

別添 1

事故進展フロー図

および

3M3E 分析シート

(1)ポリプロピレン製造工場で爆発	1973年10月8日	千葉県
(2)水素還元プロセス中に爆発	1992年5月30日	神奈川県
(3)オレフィン製品製造工場で爆発	2005年10月6日	米国・テキサス州
(4)三フッ化窒素製造プラントで爆発	2009年11月4日	山口県
(5)ポリフッ化ビニルスラリー貯蔵タンクの爆発	2010年11月9日	米国・ニューヨーク州
(6)塩化ビニルモノマ製造施設で爆発	2011年11月13日	山口県
(7)レゾルシンプラントが爆発	2012年4月22日	山口県
(8)アクリル酸製造施設で爆発	2012年9月29日	兵庫県
(9)水冷熱交換器の洗浄作業中に爆発	2014年1月9日	三重県
(10)運転データを分析した事例		千葉県

(1)ポリプロピレン製造工場で爆発

PFA, RISCAD, AIST

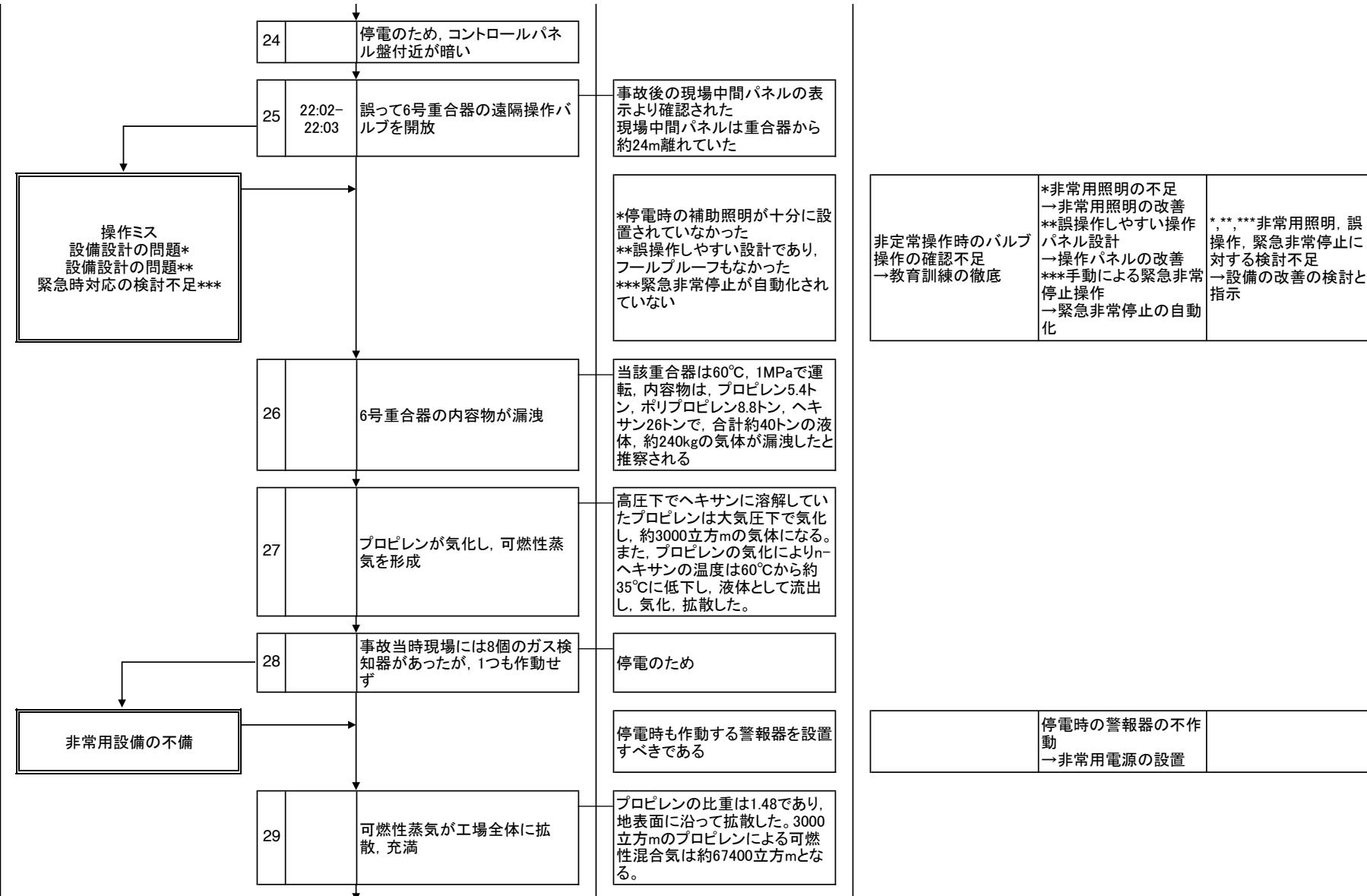
事故概要	事故番号 発生日時(曜日) 所在地
1973-FC-05, 1973年10月8日(月)22:00頃, 千葉県市原市	<p>ポリプロピレン製造工場でポリプロピレン装置の冷却器洗浄後に爆発が起きた。複数基あるポリプロピレン装置の重合槽のうち、2基に付帯する補助冷却器の洗浄を行っていた。1基の洗浄が終わり、引き続き他の1基の洗浄を行っていたところ、工場に停電が起こり、後から停止した反応器の遠隔操作弁を開こうとした際に、誤って先に停止していた方の反応槽の遠隔操作弁を開いた。遠隔操作弁の先が工事のため大気開放になっており、ここから大量のプロピレン、ヘキサンなどが流出し、大爆発になった。ガス漏洩から4から5分後に着火したため、ガスが充満し、被害が拡大したと考えられる。物的被害は、建物、機器類の破損および焼損で約25億円となり、付近の民家でも、9戸に窓ガラス破損、2戸に壁破損、1戸に窓枠外れるなどの被害が出た。4名が死亡し、6名が重傷、付近住民1名を含む3名が軽傷を負った。</p>
背景	<ul style="list-style-type: none"> 当該工場では、プロピレンからポリプロピレンを製造しており、当時の年間生産能力はポリプロピレン5万トンであった。 当該工場には、ポリマー製造装置が3プラントあり、事故の起きた第2プラントには重合器が4基(4号-7号)あった。 製造工程では、受け入れたプロピレンを一度タンクに貯蔵し、プロピレン精溜塔にてプロピレンの純度を高め、重合器に連続的に送入していた。重合器では、n-ヘキサンを溶媒に、アルキルアルミニウム系の触媒を用いて重合を行っていた。 重合反応は発熱反応であり、重合器内部の水冷却管および冷却用ジャケット、ならびに、重合器外部の補助冷却器により温度調節を行っていた。また、原料の充てん量を減らした場合、この補助冷却器を使用せずに運転は可能であった。 事故時には補助冷却器のラインのフランジが切り離され、補助冷却器を使用せずに運転していた。

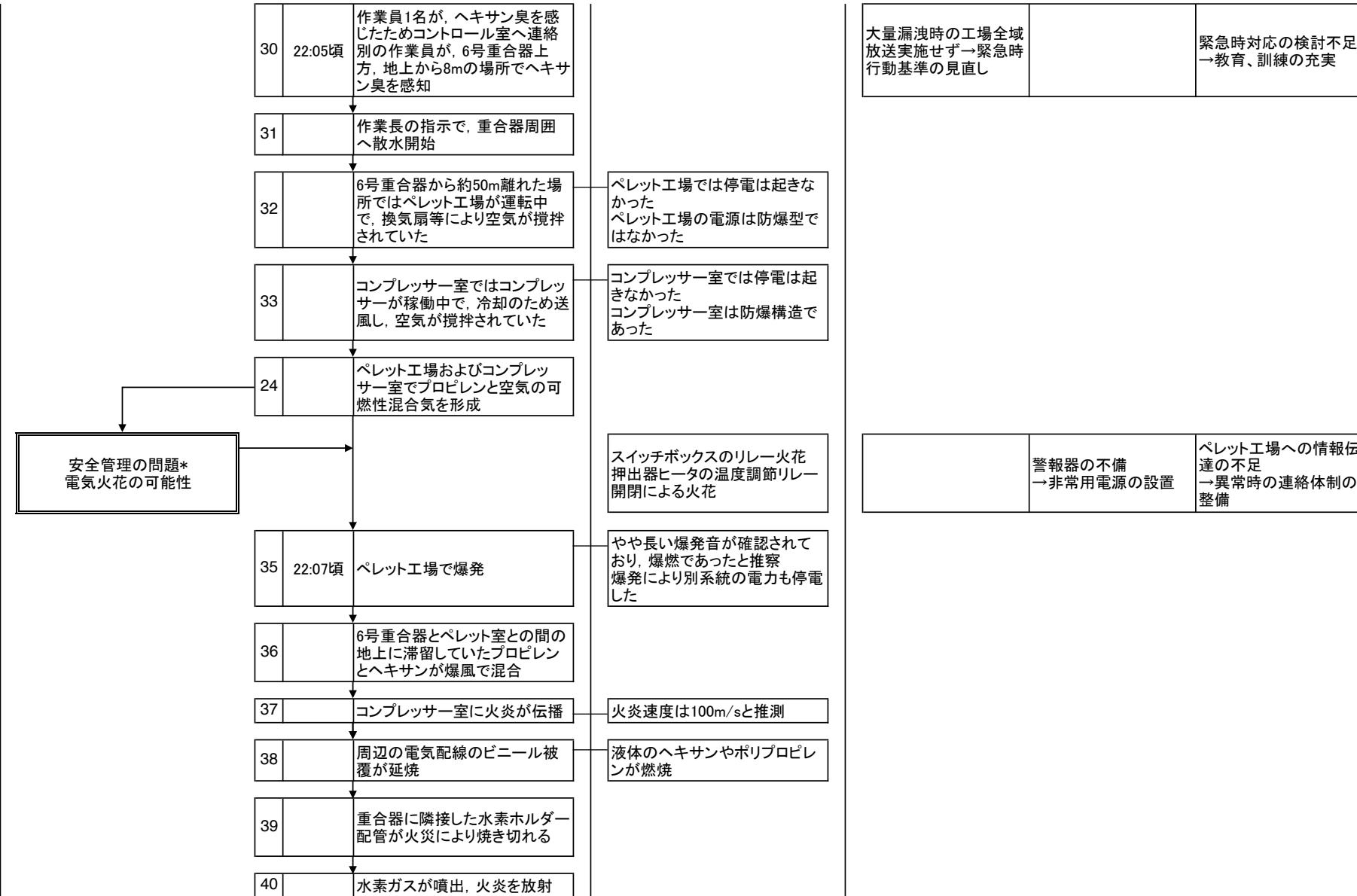
3M解析(3M→対策)

区分	原因事象	事故進展フロー	備考	Man	Machine	Media&Management																		
経過	<p>設備設計の問題* 非定常作業に対する 危険意識の欠如**</p>	<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>1973 10/4</td> <td>6号重合器で補助冷却器の目詰まり発生</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td></td> <td>6号重合器の補助冷却器の洗浄</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>10/5 18:00頃</td> <td>6号重合器の運転開始</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>20:00頃</td> <td>6号重合器で補助冷却器が再び目詰まり</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>10/6-7</td> <td>6号重合器からガス抜き</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td></td> <td>6号重合器と補助冷却器をサクション弁により下方のフランジ部で切り離し</td> </tr> </table>	1	1973 10/4	6号重合器で補助冷却器の目詰まり発生	2		6号重合器の補助冷却器の洗浄	3	10/5 18:00頃	6号重合器の運転開始	4	20:00頃	6号重合器で補助冷却器が再び目詰まり	5	10/6-7	6号重合器からガス抜き	6		6号重合器と補助冷却器をサクション弁により下方のフランジ部で切り離し	<p>*重合器用補助冷却器は、これまでにも度々目詰まりを起こしていた。 **そのため、弁の開放などに対する注意が鈍っていた(危険感覚の麻痺)</p> <p>サクション弁と重合器との間に遮断弁があった</p>	<p>**目詰まり対策という非定常作業に対する危険感覚欠如 →重合物が付着しないように設備改善</p>	<p>*補助冷却器目詰まり対策不良 →重合物が付着しないように設備改善</p>	<p>*頻発する不具合の原因を究明しなかった →原因究明と設備や運転条件の改悪の指示</p>
1	1973 10/4	6号重合器で補助冷却器の目詰まり発生																						
2		6号重合器の補助冷却器の洗浄																						
3	10/5 18:00頃	6号重合器の運転開始																						
4	20:00頃	6号重合器で補助冷却器が再び目詰まり																						
5	10/6-7	6号重合器からガス抜き																						
6		6号重合器と補助冷却器をサクション弁により下方のフランジ部で切り離し																						









		<p>41 当該工場で停電による緊急バージ作業が継続中</p> <p>42 6号重合器の緊急バージラインを通じ、他の重合器の可燃性物質の逆流による供給が継続</p> <p>43 爆発後も開口部より火炎が噴出</p>
対応操作		<p>44 メタルフューズの溶断で可燃性物質の流出が停止</p> <p>45 消火活動</p> <p>46 23:00頃 現場指揮本部設置</p> <p>47 消火活動用燃料の供給や、負傷者の搬送</p> <p>48 10/9 3:05頃 鎮圧</p> <p>49 3:50頃 鎮火</p>
恒久的対応策		<p>1 保安管理 設備保全担当部門を強化し、また生産部門の保安意識の向上を図る。</p> <p>2 安全教育 緊急時対応に向けて、就業時の後始末、引き継ぎ事項の確認、少しのミスでも記録する習慣をつけるなど、十分に教育と訓練を実施する。</p> <p>3 緊急時対応の検討 危険な現場への状況確認なしの直行をしないよう、状況判断の訓練を行い、避難場所の設置位置も十分に検討する。</p> <p>4 設備 度々故障を起こすような機器があれば、徹底的な改良を行う。</p>

5	設備	停電時には事故が多いため、緊急操作のための工場内配線を設備し、計装関係は停電による影響を受けないように改善する必要がある。
6	設備	夜間や停電時の作業を想定し、現場中間パネルやコントロール室の照明を改善する。
7	設備	計装記録装置は、停電や空気源の故障の際にも機能停止が起こらない設計にする。また、危険度の高い装置の異常時には、緊急非常停止が自動的に行われる設計であれば尚望したい。
8	設備	現場巡回時に異常があった時に緊急停止と避難指示が即座に取れるよう、通報・警報の設備改善を行う。
9	設備	ガス検知器は停電時でも作動するものにし、警報器の作動後には緊急操作を即座に取れる保安システムに改良する
10	設備	保安上重要な各種コック、元弁などは誤操作防止対策の設備を設ける必要がある。また、必要に応じて色分け、注意書き、施錠などの対策も考える。
11	設備	スプリンクラー能力と設置場所を事故拡大防止につなぐための再検討を行う
12	マニュアル	あらゆる種類の異常事態を想定し、作業手順、判断基準を整備し、実施責任者を明確にする
13	マニュアル	状況に応じて常に改訂を行い、その際には講義、実習、討論等をもって、従業員への周知徹底を行う。

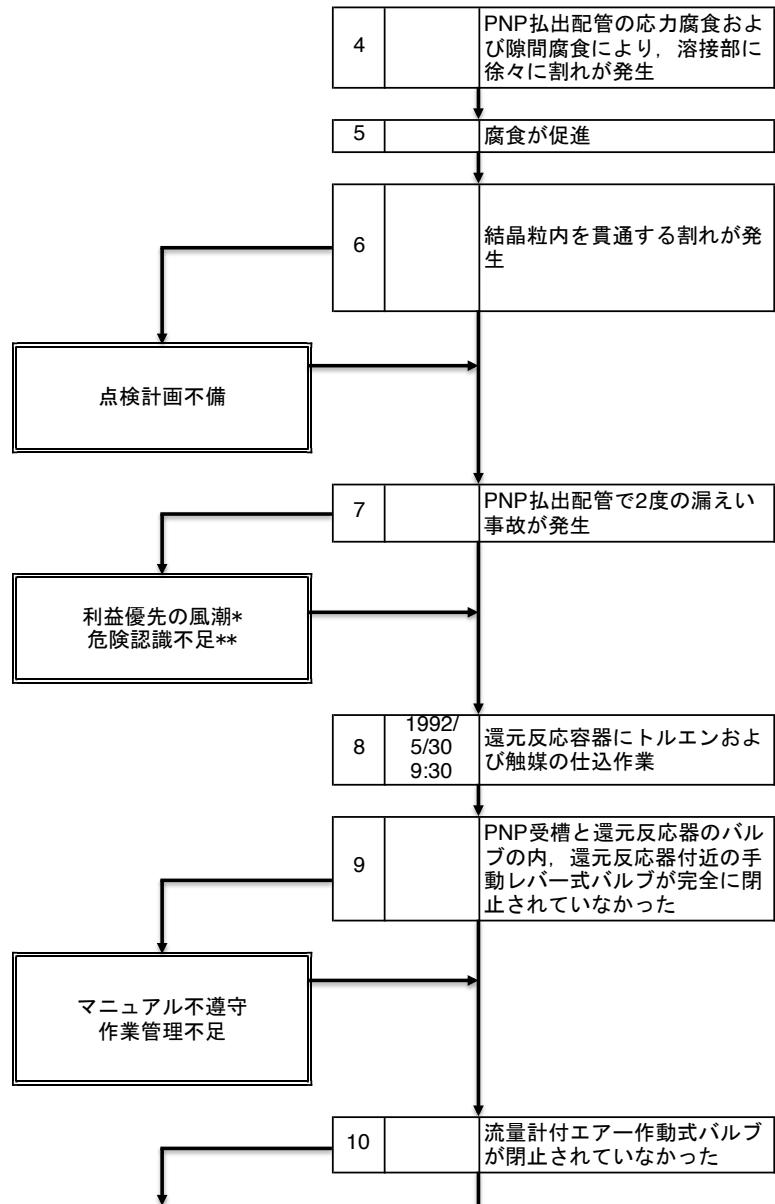
(2)水素還元プロセス中に爆発

PFA,RISCAD,AIST

事故概要	発生日時(曜日)	発生場所
1992年5月30日(土)16:00頃、神奈川県川崎市川崎区 パラフェネチジン(PPD)製造プラントのパラニトロフェネトール(PNP)の水素還元プロセスで爆発が起きた。PNP受槽の保温材の一部が破損、脱落し、受槽周辺数m以内に保温材が飛散し、保温カバーが剥離した。けが人はなかった。調べでは、還元塔に水素を導入し還元反応を開始したところ、PNP受槽と水素還元塔の間の配管で漏えいがあり、バルブが完全に閉止していなかったため溶媒のトルエン蒸気を含む水素がPNP受槽側に逆流した結果、水素が保温材内に漏えいし、静電気で着火した可能性がある。		
背景		
<ul style="list-style-type: none"> 当該プラントで扱われていた危険物は以下の通り。 <ul style="list-style-type: none"> -第4類、第1石油類(トルエン、メタノール、エタノール)、第3石油類(ジメチルスルホキシド、パラフェネチジン、オルソクロロアニリン、オルソアニジン、水加ヒドラジン) -PPDの貯蔵量は、約6400Lであった。 当該プラントの製造工程は、下記の通り。 エトキシ化反応→中和→溶媒分離→PNP水洗→還元反応→触媒濾過→製品蒸留 爆発は、5番目の還元反応工程で発生した。 PNP受槽は常圧のタンクで、内径約1.6m、高さ約3.3mで、温度70°C、材質はSUS304で、使用期間は約1.5年のものであった。 事故後のタンク本体の気密試験では、漏えいが認められなかった。 PNP：融点60°C、引火点149°C、沸点283°C、発火点458-468°C 当該プラントは1991年3月から稼働し、今回の事故までに2回の漏えい事故を起こしている。 		

3M解析(3M→対策)

区分	原因事象	事故進展フロー	備考	Man	Machine	Media&Management
経過	<p>材料選定のミス</p> <p>設備施工不良</p>	<pre> graph TD A[1 1990年頃 PNP受槽の設置] --> B[2 PNP受槽および払出配管の材料にSUS304が使用されていた] B --> C[3 PNP払出配管の溶接部すべてが溶け込み不足] C --> D[溶接不良] B --> E[塩素を含むPNPの配管に、塩化物応力腐食割れの感受性が強いSUS304を使用したこと 運転条件に応じた配管材料の選定をしていないこと] C --> F[配管の厚さは約3mm、事故までの使用期間は約1.5年] E --> G[設計者の材料についての知識不足 ・応力腐食割れに対する認識不足] F --> H[設計者の溶接についての知識不足 ・溶接指図書の不備 ・溶接不良 ・溶接検査不良] G --> I[設備の材料選定時の条件の抽出および材料決定の体制の不備 ・内容物(PNP)に塩化物の存在の確認不足 ・応力腐食割れに対する認識不足] H --> J[施工業者の技術レベルの見誤り ・業者選定のミス] </pre>	<p>事故までの使用期間は約1.5年であった</p> <p>塩素を含むPNPの配管に、塩化物応力腐食割れの感受性が強いSUS304を使用したこと 運転条件に応じた配管材料の選定をしていないこと</p> <p>配管の厚さは約3mm、事故までの使用期間は約1.5年</p> <p>溶接不良</p>			



事故後の調査で、全ての溶接箇所に腐食が認められ、8ヶ所で漏えいが確認された他、配管内面にも多くの割れがあった

点検で腐食を見つけられなかつたこと

- ・運転管理者の材料および溶接についての知識不足
- ・点検の必要性の意識欠如
- ・配管点検基準の不備
- ・配管点検計画の不備

- ・設備・配管の点検についての管理規定の欠如

*事故原因を十分に検討せず、運転を続けたこと
**配管漏れの危険性を十分に認識していなかつたこと

トルエン : 3,500L

- ・再発防止策の未実施
- ・上司への適切な防止策実施の要請
- ・配管漏れに対するリスク評価不足

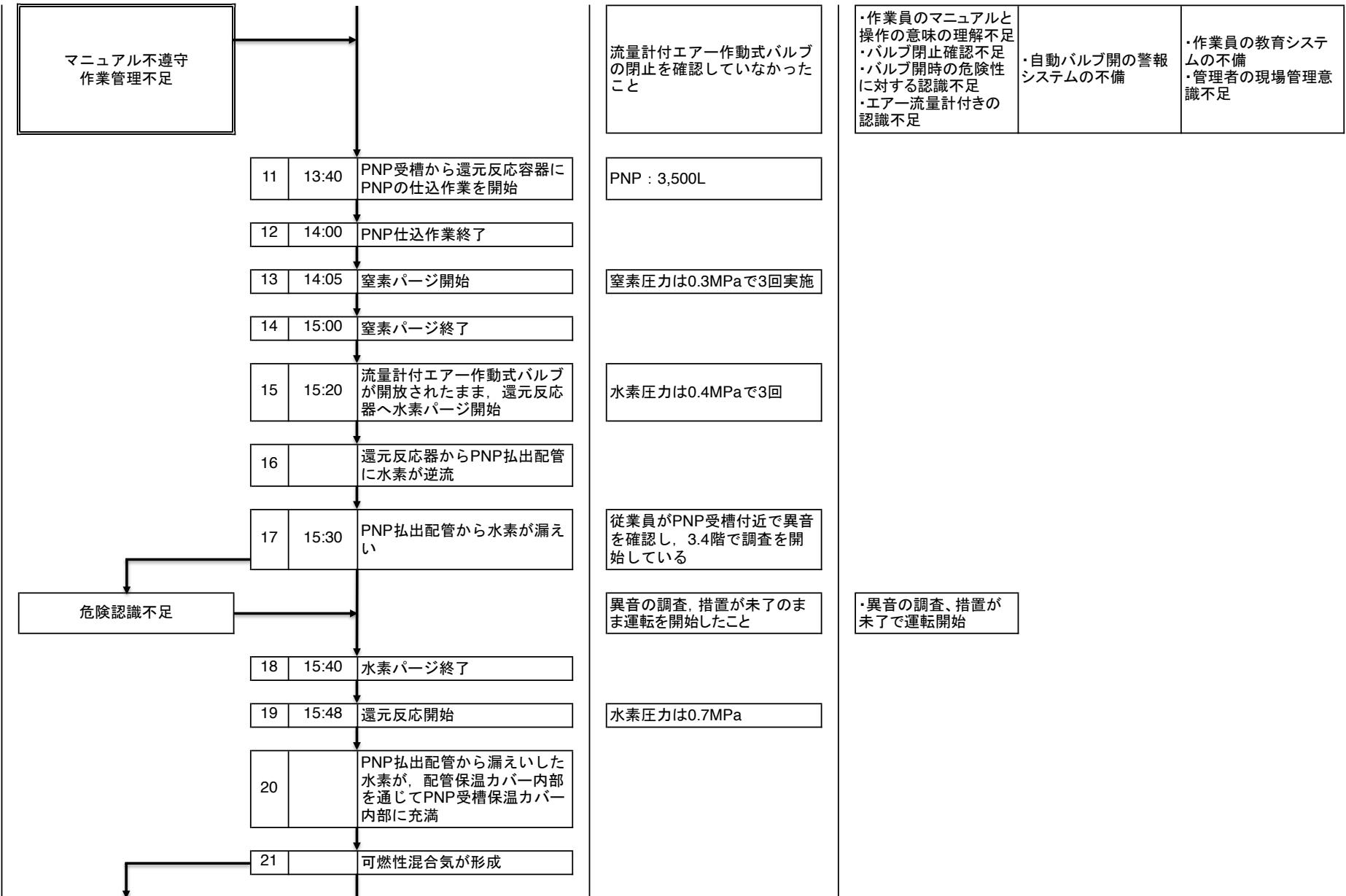
- ・管理者の設備異常にに対する感受性不足
- ・事故原因を追究しない現場風土

水平状態で閉、下向き垂直状態で開で、水平より約5度下がった状態であった

手動レバー式バルブの閉止を確認していなかつたこと

- ・作業員のマニュアルと操作の意味の理解不足
- ・バルブ開時の危険性に対する認識不足
- ・バルブ閉止確認不足

- ・作業員の教育システムの不備
- ・管理者の現場管理意識不足



	<pre> graph TD A[静電気] --> B["22 16:05 着火, 爆発"] B --> C["23 火災"] </pre>	<p>PNP拡出配管から漏えいした水素が噴出する際に発生した静電気が着火源となった可能性が高い</p> <p>4階にいた従業員が爆発音を聞いた</p> <p>従業員がPNP受槽下部および上部が炎上しているのを確認</p>	<p>・接地やボンディングの点検不足</p> <p>・配管の接地やボンディング等の静電気対策不備の可能性</p>
対応操作	<ol style="list-style-type: none"> 1 従業員は消火器で消火活動を開始 2 火勢は収まらなかった 3 他の従業員に応援を求め、泡消火栓を用いて消火活動再開 4 還元反応器への水素供給を停止 5 事務所にいた従業員が消防へ通報 6 16:10 従業員の消火活動により鎮圧 7 PNP受槽に水を入れ、還元反応器内の反応液をコンデンサ側へ循環 8 手動バルブの増し締めおよびエアー作動バルブの閉止を実施 9 バルブ閉止確認操作 10 16:16 鎮火 	<p>4本の消火器を使用した</p> <p>液温の低下を図ったため</p> <p>水素をPNP配管側へ漏えいさせないため</p> <p>消防が確認</p>	
恒久的対応策	<ol style="list-style-type: none"> 1 設備設計 還元反応器へのPNP拡出配管の材質を、耐食性の高いSUS316に変更 		

2	設備管理	新しい配管を使用する前に、溶接箇所の放射性透過試験を実施し、完全に溶け込みがなされているかを確認
3	設備設計	流量計付エアー作動式バルブからコントロールルームへ信号を送り、バルブ開放時に警報を発する仕組みへ変更
4	運転管理	手動レバー式バルブなどを、完全閉止状態ではレバーがロックされ、開閉の状態が確認しやすいものへ交換
5	安全管理	原料受入配管については、要所に点検窓を設け、毎日点検および定期的に配管の保温材を剥がした上での腐食状況の確認を実施
6	安全管理	作業手順を見やすい場所に掲示
7	安全文化	事故の原因を究明し、繰り返さない仕組の構築

RISCAD提案

教訓

- ・ **ステンレスにも好みがある**：さびないと言われているステンレスでも、条件次第では腐食するし、亀裂が生じる。ステンレスを使用する際には、特に塩化物、硫化物、アルカリ性水溶液などの相性を考慮し、適切なステンレスを選定することが大事である。
- ・ **事故を掘れ**：過去の事故例は情報の山であるが、埋もれたままでは意味がない。当該プラントでは過去同じ箇所で2度の漏えい事故が起きていた。

(3)オレフィン製品製造工場で爆発

事故概要 事故番号 発生日時(曜日) 所在地

2005年10月6日(木)、米国・テキサス州ポイント・コンフォート

オレフィン製品の製造工場にて連続した爆発が起きた。フォークリフトのトレーラーがプロピレン配管のバルブに引っかかり、配管を破断したために液体プロピレンが漏洩し、気化したガスから火災が発生し、連続した爆発を引き起こした。炎は約150m上空にまで拡がった。従業員2名が火傷を負い(うち1名は重傷)、他14名がすり傷と気道熱傷を負った。火災は5日間続いた。事故の影響で、工場は5ヶ月間閉鎖された。

背景

・当該工場は1983年から操業されており、アメリカにある当該企業の工場の中で一番大きな工場であった。プラスティック樹脂と石油化学製品を製造していた。

・オレフィン第二製造設備は、1980年代に設計された古い設備のコピーであり、最新の安全基準に従っていなかった。

3M解析(3M→対策)

区分	原因事象	事故進展フロー	備考	Man	Machine	Media&Management
経過	<p>1 1980 半ば オレフィン第一製造設備のライセンサが別会社のエチレンプラントを設計</p> <p>2 1988 当該企業が同じライセンサにオレフィン第一設備の設計を依頼</p> <p>3 1996 同じライセンサにオレフィン第二設備の設計を依頼</p> <p>4 2005 10/6 15:05 作業員がフォークリフトでトレーラーを牽引し、方向転換のためパイプラックの下の2本の柱の間に後退</p> <p>車両衝突防護の不足* 車両通行箇所の非表示** 作業手順の不備***</p> <p>5 トレーラーがプロピレンの配管のろ過器から突き出てたバルブに引っかかる</p> <p>安全確認の不足</p>	<p>・上記エチレンプラントと類似の設計であり、米国石油協会(API)の「安全放出・火炎配管などの鋼製の重要な構造は耐火加工せよ」(1988)という勧告に従っていなかった</p> <p>オレフィン第一設備とほぼ同じ構造、設備等の更新なし</p> <p>車両運転規則に通行許可地域の指定が無かった 車両通行エリアでは無かったが、楽に通行できるスペースがあった</p> <p>*危険性分析の結果を受け、防火設備に対しては車両衝突防護が行われたが、配管等に対しては不十分であったこと **設計図には車両の通行可能箇所が書かれていたが、現場には表示されていなかったこと ***無理な運転であった可能性</p>	<p>***危険感受性(知識)の不足→ *車両衝突防護の不足→防護の実施 **車両通行箇所の現場表示なし→表示する *危険性分析の結果を設計・建設に反映せず→設計・建設への反映を確実に行うシステム</p>			



	<table border="1"> <tr><td>16</td><td>制御室のオペレーターが工場全体に非常事態を宣言</td><td></td></tr> <tr><td>17</td><td>制御室のオペレーターがプロピレン臭を感じ避難</td><td></td></tr> <tr><td>18</td><td>パイプラックや高架構造物下で火炎発生</td><td>パイプラックは、配管、機器、動力線などを支持</td></tr> <tr><td>19</td><td>工場内のERT(緊急対応隊)が出動</td><td>緊急対応隊(Emergency Response Team: ERT) 120名と消防車2台が設置、非番の2名が訓練のため出勤、他に90名が対応可能であった</td></tr> <tr> <td colspan="2"></td><td>事故発生から30分内に高架構造物が倒壊し、フレアラインのヘッダが損傷</td></tr> <tr> <td colspan="2">耐火加工の不備 安全基準の不遵守 防火設備の不備</td><td>フレアラインのヘッダに繋がる緊急放出配管が屈曲により閉塞</td></tr> <tr> <td colspan="2"></td><td>API(1988)は耐火被覆を要求する様に変更されていた</td></tr> <tr> <td colspan="2"></td><td>フレアラインのヘッダが機能を喪失</td></tr> <tr><td>21</td><td>高温で配管と鋼構造が屈曲、多数の配管や設備が破裂、フレアラインのヘッダが崩壊</td><td></td></tr> </table>	16	制御室のオペレーターが工場全体に非常事態を宣言		17	制御室のオペレーターがプロピレン臭を感じ避難		18	パイプラックや高架構造物下で火炎発生	パイプラックは、配管、機器、動力線などを支持	19	工場内のERT(緊急対応隊)が出動	緊急対応隊(Emergency Response Team: ERT) 120名と消防車2台が設置、非番の2名が訓練のため出勤、他に90名が対応可能であった			事故発生から30分内に高架構造物が倒壊し、フレアラインのヘッダが損傷	耐火加工の不備 安全基準の不遵守 防火設備の不備		フレアラインのヘッダに繋がる緊急放出配管が屈曲により閉塞			API(1988)は耐火被覆を要求する様に変更されていた			フレアラインのヘッダが機能を喪失	21	高温で配管と鋼構造が屈曲、多数の配管や設備が破裂、フレアラインのヘッダが崩壊		<table border="1"> <tr><td>設計・施工担当者の安全意識不足→安全基準の遵守</td><td>安全基準で要求された耐火被覆をせず施工する</td><td>安全管理基準の不遵守→安全管理システムの欠陥を正す</td></tr> </table>	設計・施工担当者の安全意識不足→安全基準の遵守	安全基準で要求された耐火被覆をせず施工する	安全管理基準の不遵守→安全管理システムの欠陥を正す
16	制御室のオペレーターが工場全体に非常事態を宣言																															
17	制御室のオペレーターがプロピレン臭を感じ避難																															
18	パイプラックや高架構造物下で火炎発生	パイプラックは、配管、機器、動力線などを支持																														
19	工場内のERT(緊急対応隊)が出動	緊急対応隊(Emergency Response Team: ERT) 120名と消防車2台が設置、非番の2名が訓練のため出勤、他に90名が対応可能であった																														
		事故発生から30分内に高架構造物が倒壊し、フレアラインのヘッダが損傷																														
耐火加工の不備 安全基準の不遵守 防火設備の不備		フレアラインのヘッダに繋がる緊急放出配管が屈曲により閉塞																														
		API(1988)は耐火被覆を要求する様に変更されていた																														
		フレアラインのヘッダが機能を喪失																														
21	高温で配管と鋼構造が屈曲、多数の配管や設備が破裂、フレアラインのヘッダが崩壊																															
設計・施工担当者の安全意識不足→安全基準の遵守	安全基準で要求された耐火被覆をせず施工する	安全管理基準の不遵守→安全管理システムの欠陥を正す																														
対応操作	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>ERTは燃料を可能な限り隔離、小規模の火災は放置</td><td>封じ込めたHClは燃えるに任せた</td></tr> <tr><td>2</td><td>近隣消防署が応援、消防隊員を派遣、健康監視室を設置</td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>地方当局は爆発の後数分内に退避を勧告、高速35号を閉鎖</td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td>5日後に鎮火</td><td></td></tr> </table>	1	ERTは燃料を可能な限り隔離、小規模の火災は放置	封じ込めたHClは燃えるに任せた	2	近隣消防署が応援、消防隊員を派遣、健康監視室を設置		3	地方当局は爆発の後数分内に退避を勧告、高速35号を閉鎖		4	5日後に鎮火																				
1	ERTは燃料を可能な限り隔離、小規模の火災は放置	封じ込めたHClは燃えるに任せた																														
2	近隣消防署が応援、消防隊員を派遣、健康監視室を設置																															
3	地方当局は爆発の後数分内に退避を勧告、高速35号を閉鎖																															
4	5日後に鎮火																															
恒久的対応策	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>設備</td><td>立地分析による車両衝撃被害からの装置の保護</td></tr> <tr><td>2</td><td>設備</td><td>遠隔操作バルブの設置</td></tr> <tr><td>3</td><td>管理</td><td>防護服着用の義務化</td></tr> <tr><td>4</td><td>設備</td><td>プラント設計、建設の際の最新の安全基準の適用</td></tr> </table>	1	設備	立地分析による車両衝撃被害からの装置の保護	2	設備	遠隔操作バルブの設置	3	管理	防護服着用の義務化	4	設備	プラント設計、建設の際の最新の安全基準の適用																			
1	設備	立地分析による車両衝撃被害からの装置の保護																														
2	設備	遠隔操作バルブの設置																														
3	管理	防護服着用の義務化																														
4	設備	プラント設計、建設の際の最新の安全基準の適用																														
教訓																																

- ・**危険性評価**: 施設立地分析、車両衝突、遠隔操作隔離を含むpre-startup safety reviewによる危険性評価が必要である。
- ・**耐熱耐炎性作業衣**: 引火性液体または可燃性ガスを大量に扱うプラントでは、作業員をフラッシュ火災から守るために耐熱耐炎性作業衣を着用する。
- ・**最新の安全基準**: 化学・石油化学プラント建設や更新の際には最新の安全基準を用いることが必要である。

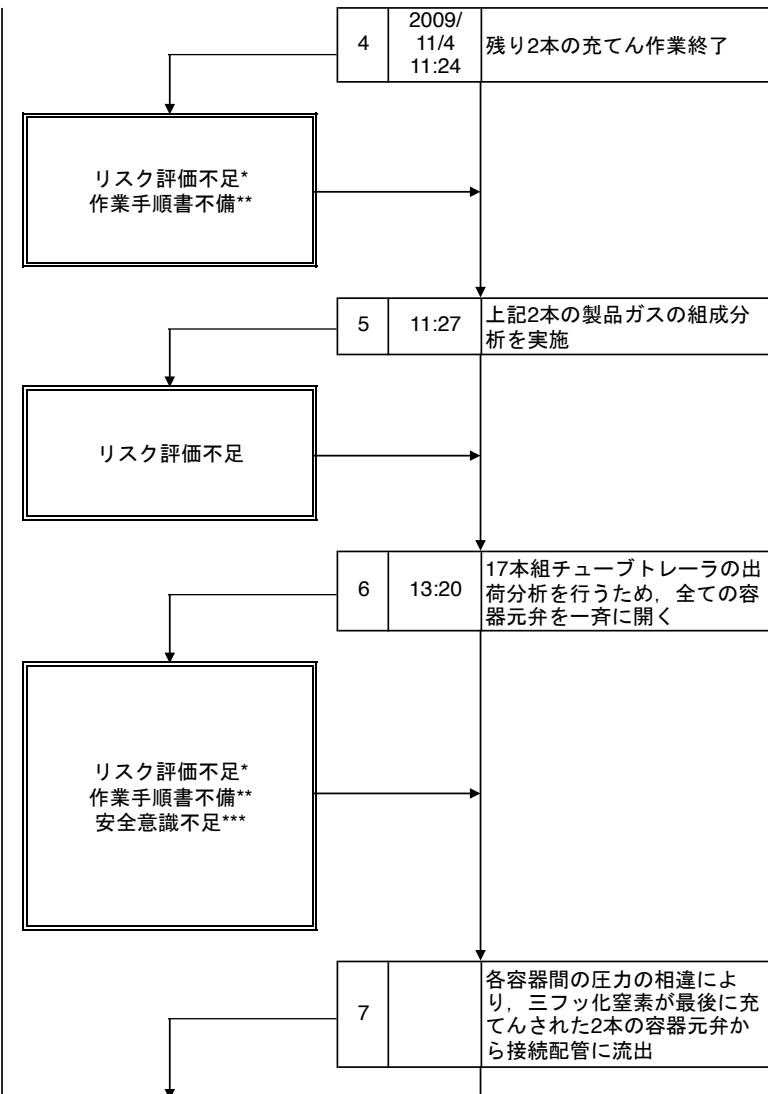
(4)三フッ化窒素製造プラントで爆発

PFA, RISCAD, AIST

事故概要	発生日時（曜日）	発生場所
2009年11月4日(水)13:20頃、山口県下関市		
化学製品製造会社にある鉄骨造の工場で直径約0.6m、長さ約6mのガスボンベに三フッ化窒素を充填する作業中に火災、爆発が起きた。火災は約3時間後に鎮火したが、同棟および隣接する建物、計2棟、計約1,500平方mが全焼し、爆風により同工場の周辺約半径200-300mにある住宅および事務所など、計101棟の屋根の一部や窓ガラスが破損し、車両36台の窓ガラスが割れるなどの被害が出た。充填作業が行われた部屋には、出火当時約70本のボンベがあったが、多くが破裂した。作業中の社員1名、協力会社社員1名および周辺住民9名が、爆風で飛ばされたり、飛散したガラス片でけがをしたりして、軽傷を負った。三フッ化窒素が工場の敷地内外へ漏えいしたため、約430世帯に自主避難が呼びかけられ、周辺住民約30名が避難したが、健康被害はなかった。警察と会社の調べでは、会社員1名が三フッ化窒素をガスボンベに注入していた際にガス管の接続部分から出火し、その後爆発にいたった。現場に火の気はなく、容器間の圧力差により三フッ化窒素が移動した際の流体摩擦が原因の可能性がある。同工場では、2001年4月にも三フッ化窒素による爆発事故を起こしている(RISCAD ID : 5047)。		
背景		
<ul style="list-style-type: none"> 三フッ化窒素製造設備の充てん場は2系統あり、そのうちの1系統では、各710L、17本組のチューブトレーラへの三フッ化窒素の充てんを行っていた。容量が大きいため、1日に容器2-3本をまとめて充てんしていた。 同系統の充てん場に充てん済みの40フィートISOチューブトレーラ(8.4MPa)が出荷待ちで保管されていた。 別系統の充てん場に充てん作業中の20フィートISOチューブトレーラ(2.8MPa)と空の真空引き状態の40フィートISOチューブトレーラが置かれていた。 チューブトレーラの諸元 <ul style="list-style-type: none"> 17本組チューブトレーラ 710L容器、17本、トレーラ全長約11m 40フィートISOチューブトレーラ 2,400L容器、8本、トレーラ全長約13m 20フィートISOチューブトレーラ 1,200L容器、8本、トレーラ全長約9m 三フッ化窒素の性質：沸点-129.06°C、ガス比重2.45、参加能力指数1.6(酸素1) 高圧、高温の三フッ化窒素は純酸素と同等の限界酸素指数の可能性がある 		

3M解析(3M→対策)

区分	原因事象	事故進展フロー	備考	Man	Machine	Media&Management
経過	<p>リスク評価不足</p> <pre> graph TD A[リスク評価不足] --> B[当該充填場所での1回目の充填作業] B --> C[当該充填場所での2回目の充填作業] C --> D["2009/11/3まで 17本組のチューブトレーラのうち15本の充てん作業終了"] </pre>	<p>1 当該充填場所での1回目の充填作業</p> <p>2 当該充填場所での2回目の充填作業</p> <p>3 2009/11/3まで 17本組のチューブトレーラのうち15本の充てん作業終了</p>	<p>圧力約6MPa</p> <p>1回目の成功体験により圧力増加に対するリスクを評価せず2回目を実施したこと</p> <p>圧力約9.5MPa</p>		<p>充填圧力が高くなると危険性が増すとの認識不足</p>	<p>充填圧力による危険性を設計上評価不足</p> <p>圧力増加についてのリスク評価・変更管理が不十分</p>



*容器毎に充てんした際の差圧発生による危険性を評価していなかったこと
**容器毎に充てんする作業手順であったこと

サンプリング容器や手順の詳細は不明

サンプリングの際の元圧の降低手順が不明で、高流速(音速)となった可能性があり、外気温条件下での可溶栓部の昇温推算が必要であったこと

空気駆動弁

*容器間の差圧で生じる内部流体の移動による危険性を評価していなかったこと
**容器弁を全て開く操作手順であったこと
***容器間の差圧による流動に対する危険意識がなかったこと

最後に充てんされた2本の内圧は9.5MPaで、最小圧力の容器よりも約0.4MPa高かったと推定

*容器ごとの圧力差異によって起るリスクの理解不足
**容器ごとに充填する作業手順の是非について未確認

*容器ごとの圧力差異によって起るガス流動に対するリスクを設計上配慮不足

**充填時の流速指定不備、各容器圧力平準化の必要性等の作業手順書記載不備

サンプリング時の弁開度による昇温リスクを考慮不足。

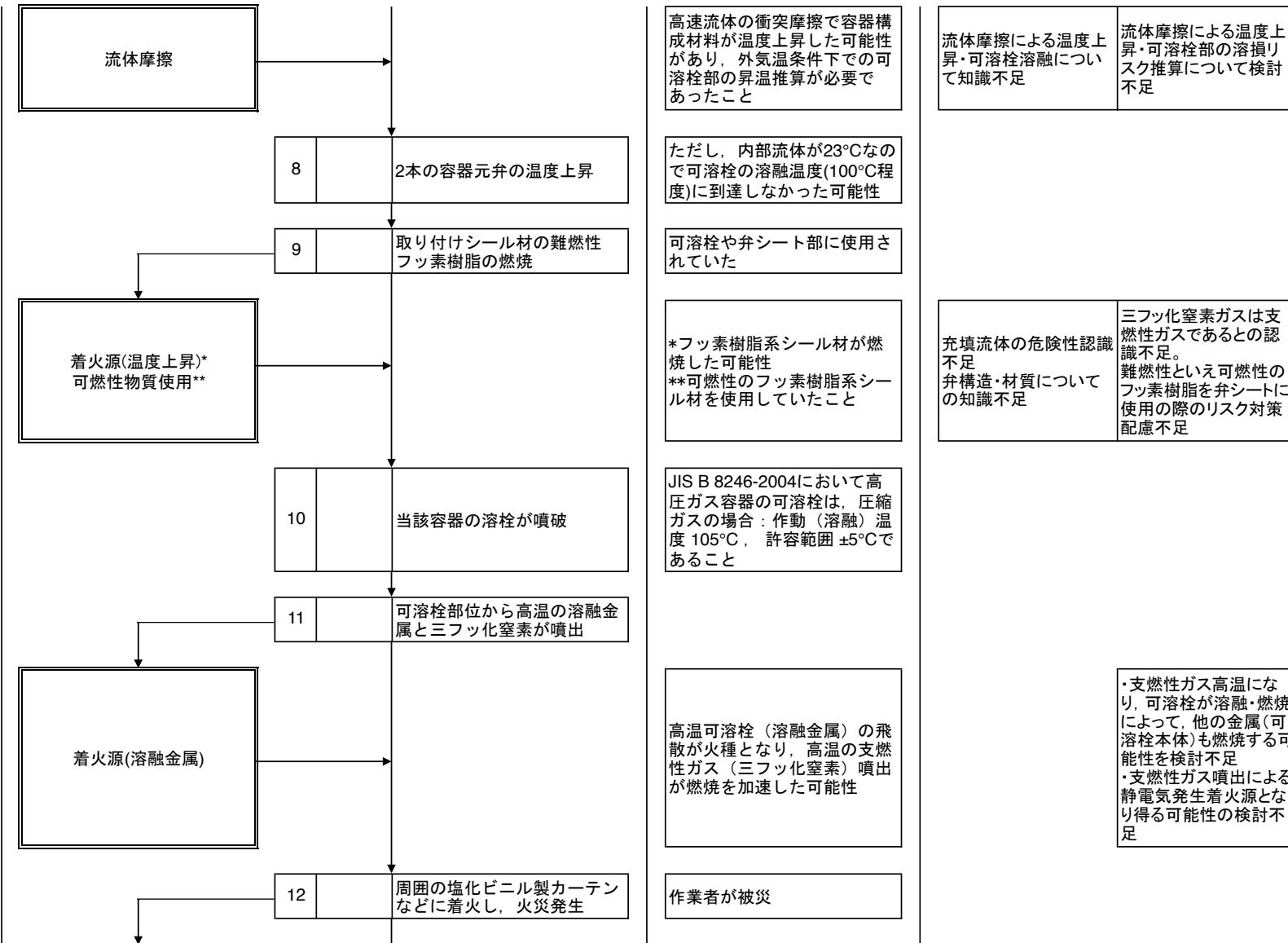
ガス流速による昇温推算を行わず、設計上の配慮不足

作業手順書においてガスサンプリング時の開度(ガス流速)未指定、リスク評価不足

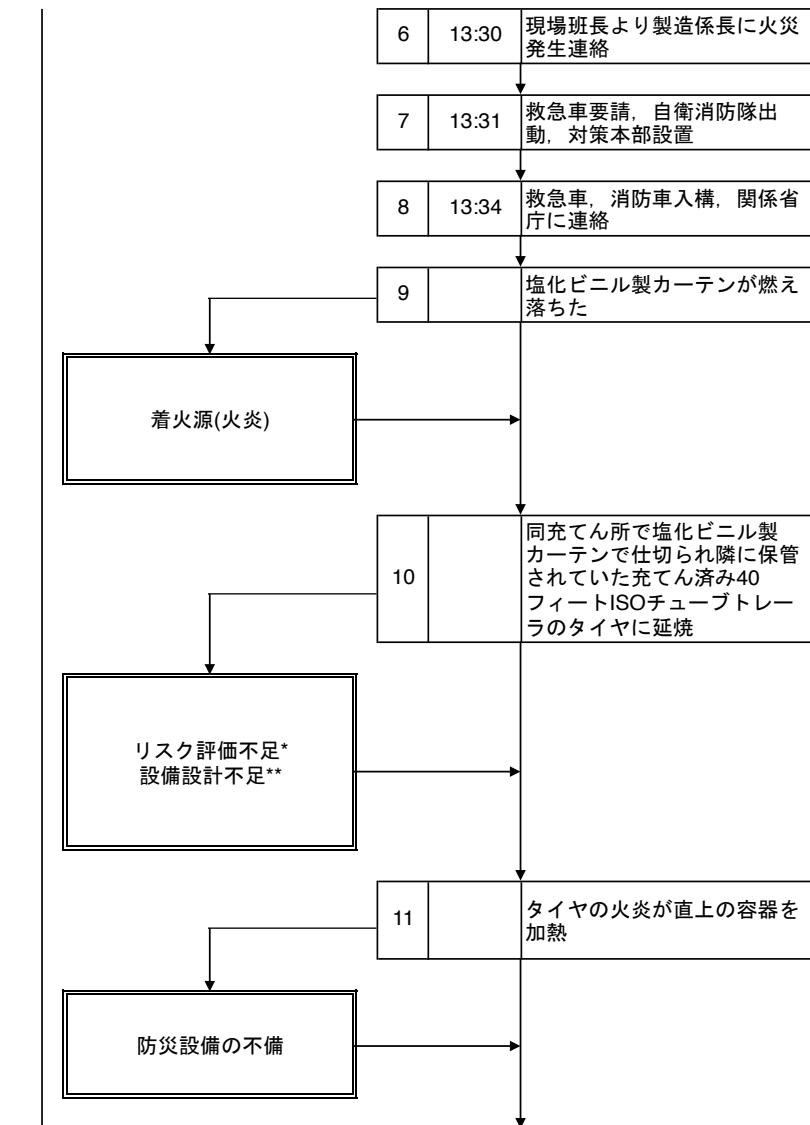
*容器ごとの圧力差による流動の危険性認識不足
**容器弁を一括全開の作業手順に対する妥当性の検討不足
***弁全開時の容器間差圧による摩擦熱発生や断熱圧縮による昇温リスクに対する危険意識欠如

*容器ごとのガス圧力制限を指定せず、流動による危険性評価が不足。
**容器弁を一括全開の作業手順に対する妥当性の検討不足
***容器間差圧による摩擦熱発生、断熱圧縮による昇温リスクに対する危険意識欠如

**作業手順書通りの作業による危険性を認識不足
***ガス流動による摩擦熱発生、時断熱圧縮による昇温リスクに対する安全意識欠如



	<p>リスク評価不足* 設備設計不足**</p>	<p>*約10MPaの高圧容器の異常時の可溶栓溶融と内部流体噴出シナリオを評価しておらず、高温高圧の支燃性ガス環境下での難燃性材料の燃焼性を評価していなかったこと **塩化ビニルの難燃性を過信し、支燃性ガス充填場所で可燃性材料を使用していたこと、また、延焼防止のための区分けが不十分で、散水設備が設置されていなかったこと</p>	<p>*異常事態発生時の対応・訓練不足</p>	<p>*高圧容器の異常時ににおける最悪リスクシナリオ検討不足 **支燃性ガスの取扱場所での可燃物使用による危険性検討不足。 **万一を考慮した消火・散水設備の不設置</p>
対応操作	<pre> graph TD A["リスク評価不足* 設備設計不足**"] --> B["17本組チューブトレーラ登載の周囲の容器や容器弁、マニホールド配管が延焼"] B --> C["防災設備の不備"] C --> D["容器弁の空気作動部が溶融し、容器弁が開放状態になる"] D --> E["設備設計の不備* 防災設備の不備**"] E --> F["3 13:23 総合計器室でガス検知器、火災報知器が発報、関係部署に連絡"] F --> G["4 13:24 両系統の電灯盤の警報発報"] G --> H["5 13:27 充てん用コンプレッサ緊急停止"] </pre> <p>1 17本組チューブトレーラ登載の周囲の容器や容器弁、マニホールド配管が延焼</p> <p>直火や輻射熱による温度上昇を回避する散水冷却による初期消火設備が無かったこと</p> <p>空気作動部はアルミダイキャスト製であった</p> <p>*制御系である空気作動部が金属カバーによる耐火保護仕様になっていたこと **直火や輻射熱による温度上昇を回避する散水冷却による初期消火設備や冷却機能と組み合わせた容器の個別隔離機能が無かったこと</p> <p>初期消火・冷却に必要な散水冷却・消火設備未設置</p> <p>防火管理区域の設定不備</p> <p>*弁制御作動部の金属カバー等による耐火保護性能不備。 **万一を考慮した散水冷却設備 **容器隔離機能等防災設備不備</p> <p>防消火設備設置基本方針不明確</p>			



可燃物使用に対する延焼防止方策不備
火炎の消火対策不備による、他の可燃物への延焼発生
消火活動遅れによる着火源排除未実施

*万一を考慮したリスク評価未実施 **支燃性ガスの取扱場所での可燃物使用による危険性考慮不足 ***消火・散水設備の不設置	危険物取扱場所指定不整合
---	--------------

・万一を考慮した初期消火に必要な散水冷却・消化設備等防災設備不備

	<table border="1"> <tr><td>12</td><td>13:45</td><td>充てん場にて1回目の爆発</td></tr> <tr><td>13</td><td></td><td>飛散物発生</td></tr> <tr><td>14</td><td>13:50</td><td>2回目の爆発</td></tr> <tr><td>15</td><td>16:10</td><td>鎮火</td></tr> </table>	12	13:45	充てん場にて1回目の爆発	13		飛散物発生	14	13:50	2回目の爆発	15	16:10	鎮火	<p>保管されていた充てん済み40フィートISOチューブトレイの容器の爆発</p> <p>周辺家屋や車両の損傷</p> <p>組成分析中の17本組チューブトレイの1本の容器弁付近の破裂</p>									
12	13:45	充てん場にて1回目の爆発																					
13		飛散物発生																					
14	13:50	2回目の爆発																					
15	16:10	鎮火																					
恒久的対応策	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>作業管理</td><td>容器間の差圧発生を回避するため個別充填から17本同時充填に変更する</td></tr> <tr><td>2</td><td>作業管理 安全教育</td><td>再発防止対策を反映した手順書の改訂と教育</td></tr> <tr><td>3</td><td>安全設計</td><td>異常発生時の緊急遮断システム強化</td></tr> <tr><td>4</td><td>安全設計</td><td>異常の早期発見のための監視システム強化</td></tr> <tr><td>5</td><td>安全管理</td><td>充填場内の可燃物の除去</td></tr> <tr><td>6</td><td>安全管理</td><td>チューブトレー充填設備に散水設備の設置</td></tr> <tr><td>7</td><td>安全設計</td><td>安全装置作動用用計装システムの耐火保護</td></tr> </table>	1	作業管理	容器間の差圧発生を回避するため個別充填から17本同時充填に変更する	2	作業管理 安全教育	再発防止対策を反映した手順書の改訂と教育	3	安全設計	異常発生時の緊急遮断システム強化	4	安全設計	異常の早期発見のための監視システム強化	5	安全管理	充填場内の可燃物の除去	6	安全管理	チューブトレー充填設備に散水設備の設置	7	安全設計	安全装置作動用用計装システムの耐火保護	<p>充填容器ごとに緊急遮断弁設置、充填ヘッダー配管に監視用圧力計と緊急遮断弁の設置</p> <p>各充填場に監視カメラを増設</p> <p>RISCAD提案</p>
1	作業管理	容器間の差圧発生を回避するため個別充填から17本同時充填に変更する																					
2	作業管理 安全教育	再発防止対策を反映した手順書の改訂と教育																					
3	安全設計	異常発生時の緊急遮断システム強化																					
4	安全設計	異常の早期発見のための監視システム強化																					
5	安全管理	充填場内の可燃物の除去																					
6	安全管理	チューブトレー充填設備に散水設備の設置																					
7	安全設計	安全装置作動用用計装システムの耐火保護																					
教訓	<ul style="list-style-type: none"> ・燃えにくいものでも燃える：難燃材や金属であっても酸素などの支燃性ガスの存在によって燃えることがある。支燃性ガスの取扱い時は使用している材料の燃焼性に特に注意が必要である。 ・危険を知らなければ安全対策はない：リスク評価をきちんと行って危険性を認識しなければ、安全対策に考えが及ばない。火災が起きてしまったらどうなるかを想定して、防火設備や使用材料を検討する必要がある。 																						

各支燃性ガス雰囲気中におけるシール材等の発火温度(°C)

	NF ₃	O ₂	ClF ₃
PTFE	>450	>450	>450
PCTFE	>450	392	>450
PE	422	215	180
FKM	395	411	188
CR	374	378	187

PTFE : ポリテトラフルオロエチレン

PCTFE : ポリクロロトリフルオロエチレン

PE : ポリエチレン

FKM : フッ素ゴム

CR : クロロブレンゴム

(5)ポリフッ化ビニルスラリー貯蔵タンクの爆発

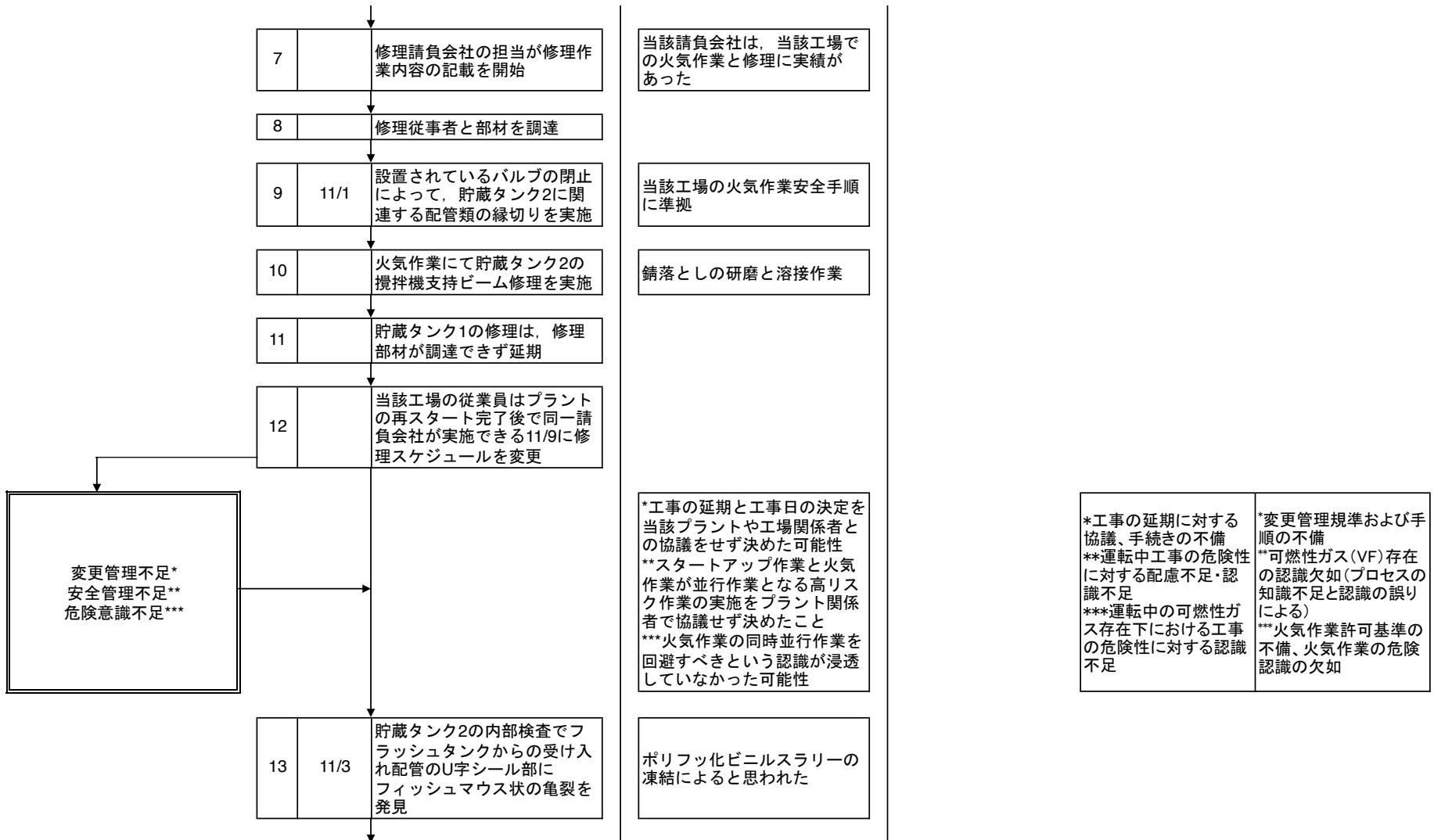
PFA, RISCAD, AIST

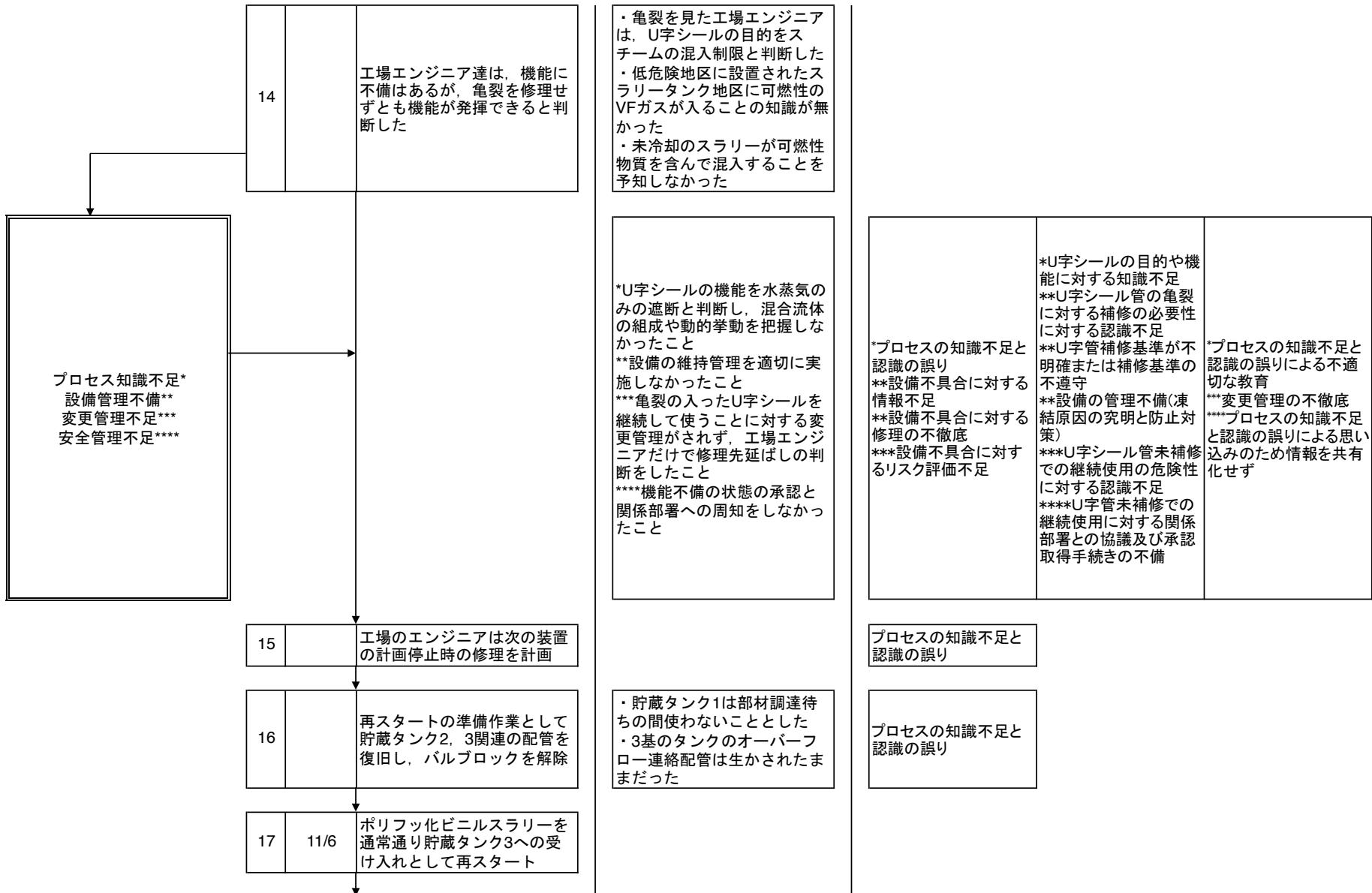
事故概要	発生日時（曜日）	発生場所
2010年11月9日(火)11:04頃、米国・ニューヨーク州バッファロー 米国のポリフッ化ビニルなどを製造する化学工場でポリフッ化ビニルスラリー貯蔵タンクの攪拌機支持ビームの修理作業中に貯蔵タンクの爆発が起きた。貯蔵タンクの屋根の約7.3mの溶接部は約60cmを残して側壁の円周部から切り離され、鋼製通路カバーが30m以上吹き飛ばされた。溶接作業をしていた作業者1名が死亡し、作業監督者1名が1度のやけどなどで重傷を負った。計画点検後の再起動時に3基ある貯蔵タンクのうちの1基の修理作業を平行して実施しており、オーバーフロー配管の縁切りが欠落していたところに、圧縮機の故障やシール部の亀裂により、他の2基の貯蔵タンクから可燃性のフッ化ビニルが当該貯蔵タンクに入り込み、溶接作業の火花か、熱により着火した可能性がある。		

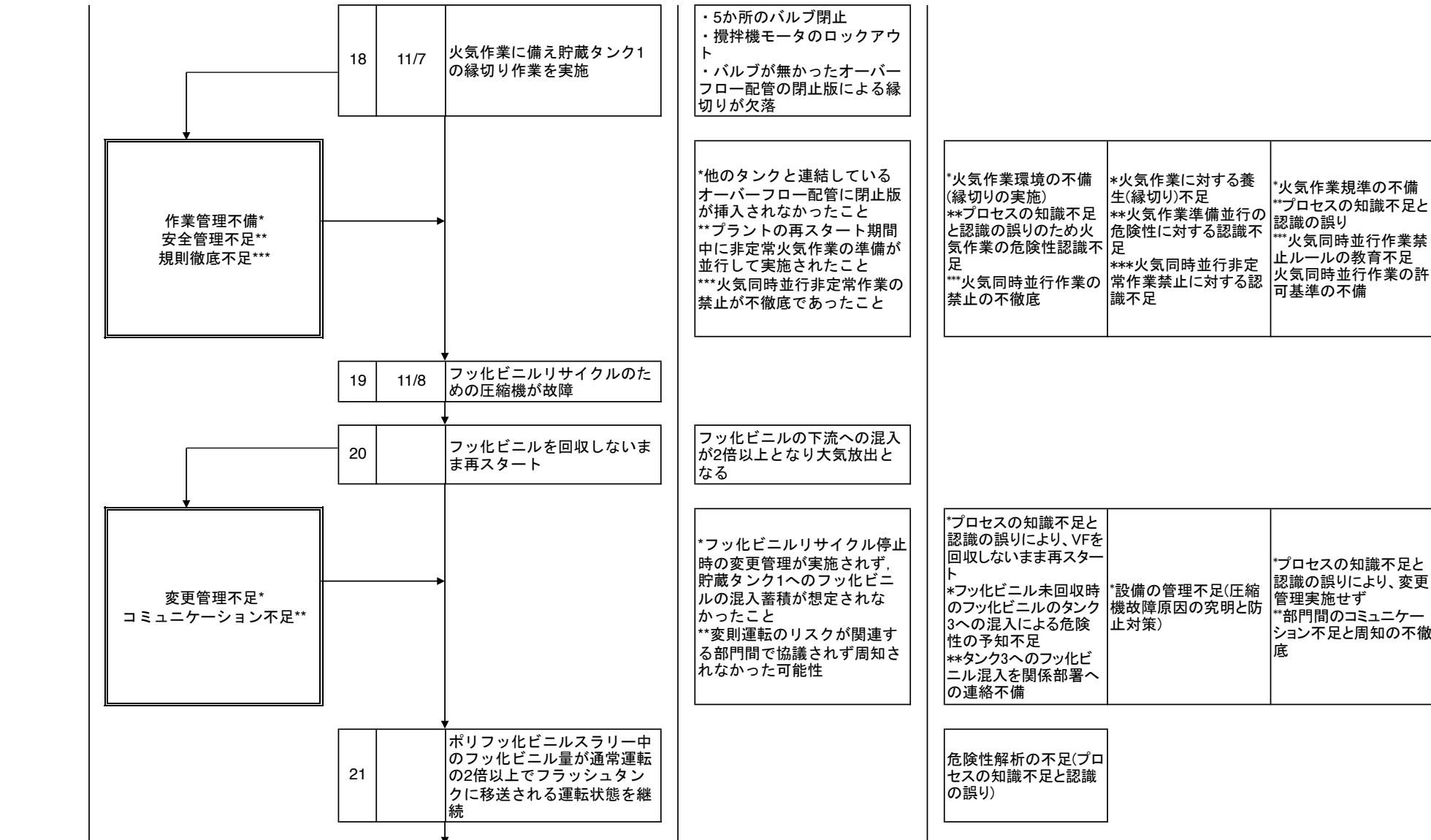
背景
<ul style="list-style-type: none"> プロセス概要：同社の他工場で作られたフッ化ビニルを受け入れて樹脂化し、乾燥後包装する。反応器で水溶媒中にてフッ化ビニルからスラリー状のポリフッ化ビニルを生成し、分離器で未反応のフッ化ビニルが分離され、圧縮機で昇圧後、反応器にリサイクルされる。スラリー状のポリフッ化ビニルは送出配管途中でスチームを投入、混合し、フラッシュタンクで残渣フッ化ビニルを除去し、冷却後に3基のスラリー貯蔵タンクへ送られ、乾燥後、包装される。 ポリフッ化ビニルスラリー貯蔵タンクの仕様：直径：約3.4m、高さ：約5.8m、肉厚：約0.4mm）、容量：約40立方m、ステンレス製、攪拌機付き。攪拌機用モータ、ギャボックスなどの付属部品は、溶接施工されたビームにボルト締め取り付け。 ポリフッ化ビニルスラリー貯蔵タンクの使い方：製造建屋に隣接したタンク地区に保温施工された貯槽タンクを3基保有。通常は2009年に更新された貯蔵タンク3に受け入れるが、満液の際は貯蔵タンク1と2を使用する。その際連結されているオーバーフロー配管を通して貯蔵タンク2に受け入れられ、通常は貯蔵タンク1は空である。貯蔵タンク2には、フラッシュタンクの液レベルが高くなった場合の安全策として直接タンクに受け入れる配管が敷設されている。配管には、未冷却スラリーからのフッ化ビニル蒸気の混入防止のためにU字シールループが貯蔵タンク内に設置してある。 フッ化ビニルの物性：無色透明な高引火性気体。エーテル臭。気体は空気より重い。爆発範囲：2.6-21.7%，発火温度：385°C。許容値限界：5ppm(TWA)。 鋼材の溶接時の温度：鋼の融点：1,538°C、赤熱状態：650°C以上

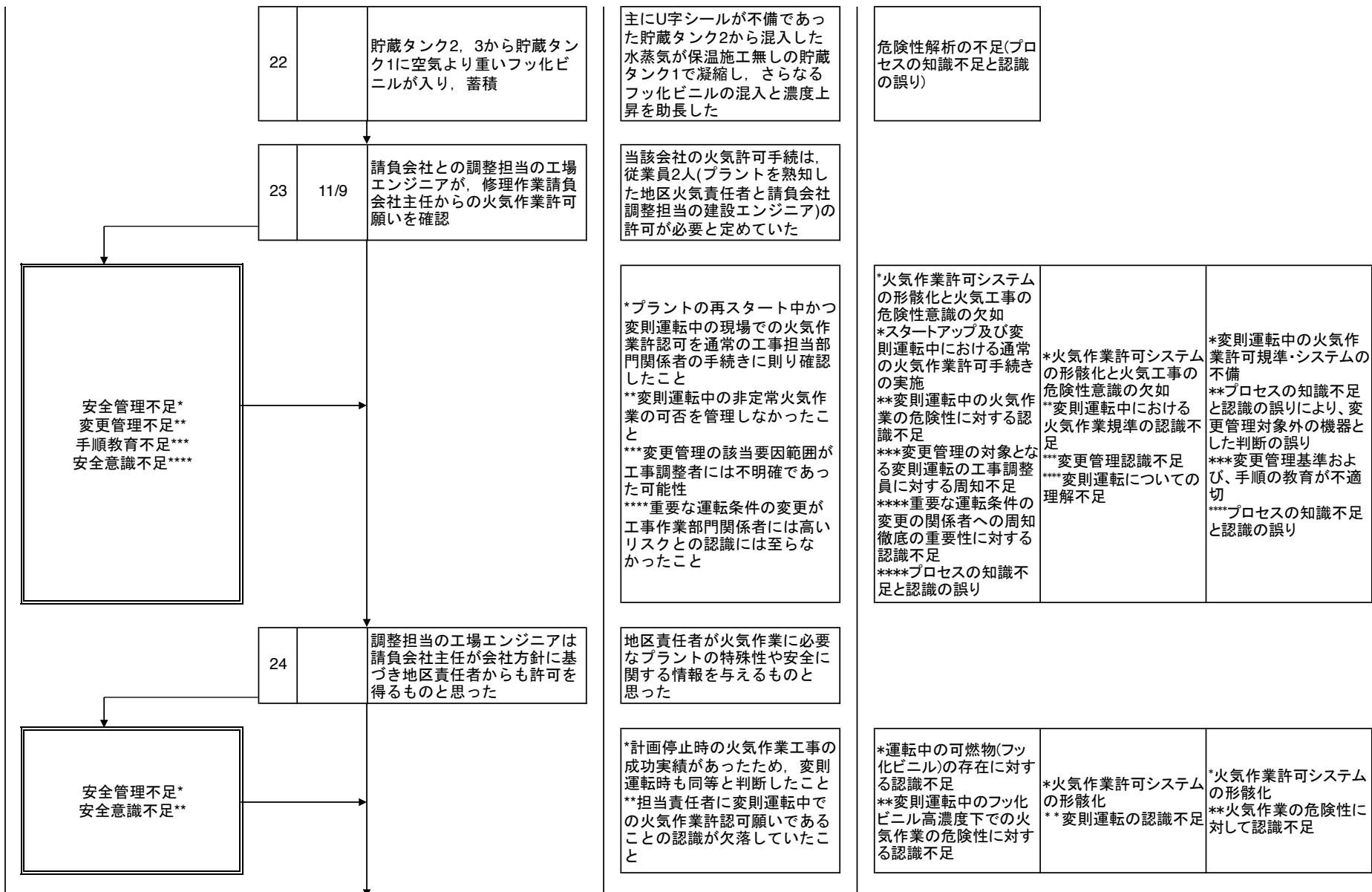
3M解析(3M→対策)

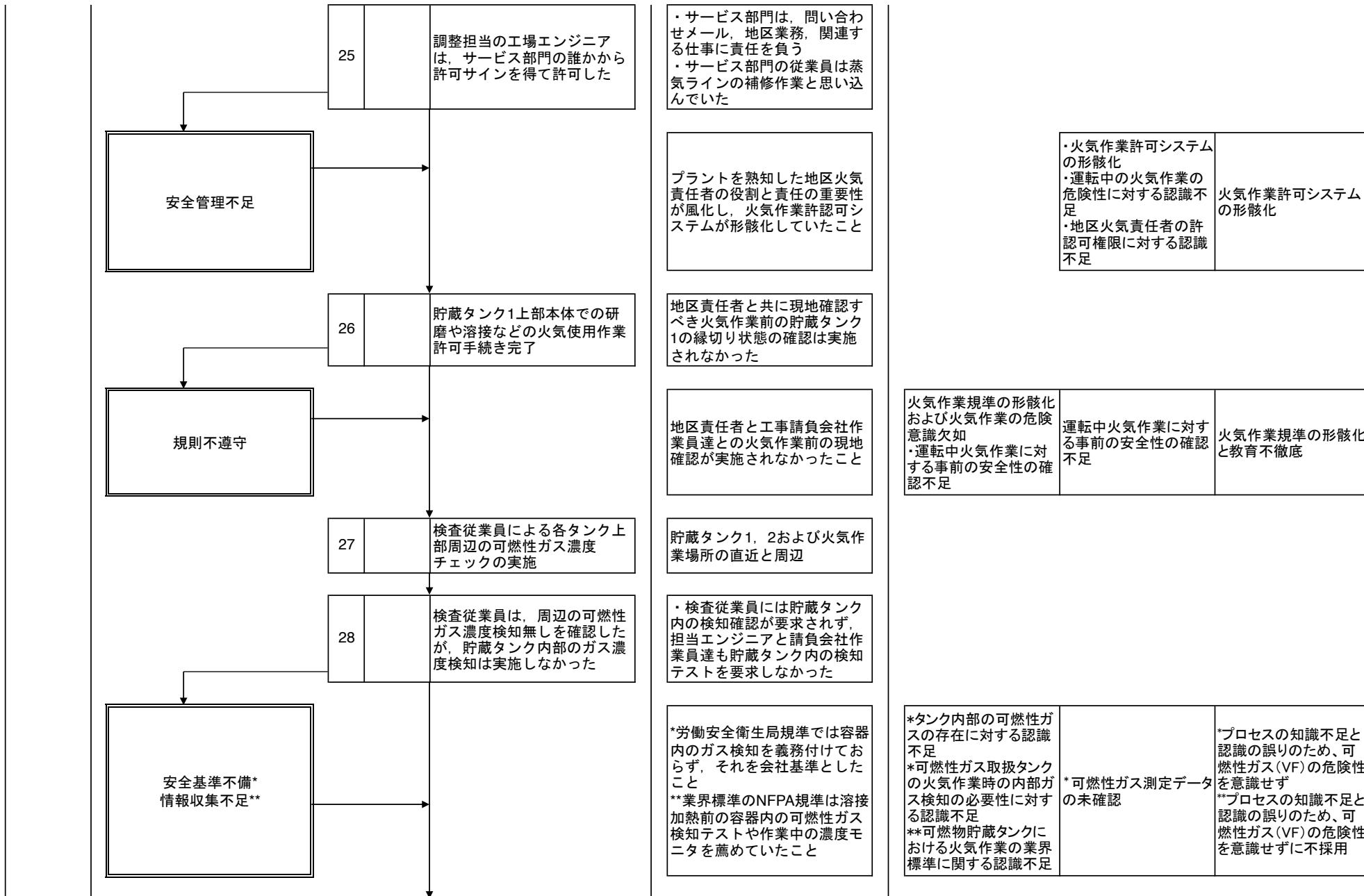
区分	原因事象	事故進展フロー	備考	Man	Machine	Media&Management																		
経過		<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>2010 10/22-11/6間のプラントの計画停止を決定</td> <td></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>10/21 夕方</td> <td>プラントの停止および貯蔵タンク1、2内のスラリーをポンプ移送</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>10/22</td> <td>貯蔵タンクの使用禁止と清掃により入槽可能な状態にした</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td></td> <td>貯蔵タンク1、2のアスベスト製保温材をノンアスベスト製に施工するため取り外し</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>10/29</td> <td>点検で貯蔵タンク1、2の攪拌機支持ビームに腐食を発見</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td></td> <td>工場のエンジニアが支持ビーム修理の発注書を作成</td> </tr> </table>	1	2010 10/22-11/6間のプラントの計画停止を決定		2	10/21 夕方	プラントの停止および貯蔵タンク1、2内のスラリーをポンプ移送	3	10/22	貯蔵タンクの使用禁止と清掃により入槽可能な状態にした	4		貯蔵タンク1、2のアスベスト製保温材をノンアスベスト製に施工するため取り外し	5	10/29	点検で貯蔵タンク1、2の攪拌機支持ビームに腐食を発見	6		工場のエンジニアが支持ビーム修理の発注書を作成	<p>当該貯蔵タンクは計画点検の該当設備</p> <p>保温材の復旧は、この事故までの間には実施されなかった</p>			
1	2010 10/22-11/6間のプラントの計画停止を決定																							
2	10/21 夕方	プラントの停止および貯蔵タンク1、2内のスラリーをポンプ移送																						
3	10/22	貯蔵タンクの使用禁止と清掃により入槽可能な状態にした																						
4		貯蔵タンク1、2のアスベスト製保温材をノンアスベスト製に施工するため取り外し																						
5	10/29	点検で貯蔵タンク1、2の攪拌機支持ビームに腐食を発見																						
6		工場のエンジニアが支持ビーム修理の発注書を作成																						











		<p>29 9:00 請負会社の作業員達が貯蔵タンク1上部の渡り歩廊に到着</p> <p>30 作業員は安全ベルトを攪拌機に付け、足を貯蔵タンク上に置いて火気修理作業開始</p> <p>31 アーク溶接にて貯蔵タンク1頂部でC型鋼に溶接作業実施</p> <p>着火源(溶接火花または高温物体)</p> <p>32 11:04 貯蔵タンク内で発火、爆発</p>	<p>主任は火気監視のためカバーの付いたマンホールの近くの歩廊に待機</p> <p>C型鋼は攪拌機支持鋼と溶接継ぎする段取りであった</p> <p>溶接修理作業の火花が攪拌機シャフトの周囲の開口部(幅約1.3cm)から貯蔵タンク内に入ったか、開口部からの可燃性混合気の排出経路が作業場所となつたこと</p> <p>計器室の貯蔵タンク1の液面計が突然の急上昇を記録</p>	<ul style="list-style-type: none"> 火気工事の火気が着火源になることの知識と認識不足 ガス検知不備 	<ul style="list-style-type: none"> 火気工事の火気が着火源になることの知識と認識不足 ガス検知不備
対応操作		<p>1 火災は可燃性混合気が消費され自然に鎮火</p>			
恒久的対応策		<p>1 安全管理 全工場の火気使用に先立つ火気使用許認可システムの監査に求める会社方針と手順を作成し、定着させること</p> <p>2 安全管理 火気使用作業に関連するすべての潜在的爆発危険が確認され軽減されること</p> <p>3 安全管理 会社方針や業界標準*と一致した適切な記入様式にて許可に必要とすることを全て記載すること</p> <p>4 安全管理 火気使用許可を会社方針と一致した署名や同等の手法で適材の従業員が会社の公式承認をすること</p> <p>5 安全管理 タンクや槽に連結する全てのプロセス配管、類似の継ぎ手を明確に縁切り*を要求する会社方針と手順に改訂すること</p> <p>6 安全管理 火気作業が承認される前に装置内を適切に排気すること</p>	<p>*NFPA（全米防火協会）の326、51Bを含むこと</p> <p>*バルブの閉止、閉止版の挿入、切り離し開放等</p>		

7	安全管理	装置表面での溶接、切断、研磨等の火気作業に先立ち装置内の可燃性蒸気のモニターを要求する会社方針と手順に改訂すること	
8	安全管理	火気作業期間の間、装置内の可燃性ガスのモニターを要求する会社方針と手順に改訂すること	*NFPAの326、51B
9	安全管理	火気作業期間の間、連続とするか定期的なテストとするかの基準を決定するための方針を作ること	
10	安全管理	非定常スタートアップ期間は、非定常火気作業との同時並行作業をしない会社方針と手順に改訂すること	RISCAD提案
11	変更管理	変更の発信と管理機能を充実するため工場の操業維持管理に関連する各機能部門が変更の管理を加えた業務の方針と業務改訂をすること	RISCAD提案
12	変更管理	変更の管理を各機能部門業務に浸透・定着させるため工場組織の成果（パフォーマンス）指標として提示し、抜け防止と向上を期すこと	RISCAD提案

教訓	<ul style="list-style-type: none"> 形骸化は赤信号：工場の運営は、各機能部署の一人ひとりの役割と責任が健全に保たれ維持される前提で構成されている。重大作業の手続き等の管理形態の形骸化・不透明化がはびこる前に不足する技能を補完する人材登用や仕組みの見直しを厳格、且つ弾力的に実施してその芽を摘み取り合う風土が安全を持続させる基盤と言える。 変更も全員参加でコントロール：長い期間の健全な操業維持は、変化・変更の管理と設備の健全性とに在ると言っても過言ではない。安全を支える責務として変化・変更を責任を持って都度発信すべきことを各部門業務に明記し、多層防護にて運営に当たるべきである。 気付きを得られる効果的なコミュニケーション：非定常作業は、特に各機能部門の専門性と全体の意識合わせが重要である。一機能部門が蛸壺判断に落ち入らぬよう意図して関連部門から広く情報を集め、リスクに影響を及ぼす状況の理解と判断および組織間のベクトル合わせに機能部門間コミュニケーションの実施が有効である。 慢心が足元を揺さぶる：安全には特効薬はない。謙虚に自ら創り続けなければならない。この会社の安全記録も2009年までは、自らを優秀な会社の実績データとして表示し、安全のビジネス展開に生かされてきた。立派な安全管理システムのフレームとその仕組みではあったが数ある自工場の一部では実行されず、監査でも見つけられず、自浄作用が働かなかった。
-----------	--

(6)塩化ビニルモノマ製造施設で爆発

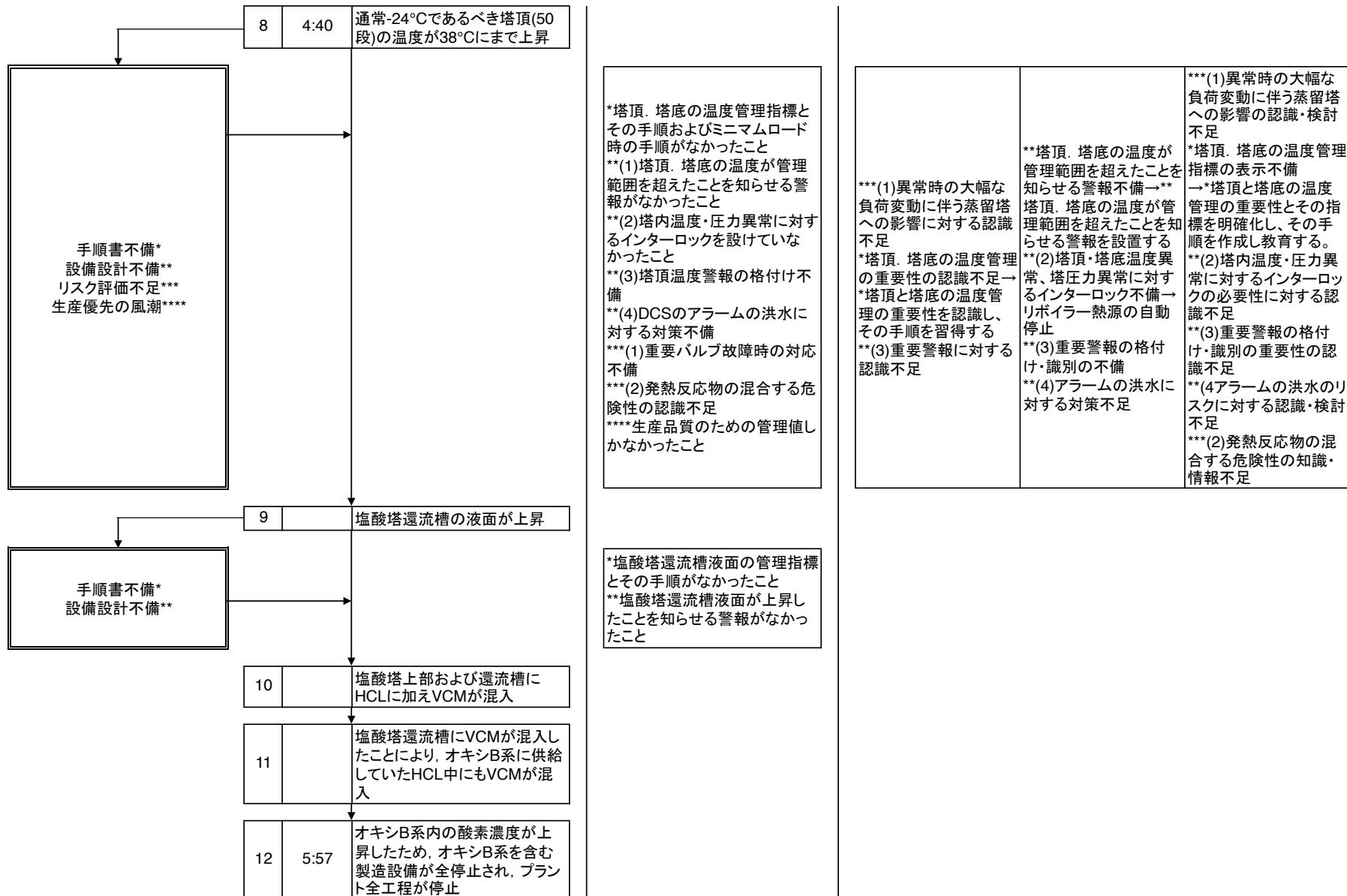
PFA, RISCAD, AIST

事故概要	発生日時(曜日) 発生場所
2011年11月13日(日)15:15頃、山口県周南市	
塩化ビニルモノマ製造施設にある塩酸塔還流槽付近で漏えい、爆発、火災が起きた。2回の爆発の後で発生した火災により、液塩酸一時受タンクが延焼した。当該施設、および、周辺プラントが損壊した。従業員1名が死亡した。会社と警察の調べでは、事故当日は反応工程A系の緊急放出弁(開)が故障したため、オキシ反応工程A系が停止しており、大幅なロードダウンによって塩酸塔の運転状態が変動していた。この変動への対応に不備があり、塩酸塔塔頂の塩酸中に塩化ビニルモノマ(VCM)が混入したため、プラント全工程が停止した。その後、塩酸塔還流槽内、一時受タンク内に溜まった塩酸、VCMの混合液が、触媒となる鉄錆などのもとで約12時間に渡って保持されたため、副反応である発熱によって1,1-二塩化エタン(1,1-EDC)の生成が徐々に進行した。これに運転者が気づかなかつたため、同槽内の温度上昇して反応が急激に進行し、内部圧力が異常上昇したため、一時受タンクから可燃物が漏えいし、その後塩酸塔還流槽が破裂し、爆発、火災にいたった可能性がある。	
背景	
<ul style="list-style-type: none"> ・当該製造施設は、オキシ反応工程(発熱)、1,2-EDC(二塩化エタン:C₂H₄Cl₂)洗浄工程、1,2-EDC精製工程、1,2-EDC分解工程(吸熱)、VCM(塩化ビニルモノマー:C₂H₃Cl)精製工程(塩酸塔、塩化ビニル塔)などから構成されていた。 ・オキシ反応工程は2系列あり、1,2-EDC分解工程は、3系列に分かれていた。 ・オキシ反応工程とは、エチレン(C₂H₄)、塩酸、酸素(O₂)を原料とした気相反応で、1,2-EDCと水が生成される発熱反応(239kJ/mol)である。 $C_2H_4 + 2HCl + 1/2O_2 \rightarrow C_2H_4Cl_2 (1,2-EDC) + 239\text{ kJ/mol}$ ・1,2-EDC洗浄工程では、オキシ反応工程で生成された1,2-EDCをエチレンと塩素(Cl₂)より合成された直接塩素化1,2-EDCと混和し、中和洗浄して、粗1,2-EDCとして精製工程に入れる。 ・粗1,2-EDCは、蒸留分離されて精製1,2-EDCとなり、1,2-EDC分解工程へ供給される。 ・1,2-EDC分解工程では、精製1,2-EDCをVCMと塩酸に熱分解する。 $C_2H_4Cl_2 (1,2-EDC) \rightarrow C_2H_3Cl (VCM) + HCl + (\text{未反応 } 1,2-EDC)$ ・生成したVCM、塩酸および未反応1,2-EDCは、冷却され、塩酸塔へ供給される。 ・液塩酸一時受タンクとは、塩酸塔還流槽の還流液を一時的にストックするタンクである。また、緊急停止時のストック先としても使用する。 ・副反応: $HCl + C_2H_3Cl (VCM) \rightarrow CH_3CHCl_2 (1,1-EDC) + 62\text{ kJ/mol}$ 鉄錆成分+塩酸→FeCl₃の触媒: ルイス酸系触媒 ・1,1-二塩化エタン(1,1-EDC): CH₃CHCl₂(副反応生成物) ・エチレンリサイクルラインには、停電時の系内圧力を下げる目的として、緊急放出弁が設置されていた。 	

3M解析(3M→対策)

区分	原因事象	事故進展フロー	備考	Man	Machine	Media&Management											
経過		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 10%;">1</td> <td style="width: 10%;">2011/11/25</td> <td style="width: 80%;">塩化ビニルモノマ(VCM)精製工程の塩酸塔は運転中</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td style="text-align: center;">↓</td> </tr> <tr> <td style="width: 10%;">2</td> <td style="width: 10%;">3:39</td> <td style="width: 80%;">オキシ反応工程A系(オキシA系)の緊急放出弁が故障</td> </tr> </table> <p>↓</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 10%; text-align: right;">↓</td> <td style="width: 80%; text-align: center;">放出弁が開の状態になった</td> </tr> </table>	1	2011/11/25	塩化ビニルモノマ(VCM)精製工程の塩酸塔は運転中			↓	2	3:39	オキシ反応工程A系(オキシA系)の緊急放出弁が故障	↓	放出弁が開の状態になった				
1	2011/11/25	塩化ビニルモノマ(VCM)精製工程の塩酸塔は運転中															
		↓															
2	3:39	オキシ反応工程A系(オキシA系)の緊急放出弁が故障															
↓	放出弁が開の状態になった																







	19	塩酸一時受タンクに溜まった塩酸と混入したVCMが鉄イオンが触媒となり1,1-EDCを生成		
	20	塩酸塔還流槽の温度、圧力が上昇していたが、作業員は気づかず		
		手順書不備* 設備設計不備** リスク評価不足***	*塩酸塔還流槽の温度、圧力の管理指標とその手順がなかったこと **塩酸塔還流槽の温度、圧力が上昇したことを知らせる警報がなかったこと **DCSアラームの洪水に対する対策の不備 ***設備の正常停止確認の重要性に対する認識不足	*塩酸塔還流槽(容器)の圧力・温度の管理意識不足 →塩酸塔還流槽(容器)の圧力・温度の管理指標とその手順を習得する ***設備の正常停止確認の重要性に対する認識不足 **塩酸塔還流槽(容器)の圧力・温度が上昇したことを知らせる警報がなかったこと →塩酸塔還流槽(容器)の圧力・温度が上昇したことを知らせる警報を設置する **アラームの洪水に対する対策不足 ***設備の正常停止に対する確認方法の認識・検討不足
	21	15:00頃 液塩酸一時受タンクの圧力上昇を認知し、圧力除去操作を実施		
		異常時対応不足	圧力が上昇しているタンクに近づいて操作することを禁じていなかったこと	・現場操作禁止とする危険圧力を認識不足 →現場操作禁止とする危険圧力の指標とその手順を習得する
	22	15:15 液塩酸一時受タンク上部から異音がし、白煙が噴出		・現場操作禁止とする危険圧力を知らせる警報がなかったこと →現場操作禁止とする危険圧力を知らせる警報
	23	15:23 塩酸塔還流槽の圧力が2.0MPa以上に上昇	設計圧力: 1.9MPaG	・現場操作禁止とする危険圧力の指標を明確化し、その手順を作成し教育する。
	24	15:24 還流槽が破裂、爆発2回、炎上	火災発生覚知	
対応操作		1 15:27 防災センター消防車出動		



	7	設備設計	塩酸塔還流槽内の温度異常および圧力上昇検知設備	
	8	設備設計	液塩酸一時受タンク監視システムの強化 (ガス検知／温度検知)	
	9	設備管理	1,1-EDC生成反応抑制 (内壁に残存する鉄鏽除去および防鏽処理)	
	10	手順書	1,1-EDC生成反応条件、反応速度、触媒などの整理をして、それらに関する注意事項を運転マニュアルに記載、周知徹底	
	11	手順書	液塩酸一時受タンクのマニュアル改訂ならびに教育訓練	
	12	危機管理	プラントの異常停止時の対応のマニュアル、教育、訓練の見直し	RISCAD提案
	13	設備管理	緊急放出弁など設備上重要なバルブ類の点検、管理	RISCAD提案
	14	手順書	緊急時の塩酸塔塔頂、塔底の温度、塩酸塔還流槽の液面、温度、圧力管理指標とその手順の決定	RISCAD提案
	15	設備設計	塩酸塔還流槽液面、温度、圧力異常の警報強化	RISCAD提案
	16	危機管理	異常時の周辺住民への迅速な広報活動をマニュアル化	RISCAD提案
教訓	<ul style="list-style-type: none"> ・システム全体のバランスを見よ：プラントの運転は、1ポイントだけで制御している訳ではない。プラント全体のバランス(温度、圧力、組成など)やトレンドを監視する必要がある。 ・副反応を想定せよ：通常運転時には主反応にしか眼が行かないが、プラントのバランスが崩れた時には、想定外の副反応が起こるリスクに眼を向ける必要がある。鉄鏽などの不純物が危険な反応を引き起こすこともある。 ・異常に泥縄で対応するな：異常に問題のある箇所に近づくのは危険である。異常時の対応のための判断基準をあらかじめ決めておくことが必要である。 			

(7)レゾルシンプラントが爆発

PFA, RISCAD, AIST

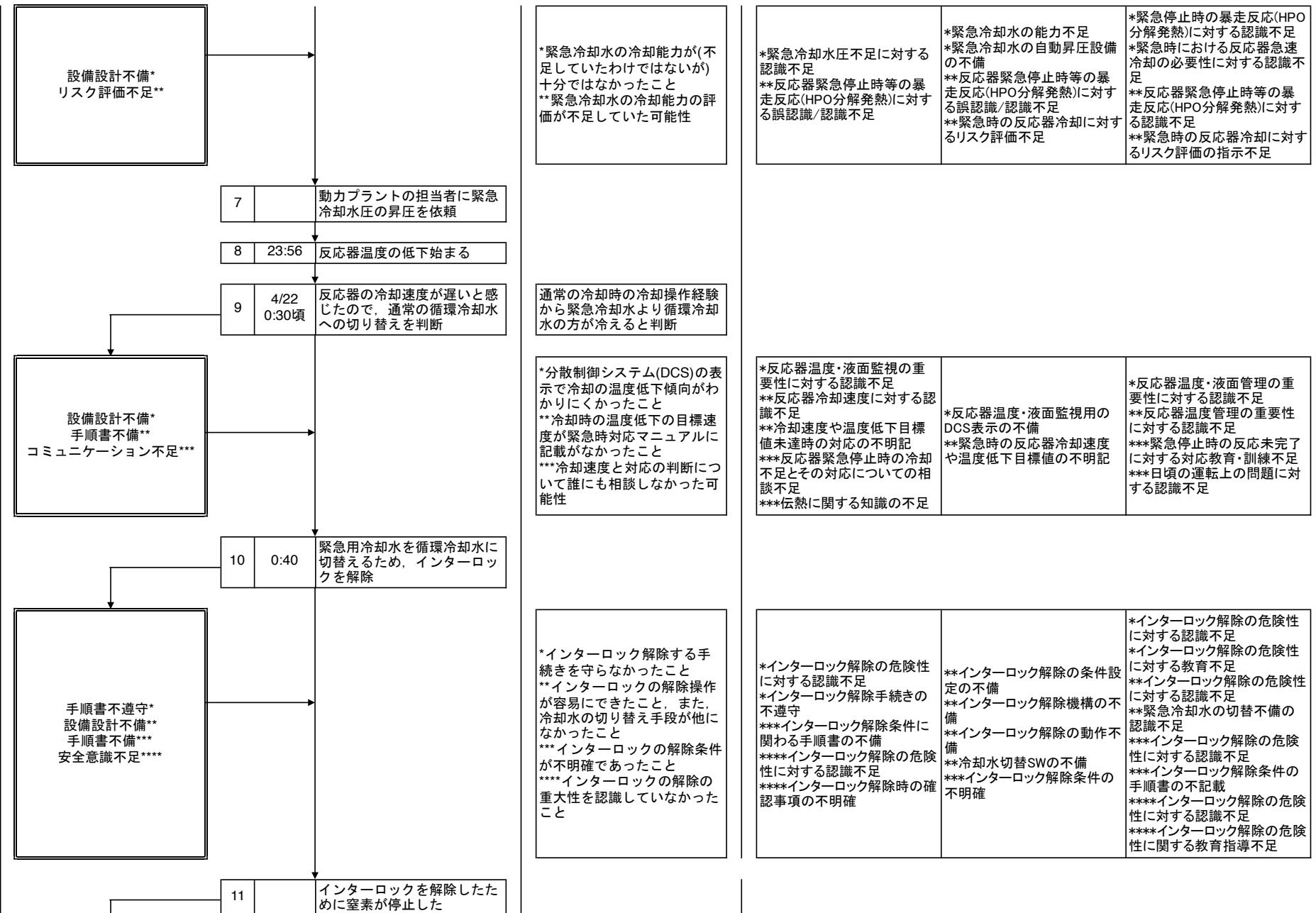
事故概要	発生日時(曜日)	発生場所
2012年4月22日(日)2:15頃、山口県玖珂郡和木町 化学工場で蒸気発生プラントの不具合により蒸気の供給が停止し、レゾルシン製造プラントの緊急停止作業中に爆発、火災が起きた。火災は約15時間後に鎮圧され、約36時間後に鎮火したが、爆発によって飛散した反応器の破片により、同工場内の約300mの範囲の製造設備(15プラント)および動力プラントの配管ラックで損傷や延焼が発生し、ガラス、スレートなども損傷した。近隣住宅の窓ガラス、ドア、シャッターなどの破損が99軒発生した。工場内で従業員1名が死亡、2名が重傷を負い、従業員および協力会社社員計7名が負傷、近隣居住者と近隣工場で16名が負傷した。会社の調べでは、緊急停止による酸化反応器の温度下降が低いと運転者が誤判断し、インターロックを解除して緊急冷却水による冷却から、通常の運転停止時の循環冷却水による冷却に切り替えた際に液循環のために導入されていた窒素が自動で停止した。冷却用コイルが酸化反応器上部には設置されていなかったために酸化反応器上部で中間体のジヒドロキシパーオキサイドの分解、発熱が起こり、温度、圧力が上昇して破裂し、爆発に至った可能性がある。		

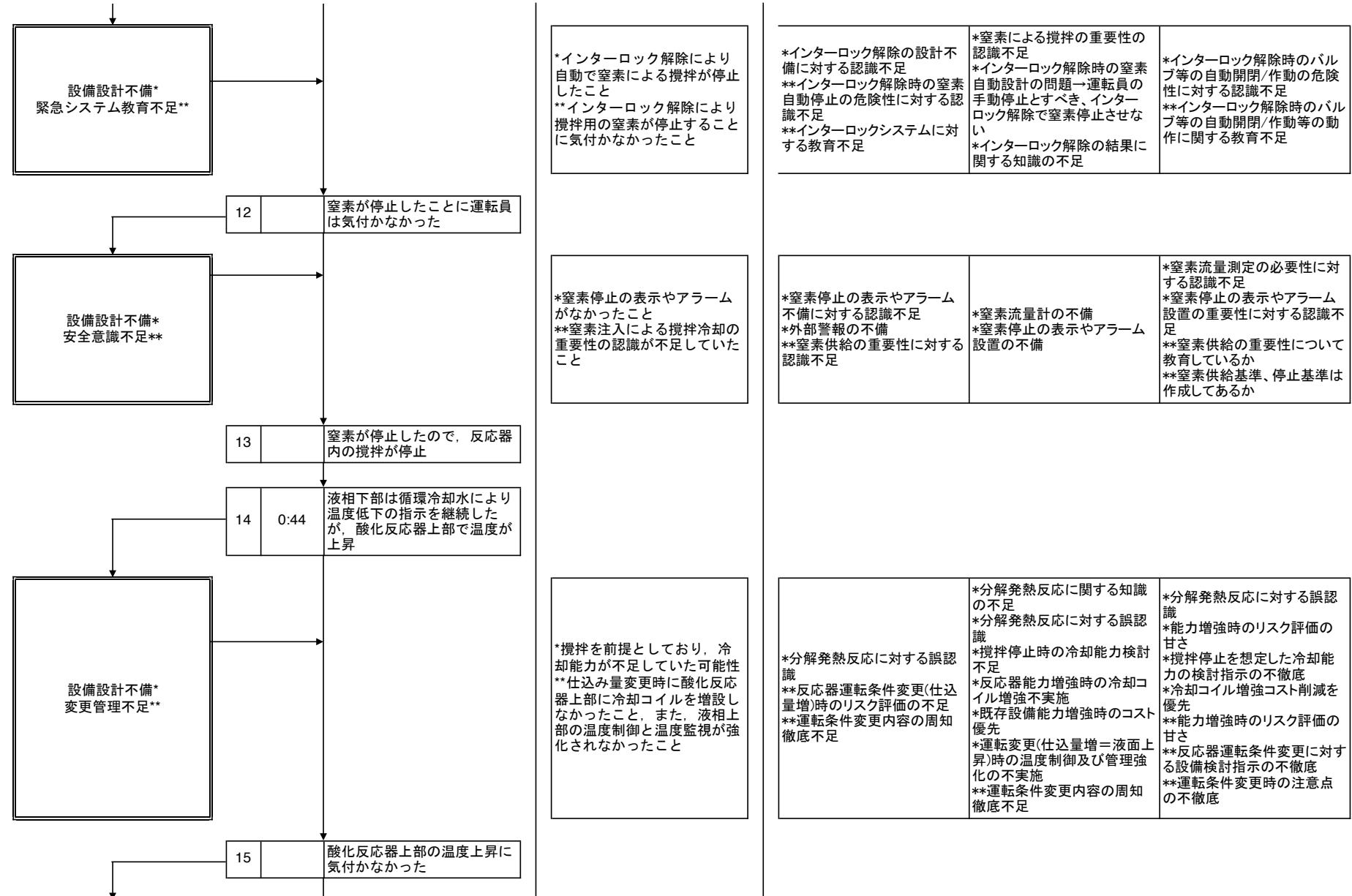
背景

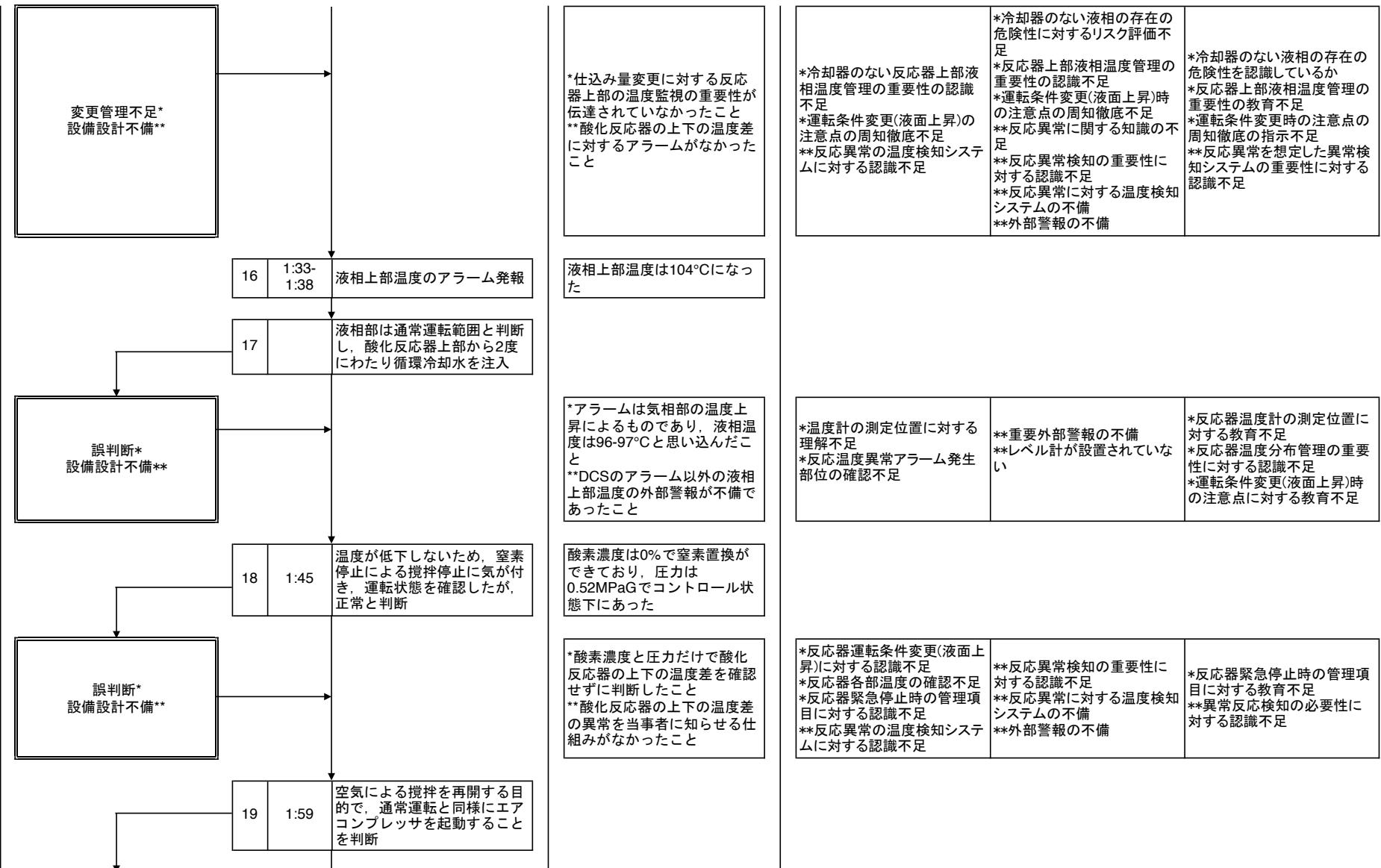
- 当該工場は1980年操業開始、1999年に酸化反応器などを新設、生産能力7,600t/aであった。
- 酸化反応器は2011年3月に仕込み量を101tから121tに変更しているが、その際に設備の変更はなかった。
- 主工程は酸化工程、再酸化工程、クリベージ工程、精製工程からなる。
- 酸化工程は、温度96°C、圧力520kPa、約40時間のバッチ処理でメタジイソプロピルベンゼン(m-DIPB)の空気酸化により中間体のモノヒドロキシパーオキサイド(MHP)からジヒドロキシパーオキサイド(DHP)を生成する。その後は連続処理で、副生物の再酸化工程、さらにDHPの酸触媒クリベージ反応により、レゾルシンを製造している。なお、酸化工程の目的生成物は、DHPであるが、ヒドロキシハイドロパーオキサイド(HHP)を含むハイドロパーオキサイド(HPO:副生成する過酸化物の総称)を副生する。
- 酸化反応器の仕様は、材質SUS304L(クラッド)、内径約5.2m、TL(正接線間)長12m、内容量288立方m、設計温度125°C、設計圧力0.8MPa、コイル伝面80平方mで、酸化用空気は、反応器下部より供給することで攪拌を兼ねている。
- 温度制御は、冷却コイル付近の制御用温度計が目標温度となるように冷却コイル入口の循環水温度で制御していた。

3M解析(3M→対策)

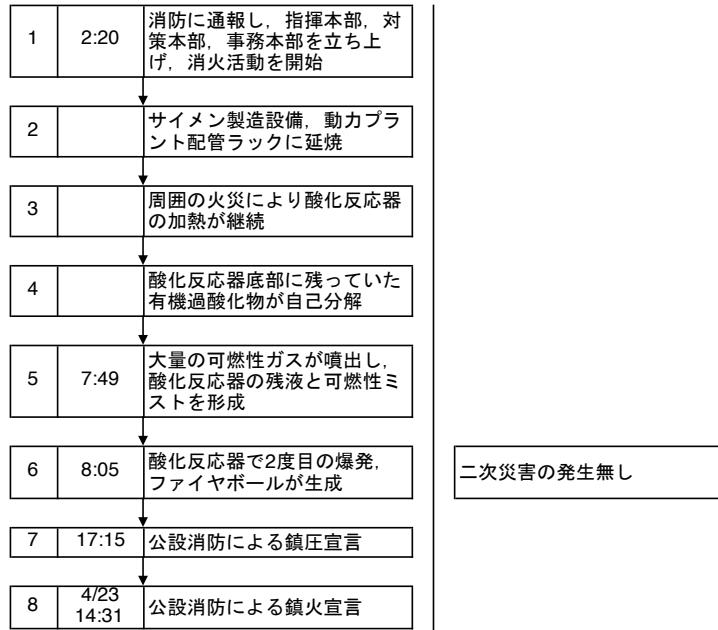
区分	原因事象	事故進展フロー	備考	Man	Machine	Media&Management
経過		<p>1 2012/4/21 レゾルシン酸化反応器、順調に運転</p> <p>2 23:20 用役プラント停止の影響で蒸気の供給停止</p> <p>3 23:32 レゾルシンプラント緊急停止</p> <p>4 インターロックが正常作動し、反応器冷却水が循環冷却水から緊急冷却水に切り替る</p> <p>5 酸化反応器内が空気から窒素に置換され、攪拌を継続して、温度は緩やかに下降</p> <p>6 23:52 液面下部温度(冷却水コイルあり)が下がっていないと感じ、緊急冷却水圧の水圧不足と判断</p>	<p>バッチ反応36時間経過(40時間を予定) 冷却水による温度制御</p> <p>全工場に緊急指令発令(0.3MPaG蒸気使用プラント)</p> <p>ALL-ESD:Emergency Shut Downスイッチを作動</p> <p>反応用空気の供給停止、酸化反応停止のため、窒素供給開始(窒素供給により酸化反応器内を攪拌)</p> <p>デジタル表示のため温度の下降傾向がわかりにくかった 緊急冷却水圧:0.3-0.4MPaG</p>			











恒久的 対応策

1	緊急時 対応	緊急時対応を具体的なシミュレーションした中で訓練する
2	緊急時 対応	実効的な緊急時の段取りを手順書に明記する
3	設備設計	DCSで温度のトレンドをわかりやすく表示する
4	緊急時 対応	緊急時冷却の温度低下の目標速度を決め、手順書に記載する
5	安全文化	異常時の状況の判断などを上司や周囲に相談する文化を醸成する
6	安全教育	インターロックを解除する判断の重大性を再教育する
7	設備設計	容易にインターロックを解除できないようにする
8	緊急時 対応	インターロックを解除する際の条件を検討し、手順書に記載する
9	設備設計	インターロックの解除と攪拌の自動停止を切り離すシステム設計とする

RISCAD提案

10	安全教育	インターロックによって具体的に動作する箇所を明確にし、運転員にも周知する	
11	設備設計	緊急時に重要な役割を果たす窒素供給に対して停止時の表示やアラームを設置する	RISCAD提案
12	変更管理	仕込み量変更などの際にリスク評価を行い、冷却コイルなどの必要な設備を設置し、温度制御と温度監視を行う	
13	変更管理	仕込み量変更などの際に変更前とは異なる監視項目を検討し、運転員に伝える	RISCAD提案
14	設備設計	酸化反応器の上下の温度差に対するアラームを設置する	RISCAD提案
15	安全教育	酸化反応器の状態を一部分の温度、圧力で判断しないことを教育する	RISCAD提案
16	安全教育	副生成物質の熱安定性などを含めた安全教育、訓練をする	

教訓	<ul style="list-style-type: none"> ・ 判断の前に思いを発信：思い込みで判断をすると事故につながる。行動する前に判断を周囲に伝えて情報を共有する必要があり、それを補う仕組みも大切である。 ・ インターロックは安易に解除するな：インターロックを解除する操作は、大きな危険を伴う操作である。だからこそ、安易に解除できないようにする設備の工夫や手続きなどの多重防護が必要である。 ・ 変更はみんなが知ってる？：設備や条件の変更によって管理すべきことも変わる。仕込み量の増加によって、温度計測の位置や監視の方法を変える必要があるかどうかを検討し、情報共有し、伝承する必要がある。
----	--

(8)アクリル酸製造施設で爆発

PFA, RISCAD, AIST

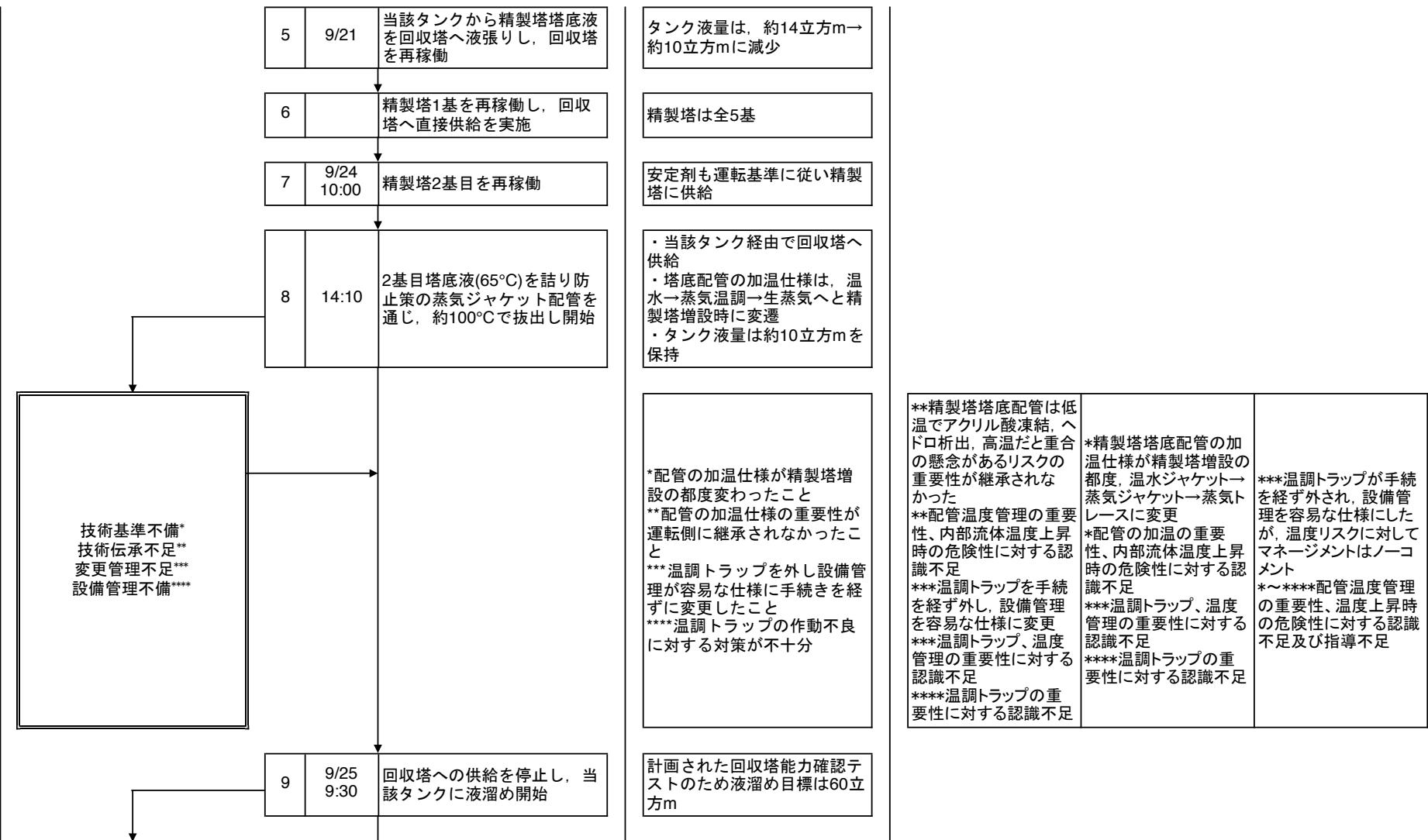
事故概要	発生日時(曜日)	発生場所
2012年9月29日(土)14:35頃、兵庫県姫路市 化学プラントのアクリル酸製造施設で保全工事後の再稼働中にアクリル酸中間タンクが破裂し、火災が起きた。消防車約80台などが出動し、約25時間後に鎮火したが、隣接タンク3基と防災活動中の消防車両および周辺設備が焼損した。消防活動中の消防士1名が死亡、消防士2名と従業員3名の計5名が重傷、消防士22名、警察官2名、従業員7名の計31名が中軽傷を負った。会社の調べでは、4日前から当該タンクの下流の回収塔の能力確認テストのため重合しやすい性質を持つアクリル酸の精製塔塔底液60立方mを当該タンクに溜めた際に、25立方m以上で実施することになっていた天板リサイクルが実施されなかったため、タンク上部で温度上昇とともにアクリル酸の二量化反応が進行し、反応暴走に至った。それにより内部圧力が上昇し、タンク側板の溶接線の亀裂、開口進展から内容物が漏洩して生じた圧力急降下によりアクリル酸の蒸気爆発が起きた可能性がある。		

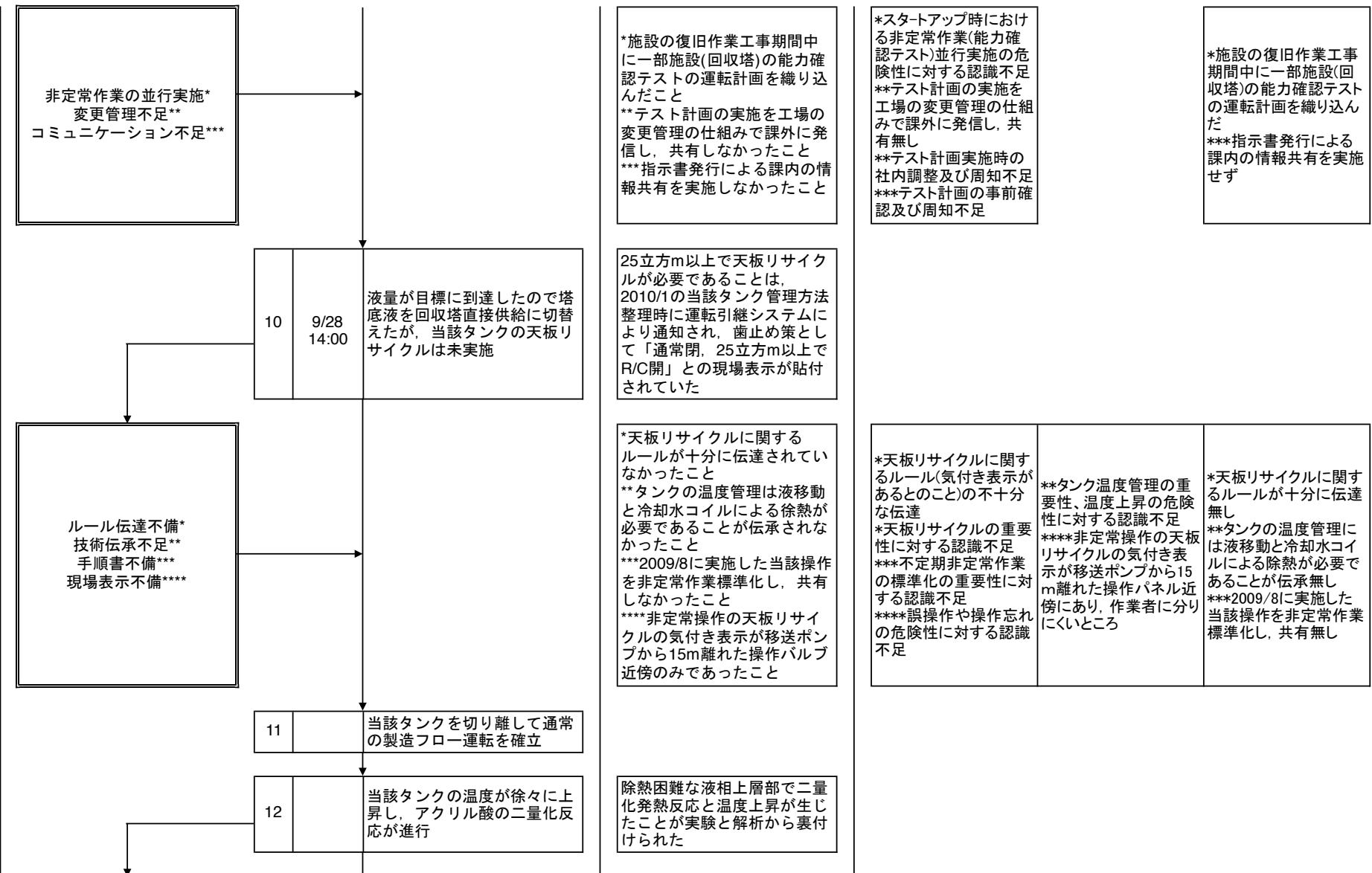
背景

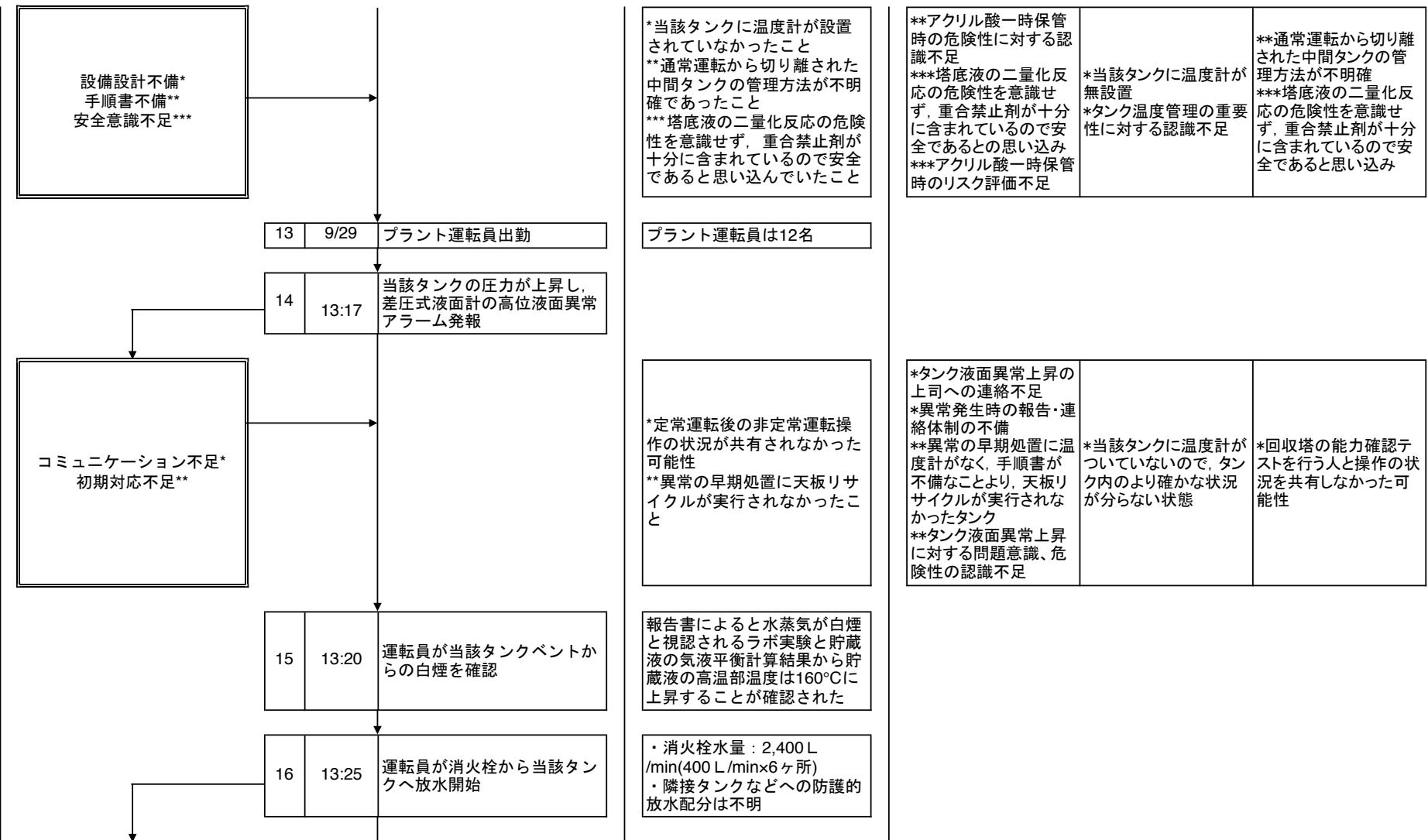
- 当該工場のアクリル酸製造は、原料プロピレンを空気気相酸化し、生成物から蒸留操作等で粗アクリル酸を得る工程と粗アクリル酸を精製し、高純度アクリル酸及び残渣物から粗アクリル酸の回収設備を含んだ高純度アクリル酸工程に大別される。
- 製造設備は粗アクリル酸が4系列(1973-1995年の間に設置)、高純度アクリル酸は5系列の精製塔と2系列の回収塔(1985年-1998年の間に設置)とがそれぞれ増設されてきた。
- 1985年設置の当該タンクの仕様は、保温(75mm)付きコーンルーフ型で容量70kL(径4.2m×高さ5.6m)のステンレス(SUS304および316)製で肉厚が側板3mm(最小許容肉厚:3.2mm)、底板4mmである。5系列の精製塔の塔底液を精製塔停止時などに一時保管するタンクで、通常運転時は切り離されている。当該タンクには温度計が設置されていなかった。
- タンク頂部からの天板リサイクルと冷却水コイルによる徐熱機能で温度管理を設計したが、2010/2から低液量(5立方m以下)管理を前提に液面計リサイクルに変更した。冷却コイル上部(25立方m)以上の液量で数日間保持する場合は、天板リサイクルを実施することとし、2010/1の当該タンクの基本管理方法を整理した際に運転引継システムで通知され、さらに歯止めとして天板サイクル用操作バルブ上部配管に現場表示した。
- アクリル酸(消防法の危険物第4類第2石油類)の性状、密度:1.05g/cm³(20°C)、融点:13.5°C、粘度:1.25mPa·s、沸点:141°C、発火点:428°C、引火点:51.4°C、爆発範囲:2-17vol.%、比熱:2,093J/kg°C、二量体生成熱:145.3kJ/kg、重合熱:1,076J/kg
- 重合反応を抑制するため酸素濃度を5vol.%以上の雰囲気で管理し、安定剤を添加していた。当該タンクもシールガスに酸素7vol.%と窒素93vol.%のミックスガスを供給して管理していた。また、蒸留分離などの入熱による重合と閉塞を回避するため重合禁止剤が使われていた。発災タンク区域内には、8基の安定剤タンクがあった。
- 天候:曇り、気温:24-25°C、風向:西-南西、風速:2-3m/s
- 危険物燃焼量、アクリル酸約66立方m、トルエン約28立方m

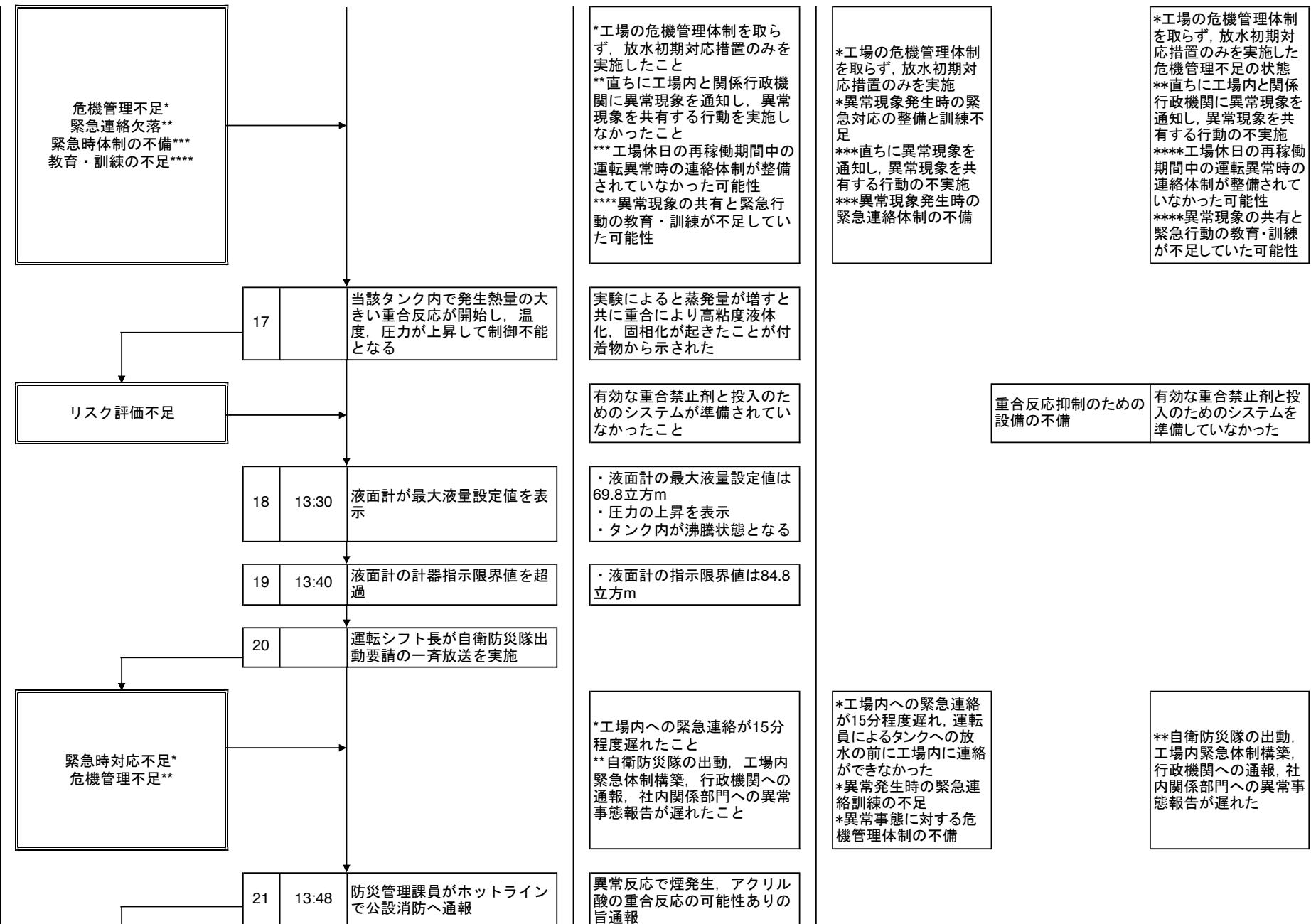
3M解析(3M→対策)

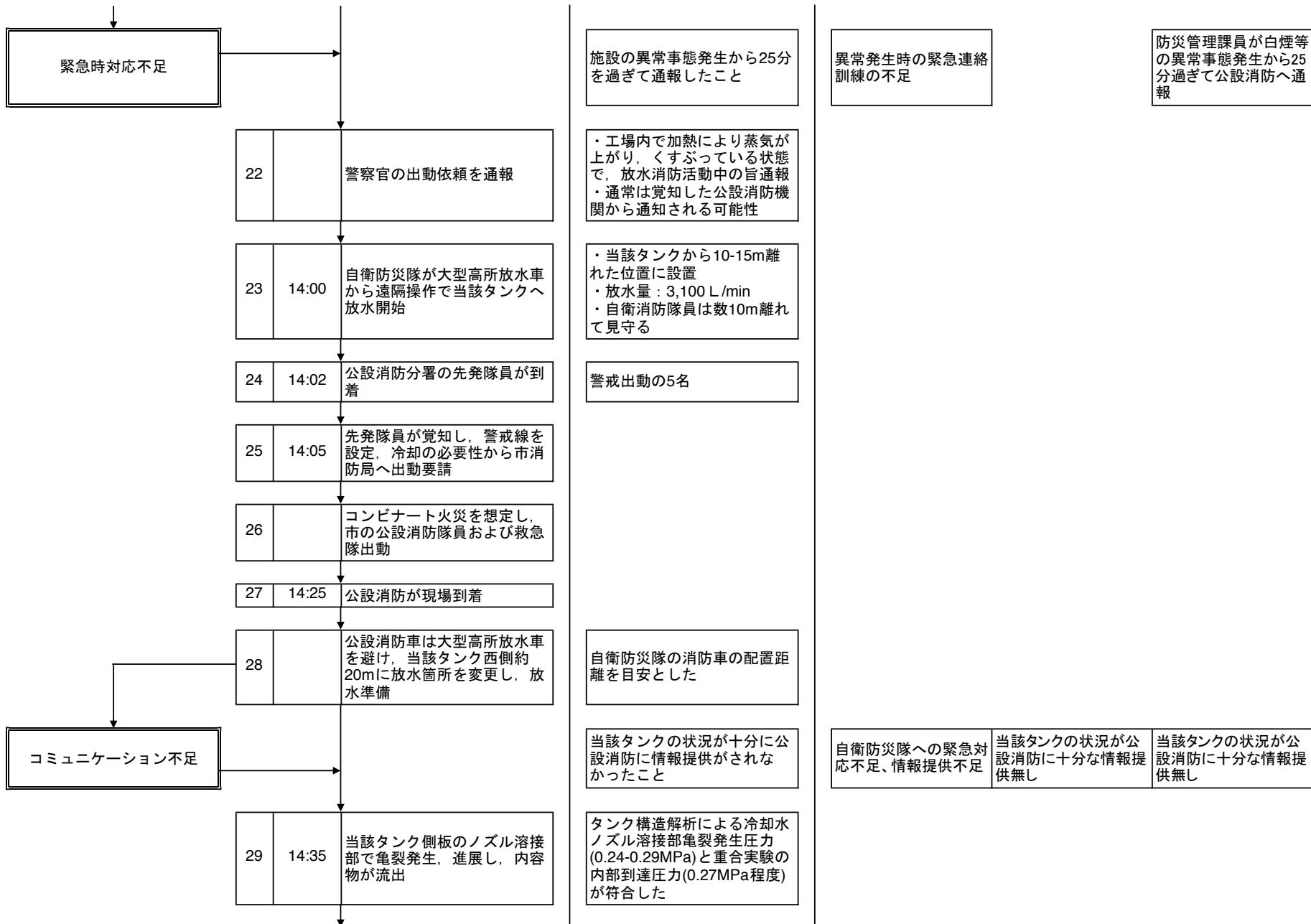
区分	原因事象	事故進展フロー	備考	Man	Machine	Media&Management																											
経過		<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>2009</td> <td>当該アクリル酸中間タンクへの液溜めによる回収塔能力アップテストを実施</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> アクリル酸の精製塔塔底液を運転停止時に一時貯蔵する中間タンク この時は液溜め後に天板リサイクルを実施 </td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>2012/9/18-20</td> <td>当該工場の全面停電による電気計装保全工事実施</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>9/20 21:00</td> <td>当該タンク設備の通電完了</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td></td> <td>当該タンクを復旧し、通常の液面計リサイクル運転を開始</td> <td>冷却水コイル通水、タンクシール開始、送液ポンプ稼働</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	1	2009	当該アクリル酸中間タンクへの液溜めによる回収塔能力アップテストを実施	<ul style="list-style-type: none"> アクリル酸の精製塔塔底液を運転停止時に一時貯蔵する中間タンク この時は液溜め後に天板リサイクルを実施 				2	2012/9/18-20	当該工場の全面停電による電気計装保全工事実施					3	9/20 21:00	当該タンク設備の通電完了					4		当該タンクを復旧し、通常の液面計リサイクル運転を開始	冷却水コイル通水、タンクシール開始、送液ポンプ稼働						
1	2009	当該アクリル酸中間タンクへの液溜めによる回収塔能力アップテストを実施	<ul style="list-style-type: none"> アクリル酸の精製塔塔底液を運転停止時に一時貯蔵する中間タンク この時は液溜め後に天板リサイクルを実施 																														
2	2012/9/18-20	当該工場の全面停電による電気計装保全工事実施																															
3	9/20 21:00	当該タンク設備の通電完了																															
4		当該タンクを復旧し、通常の液面計リサイクル運転を開始	冷却水コイル通水、タンクシール開始、送液ポンプ稼働																														











	<table border="1"> <tr><td>30</td><td></td><td>液面計指示値が急激に降下し、低位液面異常アラーム発報</td></tr> <tr><td>31</td><td></td><td>高温高圧の保持状態からアクリル酸の気液相平衡が破綻し、過熱状態となり、内液が突沸</td></tr> <tr><td>32</td><td></td><td>蒸気爆発により当該タンクが破裂し、内容物が噴出、飛散</td></tr> <tr><td colspan="2">着火源</td><td></td></tr> <tr><td>33</td><td></td><td>噴出内容物の着火により火災発生</td></tr> </table>	30		液面計指示値が急激に降下し、低位液面異常アラーム発報	31		高温高圧の保持状態からアクリル酸の気液相平衡が破綻し、過熱状態となり、内液が突沸	32		蒸気爆発により当該タンクが破裂し、内容物が噴出、飛散	着火源			33		噴出内容物の着火により火災発生	<table border="1"> <tr><td>低位液量設定値は58.6立方m</td></tr> <tr><td>飛散した天板や付属物の飛散距離から破裂時の推定内部圧力を0.45-0.64MPaと推算している(TNO解析法)</td></tr> <tr><td>飛散した金属による衝撃と電線の切断による火花の可能性</td></tr> <tr><td>飛散した金属による衝撃と電線の切断による火花の可能性</td></tr> </table>	低位液量設定値は58.6立方m	飛散した天板や付属物の飛散距離から破裂時の推定内部圧力を0.45-0.64MPaと推算している(TNO解析法)	飛散した金属による衝撃と電線の切断による火花の可能性	飛散した金属による衝撃と電線の切断による火花の可能性
30		液面計指示値が急激に降下し、低位液面異常アラーム発報																			
31		高温高圧の保持状態からアクリル酸の気液相平衡が破綻し、過熱状態となり、内液が突沸																			
32		蒸気爆発により当該タンクが破裂し、内容物が噴出、飛散																			
着火源																					
33		噴出内容物の着火により火災発生																			
低位液量設定値は58.6立方m																					
飛散した天板や付属物の飛散距離から破裂時の推定内部圧力を0.45-0.64MPaと推算している(TNO解析法)																					
飛散した金属による衝撃と電線の切断による火花の可能性																					
飛散した金属による衝撃と電線の切断による火花の可能性																					
対応操作	<table border="1"> <tr><td>1</td><td></td><td>隣接タンク3基に延焼拡大</td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td>火の着いた内容物の飛散により周囲に延焼</td></tr> <tr><td>3</td><td>22:36</td><td>火勢鎮圧</td></tr> <tr><td>4</td><td>9/30 15:30</td><td>鎮火</td></tr> </table>	1		隣接タンク3基に延焼拡大	2		火の着いた内容物の飛散により周囲に延焼	3	22:36	火勢鎮圧	4	9/30 15:30	鎮火	<p>延焼タンクと公称容量</p> <ul style="list-style-type: none"> ・アクリル酸 : 100立方m ・トルエン : 50立方m ・アクリル酸 : 5.2立方m <p>・周囲の消防隊員や従業員が被災。 ・消防車3台に延焼</p>							
1		隣接タンク3基に延焼拡大																			
2		火の着いた内容物の飛散により周囲に延焼																			
3	22:36	火勢鎮圧																			
4	9/30 15:30	鎮火																			
恒久的対応策	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>設備設計</td><td>塔低液移送の際の過剰な過熱防止策として、液性状再確認と配管設計条件の設定、配管仕様変更に伴うリスク検討と妥当性の評価、実施後の性能確認を実施</td></tr> </table>	1	設備設計	塔低液移送の際の過剰な過熱防止策として、液性状再確認と配管設計条件の設定、配管仕様変更に伴うリスク検討と妥当性の評価、実施後の性能確認を実施																	
1	設備設計	塔低液移送の際の過剰な過熱防止策として、液性状再確認と配管設計条件の設定、配管仕様変更に伴うリスク検討と妥当性の評価、実施後の性能確認を実施																			

2	設備設計	新設タンクの付帯設備として、液性状の再確認と管理温度の設定、天板リサイクルを含む温度管理手段の設定、緊急安定剤投入検討を含む異常判断基準および対応手段の設定、付帯設備設置に伴うリスク管理と妥当性評価の実施、試運転による性能確認の組み込み
3	運転管理	精製塔と中間タンクに関して、マニュアル類の整備、P&Iなどの図面類の更新、現場表示の作成を実施
4	安全教育	整備したマニュアルによる運転員教育、アクリル酸の二量体拳動把握とアクリル酸の危険性再教育
5	変更管理	非定常作業および手順、方法、設備など変更時のリスク検討と作業内容の周知徹底
6	危機管理	異常現象発生時における対応能力の強化
7	情報共有	トラブル水平展開の仕組みの見直し、社外事故事例、技術情報等の収集、活用
8	運転管理	タンク温度監視統一基準の整備、タンク管理温度、管理手法見直し
9	危機管理	異常兆候の判断基準と対応方法の基本思想制定
10	リスク評価	リスク検討と妥当性評価、使用設備改良
11	水平展開	他事業所における対策の見直しと事故原因究明で得た知見の他社や業界への提供、安全な生産活動への貢献
12	緊急時対応	公設消防への連絡体制の観点から役割分担と定義の見直しを休日・夜間を含め実施、通報を含む異常現象に対する初期対応の改善、防災資機材・備品類の見直しの実施を含む自衛防災マニュアルの見直し
13	安全文化	ルールを「守る」、安全を損なう可能性に「気づく」、安全な企業に「変わる」ことで安全を勝ち取る

		<table border="1"> <tr> <td>14</td><td>安全管理</td><td>大規模非定常作業期間中は、注意分散が危惧される異質の非定常作業の並行実施を禁止し、止むをえぬ場合に限り特別安全管理として工場の安全機能部門が共有</td></tr> <tr> <td>15</td><td>手順書</td><td>非定常作業といえども極力標準化して伝承</td></tr> </table>	14	安全管理	大規模非定常作業期間中は、注意分散が危惧される異質の非定常作業の並行実施を禁止し、止むをえぬ場合に限り特別安全管理として工場の安全機能部門が共有	15	手順書	非定常作業といえども極力標準化して伝承	<table border="1"> <tr> <td>RISCAD提案</td></tr> <tr> <td>RISCAD提案</td></tr> </table>	RISCAD提案	RISCAD提案
14	安全管理	大規模非定常作業期間中は、注意分散が危惧される異質の非定常作業の並行実施を禁止し、止むをえぬ場合に限り特別安全管理として工場の安全機能部門が共有									
15	手順書	非定常作業といえども極力標準化して伝承									
RISCAD提案											
RISCAD提案											
教訓											

・**非定常作業こそマニュアル化**：非定常作業では重要な手順が見落とされることがある。非定常作業時の温度管理のための手順などをマニュアル化して、作業前に確認し、情報を共有することが必要である。

・**一時貯蔵といえども危険**：一時貯蔵といえども温度などの管理と監視を行わなければ、思わぬ反応が進み大きな災害に至ることがある。アクリル酸などの反応性化学物質の一時貯蔵の際には、温度管理を適切に行わなければ、安定剤の効用を無くし、暴走反応にいたる可能性がある。

・**コミュニケーションが緊急時を救う**：緊急時こそ日頃の教育、訓練に基づいた地域コミュニティーとの機能連携が試される。異常事態の高リスク状態の情報共有とその対応措置に各組織が機能発揮できてこそ被害拡大と活動リスクの回避が可能となる。

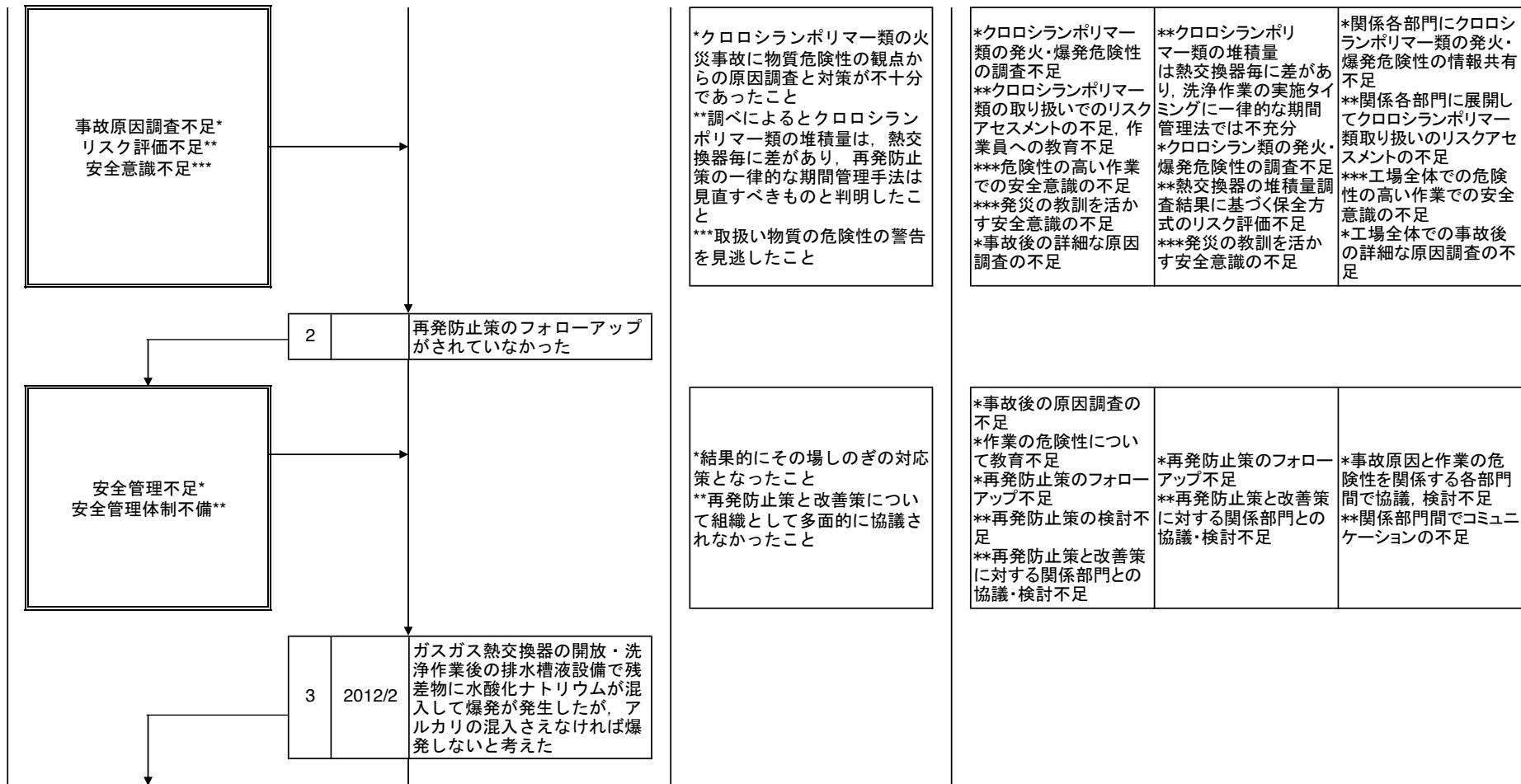
(9)水冷熱交換器の洗浄作業中に爆発

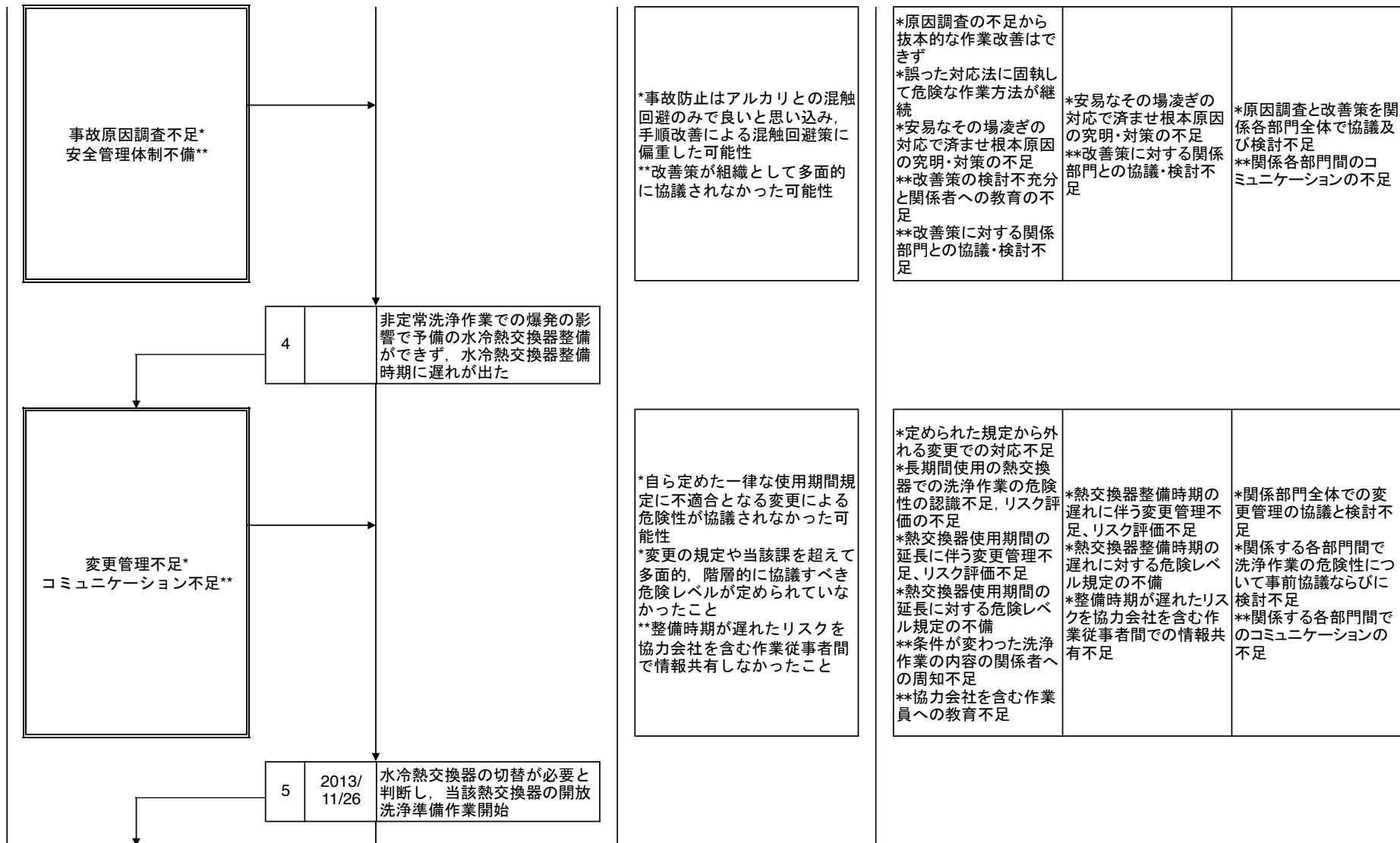
PFA, RISCAD, AIST

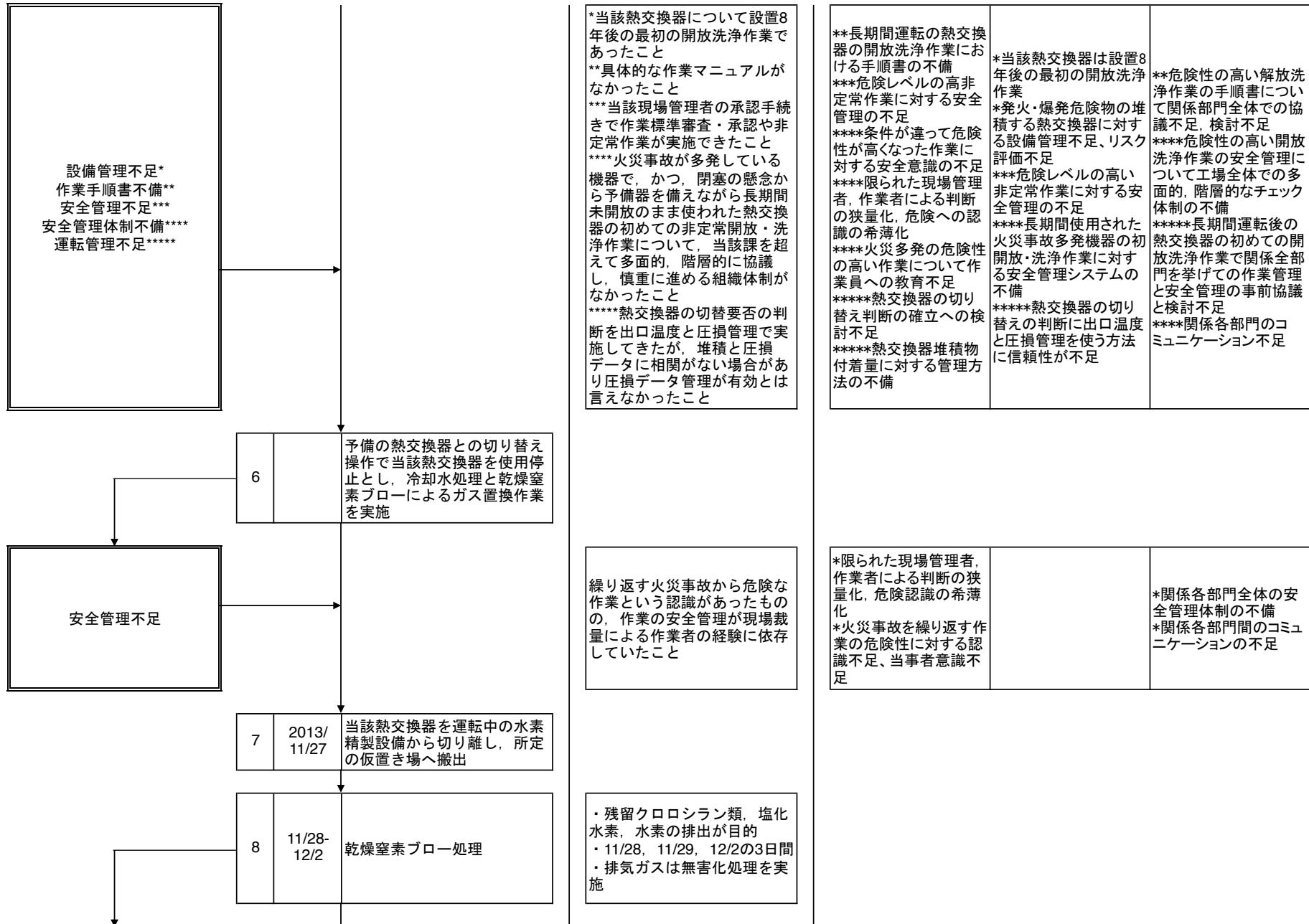
事故概要	発生日時（曜日）	発生場所
2014年1月9日(木)14:05頃、三重県四日市市		
<p>半導体向けシリコンウェーハの素材として使用される超高純度の多結晶シリコン製造工場で水冷熱交換器の洗浄作業中に爆発、火災が起きた。周囲にいた作業員のうち死者5名、重傷1名、中軽傷12名となった。事故調査委員会の調べでは、水素精製設備から熱交換機能が低下した水冷熱交換器を取り外して、内部洗浄作業のため熱交換器の上部チャンネルカバーを開放した直後に爆発が起きた。原因是、クロロシランポリマー類が加水分解の際の反応温度が低いと爆発威力が大きい物質を生成することと、その物質が乾燥状態下で感度を増したことで、フランジ同士の衝突などの衝撃によりその物質が爆発し、飛散したポリマー類から分解生成した可燃性物質などが燃焼した可能性がある。再発防止策として開放、洗浄作業の改善や種々のリスク低減対策、安全文化の醸成策が事故調査委員会から提言された。</p>		
<p>背景</p> <ul style="list-style-type: none"> ・多結晶シリコンの純度は1N(99.99999999%)であった。 ・高純度多結晶シリコン製造工程は、塩化、蒸留、反応、加工・仕上、水素精製の各工程からなっていた。水素精製工程では、反応炉から排出されるプロセスガスから水素およびクロロシラン類を冷却分離、回収するため、プロセスガスは、水冷熱交換器→ガスガス熱交換器→低温熱交換器の順で温度を下げる構成になっていた。水冷熱交換器は、使用中に内部にクロロシランポリマー類が付着し、機能が低下すると予備熱交換器に切り替え、製造ラインから取り外し、洗浄を行うこととしていた。 ・水冷熱交換器は、多管式熱交換器構造で、プロセスガスは伝熱管内、冷却水は外側を流されていた。主要仕様は、伝熱面積：101平方m、(空)重量：4,800kg、材質：胴、チャンネルカバー：SUS304製、チューブ：SUS316L製、本体寸法：全長約6,000mm×直径900mmφ、伝熱管：長さ4,000mm×293本であった。 ・当該工場の他の水冷熱交換器の洗浄作業においては、発火・着火事故などが頻発している状況にありながら、物質の分析などの根本的な対策が検討されず、堆積したクロロシランポリマー類の処理方法が未確立であった。当該水冷熱交換器は、使用開始から8年間開放洗浄が行われておらず、大量のクロロシランポリマー類の付着状態に至った。 ・加水分解生成物の発火・爆発危険性や、その生成過程およびクロロシランポリマー類の適正な加湿処理条件について、十分、かつ、正確な公知の科学的情報がなかったため、適切な安全対策について十分検討することができなかつた。 ・実験などによる検討の結果、加水分解生成物の化学構造は、クロロシランポリマー類と比べて大幅な塩素の減少と酸素が増加したシラノール/シロキサンの縮合ポリマーと推定された。発火・爆発危険性は、無酸素状態でも80-200°Cの温度で発火・爆発し、MkIII弾動臼砲試験でTNT比30%程度の高い爆発威力が確認された。爆発威力は、加水分解温度が40°C以上で大幅に低下し、4°Cと比べて1/10の威力となった。さらに、水による潤滑状態では加水分解温度によらず打撃感度が低下し、爆発しなかった。また、加水分解生成物の落つい感度試験から衝撃力を算出すると2級の78-110kN(690-970MPa)が得られた。これは熱交換器フランジ部の衝突実験でねじれ振れ幅5cmの衝突運動(810MPa)付近に相当するものであった。 ・当該工場の特徴的な背景要因としては、1967年設立、1987年当該会社の100%子会社、2007年吸収合併の歴史があり、会社としては化学プラントで構成される生産拠点は当該工場のみの特殊性があり、外の風が入りにくく事業環境も悪化していた構造的な面が抽出された。 ・気象条件、天候：晴れ、気温：8°C、湿度：60%、風向：北北西、風速：4m/s。 		

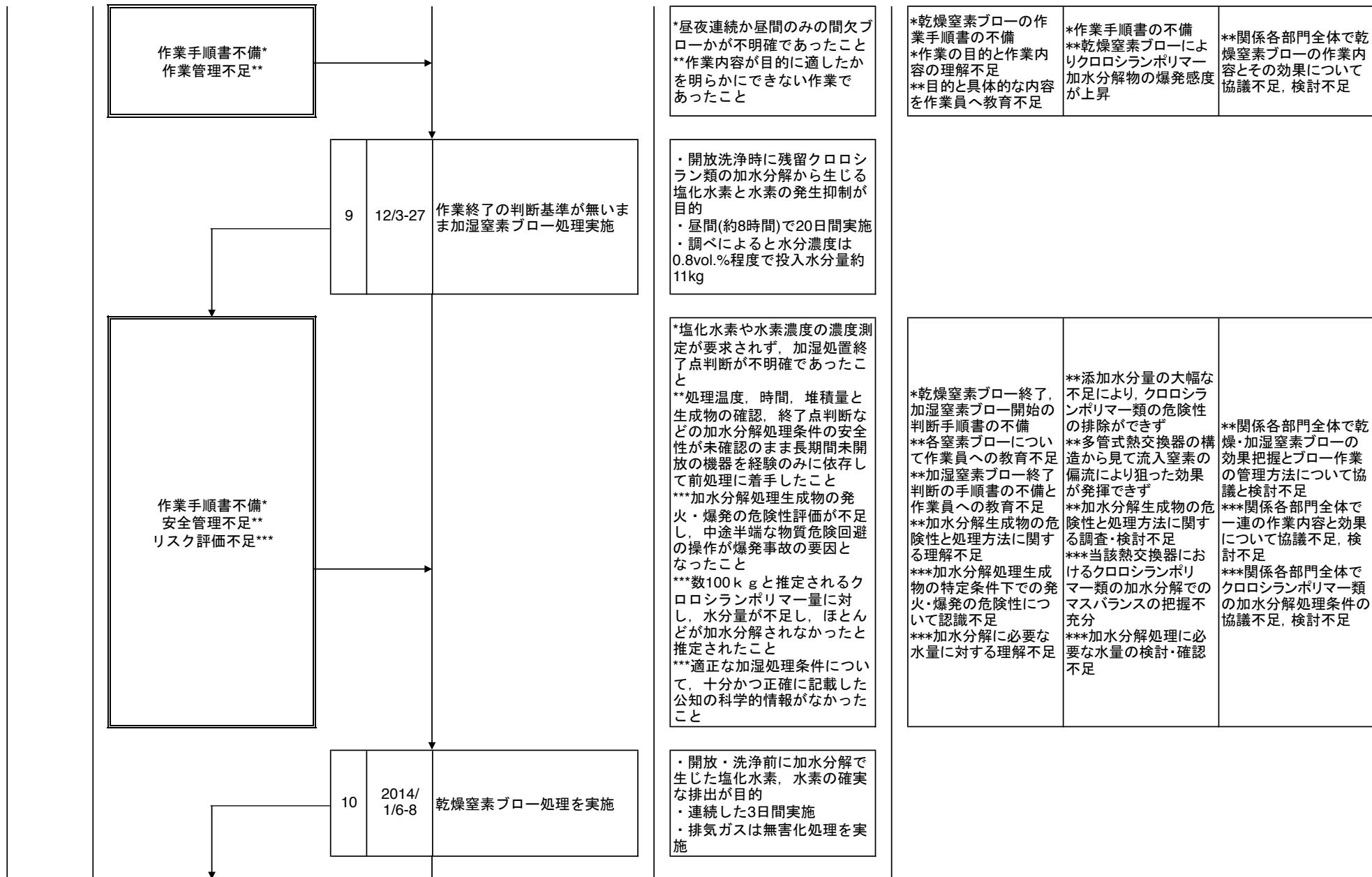
3M解析(3M→対策)

区分	原因事象	事故進展フロー	備考	Man	Machine	Media&Management			
経過		<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>2011/3</td> <td>熱交換器解体時に事故が発生し、再発防止対策としてクロロシランポリマー類の堆積量を減らすため一律に使用期間の管理を規定</td> </tr> </table>	1	2011/3	熱交換器解体時に事故が発生し、再発防止対策としてクロロシランポリマー類の堆積量を減らすため一律に使用期間の管理を規定	<ul style="list-style-type: none"> ・やけど1名の不休業災害であった ・2010/2に別の熱交換器の洗浄作業中、発火とやけどを負う事故があったとの情報がある 			
1	2011/3	熱交換器解体時に事故が発生し、再発防止対策としてクロロシランポリマー類の堆積量を減らすため一律に使用期間の管理を規定							









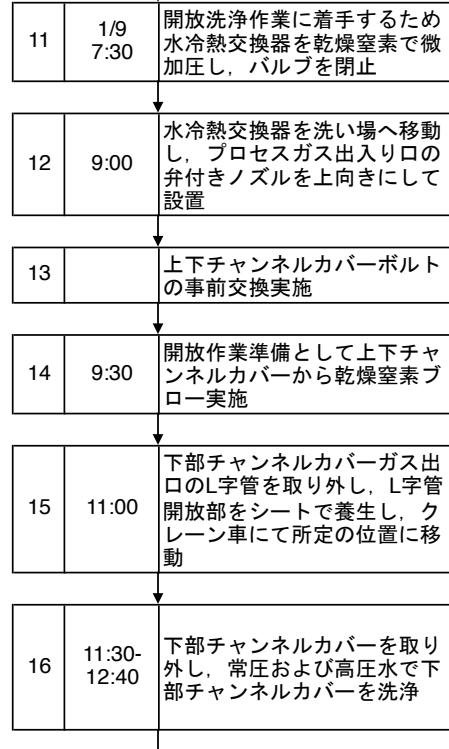
作業手順書不備*
リスク評価不足**
安全管理不足***
安全知識不足****

*昼夜連続か昼間のみの間欠ブローカが不明確であったこと
**クロロシランポリマー類の低温での加水分解生成物は、乾燥状態で爆発威力が大きくなり、爆発感度を高めることが判明したこと
***塩化水素や水素濃度の濃度測定を要求せず、過去の同種機器の経験に依存して長期間未開放機器の作業をしたこと
**乾燥状態から湿潤状態へという通常の紛体に対する安全操作と逆の操作をしたこと

*窒素プロー作業の手順書(作業時間管理等)の不備
**長期間運転の特殊条件の熱交換器でも従来の作業法を踏襲実施
***判断の狹量化と危険認識の希薄化
***内容物の危険性の排除、安全を担保するための基準不明確
****クロロシランポリマー類の加水分解生成物は乾燥状態で爆発威力を増すことの調査不足
*****湿潤粉体の安全性、乾燥粉体の危険性について教育不足

**長期間未開放の熱交換器の開放洗浄作業について機器設計の面から検討不充分
**加水分解生成物の低温における爆発特性に対する調査・検討不足
***総括伝熱係数の変化の把握による開放タイミングの推定手法の未検討
***内容物の危険性の排除、安全を担保するための基準不明確

***関係各部門全体で窒素プローの作業手順について協議不足、検討不足
**関係各部門全体でクロロシランポリマー類の加水分解生成物の物性等の調査不足
***関係各部門全体で長期間運転の特殊条件の熱交換器の開放洗浄作業の危険性について協議不足、検討不足



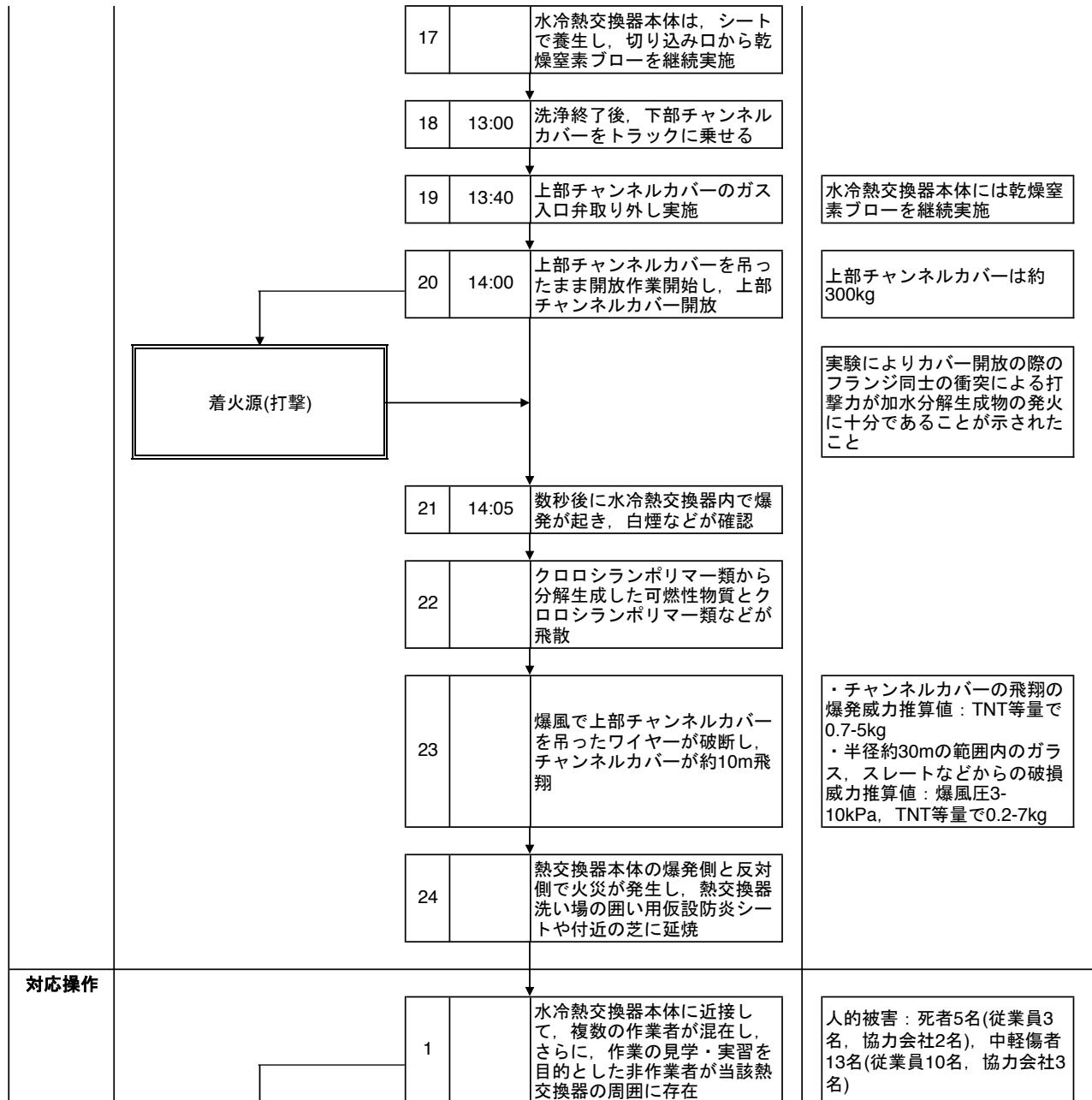
残留水素や生成水素排出を考慮

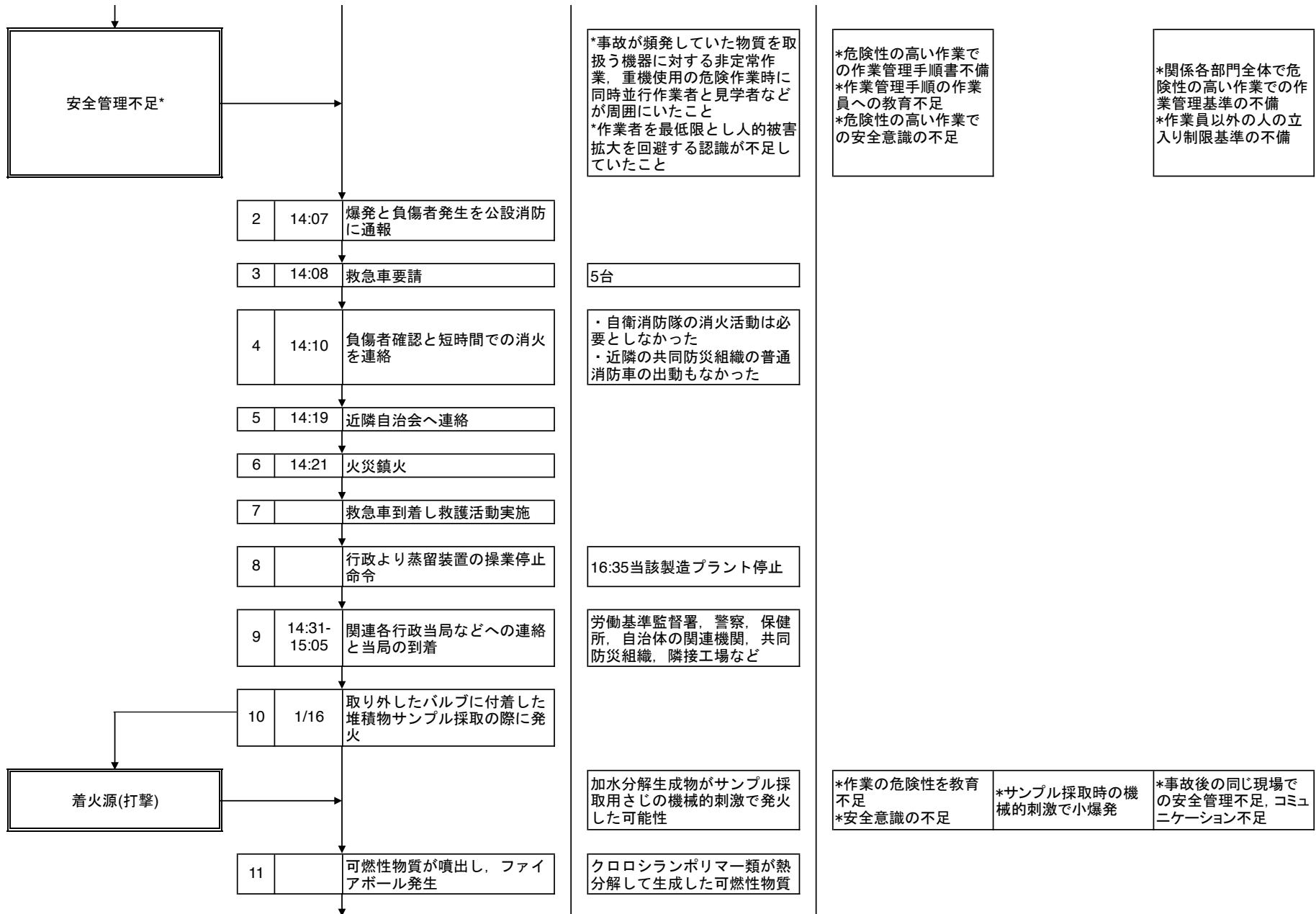
固着ボルトによる作業の手間取り回避策

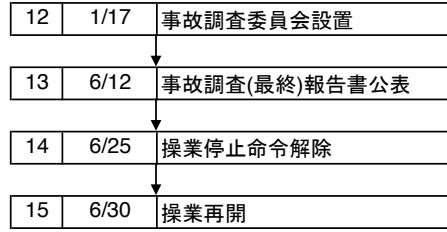
流量 : 20N立方m/時、圧力 : 0.018MPa

窒素プロー状態で実施

下部チャンネルカバー部分のクロロシランポリマー類には加水分解された形跡がなく、水分が到達していなかったと推定







恒久的 対応策	1 事故情報 活用	過去の事故事例の原因調査を行い、再発防止策を検討し、継続的にフォローアップする	RISCAD提案
	2 リスク 評価	危険の大きさ(影響度)が大きい作業については、リスクアセスメントを再度実施し、安全性を再確認する	RISCAD提案
	3 安全文化	小さな事故やヒヤリハットから大きな事故につながる危険性の警告を読み取る意識を醸成する	RISCAD提案
	4 安全管理 体制	再発防止策や改善策を多面的に協議する体制を構築する	RISCAD提案
	5 変更管理	変更の規定や変更について多面的、階層的に協議すべき危険レベルを決定する	RISCAD提案
	6 安全管理	新たな物質の取扱や設備変更などの際は、協力会社とも連携してリスクアセスメントを実施し、作業の安全性を確認する	
	7 設備管理	物質の堆積などを考慮し、適切なモニタリング、間隔で検査、整備を行う	
	8 作業 手順書	作業標準類の必須記載事項および留意点等を定めた規程を新たに制定し、明確な判断基準の不記載、経験則に依存するなどの不備を改善する	
	9 運転管理	熱交換器の切り替えタイミングの予測管理に適切な管理指標を採用する	熱交換器伝熱管内の堆積厚さが運転データを用いた総括伝熱係数からの推算堆積量とほぼ一致
	10 安全管理	現場作業者の経験に頼った安全管理を見直し、リスク評価に基づく作業手順を作成する	
	11 リスク 評価	作業条件が危険回避のために十分であるかどうかを危険性評価試験によって確認する	

		<table border="1"> <tr><td>12</td><td>安全教育</td><td>乾燥状態から湿潤状態へといった粉体の安全操作の基本を教育する</td></tr> <tr><td>13</td><td>作業管理</td><td>危険作業は人的被害防止のため遠隔操作とする</td></tr> <tr><td>14</td><td>安全管理</td><td>危険作業の際には作業者を最低限とし、人的被害拡大を回避する</td></tr> <tr><td>15</td><td>作業管理</td><td>熱交換器内を満水状態にし、水温を約40°C、加水分解の終了点をpH中性と水素濃度の減少から判断する</td></tr> <tr><td>16</td><td>安全管理</td><td>FTAを使ったハザード要因抽出から要因チェックリスト作成とリスクアセスメントによるリスクの低減化を行う</td></tr> <tr><td>17</td><td>リスク管理</td><td>危険の大きさ(影響度)により作業標準類のレベル分けを行い、これに応じて審査・承認案件に重みづけをする</td></tr> <tr><td>18</td><td>作業標準</td><td>作業標準類の総点検を実施し、見直し結果に基づき作業者に教育の上、遵守、徹底するとともに、継続的に見直しを行う</td></tr> <tr><td>19</td><td>安全文化</td><td>体系的な教育の仕組みとカリキュラムの整備、プロセス技術専門部署の設置、工場・本社・外部機関等との連携による安全基盤や工場内安全管理機能の強化、外部からの知見を取り入れる仕組みを構築し、安全文化が醸成するよう継続的に改善を進める</td></tr> </table>	12	安全教育	乾燥状態から湿潤状態へといった粉体の安全操作の基本を教育する	13	作業管理	危険作業は人的被害防止のため遠隔操作とする	14	安全管理	危険作業の際には作業者を最低限とし、人的被害拡大を回避する	15	作業管理	熱交換器内を満水状態にし、水温を約40°C、加水分解の終了点をpH中性と水素濃度の減少から判断する	16	安全管理	FTAを使ったハザード要因抽出から要因チェックリスト作成とリスクアセスメントによるリスクの低減化を行う	17	リスク管理	危険の大きさ(影響度)により作業標準類のレベル分けを行い、これに応じて審査・承認案件に重みづけをする	18	作業標準	作業標準類の総点検を実施し、見直し結果に基づき作業者に教育の上、遵守、徹底するとともに、継続的に見直しを行う	19	安全文化	体系的な教育の仕組みとカリキュラムの整備、プロセス技術専門部署の設置、工場・本社・外部機関等との連携による安全基盤や工場内安全管理機能の強化、外部からの知見を取り入れる仕組みを構築し、安全文化が醸成するよう継続的に改善を進める	<p>加水分解処理温度は、加水分解反応速度、加水分解生成物の爆発威力およびステンレス鋼の応力腐食割れに留意して定めた</p> <p>レベル分けは、複数の関係部門が参画し属人性を排除する</p>
12	安全教育	乾燥状態から湿潤状態へといった粉体の安全操作の基本を教育する																									
13	作業管理	危険作業は人的被害防止のため遠隔操作とする																									
14	安全管理	危険作業の際には作業者を最低限とし、人的被害拡大を回避する																									
15	作業管理	熱交換器内を満水状態にし、水温を約40°C、加水分解の終了点をpH中性と水素濃度の減少から判断する																									
16	安全管理	FTAを使ったハザード要因抽出から要因チェックリスト作成とリスクアセスメントによるリスクの低減化を行う																									
17	リスク管理	危険の大きさ(影響度)により作業標準類のレベル分けを行い、これに応じて審査・承認案件に重みづけをする																									
18	作業標準	作業標準類の総点検を実施し、見直し結果に基づき作業者に教育の上、遵守、徹底するとともに、継続的に見直しを行う																									
19	安全文化	体系的な教育の仕組みとカリキュラムの整備、プロセス技術専門部署の設置、工場・本社・外部機関等との連携による安全基盤や工場内安全管理機能の強化、外部からの知見を取り入れる仕組みを構築し、安全文化が醸成するよう継続的に改善を進める																									
教訓		<ul style="list-style-type: none"> マイプロセスを消化せよ：化学プロセスを安全に維持するためには物質、設備、操作条件を理解することが大切である。化学プロセスの理解不足が物質や操作の危険性の見落としを引き起こし、事故のリスクを増大させる。 安全は丸投げでは守れない：経営トップが安全最優先を掲げ、実行するためには、安全を維持するための生産部門と独立した組織が必要である。現場の経験に丸投げせず、組織として危険をコントロールする。 危険は繰り返し顔を出す：物質の危険性は、条件が整うと異常現象として警告を発する。警告に対してその場の対策だけで、本質的な安全対策を実施しなければ事故は繰り返され、大事故につながる。 																									

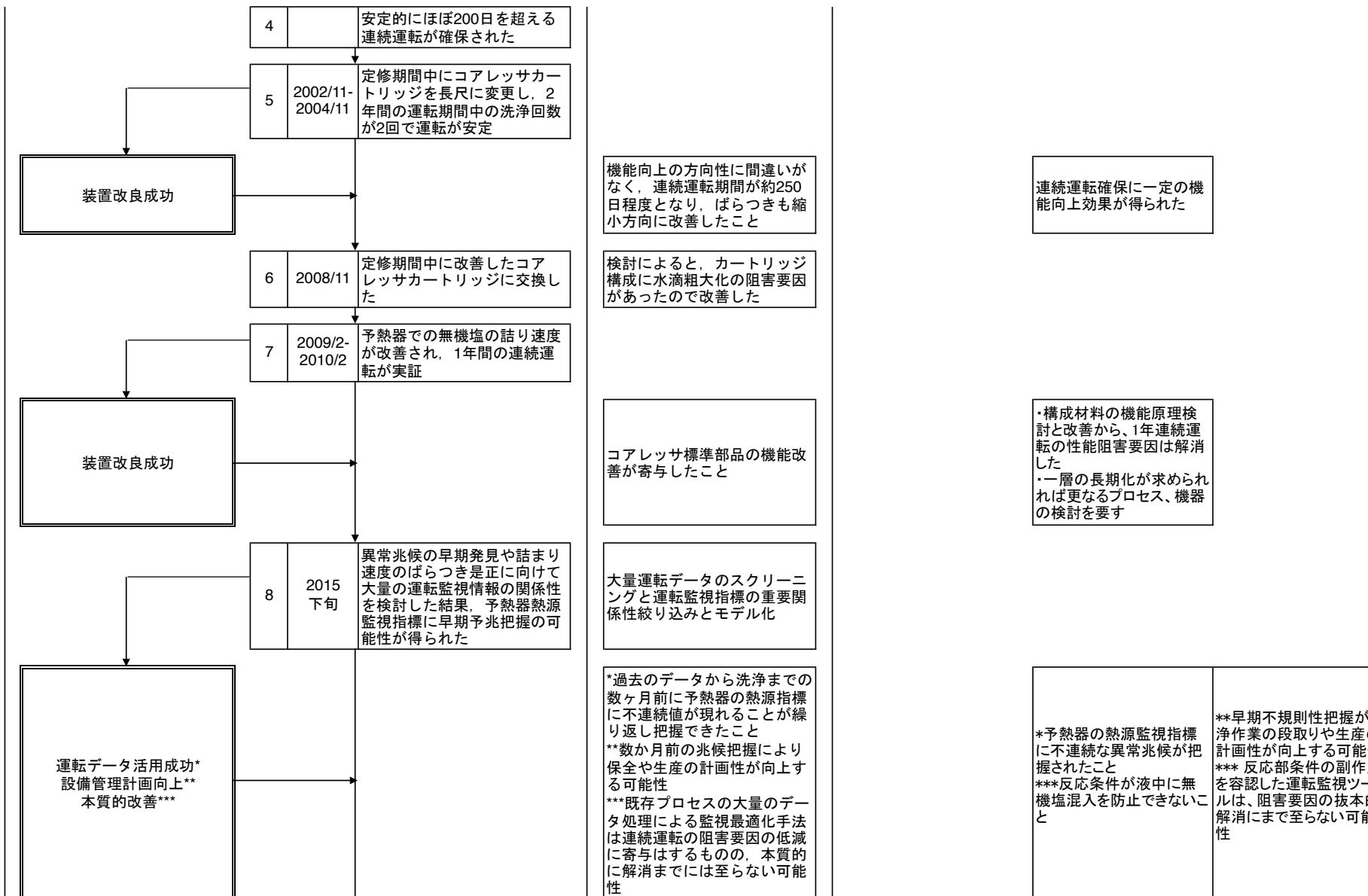
(10)運転データを分析した事例

PFA, RISCAD, AIST

事故概要	発生日時(曜日)	発生場所
ナフサ分解で得られる汎用石油化学原料から石油化学製品を量産するプロセスにおいて、濃縮工程の予熱器などの性能低下のトラブルが起きた。原料の空気酸化による有機過酸化物生成の反応工程で使用される弱アルカリ塩水溶液の助剤が、下流の濃縮工程の予熱器などに付着したことが原因で、プロセスを停止し、洗浄などによる助剤除去作業が必要となった。また、その運転継続期間にばらつきが生じていたため、長期連続運転の阻害要因となった。運転連續化に向けた改善を積み重ねてきて大幅な改善が達成されている。		
背景		
<p>・製法：汎用石油化学原料+酸素(空気)→助剤(弱アルカリ無機塩水溶液)が含まれた湿式液相酸化反応→過酸化物→酸を触媒とした液相酸開裂反応→製品A, Bを併産</p> <p>・濃縮工程は、前段がコアレッサを保有した油水分離、後段が予熱・気液分離の構成である。</p> <p>・コアレッサの機能と構造：油水分離用に濾材やクロスなどを多層に重ねて微小水滴の凝集、粗大化を図り、油分と分離する装置で、内装、外装を金属製パンチングプレートで濾材などの保護と型崩れ防止施工をしたカートリッジを多用するフィルター。</p> <p>・予熱器の汚れ管理：予熱器(多管熱交換器)の熱供給側の出口圧力値は、管内汚れが増すと共に熱交換量の低下で高い値になり、流量低下も生じるのでそれを監視し、原則として許容管理設定上限値到達で洗浄を決めていた。</p>		

3M解析(3M→対策)

区分	原因事象	事故進展フロー	備考	Man	Machine	Media&Management
経過		<pre> graph TD A[設備管理不足* 運転管理不足**] --> B[1 当該プラントでは、湿式酸化後に過酸化生成物に同伴する微量の助剤中の無機塩が濃縮工程の数基の予熱器に付着を生じ、定期的な工程停止による汚れの洗浄除去をして運転を継続] B --> C[2 2000/10 6月の定期洗浄後、定修までの約110日の短期間で洗浄設定値に到達] C --> D[3 定修で予熱器の洗浄実施とコアレッサカートリッジの定期取り換えを実施し、再稼働した] </pre>	<ul style="list-style-type: none"> ・コアレッサ設置後、ばらつきがあるもののほぼ200日前後の連続運転をしていた ・洗浄効果把握は、過去の分析根拠値から洗浄時間で定めていた <p>*油水分離用コアレッサの不調で油分中の同伴塩分量が増加し、下流の予熱器の汚れ速度が増した可能性 **運転日数でのデータ整理は運転負荷モードの違いが考慮されないこと(ただし、稼働時間が常に一定運転負荷である場合はこの限りでない)</p>			



		<p>無機塩を使用した不均一湿式液相酸化反応を前提とする と、定期的な非定常洗浄作業の解消までには至らない可能性があり、非定常洗浄作業解消と環境にも配慮した抜本的プロセス改良の検討が望まれる</p>	
	9	<p>*当該コアレッサは過飽和水の助剤混入を除去する装置であること **蒸発を伴う気液分離操作は無機塩が蒸発層で固化付着し、機能の阻害が生じうること ***過酸化物生成の安全性担保に不均一な弱アルカリ環境条件を採用するとそれも出口油分に混入する副作用があること</p>	<p>*過飽和水分中の塩分の混入を防止できても飽和分は混入する **蒸発分離では蒸発部位で無機塩が固化する ***反応条件が液中に無機塩混入を防止できない ****反応部条件の副作用を容認した運転監視ツールは、阻害要因の抜本的解消にまで至らない可能性 ***反応・濃縮工程のプロセスレビューによる本質安全化を検討する</p>
対応操作			
恒久的 対応策		<p>1 運転管理 ビッグデータ処理を伴う運転の乱れ予兆把握方法を開発し、ばらつきを防止する</p> <p>2 運転管理 通液量と汚れのガイドラインを作成し運転最適化を図る</p> <p>3 運転管理 洗浄履歴、保全改良履歴、リアル運転情報などにおいて人工知能を活用した統合管理による異常兆候の早期発見と改善技術の向上</p> <p>4 プロセス 非水均一相プロセスの安全確保検討にて濃縮工程の油水分離装置群と洗浄作業が不要な連続操業のプロセス本質安全化を図る</p>	<p>RISCAD提案</p> <p>RISCAD提案</p> <p>RISCAD提案</p>