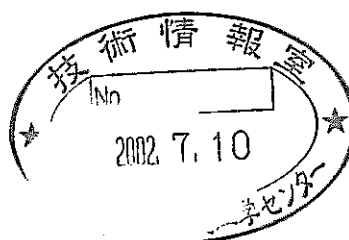


固体廃棄物処理技術開発施設 (LEDF) 合理化設計
—セル消火実証試験 (I) —
(技術報告)



2002年1月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2002

固体廃棄物処理技術開発施設(LEDf)合理化設計

-セル消火実証試験(Ⅰ)-

(技術報告)

堂野前 寧^{*}、松本 誠弘^{**}、菊地 豊^{*}加藤 徳義^{*}、宮崎 仁^{*}、谷本 健一^{*}

要 旨

固体廃棄物処理技術開発施設(LEDf)の合理化の一貫として、セル消火設備に付属する気化器を削減する検討を行っている。

本試験では、液化炭酸ガスを直接放出した場合のセル内の圧力変動や消火性能を把握するため、液化炭酸ガスによる圧力挙動確認及び消火試験を実施した。また、本方式の補完として水噴霧による水噴霧消火試験を実施した。

得られた成果は、以下の通りである。

- (1) 圧力挙動確認試験では、実験室を-40mmAqとして液化炭酸ガスを放出し、放出当初0.8mmAq/秒程度の圧力上昇が見られたが、20秒後から0.1mmAq/秒程度の緩やかな上昇となり、120秒後には1.5mmAq/秒程度の急激な上昇が見られた。
- (2) 液化ガス消火試験では、実験室を-40mmAqに保ち、ポリエチレン、木片+綿を燃焼させた状態で消火試験を行った。ポリエチレンは、完全に消火できたが、木片+綿では再着火及び発煙が見られた。一方、実験室内の圧力挙動として、放出当初1.3mmAq/秒程度の急激な上昇が10秒程度見られたが、その後状態を維持し放出後30秒後に再び1mmAq/秒程度の上昇が見られた。また、放出ノズル径を14mm²から10mm²に変更することにより放出後100~120秒の急激な上昇が緩和された。
- (3) 水噴霧消火試験では、液化ガス消火試験と同じ条件で水噴霧での消火試験を行った結果、木片+綿は消火できたが、ポリエチレンは消火できなかった。
- (4) 本試験より、LEDfに液化ガス方式を採用する場合は、放出ノズル径を14mm²から10mm²の小径なものに変更する等の室容積に適合する噴口面積を設定することにより、負圧を維持しつつ消火が行える見通しが得られた。
- (5) 消火性能については、木片+綿のような内部に火種の残りやすい燃焼物はガス濃度を50%以上の高い濃度に設定する必要がある。
- (6) 水噴霧消火は、ポリエチレン対し消火性能が発揮されないことや消火用水が大量に発生するなど採用には多くの検討を要することが分かった。

^{*}:大洗工学センター 照射施設運転管理センター 環境保全課

^{**}:現三井造船株式会社

Rationalization Design on Large Equipment Dismantling Facility
-The cell fire-extinguishing examination I -
(Technical report)

Yasushi Donomae*, Yoshihiro Matsumoto**, Yutaka Kikuchi*
Noriyoshi Katoh*, Hitoshi Miyazaki*, Ken-ichi Tanimoto*

Abstract

In order to rationalize for Large Equipment Dismantling Facility (LEDF), the plan of removing vaporizer belong to Cell-fire-extinguishing-system was investigated.

In this test, in order to study the behavior of pressure in cell, when the liquefaction carbon dioxide (liq-CO₂) is emitted, and the performance of extinguishing fires, the test of behavior of pressure and the extinguishing fires take effect.

Also the extinguishing fires test used water-mist take effect for complement liq-CO₂.
The results as follows;

- (1) In the test of behavior of pressure, Liq-CO₂ was emitted test room under -40mmAq negative pressure. Room pressure was increase about 0.8mmAq/sec at first. After 20sec, the pressure was increase slowly about 0.1mmAq/sec. After 120sec, the increase was drastic about 1.5mmAq/s.
- (2) In the test of extinguishing fires by liq-CO₂, under -40mmAq, Polyethylene and wooden chips + cotton (crib) was burn. Polyethylene was extinguished perfectly, but the embers remained in cribs. While the room pressure was increase about 1.3mmAq/sec for 10sec at first. After 30 sec, the pressure was increase about 1mmAq/sec. On the other hand, the drastic increase of pressure disappeared between 100sec to 120sec by change the nozzle size from 14mm² to 10mm².
- (3) In the test of extinguishing fires by water-mist, Cribs was extinguished perfectly, but Polyethylene was extinguished difficulty under the same condition of liq-CO₂ test.
- (4) Therefore the results, It's coped with the fire extinguishing and the keeping negative pressure for LEDF cells. Therefore nozzle size is fitted cell volume as changing 14mm² to 10mm².
- (5) As the performance of extinguishing fires by liq-CO₂, It is necessity the concentration of above 50% CO₂ for combustibles as cribs, remaining the embers.
- (6) On the other hand, It is necessity most study for the adoption of water-mist. Therefore water-mist was not effective for polyethylene, and it needed water for fire in great volume.

*Oarai Engineering Center Irradiation Center Waste Management Section

**Mitsui Engineering & Shipbuilding CO., LTD.

目 次

1. はじめに	1
2. 試験内容	2
2.1 概 要	2
2.2 試験条件	2
2.3 試験装置等	2
2.4 圧力挙動確認試験	4
2.5 液化ガス消火試験	4
2.6 水噴霧消火試験	4
3. 試験方法	5
3.1 圧力挙動確認試験方法	5
3.2 液化ガス消火試験方法	5
3.3 水噴霧消火試験方法	6
4. 試験結果	8
4.1 圧力挙動確認試験結果	8
4.2 液化ガス消火試験結果	8
4.3 水噴霧消火試験結果	11
5. 考 察	13
6. おわりに	15
7. 謝 辞	16
8. 参考文献	17

図表

付録-1 燃焼物の選定について	付-1 (52)
付録-2 炭酸ガス噴射ヘッドの放出特性について	付-2 (59)
付録-3 圧力変動のメカニズムについて	付-3 (63)

図表目次

表4.2-1	液化ガス消火試験結果のまとめ	18
表4.2-2	液化炭酸ガス放出後から燃焼物が100℃に到達するまでの時間	19
表4.3-1	水噴霧消火試験結果のまとめ	20
図2.3-1	試験設備概要	21
図2.3-2	実験室の仕様	22
図2.3-3	液化ガス消火試験配置	23
図2.3-4	水噴霧消火試験配置	24
図2.3-5	データ取得位置	25
図3.2-1	ラック及び容器の位置	26
図3.2-2	燃焼物の状態（木片＋脱脂綿）	26
図3.2-3	燃焼物の状態（ポリエチレン）	27
図3.2-4	着火方法	27
図3.2-5	熱伝対の配置	27
図3.3-1	水噴霧ノズル レイアウト	28
図4.1-1	実験室空気漏れこみ量と排気フロア排気能力の関係	29
図4.1-2	室内差圧挙動（圧力、濃度確認試験（第1回））	30
図4.1-3	液化炭酸ガス放出特性と炭酸ガス濃度（圧力、濃度確認試験（第1回））	30
図4.1-4	室内差圧挙動と温度（圧力、濃度確認試験（第2回））	31
図4.1-5	液化炭酸ガス放出特性と炭酸ガス濃度（圧力、濃度確認試験（第2回））	31
図4.2-1	ポリエチレン燃焼温度推移（容器保管棚上段）	32
図4.2-2	ポリエチレン燃焼温度推移（容器保管棚中段）	32
図4.2-3	ポリエチレン燃焼温度推移（容器保管棚下段）	33
図4.2-4	木片＋綿燃焼温度推移（容器保管棚上段）	33
図4.2-5	木片＋綿燃焼温度推移（容器保管棚中段）	34
図4.2-6	木片＋綿燃焼温度推移（容器保管棚下段）	34
図4.2-7	実験室内の差圧挙動	35
図4.2-8	液化炭酸ガス放出量と炭酸ガス濃度（平均値）	35
図4.2-9	実験室内の温度推移（天井温度）	36
図4.2-10	実験室内の温度推移（天井温度）[-40℃～100℃]	36
図4.2-11	実験室内の温度推移（壁面温度）	37
図4.2-12	実験室内の温度推移（壁面温度）[-60℃～50℃]	37
図4.2-13	各燃焼物（ポリエチレン、木片＋綿）の燃焼温度推移（第5回）	38
図4.2-14	実験室内の温度推移（天井・壁面）（第5回）	38
図4.2-15	燃焼物内部の温度推移（木片＋綿、容器保管棚上段）	39
図4.2-16	燃焼物内部の温度推移（木片＋綿、容器保管棚中段）	39
図4.2-17	燃焼物内部の温度推移（木片＋綿、容器保管棚下段）	40
図4.3-1	ポリエチレン燃焼温度推移（容器保管棚上段）	41
図4.3-2	ポリエチレン燃焼温度推移（容器保管棚中段）	41
図4.3-3	ポリエチレン燃焼温度推移（容器保管棚下段）	42
図4.3-4	木片＋綿燃焼温度推移（容器保管棚上段）	42
図4.3-5	木片＋綿燃焼温度推移（容器保管棚中段）	43
図4.3-6	木片＋綿燃焼温度推移（容器保管棚下段）	43
図4.3-7	燃焼物内部の温度推移（木片＋綿、容器保管棚上段）	44
図4.3-8	燃焼物内部の温度推移（木片＋綿、容器保管棚中段）	44
図4.3-9	燃焼物内部の温度推移（木片＋綿、容器保管棚下段）	45
図5-1	各試験における室内圧力の変化	45
図5-2	各試験における排気流量推移	46

図5-3	投入容器保管庫の水噴霧ノズル配置	46
写真2.3-1	実験室全体外観	47
写真2.3-2	実験室排気口	47
写真2.3-3	ノズル(TF14FC)	47
写真2.3-4	水噴霧用ポンプ	47
写真3.2-1	燃焼物配置状況	47
写真3.2-2	木片+綿	47
写真3.2-3	ポリエチレン	48
写真3.2-4	着火状況	48
写真4.2-1	燃焼状況(1)	48
写真4.2-2	燃焼状況(2)	48
写真4.2-3	ポリエチレン消火後	48
写真4.2-4	木片+綿消火後	48
写真4.2-5	木片+綿内部消火後	49
写真4.2-6	消火後の綿	49
写真4.2-7	ポリエチレン内部消火後	49
写真4.2-8	消火後のポリエチレン	49
写真4.2-9	実容器の燃焼状況	49
写真4.2-10	消火後の実容器(ポリエチレン)	49
写真4.3-1	水噴霧消火試験着火直後	50
写真4.3-2	水噴霧消火試験燃焼状況(1)	50
写真4.3-3	水噴霧消火試験燃焼状況(2)	50
写真4.3-4	水噴霧消火試験水噴霧状況	50
写真4.3-5	水噴霧終了後の木片+綿	51
写真4.3-6	水噴霧完了後ポリエチレン燃焼	51
写真4.3-7	噴霧20分後の木片+綿(上段)	51

1. はじめに

固体廃棄物処理技術開発施設（L E D F）の合理化の一貫として、セル消火設備に付属する気化器を削減する検討を行っている。

気化器は、消火剤である液化炭酸ガスを完全に気化させる機器である。液化炭酸ガスを完全に気化させることにより火災時でもセル内の負圧を容易に制御することが可能となるが、気化器はコストが高く、建設費への影響が大きいため、平成10年度合理化検討設計（I）において合理化対象として検討することとなった。

気化器を削減した場合、液化炭酸ガスを直接セル内に供給する方法（以下、液化ガス方式）となる。液化ガス方式は、セル内で急激に液化炭酸ガスが気化するため負圧維持が困難とされており、セル消火設備では採用されていない。

しかし、液化ガス方式をセル消火設備に適用した場合のセル内負圧挙動や消火性能等は不明であり、これらについて試験を行い確認する必要がある。

一方、液化ガス方式での消火が不十分の場合は、バックアップとして水等による消火が必要となるため、併せて水噴霧消火方式についても消火性能について確認しておく必要がある。

本試験では、液化ガス方式のL E D Fへの適用可否を判断するために必要な以下の実証試験を行った。

- (1) 圧力挙動確認試験 : 液化炭酸ガスを実験室内に放出し、室内の圧力変化、炭酸ガス濃度の変化等のデータを取得する。
- (2) 液化ガス消火確認試験 : 実験室内で燃焼物を燃焼させて液化炭酸ガス消火を行い、燃焼物の消火状態を燃焼温度の測定、目視観察により消火能力を確認するとともに、室内の圧力変化、炭酸ガス濃度の変化等のデータを取得する。
- (3) 水噴霧消火確認試験 : 実験室内で燃焼物を燃焼させて水噴霧消火を行い、燃焼物の消火状態を燃焼温度の測定、目視観察により消火能力を確認する。

本書は、上記試験で得られた結果についてとりまとめたものである。

2. 試験内容

2.1 概要

液化ガス方式のLEDFへの適用可否を判断するために必要な以下の実証試験を行った。

- (1) 実験室に液化ガス放出し室内の圧力変化、炭酸ガス濃度の変化等のデータを取得した。
- (2) 実験室内で燃焼物を燃焼させて液化炭酸ガス消火を行い、燃焼物の消火状態を燃焼温度の測定、目視観察により消火能力を確認するとともに、室内の圧力変化、炭酸ガス濃度の変化等のデータを取得した。
- (3) 実験室内で燃焼物を燃焼させて水噴霧消火を行い、燃焼物の消火状態を燃焼温度の測定、目視観察により確認した。

2.2 試験条件

(1) 想定火災発生場所：

可燃性の廃棄物が長期に渡り大量に保管される前処理セルの投入容器保管庫を火災発生場所と想定する。

(2) 着火源及び火災規模

着火源：前処理セルレーザ切断機使用時の赤熱した切断片や火花

燃焼物：LEDF受入廃棄物中から最も火災に寄与するものとして、ポリエチレン及び木片+綿を燃焼物とする。なお、選定根拠を付録-1に示す。

火災規模：投入容器保管庫の投入容器及び中の燃焼物が全量燃焼した場合と想定する。

(3) 消火方法及び炭酸ガス濃度

使用消火剤：液化炭酸ガス

消火方法：液化炭酸ガスを実験室に放出することにより行う。

炭酸ガス濃度：実験室内の炭酸ガス濃度を34%¹⁾以上とする。

2.3 試験装置等

(1) 実験室

寸法：L 3.6m × W 5.4m × H 3.0m

構造：鉄骨構造（壁及び天井は耐火ボード二重構造）

仕様：図2.3-1～2に試験設備概要及び実験室の仕様を示す。また、実験室の写真を写真2.3-1～2.3-2に示す。

(2) 実験室付帯機器

①排気ブロア

メーカー：ヤマト科学株式会社

型式：YNB-102

仕様：20m³/min × 785Pa (80mmAq) × 1.5kw

②デミスター

メーカー：ヤマト科学株式会社

型式：CRS-D-20

仕様：HCL、HFガス等90%以上除去

(3) 炭酸ガス消火試験装置

① 炭酸ガス噴射ヘッド

型 式： TF14FC、TF10FC
認定型式番号： DN-013号
材 質： C3604BD
外 観： 写真2.3-3参照

② 液化炭酸ガスボンベ

容 量： 82.5ℓ
弁認定型式番号： よー105号

なお、図2.3-3に炭酸ガス消火試験配置図を示す。

(4) 水噴霧消火装置

① ウォータミスト発生ノズル

型 式： 04-3410-1120（一流体式）
噴霧角度： 90°※1）
基準圧力： 1.2MPa ※2）
基準水量： 10 ℓ/min
ミスト平均粒径： 150μm

② ウォータミスト用ポンプ

メ ー カ： グルンドフォスポンプ株式会社
型 式： CRN8-108
仕 様： 吐出し量100～200ℓ/min 全揚程177～110m
外 観： 写真2.3-4

なお、図2.3-4に水噴霧消火試験配置図を示す。

(5) 計測機器

主要機器、計測機器の仕様を以下に示す。

① 酸素濃度計

メ ー カ： 島津製作所
型 式： POT-101
測定方式： 磁気風式
サンプリングチューブ

：材質 テフロン、長さ 7m、内径 4mm

設置台数： 2台

② 炭酸ガス濃度計

メ ー カ： 島津製作所
型 式： CGT-10-1A
測定方式： 非分散形赤外線吸収方式
サンプリングチューブ

：材質 テフロン、長さ 7m、内径 4mm

③ 重量計

メ ー カ： (株)エー・アンド・デイ
型 式： HV-200KGL

④ 微差圧計（室内差圧測定用）

メ ー カ： (株)サヤマトレーディング
型 式： マノエース140

⑤ 圧力トランスミッタ

メーカ： 長野計器(株)

型 式： KH15

※1) 既存のノズルとして、噴射角度60°と90°のものがあるが、この中から噴射角度が広く、広い範囲の対象物にミストが当たる噴射角度90°のものを採用した。

※2) 試験実施前にウォーターミスト用ポンプを運転し、ポンプ出口側に設置したボール弁の開度を調整し、ノズル圧力が1.2MPaになるよう開度設定した。

なお、本試験におけるデータ取得位置を図2.3-5に示す。

2.4 圧力挙動確認試験

(1) 実験室気密度の確認

試験室の気密性を把握するため試験室の空気の漏込み及び実排気流量を取得する。なお、空気漏れ込みは、給気ダンパを全閉にした状態で取得し、実排気流量は、排気流量から空気漏れ込み量を引いて求めた。

(2) 炭酸ガス放出による実験室負圧挙動

炭酸ガス噴射ヘッド (TF10FC, TF14FC) を用い、液化炭酸ガスを実験室に放出し、炭酸ガス放出特性、実験室内の負圧挙動データを取得する。なお、各試験で使用する噴射ヘッドの選定は計算²⁾及びその特性を確認して選定した。特性の確認結果を付録-2に示す。

2.5 液化ガス消火試験

燃焼物及び試験設備の圧力条件、ノズル仕様を基に実際の火災を想定した消火試験を行い、着火から消火までの燃焼物の温度や燃焼・消火状況観察、室内の圧力挙動、壁・天井の温度、室内の炭酸ガス濃度等のデータを取得する。

2.6 水噴霧消火試験

2.5液化ガス消火試験と同一の条件で水噴霧による消火試験を行い、着火から消火までの燃焼物の温度データの取得や燃焼・消火状況観察を行う。

3. 試験方法

3.1 圧力挙動確認試験方法

(1) 実験室気密度の確認

試験室の気密性を把握するため、以下のデータを取得する。

- ①実験室空気漏れ込み量
- ②ブロー排気流量
- ③実験室実排気量
- ④実験室内差圧

なお、①は給気ダンパを全閉とした状態での排気量を-10~-45mmAqまで排気弁を調整し取得する。また、③は②から①を差し引いて求めることとする。

(2) 炭酸ガス放出による実験室負圧挙動

炭酸ガス噴射ヘッド (TF10FC, TF14FC) を用い、液化炭酸ガス90kg (45kg入りの液化炭酸ガスボンベ2本) を実験室に放出し、以下のデータを取得する。

- | | |
|---------------|----------------|
| ① ノズルヘッド圧力 | (一定時間毎) |
| ② 実験室内差圧 | (一定時間毎) |
| ③ 実験室温度 | (一定時間毎に上下2箇所) |
| ④ 実験室内炭酸ガス濃度 | (一定時間毎に上中下3箇所) |
| ⑤ 液化炭酸ガスボンベ重量 | (一定時間毎) |

3.2 液化ガス消火試験方法

燃焼物および炭酸ガス噴射ヘッド (TF10FC, TF14FC) を用いて液化ガス消火試験を実施する。燃焼物は、ポリエチレン製投入容器に収納した場合とステンレス製メッシュのカゴに収納した場合の2種類行う。試験は全体で7回実施し、以下のデータを取得する。

- | | |
|-----------|-------------------|
| ①燃焼物の温度 | (一定時間毎) |
| ②実験室内差圧 | (一定時間毎) |
| ③実験室温度 | (一定時間毎に天井・壁付近2箇所) |
| ④炭酸ガス濃度 | (一定時間毎に上中下3箇所) |
| ⑤ボンベ重量 | (一定時間毎) |
| ⑥消火状況 | (実験室窓からの目視) |
| ⑦燃焼物の消火状態 | (消火後の立入り確認) |

(1) 容器

- ①ステンレス製メッシュカゴ
 - メーカー：サカエ
 - 型番：SM-250 (φ250×H250)
- ②投入容器 (ポリエチレン製)
 - メーカー：ヤマト科学(株)
 - 型番：12-112-010

(2) ラック及び容器の位置

図3.2-1及び写真3.2-1参照

(3) 燃焼物の充填方法

- ①木片+綿
 - 木片+綿は脱脂綿と木片を層状に充填する。(図3.2-2及び写真3.2-2参照)
- ②ポリエチレン

ポリエチレンは3cm角に細断し、容器に充填する。(図3.2-3及び写真3.2-3参照)

(4) 着火方法

n-ヘプタンを着火材とし、投入容器の下部から着火する。着火材量は約50mlとした。
(図3.2-4及び写真3.2-4参照)

(5) 熱電対の配置

燃焼物の温度を測定するために熱電対を図3.2-5のように設置する。

(6) 炭酸ガス貯蔵容器及びノズル

使用ノズル：TF14FC (第1回～第5回)、TF10FC (第6、7回)

貯蔵容器：55kg入り液化炭酸ガスボンベ2本。

(7) 実験手順

- ① カメラで可燃物の状態を撮影。
- ② 給気口開 (燃焼に必要な十分な酸素を供給するため)、排気ブロー起動。
(ビデオ撮影も同時に開始)
- ③ 計測スタート。(パソコンのみ) 差圧計ON。
- ④ 着火。
- ⑤ 放出30秒前、濃度計スタート。給気口閉。
- ⑥ 消火剤放出。
(燃焼時間は9分 (壁温度100℃、天井温度300℃と想定) とする。)
- ⑦ 第1～3回までは82秒 (CO₂濃度34%相当) 後に放出停止。
第4～7回は、放出を停止せず、ボンベが空になるまで放出
- ⑧ 放出停止後、排気ブロー停止
- ⑨ 状況により10分、20分、30分間放置後、換気。
- ⑩ CO₂濃度が1%以下になったら、中に入り、燃え残りを確認。
- ⑪ 燃え残りをカメラで撮影。

3.3 水噴霧消火試験方法

液化ガス消火試験と同様の燃焼物を用い、ウォータミスト発生ノズルを用いて水噴霧消火試験を実施する。燃焼物は、実機で用いる投入容器に収納した場合とステンレス製メッシュのカゴに収納した場合の2種類行う。試験は全体で5回実施し、以下のデータを取得する。

- | | |
|-----------|-------------------|
| ①燃焼物の温度 | (一定時間毎) |
| ②実験室温度 | (一定時間毎に天井・壁付近2箇所) |
| ③消火状況 | (実験室窓からの目視) |
| ④燃焼物の消火状態 | (消火後の立入り確認) |

(1) 容器

3.2項(1)参照

(2) ラック及び容器の位置

3.2項(2)参照

(3) 燃焼物の状態

3.2項(3)参照

(4) 着火方法

3.2項(4)参照

(5) 熱電対の配置

3.2項(5)参照

(6) ウォータミスト発生ノズル配置

ノズル配置を図3.3-1に示すが、ノズルと消火対象物との最短距離は、1000mm以上必要のため、実設備に適用した場合のスペース効率を考慮し、最低値に若干の余裕をみて約1200mmで配置することとした。

(7) ノズル圧力の調整

本試験で使用するウォータミスト発生ノズルは、基準圧力1.2MPaとなっている。従って、ノズル数を変更する毎に、ウォータミスト用ポンプを運転し、ポンプ出口側に設置したボール弁の開度を調整し、ノズル圧力が1.2MPaになるよう開度設定する。

(8) 試験手順

- ① 給気口 開 (燃焼に必要な十分な酸素を供給するため)、排気プロア起動。
- ② 計測スタート。
- ③ 1分後着火。
- ④ 水噴霧開始 消火したと思われる時点で一旦放水停止。
↓
- ⑤ (開閉繰り返し) 煙の発生または再着火があれば、再度放水。
↓
- ⑥ 水噴霧終了 消火するまで3回繰り返す。
- ⑦ 燃え残りをカメラで撮影。着火から実験終了までをビデオで撮影。

なお、燃焼時間は、壁付近温度が100℃、天井付近温度が300℃に近づいた時点とする。ただし、最大でも燃焼時間は13分とする

4. 試験結果

4.1 圧力挙動確認試験結果

(1) 実験室気密度の確認

試験結果を図4.1-1に示す。実験室負圧値の下限值は-46.3mmAqであり、空気漏れ込み量は、-10mmAqにおいて約0.07m³/s、-46.3mmAqでは0.174m³/sであった。一方、排気流量は、-10mmAqにおいて約0.33m³/s、-46.3mmAqでは0.174m³/sであった。これらの結果から、実験室の気密度は-46.3mmAqで約1000%/hであった。

(2) 炭酸ガス放出による実験室負圧挙動

圧力挙動確認試験は、TF14FC噴射ヘッドを用いて、液化炭酸ガス45kg入りの液化炭酸ガスボンベ2本を使用し2回実施した。

第1回の実験室内の圧力挙動を図4.1-2に示す。室内の圧力挙動は、液化炭酸ガス放出直後に上昇をはじめ、約10秒程度経過したのち、上昇が鈍化する。その後の安定段階においても-33~-17mmAqの間で徐々に上昇を続け、ピークは-5mmAqまで上昇する。また、液化炭酸ガス放出量及び室内の炭酸ガス濃度を図4.1-3に示す。炭酸ガス濃度はボンベ2本を使用し40%となった。

第2回の実験室内の圧力挙動を図4.1-4に示す。室内の圧力挙動は第1回とほぼ同じ挙動である。第2回の試験では室内の温度も測定し120秒を境に下降から上昇へと転じ傾向が見られた。

炭酸ガス濃度は、図4.1-5に示す通り、液化炭酸ガスボンベを2本使用したことにより設計値34%を越えて40%に到達したが、同時に圧力の上昇は、最大値で-5mmAqとなり、正圧付近まで上昇した。

2回の試験結果から、液化炭酸ガスの放出による実験室の圧力の挙動は、実験室内の温度変化がない状態ではほとんど同じ傾向を示し、炭酸ガス放出後20秒前後で圧力が安定する段階を迎え、気液混合状態となるところから、急激な圧力上昇が始まり、その後すぐ圧力低下する挙動が観察できた。

4.2 液化ガス消火試験結果

液化ガス消火試験は、圧力挙動確認試験と同様にTF14FC噴射ヘッドを用いて実施した。なお、実機で使用するポリエチレン製の投入容器を用いた試験は、容器が燃焼に伴い液状化しラックからの落下する等により、有効なデータが得られないと判断し、1回のみ実施することとした。

(1) 試験結果

試験結果を表4.2-1に示す。また、試験状況を写真4.2-1~10に示す。

全ての試験（第1~7回）でポリエチレンは完全に消火されていることを確認した。木片+綿は、炎はなくなっていたが、実験によっては、炭酸ガス放出完了後の煙発生、または、換気後の煙発生等が見られた。

① 各燃焼物の燃焼状況

各燃焼物（ポリエチレン、木片+綿）の燃焼温度推移を図4.2-1~6に示す。

ポリエチレンは、第1回~7回まで同様の燃焼傾向を示した。着火から炭酸ガス放出までの燃焼物の温度はカゴ上部で最大630℃、中部で最大640℃、下部で最大200℃程度であった。ポリエチレンの燃焼傾向は、着火後約100~150秒前後で火が回り始め、その後100秒程度で急激に温度の上昇が見られる。炭酸ガス放出前に上・中段で600℃~700℃、下段で150℃~300℃に達している。

木片+綿は、位置により異なる燃焼傾向を示すが、着火から炭酸ガスを吹

くまで燃焼物の温度はカゴ上部で最大380℃、中部で最大430℃、下部で最大500℃程度であった。木片+綿の燃焼傾向は、大きく2つに分けられ、着火後すぐに火が回り始めるもの（下段）と、約100～150秒前後で火が回り始めるもの（上段、中段）がある。すぐに火が回り始めるものはそのまま炭酸ガスの放出まで、700～800℃前後の温度を保つ。また、約100～150秒前後で火が回り始めるものは、100～200秒程度でじわじわ温度を上げていき、液化炭酸ガス放出前で最大700℃前後、平均500℃程度の温度に達する。

② 各燃焼物の消火状況

ポリエチレンの温度は、液化炭酸ガス放出後100秒で50℃前後まで低下し、ほぼ消火される。

木片+綿の温度は、炭酸ガス放出後ポリエチレンと同様に100秒で50～150℃まで低下するが、一部の燃焼物では100秒後で300℃となっているものもあり、綿の保温効果で温度が下がりにくいことや、炭酸ガスが浸透せず熾き状態となるものが確認された。

表4.2-2に各燃焼物の温度が炭酸ガス放出後から100℃に到達するまで時間を示す。表4.2-2に示すとおり、ポリエチレンに対する炭酸ガスの効果は大きく第1回から7回までの平均到達時間は63秒（上中下部平均）であった。

一方、木片+綿では、短時間で到達する場合と長時間かかる場合があり、平均到達時間も165秒（上中下部平均）となり、ポリエチレンに比べて倍以上遅くなっている。

③ 各燃焼物の消火後の目視確認

炭酸ガス放出後、10分間濃度を保持するため、排気ブローを停止したが、その間は木片+綿の容器、ポリエチレンの容器とも再着火はしていない。

濃度保持を終了し排気を開始した後、第1～3回の試験では、木片+綿の3個の容器から煙が発生していた。また、第1回では、燃焼物を掻き分けると再着火した。

一方、第4回では、放出後の煙発生、再着火はなかった。

投入容器を使用した第5回では、ポリエチレンはすべて消火したが、木片+綿の1個は、換気中に煙が発生した。

放出率の小さいTF10FCを使用した第6、7回では、ポリエチレンは完全に消火されたが、木片+綿は換気後に煙が発生した。

④ 室内圧力挙動

液化ガス消火試験における室内負圧挙動を図4.2-7に示す。室内負圧については、液化炭酸ガス放出約30秒前程度まで、給気弁を解放(0mmAq)した。放出30秒前に給気弁を閉止すると、-35～-40mmAqに深くなり、液化炭酸ガス放出後に、3～5秒で-45～-50mmAqまでさらに深くなったが、すぐに-35～-40mmAqまで回復した。その後、第1回及び3回（炭酸ガスボンベ1本放出）では、また深くなったのち-20mmAq程度まで負圧が浅くなり、炭酸ガス放出が終了している。また、第4回及び5回（炭酸ガスボンベ2本放出）では、第1回及び3回と同じく-20mmAq程度まで負圧が浅くなった後、さらに炭酸ガスボンベの気液混合状態となる点と同じ時間から急激に負圧が浅くなり、正圧付近まで上昇した。なお、第7回では放出ノズルを小さくし、液化炭酸ガスボンベも1本のみとしたため、放出直後から3,40秒間は他の試験と同様の傾向を示したが、第4回、5回で急激な負圧の変動はなかった。この結果は、4.2.4圧力濃度上昇試験での室内圧力挙動と傾向は同じである。

⑤ 液化炭酸ガス放出量と炭酸ガス濃度

液化炭酸ガス放出量と炭酸ガス濃度の時間推移を図4.2-8に示す。液化炭酸ガスの放出量は、第1回～第3回は54～62kgを放出し、第4回以降は110kg（55kgボンベ2本分）を放出した。また、第6回、第7回では、ノズルをTF14FCからTF10FCに変更し放出率を小さくして放出した。

炭酸ガス濃度については、第1回～5回までは濃度の立ち上がりは70秒付近で最大濃度に達し、若干の下降はあるものの概ね40%～50%の濃度を維持している。特に第1回では、放出終了直後に排気プロアを起動し、負圧を-50mmAqまで深くしたが、濃度は40%前後を維持した。

一方、第6回、第7回では、濃度の立ち上がりが第1回～5回よりも急激ではなかったが、放出から200秒前後で最大濃度に達し、濃度も38%～43%付近で維持されている。

液化炭酸ガス放出量については、第1回～5回まではほぼ同じ勾配で立ち上がり、放出量に応じて勾配の変わる点に変化する。一方、第6回、第7回では放出量は同じであるが、ノズルの噴口面積を半分にしているため、放出勾配も半分となっている。

⑥ 実験内温度変化

室内温度は、天井及び壁面で計測した。室内温度の時間推移を図4.2-9～12に示す。

室内温度の変化は、天井では燃焼物の炎が直接接触することや、その輻射熱により第1回から7回までの間最大で330℃、最低でも200℃に達している。液化炭酸ガス放出後は、100秒までの間に約5℃～50℃まで低下し、その後建物や燃焼物の自熱で温度が回復する。

天井温度の下降勾配は、第1回～4回までの勾配はほぼ同じである。放出率の小さい第6回と7回については下降の始まり付近は第1回から4回までの勾配とほぼ同じであるが最低温度に達するまでの時間が第1回から第4回の結果に比べ約2～2.5倍程度長くなっている。

一方、壁面温度の下降勾配は、第1回～3回までの勾配は0℃から-50℃の間で大きくばらついており、変動が激しいため、主だった傾向は見られなかった。第6回、第7回は第1回～4回に比べて壁面の温度下降はより緩やかであった。

⑦ 投入容器を用いた液化ガス消火試験（第5回）

第5回試験は、その他の試験と違い、ステンレスカゴではなく投入容器（ポリエチレン製）を使用して試験を行った。

各燃焼物（ポリエチレン、木片＋綿）の燃焼温度推移を図4.2-13に示す。各燃焼物の内、上段のポリエチレンがもっとも燃焼が激しく、最大で750℃付近まで達している。しかし、木片＋綿は、中段で180℃前後であり燃焼は激しくない。これは、ポリエチレン容器に投入したため表面のポリエチレンへの火の回りが早く内部まで火が到達していないものと考えられる。

また、ポリエチレンは高温では軟化・液状化するためバランスが悪く、ラック内で転倒や床に滴下したため有効に温度計測できなかったと思われる。

第5回試験の目視による燃焼状況の確認では、写真4.2-9に示すとおり、容器全体が火に包まれて燃焼し、バランスを崩して転倒するものや、表面が溶け中身が露出するものもあり、より延焼を引き起こす原因となると考えられる。液化炭酸ガスの放出による消火状況については、ステンレスカゴでの

燃焼と同様にポリエチレンは全て消火したことを確認した。また、木片+綿も消火できたが、内部まで火が回っていなかった。

実験室内の温度についても、図4.2-14に示すように天井で最大100℃、壁面で最大45℃前後であり、他の試験と比べると比較的低くなった。

⑧ 燃焼物内部（木片+綿のみ）の燃焼状況

燃焼物内部の温度変化として、木片+綿の内部温度推移を図4.2-15～17に示す。図4.2-15及び17では、内部温度が炭酸ガス放出前よりも上昇している。特に、図4.2-15では容器の表面温度が炭酸ガス放出後20℃前後となるのに対し、内部は50℃から80℃まで上昇しており、700秒後でもほとんど温度は下がっていない。

4.3 水噴霧消火試験結果

(1) 試験結果

試験結果を表4.3-1にまとめた。また、試験状況を写真4.3-1～7に示す。

① 各燃焼物の燃焼状況

各燃焼物（ポリエチレン、木片+綿）の燃焼温度推移を図4.3-1～6に示す。

ポリエチレンは、着火から水噴霧開始までの温度はカゴ上部で最大560℃、中部で最大740℃、下部で最大677℃程度であった。ポリエチレンの燃焼傾向は、5.1炭酸ガス消火試験と同様である。水噴霧開始前に上・中段で400℃～700℃、下段で500℃～700℃に達している。

木片+綿は、着火から水噴霧開始までの温度はカゴ上部で最大624℃、中部で最大784℃、下部で最大396℃程度であった。木片+綿の燃焼傾向は、5.1炭酸ガス消火試験と同様に大きく2つに分かれた。すぐに火が回り始めるものは水噴霧開始まで、500℃～600℃前後の温度を保つ。また、火の回りが遅いものは、徐々に温度を上げていき、水噴霧開始前で最大700℃前後の温度に達する。

② 各燃焼物の消火状況（温度及び目視観察）

水噴霧は噴霧開始から10分から17分程度連続または状況を見ながら断続的に実施した。

ポリエチレンの温度は、水噴霧後30～50秒で50℃前後まで低下し温度計測結果からは水噴霧の有効性を示す結果となった。しかし、監視窓からの観察では噴霧している間絶えず残った火が見えており消火はできていなかった。消火されない部分は主にノズルの反対側に向いている部分の下部であり、水滴が直接の当たらない部分である。また、水噴霧終了後、残った火によりポリエチレンが乾燥し再度延焼するような状況も観察された。

木片+綿の温度は、ポリエチレンよりも若干遅いが100秒以内に50℃まで低下したが、一部の燃焼物では150秒後でも600℃となっているものもあり、温度の計測結果からは一部温度の下がらないものがあり水噴霧の有効性は見られない結果となった。しかし、木片+綿は水噴霧終了後には全て消火されており、木片+綿には水噴霧は有効であった。また綿が水を吸収し内部の消火の効果も確認できた。

一方、木片+綿の燃焼及び消火中の内部温度を図4.3-7～4.3-9に示す。木片+綿の内部温度は水噴霧を開始してから、温度が下降するまでに長いもので100秒近くかかっており、保温性が高いことや噴霧された水が内部に浸透するまでに約50秒～100秒程度の時間がかかっている。したがって、木片+綿は水

噴霧で消火しやすいものの温度が完全に下がる300秒～400秒程度の噴霧時間をとる必要がある。

上記のことから、水噴霧消火はポリエチレンには温度計測上は有効性が見られるが、ノズルから死角となる部分には火種が残りやすく完全に消火することは困難である。一方、木片+綿には、温度上も目視からも十分有効性が確認され、さらに水の浸透効果で死角の部分も十分消火できることがわかった。ただし、図4.3-7から、ノズル設置位置より高い場所に設置されている上段の容器には水滴が到達し難いため消火が困難である。

③ 実容器による消火試験（第5回）

投入容器を用いた試験の結果では、容器の軟化・液状化による中身の露出や、溶けたポリエチレンが燃焼物を包含し、水滴の浸透を抑制することがわかった。

5. 考 察

今回行った試験結果を基に、液化炭酸ガスの負圧維持の条件、消火性能について考察する。

(1) 液化炭酸ガスによる負圧維持について

① 図5-1にTF14FC噴射ヘッドを用いた時の圧力変動とTF10FC噴射ヘッドを用いた時の圧力変動を示す。TF14FC噴射ヘッドによる液化炭酸ガスの放出では放出後120秒程度で急激な圧力上昇が見られた。一方、TF10FC噴射ヘッドによる放出では、炭酸ガス放出後の急激な圧力上昇は見られなかった。液化炭酸ガス放出量と排気ブロア、空気漏れこみの収支試算（付録-3）では、TF14FC、TF10FC共に放出量から考えると放出時からブロアの排気能力を上回り陽圧になると考えられる。実験結果と試算の相違については、詳細は不明であるが、炭酸ガス放出により室温は-50℃前後まで下降しているため、ガスがドライアイスの微粒子に相変位し、そのまま排気されたのではないと思われる。

② 図5-2に図4.1-1から求めた各試験の排気流量推移を示す。図5-2からTF14FC噴射ヘッドでは第7回消火試験を除いて約100秒付近から排気ブロアの定格風量（ $0.33\text{m}^3/\text{s}$ ）を超えており、室内圧力も急上昇した。一方、第7回消火試験では定格風量に比べて $0.08\sim 0.1\text{m}^3/\text{s}$ 程度低くなっており、負圧が保たれている。

上記のことから、排気ブロアの排気能力に比べて十分余裕をもった小径の噴射ヘッドを用いることにより排気及び室温下降による空気圧縮の方が炭酸ガス放出量よりも多くなって負圧が保たれると考えられる。

③ 液化炭酸ガス放出ノズルにより液化炭酸ガス放出量を調節することにより、負圧維持できる可能性がある。ただし、室内の気密度や気温、液化炭酸ガスの昇華状況等を詳細に解析し、液化炭酸ガスの昇華メカニズム及び排気とのバランス等を解明する必要がある。

(2) 液化炭酸ガスの消火能力について

① 試験の結果から液化炭酸ガスによる消火は、ポリエチレンには非常に有効であることがわかった。また、木片+綿等には、炭酸ガス濃度44%～55%程度で延焼の抑制効果があることを確認できた。

ポリエチレンは、ガス放出から燃焼物が100℃までに達する時間（表4.2-2）が、木片+綿に比べて平均100秒も短く、液化炭酸ガスの有効性を示している。

一方、木片+綿は、ポリエチレンと同時に着火し消火を行ったため、まだ内部にまで火が到達しておらず、木片も綿も白い部分が多く見られた。また、一部の木片+綿容器では、給気や容器内部を掻き分けにより空気と接触すると再発火や発煙が観察された。綿は保温性が良いため、炭酸ガスにより、表面の火が消えても内部は高い温度を保つと考えられる。また、綿内部に燃焼に必要な空気が存在しているため一時的に炭酸ガス濃度を高くしても内部の火種が残ると考えられる。これには高濃度の炭酸ガス環境下で十分な保持時間をとって消火する³⁾必要があると考えられる。

(3) 水噴霧消火設備での消火能力について

① 今回の試験では、投入容器保管庫への配置を模擬したため燃焼物に対して1方向に水噴霧ノズルを設置した。その結果、ノズル側の火は消えたが、反対側の燃焼は持続した。固定型の水噴霧消火方式では水滴が到達しない部分があり対応

が困難である。また、木片＋綿には噴霧水が容易に浸透していくため、水滴が直接到達しなくても消火が可能であることがわかった。一方、ポリエチレンは水噴霧中にノズル側でも炎が確認されており消火できなかった。

- ② ノズル設置位置より高い場所に設置されている容器には、ミストが到達し難いことを確認した。また、ノズルを水平に噴出する方向に設置した場合には重力の影響で水滴が下方に多く到達する。実際の設備にノズルを設置する場合に考慮する必要がある。

- ③ 前処理セル投入容器保管庫に水噴霧ノズルを配置した場合、10分間の水消費量は図5-3から、正・裏面30個（5列3段×2面）、上面10個（5個2列）、左右12個（2列3段×2面）の合計52個配置する必要があるため、必要消火水量は

$$10\ell/\text{min} \times 10\text{min} \times 52\text{個} = 5.2 \text{ m}^3$$

となり、消火後の放射性廃液が大幅に増加すると思われる。

6. おわりに

LEDFの合理化に資するため、液化炭酸ガス放出による室内の圧力挙動の確認、液化炭酸ガスによる消火性能の確認、液化炭酸ガスの補完として水噴霧消火による消火性能の確認を行った。結果の要約を以下に示す。

- (1) 実験室内を -40mmAq の負圧状態で液化炭酸ガスを実験室内に放出した。放出当初 0.8mmAq/秒 程度の圧力上昇が見られたが、20秒後から 0.1mmAq/秒 程度の緩やかな上昇となり、120秒後には 1.5mmAq/秒 程度の急激な上昇が見られた。
- (2) 燃焼物をポリエチレン及び木片+綿として液化炭酸ガスによる消火試験を行った結果、ポリエチレンは、完全に消火できたが、木片+綿では再着火及び発煙が見られた。万が一、木片や綿等で火が内部まで進行した場合、炭酸ガスの高濃度化や濃度保持時間の確保等が必要と考えられる。一方、実験室内の圧力挙動は、放出当初 1.3mmAq/秒 程度の急激な上昇が10秒程度見られたが、その後状態を維持し放出後30秒後に再び 1mmAq/秒 程度の上昇が見られた。また、放出ノズル径を 14mm^2 から 10mm^2 に変更することにより放出後100～120秒の急激な上昇が緩和された。この結果から、小径の放出ノズルを使用することにより負圧変動を抑えることが可能なことが分かった。
- (3) 燃焼物をポリエチレン及び木片+綿として水噴霧での消火試験を行い、木片+綿は消火できたが、ポリエチレンは消火できなかった。また、投入容器保管庫に設置する場合、必要ノズル数は52個必要であり、10分間で 5.2m^3 の消火用水が発生する。

上記の結果から、LEDFに液化ガス方式を採用する場合は、放出ノズル径を 14mm^2 から 10mm^2 の小径なものに変更する等放出対象室に適合する噴口面積を設定することにより、負圧を維持しつつ消火が行える見通しが得られた。また、消火性能については、木片+綿のような内部に火種の残りやすい燃焼物はガス濃度を50%以上に設定する必要がある。一方、水噴霧消火は、ポリエチレン対し消火性能が発揮されないことや消火用水が大量に発生するなど採用には多くの検討を要することが分かった。

上記の知見に基づき、以下の試験を行いLEDFのセル消火設備設計に反映していく予定である。

- (1) 液化炭酸ガス方式での負圧維持条件を明確にするため、気密度の高い部屋で炭酸ガス放出時の圧力挙動の検証試験を実施する。
- (2) 木片+綿等の内部に火種の残りやすいものの消火について、50%以上の炭酸ガス濃度での消火試験を実施する。

7. 謝辞

セル消火実証試験を実施するに当たり、多大なご協力を頂いた富士電機株式会社の小原潔氏、日本フェンオール株式会社の関沢浩一氏に深甚なる謝意を表する。また、データの取りまとめにご協力頂いた検査開発株式会社の小林正美氏に深く感謝の意を表する。

8. 参考文献

- (1) National Fire Protection Association, "Standard on Carbon Dioxide Extinguishing Systems", Table 2-3.2.1, NFPA12 (1993)
- (2) (社)日本消火装置工業会, "炭酸ガス消火設備 消火剤放出時の圧力損失計算等の基準", JFEES-235-1986 (1986)
- (3) National Fire Protection Association, "Standard on Carbon Dioxide Extinguishing Systems", 2-4.2, NFPA12 (1993)

表4.2-1 液化炭酸ガス消火試験結果のまとめ

実験 No.	噴射 ヘッド	周囲温度 (ポンベ 周り)	消火剤 放出量	室内差圧 の初期値 (mmAq)	最高温度 上段は天井付近 下段は壁付近	消火剤放出中 の最高/最低室 内圧力 (mmAq)	炭酸ガス 放出率 (Kg/s)	燃焼時間 (分)	放置 時間 (分)	最高炭酸 ガス濃度 (%)	消火の状況
1	TF14FC	11℃	62Kg	-46	330℃ 150℃	-46 -22	0.783	9	10	上部:48 中部:49 下部:52	①ポリエチレンは全て消火した。 ②木片+綿については全て炎は消えていたが、煙が発生していた。ラック最上段の燃え 残りを掻き分けたら再着火した。
2	TF14FC	10℃	54Kg	-52	325℃ 115℃	計測器不備の ために計測で きず	0.656	9	20	上部:50 中部:48 下部:50	①ポリエチレンは全て消火した。 ②木片+綿については全て炎は消えていたが、ラックの2、3段目の燃焼物から煙が発生 していた。これら2つを掻き分けたが火は見られなかった。
3	TF14FC	15℃	62Kg	-50	250℃ 90℃	-47 -23	0.771	9	30	上部:48 中部:47 下部:47	①ポリエチレンは全て消火した。 ②木片+綿については全て炎は消えていたが、ラックの2、3段目の燃焼物から煙が発生 していた。これら2つを掻き分けたが火は見られなかった。
4	TF14FC	10℃	110Kg	-50	220℃ —	-49 -2	0.776	9	30	上部:56 中部:49 下部:46	①ポリエチレンは全て消火した。 ②木片+綿については全て炎は消えていたが、ラックの2段目の燃焼物からわずかに煙 が発生していた。この燃焼物には上段から滴下したポリエチレンが付着していた。 2つの燃焼物を掻き分けたが火は見られなかった。
5	TF14FC	13℃	110Kg	-48	102℃ 39℃	-49 0	0.767	10	30	上部:49 中部:54	①実容器を使った試験。 ②ポリエチレンは全て消火した。 ③換気前は煙の発生は見られなかったが、換気をはじめると、木片+綿の一つから煙が 発生した。この燃焼物を掻き分けたところ少し火が見られたが、自然に消火した。 ④容器が崩れてラックより落下したものがあつた。
6	TF10FC	17℃	110Kg	-49	300℃ 86℃	計測器不備の ために計測で きず	0.375	9	30	上部:44 中部:45	①ポリエチレンは全て消火した。 ②換気前は煙の発生は見られなかったが、換気をはじめると、木片+綿の一つから煙が 発生した。
7	TF10FC	15℃	110Kg	-47	226℃ 79℃	-45 -32	0.370	9	30	上部:44 中部:45	①ポリエチレンは全て消火した。 ②換気前は煙の発生は見られなかったが、換気をはじめると、ラックの2、3段目の燃 焼物から煙が発生した。これら2つを掻き分けたところ火が見られた。

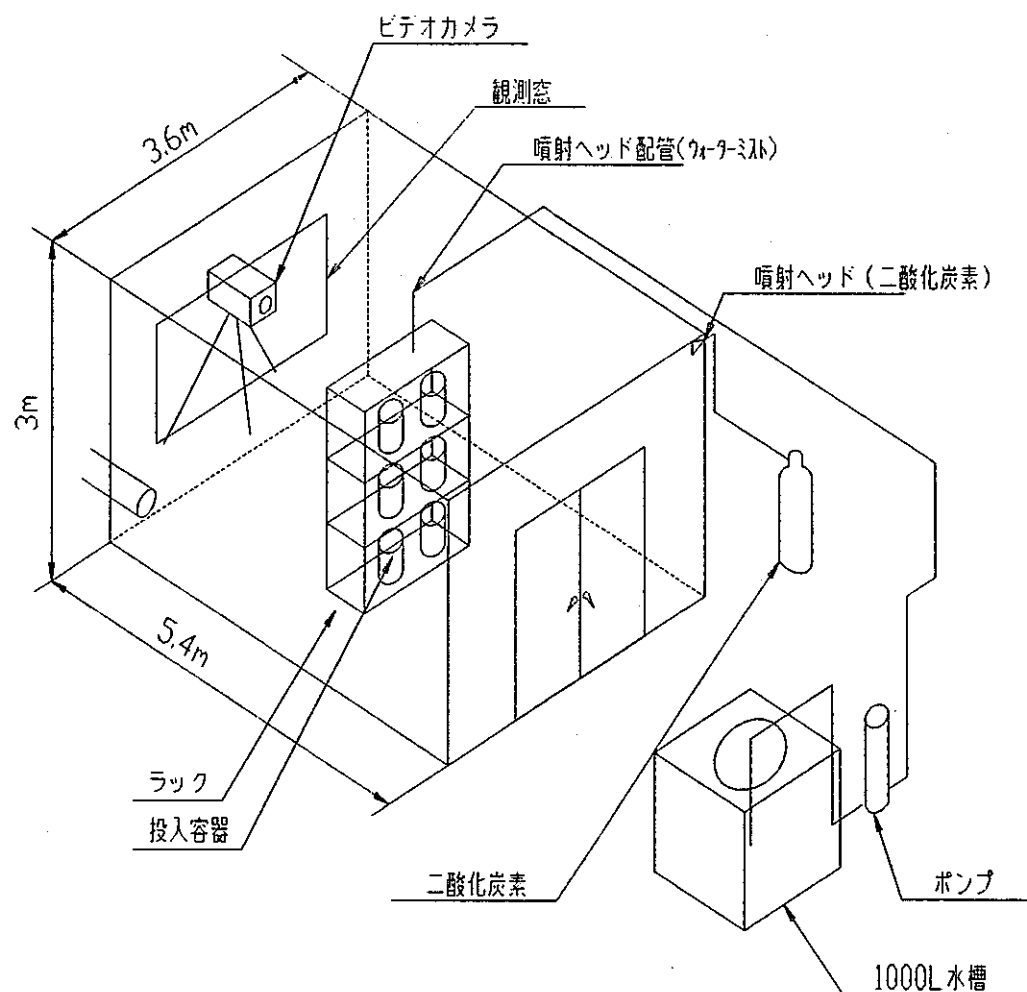
表4.2-2 液化炭酸ガス放出後からの燃焼物が100℃に到達するまでの時間

単位：秒

試験回数	チャコール	ポリエチレン (上段)	ポリエチレン (中段)	ポリエチレン (下段)	木片+綿 (上段)	木片+綿 (中段)	木片+綿 (下段)
第1回	311	74	66	76	190	64	74
第2回	439	78	55	-	131	54	62
第3回	57	69	58	64	81	700	74
第4回	739	79	85	31	70	35	-
第5回	-	32	-	5	-	17	-
第6回	-	153	73	27	87	327	85
第7回	-	78	72	-	98	411	483
平均	387	80	68	41	110	230	156
	387	63			165		

表4.3-1 水噴霧消火試験結果のまとめ

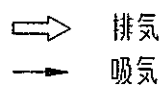
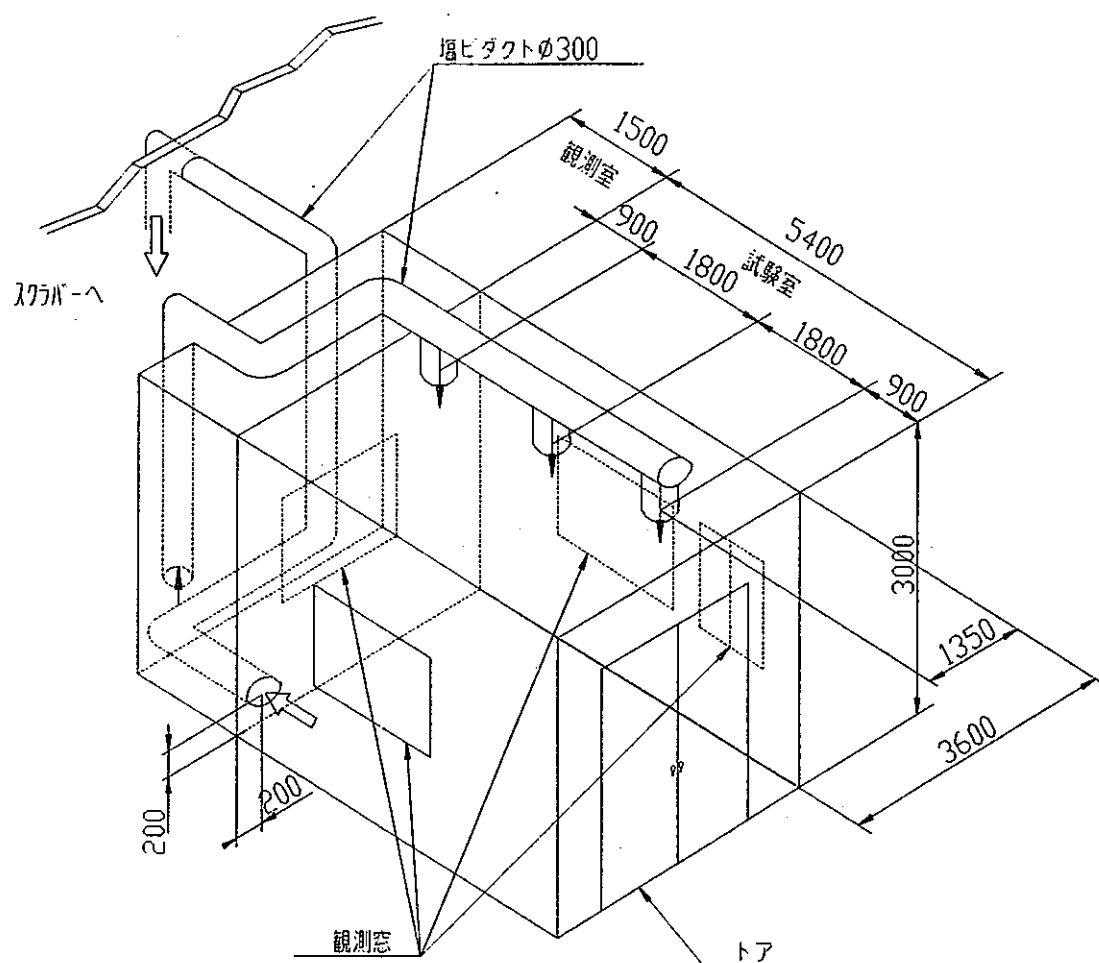
実験No.	可燃物のレイアウト	燃焼時間	ノズル数	放水量 (m ³)	試験結果	考察
					消火の状況	
1	ポリエチレン：3ヶ 木片＋綿：3ヶ 上記を交互に配置	9min	5	0.45	ポリエチレン消火せず。木片＋綿は消火。	ウォーターミストのノズルレイアウトの考え方は、燃焼面全てにミストが当る必要がある。よってポリエチレンは底面が消火せずに、燃えていたものと思われる。木片＋脱脂綿が消火したのは、底面まで十分に水が浸漬していったことが考えられる。
					放水6分後、一旦放水停止し状況を確認。ポリエチレンの上段と下段が燃焼している。燃焼は底部で起こっている。木片＋脱脂綿は煙も発生しておらず、消火している感じである。一旦停止から7分後、再び放水し、ポリエチレンが消火しそうなことから、10分後放水停止。木片＋脱脂綿は中を掻き分け、燐きがないことを確認。	
2	木片＋綿：6ヶ	13min	2	0.26	消火せず。	横向きにノズルを設置した場合には、放水軸が下方に落ちるので、上段の燃焼物に対し水量が十分でなかったためと思われる。燃えている箇所はやはり、ノズル設置側と反対面であった。
					放水開始後20分経過しても上段の1つは炎が消えず、また上段の他方は煙が発生したままであるので消火せずと判断し、放水停止。	
3	木片＋綿：6ヶ	13min	2	0.26	消火。	今回の実験は20分で消火したが、実験2と同じくノズル設置側の反対面が消火しにくい状態であった。また実験2と同じ燃焼時間であったが、明らかに燃焼が弱かった。よってこのノズルレイアウトが必ず消火するというわけではなく、基本的には全ての面にミストが当るように設置するのが望ましい。
					放水開始後17分くらいまでは、上部の1ヶに炎がみられたが、20分後では消火したため、放水停止。燃焼物の中を掻き分け、燐きがないことを確認。	
4	ポリエチレン：3ヶ 木片＋綿：3ヶ 上記を交互に配置	11min	2	0.22	ポリエチレン消火せず。木片＋脱脂綿は消火。	実験2、3と同じくノズル設置側の反対面が消火しにくい状態であった。よってこのノズルレイアウトが木片＋脱脂綿を必ず消火するというわけではなく、基本的には全ての面にミストが当るように設置するのが望ましい。
					放水11分後、放水を停止し状況を確認。ポリエチレンの上段と下段が燃焼している。燃焼は底部で起こっている。木片＋脱脂綿は煙も発生しておらず、消火している感じである。木片＋脱脂綿は中を掻き分け、燐きがないことを確認。	
5 (実容器)	ポリエチレン：3ヶ 木片＋綿：3ヶ 上記を交互に配置	10min	2	0.20	容器6ヶ共消火せず。	対象物が崩れたり、ポリエチレン容器が壁になり、ミストが対象物に当らなかったため、消火できなかったと考えられる。
					放水開始後10分経過しても、燃焼は弱くならないため消火せずと判断し、放水停止した。容器は、くずれてラックより落ちたものがあった。ポリエチレン容器が壁になって、ミストが内部の燃焼物に当たらない。	



実験室容積：5.4m×3.6m×3m=58.3m³

排気ダクトの下流側にファンと排ガス処理設備が設置されている
 ウォーターミストの噴射ヘッドは、実際の設備で考えられる位置とする
 天井部に3ヶ所吸気口がある

図2.3-1 試験設備概要



1. 実験室材質

天井：ケイカル板(t6)+石膏ボード(t9.5)
 壁：PB(t12.5) +ケイカル板(t9.5)

2. 排気ファンの仕様

20m³/min×78.5Pa(80mmH₂O)×1.5KW

図2.3-2 実験室の仕様

測定箇所	測定データ
a	温度、CO ₂ 濃度（O ₂ 計換算）
b	CO ₂ 濃度、室内差圧
c	温度、CO ₂ 濃度（O ₂ 計換算）
d	温度（天井付近）
e	温度（壁付近）

ラック位置 : 実験室中央
 熱電対 : dの位置は天井中心で、50ミリ離れた位置
 : eの位置は床から1000ミリで、ラックの中心にむかって100ミリ離れた位置
 : その他位置は図に記載

燃焼物温度測定位置 : 熱電対を可燃物上面から10mm以内に設置
 投入容器数個には可燃物の内部にも設置

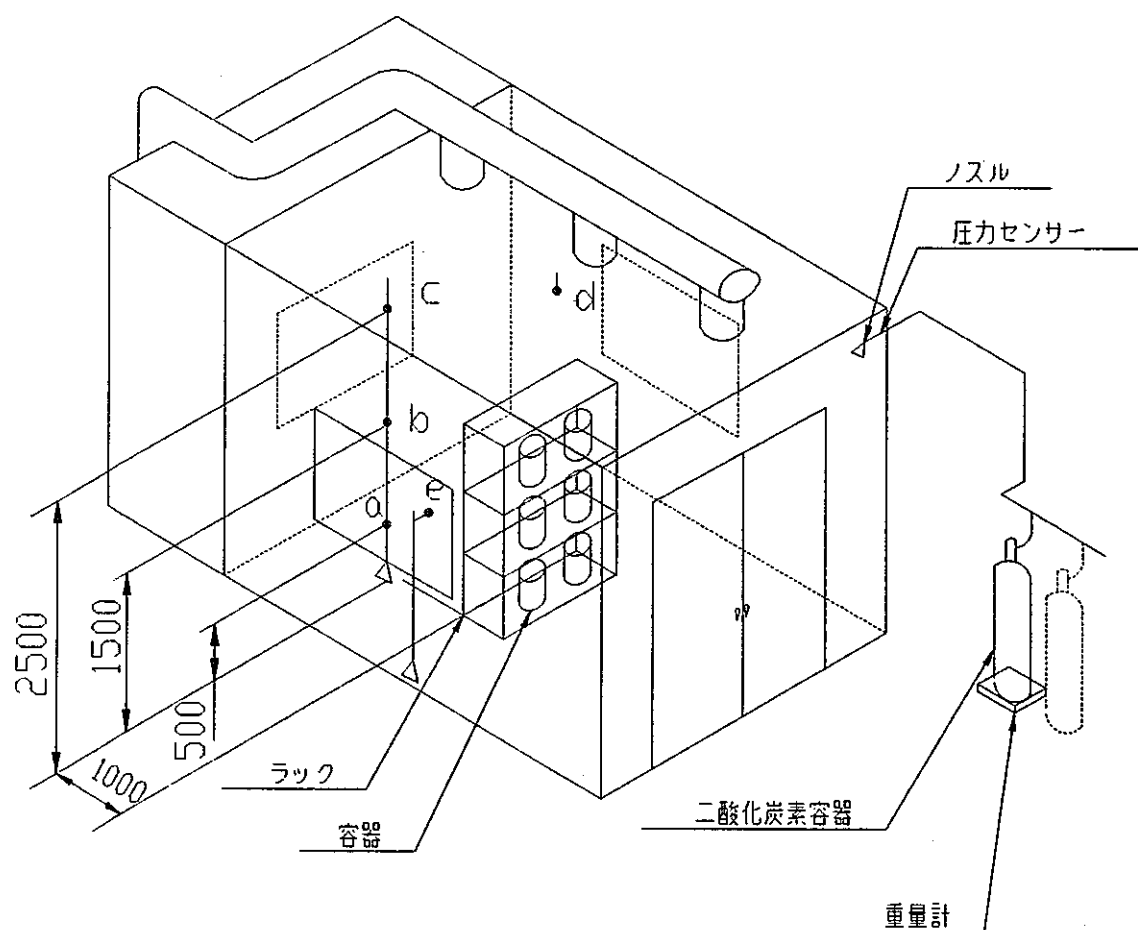


図2.3-3 液化炭酸ガス消火試験配置

ラック位置：実験室中央

温度測定：熱電対を各投入容器可燃物上面から10mm以内に設置
投入容器数個には可燃物の内部にも設置

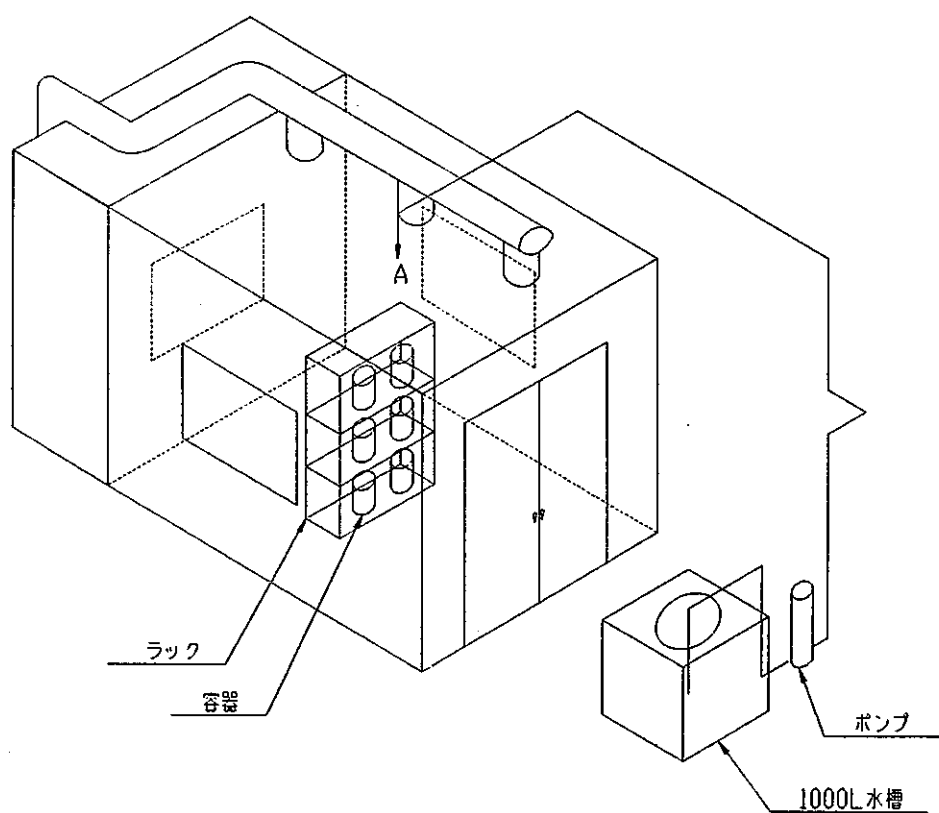


図2.3-4 水噴霧消火試験配置

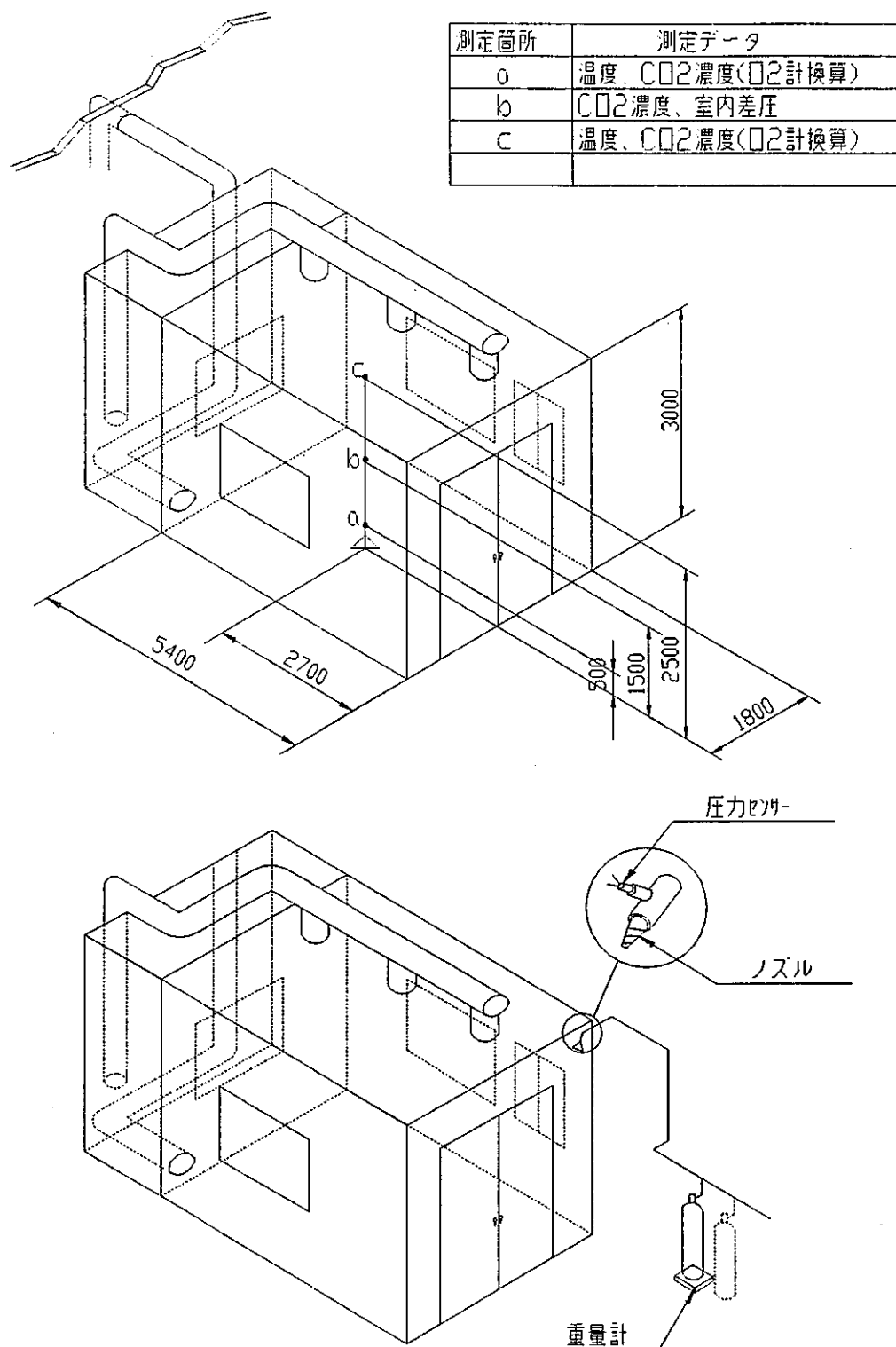


図2.3-5 データ取得位置

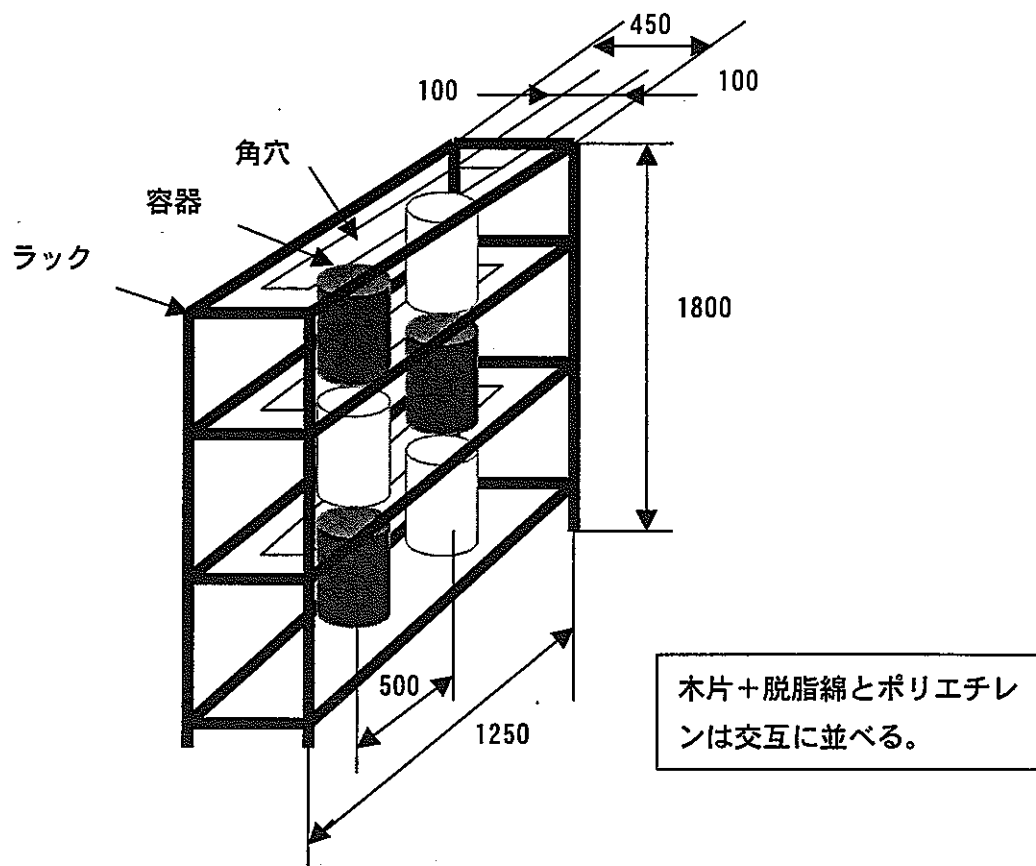


図3.2-1 ラック及び容器の位置

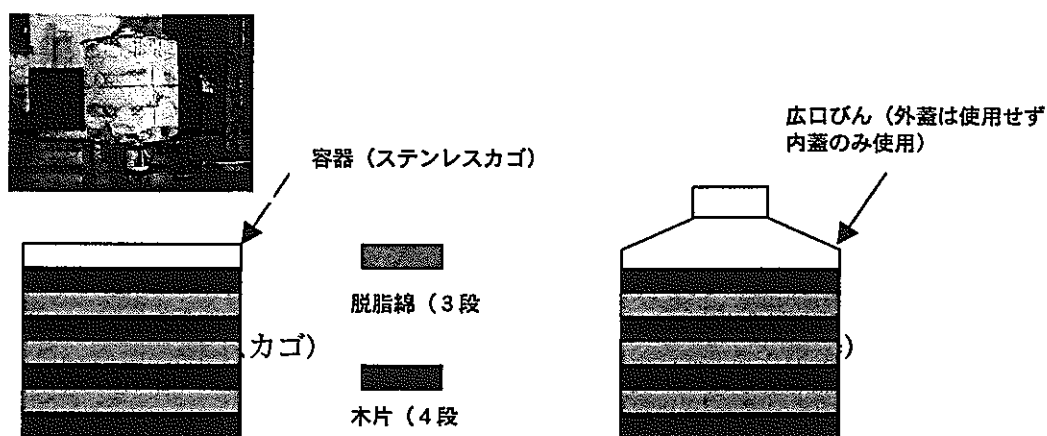


図3.2-2 燃焼物の状態 (木片+脱脂綿)

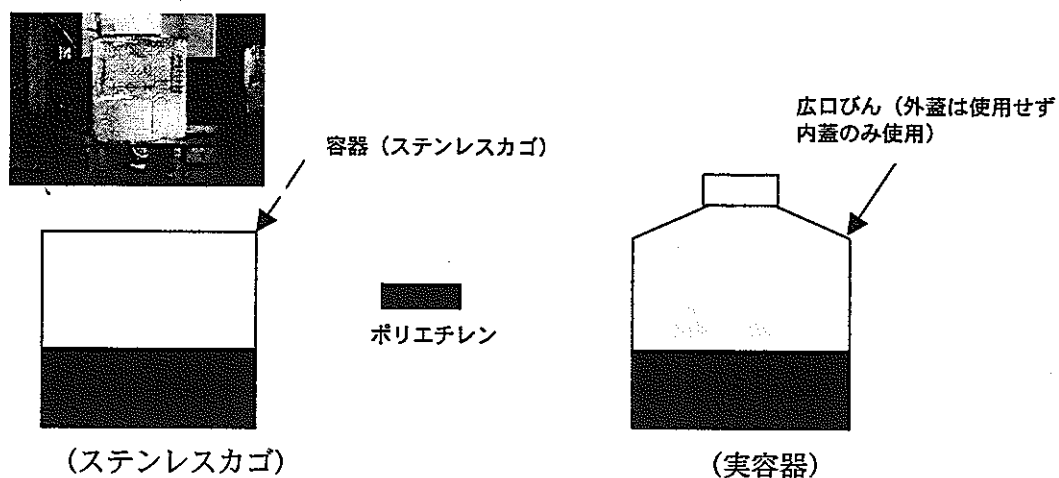


図3.2-3 燃焼物の状態 (ポリエチレン)

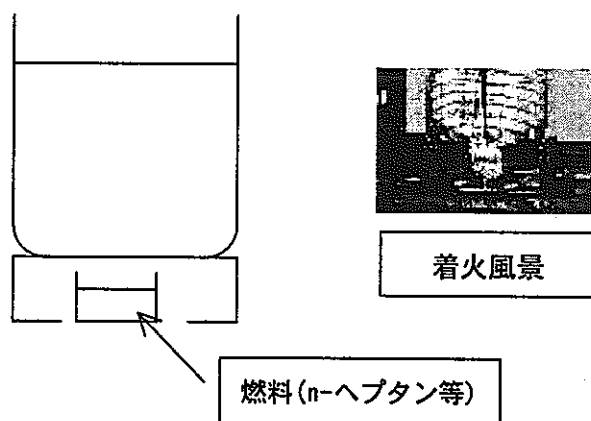


図3.2-4 着火方法

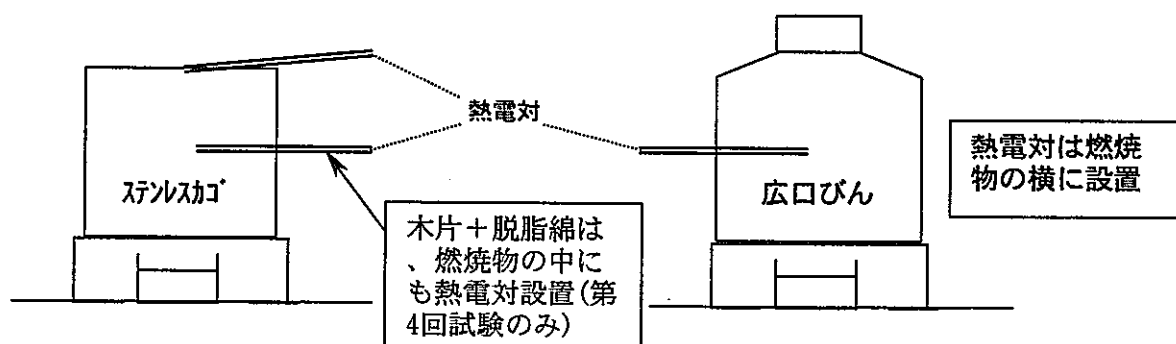


図3.2-5 熱伝対の配置

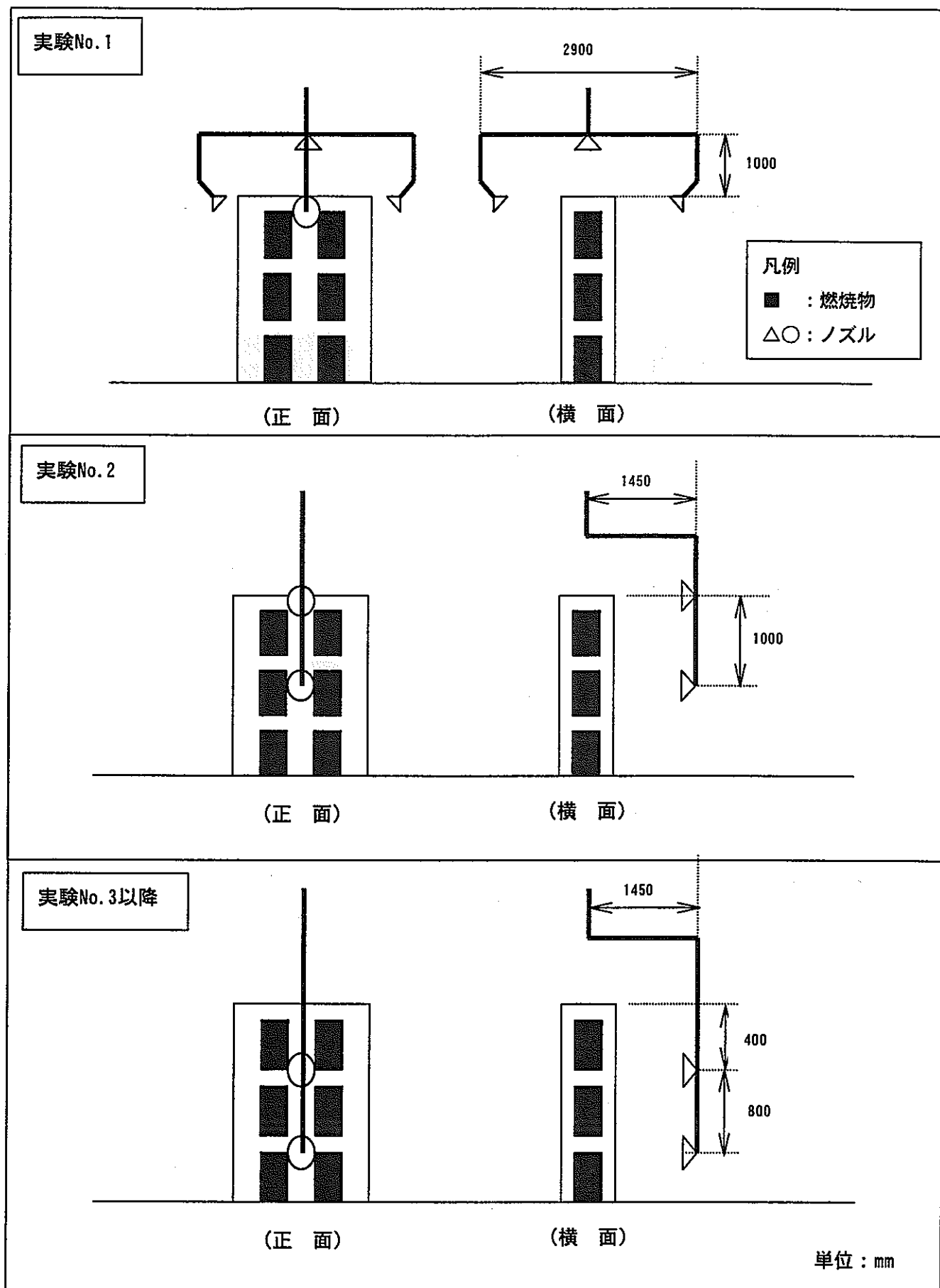


図3. 3-1 水噴霧ノズル レイアウト

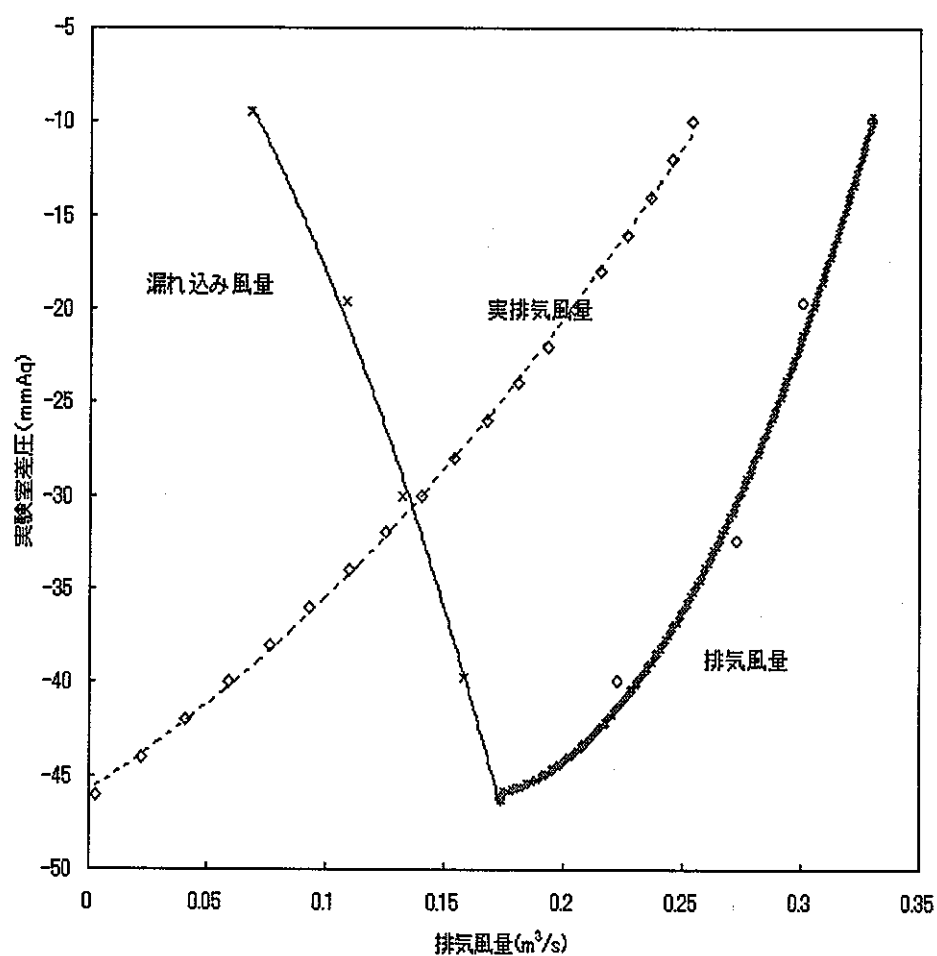


図4.1-1 実験室空気漏れこみ量と排気プロア排気能力の関係

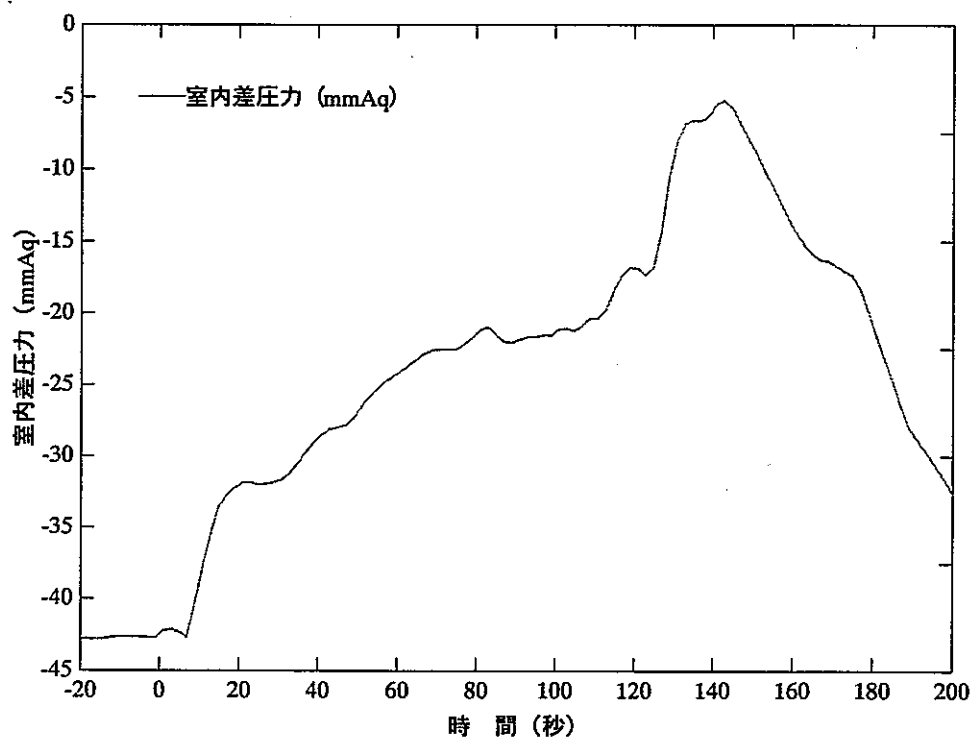


図4.1-2 室内差圧挙動 (圧力、濃度確認試験(第1回))

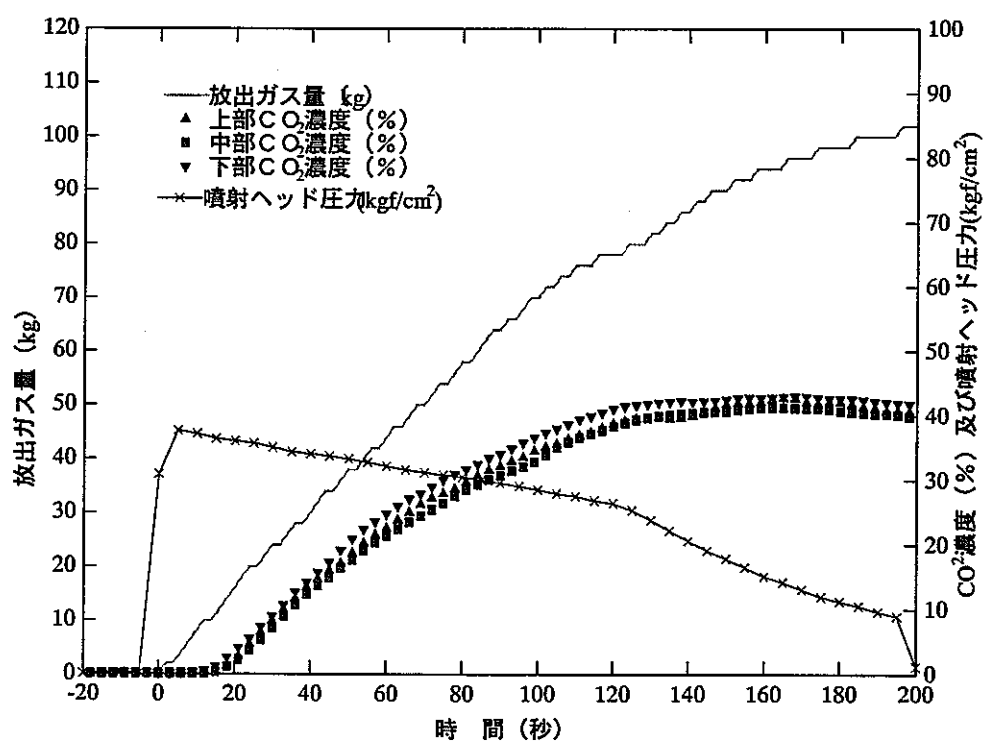


図4.1-3 液化炭酸ガス放出特性と炭酸ガス濃度 (圧力、濃度確認試験(第1回))

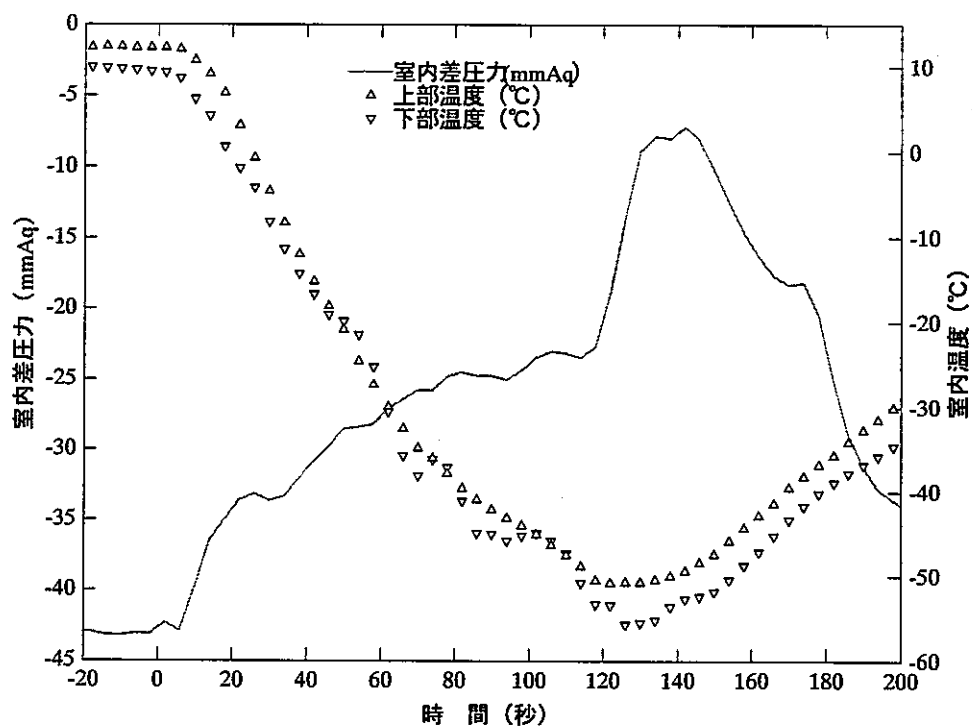


図4.1-4 室内差圧挙動と温度 (圧力、濃度確認試験(第2回))

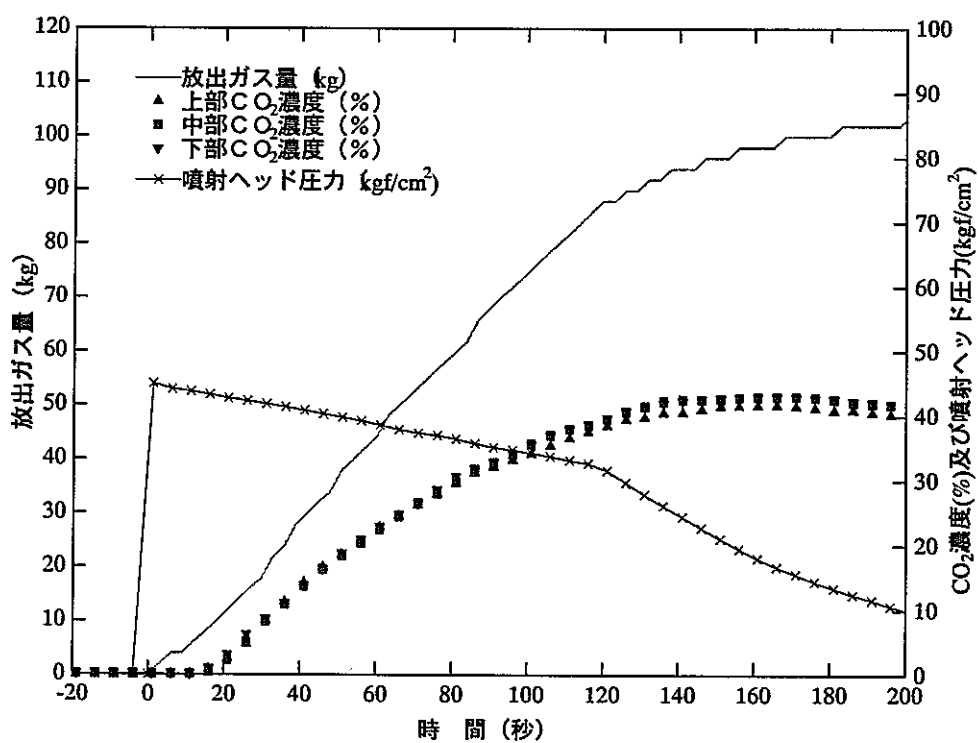


図4.1-5 液化炭酸ガス放出特性と炭酸ガス濃度 (圧力、濃度確認試験(第2回))

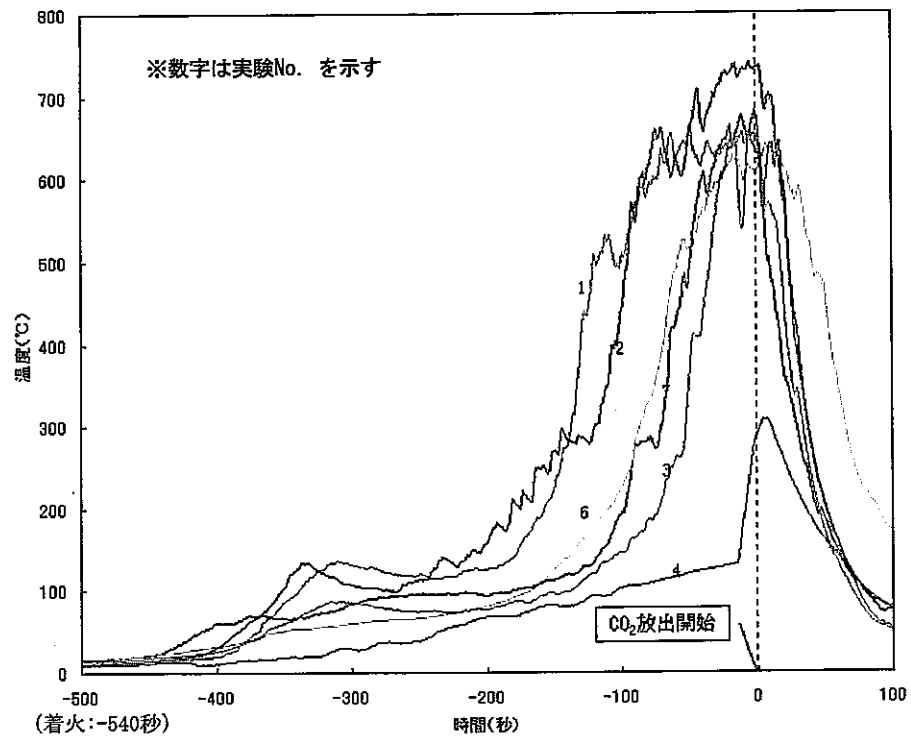


図4.2-1 ポリエチレン燃焼温度推移 (容器保管棚上段)

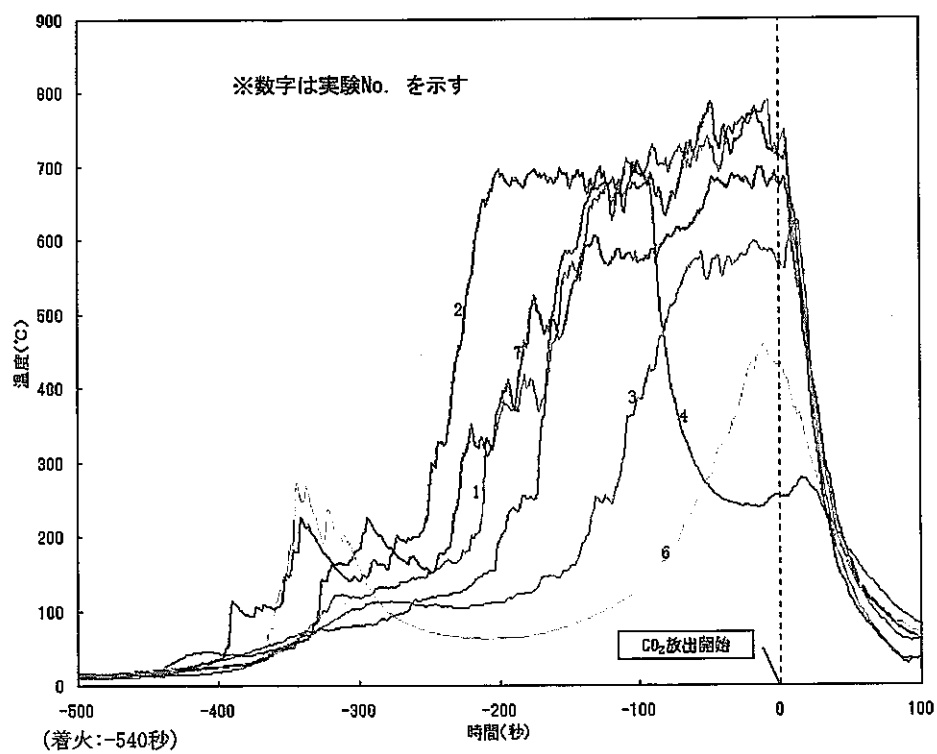


図4.2-2 ポリエチレン燃焼温度推移 (容器保管棚中段)

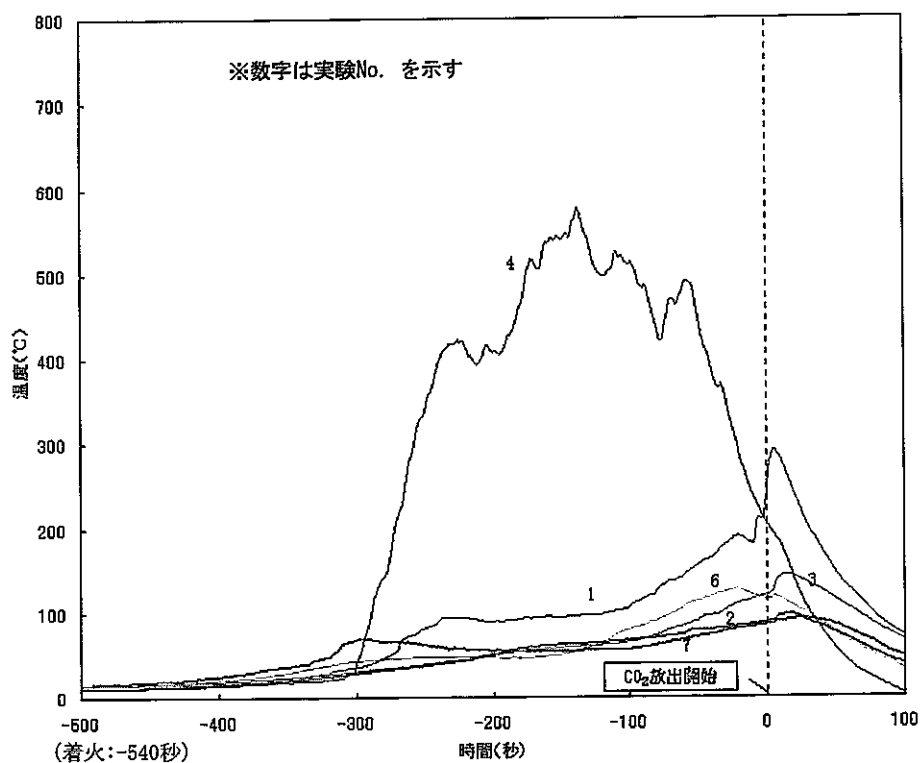


図4.2-3 ポリエチレン燃焼温度推移 (容器保管棚下段)

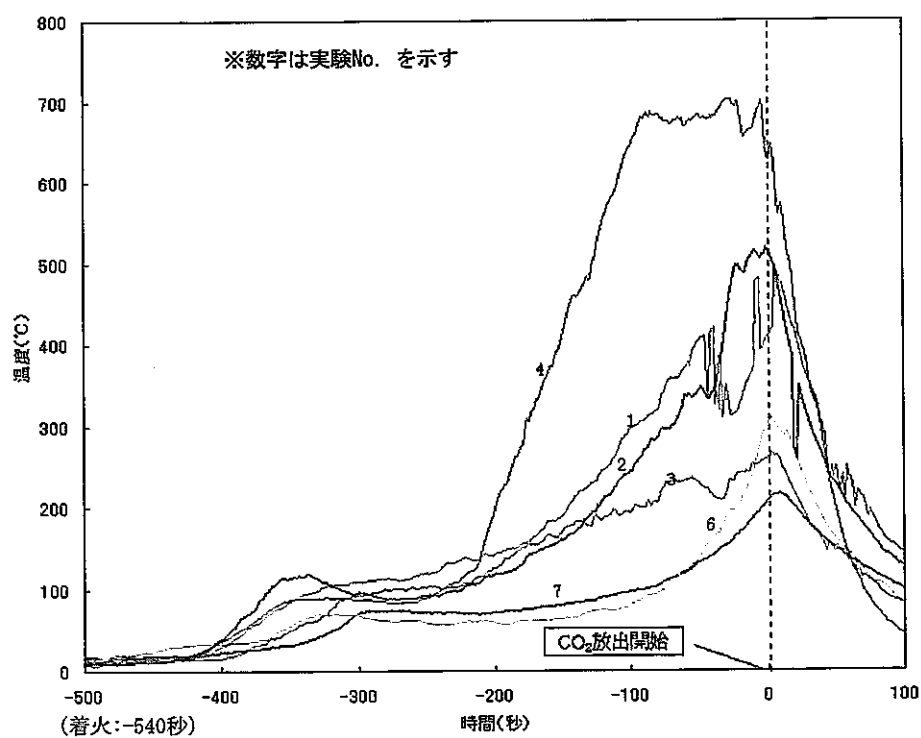


図4.2-4 木片+綿 燃焼温度推移 (容器保管棚上段)

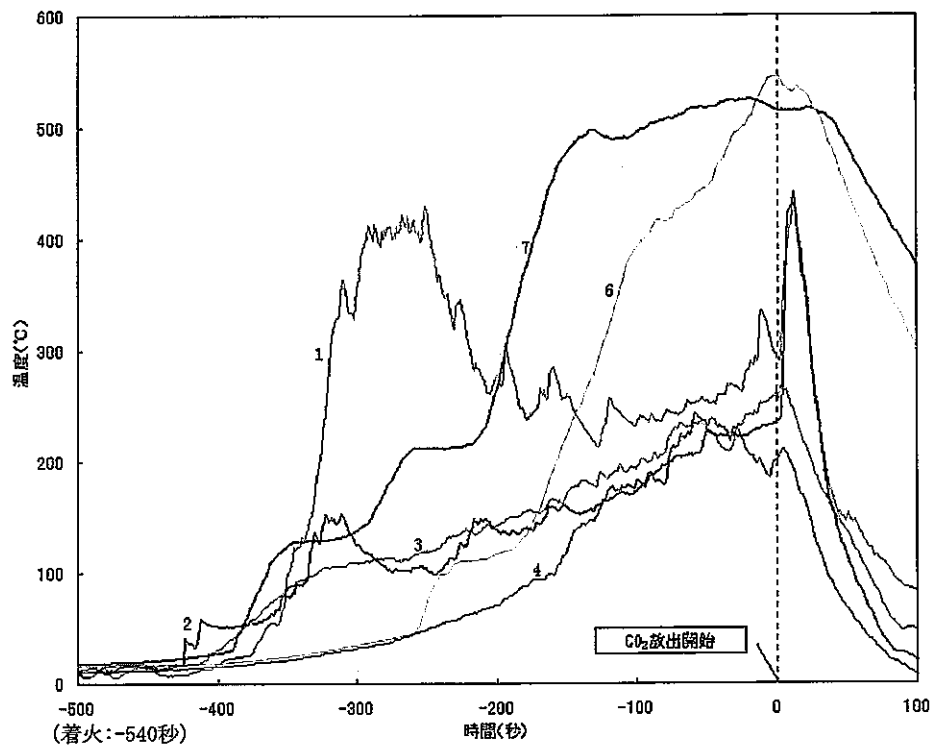


図4. 2-5 木片+綿 燃烧温度推移 (容器保管棚中段)

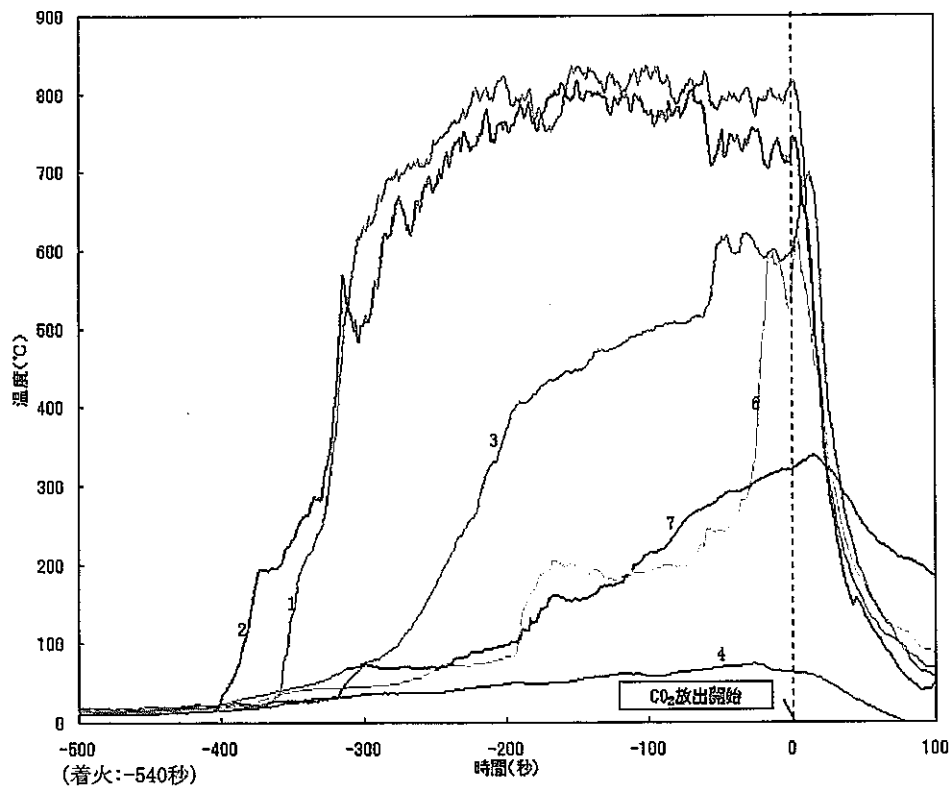


図4. 2-6 木片+綿 燃烧温度推移 (容器保管棚下段)

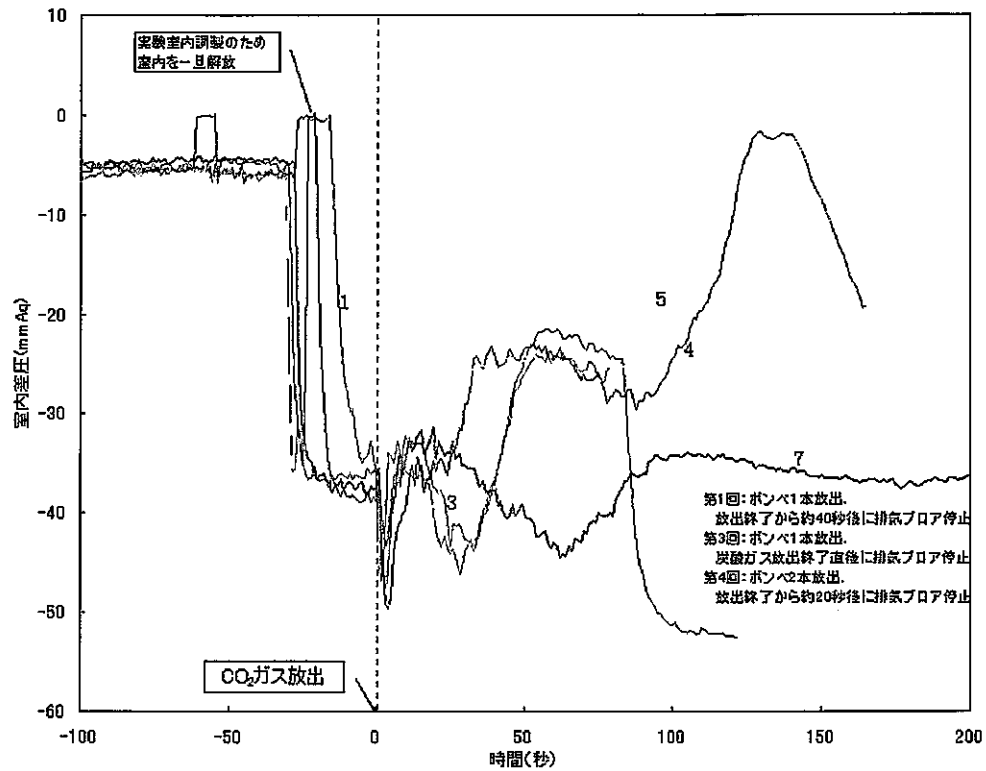


図4.2-7 実験室内の差圧挙動

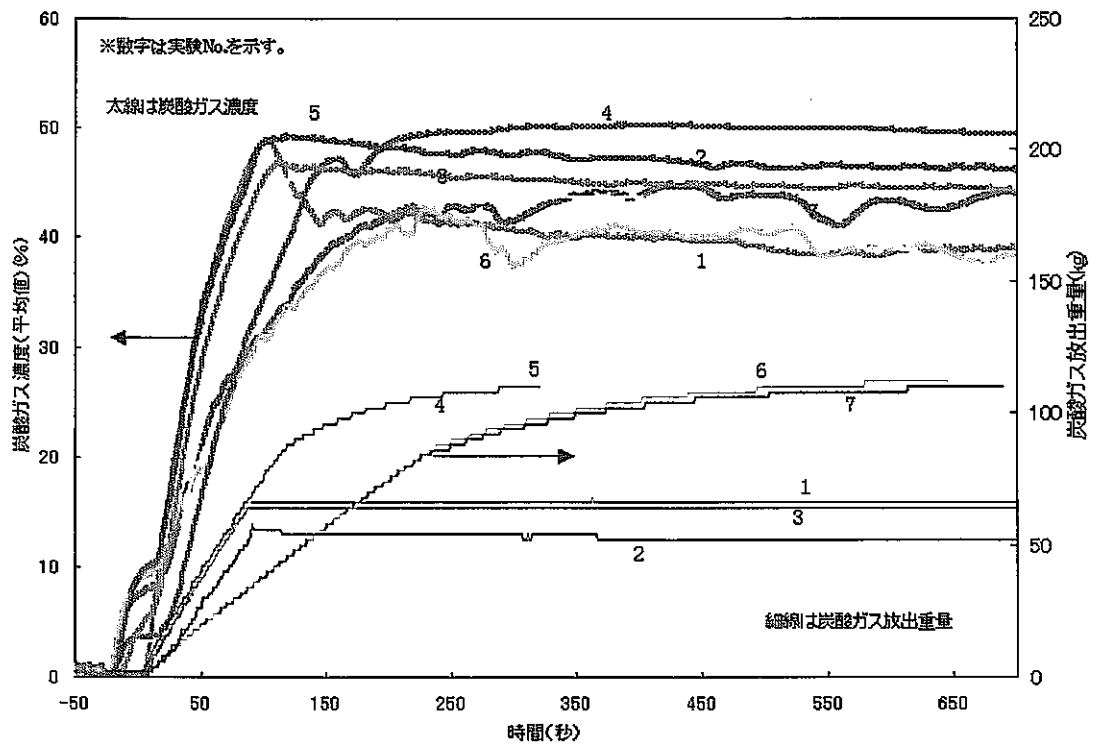


図4.2-8 液化炭酸ガス放出量と炭酸ガス濃度 (平均値)

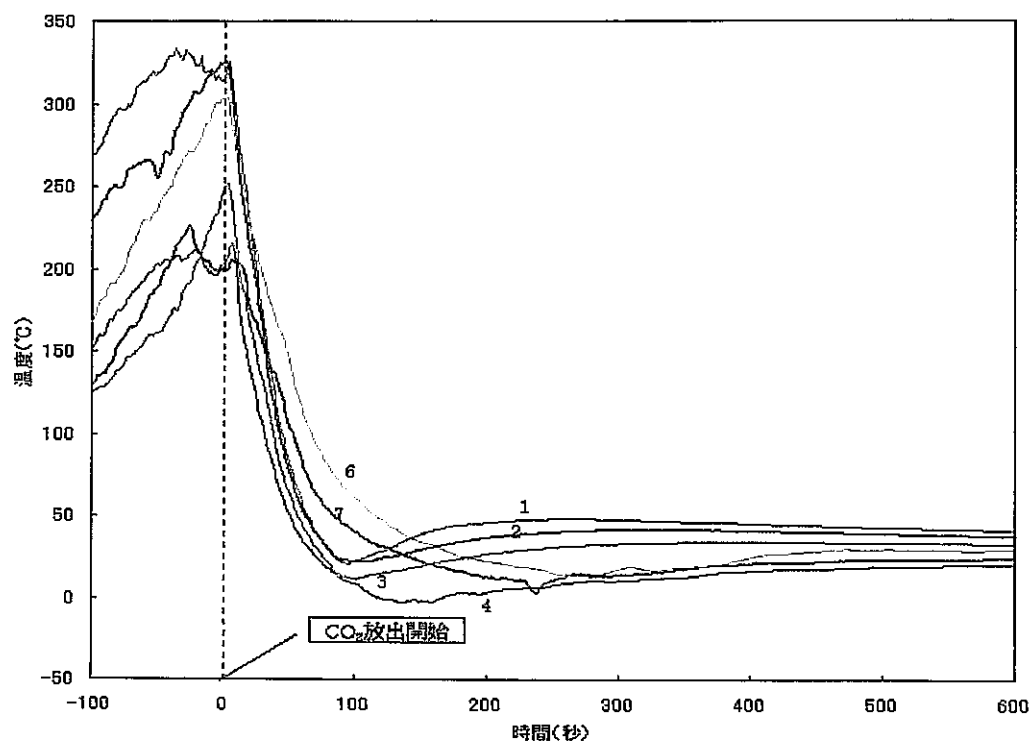


図4.2-9 実験室内の温度推移（天井温度）

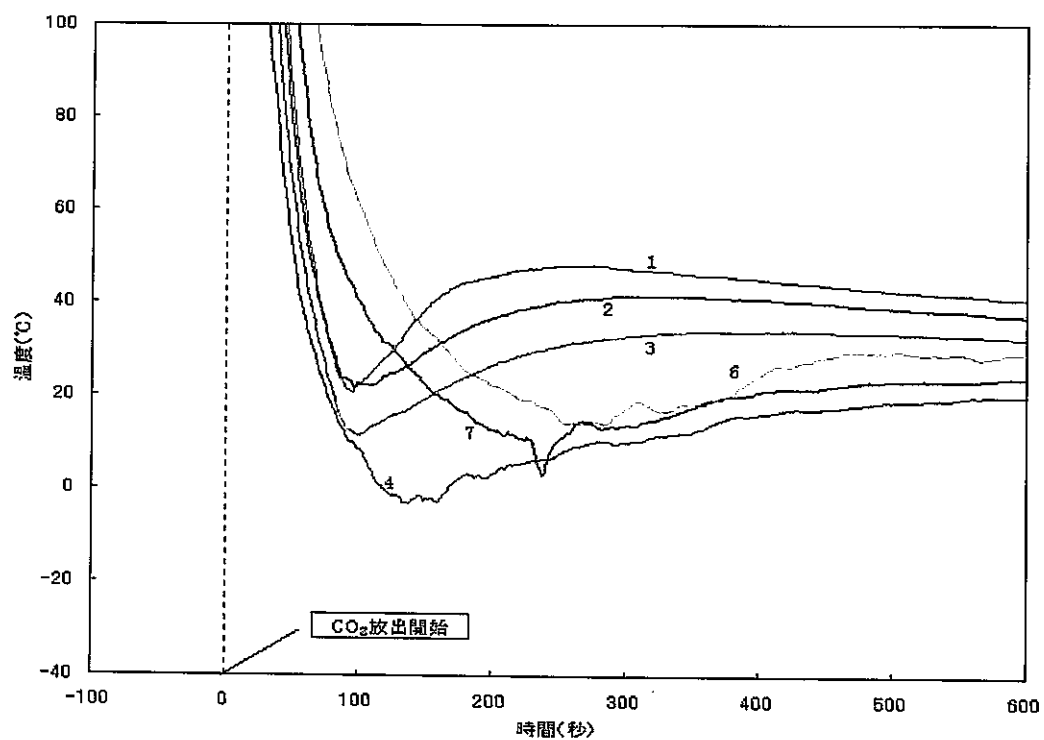


図4.2-10 実験室内の温度推移（天井温度）[-40℃～100℃]

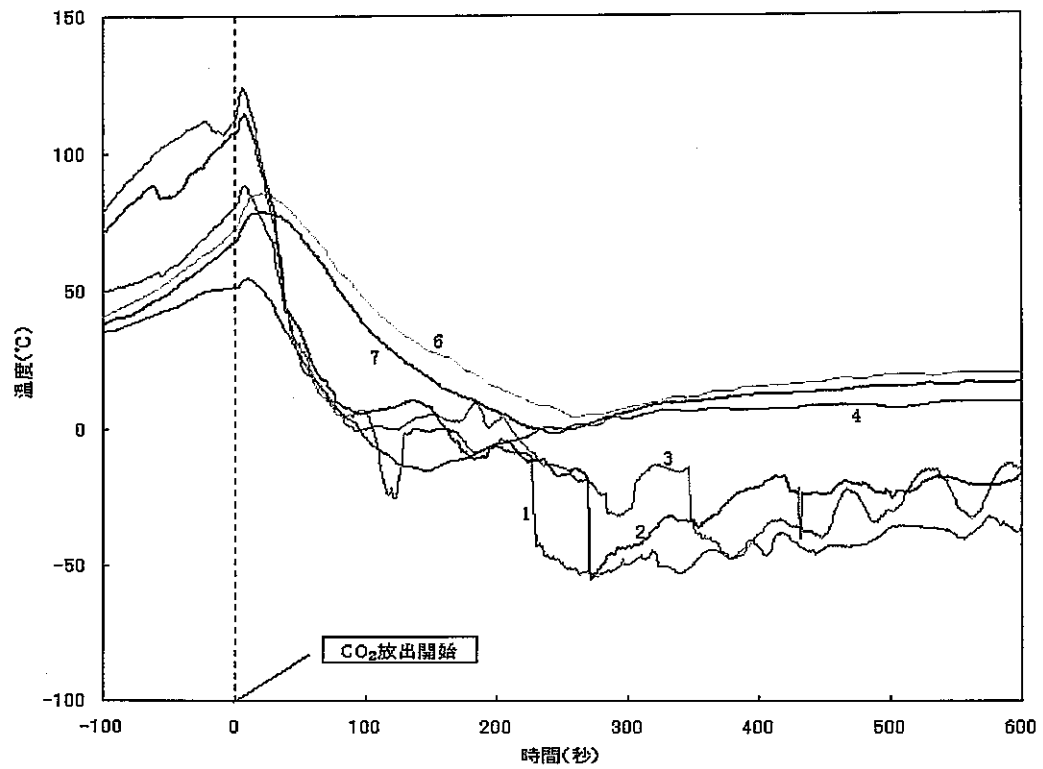


図4.2-11 実験室内の温度推移（壁面温度）

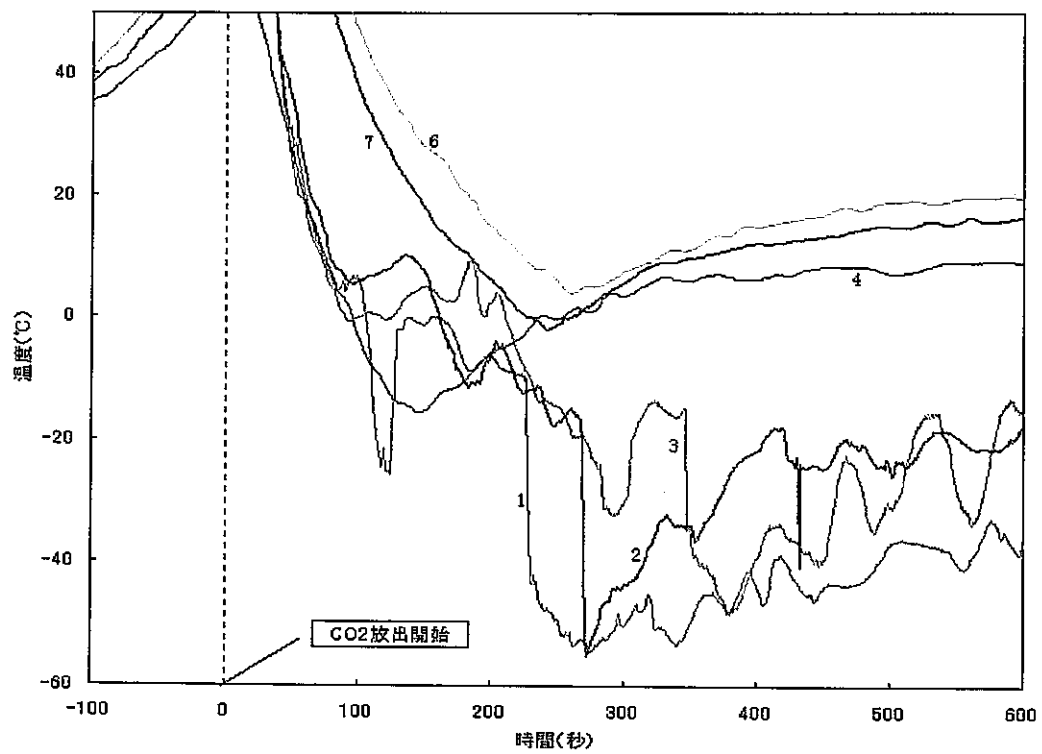


図4.2-12 実験室内の温度推移（壁面温度）（-60°C～50°C）

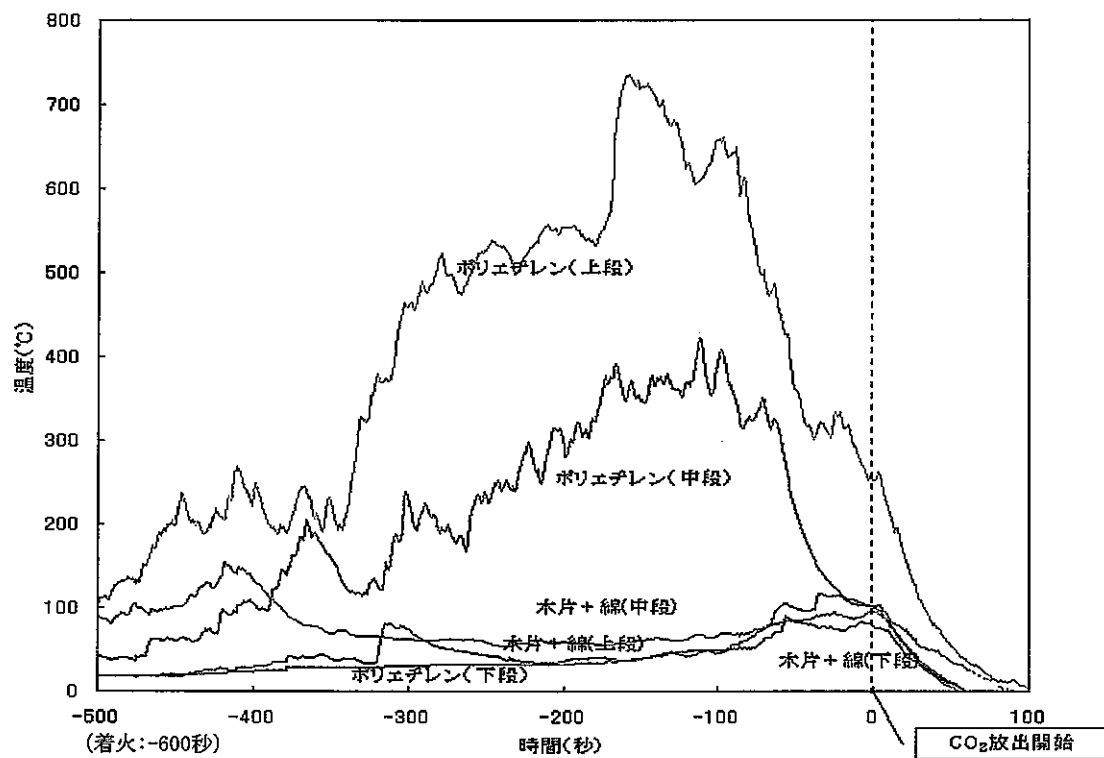


図4.2-13 各燃焼物（ポリエチレン、木片＋綿）の燃焼温度推移（第5回）

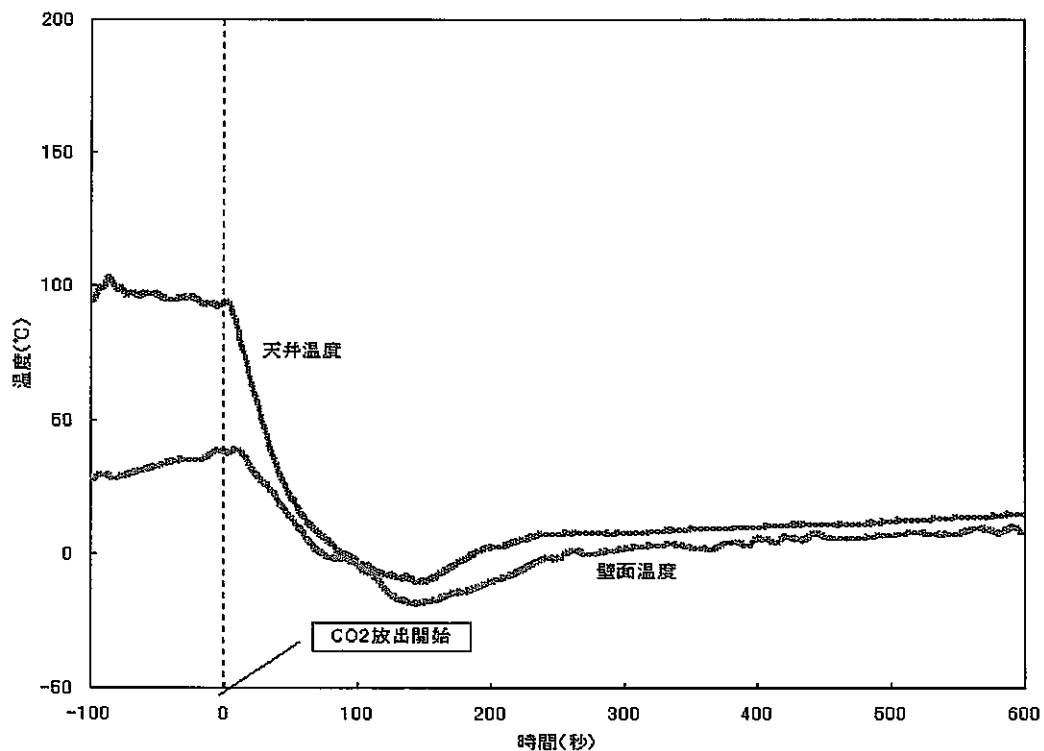


図4.2-14 実験室内の温度推移（天井・壁面）（第5回）

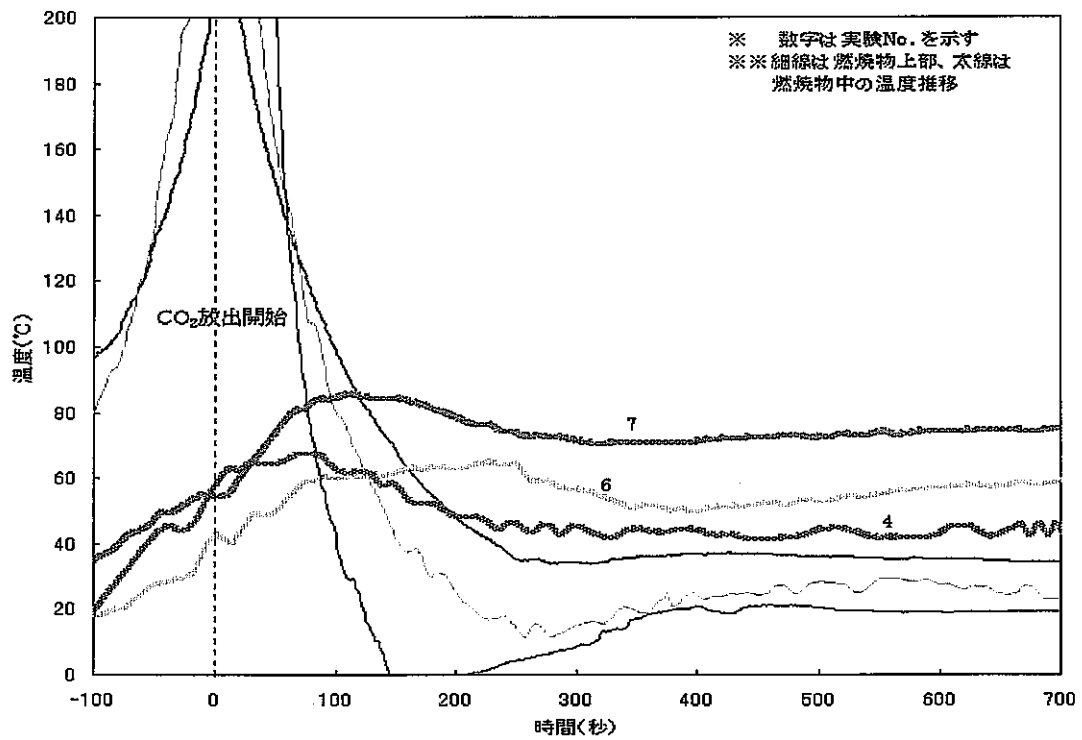


図4.2-15 燃焼物内部の温度推移（木片＋綿、容器保管棚上段）

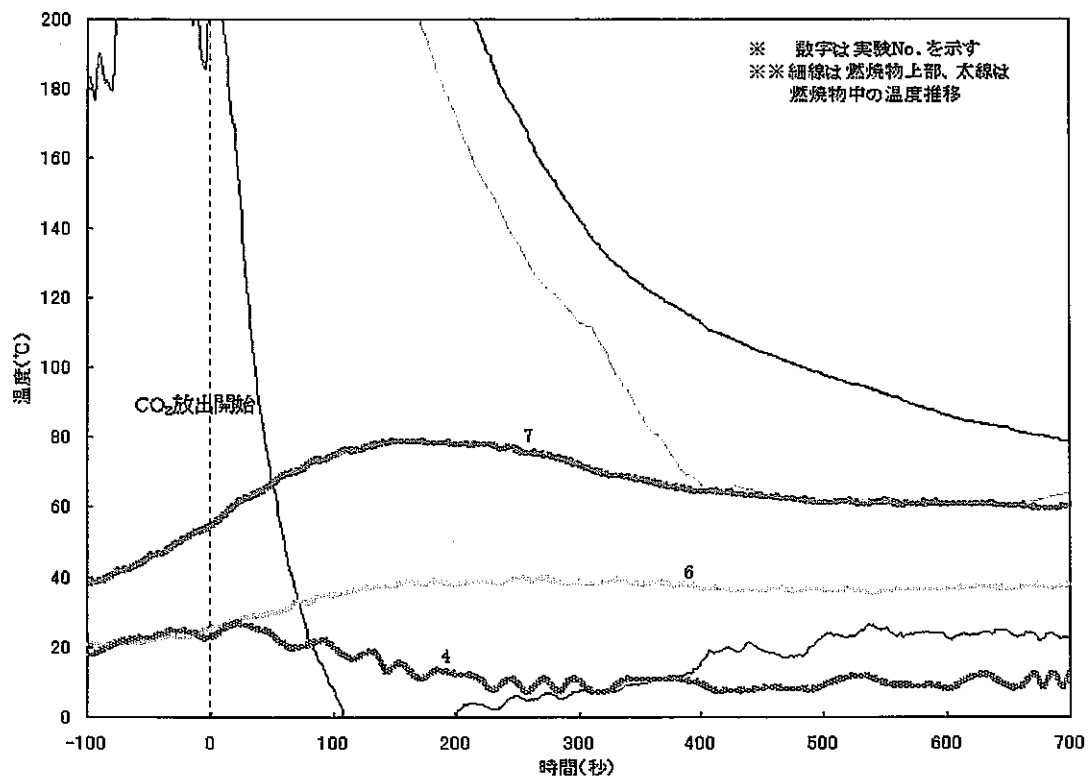


図4.2-16 燃焼物内部の温度推移（木片＋綿、容器保管棚中段）

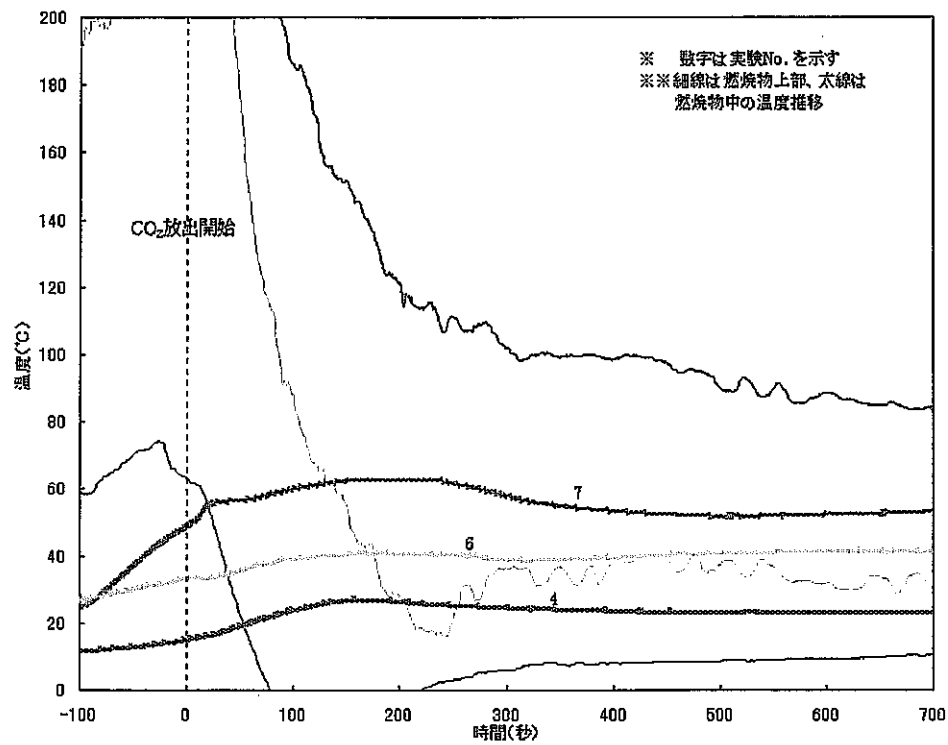


図4.2-17 燃焼物内部の温度推移（木片+綿、容器保管棚下段）

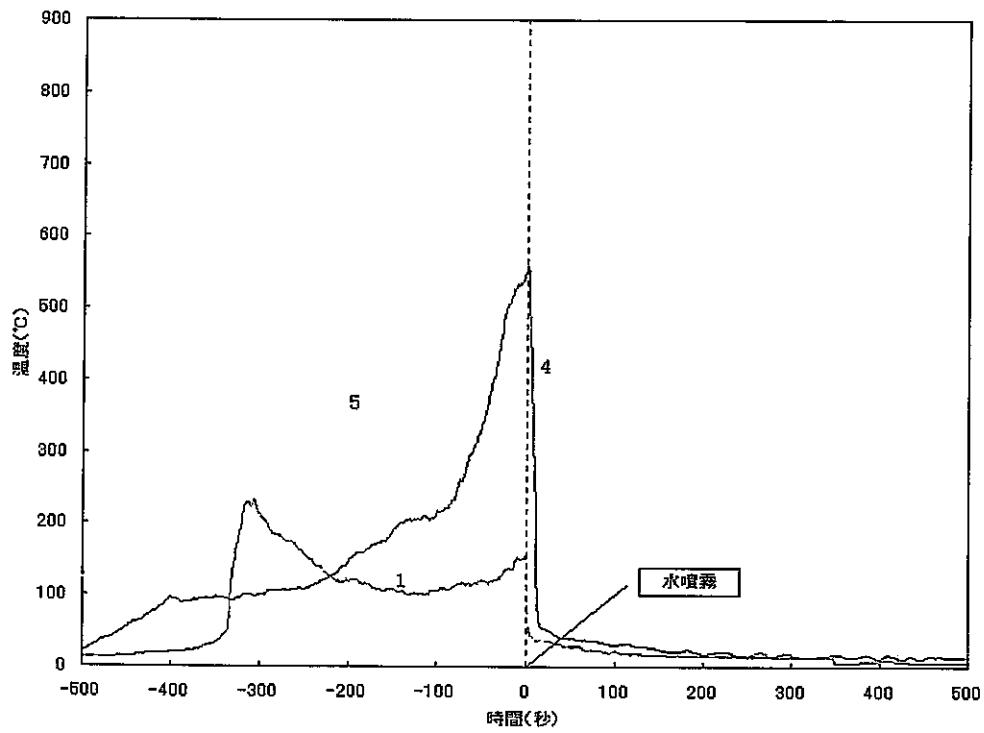


図4.3-1 ポリエチレン燃焼温度推移（容器保管棚上段）

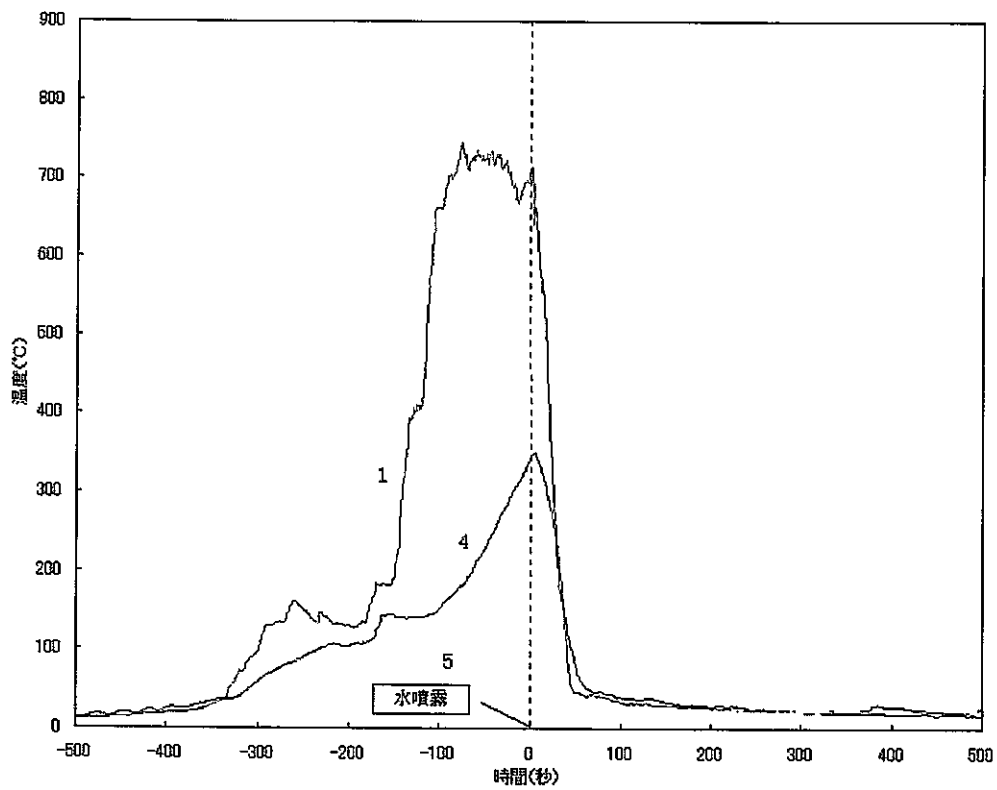


図4.3-2 ポリエチレン燃焼温度推移（容器保管棚中段）

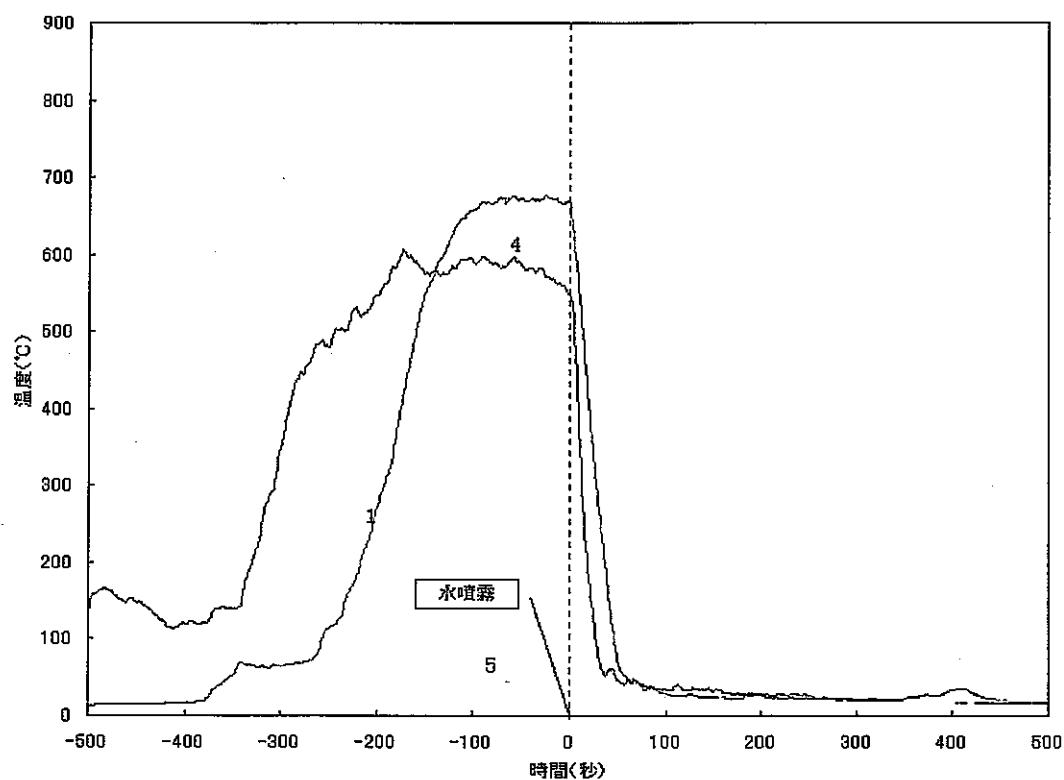


図4.3-3 ポリエチレン燃焼温度推移（容器保管棚下段）

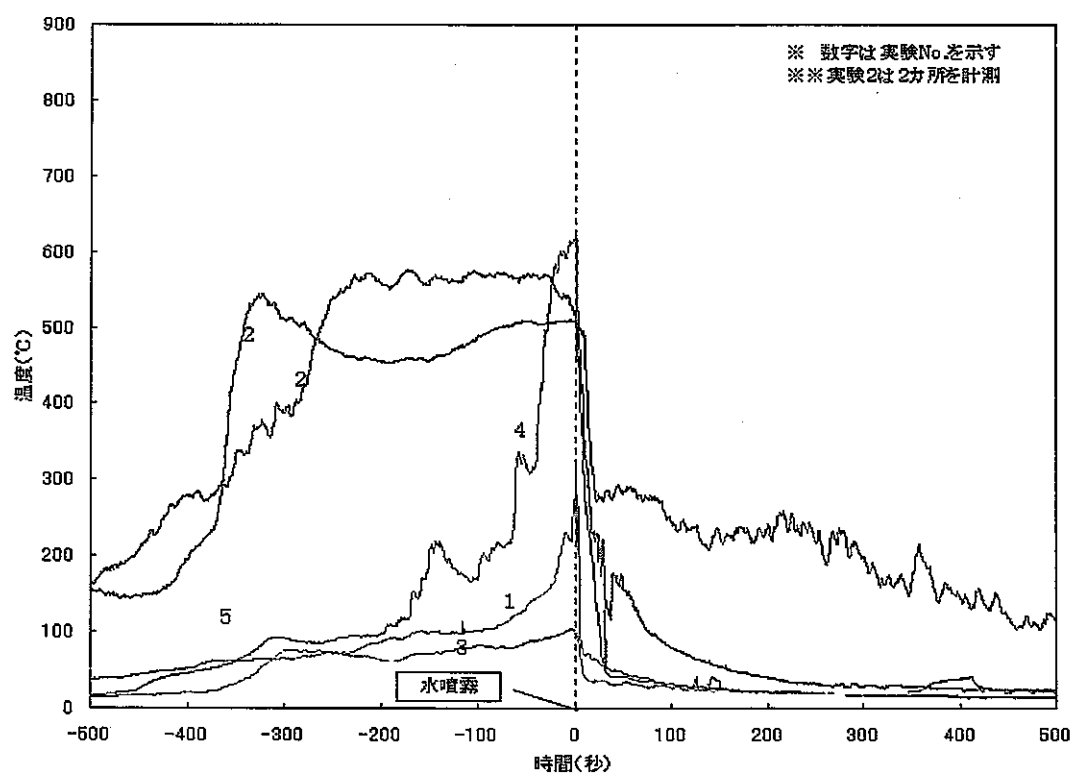


図4.3-4 木片+綿燃焼温度推移（容器保管棚上段）

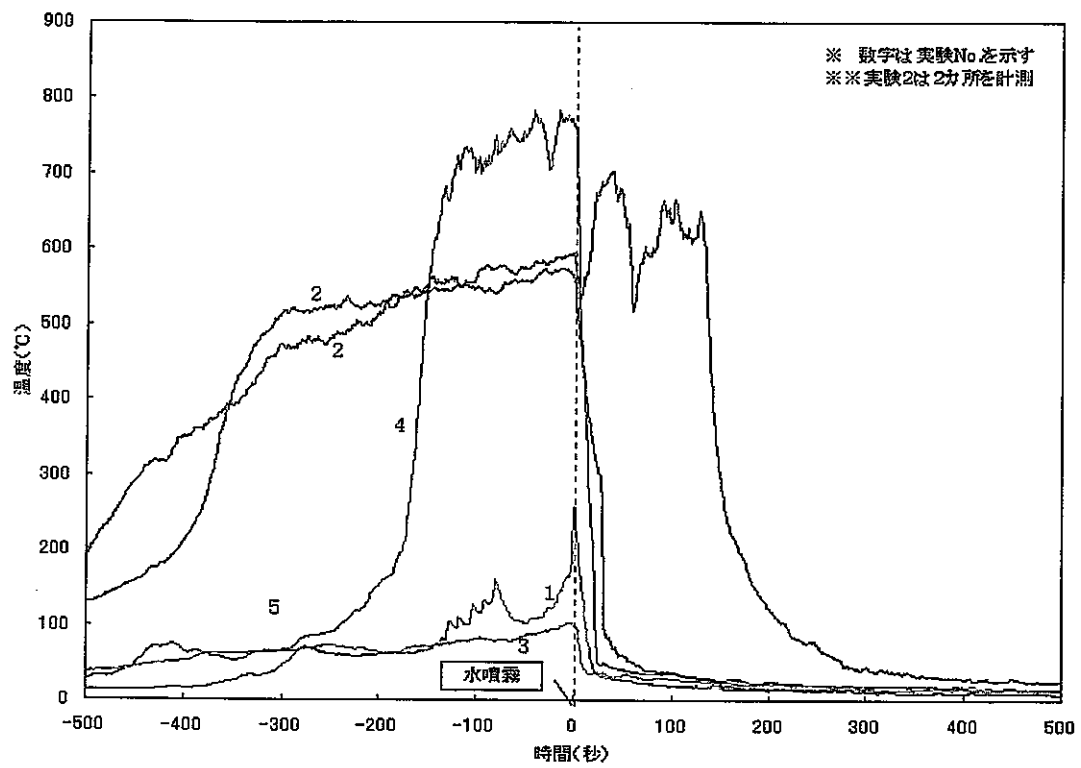


図4.3-5 木片+綿燃焼温度推移 (容器保管棚中段)

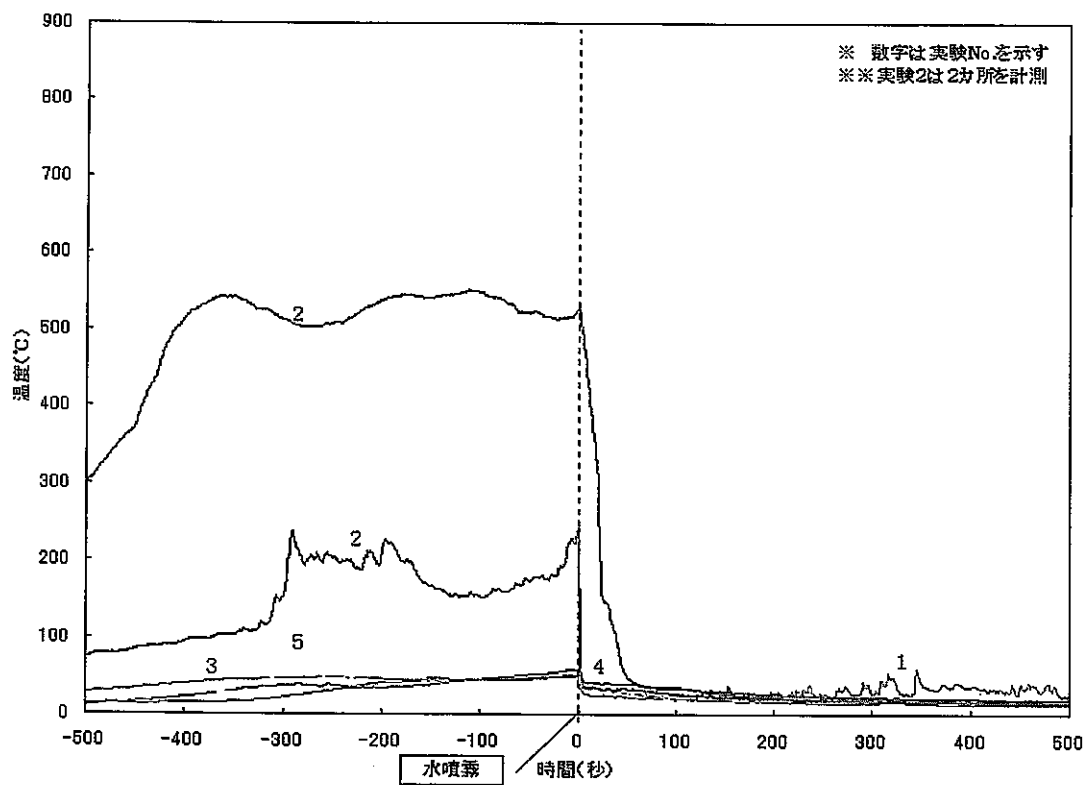


図4.3-6 木片+綿燃焼温度推移 (容器保管棚下段)

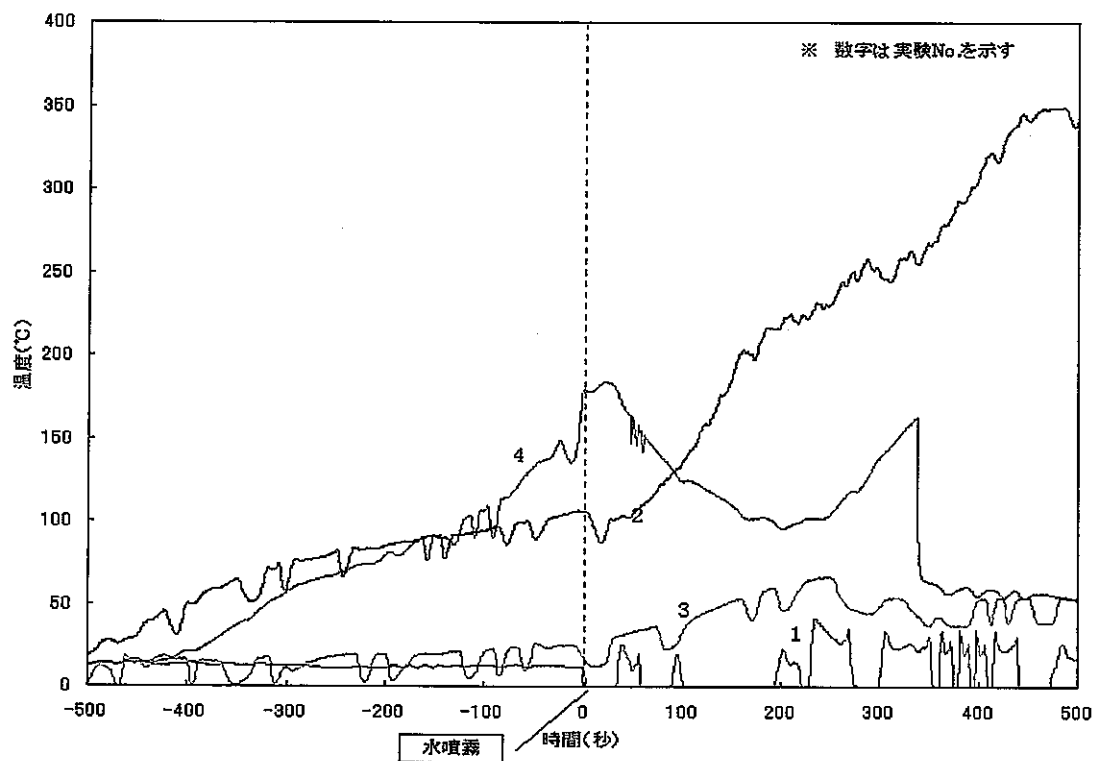


図4.3-7 燃焼物内部の温度推移（木片+綿、容器保管棚上段）

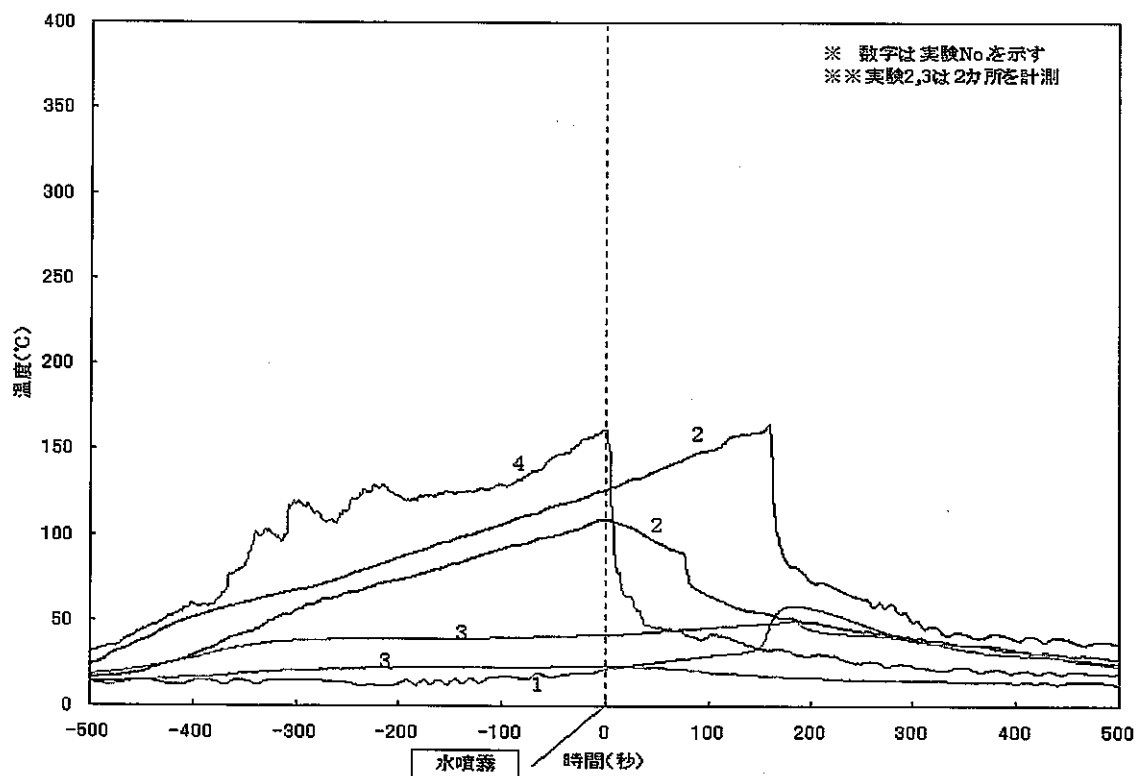


図4.3-8 燃焼物内部の温度推移（木片+綿、容器保管棚中段）

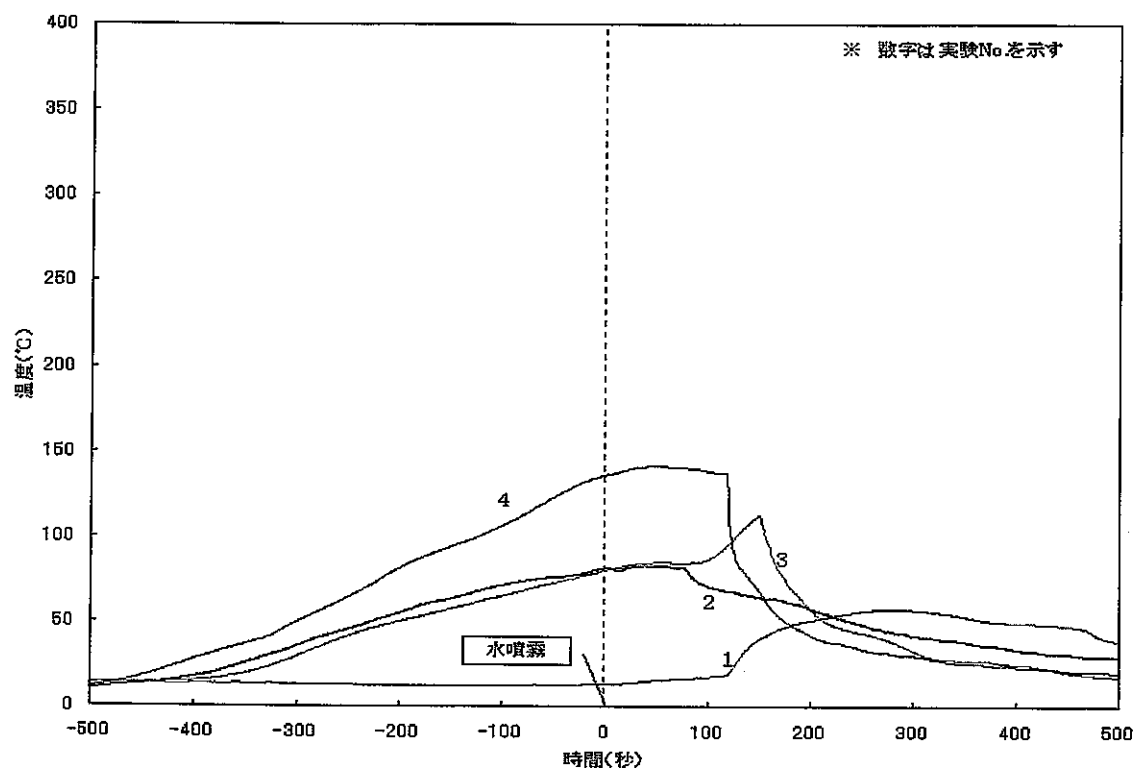


図4.3-9 燃焼物内部の温度推移（木片+綿、容器保管棚下段）

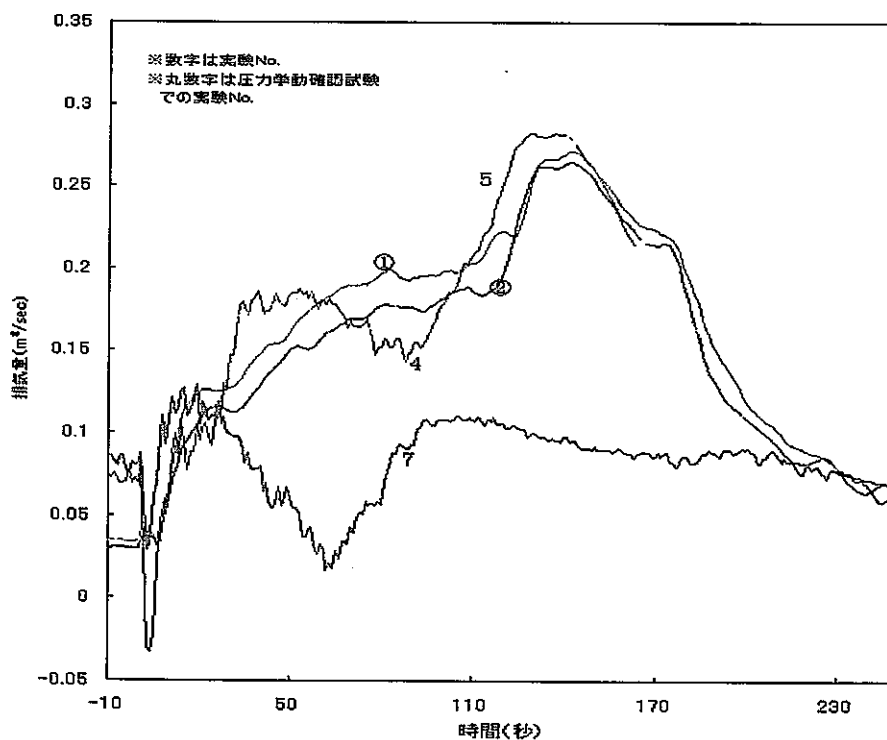


図5-1 各試験における室内圧力の変化

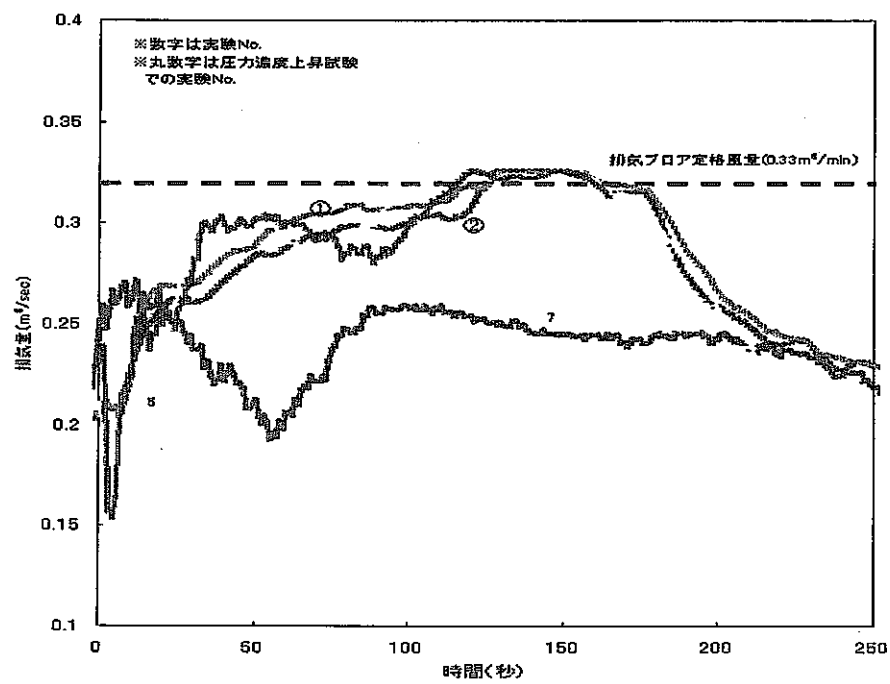


図5-2 各試験における排気流量推移

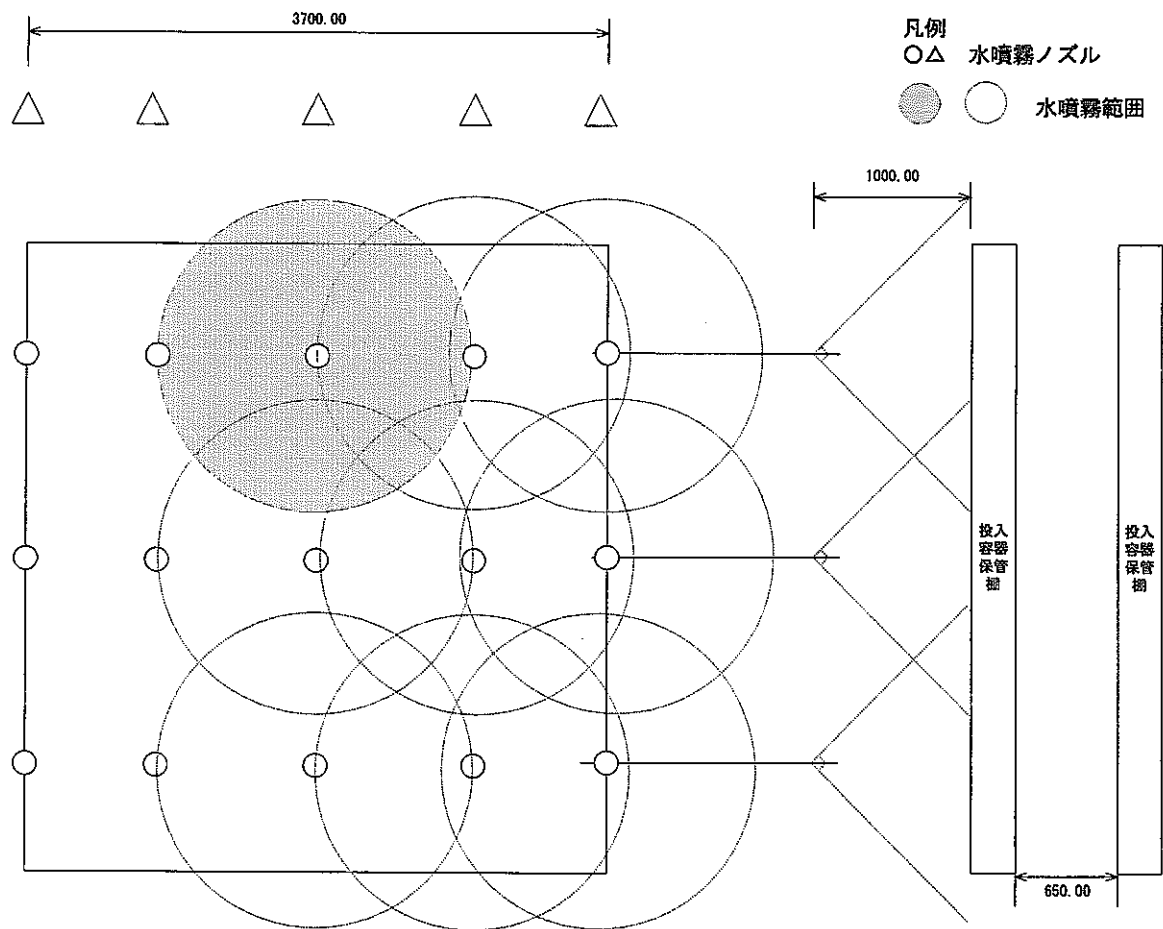


図5-3 投入容器保管庫の水噴霧ノズル配置

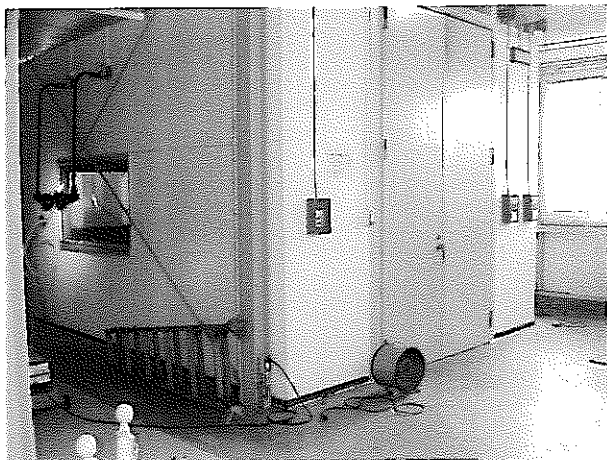


写真 2. 3-1 実験室全体外観

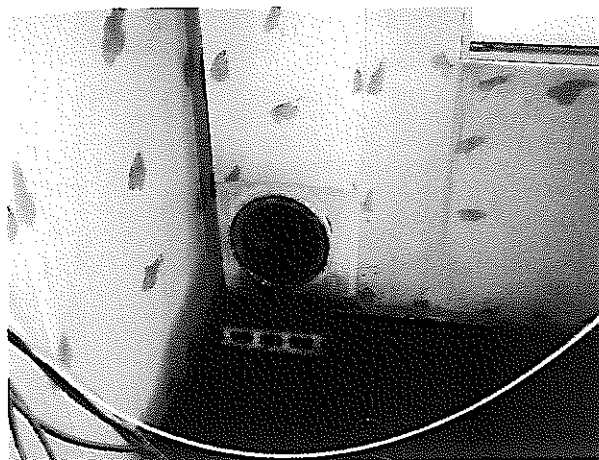


写真 2. 3-2 実験室排気口

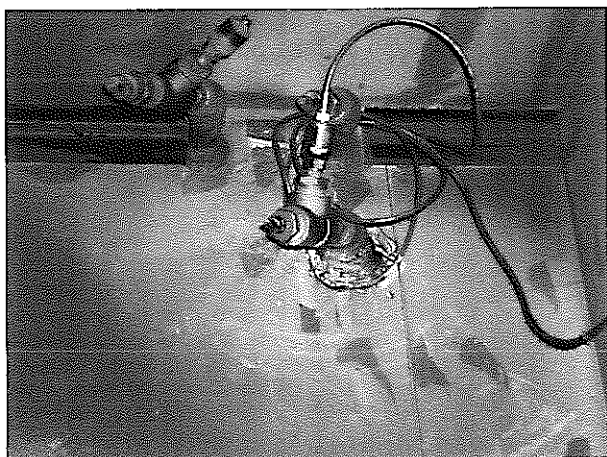


写真 2. 3-3 ノズル(TF14FC)



写真 2. 3-4 水噴霧用ポンプ

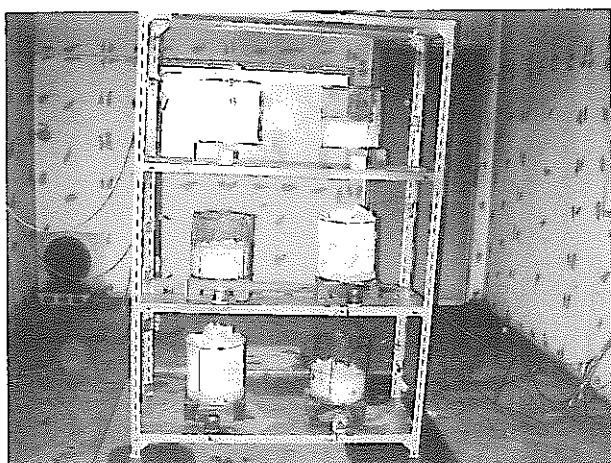


写真 3. 2-1 燃焼物配置状況

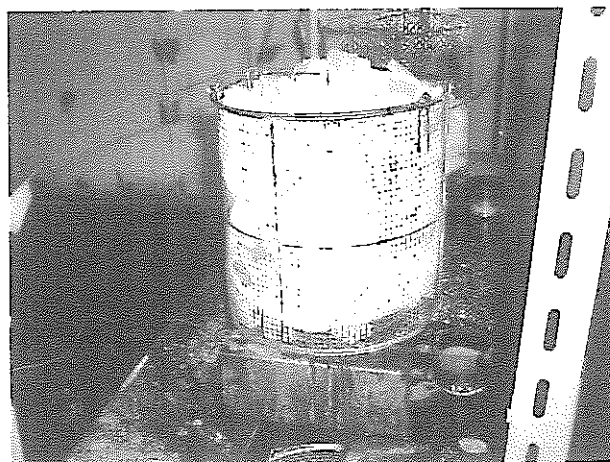


写真 3. 2-2 木片+綿

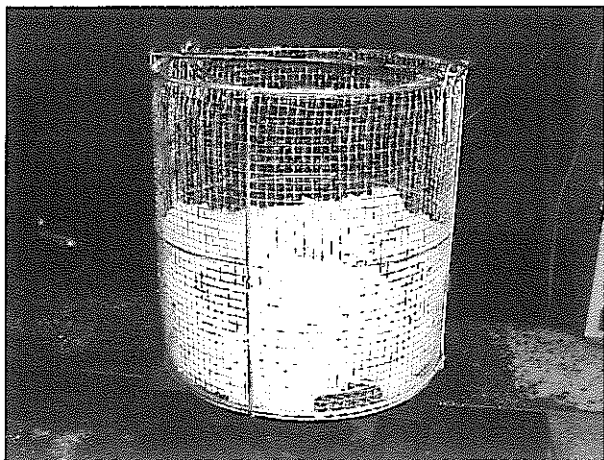


写真3.2-3 ポリエチレン

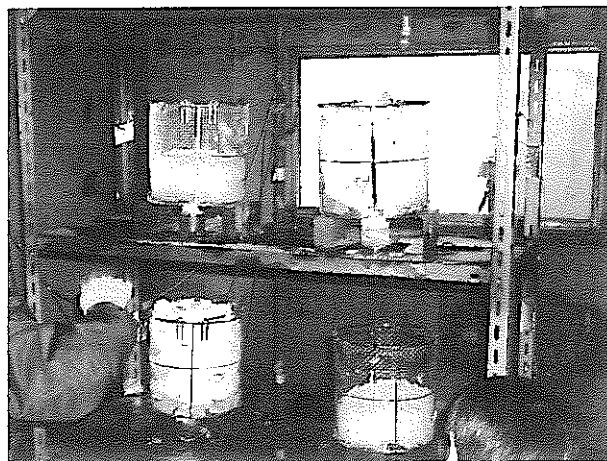


写真3.2-4 着火状況



写真4.2-1 燃焼状況 (1)



写真4.2-2 燃焼状況 (2)

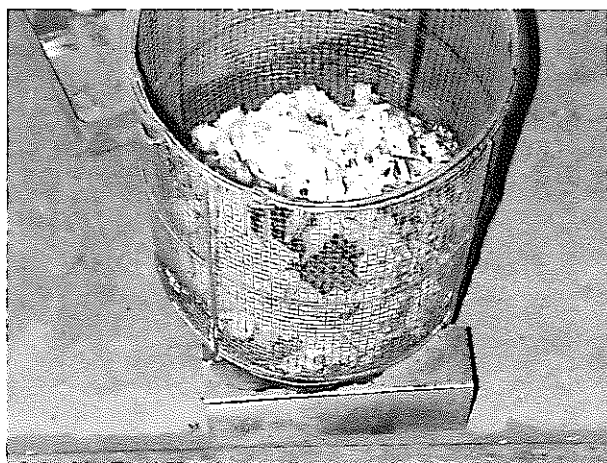


写真4.2-3 ポリエチレン消火後

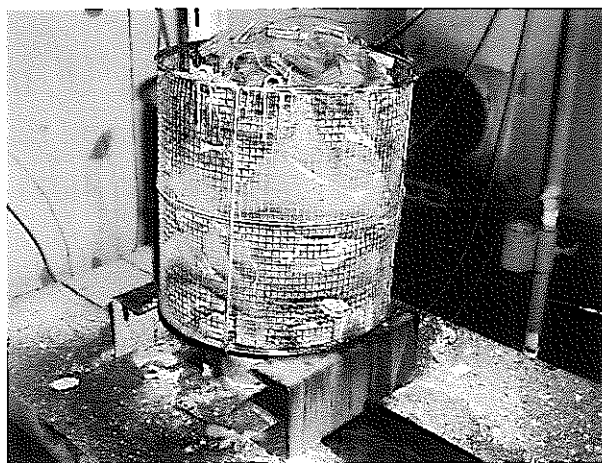


写真4.2-4 木片+綿消火後

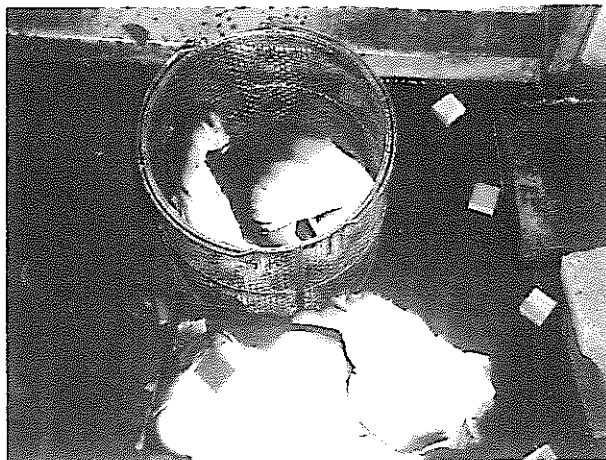


写真 4. 2-5 木片+綿内部消火後



写真 4. 2-6 消火後の綿

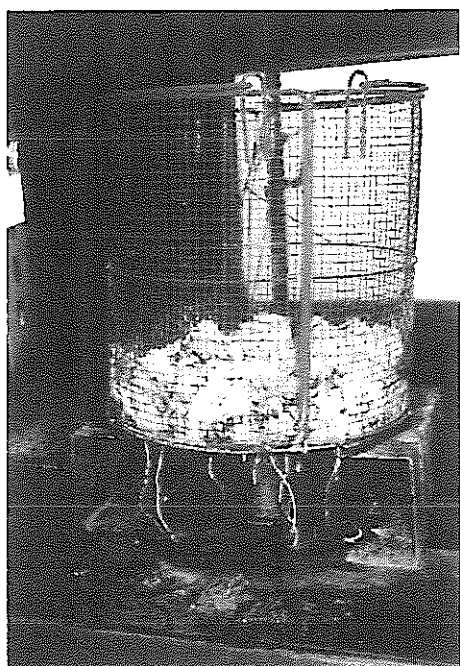


写真 4. 2-7 ポリエチレン内部消火後

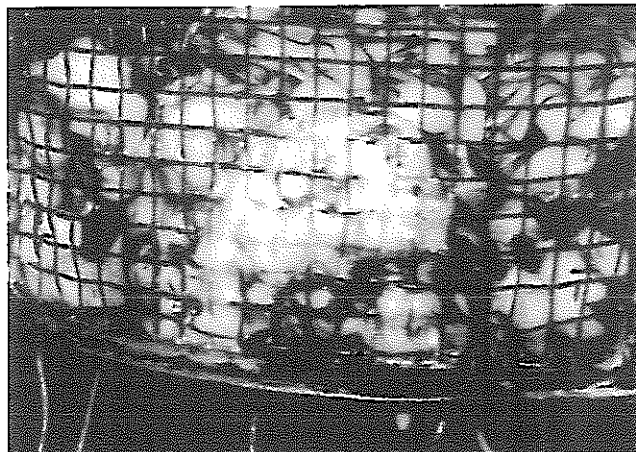


写真 4. 2-8 消火後のポリエチレン



写真 4. 2-9 実容器の燃焼状況

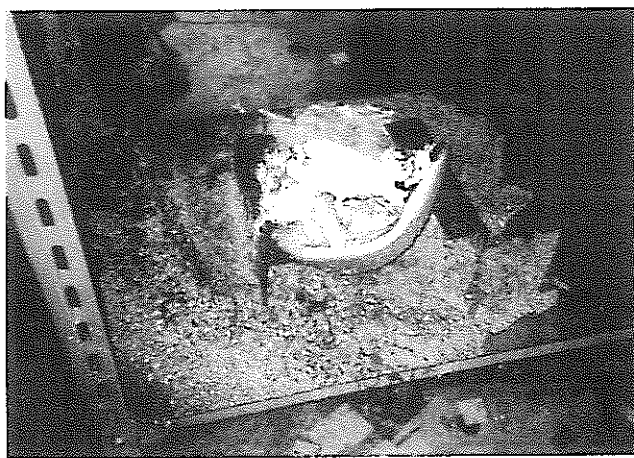


写真 4. 2-10 消火後の実容器（ポリエチレン）

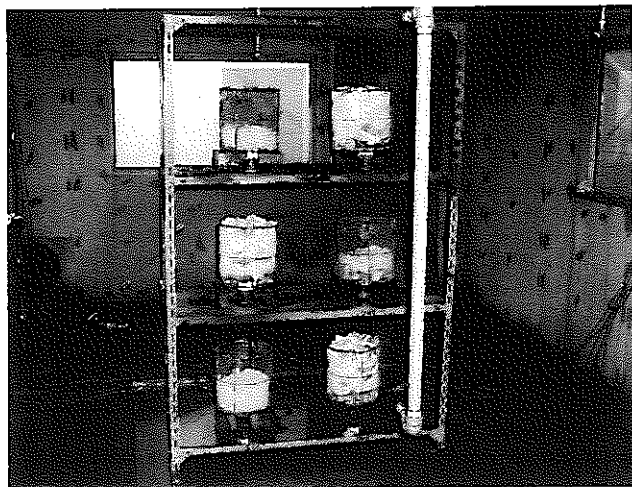


写真 4.3-1 水噴霧消火試験 着火直後



写真 4.3-2 水噴霧消火試験 燃焼状況 (1)

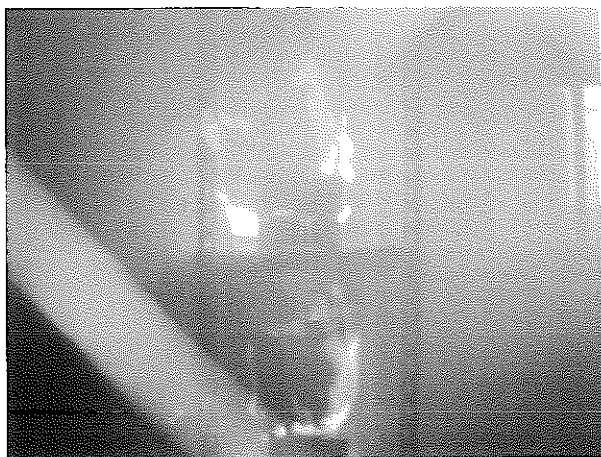


写真 4.3-3 水噴霧消火試験 燃焼状況 (2)



写真 4.3-4 水噴霧消火試験 水噴霧状況



写真 4. 3-5 水噴霧終了後の木片+綿

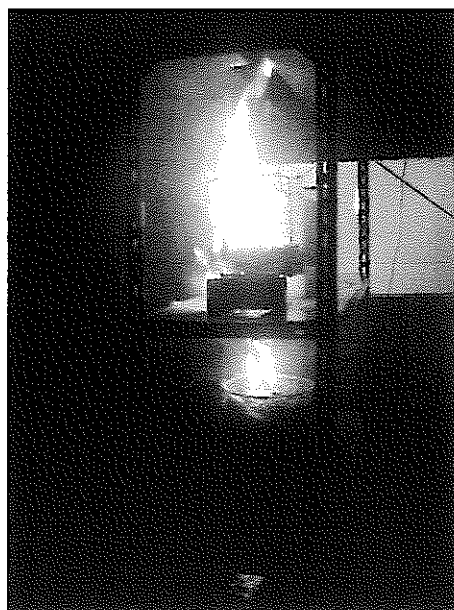


写真 4. 3-6 水噴霧完了後 ポリエチレン燃焼

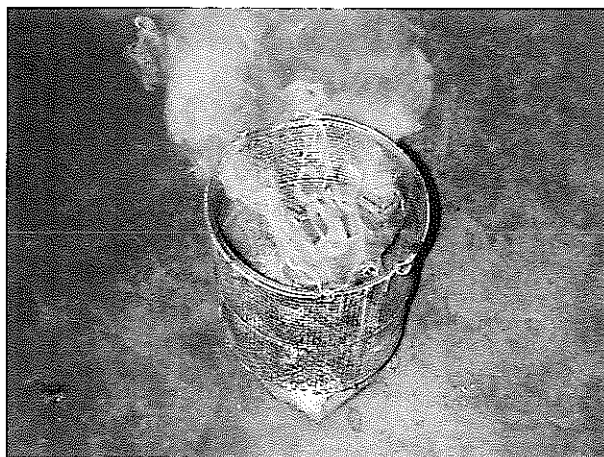


写真 4. 3-7 噴霧 20 分後の木片+綿（上段）

燃焼物の選定について

1. 目的

廃棄物中の内容物による燃焼試験・消火試験を行い、最もセル内火災に寄与する燃焼物を、個別に着火及び消火し、可燃物および難燃物をそれぞれ1種類ずつ選定する。選定された可燃物および難燃物は液化ガス消火試験で使用する。

2. 燃焼物選定方法

燃焼物選定試験は、LEDF で取り扱う各対象物の着火確認、着火した燃焼物の消火確認である。

(1) 試験に使用する燃焼物

LEDFで取扱う可燃・難燃物を対象物として、以下の10種類を燃焼性確認の対象とした。

- ①アニオン樹脂 ⑥チャコール
- ②カチオン樹脂 ⑦紙
- ③アクリル ⑧綿
- ④ポリエチレン ⑨酢酸ビニール
- ⑤PVC ⑩ゴム

なお、紙、綿は燃焼することが明らかなため、消火試験のみ行う。

また、ゴムは、ニトリルゴム（NBR）とした。

(2) 着火方法

可燃・難燃物の性状（着火性）に応じた下記の着火方法を採用する。

① 容易に着火する燃焼物

対象：紙、綿

着火方法：着火用器具（ライター等）で着火

② 通常の燃焼物

対象：アクリル、ポリエチレン、PVC（第1回試験）、酢酸ビニール、ゴム

着火方法：オイルパン（φ10cm×10cmH）に入れたn-ヘプタン（約50cc）を燃焼させ、着火

③ 着火し難い燃焼物

対象：アニオン樹脂、カチオン樹脂、PVC（第2回試験）、チャコール

着火方法：ガスバーナーで着火

(3) 着火試験

着火試験では(1)の燃焼物を金網の上に100gずつのせ、(2)着火方法に従い着火を行った後、各燃焼物の燃焼状況の目視確認及び各燃焼物の一定時間毎の温度測定を行った。

(4) 消火試験

消火試験では(1)の燃焼物の内着火したもの及び着火することが明らかな紙と綿を加えて着火

し、着火から 80 秒後、液化炭酸ガスを放出し、炭酸ガス濃度目標値 34%以上になるようにした。炭酸ガス濃度 34%到達後消火剤の放出を止め、その後 10 分間の放置時間を設け、その後換気し、炭酸ガス濃度が 1%以下になったことを確認の後、入室して各燃焼物の消火状況の目視確認及び実験室の一定時間毎の炭酸ガス濃度の測定を行う。

(5) 燃焼温度

燃焼物の上1cm程度に熱電対を置き、温度変化を記録する。

3. 燃焼物選定試験結果

(1) 第1回燃焼物選定試験結果

①着火試験結果

着火試験は合計 2 回実施し、第 1 回着火試験では紙および綿を除いた 8 種類について行った。それぞれ 8 種類を金網の上に載せ、(2) 着火方法に従い着火の確認を行った。

第 2 回着火試験では第 1 回の試験で着火しなかった PVC、アニオン樹脂、カチオン、チャコールについて再度着火の確認を行った。

PVC は第 1 回試験では着火後、すぐに自然に消えたため「着火しなかった」ものとした。試験結果を表-1 に示す。8 種類の内、着火したものはアクリル、ポリエチレン、酢酸ビニール、ゴム、PVC の 5 種類であった。

アクリル、ポリエチレン、酢酸ビニールは燃焼挙動に有意な差は見られなかった。アニオン樹脂およびカチオン樹脂はガスバーナーによる燃焼で、樹脂粒が赤熱するが、離すとすぐに冷めた。チャコールもアニオン樹脂カチオン樹脂と同様の挙動を示した。PVC は着火した後、消火性のガスを放出し、自己消火する挙動が確認できた。ゴム (NBR) は、燃焼により次第に炭化していった。

②消火試験結果

試験結果を表-1 に示す。熱電対で測定した燃焼物の温度及び炭酸ガス濃度を図-2 に示す。炭酸ガス濃度が十分に下がったのを確認してから入室し消火状況を確認した。綿以外は全て消火されていたことを確認した。綿は、液化炭酸ガス放出直後は室内が水蒸気や炭酸ガス等の白煙で可視できないが、換気に伴って室内が可視できるようになると少し煙が確認できた。換気が進むに従い煙の量は徐々に多くなり、入室後の消火状況確認時では中心部の赤熱が確認できた。

チャコールについては、着火せず、炭酸ガスの放出前にすでに消火されていた。

なお、綿、チャコール、ポリエチレンについては熱電対の位置の関係から温度を確認できなかった。

(2) 第2回燃焼物選定試験結果

①着火試験結果

試験結果を表-2 に示す。結果は第 1 回試験と同様であった。

ただし、PVC は n-ヘプタンに代わりガスバーナーを使用した。第 1 回試験と同様に着火後ガスバーナーの炎を離すと自然に消火した。

②消火試験結果

試験結果を表-2 に示す。結果は全て消火できた。

消火試験時の各燃焼物の温度および炭酸ガス濃度を図-3 に示す。燃焼の挙動は第 1 回試験と同様

であるが、綿は入室後の確認でも赤熱部は確認できなかった。

4. 考 察

- ① 表-1 に示すとおり、第 1 回消火試験で綿が消火剤放出完了後、徐々に煙の発生量が多くなってきたのは、深部に高温部が残っており、この高温部が徐々に延焼してきたためと考えられる。炭酸ガス保持時間中の炭酸ガス濃度は、図-2 の炭酸ガス濃度から分かるとおり、ほとんど変化していないと思われる。これに対し、第 2 回消火試験では、完全に消火したがこれは燃焼が深部に達せず、内部が高温とならなかったためと思われる。
- ② チャコール、アニオン樹脂樹脂、カチオン樹脂は、今回は着火できなかったが、周囲に大量の発熱がある場合は、熾きの状態で燃焼すると考えられる。ただし、綿と木片の方が熾き状態になりかつ燃焼性も強いと思われる。
- ③ 紙についても本のように重なる状態にあれば、深部火災となる可能性もあるが、投入容器の中ではそのような状態にならないと考える。
- ④ アクリル、ポリエチレン、酢酸ビニールについては、燃焼試験、消火試験において、有意な差は確認されなかった。したがって本試験では廃棄物中にもっとも多く含まれると思われるポリエチレンを使うこととする。

5. 消火試験で用いる燃焼物について

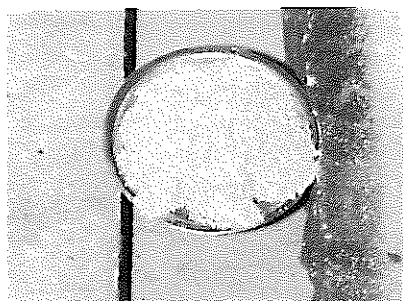
- ① 液化ガス消火試験、水噴霧試験で使用する難燃・可燃物は以下の通りとする。
 - a) 深部火災となりやすいように木片と綿を組み合わせる。
 - b) LEDFにおける使用量が多く、よく燃えるポリエチレンを選定する。
- ② 燃焼物の組み合わせ及びその量は以下の通りとする。

可燃物	仕 様	数量
ポリエチレン	寸法：30mm×30mm ^{*1} 厚さ 1mm 重量：1.5kg	3
木片+綿	木片： 寸法：合板 30mm×30mm ^{*1} 厚さ 12mm ^{*2} 重量：0.8kg 脱脂綿： 仕様：市販品 重量：0.5kg ^{*3}	3

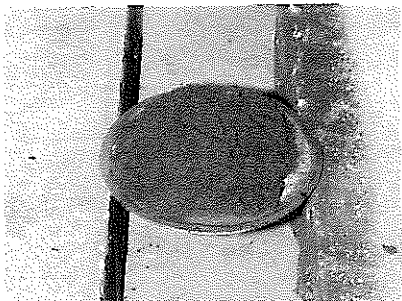
*1：現設計では、前処理セルの破砕機で破砕された後、投入容器に充填されるため 30mm×30mm に細断することとした。

*2：LEDFへ持ち込まれる木片は、フィルタケーシングが主体であるため、その材料である合板とした。

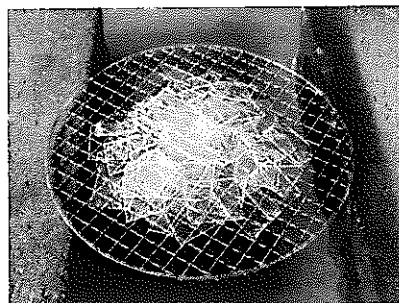
*3：脱脂綿は、ステンレスカゴ、容器から溢れないよう 0.5kg 充填とした。



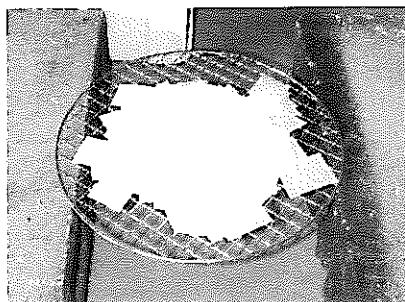
イオン交換樹脂 (アニオン)



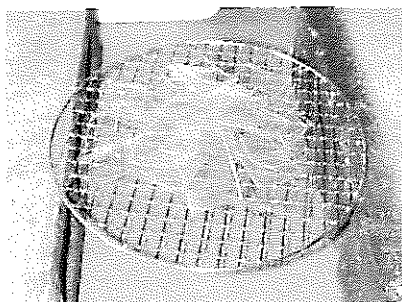
イオン交換樹脂 (カチオン)



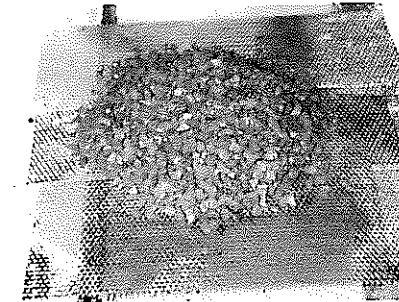
アクリル



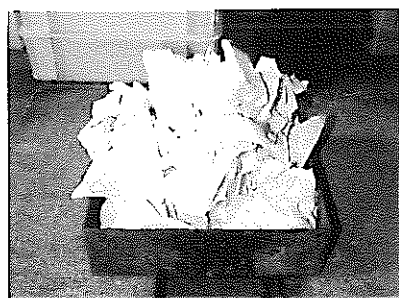
ポリエチレン



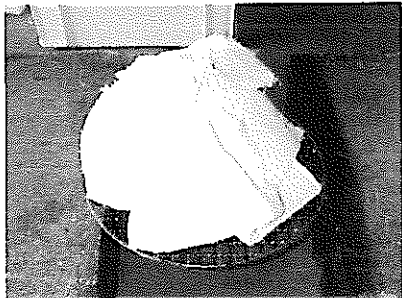
PVC



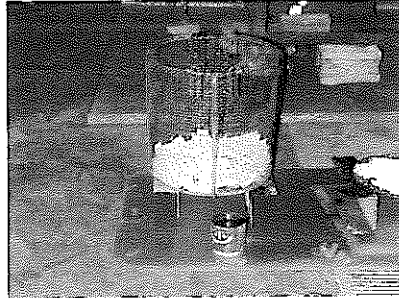
チャコール



紙



綿



酢酸ビニール



ゴム (NBR)

図-1 燃焼物

表-1 可燃・難燃物燃焼性確認（着火試験、消火試験）

試験項目	仕様	第1回着火試験		第1回消火試験		備 考
		試験実施	試験結果	試験実施	試験結果	
①アニオン樹脂	重量：61g*2) 品名：IPV 付500	○	ガスバーナーの炎でも着火せず。1つ1つ離れた周囲の粒だけが赤熱しすぐ消える状態。粒が積層した部分は赤熱しない。	—	—	1) 水分 50%含有の材料であるため、乾燥後に燃焼試験を実施 2) 着火しなかったため、消火試験を実施せず
②カチオン樹脂	重量：66g*2) 品名：IPV 付250	○	ガスバーナーの炎でも着火せず。1つ1つ離れた周囲の粒だけが赤熱しすぐ消える状態。粒が積層した部分は赤熱しない。	—	—	1) 水分 50%含有の材料であるため、乾燥後に燃焼試験を実施 2) 着火しなかったため、消火試験を実施せず
③アクリル	寸法：11×3cm□ 重量：60g	○	着火	○	消火	1) 酸素指数 18.8%
④ポリエチレン	寸法：11×3cm□ 重量：60g	○	着火 (燃焼に伴い、液状化する)	○	消火	1) 酸素指数 17.4%
⑤PVC	寸法：11×3cm□ 重量：60g	○	自己消火 着火するが、消火性のガスによりすぐに消火する	—	—	1) PVC の酸素指数*1) は 21%であり、かつ自己消火性があり着火しなかったものと思われる。 2) 自己消火を確認したため、消火試験を実施せず
⑥チャコール	重量：60g 粒径：3～5mm	○	ガスバーナーの炎で一端炎が立ち上がるがすぐに消え、そのまま熾き状態となる。但し、延焼せずに、自然に鎮火した。	○	ガスバーナーで燃焼させようとしたが、着火せず。また、熾き状態も持続せず、消火剤放出前に鎮火	1) 炭素 90%の材料である。炎は殆ど発生せずに、熾き状態となるが、熾き状態を維持するためには、周囲に大きな発熱体を配置する必要がある。 2) 着火しなかったが、熾き状態であれば高温状態が続くものと考え、消火試験を実施
⑦紙	普通紙A4×14枚 重量：60g	—	—	○	消火	1) 着火することが明らかなため、着火試験は実施せず
⑧綿	綿 100% 10cm×15cm の綿 6.5 枚 重量：60g	—	—	○	消火剤放出完了後、煙が発生。また、徐々に煙の量が多くなり、赤熱（熾き）部分が確認された。	1) 着火することが明らかなため、着火試験は実施せず
⑨酢酸ビニール	寸法：11×3cm□ 重量：60g	○	着火 (燃焼に伴い、液状化する)	○	消火	
⑩ゴム (判別済)	寸法：11×3cm□ 重量：60g	○	着火	○	消火	1) 燃焼により炭化する。

* 1 : 酸素指数=O₂濃度/(O₂濃度+N₂濃度)、窒素を加えて行き着火しなくなった時の値。酸素指数は、着火性を評価する指標で、値が小さいほど着火しやすい材料といえる。

* 2 : 100℃の恒温槽で約2日乾燥させた物を使用。乾燥前後の重量変化は、アニオン：100g→61g、カチオン：100g→66gであった。

第1回消火試験では着火試験で着火しなかったPVC、アニオン樹脂、カチオンを除き、紙と綿を加えた7種類に対して行った。チャコールについては、一度着火すると消えにくいと考えられたため、再度試験に加えた。

表-2 第2回 可燃・難燃物燃焼性確認（着火試験、消火試験）

試験項目	仕様	第2回着火試験		第2回消火試験		備 考
		試験実施	試験結果	試験実施	試験結果	
①アニオン樹脂	重量：61g*2) 品名：AN 付 500	○	炎はほとんど出ずに、バーナーであぶった表面だけ赤熱し、すぐ鎮火	—	—	着火しなかったため、消火試験を実施せず
②カチオン樹脂	重量：65g*2) 品名：AN 付 250	○	炎はほとんど出ずに、バーナーであぶった表面だけ赤熱し、すぐ鎮火	—	—	着火しなかったため、消火試験を実施せず
③アクリル	寸法：11×3cm□ 重量：100g	—	—	○	消火	着火することが明らかなため、着火試験は実施せず
④ポリエチレン	寸法：11×3cm□ 重量：100g	—	—	○	消火	着火することが明らかなため、着火試験は実施せず
⑤PVC	寸法：11×3cm□ 重量：100g	○	一端着火するが自然消火	—	—	自己消火を確認したため、消火試験を実施せず
⑥チャコール	重量：100g 粒径：5mm	○	バーナーで2分以上あぶると熾き状態となった。	—	—	
⑦紙	普通紙A 4×14枚 重量：60g	—	—	○	消火	着火することが明らかなため、着火試験は実施せず
⑧綿	綿100% 10cm×15cmの綿6.5枚 重量：100g	—	—	○	消火	着火することが明らかなため、着火試験は実施せず
⑨酢酸ビニール	—	—	—	—	—	
⑩ゴム（判別済）	—	—	—	—	—	

* 1：酸素指数＝ O_2 濃度／（ O_2 濃度＋ N_2 濃度）、窒素を加えて行き着火しなくなった時の値。酸素指数は、着火性を評価する指標で、値が小さいほど着火しやすい材料といえる。

* 2：100℃の恒温槽で約2日乾燥させた物を使用。乾燥前後の重量変化は、アニオン：100g→61g、カチオン：100g→65gであった。

第2回消火試験では、第1回消火試験の結果から、チャコール、酢酸ビニール、ゴムを除いた4種類に対して試験を行った。対象を限定した理由は以下の通りである。

- ・ チャコールは容易には着火困難であった。
- ・ 酢酸ビニールはポリエチレンと同様の燃焼挙動を示した。
- ・ ゴムは着火するが、燃焼に持続性がなく消火しやすい

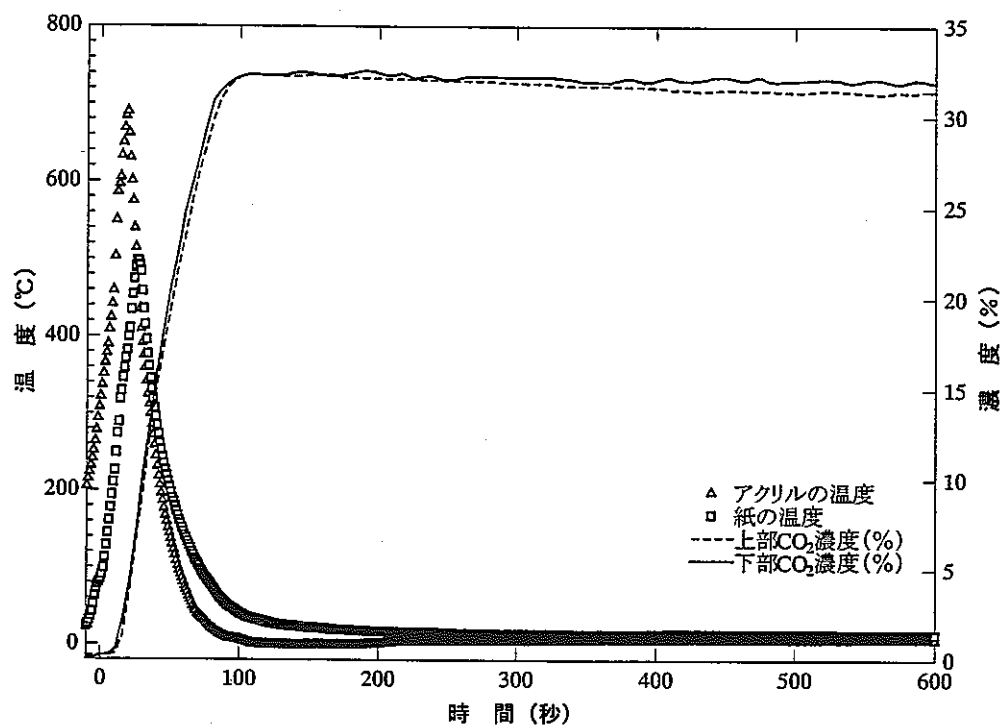


図-2 燃焼物の温度推移及び実験室内の炭酸ガス濃度 (第1回)

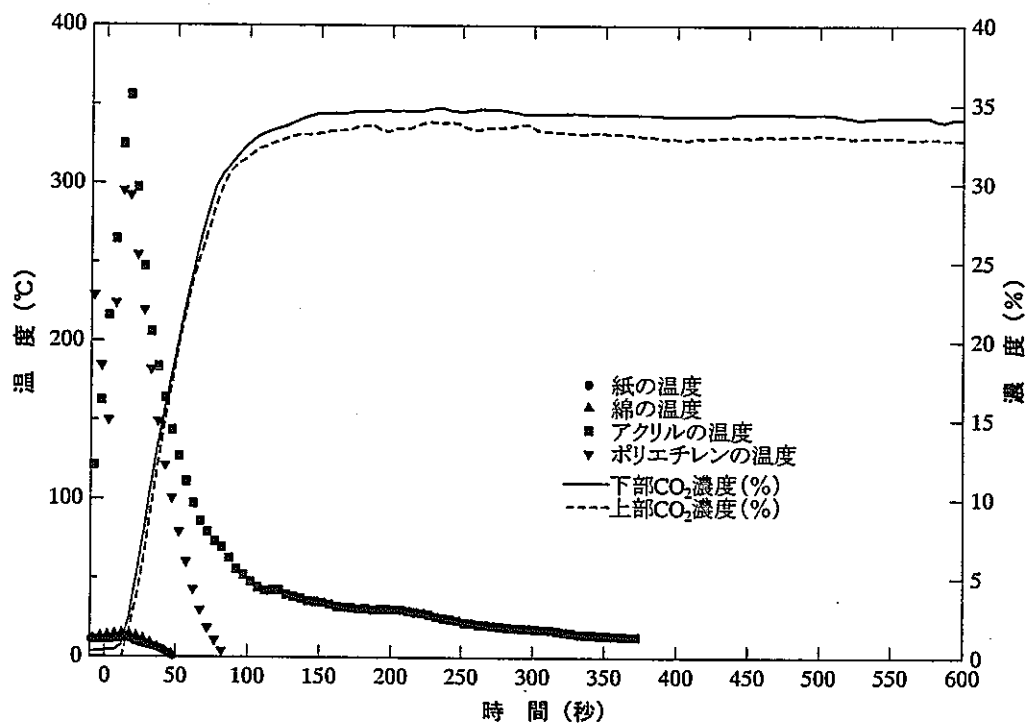


図-3 燃焼物の温度推移及び実験室内の炭酸ガス濃度 (第2回)

炭酸ガス噴射ヘッドの放出特性について

1. 目的

液化炭酸ガス消火設備は、極低温度液体を消火対象室に放出するため、放出開始後の流量調節はできない構造となっている。一方、本試験では負圧を維持しつつ炭酸ガス濃度を34%以上に上げる必要があるため、排気流量に対応した放出ノズルを選定する必要がある。本検討では実験の基準となる放出ノズルの決定を行った。

2. 噴射ヘッドの検討

基準ノズルの選定については、炭酸ガス消火設備の圧力損失計算式⁽³⁾により計算した。基準ノズルによる平均放出率と消火のために必要な炭酸ガス濃度34%に達すると考えられる概略時間を表1に示す。

消火の際に負圧を保って液化炭酸ガスを放出するためには、セルと同じ負圧-20mmAq(セルとトランスファ一元との差圧が-20mmAq程度)を維持できるTF10FC噴射ヘッドを使用することとした。ただし、計算は規格により20℃が基準であり、実験時の気温では計算結果より小さくなるため、TF10FCで予備的に放出率を確認し、必要があれば、別の噴射ヘッドを使用することとした。

3. 噴射ヘッドの放出特性の確認

(1) TF10FC噴射ヘッドによる炭酸ガス放出特性

給気を調整し、実験室内圧力を-20mmAq程度としてから液化炭酸ガスを放出した。TF10FCによる液化炭酸ガスの放出重量と噴射ヘッド圧力の測定結果を図-1に示す。気温は約10℃であり、液化炭酸ガス45kgの放出時間は約130秒であった。比容積0.55m³/kg(20℃)とすると炭酸ガス放出率は0.19m³/secとなった。

なお、ヘッド圧力およびガス残量の変化率が130秒付近で変わる現象は、液化炭酸ガスが液体の状態から、気化した炭酸ガスと液体のままの炭酸ガスが混合した状態(気液混合状態)へと変化するために起こるものと思われる。図-2にTF10FCによる実験室内の温度変化と室内圧力挙動を示す。室内温度は140秒付近を境に下降から上昇に転じる。室内圧力は液化炭酸ガス放出直後は若干下降するが、徐々に立ち上がり、-13~-10mmAqのところで安定する。再び125秒付近から急激に立ち上がり、145秒付近でピークを迎えその後下降する。

(2) TF14FC噴射ヘッドによる炭酸ガス放出特性

TF10FC噴射ヘッドでは炭酸ガスの放出率が小さいため、負圧が深くなりすぎる傾向が考えられる。そこで、噴口面積がTF10FCの2倍であるTF14FC噴射ヘッドによる放出試験を行った。TF10FCによる液化炭酸ガスの放出重量の測定結果を図-3に示す。液化炭酸ガス45kgの放出時間は約70秒であった。炭酸ガス放出率は0.35m³/secとなり、-20mmAqのときの排風量は0.3m³/sec程度と近いので、TF14FC噴射ヘッドを用いて試験を行う。また、今回は炭酸ガス濃度の測定も行っており、液化炭酸ガスの放出終了時点で炭酸ガス濃度は約30%前後であった。図-4にTF14FCによる実験室内の温度変化と室内圧力挙動を示す。TF10FCに比べ噴口面積が2倍(22.1mm²)となるため、室内温度は65秒から底となり

80 秒付近から上昇する。室内圧力は TF10FC と同様に、液化炭酸ガス放出直後は若干下がるが、徐々に立ち上がり、 $-38 \sim -32 \text{ mmHg}$ のところで安定する。再び 60 秒付近から急激に立ち上がり、75 秒付近でピークを迎えその後下降する。

表-1 噴射ヘッド性能

ノズルコード番号	型式記号	ノズル噴口面積 mm^2	平均放出率 m^3/s	放出時間 s
23	TF10FC	11.0	0.302	83
26	TF12FC	15.9	0.399	63
29	TF14FC	22.1	0.513	49

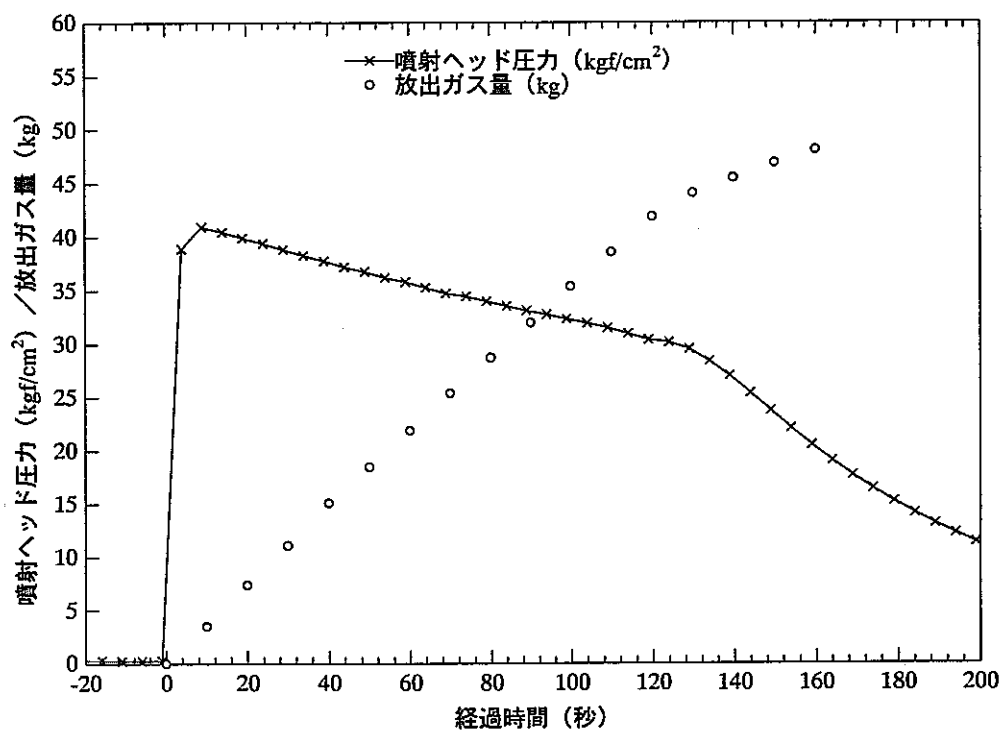


図-1 TF10FC による液化炭酸ガス放出特性

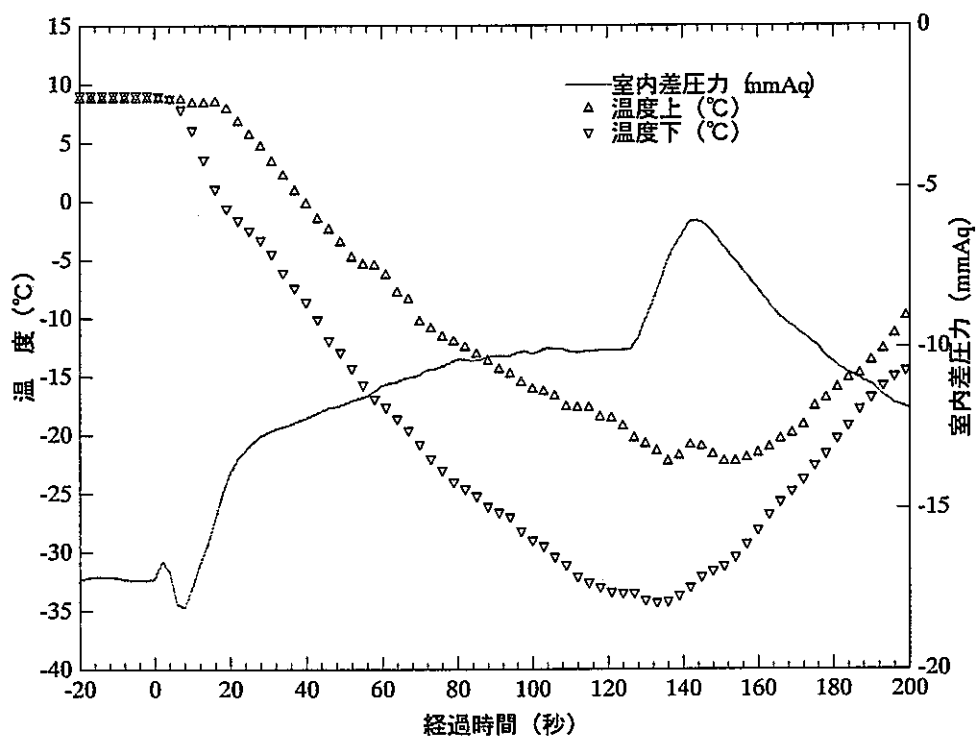


図-2 TF10FC 液化炭酸ガス放出による室内温度変化と室内圧力挙動

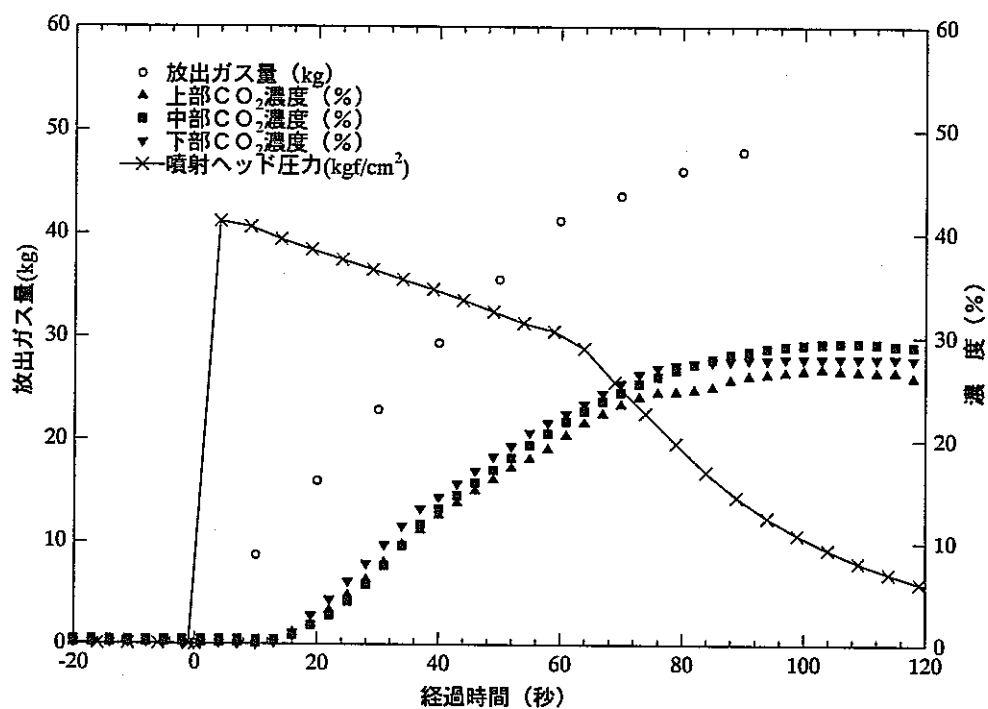


図-3 TF14FC による液化炭酸ガス放出特性

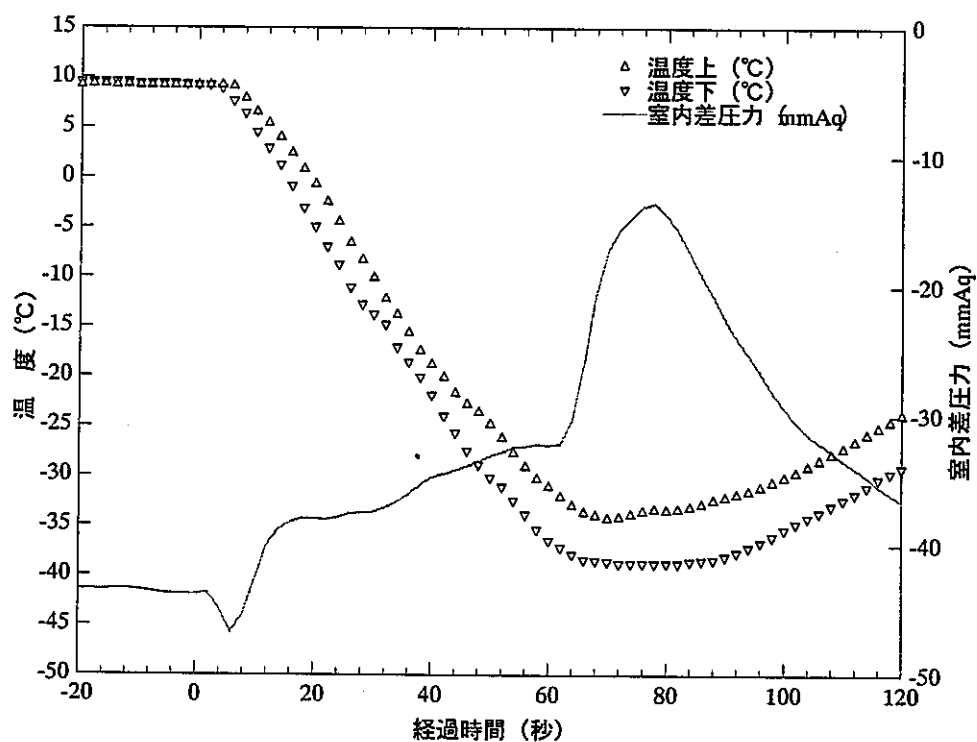


図-4 TF14FC 液化炭酸ガス放出による室内温度変化と室内圧力挙動

圧力変動のメカニズムについて

1. 目的

圧力挙動確認試験及び液化ガス消火試験で得られた実験室内の圧力変動データから、実験室内の圧力変動原因を検討する。

2. 圧力変動のメカニズムの検討について

(1) 圧力挙動確認試験における圧力変動について

第1回圧力濃度上昇試験における室内温度、室内負圧および液化炭酸ガス放出量を図-1に示す。各時間間隔における温度および液化炭酸ガス放出量の直線近似も同時に示す。なお、液化炭酸ガス放出量は、累積の放出量である。

室内圧力を低くする要因は、排気量と給気量の収支差による圧力降下と温度下降による気体の収縮からの圧力降下がある。

時間間隔 10～60 秒では液化炭酸ガスの放出重量から、室温-20℃として計算すると、炭酸ガス放出量 V_{CO_2} は、

$$V_{CO_2} = 0.33 \text{ m}^3/\text{s}^{1)}$$

温度降下を上部と下部の平均とした体積減少 V_{temp} は、

$$V_{temp} = 0.18 \text{ m}^3/\text{s}^{1)}$$

このときの室内負圧を-25mmAq とすると図-2 のグラフから排気量を v_{ex} 、漏れ込み量を v_l とすると、

$$v_{ex} - v_l = 0.17 \text{ m}^3/\text{s}^{1)}$$

$$\therefore V_{CO_2} - V_{temp} - (v_{ex} - v_l) = -0.02 \text{ m}^3/\text{s}$$

となり、排気が若干強くなっている。誤差等を考慮すると室内の圧力上昇を抑える方向に働いていると説明できる。

次に炭酸ガスの放出が緩やかになった放出後 120～150 秒あたりで上記と同様に室内の空気の容積バランスについて考察する。液化炭酸ガスの放出は終わり、気化した炭酸ガスが放出されているため温度変化はほとんど無いので、室温-55℃として計算すると、

$$V_{CO_2} = 0.18 \text{ m}^3/\text{s} \quad (-55^\circ\text{C})$$

$$V_{temp} \doteq 0.0 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$v_{ex} - v_l = 0.23 \text{ m}^3/\text{s}^{1)}$$

(-15mmAq)

$$\therefore V_{CO_2} - V_{temp} - (v_{ex} - v_l) = -0.05 \text{ m}^3/\text{s}$$

これは 10～60s の状態から比較すると排気が倍以上強くなっており、本来であれば負圧が深くなるはずであるが、逆に 120～130 秒にかけて急に浅くなる。

(2) 液化ガス消火試験における圧力変動について

第4、5、7回消火試験のデータを図-2～5にそれぞれ示す。第7回消火試験を除いて、圧力バランスは第1回圧力挙動試験と同様で、温度降下が見られる間は負圧が保たれているが、液化炭酸ガスの放出が減少して気液混合となり、温度降下がほとんど無くなったところに、同様に排気は強くなるが、負圧は圧力の上昇が見られる。

実際に燃焼物を使った消火試験のデータにおいても、ほぼ同様の傾向が得られる。ただし、温度は天井と壁各1点での測定のため詳細な温度変化による圧力の下降は不明である。

炭酸ガスの放出が少なくなり、温度降下がほぼ無くなったところに圧力上昇が見られる現象について考察する。圧力上昇がピークに達し、さらに時間が経過すると圧力は下降に転じる。この時、炭酸ガスの放出は緩やかながら続いており、炭酸ガスの放出量もあまり小さくなっていない。つまり炭酸ガスの放出と、圧力変化には時間遅れがあると考えられる。このような時間遅れの原因として、液体炭酸ガスがノズルから放出されるとその一部がドライアイスの塵（ダスト）となり、塵となった炭酸ガスが、徐々に気化するために時間遅れが出来るのではないかと考えられる。実際、試験中に白い塵のようなものが浮遊しているのが見られた。

一方、第7回の消火試験では他の試験と異なり気液混合状態における急激な圧力上昇は確認できていない。炭酸ガス放出割合は、0℃として、

$$v_{\text{CO}_2} = 0.19 \text{ m}^3/\text{s}^{1)}$$

室内圧力を-35mmAq とすると、

$$v_{\text{ex}} - v_{\text{f}} = 0.11 \text{ m}^3/\text{s}^{1)}$$

$$\therefore v_{\text{CO}_2} - (v_{\text{ex}} - v_{\text{f}}) = 0.08 \text{ m}^3/\text{s}$$

温度下降を考慮すると、明らかに炭酸ガス放出量の方が排気よりも多くなっているが、室内圧力挙動は急変動がなく安定している。これは、これまでの挙動の異なり、150～200秒にかけて、温度の変化はそれほど無く、炭酸ガス放出割合もほとんど変化していない。

3. 結 論

上記の試験結果及び考察を総合して考えた場合、炭酸ガスの放出割合が大きい場合、放出された炭酸ガスの一部はドライアイスとなって実験室床面に滞留し、温度変化が緩やか若しくは上昇に転じると滞留したドライアイスが昇華を始め、急激な圧力上昇が発生すると思われる。また、炭酸ガスの放出割合が比較的小さい場合は、床面に滞留するドライアイスが少ないため、同様に温度変化が緩やか若しくは上昇に転じ、ドライアイスが昇華を始めても十分に排気の方が多く、差圧が安定しているものと考えられる。ただし、上記は仮説であり今後試験を行い、挙動を解明していく必要がある。

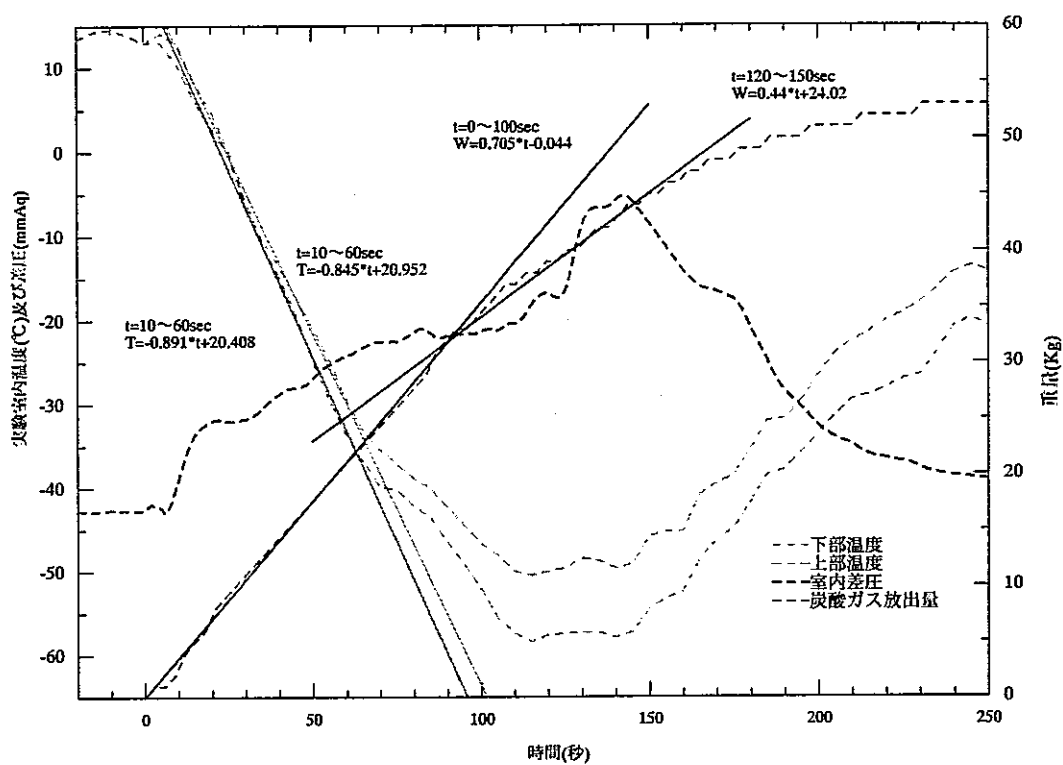


図-1 第1回圧力挙動確認試験

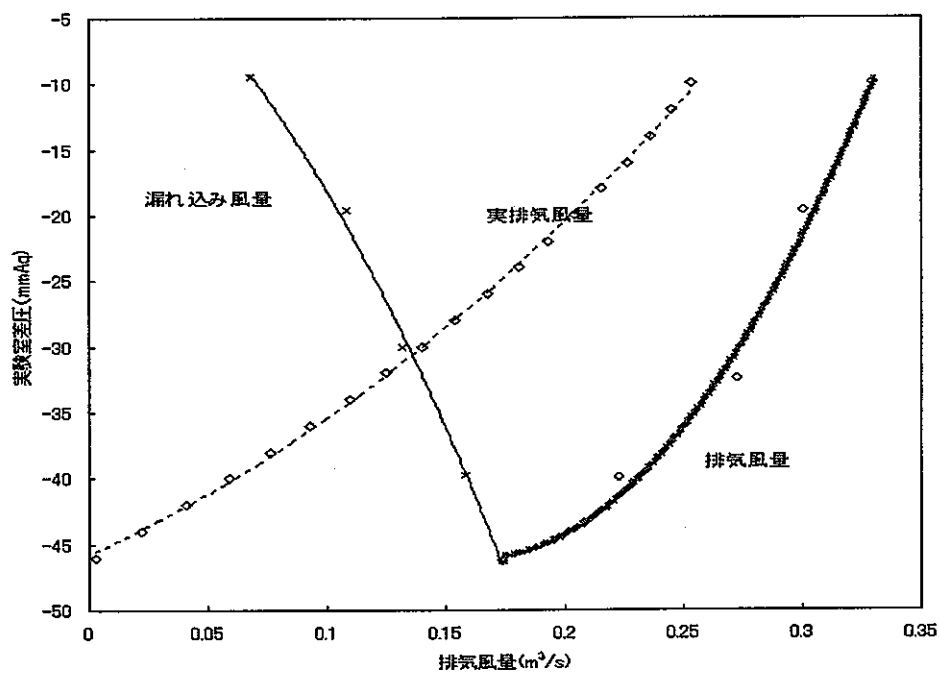


図-2 実験室空気漏れこみ量と排気プロア排気能力の関係

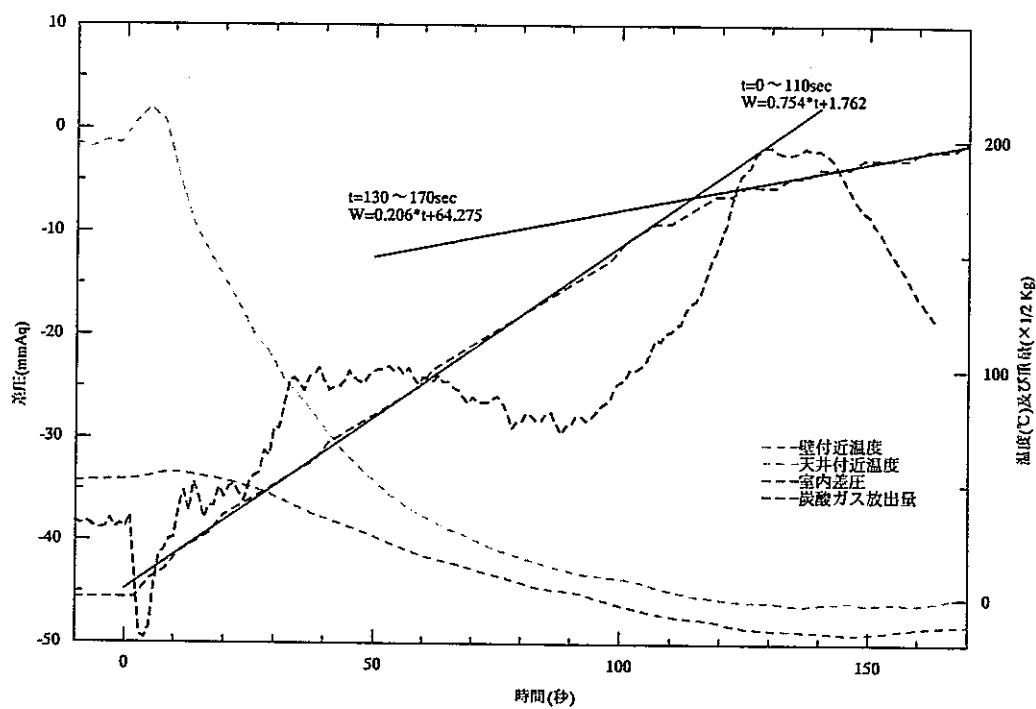


図-3 第4回液化ガス消火試験

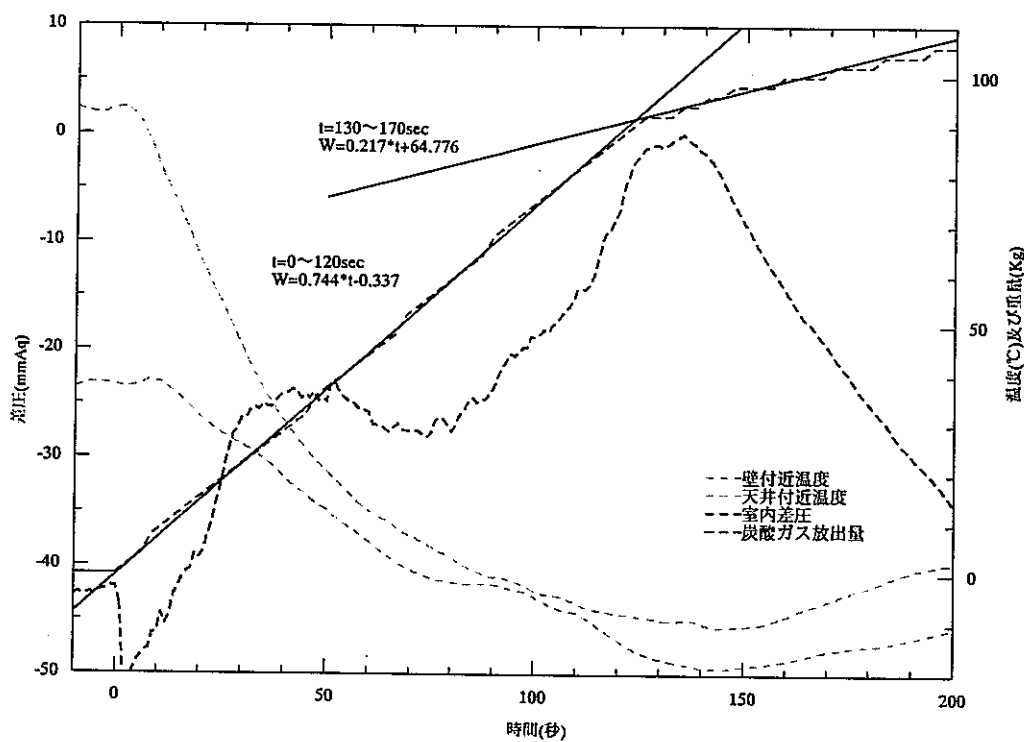


図-4 第5回液化ガス消火試験

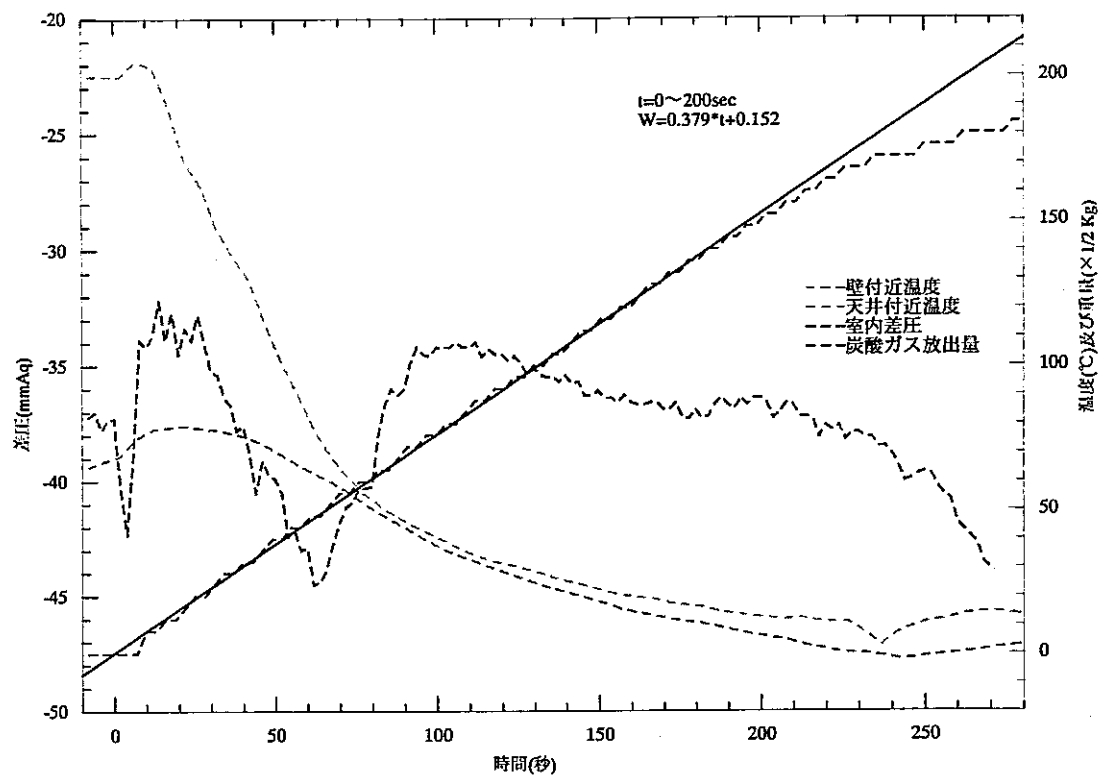


図-5 第7回液化炭酸ガス消火試験

1) 解析に使用した数値根拠

第1回圧力濃度上昇試験

図-1の近似式から

(10~60s)

$$\text{炭酸ガス} \quad W = 0.705t - 0.044 \text{ kg/s}$$

$$\text{温度：下部} \quad T = -0.891t + 20.408 \text{ deg}$$

$$\text{温度：上部} \quad T = -0.845t + 20.952 \text{ deg}$$

-20℃ 1atm における炭酸ガス放出

$$V_{co_2} = \frac{0.705 \times 22.4}{16 \times 2 + 12} \times \frac{273 - 20}{273} = 0.333 \text{ m}^3/\text{s}$$

温度降下によって

$$\frac{0.891 + 0.845}{2 \times 273} \times 58 = 0.184 \text{ m}^3/\text{s}$$

-25 mmAq において(排気-漏れ込み)=0.17 m³/s

(120~150 s)

$$W = 0.440t + 24.02 \text{ kg/s}$$

$$\text{-55 } ^\circ\text{C 1atm において} \quad V_{co_2} = 0.179 \text{ m}^3/\text{s}$$

温度降下なし

図-2 から、-15 mmAq において(排気-漏れ込み)=0.23 m³/s

第7回消火試験

図-5の近似式から

0~200 s

0℃ 1atm における炭酸ガス放出

$$V_{co_2} = \frac{0.379 \times 22.4}{16 \times 2 + 12} = 0.193 \text{ m}^3/\text{s}$$

図-2 から、-35 mmAq において(排気-漏れ込み)=0.11 m³/s