



第22回 海上技術安全研究所研究発表会



リスク評価技術の高度化 —自動運航船と新規貨物・燃料船のリスク評価—

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

柚井 智洋、伊藤 博子、木村 新太、塩苅 恵

三宅 里奈、工藤 潤一、石村恵以子、河島 園子

- 1.はじめに
- 2.リスク評価の概要
- 3.自動運航船のリスク解析
- 4.液化水素運搬船のリスク解析
- 5.今後の発展
- 6.まとめ

1.はじめに

2. リスク評価の概要

3. 自動運航船のリスク解析

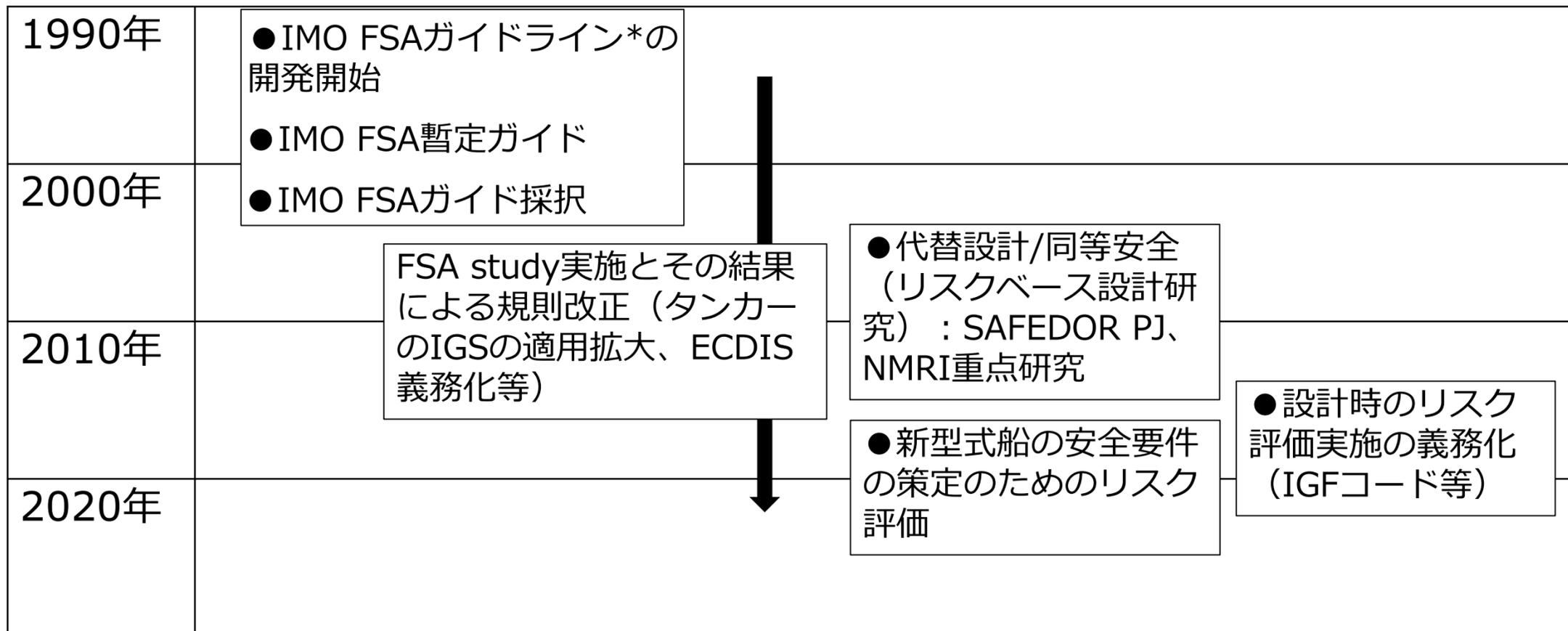
4. 液化水素運搬船のリスク解析

5. 今後の発展

6. まとめ

- (工学的な定義) 「リスク」 = 「事故の発生頻度」 × 「事故の結果の重大性 (被害度)」
- リスク評価：リスクを用いた安全性評価。

船舶分野のリスク評価の歴史



- **船舶分野のリスク評価は需要増大&目的も多様に**
- 海技研は、リスク評価技術の高度化及び自動運航船や新規貨物・代替燃料船への適用を進めている

*FSAガイドライン：「リスク評価」と「費用対効果評価」を実施し、安全性と経済性を両立する合理的な規則の開発を実施するためのIMOにおける規則策定ツール。

1.はじめに

2.リスク評価の概要

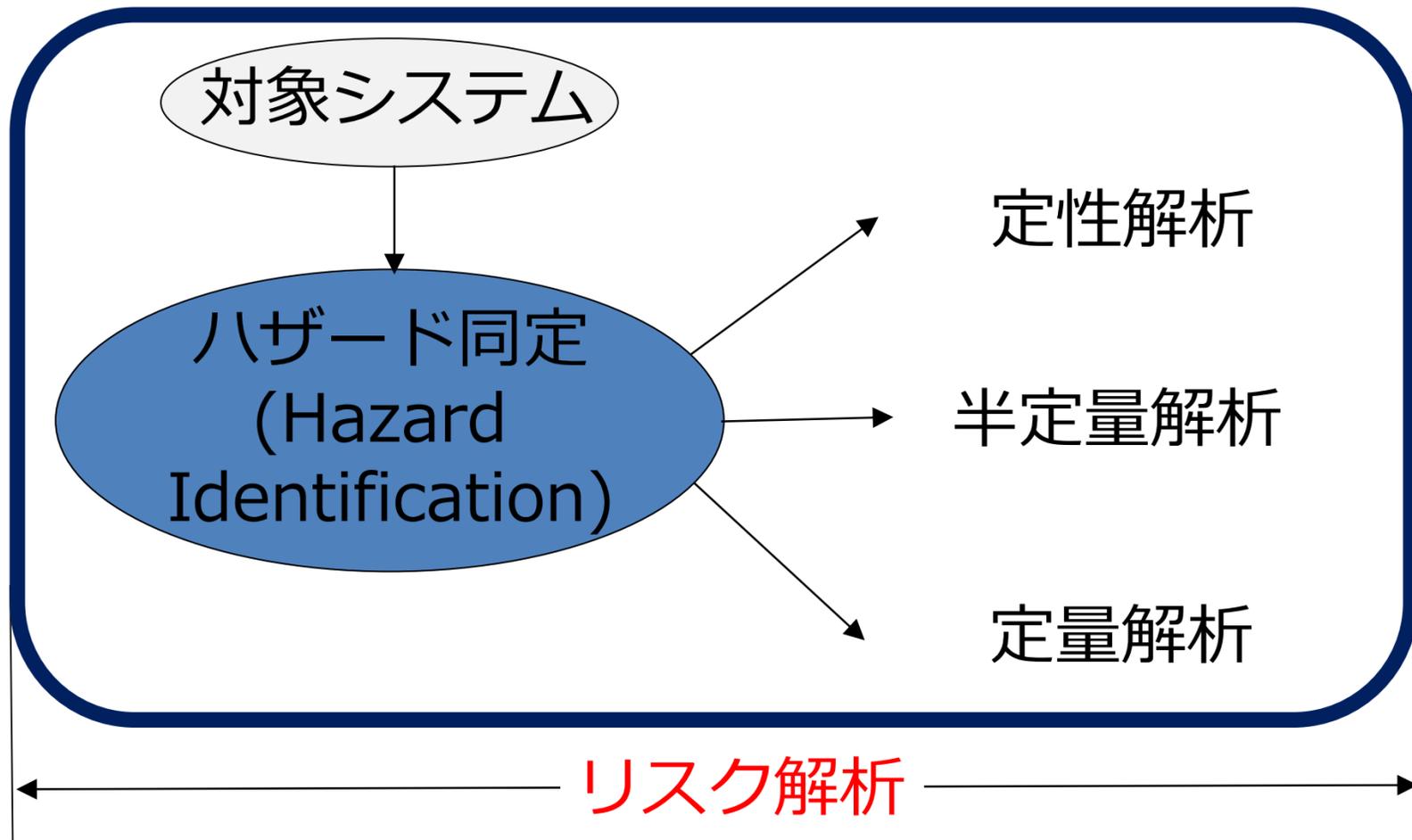
3.自動運航船のリスク解析

4.液化水素運搬船のリスク解析

5.今後の発展

6.まとめ

①ハザードの特定



②ハザードの評価

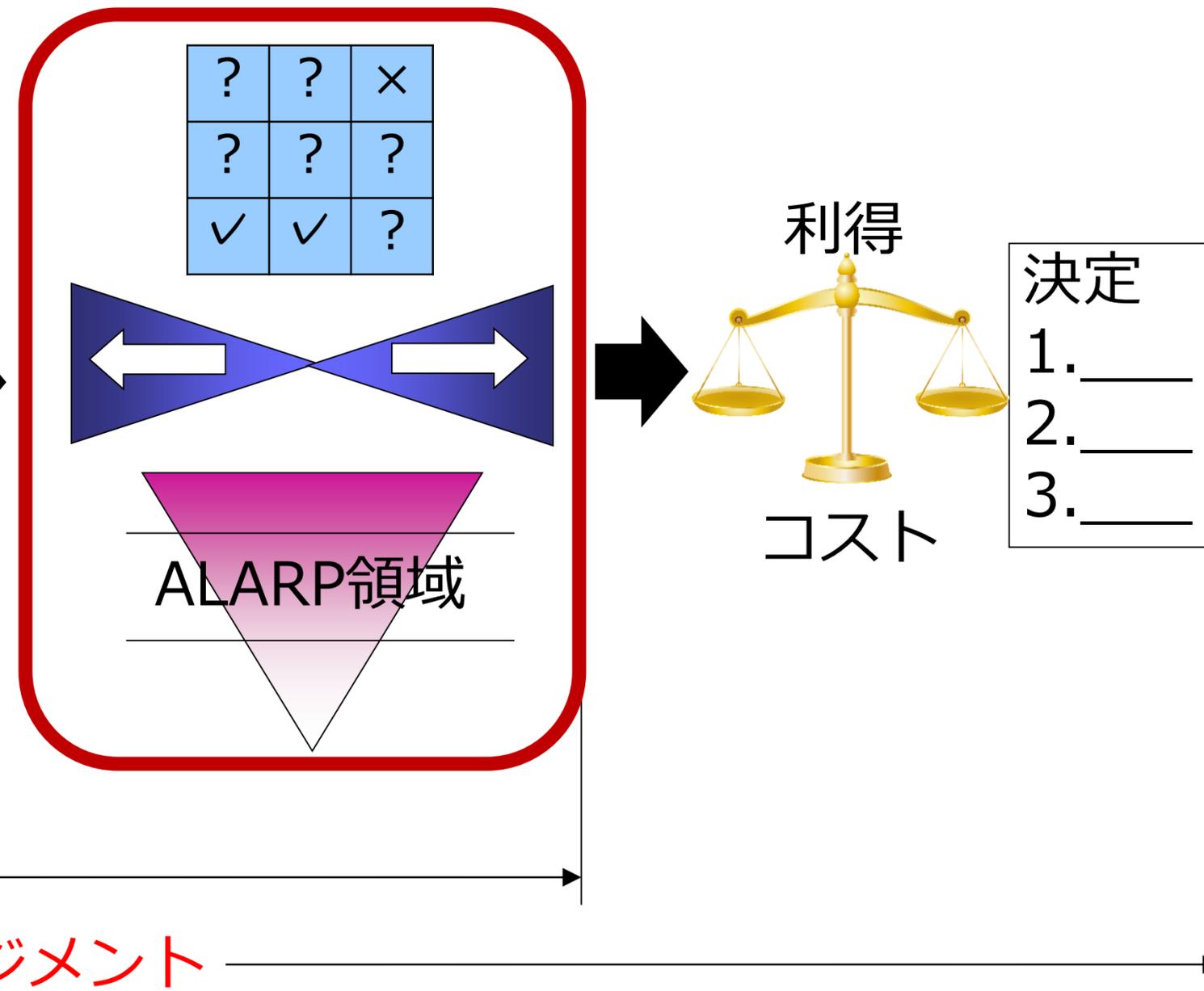


図 リスク評価のプロセス*

*UK HSE: Marine Risk Assessment. Offshore Technology Report 2001/063 (2001), Prepared by DNV for HSE.を修正

	概要と特徴	船舶分野における代表的な手法
定性解析	ハザードとその原因や結果等を特定 長所：比較的簡易に実施可能 短所：各ハザードの重要度の議論は不可能	SWIFT (Structured What IF Technique), FMEA (Failure Mode and Effects Analysis), HAZOP (Hazard and Operability Studies)等
半定量解析	ハザードの発生から結果に至る事故シナリオの発生頻度と被害度及びリスクを <u>対数スケール</u> 等で表現 長所：比較的簡易に定量化が可能 短所：定量化された値の不確実性が大きい	定性解析と同じ
定量解析	ハザードの発生から結果に至る事故シナリオの発生頻度と被害度及びリスクを <u>数値的に表現</u> 長所：定量的な議論が可能 短所：手間が掛かる	FT (Fault Tree), ET (Event Tree), BN (Bayesian Network)等 ※被害度の推定のためにシミュレーションが実施されることもある

本講演では下記の概要を報告

- ① 定性解析の高度化：自動運航船に関する研究
- ② 定量解析の高度化：液化水素運搬船に関する研究

1.はじめに

2.リスク評価の概要

3.自動運航船のリスク解析

4.液化水素運搬船のリスク解析

5.今後の発展

6.まとめ

■ リスク解析実施のためには、**対象の明確化が必要**

- 従来船舶対象のリスク解析：ハードウェアを中心としたシステム構成図を利用。
- 自動運航船は、大規模・複雑システム。その全体像（システムのアーキテクチャやタスク等）を表現する必要有。しかし、適当な手法が無い。

➤ UML (Unified Modeling Language)を応用したモデル化手法¹⁾を開発

➤ 開発手法によるモデル図を参照しながら、SWIFT (Structured What IF Technique) でハザードを同定する手法を提案。

■ 自動運航船のリスク解析：タスクの誤り、未実施、遅延等に着目した解析が有用

➤ タスクベースのハザード同定手法²⁾を開発

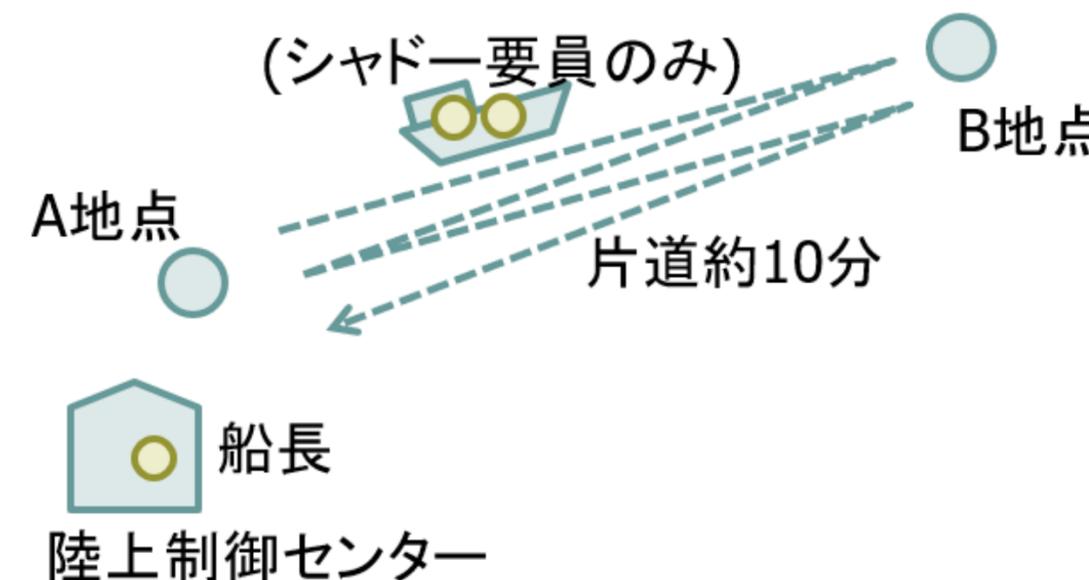
■ 上記開発手法を「仮想の自動運航船」に適用

1) 塩苅他：システムモデリングによるリスク解析手法の自動運航船の概念設計への適用，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第32号(2021)，pp.355-366.

2) 石村他. 仮想の自動運航船を対象としたタスクベースのハザード抽出について，JIME学術講演会第91回講演論文集，(2021).

■ 既往研究*等を参考に、自動運航船の一類型として定義

- 基本構想、運航フェーズ、ODD (Operational Design Domain, 運航設計領域) システム構成、システムアーキテクチャ、タスク・サブタスク (自動化の対象内外の明確化) 等を定義
- これを対象にリスク解析を実施することで、今後開発される同種の自動運航船の**リスク解析作業の効率化に貢献**



※法令上の課題（船員の配乗や資格要件等）は扱わない。

表1 基本構想

航路概要	乗客と船員が乗船する瀬戸内海の航海時間が10分程度のフェリー。日中の定期航路。
操船	船上の機器は基本的に陸上センターの指示通りに自動的に操作される。
安全性	人損・物損を生じさせない。乗客・船員・船舶・貨物の安全を確保する。

運航フェーズ

- 下記のフェーズで自動化システムが作動（フェーズ間の移行も自動的に切替わる）
 - 計画
 - 離着岸
 - 通常航行

*K. Wróbel, et al.: Towards the development of a system-theoretic model for safety assessment of autonomous merchant vessels, Reliability Engineering and System Safety, Vol.178 (2018), pp.209-224.

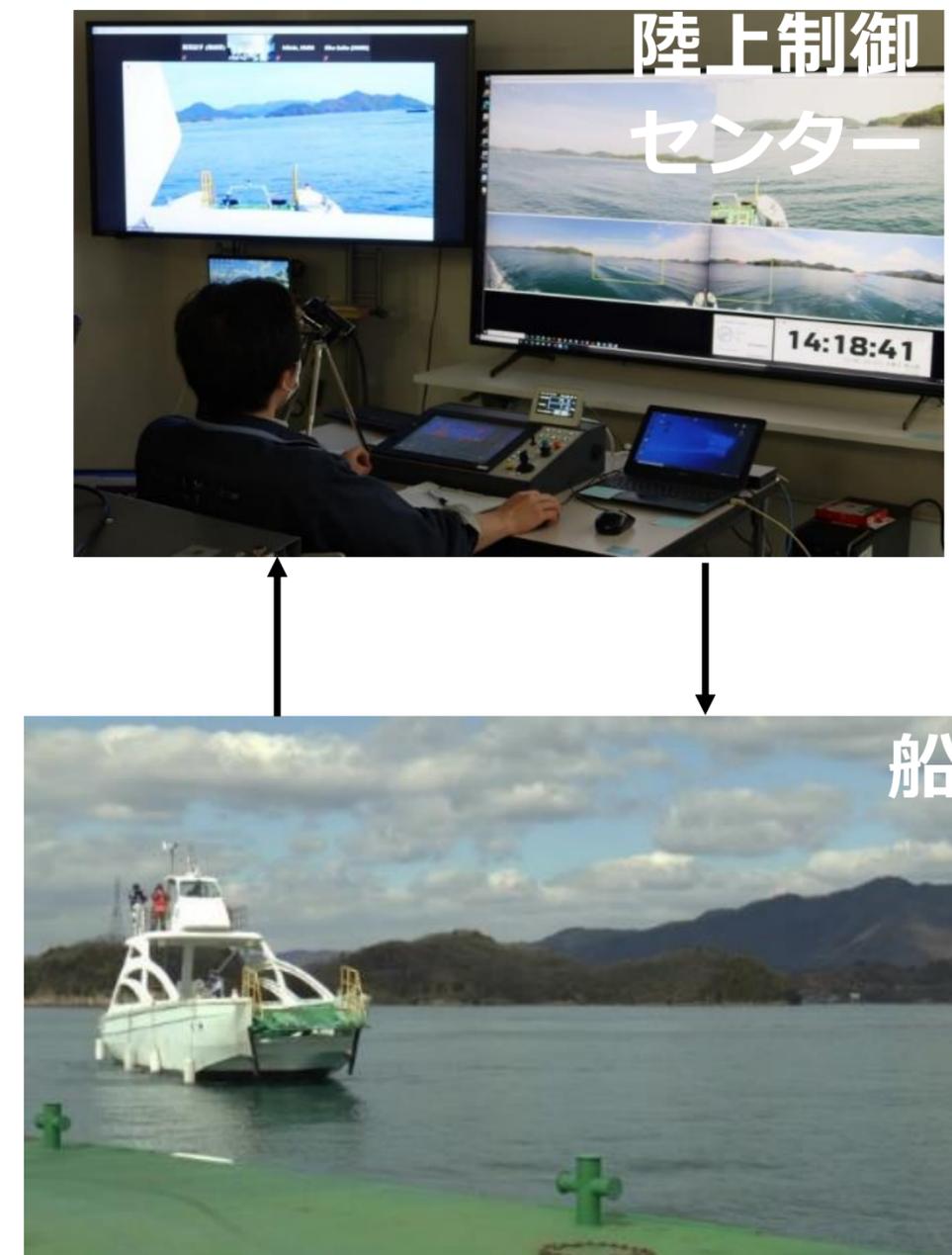
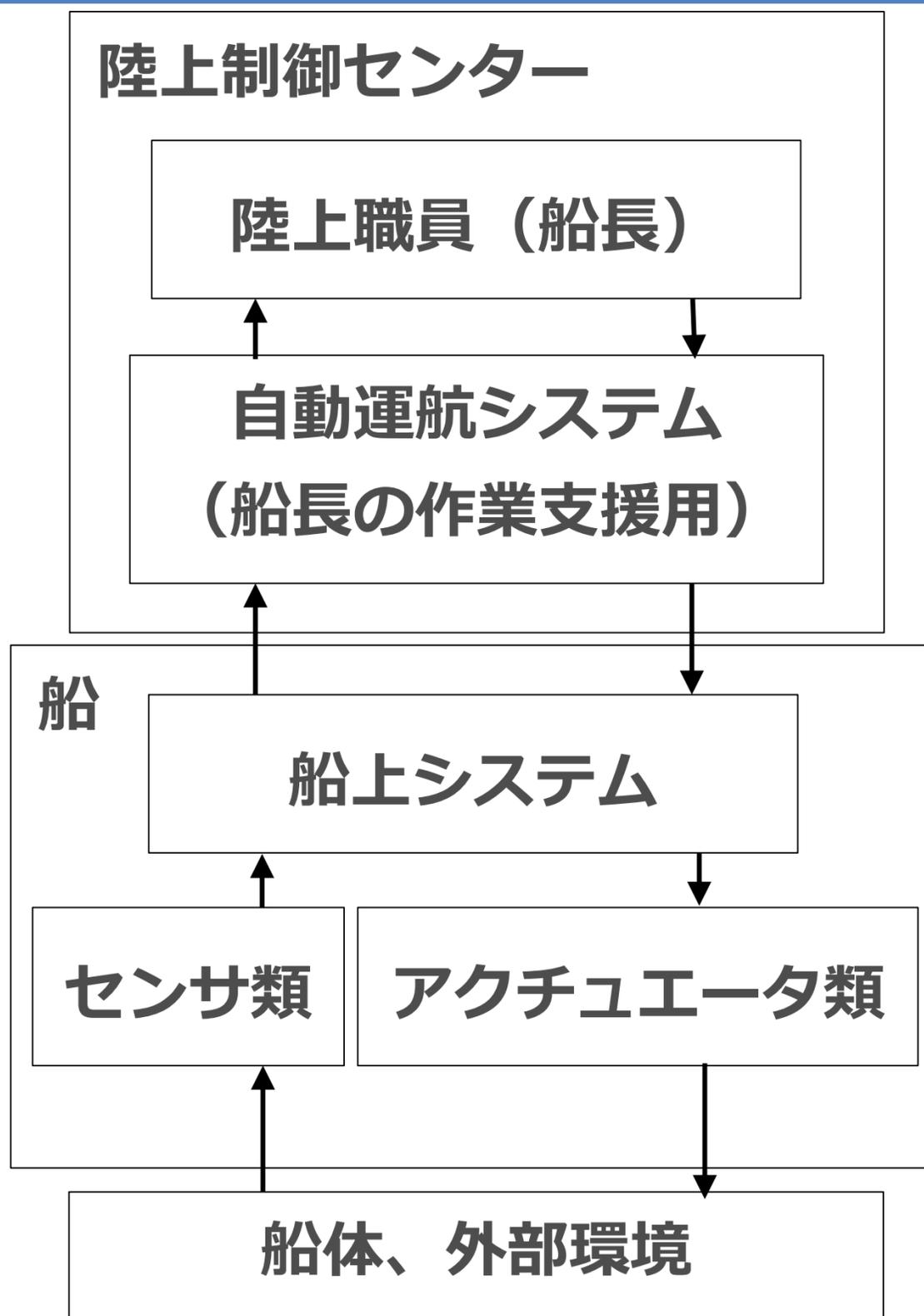


図 システム構成（簡略版）*

*石村他. 仮想の自動運航船を対象としたタスクベースのハザード抽出について, JIME 学術講演会第91回講演論文集, (2021).

■ 留意点

- ハードウェア:機器の不具合
- ソフトウェア:バグ、サイバーセキュリティ
- ソフトウェア・人間:
 - タスクの誤り/未実施/遅延
 - 状況認識に関するハザード
 - ✓モードエラー、思い込みエラー、コミュニケーションエラー等
 - ✓構成要素間での共有情報の解釈の相違
- ハード/ソフトと人間との相互作用、開発者の意図しない使用方法
- フェーズ（モード）間の移行に関するハザード
- ODD（Operational Design Domain：運航設計領域）からの逸脱（フォールバック領域への遷移）に関するハザード

■ 方法

- HAZID会議形式
- 各フェーズ、システム毎に各タスクのハザード、原因、結果、安全対策の検討を実施

仮想の自動運航船のリスク解析（結果）



- 200弱のハザードを抽出（重複含む）

- 結果の一例：

対象フェーズ：
通常航海中
対象システム：
自動運航システム
対象タスク：
（避航）操船計画立案

ハザード：
不適切な避航操船計画の立案

結果1：
・ 避航失敗、衝突

結果2：
・ 自船の制御性能を超えた操船指令による舵・機関等の損傷

原因1-a：
・ 自船情報、他船・漂流物情報、気象海象情報の誤り

原因1-b：
・ タイミングの異なる自船情報、他船・漂流物情報、気象海象情報による操船計画の立案

原因2：
・ システム内の不適切なパラメータ設定

対策1：
・ センサ類、船上システム及び船陸間通信機器の信頼性向上による情報誤りの発生防止

対策2：
・ 自船の制御性能の定期確認とシステム保有情報の定期更新

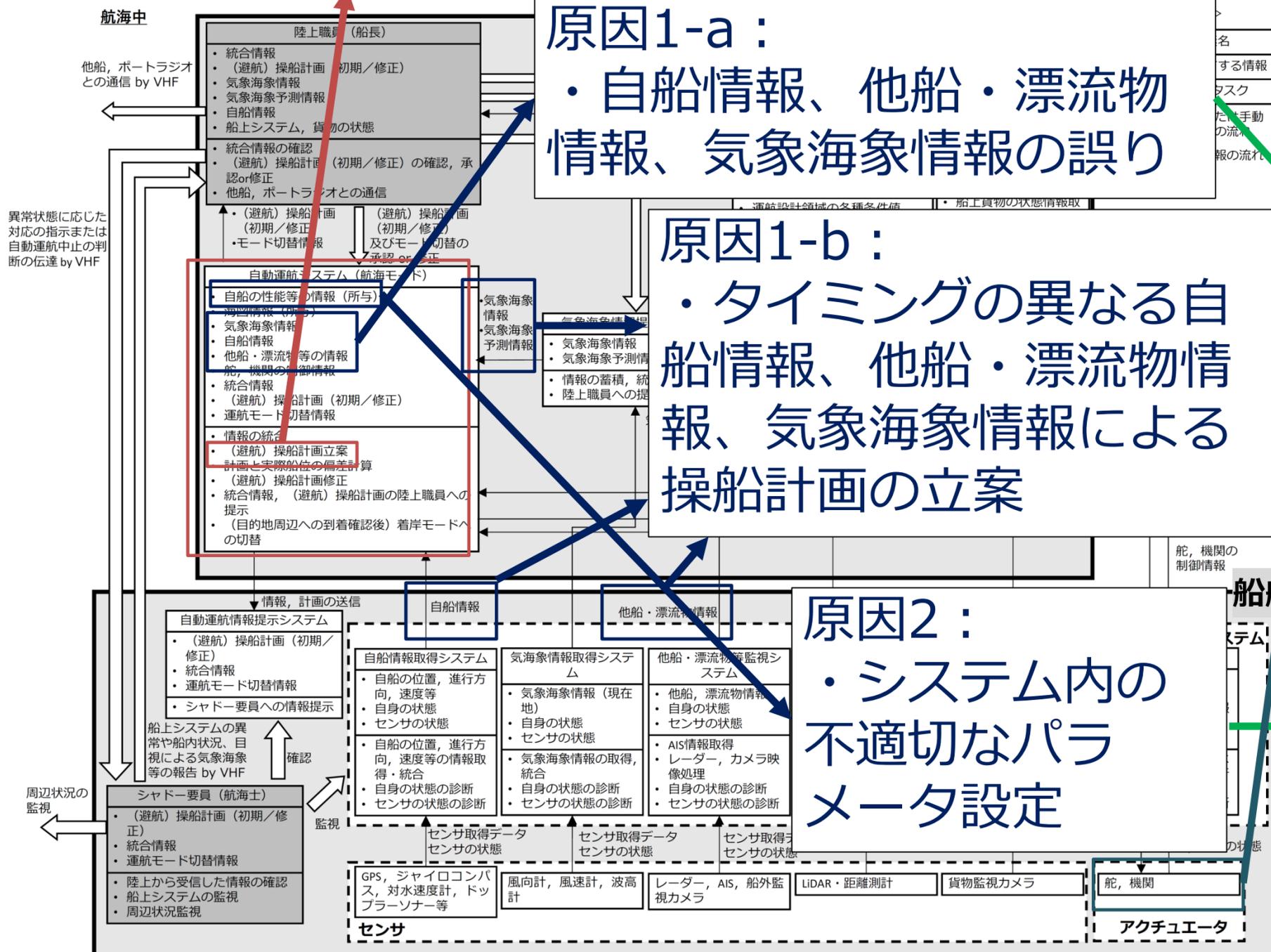


表 通常航海中に関するリスク解析結果の例（一部）

対象システム	対象タスク	ハザード	原因	結果	対策案
自動運航システム	（避航）操船計画立案	不適切な避航操船計画の立案	<ul style="list-style-type: none"> ・ 自船情報、他船/漂流物情報、気象海象情報の誤り ・ タイミングが異なる自船情報、他船/漂流物情報、気象海象情報を基にした計画立案 ・ システム内の不適切なパラメータ設定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 避航失敗、衝突 ・ 自船の制御性能を超えた操船指令による舵/機関等の損傷 	<ul style="list-style-type: none"> ・ センサ類、船上システム及び船陸間通信機器の信頼性向上による情報誤りの発生防止 ・ 自船の制御性能の定期確認とシステム保有情報の定期更新
自動運航システム	着岸モードへの切替	着岸モードへの切替の遅れ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 着岸モード切替地点の入力誤り ・ 自船位置の取得情報の誤り ・ 自船位置情報の取得の遅れ ・ 自船位置情報の改ざん 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 着岸の遅れ ・ 不適切な着岸操船 ・ 岸壁への衝突 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 着岸モード切替地点の入力のダブルチェック ・ センサ類の信頼性向上 ・ 通信システムの信頼性向上 ・ セキュリティ対策
他船・漂流物等監視システム	自身の状態の診断	自身の状態の診断の誤り	<ul style="list-style-type: none"> ・ 不適切な診断アルゴリズム 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 船上システムの状態把握の誤り ・ 衝突、座礁等 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 診断アルゴリズムの修正 ・ 他システムへの診断機能の追加 ・ 事前の動作テスト
シャドー要員	船上システム監視	船上システム監視の未実施	<ul style="list-style-type: none"> ・ 居眠り、急病 ・ ワークロード過多 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 船上システムの状態把握不可 ・ 衝突、座礁等 	<ul style="list-style-type: none"> ・ シャドー要員監視システム ・ 船上システムへの警報機能の追加 ・ ワークロード分散

■ UML(Unified Modeling Language)を応用したモデル化手法を開発

- リスク解析のためには対象の明確化が必要だが、大規模・複雑システムである自動運航船の全体像を表現する適切な手法が無かった
- 本手法により適切な粒度での自動運航船のモデル化が可能に

■ タスクベースのハザード同定手法を開発

- 自動運航船のリスク解析では、タスクの誤り、未実施、遅延等に着眼した解析が有用であることを考慮。
- 本手法により効率的&網羅的なハザード同定が可能に

■ 上記開発手法を「仮想の自動運航船」に適用

- 今後開発される同種の自動運航船のリスク解析作業の効率化に貢献

- 1.はじめに
- 2.リスク評価の概要
- 3.自動運航船のリスク解析
- 4.液化水素運搬船のリスク解析**
- 5.今後の発展
- 6.まとめ

- **水素漏洩**：水素を取り扱う多くの設備の重要ハザード
 - 陸上の水素ステーション：水素漏洩の定量的なリスク解析が既に実施済み¹⁾⁻³⁾。
 - 液化水素運搬船：定性的・半定量的リスク解析は実施済み⁴⁾。一方、**定量的リスク解析は未実施**。
 - ▶ 海技研では、液化水素運搬船の漏洩リスクの定量的リスク解析研究を実施中。
 - ① 解析対象シナリオの構築
 - ② 頻度解析
 - ③ 被害度解析



Ref.)
<https://business.nikkei.com/atcl/gen/19/00002/121000953/>



Ref.)
<https://aogdigital.com/news/468501-imo2020-the-rise-of-bulk-liquid-hydrogen-in-norway>

1) KM. Groth, et al.: Early-Stage Quantitative Risk Assessment to Support Development to Codes and Standard Requirements for Indoor Fueling of Hydrogen Vehicles, SAND2012-10150 (2012).

2) 産業技術総合研究所：水素ステーションとその周辺のリスク評価書(2019).

3) 木原他：有機ハイドライド型水素ステーションの漏洩頻度のベイズ推定, 安全工学, 56号 (2017), pp.245-254.

4) K. Nishifuji: Hazard Identification Study of Liquefied Hydrogen Carrier, Proc. of the 7th International Maritime Conference on Design for Safety (2018), pp.20-30.

- 文献*を参考に、解析対象シナリオ (Event Tree, ET) を構築

- 噴出火炎 (Jet fire) と爆発 (Explosion) のリスク推定が目的

$$R_{Ji}(x) = f_i(x) \cdot (1 - p_1) \cdot p_2 \cdot S_{Ji}(x)$$

$$R_{Ei}(x) = f_i(x) \cdot (1 - p_1) \cdot (1 - p_2) \cdot p_3 \cdot S_{Ei}(x)$$

$R_{Ji}(x)$ 及び $R_{Ei}(x)$ ：機器iの漏洩孔径がxの時のJet fireとExplosionのリスク

$f_i(x)$ ：機器iの漏洩孔径がxである場合の頻度

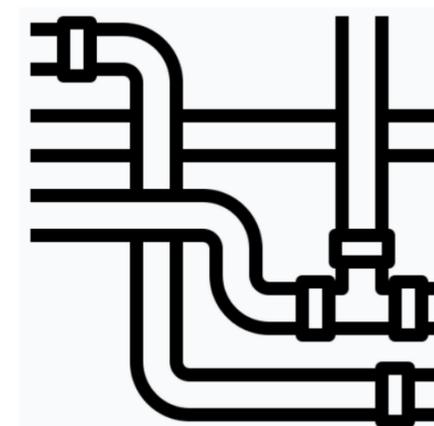
p_1 , p_2 及び p_3 ：ETの各分岐確率

$S_{Ji}(x)$ 及び $S_{Ei}(x)$ ：機器iの漏洩孔径がxの時の被害度

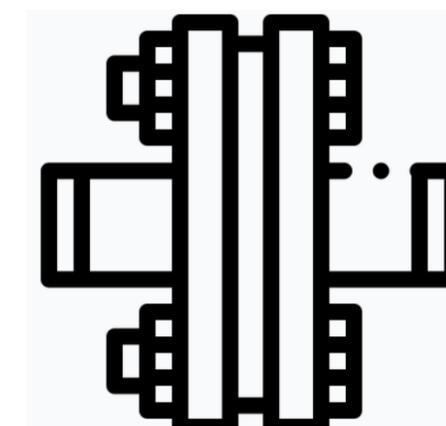
※本研究の対象機器は、パイプ、フランジ、バルブ

水素漏洩	着火前の漏洩 検知と隔離	瞬時着火	遅れ着火	結果
Yes	Yes			No ignition
$f_i(x)$	p_1			
	No	Yes		Jet fire
	$1-p_1$	p_2		
		No	Yes	Explosion
		$1-p_2$	p_3	
			No	No ignition
			$1-p_3$	

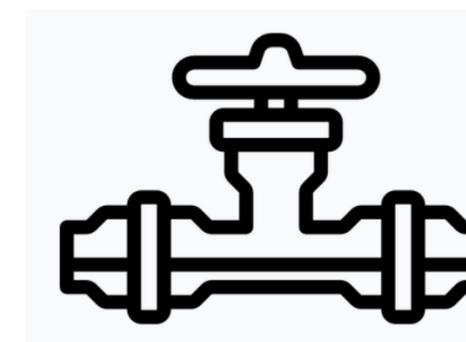
図1 解析対象シナリオ



(a) パイプ



(b) フランジ



(c) バルブ

図2 解析対象機器のイメージ図

$$R_{Ji}(x) = f_i(x) \cdot (1 - p_1) \cdot p_2 \cdot S_{Ji}(x)$$

$$R_{Ei}(x) = f_i(x) \cdot (1 - p_1) \cdot (1 - p_2) \cdot p_3 \cdot S_{Ei}(x)$$

- ETの $f_i(x)$ 、 p_1 、 p_2 、 p_3 を推定

$f_i(x) =$ 「漏洩の発生頻度(漏洩頻度)」 × 「漏洩孔径の発生確率」

※漏洩頻度 = n/E (1/equipment*year)

n : 漏洩件数、 E : Exposure (equipment*year)

- p_1 、 p_2 、 p_3 は既往研究¹⁾、²⁾の値を参考に設定

	確率
漏洩検知及び隔離の確率 p_1	0.90
瞬時着火の確率 p_2	0.10
遅れ着火の確率 p_3	0.05

1) KM. Groth, et al.: Early-Stage Quantitative Risk Assessment to Support Development to Codes and Standard Requirements for Indoor Fueling of Hydrogen Vehicles, SAND2012-10150 (2012).

2) Canadian Hydrogen Safety Program: Quantitative Risk Comparison of Hydrogen and CNG Refueling Options. Presentation at IEA Task 19 Meeting (2006).

■ 課題：液化水素運搬船における漏洩に関するデータベースは存在しない

■ 解決策：

データが少なくても推測可能な**ベイズ推定**が有用

$$p(\theta|y) = \frac{p(y|\theta)p(\theta)}{p(y)}$$

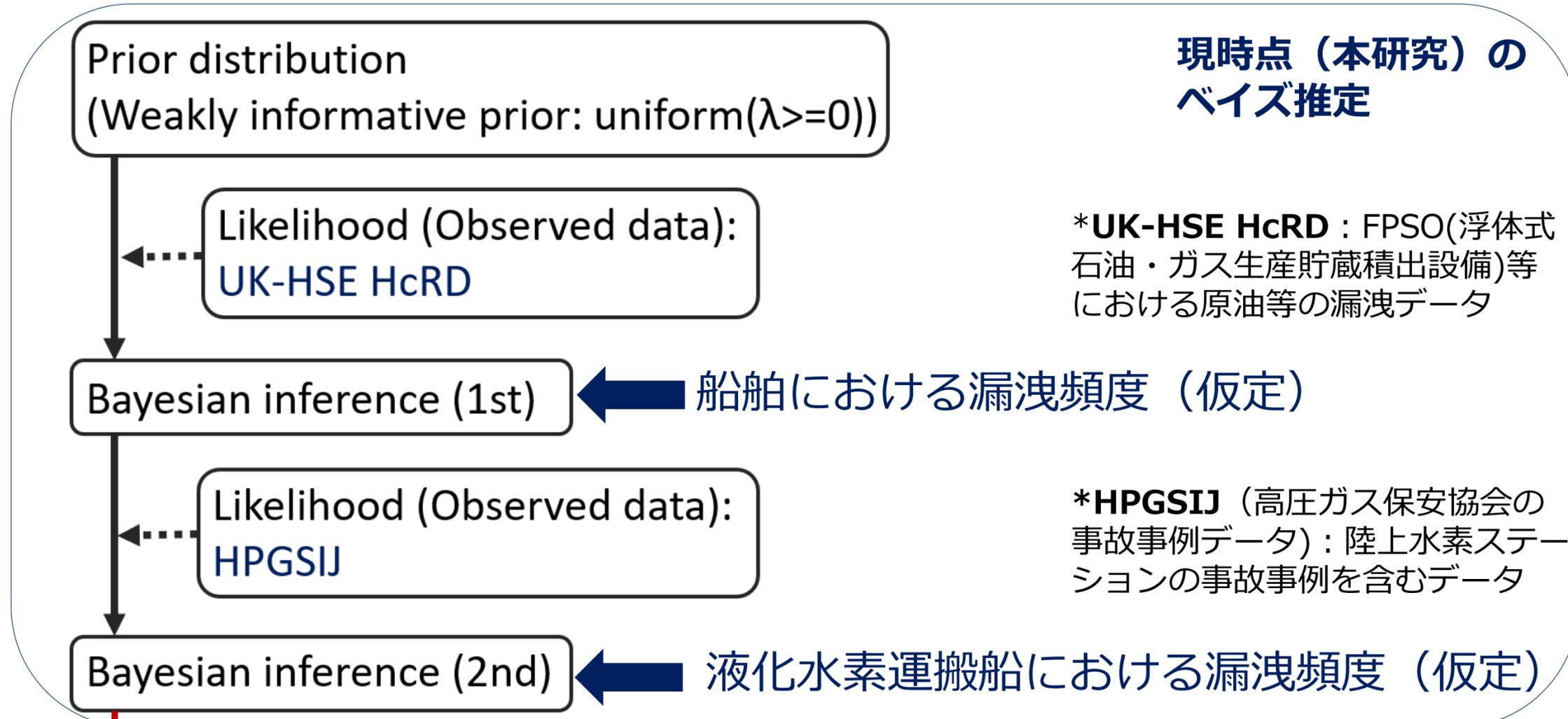
θ ：母数

y ：データ

$p(\theta)$ ：事前分布

$p(\theta|y)$ ：事後分布

$p(y|\theta)$ ：尤度

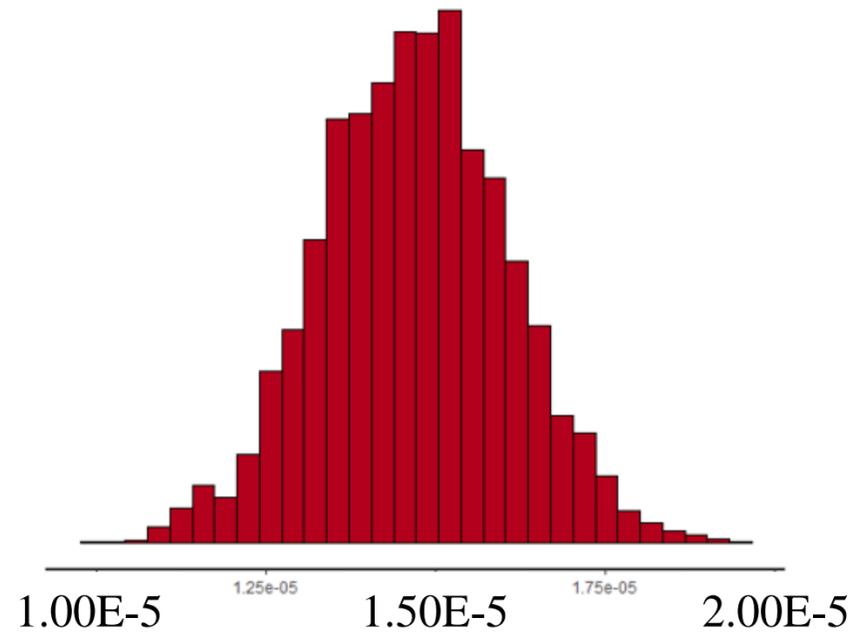


←---**尤度：運航データ**

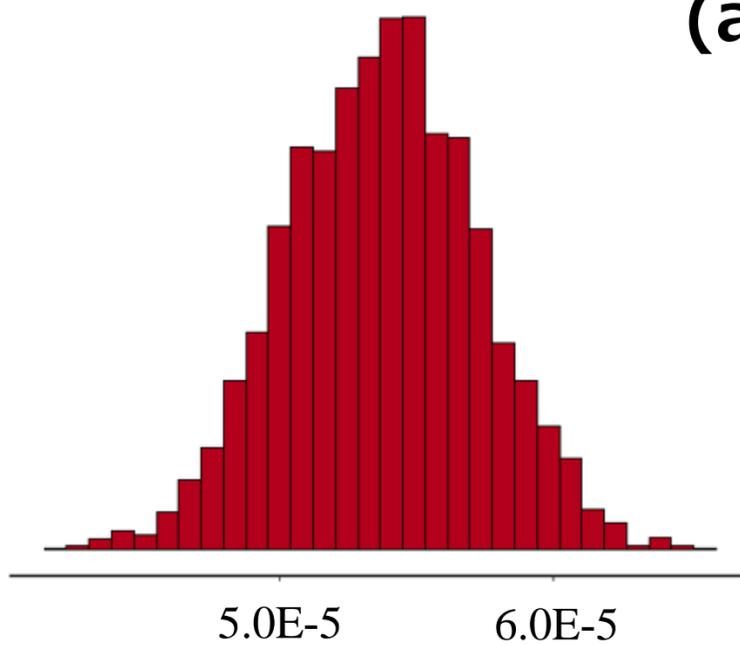
Bayesian inference (n回目)

ベイズ推定の利点：
商用運航が開始後、漏洩頻度を更新可能！ （漏洩が起きていないという情報も使える）

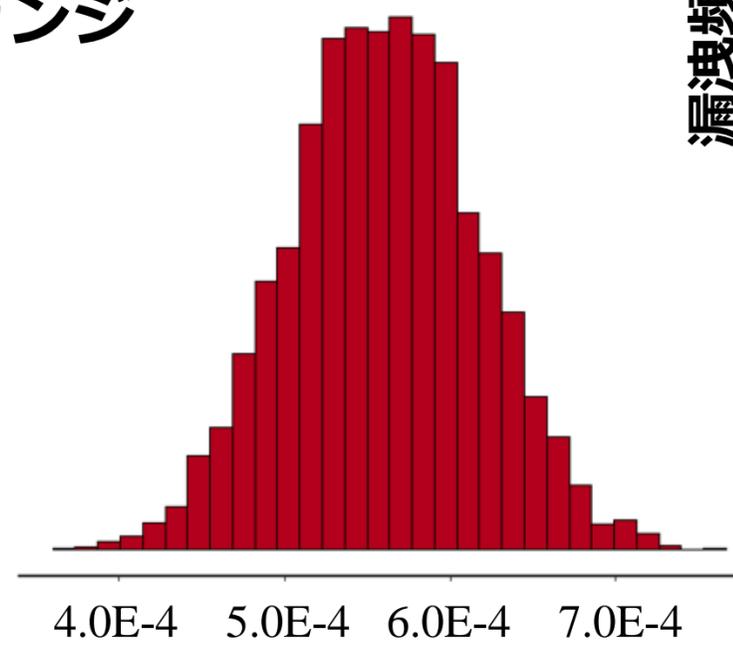
将来のベイズ推定



(a) フランジ



(b) パイプ



(c) バルブ

漏洩頻度

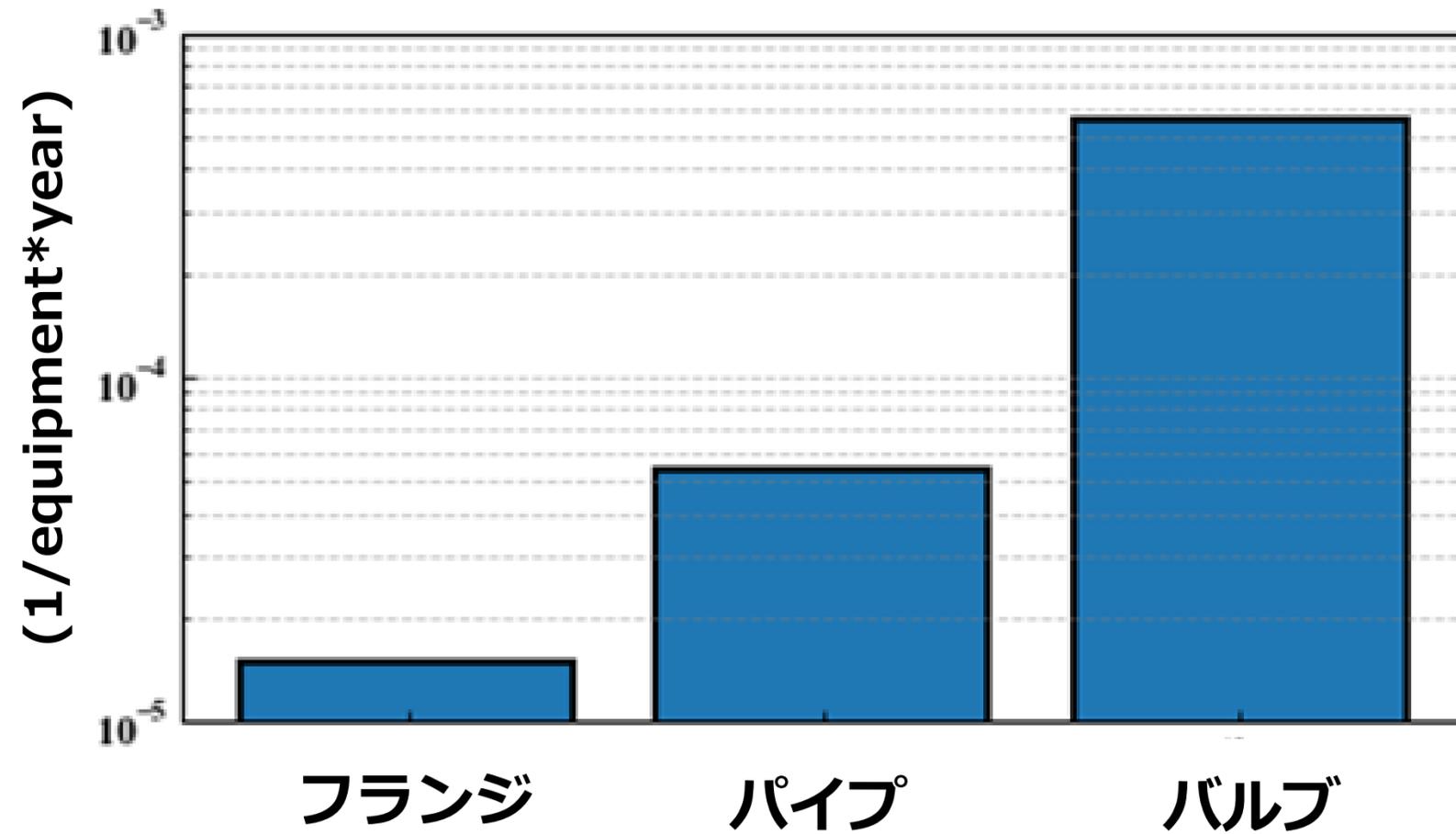


図2 各機器の漏洩頻度の平均値

図1ベイズ推定として得られた漏洩頻度の確率分布

- 漏洩孔径の発生確率はべき乗分布に従うが、幾つか課題有
- その課題を解決した「**拡張べき乗分布関数 (EPLDF)**」を海技研は開発（前重点）¹⁾

$$CCDF_i(x) = \frac{x^{m_i} - D_{i,max}^{m_i}}{\left(a_i^{k_i} + (x^{m_i} - D_{i,max}^{m_i})^{k_i}\right)^{\frac{1}{k_i}}}$$

- 本研究：FLNGにおける漏洩孔径のEPLDF²⁾を利用（右図）

➤ 本来はベイズ推定する必要有（今後の課題）

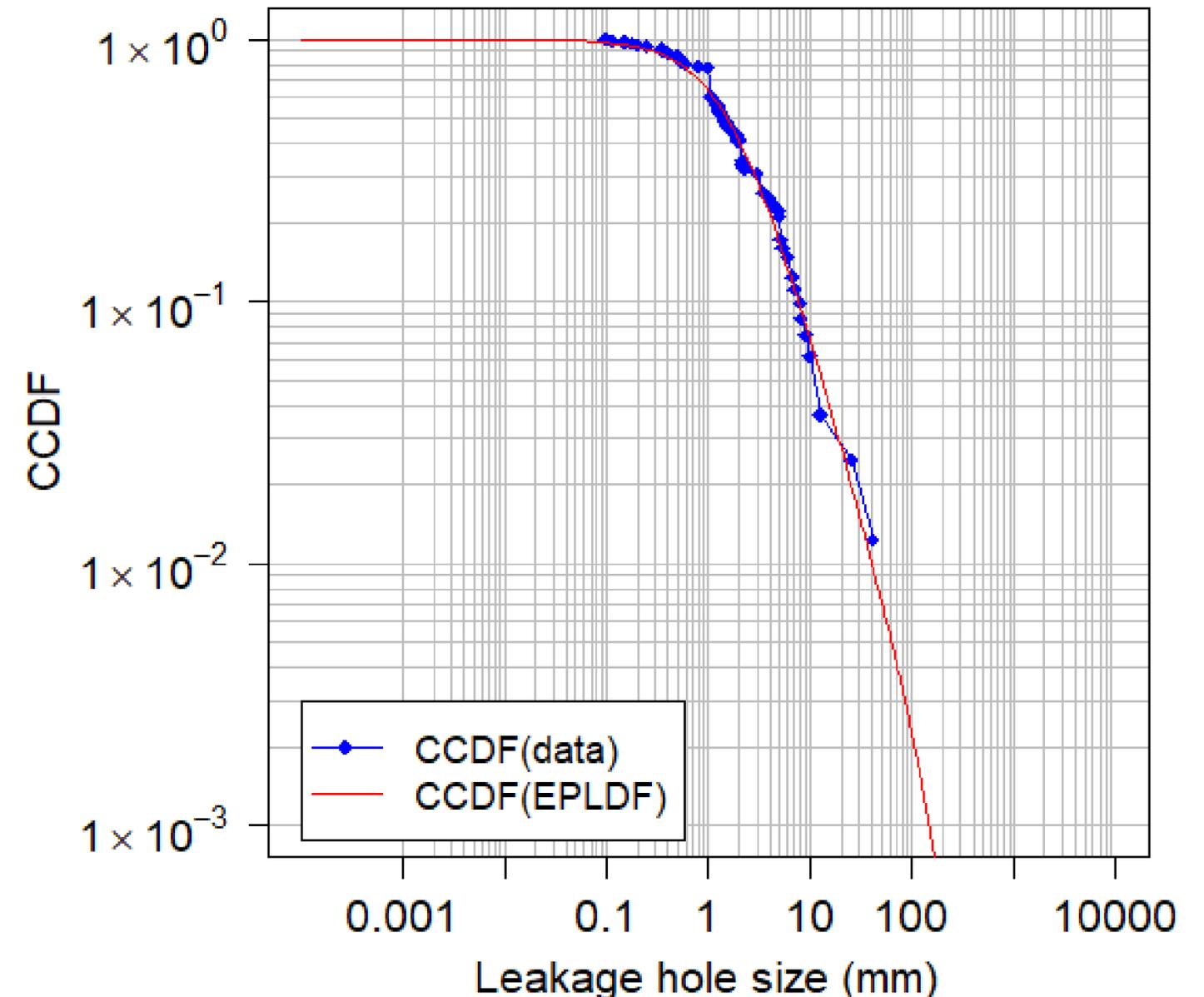


図1 漏洩孔径の発生確率の例（フランジ）

※CCDF: Complementary Cumulative Distribution Function
 CCDF = 1 - CDF(Cumulative Distribution Function)

1) F. Kaneko & T. Yuzui: A New Function for Frequency Analysis in the Risk Assessment of Offshore Oil-Related Platforms, Journal of Ship Research, <https://doi.org/10.5957/JOSR.04210009> (2022).

2) 例えば、金湖他：FLNGにおける極低温流体漏洩頻度解析、海上技術安全研究所報告、第13巻、第4号、pp.1-12、(2014).

$$R_{Ji}(x) = f_i(x) \cdot (1 - p_1) \cdot p_2 \cdot S_{Ji}(x)$$
$$R_{Ei}(x) = f_i(x) \cdot (1 - p_1) \cdot (1 - p_2) \cdot p_3 \cdot S_{Ei}(x)$$

- Hydrogen Plus Other Alternative Fuels Risk Assessment Models (**HyRAM+**)を利用

- 目的：水素漏洩によって生じる潜在的な被害度の解析
- 仮定：障害物や大気風が無い空間における鉛直上向きの液化水素漏洩

個船の設計は非考慮

- 本解析の被害度の指標：**Effective distance（影響到達距離）**

- 噴出火炎（Jet fire）：60秒以内にII度の火傷を引き起こす放射熱（Thermal radiation）強度（5kW/m²）¹⁾を基に計算
- 爆発（Explosion）：乗組員に重大な損害を与える爆風圧（Overpressure）の基準（24.1kPa²⁾）を基に計算

1) RK. Zipf & KL. Cashdollar: Explosion and refuge chambers, effects of blast pressure on structures and the human body. NIOSH Docket Number 125 (2007), Columbus, OH: National Institute for Occupational Safety and Health.

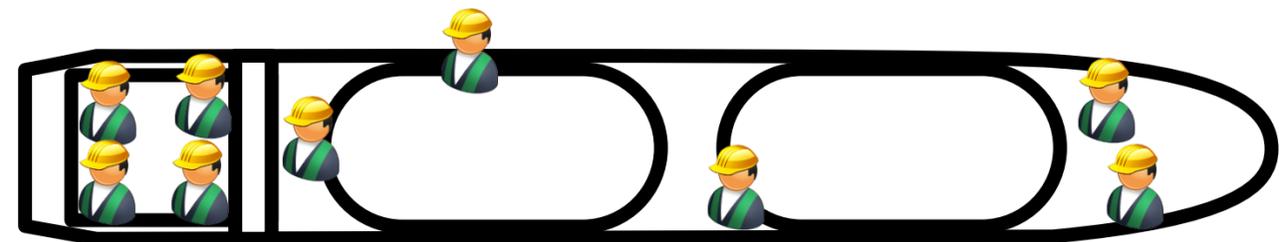
2) Federal Emergency Management Agency, U.S. Department of Transportation, and U.S. Environmental Protection Agency: Handbook of Chemical Hazard Analysis Procedures (1989).

本解析の被害度の指標

影響到達距離[m]



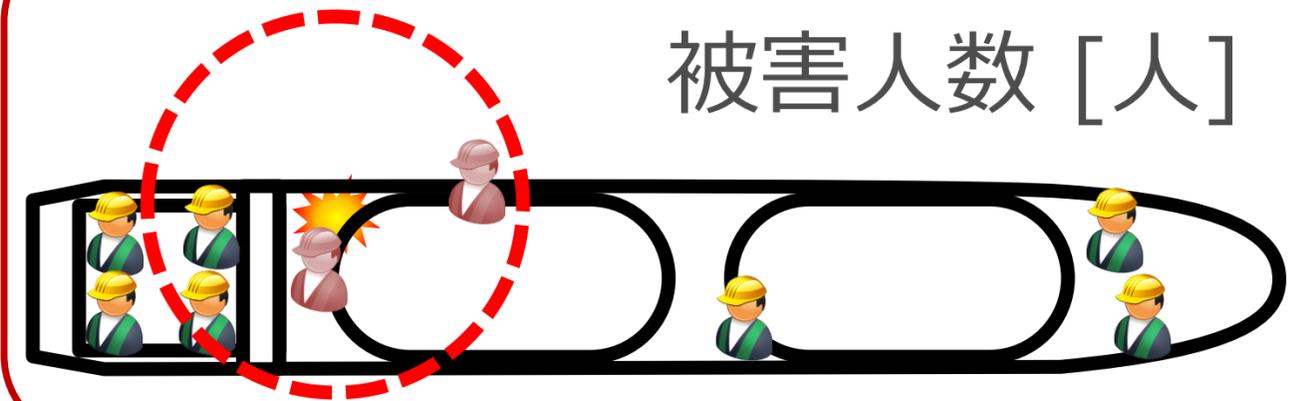
被害が及ぶ範囲 [m²]

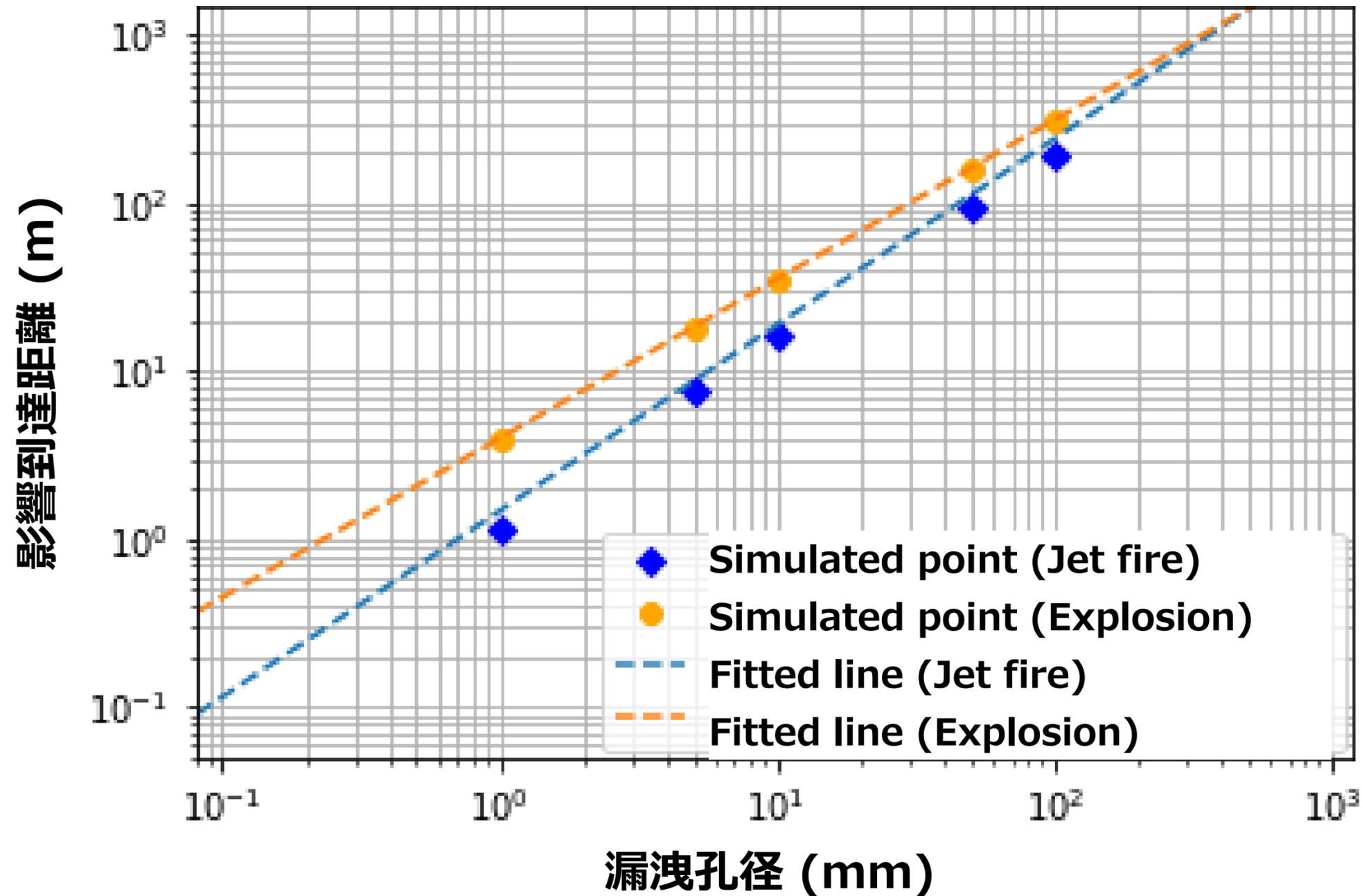


人口密度 [人/m²]

将来の被害度の指標 （今後の課題）

被害人数 [人]





■ 影響到達距離は、漏洩孔径のべき乗で表される

$$S_{Ji}(x) = 1.471x^{1.106}$$

$$S_{Ei}(x) = 3.982x^{0.946}$$

$S_{Ji}(x)$ 及び $S_{Ei}(x)$ ：
機器iの漏洩孔径がxの時の被害度

※ $S_{Ji}(x)$ 及び $S_{Ei}(x)$ は、全ての機器で同じと仮定

図1 漏洩孔径とEffective distanceの関係

- 頻度解析及び被害度解析の結果を下式（再掲）に代入&漏洩孔径に関して積分し、各機器の噴出火炎（Jet fire）と爆発（Explosion）のリスクを推定

$$R_{Ji}(x) = f_i(x) \cdot (1 - p_1) \cdot p_2 \cdot S_{Ji}(x)$$

$$R_{Ei}(x) = f_i(x) \cdot (1 - p_1) \cdot (1 - p_2) \cdot p_3 \cdot S_{Ei}(x)$$

■ 結果

水素漏洩	着火前の漏洩検知と隔離	瞬時着火	遅れ着火	結果
Yes	Yes			No ignition
$f_i(x)$	p_1			No ignition
	No	Yes		Jet fire
	$1-p_1$	p_2		Explosion
		No	Yes	Explosion
		$1-p_2$	p_3	No ignition
			No	$1-p_3$

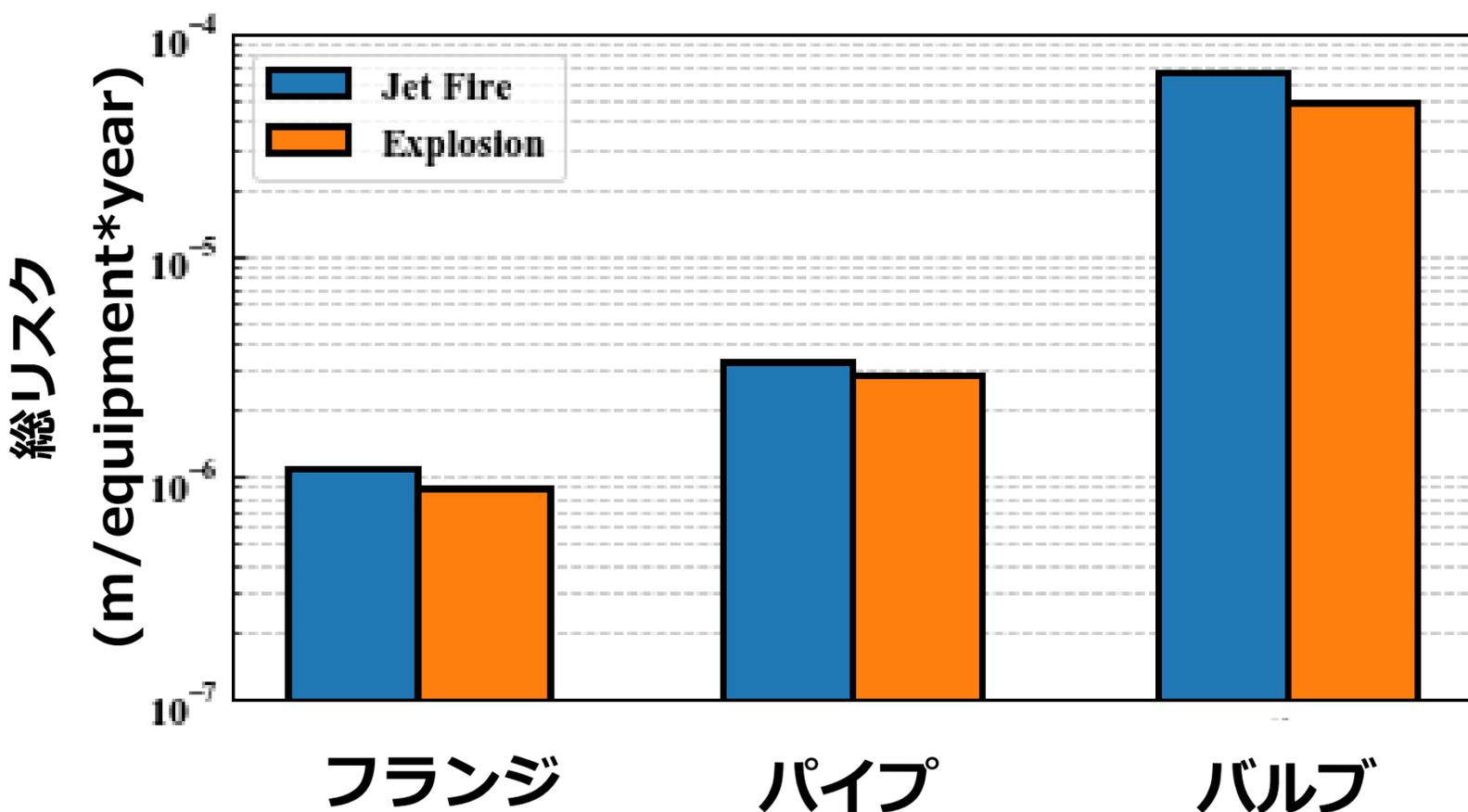


図1 機器別のリスクの推定結果

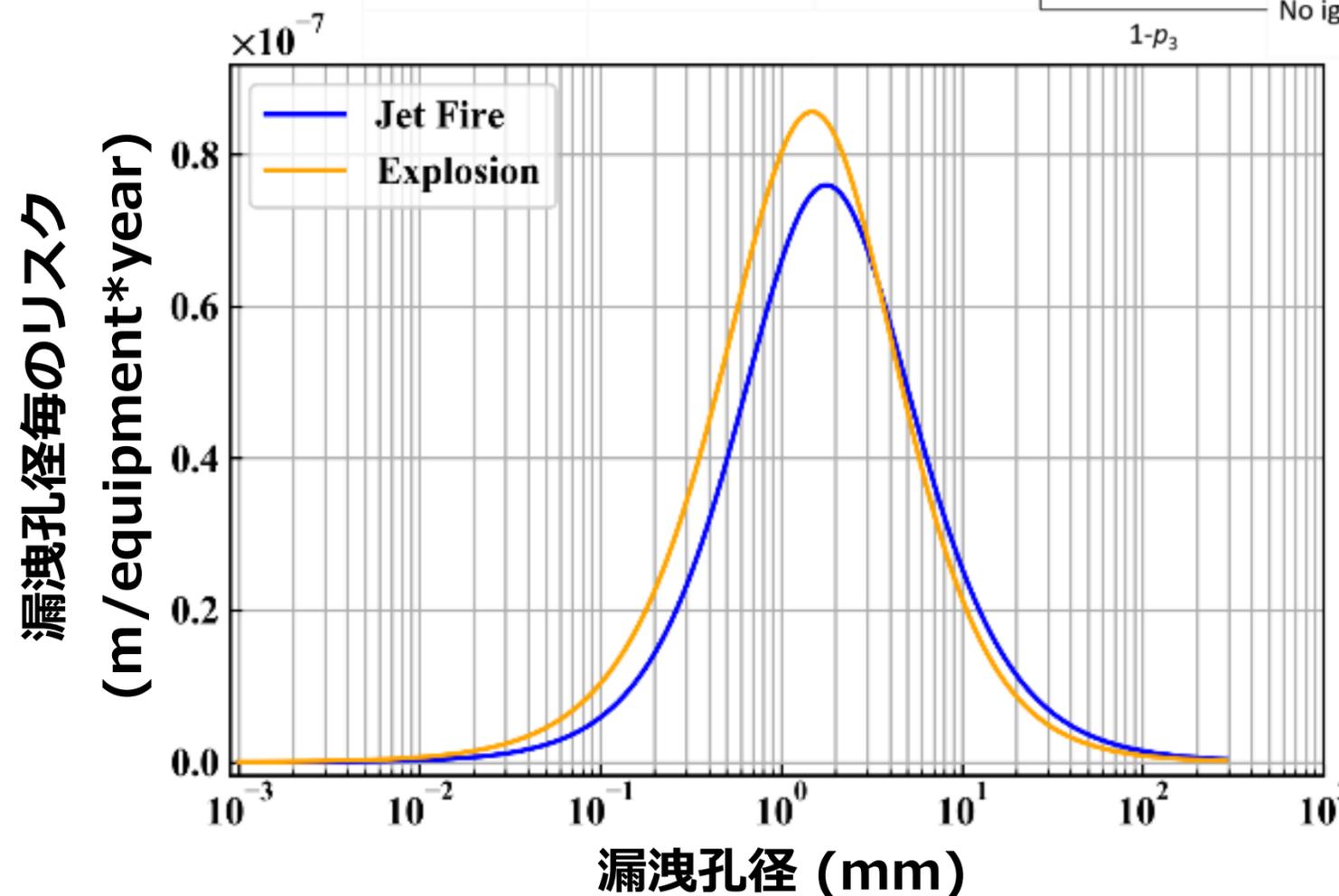


図2 漏洩孔径を変数とするリスクの分布（フランジ）

- 液化水素運搬船の漏洩リスクの定量解析に関する研究の概要を報告
 - 解析対象シナリオ：ETで示しリスクの計算式を示した
 - 頻度解析：漏洩頻度と漏洩孔径の発生確率の計算方法と結果を示した
 - 被害度解析：Jet fireとExplosionについて、被害度の指標を影響到達距離とした計算結果を示した
 - リスク解析：上記の結果を利用し機器別のJet fireとExplosionのリスク推定結果を示した
- 本研究では、多くの仮定を置いてリスクを推定しているため、推定結果の信頼性向上のため、研究を継続していく

- 1.はじめに
- 2.リスク評価の概要
- 3.自動運航船のリスク解析
- 4.液化水素運搬船のリスク解析
- 5.今後の発展**
- 6.まとめ

- 開発手法を実船に適用し、手法の改良を進める
 - 小型実験船「神峰」への適用を実施中
- タスクベースのリスク解析：タスクを静的に考慮
 - ⇒ 実際には、多数のタスクが同時並行で動的に実施される
 - 動的なタスクベースの手法の研究を実施中
- 自動運航船の定性的なリスク解析：世界的に多くの研究が実施中
 - ⇒ 定量的なリスク解析研究は世界的にも少ない
 - 今後は定量的リスク解析研究も進める

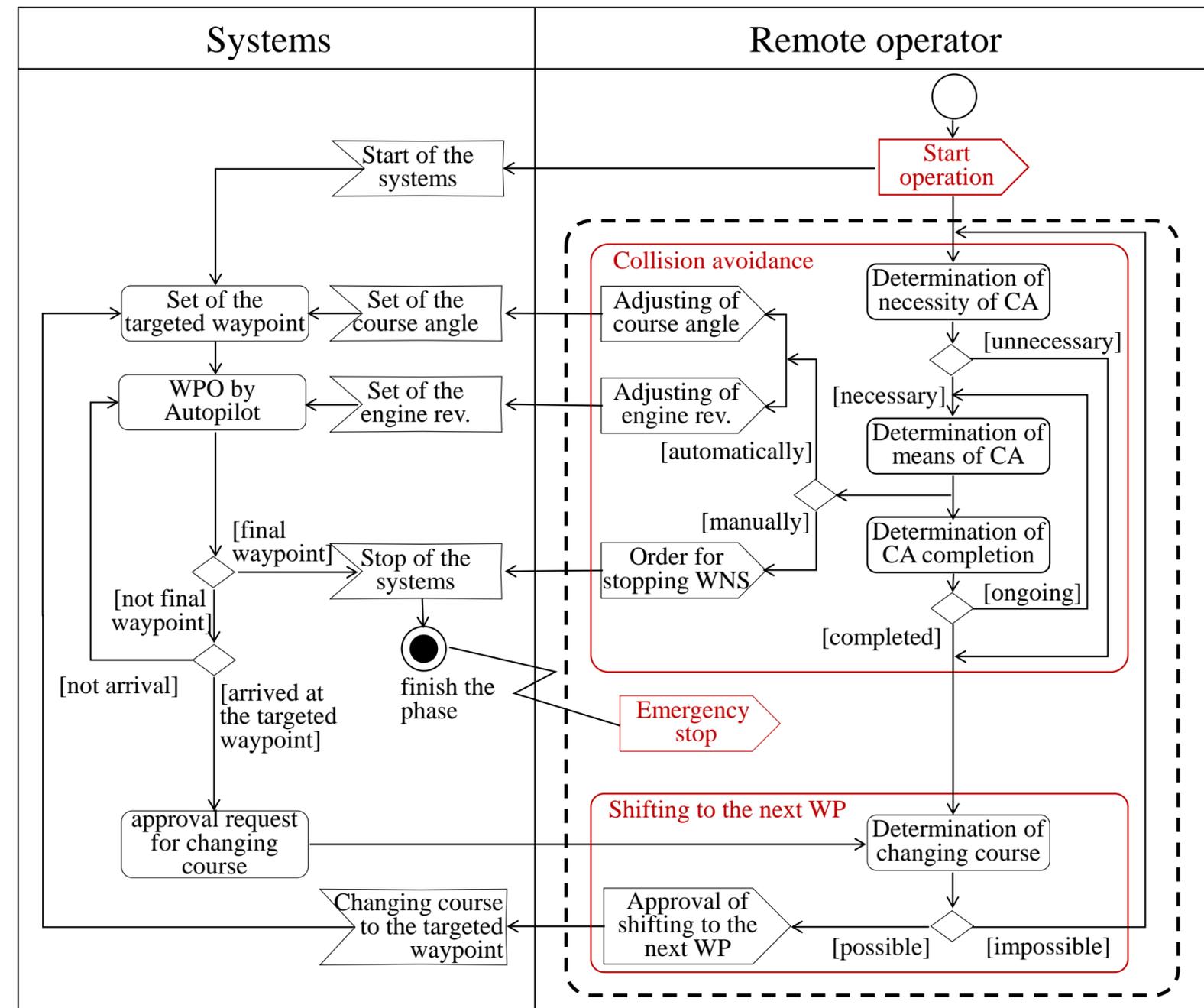


図1 遠隔Waypoint運航のUMLアクティビティ図*

* R. Miyake et al.: Application of Dynamic-Task-Based Hazard Identification Method to Remote Operation of Experimental Ship Shinpo, Proc. of ICMASS/MTEC 2022 (2022).

- 液化水素運搬船のリスク解析
 - 個船を想定した解析
 - 漏洩孔径の発生確率のベイズ推定
 - 被害度の指標を人命損失数とした解析
- 新規貨物・代替燃料船のリスク解析
 - 定量的な漏洩リスク解析のフレームワークの他の新規貨物・代替燃料船への適用

- 1.はじめに
- 2.リスク評価の概要
- 3.自動運航船のリスク解析
- 4.液化水素運搬船のリスク解析
- 5.今後の発展
- 6.まとめ**

- 船舶分野におけるリスク評価：IMO FSAの開発を端緒に、現在では多様な目的のために実施され、需要増加中
- リスク解析：定性解析・半定量解析・定量解析に大別
- 海技研はリスク評価技術の高度化研究を実施中
 - 定性解析の高度化：UMLを応用したモデル化手法及びタスクベースのリスク解析手法の開発と、それらの仮想の自動運航船への適用
 - 定量解析の高度化：液化水素運搬船における漏洩リスク推定のためのベイズ手法による頻度解析とシミュレーションによる被害度解析
- 船舶分野におけるリスク評価の需要・目的に今後も適切に対応できるように、海技研は、リスク評価技術の高度化に引き続き取り組んでいく

ご清聴ありがとうございました。

本研究の一部はJSPS科研費JP20K14969の助成を受けたものです。