

参照した国内外のデータベースの説明です

HPI では国内外の事故・損傷・故障などに関わる約 40 の公開されたデータベースを調査しました。その中で、GFF データ作成に関係が深い破損頻度データを提供している 7 つのデータベースを対象にしました。

表 1 GFF データベース作成において参照した 7 つのデータベース

No.	名称	機関	発行
A	OREDA(Offshore and Onshore Reliability Data) 6th Edition	DNV ノルウェー	2015
B	API RP581 Risk-Based Inspection Methodology, 3rd Edition	API 米国	2016
C	Failure frequency guidance, Process equipment leak frequency data for use in QRA	DNV ノルウェー	2012
D	Handbook Failure Frequencies	Flemish オランダ	2009
E	HSE, Failure Rate and Event Data for use within Risk Assessments	HSE イギリス	2012
F	故障件数の不確実さを考慮した国内一般機器故障率の推定(1982 年度～2010 年度29 カ年56 基)	原子力安全 推進協会	2016
G	石油コンビナート等防災アセスメント調査報告書(広島県)(千葉県)(神奈川県)など	消防庁	2015

表 2 各データベースの抽出した機器分類とデータ数

No.	種別	名称	分類	機器 分類数	抽出 データ数
A	推奨 FF	OREDA	型式・容量	>260	722
B	暫定 GFF	API RP581	孔径・寸法	10	129
C	推奨 FF	DNV Failure frequency guidance	孔径・寸法	12	864
D	推奨 FF	Flemish Handbook Failure Frequencies	タンク種別・配管	12	96
E	推奨 FF	HSE Failure Rate and Event Data	容器・輸送貯槽	22	157
F	推奨 FF	原子力	ポンプ・発電機・弁	80	177
G	推奨 FF	石油コンビナート等	危険物・ガス・タンク	6	23

(注) FF(破損頻度) GFF(一般破損頻度)

その中から、表 2 に示すデータを抽出しました。この中から、特に関係するデータをさらに抽出し、“HPI-GFF 推奨値データベース”を作成しました。

それぞれのデータベースは、母集団の分布を推定して、さらに信頼区間を設定してデータの信頼度を提示しています。また、漏洩について孔径との関係を重視しています。(表 3)

表 3 各データベースの母集団の推定、データの信頼区間の設定など

データベース	特徴的な解析方法の抜粋 (GFFデータの信頼度)																
OREDA 2015	90%信頼区間 χ^2 -分布の95%・5%信頼限界 ・複数データ(各データが、平均値と90%信頼区間(最小最大)を有する場合)の解析方法																
DNV Leak Frequency	$F(d) = Cd^n + F_{rup}$ F =(孔径d以上の)容器・基当たりの漏洩頻度、 C , n =孔径分布を表わす定数、 F_{rup} =容器・基当たりの追加破断頻度、 d =孔径 <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th>シナリオ</th> <th>C</th> <th>n</th> <th>F_{rup}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>漏洩全量</td> <td>1.80E-03</td> <td>-0.43</td> <td>1.00E-04</td> </tr> <tr> <td>全漏洩</td> <td>5.00E-04</td> <td>-0.38</td> <td>0.00E+00</td> </tr> <tr> <td>ゼロ圧</td> <td>4.30E-04</td> <td>-0.18</td> <td>0.00E+00</td> </tr> </tbody> </table>	シナリオ	C	n	F_{rup}	漏洩全量	1.80E-03	-0.43	1.00E-04	全漏洩	5.00E-04	-0.38	0.00E+00	ゼロ圧	4.30E-04	-0.18	0.00E+00
シナリオ	C	n	F_{rup}														
漏洩全量	1.80E-03	-0.43	1.00E-04														
全漏洩	5.00E-04	-0.38	0.00E+00														
ゼロ圧	4.30E-04	-0.18	0.00E+00														
Flemish	<ul style="list-style-type: none"> 破損頻度=破損発生回数/延稼働時間、平均値および99%信頼限界(破損可能性、漏洩による破損、崩壊の3モード) 漏洩サイズ、破損数、破損頻度、99%信頼限界(最小、最大) 																
原子力	<ul style="list-style-type: none"> 一般破損頻度 ・階層ベイズモデル(事象・サイズを一致させた超事前分布) ・マルコフ連鎖モンテカルロ(確率分布、超事前分布の99%信頼限界および標準偏差).....RStan 																
石油コンビナート	(石油コンビナートの防災アセスメント指針) <ul style="list-style-type: none"> 災害発生危険度(確率的安全評価) by ETA ETAにおける事象分岐確率評価(防災設備の作動失敗) by FTA 																

(添付資料) 各 DB の詳細説明

OREDA (2015)

OREDA は著名なデータベースであり、1981年～2017年 (Phase 1～Phase 12)の間、参加機関から設備・機器の故障・破損データの提供を受け、それぞれの故障頻度データを解析し公表している。現在の参加企業は、BP Exploration Company Ltd, ConocoPhillips Skandinavia AS, Eni S.p.A Exploration Production Div. ExxonMobil Production Company, Gassco, Shell Global Solution UK, Statoil ASA, Total S.A.の8社である。取りまとめ・販売をDNV GL社が行って

いる。データ解析・作成は SINTEF (ノルウェー産業科学技術研究所)および NTNU (ノルウェー科学技術大学)が実施し表 4 に示す 1965 ユニットの機器データ収録されている。

表 4 OREDA(2015)に収録されている機器の種類

大分類	中分類	小分類	全ユニット数 (2015年版)
機械類	圧縮機	遠心圧縮機、レシプロ圧縮機、・・・・・・	47
	ガスタービン	航空機転用型、工業用、・・・・・・	28
	ポンプ	遠心型(様々な適用別)、レシプロ型(様々な適用別)、・・・・	157
	内燃機関	ディーゼルエンジン(非常用、マテハン、防火用水)、・・・・	45
	膨張タービン	ガス輸送、ガスプロセス、・・・・	4
	蒸気タービン	多段式(冷却システム、基盤駆動)、単式・・・・	4
電気設備	発電機	非常用(発電量別)、基盤用、防火用水、主電力・・・・	34
	モータ	圧縮機、ポンプ用、・・・・	91
	バッテリーおよび非常用電源	スタンドバイ用、非常用、・・・・	6
構造設備	熱交換器	板型、容器および伝熱管・・・・	43
	容器	各種容器・・・・	55
	加熱器およびボイラ	各種加熱器およびボイラ・・・・	10
制御および安全設備	火災・ガス検知器	火災、HC ガス、煙、燃焼、発火、・・・・	391
	入力装置	流れ、レベル、圧力、温度、・・・・	337
	演算装置	非常停止用、プロセス制御、プロセス遮断、・・・・	10
	弁(適用コード)	ボール型、ゲート型、口径別・・・・(種類多数)	703
	弁(分類コード)	ボール型、ゲート型、口径別・・・・(種類多数)	
ユニット総計			1965

表 5 OREDA(2015)におけるデータ項目(抜粋)

項目	データ項目1	データ項目2	データ項目3	データ項目4	データ項目5
対象数	機器数	設備数	—	—	—
階層化(一例)	大分類(機械)	中分類(圧縮機)	小分類(遠心型)	機能分類 (例 蒸気タービン用)	—
故障モード	全故障モード	致命的(Critical)	劣化型(Degraded)	初期故障(Incipient)	不明
故障モード詳細分類	外部漏洩	内部漏洩	過熱	振動	その他
集計時間	カレンダー時間 (起動から停止までの累積時間)		運転時間 (定格運転の累積時間)		
故障回数	故障回数	—	—	—	—
故障率	最小	平均	最大	標準偏差	単一サンプル故障率
補修時間	平均	最大	—	—	—
人工時間	平均	最大	—	—	—

データ項目(抜粋)を表 5 に示す。特にシステムの階層化を重要視しており、機器・機械のタイプ、容量、寸法などを詳細に分類してデータ整理を行っている。故障モードとして、全故障モード、致命的故障、劣化型故障、初期故障、その他に分類している。故障頻度データの基本(故障頻度の母数)となる運転時間は、カレンダー時間(起動から停止までの累積時間)および正味の運転時間(定格運転の時間)を適用し、さらにその間のメンテナンス時間、人工

時間などのデータも集計している。ここでは“複数サンプルデータ(Multi-sample problem) に関する解析法を採用して、 χ^2 分布を仮定し平均値、95%5%信頼限界、標準偏差、変動係数などを計算してデータの信頼性を保証している。

API RP581 ver.3, 2016 (Risk-based Inspection Methodology)

これは、API RBI 規格として世界的に普及している。リスクを定義する2つの因子、破損発生確率と破損影響度の内、破損発生確率 (PoF, Probability of Failure)の定義として以下が示されている。

$$\text{PoF} = \text{GFF} \times \text{DF (損傷係数)} \times \text{FM (管理システム係数)}$$

GFF (Generic Failure Frequencies) は、機器別(圧縮機、熱交換器、配管(サイズ別)、ポンプ、タンク、容器/フィン・ファン)に孔径(Small, Medium, Large, Rupture, Total)毎に、API RP581 ver.3 “ Table 3.1”として記載されている。データソースは必ずしも明確ではない。

DNV Failure Frequency Guidance

本データベースは、QRA(Quantitative Risk Analysis, 定量的リスク評価)による設備の安全性評価のために解析されたものである。EU ではセベス指令(各国の信頼性手法に基づく設備安全の法規導入の勧告、参加は54カ国)に関して多くの国でこのような解析を行っており、その関係から DNV がガイダンスを発行したものである。HSE(後述)が有する20年間での約4,000の事例データを用いて解析し、プロセス設備における78の異なったタイプの機器に対し漏洩量・漏洩速度を基準に機器のサイズ、漏洩孔のサイズ毎に故障頻度を計算している。

機器の種類として、遠心圧縮機、レシプロ圧縮機、フィルター、フランジ、フィン式熱交換器、プレート式熱交換器、熱交シェル側、熱交伝熱管側、プロセス配管、遠心ポンプ、レシプロポンプ、弁などが含まれている。

Flemish Handbook

Flemish Handbook では引用データ文献を基に、表6に示した内容から故障頻度の統計的な信頼限界を含めた妥当性の議論も含んでいる。標準偏差モデルでは漏洩と瞬間的放出とい

う両極端な現象を 10 分以内のホールドアップ放出、10 分以内の全量放出、破裂などの状態に分け破損頻度の算定が行われている。

表 6 Flemish データベースの内容

設備	種別	調査設備数	期間	母数	発生件数
加圧タンク	プロセス機器	20,000 基	1962~1978	310,000 基・年	漏洩・破裂 46 件
	貯蔵、タンクローリー、タンク貨車	統計的な裏付けは明示されていないが、破損頻度がプロセス機器の 10 分の 1 になるとされた。			
可搬圧力容器	ガスボンベ<150L	10,000,000 本	1977~1984	—	74 件
	圧力容器 (1 m ³ 以下)	統計的な裏付けは明示されていないが、破裂の破損頻度がガスボンベに等しく、漏洩の破損頻度はその 10 倍になるとされた			
常圧タンク	浮き屋根	2,420 基	1981~1995	33,909 基・年	シエル漏洩 96 件、屋根溢れ・沈降 92 件
	固定屋根	—	—	3,241 基・年	漏洩 8 件
結果として統計的根拠が脆弱なため浮き屋根タンクのデータから算出					
タンク火災	浮き屋根	2,420 基	1981~1995	33,909 基・年	57 件
	固定屋根	100,000 基	1969~1977	—	270 件
チューブ熱交	シエル漏洩開孔径 < 50mm	531 基	—	1,194 基・年	61 件
		4 プラント	—	5,950 基・年	10 件
	シエル破裂 瞬間的破損及び開孔径 < 150mm	統計データなく、Delphi Method による推算			
	チューブ漏洩	(具体的統計元データの提示・議論はない)			
チューブ破裂	(具体的統計元データの提示・議論はない)				
プレート熱交	—	474 基	—	2,300 基・年	—
ポンプ	—	—	—	3,252 基・年	730 件
コンプレッサー	—	—	—	2,256,000 基年	漏洩：遠心 16 レシ 102
配管システム	プロセス配管	(具体的統計元データの提示・議論はない)			
	地下ガス配管	—	1970~2007	3,150,000 km・年	1,172 件
	液送パイプライン	—	1971~2006	800,000 km・年	448 件
ローディング・アーム／ホース	タンクローリー、タンク貨車、貨物船	(具体的統計元データの提示・議論はない)			
	LPG ホース	(具体的統計元データの提示・議論はない)			
倉庫火災	—	—	1976~1987	36,192 棟・年	351 件(当局の報告値)
パッケージ取扱・保管	取扱	—	1993~2006	3,752,094 個・回	98 件
	保管	—	—	1,277,361 個・年	35 件
制止システム	逆止弁など	(具体的統計元データの提示・議論はない)			
派生災害	—	設備の破損頻度ではなく、取扱物質の性状(沸点や発火点など)による着火・爆発の確率を議論			

HSE (Health Safety Executive), Failure Rate and Event Data for use within Risk Assessments, 2012, UK

各種設備・作業における故障頻度 (Failure Rate) と災害の取り扱い (Event Data)、ならびに人的ミス (Human Factor) に関する 3 章で構成され、ほとんどは以下に示す故障頻度に関する記述である。

- ・各種設備条件や破損形態に応じた故障頻度の提示

- ・当該故障頻度の選定経緯や補足条件などの記述 (Derivation)
- ・当該故障頻度の出典 (Reference)
- ・特殊要件におけるデータに関する記述 (Failure Rate Advice)
- ・当該設備に関する故障頻度等を記述しているその他の文献 (Bibliography)

事象データ(Event Data)においては、飛行機墜落、洪水、落雷が取り上げられているが、飛行機墜落のみ墜落頻度としての具体的数値と破損頻度への適用方法の提示、洪水については個別問題、落雷については地域と防護設備要件の影響が大きいとして計算手法のみ提示している。表 7 は、故障頻度の計算における対象設備の階層化および漏洩孔径を示している。

表 7 HSE データベースにおける機器階層化と開孔径毎の故障頻度の定義

大分類	中分類	小分類	タイプ	詳細	
機械	容器	常温常圧容器	450m ³ 以上の大規模容器	放出タイプ(破壊、大、小、屋根)	
			450m ³ 未満の中小規模容器	可燃・非可燃,放出(破壊、大、小),孔径別	
		低温常圧容器	一重殻・二重殻の別	放出タイプ(破壊、大、小、蒸気噴出)	
			450m ³ 以上の二重殻低温LNGタンク	放出タイプ	
			200m ³ 以上の低温液化酸素タンク	シングル・クラスタータイプの別×放出タイプ(破壊、大、小) 孔径別	
		圧力容器	破裂箇所(3種:上、中、下)	孔径(50, 25, 13, 6mm) 災害外部要因	
			塩素圧力タンク	特殊要件の有無+孔径(50、25、13、6mm)	
			LNG圧力タンク	冷・熱破裂(BLEVE)+孔径(50、25、13mm)	
			球形タンク	破裂(上、中、下)+孔径(50、25、13、6mm)	
		加圧化学反応器	破壊として熱暴走の可能性の別	(3既知、有、皆無)+孔径(50、25、13、6mm)	
	付属機器	付属機器では、液滴にならない程度の孔(<50μm)からのスプレーの発生頻度が加わる			
		バルブ	制御動作不良(4種)	軸からのスプレー	
		ポンプ	ケーシング割れ	タイプ別スプレー(シングル、ダブル)	
		ホース/カップリング	安全対策(1種、2種(平均)、複合)	開孔径(切断、15、5mm)+スプレー	
フランジとガスケット		ガスケットの種類別	2種:開孔径は厚み等から計算+スプレー		
	直径1000mm以下の配管	配管径別(5分類)	孔径(3、4、25mm、径1/3、切断)+スプレー		
電気			参考文献のみ		
大量輸送	パイプライン	埋設管	数値無し。故障頻度はモンテカルロ法で計算する		
		地上高1.5m以下	長さ1m当たりの故障頻度	破損形態別(破裂、大、小、ピンホール)	
		コンプレッサー	圧縮方式(2種)	破損形態別(破裂、大、小、ピンホール)	
	タンカー	タンカー型容器(ISOタンカー)	圧力安全弁の有無(2種)	孔径(50、25、13、4mm)+蒸気放出	
		タンクローリー	当該容器を落とした場合を想定-落下高<5m(50mm開孔)+落下高>5m(破壊、50mm開孔)+タンク上への落下(50mm開孔)		
			深刻な事故として(1種)		
	船舶輸送	荷揚げアーム	LPGタンクローリーにおけるBLEVE	地域特質(小タンク群、大タンク群)	
禁接触物質輸送			管理レベル別(低度、普通、高度)		
		タンク貨車	参考文献のみ		
可搬貯槽		1m ³ ドラム	取り扱い物質性質(液体、ガス)、ドラムの開孔(大、小)、配管、バルブや接合部の破断、カップリングの装着・脱着時のエラーなどの12種のケース		
		200~220Lドラム	参考文献のみ		
		ポンベ	参考文献のみ		
		中型コンテナ(IBC)	参考文献のみ		
		小型コンテナ	参考文献のみ		

故障件数の不確実さを考慮した国内一般機器故障率データベース

原子力施設情報公開ライブラリー(NUCIA)の確率論的リスク評価(PRA)用データベースに掲載されている国内原子力発電所の機器員数情報、故障件数、露出(稼働)データ等に基づき、国内一般機器故障率の推定結果を報告すると共に、その推算方法およびその妥当性評価結果を詳しく記述している。この故障率推定については、原子力安全推進協会が集計し 2009 年に 1982 年度～2002 年度の 21 年間、49 基を対象に公表して以降、対象期間、設備数の拡大と推定手法の改善をしながら 3 回の改版を重ね、本稿では、1982 年度～2010 年度の 29 年間、56 基を対象としている。対象は、非常用発電機、ポンプ、熱交、タンクなどの大型機器から、安全弁など配管機器、各種センサー、スイッチなどの制御用機器やケーブルまで、原子力発電所を構成する機器全般に及んでいる。故障モードは、起動失敗、継続運転失敗または誤作動などの機械的故障や内外部への漏洩などの設備破損である。常時稼働している機器については、時間故障頻度が算出され、安全弁などの必要に応じて動作する機器については、デマンド故障率が算出されている。

データ収集頻度、データ収集頻度自身の不確実性、時間故障率における個別プラント故障率の分布、母集団変動分布、デマンド故障率に関する個別プラント故障率、母集団変動に関する分布を考慮してデータ収集の不確実性へ対応している。表 8 は、タービン駆動ポンプ、電動弁の時間故障率データの一例である。

表 8 時間故障率データの一例

機種		タービン駆動ポンプ		電動弁(純水)				
故障モード		起動失敗	継続運転失敗	作動失敗	誤開 又は誤閉	閉塞	外部リーク	内部リーク
観測された故障件数 [件]		29	12	31	0	2	1	2
延べ運転時間 [h]		9742176	11585892	1319467466	1319467466	1319467466	1319467466	1319467466
故障率 事前情報	平均値 [1/h]	9.0E-06	1.6E-03	1.3E-06	3.4E-08	1.9E-06	3.3E-08	1.0E-07
故障率 推定結果 (対数正規分布)	μ *1	-11.93	-12.49	-17.11	-19.49	-18.23	-19.20	-18.71
	σ *1	0.51	0.38	1.07	0.64	0.44	0.61	0.53
	平均値*2 [1/h]	7.5E-06	4.0E-06	6.6E-08	4.2E-09	1.3E-08	5.5E-09	8.7E-09
	5%ile値*2 [1/h]	2.9E-06	2.0E-06	6.3E-09	1.2E-09	5.8E-09	1.7E-09	3.1E-09
	中央値*2 [1/h]	6.6E-06	3.7E-06	3.7E-08	3.4E-09	1.2E-08	4.6E-09	7.5E-09
	95%ile値*2 [1/h]	1.5E-05	7.0E-06	2.2E-07	9.9E-09	2.5E-08	1.2E-08	1.8E-08
	σ_{FF} *3	2.3	1.9	5.9	2.9	2.1	2.7	2.4

石油コンビナート等防災対策検討会、神奈川県石油コンビナート等 防災アセスメント調査報告書 2015.3 その他、千葉県、広島県など

防災アセスメントは、消防庁を中心として各県が管轄の石油コンビナートの災害発生頻度(危険度)を解析したもので、公表されている。対象施設に対し平常時(地震時、津波時を除く)を対象にした災害発生危険度(発生頻度)を計算し、その結果を基に重要度の高い災害事象を対象とした影響度(影響範囲)を推定している。災害発生危険度(発生頻度)の推定は次の手順に従っている。対象設備は、危険物タンク(屋外タンク貯蔵所)、ガスタンク(可燃性ガスを貯蔵したガスタンク、高圧ガス貯蔵又はガスホルダー)、毒性ガスを貯蔵した高圧ガスの貯蔵、毒物液体タンク、プラント(危険物、高圧ガス製造設備、発電設備)、海上出入荷設備(石油、LPG、LNGを取り扱うタンカー設備)、パイプライン(事業所間を結ぶ石油または高圧ガスの導配管)である。初期事象の発生頻度として、付属配管の損傷等による漏洩、タンク本体の破損等による漏洩、タンク屋根の揺動による漏洩を設定している。発生頻度の単位は、災害発生頻度(件/年)である。

災害シナリオは、ETA(イベントツリー解析)、FTA(フォールトツリー解析)により計算し分岐事象としては、漏洩から操作ミス(消火の失敗、緊急遮断設備の操作の失敗、元バルブの操作の失敗、内容物移送の失敗)による火災発生を想定している。予想される災害は、危険物タンク(流出火災、毒性ガス拡散、タンク火災)、ガスタンク(可燃性ガス火災、毒性ガス拡散)、プラント(製造施設)(可燃性物質火災、毒性物質拡散)、プラント(発電施設)(可燃性物質の流出・火災)、海上入出荷設備(可燃性物質の流出・火災)、パイプライン(可燃性物質の流出・火災)である。表9に計算結果の一例を示す。

表9 石油コンビナートの災害発生頻度(千葉県の一例)

施設	災害事象		災害発生頻度(件/年) 京葉臨海部			
			北部	中部	南部	
危険物 タンク	流出火災	小量流出・火災	6.7E-04	1.7E-02	1.2E-04	
		中量流出・火災	2.4E-03	1.1E-02	7.3E-06	
		仕切堤内流出・火災	3.9E-08	9.9E-05	対象施設なし	
		防油堤内流出・火災	1.2E-04	3.9E-04	8.1E-07	
		防油堤外流出・火災	1.5E-08	4.4E-08	3.9E-11	
	タンク火災	タンク小火災/リム火災	7.7E-04	3.1E-03	5.2E-06	
		リング火災	対象施設なし	5.1E-05	対象施設なし	
		タンク全面火災	8.5E-05	4.9E-04	5.7E-07	
	毒性ガス拡散	小量流出・拡散	対象施設なし		2.7E-04	対象施設なし
		中量流出・拡散			2.4E-04	
		仕切堤内流出・拡散			1.5E-08	
防油堤内流出・拡散		1.9E-05				
防油堤外流出・拡散		2.1E-09				
ガス タンク	爆発火災	小量流出・爆発火災	6.3E-05	6.2E-03	3.7E-04	
		中量流出・爆発火災	2.4E-06	4.8E-04	1.4E-05	
		大量流出・爆発火災	4.5E-08	1.2E-04	2.6E-07	
		全量流出・爆発火災	1.8E-06	6.3E-05	1.0E-05	