

# フッ素フリー泡消火薬剤のシール性能

ニューカッスル大学 工学部 プロセス安全性・環境保全研究グループ  
(Process Safety and Environment Protection Research Group,  
School of Engineering, The University of Newcastle)  
Callaghan, NSW 2308, AUSTRALIA

## 抄録

本研究では、最近開発された 3 種類の合成泡消火薬剤(フッ素系界面活性剤、フッ素系ポリマーを含有しないもの)と水性皮膜形成泡(AFFF)消火薬剤のシール性能を試験、比較した。試験にはオーストラリア国防軍の仕様 DEF(AUST)5706 に概説されるシール性評価メソッドを用いた。このメソッドでは  $0.28\text{m}^2$  の小規模ファイアーパンの室内使用を定めている。ファイアーパンはまず 10 リットルの水を注ぎ入れ、その上から燃料として 5 リットルの AVGAS (航空機用ガソリン、引火点  $-50^{\circ}\text{C}$ ) またはヘプタン(引火点  $-4^{\circ}\text{C}$ ) を注ぎ入れた。消火泡は上述の仕様に定める泡ノズルを泡膨張率 4:1 に設定して取り付けられた加圧式消火器によって生成し、燃料の表面全体を覆い尽くすまでまんべんなく吐出した。火のついたテーパーを 5 分おきに消火泡の表面から約 15mm の高さのところを 2 周、円を描くように動かした。その結果、AFFF 消火薬剤とフッ素フリー泡消火薬剤の間でシール性能の違いが示された。実験室条件下では、泡ブランケットの厚みが 1~2cm のとき、もっとも優れた性能をもつフッ素フリー泡消火薬剤(RF6)であっても、引火点の低い可燃性液体の蒸発を防ぐ耐久性において AFFF 消火薬剤の約 30% に留まった。また、本試験では、他の 2 種類の泡消火薬剤に AVGAS 蒸気をシールする性能がほとんどないことが分かり、フッ素フリー泡との顕著な違いを観察した。

キーワード: クラス B 泡消火薬剤、フッ素フリー泡消火薬剤、AFFF、RF6

## 緒言

可燃性(クラス B)液体の消火に使われる今日の高性能泡消火薬剤は、従来、低濃度のフッ素系界面活性剤を主原料としてきた。フッ素系界面活性剤により、これら泡消火薬剤は燃焼中の液体表面に薄膜を形成し、可燃性蒸気が拡散するのを顕著に妨げる(シール性)。「膜形成特性」と「シール性」というこれら 2 つの特性は、フッ素系界面活性剤を基材とする泡消火薬剤の迅速な消火性能と長時間の耐再燃性をもたらす。フッ素系界面活性剤は一般的にパーフルオロオクチルスルホン酸(PFOS)派生物、パーフルオロオクタン酸(PFOA)派生物、およびテロマー化合物を含む。パーフルオロ化された分子は、フッ素系界面活性剤に激しい燃焼環境に耐えられる安定性を与える。そして、これら特性は、そうした燃焼環境において、これらの分子に予想以上の長期安定性を与える。結果として、フッ素系界面活性剤を含有しない生分解性合成泡消火薬剤に対する関心が高まっている。

泡消火薬剤は、蒸気から揮発性有機化合物が流出するのを防ぐために用いられる。泡消火薬剤の蒸気抑制能力を予測するために使われるフラックスチャンバーは、消防分野で広く普及している評価メソッドである。文献<sup>[2]</sup>から分かるように、経験則や予測チャートは進化してきており、消防で特定種類の泡消火薬剤が効果的に使われるようになっている。例えば、ピグナト(Pignato)は、泡厚 15cm、濃度 6%の AFFF を使って n-ヘプタンの流出を 60 秒間抑制することを推奨している<sup>[1]</sup>。一方、スタブリー(Stubley)とマリガン(Mulligan)<sup>[3]</sup>によって再現されたカズンズ(Cousins)とブリッグズ(Briggs)の研究では、合成 AFFF 消火薬剤は炭化水素燃料の燃焼性を高める場合があることが示唆された。フッ素系界面活性剤および非フッ素系界面活性剤を基材とする泡消火薬剤の予測蒸気抑制効率は、フラックスチャンバーを用いた試験結果<sup>[4]</sup>と類似していたが、これら泡消火薬剤が泡ブランケットの上に裸火をかざした際に十分な抑制性能を発揮するか否か、そして抑制時間がどれ位なのかについては不明である。本研究で使用した評価メソッドはフラックスチャンバーの限定された環境を超えるものであり、点火源については、緊急サービス人員の安全を確保できる作業環境が維持できるような泡消火薬剤性能を試験するために使用した。

また、本研究では、フラックスチャンバー以外に別の試験メソッドを検討し、泡消火薬剤の蒸発抑制効率および発火時間を測定した。さらに、今回の室内条件で得られた測定結果とフラックスチャンバーを使用した人工的条件で得られた測定結果を比較した。その目的は、これら2つのアプローチから得られる泡消火薬剤の相対ランキングを比較することである。

## 実験

オーストラリア国防軍の仕様 DEF(AUST)5706 付属文書 A<sup>[5]</sup>は、液体燃料の蒸気抑制に使用する泡消火薬剤の性能評価メソッドを定めている。このメソッドは、液体燃料を覆った泡消火薬剤に裸火を近づけるといものである。これは、フラックスチャンバー<sup>[4]</sup>に比べ、厳密さや実用性に劣るが、本研究では採用した。

DEF(AUST)5706 付属文書 A のメソッドでは、0.28m<sup>2</sup>の小規模ファイアーパンの室内使用を定めている。ファイアーパンはまず 10 リットルの水を入れ、その上から燃料として 20±2°C の AVGAS (航空機用ガソリン) を 5 リットル、静電放電が発生しないようにアースを取り付けた安全缶を使って注ぐ。AVGAS の他、AVGAS より引火点の高いヘプタンを燃料として使った試験も行なった。表 1 にこれら2種類の燃料の物性および燃焼特性の比較結果を示す。

表 1. n-ヘプタンと AVGAS の物性の比較

物性	n-ヘプタン	AVGAS 100LL
	[6]	[7]
色	無色	青
蒸気圧 (kPa) @25°C	6.1	最小 38.0、最大 48.5
密度 (g/cm <sup>3</sup> ) @ 20°C	0.6839	0.69 [製品安全データシート]
引火点 (PMCC)* (°C)	-4	-50 [製品安全データシート]

\*ペンスキーマルテンスクローズドカップ法

消火泡は、DEF STAN 42-40/2 付録 A の仕様に定める泡ノズルを泡膨張率 4:1<sup>[8]</sup>に設定して取り付けられた加圧式消火器によって生成した。消火泡は、NFPA 412<sup>[9]</sup>に記載の泡収集板を使ってノズルから収集し、泡膨張率を設定した。これとは別に、実験に使用する泡を 4 リットルのビーカーを使って収集板から収集した<sup>[9]</sup>。

本実験では、2 つの異なる量(1.5 リットル、3.0 リットル)の消火泡を、泡ブランケットの厚みがそれぞれ 1cm、2cm になるよう AVGAS 燃料の表面に吐出した。泡ブランケットがこの厚みの場合、想定される燃焼抑制時間は 10 分であり、VOC(揮発性有機化合物)の濃度を可燃レベル未満に維持するため再吐出が必要となる<sup>[1]</sup>。実験室条件下では、AFFF の泡厚を 1~2cm にすると、燃焼抑制効果を 6 時間以上持続させることができる。本実験で泡厚を 1~2cm にしたことにより、妥当な時間内に試験を完了することができた。

消火泡は、燃料の表面全体を覆い尽くすまでまんべんなく吐出してからシール性能の試験を開始した。試験では、図 1 に示すように、火のついたテーパーを 5 分おきにファイアーパン内の消火泡の表面から約 15mm の高さのところで 2 周、円を描くように動かした。その結果、「発火せず」「小さな発火」「ファイアーパン全体にわたる激しい発火」の 3 つのケースが観察された。

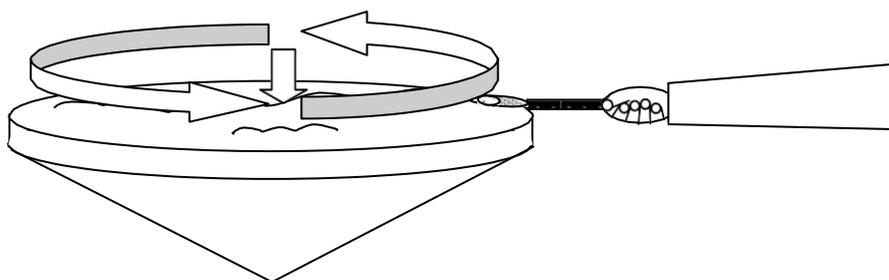


図 1. 泡表面から 15mm の高さのところで火のついたテーパーをかざす様子

さらに、飲用水および合成海水から生成した泡溶液を使い、一連の実験を行なった。合成海水による泡溶液は、無機塩と水の割合を 4.16:95.84 にして生成した。合成海水は、重量パーセントで、塩化マグネシウム( $MgCl_2 \times 6H_2O$ )を 1.10%、塩化カルシウム( $CaCl_2 \times 2H_2O$ )を 0.16%、無水硫酸ナトリウム( $Na_2SO_4$ )を 0.40%、塩化ナトリウム( $NaCl$ )を 2.50%含有するものである<sup>[5]</sup>。

試験対象となった泡消火薬剤は、AFFF 消火薬剤 1 種類(消火薬剤製造中止前の 3M 社製 FC-206CF)および合成泡消火薬剤 3 種類(RF6(3M Australia 社が 2006 年まで製造)、泡消火薬剤 A、泡消火薬剤 B)である。RF6 は ICAO レベル B 基準を満たした。現在、ノルウェーの Solberg 社によって改良型 RF6 がアーケティック・リヒーリング泡消火薬剤として製造されている。リヒーリング泡消火薬剤は ICAO レベル B の基準を満たしている。泡消火薬剤 A と B は 2004 年にオーストラリア国内で購入されたものであるが、当時、クラス B 泡消火薬剤として認められていなかったにもかかわらず、クラス B 泡消火薬剤として販売されていた。RF6 はキサントガム樹脂を含有するのに対し、泡消火薬剤 A および B はいずれも樹脂を含有しない。各製品の濃度は、メーカーのラベルや印刷物に記載されている指示に従って設定した。表 2 にその内容を要約する。

表 2. 試験対象の泡消火薬剤および使用濃度

泡原液 使用レベル	FC-206CF	RF6	泡消火薬剤 A	泡消火薬剤 B
推奨濃度	6%	6%	0.4%	1~3%
使用濃度	6%	6%	0.4%	2%

FC-206CF は膜形成泡消火薬剤である。すなわち、通常条件下(20~25°C)において、シクロヘキサンに対して正の静的膜拡張係数を有している。

$$S = \gamma_{C6H12-air} - (\gamma_{sol-air} + \gamma_{C6H12-sol}) \quad (1)$$

式(1)右辺の記号はそれぞれ、シクロヘキサンと泡溶液の表面張力、およびシクロヘキサンと泡溶液の間の界面張力を表す。予想どおり、表 3 に示すように、FC-206CF 溶液のみシクロヘキサン上で拡張した。泡消火薬剤 A と B の界面張力が非常に小さいことが特筆される。界面張力が 0 に近づくと完全混和が生じる。そのため、泡消火薬剤 A と B のフォースフル投入時、優れた燃料吸収性能および著しく低い再燃挙動を示すことが予想されるであろう。

実際には、薄膜形成は動的表面張力・界面張力と温度(燃料と泡溶液の温度が高くなるため)の関係性、および燃料の種類に依存する<sup>[10]</sup>。例えば、n-ヘプタンなど脂肪族炭化水素は約 20 mN m<sup>-1</sup>の表面張力を有し、芳香族化合物は約 28 mN m<sup>-1</sup>の表面張力を有する。それに対し、シクロヘキサンの表面張力は 24 mN m<sup>-1</sup>である。参考文献 10 に示されるよう

に、AFFF 溶液は、含まれるフッ素系界面活性剤が臨界ミセル濃度を超えない限り、n-ヘプタン上では拡がらなかった。一般的に、同等の条件下において、脂肪族燃料は芳香族燃料より消火するのが難しいため、脂肪族燃料の表面に膜を形成するのはより困難である。拡張係数が 0 に近づくと、膜拡張は非常に遅くなりやすい。そのため、フッ素系界面活性剤溶液の薄膜拡張特性は、燃焼抑制において、フッ素系界面活性剤の存在によって高められた可燃性蒸気シール性ほど重要ではないと考える。

表 3. 本研究で考察した泡溶液の表面・界面特性

	FC-206CF	RF6	泡消火薬剤 A	泡消火薬剤 B
泡溶液の表面張力 ( $\text{mN m}^{-1}$ )	16.4	26.4	24.0	27.0
シクロヘキサンでの 界面張力 ( $\text{mN m}^{-1}$ )	4.3	2.4	0.6	0.8
シクロヘキサンでの 拡張係数 ( $\text{mN m}^{-1}$ )	3.3	-4.8	-0.6	-3.8

実験の再現性を確認するため、RF6(泡厚 1cm)を使った実験は 2 回繰り返して行なった。蒸気抑制に要した時間はそれぞれ 25 分、30 分で、平均 27 分であった。同じ手順により泡厚 2cm の RF6 を使った実験では、蒸気完全抑制に 60 分以上 (65 分、70 分、平均 67 分) かかった。図 2 に実験結果を示す。

## 結果および考察

### 飲用水から生成した泡溶液で AVGAS 蒸気を抑制

図 2 および図 3 に示すように、AFFF が総合的にもっとも優れた AVGAS 蒸気抑制性能を示し、泡厚 1cm にて 70 分間燃焼を抑制した。泡消火薬剤 A および B は蒸気抑制性能が極めて低かった。AFFF は実験の最後の 20~25 分間に泡が崩壊し、小さな発火が観察された。これは、AFFF が大量の炭化水素蒸気を放出したことによるものであろう。このことから、AFFF の有効な蒸気抑制時間は泡厚 1cm で少なくとも 70 分、つまり発火時間よりも約 30 分

短いと考えられる。泡厚を 2cm にすると、抑制時間は 180 分でその後小さな発火が起こり、195 分で激しい発火が起こった。結果として、FC-206CF では「小さな発火」および「激しい発火」という 2 種類の発火反応をもって実験が終了した。最初の「小さな発火」または「激しい発火」（「小さな発火」のない泡消火薬剤の場合）が発生した時点で、泡ブランケットの再発火抑制時間が終了したと見なされた。小さな発火反応は AFFF と泡消火剤 B のみ観察されたが、再現性のある結果は AFFF でのみ観察された。

泡が完全に残っている場合、FC-206CF は優れた蒸気抑制性能を示したが、泡の崩壊後約 20～25 分間は不完全な抑制に終わった。この間、小さな発火が観察されたが、持続的な燃焼は起こらなかった。これはカズンズ (Cousins) とブリッグズ (Briggs)<sup>[2]</sup>の研究で報告された効果と関連していると思われる。その研究では、AFFF 溶液で膜が形成されたケロシンは膜形成のないケロシンよりも発火しやすいことが報告されている。泡溶液は目薬容器を使ってケロシンの表面に慎重に垂らした。カズンズとブリッグズが報告した効果は、AFFF 溶液の投入当初に観察されているが、本研究で観察された効果は、AFFF の泡および水性皮膜が最終的に崩壊したときに顕著に見られた。これは、燃料表面に垂らされた限られた量の AFFF 溶液が、カズンズとブリッグズによって報告されたのと同様、小さな発火を引き起こす条件をつくり出したことが原因であると考えられる。

スタブリー (Stubley) とマリガン (Mulligan)<sup>[3]</sup>は、カズンズとブリッグズ<sup>[2]</sup>の研究を再現し、ケロシン、n-ドデカン (C<sub>12</sub>H<sub>26</sub>)、およびトリデカン (C<sub>13</sub>H<sub>28</sub>) の 3 種類の炭化水素混合物に対して同様の結果を得た。スタブリーとマリガンの研究では、対象となった炭化水素燃料の水性皮膜の挙動につき 2 種類の説明がされている。1 つめは軽い蒸気の分離をその根拠とし、水性皮膜がケロシンの冷却蒸留を促進し、その結果、より小さい揮発性留分が燃料の上で分離・蒸発し、その蒸気が裸火に触れたときに発火したというものである。しかしながら、彼らの実験では、ケロシン、n-ドデカン、トリデカンの 3 種類の燃料で同じ発火反応が示されており、これは説明に反するものである。2 つめは粘性皮膜を説明の根拠としている。これは、水性皮膜に含まれる水分が蒸発し、界面活性剤によって炭化水素燃料が潜在的に可燃性の混合物に乳化されるというものである。n-ドデカンおよびトリデカンから得られた数値は、AFFF の水性皮膜は脱水しやすく、燃料表面に残った界面活性剤が炭化水素燃料を乳化し、本研究における観察と同様の早期発火を促すことを示した。

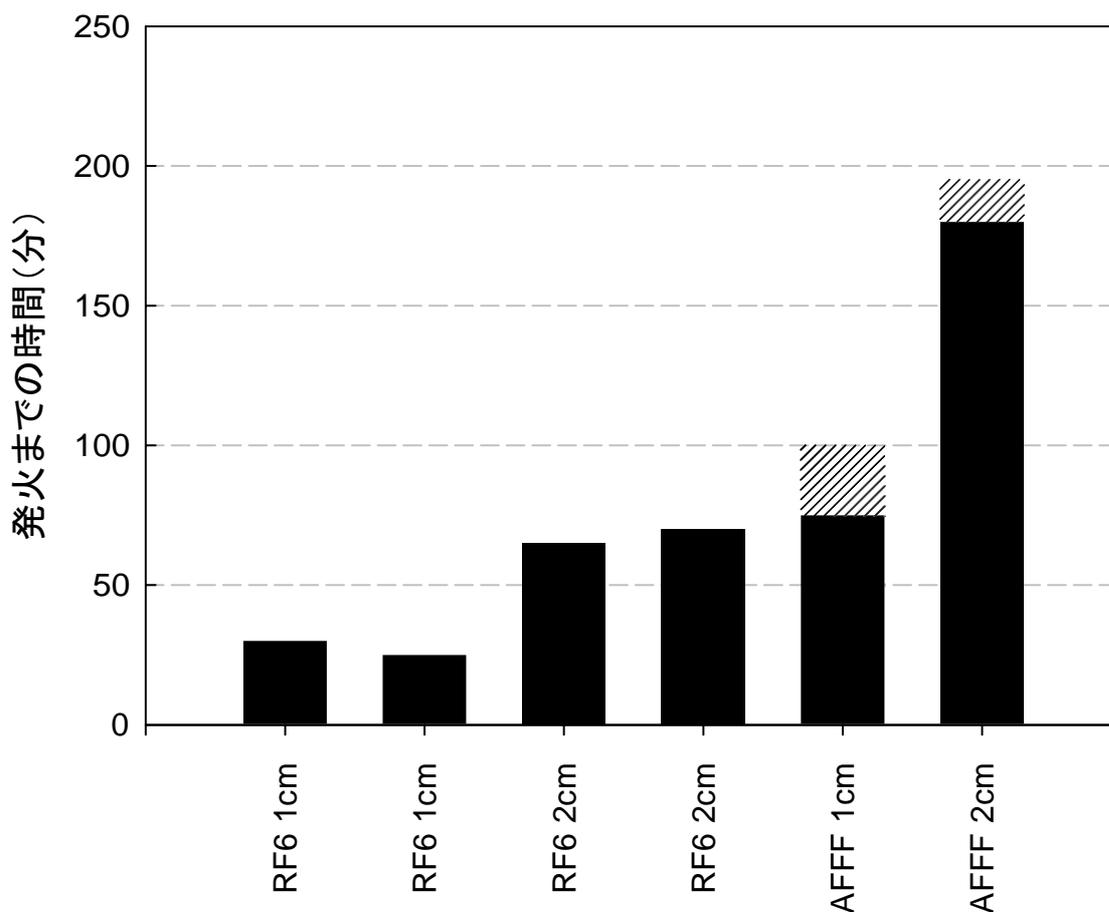


図 2. RF6 と AFFF の可燃性蒸気抑制の再現性 (AVGAS、飲用水から生成した泡溶液)

AFFF のグラフの斜線部分は小さな発火から持続的な燃焼にいたるまでの時間を表す。RF6 および AFFF のいずれも、泡厚を 2 倍にすると抑制時間も 2 倍になる。

還元泡によって界面活性剤溶液が絶えず供給されないと、水性皮膜はゆっくりと消滅する。最終的に炭化水素燃料が下にあるより密度の高い水層に接触すると、皮膜は蒸発するか崩壊する。泡溶液中の界面活性剤の濃度が低下するかあるいは炭化水素液表面の泡溶液の量が減少すると、結果として、AVGAS 蒸気の濃度が高くなり小さな発火が引き起こされる。皮膜は時間の経過とともに減退し、最終的に蒸気濃度は発火および持続的な燃焼に十分な高さに到達する。小さな発火は危険な状態をもたらすため、緊急サービス人員の安全にとって見逃すことのできないリスクである。このため、小さな発火は泡ブランケットが燃料蒸気を十分に抑制していないことを示す。

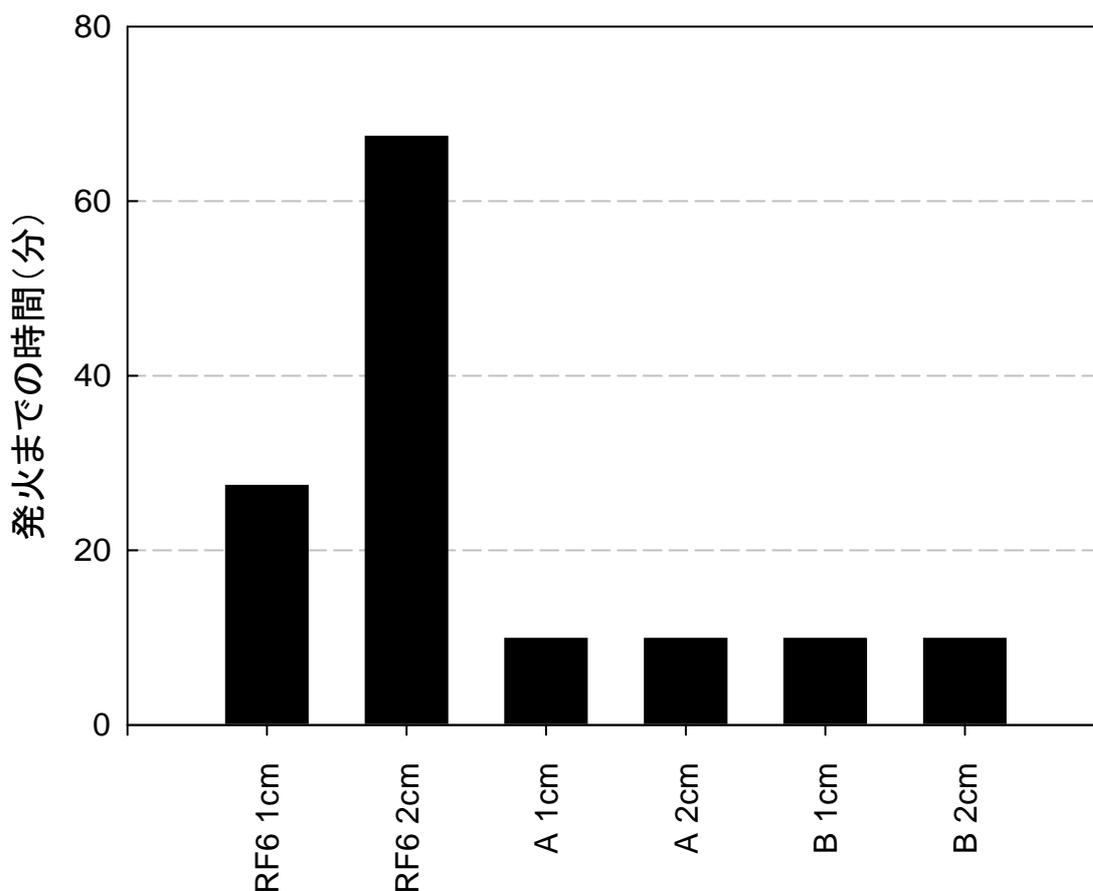


図 3. フッ素フリー泡消火薬剤の性能比較 (AVGAS、飲用水から生成した泡溶液)

#### 飲用水から生成した泡溶液でヘプタン蒸気を抑制

図 4 は、泡厚 2cm でのフッ素フリー泡消火薬剤と AFFF 消火薬剤の性能比較を示す。実験結果から明らかなように、n-ヘプタンを燃料とした場合、AVGAS よりも蒸気抑制時間が長い。これは、AVGAS の蒸気圧が 38~48.5kPa であるのに対し、n-ヘプタンの蒸気圧は 6.1kPa と低いためである。図 4 に示すように、泡厚 2cm での RF6 の蒸気抑制時間は 2 回の実験の平均が 270 分、それぞれ 260 分、280 分であった。これは 7% 程度のばらつきに相当し、推定蒸気抑制時間の総合誤差は 12.5% である。

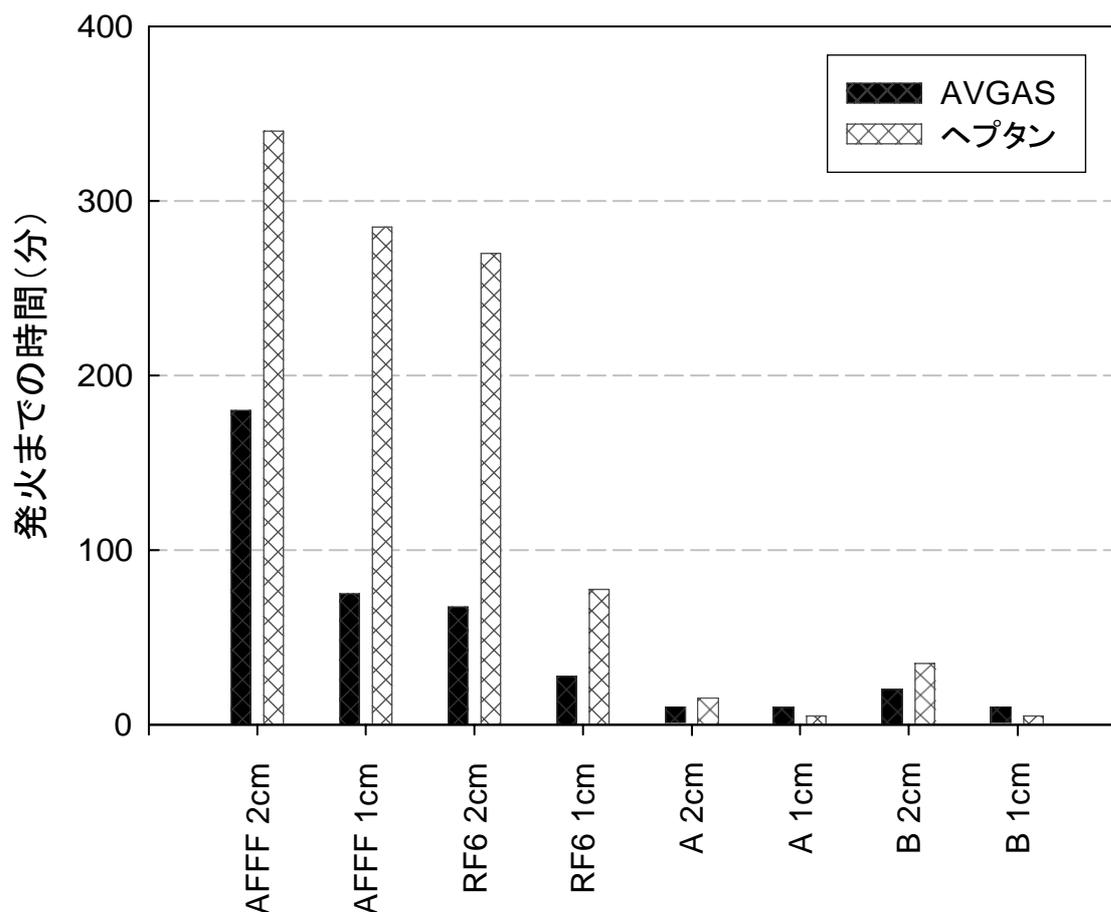


図 4. AFFF とフッ素フリー泡消火薬剤の性能比較 (AVGAS、ヘプタン、飲用水から生成した泡溶液)

燃料に AVGAS を使用したとき、泡消火薬剤 A では泡厚 2cm 時、経過時間 10～35 分にて小さな発火が見られた。本論文の考察に従い、図 4 では蒸気抑制時間を 10 分とした。

AVGAS では、泡厚を 2 倍にするとシール継続時間も約 2 倍となる。一方、n-ヘプタンでは、泡厚を 2 倍にすると RF6 のシール継続時間は 3 倍、AFFF のシール継続時間は 1.2 倍となった。他の合成泡消火薬剤では、溶液濃度を高くしても蒸気抑制効果に顕著な変化は見られなかった。泡消火薬剤 A と B については、一貫性に欠ける結果が示されたが、泡厚 1cm のときと比較し、泡厚 2cm のとき蒸気圧の低い燃料に対して蒸気抑制効果が高まったように見える。ヘプタン使用時にもシール継続時間の順位は変わらず、泡消火薬剤 A と B は AVGAS 使用時の順位と同じであり、有効な蒸気抑制効果は見られなかった。

海水から生成した泡溶液で AVGAS 蒸気を抑制

合成海水から生成した泡混合液を AVGAS に投入し、電解質の効果を観察するため、一連の実験を実施した。前述のメソッドに従い、同一の泡消火薬剤のシール性能を観察した。合成海水などに含まれる電解質は、界面活性剤系水性泡混合液の還元速度を高めることが示されてきた<sup>[11]</sup>。今回の研究対象となったすべての泡消火薬剤も、海水中の電解質に対して同様の反応を示し、消火泡がより短時間で崩壊し蒸気シール性が低下することが予想された。

図 5 は海水の実験結果と飲用水の実験結果との比較である。合成海水と泡原液の混合液を使用時、AFFF と RF6 の蒸気抑制時間が短くなった。AFFF、RF6 ともに崩壊が早まり不安定になり、飲用水と泡原液の混合液に比べ、発火までの時間が 20～25 分程度短くなった。これは 14～30% の性能低下に相当する。細胞状泡沫層の最終崩壊段階において泡構造に白色の沈殿物が現れるなど、消火泡の外観が変化したケースもあった。

しかし、泡消火薬剤 B で合成海水を使用した場合、消火泡の耐久性および発火までの時間は 10～15 分程度向上した。泡消火薬剤 B は無機塩類からマイナス影響を受けない界面活性剤を含んでいる可能性がある。泡消火薬剤 B は炭化水素燃料の消火および現場での修復を意図しているため、組成の一部としてバクテリアを含んでいる可能性がある。また、炭化水素の分解を助ける乳化剤あるいは脂肪酸を含んでいる可能性が高い。乳化剤や脂肪酸は耐塩性を有することで知られており、これが泡構造の安定化を助けている可能性がある。

## 性能比較

図 4 は泡消火薬剤の性能の順位付けを示す。順位が 1 位の泡薬剤はシール継続時間も最も長く、最高の性能を有している。性能順位は 5 セットの実験を通して基本的に変わらない。図 4 から、AFFF (FC-206CF) が最高の蒸気シール性を有していることは明らかであり、つぎに RF6 が続き、さらに泡消火薬剤 A と B が続く。この順位は、燃料種類、泡厚、水に含まれる電解質の有無に影響を受けない。

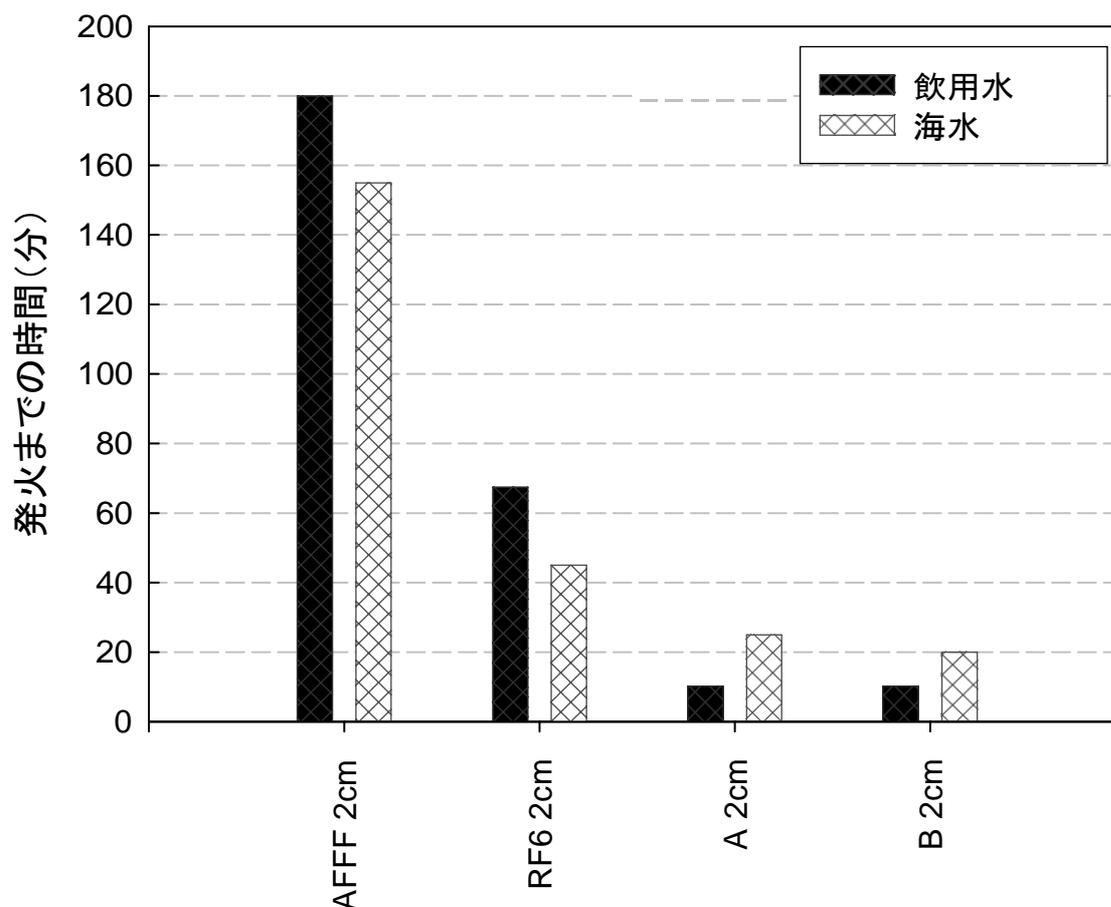


図 5. AFFF とフッ素フリー泡消火薬剤の性能比較 (AVGAS、飲用水／海水から生成した泡溶液)

ここでは、参考文献 4 で報告されたフラックスチャンバーによる実験結果と本研究におけるシール性能実験結果とを比較する。いずれの実験結果も、消火泡の可燃性蒸気抑制能力が低下すると、蒸気濃度が小さな発火や激しい発火をもたらすレベルまで上がることを示している。参考文献 4 の図 3～6 が示すように、蒸気濃度が急上昇し燃料質量流束が急激に増加すると、消火泡の有効性が低下し、泡ブランケットの機能が急激に失われる。そのため、実際の使用現場でリスクを低減するには、消火泡をより頻繁に放射して燃料の発火を防ぐ必要がある。表 5 はシール性能実験結果とフラックスチャンバーによる実験結果との比較である。

表 4. シール性能実験結果と性能順位のまとめ

燃料	AVGAS	AVGAS	AVGAS	Heptane	Heptane
泡厚(cm)	1	2	2	1	2
水の種類	飲用水	飲用水	海水	飲用水	飲用水
泡原液の順位					
FC-206CF	1	1	1	1	1
RF6	2	2	2	2	2
Pyrocool FEF	3 - 4	3	3	3 - 4	4
Micro-Blaze Out	3 - 4	4	4	3 - 4	3

表 5 は、RF6 の消火泡を優れた AFFF の 3 倍の頻度で補充した場合、RF6 が可燃性燃料の蒸気を効果的に軽減できることを示している。泡消火薬剤 A と B は、蒸気抑制能力がまったく無いまたはほとんど無い。著者らの知る限り、A と B は泡消火薬剤として認められていないものである。実用的な観点から言えば、本研究の結果が示すように、AFFF と同様、フッ素フリー泡消火薬剤の選定・購入時には認可されたものを選ぶことが必要である。

過去の研究文献にある予測チャートでは、ヘプタン、メチルエチルケトン、トルエンなどの揮発性炭化水素の抑制には、AFFF の泡厚を大きくし、より頻繁に再放射することが推奨されている。予測チャートには、泡厚 2.5cm の AFFF を 10 分置き、泡厚約 20cm を 30 分置き、あるいは泡厚 30cm の AFFF を 60 分置きに再放射することによって蒸気を完全に抑制する方法が記載されている<sup>[1]</sup>。本研究で RF6 または AFFF の泡厚を大きくした場合、蒸気抑制性能は顕著に向上した。従って、消防隊現場使用指針では、消火泡を通常 20～30 分置きに再放射し、泡厚を 1cm 以上にすることが定められている。RF 泡技術は、広範囲にわたる燃料流出から発生する蒸気を抑制するために、日本の出光興産株式会社などによって使用されている。

表 5. AVGAS と n-ヘプタンに対する泡厚 1cm の泡ブランケットのシール性能実験結果とフラックスチャンバーの実験結果(n-ヘプタンのみ<sup>[4]</sup>)との比較

シール性能メソッド(AVGAS)	シール性能メソッド(n-ヘプタン)	シール性能メソッド(フラックスチャンバー (n-heptane))
本研究	本研究	本研究
小さな発火まで	激しい発火	激しい発火
		蒸気濃度

	の時間(分)	までの時間 (分)	までの時間 (分)	急上昇(分)
AFFF	180	195	285	159
RF6	観察されず	50～65	75～85	48
泡消火薬剤 A	観察されず	10	5	0
泡消火薬剤 B	観察されず	10	5	0

## 結論

本研究では、2004 年頃オーストラリア国内で販売されていたフッ素フリー泡消火薬剤とパーフルオロオクタンスルホン酸(PFOS)を基材とする AFFF 消火薬剤の AVGAS (引火点-50°C) および n-ヘプタン(引火点-4°C)に対する蒸気抑制性能を比較した。比較試験にはオーストラリア国防軍の仕様 DEF(AUST)5706 に定められているメソッドを用いた。

著者らは「小さな発火」の発生が、泡ブランケットが可燃性蒸気を抑制できない基準となることを論じた。小さな発火は危険な状態をもたらすため、緊急サービス人員の安全にとって見逃すことのできないリスクである。従って、本研究における実験結果を解釈するにあたっては、常にこの基準を適用した。小さな発火は、AFFF 消火剤に含まれるフッ素系界面活性剤が要因であると考えられ、スタブリーとマリガン<sup>[3]</sup>の報告に類似した挙動を引き起こす現象をもたらす可能性がある。

本研究から以下の知見が得られた。

- 実験室条件下では、泡ブランケットの厚みが 1～2cm のとき、もっとも優れた性能をもつフッ素フリー泡消火薬剤(RF6)であっても、引火点の低い可燃性液体の蒸発を防ぐ耐久性において AFFF 消火薬剤の約 30%に留まった。RF6、AFFF のいずれも、泡厚を大きくすると蒸発抑制性能が顕著に向上する。本研究における実験結果は、泡原液の性能順位についても、参考文献 4 のフラックスチャンバーによる実験結果との間に高い整合性が見られた。
- 本研究結果および広範囲にわたる燃料流出への RF 泡技術適用の成功例(例. 日本の出光興産株式会社)に基づき、著者らは、RF6 や類似のフッ素フリー泡消火薬剤が実際の場面

で十分な性能を発揮できると考える。これを実証し、AFFFを使ったピグナトの研究<sup>[1]</sup>のように推奨泡厚と放射頻度を決定するためには、より大規模な実験を行う必要がある。将来的には一部の国でフッ素系界面活性剤を含む泡消火薬剤の使用が制限される可能性があり、その場合、RF6 や類似のフッ素フリー泡消火薬剤が環境的に受容可能な代替品となるであろう。

- 本研究では、2004 年にオーストラリア国内で販売されていた 2 種類のフッ素フリー泡消火薬剤には可燃性蒸気抑制効果がまったく無いまたはほとんど無いことが示された。RF6 の優れた性能は、含まれているキサentanガムに起因する。今回の実験結果から、2004 年にオーストラリア国内で販売されていた 2 種類のフッ素フリー泡消火薬剤(泡消火薬剤 A と B) の販売は支持されない。また、泡消火薬剤の選定・購入時には認可されたものを選ぶことが必要であることが確認された。
- 実験室条件下では、合成海水を使用した場合、泡消火薬剤に含まれる無機塩類が AFFF および RF6 の性能を 14～30% 低下させる。

## 参考文献

1. J.A. Pignato, Jr., “Evaluation Test for Foam Agent Effectiveness”, Fire Eng., pp. 46-48, July 1984.
2. C.S. Cousins and A.A. Briggs, “Tests show unfoamed agents capable of increasing fire potential in fuels”. Fire 78, pp. 20-21, 1986.
3. D. Stublely and D.J. Mulligan, “The effect of aqueous surfactant films on the ignitability of aviation kerosene”, Fire Tech., pp. 110-115, 1988.
4. T.H. Schaefer, B.Z. Dlugogorski and E.M. Kennedy, “Vapour suppression of n-heptane with fire fighting foams using laboratory flux chamber”, 7<sup>th</sup> Asia-Oceania Symp. Fire Scie. Tech. (審査中).
5. DEF(AUST)5706, Foam, Liquid Fire Extinguishing; 3 Percent and 6 Percent

- Concentrate Specification, Commonwealth of Australia, Australian Defence Standard, 2003.
6. D.R. Lide, CRC Handbook of Chemistry and Physics, 80<sup>th</sup> Ed., CRC Press, New York, pp. 6-83, 2000.
  7. DEF(AUST)5215, Gasoline, Aviation, Specification, NATO Code F-18 and F-22 (AVGAS 100/130, 100LL and 115/145), Commonwealth of Australia Australian Defence Standard, 1999.
  8. Defence Standard 42-40, issue 2, Foam Liquids, Fire Extinguishing (Concentrates, Foam, Fire Extinguishing), UK Ministry of Defence, 2002.
  9. NFPA 412, Standard for Evaluating Aircraft Rescue and Fire-Fighting Foam Equipment, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, USA, 1998.
  10. B.Z. Dlugogorski, S. Phiyalaninmat and E.M. Kennedy “Dynamic surface and interfacial tension of AFFF and fluorine-free Class B foam solutions”, Proc 8<sup>th</sup> International Symposium on Fire Safety Science, Beijing, China (September 2005), 719-730.
  11. D.O. Shah, N.F. Djabbarah and D.T. Wasan, “A correlation of foam stability with surface shear viscosity and area per molecule in mixed surfactant systems”. Colloid & Polymer Sci. 256, pp. 1002-1008, 1978.