩密度の違いによる消火特性を調査し、結果を今後の消火試験に反映する。

5.1 模擬ファインの粒径の違いによる発火及び消火特性の確認試験

従来の試験に使用した粒径と同程度の小粒径（400 メッシュ以下の粒径）と大粒径（60 メッシュ～100 メッシュの粒径）との模擬ファインについて、発火のし易さあるいは消火のし難さに関する相違の有無を確認した。その結果を評価した上で、本試験の目的に合致した模擬ファインの粒径分布を選定した。

5.1.1 発火特性試験

(1) 試験方法・手順

模擬ファインをホットプレート上へのせ、徐々に加熱したときの、発火した温度を測定することにより、発火のし易さを比較した。手順を以下に示す。

- ① 熱板上にセットされた径φ100mm、厚さ約2mmの円筒型治具の中に、模擬ファイン17gを均一にさらっと堆積させた。
- ② 熱板の温度を徐々に上げていき、発火するおおよその温度をつかむ。
- ③ 次に発火した温度から20℃低い温度から1℃/10secの割合で上昇させ発火する温度を測定した。

(2) 試験設備

使用温度範囲が常温～450℃、温度分布 8℃（450℃のとき）の電熱板を使用した。また、発火温度測定位置は模擬ファインの堆積端から 10 mm 離れた伝熱板上とし、熱電対で測定した。電熱板の概要を図 5.1-1 に、測定概要を図 5.1-2 に示す。

(3) 試験結果

小粒径模擬ファイン 17g（堆積厚さ 1.6mm、嵩密度約 1.31kg/L）が発火した温度は 297℃であった。また、大粒径ファイン 17g（堆積厚さ 0.8mm、嵩密度約 2.63kg/L）については試験装置のほぼ最高温度である 440℃に
いおても発火しなかった。

5.1.2 消火特性試験

消火剤適応性試験の結果、選定された消火剤を用い、消火試験を行い、粒径による消火のし難さを比較した。

適応可能な消火剤としては、二酸化炭素消火設備、スプリンクラー消火設備が挙げられたが、二酸化炭素消火設備では、消火の過程を観察できず、スプリンクラー消火設備の代替である散水装置を用いて消火試験を行った。消火剤選定試験における小粒径模擬ファインの消火試験と消火状況、消火の可否、消火時間等を比較することにより、消火のし難さを判定した。

(1) 試験方法

大粒径の模擬ファインを用いた試験は、小粒径を用いた消火剤適応性試験と同様に、200g の模擬ファインを山状に堆積した場合と薄い層状に堆

積した場合について実施した。消火方法は消火剤適応性試験と同じ方法で実施した。

(2) 試験設備

消火設備は、消火剤適応性試験と同じ設備で実施した。

(3) 試験結果

大粒径模擬ファインでは、山状の場合、消火開始後 70 秒（流量 24.5L）で鎮火し、9 分 10 秒後かき混ぜて見たが、熾きは確認できなかった。また、 $\phi 500$ の薄い層状の場合には着火しなかった。

小粒径模擬ファインでは、山状の場合、消火開始後 2 分 30 秒（流量 52.5L）で鎮火しており、小粒径の方が消え難いことが判明した。

試験結果を表 5.1-1 に示す。

5.1.3 評価

小粒径と大粒径の模擬ファインについて、発火のし易さと消火のし難さを試験により調査した結果、小粒径ファインの方が発火し易く、消火し難いことが判明した。

一般に、堆積粉じんの発火のし易さについては、粒径が小さいほど比表面積が大きく、発熱量が多いため、発火温度が低いことが知られている。模擬ファインについても、大粒径に比べて小粒径のほうが発火し易いという妥当な結果が得られた。また、消火のし難さについては、公表されているデータは見あたらなかったが、発熱量が多いため高温になることが考えられ、消火し難かったのではないかと予測される。このことは、燃焼中の明るさからも

推測される。

このため、以降の消火試験には、小粒径ファインを用いた。

5.2 模擬ファイン堆積層の嵩密度の違いによる発火及び消火特性確認試験

堆積層の嵩密度については、小粒径の模擬ファインを用い、乾燥状態での自然な堆積状態と圧密された状態での発火特性試験及び消火特性試験を行い、発火のし易さあるいは消火のし難さに関する相違の有無を確認した。これは、水中で堆積したファインが乾燥した場合に比べ圧密されると予測されるからである。

5.2.1 発火特性試験

(1) 試験方法・手順

試験方法・手順は、粒径の違いによる発火特性試験と同じ方法に依った。ただし、密度を高めるため、全体に均一になるようにさらっと堆積させたのち、上から 20kg の重りで 10 分間押し固めた。

(2) 試験設備

試験設備は、粒径の違いによる発火特性試験と同じ方法に依った。

(3) 試験結果

さらっと堆積させた場合の小粒径模擬ファイン 17g (堆積厚さ 1.6mm, 嵩密度約 1.31kg/L) が発火した温度は 297℃であった。また、押し固めたファイン 17g (堆積厚さ約 1.0mm, 嵩密度約 2.23kg/L) については、試験装置のほぼ最高温度である 440℃においても発火しなかった。

また、参考までに、大粒径ファインを押し固めた場合には、嵩密度に変化が見られなかった。

5.2.2 消火特性試験

消火剤適応性試験の結果、選定された消火剤を用い、消火試験を行い、嵩密度による消火のし難さを比較した。

(1) 試験方法

押し固めた模擬ファインを用いた試験は、自然に堆積した模擬ファインを用いた消火剤適応性試験と同様に、200g の模擬ファインを山状に堆積したのち押し固めて実施した。消火方法は消火剤適応性試験と同じ方法で実施した。

(2) 試験設備

消火設備は、消火剤適応性試験と同じ設備で実施した。

(3) 試験結果

押し固めた模擬ファインでは、山状の場合、消火開始後 2 分 23 秒（流量 52.5L）で鎮火し、6 分後かき混ぜて見たが、熾きは確認できなかった。

自然に堆積した模擬ファインでは、山状の場合、消火開始後 2 分 30 秒（流量 52.5L）で鎮火しており、ほぼ同程度の消し難さであることが判明した。試験結果を表 5.2-1 に示す。

5.2.3 評価

自然な堆積状態と圧密した状態の模擬ファインについて、発火のし易さと

消火のし難さを試験により調査した結果、自然に堆積したファインの方が発火し易く、消火のし難さは同程度であることが判明した。

一般に、堆積粉じんの発火温度は、発熱量と放熱量に関係することが知られている。模擬ファインを圧密することにより、伝熱性が向上して放熱量が増すとともに、酸素の供給が阻害されて発熱量が低下したと考えられる。この結果、圧密状態のファインが発火し難かったと考えられる。

また、消火のし難さに関しても、酸素の供給が阻害される圧密状態のファインが発熱量が低く消火し易いと考えられるが、本試験では、ファインの燃焼を促進する水が消火剤として使用され、さらに、水流により酸化膜が流され、常に燃焼に寄与したと考えられる。このため、嵩密度による消火のし難さに差がなかったと推測される。

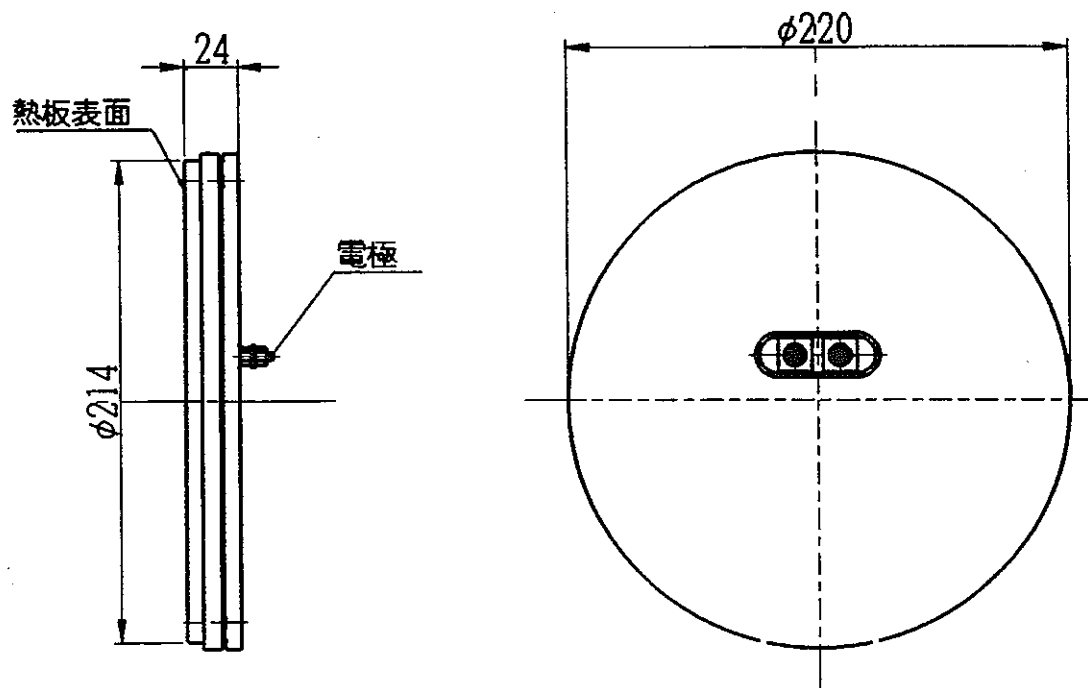
今後の消火試験には、自然に堆積した模擬ファインを用いる。

表 5.2-1 模擬ファインの粒径の違いによる消火特性試験結果

項目	小粒径模擬ファイン	大粒径模擬ファイン
ファイン量	200 g	200 g
堆積状況	山状	山状
燃焼状況	火花を発生しながら表面は回りから酸化した被膜に覆われた状態となった。酸化被膜が水に流され燃焼速度が速かった。さらに、水が高温により分解され、燃焼が促進したと考えられる。	同 左
消火剤放出時間	2分30秒	70秒
鎮火時間	2分30秒 10分後かき混ぜ完全に鎮火していることを確認した。	70秒 6分後かき混ぜ熾きがないことを確認した。
消火剤量	水 52.5L	水 24.5L

表 5.2-1 模擬ファインの嵩密度の違いによる消火特性試験結果

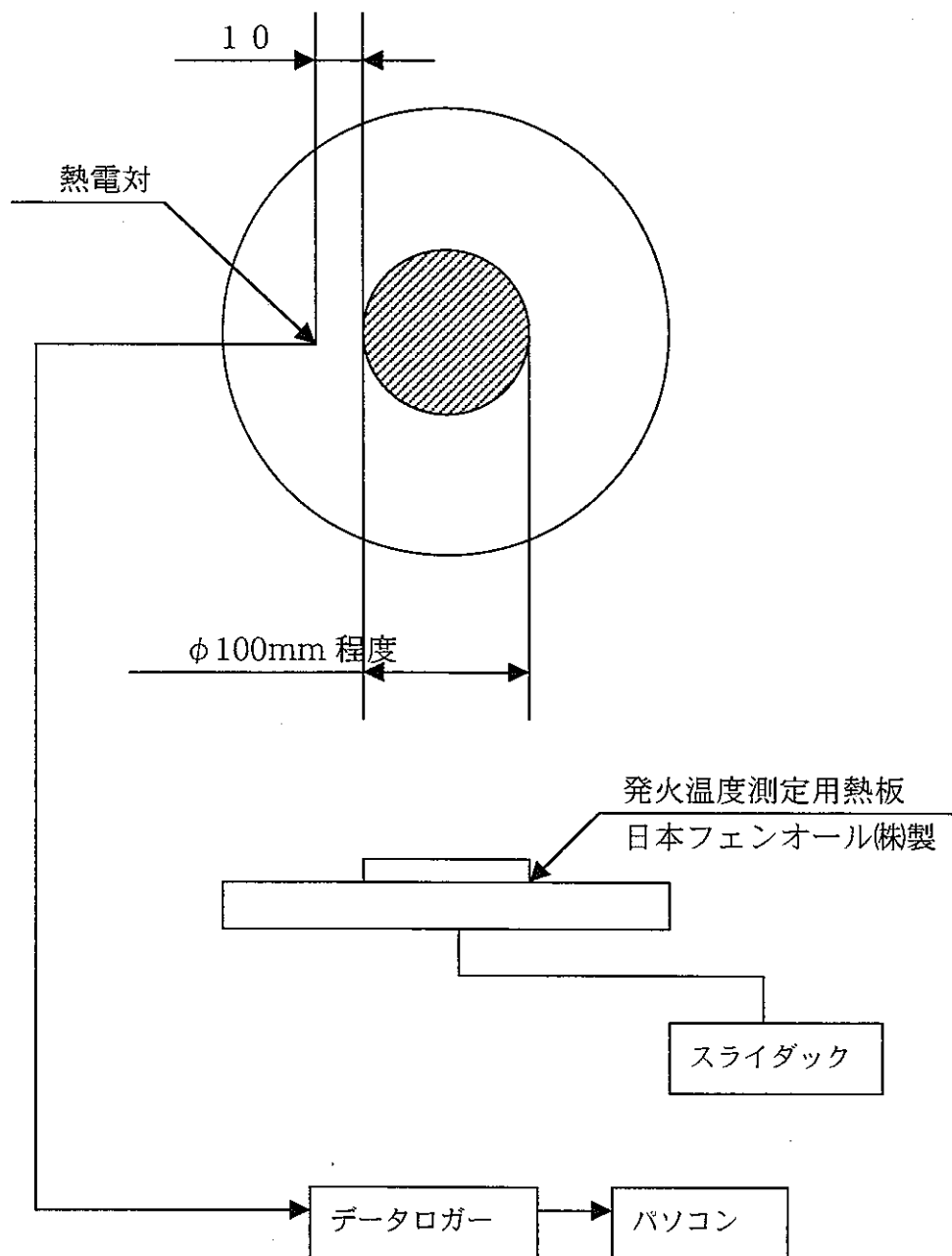
項目	自然に堆積した模擬ファイン	押し固めた模擬ファイン
粒 径	小粒径	小粒径
ファイン量	200 g	200 g
堆積状況	山 状	山 状
燃焼状況	火花を発生しながら表面は回りから酸化した被膜に覆われた状態となった。酸化被膜が水に流され燃焼速度が速かった。さらに、水が高温により分解され、燃焼が促進したと考えられる。	同 左 ただし、回りから鎮火する様子が観察された。
消火剤放出時間	2分30秒	2分23秒
鎮火時間	2分30秒 10分後かき混ぜ完全に鎮火していることを確認した。	2分23秒 6分後かき混ぜ燃え尽きがないことを確認した。
消火剤量	水 52.5L	水 52.5L



熱板の仕様（日本フェンオール(株)製：8C/C-SiC-F5)

1. 仕様温度範囲：常温～450℃MAX
2. 温度分布：R8℃/at450℃
3. 電流容量：AC200V, 1500W
4. 熱板主材質：SiC（炭化珪素）

図 5.1-1 発火特性試験用熱板の概要



データロガーで温度入力、パソコンでデータ処理

図 5.1-2 発火特性試験の測定概要

6. 消火剤選定試験

消火剤適応性試験により選定された二酸化炭素消火設備及びスプリンクラーの代替である散水設備を用いて消火試験を行い、ジルカロイファインの消火に最も適した消火剤を選定した。模擬ファインは発火・消火特性試験の結果より、小粒径ファイン 200 g を自然に堆積した状態とした。

6.1 二酸化炭素消火設備による消火試験

(1) 試験方法・手順

試験方法は消火剤適応性試験と同様である。ただし、放置時間については、消火剤適応性試験において、10 分間では再発火してしまい、消火には不十分だったため、20 分とした。

(2) 試験結果

試験は同条件で 3 回行い、20 分後残渣をかき分けて、目視にて確認したが、いずれも完全に鎮火した。二酸化炭素放出開始後 4 分程度までは、燃焼が下火になるのが確認できたが、その後は実験室内部が霜状になり、鎮火した時間は確認できなかった。試験結果を表 6.1-1 に示す。

6.2 スプリンクラー消火設備による消火試験

(1) 試験方法・手順

試験はスプリンクラー消火設備の代替として、散水装置を使用した。消火剤適応性試験において、水が反応することが判明しており、また、一方では、燃焼規模が小さくなると水の冷却効果が顕著に表れていた。

そのため、本試験では、スプリンクラー消火設備に比べ、多量の水を用い、水での消火の可否、及び消火できる場合には最適な水量を調査することを目的に、水槽、ポンプ、流量調整弁を設置し、水量を調整しながら、消火試験を行った。試験概要を図 6.2-1 に示す。

(2) 試験結果

水量を変えて 2 回試験を実施した。水量を多くしたにも係わらず、消火効果は顕著に表れず、さらに水と激しく反応するとともに、表面の酸化膜が水で流されるため、燃焼が早く完了したように感じられた。

一般にスプリンクラー消火設備では、半径 2.1m の範囲に 80L/分の水量が放出される。本試験では、多めの水量で試験した。試験後、散水量を測定した結果では、火炎に直接散水された水量は 0.1L/100cm² および 0.34L/100cm² であり、スプリンクラーでのノズル 1 個当たり水量に換算すると、138L/分、及び 470L/分と充分であり、これ以上の増量は効果がないと判断し、試験を中止した。

また、二種類の強化剤（①炭酸カリウム、②リン酸水素アンモニウムとフッ素系界面活性剤）での消火試験についても実施したが、水と比べて火花は少ないが、消火効果はあまり変わらないうえ、水蒸気以外と思われる煙が発生した。

試験結果を表 6.1-1 に示す。

6.3 消火剤の選定

試験の結果、二酸化炭素消火設備が、200 g 程度の堆積したジルカロイファ

インの消火方法としては、適していることが判明した。一方、水は消火剤としては適していないと考えられる。しかし、試験後のステンレス板を観察すると、燃焼表面は若干焼けた形跡があるが、裏面は変色もなかった。このため、延焼を防止するとともに、セル床の材料を冷却しながら安全に燃やしきるといふ効果があるように窺えた。

表 6.1-1 消火剤選定試験結果

消火剤の種類	ファイン 使用量 [g]	ファインの 推積状態	消火中の燃焼状態	消火剤放出時間	鎮火時間	消火剤投入量	備 考	
二酸化炭素	200	山状態	二酸化炭素放出後は実験室内の空気に含まれる湿分が、二酸化炭素の潜熱により冷却され白く霧状になり、消火状況が確認できない。但し、消火剤放出完了後4分までは赤く光っているのが確認できた。	60sec 以内	消火剤放出完了後、20分間放置、換気後かきわけ残渣に焼きがなかった。また、金属塊状のものがあつた。消火時間は未定である。	55kg		
	同 上	同 上	同 上	同 上	同 上	同 上		
	同 上	同 上	同 上	同 上	同 上	同 上		
	同 上	薄層状態	比燃焼、延焼している模擬ファインが、ドライアイスにより冷却され、燃焼が抑えられ、徐々に消火していく状態がみられた。	同 上	消火の最後の方は室内が霧状態になったため確認できなかったが、明らかに山盛り状態よりは早いと思われる。	同 上		
水 系	散水装置での水	同 上	山状態	水が当たるところは、火花が発生している。消火は冷却され易い回りから起こり、消火した部分は酸化層となり徐々に中心へと広がっていく。最後の方は、炎が吹き出している状態があつたがやがて消火している。	200 秒	200 秒	100cm ² あたり 0.1L/min	冷却による延焼防止として可能性がある。
	散水装置での水	同 上	同 上	同 上	210 秒	205 秒	100cm ² あたり 0.34L/min	同 上
	散水装置での強化液（炭酸カリウム）	同 上	同 上	水と比べて火花はあまり発生しないが、水蒸気以外の煙が発生している。	294 秒	275 秒放水、再度燃焼したためその後8秒後に19秒放水。	100cm ² あたり 0.34L/min	水と消火の状態は変化がなさそうである。

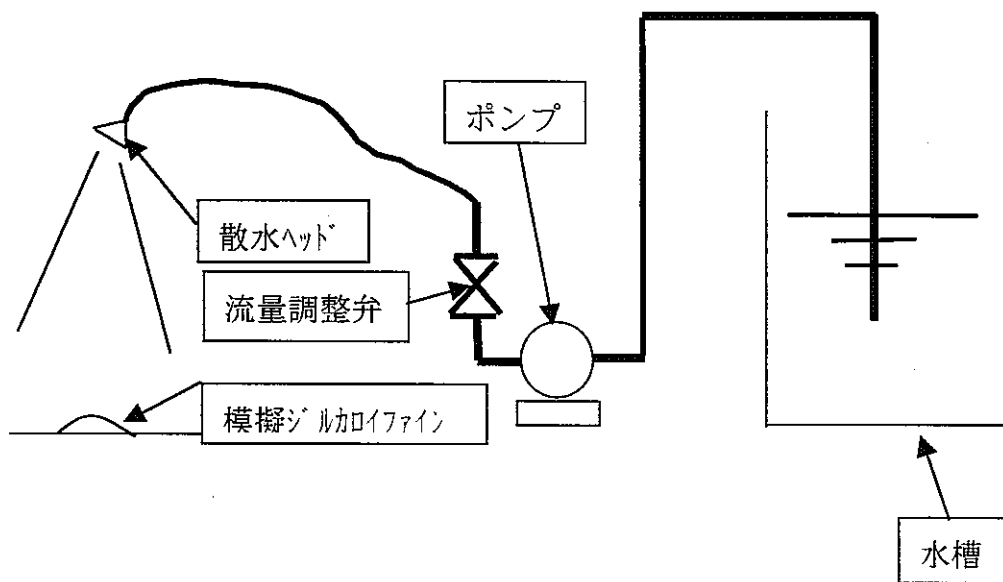


図 6.2-1 散水装置による試験概要

7. 消火試験

7.1 堆積ジルカロイファイン消火試験

7.1.1 試験方法・手順

実際のプロセス上で堆積したジルカロイファインが発火した場合を想定して、以下に示す堆積条件下で、消火剤選定試験で選定された二酸化炭素消火設備で消火できることを確認した。

- ① □500mm のステンレス板上（セルライニングを想定）に、約 200 g の模擬ジルカロイファインをほぼ均一な層状に堆積させ発火させた場合（試験の都度ステンレス板を交換する）。
- ② ステンレス板状（セルライニングを想定）に、約 200 g の模擬ジルカロイファインを約φ100mm の範囲内に山盛り状に堆積させ発火させた場合（試験の都度ステンレス板を交換する）。

試験設備、試験方法・手順及び消火の確認方法については、消火剤選定試験と同様とした。また、各ケースの試験回数は3回とし、十分な再現性が得られることを確認した。さらに、燃焼中のステンレス板の温度を測定するとともに、燃焼後の損傷状況を観察した。

7.1.2 試験結果

(1) 燃焼状況及び消火状況

55kg の消火剤を消防法の基準に従い 60 秒以内で放出した。図 7.1-1 に二酸化炭素のノズル圧力と二酸化炭素の放出時間を示す。

山状の堆積ファインでは、一ヶ所に着火し、燃焼が全体に行き渡り、火

勢が最も強い状態で消火剤を放出した。二酸化炭素の放出と同時に火勢が弱まっていくのが観察されたが、実験室内が二酸化炭素の気化熱等により冷却され、全体が霜が降ったようになり、内部の状況が見えなくなった。約 3～4 分後までは燃焼による赤色が目視で確認できた。

図 7.1-2 に燃焼部分から 50mm のステンレス板の温度上昇カーブを示す。これによると、燃焼開始後は表面のみの燃焼のため温度が上昇せず、二酸化炭素の放出により一旦温度が下がったのち、放出から約 400 秒後までは上昇に転じ、その後鎮火に向かったのが想像される。

消火剤放出後 20 分間放置し、さらに、約 5 分間室内を換気したのち、燃焼残渣をかき分けて目視観察した。熾きの存在は確認されず完全に鎮火していた。燃焼による灰（酸化物）の厚みは中央で約 2mm、端で約 1mm であり、灰の下には模擬ファインが燃焼熱により焼結したと思われる固化物が見られた。表 7.1-1 に試験結果、写真 7.1-1 に山状堆積ファイン及び薄層状堆積ファインの燃焼残渣を示す。この固化物の表層及び内部の黒色部分について X 線回折（日本電子株式会社製 JDX-3530）で分析した結果、 $ZrO_{0.35}$ に続いて ZrO の高いピークが観察された。山状堆積ファインを消火せずに燃焼させた場合にも固化物が観られるが、この固化物の分析結果、 ZrO 、 $ZrO_{0.35}$ 、 ZrO_2 のピークが観察され、消火した場合とは明らかに違っている。図 7.1-3 (1) ～ (6) に X 線回折結果を示す。

また、薄層状では、全体に燃焼が行き渡るように数カ所に着火して試験を行った。試験状況は山状とほぼ同様であるが、薄層状の模擬ファインの燃焼は山状に比べて火勢及び延焼力も弱く、消火効果が明らかに速かった。

なお、山状、薄層状ともに、二酸化炭素の放出による模擬ファインの巻き上げは発生せず、粉じん爆発に至る可能性はないように考えられる。

(2) セル材料への影響

本試験ではセルの床上等で発生することを考慮し、燃焼によるセルへの損傷を観察するため、ステンレス板上で試験を行った。

燃焼部近傍（燃焼端より 50mm）の温度を測定した結果、山状では最高 115℃、薄層状では温度上昇はほとんど見られなかった。図 7.1-2 (1) ～ (6) に温度上昇カーブを示す。

また、試験後のステンレス板の損傷状況を目視確認した。山状では、ステンレス板の表面は一部熔融したような損傷が見られたが、裏面は模擬ファインの堆積部分及びその周囲 10mm程度に変色したのみであった。模擬ファインの外周部の損傷、変色が著しく、中央部分は温度が低いように見られる。薄層状では、表面がやや変色したが、裏面は変色しなかった。写真 7.1-2 (1) ～ (6) にステンレス板の損傷状況を示す。

山状に堆積した模擬ファインを消火せずに燃焼させ、その表面温度を放射温度計（ミノルタ製 TA-630A：温度測定範囲 600～3000℃）を用いて測定した。図 7.1-4 に山状堆積ファイン燃焼の表面温度の推移を示す。これによると、最高温度は燃焼直後に 1638℃を示し、直ぐ下がるが、これは表面に酸化膜が形成されて遮断されたためと考えられる。

この結果と消火時のステンレス板の温度測定結果から、消火開始から数十秒はステンレス板が高温に晒されると考えられ、ステンレス板表面と模

擬ファイン表面の接触部分では、ステンレス板の溶融が発生したと考えられる。

(3) 燃焼による煤塵発生量

消火中に煤塵が発生し、排気系のフィルターの目詰まりが懸念されるため、消火中の煤塵量を測定した。

消火剤が二酸化炭素であるため、多くの煤塵の発生は考えられず、実験室規模では消火により発生する煤塵と、以前から行っていた実験によって室内に蓄積したごみとを区別するため、小規模な設備で実施した。

図 7.1-5 に試験装置を示す。ステンレス製の容器 (600×600×1000mm) を作製し、内部に模擬ファイン 200g を山状に堆積させ、充分燃焼させたのち、二酸化炭素消火器を用いて容器内部の濃度が規程濃度 (0.9kg/m³) になるように 0.33kg の消火剤を放出し消火した。二酸化炭素の放出とともに、内部のガスをエアースAMPLER (柴田科学製ローボリュウムエアースAMPLER SL300) を用い、煤塵を吸引 (流量 30L/分で 12 分間)、捕集した。試験は 3 回実施した。

煤塵の評価は、エアースAMPLER の吸引前後のろ紙の重量測定により行った。この結果、最大煤塵量は 0.13g、平均 0.1g 程度と極微量であった。二酸化炭素と模擬ファインの反応による煤塵の発生は考えられず、空気中のごみ、水分、模擬ファインの微粉じん等と考えられる。試験結果を表 7.1-2 に示す。

7.2 フィルタ堆積ジルカロイファイン消火試験

7.2.1 試験方法・手順

(1) 目的

実際のプロセス上で、換気系若しくはオフガス系のフィルタに堆積したジルカロイファインがフィルタ保守時に発火した場合を想定して、開口寸法約 300×300mm のHEPAフィルタに、約 100g の模擬ジルカロイファインを吸引により内部まで堆積させ着火した場合、二酸化炭素消火設備で確実に消火できることを確認した。

(2) 試験装置

試験装置は上部から HEPA フィルタ（日本無機株式会社製アトモスパーフェクトフィルタ ATM-8-P-F）、ダクト、模擬ファインを HEPA フィルタに吸引するためのファンから構成されている。HEPA フィルタは上面にろ過面（一次側）、下面に透過面（二次側）とし、ろ過面から着火し、透過面から消火する構造とした。ダクトは内部の消火状況観察用の窓および消火用ノズルを備えており、二酸化炭素消火器を接続して消火が可能である。消火試験時は吸引ファンを取り外し、閉止板を設置した。表 7.2-1 に HEPA フィルタの概要を、図 7.2-1 にジルカロイファイン吸引及び消火試験設備の概要を示す。

(3) 試験方法・手順

試験方法は以下に依った。また、消火試験回数は 3 回とし、3 回とも消火することを確認した。

- ① 吸引ファンを起動し、風速が約 5m/sec 以上であることを、ダクト内で風速計 (KANOMAX 6141) を用いて確認した。
- ② 模擬ファイン 100 g を HEPA フィルタの上部で均一になるように蒔いて、HEPA フィルタ内部に吸着させた。
- ③ 吸引ファンを取り外し、消火試験用に閉止板を設置した。
- ④ フィルタの一辺に着火用の模擬ファインを少量載せ、点火棒で着火した。HEPA フィルタは内部がステンレス製のセパレータで一方向に並行に区切られており、フィルタの燃焼試験の結果、セパレータの方向に延焼し易いことが判明した。そのため、着火用の模擬ファインはセパレータと直角方向の一辺に載せた
- ⑤ フィルタの上部表面の延焼状況を観察しながら、約半分程度まで延焼した時点で消火剤を放出した。
- ⑥ 消火剤の放出は、目視により消火できるまで継続し、消火時間および消火剤放出量を測定した。

7.2.2 試験結果

(1) 燃焼状況及び消火状況

消火試験に先立ち、HEPA フィルタに模擬ファインを吸引させたのち、着火し、燃焼状況を観察した。その結果、概ね以下のことが判明した。

- ① 最初は、セパレータに沿って水平、垂直方向に延焼する傾向がある。
しかし、燃焼が激しくなるに従い、セパレータの直角方向にも延焼し、最後は全体が溶落するよう見える。

② 模擬ファインは、弾けるように燃焼している。ファインの存在しない部分と比べると、燃焼が激しい。

③ 粉じん爆発のような挙動は見られなかった。

この結果から、セパレータに対し、直角方向の一辺に着火し、消火後の燃え残り状況を観察することにより、消火の効果を判定することにした。フィルタの表面（上部）の延焼を観察しながら、約半分程度まで延焼した時点で消火剤を放出した結果、最初は二酸化炭素がフィルタを逆流する勢いで燃焼が激しくなるのが観察された。しかし、徐々に鎮火する傾向が見られ、最後は鎮火した。試験は 3 回行われ、放出時間は最長 73 秒、放出量は 5.93kg であった。表 7.2-2 に試験結果を示す。

鎮火後のフィルタの状況を観察した結果、表面（上部）は全て延焼していたが、裏面（下部）を観察すると途中で延焼が停止しており、燃え残りが見られた。これは、フィルタの裏面に向けて二酸化炭素を放出したために形成されるドライアイスの冷却効果によって消火したと考えられる。写真 7.2-1 に消火後のフィルタの外観を示す。

(2) 燃焼箇所近傍部温度

燃焼部近傍の温度として HEPA フィルタの外枠外面の温度を測定した。その結果、フィルタ側面の温度上昇もドライアイスの冷却効果の影響により、最高 32.7 度であった。

(3) 燃焼による煤塵発生量

消火中に煤塵が発生し、排気系のフィルターの目詰まりが懸念されるため、消火中の煤塵量を測定した。

消火剤が二酸化炭素であるため、多くの煤塵の発生は考えられず、実験室規模では消火により発生する煤塵と、実験室内に存在する一般的なごみとを区別するため、小規模な設備で実施した。

試験装置は堆積ファインと同じ装置を使用し、内部に模擬ファイン 100 g を吸引させた HEPA フィルタの一部を切り取ったもの（容積で 1/10 程度）を入れ、燃焼させたのち、二酸化炭素消火器を用いて容器内部の濃度が規程濃度 ($0.9\text{kg}/\text{m}^3$) になるように 0.33kg の消火剤を放出し消火した。

この結果、最大煤塵量は約 0.04 g、平均 0.03 g 程度と極微量であった。燃焼させたフィルタが約 1/10 の容積であり、最大 0.4 g となる。表 7.2-3 に試験結果を、写真 7.2-2 に煤塵量測定用フィルタを示す。

7.3 まとめ

二酸化炭素消火設備により山状及び薄層状の堆積ファインの燃焼の消火試験を行った結果、消火剤放出後 20 分放置することにより、完全に消火することが可能であった。消火時のセルへの影響についても調査したが、ステンレス板表面では溶融によると考えられる損傷が観察されたが、裏面は黒く変色したに留まり、セルの閉じ込め機能は健全であることが判明した。さらに、消火時に発生する煤塵量は極微量であった。

また、二酸化炭素消火設備によりフィルタ堆積ファインの燃焼の消火試験を行った結果、ドライアイスの冷却効果が及ぶ部分については消火することが可能であった。消火時に発生する煤塵量は極微量であった。

表 7.1-1 堆積ジルカロイファイン消火試験結果

試験 NO.	消火剤 放出時間 (秒)	近傍温度 (℃)	鎮火後の模擬ファイン の状態	ステンレス板の状態
山状-1	54	115	熾きなし。 灰（酸化物）厚さは中 央で約 2mm, 端で約 1mm	表面は酸化して損傷 がある。裏面は変色 のみ。
山状-2	54	102	同 上	同 上
山状-3	54	105	同 上	同 上
薄層状-1	54	ほとんど温 度上昇なし	熾きなし。 燃焼した部分と燃え残 り部分が斑に観察され た。	表面はやや変色した が、裏面は変化が見 られなかった。
薄層状-2	54	同 上	同 上	同 上
薄層状-3	54	同 上	同 上	同 上

表 7.1-2 堆積ジルカロイファイン燃焼による煤塵量

実 験 No	吸収前のろ紙 の重量 (g)	吸収後のろ紙 の重量 (g)	煤塵の量 (g)	放出時間 (秒)	放出量 (kg)
1	0.1436	0.2026	0.0590	5	0.37
2	0.1426	0.2755	0.1329	54	0.33
3	0.1451	0.2533	0.1082	30	0.35

表 7.2-1 HEPA フィルタ概要

項 目	仕 様
型 式	ATM-8-P-E
外径寸法	305×305×290 (mm)
定格風量	8m ³ /min
初期圧力損失	25.4 (mmAq)
最終圧力損失	50 (mmAq)
捕集効率	99.97%
製品重量	5.2kg
外枠材質	鋼板
濾 材	硝子ペーパー
セパレータ材質	アルミニウム
シール材	特殊接着剤
ガスケット材質	ネオプレン
最高使用温度	120℃
最高使用湿度	100%

表 7.2-2 フィルタ堆積ジルカロイファイン消火試験結果

実験 No	放出時間 (秒)	放出量 (kg)	実験棟内 温度 (℃)	フィルタ 側面温度 (℃)	備考
1	57	5.35	8.3	29.1	
2	73	4.10	7.5	32.7	55 秒で一旦停止。熾き火があったため、65 秒後再放出。
3	60	5.93	5.6	11.8	

表 7.2-3 フィルタ堆積ジルカロイファイン燃焼による煤塵量

実験 No	吸収前のろ紙 の重量 (g)	吸収後のろ紙 の重量 (g)	煤塵の量 (g)	放出時間 (秒)	放出量 (kg)
1	0.1424	0.1612	0.0188	10	0.35
2	0.1465	0.1731	0.0266	58	0.34
3	0.1432	0.1821	0.0389	82	0.33

グラフ1 ノズル圧力と二酸化炭素放出時間

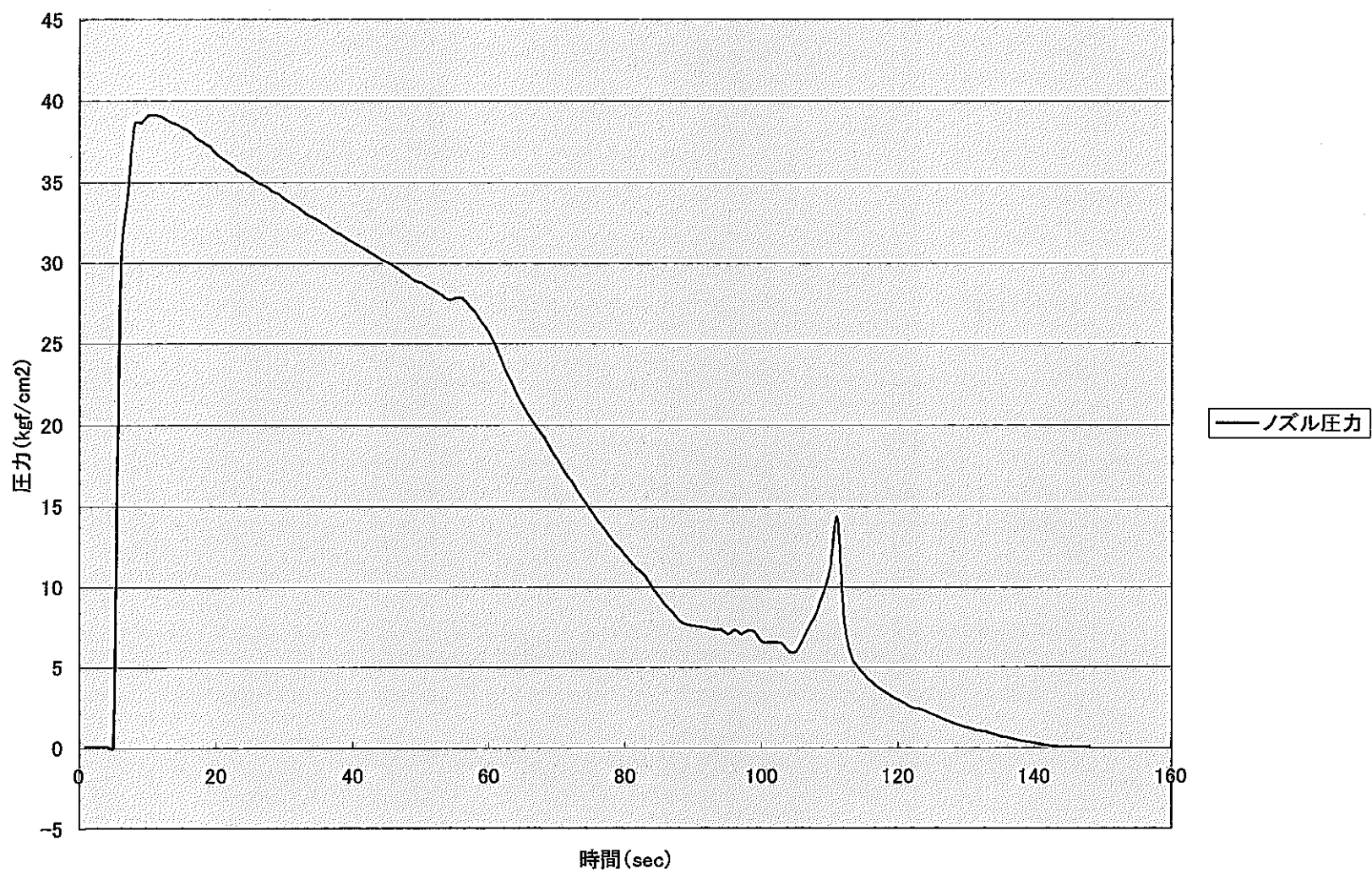


図 7.1-1 ノズル圧力と二酸化炭素放出時間

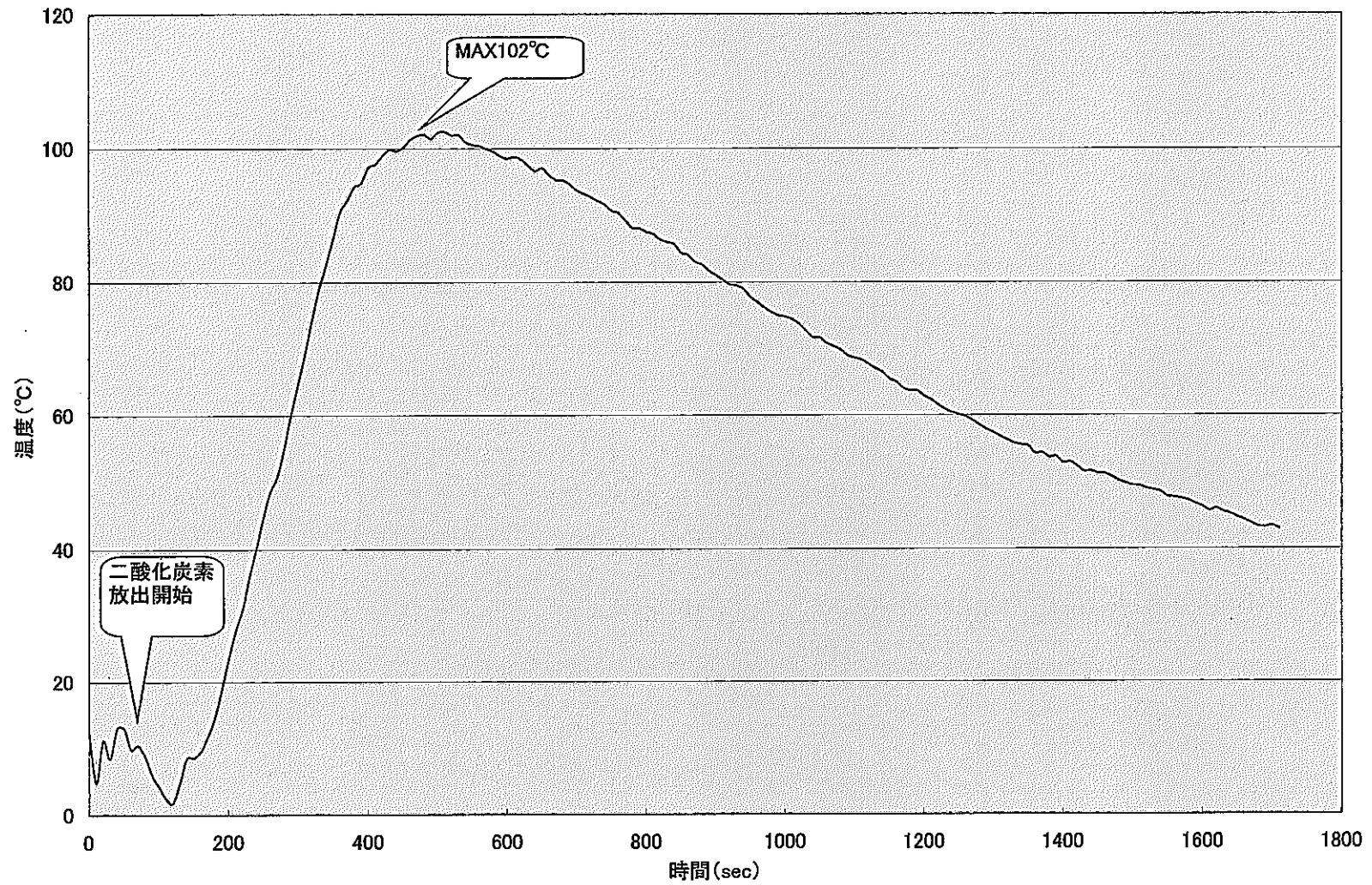


図 7.1-2 (1) 温度上昇カーブ (山状-1)

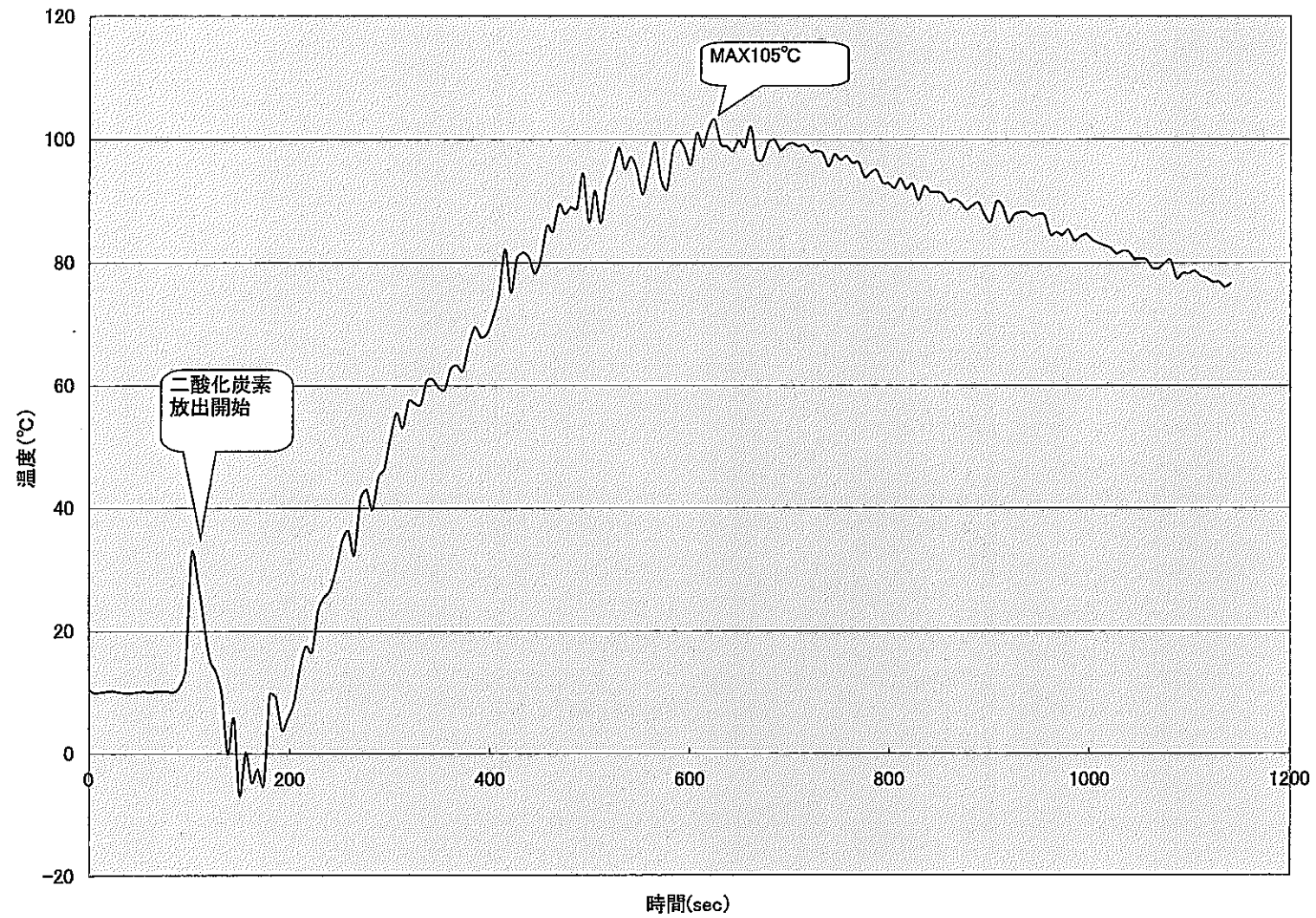


図 7.1-2 (2) 温度上昇カーブ (山状-2)

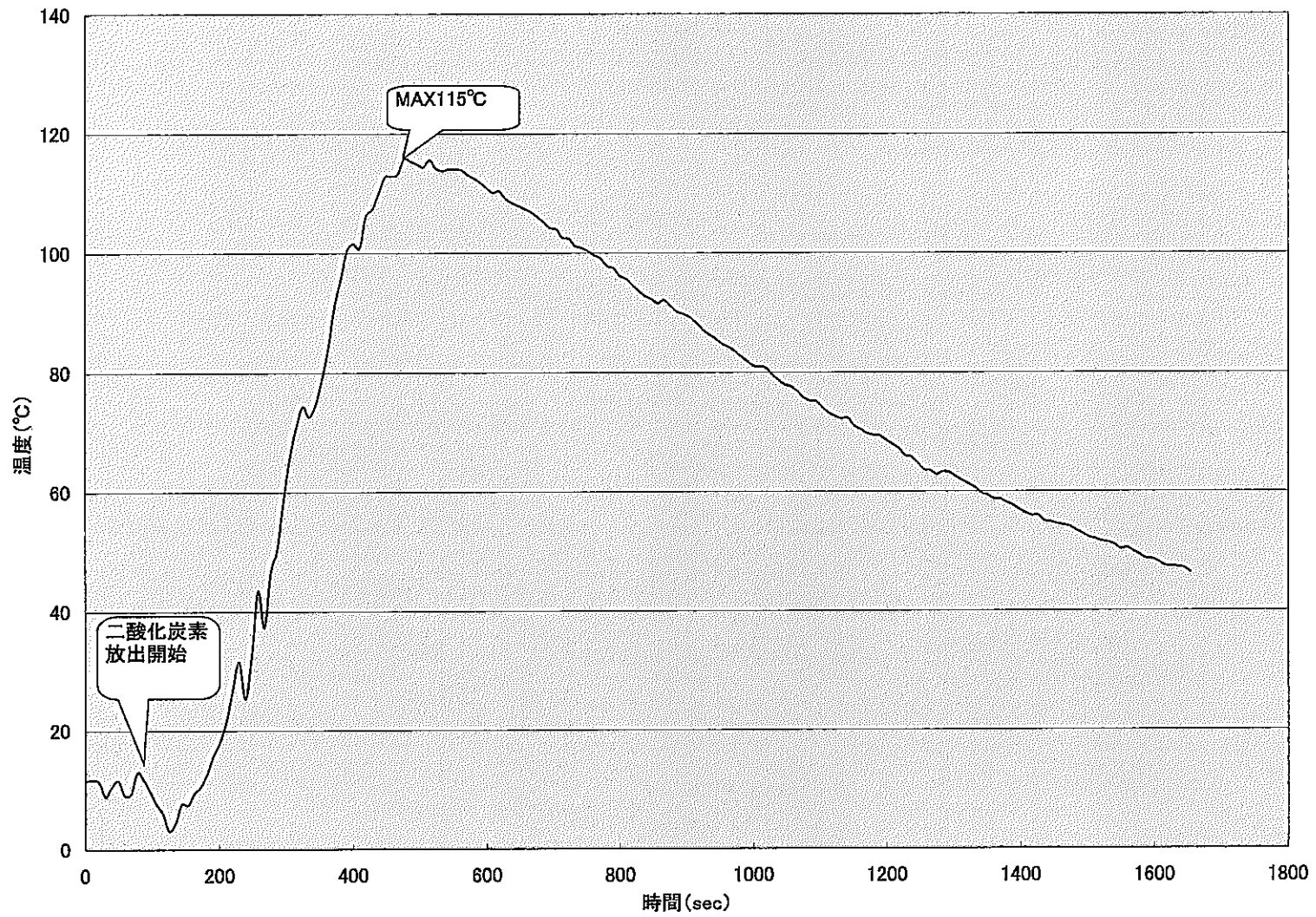


図 7.1-2 (3) 温度上昇カーブ (山状-3)

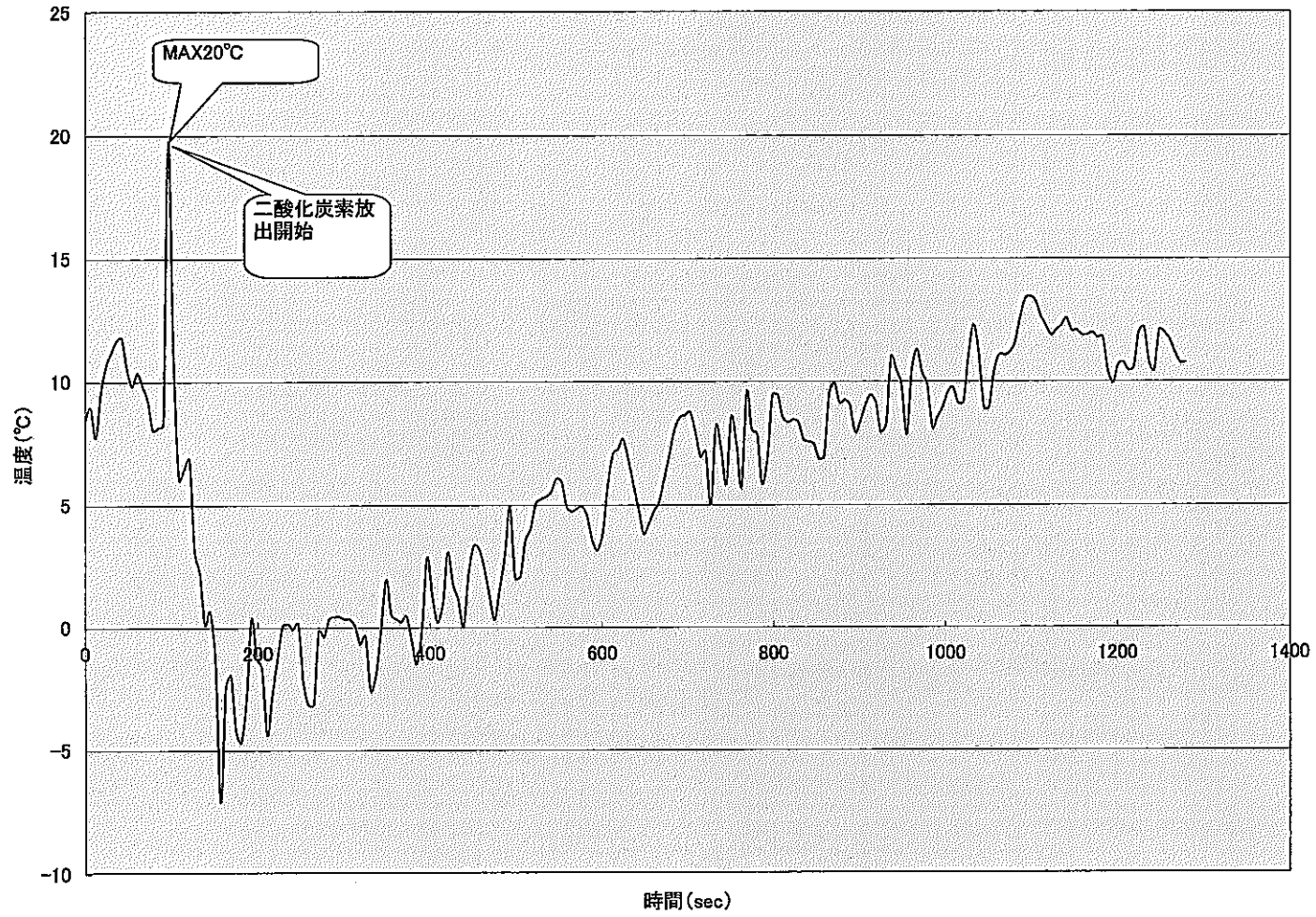


図 7.1-2 (4) 温度上昇カーブ (薄層状-1)

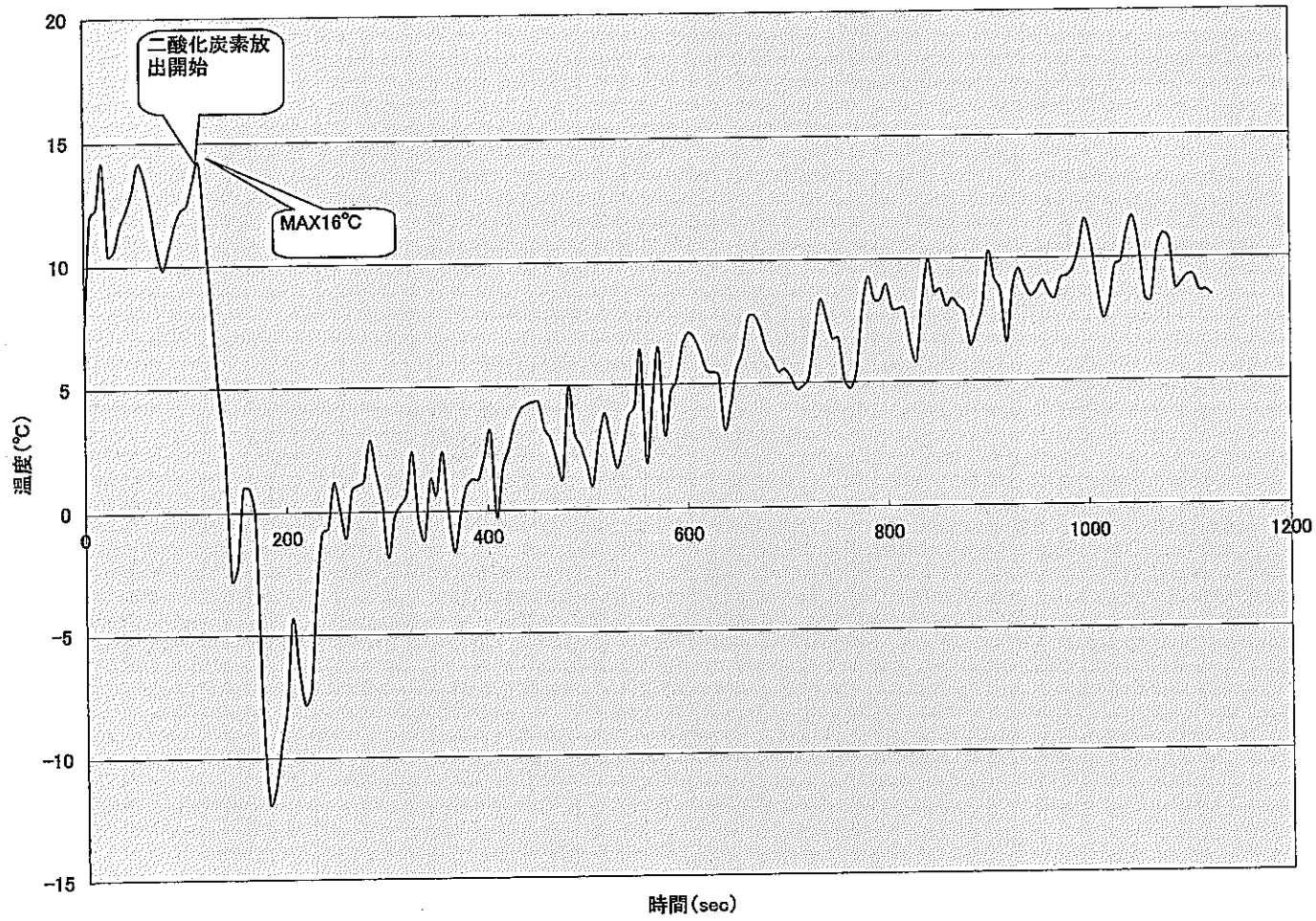


図 7.1-2 (5) 温度上昇カーブ (薄層状-2)

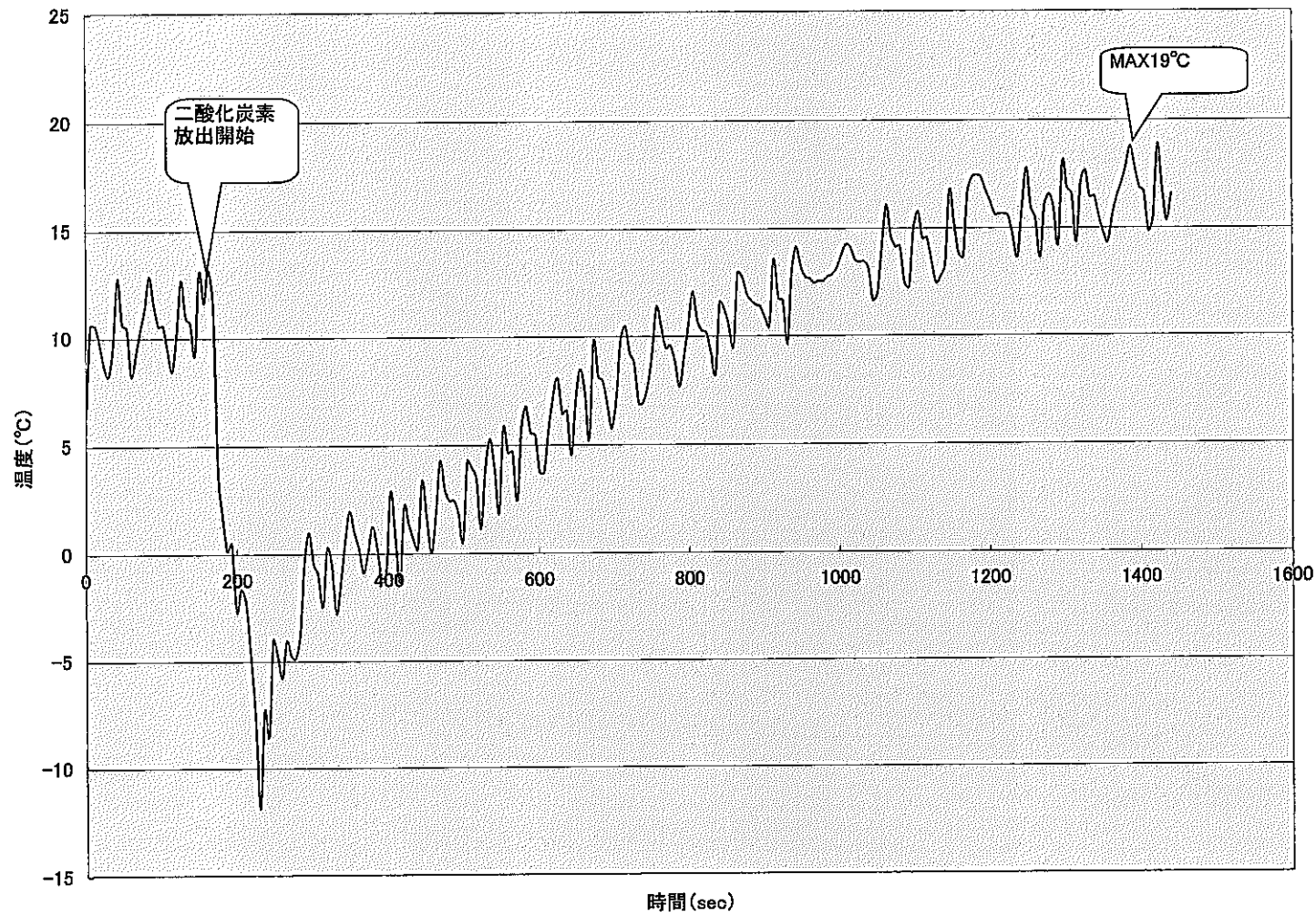
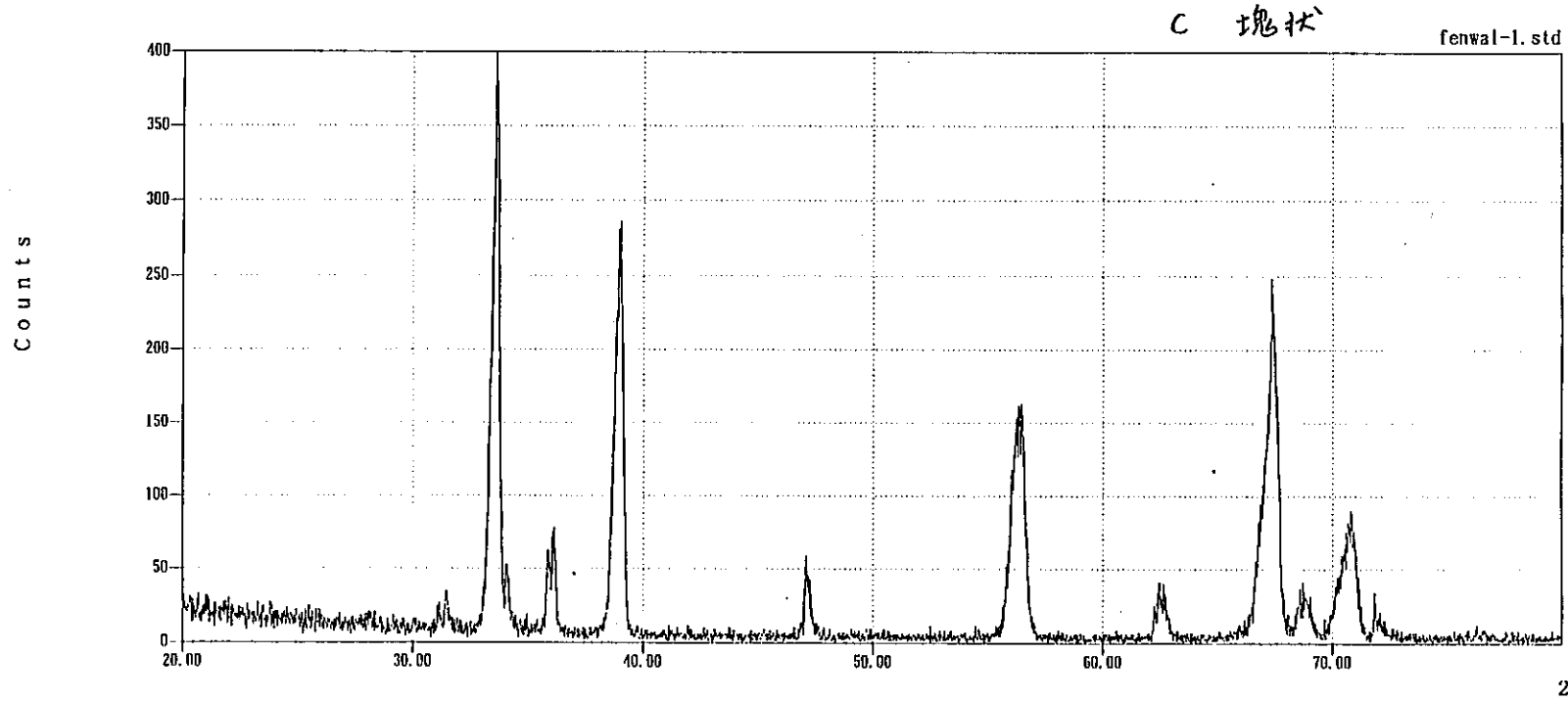


図 7.1-2 (6) 温度上昇カーブ (薄層状-3)



条件					
ファイル名	fenwal-1. std	ステップ 角度(°)	0.020	散乱スリット	1°
物質名	C	計数 時間(sec)	1.00		
サンプル名		管 電 圧(kV)	30.00		
測定日付	1999年 2月 2日	管 電 流(mA)	30.00	スキャン点数	0
測定 法	ステップ	ターゲット 名	Cu	スキャン回数	0
測定 軸	2θ・θ	発散スリット	1°	2θ 補正角度	0.00
モ ー ド	通常	受光スリット	0. 2mm		
社	日本電子(株) JDX-3530				

図 7.1-3 (1) 燃烧残渣の X 線回折結果 (1: 消火せず燃烧-1)

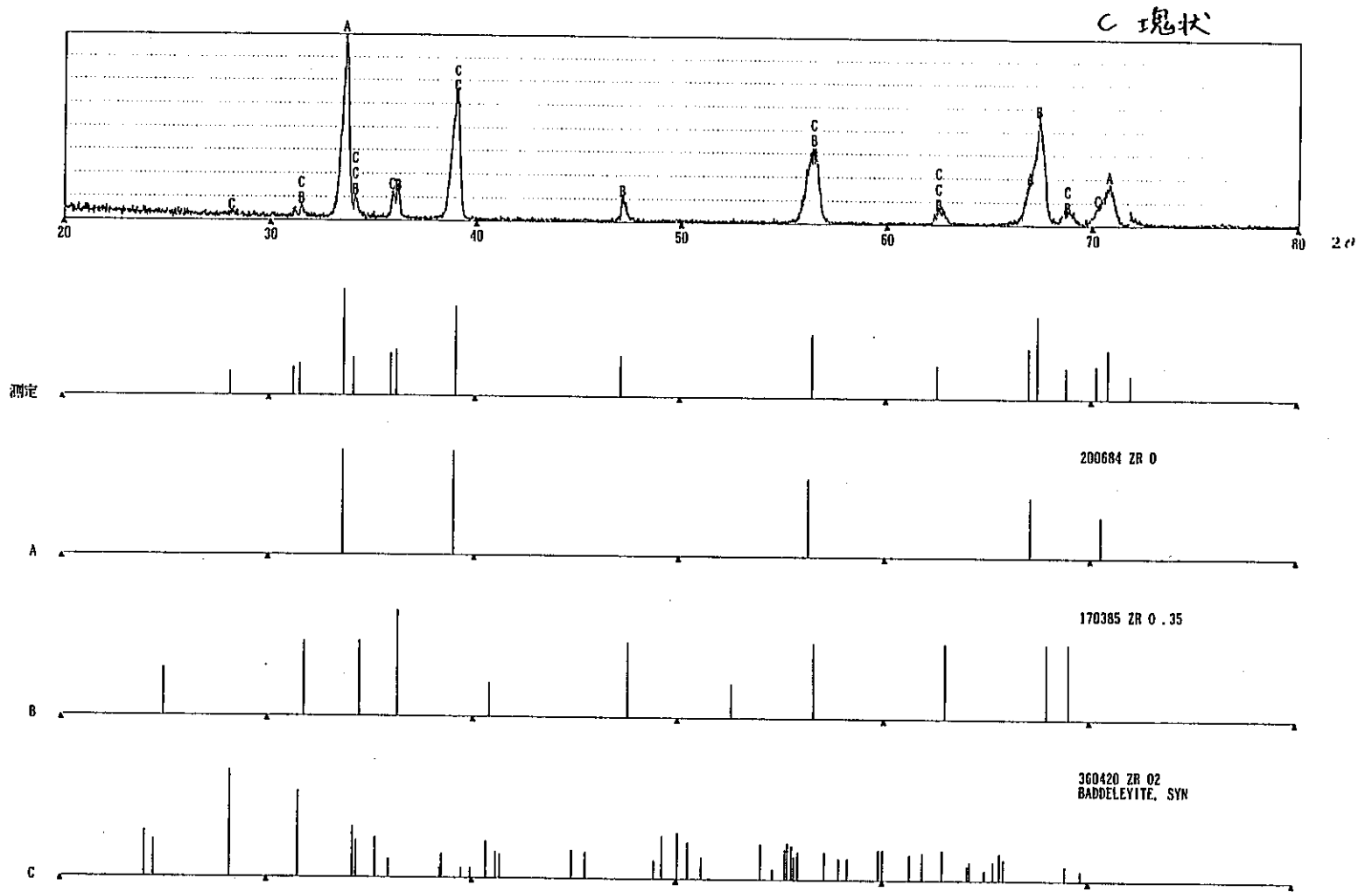
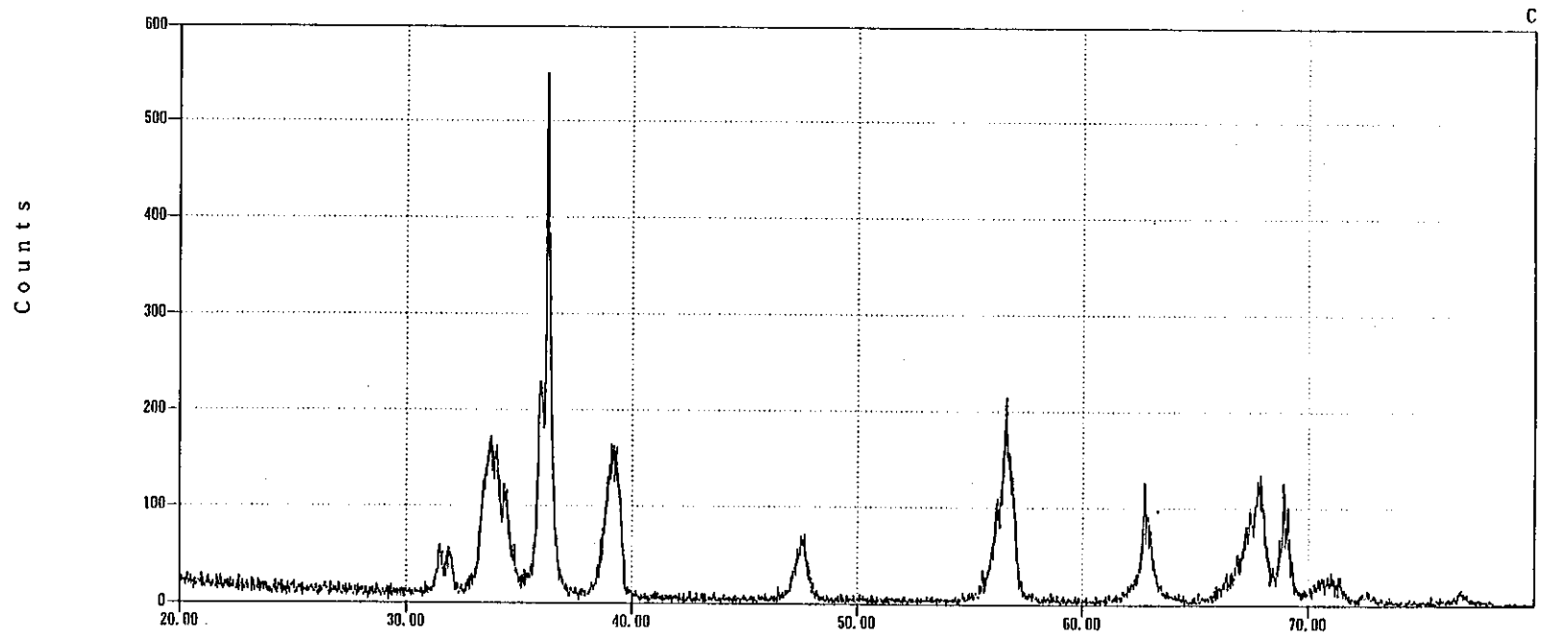


図 7.1-3 (2) 燃焼残渣の X 線回折結果 (2: 消火せず燃焼-2)



条件					
ファイル名	fenwal-a.std	ステップ角度(°)	0.020	散乱スリット	1°
サンプル名	C	計数時間(sec)	1.00		
プレート名		管電圧(kV)	30.00		
測定日付	1999年2月2日	管電流(mA)	20.00	スキャン点数	0
測定法	ステップ	ターゲット名	Cu	スキャン回数	0
測定軸	2θ・θ	発散スリット	1°	2θ補正角度	0.00
モード	通常	受光スリット	0.2mm		

片

図 7.1-3 (3) 燃焼残渣の X 線回折結果 (3: 消火表層-1)

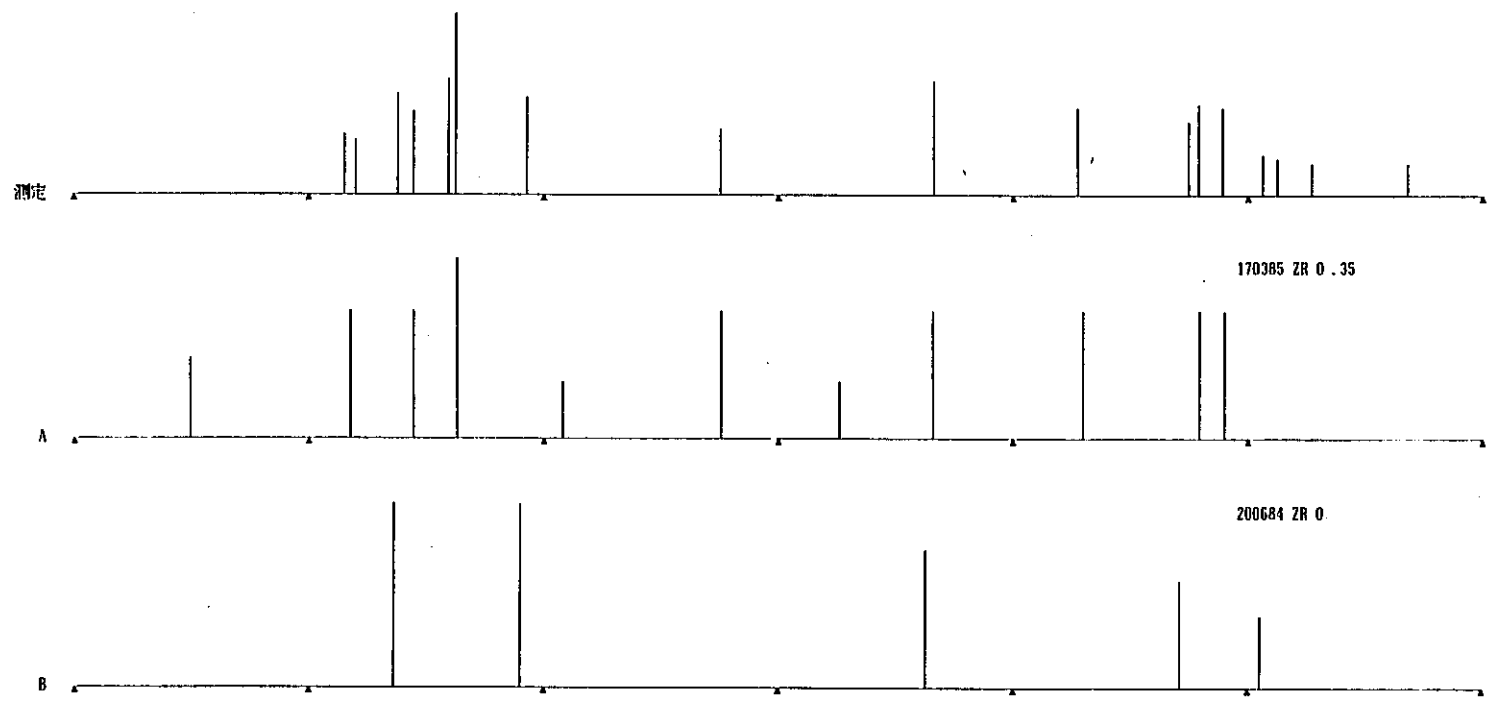
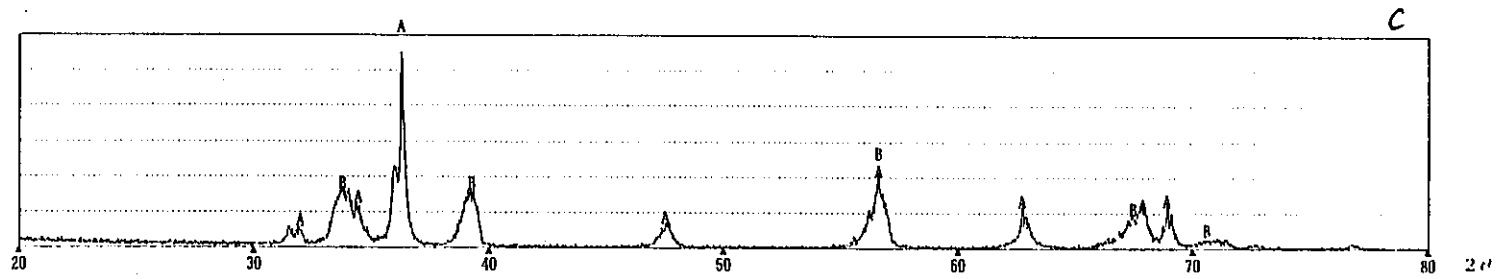
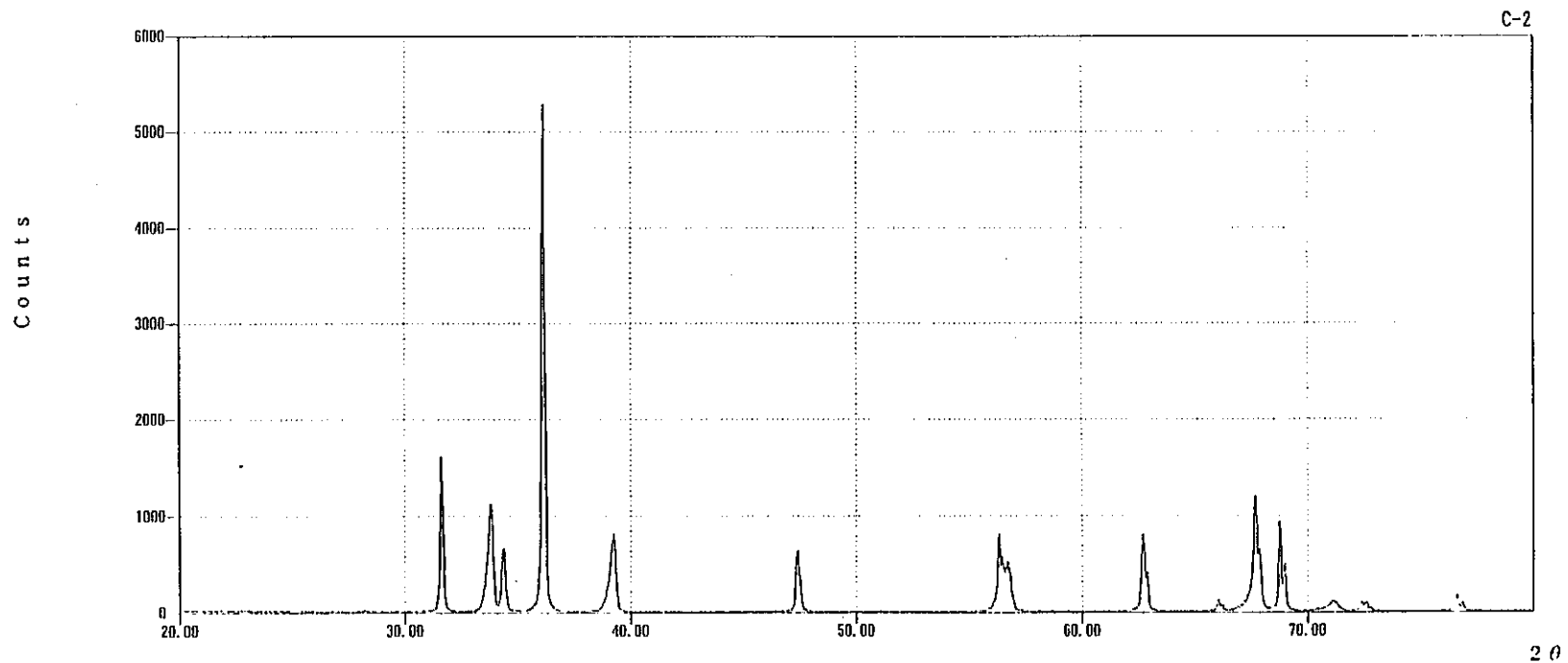


図 7.1-3 (4) 燃焼残渣の X 線回折結果 (4: 消火表層-2)



条件					
ファイル名	fenwal-b. std	ステップ 角度(°)	0.020	散乱スリット	1°
物質名	C-2	計数時間(sec)	1.00		
サンプル名		管電圧(kV)	30.00		
測定日付	1999年 2月 2日	管電流(mA)	30.00	スキップ点数	0
測定法	ステップ	ターゲット名	Cu	スキップ回数	0
測定軸	2θ・θ	発散スリット	1°	2θ補正角度	0.00
モード	通常	受光スリット	0.2mm		

図 7.1-3 (5) 燃焼残渣の X 線回折結果 (5: 消火黒色-1)

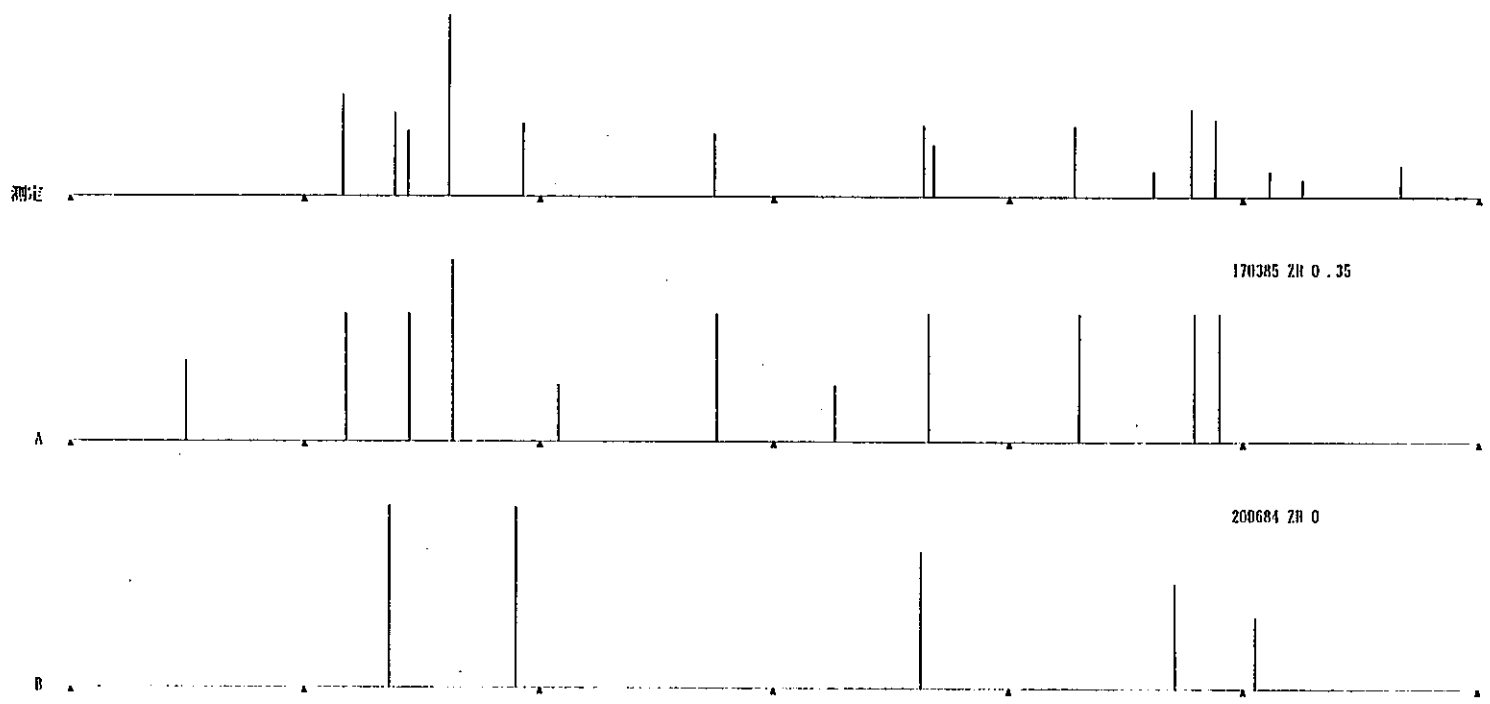
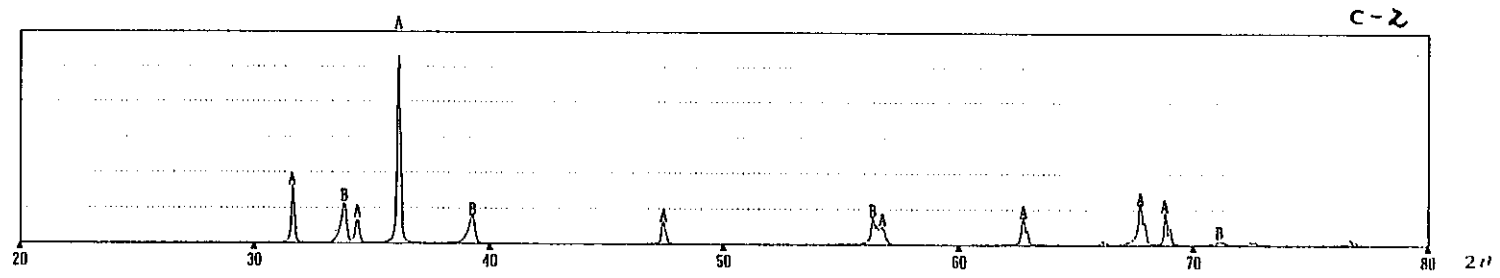


図 7.1-3 (6) 燃烧残渣の X 線回折結果 (6: 消火黒色-2)

グラフ1. 表面温度

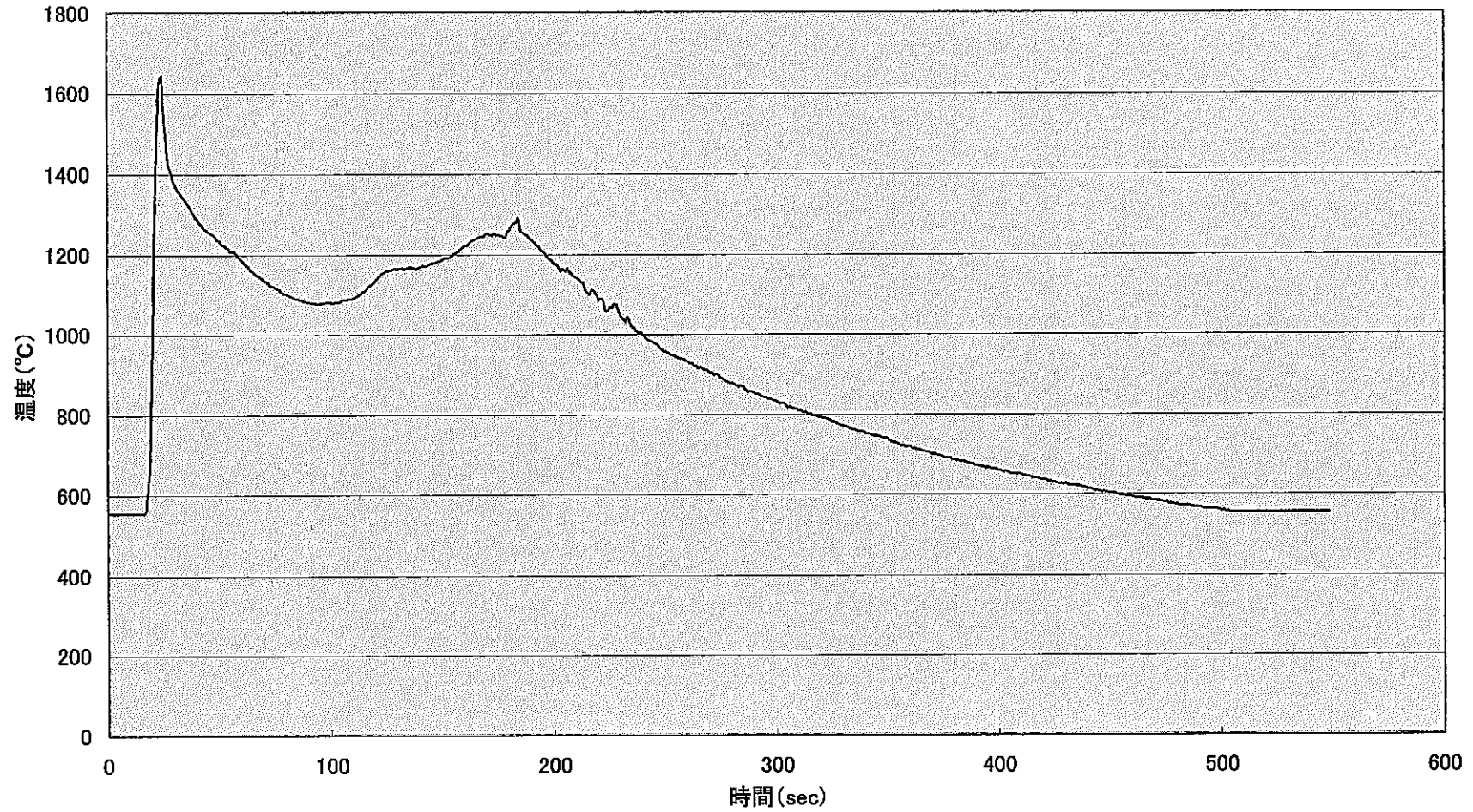


図 7.1-4 堆積ファイン燃焼の表面温度

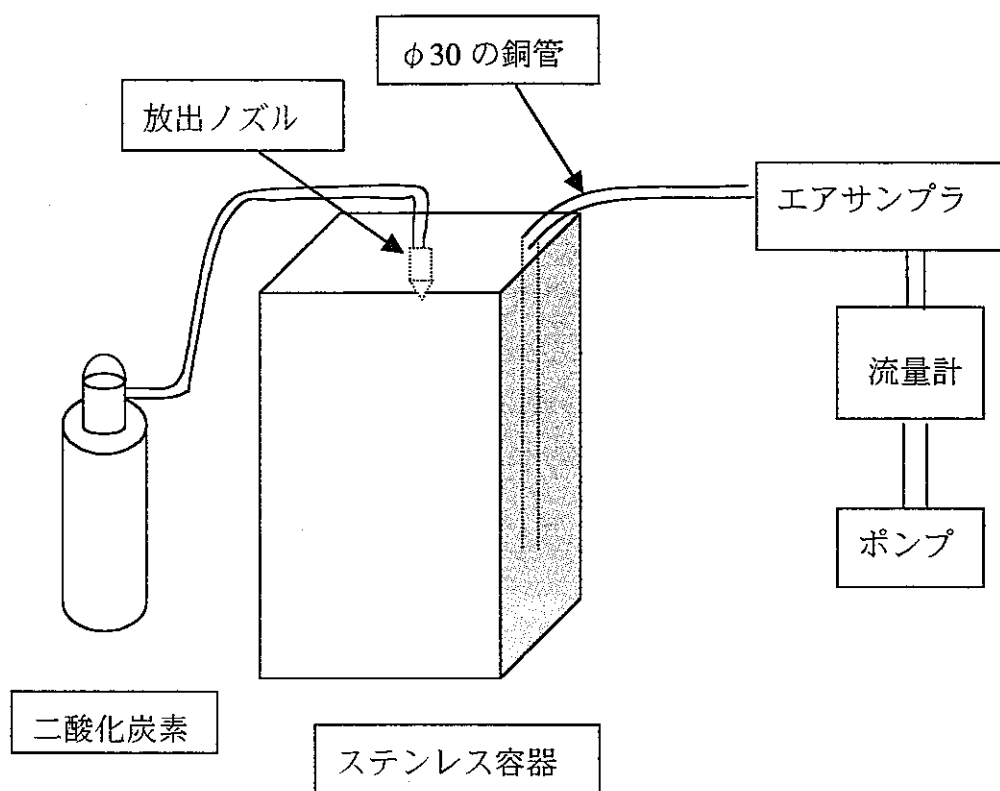


図 7.1-4 煤塵発生量試験装置

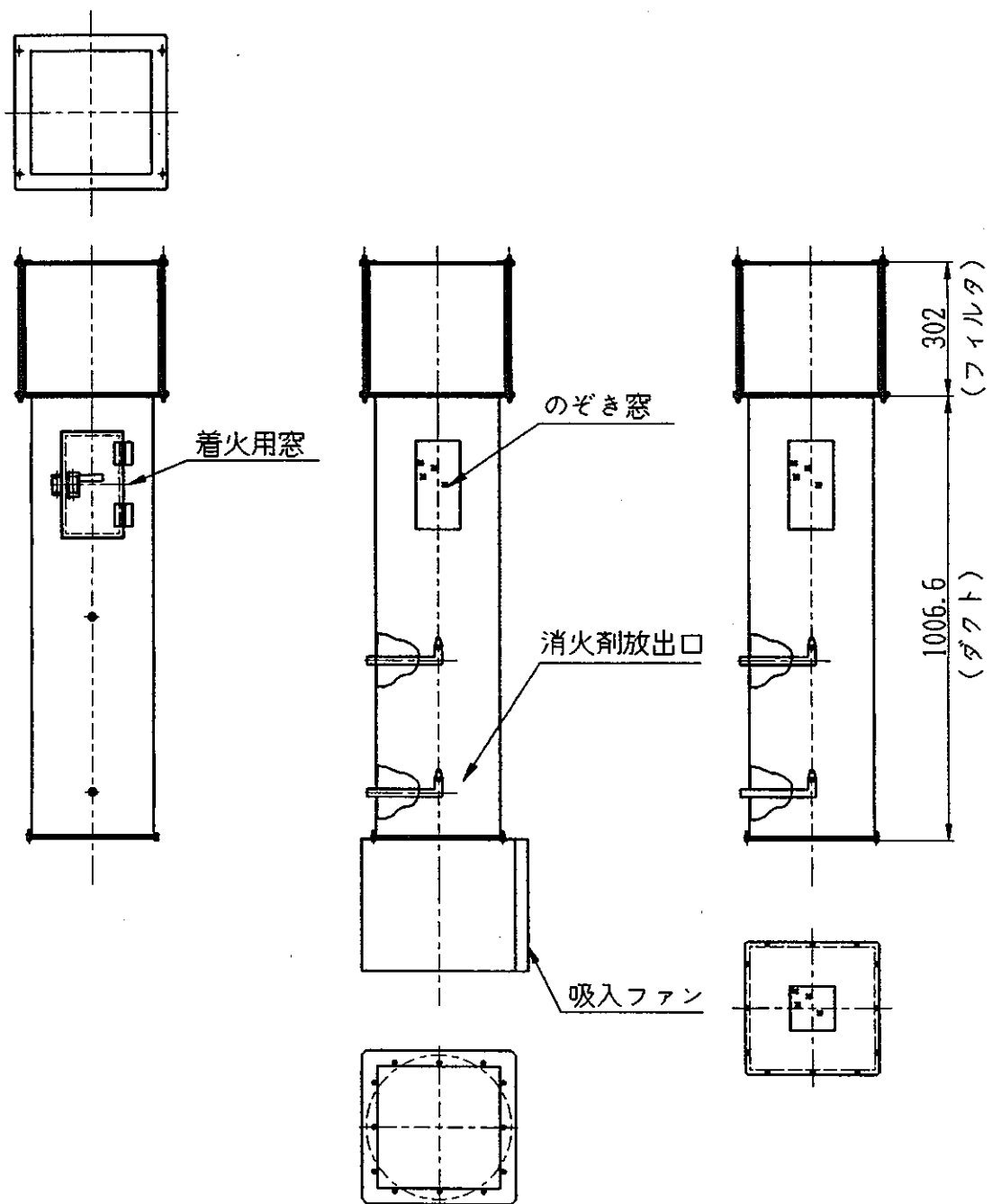
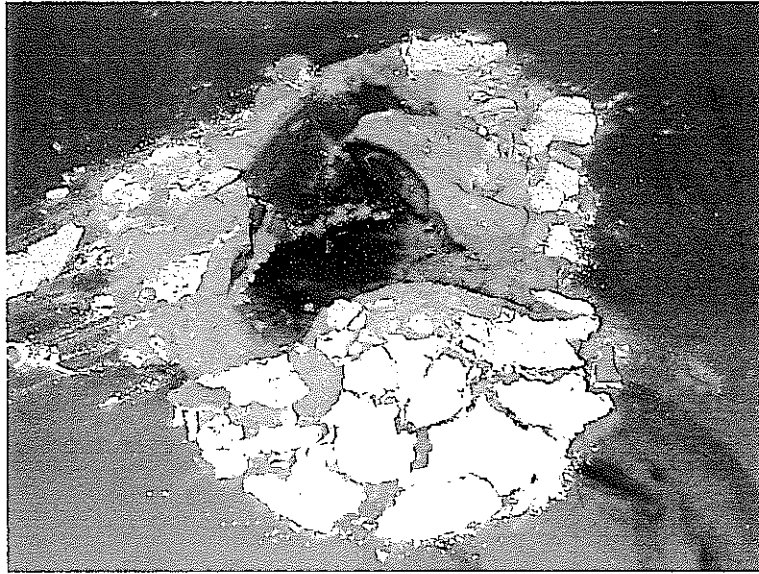
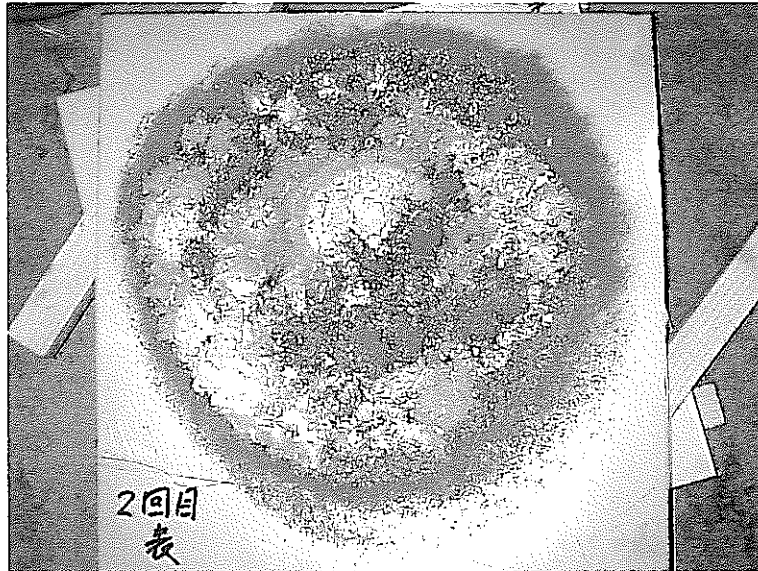


図 7.2-1 フィルタ堆積ジルカロイファイン吸引及び消火試験装置

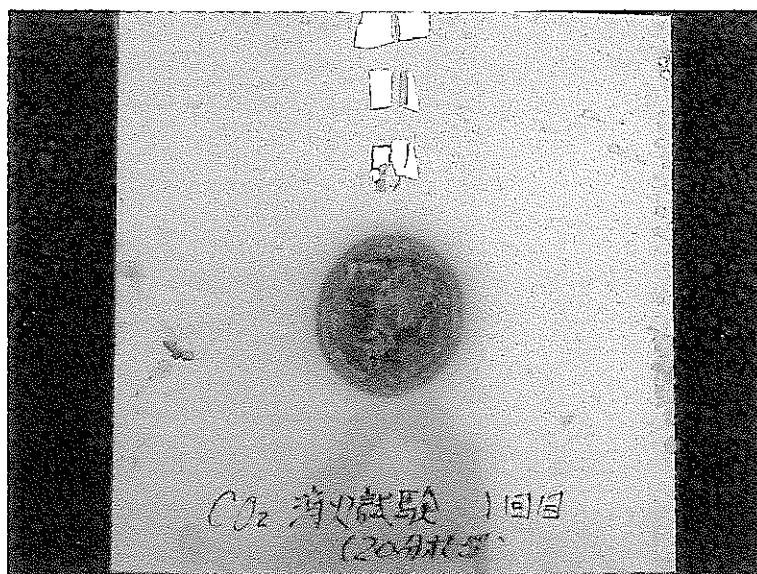


消火後の山状ファイン



消火後の薄層ファイン

写真 7.1-1 消火後の堆積ファイン



山状-1 表面

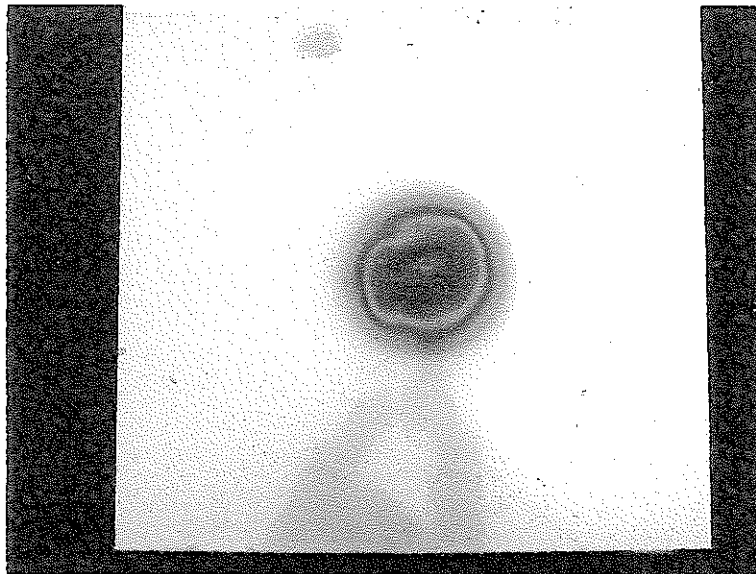


山状-1 裏面

写真 7.1-2 ステンレス板の損傷状況 (1)

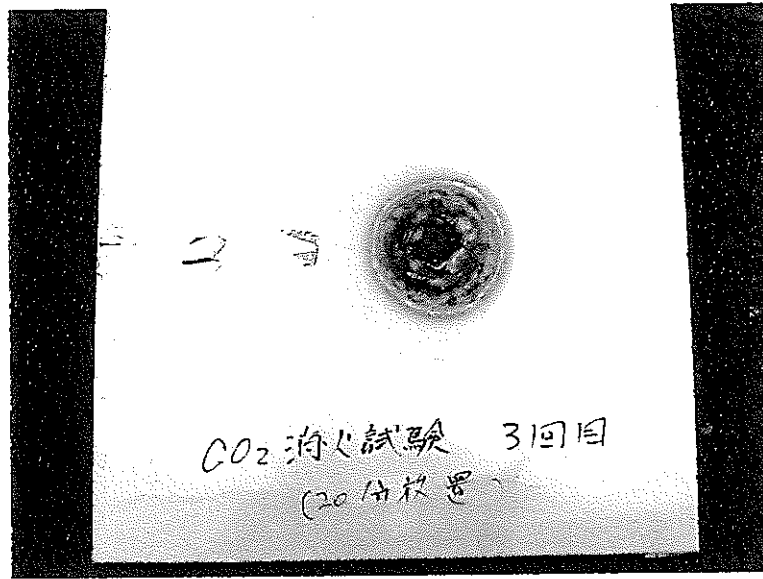


山状-2 表面

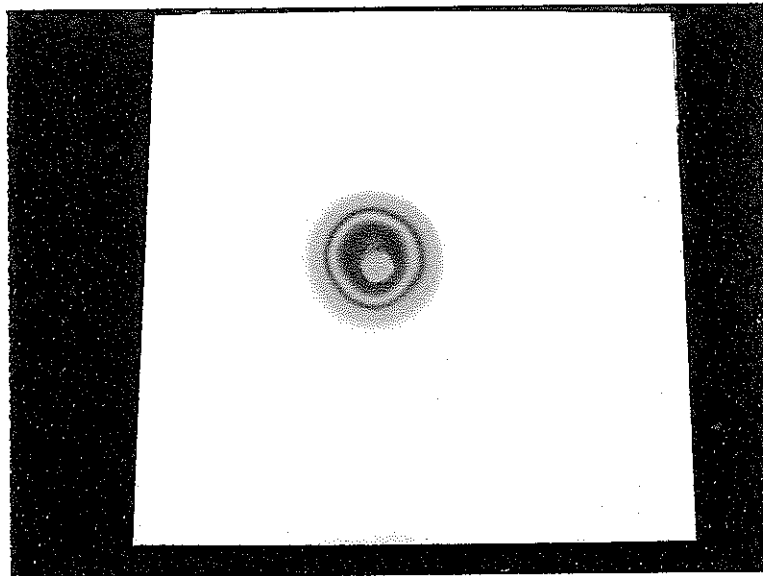


山状-2 裏面

写真 7.1-2 (2) ステンレス板の損傷状況 (2)

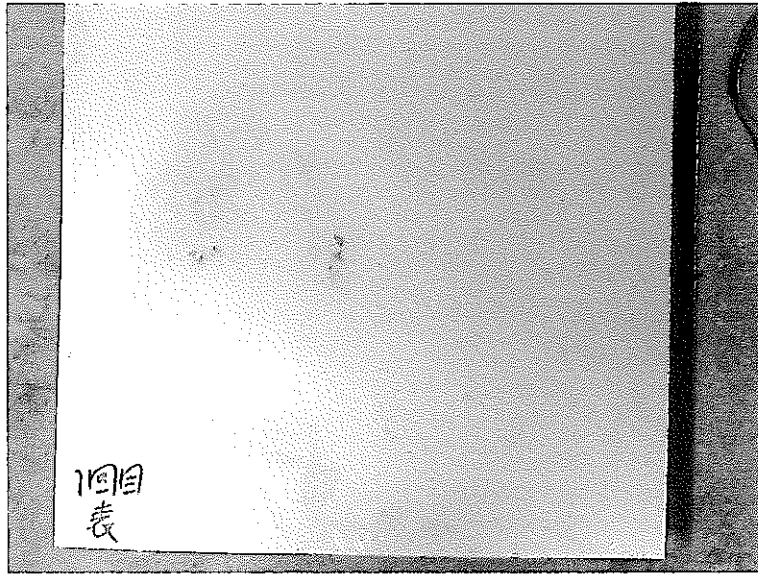


山状-3 表面

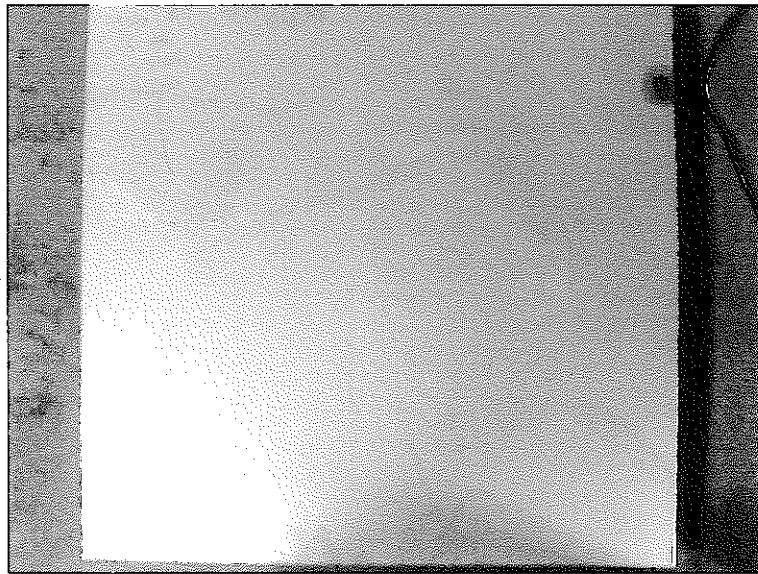


山状-3 裏面

写真 7.1-2 (3) ステンレス板の損傷状況 (3)



薄層-1 (表面)

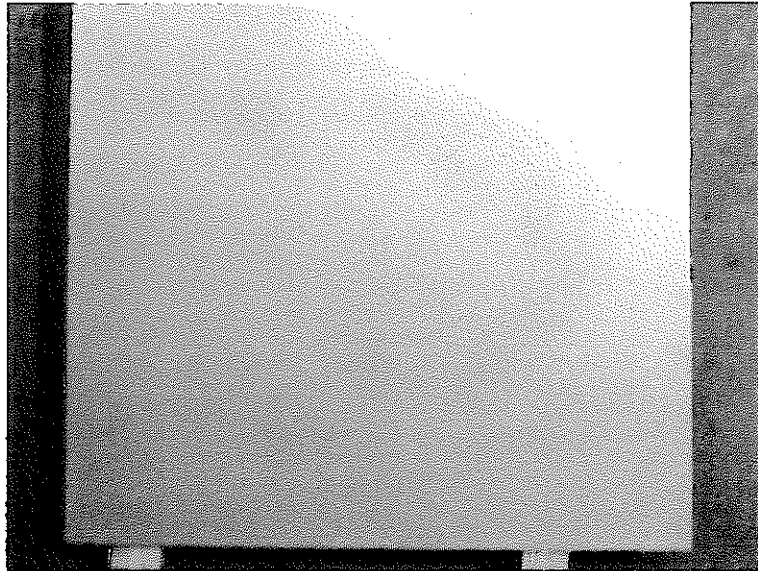


薄層-1 (裏面)

写真 7.1-2 (4) ステンレス板の損傷状況 (4)



薄層-2 (表面)

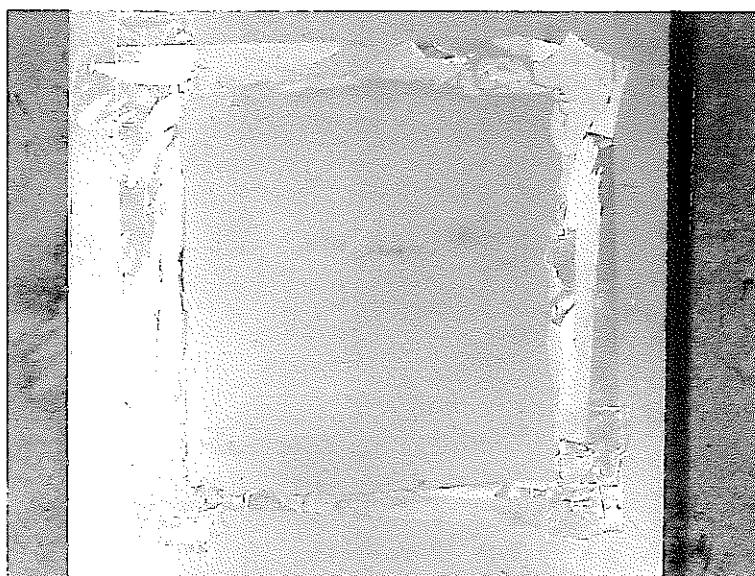


薄層-2 (裏面)

写真 7.1-2 (5) ステンレス板の損傷状況 (5)

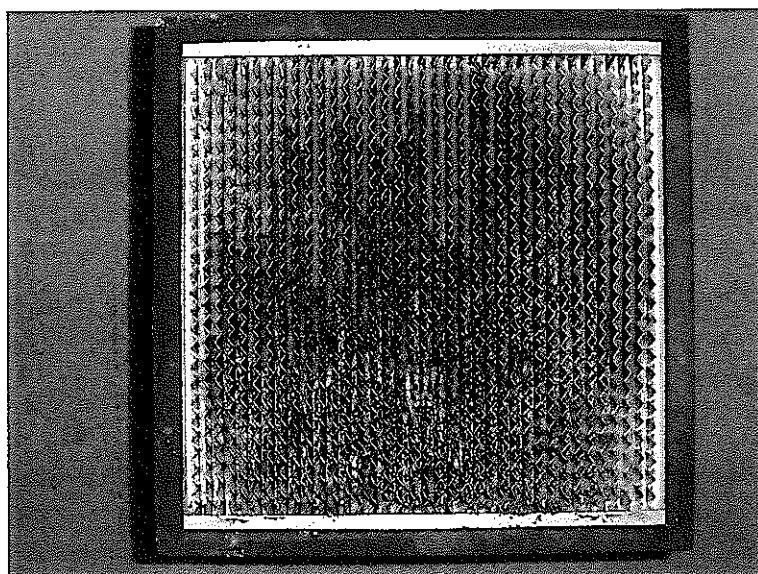


薄層-3 (表面)

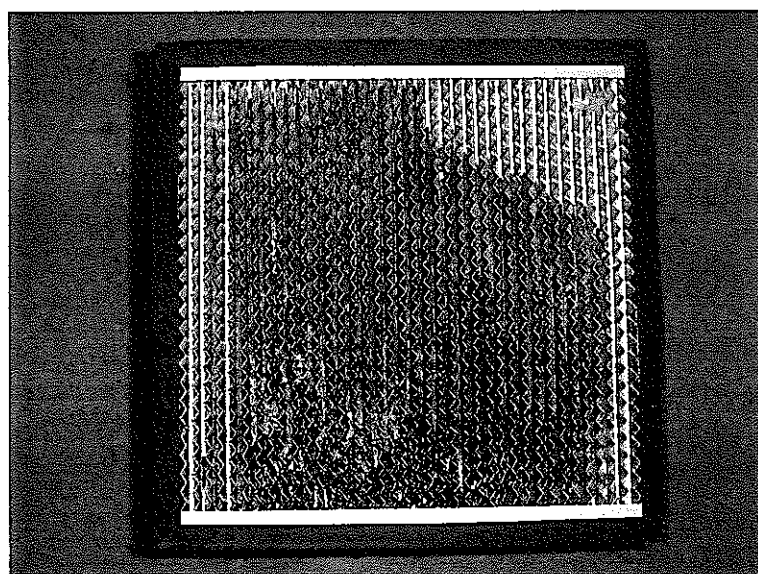


薄層-3 (裏面)

写真 7.1-2 (6) ステンレス板の損傷状況 (6)

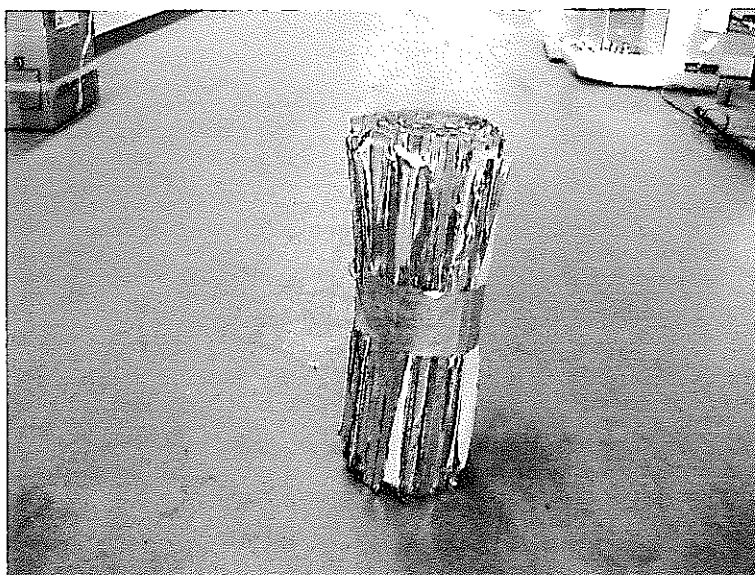


表面（上部）

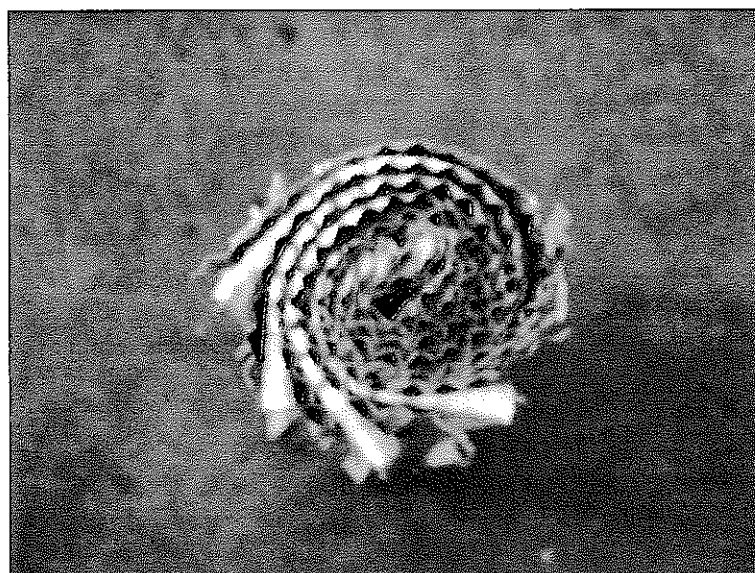


裏面（下部）

写真 7.2-1 フィルタ消火試験後のフィルタ



渦巻き状にしたフィルタ（全体）



渦巻き状にしたフィルタ（真上）

写真 7.2-2 煤塵量測定試験用フィルタ

8. ジルカロイファイン混入可燃・難燃物消火試験

ジルカロイファインが混入した可燃・難燃物が発火した場合を想定して、焼却セルに設置予定の消火設備（二酸化炭素消火設備又はスプリンクラー設備を想定）で十分消火可能であることを確認した。

8.1 消火対象物の仕様

可燃・難燃物の種類及び模擬ファイン混入量は、以下の通りとした。

① 可燃・難燃物の種類

ウェス(50wt.%)，ポリエチレン(50wt.%)を混合して、1 kg 毎に段ボール箱 (D240×W340×H120mm, 材質 K5A フルード) に分けて収納した。

② 模擬ファイン混入量

可燃・難燃物 1 kg 当たり 15g の模擬ファインを混入させる。

③ 混合方法

ウェスとポリエチレンを、前もって充分手で混合し、混合物 100 g ずつ段ボール箱に敷き詰め、その都度 1.5 g ずつ模擬ファインを振りかけた。

④ 1 回の消火試験で使用する可燃・難燃物の量は、想定される最大保管量（約 70kg）と焼却セルの大きさ（約 22×7×H14m）とを模擬して設定し、実験室との面積比より、1 度に 8 個を燃焼させた。

⑤ 燃焼させる可燃・難燃物の調整条件は、以下のとおりとした。

- ・ケース 1：可燃・難燃物のみ（模擬ファイン混入なし）

- ・ケース 2：模擬ファイン混入可燃・難燃物（乾燥状態）
- ・ケース 3：模擬ファイン混入可燃・難燃物（水切り状態：水中に充分浸し，引き上げ 10 分程度放置した）

8.2 試験結果

8.2.1 消火対象物の調整条件選定試験

ケース 1 からケース 3 について消火試験を行い，最も消火し難い条件を選定した。

二酸化炭素消火設備では，消火状況の確認が難しいため，スプリンクラー消火設備を用い，消火試験を実施した。スプリンクラー設備は，消防法の規程によると，流量 80L/分で 20 分間継続して放出されるが，本試験では少量の水で消えることを予測し，既存の水槽を用いたため，総水量 370L の水を，流量 80L/分で約 275 秒間放出して消火した。スプリンクラーヘッドは能美防災株式会社製散水ヘッド（型番：MHS124NH 型）を使用した。

消火対象物 1 箱を，鋼製の棒上に置き，助燃剤を散布したのち段ボールの下から着火した。箱全体に炎が行き渡ってから，放水を開始した。

規程時間放水後，燃え残りをかき分け鎮火状況を確認した。その結果，ケース 1 の模擬ファイン未混入物では鎮火できず，ケース 2 の模擬ファイン混入物では鎮火した。また，ケース 3 の水分混入物では助燃剤と一部の段ボールが燃えただけで，自然に鎮火した。

ケース 2 の模擬ファイン混入物の消火状況を観察していると，模擬ファインが燃焼して激しく飛び散っているのが判かるが，全体的にはケース 1 の可燃・難燃物のみの場合の燃焼と大差なかった。さらに，ケース 1 の消火状況

を観察していると、放水と同時に火勢は衰えたが、段ボール箱の天井が傘の役目を果たし、内部には十分な水が届かない状況であった。このため、鎮火しなかったと考えられる。この状況は模擬ファインの有無に係わらず発生すると考えられ、スプリンクラーでの確実な消火は難しいように感じられた。

これらの理由により、以後の消火試験はケース 2 の模擬ファイン混入物で実施した。

8.2.2 スプリンクラー消火設備による消火試験

消火対象物 8 箱を、鋼製の棒上に一段積みで二列に並べ、火が全体に行き渡るように助燃剤を散布したのち着火した。写真 8.2-1 に燃焼前の消火対象物の状況を、写真 8.2-2 に消火前の燃焼状況を示す。

火勢が充分激しくなったところで、放水を開始した。前述の試験で消火できなかったため、大型貯水槽を設け、消防法の基準に従って、流量 80L/分で、20 分間放水した。図 8.2-1 に試験設備の概要を、写真 8.2-3 にスプリンクラーで消火中の状況を示す。

規定時間放水後、燃え残りをかき分け鎮火状況を確認した。試験は 3 回実施し、1 回目は鎮火、2 回目は燐きが残留、3 回目は一部で燃焼が継続した。

放水と同時に火勢は衰えたものの、長時間放水したにも係わらず、燃焼物の内部まで水が届き難く、完全な消火は望めないように感じられた。

特に、3 回目は火が消えたように思われる場面が数度観察されたが、その都度、水が届き難い部分から再発火を繰り返した。

また、燃焼物から 500mm 離れた場所での温度を測定した結果、最高 145℃

であった。表 8.2-1 に試験結果を示す。

8.2.3 二酸化炭素消火設備による消火試験

スプリンクラー消火設備と同じ方法で着火した。火勢が充分激しくなったところで、堆積ファインの消火試験と同様に、実験室内に 55kg の消火剤を消防法の基準に従い 60 秒以内で放出した。

消火剤を放出して 20 分経過後、実験室内を 5 分間で換気し、消火対象物をかき分け消火状況を観察した。試験は 3 回実施し、3 回共完全に鎮火した。写真 8.2-4 に消火後の状況を示す。

また、燃焼物から 500mm離れた場所での温度を測定した結果、最高 133℃であった。表 8.2-1 に試験結果を示す。

8.2.4 まとめ

可燃・難燃物の燃焼は、深層火災であり、浸透性のある水は有効であると考えられたが、スプリンクラー消火設備のみで完全に消しきることは難しいと思われる。ただし、本消火設備は当該部分だけに放水するため、水量がすくなく、延焼を防止する観点からは優れていると考えられ、遠隔での手動の局所的な残焼の消火設備と組み合わせれば有効であると考えられる。

また、二酸化炭素消火設備は、消火可能であった。しかし、消火対象物の状況によっては、完全とは言えず、やはり、遠隔での手動の局所的な残焼の消火設備と組み合わせれば有効であると考えられる。

表 8.2-1 ジェル177777混入可燃・難燃物消火試験結果

可・難燃物の条件	消火剤	消火剤量	消火剤放出時間	段ボール箱設置状態	着火側	消火中の燃焼状態、消火後の状態	備 考	近傍温度 (端の段ボール箱から約 500mm の位置)
乾燥状態777777混入	水 (スプリンクラー)	80L/min (総水量 1.6t)	20 分	2 列平置き 8 箱	段ボール下	消火剤放出時間内に消火した。		114℃
同上	同上	同上	同上	同上	同上	消火剤放出完了後も煙が発生していた。 燃え残りをかき分けると熾きが発見された。 但し自然鎮火した。		102℃
同上	同上	同上	同上	同上	段ボール上	消火せずに燃えている箇所が1カ所あった。		145℃
同上	二酸化炭素	55kg	60 秒以内	同上	段ボール下	消火した。但し消火剤放出後、室内が白く霧状になるため、消火時間は不明。かき分けても熾きは発見されなかった。	放置時間：20 分 換気 : 5 分	133℃
同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	133℃
同上	同上	同上	同上	同上	段ボール上	同上	同上	94℃

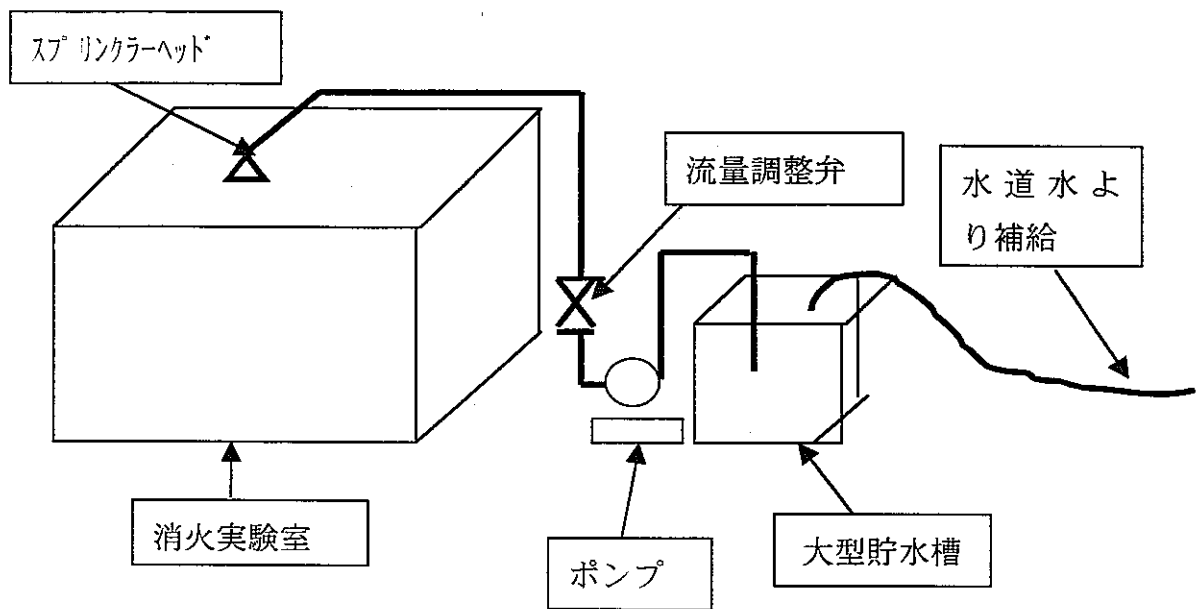


図 8.2-1 スプリンクラー消火試験装置

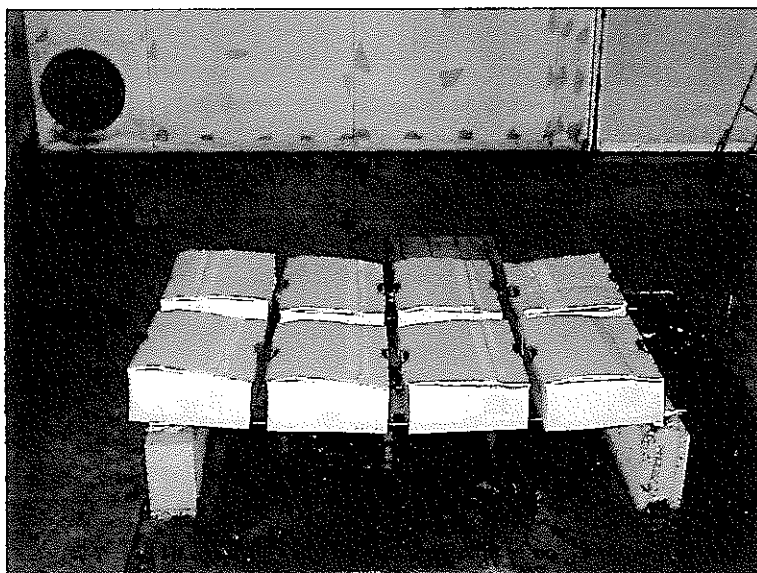


写真 8.2-1 燃焼前の消火対象物の状況

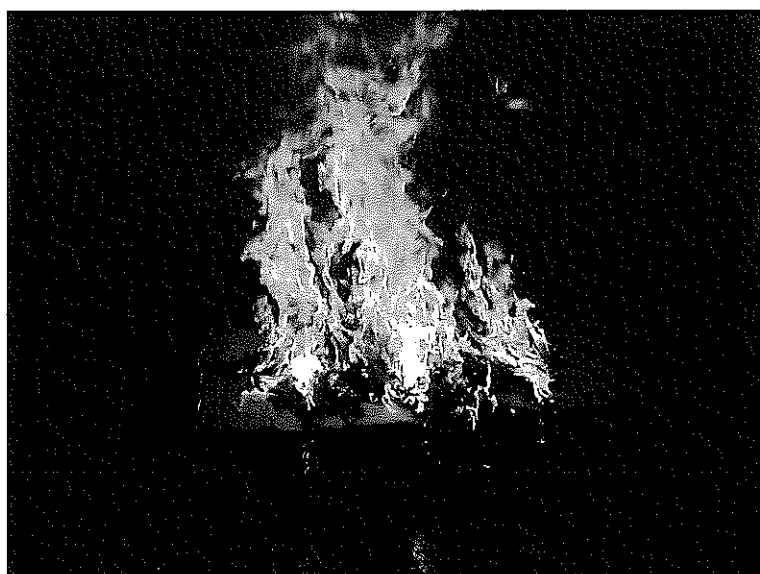


写真 8.2-2 消火前の燃焼状況

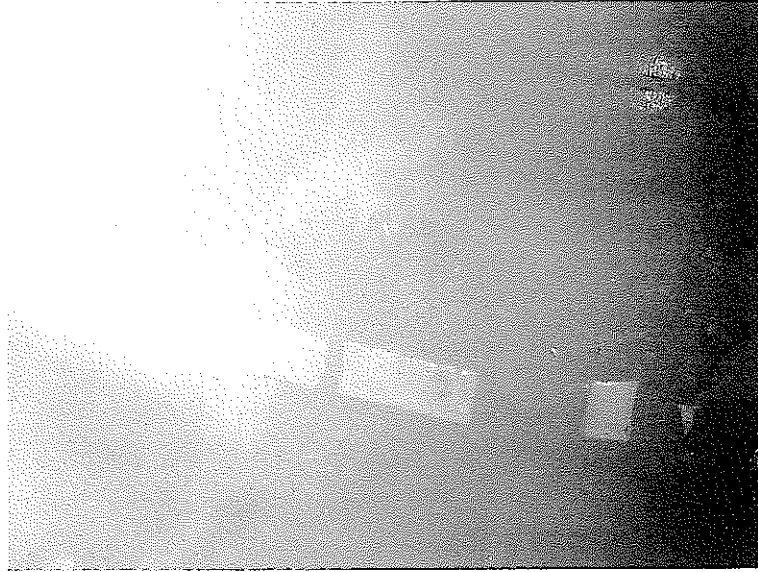


写真 8.2-3 スプリンクラーで消火中の状況

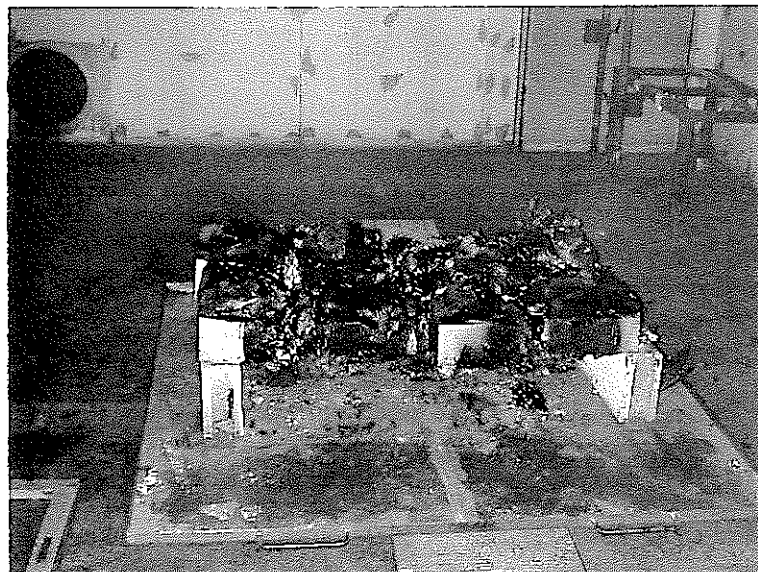


写真 8.2-4 二酸化炭素消火設備で消火後の状況

9. まとめ

金属粉の消火事例について文献調査した結果、砂、セメントなどの原子力施設への反映が困難な方法しか見あたらず、種々の消火設備について模擬ファインを用いて適応性を調査した。その結果、二酸化炭素消火設備とスプリンクラー消火設備が有望であると判断された。さらに、この二つの方法について実機での状況を模擬した消火剤選定試験を行った結果、二酸化炭素消火設備が、200 g程度の堆積したファインについては、消火可能であることが判明した。

二酸化炭素消火設備では、液化二酸化炭素の気化熱により、実験室内全体が冷却され、ドライアイスと気中の水分が霜状になるのが観察された。その強力な冷却効果により消火できたと推測された。ガス状の二酸化炭素では消火できなかったことから、窒息効果のみでは消火は不可能であると考えられた。また、スプリンクラー消火設備では、水は模擬ファインの燃焼と反応して火勢を増長するため、消火はできないが、延焼を防止するとともに、セルの材料を冷却することが可能で、安全に燃やしきるという効果が窺えた。なお、粉体の火災は深層火災であると思われ、粉末消火剤のような浸透性がないものでは、消火が不可能と考えられた。

二酸化炭素消火設備により山状及び薄層状の堆積ファインの燃焼の消火試験を行った結果、消火剤放出後 20 分放置することにより、完全に消火することが可能であった。また、消火時のセルへの影響を調査したが、表面では熔融によると考えられる損傷が観察されたが、裏面は黒く変色したに留まり、セルの閉じ込め機能は健全であることが判明した。さらに、消火時に発生す

る煤塵量は極微量であった。

一方、同消火設備により HEPA フィルタ堆積ファインの燃焼の消火試験を行った結果、ドライアイスの冷却効果が及ぶ部分については消火することが可能であった。また、消火時に発生する煤塵量は極微量であった。

ジルカロイファインが混入した可燃・難燃物の消火試験を行った。可燃・難燃物の燃焼は、深層火災であり、浸透性のある水は有効であると考えられたが、スプリンクラー消火設備のみで完全に消しきることはできなかった。ただし、本消火設備は当該部分だけに放水するため、水量がすくなく、延焼を防止する観点からは優れていると考えられ、遠隔での手動の局所的な残焼の消火設備と組み合わせれば有効であると考えられる。また、二酸化炭素消火設備は、消火可能であった。しかし、消火対象物の状況によっては、完全とは言えず、やはり、遠隔での手動の局所的な残焼の消火設備と組み合わせれば有効であると考えられる。

10. 参考文献

- ① ジルカロイファイン特性試験（Ⅱ）：PNC ZJ1058 97-007
- ② 最近の消火剤と消火法：吉田，桑原：燃料および燃焼 第56巻 第10号
- ③ Containerbrand mit Leichtmetallen. : PIETRON G : Brandschutz VOL.46 NO.8 PAGE.529-530 1992
- ④ Fire fighting expertise in French underground mines.:FROGER C E : Mine Vent 1985
- ⑤ マグネシウム取扱安全講習会テキスト：マグネシウム委員会
- ⑥ Studies on the Burning Behaviour of Metal Powder Fires and Their Extinguishment : Part II Magnesium Powder Heaps on Insulated and Conducting Material Beds.:SHARMA T P :Fire Saf J VOL.21 NO.2 PAGE. 153-176 1993
- ⑦ Studies on the Burning Behaviour of Metal Powder Fires and Their Extinguishment : Part I Mg, Al, Al-Mg alloy powder fires on sand beds. : SHARMA T P : Fire Saf J VOL.16 NO.2 PAGE. 93-117 1990
- ⑧ 消防設備 オーム社

自主試験-1 模擬ファインの水による冷却効果確認試験

1. 目的

消火剤選定試験において、水はファインの燃焼に対する消火剤としては、あまり適していないことが判明した。しかし、他の廃棄物等への延焼を防止するとともに、セル床を冷却して安全に燃やしきる効果があることが判明した。このため、水量をパラメータとした試験を行い、最少の水量で最大の冷却効果がある水量について調査した。

2. 試験装置及び方法

試験装置は消火剤選定試験と同じ散水装置を使用した。図-1 に試験装置の概要を示す。試験の手順を以下に示す。

- ① 水の流量については、弁の開度を調整し、模擬ファインとほぼ同直径の 110mm容器を、模擬ファインが置かれる位置に置き、散水して容器に溜まった水量を測定して求めた。
- ② □500mmのステンレス板上に、模擬ファイン 200g を直径 110mm となるよう山状に堆積させ、模擬ファイン中心部に着火した。
- ③ 模擬ファイン全体に燃焼が行き渡ったところで散水を開始するとともに、鎮火までの時間及びステンレス板の温度を測定した。
- ④ 温度測定はファインがのっているステンレス板裏面の中心に熱電対を貼り付けて行い、着火から鎮火までを測定し、その間の最大温度を読みとった。
- ⑤ 鎮火時間は目視と燃焼音で判断した。散水停止後、燃焼残渣をかき分け完全に鎮火していることを確認した。

3. 試験結果

試験は水量 12.6, 18.2, 35.82L/min/m² で実施した結果、鎮火時間は 3 分 30 秒, 2 分 5 秒, 2 分 10 秒であり、ステンレス板の温度は 682℃, 340℃, 366℃であり、18.2 と 35.83L/min/m² では大きな差は認められなかった。

次に 15.4L/min/m² で試験した結果、2 分 10 秒後鎮火したと判断し、散水を停止したが、3 分後再着火した。この時のステンレス板の温度は 378℃であった。

これらの結果から、18.2L/min/m² 程度の水量があれば、充分と判断し、さらに 2 回追加試験を実施した。その結果、3 回のデータにはバラツキはあるが、鎮火時間最長 2 分 25 秒、ステンレス板の最高温度 395℃であった。

4. 評価

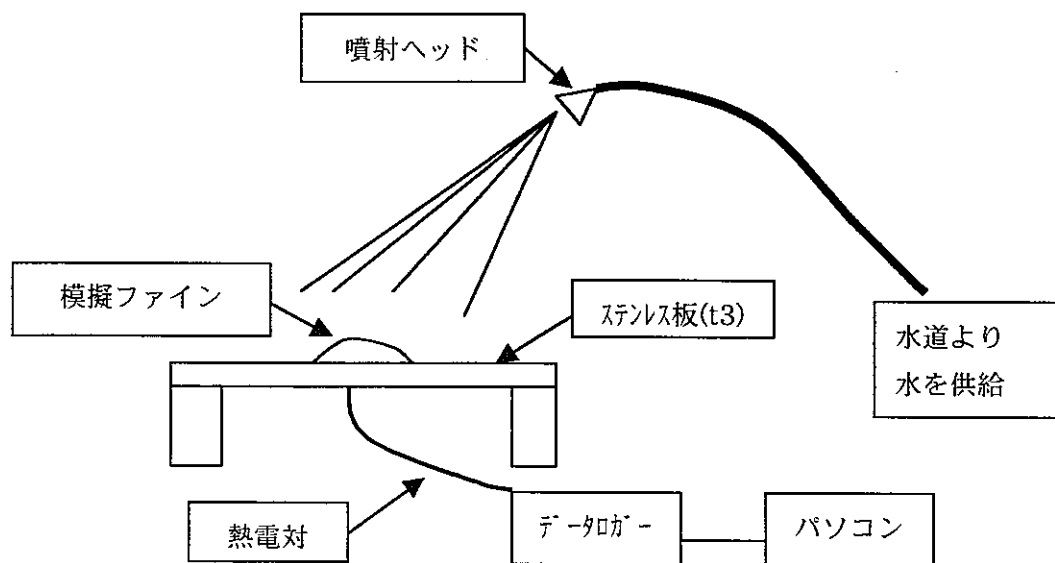
スプリンクラー消火設備では、半径 2.1m の範囲 (13.85m²) に 80L/min の水量が 20 分間放出される。本試験結果の 18.2L/min/m² を半径 2.1m の範囲 (13.85m²) に換算すると、水量は 252L/min であり、約 3 倍程度であった。鎮火時間についても最長 2 分 25 秒であり、延焼防止、セル材料の冷却の観点からは充分使用できると考えられる。

表-1 試験結果

実験 No	水量 (L/min/m ²)	鎮火時間	放水時間	かきわけ 時の時間	最高温度 (°C)
1	12.6	3'30"	3'45"	4'45"	682
2	18.2	2'05"	2'35"	3'20"	340
3	35.8	2'10"	2'20"	3'20"	366
4	15.4	-	6'10"	6'20"	378
5	18.2	2'25"	2'25"	5'00"	369
6	18.2	1'50"	2'10"	4'00"	395

注) ・ 時間は放水開始後の経過時間

- ・ 鎮火時間は目視と燃焼音で確認し、表面上消火し、且つ燃焼音が消えた時点を鎮火時間としている。
- ・ 実験 No. 4 は鎮火したと思われ、放水を一時停止したが(1'50")再着火している。



噴射ヘッド : 日本フェンオール製 型番 TF20FC

データロガー : KEYENCE 製 型番 N-250

熱電対 : K線 φ0.127 アルメルクロメル

図-1 試験装置概要