

FLNGにおける極低温流体漏洩頻度解析

金湖富士夫*、柚井 智洋*、前田 健策**

Frequency Analysis of Cryogenic Fluid's Leakage on FLNG

by

Fujio KANEKO, Tomohiro YUZUI, Kensaku MAEDA

Abstract

Over 10 FLNG projects have been conducted in the world. As a part of engineering work, various safety risk analysis is regarded to have greater importance for FLNG because of its novel nature of technology and design. Among various kinds of hazards, leak of cryogenic fluid such as refrigerant or LNG is considered as a primary hazard as a source of flammable gas cloud which lead to fire and explosion, and as an initiator of brittle fracture of steel structure. In this JIP(Joint Industry Project) risk analysis considering that leak of cryogenic fluid causes the latter disaster was carried out and leak frequency of those cryogenic fluid at every equipment and process segment of the considered FLNG was estimated, before simulations of leakage of cryogenic fluid were carried out at a number of combinations of parameters which affect leakage of the fluid aiming at obtaining exceedance frequency of pool diameter. The members of the JIP were JGC corporation, Nippon Kaiji Kyokai, Nippon steel and Sumitomo metal, Japan Marine United and National Maritime Research Institute(NMRI). NMRI carried out the research on estimation of leak frequency of cryogenic fluid. The challenge to estimate cryogenic leak frequency for FLNG is that there is few leak frequency data available in public domain which can provide for appropriate risk analysis. Such data base as HCRD -Hydrocarbon Release Database by UK HSE - from conventional offshore oil & gas production facilities is available, on the other hand, the leak frequency from LNG related plant is said to be less than those. Therefore utilizing such data of UK HSE as the basis, NMRI attempted to apply valid adjustment on them from engineering point of view. This paper presents the leak frequency of cryogenic fluid from various process segment applying a new methodology developed for estimation of leak frequency. The results lead by the introduction of new CCDF was found satisfactory.

* 海洋リスク評価系、** 日揮株式会社
原稿受付 平成26年1月27日
審査日 平成26年3月7日

目 次

1. まえがき	2
2. 対象 FLNG について	3
3. 手法の概要	3
3.1 HCRD のデータの適正化	3
3.2 Equipment 毎の漏洩全体の頻度推定法	4
3.3 Equipment 毎の漏洩ホール径の超過頻度推定法	4
3.4 Process segment 毎の漏洩ホール径の超過頻度推定法	5
4. 対象 FLNG の漏洩頻度解析	5
4.1 Equipment 毎の漏洩ホール径の超過頻度と信頼区間	6
4.2 Process segment 毎の漏洩ホール径の超過頻度と信頼区間	7
5. 漏洩ホール径の超過頻度関数の基礎となる新たな超過確率分布関数	7
5.1 これまでの方法	7
5.2 新たな方法	8
5.2.1 パラメータの影響	9
5.2.2 べき乗分布の超過確率分布関数との比較	10
5.2.3 修正べき乗分布の累積確率分布関数	10
5.3 FLNG のために適正化された HCRD への適用	11
6. おわりに	11
謝辞	11
参考文献	11

1. まえがき

現在世界各地で 10 以上の FLNG プロジェクトが実施されている¹⁾。それらのプロジェクトではリスク解析を行い、得られたリスクが許容基準を満たすことを確認する。主要なハザードの一つとして LNG や冷媒等の極低温流体の漏洩があり、それによる被害として船体の脆性破壊が考えられる。ここでは極低温流体の漏洩のリスク解析を目的とし、一般財団法人日本海事協会、株式会社ジャパンマリンユナイテッド、新日鐵住金株式会社、日揮株式会社および当所による共同研究「LNG 向け極低温流体漏洩リスク解析と、アレスト設計の適用による脆化被害軽減策の検討」として調査研究を実施した。

まず、わかりやすさのため、本稿で頻出するプラント関連用語を以下に定義する。

・ **Equipment**: プロセス漏洩が発生しうる圧力容

器、ポンプ、バルブ、配管、計装品等の総称。

・ **Process segment**: 機器等で区切られる配管システムの一部で、代表的な温度、圧力、主な流体成分で区別される。

・ **Process module**: 複数のデッキで構成された、プロセス機器、配管等を含む機能単位の構造物。

本研究は FLNG における LNG 等の極低温流体が存在する equipment 毎および process segment 毎の漏洩頻度と漏洩ホール径の超過頻度を求めることを目的とした。他のメンバー団体の活動としては、液化ガスの二相流状態に於ける漏洩拡散の CFD シミュレーション、その結果と本研究で得られた process segment 毎の漏洩頻度を用いて、漏洩拡散後生成され得る、液溜まりの径の超過発生頻度の算出、新たに開発されたアレスト鋼と従来鋼を用いた、脆性破壊の伝播停止性能の比較試験の実施、さらに脆性破壊発生後、FLNG の稼働率に与える影響の簡易評価等が実施された。

LNG 関連施設は、石油掘削施設等のいわゆる dirty service と異なり参照可能な漏洩事故の記録が少なく、また、リスク解析で求められる漏洩頻度解析に必要な対象機器数×稼働年数、すなわち exposure も正確には得られない。日本では、高圧ガス保安法下で建設され、操業中の LNG 施設の事故データが高圧ガス保安協会により公開されているが、それらの事故に対応する exposure 情報は提供されていない。また、日本には他に、ガス事業法、電気事業法下で建設された LNG 施設があるが、それらについては事故情報さえ公開されていない。この状況は海外の液化基地でも同様である。したがって、現状では LNG 関連施設における LNG 等の極低温流体の漏洩頻度を推定するために、それらの施設における漏洩データを使用することは極めて困難であるため、FLNG における極低温流体の漏洩頻度解析のためには UK HSE (United Kingdom Health and Safety Executive) の HCRD (Hydrocarbon Release Database) を LNG に適合するよう調整して用いる以外に方法はない。

事実、オフショアの油・ガス生産設備からのデータを母体とする UK HSE の HCRD (以下、HCRD と略称する) を解析し、clean service である LNG の漏洩頻度を求めた文献がいくつか存在する^{2),3),4)}。また、LNG 関連施設の事故データを基にそれらの施設の漏洩頻度を推定した文献も存在する^{5),6)}が、equipment あるいは process segment 毎にデータを示しておらず、また、漏洩部分が限られていること等により、それらは直接的な本研究への活用には不十分である。

本研究ではそれらの文献を調査するとともに、

FLNGにおける極低温流体の漏洩頻度を推定する新たな方法を開発し、それを用いてFLNGの漏洩頻度解析を行った。

本稿では対象FLNGのequipment毎およびprocess segment毎の極低温流体の漏洩頻度を求める方法を概説するとともに、その方法に従って推定した幾つかのequipmentと1つのprocess segmentの極低温流体の漏洩頻度を示す。また、その過程において開発した漏洩ホール径の超過頻度を表す新たな関数について解説する。

2. 対象FLNGについて

本研究で頻度解析の対象として採用したのは、LNG生産能力としてベースロード規模3~5MTPA (Million Ton Per Annum)のFLNGである。このFLNGについて、極低温流体が流れるストリームをガス組成毎に分類し、さらに温度・圧力・気液比が大きく異なる箇所を区別しながら、機器やprocess module境界らで区切り、合計17種のprocess segmentを定義した。

対象FLNGのこれらprocess segmentを含むprocess moduleの3次元モデルを図-1に示す。

これらのmoduleに含まれる極低温流体は、大きく分類すれば約-30℃の予冷冷媒、約-110℃の液化冷媒、そしてプロダクトである-163℃のLNG、さらに、LPG分の分留で生産されるエタン(C2)の4種類である。予冷冷媒はほとんどが予冷moduleに、液化冷媒は液化moduleに最も多く存在する。プロダクトのLNGは液化moduleの中に設置される主熱交換器の塔頂から下流に限定して存在する。

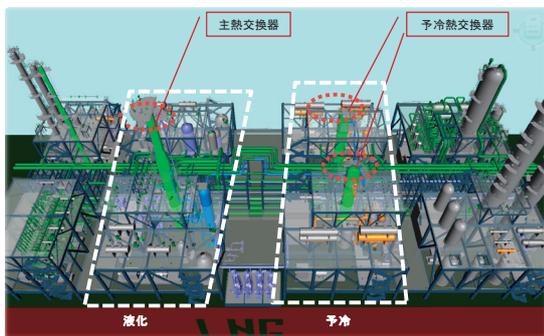


図-1 対象 process module 鳥瞰図

3. 手法の概要

FLNGの各process segmentにおける通常稼働

時の極低温流体の漏洩頻度を求めるために、下記の手続きを実施する。

- 1) HCRDのデータからFLNGに生じ得るデータのみ抜き出す。(以下、適正化と呼ぶ)
- 2) Equipment毎の漏洩ホール径の超過頻度関数を適正化されたHCRDの解析より求める。
- 3) Equipment毎の漏洩ホール径の超過頻度関数にequipment毎にprocess segment内のパーツカウントを乗じて総和を取ることにより、process segment毎の漏洩ホール径の超過頻度関数を作成する。

3.1 HCRDのデータの適正化

FLNGの漏洩頻度を推定するには、同種のLNG液化プラントからの事故情報で構成されたデータを本来使用すべきであるが、前述のように参照可能なデータは存在しないためHCRDを使用することにした。同データベースは、北海のUKセクターに位置する原油やパイプラインガスといったいわゆるdirty serviceを扱う設備からの事故情報を20年程度蓄積しているデータベースであり世界的な評価も高い。しかしながら本研究の対象はFLNGのいわゆるclean serviceと呼ばれる極低温部であり、HCRDが対象とするプラント設備とは本質的に特徴が異なるため、HCRDをそのまま使用することは適切ではないと考えられる。そのため、本研究では、LNG関連設備の特徴を考慮し合理的な範囲内でHCRDに適正化を施したデータを使用し、解析を実施した。

- (1) 2000年以降のデータを使用

図-2に年毎の事故数及び大口徑（漏洩ホール径が40mm以上）の事故数を示す。図-2より、近年は事故数が減少傾向にあること、また、大口徑事故は2000年以前と比較すると、2000年以降大幅に減少していることがわかる。

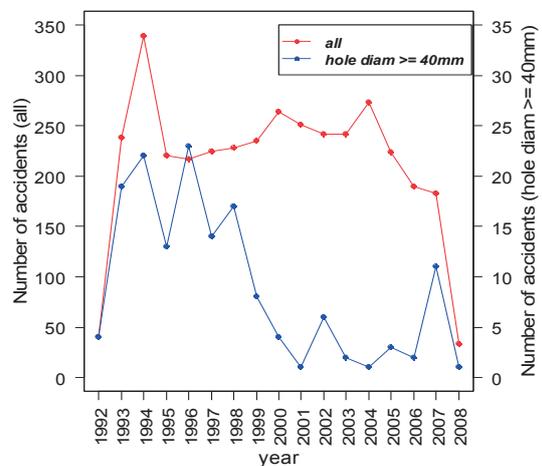


図-2 漏洩事故数の推移(UK-HSE HCRD)

これは、設備やマネジメント等が年代と共に改善されているためであると考えられる。そのため、本研究では、近年のトレンドを反映するために、2000年以降のデータを使用することとした。

(2) 事故原因が corrosion/erosion であるデータを除外

これは、LNG 等極低温サービスの液体は腐食性ではないこと、また外部からの腐食もほとんど無視しうるレベルとみなして良いと考えられるためである。

(3) 事故原因が human error であるデータで、かつ漏洩ホール径が 20mm 以上のものは、漏洩ホール径を 20mm として扱う。

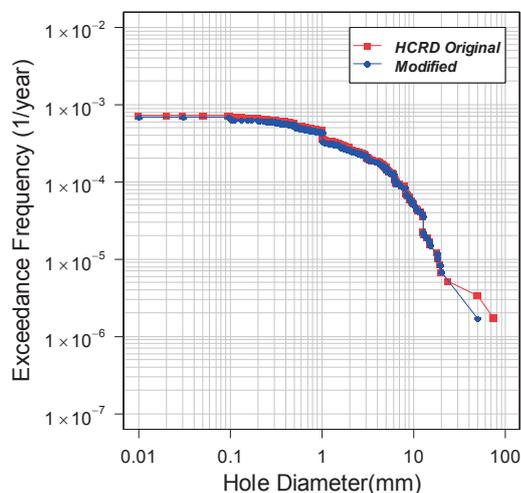


図-3 HCRD 適正化の結果
(INSTRUMENTS)

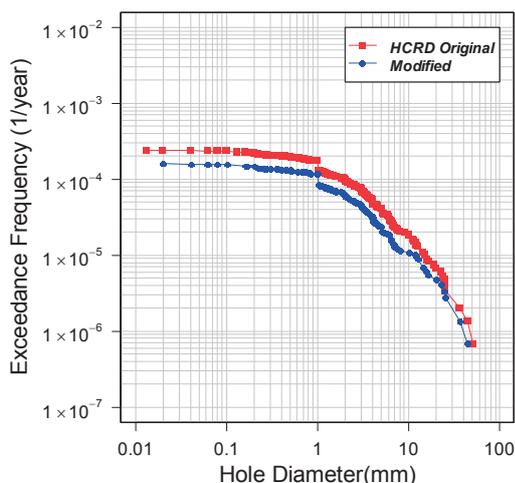


図-4 UK-HSE HCRD 適正化の結果
(PIPING / STEEL / D <= 3 (inches))

これは、実際の液化プラント内に設置されるバルブで、開放されるとそのまま液漏れに通じるバルブの最大径を調査したところ、コントロール弁や安全弁の取り外しの際使用される、3/4 インチのブリーダー弁が最大径であることが判明したため、human error で漏洩が起きる場合その最大径を 20mm と仮定したことによる。なお、ここでの human error による漏洩とは、機器には本質的に問題が無く、開放して放置したことにより発生した漏洩のことである。

2000年以降のデータについて、上記の適正化(2)、(3)を施す前のデータと適正化を施した後のデータのそれぞれから漏洩ホール径の超過頻度を求めた。ここでは一例として、2つの equipments について、それらの比較を示す(図-3、図-4)。図-3は、INSTRUMENTS は適正化(3)により最大漏洩ホール径が小さくなっていることを示している。一方、図-4は、PIPING / STEEL / D <= 3 (inches)は、適正化(2)により事故数が減少し、頻度が小さくなっていることを示している。なお、ここでの各種 equipment のサイズによる分類は HCRD における分類法に従っている。

なお、HCRD の漏洩ホール径は水力学的等価直径にて求めている。すなわち、A を漏洩ホールの断面積、p を漏洩ホールの縁の長さとする、漏洩ホール径は $4A/p$ となる。

3.2 Equipment 毎の漏洩全体の頻度推定法

対象のプラントの equipment (i) の exposure を ET_i [Equipment · Year]、同 equipment の対象期間中の事故数を N_i とすると、事故発生頻度 (λ_i) は N_i/ET_i [1/ Equipment · Year] として求めることができる。また、 λ_i の信頼区間は、危険率を α とすると、(1)式のようにして求められる。

なお、 $\chi_M^2(\beta)$ は自由度 M のカイ二乗分布の CDF で確率 β の確率変数の値である。

$$\frac{\chi_{2(N_i+1)}^2\left(1-\frac{\alpha}{2}\right)}{2E_{Ti}} \leq \lambda_i \leq \frac{\chi_{2(N_i+1)}^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{2E_{Ti}} \quad (1)$$

3.3 Equipment 毎の漏洩ホール径の超過頻度推定法

データから直接求める方法 ((2)式) と、5章に示す修正べき乗分布 ((3)式) より求める方法の 2通りにより推定した。

$$\bar{F}_i(x) = (\bar{\lambda}_i - \bar{F}_{i-rup}) \int_x^{D_{i\max}} \bar{f}_i(v) dv + \bar{F}_{i-rup} \quad (2)$$

$$F_i(x) = (\bar{\lambda}_i - \bar{F}_{i-rup}) \frac{x^{m_i} - D_{i\max}^{m_i}}{(a_i^{k_i} + (x^{m_i} - D_{i\max}^{m_i})^{k_i})^{\frac{1}{k_i}}} + \bar{F}_{i-rup} \quad (3)$$

(2)および(3)式で、

$\bar{F}_i(x)$: 対象プラントの equipment(i)の漏洩ホール径 x の超過漏洩発生頻度(データから求める)

$\bar{\lambda}_i$: 対象プラントの equipment(i)のすべての漏洩ホール径の漏洩ホール発生頻度(漏洩事故発生頻度: データから求める)

\bar{F}_{i-rup} : 対象プラントの equipment(i)の破裂頻度 (equipment(i)の最大径以上の漏洩ホール径の発生頻度: データから求める)

$D_{i\max}$: 対象プラントの equipment(i)の漏洩ホール径の最大値

$\bar{f}_i(v)$: 対象プラントの equipment(i)の漏洩ホール径 v の漏洩発生確率密度関数(データから求める)

m_i : べき乗則部分の両対数グラフでの傾き

a_i : べき乗則の部分を並行に上下させる定数

k_i : べき乗則の1に漸近する部分への過渡部分の鋭さに影響する定数

である。それらの意味については5章で詳述する。(1)式と(2)式より、 $F_i(x)$ の信頼区間は(4)式となる。

$$\frac{\chi_{2(E_{Ti} \cdot \bar{F}_i(x)+1)}^2 \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)}{2E_{Ti}} \leq F_i(x) \leq \frac{\chi_{2(E_{Ti} \cdot \bar{F}_i(x)+1)}^2 \left(\frac{\alpha}{2}\right)}{2E_{Ti}} \quad (4)$$

3.4 Process segment 毎の漏洩ホール径の超過頻度推定法

Process segment の漏洩頻度及び漏洩ホール径の超過頻度は、その process segment を構成するプラント機器種の漏洩頻度及び漏洩ホール径の超過頻度の総和として求められる。つまり、(5)式から推定される。しかし、process segment における漏洩事故は知られておらず、漏洩実績と(1)式から信頼区間を求められないため、超過漏洩頻度の信頼区間は(6)式で近似する。

$$F_{sj}(x) = \sum_{i=1}^{M_j} F_i(x) \times c_{ji} \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{M_j} \bar{F}_i(x) \times c_{ji} + Z \left(\frac{\alpha}{2}\right) \sqrt{\sum_{i=1}^{M_j} \frac{\bar{F}_i(x)}{E_T} c_{ji}^2} \leq F_{sj}(x) \leq \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^{M_j} \bar{F}_i(x) \times c_{ji} + Z \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \sqrt{\sum_{i=1}^{M_j} \frac{\bar{F}_i(x)}{E_T} c_{ji}^2}$$

(5)式および(6)式で、

$F_{sj}(x)$: process segment j の漏洩ホール径 x の超過漏洩発生頻度

M_j : process segment j に含まれる equipment の数

c_{ji} : process segment j に含まれる equipment i の個数

$Z(\alpha)$: 標準正規分布の CDF = α に対応する確率変数の値

である。

4. 対象 FLNG の漏洩頻度解析

以下、HCRD の解析により求めたパイプ、フランジ等の幾つかの equipment と process segment (No.11) の漏洩頻度を示す。

表-1 Segment (No. 11) の equipment の数

Equipment type	Dimension [inches] / type	Count
Flanges	<3	6
Instruments		2
Piping	2	15
Actuated, block valve	<3	3
Manual, check valve	<3	1

表-2 機器の漏洩頻度

Equipment type	Exposure [equipment years]	Number of Accidents	Frequency [1/year]	Frequency [1/year] (Lower limit)	Frequency [1/year] (Upper limit)
FLANGES / D <= 3	3,107,829	81	2.61×10 ⁻⁵	2.10×10 ⁻⁵	3.24×10 ⁻⁵
INSTRUMENTS	590,094	402	6.81×10 ⁻⁴	6.18×10 ⁻⁴	7.51×10 ⁻⁴
PIPING / STEEL / D <= 3	1,472,346	234	1.59×10 ⁻⁴	1.40×10 ⁻⁴	1.81×10 ⁻⁴
VARIOUS VALVES	124,359	11	8.85×10 ⁻⁵	4.99×10 ⁻⁵	1.58×10 ⁻⁴

表-1 は process segment (No.11)の equipment とそれらの数を示す。なお、以下で、 \bar{F}_{i-rup} は 0 とし、 D_{imax} はパラメータとして、適正化した HCRD データより(3)式のパラメータを同定する際に求めた。

4.1 Equipment 毎の漏洩ホール径の超過頻度と信頼区間

表-2 に equipment 毎の漏洩頻度と信頼区間を求めた結果を示す。VALVE ACTUATED / BLOCK / $D \leq 3(\text{inches})$ 及び VALVE MANUAL / CHECK / $D \leq 3(\text{inches})$ は事故数が少なかったため、同様に事故数が少なかった VALVE ACTUATED / BLOCK / $3 < D \leq 11(\text{inches})$ と VALVE MANUAL / CHECK / $3 < D \leq 11(\text{inches})$ と合計して漏洩頻度を推定した。なお、上限及び下限を推定する際の危険率 α は 5% とした。

表-2 より、FLANGES / $D \leq 3(\text{inches})$ 、INSTRUMENTS 及び PIPING / STEEL / $D < 3(\text{inches})$ は exposure が大きいため信頼区間が狭く、一方、VARIOUS VALVES は exposure が小さいため信頼区間が広いことがわかる。

データから求めた漏洩ホール径の超過頻度と信頼区間及び修正べき乗分布により推定した漏洩ホール径の超過頻度を図-5~図-8 に示す。

これらの図より FLANGES / $D \leq 3(\text{inches})$ と VARIOUS VALVES は修正べき乗分布による超過頻度の線が信頼区間の中にあるが、INSTRUMENTS と PIPING / STEEL / $D < 3(\text{inches})$ は修正べき乗分布による超過頻度の線が一部で信頼区間の外にあることがわかる。

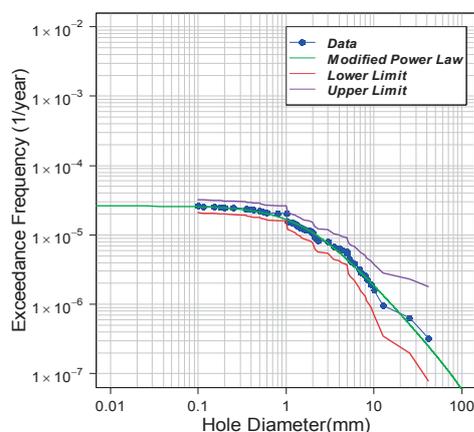


図-5 漏洩ホール径超過頻度
(FLANGES / $D \leq 3$)

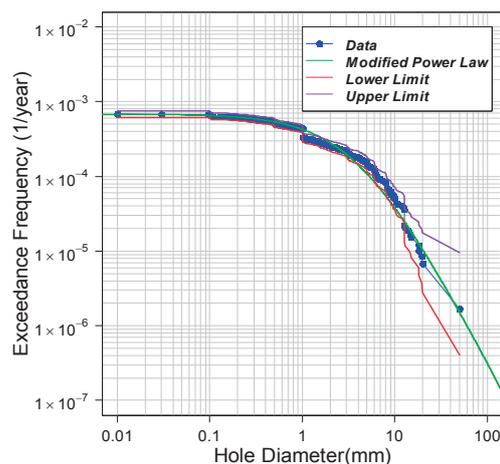


図-6 漏洩ホール径超過頻度
(INSTRUMENTS)

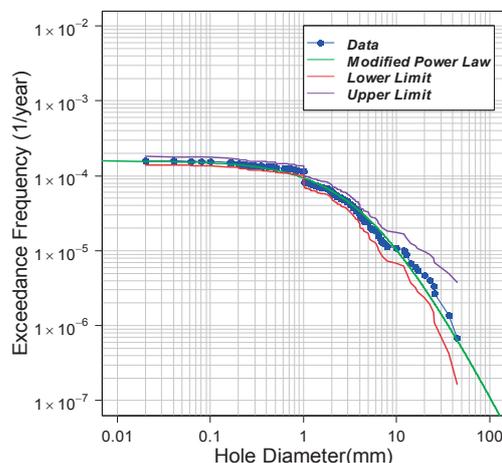


図-7 漏洩ホール径超過頻度
(PIPING / STEEL / $D \leq 3$)

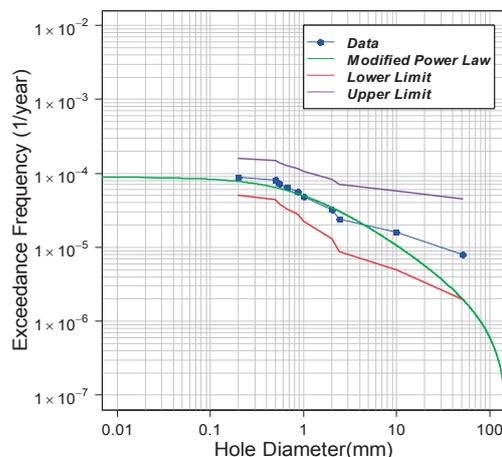


図-8 漏洩ホール径超過頻度
(VARIOUS VALVES)

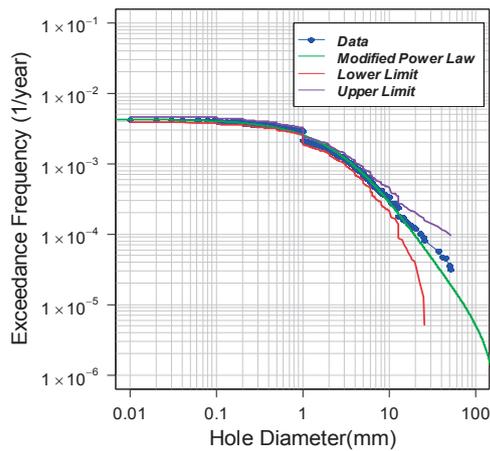


図-9 漏洩ホール径超過頻度 (Segment (No. 11))

漏洩ホール径= 1mm の周辺で修正べき乗分布が信頼区間の外に位置する理由は、漏洩ホール径= 1mm である事故数が他に比べて多いためである。これは、事故報告の際に漏洩ホール径を 1mm と丸めて報告することが多いためであると推測される。それにより、データから求めた超過頻度では、漏洩ホール径= 1mm で超過頻度が大きく減少するが、修正べき乗分布による超過頻度は滑らかに減少するので、漏洩ホール径= 1mm の周辺で修正べき乗分布が信頼区間の外に位置することになる。

また、図-8 では、漏洩ホール径が大きい箇所では修正べき乗分布がデータより求めた超過頻度をかなり下回っている。修正べき乗分布は両対数グラフでは変域のどの部分でも上に凸の線であり変曲点がなく傾きの絶対値は変域の値が大きくなるにつれて大きくなるが、図-8 の Various Valves の実績は漏洩ホール径が 2~4mm の辺りに変曲点があり超過頻度の傾きの絶対値が変曲点以降小さくなっている。このことと、全体としてデータとの乖離が小さくなるように最適化してパラメータを求めていることのため漏洩ホール径が大きいところで修正べき乗分布がデータを下回ることになると思われる。データから求めた信頼区間がある箇所では、修正べき乗分布は信頼区間内に入っていると言えるが、それ以外では何とも言えない。しかし、Various Valves の漏洩実績はかなり少ないため、データを加えることによりこの問題は解決するかもしれない。なお、両対数グラフにおいて変曲点を持つ超過頻度分布関数として対数正規分布があり、このような変曲点のある超過頻度の近似には有効かも知れない。しかし、後述するように漏洩ホール径に最大値が存在し、対数正

規分布はそれ以降使用できず、そこで強制的に 0 にするために得られる超過頻度関数はそこで不連続となる、という問題がある。したがって原理的に対数正規分布を用いることは不適切と思われるが、最大値未満の漏洩ホール径に対してより良い近似がなされれば、対数正規分布を使用することも考えられる。

4.2 Process segment 毎の漏洩ホール径の超過頻度と信頼区間

Process segment(No.11)の漏洩ホール径の超過頻度と信頼区間を推定した結果を図-9 に示す。ただし、(6)式で求める信頼区間の下限は、ある漏洩ホール径以上は負となるためその部分は図には示していない。

図-9 より修正べき乗則による超過頻度の線は、漏洩ホール径= 1mm の周辺以外では信頼区間の中に位置することがわかる。修正べき乗分布による線が漏洩ホール径= 1mm の周辺で信頼区間の外に位置する理由は、上述した理由と同様である。事故報告数が特別に多いところ以外は修正べき乗分布による超過頻度の線が信頼区間の中に位置するので、本研究で行った頻度解析は妥当であると考えられる。しかし漏洩ホール径が大きい箇所ではデータから得られる超過頻度を若干下回るためここで得られた修正べき乗分布により漏洩ホール径が大きいところでの漏洩頻度を推定する場合には注意が必要である。

5. 漏洩ホール径の超過頻度関数の基礎となる新たな超過確率分布関数

5.1 これまでの方法

これまで実施されたオフショア施設等における漏洩頻度の累積確率分布関数として用いられた関数として、最小漏洩ホール径を仮定したべき乗分布²⁾と対数正規分布⁴⁾がある。

DNV(Det Norske Veritas)では、漏洩事故を下記の3種類に分け、それぞれで漏洩ホール径の超過頻度を求めている²⁾。

- 1) Zero pressure leaks: Equipment内の圧力が0.01バール未満の漏洩。ドレインのような通常圧力が0の場合、また、保守時のように圧力を下げている場合の漏洩を想定している。
- 2) Limited leaks: Equipmentに圧力がかかっているが、ESD (Emergency Shut Down) や Blowdown 時の漏洩よりも大幅に漏れ量が少ない。不注意で開け放しになっていたバルブを閉める等のオペレータによる操作により限定された漏洩の

場合。

3) Full leaks: shutdown or blowdown により制御された通常稼働圧力における漏洩。

これらの場合の超過頻度の式の一般形は(7)式であり、DNVによる漏洩頻度関数とされている。

$$F(x) = f(D)x^m + F_{rup} \quad (7)$$

ここで、

$F(x)$: 漏洩ホール径がサイズ x を超える頻度 [1/year]

$f(D)$: D の漏洩頻度の差を表す関数

D : Equipment の直径 [mm]

x : 漏洩ホール径(最大値は D) [mm]

m : 傾きのパラメータ

F_{rup} : 追加破裂頻度 [1/year]

である。(7)式は以下の仮定に基づいている。

- 1) 漏洩ホール径のサイズと機器のサイズによる漏洩頻度の変化は滑らかになるべきである。
- 2) 漏洩ホール径のサイズの確率は equipment の直径に至るまで対数的に減少すべきである。
- 3) 漏洩ホール径のサイズと equipment の直径が等しい場合に追加される要素で、破裂(rupture)を表す。

(7)式を対象 equipment の漏洩事故全体の発生頻度で除すと同機器の超過確率分布関数(Exceedance Probability Distribution Function)あるいは相補累積確率分布関数(Complementary Cumulative Distribution Function)となり、その形はべき乗分布である。以後、超過確率分布関数を CCDF、累積確率分布関数(Cumulative Distribution Function)を CDF と略記する。CCDF(x)=1-CDF(x)である。

しかし、(7)式には以下に示す問題がある。

- 1) x の指数が負であるため、 x が小さくなるにつれて超過確率は大きくなる。しかし、超過確率は 1 を超えてはならないため、 x の最小値を仮定する必要がある。しかし、 x はいくらでも小さくなり得るので x の最小値を仮定することは実態を表していないと言える。
- 2) (7)式は漏洩ホール径の最大値を D とし、漏洩ホール径が equipment の直径を超える場合は、破裂として一定の確率を考慮しているが、漏洩ホール径が equipment の直径に近くなっても(7)式のべき乗部分は 0 にならないため、equipment の直径で超過頻度関数が不連続になる。超過頻度関数が不連続になると、equipment の直径で確率密度関数が発散するという不具合が生じる。

したがって、(7)式を equipment の漏洩事故全

体の発生頻度で除してできるべき乗分布の式は漏洩ホール径の CCDF の式としては不相当と思われる。

これ以外に、値の範囲が数桁に及ぶ確率変数の確率分布としては対数正規分布が用いられる場合が多く、漏洩ホール径でもそのような扱いがなされることがある⁴⁾。

データから対数正規分布を求める場合は、下記に示すモーメント法を用いることができる。

モーメント法とは、想定される確率密度関数から求められる平均、分散等のモーメント(積率)とデータから求められる平均と分散等のモーメントが等しいと置いて方程式を作成し、それを解いて確率密度関数のパラメータを求める方法である。

対数正規分布のパラメータを求める方法を下記に示す。対数正規分布の確率密度関数は式(8)で表される。

$$f(x) = \frac{1}{\alpha x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (8)$$

平均値($E(x)$)は式(9)で表される。

$$E(x) = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right) \quad (9)$$

分散($V(x)$)は式(10)で表される。

$$V(x) = \exp(2\mu + \sigma^2) \cdot (\exp(\sigma^2) - 1) \quad (10)$$

(9)式と(10)式から(11)式、すなわち対数正規分布のパラメータが得られる。

$$\begin{aligned} \mu &= \ln(E(x)) - \frac{\sigma^2}{2} \\ \sigma &= \sqrt{\ln\left(\frac{V(x)}{E(x)^2} + 1\right)} \end{aligned} \quad (11)$$

対数正規分布で漏洩ホール径の CCDF を近似する場合は、(7)式のようなべき乗分布で近似する場合の問題点の 1) を克服できるが、2) の問題、すなわち漏洩ホール径の最大値で強制的に CCDF を 0 にせざるを得ず不連続となる、という問題を克服することはできない。

5.2 新たな方法

以下に、べき乗分布と対数正規分布の問題を克服し、べき乗分布と一部ほとんど重なる新たな

CCDF を(12)式で定義する。(12)式の形の CCDF による確率分布を修正べき乗分布(Modified Power Distribution)と名付けることにする。

$$F(x) = \frac{x^m - D_{max}^m}{\left(a^k + (x^m - D_{max}^m)^k\right)^{\frac{1}{k}}} \quad (12)$$

(12)式ではパラメータが4つ(a, m, k, D_{max})ある。それらの意味は以下のとおり。

- a : べき乗則の部分の平行に上下させる
- m : べき乗則部分の両対数グラフでの傾き
- k : べき乗分布から1に漸近する部分への過渡部分の鋭さに影響する。

D_{max} : x の最大値であり、 $F(x)$ は x が D_{max} に近づくにつれ急速に0に近づく。

次に、それらのパラメータの影響を例題にて示す。なお、パラメータは調整データを用いて最尤法で定式化し最適化手法(Nelder-Mead 法)を用いて求める。また、(12)式の CCDF を用いて対象 equipment の漏洩ホール最大径未満の漏洩ホール径の超過頻度(すなわち破裂以外の漏洩時の漏洩ホール径の超過頻度)を、(12)式に漏洩ホール最大径未満の漏洩事故発生頻度を乗じ、それに漏洩ホール最大径以上、すなわち破裂時の発生頻度を加えることにより得ることができる。その式は(3)式である。

5.2.1 パラメータの影響

以下に、パラメータの影響を調べる。図-10～図-15は Mathematica を用いて作図しており、それらは両対数グラフである。

(1) m の影響

- $a = 1$
- $m = -0.7$ (青実線), -1.2 (緑点線), -1.7 (赤破線)
- $k = 2$
- $D_{max} = 1000$

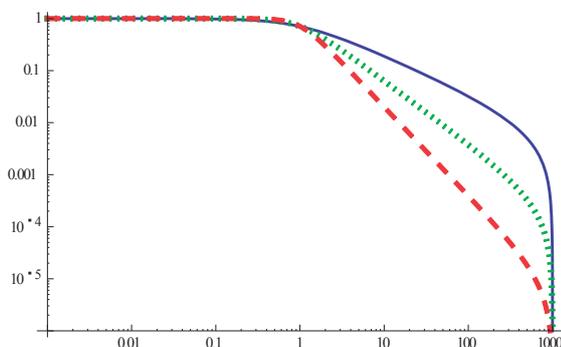


図-10 修正べき乗分布におけるパラメータ m の影響

とすると、図より明らかなように、 m は修正べき乗分布のべき乗部分の傾きに影響を与えることがわかる。 m の絶対値が大きくなるとべき乗部分の傾きは大きくなる。

(2) a の影響

- $a = 1$ (青実線), 10 (緑点線), 100 (赤破線)
- $m = -0.7, k = 2, D_{max} = 1000$

とすると、図-11より明らかなように、 a が大きくなるとべき乗分布の部分が下方に移動する。例えば、 a が10倍になると、べき乗部分が両対数グラフでは一桁下に下がる。

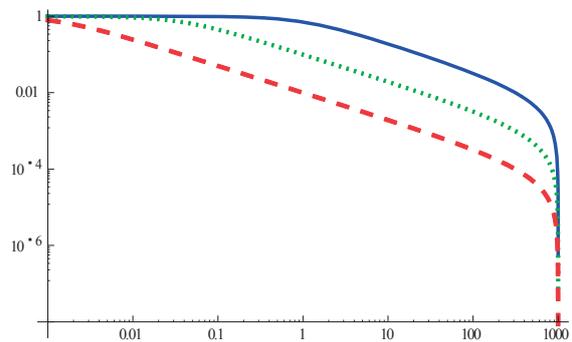


図-11 修正べき乗分布におけるパラメータ a の影響

(3) k の影響

- $a = 1$
- $m = -0.7$
- $k = 1$ (赤破線), 2 (緑点線), 10 (青実線)
- $D_{max} = 1000$

とすると、 k の違いにより図-12のように超過確率分布関数の形状が変化する。

図-12より明らかなように、 k が大きくなるとべき乗分布の部分から1に漸近する部分との間の遷移領域が狭く、その間の角度が鋭くなる。

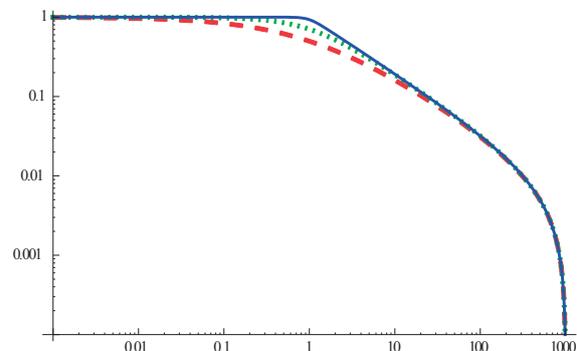


図-12 修正べき乗分布におけるパラメータ k の影響

(4) D_{max} の影響

$a = 1$

$m = -0.7$

$k = 2$

$D_{max} = 100$ (青実線), 1000 (緑点線), ∞ (赤破線) とすると、 D_{max} の違いにより図-13 のように超過確率分布関数の形状が変化する。

なお、 $D_{max} \rightarrow \infty$ の場合は、 $F(x)$ は(13)式となる。

$$F(x) = \frac{x^m}{(a^k + x^{m \cdot k})^{\frac{1}{k}}} \quad (13)$$

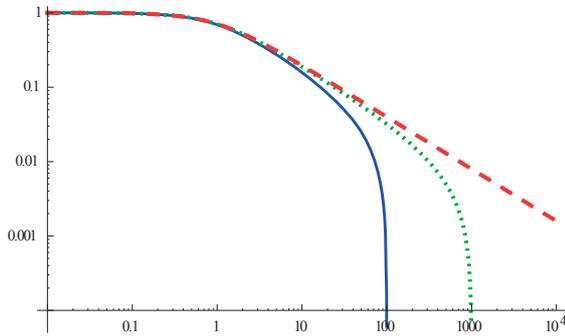


図-13 修正べき乗分布におけるパラメータ k の影響

5.2.2 べき乗分布の超過確率分布関数との比較

べき乗分布の CCDF ($G(x)$) は、式(14)のように表される。

$$G(x) = \left(\frac{x}{D_{min}} \right)^S \quad (14)$$

ここで、

D_{min} : x の最小値, $S < 0$

である。

なお、(15)式の x は D_{min} 以上で定義される。

また、(11)式で $x \gg 1$ の場合、 $a^k \gg (x^m - D_{max}^m)^k$

であるため、(15)式となる。

$$F(x) = \frac{x^m - D_{max}^m}{a} \quad (15)$$

(15)式で、 $D_{min} = a^{\frac{1}{m}}$ と置くことにより、 $D_{max} \rightarrow \infty$ とした修正べき乗分布の超過確率分布関数(13)式において、 a^k が a^{mk} より実質的に 0 とみなされる程度に

大きい場合、修正べき乗分布と(14)式のべき乗分布とは $m = s$ の場合、重なることになる。また、 D_{max} が有限値の場合は一部が重なる。このことは図-14からも明らかである。図-14では、青実線が修正べき乗分布($a = 10, m = -0.7, D_{max} = 1000, k = 10$)で、赤破線がべき乗分布($s = m = -0.7, D_{min} = a^{\frac{1}{m}} = 10^{\frac{1}{0.7}}$)である。また、図-14では比較のためにべき乗分布の超過確率分布関数が 1 以上となる部分も図示した。

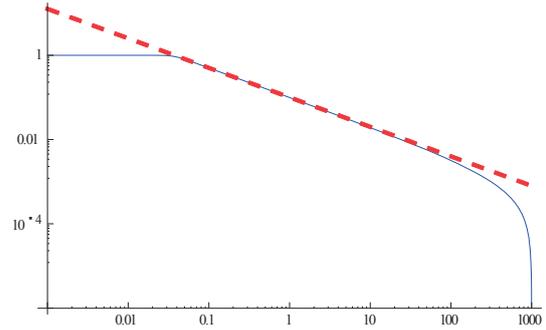


図-14 べき乗分布関数と修正べき乗分布関数との関連

5.2.3 修正べき乗分布の累積確率分布関数

次に、CCDF が式(7)で表される確率変数の CDF を考慮する。同関数は(16)式で表される。

$$G(x) = 1 - F(x) = 1 - \frac{x^m - D_{max}^m}{(a^k + (x^m - D_{max}^m)^k)^{\frac{1}{k}}} \quad (16)$$

次に、 $G(x)$ の $x \ll 1$ の箇所について考慮する。(16)式のままでは式の変形が困難なため、確率密度関数($g(x)$)を作成すると(17)式のようになる。

$$g(x) = \frac{dG(x)}{dx} = -\frac{a^k \cdot m \cdot x^{m-1}}{(a^k + (x^m - D_{max}^m)^k)^{\frac{k+1}{k}}} \quad (17)$$

$x \ll 1$ の場合、 x^m は D_{max}^m, a^k と比べて値が大きいとみなされるため、(17)式は(18)式で近似可能である。

$$g(x) = -a^k \cdot m \cdot x^{-1-mk} \quad (18)$$

(18)式を積分して CDF($H(x)$)を求めると(19)式となる。

$$H(x) = -\int_0^x a^k \cdot m \cdot y^{-1-mk} dy = \frac{a^k}{k} x^{-mk} \quad (19)$$

H(x)は両対数グラフにすると傾き $-m \times k$ の直線(m が負のため、 $-m \times k$ は正である)となるため、 $x \ll 1$ の場合、 $G(x)$ は $H(x)$ が示す直線に漸近することが予想される。図-15に $G(x)$ を青実線、 $H(x)$ を赤破線で描画する。なお、それらにおいて、 $a=10$ 、 $k=2$ 、 $m=-0.7$ 、 $D_{max}=1000$ である。

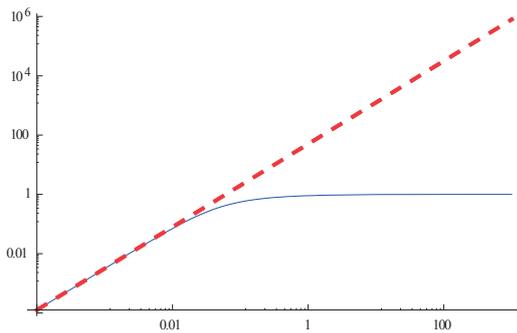


図-15 修正べき乗分布の CDF と漸近線

図-15 より明らかな用に、修正べき乗分布の CDF は原点を通り傾き $-m \times k$ の直線に漸近する。

5.3 FLNG のために適正化された HCRD への適用

HCRD の適正化データに修正べき乗分布を適用した結果を以下に示す。

図-16に、適正化データより作成された CCDF、それを対数正規分布で近似した CCDF、そして修正べき乗分布で近似した CCDF を両対数グラフにて示す。なお、修正べき乗分布のパラメータを求める際には、適正化データの CDF の $x < 1$ の部分の両対数グラフの傾きが $-m \times k$ であることを利用して非線形最適化手法の1つである Nelder-Mead 法を用いた。図-16より、CCDFにおいては対数正規分布も修正べき乗分布も $x > 1$ ではほぼ一致しており、この場合はデータの CCDF として両者とも実質的に適当と思われる。

図-17に適正化データより作成された CDF、それを対数正規分布で近似した CDF、そして修正べき乗分布で近似した CDF を両対数グラフにて示す。図-17より、CDF では修正べき乗分布は適正化データとほぼ一致しており、対数正規分布に比べて近似が良いことがわかる。これらの図より修正べき乗分布は漏洩ホール径の取りうる値全体で良い近似を示すと言える。このことは他の大半の機器でも確認されており、修正べき乗分布は

漏洩ホール径の統計的性質を十分に表現できると言えよう。

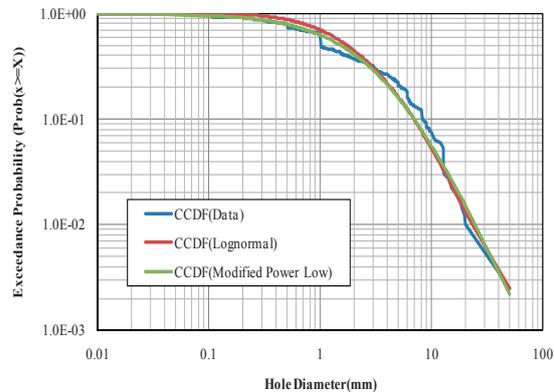


図-16 データから求めた CCDF と修正べき乗分布および対数正規分布による CCDF の近似

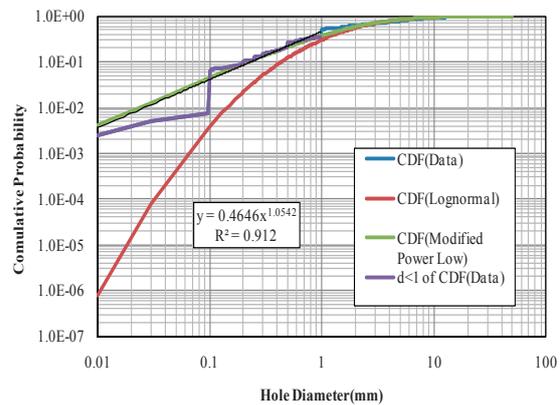


図-17 データから求めた CDF と修正べき乗分布および対数正規分布による CDF の近似

また、修正べき乗分布は、最大値が明らかに存在して CCDF がべき乗分布で近似できるが、最小値が仮定できない種々の確率変数の確率分布のより良い近似となる可能性がある。なぜなら、べき乗分布では確率変数の最小値を仮定しなければならず、また、最大値が考慮できないからである。

6. おわりに

衝突等の外部的要因は除き、オフショア施設の通常オペレーションによる漏洩を仮定した FLNG における漏洩頻度推定法を構築するとともに対象 FLNG の漏洩頻度解析を行った。ベースとなったのは UK HSE の HCRD であり、これは石油掘削施設等の現状のオフショア施設で標準的に用いられてい

る漏洩データベースのため、本研究で開発した手法はそれらの施設すべてに適用可能である。また、不確実さ解析も実施し、得られた LNG の漏洩の超過頻度がデータから得られる 95%信頼区間内に収まることが示された。残念ながら LNG 施設の漏洩データは統計解析には不十分なものであるため使用できなかったが、今後それらの施設の漏洩データが統計解析に耐えうる程度に蓄積された場合にはそれを用い、ベイズ推定を行うことになる。

これまで漏洩データの解析の際には、漏洩ホール径の超過頻度関数として Spouge によるべき乗分布近似、あるいは対数正規分布近似が用いられてきたが、データから得られる CCDF の解析には不十分と思われるため、修正べき乗分布関数を作成し、それによる CCDF の近似を行い良好な結果を得た。すなわち、べき乗部分における良好な一致のみならず、漏洩ホール径が小さい場合の 1 への漸近部分、漏洩ホール径最大値近辺の大幅な確率の低下を表現することができる。また、ここで開発した修正べき乗分布関数は、FLNG 等の LNG 施設だけでなく、大多数のオフショア施設の漏洩の CCDF を求める際にも使用可能と思われる。

さらに、これまでべき乗分布で確率分布を近似している多くの分野で修正べき乗分布がより良い近似として用いられる可能性がある。

謝 辞

本研究は、株式会社ジャパンマリンユナイテッド、新日鐵住金株式会社、日揮株式会社、独立行政法人 海上技術安全研究所、そして一般財団法人 日本海事協会との共同研究体制により研究を実施するとともに、日本海事協会の「業界要望による共同研究」のスキームにより研究支援を受けて実施しました。関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) JOGMEC: フローティング LNG への期待と最近の動向, 石油・天然ガスレビュー, Vol.49, No.5, 2013/9/20, pp.73-82. <http://oilgas-info.jogmec.go.jp/>
- 2) Spouge, J. : New Generic Leak Frequencies for Process Equipment, Process Safety Progress, Vol.24, No.4, 2005, pp.249-257.
- 3) OGP: Process release frequencies, Report No.434-1, 2010.
- 4) Lilleaker Consulting a.s.: FLNG leak frequency study, 2010.
- 5) Acton, A. et al.: LNG incident identification - A compilation and analysis by the international LNG importer's group, Paper PS7-3.
- 6) Willams, A. : Reduction of LNG operator error and equipment failure rates, Report of Gas Research Institute, 1990.