

核燃料サイクル施設における可燃性物質の 燃焼時の閉じ込め効果評価試験

(受託研究)

Experiment on Evaluation of Confinement Capability of Fuel Cycle Facility under
Combustion of Combustible Materials
(Contract Research)

阿部 仁 田代 信介 渡邊 浩二 内山 軍藏

Hitoshi ABE, Shinsuke TASHIRO, Koji WATANABE and Gunzo UCHIYAMA

安全研究センター
サイクル施設等安全研究ユニット

Fuel Cycle Safety Research Unit
Nuclear Safety Research Center

January 2013

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

核燃料サイクル施設における可燃性物質の燃焼時の閉じ込め効果評価試験
(受託研究)

日本原子力研究開発機構安全研究センター
サイクル施設等安全研究ユニット
阿部 仁、田代 信介、渡邊 浩二、内山 軍藏

(2012 年 11 月 21 日受理)

核燃料サイクル施設の安全性の確認に資するため、同施設における火災時の閉じ込め機能の健全性を評価するための手法の整備を進めている。同施設に存在する代表的な有機物として、再処理有機溶媒や MOX 燃料加工工程で MOX 粉末へ添加されるステアリン酸亜鉛さらに代表的な潤滑油を取り上げ、これらの燃焼に伴う質量減少速度や煤煙化率等の燃焼特性データを取得した。また、再処理有機溶媒の燃焼に伴う煤煙の目詰まりによる HEPA フィルタの差圧上昇データを取得した。その結果、30%TBP/70%ドデカンの燃焼では、煤煙化率がドデカンを含む他の燃焼物質と比べて大きいこと、燃焼晩期にこれまで報告されていない HEPA フィルタの急激な差圧上昇が引き起こされる可能性があることがわかった。また、これまで燃焼性については考慮されていないステアリン酸亜鉛も、外部から加熱された状態では、定常的に燃焼を継続することを確認した。

本報告書は、日本原子力研究開発機構が(独)原子力安全基盤機構から委託されて実施した「平成22年度火災時エアロゾル評価試験」の研究成果を使用して取りまとめたものである。

原子力科学研究所（駐在）：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

Experiment on Evaluation of Confinement Capability of Fuel Cycle Facility under
Combustion of Combustible Materials
(Contract Research)

Hitoshi ABE, Shinsuke TASHIRO, Koji WATANABE and Gunzo UCHIYAMA

Fuel Cycle Safety Research Unit
Nuclear Safety Research Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received November 21, 2012)

To contribute on confirmation of safety of fuel cycle facilities, an evaluation method for soundness of confinement capability of the facilities under fire accident has been investigated. Organic extraction solvents, zinc stearate, which is added into MOX powder in MOX fuel preparation process, and typical lubricating oil were considered to be examination objects as the representative organic materials in the facilities. Combustion property data, such as mass loss rate and soot release fraction, of them and clogging property data of HEPA filter with combustion of the organic extraction solvents were measured. As the results, it was found that soot release fraction from burning 30%TBP/70%dodecane was larger than that of the other materials including dodecane and very rapid rise of differential pressure of HEPA filter, which has not been reported, would be induced in the last stage of combustion of 30%TBP/70%dodecane. Furthermore, it was confirmed that zinc stearate, of which combustibility has not been considered, burned continuously in the condition which was heated from outside.

Keywords : Nuclear Fuel Cycle Facility, Safety, Fire Accident, Combustible Material, TBP, Dodecane, Zinc Stearate, Source Term, HEPA Filter, Confinement

This work includes the experimental results under the auspices of the Japan Nuclear Energy Safety Organization.

目 次

1. 緒言	1
2. 試験	2
2.1 試験装置	2
2.2 試験方法及び試験条件	5
2.2.1 試験体の調整及び燃焼	5
2.2.2 煤煙の捕集・定量	5
2.2.3 水分の発生量の測定	5
2.2.4 燃焼セルに対する給気条件	6
2.2.5 輻射熱流束条件	6
3. 試験結果及び考察	7
3.1 燃焼に伴うソースタームデータ評価	7
3.1.1 質量減少速度の評価	7
3.1.2 発熱量の評価	9
3.1.3 煤煙放出特性の評価	11
3.2 HEPA フィルタの目詰まり挙動の評価	15
3.2.1 HEPA フィルタの差圧上昇評価	15
3.2.2 HEPA フィルタの差圧上昇への水分の影響の検討	21
4. 結言	24
謝辞	25
参考文献	25

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental	2
2.1 Apparatus	2
2.2 Method and conditions	5
2.2.1 Preparation of sample and combustion method	5
2.2.2 Collection and quantitateness of released smoke	5
2.2.3 Measurement of humidity	5
2.2.4 Experiment condition of supply flow to combustion cell	6
2.2.5 Experiment condition of radiation heat flux	6
3. Results and discussion	7
3.1 Evaluation of source-term data	7
3.1.1 Evaluation of mass loss rate	7
3.1.2 Evaluation of combustion heat	9
3.1.3 Evaluation of soot release property	11
3.2 Evaluation of clogging behavior of HEPA filter	15
3.2.1 Evaluation of rise of differential pressure of HEPA filter	15
3.2.2 Examination of effect of moisture on the rise of differential pressure of HEPA filter	21
4. Conclusion	24
Acknowledgment	25
References	25

図表リスト

図 1	FSEEA の燃焼セル部分の概略図	4
図 2	FSEEA の全体図	4
図 3	燃焼セルへの給気流速と質量減少速度の関係	8
図 4	Zn-St の燃焼に伴う質量減少速度に対する輻射熱流束の影響	8
図 5	再処理有機溶媒及び代表的な潤滑油並びに PMMA の燃焼に伴う発熱量評価結果	10
図 6	Zn-St の燃焼に伴う発熱量評価結果（輻射熱流束の影響）	10
図 7	燃焼セルへの給気流速と煤煙化率の関係	12
図 8	給気中の酸素濃度と煤煙化率の関係（燃焼物質：ドデカン）	13
図 9	空気過剰率と煤煙発生挙動の関係の評価モデル図	13
図 10	空気過剰率と煤煙濃度の関係（燃焼物質：ドデカン）	14
図 11	Zn-St の燃焼に伴う煤煙化率に対する輻射熱流束の影響	14
図 12	再処理有機溶媒の燃焼に伴う HEPA フィルタの差圧上昇評価結果	18
図 13	再処理有機溶媒の燃焼に伴う残存質量と差圧上昇の関係	18
図 14	30%TBP/70%ドデカンの燃焼に伴う質量減少と HEPA フィルタ差圧上昇挙動との関係	19
図 15	30%TBP/70%ドデカンの燃焼晩期における煤煙粒子の個数分布の経時変化 （ D_{p50} ：ELPI の各捕集段における 50%カットオフ径）	19
図 16	30%TBP/70%ドデカンの燃焼に伴う煤煙粒子の個数中央径の経時変化と HEPA フィルタ差圧上昇挙動との関係	20
図 17	煤煙粒子の質量分布の比較（ D_{m50} ：カスケードインパクトの各捕集段における 50% カットオフ径）	20
図 18	HEPA フィルタの差圧上昇特性に対する相対湿度の影響を観察するための試験にお ける相対湿度条件	22
図 19	HEPA フィルタの差圧上昇特性に対する相対湿度の影響を観察するための試験にお ける水分濃度条件	23
図 20	ドデカンの燃焼に伴う HEPA フィルタ差圧上昇に対する湿度の影響	23

1. 緒 言

核燃料サイクル施設では、原子炉施設等と比べて、グローブボックス等の設備の内部で放射性物質を直接取り扱う頻度が高い。したがって、核燃料サイクル施設の工程室において火災が発生した場合には、施設内部の放射性物質が設備及び建屋に接続した換気系に移行し、スタックから直接環境に放出されるリスクが相対的に高いものと考えることができる。核燃料サイクル施設の換気系には、高性能粒子エアフィルタ（以下、「HEPA フィルタ」という。）が複数段設置されており、換気系に移行した放射性物質を捕集し、環境への放出を防ぐ働きを担っている¹⁾。核燃料サイクル施設の内部で火災が発生した場合には、可燃性物質の燃焼に伴って大量の煤煙が発生し、飛散した放射性物質とともに換気系へ流出する。換気系に流入した煤煙は換気系内を移行し HEPA フィルタ表面に付着する。これにより HEPA フィルタの流動抵抗は上昇し、流動抵抗が HEPA フィルタの耐圧性能を超えると HEPA フィルタの破損が引き起こされる。上述のように放射性物質の施設内への閉じ込めは、非常に大きな割合で HEPA フィルタによって担保されることから、仮に HEPA フィルタの破損が生じた場合には、大量の放射性物質が環境に放出されることになり、それによって周辺公衆に対する放射線被害を引き起こすことになる。したがって、火災時の安全性を評価するうえでは、事故時の HEPA フィルタの健全性の維持をいかに定量的に評価するかということが極めて重要な観点となる。見方を変えれば、事故時の HEPA フィルタの流動抵抗の上昇挙動の評価を定量的に正確に実施することができれば、火災時の対応に対する時間的猶予（HEPA フィルタが破損に至るまでの時間的猶予）を正確に見積もることが可能となるため、より実際に即した事故対応計画等の策定に資することも可能となる。

上述のように燃焼物質から放出された煤煙は、換気系配管内で沈着・沈降等の物理的運動を行いながら配管系内を移行するため、煤煙の移行挙動に対しては、配管系内の流体の流れに大きく影響を受けることになる。したがって、火災時の HEPA フィルタの煤煙の負荷による流動抵抗の上昇挙動を定量的に評価するためには、燃焼物質の燃焼に伴う煤煙の発生割合等のソースデータに加えて、煤煙が移行する媒体である換気流の流れを解析・評価するための熱流動ソースタームデータ（換気流に対する質量放出速度及びエネルギー放出速度）が必要となる。着火から燃焼・鎮火（あるいは強制消火）までの一連の現象に依存した評価を行うためには、これらの知見を様々な燃焼条件（雰囲気酸素濃度、供給流量等）のもとで取得することが必要となる。

（独）日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」という。）では、（独）原子力安全基盤機構（以下、「JNES」という。）からの受託事業「MOX 燃料加工施設火災時ソースターム試験」（平成 17 年度～平成 19 年度）及び同「火災時エアロゾル評価試験」（平成 20 年度～平成 22 年度）の実施を通して、可燃性物質の燃焼特性（燃焼性の有無、煤煙発生挙動等）及び換排気系 HEPA フィルタの目詰まり特性に着目した試験及び評価を実施してきた²⁾³⁾。平成 21 年度には、グローブボックスパネル材とケーブルシース材に着目し、これらの燃焼特性データと燃焼時に放出される煤煙の目詰まりによって引き起こされる HEPA フィルタ

の差圧上昇データを取得し、これらを用いて、仮想的な事故シナリオに基づいた HEPA フィルタの差圧上昇の時間進展を評価した⁴⁵⁾。

PUREX 法を採用する再処理施設では、ウランやプルトニウムの分離回収のために、有機抽出剤であるリン酸トリブチル（以下、「TBP」という。）を用いる。TBP は比重が 1 に近いと、水相/有機相間の物理的な相分離を効率良く行う観点から希釈剤としてのドデカン中に溶解させて用いられる。現在建設が進められている民間の再処理施設の事業指定申請書⁶⁾においても、運転時の異常な過渡変化を超える事象の一つとして、プルトニウム精製設備のセル内での有機溶媒火災が考慮されているなど、TBP 及びドデカンは、再処理施設の火災時安全性を確認する上で重要な物質である。そこで、平成 22 年度は、試験対象物質としてこれら有機溶媒を取り上げることとした。有機溶媒の燃焼時には大量の水分が放出されることが予想される。水分を含んだ煤煙が HEPA フィルタに付着した場合には、乾燥した煤煙が付着した場合と比べ、HEPA フィルタの目詰まりによる差圧上昇が促進される可能性が考えられる。そこで、有機溶媒の燃焼に伴う質量減少速度や発熱量等のソースデータを測定することに加え、換気中の水分量をパラメータとした試験をおこなうことで、HEPA フィルタの目詰まり挙動に対する水分の影響についても観察することとした。

MOX 燃料加工施設における粉末調整工程では、MOX 粉末の密度調整等のためにステアリン酸亜鉛（以下、「Zn-St」という。）が有機添加剤として定常的に使用されている。Zn-St は、主要な工程が乾式である同施設において定常的に使用される、ほとんど唯一の中性子減速効果を有する物質である。同施設を対象とした仮想的な臨界事故時に想定される総核分裂数は、Zn-St が熱分解を生じて消滅するのに必要なエネルギー量を参考にして決定された経緯がある⁷⁾。Zn-St は、加熱によって分解するとの報告⁸⁾⁹⁾があるが、可燃性あるいは引火性の観点からは分類対象外とされている。しかしながら、上述のように Zn-St が、同施設の臨界安全管理上のみならず仮想的な臨界事故の評価上極めて重要な物質である点を踏まえ、外部からの輻射熱供給条件下での Zn-St の燃焼性についても検討することとした。また、核燃料サイクル施設に存在する火源物質としては、同施設の機器に使用されている潤滑油も考えられる。そこで、上述の再処理有機溶媒に加えて、ステアリン酸亜鉛及び潤滑油についても試験対象物質として取り上げることとした。

本報は、平成 22 年度に実施したこれらの研究成果の一部を用いて取り纏めたものである。

2. 試 験

2.1 試験装置

原子力機構は、可燃性物質燃焼時の燃焼特性を観察することが可能な試験装置である「火災時ソースターム実験装置（Fire Source-term Evaluation Experiment Apparatus）」（以

下、FSEEA という。)を所有している。本試験ではこの装置を用いて、対象とする有機物の燃焼特性(燃焼性の有無、煤煙発生挙動等)及び換排気系 HEPA フィルタの目詰まり特性に着目した試験及び評価をおこなった。

FSEEA は、燃焼セル、配管系(配管、流量調節弁、ブロア、酸素濃度調整系)、計測系(温度・流量・差圧計、制御盤)、煤煙サンプリング系、燃焼ガス分析装置、フィルタユニット、ハロゲンスポットヒーター及びデータ処理装置(パソコン及びデータロガー)並びに架台から構成される。図 1 に燃焼セル部分の概略図及び図 2 に実験装置全体の模式図をそれぞれ示す。

箱状(ステンレス製)の燃焼セル本体は、上部の防煙ガラス(内部が観察可能な石英ガラス製の筒状(300 mm ϕ ×700 mmH))部分と下部の重量測定装置(アルミナ製の称量皿を装着した読取限度 1 mg の電子天秤、ジャッキにより高さを可変)の部分で構成される。

酸素濃度調整系として、燃焼セルの上流側にマスフローコントローラを介して CO₂ ボンベ及び既設圧空ラインを接続させた。これにより燃焼セルへの給気に CO₂ を任意の割合で混合して燃焼セルに給気することで、燃焼セル内雰囲気酸素濃度を制御することとした。

煤煙サンプリング系は、カスケードインパクト(東京ダイレック製 LP-20S-60)及びフィルタフォルダから構成される。両者には、メンブレンフィルタ(住友電工(株)製 ポアフロンメンブレン WP-500-50)を設置した(前者には分級段毎、後者には一枚を設置)。なお、煤煙粒子の個数分布の経時変化を計測する際には、カスケードインパクトの代わりに、エレクトロカルロープレッシャーインパクト(DEKATI 製 ELPI Model 97 2E、以下、ELPI という。)を設置した。また、フィルタフォルダの後段に湿度温度変換器(VAISALA 製 HM330)を設置した。

燃焼セル出口配管部に燃焼ガス分析措置(島津製作所製 NAS-308)を設置した。同分析装置は、気相中の O₂ 濃度及び CO₂ 濃度並びに CO 濃度を連続して計測した。

燃焼セルから流出した流体は、希釈ダクトからの希釈流によって希釈され、フィルタユニットに導入される。HEPA フィルタは、原子力施設において実際に用いられている大風量タイプのものを用いることとし、煤煙を効率的かつ均一に捕集することが可能なように、濾過面積を小さく改造したものを使用した(フィルタ部分の大きさ: 9 cm×8 cm×12.5 cmH、濾過面積: 0.42 m²)。燃焼試験中は HEPA フィルタの透過流量は定格流量(0.95 m³/min)で一定となるようにブロアによって制御した。また、HEPA フィルタの差圧は、精密デジタル圧力計(長野計器製、GC15-170)を用いて測定した。

ケーブルや電気盤等の設備・機器が近傍での火炎等から輻射を受けることを想定して、ハロゲンスポットヒーター(インフリッジ工業製、HSH-2、最大エネルギー波長: 約 1 μ m、照射能力: 約 90 kW/m²)を設置し、防煙ガラスの外側から、燃焼皿上の試験体に直接、輻射熱流束を与えた。

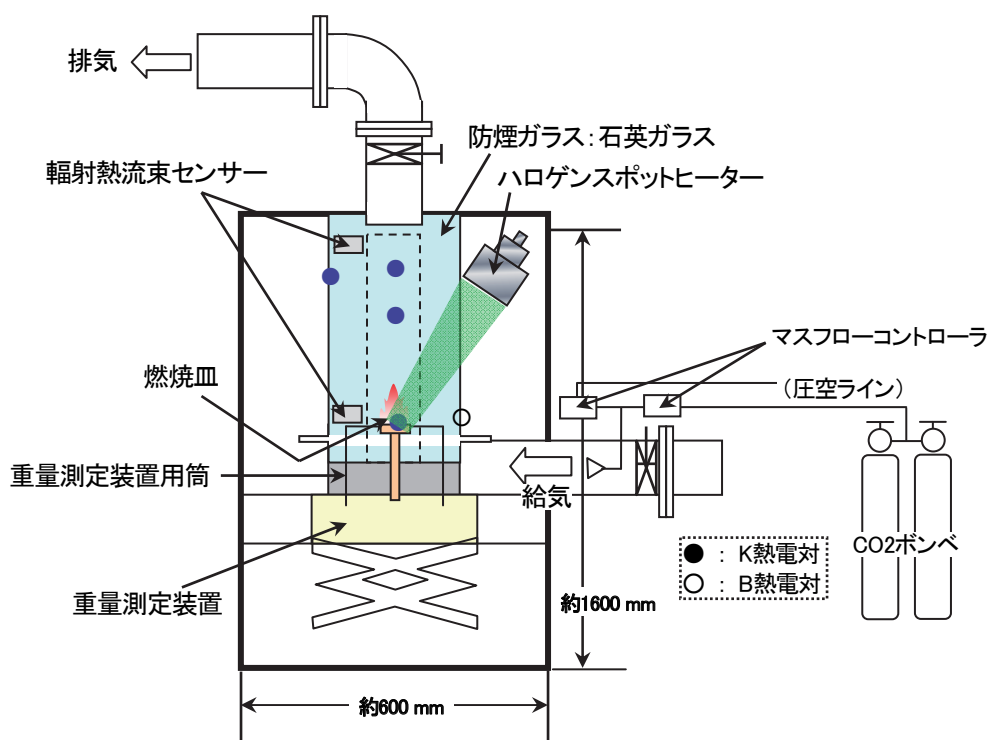


図 1 FSEEA の燃焼セル部分の概略図

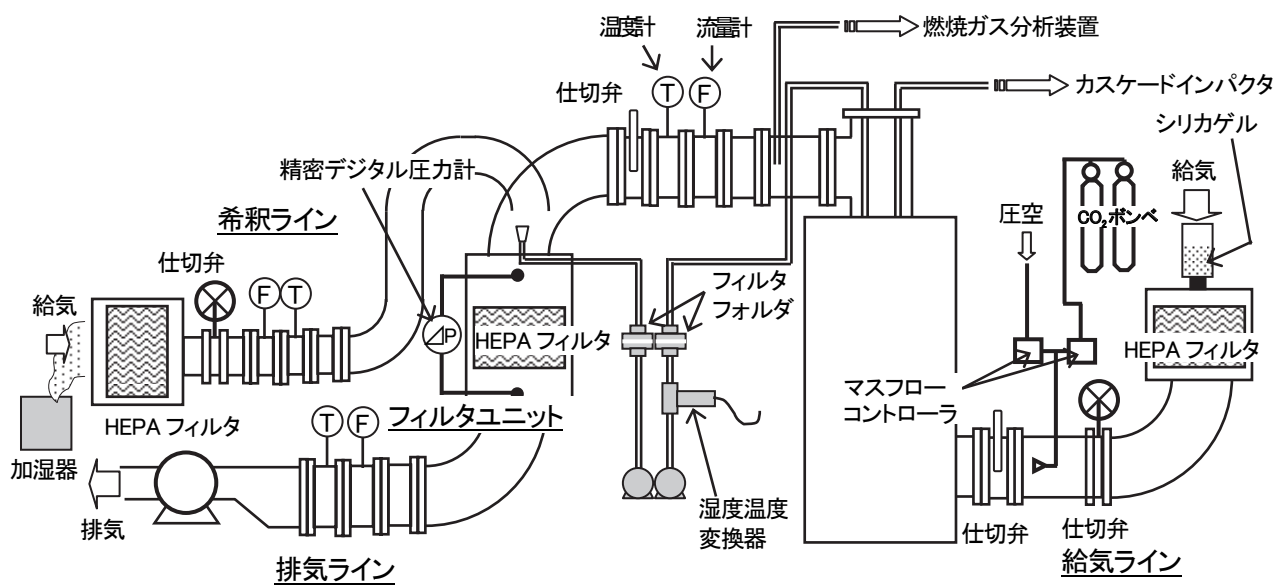


図 2 FSEEA の全体図

2.2 試験方法及び試験条件

2.2.1 試験体の調整及び燃焼

TBP 及びドデカンとともに特級試薬を用いた。Zn-St としては、含水率 0.1%、金属含有率 0.1%、かさ密度 0.2 g/cm^3 （ミルシートによる）の性状のものを使用した。また、潤滑油としては、工業用潤滑油として広く一般に使用されているシェルテラスオイル（型番：SX-Z46、以下、「代表的な潤滑油」という。）を使用した。これらを重量測定装置の秤量皿上の燃焼皿（約 $60 \text{ mm}\phi$ ）に入れ、ガスバーナーにより着火し、ジャッキにより燃焼セル本体上部の燃焼セル内の定位置まで移動し、各測定装置による計測を開始した。

Zn-St は常温下では粉末状の固体である。1 で述べたように Zn-St は MOX 燃料加工施設の粉末調整工程において MOX 粉末に添加される物質である。仮にこの粉末調整工程において臨界事故が発生した場合には、臨界に伴う熱エネルギーが Zn-St に加えられ、Zn-St は容易に融解する⁸⁾。これを踏まえて、Zn-St については、ガスバーナーによる着火の前に、ハロゲンスポットヒーターによる輻射 (40 kW/m^2) を与え、融解した状態で着火し、着火後、目的の輻射熱流量に調整した。代表的な潤滑油の引火点は、製品安全データシートによると 250°C 以上とされている。このように可燃性ではあるが引火点が高いため、本試験では、ハロゲンスポットヒーターによる輻射下において燃焼性を観察した。

2.2.2 煤煙の捕集・定量

試験体の燃焼によって放出された煤煙は、FSEEA の煤煙サンプリング系を用いて、防煙ガラス内の気相部及びフィルタユニット前段部より煤煙を含む流体を等速吸引することで捕集した。捕集した煤煙量は、試験前後のメンブレンフィルタ（カスケードインパクトの各段の捕集盤にもメンブレンフィルタが設置されている。）の重量変化から同定した。

HEPA フィルタによって捕集された煤煙の重量は、フィルタユニットの前段部より等速吸引によってメンブレンフィルタに捕集した煤煙量から求めた。精密デジタル圧力計を用いて計測された HEPA フィルタ前後の差圧上昇との相関を観察することで、煤煙の負荷と目詰まりによる HEPA フィルタの目詰まり特性を評価した。

2.2.3 水分の発生量の測定

湿度温度変換器を用いて、試験体の燃焼に伴う水の発生挙動及び HEPA フィルタの目詰まり特性に対する流体中に含有した水分量を測定した。図 2 には、燃焼セルからのサンプリング配管にこの変換器を設置してある場合を記載しているが、HEPA フィルタへの供給流体中の水分量を観察する場合には、この変換器をフィルタユニット前段部からのサンプリング配管につなぎ換えることで測定を行った。

また、HEPA フィルタの差圧上昇挙動に対する流体中の水分量の影響を観察する場合には、希釈ラインからの給気口の前に加湿器を設置して加湿することで、HEPA フィルタへ供給される流体中の水分量の制御を行った。なお、試験体に対する給気中の水分量の影響をそろえるため、給気口にシリカゲルを設置し、給気流体中の水分量を可能な限り除去す

ることを試みた。

2.2.4 燃焼セルに対する給気条件

放射性物質取扱作業用グローブボックスについては JIS によって規格が設定されている¹⁰⁾。それによるとグローブボックスの排気能力については、グローブポート 1 個を開放したときの開口部における通過風速を 0.5 m/s 以上に保つために必要な風量を満足すること等の要求が規定されており、旧 JIS における換気回数に関する要求事項は規定されていない。これに加えて実施設には様々な大きさや形状を有するグローブボックスが存在するため、実施設のグローブボックスにおける代表流速（すなわち試験体に供給する給気流速条件）を推定することは非常に困難である。そこで、以下の考察を行い、燃焼試験で設定する給気流速条件を検討することとした。

- ・代表的なグローブボックスの構造として、原子力機構プルトニウム燃料第三開発室における核燃料物質加工事業許可申請書 添付書類の添 5 第 1 図に記載があるグローブボックス概略構造図（代表例）を例として取り上げることとした¹¹⁾。これによると、グローブボックス本体は、高さ及び幅 3 m、奥行き 1 m のディメンジョンを有しており、さらにその上部に約 200 mm の伸縮継手を介して高さ 1.6 m、奥行き 1 m の受払搬送装置グローブボックスと接続している。したがってグローブボックスの容積は、 $3 \times 3 \times 1 = 9 \text{ m}^3$ と評価できる。
- ・上述のように現行 JIS ではグローブボックス内の換気回数に関する規定はないが、ここでは旧 JIS において規定されていた 20 回/h の換気回数がなされるものと仮定してグローブボックス内の換気流量を評価した。それによると、換気流量は、 $20 \times 9/60 = 3 \text{ m}^3/\text{min}$ と評価できる。
- ・上記添 5 第 1 図¹¹⁾からは、グローブボックス本体の底部より給気となされ、伸縮継手を介して受払搬送装置グローブボックスの上部から排気されるものと推察される。換気流に対する断面積をグローブボックス本体の底面積と考えると、代表流速は、 $3/(3 \times 1)/60 \approx 0.02 \text{ m/s}$ と評価できる。

実際の火災時にはグローブボックス内に燃焼ガスの放出やグローブボックス外部からの局所的な空気の流入等が生じるため、グローブボックス内部の気体の流れは極めて複雑になり、それによって局所的な流速はこれの数倍になるものと予想される。そこで本試験では、試験体に対する給気流速として上述の評価結果である 0.02 m/s から評価結果の約 3 倍（0.1 m/s 程度）までを給気流速条件とすることとした。

2.2.5 輻射熱流束条件

米国原子力規制委員会原子力規制局システム安全解析部から公刊されている防火検査プログラムのための定量的火災ハザード解析手法の最終報告書¹²⁾によると、目標物表面温度

を限界温度（可燃物が発火する温度）にまで上昇させるために必要となる入射熱流束（限界熱流束）としては、一般に $15\sim 25 \text{ kW/m}^2$ の幅があると述べている。これを参考にした上でさらに保守側の評価結果を得ることを念頭におき、本試験では試験体に照射する輻射熱流束を最大で 40 kW/m^2 までとした。

3. 試験結果及び考察

3.1 燃焼に伴うソースタームデータ評価

3.1.1 質量減少速度の評価

各燃焼物質の燃焼に伴う質量減少速度に対する給気流速の影響を図 3 に示す。質量減少速度は、試験中の試験体の減少量を時間微分することで求めたものである。また、燃焼面積で除することで、単位燃焼面積当たりの値として表現している。評価結果はばらついてはいるが、この給気流速条件の範囲内では、各燃焼物質の燃焼に伴う質量減少率は給気流速に依存せず、約 $3\times 10^{-3} \text{ kg/m}^2\text{s}$ から約 $1\times 10^{-2} \text{ kg/m}^2\text{s}$ の範囲でほぼ一定の値となった。ドデカン及び 30%TBP/70%ドデカンの平均値はそれぞれ、約 $5.9\times 10^{-3} \text{ kg/m}^2\text{s}$ 及び $6.0\times 10^{-3} \text{ kg/m}^2\text{s}$ でありほぼ同値であった。なお、図 3 中の代表的な潤滑油及び Zn-St については、それぞれ輻射熱流束 20 kW/m^2 及び $10\sim 40 \text{ kW/m}^2$ の輻射熱流束照射条件のデータである。代表的な潤滑油の質量減少速度の平均は約 $5.8\times 10^{-3} \text{ kg/m}^2\text{s}$ であった。これらの値は、解析コードを用いて火災事故下の換気系内の熱流動及び物質移行を計算するための入力ソース項として必要不可欠な知見である。また、3.1.3 で後述する煤煙の放出量を汎用性をもった値として表現するために、燃焼物質の燃焼質量あたりに規格化する上で必要な値である。

図 3 に示したように、Zn-St は、輻射熱流束を与え融解した状態では、ガスバーナーによる着火によって容易に燃焼し、 10 kW/m^2 以上の輻射熱流束供給下では、定常的に燃焼を継続することを確認した。図 4 に Zn-St の燃焼に伴う質量減少速度に対する輻射熱流束の影響を示す。Zn-St の質量減少速度は、輻射熱流束の値が大きくなるにしたがって増大することがわかった（ただし、 30 kW/m^2 以上では次第に一定値に漸近する傾向がみられる。）。Zn-St は、加熱によって分解するとの報告⁸⁹⁾があるが、可燃性あるいは引火性の観点からは分類対象外とされている。図 3 及び図 4 の結果からは、なんらかの原因（仮想的ではあるが、例えば臨界事故）によって外部からの熱が Zn-St に加えられる状況下では、Zn-St 自身が燃焼し、二次的な事故を誘発する可能性があることを意味する。

既報告のグローブボックスパネル材及びケーブルシース材の燃焼に伴う質量減少速度と比較すると、再処理有機溶媒の燃焼に伴う質量減少速度は、輻射熱流束を与えない条件下でのポリメチルメタクリレート（以下、PMMA という。）の燃焼に伴う質量減少速度とほぼ同じ程度の値であった。

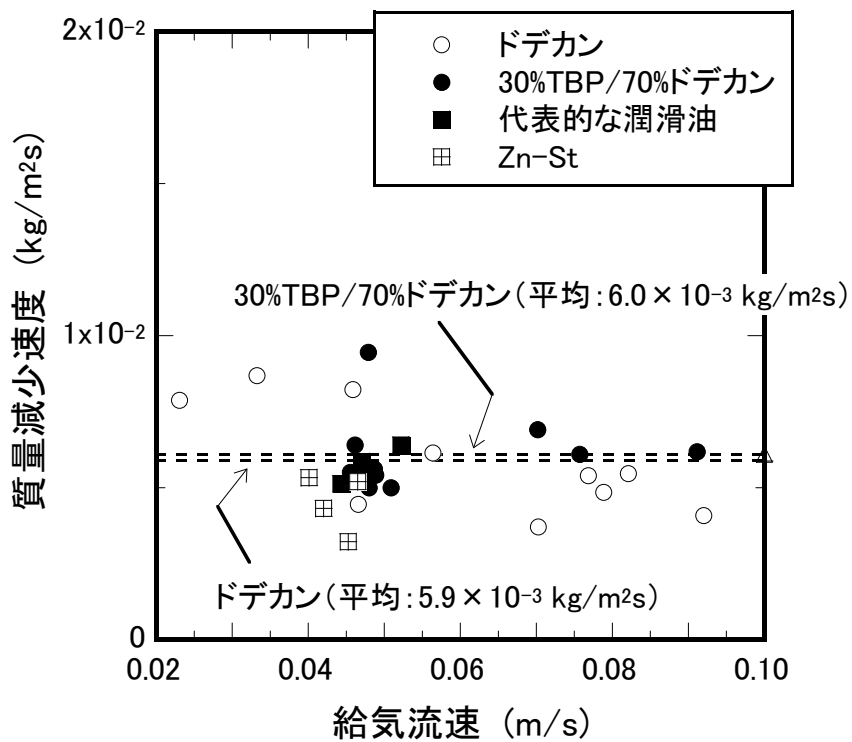


図3 燃焼セルへの給気流速と質量減少速度の関係

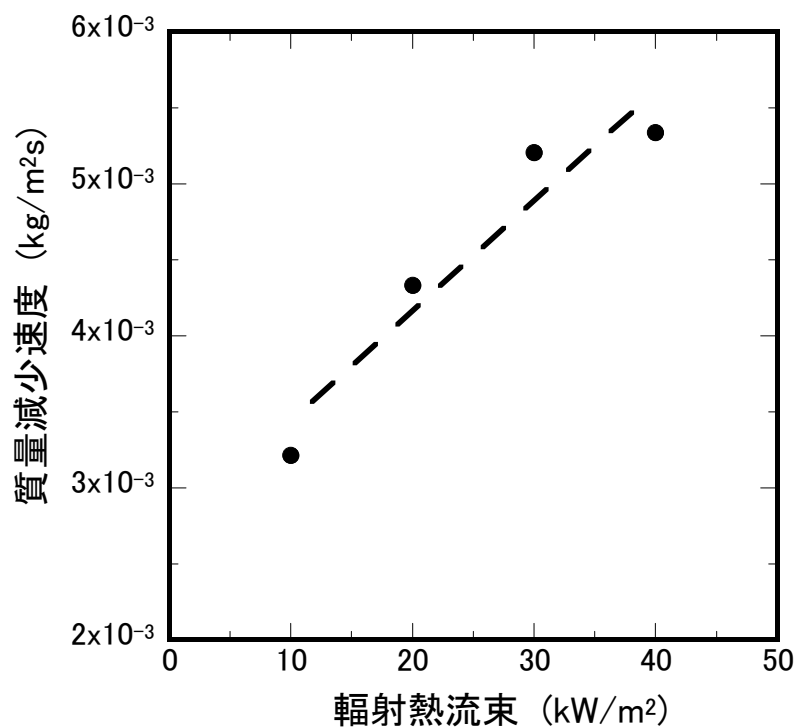


図4 Zn-St の燃焼に伴う質量減少速度に対する輻射熱流束の影響

3.1.2 発熱量の評価

物質の燃焼に伴う発熱量は、燃焼によって消費される O_2 量から評価できる。この発熱量と O_2 消費量の関係としては、ANS E1354-04a では、燃焼物質の種類に拠らず、 $1.31 \times 10^7 \text{ J}/(O_2 \text{ 消費 kg})$ の関係があると述べられている¹³⁾。そこで、燃焼物質の燃焼に伴う O_2 濃度の低下より燃焼に伴って消費された O_2 量を評価し、燃焼物質の燃焼に伴う発熱量の評価を行った。図 5 に再処理有機溶媒及び代表的な潤滑油の燃焼に伴う発熱量評価結果を示す。30%TBP/70%ドデカンの燃焼に伴う燃焼熱は、燃焼初期ではドデカン単独の場合とほぼ同様の値を示しているが、燃焼が進むにつれて若干小さい値を示すようになった。これは、30%TBP/70%ドデカンの場合では、燃焼の進行によって、低沸点成分であり燃焼性が大きいドデカンが消費されるためと考えられる。なお、図 5 に示したドデカンの発熱量評価結果は、米国の事故解析ハンドブック¹⁴⁾において使用が推奨されている、溶媒 (Kerosene) の発熱量とほぼ一致している。代表的な潤滑油の場合、再処理有機溶媒の値よりも若干低い値となった。

3.1.1 で検討したように、Zn-St は MOX 燃料加工施設においてもっとも大量に使用される有機物であるのにもかかわらず、燃焼性に係るデータはない。本試験では、Zn-St の燃焼に伴う発熱量についても評価を行った。評価結果を図 6 に示す。燃焼初期では、外部からの輻射熱流束の大きさにかかわらず、 $3 \times 10^7 \text{ J/kg}$ 程度で一定であったが、燃焼後期になると、発熱量は急激に大きくなった。その増大割合は輻射熱流束が大きい程、大きくなる傾向がみられた。Zn-St は、燃焼初期には、融解によって透明な液体となっているが、燃焼が進むにつれて焦げたように茶褐色に変色する。この変色によって輻射熱の吸収が非常に大きくなった結果、燃焼後期における発熱量の急激な増大が生じたものと考えられる。MOX 燃料加工施設の粉末調整工程における臨界事故下では、MOX 粉末からの Zn-St への伝熱は、主に熱伝導によるものと考えられる。図 6 に示した燃焼後期における発熱量の急激な増大が、輻射による伝熱様式を用いた事によるものと考えた場合には、混合槽内での Zn-St の発熱量としては、燃焼初期において評価された値を適用することが適切であるとも考えられる。

ここで評価された可燃性物質の燃焼に伴う発熱量は、3.1.1 で言及した質量減少速度に乗ずることで、燃焼に伴うエネルギー放出速度を算出する。これらの知見は、火災時換排気系影響評価手法の検討において必要不可欠な入力データとして適用される。これらの値は、質量減少速度とともに、火災事故下の換気系内の熱流動及び物質移行を計算するための入力ソース項として必要不可欠な知見である。

図 5 には、平成 20 年度試験で取得した PMMA の燃焼に伴う発熱量評価結果を合わせて示す。再処理有機溶媒の発熱量は PMMA のそれに比べて 1.7~1.8 倍程度大きいことがわかる。再処理有機溶媒の火災時にはより大きな熱的影響を与えるものと考えられる。

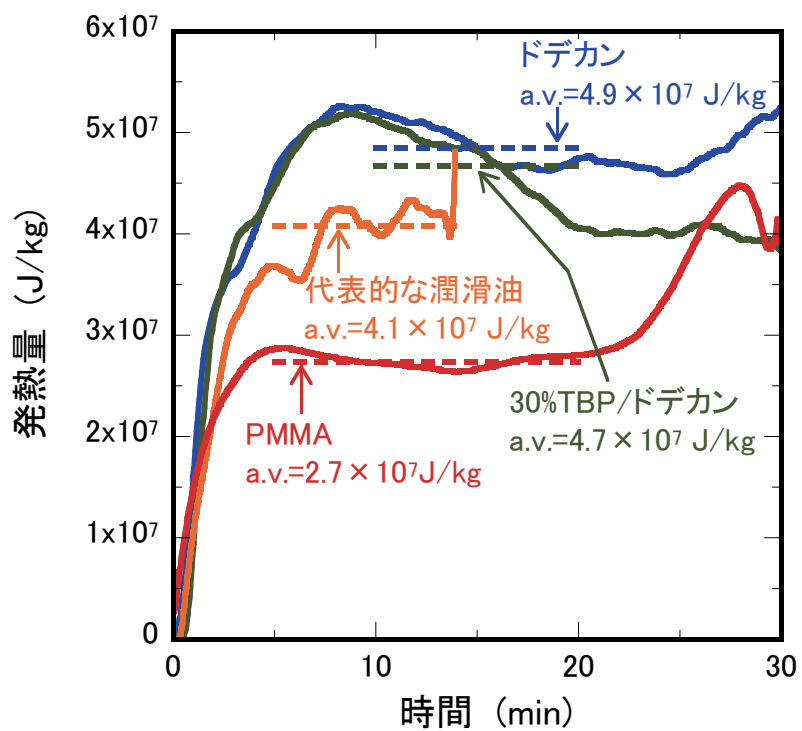


図 5 再処理有機溶媒及び代表的な潤滑油並びに PMMA の燃焼に伴う発熱量評価結果

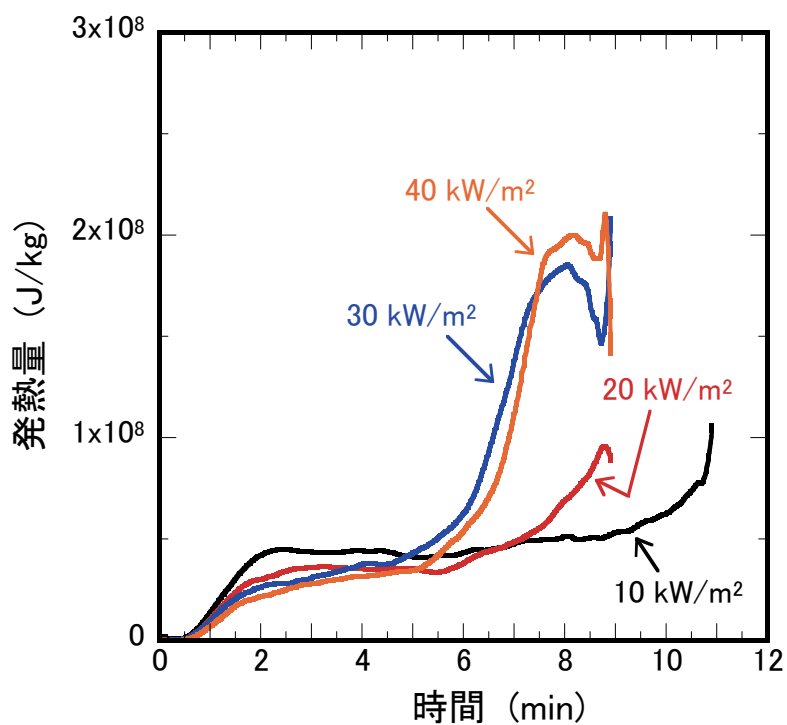


図 6 Zn-St の燃焼に伴う発熱量評価結果 (輻射熱流束の影響)

3.1.3 煤煙放出特性の評価

図 7 に各燃焼物質の燃焼に伴う煤煙化率に対する給気流速の影響を示す。煤煙化率とは以下の式で定義した値であり、燃焼物質の燃焼重量当たりの煤煙の放出量を表している。

$$\text{煤煙化率 (\%)} = \frac{\text{総煤煙放出量(フィルタフォルダに捕集された煤煙の積算重量)}}{\text{総質量減少量(燃焼物質の積算質量減少量)}} \times 100 \quad (1)$$

ドデカン単独と代表的な潤滑油及び Zn-St の燃焼に伴う煤煙化率はほぼ差がなかった。ドデカン単独の場合の平均値は約 3.0%であった。一方で 30%TBP/ドデカンでは、煤煙化率は他の燃焼物質に対して相対的に大きな値を示し、平均すると約 16.7%程度であった。なお、図 7 中の代表的な潤滑油及び Zn-St については、それぞれ輻射熱流束 20 kW/m² 及び 10~40 kW/m² の輻射熱流束照射条件のデータである。既報告のグローブボックスパネル材及びケーブルシース材の燃焼試験結果と比べると、ドデカンはアクリルと、30%TBP/70%ドデカンは難燃性ケーブルシースとほぼ同じ値であった。

グローブボックス内で火災が生じた場合などでは、不活性ガスによる窒息消火がなされる。また、火災が存在する空間では酸素濃度の分布が生じている可能性がある。そこで、比較的単純な燃焼形態を示すドデカンを評価対象物質として、煤煙化率と酸素濃度の影響を観察するとした。図 8 にドデカン燃焼に伴う煤煙化率に対する給気中の酸素濃度の影響を示す。酸素濃度が低下すると煤煙化率も小さくなる傾向が見られた。拡散燃焼を考えた場合、燃料流量が少ないと、煤は火炎の中でいったん発生し輝炎を形成するが、反応域で十分酸化され、燃焼ガスが反応域を出るときには、煤は消滅している。一方で、燃料流量を多くすると、火炎の高さは増すが、火炎の先端にいくに従い、火炎周囲からの空気の供給が不足し、燃焼が抑制され火炎先端から煤が遊離してくる。図 8 に示した結果においては、燃料流量とはドデカン液体から揮発したドデカン蒸気の火炎面への供給量であると考えられる。給気中の酸素濃度が低下すると燃焼の激しさが低下するため、このドデカン蒸気の火炎面への供給量も低下することが予想される。また逆に酸素濃度が高い場合には、火炎高さは約 30 cm を超えるなど非常に激しい燃焼が生じることが観察されている。図 8 に示した傾向は、拡散燃焼を考えた場合の傾向と矛盾しない。このように煤煙の放出挙動は、雰囲気酸素濃度に極めて大きく影響を受けることが確認できた。火災時の煤煙放出挙動を精度よく評価するためには、例えば三次元熱流動解析コードを用いて火災が発生しているコンパートメント内の酸素濃度の空間的なばらつきを詳細に解析することなども必要となると考えられる。

また、燃焼ガスと空気の境界に形成されると考えられる火炎面に流入する燃焼ガス流束と空気流束との相対的な比に着目し、これと煤煙発生挙動を関連づけて考察することとした。図 9 に評価対象とする体系を示す。これは FSEEA の燃焼セル内に設置されている防煙ガラスの内部を模式的に表したものである。単純化のために、燃焼物質表面から放出されるガスはドデカン蒸気であると仮定した。ドデカンの化学的組成に基づき、ドデカンの燃焼に対する量論燃空比を計算した。火炎面に対する熱分解ガスの流入フラックスとして

は、燃焼面からの熱分解ガスの放出速度はドデカンの燃焼に伴う質量減少速度と等しいと仮定し、この値を適用することとした。また、火炎面に対する空気の流入フラックスとしては、各燃焼条件における給気流速を用いた。給気流速を質量減少速度で除することで、燃空比を計算し、理論燃空比をこの燃空比で除することで空気過剰率を求めた。煤煙の発生傾向として、煤煙濃度を取り上げ、空気過剰率との関係を考察した。ここでの煤煙濃度とは、試験において燃焼物質から放出された総煤煙重量 (kg) を、その煤煙重量が放出された時間に防煙ガラス内を流れた換気流の総体積 (m^3) で除することで求めた平均の濃度値である。図 10 にこの煤煙濃度と空気過剰率の関係を示す。煤煙濃度は空気過剰率が増大するにしたがって減少する傾向が見られた。この傾向は既報告の PMMA の燃焼に伴う傾向と一致するものであり、一般的に言われている空気過剰率が大きくなると煤煙の発生傾向は低下するという傾向とも一致している。

図 11 に Zn-St の燃焼に伴う煤煙化率に対する輻射熱流束の影響を示す。図 4 と同様に、輻射熱流束の値が大きくなるにしたがって増大した。

火災事故時の施設が有する閉じ込め性能に対しては、HEPA フィルタの健全性が重要な因子である。HEPA フィルタの健全性を評価するためには、煤煙の負荷によって引き起こされる目詰まりとそれに起因する差圧上昇挙動を評価する必要がある。燃焼物質毎の様々な燃焼条件下での質量減少速度や煤煙放出速度、あるいは煤煙化率に係るデータは、この評価を定量的に実施する上で極めて重要な技術的知見である。

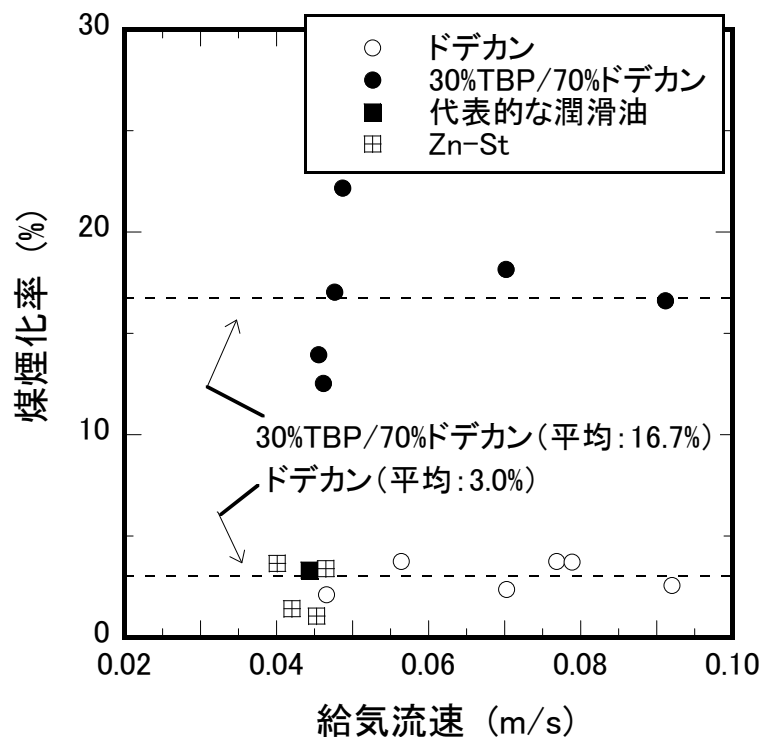


図 7 燃焼セルへの給気流速と煤煙化率の関係

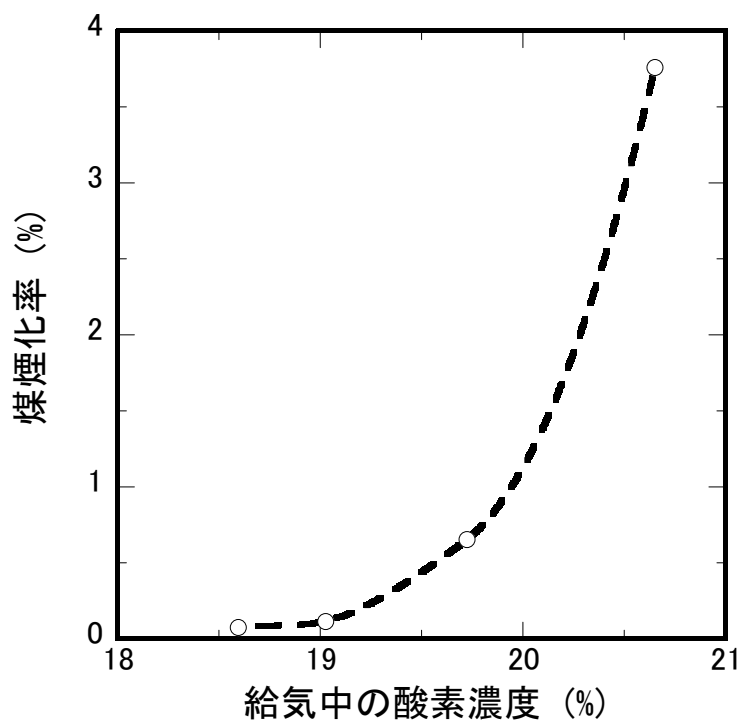


図 8 給気中の酸素濃度と煤煙化率の関係（燃焼物質：ドデカン）

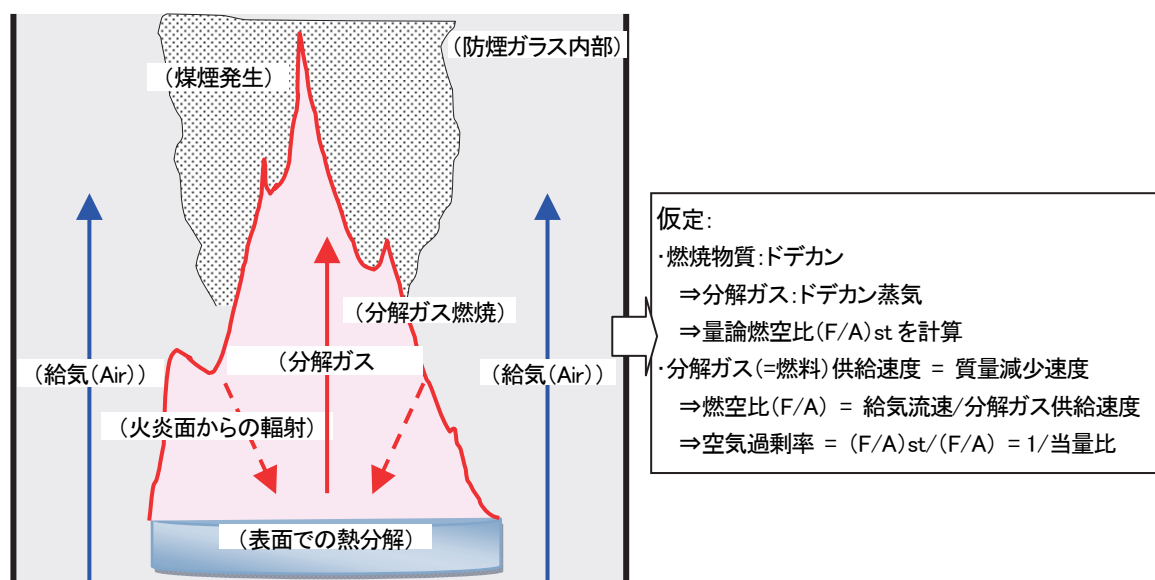


図 9 空気過剰率と煤煙発生挙動の関係の評価モデル図

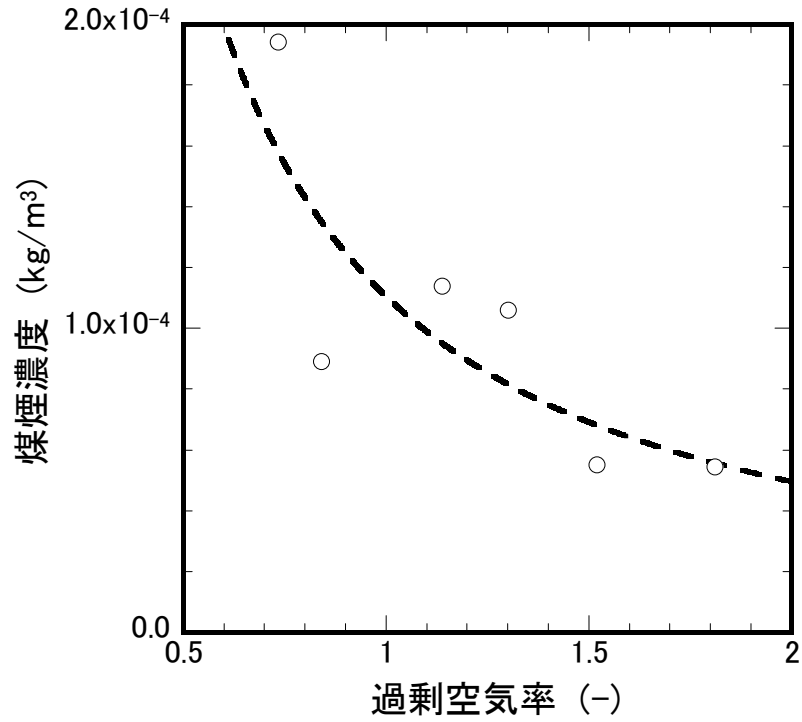


図 10 空気過剰率と煤煙濃度の関係（燃焼物質：ドデカン）

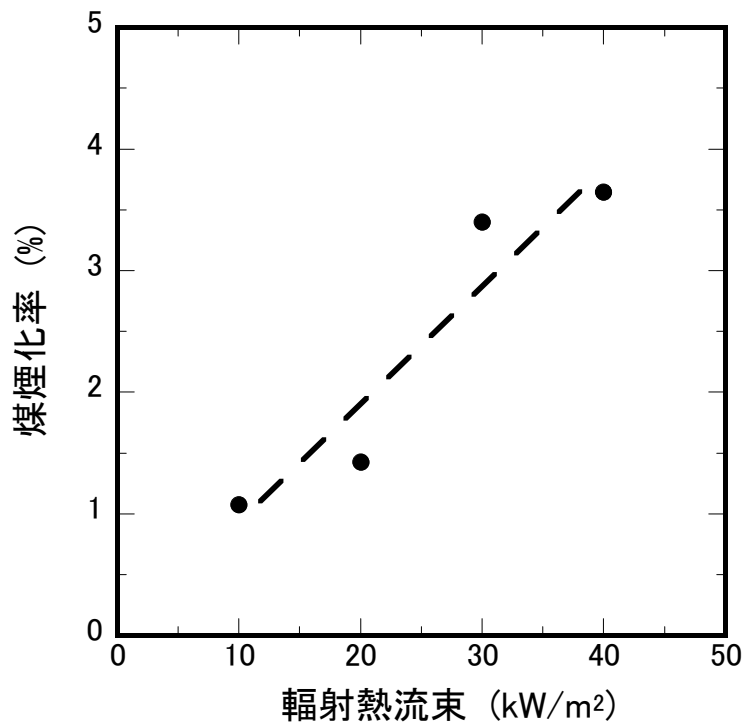


図 11 Zn-St の燃焼に伴う煤煙化率に対する輻射熱流束の影響

3.2 HEPA フィルタの目詰まり挙動の評価

3.2.1 HEPA フィルタの差圧上昇評価

図 12 に再処理有機溶媒の燃焼に伴う HEPA フィルタの差圧上昇評価結果を示す。同じ単位濾過面積当たりの煤煙負荷重量で比較すると、ドデカン単独の燃焼に伴う HEPA フィルタの差圧上昇のほうが、30%TBP/70%ドデカンの燃焼による上昇よりもより少ない煤煙負荷重量で引き起こされている。ただし、図 7 に示したように煤煙化率（すなわち単位燃焼質量当たりに放出される煤煙量）は 30%TBP/70%ドデカンの方がドデカン単独の場合よりも約 5.6 倍大きいと、実際の火災事故時における HEPA フィルタの差圧上昇は、単純にドデカン単独系の方が早い時間で引き起こされるとは限らない点に注意が必要である。図 12 から、30%TBP/70%ドデカンの燃焼によって差圧が約 4 kPa に到達する煤煙負荷重量は約 $7.4 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2$ であり、この値はドデカン単独の燃焼によって同じ差圧に到達するために要する煤煙負荷重量約 $1.4 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2$ の約 5.2 倍であることがわかる。燃焼に伴って放出される煤煙量は、質量減少速度に煤煙化率を乗ずることで計算される。したがって、図 3 に示した様に両者の質量減少速度 ($\text{kg/m}^2\text{s}$) はほぼ差がないことを考慮すると、この同じ差圧に到達するまでに要する煤煙負荷重量の差は両者の煤煙化率の差によって相殺され、両者共にほぼ同じ時間履歴を示すことになる。

図 12 での極めて重要な点は、30%TBP/70%ドデカンの燃焼では、燃焼晩期において急激な差圧の上昇を引き起こすことである。この傾向はドデカン単独系の燃焼では観察されない特異な傾向である。図 12 中のドデカンが示した最大差圧は、燃焼体積約 70 ml がすべて焼失し自然鎮火した時点での値であるのに対して、30%TBP/70%ドデカンの差圧は、燃焼晩期において差圧が急激に上昇したために、装置の安全性を考慮し燃焼途中で強制的に消火したものである。したがって、強制消火が遅れた場合には、30%TBP/70%ドデカンの燃焼による HEPA フィルタの差圧の上昇はさらに高い値にまで一気に急上昇する可能性が高い。煤煙の負荷による HEPA フィルタの目詰まり特性については、旧原研が実施した「再処理施設排気フィルタ事故時安全性実証試験」で検討されている¹⁵⁾。この報告では、ドデカン単独と 30%TBP/70%ドデカンの燃焼に伴って引き起こされる HEPA フィルタの差圧上昇挙動には差がなく、これらを平均化することで差圧上昇を評価する経験式を導出しており、この経験式が火災事故時の安全性の評価に広く採用されてきた経緯がある。図 12 に示したように 30%TBP/70%ドデカンの燃焼によって、HEPA フィルタの急激な差圧上昇が引き起こされるということであれば、HEPA フィルタの破壊による公衆への影響を評価する上で重要な新たな技術的知見であるといえる。そこで、燃焼物質の燃焼の進行具合と差圧上昇の関係を考察するため、再処理有機溶媒の燃焼に伴う残存質量と差圧上昇の関係を検討した。ここで残存質量は、各試験体の初期質量から各燃焼時間における質量減少量を差し引くことで計算した。ドデカンはほぼ全量燃焼している。鎮火時点での 30%TBP/70%ドデカンの残存質量がゼロとはならないのは、上述のように燃焼晩期において HEPA フィルタの差圧が急激に上昇したため、安全性を考慮し強制消火したためである。両者の関係を図 13 に示す。図 13 を見ると、両者の混合比から計算される試験体中の TBP の質量%を

若干超えた段階でこの差圧の急激な上昇が引き起こされていることがわかる。さらに図 14 に、燃焼の進行に伴う質量減少と差圧上昇を一緒に示した。質量減少は、燃焼の進展とともに緩やかにその減少の割合を弱めながら推移し、結果的に時間に対して二次関数的な変化を示すことがわかる。図 13 及び図 14 からは、燃焼初期段階ではより低沸点成分であるドデカンの燃焼が支配的であるが、若干量の TBP もドデカンとともに徐々に燃焼していき、TBP の濃縮が進んだ段階から HEPA フィルタの急激な差圧上昇が引き起こされることが推察される。図 14 には、急激な差圧上昇が引き起こされる前と後の時間領域で測定された煤煙化率と煤煙に含まれていた含水率を示した。煤煙含水率は、試験終了直後の煤煙捕集重量と乾燥後の重量の差から求めたものである。急激に差圧が上昇する時間領域では煤煙化率及び煤煙含水率ともにそれ以前の時間領域よりも値が大きくなっている。煤煙含水率の増加分は少ないが、煤煙化率自体が大きくなっているため、HEPA フィルタへ付着した煤煙由来の水分量は大きくなっている。これもまた急激な差圧上昇を引き起こす原因の一つであるものと考えられる。

HEPA フィルタの急激な差圧上昇が引き起こされる 30%TBP/70%ドデカンの燃焼晩期における煤煙の粒子径分布の変化を観察するため、ELPI を用いて、この領域における煤煙粒子の個数分布の時間変化を観察した。図 15 及び図 16 に煤煙粒子の個数分布の経時変化及びそれぞれの分布の個数中央径の経時変化を示す。図 15 をみると、燃焼の進行とともに分布が粒子径が大きい方に推移していくことがわかる。また、図 16 をみると、煤煙の個数中央径が増大すると、ほぼ同時あるいは若干の時間遅れの後に HEPA フィルタの急激な差圧上昇が引き起こされることがわかる。さらに、煤煙を捕集したメンブレンフィルタを試験終了後に回収したところ、HEPA フィルタの急激な差圧上昇を引き起こした時間領域に対応するフィルタの表面は若干濡れた状態であり、強い有機物臭が確認された。本報では、便宜上、燃焼にともなって燃焼物質から放出された放出物質をまとめて「煤煙」と呼称しているが、特に 30%TBP/70%ドデカンの燃焼晩期においては、固体状の煤煙に加えてなんらかのミスト状の有機溶媒（あるいは分解物）が主として放出されている可能性がある。

以上の点を踏まえると、30%TBP/70%ドデカンの燃焼晩期には、煤煙及びミスト状の有機溶媒が粒子径を増大及び量を増加させながら放出されるようになるため、急激な HEPA フィルタの目詰まりとそれに起因する差圧上昇が引き起こされたものと推察される。この放出物の同定については今後の検討課題である。一般的に実施設においては、火災発生箇所から HEPA フィルタまでには、かなりの距離の換気系配管が存在する。そのため、HEPA フィルタへ到達する煤煙等の量や性状は、具体的な換気系形状に依存することになる。本報での試験では小型の実験装置である FSEEA を使用し、このような換気系形状に依存しない試験データを取得した。実施設で 30%TBP/70%ドデカンが燃焼する火災が生じた場合、燃焼晩期にミスト状の有機溶媒が放出されても換気系を移行する過程で沈降・沈着することによって減衰するため、HEPA フィルタへ到達する量は、本報での試験結果よりも少なくことが考えられる。そのため、燃焼晩期における HEPA フィルタの差圧の上昇は、本報での試験結果よりも、緩やかになる可能性はあると考えられる。しかしながら、

HEPA フィルタが担う閉じ込め機能の重要性を鑑みた場合、燃焼条件によっては、火災事故の進展により HEPA フィルタの閉じ込め機能が喪失する可能性があることが確認できたことは、火災事故時の施設の閉じ込め安全性を評価する上で重要な知見であると考ええる。

図 17 に、カスケードインパクトにて計測した、ドデカン及び 30%TBP/70%ドデカンの燃焼に伴って放出された煤煙粒子の質量分布を示す。カスケードインパクトでは各粒子径範囲に区分された各段に煤煙粒子が捕集される。各粒子径範囲に捕集された煤煙重量をそのまま各粒子径範囲の中央径に対してプロットすると、各粒子径区分の煤煙重量（すなわち頻度）が粒子径区分の幅に左右されることになり、分布形状が歪んでしまう。そこで図 17 は、カスケードインパクトの各段において捕集された煤煙重量をその各段の区分の幅で除し、粒子間隔で規準化している。また、それぞれの分布を比較するため、各段における全捕集重量で除することで質量割合とするとともに捕集した気体の体積で除することで濃度として表している。なお、図 15 に示した ELPI を用いた煤煙の粒子径分布は煤煙（ミスト状有機溶媒が主である可能性が大きい）、便宜上これを含めて煤煙と表現する。以下同様である。）の個数基準の粒子径分布であり、図 17 に示した質量基準の粒子径分布とは直接比較できない点に注意が必要である。本試験では、試験体の燃焼開始時点から終了時点まで煤煙をカスケードインパクトにて継続して捕集した。したがって、図 17 に示した煤煙粒子の質量分布は、燃焼中に放出された煤煙を積算したものの結果である。図 14 及び図 15 に示したように、30%TBP/70%ドデカンの燃焼晩期には、煤煙が粒子径を増大及び量を増加させながら放出するようになるため、図 17 の 30%TBP/70%ドデカンからの煤煙粒子の質量分布にはこの燃焼晩期における煤煙の寄与も含まれることになる。しかしながら、HEPA フィルタの差圧が急激に上昇する前後での煤煙化率は極端に大きく変わらないこと、フィルタの差圧が急激に上昇する時間幅は全燃焼時間の 1 割程度に過ぎないことを考慮すると、図 17 の 30%TBP/70%ドデカンからの煤煙粒子の質量分布に対する燃焼晩期における煤煙の粒子径の増大及び量の増加の影響は、比較的小さいと考えることもできる。その仮定に基づくと、図 17 の結果からは、ドデカンの燃焼に伴って放出される煤煙粒子は、30%TBP/70%ドデカンの燃焼に伴う煤煙粒子よりも径が小さいとみることも可能である。既報告⁴⁵⁾のグローブボックスパネル材及びケーブルルシース材の燃焼試験でも、煤煙化率をもっとも小さかったアクリルが、同じ単位濾過面積当たりの煤煙捕集重量で比較した場合、他の燃焼物質よりも少ない捕集重量で HEPA フィルタの差圧上昇が引き起こされた。これらの傾向を踏まえると、煤煙がミスト状の有機溶媒のような異なる性状を有するものではない場合には、HEPA フィルタの差圧上昇に対しては、付加される煤煙粒子の大きさ自体が大きな影響を与えるものと推察される。

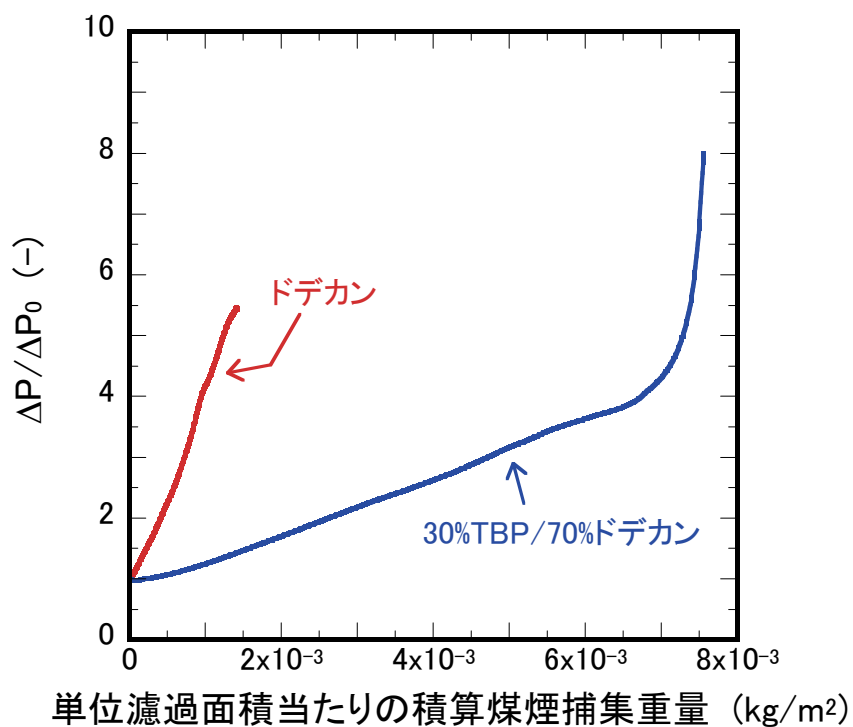


図 12 再処理有機溶媒の燃焼に伴う HEPA フィルタの差圧上昇評価結果

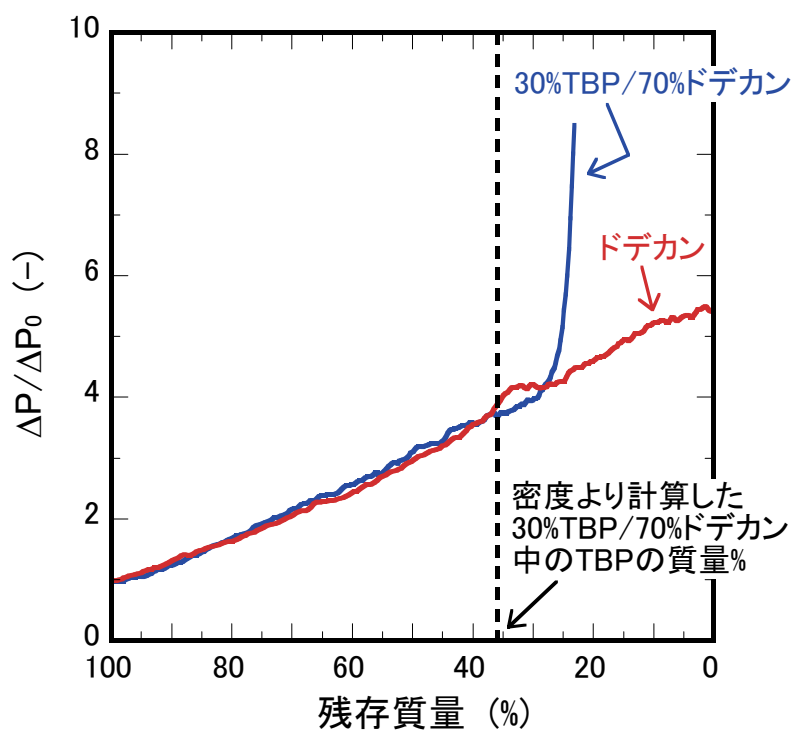


図 13 再処理有機溶媒の燃焼に伴う残存質量と差圧上昇の関係

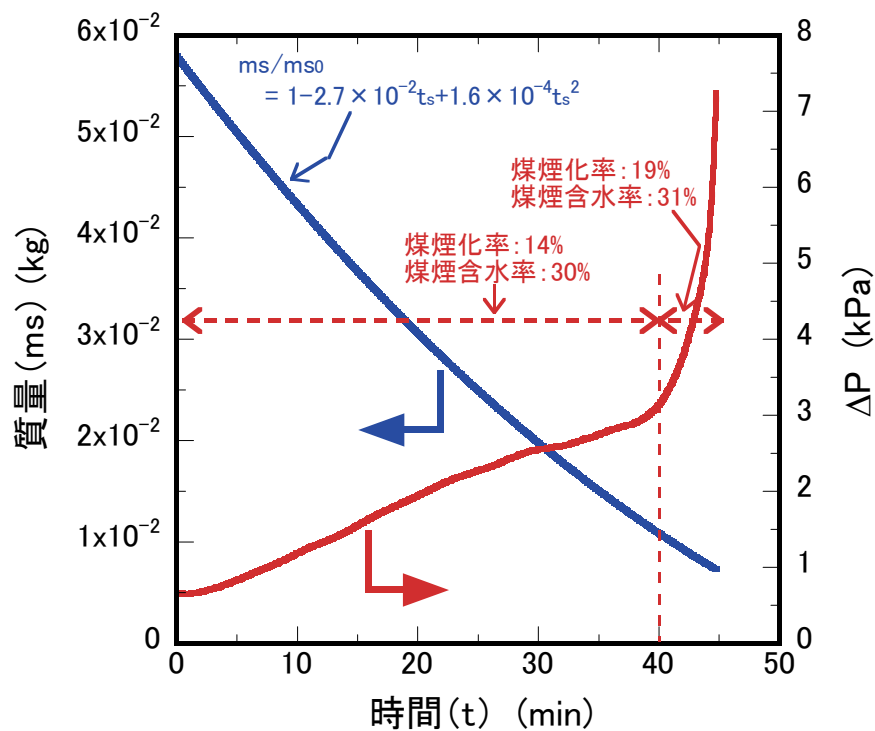


図 14 30%TBP/70%ドデカンの燃焼に伴う質量減少と HEPA フィルタ差圧上昇挙動との関係

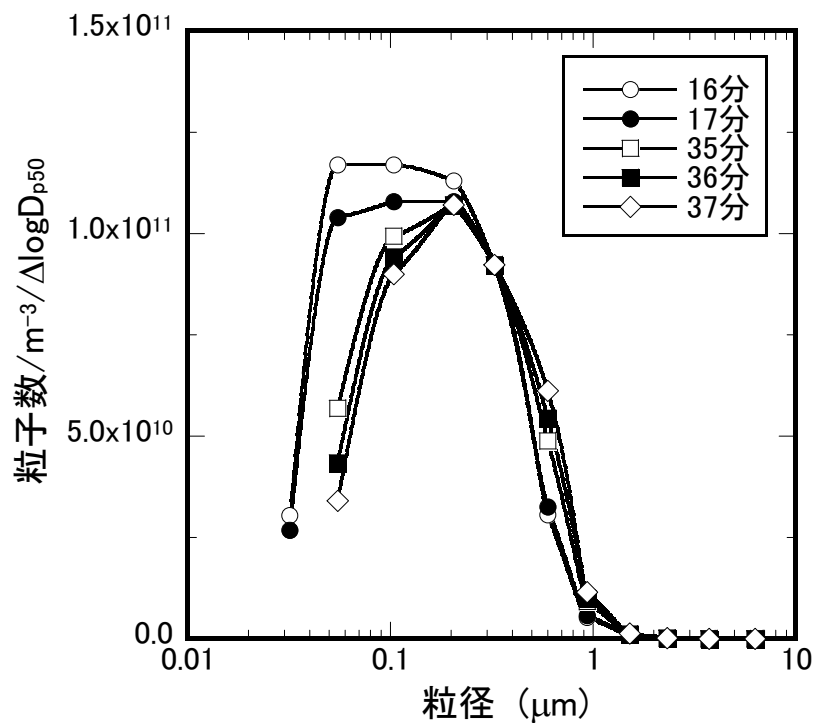


図 15 30%TBP/70%ドデカンの燃焼晩期における煤煙粒子の個数分布の経時変化
(D_{p50} : ELPI の各捕集段における 50%カットオフ径)

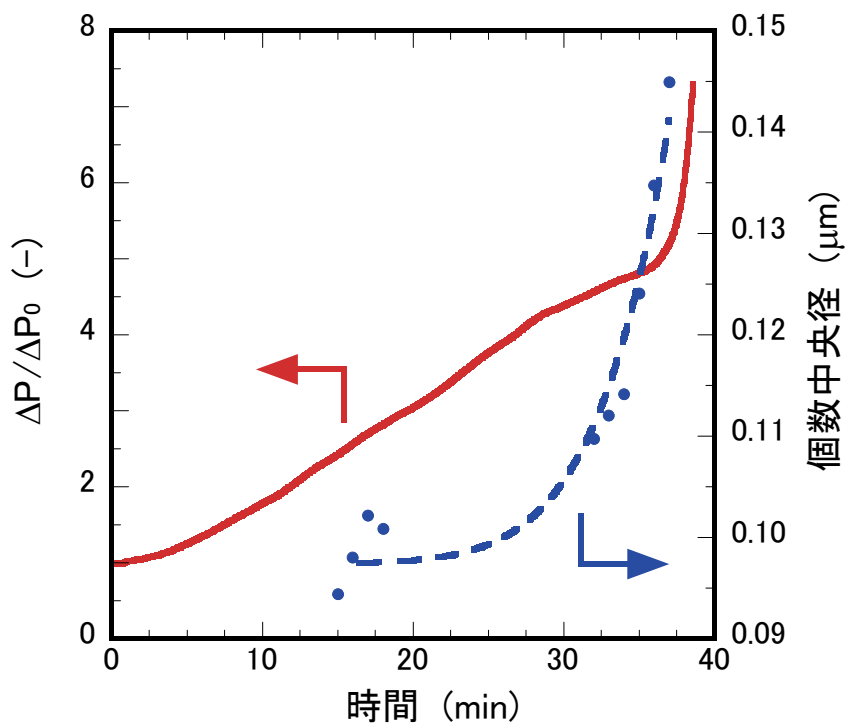


図 16 30%TBP/70%ドデカンの燃焼に伴う煤煙粒子の個数中央径の経時変化と
HEPA フィルタ差圧上昇挙動との関係

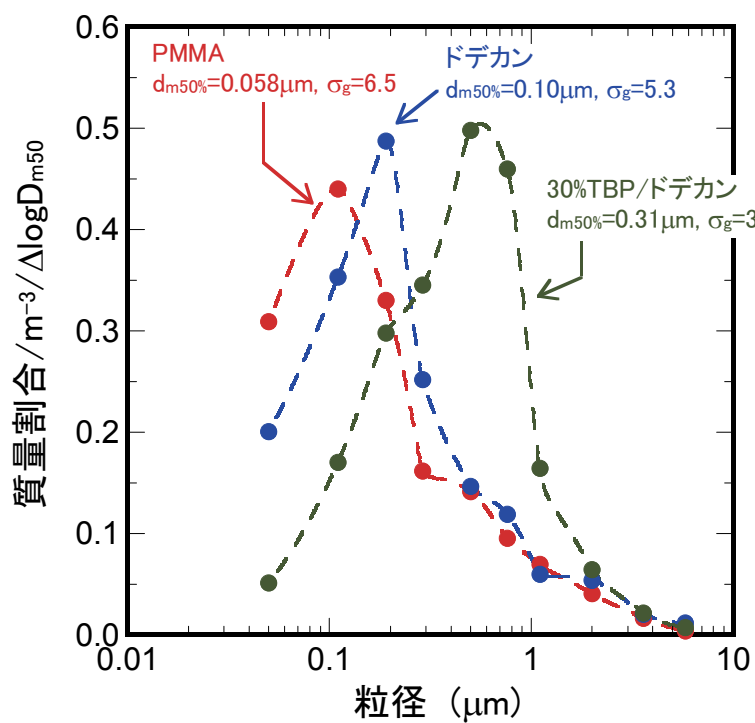


図 17 煤煙粒子の質量分布の比較
(D_{m50} : カスケードインパクタの各捕集段における 50%カットオフ径)

3.2.2 HEPA フィルタの差圧上昇への水分の影響の検討

HEPA フィルタの差圧上昇への供給流体中の湿度の影響については、これまで、標準風量タイプの HEPA フィルタ¹⁾に対して実施された報告がある¹⁶⁾。報告では各メーカーの 3 種類の HEPA フィルタを試験対象としており、それぞれの HEPA フィルタともに HEPA フィルタへの供給流体中の相対湿度が 60 %付近から若干の差圧上昇が認められる結果となっている。相対湿度 95 %条件下での差圧の上昇割合は、2 %～30 %（いずれも相対湿度 30 %における差圧に対する割合）であり、HEPA フィルタの種類によって異なった結果となっている。現在の核燃料サイクル施設においては、さらに大きな換気風量に対応できる多風量タイプの HEPA フィルタが採用されている。HEPA フィルタの差圧上昇挙動は、HEPA フィルタの透過流量等の条件のみならず、HEPA フィルタ自身の構造によっても異なることが予想される。そこで多風量タイプの HEPA フィルタの差圧上昇挙動に対する相対湿度の影響を観察することとした。2.1 で述べたように、本試験では通常用いられる多風量タイプの HEPA フィルタ¹⁾をもとに濾過面積を小さくしたものを使用しているが、HEPA フィルタを透過する定格の流速は、通常の HEPA フィルタに合わせた値で制御している。図 18 に各試験で設定した相対湿度条件を示す。HEPA フィルタへ供給流体中の相対湿度は、湿度温度変換器をフィルタユニット前段部からのサンプリング配管に接続し測定を行った。また、各試験における相対湿度については、FSEEA の希釈ダクトの吸気口に加湿器を設置し、目的の相対湿度になるように制御した。相対湿度は気体の温度の関数となっているため、各試験結果を直接比較するために、以下の式を用いることで相対湿度から HEPA フィルタへの供給流体中に含まれる水分濃度を計算した。

$$E = 6.11 \times 10^{\frac{7.5t}{t+237.3}} \quad (2)$$

$$a = \frac{217 \times E}{(t + 273.15) \times 1000} \quad (3)$$

ここで、E は温度 t (°C) における飽和水蒸気圧 (hPa)、a は温度 t (°C) における飽和水蒸気量 (kg/m³) である。湿度温度変換器から計測された流体の温度をもとにこれらの式からその温度の a を求め、同変換器から計測された相対湿度と a から給気流体中の水分濃度を計算した。結果を図 19 に示す。図 18 及び図 19 から、各試験での相対湿度及び水分濃度はほぼ一定に制御できていることがわかる。なお、図 18 及び図 19 に示した相対湿度及び水分濃度は、燃焼物質の燃焼によって放出された水分を含んだ値であり、HEPA フィルタを透過する流体中に含まれている正味の値である。このように制御した条件下で、比較的単純な系であるドデカンの燃焼に伴って放出される煤煙の負荷による HEPA フィルタの差圧上昇を測定した。測定結果を図 20 に示す。各条件下で得られた HEPA フィルタの差圧上昇はほぼ一致しており、このことから、この条件の範囲内では、HEPA フィルタの差圧上昇に対する HEPA フィルタへの供給流体中の水分濃度の影響はみられなかった。

今回の試験結果は、現在の核燃料サイクル施設において用いられている多風量タイプの HEPA フィルタの差圧上昇に対する相対湿度の影響を観察したものである。これまでの報告は、標準風量タイプの HEPA フィルタを用いた結果であり、両者を直接比較することはできないと考える。本試験の結果では、HEPA フィルタの差圧上昇挙動に対する相対湿度の有意な影響は観察されなかったが、より大きな実サイズの多風量タイプの HEPA フィルタを用いた実証的な試験を実施し、この傾向を確認することが次の課題であると考ええる。

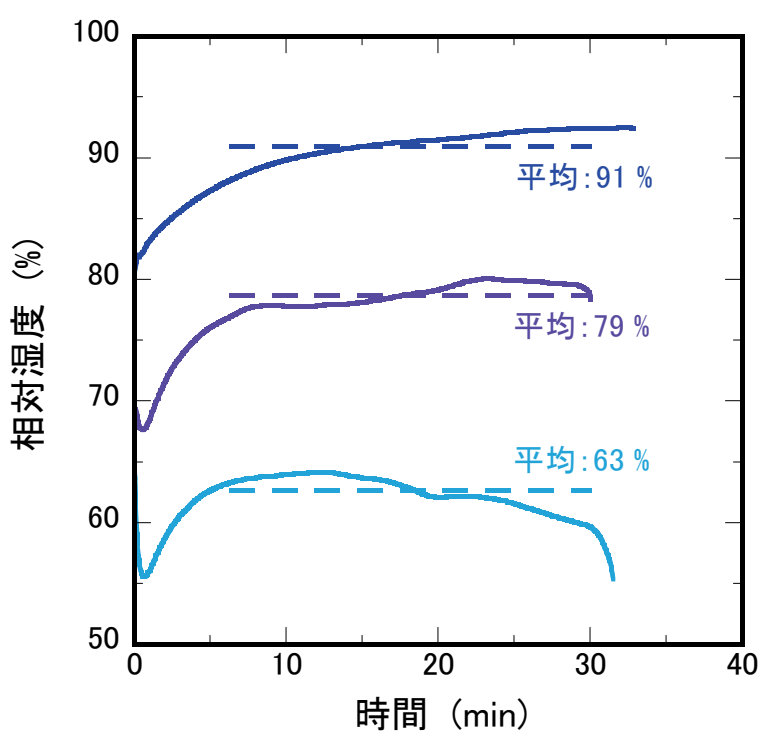


図 18 HEPA フィルタの差圧上昇特性に対する相対湿度の影響を観察するための試験における相対湿度条件

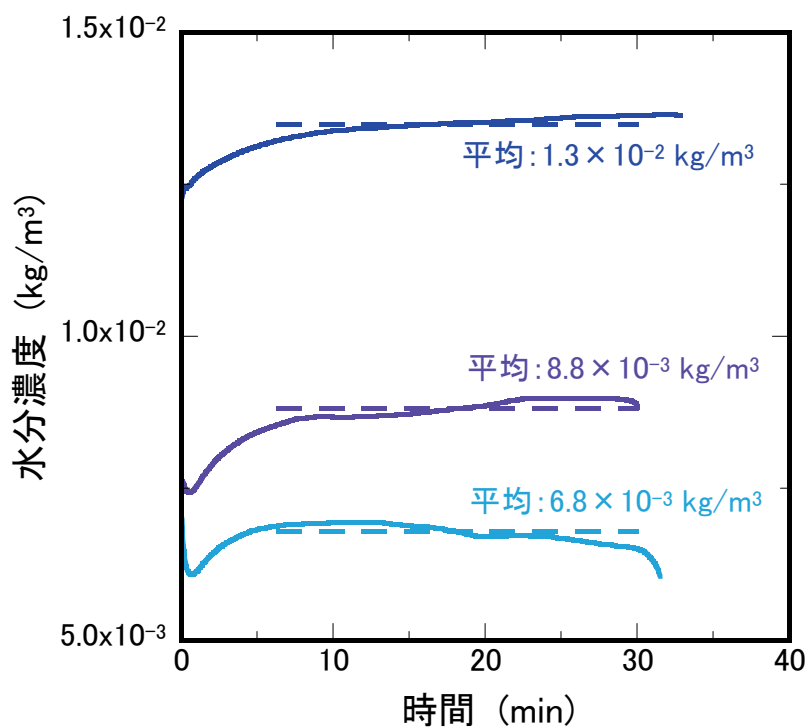


図 19 HEPA フィルタの差圧上昇特性に対する相対湿度の影響を観察するための試験における水分濃度条件

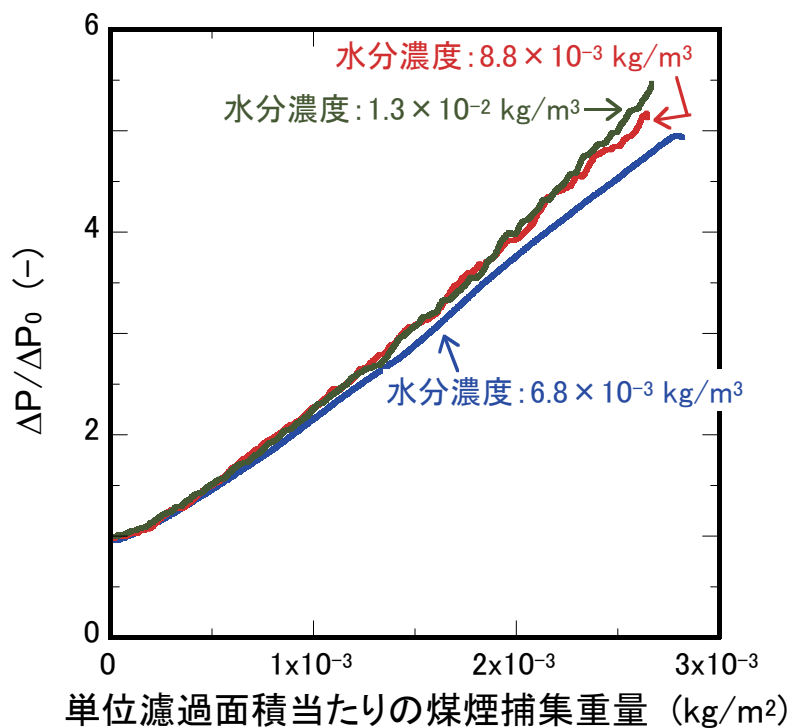


図 20 ドデカンの燃焼に伴う HEPA フィルタ差圧上昇に対する湿度の影響

4. 結 言

再処理有機溶媒（ドデカン及び 30%TBP/70%ドデカン）及び Zn-St 並びに代表的な潤滑油の燃焼に伴う質量減少速度や煤煙化率をこれら燃焼物質に対する給気流量をパラメータとして定量的に把握することができた。燃焼に伴う質量減少速度は、ばらつきはあったものの各燃焼物質で大きな相違は観察されなかった。一方、30%TBP/70%ドデカンの燃焼に伴う煤煙化率は、他の燃焼物質よりも大きい値（約 16.7%、他の燃焼物質では約 3.0%）を示すことがわかった。30%TBP/70%ドデカンの燃焼に伴う燃焼熱は、燃焼初期ではドデカン単独の場合とほぼ同様の値を示しているが、燃焼が進むにつれて若干小さい値を示すようになった。これは、30%TBP/70%ドデカンの場合では、燃焼の進行によって、低沸点成分であり燃焼性が大きいドデカンが消費されるためと考えられる。これらの値は、解析コードを用いて、火災事故下の換気系内の熱流動及び物質移行を計算するための入力ソース項として必要不可欠な知見である。

Zn-St は MOX 燃料加工施設においてもっとも大量に使用される有機物であるのにもかかわらず、可燃性あるいは引火性の観点からは分類対象外とされている。本試験では、Zn-St は、輻射熱流束を与え融解した状態では、ガスバーナーによる着火によって容易に燃焼し、10 kW/m² 以上の輻射熱流束供給下では、定常的に燃焼を継続することを確認した。なんらかの原因によって外部からの熱が Zn-St に加えられる状況下では、Zn-St 自身が燃焼し、二次的な事故を誘発する可能性があると考えられる。

煤煙の負荷による HEPA フィルタの目詰まり挙動評価においては、30%TBP/70%ドデカンの燃焼晩期において急激な差圧の上昇が引き起こされることを確認した。この傾向はドデカン単独系の燃焼では観察されない特異な傾向である。30%TBP/70%ドデカンの燃焼晩期には、煤煙及びミスト状の有機溶媒が粒子径を増大及び量を増加させながら放出されるようになるため、急激な HEPA フィルタの目詰まりとそれに起因する差圧上昇が引き起こされるものと推察される。これまでの報告では、ドデカン単独と 30%TBP/70%ドデカンの燃焼に伴って引き起こされる HEPA フィルタの差圧上昇挙動には差がなく、これらを平均化することで差圧上昇を評価する経験式を導出しており、この経験式が火災事故時の安全性の評価に広く採用されてきた経緯がある。この現象は、HEPA フィルタの破壊による公衆への影響を評価する上で重要な新たな技術的知見であるといえる。

さらに、換気中の水分量をパラメータとした試験をおこなうことで、HEPA フィルタの目詰まり挙動に対する水分の影響についても観察した。しかしながら本報で検討した条件の範囲内では、HEPA フィルタの差圧上昇に対する HEPA フィルタへの供給流体中の水分濃度の影響はみられなかった。

今後は、さらに規模の大きな試験体系を用いた試験を実施し、本報で取得した試験データの適用性の検討を実施したい。また、本報で得られた技術的知見（特に 30%TBP/70%ドデカンの燃焼晩期において引き起こされる急激な差圧の上昇の原因）に対する定量的な考察を行うための検討を行うことも重要である。

謝 辞

本研究の実施に際し、ご協力を頂いた千代田メンテナンス株式会社 田山 拓治氏及び(有)ジェステクノシステム 鹿島 陽夫と貴重なコメントを頂いた JNES 土野 進氏及び石橋 隆氏並びに松本 史朗氏に心から感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本規格協会, “放射性エアロゾル用高性能エアフィルタ”, JIS Z 4812 (1995).
- 2) 阿部 仁, 渡邊 浩二, 田代 信介, 内山 軍藏, “火災事故時のグローブボックスの閉じ込め性能評価に関する研究”, JAEA-Research 2006-054 (2006.9).
- 3) 阿部 仁, 渡邊 浩二, 田代 信介, 内山 軍藏, “火災事故時のグローブボックスの閉じ込め性能評価に関する研究 (II)”, JAEA-Research 2007-075 (2007.11).
- 4) 阿部 仁, 鹿島 陽夫, 内山 軍藏, “核燃料サイクル施設におけるグローブボックスパネル材及びケーブル被覆材燃焼時の閉じ込め効果評価試験 (受託研究)”, JAEA-Research 2011-015 (2011.6).
- 5) H. ABE and G.Uchiyama, “Study on Evaluation of Confinement Capability of Fuel Cycle Facility under Combustion of Glove-box and Cable Sheath Materials”, Proceeding of GLOBAL 2011 (2011.12).
- 6) 日本原燃(株), “再処理事業所 再処理事業指定申請書”, (1989).
- 7) 三好 慶典, 山本 俊弘, 中島 健, “MOX 粉体燃料の臨界事故の簡易評価”, JAERI-Research 2002-002 (2003.3).
- 8) 阿部 仁, 田代 信介, 三好 慶典, “ステアリン酸亜鉛の熱分解特性評価モデルの検討”, 日本原子力学会和文論文誌, Vol.6, No.1, p.10-21 (2007).
- 9) 山根 祐一, 酒井 幹夫, 阿部 仁, 山本 俊弘, 奥野 浩, 三好 慶典, “MOX 粉体系の過渡臨界事象評価のための物性値データ —MOX 及びステアリン酸亜鉛粉末の物性値— (受託研究)”, JAEA-Data/Code 2006-021 (2006.10).
- 10) 日本規格協会, “放射性物質取扱作業用グローブボックス”, JIS Z 4808 (2002).
- 11) (独)日本原子力研究開発機構, “核燃料物質加工事業許可申請書 本文及び添付書類”, (2004.9).
- 12) N.Iqbal, M.H.Sally and S.Weerakkody, “米国原子力規制委員会 防火検査プログラムのための定量的火災ハザード解析手法 最終報告書”, NUREG-1805 (2004.10).
- 13) “Standard test Method for Heat and Visible Smoke Release Rates for Materials and Products Using an Oxygen Consumption Calorimeter”, ANS E1354-04a.
- 14) J.E.Ayer, et al., “Nuclear Fuel Cycle Facility Accident Analysis Handbook”, NUREG-1320 (1988).

- 15) 西尾 軍治, 橋本 和一郎, ”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).
- 16) 尾崎 誠, 杉本 憲治, 金川 昭, “高性能エアフィルタの苛酷時健全性試験, (IV) 多湿試験”, 日本原子力学会誌, Vol.28, No.6 (1986).

国際単位系（SI）

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	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

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	数メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
電界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比誘電率 ^(b)	(数字の) 1	1

- (a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	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	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束密度	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
光照射度	ルーメン	lm		K
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq	cd sr ^(c)	m ² cd s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

- (a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎平方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁻¹ m ² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ⁻² m ² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm ²)2=10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St =1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb =1cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
フォトリ	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx = 1G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G =1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ⁷ /4π)A m ⁻¹

- (c) 3 元素のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≐」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ =1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1フェルミ≐1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J (「15°C」カロリー) , 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J (「熱化学」カロリー)
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10 ⁻⁶ m

