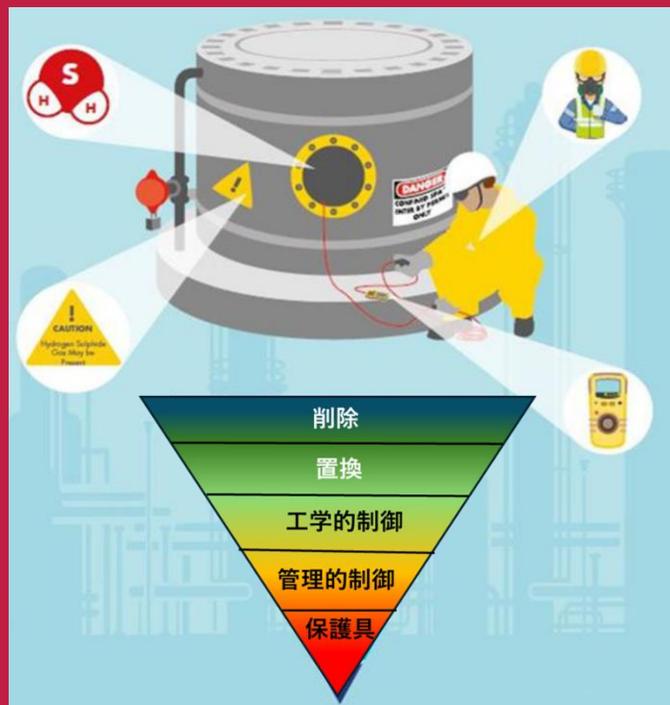


プロセス安全の鉄則： 硫化水素



謝辞

米国化学工学会（AIChE）と化学プロセス安全センター（CCPS）は、特定技術に対するプロセス安全の鉄則プロジェクト小委員会に参加された全会員の皆様が、このガイドラインの作成と準備にご尽力を頂いたことに感謝申し上げます。CCPS はまた、小委員会のメンバーが様々な段階においてこのプロジェクトに参加する際に、ご支援いただいた各企業にも感謝の意を表したい。

小委員会のコアチームメンバー:

Denise Chastain-Knight, Chair	Exida
Della Mann	Vice Chair
Warren Greenfield	CCPS Consultant
Denise Albrecht	3M
Kevin Campbell	Shell
Walt Frank	CCPS Emeritus
Anil Gokhale	CCPS Staff
Mike Hazzan	Acutech
Ng Ern Huay	Petronas
Pete Lodal	D&H Process Safety
Frank Renshaw	CCPS Emeritus
Louisa Nara	CCPS Staff
Linda Bergeron	CCPS Emeritus
Jeff Fox	CCPS Emeritus
Curtis Clements	Chemours

硫化水素小委員会のメンバー:

Della Mann, Lead	CCPS Emeritus
Gary Amideneau	CCPS Staff
Andy Crerand	Shell
Andrew Moulder	Inter Pipeline
Jason Vercher	Arkema

小委員会メンバーの業界における経験とノウハウが詰まったこのガイドラインは特にプロセス安全プログラムやその管理システムを推進する方達には有用な物ものとなっている。

すべての CCPS ガイドラインは発行前に査読をしている。CCPS は、査読者の思慮深いコメントと提案に感謝する。彼らの取り組みのお陰で、このガイドラインはより一層正確で明確なものとなっている。

硫化水素の鉄則をレビューした査読者:

Steven Betteridge	Shell
Danielle Brown	Buckeye Partners
Andrew Goddard	Arkema
Rizal B Harris Wong	Petronas

査読者はコメントや提案を提供したが、このガイドラインを保証することを求められたものではなく、公開前に最終原稿をレビューすることもなかった。

化学プロセス安全センター(CCPS)は、有害な化学物質や炭化水素の放出に関する重大事故の未然防止および被害軽減に資する技術と管理に着目して、1985年に米国化学工学会(AIChE)によって設立された。CCPSは、書籍の出版、年次の技術会議、調査研究、工学部学生向けの教材を通じて世界的に貢献している。CCPSの詳細については、(+1) 646-495-1371に電話するか、ccps@aiiche.orgに電子メールを送信するか、次のサイトからアクセスすることができる。
www.aiiche.org/ccps

この文書は、法的義務や前提なしに使用できるように作成されている(つまり、自己責任で使用)。修正、更新、追加、提案、推奨事項は、CCPSプロジェクトのシニアディレクターであるAnil Gokhale博士(anilg@aiiche.org)に送信頂きたい。

もしこれをプリントなどのオフラインで読んでいるのであれば、それは最新版ではない可能性がある。最新版をCCPSのWebサイトから参照のこと。

<https://www.aiiche.org/ccps/tools/golden-rules-process-safety>

本書に記載されている情報が、業界全体の安全成績の向上につながることを心から願っている。しかし、アメリカ化学協会(AIChE)、そのコンサルタント、CCPS技術運営委員会および小委員会メンバー、その組織、組織の役員および取締役、およびその従業員は、本書に記載されている情報の正確性を保証するものではない。(1)AIChEと、そのコンサルタント、CCPS技術運営委員会および小委員会メンバー、その雇用者、雇用者の役員および取締役、およびその従業員と請負業者と、(2)本書のユーザーとの間では、ユーザーがその使用または誤用の結果に対して法的責任を負うものとする。

目次

鉄則 #1: H ₂ S の危険な特性を常に理解し尊重すること.....	2
鉄則 #2: H ₂ S の危険性がどこに存在し、または発生するかを常に把握しておくこと.....	9
鉄則 #3: H ₂ S の放出に対する予防策を常に講じること.....	14
鉄則 #4: H ₂ S の放出に備え、常に緩和策を策定すること.....	17
鉄則 #5: H ₂ S の事故を調査し、常に管理システムを改善すること.....	22
参考文献.....	25

鉄則 硫化水素 (H₂S) 編

鉄則 #1: H₂S の危険な特性を常に理解し尊重すること

鉄則 #1: H₂S の危険な特性を常に理解し尊重すること

❖ なぜ :

- 1) H₂S は、極めて低濃度でも有毒である。
- 2) H₂S は、可燃性である [1]。
- 3) H₂S のガスは、無色なので存在を検知するのは難しい。
- 4) H₂S は、腐った卵のような臭いがするが、H₂S 濃度が高くなると嗅覚が鈍くなるため、人はガスの臭いを感じなくなる。
- 5) H₂S は、空気より重いため低い場所に蓄積する。
- 6) H₂S が燃焼すると、有毒な二酸化硫黄 (SO₂) が発生する。
- 7) H₂S は、硫黄含有化合物が酸性溶液と接触して反応することで生じることがある。
- 8) H₂S は、水と結合して腐食性の硫酸 (H₂SO₄) を形成する可能性がある [2]。
- 9) さび (酸化鉄) は、H₂S の存在下で硫化鉄に変化する。硫化鉄は自然発火して火災を発生させることがある (すなわち、発火性がある) 。
- 10) H₂S は、水和物の形態では非常に攻撃的である (すなわち、H₂S は水の存在下で最も高温の水和物の一つを容易に形成する)。サワーオイルやサワーガスの生産、処理、移送では、H₂S 水和物の発生を抑えるために流量を制限することがある [3]。
- 11) 以下のような場合に誤った安全意識を持つ可能性がある :
 - a) 従業員、契約業者、訪問者が H₂S に対する経験がほとんどない。
 - b) H₂S に曝露する可能性を理解していない。
 - c) それまでに H₂S を取り扱い、怪我をしなかったことで、H₂S の潜在的な危険性や危害を軽視することがある。
- 12) 事故事例:
 - a) 2019 年 10 月 26 日の夕方、ポンプ室内のポンプが故障し、H₂S を含む水が放出された。従業員がポンプのオイルレベルアラームに対応するため車で施設に向かった。ポンプ室に入った後、従業員は H₂S ガスに襲われた。午後 9 時半頃、夫から数時間連絡がなかったので、従業員の妻は夫の様子を確認しに 2 人の子供を連れて自家用車でポンプ室に向かった。彼女は夫を探そうとしてポンプ室に入ったと見られ、そこで H₂S ガスに襲われた。後から到着した救急隊員が、妻の車の後部座席に 2 人の子供がいることに気づいた。救急隊員は自給式呼吸器 (SCBA) を含む保護具を着用し、ポンプ室に入った。H₂S ガスへの曝露により従業員とその妻は死亡した [4]。救急隊員は 2 人の子供を車から救出した。

この鉄則に関連する本事故から得られる教訓は、経営陣とスタッフが H₂S の危険性を理解していなかったことは、以下の事実から明らかである :

- (1) 必要とされる個人用防護具の不着用 (すなわち、会社が提供した携帯式 H₂S 検知器の不着用)
- (2) ロックアウト/タグアウトが不十分
- (3) 機械換気の設計が不適切で、ポンプ室内に H₂S が封じ込められた
- (4) 固定式 H₂S 検知器と警報システムの機能不全

鉄則 硫化水素 (H₂S) 編

鉄則 #1: H₂S の危険な特性を常に理解し尊重すること

- (5) サイトの警備体制が不十分
- (6) H₂S を含む機器が設置されているポンプ室の状況と潜在的な危険性に対して、標示と理解が不十分。適切な標識については図 1 を参照。



図 1 行動する前に H₂S の持つ毒性を認識せよ

出典: Shutterstock.com

- b) 2003 年 12 月 23 日午後 9 時 55 分、ガス井が噴出し、高さ 30 メートルに及ぶ天然ガスと有毒な H₂S ガスの雲が発生した。この雲は 25 平方キロメートル (10 平方マイル) を覆い、234 人が死亡、1000 人以上が負傷、数百頭の家畜が死亡した。安全当局に通報されるまで約 1 時間半の遅れがあった。山岳地形により、人口が密集する低地に重い H₂S が集まった。図 2 は影響を受けた範囲である。全体で 6 万人が避難した。専門家チームは 4 日目に被災地に到着した。5 日目に放出は抑制され、その翌日から人々は帰宅し始めた [5]。

この鉄則に関連する教訓は、H₂S の危険性に対する理解も尊重もなかったということである。以下の失敗は、これらの危険性を理解していなかったらなかっただろう：

- (1) 当時の規制では H₂S の危険範囲を考慮せず、ガス井から 30 m (98 feet) 以内に住宅を建てるのが許可されていた。
- (2) 作業手順が守られていなかった。
- (3) 事故の報告が遅すぎて効果的な緊急対応ができなかった。
- (4) 緊急対応は当初、知識も乏しく、資機材も不足した状態で実施された。

鉄則 硫化水素 (H₂S) 編

鉄則 #1: H₂S の危険な特性を常に理解し尊重すること



図 2 H₂S が大気中に放出された際の影響範囲

出典: [5]

❖ どのように行動すべきか - 全ユーザー :

- 1) 以下のような H₂S の危険性を理解するための適切なトレーニング [6]を受講し、職場での H₂S に曝露する可能性を把握すること。 :
 - a) H₂S は、有毒である。
 - b) H₂S に対する一般的な懸念レベル。表 1 に示すように、低濃度でも短期的な健康被害が発生する可能性があり、中程度の濃度では人がすぐに動けなくなる可能性がある。
 - c) H₂S は、嗅覚を鈍らせる。
 - d) H₂S は、表 2 に示すように可燃性である。
 - e) H₂S は、空気より重いいため低い場所に蓄積する可能性がある。
 - f) H₂S は、無色である。
 - g) H₂S は、水と炭化水素に可溶である。
 - h) H₂S の放出はかなりの距離を漂う可能性がある。

鉄則 硫化水素 (H₂S) 編
鉄則 #1: H₂S の危険な特性を常に理解し尊重すること

表 1 H₂S の危険性 - OSHA -

健康被害

硫化水素ガスは、さまざまな健康影響を引き起こす。労働者は、主に硫化水素を吸入することによって曝露される。その影響は、どれだけの量の硫化水素をどれだけの時間、吸入するかによって異なる。非常に高濃度の硫化水素にさらされるとすぐに死に至る。

短期的な(急性とも呼ばれる)症状と影響を以下に示す:

労働者曝露限界値	濃度 (ppm)	症状/影響
NIOSH REL (10分間上限): 10 ppm OSHA PELs: 一般産業上限値: 20 ppm 一般産業ピーク限度: 50 ppm (シフト中に他の曝露がない場合は10分まで) 建設業8時間限界値: 10 ppm 造船業8時間限界値: 10 ppm NIOSH IDLH: 100 ppm IDLH: 生命と健康に直ちに危険を及ぼす (脱出限界濃度) (NIOSH: 米国国立労働安全衛生研究所) PEL: 許容曝露限界 (作業可能) (OSHA: 米国労働安全衛生管理局) ppm: 濃度単位 REL: 推奨曝露限界 (NIOSH)	0.00011-0.00033	代表的な環境濃度
	0.01-15	臭気閾値 (腐った卵のような臭いを最初に誰かが気づける) 臭いは、3-5ppm でより不快になる。30 ppm を超えると臭いは甘ったるいか、気持ち悪いほど甘いと表現される。
	2-5	長時間の曝露は、吐き気、目の充血、頭痛、または睡眠障害を引き起こす可能性がある。一部の喘息患者では気道障害(気管支狭窄)
	20	倦怠感、食欲不振、頭痛、イライラ、記憶力低下、めまいの可能性
	50-100	1時間後の軽度の結膜炎("ガス眼")や気管支炎、消化不良や食欲不振を引き起こす可能性
	100	2-15分後に咳、目の炎症、嗅覚喪失(嗅覚疲労)。呼吸の乱れ、15-30分後に眠気、1時間後に喉の炎症。症状は、数時間をかけて徐々に重くなる。48時間後に死亡する可能性
	100-150	嗅覚喪失(嗅覚疲労または麻痺)
	200-300	1時間後に顕著な結膜炎や気管支炎、長期間曝露すると肺水腫を起こす可能性
	500-700	5分でもめき、倒れる。30分で目に深刻な損傷。30-50分後に死亡
	700-1000	急激な意識喪失、"ノックダウン"、または1-2呼吸で卒倒、呼吸停止、数分以内の死亡
	1000-2000	ほぼ即死

脚注: さまざまな生理学的影響が発生する濃度と曝露時間は正確にはわかっておらず、業界団体によってわずかに異なる境界レベルを使用して、致死性を含む生理学的影響を分類している。したがって OSHA が発行した表は、特に高濃度レベルでの H₂S の危険性を管理するためのおおよそのガイドとしてのみ使用する必要がある。出典: OSHA [7]

鉄則 硫化水素 (H₂S) 編
鉄則 #1: H₂S の危険な特性を常に理解し尊重すること

表 2 H₂S 国際化学物質安全性カード

硫化水素 (Hydrogen sulfide)		化学式： H ₂ S	CAS登録番号： 7783-06-4	RTECS番号： MX1225000	IDLH： 100 ppm
換算：1 ppm = 1.40 mg/m ³		国連番号：1053 117			
類似/取引名：硫化水素酸、下水ガス、硫化水素 (Sulfuretted hydrogen)					
曝露限界： NIOSH REL：C 10 ppm (15 mg/m ³) [10-分] OSHA PEL：C 20 ppm 50 ppm [10-分 最大ピーク]				測定方法 (表 1 参照) NIOSH 6013 OSHA ID141	
物理的性質：強い腐卵臭の無色のガス [注：嗅覚はすぐに疲労するので、H ₂ Sの継続的な存在を警告するのに頼ることはできない。圧縮液化ガスとして出荷される。]					
H	化学的、物理的特性： 分子量：34.1 沸点：-77 °F 溶解度：0.4% 引火点：非適用 (気体) イオン化電位：10.46 eV 相対蒸気密度：1.19 蒸気圧：17.6 atm 凝固点：-122 °F 爆発上限界：44.0% 爆発下限界：4.0% 引火性気体		個人用保護/衛生 (表 2 参照) 皮膚：凍傷 眼：凍傷 皮膚洗浄：推奨なし 除去：濡れた場合 (引火性) 着替：推奨なし 設置：凍傷洗浄		推奨呼吸器 (表 3 および表 4 参照) NIOSH 100 ppm：電動空気浄化呼吸器/フィルター付 ガスマスク/圧送空気/全面型自己運搬式呼吸器 他：全面型自己運搬式呼吸器：要陽圧/ 全面型圧送空気：要陽圧：空気供給自己運搬 式呼吸器 脱出用：フィルター付ガスマスク/脱出用のみ 自己運搬式呼吸器
	混合物と反応性：強酸化剤、強硝酸、金属				
曝露経路、症状、対象器官 (表 5 参照)： 曝露経路：吸入、接触 症状：眼の刺激、呼吸器系；無呼吸、昏睡、痙攣；結膜炎、目の痛み、 涙の分泌、光過敏症、水疱の発生；めまい、頭痛、倦怠感、不快感、不 眠症；消化器系の刺激；液体：凍傷 対象器官：目、呼吸器系、中枢神経系				応急措置 (表 6 参照)： 眼：凍傷 皮膚：凍傷 呼吸：呼吸支援	

出典： [8]

❖ どのように行動すべきか - 運転員、整備士、技能工 - :

- 1) H₂S のすべての特性を認識しておくこと。
- 2) H₂S の危険性の本質を理解すること。
- 3) 個人用 H₂S 検知器を含む H₂S の個人用防護具 (PPE) の正しい使用方法を理解すること (図 3 を参照)。
- 4) H₂S 放出の警報通知システムを理解すること。
- 5) H₂S の危険性に対処する作業手順を作成し、または作成を支援すること。
- 6) H₂S 曝露に対する適切な対応手順を理解すること。
- 7) H₂S の危険性の可能性がある場合、作業許可証や作業ごとの危険性分析において H₂S への曝露の考慮を含めること。
- 8) H₂S を含む機器を取り外すときは、H₂S 除染およびガス除去手順に従うこと。
- 9) H₂S が鉄と接触すると、発火性の硫化鉄が発生する可能性があることに注意する。そのような設備を開ける時は注意すること。
- 10) 同僚が H₂S を扱うところを観察して、より良いやり方を肯定的で前向きな仕方でアドバイスすること。

鉄則 硫化水素 (H₂S) 編

鉄則 #1: H₂S の危険な特性を常に理解し尊重すること



通常の保護具では
H₂S の放出に
使用するには不適切



脱出のための短時間の
使用に適用可能な
呼吸器



H₂S の放出への
使用に適用可能な
呼吸器



H₂S の放出への
使用に適用可能な
呼吸器と化学防護服

図 3 正しい防護具の選択

出典：画像 1, 2, 3：Shutterstock、画像 4：CSB

❖ どのように行動すべきか - 管理者：

- 1) H₂S に曝露する可能性のあるすべての作業者に適切な訓練を実施すること。
- 2) H₂S の危険な特性がプロセス安全情報／プロセス知識管理データベースに文書化されていることを確認すること。
- 3) H₂S の危険がある場所でのすべての作業に対して安全に関する要請事項を定めて守らせること。
- 4) 定量的リスク評価 (QRA)、プロセスハザード分析 (PHA)、ハザード特定 (HAZID) のような定性的／定量的検討が、H₂S の危険性を理解し、レビュー対象の装置の理解が適切なレベルの有能な人材により完了していることを確認すること。
- 5) 適用される基準や規制と、それらの基準や規制を上回ることもある会社の要求事項を明記した施設全体の H₂S 方針を策定し文書化すること。
- 6) 他に適切な排出方法がない又は不可能な場合には、H₂S の意図的放出のリスク管理方針を適用すること。この非常にまれな状況には徹底的なリスク分析で保証すること。
- 7) たとえ H₂S 濃度が許容曝露レベル以下であっても、職場において H₂S の臭気を容認しないこと。詳細は補足資料「硫化水素と硫化カルボニルの毒性プロファイル」[9]を参照。

❖ どのように行動すべきか - エンジニアおよび設計者：

- 1) 自分が H₂S に曝露する可能性がある場合、または H₂S 関連の設計に関与している場合には、適切な訓練を受けること。
- 2) 関連する H₂S 設計基準に従うこと。
- 3) H₂S の危険性がある場所には現場全体に標識を設置すること。

鉄則 硫化水素 (H₂S) 編

鉄則 #1: H₂S の危険な特性を常に理解し尊重すること

- 4) H₂S の放出を人々に知らせるために視覚的および聴覚的なアラームを設けること。
- 5) 起こりうる副反応を含め、H₂S プロセスの組成情報をレビューし記録すること。これらの副反応には、可能性が低いとしても、H₂S が現場にある他の物質と接触するかもしれないというシナリオを含めるべきである。
- 6) H₂S の危険に対処する定性的/定量的検討 (QRA/PHA/HAZID など) に参加し、支援する。

❖ どのように行動すべきか - 緊急対応者 :

- 1) H₂S 雲を分散するために水噴霧が使用できることを知っておくこと。
- 2) 流出水の取り扱いと貯蔵に注意を払うこと。H₂S を含む水は健康被害をもたらす可能性があるため、H₂S が水に溶解する危険性に対応要員は知っておくこと。
- 3) 緊急事態のダイナミックな特性や H₂S の毒性のために、H₂S 放出事故に対応するときに、常に最高レベルの保護具 (鉄則 4 参照) を着用できる準備をしておくこと。

❖ 補足資料 :

- API RP 55 硫化水素を含む石油とガスの生産およびガス処理プラント操業のガイドライン [3]
- 小型、可搬式の石油やガス生産設備 : 設計と運転の推奨解決策 (安全ガイド) [6]
- OSHA : 硫化水素 - 危険性 [7]
- 硫化水素と硫化カルボニルの毒性プロファイル [9]
- アルバータ州政府、Killer Gas Bulletin CH026 [10]
- リスクベースのプロセス安全、第 8 章および第 9 章 [11, pp. 169-244]
- API 49 硫化水素を伴う掘削および坑井保守作業のガイドライン [12]
- 環境衛生基準 19 硫化水素 [13]
- API STD 2015 石油貯蔵タンクの安全な入槽と洗浄のための要件 [14]
- 致死量情報クイックガイド [15]
- ASME, Section VIII ボイラーおよび圧力容器 Code Division 1 Section UW-2 [16]
- 硫化水素の毒性レビュー [17]
- 物質情報 - 硫化水素 [18]
- H₂S の放出率評価と監査フォーム [19]

鉄則 硫化水素 (H₂S) 編

鉄則 #2: H₂S の危険性がどこに存在し、または発生するかを常に把握しておくこと

鉄則 #2: H₂S の危険性がどこに存在し、または発生するかを常に把握しておくこと

❖ なぜ :

- 1) H₂S の存在や生成の可能性のある場所を知ることは、リスク管理にとって極めて重要である。
- 2) 知識の欠如は、H₂S の危険性への意識、認識または評価の不足による可能性がある。
- 3) H₂S は、皮革なめし、パルプ・製紙、化学、染料、有機物の分解、廃水プラント、滞留海水系、温泉、鉱物採掘、石油・ガスの生産など、自然界や非常に広範な産業や場所に存在する [20]。多くの事故は人々が H₂S の存在や生成の可能性のある場所を知らずに H₂S の危険性に備えをしなかったことで起きている：
 - a) 人々は H₂S を生成する反応を知らなかった。反応シナリオは、意図的な混合（例えば、H₂S を含む水の入った容器を塩酸で化学洗浄）、化学物質の混合順序の間違い、または不注意による混合によって生ずることがある [21] [22] [23]。
 - b) 人々は H₂S が低地に蓄積する可能性があることに気づいていなかった。人々は化学反応が起きて H₂S が発生するというプロセス安全の知識に乏しかった。
 - c) 人々は隣接するエリアで行われている作業（例えば、異なる高さでの同時作業）に気づいていなかった。放出された H₂S の拡散は、建物の内外、または隣接する場所の内外に移動することがあるため、簡単には分からない場合がある [24]。
 - d) 人々は H₂S の危険にさらされていることを認識せずに、倒れた被災者を助けるために行動した。多くの人は生来、倒れた被災者を助けようと自発的に行動する。彼らは（自分の安全を確保する前に）まず他人を助けようと自動的に動いてしまう。
 - e) 人々は H₂S の雲が目に見えなかったため、はっきり認識できなかった。
 - f) 人々は H₂S の放出に繋がる異常事態に対して準備ができていなかった。
- 4) H₂S の存在やその可能性を知ることにより管理、エンジニアリング、操業、保全、そして緊急対応する者は、H₂S に関連したプロセス安全事故を防止する事前の措置がとれる。鉄則 # と鉄則 #4 も参照のこと。
- 5) 事故事例：
 - a) 請負工事の従事者がパルプ・製紙工場で作業していた。2002 年 1 月 15 日、硫化水素ナトリウム (NaSH) がタンクローリーの荷降ろし場で荷降ろしされた。荷降ろし場の床面は雨水、結露水、荷卸し作業で時折こぼれる化学品（例えば、NaSH）を油溜めと呼ばれる集合ピットに排出していた。油溜めからは排水溝に排出することもできた。図 4 を参照。しかし環境への配慮により油溜めから排水溝への排出弁は通常閉じられ施錠されていた。事故当日、2002 年 1 月 16 日、油溜めには水で希釈された相当量の NaSH 溶液が溜まっていた。工事作業者が液体で充満したピットに立つのを避けるため、運転員が弁の施錠を解除して開け、油溜めの内容物を排水溝に排出した。5 分後、弁は閉じられ、再び施錠された。

事故当日、下流の排水処理エリアの pH を調整するために排水溝に硫酸が添加された。硫酸が排水溝内の NaSH と反応し、H₂S が発生した。排水溝のマンホールのシールに隙間があったため、H₂S ガスが放出され、作業者のいるエリアに流れ込んだ。マンホールの近くにいた事作業員 2 人が H₂S 中毒で死亡した。さらに、7 人の建設作業員と 1 人のトラック運転手が H₂S 暴露により負傷した [25]。

鉄則 硫化水素 (H₂S) 編

鉄則 #2: H₂S の危険性がどこに存在し、または発生するかを常に把握しておくこと

この鉄則に関連する教訓は、油溜めから排水溝に流したときに H₂S の発生する可能性があったということである。

- (1) 会社は NaSH の配送、荷降ろし、取扱いに携わる作業者に、酸と混ぜると H₂S が発生することを伝えていなかった。
- (2) 事故が発生した工場のすぐ近くのエリアは H₂S の危険性が特定されていなかった。このため、そのエリアにはガス検知器、警報機、警告標識がなかった。
- (3) 設計エンジニアは荷降ろし場の排水をプラントの酸性の排水溝の系に接続する際、H₂S 発生の可能性を評価しなかった [26]。
- (4) 保全スタッフは、酸性の排水溝の系を密閉して維持することの重要性を認識していなかった。

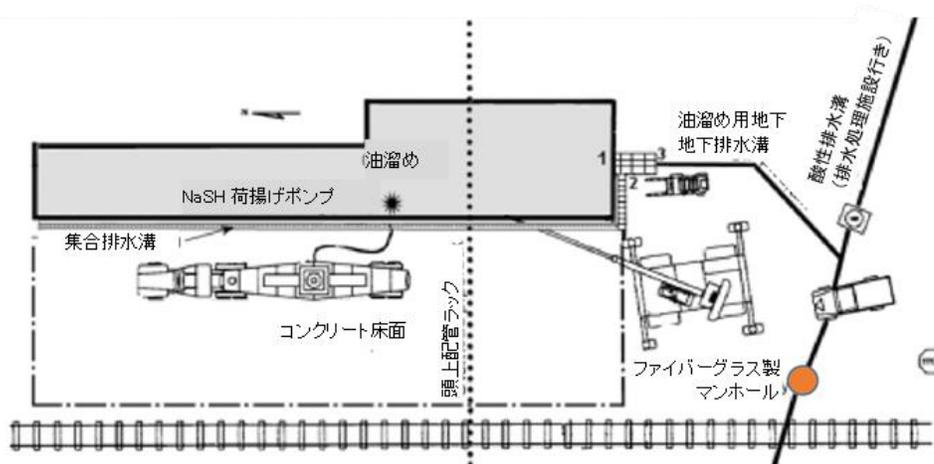


図 4 酸性の排水溝の系の安全上重要な設備の故障—マンホールカバーのシール不良が原因で 9 人が H₂S ガスに暴露した

出典：米国化学物質安全性および有害性調査委員会 [25]

❖ どのように行動すべきか - 全ユーザー:

- 1) 現場や新たなエリアに行く際、H₂S のある場所に注意すること。例えば、
 - a) 皮革産業では、H₂S は原皮のなめし前に存在する可能性がある。
 - b) 滞留海水系では、ある種のバクテリアの作用によって H₂S が生成されることがある。
 - c) 下水管の系では、有機物の腐敗によって H₂S が発生することがある。
 - d) 製油所では、H₂S が多くのユニットに存在する可能性がある。
 - e) H₂S 製造現場では、H₂S は現場全体に存在する。
- 2) 標識の指示に従うこと。許可なく H₂S 制限区域に立ち入らないこと。
- 3) H₂S が存在する可能性のある場所を尋ねること。
- 4) H₂S の危険性、暴露の可能性のある場所、緊急時の対応手順の全てを理解するために、受けられる訓練や意識向上のためのプレゼンテーションに出席すること。

鉄則 硫化水素 (H₂S) 編

鉄則 #2: H₂S の危険性がどこに存在し、または発生するかを常に把握しておくこと

- 5) H₂S の放出を知らせるすべての警報について理解し、注意すること。
- 6) 指定された避難経路および集合場所の要件に留意すること。
- 7) 防護具の使用方法を理解し、その要件を遵守すること。例えば、H₂S の放出される可能性が特に高いエリアで作業したり、そのエリアを視察したりする場合、緊急避難用呼吸器の携行を義務付けている事業所もある。

❖ どのように行動すべきか — 運転員及び保全員 :

- 1) 運転員、整備工、技能工向けの高度なトレーニングに参加し、H₂S の有害性、存在場所、暴露の可能性と緊急時の対応手順を学ぶこと。
- 2) H₂S の放出のすべての観察結果を報告して、ほかの人に十分に理解されていないかもしれない潜在的な危険性を報告すること。
- 3) プロセスの運転状態を変更する時は、常にプロセスの経路を歩いて、その移行が H₂S に対して安全であるか確認すること。特にプロセスの制限が関与する場合は要注意。
主な H₂S の存在場所を特定するには図面に印をつけることが役に立つ。これにより H₂S が存在する場所を知ることができる。[27] [28]。
- 4) H₂S を含有する設備の保全工事が発生した時は、業務作業分析が承認され、この状況に対するリスク分析がなされていることを確認すること [29]。
- 5) 手順からの逸脱が必要になったときには H₂S の危険性に注意が必要である。事故の歴史は望ましくない化学反応が起きる可能性を示唆している。該当する場合は、プロセスハザードレビューを行い変更管理に従う。詳細は CCPS のハンドブック「効果的な運転と保守の手順作成のガイドライン」と「プロセスプラント運転のためのヒューマンファクター」の補足資料を参照のこと [30] [31]。
- 6) H₂S が存在するか生成する可能性のある場所について、運転手順書と保全手順書に適切に記述されているかを確認すること。
- 7) 保全計画を作成する時には常に H₂S が存在しているかもしれないと考慮すること。鉄則 #3 を参照のこと。

❖ どのように行動すべきか — 管理者 :

- 1) 部外者の化学施設への立ち入りを防ぐため、リスクベースのセキュリティ対策を立てて実施すること [32]。これには有害化学品の警告表示、ビデオ監視、工場周辺のフェンス等が含まれる。
- 2) H₂S に曝露する可能性がある作業員には知識教育を実施すること。彼らにはその作業場所の危険性を認識させなければならない [33]。
- 3) 意図しない化学反応による H₂S の生成を含め、H₂S が存在または生成しうる場所を特定するための「プロセスの危険性の特定と評価」には多分野のグループが参加するように資源を出すこと。
- 4) H₂S の危険が存在する場所、H₂S の特性と関連する緊急対応手順を幅広く伝えること。
- 5) H₂S の放出の可能性が顕著なエリアに、適切なレベルの H₂S 検知と警報システムを義務付けること。さらにそれらのシステムを常時機能維持させることを義務付けること。

鉄則 硫化水素 (H₂S) 編

鉄則 #2: H₂S の危険性がどこに存在し、または発生するかを常に把握しておくこと

- 6) これから導入する場合は、H₂S への曝露のリスクに対処し、H₂S のリスクと曝露の可能性がある場所についての意識を高めることにつながるような強制力を持つ作業許可制度を確立すること。

❖ どのように行動すべきか — エンジニア及び設計者:

- 1) プロセスに関する知識、中でも特に H₂S に関する知識を持った者が、プロセスハザード分析 (PHA) 検討会に参加すること。それらのエンジニアは H₂S を発生させる可能性のある定常時及び非定常時の状況を良く理解しているだろう。PHA 検討会では、H₂S の危険がどこに存在するか、あるいはどこで生成しうるかに関するプロセス安全知識を高めるように記録され、伝達されるべきである [11, pp. 169-244]。
- 2) 設備保全のエンジニアはどこに H₂S が存在するのか、または発生する可能性があるのかを知り、容器類の機械的健全性に H₂S が及ぼす影響を評価しなければならない。補足資料「機械的健全性のシステムのためのガイドライン」を参照のこと [34]。
例えば、H₂S と引張応力の組合せは、金属材料の硫化物応力腐食割れ (SSC) を引き起こすことがある。設備保全のエンジニアは既知の SSC の危険を予測することができる。これは特に、溶接 (継手など) は承認された溶接手順 (溶接材料中の過剰なマンガンやクロム、不十分な溶接材料の溶着、または不十分な脚長を避けるなど) で行われるべき場合に当てはまる。適切な前処理が必要である (特に炭素鋼のベークアウト処理 (脱ガス目的の加熱処理) の手順など) [35] [36]。
- 3) H₂S が大気中に放出される可能性があり、H₂S のガスや液体の逆流防止を逆止弁に依存している場合は、リスクベースのアプローチを採用すること。リスクベースのアプローチにより不要であると判断されない限り、能動的 (非受動的) で確実な遮断装置を設置しなければならない [37]。
- 4) プロセスに H₂S が含まれる時には大気開放の設計を避けること。H₂S があるか、または生成の可能性のある時にはエンジニアは、pH 測定やレベル測定のために装置を開放するような行為を避けるために、密閉型 (封じ込め型) システムで設計を検討すべきである [23] [38]。
- 5) H₂S が溶液から放散するかどうか、またいつ放散するかを判断するには、プロセスの化学と物理学 (特にヘンリーの法則) を理解すること。H₂S ガスは水や炭化水素への溶解度により、元の発生源や発生場所から直接放散されることもあれば、下流で放散されることもある。詳細については、補足資料「溶融硫黄の貯蔵と取扱いの危険性 [39]」を参照のこと。
- 6) 高温と低 pH の時には、放散量が多くなる。H₂S ガスの放散場所はあり得る全ての運転条件を基に設計されるべきである。例えば、溶存 H₂S 含有の廃水タンクは温度が上昇すると H₂S ガスが放出される。もし設計で解決できないなら、「リスクの階層的制御」の考え方を採用すること (図 5 参照)。
- 7) H₂S の固定式ガス検知器とそれに連動したアラームシステムの作動基準と設置場所を決定すること。考慮すべき事は、放出の可能性のある場所とその H₂S の特性 (例えば、空気より重いなど)、放出事故時の H₂S の移動の可能性 (例えば、主な風速、風向、風下にある敏感な受容体、例えば人間との距離) が含まれる。

❖ どう行動すべきか - 緊急対応者:

- 1) H₂S の放出に対応する場合は、風向き、建物の換気、地形などの要因を考慮すること。
- 2) 緊急時には、H₂S が存在する場所や生成している可能性のある場所を把握するために検知器を使用して確認すること: 鉄則 #4 を参照のこと

鉄則 硫化水素 (H₂S) 編

鉄則 #2: H₂S の危険性がどこに存在し、または発生するかを常に把握しておくこと

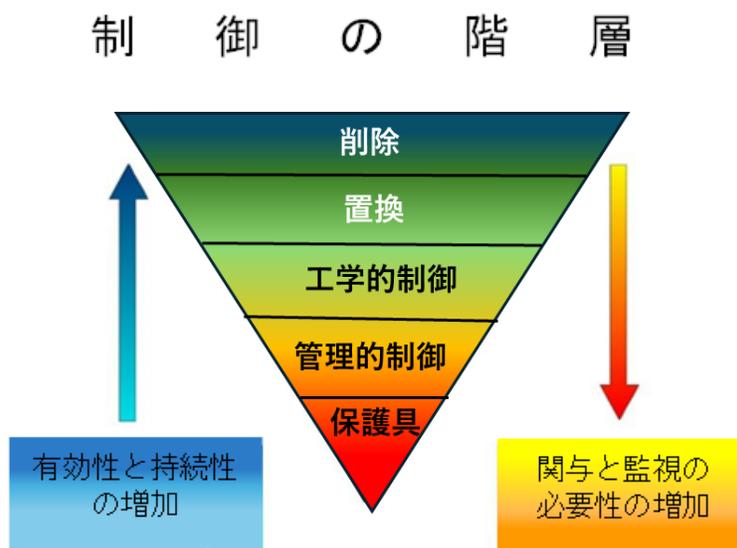


図 5 制御の階層

出典: Shutterstock.com

❖ 補足資料:

- 2016 年版硫化水素の毒性概要 [9]
- CCPS, リスクに基づくプロセス安全、第 8 章および第 9 章 [11, pp. 169-244]
- GSB ジョージア・パシフィック社の硫化水素中毒事故報告書 [25]
- 効果的な運転および保全手順書を作成するためのガイドライン [30]
- プロセスプラント運転のためのヒューマンファクター: ハンドブック [31]
- 機械健全性システムのガイドライン [34]

鉄則 硫化水素 (H₂S) 編

鉄則 #4: H₂S の放出に備え、常に緩和策を策定すること

鉄則 #4: H₂S の放出に対する予防策を常に講じること

❖ なぜ:

- 1) 作業員及びその他の人を、死亡または重症事故に繋がる可能性のある有害ガス曝露から守ること [40] [41] [42]。
- 2) 環境汚染を防ぐこと [43] 。
- 3) 事故事例：
 - a) 1993年7月7日、フランスの Grasse で廃水をタンクからタンクローリーへの移送作業中に H₂S が放出し、その結果タンクローリーの運転手が死亡した。製造工程で発生した H₂S は廃水をタンクローリーへ移送する前段階で中和されることになっていた。しかし主要な反応物質の一つが変更されたという理由で中和手順は記載通りに実行されなかった。加えて、廃水中の H₂S 濃度を測定する計器もなく、技能工は自分の臭覚に頼って中和反応を監視せざるを得ない状態であった。中和工程での検査が正確でなかったため、極めて高濃度の H₂S が廃水中に残存していた。廃水を真空ポンプで移送したため、高濃度の H₂S がポンプの排気口から放出された。ポンプの排気口は毒性物質の取り扱いを想定していなかったため、ちょうどそこにいた運転手がフェームを吸う高さであり、死亡事故に繋がった [44]。

この鉄則に関する教訓は：

- (1) H₂S の処理条件が厳密に守られておらず、主要な反応物質の一つが必要量を検討せずに変更していた。処理手順が不完全で、どの段階でも管理がされていなかった。
- (2) 手順には不必要な詳細情報が含まれており、そして肝心な情報が入っていなかった。
- (3) 高濃度の H₂S 廃水を移送前に分析しなかった。
- (4) ガイドラインや手順が守られていなかった（例えば、運転開始記録にサインがなかった、中和後の廃水タンクの記録がとられていなかった）。
- (5) H₂S は有害であると現場では認識されていたが、液体蒸気や排ガス中の濃度を測る計器はなかった。

❖ どのように行動すべきか — 全ユーザー:

- 1) 常に H₂S を排除/代替/回避する方策を考え実行すること [45]。図 5 に示すように階層的制御は排除からスタートすべきである。
- 2) H₂S の危険性を良く知り、H₂S への暴露から身を守るために、手順やその他の管理的制御を厳格に守ること。例えば、個人用 H₂S 検知器は正しく機能しているか、定期的校正を含め、正しく保守されているか等を確認すること。

❖ どのように行動すべきか — 運転及び保全:

- 1) 適切な運転手順と保全手順を書いてそれに従うこと、それには下記が含まれる。
 - a) H₂S の危険性が存在する箇所の手順書は強調して表示する。
 - b) H₂S への予防的監視と制御が必要な重要な工程は強調して表示する。
 - c) これらの手順書は誤りがなく最新であることを検証し保証する [30]。
- 2) 蒸気や過マンガン酸カリウム (KMnO₄) 等の酸化剤の使用を含め、H₂S 機器の除染手順を作成しこれに従うこと [46]。

鉄則 硫化水素(H₂S)編

鉄則 #4: H₂S の放出に備え、常に緩和策を策定すること

- 3) 配管開放の手順書を作成しこれに従うこと。これには、少なくとも、最初を実施する開放作業と作業者を保護するための要件（未知の濃度の H₂S に対する自給式呼吸器（SCBA）までを含めた呼吸保護具）が含まれていなければならない。
- 4) H₂S 使用機器が運転復帰するとき及び H₂S 使用機器に変更が発生した時には、運転前の安全レビューを含む運転準備レビューに参加すること [40]。例としては次のようなものがある：
 - a) 手動弁の開閉ポジションが正しく、配管開放部がないことを現場パトロールで確認する。
 - b) 固定式 H₂S 検知器を含め、プロセス計器のすべてが使用可能な状態にあることを確認する。
- 5) 以下のような H₂S 取扱機器に一般的に関連する活動に対する作業許可制度に従うこと（ただし、これらに限定されるものではない）。
 - a) 一般作業
 - b) 火気使用作業 [47]
 - c) 密閉空間作業 [48]
 - d) ロックアウト／タグアウト [49]
- 6) 作業許可制度の検討では、現場レベルのリスクアセスメントや作業危険性評価を実施し、その中で H₂S のような危険性の検討を促すこと。
- 7) 重大な安全機能が損なわれている場合、保全作業依頼での優先順位を上げること。

❖ どのように行動すべきか — 管理者:

- 1) すべての H₂S 放出やニアミスはプロセス事故調査を受けるという方針を確立し、重要な知見は組織全体で共有することを義務付ける [50]。H₂S の放出やニアミスの調査結果の知見を理解することで、組織の将来の予防対策に繋がるはずである。鉄則 #5 を参照のこと。
- 2) H₂S 使用設備を含めた変更管理の基準を確立すること [40]。その基準では変更が許容できるかどうかを確認するために、H₂S の予防対策のレビューを含めるべきである。
- 3) H₂S の危険性が管理システムに含まれていることを確認し、H₂S 放出事故で起こり得る過酷な結果に対する脆弱性への感覚を高めさせること。それには設計標準、緊急対応計画、新人研修等が含まれる。鉄則 #1 を参照のこと。
- 4) 安全上重要な機能が損なわれた場合に保全作業依頼が迅速に処理されていることを確認できるパフォーマンス指標を作成すること。
- 5) 安全上重要な機器の故障の再発を防ぐには、作業依頼を要した故障の根本原因を特定することが最も重要である [51]。

鉄則 硫化水素 (H₂S) 編
鉄則 #4: H₂S の放出に備え、常に緩和策を策定すること

❖ どのように行動すべきか — エンジニアリングとプロジェクト:

- 1) H₂S 関連情報を含む設計基準を確立し、H₂S 含有量の変化が適切に変更管理の対象となるようにすること。例えば、原料の変更など。
- 2) H₂S の危険性に対応する社内設計標準を制定し、これに従うこと。それには以下の内容が含まれる。
 - a) H₂S 工程は、図 5 の本質的安全設計 (ISD) に沿って設計すること。例えばエンジニアは：
 - (1) 後工程の H₂S の危険性は、苛性ソーダ (NaOH) を投入して H₂S と反応させることにより除去し、下流部の危険性物質を NaSH (または Na₂S) 溶液 (液体) に変えること。これは H₂S (ガス) に比べ安全な移送が簡単になるであろう。
 - (2) フェイルセーフ設計をすること。例えばフレア装置に繋がる圧力開放弁には“フェイルオープン”弁を採用する。
 - (3) 配管設計は交差汚染(クロスコンタミ)を防止するために単純にする。
 - (4) 配管網などの下流の機器から H₂S を除去、低減するために、サワー天然ガスの処理用に硫化水素除害装置を設計する。
 - b) 離隔距離とレイアウト設計を決めるために影響(リスク)コンター図(影響度を等値線で表した地図)を作成して、施設の配置(設置場所とレイアウト)をデザインすること。H₂S の影響が及ぶエリアを算出し、避難場所、施設の配置、地域への影響も含めた緊急対応計画のリスク判断にこのデータを使用する [52] [53] [54]。H₂S の有害性には毒性と可燃性が含まれる。
 - c) 特にサワー水の施設については、検査、試験、予防保全作業及び頻度を規定する際は、一般的技術標準 (RAGAGEP) に従うこと。これは、腐食が促進される可能性があるため、綿密な予防保全 (PM) による監視が必要となる領域である [55] [56]。
 - d) H₂S 危険地域の中の居住建物には特別考慮された換気システムを提供すること [57]。
- 3) H₂S を取り扱う機器の設計では毒性物質設計基準に従うこと [58]。
- 4) H₂S 含有機器の仕様では腐食を削減/防止するために適切な構造材料を指定すること。例えば、H₂S 取扱い機器には黄銅や銅の使用は避けなければならない[59]。
- 5) 漏れの発生源を最小にすること (例えば、小口径継手やねじ込み式継手は H₂S 含有設備には使用しないこと)。
- 6) 特に放出防止と安全対策の適切性評価に重点を置いて、定期的なプロセスハザード分析を実施すること [60]。
- 7) H₂S を含む機器を隔離し換気する手段を策定し、機器への立入りや運転からの切り離しを可能とすること。状況が変化している可能性があるため (例えば、完全に閉まっていると思われたバルブからの僅かな漏れ)、長期間経過した後は、H₂S が存在しない環境を再構築するよう注意すること。
- 8) H₂S 事故やニアミスに繋がりを防ぐことへの責任を自覚すること (材質や機器の選定、プロセス設計、化学反応や副反応、など)。

❖ 補足資料:

- CCPS, プロセス安全の文書化ガイドライン [61]
- CCPS, プロセス安全のためのエンジニアリング設計ガイドライン第 2 版 [62]
- WHO, H₂S 人の健康への影響 [63]

鉄則 硫化水素 (H₂S) 編

鉄則 #4: H₂S の放出に備え、常に緩和策を策定すること

鉄則 #4: H₂S の放出に備え、常に緩和策を策定すること

なぜ:

- 1) H₂S 流出警報を早めに出すことで、人々は効果的な緩和対策がとり易くなる。
- 2) H₂S 放出を制限する対策を施せば、死者数や重傷者数を最小にできる可能性が高くなる。
- 3) 緊急時対応計画の訓練を行うことと適切な避難用防護具を使用することにより、死者数や重傷者数を最小にできる可能性が高くなる。
- 4) 安全な場所を作ることは、人々を流出した H₂S から守り易くする。
- 5) 事故事例
 - a) 1 人の製油所の作業員がバルブ操作中に H₂S に暴露して倒れた。現場監督者は彼を助けようとして倒れ、3 人目の作業員も同様だった。救助しようとした者の誰もが H₂S 検知器を持たず、また呼吸保護具を装着していなかった。他の同僚たちが自給式呼吸装置を付けて最終的には倒れた作業員たちをその場から移動させた。3 人目の作業員は蘇生したが、最初の作業員と現場監督者は死亡した [64]。

鉄則に関連する教訓は:

- (1) 適切な防護具 (PPE) を装着せず、また訓練も受けずに対応すると救助者が犠牲者になる。
図 3 を参照のこと。

- b) 2 人の作業員が、建物内で発生源も規模も不明な H₂S の漏れを調査していた。作業員たちは呼吸保護具を着用せずにガス濃度を測るため建物の中に入った。1 人の作業員の個人用 H₂S ガス検知器の警報が建物の入口で作動したため、2 人はその場を離れた。1 人の作業員がほうきの柄の先に検知器を取り付けて戻ってきて、250ppm の H₂S 濃度 (これは生命と健康に直ちに危険を及ぼす濃度 (IDLH) の 2 倍以上) を測定した。2 人とも医師の診察を受けた [64]。

この鉄則に関連する教訓は以下の通りである:

- (1) この建物に適切なガス検知器が設置されていれば、作業員は早目の警報を受け、高濃度の H₂S が存在する場所を調査するというリスクを冒すことはなかったであろう。
- (2) また、作業員のリスクを増大させたその場しのぎの測定体制で、その場所に戻る必要はなかった。
- (3) H₂S の漏れ調査では、作業員は SCBA または同等の空気供給器具を必ず使用すべきである。特に漏れの程度が最初の報告時より変化/悪化した場合には、これが作業員のリスク低減に役立つ。

- c) 鉄則 #2 のなぜ事故は起きたのかを読むこと。

負傷した請負業者のうち 7 人は自家用車で地域の医療センターに運ばれ、救急医療サービス (EMS) は他の 3 人の被災者 (死亡した 2 人を含む) を別の病院に搬送した。1 人の被災者の衣服は完全に脱がされて袋の中に入れていたが、他の 2 人の被災者の服は脱がされなかった。被災者を搬送した EMS 隊員たちも H₂S 暴露の症状を訴えたが、患者の衣類を脱がせた 2 人の救急隊員の症状の方が軽かった。救急隊員は全員、医療検査を受けた後、解放された。

鉄則 硫化水素 (H₂S) 編

鉄則 #4: H₂S の放出に備え、常に緩和策を策定すること

この鉄則に関連する教訓は以下の通りである：

- (1) 被災者は現場で除染処置を受けることなく、事故対応指揮システムの立ち上げ前に事故現場から工場の救護所に運ばれた。工場のガイドラインには、現場においても救護所においても除染処置が必要だとはされていなかった。
- (2) 病院に搬送された被災者3人のうち1人の衣服は脱がされていたが、他の2人の衣服は脱がされていなかった。緊急医療隊員たちは汚染された衣服によって H₂S に暴露した。
- (3) 地方自治体の医療管理ガイドラインでは、H₂S ガスに暴露した被災者の衣服から H₂S が放出され、それが救急隊員に医療リスクをもたらす可能性を認識していなかった [25]。

❖ どのように行動すべきか - 全ユーザー：

- 1) H₂S が存在するか発生する可能性のある施設内の場所及び、H₂S の放出を検知し警報を発する手段を常に把握しておくこと。
- 2) H₂S の危険性（引火性、毒性を含む）に関する教育訓練に参加すること。
- 3) 施設の手順書で規定されている場合は、避難用呼吸器を携帯すること。
- 4) H₂S の警報が鳴ったときの避難方法を知るために、すべての緊急対応訓練に積極的に参加すること（例：風上に向かって避難し、（用意されている場合は）脱出用呼吸器を使用する）[10]。
- 5) 緊急対応要員の指示に従うこと。
- 6) 救助訓練を受けていて、自給式呼吸器（SCBA）など適切な防護具を着用していない限り、H₂S に被災した人を救助しようとしてはならない。

❖ どのように行動すべきか - 運転及び保全：

- 1) 固定式及び携帯式ガス検知システムは、定期校正（通常、メーカーにより指定された月1回または隔月1回の校正）など、メーカーの仕様に従って良好な状態を維持すること。
- 2) ガス検知と音声による警報システムの定期試験を実施すること。
- 3) H₂S 検知器によるインターロック・シャットダウンの点検、整備、機能試験を行うこと。
- 4) 施設にあるすべての避難用呼吸器および自給式呼吸装置を点検し、良好な状態に維持すること。
- 5) H₂S ガスの侵入に対して安全な場所を何か所か、施設全体に整備しておくこと。
- 6) 現場作業の前に、作業許可に適用される H₂S の危険性について話し合うこと。これには、全ての機器の最初の切り離し時の H₂S の危険性の軽減も含まれる。これにより、H₂S 放出の際に H₂S の危険性を軽減するための心の準備ができる。
- 7) H₂S が放出された場合の、プロセスの緊急停止を含む緩和策を準備し、訓練を受けること。
- 8) H₂S が存在する可能性のあるプロセスエリアやその他の場所に立ち入る際には、避難などのリスク緩和策を準備すること。
- 9) 暴露の可能性に関する適切な情報を全ての緊急対応（ER）チームに伝達できるようにしておくこと。

❖ どのように行動すべきか - 管理者：

- 1) 緊急事態に応じて、H₂S に対して安全な場所を施設内または施設外に設置すること。

鉄則 硫化水素 (H₂S) 編

鉄則 #4: H₂S の放出に備え、常に緩和策を策定すること

- 2) H₂S の危険性（引火性、毒性を含む）に関する施設の教育訓練が組織の全レベルで実施されていることを確認する。施設内にいる可能性のあるすべての人（例えば、来訪者、請負業者、運転以外のスタッフ、事務部門スタッフ）に対して、適切な教育訓練のレベルを設定すること。
- 3) 施設においてリスクアセスメントが実施され、H₂S に暴露する可能性のあるすべての従業員の適切な避難／呼吸装置が定義されていることを確認すること。
- 4) 保護具が従業員の健康と安全に危険をもたらさないことを確認すること。例えば、救助作業には脱出用限定のボンベ／呼吸器を使用してはならない。
- 5) 施設全体の緊急時対応計画が活用できる状態にあり、定期的な訓練と演習が実施され、文書化され、レビューされていることを確認すること。
- 6) H₂S 事故に対応するための適切な機材を緊急対応（ER）チームに提供すること。
- 7) 施設の H₂S 対応方針に緩和対策と予防対策が含まれていることを確認すること。
- 8) 必要に応じて、緊急対応機関を含む地域当局との連携を確保すること。

❖ どのように行動すべきか - エンジニアリング及びプロジェクト:

- 1) 警報設定値に関する社内基準、法規制、あるいは業界のガイダンスに従って、固定式 H₂S ガス検知器の適切な検出範囲を設計して設置すること [65]。
- 2) 社内基準、法的要件、業界標準のガイダンスに従って、適切なレベルの警報（可視および可聴）を設計して設置すること。H₂S の放出は急速に拡散する可能性があるため、遅れを避けるために、警報は常に自動にしておくこと [66]。
- 3) H₂S の内部放出を囲いの外部の人々に知らせる方法（例えば、外部の可聴・可視警報と連動したガス検知）を備えた囲いを設計すること。
- 4) 屋内／屋外の作業場における H₂S の危険性を低減するための制御方法を設計すること；例えば、建物内部の人を保護するために換気を強化したり冷暖房空調設備（HVAC）を自動で閉鎖したりすることが挙げられる。
- 5) 想定される放出シナリオ、卓越風向（高頻度の風向）、侵入 H₂S ガスに対して有効な希釈濃度に基づいて、現場に H₂S に対して安全な場所を設計すること。理想的には、異なる風向にも備え、安全な場所は複数設けるべきである。
- 6) H₂S を含む機器には遠隔操作式の緊急遮断弁の設置を計画すること。これには定められたしきい値量や漏洩しやすい箇所への考慮も含まれるだろう。

❖ どのように行動すべきか - 緊急対応者:

- 1) 現場の H₂S 濃度に基づき、適切な呼吸装置を指定すること。緊急時の対応には、フルフェースの自給式呼吸器（SCBA）を使用すること。緊急時の対応には、決して脱出用呼吸器やリブリーザー（排気を再呼吸するもの）を使用しないこと [64] [66] [67]。
- 2) 施設内で H₂S の放出が想定されるすべての場所に対して緊急時管理計画を策定すること。
- 3) 自給式呼吸器（SCBA）を用いた実践的訓練を含め、これらのシナリオに対する緊急対応訓練を実施すること。
- 4) H₂S の危険性に特化した緊急対応（ER）および応急処置の訓練を修了すること。

鉄則 硫化水素(H₂S)編

鉄則 #4: H₂S の放出に備え、常に緩和策を策定すること

- 5) 囲いに入る際は、有害な大気への侵入を避けるため、ガス検知器を使用して内部の大気を特定すること [66]。
- 6) H₂S の放出に対応する際は、風向の継続的な監視も含め、定められた緊急時対応計画 (ERP) に従うこと。
- 7) H₂S が放出された場合、大きな影響を受けるエリアが広範囲に及ぶ可能性があることに注意すること。この区域は周辺地域にも広がる可能性があるため、施設や地方自治体の緊急時対応計画 (ERP) に含める必要がある。
- 8) SCBA の使用に関する訓練を受けていない限り、H₂S が放出された場所で人を救出しようとしてはならない。バディシステム (2 人組のペアでの対応) を採用してもよい [4] [64]。
- 9) H₂S に被災した人を安全な場所 (新鮮な空気のある場所など) に移動させること。被災者が呼吸困難または呼吸をしていない場合には、逆止弁付き人工呼吸用マスク (ポケットマスクなど) を用いて人工呼吸を開始し、利用可能であればマスクに酸素を送気する。作業者に脈拍がない場合は、心肺蘇生法 (CPR) を開始する。H₂S への曝露から離されると身体は H₂S を自然に排除するため、医療支援が到着するまで被災者に酸素を使った人工呼吸を継続することが重要である [64]。
- 10) 被災者の皮膚や衣服に付着している可能性のある H₂S への曝露を防ぐこと。これには、被災者と緊急対応要員を保護するために、換気の良い場所で犠牲者の衣服を脱がせることが含まれよう。
- 11) 高圧酸素装置など、H₂S 曝露の治療に役立つ装置を備えた地域の施設を利用できるように協力体制を計画すること [68]。
- 12) 事故の緊急対応 (訓練と実際の事故の両方) を評価して改善を図ること。

❖ 補足資料:

- 避難を考え直す [69]
- 屋内退避—有害物質の影響からのリスクの軽減 [70]
- 29 CFR. 1910.119 労働安全衛生管理局 [71]
- 工場の緊急事態に対する技術計画に関する CCPS ガイドライン [72]
- 化学プロセス産業における放出後緩和技術に関する CCPS ガイドライン [73]

鉄則 硫化水素 (H₂S) 編

鉄則 #5: H₂S の事故を調査し、常に管理システムを改善すること

鉄則 #5: H₂S の事故を調査し、常に管理システムを改善すること

❖ なぜ:

- 1) 多くの事故の根本原因は、管理システムの欠陥に関連している。
- 2) H₂S の事故やニアミスを調査することにより貴重な教訓を得ることができ、これを適切に適用すれば、将来の類似事故が再発する可能性を低減することができる。
- 3) 事故調査から得られた教訓は、他のプロセス安全の要素も含めて、管理システムと企業文化を強化する機会となる。
- 4) 社内の他のサイトや業界内の他の工場の事故調査から得られた教訓からは、現場の管理システムを改善するための貴重な見識が得られる可能性がある [74]。
- 5) 事故事例:
 - a) 2002 年 12 月 11 日、従業員が廃水処理室に入った際に H₂S の暴露により倒れるという事故が発生した (図 6 を参照)。従業員は工具を取るために部屋に入り、「腐った卵」のような臭気に気づき、肺に圧迫感を感じて呼吸困難となった。彼は避難しようとしたが室内で倒れ、同僚が彼を安全な場所に引き上げた。この施設は以前にも H₂S による事故を起こしており、そのために、市当局による外部調査が行われ、書面による改善命令が出された。これを受けて、H₂S のガス検知器が設置されたが、要求事項であった手順書の策定と従業員が廃水処理プロセスに関する H₂S の危険性とその対策を理解するための教育訓練は行われていなかった。

この鉄則に関する教訓は以下の通りである:

- (1) H₂S の管理システムの脆弱性が、事故発生の道筋を与えることとなった。同社には、H₂S の危険性を管理し、効果的に危険源を特定し管理することにより従業員の安全を守るための堅牢なシステムがなかった。
- (2) 同社には、事故を調査しこれを伝達するための正式なシステムがなかった。過去の社内事故から学ぶことを怠ったため、事故が再発する機会が残されてしまった。前回の事故後、教訓は適切に学習されず、管理システムの改善も不十分であった。
- (3) 廃水処理エリアで働くための正式な手順書と訓練が不足していた。この設備の運転員が、H₂S が発生する可能性のある反応について認識していれば、この事故は回避できたかもしれない。
- (4) 違反行為の常態化は、施設の運営において不快な臭いが常態であるという納得と受容につながり、従業員は「腐った卵」のような臭いに慣れてしまっていた。全員が H₂S に関する危険性を理解していたわけではなかった。
- (5) 化学物質安全委員会 (CSB) の調査中に、この事故は化学処理用に設計されていない容器において廃棄物を化学処理した結果であることがさらに判明した [75]。

鉄則 硫化水素(H₂S)編

鉄則 #5: H₂S の事故を調査し、常に管理システムを改善すること



図6 作業者がH₂Sの臭気に慣れてしまった場所

出典: Chemical Safety Board [75]

❖ どのように行動すべきか - 全ユーザー:

- 1) H₂S に関する事故やニアミスの報告会と調査計画に参加し、組織を挙げてこの計画が着実に実施できるように協力すること。
- 2) H₂S の教育訓練および事故・ニアミスの教育訓練で得た知識を活用し、調査が必要な H₂S の事故とニアミス特定する。鉄則 #1 を参照のこと。
- 3) 適切な手法を使用して事故とニアミスを調査すること [50]。
- 4) 可能な限り、事故の発生を招いた物理的要因あるいは人的要因にとどまらず、管理システムレベルの原因を特定できるように調査を行うこと。これにより、なぜ物理的要因や人的要因が存在したのかを理解することができ、将来の事故をより広範囲にかつ効果的に防止することができるようになる。
- 5) 事故からの発見事項に基づき、防護層の有効性を評価し、改善が必要な欠陥を特定すること。
- 6) 事故やニアミスの調査結果の文書化と共有化に参加すること。
- 7) 調査結果に従って勧告を完了させること。これには、勧告に関連する実践、教育訓練、管理システムの更新が含まれる。
 - a) 事故と関連する根本原因を追跡調査して、再発の可能性がある原因因子を特定するために更なる調査が必要な再発している事故とニアミスがどれかを特定すること。

鉄則 硫化水素 (H₂S) 編

鉄則 #5: H₂S の事故を調査し、常に管理システムを改善すること

- b) 管理システムを継続的に改善して、事故やニアミスの可能性を低減すること。
- c) すべての事故が「最悪のケース」を示すものではないことを認識すること。その事象が軽微な結果にとどまったからといって、より重大な事象が発生する可能性がないとは限らない。
- d) 事故に対する「企業の記憶」が有効であり続けるようにして、得られた教訓が新入社員と現従業員に定期的に共有されるようにすること。
- e) 業界横断的（同じ業界内および異なる業界間）アプローチを用いて、事故から学んだ教訓を収集すること。

❖ どのように行動すべきか - 運転員及び保全員:

- 1) 調査が必要な H₂S の事故やニアミス特定する方法を理解すること。鉄則 #2 を参照のこと。
- 2) 調査計画を実施する際の役割を理解すること。
- 3) 調査のために H₂S の事故およびニアミスを報告すること。
- 4) 要請に応じて（チームメンバーまたは立会人として）調査に参加すること。
- 5) H₂S の事故とニアミスからの教訓を認識し、これらの教訓が運転と保全に対してどのように活用できるかという認識を持ち続け、H₂S の安全性に関する作業プロセスを継続的に改善すること。
- 6) 調査による勧告の実施を支援すること。
- 7) 異常事態への対応活動など、自分の行動が事故やニアミスにつながる可能性のあることを自覚すること。
- 8) 事故の結果の拡大を防ぐために取り得る行動を知り、可能な場合にはこれを実行すること。
- 9) 事故に関する自分の経験や知識が役立つ場合は、これを共有して H₂S が関係する実際の事象について他の人々が学習し、認識を深めることに寄与すること（例えば、プロセスハザード分析に参加した場合など）。

❖ どのように行動すべきか - 管理者

- 1) 事故およびニアミスの調査計画の文書を策定し、実行すること。
- 2) 事故調査計画に関する研修を提供すること。
- 3) 事故やニアミスの報告を奨励するための強化策を提供すること。
- 4) 学んだ教訓を業界全体に共有するために必要なリソースを提供すること。
- 5) 事故調査計画を遵守することへの期待を示し、実行させること。
- 6) 事故調査が速やかに開始され、事故現場の片付け作業の前または片付け作業中にデータ収集（物的証拠、目撃者の情報、および電子データを含む）が確実に開始されるようにすること。
- 7) 訓練を受けた経験豊富な第一線の調査員を活用し援助を受けられるようにし、必要に応じて外部の専門家を招集すること。
- 8) 調査チームは必ず客観的な調査を実施できるような人材で構成すること。
- 9) 調査チームには、H₂S の特性（鉄則 #1 を参照）、H₂S のプロセス、現場の管理システム（方針、基準、手順）を理解している社員が参加することを求めること。
- 10) 調査チームが質の高い調査を実施できるよう、十分なリソースと優先順位を与えること。
- 11) 事故調査の勧告がタイムリーに完了できるようにリソースを提供すること。
- 12) 他の施設や業界と教訓を共有すること。

鉄則 硫化水素 (H₂S) 編

鉄則 #5: H₂S の事故を調査し、常に管理システムを改善すること

- 13) H₂S の事故原因の傾向を監視して、システム上の問題を特定して対処すること。
- 14) 事故調査計画の遂行と遵守状況を監視すること。これにはタイムリーな調査完了とタイムリーな勧告実施が含まれる。
- 15) 事故調査の範囲には、事故の時系列の中に事故対応活動が含まれるようにすること。事故対応活動の調査がメインの事故の時系列から切り離されてしまうことがある。

❖ どのように行動すべきか - エンジニアと設計者:

- 1) 調査が必要な事故やニアミス特定する方法を理解すること。鉄則 #2 を参照のこと。
- 2) 事故調査計画を実施する際の役割を理解すること。
- 3) 要請に応じて調査に参加すること（主任調査員、チームメンバー、または証人として）。
- 4) 事故時系列表の作成のために、プロセスデータ（デジタルのイベントログ、計器記録、システムステータスなど）へのアクセスを提供すること。
- 5) 事故およびニアミスの事例を常に意識しておくこと。
- 6) 調査の勧告の実施に協力、必要に応じて、過去の事故の根本原因を取り除く解決策の実施にも協力すること。
- 7) 調査から得られた教訓を社員に提供するための研修をアシストすること。
- 8) 調査のために事故とニアミスを報告すること。
- 9) エンジニアたちが H₂S の施設をより適切に設計できるように、過去の事故を再検討すること。

❖ どのように行動すべきか - 緊急対応者:

- 1) 事故調査計画を実施する際の役割を理解すること。
- 2) 要請に応じて調査に参加すること（チームメンバーまたは証人として）。
- 3) 緊急対応者が事故対応中に行った運転操作上のすべての変更（バルブの開閉、物品の移動など）を調査チームに報告すること。
- 4) 緊急時対応計画を改善するために、過去の事故を再検討する。

❖ 補足資料:

- CCPS, リスクに基づくプロセス安全ガイドライン 0、第 8 章および第 9 章 [11, pp. 169-244]
- CCPS, プロセス安全事故調査ガイドライン第 3 版 [50]
- CCPS, 運転および保全作業向け危険源の特定の実践的なアプローチ [76]
- CCPS, プロセス安全管理システムの実施に関するガイドライン [77]
- CCPS, プロセス安全指標ガイドライン [78]
- CCPS, プロセス安全におけるヒューマンエラー防止のためのガイドライン [79]
- CCPS, 事故調査からの継続的なプロセス安全の向上推進 [80]

Golden Rules for Hydrogen Sulfide (H₂S)

References

- [1] OSHA, "OSHA Fact Sheet: Hydrogen Sulfide," OSHA (U.S. Occupational and Health Administration, U.S. Department of Labor), Washington, D.C. U.S., 2005.
- [2] American Petroleum Institute (API), RP 571 Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry, Washington, DC, USA: American Petroleum Institute, 2020.
- [3] American Petroleum Institute (API), API RP 55, 2nd edition, Recommended Practice for Oil and Gas Producing and Gas Processing Plant Operations Involving Hydrogen Sulfide, Washington, DC, U.S.A.: American Petroleum Institute (API), 2000.
- [4] CSB, "Hydrogen Sulfide Release at Aghorn Operating Waterflood Station, No. 2020-01-I-TX," US Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB), [csb.gov](https://www.csb.gov), 2021.
- [5] International Federation of Red Cross And Red Crescent Societies, "China: Gas Well Explosion in Chongqing - Information Bulletin n° 1," OCHA, 2003.
- [6] Canadian Association of Petroleum Producers (CAPP), "Small, Portable Oil & Gas Production Facilities: Recommended Solutions for Design and Operation (Safety Guide)," Canadian Association of Petroleum Producers, Calgary, Alberta Canada, 2014.
- [7] OSHA (U.S. Occupational and Health Administration), "Hydrogen Sulfide - Hazards," [Online]. Available: <https://www.osha.gov/hydrogen-sulfide/hazards>.
- [8] NIOSH, NIOSH pocket guide to chemical hazards, Cincinnati OH: National Institute for Occupational Safety and Health, Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, 2010.
- [9] U.S. Department of Health and Human Services, "Toxicological Profile for Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide," U.S. Department of Health and Human Services, Atlanta, GA, U.S.A., 2016.
- [10] Government of Alberta, "H₂S The Killer CH026," Worksafe Alberta, Alberta, Canada, 2012.
- [11] CCPS (Center for Chemical Process Safety), Guidelines for Risk Based Process Safety, Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, 2007.
- [12] American Petroleum Institute (API), API RP 49, 3rd Edition, Recommended Practice for Drilling and Well Servicing Operations Involving Hydrogen Sulfide, Washington, DC, U.S.A.: American Petroleum Institute, 2001.
- [13] United Nations Environment Programme, the International Labour Organisation, and the World Health Organization, Environmental Health Criteria 19 Hydrogen Sulfide, Geneva, Switzerland: World Health Organization, 1981.
- [14] American Petroleum Institute (API), API STD, 8th Edition, Requirements for Safe Entry and Cleaning of Petroleum Storage Tanks, Washington, DC, U.S.A.: American Petroleum Institute (API), 2015.
- [15] L. Brundrett, "Lethal Service – Quick Guide," 23 February 2017. [Online]. Available: <https://www.pveng.com/lethal-service-notes/>.
- [16] National Board Inspection Code, *ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1, Subsection A*, New York: ASME, 2021.
- [17] U.S. EPA, "Toxicological Review Of Hydrogen Sulfide," U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, U.S.A., 2003.
- [18] ECHA - European Chemicals Agency, "Substance Information - ECHA," 21 December 2021. [Online]. Available: <https://echa.europa.eu/substance-information>.
- [19] Canadian Association of Petroleum Producers (CAPP), "H₂S Release Rate Assessment and Audit Forms," Canadian Association of Petroleum Producers, Calgary, Alberta, Canada, 2012.
- [20] Government of Alberta, "Hydrogen Sulphide at the Work Site CH029," Worksafe Alberta, Alberta, Canada, 2010.
- [21] CCPS, "Fatality caused by unloading the wrong chemical into a storage tank!," *Process Safety Beacon*, March 2009.

Golden Rules for Hydrogen Sulfide (H₂S)

- [22] CCPS, "CCPS Process Safety Incident Database No. 624: Chemical Cleaning Results in Hydrogen Sulfide Release, 2009," Center for Chemical Process Safety.
- [23] CCPS, "CCPS Process Safety Incident Database No. 810: Exposure to Hydrogen Sulfide while Charging the Reactor, 2000," Center for Chemical Process Safety.
- [24] CCPS, "CCPS Process safety Incident Database No. 567: Sour Steam Release in Oil Refinery, 2000," Center for Chemical Process Safety.
- [25] CSB, "Georgia Pacific Naheola Mill Hydrogen Sulfide Poisoning," U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board, csb.gov, 2002.
- [26] CCPS (Center for Chemical Process Safety), *Guidelines for Management of Change for Process Safety*, Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, 2008.
- [27] CCPS, "CCPS Process safety Incident Database No. 449: Operator Mistakenly Drained Hydrogen Sulfide to an Open Sewer, 2004," Center for Chemical Process Safety.
- [28] CCPS, "CCPS Process Safety Incident Database No. 498: H₂S Release when Liquids Dumped to Chemical Sewer, 1996," Center for Chemical Process Safety.
- [29] CCPS, "CCPS Process Safety Incident Database No. 509: H₂S Released during Relief Valve Replacement, 1997," Center for Chemical Process Safety.
- [30] CCPS, *Guidelines for Writing Effective Operations and Maintenance Procedures*, Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 1996.
- [31] CCPS, *Human Factors for Process Plant Operations: A Handbook*, Hoboken, NJ USA: John Wiley & Sons, 2022.
- [32] U.S. Homeland Security, "Chemical Facility Anti-Terrorism Standards: Risk-Based Performance Standards Guidance," U.S. Homeland Security, Washington DC USA., 2009.
- [33] AB OH&S, "Alberta Occupational Health & Safety Code Regulation 191/2021, Section 21,," Alberta Occupational Health & Safety, Alberta, 2021.
- [34] CCPS, *Guidelines for Mechanical Integrity Systems*, Hoboken, N.J.: John Wiley and Sons, 2006.
- [35] CCPS, "CCPS Process Safety Incident Database No. 496: Hydrogen Sulfide Release due to Weld Failure on Level Control, 1997," Center for Chemical Process Safety.
- [36] UK Health & Safety Executive, "The Offshore SECE Management and Verification Inspection Guide," HSE, Published under open government license, 2020.
- [37] CCPS, "CCPS Process Safety Incident Database No. 697: Sour Water Release, 2003," Center for Chemical Process Safety.
- [38] F. Renshaw, "Open System Chemical Operations – Eliminate Them or Control Them," in *CCPS Pharma, Food & Fine Chemicals (PFFC) Subcommittee Quarterly Meeting*, 2022.
- [39] J. E. Johnson and N. A. Hatcher, "Fundamentals of Sulfur Recovery: Hazards of Molten Sulfur Storage & Handling," in *53rd Lawrence Reid Gas Conditioning Conference Proceedings*, 2003.
- [40] OSHA, "OSHA Publication 3133," 1994. [Online]. Available: <https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/osha3133.pdf>.
- [41] World Health Organization, "Hydrogen Sulfide: Human Health Aspects," 2003. [Online]. Available: <http://www.who.int/ipcs/publications/cicad/en/cicad53.pdf>.
- [42] USA EPA, "H₂S FAQs," 2017. [Online]. Available: https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-12/documents/appendix_e-atsdr_h2s_factsheet.pdf.
- [43] T. Ausma and L. J. DeKoK, "Atmospheric H₂S: Impact on Plant Functioning," *Front. Plant Sci.*, vol. 2019, no. 10, p. 743, 2019.
- [44] French Ministry of Environment, "H₂S Leakage during the transfer of effluents," French Ministry of Environment, 1993.
- [45] Canadian Centre for Occupational Health and Safety, "Substitution of Chemicals-Considerations for Selection," 27 October 2021. [Online]. Available: <https://www.ccohs.ca/oshanswers/chemicals/substitution.html>.

Golden Rules for Hydrogen Sulfide (H₂S)

- [46] P. Vella and J. L. Nickerson, "Hazardous Material Decontamination With Potassium Permanganate for Refinery Turnarounds," in *CORROSION* 98, San Diego, 1998.
- [47] US Occupational Safety and Health Administration (OSHA), *29CFR1910.252 Hot Work Permit General Requirements*, Washington, DC: OSHA, 2012.
- [48] US Occupational Safety and Health Administration (OSHA), *29 CFR 1910.146 Permit Required confined spaces*, Washington, DC: OSHA, 2011.
- [49] US Occupational Safety and Health Administration (OSHA), *29CFR1910.147 The Control of Hazardous Energy*, Washington DC: OSHA, 2021.
- [50] CCPS, *Guidelines for Investigating Process Safety Incidents 3rd Ed.*, Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2019.
- [51] CSB, "Investigation Report: Hydrogen Sulfide Poisoning," U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board, [csb.gov](https://www.csb.gov), 2002.
- [52] API, *RP 752 Management of Hazards Associated with Location of Process Plant Permanent Buildings*, 2009.
- [53] API, *RP 753 Management of Hazards Associated with Location of Process Plant Portable Buildings*, American Petroleum Institute, 2007.
- [54] API, *RP 756 Management of Hazards Associated with Location of Process Plant Tents*, American Petroleum, 2014.
- [55] API, *RP 580 Risk-Based Inspection 3rd Ed.*, API, 2016.
- [56] Det norske Veritas Industry, Inc., "Inspection Programs and Engineering Analysis of Pressure Vessels in Wet Hydrogen Sulfide Service," in *27th Annual Loss Prevention Symposium*, Houston, 1993.
- [57] OSHA, "OSHA Technical Manual (OTM)," OSHA, 2014. [Online]. Available: <https://www.osha.gov/otm/section-3-health-hazards/chapter-3>. [Accessed 4 February 2022].
- [58] ASME, *Section VIII Boiler and Pressure Vessel Code Division 1 Section UW-2*, ASME, 2021.
- [59] ANSI/NACE, *MR0175/ISO15156-1 Materials for use in H₂S containing environments in oil and gas production*, Houston: Nace International, 2015.
- [60] CCPS, *Guidelines for Hazard Evaluation Procedures 3rd Ed.*, Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2011.
- [61] CCPS, *Guidelines for Process Safety Documentation*, Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 1995.
- [62] CCPS, *Guidelines for Engineering Design for Process Safety 2nd Ed.*, Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2012.
- [63] WHO, "H₂S Human Health Aspects," 2003. [Online]. Available: <https://www.who.int/>.
- [64] W. S. BC, "Hydrogen Sulfide in Industry," worksafefbc.com, 2010.
- [65] CCPS, "CCPS Process Safety Incident Database No. 651: Hydrogen Sulfide Exposure, 2002," Center for Chemical Process Safety.
- [66] CSB, "Toxic Chemical Release at the DuPont La Porte Chemical Facility," US Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB), Washington, D.C., 2019.
- [67] "OSHA FactSheet Hydrogen Sulfide (H₂S)," US Department of Labor, 10/2005.
- [68] Calgary First Aid, "Treatment and Management of H₂S Poisoning," 2022. [Online]. Available: <https://firstaidcalgary.ca/>.
- [69] J. A. Rau, A. Wong and M. McDermott, "Rethink your refuge," *Chemical Processing: Process Safety eHANDBOOK: Take a Closer Look at Process Safety*, pp. 28-37, 2019.
- [70] Baker Risk, "Shelter-in-place. Reducing Risk from Toxic Impacts.," www.bakerrisk.com, San Antonio Texas, 2020.
- [71] US Occupational Safety and Health Administration (OSHA), *29 CFR1910.119 Process safety management of highly hazardous chemicals*, Washington, DC: OSHA.
- [72] CCPS, *Guidelines for Technical Planning for On-Site Emergencies*, Hoboken NJ, U.S.A: John Wiley & Sons, 1995.
- [73] CCPS, *Guidelines for Post Release Mitigation Technology in the Chemical Process Industry*, Hoboken, NJ, U.S.A.: John Wiley & Sons, 1996.
- [74] CCPS, *Recognizing and Responding to Normalization of Deviance*, Hoboken, N.J.: John Wiley and Sons, 2018.

Golden Rules for Hydrogen Sulfide (H₂S)

- [75] CSB, "Hydrogen Sulfide Exposure," U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board, csb.gov, 2003.
- [76] CCPS, A Practical Approach to Hazard Identification For Operations and Maintenance Workers 1st Ed, Hoboken, NH, USA: John Wiley & Sons Inc., 2010.
- [77] CCPS, Guidelines for Implementing Process Safety Management Systems, 2nd Edition, Hoboken, N.J.: John Wiley and Sons, 2016.
- [78] CCPS, Guidelines for Process Safety Metrics 1st Ed., Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2010.
- [79] CCPS, Guidelines for Preventing Human Error in Process Safety, Hoboken, NJ, U.S.A.: John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [80] CCPS, Driving Continuous Process Safety Improvements from Investigated Incidents, Hoboken, NJ, U.S.A.: John Wiley & Sons, Inc., 2021.

プロセス安全の鉄則: 硫化水素

GR3 – H2S, January 2024

Copyright 2024 American Institute of Chemical Engineers

www.aiche.org/ccps
