

ENEOS株式会社 堀製油所
硫化水素ガス漏洩事故
事故調査報告書

2026年1月

ENEOS株式会社 堀製油所硫化水素ガス漏洩事故調査委員会

目次

1 事故調査委員会	1
1-1 体制	1
1-2 要綱	1
1-2-1 役割	1
1-2-2 構成	1
1-2-3 審議（実績）	2
2 製油所及び装置の概要	3
2-1 製油所の概要	3
2-2 装置の概要	4
2-2-1 1号ガスタービン装置	4
2-2-2 フレアスタック	5
3 事故の概要	6
3-1 発生場所	6
3-2 発生日時	7
3-3 通報日時	7
3-4 被害状況	7
3-5 気象状況	7

4 事故当日の製油所の運転・作業状況	8
4-1 事故当日の運転状況・作業状況	8
5 事故の経緯	12
5-1 有毒ガス放出の経緯	12
5-2 ばく露の経過	14
5-3 救出活動	15
5-4 ガス漏洩の停止	15
6 事故原因調査結果	16
6-1 事故発生のメカニズム、有毒ガスの特定とその特性	16
6-1-1 発災現場に存在したガス	16
6-1-2 硫化水素による健康影響	16
6-1-3 二酸化炭素による健康影響	17
6-1-4 酸欠霧因気による健康影響	17
6-1-5 従業員 F の健康影響	18
6-2 原因要素の抽出	19
6-2-1 硫化水素ガスの存在	19
6-2-2 硫化水素ガスの放出	20
6-2-3 硫化水素ガスの吸引	22

6-3 原因要素の発生理由	39
6-3-1 硫化水素ガスの存在	39
6-3-2 硫化水素ガスの放出	39
6-3-3 硫化水素ガスの吸引	40
7-1 原因要素を防止する対策の検討	41
7-1-1 硫化水素ガスの存在	41
7-1-2 硫化水素ガスの放出	41
7-1-3 硫化水素ガスの吸引	42
8 再発防止に向けた提言	43
添付 1 : CFD 解析に関する補足資料	48
添付 2 : 略語の説明	54

1 事故調査委員会

1-1 体制

2025年5月17日（土）、ENEOS 株式会社堺製油所において、硫化水素ガス漏洩による死亡災害が発生した。ENEOS 株式会社は、社外有識者及び社内の委員から構成される事故調査委員会を設置し（2025年6月19日）、同委員会のもとに、調査検討チームを設けた。

同委員会により、事故の調査、原因究明、再発防止策立案を実施した。

1-2 要綱

1-2-1 役割

本委員会は、2025年5月17日に ENEOS 株式会社堺製油所において発生した硫化水素ガス漏洩事故に関して、第三者による公正な立場から、その要因の究明と再発防止について検討する。そして、安全管理の推進と操業の透明性を高めるための提言を行うことを目的とする。

1-2-2 構成

構成メンバーは、以下の社外有識者 3 名と社内 4 名からなる。また、以下の関係官庁・機関がオブザーバーとして委員会に参加した。

委員長	中村 昌允	(一社) 京葉人材育成会名誉会長、 東京大学工学系研究科 非常勤講師
委 員	三宅 淳巳 若倉 正英 荒木 信之 寺本 光司 五内川 真 山中 啓司	横浜国立大学 上席特別教授／名誉教授 特定非営利活動法人 保安力向上センター 常務理事 ENEOS 株式会社 常務執行役員 ENEOS 株式会社 常務執行役員 ENEOS 株式会社 環境安全部長 ENEOS 株式会社 執行理事 製造部長
オブザーバー	経済産業省 中部近畿産業保安監督部 近畿支部 大阪府 消防保安課 堺市 消防局 高圧ガス保安協会	

1 - 2 - 3 審議（実績）

（1）事故調査委員会の設置 2025 年 6 月 19 日（木）

- ①. 事故調査委員会体制の確認

（2）第 1 回事故調査委員会 2025 年 7 月 2 日（水）ENEOS（株）本社

- ①. 事故概要と調査の進め方
- ②. 情報収集内容と原因要素に関する討議

（3）第 2 回事故調査委員会 2025 年 8 月 21 日（木）ENEOS（株）本社

- ①. 第 1 回事故調査委員会のフォロー事項の報告
- ②. 原因に関する報告と討議

（4）第 3 回事故調査委員会 2025 年 10 月 1 日（水）ENEOS（株）本社

- ①. 第 2 回事故調査委員会のフォロー事項の報告
- ②. 原因とは正処置（対策）に関する討議
- ③. ガス拡散(CFD)解析の討議

（5）第 4 回事故調査委員会 2025 年 10 月 14 日（火）ENEOS（株）本社

- ①. 第 3 回事故調査委員会のフォロー事項の報告
- ②. 報告書骨子に関する報告
- ③. ガス拡散(CFD)解析の報告

（6）第 5 回事故調査委員会 2025 年 11 月 18 日（火）ENEOS（株）本社

- ①. 第 4 回事故調査委員会のフォロー事項の報告
- ②. 事故報告書に関する討議
- ③. 委員長総括に関する討議

2 製油所及び装置の概要

2-1 製油所の概要

ENEOS 株式会社堺製油所は、1965 年に操業を開始し、1984 年に流動接触分解装置（FCC 装置）、1990 年にパラキシレン製造装置を建設した。敷地面積 77 万 m²、原油処理能力 141KBD であり、燃料油、石油化学製品等を生産している。（図-2-1-1：精製フロー図）

精製設備を稼働させるためには、電力、蒸気等の用役が必要であり、用役を供給する設備も有する。

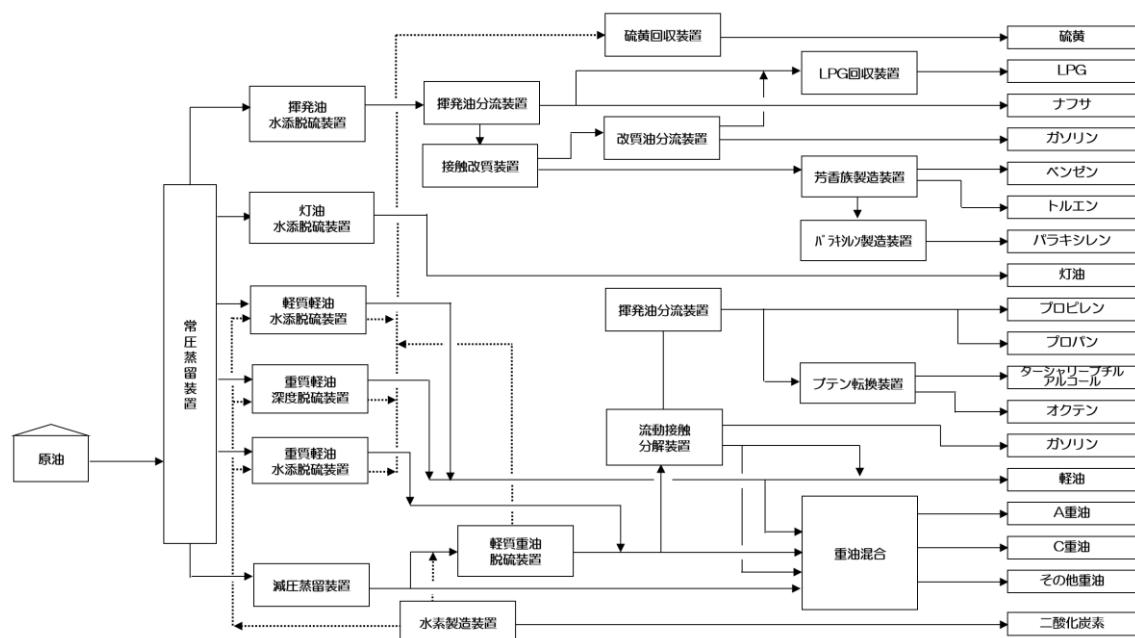


図-2-1-1：精製フロー図

2-2 装置の概要

2-2-1 1号ガスタービン装置

1号ガスタービン装置（以下 1st GTG 装置）は、堺製油所内で発生する余剰ガスを燃料として、ガスタービンを駆動させ、その軸出力により発電機で 25,800KW の電力を発生する装置である。ガスタービンとは、燃料の燃焼によって得られた高温のガスを膨張させてタービンを回すことにより、燃焼ガスから動力を得る熱機関をいう。

ガスタービンへの燃料は、ガスコンプレッサー（C-1851）を用いて供給する。（図-2-2-1：1号ガスタービン燃料供給装置概略図）ガスタービンで発生した電力は特高受変電所に送電され、買電と合わせて製油所内の各装置に供給される。

1st GTG 装置内の各機器からの余剰ガス、除害作業などで発生したガスはフレア配管に回収され、フレアヘッダー配管（内径約 1m）を経由して、フレアスタックで燃焼される。

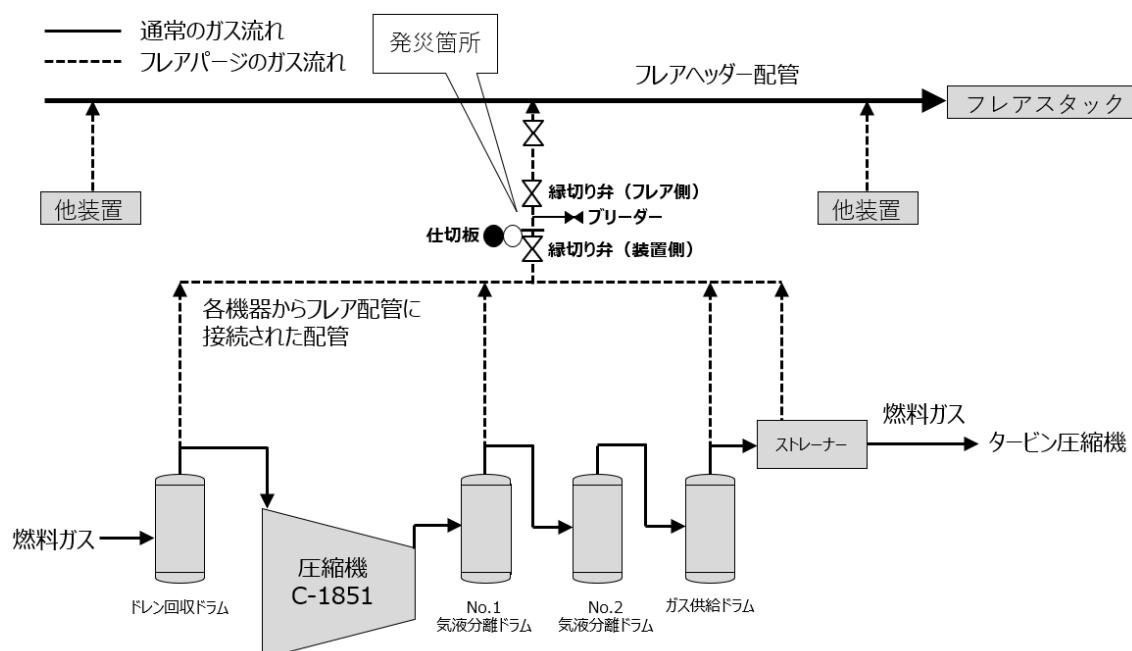


図-2-2-1：1号ガスタービン燃料供給装置概略図

2-2-2 フレアスタック

製油所などの施設では、装置の圧力管理や緊急時の安全確保などによって余剰ガスが発生するが、その余剰ガスを直接大気中に放出すると火災、健康被害や環境汚染となる可能性がある。このため、余剰ガスはフレアスタックに送気され、安全に燃焼される。堺製油所には、フレアスタックへの送気配管であるフレアヘッダー配管は、ドレン回収ドラムである D-2901 行きと、D-401 行きの 2 系統があるが、今回のガス漏洩事故は、D-2901 行きフレアヘッダー配管に接続されている 1st GTG 装置のフレア配管の縁切り箇所(以下、フレア配管)で発生した。図-2-2-2 および表-2-2-1 に、フレアヘッダー配管に接続された各装置を示す。

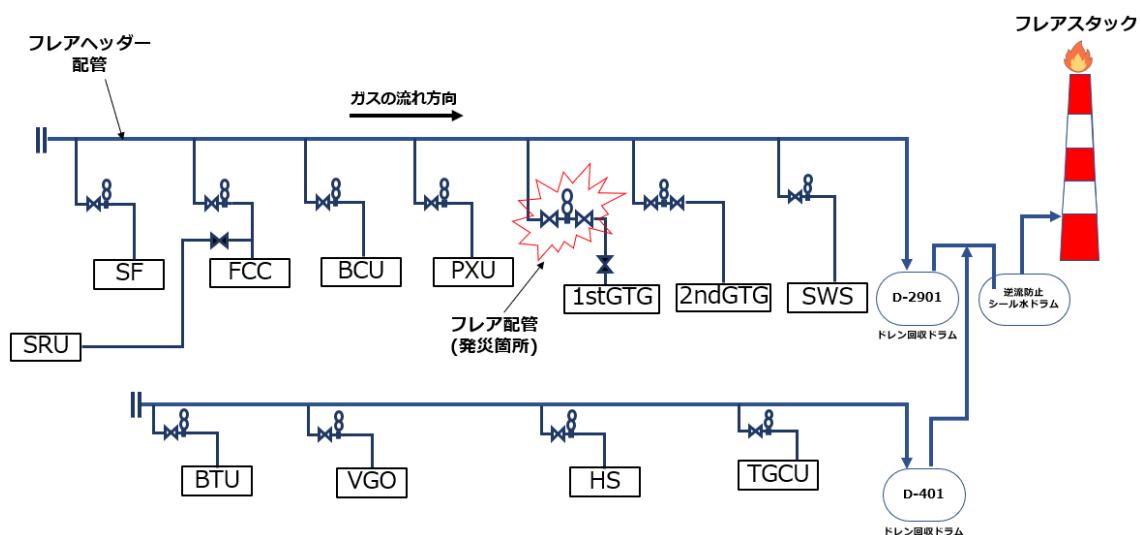


図-2-2-2：各装置からフレアスタックまでの簡易フロー

表-2-2-1：D-2901 行きフレアヘッダー配管に接続された装置

装置	説明
SRU	硫黄回収装置
SF	ガソリン脱硫装置
FCC	流動接触分解装置
BCU	ブテン転換装置
PXU	パラキシレン製造装置
1st GTG	1号ガスタービン装置
2nd GTG	2号ガスタービン装置
SWS	廃水処理装置

3 事故の概要

3-1 発生場所

1st GTG 装置のフレア配管で発災した。発災箇所のプロット図は図-3-1-1 に示す通りである。

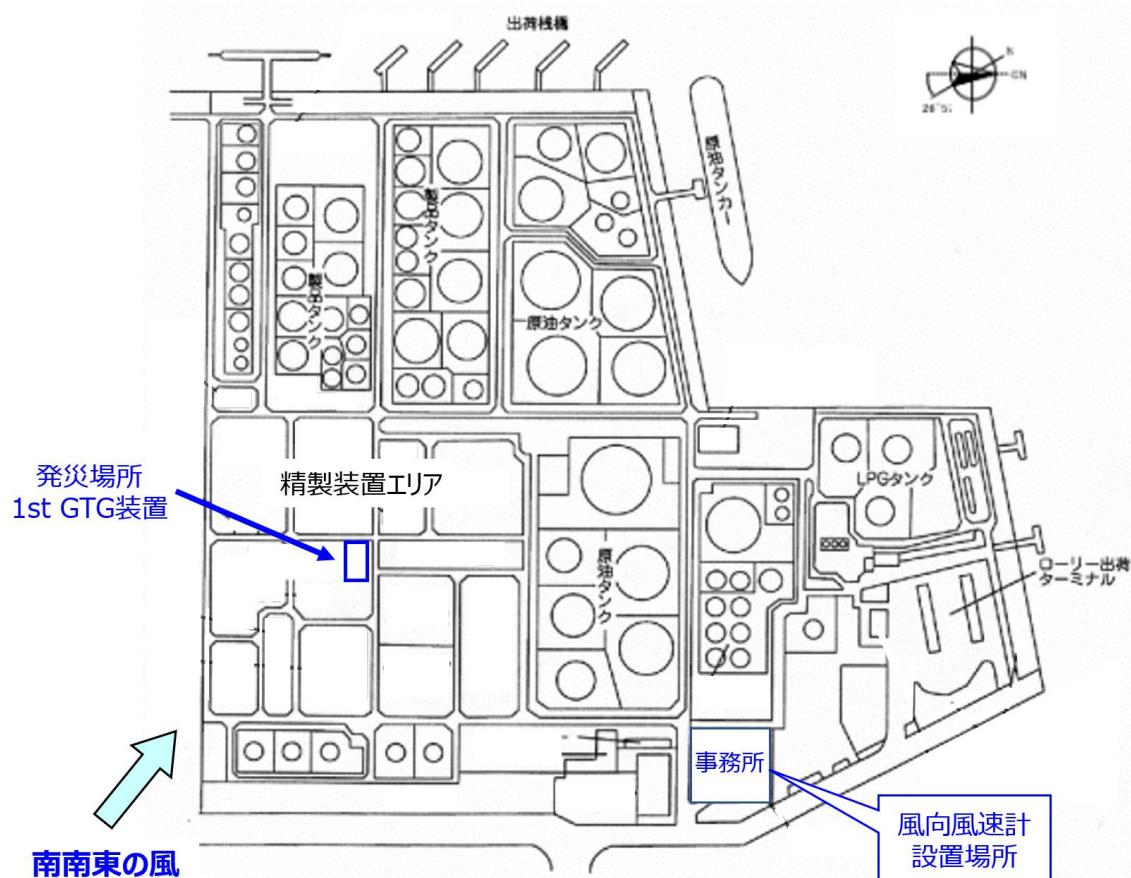


図-3-1-1：発災箇所プロット図

3-2 発生日時

2025年5月17日（土）9時57分頃

※：作業員 A が倒れた推定時刻

3-3 通報日時

2025年5月17日（土）9時59分頃

※：監督 E が消防へ通報した時刻

3-4 被害状況

ENEOS 社員（従業員 F） 1名

意識喪失後に近隣病院に救急搬送、その後、死亡を確認

協力会社員（作業員 A） 1名

意識喪失後に近隣病院に救急搬送、7月3日退院

協力会社員（作業員 B） 1名

意識あり、体調不良のため近隣病院に救急搬送、5月18日退院

なお、製油所近隣からの被害報告は無かった。

3-5 気象状況

2025年5月17日9時57分、観測点：本館屋上

天気 : 雨

風速 : 5.8 m/s

風向 : 南南東

気温 : 21 °C

湿度 : 100 %

WBGT : 21°C

4 事故当日の製油所の運転・作業状況

4-1 事故当日の運転状況・作業状況

以下に記述する 1)、2)、3)から、今回の事故において、発災箇所である 1st GTG 装置のフレア配管に存在したガスは、FCC 装置から送気された CAG と呼ぶガス以外にないことを確認した。

- 1) 1st GTG 装置が接続されているフレアヘッダー配管にガスを放出していた装置は、FCC 装置と 2nd GTG 装置のみであった。
- 2) 1st GTG 装置とフレアヘッダー配管との合流部に流れていたガスは、FCC 装置から放出された CAG であった。
- 3) 発災箇所の周辺装置からのガス漏洩は確認されなかった。

それぞれの確認結果を以下に示す。

1) D-2901 行きフレアヘッダー配管に接続された装置の操業とガス放出の状況

定期修理に向けて精製装置の停止作業を開始しており、1st GTG 装置は 5 月 14 日に停止され、5 月 17 日 9 時の段階で、装置内の窒素によるバージが完了しており、フレア配管内は窒素で置換されていた。

D-2901 行きフレアヘッダー配管に接続された各装置の操業状況およびフレアヘッダー配管への余剰ガスの放出の状況を、表 4-1-1 に示す。FCC 装置と 2nd GTG 装置からフレアヘッダー配管へ放出されており、図-4-1-1 にある通り、1st GTG 装置の上流側にある FCC 装置から CAG が放出されていた。通常、FCC 装置からの CAG は SRU 装置に送気されるが、その送気配管の閉塞により 5 月 10 日にフレアヘッダー配管への放出に変更されていた。

なお、5 月 14 日の CAG の分析結果では、硫化水素 25vol%、二酸化炭素 60vol%、炭化水素等 15vol% であり、それ以降、FCC 装置の運転状況は変わっていなかったため、5 月 17 日の発災時の CAG 中の硫化水素濃度も 25vol% であったと推定される。

2nd GTG 装置では、燃料切り替えのための運転操作が行われており、余剰ガスがフレアヘッダー配管に放出されていたが、2nd GTG 装置は 1st GTG 装置の下流側にあるため、その余剰ガスは 1st GTG 装置の方向ではなくフレアスタックの方向に流れていった。

FCC 装置および 2nd GTG 装置以外の装置からのフレアヘッダー配管への放出は、以下の確認の結果、行われていなかった。

- ✓ フレアヘッダー配管に接続されている安全弁および緊急降圧弁が作動していないことを確認した。
- ✓ 製油部門の作業記録および運転員へのヒアリングにより、各装置内にあるフレア配管とフレアヘッダー配管との縁切り弁が開放されていないことを確認した。

表-4-1-1-1：フレアヘッダー配管へのガス放出有無

装置	発災時の操業	フレアヘッダー配管への放出	ガス中の硫化水素	根拠
SF	運転	無し	—	・装置内圧力は安全弁や緊急降圧弁の設定圧力を超えていない
FCC	運転	有り	有り	・装置内圧力は安全弁や緊急降圧弁の設定圧力を超えていない ・CAGIはフレアヘッダー配管に放出
BCU	運転	無し	—	・装置内圧力は安全弁や緊急降圧弁の設定圧力を超えていない
PXU	停止	無し	—	・作業記録および運転員へのヒアリングにより、放出無しを確認
1st GTG	停止	無し	—	・作業記録および運転員へのヒアリングにより、放出無しを確認
2nd GTG	運転	有り	無し	・装置内圧力は安全弁や緊急降圧弁の設定圧力を超えていない ・燃料切り替えに伴い、燃料ガスをフレアヘッダー配管に放出
SWS	運転	無し	—	・装置内圧力は安全弁や緊急降圧弁の設定圧力を超えていない

2) 発災直前に D-2901 行きフレアヘッダー配管を流れていたガス (9 時 57 分頃)

発災直前に D-2901 行きフレアヘッダー配管内を流れていたガスの状況を図-4-1-1 に示す。1st GTG 装置のフレア配管とフレアヘッダー配管との合流部(赤丸)には、CAG(緑色)が流れていた。1st GTG 装置内においてフレア配管に接続されている配管の弁が閉止されていたため、発災箇所であるフレア配管内は窒素置換された状態(灰色)で保持されていた。CAG の流量は $120\text{Nm}^3/\text{hr}$ であり、2nd GTG 装置からのフレアヘッダー配管への燃料ガスの放出量は $3,389\text{Nm}^3/\text{hr}$ であった。フレアスタックで燃焼されていたガス総量は、D-401 系統からのガス流量も合わせ $13,640\text{Nm}^3/\text{hr}$ であった。

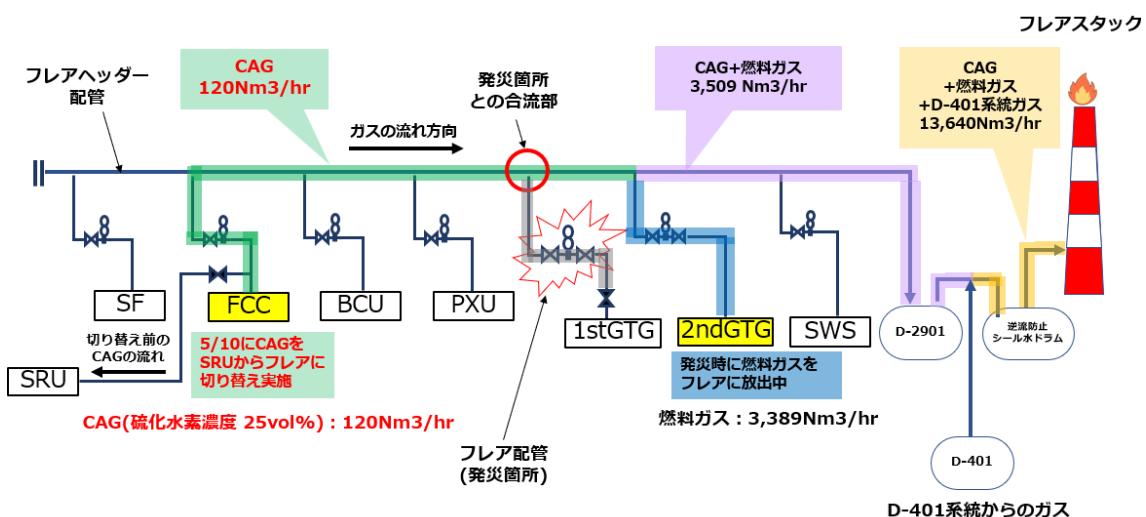


図-4-1-1 : フレアヘッダー配管内を流れていたガス

3) 発災箇所の周辺装置からのガス漏洩の可能性 (9時57分頃)

発災箇所の風上の装置から大気に放出されたものがないか確認した。図-4-1-2 で示す通り、発災当時の風向きは南南東であり、発災箇所の風上にある装置は、2nd GTG 装置、SWS 装置、冷却塔であるが、表-4-1-2 の通り、これらの装置においてガスを大気に放出するような事象はなかったことを確認した。

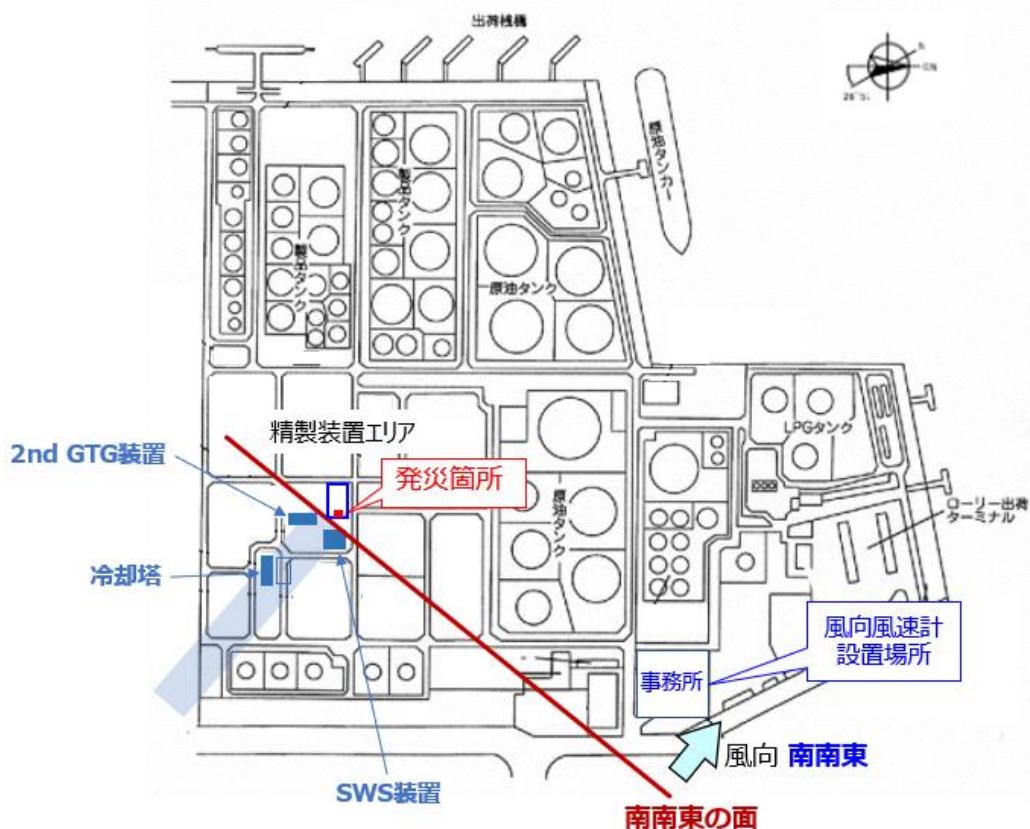


図-4-1-2：発災箇所の風上にある装置

表-4-1-2：風上の装置からのガス放出有無

風上にある装置	大気へのガス放出
2nd GTG装置	無し
SWS装置	無し
冷却塔	無し

5 事故の経緯

5-1 有毒ガス放出の経緯

2025年5月16日に、1st GTG 装置において、交替運転員によって窒素ガスによる装置内残留物の除害作業が実施された後、翌日の5月17日にENEOSの仕切板担当者である従業員Fの立会いのもと、協力会社の監督Dおよび作業員A、B、Cがフレア配管の縁切りのための仕切板挿入作業を実施していた。作業員Aが仕切板挿入箇所のフランジを開放したところ、高濃度の硫化水素を含むガスが放出された。協力会社の監督Eは当日フレア配管の前に行なった仕切板挿入作業の監督であり、この作業の際に地上にいた。監督EはSD作業の安全を統括する立場であり、作業員Aが倒れた後、監督Dは監督Eに報告するため地上に下りた。(図-5-1-1：発災直前のフレア配管における従業員Fと協力会社員の立ち位置およびバルブの位置)

なお、図-5-1-1の各ステージには手すりが設置されているが、図が煩雑になることを避けるために記載を省略している。また、発災箇所の実寸は図-5-1-2に示す通りであるが、本報告書内で説明に使用する発災箇所の図については、人物の位置や動きを分かり易く表現しやすい図-5-1-1を使用する。発災箇所であるフレア配管上に設置されているバルブについては、これ以降、フレアヘッダー配管側に設置されているものをV1バルブ、1st GTG装置側に設置されているものをV2バルブ、それらの間に設置されているブリーダーバルブをV3バルブと記載することとする。

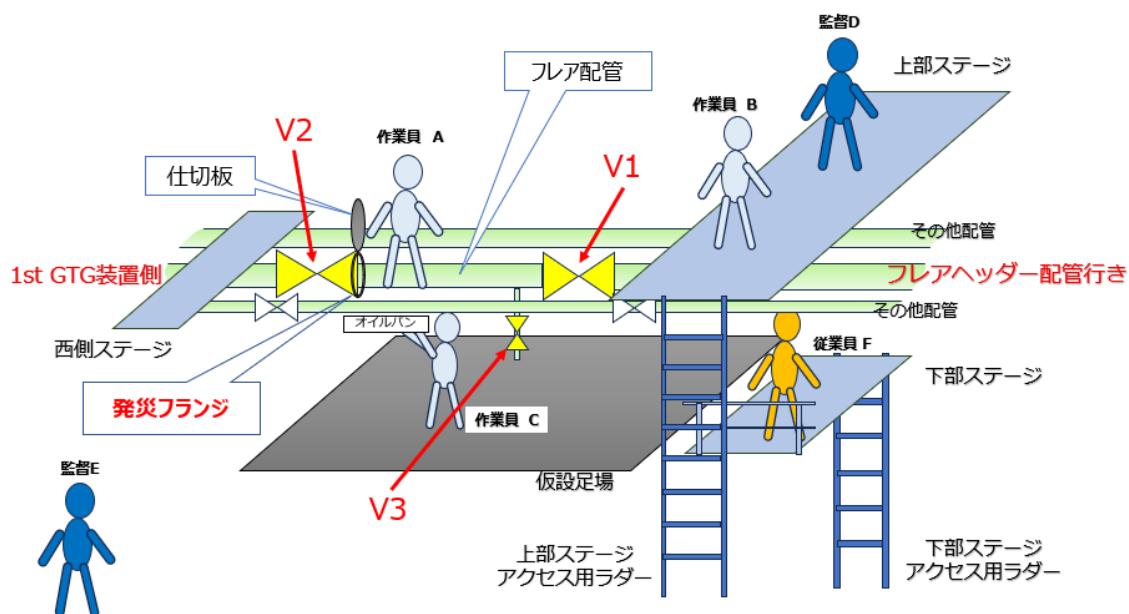


図-5-1-1：発災直前のフレア配管における従業員Fと協力会社員の立ち位置およびバルブの位置

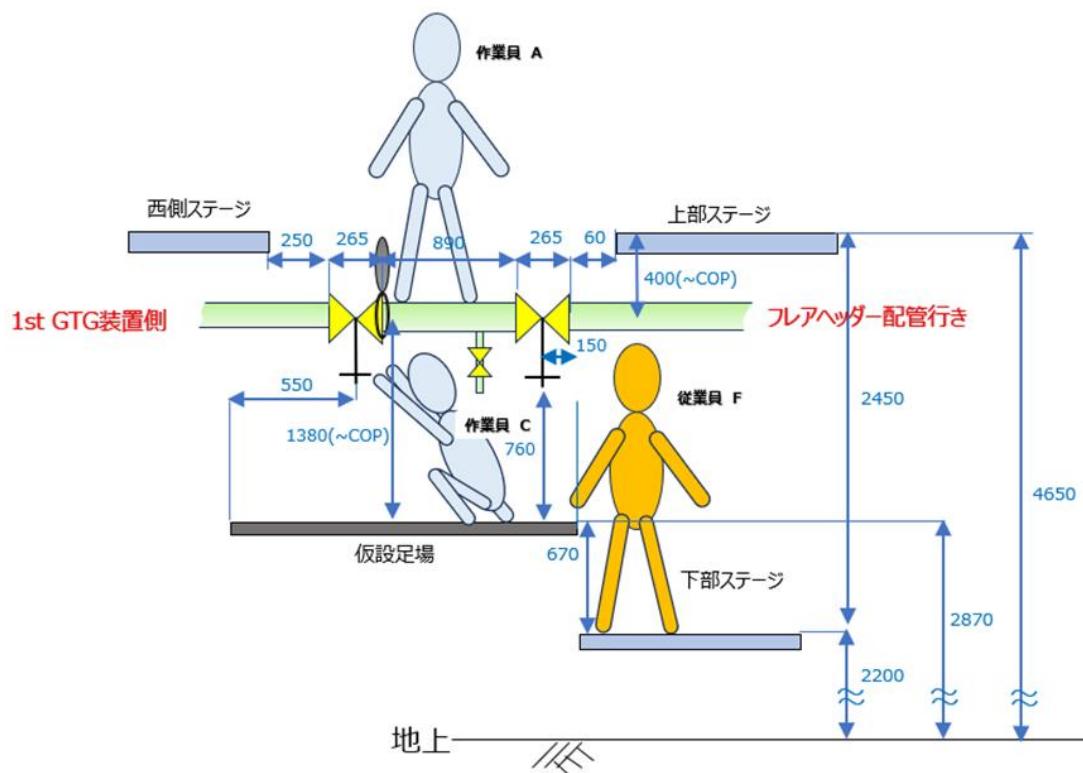
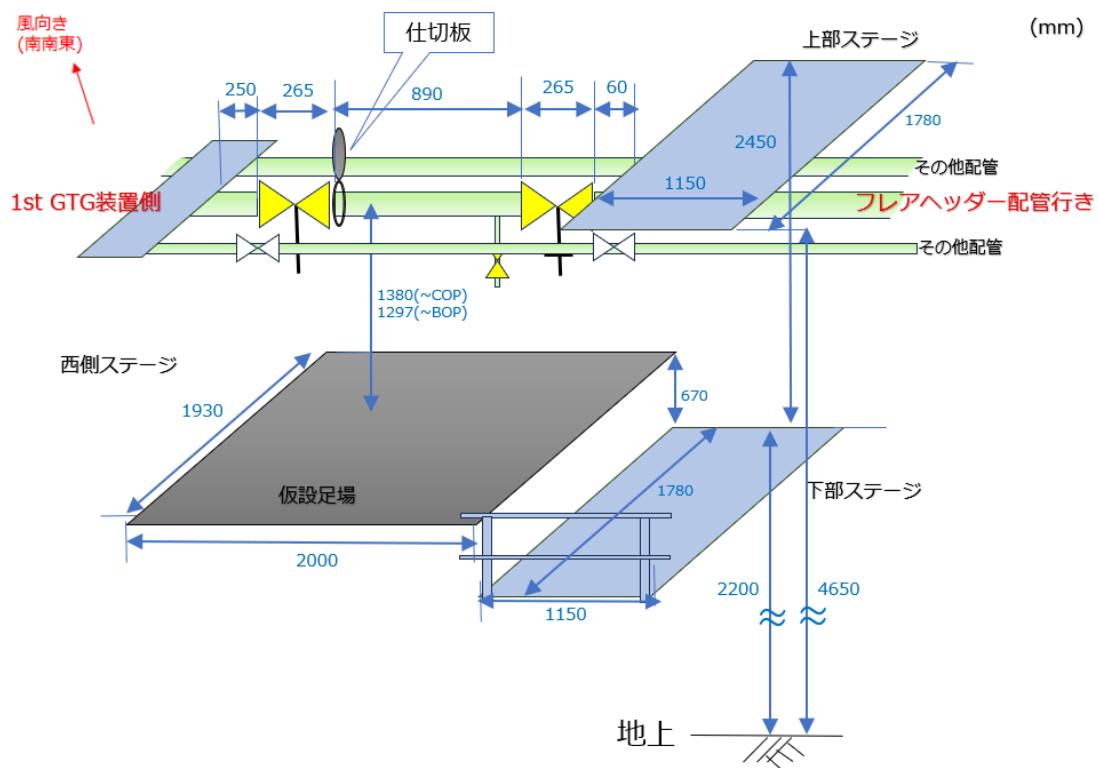


図-5-1-2：発災箇所の実寸

5 - 2 ばく露の経過

2025年5月16日

交替運転員によって、1st GTG 装置の装置内残留物の除害作業が実施され、フレア配管内が窒素ガスに置換された。

2025年5月17日（時刻は推定）

- 7:00 頃 仕切板担当者である従業員 F が、発災箇所の仕切板挿入作業の作業許可証を申請し、その作業許可証を班長が承認した。作業許可結果は協力会社の監督に届き、発災箇所が硫化水素サービスであることが示されていた。
- 9:00 頃 従業員 F および監督、作業員が現場に到着し、当日の作業を開始した。
発災箇所の仕切板挿入作業の前に、他の 2 箇所の仕切板挿入作業を実施した。
- 9:45 頃 発災箇所の仕切板挿入作業を開始した。作業員 A がフランジを開放し、仕切板を抜いた後、ガスが漏洩して作業員 A が倒れた。傍にいた作業員 B が作業員 A を救出しようとしたが倒れた。従業員 F は異変に気付き、その場にいた作業員 C に避難を指示し、監督 E に通報を指示した後、倒れている作業員 A, B の救出に向かった。作業員 B は従業員 F に搖さぶられることによって意識を取り戻し、そのまま避難した。その後、作業員 A を救出しようとした従業員 F も倒れた。
- 10:00 頃 地上にいた監督 E が 119 番通報を実施した。現場から計器室に向かった監督 D が道中で運転員へ報告した。その運転員が無線で計器室へ連絡し、直課長は人が倒れたことを覚知した。無線連絡した運転員が他の運転員 2 名とともに空気呼吸器(以降、「ライフゼム」と呼ぶ)をもって現場へ急行し、現場にてライフゼムを装着して救出作業を開始した。
- 10:07 頃 直課長から通報の指示を受けた班長が 119 番通報を実施した。
- 10:15 頃 漏洩箇所上下流の V1, V2 バルブが開いていたことに気づいた運転員が当該バルブを閉止した。
- 10:18 頃 現場に駆け付けた運転員が従業員 F および作業員 A の心臓マッサージを実施した。
その後、被災者を救急車にて近隣病院に救急搬送した。
- 10:40 頃 開放状態であった仕切板挿入箇所のフランジを運転員が閉止した。

5 - 3 救出活動

発災箇所の仕切板を抜いた作業員 A が倒れた後、上部ステージにいた監督 D はラダーを下りて、地上にいた監督 E に作業員 A が倒れたことを報告した。監督 E は監督 D に対して製油 1 グループへ状況を報告するよう指示した。監督 D は計器室への移動中に製油 1 グループ員に出会い、事故の報告をした。製油 1 グループ員は、無線で製油 1 グループのコンソールオペレーターに人が倒れたと連絡した。その際、直課長はその無線のやりとりで人が倒れたことを聞いたため、班長に救急車の要請を指示し、班長は救急車の要請を実施した。直課長は製油各グループの班長を招集し、工事は中止して避難させるよう指示した。また、製油副所長に電話をかけた後、現場に向かった。これらは、堺製油所の要領『硫化水素管理要領』などに基づく対応であった。

前述の製油 1 グループ員は無線で連絡したあと、計器室にライフゼムを取りに行つた。その際、2 人の製油 1 グループ員と合流して現地に向い、ライフゼムを装着した後、ラダーで上部ステージに上り、倒れている従業員 F および作業員 A を見つけた。従業員 F は作業員 A に覆いかぶさるように倒れていたため、最初に従業員 F を配管上から上部ステージ上まで運んだ。続いて、作業員 A を上部ステージまで運んだ。

その後、現場にかけつけた他の運転員が交代で従業員 F および作業員 A の心臓マッサージを実施した。レスキュー隊が現場に到着し、救急車にて被災者を病院へ搬送した。

5 - 4 ガス漏洩の停止

発災後に救出に向かった製油 1 グループ員が、従業員 F および作業員 A の救出の際、開放されたフランジから放出されたガスが、自身が着ていた合羽に吹き付ける状態であることに気づいた。これにより、開放箇所を縁切りするための V1 バルブが開いていると考え、バルブを閉止するために上部ステージからラダーで地上に下りて、別のラダーを上って下部ステージに向かった。もう一人の製油 1 グループ員も同様に上部ステージから地上に下りて、そこから下部ステージに移動した。

直課長が現場に到着した時、製油 1 グループ員は V1 バルブを閉止しようとしていた。その後、直課長が現場指揮所を設置した。

製油 1 グループ員は、V1 バルブを閉止していたが、途中でライフゼムの残圧が低下したため、地上に下りた。その後、もう一人の製油 1 グループ員が V1 バルブを閉止し、続いて V2 バルブを閉止した。

その後、あとから駆け付けた運転員が、開放されていたフランジを閉止した。

6 事故原因調査結果

6-1 事故発生のメカニズム、有毒ガスの特定とその特性

有毒ガスが存在したこと、有毒ガスが放出したこと、有毒ガスを吸引したこと、の3つの事象が発生したことにより、今回の事故が発生している。

6-1-1 発災現場に存在したガス

4-1 項に示す通り、発災箇所のフレア配管が接続されているフレアヘッダー配管には CAG が流れている。1st GTG 装置のフレア配管縁切り箇所の仕切板挿入作業のため配管のフランジを開放した際に、フレアヘッダー配管を流れていた CAG が開放されたフランジ側に流れてフランジから放出された。作業員 A と救出に向かった作業員 B および従業員 F がこの CAG を吸引したことで被災した。4-1 項のとおり、発災時の CAG の成分は、5月14日の分析結果から、硫化水素 25vol%、二酸化炭素 60vol%、炭化水素等 15vol% であったと推定しており、それらを吸引して被災したと推定される。

6-1-2 硫化水素による健康影響

硫化水素は無色透明の気体であり、視覚では認識できない。また、100~200ppm の硫化水素を吸引した場合、嗅覚麻痺を起こして臭気を感じなくなるとされている。硫化水素による健康影響は以下の表-6-1-1 の通りである。

表-6-1-1：硫化水素による健康影響

濃度 (ppm)	影響	備考
0.0081	独特な「硫化水素臭」を感じる	嗅覚閾値
5	不快臭・不快感	ばく露限界値 (ACGIH-TLVs TWA) であり、これを超えると健康影響（不快感や眼・気道の刺激など）を訴える作業者が始める
50~100	眼・気道の刺激	眼や気道の刺激など健康影響が出る濃度
100	気管支炎や肺炎、肺水腫等の発症	硫化水素100 ppmに連続ばく露した場合、数時間かけて肺水腫などの重篤な症状に進行する可能性がある。 肺水腫を発症すると体内でのガス交換ができなくなり、窒息死のリスクが高まる。 IDLH : 100ppm(30分以内に避難しなければ死亡または不可逆な障害を起こすリスクのある濃度)
100~200	嗅覚麻痺	嗅覚が麻痺して硫化水素臭を感じなくなる
500~1000	急激に意識を失う	意識を失ったあともばく露が続くと死に至る
1000~	即死	一瞬で意識を失い呼吸が止まる

出典：日本産業衛生学会 許容濃度等の提案理由（硫化水素）

出典：NIOSH (Hydrogen sulfide)

6-1-3 二酸化炭素による健康影響

二酸化炭素は無色透明の気体であり、視覚では認識できない。17～30vol%の二酸化炭素を吸引した場合、肉体のコントロールを失い、意識喪失や昏睡等の症状が現れ、その後、1分以内に死亡に至る可能性がある。30vol%以上の二酸化炭素を吸引した場合、数秒で意識喪失し、自発呼吸停止で死亡に至るとされている。（表-6-1-2）

表-6-1-2：二酸化炭素による健康影響

濃度(vol%)	影響	備考
3～5	頭痛、めまい、吐き気	30分程度の曝露で中毒症状の兆候 IDLH : 4vol%
7～10	数分で意識混濁または意識喪失	放置すれば呼吸中枢が抑制され、呼吸停止に至る
17～30	1分以内に意識喪失、痙攣、昏睡。急速に呼吸中枢が麻痺し、呼吸停止・死亡に至る。	
30以上	数秒で意識喪失し、1分以内に呼吸停止・死亡に至る。	行動の猶予なし

出典：NIOSH(米国国立労働安全衛生研究所 : Carbon dioxide)

出典：EPA(米国環境保護庁)

出典：NIH / PMC(米国国立衛生研究所)(PMC ID: 5380556)

6-1-4 酸欠霧団気による健康影響

大気中酸素濃度 6vol%未満の酸欠霧団気では、即座に痙攣、その後呼吸停止、心停止が続き、死亡に至るとされている。（表-6-1-3）

表-6-1-3：酸欠霧団気による健康影響

濃度(vol%)	影響	備考
16～19.5	労作（運動）を行うと、組織が酸素を十分に得られなくなり、急速に症状が出る。呼吸数増加、心拍数増加、思考力や協調性の低下	
12～16	安静時でも頻呼吸（呼吸数増加）、頻脈（心拍数増加）、注意力・思考力・協調性の障害が起こる	
10～14	最小限の労作でも、判断力の低下、断続的な呼吸、疲労困憊が予想される	
6～10	吐き気、嘔吐、無気力な動作、そして意識不明に至る可能性がある	
6	即座に痙攣、その後呼吸停止、心停止が続き、死亡に至る	

出典：OHSAS(米国労働安全衛生局)

6-1-5 従業員 F の健康影響

従業員 F が携帯していたガス検知器の測定記録において、従業員 F が作業員 A を救出した時点と思われる 10:00:32～10:01:31 の硫化水素濃度測定値の 1 分間平均が、ガス検知器の測定上限である 100ppm を超過して、これ以降は測定不能となっていた。また、従業員 F が携帯していたガス検知器では、二酸化炭素は測定できなかった。このため、ガス検知器の測定記録が残っている酸素濃度の測定値から、硫化水素濃度および二酸化炭素濃度を推算すると、表-6-1-4 に示す結果となった。これによると、死亡にいたるとされている濃度に最も早く達したのは硫化水素(1,000ppm 以上で即死)であり、二酸化炭素(30vol%以上で自発呼吸停止、死亡)はその 1 分程度後、酸素(6vol%未満で即座に呼吸停止、死亡)はその 3 分程度後であったことから、従業員 F の致死原因は硫化水素と特定した。この結果から、これ以降の調査は、従業員 F の死因を硫化水素中毒に絞って実施している。また、この死因については、後述の CFD 解析の中でもおおむね支持される結果となっている。

表-6-1-4：硫化水素濃度の推算結果

2025年5月17日	10:00	10:01	10:02	10:03	10:04	10:05
酸素,vol% (測定値)※1	-	12	10	7	6	5
硫化水素,vol% (測定値)※1	0.003 (30ppm)				測定上限超過	
硫化水素,vol% (計算値)※2		11	13	17	18	19
二酸化炭素,vol% (計算値)※2		25	31	40	43	46

※1:ガス検知器の測定値は、前1分間の測定値の平均値

※2:ガス検知器の硫化水素濃度は測定上限超過であるため、酸素の測定値からガス比率(空気(酸素 : 20vol%、窒素 : 80vol%)および放出ガス成分(硫化水素 : 25vol%、その他 : 75vol))より求めた計算値

※3:ガス検知器の二酸化炭素濃度は測定不可であるため、酸素の測定値からガス比率(空気(酸素 : 20vol%、窒素 : 80vol%)および放出ガス成分(二酸化炭素 : 60vol%、その他 : 40vol%))より求めた計算値

6 - 2 原因要素の抽出

6 - 2 - 1 硫化水素ガスの存在

5月10日以降、FCC装置からフレアヘッダー配管へのCAG放出が継続されており、そのフレアヘッダ配管には発災箇所である1st GTG装置のフレア配管が接続されている。CAG中の硫化水素の濃度は、4-1項に記載の通り、25vol%であったと推定している。

ただし、発災前日の5月16日に、1st GTG装置内は窒素ガスによる除害作業が実施されており、装置内の残存ガスは窒素で置換されてフレア配管を経由してフレアヘッダー配管に排出され、その後、1st GTG装置内の弁を閉止したため、フランジ開放前の発災箇所の配管内は窒素で置換された状態であった。（図-4-1-1：フレアヘッダー配管内を流れていたガス）

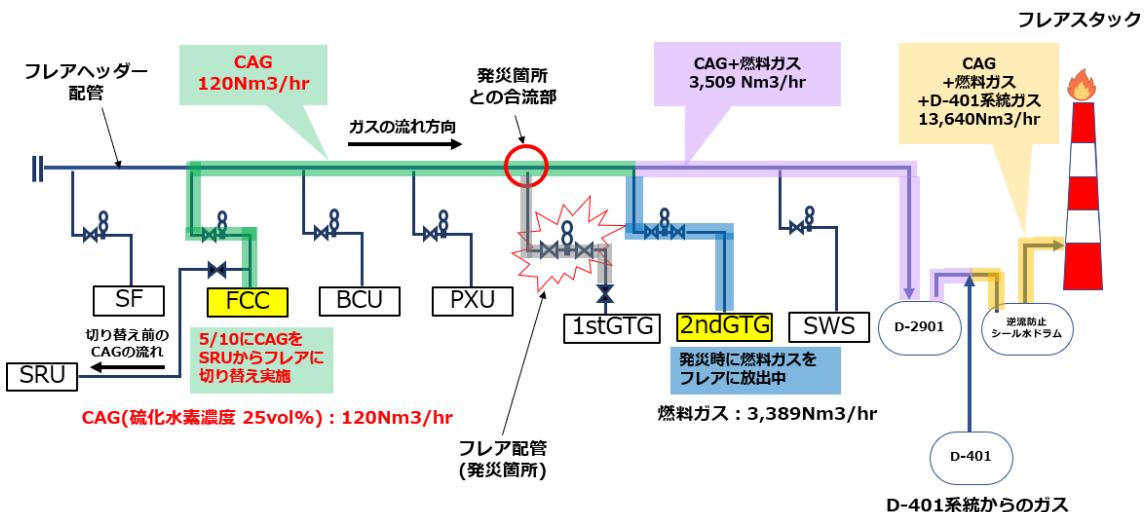


図-4-1-1：フレアヘッダー配管内を流れていたガス(再掲)

6 - 2 - 2 硫化水素ガスの放出

発災時、1st GTG 装置のフレア配管において仕切板挿入のためにフランジを開放した際、フレアヘッダー配管との間に設置されている V1 バルブと 1st GTG 装置との間に設置されている V2 バルブは開放されたままであった。(図-5-1-1)

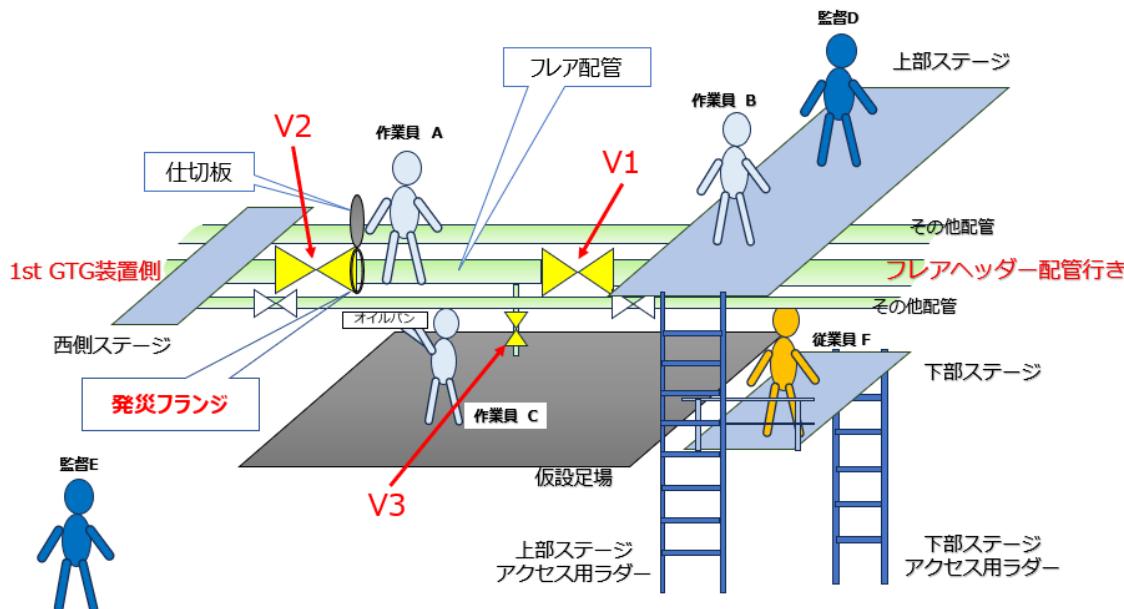


図-5-1-1：フレア配管における従業員 F と協力会社員の立ち位置およびバルブの位置(再掲)

フレアヘッダー配管と 1st GTG 装置フレア配管との合流部の推定圧力は、フレアヘッダー配管内を流れているガスの流量、配管サイズなどから推算した結果から約 6.5kPaG であったと推定され、フランジを開放した箇所の圧力が 0kPaG(大気圧)であることから、フレアヘッダー配管内の CAG が逆流し、開放箇所から大気に放出された。(図-6-2-1 : フレアヘッダー配管と 1st GTG 装置フレア配管との合流部の推定圧力) また、作業員 C などの証言から、開放されたフランジの隙間は 10mm であったと推定しており、その隙間からのガスの放出速度は 2.5m/s 程度であったと推定される。

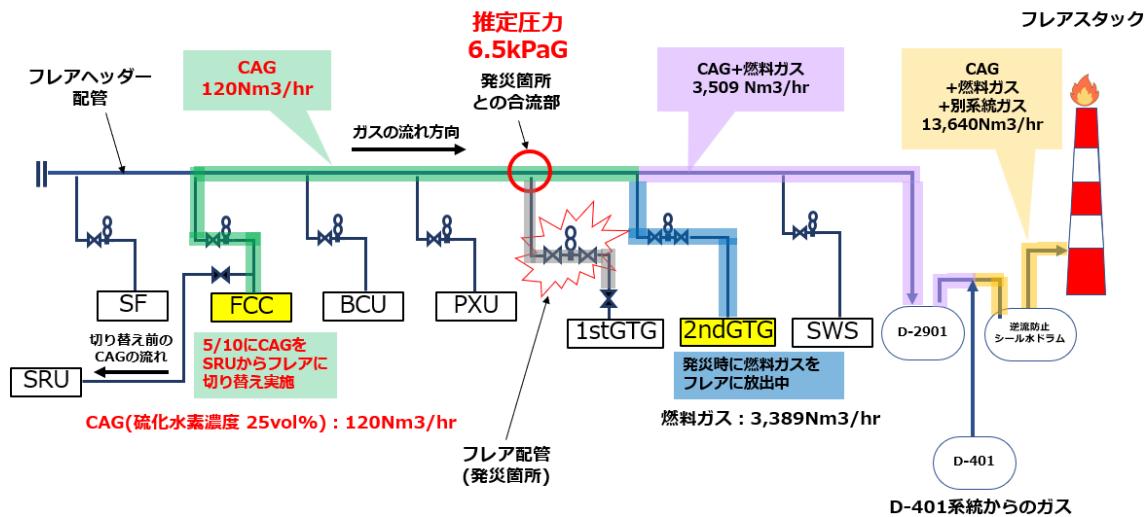


図-6-2-1：フレアヘッダー配管と1st GTG装置フレア配管との合流部の推定圧力

6 - 2 - 3 硫化水素ガスの吸引

(1) 発災時の状況

フレア配管のフランジが開放された後、その開放作業を実施していた作業員 A が配管上で倒れ、その作業員 A を救出しようとした作業員 B も上部ステージ上で倒れた。その後、下部ステージにいた従業員 F が地上を経由して上部ステージに救出に向かい、作業員 A に覆いかぶさるように倒れた。

作業員 B、監督 D、監督 E、救出者(製油 1 グループ員)へのヒアリング結果および従業員 F が携帯していたガス検知器(※：ガス検知器の仕様参照)の測定記録から、発災時の状況を推定した。ここで、従業員 F の立ち位置、行動およびその時間的な前後関係はすべて推定である。作業員 A、作業員 B、作業員 C、監督 D、監督 E の行動も正確な時間はわからないので推定である。

なお、本報告書中に記載されている「呼吸用保護具」は、エアラインマスクまたはライフゼムを指しており、防毒マスクは含まれない。

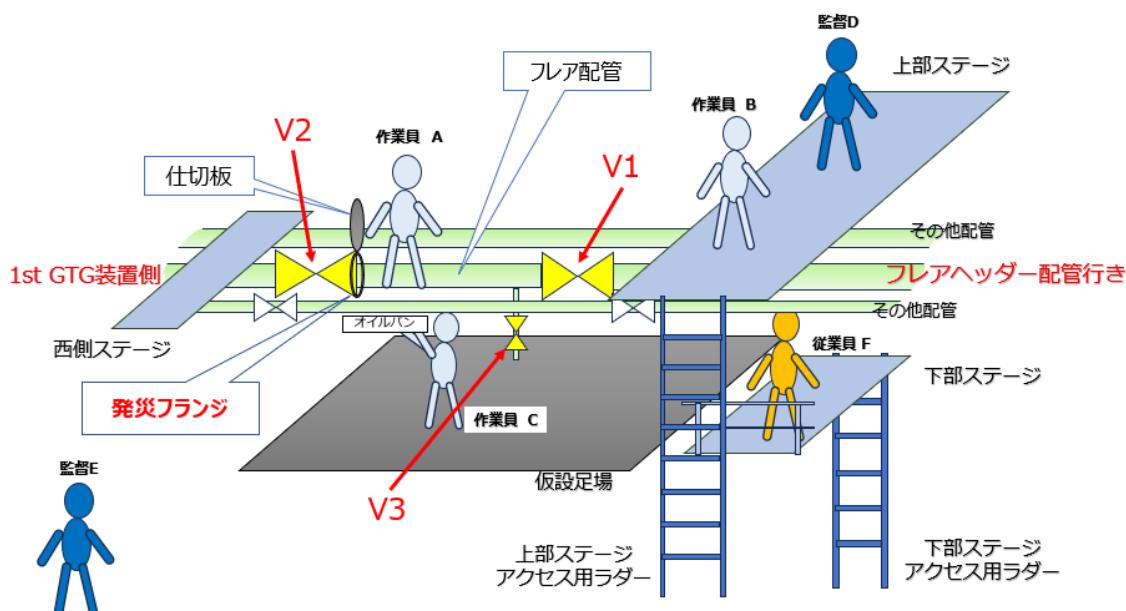


図-5-1-1 : フレア配管における従業員 F と協力会社員の立ち位置およびバルブの位置(再掲)

作業員 A が倒れた時点(09:57 時頃)

- ・(作業員 B の証言) 作業員 A は、発災箇所のフランジを開放して仕切板を抜いた後、作業員 B に仕切板を渡そうと移動している途中に配管上に倒れた。
- ・作業員 A は、作業開始時点では硫化水素が 5ppm 未満であったため、呼吸用保護具を装着していないかった。(図-6-2-2)
- ・(作業員 C の証言) この時、従業員 F は、下部ステージにいた。
- ・従業員 F が携帯していたガス検知器のアラームが吹鳴し、硫化水素濃度測定値の 09:57:31 時点の直近 1 分間平均が 56.5ppm であった。

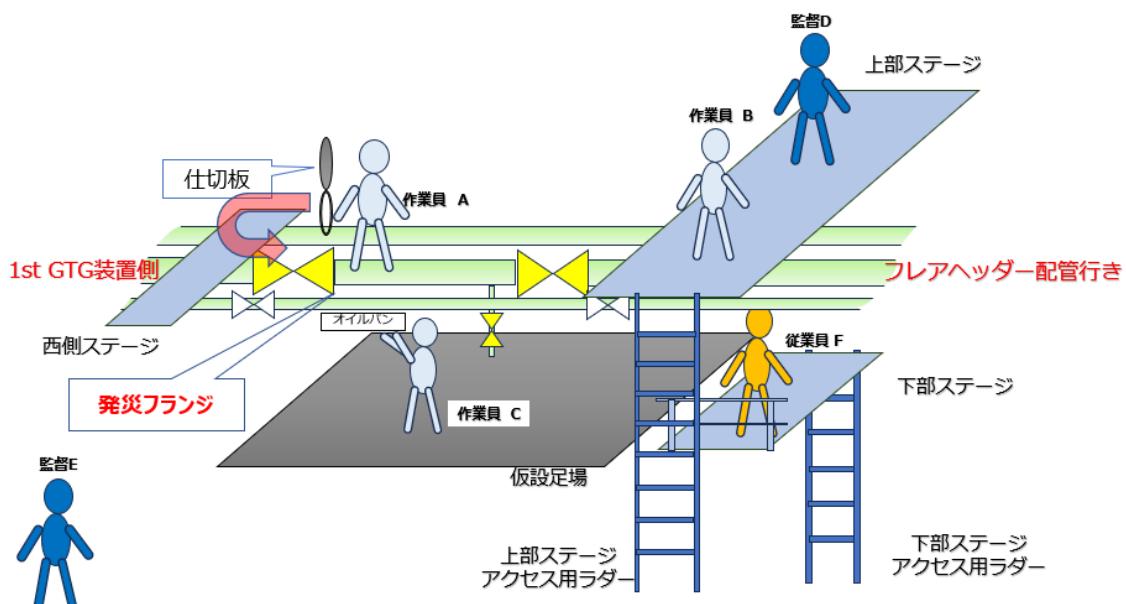


図-6-2-2：フレア配管における従業員 F と協力会社員の立ち位置(09:57 時頃)

作業員 B が作業員 A を救出しようとした時点(09:58 頃)

- ・(監督 D の証言) 監督 D は、作業員 A が脳卒中で倒れたと思い、地上にいた監督 E へ報告するためにラダーを使って上部ステージから地上に下りた。ラダーを下りる途中で自身が携帯していたガス検知器の硫化水素のアラームが吹鳴した。(図-6-2-3)
- ・(作業員 B の証言) 監督 D が地上に下りた後、作業員 B は、作業員 A を救出するために上部ステージから配管上に下りたが、危険を感じたため、上部ステージに戻った。その後、気を失って上部ステージ上に倒れた。

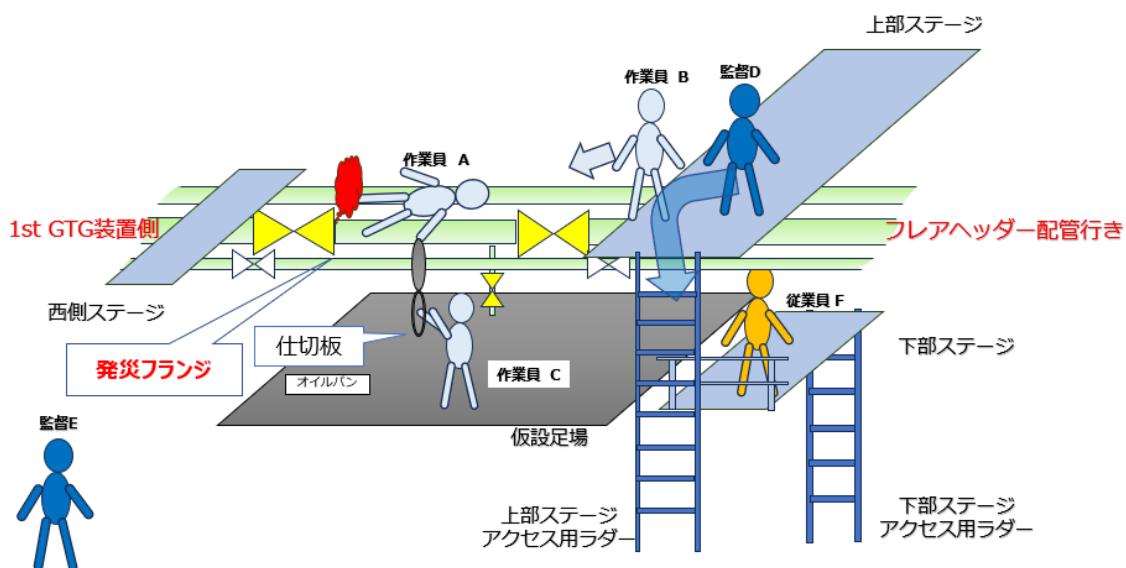


図-6-2-3：フレア配管における従業員 F と協力会社員の立ち位置(09:58 頃)

従業員 F が避難指示および通報指示をした時点(09:59～10:00 頃)

- ・(作業員 C の証言) 下部ステージにいた従業員 F は、地上にいた監督 E に通報を指示し、仮設足場にいた作業員 C に避難を指示した。(図-6-2-4)
- ・(作業員 C の証言) その後、上部ステージに向かうには地上にいったん下りなければならなかつたため、従業員 F は下部ステージからラダーで地上に下りた。
- ・従業員 F が携帯していたガス検知器では、硫化水素濃度測定値の 09:59:31 時点の直前 1 分間平均が 1.2ppm であった。
- ・従業員 F が、09:59:03 に携帯していたガス検知器のアラーム確認ボタンを押した。この際、硫化水素濃度がアラーム設定値未満であったため、吹鳴し続けていたアラーム音は停止した。
- ・従業員 F は、地上からラダーを使って上部ステージに移動したと推定している。その際、呼吸用保護具は装着していなかつた。
- ・(作業員 B の証言) 従業員 F は、上部ステージに倒れていた作業員 B を揺さぶって意識を回復させた。
- ・従業員 F が携帯していたガス検知器では、硫化水素濃度測定値の 10:00:31 時点の直前 1 分間平均が 25.8ppm であった。

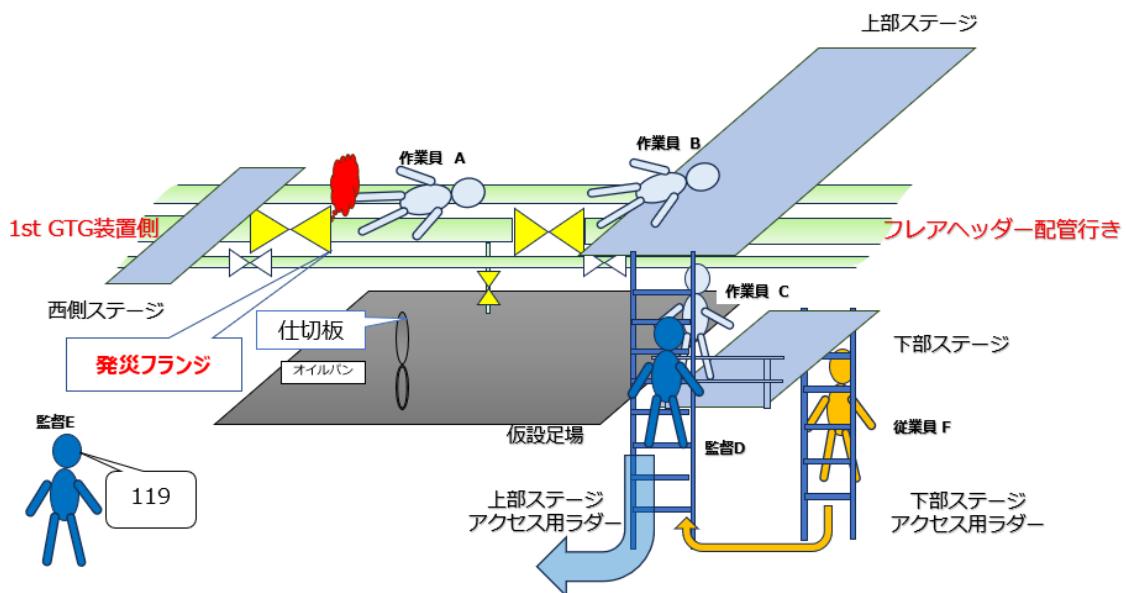


図-6-2-4 : フレア配管における従業員 F と協力会社員の立ち位置(09:59～10:00 頃)

従業員 F が作業員 A を救出しようとした時点(10:01 頃)

- ・(作業員 B、作業員 C の証言) 作業員 B および作業員 C は、それぞれ上部ステージおよび下部ステージから地上に避難した。(図-6-2-5)
- ・従業員 F は、作業員 A を救出するために上部ステージから配管上に下りたと推定される。
- ・(作業員 B の証言) その後、作業員 A に覆いかぶさるように倒れた。
- ・従業員 F が携帯していたガス検知器では、硫化水素濃度測定値の 10:01:31 時点の直前 1 分間平均が測定上限である 100ppm を超えて測定不能となった。

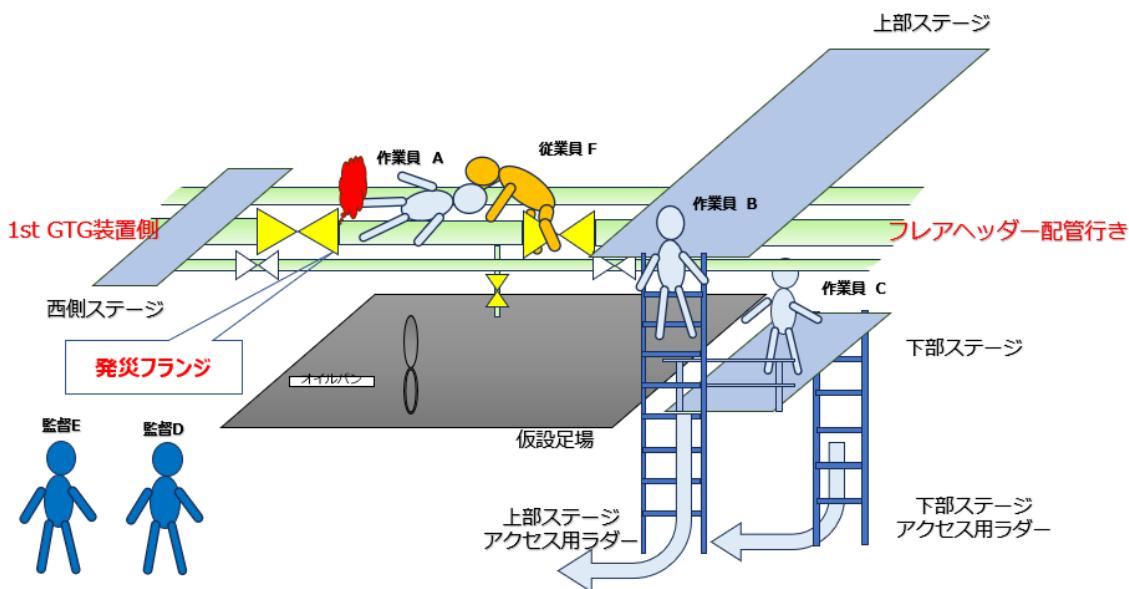


図-6-2-5：フレア配管における従業員 F と協力会社員の立ち位置(10:01 頃)

※：ガス検知器の仕様

- ・ドレーゲル社 X-am 5000
- ・硫化水素と酸素が測定可能
- ・硫化水素のアラーム設定値は、A1 が 5ppm、A2 が 10ppm
- ・測定データの 1 分間平均を電子媒体として記録可能
- ・なお、ガス検知器の時刻に標準時間とのずれがあったため、測定記録の時間を標準時間に補正した

(2) CFD 解析

CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析により、漏えいガスの拡散挙動の再現を試みた。計算には Ansys Fluent 2025R1 (業界標準の 1 つである Ansys 社製の CFD 解析ソフトの最新版) を用い、以下のケースを検討した。なお、解析手法、構造物の CFD モデル形状などの説明は、添付-1 : CFD 解析に関する補足資料に示す。

	ケース1	ケース2	ケース3
	形状①	形状②	
想定状況	9:57 作業員Aが倒れる前 (直前)	9:57 作業員Aが倒れた後 (直後)	10:01 作業員Aが倒れた後 (従業員 F が作業員 A を救出しようとした時点)
ガス放出速度	2.5 m/s		
風速	5.81 m/s		7.38 m/s

ア. 風向、風速

風向風速計は、発災箇所から東方向に約 600m の位置にある製油所事務所に設置されている計測器によって計測された値を使用した。(図-6-2-6 : 風向風速計の設置場所)

作業員 A が倒れた時点および従業員 F が作業員 A を救出しようとした時点の風向風速は、それぞれ当日の 09:57(風向 : 南南東、風速 : 5.81m/s)および 10:01(風向 : 南南東、風速 : 7.38m/s)に計測された値を使用した。

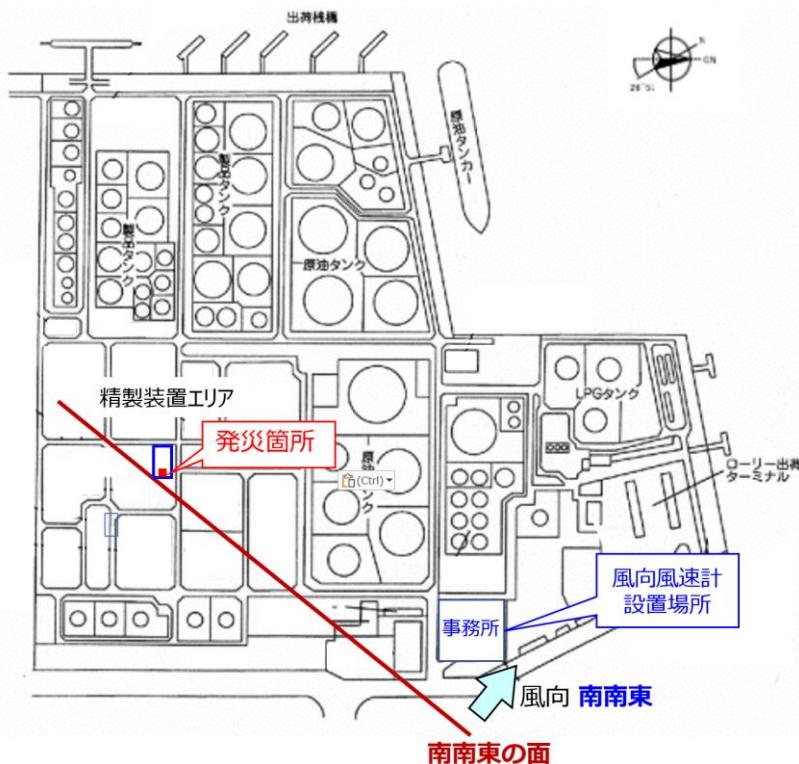


図-6-2-6 : 風向風速計の設置場所

イ. 確認方法

- ・硫化水素濃度について、嗅覚麻痺を起こすとされる 100ppm と、即死するとされる 1,000ppm の 2 つを設定し（表-6-1-1）、発災時において想定されるそれぞれの濃度の等値面（一定の硫化水素濃度の面で、この面の外側はより低濃度、内側はより高濃度）を青色および赤色として図を作成した。
- ・上記の等値面の図中に、それぞれの被災者の立ち位置を重ね合わせ、被災者の行動と健康影響の相関を確認した。
- ・なお、発災箇所のモデル形状とガス放出部は図-6-2-7 に示す通りである。

表-6-1-1：硫化水素による健康影響(再掲)

濃度 (ppm)	影響	備考
0.0081	独特な「硫化水素臭」を感じる	嗅覚閾値
5	不快臭・不快感	ばく露限界値 (ACGIH-TLVs TWA) であり、これを超えると健康影響（不快感や眼・気道の刺激など）を訴える作業者が始める
50～100	眼・気道の刺激	眼や気道の刺激など健康影響が出る濃度
100	気管支炎や肺炎、肺水腫等の発症	硫化水素100 ppmに連続ばく露した場合、数時間かけて肺水腫などの重篤な症状に進行する可能性がある。 肺水腫を発症すると体内でのガス交換ができなくなり、窒息死のリスクが高まる。 IDLH : 100ppm(30分以内に避難しなければ死亡または不可逆な障害を起こすリスクのある濃度)
100～200	嗅覚麻痺	嗅覚が麻痺して硫化水素臭を感じなくなる
500～1000	急激に意識を失う	意識を失ったあともばく露が続くと死に至る
1000～	即死	一瞬で意識を失い呼吸が止まる

出典：日本産業衛生学会 許容濃度等の提案理由（硫化水素）

出典：NIOSH (Hydrogen sulfide)

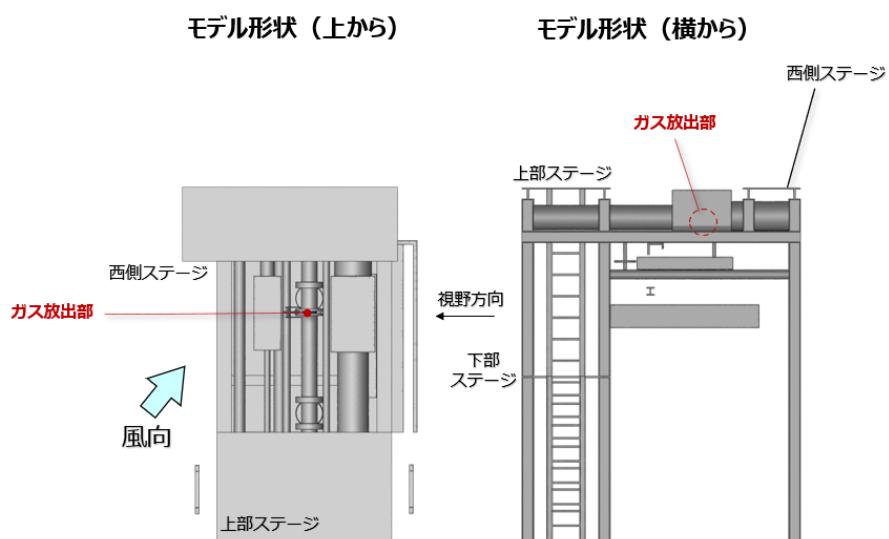


図-6-2-7：発災箇所のモデル形状とガス放出部

ウ. 被災者の行動と健康影響

以下に記載する被災者の行動および時間は、作業員 B および救出者(製油 1 グループ員)へのヒアリング結果等に基づいて推定したものである。

作業員 A

作業員 A は、発災箇所のフランジを開放した後、取り外した仕切板を上部ステージにいる作業員 B に渡そうと移動しているときに意識を失って配管上に倒れた。その後、救出されるまで、配管上に倒れた状態が 20 分程度続いた。作業員 A は、発災当日に意識喪失状態で近隣病院に救急搬送され、5 月 20 日頃から意識が回復し始め、7 月 3 日に退院している。

作業員 B

作業員 B は、作業員 A が配管上に倒れた後、作業員 A を救出しようと上部ステージから配管上に一時的に下りたが、危険を感じてすぐに上部ステージ上に戻った後に意識を失って倒れた。その後、従業員 F に身体を揺さぶられて意識を取り戻し、自力で上部ステージから地上に避難したが、意識を取り戻した後は、硫化水素の臭いを感じなかったと証言している。作業員 B は、発災当日に意識がある状態で近隣病院に救急搬送され、翌日 5 月 18 日に退院している。

従業員 F

従業員 F は、作業員 A が倒れた後、下部ステージから地上を経由して上部ステージに移動した。そこで、上部ステージに倒れていた作業員 B の身体を揺さぶって、作業員 B の意識を回復させた。続いて、作業員 A を救出するために、配管上に下りて作業員 A を持ち上げようとした際に、意識を失って作業員 A に覆いかぶさるように倒れた。その後、救出されるまで、配管上に倒れた状態が 20 分程度続いた。従業員 F は、発災当日に意識喪失状態で近隣病院に救急搬送され、その後に死亡が確認された。

工. 解析結果

1) 作業員 A の状況

作業員 A が倒れる直前から救出されるまでの間に、風速およびガス放出部の条件が経時に変化していた。よって、作業員 A が硫化水素ガスを吸引した状況については、①作業員 A が倒れる直前(風向：南南東、風速：5.81m/s)、②作業員 A が倒れた直後(風向：南南東、風速：5.81m/s、ガス放出部に変化あり)、③従業員 F が作業員 A を救出しようとした時点(風向：南南東、風速：7.38m/s)、の 3 つに分けて分析した。

① 作業員 A が倒れる直前(風向：南南東、風速：5.81m/s)

作業員 A は、仕切板を持って西側ステージ側から上部ステージ側に移動しており、その際に意識を失って倒れたため、配管上に立った状態で硫化水素ガスを吸引したと想定される。前述した健康影響から、作業員 A が吸引した硫化水素ガスの濃度は 100～1,000ppm 程度であったと推定される。この時点の CFD 解析で計算された 100ppm 等値面および 1,000ppm 等値面はそれぞれ図-6-2-8 および図-6-2-9 に示す通りであり、ガス放出部から放出された硫化水素ガスが上方向に拡散し、計算上の 100ppm 等値面は 100ppm 等値面よりも低い方向に広がっている。一方で、計算上の 1,000ppm 等値面は 100ppm 等値面よりも低い方向に広がっている。以上より、作業員 A は致死濃度の硫化水素を吸引していなかったことをおおむね支持する結果となった。

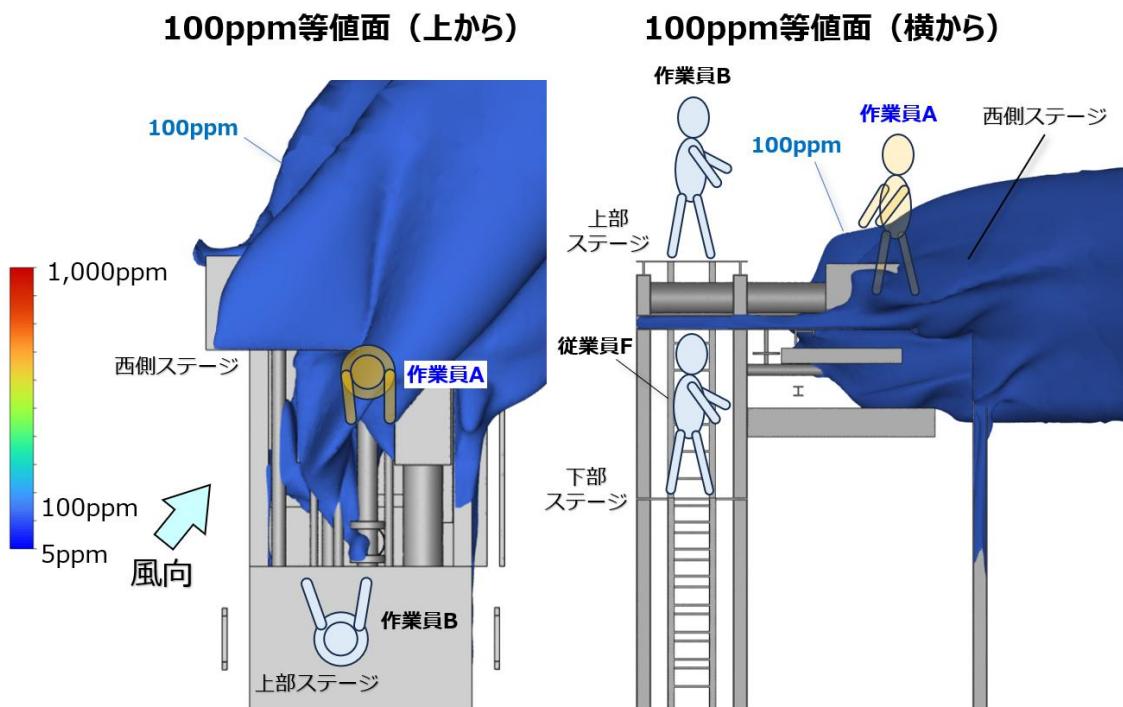


図-6-2-8：作業員 A が倒れる直前の硫化水素ガス 100ppm 等値面

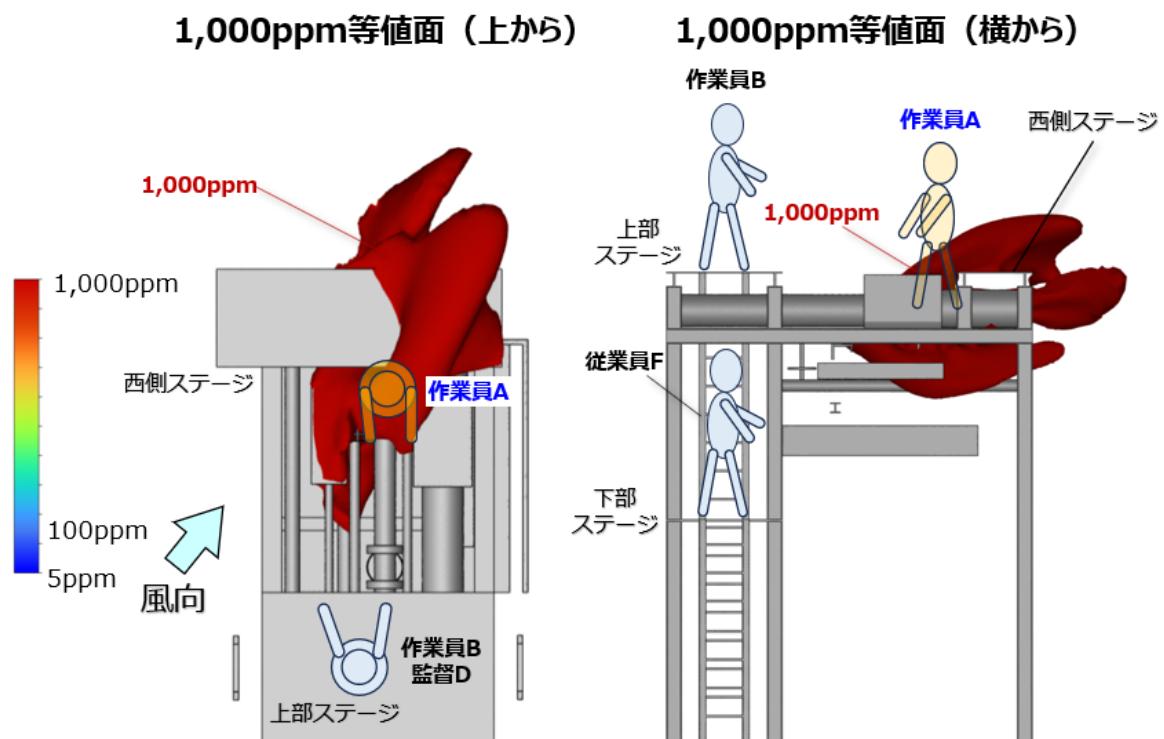


図-6-2-9：作業員 A が倒れる直前の硫化水素ガス 1,000ppm 等値面

② 作業員 A が倒れた直後(風向：南南東、風速：5.81m/s)

作業員 A は、片脚が開放されたフランジに一部かかった状態になり、救出されるまでその姿勢は変わらなかったと推定している。前述した健康影響から、作業員 A が吸引した硫化水素ガスの濃度は 100 ~1,000ppm 程度であったと推定される。この時点の CFD 解析で計算された作業員 A の頭の高さにおける硫化水素ガスの濃度分布は図-6-2-10 に示す通りであり、計算上は作業員 A の顔付近の硫化水素ガスの濃度はその周囲よりも相対的に低くなっている。以上より、作業員 A は致死濃度の硫化水素を吸引していなかったことをおおむね支持する結果となった。

作業員Aの頭の高さでの硫化水素ガス濃度-等値面（上から）

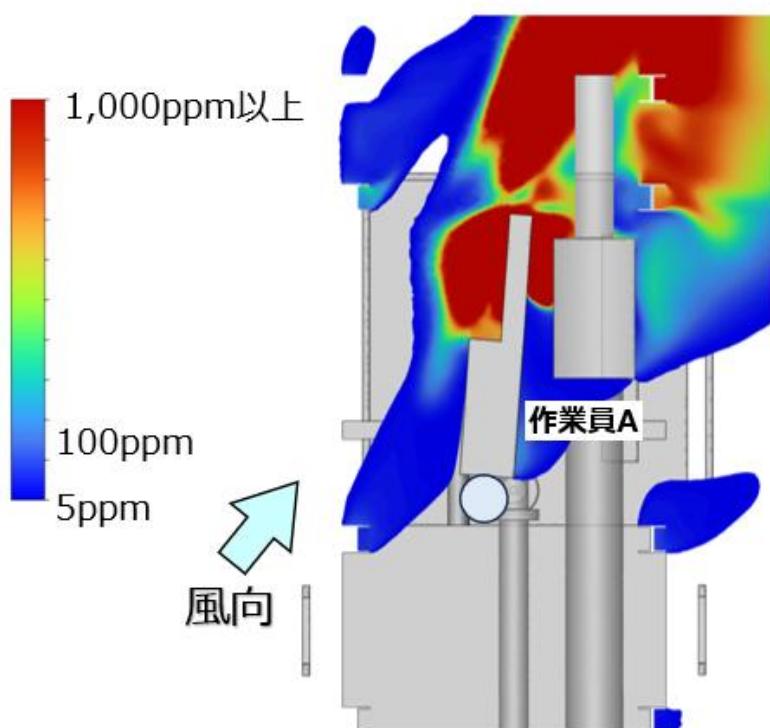


図-6-2-10：作業員 A が倒れた直後における作業員 A の頭の高さの硫化水素ガス濃度

③ 従業員 F が作業員 A を救出しようとした時点(風向：南南東、風速：7.38m/s)

作業員 A は、配管上に倒れた後、救出されるまでその姿勢は変わっていなかったと推定している。前述した健康影響から、作業員 A が吸引した硫化水素ガスの濃度は 100~1,000ppm 程度であったと推定される。この時点の CFD 解析で計算された作業員 A の頭の高さにおける硫化水素ガスの濃度分布は図-6-2-18 に示す通りであり、計算上は作業員 A の顔付近の硫化水素ガスの濃度はその周囲よりも相対的に低くなっている。以上より、作業員 A は致死濃度の硫化水素を吸引していなかったことをおむね支持する結果となった。

作業員Aの頭の高さでの硫化水素ガス濃度-等値面（上から）

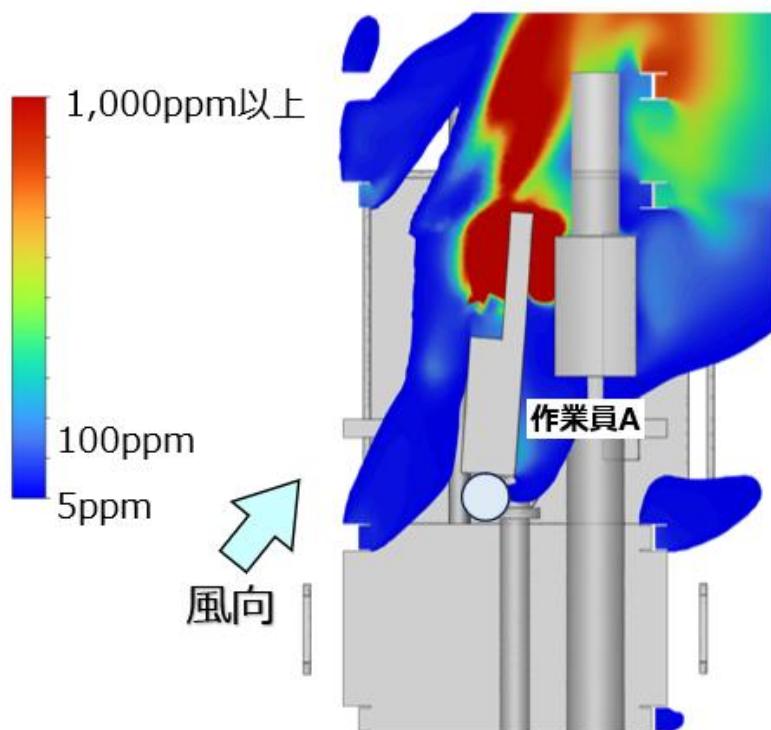


図-6-2-18：従業員 F が作業員 A を救出しようとした時点における作業員 A の頭の高さの硫化水素ガス濃度

2) 作業員 B の状況

作業員 B は、上部ステージから配管上に一時的に下りて、危険を感じてすぐに上部ステージ上に戻ったため、配管上の上部ステージにごく近い位置で硫化水素ガスを吸引したと推定している。よって、作業員 B が硫化水素ガスを吸引した状況については、作業員 A が倒れた直後の条件(風向：南南東、風速：5.81m/s)で分析した。

前述した健康影響から、作業員 B が吸引した硫化水素ガスの濃度は 100～200ppm 程度であったと推定される。この時点の CFD 解析で計算された 100ppm 等値面および 1,000ppm 等値面はそれぞれ図-6-2-11 および図-6-2-12 に示す通りであり、計算上の 100ppm 等値面が作業員 B の足元に向かって広がっている。一方で、計算上の 1,000ppm 等値面は 100ppm 等値面よりもさらに低い方向に広がっている。以上より、作業員 B は致死濃度の硫化水素を吸引していなかったことをおおむね支持する結果となった。

なお、このあと作業員 B は従業員 F に揺さぶられることによって意識を取り戻しているが、作業員 B はその後硫化水素の臭いを感じなかつたと証言しているため、作業員 B が吸引した硫化水素ガスの濃度は嗅覚が麻痺する程度(100～200ppm)であったと推定する。

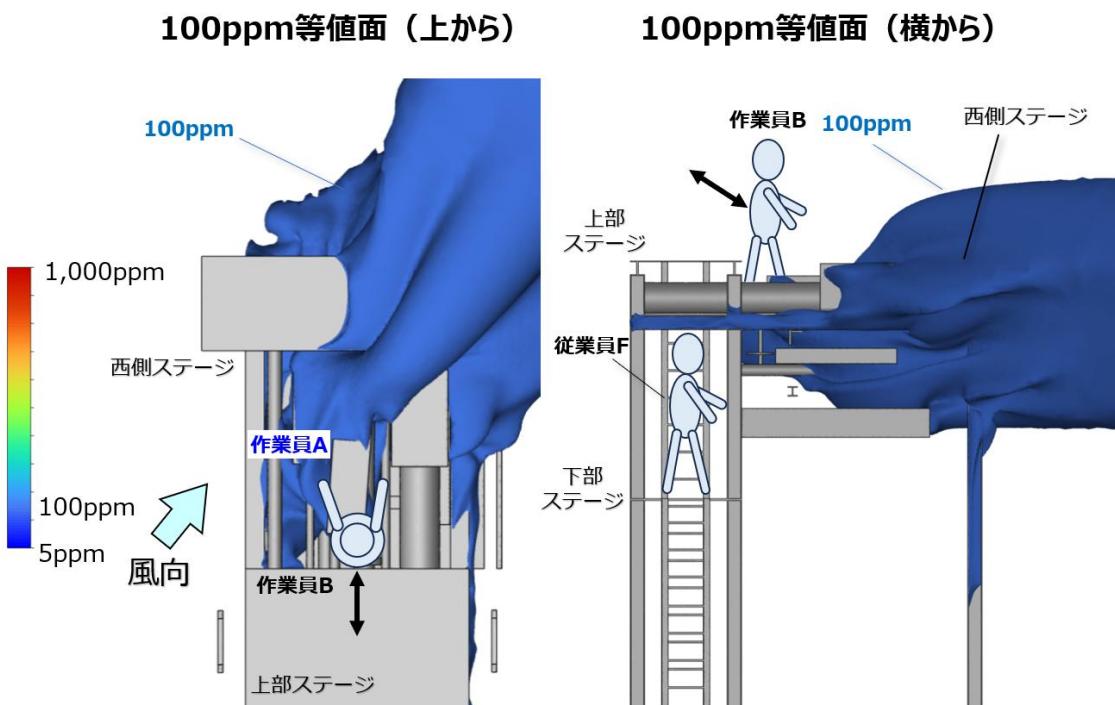
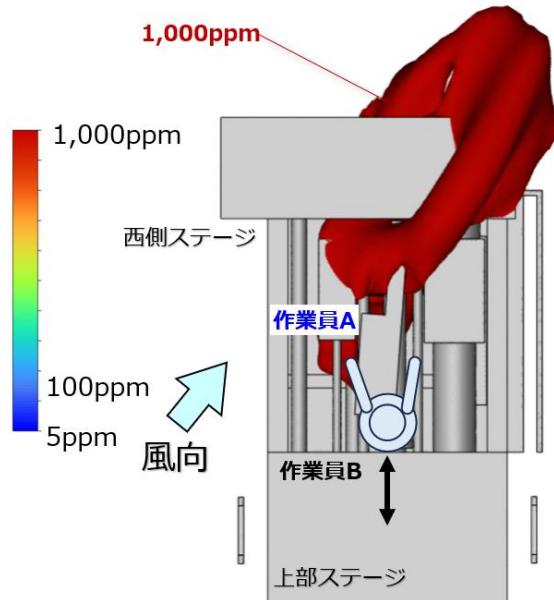


図-6-2-11：作業員 A が倒れた後の硫化水素ガスの 100ppm 等値面

1,000ppm等値面（上から）



1,000ppm等値面（横から）

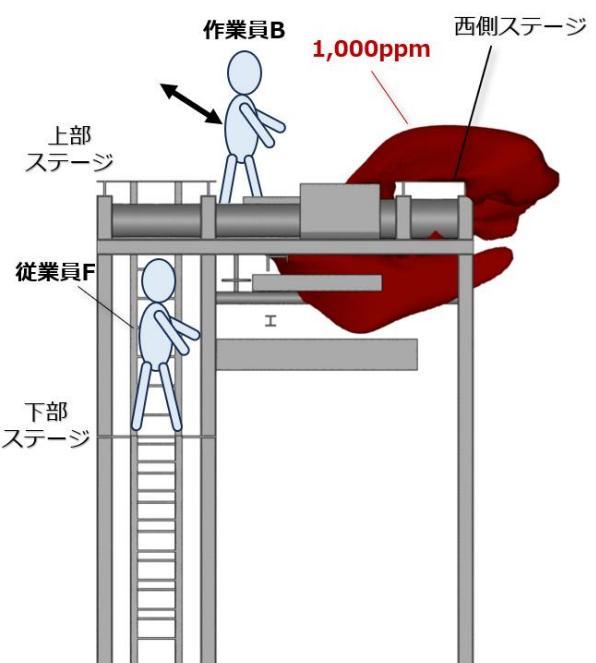


図-6-2-12：作業員 A が倒れた後の硫化水素ガスの 1,000ppm 等値面

3) 従業員 F の状況

従業員 F は、上部ステージから配管上に下りて、作業員 A を抱きかかえようと前かがみになったときに硫化水素ガスを吸引したと推定する。よって、従業員 F が硫化水素ガスを吸引した状況については、従業員 F が作業員 A を救出しようとした時点の条件(風向：南南東、風速：7.38m/s)で分析した。

前述した健康影響から、従業員 F が吸引した硫化水素ガスの濃度は 1,000ppm 以上であったと推定される。この時点の CFD 解析で計算された 100ppm 等値面および 1,000ppm 等値面はそれぞれ図-6-2-13 および図-6-2-14 に示す通りであり、計算上の 100ppm 等値面が従業員 F の頭に向かって広がっている。また、計算上の 1,000ppm 等値面についても従業員 F の頭に向かって広がっている。以上より、従業員 F は致死濃度の硫化水素を吸引したことをおおむね支持する結果となった。

なお、この時点の二酸化炭素濃度 4vol%(IDLH)および 30vol%(意識喪失、自発呼吸停止・死亡)、酸素濃度 6vol%(即座に痙攣、呼吸停止、死亡)の等値面は図-6-2-15～図-6-2-17 に示す通りで、開放されたフランジの直近となっており、硫化水素ガスの計算上の 1,000ppm 等値面よりもかなり内側であることが分かる。これにより、従業員 F の死因は、4-1 項に記載した通り、硫化水素中毒であったことをおおむね支持する結果となった。

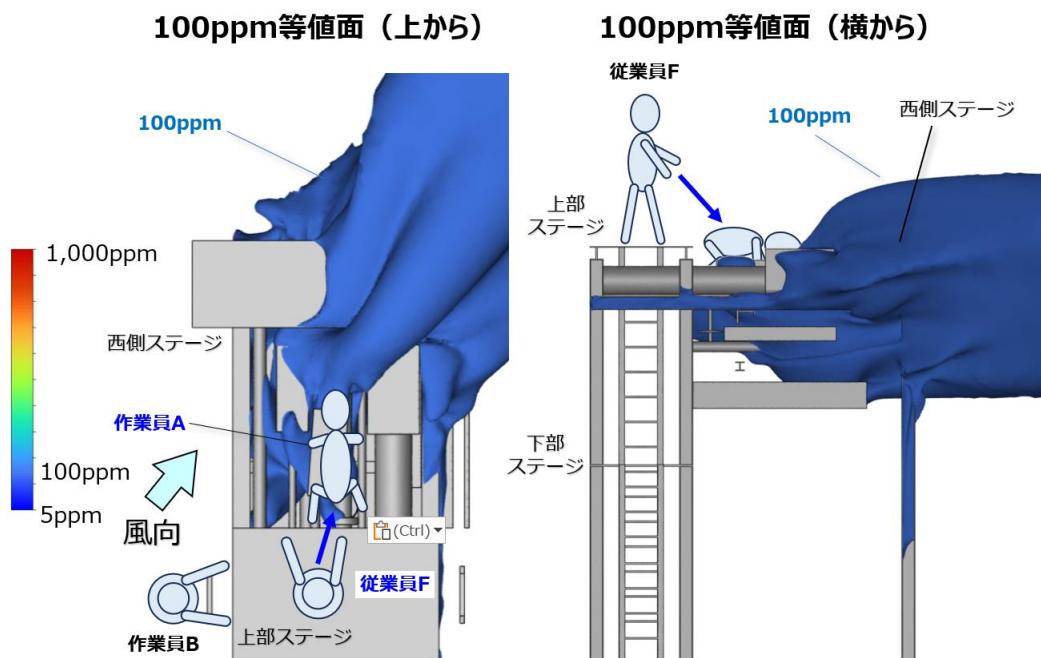


図-6-2-13：従業員 F が作業員 A を救出しようとした時点の硫化水素ガス 100ppm 等値面

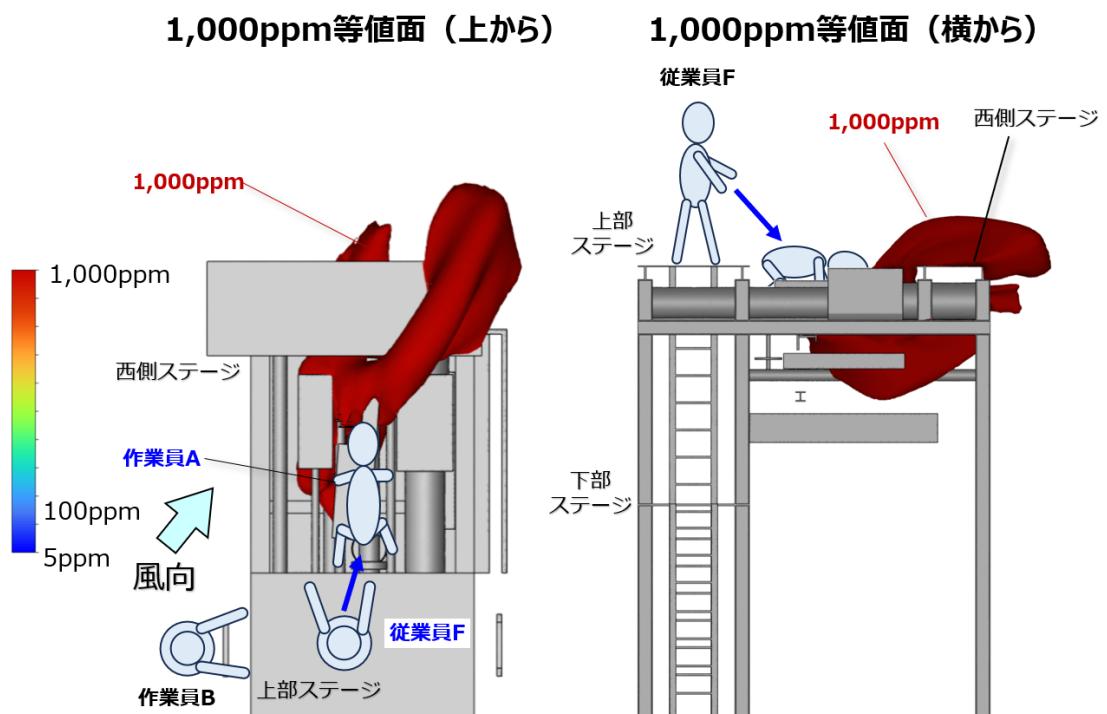


図-6-2-14：従業員 F が作業員 A を救出しようとした時点の硫化水素ガス 1,000ppm 等値面

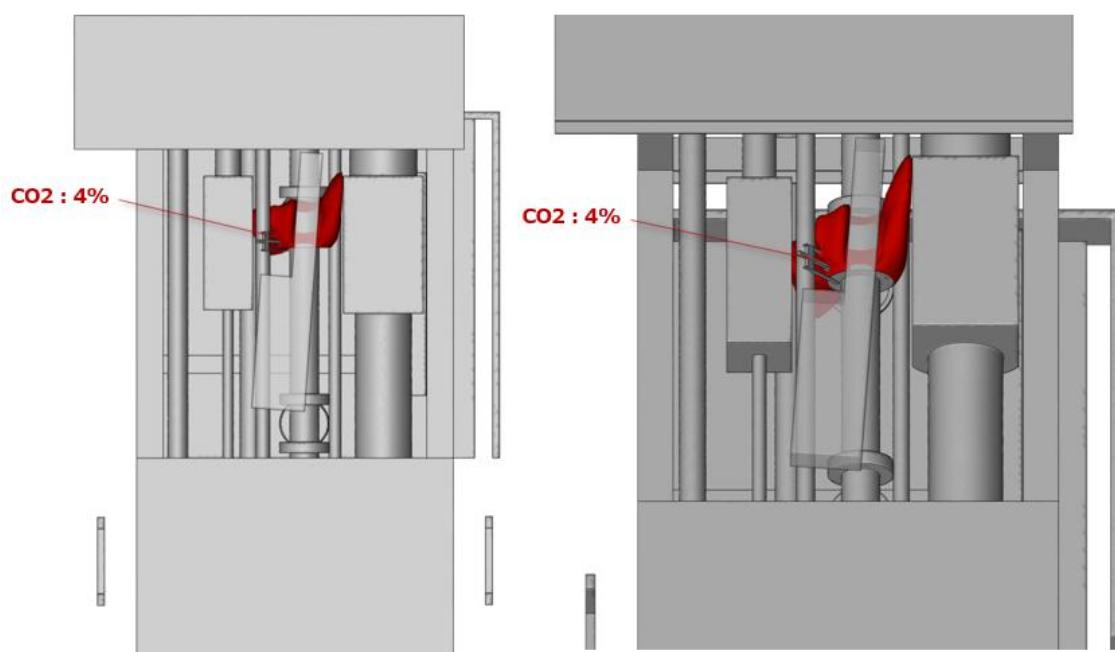


図-6-2-15：従業員 F が作業員 A を救出しようとした時点の二酸化炭素 4vol%等値面(赤色)

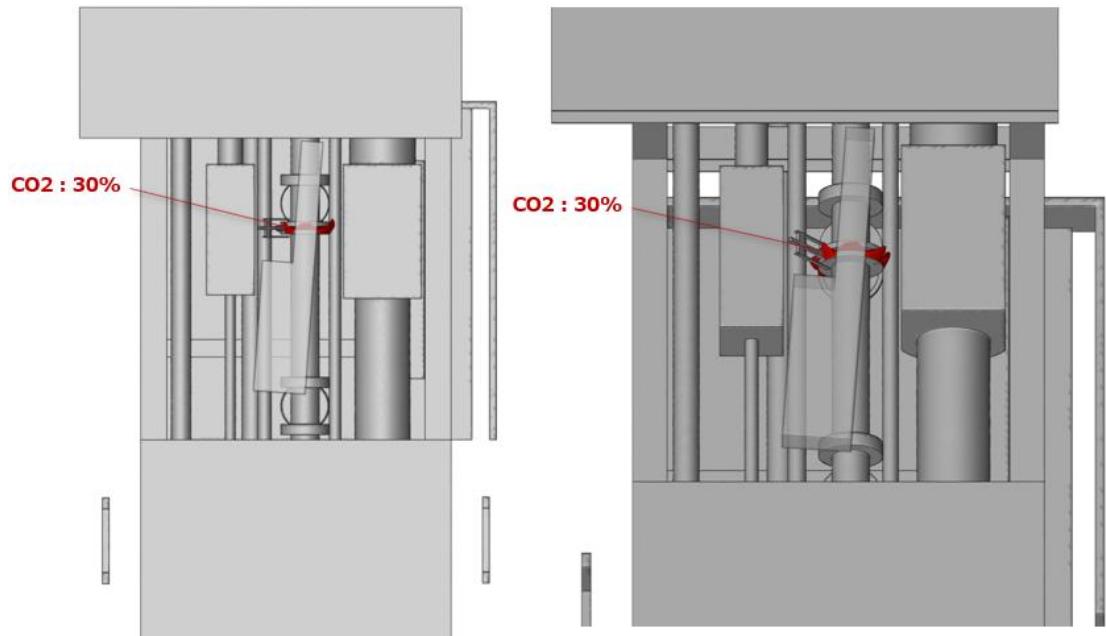


図-6-2-16：従業員 F が作業員 A を救出しようとした時点の二酸化炭素 30vol%等値面(赤色)

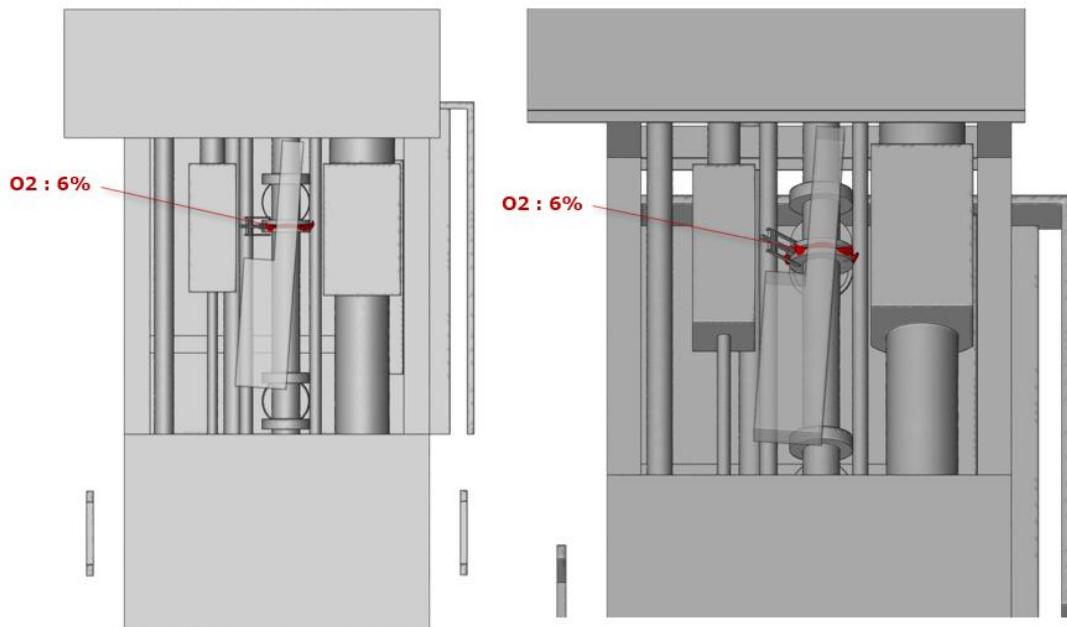


図-6-2-17：従業員 F が作業員 A を救出しようとした時点の酸素 6vol%等値面(赤色)

6-3 原因要素の発生理由

6-3-1 硫化水素ガスの存在

通常、FCC 装置の CAG は、SRU 装置に送気され、硫黄製品となる。本来の定期修理工程では、両装置を停止する 5 月 24 日までその状態が維持される予定であったが、5 月 10 日に FCC 装置から SRU 装置への CAG 送気配管が閉塞したため、SRU 装置行きのバルブを閉止し、フレアヘッダー配管に送気先を切り替えていた。その結果、5 月 17 日に 1st GTG 装置のフレア配管への仕切板挿入作業を実施する際には、フレアヘッダー配管には FCC 装置から放出された CAG が流れていた。

FCC 装置から SRU 装置への CAG 送気配管は、過去からスチームトレースが設置されていない箇所がある等の理由により温度低下による塩析出が発生していた。また、前回の 2023 年定期修理において、FCC 装置で使用されている硫化水素抽出液を 1 級アミンから 3 級アミンに変更して以降、CAG 送気配管の閉塞頻度が上がっていた。当該配管の塩析出による閉塞は冬季に発生する傾向があり、前回のクリーニングは 2025 年 2 月であったことから、気温が上昇してきた 5 月に閉塞が発生することは想定されていなかった。

フレアヘッダー配管への CAG 放出は手順化されており、SOx 環境規制値以下で管理できていたことと、定期修理に伴う装置停止が間近であったことから、CAG 送気配管のクリーニングはすぐには実施されず、CAG はフレアヘッダー配管に送気され続けていた。

6-3-2 硫化水素ガスの放出

フレア配管の仕切板挿入作業において、仕切板が挿入されているフランジを開放した際に事故は発生している。仕切板挿入作業の環境整備作業として、開放フランジの上下流バルブの閉止、ブリーダーバルブでの圧抜きおよび閉止した上下流バルブに漏洩がないことの確認が実施されるが、6-2-2 項にあるように、事故発生時、フレアヘッダー配管との縁切りバルブである V1 バルブおよび V2 バルブは全開であった。また、圧抜きができていることと V1 バルブおよび V2 バルブに漏洩がないことを確認するために使用する V3 バルブは微開(3 山分)となっていたが、事故後の調査で、V3 バルブは堆積したスラッジで閉塞しており、貫通されていなかったことが分かっている。

『定修作業許可手続要領 附属 定修仕切板反転作業許可手続手順』には、仕切板挿入作業の着工前安全確認として、縁切りおよび圧抜きができていることを確認し、「圧抜き・ページが出来ていない場合は、一旦作業を中断させ対処法を検討の上、班長または区域担当 GM・直課長に報告・相談すること」と記載されているが、縁切りが実施されておらず、圧抜き・ページが確認できていない状態で、作業を中断せずに、仕切板挿入のためにフランジ開放作業を進めてしまったために、ガスが放出された。

6-3-3 硫化水素ガスの吸引

作業員 A は、フレア配管のフランジを開放して仕切板を取り外した後、作業員 B に仕切板を渡そうとした際に、硫化水素を吸引して倒れている。その後、従業員 F が呼吸用保護具を装着せずに救出に向かい、硫化水素を吸引して倒れている。

6-2-3 項に記したように、作業員 A が倒れた際に、従業員 F は下部ステージにいたと推測され、開放したフランジから漏洩したガスによって従業員 F が携帯していたガス検知器のアラームが吹鳴し、硫化水素濃度測定値の 1 分間平均値が 56.5ppm となっていた。従業員 F はガス検知器のアラーム確認ボタンを押していたため、硫化水素が検知されていることを認識していたものと推定している。

今回の仕切板挿入作業で使用する『重要非定常作業手順書』は、リスクアセスメントの結果に基づいて従業員 F が作成しており、そこには「ブロックバルブのリークが大量である場合は作業を中断し、速やかに縁切り箇所を変更」と記載されているが、V1 バルブおよび V2 バルブが全開となっていることに気づいていなかったと推定され、この時点で既に嗅覚が麻痺していて大量漏洩を認識できていなかつた可能性がある。

6-2-3 項にあるように、その後、従業員 F は、作業員 C に対して仮設足場からの避難、監督 E に対して救急車の通報を指示した後、地上に下りて直ちに上部ステージへと昇ったと推定している。上部ステージ上には作業員 B が倒れており、従業員 F は作業員 B を揺さぶって意識を回復させた後、続いて作業員 A の救出に向かい、その上に倒れることとなる。

従業員 F は、下部ステージにおいて硫化水素を一度は覚知したと推定するが、以下の理由・状況から呼吸用保護具を装着せずに作業員を救出できると思いこんだと推定する。

- ✓ 下部ステージにおいて硫化水素を覚知した際、硫化水素濃度測定値の 1 分間平均が 56.5ppm に上がり、瞬間的には 100ppm 以上となった可能性があることから、この段階で嗅覚が麻痺し、それが継続されていたものと推定する。
- ✓ 従業員 F は、監督 D が上部ステージから地上まで下りてきたこと、および、ガス検知器のアラーム確認ボタンを押して硫化水素濃度が 5ppm 未満に低下していることを確認していたことから、呼吸用保護具無しでも上部ステージまで上れると考えた可能性がある。なお、従業員 F は作業員 C への避難指示をしたが、もう一人の作業員 B が上部ステージから下りていなかつたため、作業員 B も避難させようと考えたものと推定する。
- ✓ 上部ステージまで上ったところで、倒れていた作業員 B を揺さぶることで意識を取り戻すことができたことから、作業員 A も同様に揺さぶることで意識を取り戻すことができると考え、作業員 A を救出に向かったものと推定する。なお、作業員 B は作業員 A を救出に向かった際に、危険を感じてすぐに配管上から上部ステージ上に戻ったところで倒れているため、作業員 A と比較して吸引した硫化水素濃度が低く、量も少なかつたと思われる。このため、揺さぶられることで意識を回復することができたと推定するが、発災時点で下部ステージにてその状況を見ていない従業員 F は、作業員 A と作業員 B の健康影響の違いを認識することはできなかつたと思われる。

7-1 原因要素を防止する対策の検討

この事故原因調査に基づいて、下記の事故対策を提言する。

7-1-1 硫化水素ガスの存在

(1) CAG 送気配管の閉塞回避するための改善策

冬季に当該配管の閉塞頻度が上がることから、2025 年定期修理において当該配管の保温設置およびスチームトレースの強化が実施され、且つ閉塞頻度が低かった 1 級アミンに戻すことが実施された。

ただし、2023 年以前の実績では 1 級アミンでも当該配管の閉塞は発生していたため、上記対策の効果の確認の上、更なる閉塞回避を目的とした設備改善を状況に応じて行なう必要がある。

なお、1 級アミンから 3 級アミンへの変更は、硫化水素の吸収効率向上、腐食軽減などの設備信頼性向上を考慮して実施していた。3 級アミンに戻す場合は、定期修理時に閉塞状況を点検し、その結果に基づいて更なる有効な対策を講じる必要がある。

7-1-2 硫化水素ガスの放出

(1) 仕切板担当者の責務を全うするための改善策

従業員 F は、仕切板担当者が使用する『重要非定常作業手順書』の内容を十分に理解していた。また、当日午前中の作業は仕切板挿入 3 件であり、タイムプレッシャーがあるような状況ではなかった。下部ステージにいた従業員 F は、発災時、携帯していたガス検知器の警報で硫化水素の濃度が上昇したことに対応し、仮設足場にいた作業員 C を避難させ、地上にいた監督 E に救急車の通報を指示した。一方で、従業員 F は自身のすぐ前にある V1 バルブが開放状態であることに気づいていなかったものと推定する。

なお、図-5-1-2 にあるように、V1 バルブは下向きに据え付けられており、ゲートバルブであるためステムの長さで開放されていることは容易にわかる。

従業員 F の作業経験、教育履歴から、従業員 F は仕切板担当者の役割を行えると製油 1 グループ動力係では判断していたが、今回の事故が発生した。

対策として以下の実施が必要と考える。

- ① 管理者は、仕切板担当者の役割を行える社内能力認定レベルを取得している者で且つ、直前の実習テストで合格した者を仕切板担当者に任命すること。
- ② 仕切板担当者は、作業で使用する手順書を携帯し、作業項目を確認の上、指差呼称して作業すること。それを見聞きすることで作業員への周知にもつながる。
- ③ 仕切板担当者は、フランジ開放条件が満足できない場合は、その箇所の作業を中止し、是正措置が実施された後に班長に作業許可を申請しなおすことを徹底すること。

(2) 背景にある工事環境整備作業を確実に実行するための追加の改善策

定期修理時の縁切りにおける仕切板挿入箇所での工事環境整備作業については、「定修作業許可手続要領 附属 定修仕切り板反転作業許可手順手順」に規定されており、仕切板担当者が用いる手順書もその内容を前提に作成・運用されていた。また、配管等の窒素置換についても手順書が定められていた。そして、これらの手順書においては、閉止対象として V1 及び V2 バルブの特定はしていなかったものの、製油 1 グループ動力係では、個々の工事環境整備作業について、仕切板担当者が、仕切板挿入作業の実施を計画したうえで、自らの所掌の下、工事環境整備作業の担当を適宜運転員と相談しながら決めて実施する運用となっていた。

今回の事故を踏まえ、定期修理時の工事環境整備作業の実施を運転員が担当することとし、「工事環境整備作業の実施者」と「仕切板作業開始前の最終確認者」を分けることが、工事環境整備作業の実施を確実にするために有効だと考える。

7-1-3 硫化水素ガスの吸引

(1) 救出時の硫化水素吸引への改善策

堺製油所の要領では、硫化水素漏洩箇所等の現場確認は必ず 2 名以上で呼吸用保護具を装着して実施すること、被災者の救出は呼吸用保護具を装着して実施することが定められている。そのような内容も含めて、製油所の全従業員に対して硫化水素ハザードの繰り返し教育を毎年実施しており、基本知識、守るべき対処は会得できると考えられるため、この繰り返し教育を継続して実行する。

繰り返し教育の際には、これまでの教育に含めていた 1995 年に発生した川崎製油所の硫化水素事故に加えて、今回の堺製油所の事故事例にも触れて、硫化水素吸引による嗅覚麻痺の危険性について実感を持って教育できるように各々の組織の小集団で毎回討論をする等により、このような重篤な事故を二度と起こさないようにする必要がある。

(2) 背景にある被災者の症状を重篤化させた硫化水素吸引への追加の改善策

内部流体に硫化水素が含まれている機器・配管での仕切板挿入作業やその工事環境整備作業において、ガス検知器で硫化水素ガスを検知した後に呼吸用保護具を装着することとした場合、今回のような状況では装着が間に合わないことがある。そのような硫化水素ガスの漏洩の可能性がある場合、予め呼吸用保護具を装着して作業に当たることが重篤化回避には有効だと考える。また、今回の事故では消防局のレスキュー隊によって被災者が地上に下されている。硫化水素ガス漏洩時の避難や救出が容易ではないなどの状況が想定される場合は、呼吸用保護具を予め作業現場に準備しておくことが有効だと考える。

8 再発防止に向けた提言

この事故は、ガスタービン装置の定期修理工事開始の準備作業として、配管のフランジに仕切板を挿入する過程で起きた。作業者が配管のフランジ部から漏洩した硫化水素ガスを吸引して硫化水素中毒となり、1名が死亡、1名が重症となった重大事故である。

当該企業の安全マネジメントは「誰もケガをしない・させない」の安全方針の下にリスクアセスメントが行われ、関係請負人との情報伝達も的確に行われている。また、高圧ガス保安法のスーパー認定を国内で初めて取得しており、安全マネジメントレベルは業界でもトップレベルである。それでもこの事故が起きたことに、人間は「普段行っている作業を確実に実行することの難しさ」と、「硫化水素中毒の危険性を知識として知っていても、とっさの場合に、的確に行動できるとは限らない」という安全マネジメントの難しさを再認識させられた。

事故原因は、硫化水素中毒、酸素欠乏症（酸欠）、二酸化炭素中毒の可能性を検討し、それぞれのガスの致死濃度に達する時間の差から、硫化水素中毒と特定した。

この事故は、三つの事象が重なって起きた。

一つ目は、硫化水素ガスが除害措置を講じた配管内に流入していたことである。FCC 装置（流動接觸分解装置）の CAG（硫化水素濃度約 25vol%）は、通常、SRU 装置（硫黄回収装置）に送気されるが、発災当日は SRU 装置への配管が閉塞気味であったために、フレアヘッダー配管に放出されていた。

二つ目は、1st GTG 装置（1号ガスタービン装置）の定期修理工事を開始する際の最終確認作業が終わっておらず、発災個所の縁切り弁が開いているにも拘らずフランジ開放作業を始めたことである。CAG はフレアヘッダー配管から発災箇所の配管に流入し、フランジ部から作業エリアに漏洩した。

三つ目は、フランジ開放作業に従事していた作業者が、硫化水素ガスを吸引したことである。作業者は硫化水素ガスを吸引して嗅覚機能が麻痺したために、「硫化水素の臭いがしないので大丈夫」と錯覚して仲間の作業者の救出に向かった。そこで、高濃度の硫化水素ガスを吸引して中毒になったものと推定される。

これらの原因と再発防止策について、事故調査委員会として以下のように提言する。

一つ目の CAG がフレアヘッダー配管に流入したことに対する対策

FCC 装置の排ガスを SRU 装置に送気する配管が閉塞気味であったために、発災当日、CAG をフレアヘッダー配管に送気していたことに対する対策である。

閉塞に至った経緯を調査すると、付着物は冬季に増えることとスチームトレースが設置されていない箇所で付着が増えることが分った。また、2023 年定期修理工事以降に配管の閉塞頻度が上昇していたことが分った。2023 年の定期修理工事では、硫化水素吸収率の向上のために、硫化水素抽出液が 1 級アミンから 3 級アミンに変更されていた。

SRU 装置への送気配管の閉塞状況の改善対策は、2段階で考える。

第 1 段階は、保温及びスチームトレースを強化とともに、硫化水素抽出液を 3 級アミンから 1 級

アミンに戻す。

第2段階は、硫化水素吸収率向上のためには3級アミンに戻す際は、点検頻度を増して配管の閉塞状況を確認し、必要な設備上の対策など講じる。

このように物質・設備・方法を変更する際には、対策実施後の点検・フォローを強化して安全を担保していく必要がある。対策実施後、点検・保全を強化することによって、異常を早期に発見して大事に至らせないことが重要である。

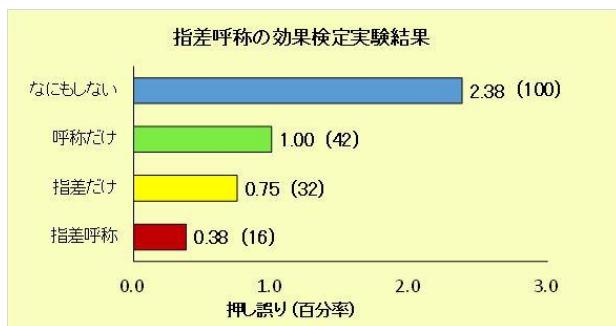
二つ目の1st GTG装置のフランジを開放した際のCAGの漏洩に対する対策

1st GTG装置の定期修理工事を開始する前の最終確認作業中にフランジからCAGが漏洩した。直接原因は、仕切板担当者が発災個所の縁切り弁（V1）が「開」の状態であることを気付かないまま、仕切板抜き出し作業を開始したことである。通常、実施されていることが、この日は実施されていなかったことになる。仕切板担当者の「確認不足」になるが、同様な確認不足は、本件事故に限らず、多くの事故でも起きている。厚生労働省の労働災害調査報告書でも、事故の3分の1は確認不足に起因していると指摘されている。⁽¹⁾

確認不足を防止するための対策として下記の方策を提言する。

① 仕切板担当者は、資格保有者、運転技能を十分有したもの等に担当させる必要がある。力量の見極め方法は作業内容によって異なるので、それぞれの作業に適した能力見極め対策が必要である。

② 誤りのない行動をするためには、手順書の携帯と共に「指差呼称」を励行する必要がある。「指差呼称」は作業対象を指で差し、声に出して確認する安全作業の基本動作で、作業する当事者の集中力・緊張感の維持といった効果を期待できる。併せて、声を出すことによって、当事者はもちろん、周囲の作業者も、所定の作業が行われていることを知ることができる。鉄道総研のデータで指差呼称の効果は、何もしないときのエラーが2.38%に対し、指差呼称すれば0.38%に低減できている。⁽²⁾



③ 工事環境整備作業の実施者と確認者とを分けることによって、作業が確実に実施できるようにする。

これまで、縁切り弁（V1）の操作は仕切板担当者が工事環境整備作業を担当する運転員と相談しながら実施する運用になっていた。これからは「工事環境整備作業での縁切り弁閉止実施者」と「仕切板作業開始前の縁切り弁閉止最終確認者」（すなわち、仕切板担当者）とを区分し、責任と役割が明確化され、安全対策の二重確認によってリスクを防止する。

三つ目の硫化水素中毒に対する対策

この事故の重要な教訓は、「知識として知っていても、いざという場合に的確に行動できるとは限らない」ことである。重要な危険情報ほど実感を伴った教育方法が必要である。

硫化水素は濃度が増すほど危険性が増大し 1,000ppmm 以上の濃度では死亡に至る。一方、人間の嗅覚神経は、硫化水素濃度が低いときは硫化水素特有の臭気を感じるが、20~30ppm では臭気の慣れ（臭気疲労）で濃度が高くなったと感じなくなる。100~200ppm の濃度では嗅覚神経麻痺のため不快感が減少するために危ないと感じなくなる。⁽³⁾ すなわち人間は、高濃度の硫化水素雰囲気下では危険な状態にあるにも拘らず、嗅覚機能が麻痺して臭いを感じなくなるので「大丈夫」と錯覚してしまう。

この事故の被災者である従業員 F は、当初、硫化水素濃度検知器によって硫化水素ガスが存在していることを知っている。しかし、その後、嗅覚機能が麻痺して臭いを感じなくなったので大丈夫と思って、倒れている作業者 A、作業者 B の救出に向かっている。従業員 F の行動は、嗅覚が麻痺して硫化水素の臭いを感じていなかったことと、「仲間の救出」という使命感に基づくものと考えれば理解できる。

従業員 F は、まず、作業者 B を救出しようとして体を揺すったところ、作業者 B は立ち上がった。そこで従業員 F は大丈夫と判断し、さらに作業者 A の救出に向かった。そこで致死濃度 1,000ppm を超える硫化水素を吸引し亡くなられたものと推定する。作業員 A が倒れていた場所は、CFD 解析によって高濃度の硫化水素ガスの範囲から外れていたと推定され、重症に止まったものと考える。

当該企業は、1995 年に川崎製油所の石油精製プラントの定期修理工事中に硫化水素ガスが大量に漏洩し死者 4 名を含む作業者 47 名が被災する重大事故を経験している。⁽⁴⁾ この事故の再発防止策として、「硫化水素は人体に大きな影響を及ぼす危険なガスであること、濃度が高くなれば嗅覚が麻痺すること」が作業者全員に教育されている。それでもこの事故を防げなかつことを受け止めた安全教育方法が必要である。

「人間は、硫化水素ガスを吸引すると嗅覚機能が麻痺して、臭いを感じないので大丈夫と錯覚してしまう」ことを、受講者の一人一人が自分事として理解し実感できる教育方法が必要である。

安全教育方法として、一つ目は、川崎製油所や今回の事故で被災された方々の行動と硫化水素の怖さとを結びつけた教育を行うことである。「知識」としてではなく、「物語」として、「人間は、硫化水素の濃度が低いときは臭いを感じるが、濃度が濃くなると嗅覚が麻痺して臭いを感じなくなるので大丈夫と思ってしまう」を自分事として納得する教育である。二つ目は、「事故の語り部」も有効と考える。JR 東日本は、「事故の語り部」が東日本大震災時に津波によって列車が流されても、従業員が自ら考えた自発的行動によって、死者が一人も出なかつことを、毎年新入社員に語り伝えている。三つ目は、最近のコンピューター技術を活用した画像を利用し、人間の視覚に訴える教育である。このような工夫が硫化水素の安全教育には必要と考える。

一方、この事故のもう一つの教訓は、「硫化水素の漏洩に気付いてからでは間に合わなかつ」ことである。

安全対策は、これまでの保護具の着用基準は、硫化水素濃度 5ppm 以上であったが、今後は、「硫化水素ガスの漏洩リスクがある作業は、保護具装着の上で工事に取り掛かる」に見直す必要がある。

事故原因調査の過程で、フランジから漏れた硫化水素ガスの拡散状態を CFD 解析によってシミュレ

ーションした結果、作業者は瞬時に高濃度の雰囲気に晒されていることが分った。これが「気付いてからでは間に合わなかった」ことの理由である。

この事故の原因調査は“人間はどのように判断し行動するか”を考察することがポイントであった。

「なぜ、被災者は、そのような判断や行動をしたか」を、関係者の方々からの聞き取り調査と CFD 解析を利用して事故に至る推論をまとめた。なお、今回の事故原因調査で活用した CFD 解析は、各地で起きている有毒ガス中毒事故に対しても有効な方法と考える。

2005 年日本学術会議は、JR 福知山線脱線事故を受けて「事故調査体制の在り方」⁽⁵⁾ を提言している。

事故原因の究明のためには、技術的な面以外に、人間や組織の関与、つまりヒューマンファクターの解明を行うことが不可欠である。したがって、事故の真の原因を探り、再発防止の教訓を引き出すためには、事故当事者の証言をいかに的確に得るかが重要な課題となる。 —中略—

そこで、事故調査においては、個人の責任追及を目的としないという立場を明確に確立することが重要であり、この立場のもとに調査を行えば、真相究明が容易となり、類似事故の再発防止、安全向上にとって貴重な事実が明らかになることが期待される。

製造現場では現場力の低下に起因する事故が増えている。定期修理工事などは人間と機械とが共存して作業するので、さらに事故の可能性が高くなる。設備・システムを整えることが安全対策の基本であるが、“人間の行動特性（ヒューマンファクター）”に基づく視点も重要になる。

この事故で見られたように、「普段行われていた作業（工事実施前の環境整備作業の一連の操作の最終確認）が、なぜ、当日は行われていなかったのか」、「硫化水素の怖さは頭で理解していても、とっさの場合、現場で活かされていない」等の事象を、「なぜ、人間はそのような行動をするのか」というヒューマンファクターの観点で考えてみる必要がある。

これらの点を反省して、“現場で活かせる知識”、“現場で確実に作業できる”、“現場で発想できる感性”を持った人材育成の重要性を痛感する。人材育成はトップ主導のもとに行う必要がある。

自動車業界の安全の基本は『止める、呼ぶ、待つ』である。“止める”は、止めればそれ以上に事故が拡大しないが、生産への影響があるので、実際に行動するには勇気が必要である。そこでトヨタは、経営トップからライン長に至る管理者が率先垂範して行動することを推奨している。“呼ぶ”、“待つ”は、「作業ができる人を呼び、その人が来るまでは手を出さない」という意味であり、今回の 2 次被害の防止にも通じることである。現場で確実に作業できる力量を持った人が少なくなってきたといえる。これらを踏まえて、今回の事故を考えると、万一に備えた監視人の役割の重要性、確実に作業できる人材の重要性が分かる。

最後に、悲惨な事故に遭遇された被災者の方々に、心から哀悼の意を捧げる。

この事故調査報告書をまとめるにあたり、貴重なご意見をいただいた事故調査委員会の委員諸氏、精力的に現場検証や聞き取りをした関係者の方々、原因推定の確度を上げるために CFD 解析に取り組んでいただいた方々、大所高所からご指導いただいた経済産業省高圧ガス保安室、そして事故調査委員会を傍聴していただいた経済産業省 中部近畿産業保安監督部 近畿支部、大阪府消防保安

課、堺市消防局、高圧ガス保安協会をはじめ関係機関、諸団体の方々に厚く御礼申し上げる。

この調査報告書が ENEOS 株式会社の安全確保に寄与するとともに、石油業界ならびに各地で起こっている有毒ガスの漏洩・中毒事故の防止にも寄与することを期待する。

事故調査委員会 委員長 中村昌允

- (1) 令和 2 年 3 月 厚生労働省労働基準局安全衛生部安全課「令和元年度老朽化した生産設備における安全対策の調査分析事業」
- (2) 芳賀繁、赤塚翠、白戸宏明：「指差呼称のエラー防止効果の室内実験による検証」、産業・組織心理学研究、第 9 卷、第 2 号、pp107-114 (1996)
- (3) 日本産業衛生学会 産業衛生学雑誌 43 卷 4 号
- (4) 失敗知識データベース「製油所のオフサイト配管の保全工事ミスの重なりによる硫化水素ガスの漏洩」
<https://www.shippai.org/fkd/cf/CC0000027.html>
- (5) 平成 17 年 6 月 23 日 日本学術会議「事故調査体制の在り方に関する提言」

添付 1：CFD 解析に関する補足資料

本資料は、6-2-3 項に記載した CFD 解析の内容を説明するものである。CFD 解析の目的は、発災時の硫化水素・酸素・二酸化炭素の空間濃度分布と被災者の立ち位置・健康影響との相関を検証することとした。本目的に必要な精度を得るために、後述の通り、解析手法、モデル形状、境界条件、ガス組成・物性を慎重に選定・設定した。一方、CFD 解析にはモデル化や仮定に基づく限界が存在するため、本資料では精度についても率直に説明し、結果の解釈にあたっての留意点を記載した。

1. 解析手法

CFD 解析には Ansys Fluent 2025R1 を用いた。風（空気）の流れの中での放出ガスの輸送拡散解析を実施するため、RANS の乱流モデル（SST- $k\omega$ モデル）、化学種輸送モデルを用いて、疑似非定常で定常解析を実施した。圧力-速度結合は Coupled を使用し、離散化スキームは二次を選択できるものは全て二次とした。

2. 構造物の CFD モデル形状

構造物のモデル構築にあたっては実際の現地観察に基づき、ガス放出したフランジの周囲のガス流れ、風の流れ、人の動線の三点に影響を与える構造物を慎重に選定し、寸法を採寸して CFD モデル形状①を作成した。また、作業員 A が倒れた後の状況を解析するため、作業員 A の左足および胴を模擬した四角柱を加えた CFD モデル形状②も作成した。（図-a-1）。

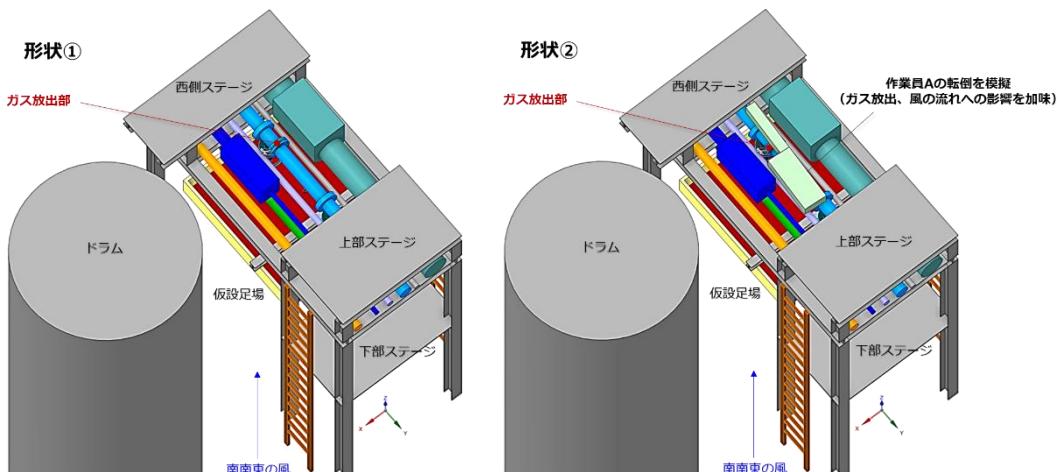


図-a-1 : CFD モデル形状（左：作業員 A の転倒前、右：作業員 A の転倒後）

ガス放出部は、 $\phi 152\text{mm}$ （フランジ内径） $\times 10\text{mm}$ 幅の面（図中のオレンジ部分）とした。また、フランジオープナー、および、フランジ穴ごとのボルトの有無も再現した。（図-a-2）

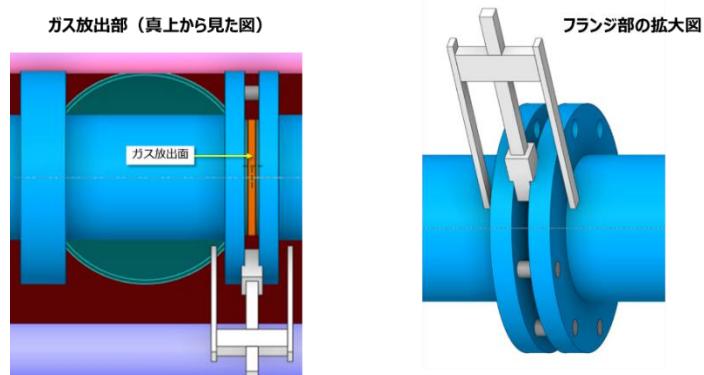


図-a-2：ガス放出部およびフランジ部の CFD モデル形状

3. 外部流れの CFD モデル形状

6-2-3 項の図-6-2-6 に記載の通り、発災時の風向は南南東であった。この風の流れ（外部流れ）の影響を解析するために、南南東の方角に面する直方体で構造物を囲い、流入・流出面を設定した。地面は壁（滑り無し壁）、側面および上面は対称境界（流入・流出の無い滑り壁）として、CFD 解析ソフト内で設定した。三面図に示す通り、直方体の各面（底面以外）と構造物との間に一定の距離を設け、構造物による風の流線の湾曲や圧力分布が境界面に過度に干渉しないように注意して直方体の大きさを設定した。（図-a-3）

メッシュは Ansys Fluent Meshing のポリヘドラ（多面体メッシュ）で作成した。放出ガスの輸送拡散現象を十分な解像度で捉えるために、構造物の無い空間、構造物付近、フランジ付近の三段階で徐々にメッシュ解像度が細かくなるようにメッシュを作成した。（図-a-4）

図-a-5 にフランジの中心断面における風のベクトル図を示す。流入・流出面の風速・風向は概ね均一であり、側面付近の風向も概ね側面に平行であることが分かる。このことから、構造物付近の放出ガスの空間濃度分布の解析精度に影響を与えない大きさで、外部流れの解析領域を設定できていると判断した。

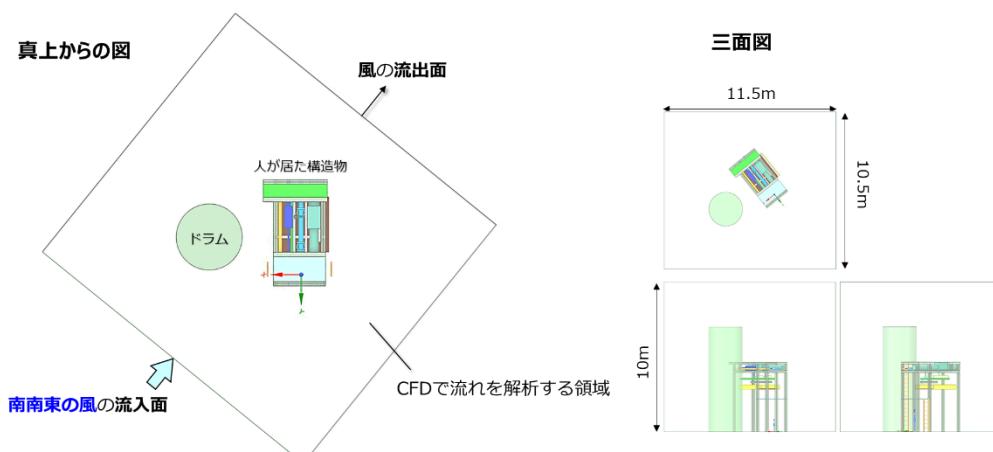


図-a-3：外部流れの解析領域を含む CFD モデル形状の全体像

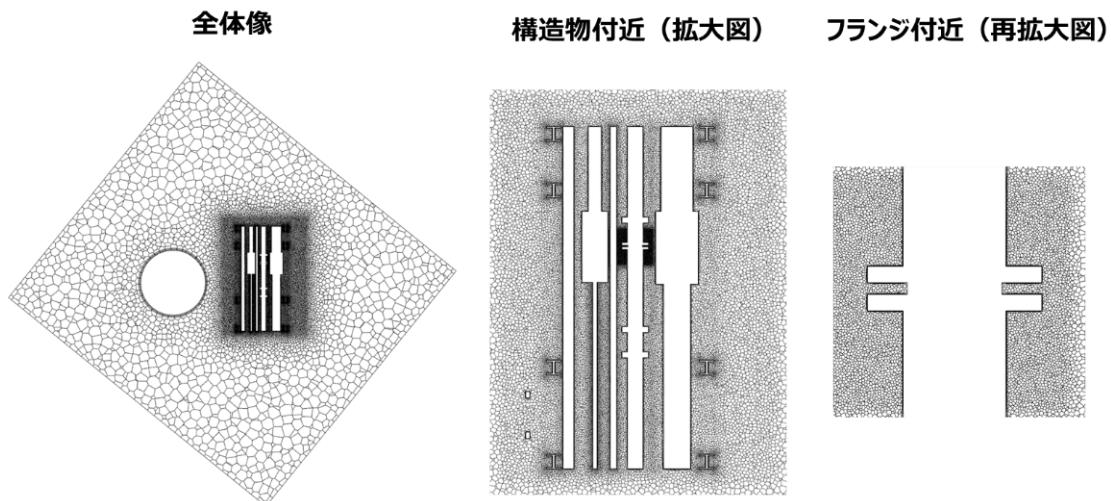


図-a-4：フランジの中心断面におけるメッシュ解像度（水平断面）

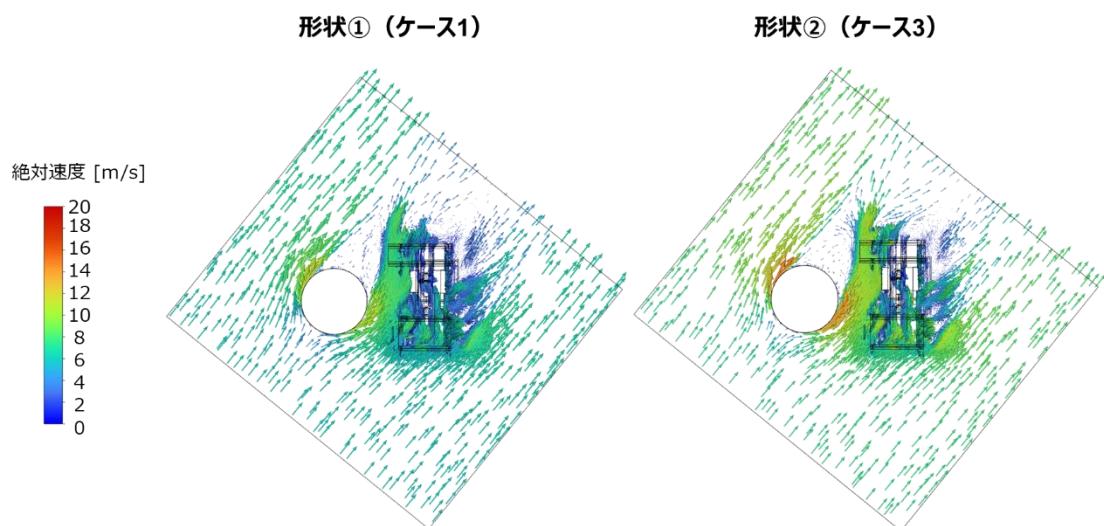


図-a-5：フランジの中心断面における風のベクトル図（水平断面）

4. 解析ケース

表-a-1 に記載の通り、CFD モデル形状、フランジのガス放出部からのガス放出速度、空気の風速を変化させた 3 つの条件で解析を実施した。

ガス放出速度は、6-2-2 項で推定した通り 2.5m/s とした。風速は、各時刻における風向風速計の指示値とした。なお、6-2-3 項の図-6-2-6 に記載の通り、風向風速計が設置されている事務所と発災現場は南南東の面でほぼ同じ面内に位置しており、事務所の風向風速計の値を解析条件に用いることは合理的であると考えた。

表-a-1：各解析ケースでの条件（形状、ガス・風の速度）

	ケース1	ケース2	ケース3
	形状①	形状②	
想定状況	9:57 作業員Aが倒れる前 (直前)	9:57 作業員Aが倒れた後 (直後)	10:01 作業員Aが倒れた後 (従業員Fが作業員Aを救出しようとした時点)
ガス放出速度	2.5 m/s		
風速	5.81 m/s		7.38 m/s

5. ガス組成・物性

放出ガスのガス組成は、フランジから漏洩したCAGのラボ分析値(硫化水素が25vol%、その他は二酸化炭素が主成分)から決定した。空気のガス組成は、飽和水蒸気濃度を加味して決定した。化学種ごとに、Pro II(プロセスシミュレーター)で外気温 21℃の物性(密度、粘度)を推算し、組成と共にCFD解析ソフト内で設定した。

拡散係数は、文献¹⁾のパラメータを元に、Chapman-Enskog の理論式で化学種間の相互拡散係数 D_{ij} を算出し、CFD解析ソフト内で設定した。

化学種の一覧と濃度を表-a-2に示す。炭化水素は炭素数1から4までの混合物であったが、本解析の目的は硫化水素・酸素・二酸化炭素の空間濃度分布を得ることであるため、簡略化して平均分子量が近いC2H6のガスで代表して表現した。

表-a-2：放出ガスおよび空気のガス組成

ガス組成	放出ガス	空気
	vol%	
H ₂	0.09	0
CO	0.5	0
H ₂ O(g)	2.46	2.46
C ₂ H ₆	11.48	0
H ₂ S	25.14	0
CO ₂	60.33	0
O ₂	0	20.48
N ₂	0	77.06

6. 評価方法

硫化水素濃度について、嗅覚麻痺を起こすとされる100ppmと、即死するとされる1,000ppmの2つの濃度の等値面(一定の硫化水素濃度の面で、この面の外側はより低濃度、内側はより高濃度)を、それぞれ青色および赤色で構造物中に示した図を作成した。(図-a-6)

同様に、酸素濃度、二酸化炭素濃度についても、濃度の等値面を構造物中に示した図を作成した。

これらの等値面の図の中に、被災者の立ち位置を重ね合わせ、被災者の行動と健康影響が CFD 解析によって支持されるか 6-2-3 項にて考察した。

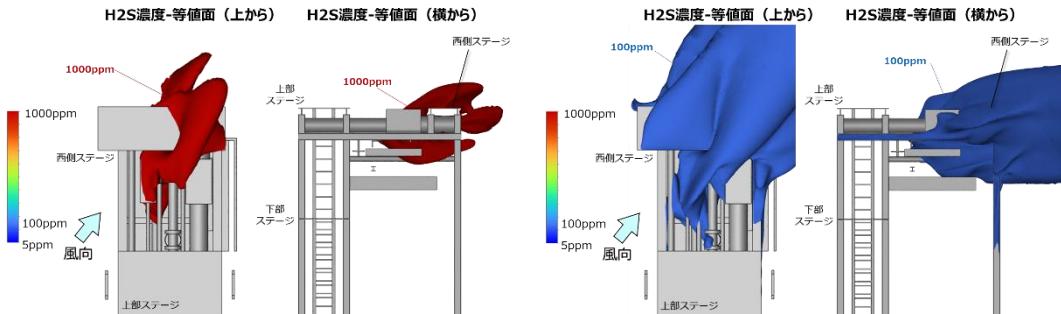


図-a-6：硫化水素濃度の 100ppm 等値面(左)と 1,000ppm 等値面(右)

7. 解析精度

CFD 解析を行うにあたり、解析手法、モデル形状、境界条件、ガス組成・物性を慎重に選定・設定したが、モデル化や仮定に基づく限界も存在する。

本解析では非定常性（構造物の背後で巻く風の周期的な振動など）がある解析対象を、定常解析として取り扱っているため、各ガス濃度は CFD 解析の反復計算（イテレーション）のたびに僅かに変化する。これを平均化して評価するために、定常解析の中でも疑似非定常モデルを用い、計算安定後 10000 回の反復計算の平均値を各ガス濃度の値として定義して評価に用いた。このため、各ガス濃度の等値面は、実際には図示した領域から僅かに空間的に揺らいでいると考えられる。（図-a-7）

また、風向についても、解析対象の時刻の前後で風向風速計の指示値が安定して南南東を示しているため南南東としたが、16 方位より細かな解像度での風向の変化の影響は加味していない。つまり、22.5°程度の範囲で放出ガスの輸送拡散の方向が変化する可能性はある。

以上のようにモデル化や仮定の限界の例を示したが、図-a-7 の図の左右差で示したように、また、風向が 22.5°の範囲で変化した場合を想像しても、誤差は大勢の CFD 解析結果を覆すほど大きなものではないと考える。従って、本報告書の CFD 解析結果は、濃度等値面の位置・傾向を可視化し各種ガスの空間濃度分布と被災者の立ち位置・健康影響との相関を検証するという目的において活用できる十分な精度を有していると考える。一方、絶対値としての精度の保証は意図しておらず、少なくとも図-a-7 に示した程度の誤差は内包するという認識の下で考察に活用すべきである旨注記する。

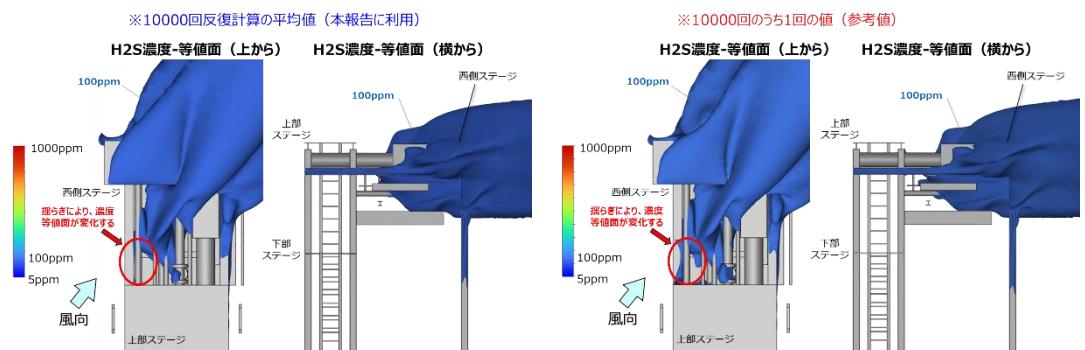


図-a-7：ケース 1 の硫化水素濃度 100ppm 等値面（左：10000 回平均値、右：1 回の値）

参考文献

- 1) Bruce E. Poling, John M. Prausnitz, and John P. O'Connell, "The Properties of Gases and Liquids, 5th Edition", McGraw-Hill Professional Pub (2000)

添付2：略語の説明

略語	原文	説明
BCU	Butene Conversion Unit	ブテン転換装置 FCCで生産されたLPG留分のうち、不飽和のLPG留分を転換、重合することによってターシャリーブチルアルコールとオクテンを製造する。
CAG	Clean Acid Gas	クリーンアシッドガス FCC装置で発生する余剰ガスには、硫化水素および二酸化炭素が含まれており、アミン溶液によってその硫化水素および二酸化炭素が抽出された後、余剰ガスは所内の燃料ガスとして使用される。一方、抽出された硫化水素および二酸化炭素は、CAGとしてSRU装置に送気され、最終的には液体硫黄となる。
CFD	Computational Fluid Dynamics	計算流体力学 流体力学への計算機応用で、流体の方程式を数値計算によって解くシミュレーションを主とする。
FCC	Fluid Catalytic Cracking	流動接触分解装置 減圧蒸留装置で抜き出され、脱硫された軽質重油等は、流動接触触媒層で分解反応を起こさせた後、蒸留、分離工程を経て、LPG、ガソリン、軽油の製品となる。
GTG	Gas Turbine Generator	1号ガスタービン装置 製油所内で発生する余剰の燃料ガスを燃料として、ガスタービンを駆動させ、その軸出力により発電機で電力を発生させる。ガスタービンへの燃料は、ガスコンプレッサーを用いて供給する。ガスタービンで発生した電力は特高受変電所に送電され、買電と合わせて製油所内の各プラントに供給される。また、ガスタービンからの排ガスを利用した排熱回収ボイラーにより4.59 MPagのスチームを発生させ、同じく製油所内の各プラントに供給される。
PXU	Paraxylene Production Unit	パラキシレン製造装置 ベンゼン、トルエン製造装置前段で蒸留分離されたキシレン留分からパラキシレンを取り出す。
SF	ScanFiner	ガソリン脱硫装置 FCC装置から得られる重質ナフサに含まれる硫黄分を除去し、サルファーフリーガソリンの生産をする。
SRU	Sulfur Recovery Unit	硫黄回収装置 脱硫装置等から回収した硫化水素を触媒を用いて、液体硫黄を生産する。
SWS	Sour Water Stripper	廃水処理装置 FCC装置の諸装置から排出されるサワーオーターやフェノールを含んだ廃水及び廃ソーダをスチーム及び硫酸で処理し、悪臭の無い排水にする。