

2021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

2021年5月12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

報告内容

1. 本研究開発の位置づけ
2. 本研究開発の概要
3. 本研究開発のリスクアセスメントのフレームワーク
4. リスクの定量化について
5. 定量的リスクアセスメント(QRA)
6. リスク算定結果に基づく合理的な安全対策の提案
 6. 1 蓄圧器出口配管の遮断弁の配置の合理化
 6. 2 過流防止弁の配置の合理化及びオリフィスへの代替
 6. 3 蓄圧器出口配管の圧力リリーフ弁の不要化
7. まとめ

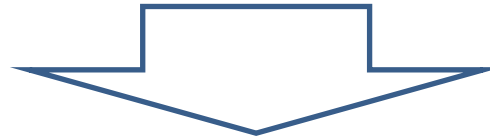
1. 本研究開発の位置づけ

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

超高压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

2. 本研究開発の概要

目的

2005年水素スタンドの技術基準(一般則7条の3)制定以降、商用スタンド運用実績が積み重ねられてきた。現行スタンドに対し定量性向上を目指したリスクアセスメントを再度実施し、必要な安全対策を見直し、技術基準の見直しに資する検討を行う。

リスク基準

リスク評価におけるリスクの重大性を評価するための目安となるリスク基準として、日本学会議が提案する工学システムの安全目標より、化学物質を取り扱う施設を代表する化学プラント等の設備の基準を準用することとした。

設計起因事故、機器故障、破断、腐食、操作・作業ミス等の内的要因による重大事故の発生確率は、 10^{-6} [/年]以下を満足することし、重大事故として水素ステーションの敷地境界における人の死亡事故として数値化した。

ステーションモデル

リスクアセスメントの対象とする水素ステーション設備について、その仕様・配置・運転方法等、リスクアセスメントの実施に必要な情報を明確化するため、水素ステーションモデルを作成した。

広く水素ステーション全般に適用される技術基準の見直しを目的としているため、評価対象を多くの水素ステーションの代表選手とも言うべき「一般的な水素ステーション」と位置付け、モデルを作成し、設備構成、PFD、P&ID、配置図、機器仕様・数量、運転モードと機器動作シーケンス及び、異常時の機器動作シーケンスでモデルを記述した。

3. 本研究開発のリスクアセスメントのフレームワーク

	事故のトリガーによる リスクシナリオの分類	リスク分析手法			評価精度			対象となるリスクシナリオ
		リスクシナリオ 特定	頻度分析	影響度分析	頻度評価	影響度評価	リスク評価	
内的要因	I 内的要因に起因する事故 <ul style="list-style-type: none"> ・機器故障 ・機器故障の連鎖 ・設計不良、施工不良 ・ヒューマンエラー ・その他 	HAZOP 作業HAZOP FMEA	漏洩頻度DB パーツカウント (狭義のQRA(TNO式))	数値解析	○ (可能)	○ (可能)	○ (可能)	漏洩頻度データにより頻度の定量化が可能であり、定量的な評価が可能なリスク
	I a 機器故障の連鎖 <ul style="list-style-type: none"> ・遮断弁誤作動→圧力上昇→漏洩 	FMEA	機器故障率DB ETA	数値解析	○ (可能)	○ (可能)	○ (可能)	故障率データによりリスクの定量化が精度よく可能であり、定量的な評価が可能なリスク
	I b ヒューマンエラー <ul style="list-style-type: none"> ・誤操作 ・その他 	作業HAZOP	ヒューマンエラー頻度DB ETA	数値解析	△ (精度 低)	○ (可能)	△ (精度 低)	頻度データの不確かさが大きいですが、リスクを相対評価可能なリスク
外的要因	II 外的要因に起因する事故 <ul style="list-style-type: none"> ・近隣火災 ・内部火災 ・地震(外力の作用) ・車両誤発進 ・車両飛込み 等 	HAZOP What-if	類似事象の頻度データ ETA	数値解析	△ (精度 低)	○ (可能)	△ (精度 低)	頻度データの不確かさが大きいですが、リスクを相対評価可能なリスク

[赤背景部分] QRAを適用 (種々の事故原因のリスクの総括的評価)

[青背景部分] シナリオベース評価を適用 (個々の事故原因のリスクの個別評価)

4. リスクの定量化について

本研究開発でのリスクの定義

$$\begin{aligned}\text{「リスク」} &= \text{「発生確率(頻度)」} \times \text{「影響度」} \\ &= \text{事故の発生頻度(/年)} \times \text{「n(人)} \times \text{事故事象の影響による致死率(-)」}\end{aligned}$$

リスク算定においては、n(人)の部分を個人リスクとして無次元化、「水素ステーションの敷地境界に(365日、24時間)人がいると仮定し、その人物の致死率」を「影響度」と表現する。したがって、単位は「/年」となる。

水素ステーションモデルで想定されるリスクシナリオの事故発生頻度を統計データ等から定量化し、事故発生に伴う水素漏洩の影響度を水素着火の熱、爆発による爆風圧の人に対する影響度を致死確率で定量化することにより、リスクの定量化を行うことを基本とした。

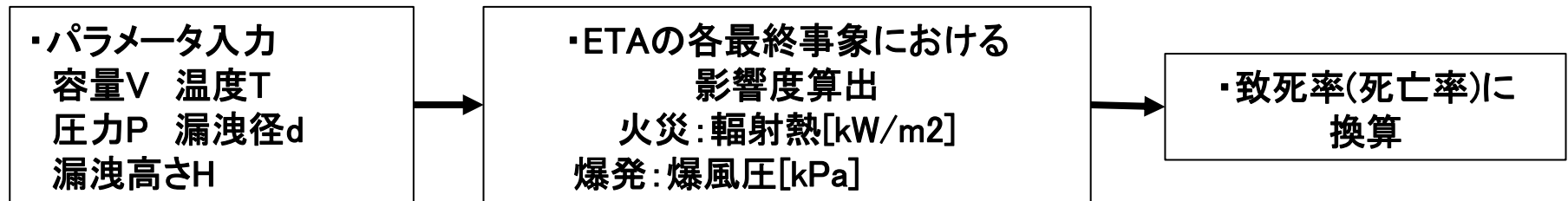
5. 定量的リスクアセスメント(QRA)①

○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
大気安定度:D
風速:1.5m/s etc.

・ユニット代表機器の位置
・着火源位置 etc.

○解析ソフトウェア

DNV社 PHAST-Safeti ver 8.11

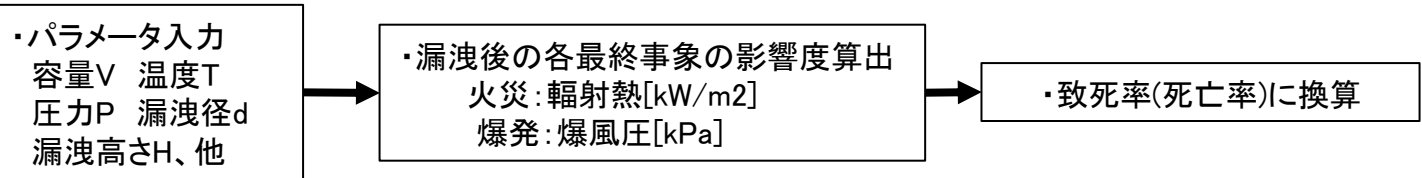
PHAST: 影響度計算ソフト, 計算コード/モデル

Safeti : 統合リスク評価ソフト名

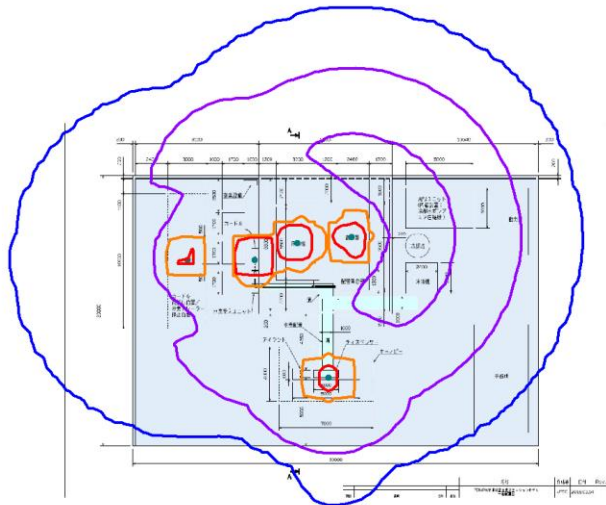
5. 定量的リスクアセスメント(QRA)②

QRAによるリスク算定方法

QRA: プラントシステム等に対する一連のシステムティックなリスク定量化方法。
構成機器毎の漏洩頻度データベースを元に、種々の事故原因のリスクを総括的に評価。

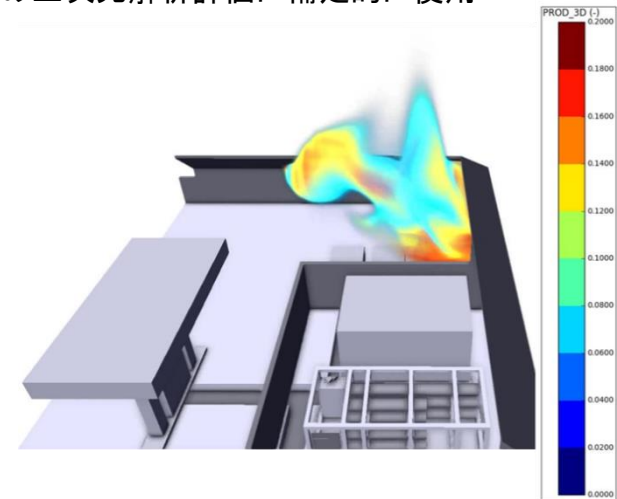


- 解析ソフトウェア(二次元): DNV社 PHAST-Safeti ver 8.11 ※二次元解析のため、障壁効果は評価できない
(三次元): GexCon社 FLACS ※障壁効果等の三次元解析評価に補足的に使用



Safetiによる等リスク線図(リスクカウンター)

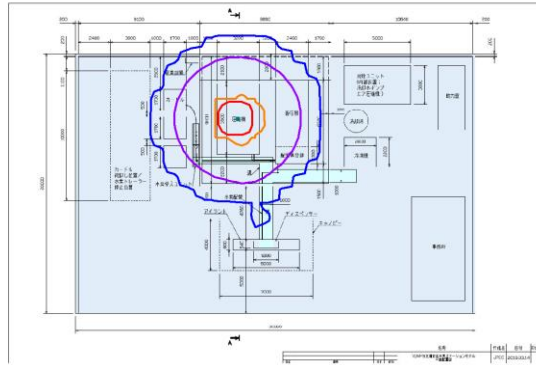
赤: 10⁻³ 人/y
橙: 10⁻⁴ 人/y
紫: 10⁻⁵ 人/y
青: 10⁻⁶ 人/y



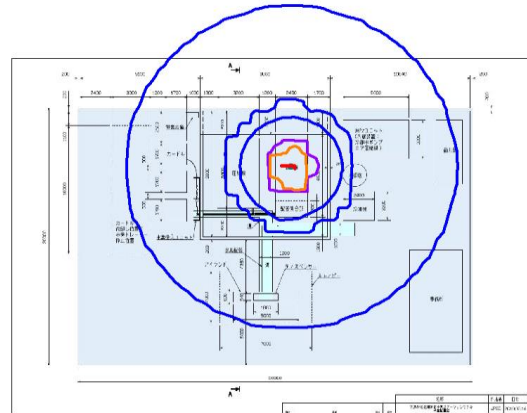
FLACSによる障壁の火炎遮蔽効果シミュレーション

5. 定量的リスクアセスメント(QRA)③

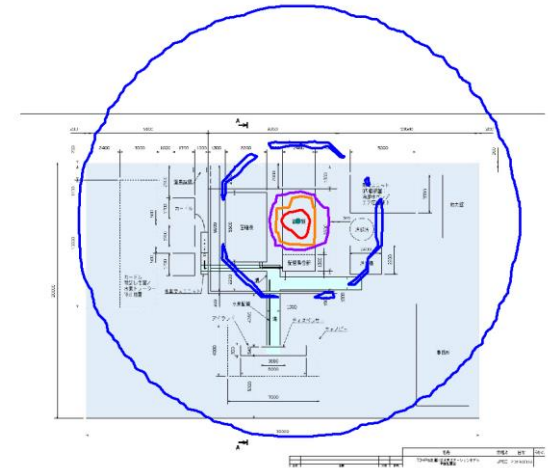
- QRAのリスク算出結果（等リスク線図）
（二次元解析：障壁等の構造物の影響は考慮せず）



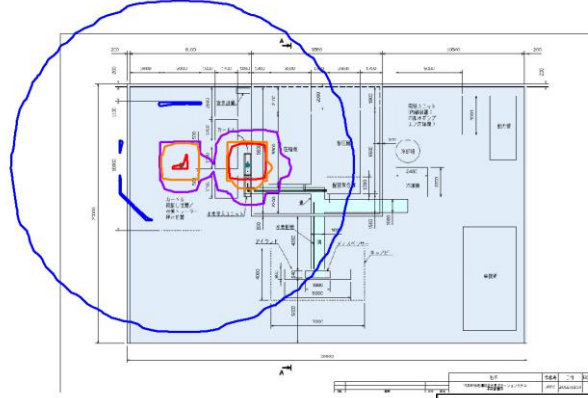
【圧縮機】



【中間蓄圧器】

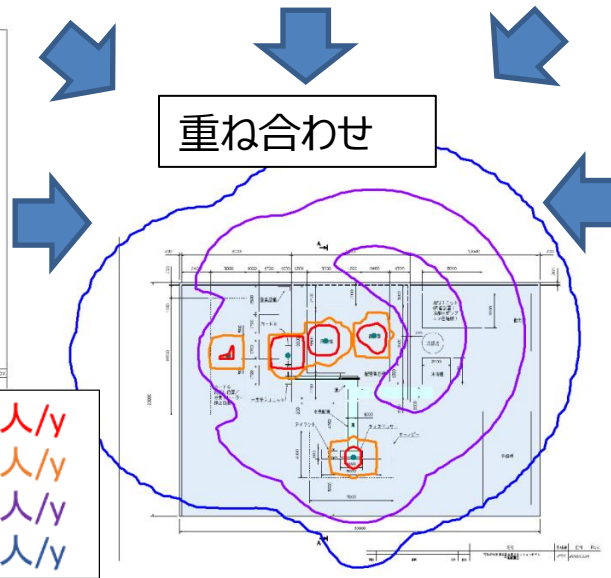


【蓄圧器】

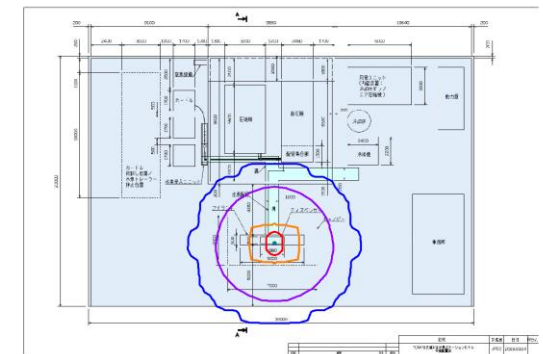


【受入 ; トレーラ、
カードル】

赤: 10^{-3} 人/y
橙: 10^{-4} 人/y
紫: 10^{-5} 人/y
青: 10^{-6} 人/y



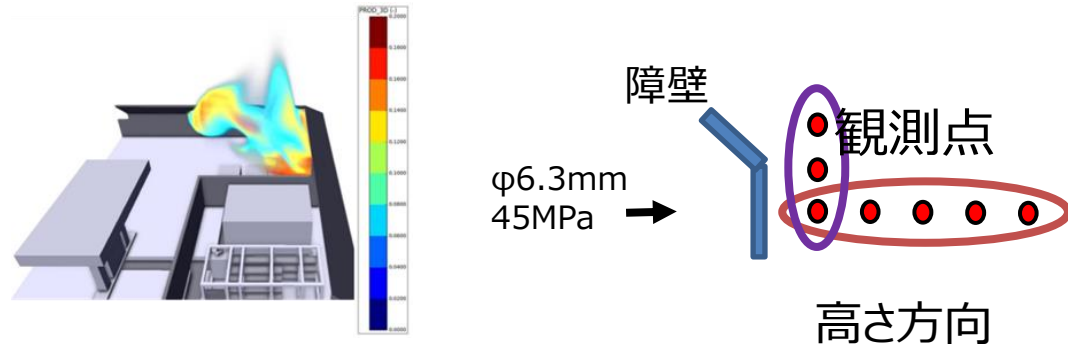
重ね合わせ



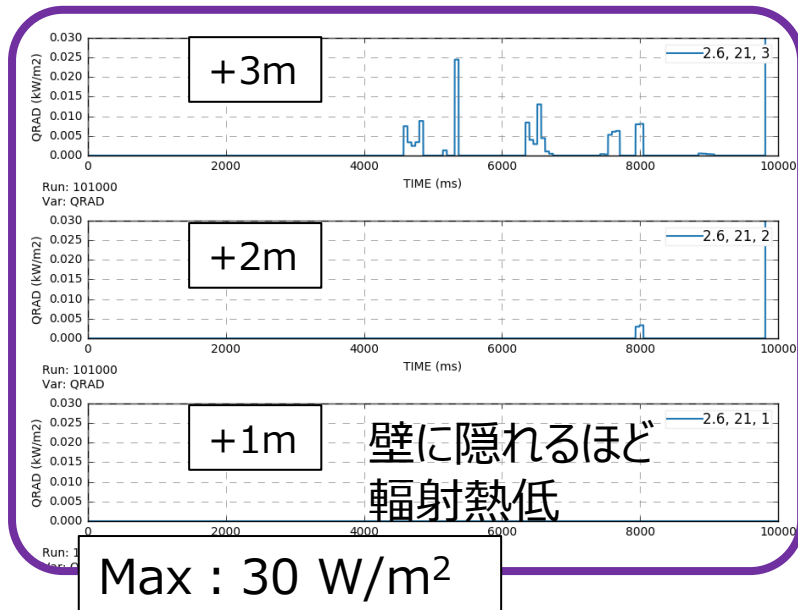
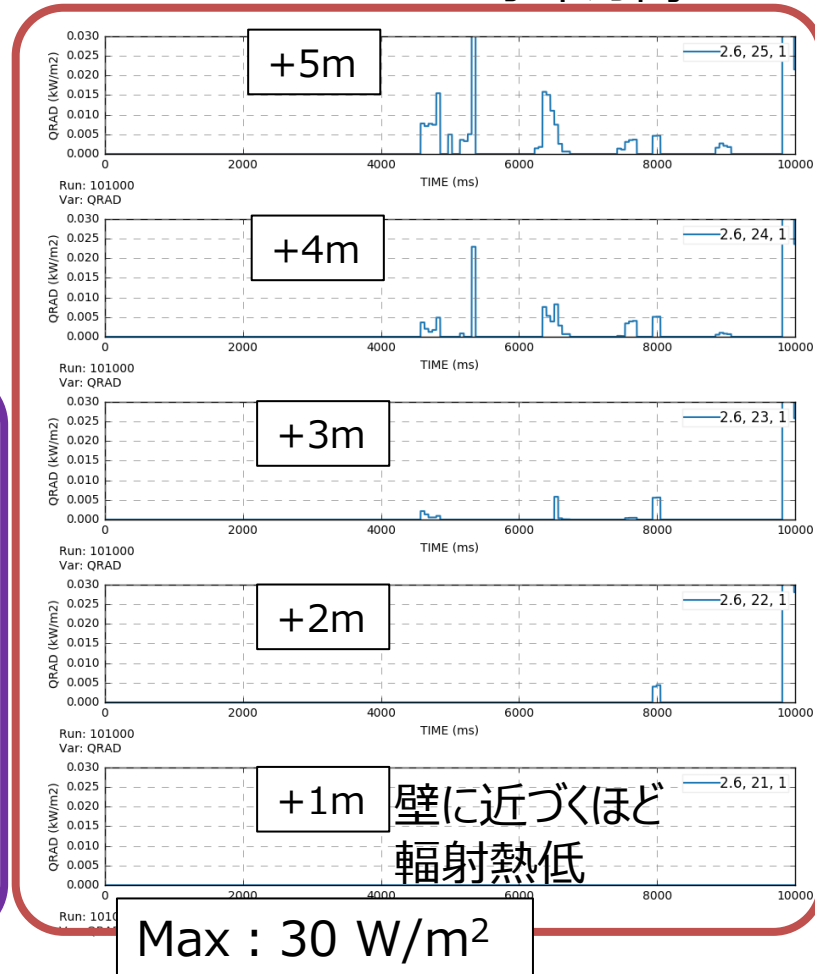
【ディスペンサー】

5. 定量的リスクアセスメント(QRA)④

■ QRAのリスク算出結果 (障壁による放射熱の遮蔽効果) (三次元解析: FLACS)



水平方向



- 計算条件
- V : 9 m³
 - P : 45 MPa
 - T : 25 °C
 - d : 6.3 mm
 - 10s間

※ 0.9kW/m² : 太陽 (真夏) 放射熱強度 ← 上のグラフのフルスケールはこれの1/30
 1.3kW/m² : 人が長時間曝されても安全な強度
 (石油コンビナートの防災アセスメント指針 (2013))

5. 定量的リスクアセスメント⑤

シナリオベース評価によるリスク算定方法

QRAでは、

- 種々の事故原因のリスクを総括的に評価可能
- 一方で、個別の事故原因に着目したリスクや安全対策効果の評価は困難

そこで、水素ステーション特有の事故原因については、**リスクシナリオ単位で個別に評価実施**

□ 評価対象の事故原因： 機器故障、ヒューマンファクター（操作ミス等）、外乱（火災）、天災（地震等）

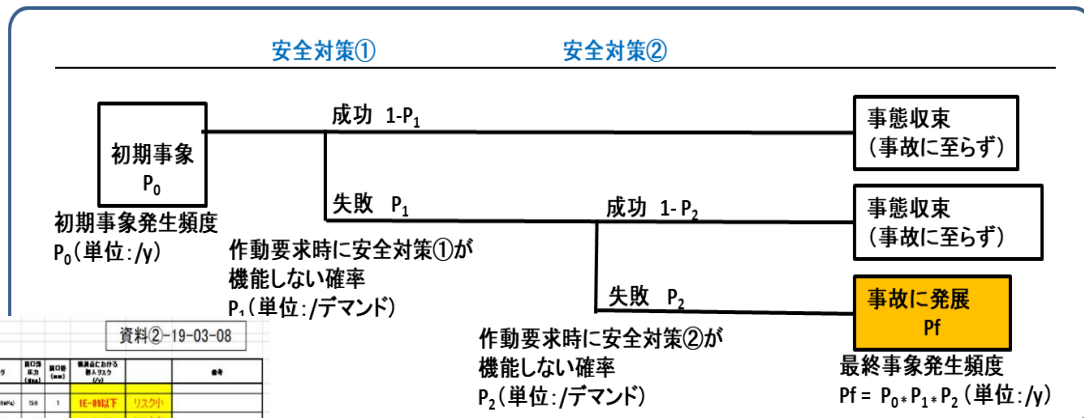
□ リスクシナリオ毎のイベントツリー分析を実施し、漏洩頻度を算出

元データ： 国内原発の機器故障率DB（JANSI-CFR-02）、北海油田プラットフォームの機器故障率DB（OREDA2015）、国内原発のヒューマンファクターDB、その他

ETA（イベントツリー分析）

□ 影響度評価とリスク算定

- 上記漏洩頻度算出結果を用い、PHAST-Safetiで影響度とリスクを算定
- 結果を一覧表に整理（全64シナリオ）



ヒューマンファクター、外乱・地震シナリオ評価一覧表

資料②-19-03-08

シナリオ	シナリオID	シナリオ内容	発生頻度	影響度	リスク	評価
初期事象	初期事象	初期事象発生頻度 P_0 (単位: /y)				
安全対策①	成功 $1-P_1$	事態収束 (事故に至らず)				
安全対策①	失敗 P_1	作動要求時に安全対策①が機能しない確率 P_1 (単位: /デマンド)				
安全対策②	成功 $1-P_2$	事態収束 (事故に至らず)				
安全対策②	失敗 P_2	作動要求時に安全対策②が機能しない確率 P_2 (単位: /デマンド)				
最終事象	最終事象	最終事象発生頻度 P_f (単位: /y)				

6. リスク算定結果に基づく合理的な安全対策の提案

QRA & シナリオベース評価 によるリスク評価結果

- [QRA] 敷地境界上の水素ステーションのリスクは、 10^{-6} /year以下であることを確認
 - ディスペンサー側の公道境界上(ディスペンサーから5m地点)のリスクは、 10^{-6} /year以下と算出された。
 - 設備側敷地境界上のリスクは、二次元評価(PHAST-Safeti)では 10^{-6} /yearを上回るが、境界線上の障壁により敷地外への影響は十分低減されることが三次元評価(FLACS)で確認された。
- [シナリオベース] 全リスクシナリオのリスク(敷地境界上の死亡リスク)が 10^{-6} /year以下であることを確認



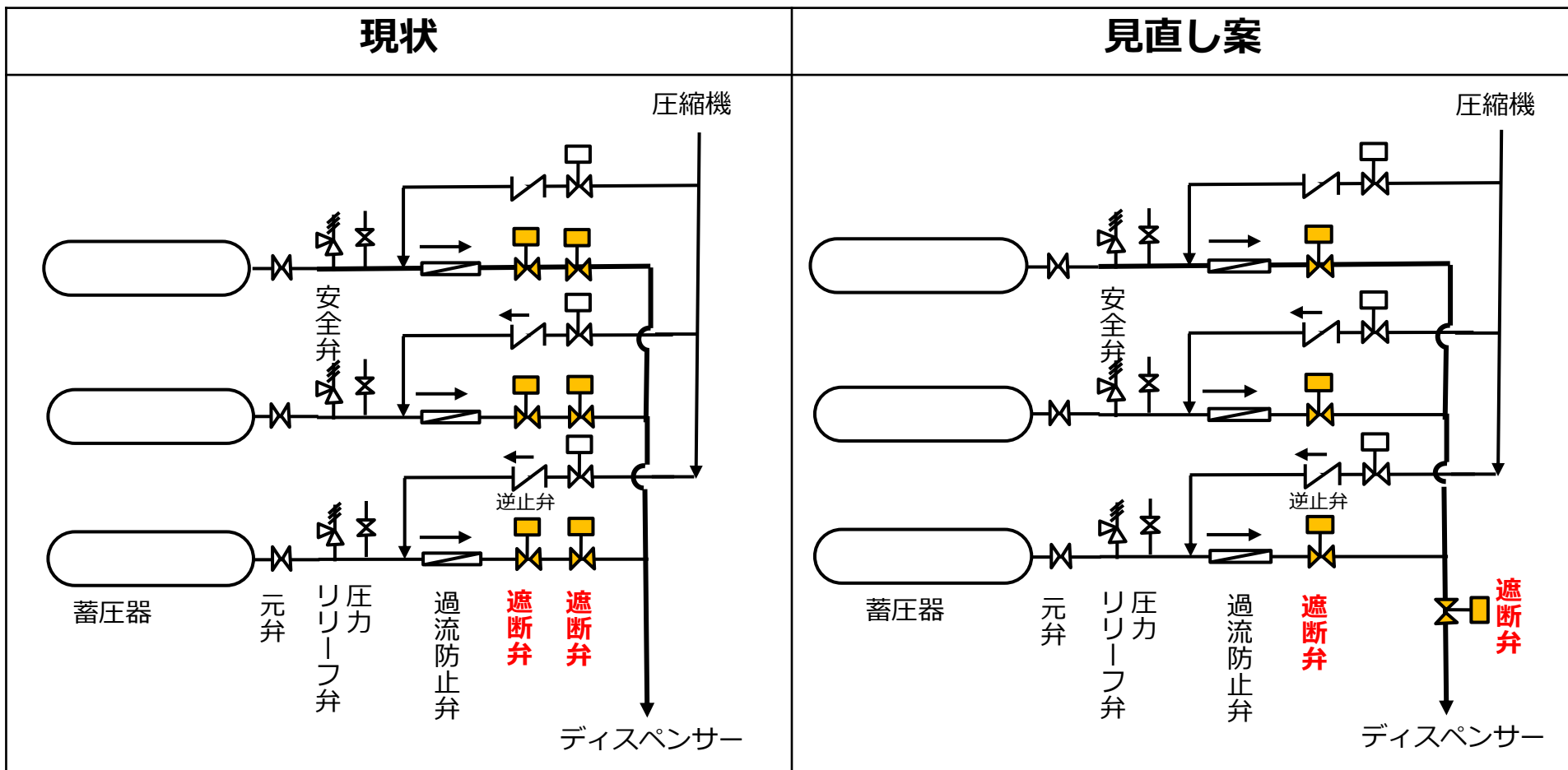
- 現行技術基準(省令・例示基準)に対し、新たに追加すべき安全対策は無し
- 現行技術基準に規定される安全対策のリスク低減効果を評価
 - ⇒ 以下の4項目について、リスクを増大させることなく簡素化が可能
 - 蓄圧器出口遮断弁二重化 → 配置の合理化
 - 過流防止弁の配置 → 配置の合理化
 - 過流防止弁の代替安全対策 → オリフィスで代替
 - 圧カリリーフ弁設置条件の見直し → 圧カリリーフ弁を省略できる条件提示

6.1 蓄圧器出口配管の遮断弁の配置の合理化①

● 具体的な見直しの内容

- ✓ 遮断弁について、蓄圧器から水素が流れる配管ごとに2カ所ずつ配置する代わりに、蓄圧器からの配管ごとに1カ所ずつ配置した上で、それらの集合配管に1カ所配置することも可能とする。

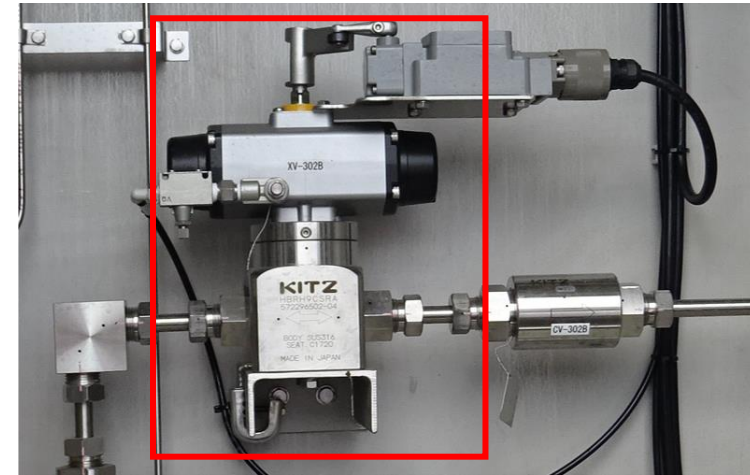
〈水素スタンド機器構成図〉



6.1 蓄圧器出口配管の遮断弁の配置の合理化②

現 状

- 遮断弁は配管、ディスペンサー等からの水素の漏えい、地震、火災等の異常を検知した際に、蓄圧器からの水素の供給を停止する弁。
- 水素の流れを確実に停止させることを目的に、設備を多重化(2カ所ずつ設置)している。



遮断弁は、空気圧・油圧・電気・バネ等を動力として用いたダイヤフラム・ピストン等により、弁を急速に開閉する構造

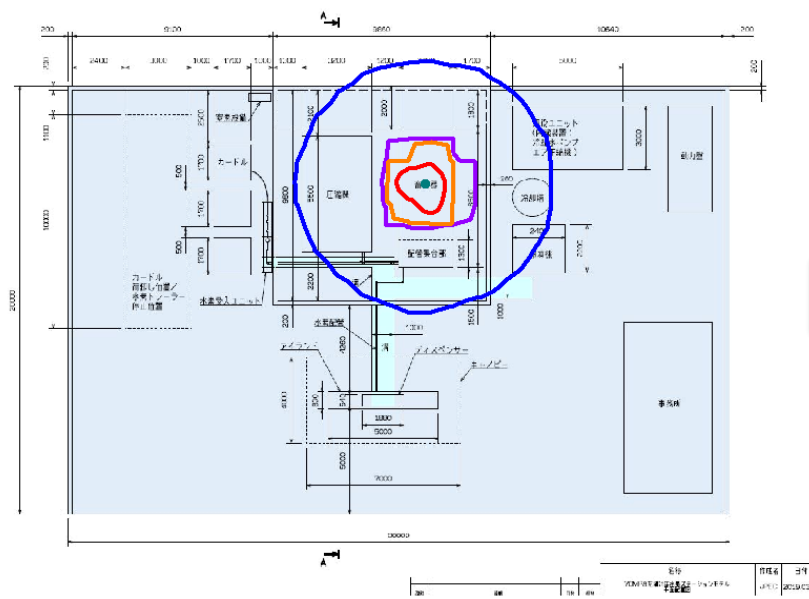
見直し案でも安全性が同等に確保できる理由

- 見直し案のように配置しても、遮断弁に求められる多重化に係る機能は現状と同様に有しており、リスクアセスメントの結果からも、異常時の対応に係るリスクに差は生じないことが確認されたことから、安全性は同等に確保される。
- ※ 遮断弁の配置が合理化され、機器の点数が減ることは、機器の故障（漏洩）頻度が低減されるという観点で言えば、安全性の向上に寄与する。
- ※ 配管ごとに蓄圧器を制御するため、遮断弁は各配管に最低 1 カ所は必要であり、2 カ所とも集合配管に配置することは検討しなかった。

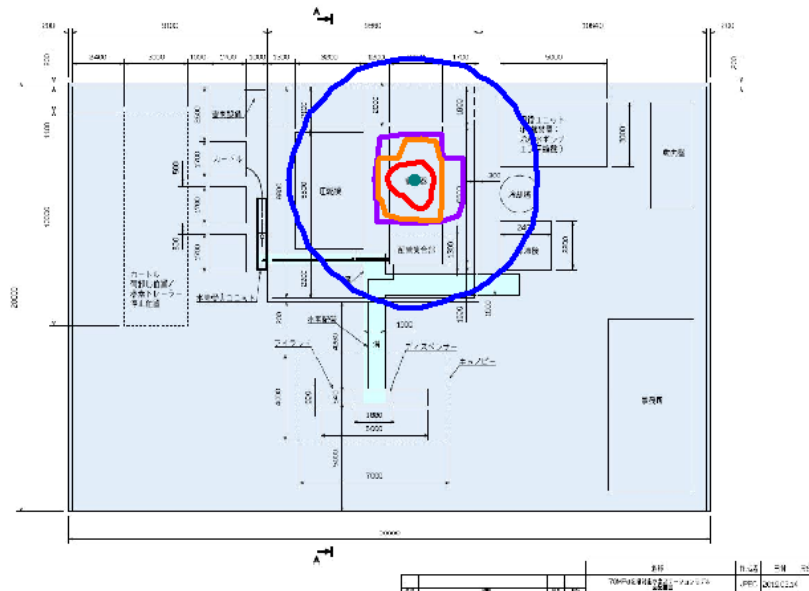
6.1 蓄圧器出口配管の遮断弁の配置の合理化③

見直し前と見直し後の敷地の外の人に対するリスクを評価し、安全対策の効果が同等であることを確認。

- ✓ 遮断弁の配置を合理化しても、リスク値にほとんど変化は見られない。
- ✓ 機器数が減るため漏洩頻度は減少する。



<見直し前>



<見直し後>

リスク値とは・・・

- 赤: 10^{-3} 人/y
- 橙: 10^{-4} 人/y
- 紫: 10^{-5} 人/y
- 青: 10^{-6} 人/y

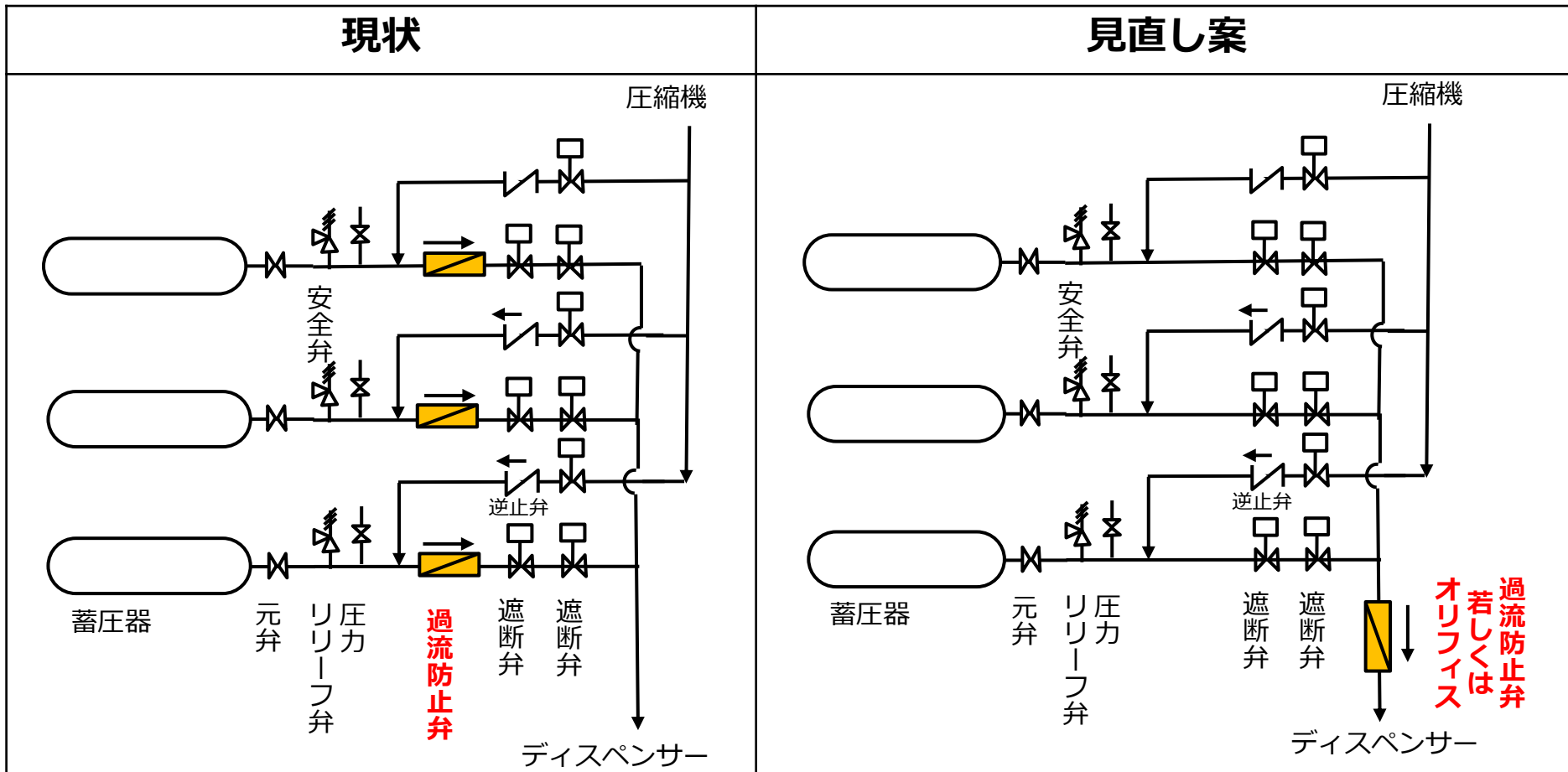
- その場所での重大事故の発生確率で示す。
- 当該資料においては重大事故を漏洩箇所の周囲の人が死亡に至る事故として、人の致死率を率毎に色分けして示している。
- 一番外枠の 10^{-6} 人/yとは、100万年に1回死亡事故が発生する確率のことであり、日本学術会議が提案している安全目標である。

6.2 過流防止弁の配置の合理化及びオリフィスへの代替①

● 具体的な見直しの内容

- ① 過流防止弁について、蓄圧器から水素が流れる配管ごとに1カ所ずつ配置する代わりに、それらの集合配管に1カ所配置することを可能とする。
- ② さらに、過流防止弁の代替として、オリフィス（最大流量60g/sec以下）の配置も可能とする。

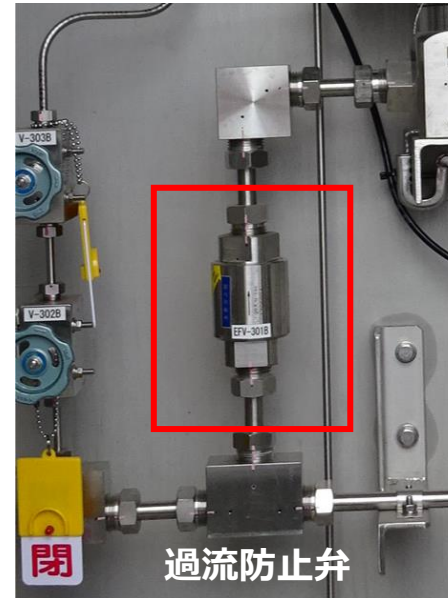
〈水素スタンド機器構成図〉



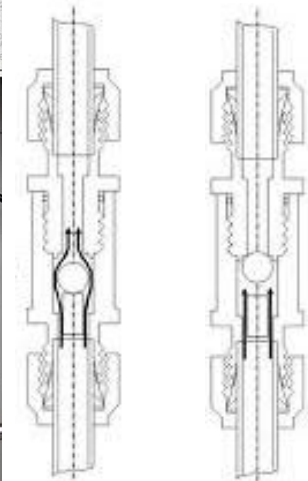
6.2 過流防止弁の配置の合理化及びオリフィスへの代替②

現 状

- 過流防止弁は、配管、ディスペンサーホース等の破断・故障等により水素の流量が急増した際に、蓄圧器からの水素の流れを遮断する弁。
- 過流防止弁は、ディスペンサーに流れる水素の流量が通常の3倍 ($60\text{g/sec} \times 3 = 180\text{g/sec}$) 以上となった場合に機械的に水素の供給を遮断する弁。



過流防止弁の作動



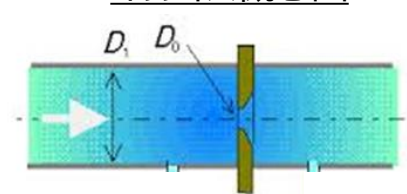
開状態

閉状態

見直し案でも安全性が同等に確保できる理由

- ①については、見直し案のように配置した場合でも、過流防止弁による水素供給を遮断する機能は現状と同様に有しており、リスクアセスメントの結果からも配管、ディスペンサー周りの故障時等の漏えいに係るリスクに差は生じないことが確認されたことから、安全性は同等に確保される。
- ②については、オリフィスの性能要件を最大流量 60g/sec 以下 (ディスペンサーに通常流れる流量以下) とすることで、過流防止弁が作動する状態に達する前の段階で、流量の著しい増加を抑制することが可能であり、リスクアセスメントの結果からも、配管、ディスペンサー周りの故障時等の漏えいに係るリスクに差は生じないことが確認されたことから、安全性が同等に確保される。
※ 通常流れる流量 \leq オリフィスにより制限される流量 $<$ 過流防止弁が作動する流量

オリフィス概念図



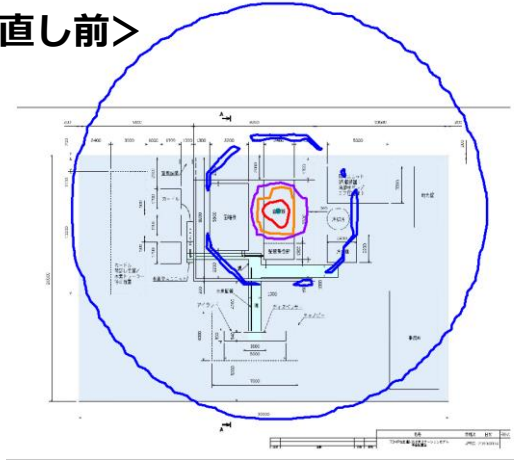
オリフィスは、穴を設けたプレートに流路を設置することにより流量を制限する構造

6.2 過流防止弁の配置の合理化及びオリフィスへの代替③

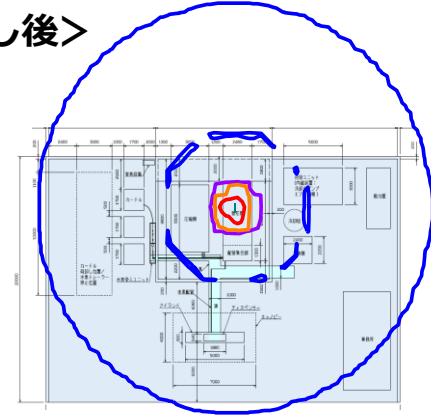
見直し前と見直し後の敷地の外の人に対するリスクを評価し、安全対策の効果が同等であることを確認。

- ✓ 過流防止弁の配置を合理化しても、リスク値の変化はほとんどみられない。

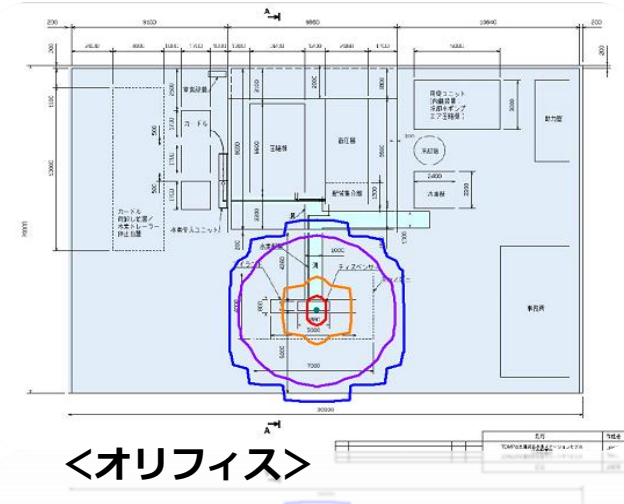
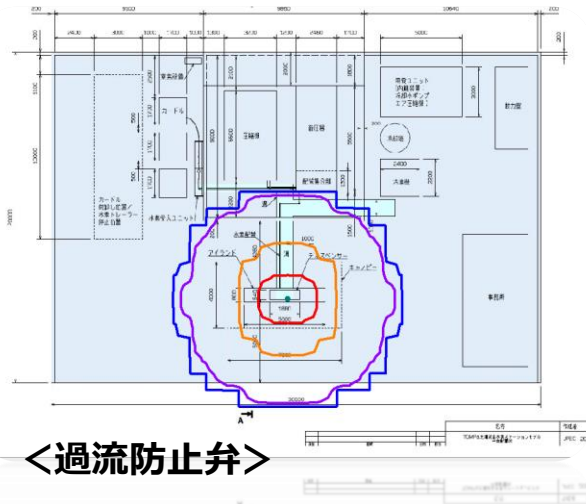
〈見直し前〉



〈見直し後〉



- ✓ 過流防止弁に代えてオリフィス（流量60[g/s]）を設置しても、同等のリスク低減効果が得られる。

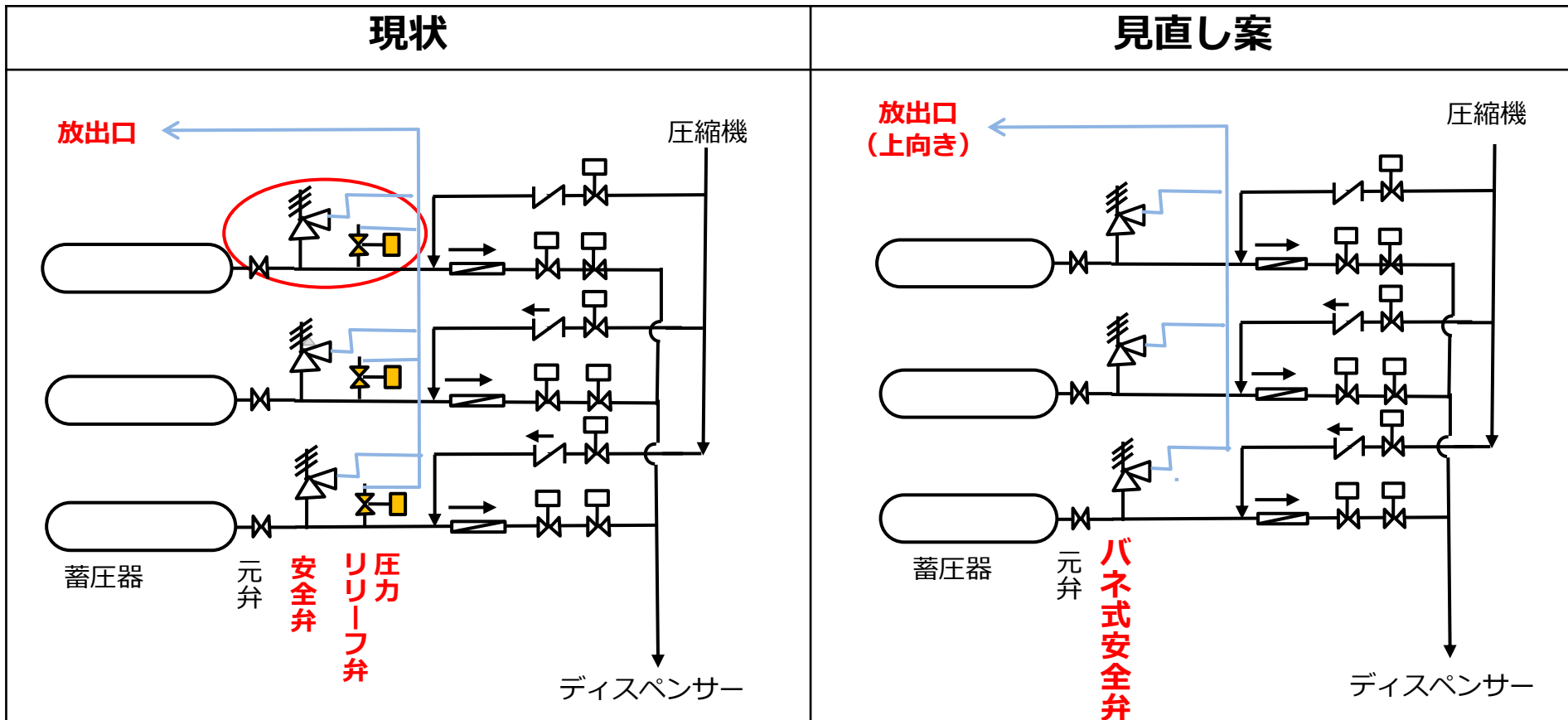


6.3 蓄圧器出口配管の圧力リリーフ弁の不要化①

● 具体的な見直しの内容

- ✓ 圧力リリーフ弁と安全弁について、配管ごとにそれぞれを設置する代わりに、一定の放出条件を満たすバネ式の安全弁を用い、かつ、放出口を上向きに設定することを条件に、圧力リリーフ弁の不要化（=当該バネ式安全弁のみの設置とすること）を可能とする。

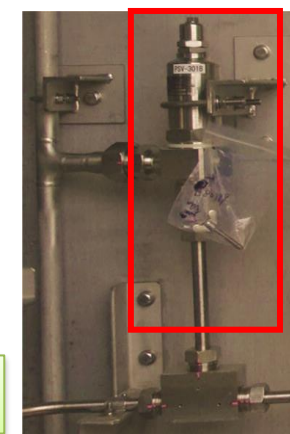
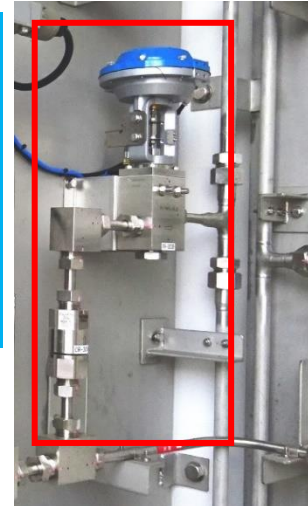
〈水素スタンド機器構成図〉



6.3 蓄圧器出口配管の圧力リリーフ弁の不要化②

現 状

圧力リリーフ弁は、圧力検出値が設定値になると弁が開となり、オリフイスで制限された量が吹き出す構造

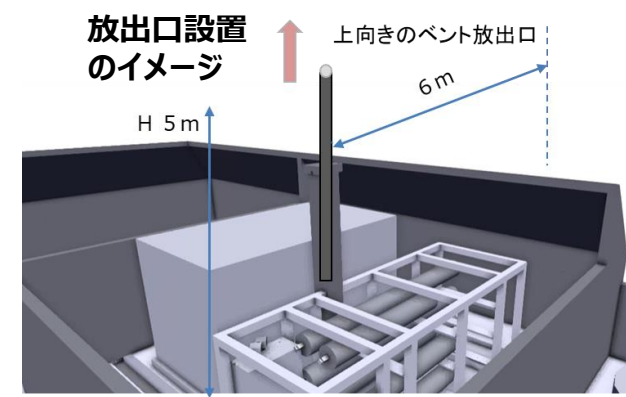


バネ式安全弁は、設定圧でバネが押し上げられ、弁に隙間が生じ規定の量が吹き出す構造

- 安全弁は、蓄圧器の圧力が許容圧力を超えることを防ぐため、設定圧力（設備設計圧力）を超えた際に、圧力を下げるために水素を放出する弁。
- 圧力リリーフ弁は、安全弁が作動する前に、設定圧力（例：常用圧力）以下になるまで水素を放出する弁。
※ 常用圧力 ≤ 圧力リリーフ弁設定圧力 < 安全弁設定圧力 < 設備設計圧力 < 許容圧力
- 安全弁から大量の水素が一気に放出される場合、敷地境界外への影響が懸念されることから、安全弁が作動する前に、安全な量の水素を放出することを目的に、圧力リリーフ弁を併せて設置している。
※ 放出口から水素を放出した際に、敷地境界における大気中の水素濃度が1%以下となるよう、放出管の設置位置（放出口の位置は、地表面から5m以上、敷地境界から6m以上）やオリフイス等により調整を行っている（放出口の向きは法令で特に定めていない）。

見直し案でも安全性が同等に確保できる理由

- 安全弁等が以下の要件を全て満たすことで、大量の水素が一気に放出されることは無く、リスクアセスメントの結果からも敷地境界外への影響を抑制できることが確認されたことから、安全性は同等に確保される。
 - ① 一定の放出条件を満たすバネ式的安全弁を採用する。
※「バネ式」は、一気に水素が全量放出されることのない弁。これに対し、「破裂板方式」は、一度弁が開くと全量放出される弁。
 - ② 安全弁に接続される放出管は、放出口を上向きとする。

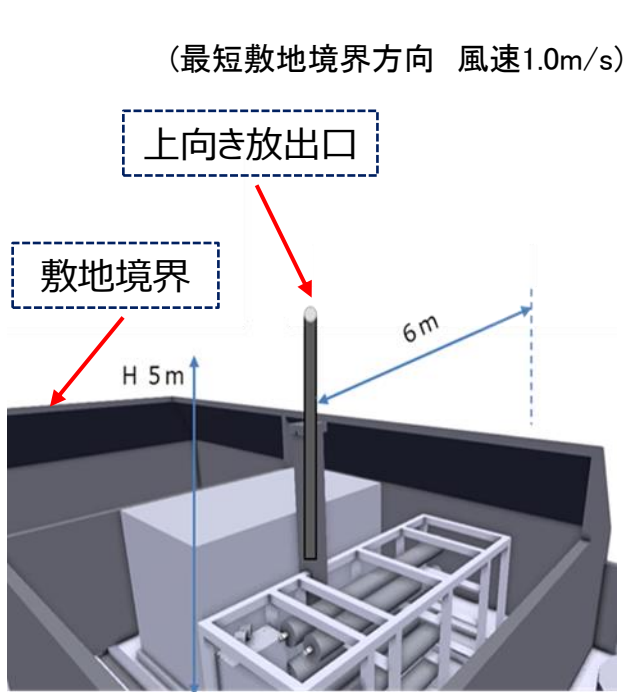


6.3 蓄圧器出口配管の圧カリリーフ弁の不要化③

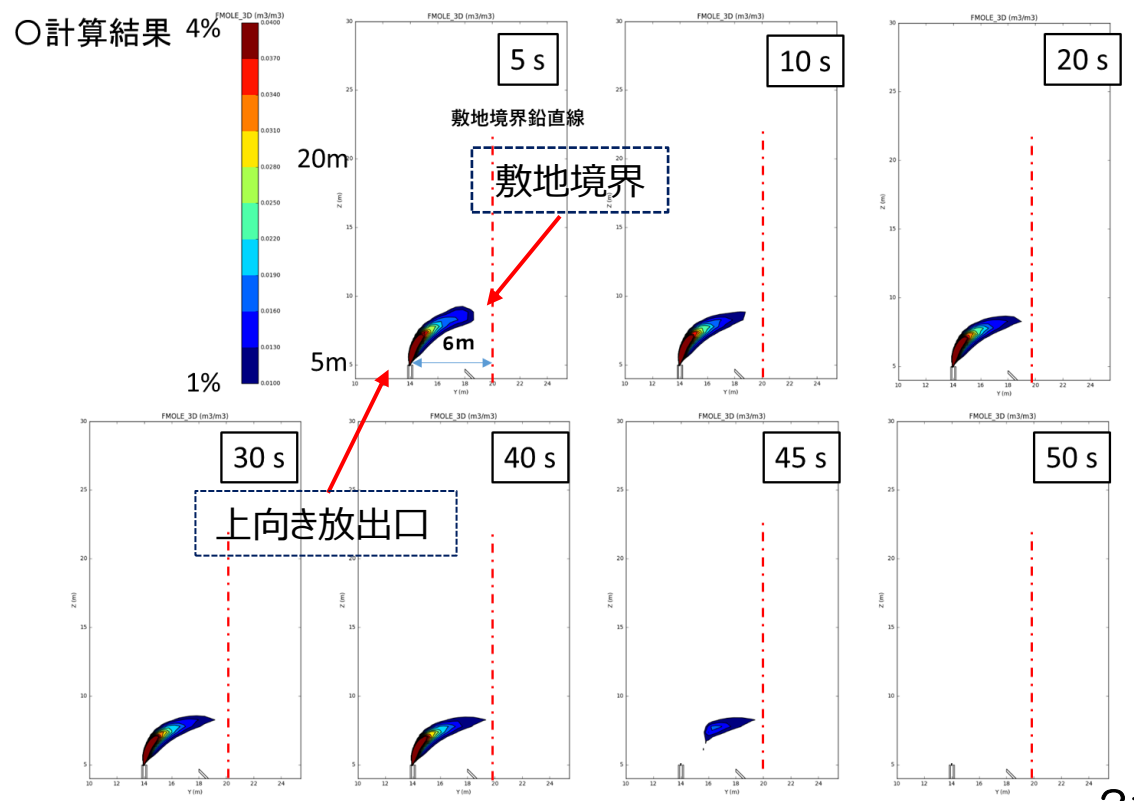
リスクアセスメントの評価結果例

- ✓ 圧カリリーフ弁に求められている水素放出時の敷地外への影響低減が、一定の放出条件を満たすバネ式の安全弁であれば同様に確保できることを影響度（水素拡散）評価したもの。
- ✓ 規定吹出し量；300kg/h、吹始め圧力；95MPa、吹止まり圧力；80MPaの安全弁からの水素放出の場合、吹始めから43secで放出が停止し、敷地境界外に爆発下限界を超える濃度の水素が拡散しないことを確認。

＜バネ式安全弁に接続される上向き放出管からの水素放出時の拡散挙動＞



放出口設置のイメージ



7. まとめ

リスク算定結果に基づく合理的な安全対策の提案(技術基準の見直し)

項目	対象基準	要点	見直し提案内容
遮断弁二重化に関する配置の合理化	例示基準 19の2	緊急遮断装置のうち一つは蓄圧器から圧縮水素を送り出す集合配管に設置することが可能	例示基準に当該配置図を追加記載
過流防止弁の配置の合理化	例示基準 59の5	ディスペンサーに供給する配管に過流防止弁を設置することが可能(蓄圧器フレーム内)	左記を例示基準に追記
過流防止弁代替安全対策(オリフィス)	例示基準 59の5	過流防止弁の代替としてディスペンサー出口の最大流量(ホース破断時)を60g/sec以下となる措置(オリフィス等)を可能	左記を例示基準に追記
圧力リリーフ弁設置条件の見直し	一般則 7条の3 2項10号	蓄圧器配管の安全装置が揚程式バネ式安全弁で吹き出し量が一定以下の場合、圧力リリーフ弁は不要とする	安全弁に仕様条件を提示し、安全弁の放出口が上向きの場合とする



省令・例示基準の改正の実現により、水素ステーション建設コスト・運営コストの低減に寄与することができる

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
「超高压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