

デンカ株式会社青海工場
クロロプレンモノマー製造設備
事故調査 最終報告書

2024年1月11日

デンカ株式会社青海工場 クロロプレンモノマー製造設備
事故調査委員会

目 次

1. 目的	01
2. 事故原因調査	
2-1. 本委員会の体制	01
2-2. 事故原因調査の体制	02
3. 事故概要	
3-1. 事故の発生状況	03
3-2. 5MC プラントの設備及び事故の発生場所の状況	04
3-3. 事故の発生状況の詳細	05
3-4. 配管の破裂状況	06
3-5. 破裂した配管材の分析結果	07
3-6. 配管内壁のスケール（事故調査で爆発物質と特定）付着状況	08
4. 事故の直接原因	
4-1. 調査結果のポイント	10
4-2. 爆発物質の特定	10
4-3. 爆発物質の危険性評価結果	14
4-4. 爆発物質の生成メカニズム	16
4-5. 窒素流入による爆発物質の乾燥化	17
4-6. 爆発物質の結論	18
4-7. 着火源の特定と爆発のメカニズム	19
4-8. 事故に至るシナリオ等	23
5. 事故の背景要因（間接的要因）	
5-1. 自社のインシデント、他社の類似事故情報の活用不十分	25
5-2. スケール増加要因の追究不十分	25
5-3. 工事協力会社との連携不十分	26
6. 再発防止策	
6-1. 再発防止のための基本的な考え方	27
6-2. 第一段階	27
6-3. 第二段階	28

6-4. 協力会社の安全管理	28
7. 全社的な安全管理の強化	
7-1. リスクアセスメントの質的向上	30
7-2. 工事安全管理	30
7-3. 安全保安教育	31
7-4. 協力会社及びデンカ社内に対する安全監査	31
7-5. 安全の日	32
8. おわりに	33

添付資料 1～8 (4. 事故の直接原因に係る補足)

添付資料 9 (6. 再発防止策に係る補足)

添付資料 10 (7. 全社的な安全管理の強化に係る進捗／今後の予定)

1. 目的

デンカ株式会社（以下「デンカ」という。）の新潟県糸魚川市内にある青海工場（以下「青海工場」という。）において、2023年6月14日にクロロプレンモノマー¹製造設備の配管破裂事故（以下「事故」という。）が発生した。この事故を受けて、デンカは、関係当局の調査に全面的に協力するとともに、社内での事故原因等の調査検討を行ってきたところ、より専門的な調査による徹底した事故原因の究明及び再発防止策の策定を目的として、同年7月11日、社外の有識者及び専門家を招聘して、事故調査委員会（以下「本委員会」という。）を設置した。これまで本委員会では9回にわたり会議を開催し、事故原因の究明を行ってきたが、今般、事故の直接原因と背景要因を特定するとともに、その原因と要因に対する再発防止対策がまとまったため、最終報告書として報告する。

2. 事故原因調査

2-1. 本委員会の体制

(1) 体制

本委員会は、社外有識者及び専門家として社外委員4名、並びに社内委員4名の8名を事故調査委員として事故の調査に当たった。なお、本委員会の事務局は5名とした。

本委員会の体制は、以下のとおりである。

【社外委員】

- ・中村 昌允委員長 一般社団法人京葉人材育成会 代表理事・会長
東京大学 工学系研究科 非常勤講師
- ・鈴木 和彦 岡山大学 名誉教授
- ・竹中 克彦 長岡技術科学大学 技学研究院 物質生物系 教授
- ・藤田 政次 藤田技術安全コンサルタント事務所 代表

【社内委員】

- ・高橋 和男 代表取締役 専務執行役員 技術統括、コンプライアンス担当
- ・石田 郁雄 取締役 常務執行役員 経営企画部、人財戦略部、コーポレートコミュニケーション部 担当
- ・渡辺 健 執行役員 総務部、法務部、内部統制部、秘書部 担当
- ・渡邊 祥二郎 常勤顧問 事故災害対応

【事務局】

- ・持田 宗春 技術統括補佐
- ・山本 広記 環境保安部長
- ・湯舟 和之 生産・技術部長
- ・渡邊 道明 法務部長
- ・前川 博昭 環境保安部員

¹ クロロプレンモノマーとは、クロロプレンゴムの原料となる化学物質である。

(2) 本委員会の開催状況

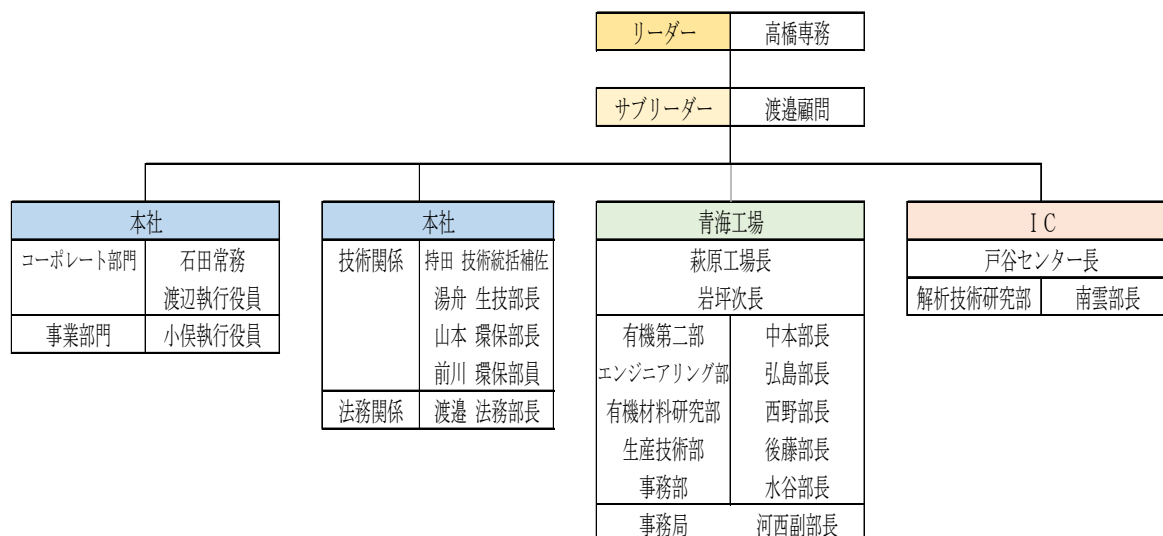
本委員会の開催状況は、現地視察（第1回委員会）を含めて、以下のとおりである。

	開催日	開催場所
第1回委員会	2023年7月17日（月）	青海工場（Web 併用）
第2回委員会	2023年8月17日（木）	本社（Web 併用）
臨時委員会	2023年8月23日（水）	本社（Web 併用）
第3回委員会	2023年9月22日（金）	本社（Web 併用）
第4回委員会	2023年10月8日（日）	本社（Web 併用）
臨時委員会	2023年11月2日（木）	本社（Web 併用）
第5回委員会	2023年11月18日（土）	本社（Web 併用）
臨時委員会	2023年12月1日（金）	本社（Web 併用）
第6回委員会（最終）	2023年12月19日（火）	本社（Web 併用）

2-2. 事故原因調査の体制

デンカは、事故の原因調査のため、各種の調査・検証や実験等を行うべく、社内において、以下の事故原因究明チームを設置し、本委員会の指示・指導の下で事故の調査を進めた。

【事故原因究明チーム】



3. 事故概要

3-1. 事故の発生状況

事故は、2023年6月14日、デンカの青海工場田海地区工場クロロブレンモノマー製造設備において、クロロブレンモノマー移送配管の一部更新（新規製作・取替）工事に際し、工事の協力会社がセーバーソー（電動のこぎり）で対象配管を切断中にその約2.9m先の配管が破裂し、作業していた協力会社の従業員3名が被災して、1名が死亡し、2名が負傷したものである。

工事は、クロロブレンモノマーの合成プラント（設備）内のタンクから別の場所にあるタンクヤードへの移送配管において、一部の配管内壁に付着しているスケール（付着物）を洗浄しやすくするために、デンカが配管の更新工事を建設会社（以下「工事元請会社」という。）に発注したものである。工事の実際の作業は、工事元請会社からさらに発注を受けた施工会社（以下「工事施工会社」という。）が行っており、事故は、工事施工会社従業員が、工事における既設配管の取替作業を実施した際に発生した。

事故及びその発生の経緯の詳細は、以下のとおりである。

- ① 日時 : 2023年6月14日（水） 午前9時5分頃
- ② 場所 : 有機第二部クロロブレン第一課
クロロブレンモノマー製造設備 5MC プラント（危険物製造所）²（以下「5MC プラント」という。）
- ③ 被災状況 : 工事施工会社従業員 1名死亡、2名負傷

<事故発生の経緯>

- ・デンカにおいて、2023年6月13日から同月16日までの4日間、5MCプラントを計画停止し、整備とクリーニング作業を計画した。

- ・6月13日
（午前）

- 9:00 5MCプラント内の5C工程³の精製系を停止

- 10:00頃 5C工程内タンクから精CP⁴ 集約タンクへの移送配管の液抜き処置開始

- 14:00頃 移送配管のクロロブレンモノマーの液切れを確認し、窒素にて配管の置換を実施

- 15:00頃 配管の水洗開始（5C 精CP輸送ポンプ⁵吐出～4C タンクヤード⁶ヘッダー）

- ・6月14日
（午前）

- 4:00頃 配管解体前準備の為、水洗を停止し、ドライ窒素にて水切置換開始

- 6:30頃 配管水切り終了し、窒素置換を停止

- 8:40頃 デンカから工事元請会社へ配管交換作業許可証を発行

- 9:00頃 工事元請会社・工事施工会社が現地の作業前ミーティング実施

² 5MC とは、デンカにおいて、5 番目に建設された最も新しいクロロブレンモノマー合成プラント（2009 年に操業開始）である。なお、MC とは、M 工程及び C 工程を指し、M 工程とは、アセチレンの 2 量化によりモノビニルアセチレン（MVA）を合成する工程である。C 工程については、以下の脚注 3 を参照。

³ C 工程とは、モノビニルアセチレンへの塩酸の付加反応によりクロロブレンモノマー（CP）を合成する工程。逐次反応により副生するジクロロブテン（DCB）を、後工程で除去している。

⁴ CP とは、クロロブレンモノマーのことをいう。以下同じ。

その後、工事施工会社従業員が5C工程内タンクヤード内にて更新する配管の
取り外し作業を開始

配管の両端のフランジを開放

配管をラックから取り出すために、配管の中央付近で切断に着手

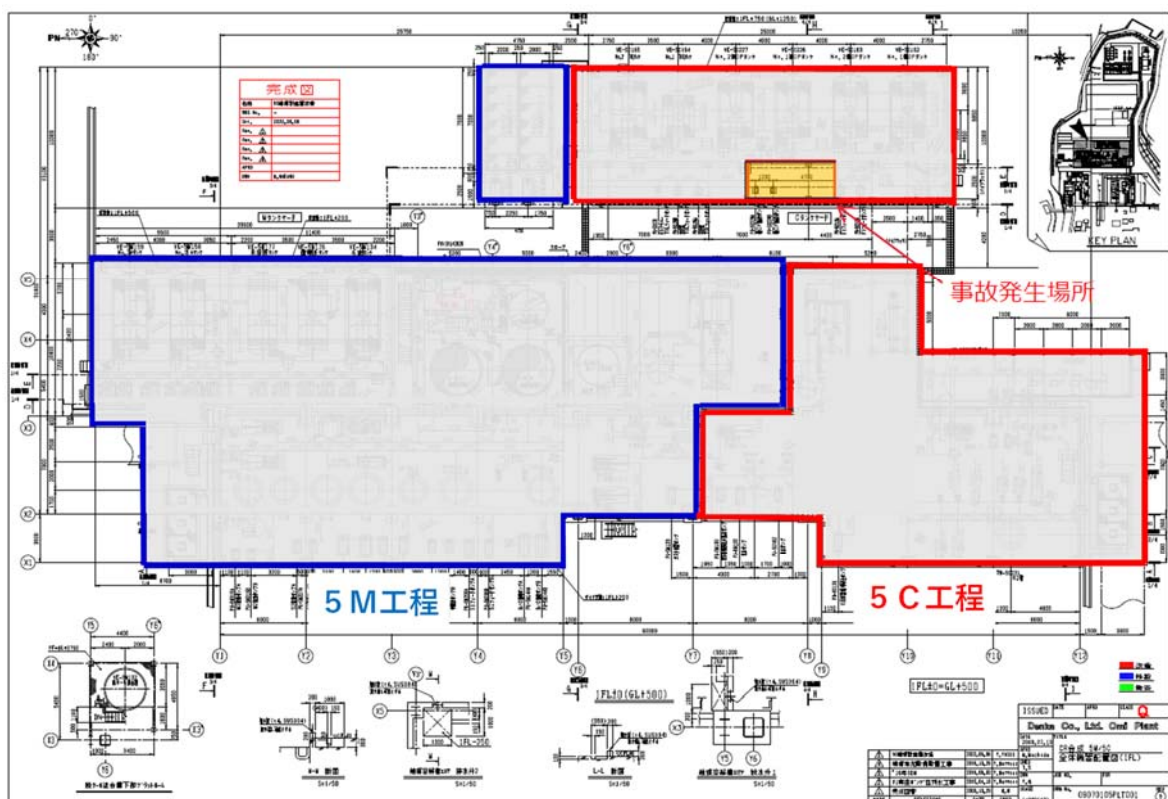
工事施工会社従業員のうち、1名が脚立上で配管を支え、1名がラック上でセーバーソー（電動のこぎり）を使用、1名が歩廊上で監督

9:05頃 配管破裂（爆発）が発生（事故の発生）

3-2. 5MC プラントの設備及び事故の発生場所の状況

事故が発生した 5MC プラントの平面配置図は、以下の図 1 のとおりである。

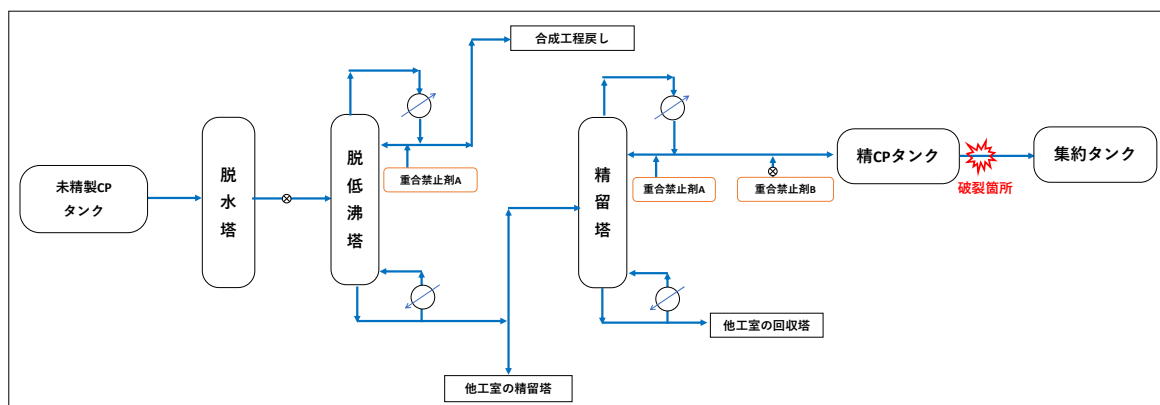
【図 1. 5MC プラント 1 階 平面配置図】



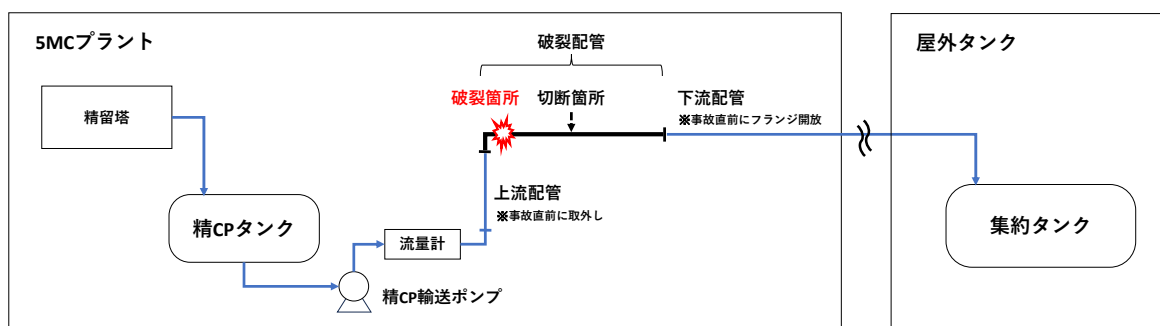
事故が発生した場所周辺の精製系のフロー図は、図 2、3 のとおりである。

5C 合成系で得られた未精製 CP を脱水、脱低沸（CP よりも沸点が低い物質を除去）した後、さらに精留塔で高沸分（CP よりも沸点が高い物質）を除去することで精 CP が得られる。この得られた精 CP は、5MC プラント内にある精 CP タンクで受け、その後、集約タンクへ移液し、後工程（重合プラント）へ供給される。

【図 2. 5C 工程 精製系のフロー図】



【図 3. 破裂箇所周辺の詳細なフロー図】



3-3. 事故の発生状況の詳細

事故の発生状況の詳細は、以下のとおりである。

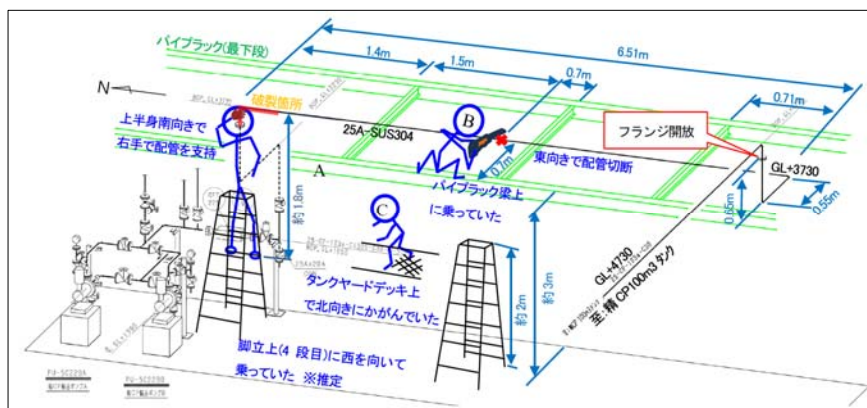
まず、工事において取り替える配管は約 8m あり、これを取り外すために、工事施工会社従業員が、両端のフランジを外した。

次いで、配管の直管部分の中心辺りを同社 B 従業員がセーバーソーで切断を開始した。同社 A 従業員は、配管のうち、切断箇所から約 2.9m 離れた位置で、エルボ部手前を手で支えていた。同社 C 従業員は A・B 従業員の作業の監督を奥のタンクヤード歩廊上で行っていた。

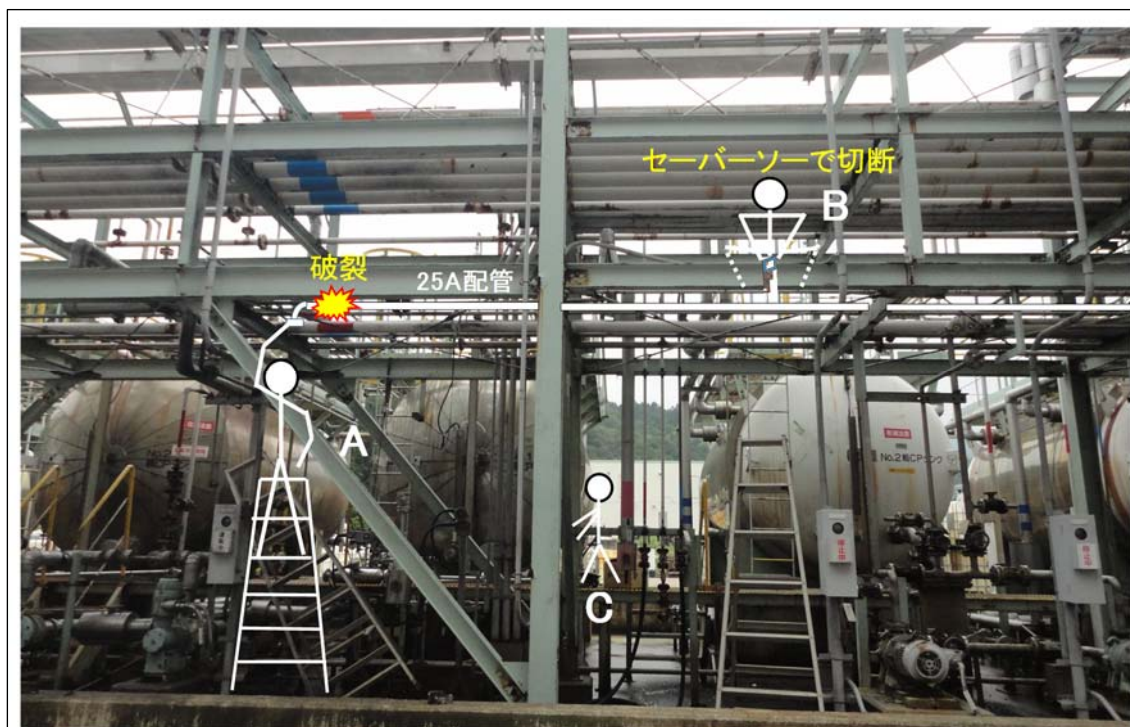
そして、B 従業員がセーバーソーで配管の切断を開始して間もなく、A 従業員が手で支えていたエルボ部手前付近で配管破裂が発生し、A 従業員死亡、B、C 従業員が負傷した。

事故発生時における被災した上記従業員 3 名の位置状況は、図 4 及び添付写真のとおりである。

【図 4. 事故発生時における被災した従業員 3 名の位置状況】



【添付写真．事故発生時における被災した従業員 3 名の位置状況】



3-4. 配管の破裂状況

事故で破裂した配管の材質・製品は、SUS304TP-A、sch10S、25A であり、長さ約 8m のものである。事故後、配管の材質は正常であることを確認した。

図 5 は破裂（爆発）後の配管の写真であり、破裂の際の爆発力により配管が曲がっている事が分かる。

図 6 は配管のうちセーバーソーの切断箇所の写真である。切込みが配管の内面に達した辺りで、エルボ部手前での配管破裂（爆発）が発生したと推定される。図 5 の緑色の網のかかっているところが配管破裂箇所である。図 6 にみられるように、切断箇所は配管が破裂していなかった。

【図 5. 破裂配管】

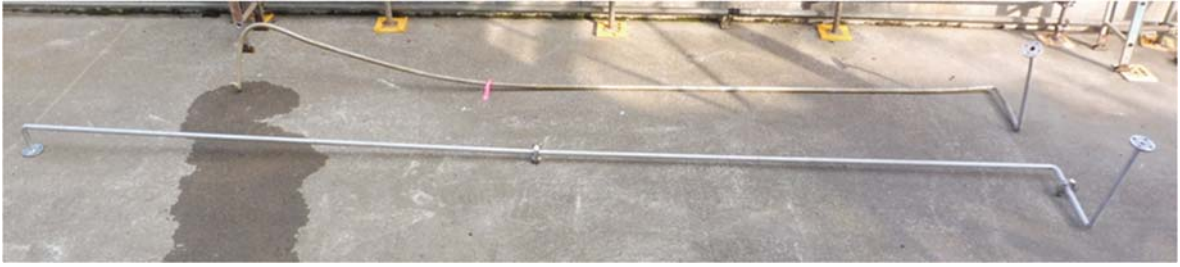


【図 6. セーバーソーでの切断箇所】



図 7 は、配管（図 7 のうち上の配管）及び工事で更新予定だった配管（図 7 のうち下の配管）の写真である。なお、図 7 のうち、配管におけるピンクテープの箇所がセーバーソーでの切断箇所である。

【図 7. 配管及び工事で更新予定だった配管】



事故における配管の破裂は、セーバーソーによる切り込み箇所から約 2.9m 上流側にあるエルボ部付近で発生し、破裂した破片は半径最大約 25m の範囲に飛散した。

図 8 には事故後に回収できた破裂配管の破片の写真を示す。事故の配管破裂は、配管のうち、写真の右にあるフランジ付きエルボ部からセーバーソー切断箇所に向かって約 65cm の直管配管が破裂したこと（損失）が判明した。

配管の損失（破裂）長さは実測の結果 64.5cm、回収した破片の合計重量は 878.5 g、健全な配管重量は 64.5cm で 1,406 g のため、回収できた破片は全体の 62.5%であり、全体の 37.5%の破片が細かく破砕されているので回収できなかった。

【図 8. 破裂した配管の破片】



3-5. 破裂した配管材の分析結果

破裂した配管について、材料検査会社を用いて詳細分析を行った。その結果、以下のことが判った。

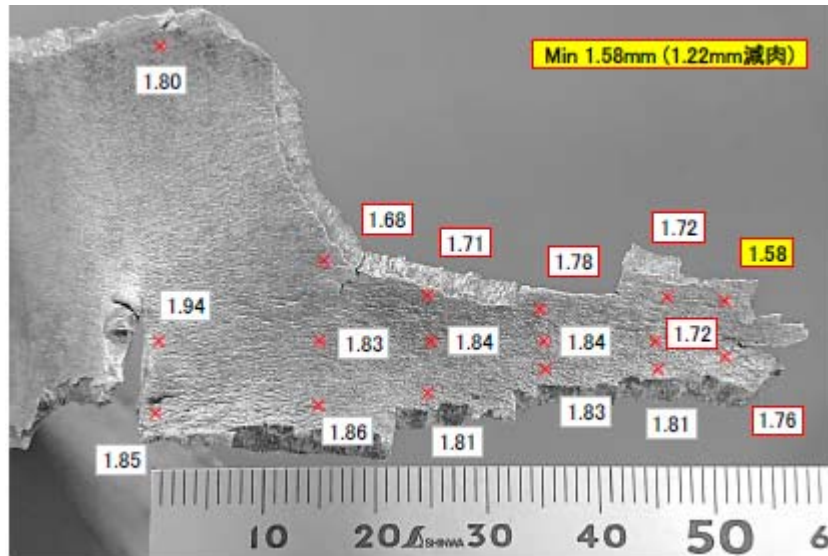
- ① 配管の成分分析の結果、JIS G3459 の SUS304TP 材の規格を全て満足する正常な組成であった。フランジ部近傍の配管の硬度 Hv も測定したが、Hv=145～155 で SUS304 の標準の硬さ (Hv $\leq$ 200) の範囲内であった。またミクロ組織はオーステナイト組織を呈しており、配管材料としては問題無いことを確認した。
- ② 溶接線の状態について確認したが、異状は認められず、溶接不良や腐食が無いことを確認した。
- ③ SEM(Scanning Electron Microscope)による破片の破面観察を行った結果、全域で延性破壊の特徴であるディンプル破面⁵が観察された。

⁵ 延性破壊が起きる場合、破面の周辺に塑性変形をともしう微小な多数のくぼみが観察され、これをディンプル破面と呼ぶ。

④ フランジ部、破片等の肉厚を測定した結果、公称肉厚 2.8mm に対して、以下の通りであった。

- ・フランジ部（健全部） 平均値 2.74 mm（規格内）
- ・破片 平均値 1.97 mm（最小値 1.58mm）

【図 8A. 破裂破片の肉厚測定】



これらの結果より、配管は JIS に規定された正常な材料であるが、爆発により配管が急激に膨張し、破断に至ったと推定される。

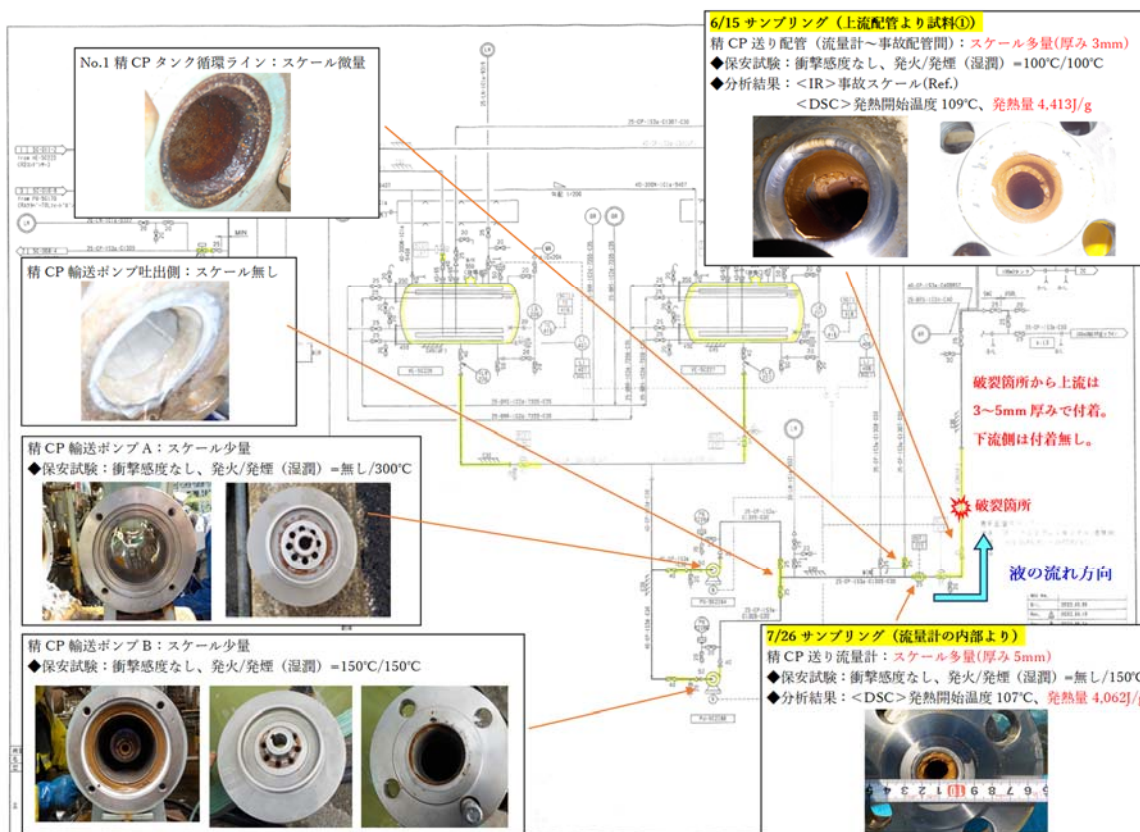
3-6. 配管内壁のスケール（事故調査で爆発物質と特定）付着状況

4-2 項で後述するとおり、事故の原因調査の結果、配管の破裂を惹起した爆発物質として、配管内壁に付着していたスケール（以下「スケール」という。）が特定されているが、そのスケールの付着状況は以下のとおりである。

5MC プラントの精留塔のコンデンサーからスケールの付着が認められ、精 CP タンク抜出配管から事故が発生した場所の上流部までの間で配管内壁にスケールが薄く付着していることが確認された。スケールは黄土色をしており、配管内面には上流側（精 CP タンク側）ほど厚く付着していた。一方で、セーバーソーで切断した箇所から下流部では配管内壁には、スケールの付着は認められなかった。

精 CP タンクから配管付近における各箇所のスケールの付着状況は、図9のとおりである。

【図 9. 精 CP タンクから配管付近におけるスケールの付着状況】



事故の爆発後の配管の内部写真は、図 10 のとおりである。配管の中央部（セーバーソーの切断部を含む）から上流部（破裂したエルボ部付近）に向かっては、燃焼によって黒く変色した付着物が認められる。一方で、配管の中央部より下流部では、付着物が認められず、ステンレスの表面であった。

【図 10. 配管の内部観察】

<配管の上流部>



<配管の下流部>



4. 事故の直接原因

4-1. 調査結果のポイント

事故の原因調査により判明したポイントは以下のとおりであり、これらを 4-2 以降で詳述する。このうち、なぜ、爆発が、セーバーソー切断箇所ではなく、約 2.9m 離れたエルボ部で起きたのか、セーバーソー切断時の発熱がどのようにしてエルボ部の爆発につながったのかを解明することが調査において重要なポイントである。

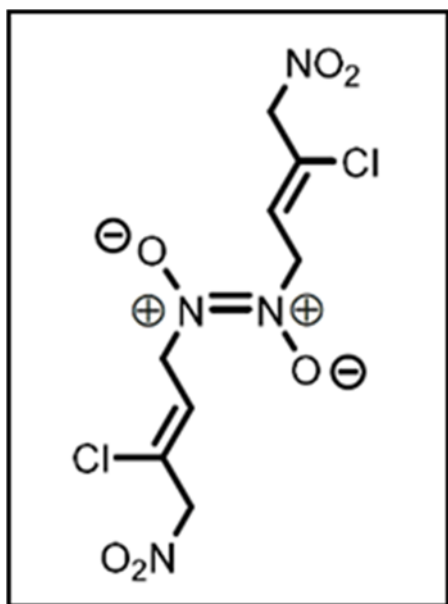
- ① スケール（付着物）は、CP-NO_x ダイマーと特定された。（下記 4-2 参照。）
- ② 配管のセーバーソーによる切断箇所は爆発しておらず、爆発箇所は、当該切断箇所から約 2.9m 離れたエルボ部付近で起きた（このエルボ部を支えていたと推察される工事施工会社従業員 A が被災）。
- ③ 当該爆発の着火源は、セーバーソーによる配管の切断時に発生した熱と推定する。
 - ・切断時にその刃先は 150℃以上に発熱した。
 - ・スケール（付着物）は、約 100℃になれば発火する。
- ④ 当該切断箇所から爆発箇所にかけての配管内にスケールが付着しており、爆発箇所において多く付着していたと推定されることから、約 2.9m 離れたエルボ部で配管破裂事故が発生した。

4-2. 爆発物質の特定

デンカの事故原因究明チームは、配管の破裂箇所より上流側にある配管の両端から 2023 年 6 月 15 日に採取したスケールを使用し、構造分析を実施した。

スケールに対する核磁気共鳴分析（¹H-NMR）（図 13）、赤外分光分析（IR）（図 14）、元素分析（下記表 1）の測定結果より、スケールの主成分は、「2-クロロ-1-ニトロ-4-ニトロソ-2-ブテン、ダイマー」（以下「CP-NO_x ダイマー」という。）と特定した。CP-NO_x ダイマーの構造式は、図 11 のとおりである。〔添付資料 1〕

【図 11. CP-NO_x ダイマーの構造式】



従来より、5C 工程において、事故のあった配管以外でスケールが生成する箇所はあり、そのスケールは、デンカ内ではクロロプレンモノマーに NOx が付加した物質と推定していたが、今回の事故調査で初めて、そのスケールが CP-NOx ダイマーであることが判った。

事故以前の認識	事故後、判明したこと
・スケールが何かは判っていなかった。	・ CP-NOx ダイマー (2-クロロ-1-ニトロ-4-ニトロソ-2-ブテン、ダイマー)

以下の検討により、スケールを CP-NOx ダイマーと特定した。

まず、スケールの試料を 2023 年 6 月 15 日に配管の破裂箇所の上流部より採取し（以下「試料①」という。）、また、破裂した配管より採取した（以下「試料②」という。）。試料①は、爆発の影響を受けていないサンプルであり、試料②は、爆発の影響を受けたサンプルである。試料①②の外観は、図 12 のとおりである。

試料①を使用して、核磁気共鳴分析（ $^1\text{H-NMR}$ ）（図 13）、赤外分光分析（IR）（図 14）、元素分析（下記表 1）を行った。なお、試料②は、爆発により燃焼して黒変（炭化）しているので、分析対象としなかった。

【図 12. スケールの試料①②の外観】

<試料①>



<試料②>



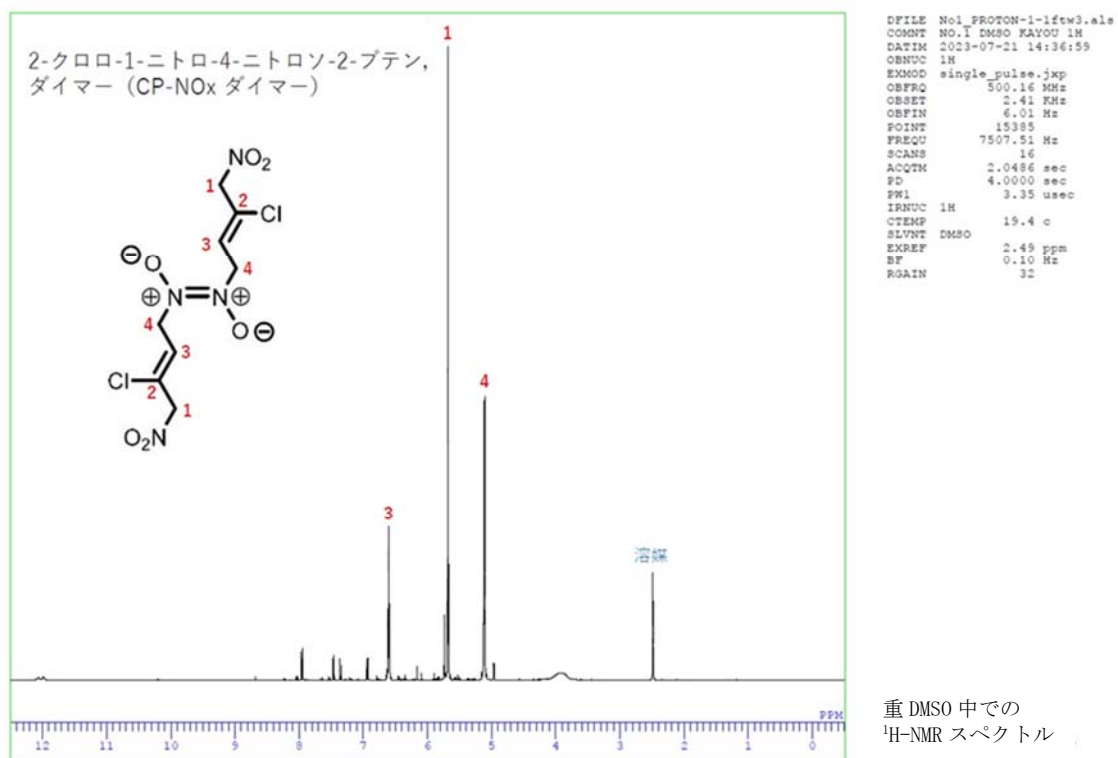
試料①につき、核磁気共鳴分析（ $^1\text{H-NMR}$ ）及び赤外分光分析（IR）を行い、その結果得られた $^1\text{H-NMR}$ スペクトルを図 13 に、IR スペクトルを図 14 に示す。

$^1\text{H-NMR}$ 分析によって、スケールには図 13 のピーク 1, 3, 4 が確認できたこと、IR スペクトルによって $-\text{NO}_2$ 基を含んでいることを確認できることより、スケールは CP-NOx ダイマーの可能性が高いことが判った。

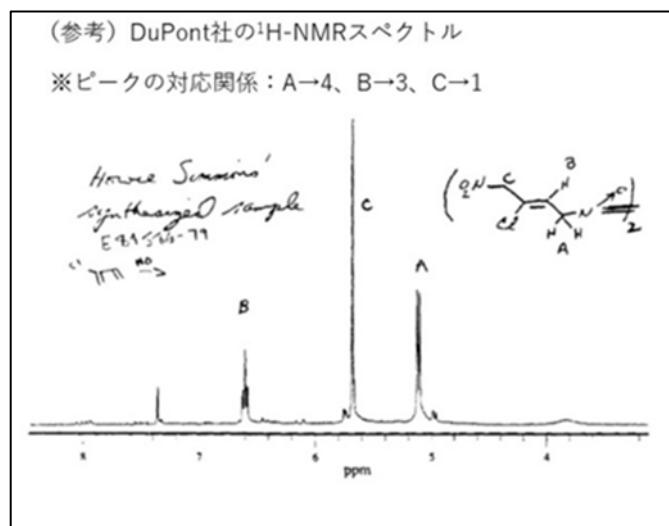
更に、スケール（試料①）の元素分析結果を行った結果、表 1 に示すように、CP-NOx ダイマーの化学構造式から計算される値とほぼ一致したので、爆発物質は、CP-NOx ダイマーと特定された。

なお、今回の配管に付着していたスケールの $^1\text{H-NMR}$ スペクトル、IR スペクトルは、事故後入手した DuPont 社の事故（4-3 項で後述）の原因物質である CP-NOx ダイマーの $^1\text{H-NMR}$ スペクトル、IR スペクトルと概略一致しており、事故の原因物質は、DuPont 社事故の原因物質と同様であったと考える。

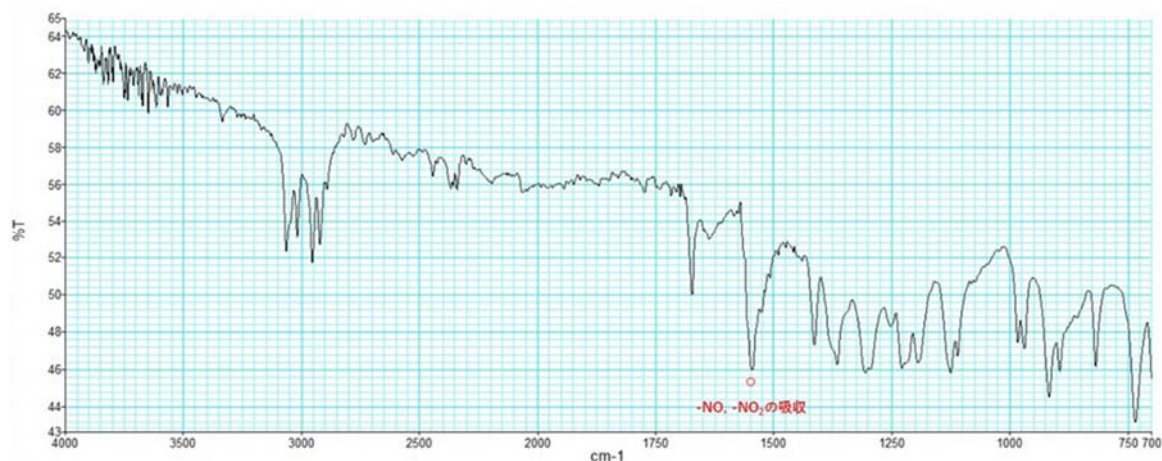
【図 13. 試料①の核磁気共鳴分析 (^1H -NMR) スペクトル】



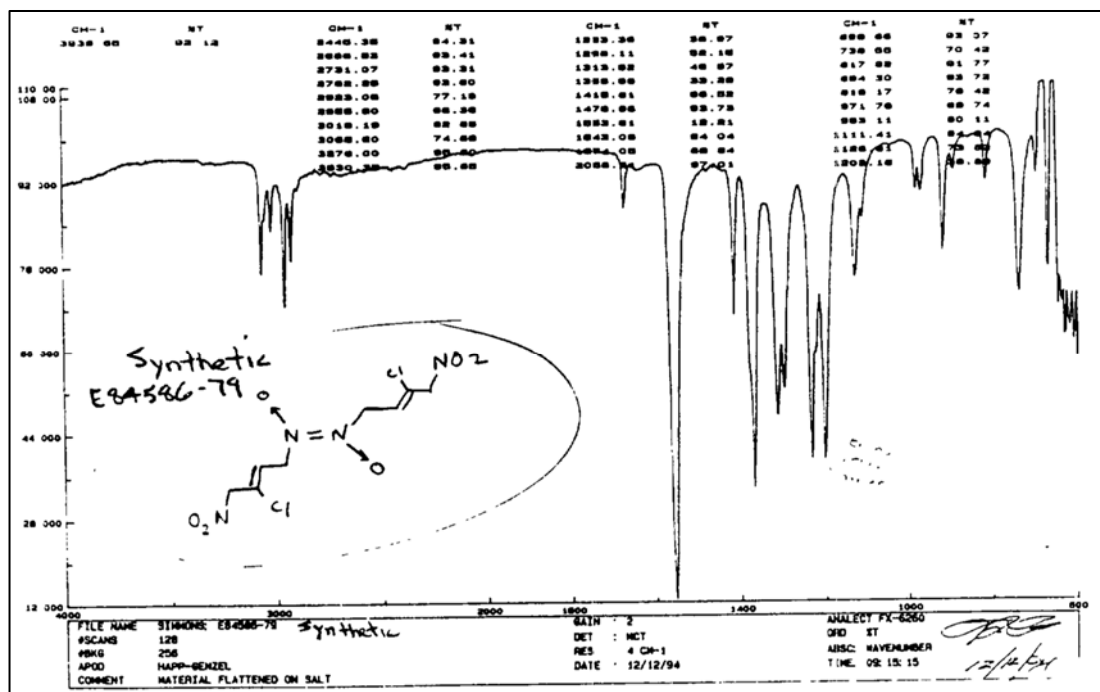
(参考 : DuPont 社の核磁気共鳴分析 (^1H -NMR) スペクトル)



【図 14. 試料①の赤外分光分析 (IR) スペクトル】



(参考 : DuPont 社の赤外分光分析 (IR) スペクトル)



【表 1. スケール試料①の元素分析の結果】

元素	単位	測定結果	CP-NO _x ダイマー 計算値
炭素 (C)	wt%	30.01	29.20
水素 (H)	wt%	3.01	3.06
窒素 (N)	wt%	16.37	17.02
硫黄 (S)	wt%	<0.1	—

4-3. 爆発物質の危険性評価結果

2023 年 7 月 26 日に配管破裂の上流部にある流量計の出口部より採取した試料を用いて、危険性評価として落つい感度試験及び摩擦感度試験を行った。それぞれの試験方法は、次のとおりである。

落つい感度試験：試料に重量 5kg の鉄槌を落として、爆発の有無を判定する。

JIS5 級 1/6 爆点⁶が 20cm 以上～30cm 未満

JIS8 級 1/6 爆点⁶が 50cm 以上

摩擦感度試験：試料に摩擦荷重を加えて、爆発の有無を判定する。

JIS6 級 1/6 爆点⁶が 16kgf 以上～36kgf 未満

JIS7 級 1/6 爆点⁶が 36kgf 以上

その結果、スケールは、湿潤状態と乾燥状態では危険性が異なることが判明した。

本報告書では、乾燥状態⁷、湿潤状態⁸を下記脚注のような状態と定義した。

スケールの危険性評価結果は、乾燥状態では落つい感度の JIS 等級は 5 級(意識的に強く叩くと爆発)、摩擦感度の JIS 等級は 6 級(注意すれば取扱い可)であったが、湿潤状態では落つい感度の JIS 等級は 8 級、摩擦感度の JIS 等級は 7 級であった。(スケールの落つい感度試験結果は表 2、摩擦感度試験結果は表 3 のとおりである。)

デンカでは、事故以前においてもスケールを湿潤状態にすれば安全に取り扱いできるとの経験的な認識はあったが、今回の調査によって、湿潤状態とすることで、定量的に落つい感度試験、摩擦感度試験の最も危険性が低い等級で、安全に取り扱えることが確認された。

[添付資料 2]

【表 2. スケールの落つい感度試験結果】

サンプル状態	湿潤（水分約 30%）	乾燥（水分 1%未満）
試験実施日	2023 年 8 月 28 日	2023 年 8 月 7 日
試験条件	温度 19℃、湿度 53%	温度 20℃、湿度 60%
試験結果	落高 50cm で 0/6	落高 30cm で 5/6、落高 20cm で 0/6
1/6 爆点	50cm 以上	20cm 以上 30cm 未満
JIS 等級(備考)	8 級	5 級（爆痕が認められた）

【表 3. スケールの摩擦感度試験結果】

サンプル状態	湿潤（水分約 30%）	乾燥（水分 1%未満）
試験実施日	2023 年 8 月 28 日	2023 年 8 月 7 日
試験条件	温度 19℃、湿度 51%	温度 20℃、湿度 50%
試験結果	荷重 36kgf で 0/6	荷重 36kgf で 3/6、荷重 16kgf で 0/6
1/6 爆点	36kgf 以上	16kgf 以上 36kgf 未満
JIS 等級	7 級	6 級（煙が認められた）

⁶ 1/6 爆点とは、連続 6 回試験を行い、1 回だけ爆発するか、または 1 回だけ爆発すると推定される高さ又は荷重を指す。落つい感度試験では、爆発、発煙、爆痕があった時に爆判定とし、摩擦感度試験では、爆発、発火、発煙があったときに爆判定とする。試験結果では爆判定の数が 5 であれば、5/6 と表す。

⁷ 乾燥状態とは、回収した事故スケールを窒素気流下で一昼夜静置して、乾燥後の水分 1%未満の状態

⁸ 湿潤状態とは、乾燥した事故スケール/蒸留水＝1/1（重量比）で混合し、葉さじにてかき混ぜ、30 分程度静置し、含水量は約 30%の状態。葉さじにてすくい取り、落つい摩擦感度試験を実施。

＜スケールの危険性に対する認識＞

事故以前の認識	事故後の危険性評価試験の結果
湿潤状態を保てば安全に取扱い出来る	湿潤状態と乾燥状態では危険性が異なり、湿潤状態では危険性評価結果は最低位で安全であるが、乾燥状態では危険性が増す。 ＜JIS の落つい感度と摩擦感度を定量評価＞ 【乾燥状態】 落つい 5 級（意識的に強く叩くと爆発） 摩 擦 6 級（注意すれば、取り扱い可） 【湿潤状態】 落つい 8 級（最も低位：安全） 摩 擦 7 級（最も低位：安全）

＜過去の事故情報＞

過去の事故情報を調べた結果、DuPont 社のクロロプレングム（CR）工場（米国ケンタッキー州ルイビルに所在。ただし、現存せず。）においても 1994 年に類似の事故が起きていた。

また、2001 年には、デンカの事故発生部門（但し、4C プラント）にて、インシデントが起きていた。

① 1994 年 DuPont 社事故

デンカは、1995 年頃、DuPont 社研究者から送付された書簡によりその事故の概要を知った。その書簡は、保安技術に関して同業関係者への参考情報として送付されたもので、そこでは、DuPont 社において配管破裂事故があり、その原因物質が CP-N0x ダイマーであることが記載されていた。

今回の事故発生後、DuPont 社事故の詳細を調べたところ、1995 年 8 月発行の Chemical and Engineering News において、DuPont 社の研究者からの速報として、CP-N0x ダイマーの危険性を警告する記事が掲載されていた。しかし、当時のデンカに送付された書簡や Chemical and Engineering News の記事からは、当該物質の構造や生成メカニズム等の詳細までは確認できず、今回のデンカでのプラントにおける配管内壁付着スケールの危険性を想定することは難しかった。

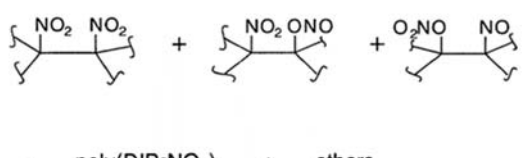
今回の配管破裂事故後、デンカは DuPont 社事故についてデンカパフォーマンスエラストマー社⁹に問い合わせを行い、当時の事故の詳細に関する報告書を取り寄せた。その報告書をもとに 1994 年の事故と今回の事故を比較した結果、重合禁止剤は異なっているが、今回の配管破裂事故の爆発物質が DuPont 社事故と同じ CP-N0x ダイマーであることが特定できた。（図 13、図 14）

表 4 に DuPont 社の事故とデンカ事故の比較を示す。

【表 4. DuPont 社の事故と今回のデンカ事故の比較】

	1994 年 DuPont 社のルイビル工場 精製モノマー移送タンク循環配管事故	2023 年 デンカの青海工場 クロロプレんモノマー移送配管事故
日時	1994 年 11 月 14 日	2023 年 6 月 14 日
場所	クロロプレんモノマータンクからの 循環ライン	クロロプレんモノマータンクからの 移送ライン

⁹ デンカは 2014 年に三井物産（株）との共同出資により米国にデンカパフォーマンスエラストマー社を設立し、同社は 2015 年に DuPont 社の CR 事業を譲り受けた。

発生状況	1 インチのステンレス配管 (Sch10, 316L) からのフランジ切断作業 (ポータブルのバンドソー使用) において配管が破裂した。	配管 (SUS304TP-A sch10S 25A×約 8m) をラックから出すため、セーバーソーにて配管を切断していたところ破裂した。
原因物質	2-クロロ-1-ニトロ-4-ニトロソ-2-ブテン、ダイマー	同左であることを特定。
DSC 測定	80℃ 急な立ち上がり、100℃ 強い発熱 発熱量 2,550J/g	発熱開始温度 108.5～109.2℃ 発熱量 4,413J/g (1.05TNT 当量)
重合禁止剤の構造	DIBN(diisobutylene nitrosoate)  + poly(DIB•NO _x) + others	重合禁止剤 A 重合禁止剤 B (R-NO) (R'-NO) 注)重合禁止剤 A、B ともに、分子内に -NO 基を有する。

- ・TNT換算で得られる質量をTNT当量というが、1 TNT換算トン=4.184×10⁹ J (DSC DuPont社とデンカのスケールの発熱量が異なっているのは、SC-DSCチャートにおけるベースラインの引き方の違いによるものと考える。
- ・表4にみるように、DuPont社とデンカは異なる種類の重合禁止剤を使用している。

②2001 年デンカのインシデント

デンカ青海工場では、2001 年にクロロプレンモノマーと NO_x の付加物と推察されるスケールが付着した配管が破裂したことがあった。これに関する『デンカクロロプレンの 50 年』の記載を下記に示す。

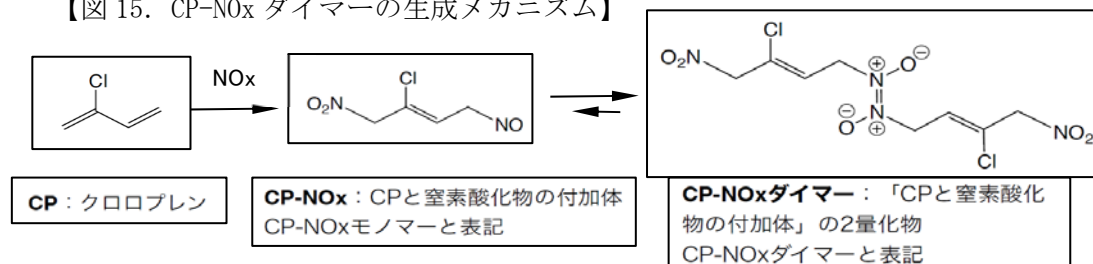
クロロプレンモノマー (CP) の安定剤 (重合禁止剤) として、窒素化合物を使用した場合、その分解生成物 NO_x が酸素の存在下、CP と付加物を作る。この付加物も爆発的に分解・発火する危険性を有している。
2001 年には、これが原因と思われる配管破損を経験した。

この事象は気相部でクロロプレンモノマー、NO ガス及び酸素が存在したことが発生原因であったことから、再発防止策としてクロロプレンモノマー蒸留塔のコンデンサー冷却、及び真空装置の気密管理を強化した。この結果、スケール類の生成・堆積を抑え込むことができ、この問題は解決したものと判断されていた。加えて、過去より、今回の事故が生じたクロロプレンモノマー移送配管のような液相部において、クロロプレンモノマーと NO_x の付加物が析出するといった事象がなかったこともあり、この情報を活用するには至らなかった。

4-4. 爆発物質の生成メカニズム

CP-NO_x ダイマーは、図 15 に示すように、クロロプレンモノマーと NO_x との反応によって生成した CP-NO_x モノマーを経由して生成する。なお、CP-NO_x ダイマーはクロロプレンモノマーに不溶であることから、スケールとして析出し配管内壁に付着した。

【図 15. CP-NO_x ダイマーの生成メカニズム】



DuPont 社が使用していた重合禁止剤 DIBN(diisobutylene nitrosoate)は、NO 及び NO₂ を発生するが、デンカが使用している重合禁止剤 A、B は NO を発生するものの NO₂ を発生しない。

そこで、デンカが使用している重合禁止剤 A、B によっても、CP-NO_x ダイマーが生成するかを実証実験した。表 5 に実証実験結果、添付写真に得られたスケールを示す。

重合禁止剤 A 及び B からは NO のみを発生するので、実証実験では重合禁止剤の代わりに所定量の NO ガスを吹き込んで実験を行った。条件①は NO ガスのみ（＝重合禁止剤のみ）、条件②と③は NO ガ스에酸素（空気）を吹き込んだ条件である（＝空気の漏れ込みを想定）。

実証実験の条件②、条件③で生成したスケールを FT-IR と ¹H-NMR により分析した結果、事故原因物質である CP-NO_x ダイマーと同一のピークとなる物質が認められた。

表 5 に示すように、CP-NO_x ダイマーは、NO ガスのみ（条件①）では生成しないが、酸素（空気）の混入（条件②、③）があれば生成することを確認できた。〔添付資料 3〕

また、条件③では条件②に対して、酸素量を 1/3 に減らしたところ、スケール生成量が約 1/5 に減量したことを目視により判断した。

【表 5. プラント情報及び実証実験結果】

	DuPont 社	実証実験		
		条件①	条件②	条件③
重合禁止剤	DIBN	重合禁止剤 A, B	重合禁止剤 A, B	重合禁止剤 A, B
重合禁止剤 起因 NO _x	NO、NO ₂	NO ガス	NO ガス	NO ガス
空気(酸素)	—	無し	添加（NO ガスの約 3 割が NO ₂ になる量）	添加（NO ガスの約 1 割が NO ₂ になる量）
実験結果	—	スケール 生成なし	黄土色固体状 スケール生成	黄土色固体状 条件②の 1/5 に減量

【添付写真. 条件②で生成したスケールの写真】



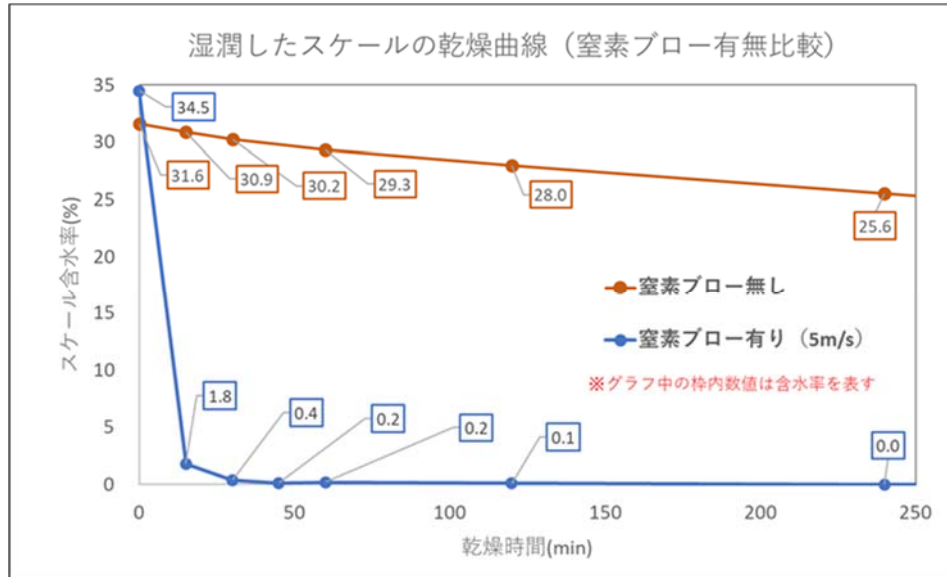
4-5. 窒素流入による爆発物質の乾燥化

配管において、当日未明までに、配管水洗によりスケール（CP-NO_x ダイマー）を湿潤状態にした上、湿潤下における有機物の液だれによる薬傷(皮膚の炎症)を防止するため、ドライ窒素を流入させていた。事故以前は、スケール類は、一旦湿潤状態にすれば、湿潤状態が維持できていると考えられていた。

事故当日のドライ窒素ガスの流入条件(窒素流速 5m/s)に合わせた実証実験の結果、湿潤状態にしたスケールにドライ窒素ガスを流入すると、短時間で乾燥することが判明した。実証実験の結果は、図 16 の通りである。図中の青字は、水分含有量を示す。

5MC プラントの配管内壁に付着していた CP-N_{0x} ダイマーは、当日未明までのドライ窒素ガス流入によって乾燥され、その危険性が著しく増したと考えられる。〔添付資料 4〕

【図 16. 窒素ガス流入によるスケールの乾燥】



4-6. 爆発物質の結論

以上の爆発物質に対する調査から、当該爆発物質につき判明した内容は以下の通りである。

① 爆発物質は、CP-N_{0x} ダイマーである。

爆発物質(スケール)は、クロロプレンモノマーと N_{0x} の付加物の二量体である CP-N_{0x} ダイマーと特定された。

② CP-N_{0x} ダイマーの危険性

CP-N_{0x} ダイマーは乾燥することによって、著しく危険性が増加する。

＜乾燥状態での危険性＞

落つい感度 JIS 等級 5 級(意識的に強く叩くと爆発)

摩擦感度 JIS 等級 6 級(注意すれば取扱い可)

関係者は、事故発生以前、5MC プラントの配管に付着していたスケールを湿潤状態にしておけば安全に取り扱えると認識しており、協力会社にも情報共有されていた。スケールが CP-N_{0x} ダイマーであること及びその危険性は、事故原因調査で初めて判明した。

③ CP-N_{0x} ダイマーの生成メカニズム

DuPont 社が使用していた重合禁止剤は NO と N₀₂ を発生する。デンカが使用していた重合禁止剤は NO しか発生しないが、NO 単独でも酸素が共存すると、CP-N_{0x} ダイマーが生成することが確認できた。

④ 湿潤した CP-N_{0x} ダイマーの乾燥

水洗による液だれによる薬傷を防止するために、湿潤したスケールに対し、ドライ窒素を流入すると、短時間で乾燥状態になる。(事故以前は、スケール類は、一旦湿潤状態にすれば、湿潤状態が維持されていると認識されていた。)

5MC プラントの配管内壁に付着していた CP-N0x ダイマーが、このドライ窒素流入によって乾燥され、危険性が増した。

4-7. 着火源の特定と爆発のメカニズム

燃焼には、①可燃物、②着火源、③酸素が必要である。事故において、可燃物である CP-N0x ダイマーの着火原因について検討し、爆発のメカニズムを明らかにする。

(1) セーバーソー切断時の刃先の温度（実証実験結果）

実証実験の結果、セーバーソー切断時に刃先が発熱し、刃先が中古品でも新品でも CP-N0x ダイマーの発火温度である 100℃以上の温度に達することが判明した。(図 17、表 6 参照) 事故時と同型のセーバーソーを用いた実証試験結果のうち、表 6 は、事故発生時の切断による切込み長さ (22 mm) におけるセーバーソーの刃先の温度を示している。

図 17 は、そのセーバーソーの刃先温度の推移を示す。[添付資料 5]

【表 6. セーバーソーの刃先温度の実証試験結果】

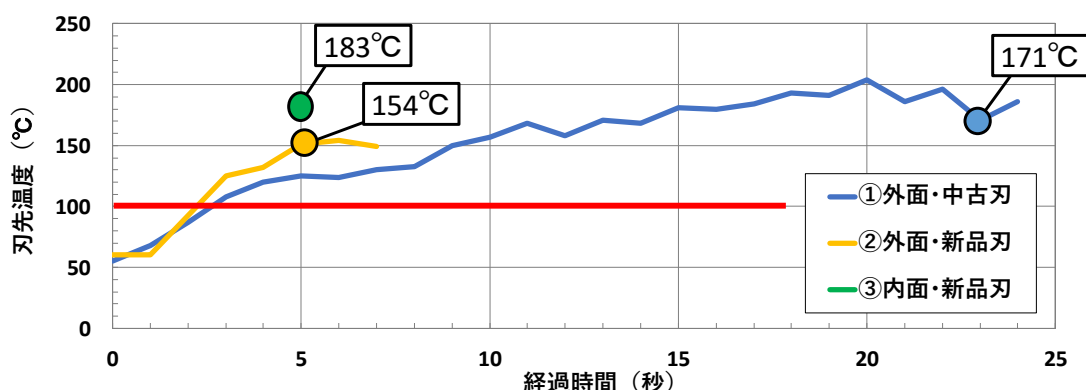
No.	刃先测温箇所	替刃	22mm 切込長さ(※1)まで切断に要した時間	22mm 切込長さ(※1)到達時の刃先温度
1	外面(※2)	中古	23 秒	171℃
2	外面(※2)	新品	5.1 秒	154℃
3	内面(※3)	新品	4.7 秒	183℃

※1 22 mm：配管破裂時の配管切込み長さ

※2 外面：配管の外から刃先の温度を測定

※3 内面：貫通した刃先の温度を配管内部から測定

【図 17. セーバーソーの刃先温度の推移】



※上図中①は、中古刃で切断能力が低いため、所定の切り込み長さに達するまで時間が掛かった。

※上図中③は、切断によって配管内面に刃先が直接出てきたため、高温を示した。

スケールの試料①につき、熱分析試験（発火テスト）を行ったところ、デンカ社内法による危険性の評価では、約 100℃で発火する事を確認した。一方で、社外に依頼した熱分析試

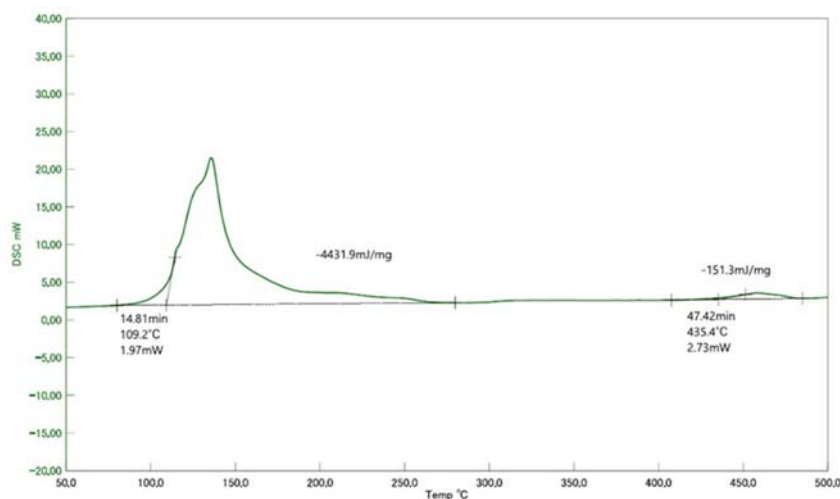
験（密閉型セルを用いた示差熱分析：SC-DSC）測定では約 109℃が発熱開始温度である。しかし、SC-DSC では SC-DSC の測定チャートのピークの接線とベースラインとの交点を発熱温度としているので 109℃であるが、発熱は、測定チャートにみられるように 100℃以下の温度から開始されているので、発火温度は約 100℃とした。

SC-DSC から求めた発熱量は約 4000 から 4700J/g で、TNT¹⁰に匹敵する発熱量であった。この社外の熱分析試験結果を表 7 に示す。

【表 7. スケール（試料①）の熱分析試験結果（発火テスト）】

試料 No.	発熱開始温度(℃)	発熱量(J/g)
N=1	109.2	4,432
N=2	108.7	4,078
N=3	108.5	4,728

（試料 N=1 の SC-DSC 測定チャート）



（2）切断部の発熱がエルボ部付近での爆発の着火源となり得ること

配管破裂は、セーバーソー切断部で火炎が発生し、それがエルボ部付近（破裂箇所）まで伝播したことによって起きたものと考えられる。

- ① セーバーソー切断箇所は配管破裂の中心部（エルボ部付近）と約 2.9m 離れている。
- ② 切断部で配管の破裂は起きていない。
- ③ エルボ部付近は激しく破裂している。

そこで、配管切断時に生じた発熱がエルボ部付近（破裂箇所）に伝播したメカニズムを明らかにするため、株式会社爆発研究所¹¹に燃焼伝播作用のシミュレーションを依頼した。

（2）－1. シミュレーションの結果

シミュレーションの結果、表 8 に示すように、スケールの厚みが 0.37mm 以下では配

¹⁰ TNT はトリニトロトルエンのことで、TNT の爆発で放出されるエネルギーは一般的に 4,184 J/g である。

¹¹ 株式会社爆発研究所は、爆発衝撃解析に関する豊富な知識と経験を基に数値解析、可視化シミュレーションを行っており、各種の爆発事故のシミュレーションを行った実績がある。

管は破裂しないことと、0.75 mmでは破裂することが判った。

(なお、0.37～0.75mmの間に破裂しない限界厚みがあると考えられる。)

切断箇所のスケールの付着厚みは、図 18 に示すように 0.4 mmと推定され、配管破裂に至らなかった。一方、エルボ部分の付着量は 1.2～1.6mm と推定され、配管破裂に至ったと考える。

セーバーソーによる切断によって生じた熱によって火炎が発生し、急速な燃焼（爆燃現象）が起き、それがエルボ部に到達して配管破裂に至ったと推定する。[添付資料 6]

【表 8. シミュレーションの結果】

スケールの厚み(mm)	エルボ近傍の配管に発生する相当応力(MPa)	破裂の有無
3.40	520<	破裂した
0.75	520<	破裂した
0.37	430	破裂せず
0.12	230	破裂せず

※配管材料（SUS304TP-A、Sch10S、25A）の引張強度は 520MPa である。

(2) -2. 配管のスケール付着状況とシミュレーションの結果の対比

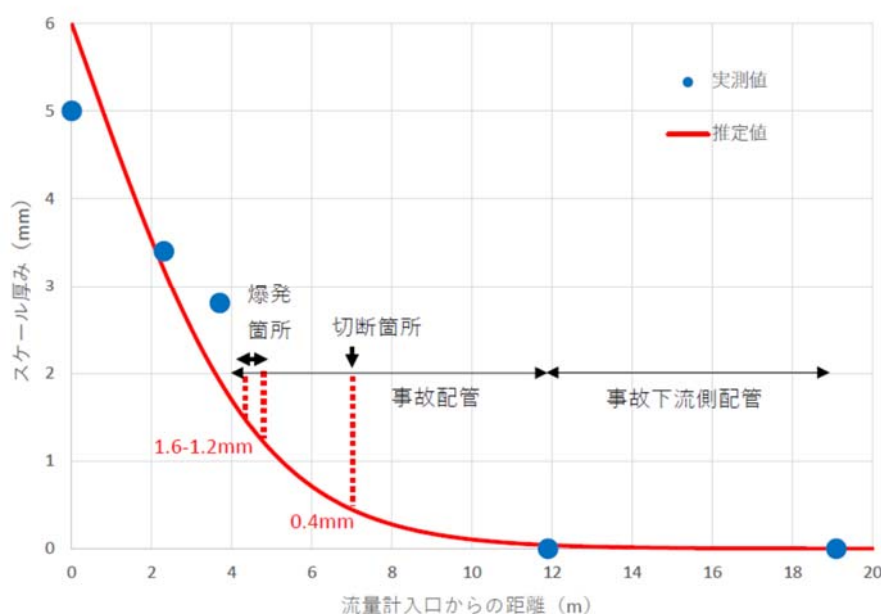
配管の内部を観察した結果、切断部を含む中央部とエルボ部との間は燃焼による黒変した付着物があり、エルボ部に近づくほど黒変した付着物が増加している。(図 10)

一方で、配管の切断部より下流側は、事故後も内壁はきれいなステンレスであった。セーバーソーによる配管切断部で着火し、爆発に至らなかったのは、その付近でのスケールの付着量が少量であったためと推定される。

図 18 では、配管におけるスケールの厚みの実測値と実測値を基に算出した推定値の対比を示す。配管の切断箇所のスケールの厚みは薄く、爆轟には至らなかったと推定される。一方、切断箇所から上流の配管ほどスケールの厚みが増し、破裂箇所（図 18 中 4m 付近、スケール厚み約 1.2～1.6 mm）では破裂の可能性が十分あったと推定される。

【図 18. 配管におけるスケール厚みの実測値及び推定値】

スケール厚み実測値及び推定値との対比



推定値に用いた計算式は化工便覧改訂六版 p.493 の総括結晶速度式を使用

<結論>

- ① セーバーソーによる配管の切断時に発生した熱によって切断部付近の付着スケールが発火して、火炎が生じ、切断部付近に付着していたスケールが燃えて爆燃現象が生じた。
- ② 爆燃現象によって発生した火炎・圧力が、配管内の上流側に付着していたスケールに次々と伝播して、スケール量が増えるに伴って、火炎は大きくなり、エルボ部まで達した。
- ③ 配管の上流側（図 9、図 10）はスケールが多く堆積していたので、配管のエルボ部付近において爆発・配管破裂が起きた。
- ④ エルボ部は流速が遅くなるため特異的に堆積・偏析する可能性を、流体解析ソフトによるシミュレーションで確認したが、特異的な堆積・偏析現象は認められなかった。実際に、爆発箇所の上流部の配管のエルボ部を確認したが、特異的な堆積・偏析はなかったので、シミュレーション結果は実際の付着・堆積状況と整合している。〔添付資料 7〕

<爆発形態>

爆発形態は、配管破裂によって生じた破片の形状（破片が細かく引き千切られた状況）からみて、「爆轟」であったと推定される。爆轟は、気体の急速な熱膨張の速度が音速を超え、衝撃波を伴いながら燃焼する現象である。

【p. 7 図 8. 破裂した配管の破片 を参照】

(3) その他の着火源の可能性

事故の着火源につき、セーバーソーの熱以外の可能性を検討した結果、着火源は、セーバーソーによる切断時の発熱と考える。

① 他の高温物体の不在

セーバーソーの熱の他に、着火源となるような高温物体は事故の現場付近になかった。

② 配管の振動が着火源となる可能性

セーバーソー切断時に、エルボ部付近の配管がラックに固定されていなかったことから、配管の振動によって、スケール（CP-N0x ダイマー）が爆発する可能性を検討した。

セーバーソーによって切断する際のエルボ部付近の振動がどの程度の振動エネルギーであるかを確認するための実証実験を行った。

実証試験にて配管の破裂した部分の振動値を測定し、振動エネルギーと CP-N0x ダイマーが有する落つい感度相当のエネルギー¹²を比較した結果、振動エネルギーは落つい感度相当のエネルギーより十分に低く、振動が着火源となった可能性は極めて低いと判断する。〔添付資料 8〕

この実証実験におけるセーバーソー切断時の振動試験結果は表 9 のとおりである。

【表 9. セーバーソー切断振動試験結果】

切断時の振動エネルギー [J]	落つい感度相当のエネルギー [J]
5.62×10^{-2}	9.81

③ 静電気が着火源となる可能性が低いこと

¹² 配管の破裂箇所の上流側の配管から採取されたスケールの落つい感度は 5 級相当である（4-3 参照）。

配管は、まだサポートが残してあり配管に接触していたこと、片側のフランジはガスケットを外した状態で1本のボルトとナットで緩い状態で下流配管のフランジに接続してあったことにより、通電状態が維持されており、静電気の可能性は低い。仮に静電気が発生しても、配管における静電気防止のためのアースボンディング¹³はきちんと施されており、着火源となる可能性は低い。

(4) 着火源の特定及び爆発メカニズムの推定

以上の検討結果から、事故の着火源は、セーバーソーによる切断時の熱であると特定できる。その爆発メカニズムは、セーバーソーの切断時の熱により、配管の切断箇所付近のCP-N0x ダイマー（スケール）が発火して、その火炎がエルボ部まで急速に伝播して（爆燃現象）、爆発を引き起こしたと推定される。

4-8. 事故に至るシナリオ等

(1) 5C 工程の運転状況

5C 工程の配管内部でのスケールの付着状況について、2022 年 10 月の定期修繕工事（いわゆる定修）以降で、精留塔コンデンサー以降の配管で付着が発生し増えていた。そこで、デンカは、その配管のスケールをより洗浄し易くするために、配管取替を計画した。事故は、工事施工会社がその取替え作業中に従来配管を切断しようとした際に起きた。

2022 年 10 月の定修以降、5C 工程では重合禁止剤 A、B の添加量、並びに精留塔周りへの空気の漏れ込みが、基準内であるも多い傾向にあった。これら 2 因子によって、CP-N0x ダイマーが生成して析出したと推定される。

表 10 に、同じ 5C 工程の同一時期（季節）の運転状況の比較を示した。

【表 10. 5C 工程運転状況】

			5C工程	
			21年度定修後 (21年11月~22年6月)	22年度定修後 (22年11月~23年6月)
	精留塔フィード流量(t/h)		3.7	3.3
NO源	重合禁止剤A	添加条件(L/h)	100	
		濃度(ppm/精CP)	267	309
	重合禁止剤B	添加量(L/h)	5.1	5.8
		濃度 (ppm/精CP)	26	33
酸素源	精留塔気密テスト (初期圧80kPa)	基準(kPa/30分)	圧力低下 0.67kPa以下	
		実績(kPa/30分)	0.00~0.48kPa低下	0.085~0.55kPa低下
	真空コントロールバルブMV(%)		34	40

表 10 を見ると、CP-N0x の生成要因である NO 源の重合禁止剤添加濃度は 2022 年度定修後の方が増加しており、精留塔（減圧蒸留塔）の運転前の気密テスト時の圧力低下幅は 2022 年度定修後の方が大きいこと（減圧蒸留系への空気の漏れ込みが多かったこと）が分かる。

¹³ フランジ同士を電線で接続し、電位差をなくすことで配管内の帯電を防ぐ

実証実験にて、所定量のクロロブレンモノマーに重合禁止剤量（NO ガス）及び酸素（空気）を投入した際の CP-NOx ダイマー生成を検討した結果、重合禁止剤に酸素混入が重なると、CP-NOx ダイマーが生成することが判った。（表 5 参照）

2022 年度定修後、重合禁止剤の添加量が増加し、精留塔への空気の漏れ込みが多かったことにより、5C 工程において、CP-NOx ダイマーが 2022 年 11 月から 2023 年 6 月にかけて、より多く生成され、その析出物が配管の内壁に、より多く付着していったと考えられる。

(2) 事故に至るシナリオ

事故に至るシナリオは、下記のように考えられる。（表 11）。

まず、5C 工程において、製造されているクロロブレンモノマーに加え、重合禁止剤である重合禁止剤 A・B 及び酸素の漏れ込み等により、配管内壁に CP-NOx ダイマー（スケール）が発生し付着した。

この配管内壁に付着する CP-NOx ダイマー（スケール）を洗浄し易くするために、配管取替え工事が行われることとなった。

工事に先立ち、配管の液抜きや水洗を行い、CP-NOx ダイマー（スケール）を湿潤化したものの、水洗による液だれを防止するために、ドライ窒素で配管をブローした結果、CP-NOx ダイマー（スケール）が乾燥し、落つい感度や摩擦感度が高まって危険性が増すことになった。

そして、工事施工会社従業員が配管をセーバーソーで切断を開始し、その切断時のセーバーソーの刃先の熱で、その切断箇所付近に付着していた CP-NOx ダイマー（スケール）が発火し、火炎が生じた。

この火炎は、配管内壁の上流側に付着していた CP-NOx ダイマー（スケール）に順々に伝播し、エルボ部付近まで達した。このエルボ部付近においては、CP-NOx ダイマー（スケール）の付着量が多かったことから、その箇所で配管破裂に至り、事故に至った。

【表 11. 事故に至るシナリオ】

項目	内容
1. 配管取替え工事	・配管内壁に付着したスケールを洗浄しやすくするために、配管取替えを計画。
2. 除害措置	・配管の液抜き、水洗を行った（湿潤化）。 ・水洗による液だれを防止（有機物による薬傷防止）するために、配管をドライ窒素でブローした。これにより配管内壁が湿潤状態から乾燥状態となった。
3. 切断作業開始	・セーバーソーによる配管切断を開始。
4. 火炎の伝播	・セーバーソーの切断の熱によって、CP-NOx ダイマー（スケール）に着火して火炎が生じた。 ・火炎は、配管内壁に付着している CP-NOx ダイマー（スケール）に順々に伝播し、エルボ部付近まで達した。
5. 爆発破裂	・エルボ部付近は CP-NOx ダイマー（スケール）の付着量が多かったため、配管破裂に至った（事故の発生）。

5. 事故の背景要因（間接的要因）

事故の直接原因は、配管内壁に付着していた CP-N0x ダイマーがドライ窒素ガスの流入によって乾燥され危険性の高い物質に変化していたことと、発災当日、配管を撤去する作業時にセーバーソーで切断したことである。（4 項参照）

この事故の背景要因としては、配管に付着していたスケールが持っている危険性に対する関係者の認識が低かったこと、プラントの運転状態のわずかな変化に対する原因の追究が不十分であったこと、工事における関係者間の情報伝達などの問題がある。

5-1. 自社のインシデント、他社の類似事故情報の活用不十分

デンカでは、1962 年にクロロプレノゴムの製造開始以降、大きな事故もなく運転されてきた。関係者は長年事故がなかったことから、この設備は安全であるという「思い込み」があったように感じる。

リスクアセスメントは安全確保の最も重要な手段である。リスクアセスメントは危険源を網羅的に抽出し、危険源のリスクの大きさを評価することである。特に、危険源を抽出することが重要であるが、危険源抽出には、自社のインシデント・ヒヤリハット情報、及び他社でのこれまでの事故情報を活用することが極めて重要である。

4-3 項で記述したとおり、過去に海外の同業他社やデンカ青海工場において、今回と類似の事故・インシデントが起きていたが、重合禁止剤が異なることや、製造工程のスケール生成場所が異なることから、配管内壁に付着したスケールの特異的な生成並びに危険性を予測することは難しかった。

また、今回の配管取替工事にあたって、関係者はスケールを湿潤状態に保てば安全に工事を実施できるという認識であった。

以上を踏まえ、本委員会は、下記の対策を実施し、リスクアセスメントの質的向上を図ることを提言する。

① ヒヤリハット報告活動の強化

ヒヤリハット情報を層別し、保安事故につながると想定される報告は、リスクアセスメントを行い、対策を講じる。

② 他社事故情報の活用

他社の類似事故情報は、本社環境保安部より関連する事業所に伝え、各事業所はリスクアセスメントを行い、対策を講じる。

③ 技術・技能継承のためのプロセスセーフティ教育の実施

自社のインシデント、および他社の類似事故発生から、20～30 年が経過している。

当時の技術者はこの情報を知っていたが、次の世代にまで継承できていなかった。

技術・技能継承は、デンカに限らず多くの化学企業に「共通する課題」である。すべての技術・技能を継承することは難しいが、デンカが取り扱っている危険物質に関する「プロセスセーフティ教育」を、中核技術者を対象に実施する。

5-2. スケール増加要因の追究不十分

今回の事故の背景に、2022 年 10 月の定修以降、配管内壁に付着するスケールが増加していたことがある。この現象は 5C 工程においては、2009 年の操業開始以降、初めて見られたことであるが、運転条件が基準値内であったために、スケール増加要因が深く追究されなかった。

今回の配管破裂事故後、運転条件を解析した結果、重合禁止剤濃度、漏れ込み酸素量は、基準値内にあるとはいえ、少し変化しており、スケール生成の増加に関係していることが判明した。

「逸脱の正常化 (Normalization of deviating)」とは、本来あるべき姿から少しずれてもそれを許容することで、逸脱の正常化が繰り返されると事故になる。

本委員会は「プロセスの正常状態」を考える習慣を身に付けることを提言する。

プラントで、配管の内壁付着の増加等の異常な現象が起されば、「プロセスの正常状態からのずれ」と考えて、一人ひとりが原因をより深く追究することが重要である。

5-3. 工事協力会社との連携不十分

今回の工事は「発注者—工事請負業者—工事施工業者」の3社の協力のもとに行われた。このような工事において、最も重要なことは「作業間の連絡調整の徹底」である。

労働災害を防止するためには、作業間の連絡調整を統括管理する者を発注者が選定し、工事請負業者および工事施工業者は、連絡責任者を定めておく必要がある。

これまでもデンカ、工事請負業者、工事施工業者との間では、安全協議会、安全協力会の下で情報交換が行われ、工事安全教育も実施されてきている。

それでも事故が起きたことを踏まえて、工事協力会社間の作業の連絡調整に関する段取り調整や、安全上の措置が工事請負業者、工事施工業者に確実に伝わるような仕組み、工事協力会社への安全教育内容の充実など一層の工夫が必要である。

加えて、工事施工業者が持ち込む機器・工具に関する管理を徹底する。

6. 再発防止策

6-1. 再発防止のための基本的な考え方

今回の事故調査により、CP-N₀xダイマーの発生メカニズム、危険性が把握されたことから、CP-N₀xダイマーの安全な取り扱い方法を確実に実施するとともに、CP-N₀xダイマーの生成を抑制して事故の再発防止を図る。

第一段階は、CP-N₀xダイマーを湿潤状態に保つことにより、安全に取り扱えることが判明したので、湿潤状態を保つための操作条件を徹底する。並びに、CP-N₀xダイマーの生成を抑制する運転条件の範囲を明確にする。

この第一段階の措置を実施することによって、安全に運転できる。

第二段階は、この運転状態をさらに安定して維持できるように、運転条件の管理に必要な酸素センサーなどの機器類の設置や運転条件のずれがあった場合に、システムの解消する安全計装システムの導入を検討する。

6-2. 第一段階

(1) 配管及び機器の点検・整備時のスケール（CP-N₀x ダイマー）の湿潤徹底

・配管等の機器が湿潤状態にない時は作業を実施しないことを徹底 [添付資料 9]

① 配管や機器内の液抜き、ガス抜きの作業手順については、窒素ガスによる、配管や機器内の液抜き、ガス抜きを実施し、可燃性ガスが基準値内（＜1%）になる事を確認する。

② その後、配管や機器内の通水、満水、散水により解体、点検、整備まで、スケールを水に接触させて湿潤な状態にする。

この通水、満水、散水の時間は、8 時間以上を実施した上で、湿潤な状態を保持する。

※安全な取扱いを可能とする水分 30%を含有したスケールの湿潤状態は、スケールと同重量の水を約 30 分間混合する事により作り出すことができる。

③ 上記湿潤措置を実施後は、窒素ガスの流入を行わない。

・設備及び工事を所管する部門（以下「所管部門」という）の管理者は、上記①、②の作業開始前及び終了時に、これらの作業が確実に実施されていることを確認する。

・上記①、②の作業時には、機器及び配管へ衝撃や熱等を与えないことを徹底する。

（※）CP-N₀x ダイマーの安全な取扱い作業手順 （※）：関連文書名を示す、以下同じ

(2) 配管等設備内のスケールの付着状況の定期的確認と定期的除去（※）

・スケール生成懸念設備（減圧蒸留系のコンデンサー、タンク、移送配管）について、定期的に開放点検し、スケールの堆積・付着状況を確認する。

・点検周期は、先ず 3 ヶ月周期で行い、スケールの堆積・付着状況を確認する。

その状況に基づき、点検周期を適正化していく。

・スケールが認められた際は、上記のように湿潤状態を保って、付着物を取り除く。

（※）CP-N₀x ダイマーの安全な取扱い作業手順

(3) 運転条件・運転管理の見直し（CP-N₀x ダイマーの生成抑制）

・CP-N₀x ダイマーの生成に係る重合禁止剤と酸素の漏れ込み量を厳格に管理する。重合禁止剤の添加量の管理：従来は、基準 100 に対して±20 の幅で管理したが、

今後は±10 の幅で管理する。

設備の気密管理基準 : 従来の管理基準の半分にする。

表 10 に記載した通り、2021 年の定修までは管理基準（圧力降下 0.67kPa 未満／30 分間）に対して、0～0.48kPa の実績でスケール生成は無かったが、酸素の漏れ込みによる CP-NO_x ダイマー生成の抑制を強化する為、また、5MC 以外のプラントでは従来基準に対して半分の気密実績がある事から、今後は従来基準の半分で管理していく。

6-3. 第二段階

- ・運転条件の管理を徹底するために、空気の漏れ込みを早期検知できるように、酸素センサーの導入を検討する。（2024 年の定修での導入を目指す）
- ・さらに、安定した運転条件確立のために、プロセスの正常状態からのずれに対して、安全計装システムのように、システムの的にプラントを安全に保てるような仕組みの導入を検討する。

6-4. 協力会社の安全管理

事故は、協力会社に依頼した工事で起きた。

発注者であるデンカから協力会社への危険源情報等の伝達と施工方法の情報交換をより徹底することと、安全管理体制をより強固にするために、下記の施策を実施する。

(1) 取り扱い物質の危険性・有害性に関する教育の強化

事故原因調査にて判明した CP-NO_x ダイマーに関する情報（発生懸念箇所、性状、危険性・有害性）について部門教育資料（※）として取りまとめ実施する。

対象は、デンカ社員ならびに協力会社従業員とする。

（※）有機第二部クロロブレン第一課 CR 合成_製造保安教育 2023 年 11 月見直し版

(2) 協力会社持ち込み機器に関する管理の強化

工事元請業者及び工事施工業者は、工事作業に際して使用する持ち込み機器（火気工具等）を漏れなく作業許可書に明記する。

所管部門は、適正な工具が選定されているか判断の上、持ち込み機器の使用を許可する。

また、安全措置後の残留リスクに応じて立会い方法を基準（※）に定め、実施する。

（※）工事安全確保に関する補足基準

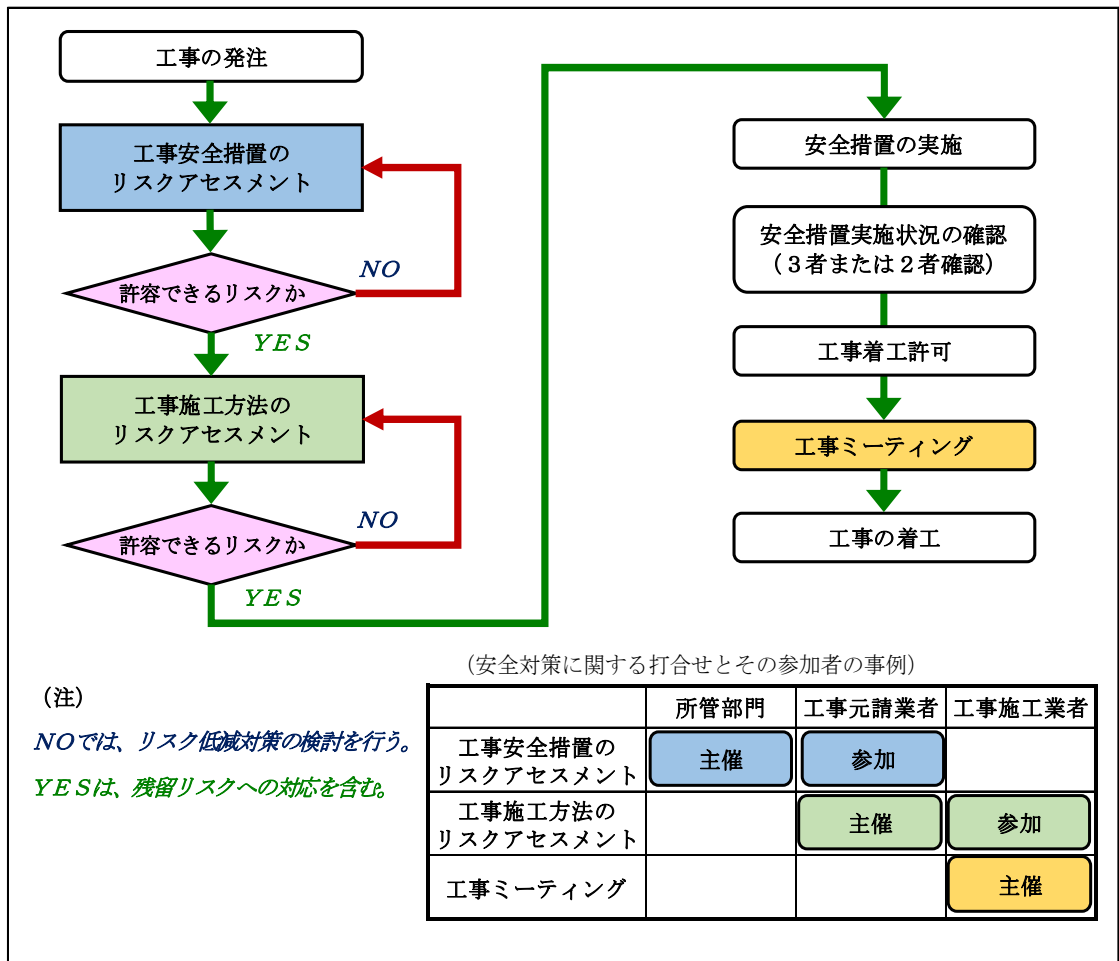
(3) 工事開始前のリスク評価並びに工事方法の確認

以下項目を確実に実施するよう、ガイドライン（※）を策定し、運用する。

（※）リスクアセスメントを用いた安全衛生対策のガイドライン

- ・工事安全措置のリスクアセスメント 主催：「所管部門」
- ・工事施工方法のリスクアセスメント 主催：「工事元請業者」
- ・工事ミーティング 主催：「工事施工業者」

リスクアセスメントの実施方法は、平成 23 年 2 月発行の厚生労働省・中央労働災害防止協会の「化学工業における元方事業者と関係請負人との安全衛生管理マニュアル」に準じて実施する。これに準じて上記ガイドラインを策定する。



(4) 協力会社の安全管理体制の監査実施 (※)

監査メンバー：デンカメンバーに第三者を加える

頻度：年に1回

監査内容：安全実績、設備管理実績、事故トラブルへの対応状況、安全教育 等

(※) リスクアセスメントを用いた安全衛生対策のガイドライン

7. 全社的な安全管理の強化 [添付資料 10]

本委員会は、今回の配管破裂事故を踏まえ、デンカ並びに協力会社の保安管理体制を強化するために、下記の安全対策実施を提言する。

7-1. リスクアセスメントの質的向上

(1) 既存物質に関する実施済リスクアセスメントの再点検

- ・すでに実施されている既存物質のリスクアセスメントについて、漏れがないか、リスク評価や対策は適正か改めて総点検する。

(2) 危険な物質に関する全社ガイドラインの策定

- ・今回の配管破裂事故において、配管付着スケールの危険性評価が不十分であったことを反省し、全社ガイドラインに基づいて、各事業所で取り扱っている「特に注意を要する危険な物質」を規定し、危険性評価方法を策定する。
- ・上記ガイドラインに基づいて、各事業所は、危険物質の危険性評価後、得られた結果を作業条件及び作業手順に反映する。

(3) 運転状態に関わる変化点の周知

- ・今回の事故の背景には、運転条件が基準値内でもスケール生成が増加したことにある。所管部門は、化学プラントで副生物や設備故障増加などの運転状態が正常状態から外れていないか（変化）について、“いつもと違う”と感じたら、月例の事業所長報告会等で審議し、事業所内関係者に周知する。

(4) 事故・ヒヤリハット報告事例の有効活用

- ・事故・ヒヤリハット報告事例を有効活用するため、事故・ヒヤリハット（インシデント）が起きた場合、所管部門は、その事象をプロセスセーフティの観点から深掘りし、運転条件や作業基準書に反映させる。
- ・各部門は、他社の化学プラント事故に関心を持ち、その情報を基に自社のプロセスにも、同様の危険性や事故が起きる可能性がないかを検討し、必要に応じて、設備改善を行うとともに、運転条件や作業基準書に反映させる。

7-2. 工事安全管理

(1) 工事安全措置に関するリスクアセスメントの徹底

- ・所管部門は、工事安全措置に関するリスクアセスメントを工事元請業者が参加の下で実施する。
- ・リスクアセスメント結果を基に、工事施工前までにリスク低減措置を講じる。
- ・所管部門は、残留リスク情報が工事元請業者に確実に伝わっていることを確認する。

(2) 工事施工方法に関するリスクアセスメントの徹底

- ・工事元請業者は、工事安全措置に関するリスクアセスメントを基に、工事施工方法に対するリスクアセスメントを実施する。
- ・工事施工方法に関するリスクアセスメントには、工事施工業者も加わって実施する。

(3) 工事ミーティング

- ・工事施工業者は、工事施工方法に関するリスクアセスメントに基づいて、工事を実施する。
- ・残留リスク情報に基づいて、危険予知を徹底する。特に、作業直前の危険予知が重要である。

(4) 協力会社持ち込み機器に関する管理の強化

- ・所管部門は、工事元請業者が実施した工事施工方法に関するリスクアセスメントを確認する。特に、工事安全措置に関するリスクアセスメント実施後の残留リスクに対して、どのように対策が講じられているかを確認する。
- ・所管部門は、工事元請業者、工事施工業者の持ち込み機器に関して、持ち込み可能な機器の情報を提供する。
- ・工事元請業者及び工事施工業者は、使用する火気工具等持ち込み機器全てを作業許可書へ明記し、許可された持ち込み機器のみを使用する。また、工事施工方法に関するリスクアセスメント実施後の残留リスクに応じて、有資格者による作業、教育訓練状況、立会い方法を基準に定めて実施する。

(5) 工事前の教育受講状況の確認

- ・所管部門は、工事元請業者および工事施工業者が、現場の状況・作業の注意事項・化学物質の危険性や有害性などを理解してから工事を開始できるよう、事前に協力会社の教育受講状況を確認する。

(6) 安全衛生責任者の選任 及び 管理者の役割と責任の明確化

- ・「一 の場所」で50人以上の労働者が作業する場合は、統括安全衛生管理体制を敷く。
- ・統括安全衛生管理体制の整備が義務づけられていない規模の工事においても、安全衛生管理の充実を図るため、選任が必要な工事を定めた上で、当該工事に係る所管部門の統括管理者を定める。
- ・工事元請業者、工事施工業者は安全衛生責任者を選任する。
- ・安全衛生責任者は「安全衛生責任者教育」及び「職長等及び安全衛生責任者の能力向上教育」を社内外で受講し、工事全般の安全衛生管理に関する役割と責任についての認識を明確化する。

※所管部門は、上記工事安全管理に関する実施項目について、関連ガイドラインに明記する。

※一 の場所：製造事業場内の各工程の工場や作業場または最大では製造事業場全域

7-3. 安全保安教育

(1) 化学物質の危険性・有害性の評価や再教育の実施

- ・ライン管理職、技術スタッフ、運転員一人ひとりが自職場の化学物質を安全に取り扱うため、それらの従業員に対し、化学物質の危険性と取り扱いに関する安全教育を実施する。

(2) プロセスセーフティに関するリスクアセスメント教育の実施

- ・プロセスセーフティに関するリスクアセスメント教育を、管理者・技術スタッフ等を対象に実施する。

7-4. 協力会社及びデンカ社内に対する安全監査

- ・各事業所の環境保安部門が主体となって、主な工事請負業者、工事施工業者に対する安全監査を実施する（年1回）。
- ・本社環境保安部は、デンカ各事業所において、7-1. 7-2. 7-3 の各対策が確実に実行されているかを監査し、監査結果を定期的に取り締役会で報告する。

更に青海工場の他、全工場の安全管理の継続的支援を通して、危険有害物質の取扱いに関する法令の遵守状況や、安全衛生管理体制について確認する。

- ・経営幹部・ライン管理者の「感じてもらえる指導力 (Felt Leadership)」が発揮されなければ優良安全は達成されない。経営幹部・ライン管理者をサポートするため、全工場環境保安部門に新しく安全管理係の設置、またはそれに準じた専任体制を確保する。今後は、その安全管理係の現地現物によるパトロール等を通して課題を改善する。

7-5. 安全の日

- ・事故の記憶を風化させないために、本事故の起きた6月14日を全社の「安全の日」とする。この日に、なぜ事故が起きたのかを、全社員が振り返り、安全意識の向上を図る。

以上

8. おわりに

事故調査委員長総括

この事故は、クロロブレンモノマー製造設備で、製造工程のクロロブレンモノマー移送配管を取り外す作業時、配管を切断した際に配管が破裂したことによって起きました。工事に携わっていた協力会社の社員が被災されました。（死者1名、負傷者2名）

爆発物質は、移送配管内壁に付着していたスケールを分析した結果、「2-クロロ 1-ニトロ-4-ニトロソ-2-ブテン」の二量化物（ダイマー）（以下 CP-NO_x ダイマー）と特定されました。事故原因調査によって、CP-NO_x ダイマーは湿潤状態では安全に取り扱うことができますが、乾燥すると爆発物質になることが判明しました。

発災当日、移送配管を取り外す作業を行うために、配管内部を水洗して湿潤状態にした後、液だれによる薬傷を防止するために、ドライ窒素ガスが流入されました。その結果、配管に付着していたスケールが乾燥し、CP-NO_x ダイマーの危険性が高まりました。

この原因調査の難しさは、①爆発物質の特定、②スケールが乾燥し危険性が増大したこと、③配管の切断場所から約 2.9m 離れたところで、火炎の伝播によって配管破裂事故が起きたことを、実証実験やシミュレーションによって確認し、事故に至ったシナリオをまとめたことです。

この原因調査を振り返って、下記の三つの点が類似事故防止のために重要と考えます。

一つ目は、取り扱っている物質の危険性把握の重要性です。

この事故は、クロロブレン製造工程で副生した配管付着物が乾燥して危険性が増し爆発しました。類似事例として 2014 年に起きた三菱マテリアル㈱四日市工場の熱交換器爆発事故があります。物質は異なりますが、二つの事故に共通することは、ドライ窒素ガスを流入したことによって付着物が乾燥して爆発したことです。

液だれ防止という一つの面からみると良い方法も、新たな別のリスクを生み出したという事例になります。それだけに物質の持つ危険性をきちんと把握することが、プロセスセーフティの観点から重要になります。今まで大丈夫と思っていた作業も、工事等に取り掛かる際にリスクアセスメントを徹底し、「もう一度、これで大丈夫か」と問い直す必要があります。

二つ目は、自社並びに他社の事故・インシデント情報を活用することの重要性です。

クロロブレンゴムの製造プロセスは 1962 年の製造開始以降、大きな事故もなく運転されてきました。関係者は長年事故がなかったことから、この設備は安全であるという思い込みがあったように思います。1994 年 DuPont 社で類似事故がありましたが、あらためて化学プロセスの安全確保の難しさと、類似事故情報を活用することの重要性を感じます。

事故は滅多に起こるものではありません。起きた事故に対する事後対策から、「自社のヒヤリハット情報を深掘りして重大事故につながる可能性はないか。他社の事故やインシデント情報を基に、自社のプロセスは大丈夫か」等を常に問い直す習慣をつけて、事故の未然防止に取り組むことが重要です。

安全に携わる者にとって、他社の事故は、自社の事故に対する執行猶予です。「明日は我が身である」ことを心に刻み込み、日々の作業に当たることが必要です。

三つ目は、協力会社が工事を実施する際に、発注者と協力会社とが「リスク情報を共有し工事に反映していくことと、その仕組みを構築すること」の重要性です。

再発防止策に、「発注者、元請事業者、工事施工業者の 3 者間でのリスクアセスメントの

在り方」を提言しました。

設備を所有する発注者は、工事安全措置に関する責任があります。除害措置を講じ、それでも残っているリスク（残留リスク）が、工事を実施する元請事業者に伝わっていることが重要です。

元請事業者は、工事施工方法に関する責任があります。工事安全措置に関するリスクアセスメントでの残留リスク情報を基に、発注者の設備部門、工事を実施する下請事業者と協力して、工事施工方法を決定します。

下請事業者は、これらのリスクアセスメント情報に基づいて、着工前の安全確認、危険予知を実施し、安全に工事を実施します。特に、工事開始直前に実施する危険予知が、事故を防ぐ最後の砦であることを感じます。

安全に工事を遂行するには、関係者間で情報がきちんと伝わって共有されていることが前提です。3者間のリスクアセスメント体制を構築し実行するとともに、それぞれの組織の安全衛生責任者、情報連絡の責任者を明確に定めておく必要があります。

これからの安全は、基本的には安全マネジメントシステムで確保しますが、マネジメントシステムですべてを決めることは困難です。

最後の判断は「人間」に委ねられます。

その時、一人ひとりが的確な判断・行動をするためには、トップの安全に関する“Philosophy”の基に、地道に日常の安全行動を積み重ねていく必要があります。それが組織の共通の考え方、すなわち「安全文化」になります。

一人ひとり、当事者意識をもって、「プラントの正常状態とはどんな状態か」を常に考える習慣をつけること、そして異常があれば積極的に問題解決にあたる必要があります。

本調査報告書が、当該設備の事故再発防止はもちろんのこととして、他社の類似設備の事故防止にも寄与できることを願っております。

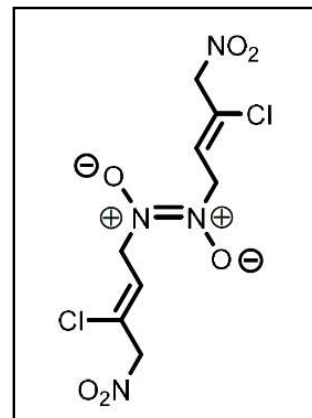
事故調査委員会委員長 中村昌允

CP-NO_x ダイマー同定評価

1. 概要

配管の破裂箇所より上流側から採取したスケールを使用し、爆発物質の特定を目的に構造分析を行った。

スケールに対する核磁気共鳴分析 (NMR)、赤外分光分析 (IR)、元素分析等の測定結果より、スケールの主成分は、「2-クロロ-1-ニトロ-4-ニトロソ-2-ブテン、ダイマー」(以下「CP-NO_x ダイマー」という)と特定した。CP-NO_x ダイマーの構造式は、図1の通りである。



【図1 CP-NO_x ダイマーの構造式】

2. 爆発物質の特定

1) 分析試料

スケールの試料を2023年6月15日に配管の破裂箇所の上流部より採取し(以下「試料①」という。)、また、破裂した配管より採取した(以下「試料②」という。)。試料①は、爆発の影響を受けていないサンプルであり、試料②は、爆発の影響を受けたサンプルである。試料①②の外観は、図2の通りである。なお、試料②は、爆発により燃焼して黒変(炭化)しているので、分析対象としなかった。

【図2 スケールの試料①②の外観】

<試料①>



<試料②>



2) 構造分析による物質特定

試料①につき、まず、核磁気共鳴分析 (NMR) 分析および赤外分光分析 (IR) を行い、その結果得られた¹H-NMR スペクトルを図3に、IR スペクトルを図4に示す。図3のスペクトルには帰属のついていない小さなピークが見られるが、これは DuPont 社の事故情報¹⁾との比較から試料①の成分が極性溶媒である重水素化ジメチルスルホキシド(重 DMSO)中で異性化した成分であると判明した。図4の IR スペクトルによって-NO₂基を含んでいることを確認できたことから、ニトロ基を含有する物質であることがわかった。また、スケールの¹H-NMR スペクトル、IR スペクトルは、事故後入手した DuPont 社の

事故の原因物質である CP-NO_x ダイマーの ¹H-NMR スペクトル、IR スペクトルと概略一致しており、事故の原因物質は、DuPont 社事故の原因物質（図 1）と同様であったと推定された。

スケールが図 1 の構造であることを特定するため、2 次元 NMR 測定を行った。水素同士の位置関係を調べる COSY (Correlation Spectroscopy)、水素と炭素の位置関係を調べる HSQC (Heteronuclear Single Quantum Correlation) と呼ばれる 2 つの手法を用いて解析を行い、その結果得られた ¹H-¹H COSY スペクトルを図 5 に、¹H-¹³C HSQC スペクトルを図 6 に示す。図 5 より、ピーク 3 とピーク 4 の水素に相関関係がみられることから、これらは隣接水素であることが確認され、推定構造と矛盾のない結果であった。また、図 6 はどの炭素とどの水素が結合しているかを示すものであり、ピーク 1, 3, 4 の炭素と水素の関係は、推定構造と一致した。

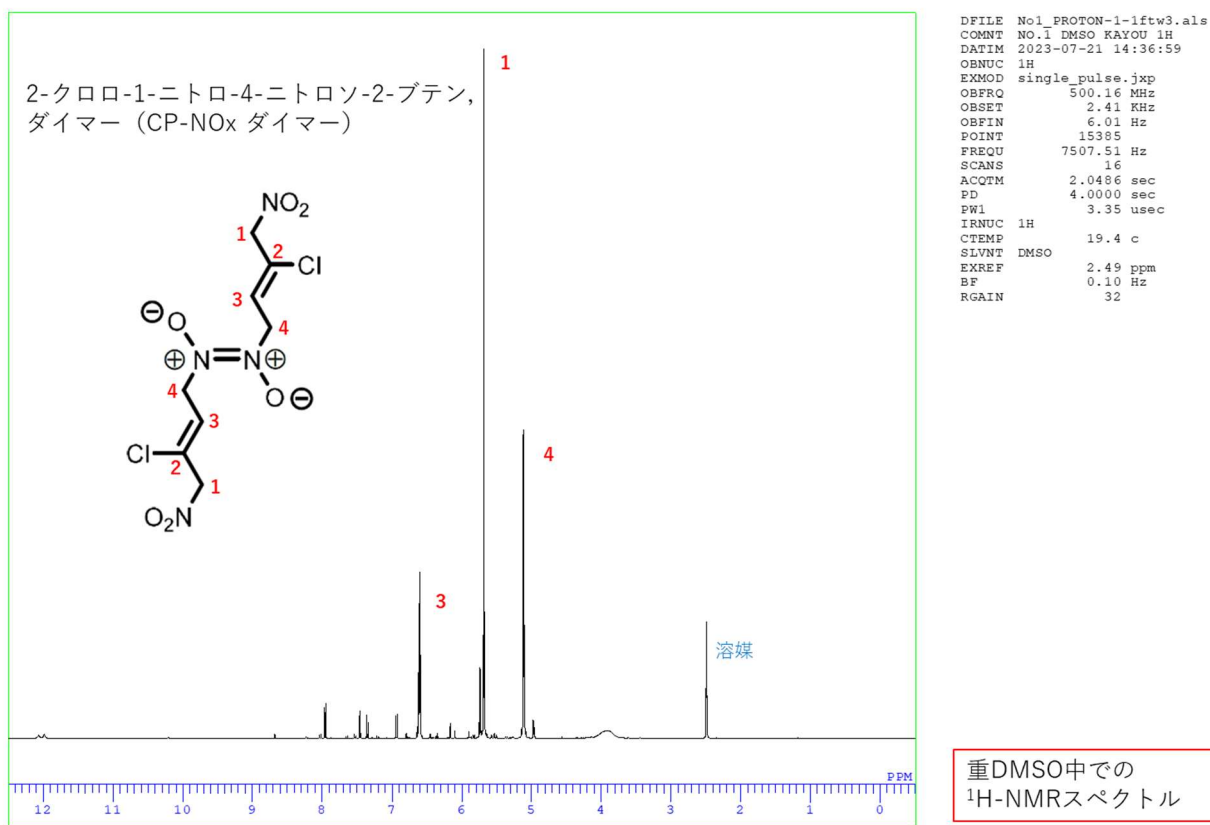
また、スケールの直接導入法質量分析により、熱分解生成物の特定を行った。高真空下での加熱により、100°C 程度から揮発性の成分が観察され、それらの質量スペクトルを図 7 に示す。質量スペクトルには CP-NO_x ダイマーから NO₂ が 1 つ或いは 2 つ脱離したフラグメントイオンのピーク ($m/z=282$, $m/z=236$) が観測された。この結果は両末端に NO₂ が存在することを意味し、推定構造と矛盾がない結果であった。また、フラグメントイオンのピーク ($m/z=236$) は、 $m/z=238$ ならびに $m/z=240$ のピークを伴って観察され、それらの強度比は分子内に塩素原子を 2 つ有する化合物に特徴的なパターンを示しており、この結果も推定構造と矛盾がない。

さらに、スケールの元素分析を行った結果、表 1 に示すように、CP-NO_x ダイマーの化学構造式から計算される値とほぼ一致した。

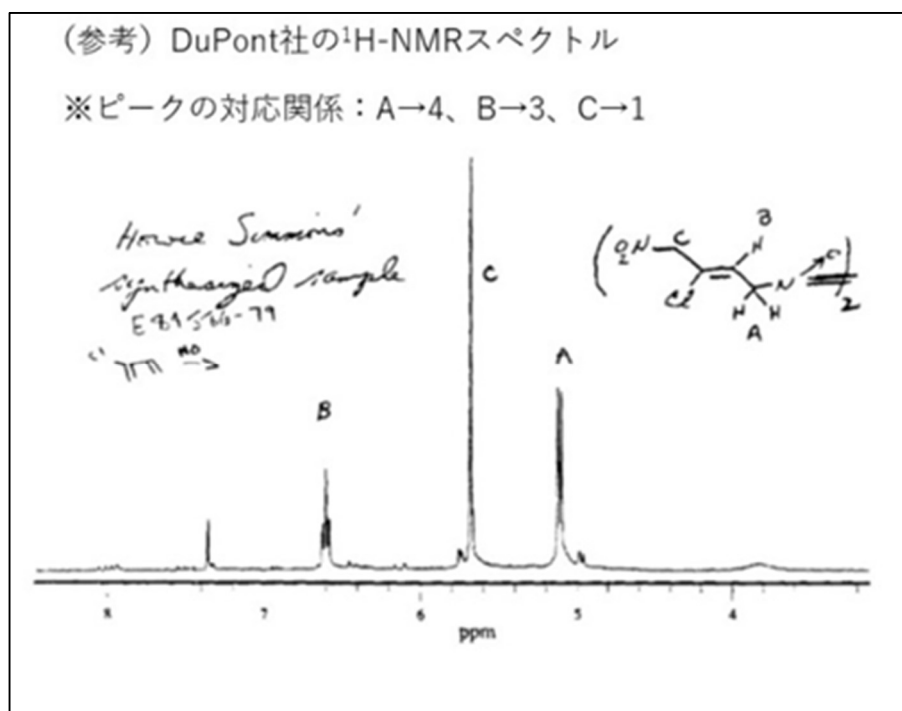
以上の結果を総合して、爆発物質は図 1 に示す CP-NO_x ダイマーと特定された。

1) デンカパフォーマンスエラストマー社より取り寄せた 1994 年 11 月 14 日発行のレポート

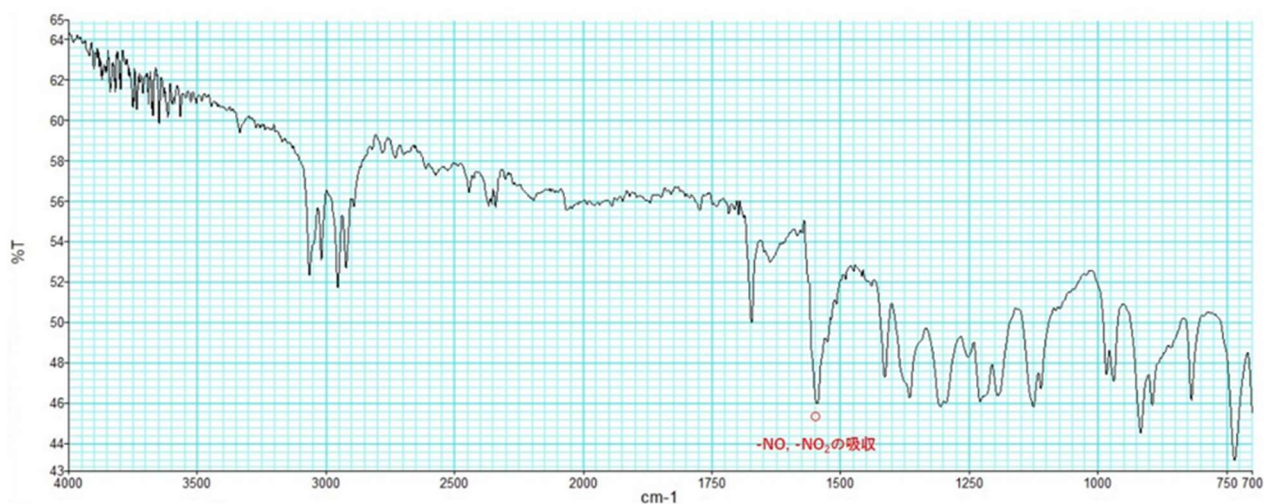
以上



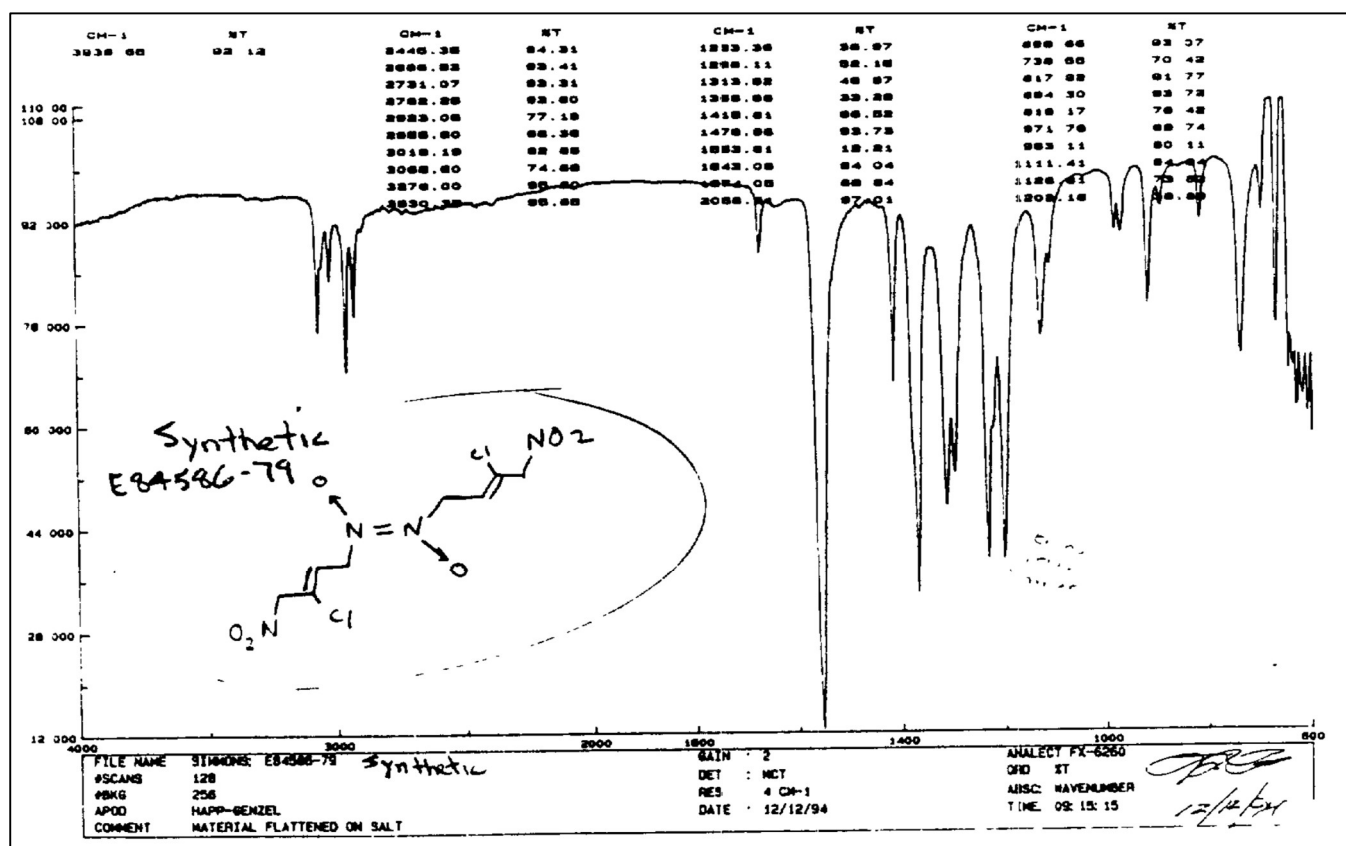
【図3 試料①の核磁気共鳴分析 (¹H-NMR) スペクトル】



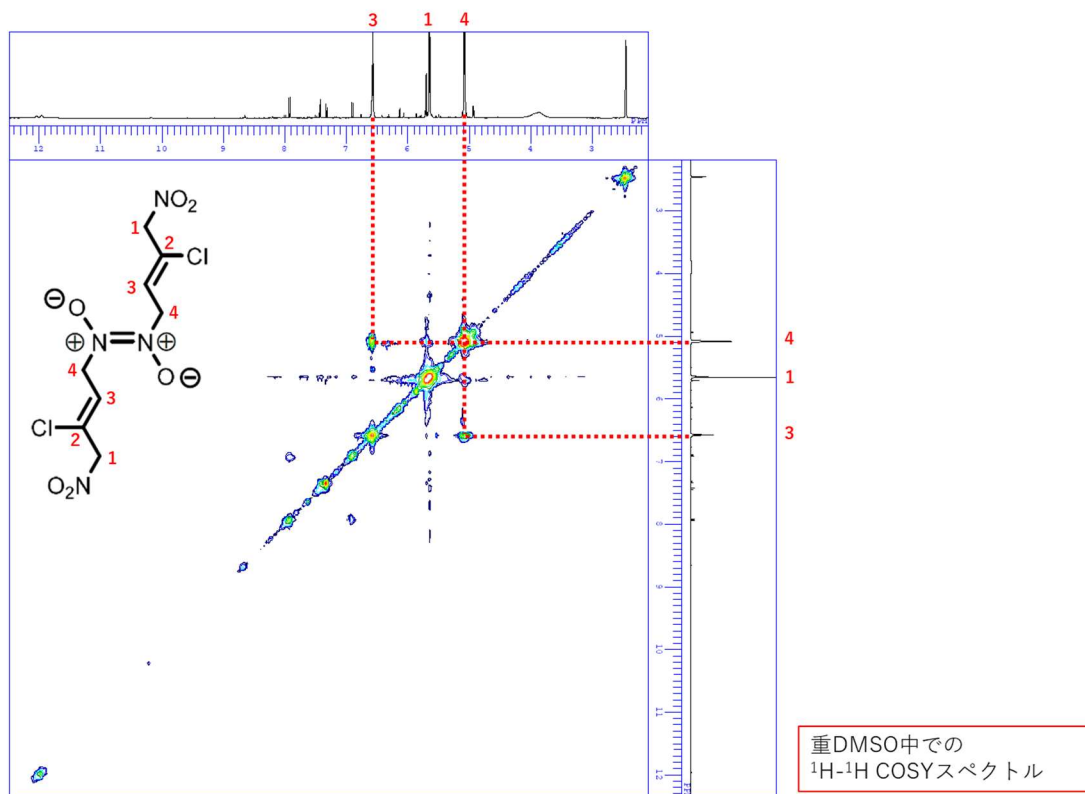
(参考：DuPont社の核磁気共鳴分析 (¹H-NMR) スペクトル)



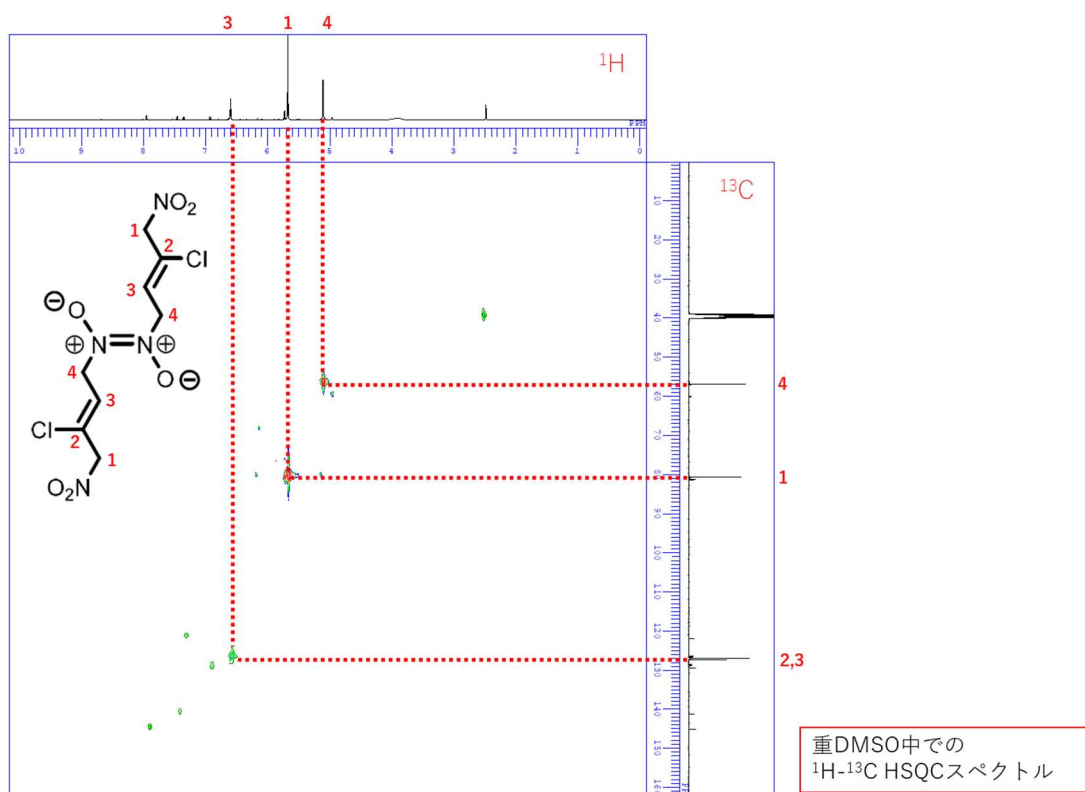
【図4 試料①の赤外分光分析 (IR) スペクトル】



(参考：DuPont 社の赤外分光分析 (IR) スペクトル



【図5 試料①の ^1H - ^1H COSY スペクトル】



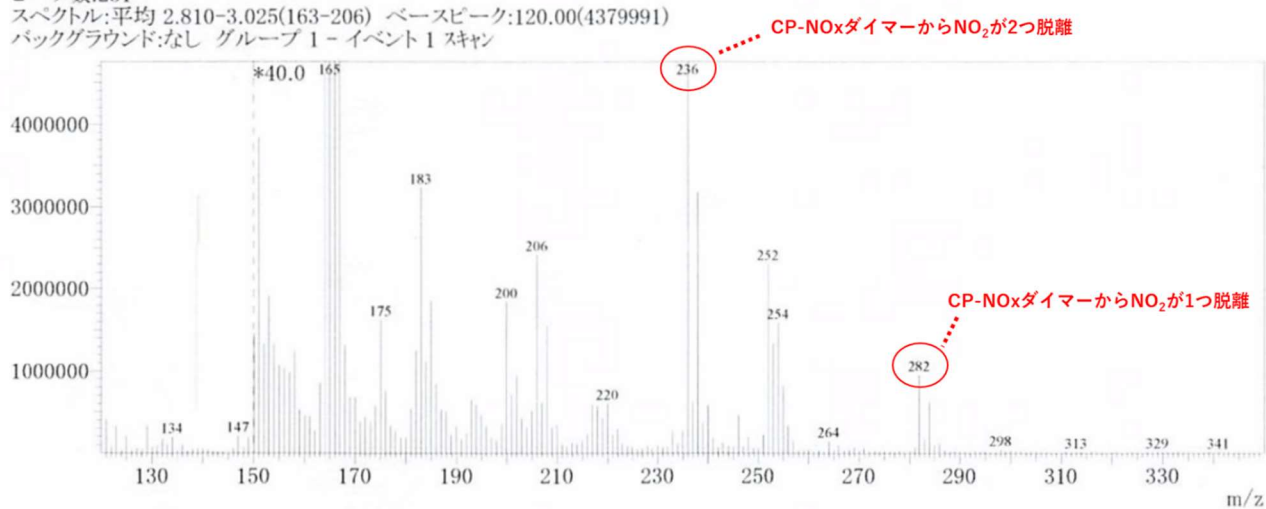
【図6 試料①の ^1H - ^{13}C HSQC スペクトル】

#:1 保持時間:2.920(スキャン#:185)

ピーク数:231

スペクトル:平均 2.810-3.025(163-206) ベースピーク:120.00(4379991)

バックグラウンド:なし グループ 1 - イベント 1 スキャン



【図7 試料①の直接導入法質量分析の質量スペクトル】

【表1 試料①の元素分析結果】

元素	単位	測定結果	CP-NOx ダイマー 計算値
炭素 (C)	wt%	30.01	29.20
水素 (H)	wt%	3.01	3.06
窒素 (N)	wt%	16.37	17.02
硫黄 (S)	wt%	<0.1	—

2023 年 12 月 7 日

青海工場 有機材料研究部

含水率の異なるスケールの衝撃感度試験報告書

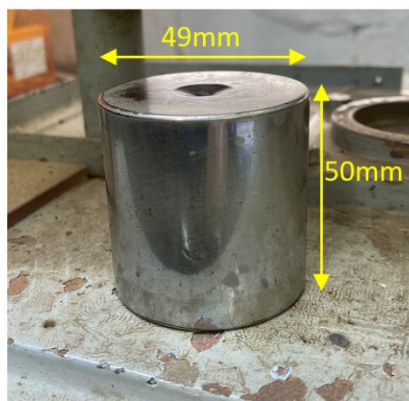
1. 目的

- 外部試験機関でのスケールの落つい感度試験の結果、含水量が約 30wt%の湿潤状態での落つい感度 JIS 等級は 8 級、含水量が 0.1wt%未満の乾燥状態での落つい感度 JIS 等級は 5 級であり、含水量によって衝撃感度が変わることがわかっている。今回、デュポン式落下衝撃試験機を使用し、含水量の異なるスケールに落つい感度 JIS 8 級相当のエネルギーを加え、含水量と衝撃感度の関係を調査した。

2. 試験方法

- 湿潤状態のスケールから乾燥条件を調整することで、含水量が 20%、10%目標の試料を調整した。
- 調整後のサンプルは直ちに衝撃感度試験を行うとともに、重量測定から正確な含水量を求めた。
- 衝撃感度試験は、デュポン式落下衝撃試験機を用いた。図 1 の受け台に、ミクロスパーテルを用いて試料を一さじ採取し、その上に受け皿、撃芯をセットした。その後、撃芯上に落つい感度 JIS 8 級相当のエネルギー (24.5J) となるよう重りを落下させ、発火、発煙の有無を観察した。また、受け台の爆痕の有無を観察した。

受け台



撃芯+受け皿



受け台、撃芯セット後 (正面)



3. 結果

- 表 1 の示す通り、JIS 8 級相当の衝撃試験を行った結果、含水量 20.9wt%までは衝撃感度は無し、含水量 10.1wt%では衝撃感度があり、含水量約 10~20wt%の間に境界があることがわかった。

表 1. スケール含水量と衝撃感度

含水量	34.1wt% (湿潤直後)	20.9wt%	10.1wt%	0.1wt%未満
衝撃エネルギー 24.5J (8 級相当)	不爆 (発火・発煙・爆痕無し)	不爆 (発火・発煙・爆痕無し)	爆痕有り (発火・発煙なし)	爆痕有り (発火・発煙なし)

以上

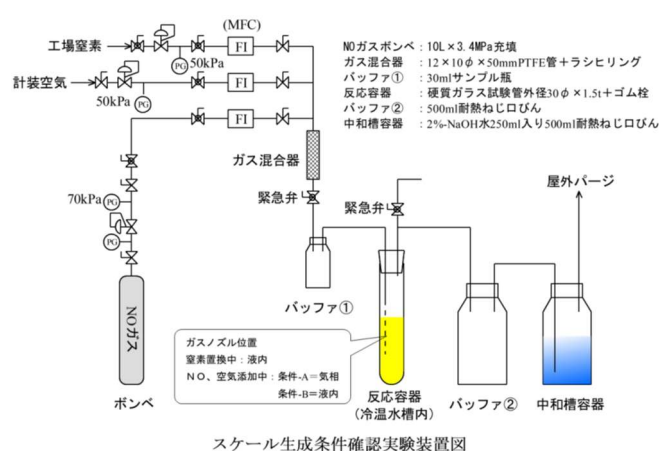
CP-NO_x ダイマー生成 ラボ実証試験

1. 目的

- 事故が発生した配管内に付着していたスケール（CP-NO_x ダイマー）について、ラボで CP-NO_x ダイマーが生成するか実証実験した。

2. 試験方法

- 図に示す装置にて、クロロプレンモノマーを仕込んだ反応容器（試験管）を窒素にて脱気後、NO ガス（ボンベより）と空気を供給して、液相と気相の状態を確認した。



・試験条件

今回は試験条件-A を実施。

		試験条件-A	試験条件-B
試験温度	(°C)	-20	-20
NOガス流量	(ml/min)	6.2	6.2
空気流量	(ml/min)	5.0	5.0
ガス流通時間	(min)	30	30
ガス添加位置	気相／液相	気相	液相

※ガス添加後、試験温度で3時間熟成する。

NOガスの約1/3がNO₂ガスに酸化する空気量

CPモノマーに対するNO／NO₂濃度

	NO	NO ₂
実機	41	11
ラボ実証試験	3,300	1,700

(ppm：推定)

実機の酸素漏れ込みは、多かった時の条件

3. 結果

- 反応 15 分後の段階で液界面より濁り状の物質が沈降した
- 反応終了後、試験容器内の壁面全体に固体と思われるスケールが生成した。
- 窒素風乾後、ベージュ色、粉状（結晶状）のスケールが生成し、回収した。
- FT-IR と 1H-NMR 測定を実施し、いずれも事故スケールと同一ピークが認められた。

4. 考察

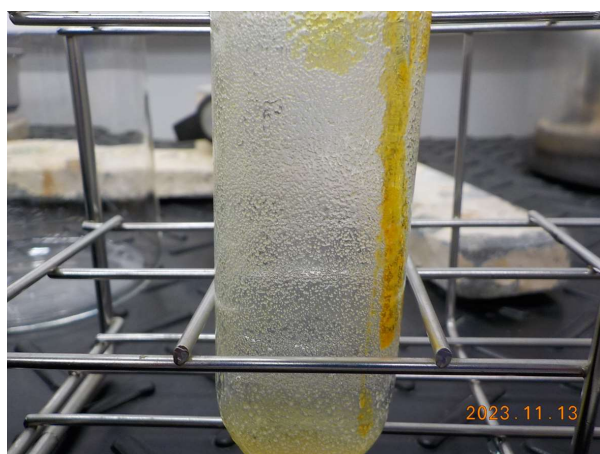
- ・ NO ガスと NO₂ が共存する実験条件で事故原因物質と同様の物質が生成した
FT-IR と 1H-NMR で事故と同一ピークであり、CP-NO_x ダイマーと推定される。
- ・ 5MC プラントでは定修前に比較して、酸素の漏れ込み量が多かった事が原因の一つとして挙げられて
おり、酸素による影響がスケール生成の可能性につながっている事が確認できた。
- ・ 今後、スケール生成を抑制できる要因、追加実験を進める。

(スケールの外観写真)

●試験 15 分後



●試験終了後（窒素風乾前）



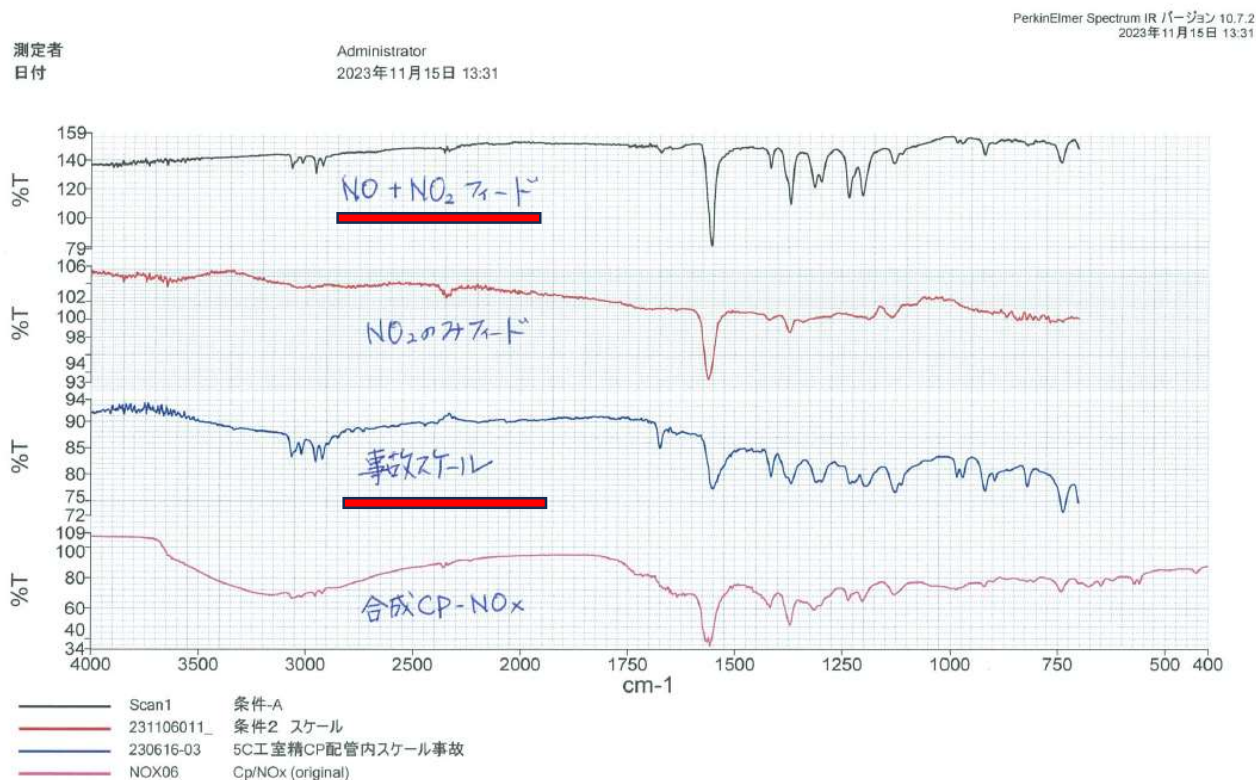
●窒素風乾後（翌日）



●測定サンプル（試験管より回収）

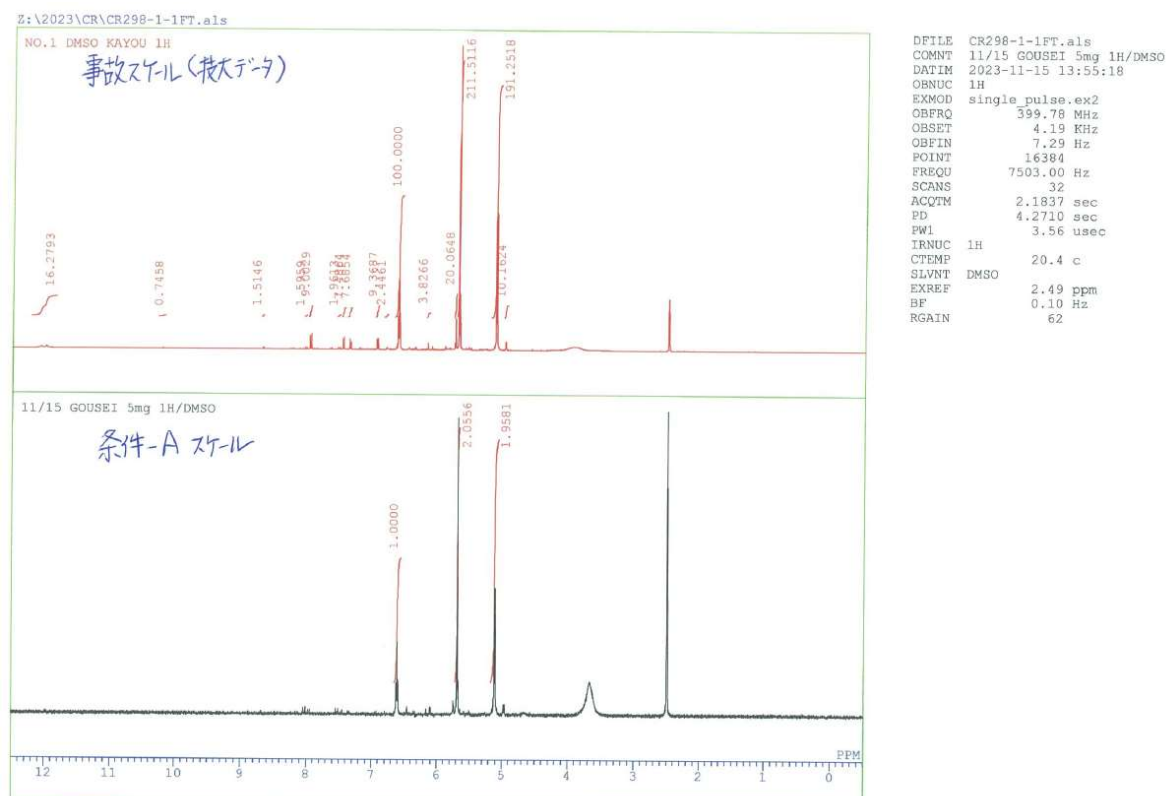


(FT-IR 測定結果)



ページ 1

(1H-NMR 測定結果)



以上

スケール乾燥試験報告書

1. 目的

- ・事故が発生した配管は、工事引き渡しに際し、水洗による湿潤処理の後、水切りのため、2 時間半の窒素ブローが行われた。窒素ブローにより湿潤処理のスケールが乾燥状態となった可能性をモデル試験により検証した。

2. 試験方法

- ・図 1 に示す装置を作製し、吹き出しノズルから 5m/s の風速（流量 23L/min）で吹き出した窒素ガスにより、湿潤状態スケールの含水量経時変化を重量変化から求めた。また、比較として窒素ブロー無しの試験も実施した。
- ・スケールは、事故配管上流の流量計内部から採取した塊状のスケールを用い、水に浸けた後、濾紙上で水切りをして湿潤状態とした。
- ・試験開始から経時で重量を測定し、含水量を求めた（試験終了後のサンプルを一晩真空乾燥し、その重量を含水量の基準とした）。



図 1. 装置の写真

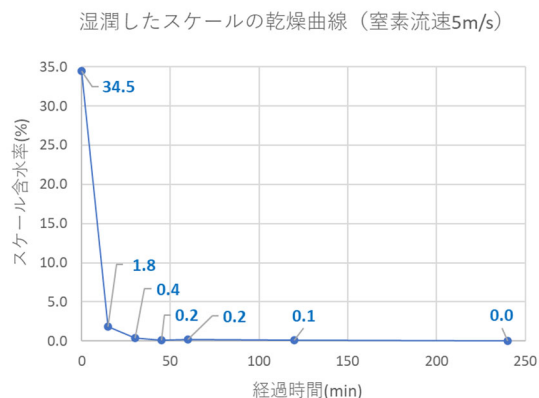


図 2. 窒素ブロー時の乾燥曲線

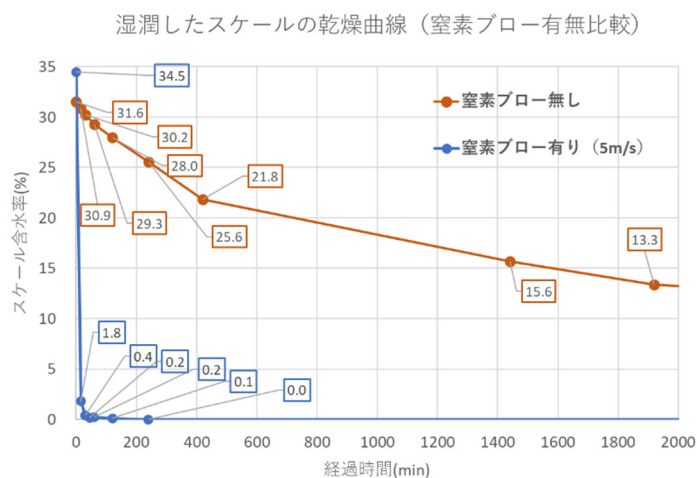


図 3. 窒素ブロー無しの乾燥曲線

3. 結果

- ・ 5m/s の風速で窒素ブローした場合、試験開始から 15 分の時点で含水量は 1.8%まで低下し、30 分以降では 1%未満に低下した。窒素ブロー無しの場合は、含水率の低下は緩やかであり、窒素ブローにより乾燥が大幅に促進されることがわかった。

4. 考察

- ・ 今回実施した 5m/s の風速はスケールでは、30 分程度でほとんど乾燥状態となった。事故当日に行われた配管水切り時の窒素流速は 5m/s 以上であつと推定されることから、実際の配管で 2 時間半の窒素ブローを行った後、スケールは乾燥状態であつたと推定される。

以上

(窒素ブロー有りの試験記録とスケールの外観)

試験条件 No.	サンプル 量(g)	風袋 重量(g)	水分調整方法	窒素流速 10φノズル
本試験	0.7046	21.6543	水浸し濾紙で液切り	5m/sec

サンプル：サンプルID、8
5C 精CP移送 流量計内部スケール（災害後水没・外気温で保持）、出口側より採取

時刻	室温 (°C)	操作	空気流量計 読み(L/min)	サンプル重量 風袋込み(g)	サンプル 重量(g)	状況	含水率 (%)
13:00	21.5	風乾 スタート	0⇒23.2	22.3589	0.7046	スタート、スケールは茶色と濃茶色混在	34.5
13:15	21.6	15分後	23.2	22.1286	0.4743	スケールがベージュ色と含緑ベージュ色になる 試料容器が若干冷えている	1.8
13:32	21.6	30分後	23.2	22.1188	0.4645	スケールの色が薄くなる 試料容器が若干冷えている	0.4
13:49	21.3	45分後	23.2	22.1170	0.4627	色変わらず 試料容器の冷えはなくなった	0.2
14:06	21.2	1時間後	23.2	22.1174	0.4631	色変わらず	0.2
15:08	21.0	2時間後	23.2	22.1167	0.4624	色変わらず	0.1
17:10	20.4	4時間後	23.2⇒0	22.1159	0.4616	色変わらず、ストップ スケールの飛び散りなし	0.0
②サンプル室温×15hr真空乾燥後重量：					0.4616	4時間目と同じ重量 風乾でスケール内部まで乾いていた	0.0

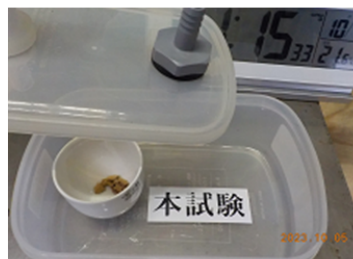
スタート前



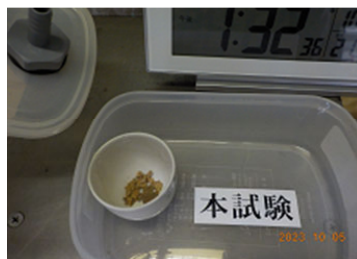
スタート



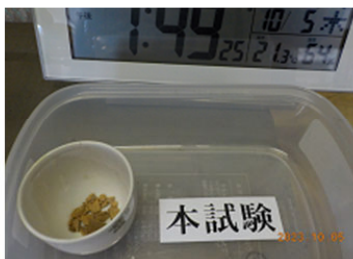
15分後



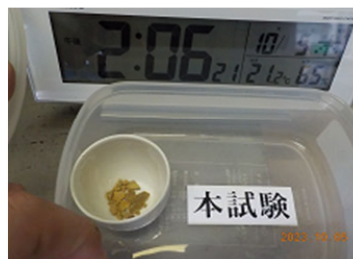
30分後



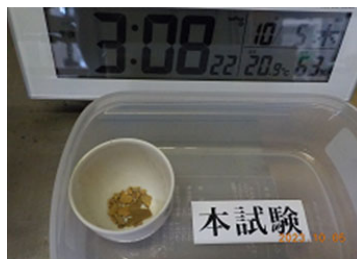
45分後



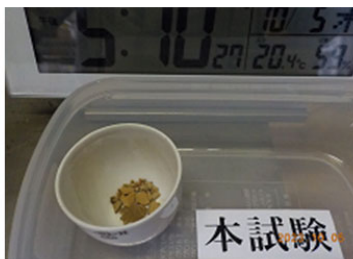
1時間後



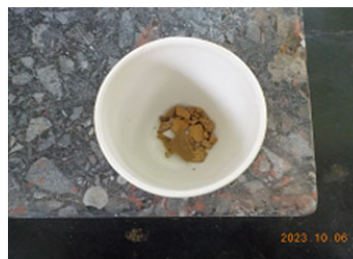
2時間後



4時間後



真空乾燥後



(窒素ブロー無しの試験記録)

試験条件 No.	サンプル 量(g)	風袋 重量(g)	水分調整方法	窒素流速 10φノズル	サンプル素性：サンプルID、12(ID.8乾燥品) 再湿潤処理 SC 精CP移送 流量計内部スケール（災害後水没・外気温で保持）、出口側より採取
無風試験	0.6090	21.6543	水浸し濾紙で液切り	窒素なし	

時刻	室温 (°C)	操作	空気流量計 読み(L/min)	サンプル重量 風袋込み(g)	サンプル 重量(g)	状況	含水率 (%)
9:35	20.4	乾燥開始	使用なし 無風	22.2633	0.6090	スタート、スケールは茶色と濃茶色混在	31.6
9:50	21.3	15分後	〃	22.2590	0.6047	変化なし	30.9
10:05	21.2	30分後	〃	22.2553	0.6010	変化なし	30.2
10:35	21.5	1時間後	〃	22.2496	0.5953	変化なし	29.3
11:35	22.2	2時間後	〃	22.2415	0.5872	変化なし	28.0
13:35	23.7	4時間後	〃	22.2267	0.5724	変化なし	25.6
16:35	20.8	7時間後	〃	22.2041	0.5498	スケールの色やや薄くなった	21.8
9:35	18.9	24時間後	〃	22.1664	0.5121	スケールの色やや薄くなった	15.6
17:35	19.4	32時間後	〃	22.1524	0.4981	スケールの色やや薄くなった	13.3
②サンプル室温×15hr真空乾燥後重量：				0.4168	試験中湿度：53%～67%		0.0

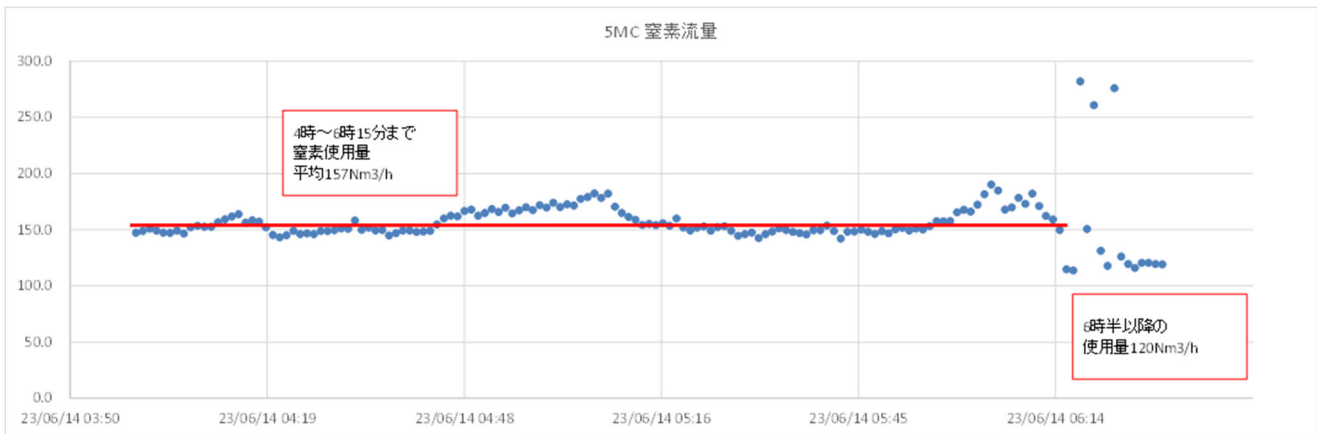
(配管水切り窒素流速について)

- ・事故当日朝方の 5MC プラントの窒素使用量は次の通りである。

4 時～6 時 15 分頃まで 平均 157Nm³/h : 水切り中

6 時半以降 平均 120Nm³/h (▲37Nm³/h) : 水切り終了後

- ・運転日報には、水切り以外に窒素使用を停止した記録はなく、上記の差分である 37Nm³/h をすべて 25A 配管の水切りに使用していたとした場合、窒素流速は約 16m/s となり、水切り時の窒素流速は 5m/s 以上であった可能性が高い。



SUS 配管切断時のセーバーソー刃先温度試験

1. 概要

- ・ SUS 配管をセーバーソーで切断した際の刃先・配管の温度上昇を確認するため、サーモカメラによる温度上昇再現試験を実施した。
- ・ 試験の結果、セーバーソー刃先温度は切断時に 150℃以上となり、スケール着火温度を上回る温度に上昇することが確認された。

2. 試験日時

1回目 2023年6月21日 14:00 2回目 2023年6月26日 10:00

試験場所:旧OM修工室

3. 使用機材、試験条件

<試験方法>

- ・ SUS 配管切断作業をサーモカメラで動画撮影し、災害発生時と同じ 22mm 切込長さに到達するまでの時間と刃先温度を計測した。

(1) SUS 配管:25A SUS304TP Sch10

(2) 切断機器:本体 HIKOKI CR18DBL (災害で使用していたものと同型機種)

① 鋸刃 #103 山数 14、全長 150mm、刃圧 0.9mm、厚物・ステンレス管材用(災害時と同じ)

② 1回目の試験では中古の替刃を使用、2回目の試験では新品の替刃を使用した

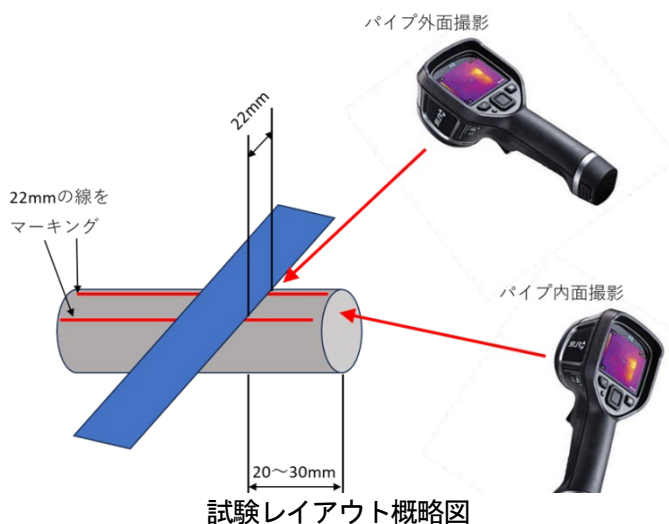
(3) 切断条件:低速モード

(4) サーモカメラ:FLIR E75

① 放射率:0.95(接触温度計を用いて調整)、温度レンジ:0~650℃

② 動画モード、最高温度点追尾モード(外面撮影)、中心点温度モード(内面撮影)

(5) 撮影アングル:配管外面と内面それぞれ撮影



HIKOKI CR18DBL



試験風景(外面撮影)

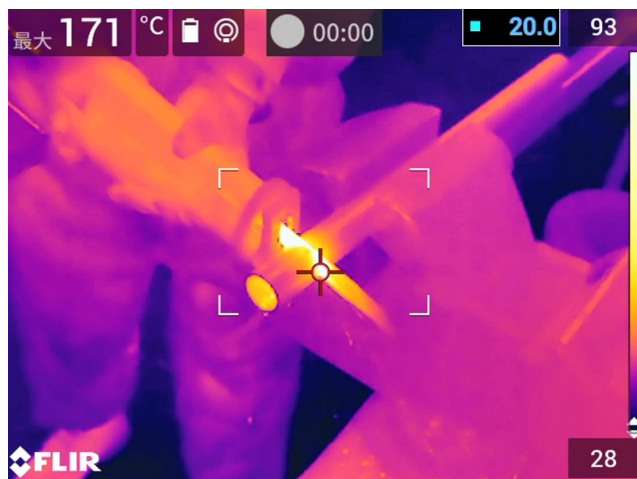


試験風景(内面撮影)

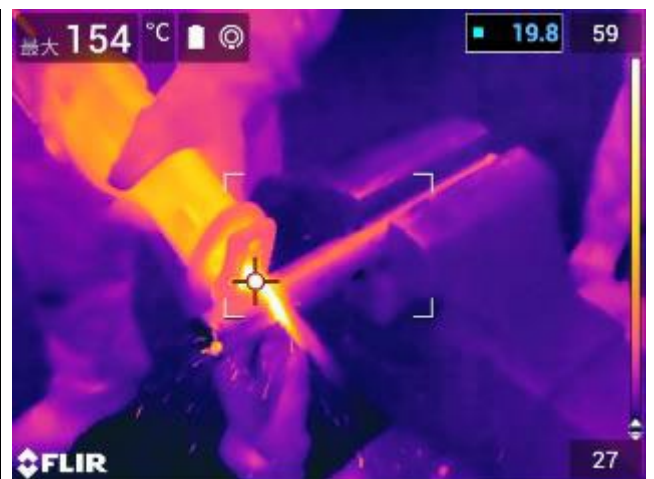
4. 試験結果

No.	撮影アングル	替刃	速度モード	22mm 切込時の刃先温度	22mm 切込までの時間
①	外面	中古	低速	171℃	23 秒
②	外面	新品	低速	154℃	5.1 秒
③	内面	新品	低速	183℃	4.7 秒

①外面・中古刃

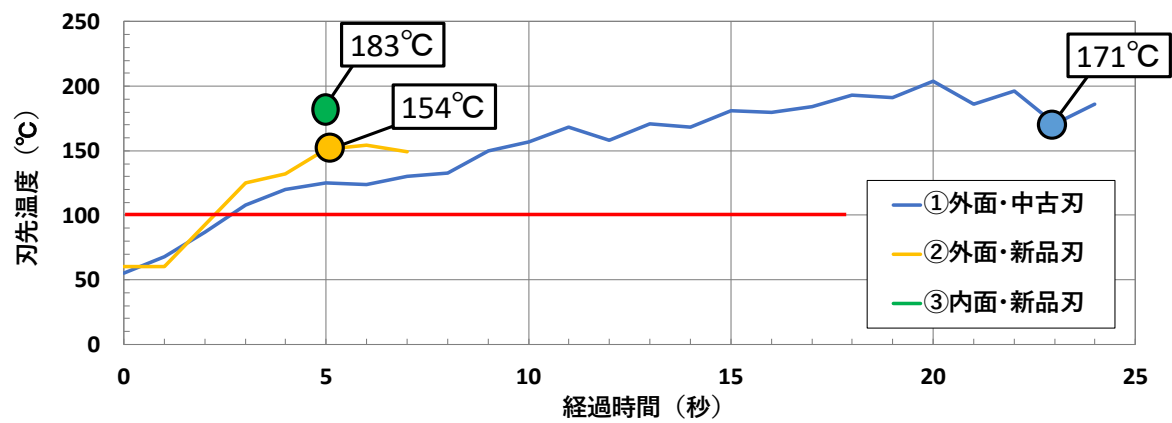


②外面・新品刃



③内面・新品刃





5. 結論

いずれの切断条件でも刃先温度は 150°Cを上回り、セーバーソーの刃先がスケールに接触した場合には発火する可能性があることが確認された。

以上

1. 概要

1-1. 背景

- ・デンカ（株）よりクロロブレンモノマー製造設備事故調査の一環として、配管破裂が発生したメカニズムと現場現象の解明を行うため、シミュレーション解析の依頼を受けた。

1-2. 手法

- ・配管内のスケールが爆轟した際の管内壁にかかる圧力の経時変化を流体解析により求める。計算モデルは二次元軸対称モデルとし、計算エリアは切断箇所から破壊箇所を含むエルボ部までの間とする。スケールは TNT 相当の爆発威力を有するものとし、設定する。
- ・流体解析の結果（管内圧力）を受け、有限要素法による構造解析ソフトを用いて、爆轟圧力による配管の変形・破壊を評価する。

1-3. 結果と考察

- ・配管におけるスケール厚みの実測値及び計算値が図 1 に示される。配管の切断箇所のスケール厚みは薄く、一方、切断箇所から上流の配管ほどスケールの厚みが増している状況が確認できている。
- ・シミュレーション結果は表 1 に示す通りであり、
 - ＊スケールの厚みが 0.37mm 以下では配管は破裂しないことと、0.75mm は破裂することが判った。
(なお、0.37～0.75mm の間に破裂しない限界厚みがあると考えられる。)
 - ＊実際の配管内部でのスケールの付着状態と比較すると、切断箇所の付着厚みは 0.4 mm 推定され、配管破裂に至らなかったものと考えられる。エルボ部分の付着量は 1.2～1.6mm と推定され、配管破裂に至ったと考える。
- ・このシミュレーション結果から、セーバーソーによる切断によって生じた熱によって火炎が発生し、急速な燃焼（爆燃現象）が起き、それがエルボ部に到達する直前の地点で爆轟となり、配管破裂に至ったと推定する。
また、爆発形態は、配管破裂によって生じた破片の形状や肉厚の変化からみて、「爆轟」であったと推定される。

図 1. スケール厚み実測及び推定結果 (出典：青海工場 有機材料研究部)

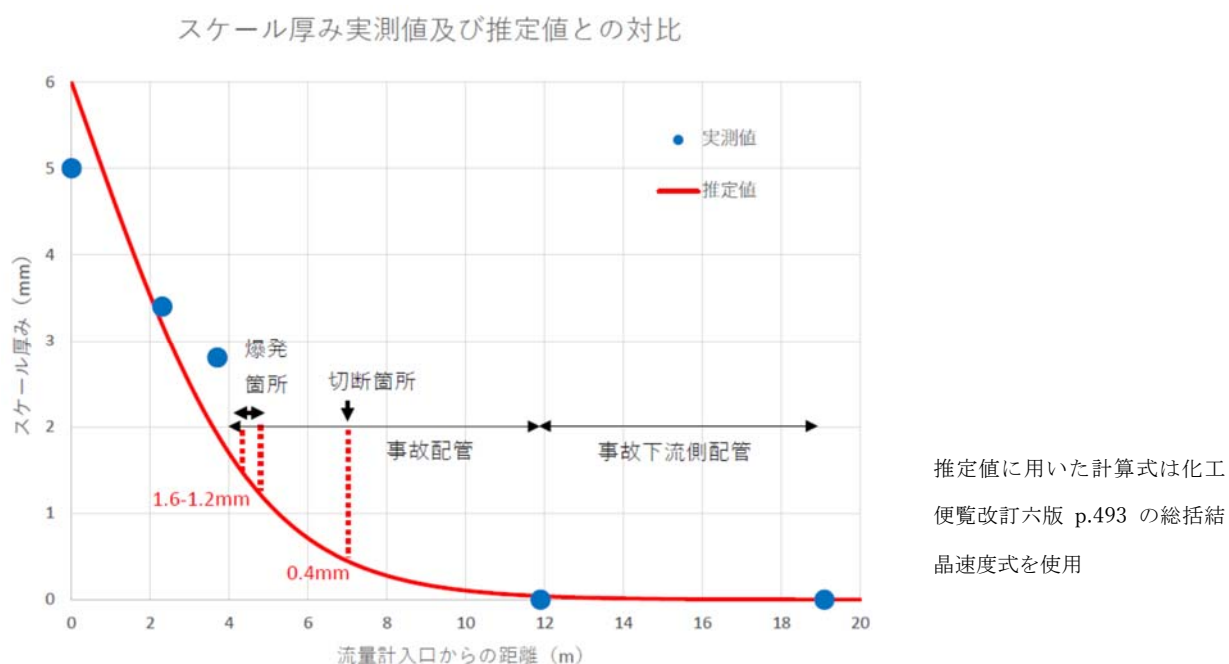


表 1. シミュレーションの結果

スケールの厚み (mm)	エルボ近傍の配管に発生する相当応力 (MPa)	破裂の有無
3.4	520<	破裂した
0.75	520<	破裂した
0.37	430	破裂せず
0.12	230	破裂せず

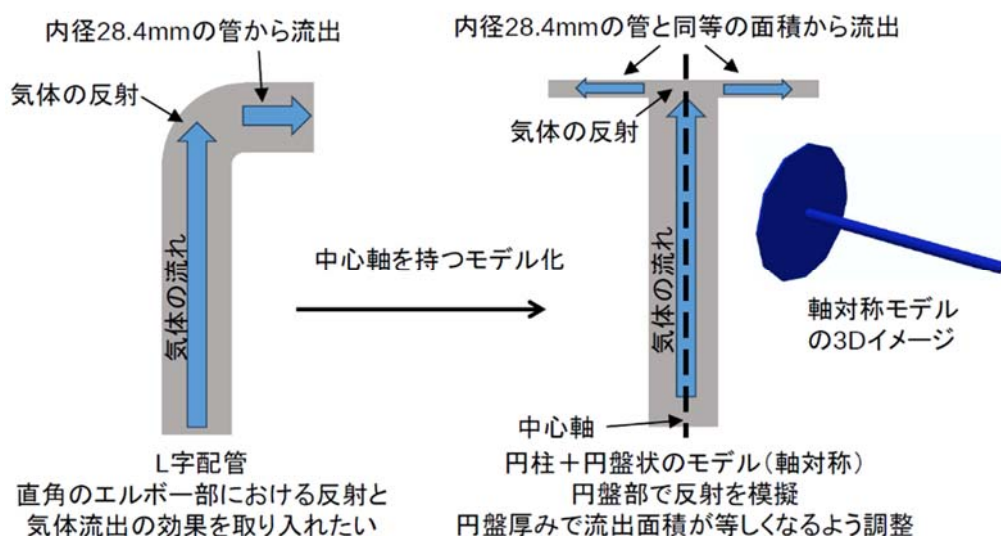
※配管材料 (SUS304TP-A、Sch10S、25A) の引張強さは520MPaである。

2. シミュレーションの内容と結果

2-1. 流体解析ソフトの説明、計算条件

- ・配管内のスケールが爆轟した際の管内壁にかかる圧力評価は下記の流体解析 (二次元モデル) による。流体解析ソフト (ERI Explosion) は、一般の Open FOAM を株式会社爆発研究所が気相や凝縮相 (爆薬) における爆発爆轟燃焼の数値解析を可能にしたものである。
- ・流体解析の手法、計算事例を図 2、3 に示す。

図 2. 流体解析の手法



*配管部の内径は 28.4mm (半径 14.2) とした。配管長さは 500、1000mm とした。

*エルボ部に相当する円盤状部分の厚さは 7.1mm

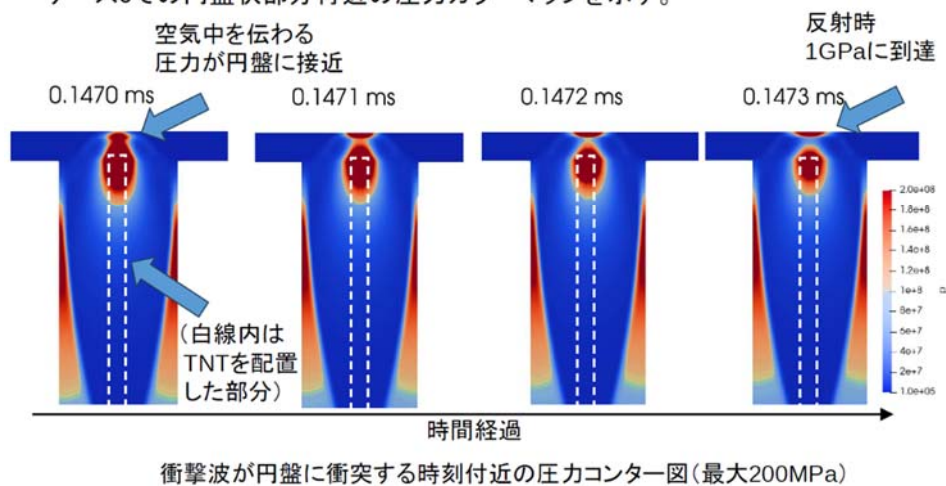
→配管部から円盤状部分に流出できる部分の面積は配管断面積と同じ

*爆薬として TNT を配管中央に円柱状に配置した。

図 3. 円盤部 (エルボ部を想定) への圧力伝播の計算例 (スケール厚み 0.37 mm)

円盤状の止端部でも反射が見られた。

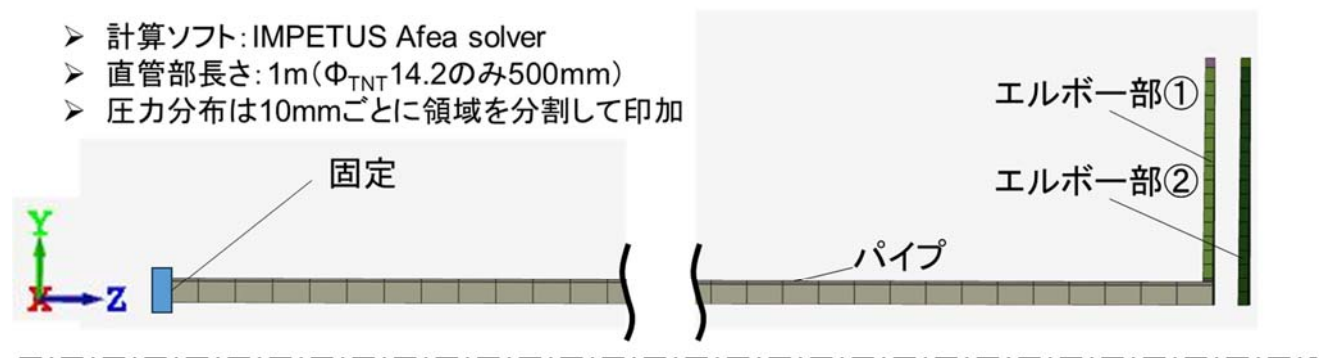
ケース3での円盤状部分付近の圧力カラーマップを示す。



2-2. 構造解析ソフトの説明、計算条件

- 爆轟圧力による配管の変形・破壊の状況は、ノルウェイの IMPETUS Afea 社が開発した有限要素法の構造解析ソフトウェアを用い、評価した。構造解析の境界条件、手法などの情報を図 4 に示す。

図 4. 構造解析の境界条件、手法



- 配管: SUS304 25A Sch10S

機械的性質

密度	7800	kg/m ³
ヤング率	200	GPa
ポアソン比	0.3	—
降伏強さ	220	MPa
静的引張強さ	520	MPa
破断歪み	60.6	%

3. 主な提出資料

- ・数値解析方針案 2023 年 8 月 17 日
- ・スケールの爆轟に起因する配管破裂メカニズムの調査
流体＋構造解析 2023 年 10 月 8 日

以上

1. 概要

1-1. 目的

- ・配管破裂は、セーバーソー切断部で火炎が発生し、それがエルボ部付近（破裂箇所）まで伝播したものと考えられる。切断箇所から上流の配管ほどスケールの厚みが増し、スケールが多く堆積していたので、配管のエルボ部付近において爆発・配管破裂が起きたと考える。
- ・エルボ部は流速が遅くなるため、スケールが特異的に堆積・偏析する可能性もあると考えられ、流体解析ソフトウェアを用いて評価した。

1-2. 手法

- ・流体解析ソフトウェア（scFLOW）を用いて、配管内の流体の流れをシミュレーションし、偏流発生の有無を含め流れの状態を評価する。さらに、微粒子（ 10μ 、 30μ ）を導入し、粒子の特異的な滞留や堆積の有無などを確認する。
- なお、堆積スケールの拡大観察より、平均的な一次粒子のサイズは数 μ から 10μ 程度と見るのが妥当と評価し、計算条件に反映させる。

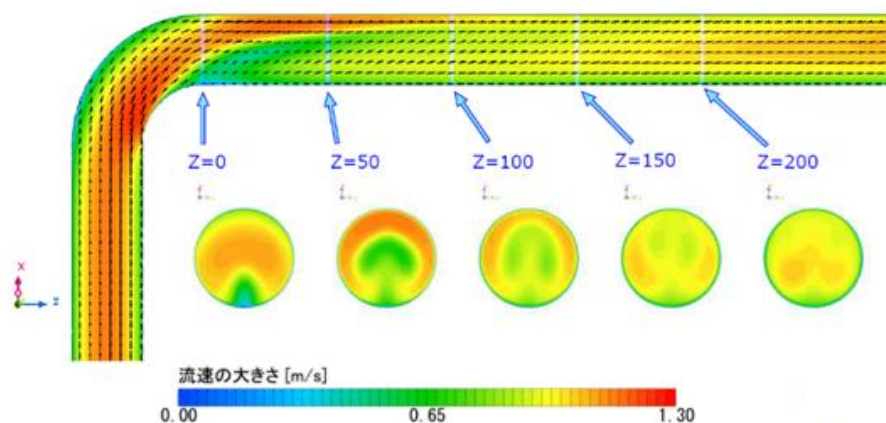
1-3. 結果と考察

- ・エルボ部は流速が遅くなり、特異的にスケールが堆積・偏析する可能性があると考えられ、流れのシミュレーションを行ったが、その様な傾向は認められなかった。さらに $10\mu\text{m}$ 、 $30\mu\text{m}$ の粒子の流れ、動きをシミュレーションしており、この結果もこれらの粒子が特異的に滞留や堆積する状況は見られなかった。
- ・配管の上流部の別の配管のエルボ部を観察したが、特異的な堆積・偏析はなかった。この流体シミュレーション結果は、配管内部の付着状況の観察結果（ほぼ均一に付着している）と合致している。

図 1. 配管内の流れのシミュレーション

解析結果

・エルボ①周辺の断面速度分布

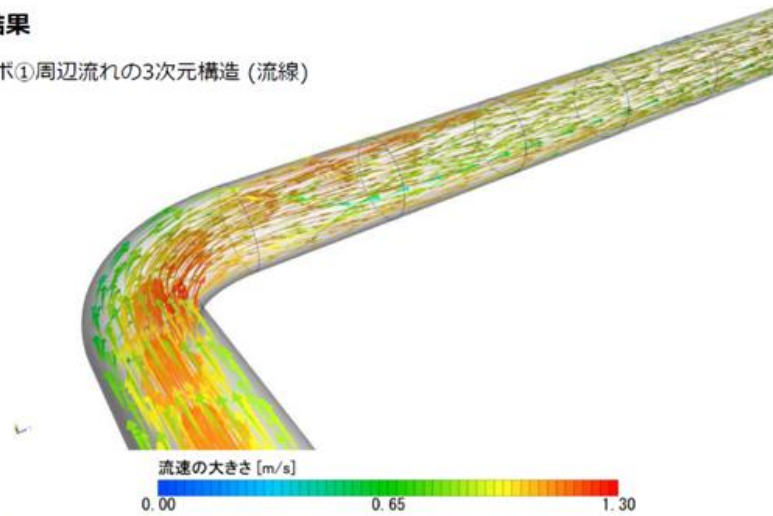


→配管内（エルボ部含む）流動解析：局所的な液の滞留／逆流などは見られない。

図 2. 配管内の流れのシミュレーション（エルボ部付近を拡大）

解析結果

・エルボ①周辺流れの3次元構造（流線）



→特にエルボ部付近を拡大し観察しても、液の滞留は認められない。

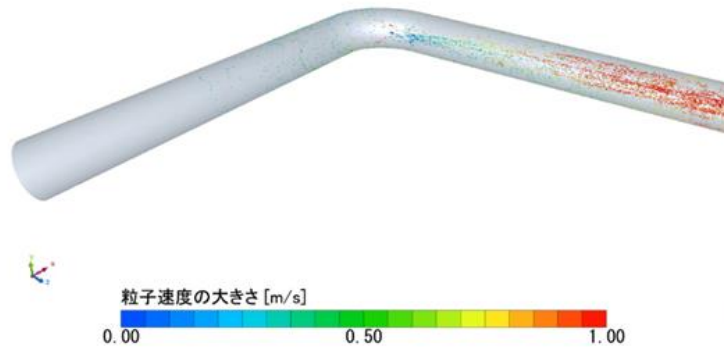
図 3. 配管内の粒子（トレーサー）の流れ／堆積（有無）のシミュレーション

解析結果 Case3

・エルボ①周辺の粒子挙動

Time : 0.500000

粒径 : **10 μ m**
反発係数 : 反発せず壁に沿って動く
付着割合 : 0% (= 付着しない)



→10 μ m 粒子、1 万個をトレーサーとして導入して流動解析：

トレーサー導入から 2sec 以内で全粒子が流れ去り、滞留は起きていない
ことが動画で確認できた。

2. シミュレーションの内容と結果

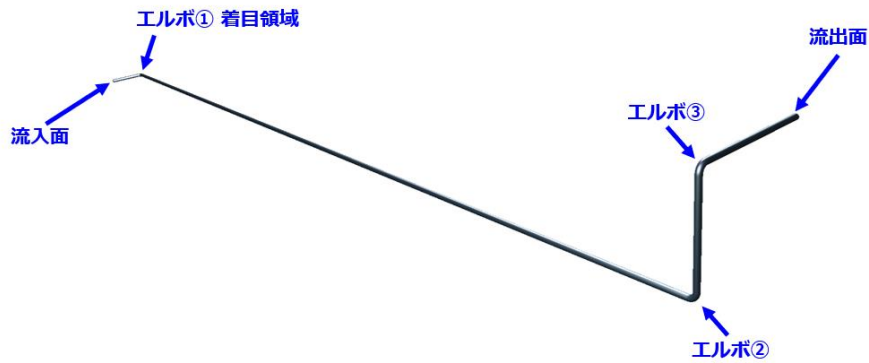
2-1. 計算モデルの説明、計算条件

・配管形状は下記の通りであり、流路のみを考慮して計算モデルを作成した。

＊配管 25A-Sch10s, 内径 28.4mm

＊エルボ半径 38.1mm

図 4. 流体シミュレーションの配管



・以下に、計算条件を示す。

- ・条件設定
 - ・非圧縮性乱流解析
 - ・乱流モデル : RANS SST k- ω モデル
 - ・ソルバータイプ: 圧力ベースソルバー
 - ・定常解析
 - ・収束判定条件 : 各変数の変動が0.0001以下となった場合に収束とみなす
 - ・物性値
 - ・液体(水に近い物性)
 - ・密度 : 990kg/m³ [= 0.99g/cm³]
 - ・粘性係数 : 7.5×10^{-4} Pa·s [= 0.75cp]
 - ・定圧比熱 : 4,183J/(Kg·K)
 - ・境界条件
 - ・Inlet : ドライバー型流入条件 体積流量2.1m³/h
 - ・Outlet : 静圧(流出)条件 圧力0Pa
 - ・その他の面 : 静止壁条件(ノースリップ壁)

2-2. 流体解析による粒子挙動のシミュレーション条件

・以下に、計算条件を示す。

- ・条件設定
 - ・非定常粒子解析
 - ・流れは解析せず、事前の定常解析の結果を使用
- ・粒子物性②
 - ・密度 : 1.62g/cm³
 - ・粒径 : 10 μ m
 - ・発生粒子数 : 10,000個
 - ・反発係数 : 反発せず壁に沿って動く
 - ・付着割合 : 0% (= 付着しない)

以上

SUS 配管切断時の振動再現試験(先端フランジ部振動測定)

1. 目的

セーバーソーで SUS 配管を切断した場合の配管振動を再現し、振動による破裂原因を検証する。

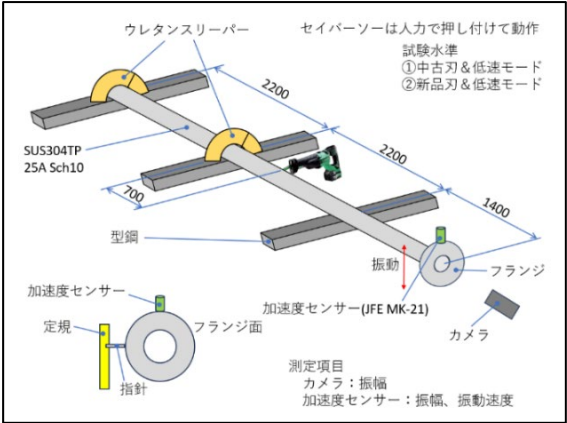
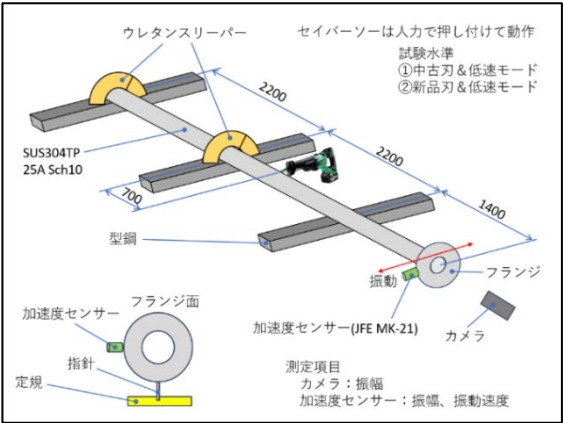
2. 試験条件

事故時の SUS 配管の現場状況を再現し、カメラ撮影および振動計を用いて配管の振動を測定した。

試験日時 : 2023 年 9 月 29 日 10:00
SUS 配管 : 25A SUS304TP Sch10
セーバーソー : 本体 HIKOKI CR18DBL (災害で使用していたものと同型機種)
振動計 : JFE アドバンテック MK-21

3. 試験方法

- ・事故配管を再現し、振動センサーを配管端部(破裂が起きた付近)に取り付け、垂直方向・水平方向の振動を測定(各成分測定に1回の切断試験を実施/計2回実施)。
- ・配管端部のエルボ部分は事故状況を再現されていないが重量が小さいため振動試験への影響が小さいと判断。
配管(2.2m+1.4m)重量 7.84kg + フランジ 1.12kg >> エルボ 0.13kg



4. 試験結果

(1) 水平方向の振動値

	振幅(mm)		速度(mm/s)
	撮影画像	振動計	
	からの目測	MK-21	
中古刃/低速	1.0	0.7	62
新品刃/低速	1.5	1.0	112

(2) 垂直方向の振動値

	振幅(mm)		速度(mm/s)
	撮影画像	振動計	
	からの目測	MK-21	
中古刃/低速	0.5以下	0.3	21
新品刃/低速	0.5以下	0.2	26

5. 結論

- ・配管振動の水平方向速度最大値 112mm/s での運動エネルギーは落つい感度 5 級(※)のエネルギーより極めて小さく、切断時の配管振動による破裂の可能性は低いと考えられる。

(※落つい感度 5 級:事故点上流配管から採取されたスケールの落つい感度)

配管の運動エネルギー : $0.5 \times 8.96 \text{ kg} \times (0.112 \text{ m/s})^2 = 5.62 \times 10^{-2} \text{ J}$

落つい感度5級の運動エネルギー : $9.81 \text{ m/s}^2 \times 5 \text{ kg} \times 0.2 \text{ m} = 9.81 \text{ J}$

以上

CP-N0x ダイマーの湿潤状態での安全な取扱い方法について

2023 年 6 月 14 日に発生した配管破裂事故では、配管内に付着していたスケールが破裂事故の原因物質。この原因物質は、CP-N0x ダイマー※と特定された。この CP-N0x ダイマーは、過去 Dupont 社の米国工場で配管破裂事故を発生させていた事が今回の調査で分かった。この物質は、TNT※に匹敵する発熱量を有しており爆薬に相当する物質である。

※CP-N0x ダイマー：「2-クロロ-1-ニトロ-4-ニトロソ-2-ブテン、ダイマー」

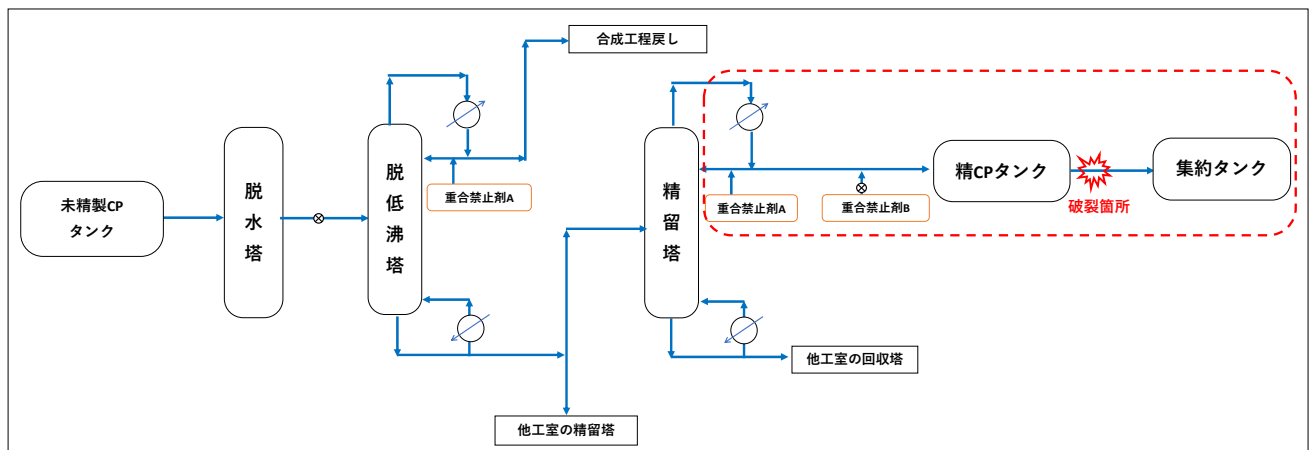
クロロブレンモノマーに N0 基、N02 基が結合した 2 量体物質、黄土色～茶色の固形状

※トリニトロトルエン：TNT 火薬の主成分

1) CP-N0x ダイマーが生成する可能性のある場所

これまでの事故調査の結果、CP モノマー精留塔の周辺設備で生成する可能性がある（下図）。

- ・精留塔上部
- ・精留塔コンデンサー
- ・精留塔の還流配管
- ・精留塔から精 CP タンクまでの溜出配管
- ・精 CP タンク周り
- ・精 CP タンク抜出から移送ポンプと移送配管周り



2) CP-N0x ダイマーが存在する可能性のある配管及び機器の点検・整備時の湿潤徹底

以下の対応を徹底して実施し、CP-N0x ダイマーのスケールを湿潤状態で安全に取り扱う。
配管や機器が湿潤状態にない時は、作業を実施しないことを徹底する。

- 配管や機器内の液・ガス抜きをドライ窒素を使用して実施し、可燃性ガスを除去する。
- その後、水洗・水没処理を行い、湿潤状態を維持して作業する。
これ以降は、ドライ窒素ブロー、水切り作業は実施しない。スケール乾燥防止を防ぐ。

詳細については、以下の対応、手順にて実施する。

- ①配管や機器内の液抜き、ガス抜きの作業手順については、これまで通りの作業手順に従い、窒素による液ガス抜きを実施し、可燃性ガスが基準値内（＜1％）になる事を確認する。
- ②その後、配管や機器内の通水、満水、散水により解体、点検、整備まで、スケールを水に接触させて湿潤な状態を保持する。

この通水、満水、散水の時間は、8 時間以上を実施した上で、湿潤な状態を保持する。
乾燥状態のスケールと同重量の水を約 30 分間混合する事により、約 30% の水分が含まれたスケールの湿潤状態を作り出すことができる。
実際のプラント現場では、スケール付着量に対して大過剰な水と接触しており、その状態を 8 時間以上保持する事により湿潤状態を担保できると考えられる。

※配管や機器毎については、以下の方法により湿潤状態とする。

発生可能箇所	水による湿潤方法
精留塔	コンデンサーより満水オーバーさせた水によりガスラインを経由して塔内を散水する
精留塔コンデンサー	通水による満水状態 満水オーバーさせた水を精留塔へ
精留塔還流配管	通水により塔内へ
精留塔から精 CP タンクまで溜出配管	タンクヤード内の精 CP タンク側より精留塔コンデンサーの溜出口まで通水により満水オーバーブローする
精 CP タンク	通水による満水オーバーの状態にする
精 CP タンクから移送ポンプ移送配管	通水により水洗状態を保持

③その後、湿潤な状態で配管、機器等の解体作業を実施する。

解体前の水抜きについては、エアリング等をとって、フリードレンとして排水する。

※絶対に、窒素ガスやその他の不活性ガス、エア等を流してスケールを乾燥状態にしない。

また、3) 乾燥による影響で記載したが、解体後の機器においても1日以上、放置した状態では水分が低下し、乾燥した状態に至る危険性があるため、解体した機器においても散水する。

絶対にスケールを乾燥させた状態にはさせない。

④スケール（付着物）を見つけた場合は作業を中断。落つい感度8級相当まで評価できる保安試験により衝撃感度、発煙発火温度を評価し、湿潤状態での安全な取り扱い方法を確認する。

⑤スケールが付着している可能性のある場所では、スケールを除去し、安全な状態で引き渡すまでは、火気使用作業を禁止する。火気の種類と工具類に該当するものについては、エンジ部から発行された基準を参照されたい。

a) 生火、b) 火花発生工具・高温工具、c) 内燃機関、d) 非防爆電動工具

3) 機器の点検、整備、解体時の手順

<共通の禁止事項>

- ① ガス検知器により安全を確認するまで作業を始めてはいけない。
- ② 保護具は破損や異常がないことを確認してから使用し、確実に装着してから作業を始めなければいけない。
- ③ 周囲に温水やむき出しの蒸気配管等、高温に接するリスクが存在しないか確認してから作業を始めなければいけない。
- ④ 衝撃等により火花／熱を発生する可能性のある工具（グラインダー、セーバーソー、ハンマードリル等）を使用してはならない。
- ⑤ 機器及び配管に衝撃を与えてはならない。特に安全帯や工具の接触に注意する。
また作業中に工具の投げ渡し等の落下物及び衝撃による火花の発する行為を禁止する。
- ⑥ 配管を切断してはならない。
- ⑦ フランジ解体時は必ず立会者の下で実施しなければならない。
- ⑧ 配管内にスケールなどの付着物が見つかった場合、湿潤状態を維持した状態で作業を中断し、衝撃感度、発煙・発火温度を確認しなければならない。
- ⑨ 作業する時は安全な立ち位置で行わなければならない。
- ⑩ 作業内容で計画から変更する点が生じた場合は作業を中断し、勝手な判断で作業を行わない。

<共通事項>

- ① 解体後に機器、ガスケット等の湿潤状態を維持するために、ホース、散水用具等を準備する。
- ② 解体時に、機器内部の状態を写真で記録し、スケールを採取する。
- ③ 解体担当者 製造、エンジ部、協力会社の3者立会いの下、作業を行う。
- ④ 関係者には、スケールの危険性について十分に説明を行う。

以上

安全管理強化項目及び進捗表

・今回事故の対策・安全管理の強化に係る実施項目および進捗状況について下図に示す。

項目	具体的な実施項目・進捗状況	実施期限	
		青海工場	全社
1. リスクアセスメントの質的向上			
(1) 既存物質に関する実施済リスクアセスメントの総点検	・すでに実施されている既存物質のリスクアセスメントについて、漏れがないか、リスク評価や対策は適正か改めて総点検する。		2024 年 6 月
(2) 危険な物質に関する全社ガイドラインの策定	・今回の配管破裂事故において、配管付着スケールの危険性評価が不十分であったことを反省し、全社として、各事業所で取り扱っている「特に注意を要する危険な物質」を規定し、危険性評価方法を策定する。(ガイドラインの策定) ・上記ガイドラインに基づいて、各事業所は、危険物質の危険性評価後、得られた結果を作業条件及び作業手順に反映する。		2024 年 9 月
(3) 運転状態に関わる変化点の周知	・今回の事故の背景には、運転条件が基準値内でもスケール生成が増加したことにある。所管部門は、化学プラントで副生物や設備故障増加などの運転状態が正常状態から外れていないか(変化)について、“いつもと違う”と感じたら、月例の事業所長報告会等で審議し、事業所内関係者に周知する。		2024 年 3 月
(4) 事故・ヒヤリハット事例の有効活用	・事故・ヒヤリハット報告事例を有効活用するため、化学プラントで事故・ヒヤリハット(インシデント)が起きた場合、所管部門は、その事象をプロセスセーフティの観点から深掘りし、運転条件や作業基準書に反映させる。 ・各部門は、他社の化学プラント事故に関心を持ち、その情報を基に自社のプロセスにも、同様の事故が起きる可能性がないかを検討し、必要に応じて運転条件や作業基準書に反映させる。		2024 年 3 月
2. 工事安全管理			
(1) 工事安全措置に関するリスクアセスメントの徹底	・所管部門は、工事安全措置に関するリスクアセスメントを工事元請会社が参加の下で実施する。 ・リスクアセスメント結果を基に、工事施工前までにリスク低減措置を講じる。 ・所管部門は、残留リスク情報が工事元請会社に確実に伝わっていることを確認する。	継続実施中	2024 年 6 月
(2) 工事施工方法に関するリスクアセスメントの徹底	・工事元請会社は、工事安全措置に関するリスクアセスメントを基に、工事施工方法に対するリスクアセスメントを実施する。 ・工事施工方法に関するリスクアセスメントには、工事施工業者も加わって実施する。	継続実施中	2024 年 6 月
(3) 工事ミーティング	・工事施工業者は、工事施工方法に関するリスクアセスメントに基づいて、工事を実施する。 ・残留リスク情報に基づいて、危険予知を徹底する。特に、作業直前の危険予知が重要である。	継続実施中	2024 年 6 月

項目	具体的な実施項目・進捗状況	実施期限	
		青海工場	全社
(4) 仕組みを活用した施工方法の確認	・所管部門は、工事元請会社が実施した工事施工方法に関するリスクアセスメントを確認する。特に、工事安全措置に関するリスクアセスメント実施後の残留リスクに対して、どのように対策が講じられているかを確認する。 ・所管部門は、工事元請会社、工事施工業者の持ち込み機器に関して、持ち込み可能な機器の情報を提供する。 ・工事施工業者は、使用する火気工具等持ち込み機器全てを作業許可書へ明記し、許可された持ち込み機器を使用する。また、工事施工方法に関するリスクアセスメント実施後の残留リスクに応じて、有資格者による作業、教育訓練状況、立会い方法を基準に定めて実施する。	継続実施中	2024 年 6 月
(5) 工事前の教育受講状況の確認	・所管部門は、工事元請会社および工事施工業者が、現場の状況・作業の注意事項・化学物質の危険性や有害性などを理解してから工事を開始できるよう、事前に協力会社の教育受講状況を確認する。	継続実施中	2024 年 6 月
(6) 安全衛生責任者の選任 及び 管理者の役割と責任の明確化	・統括安全衛生管理体制の整備が義務づけられていない規模の工事においても、安全衛生管理の充実を図るため、選任が必要な工事を定めた上で、当該工事に係る所管部門の統括管理者を定める。 ・工事元請会社、工事施工業者は安全衛生責任者を選任する。 ・施工依頼部門及び協力会社の管理者は「安全衛生責任者教育」及び「職長等及び安全衛生責任者の能力向上教育」を社内外で受講し、工事全般の安全衛生管理に関する役割と責任についての認識を明確化する。	継続実施中	2024 年 9 月
3. 安全保安教育			
(1) 化学物質の危険性・有害性の評価や再教育の実施	・ライン管理職、技術スタッフ、運転員一人ひとりが自職場の化学物質を安全に取り扱うため、それらの従業員に対し、化学物質の危険性と取り扱いに関する安全教育を実施する。	2024 年 9 月	
(2) プロセスセーフティに関するリスクアセスメント教育の実施	・プロセスセーフティに関するリスクアセスメント教育を、管理者・技術スタッフ等を対象に実施する。	2024 年 9 月	
4. 協力会社及びデンカ社内に対する安全監査／年 1 回			
(協力会社及びデンカ社内に対する安全監査／年 1 回)	・各事業所の環境保安部門が主体となって、主な工事請負業者、工事施工業者に対する安全監査を実施する（年 1 回）。 ・環境保安部門は、デンカ各事業所において、7-1. 7-2. 7-3 の各対策が確実に行われているかを、監査し、監査結果を定期的に取り締役会で報告する。更に青海工場の他、全工場の安全管理の継続的支援を通して、危険有害物質の取扱いに関する法令の遵守状況や、安全衛生管理体制について確認する。 ・経営幹部・ライン管理者の「感じてもらえる指導力」が発揮されなければ優良安全は達成されない。経営幹部・ライン管理者をサポートするため、全工場の環境保安部門に新しく安全管理係の設置、またはそれに準じた専任体制を確保する。今後は、その安全管理係の現地現物によるパトロール等を通して課題を改善する。	仕組み作りの期限： 2024 年 6 月	
5. 安全の日			
(安全の日)	・事故の記憶を風化させないために、本事故の起きた 6/14 を全社の「安全の日」とする。この日に、なぜ事故が起きたのかを、全社員が振り返り、安全意識を向上させる。		