

株式会社日本触媒 姫路製造所
アクリル酸製造施設 爆発・火災事故
調査報告書

2013年3月

株式会社日本触媒 事故調査委員会

目 次

	ページ
1. 序	1
1.1. はじめに	1
1.2. 事故調査委員会	1
1.2.1. 委員会の目的および構成	1
1.2.2. 委員会の経緯	2
2. 事故の概要	3
2.1. 発災事業所および発災設備	3
2.2. 発災日時	3
2.3. 気象状況	3
2.4. 被害状況	3
2.4.1. 人的被害	3
2.4.2. 物的被害	3
2.4.3. 環境への影響	3
2.5. 事故後の状況	3
3. 発災事業所および発災設備の概要	4
3.1. 発災事業所の概要	4
3.2. アクリル酸製造工程の概要	5
3.2.1. アクリル酸の特性	5
3.2.2. アクリル酸製造工程	6
3.3. 発災設備の概要	8
4. 事故の発生状況	9
4.1. 爆発・火災に至る過程	9
4.1.1. 時系列情報	9
4.1.2. 事故の進展状況	10
4.2. 爆発・火災による被害状況	15
4.2.1. 爆発影響および被害	15
4.2.2. 火災影響および被害	26
5. 事故原因の究明	28
5.1. 爆発・火災の発生要因	28
5.1.1. 事故の直接原因	28
5.1.2. 事故の要因	28
5.1.3. 事故要因の背景	30
5.2. 爆発・火災による被害拡大に関連する事項	40

6. 再発防止対策の提言	41
6.1. 発災設備の再発防止対策	41
6.2. 類似災害防止のための対策および水平展開	42
6.2.1. 類似災害防止のための対策	42
6.2.2. アクリル酸使用設備の災害防止対策	43
6.2.3. 災害防止対策の水平展開	43
6.3. 安全な製造所・企業に向けての安全文化の醸成	44
おわりに	51

1. 序

1.1. はじめに

2012年9月29日（土）14時35分頃、兵庫県姫路市の株式会社日本触媒 姫路製造所 アクリル酸製造施設において、アクリル酸中間タンク（V-3138）の爆発・火災事故が発生し、死者1名、負傷者36名の人的被害が発生した。

日本触媒は、本事故の原因究明と再発防止策の策定を目的に、10月5日、社外委員4名、社内委員3名で構成される事故調査委員会を設置した。

当委員会は、これまでに7回の委員会を開催し、事故現場を検証し、日本触媒 姫路製造所より提供された記録類、各種実験データや解析結果、証言等について検証を行い、原因究明と再発防止策についての議論を重ねた。その結果、爆発・火災に至る事故の原因を解明し、再発防止対策の提言をまとめるに至ったので、本報告書をもって最終報告を行う。

1.2. 事故調査委員会

1.2.1. 委員会の目的および構成

事故調査委員会は、公正な立場から事故に至った事実を明らかにし、次いで、事故原因を究明し、それに基づき、事故の再発防止対策を提言することを目的として、下記の社外有識者4名と社内の安全および生産に関わる3名で構成された。

委員長	田村 昌三	東京大学名誉教授
委員	荒井 保和	元 高压ガス保安協会 理事
	越 光男	東京大学大学院工学系研究科 総合研究機構 特任教授
	中村 昌允	東京農工大学 工学府産業技術専攻 教授
	尾方 洋介	株式会社日本触媒 代表取締役専務執行役員
	北野 正雄	株式会社日本触媒 安全生産技術統括室長
	小林 博也	株式会社日本触媒 レスポンシブル・ケア室長

1.2.2. 委員会の経緯

第1回委員会 2012年10月23日（火） （株）日本触媒 姫路製造所

- ①事故調査委員会体制の決定
- ②事故概要確認と事故現場の検証
- ③事故原因究明へのアプローチ方法の審議

第2回委員会 2012年11月15日（木） （株）日本触媒 東京本社

- ①時系列推移およびV-3138運用経緯の確認
- ②爆発・火災被害の整理
- ③原因究明課題の審議

第3回委員会 2012年12月 4日（火） （株）日本触媒 東京本社

- ①原因究明課題の継続審議
- ②事故シナリオおよび直接原因の推定
- ③直接原因対策の方向性についての審議

第4回委員会 2012年12月25日（火） （株）日本触媒 姫路製造所

- ①事故シナリオおよび直接原因の特定
- ②直接原因対策の審議
- ③背景要因究明へのアプローチ方法の審議

委員会中間報告 2013年 1月18日（金） （株）日本触媒 大阪本社

- ①姫路製造所における爆発・火災事故について

第5回委員会 2013年 1月25日（金） （株）日本触媒 姫路製造所

- ①事故シナリオおよび直接原因のまとめ
- ②抽出した背景要因の審議
- ③再発防止対策の方向性についての審議

第6回委員会 2013年 2月14日（木） （株）日本触媒 東京本社

- ①背景要因の審議
- ②再発防止対策の審議
- ③最終報告書の目次の確認

第7回委員会 2013年 2月22日（金） （株）日本触媒 東京本社

- ①背景要因のまとめ
- ②再発防止対策のまとめ

2. 事故の概要

2012 年 9 月 29 日 14 時 35 分頃、株式会社日本触媒 姫路製造所において、高純度アクリル酸精製塔のボトム液を一時貯蔵する中間タンク（機番V-3138、公称容量 70m³）が爆発・火災を起こし、隣接するアクリル酸タンク、トルエンタンク等の設備や建屋、および消防車輛にも延焼した。

2.1. 発災事業所および発災設備

(1) 発災事業所

兵庫県姫路市網干区興浜字西沖 992-1

株式会社日本触媒 姫路製造所

(2) 発災設備

アクリル酸製造施設内の中間タンク（V-3138）

2.2. 発災日時

2012 年 9 月 29 日（土） 14 時 35 分頃

2.3. 気象状況

天候	: 曇り	気温	: 24～25℃	気圧	: 1010hPa 程度
湿度	: 60%程度	風向	: 西～南西	風速	: 2～3m/sec

2.4. 被害状況

2.4.1. 人的被害

死者	1 名（消防吏員）	
重症	5 名（消防吏員 2、従業員 3）	
中等症	13 名（消防吏員 8、警察 1、従業員 4）	
軽症	18 名（消防吏員 14、警察 1、従業員 3）	合計 37 名

2.4.2. 物的被害

当該タンクは大破し、周辺設備およびラック、配管、ケーブル等が損傷した。

2.4.3. 環境への影響

排水口の閉鎖により、有害物質の製造所構外への漏洩はなかった。

2.5. 事故後の状況

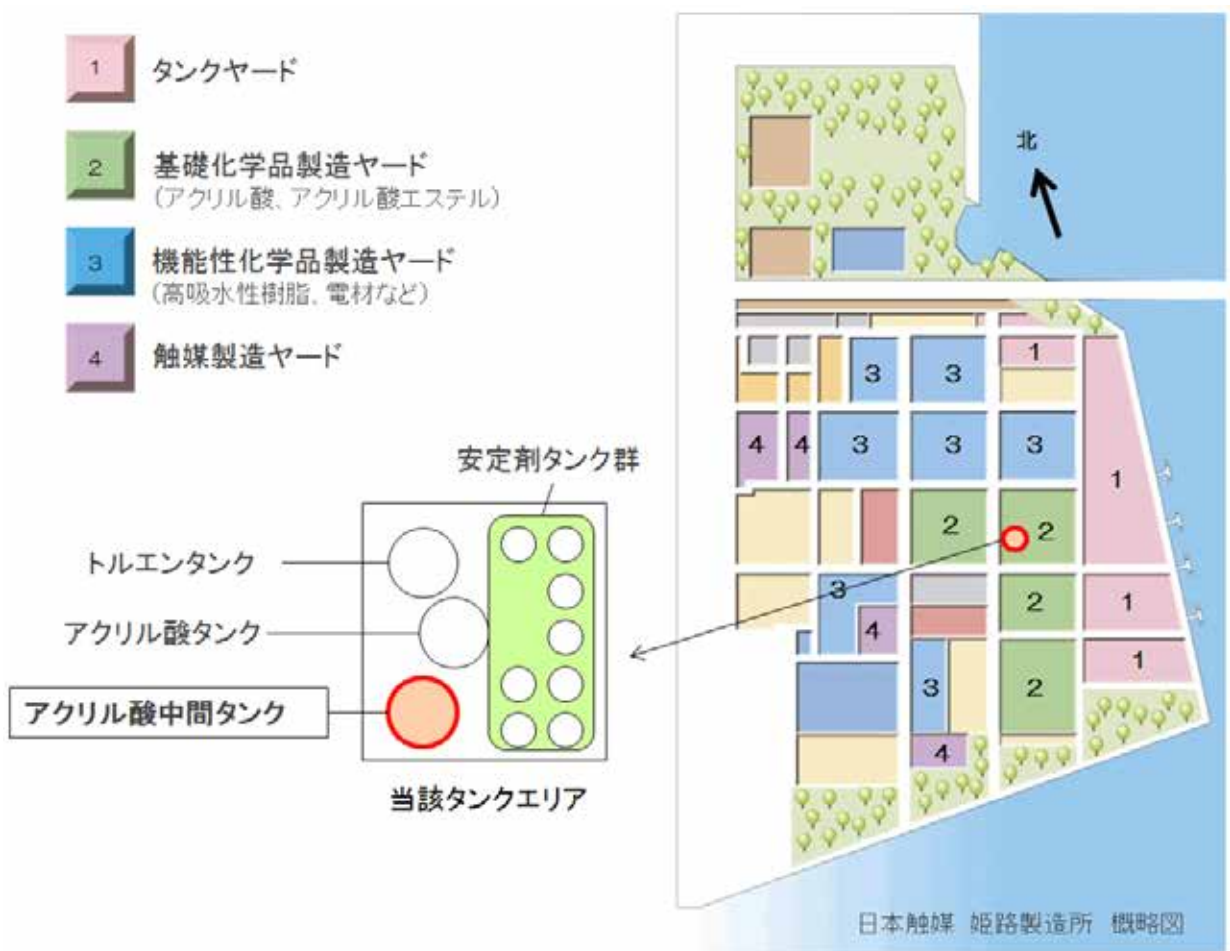
危険物製造所等一時使用停止命令が発令され、所内の全危険物施設を停止した。その後、一部施設は危険物製造所等命令等解除通知により、稼働を再開している。

3. 発災事業所および発災設備の概要

3.1. 発災事業所の概要

発災事業所である株式会社日本触媒 姫路製造所は、兵庫県姫路市の南西端に位置する敷地面積 約 90 万 m^2 の製造所であり、基礎化学品（アクリル酸およびアクリル酸エステルなど）、機能性化学品（高吸水性樹脂や電子情報材料など）、触媒などの生産を行っている。

爆発・火災を起こしたアクリル酸中間タンク（V-3138）は、図3－1に示す基礎化学品製造ヤード アクリル酸製造施設内に位置する。



(図3－1) 姫路製造所概略図

3.2. アクリル酸製造工程の概要

3.2.1. アクリル酸の特性

化学式 $\text{CH}_2=\text{CHCOOH}$ で表される刺激臭のある無色透明な引火性液体で、消防法第4類第2石油類に分類される。

主な物理的および化学的性質は以下の通りである。

密度 : 1.05 g/cm³ (20℃)

融点 : 13.5 °C

沸点 : 141 °C

粘度 : 1.25 mPa・s

発火点 : 428 °C

引火点 : 51.4 °C

爆発範囲 : 2～17 vol%

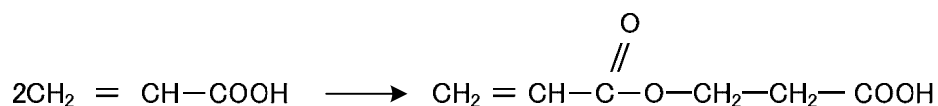
比熱 : 2093 J/kg・°C

二量体生成反応熱 : 145.3 kJ/kg

重合熱 : 1076 kJ/kg

導電率 : $>10^{-7}$ S/m

反応性 : 二重結合に関わる反応として、図3-2に示す二量体(DAA)生成反応や、図3-3に示す重合反応などを行うため、通常は、重合反応を抑制する目的で酸素濃度を5vol%以上の雰囲気管理し、安定剤が添加されている。



(図3-2) アクリル酸の二量体(DAA)生成反応式



(図3-3) アクリル酸の重合反応式

3.2.2. アクリル酸製造工程

アクリル酸の製造工程は、粗アクリル酸製造工程と高純度アクリル酸製造工程に大別される。

(1) 粗アクリル酸製造工程

粗アクリル酸製造工程は、プロピレンと空気中の酸素との気相酸化反応によりアクリル酸ガスを生成させ、これを水溶液として捕集する粗製工程、および当該水溶液から水、その他の不純物を分離し、粗アクリル酸を得る精製工程から成る。

(2) 高純度アクリル酸製造工程

高純度アクリル酸製造工程は、精製塔および回収塔より成る。

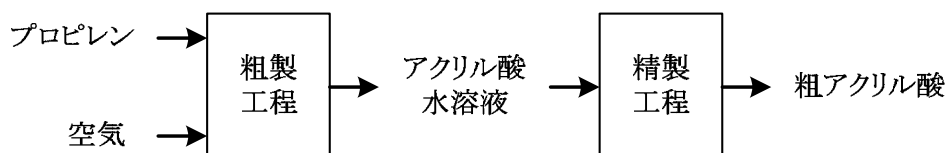
粗アクリル酸を精製塔へ供給して微量に含まれる不純物を分離し、高純度アクリル酸を得る。

分離された不純物を含む精製塔ボトム液は、回収塔へ供給され、不純物を廃油として分離し、回収されたアクリル酸は粗アクリル酸として再利用される。

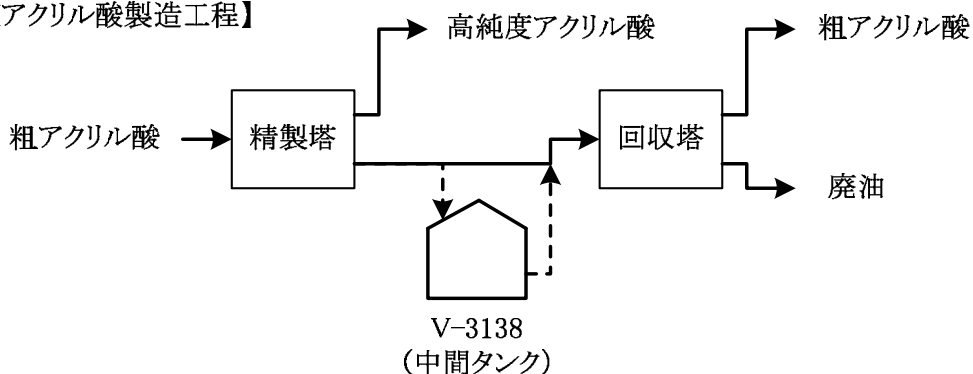
精製塔ボトム液は、粗アクリル酸に含有する安定剤、精製塔に供給される安定剤が濃縮され、高純度アクリル酸と比べ多量の安定剤を含有しているため重合しにくい。

V-3138 は、精製塔ボトム液を一時貯蔵する中間タンクであり、粗アクリル酸製造設備内に設置されている。

【粗アクリル酸製造工程】



【高純度アクリル酸製造工程】



(図3-4) アクリル酸製造工程概略図

(3) 各工程の構成

当製造所が有している粗アクリル酸製造設備と高純度アクリル酸製造設備の構成を図3－5に示す。

粗アクリル酸製造設備は、4系列（2～5AA）から構成されており、各系列は以下の時期に建設（完工）されている。

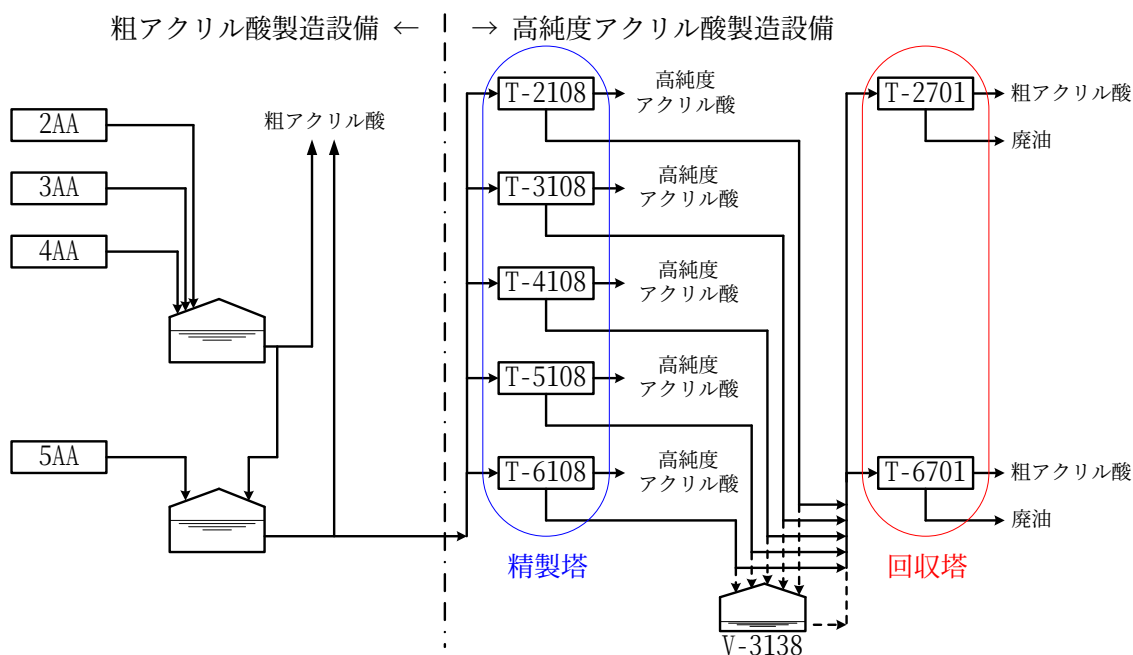
2AA：1973 年、3AA：1985 年、4AA：1990 年、5AA：1995 年

高純度アクリル酸製造設備は、5系列の精製塔（T-2108～T-6108）と2系列の回収塔（T-2701、T-6701）から構成されており、各系列は以下の時期に建設（完工）されている。

＜精製塔＞ T-2108：1985 年、T-3108：1985 年、T-4108：1990 年、
T-5108：1994 年、T-6108：1998 年

＜回収塔＞ T-2701：1985 年、T-6701：1998 年

精製塔ボトム液を一時貯蔵する中間タンクは、V-3138のみである。なお、V-3138の建設(完工)時期は1985年である。



(図3－5) アクリル酸製造工程構成図

3.3. 発災設備の概要

発災設備であるアクリル酸中間タンク（V-3138）は、1985 年 11 月に設置された公称容量 70m³の保温（厚さ 75mm）を施したコーンルーフ型タンクであり、精製塔の停止時等に精製塔からの抜き出し液を一時貯蔵する中間タンクである。

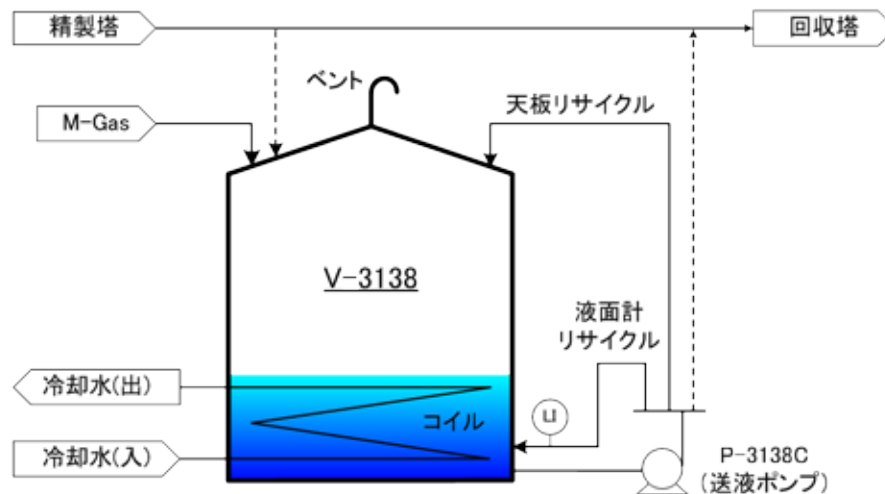
通常、精製塔ボトム液は V-3138 を経由せず回収塔へ直接供給されるため、当該タンクへの液の出入りはない。

V-3138 内部には、アクリル酸の凍結防止と当該タンクへ流入した液の冷却を兼ねて、冷却水コイルが設置されている。コイル上面までの液容量は約 25m³である。

アクリル酸は引火性液体であるが、その蒸気は酸素濃度が 8vol%以下では燃焼しないため、V-3138 空間部には 7vol%の酸素と 93vol%の窒素からなるミックスガス（M-Gas）を供給し、シールしている。

V-3138 の貯蔵液は送液ポンプ（P-3138C）を介して、同じ V-3138 へ循環されている。循環先はタンク側板下部に設置された液面計ノズル部（液面計リサイクル）およびタンク天板（天板リサイクル）の 2 箇所がある。

1985 年の V-3138 設置当初には天板リサイクルラインのみであったが、液面計誤指示の原因となる検出部での析出物の堆積を防止する目的で、2009 年に液面計リサイクルラインを設置した。



(図 3－6) V-3138 概要図

4. 事故の発生状況

4.1. 爆発・火災に至る過程

4.1.1. 時系列情報

爆発・火災事故の時系列情報を以下に整理する。

2012 年 9 月 18 日～9 月 20 日

全面停電による電気・計装保全工事（全面停電工事）

2012 年 9 月 20 日

21:00 頃

全面停電工事後の中間タンク（V-3138）復旧
（冷却水コイル通水開始、M-Gas シール開始、P-3138C 稼働）

2012 年 9 月 21 日

11:00 頃～14:00 頃

V-3138 から回収塔（T-6701）へ液張り、T-6701 スタート
その後、精製塔（T-6108）スタートし、T-6701 へは直接供給
（液張り後、V-3138 液量は約 14m³から約 10m³に減少）

2012 年 9 月 24 日

10:00 頃～

精製塔（T-5108）スタート

14:10 頃～

T-5108 ボトム液拔出し開始（V-3138 経由で T-6701 へ供給）

2012 年 9 月 25 日

9:30 頃～

V-3138 液溜め開始（V-3138 から T-6701 への供給停止）

2012 年 9 月 28 日

14:00 頃～

V-3138 液量 60m³到達後、V-3138 への供給停止
（T-5108 ボトム液を T-6701 への直接供給に切り替え）

2012 年 9 月 29 日

13:17 頃

V-3138 液面計 高位液面異常アラーム発報

13:20 頃

V-3138 ベントからの白煙を確認

13:25 頃～

運転員による V-3138 への放水開始

13:40 頃

運転シフト責任者が自衛防災隊出動要請の一斉放送を実施
V-3138 液面計指示値が計器指示限界値（84.8m³）を超過

13:48 頃～13:49 頃

防災管理課員がホットラインにて消防へ通報

14:00 頃～

自衛防災隊による V-3138 への放水開始

14:02 頃

公設消防隊が現場に到着、警戒線を設定

～14:35 頃

V-3138 き裂箇所より内容物が流出

14:35 頃

V-3138 液面計指示値が降下、低位液面異常アラーム発報

V-3138 爆発・破裂、V-3138 内容物に着火し、火災発生

22:36

火勢鎮圧

2012 年 9 月 30 日

15:30

鎮火

4.1.2. 事故の進展状況

事故発生までの経緯を4つの段階に区分し、事故シナリオと要因について検討した。

(1) 中間タンク(V-3138)液溜め開始前

(2012年9月21日～9月25日9時30分頃)

全面停電工事終了後、V-3138 冷却水コイルへの通水および M-Gas シールを開始した。また、送液ポンプ (P-3138C) を起動させ、液面計リサイクルを開始した。

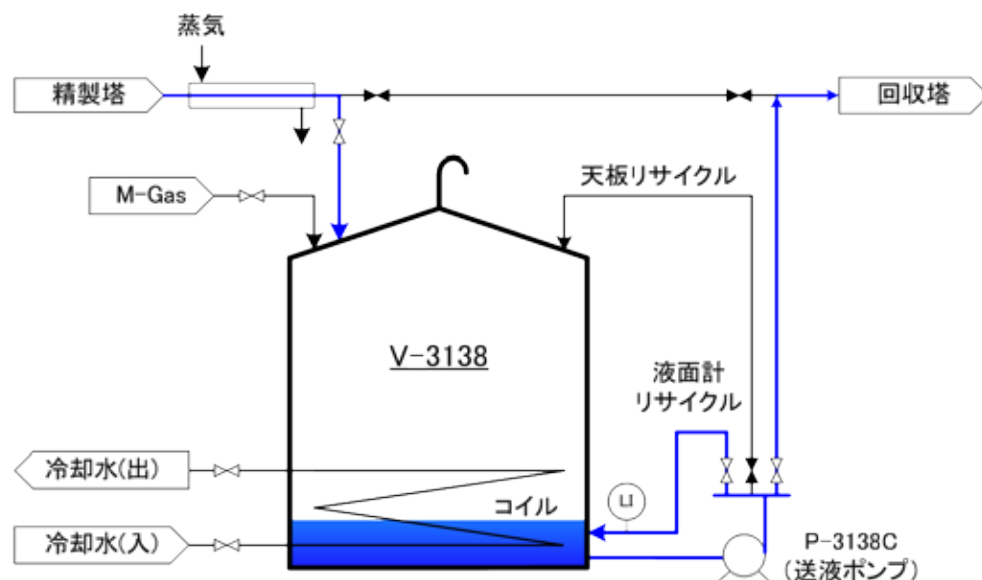
粗アクリル酸製造設備の運転状況には特に異常は認められず、精製工程より得られる粗アクリル酸に供給されていた安定剤も運転基準に従って投入されていた。

高純度アクリル酸製造設備については、9月21日に精製塔 (T-6108) および回収塔 (T-6701) の運転をスタートした。この T-6108 ボトム液は T-6701 へ直接供給されていた。

9月24日に別系列の精製塔 (T-5108) をスタートし、そのボトム液は V-3138 経由で T-6701 へ供給する運転としていた。この運転状態の間は、V-3138 の液量は約 10m^3 でほぼ一定の状態に保持されていた。

T-5108 ボトム液は、析出物による詰り防止のため蒸気ジャケット配管を通じて送液されており、V-3138 流入時点における液の温度は、ジャケットの蒸気温度と配管長さなどから約 100°C と推定される。

T-5108 へ供給される安定剤等は運転基準に従って投入されていた。



(図4-1) V-3138 液溜め前の状態

(2) 中間タンク(V-3138)液溜め中

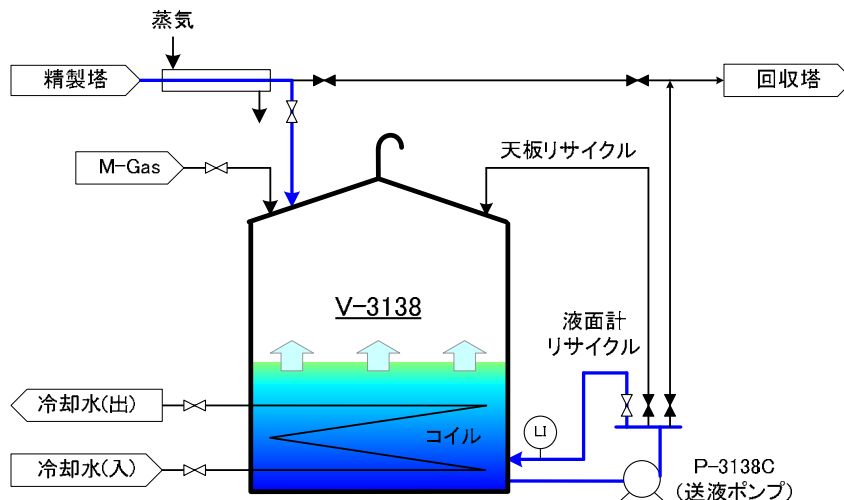
(2012年9月25日9時30分頃～9月28日14時00分頃)

後日実施予定のT-6701能力アップテスト準備のため、9月25日9時30分頃よりV-3138からT-6701への送液を停止し、V-3138の液溜めを開始した。

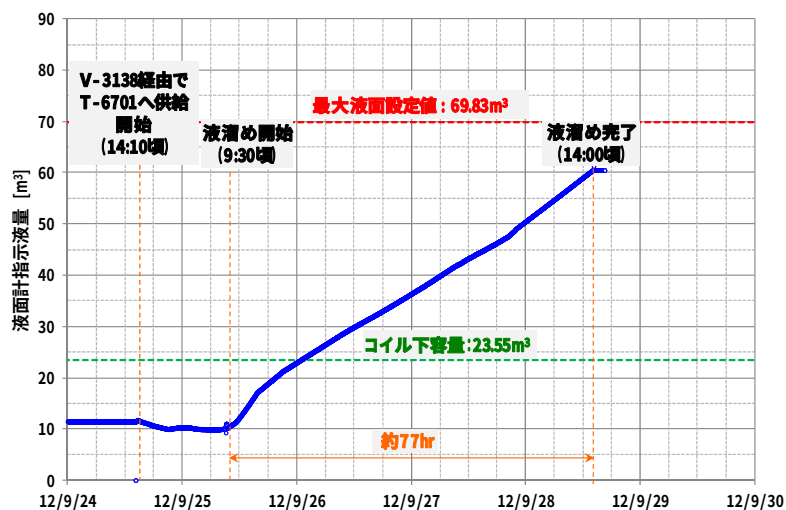
T-5108へ供給される粗アクリル酸、安定剤等には特に変化はなく、運転基準に従い正常に運転されていた。

V-3138の液量は、液溜めを開始してから約77時間後の9月28日14時00分頃に、計画していた60m³に到達した。その間、V-3138の貯蔵液の天板リサイクルは実施されなかった。この間のV-3138貯蔵液量上昇の推移を図4-3に示す。

V-3138下部の液はコイルにより冷却されるが、コイル上面より上部の液は冷却されにくくなり、貯蔵液縦方向に不均一な温度分布が生じた。その結果、比較的温度が高い領域において、アクリル酸の二量体(DAA)生成反応が進行し、この反応熱がV-3138貯蔵液の温度を徐々に上昇させたと推定される。しかし、V-3138には温度計が設置されておらず、温度上昇を検知できなかった。



(図4-2) V-3138 液溜め中の状態



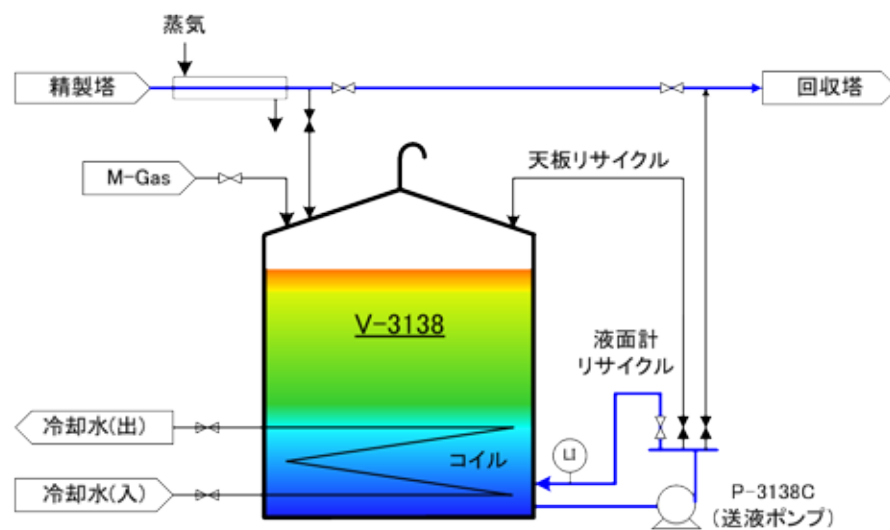
(図4-3) V-3138 液面計指示液量の推移 (液溜め完了まで)

(3) 中間タンク(V-3138)液溜め後

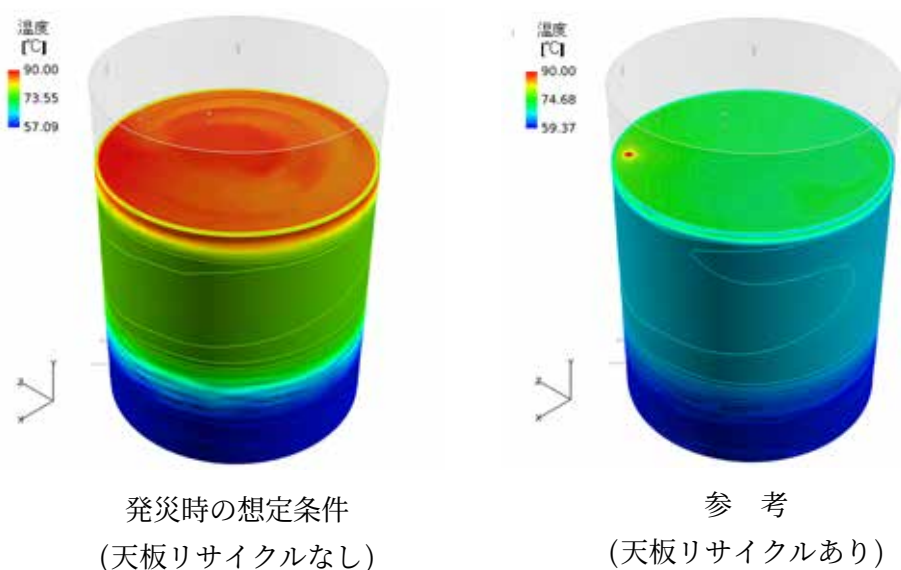
(2012年9月28日14時00分頃～14時10分頃)

9月28日14時00分頃にV-3138の液量が60m³に到達した後、T-5108ボトム液をT-6701への直接供給に切り替えた。

V-3138貯蔵液の天板リサイクルはその後実施されなかった。したがって、コイル上面より上部の液は冷却されず、比較的温が高い状態で保持された。V-3138貯蔵液の温度分布を推定する目的で、V-3138の3次元モデルを作成し、反応熱を考慮しない条件でANSYS Fluent Ver.13を使用して流動解析を行った。その結果が図4-5であり、天板リサイクルがない条件では、60m³到達直後の貯蔵液表層部では平均約87℃の比較的高温な領域が存在する推定結果となった。



(図4-4) V-3138 液溜め後の状態



(図4-5) V-3138 における 60m³到達時の流動解析結果

(4) 中間タンク(V-3138)液溜め保持～爆発・火災

(2012年9月28日14時10分頃～9月29日14時35分頃)

V-3138の貯蔵液においてDAA生成反応の進行が加速され、その反応熱によりV-3138貯蔵液の温度は上昇を続けたと推定される。ラボで行った断熱反応実験の結果、アクリル酸(AA):約40wt%、DAA等:約60wt%の組成まで反応が進むことが確認された。この組成まで断熱条件下で反応が進行した場合、その反応熱量はV-3138貯蔵液全量に対し、温度を約40℃上昇させる熱量に相当する。

温度上昇の結果、アクリル酸の重合反応が開始し、重合熱によりV-3138貯蔵液の温度がさらに上昇したと推定される。

9月29日13時20分頃、運転員がV-3138ベントよりアクリル酸蒸気による白煙の流出を発見した。この時、V-3138の貯蔵液温度は高温部で160℃程度と推定される。この推定は、水蒸気が白煙と視認される温度をラボで確認し、その時の蒸気圧とV-3138貯蔵液の液組成からAspen Plusを用いた気液平衡計算により行った。

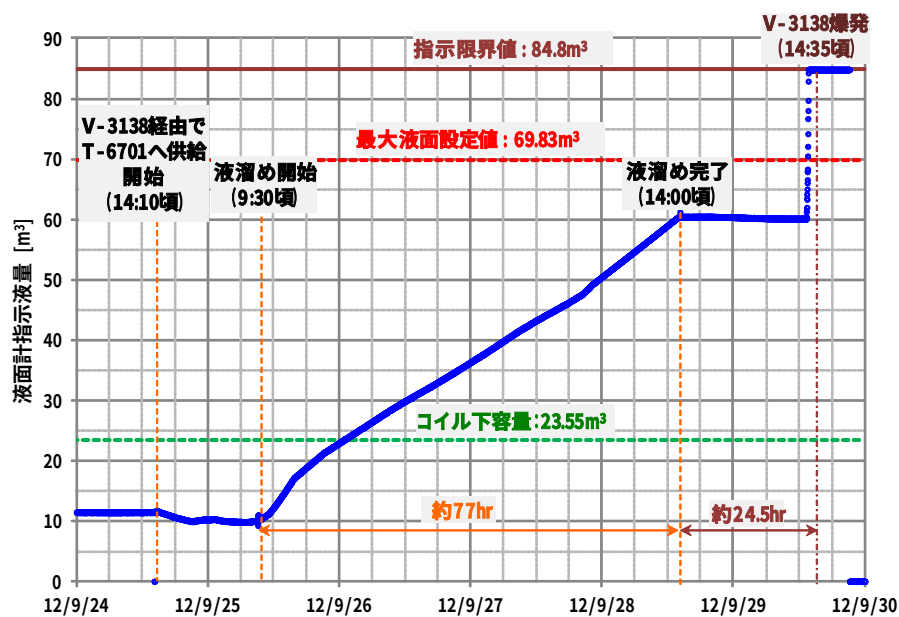
V-3138の差圧式液面計の指示値が、13:20頃より上昇を開始し、13:30頃に最大液量設定値(69.8m³)を表示し、13:40頃には計器指示限界値(84.8m³)を振切ったことで、V-3138内部の圧力上昇の挙動がわかる。この圧力上昇は、重合反応がさらに進行し、V-3138内が沸騰状態となることで蒸発量が増加し、ベント等からのガス排出能力を超えたために発生したと推定される。この液面計指示液量の推移を図4-6に示す。

その後もV-3138の圧力は上昇を続け、タンク側板にき裂が発生した。き裂発生時の圧力は、タンクの構造解析から推定した結果が0.24～0.29MPaG、断熱重合実験の反応データから推定したV-3138内部の到達圧力は、0.27MPaG程度となった。推定した圧力上昇の推移を図4-7に、推定に用いたモデルを資料-2に示す。なお、この時のV-3138貯蔵液温度は、高温部で230～240℃程度と推定される。また、断熱重合実験の反応データについては資料-1、構造解析より推定した結果については4.2.1の章で述べる。

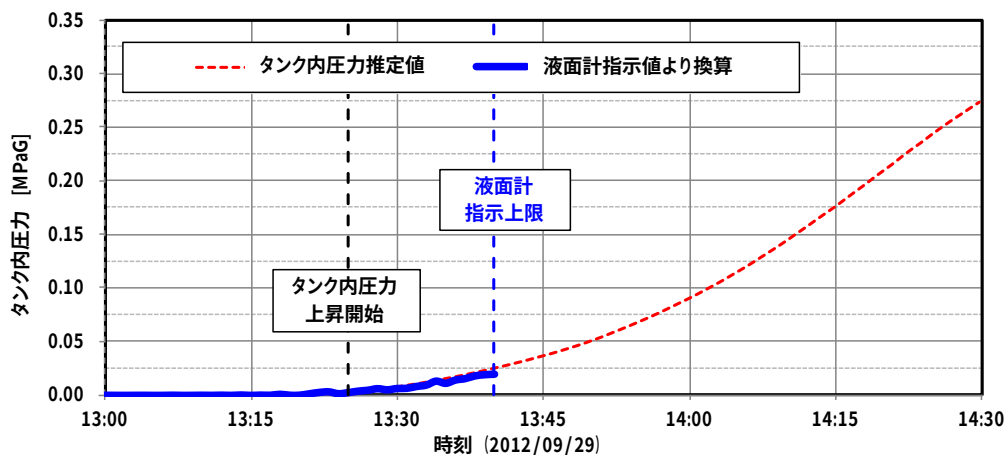
発生したき裂からタンク内容物が流出し、V-3138の圧力が急激に降下した。

9月29日14時35分頃、温度が保持されたまま圧力が降下したためにV-3138の貯蔵液が急激に沸騰(突沸)し、タンク内で蒸気爆発が発生、V-3138が破裂し、飛散した内容物に着火して、火災が発生した。飛散物の飛散距離より推定した爆発時のタンク内部圧力は、0.45～0.64MPaG程度であり、着火源は、爆発の際の金属による衝撃や電線の切断による火花の可能性が考えられる。

また、爆発の衝撃により損傷を受けた近傍のタンクよりアクリル酸およびトルエンが漏洩し、延焼した。表4-1に、V-3138貯蔵液が沸点に達し、内部圧力が上昇を開始してから爆発・火災へと至った推定主要事象の進展を整理した。



(図 4 - 6) V-3138 液面計指示液量の推移 (爆発事故まで)



(図 4 - 7) V-3138 液面計指示値 (圧力換算値) と圧力上昇の推移

(表 4 - 1) V-3138 爆発・火災の推定進展事象

※内部圧力・温度はいずれも推定値

事象の進展	発生時刻	V-3138内部 圧力 [MPaG]	V-3138内部 温度 [°C]
・ V-3138 内部圧力上昇開始	13:20頃	大気圧	(160~170)
・ 液面計指示値振切り	13:40頃	(0.025)	(175)
・ 自衛防災隊消防自動車による放水開始 (3,100L/min)	14:00頃	-	-
・ V-3138 アンカーボルト破断	-	(0.1)	
・ 冷却水コイル出口ノズルにき裂発生 (ノズル向き: 270°)	14:35頃まで	(0.24~0.29)	(234)
・ き裂進展し、内容物流出 (270° 上下縦方向)	14:35頃まで	(0.24~0.29)	(234)
・ 気相部にき裂到達、一気に内部圧力低下	14:35頃	(大気圧)	(234)
・ 蒸気爆発 (平衡破綻型)	14:35頃	(0.45~0.64)	(234)
・ 火災 (アクリル酸: 約66m³、トルエン: 約28m³が燃焼)	14:35頃	-	-
・ 火勢鎮圧	22:36頃	-	-

4.2. 爆発・火災による被害状況

4.2.1. 爆発影響および被害

(1) 設備損傷状況

＜V-3138 本体および周辺設備の概況＞

爆発により大破した V-3138 本体とその周辺設備の損傷状況を、図 4－8 に写真で示す。

(1) 発災タンク(南西より撮影)



(2) 発災タンク拡大(南西より撮影)



(3) 発災タンク(東上方より撮影)



(4) 発災タンク西側ラック(南東より撮影)



(5) 発災タンク西側ラック(南より撮影)



(6) 発災タンク西側ポンプ周辺(南より撮影)



(図 4－8) V-3138 周辺の被害状況

<V-3138 本体の損傷状況>

爆発により大破した V-3138 の主要部材は以下の様な状態であり、飛散した破片を含めて復元し、図 4－9 に示す。

①天板（屋根板）

側板との接合部近傍が破断して分離し、さらに二つに分裂して、共に約 50m 程度飛散していた。

②側板（胴板）

270° 方向で縦方向にほぼ直線的に裂け、観音開きになるまで変形し、1 枚の板に近い状態で発災現場の防液堤内に残った。

③底板

側板との接合部近傍で破断していた。一部破断せずに側板とつながった状態で、側板と共に防液堤内に残っていた。

これら V-3138 部材のき裂破断面を観察した結果、破面のほとんどの部分が、板厚方向に対して斜めに傾いており、すべり面分離による剪断破壊により形成される特徴を有していた。しかし、冷却水コイル出口ノズル周辺部の破面には、引張り変形で破壊する際に形成される延性破面と剪断破壊による破面の二つの破面が形成されており、この部位がき裂の主要な起点の一つと判断した。き裂破断面の観察結果については、資料－3 に記載する。

この部位で発生したき裂は、タンク側板 270° の上下二方向に分裂して進展し、上方に進展したき裂は天板側へ侵入して 135° 位置付近で天板を貫通した。天板および底板は概ね側板の接合部付近で周方向にき裂が進展した。これらき裂の推定進展経路をタンク側板および天板の展開図上に示したものが、図 4－10 である。

<周辺設備の損傷状況>

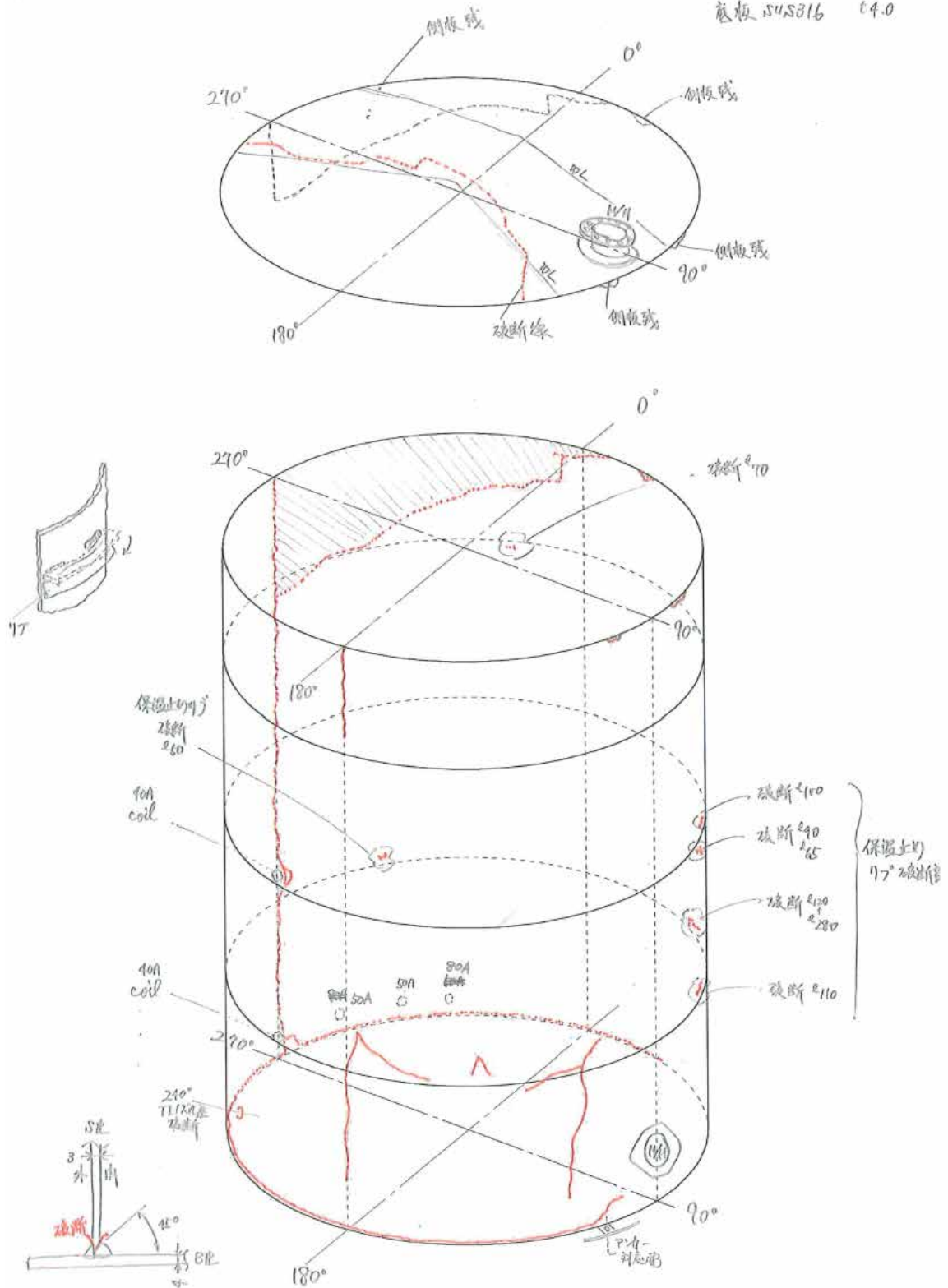
図 4－8 に示す周辺設備の損傷状況としては、V-3138 と同じ防液堤内に設置されていたタンク V-3116（100m³：アクリル酸タンク）、V-3124（50m³：トルエンタンク）、V-3145B/V-3147B/V-3147C/V-3148C（各々 5m³：安定剤タンク）の 6 基と防液堤西側に配置されていたポンプ数台に大きな損傷があった。また、防液堤南側の建屋（電気室）、周辺ラック、配管、ケーブルおよび消防車両にも大きな損傷が見られた。

<飛散物の状況>

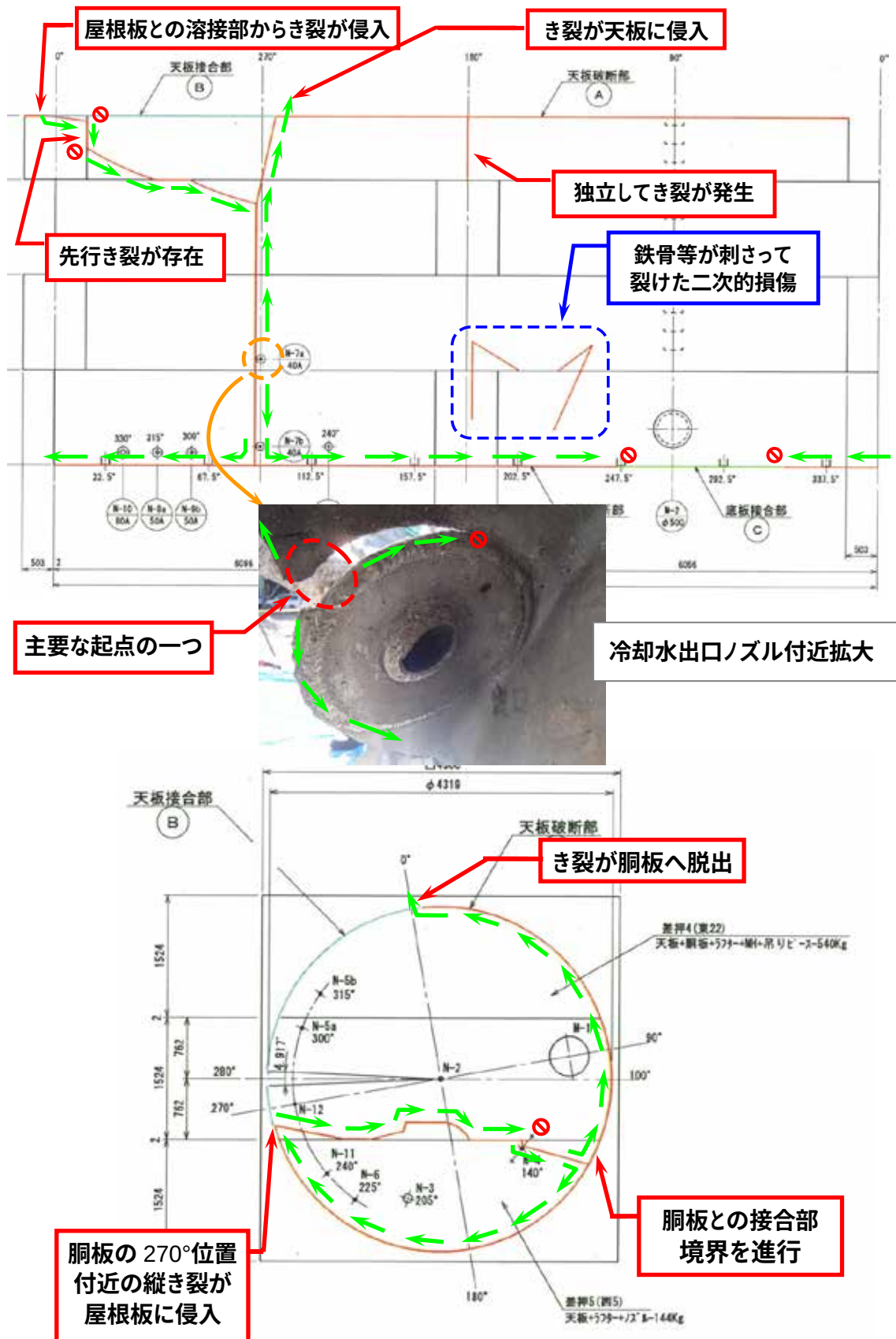
V-3138 および周辺設備の破片（約 80 点）は、概ね全周囲方向に半径 100m 程度の範囲に飛散していた。タンク内容物については、概ね全周囲方向に半径 70m 程度の範囲内に飛散し、特にタンク側板破断面の西側（270° 側）方向への飛散が激しい状況であった。

<3AA> V-3138 771L酸 771 (CRT)

側板 SUS 304 $t_{3.0}$
底板 SUS 316 $t_{4.0}$



(図4-9) V-3138 破片を復元した全体図 (スケッチ図)



(図 4 - 1 0) V-3138 き裂起点と推定進展経路 (側板および天板展開図)

(2) 爆発によるタンク破裂時の内部圧力

爆発によるタンク破裂時の内部圧力の推定は、①タンクの構造解析による内部圧力の推定、②タンク破片の飛散距離に基づく内部圧力の推定 により行った。

① タンクの構造解析による内部圧力の推定結果

有限要素法を用いた内部圧力による V-3138 の構造解析を行った。構造解析には、図 4-11 に示す 3 次元モデルを作成し、約 10 万要素に分割して評価を行った。また、モデル化したタンク構成要素を図 4-12 に示す。

構造解析の結果、アンカー部の破断は 0.1MPaG 程度、タンク本体にき裂が発生した圧力は 0.24~0.29MPaG と推定された。なお、解析コードには汎用非線形構造解析コード LS-DYNA を使用した。

破断推定した 2 箇所の解析は、以下の内容で行った。

a) アンカー取り付け部

タンクの内部圧力が上昇するとタンクは浮き上がろうとし、それをアンカーが拘束するため局部的に大きな抵抗力が生じると考えられるため、3 次元モデルにて解析を行った。

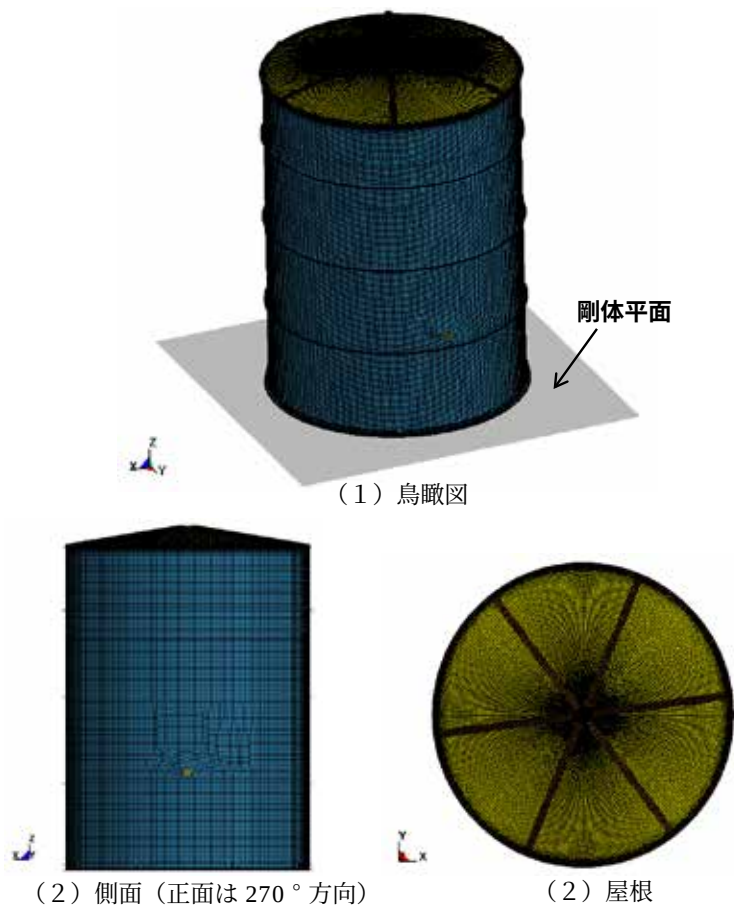
図 4-13 に、タンクの内部圧力によるタンク表面の相当塑性ひずみを、図 4-14 に、タンクの内部圧力によるアンカー部に作用する鉛直反力を示す。アンカー破断荷重 1005kN となるタンク内部圧力の下限値は 0.073MPaG であり、鉛直反力が破断荷重を超える内部圧力は 0.1MPaG 程度と推定されたが、その時のタンク側のひずみは 2~3%程度であり、タンク側板に破断が生じるレベルではなかった。

b) 冷却水コイル出口ノズル部

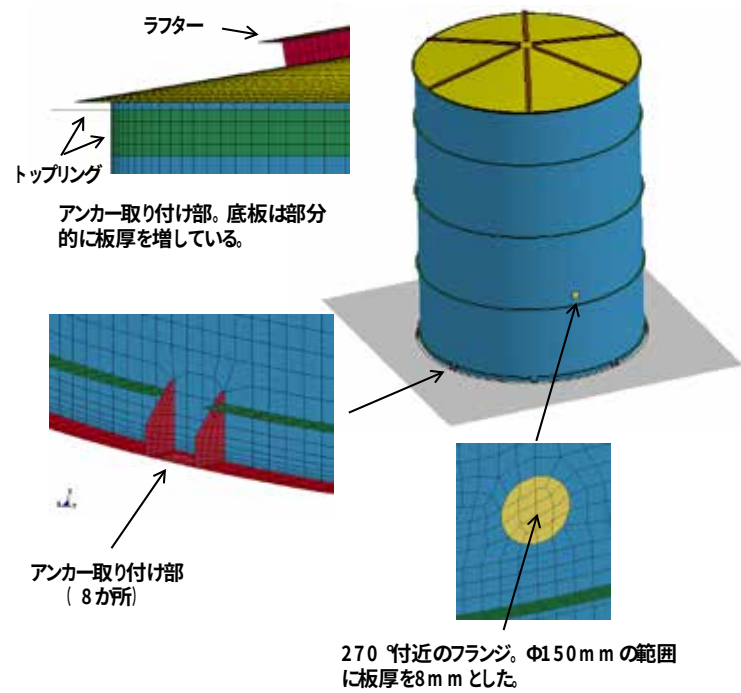
大破した V-3138 側板の板厚測定結果は 2.8mm であり、製作時の板厚を維持していた。このことから、材料の弾性範囲を超えて始まる板厚減少は生じていなかったと推定した。その板厚減少が顕著となる圧力を 3 次元モデルによる構造解析により推定した結果、0.25~0.30MPaG 程度であった。図 4-15 にタンク内部圧力による板厚減少の結果を示す。

この圧力までにき裂が発生したと推定し、タンク本体の構造的に厳しいと考えられる箇所として、冷却水コイルのノズル部、側板と天板および底板との溶接部、側板の端部に着目して構造解析を行った。その結果、冷却水コイル出口ノズル部が周囲に比べて局所的に大きなひずみが生じていることが確認できた。図 4-16 および図 4-17 にひずみの解析結果を示す。

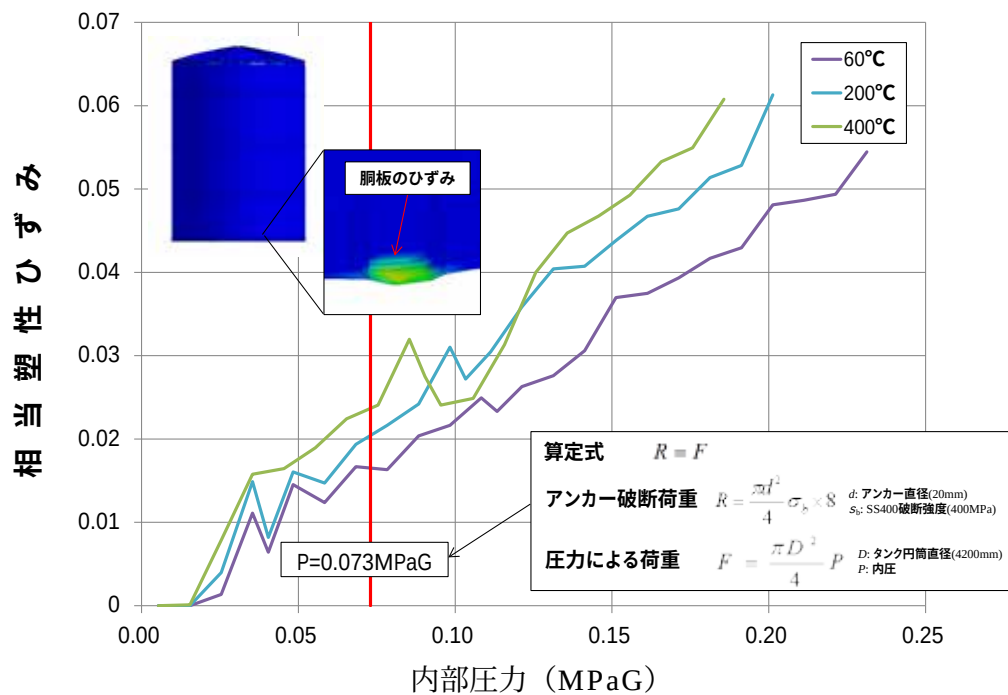
この部位の解析精度を上げるため、ノズル部近傍をズームした局部シェルモデルを用い、塑性変形の際限ない増加が生じる圧力を推定した結果、0.24~0.29MPaG 程度であった。図 4-18 にその結果を示す。なお、この部位にき裂が発生する理由としては、直径約 150mm、板厚約 8mm のフランジが側板に取り付けられた構造不連続部であり、境界近傍において過大な応力およびひずみが発生する部位であるためと推定される。



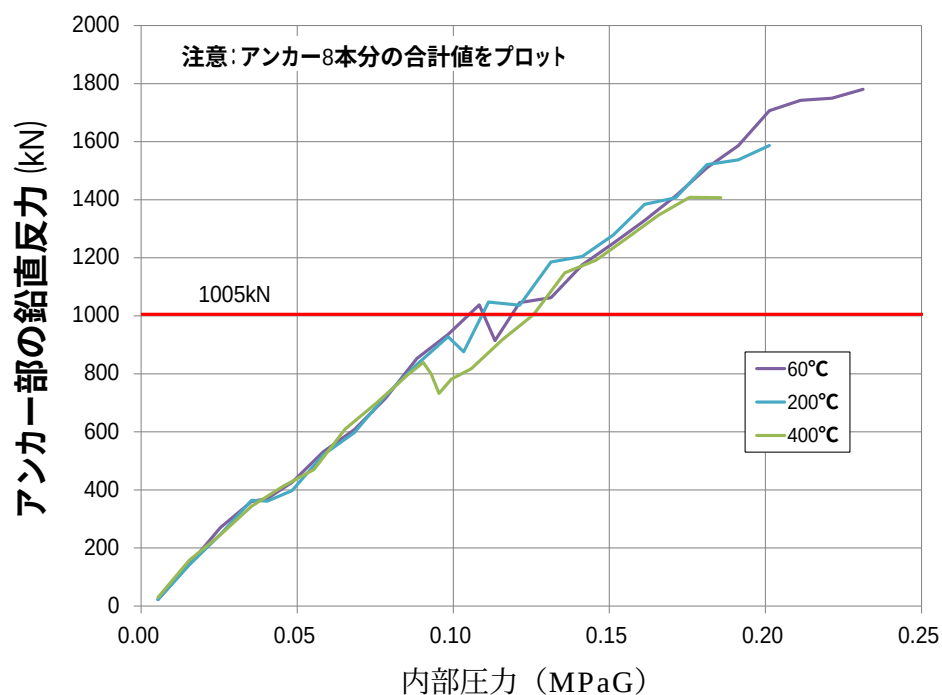
(図 4-1-1) 構造解析に用いた 3 次元モデル



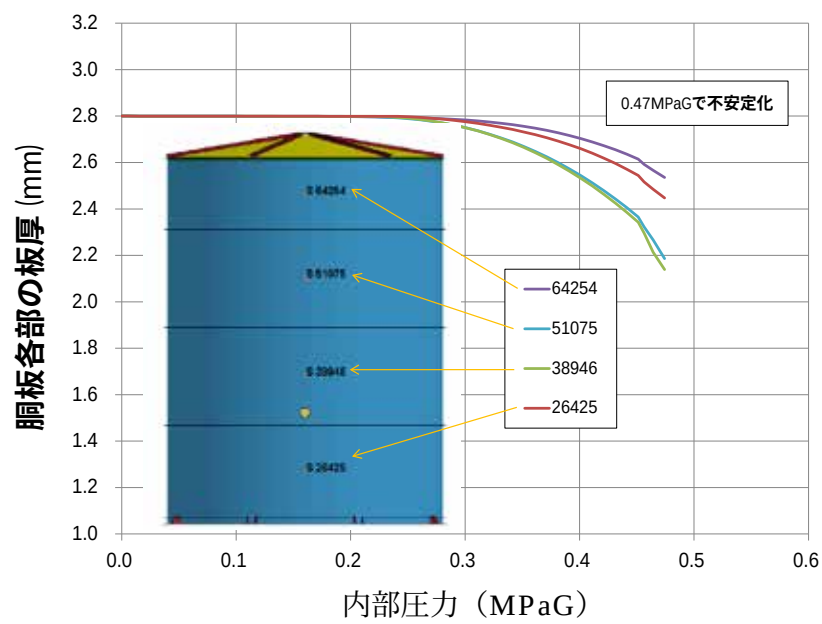
(図 4-1-2) 3 次元モデルのタンク構成要素



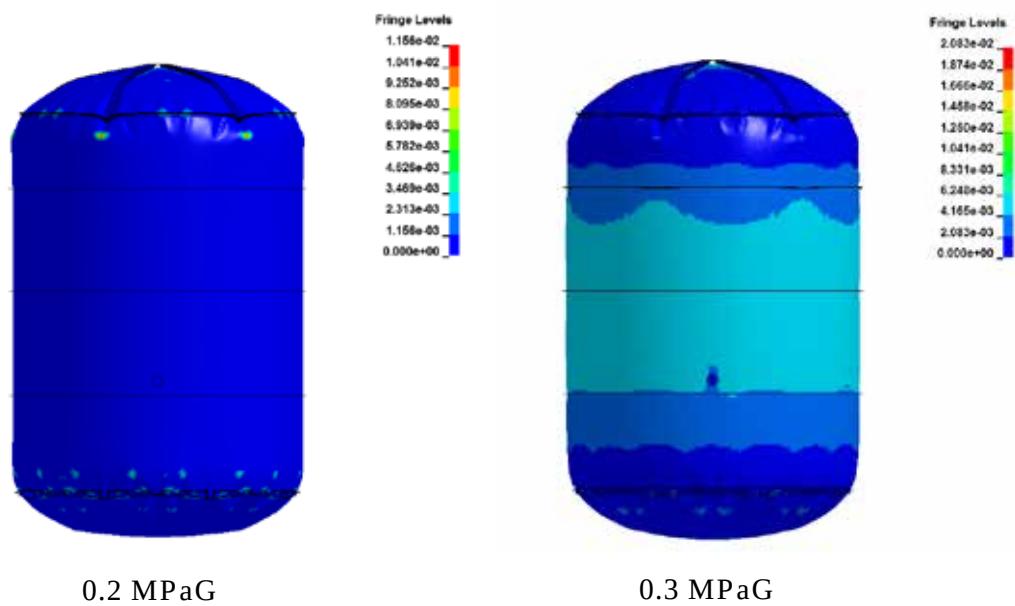
(図4-13) タンク内部圧力上昇に伴う相当塑性ひずみの変化



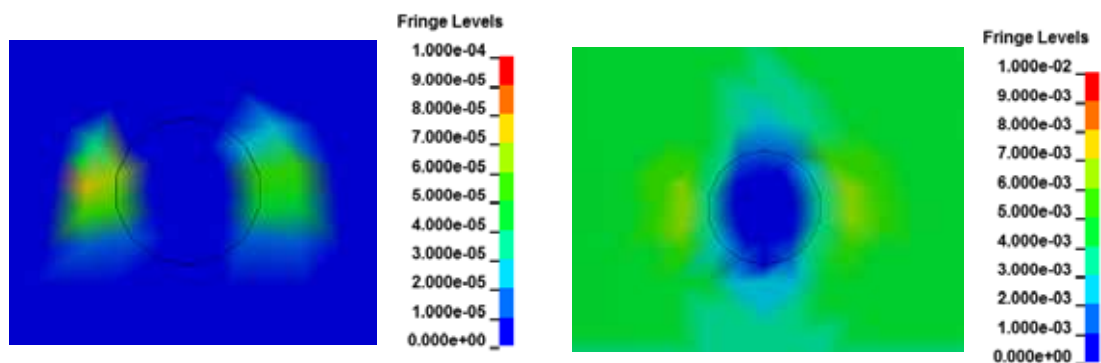
(図4-14) タンク内部圧力上昇に伴うアンカー部の鉛直反力の変化



(図4-15) 3次元モデルによる板厚変化の解析結果 (200℃条件)



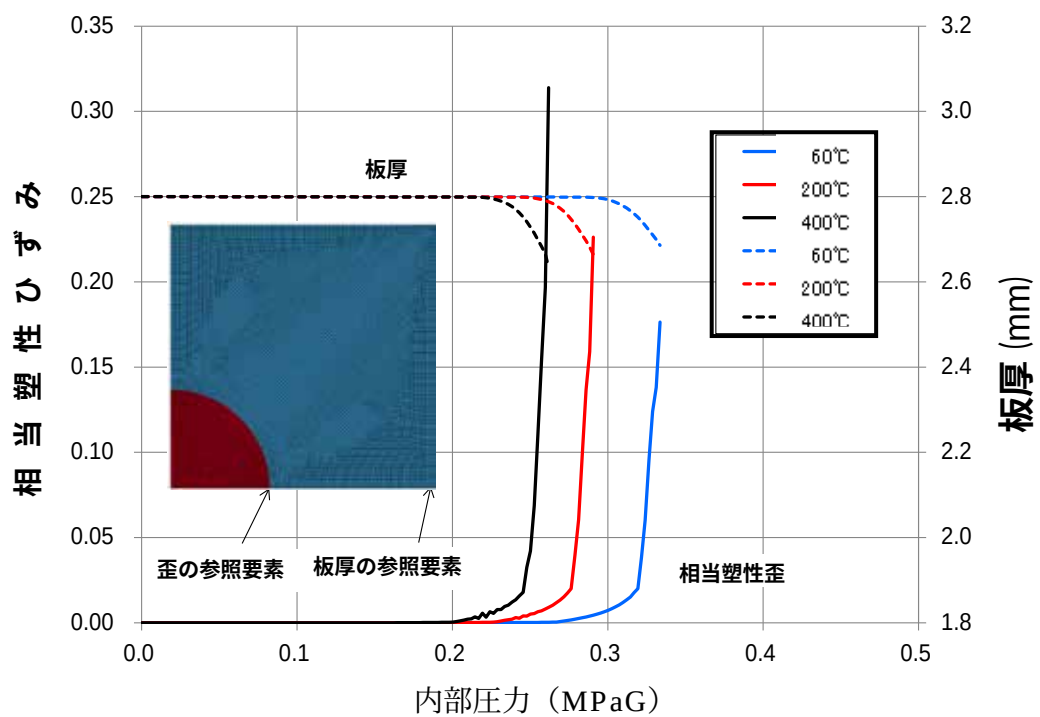
(図4-16) 3次元モデルによるひずみの解析結果 (200℃条件)



0.2 MPaG における
冷却水コイル出口ノズル部拡大

0.3 MPaG における
冷却水コイル出口ノズル部拡大

(図 4-17) 3 次元モデルによるひずみの解析結果 (200℃条件)
冷却水コイル出口ノズル部の拡大



(図 4-18) 冷却水コイル出口ノズル近傍解析結果

② V-3138 破片の飛散距離に基づくタンク破裂時の内部圧力の推定結果

V-3138 の部材であることが明らかな天板、作業デッキおよびベント管の飛散距離より最低初速度を求め、マッハ数に換算した後、タンク破裂時の内部圧力を推定^[4.2.1-1]した結果、0.45～0.64MPaG であった。

(表 4－2) V-3138 破片の飛散距離より推定したタンク破裂時の内部圧力

対象物	飛散距離	重量	表面積	最低初速度	タンク内部圧力
天板 1	52m	144kg	2m ²	28.4m/s	0.49MPaG
天板 2	49m	540kg	11.1m ²	27.4m/s	0.45MPaG
作業デッキ	94m	171kg	2.3m ²	35.7m/s	0.64MPaG
ベント管	91m	14kg	0.02m ²	31.5m/s	0.57MPaG

また、V-3138 周辺の構造物から、火災による影響がないと推定される設備として、表 4－3 に記載の構造物を取り上げた。爆風のような作用時間の短い荷重に対する構造物の応答は、一般には動的応答解析を行う必要があるが、取り上げた構造物の固有周期に対し、作用した荷重の持続時間が十分長いと仮定して、静的なモデルを用いて爆風圧力の推定を行った。

(表 4－3) V-3138 周辺構造物の損傷度より推定した爆風圧力

対象物	タンク中心からの距離	損傷状況	仕様	爆風圧力 [MPaG]
防液堤 (南側)	3.3m	倒壊	630mm ^H ×150mm ^t	0.067 以上
防液堤 (西側)	3.3m	健全	480mm ^H ×150mm ^t	0.115 未満
配管ラックH形鋼	5.2m	屈曲	125mm ^W ×4820mm ^H ×7mm ^t	0.032～0.066
電灯柱	13.9m	曲り	125A×940mm ^H + 80A×2950mm ^H	0.014～0.018
窓ガラス	74m	割れ	430mm ^W ×860mm ^H ×3mm ^t	0.001～0.002

以上の周辺構造物に作用した爆風圧力と爆心（タンク中心）からの距離より、爆発威力を評価^[4.2.1-1]すると、TNT 当量は約 1～3kg 程度であると推定された。

参考文献 [4.2.1-1]

C.J.H. van den Bosch, R.A.P.M Weterings, Methods for the calculation of physical effects - due to releases of hazardous materials (liquids and gases) - 'Yellow Book'

(3) 爆発形態

以上の爆発威力をもたらした爆発形態として、以下の三つのタイプについて検討を行った結果、平衡破綻型蒸気爆発の可能性が最も高いと推定される。

① 可燃性蒸気（アクリル酸蒸気）によるガス爆発

蒸気雲となった可燃性ガスに着火し爆発する現象であり、非常に大きな爆発威力を伴う。

この爆発には酸素が必要であり、内部を M-Gas シールしていた V-3138 では、タンク内部で発生することは考えにくい。しかし、破片や内容物の飛散方向から考えて、V-3138 は内部より大きな圧力を受けたと考えられ、現象面として符合しない。

爆発威力として推定した TNT 当量から、爆発に寄与したアクリル酸蒸気量を算出すると、2～8kg 程度となる。一方、爆発までに V-3138 ベントから周囲へ流出した推定アクリル酸蒸気量は約 5,500kg（資料－2 参照）であり、爆発威力の点からみても、現場事象に符合しているとは言い難い。

② 反応（重合反応）暴走による V-3138 内部圧力上昇が原因の爆発（破裂）

V-3138 の内部圧力上昇に伴う爆発（破裂）であり、タンクの破片や内容物の飛散状況には符合する。

断熱重合実験により得られたデータから推定した爆発時刻におけるタンク内部圧力は、0.27MPaG 程度で、タンク構造解析により推定したき裂発生圧力は、0.24～0.29MPaG である。これら二つの推定方法による V-3138 の推定内部圧力はほぼ一致したが、タンク破片の飛散距離より推定した V-3138 爆発時の内部圧力は 0.45～0.64MPaG であり、推定き裂発生圧力の約 2 倍程度となり、この圧力差を十分に説明できない。

プロセスデータとして残っていた V-3138 液面計の指示値の記録では、13:40 頃に上限値を振切った指示値が、爆発直前に指示値が降下して 58.6m³の低位液面異常アラームを発報している。これは、一旦タンク内部圧力が低下した後爆発した事を示しているが、反応暴走による爆発ではこの事象を十分に説明できない。

③ 平衡破綻型蒸気爆発

高温高圧状態で保持された状態から、急激に圧力が低下することで相平衡が破綻（過熱状態）し、液が突沸する現象であり、液面計指示値(内部圧力)の変化によく符合する。

文献によると、初期圧の約 2 倍程度のオーバープレッシャーとなることが報告されており、き裂発生推定圧力（0.24～0.29MPaG）と爆発時の推定内部圧力（0.45～0.64MPaG）の圧力差が生じている推定結果ともよく符合する。

タンク内部で発生する爆発現象であり、V-3138 破片や内容物の飛散状況とも符合する。

4.2.2. 火災影響および被害

爆発後に発生した火災として確認出来ている事実（消火活動を行った事実）は以下の通りであり、図４－１９にその位置を示す。

- ① V-3138 が設置されていた防液堤内でのプール火災
- ② V-3138 の南側に位置していた建屋（電気室）の火災
- ③ 周辺ケーブルおよび消防車輛への延焼
- ④ 東方に飛散したタンク内容物が原因での延焼

なお、V-3138 が設置されていた防液堤内にあったタンク、その内容物、発災前後での液量を表４－４に示す。V-3138 以外で、発災前後で保有液量に差が生じている３基のタンク（V-3116、V-3124、V-3148C）は、V-3138 の爆発により損傷を受けた際に、内容物が防液堤内に漏洩し、プール火災により燃焼したと推定される。（アクリル酸：約 67m³、トルエン：約 28m³）

（表４－４）防液堤内設置タンクとその内容物および保有液量

タンク機番	内容物 (主成分)	公称容量 [m ³]	保有液量 [m ³]		発災後の 設備の状態
			発災前	発災後	
V-3138	アクリル酸	70	60	—	大破
V-3116	アクリル酸	100	67	2	損傷(漏洩)
V-3124	トルエン	50	30	1.5	損傷(漏洩)
V-3145A	トルエン	15	9.4	9.4	
V-3145B	トルエン	5.2	0.4	0.4	損傷
V-3146A	アクリル酸	15	8	8	
V-3146B	アクリル酸	15	13	13	
V-3147A	アクリル酸	10	7	7	
V-3147B	アクリル酸	5.2	3	3	損傷
V-3147C	アクリル酸	5.2	4.2	4.2	損傷
V-3148C	アクリル酸	5.2	1.5	0.08	損傷(漏洩)

また、人的被害に対しては、以下の要因の可能性が高いと推定される。

- ① V-3138 内の高温内容物が爆発時に飛散し、それを浴びたことによる影響
- ② V-3138 設置の防液堤内で発生したプール火災の放射熱による影響
- ③ 蒸気爆発後に発生した可能性があるファイアーボールの放射熱による影響

なお、本火災の着火源としては、以下の要因の可能性が高いと推定される。

- ① 爆発時に飛散した金属による衝撃
- ② 電線の切断による火花

タンク周辺火災エリア

※本資料は事故後の状況確認及び日本触媒従業員への聞き取り結果に基づき作成したものである。



(図 4-19) タンク周辺火災エリア

5. 事故原因の究明

5.1. 爆発・火災の発生要因

5.1.1. 事故の直接原因

これまでの調査および解析結果により、事故の直接原因は次のように特定された。

- ① V-3138 へ高温の T-5108 ボトム液を受け入れ、また、タンクの貯蔵液量を増加したにもかかわらず天板リサイクルを実施しなかったために、タンクの上において、アクリル酸を高温で長時間滞留させることになった。
- ② タンク貯蔵液の高温部において、アクリル酸の二量体生成反応が加速的に進行し、その反応熱によりタンクの貯蔵液温度が上昇した。その結果、アクリル酸の重合反応が進行し、更なる温度上昇を招いた。
- ③ タンク貯蔵液の温度検知および温度監視の不備があったことにより、アクリル酸の重合反応が進行するまで異常な状況を把握できなかった。

その結果、V-3138 は爆発し、さらに火災発生へと至り、甚大な人的・物的被害を引き起こした。

5.1.2. 事故の要因

(1) 事故要因系統図(FT 図)

事故の直接原因を踏まえて、事故を引き起こした可能性がある要因およびこれらの繋がりを明らかにするために、FT 図を用いて系統的に整理した。その結果を、図 5-1 に示す。ここで、事故を引き起こした要因を抽出すると、次の 8 項目が挙げられる。

a) タンク流入液の過剰な加熱

T-5108 のボトム温度は約 65℃であるが、蒸気ジャケット配管によりボトム液が移送される間に約 100℃まで温度が上昇し、V-3138 へ流入した。

b) 天板リサイクルバルブ閉

タンクの貯蔵液量が 25m³以上で数日間保持する場合は、天板リサイクルを行うことになっていたが、当該バルブは操作されず、閉状態であった。

c) タンク管理温度設定不備

d) タンク温度検知不備

タンクの管理温度が設定されておらず、温度計が設置されていなかった。

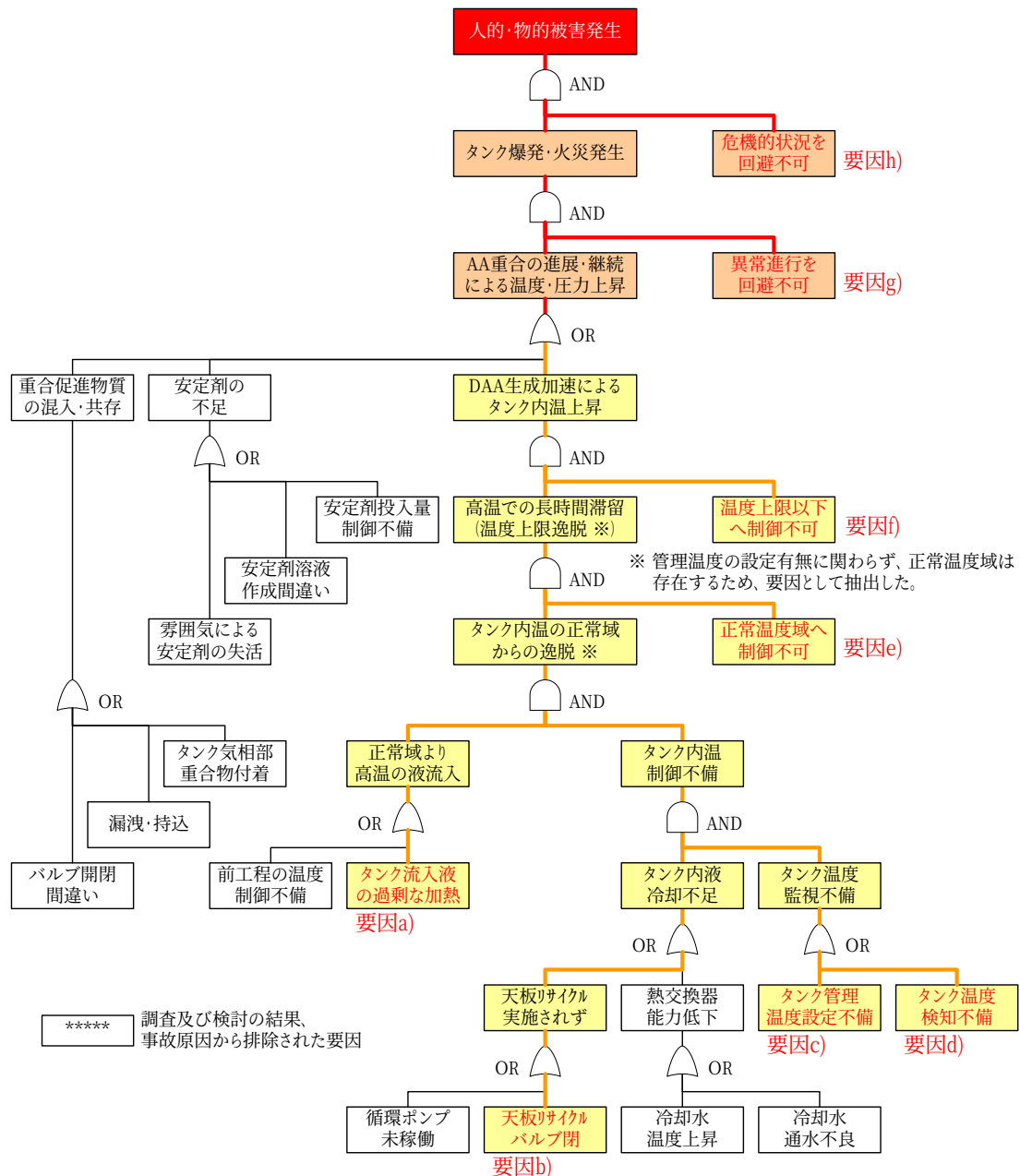
e) 正常温度域へ制御不可

f) 温度上限以下へ制御不可

g) 異常進行を回避不可

h) 危機的状況を回避不可

タンク温度の異常およびその予兆に関する判断基準の他、異常事態への対応手段が確立されていなかった。



(図 5－1) 事故要因系統図

(2) 事故要因と管理的要素

事故要因に関連する事柄や今後のより安全な仕組みづくりの視点も加えた周辺状況等の背景について、管理的要素を踏まえた観点から考察した。表 5－1 に、各事故要因とその背景にある管理的要素を示す。

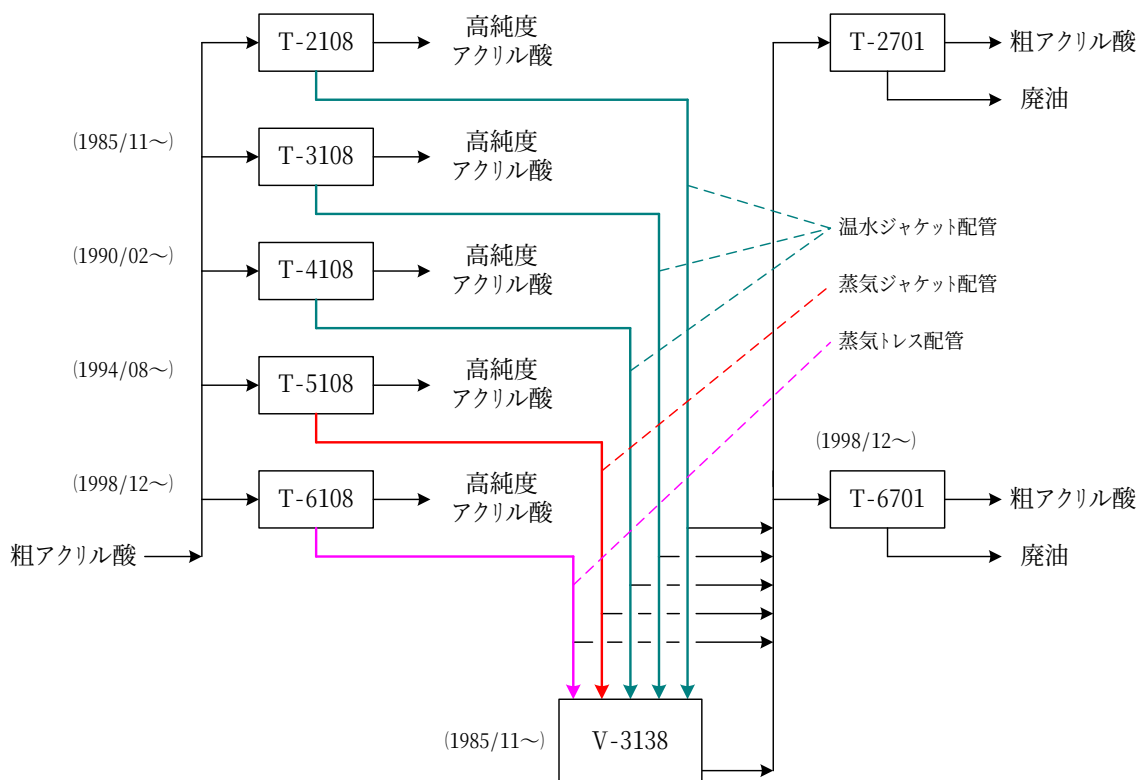
(表 5－1) 事故要因とその背景にある管理的要素

No	事故要因	管理的要素
(1)	a) タンク流入液の過剰な加熱 b) 天板リサイクルバルブ閉	設計の評価、検証および設計思想の伝承
(2)	-1)V-3138 基本管理方法	運転マニュアルの整備および周知
(3)	-2)T-6701 能力アップテスト	非定常作業におけるリスク評価および作業管理
(4)	c) タンク管理温度設定不備 d) タンク温度検知不備	運転条件の設定および管理
(5)	e) 正常温度域へ制御不可 f) 温度上限以下へ制御不可 g) 異常進行を回避不可	異常事態の判断および対応
(6)	h) 危機的状況を回避不可	危機管理および防災活動

5.1.3. 事故要因の背景

事故要因の背景について管理的要素の観点から考察した。

(1) 要因 a) タンク流入液の過剰な加熱



(図 5－2) 高純度アクリル酸設備経緯

① 設備経緯

古くは重合や析出物の発生防止用に蒸留塔や配管に温水ジャケットが採用されていたが、重合防止技術の進歩とともに温水ジャケット採用設備は減少し、温水供給設備も減少した。

T-5108 建設時は技術改良により T-5108 本体の温水ジャケットは不要となったが、T-5108 ボトム液移送配管については凍結や析出防止のため加温が必要であった。しかし、温水設備がなかったことなどから蒸気ジャケットが採用された。なお、後に建設された T-6108 のボトム液移送配管については蒸気トレスが採用された。(図 5-2 参照)

② 設計・建設段階

T-5108 は、5AA 建設プロジェクトの一環として建設され、1994 年 8 月より稼動を開始した。当該プロジェクトは製造・技術・エンジの 3 部門による混成チームであった。

T-108 系ボトム液は、低温ではヘドロ等の析出が、高温では重合の懸念があることは広く認識されていたが、その液中には安定剤が多く含まれていたため、V-3138 貯蔵液の冷却不足によるトラブル発生の懸念は低いと認識されていた。T-5108 ボトム液移送配管への蒸気ジャケット採用に際しては、過剰な加熱による重合を懸念した検討はなされており、蒸気ジャケットには減圧弁と温調トラップが採用された。しかし、V-3138 コイルの冷却能力確認はなされておらず、タンク上部の液の冷却不足を招く要因、リスクについては未検討であった。

当時は、初期管理規則やデザインレビュー等の新規設備に対する設計妥当性の評価機構が整備されておらず、様々な観点から設計の妥当性をレビューすることができなかった。

③ 試運転段階

T-5108 ボトム液を移送する蒸気ジャケット配管の減圧弁は 0.02MPaG に設定され、運転マニュアルにも明記された。一方、温調トラップの設定温度は試運転結果より 90℃としたが、蒸気ジャケット配管出口における T-5108 ボトム液の温度は定量的に把握されておらず、既にこの時点において、T-5108 ボトム温度よりも高い温度に過剰に加熱されていたと推定される。

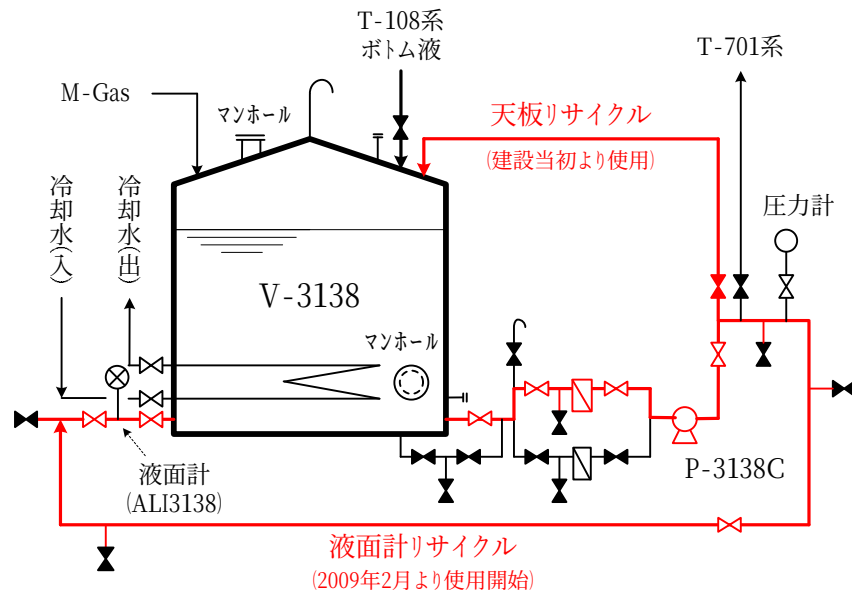
④ 商業運転開始後

T-5108 ボトム液の蒸気ジャケット配管出口における温度は、製造部門内で広く認識されてはならず、T-5108 ボトム温度と同程度と認識されていた。これは、技術検討結果や採用理由を製造部門側に正確に伝承できていなかったためと推定される。

また、温調トラップの使用はジャケット内でのドレン滞留およびドレン排出部の鉄錆等による閉塞をしばしば招き、最終的に、温調トラップは取り外され、吹流しになった。その結果、T-5108 ボトム液は約 100℃まで加熱された状態となった。なお、2009 年 12 月に蒸気減圧弁の交換を行っており、この時、設定

圧を 0.005MPaG に調整しているのですが、温調トラップが取り外されたのは、この時期以降と推定される。しかし、温調トラップが取り外された時期および取り外しに関する検討や手続きについての記録は残っていない。

(2) 要因 b)-1) 天板リサイクルバルブ閉(V-3138 基本管理方法)



(図 5 - 3) 事故前の V-3138 の周辺の状態

① 経緯：1985～2009 年

V-3138 は T-108 系/701 系間の中継タンクとして 1985 年に設置された公称容量 70m³ のタンクである。当時は T-2701 の停止・整備に 2 日間を要していたが、この期間の T-108 系(T-2108/3108)のボトム液を貯蔵できる容量として V-3138 は設計された。また、タンクリサイクルは天板のみであり、T-108 系/701 系が正常に稼動している時は V-3138 へ大量に液を貯蔵する必要はないため、通常は冷却水コイルの上面までの低液量にて管理していた。

T-108 系ボトム液は V-3138 経由、または T-701 系へ直接、いずれかで供給されていたが、2000 年頃からは、T-701 系への供給流量を安定させるため、V-3138 経由で供給されていた。V-3138 貯蔵液は、温度が低下するとヘドロ状の析出物が発生してタンク内で堆積し、液面計誤指示や P-3138C ストレーナの閉塞等を招き、その対応作業が数多く発生していた。2009 年 2 月に液面計の誤指示対策として液面計リサイクルラインが設置された。

② 経緯：2009～2010 年

液面計リサイクルラインの設置後も、ポンプのストレーナや周辺配管等での掃除・洗浄作業は依然として数多く発生していたが、2009 年 8 月にタンクを開放・洗浄後、2009 年 9 月より暫定的にタンクの使用方法を変更し、以降、その使用方法の良否の確認を行った。タンク使用に関する暫定条件は運転引継

システムへの記載により通知されたが、その内容は次のとおりであった。

- 1) T-108 系が停止し、塔内の液を抜く時のみ V-3138 へ受液する。
- 2) V-3138 への受液後は、タンク内の液をT-701 系へ供給して液の処理を行い、実績のある最低液量である 5m³まで液量を低下させる。
- 3) タンク内の液を処理した後は、液処理に使用した配管のブローを行う。
また、タンクリサイクルは液面計リサイクルのみを行う。
- 4) タンクの冷却水コイルへの冷却水のバルブは閉とする。

約5ヵ月後の2010年1月末に、「V-3138 基本管理方法」として整理された。

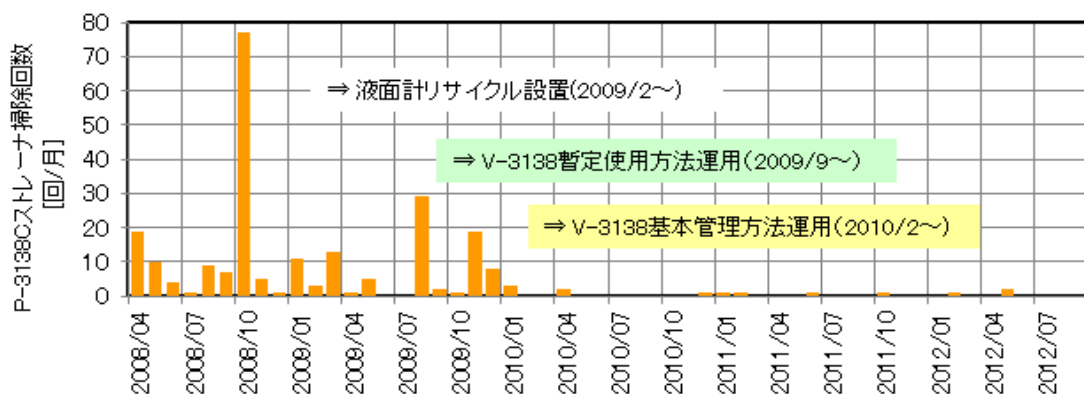
なお、運転引継システムにより通知された内容は次のとおりであった。

- 1) T-108 系の稼動時は、T-701 系へ T-108 系のボトム液を直接供給する。
T-108 系が停止し、塔内の液を抜く時のみ V-3138 へ受液する。
- 2) V-3138 への受液後は、タンク内の液をT-701 系へ供給して液の処理を行い、冷却水コイルの下部が液に漬かる最低液量である 5m³まで液量を低下させる。
- 3) タンク内の液を処理した後は、液処理に使用した配管のブローを行う。
また、タンクリサイクルは液面計リサイクルのみを行う。
- 4) タンク内の液を処理できず、冷却水コイルの上部までの液量である 25m³以上の液量で数日間保持する場合は、タンク天板リサイクルを行う。
- 5) タンクの冷却水コイルへの冷却水のバルブは、通常開とする。

「V-3138 基本管理方法」は恒久的な事柄であるが運転引継システムによる通知までに止まり、運転マニュアル等には反映されていない。ただし、歯止め策として、天板リサイクルラインの操作バルブの上側に「通常閉、25m³以上で R/C開」との現場表示が貼付された。※R/C：リサイクルの意味

③ 経緯：2010～2012 年

V-3138 の管理方法変更後、ポンプストレーナ掃除回数等は激減し、運転員の作業負荷は大幅に低減された。また、タンクの内部洗浄も2009年8月を最後に実施されていない。図5-4にポンプストレーナ掃除回数の推移を示す。



(図5-4) P-3138C ストレーナ掃除回数推移

もともと V-3138 周辺での掃除・洗浄作業は、タンク内での析出物の堆積に起因している。タンク運用方法変更の効果の検証は、ストレーナ掃除回数の減少等により確認しているが、タンク内の堆積物増減の確認や液面計リサイクル要否の再検討は行われていない。

その後、V-3138 に 25m³以上の液を貯蔵する、つまり、天板リサイクルのバルブを操作する機会はほとんどなかったため、運転員の認識から天板リサイクルの必要性は薄れた。

なお、V-3138 には多数の蒸留塔が連絡しているが、T-108 系ボトム液の V-3138 側または T-701 系側への送液先の切替は、図 5-3 に記載の P-3138C 吐出ヘッダーから 15m 程度離れた別な場所にあるヘッダーでバルブ操作を行うため、天板リサイクルに係る現場表示は、作業者にとって判りにくかった可能性がある。

(3) 要因 b)-2) 天板リサイクルバルブ閉(T-6701 能力アップテスト)

① 作業管理および指示書に関する背景

安全対策に特段の注意を要する作業については「危険作業規則」が、また、それらの作業のうち作業標準に定められていない作業には「定型外作業基準」が適用される。危険作業の実施には許可が必要であり、あらかじめ作業種別に応じて安全対策書を作成し、作業実施前に作業者に内容を周知している。

一方、運転・作業管理に関して、指示書の発行や承認ルート等を規定した規則はない。指示書の運用は部署により異なるが、基本的にはマニュアルの有無に関係なく、運転や作業の実施に際して必要があれば課長承認で発行され、概ね、マニュアル類の補完に発行されることが多い。

② 変更に伴うリスク管理

設備・プロセス等の恒久的または一時的な変更に伴うリスク管理については「変更管理規則」が適用される。該規則は 2004 年 8 月に制定、2009 年 9 月に全面改定され、以降はデータベースにより運用している。各職場は、この規則と自職場での諸活動を照合し、必要な検討・措置を実施している。

この規則では、変更規模は変更管理チェックシートにより評価し、その結果により審査・承認ルートが決まる仕組みであるが、併せて、適用対象外も例示されている。例えば、「設備、配管、機器の同一仕様での更新」や「安全運転範囲内での運転条件、手順の変更」は適用対象外となるが、規則の適用対象についての解釈は個人によって異なることがあり、適用対象外と見なされれば、変更管理チェックシートは利用されない。

③ 2009 年度テスト実施時

V-3138 へ液溜めを行う理由は、T-6701 能力アップテストのためであるが、V-3138 へ意図的に液を溜める作業は、通常は行わない非定常作業であり、また、T-6701 能力アップテストは一時的な条件による運転マニュアル外の操作

であった。

T-6701 能力アップテストの目的は留出品の品質を確保できる稼動条件の見極めであったが、T-6701 テスト条件は、蒸留塔の負荷としては過去に実績のある範囲内であったこと、また、V-3138 の貯蔵液量も公称容量内であったことから、設備の能力範囲内における調整と認識されていた。したがって、T-6701 テスト方法・条件・予定等を記載したテスト実施計画書が作成されたが、V-3138 液溜めに付随するリスクは未検討であった。

テスト計画書は課長承認を得て発行されたが、指示書は発行されていない。ただし、この時は、V-3138 暫定使用方法の確認中でもあり、タンク液溜め後に天板リサイクルが実施された。

④ 2012 年度テスト実施時

T-6701 能力アップテストに対する基本的な認識は 2009 年度実施時と同様であり、V-3138 液溜めに付随するリスクは未検討であった。また、V-3138 液溜め作業は「V-3138 基本管理方法」に沿って実施されるべきであるが、本内容はマニュアルに未反映であり、指示書も発行されなかったため、運転員へ再度周知することができなかった。

(4) 要因 c) タンク管理温度設定不備

要因 d) タンク温度検知不備

① V-3138 の温度管理

アクリル酸プラントは、酸化反応の他、吸収・蒸留等の様々な単位操作から成り立っており、これら主要工程における温度管理は精密な制御を必要とする。

V-3138 の温度管理面については、タンク貯蔵液は低温ではアクリル酸の凍結やヘドロ等の析出が、高温では重合の懸念があるため、良好な状態を維持するための温度領域自体は存在する。しかし、V-3138 の通常の貯蔵液量は少なく、また、タンク内のコイルにより液が冷却され、液中には安定剤を多く含んでいたことから、常時温度を監視し、ある設定値に制御するといった精密な制御を行う必要性はあまりなかった。したがって、V-3138 の定量的な温度管理の必要性は、主要工程に比べて相対的に低く認識されていた。これはタンク建設当時から現在に至るまで変わらないと推定される。

なお、アクリル酸の二量体（DAA）の生成には安定剤や雰囲気は影響せず、温度の影響が大きい。DAA 生成に伴う危険性情報が広く共有化されていなかったことも温度管理への認識に影響を与えたと推定される。

② 計器設置の要否

温度計の設置の要否や利用形態（現場型または遠隔監視）は、温度管理の必要性や温度監視周期の長短、法的要求等を踏まえて設定されるが、これらを総合的に反映した温度監視手段についての所内統一的な基準はない。一方、温度管理・監視の必要性に関する評価は個々のプラント毎に実施されるため、温度

管理の必要性が低く評価された場合、温度常時監視の必要性も同様に評価され、間歇的な検知で十分な場合は、温度計が設置されないことがある。その結果、設備により温度管理・監視に関する評価・認識のバラツキが生じる。

③ V-3138 の温度計：設計・建設段階

前述のとおり、V-3138 の定量的な温度管理の必要性は低く認識されていたため、タンクの設計段階時点では温度計の設置は計画されていない。その後、詳細設計・建設へと進む中でタンクへのノズル追加および変更があり、温度計座はその一つであるが、設備の利用開始時点で本ノズルを利用する意図、あるいは温度計の有無を正確に特定できる記録は残っていない。

④ V-3138 温度計に関して：トラブル水平展開との関係

1994 年 4 月に、他のアクリル酸中間タンクにおいて重合トラブルが発生した際、そのタンク以外の類似タンクにも温度常時監視や外部冷却熱交換器設置等の対策が実施された。しかし、V-3138 はこの時の調査により温度計が設置されていないことが確認されたが、水平展開の実施対象外となった。水平展開の対象設備は 80～100℃の蒸留塔ボトム液の受液タンクとされたが、T-108 系のボトム温度は 65～70℃であったことが理由と推定される。なお、この時点では T-5108 は建設されていない。

これら一連のトラブル原因・対策検討はその部署内で完結しており、技術系の他部門が参画した形で幅広く類似トラブルを防止するための仕組みが整っていなかった。

(5) 要因 e) 正常温度域へ制御不可

要因 f) 温度上限以下へ制御不可

要因 g) 異常進行を回避不可

① アクリル酸の安全対策全般

アクリル酸プラントに限らず、製造プラントの正常稼動継続が困難であることを検知すれば、インターロックにより設備を停止させる仕組みが整備されている。従来、アクリル酸の安全対策は、トラブルの予防対策が中心であるが、設備停止等の処置では抑制できない異常事態を想定した判断基準や対応手段は未確立であった。

② V-3138

V-3138 は温度監視に不備があったため、設備を停止させ、何らかの処置を行うべき温度を超過した状態になるまで異常を検知できなかった。また、異常事態への判断基準、対応手段は確立されておらず、これに対処するための設備もなかった。

(6) 要因 h) 危機的状況を回避不可

① 過去のトラブル

姫路製造所において、過去にアクリル酸の重合によりタンクが破裂・爆発したことはない。しかし、タンク内部点検時にアクリル酸重合物が確認されたことはあり、不要な構造物の撤去などの基本的な重合防止対策は各タンクについて実施されている。

過去のタンク内でのアクリル酸重合時の処置として、タンクへの散水が2件、マンホールから水・安定剤の投入が1件あるが、タンクジャケットへの冷却水通水等の処置も併せて実施された。

② 異常現象への対応に関する活動

HMI（姫路ものづくり一新）活動において、総合安全チームによる防災力の向上を目的とした活動を、RC（レスポンスブルケア）活動と連動した形で2007年度より進めている。また、総合防災訓練の他、各職場において防災訓練を計画的に実施している。消防操法訓練もその一つであり、1回/年の頻度で操法大会も実施している。この他、防災資機材等の充実も図っている。

これらの活動を通じて危険物や高圧ガスの漏洩や火災等の異常現象に対する初期対応手順を事業所要領として整備を進めているが、暴走反応については、まだ作成されていなかった。（異常現象と通報に関する教育資料（承認途中）では、暴走反応への対処として放水によるタンク冷却の例示がある。）

③ 規則等の整備状況

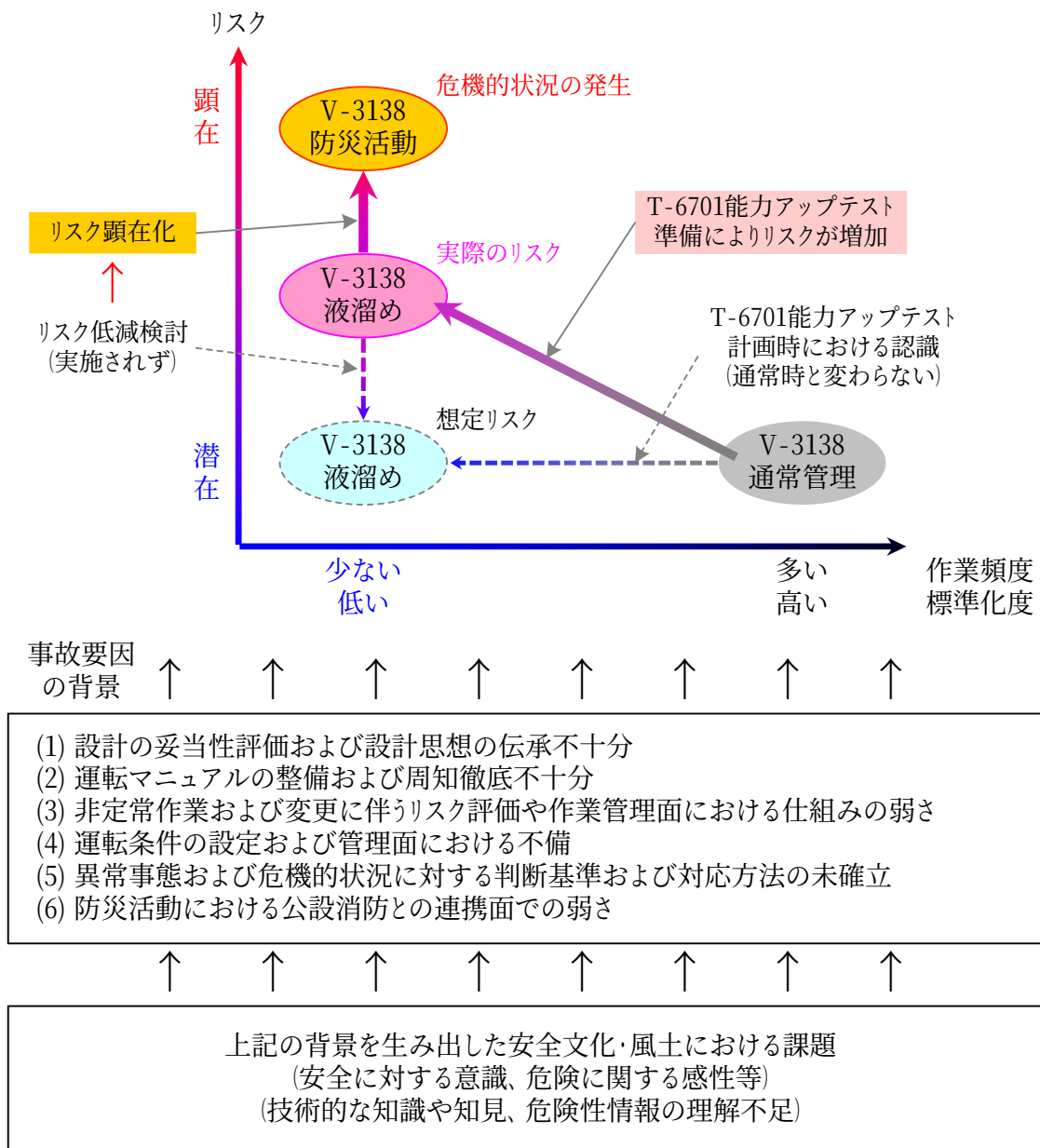
事業所規程として自衛防災マニュアルが整備されているが、自衛防災隊組織における役割分担とその定義には、公設消防への情報提供等の連絡体制の面において不明確な点がある。また、各プラントの異常判断基準および対応方法を一元集約したマニュアルは確立されていなかった。

④ 今回の事故時の対応

V-3138 の状況より冷却が必要と判断し、放水を実施した。運転員が6ヶ所の消火栓より放水を行い（各400ℓ/min）、その後、自衛防災隊の消防自動車による放水（3100ℓ/min）を行った。しかし、V-3138は保温施工されていたため、放水によるタンク貯蔵液の冷却効果はあまりなかったと推定される。

なお、V-3138 からアクリル酸蒸気が放出されていたため、タンクへの放水にはアクリル酸蒸気を冷却し、吸収させる意図もあり、ガス爆発の発生を抑制した可能性が考えられる。しかし、このような状況下では、タンク内部へ水や安定剤を投入するなどの追加処置を行うことはできず、放水以外に異常事態の進行を抑制する手段はなかった。

以上より、事故要因の背景についてまとめると、図5-5に示すとおりになる。また、事故要因とその背景にある管理的要素および再発防止に際して考慮すべき点を整理すると、表5-2に示すとおりになる。



(図 5－5) 事故要因の背景のまとめ

(表5-2) 事故要因とその背景にある管理的要素および再発防止に際して考慮すべき点

No.	事故要因	管理的要素
	再発防止に際して考慮すべき点	
(1)	a) タンク流入液の過剰な加熱	設計の評価、検証および設計思想の伝承
	-1) 設計段階におけるリスク検討および設計妥当性の評価 -2) 試運転段階における運転条件の検証 -3) 技術検討内容および変更事項の運転員に対する教育と周知 -4) 設備変更時のリスク検討および変更後の検証 -5) 変更に伴う履歴および記録管理の徹底	
(2)	b) 天板リサイクルバルブ閉 -1)V-3138 基本管理方法	運転マニュアルの整備および周知
	-1) 運転マニュアルへの中間タンクの管理方法の反映 -2) 操作方法変更時のリスク検討および変更後の検証 -3) 操作方法等の運転員への周知および作業の確実な実施とその確認 -4) 作業の確実性を高める工夫（作業員にとって判りやすい現場表示等）	
(3)	b) 天板リサイクルバルブ閉 -2)T-6701 能力アップテスト	非定常作業におけるリスク評価 および作業管理
	-1) 非定常作業および変更に伴うリスク評価の確実な実施 -2) 変更管理規則の見直し（リスク評価対象、チェックシート運用等） -3) リスク評価を踏まえた運転・作業指示書の発行・承認ルート等の規定 -4) 指示書に基づく作業実施前の注意事項の確認励行 -5) 教育、育成によるリスク管理体制の強化	
(4)	c) タンク管理温度設定不備 d) タンク温度検知不備	運転条件の設定および管理
	-1) 温度監視手段の統一基準整備 -2) 温度管理手段の標準化および温度制御の確実性向上 -3) 取扱い物質の危険性に関する情報の共有化 -4) 設備履歴管理の徹底 -5) トラブル検討への技術部門等の複数部門の参画強化	
(5)	e) 正常温度域へ制御不可 f) 温度上限以下へ制御不可 g) 異常進行を回避不可	異常事態の判断および対応
	-1) 異常事態に対する判断基準および対応手段の確立	
(6)	h) 危機的状況を回避不可	危機管理および防災活動
	-1) 危機的な状況に対する判断基準および対応手段の確立 -2) 公設消防との連携改善（提供情報整備、連絡体制の見直し等）	

5.2. 爆発・火災による被害拡大に関連する事項

5.1 項にて整理された事故要因に関して、事故による被害の拡大に係るものを以下に整理する。

(1) 物的被害

- ① タンク爆発へと至る異常の進展は、アクリル酸の重合反応の進行によりもたらされており、温度検知の不備により、早期に異常を検知できなかったことが、被害拡大を招いた一因にある。
- ② また、5.1.3.項(6)に記載のとおり、危機的な状況へと事態が進行する中で、放水以外に異常事態の進行を抑制する手段がなかったことが、物的被害を拡大させた要因に挙げられる。

(2) 人的被害

- ① 本事故における人的被害は、タンクへの放水およびその準備作業中にタンクが爆発したことにより発生しており、人にダメージを与えた要因は、火災の放射熱や高温のタンク内容物を浴びたことが考えられるが、これらは作業者のタンクからの距離や装備も関係する。
- ② 適切な距離や装備により防災活動を行う上では、危機的な状況の進行に対する判断基準や対応手段、体制等が重要な要素になるが、これらが十分に確立されていなかったことは、人的被害を拡大させた要因に挙げられる。

6. 再発防止対策の提言

前項に整理した事故の要因および背景に対して、以下の再発防止対策を提言する。なお、再発防止対策は、表 6－1 に示す観点に基づく 6M-5E 分析により導出した。この分析の詳細については表 6－2 に示す。

(表 6－1) 事故要因の背景と再発防止対策に関する 6M-5E 分析

6M: 事故要因の背景分類の観点	5E: 再発防止対策の導出の観点
Man (人)	Education (教育・訓練)
Machine (設備・機器)	Engineering (技術・工学)
Method (方法・手段)	Enforcement (強化・徹底)
Material (物質・材料)	Environment (業務環境)
Measurement (測定・精度)	Example (事例・模範)
Management (組織・管理)	

6.1. 発災設備の再発防止対策

発災設備を復旧させ、より安全、かつ、安定に生産活動を行うため、次に示す再発防止対策を実施する。

(1) T-5108 ボトム液移送配管の仕様変更

タンク流入液の過剰な加熱を防止するために、以下の事項を実施する。

- ① 液性状等の再確認および設計条件の設定
- ② 配管仕様変更に伴うリスク検討および妥当性評価の実施
- ③ 試運転における配管使用条件および状態等の確認

(2) V-3138 および付帯設備仕様検討（新設）

V-3138 の貯蔵液を適切な温度に管理し、また、逸脱した場合の判断基準および対応手段を明確にするために、以下の事項を実施する。

- ① 液性状等の再確認および管理温度の設定
- ② 温度管理手段の設定（温度計の設置およびタンク天板リサイクルの常時実施を含む）
- ③ 異常判断基準温度および対応手段の設定（緊急安定剤投入等の検討）
- ④ V-3138 および付帯設備設置に伴うリスク検討および妥当性評価の実施
- ⑤ 試運転における V-3138 および付帯設備の使用条件、状態等の確認

(3) マニュアル等の整備

復旧した設備の安全、かつ、安定な使用に必要な事柄を明確にするために、以下の事項を実施する。

- ① T-5108 および V-3138 マニュアル類の整備
- ② T-5108、V-3138 周辺の P&I 等の図面更新

- ③ T-5108、V-3138 周辺の現場表示作成

(4) 教育・訓練

復旧した設備をマニュアルに沿って、安全、かつ、安定に使用するために、以下の事項を実施する。

- ① T-5108、V-3138 マニュアル等に基づく運転員の教育
- ② アクリル酸二量体の生成挙動詳細の把握およびアクリル酸の危険性の再教育

6.2. 類似災害防止のための対策および水平展開

6.2.1. 類似災害防止のための対策

姫路製造所の他の生産設備における類似災害防止のため、次に示す再発防止対策を実施する。

(1) 運転・作業管理

非定常作業および手順・方法・設備等の変更時において、リスクの検討を確実にに行い、作業内容等を周知徹底するために、以下の事項を実施する。

① 作業管理に係る基本規則の制定

作業管理に係る基本規則を制定し、各作業の定義および作業管理の仕組みを標準化する。また、本規則の運用教育を行うとともに、作業実施前の注意事項の確認励行および危険予知実施の徹底を図る。

② 変更管理規則の見直し

変更に伴うリスクの評価対象、チェックシート運用等を見直し、リスク評価対象からの抜け漏れを防ぐ。また、変更管理の対象事例等を用いた運用教育を実施するとともに、セーフティマネージャー等の育成によるリスク管理体制の強化を図る。

③ 指示書の運用方法の見直し

作業管理および変更管理に係る規則の制改定に際してリスク評価を踏まえた指示書の発行・承認ルート等を規定する。また、事前のリスク検討、作業前の危険予知実施の他、作業実施後の結果の確認を確実に行う。

(2) 危機管理

異常現象発生時における対応能力を強化するために、以下の事項を実施する。

① 危機管理マニュアルの整備

危機管理に対する基本方針、危機管理体制等を明確にし、異常現象に対する平常時の実施事項を設定する。また、異常現象発生時における安全確保、二次災害防止および被害最小化に関する措置を確立し、もって、公設消防への提供情報を明確にする。

② 自衛防災マニュアルの見直し

公設消防への情報提供等の連絡体制の観点から、自衛防災隊組織における役割分担および定義の見直しを、休日・夜間時の体制も含めて実施する。また、

通報を含む異常現象に対する初動対応の改善を図るとともに、防災資機材・備品類の見直しを行う。

③ マニュアルに基づく教育・訓練の実施

教育・訓練の計画的な実施により、公設消防とのより効果的な連携を可能とする自衛防災体制を確立する。

(3) その他

① 取扱い物質の危険性等に関する再教育

② タンク付帯設備設計基準の見直し

③ トラブル水平展開の仕組みの見直し

トラブル検討への技術部門等の複数の関連部門の参画により、水平展開対策の実施漏れを防ぐ。

④ 社外の事故事例、技術情報等の収集および活用

前項の対策と併せて、社外の各種情報も活用することにより技術者の育成や技術力の向上を図る。

6.2.2. アクリル酸使用設備の災害防止対策

アクリル酸使用設備における類似災害の発生を防止するために、以下の事項を実施する。

① タンク温度監視（温度計設置）統一基準の整備

② タンク管理温度および温度管理手段の見直し

アクリル酸を貯蔵する各タンクの管理温度を再度整理するとともに、所定の管理温度内にタンクの温度を制御するための基本的な管理手段および温度管理補完策を設定する。

③ 異常予兆に係る判断基準および対応方法についての基本思想の設定

異常もしくはその予兆を判断するための基準温度および基準逸脱時の対応方法・手段についての基本思想を設定する。

④ 異常予兆に係る判断基準に基づく各設備の基準温度の設定

⑤ 想定される異常事態や危機的状況に対する各設備の対応方法の設定

異常事態等への対応方法としては、供給遮断、異常進行遅延、拔出・放出、隔離があり、設備の特徴に応じて適切な方法を採用し、従来からの対応方法を補強することにより、異常事態における被害の最小化を図る。

⑥ 上記①～⑤についてのリスク検討および妥当性評価の実施

⑦ 上記①～⑥に基づくアクリル酸使用設備の改良

⑧ 各アクリル酸使用設備のマニュアル類更新および教育・訓練の実施

6.2.3. 災害防止対策の水平展開

6.2.1.および6.2.2.の対策について、他事業所においても現状の対策と照らし合わせて、見直しを図る。

また、事故の原因究明を通じて得られた知見を、他社や業界へ提供することにより、アクリル酸業界はもとより化学関連産業全体におけるより安全な生産活動への貢献を図る。

6.3. 安全な製造所・企業に向けての安全文化の醸成

これまで日本触媒は、「安全が生産に優先する」を社是に、様々な安全活動を展開してきた。その中で、姫路製造所は、日本触媒における基幹工場として大きな事故を起こすことなく、生産能力の増強を繰り返してきた。しかしながら、その中心であるアクリル酸の製造設備において爆発・火災事故が発生し、人的にも物的にも多大な被害をもたらした。

事故調査の結果、事故原因には様々な要因が複雑に絡み合っていることが明らかになったが、長年にわたる安定生産の継続が、安全意識の緩みや危険に対する感性の低下などを招き、これらの要因へと波及した結果、今回の事故を招いたとも考えられる。

これらの要因は、特定の組織や設備等に限定される局所的なものと矮小化することなく、現時点における日本触媒の安全面での実力の現われと捉えるべきである。よって、今回の事故を重く受け止め、今一度、社是の意味するところを社員全員が深く考えるとともに、今後、これを実現させなければならない。

そのためには、安全は他者から与えられるものではなく、自ら考え、勝ち取るものであるということを改めて自覚し、今後の組織および個人の行動へと反映させることが必須である。安全を勝ち取るということは、安全を確保するためのルールを「守る」こと、また、安全を損なう可能性がある事柄に「気付く」ことから始まり、より安全な企業へと「変わる」ことにより成し得る。いずれも、組織および個人に知識、知見、知恵がなければ実現はおぼつかないため、再発防止対策の実施と並行して、人材育成についても全社的な課題として取り組むべきである。

また、今回の事故から得られた教訓を風化させず、再発防止対策の実効性を担保するには、日本触媒および製造所自身による検証も必要であるが、安全確保に関して新たな気付きを得る上でも、第三者による検証を併せて計画してゆくことも必要である。

企業の安全文化は、これら様々な取り組みを通じて、時間をかけて醸成されてくるものである。したがって、事故調査を通じて導出された再発防止対策の実施に際しては、短期的対応のみならず、中長期的な視点から計画を立案し、その着実な実施をもって、日本触媒全体の安全文化の醸成に繋げてゆくことを提言する。

(表6-2) 事故要因の背景および対策検討における6M-5E分析(1) 要因 a) タンク流入液の不要な加熱

事故要因の背景	Man (人)	Machine (設備・機器)	Method (方法・手段)	Material (物質・材料)	Measurement (測定・精度)	Management (組織・管理)
設計・建設段階	T-108 系ボトム液の低温、高温下での懸念については広く認識されていた。しかし、液中に安定剤が多く含まれていたため、V-3138 貯蔵液の冷却不足によるトラブル発生の懸念は低いと認識。	T-5108 本体の温水ジャケットは廃止、ボトム液移送配管に蒸気ジャケットを採用。この液の過剰な加熱を懸念して、蒸気ジャケットには蒸気減圧弁、温調トラップを設置。 V-3138 コイルの冷却能力確認やタンク上部の液の冷却不足を招く要因、リスクは未検討。	蒸気減圧弁：0.02MPaG 温調トラップ：90℃ にそれぞれ設定。	T-108 系ボトム液は、低温ではヘドロ等の析出が、高温では重合の懸念があった。		5AA 建設プロジェクトにて T-5108 を設計・建設、プロジェクトは製造・技術・エンジニア部門より構成。 5AA 建設時点では新規設備の設計妥当性の評価機構なく、様々な観点から評価できず。
試運転段階			蒸気減圧弁：0.02MPaG 温調トラップ：90℃ にそれぞれ設定。	既にこの時点において、T-5108 ボトム温度よりも高い温度に過剰に加熱されていたと推定される。	T-5108 試運転結果より温調トラップの設定温度を決定したが、蒸気ジャケット配管出口における T-5108 ボトム液の温度は定量的に把握されていない。	運転マニュアルに T-5108 ボトム液移送配管の蒸気ジャケット減圧弁の設定圧を明記。
商業運転開始後	T-5108 ボトム液の蒸気ジャケット配管出口における温度は T-5108 ボトム温度と同程度と認識。	蒸気ジャケット内にドレンが滞留、ドレン排出部が鉄錆等によりしばしば閉塞。最終的に、蒸気ジャケットに設置の温調トラップは取り外された。	蒸気減圧弁の設定値を 0.005MPaG に調整。	温調トラップが取り外されたことにより、T-5108 ボトム液は約 100℃まで加熱された状態となった。		プロジェクトでの技術検討、採用理由が製造側に正確に伝承されていない。 温調トラップ取り外しの時期を特定できる記録なし。
対策の観点						
Education (教育・訓練)	変更に伴うリスク管理に関する教育 (規則・事例等)	配管仕様変更に係る運転員教育 (仕様、設計条件等)	配管仕様変更に係る運転員教育 (手順・管理基準等)	配管仕様変更に係る運転員教育 (液性状態)	配管仕様変更に係る運転員教育 (試運転結果)	
Engineering (技術・工学)		T-5108 ボトム液移送配管の仕様変更 (設計条件等) 仕様変更に伴うリスク検討	T-5108 周辺 P&I 等の図面更新	T-5108 ボトム液移送配管の仕様変更 (液性状態等の再確認)	試運転時における配管使用条件、状態等の確認	T-5108 ボトム液移送配管仕様の妥当性評価
Enforcement (強化・徹底)	設備設計および変更時のリスク検討の徹底		高純度アクリル酸製造設備運転マニュアル類の更新			マニュアル、記録類の更新、履歴管理徹底
Environment (業務環境)		配管仕様変更に伴う現場表示の更新				
Example (事例・模範)		変更管理該当事例の作成 (設備変更)				

(表6-2) 事故要因の背景および対策検討における6M-5E分析(2) 要因b)-1) 天板リサイクルバルブ閉(V-3138 基本管理方法)

事故要因の背景	Man (人)	Machine (設備・機器)	Method (方法・手段)	Material (物質・材料)	Measurement (測定・精度)	Management (組織・管理)
1985～2009 年	タンク内で堆積したヘドロ状の析出物が、液面計誤指示やポンプストレーナの閉塞等を招き、その対応作業が数多く発生していた。	V-3138公称容量は70m3、冷却水コイル部の容量は約25m3。 建設当時は天板リサイクルのみ。T-108 系/701 系が正常稼動時は通常、低液量にて管理していた。	V-3138 は通常、低液量(=コイル部)で管理。 T-108 系 ボトム液は V-3138 経由 or T-701 系 直接供給していたが、2000 年頃から V-3138 経由で T-701 系へ供給。	V-3138 貯蔵液は温度が低下するとヘドロ状の析出物が発生してタンク内で堆積する。		
2009～2010 年	液面計リサイクルラインの設置後も、ポンプのストレーナや周辺配管等での掃除・洗浄作業は依然として数多く発生していた。	タンク内析出物の堆積による液面計誤指示の対策として、2009 年 2 月に液面計リサイクルラインを設置。 V-3138 基本管理方法設定時に、天板リサイクルラインのバルブ上部に「通常閉、25m3 以上で天板 R/C 開」の現場表示を貼付。	2009 年 9 月より T-108 系停止時のみ V-3138 へ受液する方式に暫定的に変更。約 5 ヶ月間、本方式の良否について確認。 2010 年 1 月にタンク液量によりタンクリサイクルを変更する方法等を含む基本管理方法を設定。			運転引継システムにより暫定運用方法を通知。 V-3138 基本管理方法は恒久的な手順だが、運転引継システムによる通知に止まり、運転マニュアル等へは未反映。
2010～2012 年	ポンプストレーナ掃除回数等は激減し、作業負荷は大幅に低減。しかし、その後、天板リサイクルを行う機会はほとんどなく、運転員の認識から天板リサイクルの必要性が薄れた。	T-108 系 ボトム液の V-3138 側または T-701 系側への切替操作は、P-3138C 吐出ヘッダーとは別な場所にあるヘッダーにてバルブ操作を行うため、天板リサイクルに係る現場表示は、作業者にとって判りにくかった可能性がある。				効果の検証は、ストレーナ掃除回数の減少等により確認しているが、タンク内の堆積物増減の確認や液面計リサイクル要否の再検討は行われていない。
対策の観点						
Education (教育・訓練)		V-3138 新設に係る運転員教育 (仕様、設計条件等)	V-3138 新設に係る運転員教育 (手順・管理基準等)	V-3138 新設に係る運転員教育 (液性状等)	V-3138 新設に係る運転員教育 (試運転結果)	
Engineering (技術・工学)		V-3138 及び付帯設備の仕様検討(新設) (管理温度・手段等) 新設に伴うリスク検討	V-3138 周辺 P&I 等の図面更新	V-3138 及び付帯設備の仕様検討(新設) (液性状等の再確認)	試運転時における設備状態、使用条件等の確認	V-3138 及び付帯設備仕様の妥当性評価
Enforcement (強化・徹底)	作業内容の確実な実施とその確認		高純度アクリル酸製造設備運転マニュアル類整備			運転マニュアルへの中間タンク管理方法の反映
Environment (業務環境)	作業の確実性を高める工夫(判りやすい現場表示等)	新設に伴う現場表示作成				
Example (事例・模範)		タンク温度基本管理手段・補完策の設定 上記に基づく設備見直し	タンク付帯設備設計基準の見直し			

(表6-2) 事故要因の背景および対策検討における6M-5E分析(3) 要因b)-2) 天板リサイクルバブル閉(T-6701 能力アップテスト)

事故要因の背景	Man (人)	Machine (設備・機器)	Method (方法・手段)	Material (物質・材料)	Measurement (測定・精度)	Management (組織・管理)
作業管理および指示書に関する背景	危険作業の実施前には安全対策書に基づいて作業者に内容を周知している。指示書は、基本的にはマニュアル有無に関係なく、運転や作業の実施に際して必要があれば課長承認で発行される。		安全対策に特段の注意を要する作業には「危険作業規則」が、また、それらの作業のうち作業標準に定められていない作業には「定型外作業基準」が適用される。運転・作業に関する指示書の発行・承認ルート等を規定した規則はない。			危険作業の実施には許可が必要であり、あらかじめ作業種別に応じて安全対策書等が作成される。指示書の運用は部署により異なるが、概ね、マニュアル類の補充に発行されることが多い。
変更に伴うリスク管理	「変更管理規則」の適用についての解釈は個人により異なることがある。適用対象外となれば変更管理チェックシートが利用されない。		設備・プロセス等の恒久的または一時的な変更に伴うリスク管理には「変更管理規則」が適用される。この規則には適用対象外の例示あり。			「変更管理規則」の運用はデータベースによる。変更規模は変更管理チェックシートにより評価し、その結果により審査・承認ルートが決まる仕組み。
2009年度テスト実施時	T-6701 能力アップテストの目的は、留出品の品質を確保できる稼動条件の見極めであり、過去の実績等より、設備の能力範囲内での調整と認識されていた。	T-6701 テスト条件は蒸留塔の負荷としては過去に実績があり、V-3138 貯蔵液量も公称容量内。V-3138 液溜めに付随するリスクは未検討。	T-6701 テスト計画書には、テスト方法・条件・予定を記載して作成。この時はV-3138 暫定運用方法を確認中でもあり、液溜め後に天板リサイクルが実施された。			V-3138 へ意図的に液を溜める作業は、非定常作業、T-6701 能力アップテストは運転マニュアル外の操作である。テスト計画書は課長の承認を得て発行、指示書の発行はなし。
2012年度テスト実施時	テストの基本的な認識は2009年度と同様。	2009年度と同様、V-3138 液溜めに付随するリスクは未検討。	2009年度と同様にテスト計画書を作成。			2009年度と同様、指示書の発行はなし。V-3138 基本運用方法を再度周知できず。
対策の観点						
Education (教育・訓練)	非定常作業および変更に伴うリスク管理に関する教育(リスク評価、KY 等)		作業管理および変更管理に関する教育(規則・事例等)			
Engineering (技術・工学)						
Enforcement (強化・徹底)	非定常作業および変更に伴うリスク評価の確実な実施教育、育成によるリスク管理体制の強化		リスク評価を踏まえた運転・作業指示書の発行・承認ルートの等の規定 変更管理規則の見直し			変更に伴うリスク評価対象、チェックシート運用の見直し
Environment (業務環境)						
Example (事例・模範)			変更管理対象事例の作成			

(表6-2) 事故要因の背景および対策検討における6M-5E分析(4) 要因 c) タンク管理温度設定不備
要因 d) タンク温度検知不備

事故要因の背景	Man (人)	Machine (設備・機器)	Method (方法・手段)	Material (物質・材料)	Measurement (測定・精度)	Management (組織・管理)
V-3138 の温度管理	主要工程に比べて V-3138 の定量的な温度管理の必要性は相対的に低く認識されていた。 DAA の生成に伴う危険性情報は広く共有化されていなかった。	アクリル酸プラント主要工程の温度管理には精密な制御を必要とする。 V-3138 貯蔵液はコイルにより冷却されているが、精密な制御(常時温度を監視し、ある設定値に制御)の必要性はあまりない。		V-3138 貯蔵液は、低温ではアクリル酸の凍結やヘッド等の析出が、高温では重合の懸念があるが、安定剤を多く含んでいる。 DAA の生成に安定剤や雰囲気は影響せず、温度の影響が大きい。	液性状態を良好な状態に維持するための温度領域自体は存在する。	
計器設置の要否	温度管理の必要性が低く評価された場合、温度常時監視の必要性も同様に評価される。	間歇的な検知で十分な場合は、温度計が設置されることがある。	温度計の設置要否や利用形態は、温度管理の必要性や温度監視周期の長短、法的要求等を踏まえて設定。温度監視手段についての所内統一的な基準はない。			温度管理・監視の必要性に関する評価は個々のプラント毎に実施。 設備により温度管理・監視に関する評価・認識のバラツキが生じる。
V-3138 の温度計 (設計・建設段階)		V-3138 設計段階では温度計設置の計画なし。 詳細設計・建設と進む中で温度計座を追加。				設備の利用開始時点で該ノズルを利用する意図、温度計の有無を正確に特定できる記録なし。
V-3138 の温度計 (トラブル水平展開との関係)	V-3138 に温度計が設置されていないことが確認されたが水平展開の実施対象外と判断。	他のアクリル酸中間タンクでの重合トラブル(1994 年 4 月)発生後に、そのタンク以外の類似タンクにも、温度常時監視や外部冷却熱交設置等の対策を実施。	トラブル水平展開の対象は 80～100℃の蒸留塔ボトム液の受液タンク。		T-108 系のボトム温度は 65～70℃。 (この時点では T-5108 は建設されていない)	トラブル原因・対策検討は自部署内で完結。 技術系の他部門が参画した形で幅広く類似トラブルを防止する仕組みが整っていないかった。
対策の観点						
Education (教育・訓練)		V-3138 新設に係る運転員教育 (V-3138 および付帯設備)	V-3138 新設に係る運転員教育 (手順・管理基準等)	V-3138 新設に係る運転員教育 (液性状態、DAA 挙動等)	V-3138 新設に係る運転員教育 (試運転結果)	
Engineering (技術・工学)	トラブル検討の参画による技術者育成、技術力の向上	V-3138 および付帯設備の仕様変更(新設) (管理温度・手段等) 新設に伴うリスク検討	V-3138 周辺 P&I 等の図面更新	V-3138 および付帯設備の仕様変更(新設) (液性状態等の再確認) DAA 生成機構詳細解明	試運転時における設備状態、使用条件等の確認	V-3138 および付帯設備仕様の妥当性評価
Enforcement (強化・徹底)		タンク温度監視(温度計設置)統一基準整備	高純度アクリル酸製造設備運転マニュアル類整備			運転マニュアルへの中間タンク管理方法の反映 トラブル水平展開見直し
Environment (業務環境)		新設に伴う現場表示作成				
Example (事例・模範)		タンク温度基本管理手段・補完策の設定 上記に基づく設備見直し	タンク付帯設備設計基準の見直し			

(表6-2) 事故要因の背景および対策検討における6M-5E分析(5)

要因 e) 正常温度域へ制御不可
 要因 f) 温度上限以下へ制御不可
 要因 g) 異常進行を回避不可

事故要因の背景	Man (人)	Machine (設備・機器)	Method (方法・手段)	Material (物質・材料)	Measurement (測定・精度)	Management (組織・管理)
アクリル酸安全対策全般		アクリル酸に限らず製造プラント全般に、正常稼動継続が困難であることを検知すれば、インターロックにより設備を停止させる仕組みあり。	設備停止等の処置では抑制できない異常事態を想定した判断基準、対応手段は未確立。			従来、トラブル発生防止を目的とした予防対策が中心。
V-3138	設備を停止させ、何らかの処置を行うべき温度を超過した状態になるまで、異常検知できず。	(温度検知不備あり) 異常事態に対処するため の設備はない。	(管理温度設定不備あり) 異常事態への判断基準、 対応手段は未確立。			
対策の観点 Education (教育・訓練)	訓練に基づく異常時対応能力の維持・向上	V-3138 異常時対応手段に係る運転員教育・訓練(仕様、設計条件等)	V-3138 異常時対応手段に係る運転員教育・訓練(手順・管理基準等)	V-3138 異常時対応手段に係る運転員教育・訓練(緊急安定剤の取扱い)	訓練による異常時対応所要時間の検証	異常時対応訓練の計画的な実施
Engineering (技術・工学)	社外事例の解析による技術者の育成、技術力向上	V-3138 異常時対応手段検討(基準温度、緊急安定剤投入設備等) アクリル酸使用設備の異常時対応手段検討(基準温度、設備仕様等) 異常時対応手段に関するリスク検討	V-3138 異常時対応手段検討(手順・管理基準等) アクリル酸使用設備の異常時対応手段検討(手順・管理基準等) 異常予兆に係る判断基準および対応方法に関する基本思想の整備	V-3138 異常時対応手段検討(緊急安定剤の選定、物性等の把握) アクリル酸使用設備の異常時対応手段検討(緊急安定剤の選定、物性等の把握)		V-3138 異常判断基準、対応手段の妥当性評価 アクリル酸使用設備の異常判断基準、対応手段の妥当性評価 基本思想に基づく他の設備の見直し
Enforcement (強化・徹底)	日々の危険予知実施の補強		V-3138 マニキュアル類整備 アクリル酸使用設備の運転マニキュアル見直し			
Environment (業務環境)		設備設置に伴う現場表示の作成				
Example (事例・模範)						社外事故事例、技術情報の収集および活用検討

(表6-2) 事故要因の背景および対策検討における6M-5E分析(6) 要因 h) 危機的状況を回避不可

事故要因の背景 過去のトラブル	Man (人)	Machine (設備・機器)	Method (方法・手段)	Material (物質・材料)	Measurement (測定・精度)	Management (組織・管理)
		姫路製造所においてアクリル酸重合によりタンクが破裂・爆発したことはない。タンク内部点検時にアクリル酸重合物が確認されたことはあり、基本的な重合防止対策は各タンクに実施している。	アクリル酸重合時の処置として、タンクへの散水が2件、マンホールから水・安定剤の投入が1件あり。併せてタンクジャケットへの冷却水通水等も実施された。			
異常現象への対応に関する活動	総合防災訓練の他、各職場にて防災訓練を計画的に実施している。消防操法訓練も行っており、1回/年の頻度で操法大会も実施している。	防災力向上の一環として防災資機材等の充実に図っている。	漏洩や火災等の異常現象に対する初期対応手順を事業所要領に整備中だが、暴走反応は未作成。(異常現象と通報に関する教育資料(承認途中)では、暴走反応への対処として放水によるタンク冷却の例示あり。)			HMI活動(総合安全)による防災力の向上を目的とした活動をRC活動と連動した形で2007年度より進めている。
規則等の整備状況			各プラントの異常判断基準及び対応方法を一元集約したマニュアルは未確立。			自衛防災隊組織における役割分担とその定義には、公設消防への情報提供等の連絡体制の面において不明確な点がある。
今回の事故時の対応	V-3138の状況より冷却が必要と判断し、放水を実施。なお、アクリル酸蒸気が放出していたため、これを冷却・吸収させる意図もあった。	運転員が6ヶ所の消火栓より放水(各400ℓ/min)、その後、自衛防災隊の消防自動車による放水(3100ℓ/min)を行った。	アクリル酸蒸気が放出されていたため、V-3138内部の水や安定剤投入等の追加処置を行えず、放水以外に異常事態の進行を抑制する手段はなかった。	V-3138は保温施工されていたため、放水によるタンク貯蔵液の冷却効果はあまりなかったと推定されるが、ガス爆発の発生を抑制した可能性あり。		
対策の観点						
Education (教育・訓練)	訓練に基づく異常時対応能力の維持・向上	危機管理/自衛防災マニュアルに基づく教育・訓練(仕様、設計条件等)	危機管理/自衛防災マニュアルに基づく教育・訓練(初動改善、他)	取扱い物質の危険性等に関する再教育	訓練による異常対応所要時間の検証	教育・訓練の計画的な実施
Engineering (技術・工学)	社外事例の解析による技術者の育成、技術力向上	危機的状況への対応手段検討(基準温度、仕様等)対応手段のリスク検討	危機的状況への対応手段検討(手順・管理基準)			対応手段の妥当性評価
Enforcement (強化・徹底)			危機管理マニュアル整備 自衛防災マニュアル見直し 運転マニュアル見直し			
Environment (業務環境)		マニュアルに基づく防災資機材、備品類の見直し				
Example (事例・模範)						社外事故事例、技術情報の収集および活用検討

おわりに

今回の株式会社日本触媒姫路製造所の爆発・火災事故は、アクリル酸製造施設内の高純度アクリル酸精製塔のボトム液を一時貯蔵する中間タンクにおいて、タンクの貯蔵液量を増加したにもかかわらず、貯蔵液の天板リサイクルを実施しなかったために冷却不足となり、アクリル酸二量体生成反応が加速され、温度上昇を生じた結果、アクリル酸の重合反応という異常な状況を引き起こしたが、タンク貯蔵液の温度検知および温度監視の不備により、これらの状況を把握できず、爆発・火災に至ったものである。

株式会社日本触媒は、多大な人的被害を発生させた本事故を真摯に受け止め、社是である「安全が生産に優先する」の基本に立ち返り、社会から信頼される化学会社として再生するためにも、本事故調査委員会が提言した再発防止対策を確実に実施するとともに、第三者による検証を行う等により、実効性のある安全管理体制の構築に向けて、地に足がついた着実な活動を進めていただくことを強く望むものである。

本事故調査委員会が提言した再発防止対策には、姫路製造所のみならず他の製造所においても参考にすべきものもあろう。是非、他の製造所においても水平展開され、株式会社日本触媒全体の安全管理体制のブラッシュアップにつなげていただきたい。

また、本事故調査報告書が化学関連産業分野における類似化学プロセスはもとより、多様な化学プロセスの事故防止のために活用され、日本の化学関連産業の安全の向上のために多少なりとも貢献できれば幸いである。

最後に、本事故の調査を進めるに当たり、貴重なご意見をいただいた事故調査委員会の方々、精力的な調査を実施していただいた関係者の方々、また、爆発・火災に至る過程および爆発・火災影響を調査するにあたり、流動解析でご支援をいただいた東洋エンジニアリング株式会社、タンク構造解析および爆風圧力の調査・解析でご支援をいただいた株式会社 IHI、それら調査・解析結果の妥当性について検証いただいた独立行政法人 産業技術総合研究所 中山良男博士に心から感謝申し上げます。

また、事故調査並びに事故調査報告書のまとめに際し、大所高所からご指導いただいた消防庁、消防研究センター、姫路市消防局の方々に厚く御礼申し上げます。

2013年3月

株式会社日本触媒 事故調査委員会
委員長 田村 昌三

資料-1 断熱反応実験による確認

- (1) 目的：断熱反応実験装置を用いてV-3138貯蔵液(T-5108 ボトム液)について、以下の確認を行う。

- ① 開始温度 80℃, 90℃, 100℃ における液組成の経時変化
- ② 開始温度 90℃における暴走反応挙動
- ③ 開始温度、雰囲気による温度推移の違い

- (2) 実験方法および条件

実験は、日本触媒 ラボ とカヤク・ジャパン(株) 厚狭工場密閉試験場の両方にて実施。いずれの実験も資料の入った断熱容器を温風乾燥機に入れ、発熱による試料温度上昇に伴い、乾燥機温度を追従させる擬似断熱状態にて実施した。(試料と乾燥機の温度差：1℃以内) それぞれの実験装置および条件については別紙(3/9～5/9)を参照のこと。

- (a) 日本触媒 ラボ での実験 (確認目的:①、③)

- ・ 液組成分析は実験開始時および経過とともにサンプリングノズルより採取して実施した。なお、異常反応による事故防止のため、試料温度が130℃に到達した時点で断熱容器に緊急溶媒を投入して反応を停止し、実験を終了した。

- (b) カヤク・ジャパン(株) 厚狭工場密閉試験場での実験 (確認目的:②、③)

- ・ 試料温度140℃以上は、安全のため密閉試験室への立入ができないため、乾燥機の昇温は行わなかった。(試料温度の上昇に追従させない)

- (3) 実験結果 (アクリル酸:AA, アクリル酸二量体:DAA, アクリル酸三量体:TAA)

- ① 80℃, 90℃, 100℃ それぞれの開始温度における液組成の経時変化

- ・ 開始温度100℃(M-Gas, N₂雰囲気)
 - ・ AA, DAA, TAA組成に多少の違いはあるものの、重合物は生成していない。
 - ・ MQ濃度の経時変化はあまりないが、PTZはいずれも経時的に減少している。
- ・ 開始温度90℃(N₂雰囲気)
 - ・ 実験終点におけるAA, DAA, TAA組成は100℃のケースとあまり変わらない。重合物は実験終盤において僅かに生成している。
 - ・ 安定剤の挙動も100℃のケースと同様だが、経過時間が長いためか、PTZの実験終点における濃度は100℃のケースよりも低い。
- ・ 開始温度80℃(N₂雰囲気)
 - ・ 他の開始温度のケースと同様にDAA, TAA濃度が経時的に上昇しているが、DAA濃度は約40wt%で頭打ちになり、TAA濃度は約13wt%まで上昇している。
 - ・ 90℃到達時点で、既に、DAAが約21wt%生成していることから、以降の挙動は開始温度90℃のケースとは異なる(100℃についても同様)。
 - ・ 他のケースよりも経過時間が大幅に長くなったためか、PTZ濃度の低下も大きく、実験終盤より徐々に重合物が生成している。(MQ濃度の経時変化はあまりない)

- ② 開始温度 90℃における暴走反応挙動

- ・ 温度推移および比較
 - ・ 130℃までの温度推移は、ラボでの実験結果とほとんど同じである。
 - ・ その後、温度は急上昇するが約190℃で温度上昇は止まり、その後、降下に転じる。
- ・ 実験前後の組成および重量変化

	重量 [g]	組成分析値 [wt%]				安定剤濃度[ppm]	
		AA	DAA	TAA	重合物	PTZ	MQ
実験前	1,503	98.8	3.2	0.0	0.0	215	1,527
実験後	1,439	20.1	22.2	16.6	41.7	30	937

重量減少 64 g ⇒ 4.3% : 対実験前重量

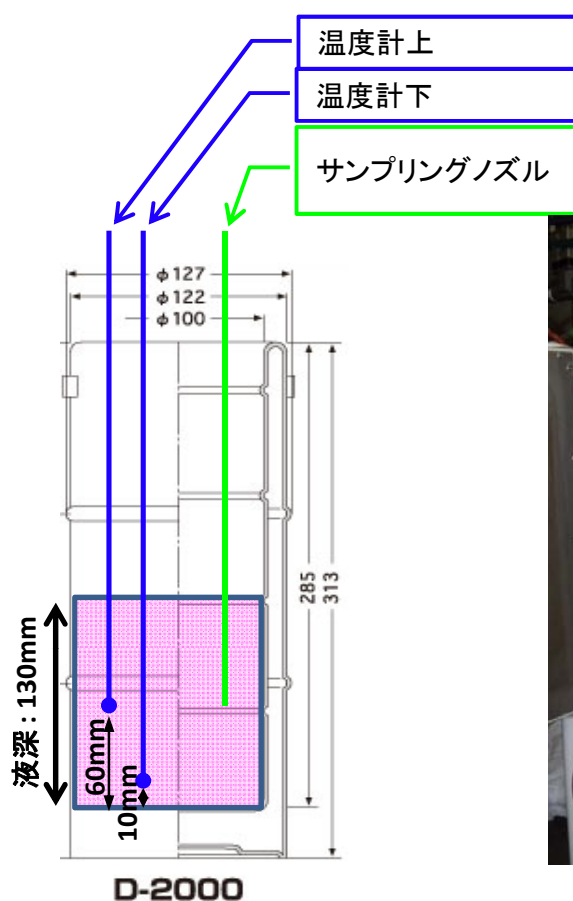
- ・ 実験前後の重量減少は蒸発した試料が系外へ流出したことによると考えられる。
※ 試料の温度上昇により発生した蒸気は排気ベントから装置外へ流出するため、実機のような圧力上昇は生じなかったと推定される。

- ・ 実験後は約40wt%の重合物が生成しており、約190℃で温度上昇は止まったものの、重合反応自体は進行していたことが分かる。
- ・ デュアール瓶内には黒色・白色の浮遊重合物が存在しており、ベント管や蓋にも蒸発後の凝縮液が重合したと見られる重合物が付着している。
- ・ 考察
 - ・ 実験後の内容物の組成および重量より、反応により生成した熱が全て自身の温度上昇に使われた場合、試料の推定到達温度は260～270℃程度に達する。
 - ・ 上記温度まで到達せずに温度上昇が停止した理由は、以下の要因による反応熱の消費が原因と考えられる。
 - ・ 140℃以上の温度領域における放熱
 - ・ 液の蒸発潜熱
 - ※ 蒸発による系外流出分は初期仕込量の4.3%だが、ベントチューブ内に凝縮液やその重合物が存在したことから、ベントチューブで凝縮した液がデュアール瓶に戻り再蒸発する、といった形で熱が消費されたと推定される。
- ③ 開始温度、雰囲気による温度推移の違い
 - ・ 開始温度による温度推移の違い
 - ・ 各ケースとも多少バラツキはあるものの、温度推移実績と組成から算出した値は、概ね、一致している。
 - ・ 130℃到達までの所要時間はそれぞれ以下のとおり。

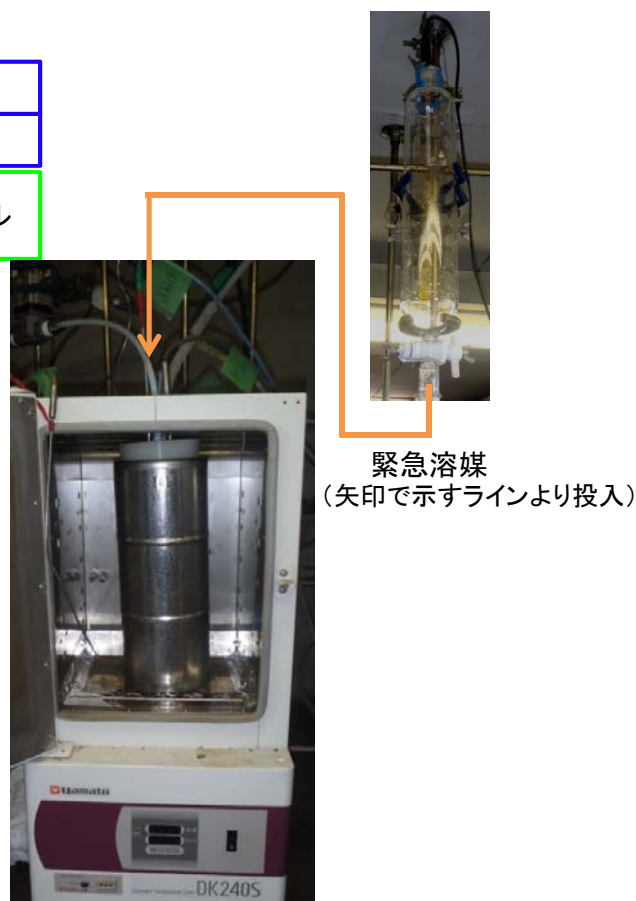
・ 開始温度 100℃	7～8 hr
・ 開始温度 90℃	約24 hr
・ 開始温度 80℃	約63 hr
 - ⇒ 130℃までの領域では、主に、DAA, TAAの生成熱で温度が上昇すると考えられる。
 - ・ 雰囲気による温度推移の違い（N₂雰囲気、M-Gas雰囲気）
 - ・ カヤク・ジャパン(株)での実験で 130℃以降の両者の温度推移にほとんど差はない。
 - ・ 日本触媒 ラボ の実験で両者の温度推移にほとんど差はなく、再現性も良好である。
 - ⇒ 一連の反応による温度推移には雰囲気の差は認められず、したがって、タンク内の雰囲気が今回の事故に影響しなかったと推定される。

日本触媒 ラボ 断熱反応実験装置

- ① 恒温装置 : ヤマト科学(株) 送風定温乾燥機 DK240S
 ② 断熱容器 : THERMO製 デュアー瓶 D-2000(2ℓ)
 ※試料温度 1℃上昇で、乾燥機内温度を1℃上昇させ追従させる(ΔT : 1℃以内)
 ③ 容器蓋 実験方法および条件
 ④ 温度計 測温抵抗体(Pt)



THERMO製 デュアー瓶
容量 : 2ℓ



乾燥機 内部
乾燥室内寸法[mm]: 幅240x奥行250x高さ340
乾燥機内容量: 約20ℓ



乾燥機 天板部

<乾燥機天板>

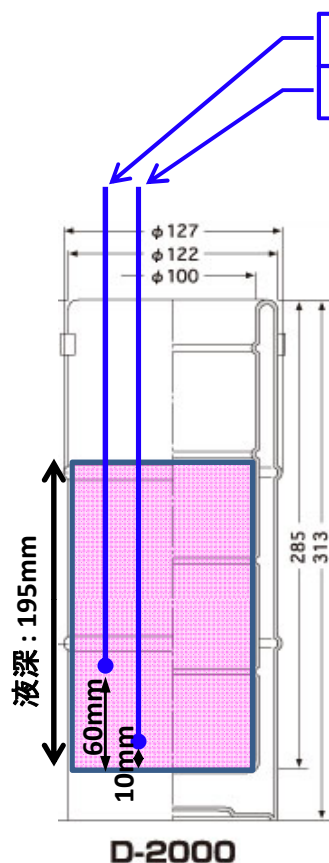
- ・試料温度測定温度計 : 2本
- ・過昇温防止用温度計
- ・サンプリングノズル
- ・大気解放ベント
(天盤100mmよりN₂投入 : 1ℓ/min)
- ・緊急溶媒投入ライン

<乾燥機下部>

- ・防爆のためN₂投入 : 1ℓ/min

カヤク・ジャパン(株)断熱反応実験装置

- ① 恒温装置 : ヤマト科学(株) 送風定温乾燥機 DK240S
重量 : 23kg、消費電力 : AC100V 4.5A (15A)
- ② 断熱容器 : THERMO製 デュアー瓶 D-2000(2ℓ)
※試料温度 1℃上昇で、乾燥機内温度を1℃上昇させ追従 ($\Delta T : 1^\circ\text{C}$ 以内)
- ③ 容器蓋 実験方法および条件
- ④ 温度計 測温抵抗体(Pt)



THERMO製 デュアー瓶
容量 : 2ℓ



針金で固定



乾燥機_内部
乾燥室内寸法[mm]:幅240x奥行250x高さ340
乾燥機内容量:約20ℓ



乾燥機_天板部

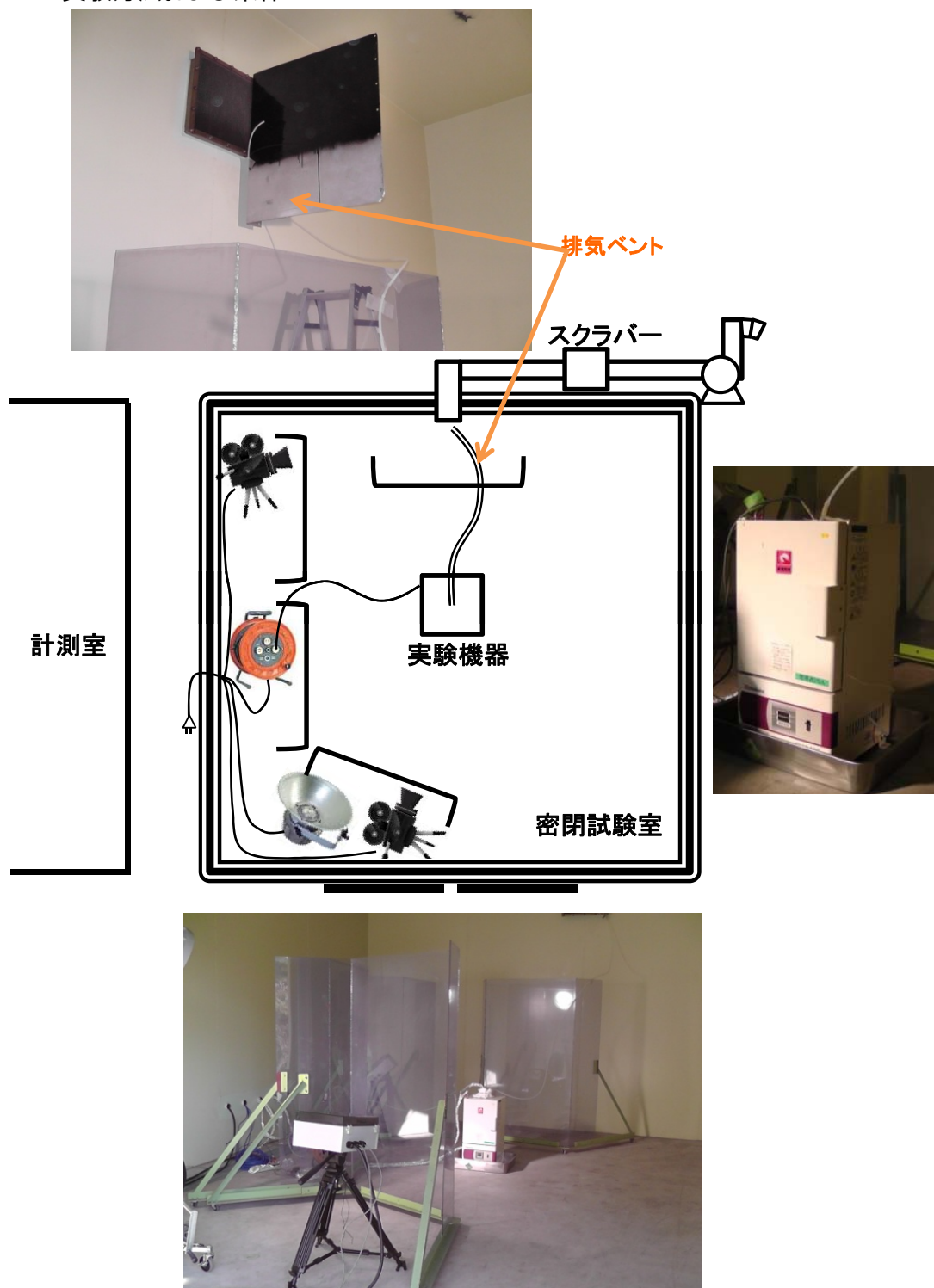
<乾燥機天板>
・試料温度測定温度計 : 2本
・大気解放ベント
(天盤100mmよりN₂投入 : 1ℓ/min)

<乾燥機下部>
・防爆のためN₂投入 : 1ℓ/min

カヤク・ジャパン(株)断熱反応実験施設配置図

- ① 実験施設恒温装置 : カヤク・ジャパン(株) 厚狭工場 密閉試験場
- ② 恒温装置 : ヤマト科学(株) 送風定温乾燥機 DK240S
- ③ 断熱容器 : THERMO製 デュアー瓶 D-2000(2ℓ)
- ④ その他機器 : ビデオカメラ、照明機器、防護板、排風機 等.

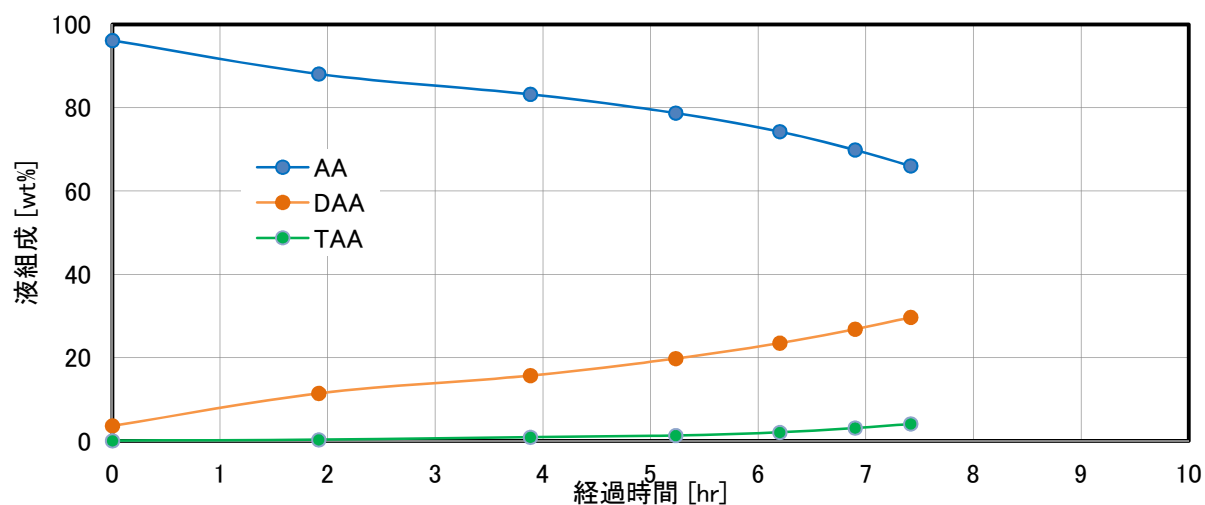
実験方法および条件



① 断熱反応実験結果(組成変化)

1. 開始温度100°C、M-Gas雰囲気

* 試料 : T-5108ボトム液(2012/10/22採取)

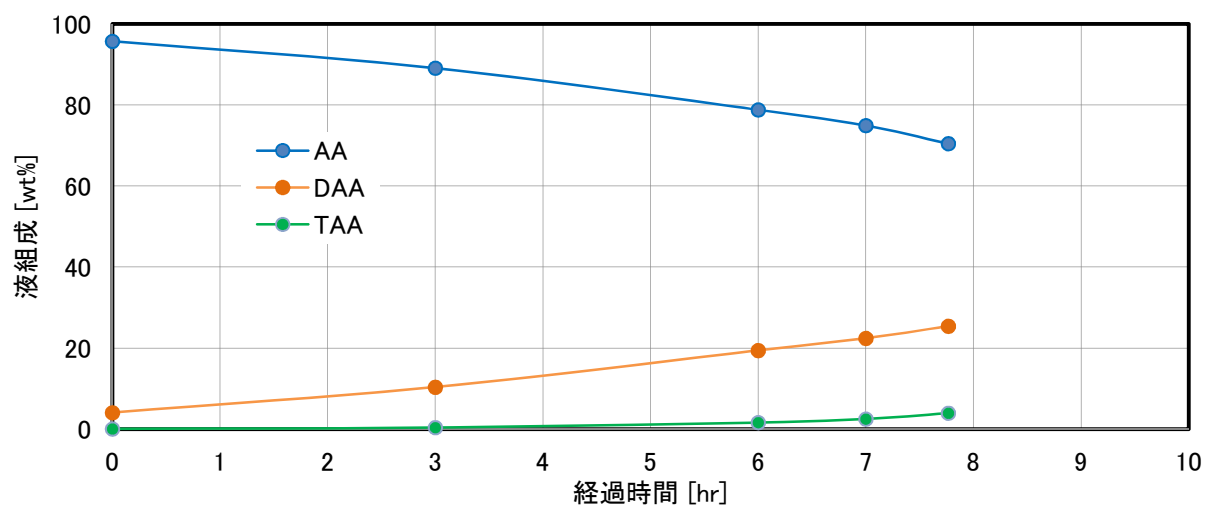


経過時間		温度 [°C]		AA	DAA	TAA	重合物	PTZ	MQ
[min]	[hr]	内温_上	内温_下	[wt%]	[wt%]	[wt%]	[wt%]	[ppm]	[ppm]
0	0.0	101.4	101.8	96.2	3.6	0.0	0.0	224	1525
115	1.9	104.4	105.0	88.1	11.4	0.3	0.0	217	1531
233	3.9	109.5	110.0	83.3	15.7	0.9	0.0	200	1529
314	5.2	114.4	115.0	78.8	19.8	1.3	0.0	192	1535
372	6.2	119.3	120.0	74.3	23.5	2.0	0.0	186	1544
414	6.9	124.2	125.1	69.9	26.8	3.1	0.0	180	1483
445	7.4	129.3	130.1	66.1	29.7	4.1	0.0	172	1537

※重合物 : 分子量 5,000~50,000

2. 開始温度100°C、N₂雰囲気

* 試料 : T-5108ボトム液(2012/10/22採取)



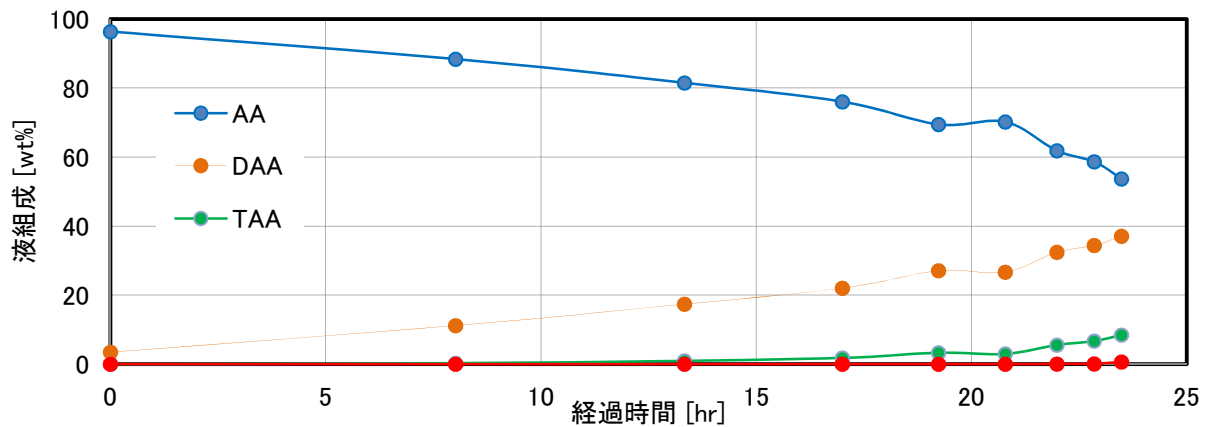
経過時間		温度 [°C]		AA	DAA	TAA	重合物	PTZ	MQ
[min]	[hr]	内温_上	内温_下	[wt%]	[wt%]	[wt%]	[wt%]	[ppm]	[ppm]
0	0.0	96.7	101.8	95.7	4.0	0.0	0.0	218	1763
180	3.0	104.6	105.2	89.1	10.3	0.4	0.0	201	1759
360	6.0	117.0	117.6	78.8	19.4	1.6	0.0	187	1793
420	7.0	123.0	123.6	74.9	22.4	2.5	0.0	174	1790
466	7.8	129.4	130.0	70.5	25.4	3.9	0.0	170	1910

※重合物 : 分子量 5,000~50,000

① 断熱反応実験結果(組成変化)

3. 開始温度90°C、N₂雰囲気

* 試料 : T-5108ボトム液(2012/10/22採取)

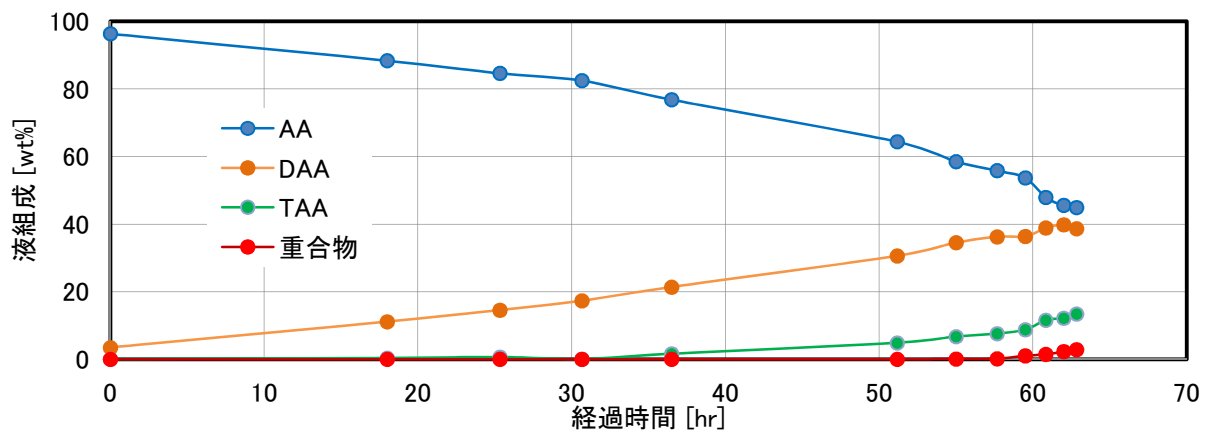


経過時間		温度 [°C]		AA	DAA	TAA	重合物	PTZ	MQ
[min]	[hr]	内温_上	内温_下	[wt%]	[wt%]	[wt%]	[wt%]	[ppm]	[ppm]
0	0.0	89.8	90.2	96.3	3.5	0.0	0.0	215	1527
481	8.0	94.5	95.0	88.4	11.2	0.3	0.0	208	1524
800	13.3	99.4	100.0	81.5	17.4	1.0	0.0	193	1522
1020	17.0	104.5	105.0	76.0	22.0	1.8	0.0	180	1518
1154	19.2	109.5	110.0	69.4	27.1	3.3	0.0	164	1519
1247	20.8	113.9	115.0	70.2	26.7	3.0	0.0	156	1585
1319	22.0	118.9	120.0	61.8	32.4	5.5	0.0	148	1609
1371	22.9	123.8	125.0	58.6	34.4	6.7	0.1	141	1558
1409	23.5	128.8	130.1	53.7	37.1	8.4	0.6	140	1521

※重合物 : 分子量 5,000~50,000

4. 開始温度80°C、N₂雰囲気

* 試料 : T-5108ボトム液(2012/10/22採取)



経過時間		温度 [°C]		AA	DAA	TAA	重合物	PTZ	MQ
[min]	[hr]	内温_上	内温_下	[wt%]	[wt%]	[wt%]	[wt%]	[ppm]	[ppm]
0	0.0	80.5	81.0	96.4	3.4	0.0	0.0	210	1510
1080	18.0	84.3	84.7	88.4	11.1	0.4	0.0	211	1358
1520	25.3	86.1	86.6	84.7	14.5	0.7	0.0	201	1519
1840	30.7	87.8	88.2	82.5	17.3	0.0	0.0	188	1517
2190	36.5	90.0	90.5	76.8	21.4	1.6	0.0	179	1549
3070	51.2	99.3	99.9	64.4	30.6	4.8	0.0	154	1594
3300	55.0	104.4	105.1	58.5	34.5	6.7	0.1	119	1625
3460	57.7	109.4	110.0	55.9	36.2	7.6	0.2	105	1567
3570	59.5	114.2	114.8	53.7	36.4	8.8	1.0	109	1552
3650	60.8	118.8	119.5	47.9	38.9	11.6	1.5	121	1563
3720	62.0	124.4	125.0	45.6	39.8	12.2	2.3	99	1554
3770	62.8	129.7	130.3	44.9	38.7	13.4	2.9	92	1565

※重合物 : 分子量 5,000~50,000

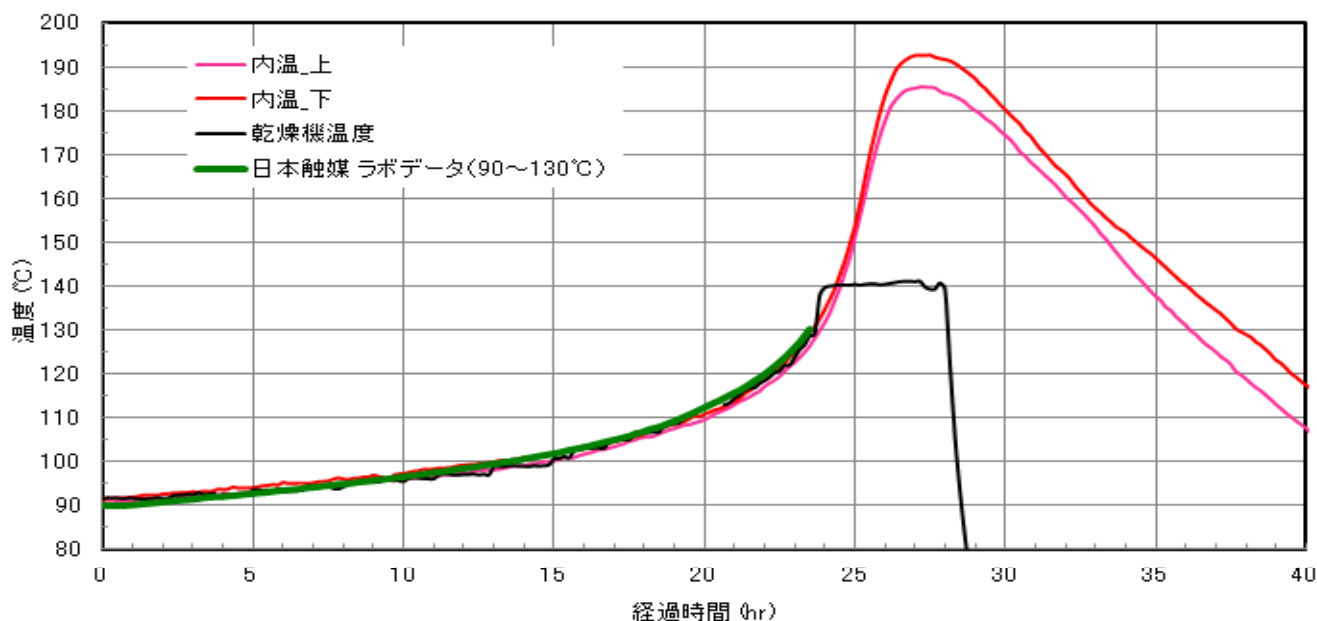
② 反応暴走挙動

1. 実験条件

- ① 試料 T-5108ボトム液(2012/10/22採取) ② 液量 1503g
 ③ 開始温度 90℃ ④ 雰囲気 N₂
 ※ 内温140℃以上は、安全のため密閉試験室に立ち入れないため、乾燥機温度の昇温は行っていない。

2. 実験結果

① 温度推移および比較



② 実験前後の液組成および重量

	組成分析値 [wt%]				重量 [g]
	AA	DAA	TAA	重合物	
実験前	98.8	3.2	0.0	0.0	1,503
実験後	20.1	22.2	16.6	41.7	1,439
重量減少分 [g]					64 4.3% (対実験前)

③ 実験後のポリマー付着状況



デュアー瓶内部
 浮遊重合物(黒色・白色) : 31g



排気ベント
 凝縮液の重合物

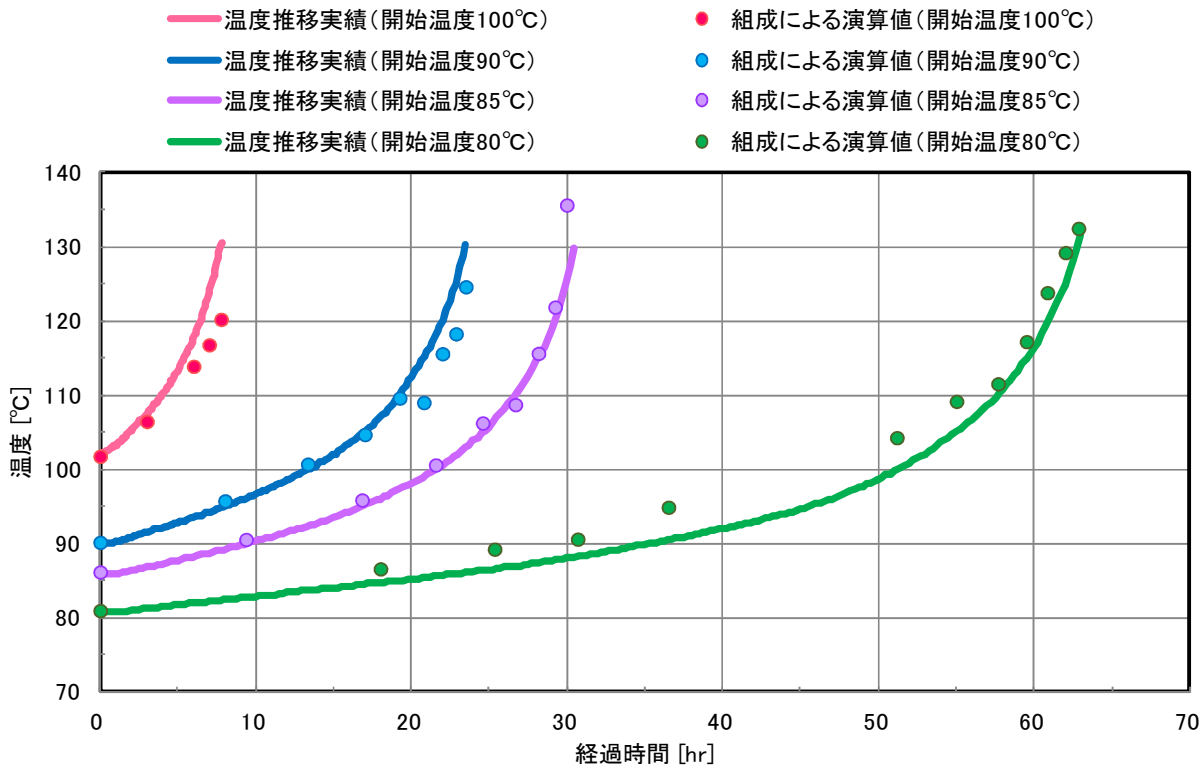


デュアー瓶蓋(シリコン栓)
 裏側に白色重合物

③ 開始温度、雰囲気による温度推移の違い

* 試料 : T-5108ボトム液 (2012/10/22採取)

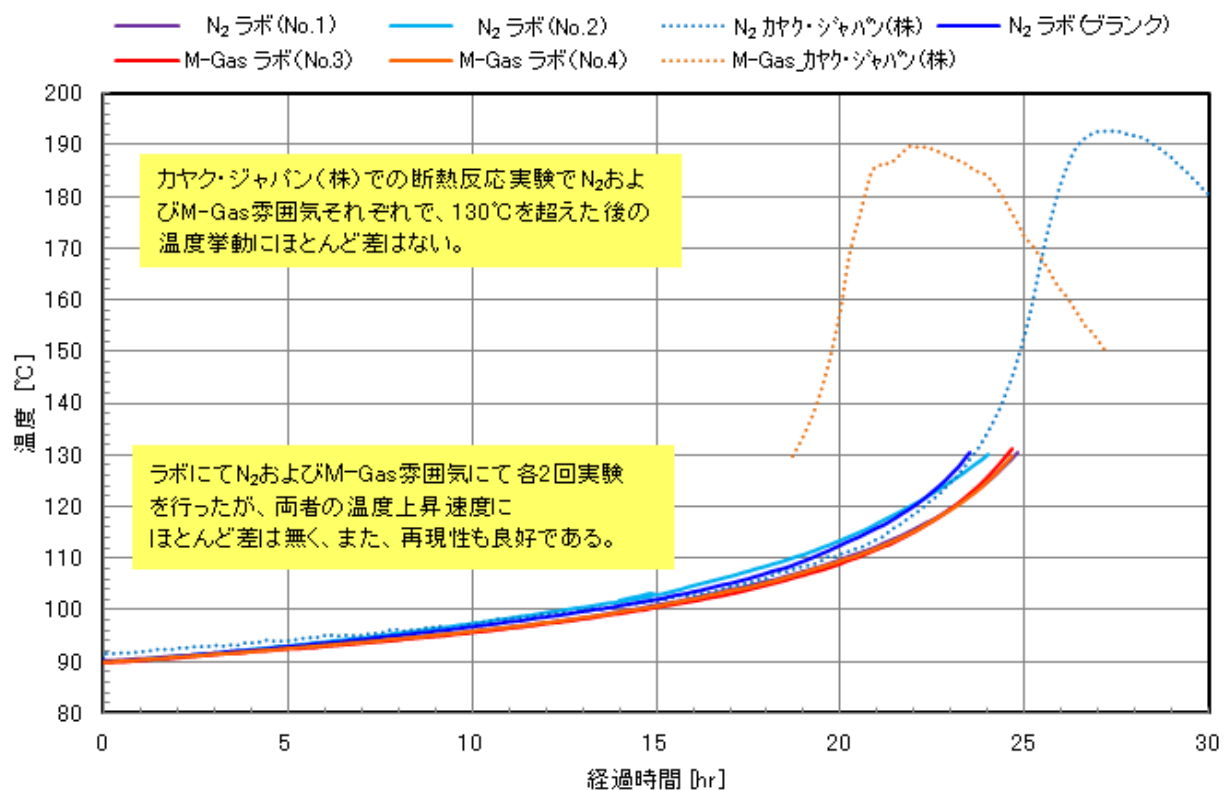
1. 開始温度による温度推移の違いおよび温度演算値の対比 (N₂雰囲気)



※ V-3138液溜めを行い、25m³到達後から60m³到達までに約60時間、タンクでの白煙現象確認までに約80hr 所要しているため、比較的経過時間の長い実験データ(開始温度80°C)をタンク内温度の推定に利用する。

2. 雰囲気による温度推移の違い

※T-5108ボトム液 : 90°Cより実験開始



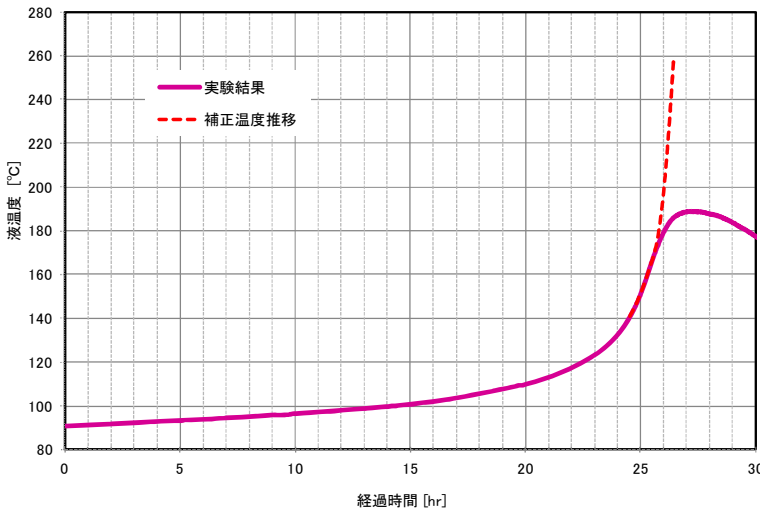
資料-2 反応解析に基づくタンク内温度および圧力の推定

(1) 推定結果

タンクのき裂発生時点の内部圧力 推定結果: 約0.274MPaG (構造解析結果: 0.24~0.29MPaG)

(2) 計算前提条件

- 1) 液の温度が上昇する領域はコイル上面より上部の液領域とし、組成および温度は均一とみなす。
- 2) タンク液量が60m³到達後、DAA等の生成によりコイル上面より上部の液の平均温度が120℃に到達した後は、重合物の生成により温度が上昇すると仮定する。
- 3) タンク内温度120℃到達時点におけるDAA等の濃度は60wt%、AAは40wt%と設定する。
- 4) 重合物の生成に伴う発熱量は、断熱反応実験結果を補正した温度上昇速度により推定する。
また、重合物の生成量は、温度上昇速度より得られた発熱量を重合熱で除して算出する。
- 5) タンク貯蔵液の蒸気圧はAA/DAA混合溶液として推定し、タンク内部圧力は発生した蒸気がタンクのベントおよびシールガス配管(シールポット)を通過する圧力損失より算出する。
- 6) チョーク流れ発生の有無確認
チョーク流れとは、ベントから放出されるガスの流速が音速に到達すると速度が音速で一定となり、ガス放出口における圧力が上昇する現象である。
チョーク流れの発生は、計算結果に大きな影響をおよぼすため、その有無の確認を行った。
⇒ タンクにき裂が発生した時のベント放出口での推定ガス線速は、248m/secであった。
一方で、アクリル酸ガス233℃における音速は約250m/secと推定され、内部圧力推定に影響を及ぼす範囲ではないことが確認された。
- 7) 断熱反応実験データの補正
実験での最高到達温度は約190℃であるが、反応速度(温度上昇)はそれまでに失速している。これは断熱重合実験での熱ロスの影響と考えられ、実験後の組成より逆算した補正到達温度に到達する時間は、熱ロスが無い場合、実験の最高到達温度への到達時間よりも早くなる。
⇒ 温度上昇速度の補正域を反応が失速する直前までとして計算する。



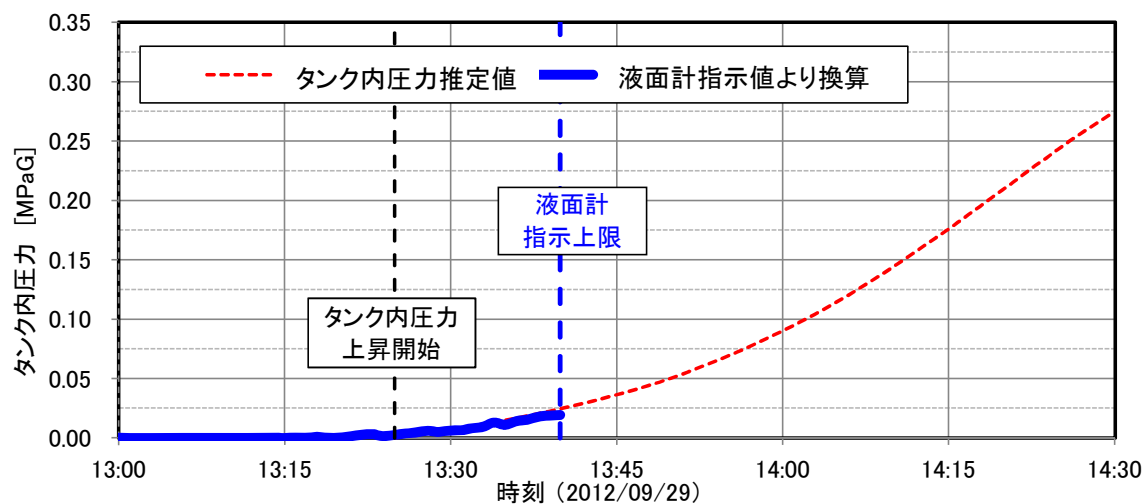
(3) 計算結果

※液温推定は、Aspen Plusを用いた気液平衡計算により算出

		(解析起点)	沸点到達	液面計 指示限界到達	タンクき裂 発生
時刻		~10:00頃	⇒ 13:20頃	⇒ 13:40頃	⇒ ~14:35頃
推定液温度	℃	120	⇒ 167	⇒ 175	⇒ 233
推定圧力	MPaG	-	⇒ 0	⇒ 0.025	⇒ 0.274
推定液組成(コイル上面より上部の液領域)					
AA	wt%	40	⇒ 35.7	⇒ 34.2	⇒ 17.0
DAA等	wt%	60	⇒ 53.8	⇒ 52.8	⇒ 46.2
重合物	wt%	0	⇒ 10.6	⇒ 13.0	⇒ 36.8
重合物生成量	kg	0	⇒ 4,248	⇒ 5,178	⇒ 12,814
蒸発量	kg	0	⇒ 59	⇒ 420	⇒ 5,522
ベント口ガス線速	m/sec	0	⇒ 20	⇒ 86	⇒ 248

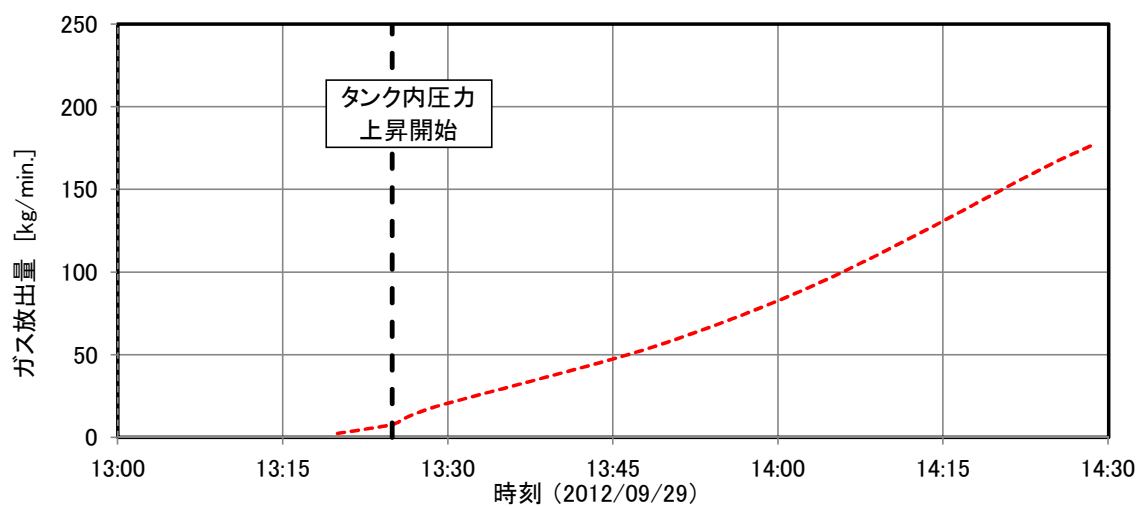
① タンク内圧力の推定

※14:35頃までにタンクにき裂発生



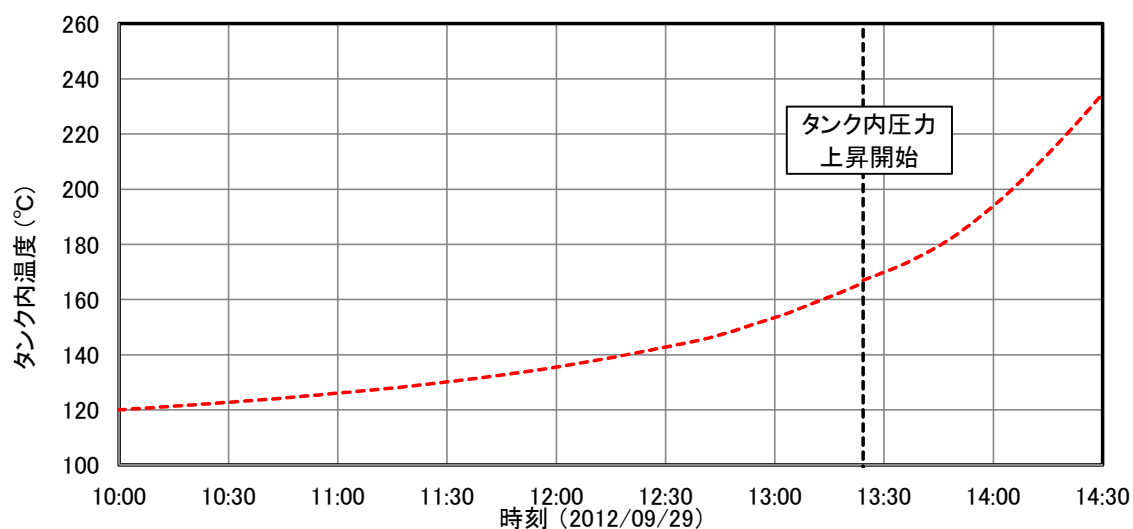
② 推定ガス放出量

※14:35頃までにタンクにき裂発生



③ タンク内温度の推定

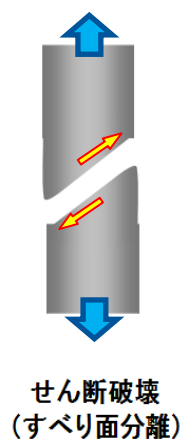
※14:35頃までにタンクにき裂発生



資料－3 V-3138 破断面の観察結果

(1) V-3138 破断部の広範囲に観察された破面

下図に示すように、板厚方向に対して斜めに傾いた、すべり面分離によるせん断破壊によって形成された破面が広範囲に見られた。せん断破壊が広範囲に観察されるという事実は、V-3138の破壊現象が高速に生じたことを否定するものではないと言える。



平面応力条件
(薄板、薄肉パイプなど)



傾斜型(せん断型)
破面を形成しやすい

せん断破壊
(すべり面分離)

(2) 冷却水コイル出口ノズル部で観察された破面

拡大写真の方に示している、外表面側に見られる暗灰色の部分は、延性を有する金属材料が引っ張り変形で破壊する際の、ポイド連結によって形成される延性破面に類似している。また、明るい灰色の部分に見られる板厚方向の微細な筋状模様は、延性破壊によって形成されたき裂がさらなる負荷によって、板厚方向に進展した際の痕跡と考えられる。

以上の観察結果より、時系列的には冷却水コイル出口ノズル部のフランジ外周外表面側でまず延性破壊によってき裂が発生し、フランジ外周から逸れて、胴板の上下方向に伸びるき裂へと変化したと推定される。



冷却水出口ノズル部
(外面側より観察)



せん断破壊ではない延性破面
(暗色の部分)
⇒ 引張変形(ポイド連結)による
破面形成

板厚方向に筋状模様
⇒ き裂の進展による破面形成