

## 火災現場で発生する有害物質の危険性に関する検証（第 2 報）

松田 侑也\*，高松 宜史\*\*，清水 崇一\*

### 概 要

海外において、火災で発生する有害物質に曝される消防隊員は、将来的に健康を害するリスクを有していると言われており、それを低減するための対策が既に講じられている。

本検証では主として、発がん性を有する揮発性有機化合物（以下「VOC」という。）及び多環芳香族炭化水素（以下「PAH」という。）に着目し、防火衣への付着状況の把握と効果的な除染方法の確立及び海外の規制を基準とした危険性評価を行った。また、その実験結果の裏付けをとるため、実際の火災現場に近い環境を想定した模擬家屋の燃焼実験と杉を燃焼させて行う実火災体験型訓練施設での汚染状況を把握した。

その結果、VOC 及び PAH が発生し、防火衣に付着することが明らかになった。また、ポリスチレン（以下「PS」という。）など、ベンゼン（以下「BZ」という。）環を有する材料が燃焼することにより、杉などの木材の燃焼よりも PAH の排出量が多いことが確認された。将来的な健康被害のリスクを低減させるためには、火点室の早期の積極的な排煙や防火衣等の各種装備品に対し、現場での除染や、二次汚染の防止のため密封して保管し、帰署後に除染を行うことが必要である。

### 1 はじめに

火災により発生する、BZ やベンゾ(a)ピレン（以下「BaP」という。）等の有害物質は、直接吸入、経皮暴露もしくは装備品に付着・残留した有害物質を後から暴露することで、将来的に健康を害するリスクがあるとされている。そのリスク低減方策としては、有害物質に曝された身体及び装備品の除染が挙げられ、米国の消防局では既に対応がとられている<sup>1)</sup>。

実際に海外の消防本部の一部では、活動終了後の消防隊員の個人装備品を、現場で離脱し密封して持ち帰り、クリーニングや防火衣用洗濯機を活用する除染方法を行っている<sup>1)</sup>。

一方、当庁では過去に「火災現場における燃焼生成ガスの採取・分析について」（平成元年）、「残火処理活動現場等に存在する粉塵等の検証と防護方策」（平成 21 年）等の検証にて、火災現場で発生する有害物質の中毒性を中心に検証し、必要な対策を提言した実績があるものの、発がん性の観点で検証したものはない。また、消防隊員や個人装備品に対しても、明確な除染の方針が示されていないのが現状である。

このような背景から、令和 2 年度より、火災現場で発生する有害物質の危険性に関する検証を行ってきた。

令和 2 年度は、一般的な建築材料や家庭用品の材料から発がん性を有する VOC である BZ 発生時の火災環境と

BZ 濃度の関係及び除染の必要性について検証を行い、火災により VOC が発生し、火点室や可燃物が高温になるほど BZ が多く発生することを明らかにしている。また、排煙活動等により、VOC の濃度が大きく減少し、消防隊員が有害物質に曝されるリスクが低減すること及び防火衣を効果的に除染しなければ、内部に BZ が残存することを明らかにしている<sup>2)</sup>。

### 2 検証目的

火災現場で発生する発がん性を有する物質等に着目し、基礎的な実験を通じて、火災環境と有害物質の発生状況を明らかにし、個人装備品への付着状況及び除染方法を確立すること、更には、実際の火災現場を模した模擬家屋や実火災体験型訓練施設で有害物質を採取し、分析することで、実験結果の裏付けをとるとともに、その危険性の評価を試みることを目的とし、火災現場における消防隊員の安全対策の向上を図った。

### 3 本検証にて着目した発がん性物質について

火災で発生する有害物質には様々なものがあるが、中でも、BZ や BaP は、国際がん研究機関（IARC）の基準において「グループ 1（人に対する発がん性があると考えられる）」に分類されている<sup>3)</sup>。日本では、環境省が定める「有害大気汚染物質に該当する可能性がある物質」（248

\*安全技術課 \*\*調布消防署

物質)のうち、「優先取組物質」(23物質)に該当するほか、日本産業衛生学会が定める発がん性分類の「第1群(ヒトに対して発がん性があると判断できる)」に分類され、がんとの因果関係が十分に立証された化学物質である<sup>4)</sup>。

以上の理由により、VOC及びPAHの分析が可能な方法及び機器を用いて、本検証を実施することとした。

#### 4 検証項目等

前述した目的を達成するために、以下の3つの項目にわけ、検証を行った。それらの目的、方法等とあわせて以下に示す。

##### (1) 有害物質発生状況及び防火衣生地片の汚染状況 (実大基礎実験)

火災により発生するVOCやPAHの基礎的な知見や傾向を得るための基礎実験を実施した。



##### ア 燃焼実験

##### イ) 燃焼方法

PSを家庭用焼却炉(以下「焼却炉」という。)内で燃焼させ、気体及び煤等の固体の捕集と、防火衣生地片(以下「生地片」という。)を焼却炉内に入れ、汚染状況を把握した。

令和2年度の検証により、他の代表的な材料に比べ、熱分解により発生するBZ濃度が高いことが判明しているPSを試料として用いた。試料の概要を表1に示す。ステンレス缶に入れたPSを、ガスバーナーを使用し燃焼させ、熱電対を設置した焼却炉内に入れた。

表1 検証で使用した試料の概要

外観写真	主成分	化学式	構造式	高分子分類
	ポリスチレン	(C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> ) <sub>n</sub>		合成高分子
使用される日用品等の例				
食品用トレイ、カップ、麺容器、CDケース、発泡スチロール等				

##### (イ) サンプル作成

本検証では、火災現場での汚染状況を把握するために、当庁で使用している防火衣を裁断し再度1辺10cmで縫製することにより、生地片を作製し使用した。作製した生地片及び防火衣の構造について、表2及び表3に示す。

表2 防火衣生地片の外観


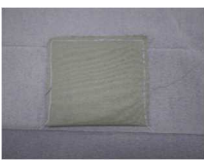
裁断後	縫製後
	

表3 防火衣性能概要

生地層	材質
1層目：表地(最外層)	メタ系アラミド、パラ系アラミド
2層目：透湿防水層(中間層)	アラミド生地、透湿防水層
3層目：断熱層(最内層)	アラミドを主体とした難燃生地

##### (ウ) 気体成分分析(捕集管)

VOC採取には、固体捕集方法を用いた。空気を捕集管(固体捕集層)に通じ、ガス状物質を固体粒子に捕集する方法であり、労働安全衛生法に定める作業環境測定の実験方法にも用いられている<sup>5)</sup>。

捕集管を簡易吸引ポンプに接続し、捕集管に気体を採取した。捕集した気体は加熱脱着装置付ガスクロマトグラフ質量分析装置(以下「TD-GC-MS」という。)で詳細な成分分析を行った。使用したガス採取機器及び条件を表4に、使用した分析機器及び条件を表5に示す。

表4 使用したガス採取機器及び条件

捕集管	Tenax TA ガスチューブ(ゲステル社)
簡易吸引ポンプ	ミニポンプ MP-Σ30NII(柴田科学(株))
吸引量(流量)	1L(0.1L/分)

表5 使用した分析機器及び条件(TD-GC-MS)

装置構成	
ガスクロマトグラフ	7890B GC System(アジレント・テクノロジー社)
質量分析装置	5977A MSD(アジレント・テクノロジー社)
加熱脱着装置	TDU2/CIS4(ゲステル社)
GC-MS条件	
カラム	HP-5MS 長さ30m、内径0.25mm、膜厚0.25μm
オープン温度範囲	40℃(1分)~300℃(5分)
昇温速度	5℃/分(40℃~100℃) 10℃/分(100℃~300℃)
スプリット比	20:1
検出器温度(イオン源)	230℃
検出温度(四重極)	150℃
測定方法	SCAN(全イオン検出)
キャリアーガス	He
加熱脱着部(TDU2)条件	
サンプルモード	Retain Tube - Standby Cooling
脱着モード	スプリット
温度範囲	40℃~280℃(3分)
昇温速度	720℃/分
トランスファー温度	320℃
クワイオフォーカス部(CIS4)条件	
加熱モード	Standard
温度範囲	-50℃~300℃
昇温速度	12℃/秒

(エ) 生地片及び固体成分分析

燃焼させた PS を入れた焼却炉に、前(イ)により作成した生地片を 15 分間入れ、取り出した生地片をジエチルエーテルにより溶媒抽出後、ガスクロマトグラフ質量分析計（以下「GC-MS」という。）により分析を行った。発生した煤についても同様に溶媒抽出後、GC-MS により分析を行った。使用した分析機器及び分析条件を表 6 に示す。

表 6 使用した分析機器及び分析条件（GC-MS）

装置構成	
ガスクロマトグラフ	7890B GC System (アジレント・テクノロジー社)
質量分析装置	5977B MSD (アジレント・テクノロジー社)
GC-MS 条件	
カラム	HP-1 長さ 30m、内径 0.25 mm、膜厚 0.25 μm
オープン温度範囲	40°C (1分) ~ 300°C (5分)
昇温速度	5°C/分
スプリット比	スプリット及び 20 : 1
検出器温度 (イオン源)	230°C
検出温度 (四重極)	150°C
測定方法	SCAN (全イオン検出) 及び SIM
キャリアガス	He

イ 生地片除染実験

前アにより汚染させた生地片の除染を行い、除染前後の有害物質の残存量を測定した。また、除染方法及び乾燥方法を変更することにより、最適な除染方法の検討を行った。分析機器及び分析条件については前アと同条件で行っている。有害物質残存量の評価は BaP、アントラセン及びフルオランテンのピーク面積の和による相対的な評価と、BaP を標準試料とした定量分析を行った。

(ア) 洗剤の種類

洗剤の種類を水、家庭用洗剤及び防火衣洗濯機材用洗剤を使用して実験を行った。除染温度はすべて 25°C とし、除染時間は、洗い 5 分、すすぎ 5 分、脱水 5 分で行った。なお、手動洗濯機を洗濯器具として使用した。溶媒抽出は、防火衣の三層同時に抽出し、スプリット比は 20 : 1 で分析を行った。

(イ) 除染温度

除染温度による効果の違いを確認するため、除染温度を 25°C と 65°C とし、水による除染と家庭用洗剤による除染をそれぞれ行った。抽出方法及び分析方法は前(ア)と同様とした。

(ウ) 除染器具

除染に使用する器具を、手動洗濯機、超音波洗浄機及び全自動洗濯機とし、それぞれ除染を行った。除染温度は 25°C とし、手動洗濯機及び超音波洗浄機の洗濯条件は、洗い 5 分を 4 回、すすぎ 5 分、脱水 2 分とし

た。また、全自動洗濯機の洗濯条件は、洗い 15 分、すすぎを 2 回、脱水 10 分の条件で行った。抽出方法は防火衣の各層毎の抽出とし、スプリット比はスプリットレスで分析を行った。

(エ) 乾燥方法

全自動洗濯機の除染後に、衣類乾燥機、天日干し及び日影干しによりそれぞれ乾燥を行った。天日干し及び日影干しは、それぞれ 5 時間実施している。抽出方法及び分析方法は前(ウ)と同様とした。

(2) 模擬家屋燃焼実験

一般家屋の一室が燃焼した場合に、有害物質はどのように発生し、防火衣等の個人装備品に残存するのかを確認するための検証を行った。

大規模火災実験棟屋内にて、多くの日用品等を収容した模擬家屋（8 畳程度）を燃焼させ、燃焼中の燃焼生成ガス等の採取と燃焼中の模擬家屋の室内に、生地片等の個人装備品を入れ暴露させた。暴露時間は防火衣生地片の取り出しを考慮し約 5 分間行った。模擬家屋の外観及び屋内収容物の状況を表 7 に示す。また、気体の捕集状況及び個人装備品暴露状況を表 8 に示す。

表 7 模擬家屋の外観や屋内収容物の状況

模擬家屋の外観	屋内収容物
	
収容物詳細	
座布団、段ボール、新聞雑誌、衣類、電気ストーブ、アイロン、照明器具、加湿器、扇風機、アロマキャンドル、灰皿、たばこ、布製品、電気ケトル、ティッシュ、TV モニター、リモコン、机、布団、木製筆筒、カーテン、フライパン、サラダ油、椅子、合板、皮革、プラ容器、トイレトペーパー	

表 8 燃焼生成物捕集状況

気体捕集状況	個人装備品暴露状況
	

(3) 実火災体験型訓練施設

杉を燃焼させ、実際の火災に近い環境下で訓練を行う実火災体験型訓練施設において、活動する消防隊員への有害物質の付着状況について知見を得ることを目的とし、訓練で使用した防火衣から揮散する成分の分析と防火衣

等の個人装備品及び隊員の皮膚に付着した物質の成分分析を行った。訓練は3日間にわたり実施され、各日において、検証条件を変更し実施した。訓練施設外観及び燃焼に使用した杉を表9に示す。

表9 訓練施設等



ア 訓練中に発生する気体の捕集

訓練中に発生する気体をテドラーバックに捕集し、消防技術安全所に持ち帰った。その後、気体捕集管に捕集し、TD-GC-MSにより分析した。

イ 訓練で使用した防火衣から揮散した成分の分析

訓練で使用した防火衣をプラスチック製ドラム缶（材質：高分子PE、容量220L）に一定時間入れ、ドラム缶内の気体を捕集することにより、防火衣から揮散した気体を確認した。気体の捕集は30分後、6時間後、24時間後に分けてそれぞれ捕集し、捕集した気体はTD-GC-MSにより分析した。

また、ドラム管内の気体に対して北川式ガス検知管（BZ）による呈色反応をそれぞれ確認した。気体捕集状況及び防火衣を入れたドラム缶内の気体捕集状況を表10に示す。

表10 捕集状況



ウ 訓練後の隊員の皮膚と個人装備品からの採取

訓練後の隊員の皮膚（前額部、頸部及び手首）及び個人装備品をウェットティッシュで拭き取り、溶媒抽出後ガスクロマトグラフ質量分析計により分析した。使用したウェットティッシュは、海外でノンアルコールタイプ用いられていることから、除菌性が高いアルコールタイプとノンアルコールタイプによる比較を行った。

エ 汚染させた生地片による有害物質の抽出

生地片を実火災体験型訓練施設に設置し、訓練終了後、汚染させた生地片を回収し、当該生地片を持ち帰り、溶

媒抽出後ガスクロマトグラフ質量分析計により分析した。生地片の設置位置は、活動する隊員を想定する位置と中性帯の高さを考慮し設置した。また、燃焼物からの距離は、訓練において隊員が最も近づくことが想定される2m、開口部付近の9mとし、各日における生地片の設置位置を表11に示す。

表11 生地片設置位置

試料番号	設置位置	1日目	2日目	3日目
①	床面からの高さ (cm)	65	130	130
	燃焼物からの距離 (m)	2	9	2
②	床面からの高さ (cm)	/	65	/
	燃焼物からの距離 (m)		9	

5 結果及び考察

(1) 有害物質発生状況及び生地片の汚染状況  
(実大基礎実験)

ア 燃焼実験

燃焼中の焼却炉内部の温度を図1に示す。PSを燃焼させることにより、試料温度は600℃にまで上昇した。焼却炉内部の温度は、高さによる大きな違いはなく、200℃付近まで上昇している。

燃焼中のPSから発生した成分の分析結果を表12に示す。発生した気体からVOCが検出され、生地片に付着する物質から、VOC及びPAHが検出された。生地片の1層目、2層目及び煤単体の溶媒抽出からPAHが検出された。また、生地片の1層目に付着した煤は目視できる大きさであるが、2層目は目視ができないものであった。生地片からVOCは検出されなかったが、汚染直後の防火衣を入れた密閉空間において、気体捕集管で捕集後、分析を行ったところ、VOCが検出された。

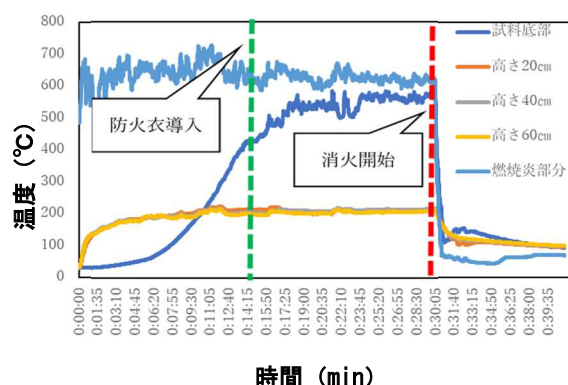


図1 焼却炉内温度変化状況

表 12 PS 燃焼生成物分析結果

	VOC	PAH
気体	○	×
防火衣生地片（1層目）	×	○
防火衣生地片（2層目）	×	○
防火衣生地片（3層目）	×	×
煤	×	○

（○：検出あり、×：検出なし又は検出下限界以下）

PSの燃焼により発生する有害物質は、様々な形態で存在し、防火衣に付着するが、防火衣の2層目である透湿防水層で留まり、内部への侵入を防いでいると考えられる。気体中のPAHは捕集時に凝集し固体になりやすく、防火衣に残存するVOCは、防火衣内部に留まるが、分析までの間に揮散することにより検出されなかったと考えられる。また、燃焼により生成される煤は、PAHにより構成されており<sup>6)</sup>、目視できる煤が付着している場合は有害物質が付着しているということを意味している。

イ 除染実験

ア) 洗剤の種類

洗剤の種類を変更し、生地片の除染を行った結果を図2に示す。分析結果から、水による除染よりも、洗剤による除染を行うことにより除染効果を得られることが分かった。しかし、家庭用洗剤と防火衣洗濯用洗剤による違いは確認されなかった。

洗剤の使用では、VOC及びPAHが水に溶けにくい脂溶性物質であるため、洗剤による効果を受けたと考えられる<sup>7)</sup>。

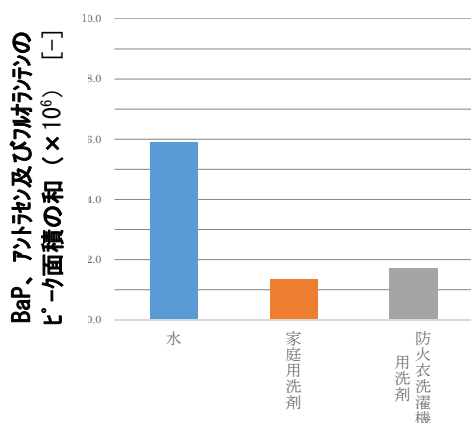


図 2 洗剤の種類の違いによる分析結果

イ) 除染温度

除染温度を変更し、生地片の除染を行った結果を図3に示す。分析結果から、水による除染及び洗剤による除染ともに、除染温度を上昇させることにより除染効果が高くなることが分かった。

一般的に、除染温度を高くすることにより溶解度が高

くなり、除染効果が高くなるとされている。

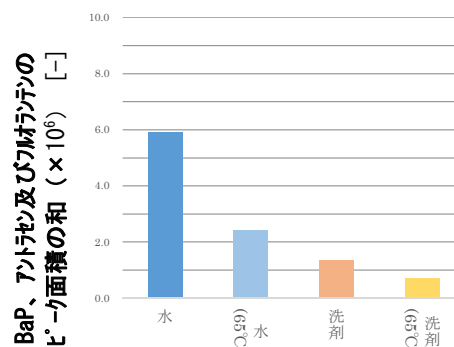


図 3 除染温度の違いによる分析結果

ウ) 除染器具

除染器具を変更し、生地片の除染を行った結果を図4に示す。分析結果から、使用器具による大きな違いは確認されなかったが、全自動洗濯機の除染効果がやや低かった。

手動洗濯機及び超音波洗浄機は全自動洗濯機に比べ、小型であり、生地片と洗濯槽との接触回数が多くなったことと、すすぎ回数が全自動洗濯機の2回（上限値）に対し、手動洗濯機等は洗浄液の汚れを考慮して4回と多く実施したことが影響したと考えられる。

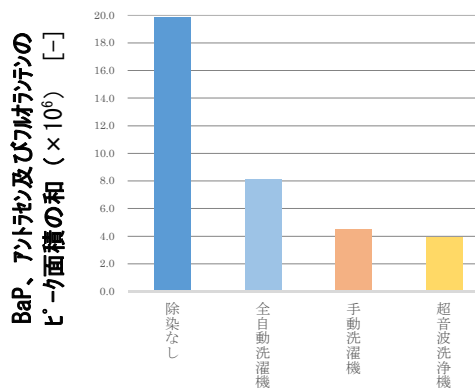


図 4 除染器具の違いによる分析結果

エ) 乾燥方法

洗浄後の生地片の乾燥方法を変更し、除染効果を確認した結果を図5に示す。乾燥方法の中では、衣類乾燥機を使用した場合に除染効果が一番高く得られた。一方、天日干しと日影干しによる除染効果の違いは確認されなかった。

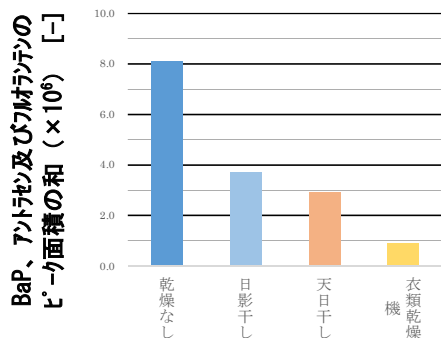


図5 乾燥方法の違いによる分析結果

衣類乾燥機内は、ヒーターにより温度が上昇しており、洗濯物が回転しているため、温度上昇による効果や、生地片と乾燥ドラムの接触による衝撃の物理的な除染効果が考えられる。

(イ) 定量分析

除染前後の生地片の定量分析結果を表13に示す。除染前後において約5分の1までBaPの残存量を低下させることができた。

表13 定量分析結果（実大基礎実験）

	防火衣生地片のBaP 残存量 (ng/ml)		1 kg あたりの残存量 (mg/kg)
	1層目	2層目	
除染前	920.0	3020.0	31.8
除染後	150.0	550.0	6.17

(2) 模擬家屋燃焼実験

模擬家屋内の温度変化を図6に示す。実大基礎実験に比べ、短時間で温度上昇が起り、全焼を防ぐため、約10分で消火を行っている。

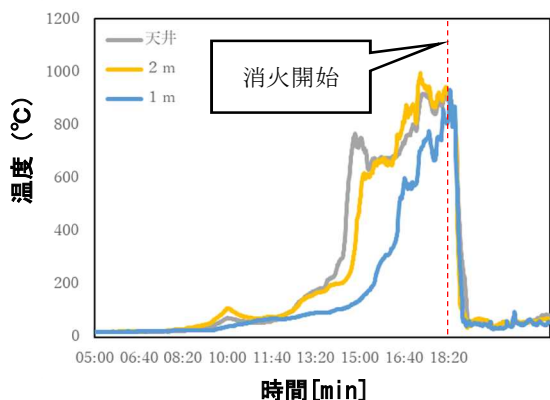


図6 模擬家屋燃焼棟温度変化

ア 実験中に発生した気体の捕集

捕集した気体から検出されたBZのピーク面積を図7に示す。出火開始から時間経過につれて、BZの排出量が増加していることが確認された。

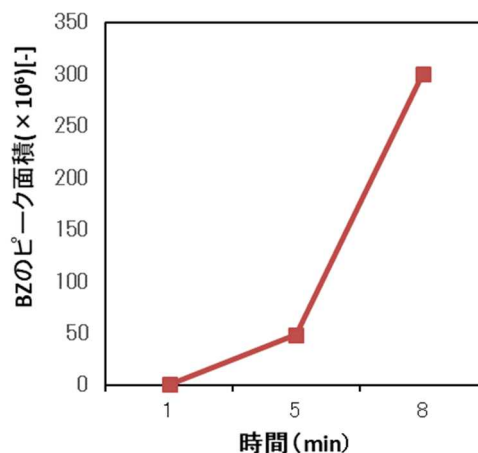


図7 出火開始からのBZ排出量

出火開始からの時間経過とともに、燃焼物が増加するとともに、居室内部の酸素濃度の低下から熱分解が促進されBZ排出量が増えたと考えられる。

イ 個人装備品の拭き取り

汚染させた個人装備品の拭き取りを実施し、溶媒抽出後GC-MSにより分析した結果、VOC及びPAHは検出されなかった。

拭き取りに使用したウエットティッシュを確認すると、汚れの付着が見られなかったことから、分析装置で検出できる十分な量が付着されなかったと考えられる。また、居室内は8畳で火炎との距離が近くなっているため、高温下にあるVOC及びPAHは気体のまま存在し、凝集しにくく、個人装備品等に、検出するのに十分な量が付着されなかったと考えられる。

ウ 汚染させた生地片

模擬家屋内に入れた生地片からは、微量であるがPAHが検出された。

除染前後の定量分析結果を表14に示す。分析結果から、一部の生地片からBaPが検出された。しかし、基礎実大実験と比べると約10分の1以下であり、目視で確認できる煤等の付着は確認できなかった。また、定量分析限界値が100ng/mlであり、除染を行うことにより、REACH規則の基準値以下までBaPを減少させることができた。

表 14 定量分析結果（模擬家屋燃焼実験）

	防火衣生地片の BaP 残存量		1 kg あたり の残存量
	1 層目 (ng/ml)	2 層目 (ng/ml)	全体 (mg/kg)
除染前	検出なし	256.3	1.71
除染後	検出なし	定量分析 限界値以下	定量分析 限界値以下

気体の分析結果から、時間経過につれて BZ の排出量が増加しているため、PAH も同様に、時間経過により増加していることが考えられる。様々な材料が燃焼する模擬家屋において、防火衣に付着した PAH が少量であるのは、火炎との距離が近く VOC 及び PAH が凝集しなかったためと考えられる。

(3) 実火災体験型訓練の機会を利用した検証

ア 訓練中に発生した気体

気体の分析結果を表 15 及び図 8 に示す。時間経過により VOC の検出量が増加していることが確認された。また、訓練開始から約 10 分後に開口部を開放しており、開口部を開放することにより VOC の捕集量が減少しているのが確認された。

表 15 訓練時間経過毎の気体分析結果

時間経過	VOC	PAH
5 分	BZ, スチレン等	ナフタレン
10 分	BZ, スチレン等	ナフタレン
12 分	開口部開放	
15 分	BZ, スチレン等	無し
22 分	BZ, スチレン等	無し

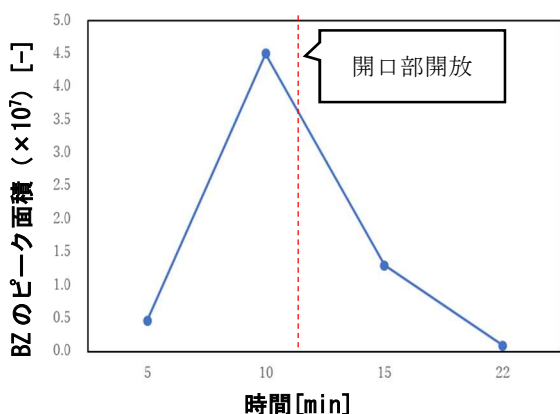


図 8 訓練中に発生した BZ のピーク面積

開口部を開放することにより、施設内部の酸素供給量が増加することと、燃焼生成物が排出されたため、BZ 排出量が減少したと考えられる。

イ 防火衣から揮発する気体の採取

防火衣を入れたドラム缶内の気体分析結果を表 16 に、訓練後の時間経過によるドラム缶内の BZ のピーク面積を図 9 に示す。分析結果より、防火衣から BZ が揮発していることがわかる。しかし、北川式ガス検知管による呈色は見られなかった。開口部を閉鎖し訓練を行うことにより、防火衣に残存する BZ の濃度の増加が確認された。

表 16 防火衣を入れたドラム缶内の気体分析結果

訓練終了 後からの 経過時間	A 班（開口部閉鎖）		B 班（開口部開放）	
	発生した 物質	検知管の 呈色	発生した 物質	検知管の 呈色
0.5 時間	BZ	無し	BZ	無し
6 時間	BZ	無し	BZ	無し
24 時間	BZ	無し	無し	無し

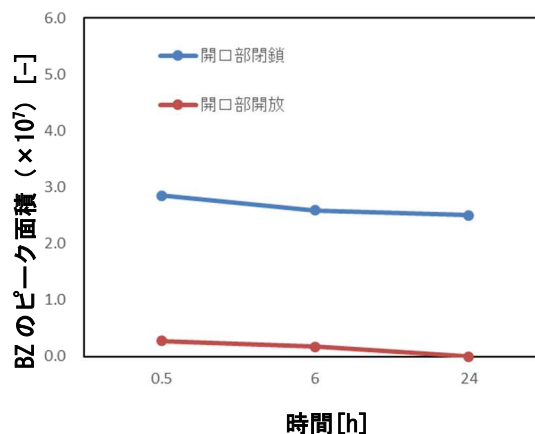


図 9 訓練後の時間経過によるドラム缶内の BZ のピーク面積

訓練で使用した防火衣は、訓練中に BZ 等の有害物質に曝され続け、防火衣内部に残存していることが確認された。訓練終了後は揮散を続け、通気性の良い環境でなければ有害物質が残存し二次汚染を引き起こすおそれがあることを示唆している。

ウ 訓練後の隊員の皮膚、個人装備品からの採取

訓練後の隊員の皮膚及び個人装備品からは VOC 及び PAH は検出されなかった。

隊員は、中性帯よりも低い姿勢で訓練を行うため、煤等が付着しにくかったと考えられる。

エ 汚染させた生地片

生地片の分析結果を表 17 に示す。燃焼物からの距離が遠い 2 日目の生地片から、PAH が検出された。また、床面から 130 cm の高さに設置した生地片からは 1 層目及び 2 層目から PAH 検出され、65 cm に設置した生地片からは 1 層目のみから PAH が検出された。PAH が検出された生地片の除染前後の BaP の定量分析結果を表 18 に示す。杉の燃焼により発生する生成物からも BaP が検出された。

しかし、除染後の生地片は、REACH 規則の基準値を下回る結果となった。

表 17 生地片の分析結果

試料番号	1層目	2層目	3層目
1日目	①	×	×
2日目	①	アントラセン、 ピレン	アントラセン、 ピレン、 (BaP)
	②	アントラセン、 ピレン	×
3日目	①	×	×

表 18 定量分析結果（実火災体験型訓練）

	残存量 (BaP)		1 kgあたりの残存量
	1層目 (ng/ml)	2層目 (ng/ml)	全体 (mg/kg)
除染前	×	146.8	1.24
除染後	×	109.1	0.91

自然材料の中でも有害物質の排出が少ないとされる杉の燃焼においても、生地片から PAH が検出されたため、実際の火災現場において、有害物質に汚染するおそれがある。

防火衣の汚染について、燃焼物から一定の距離があり、温度が下がることにより、VOC や PAH が凝集し防火衣に付着することが分かった。また、少量ではあるが中性帯よりも低い位置に設置した防火衣から VOC が検出された。これは、燃焼により発生した煙などに触れることが無くても、有害物質が付着している可能性があることを示唆している。

## 6 まとめ

- (1) 密閉空間において、燃焼により発生した煙以外の部分にも有害物質が存在しており、PAH は燃焼物付近の高温な場所より、温度が低下した場所の方が、防火衣生地片に残存しやすいことが分かった。
- (2) 火災により発生する有害物質は固体、液体及び気体と様々な形態で存在し、防火衣や人体に付着し、現場や帰署途上の車内等で二次汚染するおそれがあるため、人体及び個人装備品への効果的な除染が必要であると考えられる。
- (3) 基礎実験で、65℃のお湯で洗剤を使用して除染した場合に最も高い除染効果を得られることが分かった。
- (4) 洗浄後の防火衣は、乾燥させることでさらに有害物質が除去できることが分かった。
- (5) 模擬家屋燃焼実験や実火災体験型訓練のような、実際の火災を模した環境でも VOC や PAH 等の有害物質が検

出された。一方、洗浄等の除染を行うことにより、有害物質の残存量が REACH 規則の基準値以下に減少した。効果的な除染を行えば、二次汚染を防ぐことができると考えられる。

## 7 今後の課題

- (1) 実物大の防火衣における除染効果の評価  
ア 本検証で使用した防火衣は 10 cm 四方の生地片を使用している。除染方法の物理的な除染効果や、洗浄液量及びすすぎ回数と除染効果の相関を評価するために、実物大の防火衣と防火衣用洗濯機を使用し、除染効果の評価を行う。  
イ 乾燥方法による物理的な除染効果や、乾燥時の温度による除染効果の評価を行うため防火衣用乾燥機を使用し評価を行う。
- (2) 火災現場での人体及び個人装備品の除染方法の検討  
ア 火災現場において有害物質が人体や個人装備品に付着するおそれがあることが明らかになった。火災現場に出場する隊員の防火衣の汚染状況の把握を行う。  
イ 火災現場において使用した個人装備品や消防器具から二次汚染の影響を評価するため拭き取り除染を行うことにより、除染前後の有害物質の残存量を評価する。
- (3) 個人装備品の持ち帰り方法の検討  
火災により汚染した防火衣等の個人装備品は帰署途上の車内や車庫において二次汚染を引き起こすおそれがあるため、安全に持ち帰るために最適な方法を検討する。

## 8 おわりに

本検証では、火災により発生する有害物質の防火衣への付着状況と効果的な除染について明らかにした。

しかし、生地片を使用した実大基礎実験から、実際の火災現場を模した模擬家屋燃焼や実火災体験型訓練施設での検証に留まり、火災現場における検証について実施するまでには至らなかった。火災現場では有害物質の発生量は収容物により変化することが予想されるため、様々な火災現場でも検証し、さらに知見を深めていく必要がある。

また、本検証では、除染効果に絞って検証したが、除染効果を高めすぎると防火衣の生地を傷めて性能が維持できなくなる可能性があるため、今後は消防署での除染を想定し、市販の防火衣専用洗濯機等の防火衣の生地を傷めにくい機材に関する検証も必要である。

本検証では、発がん性のある VOC や PAH は、日本において、排出ガスや排水について規制はあるものの、衣類に付着した有害物質や、PAH そのものの質量について基準はないため、一部の危険性評価に EU の REACH 規則を基準値として使用した。人体に基準値以上の発がん性物質が吸収されると発がんリスクが高まるとされているが、基準値以下であれば安全ということではない。

様々な火災現場がある中で、収容物や火災性状により有害物質の排出量は異なることが想定される。個人装備品や



人体に汚染の可能性がある場合は、適当な時期に効果的な除染を行うことが必要であると考えられる。

## 9 謝辞

本検証の実施にあたり、横浜国立大学名誉教授の大谷英雄先生より多くの貴重な知見を賜りました。また、模擬家屋燃焼実験では、総務省消防庁消防大学校より、実験施設の御提供及び御協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

### [参考文献]

- 1) International Association of Fire Chief' s Volunteer and Combination Officers Section ㉔:Lavender Ribbon Report、2021
- 2) 灰野健二、高松宜史、清水崇一：火災現場で発生する有害物質の危険性に関する検証（第1報）、東京消防庁消防技術安全所所報、58号、pp.55-62、2021
- 3) IARC MonographsProgramme on the Evaluation of Carcinogenic Hazard to Humans:http://monographs.iarc.fr/
- 4) 日本産業衛生学会：許容濃度等の勧告（2020年度）、産業衛生学雑誌、Vol.62、No.5、pp.198-230、2020
- 5) 公益社団法人日本作業環境測定協会：作業環境測定ガイドブック0—総論編—、公益社団法人日本作業環境測定協会、2012
- 6) 戸野倉賢一：燃焼場における多環芳香族炭化水素とスス粒子の生成過程、エアロゾル研究、vol.29（1）、pp.5-9、2014
- 7) 齋藤勝裕：汚れの科学、SBクリエイティブ株式会社、2018

## Verification of the Risks of the Hazardous Substances at Fire Scenes (Report 2)

MATSUDA Yuuya\*, TAKAMATSU Nobufumi\*\*, SHIMIZU Takaichi\*

### Abstract

Some foreign fire departments have their own measures to reduce the physical risks of the firefighters exposed to hazardous materials at fire scenes.

We focused on carcinogenic potentiality, namely volatile organic compounds ( "VOCs" ) and polycyclic aromatic hydrocarbons ( "PAHs" ). Then we identified the actual VOC and PAH adhesion to fireproof clothing, established an effective decontamination method, and conducted a hazard assessment based on foreign regulations. Moreover, in order to corroborate the experiment results, we conducted a combustion experiment with a sample house under the conditions similar to an actual fire scene. Furthermore, we saw decontamination facts in a real fire simulation training facility with cedar wood for combustion.

The results showed that VOCs and PAHs were generated and adhered to fireproof clothing. In addition, we found out that the combustion of materials with benzene (BZ) rings, such as polystyrene (PS), emitted more PAHs than in the combustion of wood such as cedar. In order to reduce the risk of future health hazards, it is necessary to exhaust smoke as quickly as possible in fire-originating rooms, decontaminate and seal up on-site gear such as fire coats to prevent secondary contamination, and further decontaminate them back in the fire station.