



JAERI-Research
2001-052

JP0150821



模擬可燃性廃棄物の燃焼に伴う
放出ソースターム評価

2001年11月

阿部 仁・渡邊 浩二・田代 信介・高田 準一・内山 軍藏

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、
お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡
東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division,
Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Nakagun,
Ibarakiken 319-1195, Japan.

模擬可燃性廃棄物の燃焼に伴う放出ソースターム評価

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター燃料サイクル安全工学部
阿部 仁・渡邊 浩二・田代 信介
高田 準一・内山 軍藏

(2001年10月1日受理)

核燃料施設における火災事故時の施設内への放射性物質閉じ込め効果を定量的に評価するためには、煤煙による換気系フィルタの目詰まり挙動を含めた事故事象の進展解析を実施することが必要であり、そのためには放出される煤煙の粒径分布データや煤煙及びエネルギー放出速度等の放出ソースタームに関するデータの整備が不可欠である。そこで同施設から排出される固体廃棄物や回収溶媒を模擬した模擬可燃性廃棄物を用いた燃焼試験を実施して燃焼時に放出される煤煙の粒径分布等を測定するとともに、上記放出ソースタームの評価方法を検討した。

模擬可燃性廃棄物としてゴム手袋と綿手袋が混在した場合、粒径が $1 \mu\text{m}$ 以上の比較的大きな煤煙粒子が綿手袋の炭化した残留物によって閉じ込められ、ゴム手袋のみの場合と比べて煤煙放出率が低く押さえられた。ゴム手袋の燃焼に伴う気相温度や全燃焼重量あるいは全煤煙捕集重量等の試験結果を用いて、セル換気系安全性解析コード CELVA-1D にて、上記放出ソースタームを評価した。CELVA-1D による上記放出ソースタームの評価結果は、アメリカの事故解析ハンドブック(NUREG-1320)中で推奨されているパラメータを用いた計算結果とほぼ一致し、本試験での CELVA-1D を用いた放出ソースターム評価手法の妥当性が確認できた。このことは、燃焼に伴う気相部温度や全燃焼重量及び全煤煙捕集重量等の結果をもとに、本評価手法を用いることで、燃焼に伴う放出ソースタームを評価し得る可能性があることを意味する。

Evaluation of Released Source Terms from Burning Mock Combustible Waste

Hitoshi ABE, Koji WATANABE, Shinsuke TASHIRO
Junichi TAKADA and Gunzo UCHIYAMA

Department of Fuel Cycle Safety Research
Nuclear Safety Research Center
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 1, 2001)

To evaluate quantitatively confinement capability of the radioactive materials in the nuclear fuel facility under the fire accident, analysis of accident sequence, including clogging characteristics of the ventilation filters, needs to be performed. For the purpose of the evaluation, accumulation of the source term data such as release rates of the smoke and energy, and particle size distribution of the smoke during the fire accident is necessary. Therefore, experiments for evaluating burning characteristics of combustible solid wastes and recovered solvents, which are disposed from the facilities, have been performed by using the mock combustible wastes and the method for estimating the source terms has been investigated.

When mixtures of rubber and cloth gloves as mock combustible solid wastes were burnt, the smoke with above 1 μm in diameter was confined in the carbonized residue of cloth gloves and the release ratio of the smoke in the burning of mixtures was decreased compared with the burning of only rubber gloves. The source terms were evaluated with the cell ventilation system safety analysis code CELVA-1D by using the experimental results as the input, such as temperature of the gas phase, total burnt weight and total collected weight of the smoke under the burning of rubber gloves as mock wastes. The source terms calculated by the CELVA-1D reasonably agreed with the values estimated from the recommended calculation parameters in the Nuclear Fuel Cycle Facility Accident Analysis Handbook (NUREG-1320). Therefore, the present CELVA-1D method for evaluating the source terms during burning is considered to be valid. This means that the source terms can be estimated by using this method if the information such as the temperature of the gas phase, total burnt weight and total collected weight of the smoke are given.

Keywords : Nuclear Fuel Facility, Solid Waste, Recovered Solvent, Fire Accident,
Source Term, Smoke, CELVA-1D

目 次

1. 緒言	1
2. 試験	2
2.1 試験装置及び方法	2
2.2 試験条件	3
3. 試験結果及び考察	3
3.1 燃焼試験結果	3
3.2 CELVA-1D を用いた放出ソースターム評価	6
4. 結言	10
謝 辞	11
参考文献	11

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental	2
2.1 Experimental Devices and Methods	2
2.2 Experimental Conditions	3
3. Experimental Results and Discussions	3
3.1 Experimental Results for Evaluating Burning Characteristics of the Mock Wastes	3
3.2 Estimation of Released Source Terms with CELVA-1D	6
4. Conclusions	10
Acknowledgment	11
References	11

This is a blank page.

1. 緒 言

再処理施設等の核燃料施設の換気系の一部にはプレフィルタが設置されており、火災事故時に発生する煤煙のうち比較的大きな粒子を捕集することで、HEPA フィルタへの煤煙の負荷を緩和する役割を担っている。同施設における管理区域内で火災事故が発生した場合、大量の煤煙の発生により換気フィルタの目詰まりが生じ、最悪の場合圧損の上昇によって換気フィルタが破損することが考えられる。原研東海研究所ウラン濃縮研究棟での火災事故では、換気フィルタの破損にまでは至らなかつたが、HEPA フィルタの前段に設置されていたプレフィルタの目詰まりによる差圧上昇が観察され、事故事象の継続中、数回プレフィルタの交換がなされた¹⁾。フィルタが破損すると、施設内に内包される放射性物質が直接施設外へ放出されることになり、公衆の被曝量の増加等の甚大な環境影響を及ぼすことになる。したがって多重防護の観点から施設に設けられている幾つかの安全設備の中でも、特に換気フィルタの健全性の確保が、事故時の放射性物質の施設内へ閉じ込めの観点からは最も重要である。

原研ではこれまで、文部科学省からの受託研究「再処理施設セル換気系安全性実証試験」(以下、セル換試験)の中で、模擬可燃性固体廃棄物や模擬回収溶媒(以下、模擬可燃性物質)を用いた燃焼試験を実施してきており、これら物質の燃焼に伴う煤煙発生挙動や煤煙付加によるプレ及び HEPA フィルタの目詰まり特性データ等を取得してきた²⁾³⁾。また、セル換試験で開発してきたセル換気系安全性解析コード CELVA-1D⁴⁾を用いて試験結果を解析し、仮想的な条件の下でのこれら模擬可燃性物質の燃焼に伴うフィルタの目詰まりの経時変化を考慮した換気系の健全性評価と、フィルタの交換までの時間的裕度等の安全評価データの算出等を検討してきた。これらの場合でも、施設内で火災事故が発生した場合の放射性物質の施設内への閉じ込めを評価するためには、煤煙の発生挙動のみならず可燃性物質の燃焼に伴う換気系内部での熱流動(温度、圧力伝播等)の変化を定量的に評価することが必要になる。その際、可燃性物質の燃焼に伴って気相中に放出される質量の煤煙化率と質量及びエネルギー放出速度等が必要な情報となる。これらの値は、燃焼物質の種類のみならず、同じ燃焼物質でも酸素供給量や燃焼面積等の燃焼条件が違えば当然異なってくる。したがって、様々な燃焼条件をパラメータとしたきめの細かい条件の下での燃焼試験と試験結果解析を行い、これらの値について得られた知見をより普遍性の高い形に整理しておく必要がある。

セル換試験では、4~22 kg の模擬可燃性物質(ゴム手袋素材あるいは綿手袋素材)を約 19 m³の体積を有するセル(第 1 モデルセル)内で燃焼させている³⁾⁴⁾。このようにセル換試験では比較的多量の燃焼物を用いているため燃焼に伴う煤煙

やエネルギーの放出量が多く、煤煙の負荷によるフィルタの目詰まり現象を再現し模擬できる。そのため、施設が有する工学的な安全性を実証するためのデータを取得することが容易である。しかしながらその一方で、第1モデルセルの体積が大きいため、セル内部での煤煙の沈着や気相中の局所的な温度分布等が生じ、これらの試験データから模擬可燃性物質の燃焼に伴う煤煙化率やエネルギー放出速度等を解析・評価する上で問題が生じる可能性がある。そこで、これらの空間の大きさに起因する要因を極力排除することを目的として、セル換試験装置より小型の試験装置を作成し、幾つかの模擬可燃性物質を対象とした燃焼試験を実施した。そしてこれら模擬可燃性物質の燃焼に伴って放出される煤煙の粒径分布等を計測するとともに、セル換試験で取得され報告されている試験結果との比較を行った。さらに、煤煙の負荷による換気フィルタの目詰まりを含めた事故事象進展解析を行う上で必要な、煤煙や質量及びエネルギー放出速度を「放出ソースターム」と定義し、燃焼試験から得られた結果をCELVA-1Dを用いて解析することで、これら放出ソースタームデータの算出・評価を試みた。

2. 試験

2.1 試験装置及び方法

図1に「火災事故時ソースターム試験装置」の概要を示す。装置は給気ダクト系(含燃焼室)、希釈ダクト系、フィルタユニット及び排気ダクト系(含プロア)から構成される。給気ダクト系と排気ダクト系(プロアの手前まで)は150A配管(内径: 0.155 m)、また希釈ダクト系は100A配管(内径: 0.105 m)から成る。燃焼室も同様に150A配管から成り、燃焼室の上流側に設置された整流管を通過することで整流された気体が底部から上部に抜ける。このように火災事故時ソースターム試験装置はセル換試験装置とは異なり、模擬可燃性物質の燃焼に伴い気相中に放出された煤煙が、燃焼室内で滞留せず整流された気流に同伴し移流する。燃焼室の底部には金網が設けられており、模擬可燃性物質を金網上の燃焼皿に入れ、ガスバーナーによる強制着火によって燃焼させる。給気ダクトにおける体積流量は $4.2 \times 10^{-3} \text{ Nm}^3/\text{s}$ に調整した。燃焼室底部の金網から45 cm直上の位置より、煤煙を含有した気体を、長さ2.5 mの40A配管(断面積13.59 cm²)から成るサンプリング配管を介してカスケードインパクタ(東京ダイレック製、ロープレッシャーインパクタ LP-20S-60)へサンプリングし、煤煙の粒径分布を測定した。本装置は0.05 μm以下の粒子を捕集するバックアップサンプラーと11 μm以上の粒子を捕集するステージを含めて13の捕集段から構成される。

煤煙のサンプリングは着火から鎮火までの全燃焼時間中行った。同様に燃焼室の金網から 53 cm 直上の位置での気相の温度を熱電対にて計測した。これら煤煙の捕集及び気相温度の測定は、着火から自然鎮火まで継続して行った。フィルタユニットにはプレフィルタ(日本無機(株)製、コスモ・フィルタ(CM-KW)、200mm×200mm×50mm)と HEPA フィルタ(日本無機(株)製、ATM-1.5-Q-G、200mm×200mm×150mm)を各一枚設置した。

2.2 試験条件

これまでに実施した各試験条件を表 1 に示す。模擬可燃性物質としては、セル換試験と同様に核燃料施設から排出される回収溶媒を模擬した模擬回収溶媒(ドデカン)と低レベル固体廃棄物を模擬した模擬固体廃棄物(ゴム手袋素材及びゴム手袋素材+綿手袋素材)の 3 ケースを考慮し²⁾³⁾、EXP-1 から EXP-4 試験までの 4 試験を実施した。EXP-2~4 では市販のゴム手袋あるいは綿手袋をあらかじめ約 1 cm 四方に剪断して燃焼皿に入れ燃焼させた。

3. 試験結果及び考察

3.1 燃焼試験結果

(1) 燃焼形態

表 1 に燃焼試験結果のまとめを示す。EXP-1 試験では、火炎はほぼ垂直に立ち上がり、着火から鎮火まで火炎の大きさ及び高さ等はほぼ定常的であった。EXP-2~4 と比べて EXP-1 での火炎高さはかなり高く、燃焼室上部の気相温度測定用の熱電対にまで達していた。EXP-2~4 では EXP-1 と同様に燃焼は定常的であったが、鎮火直前では燃焼が緩やかになり、火炎も小さくなつた。EXP-2~4 の場合の火炎の高さは EXP-1 よりかなり低く押さえられ、約 5~6 cm 程度であった。CELVA-1D で火災現象を解析する場合には、ソース源は一点に置き換えてモデル化する必要がある。この点からは 3.2 で述べる CELVA-1D を用いた放出ソースターム解析を適用するのには、EXP-2~4 を対象とすることがより現実に近い条件を模擬し得るものと考えられる。

表 1 に示したように、鎮火後の状況は、EXP-1 ではドデカンは全量燃焼しており、容器内には煤等の残存もほとんどなかった。EXP-2 及び 3 では、容器底面に若干量のタール状残物が認められた。模擬可燃性物質の初期量に対する試験前後の重量差の割合で燃焼率を定義すると、EXP-2 及び EXP-3 での燃焼率はそれぞれ 86% 及び 94% と計算された。試験に先だって大気条件下で試験的にゴム手素材を燃焼した場合には、EXP-2 よりもかなり多めのタール状残物と若干

量のゴム手袋素材が残った。これは本試験装置を用いた燃焼試験では、大気条件下と比べて燃焼効率が高かったことを示唆しており、このことは本試験での給気による酸素の供給が大気条件下よりも効率良く行われていたことを意味する。また EXP-4 での燃焼率は 28% と EXP-2 及び EXP-3 より低く、EXP-2 及び 3 と比べてより多量のタール状残物と炭化した綿手袋素材の燃焼残物が認められた。このことから、綿手袋素材が共存する場合にはゴム手袋素材の燃焼効率が低下するものと考えられる。

表 1 中の試験結果から EXP-1 試験における液面降下速度を計算すると約 $1.2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ となる。この値はドデカンの大気火災試験データ⁵⁾とほぼ一致する。

(2) 煙粒径分布

図 2～図 4 にカスケードインパクタに捕集された煙の重量基準の対数確率分布図を示す。カスケードインパクタ捕集結果からの煙の質量中央空気力学径 MMAD 及び幾何標準偏差 σ_g の計算では、煙粒子を空気力学的相当球として取り扱った。カスケードインパクタの 13 の捕集段の内、粒径が $11 \mu\text{m}$ 以上と $0.05 \mu\text{m}$ 以下の粒子を捕集する 2 つの捕集段については、プロット点から外してある。図 2～図 4 のいずれの場合でもほぼ直線関係が得られている。煙の粒径分布が対数正規分布に従うと仮定して煙の MMAD 及び σ_g を計算した。結果を表 1 に示す。セル換試験で測定された煙の MMAD 及び σ_g は、模擬回収溶媒(ドデカン及び 30%TBP/70% ドデカン混合溶媒)に対して $0.2 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 及び 3～4、模擬固体廃棄物に対して $0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 及び 3～4 と報告されている⁶⁾。表 1 示した本試験における測定結果は、セル換試験結果を比較すると MMAD は小さく、逆に σ_g は大きくなっている。上述したようにセル換試験では、本試験と比べて大量の模擬可燃性物質を燃焼させているため煙の発生量も多く、また気相中の煙濃度も濃い。また模擬可燃性物質を燃焼させている第 1 モデルセルの体積が大きいため、燃焼に伴って放出された煙は第 1 モデルセル内で滞留した後、ダクトへ流出する。ちなみにセル換試験での第 1 モデルセル内の換気回数は 5～20 回/h であり⁶⁾、第 1 モデルセル内の気相を給気流によって完全に置き換えるのに 3～12 分間必要となる。セル換試験では、第 1 モデルセルからダクトに流出した煙をカスケードインパクタにて捕集し粒径分布を測定している。したがって煙は、第 1 モデルセル内での滞留時間中における凝集による径の増大の効果と重力沈降による径の比較的大きい煙の個数の減少の効果を経た後に捕集されているものと予想される。それに対して、本試験では、模擬可燃性物質を燃焼させる燃焼室の形状は、燃焼室の上流及び下流に位置するダクトと同じ径の配管を用いており、かつ比較的大きな給気流量を設定していることから、セル換試験における凝集や重力沈降等の効果によって失

われた粒径範囲の煤煙についても、より効果的に気流に同伴させることができたため、セル換試験と比べて MMAD が小さく、 σ_g が大きく評価されたものと推察できる。このことは、同じゴム手袋素材を燃焼させた EXP-2 と EXP-3 での結果を比較でも、燃焼重量が多く煤煙濃度が高かった EXP-3 試験での MMAD が EXP-2 試験結果より若干大きめになっていることとも定性的に合致する。また本試験では、燃焼開始から鎮火までの全燃焼時間にわたって煤煙をカスケードインパクタで捕集しているため、仮に煤煙粒径分布が燃焼時間によって変化する場合、このような煤煙捕集条件では、計測される煤煙粒径分布の σ_g は、定常的な燃焼条件のもとでの計測結果より大きくなるものと考えられる。この点についてはカスケードインパクタの個数を増やして煤煙捕集時間を切り替えて使用することや、煤煙粒径分布の経時変化をリアルタイムで計測できる粒径分布測定装置等を用いことで、さらに詳細に検討していく予定である。

ゴム手袋と綿手袋をほぼ 1 対 1 の割合で燃焼させた EXP-4 試験での粒径分布測定結果は、ゴム手袋のみを燃焼させた EXP-2 及び EXP-3 試験と比較して、MMAD はほぼ同じ値であるが、 σ_g は 3.4 と小さくなつた。これは主に、EXP-4 では EXP-2 及び EXP-3 と比べ、約 $1 \mu\text{m}$ 以上の比較的径の大きい煤煙粒子がカスケードインパクタに捕集されなかつたことに由来する。図 4 でのプロット点数が図 2 及び図 3 におけるプロット点数より少ないのである。EXP-2 及び EXP-3 での対数確率分布図での直線近似に伴う相関係数はそれぞれ 0.995 及び 0.987 であったのに対して EXP-4 での相関係数は 0.921 と悪化したことからも説明できるように、図 4 中の EXP-4 でのデータ点のばらつきが図 3 中の EXP-2 及び EXP-3 でのデータばらつきより大きかつた。このことは EXP-4 における煤煙粒径分布の対数正規分布からのずれが、EXP-2 及び EXP-3 と比較して大きいことを意味している。(1)述べたように、EXP-4 では、燃焼後の残留物としてゴム手袋の燃焼残留物であるタール状物質に加えて、炭化した綿手袋の残留物が確認された。EXP-4 では、この炭化した綿手袋の残留物が一種の吸着剤として作用し、比較的径の大きい粒子をはじめとした煤煙を残留物側に閉じ込める働きをしたため、煤煙粒径分布の対数正規分布からのずれが EXP-2 及び EXP-3 より大きくなつたものと推察される。この点については、炭化した綿手袋の残留物の電子顕微鏡撮影等によって残留物の微細構造を明らかにするとともに、図 4 に示した放出された煤煙粒径との相関を観察することにより、同残留物による粒径毎の煤煙の閉じ込め効果を定量的に検討していく必要がある。

なお EXP-1 での直線近似に伴う相関係数は 0.987 であった。

(3) 気相温度上昇挙動

図 5 に各試験における燃焼室上部での気相温度の時間履歴を示す。EXP-1 で

は約 120 °Cまで上昇したが、一方で EXP-2 及び EXP-4 のピーク温度はそれぞれ約 38 °C及び約 40 °C、また EXP-3 では約 73 °C程度であった。これは(1)で述べた火炎の到達高さの違いが原因であるものと予想される。同じゴム手袋素材を燃焼させた EXP-2 と EXP-3 における結果を比較すると、表 1 に示したように EXP-3 は EXP-2 より燃焼量が 4 倍多かったが、一方で自然鎮火までの燃焼時間は約 1.3 倍長かったにすぎない。このことは EXP-3 では EXP-2 と比較してより短時間に激しく燃焼したことを意味する。燃焼量を燃焼時間で除することで計算した平均燃焼速度で比較すると、EXP-3 は EXP-2 より約 3 倍速く燃焼していることが分かる。しかしながらこの平均燃焼速度をさらに燃焼皿開口部面積(燃焼面積)で除し、単位燃焼面積当たりの燃焼速度に換算すると、両者の比は約 1.3 倍まで接近する。これは、燃焼物質が同じ化学的組成を有し、酸素供給等の条件が同じである場合には、燃焼速度(あるいは燃焼時間)に対しては、燃焼面積が大きな要因となっていることを意味する。この点は、CELVA-1D 等を用いて燃焼物質量等をパラメータとした安全評価解析を実施する際の燃焼物形状条件の設定でも十分考慮しなければならない要因である。

3.2 CELVA-1D⁴⁾を用いた放出ソースターム評価

(1) CELVA-1D の概要

1) 計算モデルの概要

CELVA-1D は、換気系内の熱流動及び物質(煤煙)の移行挙動を、換気系を一次元と仮定しガスの圧縮性を考慮して解析する。熱流動の基礎式としては、時間及び変位の関数としての質量保存式、エネルギー保存式、運動量保存式及び気体の状態方程式を考慮している。CELVA-1D は、配管内での煤煙(エアロゾル)の沈着機構として、重力沈降、拡散沈着(層流、乱流)、熱泳動沈着及び慣性衝突沈着をモデル化しており、これら機構を考慮しながら、煤煙(エアロゾル)の配管内の移行挙動を、熱流動解析結果とリンクさせて評価できることが特徴となっている。また煤煙による目詰まり係数を設定することで、放射性物質の施設内への閉じ込め効果の維持という観点からは極めて重要な HEPA フィルタやプレフィルタ等の換気フィルタの煤煙の付着による差圧上昇を評価できる。

2) 試験装置のノードジャンクションデータの作成

CELVA-1D では、換気系を一次元方向に体積要素(ノード)とノード間の接続点(ジャンクション)とにモデル化することで空間的な差分化を行い、上記基礎式を解いている。まず図 1 に示した試験装置のノードジャンクション(NJ)データを構築した。作成した NJ データを図 6 に示す。図中、B、C、D、F 及び J は、それぞれ試験装置中のブロア、セル、ダクト、フィルタ及びジャンクションを

表しており、これら記号に続く数字は NJ 通し番号、さらにそれに続く数字は各ノードの流れ方向の長さ (m)を表している。ジャンクションはノード間の接続点であるため長さは設定されない。また通し番号に b が記されているダクトはベンドとして取り扱ったことを意味し、曲率半径 (m)を記号 r_c に続けて記載した。C で表したセルについては、セル内径 (m)を d に続けて記載した。図 6 には、CELVA-1D による試験解析で用いた換気フィルタの層流及び乱流抵抗係数(K_L 及び K_T)とプロアの流動特性データも併せて記載した。

(2) 放出ソースターム評価

上述のように火災事故時の施設内へ放射性物質の閉じ込め安全性を評価するためには、換気フィルタの目詰まり特性に加えて、火災事象時の質量、エネルギー及び煤煙放出速度等のデータが必要になる。ここでは図 5 で示した燃焼室上部の気相部の温度履歴及び表 1 に示したカスケードインパクタによる全煤煙捕集重量結果を CELVA-1D に適用し、これら燃焼物質からの放出項(放出ソースタームと定義)を評価することを試みた。一例として、ドデカンと比べて単位燃焼重量当たりの煤煙発生量が多いゴム手袋の燃焼を取り上げた。放出ソースタームに対する燃焼面積の増大の効果等を極力排除するため、EXP-3 と比べて燃焼量が小さい EXP-2 を評価対象とした。

1) 質量放出速度 \dot{M} の評価

物質の燃焼に伴って質量が図 5 に示した気相部の温度履歴に比例して気相中に放出されたものと仮定した。図 5 に示した温度履歴を時間で積分し、その積分値を表 1 に示した燃焼重量で規格化することで質量放出速度 \dot{M} (kg/s)を算出した。算出した \dot{M} の時間履歴を図 7 に示す。この時間履歴を時間積分すると燃焼重量と一致する。図 7 には表 1 中に記載した平均燃焼速度も合わせて示した。

2) エネルギー放出速度 \dot{E} の評価

燃焼に伴って放出されるエネルギー放出速度 \dot{E} (J/s)については、アメリカの核燃料施設安全評価ハンドブック(AAH)⁷⁾中では以下のように、質量放出速度 \dot{M} に燃焼熱と分率を乗ずることで求める方法が記載されている。

$$\dot{E}_a = X_a \times H_t \times \dot{M} \quad (1)$$

$$\dot{E}_c = X_c \times H_t \times \dot{M} \quad (2)$$

\dot{E}_a (J/s)及び \dot{E}_c (J/s)はそれぞれ、火災からの実際の放熱速度(Actual heat release from the fire)及び燃焼ガス中の対流による発熱速度(the amount of convective heat generated (heat in the combustion gases))、 H_t (J/kg)は燃焼熱

量、 X_a 及び X_c はそれぞれ H_t に乘すべき分率である。そこで本試験でも以下のように \dot{E} は \dot{M} に何らかの係数を乗ずることで表現されるものと仮定した。

$$\dot{E} = k_E \times \dot{M} \quad (3)$$

k_E (J/kg)は(1)式及び(2)式中の $X_a \times H_t$ あるいは $X_c \times H_t$ に対応する係数である。 k_E をパラメータとして \dot{M} から \dot{E} を求め、これらを放出ソースタームとして CELVA-1D によって燃焼室上部の温度計測位置(図 6 中 D27)における気相部の温度を計算し、実測値と計算値が一致する k_E を求めた。計算結果を図 8 に示す。 k_E を 1.8×10^7 (J/kg)とすると実験値と計算値は一致した。AAH 中では、幾つかの可燃性物質をリストアップし、それぞれについて \dot{M} 及び \dot{E} を手計算できるように必要なパラメータを推奨している。それらの内、ゴム手素材にもっとも近いと考えられるポリクロロプロレンについての AAH 推奨値を表 2 に示す。 Y_s は煤煙発生速度の計算に使用する分率である。本解析では気相部の温度の上昇挙動は \dot{E} に比例していると仮定しているので、 k_E は燃焼に伴う全エネルギー放出の寄与を表すべきである。そこで k_E は $(X_a + X_c) \times H_t$ に対応するものと考えると、 \dot{E} は以下の式で表現される。

$$\dot{E} = (X_a + X_c) \times H_t \times \dot{M} \quad (4)$$

$(X_a + X_c) \times H_t$ を表 2 中のパラメータを用いて計算すると、 $1.6 \sim 1.8 \times 10^7$ (J/kg)となり、図 8 に示した k_E 評価結果と良く一致する。

3) 煤煙放出速度 \dot{G} の評価

\dot{E} と同様に、AAH 中では火災による煤煙の放出速度 \dot{G} (kg/s)は \dot{M} にある分率 Y_s (表 2 参照)を乗ずることで求めることができると述べている。

$$\dot{G} = Y_s \times \dot{M} \quad (5)$$

本解析でも Y_s に対応する煤煙化率 k_G (-)を考慮し、 \dot{G} は以下の式で表現されるものと仮定した。

$$\dot{G} = k_G \times \dot{M} \quad (6)$$

図 5 に示した \dot{M} と \dot{M} に $k_E (= 1.8 \times 10^7)$ を乗ずることで算出した \dot{E} を用いて、火災時ソースターム試験装置の配管内の熱流動を計算するとともに、 k_G をパラメ

ータとして(6)式から \dot{G} を計算し、燃焼室上部の煤煙サンプリング位置での煤煙濃度 (kg/m^3)の経時変化を計算した。その煤煙濃度計算値に熱流動計算によって求められた同位置での体積流量計算値 (m^3/s)を乗じ、時間積分することで煤煙サンプリング位置における煤煙重量 (kg)を積算した。この積算の煤煙重量計算値が表 1 に示したカスケードインパクタによる全煤煙捕集量をもとに計算された煤煙サンプリング位置における煤煙重量と一致するように計算を繰り返し、 k_G を求めた。本試験の場合、放出された煤煙は燃焼室とそれに続くダクト内を給気流に同伴して垂直に上昇し、その途中でサンプリング配管を介してカスケードインパクタへ捕集される。本試験では、ダクト内の給気流量が大きいため、煤煙が燃焼物質からサンプリング配管によるサンプリング点までに至る滞留時間は約 2 秒程度と短い。この滞留時間に加えて、EXP-2 での気相部の温度は図 5 に示したように最大値でも約 38 °C と比較的低く、流体と装置配管内壁温度間の温度差が小さいため、壁方向への煤煙の熱泳動沈着は無視しうるものと考えられる。これらの点を考慮すると、放出された煤煙の運動に対しては、横方向の壁への沈着速度成分よりも煤煙の垂直方向の速度成分が支配的に作用しているものと予想されるため、煤煙の沈着・沈降機構としては重力沈降のみを考慮して CELVA-1D による煤煙の移行計算を行った。また、カスケードインパクタ捕集結果の解析と同様に CELVA-1D の計算でも煤煙粒子を空気力学的相当球として取り扱った。

図 9 に k_G の評価結果を示す。 k_G を 0.11～0.12 とすると煤煙捕集重量に関して CELVA-1D 計算結果と実測値はほぼ一致した。それに対して、表 2 中に示したように、AAH 中のポリクロロブレンに対する Y_s の値は 0.15～0.38 である。本解析では煤煙サンプリング位置からカスケードインパクタまでのサンプリング配管中の煤煙の沈着は考慮していない。煤煙の MMAD と σ_g として表 1 に示した値を用いるとともにサンプリング配管内の体積流量や配管形状をモデル化し、CELVA-1D にてサンプリング配管中の煤煙の沈着挙動(重力沈降、拡散沈着を考慮)を評価すると、煤煙の重量基準の沈着割合は約 3 %と算出された。この効果を考慮しても k_G は約 3 %増加するだけであり、本試験から得られた k_G は AAH 推奨値より若干小さめに評価されていることになる。煤煙の発生割合については、不完全燃焼割合等、燃焼条件との関係が報告されている³⁾。AAH 中でも推奨値を導出した燃焼条件(酸素供給量等)が必ずしも明確でない。今後、酸素供給量等をパラメータとすることでより広い燃焼条件の下での k_G を評価し、知見の蓄積を図っていく必要がある。

上述のカスケードインパクタによる全煤煙捕集量をもとに計算された煤煙サンプリング位置における煤煙重量を燃焼重量で除すると煤煙化率は 0.115 (-) と計算され、CELVA-1D での計算結果とほぼ一致する。このことは、給気ダクト

中の給気流量が十分大きく CELVA-1D で考慮した燃焼位置から煤煙サンプリング位置までの煤煙の重力沈降による除去効果は無視しうることを意味している。そこで、EXP-4 試験結果に対しても同様の計算を行うと煤煙化率は 0.054 と評価された。この値は EXP-2 試験における値の約 1/2 である。このことは、3.1、(2)で考察した、炭化した綿手袋の残留物による煤煙の閉じ込め効果を裏付けるものであると考えられる。

4. 結 言

火災時ソースターム試験装置を用いて燃焼試験を実施し煤煙の粒径分布を測定するとともに、温度計測結果や煤煙の捕集量をもとに可燃性物質の燃焼時の放出ソースタームを評価した。

その結果、燃焼物中に綿手袋が混在すると、綿手袋が炭化した残留物によって特に粒径が $1 \mu\text{m}$ 以上の煤煙粒子が残留物側に閉じ込められ、煤煙放出率が低く押さえられる傾向が確認できた。また、燃焼物質が同じ化学的組成を有し酸素供給等の条件が同じである場合には、燃焼速度に対しては、燃焼面積が大きな要因となっていることがわかった。この点は CELVA-1D を用いて燃焼物質量等をパラメータとした安全評価解析を実施する際の燃焼物形状条件の設定でも十分考慮しなければならない要因である。

模擬可燃性物質としてゴム手袋を燃焼させた試験を例にとり、CELVA-1D を用いた、燃焼に伴う質量、エネルギー及び煤煙放出速度等の放出ソースタームの評価手法を検討した。本評価手法では、質量放出速度の時間履歴が気相部温度の時間履歴に比例する、また、エネルギー及び煤煙放出速度がこのように求めた質量放出速度に比例する、等の幾つかの仮定を行っているが、それにもかかわらず本評価手法から求められたエネルギー及び煤煙放出速度の計算パラメータ(k_E 及び k_G)は、アメリカの核燃料施設安全評価ハンドブック(AAH)中で推奨されている計算パラメータとほぼ一致した。このことは、可燃性物質の燃焼に伴うこれら放出ソースタームを評価する上で、今回検討した CELVA-1D を用いた放出ソースターム評価方法が有効であり、本試験装置を用いて全燃焼重量と気相部温度及び全煤煙捕集重量が測定できれば、燃焼に伴う質量、エネルギー及び煤煙放出速度を評価しうる可能性があることを意味する。

今後は、まず、さらに広い燃焼条件のもとでの放出ソースタームの試計算を行うことで本評価手法の問題点及び適用範囲を明らかにし、その上で、核燃料施設で使用あるいは同施設から排出される他の様々な可燃性物質や可燃性物質単位量当たりの酸素供給量等の燃焼条件を対象とした汎用性の高い放出ソース

タームの算出と整理を進めていきたい。さらに、本試験から得られた放出ソースタームデータを、試験規模が大きくフィルタの煤煙による目詰まり現象等を含めた施設の安全性を実証するためのデータを取得する上で極めて有意義なセル換試験結果解析に適用し、総合的な安全性解析を進めていく。また、燃焼物質に放射性物質が付着していた場合を想定し、燃焼に伴って気相中に放出されるこれら放射性物質のエントレインメント量を測定し、火災事故時の放射性物質の放出率等についても定量的に把握して行く予定である。

謝 辞

本試験を実施するうえでデータの収集・解析を精力的にこなして頂いた、(株)千代田メインテナンス、田山 拓治氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) ウラン濃縮研究棟火災事故調査委員会、”ウラン濃縮研究棟火災事故調査委員会報告書”、JAERI-Review 98-011 (1998.3).
- 2) 林、高田、塚本、渡邊、滝田、阿部、田代、内山、”再処理施設セル換気系安全性実証試験(1)-火災時における煤煙発生挙動とフィルタ目詰まり特性-”、日本原子力学会 2000 年秋の大会(I57) (2000.9).
- 3) 滝田、高田、塚本、渡邊、林、阿部、田代、内山、”再処理施設セル換気系安全性実証試験 III-煤煙発生挙動に対する燃焼条件の影響-”、日本原子力学会 2001 年秋の年会(N47) (2001.3).
- 4) 西尾、渡邊、河野、山崎、向出、吉岡、”再処理施設の火災・爆発時におけるセル換気系安全性解析コード(CELVA-1D)(受託研究)”、JAERI-Data/Code 98-017 (1998.3).
- 5) 西尾、橋本、”再処理施設の溶媒火災に関する安全性実証試験”、JAERI-M 89-032 (1989.3).
- 6) 田代、渡邊、阿部、高田、内山、”火災事故時における換気系フィルタの目詰まり特性評価”、日本エアロゾル学会「第 18 回エアロゾル科学・技術討論会」(J05) (2001.7).
- 7) J.E.Ayer, A.T.Clark, P.Loysen, M.Y.Ballinger, J.Mishima, P.C.Owczarski, W.S.Gregory and B.D.Nichols, “Nuclear Fuel Cycle Facility Accident Analysis Handbook”. NUREG-1320 (1988).

表 1 各試験条件と試験結果のまとめ

試験 No.		EXP-1	EXP-2	EXP-3	EXP-4
試験条件	燃焼物質及び初期量	ドデカン 15cm ³ (11.2g [†])	ゴム手袋 1.4g	ゴム手袋 5.1g	ゴム手袋 1.1g + 綿手袋 1.0g
	燃焼皿開口部面積(燃焼面積) (cm ²)	19.6		44.2	19.6
試験結果	燃焼量	15cm ³ (11.2g [†])	1.2g	4.8g	0.59g
	燃焼率 (%)	100	86	94	28
	燃焼時間 [‡] (s)	640	247	325	305
	平均燃焼速度 (kg/s)	1.8×10^{-5}	4.9×10^{-6}	1.5×10^{-5}	1.9×10^{-6}
	単位燃焼面積当たりの平均燃焼速度 (kg/sm ²)	8.9×10^{-3}	2.5×10^{-3}	3.3×10^{-3}	9.9×10^{-4}
	粒径分布データ	MMAD=0.094μm $\sigma_g=5.8$	MMAD=0.062μm $\sigma_g=7.8$	MMAD=0.19μm $\sigma_g=7.0$	MMAD=0.12μm $\sigma_g=3.4$
	総煤煙捕集量 (mg)	46	10	41	2.4

[†] : ドデカンの比重として 0.75 g/ml を仮定して計算[‡] : 着火から自然鎮火までの時間表 2 AAH 中に記載されている放出ソースターム計算パラメータ
(燃焼物質 : ポリクロロブレン)

H _t (J/kg)	X _a (-)	X _c (-)	Y _s (-)
$2.5 \sim 2.7 \times 10^7$	0.41	0.24	0.15~0.38

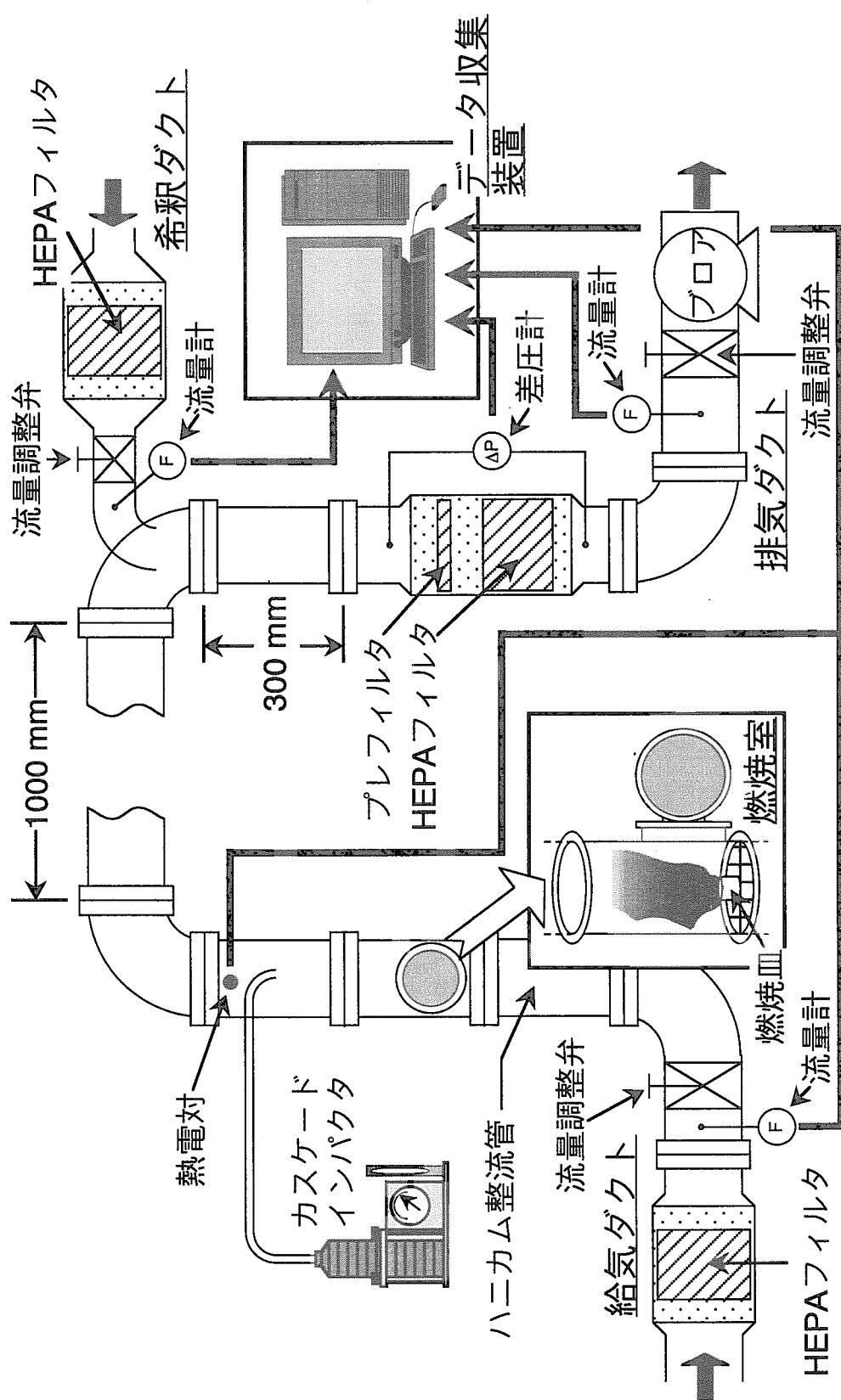


図1 火災時ソースターム試験装置の概要

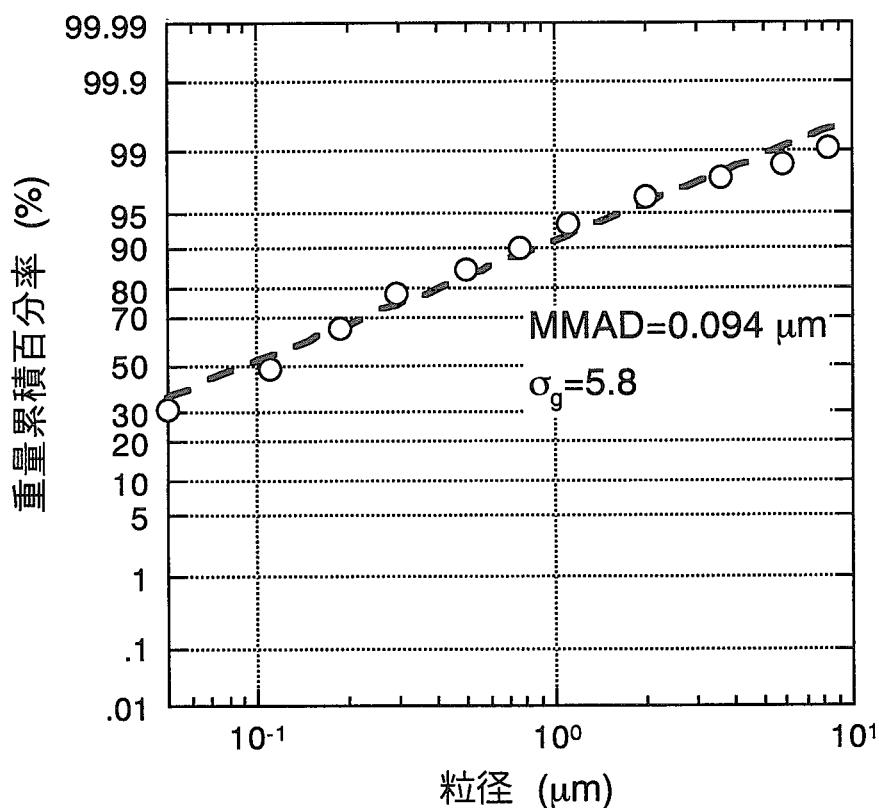


図 2 煤煙の重量基準の対数確率分布図(EXP-1)

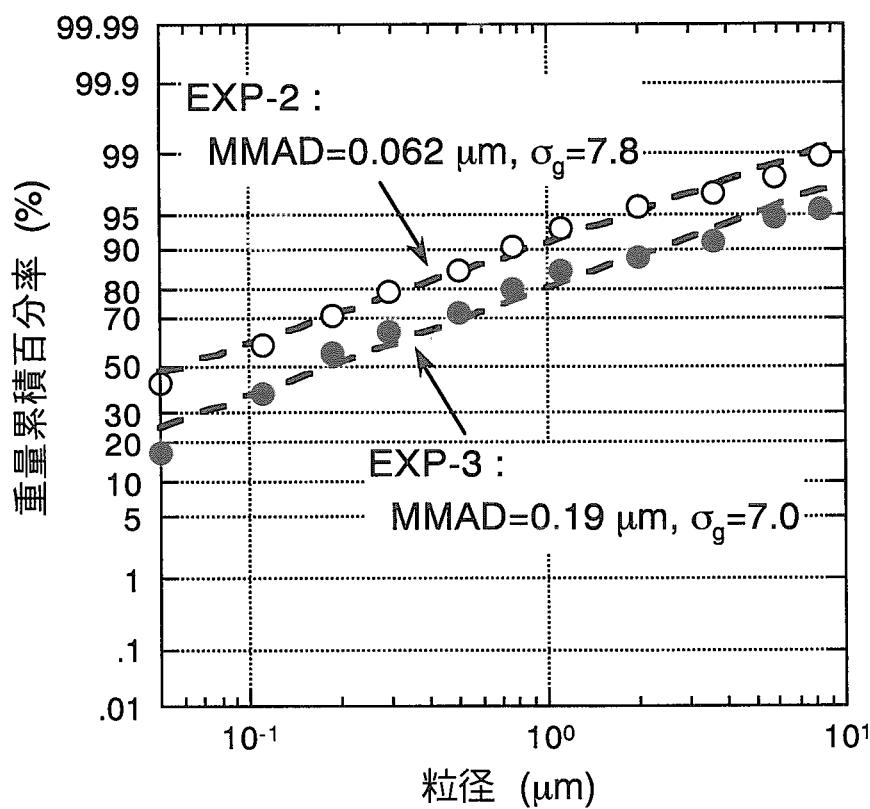


図 3 煤煙の重量基準の対数確率分布図(EXP-2 及び EXP-3)

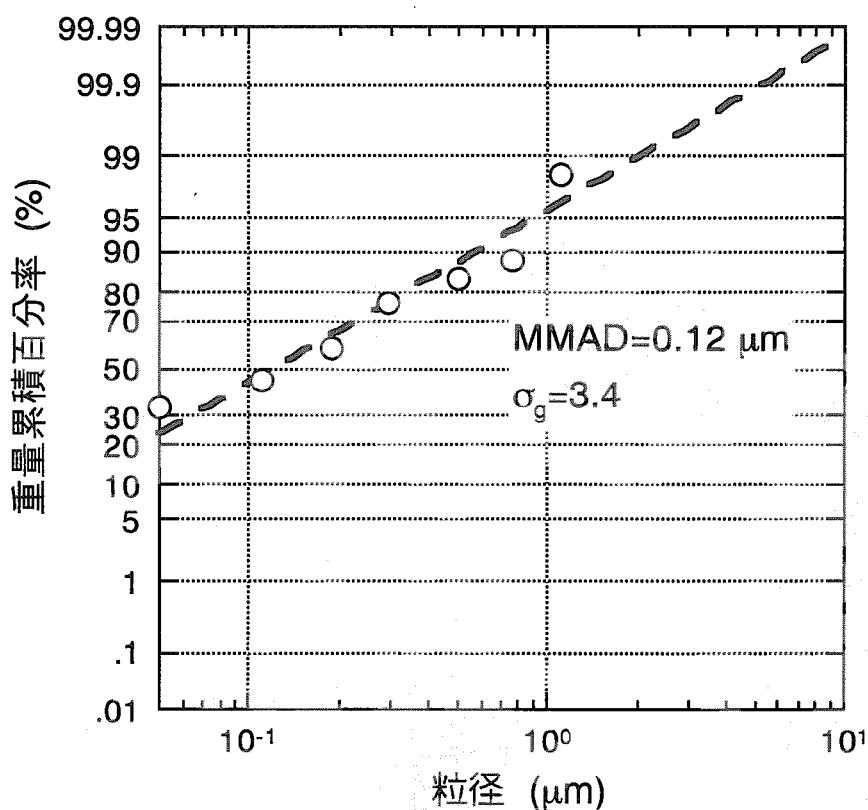


図 4 煤煙の重量基準の対数確率分布図(EXP-4)

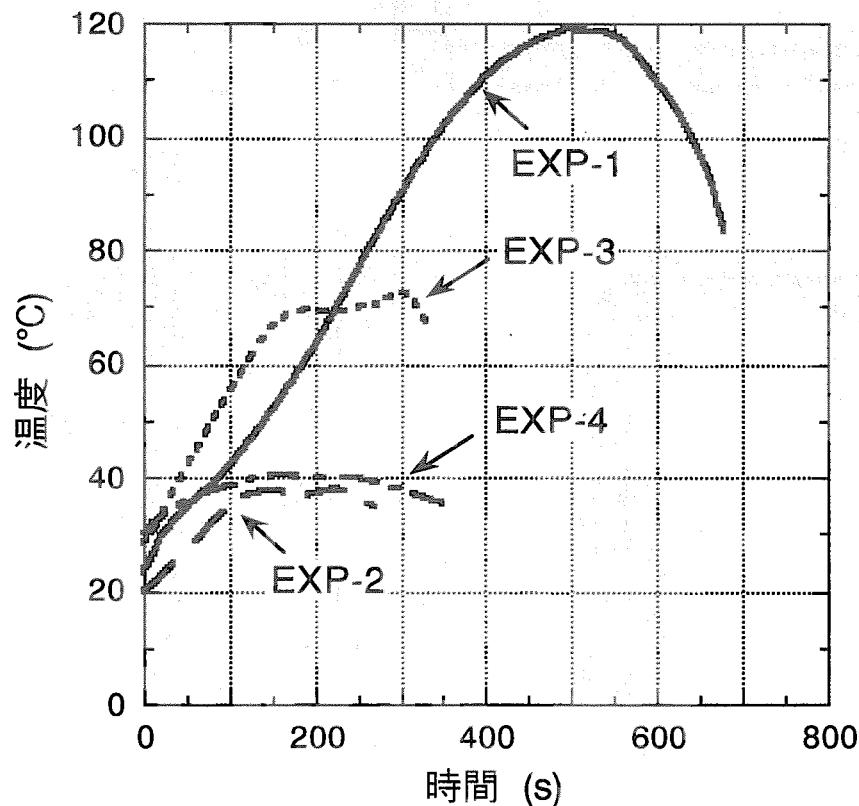


図 5 燃焼室上部気相温度の経時変化

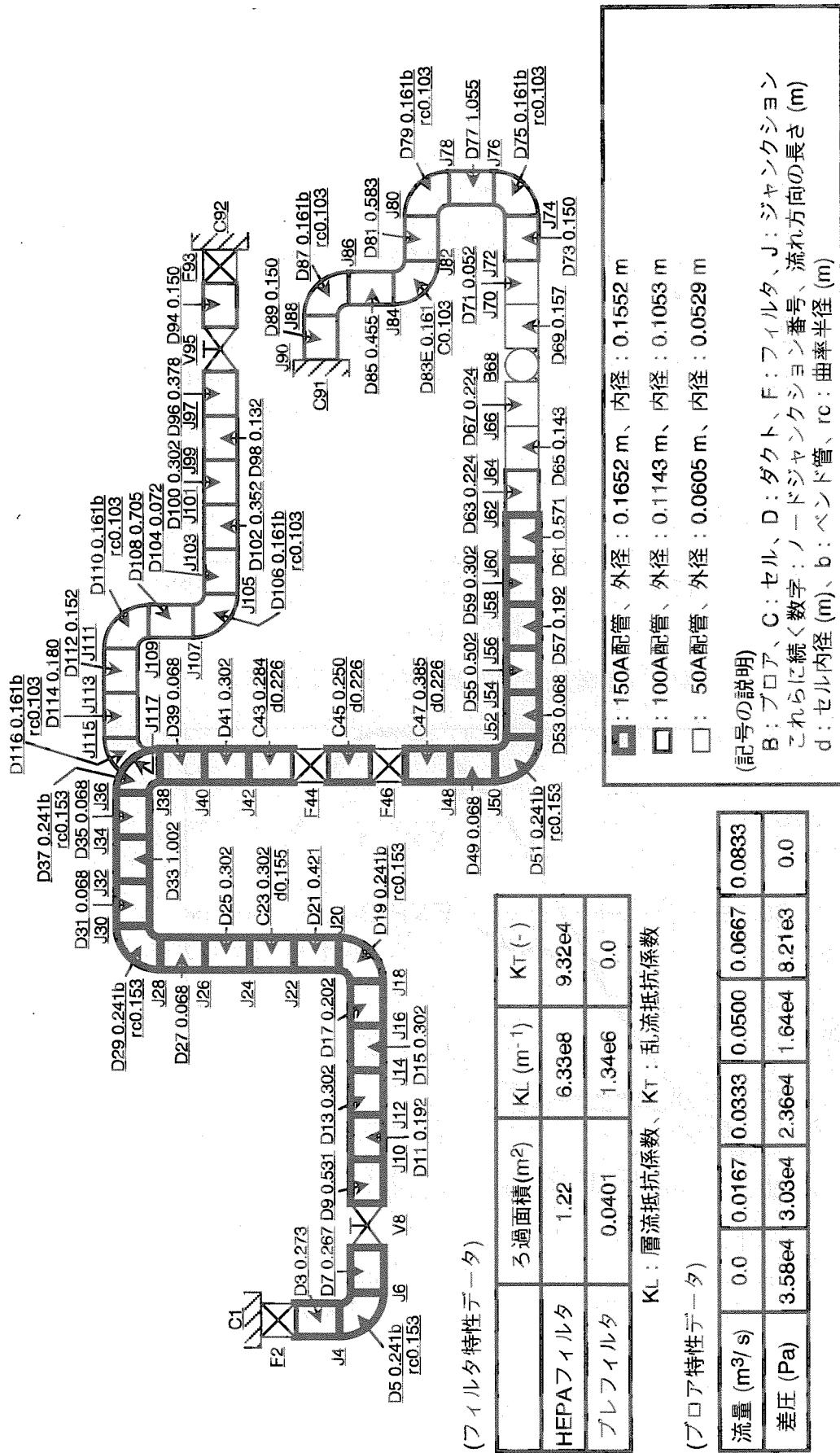


図6 火災時ソースダーム試験装置のノードジャングショントータ

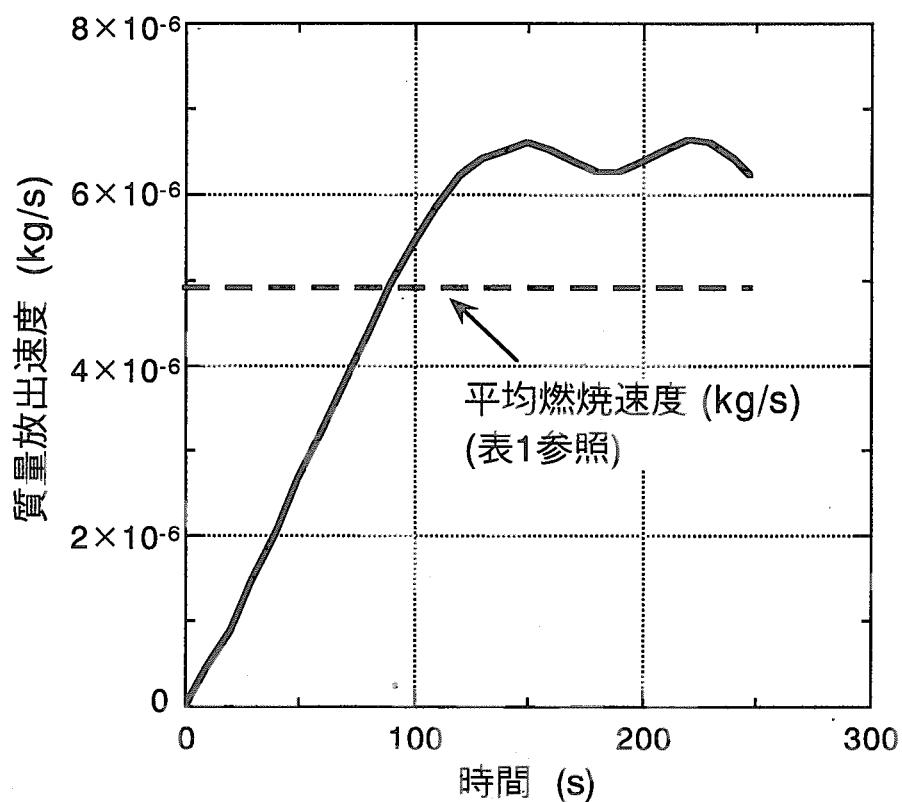


図 7 質量放出速度評価結果(EXP-2)

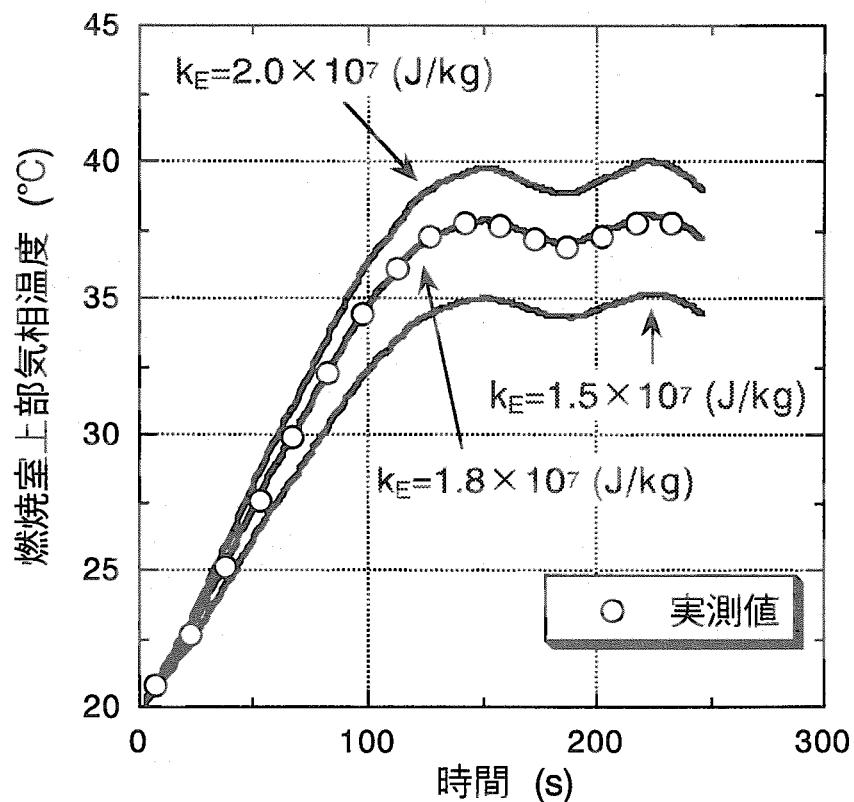


図 8 エネルギー放出速度評価結果(EXP-2)

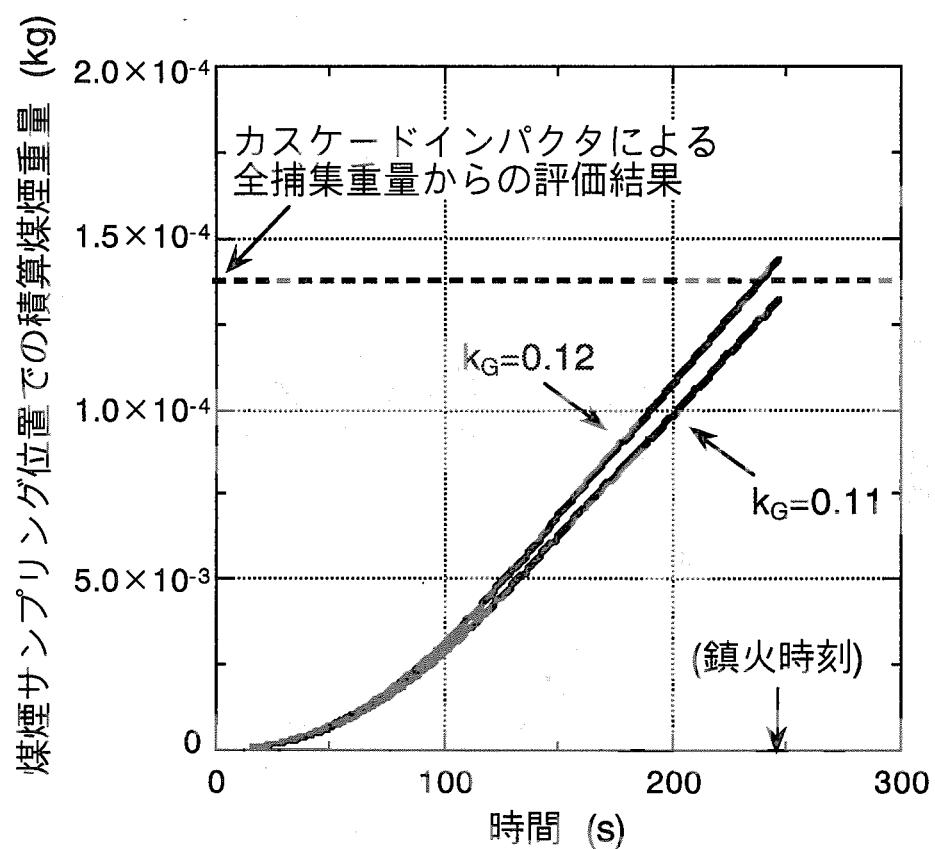


図 9 煤煙放出速度(煤煙化率)評価結果(EXP-2)

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
工率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

1. 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。

2. 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。

3. barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。

4. EC関係理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
1	10.1972	0.224809			
9.80665	1	2.20462			
4.44822	0.453592	1			
粘度 1 Pa·s(N·s/m ²)	= 10 P(ポアズ)(g/(cm·s))				
動粘度 1 m ² /s	= 10 ⁴ St(ストークス)(cm ² /s)				
力					
1	0.0980665	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
9.80665	0.101325	1	0.967841	735.559	14.2233
4.44822	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	14.6959
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1.93368 × 10 ⁻²

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV
1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	1 cal = 4.18605 J(計量法)
9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	= 4.184 J(熱化学)
3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	= 4.1855 J(15 °C)
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	= 4.1868 J(国際蒸気表)
1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	仕事率 1 PS(仏馬力)
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 75 kgf·m/s
1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1	= 735.499 W

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
1	2.70270 × 10 ⁻¹¹		1	100	
3.7 × 10 ¹⁰	1		0.01	1	

照射線量	C/kg	R
1	3876	
2.58 × 10 ⁻⁴	1	

線量当量	Sv	rem
1	100	
0.01	1	

(86年12月26日現在)

株式会社 沖縄県農業振興センターの栽培に適した紙として、
「R100」を販売いたします。

R100
古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています