

コンテナ船HOLD内消火装置 に関する研究

2013年2月

株式会社商船三井

技術部



Mitsui O.S.K. Lines

1. はじめに
2. 事業内容
 - 2-1 実船調査
 - 2-2 消火時再現シミュレーション
3. 現状の二酸化炭素消火システムの検証
 - 3-1 解析ケースと解析結果
 - 3-1-1 二酸化炭素放出時解析
 - 3-1-2 二酸化炭素放出終了後解析
 - 3-1-3 コンテナ間の隙間詳細解析
 - 3-2 考察
4. 二酸化炭素段階投入システムの検証
 - 4-1 解析ケースと解析結果
 - 4-1-1 二酸化炭素投入方法の違いによる濃度保持時間の検証
 - 4-1-2 火災コンテナからの発熱量違いによる濃度保持時間の検証
 - 4-1-3 火災コンテナの位置の違いによる濃度保持時間の検証
 - 4-2 考察
 - 4-2-1 投入方法による濃度保持時間の違いに関して
 - 4-2-2 二酸化炭素濃度と温度の関係について
5. まとめ

※添付資料:

株式会社FPEC殿作成「コンテナ船HOLD火災対策業務」

1. はじめに

事業の目的

- 現在のコンテナ船はHOLD内における火災用に二酸化炭素消火設備を搭載しているが、消火に至らなかった事例が存在
- 一般的にコンテナ船に搭載されているHOLD用消火装置の有効性を検証
- 最適な消火装置とその運用方法を開発



火災に対してより安全なコンテナ船の運航、貨物の損害防止をもたらす

2. 事業内容

2-1 実船調査

2-2 消火時再現シミュレーション

※詳細は添付資料「2. 実施概要」ご参照

2-1 実船調査

- コンテナ船に既設の二酸化炭素消火装置の設計図書の内容確認
- コンテナ船に訪船し二酸化炭素消火装置、コンテナ間の隙間寸法、二酸化炭素リーク源等を調査

2-2 消火時再現シミュレーション

三次元CFD(数値流体シミュレーション)によって火災時のHOLD内二酸化炭素濃度及び温度分布の経時変化を再現

解析対象

6,350TEU型コンテナ船 No.6 HOLD

※ 自走用燃料をタンクに有する自動車を積載する仕様とし、SOLAS II -2/Reg.3.49に定義されている車両積載区画に該当するためSOLAS II -2/Reg.20.6.11に規定されているようにHOLD容積の45%の量の二酸化炭素を放出できる仕様としている

二酸化炭素放出条件

- ノズル数 : 8
- 二酸化炭素放出速度 : 168.59kg/min
- 総放出量 : 20130.4kg

火災コンテナの発熱条件

- コンテナ内部の燃焼までは再現せず、コンテナの表面から発熱
- 発熱量は様々な実用品を燃焼させたときの発熱速度を参考に1800kW

3. 既存の二酸化炭素消火設備の検証

3-1 解析ケースと解析結果

3-1-1 二酸化炭素放出時解析

3-1-2 二酸化炭素放出終了後解析

3-1-3 コンテナ間の隙間詳細解析

3-2 考察

※詳細は添付資料「3. 現状の二酸化炭素消火システムの検証」ご参照

3. 既存の二酸化炭素消火設備の検証

- 既存の二酸化炭素消火設備が火災時に消火能力を備えているかどうかを、HOLD内に二酸化炭素を投入した状態をシミュレーションし検証
- 火災コンテナ付近の二酸化炭素濃度と温度の経時変化を観察し、「鋼船規則R編25章25.2.2炭酸ガス装置」に記載の貨物区画に対する設計濃度である30%濃度を消火濃度として評価

3-1-1 二酸化炭素放出時解析

解析ケース

- 火災発生直後に二酸化炭素をHOLD内に投入し、火災コンテナ周囲の二酸化炭素濃度が30%濃度に達するかどうか、またそれにかかる時間を検証
- 解析ケースはHOLD内のコンテナ量と火災コンテナの位置を条件パラメータとし、以下6ケース

Case名	コンテナ量	火災コンテナ位置
Case1	満載	最下部中央
Case2	半際	最下部中央
Case3	無し	—
Case4	満載	最下部の端
Case5	満載	中央
Case6	満載	最上部中央

3-1-1 二酸化炭素放出時解析

解析結果

- 放出された二酸化炭素はHOLD内を下降して底面に達してから水平に拡散し、その後上部に向けて充填されていく
- 二酸化炭素の消火濃度30%に達する時間はケース毎にばらつきがあるが、投入後遅くとも180秒後には火災コンテナ周辺は消火濃度に達する
- 火災コンテナがよりHOLD上部に存在する場合は消火濃度に達するのに時間を要す
- コンテナ積載量が多い程早く、高密度に二酸化炭素が充填される

3-1-2 二酸化炭素放出終了後解析

解析ケース

- HOLD内の二酸化炭素濃度が100%の状態から、ハッチカバーの開口部を通じて二酸化炭素が外部空気に希釈される状況を確認
- 解析ケースは火災コンテナが存在する場合と、存在しない場合の以下2ケース
- 火災コンテナからの放熱はくすぶり火災を想定し、他のケースの1/10の放熱量(180kW)として計算

Case名	コンテナ量	火災コンテナ位置
Case7-1	満載	最下部中央
Case7-2	満載	無し

3-1-2 二酸化炭素放出終了後解析

解析結果

- Case7-1では火災コンテナからの放熱による対流がHOLD内に発生して、ハッチカバー開口部にて外部空気と希釈され約2時間でHOLD内の二酸化炭素濃度が30%以下に低下する
- Case7-2では火災コンテナが存在しないため、HOLD内に対流が発生せず、外部空気との希釈が抑制され、約10時間後、最も二酸化炭素濃度が低いHOLD上部でも約30%濃度、最下部では約90%濃度

3-1-3 コンテナ間の隙間詳細解析

解析ケース

- 上記解析ケースより細かいメッシュでコンテナ間の隙間に二酸化炭素が到達するかどうかを検証し、解析ケースは以下1ケース

Case名	コンテナ量	火災コンテナ位置
Case8	満載	無し

解析結果

- 二酸化炭素は投入される空間から徐々にコンテナ間の隙間にも到達する様子を
確認

3-2 考察

- 火災コンテナの位置やコンテナ積載量によらず、火災コンテナ付近の二酸化炭素濃度は消火濃度に達することが確認できた。
- このような条件下でも、過去の事例において二酸化炭素消火設備で消火に至らなかった原因として以下1)2)3)が考えられる。
 - 1) 火災コンテナ内に二酸化炭素が十分に流入できなかった
 - 2) コンテナ内部の燃焼物が深部火災のため消火しにくく、その間に空気とHOLD内二酸化炭素が置換され消火濃度以下となり再び火災が大きくなってしまった
 - 3) コンテナ内の積載物の特性に依存したケース
例えば硝酸カリウムなどの酸化物がコンテナ内に混入されていた場合、酸素濃度が二酸化炭素により低下した場合でも燃焼反応が継続できる物質もある
- 1)と3)については、コンテナ自体や、コンテナ内の積載物の燃焼に応じた解析が必要となり、消火時シミュレーションによる解明は現実的ではない。そこで2)に対する対策として、HOLD内の二酸化炭素濃度をいかに長く消火濃度に保つかに焦点を当てて検討した。

3-2 考察

検討課題と対策

- HOLD内の二酸化炭素は外部空気と希釈される様子が明らかになり、ハッチカバーの開口部に濡れたボロ布等を詰めることがHOLD内の二酸化炭素濃度保持に有効であるが、通常On Deckにコンテナが積載されているため、運用上実用的ではない。
- 本船に搭載されている二酸化炭素量は、コンテナ積載量によらずHOLDが空の状態の容積を基準に設計されている。ここで、二酸化炭素総量(体積)とコンテナが100%積載時のHOLD内自由空間(体積)との比を計算すると156.6%と100%を越える。実際は、空気との混合もあるため100%にはならないが、必要以上の量の二酸化炭素が投入されており、余分な二酸化炭素はハッチカバーの開口部からHOLD外部に逃げていることになる。限りある二酸化炭素を有効に利用し二酸化炭素濃度をより長く保持するためには、コンテナの積載量に応じた投入が必要。
- ある二酸化炭素消火設備メーカーでは、コンテナの積載量に応じた二酸化炭素を段階的に投入する方法を提案している。既存の二酸化炭素一斉投入システム、既存段階投入、及び常にHOLD内の二酸化炭素濃度が30%以上になるような適宜段階投入についてコンテナの積載量に応じた検討を行った。

4. 二酸化炭素段階投入システムの検証

4-1 解析ケースと解析結果

4-1-1 二酸化炭素投入方法の違いによる濃度保持時間の検証

4-1-2 火災コンテナからの発熱量違いによる濃度保持時間の検証

4-1-3 火災コンテナの位置の違いによる濃度保持時間の検証

4-2 考察

4-2-1 投入方法による濃度保持時間の違いについて

4-2-2 二酸化炭素濃度と温度の関係について

※詳細は添付資料「4. 二酸化炭素段階投入システムの検証」及び「5. 考察」ご参照

4-1-1 二酸化炭素投入方法の違いによる 濃度保持時間の検証

- 二酸化炭素をHOLD内へ投入直後から、投入方法の違いによる二酸化炭素濃度の経時変化及び濃度保持時間をコンテナ積載量に応じて検証
- 濃度保持時間は、初回投入後から、最終的に二酸化炭素全量を放出後にHOLD内濃度が30%を下回るまでとしている
- 火災コンテナからの発熱量は1800kW、火災コンテナの位置は最下部中央としている

4-1-1 二酸化炭素投入方法の違いによる 濃度保持時間の検証

A: 段階投入

既存の段階投入方法。コンテナ積載量に応じた二酸化炭素を30～60分の間隔で3段階に分けて投入するというもの。消火シミュレーションでは最短30分最長60分の間で二酸化炭素濃度が30%まで低下した時点で2,3回目の投入とし、最も濃度保持時間が長くなる投入間隔条件としている。

B: 適宜投入

常にHOLD内の二酸化炭素濃度をモニタリングし、投入時には50%濃度に達するまで投入。その後濃度が30%を下回る前に再度二酸化炭素を50%濃度に達するまで投入し、これを繰り返すというもの。

C: 一斉投入

二酸化炭素全量を一斉に投入する既存の消火設備システム

4-1-1 二酸化炭素投入方法の違いによる 濃度保持時間の検証

解析ケースと結果

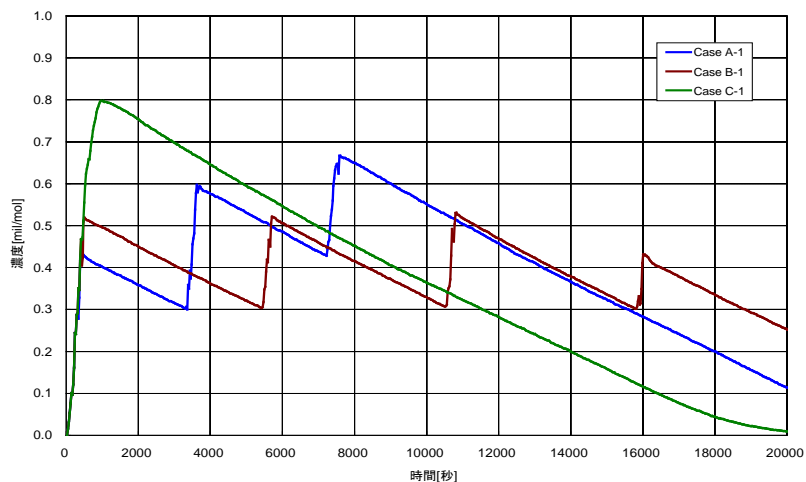
- 投入方法とコンテナ積載量に応じて、以下8ケースを検証
- コンテナ積載量が満載と半載のケースにて適宜投入が最も二酸化炭素濃度保持時間が長い

Case名	コンテナ量	投入方法	放出方法							保持時間 (s)
			1回目 (%)	停止時間 (s)	2回目 (%)	停止時間 (s)	3回目 (%)	停止時間 (s)	4回目 (%)	
CaseA-1	満載	段階投入	33.3	3000	33.3	3600	33.3	-	-	15600
CaseB-1	満載	適宜投入	44.4	5000	22.2	5000	22.2	5000	11.2	18900
CaseC-1	満載	一斉投入	100	-	-	-	-	-	-	11500
CaseA-2	半載	段階投入	50	3600	25	3600	25	-	-	19600
CaseB-2	半載	適宜投入	55.6	7500	22.2	7400	22.2	-	-	23200
CaseC-2	半載	一斉投入	100	-	-	-	-	-	-	16000
CaseA-3	無し	段階投入	75	1800	12.5	1800	12.5	-	-	19400
CaseB-3※	無し	一斉投入※	100	-	-	-	-	-	-	17600

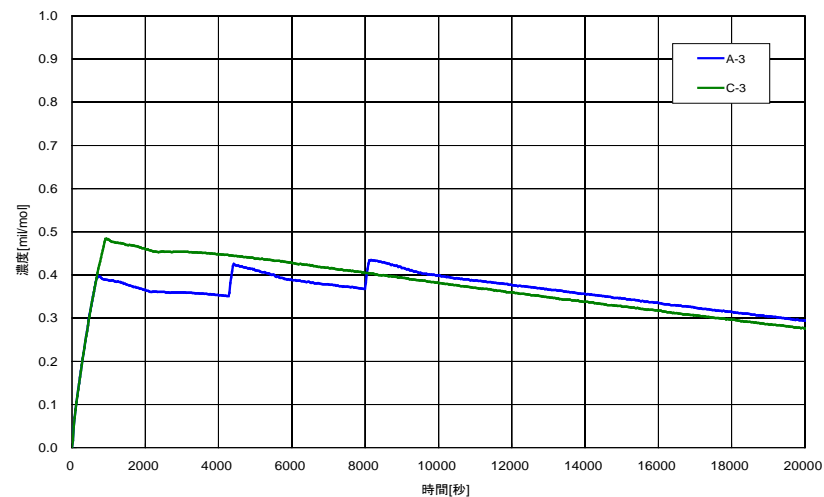
※ 元々の二酸化炭素設計量がHOLD容積に対して45%であったため適宜投入の目標濃度である50%濃度に満たず一斉投入となった

4-1-1 二酸化炭素投入方法の違いによる 濃度保持時間の検証

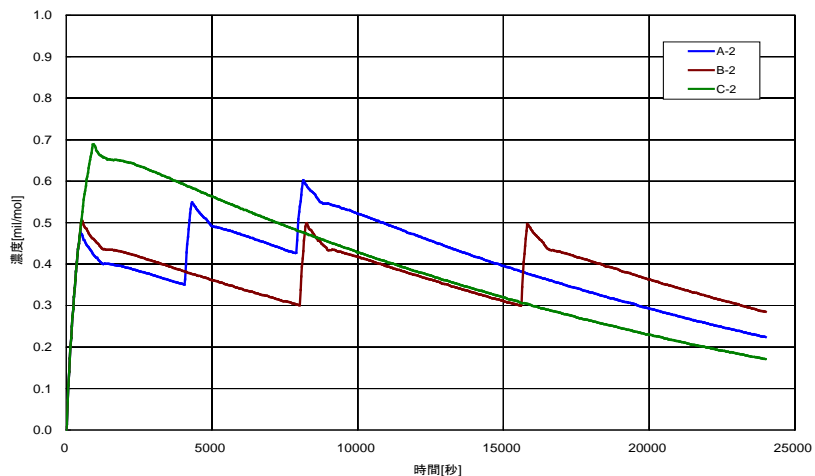
<CaseA-1、B-1、C-1 HOLD内上部の二酸化炭素濃度経時変化>



<CaseA-3、C-3 HOLD内下部の二酸化炭素経時変化>



<CaseA-2、B-2、C-2 HOLD内中部の二酸化炭素濃度経時変化>



4-1-2 火災コンテナからの発熱量違いによる 濃度保持時間の検証

- 火災コンテナからの放熱は二酸化炭素投入後も変わらず一定としてシミュレーションを行ってきた
- くすぶり火災ではコンテナ表面からの放熱が比較的小さいこと、及び火災発生後二酸化炭素を初期投入した際、消火もしくは二酸化炭素の冷却効果から放熱は弱まることが予想される
- 発熱速度は、時刻 $t=0$ (s)から二酸化炭素を一斉投入し、投入が停止するまで1800kW、停止後は1/10の180kW及び0kWとして解析を行った

4-1-2 火災コンテナからの発熱量違いによる 濃度保持時間の検証

解析ケースと結果

- 以下の9ケースにおいて、二酸化炭素濃度保持時間を検証
- 発熱速度が1/10になっても顕著な差は見られないが、濃度保持時間は少し伸びた。これは0kWの結果からも明らかのように放熱によるHOLD内自然対流の影響が弱まったためと考えられる。

Case名	コンテナ量	投入方法	火災コンテナの発熱速度 (kW)	保持時間 (s)
CaseC-1	満載	一斉投入	1800	11500
CaseE-1	満載	一斉投入	1800→180	11900
CaseF-1	満載	一斉投入	1800→0	※
CaseC-2	半載	一斉投入	1800	16000
CaseE-2	半載	一斉投入	1800→180	16400
CaseF-2	半載	一斉投入	1800→0	※
CaseC-3	無し	一斉投入	1800	17600
CaseE-3	無し	一斉投入	1800→180	17800
CaseF-3	無し	一斉投入	1800→0	※

※ 20000秒経過してもHOLD内二酸化炭素濃度が30%以下にならない

4-1-3 火災コンテナの位置の違いによる 濃度保持時間の検証

- 火災コンテナの位置を最下部中央として解析を行ってきたが、火災コンテナの位置による二酸化炭素濃度保持影響を確認するために、最上部（G-1）と中央部（G-2）に火災コンテナが存在するケースについて解析を行った
- HOLD内の二酸化炭素濃度の挙動をみることを目的としているため、コンテナ積載量は満載状態で投入方法は一斉投入としている

4-1-3 火災コンテナの位置の違いによる 濃度保持時間の検証

解析ケースと結果

- 以下ケースで解析を実施し、火災コンテナの位置による二酸化炭素濃度保持時間の検証を実施
- 火災コンテナの位置が最上部に位置する場合は濃度保持時間が最も小さく、HOLD内最上部に火災コンテナが存在するケースでは最も消火が困難と言える
- HOLD内の二酸化炭素濃度分布の経時変化をみると、火災コンテナより下の領域では二酸化炭素が滞留しやすい。一方で火災コンテナより上部の領域では濃度が減少しやすい傾向が確認された。これは火災コンテナからの放熱による自然対流が火災コンテナより上部において発生する傾向が強いためと考えられる。

Case名	コンテナ量	投入方法	火災コンテナの位置	保持時間 (s)
CaseG-1	満載	一斉投入	最上部	10320
CaseG-2	満載	一斉投入	中部	10900
CaseC-1	満載	一斉投入	最下部	11500

4-2-1 投入方法による濃度保持時間の違いに関して

- 消火濃度30%以上を保持できる時間は以下順番で長くなることが確認できた
一斉投入 < 段階投入 < 適宜投入
- 次スライドに各ケースにおける二酸化炭素投入時と停止時の濃度変化率を纏めた。二酸化炭素投入停止時の濃度減少率はコンテナ積載量が同じであれば、投入方法によらず略同等の結果である。よって、濃度保持時間に差が出るのは二酸化炭素停止時ではなく投入時と考えられる。

4-2 考察

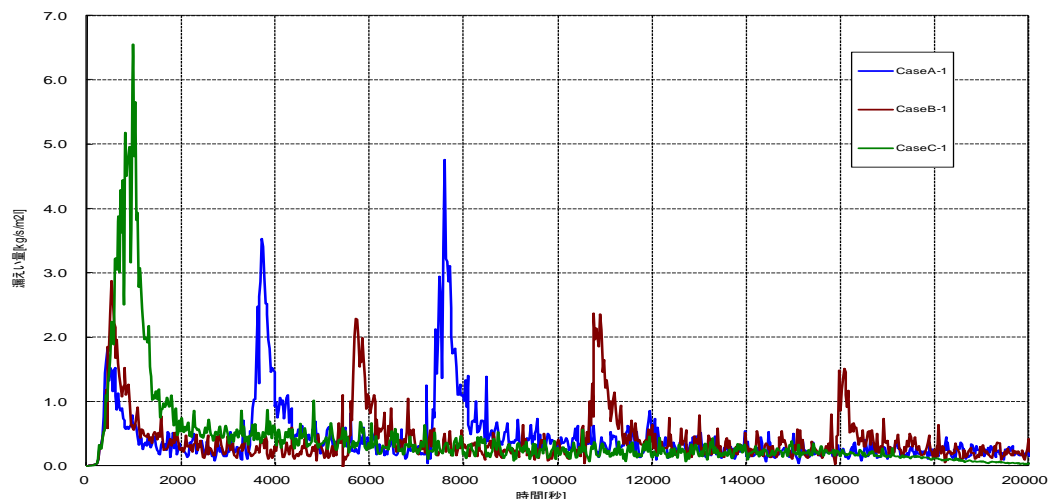
<CO2濃度変化率(増加が正)>

Case名	コンテナ量	CO2濃度変化率[vol%/min]									
		1回目 放出時	停止時	2回目 放出時	停止時	3回目 放出時	停止時	4回目 放出	停止時	放出時 平均	停止時 平均
CaseA-1	満載	6	-0.27	4.57	-0.28	4.22	-0.27			4.93	-0.27
CaseB-1	満載	6.9	-0.26	4.52	-0.27	4.32	-0.27	3.56	-0.26	5.25	-0.26
CaseC-1	満載	4.99	-0.28							4.99	-0.28
										5.05	-0.27
CaseA-2	半載	6.12	-0.21	4.51	-0.21	3.99	-0.16			4.87	-0.19
CaseB-2	半載	5.95	-0.16	4.92	-0.16	5.47	-0.16			5.44	-0.16
CaseC-2	半載	4.42	-0.16							4.42	-0.16
										4.91	-0.17
CaseA-3	無し	3.43	-0.08	3.1	-0.1	2.77	-0.07			3.1	-0.08
CaseC-3	無し	3.1	-0.07							3.1	-0.07
										3.7	-0.11

4-2 考察

- 積載量満載のケースA-1、B-1、C-1にてハッチカバーの開口部からの漏えい速度の経時変化を示した下図から明らかのように投入時の漏えいが顕著
- 目標濃度を大幅に超える二酸化炭素の投入は、開口部からの漏えい量を多くし、保持時間を短縮させてしまう

<積載量満載ケースにおける開口部からのCO2漏えい速度経時変化>



<開口部からのCO2漏えい量>

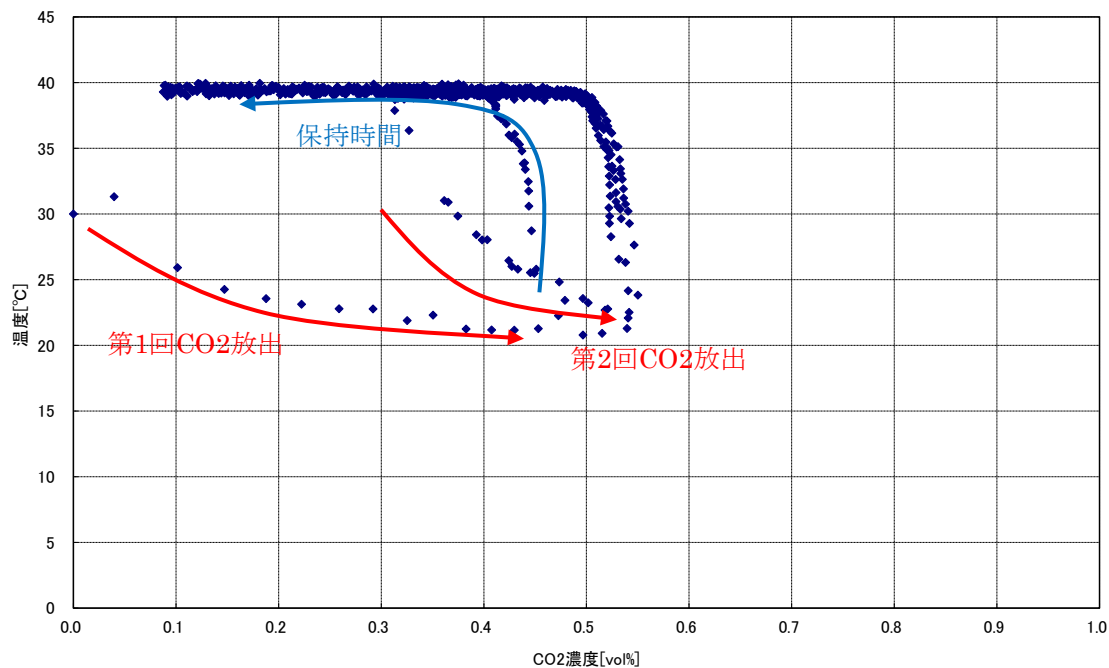
ケース	コンテナ量	投入方法	CO2漏えい量[kg]
CaseA-1	満載	段階放出	約15700
CaseB-1	満載	適宜放出	約12900
CaseC-1	満載	一斉放出	約16500

4-2-2 二酸化炭素濃度と温度の関係について

- 本船の仕様では火災発生時にHOLD内の二酸化炭素濃度の情報や消火に至ったかどうかを判断する直接的な手段がない。弊社船長にヒアリングしたところ火災発生時はHOLDの壁面の温度を測ることで温度情報を得ることは可能との事だった。
- HOLD内の二酸化炭素濃度と共に温度の経時変化についても確認し、それらの関連性について検証した。HOLD内の温度は投入時には二酸化炭素の冷却効果から20°Cまで減少するが、投入が停止すると放熱の影響により40°Cまで回復し、その後はコンテナからの放熱と開口部での吸熱のバランスが取れ一定となる。HOLD内の二酸化炭素濃度と温度には関係性が見られなかった。
- 火災発生時にHOLDの壁面から計測される温度にて、HOLD内の二酸化炭素濃度を推定することは困難だが、温度の減少が確認できれば消火に至ったと判断することができると考えられる。

4-2 考察

＜火災コンテナ周辺におけるCO2濃度と温度の関係＞



5. まとめ

- 現状の一斉投入方式の二酸化炭素消火システムは火災コンテナ周辺において消火濃度に達するが、くすぶり火災時には即時消火は困難でHOLD内に自然対流が発生し、投入後2時間程度で消火濃度30%以下に減少する可能性がある。そこで本船に搭載されている限りある二酸化炭素を有効に利用し、コンテナ積載量に応じて段階的に投入する方法の検証によって、コンテナ満載時の適宜投入では一斉投入に比べて1.6倍程度長い時間の濃度保持が可能であることが確認できた。

さらに、本研究は最もHOLD容積が大きいNo.6 HOLDを対象としており、このNo.6 HOLDの容積を元に本船の二酸化炭素搭載量が設計されている。よって、他のHOLDで火災が生じた場合は、HOLD容積に対して余裕のある二酸化炭素が搭載されていることになり、その余剰分を追加で投入し続けることでさらに濃度保持時間を長くすることが可能。

5. まとめ

- 火災コンテナの位置がHOLD内上部に存在するケースにおいても段階的に二酸化炭素を投入するシステムは濃度保持時間の観点から有効であると考えられるが、HOLD内最下部での火災よりも投入間隔を短くする必要があり、またトータルの二酸化炭素濃度保持時間も短くなるといった認識は必要。実際に運用する上では、火災発生時に火災コンテナの位置を正確に把握することは困難だが、二酸化炭素初回投入後にHOLDの壁面温度を計測するなど可能な限りHOLD内の火災状況をモニタリングしながら段階的に二酸化炭素を投入して消火に当たることが肝要。
- 本研究成果を実際のコンテナ船に反映させる際は、現状の一斉投入システムを残しつつ、適宜投入の検証結果からHOLD毎にコンテナ積載量に応じた投入量を二酸化炭素ボトル本数で指定しマニュアルで投入できるようにしておくことが現実的。基本的には現状の二酸化炭素消火装置の運用方法を改善するのみであるので特段大きな仕様の変更を必要とはしない。
- 今後、本研究成果を運用するにあたって、段階的に二酸化炭素を投入する方が濃度保持時間の観点から消火には有効だという認識を本船乗組員に周知する必要がある。

完



Mitsui O.S.K. Lines