

PT Mandom Indonesia Tbk, 本社工場
エアゾール商品生産エリア 爆発火災事故
事故調査対策委員会 報告書

2016 年 5 月 11 日

株式会社マンドム 事故調査対策委員会

目次

目次.....	i
1. はじめに.....	1
2. 事故の概要.....	3
2.1 発生場所.....	3
2.2 発生日時及びその後の経過.....	6
3. 生産設備と工程および保安設備の概要.....	7
3.1 生産設備.....	7
3.1.1 第二工場の概要.....	7
3.1.2 ガス供給の概要.....	8
3.1.3 DPS生産工程の概要.....	9
3.1.4 DPS生産設備の概要.....	11
3.2 保安設備.....	16
3.2.1 給排気設備の概要.....	16
3.2.2 ガス検知器の概要.....	19
4. 事故発生時の状況.....	22
4.1 事故発生時の稼動状況.....	22
4.1.1 生産ラインの稼動状況.....	22
4.1.2 事故発生時の人員配置状況.....	22
4.1.3 事故発生時のガスの想定使用量.....	22
4.1.4 ガス検知器の反応状況.....	23
4.2 被害の状況.....	25
4.2.1 人的被害及び物的被害.....	25
4.2.2 DPS生産エリア周辺の被害詳細.....	29
5. 事故原因.....	36
5.1 原因の推定.....	36
5.2 数値解析.....	37
5.2.1 LPガス噴出質量速度の推定.....	37
5.2.2 FLACSによる爆発の計算.....	39
6. 再発防止対策.....	45

6.1	事故の直接原因.....	45
6.2	事故の背景原因.....	45
6.3	噴出事故防止・被害軽減化対策.....	46
7.	事故調査対策委員会委員長総括.....	48

1. はじめに

2015年7月10日現地時間9時18分頃に、インドネシアのブカシ県にある株式会社マンダム
のインドネシア連結子会社であるPT Mandom Indonesia Tbk 本社工場のエアゾール商品生産
エリアにおいて、爆発火災事故が発生した。本事故では約1時間10分後に鎮火したものの事故
直後においては死者5名、重傷者53名の被害を出した。

本事故の原因究明及び再発防止対策を講じるため、9月及び10月に事前の事故現場の確認
を行うとともに、株式会社マンダムにより、社外の学識経験者及び専門家5名により構成される
「事故調査対策委員会」が設置された。

これまでに当委員会は3回にわたり会議を開催し、事故の直接原因、深層原因及びその背景
等の解析、解明をすすめてきた。株式会社マンダムは、当委員会に各種データを提出し、当委員
会は各種データをもとにシミュレーション等も実施し、当委員会で解析したそれぞれの原因への
再発防止対策を立案した。当委員会は、それらを一一つ討議し、確認し、原因を特定するとと
もに、立案した再発防止対策を確認、承認するに至った。そこで、当委員会は、「PT Mandom
Indonesia Tbk エアゾール商品生産エリア 事故調査対策委員会 報告書」を取りまとめ、本書
をもって報告する。

事故調査対策委員会委員長、委員

委員長	横浜国立大学名誉教授 総合安全工学研究所 専務理事	小川輝繁
委員	総合安全工学研究所 事業部長	中村 順
委員	東京理科大学講師	堀口貞茲
委員	大阪ガス株式会社 シニアリサーチャー	岡本英樹
委員	株式会社爆発研究所 代表取締役	吉田正典

オブザーバー

株式会社マンダム 取締役 専務執行役員	北村達芳
株式会社マンダム 執行役員	渡辺浩一
株式会社マンダム 総務部長	木田 厚
大阪ガス株式会社 導管事業部 係長	山崎修一

事務局

株式会社爆発研究所 営業部長	木村利明
----------------	------

事故現場確認日、事故調査委員会開催日と主な討議内容

回数	日付	内容
	2015年9月16日～18日	事故現場の確認（岡本英樹、渡辺浩一）
	2015年10月28日～30日	事故現場の確認（吉田正典、渡辺浩一）
1	2015年11月27日	・横浜国立大学 小川名誉教授を委員長に選任 ・事故の概要
2	2016年1月12日	・事故発生過程、事故原因
3	2016年3月2日	・事故原因と対策、報告書案検討

2. 事故の概要

2015年7月10日(金)現地時間9時18分頃、インドネシア ジャカルタの東に位置するブカシ県の工業団地内にあるPT Mandom Indonesia Tbkで、爆発火災が発生し、5名が死亡、53名が重傷を負う。

2.1 発生場所

1) 工場所在

Kawasan MM 2100 Industrial Town Jl. Irian Block PP, Bekasi, 17520 Indonesia

PT Mandom Indonesia Tbk 本社工場、エアゾール商品を含む化粧品の製造・販売を行う。

敷地面積 148,800m²、竣工 2015年6月。

(図2-1 参照)

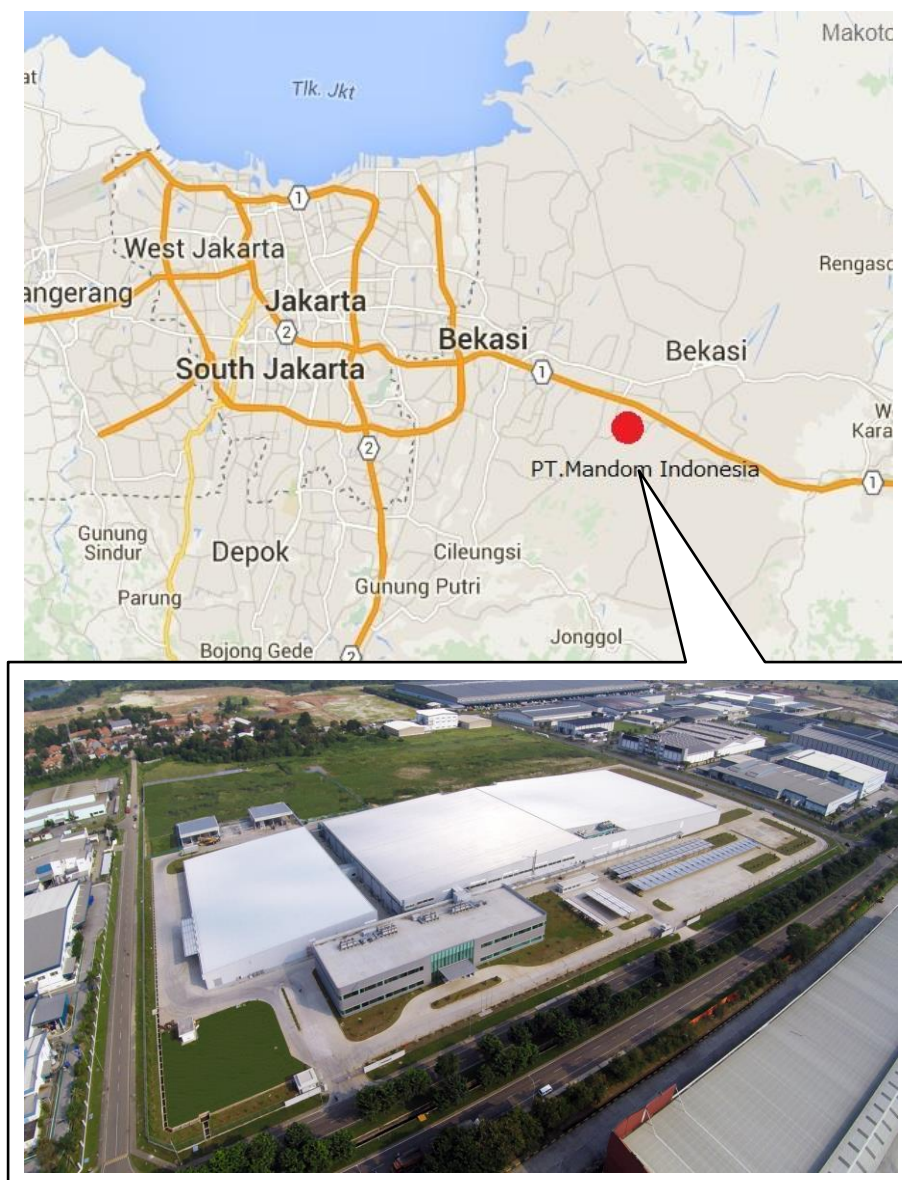


図 2-1 工場の所在

2) 事故エリア

事故発生現場は本社・工場敷地内の第二工場の一部であるデオドラントパヒュームスプレー（以下、DPSと称す）生産エリア。（図 2-2,3 参照）

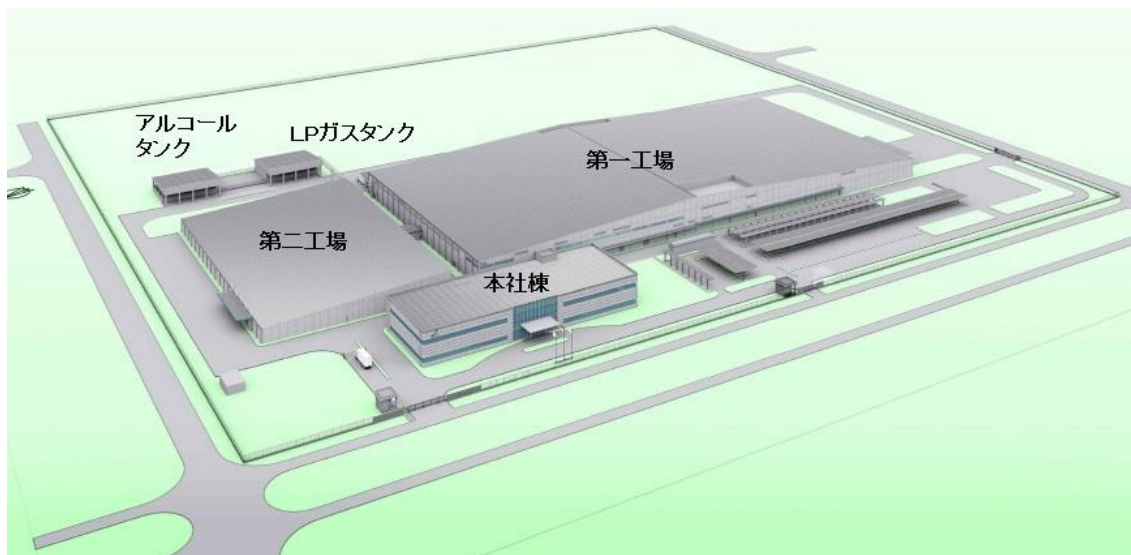


図 2-2 本社・工場全景

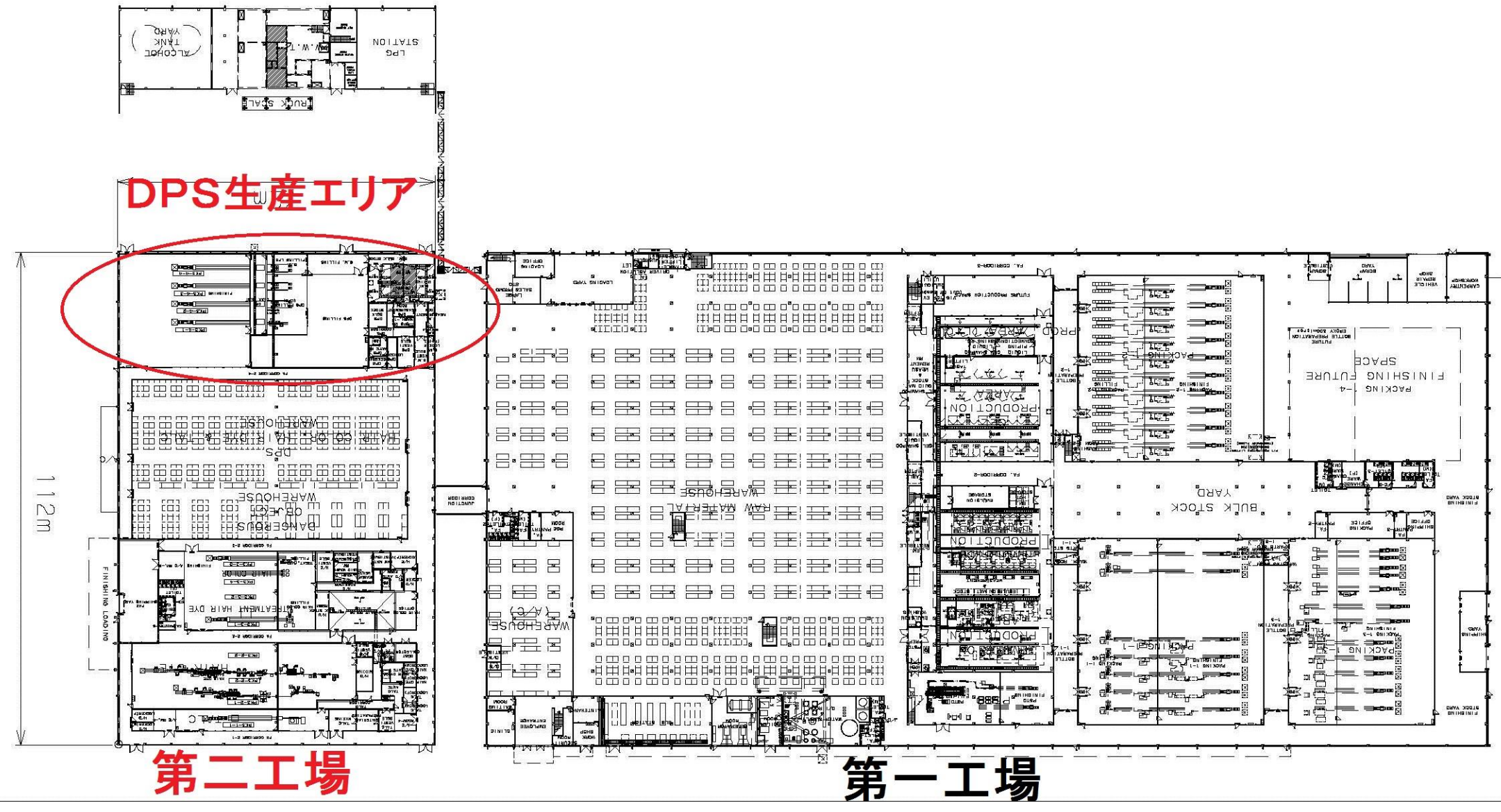


図 2-3 工場内の事故エリア

2.2 発生日時及びその後の経過

1)2015 年 7 月 10 日(金)

午前 8 時 00 分に始業。

9 時 18 分頃爆発火災発生(現地時間)。

- ・ 従業員は、本社側の屋外に避難。
- ・ 9 時 19 分頃、セキュリティから消防へ火災発生の通報。
- ・ 被災者の救出及び安全なエリアへの搬出を行い、社用車・自家用車及び救急車で病院へ搬送。
- ・ 従業員による消火栓からの消火活動。

2)9 時 45 分頃消防車 2 台が到着し、消防署員による消火活動開始。

- ・ 最終的に 9 台の消防車にて消火活動。

3)10 時 30 分頃鎮火。

3. 生産設備と工程および保安設備の概要

3.1 生産設備

3.1.1 第二工場の概要

第二工場は爆発火災のあったDPS生産エリア、危険物倉庫、及びヘアカラー・ヘアダイ・タルク生産エリアで構成され、そこにタンクからLPガスを供給している。

(図 3-1-1 参照)

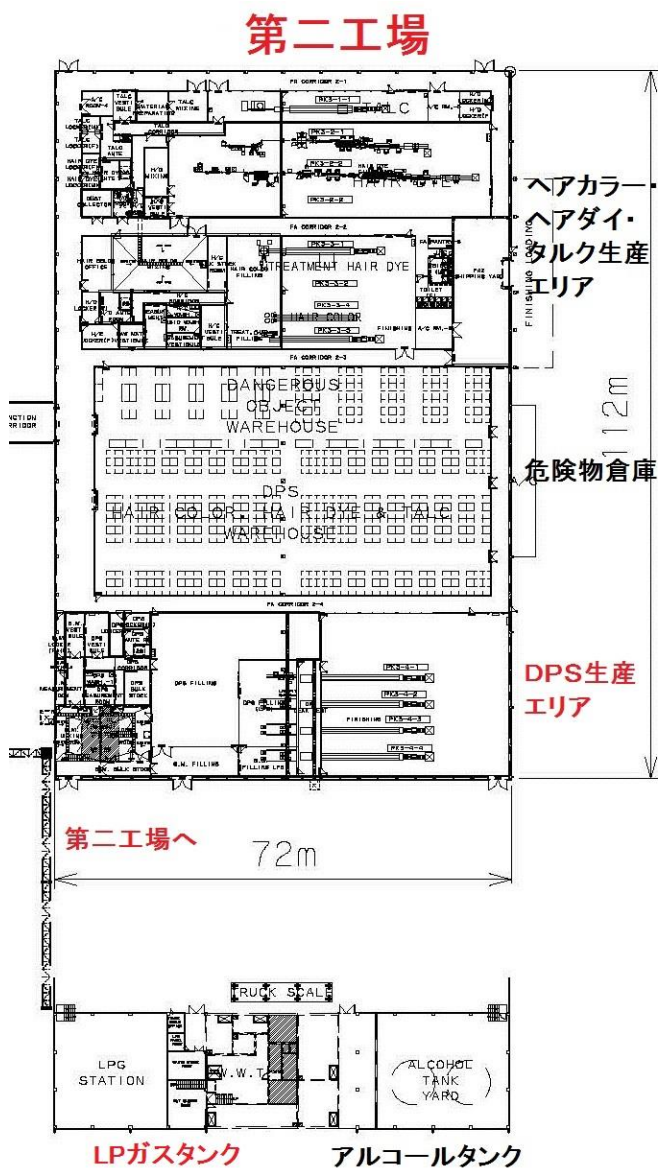


図 3-1-1 第二工場の全景

3.1.2 ガス供給の概要

LPガスタンクからDPS生産エリアへ、配管径 40mm、長さ約 86m の配管パイプにより、圧力約 1.4MPa にてガスが供給されている。

ガス配管の耐圧気密試験は 2015 年 3 月 7 日に実施。試験内容はテストする配管エリアのバルブを閉めて、配管内に 1.5MPa 及び 2.0MPa まで窒素ガスを注入し1時間後に圧力を確認、圧力は低下していなかったため漏洩なしの結果であった。

(図 3-1-2、写真 3-1-1,2 参照)

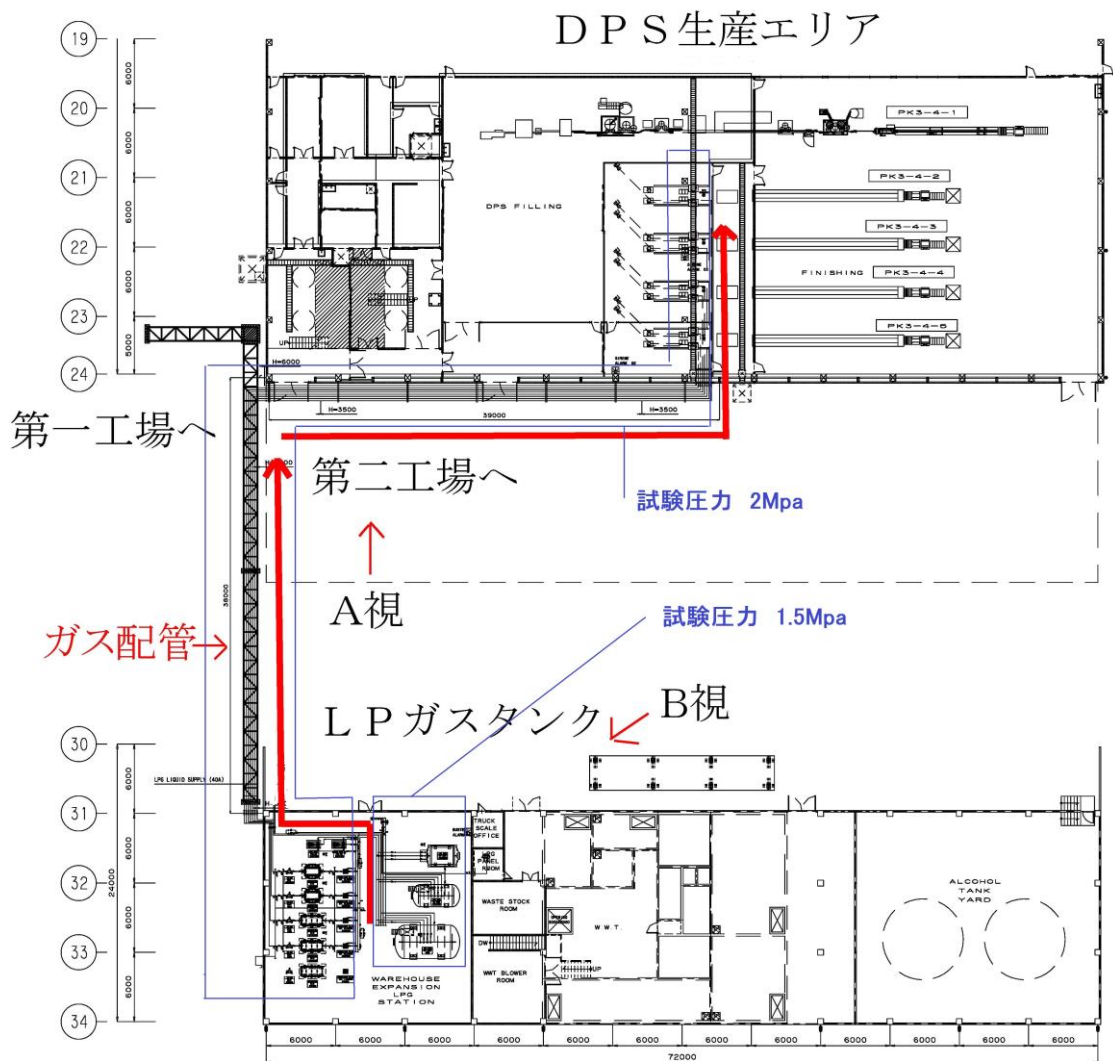


図 3-1-2 ガス配管



写真 3-1-1 LPガス供給管
(A視)



写真 3-1-2 LPガスタンク
(B視)

3.1.3 DPS生産工程の概要

DPS生産エリアは、中味を製造する調合室と、中味とガスを充填し最終商品まで仕上げる充填仕上室とで構成される。(図 3-1-3 参照)

調合室においては水、アルコールと原料を混合し中味が製造される。

充填仕上室においてはガス充填エリア、温検槽エリア、仕上エリアがそれぞれ仕切られた3エリアから成り、仕上エリアは4つのコンベアで構成される。

調合室で製造された中身は、ドラム缶に移されガス充填エリアに運ばれる。ガス充填エリアではその中味がアルミ缶に規定量が充填された後、ガス充填機によってバルブが缶にかしめられ、規定量のLPガスが充填される。

LPガスが充填されたアルミ缶は温検槽エリアにて53℃に保たれた温水槽に2分間浸されガス漏れ検査を行う。検査に合格したアルミ缶はキャップ装着機にてボタン及びキャップが装着され、コンベア上にてアルミ缶底面にロット番号が捺印された後、6本がシュリンクフィルムで包まれ、熱風機で収縮させて1セットにしてカートンケースに梱包される。

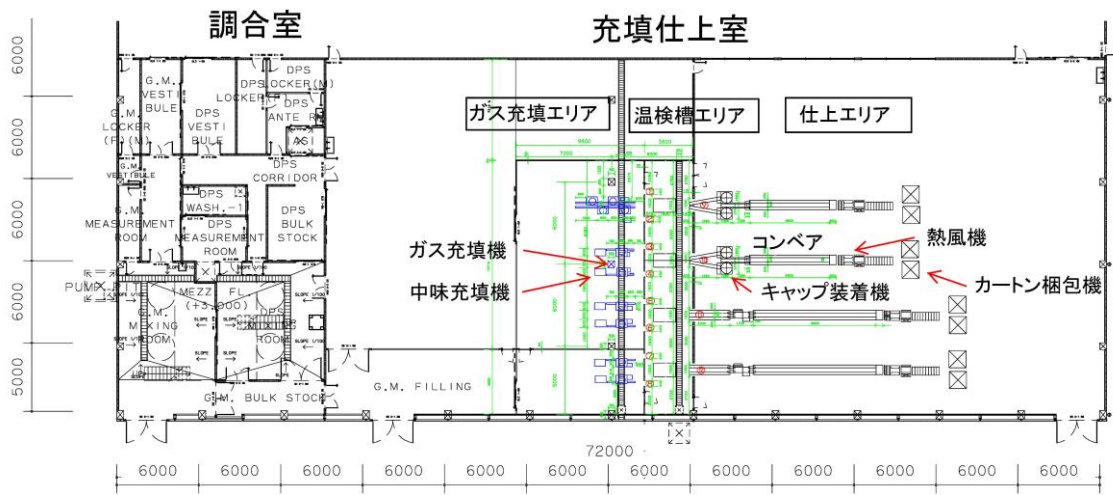


図 3-1-3 DPS生産エリア

3.1.4 DPS生産設備の概要

生産設備は前記のように、1)中味充填機、2)ガス充填機、3)温検槽、4)キャップ装着機、5)コンベア、6)熱風機、そして梱包機で構成される。次に主要設備の概要を示す。

1)中味充填機

中味充填機は規定量の液体の中味をアルミ缶の容器へ充填する装置である。

(図 3-1-4、写真 3-1-3 参照)

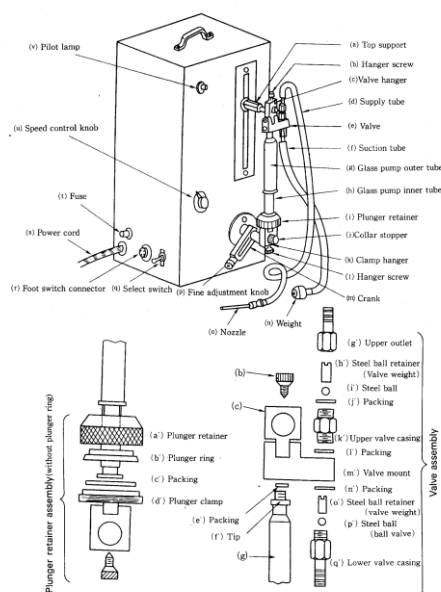


図 3-1-4 中味充填機簡易図面



写真 3-1-3 中味充填機

2) ガス充填機および配管接続

ガス充填機は中味が充填されたアルミ缶容器にバルブがかしめられ、規定量のLPガスを充填する装置である。ガス配管の先端部とガス充填機はフレキシブルホースによって接続されている。(表 3-1-1、図 3-1-5,6、写真 3-1-4 参照)

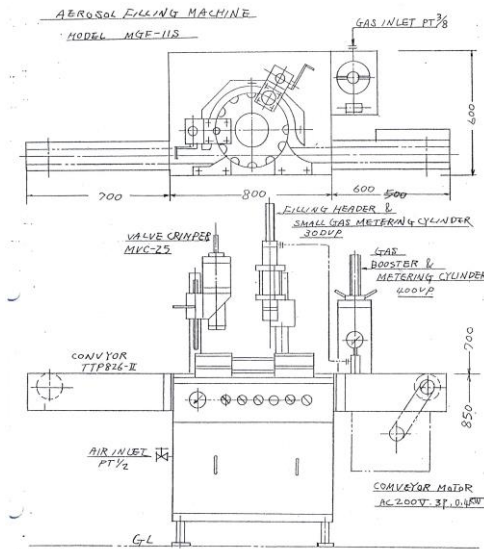


図 3-1-5 ガス充填機簡易図面



写真 3-1-4 ガス充填機

- ・ ガス配管サイズ : 内径 40mm
- ・ 配管先端部サイズ : 内径 20mm
- ・ ガス充填機下部配管サイズ : 内径 20mm
- ・ フレキシブルホースサイズ : 口径 3/4、1 インチ

なお、フレキシブルホースは、フッ素樹脂でできたテフロンチューブの外側をメッシュ状に編み上げたAISI304規格のステンレス鋼材で覆った可とう管である。後述する第二ラインおよびその他のフレキシブルホースは、事故後のヒアリングにて旧工場から転用した流用品であることが判明した。いずれのフレキシブルホースも設置時の耐圧気密試験は行われていない。通常は3年で交換している。

表 3-1-1 第二ライン使用フレキシブルホース仕様

サイズ (インチ)	内径		チューブ 厚	外径		許容屈 曲半径	稼働 圧力	破裂 圧力	重量
	最小 mm	最大 mm	最小 mm	最小 mm	最大 mm	最小 mm	Bar, 20°C		gr/m
3/4"	18.49	19.25	0.89	21.34	22.86	203	114	345	333
1"	24.82	25.83	1.02	27.69	29.46	305	69	207	455

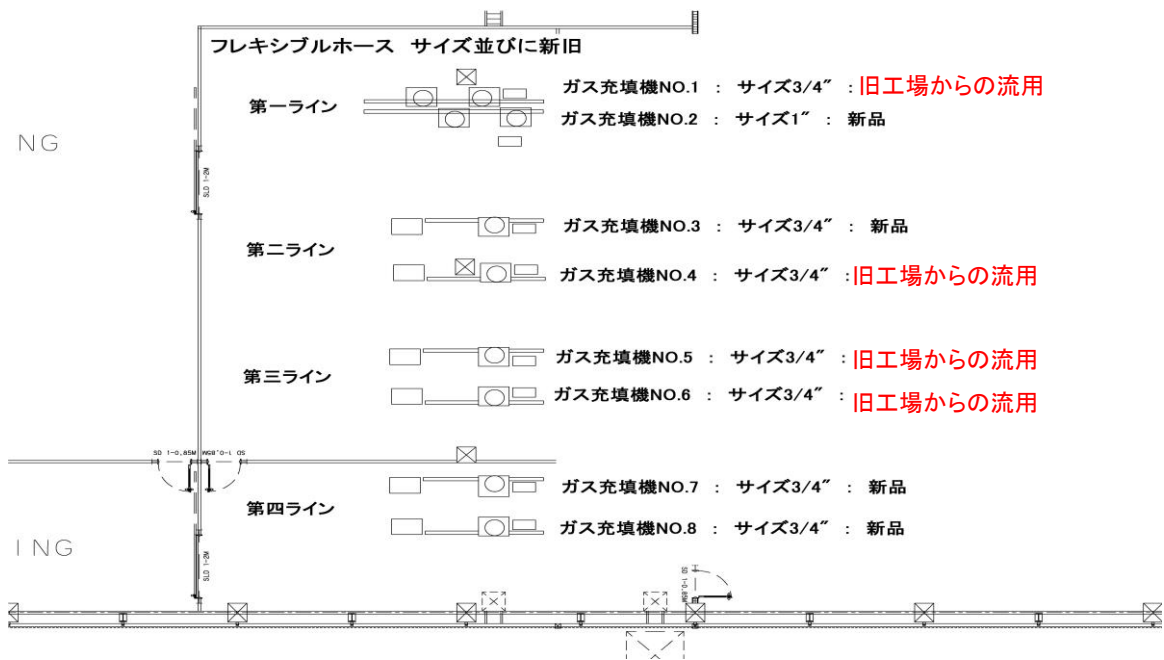


図 3-1-6 各充填機フレキシブルホースサイズおよび新旧

3) 温検槽

ガス充填されたアルミ缶容器を 53°C に保たれた温水槽に 2 分間浸されガス漏れ検査を行う。
(写真 3-1-5 参照)



写真 3-1-5 温検槽

4) キャップ装着機

温検槽にて検査に合格したアルミ缶は、このキャップ装着機にてノズルに噴射用ボタン、およびキャップが装着される。
(図 3-1-7 参照)

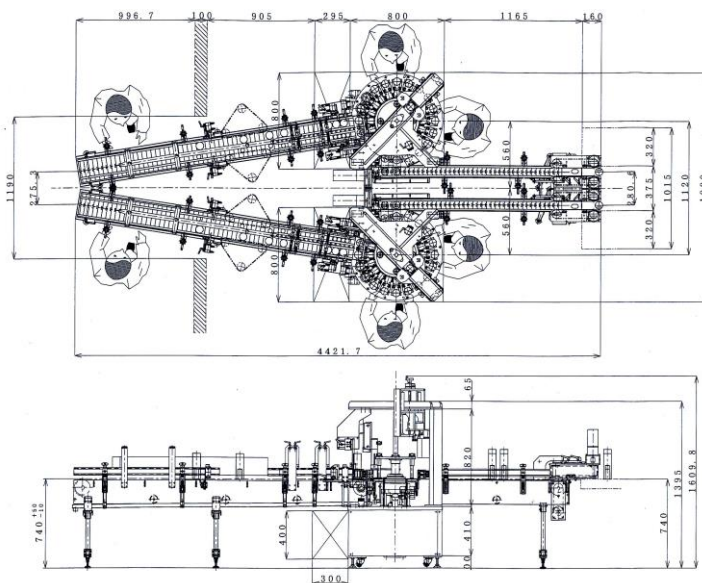


図 3-1-7 キャップ装着機簡易図面

5)コンベア

コンベア長 8,000mm、ベルト幅 300mm、袖板幅 250mm、高さ 850mm

(写真 3-1-6 参照)



写真 3-1-6 コンベア

6)熱風機

平均 200℃の熱風によりシュリンクフィルムを収縮させ商品 6 本を圧着させている。

設置寸法(単位 mm)

(図 3-1-8、写真 3-1-7 参照)

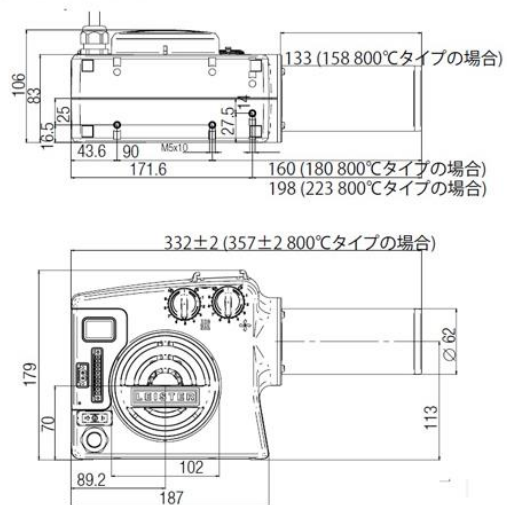


図 3-1-8 熱風機概略図面

写真 3-1-7 熱風機

3.2 保安設備

3.2.1 給排気設備の概要

空調機により給気を行っており、循環式ではなく一定して外気を取り入れるタイプで、排気においては上部に設置したフードおよび下部のピット(側溝)より強制的に排気している。(図 3-2-1,2 参照)

1) 空調機能力および給気量

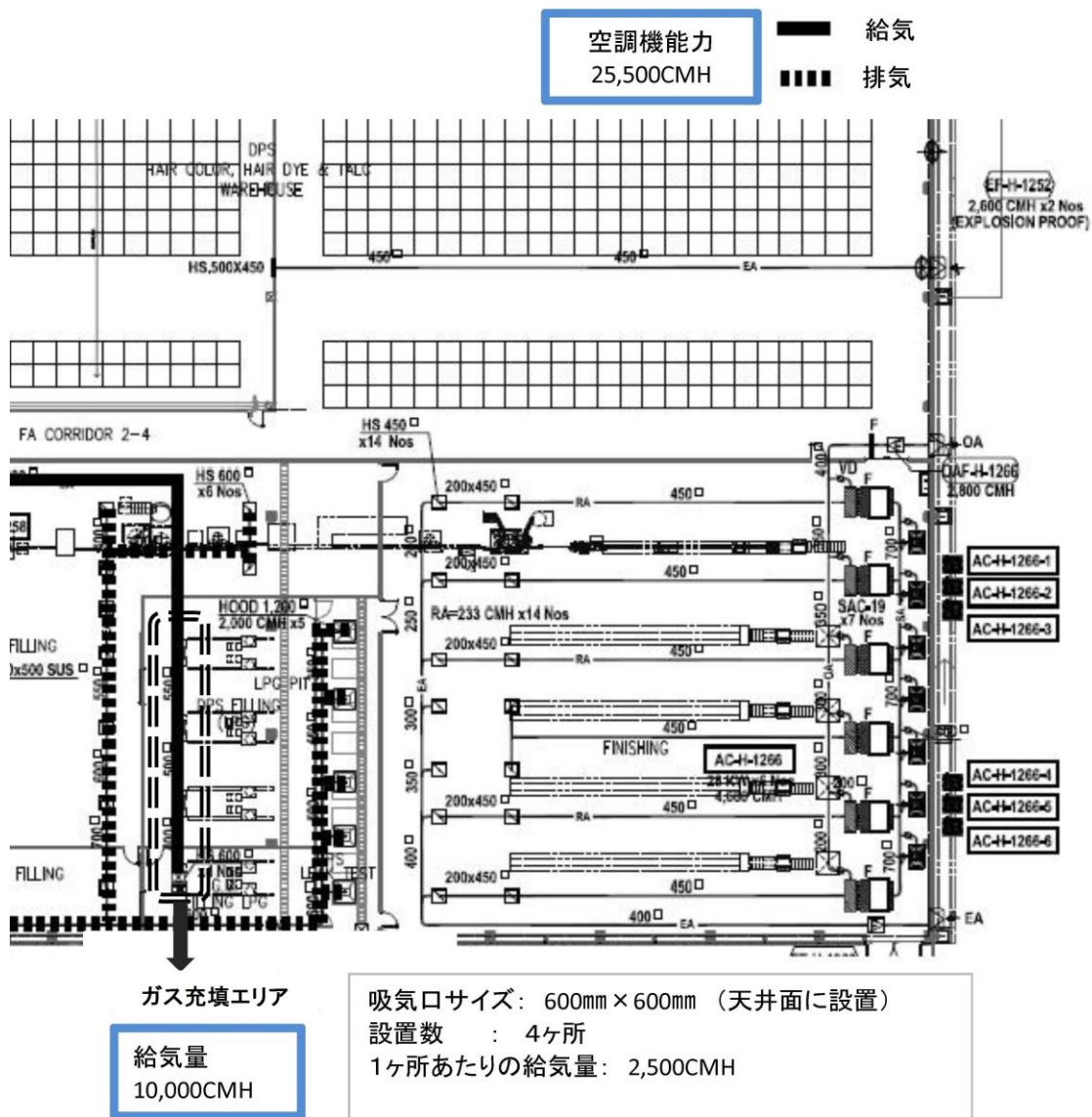


図 3-2-1 給気位置および能力

2) ガス充填エリア

ガス充填エリア給気量合計 : 10,000 CMH
(2,500CMH X 4給気口)

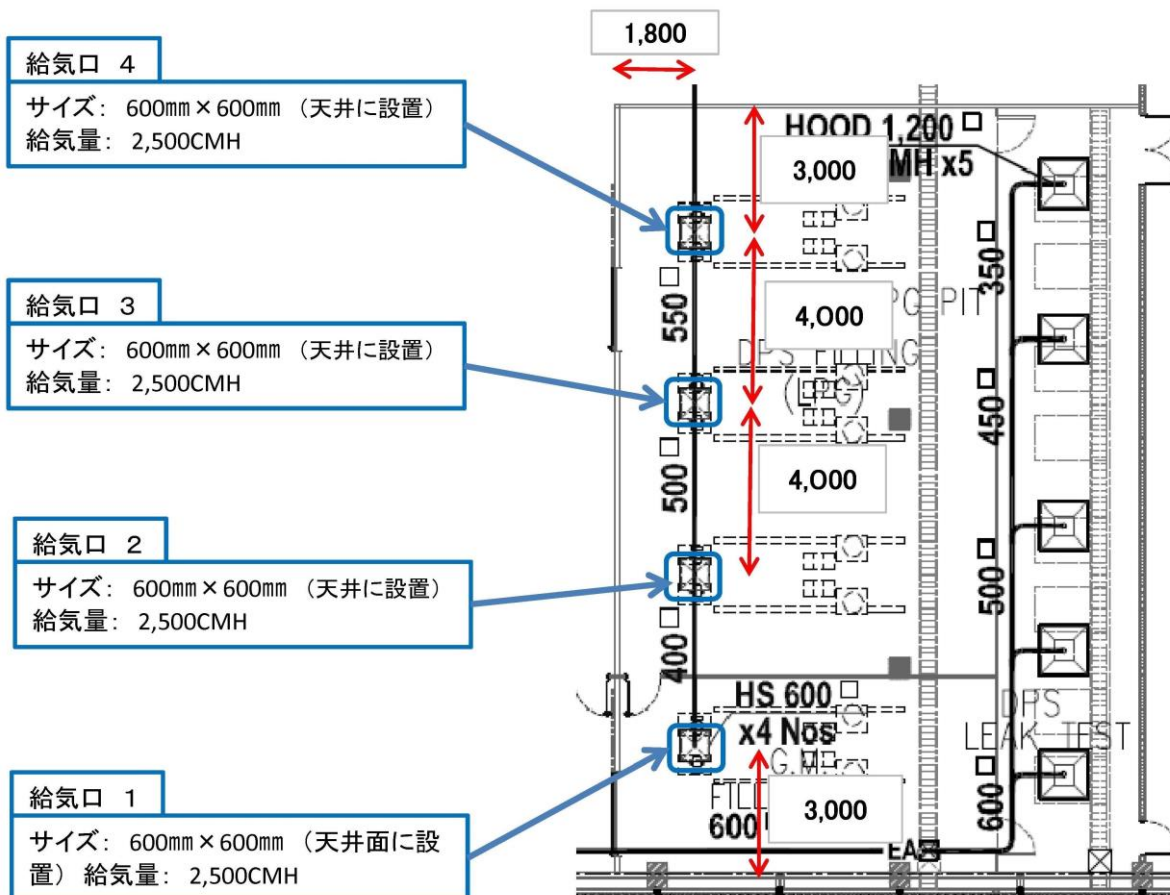


図 3-2-2 給気位置および能力

3) 排気

中味充填機およびガス充填機には上部に排気用フードが設置されている。また、ガス充填機および温検槽のピット(側溝)に排気口が設置されている。

(図 3-2-3、写真 3-2-1,2 参照)

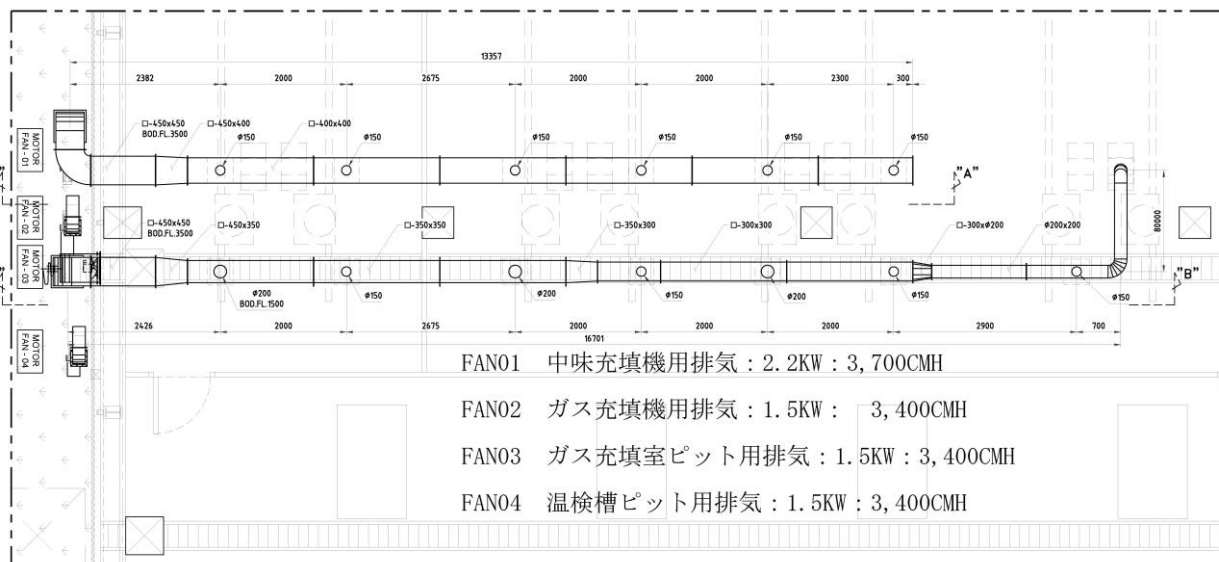


図 3-2-3 排気位置および能力

FAN-01,02,04

シロツコファン タイプ (写真は参考)



FAN-03

換気扇タイプ (写真は参考)



写真 3-2-1 排気ファンタイプ



写真 3-2-2 排気フード

3.2.2 ガス検知器の概要

検知器はガス充填機の真下に設置している。拡散式検知接触燃焼タイプ。設定は燃焼可能下限の 50%で検知。検知器の定期点検においては規定の校正ガスを使用し 18 秒～22 秒で鳴動と正常に作動していた。ガス検知器およびセンサーの仕様は以下のとおりである。

(図 3-2-4、写真 3-2-3、表 3-2-1、2 参照)

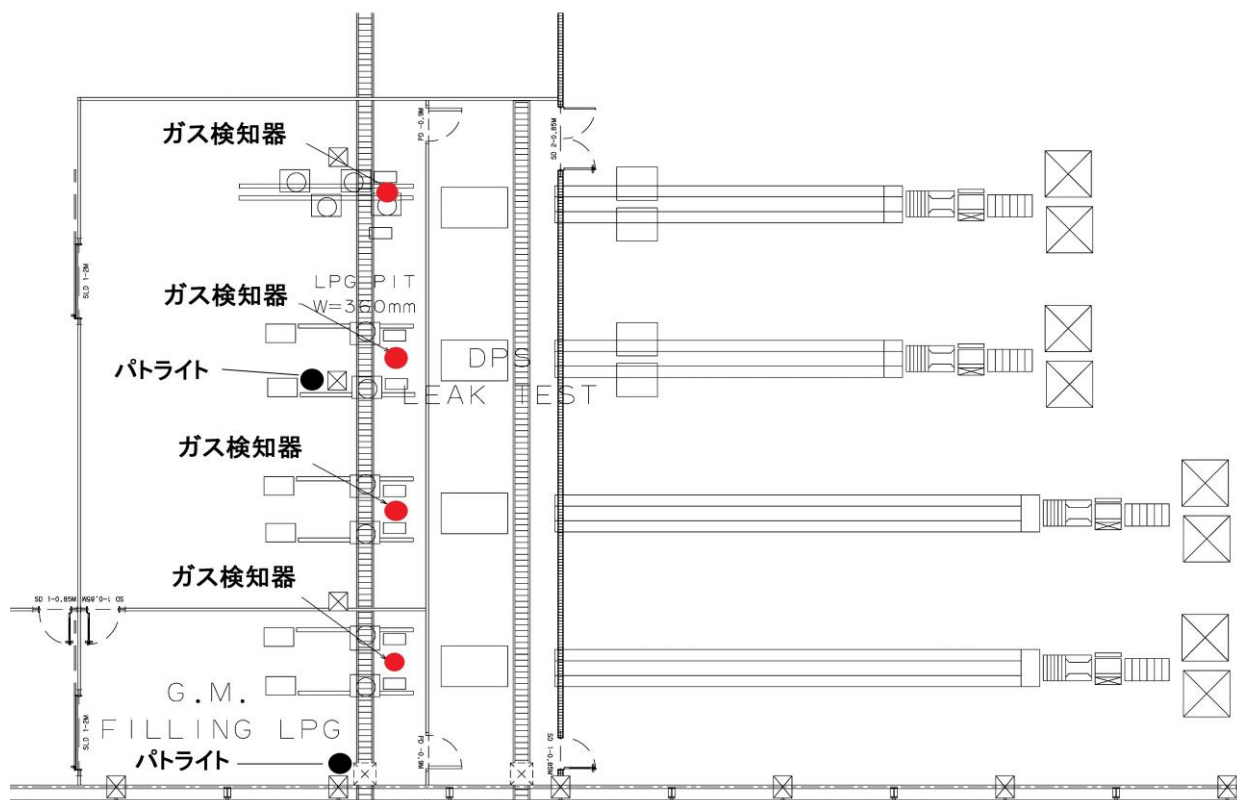


図 3-2-4 ガス検知器およびパトライトの配置



写真 3-2-3 ガス検知器センサー



写真 3-2-4 ガス検知パトライト

表 3-2-1 検知器仕様

検知原理		接触燃焼式
検知対象ガス		LPG
検知点数/ユニット		1 ユニット 2 点監視方式
検知指示範囲		0~100%LEL(イソブタン)
ガス濃度表示計		LCD バーグラフメーター(53ドット 2 列)
警報設定値表示		警報設定直読目盛付
バックライト		バックライト付
警報時ピークホールド機能		警報時ピーク値ホールド、リセットにて解除
警報設定値/設定値変更		24%LEL 又は 16%LEL/△▽キー操作方式
警報精度		警報設定値の±25%以下(同一条件下)
警報遅れ		警報設定値の 1.6 倍濃度で 30 秒以内 (吸引式は配管遅れを除く)
警報表示	個別警報ランプ	赤点滅、ブザー停止後点灯
	自己保持方式	完全ロック(レベル低下後、リセットで消灯)
警報音	標準動作	警報時:断続音、ブザー停止にて停止
	音声警報	警報時:断続音+音声メッセージ
外部警報出力	個別警報接点	無電圧 1a 接点(接点容量 AC100V 2A)
	個別有電圧出力	DC0-6-12V(20mA 以下)
	一括警報接点	無電圧 1c 接点(接点容量 AC100V 2A)
	集中監視盤出力	DC0-6-12V(20mA 以下)
	外部ブザー接点	無電圧 1a 接点(接点容量 AC100V 2A)
	外部ブザー有電圧出力	有電圧断続信号(DC12V 10mA 以下)
警報遅延		デイツプ SW にて選択可能(10 秒固定)
通常電源		AC85~264V
消費電力	KD-5 使用時	拡散式(15+3.5n)VA
	PE-2DC 使用時	吸引式(15+7.5n)VA
保安電源	使用蓄電池	密閉型鉛蓄電池
	過放電防止機能	過放電防止機能付
	蓄電池寿命判定	蓄電池寿命判定機能付
	蓄電池電圧表示	2 桁数字表示 LED

表 3-2-2 検知センサー仕様

検知対象ガス	可燃性ガス
検知原理	接触燃焼式
ガス採気方式	拡散式
指示範囲	別途仕様による
適合ケーブル	4 芯
延長可能距離	1km (2mm ² ケーブルにて)
防爆構造	d2G4 d3a・cG4
使用温度範囲	-10°C~40°C
電源	各指示計ユニットから供給
外形寸法	W114×H180×D100mm
重量	約 1.2kg

4. 事故発生時の状況

4.1 事故発生時の稼働状況

4.1.1 生産ラインの稼働状況

事故発生時は、第一ライン、第二ラインが稼働、第三ライン、第四ラインは休止であった。

4.1.2 事故発生時の人員配置状況

事故発生当時、DPS生産エリアに居た人員は通常配置の 53 名及び応援 5 名の 58 名であった。

(図 4-1-1 参照)

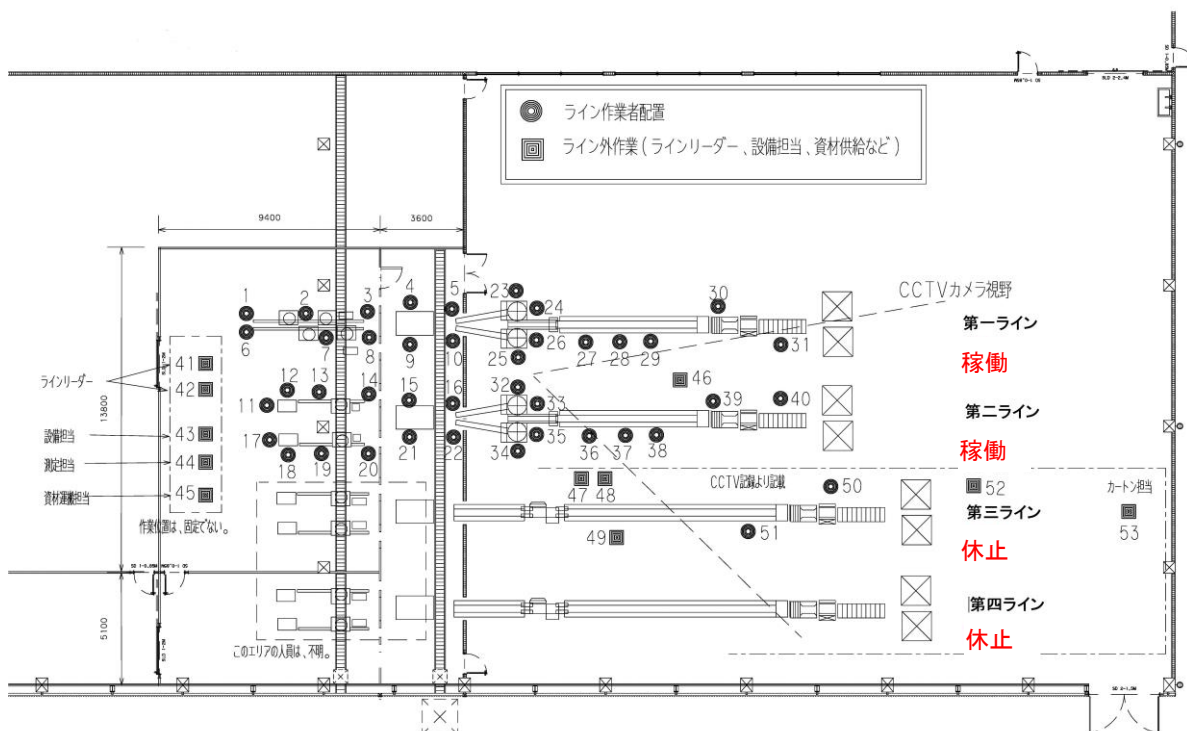


図 4-1-1 人員配置

4.1.3 事故発生時のガスの想定使用量

稼働スピードと製品充填量からの理論値で割り出した、ガスの想定使用量は以下の通りである。始業時間が午前 8 時であるため、事故のあった 9 時 18 分までの 78 分間で計算。

(表 4-1-1 参照)

表 4-1-1 事故発生時のガスの想定使用量

ライン	生產品目	製品ガス量 Kg/Pcs	生産能力 Pcs/Min	使用ガス量 Kg/Min
NO.1	DPS 100ML	0.02121	95	2.015
NO.2	DPS 150ML	0.04063	75	3.047
合計				5.062
稼動時間				78 分
ガス使用量合計				394.84 Kgs

4.1.4 ガス検知器の反応状況

写真 4-1-1 の通り、第一ラインおよび第二ラインにおいて反応が確認されたが、発報時間は特定できていない。パトライトの反応は確認できていない。

(写真 4-1-1、図 4-1-2 参照)

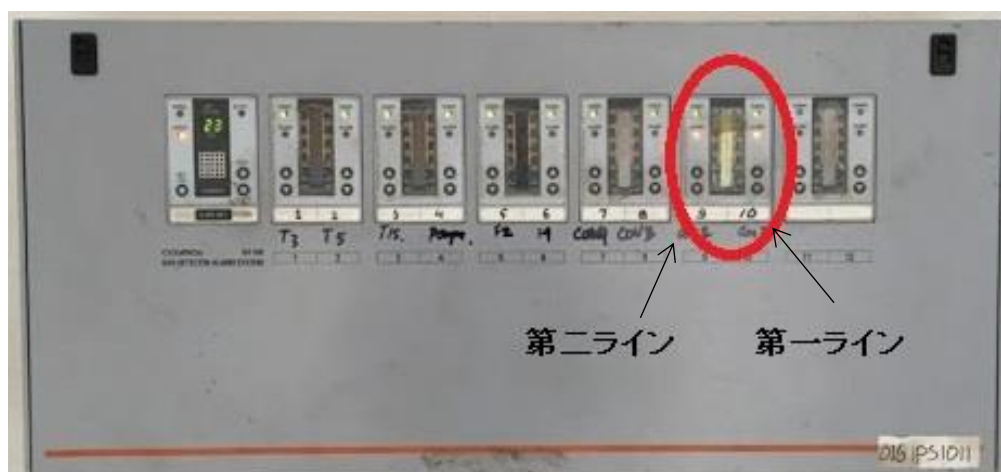


写真 4-1-1 ガス検知器制御盤

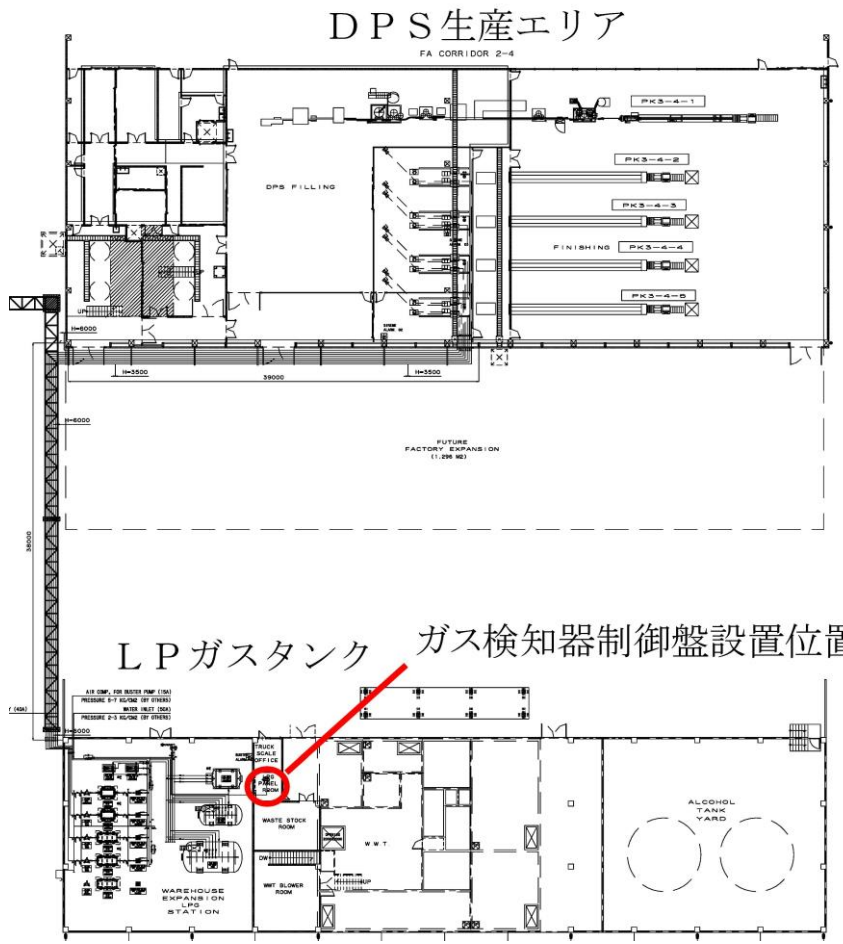


図 4-1-2 ガス検知器制御盤設置位置

4.2 被害の状況

4.2.1 人的被害及び物的被害

1) 人的被害

- ・ 事故直後：死亡 5 名、重傷 53 名（全員従業員） 合計 58 名
- ・ 9 月現在：死亡 28 名（火傷による敗血症等による死亡）

（図 4-2-1 参照）

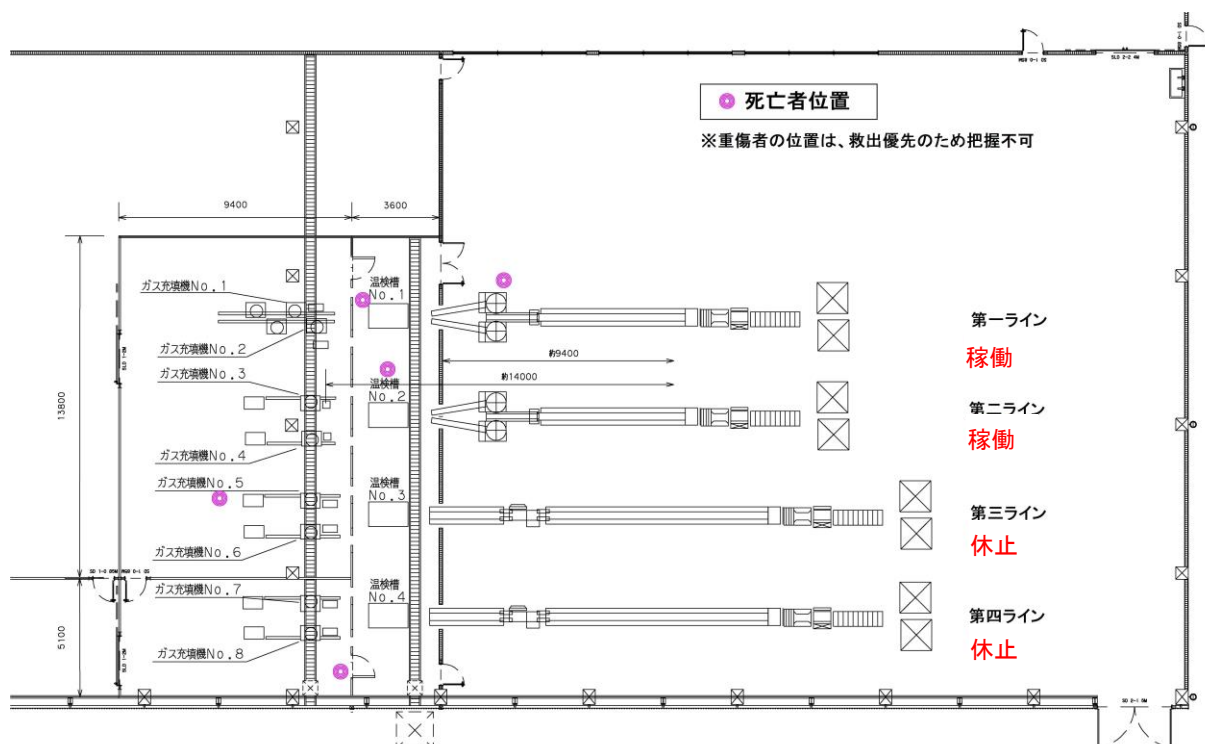


図 4-2-1 死亡者位置

2) 物的被害

- ・ 第二工場の一部である DPS 生産エリアが爆発大破および火災により損傷していた。
- ・ DPS 生産エリアに隣接する危険物倉庫をはじめ、ヘアカラー・ヘアダイ・タルク生産エリアにおいては、火災による損傷は全く無く、爆風による天井の崩落が見られた。
- ・ 建屋・機器・配管・原材料に被害が見られているのは、ガス充填機エリアを中心として第二工場全体であった。
- ・ 併設する第一工場及びオフィス棟には被害は無かった。
- ・ 環境への影響等、有害物質の構外への漏洩は無かった。
- ・ 近隣への爆風等による影響は無かった。

（図 4-2-2、写真 4-2-1～9 参照）



写真 4-2-1
熱風機付近(A視)

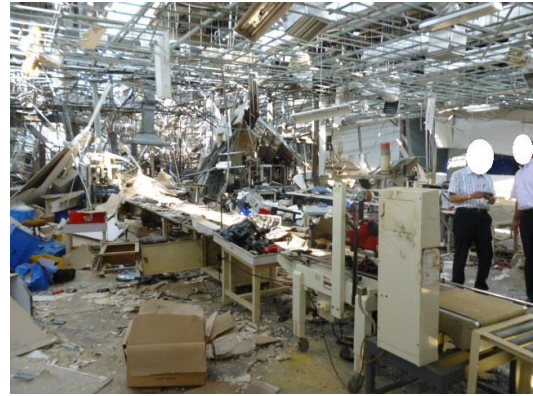


写真 4-2-2
熱風機からガス充填機付近(B視)



写真 4-2-3
ライン全景(C視)

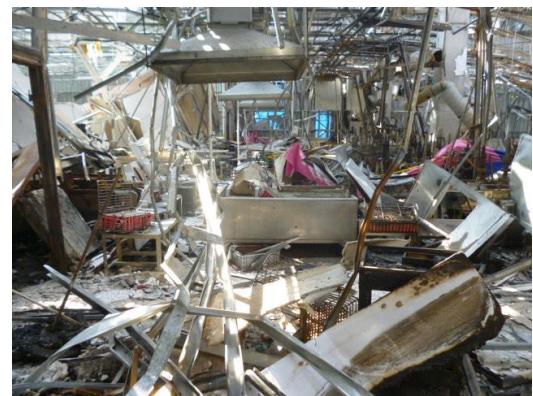


写真 4-2-4
ガス充填エリア(D視)

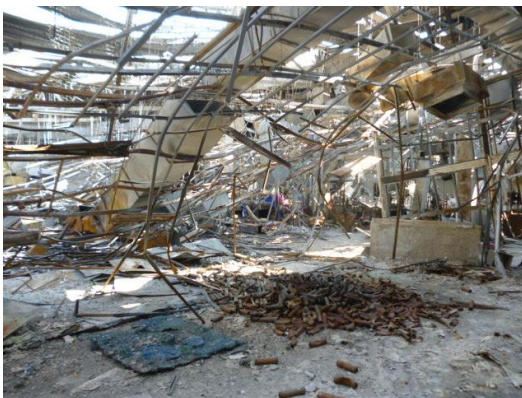


写真 4-2-5
原材料一時保管エリア(E視)



写真 4-2-6
ヘアカラー、ヘアダイ、タルク出荷エリア (F視)



写真 4-2-7
ヘアカラー仕上ライン (G視)



写真 4-2-8
ヘアカラー生産エリア (H視)



写真 4-2-9
タルク出荷エリア (I視)

4.2.2 DPS生産エリア周辺の被害詳細

1) 目視確認

特に火災による焼損、爆風による破損の激しいDPS生産エリアの状況を巡回して調査・確認の結果、同生産エリアは爆発大破していたが、特に第二ラインの熱風機から同充填機までの間の火災による損傷が激しかった。

また、第二ラインのガス充填機側の接続部において、通常は下向きの充填機配管が上向きになっており、ガス配管と接続するフレキシブルホースが第二ラインのみ破断していた。

更に、500kg程度の第二ラインガス充填機が横向きに回転していた。

(図 4-2-3,4、写真 4-2-10~13 参照)

DPS生産エリア

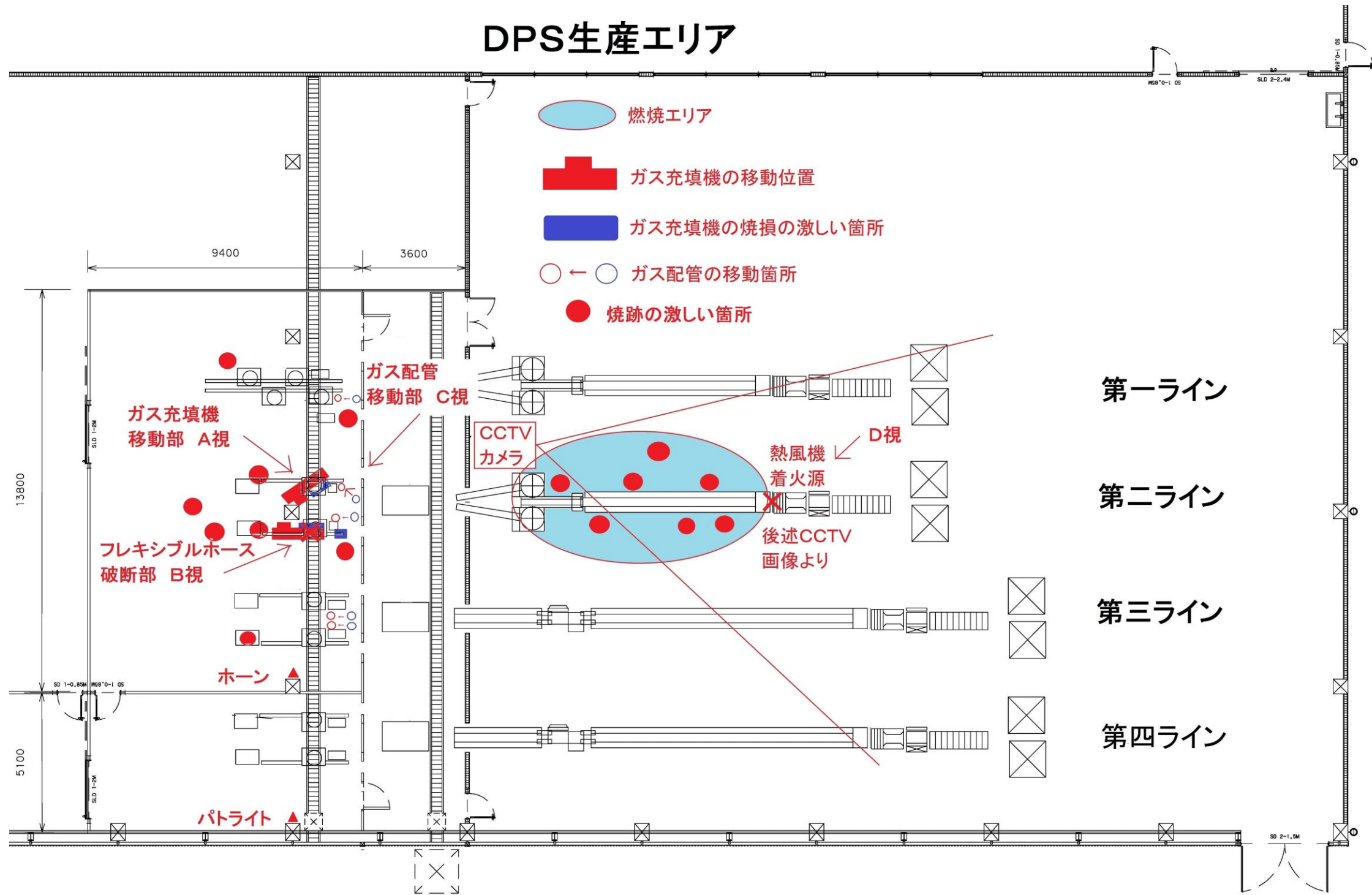


図 4-2-3 DPS生産エリアの被害詳細

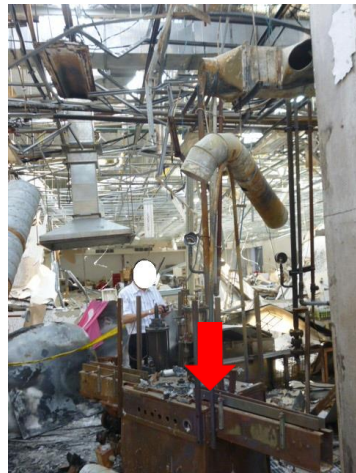


写真 4-2-10
ガス充填機移動部 (A 視)



写真 4-2-11
フレキシブルホース破断部 (B 視)



写真 4-2-12
ガス配管移動部 (C 視)



写真 4-2-13
熱風機損傷部 (D 視)



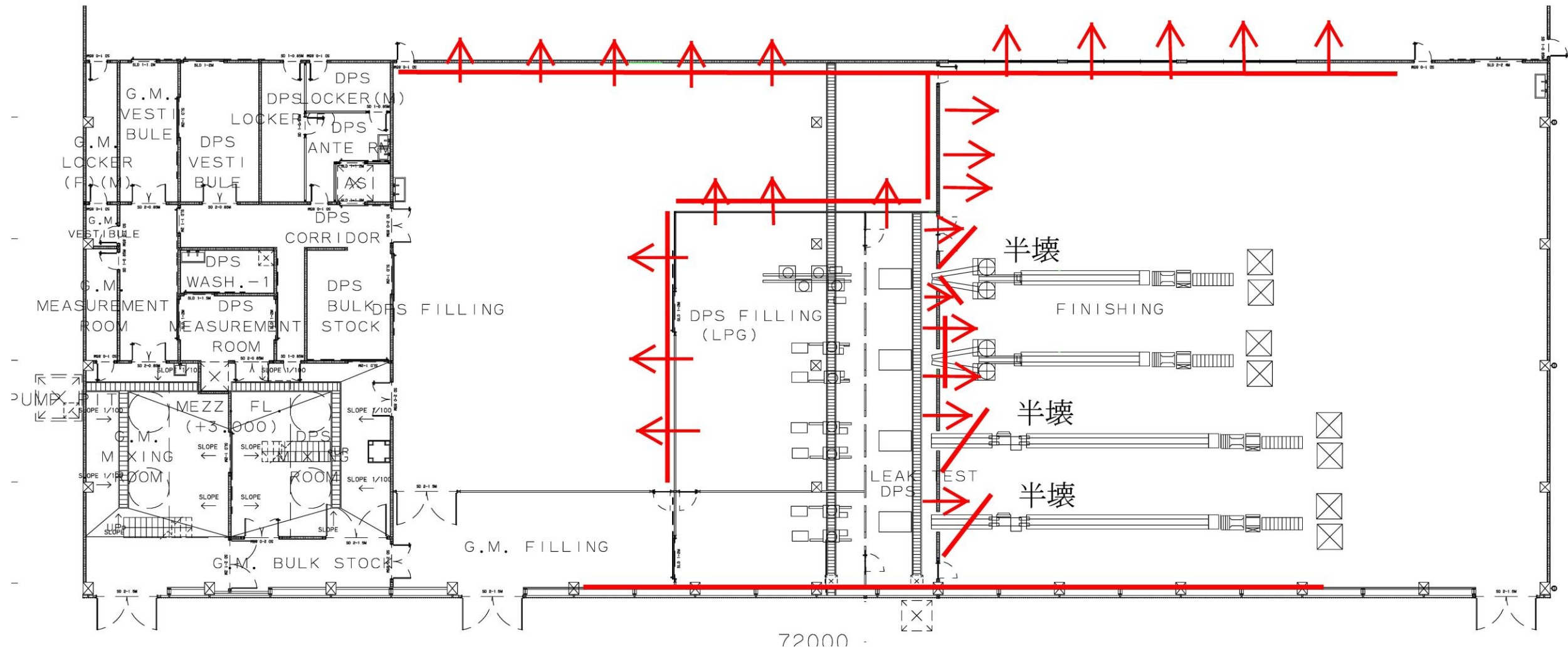


図 4-2-4 DPS生産エリアの爆風被害

2) 着火時のCCTVの画像

DPS生産エリアに設置しているCCTVの画像により、第二ラインのコンベア末端のシュリンクフィルム装着のための熱風機から発火しているのが確認された。そして、同ラインの充填機方向へ向かって長細い火炎形状で広がっているのが確認された。

なお、このラインの充填機のフレキシブルホースは上記の通り破損していた事を確認している。

その後、CCTVカメラの後方で大きな爆発が起こり、カメラの設置治具が壊れて撮影方向がずれ映像が消えた。

これらの画像をもとに火炎エリアの拡大の経時変化をプロットした。焼損エリアもこれに対応している。

(図 4-2-5,6、写真 4-2-14~20 参照)

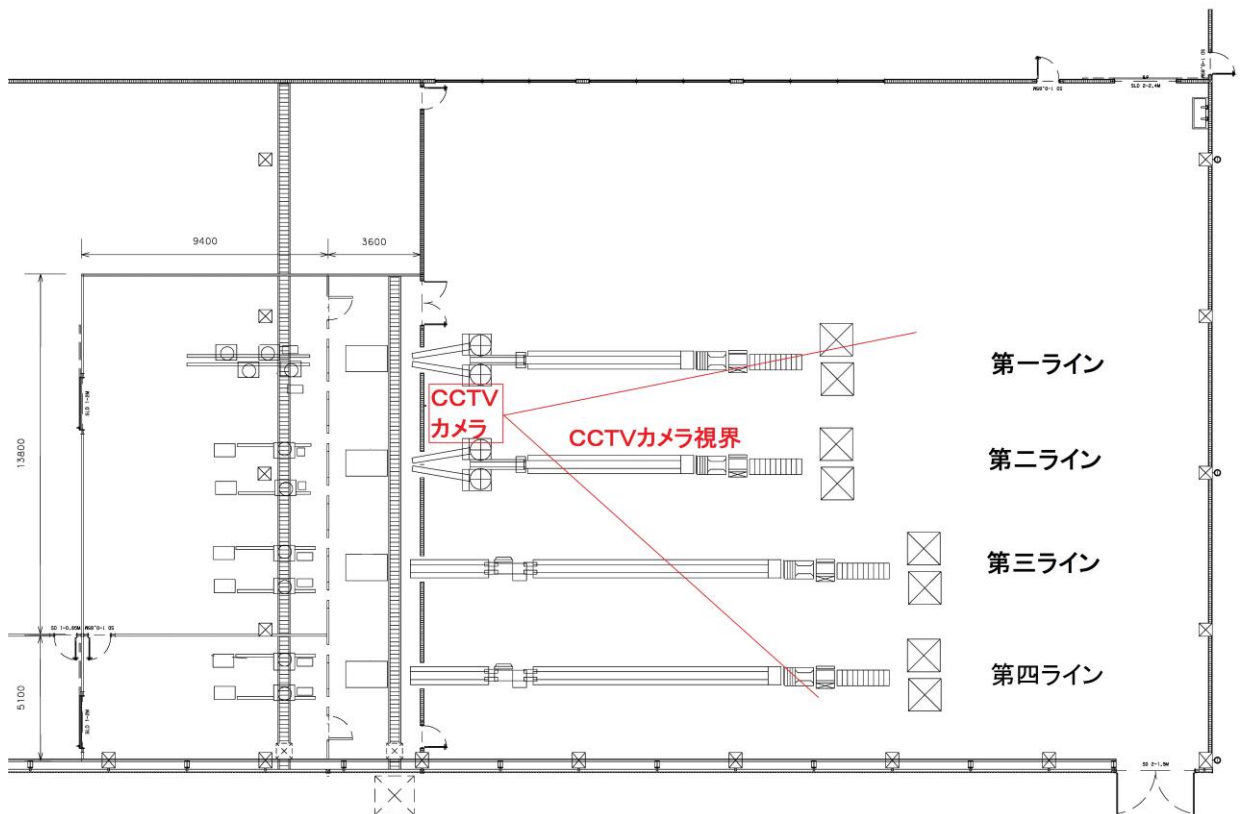


図 4-2-5 DPS生産エリアCCTV位置と視野範囲



写真 4-2-14
着火 55 秒 0000



写真 4-2-15
コンパ下部に広がる 55 秒 0046



写真 4-2-16
コンパ上部に火が上がり、広がる 55 秒 0092



写真 4-2-17
コンパ上部、充填エリア側に広がる 55 秒 0138



写真 4-2-18 55 秒 0184



写真 4-2-19 55 秒 0230

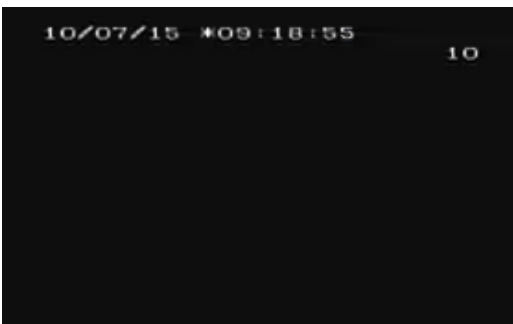


写真 4-2-20 55 秒 0644 画像終了

注) ○印は従業員が居た場所を加工して表示

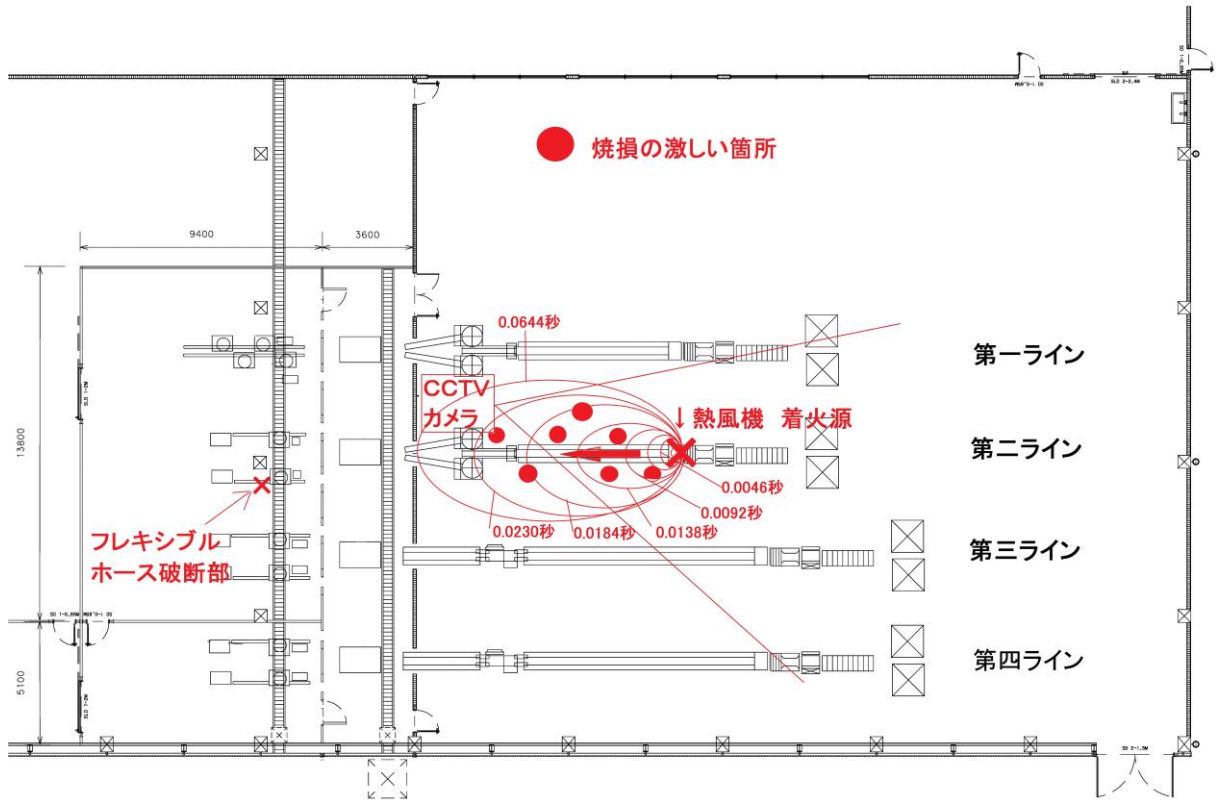


図 4-2-6 火炎エリアの拡大の経時変化

5. 事故原因

5.1 原因の推定

多くの可燃性ガスの漏洩・着火・爆発事故においては、少しずつ漏洩し、漏洩していることに気づかないまま爆発下限界に達し、なんらかの原因で着火し爆発に至る事例が数多い。本事故においては、いくつかの事実が、このような少しずつ漏洩した結果ではない可能性を示唆している。それらの事実と、そこから考えられる可能性を以下に整理する。

- 1) CCTV の画像からは、着火まで、ふだん通りの作業を行っており、誰一人として漏洩や、もしも検知器が警報を発していたとすると聞こえていたであろう警報音に気づいている気配が見られない。(p.34、写真 4-2-14)
従って、警報は鳴らなかったものと考えられる。
- 2) しかし、ガス検知器は第一ラインおよび第二ラインにおいて反応が確認されている。(p.23, 写真 4-1-1)
検知器の定期点検においては規定の校正ガスを使用し、検知後 18～22 秒で鳴動と正常作動が確認されている。(3.2.2)
従って、警報機が故障していたか、あるいはガスの検知から着火爆発までが 18 秒以下であったのいずれかであろうと考えられる。
- 3) CCTV の画像からは、第二ラインのコンベア末端の熱風機において着火し、着火後同ラインの充填機方向に向かって細長い火炎形状で広がっていることが確認されている。(p.34、写真 4-2-15,16,17)
これは、拡散したLPガスが第二ラインの近傍にのみ存在していたということであり、緩慢な漏洩拡散では考えられず、LPガスの拡散は非常に急速であったと考えられる。
- 4) 第二ラインの充填機のフレキシブルホースが大きく裂けている。(p.31, 写真 4-2-11)
また、このフレキシブルホースの裂けた場所以外に、漏洩したであろう箇所がみつかっていない。もしフレキシブルホースが裂けたことがLPガスの拡散の原因であるとすると、非常に急速に拡散したのではないかと考えられ、上記の事実とそれらから考えられる可能性と合致する。

これら事実から、爆発事故は以下のように進展したのではないかと考えられる。

- 1) 何らかの原因で、第二ライン充填機のフレキシブルホースが裂けた。
- 2) 配管の液体LPガス(タンク圧力は 1.5MPa)が噴出し、直ちに気化し、大量の可燃性ガスが急激に漏洩した。
- 3) 漏洩したLPガスは、主に第二ラインに沿って拡散し、コンベア近傍の熱風機によって着火した。
- 4) 着火した炎は第二ラインを温検室・充填機の方に伝播し、温検室や充填機周辺に漏洩していたLPガスを爆発させた。

このような原因推定が妥当なものであるかどうか、すなわち、フレキシブルホース破裂によってどれくらいの噴出質量速度で漏洩するのか、その噴出ガスは第二ラインの熱風機にまで18秒以内に到達するのか、また火炎の形状はどのようなもので、どのように伝播するか、などを検証するために次節のような数値解析を実施した(後述シナリオ A)。

同時にLPガスの激しい噴出ではなく、緩やかに漏洩し着火した場合はどのような爆発になるかを合わせて検証した(後述シナリオ B)。

5.2 数値解析

5.2.1 LPガス噴出質量速度の推定

フレキシブルホースが破裂してLPガスが噴出する場合の噴出質量速度の推定を行う。

LPガスタンクから充填機近傍までは直径 40mm 長さ約 86m の配管、充填機の近傍で直径 17mm 長さおよそ 2m のフレキシブルホースとなり充填機に結合されている。LPガスタンクでの圧力は約 1.4MPa (ゲージ圧、以下に述べる数値流体計算結果では一般的に絶対圧表記されるので、この場合は約 1.5MPa)であった。

まず、PHASTを用いて、漏洩速度の推定を行った。PHASTはDNV社のリスク評価ソフトウェアであって、経験則と流体力学に基づく簡易モデルを用いている。LPガス噴出計算の場合、PHASTの計算は資料 A.1 に示すように定常状態の場合の計算であり、また液化ガスが噴出した場合の気化は考慮に入れない、簡易化した計算方式である。

4つの case に対して計算を行った結果を表 5-1 に示す。4つの case は、配管の直径と長さが異なっており、圧損を考慮した結果となっている。代表的な例としては、直

径 20mm 長さ 1.55m で噴出質量速度 5.256 kg/s が得られている。

PHAST の計算は定常状態でかつ液体から気体への相変化を考慮していないものであるが、フレキシブルホースが破裂した場合においては、かなり短い時間で相変化しながら噴出することとなり、このような非定常の状態を数値計算で検証するためには、数値流体計算コードを用いなければならない。現象としては、噴出質量速度が非常に速く、衝撃波の発生可能性も考えなければならないので、計算コードは、三次元圧縮性流体の数値解析が可能でなければならない、また、同時に液体から気体への相変化モデルを持っていないなければならない。

ここでは、これらの条件を満たす数値計算コードとして、CRAFT Tech 社が開発販売している CRUNCH CFD コードを用いて数値解析を行った。

CRUNCH CFD の計算においては、LPガスの組成を実際の組成(プロパン 58%、ノルマルブタン 21%、イソブタン 21%)とし、それぞれの飽和蒸気圧曲線データから、圧力の減少によって飽和蒸気圧曲線で決まる状態で気化するとした。混合相の取り扱いにはオイラーモデルであり、気液界面は捕獲しておらず、各計算セルにおいては気体液体の分率でもって取り扱っている。

CRUNCH CFD による非定常解析結果を図 5-1 に示す。グラフ横軸は時間、縦軸は質量速度などである。フレキシブルホース破断によるLPガス噴出時には、気液相変化、圧縮性、高速流れによる衝撃波などの現象が関与する。これらの現象を考慮した数値解析結果である図 5-1 のグラフで示される時間変化流量を採用した。

なお、CRUNCH CFD の解析は内径 17mm、長さ 2m の配管を考慮したものである。その上流に内径 40mm、長さ 1m の配管を接続しているが、内径 17mm 部の圧損と比較して、内径 40mm 部の圧損は無視できる。CRUNCH CFD 高圧条件での定常解析の条件は、表 5-1 の PHAST の解析条件と比較すると case1 と case2 の中間に相当する。CRUNCH CFD による噴出質量速度は PHAST の case1 と case2 の解析結果の中間にある。

表 5-1 PHAST による定常状態でのLPガス噴出量

条件	ツール	PHAST			
	case 名	case1	case2	case3	case4
	元圧 (kgf/cm2.g)	15			
	元圧 (atmg)	14.52			
	配管: 内径*長さ	17mm*0.01m	17mm*100m	20mm*1.55m	20mm*100m
結果	質量速度 (kg/s)	5.003	0.470	5.256	0.733
	速度 (m/s)	47.9	104.8	37.0	102.4
	温度 (°C)	61.7	4.0	61.7	7.6

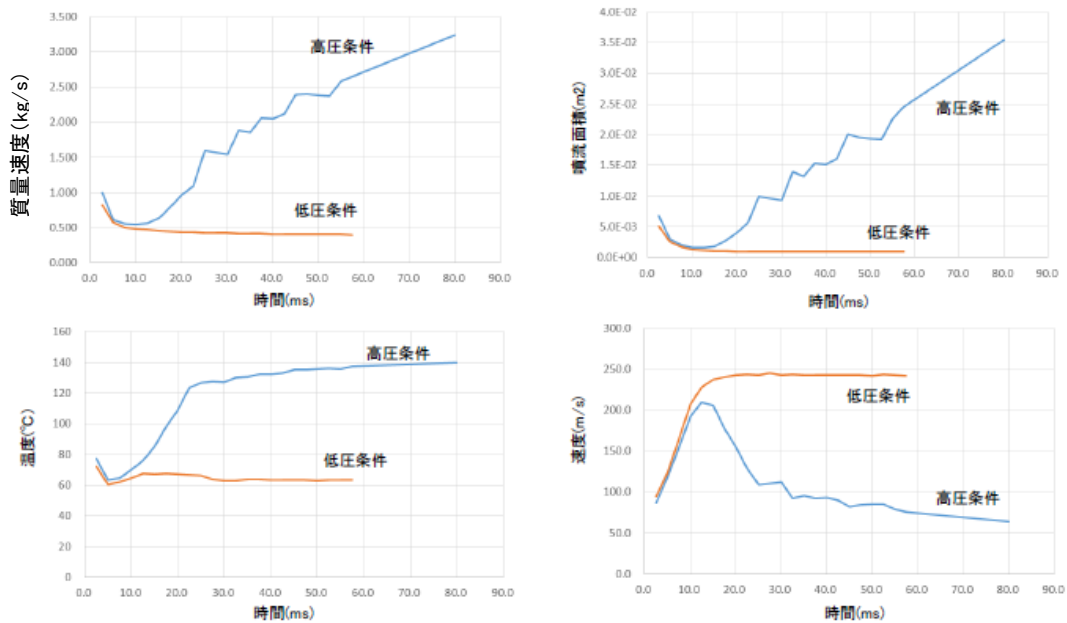


図 5-1 CRUNCH CFD による非定常数値計算結果

5.2.2 FLACSによる爆発の計算

FLACS は、ガスの漏洩・拡散・着火・燃焼・爆発をシミュレーションすることのできる三次元数値流体計算コードであり、独自の、実験的に検証した燃焼波面加速モデルを有しているため、一般的に、今回の case のような大空間での爆発は、比較的良好な精度で再現することが知られている。しかしながら、LPガスの噴出のような、衝撃波を伴い、かつ気液相変化を伴うような現象に対しては、経験則的モデルしか有していないため、ここでは、CRUNCH CFD で得られたLPガスの噴出質量速度を用いるこ

とにした。また、FLACS は緩慢な漏洩に対しては精度よく計算することが可能なので、フレキシブルホース破裂ではなく、緩やかに漏洩拡散した場合の爆発の挙動も併せて解析した。

数値解析を行ったのは以下の3つのシナリオである。

シナリオ A-1: CRUNCH 計算結果の「高圧条件」を用いて噴出させた場合

シナリオ A-2: CRUNCH 計算結果の「低圧条件」を用いて噴出させた場合

シナリオ B: FLACS の機能で緩やかに噴出させた場合

シナリオ A-1, A-2 の場合、CRUNCH 計算結果から、完全に気化する面と、その面での噴出質量速度を用い、FLACS 計算への流入条件とした。ここでのLPガス噴流のイメージを図 5-2 に示す。着火は、拡散したLPガスが、熱風機のところで、爆発下限界に達した時点で数値的に着火させた。

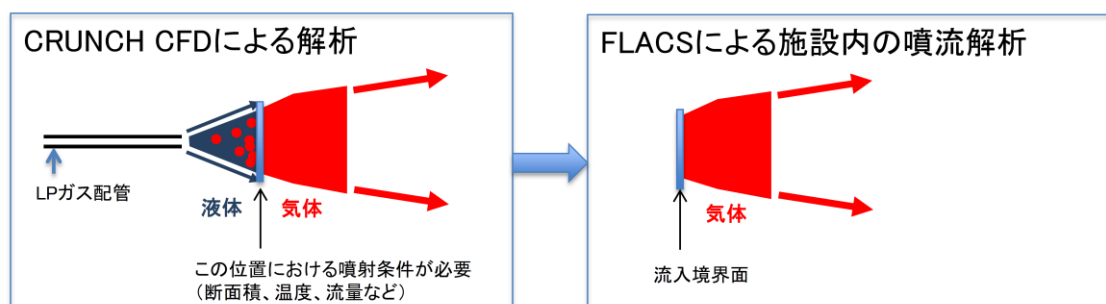


図 5-2 シナリオ A-1、A-2 でのLPガス噴流イメージ

シナリオ B では、噴出・拡散・着火・爆発をすべて FLACS の機能で計算した。着火条件は caseA-1,A-2 と同じである。

FLACS で用いた解析モデルを図 5-3 に示す。

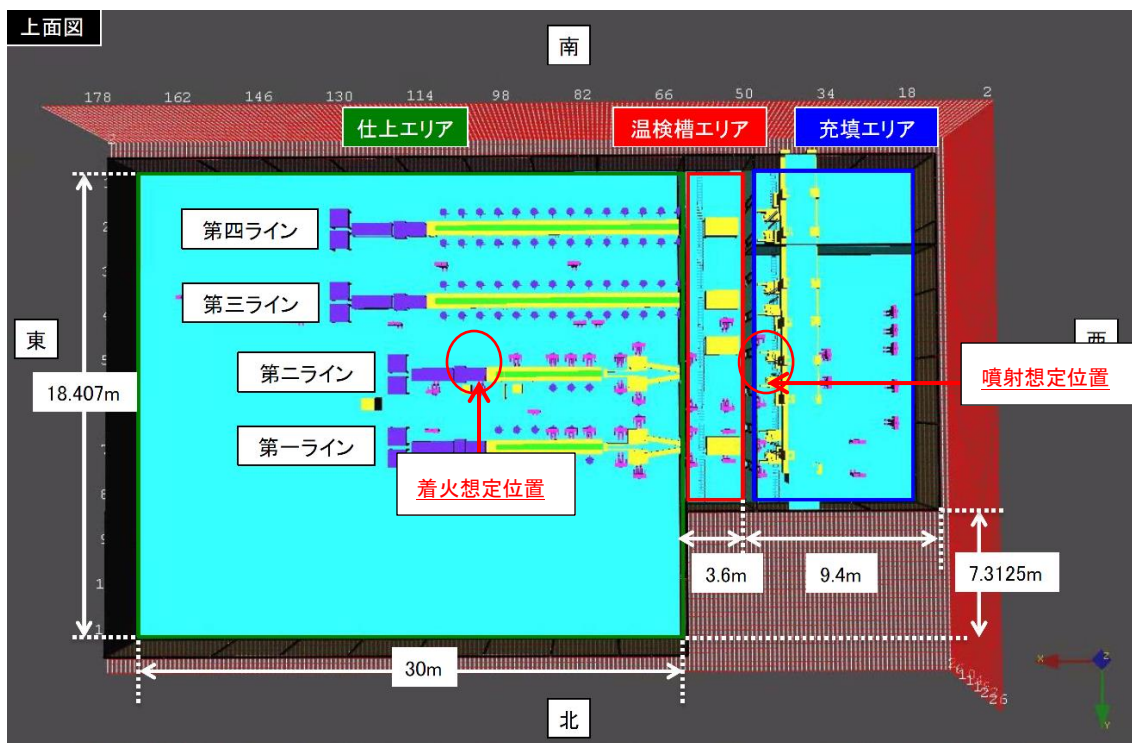
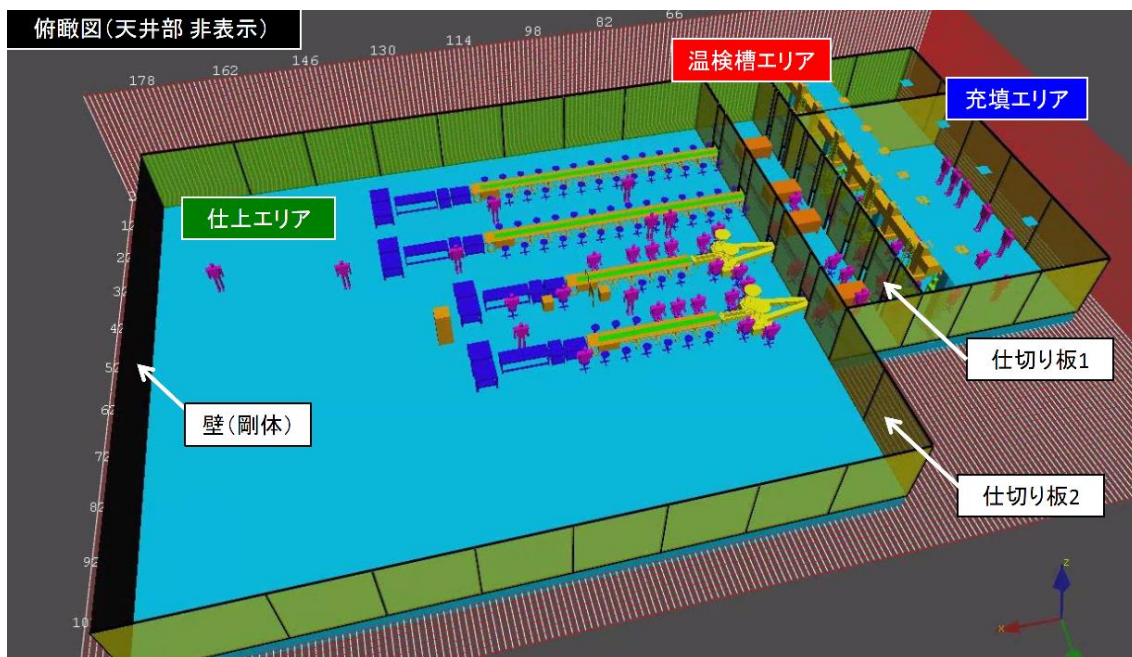


図 5-3 FLACS 解析モデル

シナリオ A-1 の場合であるが、いろいろな噴出方向で計算を行ってみると、噴出質量速度が速いため、ほとんど噴出方向にしかLPガスが流れていかなことがわかり、CCTV のような着火となりうるのは、フレキシブルホースの裂けた場所からの噴流が、

第二ラインの方向に正しく向いて、かつ、ガス充填エリアと温検槽エリア、温検槽エリアと仕上エリアの間の2つの仕切板の隙間が噴流を妨げないことが必要であることが判明した。

これは、フレキシブルホースの破裂面が、計算では配管が軸の 90 度方向垂直に切れている状態を仮定しているが、実際の破裂面は複雑で種々の方向に噴出するであろうことによることや、FLACS の機能が軸方向の噴出ししか計算できないこと、などにより、実際の噴出とは異なるためであるが、CRUNCH で計算した噴出質量速度が実際のものよりやや低い量になっている可能性もあると思われる。

このように、CCTV 画像を再現する計算モデルは、おおむね現象の本質を再現していると思われる。計算ではフレキシブルホースを第二ライン の方向に向けて数秒間噴出した場合 CCTV で撮影された状況に近いものを再現することができた。この場合の、CCTV 画像と FLACS 画像を並べたものを 図 5-4 に示す。

シナリオ A,B の解析結果の要点を以下に示す。

・ シナリオ A-1: CRUNCH 計算結果の「高圧条件」を用いて噴出させた場合

① 着火位置の濃度

噴射後約 6 秒で着火位置に着火濃度のガスが到達した。

② 検知器位置の濃度

着火時の第二ラインの検知器濃度は 1/4 LEL 以下となった。(検知器の想定動作と一致)

③ 火炎の形成状況

レーンに沿って火災が伝播する様子が確認された。また、図 4-2-3 の仕上げエリアの燃焼状況と一致する。

・ シナリオ A-2: CRUNCH 計算結果の「低圧条件」を用いて噴出させた場合

① 着火位置の濃度

噴射後約 10 秒で着火位置にガスが到達した。

② 検知器位置の濃度

着火時の第二ラインの検知器濃度は 1/4 LEL 以下となった。(検知器の想定動作と一致)

③ 火炎の形成状況

着火はするが燃焼が継続しない結果となった。また、図 4-2-3 の仕上げエリアの燃焼状況と一致する。

- ・ シナリオ B: FLACS の機能で緩やかに噴出させた場合
噴射速度 0.1 kg/s 、1.0 kg/s の 2 ケースに関して 20 分間の漏洩・拡散計算を実施した。

① 着火位置の濃度

0.1 kg/s のケースは 20 分間では着火する濃度に至らなかった。1.0 kg/s のケースでは約 10 分間で着火する濃度となった。

② 検知器の濃度

どちらのケースでも検知器位置の濃度は 1/4 LEL 以上となった。(検知器の動作と不一致)

③ 火炎の形成状況

1.0 kg/s のケースに関して、着火させたところ、火炎は球上に大きく広がり、CCTV カメラの映像とは異なる結果となった。また、図 4-2-3 の仕上げエリアの燃焼状況と一致しない。

よって、シナリオ A-1 以外の場合では、CCTV の画像はまったく再現できなかった。

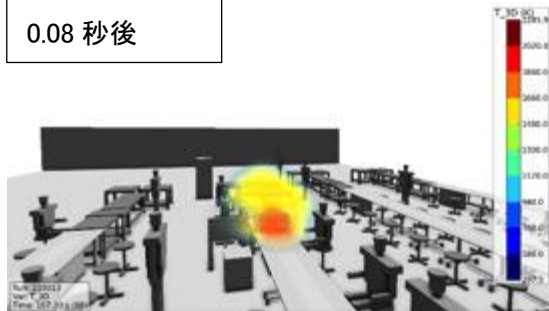
以上、計算結果と CCTV 画像との比較と仕上げエリアの燃焼状況などから以下が結論づけられる。

- A LP ガスが裂けたフレキシブルホースから高速に流出した場合のみ、CCTV 画像、仕上げエリアの燃焼状況、が再現できる。また噴出から着火までは 6 秒間程度と非常に短く、警報機が鳴る前に爆発が起きたことも説明できる。
- B 低速の噴出や、緩やかな漏洩拡散による着火爆発は、CCTV 画像をまったく再現できない。

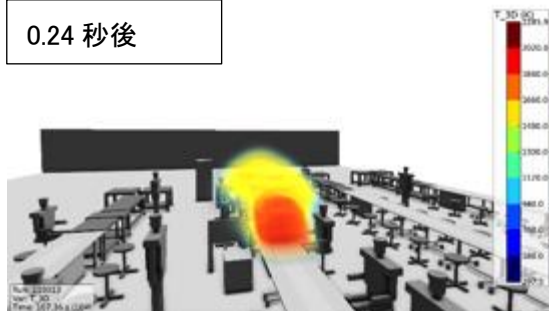
なお、CCTV に見られる火炎速度よりも、FLACS 計算による火炎速度が遅いように見られるが、これは、実際の漏洩時には噴出方向の変化や、そのための障害物との干渉によって、計算よりも乱流の程度が大きく、火炎伝播速度が速くなったためと考えられる。



0.08 秒後



0.24 秒後



0.56 秒後

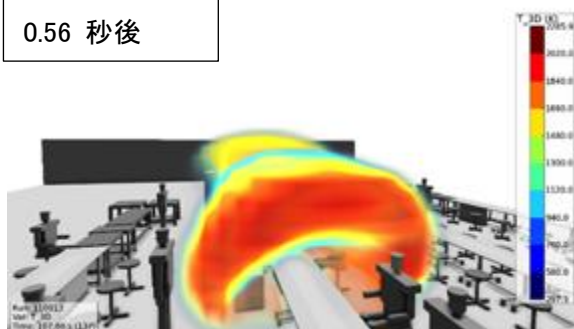


図 5-4 CCTV 画像と計算によって得られた温度コンター図
 注)○印は従業員が居た場所を加工して表示

6. 再発防止対策

6.1 事故の直接原因

前章の解析から、事故原因は充填機のフレキシブルホースが大きく裂けたためであると推定されたが、何故フレキシブルホースが大きく裂けたかは現時点では不明である。考えられる要因としては、1)老朽劣化などに起因する疲労破壊、2) なんらかの外力が加わった、の2つがありうる。このうち 2) については、現場にフォークリフトなどの大きな外力が加えられる装置もなく、要因としては排除できるであろう。

残る要因は、1)の老朽劣化などに起因する疲労破壊であるが、第二ラインガス充填機 No.4 のフレキシブルホースは、旧工場から移設されたもので、新品ではなかったことが確認されている。(p.13, 図 3-1-6) また、使用履歴も明らかではなく、何年間使用したものかも明瞭にはわかっていない。疲労破壊によって裂けたと断定することは困難であるが、これ以外の要因は考えにくいいため、おそらく、古いフレキシブルホースを継続使用し、そのための老朽劣化などに起因する疲労破壊が原因でフレキシブルホースが大きく裂けたことが事故の直接原因であったと判断される。

なお、高圧ガス保安協会のホームページにはフレキシブルホースに関して注意喚起の資料を掲載している。

http://www.khk.or.jp/activities/incident_investigation/hpg_incident/pdf/katoukan.pdf

これによると、フレキシブルホース(上記文書内では可とう管と表現されている)関連の事故は日本でも平成 19 年から 24 年の 6 年間で 61 件発生しており、疲労事故がそのうちの 35 件を占めている。フレキシブルホースはそもそも振動を吸収するための部材であり、本件のように、履歴不明で継続使用している場合、事故の直接原因になる可能性は高く、老朽劣化などに起因する疲労破壊が原因でフレキシブルホースが大きく裂けたことが事故の直接原因であったとする判断は、妥当であると考えられる。

6.2 事故の背景原因

事故の背景となった原因について考察する。

今回の事故は、フレキシブルホースの破裂に起因すると判断したが、その背景原因は、使用履歴が明らかではない、旧工場からの流用品が設置されてしまったこと、にあると考えられる。

そもそも大量にLPガスを使用する事業所においては、他のところでは問題とならないようなささいな不具合や破損・破壊が、大量のガスの漏洩を引き起こし、大きな被害を出しうること

から、安全に対しては、全社一丸となって基礎知識を習得するとともに、責任者を定め安全確保体制の整備に努めなければならない。事故の背景原因として、そのような観点から、なにが欠如していたかを今後検証する必要がある。

6.3 噴出事故防止・被害軽減化対策

このような急速な噴出による事故の場合、噴出現象が起きてから数秒間という短い時間で着火爆発に至るため、検知・避難などの対策を講じることは不可能と言ってよいであろう。従って、このような高速な噴出を起こさないことが、直接原因に対する対策となる。そのためには、LPガス関連機器類の適切な管理と定期的かつ確実な交換が決定的に重要である。

事故の直接原因に対して必要な対策を以下にまとめた。

1) 定期点検と定期交換

フレキシブルホースのみならず、配管系全体について、定期的に漏洩がないことを点検するとともに、古い部品や、履歴の不明な部品はないかをチェックし、古いものや履歴のわからないものは交換すること。定期的な交換を行うこと。なお、現地の法律で、点検・交換が規定されていない場合や、日本での規定よりも長く規定されている場合は、日本の基準を採用することが望ましいと考えられる。

2) フレキシブルホースの取り扱い

フレキシブルホースはそもそも振動を吸収するために使用しているので、長年の使用により金属疲労から破壊に至る可能性が高い部材である。そのような点に特に留意し、振動を可能な限りさけること、使用範囲(曲げ半径など)で使用すること、などの注意を払うことが重要である。

3) ガス検知器と警報装置の定期点検

今回の事故では、LPガス噴出から数秒程度の短い時間内に爆発となったと判断した。ガス検知から警報までの時間は、18～22 秒ということで、警報が鳴らなかった可能性がある。もともと警報までの時間は、誤動作対応の観点から 30 秒程度以下に設定されるため、検知・警報は今回の事故防止とは直接結びつかなかったであろうと思われるが、今回の事故の特殊性を考えると、このような急速な噴出は稀であり、ガス検知器と警報装置の定期点検は重要である。

4) 小型ガス検知器の分散配置

ガス検知器と警報装置が数カ所に設置され、検知と警報作動に 20 秒程度の遅れが生じる、という状況であったが、熱風機のような着火源となりうる場所に、小型のガス検知装置で警報鳴動までの遅れが短い装置を多数展開設置しておけば、以下の対策とあわせて、事故防止・被害軽減化できる可能性があると思われる。

5) 過流防止弁をフレキシブルホース直前に設置する

6) 仕切り隙間の面積を最小化する

ガス充填エリアと温検槽エリア、温検槽エリアと仕上エリアの間に仕切り板があり、ガスはこれらに設けられたライン通過のための隙間から拡散して広がったと考えられる。その拡散の速度は、これらの隙間の面積を最小化することによって、大きく変化する。工場設計段階で、ガス拡散を最小とする設計を行うことにより、着火の原因となった熱風機の場所での濃度上昇速度を遅くすることができるので、上記 3)の対策とともに、事故を防止あるいは被害を軽減化できる可能性があると思われる。

7) 工程の自動化

工程を自動化し、LPガスを取り扱うエリアから人員数を減らすことは、事故が起きた場合の人的被害を最小限に抑えるための有効な対策である。

また、事故の背景原因に対する対策としては、以下のように考えられる。

- 1) 安全確保が至上命題であるという意識を全社員で共有すること。
- 2) 安全確保体制は責任者を明確にして整備すること。
- 3) 関連する事故情報を収集し、安全確保のための情報収集に努めること。
- 4) リスクアセスメントが適切に実施可能な体制を確立し、適切なリスク低減策を講じること。

7. 事故調査対策委員会委員長総括

PT Mandom Indonesia Tbk 本社工場で発生した爆発火災事故では、発災で死者5名、重軽傷53名の被害となり、さらに2015年9月までに重傷者のうち23名が火傷により死亡され、尊い人命を多数失うという甚大な被害となった。

事故調査対策委員会は、株式会社マンドムから提供された情報および数値シミュレーション等から事故の現象を明らかにして、事故原因の検討を行った。その結果、製造ラインのガス充填機に接続されているフレキシブルホースが大きく裂けて、液体の液化石油ガスが噴出して気化したLPガスが製造ラインに沿って急速に拡散し、熱風機が着火源となって爆発火災が発生したとの結論を得た。フレキシブルホースの破断の原因は、第6章にて記述のとおり疲労破壊によるものと推定される。すなわち、破断したフレキシブルホースは旧工場で使っていたものであり、使用履歴も明確でなかったため、何らかの原因で疲労が蓄積していたものと推定される。

近年、技術の発展に伴い、事故防止対策のレベルも上がっているが、事故はなくなる。事故発生の直接要因には一般論ではあるが、機器・設備の故障、運転員や作業者の誤操作や危険行動、化学物質の暴走反応などがあり、その背後要因は技術力不足、危険源の把握が十分でないあるいは把握しても十分な対策ができていない、運転員や作業者のトラブル対応能力の不足、マニュアルの不備あるいはマニュアルやルールを守らない風土、職場環境が悪いなどが挙げられる。さらにその背後には、教育・訓練の不備、経営資源配分の不備、保安管理体制の不備、経営トップの安全に対するコミットの不備などがある。特に最近の産業事故では、危険源の把握や対応策の不備、教育・訓練の不備、マニュアルの不備やルール違反の問題、トラブル時の対応の問題が指摘されている。

危険源の把握や十分な対応策を実施するためには、適切なリスクアセスメントを行う必要がある。危険なLPガスを取り扱っているため、ガス爆発を防止するための安全対策として、ガス漏れ防止策やガス漏れ検知センサーを設置するなどの対策を講じていたが、今回の事故は第5章にて記述の通り少しずつガスが漏洩し気づかないまま爆発下限界に達した一般的な事故ではなく、フレキシブルホースが破断して大量の液体のLPガスが一挙に放出された通常では考えられない事故であるため、通常の実施策では有効に働かなかった。リスクアセスメントを強化し、実施されていた安全対策が十分であるかどうかの検討を徹底的に行った上で、その安全対策を確実に実行する必要があると考える。事故につながる全てのシナリオを明確にしないと十分な安全対策を検討することができない。あらゆる危険源の抽出と事故につながるシナリオをリスクアセスメントによって明確にして、安全対策を講じることの重要性を示した事故であるとする。

以上