



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)

Experiment on Evaluation of Confinement Capability of Fuel Cycle Facility under
Combustion of Glove-box and Cable Sheath Materials
(Contract Research)

阿部 仁 鹿島 陽夫 内山 軍藏

Hitoshi ABE, Takao KASHIMA 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

June 2011

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)

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、鹿島 陽夫^{*}、内山 軍藏

(2011 年 4 月 18 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材料として、グローブボックスパネル材料及びケーブル被覆材料を取り上げた。これらの燃焼に伴う質量減少速度や煤煙放出速度等の燃焼特性データと煤煙の目詰まりによる HEPA フィルタの差圧上昇データを、試験体に供給する輻射熱流束の大きさ及び試験体に対する給気流速並びに給気中の酸素濃度等をパラメータとしてそれぞれ取得した。また、これらのデータを相互に関連づけることによって、具体的な火災事故シナリオに基づいた HEPA フィルタの差圧上昇の時間的進展を評価し、燃焼物質や燃焼条件の相違による差圧上昇挙動への影響を定量的に評価することが可能となることを示した。

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 21 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

※特定課題推進員

Experiment on Evaluation of Confinement Capability of Fuel Cycle Facility under
Combustion of Glove-box and Cable Sheath Materials
(Contract Research)

Hitoshi ABE, Takao KASHIMA[※] and Gunzo UCHIYAMA

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

(Received April 18, 2011)

To contribute on confirmation of safety of fuel cycle facilities, evaluation method for soundness of confinement capability of the facilities under fire has been investigated. Panel materials of glove-box and cable sheath materials were considered to be an examination object as the representative organic materials in the facilities. Combustion property data, such as mass loss rate and soot generation ratio of the materials, and clogging property data of HEPA filter with combustion of the materials were measured as a parameter with radiation heat given to the materials, supply flow rate to the materials and oxygen concentration in the supply flow. Furthermore, progress of rising differential pressure of HEPA filter under hypothetical scenario of fire accident was evaluated quantitatively by applying these data mutually.

Keywords : Nuclear Fuel Cycle Facility, Safety, Fire, Glove Box, Cable, Source Term
HEPA Filter, Confinement

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

※Special Topic Researcher

目 次

1. 緒言	1
2. 試験	4
2.1 試験装置	4
2.2 試験方法及び試験条件	6
2.2.1 試験体の調整及び燃焼方法	6
2.2.2 試験パラメータ	6
2.2.3 煤煙及び模擬放射性物質の捕集・定量	7
3. 試験結果及び考察	9
3.1 燃焼物質からのソースタームデータ及びHEPA フィルタ目詰まり評価データの評価	9
3.1.1 質量減少速度及び煤煙放出挙動の評価	9
3.1.2 煤煙の負荷による HEPA フィルタの目詰まり評価	17
3.1.3 事故時の HEPA フィルタの目詰まりによる差圧上昇の評価	18
3.2 放射性物質放出挙動評価	21
3.2.1 PMMA 及び PC の燃焼に伴う Eu_2O_3 粉末の放出挙動評価	21
3.2.2 MOX 粉末の放出挙動評価	23
4. 結言	25
謝辞	26
参考文献	26

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental	4
2.1 Apparatus	4
2.2 Method and conditions	6
2.2.1 Preparation of sample and combustion method	6
2.2.2 Experiment parameter	6
2.2.3 Collection and quantitiveness of released smoke and simulated radioactive material	7
3. Results and discussion	9
3.1 Evaluation of smoke release behavior	9
3.1.1 Evaluation of mass loss rate and smoke release behavior	9
3.1.2 Evaluation of HEPA filter clogging behavior by loading smoke	17
3.1.3 Estimation of rise of differential pressure of HEPA filter by clogging under Fire	18
3.2 Evaluation of Radioactive Materials Behavior	21
3.2.1 Evaluation of release behavior of Eu_2O_3 powder with burning PMMA and PC	21
3.2.2 Evaluation of release behavior of MOX powder	23
4. Conclusion	25
Acknowledgment	26
References	26

図表リスト

表 1	本試験で使用している Eu_2O_3 粉末と MOX 粉末の性状の比較	24
図 1	FSEEA の燃焼セル部分の概略図	5
図 2	FSEEA の全体図	5
図 3	燃焼物質の質量減少速度に対する給気流速の影響	13
図 4	燃焼物質の質量減少速度及び煤煙化率に対する輻射熱流束の影響	13
図 5	燃焼物質からの煤煙放出速度に対する給気流束の影響	14
図 6	燃焼物質からの煤煙化率に対する給気流束の影響	14
図 7	評価対象とする体系の模式図	15
図 8	空気過剰率と煤煙化率との関係（評価対象とした燃焼物質：PMMA）	15
図 9	空気過剰率と煤煙濃度との関係（評価対象とした燃焼物質：PMMA）	16
図 10	煤煙粒子径分布の比較	16
図 11	HEPA フィルタへの煤煙の負荷重量と差圧上昇の関係	18
図 12	事故時の HEPA フィルタの差圧上昇の時間的進展評価結果	20
図 13	燃焼物質に対する Eu_2O_3 粉末の表面濃度と Eu_2O_3 粉末放出速度との関係 （給気流速： $4.7 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ ）	22
図 14	燃焼物質に対する Eu_2O_3 粉末の表面濃度と Eu_2O_3 粉末放出率との関係 （給気流速： $4.7 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ ）	22
図 15	MOX 粉末の放出率の推定結果 （輻射熱流束： 20 kW/m^2 、給気流速： $4.7 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ ）	24

1. 緒 言

現在建設が予定されている民間 MOX 燃料加工施設のような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核燃料物質を直接取り扱う頻度が高い。したがって、放射性物質を直接取り扱う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。このように、HEPA フィルタは、放射性物質の施設内への閉じ込めに対して大きな役割を有しているために、平常時のみならず事故時においても、その放射性物質に対する捕集能力が設計時に想定されている能力を十分上回って維持されていることが求められる¹⁾。一方、核燃料サイクル施設の内部で火災事故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配管系内部での沈着・沈降等の物理的運動を経ながら換気系内に移行し、換気系内に設置されている HEPA フィルタ表面に付着する。この煤煙の付着による負荷により、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、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、それによって甚大な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、火災事故時の安全性を評価するためには、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しう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 フィルタの健全性の評価、すなわち、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、火災事故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。また、燃焼物質の燃焼に伴って、共存していた放射性物質もまた飛散し、煤煙と同様に換気系配管内へ流出し、HEPA フィルタの捕集を受けるわけであるため、この放射性物質の放出・移行割合に係るデータもまた必要となる。核燃料サイクル施設の事故時の放射性物質の閉じ込めを定量的に評価するためには、これらの知見を相互に関連付けながら取得することが重要となる。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。

また、MOX 燃料加工施設のような核燃料サイクル施設に対する技術基準では、「実用上可能な限り、不燃性または難燃性を有する材料の使用」が要求されており²⁾、施設に使用される材料の技術基準に対する適合性を検討する際には、使用することが「実用上可能」か

否かの観点からの判断を行うこととなる。このためには、施設の安全性を担保するために必要な要求性能を定量化し、経済性等の他の要因と合わせて総合的に判断することが必要となるものと考えられる。

核燃料サイクル施設においては、MOX 等の放射性物質は閉じ込めの観点からグローブボックス内での取り扱いが要求されており²⁾、このため工程室には複数のグローブボックスが設置されている。グローブボックスは多くの部分が様々な種類の樹脂によって構成されており、そのうちグローブボックスに占める割合が最も大きいパネル材については、一般的にアクリル（以下、「PMMA」という。）あるいはポリカーボネート（以下、「PC」という。）のいずれかが選択され使用される。通常の酸素濃度条件下では、PMMA は可燃性である一方、PC は自己消炎性を有しており、この点からは、上述の技術基準における火災に対する考慮という意味では、PC の方が PMMA よりも優れていると言える。ただし、これはあくまでも通常の酸素濃度条件下での特性であり、実際の火災条件下での施設の安全性を担保するための必要な要求性能を定量化するためには、酸素濃度の低下や外部に存在する火炎からの輻射入熱等の影響を考慮した燃焼特性データ（燃焼性の有無、煤煙発生挙動等）に基づく閉じ込め機能低下の時間的進展評価を実施し、それぞれの材質の優劣を判断する必要がある。また核燃料サイクル施設には、同施設に設置された各設備・機器の制御のためにケーブルが敷設されている。火災によるケーブルの損傷は、設備・機器の正常な制御を妨げるのみならず、電氣的ショートによる予期しない設備・機器の誤動作等の二次的な影響も引き起こす可能性がある。核燃料サイクル施設においては、上述の技術基準に基づき、難燃性材料を用いたケーブルが採用されることになるが、一口に難燃性ケーブルといっても、様々な種類のケーブルが存在するため、グローブボックスパネル材の選択と同様に、実際の火災条件下での施設の安全性担保するための必要な要求性能を定量化するためには、各難燃性ケーブルが有する燃焼特性データに基づいた評価が必要である。なお、より高い難燃性能（高難燃性）を有するケーブルの価格は、相対的に難燃性能が低い（一般難燃性）ケーブルの価格よりも高額であり、施設に敷設するケーブルの使用量を考慮すると、どのグレードの難燃性ケーブルを採用するか（逆に言えば、施設の安全性担保するための必要な要求性能としてどのグレードまで要求されるべきか）ということは、事業者にとっては、コストの観点から極めて重要であると考えられる。この観点は安全性に観点とは異なり、かつ、安全性の確保の観点よりも優先されるべきものでは決してないが、実際の施設の建設・維持に対しては大きな問題である（この観点は、グローブボックスパネル材の選択に関しても同様であり、PC は PMMA よりも高価である。）。

（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 21 年度（計画では平成 22 年度まで））の実施を通して、上記の核燃料サイクル施設の火災時の安全性を評価する上で不可欠なこれらのデータを取得するとともに、これらのデータを踏まえた評価手法の開発・整備を進めてきた³⁾⁴⁾。特に平成 20 年度からは、上述の観

点を踏まえ、グローブボックスパネル材及びケーブル材料に着目した燃焼特性（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。本報は、主に平成 21 年度に実施した上記受託事業として原子力機構が取得した研究成果の一部をとりまとめたものである。

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⁴⁾。本試験ではこの装置を用いて、ケーブルやグローブボックスパネル材の燃焼に伴う煤煙の放出挙動等のソースデータや煤煙の負荷によるHEPA フィルタの目詰まりによる差圧上昇挙動データを取得した。

FSEEA は、燃焼セル、配管系(配管、流量調節弁、ブロア)、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ている。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 $\times$ 700 mmH))部分と下部の重量測定装置(アルミナ製の秤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。試験体をこの防煙ガラス内で燃焼させ、重量測定装置により、燃焼中の試験体の質量減少速度を連続的に測定した。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に供給する給気に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。さらに、ケーブルや電気盤等の設備・機器が近傍での火災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: $\sim$ 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。

試験体から放出された煤煙及び模擬放射性物質(試験体表面に付加)は、防煙ガラス内の気相部及びフィルタユニット前段部の2カ所から等速吸引した。前者はロープレッシャー型カスケードインパクト(東京ダイレック製 LP-20S-60)及び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)を設置したフィルタフォルダに、後者は同フィルタフォルダにそれぞれ捕集し、粒子径分布及び濃度を計測した。

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。フィルタユニットには、一段のHEPA フィルタを設置した。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 $\times$ 8 cm $\times$ 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。

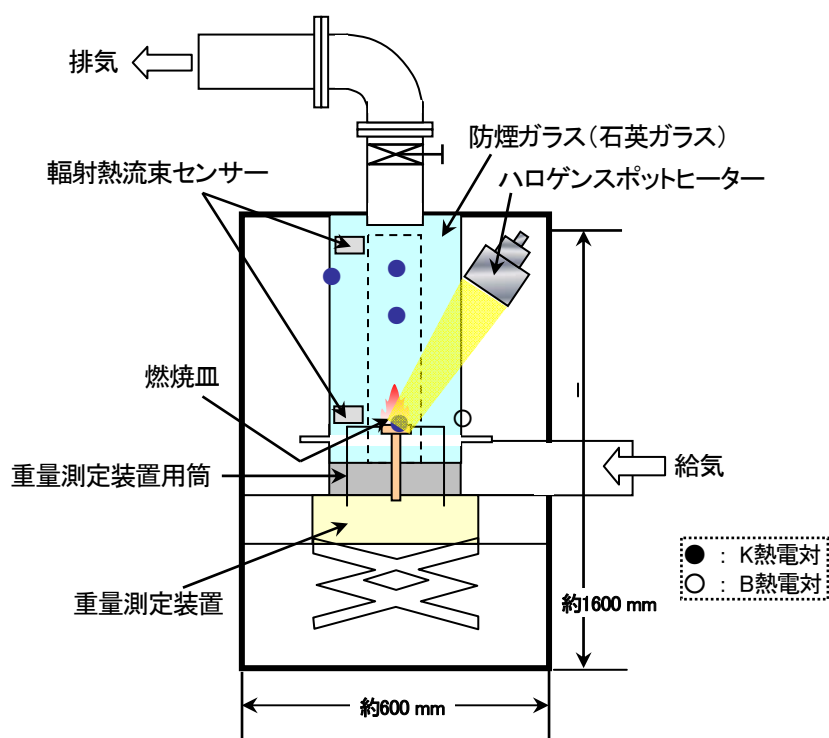


図 1 FSEEA の燃焼セル部分の概略図

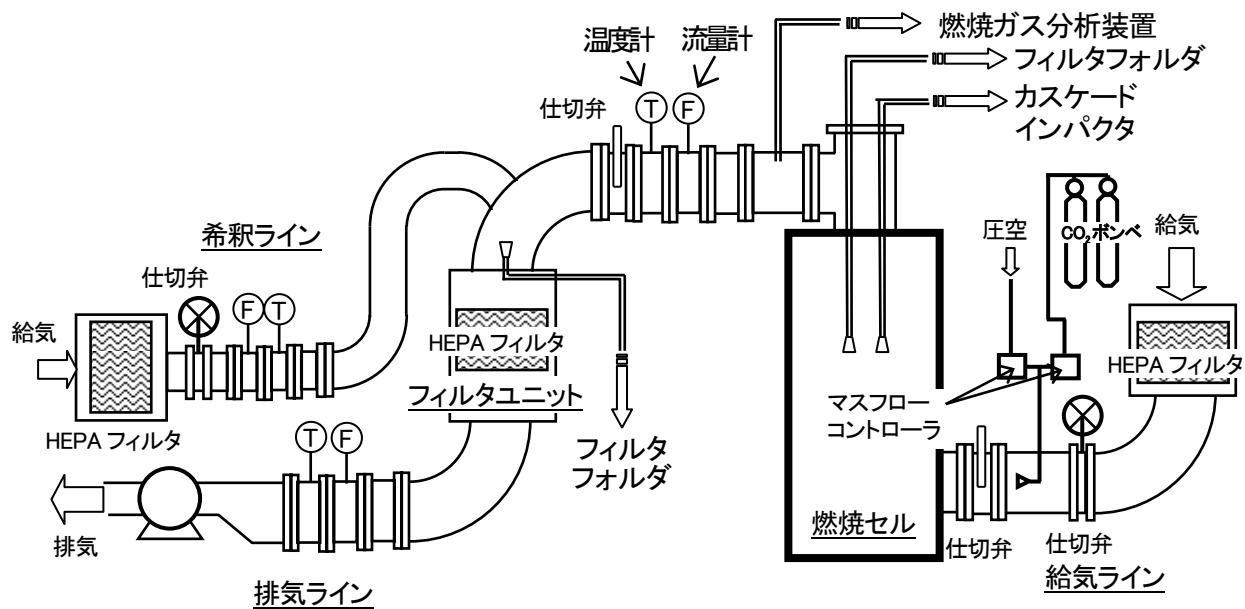


図 2 FSEEA の全体図

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方法

1. で言及したように、本試験では、グローブボックスパネル材料及び難燃性ケーブル材料を評価対象とした。

PMMA 及び PC については、実際にグローブボックスに使用されている材料（PMMA：三菱レーヨン製 S001、PC：旭ガラス製 レキサン 9034）を、一辺 5 mm の立方体の小粒に加工したものを使用した。過去に実施したペレット状の PMMA を用いた燃焼試験では、ペレットの内部での熱分解ガスの蓄積による膨張現象が観察され、その熱分解ガスの抜けに伴って煤煙の発生挙動が不連続になる傾向が報告されている⁵⁾。粒状の試験体を使用したのはこのような現象を回避するためである。

難燃性ケーブル材料としては、一般難燃性（JIS C 3005 の 4.26.2 b）60 度傾斜難燃試験に合格）と高難燃性（JIS C 3521（IEEEstd.382.1974）垂直トレイ燃焼試験（VTFT）に合格）を有する二種類のケーブルを取り上げ、火災時に火炎によって直接晒されるこれらケーブルのシース材料（いずれも耐燃性ポリエチレンであり燃焼に伴って有害なハロゲンガスを放出しない。）を試験体とすることにした（以下、試験に供した一般難燃性シースを「EM-E/F」、高難燃性シースを「NH-E/F」という。）。これらについては、それぞれをシースとして使用しているケーブル（住電日立ケーブル製 NH-KPEE-S 及び EM 600V CE/F）を取り寄せ、その被覆を直径約 2～5 mm 程度に粒状化し使用した。

これらの試験体を重量測定装置の秤量皿上の燃焼皿（ステンレス製シャーレ 100 mmφあるいは 60 mmφ）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行った。PMMA を除く試験体は難燃性物質であるために、バーナーによる着火だけでは燃焼は継続しない。そこで、PMMA を除いたこれらの材料については、少量（約 1 g）のゲル状の助燃剤（主成分：メタノール及びエチレングリコール）を試験体の表面に添付してガスバーナーにより着火し、その後で、ハロゲンスポットヒーターによる輻射熱流束を加えることで、試験体への着火を行うとともに燃焼を維持した。助燃剤は少量であることに加え、着火から短時間で焼失することを試験にて確認しており、試験体本体の燃焼に対する影響は無視できる。試験体に加えられる輻射熱流束値は、輻射センサー（CAPTEC 社製 RF-30-WP50 型水冷式輻射センサー）を用いて公正を行った。

2.2.2 試験パラメータ

(1) 給気流速条件

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⁶⁾。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⁷⁾。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。
- ・添 5 第 1 図からは、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、燃焼物質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 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) 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⁸⁾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 15～25 kW/m² 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/m² までとした。

2.2.3 煤煙及び模擬放射性物質の捕集・定量

実施設においては、グローブボックスの内壁面（たとえばパネル内表面）に MOX 粉末が付着していることが想定される。そこで本試験では MOX の模擬物質として安定な酸化

物である Eu_2O_3 粉末（50%個数中央径：7.08 μm 、幾何標準偏差：2.38、密度： $6.96 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ）を用いることとし、 Eu_2O_3 粉末を燃焼皿に充填した試験体の上表面に振りかけて添加した。その状態で試験体を燃焼させ、 Eu_2O_3 粉末の放出率等を評価した。

試験体の燃焼によって放出された煤煙及び Eu_2O_3 粉末は、2.1 で述べたように FSEEA の煤煙サンプリング系によって捕集した。カスケードインパクト及びフィルタフォルダで捕集した煤煙捕集量は、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。また、 Eu_2O_3 粉末捕集量については、以下の手順で定量した。まず、 Eu_2O_3 粉末が付着しているメンブレンフィルタを、付着面を下にした状態で 200 dm^3 ビーカー中に入れ、そこに水 20 dm^3 、硝酸 5 dm^3 、塩酸 5 dm^3 を加えて溶解した後、ホットプレート（約 280°C）上で 60 分間加熱溶出を行った。先のビーカーに濃硝酸を 5 倍希釈した硝酸 5 dm^3 を加え、ホットプレート上で約 5 分間加熱溶出を行った。両方の手順にて得られた溶出液を NO.5B 濾紙で濾過して混合し試料溶液を調整した。そして ICP-MS（パーキンエルマー製 ELAN6100DRC）を用いて試料溶液中の Eu を定量した。

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。2.1 で述べ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。有意な HEPA フィルタの差圧上昇を観察するために、燃焼試験を数回繰り返して HEPA フィルタへ煤煙の負荷量を蓄積させることで、その燃焼試験までの積算煤煙負荷重量と HEPA フィルタの差圧上昇を測定することとした。

3. 試験結果及び考察

3.1 燃焼物質からのソースタームデータ及び HEPA フィルタ目詰まり評価データの評価

3.1.1 質量減少速度及び煤煙放出挙動の評価

図 3 に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（FSEEA の防煙ガラス内への供給流速、以下同じ。）の影響を示す。この質量減少速度は、FSEEA の重量測定装置にて測定された燃焼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。なお、本試験では試験体をいれた燃焼皿（ステンレス製シャーレ）の開口部を燃焼面積として定義している。2.2.1 で述べたように本試験では粒状の試験体を用いているため、厳密には燃焼面積と燃焼皿の開口部面積は一致しない。しかしながら試験体は融解し液化した状態で燃焼することを鑑み、ここでは上述のように定義することとした。

試験体は、温度の上昇によって熱分解ガスを放出し、その熱分解ガスが周囲の空気流と接触して燃焼することで周囲の空気流との境界に火炎面を形成する。この火炎面からの輻射等の伝熱によって試験体の温度上昇が引き起こされることで熱分解と熱分解ガスの放出が促進され、燃焼が継続する。従って、ここで取り上げた質量減少速度の大きさは、燃焼の激しさを示す一つの指標となるものと考えられる。図 3 を見ると、EM-E/F 及び NH-E/F 並びに輻射熱流束を供給しない PMMA と 20 kW/m² の輻射熱流束を与えた PMMA については、給気流速によらずほぼ一定値となっている。その平均値は、EM-E/F で 5.6×10^{-3} kg/m²s、NH-E/F で 2.2×10^{-3} kg/m²s、輻射熱流束を供給しない PMMA で 6.7×10^{-3} kg/m²s、20 kW/m² の輻射熱流束を与えた PMMA で 1.1×10^{-2} kg/m²s であった。一方、40 kW/m² の輻射熱流束を供給した PMMA では、質量減少速度は給気流速の増大と共に増加した。また PMMA 同士を比較すると、輻射熱流束の値が大きくなるのに従って質量減少速度も大きくなっている。これは、上述のように、試験体の燃焼表面に外部から輻射熱流束が供給されることによって試験体表面での熱分解が促進されたためと考えられる。また、輻射熱流束を与えず、かつ、雰囲気中の酸素濃度を通常酸素濃度より低い 20% に調整した条件での質量減少速度は、輻射熱流束を与えない試験結果よりもさらに小さい値となった。これは雰囲気中の酸素濃度が低下したことによって燃焼の激しさが低下したことによるものと考えられる。このことは、質量減少速度の大きさ（すなわち燃焼の激しさ）に対しては、雰囲気中の酸素濃度の効果が極めて大きく作用することを示唆するものであり、この傾向は、消火時の事故進展評価を実施する上で考慮に入れるべき重要なポイントである。PMMA と同様に、広く一般のグローブボックスのパネル材として使用される PC については、酸素濃度を低下させた PMMA 試験結果よりもさらに低い質量減少速度を示すことがわかった。PC は、熱分解開始温度が PMMA よりも高く、かつ非常に大きな吸熱を伴いながら熱分解を生じることが報告されている³⁴⁾。このことから、PC は外部からの輻射熱流束を与えた場合でも、熱分解反応及びその結果としての熱分解ガスの放出が PMMA よりも低く抑えられ、結果として質量減少速度が小さくなったものと考えられる。PC は自己消

炎性を有するため、可燃性である PMMA と比べると、燃焼性の観点からは優れた特性を有するものと認識されている。このように燃焼時の質量減少速度が PMMA よりも小さいということは、この認識を裏付ける結果である。図 4 に輻射熱流束と質量減少速度の関係を示す（図 4 には煤煙化率との関係も示しているが、これについては後述する）。PMMA と PC とともに輻射熱流束が大きくなるに従って質量減少速度が大きくなる。PMMA については、輻射熱流束が 10 kW/m²を超えるとその増大の度合いが大きくなることがわかる。一方 PC では、輻射熱流束が 20 kW/m²以下の条件では安定な燃焼が維持されず、短時間で自己消炎に至った。上述の燃焼メカニズムを考えると、PC は質量減少速度が PMMA よりも小さいために熱分解ガスの供給速度が小さく、そのため、外部からの付加的な輻射熱流束の供給がなければ、通常の酸素濃度下では燃焼が維持できないことを意味する。本試験結果からは、PC については、定常的な燃焼が継続するために必要な外部からの輻射熱流束値の閾値は 20 kW/m²から 30 kW/m²の間に存在することが示唆される。

図 5 に各燃焼物質の燃焼に伴う煤煙放出速度に対する給気流速の影響を示す。この煤煙放出速度は、FSEEA の燃焼セル内部からフィルタフォルダに設置したメンブレンフィルタに等速吸引し捕集した煤煙の重量とサンプリング時間から評価したものである。試験体の形状の影響を排除するため、質量減少速度と同様に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している。いずれの燃焼物質ともに、給気流速が増大するに従って煤煙放出速度もまた増大している。PMMA については、加えられる輻射熱流束が大きくなるに従って煤煙放出速度も大きくなり、また、雰囲気中の酸素濃度が低下した条件では通常の酸素濃度条件よりも煤煙放出速度が小さくなるという、図 3 に示した質量減少速度と同様の傾向を示している。一方で、PMMA よりも小さな質量減少速度を示した 2 種類のケーブルシース材は、煤煙放出速度では逆に PMMA よりも大きな値を示すことがわかった。特に NH-E/F は EM-E/F と比べて、質量減少速度は小さいが煤煙放出速度では逆に大きくなっていることに着目するべきである。このことは、燃焼によって減少する質量当たりで考えた場合には、この 2 種類のケーブルシース材は PMMA と比べるとより多くの煤煙を放出することを意味する。PC は、同じ 40 kW/m²の輻射熱流束を与えた場合では、PMMA と比べると煤煙放出速度は若干小さかった。ただし、図 3 に示した質量減少速度でも、同じ輻射熱流束を与えた条件下では、PC は PMMA よりも小さい値を示しているため、煤煙の発生傾向を観察するためには、煤煙放出量を質量減少量で除することで規格化し比較する必要がある。そこで本試験では、以下に定義する煤煙率を導入し、各燃焼物質間の煤煙の発生傾向の比較検討を行うこととした。

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

このように煤煙化率は、燃焼物質の燃焼重量当たりの煤煙の放出量を表しており、図 5 に示した煤煙放出速度を図 3 に示した質量減少速度で除することと同義である。

各燃焼物質の煤煙化率を給気流速に対してプロットした結果を図 6 に示す。特徴的なこ

とは、PMMA は、他の燃焼物質と比べて極めて煤煙化率が低いということである。これは、図 3 及び図 4 に示したように、PMMA は他の燃焼物質に比べて質量減少速度が大きく、逆に煤煙放出速度が小さいためである。外部からの輻射熱流束が大きくなると煤煙化率も大きくなるが、輻射熱流束が 20 kW/m^2 以上ではほぼ同値となることがわかった。また、雰囲気中の酸素濃度を低下させた場合は、煤煙化率がさらに低下することが示された。これは、図 3 に示したように酸素濃度が低下すると燃焼の激しさが低下し、それによって質量減少速度も低下するが、煤煙放出速度の低下の方がより大きく作用するためである。PC は、同じ燃焼条件における比較において、PMMA よりも 3 倍程度高い煤煙化率を示すことがわかった。さらに図 4 からわかるように、PC も PMMA と同様に、輻射熱流束の増大に伴って煤煙化率が增大することがわかる。また、2 種類のケーブルシース材も PMMA より高い煤煙化率を示すことがわかった。特に NH-E/F は、同じ質量減少量当たりで比較すると、PMMA の 7 倍程度（換気流速：約 $9.4 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 、輻射熱流束： 40 kW/m^2 ）多くの煤煙を放出することがわかった。

上述のように燃焼物質は、温度の上昇によって熱分解ガスを放出し、その熱分解ガスが周囲の空気流と接触して燃焼することで周囲の空気流との境界に火炎面を形成し煤煙が生成するものと考えられる。従って、この火炎面における熱分解ガスと空気存在量の比が煤煙の生成に対して影響を与えていることが予想される。煤煙の生成機構については定説もなく、また、生成速度や酸化速度を見積もることは極めて難しい⁹⁾。一方で、層流拡散燃焼に対する煤煙の生成速度を表す式として以下の式が報告されている⁹⁾¹⁰⁾。

$$\text{生成速度} = 2.54 \times 10^6 \cdot \text{Ri} \cdot \text{p}_f \cdot \phi^3 \cdot \exp(-2000/T) \quad (2)$$

ここで、Ri はリチャードソン数、 p_f は燃料の分圧、 ϕ は局所当量比、T は温度である。この式からは、煤煙の生成速度は局所当量比に比例して大きくなることがわかる。本節では、熱分解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熱分解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。具体的には、比較的単純な燃焼形態を示す PMMA を評価対象物質として取り上げるとともに、燃焼条件毎に ϕ の逆数として定義される空気過剰率を求め、煤煙化率をこの空気過剰率との関係で整理することとした。

図 7 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り、上述の燃焼のメカニズムに基づいた表現となっている。まず単純化のために、燃焼物質表面から放出される熱分解ガスは PMMA のモノマーであるメタクリル酸メチルであると仮定した。この熱分解ガスの化学的組成に基づき、この熱分解ガス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。

図 8 に空気過剰率と煤煙化率の関係を示す。いずれの輻射熱流束条件でも、空気過剰率が大きくなると煤煙化率は大きくなる傾向が見られた。また、輻射熱流束が大きい程、プロット点は空気過剰率がより低い領域側に遷移している。これは、図 4 に示したように、輻射熱流束が大きくなるに従って、質量減少速度と煤煙化率が大きくなるためである。一般的には、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われている⁹⁾。図 8 に示した結果からは、煤煙の発生傾向として煤煙化率を取り上げるとこれとは逆の傾向となる。そこで、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 (m³) で除することで求めた平均の濃度値である。図 9 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。特に、輻射熱流束が 20 kW/m² の試験条件における煤煙濃度の曲線と輻射熱流束を与えなかった条件での曲線がほぼ一致している。

図 10 に各燃焼物質の燃焼時に放出された煤煙の粒子径分布を示す。PMMA からの煤煙の 50%質量中央径 $d_{m50\%}$ は他の燃焼物質のそれと比べて一桁小さいことが特徴的である。この点は、3.1.2 で述べる煤煙の負荷による HEPA フィルタの目詰まり挙動に対して影響を与えるものと推察される。

実際の火災事故を想定すると、燃焼物質の燃焼に伴う煤煙の放出挙動は、燃焼物質が存在する例えば工程室全体のようなバルクの空間における平均的な流動条件ばかりではなく、燃焼物質の周囲の局所的な換気流動条件によって影響を受けるものと考えられる。その意味では、煤煙の放出挙動データを火炎面における熱分解ガスと換気流（空気）のフラックスの相対的な比（ここでは空気過剰率）との関連で整理することは、煤煙の放出量あるいは放出速度を推定・評価する上で重要な知見である。また、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。本節で述べた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。

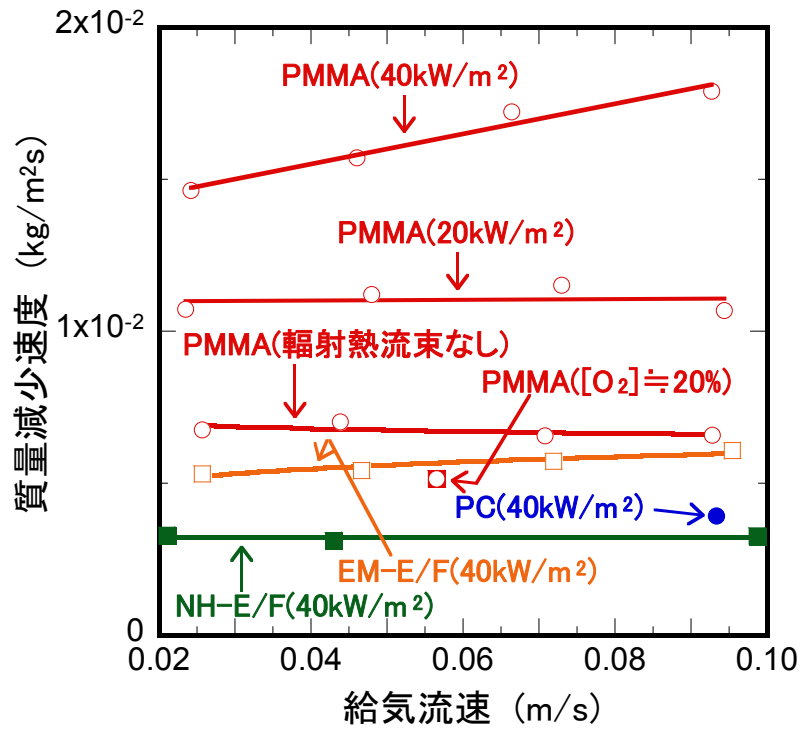


図3 燃焼物質の質量減少速度に対する給気流速の影響

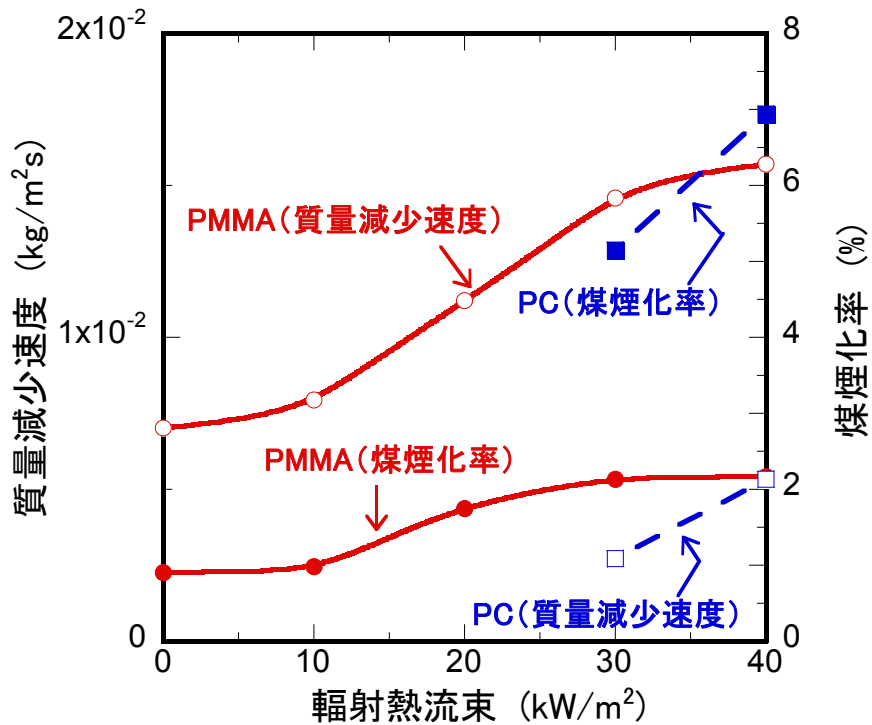


図4 燃焼物質の質量減少速度及び煤煙化率に対する輻射熱流束の影響

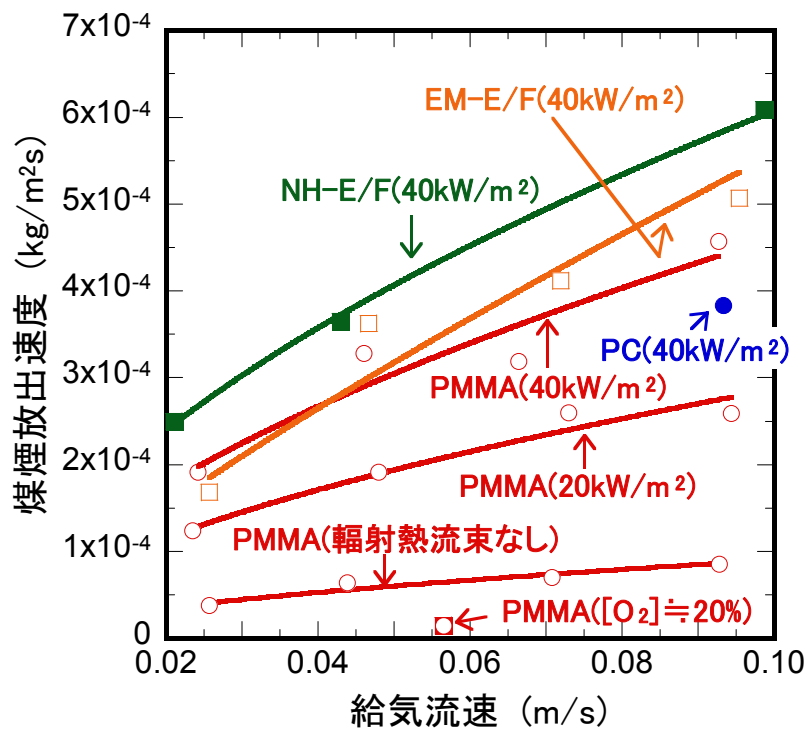


図 5 燃焼物質からの煤煙放出速度に対する給気流速の影響

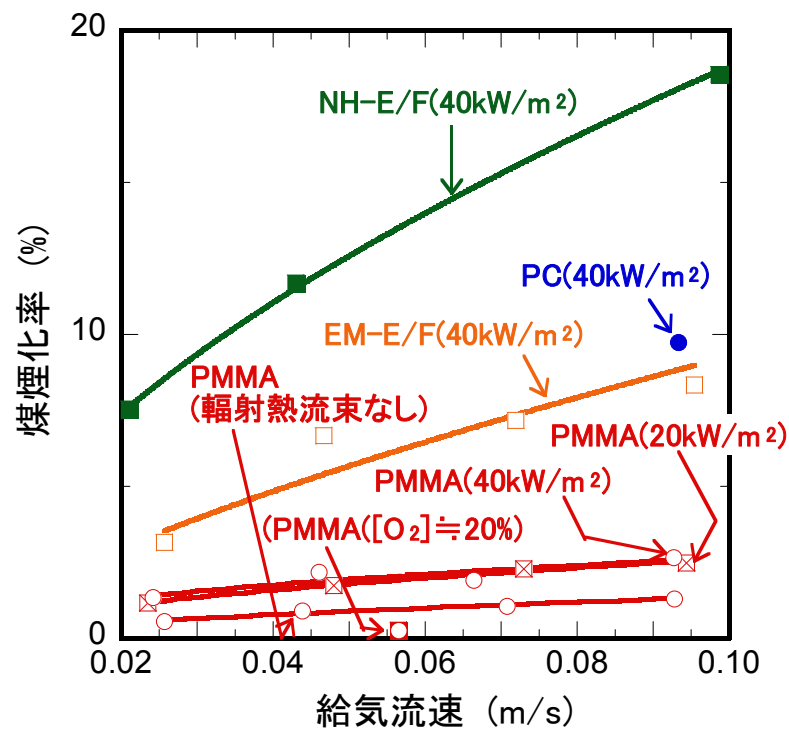


図 6 燃焼物質からの煤煙化率に対する給気流速の影響

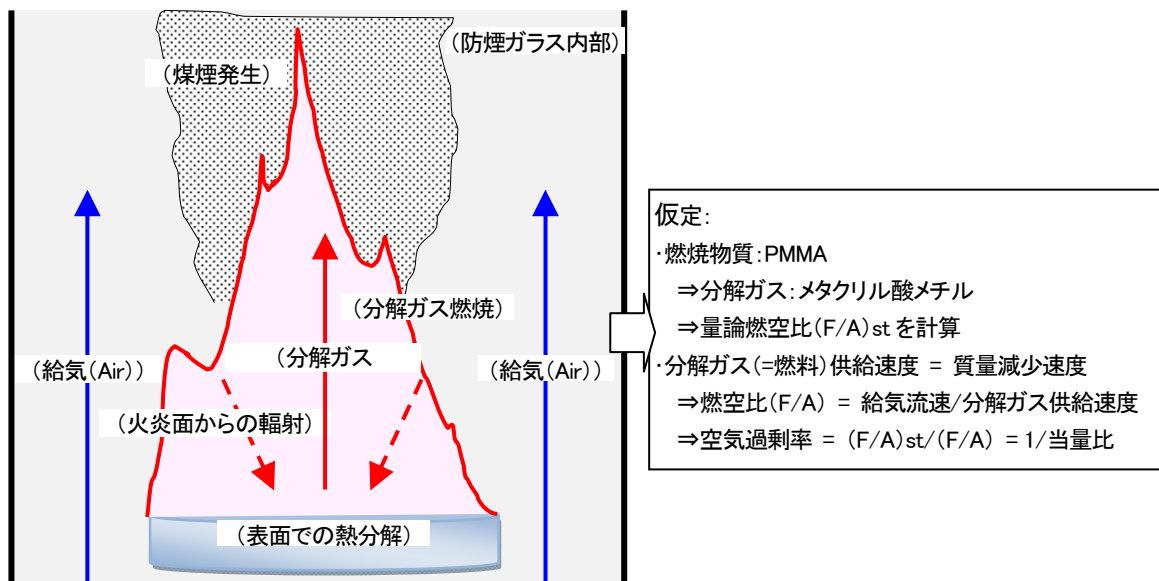


図7 評価対象とする体系の模式図

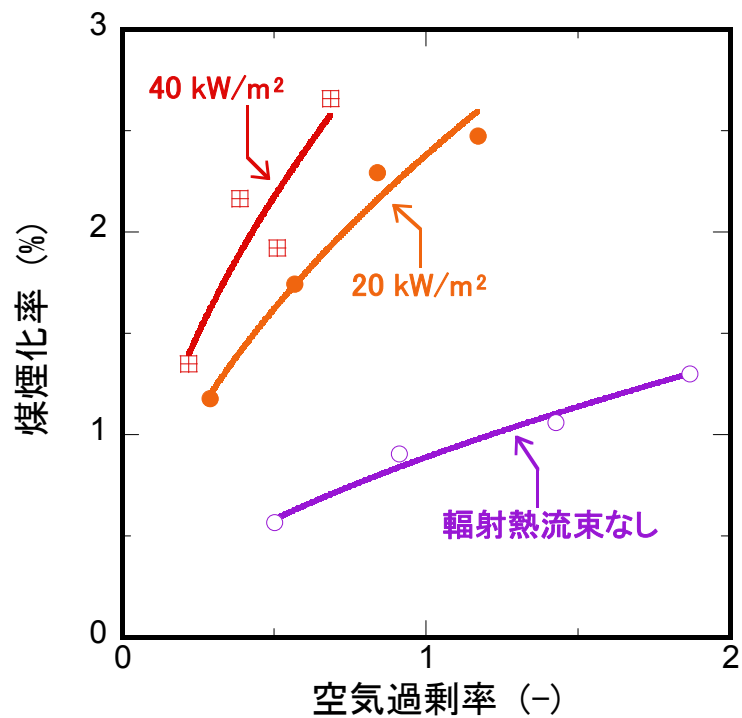


図8 空気過剰率と煤煙化率との関係 (評価対象とした燃焼物質: PMMA)

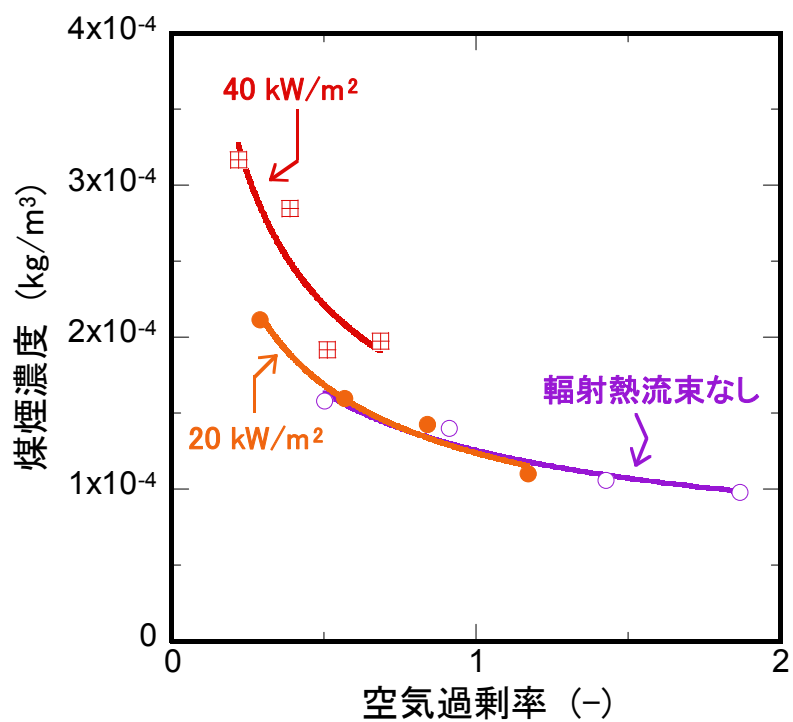


図9 空気過剰率と煤煙濃度との関係（評価対象とした燃焼物質：PMMA）

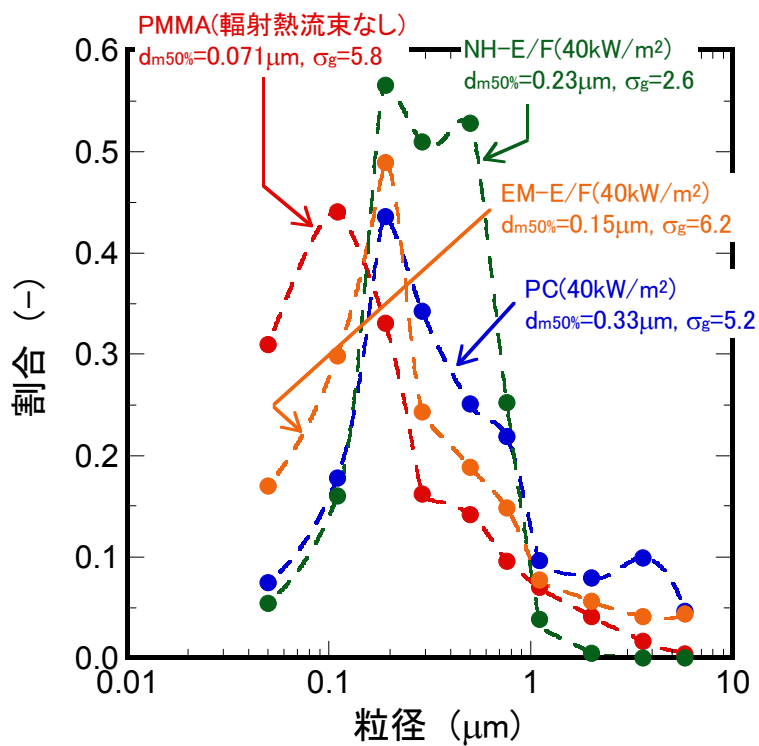


図10 煤煙粒子径分布の比較

3.1.2 煤煙の負荷による HEPA フィルタの目詰まり評価

火災事故時の閉じ込め性能は、ひとつは HEPA フィルタが担う動的閉じ込め機能によって担保されているといえる。従って火災事故時の HEPA フィルタの健全性を評価することは極めて重要である。HEPA フィルタは煤煙の負荷によって差圧が上昇し、最終的には破過に至る。このように閉じ込め機能が劣化あるいは喪失するまでの時間を定量的に評価することができれば、事故時の安全性の確認のみならず、事故対応に必要な運転管理条件の策定や閉じ込め性能の維持のために必要なアクシデント・マネジメントの具体的な検討にも資することができるものとする。本試験では煤煙の負荷による HEPA フィルタの目詰まりによる差圧上昇データを取得するとともに、HEPA フィルタに負荷された煤煙重量と差圧上昇データを関連づけて整理することとした。

図 11 に各燃焼物質の燃焼に伴う HEPA フィルタの目詰まりによる差圧上昇データを示す。図 11 では、HEPA フィルタに対する煤煙の負荷重量を、HEPA フィルタの濾過面積で除することで、単位濾過面積当たりの煤煙負荷重量に換算し、その値と HEPA フィルタ前後の差圧測定結果とをプロットしている。なお、HEPA フィルタの差圧については、煤煙の目詰まりの進行によって引き起こされる差圧 (ΔP) を HEPA フィルタの初期差圧 (ΔP_0) で除することで表した。PMMA の燃焼 (PMMA は可燃性であるためここでは輻射熱流束を与えない状態で燃焼させた。) が最も短時間で差圧上昇を引き起こしている。EM-E/F と PC (いずれも 40 kW/m^2 の輻射熱流束照射下での試験結果) はほぼ同じ傾向となった。一方、NH-E/F (同じく 40 kW/m^2 の輻射熱流束照射下での試験結果) では、煤煙の負荷が比較的少量の範囲では HEPA フィルタの差圧上昇は比較的緩やかであったが、負荷重量が 0.015 kg/m^2 を超えると急速に立ち上がるという特異な変化を示した。HEPA フィルタの目詰まりについては、これまで、HEPA フィルタの差圧上昇値と煤煙負荷重量との間に 2 次関数の関係が成り立つものと仮定して、一次及び二次の係数 (図 11 中の α_s 及び β_s) をフィッティングによって求めて報告している例がある¹¹⁾¹²⁾。また、アメリカの事故解析ハンドブックにおいても、同様の手法が提案されている¹³⁾。なお、CELVA¹⁴⁾等の熱流動・物質移行解析コードにおいても、火災事故時の HEPA フィルタの差圧上昇の解析・評価に際しては、これと同様の目詰まり係数を入力データとして設定する必要がある。このように、HEPA フィルタの差圧上昇挙動から目詰まり係数を導出し報告することは、HEPA フィルタの目詰まり評価を行う上で重要である。そこで本報でもこの目詰まり係数を導出した。結果を図 11 中に記載する。

図 10 に示したように、PMMA からの煤煙の 50%質量中央径 $d_{m50\%}$ は他の燃焼物質のそれと比べて一桁小さい。煤煙粒子径が小さいとフィルタの内部にまでより浸透しフィルタ内の空隙を減らす効果がより大きい。HEPA フィルタの差圧上昇に対して PMMA の燃焼が最も顕著な影響を与えることの理由の一つはこの煤煙粒子径が非常に小さいことによるものと考えている。その他、煤煙粒子の湿潤性も HEPA フィルタの差圧上昇挙動に対して影響を与えるものと考えられるため、この点については現在検討を進めている。

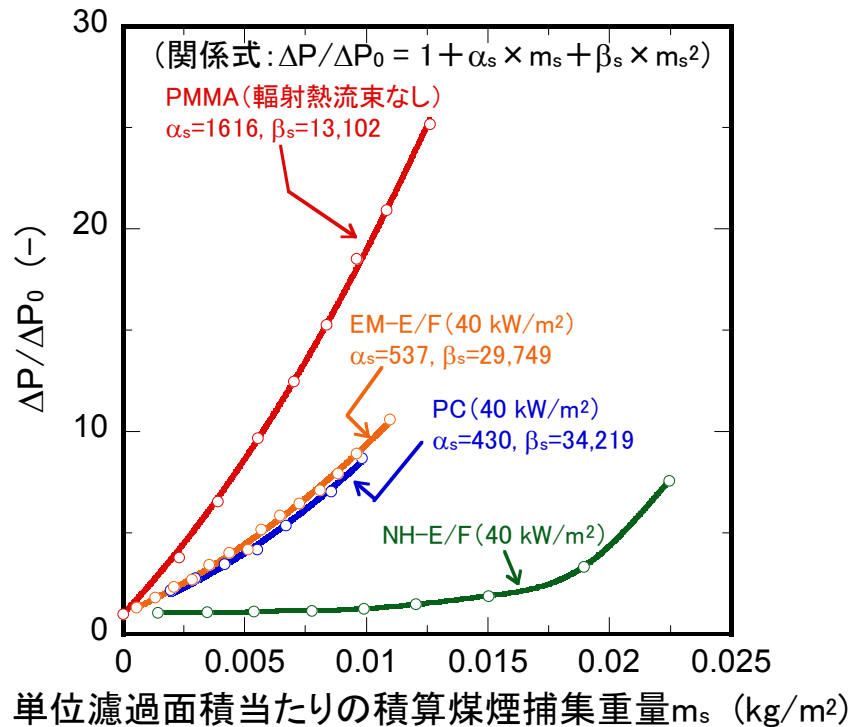


図 11 HEPA フィルタへの煤煙の負荷重量と差圧上昇の関係

3.1.3 事故時の HEPA フィルタの目詰まりによる差圧上昇の評価

図 4、図 6 及び図 8 に示した煤煙化率は、(1)式で定義したように、燃焼物質の単位質量減少量当たりの煤煙の放出量を意味している。PMMA のように施設において使用される量が相対的に多く（グローブボックスのパネル材はグローブボックス構成材中最大の割合を占める。また、施設全体でみても使用される樹脂製材料としては最も量が多いものと考えられる。）、かつ、質量減少速度が大きい場合には、仮に煤煙化率が低くても放出される煤煙の総量は多くなることも予想される。また、図 11 に示したように、PMMA の燃焼によって放出される煤煙は、同じ負荷重量で比較した場合、他の燃焼物質の燃焼によって放出される煤煙よりも、より急激な HEPA フィルタの差圧上昇を引き起こすことがわかる。このように、実際の事故時に引き起こされる HEPA フィルタの差圧上昇挙動を評価するためには、燃焼物質の存在量、質量減少速度及び煤煙化率並びに HEPA フィルタに対する目詰まり係数（図 11 中の α_s 及び β_s ）を用いて、煤煙の放出量を総合的に評価する必要がある。

本報では、以下の様な仮定を設けることで、各燃焼物質の燃焼によって引き起こされる HEPA フィルタの差圧上昇の時間的進展の評価を試みた。

- ・各燃焼物質の燃焼に伴う煤煙放出速度は、図 5 に示した値の内、給気流速が約 9.4×10^{-2} m/s（燃焼試験毎の給気流速条件は $9.3 \times 10^{-2} \sim 9.9 \times 10^{-2}$ m/s の範囲）の燃焼条件における値を使用した。なお、煤煙放出速度は質量減少速度に煤煙化率を乗じたものと等しい

ので、本評価には、各燃焼物質毎の質量減少速度の差違が反映されていることになる。

- ・ 燃焼物質から放出された煤煙が HEPA フィルタに到達するまでの移行経路での沈降・沈着によるロスとは考慮しない（この効果については熱流動・移行解析コードを使用することで、移行経路の詳細情報が決定すれば評価をすることが可能となるため、あえて本報では考慮しないこととした）。
- ・ HEPA フィルタの差圧上昇評価には、図 11 に示した各燃焼物資の目詰まり係数を用いた。ただし NH-E/F については目詰まり係数を評価することができなかったため、図 11 に示した差圧上昇曲線に対して 3 次元スプライン補間を実施することで HEPA フィルタへの煤煙の負荷重量と差圧上昇の関係を求め、評価に適用した。
- ・ 直径 50 cm の円に相当する燃焼面積で一定に燃焼するものと仮定した。燃焼物質毎に異なる質量減少速度を有しているため、燃焼面積が一定という仮定のもとでは、すなわち燃焼物質毎に燃焼面の降下速度が異なることを意味する。
- ・ HEPA フィルタの濾過面積としては、原子力施設で用いられている大風量タイプのフルサイズ HEPA フィルタの値（濾過面積：33 m²）を用いた。HEPA フィルタを透過する流速については、本試験で使用した HEPA フィルタに対する流速値を仮定した。また HEPA フィルタの初期差圧は 300 Pa と仮定した。
- ・ 本試験では、試験を実施する上での安全性を確保するため、HEPA フィルタの差圧上昇に関しては 6 kPa 程度までの範囲で試験を実施した。従って、図 11 に示した各燃焼物質に対する HEPA フィルタの目詰まり係数は、この差圧範囲でのフィッティングによって評価したものである。ここでの HEPA フィルタの差圧上昇の時間変化に係る評価では、この試験条件を超えた差圧範囲まで計算を行っており、すなわち本評価では、本試験での差圧測定範囲をこえた範囲に対しても、本試験の差圧範囲で評価された目詰まり係数を補外して適用している。

評価結果を図 12 に示す。HEPA フィルタの耐圧についてはいくつかの報告例があり、例えば、1,000 mmAq (9.8 kPa) 程度とするものや 460 mmAq (4.5 kPa) とするもの¹⁵⁾などがある。ただし、これらを実験した試験条件（流速や HEPA フィルタに負荷させる粒子条件等）が異なるため、HEPA フィルタの破過が生じる差圧を正確に定義することは困難である。また、JIS によって規定されている HEPA フィルタの圧力変形抵抗試験で定義されている差圧がある¹⁾。これは製品品質上の観点からの値であり、HEPA フィルタはこの設定値である 2.45 kPa になるまで流量を上げ、1 時間保持し、破損及び変形がないことを確認することが規定されている。したがって、この設定値もまた HEPA フィルタの健全性を評価するための一つの定量的目安ということもできる。これらを考慮して、図 12 では HEPA フィルタの差圧が 10 kPa に至るまでの時間がわかるように図示した。また、JIS によって規定されている設定値についても図中に記載した。

図 12 は、本試験で得られた煤煙放出挙動や HEPA フィルタの目詰まりによる差圧上昇挙動に係る試験結果を組み合わせるとともにいくつかの仮定を考慮して HEPA フィルタの

差圧上昇の時間的進展を評価したものであり、結果についてはあくまでも定性的なものである。それを考慮した上で評価結果を見てみると、PMMA は同じ負荷重量で比較した場合、他の燃焼物質よりもより急激な差圧上昇を引き起こすこと（図 11）、また、他の燃焼物質よりも大きな質量減少速度を示すこと（図 3）等の燃焼特性を示すのにもかかわらず、1.5 時間以降では、差圧上昇が最も低い結果となった。これは、PMMA の煤煙化率が他の燃焼物質と比べて非常に低いためである（図 6）。また、NH-E/F は、燃焼後 1.5 時間程度までは、ほとんど差圧上昇を引き起こさないが、その時間を超えると急激に差圧上昇を引き起こす結果となった。これは NH-E/F は質量減少速度は最も小さい（図 3）が逆に煤煙化率は最も高く（図 6）、両者の積として表される煤煙放出速度が結果的に大きくなったことに加え、HEPA フィルタに対する煤煙負荷重量がある閾値を超えると急激な差圧上昇を誘引する（図 11）という両方の因子の相乗効果によるものである。

本試験で得られた煤煙放出挙動及び HEPA フィルタの差圧上昇挙動に係る試験結果を組み合わせることで、HEPA フィルタの目詰まりによる差圧上昇の時間的進展の評価を試みた。このような評価を行うによって、施設の閉じ込め性能を担う HEPA フィルタ健全性が劣化あるいは喪失する時間的進展を定量的に評価することができれば、施設の事故時の安全性の確認のみならず、施設の運転管理条件（想定する火災事故規模との関連づけた運転要員の配置や事故対応の体制等の設定等）を定量化することに対して有効な情報として提供することができるものとする。

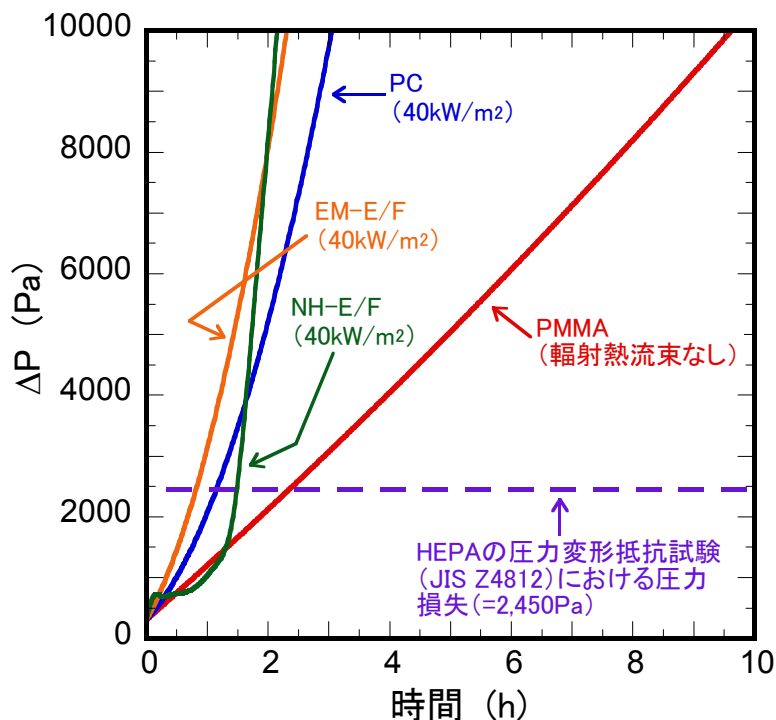


図 12 事故時の HEPA フィルタの差圧上昇の時間的進展評価結果

3.2 放射性物質放出挙動評価

3.2.1 PMMA 及び PC の燃焼に伴う Eu_2O_3 粉末の放出挙動評価

図 13 及び図 14 に、PMMA 及び PC の燃焼に伴う Eu_2O_3 粉末の放出速度及び放出率測定結果をそれぞれ示す。放出速度は、燃焼面積で除することで規格化して表した。また、放出率は、燃焼物質に添加した全量に対する全飛散量（FSEEA の燃焼セル（防煙ガラス）内から等速吸引して捕集された Eu_2O_3 粉末の全量）の比として評価した。ここでは火災時の MOX 粉末の放出挙動を評価することを念頭においたため、あえて平常時に想定される表面濃度よりも高い範囲を対象とした試験を実施することとした。

図 13 では、 Eu_2O_3 粉末の放出速度は、ハロゲンスポットヒーターによって外部から照射される輻射熱流束が大きい程大きくなる傾向が見られた。特に輻射熱流束が 40 kW/m^2 の条件下では、その傾向が顕著であった。また、各輻射熱流束条件において、燃焼物質に対する Eu_2O_3 粉末の表面濃度の増加に対して増大している。 Eu_2O_3 粉末は化学的に安定な粉末状物質であるため、燃焼物質の燃焼に伴う化学的变化を受けることはない。したがって Eu_2O_3 粉末の気相への放出挙動は、燃焼物質の燃焼に伴って Eu_2O_3 粉末に対して与えられる鉛直上方向への機械的エネルギーの大きさに一義的に影響を受けるものと考えられる。燃焼物質の燃焼の激しさを表す因子としては、質量減少速度が考えられる。図 4 に示すように、質量減少速度は輻射熱流束が増大するにつれて増大する。このことから、輻射熱流束の値が大きくなると燃焼の激しさも増大し、 Eu_2O_3 粉末の放出速度も大きくなったものと考えられる。PC については、 Eu_2O_3 粉末の放出速度は $8 \times 10^{-9} \sim 9 \times 10^{-8} \text{ kg/m}^2\text{s}$ と評価された。この値は、同じ輻射熱流束条件（ 40 kW/m^2 ）での PMMA の燃焼で得られた放出速度よりも 2 桁から 3 桁ほど小さい値である。図 4 を見ると、この輻射熱流束条件下での PC の質量減少速度は PMMA の約 1/3 であり、その分、 Eu_2O_3 粉末を巻き上げらせるのに鉛直上向き方向への機械的エネルギーが十分でなかったことが考えられる。また、PC の燃焼の様子は、PMMA のような明瞭な有炎燃焼ではなく、燃焼物質表面から直接煤煙が噴出するような燃焼を生じていた。このような燃焼の様子の違いも、PC と PMMA 間の Eu_2O_3 粉末の放出速度の大きさの差違に影響を及ぼしている可能性もある。一方、図 14 を見ると、 Eu_2O_3 粉末の放出率に関しては、測定結果に若干ばらつきは有るものの、燃焼物質に対する Eu_2O_3 粉末の表面濃度の増加に対してあまり依存しないことがわかる。図 13 と同様に Eu_2O_3 粉末の放出率は輻射熱流束が 40 kW/m^2 の条件下で急激に高くなり、4～6 %程度と評価された。また、PC では PMMA よりも低く、0.1～0.2 %程度と評価された。この傾向は、図 13 に示した放出速度の傾向と同様である。

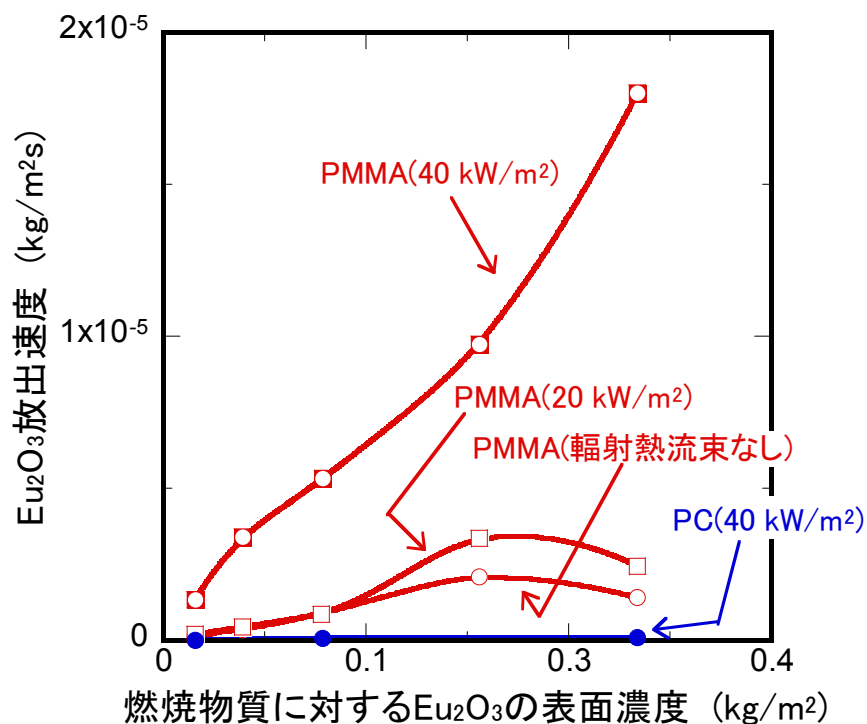


図 13 燃焼物質に対する Eu_2O_3 粉末の表面濃度と Eu_2O_3 粉末放出速度との関係
(給気流速: 4.7×10^{-2} m/s)

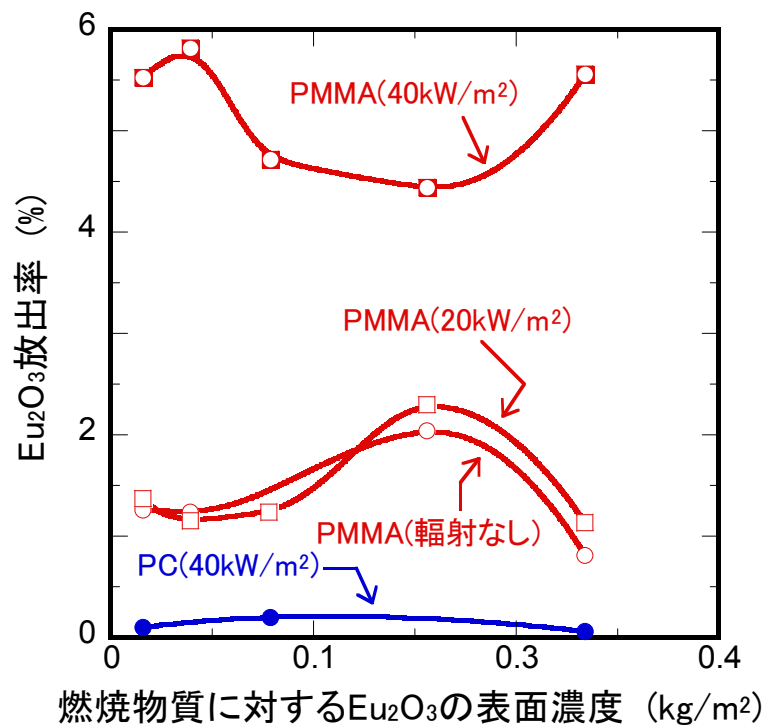


図 14 燃焼物質に対する Eu_2O_3 粉末の表面濃度と Eu_2O_3 粉末放出率との関係
(給気流速: 4.7×10^{-2} m/s)

3.2.2 MOX 粉末の放出挙動評価

本試験では MOX 粉末の模擬物質として、化学的に安定な酸化物であり燃焼物質の燃焼による化学的変化等の影響を受けない Eu_2O_3 粉末を用いることで、燃焼物質の燃焼に伴う、燃焼物質表面に付着した放射性物質の放出挙動の評価を進めてきた。 Eu_2O_3 粉末は MOX 粉末の模擬物質として使用する上で適した性質を有している一方で、MOX 粉末とは粒子径分布や密度が異なるため、 Eu_2O_3 粉末を用いることで評価した放出率等の知見をそのまま MOX 粉末に対する値として適用することには問題があることも事実である。表 1 に、本試験で使用している Eu_2O_3 粉末と過去に報告されている情報を基に推定した MOX 粉末の粒子径分布¹⁶⁾¹⁷⁾及び密度に関するデータを示す。表 1 中の密度については、 Eu_2O_3 粉末については実測値、MOX 粉末については理論密度を記している。 Eu_2O_3 粉末と MOX 粉末を比較すると、密度は約 1.6 倍 MOX 粉末の方が大きい、逆に 50%個数中央径 $d_{n50\%}$ は約 3.5 倍 Eu_2O_3 粉末が大きい。3.2.1 でも述べたが、 Eu_2O_3 粉末の気相への放出挙動は、燃焼物質の燃焼に伴って Eu_2O_3 粉末に対して与えられる鉛直上方向への機械的エネルギーの大きさに一義的に影響を受けるものと考えられ、これは MOX 粉末に対しても同様であるものと考えられる。そのように考えると、粉末粒子が燃焼物質の燃焼に伴って気相へ放出されるか否かは、この機械的エネルギーの大きさと、粉末粒子自体の粒子径あるいは重量とのバランスによって決まる、すなわち、極めて物理的な現象によって説明できるものと考えられる。そこで、以下の様な考え方を適用することで、3.2.1 で述べた Eu_2O_3 粉末に対して得られた放出率データを基にした MOX 粉末の放出率の推定・評価を実施した。

- ・ Eu_2O_3 粉末及び MOX 粉末は球形、対数正規分布に従う。
- ・ 50%個数平均径 ($d_{n50\%}$) 及び幾何標準偏差 (σ_g) を用いて両粉末の粒子径と重量頻度を計算する。
- ・ 両粉末粒子には、燃焼に伴い、同一の鉛直上向きの圧力 (N/m^2) が作用する。
- ・ 全 Eu_2O_3 粉末のうち、FSEEA で捕集された重量の Eu_2O_3 粉末を飛散させるのに必要な $X_E(\text{N/m}^2)$ を求める。
- ・ MOX 粉末の各粒子径範囲 i に属する粉末を飛散させるのに必要な $X_M(i)(\text{N/m}^2)$ を求め、その $X_M(i)$ が X_E 以下になる粒子径範囲に属する MOX 粉末の重量を積算し、MOX 粉末の飛散量・放出率を評価する。

このような考え方及び仮定に基づいて、 Eu_2O_3 粉末の放出率評価結果から MOX 粉末の放出率を換算した。上述のように MOX 粉末の性状としては、表 1 に示した $d_{n50\%}$ が概数として報告されている¹⁶⁾¹⁷⁾が、 σ_g については不明であり、正確に性状を規定することはできない。従って本節では、仮想的に Eu_2O_3 粉末と同じ粒子径分布を有し密度のみが異なる MOX 粉末を想定することとした。評価結果を図 15 に示す。 Eu_2O_3 粉末と同じ粒子径分布を有するものと仮定した MOX 粉末では、 Eu_2O_3 粉末の放出率よりも低い放出率 (0.2～0.5%) と評価された。これは、MOX 粉末の密度が Eu_2O_3 粉末よりも大きいことが反映さ

れているためである。この評価はいくつかの仮定を置いて実施したものであるため、評価結果の値についてはあくまでも試算結果として捉えるべきものであると考える。今後は、文献調査等によって実施で使用する MOX 粉末の性状を明確化することに加えて、これら計算仮定をより現実的なものにするによって評価結果の定量性を向上させることが必要である。

表 1 本試験で使用している Eu_2O_3 粉末と MOX 粉末の性状の比較

	$d_{n50\%}$ (μm)	σ_g (-)	密度 (kg/m^3)	備 考
Eu_2O_3 粉末	7.08	2.38	6.96×10^3	レーザー回折・散乱法による計測結果
MOX 粉末	2	(不明)	11.05×10^3	旧動燃による測定結果を参考に設定 ¹⁶⁾¹⁷⁾

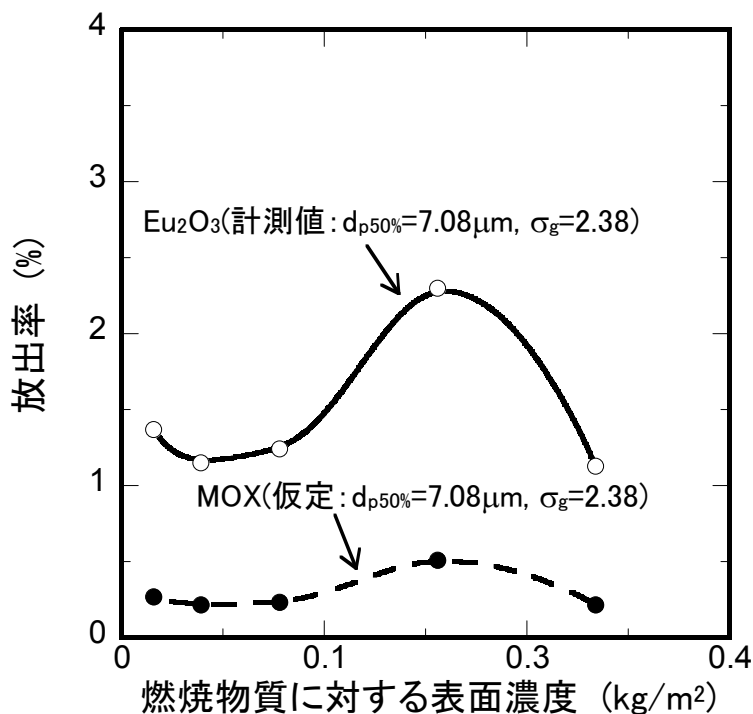


図 15 MOX 粉末の放出率の推定結果
(輻射熱流束: $20 \text{ kW}/\text{m}^2$ 、給気流速: $4.7 \times 10^{-2} \text{ m/s}$)

4. 結 言

核燃料サイクル施設において取り扱われる有機材料の内、グローブボックスパネル材 (PMMA 及び PC) とケーブルシース材 (EM-E/F 及び NH-E/F) を対象として取り上げ、これらの燃焼に伴う、質量減少速度、煤煙放出速度、煤煙化率、HEPA フィルタに対する目詰まり係数等を、給気流速、輻射熱流束の大きさ、給気流中の酸素濃度をパラメータとして定量的に取得した。また、これらの煤煙の放出挙動評価データと HEPA フィルタの目詰まり係数を組み合わせることで、火災事故時の HEPA フィルタの目詰まりによる差圧上昇の時間的進展の評価を実施し、本報にて取得した基礎的な知見を適用することで、燃焼物質や燃焼条件の相違による差圧上昇挙動への影響を定量的に評価することが可能となることを示した。施設の閉じ込め性能を担う HEPA フィルタ健全性が劣化あるいは喪失する時間的進展を定量的に評価することができれば、施設の事故時の安全性の確認のみならず、施設の運転管理条件を定量化することに対しても有効な情報として提供することができるものと考えられる。本評価をさらに定量的なものにするためには、評価において考慮した仮定をより現実に近いものとするに加え、実施設に存在する各燃焼物質の存在量を個別に設定することやこれらの燃焼に係る局所的な燃焼条件をより詳細に設定する必要がある。また、実施設に対して適用する場合には、実施設が有する換気系形状を踏まえた熱流動・物質移行解析コードを用いた詳細計算を実施し、燃焼箇所から HEPA フィルタまでに至る過程での煤煙の沈着を考慮した評価を行うこともまた必要である。さらに、実施設には HEPA フィルタの保護のために HEPA フィルタの前段にプレフィルタ等が設置される場合が多い。このプレフィルタは HEPA フィルタの目詰まりの進行を遅らせ、それによって、火災事故時の施設の閉じ込め機能の喪失に至るまでの時間を引き延ばす重要な働きを担っている。これを踏まえ、今後はプレフィルタを対象とした目詰まり評価試験についても実施し、プレフィルタが有する閉じ込め機能を定量的に評価するためのデータを取得することも重要であると考えられる。

また、これら物質の表面に付着している粉末 (MOX 粉末の模擬物質として Eu_2O_3 粉末を使用) の燃焼に伴う放出速度や放出率についても、外部から燃焼物質に与えられる輻射熱流束の大きさとの関係で定量的に取得することができた。さらに、粒子径や密度の違いに着目することで、 Eu_2O_3 粉末を用いることで得られた知見を基にした MOX 粉末の放出率の評価を実施した。火災事故時の公衆に対する被爆評価を行うためには放射性物質の施設外への放出量を定量的に評価する必要がある。本試験で取得した燃焼物質の燃焼に伴う放射性物質の放出挙動データは、この放射性物質の施設外への放出量を評価する上での一次的なソースデータとして位置づけられるものであり、その意味で貴重な技術的知見である。

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 拓治氏及び原子力機構 渡邊 浩二氏と貴重なコメントを頂いた(独)原子力安全基盤機構 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) 科学技術庁原子力安全局核燃料規制課編, “解説 核燃料施設の技術基準”, (財)原子力安全技術センター (1987).
- 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”, JAEA-Research 2006-054 (2006).
- 4) 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).
- 5) M.A.Halverson, M.Y.Baillinger and G.W.Dennis, “Combustion Aerosols Formed During Burning of radioactively Contaminated Materials - Experimental Results”, NUREG/CR-4736 (1987).
- 6) 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).
- 7) (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”, 平成16年9月(平成18年2月一部補正)。
- 8) 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).
- 9) 水谷 幸夫, “燃焼工学”, 森北出版株式会社 (2008).
- 10) A.S.Abbas, et al., “Note: Prediction of soot concentrations in turbulent diffusion flames”, J.Inst.Energy, 58-436, p.112 (1985).
- 11) M.Y.Ballinger, et al., "Aerosols Released in Accidents in Reprocessing Plants", Nucl Technol., vol.81, p.278 (1988.5).
- 12) H.Abe, J.Takada, M.Tsukamoto, K.Watanabe and M.Murata, “Generation of Smoke and Clogging of Ventilation Filter under Burning of Bitumen/Salt Mixture”, J. Nucl. Sci. Technol, Vol.36, No.7, p.619-625 (1999).
- 13) J.E.Ayer, et al., "Nuclear Fuel Cycle Facility Accident Analysis Handbook", NUREG-1320 (1988).
- 14) 西尾 軍治, 渡邊 浩二, 河野 浩二, 山崎 昇, 向出 恵勇, 吉岡 逸夫, “再処理施設の火災・爆発時におけるセル換気系の安全性解析コード (CELVA-1D) (受託研究)”, JAERI-Data/Code 98-017 (1998).

- 15) 尾崎 誠, 金川 昭, “高性能エアフィルタの苛酷条件下における性能”, 空気清浄, 第 25 卷, 第 6 号 (1988).
- 16) 青木 実, 大竹 俊英, ”MOX 燃料技術開発の動向(3) プルトニウム転換技術開発”, 原子力工業, 第 32 卷, 第 2 号(1986).
- 17) H.Oshima, “Development of Microwave Heating Method for Co-Conversion of Plutonium-Uranium Nitrate to MOX Powder”, J.Nucl.Sci.Technol., 26[1], p.161 (1989).

This is a blank page.

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량	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	立法メートル	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	毎メートル	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
磁界の強さ	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
比透磁率 ^(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	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス度 ^(e)	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照射度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		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
酸素活性化	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のみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてののみ使用される。

(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
角速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	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 s A
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
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 s A
吸収線量率	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 ⁴ 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	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	1h =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、SI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 =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。
ベレル	B	
デジベール	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	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
フオット	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=1 G 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 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3 元系の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	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

