

代替燃料使用に伴う漏えいガスの 換気解析評価

海洋リスク評価系
木村新太*, 工藤潤一, 柚井智洋,
岡秀行, 伊藤博子

■ 2020年 改正MARPOL条約発効 ⇒ 環境規制の強化

■ SOx、PM排出低減のため、以下の対応を実施する必要

①低硫黄燃料油の使用

②排気ガス洗浄装置

(スクラバー)の使用

③LNG(天然ガス燃料)等の
低引火点燃料の使用

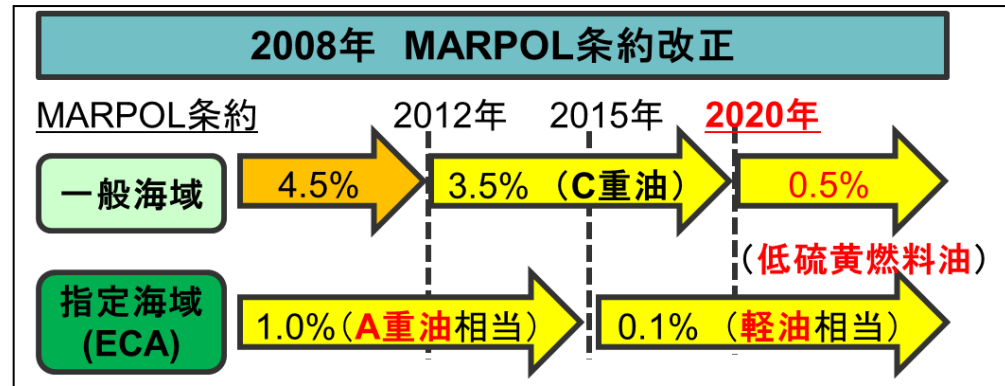
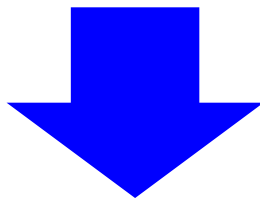


図 燃料油中硫黄分の規制の概要^[1]



✓ 他の方策と同様に燃料として利用するための技術的問題、設置に係る空間的問題のほかに、低引火点燃料は漏えいした場合の安全性が懸念される

[1] SOx規制の概要と3つの手段, <http://www.mlit.go.jp/common/001176509.pdf>

- ✓ IGFコードでは、以下の項目について人命・環境・船体への有害な影響を排除するため、以下のリスク評価を要求している

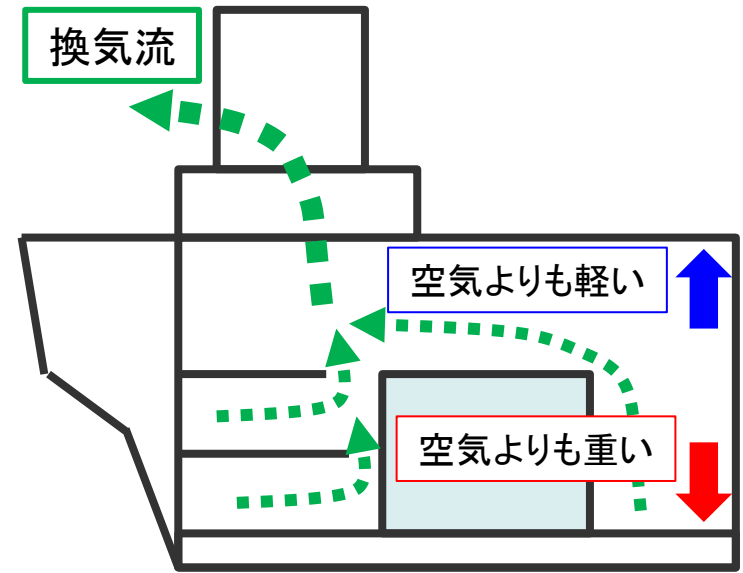
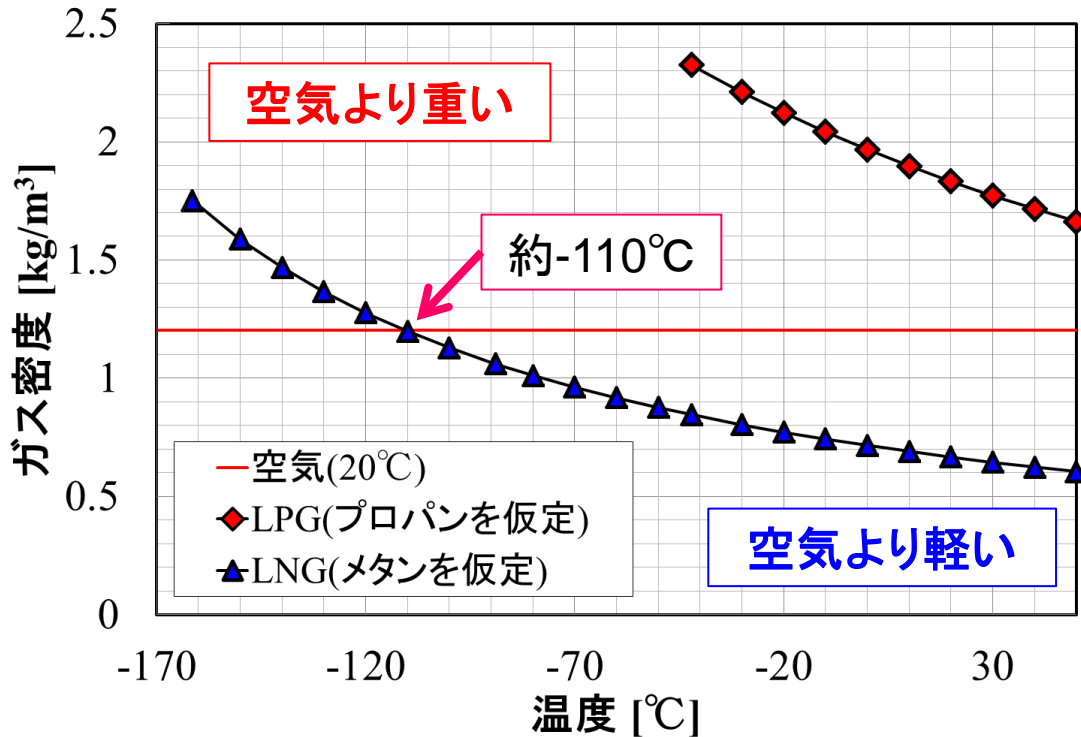
表 IGFコードにおけるリスク評価の実施を要求する項目^[2]

| 節・項 No. | 評価対象 | 評価内容 |
|----------------|---------------|---------------------|
| 5.10.5 | ドリフトレイ | 燃料最大流出量の推定 |
| 5.12.3 | エアロック | ガス流入時の重大事象の同定 |
| 6.4.1.1 | 液化ガス燃料格納設備 | 船全体の設計のハザードの同定 |
| 6.4.15.4.7.2 | メンブレンタンク | 事故シナリオの同定 |
| 8.3.1.1 & 13.7 | 燃料補給ステーション | 燃料流出量・通風容量の推定 |
| 13.4.1 | タンクコネクションスペース | 燃料漏えい時の最大圧力・通風容量の推定 |
| 15.8.1 | ガス検知 | ハザードの同定(検知器設置の検討) |

➤ 低引火点燃料使用に係る主なリスク ⇒ 燃料漏えいに伴う火災リスク

[2] International Maritime Organization, IGF Code: International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-Flashpoint Fuels

本評価の目的



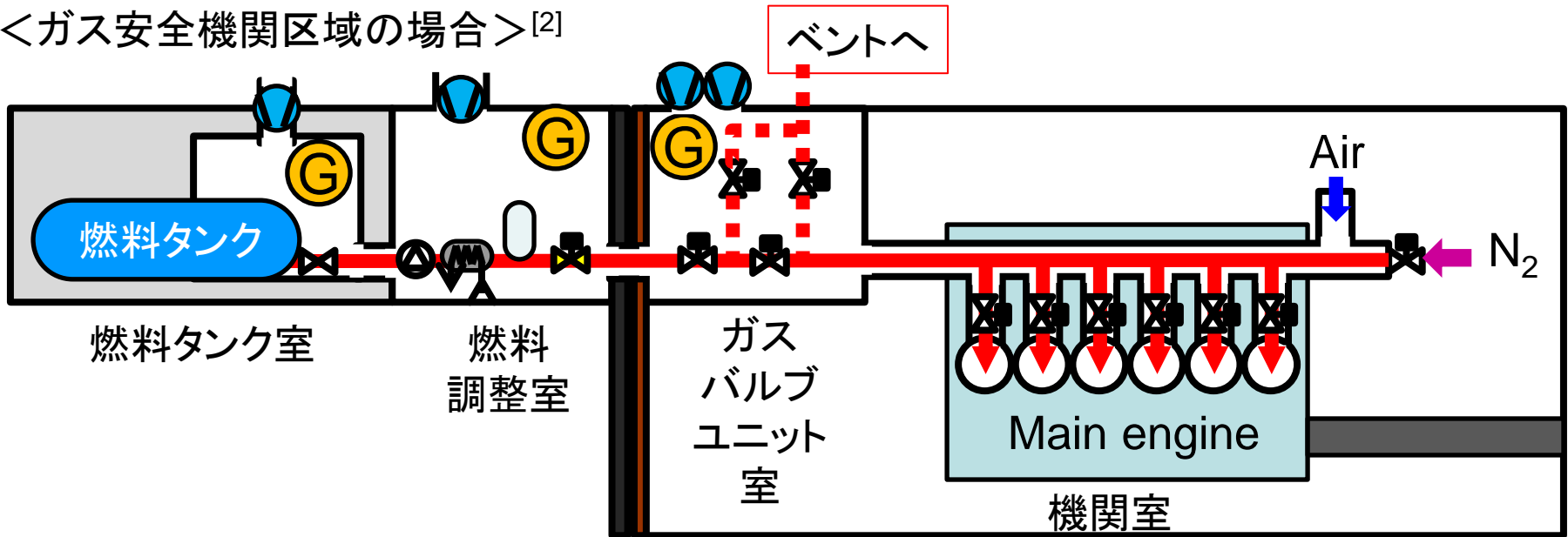
換気流と漏えいガスの流れのイメージ

- ✓ メタンは-110°C以上では周囲空気より軽く、上方へ向かう
- ✓ プロパンは周囲空気より常に重いため、底部へ滞留し、換気によって排出されない可能性

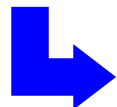
プロパン燃料の漏えいを対象として、LNG燃料の使用をベースとする現行のIGFコードに規定された換気風量で換気できるかを確認する

- ✓ 燃料タンクから機関室までの範囲において、燃料の漏えいが想定される

＜ガス安全機関区域の場合＞^[2]



- 機関室はその他の区画と比較して・・・
 - ✓ 各種機器・設備によって換気流が複雑になるため、ガス検知が難しい
 - ✓ 区画が大きく、着火した場合、広範囲に影響が及ぶ可能性



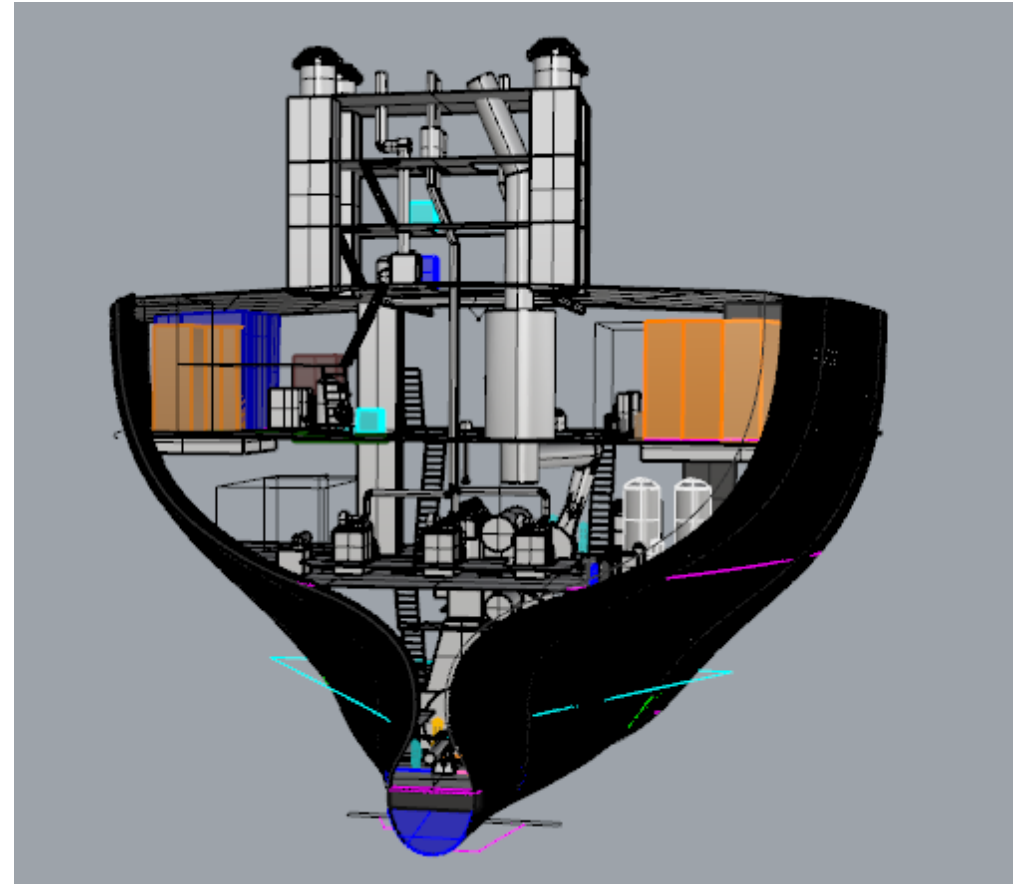
燃料漏えい・拡散・換気解析の対象として機関室を選定

[2] International Maritime Organization, IGF Code: International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-Flashpoint Fuels

- ✓ 従来の船型、機関室でLPG燃料を使用することを想定する

評価対象船舶の概要

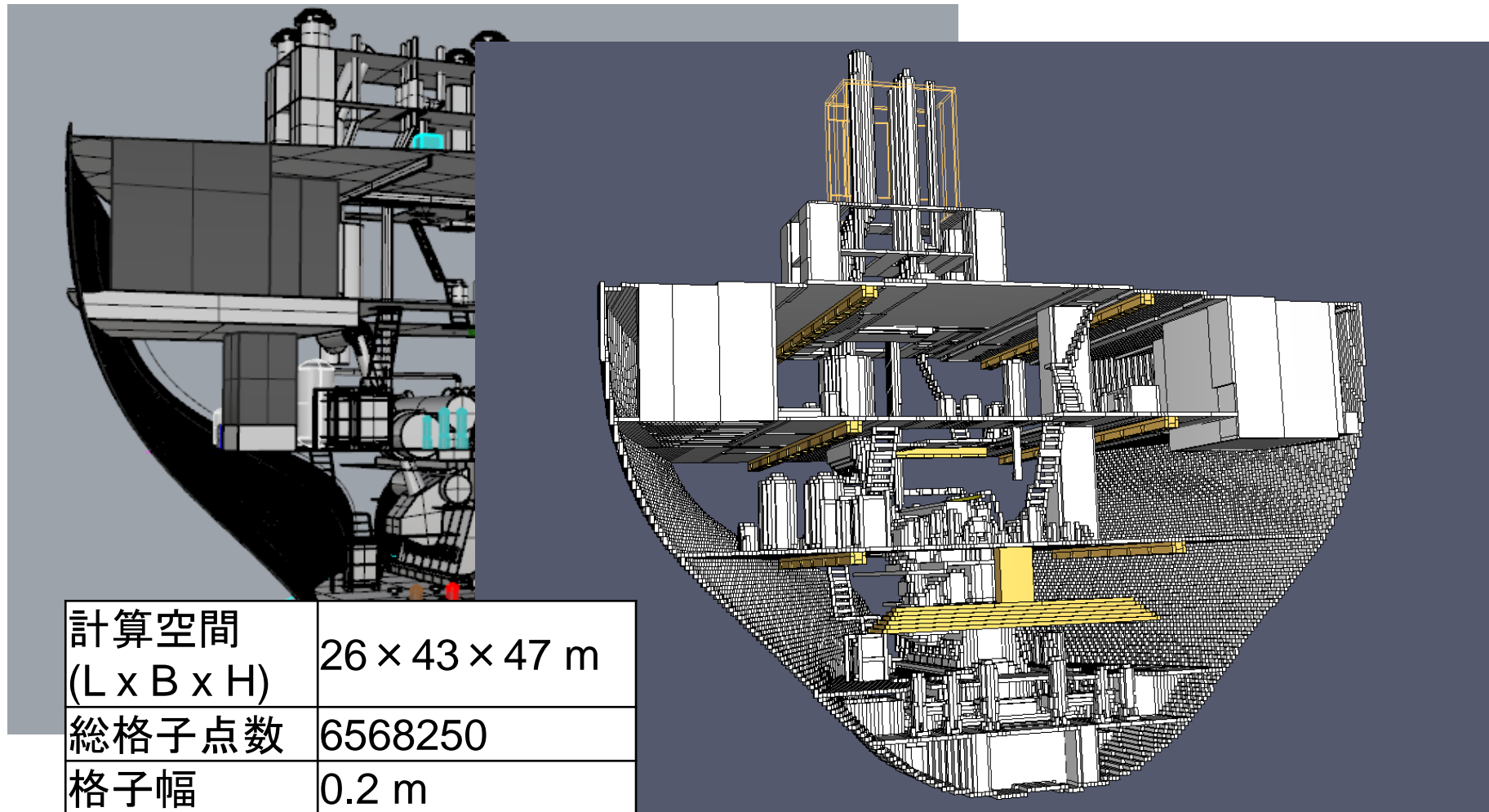
| | |
|--------------------|-------------------|
| Bulk carrier | |
| DWT | 176000 T |
| LBP | 280.00 m |
| BM | 45.00 m |
| THB | 9.00 m |
| TFL | 18.00 m |
| Minimum Power Line | 15000 kW |
| Installed Power | 17000 kW (+13.3%) |



機関室のCADモデル^[3]

[3] F. Stefanidis, Bulk Carrier Engine Room, <https://grabcad.com/fotios.stefanidis-1>

- ✓ 3次元CADデータ(.3dm形式)をCFD計算用のモデルへ変換



Thunderhead Engineering Consultants社のPyrosimソフトウェアを用いて、CADモデルに微修正を加えたうえで、構造格子の計算モデルに変換

■ Fire Dynamics Simulator Ver. 6.5.3

- ✓ 米国国立標準技術研究所(NIST)が開発した、火災安全工学のための3次元数値流体力学コード
- ✓ 建築物内の火災時における煙流動および換気解析に実績があり、数値解析コードとして十分に検証が行われている
- ✓ ソースコード(Fortran90言語で記述)は公開されており、フリーで使用可能
- ✓ 過去には、旅客船内における火災時の煙流動解析および避難シミュレーションへ適用^[4]



海洋リスク評価系で実施した、旅客船内における
火災時のすすの分布の計算例^[4]

[4] M. Asami, et al., Effects of inclination of corridors on behaviors of evacuees on passenger ships, Proc. the 12th International Marine Design Conference, Vol.2, pp.155-166, (2015).

- ✓ 機関室内の換気は、送風ダクトを通じて機関室内へ船外の空気を供給する
- ✓ 船内の空気は通常の機関室内の換気と同様にファンネルから自然排気する
- ✓ 換気風量は現行のIGFコードをベースに設定

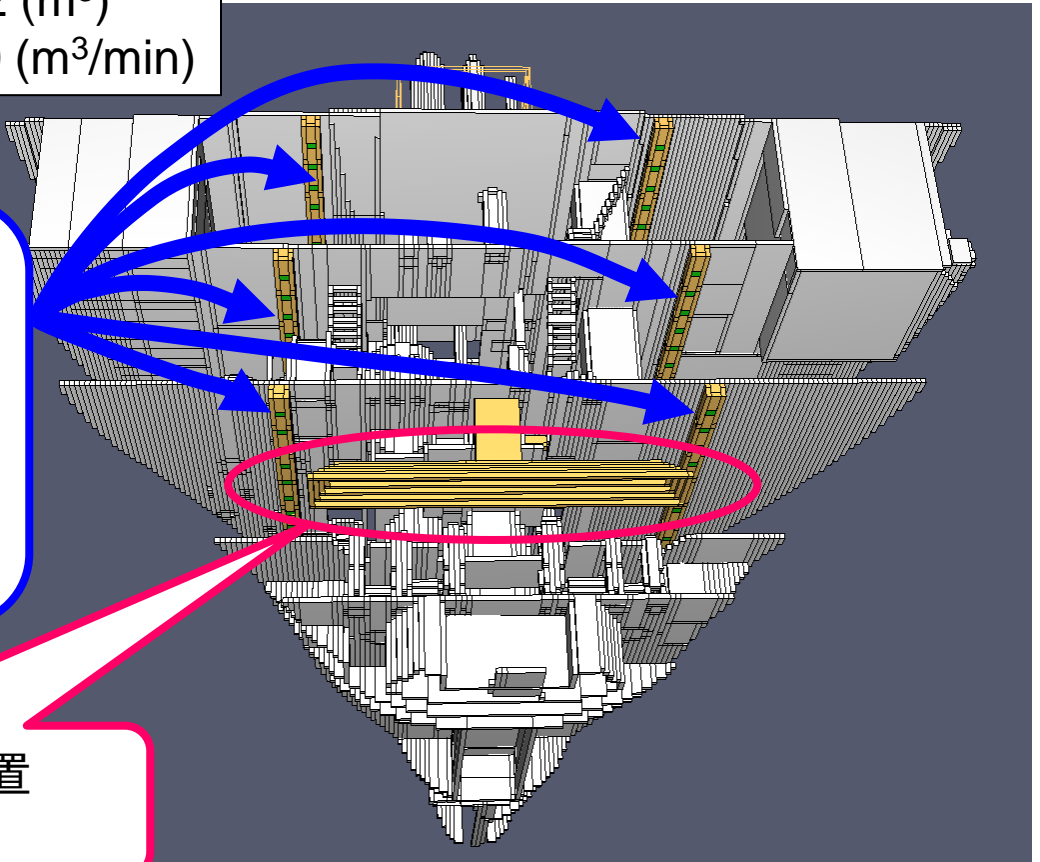
| | |
|----------------|------------------------------|
| ・IGFコード要件(LNG) | 30 回/hour |
| ・船内容積 | 14461.2 (m ³) |
| ・必要換気風量 | ≒ 7500 (m ³ /min) |

・0.4 × 0.4 m²の送風口 85カ所

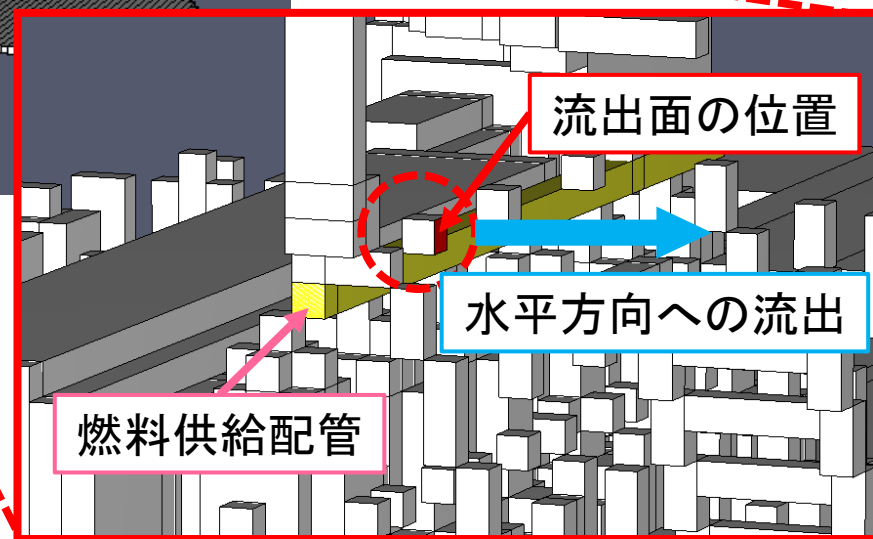
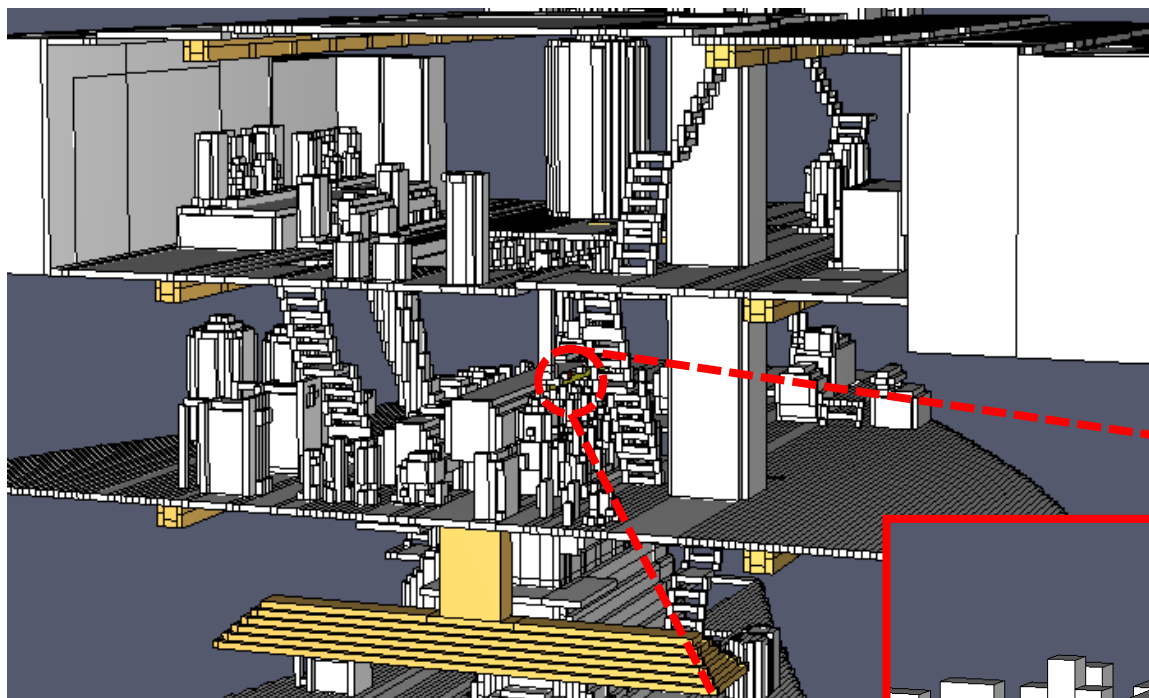


下向き
約9 m/s

Purifier station用の換気装置
⇒ 100m³/minの吸気



- ✓ 漏えいシナリオ：エンジンと燃料配管の連結部近傍からのフランジリーク



微小穴からのジェット流出となるが、
計算を簡便にするため1メッシュ分の
流出面として境界条件を設定

- ✓ 漏えいガスが機関室内で定常状態になるまで以下の条件でシミュレーションした
 - 燃料配管内は常温・加圧(20bar)された液体燃料で満たされている
 - 常温の換気流場が十分に発達した300秒後にガスを漏えいさせた
 - フランジ部に発生した欠陥、ギャップをピンホールとして扱い、以下の4ケースを実施
 - 流出口直径：2mmおよび10mmのピンホール
 - 流出温度：液化ガスの断熱膨張の影響を考慮して、沸点(-42.04°C)と常温

表 ケーススタディの検討条件

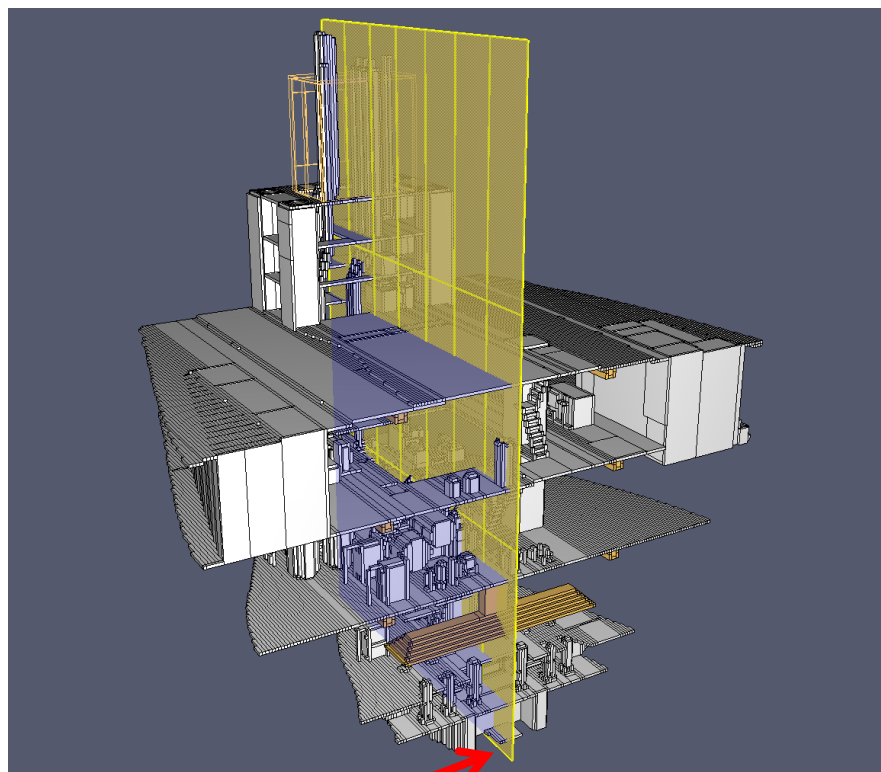
| | Case 1 | Case 2 | Case 3 | Case 4 |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|
| 流出穴直径 [mm] | 2.0 | | 10.0 | |
| 温度 [°C] | 20 | -42.04 | 20 | -42.04 |
| ガス密度 [kg/m ³] | 1.833 | 2.325 | 1.833 | 2.325 |
| 流出速度 [m/s] | 0.945 | | 23.62 | |

(参考) 20°Cにおける空気密度は約1.204 [kg/m³]

計算結果（機関室内の気流速）

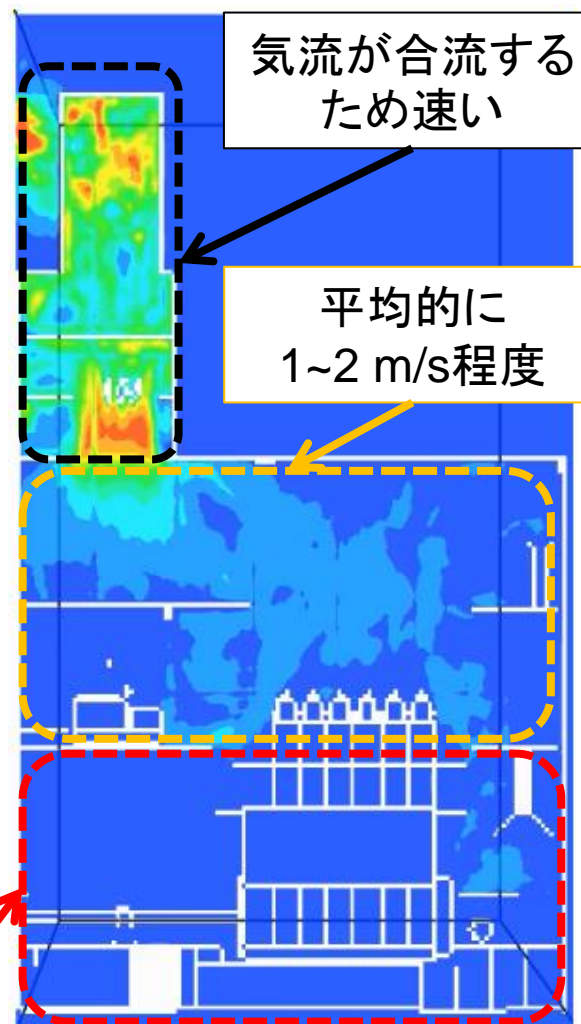
✓ 船体中央の縦断面にて室内の換気流速を確認した

速度の絶対値
[m/s]



船体中央を通過する断面A

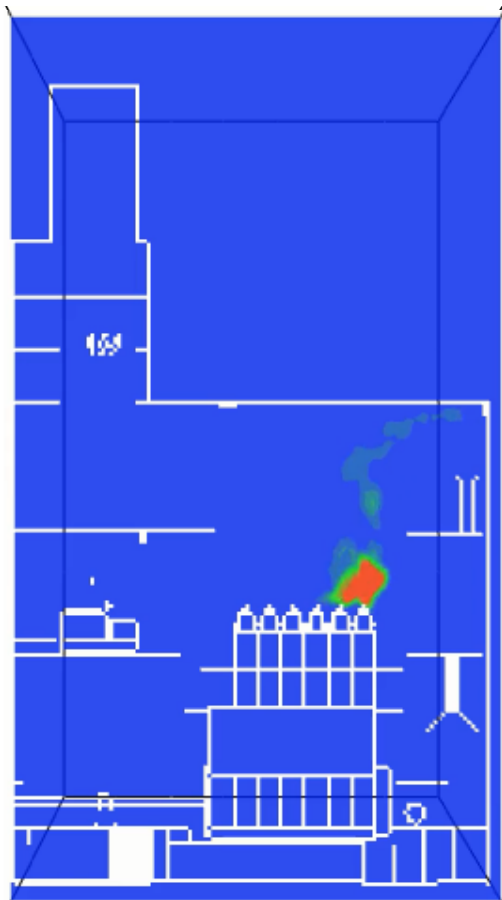
0.5 m/s程度で相対的に
よどんでいる領域



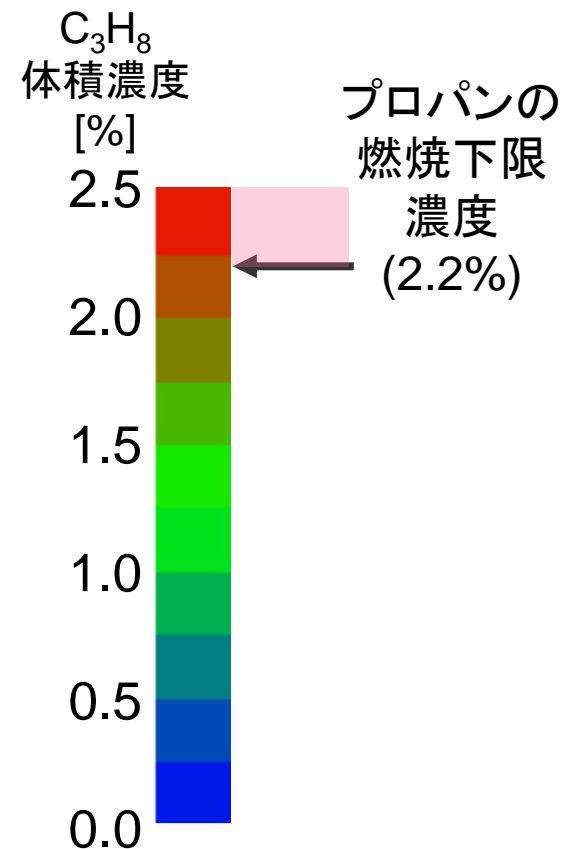
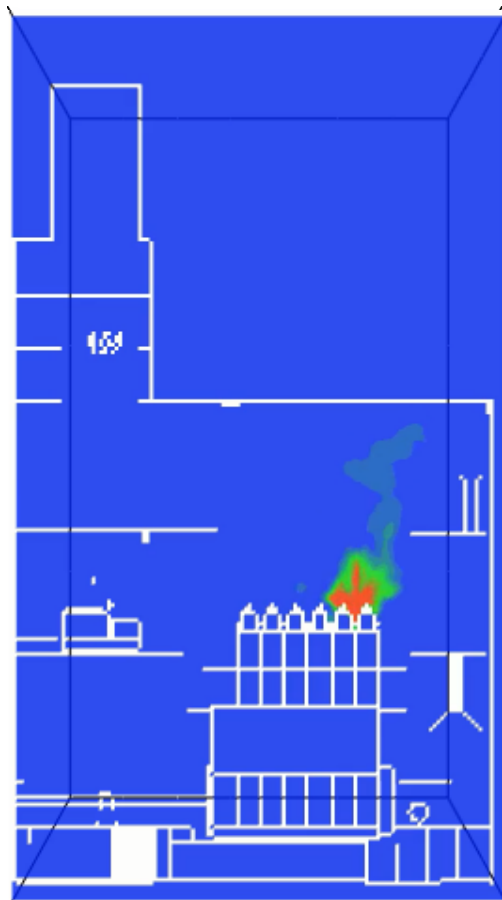
断面Aにおける換気流速の様子

流出穴径2mmの場合の断面Aにおける濃度分布の比較

《Case 1 (常温流出)》



《Case 2 (低温流出)》

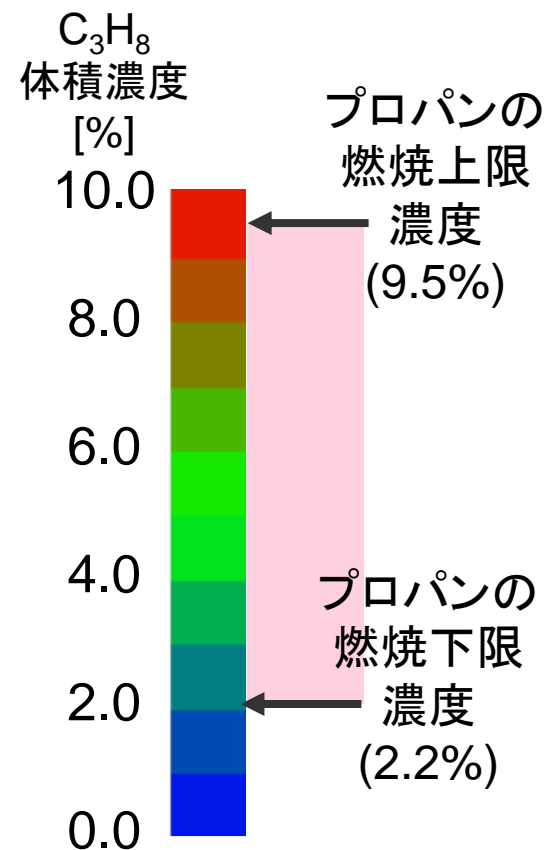
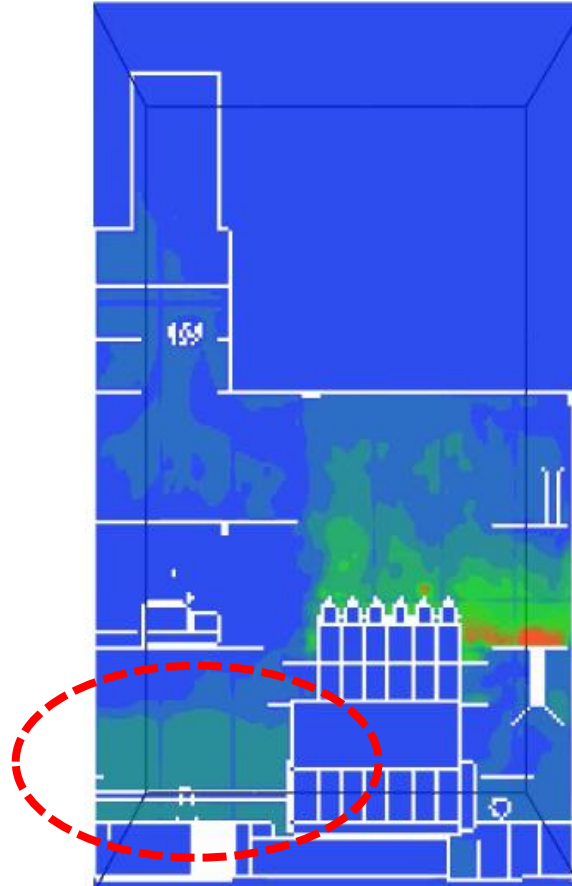
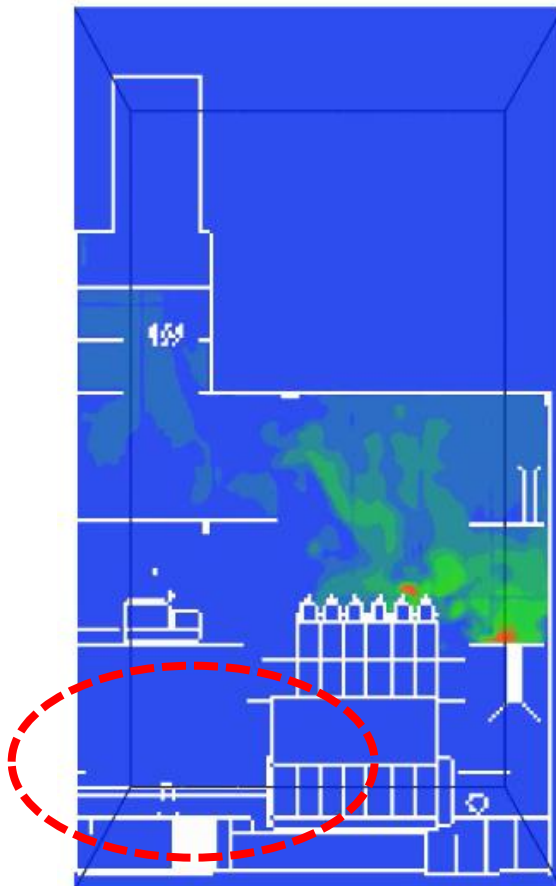


- ✓ プロパン流出源近傍において、燃焼範囲のガス濃度となる
- ✓ 温度に関係なく滞留せず、換気流と混合して排出される様子を確認

流出穴径10mmの場合の断面Aにおける濃度分布の比較

《Case 3 (常温流出)》

《Case 4 (低温流出)》

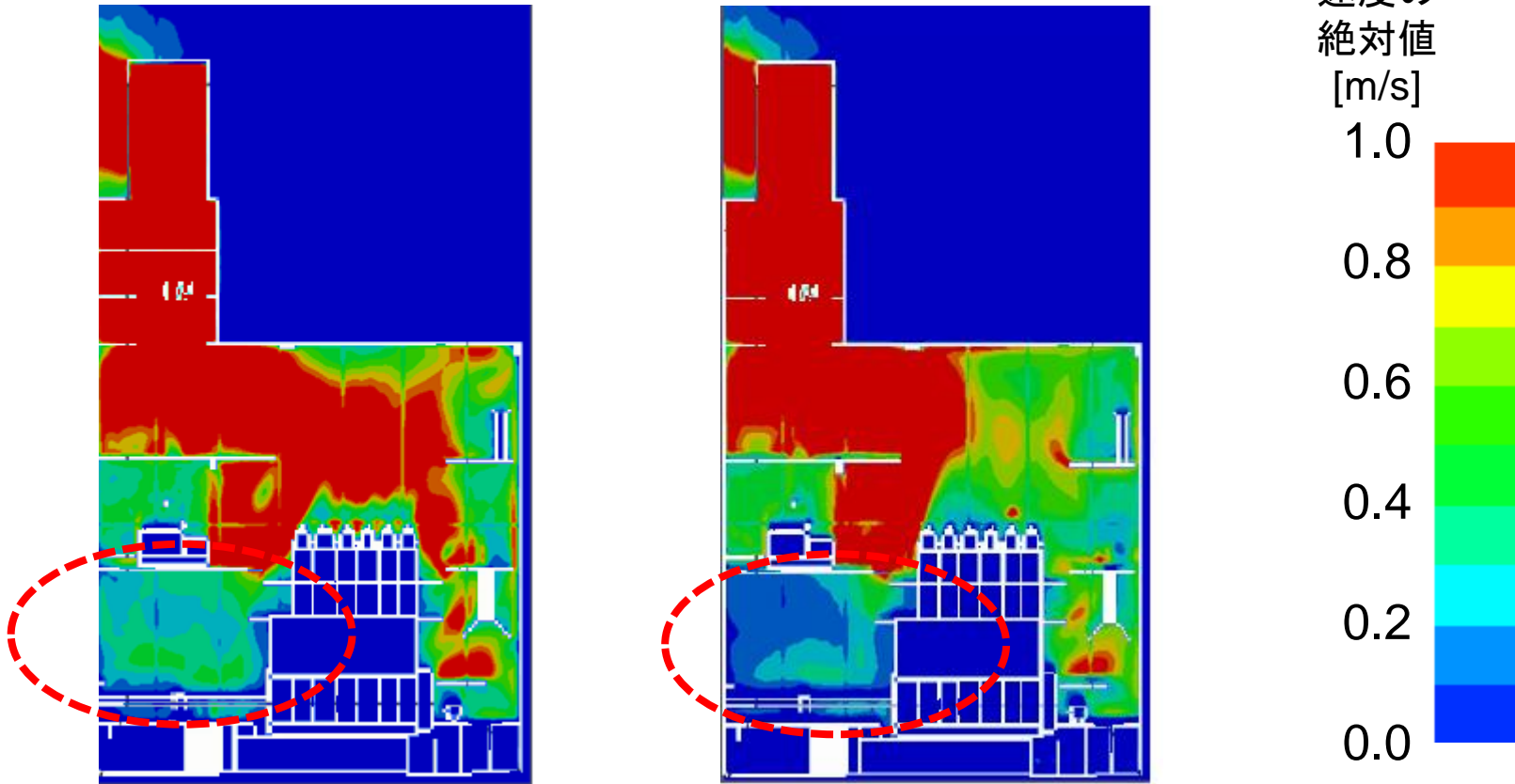


- ✓ 換気流とともに広範囲に燃焼範囲のガスが拡散した
- ✓ プロパンの低温流出の場合、底部へ滞留する様子を確認

✓ Case 4 (低温流出、穴径10mm)の断面Aにおける速度場の様子

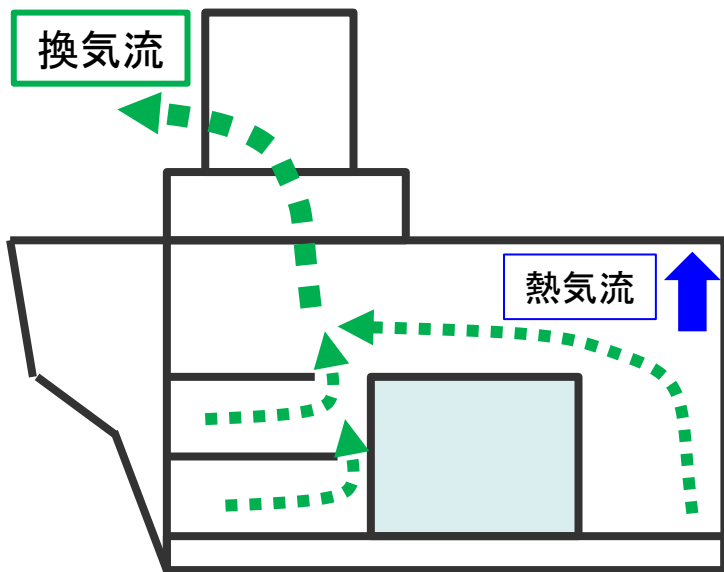
《ガス流出前》

《ガス流出後》



- ✓ 漏えいガスの滞留によって底部における速度が低下
- ✓ 流出前よりもよどんでいるため、換気によって排出されない

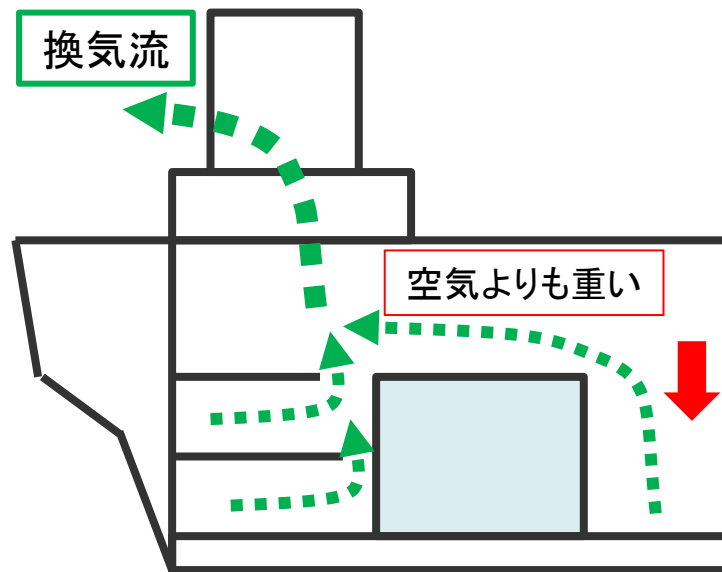
✓ 機関室の換気方法について運動量の観点から以下のように考察した



エンジン排熱の場合

送風口から供給される換気流の運動量
+ 熱気流の浮力

船内の空気が船外へ排出されやすい



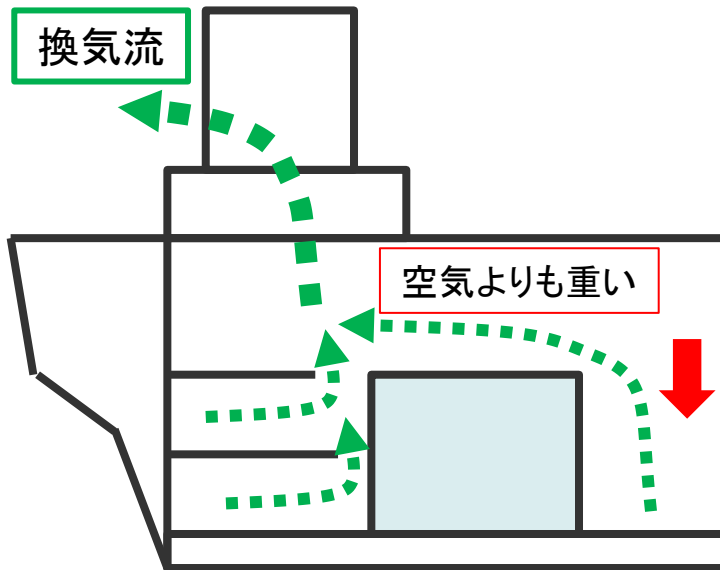
周囲空気よりも重いガス換気の場合

送風口から供給される換気流の運動量
- 重いガスを輸送するための運動量
- 重力

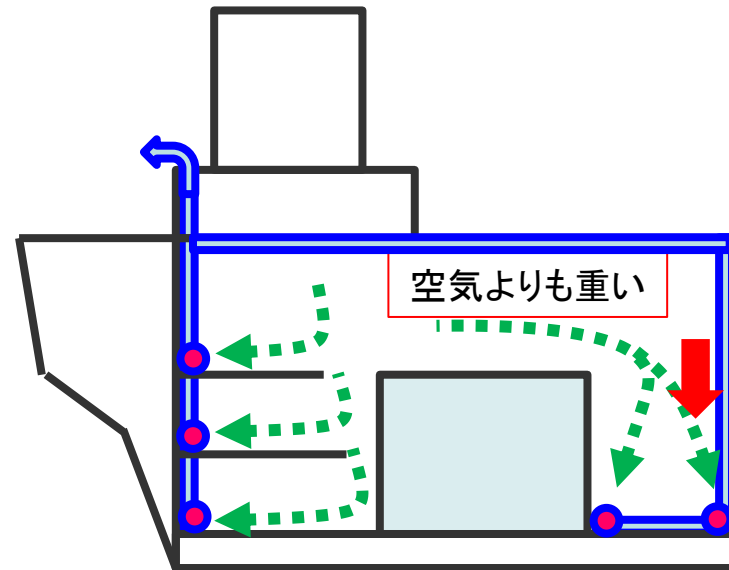
船内の空気が船外へ排出にくい

排熱のための換気方法は、エンジンからの排熱を船外へ排出するには適しているが、周囲空気よりも重いガスを船外へ排出するには非効率

- ✓ 周囲空気より重いガスの換気方法の対策例を以下に示す



排熱のための機関室の換気



漏えいガス排気のための換気の場合

- ✓ 各フロアに吸い込みのダクトを設置する
- ✓ 漏えい検知によって作動する
- ✓ 漏えい時は通常主機は停止するため排熱は時間とともに縮小する
- ✓ 可燃性ガスの拡散が各フロアの局所範囲に抑制され、換気流に乗ることによる上部フロアへの拡散が低減されるメリットがある

- 低引火点燃料の使用に伴うリスクに着目し、空気よりも密度が大きいプロパンの漏えいを対象として、既存のIGFコードの換気風量による換気解析を実施した
 - ✓ 異なる流出穴径で複数ケース試行した結果、IGFコードの換気風量で排気できないケースがあった
 - ✓ 底部にプロパンが滞留した場合、今回の換気の配置や風量では排出されない可能性がある
 - ✓ プロパンを燃料として使用する際には、その特性を考慮して換気風量だけでなく、換気設備の配置やESDと連動するガス検知器の配置に注意を払う必要がある

ご清聴ありがとうございました