

# 内航カーボンニュートラルに向けた 新技術の安全評価手法の構築

2022年度 成果報告書  
概要版

2023年 3月



一般財団法人 日本船舶技術研究協会



## 目 次

1.	事業の概要	1
1.1	目的	1
1.2	目標	1
1.3	事業内容	1
1.4	委員会の設置	2
2.	水素燃料電池船の同等安全証明のための標準安全評価手法の構築	4
2.1	概要	4
2.2	燃料タンクと燃料管の配置の代替設計に係るリスク評価	5
2.3	燃料タンクの圧力逃がし弁とベント装置の配置の設定に係るリスク評価	5
3.	新コンセプト船の代替設計のための安全評価手法の構築	6
3.1	概要	6
3.2	コンテナ電源ハイブリッド船	7
3.3	連結ユニット型プッシャーバージ輸送船	8
4.	まとめ	10
添付資料 1	事業計画	11
添付資料 2	内航カーボンニュートラルに向けた新技術の安全評価手法の検討委員会 名簿	14
添付資料 3	水素燃料電池船に係るリスク評価の概要 ・燃料タンクと燃料管の配置の代替設計に係るリスク評価 ・燃料タンクの圧力逃がし弁とベント装置の配置の設定に係るリスク評価	16
添付資料 4	水素燃料電池船のリスク評価手順書 ・燃料タンクと燃料管の配置の代替設計に係るリスク評価手順書	29
添付資料 5	水素燃料電池船のリスク評価手順書 ・燃料タンクの圧力逃がし弁とベント装置の配置の設定に係るリスク評価手順書	40
添付資料 6	コンテナ電源ハイブリッド船に係るリスク評価の概要 ・内燃機関及び燃料格納設備収納のコンテナ電源ユニット ・電池収納のコンテナ電源ユニット	57
添付資料 7	コンテナ電源ハイブリッド船に係るリスク評価の HAZID ワークシート ・内燃機関及び燃料格納設備収納のコンテナ電源ユニット ・電池収納のコンテナ電源ユニット	71



## 1. 事業の概要

### 1.1 目的

※日本財団助成申請書からの転載

国の内航船対策・日本財団の ZERO EMISSION 2050 を受け、内航カーボンニュートラルに向けた新技術の導入の環境整備が今後進められる予定である。

環境整備の一つの内航の新技術の安全基準は、外航船の条約基準ベースで整備されているが、内航船適用が困難なことを踏まえ同等安全証明（安全評価）した場合は要件緩和ができる。しかし、導入実績が少なく内航建造の造船所が証明するのは困難で、特に新コンセプト船は代替設計の高度な証明が必要となる。

このため、標準的な安全評価手法を構築し、以て脱炭素化・船舶産業の発展の一助とすることを目的とする。

### 1.2 目標

※日本財団助成申請書からの転載

#### (1) 本事業の達成目標

内航カーボンニュートラルに向けた新技術の基準緩和の同等安全証明（安全評価）では、国際海事機関が定める代替設計承認ガイドラインに準じた同等安全の証明が必要になる。証明には、リスク解析に基づく定性評価に加え、シミュレーション等による定量評価の実施が必要になる。しかしながら、内航の新技術の有効な対策の一つとして検討される水素燃料化（燃料電池・水素エンジン）については、船舶分野での使用実績が少なく火災爆発等のリスクを特定するのが難しく、漏洩拡散、爆発可燃限界をシミュレーション等で定量的に解明することは、内航船を建造する小型造船所には技術的にハードルが高い。特に新コンセプト船の場合は、前例がないために高度な証明が必要でさらに困難となる。

このため、内航の新技術の普及の環境整備の一つとして、水素燃料・新コンセプト船の標準的な安全評価手法を構築する。

#### (2) 期待される効果

内航海運の CO2 排出量は約 1,038 万 t-CO2（2019 年度）で運輸部門の 4.9%・日本全体の 0.91%を占める。近年の排出量は微減傾向にあるが、「2050 年のカーボンニュートラル実現」を達成するには、内航カーボンニュートラルの実現に向けた新技術の普及が不可欠である。本事業で標準安全評価手法を構築することにより、水素燃料等の内航への本格普及が進むことで、国内の脱炭素化の進展が期待されるだけでなく、内航の新技術の社会実装化は、我が国が船舶産業の発展を促すこととなる。

### 1.3 事業内容

※日本財団助成申請書からの転載

#### (1) 水素燃料電池船の同等安全証明のための標準安全評価手法の構築

- ・その他水素燃料使用の水素燃料電池船の標準安全評価手法の開発・検証（陸機の圧縮水素機器の船舶活用の同等安全）

#### (2) 新コンセプト船の代替設計のための安全評価手法の構築

- ・連結ユニット型プッシャーバージ輸送船の標準安全評価手法の開発・検証（水槽実験、連結強度等の安全評価）
- ・連携型省エネ船対応の船内電化・自動化システムの標準安全評価手法の開発・検証（概念設計・従来船比較の安全評価等による同等安全）

### 1.4 委員会の設置

本事業を円滑に遂行するために、外部有識者及び関係者等からなる「内航カーボンニュートラルに向けた新技術の安全評価手法の検討委員会」を設置し、標準安全評価手法等の検討を実施した。

添付資料 2 に委員会の名簿を示す。

図 1.1 に背景・目的、事業概要、事業計画（実施内容とスケジュール）等の本事業の概要を示す。

## 内航カーボンニュートラルに向けた新技術の安全評価手法の構築



### □ 背景・目的

- 世界的な脱炭素化が進む中、国内も2050年のカーボンニュートラル実現に向け官民をあげた取組みが進行。外航海運は既に国際海事機関で検討されているが、国内物流を支える内航海運は検討がはじまったばかり。国交省の検討会・日本財団のZERO EMISSION 2050を受け、内航カーボンニュートラル実現の環境整備が今後進められる予定。
- 環境整備の一つである安全基準は、外航大型船の条約基準をベースに内航船基準（小型船）の整備を進めているが、21年8月公表の燃料電池船安全ガイドラインなど大型船前提の基準適用が困難なことを踏まえリスク評価、シミュレーション等により同等安全証明（安全評価）した場合は適用基準の緩和が可能。しかしながら、カーボンニュートラル実現に向けた技術の導入実績が少ない中、内航船建造の小型造船所が安全評価を行うのは困難な状況にあり、499GT級等の内航太宗船の代替燃料化のための新コンセプト船に必要な代替設計承認のための安全評価の実施はさらに困難。
- 内航カーボンニュートラルの実現に向けた新技術の安全評価手法を構築するための研究開発を実施。

### □ 事業概要

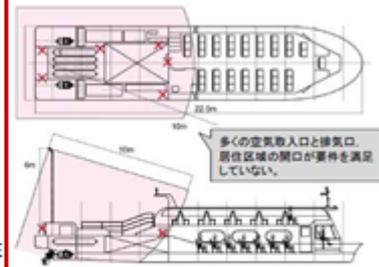
- 実施期間：2022年度～2023年度（2年間）

#### ➢ 実施内容

- ① 水素燃料電池船の同等安全証明のための標準安全評価手法の構築
  - ・ タンク配置、バント位置等の要件緩和の同等安全証明を衝突・漏洩シミュレーション等の詳細計算なしに対応できる安全評価手法を構築（定式化等）。
- ② 新コンセプト船の代替設計のための安全評価手法の構築
  - ・ コンテナ電源ハイブリッド船（LNG・水素燃料による将来のゼロエミッション化）、連結ユニット型プッシャーバージ輸送船（連結バージの効率輸送によるGHG排出削減）など新コンセプト船の代替設計に必要な安全評価手法を構築（概念設計+安全評価）。

- 予算：3,976万円（100%助成）

2022年度2,987万円、2023年度・989万円 ※増額検討中



水素燃料電池船安全ガイドの要件緩和の例（バント高さ・開口部からの隔離距離）

## 内航カーボンニュートラルに向けた新技術の安全性評価手法の構築 (別添1) 事業計画 (実施内容とスケジュール)



### □ 事業内容

- ① 水素燃料電池船の同等安全証明のための標準安全評価手法の構築
  - a. 圧縮水素燃料使用の水素燃料電池船の標準安全評価（タンク配置・バント位置の同等安全証明）
  - b. その他水素燃料使用の水素燃料電池船の標準安全評価（液化水素等のリスク評価）
- ② 新コンセプト船の代替設計のための安全評価手法の構築
  - a. コンテナ電源ハイブリッド船の標準安全評価（概念設計+安全評価）
  - b. 連結ユニット型プッシャーバージ輸送船の標準安全評価（概念設計+安全評価）
  - c. 連携型省エネ船対応の船内電化・省力化システムの標準安全評価（概念設計+安全評価） ※検討中

2022年度				2023年度			
1/4半期	2/4半期	3/4半期	4/4半期	1/4半期	2/4半期	3/4半期	4/4半期
①水素燃料電池船の同等安全証明のための標準安全評価手法の構築							
a.圧縮水素燃料FC船							
		b.その他水素燃料FC船					
②新コンセプト船の代替設計のための安全評価手法の構築							
a.コンテナ電源ハイブリッド船							
b.連結ユニット型プッシャーバージ輸送船				水槽実験・連結強度 ※検討中			
				c.船内電化・省力化システム（甲板・機関） ※検討中			

図 1.1 本事業の概要

## 2. 水素燃料電池船の同等安全証明のための標準安全評価手法の構築

### 2.1 概要

水素燃料電池船の同等安全証明のための標準安全評価手法として、次のリスク評価を実施し、その手順書を作成した。

図 2.1 に実施内容の概要を示す。

#### (1) 燃料タンクと燃料管の配置の代替設計に係るリスク評価の手順書

国土交通省の水素燃料電池船の安全ガイドラインの第 5.3.3 項（燃料タンクの配置）及び第 5.7.1 項（燃料管の配置・船側からの距離）において「検査機関が安全と認める場合」として代替設計する際に必要なリスク評価の方法を定める手順書

#### (2) 燃料タンクの圧力逃がし弁とベント装置の配置の設定に係るリスク評価の手順書

国土交通省の水素燃料電池船の安全ガイドラインの第 6.5 項（圧力逃し装置）において「ベント出口の適切な高さ」及び「圧力逃し弁からの出口の空気取入口等からの適切な距離」を設定する際に必要なリスク評価の方法を定める手順書

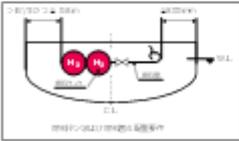
### 内航カーボンニュートラルに向けた新技術の安全性評価手法の構築 (別添2) 事業概要①水素燃料電池船の標準安全評価手法の構築



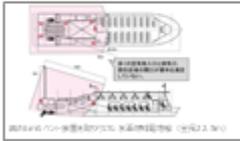
➤ 実施内容

- タンク配置、ベント位置等の要件緩和の同等安全証明を衝突・漏洩シミュレーション等の詳細計算なしに対応できる安全評価手法を構築（定式化等）。

- ❑ 大阪万博中の実証実験を計画する岩谷産業提供の圧縮水素燃料使用のカタラン型水素燃料電池船を安全評価の供試船として使用。
- ❑ 要件緩和の同等安全証明に必要な次の安全評価を実施。
  - タンク配置の代替設計
    - 区画別の衝突確率（船首・中央・船尾の衝突リスクを踏まえた配置）
    - 衝突時の船殻貫通シミュレーション（船側・船底からのタンク隔離距離）
  - ベント位置の代替設計
    - 水素の漏洩確率（配管等の通常使用の最大漏洩量の推定）
    - 水素ガスの拡散シミュレーション（拡散距離を踏まえた爆発下限界）
- ❑ 液化水素その他燃料の安全調査を実施し次年度の評価法案を検討。



タンク配置の代替設計の安全評価イメージ  
(被衝突箇所を踏まえた船殻貫通確率の定式化)



ベント位置の代替設計の安全評価イメージ  
(ガス拡散シミュレーションの結果を踏まえた爆発下限界の定式化)



水素燃料電池船の完成イメージ  
(出典：岩谷産業HP)

➤ プロジェクト参加者

- 内航カーボンニュートラルに向けた新技術の安全評価手法の検討委員会
- (水素FC船・調査協力) 名村造船所、海上技術安全研究所

図 2.1 「水素燃料電池船の同等安全証明のための標準安全評価手法の構築」の概要

## 2.2 燃料タンクと燃料管の配置の代替設計に係るリスク評価

添付資料 3 にリスク評価の概要を示す。

添付資料 4 に作成したリスク評価手順書を示す。

## 2.3 燃料タンクの圧力逃がし弁とベント装置の配置の設定に係るリスク評価

添付資料 3 にリスク評価の概要を示す。

添付資料 5 にリスク評価の手順書を示す。

### 3. 新コンセプト船の代替設計のための安全評価手法の構築

#### 3.1 概要

コンテナ電源ハイブリッド船及び連結ユニット型プッシャーバージ輸送船

図 3.1 に実施内容の概要を示す。

##### (1) コンテナ電源ハイブリッド船

LNG 燃料使用の発電用内燃機関・燃料格納設備・蓄電池をコンテナ等に収納しパッケージ化し、電気推進するコンテナ電源ハイブリッド船。

##### (2) 連結ユニット型プッシャーバージ輸送船

バージを 3 連結（縦 1 個から 3 個×横 1 個）するプッシャーバージ輸送船。連結ユニット型プッシャーバージ輸送船に連結され、港内において自律運航するバージ（自律運航バージ）。

**内航カーボンニュートラルに向けた新技術の安全性評価手法の構築**  
**(別添2) 事業概要②新コンセプト船の代替設計のための安全評価手法の構築**



---

➤ **実施内容**

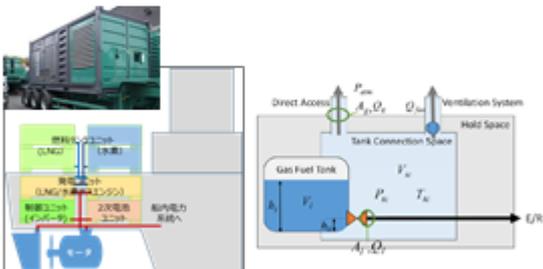
- コンテナ電源ハイブリッド船、連結ユニット型プッシャーバージ輸送船など新コンセプト船の代替設計に必要な安全評価手法を構築（概念設計+安全評価）。

□ **コンテナ電源ハイブリッド船**

- 機関室レス化と完全電動化をコンセプトに、LNG、水素等の様々な燃料展開による将来のゼロエミッション化にも対応可能な「コンテナ電源ハイブリッド船」（主発電・蓄電池パッケージ化等）の実現に必要な安全評価を実施。
- 概念設計（電源ユニット・ポンプ等のパッケージ化等）
- リスク評価（燃焼ユニット・燃料供給の火災リスク等）

□ **連結ユニット型プッシャーバージ輸送船**

- ゼロエミ技術適用の制約ある199GT内航船について、トラック無人隊列走行を参考に連結バージの効率輸送によるGHG排出削減と自律バージの港内着積をコンセプトとする「連結ユニット型プッシャーバージ輸送船」の実現に必要な安全評価を実施。
- 概念設計（船体運動・操縦性・バージ連結強度等）
- リスク評価（連結バージ船・自律バージの航行区域等）



コンテナ電源ハイブリッド船の安全評価イメージ  
 (コンテナ内ガス滞留時の必要通風量の計算)



連結ユニット型プッシャーバージ輸送船の安全評価イメージ  
 (連結バージにかかる流体力 (上) と自律バージの港内着積 (下))

➤ **プロジェクト参加者**

- 内航カーボンニュートラルに向けた新技術の安全性評価手法の検討委員会
- (コンテナ電源・調査協力) 赤阪鐵工所・海上技術安全研究所、(連結PB・調査協力) 本瓦造船・ナカシマプロペラ

図 3.1 「新コンセプト船の代替設計のための安全評価手法の構築」の概要

## 3.2 コンテナ電源ハイブリッド船

### 3.2.1 概要

LNG 燃料使用の発電用内燃機関、蓄電池等をコンテナ等に収納しパッケージ化し、電気推進するために船舶に搭載するコンテナ電源のコンテナ電源ユニットについて、図 3.2 に示す総トン数 749 トンの内航貨物船に搭載することを前提に、次のリスク評価の HAZID (Hazard identification) ワークシートを作成した (バンカリングオペレーションを除く)。

(1) 内燃機関及び燃料格納設備収納のコンテナ電源ユニットのリスク評価

- ・国際ガス燃料船安全コード (IGF コード) 第 4.2.1 項で求められるリスク評価

(2) 蓄電池収納のコンテナ電源ユニットのリスク評価

- ・国土交通省、船級協会など検査機関などにおいて蓄電池本体に求められるリスク評価 (一般財団法人日本海事協会発行の大容量蓄電池ガイドライン第 4 章第 9 項などを参照)

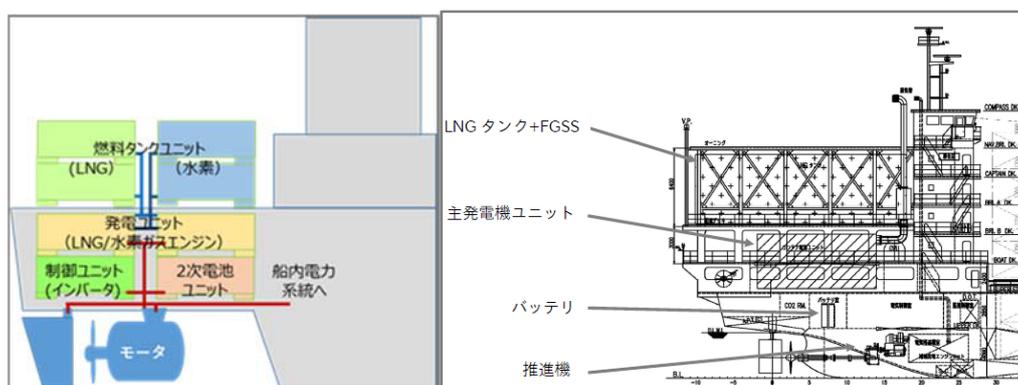


図 3.2 コンテナ電源ユニットの総トン数 749 トンの内航貨物船への搭載イメージ

### 3.2.2 コンテナ電源ハイブリッド船に係るリスク評価

添付資料 6 にリスク評価の概要を示す。

添付資料 7 にリスク評価の HAZID (Hazard identification) ワークシートを示す。

### 3.3 連結ユニット型プッシャーバージ輸送船

#### 3.3.1 概要

瀬戸内海を航行することを前提に連結ユニット型プッシャーバージ輸送船の検討を行った。

図 3.2 に示す開発コンセプトの整理を示す。

開発コンセプト（当初案）について内航輸送事業者、バージ輸送事業者と意見交換を実施したところ、①バージの大型化及び②瀬戸内海での播磨灘沖の一部沿海区域の航行が、ニーズとして寄せられた。

ニーズ①については、バージ単体の大きさを総トン数 199GT・載貨重量 850DWT として概念設計を実施した。図 3.3 に連結ユニット型プッシャーバージ輸送船の主要寸法を示す。

ニーズ②については、必要な初期検討を実施し、水槽実験含む詳細検討は図 3.4 に示すとおり 2023 年度事業で実施することとした。

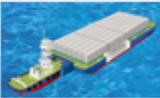
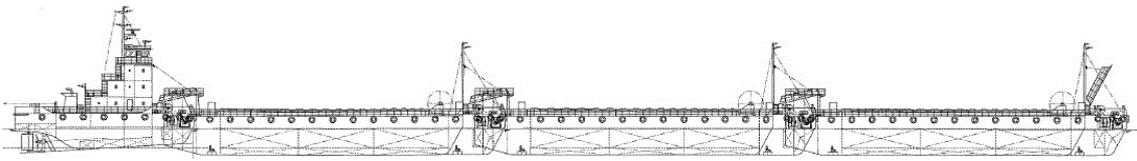
連結ユニット型プッシャーバージ輸送船の検討 開発コンセプト			JSIRA	
▶ ゼロエミ技術適用制約ある内航199GTについて、トラック無人隊列走行を参考にバージ効率輸送によるGHG排出削減と自律バージ港内着積をコンセプトに「連結ユニット型プッシャーバージ輸送船」実現				
	今回のコンセプト 小型バージ連結船	中期検討コンセプト 中型バージ連結船	参考 コンテナ専用バージ船	
航行区域	平水区域（瀬戸内海） 河川・港内	沿海区域 大型河川	平水区域（東京湾） 河川・港内	
複数バージ連結	縦1～3×横1	縦1～3×横1～2	コンテナ縦4×横7×高3個 (84FEU/・749フィーダー級)	
単バージ大きさ	小型 (199GT級・500DWT)	中型 (499GT級・1000DWT)	通常コンテナ (20フィート級)	
船舶大きさ	3連結で約130m	※確認中	バージ65m 押し船20m	
押船・引船	押船	押船	押船	
切離しバージ接岸	操船あり（自律）	操船なし	操船なし	
その他	▶ 事例なし	▶ 事例あり（海外河川）	▶ 事例あり（海外・国内）	

図 3.2 連結ユニット型プッシャーバージ輸送船の開発コンセプト（当初案）



	① 押船+バージ×1	② 押船+バージ×2	③ 押船+バージ×3	備考
全長	71.75m	117.20m	162.75m	
垂線間長	69.55m	115.00m	160.50m	
幅	10.00m	10.00m	10.00m	
深さ	5.85m	5.85m	5.85m	
満載喫水	3.75m	3.75m	3.75m	
総トン数	約 291トン	約 489トン	約 687トン	
載貨重量	約 850ton	約 1700ton	約 2550ton	バージのみ
ホールド容積	約 1155m <sup>3</sup>	約 2310m <sup>3</sup>	約 3465m <sup>3</sup>	バージのみ

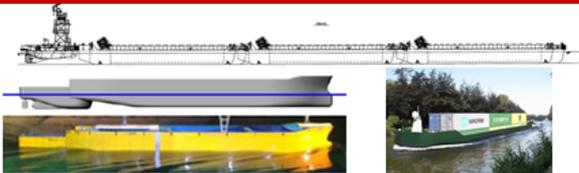
図 3.3 連結ユニット型プッシャーバージ輸送船の主要寸法

②b. 連結ユニット型プッシャーバージ輸送船（継続）

- 限定沿海航行・操縦性を考慮した水槽試験による連結強度の計算方法の構築、切り離しバージの港内自動運航の安全検証の実施。

②b. 連結ユニット型プッシャーバージ輸送船の課題

- 199GT内航船・バージの輸送ニーズは、平水区域が設定される京浜地区・中京地区・瀬戸内地区が高い。
- 瀬戸内地区は淡路島付近（播磨灘）に一部沿海区域が存在し、複数バージの連結強度等が課題。



連結バージの水槽試験イメージ  
(実際は3体のバージ連結を予定)

欧州の自動運航バージ  
(河川内の往復運航)



瀬戸内地区の航行区域 (赤：平水区域；灰色：沿海区域)

図 3.4 連結ユニット型プッシャーバージ輸送船の 2023 年度調査研究の計画の概要

#### 4. まとめ

内航カーボンニュートラルに向けた新技術の安全評価手法の構築として、次を実施した。

##### (1) 水素燃料電池船の同等安全証明のための標準安全評価手法の構築

- ・燃料タンクと燃料管の配置の代替設計に係るリスク評価
- ・燃料タンクの圧力逃がし弁とベント装置の配置の設定に係るリスク評価

##### (2) 新コンセプト船の代替設計のための安全評価手法の構築

###### ① コンテナ電源ハイブリッド船

- ・内燃機関及び燃料格納設備収納のコンテナ電源ユニットのリスク評価
- ・電池収納のコンテナ電源ユニット及び電池収納のコンテナ電源ユニットのリスク評価

###### ② 連結ユニット型プッシャーバージ輸送船

- ・開発コンセプトの検討及び概念設計

本事業は2023年まで継続するものであり、安全評価手法の構築により、もって内航カーボンニュートラルの実現に向けた環境整備の一助とれば幸いである。

添付資料 1

事業計画

## 内航カーボンニュートラルに向けた新技術の安全評価手法の構築

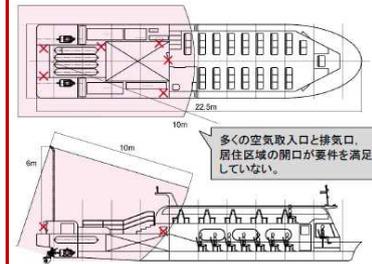


### □ 背景・目的

- 世界的な脱炭素化が進む中、国内も2050年のカーボンニュートラル実現に向け官民をあげた取組みが進行。外航海運は既に国際海事機関で検討されているが、国内物流を支える内航海運は検討がはじまったばかり。国交省の検討会・日本財団のZERO EMISSION 2050を受け、内航カーボンニュートラル実現の環境整備が今後進められる予定。
- 環境整備の一つである安全基準は、外航大型船の条約基準をベースに内航船基準（小型船）の整備を進めているが、21年8月公表の燃料電池船安全ガイドラインなど大型船前提の基準適用が困難なことを踏まえリスク評価、シミュレーション等により同等安全証明（安全評価）した場合は適用基準の緩和が可能。しかしながら、カーボンニュートラル実現に向けた技術の導入実績が少ない中、内航船建造の小型造船所が安全評価を行うのは困難な状況にあり、499GT級等の内航太宗船の代替燃料化のための新コンセプト船に必要な代替設計承認のための安全評価の実施はさらに困難。
- 内航カーボンニュートラルの実現に向けた新技術の安全評価手法を構築するための研究開発を実施。

### □ 事業概要

- 実施期間：2022年度～2023年度（2年間）
- 実施内容
  - ① 水素燃料電池船の同等安全証明のための標準安全評価手法の構築
    - ・ タンク配置、バント位置等の要件緩和の同等安全証明を衝突・漏洩シミュレーション等の詳細計算なしに対応できる安全評価手法を構築（定式化等）。
  - ② 新コンセプト船の代替設計のための安全評価手法の構築
    - ・ コンテナ電源ハイブリッド船（LNG・水素燃料による将来のゼロエミッション化）、連結ユニット型プッシャーバージ輸送船（連結バージの効率輸送によるGHG排出削減）など新コンセプト船の代替設計に必要な安全評価手法を構築（概念設計＋安全評価）。
- 予算：3,976万円（100%助成）  
2022年度2,987万円、2023年度・989万円 ※増額検討中



水素燃料電池船安全ガイドの要件緩和の例  
(バント高さ・開口部からの隔離距離)

## 内航カーボンニュートラルに向けた新技術の安全性評価手法の構築 (別添1) 事業計画 (実施内容とスケジュール)



### □ 事業内容

- ① 水素燃料電池船の同等安全証明のための標準安全評価手法の構築
  - a. 圧縮水素燃料使用の水素燃料電池船の標準安全評価（タンク配置・バント位置の同等安全証明）
  - b. その他水素燃料使用の水素燃料電池船の標準安全評価（液化水素等のリスク評価）
- ② 新コンセプト船の代替設計のための安全評価手法の構築
  - a. コンテナ電源ハイブリッド船の標準安全評価（概念設計＋安全評価）
  - b. 連結ユニット型プッシャーバージ輸送船の標準安全評価（概念設計＋安全評価）
  - c. 連携型省エネ船対応の船内電化・省力化システムの標準安全評価（概念設計＋安全評価） ※検討中

2022年度				2023年度			
1/4半期	2/4半期	3/4半期	4/4半期	1/4半期	2/4半期	3/4半期	4/4半期
①水素燃料電池船の同等安全証明のための標準安全評価手法の構築							
a.圧縮水素燃料FC船							
		b.その他水素燃料FC船					
②新コンセプト船の代替設計のための安全評価手法の構築							
a.コンテナ電源ハイブリッド船							
b.連結ユニット型プッシャーバージ輸送船				水槽実験・連結強度 ※検討中			
				c.船内電化・省力化システム（甲板・機関） ※検討中			

内航カーボンニュートラルに向けた新技術の安全性評価手法の構築  
**(別添2) 事業概要①水素燃料電池船の標準安全評価手法の構築**

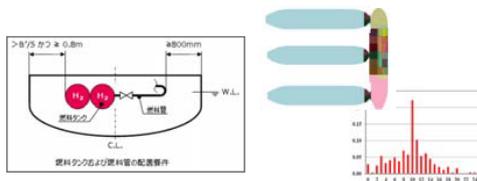


- 実施内容
  - タンク配置、バント位置等の要件緩和の同等安全証明を衝突・漏洩シミュレーション等の詳細計算なしに対応できる安全評価手法を構築（定式化等）。

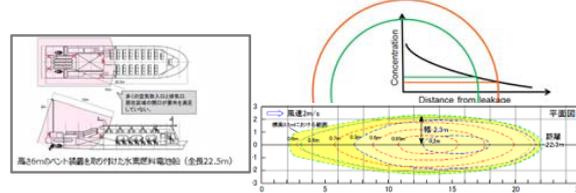
- ❑ 大阪万博中の実証実験を計画する岩谷産業提供の圧縮水素燃料使用のカタラン型水素燃料電池船を安全評価の供試船として使用。
- ❑ 要件緩和の同等安全証明に必要な次の安全評価を実施。
- タンク配置の代替設計
  - 区画別の衝突確率（船首・中央・船尾の衝突リスクを踏まえた配置）
  - 衝突時の船殻貫通シミュレーション（船側・船底からのタンク隔離距離）
- バント位置の代替設計
  - 水素の漏洩確率（配管等の通常使用の最大漏洩量の推定）
  - 水素ガスの拡散シミュレーション（拡散距離を踏まえた爆発下限界）
- ❑ 液化水素その他燃料の安全調査を実施し次年度の評価法案を検討。



水素燃料電池船の完成イメージ  
 (出典：岩谷産業HP)



タンク配置の代替設計の安全評価イメージ  
 (被衝突箇所を踏まえた船殻貫通確率の定式化)



バント位置の代替設計の安全評価イメージ  
 (ガス拡散シミュレーションの結果を踏まえた爆発下限界の定式化)

- プロジェクト参加者
  - 内航カーボンニュートラルに向けた新技術の安全性評価手法の検討委員会
  - (水素FC船・調査協力) 名村造船所、海上技術安全研究所

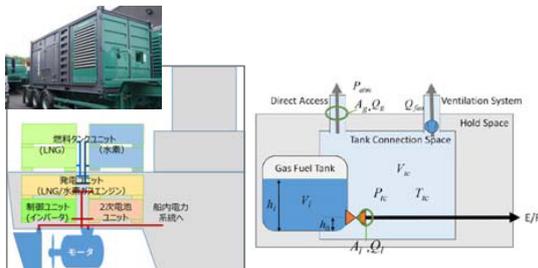
内航カーボンニュートラルに向けた新技術の安全性評価手法の構築  
**(別添2) 事業概要②新コンセプト船の代替設計のための安全評価手法の構築**



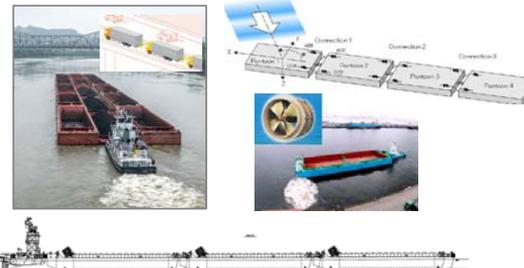
- 実施内容
  - コンテナ電源ハイブリッド船、連結ユニット型ブッシャーバージ輸送船など新コンセプト船の代替設計に必要な安全評価手法を構築（概念設計 + 安全評価）。

- ❑ コンテナ電源ハイブリッド船
  - 機関室レス化と完全電動化をコンセプトに、LNG、水素等の様々な燃料展開による将来のゼロエミッション化にも対応可能な「コンテナ電源ハイブリッド船」（主発電・蓄電池パッケージ化等）の実現に必要な安全評価を実施。
  - 概念設計（電源ユニット・ポンプ等のパッケージ化等）
  - リスク評価（燃焼ユニット・燃料供給の火災リスク等）

- ❑ 連結ユニット型ブッシャーバージ輸送船
  - ゼロエミ技術適用の制約ある199GT内航船について、トラック無人隊列走行を参考に連結バージの効率輸送によるGHG排出削減と自律バージの港内着積をコンセプトとする「連結ユニット型ブッシャーバージ輸送船」の実現に必要な安全評価を実施。
  - 概念設計（船体運動・操縦性・バージ連結強度等）
  - リスク評価（連結バージ船・自律バージの航行区域等）



コンテナ電源ハイブリッド船の安全評価イメージ  
 (コンテナ内ガス漏洩時の必要通風量の計算)



連結ユニット型ブッシャーバージ輸送船の安全評価イメージ  
 (連結バージにかかる流体力(上)と自律バージの港内着積(下))

- プロジェクト参加者
  - 内航カーボンニュートラルに向けた新技術の安全性評価手法の検討委員会
  - (コンテナ電源・調査協力) 赤阪鐵工所・海上技術安全研究所、(連結PB・調査協力) 本瓦造船・ナカシマプロペラ

## 添付資料 2

内航カーボンニュートラルに向けた新技術の安全評価手法の

検討委員会 名簿

## 2022年度 内航カーボンニュートラルに向けた新技術の安全評価手法の検討委員会 委員名簿

2022/9/12現在

	氏名	勤務先	
委員長	1 平田 宏一	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 特別研究主幹	
委員	2 井原 智則	国立大学法人東京海洋大学 学術研究院 海洋電子機械工学部門 助教	
	3 佐野 将昭	国立大学法人広島大学 大学院先進理工系科学研究科 輸送・環境システムプログラム 海上輸送システム研究室 准教授	
	4 伊崎 朋康	独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構 共有船舶建造支援部長	
	5 迫 洋輔	日本小型船舶検査機構 業務部 検査検定課 課長	
	6 宮下 和哉	一般財団法人日本海事協会 技術部 主任	
	7 三好 良	川崎汽船株式会社 GHG削減戦略グループ GHG削減戦略チーム長	
	8 土澤 基直	株式会社商船三井 技術部 プロジェクトリーダー	
	9 土肥 晴司	株式会社商船三井内航 環境安全管理部長	
	10 相澤 祐輔	日本郵船株式会社 工務グループ グリーン技術チーム	
	11 高嶺 研一	一般社団法人日本造船工業会 技術部長	
	12 山本 哲也	川崎重工業株式会社 エネルギーソリューション&マリンカンパニー 船舶海洋デバイス部 技術総括部 新事業推進部 部長	
	13 山元 康博	株式会社名村造船所 船舶海洋事業部 設計本部 技術開発センター長	
	14 中田 崇	三井E&S造船株式会社 設計部 開発グループ 主管	
	15 森本 晋介	三菱造船株式会社 マリンエンジニアリングセンター船舶技術部 計画1グループ ガス船計画チーム チーム統括	
	16 洲之内 満彦	一般社団法人日本中小型造船工業会 技術部長代理 兼 企画調査室長	
	17 日高 豊	佐伯重工業株式会社 取締役 設計部 部長 兼 装置開発事業部 部長	
	18 本瓦 誠	本瓦造船株式会社 代表取締役 社長	
	19 鈴木 隆男	一般社団法人日本船用工業会 技術部長	
	20 藤田 勝也	株式会社赤阪鐵工所 事業企画室 顧問	
21 戸松 憲治	商船三井テクノトレード株式会社 新規ビジネス推進室 テクニカル・アドバイザー		
22 徳本 学	ダイハツディーゼル株式会社 技術統括本部 技術知財企画室 主査		
23 竹ノ子 祐二	ナカシマプロペラ株式会社 東京支店 営業グループ 次長		
24 清河 勝美	ヤンマーパワーテクノロジー株式会社 特機事業部 システムエンジニアリング部 部長		
25 藏本 由紀夫	吉祥海運株式会社 代表取締役		
26 鈴木 英二郎	鈴与海運株式会社 代表取締役社長		
27 大西 祥太郎	一般社団法人内航ミライ研究会 IoTグループ デジタルチーム長		
28 西村 洋佑	一般財団法人日本造船技術センター 海洋技術部 技術課長		
関係者	29 木村 新太	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 リスク解析研究グループ	
	30 工藤 潤一	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 リスク解析研究グループ	
関係官庁	31 河合 崇	国土交通省 海事局 海洋・環境政策課 技術企画室長	
	32 森吉 直樹	国土交通省 海事局 安全政策課 船舶安全基準室 補佐	
	33 小田原 勝教	国土交通省 海事局 検査測度課 船舶検査官	
	34 岡井 功	国土交通省 中国運輸局海上安全環境部 首席海事技術専門官（船舶検査官）	
	35 今岡 宏治	国土交通省 中国運輸局尾道海事事務所 海事技術専門官（船舶検査官）	
	事務局	36 平原 祐	一般財団法人日本船舶技術研究協会 参与
		37 松井 裕	一般財団法人日本船舶技術研究協会 研究開発グループ長
38 井下 聡		一般財団法人日本船舶技術研究協会 研究開発グループ ユニット長	
39 戸村 郁美		一般財団法人日本船舶技術研究協会 研究開発グループ研究開発ユニット	

### 添付資料 3

#### 水素燃料電池船に係るリスク評価の概要

- 燃料タンクと燃料管の配置の代替設計に係るリスク評価
- 燃料タンクの圧力逃がし弁とベント装置の配置の設定に係るリスク評価

# 水素燃料電池船の標準安全評価手法

水素燃料電池船の標準安全評価手法

## 目次

---



### □ 概要

- 背景、目的

### □ 燃料タンクと燃料管の配置の代替設計に係るリスク評価

- 調査研究の概要
- リスク評価の方法・試解析の結果
- 参考資料

### □ ベント装置の配置の設定に係るリスク評価

- 調査研究の概要
- リスク評価の方法・試解析の結果
- 参考資料

## □ 背景・目的

- 世界的な脱炭素化が進む中、とりわけ国内物流を支える内航カーボンニュートラル実現の環境整備が今後進められる予定である。
- 国交省海事局では、水素燃料電池船の安全ガイドラインを整備。大型船前提の基準適用が困難なことを踏まえ、代替設計を認めている。
- ベント出口の高さ確保、ベント出口と空気取入口との距離確保などの代替設計は小規模の造船所では実施困難

➔ 内航小型船を対象とした代替設計のための同等安全性評価ガイドが必要とされている

- 現在建造に向けた検討が進められている水素燃料電池船を対象
- 同等安全性評価のためのリスク評価資料を作成する

【本検討において同等安全性評価の対象とする基準】

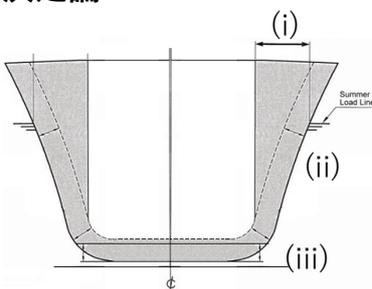
1. 水素燃料電池船の安全ガイドラインの第5.3.3項 **（燃料タンクの配置）** の同等安全性評価方法
2. 水素燃料電池船の安全ガイドラインの第6.5項において **「ベント出口の適切な高さ」** 及び **「空気取入口等からの適切な距離」** の設定方法

3

## □ 背景

- 安全ガイドライン5.5.3では、タンクを外部損傷から保護するため外板からの距離の確保を要求
- 決定論と確率論の2種類の方法から選択できる

## 決定論



安全ガイドライン5.3.3には次の指定がある。

- (i) 夏季満載喫水線から水平方向に $B/5$ 、
- (ii) 外板からの距離として、旅客船は $B/15$ 又は $2m$ 、貨物船は燃料タンク容積に応じて $0.8-2m$
- (iii) センターライン上の船底外板から $B/15$ と $2m$ の小さい方

➔ 小型船の場合には、設計の自由度が限られる可能性があるため、タンクの設置可能範囲の拡大が望まれている。

4

□ 背景

- 安全ガイドライン5.5.3では、タンクを外部損傷から保護するため外板からの距離の確保を要求
- 決定論と確率論の2種類の方法から選択できる

確率論

安全ガイドライン5.3.4にて、夏季満載喫水線からの水平距離の代替としてIGFコード5.3.4項を参照しており、衝突が発生した際に、タンクの外板の場所まで損傷が至る確率 $f_{CN}$ にて評価する。

$$f_{CN} = f_l \times f_t \times f_v \quad (1)$$

$f_l$  : 船の長さ方向の確率、 $f_t$  : 幅方向の確率、 $f_v$  : 深さ方向の確率

$$J \leq J_k: \quad f_l = \frac{1}{6} J^2 (b_{11} J + 3b_{12}) \quad (2)$$

$$J > J_k: \quad f_l = -\frac{1}{3} b_{11} J^3 + \frac{1}{2} (b_{11} J - b_{12}) J^2 + b_{12} J J_1 - \frac{1}{3} b_{21} (J^3 - J_k^3) + \frac{1}{2} (b_{21} J - b_{22}) (J^2 - J_k^2) + b_{22} J (J - J_k) \quad (3)$$

$$J = \frac{x_2 - x_1}{L} \quad (4)$$

$f_{CN}$ が旅客船は0.02未満、貨物船は0.04未満が求められている。



タンクの設置場所と大きさ、その場所の損傷確率を考慮した長さ方向の確率 $f_l$ を使用したい

□ 長さ方向の損傷確率 $f_l$ の計算方法（提案）

- 船舶を長さ方向に3等分する
- 衝突事故のうち、各部分で発生した割合Pを調査する
- 各部分の割合から、各部分の損傷確率を求め、燃料タンク長さを掛けたものを合算して長さ方向の損傷確率  $f_l$  とする



$$f_l = P_{aft} (l_{aft}/(Ls/3)) + P_{mid} (l_{mid}/(Ls/3)) + P_{fore} (l_{fore}/(Ls/3)) \quad (5)$$

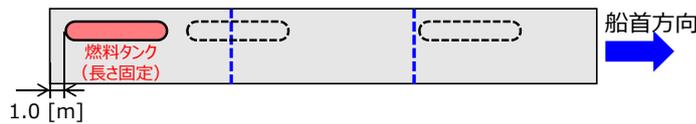
[調査結果] 衝突事故のうち、各部分で発生した割合P  
 ・海難審判庁裁判録（平成17年）から、衝突事故を抽出  
 ・総トン数が20以上499以下の船舶に絞り込み（109隻）  
 ・各部分で発生した割合を算出  
 後部( $P_{aft}$ )13%、中央部( $P_{mid}$ )16%、前部( $P_{fore}$ )72%

□ 試解析

- コードの  $f_i$  (式2) と、提案式の  $f_i$  (式5) を比較する (試解析1のみ提示)
- コードと提案式の  $f_{CN}$  (式1) を比較し、船側からの可能な距離  $b$  を求める

➢ 試解析の解析ケース

- 試解析1 タンク位置を前後方向に変えた場合 (タンク長さを固定)



- 試解析2 タンク長さを変えた場合 (タンクの後端位置を固定)



➢ 試解析の条件

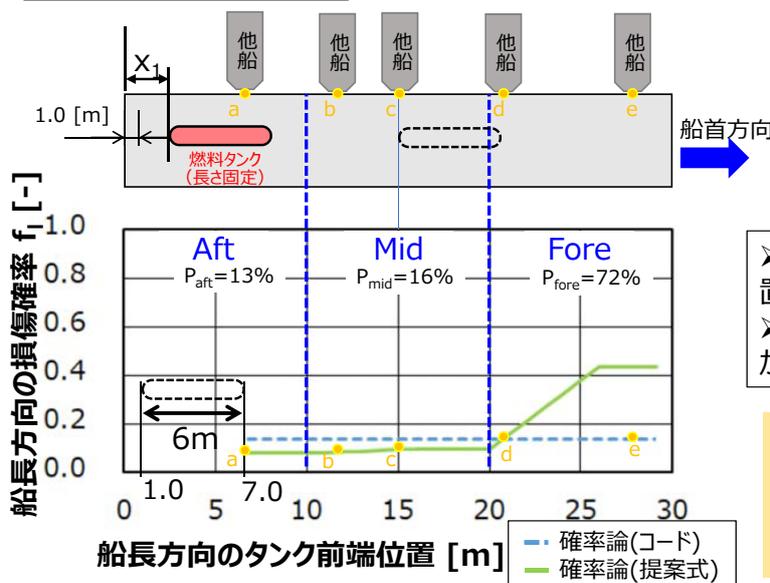
- 船舶の諸元は右表の通り
- 燃料タンクと外板を1m以上離す

パラメータ	値(m)
隔壁甲板長 $L_s$	30.0
船幅 $B$	10.0
喫水 $d$	1.0
船底からタンク底部の高さ $H$	2.3

□ 試解析1 (燃料タンク長さを固定) コードと提案式による  $f_i$  の比較結果

他船衝突位置のイメージ

\*燃料タンクの長さを6mとした場合



➢ コードの確率論の  $f_i$  (式2) は位置に依らない (一定値となる)  
 ➢ 提案式の  $f_i$  (式5) は燃料タンクが前部に入る点から上昇

衝突被害の観点では、前部を避けた燃料タンク配置が望ましいと考えられる

図: 船長方向のタンク位置に対する損傷確率  $f_i$  値 (例\*)

□ 試解析1 (燃料タンク長さを固定) : 船側からの距離bの比較結果

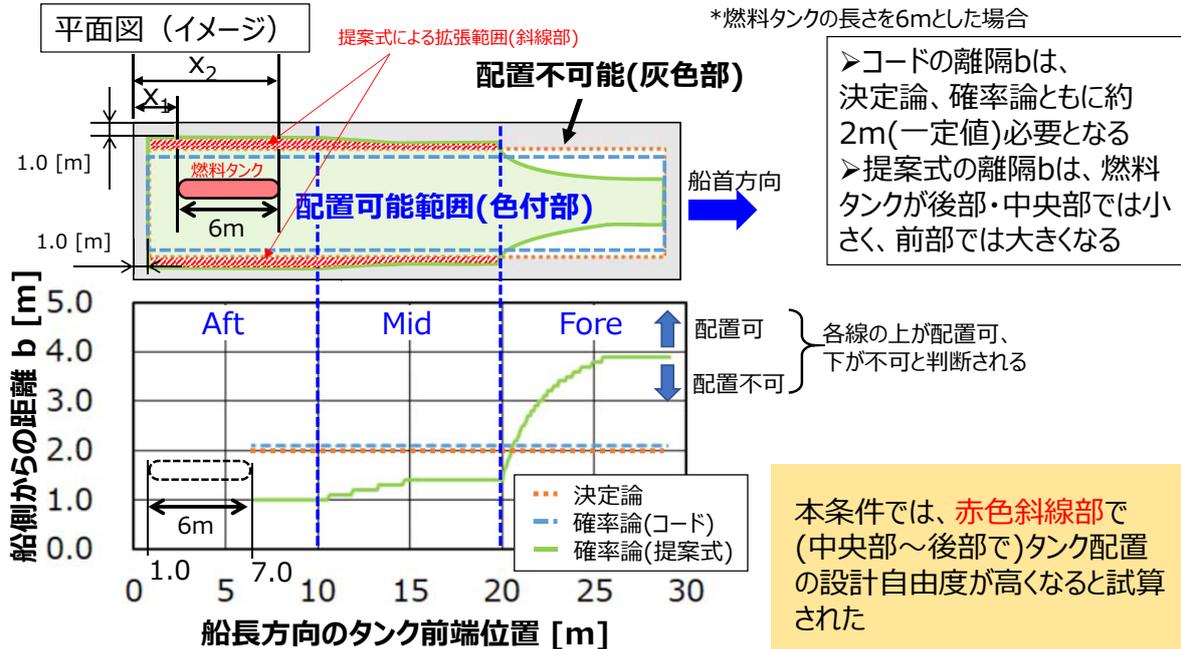


図: 燃料タンクの前端位置に対する船側からの距離 (例\*)

□ 試解析2 (タンク後端位置を固定) : 船側からの距離bの比較結果

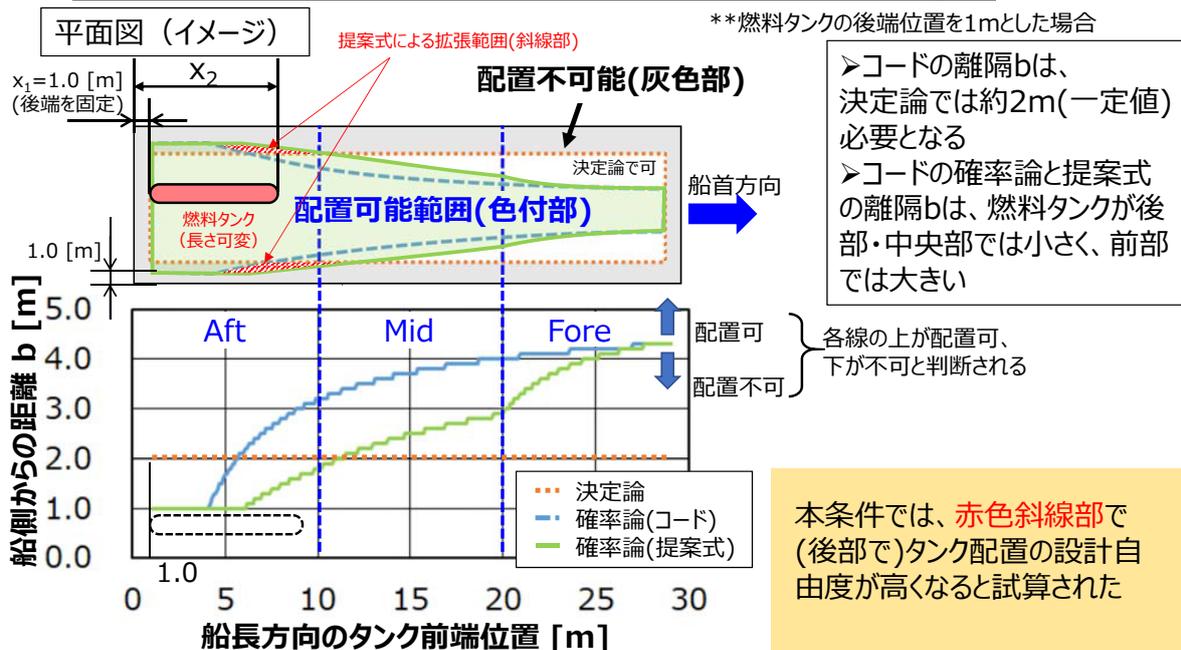


図: 燃料タンクの前端位置に対する船側からの距離 (例\*\*)

□ 参考資料

$$f_{CN} = f_l \times f_t \times f_v$$

$$b_0 = 2 \left( \frac{P_k}{J_{kn}} - \frac{1 - P_k}{J_{max} - J_{kn}} \right)$$

When  $L_s \leq L^*$ :

$$J_m = \min \left\{ J_{max}, \frac{l_{max}}{L_s} \right\}$$

$$J_k = \frac{J_m}{2} + \frac{1 - \sqrt{1 + (1 - 2p_k) b_0 J_m + \frac{1}{4} b_0^2 J_m^2}}{b_0}$$

$$b_{12} = b_0$$

When  $L_s > L^*$ :

$$J_m^* = \min \left\{ J_{max}, \frac{l_{max}}{L^*} \right\}$$

$$J_k^* = \frac{J_m^*}{2} + \frac{1 - \sqrt{1 + (1 - 2p_k) b_0 J_m^* + \frac{1}{4} b_0^2 J_m^{*2}}}{b_0}$$

$$J_m = \frac{J_m^* \cdot L^*}{L_s}$$

$$J_k = \frac{J_k^* \cdot L^*}{L_s}$$

$$b_{12} = 2 \left( \frac{P_k}{J_k} - \frac{1 - P_k}{J_m - J_k} \right)$$

$$b_{11} = 4 - \frac{1 - P_k}{(J_m - J_k) J_k} - 2 \frac{P_k}{J_k^2}$$

$$b_{21} = -2 \frac{1 - P_k}{(J_m - J_k)^2}$$

$$b_{22} = -b_{21} J_m$$

$$J = \frac{x_2 - x_1}{L_s}$$

$$J_n = \min \{ J_1, J_2 \}$$

$J \leq J_k$ :

$$f_j = \frac{1}{6} J^2 (b_{11} J + 3b_{12})$$

$J > J_k$ :

$$f_j = -\frac{1}{3} b_{11} J_k^3 + \frac{1}{2} (b_{11} J - b_{12}) J_k^2 + b_{12} J J_k - \frac{1}{3} b_{21} (J_k^3 - J_k^3) + \frac{1}{2} (b_{21} J - b_{22}) (J_k^2 - J_k^2) + b_{22} J (J_k - J_k)$$

$$f_r = 1 - r(x_1, x_2, b)$$

$$r(x_1, x_2, b) = 1 - (1 - C) \left[ 1 - \frac{G}{f} \right]$$

$$C = 12 \cdot J_0 (-45 \cdot J_0 + 4)$$

$$J_0 = \frac{b}{15 \cdot B}$$

$$G = -\frac{1}{3} b_{11} J_0^3 + \frac{1}{2} (b_{11} J - b_{12}) J_0^2 + b_{12} J J_0$$

$$J_0 = \min \{ J_1, J_2 \}$$

$(h - d) \leq 7.8$ :

$$f_v = 1.0 - 0.8 \cdot ((H - d) / 7.8)$$

$(h - d) > 7.8$ :

$$f_v = 0.2 - (0.2 \cdot ((H - d) - 7.8) / 4.7)$$

X<sub>1</sub> 船尾端から燃料タンクの後端までの距離

X<sub>2</sub> 船尾端から燃料タンクの前端までの距離

b 最高区画喫水線における外板境界とタンク境界の水平距離

H Base lineと燃料タンクの下端の距離

d Amidshipにおけるキールラインと水線面との鉛直方向の距離

L<sub>s</sub> 最高区画喫水において垂直方向の浸水範囲を制限する甲板もしくはその下方における船舶区画における船舶の区画の最大投影型長

B 最高区画喫水またはその下方における最大型幅

$$J_{max} = 10/33$$

$$J_{kn} = 5/33$$

$$p_k = 11/12$$

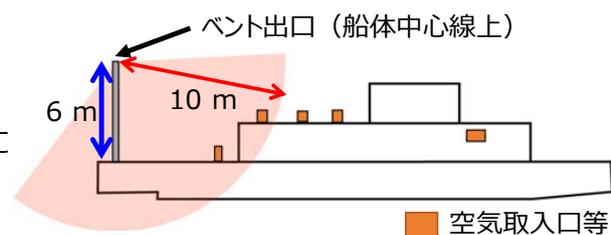
$$l_{max} = 60$$

$$L^* = 260$$

□ 背景

- ガイドライン及びIGFコードでは、バント出口について、以下の要求がある。
  - 開放甲板からの高さ確保
  - 空気取入口等からの距離確保

➡ 小型船の場合には、設計の自由度が限られる可能性があるため、バント出口に対する距離確保の縮小が望まれている。



開放甲板からの高さ要件とは

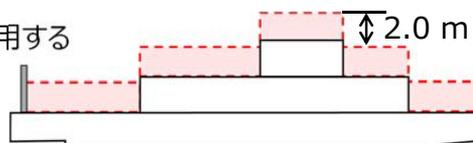
- ✓ ガイドライン6.5項(c)で、暴露甲板、作業区画と歩路からの適切な高さを要求。
- ✓ IGFコード6.7.2.7.3で、暴露甲板から高さは6mとB/3の大きい方、作業区画と歩路からの高さは6mを要求。

バント出口の空気取入口等からの距離確保の要件とは

- ✓ ガイドライン6.5項(d)で、空気取入口、排気口並びに居住区域、業務区域、制御場所又は他の非危険場所の開口（以下、空気取入口等）からの適切な距離を要求。
- ✓ IGFコード6.7.2.8.1で、空気取入口等から直線距離で10mを要求。

## □ 目的

- ベントから水素ガスが放出されるシナリオを同定して、同定されたシナリオに対する拡散を解析することでベント出口への距離に関する同等性評価を行い、緩和についての検討材料とする。
- 本検討で想定する船舶
  - 自動車用の燃料電池、圧縮水素タンクを使用する
  - 燃料タンクは暴露甲板上に設置する
- 安全性の判断基準：本検討で使用した条件



### 開放甲板からの高さ要件に関して

⇒ 人間が立ち入る場所との隔離が目的の1つと考えられる。

暴露甲板、作業区画と歩路の上方2.0m以内の領域において燃焼下限濃度(4 vol.%)の半分を下回ることを安全な状態とみなす。

### ベント出口の空気取入口等からの距離に関して

⇒ 可燃性混合気の侵入防止策と考えられる。

ベントからの排気が空気取入口等の地点にて燃焼下限濃度の半分を下回ることを安全な状態とみなす。

13

## □ シナリオの選定

- 自動車用の燃料電池、圧縮水素タンクを使用する場合の水素ガス漏洩シナリオと、本検討での選定/不選定の理由は以下の通り

水素ガス漏洩シナリオ	選定/不選定の理由
a)* タンクからの微小漏洩	UN-GTR No.13にて3.6Nml/分以下と規定。 タンクは開放甲板上に設置するため自然換気がされる。 直接大気へ放出、かつ規模が小さいことから検討外とする。
b)* 燃料電池の排気	UN-GTR No.13にて、着火しても周囲に火炎が伝搬しない条件として、瞬間8 vol%、3秒平均4 vol%以下と規定している。 着火が考えられるため評価対象とする。
c) 燃料電池の起動・停止時の水素配管のパーズ (一般的なプラントとして)	燃料電池が起動・停止時に水素配管をパーズは行わないため 検討外とする。



着火が考えられるシナリオb)を対象に、  
ベントからのガス拡散範囲を試解析する。

\*世界統一基準 第13号 (UN-GTR No.13(2013))

14

□ 試解析の方法

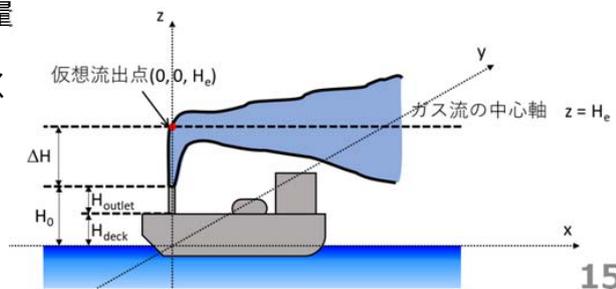
- 簡易拡散解析モデルを使用して、シナリオから導かれる計算条件下でのベント出口からの水素ガスの拡散を計算し、特定の濃度となる範囲を求める

□ 使用するモデル：簡易拡散解析モデル（Bosanquet-Pearson式）

- 流出源から放出される化学物質が大気の運動（移流による風下への輸送、乱れによる混合効果）が支配的に作用して、移流拡散する現象(大気拡散)の結果を推定する簡易拡散解析モデル
- ここでは、ベント出口における放出速度、温度等の諸条件によって、運動量や浮力の効果を考慮した推定を行うために使用する

解析手順の概略

- (ステップ1) 運動量および浮力による上昇量を考慮した仮想的な流出点高さを求める
- (ステップ2) 大気の運動による拡散式を解く



□ <試解析の方法> ステップ1: Bosanquetの式による仮想流出点の見積もり

- 運動量および浮力による上昇量を考慮した仮想的な流出点高さを求める
  - 放出される水素の密度に相当する高温の空気に換算し、浮力による上昇の効果を算出した
  - 高温の排煙（≒空気）向けのモデルであり、放出されるガスの分子量の違いを考慮していない

$$H_m = \frac{4.77}{1 + \frac{0.43U_a}{V_g}} \cdot \frac{\sqrt{Q_{T1}V_g}}{U_a}$$

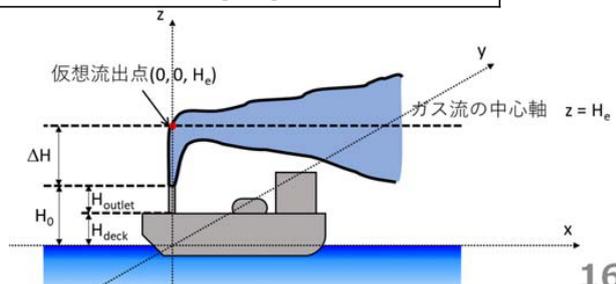
$$H_t = 6.36g \frac{Q_{T1}\Delta T}{U_a^3 T_1} \left( \ln(J^2) + \frac{2}{J} - 2 \right)$$

$$J = \frac{U_a^2}{\sqrt{Q_{T1}V_g}} \left( 0.43 \frac{T_1}{\sqrt{g} \frac{d\theta}{dz}} - 0.28 \frac{V_g}{g} \cdot \frac{T_1}{\Delta T} \right) + 1$$

$$H_e = H_0 + \Delta H$$

$$\Delta H = 0.65(H_m + H_t)$$

$H_e$  : 有効煙突高度 [m]  
 $\Delta H$  : 放出速度および浮力の影響による流出源の増分 [m]  
 $H_m$  : 流出速度による上昇分 [m]  
 $H_t$  : 浮力による上昇分 [m]  
 $U_a$  : 大気風速 [m/s]  
 $V_g$  : 放出ガスの放出速度 [m/s]  
 $g$  : 重力加速度 [m/s<sup>2</sup>]  
 $Q_{T1}$  : 温度 $T_1$ における放出ガス体積流量 [m<sup>3</sup>/s]  
 $T_1$  : 気温 [K]  
 $\Delta T$  : 排ガス温度と気温の温度差 [K]  
 $d\theta / dz$  : 大気の温位勾配 [K/m]



**□ <試解析の方法> ステップ2: Pearson式によるブルームの見積もり**

- 大気の運動による拡散式を解く

$$C(x,y,z) = \frac{Q'' \times 10^6}{\sqrt{2\pi pq} U_a x^2} \cdot F_y(x,y) \cdot F_z(x,z)$$

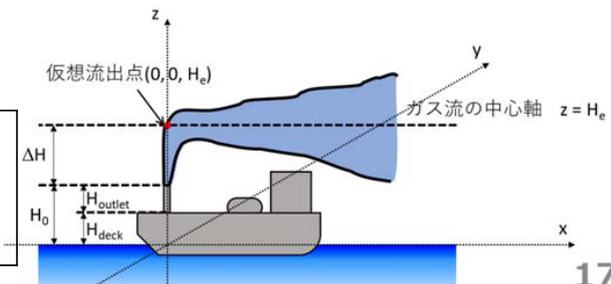
$$F_z(x,z) = \exp\left(-\frac{z-H_e}{px}\right) + \exp\left(-\frac{z+H_e}{px}\right)$$

$$F_y(x,y) = \exp\left(-\frac{(y-y_0)^2}{2(qx)^2}\right)$$

$$(qx)' = \left(\frac{t_{a2}}{t_{a1}}\right)^{1/5} \times (qx)$$

C(x,y,z) : 任意地点(x,y,z)におけるガス濃度 [ppm]  
 Q'' : 大気温度における放出ガス中の評価対象物質の体積流量 [m³/s]  
 p, q : 鉛直方向および水平方向の拡散パラメータ [-]  
 F<sub>y</sub>, F<sub>z</sub> : 任意地点(x,y,z)における放出ガスの分布関数 [-]

(qx)' : 補正後の拡散幅  
 (qx) : 補正前の拡散幅  
 t<sub>a2</sub> : 平均化時間 [s] (可燃性ガスの推奨値:18.75 秒)  
 t<sub>a1</sub> : 標準平均化時間 [s] (推奨値:600 秒)



**VENT出口の適切な高さ**

**□ 試解析の条件**

- VENTからの排出および外気の状態は以下の条件とした

パラメータ	値	備考
FCの排気流量	4000 NL/min	自動車用FC2台の最大排気流量*1
VENT出口内径	80.7 mm	80Aの配管内径
排気中の水素濃度	8 vol%	保守的に定常放出を想定
VENT方向	真上	ガイドライン通り
気温	20 °C	
風速	1~10m/s	運航上限、1m/sごと
気圧	101325Pa	
平均化時間	18.75秒	
暴露甲板高さ	1.3m	満載喫水線からの高さ
大気安定度	安定(弱い乱れ)	

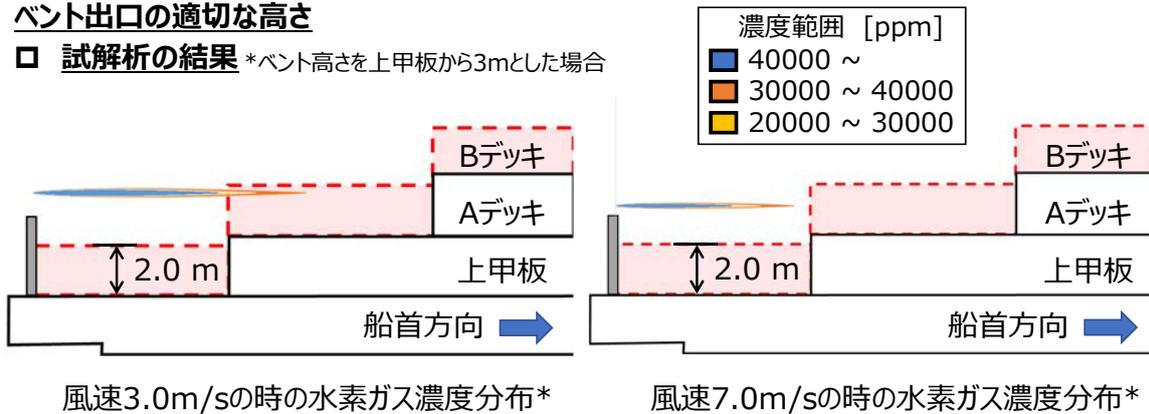
大気の状態

大気安定度	Bosanquetの式		Pearsonの式	
	dq/dz		p	q
安定 (弱い乱れ)	0.0033		0.02	0.04
中立 (平均的乱れ)	0.0067		0.05	0.08
不安定 (強い乱れ)	0.0167		0.10	0.16

\*1 山崎他、FCVのパージガス中の水素ガス濃度許容度に関する研究、自動車技術会論文集、vol.50,No.2,pp.468-472(2019)

**ベント出口の適切な高さ**

□ **試解析の結果** \*ベント高さを上甲板から3mとした場合



風速3.0m/sの時の水素ガス濃度分布\*

風速7.0m/sの時の水素ガス濃度分布\*

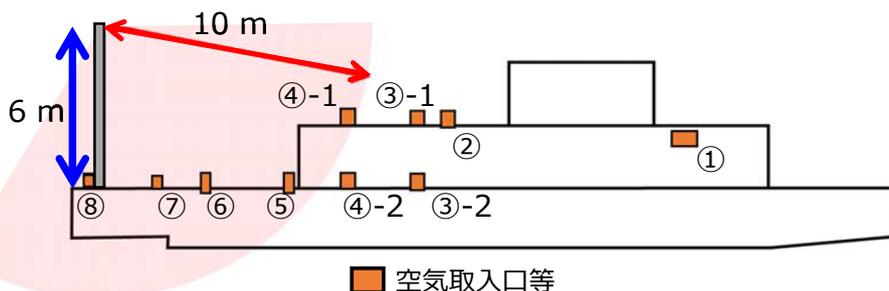
- 風速が遅いほど高所に上昇し、水平方向の到達距離が長くなる傾向が見て取れる。
- 評価対象ラインを赤線とする場合、
  - ✓ ベント高さ3mは、試算によれば、風速3.0mの時に、Aデッキ後端にて基準を満たさないため、容認できないことが分かる。
  - ✓ この条件ではベント高さを4m程度に設定すると基準を満足すると試算された

**ベント出口の空気取入口等からの適切な距離**

□ **試解析の条件**

- ベント出口からの排出および大気の状態は以下の条件とした

	数値	備考
FCの排気流量	4000 NL/min	自動車用FC2台の最大排気流量
ベント出口内径	80.7 mm	80Aの配管内径
排気中の水素濃度	8 vol%	保守的に定常放出を想定
ベント方向	真上	ガイドライン通り
気温	20 °C	
風速	1~12m/s	運航上限及び船速度を考慮、1m/sごと
風向	任意	
気圧	101325Pa	
平均化時間	18.75秒	
大気安定度	安定(弱い乱れ)	



## ベント出口の空気取入口等からの適切な距離

## □ 試解析の結果

- ベント高さを変えて空気取入口における最大濃度を解析したところ、以下の通りとなった。

ベント高さ	3m	4m	5m	6m
最大濃度(%)	0.25	3.9E-3	1.6E-4	1.6E-5
該当空気取入口等	④-1	①	①	①
風速(m/s)	12	10	7	7

- 本解析の計算範囲における最大濃度は0.25%であり、安全性の判断基準(2%)を下回っていた。
- 本解析の条件と計算範囲では、ベント高さは3m以上あれば判断基準を満たすことが分かった。

## 燃料タンクと燃料管の配置の代替設計に係るリスク評価

- 統計情報を用いて、確率論の計算式を提案。
- 試算の範囲では、確率論での設計可能な範囲が拡張され得ることが分かった。

## ベント装置の配置の設定に係るリスク評価

- 自動車用の燃料電池、圧縮水素タンクを使用する場合に少なくとも考慮すべきシナリオを抽出した。
- 試算の条件下では、ベント出口の高さを低減でき得ることが分かった。

## □ 厚生労働省 国民健康・栄養調査 (2016)

平成28年国民健康・栄養調査

身長の平均値、標準偏差、標準誤差及び分布(1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95, 99パーセンタイル値)(性, 年齢階級別)

年齢(歳)	対象者数 (人)	平均値	標準偏差	標準誤差	パーセンタイル値									
					1	5	10	25	50	75	90	95	99	
男性	1-2	128	82.4	6.0	0.6	69.2	70.5	73.0	78.0	83.2	87.0	90.0	91.8	98.7
	3-5	260	101.7	6.7	0.5	86.0	91.7	92.6	96.0	100.5	106.0	111.8	115.5	119.0
	6-7	191	119.2	6.6	0.5	100.0	110.0	111.1	114.5	119.2	124.5	127.5	130.0	135.0
	8-9	196	130.4	5.9	0.4	117.0	122.0	123.0	126.2	129.0	135.0	138.5	141.2	144.0
	10-11	187	141.5	7.7	0.6	126.0	130.0	132.0	136.0	140.3	145.6	152.5	155.2	161.6
	12-14	301	158.0	9.3	0.6	134.3	142.0	144.0	151.0	159.0	165.0	171.0	173.2	175.0
	15-17	239	169.9	5.4	0.4	152.0	160.5	162.5	166.0	170.0	173.0	177.8	180.0	187.0
	18-29	706	171.4	5.7	0.2	158.6	162.1	163.5	167.9	171.0	175.0	178.8	181.0	184.9
	30-49	2,286	171.5	5.5	0.1	157.0	162.7	164.8	168.0	171.0	175.0	178.9	181.0	186.0
	50-69	3,257	168.0	5.5	0.1	154.2	158.4	160.2	164.0	168.0	172.0	176.0	178.2	183.0
	70歳以上	2,357	162.1	5.8	0.1	147.8	151.1	154.0	158.0	162.0	166.7	170.0	172.2	177.0
	(再掲) 50-64	2,088	169.0	5.4	0.1	156.0	159.0	161.5	165.0	169.0	173.0	176.3	179.2	184.4
	(再掲) 65-74	2,031	165.3	5.6	0.1	151.0	155.5	158.0	161.5	165.2	169.1	173.0	175.4	179.7
(再掲) 75歳以上	1,495	161.0	5.7	0.2	147.0	150.3	153.0	156.9	160.8	165.0	169.0	171.4	176.8	

□ 男性の99パーセンタイル点が15歳以上かつ69歳以下の各階級において、183～187cm。

## 添付資料 4

### 水素燃料電池船のリスク評価手順書

- ・燃料タンクと燃料管の配置の代替設計に係るリスク評価手順書

## 燃料タンクの配置の代替設計に係るリスク評価の手順書

### 1. はじめに

#### 1.1 目的

本手順書は、水素燃料電池船の安全ガイドライン第 1 回改訂版（以下、安全ガイドラインと記す）の内容のうち、燃料タンクの配置の代替設計に係るリスク評価を提供する。

#### 1.2 適用対象と前提条件

本手順書は、内航船であって、総トン数が 20 以上、500 未満の船舶を対象とする。本手順書は、上記のリスク評価の事例として、実践的な評価方法を解説するものであるが、同様な評価が可能な他の方法を用いることを否定するものではない。

### 2. リスク評価手順

#### 2.1 関連規定

安全ガイドラインでは、燃料タンクの配置は決定論と確率論の 2 種類の方法から選択できる。安全ガイドラインにおける決定論の関連規定を以下に示す。下線部は本手順書の対象とする内容を示す。

#### 5.3 一般要件

##### 5.3.3 燃料タンクの配置

燃料タンクは以下の方法により配置することとし、衝突又は座礁による外的損傷から保護されなければならない。

※IGF コード 5.3.3

(a) 燃料タンクは、喫水線の位置で船側から船体中心線に直角方向に船内側に測って、小型船舶にあっては B/5 の距離、小型船舶以外にあっては B/5 又は 11.5m のいずれか小さい方の距離離れた位置よりも船内側に配置されなければならない。B は船の幅であり、単位はメートル [m] である。ただし、検査機関が安全と認める場合は、適切な距離とすることができる。

※IGF コード 5.3.3.1

(b) 各燃料タンクの境界は、タンク付弁を含むタンクの長手方向、横方向及び垂直方向の最も外側としなければならない。

※IGF コード 5.3.3.2

(c) いかなる箇所においても、燃料タンクの境界を小型船舶にあっては 0.8m の距離より、小型船舶以外にあっては次に示す距離より船側及び船尾端の外板に近づけて配置してはならない。ただし、検査機関が安全と認める場合は、適切な距離とすることができる。

※IGF コード 5.3.3.4

.1 旅客船の場合：0.8m 又は B/10 のいずれか大きい値。ただし、この距離は、B/15 又は 2m より大きい必要はない。

2 貨物船の場合：

.1  $V_c$  が  $1,000\text{m}^3$  以下の場合、0.8m

.2  $V_c$  が  $1,000\text{m}^3$  より大きく  $5,000\text{m}^3$  未満の場合、 $0.75+V_c \times 0.2/4,000$  m

.3  $V_c$  が  $5,000\text{m}^3$  以上  $30,000\text{m}^3$  未満の場合、 $0.8+V_c/25,000$  m

.4  $V_c$  が  $30,000\text{m}^3$  以上の場合、2m

この場合、 $V_c$  は  $20^\circ\text{C}$ において計画された燃料タンクの総容積 (タンクドーム及び付加物を含む。)の100%

(d) 燃料タンクの最下部境界は、船体中心線における船底外板の上面から測って、小型船舶にあっては  $B/15$  の距離、小型船舶以外にあっては  $B/15$  又は  $2.0\text{m}$  のいずれか小さい方の距離を最小距離としてその上方に配置されなければならない。ただし、検査機関が安全と認める場合は、適切な距離とすることができる。

※IGF コード 5.3.3.5

(e) 多胴船の場合、 $B$  の値は特別に考慮することができる。

※IGF コード 5.3.3.6

(f) 燃料タンクは、原則として、船首隔壁よりも後方に設置しなければならない。

※IGF コード 5.3.3.7

(注記) 小型船舶安全規則第 15 条において、沿海以上の航行区域を有する小型船舶は船首より船の長さの  $0.05$  倍の箇所から  $0.13$  倍の箇所までの間に水密隔壁を設けなければならないこととされている。

(g) 衝突及び／又は座礁に対し高い耐性を持つ構造の船舶にあっては、燃料タンクの配置位置の規定は、1.2 に従い特別に考慮することができる。

※IGF コード 5.3.3.8

このうち、タンクの設置禁止箇所を図 1 の網掛け部で示す。図中の(a), (c), (d)は安全ガイドライン 5.3.3 項の該当箇所を指す。

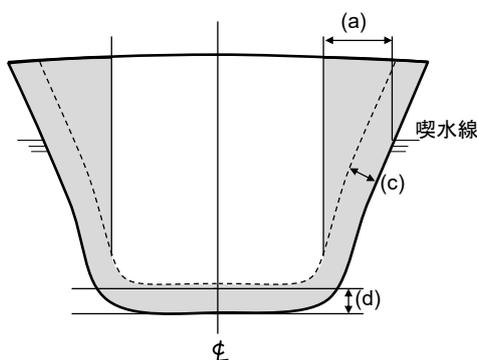


図 1 タンクの設置禁止箇所 (網掛け部) <sup>1</sup>

<sup>1</sup> IMO, resolution MSC.370(93) Amendments to the international code for the construction and equipment of ships carrying liquefied gases in bulk (IGC code)を参考に作成

次に安全ガイドラインにおける確率論の関連規定を以下に示す。下線部は本手順書の対象とする内容を示す。

#### 5.3.4 燃料タンクの配置の代替

燃料タンクの配置について、5.3.3(a)の代替として、IGF コード 5.3.4 項の計算方法を用いて差し支えない。

※IGF コード 5.3.4

安全ガイドラインにおける確率論によるタンク配置が参照する IGF コード 5.3.4 項の記載は以下の通り。

5.3.4 As an alternative to 5.3.3.1 above, the following calculation method may be used to determine the acceptable location of the fuel tanks:

- .1 The value  $f_{CN}$  calculated as described in the following shall be less than 0.02 for passenger ships and 0.04 for cargo ships.<sup>5</sup>
- .2 The  $f_{CN}$  is calculated by the following formulation:

$$f_{CN} = f_l \times f_t \times f_v$$

where:

$f_l$  is calculated by use of the formulations for factor p contained in SOLAS regulation II-1/7-1.1.1.1. The value of  $x_1$  shall correspond to the distance from the aft terminal to the aftmost boundary of the fuel tank and the value of  $x_2$  shall correspond to the distance from the aft terminal to the foremost boundary of the fuel tank.

$f_t$  is calculated by use of the formulations for factor r contained in SOLAS regulation II-1/7-1.1.2, and reflects the probability that the damage penetrates beyond the outer boundary of the fuel tank. The formulation is:

$$f_t = 1 - r(x_1, x_2, b)^6$$

$f_v$  is calculated by use of the formulations for factor v contained in SOLAS regulation II-1/7-2.6.1.1 and reflects the probability that the damage is extending vertically above the lowermost boundary of the fuel tank. The formulations to be used are:

$$f_v = 1.0 - 0.8 \cdot ((H - d)/7.8), \text{ if } (H - d) \text{ is less than or equal to } 7.8 \text{ m. } f_v \text{ shall not be taken greater than } 1.$$

$$f_v = 0.2 - (0.2 \cdot ((H - d) - 7.8)/4.7), \text{ in all other cases } f_v \text{ shall not be taken less than } 0.$$

where:

$H$  is the distance from baseline, in metres, to the lowermost boundary

of the fuel tank; and

$d$  is the deepest draught (summer load line draught).

(以下省略)

footnote 5: The value  $f_{CN}$  accounts for collision damages that may occur within a zone limited by the longitudinal projected boundaries of the fuel tank only, and cannot be considered or used as the probability for the fuel tank to become damaged given a collision. The real probability will be higher when accounting for longer damages that include zones forward and aft of the fuel tank.

footnote 6: When the outermost boundary of the fuel tank is outside the boundary given by the deepest subdivision waterline the value of  $b$  should be taken as 0.

2.2 燃料タンクの配置に関し、安全ガイドライン 5.3.3(a)にある夏季満載喫水線から確保すべき水平距離について、同ガイドライン 5.3.4 に依らずに代替設計を行う手順を図2に示す。各項目の説明は括弧内の数字が示す本手順書の各節及び付録を参照されたい。

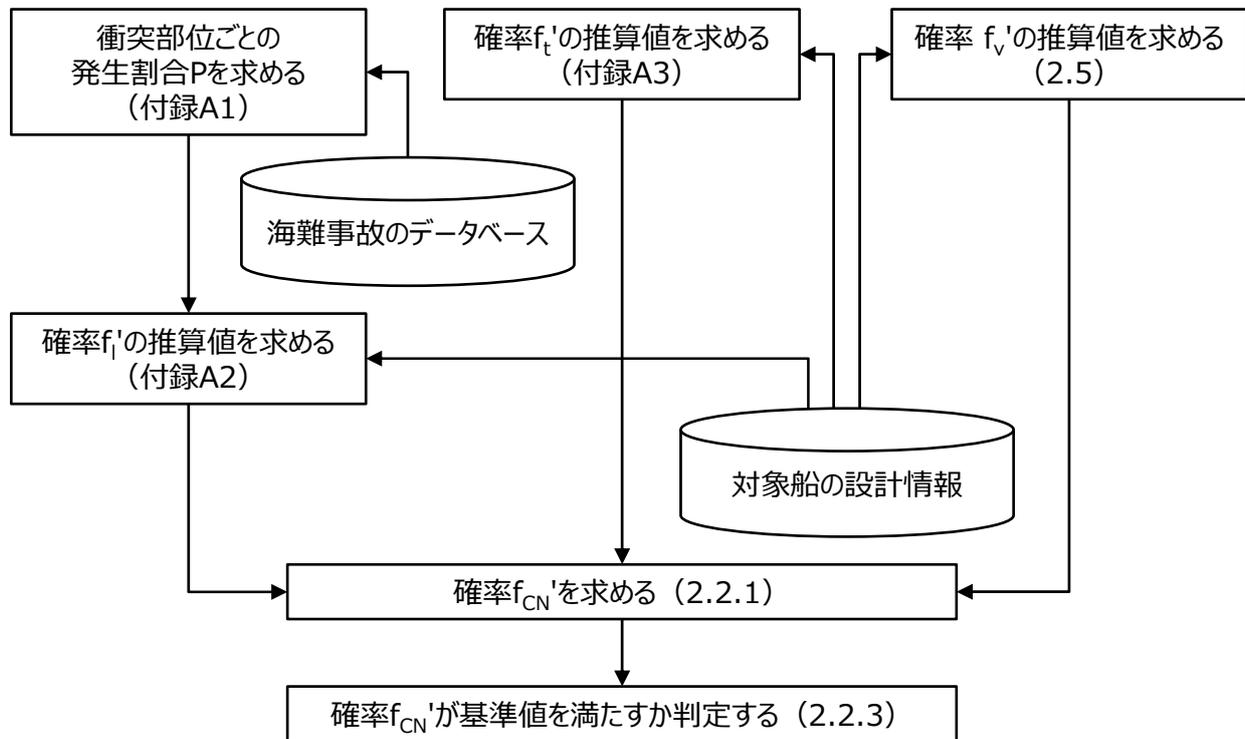


図2 安全ガイドライン 5.3.4 に依らずに代替設計を行う手順

- 1 IGF コードの 5.3.4.2 項に記載の確率論の計算式と同様に、衝突が発生した際に、燃料タンクの外板の位置まで損傷が到達する確率  $f_{CN}$  を、1 式にて求める。なお、右辺は確率を船長方向、幅方向、高さ方向に分解しており、 $f_l'$  は船長方向に見た時に燃料タンクの位置に損傷が発生する確率を、 $f_t'$  は幅方向に見た時に燃料タンク外板の位置まで損傷が到達する確率を、 $f_v'$  は燃料タンク下端の高さまで損傷が到達する確率をそれぞれ表す。

$$f_{CN}' = f_l' \times f_t' \times f_v' \quad (1 \text{ 式})$$

- .2 確率  $f_i$ ,  $f'_i$ ,  $f'_v$  は、規則が定める数式もしくは統計データによる推算値が使用できる。
- .3 確率  $f_{CN}$  は IGF コードの 5.3.4.2 項に記載の確率論の計算式と同様に、旅客船は 0.02 未満、貨物船は 0.04 未満を満たすことが求められている。

2.3 上記 2.2.1 および 2.2.2 に関し、確率  $f_i$  を海難事故のデータベースにより推算する場合、海難事故のデータベースから衝突部位の発生割合を集計する手順は付録 A1 に、推算式の構築手順は付録 A2 にそれぞれ示す。

2.4 上記 2.2.1 および 2.2.2 に関し、上記 2.3 において推算値を用いた場合かつ、燃料タンクの配置が船体の中心線に対し左右対称の場合の確率  $f'_i$  の計算式は付録 A3 の A3-1 式が使用できる。

2.5 上記 2.2.1 および 2.2.2 に関し、確率  $f'_v$  は IGF コードの 5.3.4.2 項に記載の  $f_v$  と同じ方法にて求めることができる。

## 付録 A1

### 海難事故のデータベースから衝突部位ごとに発生割合を集計する手順

A1.1 次の手順にて海難事故のデータベースから衝突部位ごとの集計が出来る。

- 1 海難事故のデータベースから、衝突海難を抽出し、更に総トン数などの条件にて適用される法令などが代替設計の対象船舶に類似する船舶に絞り込む。
- 2 絞り込んだ船舶において船長方向の衝突部位を集計する。

A1.2 内航船が収録対象に含まれており、衝突部位の記載のある海難事故のデータベースには、例えば運輸安全委員会の報告書や海難審判庁裁決録があり、その特徴を表 A1-1 に示す。

表 A1-1 内航船を対象とした場合の海難事故のデータベースの例とその特徴

	運輸安全委員会の報告書	海難審判庁裁決録
組織の沿革	2008 年 10 月に発足。	1949 年 6 月に発足、2008 年 10 月に懲戒処分は海難審判所に、事故原因究明は運輸安全委員会に移管し、廃止。
収録期間と収録件数	船舶事故の報告書は 2009 年 1 月以降公表分が web 上に公開されており、毎月下旬頃に追加されている。また、条件検索が可能。 2022 年から過去 5 年では衝突と単衝突を合わせて年間約 80 件を公表されている。	国立国会図書館には、1955 年 1 月から 2008 年 8 月分まで所蔵されている。 2007 年から過去 5 年間では衝突海難の一審が年間約 330 件収録されている。
主な記載項目	発生年月日時刻、発生場所、船種、船名、総トン数、損傷、事故等の経過	発生年月日時刻、発生場所、船種、船名、総トン数、損傷、事実の経過
独特な項目	事故等調査の経過	裁決主文、原審裁決主文（第二審のみ）

A1.3 海難事故のデータベースでは衝突、座礁、火災などの海難を収録しており、今回対象とする代替設計の対象とする要件は衝突安全が目的と考えられる。このため、データベースから衝突海難を抽出する。また海難事故のデータベースでは、様々な船舶の海難が記録されており、代替設計の対象船舶とは大きく異なる船舶の情報が含まれることも有るため、総トン数などの条件にて適用される法令などが代替設計の対象船舶に類似する船舶に絞り込みを行う。

A1.4 海難事故のデータベースは、損傷内容や衝突等が発生した場所の情報が記述されていることが有る。これらの記述から、後部、中央部、前部などの Lpp を基本とした船の長さ方向の衝突部位を判断し、A1.3 で絞り込んだ船舶を用いて、衝突部位ごとに隻数 N を集計する。また、各衝突部位の隻数が、衝突部位の判明した隻数に対する割合 P を求める。なお、P は有効数字を考慮し、端数を切り上げること。

また、付録 A2 の作業のために使用したデータベースにおける衝突部位の判定基準を確認しておくこと。

ここで参考として、衝突部位が後部、中央部、前部の3分割となる場合の模式図を図 A1-1 に、各部位の割合の計算式を A1-1 式から A1-3 式に示す。添え字の *aft* は後部を、*mid* は中央部を、*fore* は前部を表す。

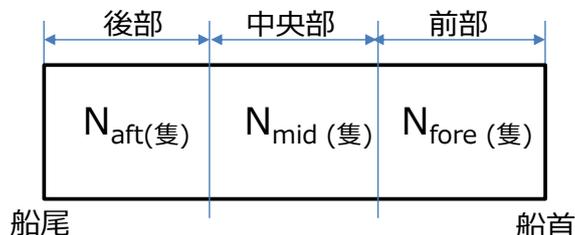


図 A1-1 衝突部位が後部、中央部、前部の3分割となる場合の模式図

$$P_{aft} = \frac{N_{aft}}{N_{aft} + N_{mid} + N_{fore}} \quad (\text{A1-1 式})$$

$$P_{mid} = \frac{N_{mid}}{N_{aft} + N_{mid} + N_{fore}} \quad (\text{A1-2 式})$$

$$P_{fore} = \frac{N_{fore}}{N_{aft} + N_{mid} + N_{fore}} \quad (\text{A1-3 式})$$

なお、本手順書の本文 2.2.3 項に記載の通り、最終的な判定指標では必要な有効数字は1桁のため、少なくとも、それぞれの衝突部位の隻数が2桁以上となるよう集計対象期間、絞り込み条件を設定すること。

表 A1-2 に、この方法を用いた衝突部位ごとの発生割合の集計の例を示す。抽出条件として、使用したデータベースの名称、集計対象期間、総トン数などの絞り込みに用いた条件をまとめること。抽出条件のまとめ方の例を表 A1-2 に示す。

表 A1-2 衝突部位ごとの発生割合の集計の例

衝突部位	隻数	割合
前部	78	0.72
中央部	17	0.16
後部	14	0.13
合計	109	-
データベースの名称：海難審判庁裁決録 集計対象期間：平成17年1月から12月に言い渡し 絞り込み条件：総トン数が20以上499以下		

## 付録 A2

### 海難事故のデータベースの集計結果に基づき、 $f_i'$ の推算式を構築する手順

A2.1 確率  $f_i'$  は衝突が発生した際に、船長方向に見た時に燃料タンクの位置に損傷が発生する確率である。この定義と整合するよう、付録 A1 で使用した海難事故のデータベースにおける衝突部位の判定基準に沿って  $f_i'$  の推算式を構築する。衝突部位の境界は付録 A1 の判定基準の通りとする。その上で衝突部位の中での発生確率を一様分布と仮定する場合、船長方向で見た時に燃料タンクに損傷が発生する確率は当該部位におけるタンクの船長方向の長さに比例する。この時、衝突部位が後部、中央部、前部の 3 分割の場合の  $f_i'$  の計算式は A2-1 式で表され、各文字の関係は図 A2-1 に示す。

$$f_i' = \frac{l_{aft}}{L_{aft}} P_{aft} + \frac{l_{mid}}{L_{mid}} P_{mid} + \frac{l_{fore}}{L_{fore}} P_{fore} \quad (\text{A2-1 式})$$

P : 付録 A1 で集計した割合のうち、添え字の衝突部位のもの

L : 添え字の衝突部位の船長方向の長さ

l : 添え字の衝突部位における燃料タンクの船長方向の長さ

aft : 後部の衝突部位

mid : 中央部の衝突部位

fore : 前部の衝突部位

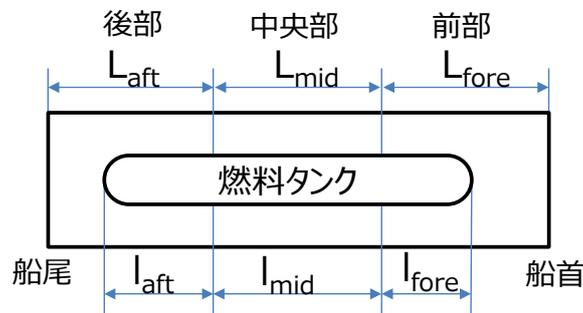


図 A2-1 衝突部位が後部、中央部、前部の 3 分割となる場合の各文字の関係

ここで、付録 A1 で使用したデータベースにおいて衝突部位の判定基準が不明の場合は、IGF コード 5.3.4.2 項記載の確率論の計算式において、船の長さとして隔壁甲板長  $L_s$  を使用しており、また燃料タンク長さを  $L_s$  で正規化していることから、 $L_{aft}$ 、 $L_{mid}$  および  $L_{fore}$  といった各部位の長さは一律と仮定し、その合計値は  $L_s$  となるようにしてもよい。ここで隔壁甲板長  $L_s$  は IGF コード 5.3.4.2 項記載の確率論の計算式同様に最高区画喫水において垂直方向の浸水範囲を制限する甲板もしくはその下方における船舶区画における船舶の区画の最大投影型長である。

例えば衝突部位が 3 分割であり、衝突部位の定義の定義が不明な場合、 $L_{aft}$ 、 $L_{mid}$ 、 $L_{fore}$  を一律  $L_s/3$  とすることができる。

## 付録 A3

### ft'導出に用いる数式

A3.1 衝突が発生した際に、船幅方向で見た時に燃料タンク外板の位置まで損傷が到達する確率ft'の導出に用いる設計変数は、IGF コードの 5.3.4.2 項に記載の確率論の計算式と同一であり、以下の通り。

$L_s$  : 最高区画喫水において垂直方向の浸水範囲を制限する甲板もしくはその下方における船舶区画における船舶の区画の最大投影型長 (隔壁甲板長) (m)

$B$  : 最高区画喫水またはその下方における最大型幅 (m)

$b$  : 最高区画喫水線における外板境界とタンク境界の水平距離 (m)。ただし燃料タンクの最も外側の境界が最高区画喫水線における外板境界よりも外側に有る場合は 0 を用いる。

$x_1$  : 船尾端から燃料タンクの後端までの距離 (m)

$x_2$  : 船尾端から燃料タンクの前端までの距離 (m)

参考として図 A3-1 に、これらの設計変数を船の模式図上に図示する。

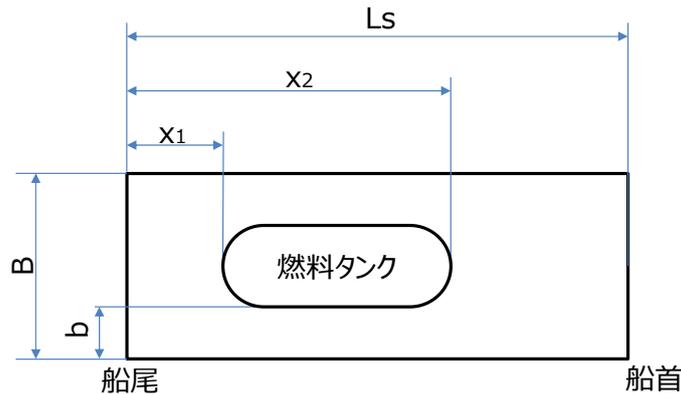


図 A3-1 船の模式図と設計変数

A3.2 ft'の導出に用いる数式は、IGF コード 5.3.4.2 項に記載の確率論の計算式と同様であり、燃料タンクが左右対称配置の場合は以下の通り。ただし、本手順書は総トン数が 20 以上 499 以下の内航船を想定しているため、 $L_s$  が 198m 未満であることを前提とする数式である。

$$f_t' = (1-C) \left[ 1 - \frac{G}{f_t'} \right] \quad (\text{A3-1 式})$$

$$C = 12 \cdot J_b (-45 \cdot J_b + 4) \quad (\text{A3-2 式})$$

$$J_b = \frac{b}{15 \cdot B} \quad (\text{A3-3 式})$$

$$G = G_2 = -\frac{1}{3} b_{11} J_0^3 + \frac{1}{2} (b_{11} J - b_{12}) J_0^2 + b_{12} J J_0 \quad (\text{A3-4 式})$$

$$J_0 = \min(J, J_b) \quad (\text{A3-5 式})$$

$$b_{11} = 4 \frac{1-p_k}{(J_m - J_k)J_k} - 2 \frac{p_k}{J_k^2} \quad (\text{A3-6 式})$$

$$J = \frac{x_2 - x_1}{L_s} \quad (\text{A3-7 式})$$

$$J_m = J_{\max} \quad (\text{A3-8 式})$$

$$J_k = \frac{J_m}{2} + \frac{1 - \sqrt{1 + (1 - 2p_k)b_0J_m + \frac{1}{4}b_0^2J_m^2}}{b_0} \quad (\text{A3-9 式})$$

$$b_{12} = b_0 \quad (\text{A3-10 式})$$

ここで fl' は付録 A1 及び付録 A2 の方法にて得られた結果を用いる。

その他の定数は、IGF コードの 5.3.4.2 項に記載の確率論の計算式と同一であり、以下の通り。

$$J_{\max} = 10/33$$

$$p_k = 11/12$$

$$b_0 = 11$$

## 添付資料 5

### 水素燃料電池船のリスク評価手順書

- ・燃料タンクの圧力逃がし弁とベント装置の配置の設定に係るリスク評価手順書

## 1 ベント出口の高さに関する特別の考慮

### 1.1 ベント出口より放出される水素ガスの拡散性状

#### 1.1.1 以下に 2021 年度改訂版の燃料電池船安全ガイドラインの関連規定を示す。

##### 6.5 圧力逃し装置

燃料タンクには、燃料格納設備の設計及び貯蔵する燃料に適した圧力逃し装置を設けなければならない。ただし、燃料供給後に加圧される恐れがない燃料タンクにおいては、圧力逃し装置を取り付ける必要はない。

当該圧力逃し装置は、次の(a)から(c)に適合するベント装置に導かなければならない。

(a) 出口で滞りなく、通常、垂直上方に排出する構造のものでなければならない。

(b) ベント装置に水や雪が入る可能性を最小限にするように配置されたものでなければならない。

(c) ベント出口の高さは、通常、暴露甲板上 6 m 以上とし、作業区域及び歩路上 6 m 以上としなければならない。ただし、特別の考慮が払われている場合には、検査機関は規定の高さを下回ることを認めることがある。

また、当該圧力逃し弁からの出口は、次の(d)及び(e)から 10 m 以上離れた場所に設けなければならない。

(d) 空気取入口、排気口並びに居住区域、業務区域、制御場所又は他の非危険場所の開口

(e) 燃料電池設備の排気ガス出口

#### 1.1.2 ベントの出口より放出されるガス拡散性状を予測する手順は、以下に示すとおりとする。

- .1 圧力逃し弁の設計条件よりベント処理される水素ガスの体積流量および温度を算出すること。
- .2 船内燃料供給設備等からの漏えい事象等、圧力逃し弁からの放出事象以外のベント処理を実施する水素ガス放出シナリオを特定し、これに基づきベント放出される水素ガスの体積流量および温度を算出すること。
- .3 .1および.2で算出したベント放出される水素ガスの体積流量をベント管流路断面積により除することでベント管出口における管断面平均流速を算出すること。
- .4 ベント管出口における管断面平均流速、大気温度、大気風速、大気の安定条件を設定し、設定した高さのベント出口より放出される水素ガスの拡散性状を推定すること。
- .5 .4で推定した可燃範囲となる濃度の水素ガス拡散範囲より、作業区域および歩路、あるいは空気取入口、排気口並びに居住区域、業務区域、制御場所又は他の非

危険場所、また燃料電池設備の排気ガス出口において、着火危険性より隔離されていることを確認すること。

1.1.3 船内燃料供給設備等からの漏えい事象に伴う水素ガスの体積流量の推定方法は、付属書 1 に定める。

- .1 配管のフランジ部及びバルブの隙間、配管の亀裂その他の水素の漏えい又は流出が発生する可能性があるガス燃料管装置を評価の対象に選択すること。
- .2 ガス燃料管装置の水素の流出穴径を統計データにより推定すること。
- .3 .2 で推定した流出穴径を使用し、ガス燃料管装置の流出開始後から配管の弁遮断までの時間に流出する水素の量を考慮すること。

なお、評価は、事故による配管の破断、不作為によるバルブの閉め忘れ等の通常使用時以外の水素の漏えい又は流出は考慮しなくて差支えない。

1.1.4 水素の流出穴径 (1.1.2.2 項) は、表 1.1 に示す統計データにより推定すること。この統計データは設備からの漏えい事故を配管等の設備の管径で規格化した漏えい寸法がまとめられたものである。

ただし、十分信頼できる情報が得られるものとして検査機関が認める場合は、その他統計データを使用することができる。

1.1.5 ベント出口より放出される水素ガスの拡散性状 (1.1.2.4 項) の推定方法は、付属書 2 に定める。

表 1.1 ガス燃料管装置の水素流出穴径の統計データ

Component	Release Size	$\mu$	$\sigma$	Mean [1/year]	5 <sup>th</sup> [1/year]	Median [1/year]	95 <sup>th</sup> [1/year]
Compressors	0.01%	-1.73	0.22	$1.8 \times 10^{-1}$	$1.2 \times 10^{-1}$	$1.8 \times 10^{-1}$	$2.6 \times 10^{-1}$
	0.10%	-3.95	0.5	$2.2 \times 10^{-2}$	$8.5 \times 10^{-3}$	$1.9 \times 10^{-2}$	$4.4 \times 10^{-2}$
	1%	-5.16	0.8	$7.9 \times 10^{-3}$	$1.5 \times 10^{-3}$	$5.8 \times 10^{-3}$	$2.2 \times 10^{-2}$
	10%	-8.84	0.84	$2.1 \times 10^{-4}$	$3.6 \times 10^{-5}$	$1.4 \times 10^{-4}$	$5.7 \times 10^{-4}$
	100%	-11.34	1.37	$3.0 \times 10^{-5}$	$1.3 \times 10^{-6}$	$1.2 \times 10^{-5}$	$1.1 \times 10^{-4}$
Cylinders	0.01%	-13.92	0.67	$1.1 \times 10^{-6}$	$3.0 \times 10^{-7}$	$9.0 \times 10^{-7}$	$2.7 \times 10^{-6}$
	0.10%	-14.06	0.65	$9.6 \times 10^{-7}$	$2.7 \times 10^{-7}$	$7.8 \times 10^{-7}$	$2.3 \times 10^{-6}$
	1%	-14.44	0.65	$6.6 \times 10^{-7}$	$1.8 \times 10^{-7}$	$5.4 \times 10^{-7}$	$1.6 \times 10^{-6}$
	10%	-14.99	0.65	$3.8 \times 10^{-7}$	$1.1 \times 10^{-7}$	$3.1 \times 10^{-7}$	$9.0 \times 10^{-7}$
	100%	-15.62	0.68	$2.1 \times 10^{-7}$	$5.3 \times 10^{-8}$	$1.6 \times 10^{-7}$	$5.0 \times 10^{-7}$
Filters	0.01%	-5.25	1.99	$3.8 \times 10^{-2}$	$2.0 \times 10^{-4}$	$5.3 \times 10^{-3}$	$1.4 \times 10^{-1}$
	0.10%	-5.29	1.52	$1.6 \times 10^{-2}$	$4.2 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^{-3}$	$6.1 \times 10^{-2}$
	1%	-5.34	1.48	$1.4 \times 10^{-2}$	$4.2 \times 10^{-4}$	$4.8 \times 10^{-3}$	$5.5 \times 10^{-2}$
	10%	-5.38	0.89	$6.9 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-3}$	$4.6 \times 10^{-3}$	$2.0 \times 10^{-2}$
	100%	-5.43	0.95	$6.9 \times 10^{-3}$	$9.1 \times 10^{-4}$	$4.4 \times 10^{-3}$	$2.1 \times 10^{-2}$
Flanges	0.01%	-3.92	1.66	$7.9 \times 10^{-2}$	$1.3 \times 10^{-3}$	$2.0 \times 10^{-2}$	$3.0 \times 10^{-1}$
	0.10%	-6.12	1.25	$4.8 \times 10^{-3}$	$2.8 \times 10^{-4}$	$2.2 \times 10^{-3}$	$1.7 \times 10^{-2}$
	1%	-8.33	2.2	$2.7 \times 10^{-3}$	$6.4 \times 10^{-6}$	$2.4 \times 10^{-4}$	$9.0 \times 10^{-3}$
	10%	-10.54	0.83	$3.7 \times 10^{-5}$	$6.7 \times 10^{-6}$	$2.6 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-4}$
	100%	-12.75	1.83	$1.5 \times 10^{-5}$	$1.4 \times 10^{-7}$	$2.9 \times 10^{-6}$	$5.9 \times 10^{-5}$
Hoses	0.01%	-6.83	0.28	$1.1 \times 10^{-3}$	$6.8 \times 10^{-4}$	$1.1 \times 10^{-3}$	$1.7 \times 10^{-3}$
	0.10%	-8.73	0.61	$1.9 \times 10^{-4}$	$5.9 \times 10^{-5}$	$1.6 \times 10^{-4}$	$4.4 \times 10^{-4}$
	1%	-8.85	0.59	$1.7 \times 10^{-4}$	$5.4 \times 10^{-5}$	$1.4 \times 10^{-4}$	$3.8 \times 10^{-4}$
	10%	-8.96	0.59	$1.5 \times 10^{-4}$	$4.9 \times 10^{-5}$	$1.3 \times 10^{-4}$	$3.4 \times 10^{-4}$
	100%	-9.91	0.88	$7.3 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-5}$	$5.0 \times 10^{-5}$	$2.1 \times 10^{-4}$
Joints	0.01%	-9.58	0.17	$7.0 \times 10^{-5}$	$5.2 \times 10^{-5}$	$6.9 \times 10^{-5}$	$9.1 \times 10^{-5}$
	0.10%	-12.92	0.81	$3.4 \times 10^{-6}$	$6.4 \times 10^{-7}$	$2.4 \times 10^{-6}$	$9.3 \times 10^{-6}$
	1%	-11.93	0.51	$7.5 \times 10^{-6}$	$2.8 \times 10^{-6}$	$6.6 \times 10^{-6}$	$1.5 \times 10^{-5}$
	10%	-12.09	0.58	$6.7 \times 10^{-6}$	$2.2 \times 10^{-6}$	$5.6 \times 10^{-6}$	$1.5 \times 10^{-5}$
	100%	-12.22	0.61	$6.0 \times 10^{-6}$	$1.8 \times 10^{-6}$	$4.9 \times 10^{-6}$	$1.3 \times 10^{-5}$
Pipes	0.01%	-11.91	0.69	$8.5 \times 10^{-6}$	$2.1 \times 10^{-6}$	$6.7 \times 10^{-6}$	$2.1 \times 10^{-5}$
	0.10%	-12.57	0.71	$4.5 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^{-6}$	$3.5 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^{-5}$
	1%	-13.88	1.14	$1.8 \times 10^{-6}$	$1.4 \times 10^{-7}$	$9.3 \times 10^{-7}$	$6.1 \times 10^{-6}$
	10%	-14.59	1.16	$9.1 \times 10^{-7}$	$6.8 \times 10^{-8}$	$4.6 \times 10^{-7}$	$3.1 \times 10^{-6}$
	100%	-15.73	1.72	$6.4 \times 10^{-7}$	$8.8 \times 10^{-9}$	$1.5 \times 10^{-7}$	$2.5 \times 10^{-6}$
Valves	0.01%	-5.19	0.18	$5.7 \times 10^{-3}$	$4.2 \times 10^{-3}$	$5.6 \times 10^{-3}$	$7.5 \times 10^{-3}$
	0.10%	-7.31	0.42	$7.3 \times 10^{-4}$	$3.4 \times 10^{-4}$	$6.7 \times 10^{-4}$	$1.3 \times 10^{-3}$
	1%	-9.71	0.98	$9.8 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-5}$	$6.0 \times 10^{-5}$	$3.0 \times 10^{-4}$
	10%	-10.34	0.69	$4.1 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$3.2 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-4}$
	100%	-12	1.33	$1.5 \times 10^{-5}$	$6.9 \times 10^{-7}$	$6.1 \times 10^{-6}$	$5.5 \times 10^{-5}$
Instruments	0.01%	-7.38	0.71	$8.0 \times 10^{-4}$	$1.9 \times 10^{-4}$	$6.2 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-3}$
	0.10%	-8.54	0.82	$2.7 \times 10^{-4}$	$5.1 \times 10^{-5}$	$2.0 \times 10^{-4}$	$7.5 \times 10^{-4}$
	1%	-9.1	0.92	$1.7 \times 10^{-4}$	$2.4 \times 10^{-5}$	$1.1 \times 10^{-4}$	$5.1 \times 10^{-4}$
	10%	-9.21	1.09	$1.8 \times 10^{-4}$	$1.7 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-4}$	$6.0 \times 10^{-4}$
	100%	-10.21	1.49	$1.1 \times 10^{-4}$	$3.2 \times 10^{-6}$	$3.7 \times 10^{-5}$	$4.3 \times 10^{-4}$

[出典：Brian D. Ehrhart, Ethan S. Hecht, Katrina M. Groth, Hydrogen Risk Assessment Models (HyRAM) Version 3.1 Technical Reference Manual, SANDIA REPORT SAND2021-5812, 2021.]

## 附属書 1

### ベント出口より放出される水素ガスの体積流量の推定方法

#### A1.1 はじめに

燃料電池船安全ガイドライン 6.5 項では、ベント出口高さは通常、暴露甲板上 6 m 以上とし、作業区域及び歩路上 6 m 以上としなければならない。ただし、特別の考慮が払われている場合には、検査機関は規定の高さを下回ることを認めることがある。

これに対して、燃料電池に使用される水素ガスは分子量が最も小さい気体分子であり、沸点 19.27 K の液化水素が気化して間もない温度範囲を除いて大気環境下においては空気より密度が高くなることは無く、水素/空気混合気体の密度に応じた鉛直上向きの浮力を常に受けること、また、ベント出口より運動量をもって水素ガスが放出されることから、これらの効果を考慮すれば必ずしも離隔すべき船上の場所が火災危険性に晒されるわけではないと考えられる。

そこで、船内燃料供給設備より漏えいする水素ガスをベント放出するときの水素ガスの体積流量を推定するための方法を以下に示す。

本推定手法は、高圧の燃料供給配管、フランジ等の継手、バルブからの漏えいシナリオに基づき、その流出流量を求める方法を示すとともに、漏えい場所において換気がなされていれば空気による希釈を考慮する算出方法を示す。図 A1.1 に本モデルの模式図を示す。

なお、解析対象は理想気体であると仮定して気体の密度を  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]、圧力を  $P$  [Pa]、気体定数を  $R$  [J/molK]、分子量を  $M_w$  [g/mol]、温度を  $T$  [K] とすれば、

$$\rho = \frac{M_w P}{RT}$$

が成り立つ。なお、解析対象が水素であるためその分子量  $M_w$  は 2.016 [g/mol] である。

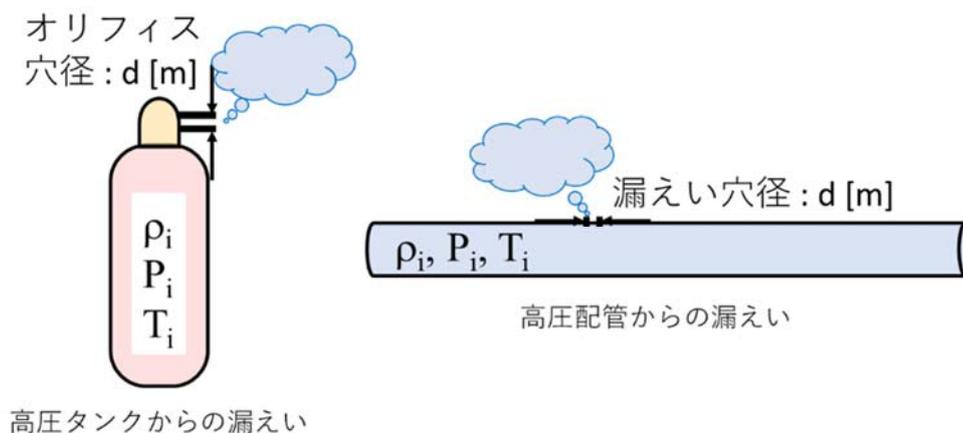


図 A1.1 モデルの模式図

## A1.2 高圧水素設備より放出する水素ガスの体積流量 $Q_{H_2}$ の算出

1.1.2.2 において検討した漏えいシナリオに基づいて、例えば緊急遮断システム (ESDS) が作動するまでの比較的短時間の漏えいの場合、配管およびタンク等の水素設備内部のガス温度や圧力の変化がない定常流として仮定すると、漏えいする水素ガスの体積流量は等エントロピー流れを仮定すると以下の式で与えられる。

$$Q_{H_2} = C_d A C \sqrt{\frac{RT_0}{M_w}}$$

$Q_{H_2}$  : 水素ガスの体積流量 [ $m^3/s$ ]

$d$  : 1.1.2.2 において決定した漏えい穴径 [ $m$ ]

$$A = \left(\frac{\pi d^2}{4}\right) [m^2]$$

$P_0$  : 水素設備内の圧力 [ $Pa$ ]

$P_a$  : 大気圧 [ $Pa$ ]

$M_w$  : 分子量 [ $g/mol$ ]

$T_0$  : 水素設備内ガス温度 [ $K$ ]

$\gamma$  : 比熱比(水素の場合 2 原子分子であるため 1.4 [-]としてよい)

$R$  : 気体定数 = 8.314 [ $J/mol K$ ]

$C_d$  : 流出係数 [-]

(1) 漏えい源が細長い開口の場合、縮流を生じさせるため

$$C_d = 0.62$$

(2) 漏えい源が円形の開口の場合、縮流を生じにくくなるため

$$C_d = 0.95 \sim 0.99$$

$C$  : 次式によって与えられる値

(1)  $\frac{P_0}{P_a} \geq \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$  の場合 (チョーク流れ)

$$C = \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}$$

(2)  $\frac{P_0}{P_a} < \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$  の場合 (非チョーク流れ)

$$C = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left\{ \left( \frac{P_a}{P_0} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left( \frac{P_a}{P_0} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right\}}$$

なお、漏えい穴より放出される水素ガスの温度、密度、圧力は、等エントロピー流れを仮定すると以下の式によって求められる。

(1)  $\frac{P_0}{P_a} \geq \left( \frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$  の場合 (チョーク流れ)

$$P = P_0 \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

$$\rho = \rho_0 \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}}$$

$$T = T_0 \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)$$

(2)  $\frac{P_0}{P_a} < \left( \frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$  の場合 (非チョーク流れ)

$$P = P_a$$

$$\rho = \rho_0 \left( \frac{P_a}{P_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}}$$

$$T = T_0 \left( \frac{P_a}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$P$  : 放出される水素の圧力 [Pa]

$T$  : 放出される水素の温度 [K]

$\rho$  : 放出される水素の密度 [kg/m<sup>3</sup>]

### A1.3 換気流によって希釈された水素/空気混合ガスの体積流量の算出

水素を流通する設備から換気のある空間に漏れいして区画外へ排出される水素/空気混合ガスの体積流量は以下の方法によって求めることができる。

$$Q_m = \frac{G_m}{\rho_m}$$

$Q_m$  : 水素/空気混合ガスの体積流量 [m<sup>3</sup>/s]

$G_m$  : 水素/空気混合ガスの質量流量 [kg/s]

$\rho_m$  : 水素/空気混合ガスの平均密度 [kg/m<sup>3</sup>]

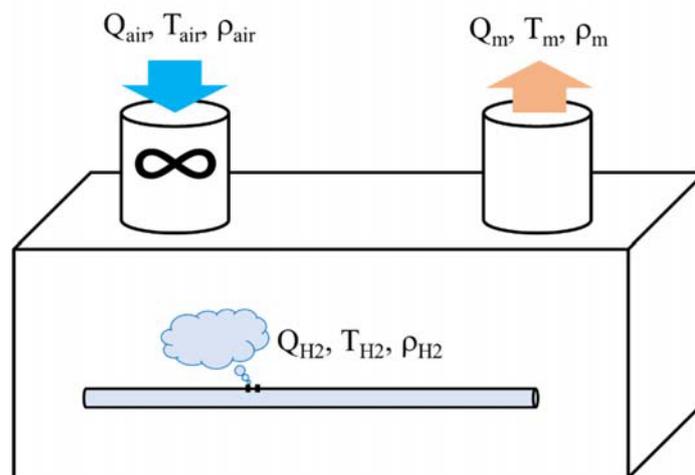


図 A1.2 シナリオの模式図

これを求めるためには、混合ガスの質量流量および密度（温度  $T_m$ 、平均分子量  $M_{wm}$ 、さらには混合ガス中の水素の質量分率  $Y_{H2}$ ）を求める必要がある。

まず、混合ガスの質量流量  $G_m$  は連続の式から、以下の式で定義される。

$$G_m = G_{H2} + G_{air}$$

$G_{H2}$  : 設備から漏洩する水素の質量流量 [kg/s]

$G_{air}$  : 換気設備より供給される空気の質量流量 [kg/s]

いま、対象区画内の圧力は大気圧  $P_a = 101325$  [Pa]であると仮定すると、理想気体の状態方程式より混合ガスの密度  $\rho_m$  は以下の式より求められる。

$$\rho_m = \frac{M_{wm}P_a}{RT_m}$$

混合ガスの温度は水素と空気の温度が異なる場合を想定して、熱平衡状態の温度から求める。また、平均分子量は混合ガスの質量分率から求めることができる。

水素および空気の質量分率は、換気の排出側では完全混合された水素/空気混合ガスが放出されるものと仮定すると以下の式によって与えられる。

$$Y_{H2} = \frac{G_{H2}}{G_{H2} + G_{air}}$$

$Y_{H2}$  : 水素の混合ガス中の質量分率 [-]

$Y_{air}$  : 空気の混合ガス中の質量分率 [-] (= 1 -  $Y_{H2}$ )

$G_{H2}$  : 設備より流出する水素ガスの質量流量 [kg/s] (以下の式より算出される)

$$G_{H2} = \rho_{H2} \times Q_{H2}$$

$Q_{H2}$  : 設備より流出する水素ガスの体積流量 [m<sup>3</sup>/s]

$T_{H2}$  : 設備より流出する水素ガス温度 [K]

$\rho_{H2}$  : 設備より流出する温度  $T_{H2}$  の水素ガスの密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$G_{air}$  : 換気設備より供給される空気の質量流量 [kg/s] (以下の式より算出される)

$$G_{air} = \rho_{air} \times Q_{air}$$

$Q_{air}$  : 換気設備より供給される空気の体積流量 [m<sup>3</sup>/s] (以下の式より算出される)

$$Q_{air} = V \times N \div 3600$$

$V$  : 対象区画の容積 [m<sup>3</sup>]

$N$  : 換気回数 [1/h] (上式では毎秒に換算する)

$\rho_{air}$  : 換気設備より供給される温度  $T_{air}$  の空気の密度 [kg/m<sup>3</sup>] (以下の式より算出される)

$$\rho_{air} = \frac{M_{w\_air}P_a}{RT_{air}}$$

$T_{air}$  : 換気設備より供給される空気温度 [K]

$M_{w\_air}$  : 換気設備より供給される空気の分子量 [g/mol] (= 29.966 g/mol)

さらに、混合ガスの平均分子量  $M_{wm}$  は以下の式より算出される。

$$M_{wm} = \frac{1}{\left[ \frac{Y_{H2}}{M_{w_{H2}}} \right] + \left[ \frac{1 - Y_{H2}}{M_{w_{air}}} \right]}$$

$M_{w_{H2}}$  : 水素の分子量 [g/mol] (= 2.016 g/mol)

最後に、混合ガスの熱平衡温度  $T_m$  は標準温度 298.15 [K] を基準として顕熱の授受として表現すれば、以下の式より算出される。

$$T_m = \frac{C_{p_{H2}} Y_{H2}}{C_{pm}} (T_{H2} - 298.15) + \frac{C_{p_{air}} (1 - Y_{H2})}{C_{pm}} (T_{air} - 298.15) + 298.15$$

$C_{p_{H2}}$  : 水素ガスの定圧比熱 [kJ/kg·K] (= 14.1971 kJ/kg·K)

$C_{p_{air}}$  : 換気設備より供給される空気の定圧比熱 [kJ/kg·K] (= 1.005 kJ/kg·K)

$C_{pm}$  : 水素/空気混合ガスの定圧比熱 [kJ/kg·K]

水素/空気混合ガスの定圧比熱は質量分率を用いて以下の式より与えられる。

$$C_{pm} = C_{p_{H2}} Y_{H2} + C_{p_{air}} (1 - Y_{H2})$$

#### 参考文献

- Jerzy A. OWZAREK, Fundamentals of Gas Dynamics, International Textbook Company, 1964, pp 254-255.
- 松尾 一泰, 圧縮性流体力学: 内部流れの理論と解析 (第 1 版), 理工学社, 1994.

## 附属書 2

### ベント出口より放出される水素ガスの拡散性状の推定方法

#### A2.1 はじめに

燃料電池船安全ガイドライン 6.5 項では、ベント出口高さは通常、暴露甲板上 6 m 以上とし、作業区域及び歩路上 6 m 以上としなければならない。ただし、特別の考慮が払われている場合には、検査機関は規定の高さを下回ることを認めることがある。

これに対して、燃料電池に使用される水素ガスは分子量が最も小さい気体分子であり、沸点 19.27 K の液化水素が気化して間もない温度範囲を除いて大気環境下においては空気より密度が高くなることは無く、水素/空気混合気体の密度に応じた鉛直上向きの浮力を常に受けること、また、ベント出口より運動量をもって水素ガスが放出されることから、これらの効果を考慮すれば必ずしも離隔すべき船上の場所が火災危険性に晒されるわけではないと考えられる。

そこで、ベント放出される水素ガスの拡散性状を予測し、離隔すべき船上の場所が火災危険性に晒されるかどうかを推定するための方法を以下に示す。

本推定手法は、ベント放出されるガスの運動量や浮力の効果を見積もり、大気の運動に移行する高さを推定する方法と、大気の運動(移流による風下への輸送、乱れによる混合効果)によって移流拡散する現象を推定するための方法の 2 段階の計算を行うものとする。前者の推定方法として、有風下における工場の排煙による化学物質拡散解析に用いられる、放出された化学物質が大気の運動が支配的な流れに移行するまでの高さ(有効煙突高度)を求める簡易的な手法の 1 つである Bosanquet の式を用いることとする。後者については、Bosanquet の式と同様に比較的簡便に大気拡散予測が可能であり、Bosanquet の式と組み合わせて用いられることが多い Pearson の式を用いることとする。図 A2.1 に本モデルの模式図を示す。

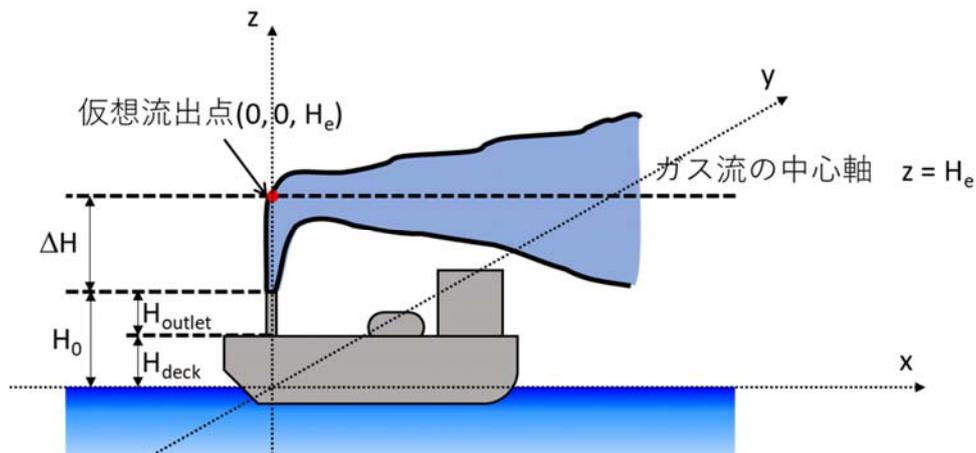


図 A2.1 大気拡散解析モデルの模式図

( $H_{deck}$ : 暴露甲板高さ、 $H_{outlet}$ : ベント出口高さ、 $\Delta H$ : 運動量および浮力による上昇分、 $H_e$ : 運動量および浮力の影響を考慮したベント放出ガス流れの仮想流出点高さ)

## A2.2 ベント放出されるガスの管断面平均流速 $u$ の算出

1.1.2.1において算出された圧力逃し弁の設計条件に基づく水素ガスの体積流量から、ベント管出口における断面平均流速は以下の式で与えられる。

$$V_g = Q_{H_2}/A$$

$Q_{H_2}$  : 水素ガスの体積流量 [m<sup>3</sup>/s]

$A$  : ベント管流路面積 [m<sup>2</sup>]

$V_g$  : ベント管断面平均流速 [m/s]

## A2.3 ベント放出されるガスの運動量による上昇効果 $H_m$ の算出

ベント放出されるガスの運動量による上昇効果は、以下の式で与えられる。

$$H_m = \frac{4.77}{1 + \frac{0.43U_a}{V_g}} \cdot \frac{\sqrt{Q_{T_1} V_g}}{U_a}$$

$H_m$  : 流出速度によるベント出口から大気拡散するガス流れの主軸の上昇分 [m]

$U_a$  : 大気風速 [m/s]

$V_g$  : ガスの放出速度 [m/s]

$g$  : 重力加速度 [m/s<sup>2</sup>]

$Q_{T_1}$  : 温度  $T_1$  における放出ガス体積流量 [m<sup>3</sup>/s]

$T_1$  : 気温 [K]

## A2.4 ベント放出されるガスの浮力による上昇効果 $H_t$ の算出

ベント放出されるガスの浮力による上昇効果は、以下の式で与えられる。

$$H_t = 6.36g \frac{Q_{T_1} \Delta T}{U_a^3 T_1} \left( \ln(J^2) + \frac{2}{J} - 2 \right)$$

ただし、

$$J = \frac{U_a^2}{\sqrt{Q_{T_1} V_g}} \left( 0.43 \sqrt{\frac{T_1}{g}} \frac{d\theta}{dz} - 0.28 \frac{V_g}{g} \cdot \frac{T_1}{\Delta T} \right) + 1$$

より求める。

$H_i$  : 浮力によるベント出口から大気拡散するガス流れの主軸の上昇分 [m]

$U_a$  : 大気風速 [m/s]

$V_g$  : ガスの放出速度 [m/s]

$g$  : 重力加速度 [m/s<sup>2</sup>]

$Q_{T1}$  : 温度  $T_1$  における放出ガス体積流量 [m<sup>3</sup>/s]

$T_1$  : 気温 [K]

$\Delta T$  : 放出ガス温度と気温の換算温度差 [K]

$d\theta/dz$  : 大気の温位勾配 [K/m] (大気安定度に基づいて表 A2.1 より与えること)

なお、Bosanquet の式は本来高温の排煙 (= 空気) に適用されるモデルであり、放出されるガスの分子量の違いを考慮したものではない。そこで、ベント出口における水素の密度に相当する温度の空気であると仮定して上式の換算温度差  $\Delta T$  を算出する必要がある。混合ガスの密度  $\rho_m$  は理想気体の状態方程式を仮定すると、

$$\rho_m = \frac{Mw_m Pa}{RT_m}$$

である。ここで、 $Mw_m$  を混合ガスの平均分子量 [g/mol]、 $Pa$  を大気圧 [Pa]、 $R$  を気体定数 (= 8.314 [J/mol K])、 $T_m$  を混合ガスの温度 [K] とする。混合ガスの平均分子量  $Mw_m$  は、

$$Mw_m = \frac{1}{\frac{Y_{H_2}}{Mw_{H_2}} + \frac{1 - Y_{H_2}}{Mw_{air}}}$$

である。ここで、 $Y_{H_2}$  を混合ガス中の水素の質量分率 [-]、 $Mw_{H_2}$  を水素の分子量 (= 2.016) [g/mol]、 $Mw_{air}$  を空気の分子量 (= 28.966) [g/mol] とする。なお、空気と水素の 2 成分系を仮定する。水素の質量分率  $Y_{H_2}$  [-] は、混合ガス中の水素の体積分率  $X_{H_2}$  [-] を用いて

$$Y_{H_2} = \frac{Mw_{H_2} X_{H_2}}{Mw_{H_2} X_{H_2} + Mw_{air} (1 - X_{H_2})}$$

である。以上より求めた混合ガス密度  $\rho_m$  [kg/m<sup>3</sup>] を用いて高温の空気に換算する。その温度は理想気体を仮定すれば以下の式より算出される。

$$T = \frac{Mw_{air} Pa}{R \rho_m}$$

よって、換算温度差  $\Delta T$  は、

$$\Delta T = T - T_1$$

である。最後に、ベント出口における放出されるガス温度  $T$  [K] の体積流量  $Q$  [m<sup>3</sup>/s] を温度  $T_1$  [K] における体積流量  $Q_{T1}$  [m<sup>3</sup>/s] に換算するには、圧力一定のもと理想気体を仮定すると、

$$Q_{T_1} = Q \times \frac{T_1}{T}$$

である。

表 A2.1 大気安定度に基づく計算パラメータ

大気安定度	Bosanquet の式	Pearson の式	
	dθ / dz	p	q
安定 (弱い乱れ)	0.0033	0.02	0.04
中立 (平均的乱れ)	0.0067	0.05	0.08
不安定 (強い乱れ)	0.0167	0.10	0.16

### A2.5 ベント放出されるガスの仮想流出点高さ $H_e$ の算出

ベント放出されるガスの運動量および浮力の影響を考慮した仮想流出点高さ  $H_e$  は以下の式で与えられる。

$$H_e = H_0 + \Delta H$$

ただし、

$$\Delta H = 0.65(H_m + H_t)$$

$$H_0 = H_{deck} + H_{outlet}$$

である。ここで、 $H_e$  を仮想流出点高さ [m]、 $\Delta H$  を放出速度および浮力の影響による流出源の増分 [m]、 $H_m$  を流出速度による上昇分 [m]、 $H_t$  を浮力による上昇分 [m]、 $H_0$  を海水面を 0 m とするときのベント出口の高さ [m]、 $H_{deck}$  を海水面を 0 m とするときの曝露甲板高さ [m]、 $H_{outlet}$  を曝露甲板からのベント高さ [m] とする。

### A2.6 ベント放出ガスの大気拡散による任意地点における濃度 $C$ の算出

ベント放出ガスの大気拡散による任意地点(x,y,z)におけるガス濃度  $C(x,y,z)$  [ppm] は以下の式で与えられる。

$$C(x, y, z) = \frac{Q'' \times 10^6}{\sqrt{2\pi p q} U_a x^2} \cdot F_y(x, y) \cdot F_z(x, z)$$

ただし、

$$F_y(x, y) = \exp\left(-\frac{(y - y_0)^2}{2(qx)^2}\right)$$

$$F_z(x, z) = \exp\left(-\frac{z - H_e}{px}\right) + \exp\left(-\frac{z + H_e}{px}\right)$$

である。ここで、 $C(x,y,z)$  を任意地点 $(x,y,z)$ におけるガス濃度 [ppm]、 $Q''$  を大気温度における放出ガス中の水素の体積流量 [ $m^3/s$ ]、 $p$  および  $q$  を鉛直方向および水平方向の拡散パラメータ [-]、 $F_y$  および  $F_z$  を任意地点 $(x,y,z)$ における放出ガスの分布関数 [-]とする。 $Q''$  はベント出口での大気温度における放出ガスの体積流量を  $Q$  [ $m^3/s$ ]、水素ガスの体積濃度を  $C_{H_2}$  [-]とすると、

$$Q'' = Q \times C_{H_2}$$

である。鉛直方向および水平方向の拡散パラメータ  $p$  および  $q$  は大気安定度により表 A2.1 より与えられる。ここで、気流方向は常に一定ではなく時間的に変化することを考慮すると、瞬時値ではなくある一定時間により平均化された拡散幅を取り入れることが望ましい。米国化学工学会化学プロセス安全センター (AIChE/CCPS) によるガイドライン『Guidelines for Use of Vapor Cloud Dispersion Models』によると、水平方向の拡散幅を平均化時間を用いて以下の式によって補正することを提案している。

$$q' = \left( \frac{t_{a2}}{t_{a1}} \right)^{1/5} \cdot q$$

ここで、 $q'$  を補正後の拡散幅 [-]、 $q$  を補正前の拡散幅 [-]、 $t_{a2}$  を平均化時間 [s]、 $t_{a1}$  を標準平均化時間 [s]とする。標準化時間  $t_{a1}$  は 600 [s]を推奨値とし、平均化時間については可燃性ガスの拡散評価では 18.75 [s]を、毒性ガスの評価では 600 [s]が用いられる。600 秒を標準化時間の基準とした場合の補正係数の値の計算例としては、以下のとおりである。

## A2.2 水平拡散幅の補正係数の計算例

平均化時間	18.75 秒	60 秒	10 分	30 分	1 時間
補正係数	0.5	0.631	1	1.246	1.431

## A2.7 離隔すべき場所における着火危険性の確認

A2.6 において、作業区域および歩路、あるいは空気取入口、排気口並びに居住区域、業務区域、制御場所又は他の非危険場所、また燃料電池設備の排気ガス出口等において離隔すべき場所の任意地点における水素ガス濃度の推定を行い、燃焼下限濃度以下であることを確認すること。なお、水素の燃焼下限濃度は 40000 [ppm] とする。

また、不確実性を考慮して安全サイドの評価として 1/2 LEL を用いる場合、水素では 20000 ppm を基準値とすること。

#### 参考文献

- ・ 川上智規, 大気環境工学, 6 章 大気汚染物質の拡散, コロナ社.
- ・ C. H. Bosanquet and J. L. Pearson, The spread of smoke and gases from chimneys, Transactions of the Faraday Society, Vol. 32, 1936, pp 1249-1263.
- ・ 荒井健弥, 大気汚染における拡散の問題, 燃料協会誌, 44 巻 9 号, 1965, pp 606-617.
- ・ 才木義夫, 葭谷規由, 菅野三郎, 福井昭三, 大気汚染と煙の拡散について (2), 安全工学, Vol. 9 No. 3, 1970, pp 178-183.
- ・ Center for Chemical Process Safety (CCPS), Guidelines for Use of Vapor Cloud Dispersion Models, Center for Chemical Process Safety/AIChE (CCPS), 1996, pp 104-109.

## 添付資料 6

### コンテナ電源ハイブリッド船に係るリスク評価の概要

- ・ 内燃機関及び燃料格納設備収納のコンテナ電源ユニット
- ・ 電池収納のコンテナ電源ユニット

# コンテナ搭載型ユニット電源システムの リスク評価

コンテナ搭載型ユニット電源システムのリスク評価



## 目次

---

### □ 概要

- 背景、目的

### □ 動力モジュールおよび燃料モジュールのリスク評価

- 解析対象の設定
- リスク評価の方法・結果

### □ 蓄電池モジュールのリスク評価

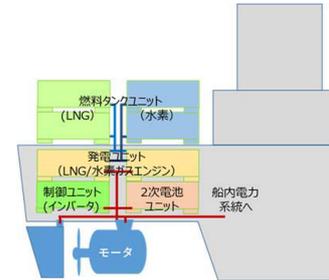
- 解析対象の設定
- リスク評価の方法・結果

### □ まとめ

## □ 背景・目的

- 世界的な脱炭素化が進む中、とりわけ国内物流を支える内航カーボンニュートラル実現の環境整備が今後進められる予定である
- 内航船舶のLNGへの燃料転換を促進し、自動化も視野に入れたメンテナンスフリーの動力システムとして、コンテナ搭載型ユニット電源システムの構想が進められている

- ✓ LNG転換が困難とされる内航船でも容易
- ✓ 簡便な保守、修繕、燃料補給
  - ✓ 整備済みユニットや燃料補給補給済みユニットと積み替えるだけで完了
- ✓ 船員の負担を軽減することが可能



➔ コンテナ搭載型ユニット電源システムは実績がない新規コンセプト船であり、その安全上の問題としてLNG燃料の使用やリチウムイオン電池からなる蓄電池システムの火災安全性が懸念される

### 1) 内燃機関及び燃料格納設備収納のコンテナ電源ユニット

- 国際ガス燃料船安全コード（IGFコード）
  - 第4.2.1項で求められるリスク評価

### 2) 蓄電池収納のコンテナ電源ユニット

- 日本海事協会の大容量蓄電池ガイドライン
  - 第4章第9項で蓄電池本体に求められるリスク評価

安全上の問題を洗い出す

3

## □ コンテナ電源ハイブリッド船

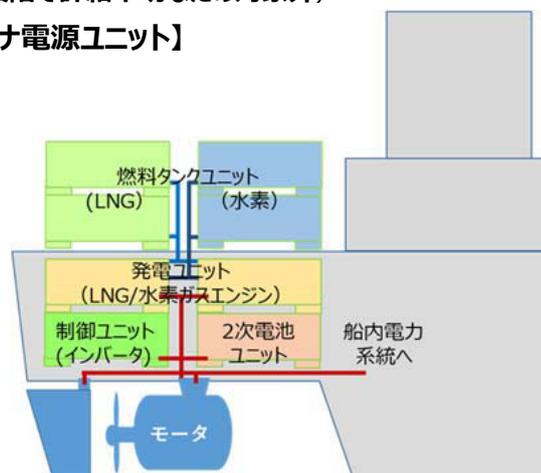
- 電源ユニットから供給される電力を用いてプロペラを電動機で回す電気推進方式
- 各モジュール間で相互に電力、燃料等が接続
  - エンジン、発電機等の機関部をコンテナに収納した動力モジュール
  - 燃料タンクおよび燃料供給システムを備えた燃料モジュール
  - リチウムイオン電池からなる蓄電池システムを備えた蓄電池モジュール
  - その他の制御機器等のモジュール（現段階で詳細不明なため対象外）

### 【内燃機関及び燃料格納設備収納のコンテナ電源ユニット】

- 動力モジュール
  - 主発電装置（2機）
    - 4ストロークガス専焼エンジン
    - 発電機
  - ガスバルブユニット（2系統）
- 燃料モジュール
  - LNGタンク（蓄圧式タイプC）
  - 燃料ガス供給システム

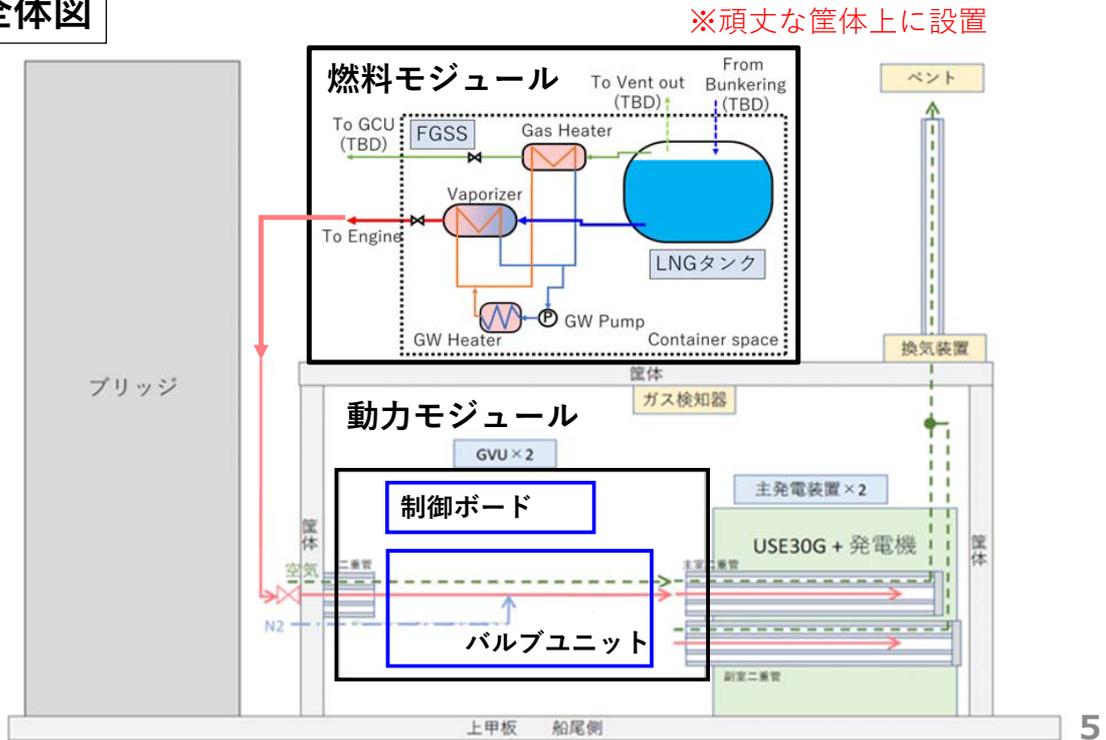
### 【蓄電池収納のコンテナ電源ユニット】

- 蓄電池モジュール
  - 電池パック
  - バッテリーマネジメントシステム（BMS）
  - その他



4

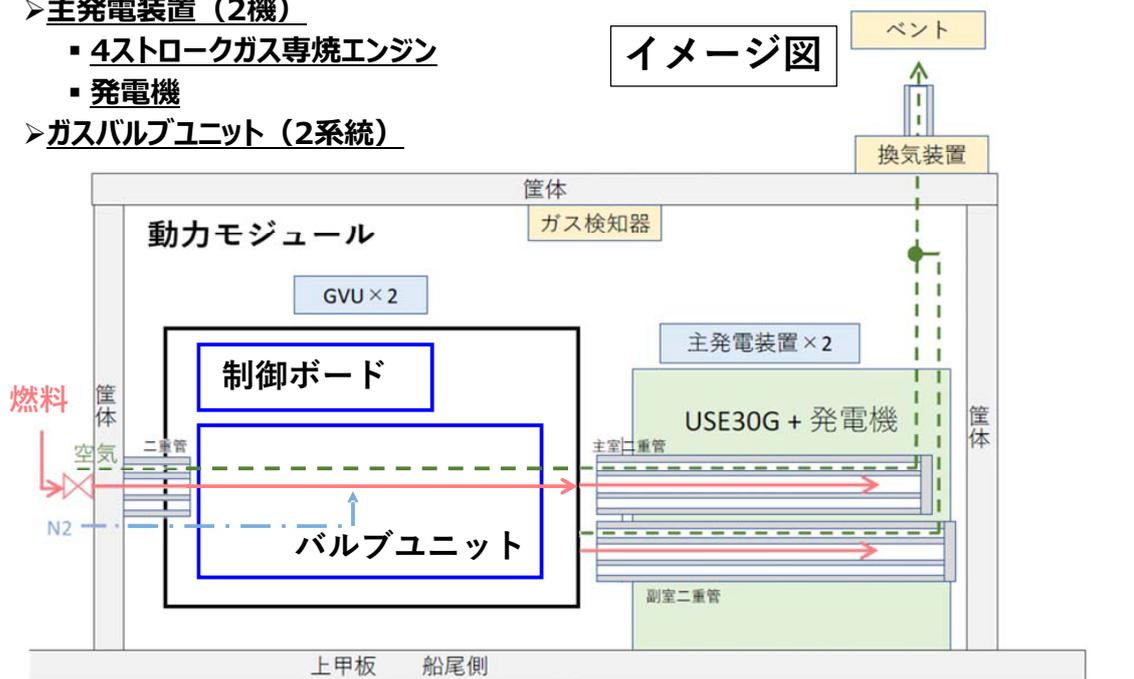
**全体図**



**ロ 動力モジュール**

- 主発電装置 (2機)
  - 4ストロークガス専焼エンジン
  - 発電機
- ガスバルブユニット (2系統)

**イメージ図**



**□ 動力モジュール**

- ブリッジより船尾側の上甲板に設置することを想定
- 上部に燃料モジュールを設置する場合、十分な強度を有する筐体が必要
- 筐体の外側のマスター弁を通じて筐体内の機関部へ燃料供給される
- 内管からの燃料漏洩によって筐体内が直ちに爆発雰囲気を形成することが無いよう二重構造かつ通風がなされている
- 本コンテナモジュールはIGFコード上のガス安全機関区域に分類される
- 筐体外部に換気装置が設置されており、筐体内に通風のために引き込んだ空気がベントを通じて排出される

**□ ガスバルブユニット**

- ガス電磁弁ボード、ガスバルブユニットボックスからなる
- ガスフリー用の窒素パーズラインを備える
- ブリードバルブの出口はフレームアレスタを経由してベントに接続される

➢IGFコード11.3.3規則が適用される場合においては、少なくとも燃料モジュールのコンテナ外壁もしくは動力モジュールの外壁はA-60級の防熱が必要（未定）

**□ リスク分析の前提条件**

- 国際ガス燃料船安全コード（IGFコード）第4.2.1項で求められるリスク評価に対応
  - ユニットの詳細情報（圧力、仕様、設計情報）を要する事項は現段階では実施困難
  - 本船側の設計はユニットを対象とするリスク評価の範囲外
- 燃料補給オペレーション・保守作業は対象外
  - 現段階で補給方式、補給オペレーションの手順が決まっていない
  - Ship to ship、Truck to ship、Shore to ship、ポータブルタンクの積み替えの3方法は、既に国土交通省の事業においてオペレーションマニュアルが整備されている
  - 入港時に整備済み/補給済みのコンテナユニットと交換することで対応が可能
  - 荷役・保守に関するフェーズは必要最小限の範囲で解析を実施

表 IGFコード第4.2.1項で求められるリスク評価の概要

節・項 No.	評価対象	評価内容
5.10.5	ドリップトレイ	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	居住区入口のガス検知	ハザードの同定(検知器設置の検討)

**ロ 対象フェーズ・ノードと解析方法**

- 解析方法：SWIFT手法
  - IMOが発行するFSAガイドラインに記載されているハザードの抽出に適したWhat-If分析の一種
  - 通常の操作からの逸脱を「もし○○だったら?」、「どのようにして○○が起こり得るか?」といったブレインストーミング形式によって行う

**【HAZIDの手順】**

Step 1 解析対象となるシステムやプロセスを定義する。  
 Step 2 ハザード及びその原因をブレインストーミングする。  
 Step 3 起こり得る結果を想定する。  
 Step 4 リスクマトリクスを基に、リスクをランク付けし優先順位を決める。  
 Step 5 以上の議論をワークシートに記録する。

- 対象フェーズ・ノード
  - 航海中およびバンカリング・保守を対象
  - 動力モジュールおよび燃料モジュール
- 一般社団法人日本海事協会の天然ガス燃料船のリスク評価ガイドライン、およびその附属書（附属書1 HAZID 手法の実施手順 および 附属書2 ハザードのチェックリスト）に基づいて解析を実施した

**ロ リスク指標の設定**

- IMOのFSAガイドラインに準拠

表 発生頻度の指標 (FI: Frequency Index)

FI	頻度	定義	F (隻年あたり)
7	頻繁	1隻において月に1度発生	10.0
5	時々	10隻において年に1度発生	0.1
3	稀な	1,000隻において年に1度発生	10 <sup>-3</sup>
1	非常に稀な	全世界5,000隻あったとして生涯中に1度発生	10 <sup>-5</sup>

表 深刻度（安全）の指標 (SI: Severity Index)

SI	深刻度	人間への影響	船体への影響	S (死者数換算)
1	小さな影響	単一負傷者又は複数の軽傷者	局所機器の損傷	0.01
2	大きな影響	複数の負傷者又は重傷者	重大で無い損傷	0.1
3	深刻な影響	単一の死者又は複数の重傷者	重大な損傷	1
4	破滅的影響	複数の死者	全損	10

表 リスク指標 (RI: Risk Index)

FI	頻度	深刻度 (SI)			
		1 小さな影響	2 大きな影響	3 深刻な影響	4 破滅的影響
7	頻繁	8	9	10	11
6		7	8	9	10
5	時々	6	7	8	9
4		5	6	7	8
3	稀な	4	5	6	7
2		3	4	5	6
1	非常に稀な	2	3	4	5

**【リスク指標のクライテリア】**  
 RI 4以下：対処不要  
 RI 5～7：リスク低減策の検討が必要  
 RI 8以上：リスク低減が必要

**ロ HAZID の結果(動力ユニット:航行中)**

- 抽出されたハザードは13件、うちリスクの低減が必要とされるハザードはなく、リスク低減の検討が必要なハザードは12件となった
- ハザードの多くは燃料使用に伴う、漏えい、火災、爆発と関連があるハザードとなっている

ID	ハザード	原因	結果	安全対策 (予防措置)	安全対策 (緩和措置)	SI	FI	RI	備考
1	燃料漏洩	・バルブの故障 ・フランジギャップ ・配管亀裂 ・配管破裂 ・衝突・座礁・荷崩れ等による燃料配管損傷	・可燃性混合ガスの形成 ・火災・爆発(⇒ID 2へ) ・窒息(無人の場合を除く) ・凍傷(無人の場合を除く)	・適切な保守・施工	・圧力逃し弁	2	4	6	
2	火災・爆発	・燃料漏洩(ID 1より) ・燃料ガスを含む換気の排気ガス滞留 ・メタンスリップを多く含む排気ガス滞留 ・他のコンテナ型モジュールの放出ガスの換気流入	・船体損傷 ・機関損傷 ・発電機損傷 ・船員の死傷 ・コンテナ筐体損傷 ・隣接コンテナ設備への延焼 ・コンテナユニットの崩落	・着火源の排除(防爆機器の使用) ・ガス検知器の設置(ESDと連動) ・強制換気(半閉鎖もしくは閉鎖区画の場合) ・適切な保守・施工	・コファダム相当の隔離区画の設置 ・防火構造 ・火災警報器の設置 ・消火装置の設置(固定式泡消火、CO2消火(無人の閉鎖区画の場合))	3	3	6	・換気は図面上「引き」ではなく「押し」である。二重管の外管も損傷するようなケースではモジュール内に可燃性ガスが拡散する可能性があるため、「引き」のほうがより安全と考えられる。 ・動力ユニット側の筐体はエンジンからの排熱や火災による加熱下において、床材の変形、支柱の変形・座屈の可能性があるため加熱下の強度設計を考慮する必要がある。

**ロ HAZID の結果(動力ユニット:航行中)**

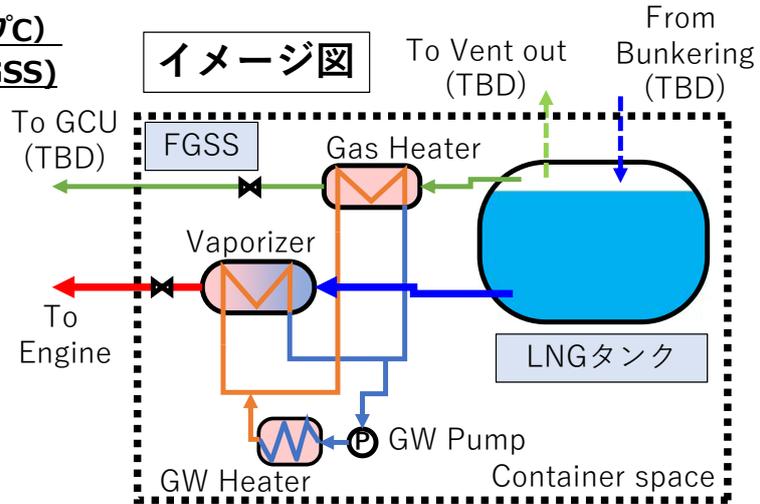
- 抽出されたハザードは13件、うちリスクの低減が必要とされるハザードはなく、リスク低減の検討が必要なハザードは12件となった
- ハザードの多くは燃料使用に伴う、漏えい、火災、爆発と関連があるハザードとなっている

ID	ハザード	原因	結果	安全対策 (予防措置)	安全対策 (緩和措置)	SI	FI	RI	備考
5	荷崩れ	・荒天 ・操船ミス ・不適切な固縛	・コンテナユニットの落水 ・燃料タンクの損傷(⇒ID 1燃料漏洩へ) ・燃料ガス供給設備の損傷(⇒ID 1燃料漏洩へ)	・固縛の増し締め	・ESDSの設置		2	1	3
10	外部火災	・隣接ユニット火災 - 蓄電池ユニット火災 - 燃料ユニット火災	・燃料配管損傷 ・GVUボックス(機器、制御系統)損傷 ・電気配線の損傷(⇒ID 8へ) ・発電機延焼(⇒ID 8へ)		・コファダム相当の隔離区画の設置 ・防火構造の検討 ・コンテナユニットレイアウトの最適化		2	3	5

- ・ コンテナを上下に積む場合、火災によって強度が低下した機関モジュールのコンテナ型モジュールが崩落する恐れ
- ・ 特に機関を搭載するコンテナ型モジュールについては火災を考慮するとコンテナの熱応力下における構造健全性を考慮する必要

**□ 燃料モジュール**

- LNGタンク (蓄圧式タイプC)
- 燃料ガス供給システム(FGSS)



- 燃料モジュールは、LNGタンク、タンクコネクションスペース、ガスヒーター、バーパライザー、Glycol Water (GW) 熱交換器/循環ポンプによって構成される
- バンカリングライン、ベント、GCU は未確定とする
- IGFコード11.3.3規則が適用される場合においては、少なくとも燃料モジュールのコンテナ外壁もしくは動力モジュールの外壁はA-60級の防熱が必要（未定）

13

**□ HAZID の結果(燃料ユニット:航行中)**

- 抽出されたハザードは15件、うちリスクの低減が必要とされるハザードはなく、リスク低減の検討が必要なハザードは14件となった
- ハザードの多くは燃料使用に伴う、漏えい、火災、爆発と関連があるハザードとなっている

ID	ハザード	原因	結果	安全対策 (予防措置)	安全対策 (緩和措置)	S	I	F	R	I	備考
1	燃料漏洩	<ul style="list-style-type: none"> <li>・バルブの故障</li> <li>・フランジギャップ</li> <li>・配管亀裂</li> <li>・配管破裂</li> <li>・衝突・座礁・荷崩れ等によるタンク損傷</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・可燃性混合ガスの形成</li> <li>・火災・爆発 ( ID2へ)</li> <li>・低温液体による熱応力                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 船体損傷</li> <li>- 燃料ユニット支持構造の損傷</li> </ul> </li> <li>・下部コンテナユニットの損傷・燃料の侵入</li> <li>・窒息</li> <li>・凍傷</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・適切な保守・施工</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・コファダム相当の隔離区画の設置</li> <li>・ドリフトレイによる下部コンテナへの影響軽減</li> <li>・圧力逃し弁</li> <li>・強制換気の設置</li> </ul>	2	4	6			
2	火災・爆発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・燃料漏洩(1.1より)</li> <li>・ベント放出ガスの滞留</li> <li>・他のコンテナ型モジュールの放出ガスの換気流入</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・船体損傷</li> <li>・タンク損傷</li> <li>・船員の死傷</li> <li>・隣接コンテナ設備への延焼</li> <li>・コンテナユニットの崩落</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・着火源の排除 (防爆機器の使用)</li> <li>・ガス検知器の設置 (ESDと連動)</li> <li>・強制換気 (半閉鎖もしくは閉鎖区画の場合)</li> <li>・適切な保守・施工</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・コファダム相当の隔離区画の設置</li> <li>・防火構造</li> <li>・消火装置の設置 (ドライケミカルによる消火、放水モニターによる冷却、CO2消火 (無人の閉鎖区画の場合))</li> </ul>	3	3	6			<ul style="list-style-type: none"> <li>・ブリッジの背後は船首側からの気流によって後流渦を生じ、コンテナユニットおよびベント出口との位置関係によってはベント放出ガスがブリッジ背後へ引き込まれて、滞留する可能性がある。配置やベント放出のレイアウトには注意が必要。</li> <li>・燃料ユニットは船内区画のような強度と閉鎖性のある構造を持っていないため、火災の結果、ブリッジ等の周囲構造への影響の伝播には注意が必要である。(封じ込めの概念が成立しにくい)</li> </ul>

14

**ロ HAZID の結果(燃料ユニット:バンカリング・保守)**

- 抽出されたハザードは15件、うちリスクの低減が必要とされるハザードはなく、リスク低減の検討が必要なハザードは14件となった
- ハザードの多くは燃料使用に伴う、漏えい、火災、爆発と関連があるハザードとなっている

ID	ハザード	原因	結果	安全対策 (予防措置)	安全対策 (緩和措置)	SI	FI	RI	備考
1	燃料過積載	・操作ミス ・液面計の故障 ・ポンプ故障 (制御失敗)	・タンク損傷 ・配管破裂 (バンカリングST タンク間) ・燃料漏洩 ( 1.1火災・爆発へ) ・ガスリターンラインへの液体燃料流入 ・燃料モジュールガスラインへの液体燃料流入 ・ガス配管損傷・燃料漏洩 (燃料モジュール内配管。 1.1火災・爆発へ)	・液面計の冗長化 ・適切な保守・施工 ・高位液面警報装置の設置	・圧力逃し弁	3	4	7	・ IGFコード 15.4.2.1において、液面計測装置に加え、高位液面警報装置の設置が求められている。
2	コンテナの落下	・操作ミス ・クレーンの故障 ・停電 ・荒天	・コンテナユニットの損傷 ・船体損傷 ・他のユニットの損傷 ・コンテナユニットの落水 ・燃料タンクの損傷 ( 1.1火災・爆発へ)	・適切な保守・施工 ・ウェザールーティング		2	5	7	
3	不適切なコンテナの設置	・操作ミス ・クレーンの故障 ・停電 ・船体動揺・移動 ・荒天	・コンテナユニットの損傷 ・船体損傷 ・他のユニットの損傷 ・コンテナユニットの落水 ・燃料タンクの損傷 ( 1.1火災・爆発へ)	・適切な保守・施工 ・ウェザールーティング		2	5	7	
4	落下物 (機関部品、食料等)	・クレーンの故障 ・クレーンの操作ミス	・コンテナユニットの損傷	・クレーンの操作範囲の制限		2	5	7	

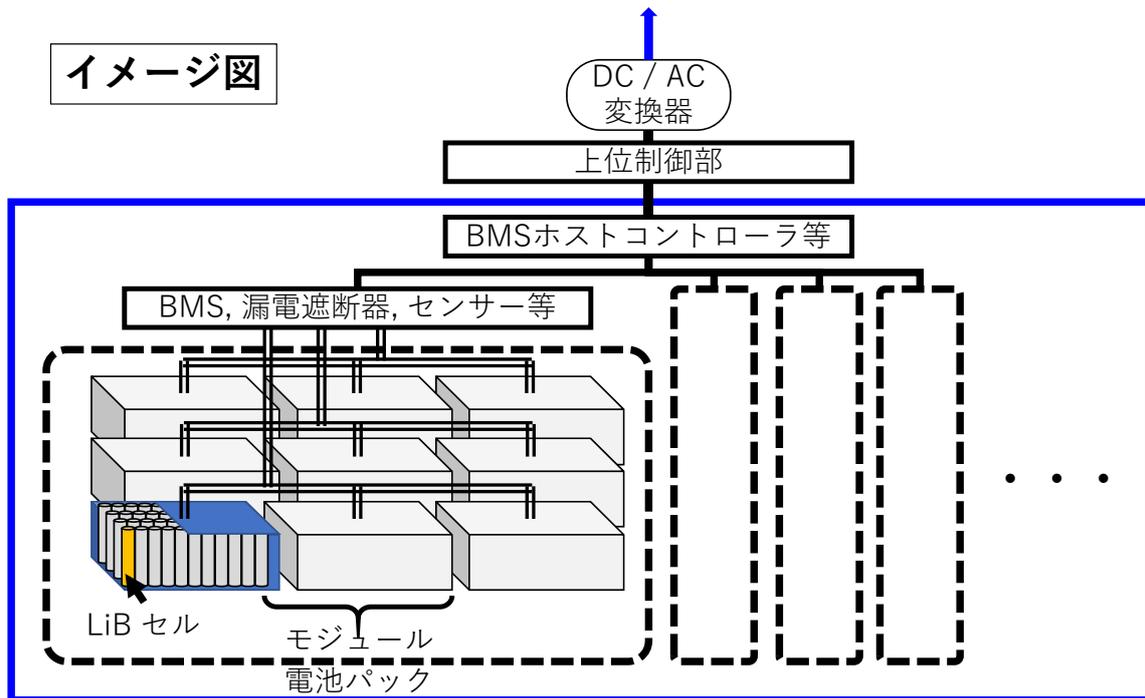
15

**ロ 蓄電池モジュール**

- 電池パック
  - 電池セルは可燃性の液体電解質を用いる
  - 電池モジュールは電池セルの集合体からなる
  - 電池パックは多数の電池モジュールで構成される
- バッテリーマネジメントシステム (BMS)
  - 各電池モジュールと接続される
  - バッテリーの異常を監視するための温度、電圧、電流、充電状態 (SOC)、健康状態 (SOH) を診断する
  - 漏電遮断器を備える
- BMSホストコントローラ
  - BMSを統括してバッテリーの管理を行う
- その他
  - 給気・排気の専用ダクトを設け、換気システムを導入する

16

イメージ図



17

□ 対象ノードと解析方法

- 解析方法：SWIFT手法
  - IMOが発行するFSAガイドラインに記載されているハザードの抽出に適したWhat-If分析の一種
  - 通常の操作からの逸脱を「もし○○だったら?」、「どのようにして○○が起こり得るか?」といったブレインストーミング形式によって行う

【HAZIDの手順】

- Step 1 解析対象となるシステムやプロセスを定義する。
- Step 2 ハザード及びその原因をブレインストーミングする。
- Step 3 起こり得る結果を想定する。
- Step 4 リスクマトリクスを基に、リスクをランク付けし優先順位を決める。
- Step 5 以上の議論をワークシートに記録する。

- 対象ノード
  - 検討の対象ノードはバッテリーシステム、コンテナスペース、電気・制御系の3つを対象とした

□ リスク指標の設定

- IMOのFSAガイドラインに準拠

18

ロ その他

- 一般社団法人日本海事協会の大容量蓄電池ガイドライン第4章第9項に記載されている蓄電池本体に求められるリスク評価事項を参照して実施した

9 リスク評価

小容量のもの（5kW以下の出力を持つ充電設備に接続される蓄電池設備）を除き、リチウムイオン蓄電池及びナトリウム硫黄蓄電池を使用する蓄電池設備については少なくとも以下の事項を含むリスク評価を行うこと。

(1) 蓄電池及び充放電システムが発火に至る全ての要因  
考慮すべき要因としては、過放電後の充電、電磁障害、感電、振動、動揺、浸水、外部短絡、内部短絡、過充電、過熱、落下、圧壊、漏洩、排出ガスへの引火、火災等がある。

(2) 状態検知、制御、異常検知、回路遮断など、リスク軽減に寄与する全ての部品、構造、機構等

(3) 検証試験の内容及びその結果

(4) 消火設備（又は鎮火へと導く機構・防火設備等）

ロ HAZID の結果(バッテリーシステム)

- 抽出されたハザードは5件、うちリスクの低減が必要とされるハザードはなく、リスク低減の検討が必要なハザードは2件となった
- 熱暴走に関連するハザードを中心に抽出された(熱暴走⇒ガス発生、熱暴走⇒拡大)

ID	ハザード	原因	結果	安全対策(予防措置)	安全対策(緩和措置)	SI	FI	RI
1	熱暴走	- 内部短絡 - 電池セルの破裂 - 過充電 - 過熱(外部からの火災、換気の喪失) - 急速放電(大電流による) - 外部火災 - 冷却システムの不具合 - 電池の長期過充電 - 外部短絡	- ガス発生(可燃性・爆発性、窒息性・有毒性) - 火災の可能性 - 爆発の可能性 - 隣接するセル(またはLiBモジュール)への延焼の可能性 - バッテリー電源の喪失	- PMS/EMSとBMS * 温度モニタリング * プロセス制御(電圧、電流) * 高/低電圧、高電流、高/低温度アラーム * SoCが推奨値を下回るとアラーム - 独立した緊急停止システム - ヒートシンク筐体 - モジュールの空冷 - 操作手順 - 冷却システムの冗長化	- 緊急シャットダウン - LiBモジュール筐体の熱設計(LiBモジュール間の断熱材) - 独立した室内換気 - コンテナ型蓄電池モジュールへの固定式消火装置設置	1	3	4
2	ガス発生	- 内部短絡 - 電池セルの破裂 - 過充電 - 過熱(外部からの火災、換気の喪失) - 急速放電 - 外部火災 - 冷却システムの不具合 - 電池の長期過充電 - 外部短絡 - 水の浸入	- 火災の可能性 - 爆発の可能性 - 毒性ガスによる影響 - バッテリー電源の喪失	- PMS/EMSとBMS * 温度モニタリング * プロセス制御(電圧、電流) * 高/低電圧、高電流、高/低温度アラーム * SoCが推奨値を下回るとアラーム - 独立した緊急停止システム - ヒートシンク筐体 - モジュールの空冷 - 操作手順 - 冷却システムの冗長化	- 緊急シャットダウン - 独立した室内換気 - コンテナ型蓄電池モジュールへの固定式消火装置設置 - 爆発性・有毒性ガス低減するための換気 - 室内へのガスセンサーの設置(LEL以下のガスを検知すると電気設備の通電停止およびシステムのシャットダウン) - 防爆型の室内換気	2	3	5
4	単一LiBモジュールを超えて伝播する熱暴走			- LiBモジュール内の火災がラック内の他のLiBモジュールに伝播しないように試験する		4	1	5

### ロ HAZID の結果(バッテリースペース)

- 抽出されたハザードは8件、うちリスクの低減が必要とされるハザードはなく、リスク低減の検討が必要なハザードは5件となった
- 火災に関するハザードと、空調・冷却設備に関するハザードが主に抽出された

ID	ハザード	原因	結果	安全対策(予防措置)	安全対策(緩和措置)	SI	FI	RI
2	バッテリー火災	- 熱暴走 (⇒B1.1と同様。その後の原因も含む) - 噴出火災	- バッテリー電源の喪失 - コンテナ型蓄電池モジュールの損失 - 船舶の損失	- 熱暴走 (⇒B1.1) に関する全ての予防措置	- 緊急シャットダウン - 独立した室内換気 - コンテナ型蓄電池モジュールへの固定式消火装置設置 - 爆発性・有毒性ガス低減のための換気 - 室内へのガスセンサーの設置 (LEL以下のガスを検知すると電気設備の通電停止およびシステムのシャットダウン) - 防爆型の室内換気 - 隣接するコンテナモジュールへのA60/A0級防熱	2	3	5
3	電池室での火災 (電池以外の原因)	- その他の電気機器 (照明、空調、その他の電気機器)	- コンテナ型蓄電池モジュールの温度上昇 - バッテリー火災への連鎖	- コンテナ型蓄電池モジュール内の室温モニタリング - 電池ケーシング用難燃性材料 - 火災危険性が高い設備の設置規制	- 隣接するコンテナモジュールへのA60/A0級防熱 - 緊急停止 - 煙・熱検知 - バッテリースペースの固定式消火装置	2	3	5
4	コンテナ型蓄電池モジュールに隣接するコンテナ型モジュールの火災	- 配電盤の火災 - DC/AC変換器の火災 - 動力モジュールの火災	- コンテナ型蓄電池モジュールの温度上昇 - バッテリー火災への連鎖	- BR 室温モニタリング - 火災リスクの高い他の部屋から独立したバッテリー換気を行う。 - A60/A0 隣接する空間への防火断熱材	- 緊急停止 - 煙・熱検知 - 消火システム設置	2	3	5

### ロ HAZID の結果(バッテリースペース)

- 抽出されたハザードは8件、うちリスクの低減が必要とされるハザードはなく、リスク低減の検討が必要なハザードは5件となった
- 火災に関するハザードと、空調・冷却設備に関するハザードが主に抽出された

ID	ハザード	原因	結果	安全対策(予防措置)	安全対策(緩和措置)	SI	FI	RI
5	電池室への水の浸入	- 外気からの水の結露 - 構造的損傷 (落下物、衝突など) - 水配管の破損 - 水系固定消火設備の不具合	- ガス発生の可能性 - 腐食	- リフトアップの手順 - 通気孔の全天候型完全性 - オーバーデッキの構造強化	- 独立した室内換気	1	3	4
6	室内排気の不具合	- 換気扇の故障 - 排気の閉止 (手動ダンパーが誤って閉じた場合)	- ダクト内爆発	- 想定される規模の爆発に耐える寸法のダクト		1	3	4
7	室内冷却装置の故障	- ポンプ故障 - 閉塞感	- 電池の過熱 - 電池の寿命の劣化	- コンテナ型バッテリーモジュール1基に対して独立した閉ループ冷却システムの設置		1	4	5
8	水没	- 固定式消火装置の不具合 - ファンコイル用冷却水の故障 - 衝突 - その他機械的衝撃 - 転覆	- ガス発生 - 短絡 - バッテリー電源の喪失 - バッテリーシステム全交換	- つり上げの手順 - 通気口の耐候性 - オーバーデッキの構造的強化 - コンテナ型蓄電池モジュールの配置 (喫水線より上)	- 火災警報器	3	1	4

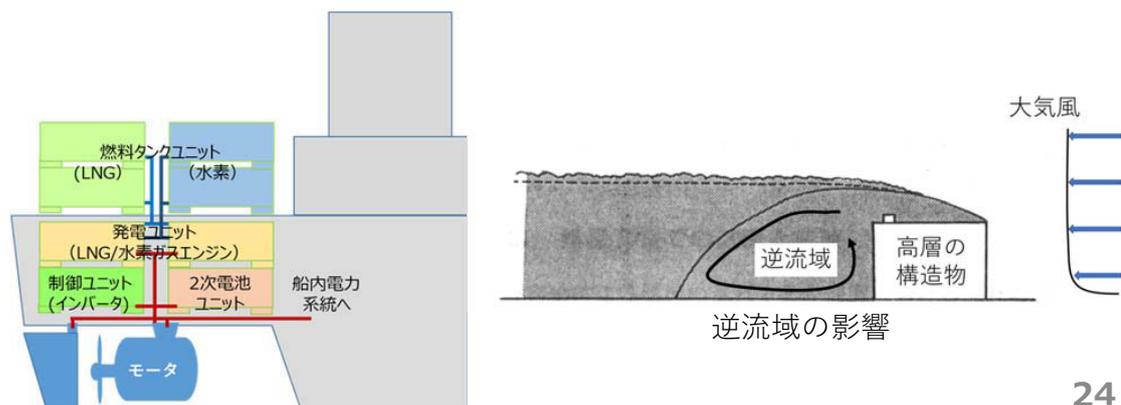
ロ HAZID の結果(電気および制御システム)

➤ 抽出されたハザードは4件、リスクの低減が必要とされるハザードおよびリスク低減の検討が必要なハザードはなかった

ID	ハザード	原因	結果	安全対策(予防措置)	安全対策(緩和措置)	SI	FI	RI
1	ブレーカの不用意なトリップ	-低電圧トリップ -過大な電流 -短絡	-バッテリー電源の喪失 -走行用エンジンの負荷増加	-バッテリー上がりの際、負荷の増加に対応できる主機と補機		1	3	4
2	コンバータの故障	-ヒューマンエラー -ソフトウェアエラー -機械的衝撃 -部品故障 -DC/AC変換器とBMS/PMS間の通信障害	-過充電 -過放電 -過電圧 -過電流 -温度上昇	-操作手順 -DC/AC変換器故障時の保護システム -システム統合のテストと検証	-PMS/EMSまたはBMS * 温度モニタリング * プロセス制御 (電圧、電流) * 高/低電圧、高電流、高/低温度アラーム * SoCが推奨値を下回るとアラーム - 独立した緊急停止システム - LiBモジュール筐体の熱設計 (LiBモジュール間の断熱材)	1	3	4
3	PMSとBMSの不具合	-ヒューマンエラー -ソフトウェアエラー -部品故障 -DC/AC変換器とBMS/PMS間の通信障害	-過充電 -過放電 -過電圧 -過電流 -温度上昇	-操作手順 -システム統合のテストと検証	- 独立した緊急停止システム - DC/AC変換器故障時の保護システム - ヒートシンク筐体 - LiBモジュールの空冷	1	3	4
4	緊急遮断システムの不具合	-ヒューマンエラー -ソフトウェアエラー -部品故障 -通信障害	-過充電 -過放電 -過電圧 -過電流 -温度上昇	-操作手順 -システム統合のテストと検証	-PMS/EMSとBMS * 温度モニタリング * プロセス制御 (電圧、電流) * 高/低電圧、高電流、高/低温度アラーム * SoCが推奨値を下回るとアラーム - ヒートシンク筐体 - LiBモジュールの空冷	1	3	4

23

- 1つのユニットで生じた火災等の事象が他のユニットに伝播するおそれがある
  - i. 横並びのユニットに対しては防火構造が有効
  - ii. 上下積みの場合、火災による高温や燃料漏洩による低温に曝されても崩落しない強度設計が有効
  
- 換気や通風の取り込み口および、漏えいしたガスの放出口が隣接する可能性がある
  - i. 放出口および取り込み口の配置には注意が必要
  - ii. 船橋背後の逆流域によってガスが滞留しやすい性状となる



24

- 現在、コンセプトの検討が進められているコンテナ収納ガスエンジン/発電ユニット、LNG燃料タンクユニット、リチウムイオン電池からなる蓄電池ユニットを対象にHAZIDを実施し、コンセプト段階において懸念されるハザードおよび安全対策の抽出を行った

□ **内燃機関及び燃料格納設備収納のコンテナ電源ユニット**

- 28件のハザードを抽出し、その多くは燃料の漏えい、火災、爆発による事象
- 漏えいや火災に伴うコンテナユニット間の影響の伝播が懸念され、コンテナに対する防火構造の導入や熱応力に対する構造強度、ベント放出されるガスの出口の配置、空気取り込み口の配置などがコンテナユニット特有の検討項目として抽出された

□ **蓄電池収納のコンテナ電源ユニット**

- 17件のハザードが抽出され、多くのハザードは、バッテリーの熱暴走、火災、バッテリーの安定性に影響を与える事象、バッテリーシステムの安全性に影響を及ぼす事象が抽出された
- 安全対策として、バッテリー制御の根幹であるBMSやPMS、空調による温度制御、換気による毒性・可燃性の発生ガス対策、防火構造によるコンテナ間の影響の伝播の抑制が考えられた

➢ **各ユニットが相互に影響するため、以下の3つの階層的な防護策が必要**

1. 個々のコンテナ単位の火災安全対策や不具合の予防策の実施
2. コンテナ間の影響の伝播の予防（防火構造、構造強度等の対策）
3. コンテナユニットのレイアウトによる隔離（配置の分散）※防火構造が困難な場合

## 添付資料 7

コンテナ電源ハイブリッド船に係るリスク評価の

### HAZID ワークシート

- ・ 内燃機関及び燃料格納設備収納のコンテナ電源ユニット
- ・ 電池収納のコンテナ電源ユニット



Node	ID	Hazard ハザード	Cause 原因	Consequences 結果	Safeguards -Prevention 安全対策(予防措置)	Safeguards - Mitigation 安全対策(緩和措置)	Severity index 深刻度	Frequency index 発生頻度	Risk index リスク	Note (commnets and remarks) 備考
A1	1	燃料漏洩	<ul style="list-style-type: none"> <li>バルブの故障</li> <li>フランジギャップ</li> <li>配管亀裂</li> <li>配管破裂</li> <li>衝突・座礁・荷崩れ等によるタンク損傷</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>可燃性混合ガスの形成</li> <li>火災・爆発 (⇒1.2へ)</li> <li>低温液体による熱応力 <ul style="list-style-type: none"> <li>船体損傷</li> <li>燃料ユニット支持構造の損傷</li> </ul> </li> <li>下部コンテナユニットの損傷・燃料の侵入</li> <li>窒息</li> <li>凍傷</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>適切な保守・施工</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>コファダム相当の隔離区画の設置</li> <li>ドリフトレイによる下部コンテナへの影響軽減</li> <li>圧力逃し弁</li> <li>強制換気の設置</li> </ul>	2	4	6	
	2	火災・爆発	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料漏洩(1.1より)</li> <li>ベント放出ガスの滞留</li> <li>他のコンテナ型モジュールの放出ガスの換気流入</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>船体損傷</li> <li>タンク損傷</li> <li>船員の死傷</li> <li>隣接コンテナ設備への延焼</li> <li>コンテナユニットの崩落</li> <li>コンテナユニットの損傷</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>着火源の排除 (防爆機器の使用)</li> <li>ガス検知器の設置 (ESDと連動)</li> <li>強制換気 (半閉鎖もしくは閉鎖区画の場合)</li> <li>適切な保守・施工</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>コファダム相当の隔離区画の設置</li> <li>防火構造</li> <li>消火装置の設置 (ドライケミカルによる消火、放水モニターによる冷却、CO2消火 (無人の閉鎖区画の場合))</li> </ul>	3	3	6	<ul style="list-style-type: none"> <li>ブリッジの背後は船首側からの気流によって後流渦を生じ、コンテナユニットおよびベント出口との位置関係によってはベント放出ガスがブリッジ背後へ引き込まれて、滞留する可能性がある。配置やベント放出のレイアウトには注意が必要。</li> <li>動力ユニット側の筐体はエンジンからの排熱や火災による加熱下において、床材の変形、支柱の変形・座屈の可能性があるため加熱下の強度設計を考慮する必要がある。</li> <li>燃料ユニットは船内区画のような強度と閉鎖性のある構造を持っていないため、火災の結果、ブリッジ等の周囲構造への影響の伝播には注意が必要である。(封じ込めの概念が成立しにくい)</li> </ul>
	3	衝突	<ul style="list-style-type: none"> <li>操船ミス</li> <li>制御不能 (エンジン停止・ブラックアウト)</li> <li>荒天</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料タンクの損傷 (⇒1.1へ)</li> <li>燃料ガス供給設備の損傷 (⇒1.1へ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>冗長化 (蓄電池ユニットへの自動切換)</li> <li>適切な保守・施工</li> <li>ウェザールーティング</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>固縛の増し締め</li> </ul>	2	4	6	
	4	座礁	<ul style="list-style-type: none"> <li>操船ミス</li> <li>制御不能 (エンジン停止・ブラックアウト)</li> <li>荒天</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>コンテナユニットの落水</li> <li>燃料タンクの損傷 (⇒1.1へ)</li> <li>燃料ガス供給設備の損傷 (⇒1.1へ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>冗長化 (蓄電池ユニットへの自動切換)</li> <li>適切な保守・施工</li> <li>ウェザールーティング</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>固縛の増し締め</li> </ul>	2	3	5	
	5	荷崩れ	<ul style="list-style-type: none"> <li>荒天</li> <li>操船ミス</li> <li>不適切な固縛</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>コンテナユニットの落水</li> <li>燃料タンクの損傷 (⇒1.1燃料漏洩へ)</li> <li>燃料ガス供給設備の損傷 (⇒1.1燃料漏洩へ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>固縛の増し締め</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ESDSの設置</li> </ul>	2	1	3	
	6	気相配管破裂	<ul style="list-style-type: none"> <li>操作ミス</li> <li>バルブ故障</li> <li>ガスバルブユニットの故障</li> <li>ガスバルブユニット制御系の誤動作</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料漏洩 (⇒1.1へ)</li> </ul>			1	4	5	
	7	燃料配管液封	<ul style="list-style-type: none"> <li>操作ミス</li> <li>バルブ故障</li> <li>ポンプ故障</li> <li>エンジン停止</li> <li>ESD作動</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>配管破裂</li> <li>燃料漏洩 (⇒1.1へ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>適切な保守・施工</li> <li>マニュアルの順守</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>バッファータンクの設置</li> <li>配管付き安全弁の設置</li> <li>液封時の復旧対応手順書の作成</li> </ul>	1	4	5	<ul style="list-style-type: none"> <li>バッファータンクを設置する場合は、容量の検討とオーバーフロー・漏洩もハザードとして考えること (⇒1.1へ)</li> </ul>
	8	液相燃料供給	<ul style="list-style-type: none"> <li>GWヒーター故障</li> <li>GW循環ポンプ故障</li> <li>気化器故障</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>エンジン故障</li> <li>動力ユニット側配管の熱応力発生</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>バッファータンクの設置</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>気化器気相側温度・圧力の監視と緊急停止装置の設置</li> </ul>	2	5	7	<ul style="list-style-type: none"> <li>バッファータンクを設置する場合は、容量の検討とオーバーフロー・漏洩もハザードとして考えること (⇒1.1へ)</li> </ul>
	9	配管への熱応力	<ul style="list-style-type: none"> <li>操作ミス</li> <li>バルブ故障</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>配管損傷</li> <li>燃料漏洩 (⇒1.1へ)</li> </ul>			1	4	5	
	10	ブラックアウト	<ul style="list-style-type: none"> <li>発電機故障</li> <li>配電盤故障</li> <li>電気火災</li> <li>配線の損傷</li> <li>FGSSの故障</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ポンプ停止</li> <li>ヒーター停止</li> <li>エンジン停止</li> <li>配管液封 (⇒1.7へ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>適切な保守・施工</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>発電機の冗長化</li> <li>適切なfail positionの設定</li> </ul>	1	5	6	
	11	外部火災	<ul style="list-style-type: none"> <li>隣接ユニット火災 <ul style="list-style-type: none"> <li>蓄電池ユニット火災</li> <li>動力ユニット火災</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>タンク損傷</li> <li>タンク付き安全弁からの燃料放出</li> <li>燃料供給配管損傷</li> <li>燃料供給関連機器損傷</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>コファダム相当の隔離区画の設置</li> <li>防火構造の検討</li> <li>コンテナユニットレイアウトの最適化</li> </ul>	2	3	5	

Node	ID	Hazard	Cause	Consequences	Safeguards -Prevention	Safeguards - Mitigation	Severity index	Frequency index	Risk index	Note (commnets and remarks)	
		ハザード	原因	結果	安全対策(予防措置)	安全対策(緩和措置)	深刻度	発生頻度	リスク	備考	
A2	1	燃料過積載	<ul style="list-style-type: none"> <li>操作ミス</li> <li>液面計の故障</li> <li>ポンプ故障 (制御失敗)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>タンク損傷</li> <li>配管破裂 (バンカリングST⇒タンク間)</li> <li>燃料漏洩 (⇒1.1火災・爆発へ)</li> <li>ガスリターンラインへの液体燃料流入</li> <li>燃料モジュールガスラインへの液体燃料流入</li> <li>ガス配管損傷・燃料漏洩 (燃料モジュール内配管。⇒1.1火災・爆発へ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>液面計の冗長化</li> <li>適切な保守・施工</li> <li>高位液面警報装置の設置</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>圧力逃し弁</li> </ul>	3	4	7	<ul style="list-style-type: none"> <li>IGFコード15.4.2.1において、液面計測装置に加え、高位液面警報装置の設置が求められている。</li> </ul>	
	2	コンテナの落下	<ul style="list-style-type: none"> <li>操作ミス</li> <li>クレーンの故障</li> <li>停電</li> <li>荒天</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>コンテナユニットの損傷</li> <li>船体損傷</li> <li>他のユニットの損傷</li> <li>コンテナユニットの落水</li> <li>燃料タンクの損傷 (⇒1.1火災・爆発へ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>適切な保守・施工</li> <li>ウェザールーティング</li> </ul>			2	5	7	
	3	不適切なコンテナの設置	<ul style="list-style-type: none"> <li>操作ミス</li> <li>クレーンの故障</li> <li>停電</li> <li>船体動揺・移動</li> <li>荒天</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>コンテナユニットの損傷</li> <li>船体損傷</li> <li>他のユニットの損傷</li> <li>コンテナユニットの落水</li> <li>燃料タンクの損傷 (⇒1.1火災・爆発へ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>適切な保守・施工</li> <li>ウェザールーティング</li> </ul>			2	5	7	
	4	落下物 (機関部品、食料等)	<ul style="list-style-type: none"> <li>クレーンの故障</li> <li>クレーンの操作ミス</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>コンテナユニットの損傷</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>クレーンの操作範囲の制限</li> </ul>			2	5	7	

Node	ID	Hazard ハザード	Cause 原因	Consequences 結果	Safeguards -Prevention 安全対策(予防措置)	Safeguards - Mitigation 安全対策(緩和措置)	Severity index 深刻度	Frequency index 発生頻度	Risk index リスク	Note (commnets and remarks) 備考
A3	1	燃料漏洩	・バルブの故障 ・フランジギャップ ・配管亀裂 ・配管破裂 ・衝突・座礁・荷崩れ等による燃料配管損傷	・可燃性混合ガスの形成 ・火災・爆発 (⇒A3.2へ) ・窒息 (無人の場合は除く) ・凍傷 (無人の場合は除く)	・適切な保守・施工	・圧力逃し弁	2	4	6	
	2	火災・爆発	・燃料漏洩(A3.1より) ・燃料ガスを含む換気の排気ガス滞留 ・メタンスリップを多く含む排気ガス滞留 ・他のコンテナ型モジュールの放出ガスの換気流入	・船体損傷 ・機関損傷 ・発電機損傷 ・船員の死傷 ・コンテナ筐体損傷 ・隣接コンテナ設備への延焼 ・コンテナユニットの崩落	・着火源の排除 (防爆機器の使用) ・ガス検知器の設置 (ESDと連動) ・強制換気 (半閉鎖もしくは閉鎖区画の場合) ・適切な保守・施工	・コファダム相当の隔離区画の設置 ・防火構造 ・火災警報器の設置 ・消火装置の設置 (固定式泡消火、CO2消火 (無人の閉鎖区画の場合))	3	3	6	・換気は図面上「引き」ではなく「押し」である。二重管の外管も損傷するようなケースではモジュール内に可燃性ガスが拡散する可能性があるため、「引き」のほうがより安全と考えられる
	3	衝突	・操船ミス ・制御不能 (エンジン停止・ブラックアウト) ・荒天	・コンテナユニットの損傷 ・コンテナユニットの落水 ・燃料ガス配管の損傷 (⇒A3.1へ) ・機関損傷	・独立した冗長動力システムの搭載 ・蓄電池ユニットへの自動切換・継続運航 ・適切な保守・施工		2	4	6	・図面より、GVU、エンジン、発電機は2機備えられており、冗長化が担保されていると考えられる。要すれば、2機同時損傷を防ぐための対策(2機間を隔離する、独立設置する等)の検討を行う必要がある。
	4	座礁	・操船ミス ・制御不能 (エンジン停止・ブラックアウト) ・荒天	・コンテナユニットの落水 ・燃料ガス配管の損傷 (⇒A3.1へ) ・機関損傷	・蓄電池ユニットへの自動切換・継続運航 ・適切な保守・施工		2	3	5	・図面より、GVU、エンジン、発電機は2機備えられており、冗長化が担保されていると考えられる。要すれば、2機同時損傷を防ぐための対策(2機間を隔離する、独立設置する等)の検討を行う必要がある。
	5	荷崩れ	・荒天 ・操船ミス ・不適切な固縛	・コンテナユニットの落水 ・燃料タンクの損傷 (⇒1.1燃料漏洩へ) ・燃料ガス供給設備の損傷 (⇒A3.1 1燃料漏洩へ)	・固縛の増し締め	・ESDSの設置	2	1	3	
	6	GVU制御失敗	・電磁弁ボードの偶発的故障 ・電磁弁の故障 ・ブラックアウト	・燃料配管破裂 ・GVUボックス内へのガス漏えい (⇒A3.1へ)	・適切な保守・施工	・独立した動力冗長システムの搭載	1	4	5	
	7	気相配管破裂	・操作ミス ・バルブ故障 ・ガスバルブユニットの故障 ・ガスバルブユニット制御系の誤動作 ・低温燃料供給による熱応力	・燃料漏洩 (⇒A3.1へ)	・適切な保守・施工		1	4	5	
	8	ブラックアウト	・発電機故障 ・エンジン故障 ・配電盤故障 ・電気火災 ・配線の損傷	・GVU停止 (⇒A3.6へ) ・換気装置停止 ・制御不能 (⇒A3.3, A3.4へ)	・適切な保守・施工	・蓄電池システムからの電気の供給 ・独立した冗長システムの搭載	1	5	6	
	9	エンジン故障	・偶発的故障 ・クランクケース内爆発損傷	・ブラックアウト (⇒A3.8へ) ・制御不能 (⇒A3.3, A3.4へ)	・適切な保守・施工	・放散弁の設置	1	4	5	
	10	外部火災	・隣接ユニット火災 - 蓄電池ユニット火災 - 燃料ユニット火災	・燃料配管損傷 ・GVUボックス (機器、制御系統) 損傷 ・電気配線の損傷 (⇒A3.8へ) ・発電機延焼 (⇒A3.8へ)		・コファダム相当の隔離区画の設置 ・防火構造の検討 ・コンテナユニットレイアウトの最適化	2	3	5	

Node	ID	Hazard	Cause	Consequences	Safeguards -Prevention	Safeguards - Mitigation	Severity index	Frequency index	Risk index	Note (commnets and remarks)
		ハザード	原因	結果	安全対策(予防措置)	安全対策(緩和措置)	深刻度	発生頻度	リスク	備考
A4	1	コンテナの落下	<ul style="list-style-type: none"> <li>操作ミス</li> <li>クレーンの故障</li> <li>停電</li> <li>荒天</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>コンテナユニットの損傷</li> <li>船体損傷</li> <li>他のユニットの損傷</li> <li>コンテナユニットの落水</li> <li>燃料タンクの損傷 (⇒1.1火災・爆発へ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>適切な保守・施工</li> <li>ウェザールーティング</li> </ul>		2	5	7	
	2	不適切なコンテナの設置	<ul style="list-style-type: none"> <li>操作ミス</li> <li>クレーンの故障</li> <li>停電</li> <li>船体動揺・移動</li> <li>荒天</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>コンテナユニットの損傷</li> <li>船体損傷</li> <li>他のユニットの損傷</li> <li>コンテナユニットの落水</li> <li>燃料タンクの損傷 (⇒1.1火災・爆発へ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>適切な保守・施工</li> <li>ウェザールーティング</li> </ul>		2	5	7	
	3	爆発	<ul style="list-style-type: none"> <li>クランクケース開放時の残留ガスの着火・爆発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>作業員負傷</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>クランクケース内ガスの換気</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ガス検知器による未燃ガスの確認</li> </ul>	3	2	5	

Node	ID	Hazard ハザード	Cause 原因	Consequences 結果	Safeguards -Prevention 安全対策(予防措置)	Safeguards - Mitigation 安全対策(緩和措置)	Severity index 深刻度	Frequency index 発生頻度	Risk index リスク	Note (commnets and remarks) 備考
B1	1	熱暴走	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 内部短絡</li> <li>- 電池セルの破裂</li> <li>- 過充電</li> <li>- 過熱（外部からの火災、換気の喪失）</li> <li>- 急速放電（大電流による）</li> <li>- 外部火災</li> <li>- 冷却システムの不具合</li> <li>- 電池の長期過充電</li> <li>- 外部短絡</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ガス発生（可燃性・爆発性、窒息性・毒性）</li> <li>- 火災の可能性</li> <li>- 爆発の可能性</li> <li>- 隣接するセル（またはLiBモジュール）への延焼の可能性</li> <li>- バッテリー電源の喪失</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- PMS/EMSとBMS</li> <li>* 温度モニタリング</li> <li>* プロセス制御（電圧、電流）</li> <li>* 高/低電圧、高電流、高/低温度アラーム</li> <li>* SoCが推奨値を下回るとアラーム</li> <li>- 独立した緊急停止システム</li> <li>- ヒートシンク筐体</li> <li>- モジュールの空冷</li> <li>- 操作手順</li> <li>- 冷却システムの冗長化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 緊急シャットダウン</li> <li>- LiBモジュール筐体の熱設計（LiBモジュール間の断熱材）</li> <li>- 独立した室内換気</li> <li>- コンテナ型蓄電池モジュールへの固定式消火装置設置</li> </ul>	1	3	4	
	2	ガス発生	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 内部短絡</li> <li>- 電池セルの破裂</li> <li>- 過充電</li> <li>- 過熱（外部からの火災、換気の喪失）</li> <li>- 急速放電</li> <li>- 外部火災</li> <li>- 冷却システムの不具合</li> <li>- 電池の長期過充電</li> <li>- 外部短絡</li> <li>- 水の浸入</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 火災の可能性</li> <li>- 爆発の可能性</li> <li>- 毒性ガスによる影響</li> <li>- バッテリー電源の喪失</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- PMS/EMSとBMS</li> <li>* 温度モニタリング</li> <li>* プロセス制御（電圧、電流）</li> <li>* 高/低電圧、高電流、高/低温度アラーム</li> <li>* SoCが推奨値を下回るとアラーム</li> <li>- 独立した緊急停止システム</li> <li>- ヒートシンク筐体</li> <li>- モジュールの空冷</li> <li>- 操作手順</li> <li>- 冷却システムの冗長化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 緊急シャットダウン</li> <li>- 独立した室内換気</li> <li>- コンテナ型蓄電池モジュールへの固定式消火装置設置</li> <li>- 爆発性・毒性ガス低減するための換気</li> <li>- 室内へのガスセンサーの設置（LEL以下のガスを検知すると電気設備の通電停止およびシステムのシャットダウン）</li> <li>- 防爆型の室内換気</li> </ul>	2	3	5	
	3	容量不足	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 電池セルの欠陥</li> <li>- 電気接続不良</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 電圧低減</li> <li>- 影響を受けたセルを搭載したバッテリーラックのシャットダウン</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 冗長化されたバッテリーシステム</li> </ul>		2	3	5	
	4	単一LiBモジュールを超えて伝播する熱暴走			<ul style="list-style-type: none"> <li>- LiBモジュール内の火災がラック内の他のLiBモジュールに伝播しないように試験する</li> </ul>		4	1	5	

	5	ケーブルの過度な発熱、モジュール階層外の接点	- 製造不良	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ガス発生</li> <li>- 爆発の可能性</li> <li>- 火災の可能性</li> <li>- 有毒ガス</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 適切な設計</li> <li>- コミッショニングとサービス手順</li> <li>- メーカー指定のメンテナンス方法</li> <li>- 難燃性ケーブル絶縁材</li> <li>- ケーブルの絶縁体から有毒ガスが発生しないこと</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 緊急シャットダウン</li> <li>- 独立した室内の換気</li> <li>- コンテナ型蓄電池モジュールへの固定式消火装置設置</li> <li>- 爆発性・有毒性ガス低減するための換気</li> <li>- 室内へのガスセンサーの設置 (LEL以下のガスを検知すると電気設備の通電停止およびシステムのシャットダウン)</li> <li>- 防爆型の室内換気</li> </ul>	1	2	3	
--	---	------------------------	--------	--	---	--	---	---	---	--

Node	ID	Hazard ハザード	Cause 原因	Consequences 結果	Safeguards -Prevention 安全対策(予防措置)	Safeguards - Mitigation 安全対策(緩和措置)	Severity index 深刻度	Frequency index 発生頻度	Risk index リスク	Note (commnets and remarks) 備考
B1	1	機械的衝撃	- バッテリーラックの転倒 - 衝突 - 不適切な支持構造・取り付け機構 - 製造不良	- バッテリー電源の喪失 - ラック損傷 - コンテナ型蓄電池モジュールの損傷 - 人身事故 - 電池セルへの機械的損傷 * ガス発生の可能性 * 熱暴走の可能性 * 火災・爆発の可能性	- コミッショニングの手順とサービ - 衝突確率の低い場所への設置 (例: コリジョンバルクヘッド 後方)	- 電池室でのガス及び火災の発生 に関する全ての安全対策 (⇒ B1.2)	3	2	5	
	2	バッテリー火災	- 熱暴走 (⇒B1.1と同様。その後の原因も含む) - 噴出火災	- バッテリー電源の喪失 - コンテナ型蓄電池モジュールの損失 - 船舶の損失	- 熱暴走 (⇒B1.1) に関連する全ての予防措置	- 緊急シャットダウン - 独立した室内換気 - コンテナ型蓄電池モジュールへの固定式消火装置設置 - 爆発性・有毒性ガス低減するための換気 - 室内へのガスセンサーの設置 (LEL以下のガスを検知すると電気設備の通電停止およびシステムのシャットダウン) - 防爆型の室内換気 - 隣接するコンテナモジュールへのA60/A0級防熱	2	3	5	
	3	電池室での火災 (電池以外の原因)	- その他の電気機器 (照明、空調、その他の電気機器)	- コンテナ型蓄電池モジュールの温度上昇 - バッテリー火災への連鎖	- コンテナ型蓄電池モジュール内の室温モニタリング - 電池ケーシング用難燃性材料 - 火災危険性が高い設備の設置規制	- 隣接するコンテナモジュールへのA60/A0級防熱 - 緊急停止 - 煙・熱検知 - バッテリースペースの固定式消火装置	2	3	5	
	4	コンテナ型蓄電池モジュールに隣接するコンテナ型モジュールの火災	- 配電盤の火災 - DC/AC変換器の火災 - 動力モジュールの火災	- コンテナ型蓄電池モジュールの温度上昇 - バッテリー火災への連鎖	- BR 室温モニタリング - 火災リスクの高い他の部屋から独立したバッテリー換気を行う。 - A60/A0 隣接する空間への防火断熱材	- 緊急停止 - 煙・熱検知 - 消火システム設置	2	3	5	

5	電池室への水の浸入	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 外気からの水の結露</li> <li>- 構造的損傷（落下物、衝突など）</li> <li>- 水配管の破損</li> <li>- 水系固定消火設備の不具合</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ガス発生の可能性</li> <li>- 腐食</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- リフトアップの手順</li> <li>- 通気孔の全天候型完全性</li> <li>- オーバーデッキの構造強化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 独立した室内換気</li> </ul>	1	3	4	
6	室内排気の不具合	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 換気扇の故障</li> <li>- 排気の閉止（手動ダンパーが誤って閉じた場合）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ダクト内爆発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 想定される規模の爆発に耐える寸法のダクト</li> </ul>		1	3	4	
7	室内冷却装置の故障	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ポンプ故障</li> <li>- 閉塞感</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 電池の過熱</li> <li>- 電池の寿命の劣化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- コンテナ型バッテリーモジュール1基に対して独立した閉ループ冷却システムの設置</li> </ul>		1	4	5	
8	水没	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 固定式消火装置の不具合</li> <li>- ファンコイル用冷却水の故障</li> <li>- 衝突</li> <li>- その他機械的衝撃</li> <li>- 転覆</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ガス発生</li> <li>- 短絡</li> <li>- バッテリー電源の喪失</li> <li>- バッテリーシステム全交換</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- つり上げの手順</li> <li>- 通気口の耐候性</li> <li>- オーバーデッキの構造的強化</li> <li>- コンテナ型蓄電池モジュールの配置（喫水線より上）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 火災警報器</li> </ul>	3	1	4	

Node	ID	Hazard ハザード	Cause 原因	Consequences 結果	Safeguards -Prevention 安全対策(予防措置)	Safeguards - Mitigation 安全対策(緩和措置)	Severity index 深刻度	Frequency index 発生頻度	Risk index リスク	Note (commnets and remarks) 備考
B3	1	ブレーカの不用意なトリップ	-低電圧トリップ -過大な電流 -短絡	-バッテリー電源の喪失 -走行用エンジンの負荷増加	-バッテリー上がりの際、負荷の増加に対応できる 主機と補機		1	3	4	
	2	コンバータの故障	-ヒューマンエラー -ソフトウェアエラー -機械的衝撃 -部品故障 - DC/AC変換器とBMS/PMS間の通信障害	- 過充電 - 過放電 - 過電圧 - 過電流 - 温度上昇	- 操作手順 - DC/AC変換器故障時の保護システム - システム統合のテストと検証	- PMS/EMSまたはBMS * 温度モニタリング * プロセス制御 (電圧、電流) * 高/低電圧、高電流、高/低温度アラーム * SoCが推奨値を下回るとアラーム - 独立した緊急停止システム - LiBモジュール筐体の熱設計 (LiBモジュール間の断熱材)	1	3	4	
	3	PMSとBMSの不具合	-ヒューマンエラー -ソフトウェアエラー -部品故障 - DC/AC変換器とBMS/PMS間の通信障害	- 過充電 - 過放電 - 過電圧 - 過電流 - 温度上昇	- 操作手順 - システム統合のテストと検証	- 独立した緊急停止システム - DC/AC変換器故障時の保護システム - ヒートシンク筐体 - LiBモジュールの空冷	1	3	4	
	4	緊急遮断システムの不具合	-ヒューマンエラー -ソフトウェアエラー -部品故障 -通信障害	- 過充電 - 過放電 - 過電圧 - 過電流 - 温度上昇	- 操作手順 - システム統合のテストと検証	- PMS/EMSとBMS * 温度モニタリング * プロセス制御 (電圧、電流) * 高/低電圧、高電流、高/低温度アラーム * SoCが推奨値を下回るとアラーム	1	3	4	





この報告書は日本財団の助成金を受けて作成しました。

内航カーボンニュートラルに向けた新技術の安全評価手法の構築  
2022年度 成果報告書  
概要版

2023年（令和5年）3月発行

発行 一般財団法人 日本船舶技術研究協会

〒107-0052 東京都港区赤坂2丁目10番9号 ラウンドクロス赤坂

TEL 03-5575-6428 FAX 03-5114-8941

URL <http://www.jstra.jp/> E-mail [info@jstra.jp](mailto:info@jstra.jp)

本書の無断転載、複写、複製を禁じます。

