2020年度 JPECフォーラム

リスクアセスメントの再実施に 基づく設備構成に関する研究開発

2020年5月8日

一般財団法人石油エネルギー技術センター 水素エネルギー部 横浜国立大学



本検討の位置づけ

規制改革実施計画

(2017年6月9日閣議決定)

No.38 水素スタンド設備に係る技術基準の見直し

最新の知見を踏まえ、水素スタンドのリスクアセスメントを事業者等が有識者及び規制当局の協力を得て再実施するとともに、当該リスクアセスメントの結果に基づき、水素スタンド設備に係る技術基準の見直しを検討し、結論を得た上で、必要な措置を講ずる。



NEDO委託事業

超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業/国内規制適正化に関わる技術開発/本格普及期に向けた水素ステーションの安全性に関わる研究開発

② リスクアセスメントの再実施に基づく設備構成に関する研究開発

報告内容

- 1. はじめに
- 2. リスク目標の設定
- 3. 水素ステーションモデルの作成
- 4. リスクシナリオ抽出
- 5. 機器の漏洩頻度データに基づく定量的リスクアセスメント(QRA)
- 6. 機器故障頻度や事象の発生頻度データに基づく定量的リスクアセスメント
- 7. まとめ

1. はじめに

前回RAの上に立脚した「再」リスクアセスメント(RA)

該リスクアセスメントの結果に基づき、水素スタンド設備に係る技術 基準の見直しを検討し、結論を得た上での必要な措置※

措置に対する議論・調整等

安全の確保と設備構成・運用の合理化の両立を指向した 技術基準案の策定

「再」リスクアセスメント (定量的なリスク算定)

一般則 第7条の3に基づいた「実際に運用されている」 商用水素STを一般化したモデル

商用水素STの建設・運用(約70箇所)

一般則 第7条の3(水素STに対する唯一の技術基準) 及び例示基準

法制化に対する議論・調整等

前回のリスクアセスメント

実証ST、想像をベースとした「商用水素STモデル」

今回のNEDO事業 「超高圧水素インフラ 本格普及技術 研究開発事業」 2018年~

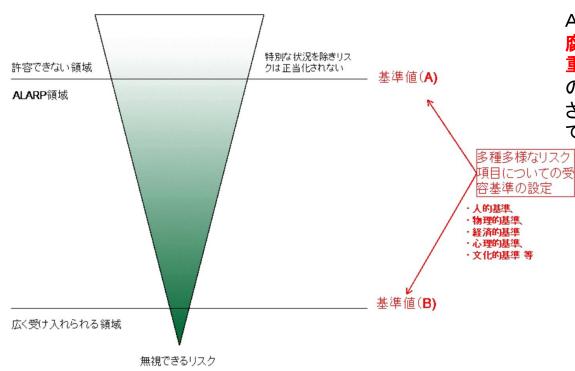
一般高圧ガス保安規則 (圧縮水素スタンドに係る 技術上の基準) 第7条の3

過去のNEDO事業 -「水素社会構築共通 基盤整備事業」 2005年~2009年

2. リスク目標の設定

日本学術会議が提案する「工学システムに対する社会の安全目標」

*日本学術会議総合工学委員会・機械工学委員会合同工学システムに関する安全・安心・リスク検討分科会,工学システムに対する社会安全目標の基本と各分野への適用,2017



A基準:プラントの設計起因・機器故障・破損・ 腐食・作業操作人的ミス等の内的事象による 重大事故の発生確率を10-6/年以下。地震等 の自然災害に関しては、致命的な事故を発生 させないための設備や体制をとり、テロに対し ては近隣住民の避難時間を確保する。

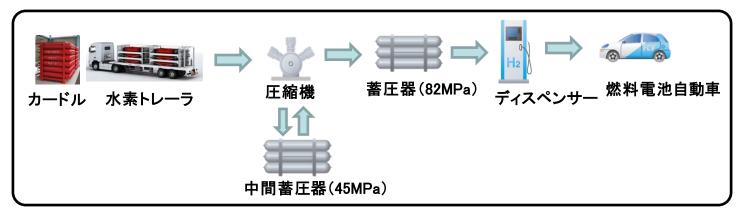
B基準:プラントの設計起因・機器故障・テロ・ 自然災害等あらゆる原因事象に関して、事故 発生シナリオとして明らかな重大事故の発生 確率を10-6/年以下。

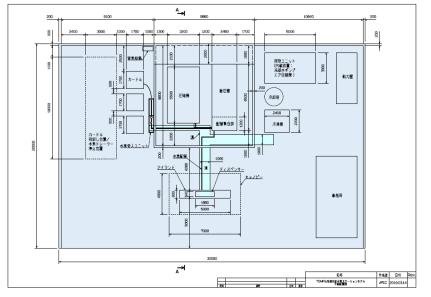
重大事故には、社会・経済・環境等へのリスク を含める。

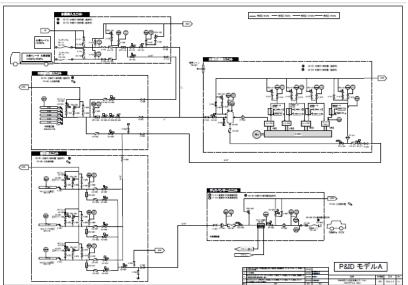
本検討では、上記の二つの安全目標(A基準、B基準)を判断基準として、 リスクアセスメントを実施した。

3.水素ステーションモデルの作成

リスクアセスメントの対象とする水素ST設備について、その仕様・配置・運転方法等、RA検討に必要な情報を明確化するため、水素STモデル(P&ID等の図面・資料)を作成した。







4. リスクシナリオ抽出

水素ステーションモデルの設備に発生しうるリスクシナリオとして、約250件を抽出した。

- (1) リスクシナリオ抽出の手法について
 - HAZOP
 - FMEA
 - 手順HAZOP (カードル/トレーラ着脱作業)

- (2) リスクシナリオ抽出検討時の前提について
 - HAZOP、FMEAにあたっては、

『水素STモデルに記載されている各種安全対策(安全弁、逆止弁、圧力異常インターロック、温度異常インターロック、等)は機能しない』

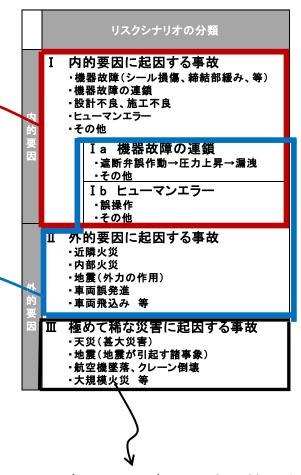
という前提で行った。

- ※ 理由:水素STの潜在的な危険要因を漏れなく洗い出すため
- ※ 今後のリスク評価では、「安全対策なしベース」、「安全対策ありベース」の双方の 条件下でのリスク評価を行う予定。

リスクシナリオ分類とRA解析手法

本検討では、二種類の手法を用いてリスクアセスメントを実施した。

- ① 機器の漏洩頻度データに基づく定量的リスク アセスメント(QRA)
 - 内的要因に起因する各種の事故全体を対象に、漏洩要因を問わず、リスクを総括的に評価
 - 機器の漏洩頻度データを基に漏洩頻度を設定
- ② 機器故障頻度や事象の発生頻度データに基 **~**づく定量的リスクアセスメント
 - QRAで評価しきれない水素ステーション特有の リスクシナリオについて、シナリオ毎に個別に リスクを評価
 - 漏洩に繋がるトリガー(機器故障、ヒューマンエラー、地震、等)の頻度データを基に、事故進展防止対策の有効性を加味して漏洩頻度を算出



シビアアクシデント対応の検討を 2020年度に実施予定

5. 機器の漏洩頻度データに基づく定量的リスクアセスメント (QRA)

QRA: Quantitative Risk Assessmentとは?

広義のQRA: リスクを定量化し、リスク基準と比較する取り組み全て

狭義のQRA:プラントシステム等に対する 一連のシステマティックなリスク定量化方法

(*プラント建設時のリスク評価手法として海外では広く利用)

本プロジェクトで採用するのは狭義のQRA



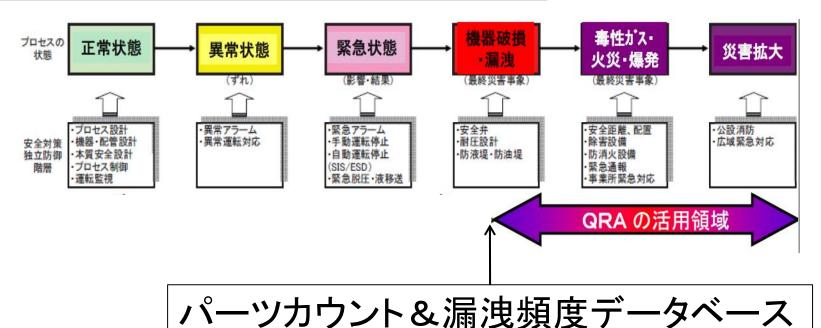
TNO:Purple book

QRAの特徴と注意点

- ・原因フリーでリスク定量化できる <u>"データベース(統計)に反映されている"</u>原因のリスクを**定量化**
- ・通常のオペレーションに絡むリスクは評価可能
- ・ヒューマンエラー、大規模災害等によるリスクが抜け落ちる可能性がある QRAとは別にリスク評価が必要である。(QRA。の限界)

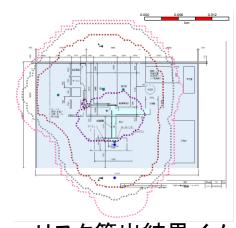
5.1 QRAの方法

QRA: Quantitative Risk Assessmentの構造



漏洩頻度例

Component	Release size	μ	σ	Mean (Calculated)
	0.01%	-5.18	0.17	5.71×10^{-3} 7.50×10^{-4} 9.92×10^{-5} 4.13×10^{-5} 1.49×10^{-5}
	0.1%	-7.27	0.40	7.50×10^{-4}
Valves	1%	-9.68	0.96	9.92×10^{-5}
	10%	-10.32	0.68	4.13×10^{-5}
	100%	-12.00	1.33	1.49×10^{-5}



リスク算出結果イメージ

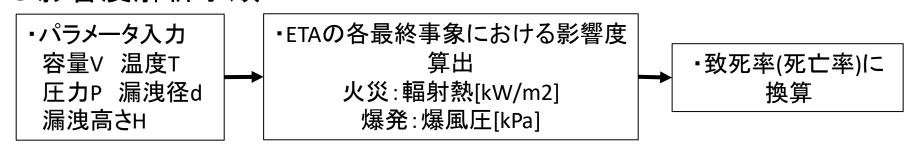
QRA方法

〇頻度設定方法

米国Sandia report(2017)*に準拠

*水素STに特化したQRA手法

○影響度解析手順



○その他の(可変)条件

気象条件・人口

大気安定度:D ・ユニット代表機器の位置

風速:1.5m/s etc. •着火源位置 etc.

○解析ソフトウェア

DNV社 PHAST-Safeti ver 8.11

PHAST:影響度計算ソフト,計算コード/モデル

Safeti:統合リスク評価ソフト名

■存在する機器の種類・漏洩サイズ・損傷頻度

出典:Sandia report(2017)

分類番号	損傷機器	サイズ	頻度	
1		Very Small	1.83E-01	
2	圧縮機	Minor	2.23E-02	
3	_	Mideum	8.01E-03	
4	Compressors	Major	2.06E-04	
5		Rapture	3.04E-05	
6		Very Small	1.18E-06	
7	蓄圧器	Minor	9.98E-07	
8		Mideum	6.80E-07	
9	Cylinders	Major	3.90E-07	
10		Rapture	2.09E-07	
11		Very Small	3.77E-02	
12	フィルター	Minor	1.60E-02	
13		Mideum	1.44E-02	
14	Filters	Major	6.87E-03	
15		Rapture	6.94E-03	
16		Very Small	7.86E-02	
17	フランジ	Minor	4.82E-03	
18		Mideum	2.72E-03	
19	Flanges	Major	3.74E-05	
20		Rapture	1.55E-05	
21		Very Small	1.15E-03	
22	ホース	Minor	2.06E-04	
23		Mideum	1.79E-04	
24	Hoses	Major	1.60E-04	
25		Rapture	7.47E-05	

分類番号	損傷機器	サイズ	頻度	
26		Very Small	7.05E-05	
27	継ぎ手	Minor	3.56E-06	
28	1,1,1	Mideum	7.80E-06	
29	Joints	Major	6.96E-06	
30		Rapture	6.21E-06	
31		Very Small	8.78E-06	
32	配管	Minor	4.57E-06	
33		Mideum	1.80E-06	
34	Pipes	Major	9.12E-07	
35		Rapture	6.43E-07	
36		Very Small	5.71E-03	
37	バルブ	Minor	7.50E-04	
38		Mideum	9.92E-05	
39	Valves	Major	4.13E-05	
40		Rapture	1.49E-05	
41		Very Small	8.31E-04	
42	計器類	Minor	2.78E-04	
43		Mideum	1.73E-04	
44	Instruments	Major	1.84E-04	
45		Rapture	1.11E-04	

5. 2 QRA検討結果(一次検討)

【現行備えられている安全対策機器】

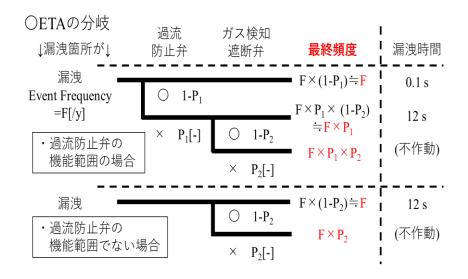
・緊急遮断弁 (ガス検知器+火炎検知器)・過流防止弁

【モデル化】

次に定められた条件で機能し、漏洩流量をゼロとする

	PFD[-]	作動時間	<i>比</i> 私 久 <i>从</i>	2182
	Probability of Failure on Demand	[s]	作動条件	引用元
ガス漏洩検知器&遮断弁	3.34E-02	12	・対策なし時の漏洩継続時間>作動時間	OREDA
			・対策なし時の漏洩継続時間>作動時間	
過流防止弁	5.90E-05		・充填時最大流量(0.03kg/s)の	
			3倍以上の流量で確実に作動	

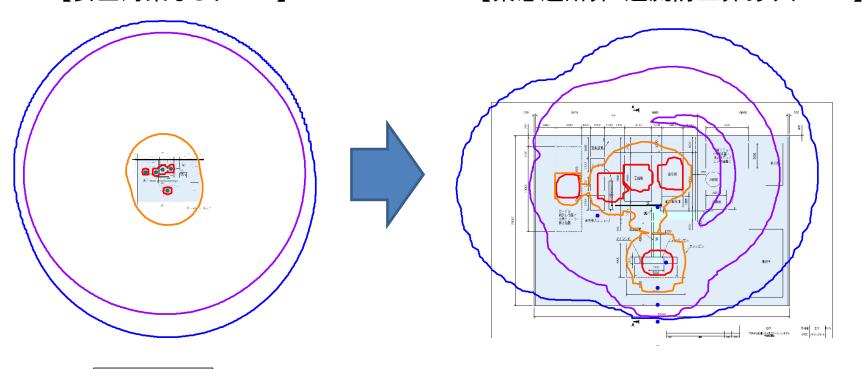
*ただし、過流防止弁は設置された上流の漏洩には効果がないものとする



■ 水素ステーションモデル(トレーラ45MPa・モデルA)の リスク計算結果(リスクコンター図)

【安全対策なしケース】

【緊急遮断弁・過流防止弁ありケース】



赤:10⁻³人/y 橙:10⁻⁴人/y

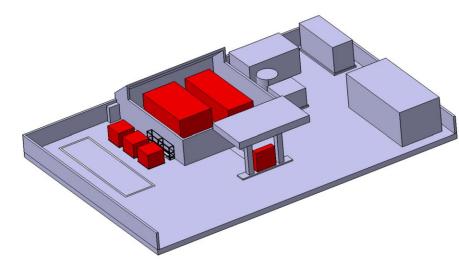
紫:10⁻⁵人/y 青:10⁻⁶人/y

14

5.3 QRA検討結果(二次検討)

一次検討の結果、水素STモデル敷地外にリスク>1×10⁻⁶の範囲が及んだため、 以下のような二次検討を行った。

- (1) 障壁・防火壁の効果の検討
 - 敷地境界上の障壁等の効果を 考慮した、三次元の影響度計算
 - 計算コード: FLACS
 - ※一次検討のPHAST-Safetiは、構造物を考慮しない 二次元計算



水素ステーションの3Dモデル

- (2) 圧力損失を加味した漏洩量計算と再QRA
 - 動的・物理モデルに基づく漏洩量数値計算 (Simulation-X)の実施
 - 計算結果を元にリスク再計算(再QRA)

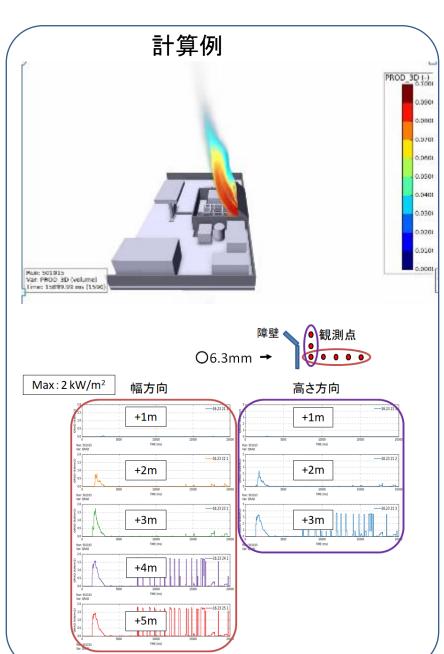
(1) 障壁・防火壁の効果の検討

Jet Fireによる熱影響の3次元数値計算を実施し、 障壁外側における輻射熱を評価した。



≪評価結果≫

- 蓄圧器等の設備から漏洩した水素に着火し Jet Fireが形成された場合、開口がφ6.3mm の配管全破断のケースであっても、現行技 術基準準拠の障壁により敷地外部への熱影響は無いことが確認された。
- H= 2mの防火壁の場合、Jet Fireが防火壁上に乗り上げるため、リスク低減効果は小さい。



(2) 圧力損失を加味した漏洩量計算と再QRA

動的・物理モデルのシステムシミュレーション・ツール(Simulation-X)を用い、水素ステーション系内の圧力損失を考慮した漏洩量計算を実施した。

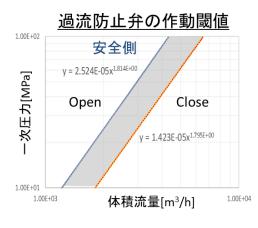


≪検討結果①≫

- 蓄圧器~ディスペンサーの間で、漏洩箇所と開口径を変化させて 漏洩流量を計算した。
- ディスペンサー手前の配管破断時の漏洩流量は、圧力損失の影響で、蓄圧近傍の配管破断時の1/3程度となることを確認した。

≪検討結果②≫

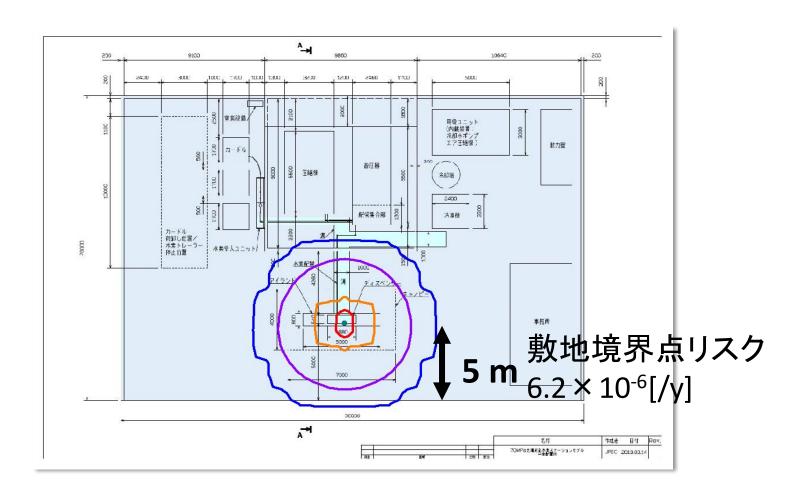
■ 過流防止弁は、配管全破断時には確実に動作するが、開口径が ф2.0mmでは動作しないことを確認した。



過流防止弁の作動確認結果

上流圧[MPa]	6.3mm	2.0mm	0.63mm	
82.0	動作	動作/動作 せず	動作せず	
65.6	動作	動作せず	動作せず	
49.2	動作	動作せず	動作せず	

前コマの≪検討結果①≫、≪検討結果②≫を取り込んで、水素ディスペンサーからの漏洩リスクをQRAにて再計算した。



5. 4 QRA検討のまとめ

過流防止弁/ガス検知器/障壁・防火壁の適切な組み合わせから構成される水素ステーションでは、敷地境界における内的事象起因のリスクを、おおむね 10⁻⁶ (学術会議のエ学システム安全目標A基準)以下に低減できていることが明らかになった。

*内的事象:プラントの設計起因・機器故障・破損・腐食・作業操作人的ミス等

6. 機器故障頻度や事象の発生頻度データに基づく 定量的リスクアセスメント

QRAで評価しきれない水素ステーション特有のリスクシナリオについて、 シナリオ毎に個別にリスクを評価した。

- □ 機器故障の連鎖のリスクシナリオ (例:圧力計故障→圧力上昇→漏洩)
- □ ヒューマンエラーに起因するリスクシナリオ
- □ 火災、地震、車両誤発進等の外的要因に 起因するリスクシナリオ

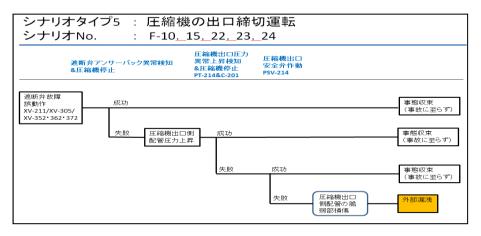
「QRAで評価しきれない」とは?

- ✓ 漏洩に至る前に事故進展を防止する対策がはかられるリスクシナリオ
- ✓ Sandiaの漏洩頻度データベースによらず、個別に漏洩頻度を評価することが 適当なリスクシナリオ

6.1 イベントツリー作成

▶ リスクシナリオ毎にイベントツリーを作成し、トリガーとなる初期事象発生後の事象進

展を整理した。



- 事故の発生と進展に関わる可能性データの整理
 - □ 機器故障の発生確率 :機器故障率データベースの時間故障率(/y)を使用
 - □ 誤操作の確率 : ヒューマンファクターに関わるデータベース(NUREG/CR-1278)の 値を使用
 - □ 外乱、地震などの確率 : 各種情報から推算
 - □ 安全対策の動作失敗確率:安全対策機器が、必要になった時に正常に機能しない確率(/D(デマンド))を、機器故障率データベースを使用して求めた。

参照した機器故障率データベースは以下の2種類

- ◆ 国内原子力発電所のデータ
- JANSI-CFR-02「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 ヵ年56 基データ)」 一般社団法人 原子力安全推進協会、2016年6月発行
- ◆ 北海油田プラットフォームのデータ
- OREDA 2015 (Offshore and Onshore Reliability Data)

6.2 リスクシナリオ毎のリスク算定

- 各リスクシナリオに対し、リスク観測点(ディスペンサー側敷地境界)における個人リスクを、PHAST/Safetiを用いて算出した。
- リスク算出結果
- 機器故障の連鎖のリスクシナリオ
 - 該当する全てのリスクシナリオにおいて、リスクは1×10⁻⁶/年を優に下回る値であった。
- □ ヒューマンエラーに起因するリスクシナリオ
 - 該当する大部分のリスクシナリオにおいて、リスクは1×10⁻⁶/年を優に下回る値であった。
 - 4件のリスクシナリオのリスクが、1×10⁻⁶/年を上回った。 → 次コマ参照
- □ 火災、地震、車両誤発進等の外的要因に起因するリスクシナリオ
 - 該当する全てのリスクシナリオにおいて、リスクは1×10⁻⁶/年を優に下回る値であった。

〔リスク>1×10⁻⁶/年〕の4件のリスクシナリオ

• ヒューマンエラーに起因する4件のリスクシナリオのリスクが、1×10⁻⁶/年を上回った。

シナリオ No.	リスクシナリオ	初期事象 発生確率(/y)	安全対策	最終事象 発生確率(/y)	観測点の個人 リスク(/y)
HB2	ホース(HO102)とトレーラロ金接続部の締結不良。継手接続部からの連続漏洩。	7.30 × 10 ⁻¹	無し	7.30 × 10 ⁻¹	1.3 × 10 ³
НА6	V103(ベントライン)誤開放。 カードル水素のベントラインからの連続放出	7.30 × 10 ⁻¹	無し	7.30 × 10 ⁻¹	1.8 × 10 ⁵
HB5	V104(ベントライン)誤開放。 トレーラ水素のベントラインからの連続放出	3.65 × 10 ⁻¹	無し	3.65 × 10 ⁻¹	3.9 × 10 ⁻⁴
HD3	水素圧縮機運転中にV217(ベントライン)誤開放。 圧縮機出口ベントラインからの連続漏洩。	2.0 × 10 ⁻³	無し	2.0 × 10 ⁻³	2.2 × 10 ⁻⁶

しかし、以下の諸点を総合的に判断して、これらシナリオのリスクは大きくないと判断できる。

- (1) ソフト的安全対策が本評価では考慮されていない
- (2) 可能性評価の精度
 - 本評価のヒューマンエラー頻度(7.30×10⁻¹/y、3.65×10⁻¹/y)は、国内水素STの運転実績から判断して、過大に見積もっていると考えられる。
- (3) 影響度評価上の保守的な前提
 - 本評価では、放出水素量計算における「手動弁誤開放」時の流路を、Φ3.2mmのオリフィス(φ3.2mm は手動弁(ニードル弁)の弁座内径)で模擬した。しかし、実際の手動弁(ニードル弁)を全開にする ためにはハンドルを数回転させる必要があり、保守的な前提であると言える。

7. まとめ

水素ステーションモデルに対し、2種類の定量的リスクアセスメント検討を行った。

- 機器の漏洩頻度データに基づく定量的リスクアセスメント(QRA)
 - 過流防止弁/ガス検知器/障壁・防火壁の適切な組み合わせから構成される 水素ステーションでは、敷地境界における内的事象起因のリスクを、おおむ ね 10⁻⁶ (学術会議の工学システム安全目標A基準)以下に低減できていること が明らかになった。
- □ 機器故障頻度や事象の発生頻度データに基づく定量的リスクアセスメント
 - 該当する大部分のリスクシナリオにおいて、リスクは1×10⁻⁶/年を優に下回る値であった。
 - ヒューマンエラーに起因する4件のリスクシナリオで、リスク計算値は1×10⁻⁶/ 年を上回ったが、総合的に判断して、これらシナリオのリスクは大きくないと判 断できる。



- 現行の技術基準体系に追加すべき点は見当たらなかった。
- なお、現行技術基準の見直し(合理化)の検討を2020年度に実施予定。

ご清聴ありがとうございました

謝辞

以上の発表に関する技術開発成果は、

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO*)からの委託事業「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業」(プロジェクトコード: P18011)の結果得られたものです。

*New Energy and Industrial Technology Development Organization