

化学プロセス産業での爆発・火災における 作業工程と事象進展の分析

板垣 晴彦*1

化学工場における爆発火災事故は、労働者や設備への被害が甚大になることが少なくない。事故事例を調べてみると正常運転中に発生した事例が最も多かったが、定期修理時や新設または改造工事中、あるいは、何らかの異常に対処している際など、実時間としては短い作業工程での事例が少なくなかった。そこで、労働安全衛生総合研究所の爆発火災データベースを用い、どのような作業工程のときに多いのか、また事故が起きた際の事象の進展はどのようなものであるかの分析を行った。その結果、バッチ操作中が半分弱、連続運転中が約 1/4 を占めること、事象の進展は、爆発から火災へは多いがその逆は少ないこと、作業工程によって、事象が多重に進展する確率が異なることなどを見いだした。これらの結果は、事故の防止対策についての有力な情報である。

キーワード: 化学プロセス産業、爆発火災、事故分析、事象進展。

1. はじめに

化学工場における爆発火災事故は、かつてよりは発生件数が減少しているものの、万一発生した場合には、労働者や設備への被害が甚大になりがちである。化学工場での事故というと通常運転中の化学反応によるものがまず思い浮かぶ。しかし、調べてみると定期修理時、装置の新設や改造工事中のほか、何らかの異常に対処している際にも事故が発生していた。そこで、労働安全衛生総合研究所（以下、安衛研）の爆発火災データベースを用い、どのような作業工程のときに事故が発生しているか、さらにその際の事象の進展がどのようなものであるかを分析した。

得られる結果は、事故の発生までにある前兆現象や進展を捉えることによって、事故に至ることを防ぐ対策の有力な情報になると考えられる。

2. 安衛研爆発火災データベースについて

1) 概略

安衛研爆発火災データベース¹⁾の原資料は、労働行政機関が事故調査をした際に作成した報告書である。同データベースの収録期間と件数は、2012年公開の第1次版から順次拡充され、2021年2月に公開した第6次版では1955～2010年、計6430件に達している。

収録されている情報項目は、大小を比較できる数値項目が「年」「死亡者数」「死傷者数」の3項目、自由な日本語文章形式が「事故の概要」の1項目、日本標準産業分類に基づく業種分類が「中分類」「小分類」の2項目、さらに原資料の記載内容から、それぞれ数単語以内に絞り込んだ独自項目である「発生場所」「発生装置」「原因物質」「着火源・原因」「作業工程」の5項目が付与されている。

2) 対象とする化学プロセス産業

今回は、化学プロセスの工程を中心に分析を行うことから、対象を化学プロセス産業で発生した事例に絞ることとした。その選択には業種分類を用い、具体的には業種が次の条件に合致する事例とした。大分類が「化学工業」「石油製品・石炭製品製造業」「パルプ・紙・紙加工品製造業」。中分類が「化学製品卸売業」。小分類が「マッチ製造業」「煙火製造業」。いずれかの条件に該当する事例数は、1965～2010年では1041件であった。

なお、業種を絞ってはいるが、化学プロセス産業であっても、製品の包装や出荷の工程、電気などのユーティリティに起因する事例など化学プロセスとの直接的な関連がみられない事例があり、それらを含めた事故全般に対する分析としている。

3) 独自5項目の再分類

元データベースにある独自5項目は自由記述であることから、集計による分析を行うためにあらかじめ作成した分類表により再分類を実施した。その分類表を表1～5に示す。表中の数字は、対象とした1041件についての件数（複数回答あり）である。

表1 発生場所の分類とその件数

大分類	小分類
プラント842	塔槽類/回転機器/配管系/付属設備/ユーティリティ/その他
荷役輸送設備34	受入払出設備/クレーン/トラック・ローリー・車/鉄道貨車/船舶/その他
付属建物159	倉庫/研究・実験室/事務所/焼却・廃棄物処理/作業室・工室/その他
その他/不明6	その他/不明

表2 発生装置の分類とその件数

大分類	小分類
塔槽類589	加熱炉/反応器/蒸留塔/熱交換器/分離器/吸収塔/容器・貯槽/ポンペ/乾燥器/ドラム缶/溶解・混合槽/その他

*1 労働安全衛生総合研究所化学物質情報管理研究センター
連絡先：〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6
労働安全衛生総合研究所 化学物質情報管理研究センター 板垣晴彦
E-mail: itagaki@s.jniosh.johas.go.jp

回転機器119	圧縮機/ポンプ/送風機/混合機/粉碎機・ふるい機/その他
配管系155	配管/継手/バルブ/その他
付属設備46	安全弁/破裂板/他の緊急設備/計装装置/断熱材/ピット/実験機器/その他
ユーティリティ47	ボイラー/変電所/焼却・廃棄/その他
荷役設備18	陸上荷役/海上荷役/その他
輸送運搬12	普通車/トラック/タンクローリー/鉄道車両/船舶/その他
その他/不明55	その他/なし/不明

表3 原因物質の分類とその件数

大分類	小分類
火薬爆薬類34	爆薬弾薬/火工品/煙火・花火・マッチ/その他
可燃性ガス256	圧縮ガス/液化ガス/溶解ガス/特殊材料ガス/その他
可燃性液体472	石油類/有機溶剤/純物質/廃液/廃油/酸アルカリ/その他
可燃性固体134	可燃物/金属粉/有機物粉/その他
反応性物質168	自然発火性/禁水性/反応性/酸化性/過酸化/その他
高温物質43	金属溶湯/熱水・水酸化ナトリウム液/他の高温液体/火炎・バーナー・火花/高温固体/高温ガス/その他
有害性物質9	有害性ガス/有害性液体/有害性固体/その他
放射性物質0	放射性燃料/放射性廃棄物/医療用放射性/その他
その他/不明14	その他/不明

表4 着火源・原因の分類とその件数

大分類	小分類
溶接溶断53	溶接溶断火花/溶接火炎/その他
火炎バーナー78	バーナー/裸火/ストーブ/点火具/逆火/火の粉/その他
衝撃摩擦156	衝撃・衝撃火花/摩擦・摩擦火花/摩擦熱/断熱圧縮/その他
高温物76	高温表面/乾燥器・ヒーター/溶湯・高温液体/高温気体/高温固体/その他
化学反応330	自然発火/水との接触/混触・一般反応/暴走反応/分解爆発/触媒/その他
電氣的286	電気火花/静電気火花/過電流・過負荷/落雷/その他
一般火災2	一般火災・延焼/放火/その他
物理的16	水蒸気爆発/突沸/その他
単純破裂52	過圧・閉塞破裂/材料劣化破壊/固定不良破裂
その他/不明105	その他/転落/不明

表5 作業工程の分類

大分類	小分類	細分類
連続運転260	スタートアップ/定常運転/シャットダウン/試運転/再スタート/試験研究/その他	原料仕込み/原料追加/移送/払い出し
バッチ操作480	正常操作/試験研究	/反応/分離/
運転停止52	定期検査/異常の点検/その他	粉碎/混合/乾燥/加温/
緊急操作61	停電/緊急全停止/緊急部分停止/異常対処操作/その他	冷却/加圧/減圧/貯蔵・
建設修理104	溶接溶断/塗装/資材運搬/解体/原料除去/組立/検査/交換修理/その他	保存/蒸留・濃縮/清掃・洗淨/焼却・
荷役作業55	原料受入/製品払出/輸送中/その他	廃棄/サンプリング/なし/
その他/不明31	その他/不明	その他/不明

3. 分析結果

1) 発生件数の推移

化学プロセス産業における爆発火災の発生件数の推移を図1に示す。傾向は、全産業と類似しており1960年代には最大で50件/年のときがあったが、1970年代の10年間でほぼ半減の20件/年程度に減少し、2001~2010年の平均値は15.3件/年となっている。

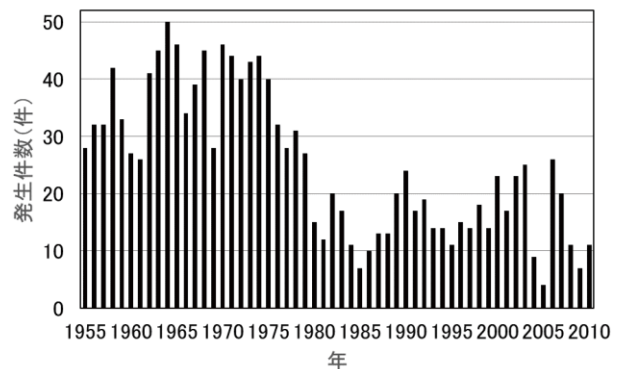


図1 化学プロセス産業での爆発火災の発生件数

2) 年代別の分析結果

(1) 業種の構成比

図2に1960年以降、10年ごとの業種の構成比を示した。図1のとおり1970年代で発生件数が半減しているが、図2の業種の構成比で見ると、大きな変動は見られない。最も多い業種は有機化学（石油化学系基礎製品、プラスチック、脂肪族系・環式中間物、合成のゴムや染料等の製造）の40%強である。その次はかつては無機化学（ソーダ、圧縮ガス、液化ガス、塩等の製造）が多かったが、石油石炭の構成比が徐々に高くなり1990年以降は無機化学を上回るようになっている。

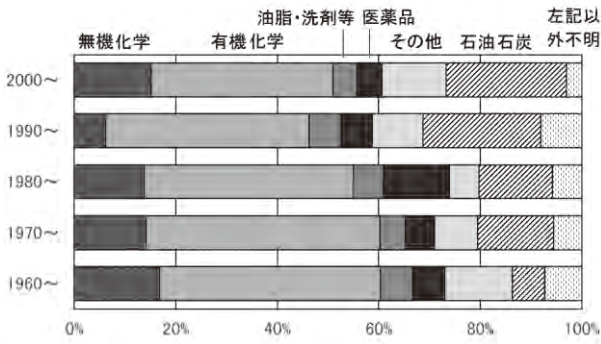


図2 年代別の業種の構成比

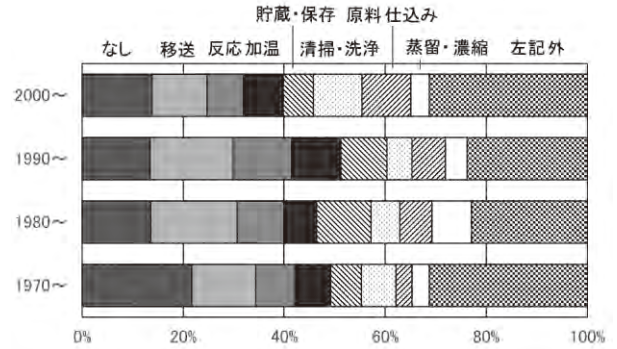


図5 年代別の作業工程（細分類）の構成比

(2) 作業工程の構成比

図3～5に、1970年以降、10年ごとの作業工程の構成比を示した。

図3の大分類を見ると、どの年代でも連続運転よりもバッチ操作の方が多いがその差は近年では減少している。また、何らかのトラブルに伴う緊急操作時がどの年代でも5～10%ほどある。

図4の小分類では、「(バッチ操作中) 正常操作」が最も多く、「(連続運転中の) 定常運転」と合わせた特に異常がない正常運転中が半数を超え、近年はほぼ60%である。実時間での正常運転の割合は60%よりもかなり多いと考えられることから、単位時間あたりの事故率は正常運転ではない場合の方が高いことになる。

図5の小分類では、「なし」と「移送」がやや多い程度であり、「反応」「加温」「貯蔵」「清掃」「仕込み」といった様々な作業工程において発生していること

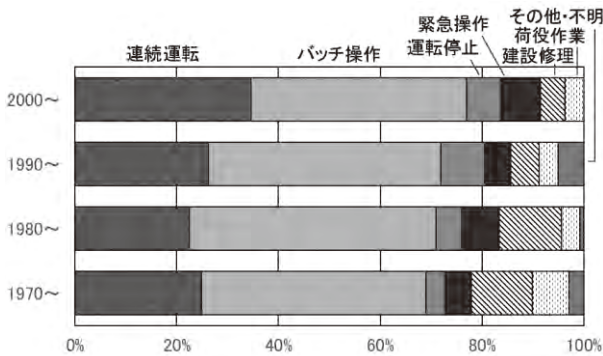


図3 年代別の作業工程（大分類）の構成比

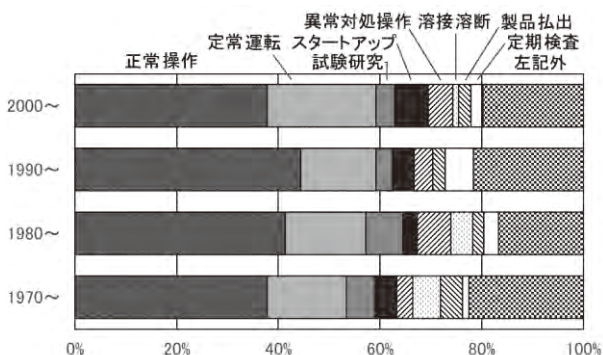


図4 年代別の作業工程（小分類）の構成比

がわかる。

業種別と同様に、作業工程の構成比については、いずれも年代に伴う明確な傾向の変化は見られない。

3) 作業工程別の分析

(1) 作業工程（大分類）別の割合

作業工程（大分類）の構成比を図6に示す。1/2弱の480件がバッチ操作、約1/4の260件が連続運転であり、この2つを合わせた正常運転中の事故が約3/4を占めていた。連続運転とバッチ操作では、定常運転と正常操作が大部分であり、スタートアップと試験研究が次に多い。一方、何らかのトラブルが発生し、その緊急操作をしていた際の事故が61件あった。

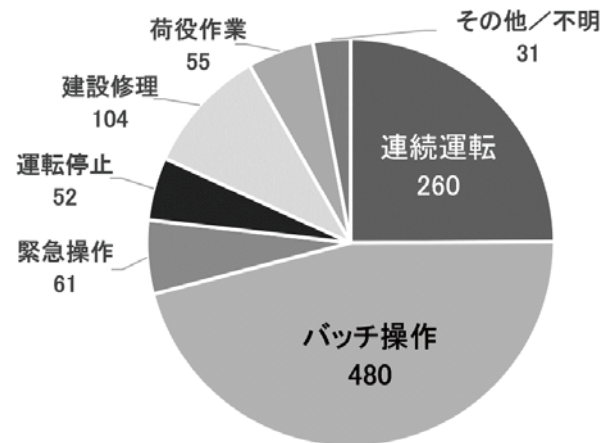


図6 作業工程（大分類）別の件数

(2) 作業工程（大分類）別の同（小分類）の件数

表6は、作業工程（大分類）別に、同（小分類）の件数を集計した結果である。連続運転では移送、運転停止ではなしと清掃・洗浄、緊急操作では反応が多かった。一方、バッチ操作では、様々な作業工程で事故が発生していることから、事故防止に当たっては多様な対応策を講じる必要がある。

表7には、作業工程（大分類）別の同（小分類）の集計結果を示した。

表6 作業工程（大分類）別の同（細分類）の件数

連続運転	バッチ操作	運転停止	緊急操作	建設修理
260	480	52	61	104
移送	原料仕込	なし	反応	なし
60	46	18	15	64
なし	貯蔵保存	清掃洗浄	移送	移送
32	44	16	7	5
加温	反応	貯蔵保存	なし	清掃洗浄
29	43	8	7	5
蒸留濃縮	清掃洗浄	移送	加温	払い出し
16	36	2	4	3
反応	加温	払い出し	冷却	貯蔵保存
15	30	1	4	2
焼却廃棄	原料追加	混合	貯蔵保存	反応
14	26	1	4	1
分離	移送	加温	その他	焼却廃棄
12	25	1	4	1
上記外	乾燥	加圧	上記外	
53	23	1	8	
	上記外			
	111			

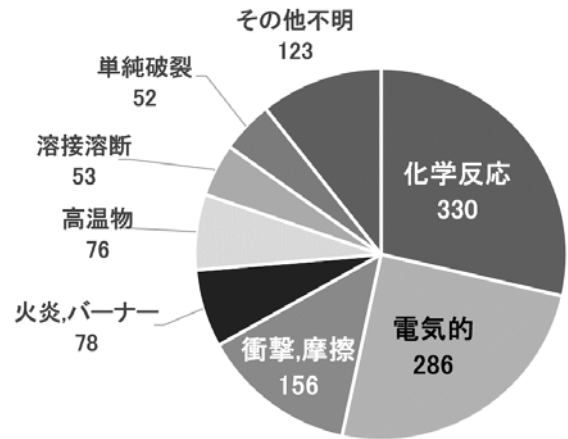


図7 着火源・原因（大分類）の件数

表8 作業工程（大分類）別の着火源・原因（小分類）の件数

連続運転	バッチ操作	運転停止	緊急操作	建設修理
260	480	52	61	104
自然発火	静電気	自然発火	暴走反応	溶接溶断 火花 32
54	134	14	16	
静電気	暴走反応	高温表面	自然発火	溶接火炎
46	53	9	10	13
高温表面	衝撃,衝撃火 花49	静電気	混触,一般 反応 7	自然発火
25		6		13
不明	自然発火	衝撃,衝撃 火花 4	静電気	静電気
25	39	5	5	8
バーナー	不明	混触,一般 反応 4	バーナー	高温物と の接触8
20	36		5	
電気火花	電気火花	電気火花	分解爆発	摩擦摩擦 火花 7
14	35	4	5	
	摩擦,摩擦火 花 25			衝撃衝撃 火花 6
	バーナー			電気火花
	20			6

表7 作業工程（大分類）別の同（小分類）の件数

連続運転	バッチ操作	運転停止	緊急操作	建設修理
260	480	52	61	104
定常運転	正常操作	定期検査	異常対処 操作 41	溶接溶断 42
157	416	25		
スタートア ップ45	試験研究 53	その他停止 16	停電 9	交換修理 18
16	5	10	5	14
シャットダ ウン 15	再スタート 2	試験研究 1	緊急部分 停止 4	原料除去 10
	再スタート 14	溶接溶断 1	その他操 作 3	その他建 設 10
上記外 14	上記外 4			上記外 10

4) 着火源・原因の分析

図7は、着火源・原因（大分類）の構成比である。多くの要因が着火源・原因となっているが、その中では化学反応と電氣的が特に多く、この2つで半数以上を占める。全業種での同様の分析では、火炎・バーナーが多くなったが、化学プロセス産業に絞ると火炎・バーナーは第4位、78件と少ない。化学プロセス産業では、可燃性物質を取り扱うことが極めて多く、火気管理が徹底されているためと思われる。

表8は、作業工程（大分類）別に着火源・原因（小分類）同様に集計した結果である。工程（大分類）によって、上位となる着火源・原因は異なる。バッチ操作では、静電気が特に多い。何らかの操作に伴って静電気

が発生していることが要因とみられる。また、暴走反応は進行していく化学反応が想定からずれたことが要因として考えられる。

一方、連続運転と運転停止では、自然発火、静電気、高温表面が上位である。みかけが定常状態であるため、時間や環境条件が着火源・原因になっているとみられる。緊急操作については、着火源・原因は多様である。これは、その状態に至る進展の種類が様々で、その進展により着火源・原因が決まるためとみられる。建設修理については、溶接、溶断作業がしばしば使われており、その作業に起因する着火源・原因が多数を占めた。

5) 事象進展の分析

3つの作業工程それぞれについて事象の進展を図8～10に示す。第2列が主事象であり、第1列は主事象への要因、第3列と第4列が主事象後の進展である。線

幅が件数の大小を表しているが、主事象に至る要因、あるいは、第3列や第4列への進展がない事例があるため件数の和は一致しない。

(1) 連続運転の事象の進展

主事象の件数について見ると、「火災」103件と「ガス爆発」75件が多い。

主事象に至る要因については、「火災」45件は「流出」33件と「破損」8件ほかからの進展である。「ガス爆発」24件は「流出」11件と「破損」7件ほかからの進展で、どちらも「流出」「破損」が多い。主事象からの事象進展についてみると、ガス爆発75件のうち31件が火災26件ほかに進展していた。一方、逆方向の「火災」103件のうち、「ガス爆発」「火災」などへの進展は9件と非常に少なかった。

(2) バッチ操作の事象の進展

主事象の件数について見ると、「ガス爆発」155件が多く、次は「火災」92件、「反応爆発」89件である。主事象に至る要因については、「反応」が多く、ガス爆発14件、破裂12件、火災11件に進展していた。

主事象の進展については、「ガス爆発」155件中の78件が「火災」69件、「粉じん爆発」4件ほか進展している。一方、逆方向の「火災」から「ガス爆発」などに進展した件数は8件であった。

第3列にある「火災」146件は、ガス爆発69件、反応爆発31件、爆発22件、粉じん爆発13件ほかからの進展であった。

(3) 緊急操作の事象の進展

主事象の件数について見ると、「ガス爆発」「反応爆発」がやや多いが、「火災」「爆発」「破裂」も起きており多様である。主事象に至る要因は、「反応」のうち4件が「破裂」に進展した。さらにガス爆発2件、爆発1件、水蒸気爆発1件に進展し、大きな事故になっている。

主事象の進展については、「ガス爆発」と「爆発」からそれぞれ9件が火災に進展した。また「火災」11件のうちの4件が2次火災や粉じん爆発やガス爆発に進展した。さらに「2次のガス爆発」4件のうち3件で火災に進展しており、連続運転やバッチ操作よりも、事象が多重に連鎖する確率が高い結果となっている。

4. まとめ

安衛研爆発火災データベースを用い、化学プロセス産業での爆発・火災は、どのような作業工程のときに多いのか、また事故が起きた際の事象の進展はどのようなものであるかの分析を行い、以下の事項を得ることができた。

(1) 年代別の分析

- ・1970年代で発生件数が半減し、2001～2010年の平均値は15.3件/年であった。
- ・業種別と作業工程の構成比については、いずれも年代に伴う明確な変化はみられなかった。
- ・1990年以降は石油・石炭が無機化学を上回った。

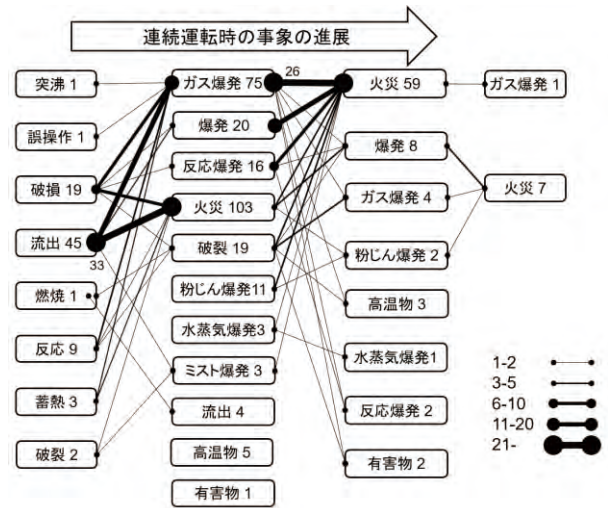


図8 連続運転時の事象の進展

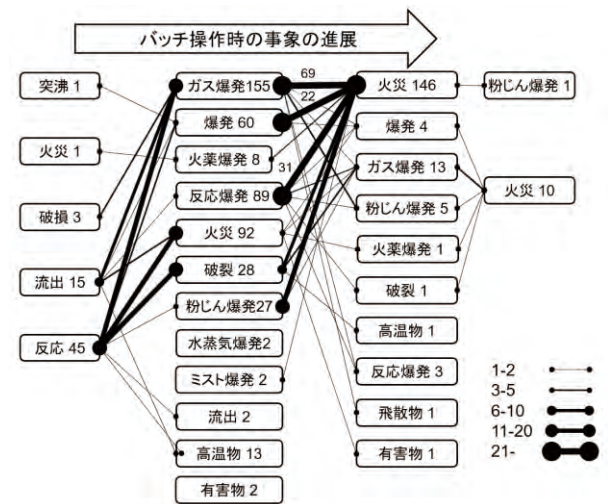


図9 バッチ操作時の事象の進展

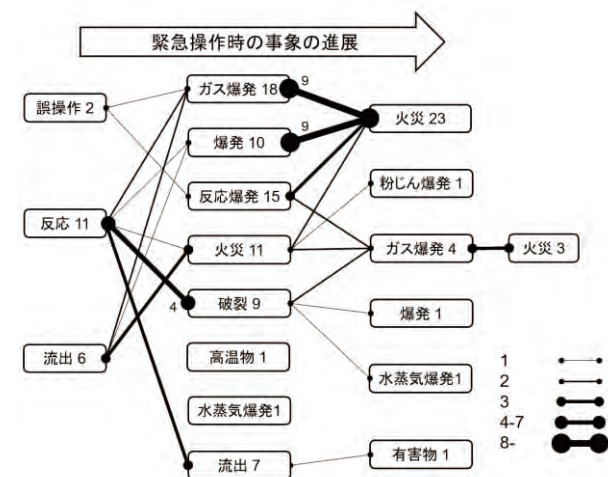


図10 緊急操作時の事象の進展

(2) 作業工程別の分析

- ・バッチ操作中が半分弱、連続運転が約1/4を占めた。
- ・バッチ操作時と連続運転時では、着火源・原因が異なった。
- ・緊急操作時の着火源・原因は、事象の進展の種類に応

じていた。

(3) 事象の進展の分析

- 爆発や火災のみで進展しない事例は多い。
- 事象が進展する事例では、爆発から火災へは多いが、その逆はわずかである。
- 第 4 列まで多重に進展する事例は限られる。その場合の進展はほとんどが「火災」である。
- 連続運転では、主事象への要因は、破損や流出が多い。
- バッチ操作では、反応が主事象への要因として多い。また多重の進展となりやすい。
- 緊急操作時では、事象の進展が 61 件中 31 件で起きており、進展する確率が高い。

参 考 文 献

- 1) 労働安全衛生総合研究所. 爆発火災データベースの公開 (第 6 次). 2020.
http://www.jniosh.johas.go.jp/publication/houkoku/houkoku_2020_05.html (最終アクセス日 2022 年 7 月 11 日)