

ナトリウムエアロゾル浮遊空間における
輻射熱の透過率測定試験

(研究報告)

2005年8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
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

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)
2005

ナトリウムエアロゾル浮遊空間における輻射熱の透過率測定試験 (研究報告)

大野 修司 *

要 旨

ナトリウム燃焼時の周囲への熱移行に重要な影響を及ぼす輻射熱伝達に着目して、ナトリウムエアロゾルが浮遊する空間における輻射熱の透過量を測定する試験を実施した。試験は、ナトリウム燃焼に伴うエアロゾルを実際に発生させて酸素濃度調整ガスとともに配管内に流し、黒体炉から射出される赤外線透過量を分光光度計で測定したものである。

エアロゾル濃度、エアロゾル浮遊空間の厚み及び雰囲気温度をパラメータとした試験を行った結果、輻射透過率をエアロゾル濃度 (g-Na/m^3) と距離 (m) の関数で表わす評価式を得た。

$$\frac{I}{I_0} = e^{-0.23 \cdot c_{\text{aero}} \cdot x}$$

本評価式は、エアロゾル濃度が $0.1 \sim 50 \text{ g-Na/m}^3$ 、ガス温度が $70 \sim 380^\circ\text{C}$ の条件で測定した結果に基づくものであり、ナトリウム燃焼事故時の典型的な環境条件が概ねカバーされている。本試験研究によって得られた知見及びデータがナトリウム燃焼時の熱的影響の評価に活用されることを期待する。

* 大洗工学センター、要素技術開発部、熱化学安全試験グループ

Measurement of Thermal Radiation Transmission in a Sodium Aerosols Suspended Atmosphere

Shuji Ohno *

Abstract

Thermal radiation transmission was experimentally measured in a sodium aerosols suspended atmosphere in order to obtain more knowledge about heat transfer behavior in a sodium combustion environment. In the experiments, actual sodium aerosols were supplied into a steel pipe and the transmission of an infrared beam from a black body furnace was measured by a spectrometer.

As the results of the experiments which were conducted with varying the aerosol concentration (c_{aero} in [g-Na/m³]), thickness of aerosol suspended atmosphere (x in [m]), and the atmospheric temperature, the thermal radiation transmission rate was formulated as:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-0.23 \cdot c_{aero} \cdot x}.$$

The empirical formula is based on the measured results in the experiments which were conducted under the conditions of aerosol concentration between 0.1-50 g-Na/m³ and of gas temperature between 70-380°C. That covers most of the circumstances in sodium fire accidents. It is expected that the new knowledge and the data from this experimental research will contribute to the evaluation of thermal consequences in sodium combustion related behavior.

* Thermochemistry Safety Engineering Group, Advanced Technology Division,
O-arai Engineering Center

目 次

1. 緒論	1
2. 試験装置及び試験方法	2
2. 1 試験装置	2
2. 2 試験方法	3
3. 試験結果と考察	6
3. 1 エアロゾル濃度、透過率、ガス温度の測定結果	6
3. 2 輻射透過率の分析・評価	10
3. 2. 1 透過率の評価式	10
3. 2. 2 透過特性の分析と評価式の導出	10
4. 結論	12
謝辞	13
参考文献	14

図表リスト

表 1	R-4 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の測定結果	15
表 2	R-5 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の測定結果	16
表 3	R-6 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の測定結果	17
表 4	R-7 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の測定結果	18
表 5	R-8 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の測定結果	19
表 6	R-9 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の測定結果	20
表 7	R-10 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の測定結果	21
表 8	R-11 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の測定結果	22
表 9	R-12 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の測定結果	23
表 10	カスケードインパクトによる浮遊エアロゾルの捕集結果(1)	24
表 11	カスケードインパクトによる浮遊エアロゾルの捕集結果(2)	25
表 12	カスケードインパクトによる浮遊エアロゾルの捕集結果(3)	26
図 1	エアロゾル浮遊空間の輻射透過率測定試験装置	27
図 2	テストセクション部の概略	28
図 3	黒体炉の概略	29
図 4	R-4 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の推移	30
図 5	R-5 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の推移	31
図 6	R-6 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の推移	31
図 7	R-7 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の推移	32
図 8	R-8 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の推移	32
図 9	R-9 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の推移	33
図 10	R-10 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の推移	33
図 11	R-11 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の推移	34
図 12	R-12 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の推移	34
図 13	透過スペクトルの計測例 (R-10 試験)	35
図 14	雰囲気ガス温度条件の達成範囲	36
図 15	雰囲気ガス温度とエアロゾル濃度の達成範囲	36
図 16	透過率測定結果 (全データ)	37
図 17	透過率測定結果 (試験後の検討で厳選されたデータ)	37
図 18	試験データから求められた減衰係数のエアロゾル濃度依存性	38
図 19	試験データから求められた減衰係数の減衰距離依存性	38
図 20	試験データから求められた減衰係数のガス温度依存性	38
図 21	減衰係数の導出プロット	39
図 22	エアロゾル浮遊空間における輻射透過率の測定データと評価式	39

1. 緒論

液体金属ナトリウムを冷却材とする原子炉において空気雰囲気下で冷却材漏えい事故が生じる場合、ナトリウムの燃焼は周囲の構造物等へ熱的影響を及ぼすため、これを評価することは重要である。このため、核燃料サイクル開発機構では、古くから多くのナトリウム漏えい燃焼試験を実施するとともに、ナトリウム燃焼時の熱的影響を評価するための解析コードの開発を進めてきている。

高温のナトリウムから周囲への伝熱に関するメカニズムとしては、伝導、対流、輻射が挙げられるが、この中でも輻射熱伝達の寄与は小さくない。例えば、過去に実施されたナトリウムプール燃焼試験²⁾では、ナトリウムプール燃焼面から建物構造物への熱伝達のうち、輻射による熱流束が 60～70%を占めることが示されている。そこで、本試験研究ではこの輻射熱伝達を対象とし、さらにナトリウム漏えい燃焼時に発生する煙状のエアロゾルによって輻射伝熱特性に変化が生じる点に着目することとした。

具体的には、ナトリウム燃焼エアロゾルの存在する環境下において輻射伝熱特性を調べる試験として、エアロゾル浮遊空間における輻射エネルギーの透過・減衰特性を測定する試験を実施した。この試験を実施するにあたっては、実際のナトリウム冷却原子炉プラントの事故時に想定される浮遊エアロゾル濃度及び温度条件を可能な限りカバーするよう、試験条件を設定した。

以下、本報告書では、第 2 章に装置、方法、条件を含めた試験の概要を、第 3 章に試験結果と考察を示し、第 4 章に結論を述べる。

2. 試験装置及び試験方法

2. 1 試験装置

本試験は、ナトリウム燃焼で生成したナトリウム酸化物エアロゾルを配管内に流し、輻射熱がその空間中を透過する程度を測定するものである。

試験装置の概略を図1に示す。試験装置は、ナトリウム燃焼室、テストセクション、ガス供給・排出ライン、ナトリウム供給系、黒体炉、分光計、計測系で構成される。

(1)ナトリウム燃焼室

ナトリウムを燃焼させてエアロゾルを生成させる部分である。内部上方に輻射防止板を備え、ナトリウムプール表面からの輻射エネルギーが直接テストセクション方向へ輸送されるのを防ぐ。下部にはステンレス製燃焼皿、ナトリウム供給ノズル、ガス供給ノズルを有する。このナトリウム燃焼室と下記テストセクションにはヒータと保温材を付設し、加熱が可能である。

(2)テストセクション

テストセクションはステンレス鋼製配管を利用して製作した。ナトリウム燃焼室で生成されたエアロゾルはガスの流れに伴い、このテストセクションを通過した後、後述のガス排出ラインに送られる。高さ方向中央部には、黒体炉からの輻射熱が水平に通過する光路を有し、この光路の両端には赤外線透過性を有する ZnSe ガラスを設置している。調査対象とするエアロゾル層の厚みを変えるために、3種類の径(約 150mm, 300mm, 500mm)のテストセクションを準備した。また、テストセクション外面にはガス加熱を目的としてヒータと保温材を、ガラス装着部近傍にはガラス方向へのエアロゾル侵入を防ぐためにガスパージラインを、それぞれ付設した。テストセクション及び光路の形状・サイズを図2に示す。

(3)ガス供給・排出ライン

ナトリウム燃焼をコントロールし、かつ輻射に影響を与えるガス成分(水分、CO₂)の含有量を低くするために、ボンベ入りの酸素濃度調整ガスを使用した。ガス流量は最大 200NL/min まで調整可能である。

ガス排出ラインは、試験計測に使用したエアロゾル含有ガスを SAPFIRE 施設の排煙処理装置まで送るラインである。

(4)ナトリウム供給系

ナトリウム供給タンクは、Ar カバーガスを加圧することでナトリウムを供給するタイプの密閉容器である。内容積は約 30L である。

(5)黒体炉

黒体炉から射出される輻射熱（赤外線）はテストセクションの光路を通過し（一部はエアロゾルによって減衰し）、分光計にて測定される。黒体炉の概略を図3に、仕様を以下に示す。

- ・ 東京精工社製 BFG-IR-5 型
- ・ 温度制御範囲 : 80～500℃
- ・ 温度安定度 : ±0.5℃以下
- ・ 開口径 : 20mm φ
- ・ 放射率 : 0.99～1.00
- ・ 昇温時間 : 500℃まで 30 分、温度安定まで 30 分
- ・ 温度検出 : K 型熱電対 (0.4 級)、シース径 1.6mm
- ・ 加熱方式 : 電気加熱 (ニクロム線)

(6)分光計

分光計は、赤外線の干渉によって作られる Interferogram をフーリエ変換することによってそのパワースペクトルを測定するタイプの、FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer) である。黒体炉から射出されテストセクションの光炉を通過した輻射エネルギーの全波長範囲積分値が算出される。

- ・ 島津製作所 FTIR-4200
- ・ 測定波長範囲 : 2.5～25 μm (400～4000 cm⁻¹)
- ・ 分解能 : 2 cm⁻¹以下
- ・ 演算波数精度 : ±0.01 cm⁻¹

(7)計測系

ナトリウム燃焼とエアロゾル発生をコントロールし、また試験条件を確認するために、以下の測定機器にて計測を行った。

- ・ 熱電対 : ナトリウム温度、各部ガス温度、装置外表面温度
- ・ 流量計 : 供給ガス流量
- ・ 圧力計 : ガス供給系圧力、ナトリウム燃焼室内圧力
- ・ 酸素濃度計 (ジルコニア式) : テストセクション部の酸素濃度
- ・ エアロゾルサンプリング装置 : テストセクション部のエアロゾル浮遊濃度
- ・ カスケードインパクタ : テストセクション部のエアロゾル粒径分布

2. 2 試験方法

試験では、実際のナトリウム冷却原子炉プラントの事故時に想定される浮遊エアロゾル濃度及び温度条件を可能な限りカバーすることを目標として、試験ごと及びそれぞれの試験中に、供給するガスの酸素濃度、ガス供給流量、テストセクション部ヒータの

ON/OFF を変更・調整した。また、エアロゾル浮遊空間の厚み（輻射減衰の距離）と輻射熱透過の関係を調べるために、一部の試験ではテストセクション直径を変更した。

試験は、装置運転方法を確立するために 4 回の予備試験 (R-0~R-3) を行った後、計 9 回 (R-4~R-12) 実施した。

試験の手順は概略以下のとおりである。

- 1) ナトリウム供給系及び燃焼室・テストセクションの昇温
- 2) エアロゾルの浮遊しない状態における輻射エネルギー測定（透過率評価のベース）
- 3) 排煙処理装置起動、ガス供給開始、ナトリウム供給（ナトリウム燃焼開始）
- 4) 分光計による透過率測定（3 分ごと）及び浮遊エアロゾル濃度測定のためのエアロゾルサンプリング（濃度の高低に応じて 1.5~10 分ごと）を一定時間間隔で実施
カスケードインパクトによるエアロゾルサンプリングは試験中に 2 回実施
- 5) 試験中、必要に応じて光路両端ガラスの交換、供給ガスの酸素濃度及び流量の変更、ナトリウムの追加供給等を実施
- 6) 透過率測定の終了後、試験装置内を窒素ガスに置換し、ヒータを OFF 操作、排煙処理装置停止を行って試験を終了

試験では、エアロゾル浮遊空間における輻射熱の透過・減衰挙動を調べる目的から、透過率を次の式によって評価した。

$$\text{透過率} \equiv \frac{I_x}{I_0} = \frac{[I_{beam} - I_{BG}]_{\text{エアロゾルあり}}}{[I_{beam} - I_{BG}]_{\text{エアロゾルなし}}} \quad (1)$$

ここで、I：分光計の全測定波長範囲にわたり積分される赤外線測定値（任意単位）

I_0 ：赤外線エネルギーの初期強度

I_x ：エアロゾル浮遊空間を距離 x だけ進んだ位置における赤外線強度

I_{beam} ：赤外線ビームの放射がある場合の測定値

I_{BG} ：赤外線ビームの放射がない場合（バックグラウンド量）の測定値
（黒体炉ビーム出口を遮蔽板で塞いだ場合）

エアロゾルあり：テストセクション（ビーム光路上）に、ナトリウム燃焼に伴うエアロゾルが浮遊している場合

エアロゾルなし：テストセクション（ビーム光路上）にエアロゾルが浮遊しない場合（ナトリウム燃焼の開始前の測定）

すなわち、上式の分母はエアロゾルによる輻射減衰の無い状態における赤外線ビーム測定値であり、透過率を求めるための基準値となるものである。同時に、この分母の値は、黒体炉から射出される赤外線及び分光計で測定される赤外線が微小立体角のものであることから、エアロゾルによる減衰を経験する前の初期ビーム強度 I_0 と等価とみなすことができる。一方、上式の分子はエアロゾルによって減衰された後の赤外線エネルギー

一の測定値である。分母・分子ともに「ビームなし」状態の測定値を差し引くのは、黒体炉から放出されるビーム以外のバックグラウンド赤外線の影響を差し引くことに相当している。このバックグラウンド赤外線としては、黒体炉以外（装置表面、浮遊エアロゾル粒子表面）から分光計方向へ放出される赤外線、及び黒体炉以外から任意方向へ放出された赤外線が浮遊エアロゾルで散乱した後に分光計方向となった成分などが挙げられる。

3. 試験結果と考察

3. 1 エアロゾル濃度、透過率、ガス温度の測定結果

計 9 回 (No. R-4~R-12) 実施した試験で得られたエアロゾル濃度及び輻射熱透過率の測定結果を、輻射透過部付近のガス温度測定値と合わせて表 1~表 9 に示す。これらの表には、エアロゾル濃度測定用サンプリングと透過率測定のタイミングが一致したデータのみ記載した。また、表に示されたデータのうち、エアロゾル濃度と透過率について、各試験における時間推移を図 4~図 12 に示す。同図には、供給ガスの酸素濃度を変更したタイミングについても記載した。さらに、分光計による赤外線エネルギースペクトルの計測結果例を図 13 に、エアロゾル粒径分布の参考とするため、カスケードインパクトによる捕集結果を表 10~表 12 に示す。

以下では、これらの図表をもとに、エアロゾル濃度と輻射透過率の関係を説明しつつ、データの妥当性を確認し、不適切なデータを除外することによってデータを厳選する。

R-4 試験 (表 1、図 4)

図 4 の R-4 試験の結果を例に、エアロゾル濃度と輻射透過率の関係を見てみる。本試験に限り、ガス温度 (光路近くの 6 点のガス温度測定値の平均値) の時間推移も図中に示した。

試験開始から 10~30 分後の時間帯においては、燃焼室内のナトリウムが酸素濃度 3% の供給ガスと反応することによって、テストセクション部のエアロゾル濃度はおよそ 1~2 g-Na/m³ で一定となり、その空間を通過する輻射の透過率は 1 に近い値 (0.96~0.98) で推移している。試験開始約 40 分後に供給ガスの酸素濃度を 10% に変更させると、それ以前よりもナトリウムの反応が激しくなったため、エアロゾル濃度は 10 倍程度高くなり、これに対応して輻射透過率は低下している。本試験では、さらに試験開始約 90 分後に供給ガスの酸素濃度を 21% に増大させて、より高いエアロゾル濃度条件下で輻射透過を調べることを試みたが、図に示されるとおりエアロゾル濃度は 90 分以前の値を上回ることなく、時間の経過につれて低下している。これはナトリウムがほぼ燃焼し尽くしてエアロゾル発生速度が低下したためと考えられる。一方、この約 90 分前後における輻射透過率測定値の推移に着目すると、エアロゾル濃度は 90 分の直前と直後で同程度の値であるにもかかわらず、輻射透過率測定値は半減している。これは、エアロゾルがテストセクションよりも ZnSe ガラスの方向へ侵入してきたこと及び ZnSe ガラスの内表面へエアロゾルが付着したことに起因して、計測対象 (R-4 試験の場合は 30cm 幅のエアロゾル浮遊空間) 以外で輻射熱が減衰したためと考える。

以上から、R-4 試験の測定結果のうち、輻射透過率が半減した 90 分以降のデータについてはエアロゾル浮遊空間中の輻射透過特性を示す測定値として妥当でないと判断し、検討対象から除外する。

R-5 試験 (表 2、図 5)

表 2 及び図 5 に示される R-5 試験では、試験開始 52 分まで、 $1\sim 3\text{ g-Na/m}^3$ で一定に近いエアロゾル濃度が測定され、その間の輻射透過率はエアロゾル濃度の増減と対応した推移を示している。すなわち、エアロゾル濃度が高いほど輻射透過率は低下する一貫した傾向が認められる。しかしながら、その後の 58 分のデータについては、エアロゾル濃度が直前の測定に比べ 1/4 に低下しているにもかかわらず、輻射透過率に変動は見られない。また、それ以降についても、エアロゾル濃度は低下し続けるが透過率測定値も低下する傾向が見られ、ZnSe ガラスへのエアロゾル付着など適切な測定を阻害する効果が働いたものと考えられる。したがって、58 分以降のデータについては検討対象から除外する。

R-6 試験 (表 3、図 6)

R-6 試験では、供給ガスの酸素濃度を 3% とした初期 60 分間については、エアロゾル濃度と透過率の関係が整合している。次に、酸素濃度 10% の供給ガスに変更した後のデータを見てみると、76 分から 94 分までエアロゾル濃度と透過率の増減関係だけは整合しているが、そのうち 88 分以降のデータについては、60 分以前のデータと比べると同程度のエアロゾル濃度であっても透過率は明らかに 30% 以上低下している。これは、試験の進行に伴いガラスへのエアロゾル付着が影響したものと考えられる。したがって、本試験については 88 分以降のデータを除外する。

R-7 試験 (表 4、図 7)

R-7 試験では、供給ガスの酸素濃度を 1.5% から 3%、21% と段階的に変更したことによって、エアロゾル濃度も段階的に上昇する結果が得られている。また、エアロゾル濃度の上昇につれて透過率は低下する傾向が認められる。しかしながら、図 7 をより詳細に見てみると、49 分、55 分、61 分の 3 点はほぼ一定のエアロゾル濃度が測定されているにもかかわらず、55 分及び 61 分における透過率は 49 分のそれに比べ 10%、20% 低下しており、ガラスへのエアロゾル付着の影響が示唆されている。したがって、本試験では 55 分以降のデータを除外する。

なお、本試験では、エアロゾル濃度の低い初期約 30 分間において、透過率が 1.0 を 2~3% 超える値が得られているが、これには本試験の手法、分析装置、評価方法等に起因する誤差が含まれていると考える。

R-8 試験 (表 5、図 8)

R-8 試験は、計 9 回の試験のうち唯一内径 50cm のテストセクションを使用した試験である。

供給ガスの酸素濃度を 1.5% から 3%、21% と段階的に変更したことによって、エアロゾル濃度は段階的に上昇し透過率は低下する全体的傾向は前述の R-7 試験と同様である。しかしながら、図 8 を詳細に見てみると、酸素濃度を 1.5%、3%、21% とした各

時間帯において、エアロゾル濃度が時間経過につれてわずかに低下する一方で透過率も低下している。この部分的傾向は前述の R-7 試験の結果には見られないものである。そこで、本試験では、供給ガスの酸素濃度の異なる各時間帯において、最初のデータだけは検討対象に含め、それ以降のデータは除外する。すなわち、4分、45分、88分のデータだけはエアロゾル濃度が急上昇した直後のデータとして参照するが、それら以外のデータはエアロゾル付着等の影響がより強いと判断し、後の検討対象に含めないものとする。

R-9 試験（表 6、図 9）

R-9 試験は、ガラスへのエアロゾル付着による透過率測定値の変化を回避するために、光路両端にガラスを装着しないケースを試行した。図 9 に示したとおり、およそ 30 分ごとにガラスの取り外しと再装着を繰り返す一方で、供給ガスの酸素濃度は 5.5% と 21% の 2 種類を使用した。

図 9 でエアロゾル濃度と透過率を見てみると、酸素濃度 5.5% 及び 21% の両方のケースにおいて、ガラスなしの時間帯のエアロゾル濃度はガラスありの時のそれを大きく下回る結果となっている。これは、ガラスを取り外したことによって、ガラス設置箇所からテストセクション部に大気が大量に引き込まれたことを示唆している。これは、表 6 に示すガス温度がガラスなしの時間帯は低いことから明らかである。大気が引き込まれたとすると、光路付近の浮遊エアロゾル濃度は空間的に乱されると考えられることから、このガラスなしの時間帯のデータは除外するのが適切と考える。

次に図 9 のガラスありの時間帯だけを見てみる。酸素濃度 5.5% の時間帯では、34 分から 40 分までエアロゾル濃度が微増した後、40 分から 52 分まではほぼ一定のエアロゾル濃度が測定されている。一方、透過率は、ガラスにエアロゾルが付着する影響で時間経過につれて低下している。以上から、エアロゾル濃度と透過率の関係が明らかに矛盾する 42 分以降のデータを除外する。また、酸素濃度 21% の時間帯については、この時間帯の最初のデータ（95 分のデータ）が他と異なる様相を呈している。これは、酸素濃度 21% 条件でガラスを再装着する際に、エアロゾル付着防止用ガスパーズの開始が遅れ、その時にエアロゾルがガラス方向へ侵入してきたためである。したがって、この酸素濃度 21%（ガラスあり）の時間帯については、95 分のデータのみを除外する。

R-10 試験（表 7、図 10）

R-10 試験以後は、ガラスへのエアロゾル付着の影響を低減させるために、ガラスを 2 組準備し、可能な限り試験途中にガラスを交換する運転法とした。ガラスの交換、エアロゾルの拭き取り、ガラスの再交換を繰り返すことによって、エアロゾル付着の少ない試験環境を作るようにしたものである。図 10 に示すように、試験ではガラスを交換しつつ、供給ガスの酸素濃度を 3%、5.5%、21% の順に変更した。なお、この R-10 試験は、計 9 回の試験のうち唯一内径 15cm のテストセクションを使用した試験である。

図 10 から、酸素濃度が 3% 及び 5.5% の約 70 分までの時間帯においては、エアロゾ

ル濃度と透過率の関係に矛盾は見られない。一方、酸素濃度を 21%に変えた時刻以降については、エアロゾル濃度がほぼ一定で推移しているにもかかわらず透過率には時間経過につれて低下する傾向が認められる。75分と78分のデータの間には矛盾は見られないものの、81分、84分のデータは78分のデータと比べ明らかに10%以上の透過率低下が示されている。したがって、本試験では81分以降のデータは除外する。

R-11 試験 (表 8、図 11)

R-11 試験は、R-10 試験と同様にガラスを交換しつつ実施した試験である。供給ガスの酸素濃度は 3%、5.5%、10%の順に変更した。

図 11 から本試験におけるエアロゾル濃度と透過率の関係をしてみると、前述の R-10 試験と同様のガラス交換方式で実施したにもかかわらず、各時間帯の中で透過率の低下傾向が見られる。そこで、本試験では、酸素濃度 3%の 2つの時間帯、酸素濃度 5.5%の 2つの時間帯及び酸素濃度 10%の前半の時間帯については、エアロゾル濃度と透過率の関係に矛盾が見られる時刻以降のデータを除外する。また、酸素濃度 10%の後半の時間帯については、図示した4つのデータのうち最後のデータ(110分のデータ)のみが酸素濃度 10%の前半のデータと矛盾しない結果を示しているため、この110分のデータ以外(101分、104分、107分のデータ)を検討対象から除外する。

R-12 試験 (表 9、図 12)

R-12 試験は、R-11 試験と同様にガラスを交換しつつ実施した試験である。供給ガスの酸素濃度についても R-11 試験と同じく 3%、5.5%、10%の順に変更した。本試験で R-11 試験から変更した条件は、ガス温度(テストセクションの加熱パワー)を変えた点だけである。

図 12 から本試験におけるエアロゾル濃度と透過率の関係をしてみると、酸素濃度が 3%及び 5.5%の時間帯(59分まで)については矛盾のない結果が得られている。しかしながら、酸素濃度を 10%に変更した時刻以降については、エアロゾル濃度がそれ以前と同程度であるにもかかわらず透過率は低めの値を示しており、妥当とは判断し難い。ガラスを交換したにもかかわらず交換直後に透過率が急激に低下したことの理由は説明できないが、透過率として不適切であることは明らかである。したがって、本試験では 65分以降のデータを検討対象から除外する。

以上のように、エアロゾル濃度と放射透過率の関係を見ながらデータの妥当性を確認してきたが、不適切なデータを検討対象から除外した上で、計 9回の試験で達成したエアロゾル濃度及びガス温度の条件を整理すると、図 14 及び図 15 に示すとおりとなる。距離を 0.15~0.5m とした条件のもとで、温度条件(70~380℃)、エアロゾル濃度条件(0.1~50 g-Na/m³)ともに、ナトリウム燃焼事故時の環境条件として典型的と考えられる範囲について偏ることなく達成されたことがわかる。

3. 2 輻射透過率の分析・評価

3. 2. 1 透過率の評価式

エアロゾル浮遊空間において一定の方向へ一次元的に射出された輻射エネルギーの減衰を微小距離 dx の区間内で考えると、その減衰率は距離及びエアロゾル濃度 c_{aero} に比例すると考えられる。比例定数を k として式で表すと、

$$\frac{-dI}{I} = k \cdot dx \cdot c_{aero} \quad (2)$$

となり、 I に関して解くと、

$$I = I_0 \cdot e^{-k \cdot c_{aero} \cdot x} \quad (3)$$

または、

$$\frac{I}{I_0} = e^{-k \cdot c_{aero} \cdot x} \quad (4)$$

と表される。

式(4)は2. 2 に示した式(1)すなわち本研究で定義したエアロゾル浮遊空間中の輻射の透過率を表すものである。また式(4)は、混濁液中の光の透過が濃度×距離の関数として表されるという Lambert-Beer の法則に相当するものである。

本試験結果が式(4)で表現できるか否かを見てみるために、表 1～表 9 に記した全ての透過率測定値をエアロゾル濃度×距離に対してプロットしたものを図 16 に示す。また、透過率測定値のうち 3. 1 に述べたとおり不適当なデータを除外した上で、残りのデータをプロットしたものを図 17 に示す。これらの図から、エアロゾル濃度と透過率の関係を見つデータを取捨選択した結果、データのばらつきが小さくなったことが確認できる。また、図 17 の透過率データの分布を見ると、透過率を式(4)の形で表現するのは概ね妥当であることがわかる。

3. 2. 2 透過特性の分析と評価式の導出

エアロゾル浮遊空間における輻射透過を表す式(4)を導出する際には、前述のとおり比例定数 k を仮定した。比例定数 k は減衰の程度を包括的に表すことから、減衰係数と呼ぶことができる。この k の値が今回の試験パラメータ（エアロゾル濃度、距離、ガス温度）に依存するか否かを調べるために、試験データから

$$k = \left(\frac{-\ln \frac{I}{I_0}}{c_{aero} \cdot x} \right)$$

を計算して、エアロゾル濃度、距離、ガス温度に対してプロットした(図 18～図 20)。比例定数 k の値は 0.05 から 0.4 程度まで広範囲にばらついているものの、エアロゾル濃度、距離及びガス温度などの試験パラメータに対する顕著な依存性は無いものと判断できる。

比例定数 k は、式(4)の自然対数をとると

$$-\ln \frac{I}{I_0} = k \cdot c_{aero} \cdot x \quad (5)$$

となることから、エアロゾル濃度×距離に対して透過率の自然対数をプロットした時の勾配から求めることができる。このプロットを図 21 に示す。エアロゾルが無い場合の透過率は 1.0 すなわち式(5)の値は 0.0 となることから、図 21 の分布は原点を通るべきものであり、これを考慮すると、最小二乗フィッティングによって $k=0.23$ と求められる。

以上から、エアロゾル浮遊空間の輻射透過率の評価式は、

$$\frac{I}{I_0} = e^{-0.23 \cdot c_{aero} \cdot x} \quad (6)$$

と表すことができる。式中のエアロゾル濃度と距離の単位はそれぞれ $[\text{g} \cdot \text{Na}/\text{m}^3]$ 及び $[\text{m}]$ である。試験で得られた透過率データと本評価式を合わせて図 22 に示す。評価式に対して透過率データにはばらつきが見られるが、本評価式はナトリウム燃焼時のエアロゾルが浮遊する空間における輻射熱の透過・減衰を評価する際に活用されるものとする。

4. 結論

ナトリウム燃焼時のエアロゾルが浮遊する空間を対象として、輻射エネルギーの透過・減衰量を測定する試験を実施した。試験は、ナトリウム燃焼に伴うエアロゾルを実際に発生させて酸素濃度調整ガスとともに配管内に流し、黒体炉から射出される赤外線透過量を分光光度計で測定したものである。

エアロゾル濃度、エアロゾルの浮遊する空間の厚み（測定対象とする距離）及びエアロゾル浮遊空間の雰囲気温度をパラメータとした試験を行った結果、エアロゾル浮遊空間における輻射の透過率 I/I_0 は次式のように整理されることを明らかにした。

$$\frac{I}{I_0} = e^{-0.23 \cdot c_{aero} \cdot x}$$

ここで、 c_{aero} はエアロゾル濃度 ($\text{g}\cdot\text{Na}/\text{m}^3$)、 x は透過距離 (m) である。

本評価式は、エアロゾル濃度が 0.1~50、ガス温度が 70~380℃ の条件で測定した結果に基づくものであり、ナトリウム燃焼事故時の典型的な環境条件が概ねカバーされている。本試験研究によって得られた知見及びデータがナトリウム燃焼時の熱的影響の評価に活用されることを期待する。

謝辞

本試験研究を計画し遂行する上で、当時のチームリーダーであった現在石炭エネルギーセンターの中村正志氏には多くのご指導と助言をいただきました。試験装置の製作及び試験の準備・実施・後処理においては、東興機械工業株式会社の鈴木和右氏に多大なご尽力をいただきました。また、検査開発株式会社の松木卓夫氏には、本報告書の図表作成を助勢いただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 宮原信哉、大野修司、石川浩康、堂田哲広、「高速増殖炉における冷却材ナトリウムの漏えい燃焼対策」、日本燃焼学会誌、第 45 巻 133 号、pp.141-151 (2003)
- 2) 宮原信哉、佐々木和一、山田敏雄、姫野嘉昭、「大規模ナトリウム漏洩燃焼試験 (I) —空気雰囲気におけるナトリウムプール燃焼試験, Run-D1—」、PNC TN9410 87-081 (1987)

表 1 R-4 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の測定結果

時間 min	エアロゾル濃度 g-Na/m ³	赤外線測定値			透過率	ガス温度 ℃
		I _{beam}	I _{BG}	I _{beam} - I _{BG}		
エアロゾルなし						
Na 燃焼前	0.00E+00	79.343	0.337	79.007	1.00E+00	
エアロゾルあり						
13	1.16E+00	76.724	0.528	76.196	9.64E-01	70
19	1.32E+00	76.703		76.175	9.64E-01	
25	1.46E+00	77.956		77.428	9.80E-01	
31	1.61E+00	76.409		75.881	9.60E-01	
53	1.55E+01	57.048	1.839	55.209	6.99E-01	90~110
59	7.55E+00	61.209		59.370	7.51E-01	
65	1.22E+01	47.755		45.916	5.81E-01	
71	2.09E+01	44.768		42.929	5.43E-01	
77	1.36E+01	44.874	3.244	43.035	5.45E-01	140
100	1.47E+01	23.107		19.863	2.51E-01	
106	1.34E+01	27.753		24.509	3.10E-01	
112	8.03E+00	54.142		50.898	6.44E-01	
118	7.91E-01	71.887		68.643	8.69E-01	
124	6.81E-02	73.747	70.503	8.92E-01		

テストセクション内径 (エアロゾル浮遊空間の厚み) = 311 mm

表2 R-5 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の測定結果

時間 min	エアロゾル濃度 g-Na/m ³	赤外線測定値			透過率	ガス温度 ℃
		I _{beam}	I _{BG}	I _{beam} - I _{BG}		
エアロゾルなし						
Na 燃焼前	0.00E+00	93.104	13.012	80.092	1.00E+00	
エアロゾルあり						
10	2.46E+00	91.111	23.417	67.694	8.45E-01	350~ 360
16	3.01E+00	90.744	23.710	67.034	8.37E-01	
22	3.12E+00	89.623	22.627	66.996	8.36E-01	
28	3.03E+00	87.212	22.334	64.878	8.10E-01	370
40	1.97E+00	89.330	21.486	67.844	8.47E-01	
46	1.35E+00	90.095	21.262	68.833	8.59E-01	
52	3.45E+00	89.618	22.105	67.513	8.43E-01	
58	8.67E-01	89.399	21.616	67.783	8.46E-01	
76	5.16E-01	76.390	38.241	38.149	4.76E-01	360~ 370
88	3.57E-02	72.417	38.252	34.165	4.27E-01	
94	2.32E-02	69.292	37.739	31.553	3.94E-01	
107	2.70E-02	67.411	34.435	32.976	4.12E-01	370~ 380
113	2.00E-02	69.972	24.455	45.517	5.68E-01	
119	1.17E-02	71.786	16.283	55.503	6.93E-01	
125	2.26E-02	71.567	13.583	57.984	7.24E-01	

テストセクション内径 (エアロゾル浮遊空間の厚み) = 311 mm

表3 R-6 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の測定結果

時間 min	エアロゾル濃度 g-Na/m ³	赤外線測定値			透過率	ガス温度 ℃
		I _{beam}	I _{BG}	I _{beam} - I _{BG}		
エアロゾルなし						
Na 燃焼前	0.00E+00	93.155	3.283	89.872	1.00E+00	
エアロゾルあり						
10	1.22E+01	60.419	8.151	52.268	5.82E-01	240
16	3.79E+00	64.845	6.922	57.923	6.45E-01	
22	6.56E+00	69.584	5.381	64.203	7.14E-01	
28	4.95E+00	71.127	5.193	65.934	7.34E-01	
48	3.24E+00	72.364	5.161	67.203	7.48E-01	240~ 250
54	2.49E+00	75.213	4.248	70.965	7.90E-01	
60	2.10E+00	76.982	4.669	72.313	8.05E-01	250~ 270
76	2.59E+01	39.567	12.091	27.476	3.06E-01	
82	2.37E+01	37.077	10.650	26.427	2.94E-01	
88	1.06E+01	42.591	7.759	34.832	3.88E-01	
94	6.64E+00	48.433	6.085	42.348	4.71E-01	
100	1.55E+00	53.343	4.245	49.098	5.46E-01	280~ 290
115	1.35E+01	20.645	15.681	4.964	5.52E-02	
121	4.76E+01	22.249	14.741	7.508	8.35E-02	
127	2.72E+01	22.954	14.112	8.842	9.84E-02	
133	5.43E+00	33.660	10.467	23.193	2.58E-01	
139	3.16E+00	39.709	7.815	31.894	3.55E-01	

テストセクション内径 (エアロゾル浮遊空間の厚み) = 311 mm

表 4 R-7 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の測定結果

時間 min	エアロゾル濃度 g-Na/m ³	赤外線測定値			透過率	ガス温度 ℃
		I _{beam}	I _{BG}	I _{beam} - I _{BG}		
エアロゾルなし						
Na 燃焼前	0.00E+00	83.312	3.554	79.758	1.00E+00	
エアロゾルあり						
5	3.31E-01	85.468	3.975	81.493	1.02E+00	220
11	1.77E-01	86.085	3.658	82.427	1.03E+00	
17	3.04E-01	85.959	3.736	82.223	1.03E+00	
20	2.10E-01	85.678	3.726	81.952	1.03E+00	
26	1.85E-01	85.809	3.641	82.168	1.03E+00	
32	1.17E-01	85.424	3.675	81.749	1.02E+00	
35	1.35E-01	85.084	3.586	81.498	1.02E+00	
43	1.23E+00	82.634	4.021	78.613	9.86E-01	220~ 230
49	2.29E+00	79.172	4.178	74.994	9.40E-01	
55	2.12E+00	73.113	4.240	68.873	8.64E-01	
61	2.10E+00	67.187	4.187	63.000	7.90E-01	
67	4.57E+00	61.034	4.189	56.846	7.13E-01	
73	3.09E+00	56.208	4.218	51.990	6.52E-01	250~ 290
81	9.43E+00	29.093	12.525	16.568	2.08E-01	
87	3.34E+01	15.715	9.794	5.921	7.42E-02	
93	3.31E+01	11.127	7.785	3.342	4.19E-02	
99	1.48E+01	8.451	6.374	2.077	2.60E-02	
105	3.58E+01	5.948	4.686	1.261	1.58E-02	
111	1.62E+01	4.479	3.760	0.719	9.02E-03	

テストセクション内径 (エアロゾル浮遊空間の厚み) = 311 mm

表5 R-8 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の測定結果

時間 min	エアロゾル濃度 g-Na/m ³	赤外線測定値			透過率	ガス温度 ℃
		I _{beam}	I _{BG}	I _{beam} - I _{BG}		
エアロゾルなし						
Na 燃焼前	0.00E+00	89.395	2.010	87.385	1.00E+00	
エアロゾルあり						
4	4.90E-01	85.083	2.018	83.065	9.51E-01	140
10	2.34E-01	84.909	2.026	82.883	9.48E-01	
16	2.24E-01	83.012	2.068	80.945	9.26E-01	
19	2.21E-01	82.056	2.083	79.973	9.15E-01	
25	1.85E-01	80.169	2.062	78.107	8.94E-01	
31	1.54E-01	77.228	2.111	75.117	8.60E-01	
34	1.77E-01	75.895	2.200	73.695	8.43E-01	
45	6.39E+00	47.585	3.294	44.291	5.07E-01	160
51	6.07E+00	14.787	3.101	11.686	1.34E-01	
57	5.50E+00	10.094	3.060	7.034	8.05E-02	
63	5.04E+00	8.046	3.069	4.978	5.70E-02	
69	1.26E+01	6.852	3.050	3.802	4.35E-02	
75	9.72E+00	5.509	2.942	2.568	2.94E-02	
88	2.36E+01	10.995	7.071	3.924	4.49E-02	
94	2.45E+01	4.946	4.524	0.421	4.82E-03	200
100	2.05E+01	3.125	2.750	0.375	4.29E-03	
106	1.75E+01	2.011	1.842	0.169	1.93E-03	
112	1.99E+01	1.585	1.512	0.073	8.32E-04	
118	1.86E+01	1.457	1.407	0.051	5.78E-04	

テストセクション内径 (エアロゾル浮遊空間の厚み) = 160 mm

表 6 R-9 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の測定結果

時間 min	エアロゾル濃度 g-Na/m ³	赤外線測定値			透過率	ガス温度 ℃
		I _{beam}	I _{BG}	I _{beam} - I _{BG}		
エアロゾルなし						
ガラスなし						
Na 燃焼前	0.00E+00	177.193	0.542	176.651	1.00E+00	
ガラスあり						
Na 燃焼前	0.00E+00	87.251	1.079	86.171	1.00E+00	
エアロゾルあり						
ガラスなし						
5	8.78E-01	178.670	0.505	178.165	1.01E+00	70
8	1.04E+00	178.300	0.535	177.766	1.01E+00	
11	1.13E+00	177.390	0.340	177.050	1.00E+00	
14	9.77E-01	178.050	0.332	177.718	1.01E+00	
17	1.30E+00	177.290	0.476	176.814	1.00E+00	
20	9.19E-01	179.910	0.388	179.522	1.02E+00	
23	9.51E-01	178.380	0.474	177.906	1.01E+00	
ガラスあり						
34	8.26E+00	49.120	1.999	47.121	5.47E-01	140~ 150
37	5.93E+00	42.572	1.874	40.698	4.72E-01	
40	1.27E+01	36.677	1.889	34.788	4.04E-01	
43	1.30E+01	32.551	1.848	30.703	3.56E-01	
46	1.36E+01	29.731	1.831	27.900	3.24E-01	
49	1.33E+01	27.465	1.871	25.594	2.97E-01	
52	1.20E+01	25.569	1.962	23.607	2.74E-01	
ガラスなし						
65	1.01E+01	154.060	1.066	152.994	8.66E-01	120~ 130
68	8.85E+00	158.140	0.992	157.148	8.90E-01	
71	8.82E+00	158.450	1.216	157.234	8.90E-01	
74	7.37E+00	155.430	1.357	154.073	8.72E-01	
77	6.74E+00	160.700	1.333	159.367	9.02E-01	
80	8.15E+00	148.900	1.376	147.524	8.35E-01	
83	6.01E+00	155.280	1.284	153.996	8.72E-01	
ガラスあり						
95	2.33E+01	4.879	3.421	1.458	1.69E-02	200~ 220
102	2.27E+01	17.652	9.423	8.229	9.55E-02	
105	2.88E+01	15.030	10.172	4.858	5.64E-02	
108	3.18E+01	14.709	10.090	4.619	5.36E-02	
111	2.68E+01	14.268	10.351	3.917	4.55E-02	
114	4.87E+01	15.064	10.690	4.374	5.08E-02	
117	3.06E+01	15.460	11.609	3.851	4.47E-02	

テストセクション内径 (エアロゾル浮遊空間の厚み) = 311 mm

表7 R-10 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の測定結果

時間 min	エアロゾル濃度 g-Na/m ³	赤外線測定値			透過率	ガス温度 ℃
		I _{beam}	I _{BG}	I _{beam} - I _{BG}		
エアロゾルなし						
ガラス A,B						
Na 燃焼前	0.00E+00	88.571	0.587	87.984	1.00E+00	
ガラス C,D						
Na 燃焼前	0.00E+00	88.756	0.733	88.024	1.00E+00	
エアロゾルあり						
ガラス A,B						
3	4.03E+00	85.776	0.942	84.834	9.64E-01	140~ 150
6	2.10E+00	88.665	0.916	87.749	9.97E-01	
9	1.18E+00	89.221	0.888	88.333	1.00E+00	
12	1.17E+00	89.852	0.935	88.917	1.01E+00	
ガラス C,D						
18	7.16E-01	91.397	0.785	90.612	1.03E+00	140~ 150
21	5.58E-01	91.229	0.736	90.493	1.03E+00	
24	4.95E-01	91.528	0.788	90.740	1.03E+00	
27	5.38E-01	91.282	0.830	90.452	1.03E+00	
ガラス A,B						
37	6.99E+00	81.669	1.034	80.635	9.16E-01	150~ 160
40	1.10E+01	76.977	1.314	75.663	8.60E-01	
43	1.09E+01	70.607	1.746	68.861	7.83E-01	
46	1.09E+01	58.468	2.507	55.961	6.36E-01	
ガラス C,D						
55	1.17E+01	78.238	0.952	77.287	8.78E-01	160~ 170
58	1.03E+01	78.980	0.883	78.097	8.87E-01	
61	1.04E+01	79.713	1.112	78.602	8.93E-01	
64	8.42E+00	79.700	1.126	78.575	8.93E-01	
ガラス A,B						
75	2.85E+01	28.623	6.545	22.078	2.51E-01	210~ 230
78	2.92E+01	27.087	7.047	20.040	2.28E-01	
81	2.82E+01	26.486	7.856	18.630	2.12E-01	
84	2.82E+01	25.812	7.994	17.818	2.03E-01	
ガラス C,D						
93	1.67E+01	29.889	10.918	18.971	2.16E-01	260~ 280
96	2.05E+01	27.965	13.162	14.803	1.68E-01	
99	1.70E+01	25.549	13.967	11.582	1.32E-01	
102	2.87E+01	26.331	15.641	10.690	1.21E-01	

テストセクション内径 (エアロゾル浮遊空間の厚み) = 498 mm

表8 R-11 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の測定結果

時間 min	エアロゾル濃度 g-Na/m ³	赤外線測定値			透過率	ガス温度 ℃
		I _{beam}	I _{BG}	I _{beam} - I _{BG}		
エアロゾルなし						
ガラス A,B						
Na 燃焼前	0.00E+00	79.780	7.193	72.587	1.00E+00	
ガラス C,D						
Na 燃焼前	0.00E+00	84.061	7.173	76.888	1.00E+00	
エアロゾルあり						
ガラス C,D						
5	3.72E+00	71.517	9.754	61.763	8.03E-01	280
8	2.29E+00	63.132	10.256	52.876	6.88E-01	
11	2.33E+00	55.999	9.789	46.210	6.01E-01	
14	1.85E+00	50.951	9.760	41.191	5.36E-01	
ガラス A,B						
23	1.96E+00	77.160	7.841	69.319	9.55E-01	280
26	1.40E+00	66.881	6.688	60.193	8.29E-01	
29	1.49E+00	62.079	6.208	55.871	7.70E-01	
32	2.31E+00	59.056	5.906	53.150	7.32E-01	
ガラス C,D						
45	7.03E+00	69.378	16.055	53.323	6.94E-01	290
48	8.59E+00	67.341	16.730	50.611	6.58E-01	
51	9.83E+00	63.119	15.034	48.085	6.25E-01	
54	9.61E+00	54.157	12.990	41.167	5.35E-01	
ガラス A,B						
63	9.66E+00	63.912	14.545	49.367	6.80E-01	290
66	9.99E+00	65.320	14.068	51.252	7.06E-01	
69	8.20E+00	63.859	14.767	49.092	6.76E-01	
72	8.25E+00	62.895	13.983	48.912	6.74E-01	
ガラス C,D						
85	1.03E+01	57.672	17.594	40.078	5.21E-01	310
88	9.50E+00	56.165	17.474	38.691	5.03E-01	
91	6.68E+00	55.002	16.502	38.500	5.01E-01	
94	5.61E+00	51.498	16.907	34.591	4.50E-01	
ガラス A,B						
101	4.07E+00	39.752	13.564	26.188	3.61E-01	320
104	7.15E+00	45.559	17.577	27.982	3.85E-01	
107	5.57E+00	49.610	18.907	30.703	4.23E-01	
110	1.42E+01	50.062	19.275	30.787	4.24E-01	

テストセクション内径 (エアロゾル浮遊空間の厚み) = 311 mm

表9 R-12 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の測定結果

時間 min	エアロゾル濃度 g-Na/m ³	赤外線測定値			透過率	ガス温度 ℃
		I _{beam}	I _{BG}	I _{beam} - I _{BG}		
エアロゾルなし						
ガラス A,B						
Na 燃焼前	0.00E+00	75.039	1.378	73.661	1.00E+00	
ガラス C,D						
Na 燃焼前	0.00E+00	74.060	1.468	72.592	1.00E+00	
エアロゾルあり						
ガラス C,D						
1	7.24E-01	69.645	1.950	67.696	9.33E-01	130
4	8.81E-01	68.157	1.550	66.607	9.18E-01	
7	3.83E-01	70.923	1.627	69.296	9.55E-01	
10	3.99E-01	70.972	1.459	69.513	9.58E-01	
ガラス A,B						
17	4.74E-01	72.966	1.646	71.320	9.68E-01	140
20	3.16E-01	73.434	1.660	71.774	9.74E-01	
23	3.81E-01	72.052	1.715	70.337	9.55E-01	
26	5.49E-01	72.161	1.725	70.436	9.56E-01	
ガラス C,D						
34	4.80E+00	53.234	2.668	50.567	6.97E-01	140
37	7.12E+00	47.692	2.924	44.768	6.17E-01	
40	8.54E+00	43.125	2.766	40.359	5.56E-01	
43	1.05E+01	43.198	2.959	40.239	5.54E-01	
ガラス A,B						
50	1.06E+01	41.273	3.295	37.978	5.16E-01	150
53	1.03E+01	45.015	3.114	41.901	5.69E-01	
56	1.10E+01	45.689	3.336	42.353	5.75E-01	
59	9.64E+00	42.924	3.276	39.648	5.38E-01	
ガラス C,D						
65	1.11E+01	23.987	2.757	21.231	2.92E-01	170
68	7.76E+00	32.315	3.719	28.596	3.94E-01	
71	6.07E+00	39.939	4.053	35.886	4.94E-01	
74	7.18E+00	37.294	4.390	32.904	4.53E-01	
ガラス A,B						
80	4.62E+00	17.017	2.805	14.212	1.93E-01	180
83	5.96E+00	25.972	4.268	21.704	2.95E-01	
86	7.03E+00	35.040	3.901	31.139	4.23E-01	
89	1.55E+01	38.018	4.100	33.918	4.60E-01	

テストセクション内径 (エアロゾル浮遊空間の厚み) = 311 mm

表 10 カスケードインパクトによる浮遊エアロゾルの捕集結果 (1)

d ₅₀ (μ m)	捕集部	R-4 試験		R-5 試験		R-6 試験	
		捕集量 (mg)		捕集量 (mg)		捕集量 (mg)	
		1 回目	2 回目	1 回目	2 回目	1 回目	2 回目
12.5	第 0 段	0.192	0.194	2.57	0.825	7.53	41.9
	第 1 段	0.124	0.0450	1.21	0.566	4.62	31.3
7.75	第 2 段	0.146	0.0191	1.23	18.3	25.8	62.6
	第 3 段	0.375	0.0174	2.55	112	108	124
5.22	第 4 段	1.66	0.0134	12.0	70.1	110	105
	第 5 段	10.3	0.0286	25.0	24.0	45.1	49.8
3.53	第 6 段	14.4	0.134	39.5	8.00	14.5	20.7
	第 7 段	6.20	0.155	26.8	1.70	2.51	4.91
2.23	第 8 段	2.92	0.0750	12.9	1.49	1.08	2.28
	最終段	0.156	0.0114	0.435	0.0313	0.0156	0.0158
1.07	その他	4.06	0.323	5.43	18.9	15.5	61.0
	その他	4.06	0.323	5.43	18.9	15.5	61.0
0.627	その他	4.06	0.323	5.43	18.9	15.5	61.0
	その他	4.06	0.323	5.43	18.9	15.5	61.0
0.446	その他	4.06	0.323	5.43	18.9	15.5	61.0
	その他	4.06	0.323	5.43	18.9	15.5	61.0
サンプリング時刻 (Na 供給開始後)		30 分後	130 分後	30 分後	90 分後	20 分後	126 分後

表 11 カスケードインパクトによる浮遊エアロゾルの捕集結果 (2)

d ₅₀ (μm)	捕集部	R-7 試験		R-8 試験		R-9 試験	
		捕集量 (mg)		捕集量 (mg)		捕集量 (mg)	
		1 回目	2 回目	1 回目	2 回目	1 回目	2 回目
12.5	第 0 段	0.764	54.8	40.4	120	17.8	268
	第 1 段	0.383	103	31.2	222	18.9	155
7.75	第 2 段	0.334	202	30.2	195	17.5	159
	第 3 段	1.13	197	31.4	134	21.1	178
5.22	第 4 段	0.487	119	31.8	59.1	18.2	111
	第 5 段	2.32	52.6	20.9	32.2	18.7	63.6
3.53	第 6 段	10.8	18.4	13.8	6.85	21.8	33.2
	第 7 段	6.35	4.48	10.9	2.13	14.7	9.85
2.23	第 8 段	4.36	2.23	6.42	1.01	5.38	2.35
	最終段	0.725	0.0240	0.432	0.0100	0.462	0.0510
1.07	その他	2.32	90.6	36.3	122	17.4	114
	その他	2.32	90.6	36.3	122	17.4	114
0.627	その他	2.32	90.6	36.3	122	17.4	114
	その他	2.32	90.6	36.3	122	17.4	114
0.446	その他	2.32	90.6	36.3	122	17.4	114
	その他	2.32	90.6	36.3	122	17.4	114
サンプリング時刻 (Na 供給開始後)		10 分後	86 分後	55 分後	98 分後	46 分後	110 分後

表 12 カスケードインパクトによる浮遊エアロゾルの捕集結果 (3)

d ₅₀ (μm)	捕集部	R-10 試験		R-11 試験		R-12 試験	
		捕集量 (mg)		捕集量 (mg)		捕集量 (mg)	
		1 回目	2 回目	1 回目	2 回目	1 回目	2 回目
12.5	第 0 段	0.628	72.6	5.58	15.6	0.381	13.3
	第 1 段	0.306	131	3.09	20.6	0.180	27.7
7.75	第 2 段	0.354	291	12.3	67.8	0.141	72.8
	第 3 段	0.484	244	35.2	104	0.209	60.2
5.22	第 4 段	0.784	153	28.1	91.7	0.463	50.3
	第 5 段	1.84	60.6	31.3	55.0	4.25	35.6
3.53	第 6 段	4.21	21.2	28.5	27.7	13.8	21.7
	第 7 段	7.42	5.48	8.96	6.05	5.33	4.07
2.23	第 8 段	5.38	2.39	2.19	2.35	3.21	1.68
	最終段	2.06	0.0365	0.231	0.0255	0.297	0.0720
1.07	その他	1.17	91.7	12.0	34.1	0.971	25.0
	その他	1.17	91.7	12.0	34.1	0.971	25.0
0.627	その他	1.17	91.7	12.0	34.1	0.971	25.0
	その他	1.17	91.7	12.0	34.1	0.971	25.0
0.446	その他	1.17	91.7	12.0	34.1	0.971	25.0
	その他	1.17	91.7	12.0	34.1	0.971	25.0
サンプリング時刻 (Na 供給開始後)		25 分後	80 分後	29 分後	93 分後	22 分後	70 分後

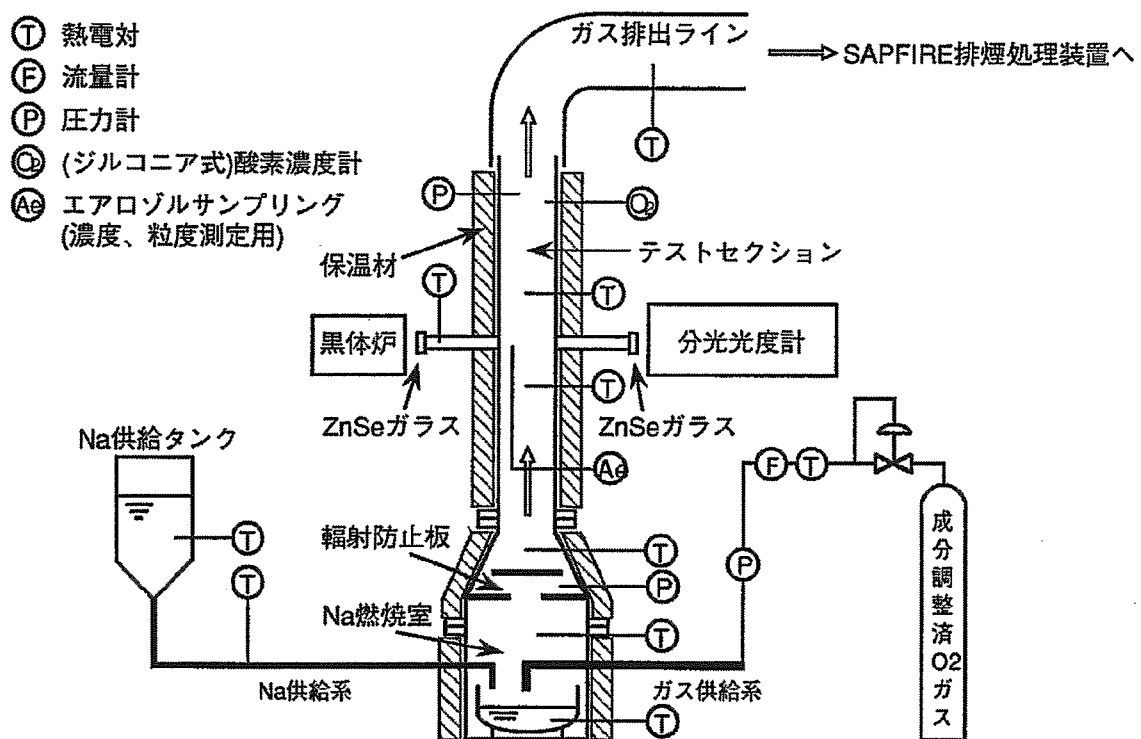
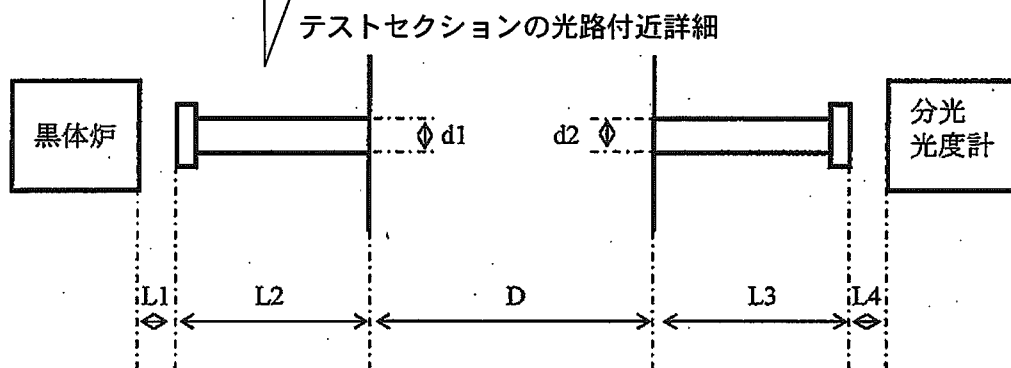
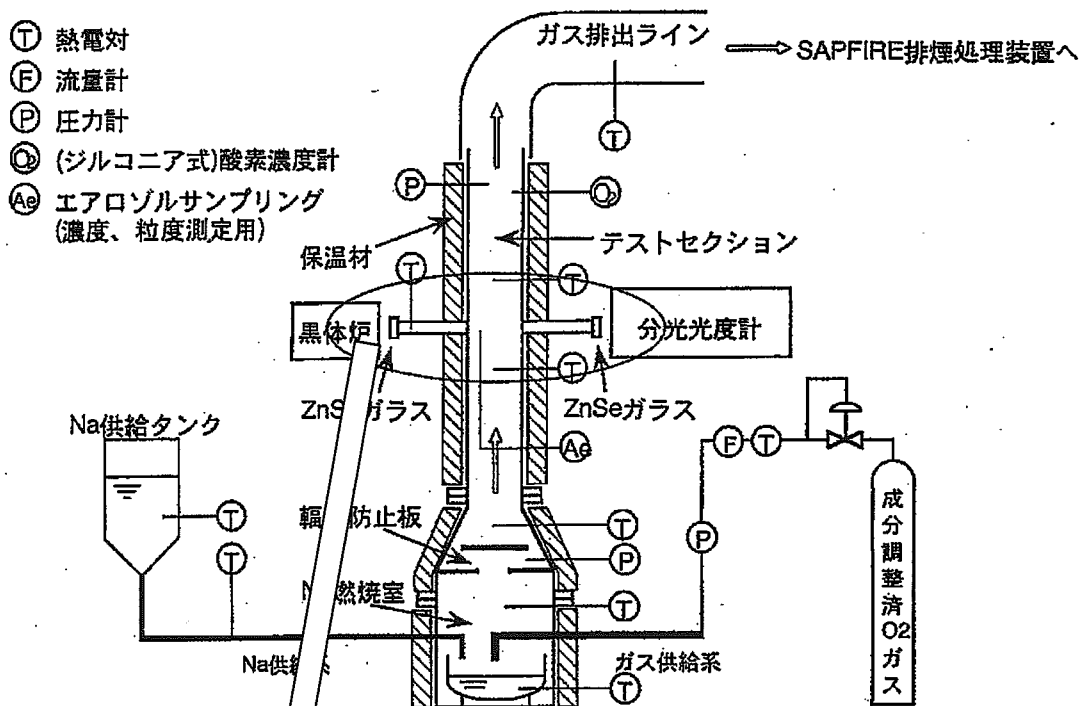


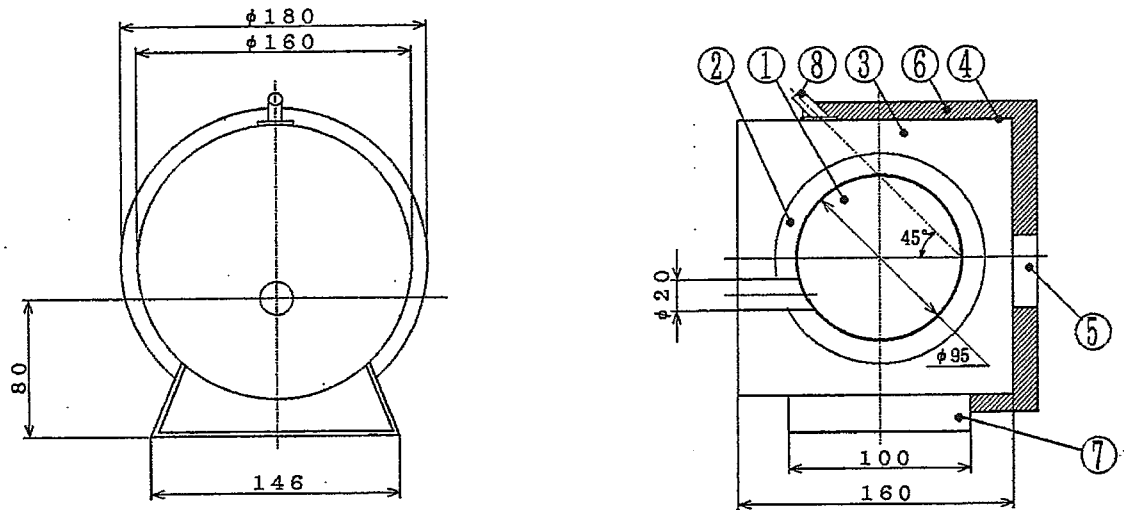
図1 エアロゾル浮遊空間の輻射透過率測定試験装置



テストセクションの光路付近の各部寸法 (mm)

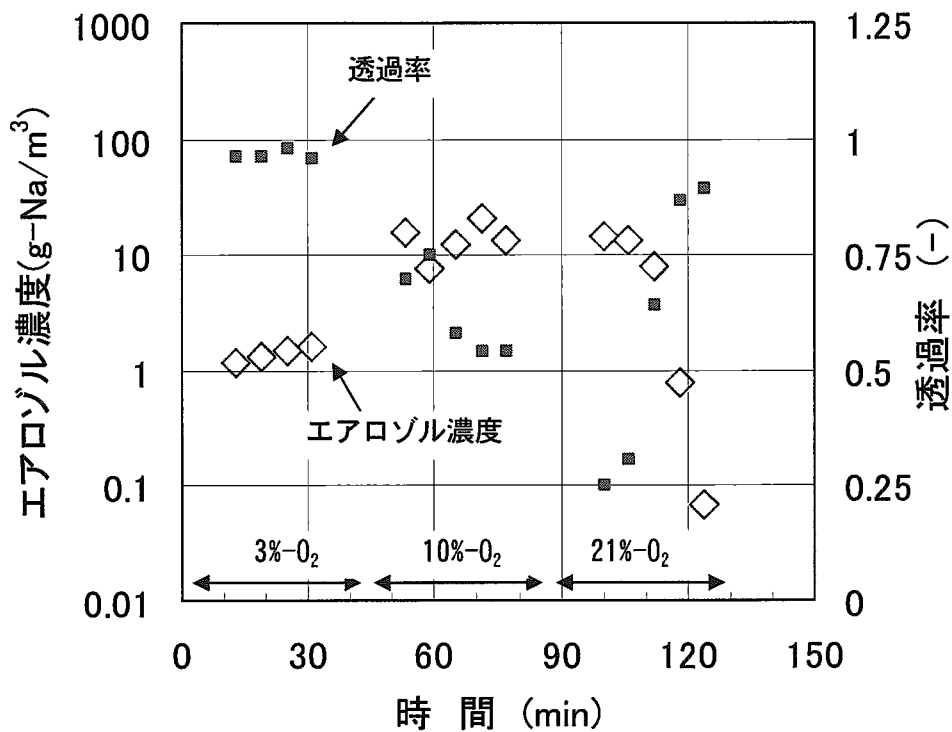
	No. 1	No. 2	No. 3
D	159.6	310.5	498.4
L1, L4	10	10	10
L2, L3	383	308	214
d1, d2	57.2	57.2	57.2

図2 テストセクション部の概略

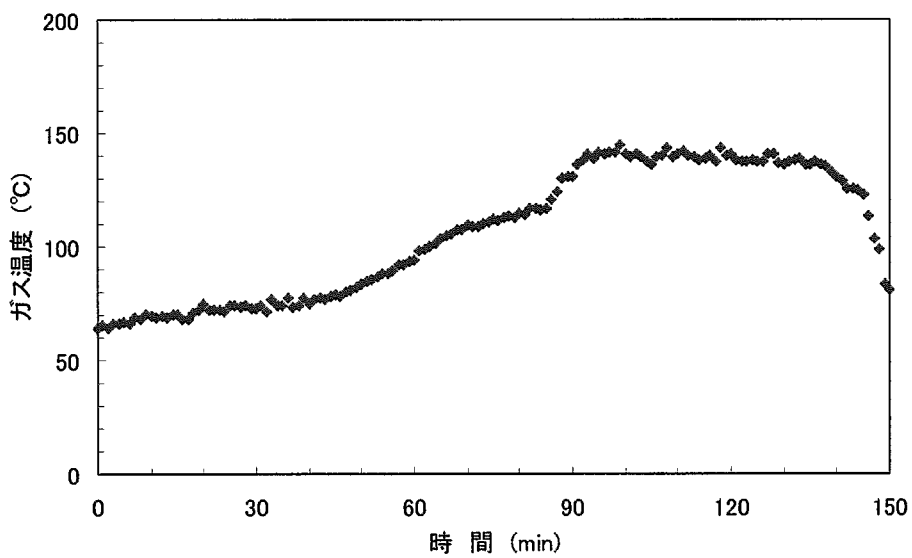


8	熱電対挿入口	1	BsBM
7	炉台	1	SUS
6	安全カバー	1	SUS
5	端子台	1	
4	きょう体	1	SUS
3	断熱材	1	
2	発熱体	1	ニクロム線
1	発熱球	1	SUS304
No	ITEM	Q'TY	MATERIAL

図3 黒体炉の概略



(a) エアロゾル濃度と赤外線透過率の推移



(b) ガス温度の推移

図 4 R-4 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の推移

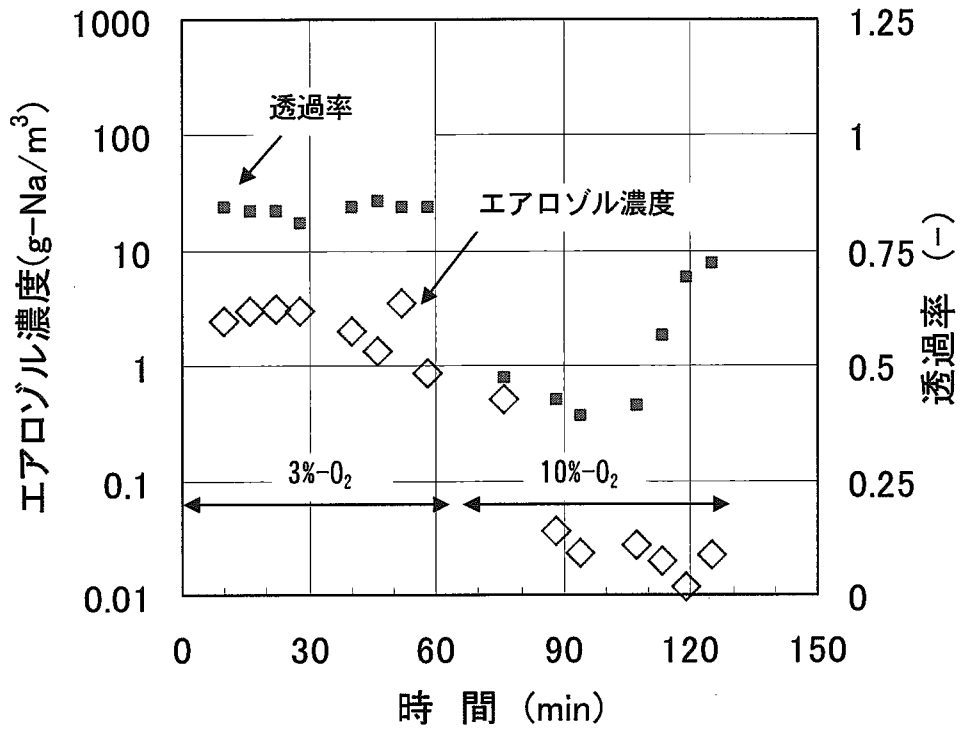


図5 R-5 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の推移

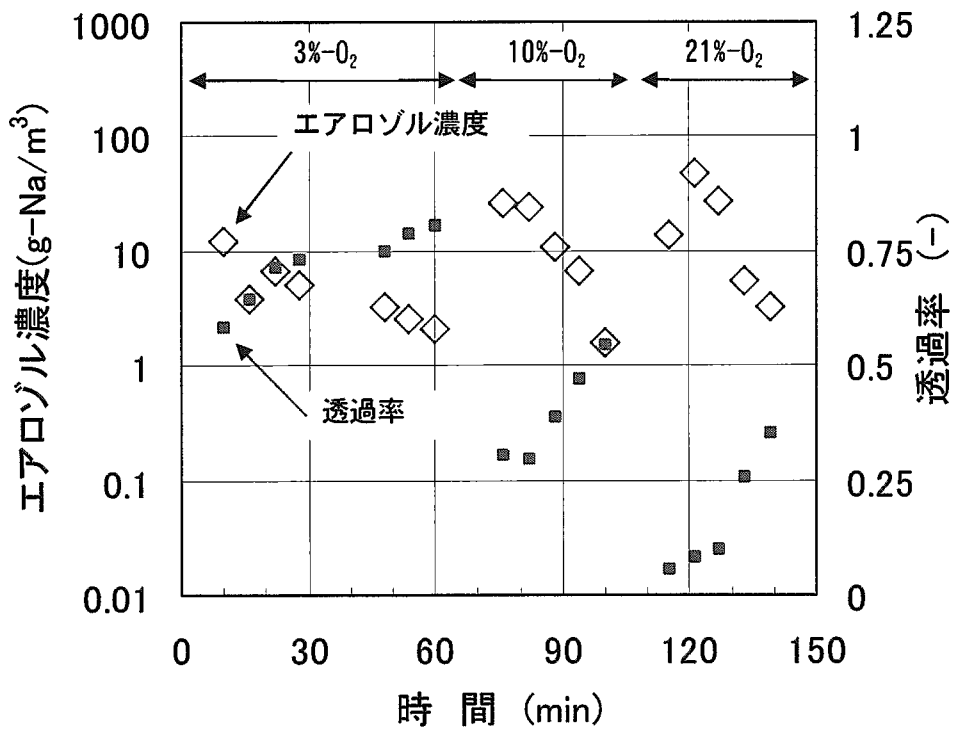


図6 R-6 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の推移

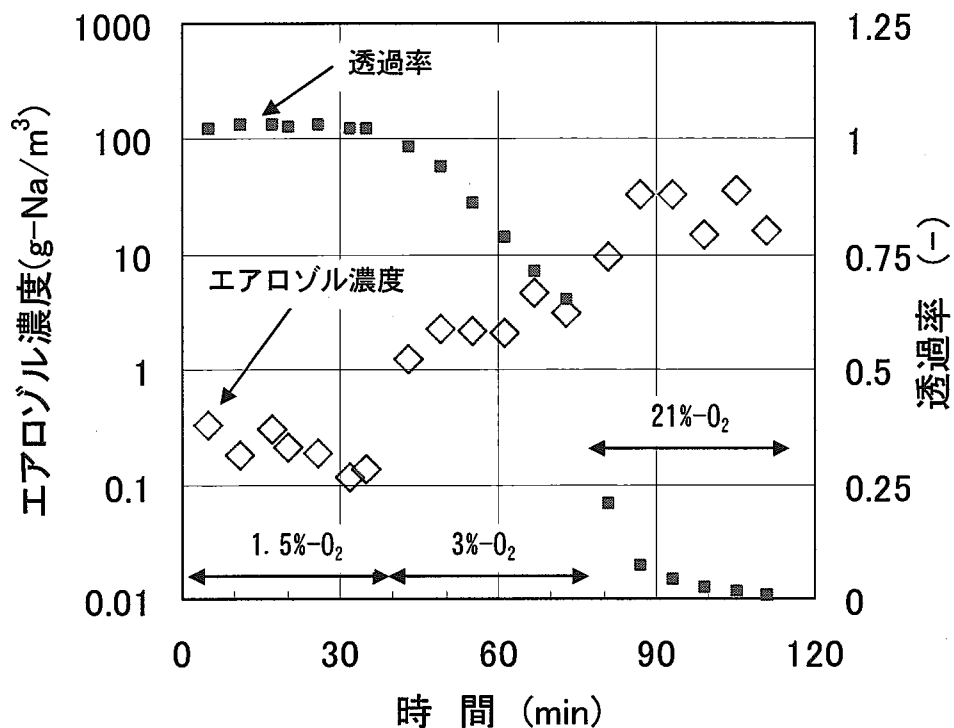


図7 R-7 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の推移

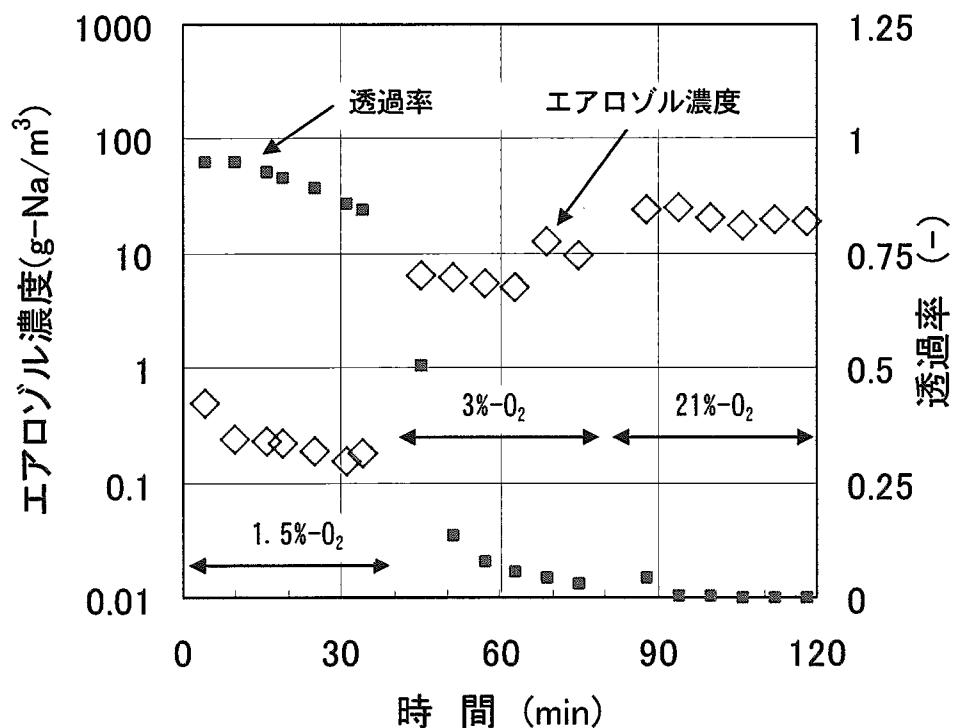


図8 R-8 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の推移

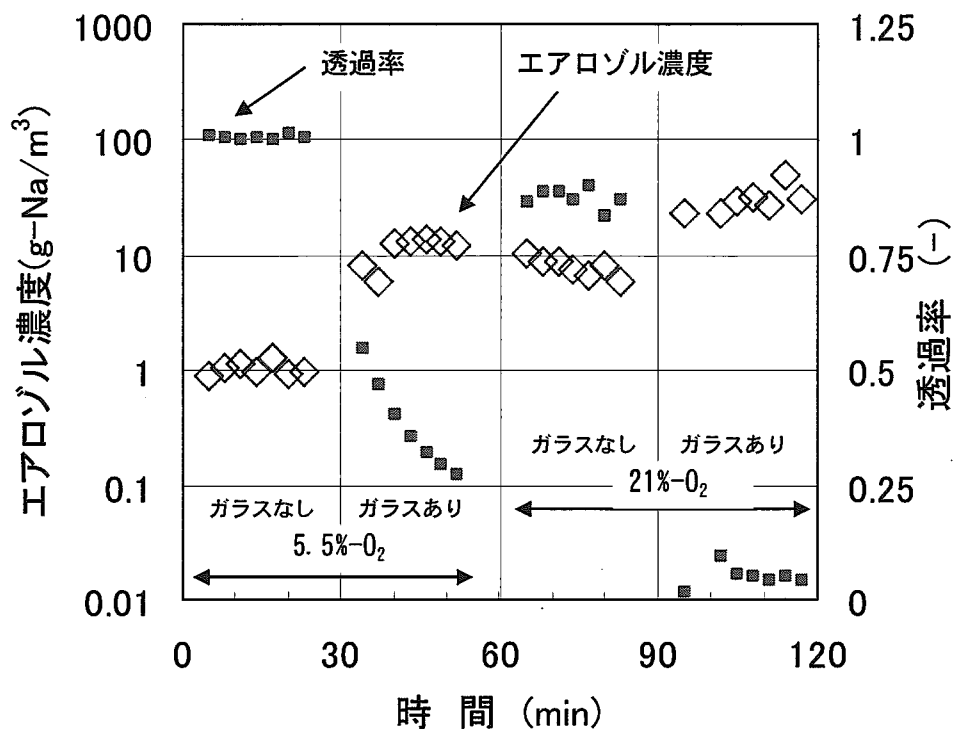


図9 R-9試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の推移

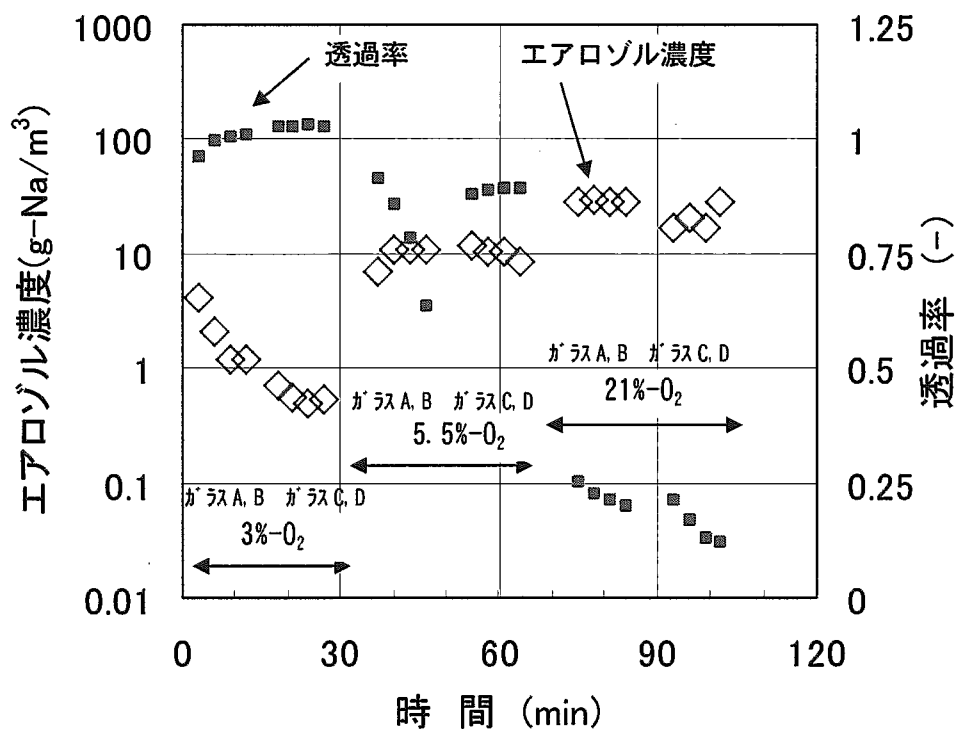


図10 R-10試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の推移

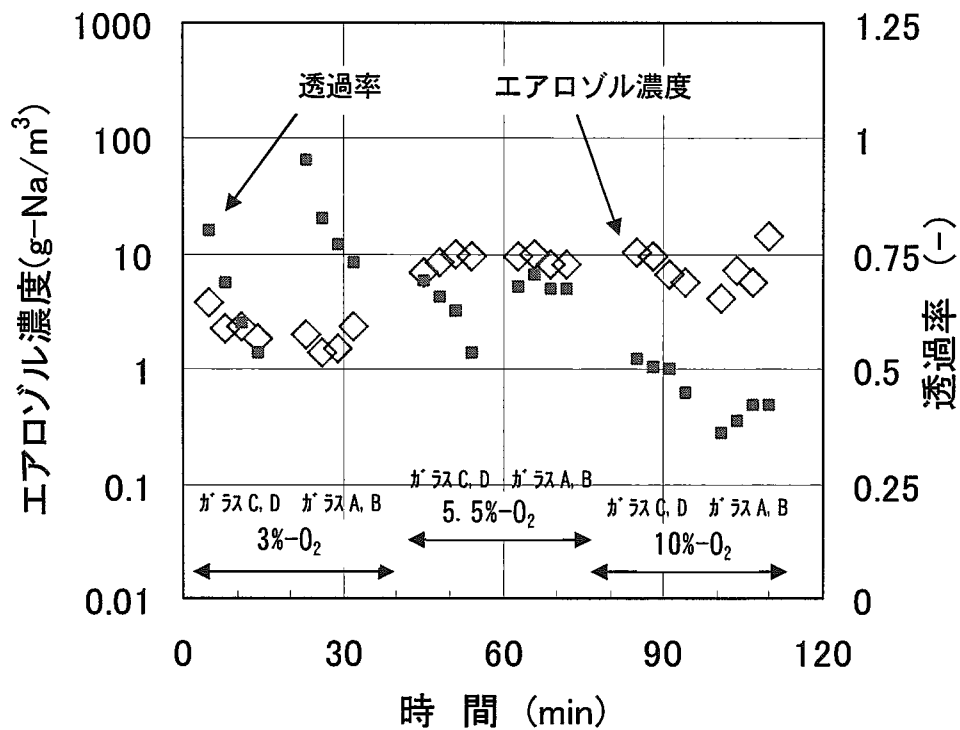


図 11 R-11 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の推移

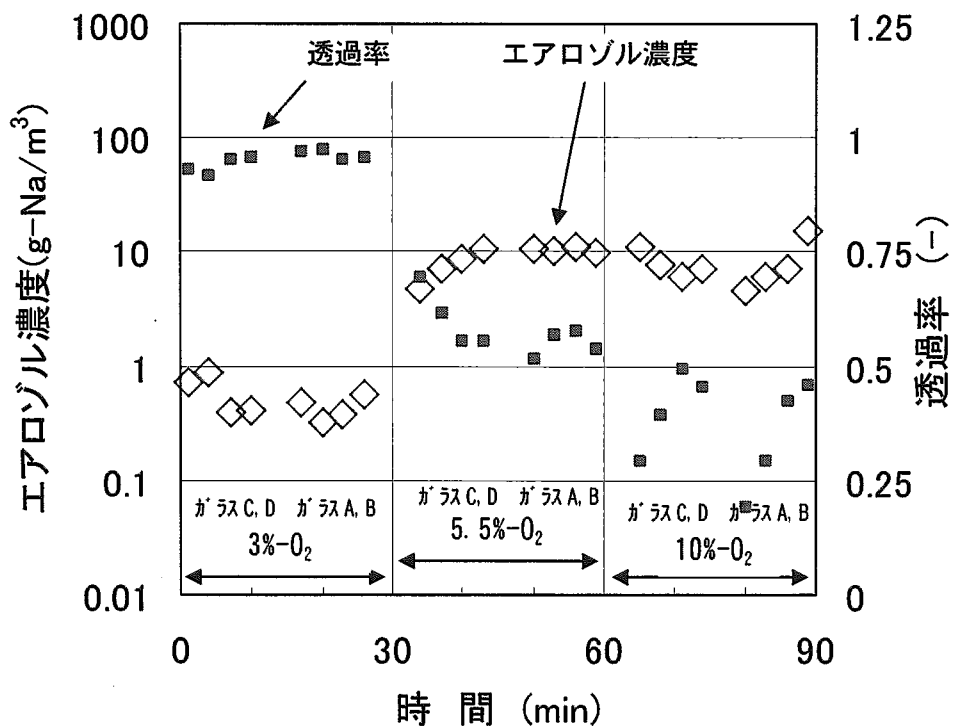


図 12 R-12 試験における浮遊エアロゾル濃度と透過率の推移

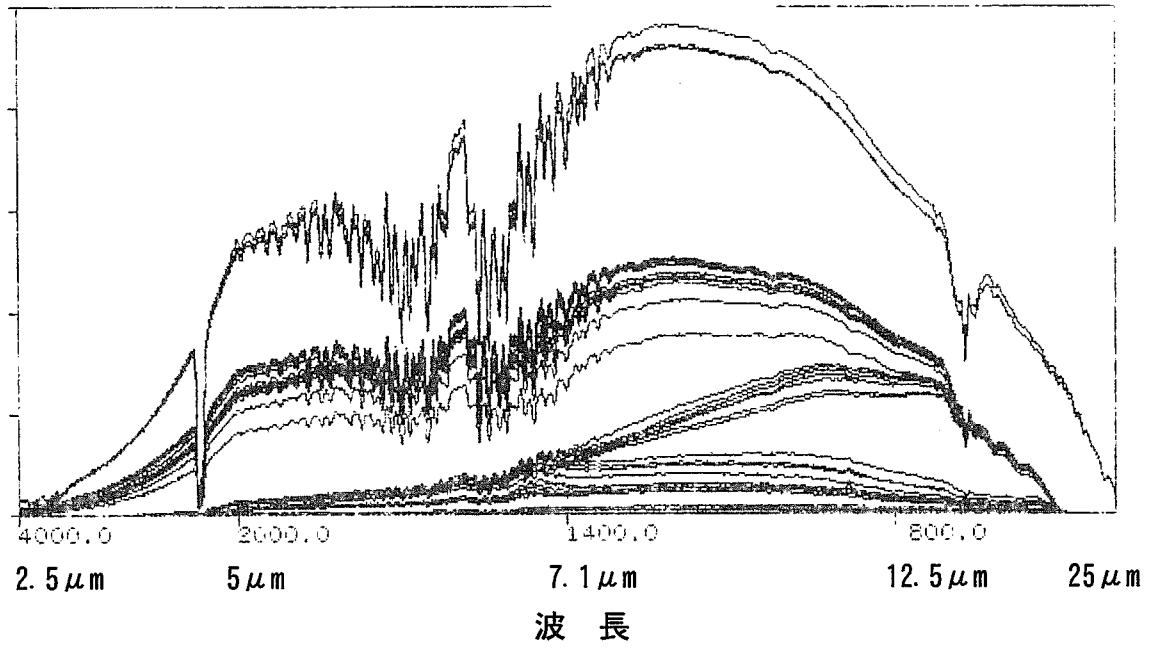


図 13 透過スペクトルの計測例 (R-10 試験)

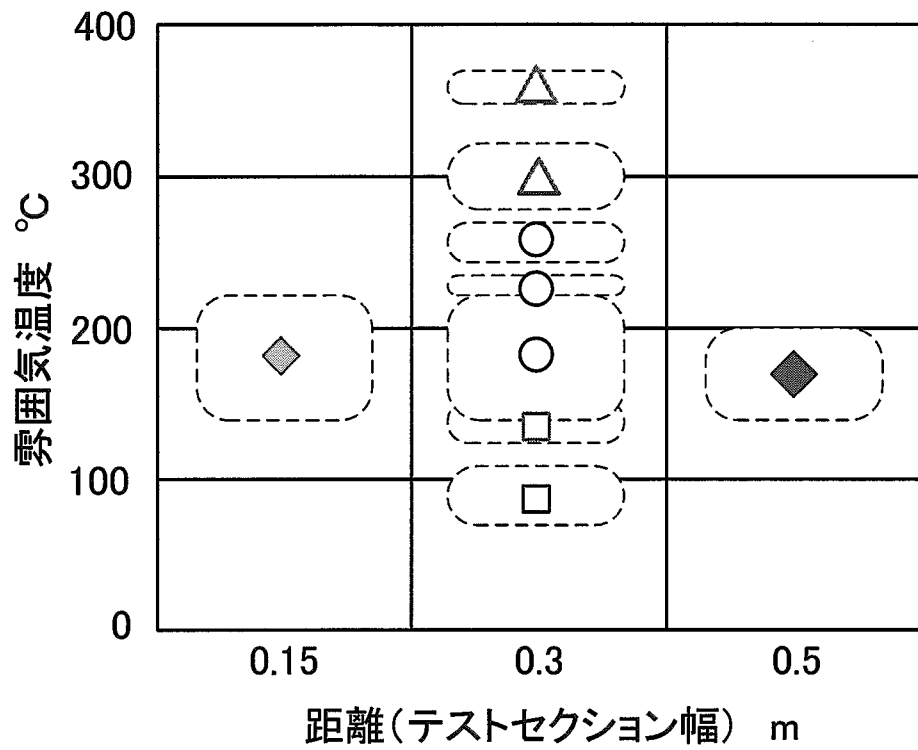


図 14 霧囲気ガス温度条件の達成範囲

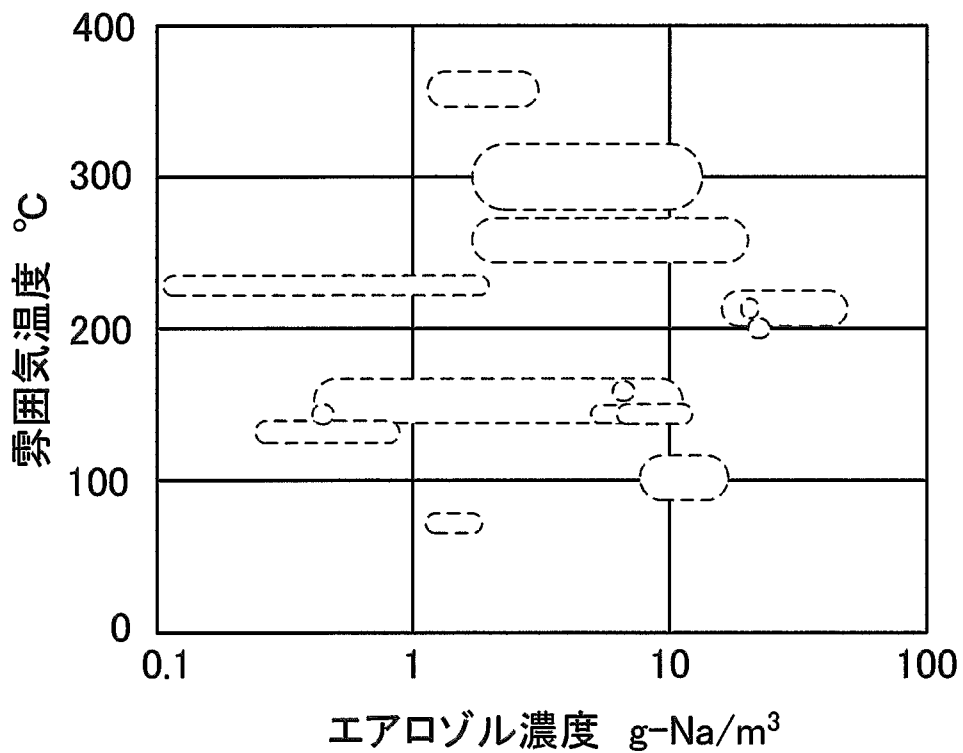


図 15 霧囲気ガス温度とエアロゾル濃度の達成範囲

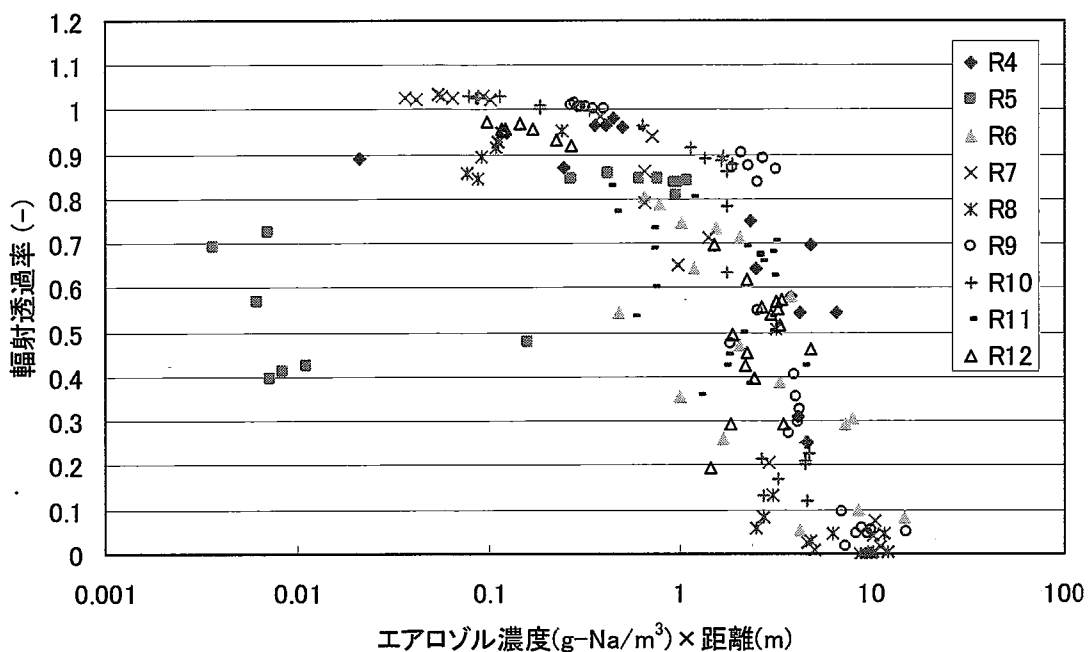


図 16 透過率測定結果 (全データ)

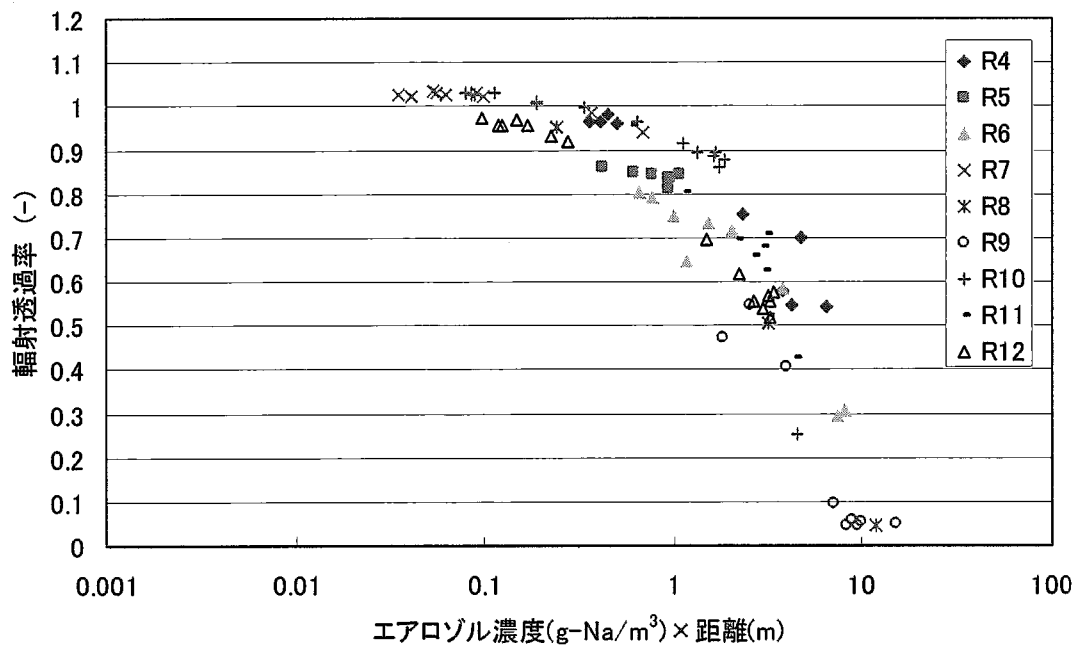


図 17 透過率測定結果 (試験後の検討で厳選されたデータ)

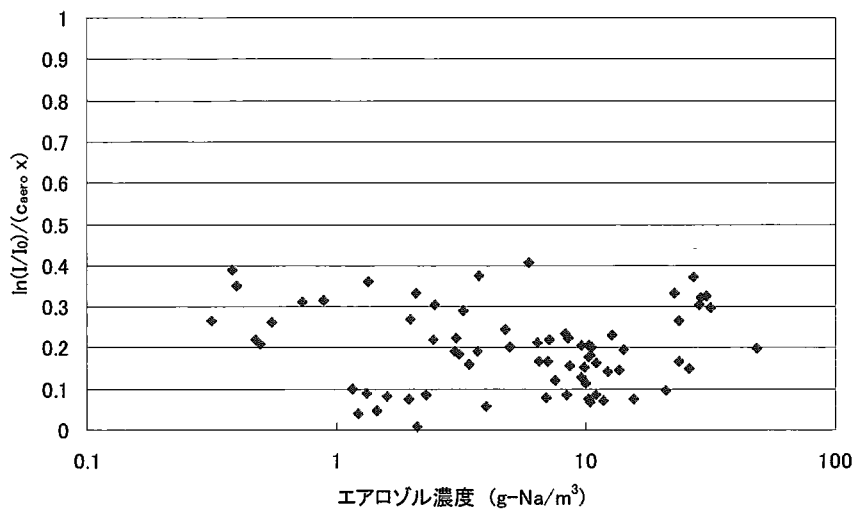


図 18 試験データから求められた減衰係数のエアロゾル濃度依存性

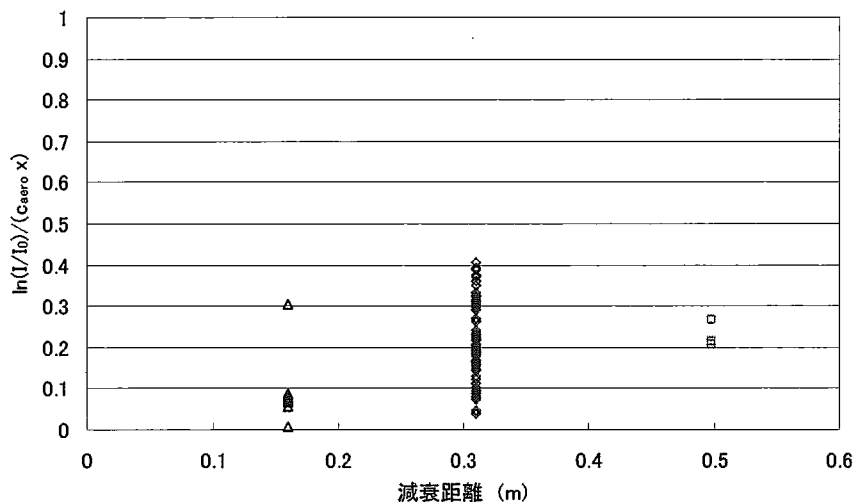


図 19 試験データから求められた減衰係数の減衰距離依存性

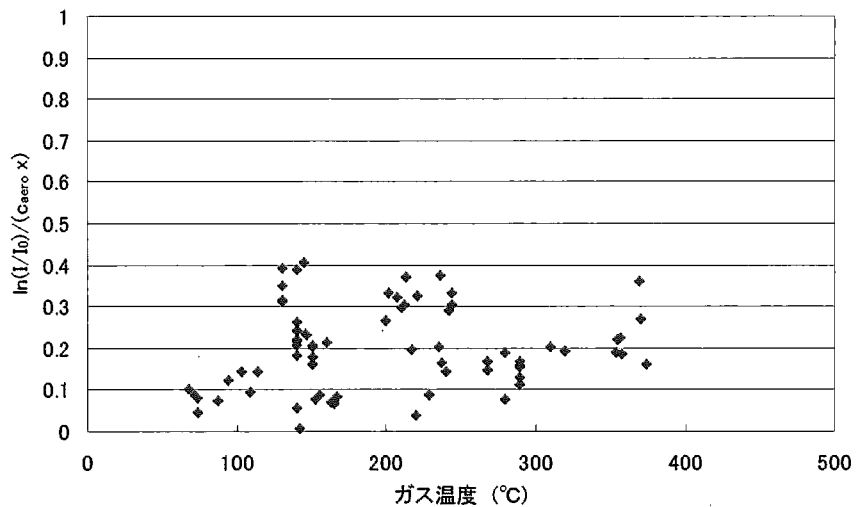


図 20 試験データから求められた減衰係数のガス温度依存性

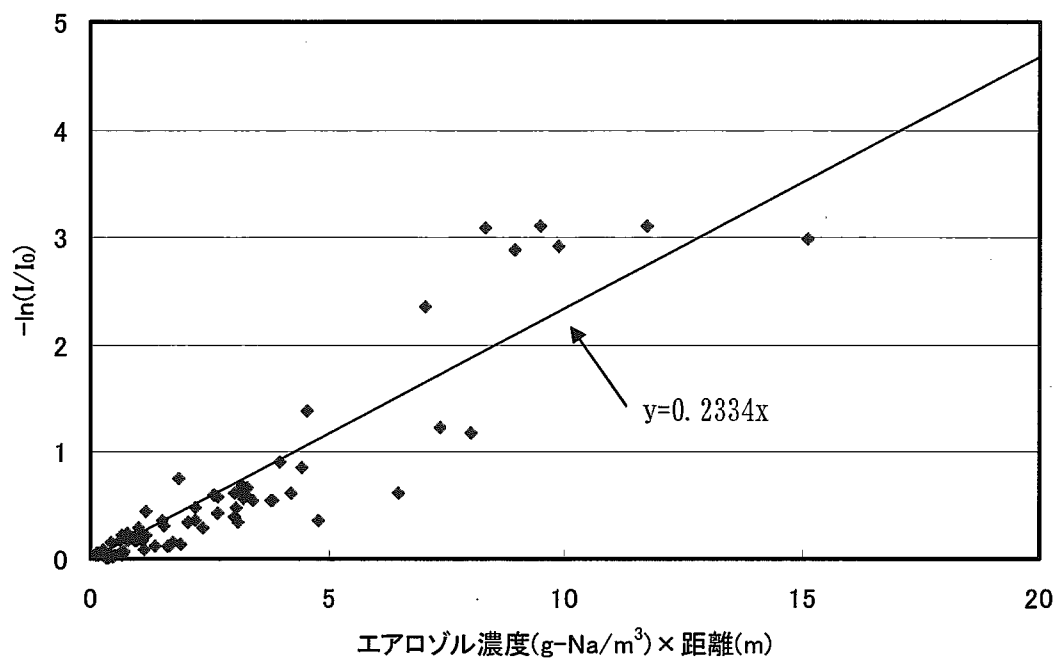


図 21 減衰係数の導出プロット

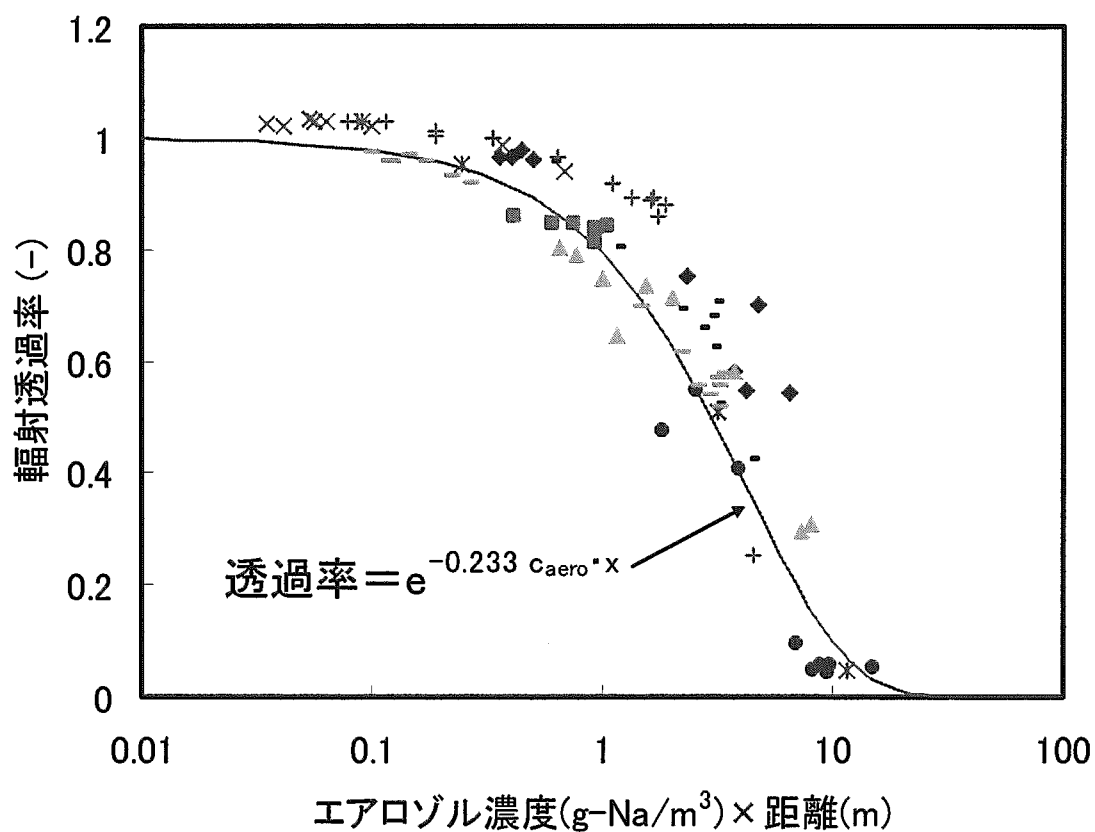


図 22 エアロゾル浮遊空間における放射透過率の測定データと評価式