

国内水素ガス関連施設の事故事例分析

三小田 憲司・諏訪 好英

株式会社大林組技術研究所
204 東京都清瀬市下清戸4-640

Analysis of the Accident Example of the Domestic Hydrogen Infrastructure in Japan

Kenji MIKODA and Yoshihide SUWA

Technical Research Institute, OBAYASHI Corporation
4-640 Shimokiyoto, Kiyose-shi, Tokyo 204

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 surpass 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. 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.

Key words: hydrogen gas, accident, human error, investigation

1. 緒言

水素関連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。これまでにも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、まとまった水素ガス事故情報を対象に要因分析を行った例は見当たらない。

本報では、既存の水素関連施設を対象に、戦後国内で発生した事故事例の要因分析を行った。個々の事例については、水素製造工程や利用目的は各々異なっているが、事故をパターン別に分類し、事故に至る背後要因を検討することによって、水素製造時に共通する事故要因を抽出し、そこから多くの教訓が得られるものと考えた。

2. 調査方法

2. 1 調査対象

調査概要を表1に示す。1949年から2002年の間に発生した国内水素ガス事故事例について、文献や事故関連データベースの調査を実施し、幅広い分野から水素事故データ

195件を収集した[1-11]。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、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取り扱った。

表1 調査概要

事故対象	国内で発生した水素ガス関連事故
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, 設備系, 車両, 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, 新时期1996.4～2002

2006年5月22日受理

2. 2 調査項目

調査項目に関しては、事故の区分および特徴についてキーワードを軸に分類した。事故パターンについては、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ケースに大きく分類し、さらに各々のケースについて細分類した。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、事故発生時と要因発生時の運転形態を規定した。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。災害現象については、破裂、爆発、火災、漏洩、その他に分類した。被害状況に関しては、死亡者及び負傷者の発生を基準に人的被害について区分した。物的被害に関しては、データ情報が不十分のため検討から除外した。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改正された高圧ガス取締法（1975.5公布）および規制体系が全般的に見直された高圧ガス保安法制定（1996.3公布）の前後で区分した。事故事例分析に当たって、着火源も重要な因子であるが、残念ながら爆発・火災事故の半数近くが着火源不明であり、検討から除外した。

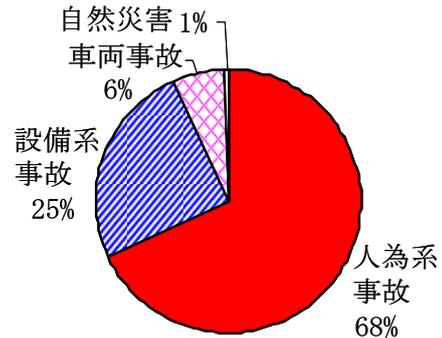


図1 事故パターン別の発生頻度

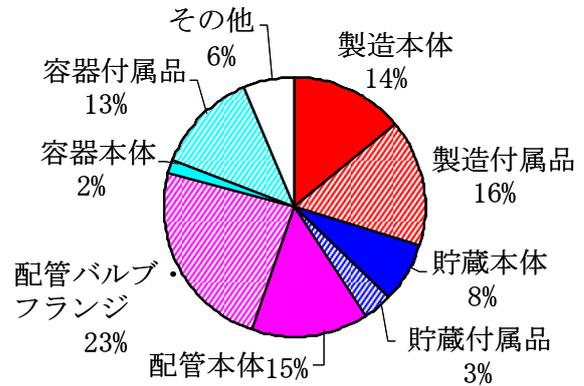


図2 部位別の発生頻度

3. 事故データの統計評価

図1に事故パターン別の発生頻度を示す。設備系事故よりも人為系事故の方が非常に多く、全体の約7割を占めるヒューマンエラー系事故対策の重要性を示している。自然災害が主要因の事故は稀にしか発生しないが、複合要因となった事例が数例あり、これについては後述する。

図2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すれば、弁・フランジ廻りの付属品系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、ポンプ廻りでの事故が多く、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。

図3に災害種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割を占めている。災害対策としては爆発、破裂、火災事故への対策が重要である。図4に人的被害別の発生頻度を示す。死亡事故は、過去約半世紀の間に21件発生し、事故全体の1割強を占めている。また、何らかの人的被害が発生した事例は、全体の4割に達している。

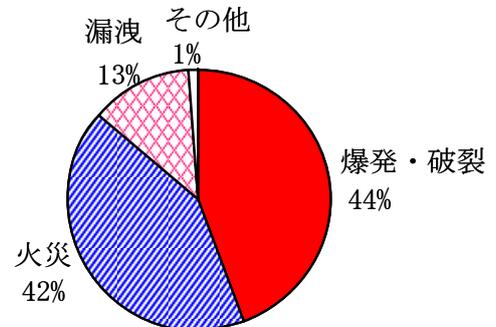


図3 災害種別の発生頻度

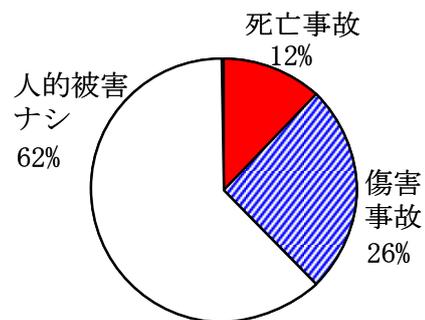


図4 人的被害別の発生頻度

人的被害が発生した事例を分析すると、当然ではあるが、事故発生時に近くに作業員がいた場合の被害が大きい傾向が見られた。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. 事故パターンの分類

表2に水素ガス事故のパターン別分析結果を整理した。人為系事故を12タイプ、設備系事故を6タイプ、車両事故を3タイプ、自然災害を2タイプに細分類して合計23タイプに区分した結果、過去に生じた水素事故について、発生パターンを明確に区分することができた。

4. 1 人為系事故パターン

4. 1. 1 点検不良型事故

点検不良に伴う事故は、全体の20%程度を占める。このタイプには、点検・修理等の作業自体は実施したが、わず

かに不備が生じていて、結果的に事故の遠因となったケースが多い。実施すべき作業行為を忘れた事故と比べると、不良の度合いが軽微なため、その場では事故に至らないが、時を経て不良度が進行して、他の要因と重なり予期せぬ事故を招くパターンが多く、事故の未然防止が難しいタイプである。「締付不良型」は、弁・継手・フランジ廻りで軽度の締付不良が長年見過ごされて締付力が低下し、運転開始又は停止時に高熱機器廻りの熱応力低下と重なって突発的に事故に至るパターンで、近年増加している。「溶接不良型」は、弁・フランジ廻りの溶接不良箇所から漏洩するパターンであるが、1984年を最後に報告例はない。「点検不良型」は、計器故障に気づかないケースと交換作業中の部品挿入ミスによる事故に分かれる。爆発・破裂事故が多く危険度が大きいタイプである。「不純物堆積型」は、触媒添加剤の配管内堆積により事故に至るケースである。

4. 1. 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。バルブ操作ミスや部品の誤使用といった単純な操作・

表2 水素ガス事故パターンの分析結果

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・非定常	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	
		不純物堆積	経年劣化 ⇨ 定常	爆弾	配管本体	火災	無	小	—	3	
	誤操作・誤判断・誤使用型	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	50 (29%)
		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	
		部品誤使用	点検・修理 ⇨ 定常	短時間	配管系	火災	無	小	平衡	6	
	認知確認ミス型	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	35 (20%)
		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	
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		
引継・連絡ミス		点検・移動 ⇨ 同時	瞬間	—	火災	無	小	—	3		
設備系	設計・構造不良型	素材不良	製作時 ⇨ 定常	時間差	配管系	火災	有	大	減少	4	16 (9%)
		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	
		設計不良	設計時 ⇨ 定常	時間差	配管本体	爆発	無	中	増加	6	
	劣化型	腐食	経年劣化 ⇨ 定常・非定常	爆弾	配管本体	火災	有	小	増加	12	27 (16%)
		亀裂・劣化	経年劣化 ⇨ 定常・非定常	爆弾	配管本体	火災	有	中	減少	12	
		機械振動	経年劣化 ⇨ 定常・非定常	爆弾	装置付属品	火災	無	小	—	3	
車両事故	衝突事故	運送中 ⇨ 同時	瞬間	車両容器	漏洩	—	—	平衡	5	11 (6%)	
	過スピード	運送中 ⇨ 同時	瞬間	車両容器	漏洩	—	—	平衡	4		
	事業所内	移動 ⇨ 同時	瞬間	ホース	火災	無	—	—	2		
自然災害	落雷	落雷 ⇨ ガス放出時	瞬間	ペントスタック	火災	無	—	—	(3)	1 (1%)	
	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「(制限)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。

使用ミスによる事故が減少する一方で、作業手順・資材管理・工具取り扱いの遵守といった作業管理に関わる事故は元をたざせば単純なミスであっても、事故は減っていない。

「禁じ行為型」には、予期しない化学反応による事故と水素雰囲気下で何らかの着火源により爆発に至る事故に分かれる。総じて爆発・破裂事故が多く、被害が大きいのが特徴である。「作業管理ミス型」は、容器の積降し・充填作業中の乱暴行為、工具取扱いミス、資材管理ミス、点検作業の手順前後による事故パターンで、近年増加している。

「バルブ操作ミス型」は、単純なバルブ開閉ミスによる事故ケースであり、1977年を最後に報告例はない。「部品誤使用型」は、配管・仕切り板・計器といった部品類の不適用による事故である。誤って使用してから短時間のうちに事故発生に至るケースが多いが、1977年を最後に報告例がない。

4. 1. 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。「置換不良型」は、不完全な窒素パージが原因の爆発事故である。パージ作業自体を忘れて起こる事故が減少する一方で、このタイプは増加傾向にあり、人的被害が大きい。「残ガス確認ミス型」は、タンク内の残存ガスを未確認のまま開放して爆発に至るケースである。事故は減少傾向にあるが、被害度は最も大きい。「容器運搬型」は、容器積載時のロープ掛け固定ミスやバルブ閉止の不具合が原因の事故で、近年減少している。「引継・連絡ミス型」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. 2 設備系事故パターン

4. 2. 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は少なく、配管や弁・フランジ廻りの事故が圧倒的に多いのが特徴である。「素材不良型」は、配管、フランジ、リング、ネジ等の材質不良や材料選定ミスが原因である。「製作不良型」は、製作段階のネジの噛合せ不具合、ノズル肉厚不足、ボルト長さの不足が原因である。「設計不良型」は、袋小路配管構造、高熱装置の配置ミス、排気ファンの基本性能不足といった設計ミスが原因のケースである。

4. 2. 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、突発的に発生することが多く、事故が隠れやすいのが特徴である。

「腐食型」は、引張応力下の金属材の応力腐食割れ、水素脆化、ポンプ廻りのキャビテーション等、腐食作用による事故で、近年増加している。運転形態を問わず突発的に発生するが、スタートアップ、シャットダウン、試験時など作業員が近くにいるケースでは人的被害が大きく、通常運転中の事故は被害が小さいケースが多い。「亀裂・劣化型」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で突発的に事故が発生するケースである。爆発事故も多く、腐食型と同様に作業員が近くにいるケースでは、人的被害が大きい傾向にある。「機械振動型」は、圧縮機やポンプ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. 3 車両事故

車両事故は事故全体の6%を占める。重大な被害はほとんどが交通事故による人身被害で、容器破損や水素ガス漏えいに伴う人的被害は軽微なケースが多い。但し、事故発生地点によっては、近隣民家への延焼や窓ガラスの破損といった物的被害も発生しており、注意を要する。「衝突事故型」は、右折車両との接触、交差点での出会い頭の事故、後方からの無理な追い越しや居眠り運転車両の追突を受けてのもらい事故が原因である。もらい事故対策に関しては、車両後方の安全確保が重要である。「過スピード型」は、スピードの出し過ぎが原因で、積載車両からの容器転落を招いて事故に至るパターンであり、容器固定ミスと重なって起きたケースが多い。「事業所内型」は、事業所内で容器の充填・取替作業開始時に、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. 4 自然災害事故

自然災害が主要因の事故は地震の1例のみで、主要因となる人為的ミスと重なって事故が生じた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後の補修点検ミス、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等が主な事故原因である。落雷に関しては、施設内に避雷針があっても、スタック塔頂と近接して引火したケースもあり注意を要する。

5. 事故パターン別の要因分析

図5に事故パターンと事故発生部位の関係を示す。発生頻度が高いのは、締付不良型のように不良度が軽微でミスに気付きにくいタイプや、禁じ行為型のように教育・管理の徹底が不十分で生じる事故タイプである。禁じ行為型や作業管理型事故のように、作業規準や連絡不備による事故は、場所を問わずに発生する。置換不良型や残ガス確認ミス型は、製造・貯蔵設備で多発している。設備系事故は配管系設備で多発する傾向が見られる。

図6に事故パターンと災害現象の関係を示す。爆発・破裂事故では人的被害が大きく、人命保護の立場から最重点課題と言える。火災止まりの事故では、死亡事故は発生していない。タンク開放に伴い混合気が発生して爆発に至るケースや、事故発生時に近くに人がいるケースでは、被害が大きい傾向にあり、置換不良型や残ガス確認ミス型がその代表である。締付不良型のように不良度が軽微なケースや、容器運搬ミス型のように事故対策の想定が容易で、安全装置が完備されたケースでは、火災止まりの事故が多い。

図7に事故発生の時代傾向を示す。貯蔵設備の事故については、残ガス確認ミス型のような「忘れ型」事故が減少する一方で、置換不良型のように窒素パージを実施したつもりでいたが、パージが不完全で事故に至る「つもり型」事故が増加している。弁・フランジ廻りの事故については、締付け・取付け作業を怠った「忘れ型」事故が減少する一方で、締付け・取付け行為は行ったが、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」事故が増加傾向にある。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、盲点になりやすく、安全対策の進歩した今日でも事故が減っていない。

図8には事故パターンと事故発生経緯の関係を示す。要因発生(左図)と事故発生(右図)の時間差を基準に分類すると、「時限爆弾型」と「瞬間・時間差型」に区別できる。時限爆弾型は、過去特定不明な時期の不完全な点検作業や腐食が原因で、通常運転時に突発的に事故が発生するタイプであり、原因の特定及び事故の未然防止が難しいが、配管や弁・フランジ廻りで起こり、ガス漏洩量が少ない事例が多く、災害規模は一般に小さいのが特徴である。締付不良型や腐食型が代表的ケースである。一方、瞬間・時間差型は、点検・修理・清掃作業中の不備が原因で、その直後あるいは運転再開直後に事故が発生するパターンで、不良度が大きく、特にタンク開放やバルブ急開放に伴う爆発

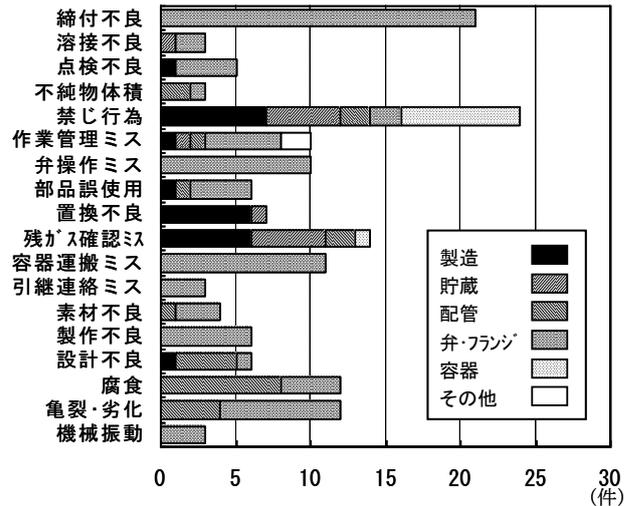


図5 事故パターンと事故発生部位の関係

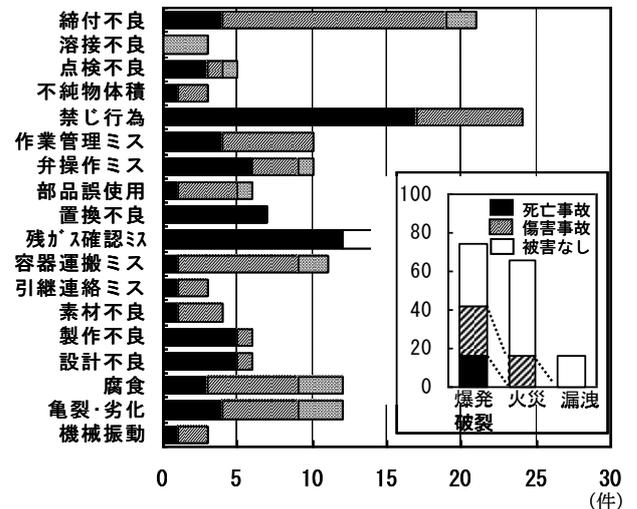


図6 事故パターンと災害現象の関係

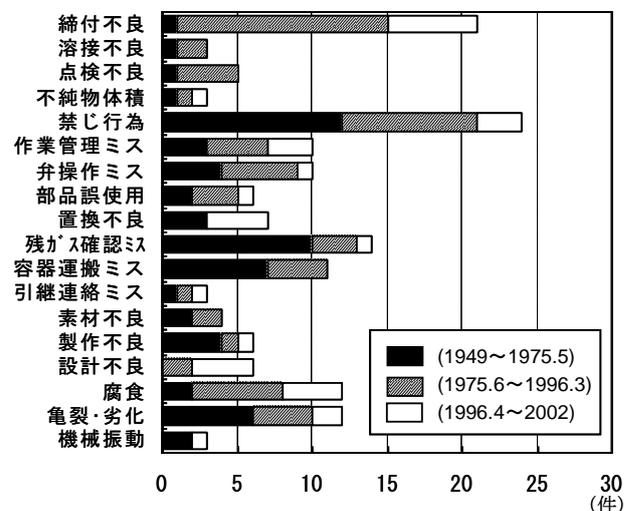


図7 事故パターンと発生年代の関係

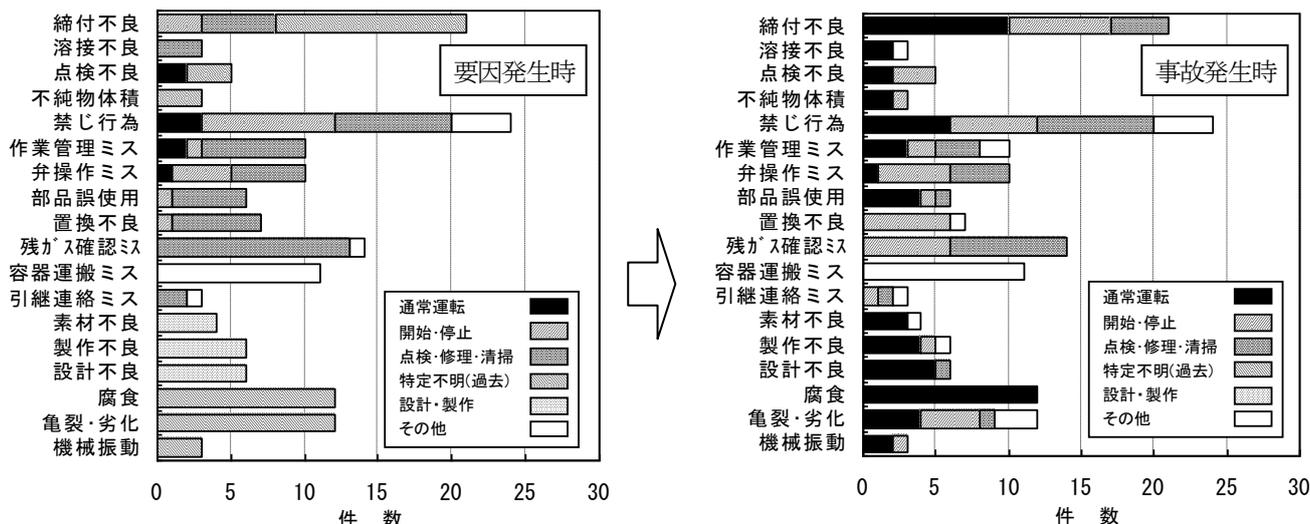


図8 事故パターンと事故発生経緯の関係

事故では災害規模が大きいのが特徴である。弁操作ミス型、置換不良型、残ガス確認ミス型が代表的ケースである。

実際に事故が発生した時点では、定常時と非定常時が共に4割程度だが、要因発生時点に遡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と言える。

6. まとめ

水素ガス事故事例について、一つ一つの事例は限られた情報であっても、まとまった事例をパターン別に分類して要因分析することにより、事故に至る経緯や傾向を把握できた。その結果、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や、強度面で弱点となり易い弁・フランジ廻りの事故が過半数を占めることが明らかとなった。また、単純な操作・使用ミスによる事故が減少する一方で、作業管理の不備に関連する事故は、根本要因が単純であっても事故が減っていないことが明らかになった。災害現象については、爆発・破裂事故対策が最重要課題であることが改めて浮き彫りとなった。また、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「時限爆弾型」の事故や、不完全な点検・確認作業を見逃して生じる「つもり型」の事故は盲点になり易く、特に注意を要することが判明した。

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関係者の皆様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. 安全工学会；火災爆発事故事例集、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・事故事例辞典、丸善、2002
8. 高圧ガス保安協会；平成14年度事故事例検索システム、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；事故災害データベース、
<http://www.nlir.or.jp/service/databank/database>