



第25回 海上技術安全研究所研究発表会



# 船体構造の影響を考慮したアンモニアの 大気拡散シミュレーション

令和7年7月18日

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

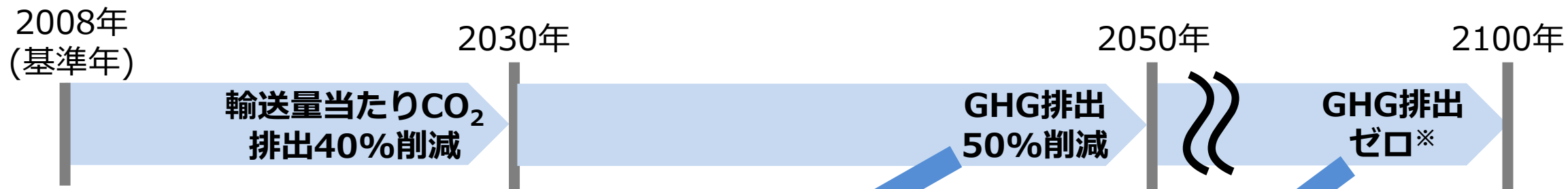
海上技術安全研究所

海洋リスク評価系

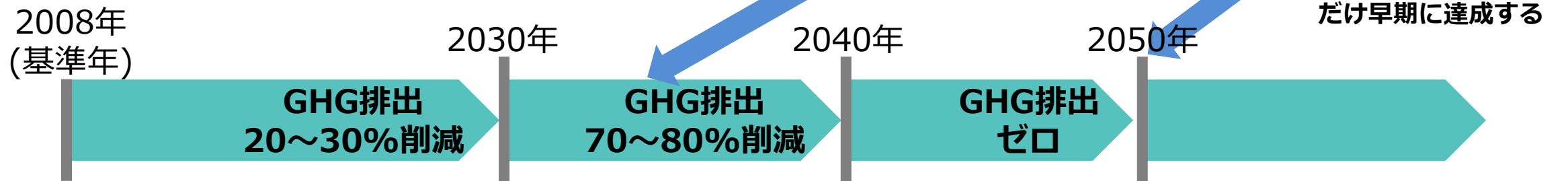
木村 新太、岡 秀行

- 2023年7月、国際海事機関（IMO）の第80回海洋環境保護委員会（MEPC80）にて、「GHG削減戦略※」を改定 ※2018年4月採択
- 国際海運「2050年頃までに温室効果ガス（GHG）排出ゼロ」等の目標に合意

## ◎ 2018年採択



## ◎ 2023年改定



- アンモニアや水素を燃料とするゼロエミッション船の普及が不可欠
- アンモニアは可燃性および腐食性をもち、人体に有害である

| ガス濃度 (ppm)※     | 影響                                       |
|-----------------|------------------------------------------|
| 25              | ほとんどの人が感知可能な顕著な臭気                        |
| 100             | 不快感はあるが、一般的な労働者には悪影響はない                  |
| 400             | 即時の鼻および喉の刺激                              |
| 700             | 即時の眼の刺激                                  |
| 1,700           | 痙攣性咳嗽、眼、鼻及び喉に対する重篤な刺激性。30分の曝露によって死亡する可能性 |
| 2,000～5,000     | 痙攣性咳嗽、重度の眼、鼻、喉の炎症。15分の曝露によって死亡する可能性      |
| 5,000～10,000    | 呼吸痙攣および急速な窒息。1分以内の曝露によって死亡する可能性          |
| 150,000～280,000 | 火災・爆発危険性（燃焼濃度範囲）                         |

※体積濃度 1 % = 10,000 ppm

✓ 火災・爆発危険性が顕在化するよりもはるかに低い濃度で人体に有害な影響を及ぼすおそれ

アンモニアバンカリング時に、アンモニア漏洩事故の発生有無を問わず、立ち入りを原則禁止若しくは制限する**危険区域**及び**管理区域**を事前に検討する。

### ● 危険区域

危険区域は、アンモニア漏洩源を中心に、液体アンモニアが飛散し、その場に乗組員及び作業員がいた場合、飛散した液体アンモニアへの接触が想定される区域とする。

乗組員及び作業員は、「接続作業」終了から「接続解除作業」開始までの間、原則として立ち入りを禁止する。

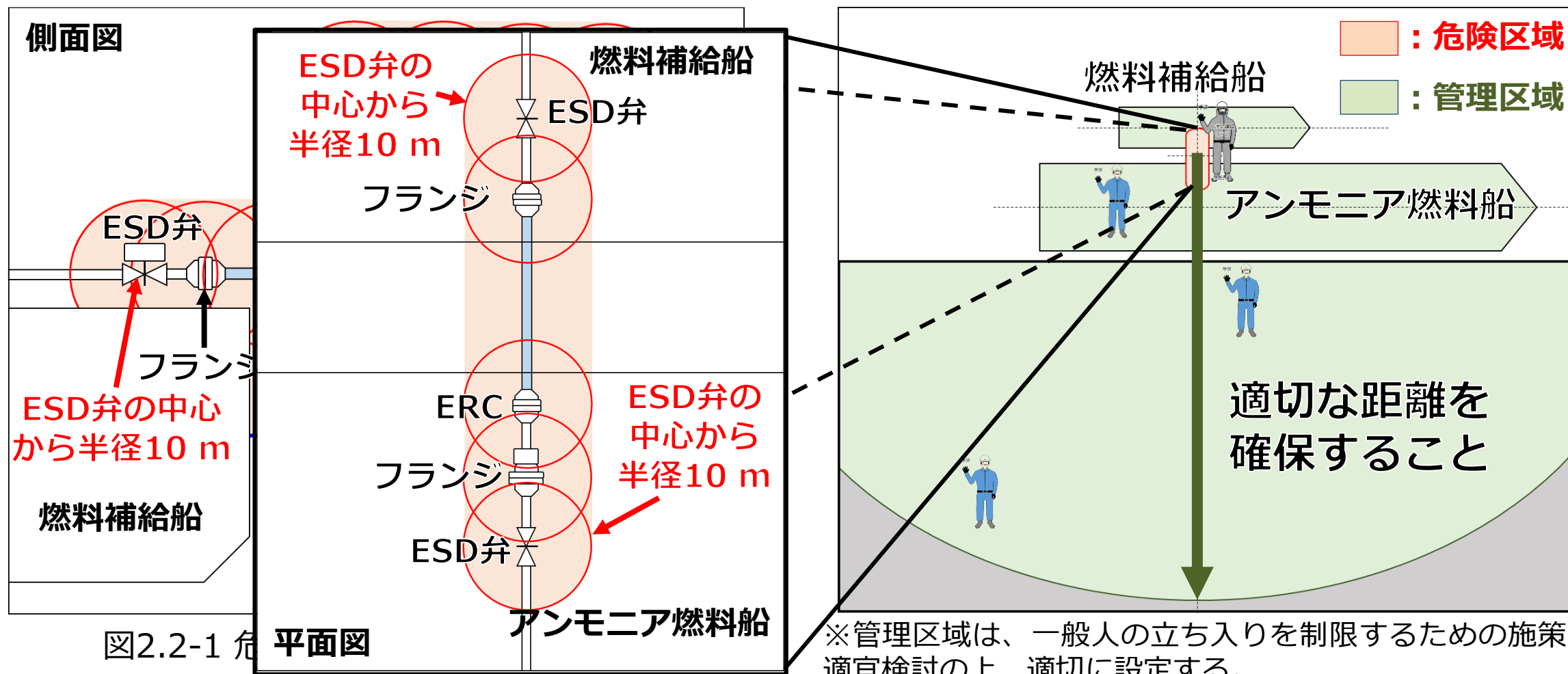
乗組員及び作業員が当該作業中に見回りや短時間の作業といった何らかの事情があり、「危険区域」に立ち入る場合は、個人保護装具を着装した上で、滞在時間に相応しい対策を検討し立ち入る。

### ● 管理区域

管理区域は、アンモニア燃料移送時の事故防止対策等を理解した乗組員及び作業員が立ち入ることの出来る区域とする。管理区域では、一般人の立ち入りを禁止する。乗組員及び作業員は保護めがね及び手袋を着装し立ち入る。

# 国土交通省 アンモニアバンカリングガイドライン

## -Ship to Ship方式編- [3]



ESD:緊急遮断(Emergency Shut-Down)  
ERC:緊急離脱カップリング(Emergency Release Coupling)

図2.7-1 管理区域の設定例 (一部改変)

# アンモニアバンカリングガイドライン - 共通編 -[2]



| 通常時  |                                |
|------|--------------------------------|
| 区域分類 | 着装する個人保護装具                     |
| 管理区域 | 保護めがね・手袋                       |
| 危険区域 | 化学防護服・防毒マスク<br>保護めがね・防護手袋・防護長靴 |

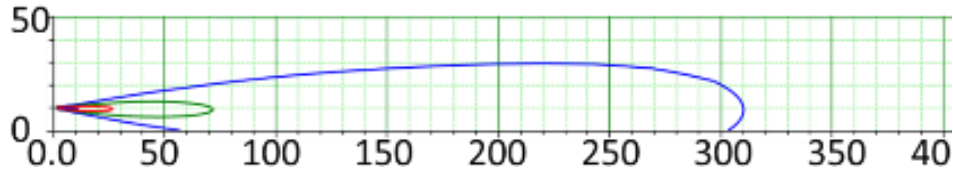
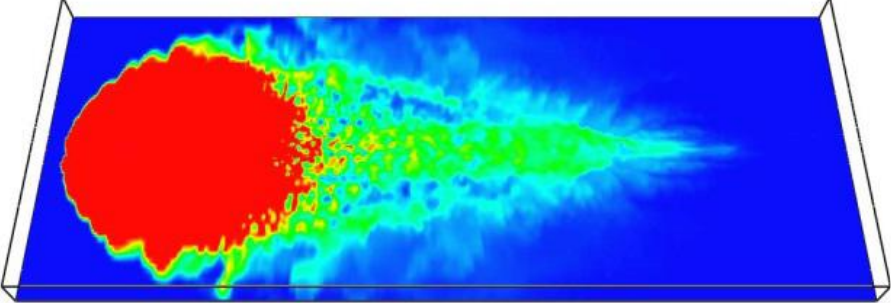
| ガス濃度<br>(ppm)※ | 影響                      |
|----------------|-------------------------|
| 25             | ほとんどの人が感知可能な顕著な臭気       |
| 100            | 不快感はあるが、一般的な労働者には悪影響はない |
| 400            | 即時の鼻および喉の刺激             |

※1 緊急対応及び救助活動時を想定し、個人保護装具の着用と漏洩対応の訓練を受けた者を想定する。

※2 乗組員及び作業員はアンモニア燃料移送に携わる者であって、安全教育と訓練を受けた者と想定する。

# 被害影響度予測のための大気拡散解析モデル



|              |                                                                                                     |                                                                                                         |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 解析例          |  <p>Phastの計算例</p> |  <p>FDSの計算例</p>      |
| 評価モデル        | 1次元積分モデル                                                                                            | 3次元数値流体力学(CFD)モデル                                                                                       |
| 計算コード        | DEGADIS, ALOHA, <b>Phast</b>                                                                        | <b>Fire Dynamics Simulator</b> , OpenFOAM                                                               |
| 特徴と影響評価への適用性 | <p>【長所】 <b>高速かつ簡便で、リスク分析におけるケーススタディ等の実務に使用される</b></p> <p>【短所】 地形や構造物等の影響を考慮できない</p>                 | <p>【長所】 <b>精度が高く、物理モデルを連立して解くことで、様々な現象を考慮できる</b></p> <p>【短所】 計算負荷が大きく、リスク評価で必要となるケーススタディ等の実用問題には不向き</p> |

- 計算機の性能向上と低廉化、オープンソースコードの増加によってCFDの利用が活発化
- 目的に応じて使い分けされる【積分モデル】Phast<sup>[4]</sup>と【CFDモデル】FDS<sup>[5]</sup>の2つのモデルの数値シミュレーションの比較を実施

[4] DNV, DNV Phast UDM Theory,

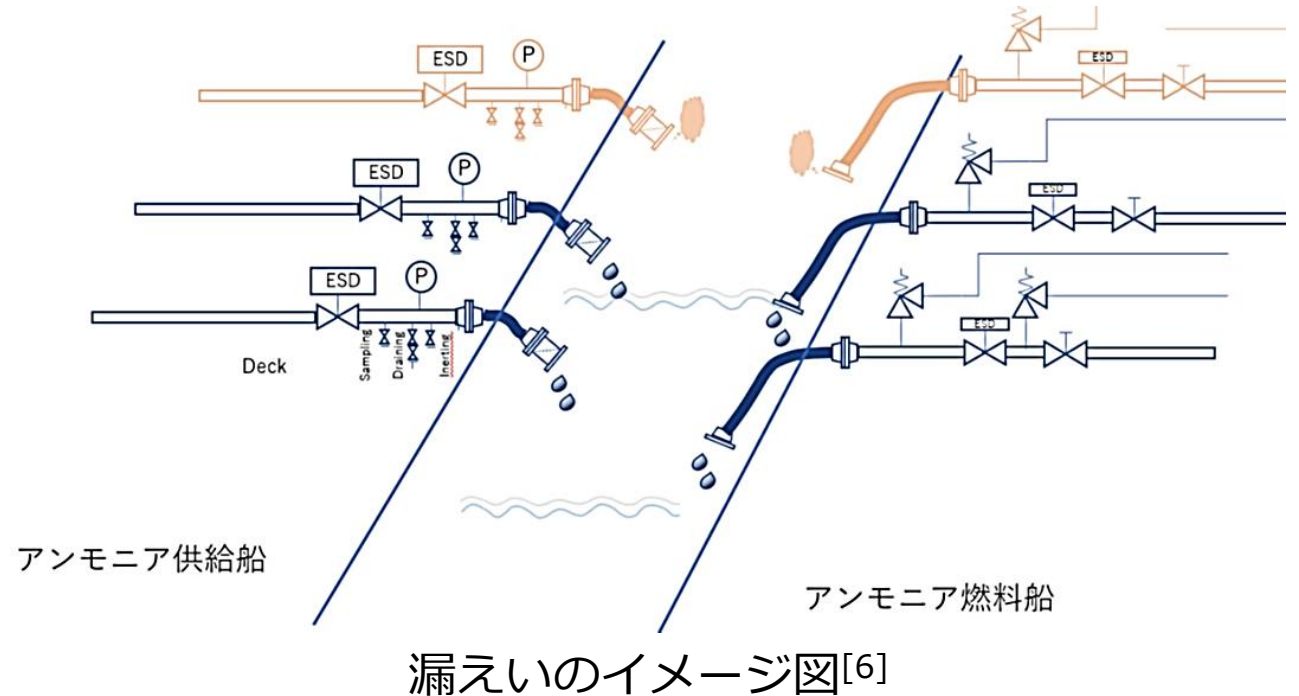
[https://mysoftware.dnv.com/download/public/phast/technical\\_documentation/05\\_dispersion/udm/theory/UDM%20Theory.pdf](https://mysoftware.dnv.com/download/public/phast/technical_documentation/05_dispersion/udm/theory/UDM%20Theory.pdf).

[5] McGrattan, K. , McDermott, R. , Weinschenk, C. and Forney, G. (2013), Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide, Sixth Edition, Special Publication (NIST SP), National Institute of Standards and Technology, <https://doi.org/10.6028/NIST.sp.1018>

# アンモニア拡散解析対象シナリオ①

## ➤ 緊急離脱カップリング(ERC: Emergency Release Couplings)からの海上漏えい<sup>[6]</sup>

緊急離脱システムの作動によって、緊急離脱カップリング(ERC: Emergency Release Couplings)から液体アンモニアが 8 L 海水面上に漏えいする。海水面上に広がる液体アンモニアの液だまりから蒸発するアンモニアガスを対象にシミュレーションを実施する。

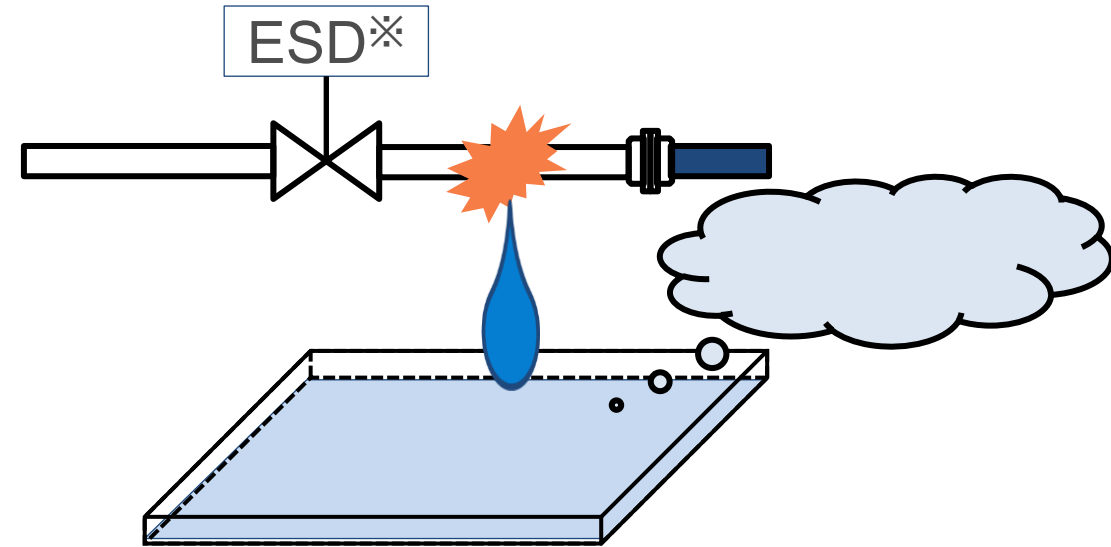


- アンモニアバンカリングガイドライン検討委員会資料のシナリオを参考に数値シミュレーションを実施
- 数値流体力学モデルではプール蒸発の計算ができないため、Phastの結果をアンモニアガス発生面の境界条件として利用

[6] 国土交通省, 第5回アンモニア燃料船への安全かつ円滑なバンカリングの実施に向けた検討委員会 参考資料6 漏洩シミュレーションに使用する条件の整理, [https://www.mlit.go.jp/maritime/maritime\\_tk7\\_000060.html](https://www.mlit.go.jp/maritime/maritime_tk7_000060.html).

## ➤ 燃料補給船上のドリップトレイからの蒸発・拡散<sup>[7,8]</sup>

燃料補給船上の燃料供給配管が全破断し、緊急遮断 (ESD:Emergency Shut-Down)によって停止するまでの60秒間連続流出<sup>[8]</sup>する。液体アンモニアは甲板上のドリップトレイに全量漏えいし、蒸発するアンモニアガスを対象にシミュレーションを実施する。



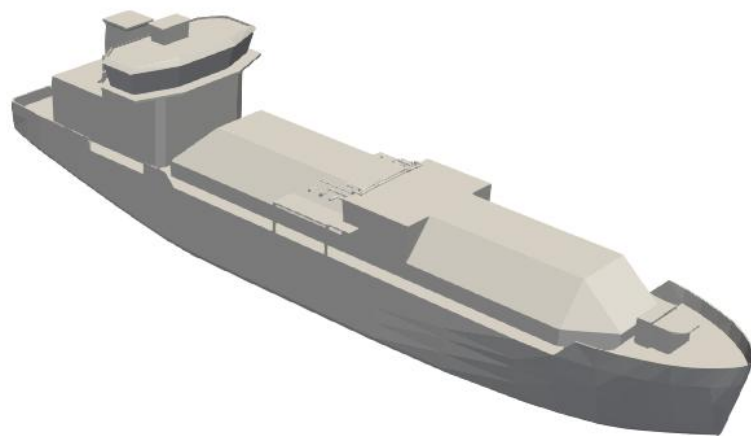
漏えいのイメージ図

※ESD:Emergency Shut-Down

- CFDモデルではプール蒸発の計算ができないため、Phastの結果をアンモニアガス発生面の境界条件として利用

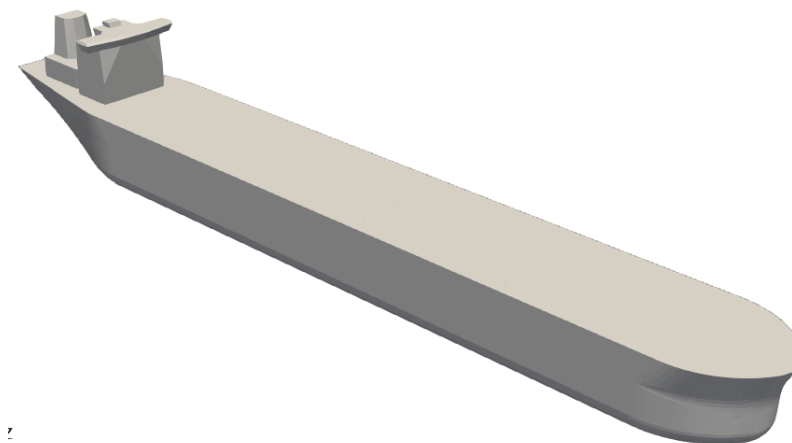
[7] 木村新太、第23回海上技術安全研究所研究発表会、PS-15 アンモニア燃料の漏えい事象を対象としたガス拡散解析。

[8] Ammonia as a Marine Fuel – Bunkering, Safety and Release Simulations – Maritime Energy & Sustainable Development (MESD) Centre of Excellence (CoE), Nanyang Technological University Singapore, Singapore Maritime Institute (2022)



## アンモニア燃料補給船

- LNG燃料補給船<sup>[9]</sup>と同型船を仮定
- 船長 99.8 m、船幅 18.6 m
- タンク容量 6000 m<sup>3</sup>



## アンモニア燃料焚きバルクキャリア

- バルクキャリアモデル<sup>[10]</sup>を利用
- 船長 249.9 m、船幅 36.8 m

[9] Hana-Dang, LNG Bunkering Vessel Low-poly 3D model, <https://www.cgtrader.com/3d-models/watercraft/industrial-watercraft/lng-bunkering-vessel-b2c3d92d-1c12-423b-9049-6455b16eeca2>

[10] Igor Khlutchin, Ocean bulk carrier, <https://grabcad.com/library/cean-bulk-carrier-1>

# 計算領域および境界条件



計算領域 ( $L_x, L_y, L_z$ ) : 2200, 1600, 200 m

格子数 ( $N_x, N_y, N_z$ ) : 500, 600, 80

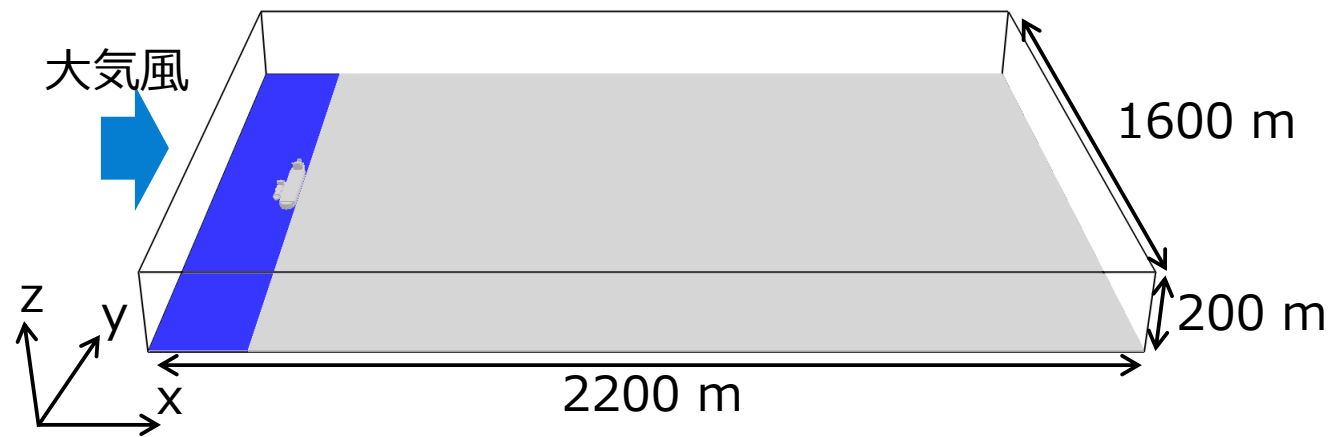
総メッシュ数 : 2400 万メッシュ

格子間隔 ( $D_x$ ) : 2, 3, 5, 8, 12 m

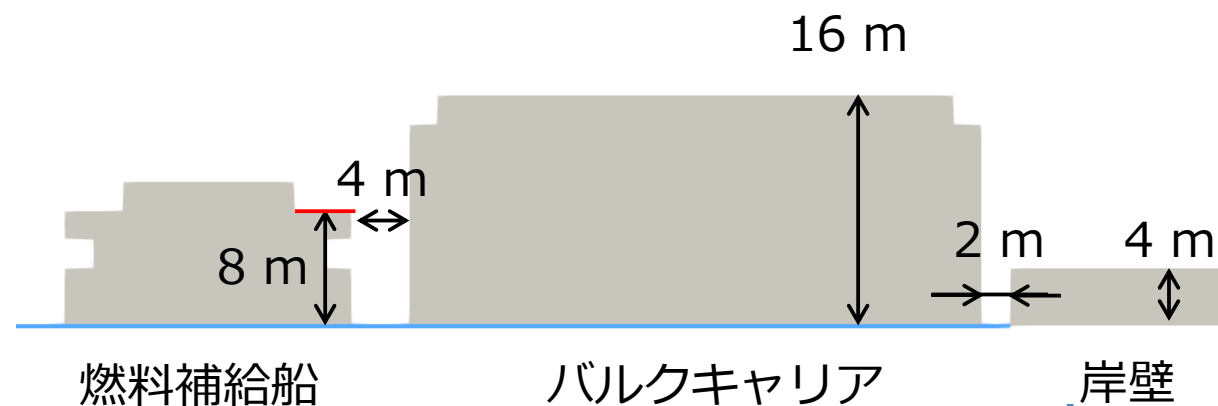
( $D_y$ ) : 2, 4 m

( $D_z$ ) : 2, 3, 4 m

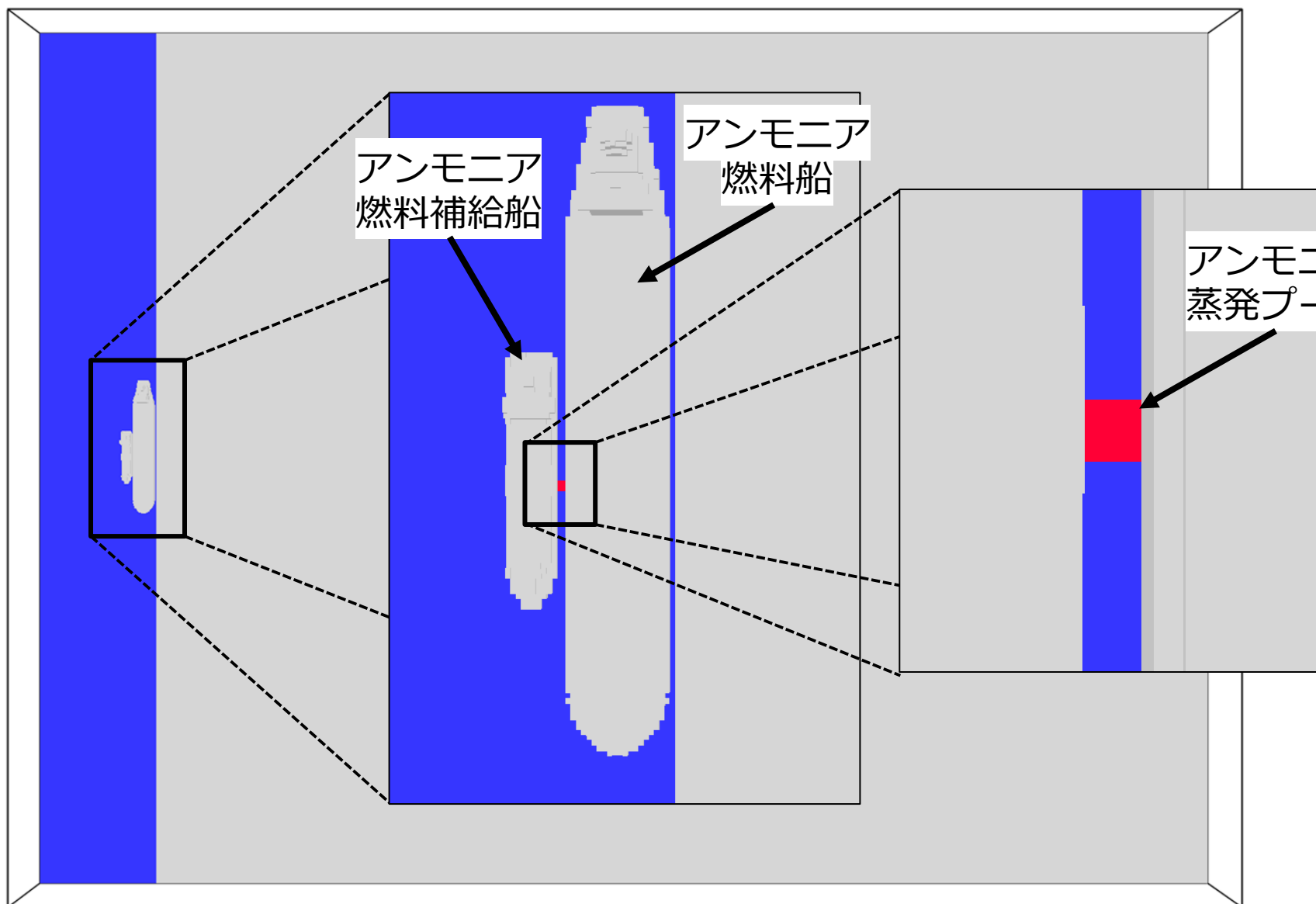
➤ 60領域に分割してMPI並列計算を実施



|               |                                                                                                     |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 気温、海面、船体、地面温度 | 20℃                                                                                                 |
| 大気安定度         | F (安定条件)                                                                                            |
| Xmin          | 大気風の鉛直分布 : Monin-Obukhov の相似則から決定<br>風速 : $U(z = 10 \text{ m}) = 2.0 \text{ m/s}$<br>海面粗度 : 0.0002m |
| Xmax          | 自由流出                                                                                                |
| Ymin, Ymax    | 自由流出                                                                                                |
| Zmin          | 滑りなし条件                                                                                              |
| Zmax          | 滑り条件                                                                                                |

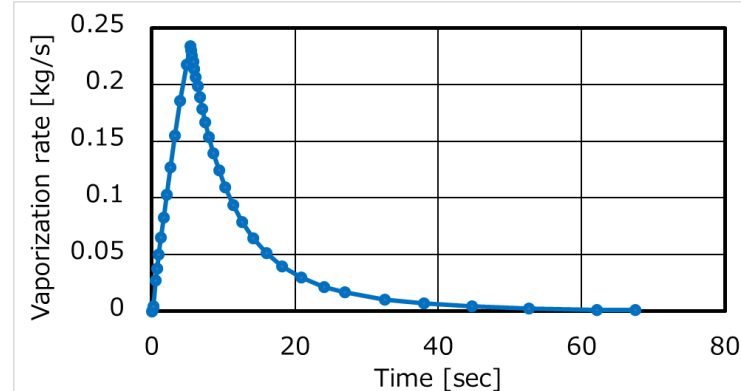


# アンモニア拡散解析対象シナリオ①



アンモニア  
蒸発プール

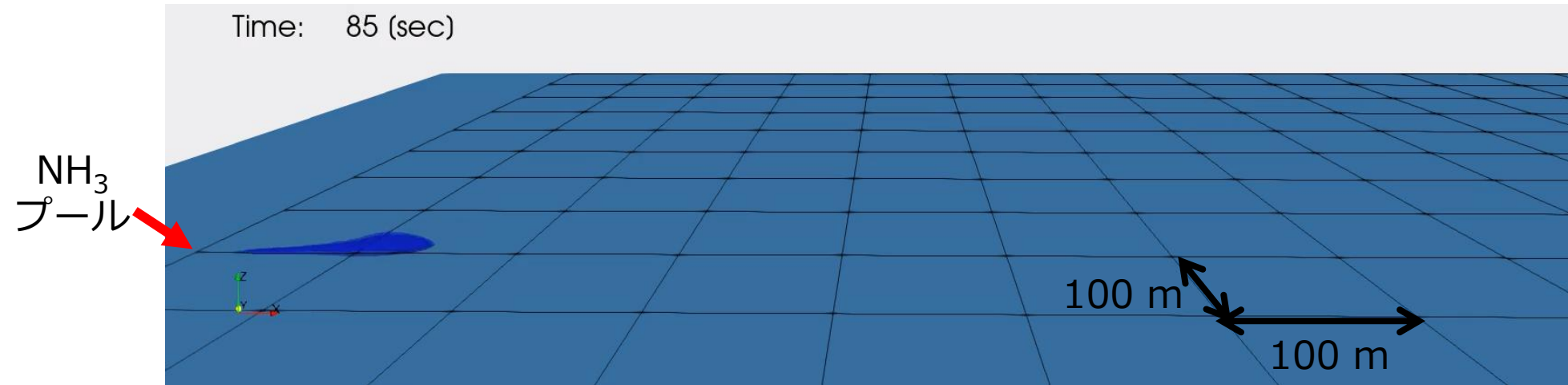
4 m × 4 mのプール発生境界面を設置し、発生速度が蒸発速度に一致するように設定した



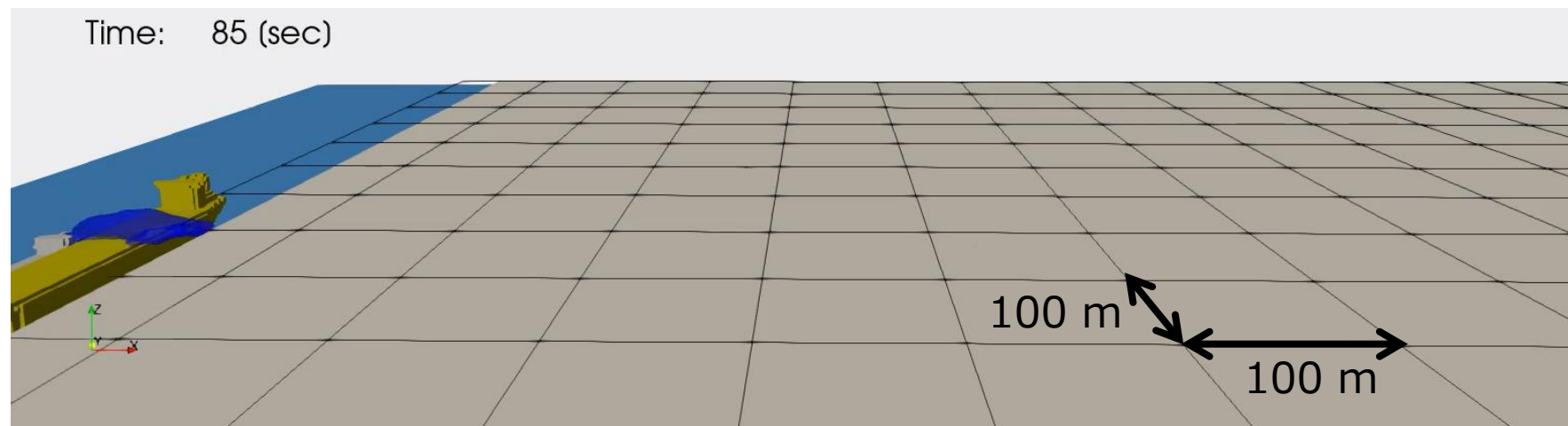
# アンモニア拡散解析対象シナリオ① (CFDモデル:FDS)



船体構造物なし



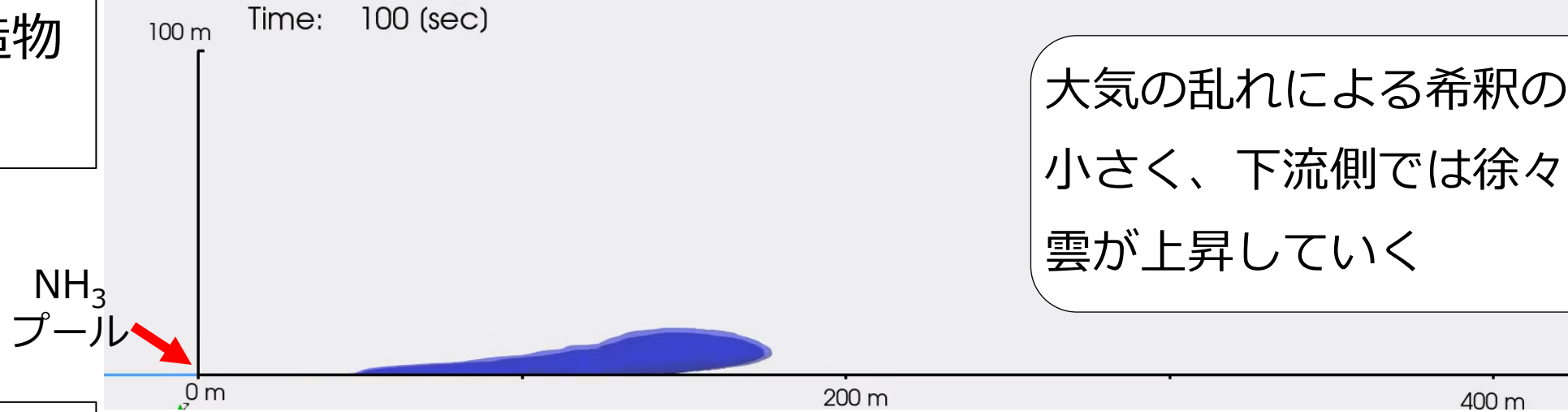
船体構造物あり



# アンモニア拡散解析対象シナリオ① (CFDモデル:FDS, x-z断面 at y=0)

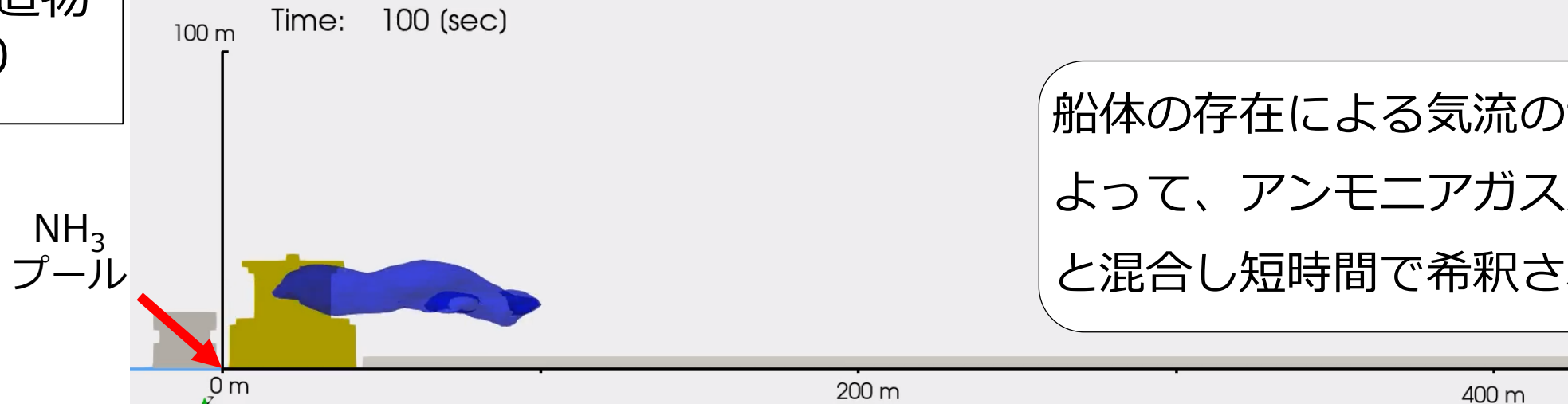


船体構造物  
なし



大気の乱れによる希釈の効果が小さく、下流側では徐々にガス雲が上昇していく

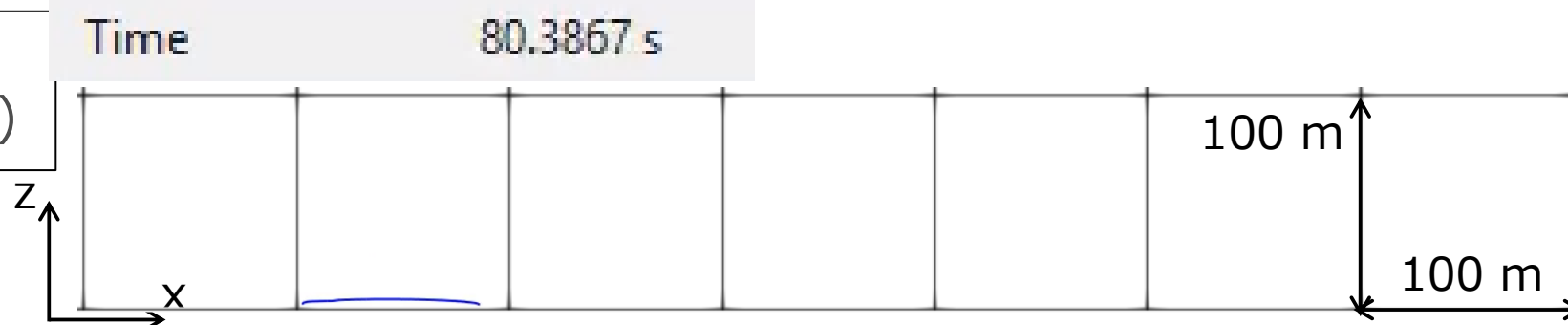
船体構造物  
あり



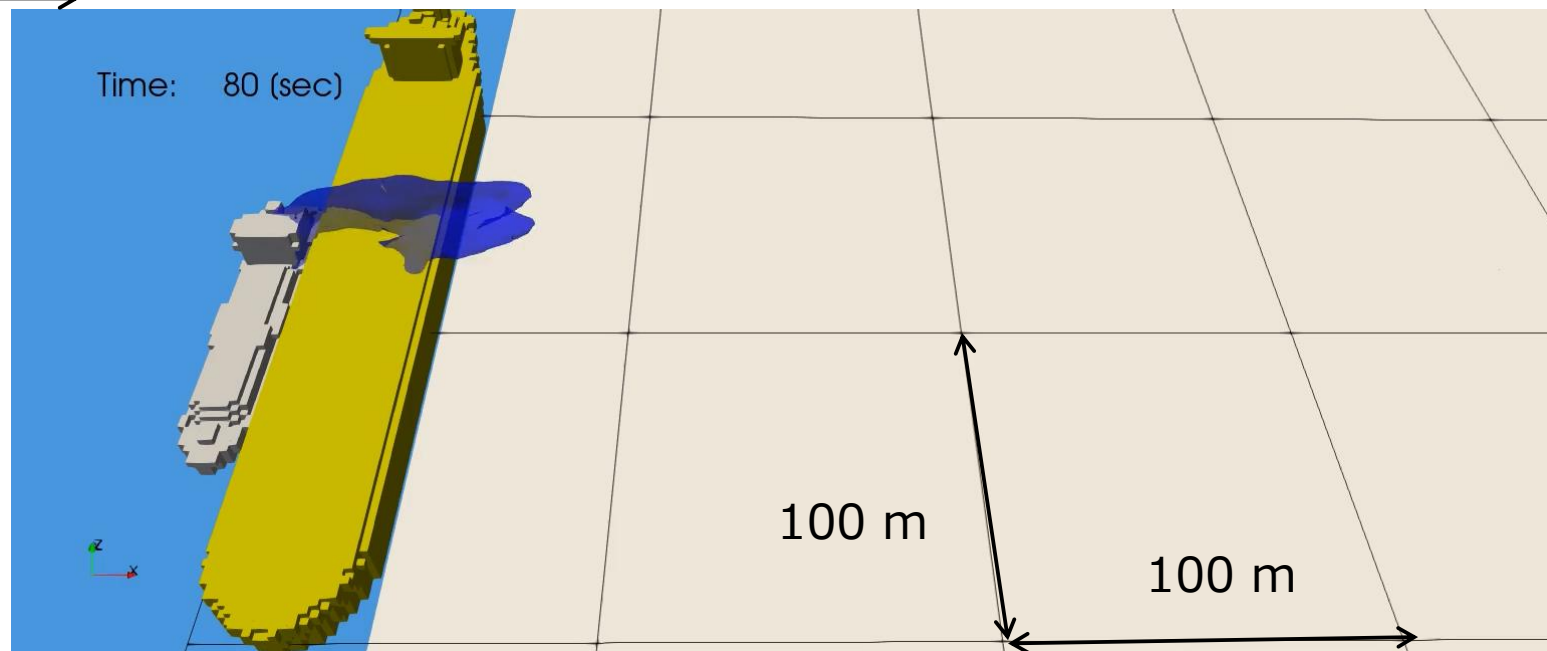
船体の存在による気流の乱れによって、アンモニアガスが空気と混合し短時間で希釈される

# アンモニア拡散解析対象シナリオ①

DNV Phast  
(x-z断面 at y=0)

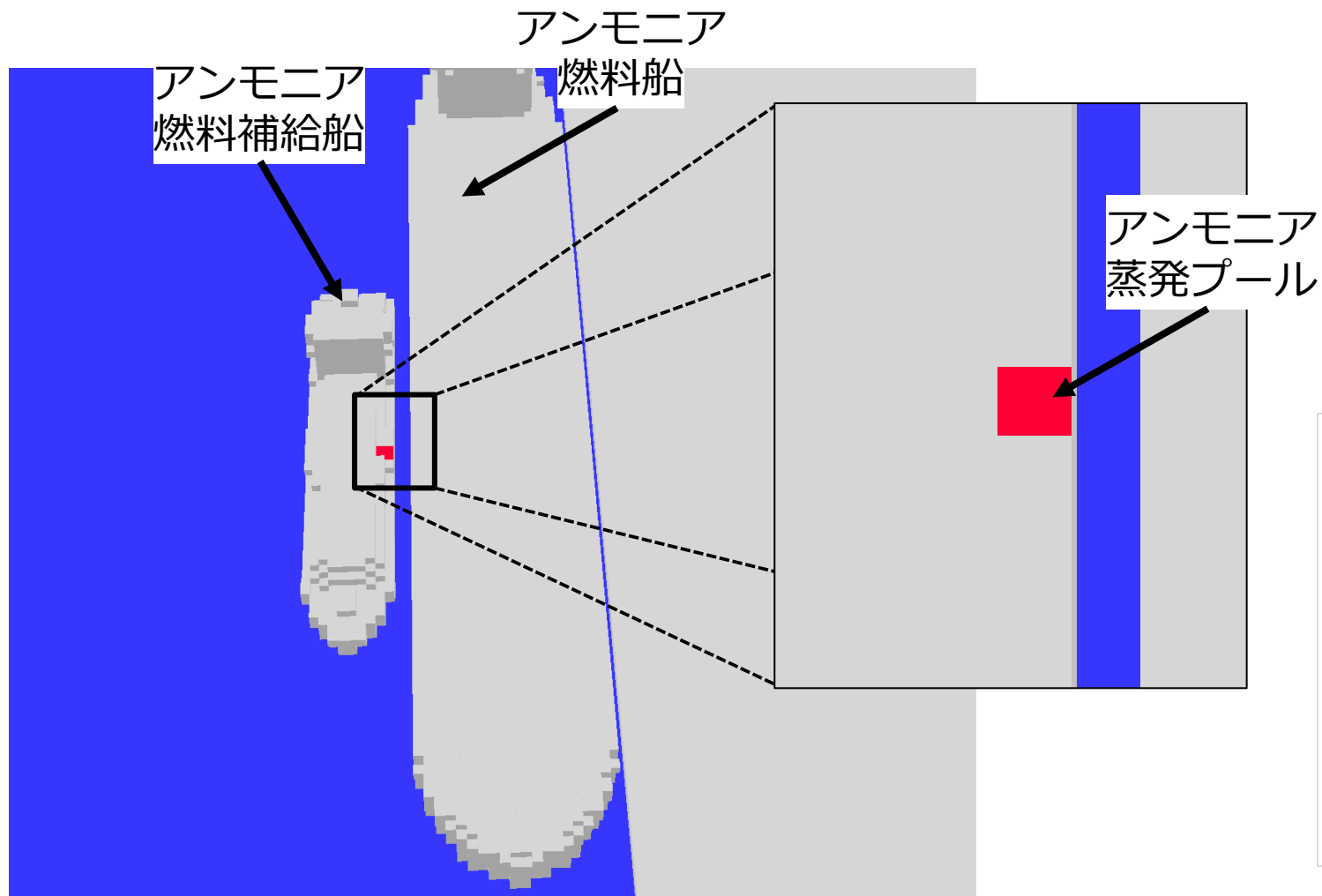


FDS

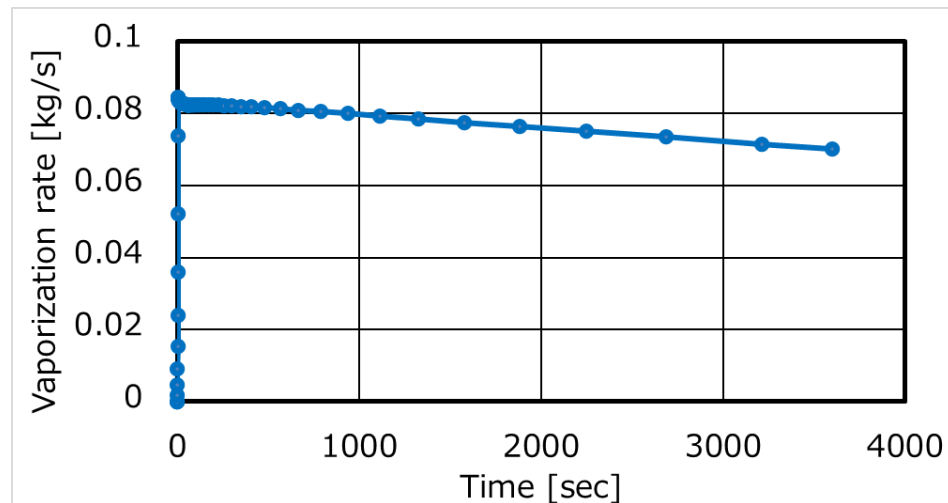


- Phastでは、アンモニアガスの塊と海水面上にプルームが形成し、地面に沿って滞留する
- FDSでは、アンモニアガスがバルクキャリアを乗り越えて風下方向に移流拡散し、Phastよりも短時間で100 ppmを超えるアンモニアガス濃度の範囲が消散する

# アンモニア拡散解析対象シナリオ②



海面から高さ8 mの甲板上に、4 m × 4 mのプール発生境界面を設置し、発生速度が蒸発速度に一致するように設定した

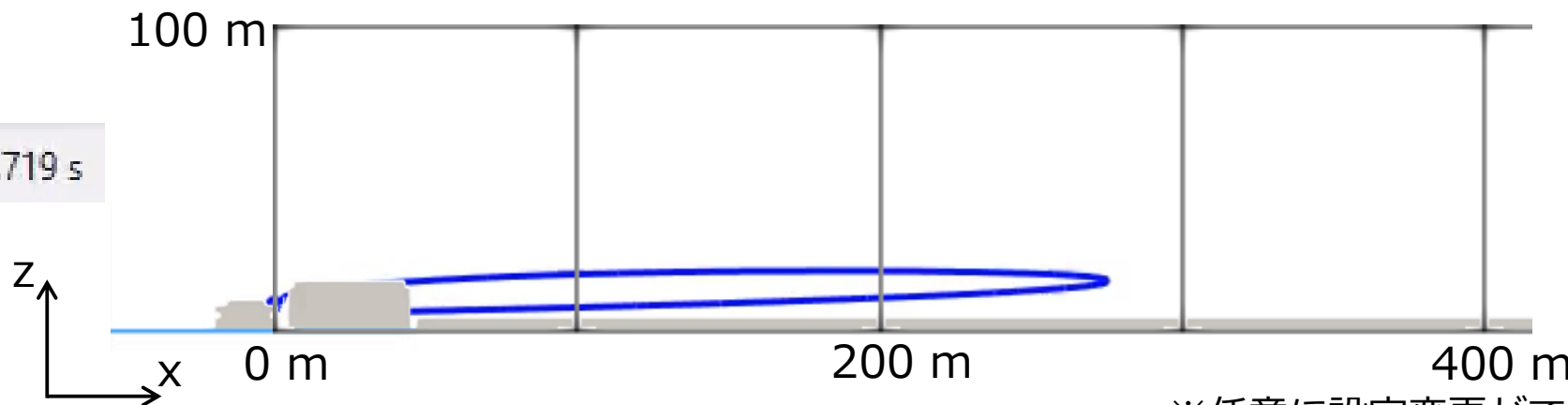


# アンモニア拡散解析対象シナリオ② (x-z断面 at y=0)



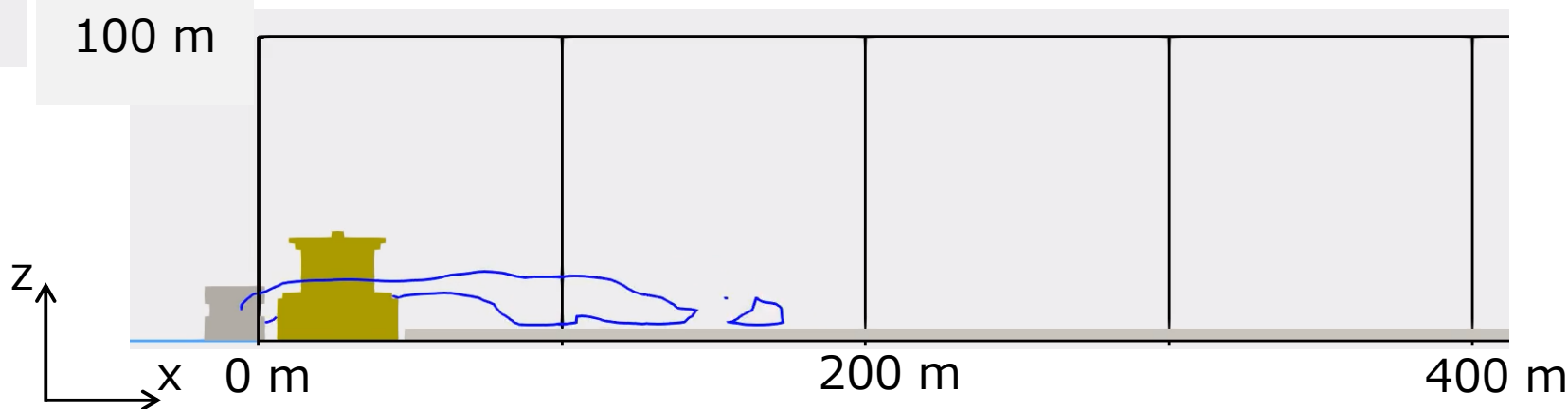
Phast※

Time 446.719 s



FDS

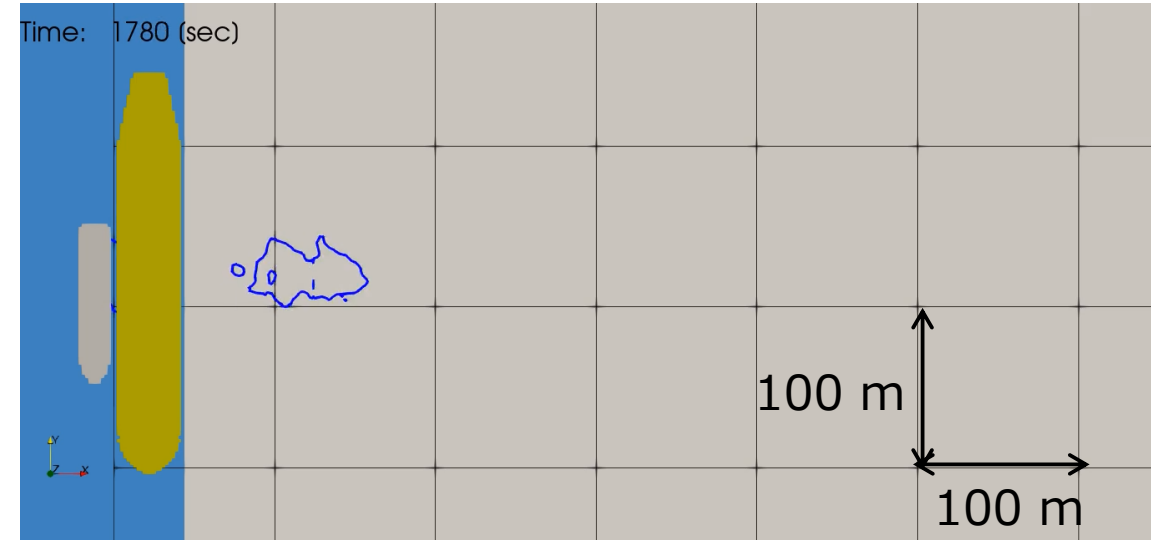
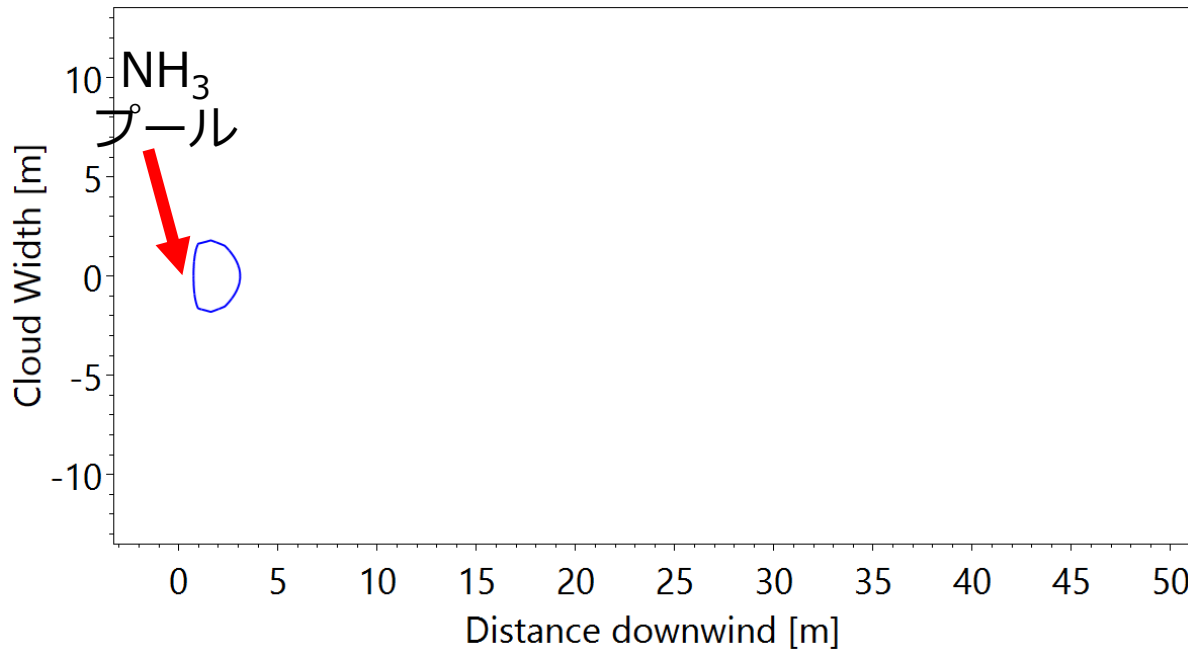
Time: 2665 (sec)



※任意に設定変更ができないため  
アニメーションフレーム間隔は不規則

- Phastでは、アンモニアガスのプルームが徐々に上昇していく
- FDSでは、バルクキャリアの背後の剥離渦の影響で、アンモニアガスが地面に降下する
- 船体周りの渦によって空気と混合し、希釈される

# アンモニア拡散解析対象シナリオ② (x-y断面 at z=5.5 m)



FDS

Phast (400 s後, 定常状態に至る)

- 岸壁上の人の顔の高さを地面から1.5 mと仮定すると、Phastではプール近傍の範囲において100 ppmの濃度範囲となる
- FDSでは、プール直上に加えて船体背後から風下方向に離れた地点で100 ppmの濃度範囲となる
- 一般的に、一次元積分モデルは遠方まで拡散範囲が及ぶ安全側の結果を与える傾向があるが、障害物の影響を考慮しないことで過少な評価結果を与える場合があることが分かった

- 2つの数値シミュレーション手法（積分モデル、CFDモデル）による、漏えい・ガス拡散解析による定量的な影響度予測について比較を行った
- 積分モデルの1つであるPhastによる解析では、1分程度の非常に短時間で結果が得られるものの、船体構造によって流れが剥離して生じる渦流れを考慮できないため、地上の評価点において基準濃度のガスが降下せず危険側の予測を与える場合がある
- CFDモデルの1つであるFDSは、船体構造によって生じる剥離渦や非定常な移流拡散現象を再現することができるものの、60コアの並列計算で1ケースあたり、気流の助走計算も含めて漏えい開始から1時間の計算に12時間を要した
- リスク分析における事前のケーススタディだけでなく、実際にアンモニアの漏えい事故が発生した際に、緊急時対応のために1、2時間程度の短期的な拡散予測を行うには時間的コストが大きいいため、精度と計算コストのバランスに優れる手法の開発を行っていく

ご清聴ありがとうございました



国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所  
**海上技術安全研究所**  
National Maritime Research Institute

