

# プロセスプラントのプロセス災害防止のための リスクアセスメント等の進め方

## 資料編

**資料編**には、STEP 1 で使用する質問票と、STEP 2 のリスクアセスメント等実施時に参考となる事例などを示した以下の表をまとめています。実施マニュアルと合わせて利用することができます。

※ 表番号は技術資料に合わせています。

表4 取り扱い物質及びプロセスに係る危険源把握のための質問票

I. 物質単独の危険源

| 質問   | どちらかに○        | 説明・事例   |
|--|---------------|---|
| 1. 取り扱い物質は、危険性又は有害性等の調査（リスクアセスメント）を義務付けられているか？     | はい<br><br>いいえ | 説明：通知対象物質（参考資料の表 A1 を参照）は、有害性だけでなく、プロセス災害の危険源となる爆発性や可燃性を有するものも多い。物質が持つ物理化学的危険性、健康・環境に対する有害性は、物質の SDS に記載の GHS 分類（参考資料の表 A2）を参照のこと。  |
| 2. 取り扱い物質は、いずれかの GHS 分類が「分類対象外」「区分外」「タイプ G」以外のものか？ | はい<br><br>いいえ | 説明：GHS 分類は、SDS の「2. 危険有害性の要約」 <sup>1</sup> に記載されている。この段階では、「分類できない」は危険源があるものとみなす。それぞれの分類の詳細な説明は、参考資料の表 A2 を参照のこと。   |
| 3. 取り扱い物質は、可燃性、引火性か？                               | はい<br><br>いいえ | 説明：SDS が存在しない、製品ではない物質（気体、液体、固体）でも、爆発火災を起こす可能性を持つ物質は存在する（石油精製時の排ガス、有機系の廃液、可燃性のごみなど）。その中でも、可燃性ガスなどは、ごく一般に使用されており、それが故に爆発火災を引き起こす可能性も高い。<br><br>事例 1：道路舗装工事会社のアスファルトプラントにおいて、アスファルト貯蔵タンク（高さ 9.2m）にアスファルト原料を送入する配管が詰まった。機械修理業者の 3 名が配管を交換作業中、タンクが爆発して天蓋がめくり上がり、天蓋上で溶断作業をしていた 1 名が地上に墜落して死亡した。原因は、配管のフランジのボルトをアセチレンガス溶断した際、配管内のアスファルトの可燃性ガスが溶断の火花により着火したとみられる。<br>事例 2：製油所蒸留脱硫エリアでの定期修理後のスタートアップにおいて、空気による送風テスト中、突然燃焼炉上部の煙道内でガス爆発を生じた。原因は、バルブリークのためフレア系の可燃性の排ガス（メタン、水素、エチレン、エタンなど）が煙道内に流入して空気と混合し、何らかの着火源により爆発したと推定される。 |
| 4. 取り扱い物質は、爆発性に関わる原子団、あるいは、自己反応性に関わる原子団を持っているか？    | はい<br><br>いいえ | 説明：その物質が爆発性や自己反応性に関わる原子団を持っている場合、エネルギー（熱、衝撃、摩擦など）が加えられた時に急速に分解し、爆発を引き起こす可能性がある。原子団の例は参考資料の表 A3 及び表 A4 を参照のこと。<br><br>事例 1：染料中間体の製造工場において、半製品のジニトロ・パラ・クレゾールを製造する硝化機でのニトロ化工程の反応温度が設定値を超え、原料の滴下を停止したが、さらに温度は上昇し爆発した。<br>事例 2：ハイドロパーオキシドを生成する酸化反応器のエマージェンシー・シャットダウン時のインターロック解除により、酸化反応器への窒素の供給が停止し、液相の攪拌が停止した。冷却コイルのない液相上部でハイドロパーオキシドの分解熱が除熱できず、温度上昇により分解反応が加速し、酸化反応器が圧力上昇により破裂した。  |
| 5. 取り扱い物質は、可燃性（有機物、金属など）の粉体（可燃性粉じん）か？              | はい<br><br>いいえ | 説明：可燃性の粉じんは、大気中に分散され、着火することにより、爆発を引き起こす可能性がある。また、堆積すると自然発火する可能性がある。<br><br>事例 1：リサイクルするため、細かく砕いたアルミ片に付着した油分などを乾燥器で取り除く作業中、アルミ粉を吸い取る集じんダクトで粉じん爆発が起こった。静電気などがアルミ粉に引火したとみられる。<br>事例 2：自然発火により発電所の貯炭サイロから出火し、発電用ボイラーに石炭を運ぶベルトコンベアーのゴム製ベルトの一部を焼いた。   |

(次ページへ続く)

<sup>1</sup> JIS Z 7253 : 2012 「GHS に基づく化学品の危険有害性情報の伝達方法—ラベル、作業場内の表示及び安全データシート (SDS)」による表記

| 質問                                      | どちらかに○        | 説明・事例  |
|---|---------------|--|
| 6.取り扱い物質は、過酸化物を生成する物質か？                 | はい<br><br>いいえ | <p><b>説明：</b>エーテル、ビニル化合物などは、貯蔵中に大気中の酸素と反応し、過酸化物を生成する可能性がある。過酸化物は、衝撃や熱に対して敏感なものが多く、爆発を引き起こす可能性がある。この危険源についての GHS の分類項目はなく、SDS では危険源となるかどうか判断できない場合がある。物質の例は参考資料の表 A5 を参照のこと。</p> <p><b>事例：</b>フロン製造所の産業廃棄物置き場において、乾燥剤に使用されたモレキュラーシーブを運搬するためにドラム缶からひしゃくで移し替える作業中、代替フロンが塩化ビニリデンに分解し、空気中の酸素と接触して過酸化物が生成していたため、ひしゃくの衝撃により爆発した。</p>                        |
| 7.取り扱い物質は、重合反応を起こす物質か？                  | はい<br><br>いいえ | <p><b>説明：</b>重合しやすい物質は、重合禁止剤の不足や雰囲気調整の失敗などにより自己重合が起こってしまい、爆発を引き起こす可能性がある。この危険源についての GHS の分類項目はなく、SDS では危険源となる得るかどうか半断できない場合がある。物質の例は参考資料の表 A6 を参照のこと。</p> <p><b>事例：</b>アクリル酸製造施設内の高純度アクリル酸精製塔のボトム液を一時貯蔵する中間タンクにおいて、冷却不足により温度が上昇し、アクリル酸二量体生成反応が加速され、アクリル酸の重合反応を引き起こして、爆発・火災に至った。</p>  |
| 8.取り扱い物質は、液化ガスか？                        | はい<br><br>いいえ | <p><b>説明：</b>気体状のガスよりも密度が高いため、破壊・噴出すると大量のガスが発生する。なお、液化ガスの多くは極低温であるので、質問 13 にも該当する可能性が高い。</p> <p><b>事例：</b>化粧品工場内の容器に整髪料と噴射剤を充填するスプレー容器の充填機において、噴射剤を窒素から LPG に切り替えて運転を開始したところ、爆発して充填機が火災となり、7 名が火傷を負った。原因は、充填ホースの接続を誤っていたため運転中に LPG が漏洩し、部品加温用の電気乾燥機（非防爆）の電気火花により着火したとみられる。</p>   |
| 9.取り扱い物質は、SDS が存在していないけれども、危険有害性が疑われるか？ | はい<br><br>いいえ | <p><b>説明：</b>プロセス内の中間体や残留物などには、危険有害性が疑われる物質が存在する可能性がある。SDS はほとんどの場合存在せず、SDS のみに固執すると危険源が見落とされる可能性がある。</p> <p><b>事例 1：</b>カーボン工場内の原料油タンクにおいて、開放点検に向けてクレオソート油の移送作業などが行われていた。作業を終了してから約 90 分後、タンク底部の残存スラッジが空気と接触して発熱反応を起こしたため、可燃性ガスが発生するとともにスラッジが自然発火して、タンクが爆発した。</p> <p><b>事例 2：</b>ニトロトルエンを生成するバッチ蒸留缶から残渣をかき出しているとき、鏡板に設けられているマンホールからジェット火炎が噴出した。</p> |

(次ページへ続く)

## II. プロセスプラントにおける物質の反応や混合、物理条件<sup>2</sup>による危険源

| 質問   | どちらかに○        | 説明・事例   |
|--|---------------|---|
| 10.対象とするプロセスプラントは、意図的に反応（副反応・競合反応なども含む）を起こしているか？   | はい<br><br>いいえ | <p><b>説明：</b>プロセス内で意図的に起こしている反応は、効率よく製品が生成する条件を求めて、高温・高圧のもとで制御されていることが多い。しかし、その制御条件が逸脱して反応容器の温度が上がれば反応が暴走し、急激な温度・圧力の上昇をもたらすこととなる。</p> <p><b>事例 1：</b>ニトロ化反応で安全性向上の観点から、反応温度を下げたところ、反応速度が低下して滴下した混酸が反応器内に蓄積し、突然ニトロ化反応が加速し、反応器が爆発した。</p> <p><b>事例 2：</b>ニトロメトキシ安息香酸に塩化チオニルを加えるハロゲン化工程で、生成した塩素が暴走的な副反応を起こし、副生した塩化メチルが発火・爆発した。</p>  |
| 11.対象とするプロセスプラントは、何らかの物理的な操作の際に温度が上がるか？  | はい<br><br>いいえ | <p><b>説明：</b>意図的な反応工程以外の物理的な操作のプロセスには、物質の温度を上げるかもしれない操作がある（吸着、激しい混合、溶解、希釈など）。温度が上がることにより、さらに発熱したり、毒性・可燃性ガスを発生したり、爆発したりするような意図しない反応を引き起こす可能性がある。操作中の意図的な加熱（蒸気による外部加熱など）は含まない。ただし、ある温度では反応しなかった物質などが、温度が上がることによって反応する可能性に注意すること。</p> <p><b>事例 1：</b>アクリル酸メチル貯蔵タンクへの送液中に、タンク内のアクリル酸メチル蒸気の可燃性混合気が活性炭への吸着熱および酸化熱により発火爆発した。</p> <p><b>事例 2：</b>合成ゴム製造工場において、重合反応後のスチレンブタジエンゴムを圧縮し水分を飛ばす押し出し乾燥機を起動したところ、乾燥機の回転数をいきなり最大にしたため、合成ゴムが圧縮と摩擦熱によって発火、火災となった。</p>  |
| 12.対象とするプロセスプラントは、意図した物質の混合や、意図していない物質の混入により、以下のいずれかの可能性があるか？<br>(1)温度が上昇する<br>(2)参考資料の表 A2 の GHS 分類のいずれかの危険源となる物質を生成する（質問 2.参照）<br>(3)大量のガスを発生する<br>(4)取り扱う物質の熱安定性が低下する | はい<br><br>いいえ | <p><b>説明：</b>複数の物質が混合することで、質問に示す現象が起こる可能性がある。いずれも意図しない爆発・火災などのプロセス災害を引き起こす可能性がある。</p> <p><b>事例 1：</b>酢酸製造プロセスで、反応塔にアセトアルデヒド、触媒、酸素を仕込み、加温を開始してしばらく経過した後、触媒量が多かったため、内部温度が上昇して反応暴走に至り、塔頂部分が爆発した。</p> <p><b>事例 2：</b>処理を受託した産業廃棄物のうち、アルミペースト（アルミニウム金属粉末を含む）とアミン系廃油（水に溶解することでアルカリ性を示す）が廃油貯蔵タンク内で混合したことにより、反応が徐々に進行し、数時間後に反応が暴走した。発生した水素などの可燃性ガスに着火し、爆発・火災となった。</p> <p><b>事例 3：</b>ジクロロアニリンを製造するバッチ水添反応器で、微量の硝酸イオンが混入したため、不安定な中間体が生成、蓄積し、破壊的な暴走反応が起きた。</p> <p><b>事例 4：</b>ヒドロキシルアミン 50%水溶液の再蒸留塔が運転中に突然爆発した。</p> |

(次ページへ続く)

<sup>2</sup> プラント・設備で危険源となりうる物理条件の例を参考資料の表 A7 に示している。

| 質問   | どちらかに○            | 説明・事例  |
|--|-------------------|--|
| <p>13.対象とするプロセスプラントは、常温・常圧ではない箇所（高温、低温、高圧、真空（低圧）、繰り返し昇温・降温、昇圧・降圧）が存在するか？</p> | <p>はい<br/>いいえ</p> | <p><b>説明：</b>常温・常圧ではない箇所は、温度の観点では高温、低温、繰り返し生じる昇温・降温があり、圧力の観点では高圧（高圧ガス保安法の規制に該当しない程度の圧力も含む）、真空（低圧）、繰り返し生じる昇圧・降圧がある。そのような箇所が存在すると、シール部分の劣化などにより内容物が漏洩する可能性がある。また、逆に大気などがプロセス内に侵入し、内容物と反応する可能性がある。</p> <p><b>事例 1：</b>製油所において、肉盛り補修した箇所でも内部腐食が進行し、減肉・開口に至り、内部の油と重質軽油のガスが漏れ、高温部分により発火した。</p> <p><b>事例 2：</b>アセチレン除去器の配管が低温脆性による破壊を生じ、管内の液体酸素が側溝（油、ボロなどのある溝）に流出。低温脆性により破壊したすき間より流出した液体酸素と側溝内に蓄積されていた油、ボロなどの接触により燃焼、続いて配管内のアセチレンガス体に引火爆発した。</p> <p><b>事例 3：</b>繊維工場において、高圧染色槽（圧力容器）の運転を開始してから約 90 分後、突然蓋が蒸気圧により飛散して、蒸気、染色用の熱湯、糸くずなどが上方に飛散したため、工場の屋根や窓ガラスなどが破損した。原因は、安全装置の整備不良があり、電磁弁用空気操作圧力の不足、あるいは、ロックピンと空気抜き回転弁とのずれによりロックピンが外れたためである。</p> <p><b>事例 4：</b>半導体原料の製造工場の実験室において、自然発火性のトリメチルインジウムを昇華反応により小分け充填する装置の充填試験を実施中、真空度が上がらないので設計者が作業を引き継ぎ、漏れ試験をしようとバルブを開いたところ、十数秒後にトリメチルインジウムの中間容器が破裂した。真空充填装置と装置の架台が変形破損し、2 名が負傷した。原因は、バルブの開閉状況を正確に確認しないままバルブを開いたため空気が混入し、トリメチルインジウムが自然発火した。</p> <p><b>事例 5：</b>割れ部分から漏れた高温ナフサが自然発火し、小炎になった。当該溶接部の形状が不良のため、配管の熱伸縮に伴う繰り返し応力が形状不良部に集中し、割れに至った。</p> <p><b>事例 6：</b>70MPa 圧縮水素スタンドにて充填試験終了後、充填ホースの圧力が急激に低下した。作業員が水素の漏洩音を確認したため、設備を手動で停止した。その後、漏洩箇所がディスペンサー充填ホース上部であることを確認した。何らかの原因でホース内面に発生した亀裂が、加圧の繰り返しによって進展し、貫通したことにより水素の漏洩が生じた。</p> |
| <p>14.対象とするプロセスプラントは、大量保管をしている箇所が存在するか？</p>                                  | <p>はい<br/>いいえ</p> | <p><b>説明：</b>SDS で危険源が表示されない物質であっても、大量の可燃性物質（ごみ固形化燃料、木材チップ、シュレッダーダスト、瓦礫、天ぷらかす、油分が付着した布など）が保有されると、微生物発酵や空気酸化を受け、蓄熱発火し、火災となる可能性がある。また可燃性物質以外にも、大量に保有された硝酸アンモニウムは昔から大爆発を起こしている。</p> <p><b>事例 1：</b>ごみ固形化燃料に存在した微生物が活動した結果、タンク内で発熱が起きて、その冷却作業中に内部で発生したメタンなどのガスが爆発した。</p> <p><b>事例 2：</b>大量に保管していた肥料用硝酸アンモニウム約 400t が突然爆発した。</p>  |

(次ページへ続く)

III. その他の要因による危険源

| 質問   | どちらかに○                 | 説明・事例  |
|--|------------------------|--|
| <p>15.対象とするプロセスプラントは、腐食が進みやすい箇所が存在するか？</p>                         | <p>はい<br/><br/>いいえ</p> | <p><b>説明</b>：金属で構成されている設備・装置は、不適切な鋼種の選択、不適切な環境での使用などにより腐食し、内容物の漏洩の原因となる。また、腐食孔から空気、水等が侵入し、内容物と反応する可能性がある。さらに、腐食部分の強度が低下するため、加圧されている場合には設備・装置が破裂するおそれがある。腐食の原因には、腐食性物質によるものはもちろんのこと、異種金属の接触によるもの、内容物の速い流れによるもの、材料にかかった応力が影響するものなど多種多様である。</p> <p><b>事例 1</b>：有機質肥料工場において、蒸煮器（圧力容器）を使用し、牛の角と蹄を蒸煮して加水分解中、容器に長さ約 1.8m の亀裂が生じて蒸気と内容物が噴出し、建屋の一部が破損した。原因は、有機質原料からは腐食性の強いガスと液体が生成し、8 年半の使用で腐食が進行して、圧力に耐えきれずに破裂したとみられる。</p> <p><b>事例 2</b>：重質軽油水素化脱硫プラントで低圧分離された油からナフサ分を分離する脱硫放散塔から漏れ出したナフサが発火した。ナフサが漏出した孔は、1 年半前に肉盛溶接により補修した箇所であり、クラッド鋼の外側部分の炭素鋼溶融金属が内側部分のステンレス鋼溶融金属面から露出し、硫化水素などを含む腐食環境にさらされ、異種金属間の電位差による腐食が進行し、内部から減肉して開口に至ったとみられる。</p> <p><b>事例 3</b>：合成アルコールの製造設備の定常運転中、反応工程において、エチレンリサイクルガス昇温用加熱炉入口側のリサイクルガス配管の T 字管部が腐食（エロージョン・コロージョン）して、破損・開口し、エチレンリサイクルガスが漏洩して静電気により着火し火災となった。</p> <p><b>事例 4</b>：酒類製造工場内で、アルミ製の酎ハイの樽を洗浄する機械の温水調圧タンク（80～85℃、圧力容器、2m<sup>3</sup>、最高使用圧力 5 気圧）の設定圧力の調整中、温水調圧タンクの底面鏡板の溶接部が破断し、熱水を浴びて被災した。原因は、設置後 22 年間で内面腐食が進み、今回の 2.8 気圧から 3.0 気圧への水圧の昇圧調整に耐えられず、応力腐食割れが起きたと推定された。</p> |
| <p>16. 対象とするプロセスプラントは、外界からの影響要因（雨水による外面腐食、紫外線による材料劣化など）が存在するか？</p> | <p>はい<br/><br/>いいえ</p> | <p><b>説明</b>：雨水による外面腐食、紫外線による材料劣化などは、作業・操作に関する不具合、設備・装置の不具合、自然災害などの外部要因から検討する潜在する危険源の洗い出しで見落とされがちな影響要因である。</p> <p><b>事例</b>：製油所の常圧蒸留装置の定期修理後、スタートアップ時だけ使用するバイパス配管を使用して高温の水素を容器に流し昇温中、当該配管が突然破損し、漏れた水素が爆発して火災となった。原因は、破損部分の保温材には切り欠きがあり、塩分を含む雨水が浸透して腐食が進み、熱応力により破損したとみられる。</p>  |
| <p>17.対象とするプロセスプラントは、高電圧／高電流の箇所が存在するか？</p>                         | <p>はい<br/><br/>いいえ</p> | <p><b>説明</b>：感電はもちろんのこと、短絡・地絡を起こすとそれ自体が着火の原因となる可能性がある。ジュール熱によって電線素材の爆発を引き起こす可能性もある。</p> <p><b>事例</b>：ゴム引き加工工場で製品を乾燥中、ゴム糊中のトルエンが爆発した。原因は、乾燥設備の静電気除去用のバー型電極が長期間稼働しておらず表面が汚れており、メーカーの修理点検で未稼働の指摘を受け修理した。事故当日から通電を再開したため、汚れが過電流のジュール熱による高熱面で着火したもの。</p>  |

表5 作業・操作に関する不具合を検討するためのずれの例

| パラメータ    | ずれの例            |
|----------|-----------------|
| 作業・操作の順番 | 作業・操作を実行しない     |
|          | 逆の順番で作業・操作を実行する |
|          | 一部の作業・操作のみを実行する |
|          | 余計な作業・操作を実行する   |
|          | 異なる作業・操作を実行する   |
| 作業・操作の時期 | 作業・操作の実行が早過ぎる   |
|          | 作業・操作の実行が遅過ぎる   |
| 作業・操作の時間 | 作業・操作時間が長過ぎる    |
|          | 作業・操作時間が短過ぎる    |
| 充填量      | 充填量がゼロ          |
|          | 充填量が多過ぎる        |
|          | 充填量が少な過ぎる       |

表6 設備・装置に関する不具合の例

(a) 容器・配管系の破損

| 容器・配管系    | 説明   | 不具合, 及び引き起こされるプロセス異常の例  |
|-----------|--|---|
| 配管        | 流量, 耐圧, 耐食性などにより, 多種多様なものがある. 振動が伝わると劣化が進みやすく, ジョイント部も含めた点検・管理が必要である.        | 閉塞, 圧力損失の増大, 内圧低下, 減圧不良, 逆流, 漏洩, 漏れ込み, 圧力の急変 (水撃) など  |
| ダクト       | 配管と比べると径が大きく大流量であることが多い. 給気系や排気系などでしばしば共通設備として使われる.                          | 配管と同様の不具合. 一般に耐圧性能や構造強度は配管よりも劣る. 共通設備では, 流れ込み防止施策がないと異常時に逆流が起きる. 設計条件 (温度, 圧力, 風量) を超えて凝縮性プロセス流体が流れた場合には, ダクト内で凝縮することがあり, 漏出や堆積, 可燃性・蓄熱性の変性物の生成につながる. |
| タンク       | 気体用と液体用が一般的だが, 粉体に使われることがある. 一時貯留から長期保管まで用途は様々.                              | 漏洩, 漏れ込み, 破裂, 貯留中の物性 (粘度, 温度など) の変動, 揮発分喪失, 保温あるいは加温・冷却不良, 不均一な温度分布, 液面計と液面の不一致が起こりうる. ジャケットや内部コイル付きのタンクでは, その内部の熱媒・冷媒が漏れることがある.                      |
| 容器        | タンクと比べると容量は少なめのもの. 平常時に高圧であったり減圧であったりすることが多い.                                | タンクと同様の不具合が考えられる. 高圧あるいは減圧の場合には, 破裂, 内圧低下, 減圧不良, 圧力の急変に注意が必要となる.  |
| コンテナ      | 輸送用又は保管用の入れ物で, 蓋あるいは栓により密閉できるもの. メンテナンス不良でのトラブルが散見されるので, 点検・管理が重要である.        | 漏洩, 漏れ込み, 酸欠, 内容物の劣化が考えられる. 移動用のものでは, コンテナ自身の劣化が起こりやすい.   |
| フレキシブルホース | 振動がある箇所や地震対策, 作業範囲の拡大に必須である配管部品. 浸透性と耐久性に応じた素材の選定の他, ジョイント部の緩みなどの点検と管理がポイント. | 配管と同様の不具合. 一般に耐圧性能や材料強度, 経年劣化が問題になりやすい.   |
| サイトグラス    | 覗き窓や液面計のこと. 金属部とのシール部分が弱点であり, メンテナンスが必要である.                                  | 配管と同様の不具合. 透明部分 (ガラス, プラスチック) は一般に強度が低い.  |
| ガスケット/シール | 部品間の密閉性を保つための消耗部品. 消耗品であり, 交換時には同一規格のものを用いる.                                 | 配管と同様の不具合. 内圧低下, 減圧不良, 漏洩, 漏れ込みなどの原因になりやすい.   |



## (b) 機器故障

| 機器        | 説明  | 不具合、及び引き起こされるプロセス異常の例   |
|-----------|---|---|
| 圧力放出弁・安全弁 | 設備・機器内の圧力を下げるための弁   | 動作せず、閉塞、流量不足、平常時の漏洩・漏れ込み、大気放出をした時には、放出完了後に大気の逆流が起こりやすい。また、放出時の摩擦や静電気により着火する場合や、放出部に存在する異物（錆など）がトラブルの原因になる場合がある。                         |
| ポンプ       | 吸い込み型と送り出し型がある。ポンプだけでなく送り側及び受け側の状態も合わせて見るのがポイント。          | 流れの停止、流量の増減、気泡の混入、圧力の増減、吸込圧力上昇、構成部品の混入、漏洩、漏れ込みなどが起こる。また、受け側の圧力との差圧により意図しない流れが起きる。   |
| コンプレッサー   | 気体を圧縮して昇圧するもの。圧縮時に発熱する。                                   | ポンプと同様だが、特に流量減と圧力低下が起きやすい。可燃性蒸気を扱う場合には、発火することがある。   |
| 攪拌機       | 液体と液体の混合や液体に固体を溶かす時に使用される。分離防止用のものもある。設計範囲外の運転はトラブルに直結する。 | 混合した物質の分離、温度や濃度の不均一、構成部品の混入が考えられる。攪拌軸とそのシール部が弱点であり、疲労破壊の他、漏洩や混入が起きることがある。   |
| バルブ       | 開閉バルブと調整バルブ、手動操作式と動力操作式がある。遠隔操作ができることもある。                 | 閉のまま開かない、開いたまま閉まらない、全閉にならず漏れがある。全開にならず流量不足が起こりうる。調整バルブでは、上記の他、開度が変わらない、開度が指示と異なるといった不具合もある。これらの不具合により、液面や圧力レベルの変動、熱媒用のものであれば、温度の変動が起きる。 |
| センサーと計測器  | 圧力や温度、流量などを計測する。制御用のものと監視用のものがある。                         | 計測値が想定範囲以外の場合、計測値が実際値よりも過小又は過大表示となる。計測値に時間遅れ。信号が来ていても読み取れない場合もある。計測値にぶれがあり不安定。外部要因による信号途絶や表示装置の不具合（過小、過大、ぶれ、表示せず）を考える必要がある。             |
| コントロール系   | 動作用の動力源が必要。多重化などの対策が可能。異常に気付かずに運転を継続することを含む。              | 指示と異なる動作や動作をしないなど、コントロール先の機器において、すべての不具合があり得る。異常状態が別の異常状態の原因となりやすい。停止することが危険である場合がある。   |
| ベント       | 容器などにおいて、内圧と外気圧をバランスさせるもの                                 | 配管・ダクト及び圧力放出弁・安全弁と同様のトラブルと配慮が必要である。   |

(c) ユーティリティ喪失

| ユーティリティ | 説明  | 不具合, 及び引き起こされるプロセスのずれの例   |
|---------|---|---|
| 電気      | 制御用, 動力用, 照明用, 熱源用など用途は幅広い.                     | 停電が起きた直後から, 回転機器を始めとして, 電気機器のすべてが停止したり, 機能が低下したりする. なお, バックアップ電源が備わっていれば, 損失を回避できるが, バックアップ可能な時間には制限がある.          |
| 窒素      | 不活性ガス雰囲気用や酸素濃度の調整用のもの. 液体窒素が極低温の保温用に使用されることがある. | 供給停止による即座の影響は少ないが, 不活性ガス環境や酸素濃度を調整した空間が乱される. 液体窒素では極低温が保持されなくなる.  |
| 水       | 水温により, 冷水, 常温水, 温水がある. 動力用に使用されることがある.          | 加温又は冷却用の場合は, 目標温度からずれが生じる. 希釈用の場合は, その目的物質の濃度にずれが生じる. 動力用の場合は, 対象機器が動作しなくなったり動作不良を起こしたりする.                        |
| 冷媒・熱媒   | 熱を移動させるための媒体. ヒートポンプに使われる.                      | 送給先において, 冷却又は加熱の目標温度からのずれが生じる.  |
| 空気      | 希釈用, 燃焼用, 動力用, 空冷用, 乾燥用などとして用いられる.              | 空気不足により, 希釈用ならば目的物質の濃度のずれが起きたり, 燃焼用ならば燃焼不良が起きたりする. この他, 乾燥不良, 冷却不良が起きることがある. 動力用の場合は, 対象機器が動作しなくなったり動作不良を起こしたりする. |
| 換気      | 有害物質や粉じんなどを運び出す場合と, 消費された空気を補う場合がある.            | 有害物質の濃度上昇, 不純物の混入, 粉じん濃度の上昇, 作業環境の悪化, 酸素不足による燃焼不良や酸欠事故  |
| 蒸気      | 熱媒・熱源であることが多いが, 動力用に使われる場合がある.                  | 熱媒に準じる. 凝縮水がトラブル (閉塞, 腐食など) の原因となりやすい.  |

表7 外部要因の例

| 外部要因の例   | 不具合, 及び引き起こされるプロセスのずれの例  |
|--|--|
| 停電   | すべての電気機器・電気設備の停止に伴う不具合   |
| 極端な天候  | 豪雨, 洪水, 高波, 高潮, 積雪, 冷温害, 高温害, 落雷, 雷障害, 突風, 竜巻, 雹 (ひょう), 台風, 気圧変化, 結露など   |
| 大規模な自然災害 (地震・津波・地割れ・地盤の隆起と沈下・土砂崩れ・地滑り・雪崩・噴火など) | 原料を積み上げているところ (ストックヤード) ; 転倒防止が必要, オフサイト系も含めてプロセスと考える. 地震を始めとする自然災害は, 同時に多くの要因を引き起こす可能性があり, 例えば, 設備の破壊と電力や水などの喪失が同時に起こりえる. さらに, 防災設備・消火設備までもが使用できなくなる可能性がある. |
| 近隣の事故による影響                                     | 火災の延焼, 飛翔物の飛来, 爆風, 停電, 共同ユーティリティーの停止, 可燃性ガスや引火性液体, 毒性物質の流入など   |
| 車両衝突   | 車両同士ならば, 車両の燃料による危険性に加え, 車両に積載中の化学物質の危険性が発現する. 車両と設備の衝突ならば, 車両の燃料による危険性に加え, その衝撃の大小に応じて, その設備が有する危険性が発現する.   |
| 破壊行為/妨害  | 侵入可能な区域にあるすべての機器, 設備における不具合  |

表8 起こりうる事故影響の例

(a) プロセス災害（漏洩、火災、爆発、破裂）

| 損失イベントの例         | 説明  |
|------------------|---|
| 漏洩               | 容器や配管などの中に閉じ込められていた物質が、その外側に噴出・漏洩する。  |
| 火災               | 意図に反して発生・拡大した燃焼のこと。その状態によって以下の種類がある。  |
| プール火災            | 滞留した可燃性液体の表面で着火し、燃焼している状態。  |
| ジェット火災           | 容器や配管の穴から噴出している可燃性液体に着火し、燃焼している状態。大規模な現象になると火炎が建物を貫くことがある。  |
| フラッシュ火災          | 漏洩した可燃性液体が蒸発し、可燃性の蒸気となった状態で着火し、短時間だけ燃焼する現象。漏洩量によっては火災の範囲が大規模になり、それによる熱の影響が大きい。  |
| ファイヤーボール         | 容器が大規模に破壊されるなどして、大気中での可燃性蒸気の着火、火災が大規模で起こると、大気中に巨大な球状の火炎を形作る。この球状の火炎をファイヤーボールという。熱を遮るものが少なくなるため、熱の影響が著しい。                                    |
| 爆発               | 蓄えられた、あるいは急激に発生した圧力が解放され、急激に体積が膨張する現象。化学反応で発生するエネルギーによる場合と、圧縮された気体の膨張による場合がある。  |
| 内部爆発<br>(装置内、屋内) | 密閉された空間（装置内、屋内）で可燃性物質や反応性の物質が燃焼・反応し、爆発する現象。もし生じた圧力が構造物の耐圧を超えると、構造物が破壊される。   |
| 蒸気雲爆発            | 大気中に形成された可燃性蒸気・ガスの雲が急速に燃焼することによって発生する爆発。爆風が広範囲の構造物に影響を及ぼす。  |
| 物理爆発             | 化学反応を伴わない物理的現象としての爆発。高温物と水との接触による水蒸気爆発、低温液化ガスの蒸気爆発などがある。  |
| 平衡破綻型爆発          | 高圧の容器内で、液体とその液体の蒸気が平衡状態にあったが、容器が破壊することにより平衡が破れ、急激に液体が気化することにより発生する爆発（BLEVEsともいう）。その液体が可燃性を有している場合には、その可燃性蒸気に着火して蒸気雲爆発を起こし、さらに大きな被害となりがちである。 |
| 粉じん爆発            | 粉じんが空気中に浮遊・分散して、ある濃度範囲で空気と混合した時、何らかの着火源により発火して、急激に燃焼することにより発生する爆発。空気中で燃える固体といくつかの種類は、細かくすれば粉じん爆発を起こす危険性がある。                                 |
| 爆ごう              | 火炎の伝播速度が音速を超えて衝撃波を伴いながら燃焼する現象。爆発圧力が極めて大きくなり、破壊力が格段に大きくなる。   |
| 液体と固体の爆ごう        | 火薬などの爆ごう。気体の爆ごうと比べると爆ごうが伝播する速度が一般に速く、発生する圧力がさらに大きくなる。   |
| 破裂               | 高圧の気体を入れている容器が破損した結果、圧力が解放され、周囲への爆風や容器の破片の飛散が起きる現象。容器の破損には、容器内の圧力が容器の耐圧を超えた場合と、材料又は構造上の問題により容器の耐圧が低下した場合がある。                                |

(b) プロセス災害発生に伴い、引き起こされるその他の影響

| その他影響の例        | 説明  |
|----------------|---|
| <b>影響</b>      |   |
| 毒性             | 漏洩した物質が毒性を持つものであれば、人に影響を及ぼす。  |
| 腐食             | 腐食性を持つ物質が漏洩すると、人の眼・皮膚などに影響を及ぼす。また、周りの構造物を腐食させる可能性がある。                     |
| 熱的影響           | 火災などで高温にさらされることにより、火傷など、甚大な影響を及ぼす。また、周りの構造物の強度を低下させる可能性がある。               |
| 過圧影響           | 爆発などにより圧力を受けると、人であれば鼓膜、肺などの損傷などの甚大な影響を及ぼす。また、周りの構造物を破壊する可能性がある。           |
| 飛翔物            | 爆発などで破壊した構造物の破片が飛翔することで、人にあたると怪我などの影響がある。また、周りの構造物を破壊する。                  |
| <b>その他への影響</b> |   |
| コミュニティ         | 大規模なプロセス災害が発生すると、地域住民や家屋などにも被害が出る。  |
| 従業員            | プロセス災害が発生すると、最も影響を受けやすい人は従業員である。また、身近な人が被害を受けることで、精神的な混乱や動揺も起きやすい。        |
| 環境             | 毒性・有害性を持つ物質が大規模に放出されると、プロセス外の環境への生態系にも影響を及ぼす。                             |
| 資産             | プロセス災害の発生によって、プラントや製品などが損傷することで、資産にも影響が出る。                                |
| 生産・製造          | プロセス災害の発生によってプラントが損傷することで、生産・製造ができなくなる。直接の被害がなくとも、規制当局の指導などによって操業ができなくなる。 |

表9 リスク低減措置の種類（優先順位）

| 優先順位 | リスク低減措置の種類             | 説明   |
|------|------------------------|--|
| 1    | A) 本質安全対策 <sup>3</sup> | 危険性若しくは有害性が高い化学物質等の使用の中止又は危険性若しくは有害性のより低い物への代替<br>化学反応のプロセス等の運転条件の変更，取り扱う化学物質等の形状の変更等による，負傷が生ずる可能性の度合又はばく露の程度の低減 |
| 2    | B) 工学的対策               | 化学物質等に係る機械設備等の防爆構造化，安全装置の二重化等の工学的対策又は化学物質等に係る機械設備等の密閉化，局所排気装置の設置等の衛生工学的対策  |
| 3    | C) 管理的対策               | 作業手順の改善，マニュアルの整備，教育訓練・作業管理等の管理的対策  |
| 4    | D) 保護具の着用 <sup>4</sup> | 安全靴，保護手袋など個人用保護具の使用  |

<sup>3</sup> 本質安全設計については，技術資料の参考資料Cも参照のこと。

<sup>4</sup> 静電気発生対策のための作業着等の着用は，本質安全対策に含まれる。その他の保護具の着用は労働災害防止のために利用されるが，実際の作業現場等へ入る際に当然のことである。

表 10 プロセス災害防止のための多重防護によるリスク低減措置と事例<sup>5</sup>

| リスク低減措置の目的  | 説明   | A) 本質安全対策  | B) 工学的対策  | C) 管理的対策   | D) 保護具の着用 |
|-------------|--|--|---|--|-----------|
| a) 異常発生防止対策 | <p>主に初期事象の発生を防止するための対策であり、異常を発生させない、あるいは異常が発生しても封じ込めシステムの適切な設計などで、正常な運転状態に保つ。</p> <p>※ 通常の運転状態 (Normal) からの逸脱を回避することが目的。</p> | <p><u>単体の健全設計</u>：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・最大負荷での機器設計</li> <li>・腐食に対する適切材料選定など</li> </ul> <p><u>誤操作防止設計</u>：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・バルブ・計器の誤操作防止対策</li> <li>・人間特性を考慮した作業環境設計</li> </ul> <p>技術資料の参考資料 C の「除去と代替」及び「より安全な条件」なども含む</p> | <p><u>基本プロセスシステム (BPCS)</u>：フィード組成の変化のような予想される変化や傾向、蒸気圧力、冷却水温度、外気状況の変化、徐々に蓄積される熱交換器 (特にチューブ) の汚れのようなユーティリティパラメータの変動に適切に対応</p> <p><u>機器の信頼性設計</u>：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・信頼性の高いセンサーの使用</li> <li>・予備機の設置、冗長化、機能としての信頼性向上など</li> </ul> <p><u>ユーティリティの信頼性設計</u>：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・電力計装用空気</li> <li>・冷却水系などの冗長化による信頼性確保 (冷却系は予備機の自動起動などのバックアップ機能)</li> </ul> <p><u>その他</u>：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・相互に接触してはならない物質が接触する可能性を減らすための分離装置、専用機器、その他設備</li> <li>・プロセス配管や機器に影響を与えるメンテナンス活動や車両交通による外的要因の可能性を減らすための防護措置 (ガードや防護壁)</li> </ul> | <p><u>作業 (操作) 手順書の改訂</u>：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・主要な封じ込めシステムの適切な設計と設置とそれらの機能を維持するための検査、テスト、メンテナンス</li> <li>・不適切な作業手順の可能性を減らすための手順 (書) の改訂 (改訂に伴う運転員教育・訓練)</li> <li>・物質、機器、手順、人、技術に関する変更管理</li> <li>・正常運転からの逸脱 (ずれ) の原因を同定する仕組み</li> </ul> |           |
| b) 異常発生検知手段 | <p>異常が発生した場合のプロセス変数 (流量, 温度, 圧力, 液レベル, 組成など) のずれ発生を検知する. 検知した結果を基に, a)異常発生防止策, c)事故発生防止対策, 又は d)被害の局限化対策でどのように対応するかを考える.</p> |  | <p><u>異常検知・警報システム</u>：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・プロセス特性に応じた検知器の設置</li> <li>・検知すべきパラメータの決定</li> <li>・ガス・油検知警報システム</li> </ul>   |  |           |

(次ページへ続く)

<sup>5</sup> 表 10 ではリスク低減措置の事例をマッピングしているが、必ずしも a)~d)の目的に分類されるわけではなく、複数の目的をカバーするリスク低減措置もある。

| リスク低減措置の目的  | 説明   | A) 本質安全対策                   | B) 工学的対策   | C) 管理的対策   | D) 保護具の着用   |
|-------------|--|-----------------------------|--|--|---|
| c) 事故発生防止対策 | 主に初期事象発生からプロセス災害発生までの異常伝播（中間事象）を防ぐための対策であり、危険源が顕在化しても、事故まで発展させないようにする。       |                             | <p>フェイルセーフ設計：機器故障が発生しても安全な方向に移行する</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・計装空気喪失時の調節弁の開閉方向</li> </ul> <p>安全インターロック（人がいない場合、人がいても対応できない（時間的余裕が無い）場合）：特定された異常状態の検知に基づきシステムを自動的に安全な状態にする</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・計装防護システム</li> </ul> <p>着火源管理：引火性混合体が存在する中での着火の可能性を減らし、またそれによる火災、粉じん爆発、蒸気雲爆発（屋内・屋外）の損失事象を防ぐ</p> <p>圧力放出設備：容器の過剰圧力を軽減し、容器爆発による損失事象を防ぐ</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・緊急脱圧システム</li> <li>・安全弁</li> </ul> <p>その他：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・手動放出や急冷システム</li> </ul>   | <p>運転員対応（時間的余裕がある場合）：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・損失事象が発生しうる前に手動でプロセスをシャットダウンするための安全警報あるいは異常状態対応（マニュアルの整備と教育・訓練）</li> </ul>  |   |
| d) 被害の局限化対策 | 主にプロセス災害発生後の影響（被害）を減らすための対策であり、事故が発生しても事故の拡大を阻止する、又は避難などにより被害を許容可能なレベルまで下げる。 | 参考資料 C（表 C1）の「保有量の低減」なども含む。 | <p>流出量の局限化：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・漏洩箇所の自動又は遠隔駆動遮断弁</li> <li>・工程毎の緊急遮断弁</li> <li>・緊急脱圧弁</li> <li>・緊急移液設備</li> </ul> <p>流出液体の拡大防止：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・貯蔵設備の防油堤／防波堤</li> <li>・ユニット区画毎の仕切堤</li> <li>・プラント設備区画毎の仕切堤</li> </ul> <p>着火源の管理：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・防爆電気設備</li> <li>・可燃性ガスの希釈・拡散のためのスチームカーテン・ウォーターカーテン</li> <li>・静電気安全対策</li> <li>・避雷針</li> </ul> <p>火災・爆発発生時の拡大防止：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・設備間距離</li> <li>・設備レイアウト</li> <li>・火災検知器、消火設備、散水設備、泡消火器</li> <li>・蒸気緩和システム</li> <li>・ウォーターカーテン</li> <li>・防火壁</li> <li>・耐火・耐爆構造</li> </ul> | <p>緊急時対応：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・消防車など緊急車両用アクセス</li> <li>・非常照明設備</li> <li>・構内連絡用通信設備</li> <li>・工業用監視カメラ</li> </ul> <p>その他：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・爆発放散口</li> <li>・火災／漏洩検知と警報システム</li> <li>・耐火性支持と構造用鋼</li> <li>・貯槽の断熱</li> <li>・居住建屋の耐爆構造</li> </ul> <p>緊急時対応：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・避難経路の確保</li> <li>・緊急対応管理計画</li> </ul> | <p>緊急時の個人用保護具：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ゴーグル（保護眼鏡）</li> <li>・耐火服</li> <li>・避難時人工呼吸器</li> </ul> |



表 11 リスク見積りのための基準  
(a) 危害の重篤度

| 重篤度（災害の程度） | 災害の程度・目安   |
|------------|--|
| 致命的・重大（×）  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・死亡災害や身体の一部に永久的損傷を伴うもの</li> <li>・休業災害（1ヵ月以上のもの）、一度に多数の被災者を伴うもの</li> <li>・事業場内外の施設、生産に壊滅的なダメージを与える<br/>（例：復旧に1年以上掛かる）</li> </ul> |
| 中程度（△）     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・休業災害（1ヵ月未満のもの）、一度に複数の被災者を伴うもの</li> <li>・事業場内の施設や一部の生産に大きなダメージがあり、復旧までに長期間を要するもの<br/>（例：復旧に半年程度掛かる）</li> </ul>                  |
| 軽度（○）      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・不休災害やかすり傷程度のもの</li> <li>・事業場内の施設や一部の生産に小さなダメージがあるが、その復旧が短期間で完了できるもの<br/>（例：復旧に1ヵ月程度掛かる）</li> </ul>                             |

(b) 危害発生頻度の頻度（可能性）

| 発生頻度         | 発生頻度の目安   |
|--------------|---|
| 高い又は比較的高い（×） | <ul style="list-style-type: none"> <li>・危害が発生する可能性が高い<br/>（例：1年に一度程度、発生する可能性がある）</li> </ul>                 |
| 可能性がある（△）    | <ul style="list-style-type: none"> <li>・危害が発生することがある<br/>（例：プラント・設備のライフ（30～40年）に一度程度、発生する可能性がある）</li> </ul> |
| ほとんどない（○）    | <ul style="list-style-type: none"> <li>・危害が発生することはほとんどない<br/>（例：100年に一度程度、発生する可能性がある）</li> </ul>            |

(c) リスクレベル

|             |              | 危害の重篤度    |        |       |
|-------------|--------------|-----------|--------|-------|
|             |              | 致命的・重大（×） | 中程度（△） | 軽度（○） |
| 危害発生<br>の頻度 | 高い又は比較的高い（×） | Ⅲ         | Ⅲ      | Ⅱ     |
|             | 可能性がある（△）    | Ⅲ         | Ⅱ      | Ⅰ     |
|             | ほとんどない（○）    | Ⅱ         | Ⅰ      | Ⅰ     |

(d) リスクレベルの説明

| リスクレベル | 優先度                         | 生産開始への留意点  |
|--------|-----------------------------|--|
| Ⅲ      | 直ちに解決すべき、又は重大なリスクがある。       | 措置を講ずるまで生産を開始してはならない。<br>十分な経営資源（費用と労力）を投入する必要がある。     |
| Ⅱ      | 速やかにリスク低減措置を講ずる必要のあるリスクがある。 | 措置を講ずるまで生産を開始しないことが望ましい。<br>優先的に経営資源（費用と労力）を投入する必要がある。 |
| Ⅰ      | 必要に応じてリスク低減措置を実施すべきリスクがある。  | 必要に応じてリスク低減措置を実施する。                                    |