

「アンモニア燃料船のリスク評価のための アンモニア漏えい頻度のベイズ推定」の解説

小島 直也*, 小野 恭子*

1. はじめに

本記事は、Kojima et al. (2025) の論文¹⁾の解説である。詳細および付属資料については、参考文献を参照されたい。特に、紙幅の関係から後述する事前分布および更新1回目の尤度の設定方法や感度解析については省略するとともに、推計に用いたパラメータや結果についてはFlangeのみを例示した。

温室効果ガス（GHG）の排出抑制は国内外ともに喫緊の課題であり、産業活動のなかで環境と調和しつつ対策が求められている。この潮流は船舶運航においても例外ではなく、国際海事機関（International Maritime Organization, 以下IMO）は当初2100年までの外航船におけるゼロエミッションの達成を目指していた²⁾が、2023年にこの目標は2050年に繰り上げられた³⁾。外航船に使用される燃料は歴史的に重油が主流であったが、近年、液化天然ガス（Liquefied Natural Gas, 以下LNG）やメタノールなど、GHG排出量が少ないとされる代替燃料の使用が増加している⁴⁾。

アンモニアは、日本の経済産業省が関係省庁と連携して策定した「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」⁵⁾において、水素社会への移行期で主力となる脱炭素燃料と位置付けられている。船舶におけるアンモニアの燃料利用も実行可能な選択肢の一つとして、ますます注目されつつある⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾など。上述したLNGやメタノール等の代替燃料と比較した際のアンモニアの利点として、高い重量エネルギー密度と体積エネルギー密度、そして全世界で1.5億トン/年の生産量（2019年）⁹⁾を支える既存の保管・運輸インフラとの互換性¹⁰⁾があげられる。また、アンモニアは大気圧で容易に液化でき、可燃性範囲が狭いといった物理的特性から実用的である。2050年までに、アンモニアは船舶燃料需要全体の約44%を占め³⁾、またアンモニア需要全体の30%を占めると予測されている⁸⁾。一方でアンモニアは、劇物であり、一定の暴露レベルでは目を刺激し、呼吸器を損傷する可能性がある¹¹⁾。また、高強度鋼、亜鉛、銅、真鍮などの材料に応力腐食割れを引き起こす可能性があげられる¹²⁾。

海上における人命の安全のための国際条約（The International Convention for the Safety of Life at Sea, 以下SOLAS¹³⁾）は、使用する液化ガス燃料の種類によらず船舶設計のためのリスク評価を要求しており、港湾と海上両方の環境における、使用・貯蔵・バンカリング（燃料供給）における評価が必要とされる。

評価手法の一つに、定量的リスク評価（Quantitative Risk Assessment, 以下QRA）が用いられることがある。これは、事故時の被害の大きさとその起こる確率を見積もり（以下、それぞれ被害評価、確率評価とよぶ）、その積をリスクとして数値化するものである¹⁴⁾。LNG船に関しては、事例が多くみられ、エンジンルーム¹⁵⁾やLNG浮体式生産貯蔵積出システム¹⁶⁾といった設備を対象とした事例から、フルボアイベントを含むLNG燃料タンカー¹⁷⁾やLNG燃料鉱石・ばら積み貨物船¹⁸⁾といった船舶を対象とした事例などがあげられる。これらの事例で用いられる漏えい頻度、あるいは事故確率や発生率などの主な情報源は、英国・Health and Safety Executive（HSE）のHydrocarbon Release System（HCR）¹⁹⁾⁽²⁰⁾、オランダ・Committee for the Prevention of Disasters（CPR）のGuidelines for Quantitative Risk Assessment（いわゆる‘Purple book’）²¹⁾、または国際石油・天然ガス生産者協会（IOGP）のデータベース²²⁾⁽²³⁾である。しかしながら、これらの情報源から得られるデータはLNGやアンモニアには特化していない点に注意が必要である。

LNGと比較すると実施数は限られるものの、近年、アンモニア燃料のQRAも実施されつつある。特にアンモニアのバンカリングに関連した事故やアンモニア拡散については懸念が大きく、港湾周辺でのリスク評価事例が多くみられる（例えば²⁴⁾⁽²⁵⁾）。これらの評価の課題として、被害評価はアンモニアの特性を踏まえて実施されているものの、確率評価にはLNGや炭化水素燃料から推計した漏えい頻度が用いられており、アンモニア漏えい事故の特徴が十分に反映されたQRAは限られていることが挙げられる。

その中で、Moon et al.²⁶⁾は、液体アンモニアを輸送するタンカーにおけるアンモニア漏えい事故のデータを

* 国立研究開発法人産業技術総合研究所

分析することで、船舶全体における潜在的なアンモニアの漏えい頻度を推定している。彼らは得られたアンモニア漏えい頻度について、IOGPの漏えい頻度データと比較するなどの考察を行い、アンモニア燃料船のリスク評価に適用できると結論づけている。ただし、漏えい径別あるいは機器別の漏えい頻度データが限られていることも指摘している。今後、アンモニア燃料船の増加が見込まれ、正確で信頼性の高いQRAが求められると予想されることから、アンモニア燃料船のQRAに適用可能な機器別の漏えい頻度データを得ることが不可欠であると考へた。

以上から我々の研究ではアンモニアの特徴、およびアンモニア利用に用いられる機器の特徴を考慮して、アンモニアの漏えい規模別・機器別の漏えい頻度（以下、漏えい頻度）を推定した。図1にアンモニア燃料船の漏えい頻度を推定するための枠組みを示す。最初に、我々は、LaChance et al.²⁷⁾、Groth et al.²⁸⁾、および木原ら²⁹⁾の手法を参考にベイズ更新モデルを開発した。更新1回目ではDavies and Fort³⁰⁾から入手したLNG燃料船の漏えい頻度データを取り込んだ。また、更新2回目では、日本の高圧ガス事故事例データベース（DB）³¹⁾における57年間にわたる18,945件の事故事例からアンモニア利用施設における漏えい頻度データを作成し、これを尤度として取り込んだ。2回目のベイズ更新の結果、アンモニア燃料船におけるアンモニア燃料船における漏えい頻度が推定された。結果の不確実性に関する検討として、尤度に対する感度解析を実施した。

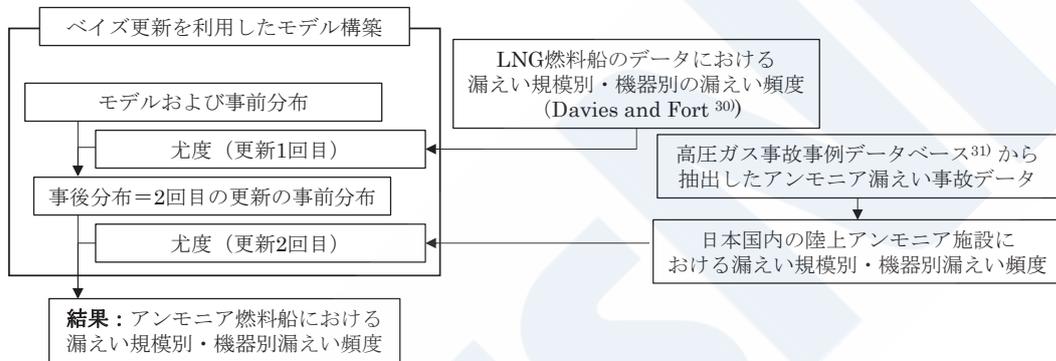


図1 アンモニア燃料船におけるアンモニア漏洩頻度推計の枠組み

2. 手法

2.1 ベイズの定理

ベイズの定理から導かれる基本式は(1)のように表される²⁹⁾。

$$\text{事後分布} \propto \text{尤度} \times \text{事前分布} \quad (1)$$

事後分布は尤度と事前分布の積に比例する。事前分布は、客観的な情報から導出される場合もあれば、専門家の経験や判断などの主観的な情報に基づいて仮定される場合も、また無情報の分布として一様分布などを仮定される場合もある。そして、尤度として新しい証拠やデータを取り込むことで、事後分布が推定できる。さらに、この事後分布を新たな事前分布として使用し、追加収集したデータを尤度として取り込み、新たな事後分布を推定する、という反復プロセスがベイズ更新として知られている。

ベイズ更新の長所は、複数の情報源からのデータを組み合わせられる点、新たな証拠やデータを継続的に取り込むことで信頼性を高められる点である。そのため、燃料アンモニアのように、経験的モデルによる予測が困難で、データが不足しがちな分野においても、一定の客観性・再現性のある確率分布を導出する目的で活用されている。

2.2 FLAを用いた階層ベイズモデルの構築と実装

当論文では、米国・Sandia National Laboratory（以下、SNL）で開発された²⁷⁾ ²⁸⁾、水素充填施設における漏えい頻度推定モデルを参考とした。

まず、このモデルの概念について整理する。SNLは(2)に示すように、漏えい頻度（Leak frequency; LF。単位は回/年）と配管等の機器断面積に対する漏えい面積の割合（Fractional leak area, 以下FLA）の対数が線形関係にある、という仮定から出発している。この仮定は、規模の大きな漏えいは発生頻度が低く、反対に規

模が小さい漏えいは高頻度で発生するという直感とも整合的である。また、化学処理、圧縮ガス、原子力発電所、および海洋石油産業における事故データを分析した結果を根拠として導出されており、その他の既往研究でも同様の傾向が確認されている（例えば、Spouge³², IOGP²²）。

モデル式について、(2)の両辺の値の対数を取ることで(3)に、また(3)の切片を定数に置換し、底の変換を行うことで(4)に簡略化できる。底の変換により表1に示すFLAの大きさが、-4, -3, -2, -1, 0と負の整数に換算されるため、理解が容易である。次に、SNLは表1に示す5つにカテゴリ化した漏えい規模Iに対応するLF(I)の対数が(5)の正規分布に従うと仮定した。

ここでカテゴリ化を行う理由は、モデルに取り込むための各データの情報源で報告される漏えい規模が一貫しないためである。つまり、漏えい規模を連続的に扱おうと、ある漏えい規模の事故がデータベース中に1件しかない場合が多数生じてしまい、結果的に尤度となる確率データを作成できず、ベイズ推定が実行できなくなる。これを避けるために、同等の漏えい規模と判断できる事故を集め、その漏えい頻度を算出する手続きを用意している。筆者らが2.6.2で実施した漏えい規模の分類作業でも、事故の報告内容は多種多様であり、このカテゴリ化手続きが必要であることを強く認識した。

モデル式の説明に戻ると、LF(I)の対数が(5)の正規分布に従うとき、(2)は切片 α_1 と傾き α_2 をもつ、対数線形モデル((6))として記述できる。この時、(5)および(6)の推定すべきパラメータである α_1 , α_2 , $\sigma^2_{LF(I)}$ については自然共役分布を採用し、それぞれ(7), (8)の正規分布、および(9)の逆ガンマ分布を仮定した。すなわち、 $\mu_{LF(I)}$ が α_1 と α_2 を変数とする分布を持ち、さらに α_1 と α_2 がそれぞれ分布を持つ、階層ベイズモデルを仮定した。

以上の手続きにより、事故データから導出した様々な機器断面積と漏えい規模の組み合わせをFLAに換算し、ベイズモデルに取り込むことで、漏えい頻度を推定できる。我々はここに、アンモニアの漏えい頻度を尤度として取り込むことで、アンモニア燃料船における漏えい頻度分布を推定するモデルとした。なお、SNLはベイズ更新のためのツールとしてWinBUGS³³を利用しており、我々はRパッケージのjagsUI³⁴を利用した。

$$LF = A_1 \times FLA^{A_2} \quad (2)$$

$$\ln LF = \log A_1 + A_2 \cdot \ln FLA \quad (3)$$

$$\ln LF = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot \log_{10} FLA \quad (4)$$

$$\ln(LF(I)) \sim Normal(\mu_{LF(I)}, \sigma^2_{LF(I)}) \quad (5)$$

$$\mu_{LF(I)} = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot \log_{10} FLA_I \quad (6)$$

$$\alpha_1 \sim Normal(\mu_{\alpha_1}, \sigma^2_{\alpha_1}) \quad (7)$$

$$\alpha_2 \sim Normal(\mu_{\alpha_2}, \sigma^2_{\alpha_2}) \quad (8)$$

$$\sigma^2_{LF(I)} \sim InvGamma(a_I, b_I) \quad (9)$$

I: 漏えい規模 (表1)。

LF(I): 漏えい規模Iにおける漏えい頻度。

A_1, A_2 : FLAのパラメータ。

α_1, α_2 : $\log_{10} FLA$ および μ_{LF} の切片と傾き。

$\mu_{\alpha_1}, \sigma^2_{\alpha_1}$: 正規分布を仮定した α_1 の平均と分散。

$\mu_{\alpha_2}, \sigma^2_{\alpha_2}$: 正規分布を仮定した α_2 の平均と分散。

$\mu_{LF(I)}$: 報告されている漏えい頻度の平均値。

$\sigma^2_{LF(I)}$: 報告されている漏えい頻度の分散。

a_I, b_I : 逆ガンマ分布を仮定した $\sigma^2_{LF(I)}$ の形状パラメータとスケールパラメータ。

表1 漏えい規模とFLAのカテゴリの対応関係

漏えい規模 (I)	FLA ^a	
1	Very small	0.0001
2	Minor	0.001
3	Medium	0.01
4	Major	0.1
5	Rupture	1

a FLA : Fractional Leak Area。機器の断面積に対する漏えい面積の割合。例えば漏えい規模の区分Very smallは、断面積の0.0001 (=0.01%) に相当する漏えい面積を指す。

2.3 漏えい頻度推計の対象とした機器

推定に必要な事前分布および2つの尤度について、それぞれの参照した出典内で報告されている機器の種類を表2に示す。当論文では、3つの情報源全てで情報が得られる機器のみ、すなわち太字で示したFlanges, Joints, Pipes, Valves (actuated), Valves (manual)を漏えい頻度の推定対象とした。なお、コンプレッサーについては、Davies and Fort³⁰⁾は遠心式と往復式を区別しているが、LaChance et al.²⁷⁾および高圧ガス事故事例DB³¹⁾では区別しておらず、両者の機械的な違を考慮して対象外とした。

表2 情報源ごとで報告される機器の種類とその対応関係

事前分布： LaChance et al. ²⁷⁾ より	更新1回目で用いた尤度： Davies and Fort ³⁰⁾ より	更新2回目で用いた尤度： 高圧ガス事故事例DB ³¹⁾ より
Flanges	Flanges	フランジ
Joints	Instrument connections^a	ジョイント, 接手
Pipes	Pipes	パイプ, 管
Valves	Valves (actuated)	バルブ, 弁
	Valves (manual)	
Compressors	Compressors (centrifugal)	圧縮機
	Compressors (reciprocating)	
Cylinders		
Filters		
Hoses		ホース
	Pressure vessel	
	Refrigerated ambient pressure vessel	
Instruments	-	その他 ^b

※空欄部はその出典内において報告されていない機器である。

- a Davies and Fort³⁰⁾では“Instrument connections include flanges within the given release frequency.”と述べられている。以下、本記事では特に断らない限りJointと記す。
- b その他として貯槽、熱交換器、ポンプ、冷却器、計測機器などがある。

2.4 事前分布

更新1回目の事前分布については、化学処理、圧縮ガス、原子力発電所、海洋石油などの分野の事故データから推定された一般機器の漏えい頻度²⁷⁾を使用した。

2.5 更新1回目の尤度：Davies and Fort³⁰⁾におけるLNG燃料システムの漏えい頻度

更新1回目では、Davies and Fort³⁰⁾が推定したLNG燃料船における漏えい頻度を、表1のFLAに対応するように変換し、これを尤度として取り込んだ。この漏えい頻度はLNG燃料船に関するリスク評価ガイドライン(IGFコード)³⁵⁾で参照されており、一定の信頼性がある。

2.6 更新2回目の尤度：高圧ガス事故事例DB³¹⁾から推計した尤度

2.6.1 アンモニア使用施設における規模別のアンモニア漏えい事故の抽出

現在、アンモニア燃料船は研究・設計段階にあるため、事故事例やそのデータベースが存在しない。このような場合の代替データとして、陸上のアンモニア生産・消費施設のデータを使用することが考えられる¹²⁾。そこで当論文では、高圧ガス保安協会が管理する、高圧ガス事故事例DB³¹⁾を参照し、日本の陸上施設におけるアンモニアに関する漏えい事故から、尤度となる漏えい頻度を推定した。

高圧ガス事故事例DBとは、高圧ガス保安法によってアンモニアを含む高圧ガスを扱う事業者に対して義務付けられる事故報告18,945件(1965～2022年)が保存されているDBである。事故ごとに識別情報、時間、場所、死傷者数、物質名、噴出や漏えいに関する情報(程度、部位など)、原因、事故概要など計28項目が用意されて

いる*1。

これらの18,945件の事故報告から物質欄や事故概要欄に「アンモニア」を含む927件を抽出した。次に、この927件のうち、アンモニアの冷媒利用に関連する610件の記録*2を除外した。除外理由は、冷媒利用するシステムではアンモニアを消費、生産することなく閉鎖系として循環させるため³⁶⁾、アンモニアを継続的に投入および消費する燃焼システムと事故の特徴が異なると考えたためである。残った317件を、表2で評価対象として選ばれた機器（Flanges, Joints, Pipes, Valves）に限定した結果、215件が抽出された。

2.6.2 アンモニア漏えい事故に対する漏えい規模の設定

得られた215件の事故の漏えい規模を図2のフローチャートに従い設定した。まず、漏えいの程度や部位に関する情報から直接にFLAが計算できる事故は、そのFLAに応じて漏えい規模を設定した。次に、事故概要欄の記述から判断が容易な事故を、RuptureとVery smallの規模に設定した。例えば、「破断」「切断」「破裂」などの記述がある事故はRuptureを設定し、「わずかな」「通常運転を維持する」「安定した運転」などの記述がある事故はVery smallを設定した。さらに、事故概要欄の記述や漏えいに関する情報から流量の推計を行える事故は、その流量にしたがって漏えい規模を設定した。それ以外の事故事例は2人の研究者が個別に漏えい規模を判断し、両者の判断が一致した場合にはその漏えい規模、一致しない場合には協議を経て漏えい規模を設定した。ここまでの手順で109件に対して漏えい規模が設定できた。

残る106件については、漏えい規模設定に必要な情報がほとんど、あるいは全く含まれていないため、ここまでに設定したVery small, Minor, Medium, Majorの漏えい規模の事故件数に基づいて按分した。ここでRuptureに対して按分しない理由は、Ruptureに該当するような大規模事故は事項報告が詳細である一方で、それ以外の事故報告は簡潔な場合が多いと判断したためである。また、ごく軽微な漏えいの一部は、検知されず報告もされていない可能性があることを考慮し、Very smallは按分対象とした。得られた結果として表3に、按分前後のアンモニア漏えい事故件数を示す。

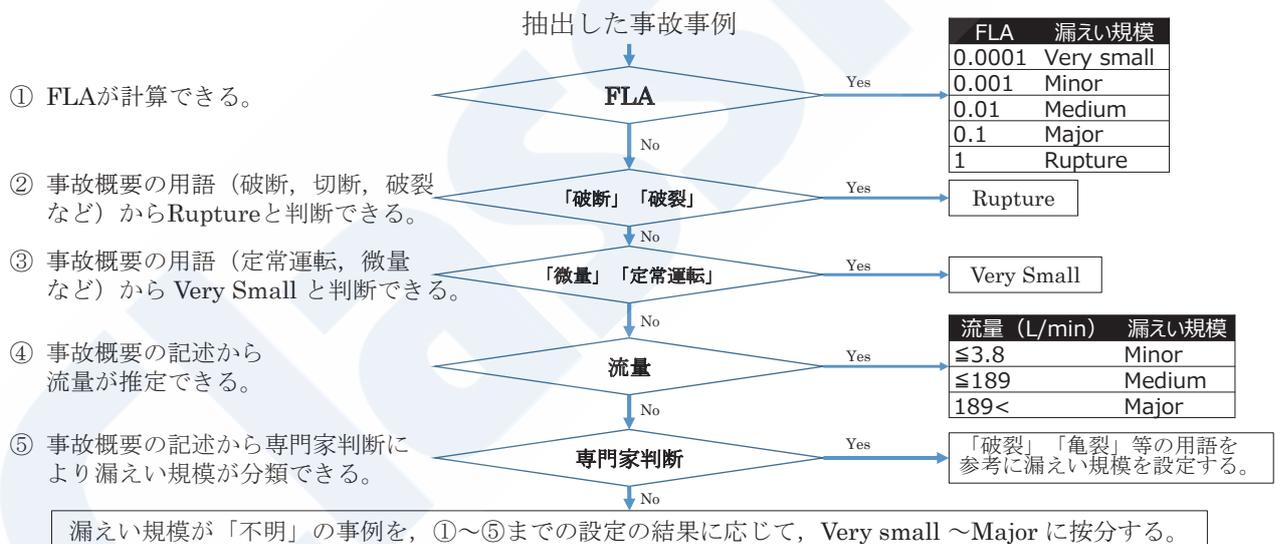


図2 DBから得られたアンモニア漏えい事故に対する漏えい規模設定のフローチャート

表3 機器別漏えい規模別のアンモニア漏えい事故件数（Flangesの例）

機器	漏えい規模別事故件数						Unknown
		Very small	Minor	Medium	Major	Rupture	
Flanges	按分前	14	1	1	0	1	18
	按分後	30	2	2	0	1	

*1 ただし、全項目が記載された事故は、18,945件のうち28件（0.1%）のみである。

*2 各事故報告において業種、設備区分、事故概要の項目欄に冷蔵、冷凍、製氷、食品、漁業、水産業の用語を含むものを除外した。

2.6.3 事故件数から事故頻度（尤度）への換算

2.6.2で推計した漏えい規模別の事故件数から、1年あたり1個あたり（Pipeでは1mあたり）の漏えい頻度に推計するために、表3の按分後の漏えい件数事例を、推定される機器総数と総運転時間で除した。機器総数は、施設数に施設あたりの平均機器数を乗じて推定する。

$$LF(I)_j = \frac{LC(I)_j}{Period \times N_F \times N_{C,j}} \quad (10)$$

$LF(I)_j$ (件/年/個)：漏えい規模 I ，機器 j における1年あたり1個あたりの漏えい頻度。

$LC(I)_j$ (件)：漏えい規模 I ，機器 j におけるアンモニア漏えい事故の件数。

$Period$ (年)：総運転時間。参照したDBの運用期間（1965～2022年）より57年とした。

N_F (施設)：アンモニア利用施設の総数。

$N_{C,j}$ (個/施設)：アンモニア利用施設あたりの機器 j の数。

アンモニア利用施設の総数 (N_F)，施設あたりの機器 j の数 ($N_{C,j}$) について、高圧ガス事故事例DBや事業者団体・国が整備する統計から直接得ることができなかつたため、それぞれ参考文献の情報に基づき推定した。

N_F について、鈴木³⁷⁾は、日本の高圧ガス保安法に照らして第二種ガス類（アンモニアを含む）を扱う一般施設数が、1996年3月時点で12,428施設、2015年3月時点で21,438施設であると報告している。また2.6.1で述べたように、全事故数18,945件に占めるアンモニア関連事故927件の割合は4.9%（=927/18,945）、冷媒用途以外のアンモニア関連事故317件に限ると1.7%（=317/18,945）の割合で発生すると推定した。これらの情報から、アンモニア取扱施設数は211（=12,428×1.7%）～1,050（=21,438×4.9）の範囲にあると考え、1965年から2022年のアンモニア利用施設数 N_F を500と推定した。

$N_{C,j}$ について、国立研究開発法人産業技術総合研究所が設定した水素ガスに関する漏えい頻度推定のための施設当たり機器数を参考とした³⁸⁾。文献では、CNG供給施設は高圧ガス関連施設を、ガソリン供給施設は危険物関連施設を代表すると仮定して、それぞれの施設の典型的な機器数を水素の漏えい頻度推定に用いた。当論文でも同様の考え方を採用し、アンモニア施設がCNGステーションに類似していると仮定し、機器数を推定した。結果、1施設あたりの機器 j の数 ($N_{C,j}$) はFlanges=10, Pipes=48, Joints=40, Valves=8とした。

以上から推定した漏えい頻度を表4に示す。漏えい頻度は 10^{-5} から 10^{-4} の範囲であり、これはLNG燃料船の漏えい頻度より低い傾向にあった。

表4 高圧ガス事故事例DBから推定したアンモニア施設におけるフランジの漏えい頻度（尤度）

FLA	漏えい頻度 (回/年)
0.0001	1.05E-04
0.001	7.02E-06
0.01	7.02E-06
0.1	Not available
1	3.51E-06

2.6.4 感度解析：高圧ガス事故事例DBから得られた漏えい頻度に関する仮定が結果に与える影響の検討

2.6.1から2.6.3までで述べた、漏えい規模が「不明」であった事故の按分方法、および N_F や $N_{C,j}$ の推定方法には、主観的な判断や仮定が含まれる。このようなデータに適用した判断・仮定が、結果にどの程度影響するかを理解するために有効な手法³⁹⁾として、感度解析を実施した。当論文では、ここまでで採用した値を最も妥当性の高いケースとし、他の仮定から得られたであろう結果と比較することで、その差異について考察した。なお、Davies and Fort³⁰⁾で報告された漏えい頻度を、FLAに変換する手続きが結果におよぼす影響についても感度解析を実施したが、その影響はごくわずかであった。詳細は、当論文を参照されたい。

2.6.2で述べた漏えい規模「不明」の事故の按分方法に関する感度解析として、Very small～Rupture, Minor～Major, Minor～Ruptureに按分したケースの推定を行い、Very small～Majorに按分したケースと比較した。

2.6.3では日本のアンモニア利用施設数 (N_F) を、211~1,050程度と推定したうえで、500を採用した。この推定範囲を参考として、感度解析ではLower bound (下限値) を採用したケースとして100, Upper bound (上限値) のケースとして1,000を採用した (表5)。また、施設あたりの機器数 ($N_{C,j}$) に関する感度解析として、CNG供給ステーション・ガソリン供給ステーションの数値などを参考に、代替ケースとして採用する $N_{C,j}$ を設定した (表6)。

表5の3つのケースと表6の3つのケースを組み合わせ、表7の5つの感度解析のためのケースを設定した。

表5 各ケースにおける日本国内の施設総数 (N_F)

パラメータ	Lower bound	Most likely	Upper bound
N_F (施設) : アンモニア利用施設の総数	100	500	1,000

表6 各ケースにおける施設あたり機器数 ($N_{C,j}$)

パラメータ	機器 (j)	Lower bound	Most likely	Upper bound
$N_{C,j}$ (個/施設) : 施設あたりの機器 j の数	Flanges	5	10	48

表7 アンモニア施設におけるフランジの漏えい頻度推定に関する5つの感度解析のケース

Case No.	1	2	3	4	5
N_F のケース	Most likely	Lower bound	Upper bound	Most likely	Most likely
$N_{C,j}$ のケース	Most likely	Most likely	Most likely	Lower bound	Upper bound
FLA					
0.0001	1.1E-04	5.3E-03	5.3E-05	2.1E-04	2.1E-05
0.001	7.0E-06	3.5E-04	3.5E-06	1.4E-05	1.4E-06
0.01	7.0E-06	3.5E-04	3.5E-06	1.4E-05	1.4E-06
0.1	NA	NA	NA	NA	NA
1	3.5E-06	1.8E-04	1.8E-06	7.0E-06	7.0E-07

NA: not available

3. 結果

3.1 アンモニア燃料船における漏えい規模別漏えい頻度の推定結果

ベイズ更新における収束を診断する指標である R_{hat} が1.1未満であり収束したことや、そのplotを確認し、感度解析を含むすべてのケースにおいて適切な解が得られた。

アンモニア燃料船における漏えい頻度推定結果を図3に示す。各プロットや信頼区間の数値は当論文の Supplementary material に記載した。図3の黒点・黒線で示した更新1回目のLNG燃料船の漏えい頻度と比較すると、赤点・赤線で示した更新2回目のアンモニア燃料船の漏えい頻度は相対的に低くなった。つまり、LNG燃料船向けの漏えい頻度をアンモニア燃料船のQRAに用いた場合には、定量的リスクが1~10倍高く推計される。この場合、より安全な (保守的な) 評価結果が得られる一方で、より厳格なリスク管理や高額な対策が必要となる可能性が示唆された。この漏えい頻度の差異が生じた理由については4章で考察する。

漏えい頻度の信頼区間について、90%信頼区間 (平均の5%から95%のパーセンタイルをカバーする範囲) は、平均のおよそ1/10~10倍の範囲におさまった。この信頼区間は、常に推定結果に付随する不確実性であり、リスク評価の実施者が考慮する必要がある。

自動弁と手動弁の漏えい頻度推定結果を比較すると、更新1回目ではDavies and Fort³⁰⁾で手動弁の漏えい頻度 (尤度) が自動弁よりもおよそ10倍高いことを反映して、手動弁が自動弁より約10倍高かった。しかし、更新2回目では、両方とも高圧ガス事故事例DBから得られた同一の尤度を取り込んでおり、異なる事前分布にもかかわらず、ほぼ同様の漏えい頻度推定結果が得られた。このような結果が得られた理由は、漏えい頻度の推定結果 (分布) が取り込む尤度の不足と(3)で定義される柔軟性のない直線モデルによって決定されるためである。直近での対応は困難だが、事故データベースの充実やより柔軟なモデリング手法の適用 (例えば、Kaneko and Yuzui⁴⁰⁾) により、各機器における事故特性をより適切に反映した結果が得られる可能性がある。

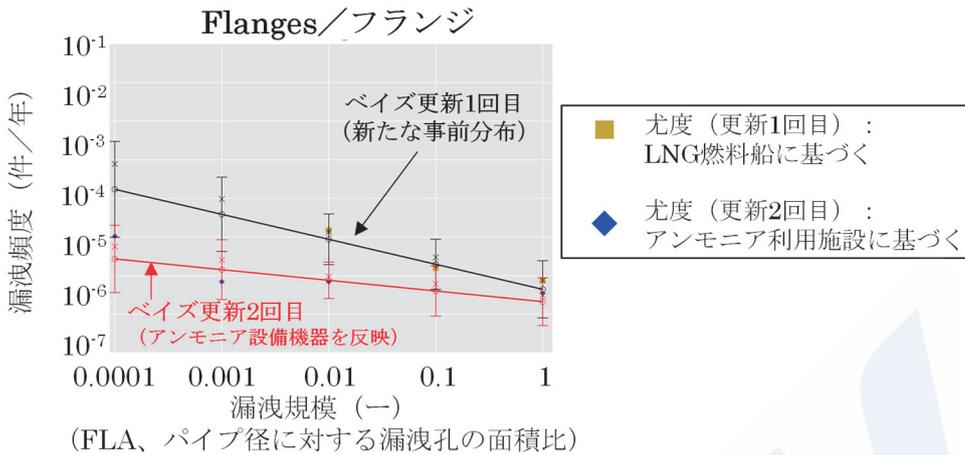


図3 アンモニア燃料船における漏えい頻度推定結果

3.2 感度解析結果

本節では、ここまでと同様にFlangesを例に、更新2回目で取り込む尤度に関する感度解析結果について述べる(図4, 図5)。その他の結果は、当論文のSupplementary materialを参照されたい。

まず図4に示す、漏えい規模がUnknownとなった事故の按分方法に関する感度解析結果について述べる。最も妥当として採用したVery small to Majorのケースでは、アンモニア燃料船における漏えい頻度推定結果は、漏えい規模が増加するにつれ、漏えい頻度が減少した。この傾向は、Minor to Major, およびVery small to Ruptureでも同様であるが、漏えい頻度の傾きは緩やかとなった。一方でMinor to Ruptureでは正の傾きを示し、漏えい規模が大きくなるほど頻度も多くなるという、直感に反する結果となった。また、90%信頼区間について、漏えい規模や機器によって結果に違いはあるものの、平均値に対して1/10~10倍範囲に収まった。結果として、Very small to Majorが最も安全側のリスク評価に適した分布が得られたといえる。

次に図5に示す、アンモニア施設数 (N_F) および施設あたりの機器数 ($N_{C,j}$) の感度解析結果について述べる。二つのパラメータはともに(10)の分母に位置しており、(10)を介して漏えい規模に関わらずその尤度が上下する。そのため、図5に示した5つの推定結果(赤色の直線)について、傾きはほぼ同様であり、切片のみが異なる結果となった。推定した漏えい頻度分布の平均について、最も妥当なケース(左上)を基準とした場合、他の4つのケースの値は、およそ1/10~10倍の範囲にあった。特に N_F の仮定に依存して平均の差は広がっており、上述したUnknownの按分方法が与える影響よりも大きかった。 N_F のLower boundケースを除き、およそすべての機器・漏えい規模において、Lower boundおよびUpper boundの平均漏えい頻度推定結果は、Most likelyケースの信頼区間内にはほぼ含まれていた。 N_F のLower boundケースで信頼区間から外れた理由として、 $N_F=100$ が過少な設定であったことが挙げられる。100を設定した理由として、 $12,428 \times 1.7\% (=211)$ から、専門家判断として、また区切りの良い数字を設定したためである。

仮定には常に一定のバイアスがあり、情報が限られていることも踏まえると、最も妥当として推計した漏えい頻度の分布は、適切な範囲におさまったものと考えられる。

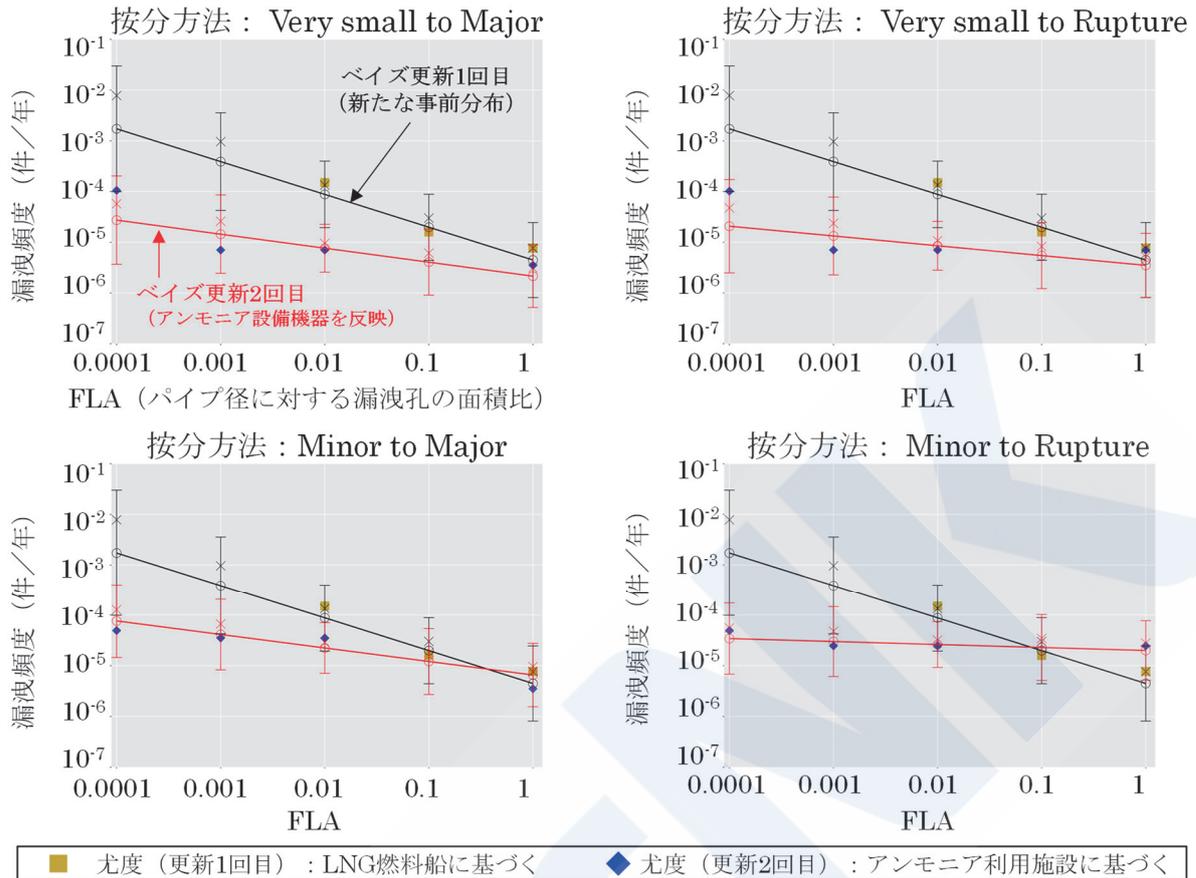


図4 漏えい規模「Unknown」の按分方法に関する感度解析の結果

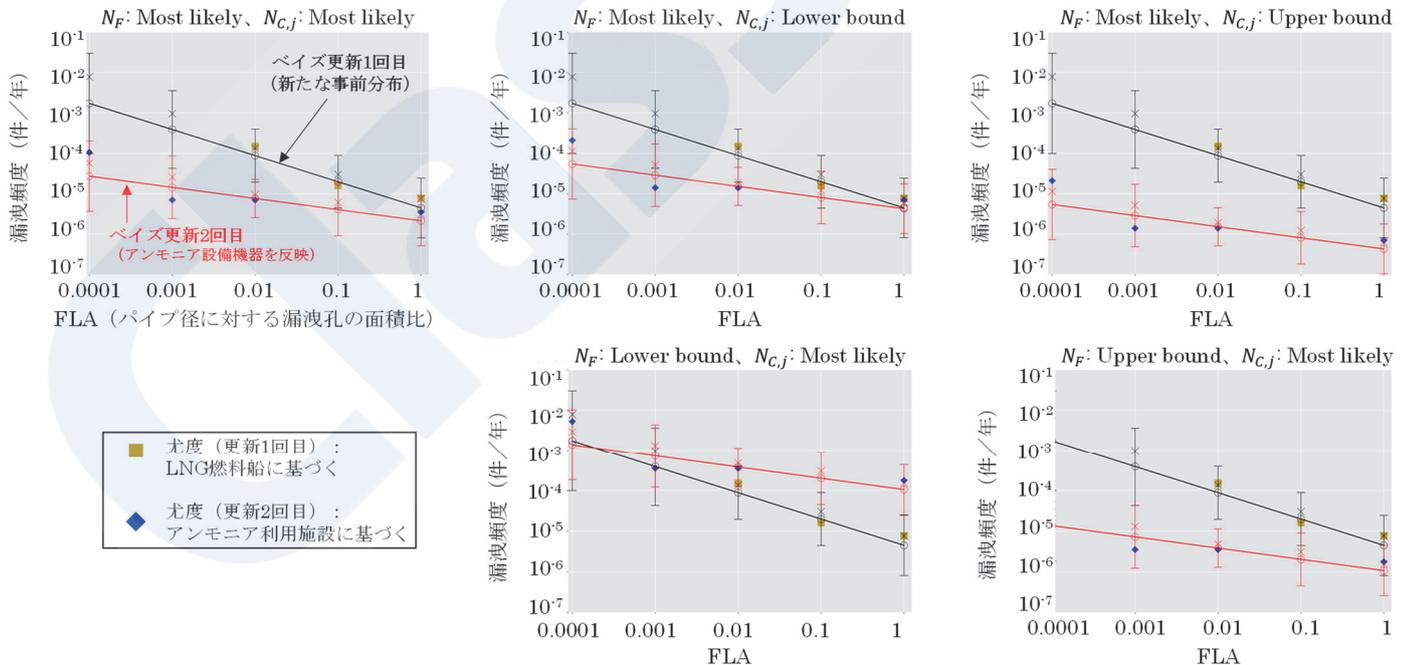


図5 アンモニア利用施設数および施設あたり機器数に関する感度解析の結果

4. 考察

4.1 アンモニア燃料船と他の燃料船における漏えい頻度の比較

アンモニア燃料船について、本研究では機器別の漏えい頻度を推定しており、Moon et al.²⁶⁾の推定結果を比

較した。なお、上述した研究以外に、アンモニアの事故特性を漏えい頻度に反映した研究は限られており、直接の比較は困難であった。Moon et al.²⁶⁾はシステムとしてアンモニア燃料船全体からの漏えい頻度を 2.40×10^{-2} と推計しており、これは従来のLPGタンカー船の 3.10×10^{-2} よりも低く、77%に相当する。当研究では船舶全体からの漏えい頻度は推定していないため、直接の比較はできないものの、アンモニア燃料船における漏えい頻度と、尤度として取り込んだLNG燃料船の機器別の漏えい頻度を比較すると、同様の傾向にあった。アンモニア燃料船でLNG燃料船よりも漏えい頻度が低い理由として、炭化水素燃料と異なり、アンモニアは可燃性と毒性の両方を有するため、比較的厳格な管理が実施されているためと考えた。一方で、我々の推計したアンモニア燃料船とLNG燃料船の漏えい頻度の差異は、Moon et al.²⁶⁾の77%よりも大きかった。この理由については、Moon et al.²⁶⁾では両方の燃料船ともに海上事故のデータソースから結果を導出した一方、我々は陸上システム由来の尤度と海上システム由来の頻度を比較したため、より差が大きくなったからと考えた。

4.2 漏えい頻度推定の不確実性に影響する要素の定性的な整理

当論文で推定した漏えい頻度が真値に対して過少か過大かを十分に考察できるだけの先行研究は、4.1で述べたように不足しているが、ここでは可能な範囲で整理する。

まず、既に述べたように、更新2回目に取り込んだ尤度は、高圧ガス事故事例DBから抽出した日本における陸上のアンモニア施設での運用・管理状況が反映されている。DBには1965年以降の事故が含まれるため、2025年現在までの材料科学、建設技術、運用管理の進歩を踏まえると、当論文で推定した漏えい頻度を用いた場合には、安全側のQRAとなる可能性がある。一方で、海上系システムは陸上系システムに比べると、外部負荷が一般的に大きく、この要素は漏えい頻度に反映されていないため、危険側のQRAとなる可能性もある。

このように高圧ガス事故事例DBのみから尤度を取り込んだために、いくつかの考慮不可能な要素があり、この点は課題である。ただし、1章で述べたように、既存のデータベースではアンモニアに関する事故は系統的にまとめられておらず、取り込むに際して何らかの工夫が求められる。関連してLaChance et al.²⁷⁾では、複数のデータベースから得られた尤度をデータ点群として取り込んでいるものの、データ点群がバラつく場合に、90%信頼区間が拡大する事例も示されており、この点も注意が必要である。

報告バイアスにも注意が必要である。Mulcahy et al.³⁹⁾は、ごく小さな漏えい規模の漏えい頻度は検出困難で、かつ報告されにくいことから、推計と実態に乖離が生じうることを指摘している。さらに、彼らは、漏えい頻度の予測結果は慎重に解釈すべきであり、小さな漏えいへの外挿はバイアスを含む可能性があること、かつそのバイアスの方向は明確でない旨を指摘しており、データを単純に追加するだけでは、不確実性が減少しないことを示唆している。

4.3 機器定義に関する整理

当論文で推定した漏えい頻度を参照する際は、名目上の意味と部品の実際の状態を考慮することも重要である。表2と関連して言及したように、機器の指す範囲は出典によって異なる可能性がある。

Joint, Flange, Instrumental connectionについて、類似語ではあるものの異なる機器を指す場合が想定される。実際、我々が日本の高圧ガス事故事例DBを参照した際に、これらを記載情報だけから区別することはできなかった。Davies and Fort³⁰⁾でも“Instrument connections include flanges within the given release frequency”と述べており、同様の困難にあったと想像される。

またPipeについては、一重管か二重管かによって判断が異なる。日本の高圧ガス保安法では、アンモニアなどの有害物質を扱うPipeは二重管が義務付けられているが、漏えいガス拡散防止措置が講じられている場合、一重管も許可されている。ほとんどの施設で防止措置が採用されており、一重管が一般的だとされている。この背景を踏まえ、高圧ガス事故事例DBに記載のパイプはすべて一重管と仮定した。Davies and Fort³⁰⁾でも管の層数に言及したうえで、一般的に一重管が用いられることを示唆しており、方法論としても整合的な仮定と考えた。

4.4 推定頻度の適用可能性

当論文で推定したアンモニアの事故特性を反映した漏えい頻度により、これまでに炭化水素燃料から導出された漏えい頻度^(20) 22)などを用いたQRA^{24) 25)}を更新することが可能であり、よりアンモニアの特性を反映したアンモニア燃料船のQRAを支援できる。当研究で推定したアンモニア燃料船に関する漏えい頻度は、アンモニアの漏えい事故に関する特徴を反映させた最初の研究であり、今後数十年間にわたるQRAの精度と信頼性を向上させる可能性がある。

5. 結論

ベイズ更新モデルを構築し、既存データが限られるアンモニア燃料船における機器別（フランジ、ジョイント、パイプ、バルブ）の漏えい頻度を推定する方法を提案した。特に更新2回目の尤度を、日本国内の陸上アンモニア施設における事故事例から推定し、ベイズ更新モデルに取り込むことで、アンモニアの事故特性を反映させた。推定した漏えい頻度の不確実性について、感度解析、先行研究におけるアンモニア燃料船・LNG燃料船のLFと比較、および尤度として取り込んだ高圧ガス事故事例DBの特徴の整理などを通じて考察した。得られた推定結果は、アンモニアの厳格な管理を反映して、既存のLNG燃料船の漏えい頻度よりも低いと考えられた。推定した漏えい規模別・機器別の漏えい頻度を用いることで、定量的なリスク管理枠組み、規制遵守の支援、アンモニア燃料船の運用安全基準の向上に適合している。

謝辞

本原稿の執筆にあたりClassNK 柳本 史教様に有益なご助言をいただきました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) N. KOJIMA, K. ONO, M. YOSHIDA, E. KATO, and F. YANAGIMOTO, “Bayesian estimation of ammonia leak frequency for risk assessment of ammonia-fueled vessels,” *Results Eng.*, vol. 26, p. 104650, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.104650.
- 2) International Maritime Organization (IMO), “Second IMO GHG Study 2009.” 2010.
- 3) International Maritime Organization (IMO), “2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships ANNEX 15.” 2023.
- 4) “ClassNK 代替燃料インサイト Version 2.2, 2025.” ClassNK. [Online]. Available: https://download.classnk.or.jp/documents/ClassNKAlternativeFuelsInsight_j.pdf
- 5) 内閣官房 et al., “2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略.” 2021.
- 6) International Energy Agency (IEA), “Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach.” 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>
- 7) O. B. Inal, B. Zincir, and C. Deniz, “Investigation on the decarbonization of shipping: An approach to hydrogen and ammonia,” *Fifth Int. Hydrog. Technol. Congr.*, vol. 47, no. 45, pp. 19888-19900, May 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.01.189.
- 8) International Renewable Energy Agency (IRENA), “Innovation outlook renewable ammonia.” 2022. [Online]. Available: <https://www.irena.org/publications/2022/May/Innovation-Outlook-Renewable-Ammonia>
- 9) F. Y. Al-Aboosi, M. M. El-Halwagi, M. Moore, and R. B. Nielsen, “Renewable ammonia as an alternative fuel for the shipping industry,” *Curr. Opin. Chem. Eng.*, vol. 31, p. 100670, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.coche.2021.100670.
- 10) A. A. Levikhin and A. A. Boryaev, “Low-carbon ammonia-based fuel for maritime transport,” *Results Eng.*, vol. 25, p. 104175, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.104175.
- 11) 厚生労働省 職場のあんぜんサイト, “安全データシート：アンモニア.” 2015. [Online]. Available: <https://anzeninfo.mhlw.go.jp/anzen/gmsds/7664-41-7.html>
- 12) H. Jang et al., “Regulatory gap analysis for risk assessment of ammonia-fuelled ships,” *Ocean Eng.*, vol. 287, p. 115751, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.115751.
- 13) International Maritime Organization (IMO), “SOLAS [WWW document].” [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/ConferencesMeetings/Pages/SOLAS.aspx>
- 14) P. A. Duong, B. R. Ryu, J. Jung, and H. Kang, “A Comprehensive Review of the Establishment of Safety Zones and Quantitative Risk Analysis during Ship-to-Ship LNG Bunkering,” *Energies*, vol. 17, no. 2,

- 2024, doi: 10.3390/en17020512.
- 15) Y. Xie, J. Liu, Z. Hao, Z. Xu, J. Qin, and J. Zhu, “Numerical simulation and experimental study of gas diffusion in a ship engine room,” *Ocean Eng.*, vol. 271, p. 113638, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.113638.
 - 16) S. Lee, “Quantitative risk assessment of fire & explosion for regasification process of an LNG-FSRU,” *Ocean Eng.*, vol. 197, p. 106825, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106825.
 - 17) B. Chu and D. Chang, “Effect of full-bore natural gas release on fire and individual risks: A case study for an LNG-Fueled ship,” *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 37, pp. 234-247, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.jngse.2016.11.043.
 - 18) B. Jeong, B. S. Lee, P. Zhou, and S. Ha, “Evaluation of safety exclusion zone for LNG bunkering station on LNG-fuelled ships,” *J. Mar. Eng. Technol.*, vol. 16, no. 3, pp. 121-144, Sep. 2017, doi: 10.1080/20464177.2017.1295786.
 - 19) Health and Safety Executive (HSE), “Hydrocarbon Releases System.” 2006 1992.
 - 20) Health and Safety Executive (HSE), “Offshore hydrocarbon releases 2016-2021. Statistics in offshore oil and gas. [xlsx file].” 2022. [Online]. Available: <https://www.hse.gov.uk/offshore/assets/docs/hcr2016-2021.xlsx>
 - 21) Committee for the Prevention of Disasters (CPR), “Guidelines for Quantitative Risk Assessment ‘Purple book.’” 1999.
 - 22) International Association of Oil & Gas Producers (IOGP), “Risk Assessment Data Directory -Process Release Frequencies-, No. 434-1, Ver. 3.0.” 2019.
 - 23) International association of Oil & Gas Producers (IOGP), “Risk Assessment Data Directory -Process Release Frequencies-, No. 434-1.” 2010.
 - 24) Det Norske Veritas (DNV), “Ammonia Bunkering of Passenger Vessel - Concept Quantitative Risk Assessment Green Coastal Shipping Programme.” 2021. [Online]. Available: <https://grontskipsfartsprogram.no/wp-content/uploads/2021/07/Ammonia-bunkering-of-passenger-vessel-Concept-quantitative-risk-assessment.pdf>
 - 25) M. Yang and J. S. L. Lam, “Risk assessment of ammonia bunkering operations: Perspectives on different release scales,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 468, p. 133757, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.jhazmat.2024.133757.
 - 26) Kyung-Tae Moon, Paul Davies, and Louise Wright, “Ammonia as a marine fuel: likelihood of ammonia releases,” *J. Adv. Mar. Eng. Technol.*, vol. 47, no. 6, pp. 447-454, 2023, doi: 10.5916/jamet.2023.47.6.447.
 - 27) J. L. LaChance, W. G. Houf, L. Fluer, and B. Middleton, “Analyses to support development of risk-informed separation distances for hydrogen codes and standards.,” Sandia National Laboratories, doi: 10.2172/983689.
 - 28) K. M. Groth, J. L. LaChance, and A. P. Harris, “Early-stage quantitative risk assessment to support development of codes and standard requirements for indoor fueling of hydrogen vehicles.,” Sandia National Laboratories, doi: 10.2172/1057251.
 - 29) 木原 武弘・牧野 良次・小野 恭子・佐分利 禎・久保田士郎・恒見 清孝・和田 有司, “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*, vol. 56, no. 4, pp. 245-254, 2017, doi: 10.18943/safety.56.4_245.
 - 30) P. A. Davies and E. Fort, “LNG as a marine fuel: Likelihood of LNG releases,” *J. Mar. Eng. Technol.*, vol. 12, no. 3, pp. 3-10, Sep. 2013, doi: 10.1080/20464177.2013.11020285.
 - 31) 高圧ガス保安協会, “高圧ガス事故事例データベース.” 2023. [Online]. Available: https://www.khk.or.jp/public_information/incident_investigation/hpg_incident/incident_db.html
 - 32) J. Spouge, “New generic leak frequencies for process equipment,” *Process Saf. Prog.*, vol. 24, no. 4, pp. 249-257, Dec. 2005, doi: 10.1002/prs.10100.
 - 33) D. Spiegelhalter, A. Thomas, N. Best, and D. Lunn, “WinBUGS User Manual, version 1.4.” 2003.

- 34) K. Kellner and M. Meredith, “Package ‘jagsUI’: A wrapper around ‘rjags’ to streamline ‘JAGS’ analyses.” 2024. [Online]. Available: <https://kenkellner.com/jagsUI/>
- 35) International Association of Classification Societies (IACS), “No.146 (Aug 2016) Risk Assessment as Required by the IGF Code.” 2016. [Online]. Available: <https://iacs.org.uk/resolutions/recommendations/141-160>
- 36) US Chemical Safety and Hazard Investigation Board, “Key Lessons for Preventing Hydraulic Shock in Industrial Refrigeration Systems.” 2015.
- 37) 鈴木則夫, “高圧ガス保安法と液化石油ガス法,” 2017. [Online]. Available: <https://www.khk.or.jp/Portals/0/khk/info/journal/2018/201708-10.pdf>
- 38) 国立研究開発法人 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. [Online]. Available: <https://riss.aist.go.jp/results-and-dissemin/846/>
- 39) G. W. Mulcahy, D. M. Brooks, and B. D. Ehrhart, “Using Bayesian Methodology to Estimate Liquefied Natural Gas Leak Frequencies.” 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2172/1782412>
- 40) F. Kaneko and T. Yuzui, “A New Function for Frequency Analysis in the Risk Assessment of Offshore Oil-Related Platforms,” *J. Ship Res.*, vol. 67, no. 02, pp. 109-119, Jun. 2023, doi: 10.5957/JOSR.04210009.