

# コンテナ船HOLD火災 対策検討業務

株式会社 FPEC

# 目次

1. 背景と目的
2. 実施概要
3. 現状の二酸化炭素消火システムの検証
4. 二酸化炭素段階投入システムの検証
5. 考察

# 1. 背景と目的

- 本検討作業では、二酸化炭素消火設備での消火の様子をシミュレーションを利用して再現する。
- NFPA12 “carbon dioxide extinguishing systems” よるとコンテナHOLD内容量に対して二酸化炭素注入量は1 lb/30ft<sup>3</sup> (→約30%二酸化炭素濃度相当) とすべしとあり、さらに出来るだけコンテナHOLD内における二酸化炭素濃度を適切な水準に長時間維持する事としている。
- 本業務の目的はコンテナ積載量に応じて、二酸化炭素の初期放出量、その後間欠的に放出する二酸化炭素の量、及び回数など適切な二酸化炭素放出をCFD (Computational Fluid Dynamics) を用いて評価し、検討することである。

## 2. 実施概要

2.1 実船調査

2.2 消火時再現シミュレーション

## 2.1 実船調査

- コンテナ船における消火設備の現況調査および消火シミュレーションに用いるデータの調査を兼ねて、実船調査を実施。
- 調査項目
  - 二酸化炭素ボンベ室内の設備内容の詳細調査
  - 二酸化炭素消火設備コントロールシステム、避難路、起動装置、火災検知システム、などの調査
  - 二酸化炭素のリーク源の位置、大きさなどの調査
  - 二酸化炭素のディストリビューション配管及び放出ノズルの位置、サイズ等の調査
  - コンテナ積載の実態確認（コンテナ間の間隙寸法、コンテナ自体の間隙など）
  - その他の消火設備や電源のバックアップシステムなど。

## 2.2 消火時再現シミュレーション

- 火災発生時のコンテナ船の消火活動を三次元CFD（数値流体シミュレーション）により再現し、カーゴHOLD内における温度分布、二酸化炭素および酸素の濃度分布を評価することにより、現状の消火装置の有効性を検証し、その結果を踏まえたより有効な消火設備の運用方法の検討を行った

## 2.2.1 シミュレーションプログラム

- 火災シミュレーションプログラムとして、米国商務省標準技術研究所(NIST)により開発・公開されている
  - FDS(Fire Dynamics Simulator)を用いる
  - 特徴
    - FDSはCFD計算コードとして高機能および高精度を有しており、様々な火災に対応できるように作られている
    - 乱流モデルにLES(ラージエディシミュレーション)モデルを採用
    - 燃焼モデルはMixture Fractionモデルを用いており、放射熱も考慮

## 2.2.2 解析対象および解析条件

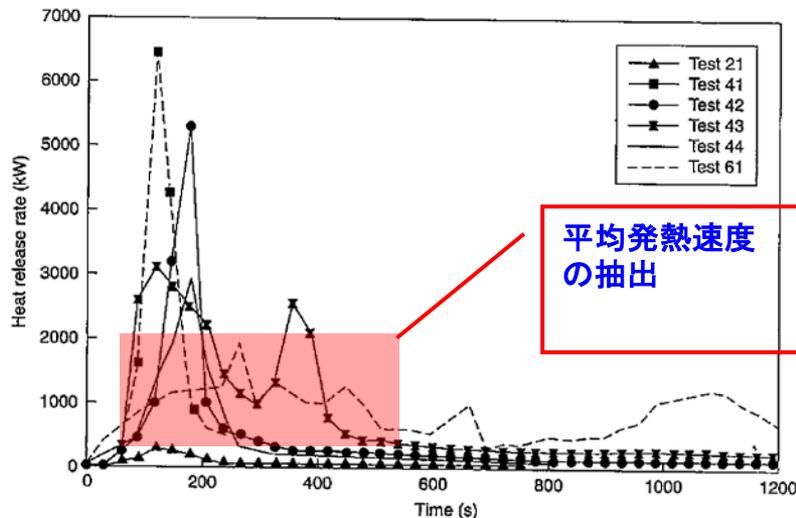
- 対象：6,350TEU型コンテナ船
- 火災箇所：カーゴHOLDNo.6内
- 火災発生源：特定のコンテナ（2台）から火災が発生したことを想定して、その表面から発熱。

## 2.2.3 解析モデル[二酸化炭素放出条件]

- 図面情報より二酸化炭素の放出箇所、放出速度を設定
  - ノズル数：8箇所
  - 二酸化炭素放出速度：168.59[kg/min]
  - 二酸化炭素総放出量：20130.4[kg]
  - 最大放出時間：15分
  - 放出温度：-50[°C]※  
※末端圧力、エンタルピーおよび雰囲気温度条件より概算

## 2.2.4 解析モデル[火災条件]

- コンテナ表面から発熱している条件でモデル化
- 発熱量は文献\*から典型的なケースを抽出
  - ※The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering'
- 主な発熱時間と発熱量から平均発熱速度を抽出



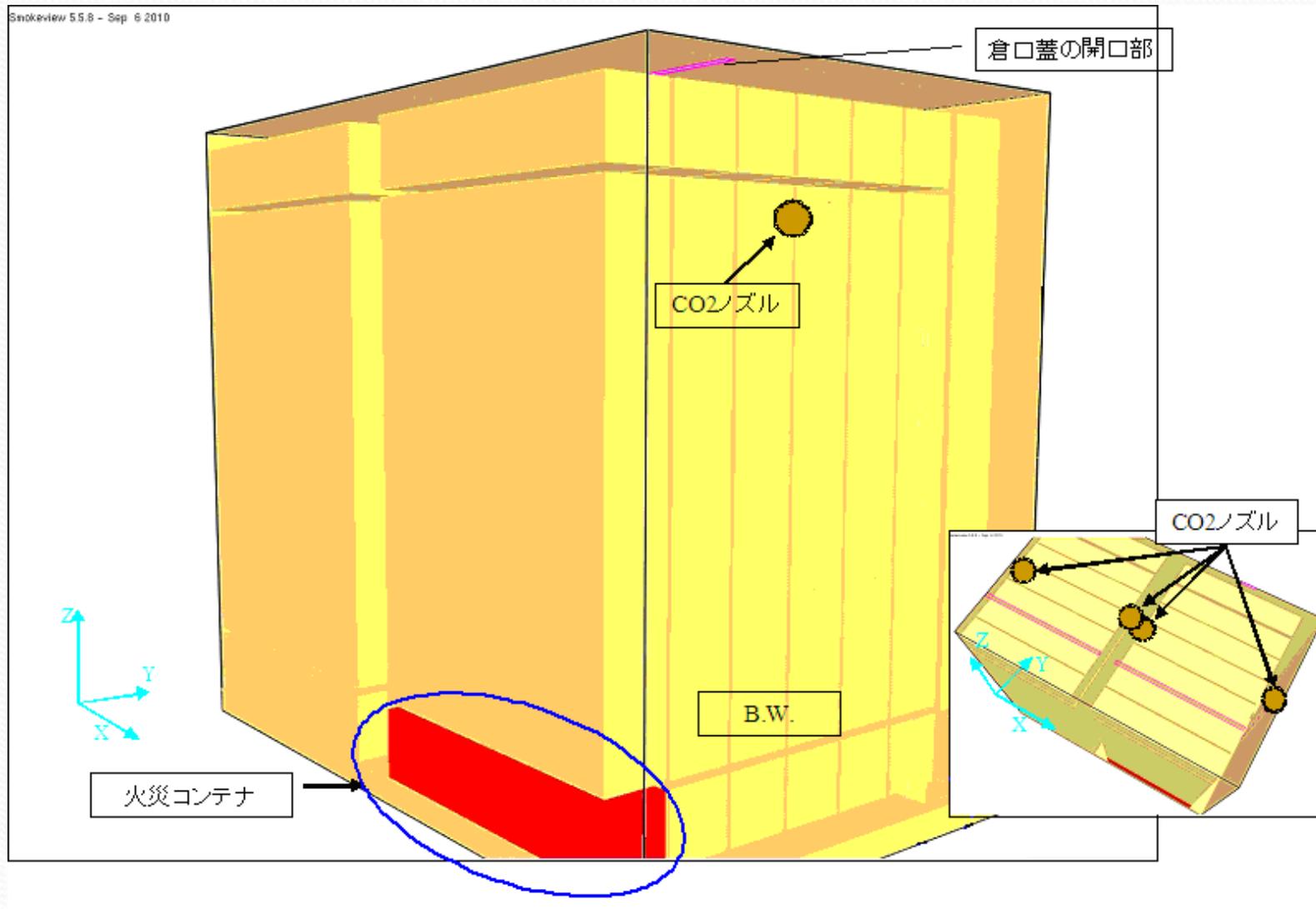
単位面積当たりの

発熱速度=13[kW/m<sup>2</sup>]

コンテナ1台の

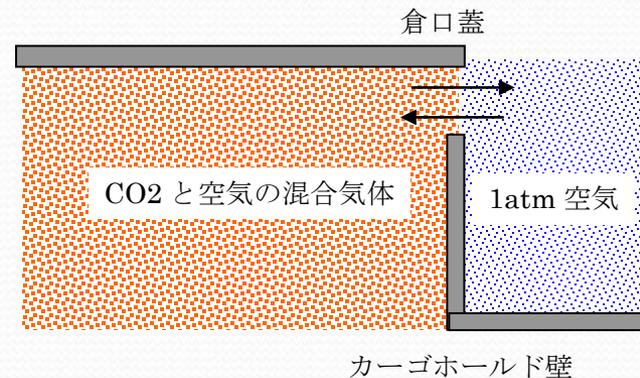
発熱速度=約1800[kW]

# 2.2.5 解析モデル[3次元形状モデル]



## 2.2.6 解析モデル[倉口蓋の間隙]

- 倉口蓋の間隙
  - 形状のモデル化
    - 開口面積を合わせラビリンス構造はモデル化、外部は100% 空気



- 他の開口部は閉ざされているものとする

## 3. 現状の二酸化炭素消火システムの検証

### 3. 1 二酸化炭素放出時解析

3. 1. 1 解析ケース

3. 1. 2 解析結果

### 3. 2 二酸化炭素放出終了後解析

3. 2. 1 解析ケース

3. 2. 2 解析結果

### 3. 3 コンテナ間の隙間詳細解析

3. 3. 1 解析ケース

3. 3. 2 解析結果

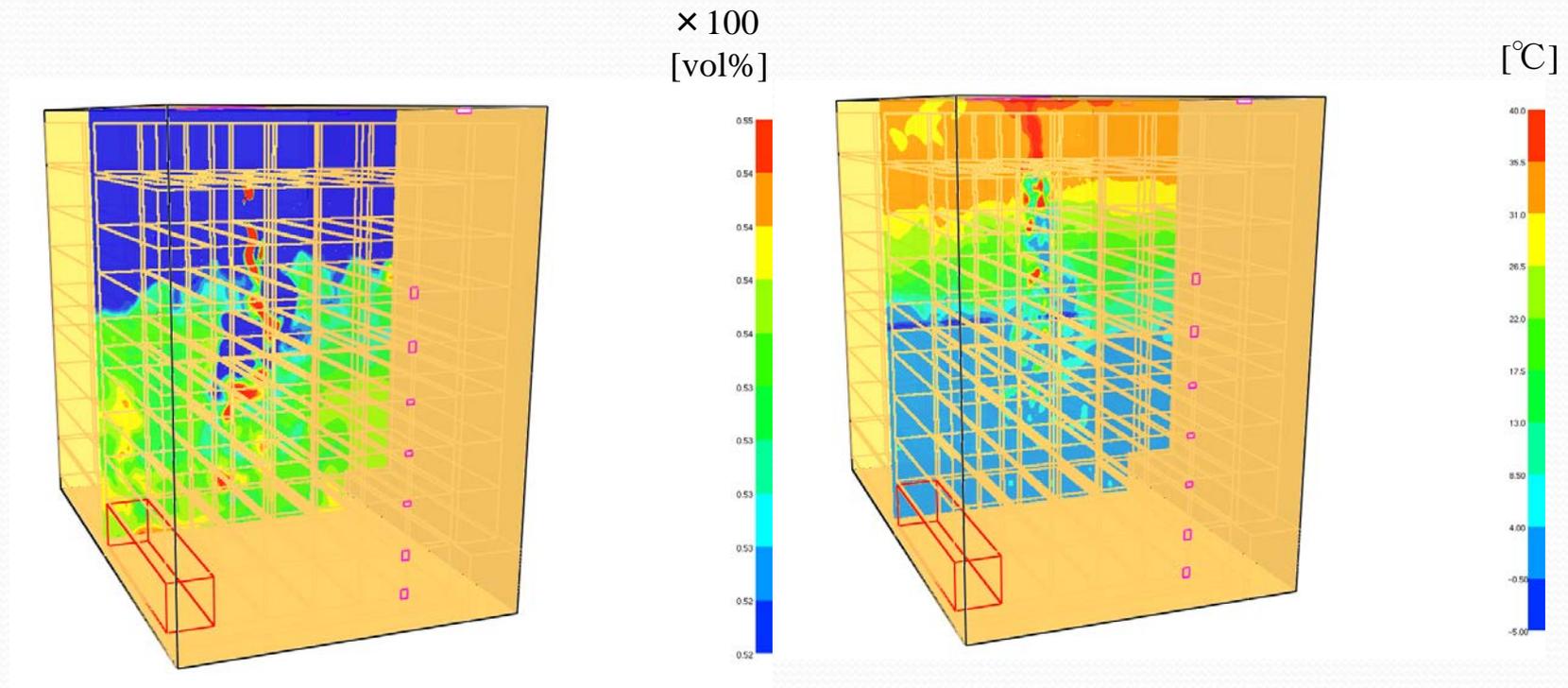
## 3.1 二酸化炭素放出時解析 ～解析ケース

- 二酸化炭素放出時の濃度変化を計算

ケース名	コンテナ数	火災コンテナ
case1	満載	最下部中央
case2	半数	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 二酸化炭素放出時解析 ～解析結果

- 解析結果例[ Case1 (420秒後)]



二酸化炭素濃度分布図

温度分布図

## 3.1 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はばらつきがあるが、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。

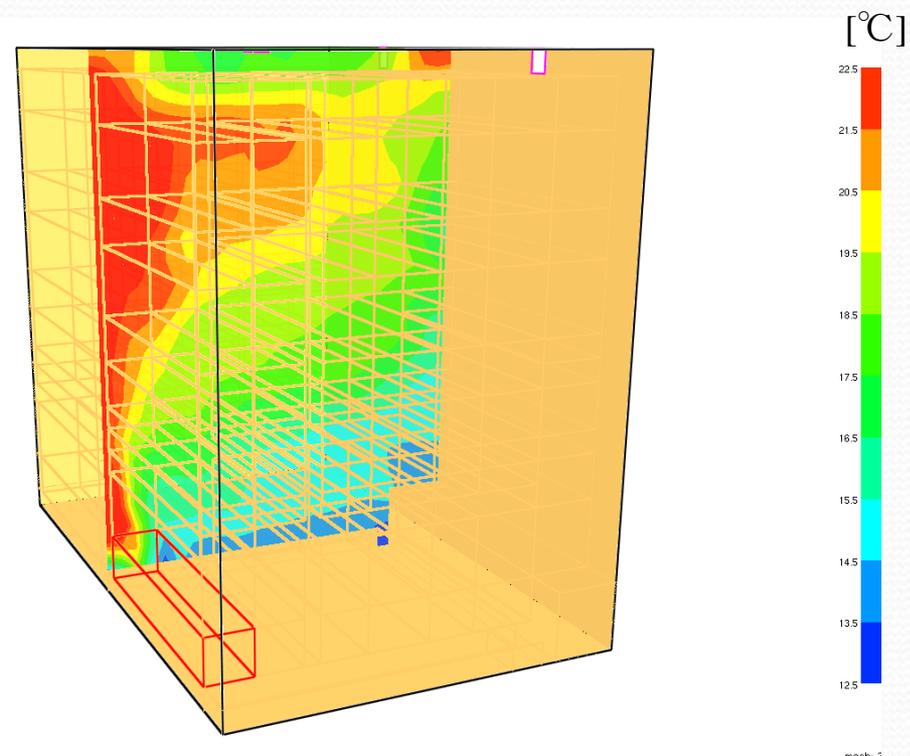
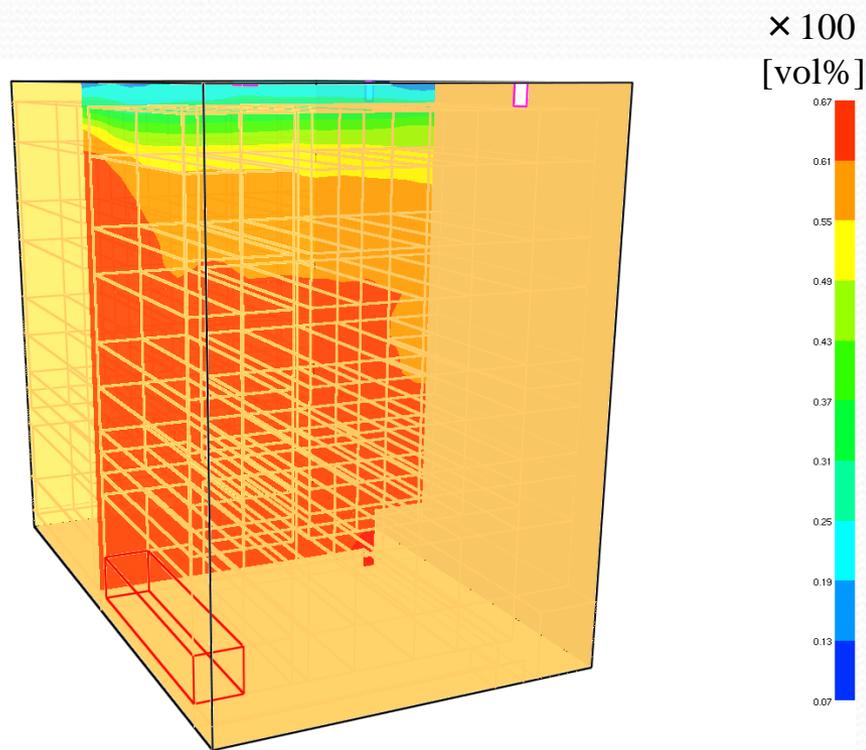
## 3.2 二酸化炭素放出終了後解析 ～解析ケース

- 二酸化炭素放出終了後の濃度経過を計算
  - コンテナ：満載
  - 二酸化炭素濃度：100[vol%]から開始
  - コンテナ内温度：12.5℃から開始
  - 発熱源（放出時の1/10）

ケース名	コンテナ数	火災コンテナ	ダンパ
case7-1	満載	最下部中央	閉
case7-2	満載	なし	閉

## 3.2 二酸化炭素放出終了後解析 ～解析結果

### 解析結果例 [ Case7-1 (3600秒後) ]



## 3.2 二酸化炭素放出終了後解析 ～解析結果

- 二酸化炭素放出終了後、二酸化炭素が補充されない場合、消火に必要な既定濃度に保持されなくなる可能性が十分ある
- 濃度が減少する速度は、火災の鎮火状況およびハッチ外部の風速により濃度変化の早さは異なる
- 減少速度は開口部の面積に比例するので、消火マニュアルに記載されているように開口部隙間にぬれたボロ布を詰めることによる効果は十分期待できる

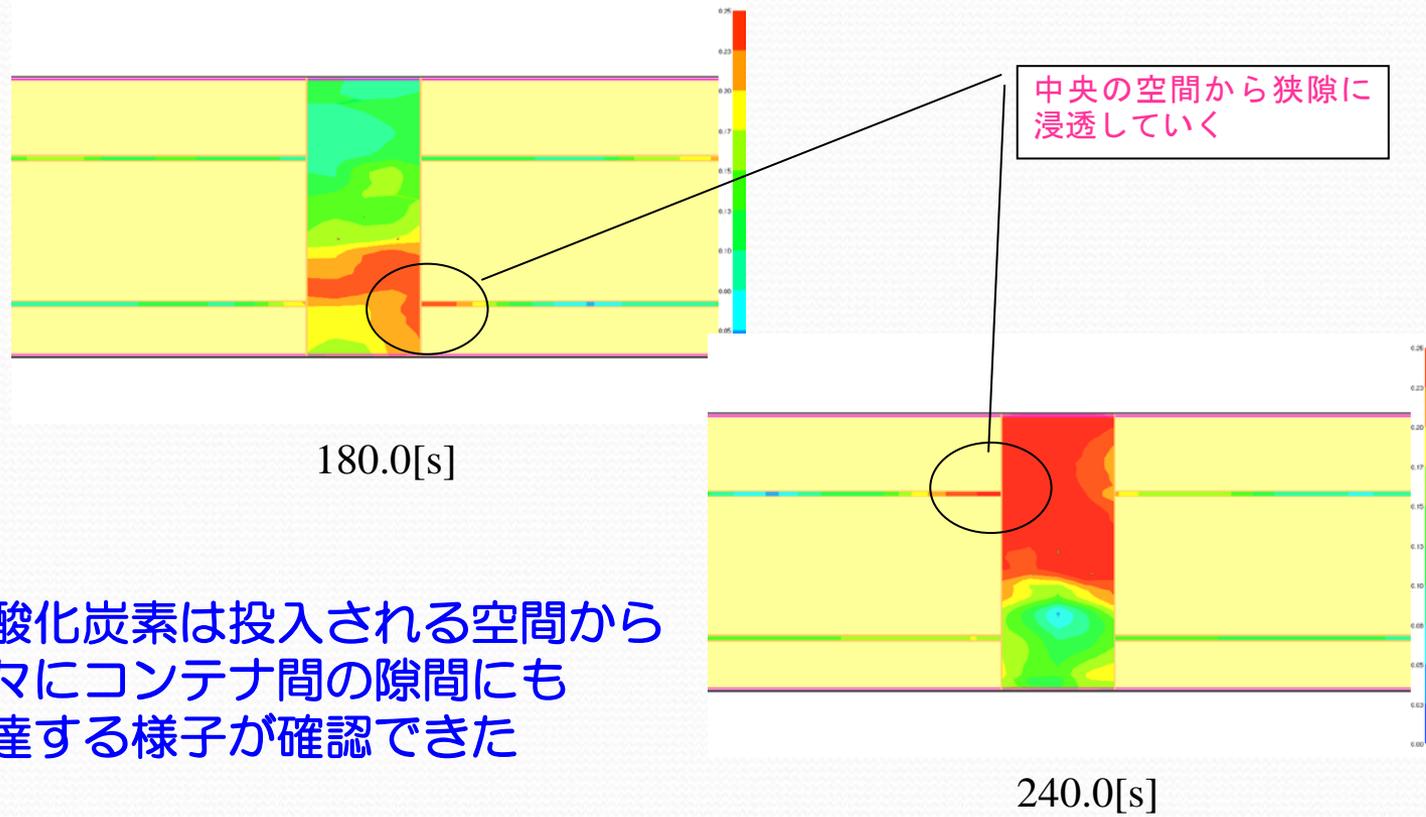
### 3.3 コンテナ間の隙間詳細解析 ～解析ケース

- コンテナ周辺をより詳細な計算格子で解析

ケース名	コンテナ数	火災コンテナ
case8	満載	なし

### 3.3 コンテナ間の隙間詳細解析 ～解析結果

#### コンテナ間の濃度分布



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が確認できた

## 4. 二酸化炭素段階投入システムの検証

### 4. 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. 1 解析ケース

4. 1. 2 解析結果

### 4. 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. 2. 1 解析ケース

4. 2. 2 解析結果

### 4. 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. 3. 1 解析ケース

4. 3. 2 解析結果

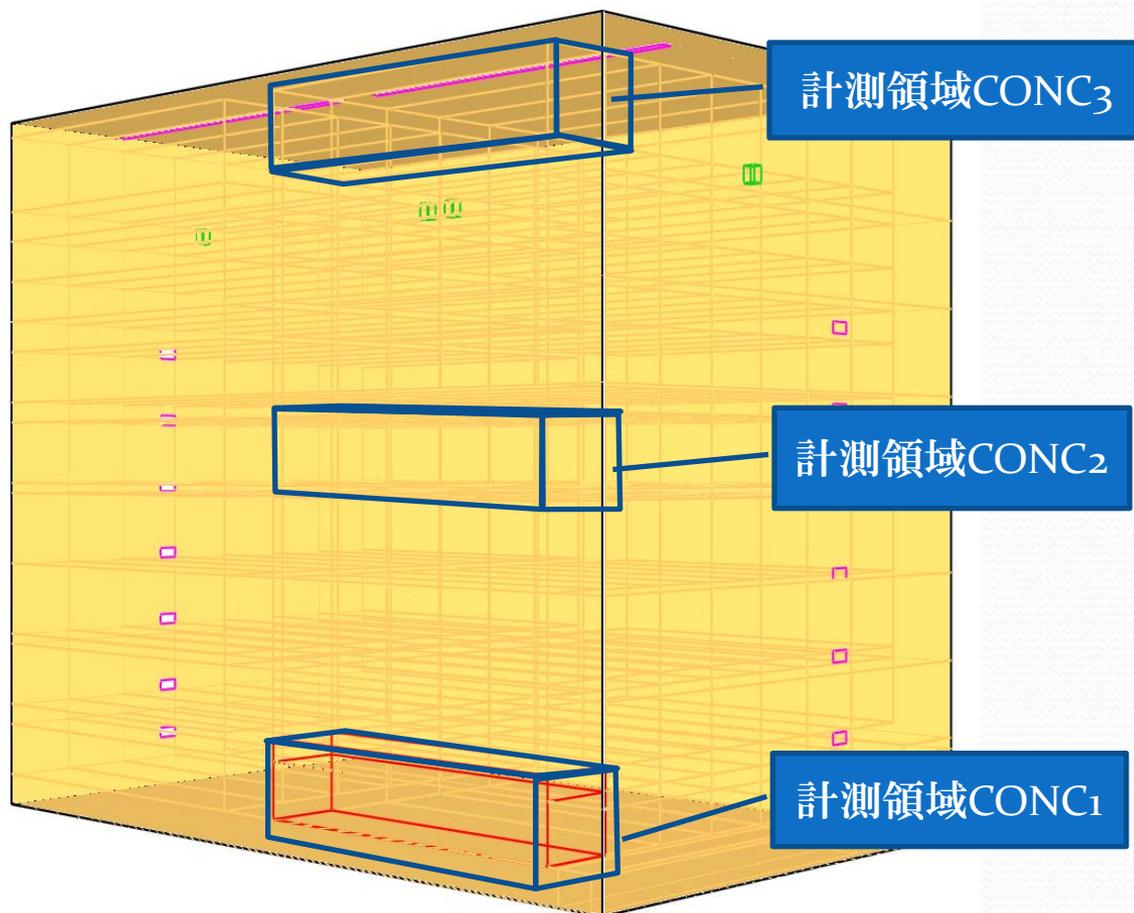
## 4.1 二酸化炭素投入方法の違いによる濃度保持時間の検証

二酸化炭素をHOLD 内へ投入直後から、投入方法によって二酸化炭素濃度の経時変化及び濃度保持時間の違いをコンテナ積載量に応じて検証

Case	コンテナ積載量	投入方法	CO2放出量
A-1	満載	段階投入	33%→33%→33%
A-2	半載	段階投入	50%→25%→25%
A-3	無し	段階投入	75%→12.5%→12.5%
B-1	満載	適宜投入	適宜放出※1
B-2	半載	適宜投入	適宜放出※1
B-3	無し	適宜投入	適宜放出※1
C-1	満載	一斉投入	100%
C-2	半載	一斉投入	100%
C-3	無し	一斉投入	100%

※1 初回到コンテナHOLD内のCO2濃度が50%になるまで放出（Deep-seated fireに対応した濃度）。その後火災コンテナ周囲のCO2濃度が30%まで減少したらCO2を50%に到達するまで放出する

## 4.1 二酸化炭素投入方法の違いによる濃度保持時間の検証



上部、中部、下部の3領域でCO<sub>2</sub>の時系列変化を計測

## 4.1 二酸化炭素投入方法の違いによる濃度保持時間の検証

- 評価方法

- 濃度計測点

- 火災コンテナ周辺の二酸化炭素濃度をモニタリングして評価

- 濃度保持時間

- 二酸化炭素投入開始から全量を放出後に HOLD 内濃度が30%を下回るまでの時間

## 4.1 二酸化炭素投入方法の違いによる濃度保持時間の検証

- 解析結果

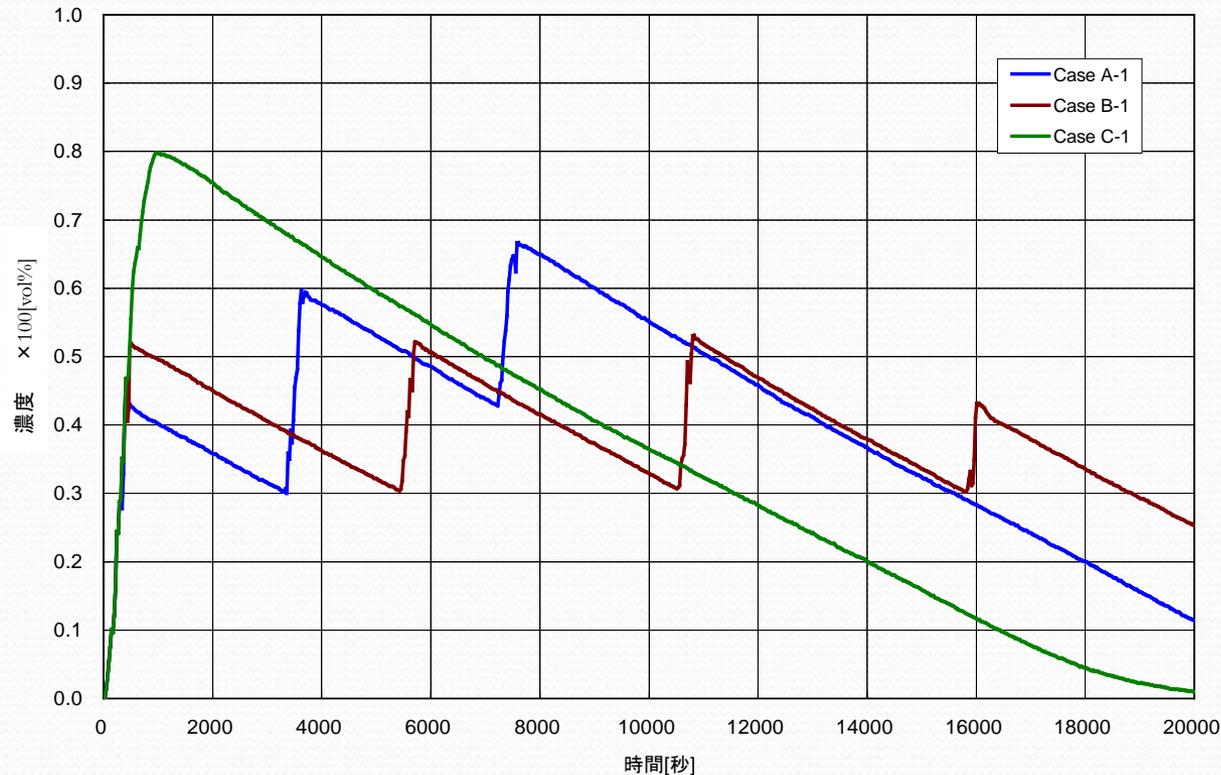
コンテナ積載量が満載と半載のケースにて、適宜投入が最も二酸化炭素濃度保持時間が長い

ケース	積載量 [%]	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								11500
CaseA-2	半載	段階投入	50.0	3600	25.0	3600	25.0			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								16000
CaseA-3	無し	段階投入	75.0	1800	12.5	1800	12.5			19400
CaseC-3※	無し	一斉投入	100.0							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 二酸化炭素投入方法の違いによる濃度保持時間の検証

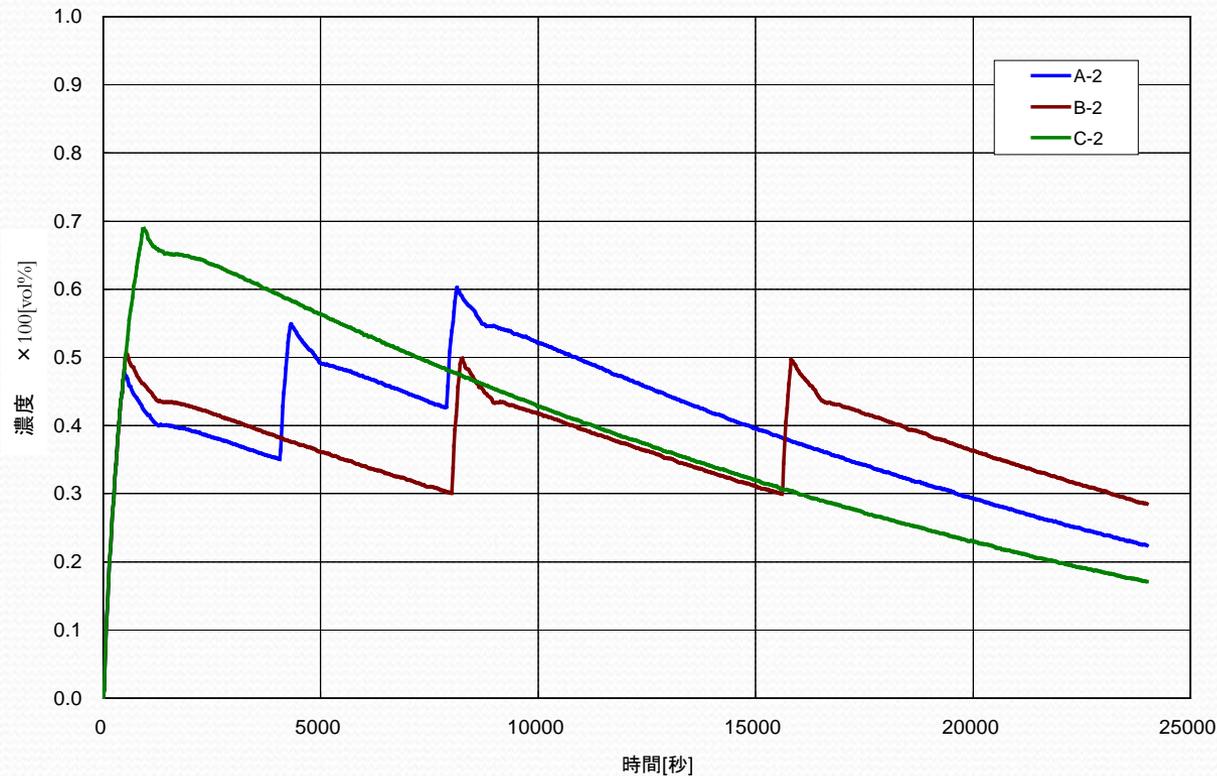
- 解析結果（満載）



ケース	積載量[%]	投入方法	保持時間[秒]
CaseA-1	100	段階投入	15600
CaseB-1	100	適宜投入	18900
CaseC-1	100	一斉投入	11500

## 4.1 二酸化炭素投入方法の違いによる濃度保持時間の検証

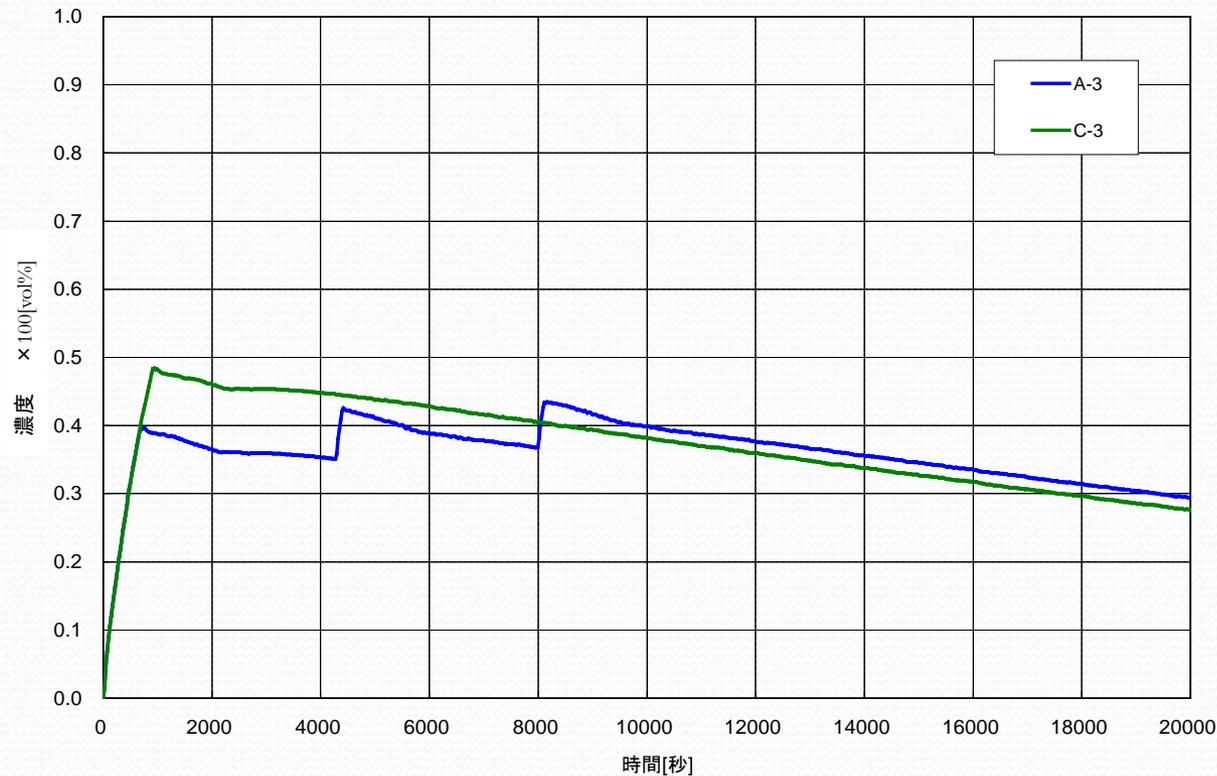
- 解析結果（半載）



ケース	積載量[%]	投入方法	保持時間[秒]
CaseA-2	50	段階投入	19600
CaseB-2	50	適宜投入	23200
CaseC-2	50	一斉投入	16000

## 4.1 二酸化炭素投入方法の違いによる濃度保持時間の検証

- 解析結果（無し）



ケース	積載量[%]	投入方法	保持時間[秒]
CaseA-3	0	段階投入	19400
CaseC-3	0	一斉投入	17600

## 4.2 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

- 二酸化炭素による消火もしくは冷却効果から発熱は弱まることを想定した
- 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発熱は1800 kW、停止後は1/10の180 kW 及び0 kW とした

## 4.2 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

ケース	積載量	火災コンテナ 発熱速度[kw]	投入方法
CaseE-1	満載	1800→180	一斉投入
CaseE-2	半載	1800→180	一斉投入
CaseE-3	無し	1800→180	一斉投入
CaseF-1	満載	1800→0	一斉投入
CaseF-2	半載	1800→0	一斉投入
CaseF-3	無し	1800→0	一斉投入

## 4.2 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

### ● 解析結果

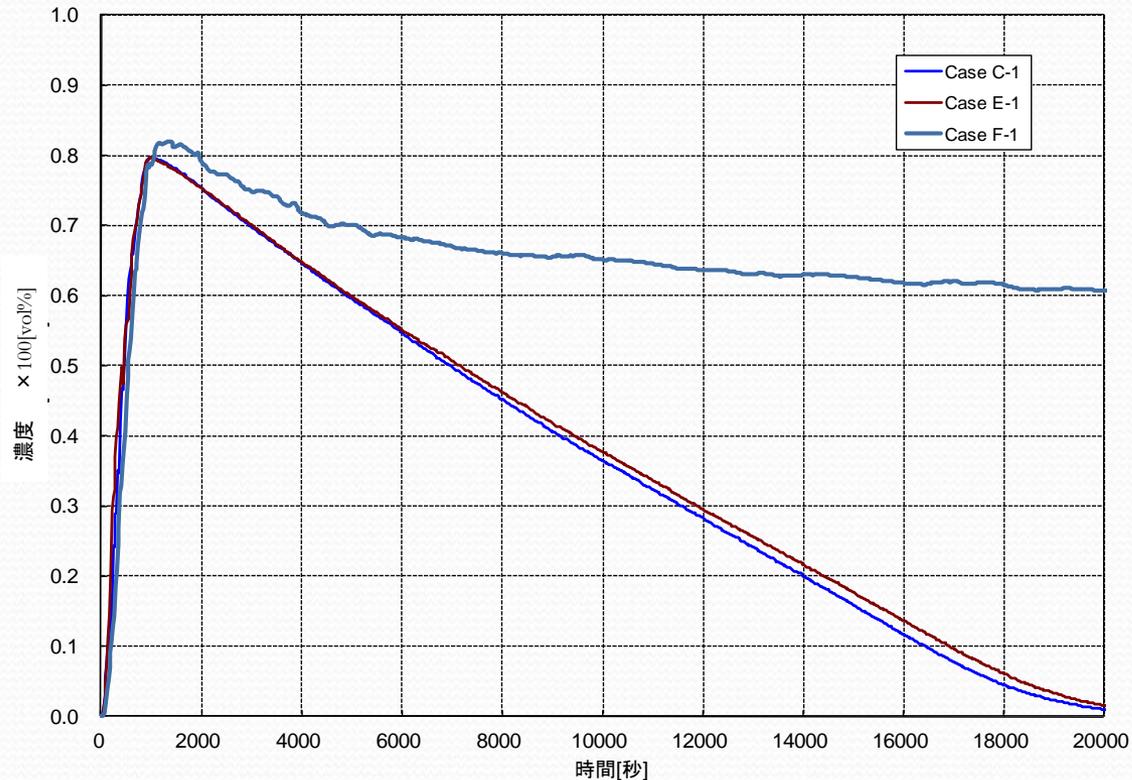
- 発熱速度が小さくなるほど、自然対流の効果が小さくなり、二酸化炭素が滞留しやすくなることで、保持時間が長くなった

ケース	積載量	火災コンテナ 発熱速度[kw]	保持時間[秒]
CaseC-1	満載	1800	11500
CaseE-1	満載	1800→180	11900
CaseF-1	満載	1800→0	※
CaseC-2	半載	1800	16000
CaseE-2	半載	1800→180	16400
CaseF-2	半載	1800→0	※
CaseC-3	無し	1800	17600
CaseE-3	無し	1800→180	17800
CaseF-3	無し	1800→0	※

- ※20000秒経過してもホール内CO<sub>2</sub>濃度が30[vol%]以下にならなかった

## 4.2 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

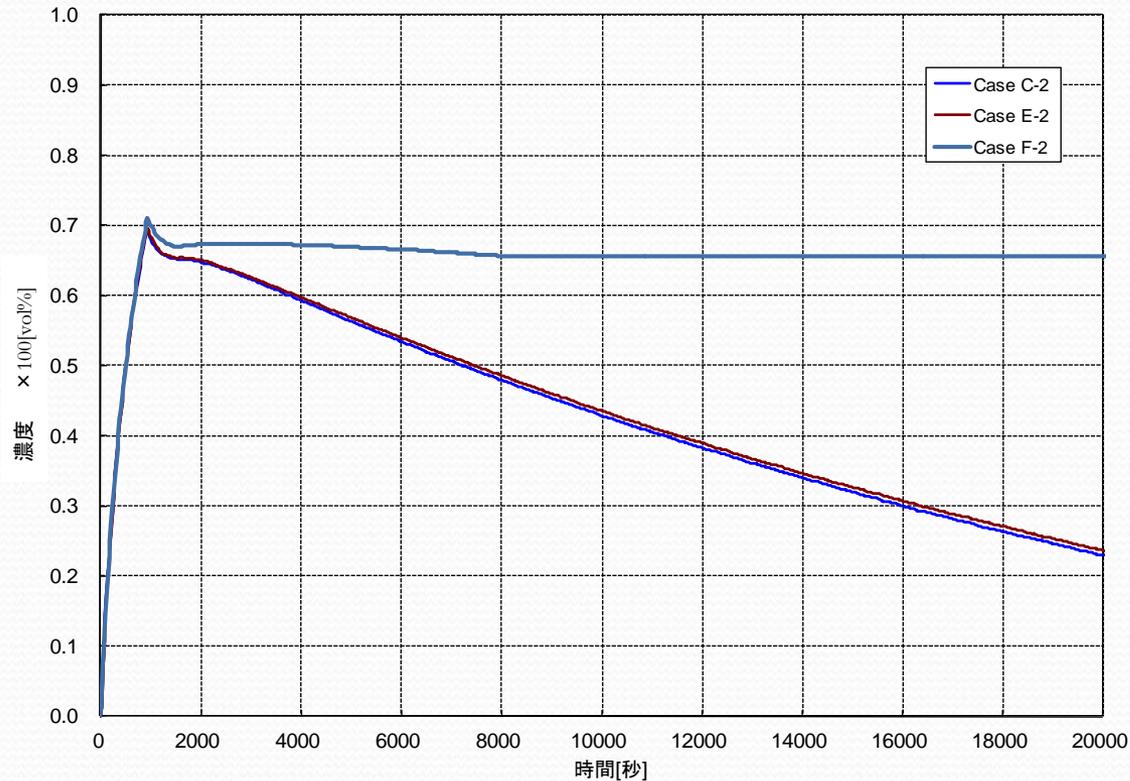
- 解析結果（満載）



ケース	積載量	火災コンテナ 発熱速度[kw]	保持時間[秒]
CaseC-1	満載	1800	11500
CaseE-1	満載	1800→180	11900
CaseF-1	満載	1800→0	※

## 4.2 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

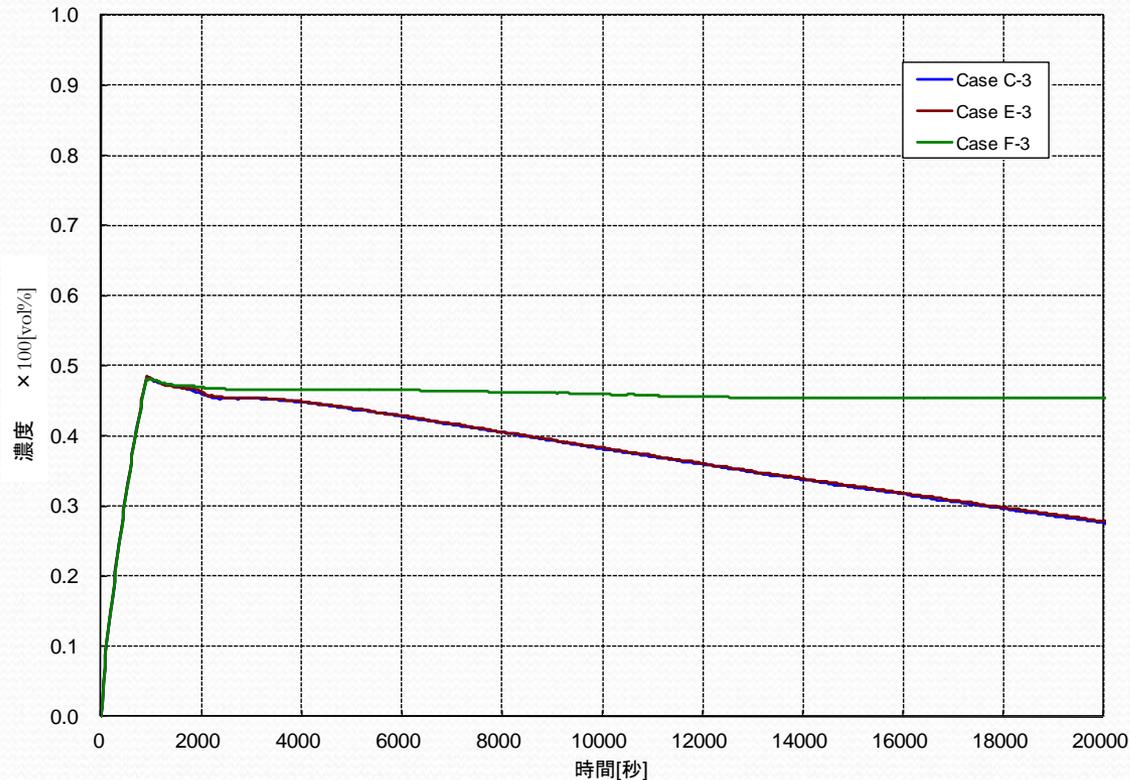
- 解析結果（半載）



ケース	積載量	火災コンテナ 発熱速度[kw]	保持時間[秒]
CaseC-2	半載	1800	16000
CaseE-2	半載	1800→180	16400
CaseF-2	半載	1800→0	※

## 4.2 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

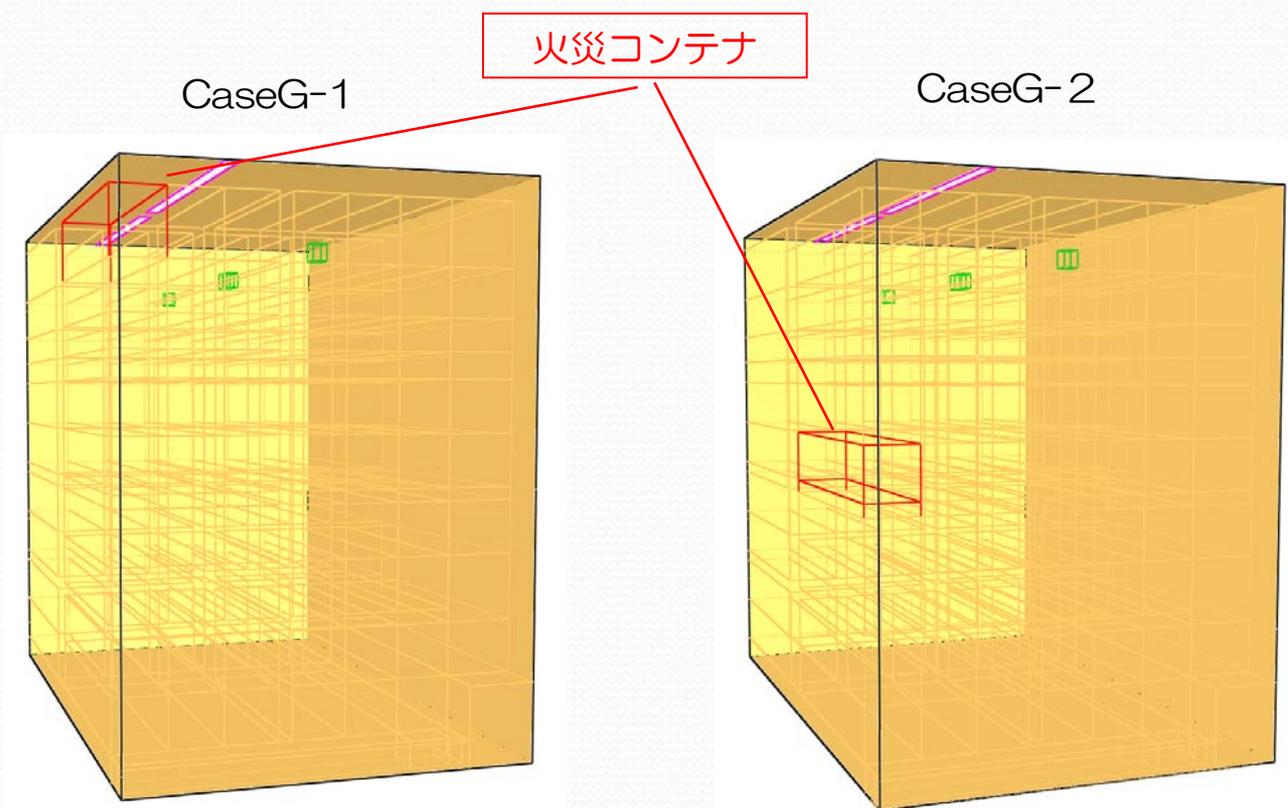
- 解析結果（無し）



ケース	積載量	火災コンテナ 発熱速度[kw]	保持時間[秒]
CaseC-3	無し	1800	17600
CaseE-3	無し	1800→180	17800
CaseF-3	無し	1800→0	※

## 4.3 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（CaseG-1）と中央部（CaseG-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



## 4.3 火災コンテナの位置の違いによる濃度保持時間の検証

### ● 解析結果

- 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
- 火災コンテナより上部の領域では、自然対流の発達により濃度が減少しやすい
- 火災コンテナ位置が高いほど保持時間が短くなる

ケース	積載量	投入方法	火災コンテナ位置	保持時間[秒]
CaseG-1	満載	一斉投入	最上部	10320
CaseG-2	満載	一斉投入	中央部	10900
CaseC-1	満載	一斉投入	最下部	11500

## 5. 考察

- 5.1 投入方法による濃度保持時間の違いに関して
- 5.2 二酸化炭素濃度と温度の関係について

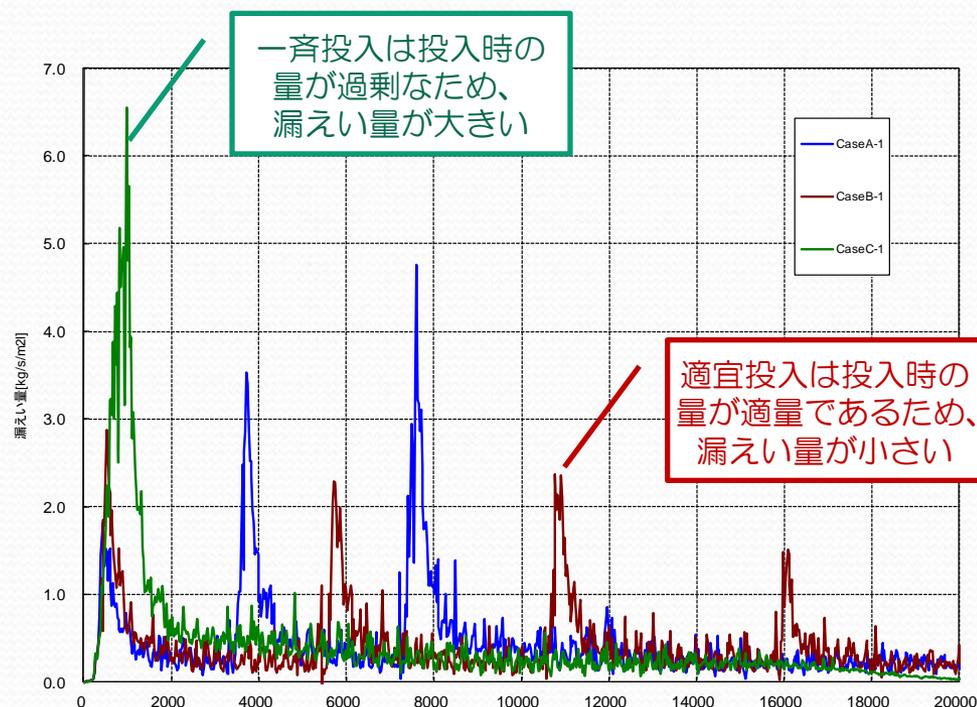
## 5.1 投入方法による濃度保持時間の違いに関して

- HOLD内の二酸化炭素濃度が30[vol%]以上保持できる時間  
一斉放出 < 段階放出 < 適宜放出
- HOLD内における二酸化炭素濃度変化率
  - 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

投入時の濃度上昇率が大→HOLD外への漏えい量が小→保持時間が長い

## 5.1 投入方法による濃度保持時間の違いに関して

- HOLDから外部への二酸化炭素漏えい量

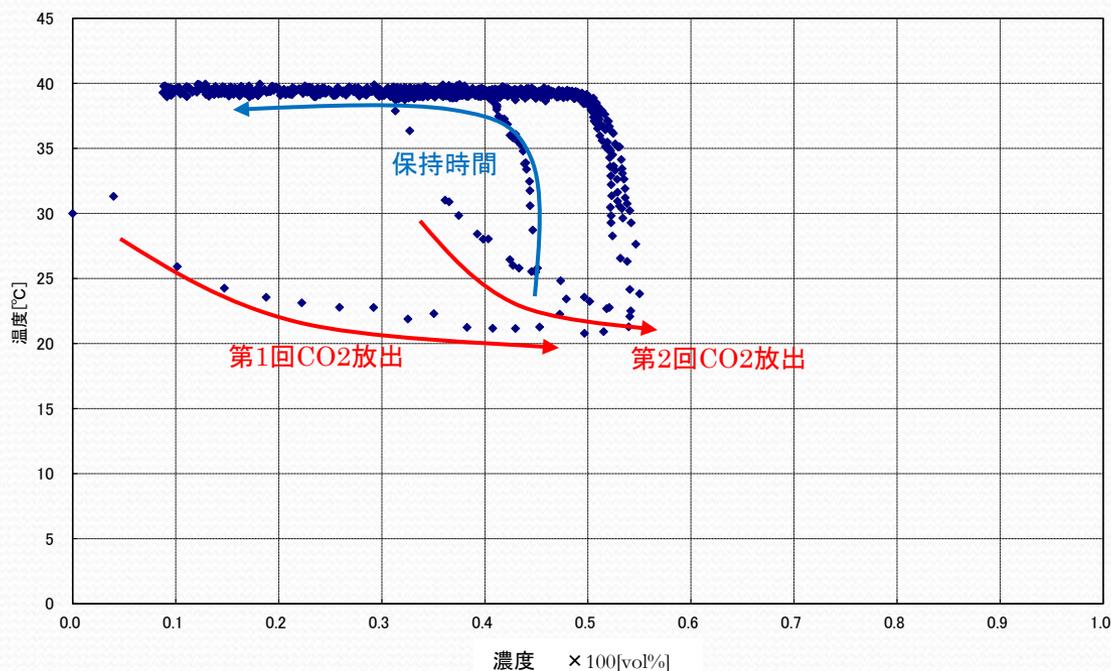


ケース	投入方法	CO2漏えい量 [kg]
CaseA-1	段階放出	約15700
CaseB-1	適宜放出	約12900
CaseC-1	一斉放出	約16500

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

## 5.2 二酸化炭素濃度と温度の関係について

- 投入方法による濃度保持時間の違いに関して
  - 二酸化炭素は投入後、濃度ではなく、対流、火災コンテナによる入熱、開口部の吸熱などの熱バランスで温度が決まる
  - 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



火災コンテナ周辺におけるCO<sub>2</sub>濃度と温度の関係

## 6. まとめ

## 6. まとめ

- 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
- 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は、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
- 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