

# LPG球形貯槽の倒壊による 火災及び爆発

佐野 尊 高圧ガス保安協会 試験センター（前 情報調査部）  
 上田洋平 高圧ガス保安協会 情報調査部  
 赤塚広隆 高圧ガス保安協会 情報調査部  
 小林英男 横浜国立大学 安心・安全の科学研究教育センター 客員教授

## 1. はじめに

平成23年3月11日に発生した東日本大震災において、複数の球形貯槽が破裂、爆発した事故が発生した。本資料は、上記の事故の原因及び事業所が実施した再発防止策を述べると共に、本事故から得られた教訓について記述する。

## 2. 事故概要

平成23年3月11日14時46分、宮城県沖を震源とする東北地方太平洋沖地震が発生した。さらに、その約30分後に発生した茨城県沖地震により、千葉県内の事業所（製油所）において、LPG球形貯槽が倒壊し、配管が破損し、LPGが漏えいして火災となり、その後、隣接する球形貯槽が破裂、爆発した事故が発生した。

事業所のレイアウトを図1に、球形貯槽が設置された3PKヤードのレイアウトを図2に示す。また、施設の名称、機器仕様等を表1に示す。

## 3. 事故の経過

平成23年3月11日の地震発生から、火災の鎮火に至るまでの経緯を以下に示す。  
〔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114ガル）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）における支柱の鋼管ブレース交差部（溶接部）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99ガル）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が漏えいした（図3及び写真1参照）。

15時16分頃：倒壊した364番貯槽周辺の

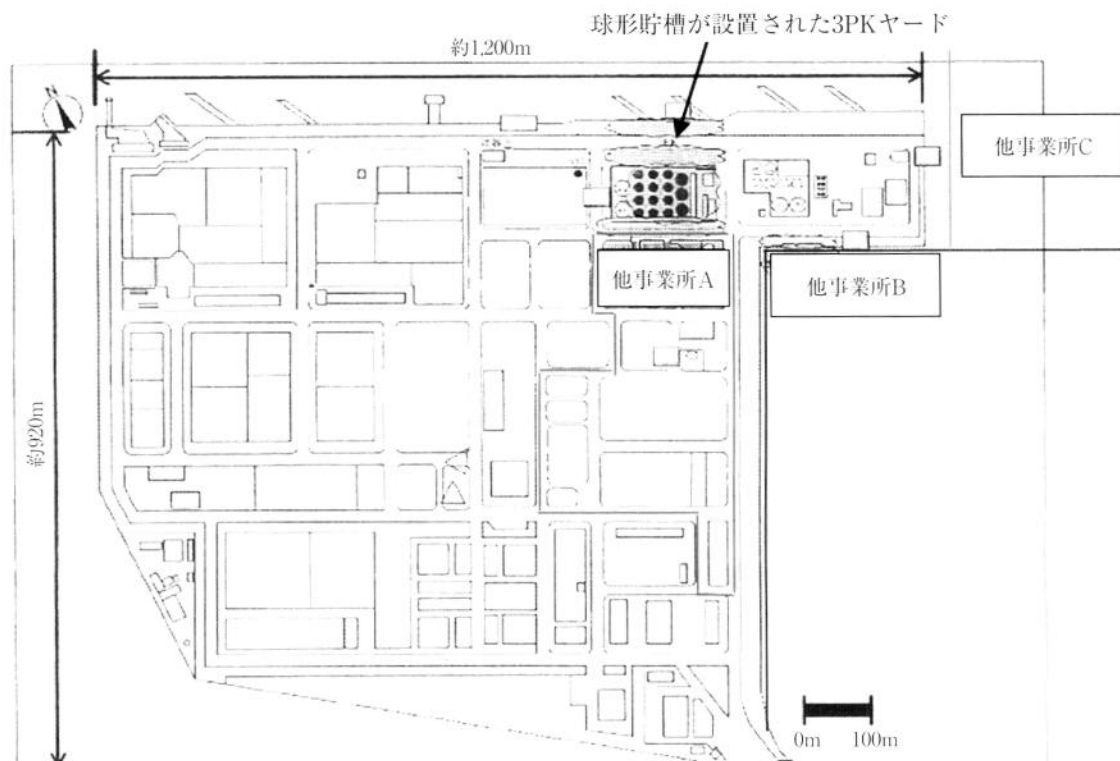


図1 事業所のレイアウト

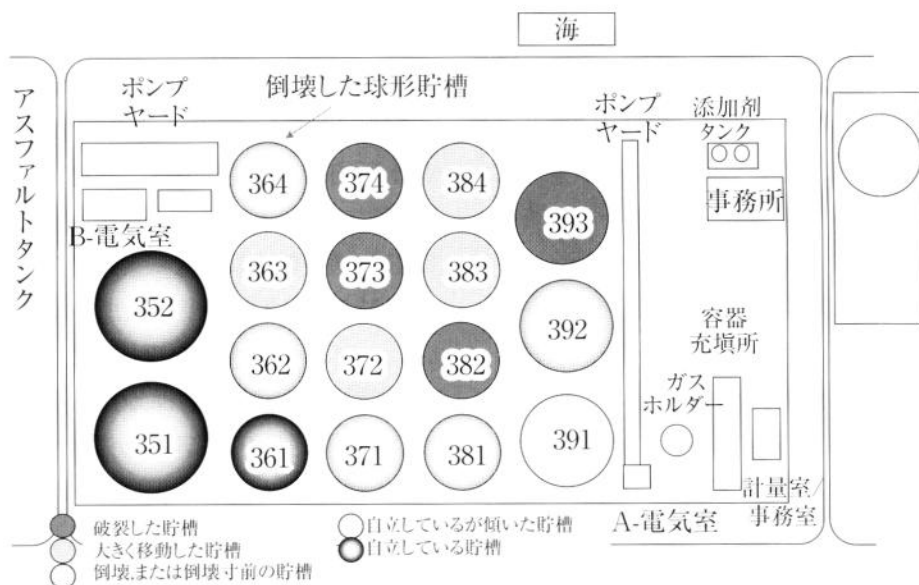


図2 3PKヤードのレイアウト

表1 設備の概要

項目	名称、仕様等
施設	名称：LPG出荷装置及び貯槽設備 高圧ガス製造能力：17,423.709 Nm <sup>3</sup> /日
機器	名称：球形貯槽 <ul style="list-style-type: none"> <li>・球殻内径：15,700 mm、肉厚：34～35 mm</li> <li>・球殻材質：高張力鋼（RA60H）</li> <li>・設計容量：2,000 kl</li> <li>・支柱構造：標準型10本</li> <li>・内容物：LPG（プロパン）</li> <li>・常用圧力：0.98 MPa、常用温度：35℃</li> </ul> プレース <ul style="list-style-type: none"> <li>・外径：216.3 mm、肉厚：5.8 mm、</li> <li>・プレース材質：STK41</li> </ul>

ガス検知器が発報した。

15時18分頃：製造装置からのLPG受け入れの切り替え先の検討を開始した。

15時23分頃：払い出し緊急遮断弁、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受け入

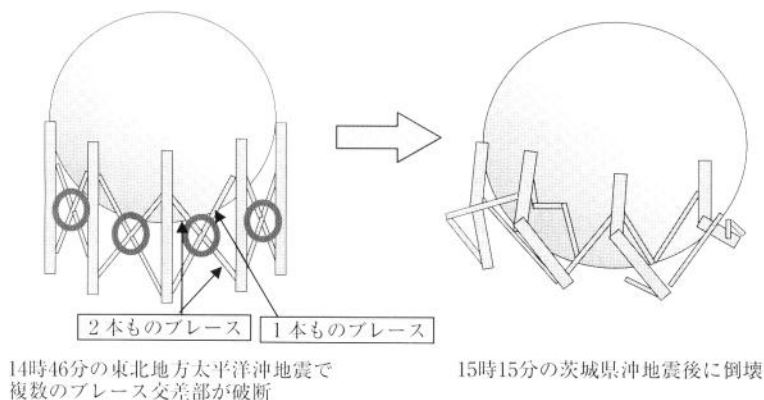


図3 貯槽の倒壊イメージ

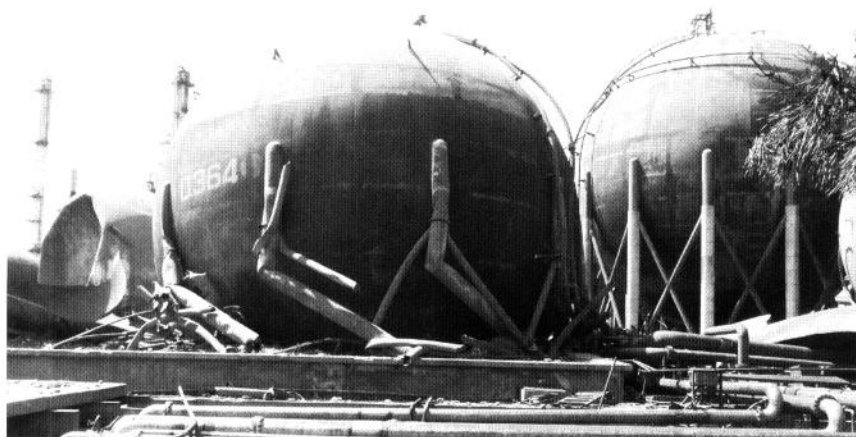


写真1 倒壊した球形貯槽（事故後撮影）

れの切り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漏えいを確認し、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漏えいを通報した。

15時47分頃：漏えい、拡散したLPGに着火し、364番貯槽付近で火災が発生した（写真2参照）。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いっぱいであり、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など、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。

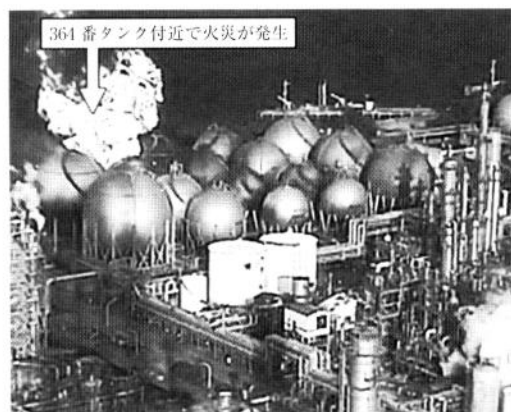


写真2 所内モニターにて撮影された火災の状況

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った。

貯槽の倒壊を確認してから鎮火までの経過を写真3に示す。また、貯槽の破裂により飛散した破片を写真4に、隣接するアスファルトタンクの損傷状況を写真5に示す。

被害状況を表2に示す。

#### 4. 事故原因

事故原因について、(1) 364番貯槽のブレース交差部の破断及び貯槽の倒壊、(2) 配管の破損及びLPGの漏えい、(3) 着火源及び爆発、延焼、(4) その他の特記事項（安全管理体制等）に分類して検討した。その結果を以下に示す。

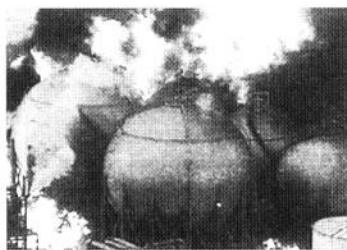
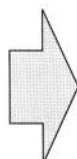
##### (1) 364番貯槽のブレース交差部の破断及び貯槽の倒壊

① 364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



3月11日15時15分頃 水張り中の貯槽が座屈



3月11日15時47分頃 火災発生直後



鎮火後の貯槽設備

3月11日17時03分頃  
374番貯槽の爆発の直前

写真3 事故の経過

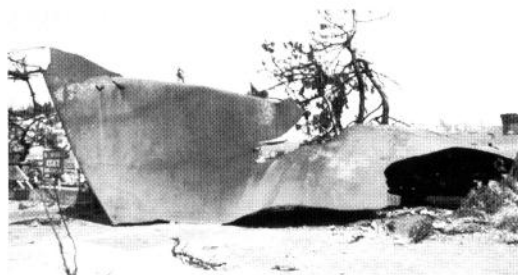


写真4 貯槽破裂後に飛散した破片

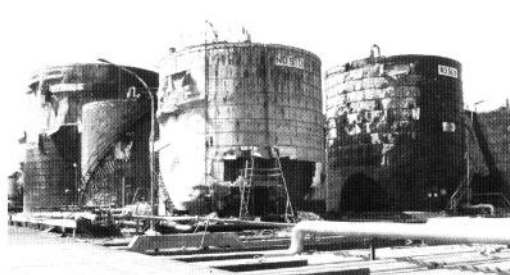


写真5 隣接するアスファルトタンクの損傷状況

表2 被害状況

被害の種類	内容
人的被害	負傷者6名（重傷者1名，軽傷者5名）
物的被害	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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，または焼損した。</li> <li>・球形貯槽の被害状況は，破裂4基，大きく移動4基，倒壊または倒壊寸前5基，自立していた状態は4基（うち1基は傾斜）であった。</li> <li>・隣接するアスファルトタンクが損傷した（写真5参照）。</li> <li>・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。</li> </ul>
社会的被害	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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1,000人に一時避難勧告（約14時間）が出された。</li> </ul>

日程度であるが、諸手続き、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、ブレース交差部が破断した（写真6及び写真7参照）。
- 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ほとんどないと推定された。

## (2) 配管の破損及びLPGの漏えい

- ①事故調査報告書\*\*では、事故後の配管の調査、配管応力解析、LPGの漏えい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の漏えいの原因となった配管の破損箇所として、3カ所（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えい、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まとめられた後、配管の破損箇所の詳細調査が実施され

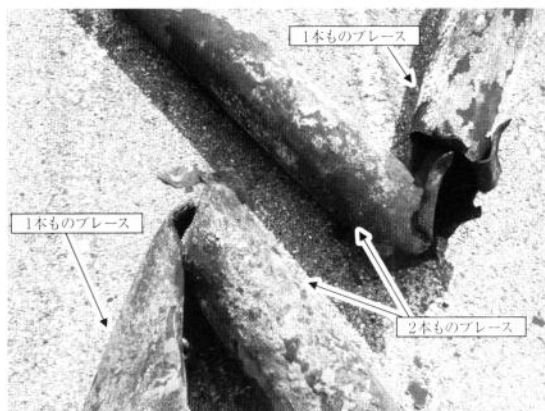


写真6 破断したブレース交差部 (その1)



写真7 破断したブレース交差部 (その2)

た。その結果、3カ所 (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または割れの様相はないことが判明した。すなわち、3カ所ともに、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。

\* 既存高圧ガス設備の耐震性向上対策について (球形貯槽・横置円筒形貯槽) 昭和57年4月1日付 57立局180号

\*\* 千葉製油所液化石油ガス出荷装置及び貯槽設備 火災・爆発事故調査報告書、2011年8月2日

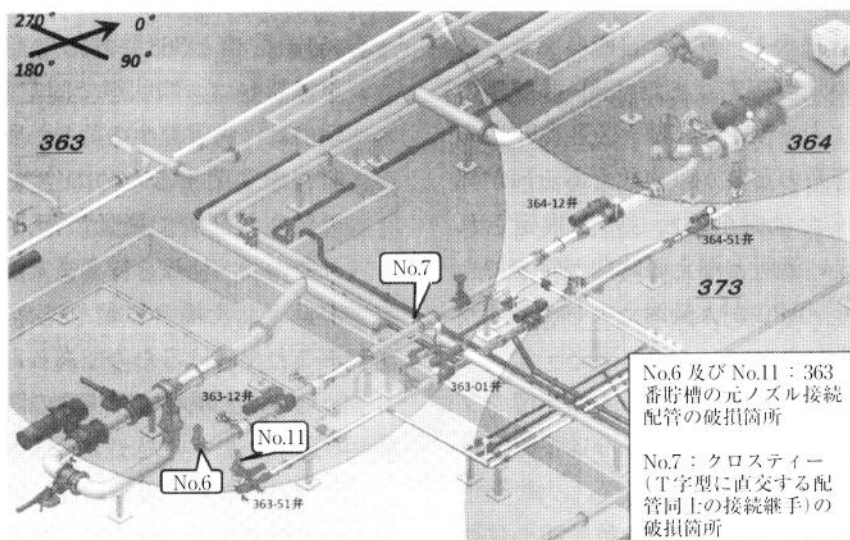


図4 363番貯槽, 364番貯槽周りの配管図

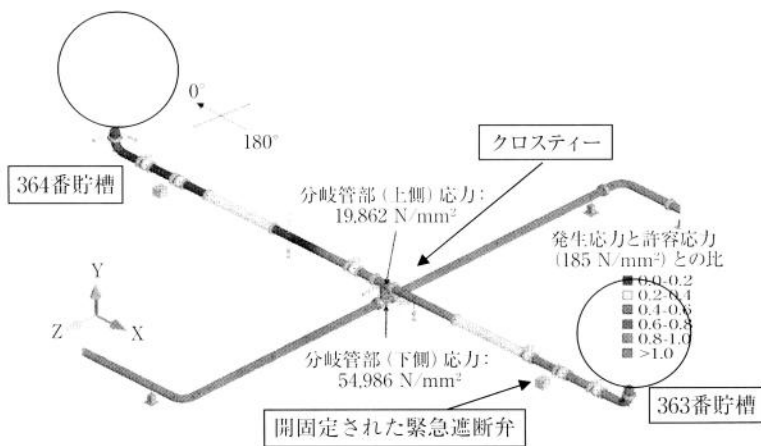


図5 破断箇所No.7の応力解析結果

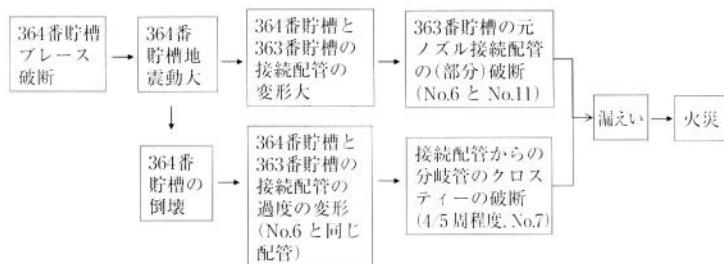


図6 配管の破損による漏えい, 火災のシナリオ (事故調査報告書)

- ③前記の結果から、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）が部分破断または完全破断したと推定される。漏えい箇所と漏えい時期が特定できなくとも、LPGが大量漏えいしたという結論は変わらない。
- ④前記の3カ所の破断は、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番貯槽の移動（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：写真8参照）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、地震発生の約1カ月前、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えいが確認されたので、補修を行うまでの間、空気圧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漏えいにより、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。

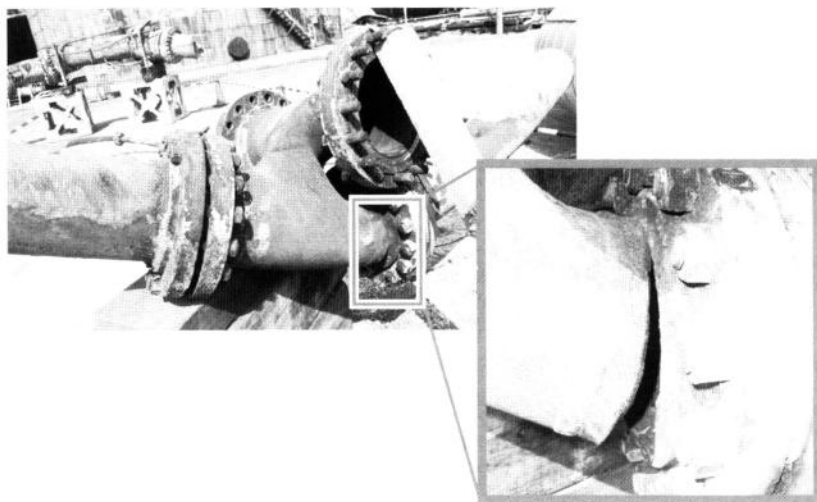


写真8 クロスティー





- 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（プール火災→ジェット火災）、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ジェット火災に変化した要因は、配管からの漏えいの継続、火災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、1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受け入れの切り替え先が検討されたが、漏えい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、また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、大規模漏えい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、現場に近づけないほどの大規模漏えい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。

## 5. 再発防止対策

事業所において、再発防止策が検討されたが、その結果について(1)設備面、(2)管理面に分類し、さらに(3)災害対応として機能した事例を追記し、以下に示す。

### (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の漏えいが発生しないように、配管、設備等の保護、緑切り、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、現行法令を満足すると共に、耐震性能に優れたプ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、火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）を事故後に導入した。

### (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共に、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共に、その背景にある潜在リスクを正しく認識できるように、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、担当部署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。
- ⑥緊急操作スイッチを常駐計器室で操作で



きるようにするなど、緊急操作に係るシステムを再検討する。

### (3) 災害対応として機能した事例

- ①震災後、回線が混雑していたため、事業所内で携帯電話が使用できない状況であったため、所内連絡において無線機が役立った。
- ②火災時には、以前から委託契約を締結していた会社により、海上からの冷却散水が実施された。陸上での消火活動との連携が円滑に実施され、火災の拡大防止の一助となった。
- ③大規模災害であったが、日頃の訓練により、避難誘導を円滑に行うことができた。

## 6. おわりに

本事故から得られた教訓を以下に示す。

- ①事故後の検討の結果、銅管ブレースの交差部（溶接部）については、これまで考慮されていなかった応力を生ずることが明らかにされた。補強も視野に入れた、銅管ブレース構造の耐震性向上の検討が重要である。
- ②事故の発端は、貯槽の満水状態時に、大

きな地震が短時間に2回発生したことであり、極めてまれな状況であった。しかし、満水状態時に大地震が発生した場合におけるリスク、対処方法等については、事前に十分検討しておくべきであった。

- ③貯槽間の接続配管系は、複雑、かつ可とう性が低い状況であった。配管系については、可とう性の向上及び単純化が重要である。
- ④緊急遮断弁は、保安上極めて重要な設備である。有事の際に確実に作動する状態としておかなければならない。さらに、緊急時に操作する場合の判断基準、運用基準などの整備、共用も必要である。
- ⑤事業所では、これほどの大規模火災を想定していなかったが、大規模火災が発生した場合の火災拡大防止方法を改めて検証し、同様な事故に備えることが重要である。

なお、本資料には、平成23年度経済産業省委託事業の内容が含まれていることを申し添える。

佐野 尊（さの たける）

上田洋平（うえだ ようへい）

赤塚広隆（あかつか ひろたか）

小林英男（こばやし ひでお）