

水素ガスの爆発事故対策に関する研究（その４）

—水素ガス事件事例の分析と要因の体系化—

三小田 憲 司 諏 訪 好 英

Countermeasures to Accidents Due to Hydrogen-Gas Explosion (Part4)

— Analysis of Hydrogen-Gas Accidents and Systemization of Factors Contributing to Them —

Kenji Mikoda Yoshihide Suwa

Abstract

We have investigated 172 domestic accidents with hydrogen gas between 1949 and 2002, categorizing them as “human related”, “machine related”, “automobile accident”, and “natural disaster”. As analytical results of accident causation, accidents caused by human error in the unsteady state largely surpasses machine related accidents. Over half of the accidents relate to connections such as valves and flanges. As these disasters involve explosion and rupture, human suffering becomes greater than with fire accidents. Especially “accidents with error of recognition or confirmation” lead to serious human suffering. In recent years, “oblivious type accidents” such as simple human error are decreasing; however, “imperfection type accident” which is difficult to notice, such as imperfect screwing together of flanges is increasing.

概 要

1949年から2002年にかけて国内で発生した水素ガス事件事例を調査し、有効172件の事例を対象に設備系、人為系、車両事故、自然災害の4パターンに分類した。事故パターン別に要因を分析した結果、非定常時の人為的ミスが原因の事故件数が設備系事故を大きく上回った。事故の発生部位は、弁・フランジ廻りが最も多く、過半数を超えた。爆発・破裂事故では、火災事故よりも人的被害が大きい傾向にあり、特に認知確認ミス型では被害が大きくなる傾向が認められた。近年は、単純なミスによる“忘れ型”事故が減少する一方で、フランジ類の締付不良のように当事者がミスを犯したことに気が付きにくい“つもり型”事故が増加していることも明らかとなった。

1. はじめに

水素社会の実現に向けて、燃料電池の開発が盛んに行われているが、現行法体系では燃料電池のような新技術を想定していない。そのため、水素供給スタンドのような小規模施設であっても、既存の大型臨海コンビナート施設等と同列の枠内で厳しく立地条件が制限されているのが実情である。水素利用技術の普及を図るためには、都市型水素インフラ施設の建設が不可欠であり、安全性の確保を前提とした立地規制緩和が政府主導で進められている。

都市型水素インフラ施設の事故防止対策を考える上で、過去の失敗事例に学ぶ意義は大きい。水素ガスに関わる事故については、個別事故事例の解析報告や事故データの網羅的な紹介例は見受けられるが、まとまった事故情報を対象に要因分析を行った例は見当たらない。そこで本報では、戦後国内で発生した水素ガス事件事例をパターン化して、事故に至る背後要因の分析を行い、事故対策の参考となる知見を得ることを目的とした。

2. 調査方法

2.1 調査対象

調査概要はTable 1の通りである。1949年から2002年にかけて発生した国内水素ガス事件事例について、文献やデータベース^{1)~11)}の調査を実施し、幅広い分野から水素事故データ195件を収集した。広告用アドバルーン掲揚中の事故や学校での理科実験中の事故等、本報の利用目的から外れる23件は除外し、残る172件を有効事例として分析を行うものとする。

2.2 調査項目

事故パターンについては、大多数を占める人為系事故と設備系事故の他、車両事故、自然災害を加えた4ケースに分類した。本報では、設備の維持管理ミスに起因する事故は、俗に言うヒューマンエラーによる事故ではなく、設備系事故として扱った。事故発生に至る経緯については、事故の引き金となった要因発生時点まで遡って分析する目的で設定した。運転形態は、定常時や非定常時(スタート

アップ、シャットダウン、点検、修理)等に分類した。発生部位に関しては、熱交換器・加熱炉・改質炉・脱硫器等を製造設備、定置式のタンク類を貯蔵設備、配管及び弁・フランジ類を配管系設備、移動式の容器類を容器設備と規定した。被害状況に関しては、死亡者及び負傷者の発生を基準に区分した。物的被害に関しては、都市型施設への直接の参考とはならないものとして検討から除外した。年代については、石油コンビナート等の事故多発を受けて保安体制強化を図った改正高压ガス取締法（1975.5公布）と規制体系が全般的に見直された高压ガス保安法制定（1996.3公布）の前後で区分した。

3. 事故データの統計評価

Fig. 1 に事故パターン別の発生頻度を示すが、設備系事故よりも人為系事故の方が非常に多く、事故全体の約7割を占めるヒューマンエラー対策が重要であることを示している。事故発生時点の運転形態別頻度をFig. 2, 原因発生時点の頻度をFig. 3に示す。実際に事故が発生した時点の状況を見ると、定常時と非定常時が共に4割程度だが、要因発生時に遡って比較すると、非定常時に原因のあるケースが圧倒的に多く、非定常時の人的ミス対策が事故を未然に防止する上で重要である。事故に至る流れとして、過去の人的ミスに遠因があり、通常運転時もしくは開始・停止運転時のショックが引き金となり、事故発生に至るパターンが多発している。一方、設計・製作時のミスが原因で起きた事故は全体の10%程度に過ぎない。

Fig. 4 に部位別の発生頻度を示す。装置類について、本体と付随設備を細分化して見ると、弁・フランジ廻りの事故が全体の過半数を占めており、強度面で弱点となりやすい部分で事故が多発する傾向にある。製造系付属品では、熱交換器、脱硫装置、圧縮機、ポンプ等の事故が多く、貯蔵系付属品廻りでは、配管バルブ接続部、充填金具、ホルダーバルブ、安全板で事故が多い。

Fig. 5 に災害別の発生頻度を示す。爆発・破裂事故と火災事故で全体の8割を占めており、事故対策としては爆発、破裂、火災への対策を講じなければならない。Fig. 6 に人的被害度別の発生頻度を示す。死亡事故は21件発生し、何らかの人的被害が発生した事例は全体の4割にも達している。人的被害が発生した事例詳細を見ると、当然ではあるが、事故発生時に近くに作業員がいた場合には、被害が大きい傾向にある。本データは製造事業所等を中心としたものであり、密集度の高い都市型施設の安全性を考える場合は、第三者や隣接地域への影響を考慮して、一層の注意を払うべきであろう。

4. 事故パターン分析結果

4.1 事故パターンの分類方法

Table 2に水素ガスの事故パターン別分析結果を整理した。人為系事故12タイプ、設備系事故6タイプ、車両事故3

Table 1 調査概要
Summary of Investigation

事故対象	水素ガス関連事故(国内)
調査期間	1949～2002年
件数	195件(有効172件)
調査項目	(1)事故パターン (人為系事故, 設備系事故, 車両事故, 自然災害) (2)事故に至る経緯(要因発生→事故発生) (定常, 非定常, 設計・製作ほか) (3)発生部位 (製造設備, 貯蔵設備, 配管系, 容器) (4)災害現象 (破裂, 爆発, 火災, 漏洩, その他) (5)人的被害 (死亡事故, 負傷事故, 人的被害なし) (6)年代 (古期1949～1975.5, 中期1975.6～1996.3, 新期1996.4～2002)

タイプ、自然災害2タイプの合計23タイプに区分した結果、過去に起きたすべての水素事故について、発生パターンを明確に区分することができた。

4.2 人為系事故パターンの特徴

4.2.1 点検不良型事故 点検不良に伴う事故は、全体の20%程度である。「締付不良タイプ」は、軽度の締付不良が長年見過ごされてフランジ廻りの締付力が低下し、運転開始・停止時に高熱機器廻りのボルト締付力低下(熱応力低下)と重なり、突発的に事故に至る典型的な「時限爆弾タイプ」の事故で近年増加している。「溶接不良タイプ」は弁・フランジの溶接不良による事故ケースだが、ここ20年間は発生していない。「点検不良タイプ」には、計器の故障に気づかずに装置を作動して事故に至るパターンと交換作業中の部品挿入ミスによるパターンがある。爆発・破裂事故が多く危険度が高い。「不純物堆積タイプ」は、触媒添加剤が配管内に堆積して事故に至るケースである。

4.2.2 誤操作・誤判断・誤使用型事故 人為的判断ミスに伴う事故は、全体の30%程度で最も多い。「禁じ行為タイプ」には、予期しない化学反応による事故ケースと水素雰囲気下で何らかの着火源により爆発するケースがある。爆発・破裂事故が多発し、被害が大きい。「作業管理ミスタイプ」は、乱暴な操作、工具取扱いミス、資材管理ミス、点検作業の手順前後により事故に至るケースで、近年増加している。「バルブ操作ミスタイプ」は、単純なバルブ開閉ミスによる事故ケースである。1961年に起きた死亡事故を最後に人的被害の生じた事例はなく、1977年を最後に報告例もない。「部品誤使用タイプ」は、部品の不適正使用による事故ケースで、1977年を最後に報告例がない。

4.2.3 認知確認ミス型事故 確認ミスに伴う事故は、全体の20%程度で、爆発事故が多く人的被害が大きいのが特徴である。「置換不良タイプ」は、不完全な窒素パージが原因の事故ケースで、近年増加傾向にあり、全ケースで爆発が生じている。「残ガス未確認タイプ」は、タンク内に残存する水素ガスを未確認のまま外部開放して爆発事故に至るケースで、近年は減少傾向にあるが、置換不良タイ

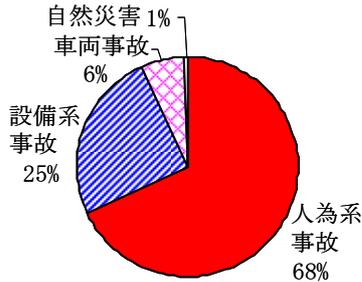


Fig. 1 事故パターン別の発生頻度
Ratio of Accidents Based on Type of Accidents

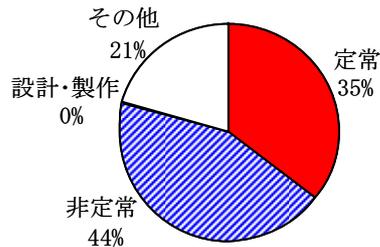


Fig. 2 事故発生時の形態別発生頻度
Ratio of Accidents Based on Situation at Accident's Occurrence

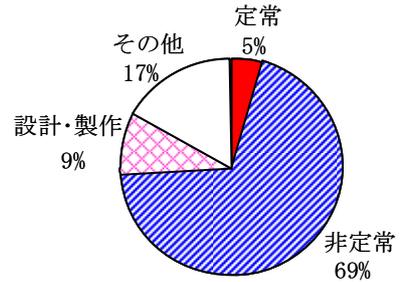


Fig. 3 原因発生時の形態別発生頻度
Ratio of Accidents Based on Situation at Causal Error

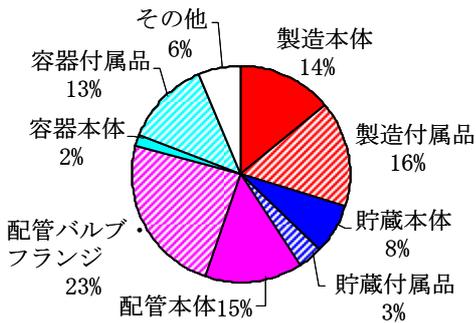


Fig. 4 部位別の発生頻度
Ratio of Accidents Based on Area of Accidents

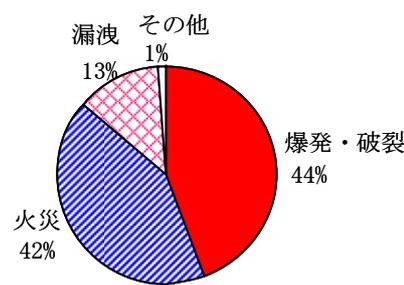


Fig. 5 災害種類の発生頻度
Ratio of Accidents Based on Type of Disaster

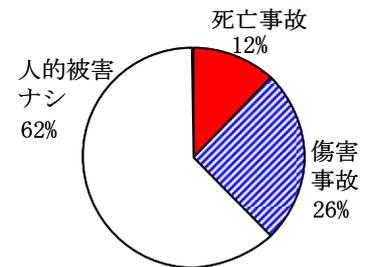


Fig. 6 人的被害度別の発生頻度
Ratio of Accidents Based on Rate of Human Suffering

Table 2 水素ガス事故パターン別の要因分析のまとめ
Summary of Type of Hydrogen-Gas Accidents Based on Pattern Analysis

事故パターン		要因発生から事故発生に至る経緯*1 (事故要因) (発生) (時間差)			多発部位	多発災害	被害規模*2 (死亡) (被害率)		時代傾向	件数*3 (小計) (計)		
人為系	点検不良型	締付不良	過去点検	⇨ 定常・非常	瞬間/爆弾	配管フランジ	火災	無	小	増加	21	32 (19%)
		溶接不良	修理	⇨ 開始	時間差	配管系	漏洩	無	小	減少	3	
		点検不良	過去点検	⇨ 定常	時間差	全般	爆発	有	小	減少	5	
	誤操作・誤判断・誤使用型	不純物堆積	経年劣化	⇨ 定常	爆弾	配管本体	火災	無	小	—	3	50 (29%)
		禁止行為	ケース不特定	⇨ 同時	瞬間	装置本体	爆発	有	中	平衡	24	
		作業管理ミス	点検・清掃	⇨ 同時	瞬間/時間差	装置付属品	火災	有	大	増加	10	
		弁操作ミス	開始・停止	⇨ 同時	瞬間	配管弁	爆発	有	小	平衡	10	
	認知確認ミス型	部品誤使用	点検・修理	⇨ 定常	短時間	配管系	火災	無	小	平衡	6	35 (20%)
		置換不良	停止	⇨ 次段階作業	短時間	装置本体	爆発	有	中	増加	7	
		残ガス確認ミス	停止	⇨ 次段階作業	瞬間	装置本体	爆発	有	大	減少	14	
設備系	設計・構造不良型	容器運搬	容器積載	⇨ 運送・積降	時間差	車両容器	火災	無	小	減少	11	16 (9%)
		引継・連絡ミス	点検・移動	⇨ 同時	瞬間	—	火災	無	小	—	3	
		素材不良	製作時	⇨ 定常	時間差	配管系	火災	有	大	減少	4	
	劣化型	製作不良	製作時	⇨ 定常	時間差	配管フランジ	爆発	有	小	減少	6	27 (16%)
		設計不良	設計時	⇨ 定常	時間差	配管本体	爆発	無	中	増加	6	
		腐食	経年劣化	⇨ 定常・非常	爆弾	配管本体	火災	有	小	増加	12	
		亀裂・劣化	経年劣化	⇨ 定常・非常	爆弾	配管本体	火災	有	中	減少	12	
車両事故	機械振動	経年劣化	⇨ 定常・非常	爆弾	装置付属品	火災	無	小	—	3	11 (6%)	
	衝突事故	運送中	⇨ 同時	瞬間	車両容器	漏洩	—	—	平衡	5		
	過スピード	運送中	⇨ 同時	瞬間	車両容器	漏洩	—	—	平衡	4		
自然災害	事業所内	移動	⇨ 同時	瞬間	ホース	火災	無	—	—	2	1 (1%)	
	落雷	落雷	⇨ ガス放出時	瞬間	ベントスタック	火災	無	—	—	(3)		
	その他災害	—	⇨ —	—	—	—	—	—	—	1		

*1: (時間差)について、要因と事故発生がほぼ同時の場合を「瞬間型」、要因と事故発生の運転段階がずれている場合を「時間差型」、要因と事故発生の日時がずれていて突発的に事故発生に至る場合を「(時限)爆弾型」と定義する。

*2: (被害率)について、人的被害発生事故比率66%以上を「大」、同33%以上、66%未満を「中」、同33%未満を「小」と定義する。

*3: 自然災害の()内件数は、自然災害は副要因であって主要因が別にある事例である。

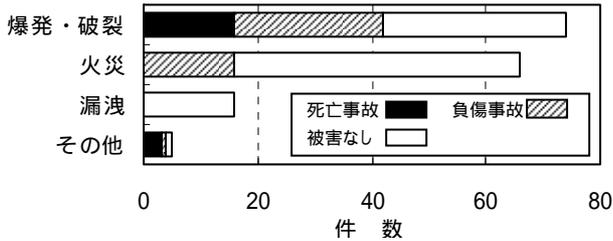


Fig. 7 災害現象と人的被害の関係
Relation between Disaster and Human Suffering

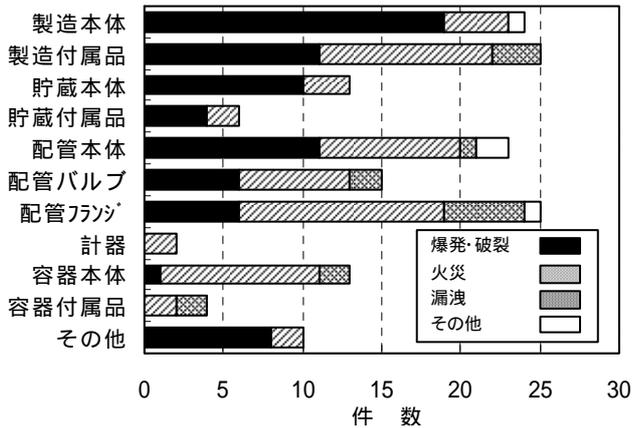


Fig. 8 事故発生部位と災害現象の関係
Relation between Area of Accidents and Disaster

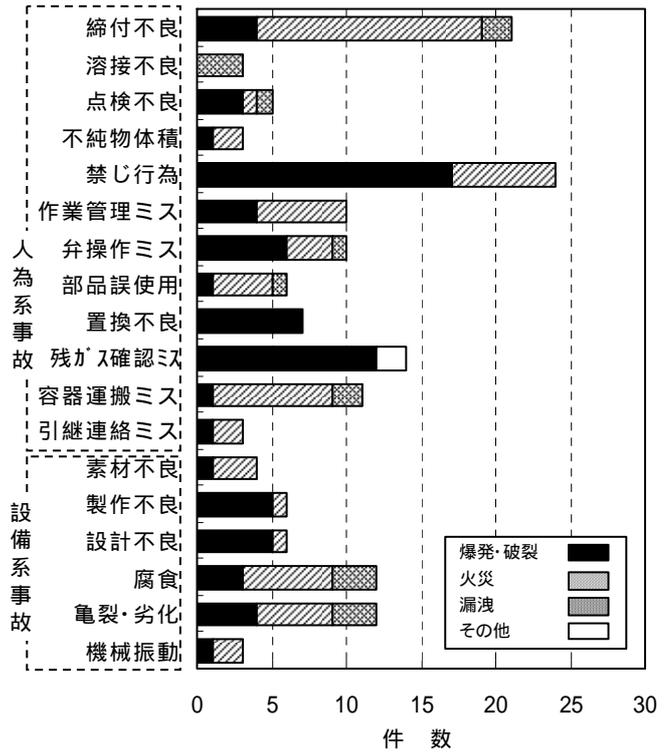


Fig. 9 事故パターンと災害現象の関係
Relation between Type of Accidents and Disaster

よりも被害が大きい。「容器運搬タイプ」は、トラックへ容器を積載する時のロープ掛固定ミスやバルブ閉止の不具合が事故原因のケースで、近年減少している。「引継・連絡ミスタイプ」は、容器搬入や点検作業中の連絡体制不備や修理中の引継ぎミスなどが原因で事故に至るケースで、過去重大な事故報告はない。

4.3 設備系事故パターンの特徴

4.3.1 設計・構造不良型事故 設計・製作段階のミスによる事故は、全体の10%程度に過ぎない。製造・貯蔵設備本体の事故例は案外に少なく、配管及び弁・フランジ廻りの事故が多い。「素材不良タイプ」は、材質不良や材料選定ミスが原因で事故に至るケースである。「製作不良タイプ」は、製作段階でのネジの噛み合わせ不具合やノズル肉厚やボルト長さの不足が原因で事故に至るケースである。「設計不良タイプ」は、袋小路構造の配管や高熱装置の配置ミスなど設計ミスが原因で事故に至るケースである。

4.3.2 劣化型事故 経年劣化に伴う事故は、全体の15%程度であるが、突発的に発生する時限爆弾タイプで事故が隠れやすい。「腐食タイプ」は、引張応力下の金属材の応力腐食割れや水素脆化等、腐食作用による事故で、近年増加しているが、火災止まりのケースが多く、被害は小さいことが多い。「亀裂・劣化タイプ」は、経年劣化に伴う配管亀裂やフランジ廻りの磨耗が原因の事故ケースである。爆発事故も多く、腐食型よりも人的被害発生率は高い。「機械振動タイプ」は、圧縮機等の振動が軸シール破損やネジ・継手の緩みを招いて事故に至るケースである。

4.4 車両事故パターンの特徴

車両事故は事故全体の6%を占める。重大な被害はすべて交通事故によるもので、容器の漏出に伴う災害は軽微な事故が多く、爆発事故例はない。「衝突事故タイプ」には、右折車両との接触や交差点での出会い頭の事故と追突によるもらい事故がある。「過スピードタイプ」は、スピードの出し過ぎが主原因の事故で、容器固定ミスと重なるケースが多い。「事業所内タイプ」は、容器とホースを接続したまま車両を移動して事故に至るケースである。

4.5 自然災害型事故パターンの特徴

自然災害が主要因の事故は、地震の1例に過ぎない。そのほか、自然現象は事故の副要因であって、主要因となる人為的ミスが別にあるケースが数例報告されている。余剰水素放出中の落雷、台風通過時の計器故障、集中豪雨時の配管保温ミス部分への浸水、異常寒波時の配管保温ミス部分における熱応力低下などが該当する。

5. 要因分析結果

5.1 災害現象や被害状況に着目した要因分析

Fig. 7 に災害現象と人的被害の関係を示す。爆発・破裂事故の場合には、過半数で何らかの人的被害が生じ、死亡事故発生率も2割に達するなど人的被害が大きい。火災事故と比較すると、被害の大きさの違いは明らかであり、人命保護の立場から、爆発・破裂事故対策が最重点課題であると言える。

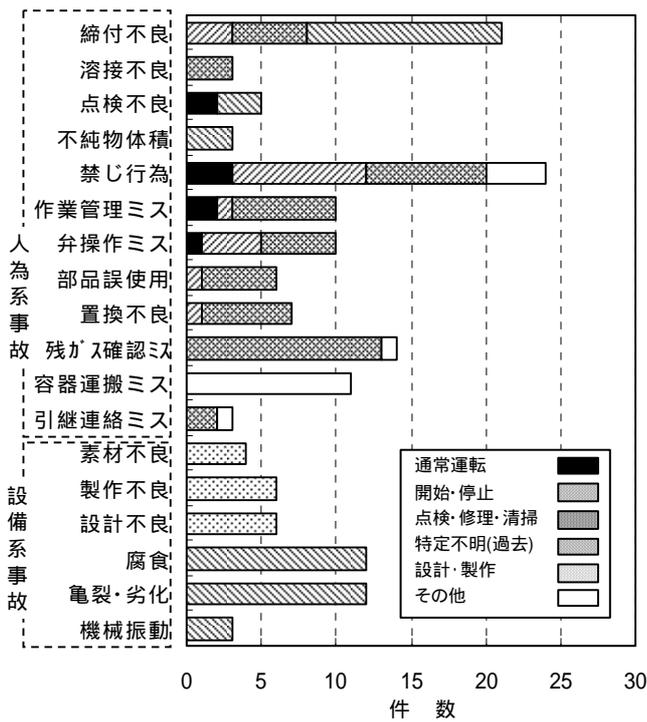


Fig. 10 事故パターンと要因発生時状態の関係
Relation between Type of Accidents and Situation at the Causal Error

Fig. 8 に事故発生部位と災害現象の関係を示す。製造・貯蔵設備本体では、爆発・破裂事故が多発している。配管本体やバルブ廻りは、爆発と火災が同程度だが、事例詳細を見ると、製作不良や弁操作ミスなど、大量にガスが噴出するパターンでは爆発に至る比率が高く、締付不良など軽度の不良による事故では、火災止まりとなる比率が高いことが分かった。容器設備では、火災止まりの事故ケースが多く、容器本体が爆発・破裂に至るケースは稀である。

Fig. 9 に事故パターンと災害現象の関係を示す。非定常時(点検、清掃等)に、水素ガスが装置内に残っている状態で外部開放して、爆発・破裂事故に至るパターンが多発し、禁忌行為タイプ、置換不良タイプ、残ガス確認ミスタイプがその代表である。設計・製作不良タイプは、事例は少ないが、爆発・破裂事故に至る確率が高く要注意である。

5.2 事故発生経緯に着目した要因分析

事故パターンと事故経緯の関係について、Fig. 10 に要因発生時の事故件数を示し、Fig. 11 には事故発生時の事故件数を示す。認知確認ミス型を除くすべての事故パターンにおいて、通常運転時に発生した事故でも、原因はもっと以前の非定常時に生じた何らかのミスに原因があるケースが多い。事故発生と原因発生の時間差を基準に事故を分類すると、“時限爆弾タイプ”と“瞬間・時間差タイプ”に区別することができる。時限爆弾タイプは、過去特定不明な時期の不完全な点検作業や腐食現象が原因で、通常運転時に突発的に事故が発生するパターンであり、締付・点

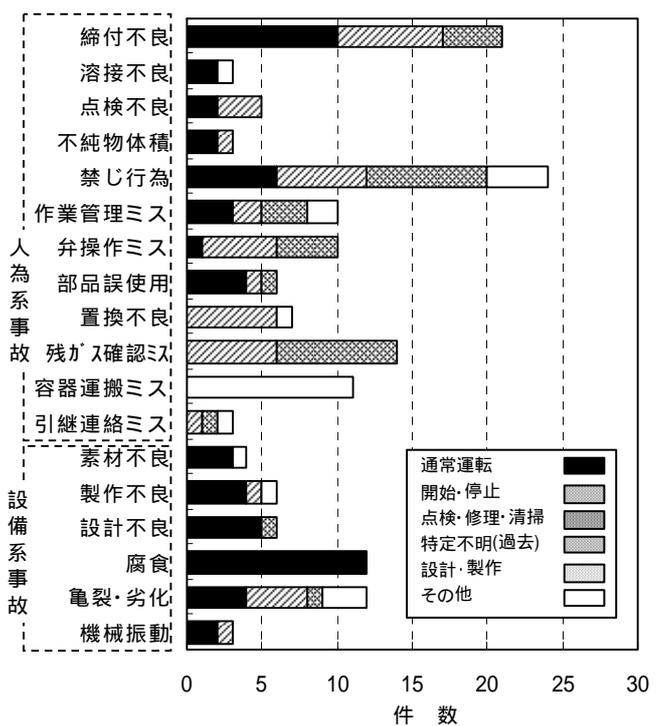


Fig. 11 事故パターンと事故発生時状態の関係
Relation between Type of Accidents and Situation at the Accident's Occurrence

検不良タイプ、不純物堆積タイプ、腐食タイプ、亀裂・劣化タイプが代表的パターンである。原因の特定が難しいケースが多く、事故が隠れやすいが、配管やバルブ・フランジ廻りの軽微な不良が原因で漏洩量が比較的少ないケースが多いので、災害規模は小さい。

一方、瞬間・時間差タイプは、点検・修理・清掃作業中の不備が原因で、その直後もしくは運転再開後しばらくしてから事故が発生するパターンで、窒素パージミスタイプ、残ガス確認ミスタイプ、弁操作ミスタイプが代表的パターンである。不良の度合が大きく、タンク開放やバルブ急開放に伴う爆発事故の場合は、特に災害規模が大きい。

バルブ・フランジ廻りで多発する締付・点検不良タイプ事故に関しては、複合要因が重なるケースが多いことも明らかになった。事故の直接的原因は、高熱機器廻りのホットボルテイングやコールドボルテイングに伴う熱応力低下、異常寒波や集中豪雨時の保温施工ミス部分の熱応力低下であるが、こうした現象が単独で水素ガスの漏洩噴出に至らしめるほどの応力低下を引き起こした例はない。そこに弁・フランジ類のわずかな緩みやナットの位置ずれによる経年的な締付力低下が重なったときに、事故が生じている。事故の未然防止が最も難しいパターンである。

5.3 時代傾向に着目した要因分析

Fig. 12 に事故パターンと発生年代の関係を示す。弁・フランジ廻りの人為系事故については、点検不良タイプ、溶接不良タイプが減少する一方、締付不良タイプが増加し

ている。高度成長期以前は、弁やフランジの締付け・取付け作業の行為自体を怠った“忘れ型”の事故が多かったが、近年は安全対策の周知効果もあって減少している。その一方で、弁やフランジの締付け・取付け作業は行ったが、作業が不完全だったことを見逃して事故につながった“つもり型”の事故が増加傾向にある。

貯蔵装置の人為系事故については、貯槽開放前に槽内の水素ガスの状況確認を怠った残ガス確認ミスタイプ(忘れ型)が減少傾向にある。一方、残存水素ガス処理を目的とした窒素パージを実施し、水素ガスを除去したつもりであったが、パージが不完全で事故が生じた置換不良タイプ(つもり型)が増加している。時代傾向として、残ガス未確認タイプの重大災害の多発の反省より、窒素パージ実施が徹底され同タイプの事故は減ったが、代わってパージ作業が不完全で事故が発生するケースが増えていることがうかがえる。つもり型事故は、当事者が正しい作業を実施したつもりで片付けてしまいがちで、ミスに気がつきにくく、安全対策の進歩した今日でも事故が減っていない。

設備系事故に関しては、腐食型が増加している。脱硫装置廻りで多発し、特に熱交換器出口配管に集中している。増加の一因として、高度成長期時代に多数建設された水素関連施設の老朽化が指摘されている。

6. まとめ

水素ガス事事故例を事故パターン別に分類して要因を分析した結果、事故に至る経緯、多発部位、多発災害現象、人的被害度、時代傾向を把握できた。事故データの統計より、水素ガス事故の4割で何らかの人的被害が発生しており、爆発・破裂対策を中心とした安全対策が必要であることが分かった。人為系事故が全体の7割を占め、非定常時の人為的ミスが事故の引き金となるケースが圧倒的に多いことから、非定常時のヒューマンエラー対策が重要であると考えられる。装置本体の安全対策に目を奪われがちであるが、実際には強度面で弱点となりやすい弁・フランジ廻りの事故が全体の過半数を占めていることも、データにより明らかとなった。事故要因の分析を行った結果、得られた知見は次の通りである。

- 1) 災害と被害に着目すると、爆発・破裂事故対策が最重要課題であり、非定常時の水素ガス処理の不具合によって起こる事故パターンは、近年も減少する気配がなく要注意である。禁じ行為タイプ、置換不良タイプが該当する。
- 2) 事故経緯に着目すると、過去特定不明な時期のエラーが原因で、突発的に発生する“時限爆弾タイプ”の事故が増加しており、締付不良タイプ、腐食タイプが該当する。
- 3) 事故発生の時代傾向に着目すると、点検・確認作業等の行為自体を怠った“忘れ型”の事故が減少傾向にある一方で、点検・確認作業が不完全だったことを見逃して生じる“つもり型”の事故が増加している。締付不良タイプ、置換不良タイプが該当する。

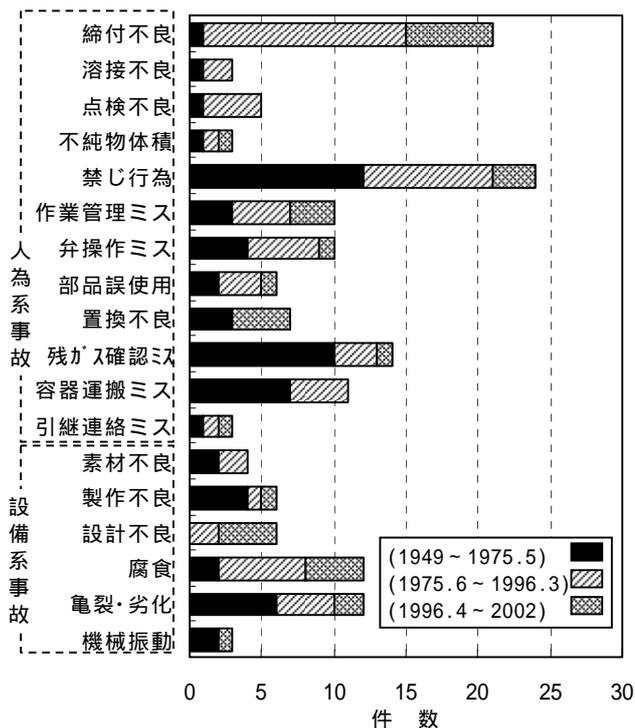


Fig. 12 事故パターンと年代の関係
Relation between Type of Accidents and Times

謝辞

本研究はNEDO(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構)からの委託を受け、「水素安全利用等基盤技術開発—水素インフラと建築構造物の耐爆、耐震性の研究開発」の一環として実施したものである。本研究の実施にあたり御指導頂きましたNEDO関係者の方々ならびに本委託業務に関する評価サポート委員会の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高圧ガス保安協会：高圧ガス事故例集，(1982)
- 2) 産業技術総合研究所：災害事例データベース，http://www.aist.go.jp/RIODB/cgi-pub019/DB019_top_jpn.cgi
- 3) 産業技術総合研究所：リレーショナル化学災害データベース，<http://www.aist.go.jp/RIODB/RISCAD/>
- 4) エネルギー総合工学研究所：水素の物性と安全ハンドブック，pp. 121-170，(2003)
- 5) 安全工学協議会：火災爆発事事故例集，コロナ社，(2003)
- 6) 大正海上安全技術センター：化学関係工場の爆発災害事例と分析，(1988)
- 7) 災害情報センター：災害・事事故例辞典，丸善，(2002)
- 8) 高圧ガス保安協会：平成14年度事事故例検索システム，(2003)
- 9) 安全衛生情報センター：労働災害事例，<http://www.jaish.gr.jp/anzen/html/select/anrd00.htm>
- 10) 安全衛生情報センター：死亡災害事例，<http://www.jaish.gr.jp/anzen/html/sibo/ansb00.htm>
- 11) 損害保険料率算出機構：事事故災害データベース，<http://www.nliro.or.jp/service/databank/database>