

整理番号 2011-078	事故名称 LPG 球形貯槽の倒壊による火災及び爆発			
事故発生日時 2011-3-11 15 時 15 分頃		事故発生場所 千葉県市原市		
施設名称 LPG 出荷 装置及び 貯槽設備	機器名 LPG 球形貯 槽	主な材料 球殻:高張力鋼 (RA60H) ブレース:STK41	概略の寸法 球殻内径:15,700mm 肉厚:34~35mm 設計容量:2000kl 支柱構造:標準型 10 本 ブレース外径:216.3mm 肉厚:5.8mm	
内容物 LPG(プロパンまたはブタン)		高圧ガス製造能力 17,423,709Nm ³ /日	常用圧力 0.98MPa	常用温度 35℃
被害状況 東北地方太平洋沖地震、及びその約 30 分後に発生した茨城県沖地震により、LPG 球形貯槽が倒壊し、配管が破損し、LPG が漏洩して火災となり、その後、隣接する球形貯槽が破裂、爆発した。被害状況は以下のとおりである(図 1~6、写真 1~8 参照)。 ①人的被害 負傷者 6 名(重傷者 1 名、軽傷者 5 名) ②物的被害 ・T-3(貯蔵施設地区)LPG タンクヤード内の 3PK ヤードに設置された球形貯槽(17 基)、配管、機器、建屋(計器室、電気室、事務所等)、道路等が損傷又は焼損した。 ・球形貯槽の被害状況は、破裂 4 基、大きく移動 4 基、倒壊又は倒壊寸前 5 基、自立していた状態は 4 基(うち 1 基は傾斜)であった。 ・隣接するアスファルトタンクが損傷した。 ・爆発による飛散物、爆風等の影響により、隣接する 2 事業所の構内で火災が発生した。 ③社会的被害 ・他の近隣事業所、居住地区等において、爆発による飛散物、爆風等の影響により、窓ガラス、シャッター、スレート等の破損、及び保温材等の軽量飛散物による車両の汚損が発生した。 なお、近隣住民約千人に一時避難勧告(約 14 時間)が出された。				
事故概要 平成 23 年 3 月 11 日 14 時 46 分、東北地方太平洋沖地震(市原市で震度 5 弱、事業所内地震計 114gal)が発生し、全ての出荷を停止した。この地震により、球形貯槽(364 番)の支柱の鋼管ブレースの多くが破断した。 14 時 52 分頃 所内災害対策組織を組織し、所内の点検を開始した。また、自家用発電設備発電所(6EG)の停止に伴い、燃料供給ポンプの停止操作を実施した。 14 時 57 分頃 隣接事業所への原料供給ポンプの停止操作を実施した。 15 時 15 分 茨城県沖地震(市原市で震度 4、加速度 99gal)が発生し、364 番貯槽の支柱が座屈し、364 番貯槽が倒壊し、周辺の複数の配管が破損し、LPG が漏洩した。 15 時 16 分頃 倒壊した 364 番貯槽周辺のガス検知器が発報した。				

15 時 18 分頃 製造装置からの LPG 受入れの切替え先の検討を開始した。

15 時 23 分頃 払出緊急遮断弁、自動弁の閉止操作を開始した。

15 時 24 分頃 固定措置がなされた緊急遮断弁の固定を外すため、現場に向かったところ、すでに LPG が大量に滞留しており、近づける状況ではなかった。

15 時 30 分頃 製造設備からの LPG 受入れの切替え先が見つからない状況であったが、この製造設備の停止要請には至らなかった。

15 時 35 分頃 自衛防災隊が LPG 漏洩を確認し、防災センターへ連絡し、共同防災組織に出動要請し、近隣他社へ連絡した。また、3PK ヤードの全貯槽に対し散水を指示した。

15 時 37 分頃 消防局へ LPG 漏洩を通報した。

15 時 47 分頃 漏洩、拡散した LPG に着火し、364 番貯槽付近で火災が発生した。このため、災害対策組織が、動力装置以外の全装置の緊急停止を指示した。

15 時 48 分頃 3PK ヤードの緊急操作に精一杯であり、散水操作が完了していないことが判明した。この時、計器室は全照明が消灯し、天井パネルが落ちる等危険な状態であり避難指示が出ていたが、従業員が計器室に戻り、15 時 54 分頃に散水作業を完了した。

17 時 04 分 火災の影響により、364 番貯槽に隣接する 374 番貯槽が爆発して、火災が拡大した。その後、周辺の複数の貯槽が爆発し、火災が 3PK ヤード全域に拡大した。(17 時 04 分～17 時 50 分の間に、合計 5 回の爆発が確認された。)

3 月 21 日

10 時 10 分 鎮火した。なお、防消火活動は火災発生当初から継続して行なった。

事故原因

(1)364 番貯槽のブレースの破断及び貯槽の倒壊

- ①364 番貯槽は開放検査が行われ、気密試験検査完了後、内部の空気をパージするため、水が注入され、満水状態であった(比重:水 1、LPG 約 0.5)。このため、内容物の重量は、耐震設計重量の約 2 倍であった。
- ②通常は、満水状態で保持される期間は数日程度であるが、諸手続、連絡等の遅れにより、地震発生まで 12 日間、満水状態が継続した。
- ③364 番貯槽は、1982 年通達^{*}を満足する耐震性を有していたが、内容物が軽量の LPG ではなく、満水状態であったので、東北地方太平洋沖地震で支柱のブレースに過大な地震荷重が作用し、ブレースの交差部が破断した。
- ④その後の茨城県沖地震で、貯槽の支柱に地震荷重が作用して座屈し、364 番貯槽の倒壊に至った。
- ⑤地盤については、ボーリング調査後に簡易液状化判定を実施した結果、基礎、杭に及ぼす液状化の影響は殆どないと推定された。

(2)配管の破損及び LPG の漏洩

- ①事故調査報告書^{*2}では、事故後の配管の調査、配管応力解析、LPG の漏洩拡散シミュレーション及び火災の状況の結果を総合して、LPG の漏洩の原因となった配管の破損箇所として、3 箇所(図 4、図 5 における No.6、No.7、No.11)を抽出し、破損の可能性と破損による漏洩、火災のシナリオを検討している。事故調査報告書のシナリオを図 6 に示す。
- ②事故調査報告書が取り纏められた後、配管の破損箇所の詳細調査が実施された。その結果、3 箇所(No.6、No.7、No.11)の破面は、シヤーリップ(せん断縁)のみで形成される完全な延性破壊の様相を示し、極低サイクル疲労、脆性破壊などの部分破断又は割れの様相はないことが判明した。すなわち、3 箇所ともに、瞬時に塑性崩壊で部分破断または完全破断したと考えられる。

- ③上記の結果から、364 番貯槽のブレース破断後の地震荷重または 364 番貯槽の倒壊により、364 番貯槽と 363 番貯槽の接続配管系のどこか(複数もある)が部分破断(割れ)又は完全破断したと推定される。漏洩箇所と漏洩時期が特定できなくとも、LPG が大量漏洩したという結論は変わらない。
- ④上記の 3 箇所の破断は、364 番貯槽のブレース破断後の地震荷重、364 番貯槽の倒壊による変形だけではなく、火災発生後の貯槽の爆発による 363 番貯槽移動(約 33m)の影響を受けており、その識別は困難である。
- ⑤364 番貯槽と 363 番貯槽の接続配管系には、可とう性が低いクロスティー(T字型に直交する配管同士の接続継手)が用いられていた。クロスティーの設置が、配管系の損傷の一因となった可能性がある。
- ⑥364 番貯槽と 363 番貯槽の接続配管の緊急遮断弁は、開状態で固定されていた。理由は、地震発生時の約 1ヶ月前、緊急遮断弁を開閉するための空気を供給する計装空気配管で微量の漏洩が確認されたので、補修を行うまでの間、空気圧力が低下した場合に緊急遮断弁が閉止することを避けるためであった。
- ⑦緊急時は、現場で開状態の固定を解除する運用としていたが、当日は大量の LPG 漏洩により、現場に近づいて解除することができず、結果的に緊急遮断弁はその機能を発揮できなかった。なお、配管の破断順序の識別が困難なことから、この遮断弁の不作動のみを、事故の主因とすることはできない。

(3)着火源及び爆発、延焼

- ①着火源は、調査を行ったが特定はできなかった。
- ②周囲の貯槽に対して、散水による冷却を継続していたが、364 番貯槽付近で発生した火災の勢いが強くなり(プール火炎→ジェット火炎)、隣接する貯槽への散水が蒸発することにより、表面温度が上昇して強度が低下し、内圧に耐えられず貯槽が破裂し、延焼したと推定される。
- ③ジェット火炎に変化した要因は、配管からの漏洩の継続、火炎の熱影響により液体ブタンの蒸発が促進されたことが推定される。
- ④一部の散水管が破損していたことが事故後に確認されたが、破損の時期は不明である。いずれかの段階から、破損により散水量が低下し、冷却効果が低くなった可能性がある。
- ⑤最初に爆発した 374 番貯槽について、熱影響、温度上昇について検討した結果、散水がなされていない場合は、出火後約 7 分後には、貯槽の表面温度が上昇し、強度低下により破裂が生じる結果となった。実際には火災が継続していることから、散水はある程度なされていたと推定される。
- ⑥消火用海水ポンプは、必要な海水量を確保するためのシーケンスが組み込まれ、それに応じたポンプ台数が、火災発生時に正常に稼働した。その後、追加起動の指示が出されたが、稼働ポンプの負荷に十分な余裕があったこともあり、他の緊急対応を優先したため追加起動が遅れ、一回目の爆発以降に起動することとなり、対応が遅れた。

(4)その他の特記事項(安全管理体制等)

- ①364 番貯槽を満水にすることは、開放検査のための一時的な措置であった。その間に地震が発生した場合における、潜在リスクに係る認識が不十分であった。
- ②緊急遮断弁を開状態で固定するなどの運転措置、及び貯槽への水張りなどの作業工程について、法令と潜在リスクの確認が不十分であった。
- ③ガス検知器発報直後、製造設備からの LPG 受入れの切替え先が検討されたが、漏洩箇所が特定されていなかったため、製造設備の停止要請には至らなかった。

また、オフサイト設備の異常時における、オンサイト設備の停止を即座に実施できる体制ではなかった。

- ④以前の組織統合時に、変更管理が不十分であったため、無人となった計器室又はその近くの現場ヤードに、ガス検知器の警報発生位置を示す外部パネル、外部警報装置、緊急操作スイッチ等を残していたため、緊急時対応が遅れた。
- ⑤自部署で対応できる訓練は実施していたが、大規模漏洩を想定した複数の部署間が連携する訓練は実施していなかった。また、マニュアルには、現場に近付けない程の大規模漏洩時の対応手順に関する記述がなかった。
- ⑥常駐計器室は、地震により全照明が消灯し、天井パネル及び天井照明が脱落した状態となり、係員が避難せざるを得ない状態となったため、その後の対応に影響が出た。なお、実際には、一部の係員が、緊急操作を継続した。

再発防止対策

(1)設備面

- ①今後、貯槽の水張り作業時における満水状態の期間をできるだけ短くし、満水状態におけるリスク低減を図る。
- ②満水状態にする時は、万が一貯槽が倒壊しても貯槽付近の配管、設備等が破損し、LPGの漏洩が発生しないよう、配管、設備等の保護、縁切り、切り離し等を行うことにより、安全対策を強化する。
- ③既存の貯槽について、満水状態を考慮し、耐震設計に関して再評価を実施し、問題がある場合は補強等の対策を実施する。
- ④貯槽を新設する場合は、現行法を満足するとともに、耐震性能に優れたブレースの採用等を実施する。
- ⑤新規に貯槽周りの配管設計を行う際には、単純化し、適切な可とう性を持つ配管構造を検討する。
- ⑥緊急遮断弁の開状態での固定措置を禁止する。
- ⑦常駐の計器室の耐震強度を高め、また無人の計器室等にあった警報発生位置を示す外部パネル、外部警報装置等を常駐計器室に設置し、緊急時対応を強化する。
- ⑧大規模火災時には、発災場所に近づくことが困難であり、通常の自衛消防車では放水の到達距離が不足したことから、三次元火災に対応した防消火設備(多機能型消火砲等)を発災後に導入した。

(2)管理面

- ①緊急異常時の対応能力向上を目指し、大規模災害を想定した訓練をこれまで以上に実施し、緊急時対応の意識向上を図るとともに、訓練時は部署間の連携を再点検し、マニュアルをより実効度の高いものに改善する。
- ②プロセス危険予知活動を活性化させ、リスク想定能力の向上を図り、事業所内において継続した技術の伝承を行う。
- ③安全装置に関するチェックリストを用いて作業点検、相互確認を実施し、法令、社内安全基準の理解を深めるとともに、その背景にある潜在リスクを正しく認識できるよう、社内教育を実施する。
- ④再発防止に関する活動の進捗状況を、事業所自らがチェックすると共に、本社及び他事業所による監査を実施して確実に実行する体制とする。また、再発防止策を実行する際に抽出された改善点は他事業所への展開を行い、全社で安全レベルの向上を図る。
- ⑤オフサイト設備の異常時には、担当課の判断で緊急停止措置ができることを明確化して所内に周知徹底し、訓練を実施する。

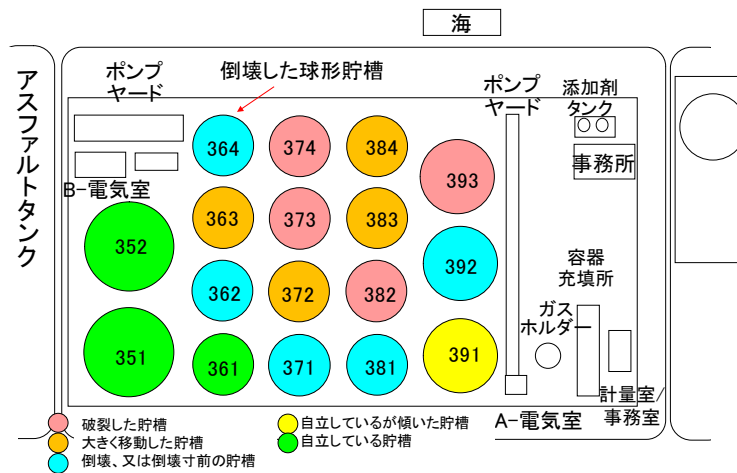
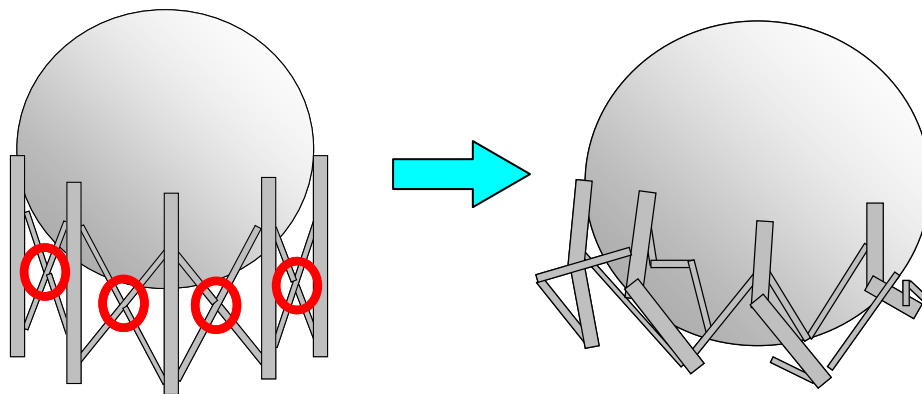


図 2 3PK ヤードレイアウト



14:46 の東北地方太平洋沖地震で
複数のブレース(交差部)が損傷

15:15 の茨城県沖地震後に倒壊

図 3 貯槽の倒壊イメージ

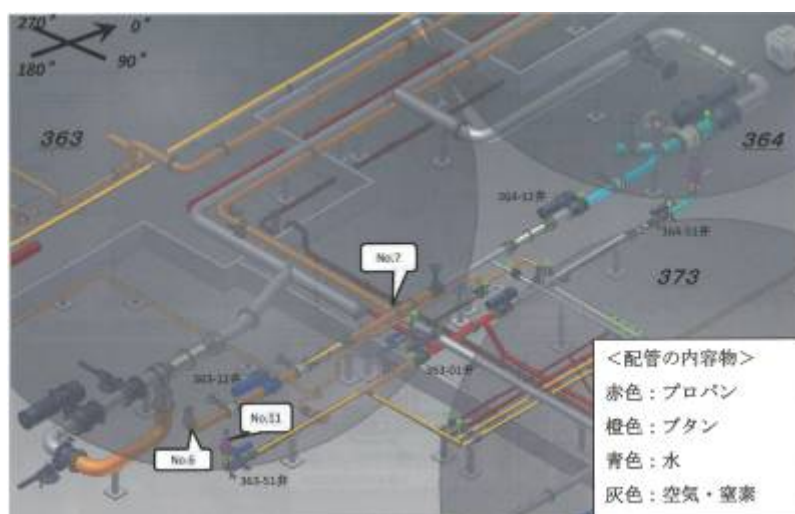


図 4 363 番貯槽、364 番貯槽廻りの配管図

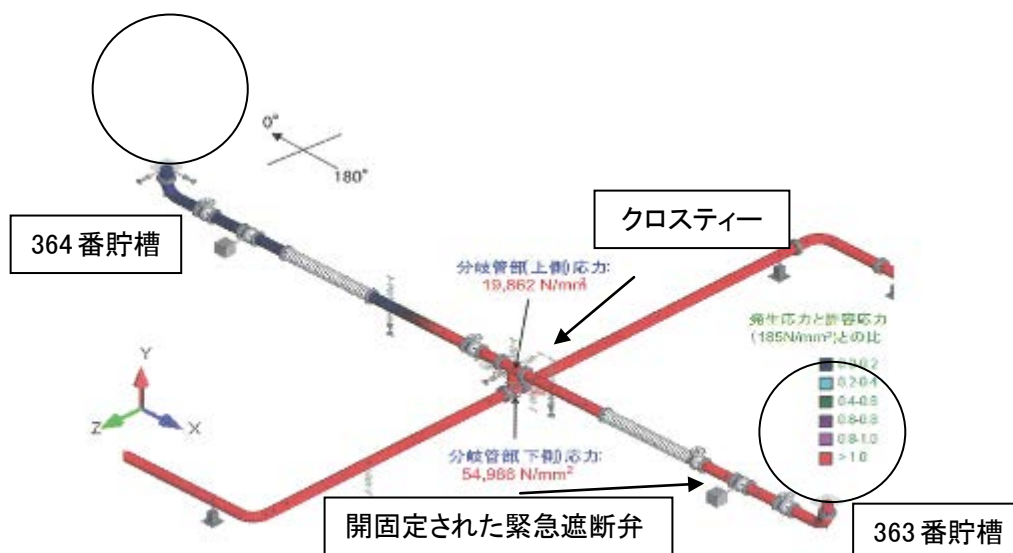


図 5 破断箇所 No.7 の応力解析結果

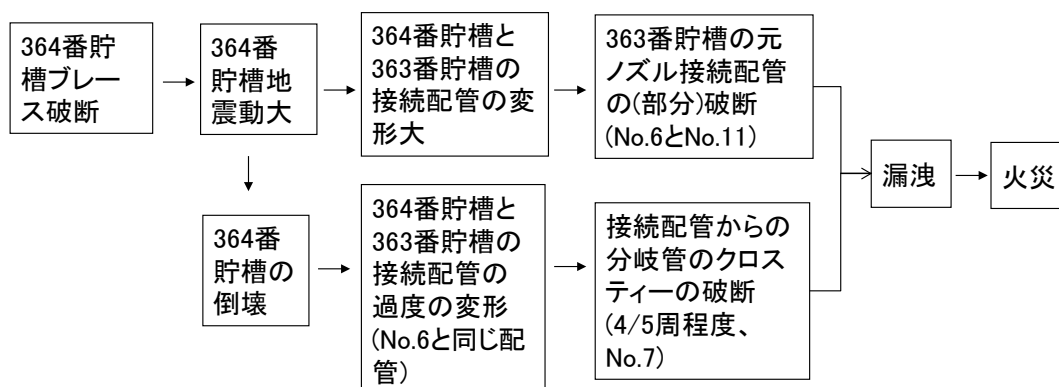


図 6 配管の破損による漏洩、火災のシナリオ(報告書^{*1})



写真 1 倒壊した球形貯槽(事故後撮影)

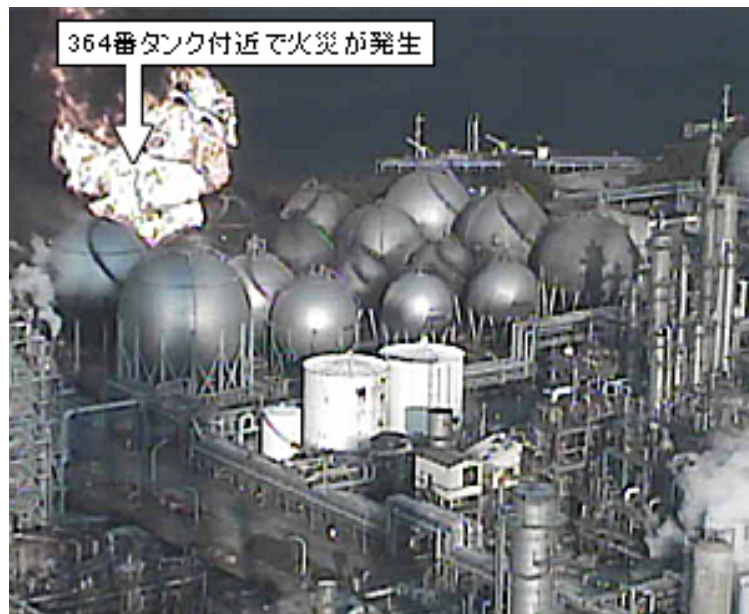


写真 2 所内モニタにて撮影された火災の状況



写真 3 事故の経過



写真 4 貯槽破裂後に飛散した破片



写真 5 隣接するアスファルトタンクの損傷状況



写真 6 クロスティー



写真 7 破断したブレース
(交差部全体)



写真 8 破断したブレース(溶接部)

整理番号 2011-386	事故名称 塩化ビニルモノマー製造施設の爆発火災		
事故発生日時 2011-11-13 15 時 15 分頃		事故発生場所 山口県周南市	
施設名称 第二塩化ビニルモノマー製造施設	機器名 ①塩酸塔 ②塩酸塔還流槽 ③液塩酸一時受タンク	主な材料 ①SLA325A、SPV315 ②SLA325A ③SLA325A	概略の寸法 ①全長:28,000 ^{TL} 上段:1,900 ^{ID} ×11,600 ^{TL} 中段:1,900 ^{ID} ×2,800 ^{ID} ×800 ^{TL} 下段:2,800 ^{ID} ×15,600 ^{TL} ②2,800 ^{ID} ×6,600 ^{TL} ③2,700 ^{ID} ×5,600 ^{TL}
内容物 塩化水素、塩化ビニルモノマー、二塩化エタン	高圧ガス製造能力 31,169,350Nm ³ /日	常用圧力 ①1.90MPa ②1.90MPa ③1.90MPa	常用温度 ①-25℃/120℃ ②-25℃ ③-25℃
被害状況 第二塩化ビニルモノマー製造施設において、オキシ反応工程A系の緊急放出弁の故障を発端に、製造施設を緊急停止させた。その後、液抜き作業等を行っていたところ、液塩酸一時受タンクから HCl、VCM などのガスが漏洩し、約 10 分後に塩酸塔還流槽付近で、爆発が 2 回発生し、施設の広範囲が炎上し、1 名の運転員が死亡した。			
事故概要 ①3 時 39 分、通常運転中の第二塩化ビニルモノマー製造施設で、オキシ反応工程 A 系(以下、オキシ A 系)の除害設備行きの緊急放出弁が故障し、突如「開」状態となったため、系内圧力が急激に低下した。 ②3 時 52 分、オキシ A 系がインターロックにより自動停止した。 ③3 時 53 分、分解炉の稼働率をオキシ B 系の稼働率に合わせるために、分解炉 A 系、B 系と緊急停止した。 ④4 時 10 分頃、分解炉 A/B 系を緊急停止したことにより、塩化水素(HCl)及び塩化ビニルモノマー(VCM)生成量、未反応の二塩化エタン(EDC)量が大幅に低下し、塩酸塔の中段(18 段)の温度が低下(通常 80℃→57℃)した。運転員は、18 段の温度を 80℃に回復させるために、塩酸塔の加熱器蒸気量を増加し、還流量を低減させた。 ⑤4 時 40 分、塩酸塔の通常-24℃であるべき塔頂(50 段)の温度が 38℃まで上昇し、塩酸塔上部及び塩酸塔還流槽に、HClに加えて VCM が混入した。 ⑥5 時 57 分、塩酸塔還流槽に VCM が混入したことで、マスバランスがくずれオキシ B 系の酸素濃度が上昇したため、オキシ B 系を含む全製造施設を停止した。 ⑦以降、塩酸塔の停止基準に則り操作を行い、8 時 40 分、塩酸塔冷凍機を停止、液面が通常状態より上昇した塩酸塔還流槽と塩酸塔を縁切りした。 ⑧11 時 39 分、塩酸塔還流槽の液面指示値がほぼ 100%であったため、その一部を、液塩酸一時受タンクへの移液を開始した。この後、塩酸還流槽及び液塩酸一時受タンクの温度、圧力は徐々に上昇していたが、初期の上昇速度は小さく、運転員は異常に気付かなかった。 ⑨15 時 00 分頃、液塩酸一時受タンクの圧力上昇を認知したため、圧力除去作業を実施した。 ⑩15 時 15 分頃、圧力除去作業等を実施中に、液塩酸一時受タンク上部から異音とともに白煙噴出を確認した。 ⑪15 時 23 分頃、塩酸塔還流槽の圧力が 2.0MPaG 以上に上昇した。 ⑫15 時 24 分、塩酸塔還流槽が破裂、爆発し、第二塩化ビニルモノマー製造施設が広範囲に炎上した。			

事故原因

①塩酸塔のロードダウン操作

- ・オキシ A 系のインターロック停止及び分解炉 A/B 系の緊急停止により、塩酸塔へのフィード量が大幅に減少したため、塩酸塔のロードダウン操作が必要になった。
- ・塩酸塔運転ロードの急激な変動時には、塔頂温度、塔底温度を監視しながら加熱器蒸気量と還流量を調整する必要があった。しかし、オキシ A 系停止時の緊急措置マニュアルでは、「塩酸塔の加熱器蒸気量、還流量の調整」のみ記載されているだけで、具体的な数値の目安は示されていない。
- ・運転員は加熱器蒸気量を増加したことで、中段(18 段)の温度が 80℃に回復したため、塩酸塔が安定状態になったと判断して、他の設備の操作に移行してしまった。その結果、加熱器蒸気量と還流量がロードダウンに見合う値に変更されことなく運転を継続したため、塔頂温度が上昇し、塩酸塔還流槽に通常の HCl に加えて VCM が混入した。
- ・塩酸塔の運転管理では、塔頂温度が異常高となった場合に、オキシ反応の停止につながるという認識が低く、異常を確実に検知できる設備になっていなかった。また、塩酸塔のロードダウン操作を想定した緊急措置マニュアルの詳細な記載と対応の教育訓練が不足していた。

②塩酸塔還流槽の破裂

- ・塩化鉄(Ⅲ) (FeCl_3)等のルイス酸系の触媒が存在すると、HCl と VCM の反応で 1,1-EDC が容易に生成することが原因と判明した。
- ・塩酸塔還流槽及び液塩酸一時受タンクの内部は HCl と VCM が混在した状態で、内壁気相部分の鉄錆と HCl の反応で FeCl_3 が生成し、さらに FeCl_3 を触媒として、1,1-EDC の生成反応が進行した。その後、DCS 上のトレンドデータで塩酸塔の塔頂温度の異常高に気付き、塩酸塔還流槽への VCM 混入の可能性を想定したが、1,1-EDC の生成までは想定できなかったため、通常の塩酸塔停止基準に基づく停止操作を指示した。
- ・この反応は発熱反応のため温度上昇を伴い、温度上昇とともに反応速度も指数関数的に大きくなる。そして、塩酸塔還流槽内部の圧力が急上昇し、液塩酸一時受タンクから可燃物が漏洩し、塩酸塔還流槽が破裂し、漏洩した VCM、1,1-EDC が何らかの着火源により爆発したと推定される。

③緊急放出弁の故障

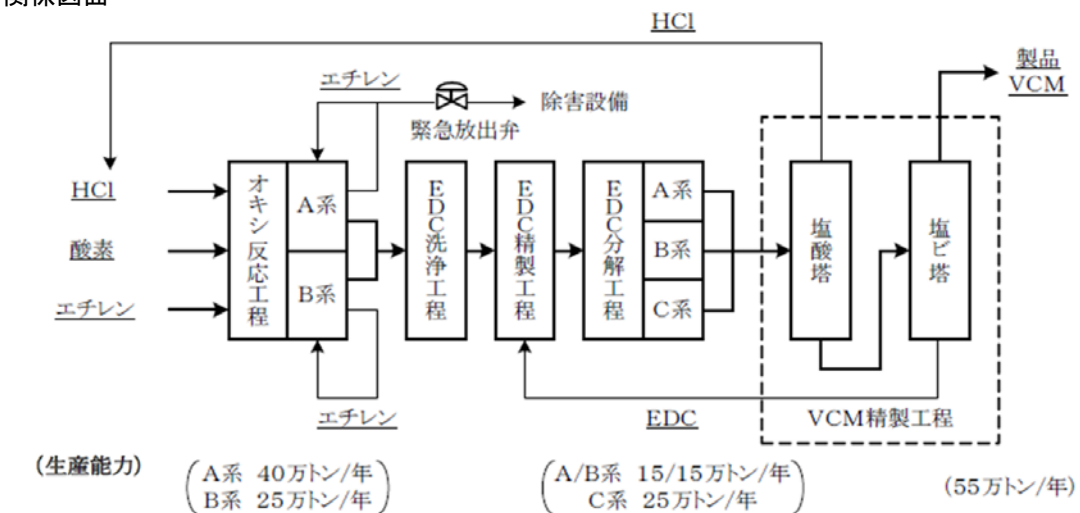
- ・オキシ A 系のインターロック作動の発端となった緊急放出弁の故障は、温度変化によるポジション内部のトルクモータコイルの接触不良であった。なお、この弁の故障により、オキシ反応工程が緊急停止に至る最重要トラブルに発展することは想定されていなかったため、対処方法について異常措置マニュアルへの記載はなく、事前の危険予知、異常対応の教育訓練がなされていなかった。

再発防止対策

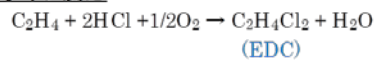
- ①塩酸塔については、塔頂側の複数の温度計が異常高となった場合に、分解工程及びオキシ反応工程の全系列を停止すると同時に、塩酸塔加熱器への蒸気を停止させるインターロックを設置する。また、塩酸塔の塔頂温度に異常が起きた後、塩酸塔の停止操作を実施する場合は、全還流運転を行い、塔頂温度が正常な -24℃になっていることを確認した後、還流を停止するように運転マニュアルに明記する。
- ②塩酸塔還流槽内への VCM 混入により、塩酸塔還流槽圧力が通常の HCl 単独の蒸気圧と異なる値となった場合の警報、単位時間当たりの温度及び圧力の変化の表

示を DCS に追加する。 ③塩酸塔還流槽、液塩酸一時受タンクを定修などで開放した際には、内壁に残存する鉄錆を取り除き、工事仕様書に添付した仕上げ写真と比較して、除去完了を確認する。 ④オキシ系については、新たに反応工程の緊急脱圧用として破裂板を設置し、系列停止のリスクを低減する。また、緊急放出弁は、今後、定修時における系内の脱圧用使用する遠隔操作弁と位置付け、緊急用には使用しない。破裂板が作動した場合の対応については、異常措置マニュアルに追加し、これを用いた危険予知と異常対応の教育訓練を実施する。
教訓 ①化学反応プロセスにおける緊急放出弁、破裂板などの安全装置の設置の目的と機能を明確にし、作動の信頼性を確保するとともに誤作動、誤操作した場合のリスクアセスメントを実行し、対応を検討する必要がある。 ②緊急停止後の状況は通常と異なるので、通常の管理ポイントと異なる箇所にも変化が生じるために注意して運転する必要がある。そのため、緊急停止後のチェックリストの整備、運転支援システム及び運転マニュアルの拡充も重要である。また、緊急停止後の運転操作を想定して定期的に訓練を行い、緊急時に備えることが大切である。 ③化学反応のリスクアセスメントの実行では、制御方法、設定値、検出部位の妥当性などについて多面的な視点を加え、より定量的な検討が必要であり、リスクアセスメントの結果から具体的な対策と教育を実施する必要がある。 ④プラントの運転において重要となる管理値は、know-how だけでなく know-why で原理、原則について、運転と保守を実行する人に教育し、伝えていくことが大切である。 ⑤他事業所、他社をも含めた運転経験、トラブル、事故の情報は、収集、分析してデータベース化するばかりでなく、適確に活用できるように知識化を図ることが必要である。
備考
事故調査解析委員会

関係図面

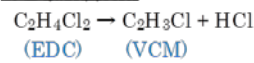


オキシ反応



EDC(二塩化エタン)

EDC分解反応



VCM(塩化ビニルモノマー)

図1 第二塩化ビニルモノマー製造施設のブロックフロー

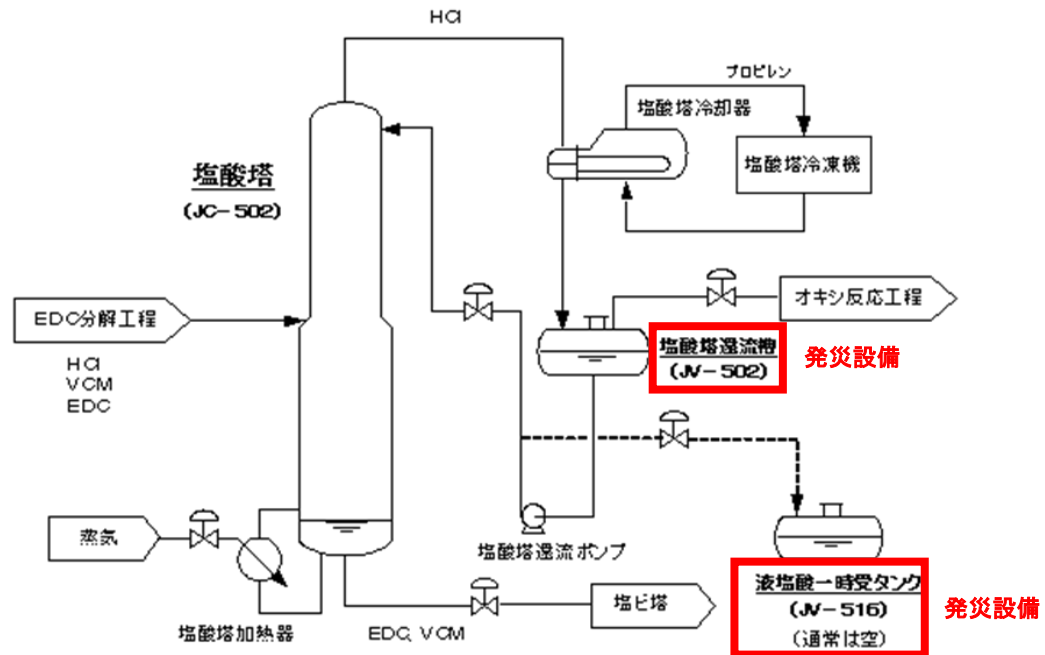


図2 VCM 精製工程 塩酸塔周りのフローシート



写真1 被災状況全体



写真2 写真1の拡大



写真 3 塩酸塔還流槽の破壊状況

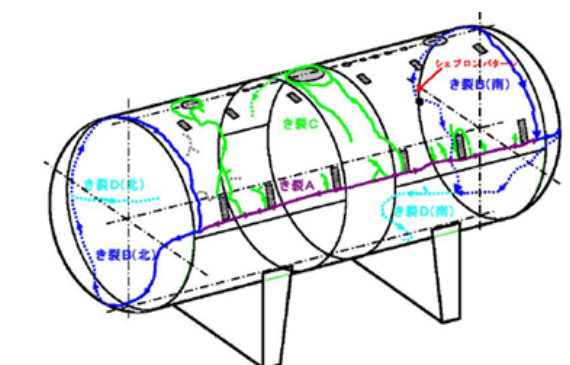


図 3 塩酸塔還流槽の破壊経路



写真 4 液塩酸一時受タンクの損傷状況

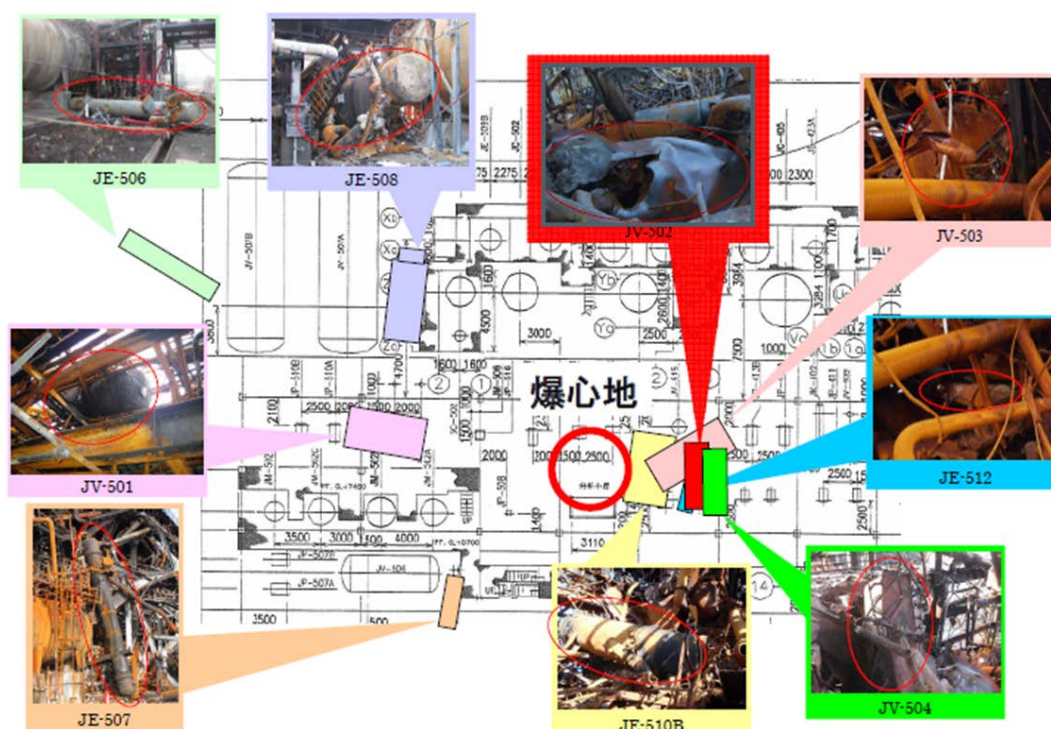


写真 5 事故発生場所と機器の飛散状況

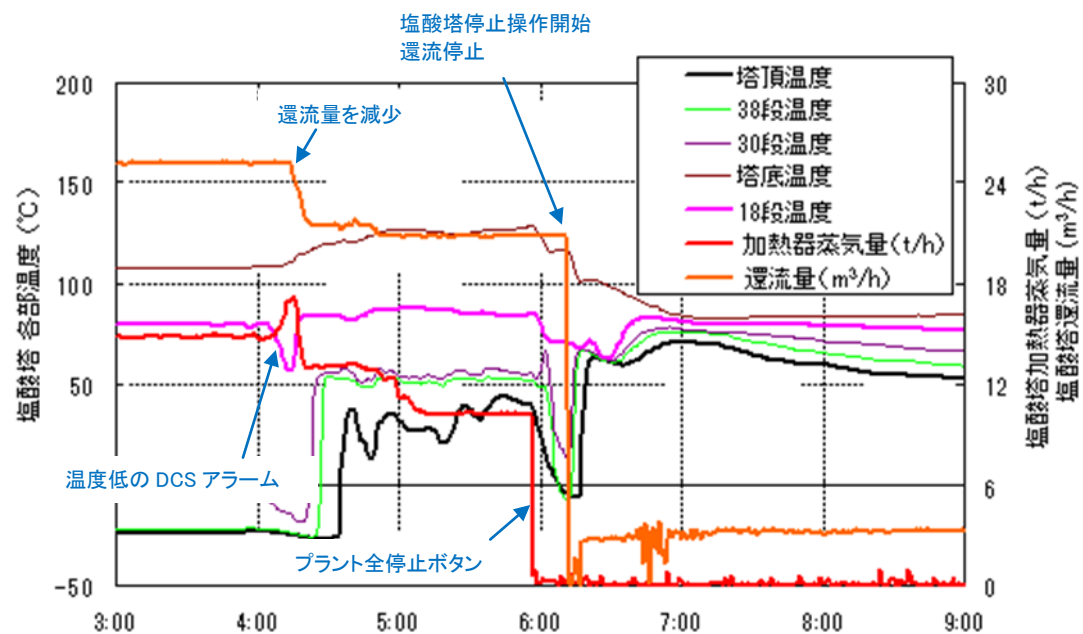


図4 塩酸塔の各部温度、蒸気量、還流量のDCSデータ

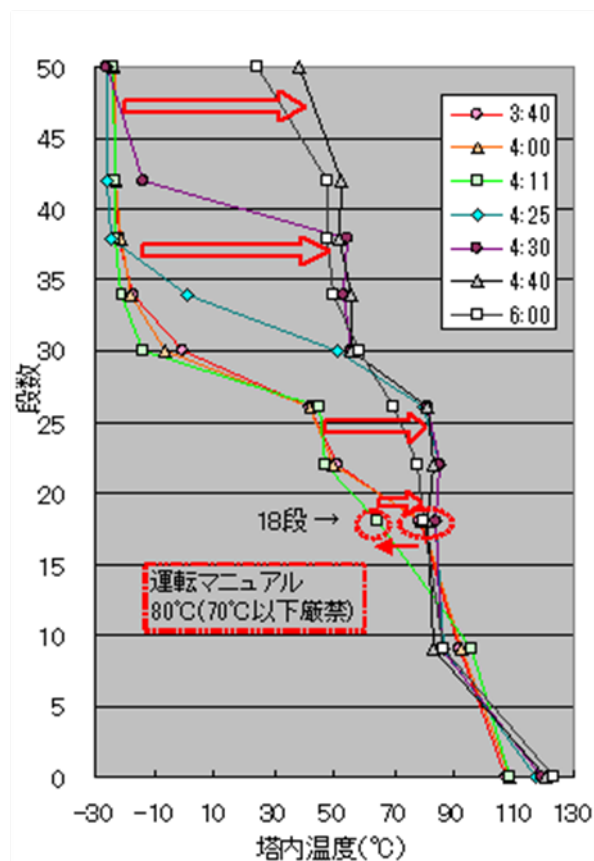


図5 塩酸塔の温度分布の履歴

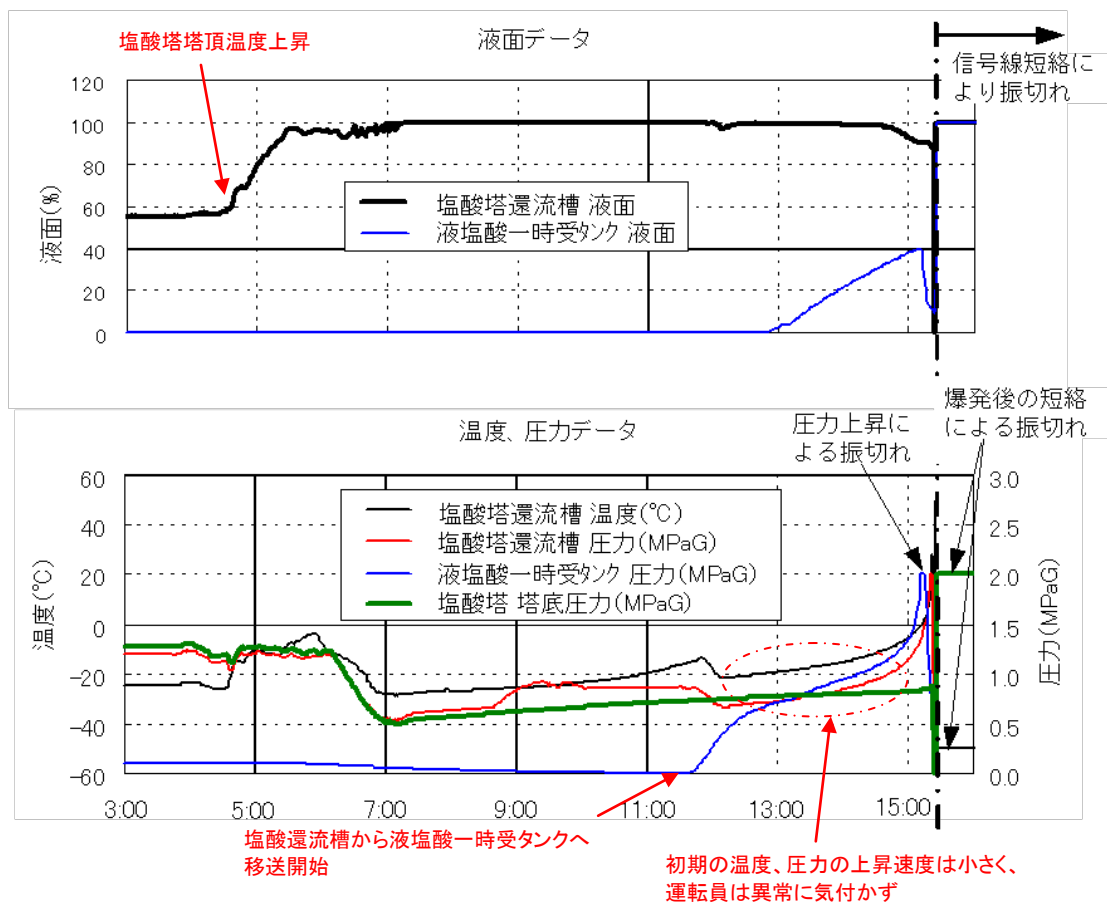


図 6 塩酸塔還流槽と液塩酸一時受タンクの液面、温度、圧力のDCSデータ

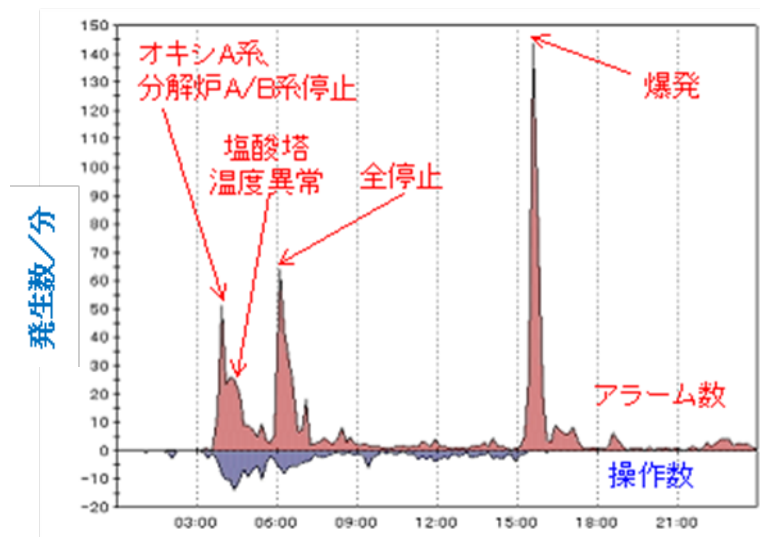


図 7 アラーム発生数/分と操作数の関係