



U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board

Investigation Report

ハリケーン・ハービーによる洪水後にアルケマ・クロスビー において発生した有機過酸化物の分解、流出、火災

テキサス州クロスビー

事故発生日：2017年8月31日

緊急対応要員への曝露、地域住民の避難、物的被害



重要課題：

- 洪水に対する施設の脆弱性の理解
- 洪水リスク評価の実施
- 洪水に対するレジリエンスの強化
- 緊急対応の改善

報告書番号：2017-08-I-TX
2018年5月

CSB (U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board) は、人々と環境を保護するために独立した調査を通じて化学安全の向上を推進することを使命とする独立した連邦機関である。

CSBは科学的調査機関であり、法執行機関や規制機関ではない。1990年の改正大気浄化法に基づき設立され、事故の原因を特定し、安全に関する勧告を行い、化学安全に関する課題を調査研究し、化学安全に関わる他の政府機関の有効性を評価する役割を担っている。CSBに関する詳細は、www.csb.govを参照のこと。

CSBは、その活動と決定を調査報告書を通じて公表しており、報告書には必要に応じて安全対策の勧告が含まれる場合がある。以下は、CSBが発行する報告書の種類である。

Investigation Reports (調査報告書) : 重大な化学事故に関する正式かつ詳細な報告書であり、主な調査結果、根本原因、安全に関する勧告が記載されている。

Investigation Digests (調査ダイジェスト) : 調査報告書の要約版で、平易な言葉で書かれている。

Case Studies (ケーススタディ) : 調査報告書よりもテーマを絞った調査報告書。

Safety Bulletins (安全速報) : 短い出版物で、多くは単一の安全性トピックに焦点を当てている。

Hazard Investigations (危険調査) : 重大な化学的危険性に関するより広範な調査研究。

Safety Videos (安全ビデオ) : 事故の各側面をアニメーションで表現したり、CSBの安全メッセージを強調したビデオ。

CSBの出版物は、www.csb.gov から自由に閲覧できるほか、下記まで問い合わせることで入手可能。

U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board

Office of Congressional, Public, and Board Affairs 1750 Pennsylvania Ave NW, Suite 910
Washington, DC 20006
(202) 261-7600

偶発的な流出またはその調査に関連するCSBの結論、調査結果、または勧告のいかなる部分も、証拠として認められず、またそのような報告書に記載された事項に起因する損害賠償を求める訴訟や法的措置において使用することはできない。42 U.S.C. § 7412(r)(6)(G) を参照のこと。

目次

略語、頭字語、および略称	6
1. 要約.....	8
1.1. 事故と活動の概要.....	8
1.1.1. ハリケーン・ハービーへの備え	9
1.1.2. 有機過酸化物の移動	10
1.1.3. 緊急対応活動	11
1.2. 主要な調査結果と教訓.....	12
1.3. 業界に対するガイダンス	15
1.4. 勧告事項の概要	15
2. アルケマ・クロスビー事業の背景情報	16
2.1. 有機過酸化物	16
2.2. 有機過酸化物の貯蔵施設	18
2.3. 冷蔵設備	18
2.4. 非常用発電機	19
2.5. 液体窒素システム	20
2.6. 冷蔵トレーラー	21
2.7. 製品用トート容器	22
3. 事故の概要.....	24
3.1. 2017年8月24日（木）	27
3.2. 2017年8月25日（金）	28
3.3. 2017年8月26日（土）	29
3.4. 2017年8月27日（日）	31
3.5. 2017年8月28日（月）	38
3.6. 2017年8月29日（火）	44
3.7. 2017年8月30日（水）	47
3.8. 2017年8月31日（木）	50
3.9. 2017年9月1日（金）	52
3.10. 2017年9月2日（土）	54
3.11. 2017年9月3日（日）	55
3.12. 2017年9月4日（月）	56
4. 洪水に関する情報.....	57
4.1. アルケマ・クロスビー施設における洪水保険料率地図（FIRM）の歴史.....	64
4.2. 洪水保険調査	66
4.3. 基準洪水標高	67
4.4. 2016年の保険報告書が洪水リスクを特定・評価	69

5. アルケマ・クロスビー施設の洪水設計	70
5.1. ハリケーン対策計画	70
5.2. 緊急対応計画	70
5.3. 貯蔵施設の安全ガイドライン	71
5.4. プロセスハザード分析	71
5.5. プロセス安全のワーストケースシナリオ	72
5.6. アルケマの声明	72
6. 洪水対策のガイダンス	74
6.1. 米国土木学会	74
6.2. 化学プロセス安全センター	74
6.2.1 化学物質の倉庫保管に関する安全ガイドライン	75
6.2.2. 反応性物質の安全な保管および取扱いに関するガイドライン	75
6.2.3. 現場での緊急事態に対する技術計画に関するガイドライン	76
6.3. 連邦緊急事態管理庁	77
6.4. 米国環境保護庁の施設設計基準	77
6.5. FM Global	77
6.6. 英国環境庁	78
6.7. 英国化学工業協会	80
6.8. 国連防災機関	81
7. 規制の分析	82
7.1. 洪水ハザード	82
7.1.1. 米国のアプローチ	82
7.1.2. 欧州連合（EU）のアプローチ	84
7.2. 反応性ハザード	85
8. 企業が自社施設の洪水リスクを評価する方法	87
9. その他の洪水事故	90
9.1. 福島第一原発事故報告書	90
9.2. サンジャシント・パイプライン洪水事故	92
10. 緊急対応活動	95
11. 避難区域	96
11.1. 二酸化硫黄	96
11.2. イソブチレン	97
11.3. アルケマ施設で発生した有機過酸化物の流出と燃焼による、未だ不明な潜在的な健康影響	97
11.4. 人員配置	98
11.5. 高速道路90号線の通行維持	99
12. 洪水災害の発生頻度とコスト	101

13. Natechリスクアセスメントとマネジメント	104
14. ハリケーン・ハービーによるその他の産業流出事故	106
15. 勧告	108
15.1. 反応性物質研究からの環境保護庁への再勧告	108
15.2. アルケマ・クロスビー施設	108
15.3. アルケマ社	108
15.4. 化学プロセス安全センター（CCPS）	108
15.4. ハリス郡	109
16. 参考文献	110
付録A: 原因分析	125
付録B: 有機過酸化物に関する追加情報	126
付録C: 冷却喪失リスクの評価	128
ハービー洪水 — シミュレーションによるリスク評価	131
異常気象に対するレジリエンス	133

略語、頭字語、および略称

ACC	アメリカ化学協議会 (American Chemistry Council)
AEGL	急性暴露ガイドラインレベル (Acute Exposure Guideline Level)
AEP	年間超過確率 (Annual Exceedance Probability)
ALARA	合理的に達成可能な限り低減 (As Low As Reasonably Achievable)
ALARP	合理的に実行可能な限り低減 (As Low As Reasonably Practicable)
API	米国石油協会 (American Petroleum Institute)
AQI	大気質指標 (Air Quality Index)
ASCE	米国土木学会 (American Society of Civil Engineers)
ASPECT	空中スペクトル分光環境収集技術 (Airborne Spectral Photometric Environment Collection Technology)
BFE	基準洪水標高 (Base Flood Elevation)
BOC	水路底 (Bottom of Channel)
CCPS	化学プロセス安全センター (Center for Chemical Process Safety)
CDL	商業運転免許 (Commercial Driver License)
CFR	連邦規則 (Code of Federal Regulations)
COMAH	重大災害ハザード規制 (Control of Major Accident Hazards)
CSB	米国化学事故調査委員会 (U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board)
CVFD	クロスビー・ボランティア消防団 (Crosby Volunteer Fire Department)
DOT	米国運輸省 (U.S. Department of Transportation)
EPA	米国環境保護庁 (U.S. Environmental Protection Agency)
EPR	環境許認可規則 (Environmental Permitting Regulations)
EU-JRC	欧州委員会合同研究センター (European Commission's Joint Research Centre)
FEMA	連邦緊急事態管理庁 (Federal Emergency Management Agency)
FIA	連邦保険管理局 (Federal Insurance Administration)
FIRM	洪水保険料率地図 (Flood Insurance Rate Map)
FIS	洪水保険調査 (Flood Insurance Study)
HCFC	ハリス郡洪水管理地区 (Harris County Flood Control District)
HSE	労働安全衛生庁 (Health and Safety Executive)
IAEA	国際原子力機関 (International Atomic Energy Agency)
KOP	キング・オブ・プルシア (King of Prussia)
LOPA	安全防護層分析 (Layer of Protection Analysis)
NFPA	米国防火協会 (National Fire Protection Association)
NIMS	国家インシデント管理システム (National Incident Management System)
NOAA	米国海洋大気庁 (National Oceanic and Atmospheric Administration)
NTSB	米国運輸安全委員会 (National Transportation Safety Board)
OSHA	労働安全衛生局 (Occupational Safety and Health Administration)
PHA	プロセスハザード分析 (Process Hazard Analysis)
PSM	プロセス安全管理 (Process Safety Management)

PVC	ポリ塩化ビニル (Polyvinyl Chloride)
RAGAGEP	広く認められ一般的に受け入れられているエンジニアリングに関するグッドプラクティス (Recognized and Generally Accepted Good Engineering Practice)
RMP	リスク管理計画 (Risk Management Plan)
RP	推奨される業務慣行 (Recommended Practice)
SDS	安全データシート (Safety Data Sheet)
SADT	自己加速分解温度 (Self-Accelerating Decomposition Temperature)
SCBA	自給式呼吸具 (Self-Contained Breathing Apparatus)
SDS	安全データシート (Safety Data Sheet)
TCEQ	テキサス州環境品質委員会 (Texas Commission on Environmental Quality)
TEPCO	東京電力株式会社 (Tokyo Electric Power Company)
TOB	堤防頂部 (Top of Bank)
TVA	テネシー溪谷開発公社 (Tennessee Valley Authority)
U.K.	英国 (United Kingdom)
UN	国際連合 (United Nations)
U.S.	アメリカ合衆国 (United States of America)
USACE	米国陸軍工兵隊 (U.S. Army Corps of Engineers)
USCG	米国沿岸警備隊 (U.S. Coast Guard)
USGS	米国地質調査所 (U.S. Geological Survey)

1. 要約

1.1. 事故と活動の概要

1. 2017年8月24日、カテゴリ4のハリケーン「ハービー」がテキサス州南東部に上陸した。その後数日間、この嵐はテキサス州南東部とルイジアナ州南西部に前例のない量の降雨をもたらした。大きな洪水を引き起こした。ハリケーン・ハービーは、米国史上、ハリケーン・カトリナに次いで2番目に大きな被害をもたらした熱帯低気圧で、大雨をもたらした。ハリケーン・ハービーによって68人が死亡、30万棟以上の家屋が浸水し、約4万人が自宅からの避難を余儀なくされた。ハリケーン・ハービーは、地元、州、連邦政府による大規模な緊急対応活動を必要とした。
2. アルケマ・クロスビー施設は、100年氾濫原および500年氾濫原に位置している^a。ハリケーン・ハービーによる大雨によって発生した広範囲に及ぶ洪水は、設備の設計高さを超え、工場の電源、予備電源、重要な有機過酸化物の冷却システムを喪失させた。その結果、アルケマは待機状態の冷蔵トレーラーを使って有機過酸化物製品を冷却した。この洪水により、最終的にアルケマの全従業員は施設からの避難を余儀なくされた。統合司令部は、アルケマ施設の周囲に1.5マイル（約2.6km）の避難区域を設定し、住民の安全のためにこの区域からの住民の移動を支援した。
3. 2017年8月31日、冷蔵トレーラー内に保管されていた有機過酸化物製品が分解し、過酸化物とトレーラーが燃えた。蒸気が工場に隣接する公道を横切り、分解生成物から発生したガスにさらされた21人が医療処置を受けた。この道路はハリケーンの復旧作業のための重要なルートであったため、緊急対応当局は当初、アルケマ施設周辺に設定された避難区域を通過する道路であるにもかかわらず、閉鎖しない判断を下した。その後の数日間にわたり、2度目の火災と統合司令部が行った管理燃焼により、低温保管が必要な有機過酸化物製品を積んだ8台のトレーラーがさらに焼失した。3回の火災によって35万ポンド（約160トン）を超える有機過酸化物が燃焼した。その結果、同施設から1.5マイル（約2.6km）圏内に住んでいたため避難していた200人以上の住民は、1週間家に帰ることができなかった。図1は、ハリケーン・ハービーがテキサス州南東部を通過し、同施設が浸水した際に、アルケマ・クロスビー施設で発生した一連の事故と活動を時系列で示したものである。

^a 100年氾濫原は、基準洪水標高とも呼ばれ、どの年においても洪水の危険性が1パーセントの地域である。500年氾濫原は、どの年においても洪水の危険性が0.2%の地域である。

Timeline Related to Arkema Inc. Chemical Plant Fires 2017



図1：時系列で示すアルケマ・クロスビー施設で発生した事象と活動の概要

1.1.1. ハリケーン・ハービーへの備え

4. ハリケーン・ハービーがメキシコ湾を10日以上かけて通過した後、2017年8月24日（木）、暴風雨がテキサス州の中部および北部沿岸に影響を与え、テキサス州上空で停滞する可能性が高いことが明らかになった [1]。気象学者たちは、この暴風雨が2017年8月25日（金）に上陸し、テキサス州の広い範囲に12～20インチ（約30～50cm）の大雨をもたらし、一部の地域では暴風雨の期間中に30インチ（約75cm）に達する可能性があるとして予測した [2]。アルケマ・クロスビー施設の職員は、施設周辺地域は暴風雨の直接の進路には入らないと予測されていたものの、ハリケーン・ハービーに備えて準備を開始した。
5. アルケマ・クロスビー施設は、ハリケーンの前を含め、どのように従業員と財産を保護するかを詳述したハリケーン対策計画を文書化していた。2017年8月24日（木）、アルケマの担当者は、ハリケーンがクロスビー施設に影響を与えた場合に備えて、施設の準備が必要であると判断した。アルケマ・クロスビー施設の従業員の経験を総合すると、予測される雨量では周辺道路が冠水する可能性が高く、「現場対応チーム (ride-out crew)」の出動が必要になる可能性が高いと判断された。このチームは、他の従業員が施設に出入りすることが困難になるため、現場に留まることになっていた。しかし、クロスビーの従業員は誰も、雨の量や洪水の規模、あるいはその結果起こりうる壊滅的な損害の可能性を予想していなかった。何十年にもわたる施設運営経験を持つ従業員でさえ、施設での軽度の冠水は予想したものの、安全システムに影響を及ぼすほどの水害は想定していなかった。
6. ハリケーン対策計画に従い、2017年8月25日（金）、アルケマは生産を停止し、嵐に備えて多くの予防措置を講じた。これらの予防措置には、予想される強風で吹き飛ばされたり、損傷を与える可能性のある緩んだ資材を固定すること、洪水に浸らないように可搬式装置を高所

に移動させること、洪水でも稼働可能なボートとフォークリフトを確保すること、土嚢やその他の防水対策を準備すること、十分な予備燃料を確保することなどが含まれていた。加えて、アルケマ・クロスビー施設では、現場対応チームを動員し、その後アルケマは、湾岸地域にあるすべてのアルケマ施設に対するハリケーンの潜在的な影響を管理するため、全社的な「危機管理チーム (crisis team)」を発足させた。

1.1.2. 有機過酸化物の移動

7. アルケマ・クロスビー施設で製造・保管されている有機過酸化物はすべて、自己加速分解温度 (SADT : Self-Accelerating Decomposition Temperature) と呼ばれる臨界温度以下に保たなければ分解・燃焼する可能性がある。クロスビー施設の有機過酸化物製品の中には、SADTが非常に低く、分解を防ぐために連続的な冷却が必要なものがあった。このため、-20°F (約-29°C) の低温に保たれている冷蔵有機過酸化物の低温貯蔵棟 (「低温倉庫」) にある有機過酸化物製品は、倉庫の電力が失われ、必要な冷却能力を維持できなくなった場合、低温を保つために他の冷蔵エリアに移動する必要があった。
8. ハリケーン・ハービーがヒューストン上空で停滞し、この地域に前例のない量の降雨をもたらす中、現場対応チームはアルケマ・クロスビー施設内の状況を監視しながら、洪水の増水状況を監視した。暴風雨が進むにつれ、水位の上昇が続くようであれば、現場対応チームはショートを防ぐために電気機器の通電を事前に遮断する必要があることは明らかであった。しかし、現場対応チームは、これまでの経験から、この状況はまだ管理可能であり、ハリケーンが施設の安全性に及ぼす影響はごくわずかで済むだろうと信じていた。暴風雨の間、現場対応チームは、水位上昇がやがて止まり、数時間持ちこたえれば水位が下がり始めるであろうと考えていた。
9. 2017年8月27日 (日)、国立ハリケーンセンターは、「ハービーはテキサス州南東部上空で蛇行を続けており、壊滅的で生命を脅かすほどの洪水を引き起こす雨を降らせている [3]」と発表した。日曜日の早い時間には施設で大きな洪水が発生し、現場対応チームは、水が電気設備に到達する前に、いくつかの低温倉庫の電源を予防的に遮断した。
10. 日曜日の午後までに、クロスビー施設の一部の水位は約4フィート (約1.2m) となった。水位の上昇に伴い、低温倉庫の冷却システムの継続運転が困難になる恐れが生じたため、作業員は有機過酸化物製品を敷地内にあった冷蔵トラックトレーラーに移し始めた。水位上昇のために低温倉庫の半数が手動で電源を遮断された後も、現場対応チームはさらに別の倉庫も失うとは考えていなかったため、まだ十分な保管スペースが確保できると信じていた。低温倉庫からの製品がトレーラーに満載されると、これらの冷蔵トレーラーは施設内の高台にある「レイダウンエリア」と呼ばれる場所に移動され、冷蔵トレーラーが稼働し、有機過酸化物製品の冷却が維持された。
11. 豪雨が続く中、アルケマ・クロスビー施設の水位は上昇し続けた。作業員たちはさらに多くの低温倉庫の電源を遮断し、有機過酸化物製品を別の場所へ移動させる必要があった。日曜日の夜までに、作業員たちは増水に直面し、7棟の低温倉庫のうち1棟を除くすべての電源を遮断し、有機過酸化物製品を冷蔵トレーラーに移動させた。月曜日の終わりまでに、6台の冷蔵トレーラーが施設の高台に移動された。
12. 2017年8月28日 (月) の午前2時頃、洪水が施設の主変圧器に達し、敷地内のすべての建物が停電した。バックアップ発電機は自動的に作動したが、洪水の増大により、作業員は安全のために発電機を停止せざるを得なかった。その結果、最後に残っていた低温倉庫も電力を失った。

13. 月曜日を通じて、作業員が冷蔵トレーラーや有機過酸化物を積んだパレットを移動させるために使用していた設備が次々と故障し始めた。施設で使用していたフォークリフトやセミトレーラーの電気系統が冠水の影響を受けて故障したためである。この時点で、現場対応チームは冷蔵トレーラーを施設内のより高い場所へ移動させることができなくなり、有機過酸化物のパレットを持ち上げることも不可能となった。さらに、低温倉庫周辺の水位は胸の高さまで上昇し、現場対応チームの移動は困難になった。
14. 月曜日の終わりまでに、作業員たちは、電源を失った最後の低温倉庫から残りの有機過酸化物の小容器（合計約2,160個）を手作業で最後に残った冷蔵トレーラーへ移動させていた。この時点までに、作業員たちは合計約10,500個（35万ポンド（約160トン）以上）の製品を9台の冷蔵トレーラーに移動させていた。しかし、そのうちの3台（4,000個以上の容器を積載）は冠水の影響で高台に運ぶことができず、増水によってトレーラーの燃料タンク内に水が流れ込み、冷却機能の喪失が懸念される状況となった。
15. アルケマ本社の担当者は、冷蔵トレーラーが電力を失った場合、内部の有機過酸化物製品が数日以内にSADTに達して発火する可能性があるかと判断した。アルケマの担当者は、この状況の悪化について地元の緊急対応要員に警告した。アルケマはまた、2017年8月30日（水）正午から、冷蔵トレーラーの遠隔測定データと、冷蔵トレーラー6台の有機過酸化物の推定SADTの情報を統合司令部に提供し始めた。
16. 2017年8月29日（火）の朝、アルケマは緊急対応要員に対して現場対応チームを避難させるよう要請した。避難完了後、緊急対応要員は、冷蔵トレーラーが発火する可能性を想定したモデリング結果に基づき、施設周辺1.5マイル（約2.6km）の避難区域を設定した。アルケマは、有機過酸化物の分解による危険性について統合司令部に警告し、この物質にさらされる可能性のある緊急対応要員は、個人用保護具と自給式呼吸具を着用すべきであると警告した。

1.1.3. 緊急対応活動

17. アルケマ・クロスビー施設で化学反応を伴う事故が発生することが明らかになり、緊急対応要員がその事態に対処している間も、ハリケーン・ハービーに対する大規模な緊急対応が進行していた。ハリケーンとそれに伴う洪水がヒューストン地域から東へ進み、ボーモント地域に拡大するにつれ、緊急対応要員も移動を余儀なくされた。ハリケーンによる降雨で州間高速道路10号線の一部が冠水したため、ハリケーンの救援・救助物資の輸送に最適なルートは、アルケマ・クロスビー事故の避難区域の中央を通る東行き的高速道路90号線となった。
18. こうした制約と、必要な場所へ人員や機材を輸送する重要性を考慮し、ハリス郡当局は、避難区域は維持しつつ、東行き的高速道路90号線については通行可能な状態を保った。また、冷蔵トレーラーの内容物が燃焼を開始した場合に備え、緊急対応要員は道路を封鎖する準備を整えていた。
19. 2017年8月30日（水）深夜直前、避難区域周辺を監視するために配置されていた警察官のうち2人が、同地域の洪水に関連する通報に対応するため高速道路90号線を西に走行中、アルケマ・クロスビー施設から発生した白煙の雲の中を車で通過したと報告した。彼らが白煙の報告をした後、統合司令部は高速道路90号線を閉鎖した。
20. 白煙の報告を受け、クロスビー・ボランティア消防団の隊員2名がアルケマ施設へ派遣され、現場の状況の評価することとなった。現場到着後、これらの消防団員は白煙や有機過酸化物の分解の兆候を確認できなかった。また統合司令部は、アルケマ社から提供された遠隔測定データを確認した。そのデータには、いくつかの冷蔵トレーラー内の温度測定値が含まれており、3台の冷蔵トレーラー内の空気温度が推定SADTを超えていることが判明した。しかし、

9台の冷蔵トレーラーのうち3台はこのデータを提供できなかった。さらに、データが提供されたトレーラーでも、測定されていたのはトレーラー内部の空気温度のみであり、有機過酸化化物製品そのものの温度は測定されていなかったため、その測定結果だけでは、有機過酸化化物が分解しているかどうかを判断することはできなかった。東行き高速道路90号線を可能な限り長く開通させておく必要と、分解が発生していないことを目視で確認したことから、緊急対応要員は高速道路の通行を再開した。

21. 白煙の中を走行した警察官は、自分の車のドライブレコーダーに白煙が記録されているのを確認し、施設で何らかの放出が発生していると他の警察官に報告した。その後、他の3人の警察官が、現場の警察官とドライブレコーダーの映像を確認するため、高速道路90号線を東へ向かった。これらの警察官もアルケマ施設の近くを通過する際、施設から発生した白煙の中を走行したと報告した。
22. その後間もなく、5人の警察官全員が、アルケマ・クロスビー施設から発生した白煙の中を走行したことで、化学物質に暴露した可能性があることを認識した。彼らは、自身のさまざまな症状を考慮し、迅速な治療を受けるため、高速道路90号線を西へ走行し指揮所へ向かった。
23. 5人の警察官が4台の警察車両に分乗し、高速道路90号線を指揮所に向かって西に走行した。警察官たちは避難区域の南西端に到着したとき、電話で医療支援を要請した。移動中、警察官たちはアルケマ・クロスビー施設からの黒煙にさらされたと報告した。避難区域の南西端に到着するまでに、警察官たちは吐き気、頭痛、喉の痛み、目のかゆみなどの症状を訴えた。他の緊急対応要員が、煙にさらされたと訴える警察官を診察し、露出した皮膚を水で洗浄した。
24. 指揮所に到着した警察官たちは、緊急対応要員に自らの経験を報告した。これを受けてハリス郡の緊急対応当局は高速道路90号線の両方向の通行を遮断した。高速道路90号線は、この数日後に警報が解除されるまでは閉鎖となった。夜になると、9台の冷蔵トレーラーのうち1台で有機過酸化物の分解が進行し、火災が発生した。
25. 翌日の2017年9月1日（金）午後5時頃、新たに2台の冷蔵トレーラーが発火・炎上した。この時点で、洪水の影響でレイダウンエリアの高台に移動できなかった冷蔵トレーラー3台はすべて焼失し、高台にあった残りの冷蔵トレーラー6台は燃焼せずにいた。これらのトレーラーの冷却装置はまだ稼働していた可能性が高いが、トレーラー内部の内容物を確認する手段がなく、遠隔測定データに頼るしかなかったため、統合司令部は有機過酸化物の内容物を安全に除去することができなかった。
26. 避難していた住民は、6台の冷蔵トレーラーがまだ燃焼していなかったため、引き続き1.5マイル（約2.6km）の避難区域内に再び入ることができなかった。この頃、多くの避難者が、自宅の様子を確認できないことや所持品を持ち出せないことに不安を抱き始めた。残りのトレーラーが燃え尽きるまでに数日から数週間かかることが明らかになったため、緊急対応要員はこれらのトレーラーの管理燃焼を実施する計画を策定した。
27. 2017年9月3日（日）、緊急対応要員がアルケマ・クロスビー施設に入り、避難と事故を終息させるために、残りの6つの冷蔵トレーラーに対して管理燃焼を実施した。それが燃え尽きた後、緊急対応要員は避難区域を解除し、住民の帰宅が許可された。最終的に、2017年9月4日、統合司令部は警報解除を宣言し、高速道路90号線を通行可能にした。

1.2. 主要な調査結果と教訓

28. 有機過酸化物は反応性の高い化学物質であり、本質的に不安定である。この不安定性のため、これらの反応性化学物質は、有機過酸化物が分解し熱や副生成物が発生することを防ぐため

に、特別な保管と取扱いの注意が必要である。有機過酸化物は、製品の温度に応じた速度で継続的に分解する。有機過酸化物の安全性に関する重要な特性の一つが、自己加速分解温度（SADT）である。アルケマが製造するすべての有機過酸化物は、分解速度を安全なレベルに制限するため、それぞれのSADTより低い温度で保管しなければならない。アルケマ・クロスビー施設では、冷蔵トレーラーが冷却機能を失い、低温貯蔵を必要とする内部の有機過酸化物製品が分解・燃焼したため、最初の3台の冷蔵トレーラーが2度の火災で燃焼した。企業は、有機過酸化物製品をSADT以下の温度に維持するために、十分な安全対策を講じる必要がある。

29. アルケマは、有機過酸化物製品を低温に保ち、SADTに達しないようにするため、複数の安全システムを導入していた。アルケマのプロセスハザード分析（PHA：process hazard analysis）においてPHAチームメンバーは、低温倉庫における冗長化された冷却システム、低温倉庫が停電した際の緊急用発電機、代替冷却手段としての液体窒素、有機過酸化物を一時的に保管するための冷蔵トレーラーなどの安全防護層を特定していた。しかし、ハリケーン・ハービーでは、これらすべての安全防護層が、共通の故障要因である洪水によって機能不全に陥った。電源喪失に対するアルケマの安全対策のいずれも、ハービー規模の洪水に対する独立防護層分析の同社または業界の基準を満たしていなかった。この洪水によって施設は電力を喪失し、バックアップの非常用発電機、液体窒素システム、有機過酸化物製品を一時的に保管・冷却するための冷蔵トレーラーも機能しなくなった。企業は、安全防護層に共通の故障要因がないようにする必要がある。
30. 連邦緊急事態管理庁（FEMA：Federal Emergency Management Agency）の洪水保険料率地図と洪水保険調査は、洪水に関する重要なリスク情報を提供する。アルケマ・クロスビー施設は、同地域の洪水地図や洪水調査が作成される前に建設された。CSBの調査によると、アルケマ・クロスビー施設を含む地域の最初の洪水地図は1985年に発行されており、その時点では施設の洪水リスクは最小とされていた。FEMAは2007年に、関連する洪水保険料率地図を大幅に更新した。その結果、アルケマ・クロスビー施設全体が氾濫原内にあることが明らかになった。施設の一部は100年氾濫原にあり、敷地の残りの部分は500年氾濫原に含まれていた。アルケマの保険会社であるFM Globalが2016年9月に作成した報告書では、氾濫原の指定を含むクロスビー施設の洪水リスクが指摘されていたが、過去に在籍していた施設管理者を除き、アルケマ・クロスビー施設の従業員は、この情報を認識していなかった可能性がある。米国のプロセス安全規制では、企業に対し関連するプロセス安全情報の収集を義務付けているが、洪水保険料率地図や関連調査を必須のプロセス安全情報として明示的に指定してはいない。CSBが調査したところ、他の企業においても、必要な安全分析において洪水関連情報が収集・評価されていない場合、洪水リスクが自社の施設にプロセス安全上のハザードをもたらす可能性について認識していないことが明らかとなった。
31. クロスビー施設の低温倉庫のPHAを実施したアルケマチームは、洪水リスクを文書化していなかった。仮にPHAにおいて洪水リスクが評価されていたとしても、洪水に関する業界ガイダンスは限られており、ハリケーン・ハービーの洪水によるハザードに対し、具体的かつ十分に安全側な対策を講じるには不十分であったと考えられる。しかしながら、洪水リスク評価がなかったにもかかわらず、クロスビー施設には100年に一度の洪水に対しては、低温倉庫の冷却を維持するための十分な安全対策が整っていたように見受けられる。
32. 企業が洪水ハザードに対処するための業界向け安全ガイダンスは、化学プロセス安全センター（CCPS：Center for Chemical Process Safety）やFEMAなど、複数の機関から提供されていた。しかし、これらの指針は一般的すぎるか、あるいは十分に安全側な対策を求める内容ではなかったため、アルケマが今回の事故を防ぐための有効な手立てとはならなかった。例えば、このガイダンスでは、ハリケーン・ハービー規模の洪水によって、アルケマ・クロスビー施

設の安全システムが機能不全に陥るのを防げるだけの高さに、重要な設備を設置することを義務付けていない。このような課題を踏まえるなら、危険物を取り扱う化学施設向けに、洪水、ハリケーン、吹雪、竜巻、干ばつなどの極端な気象現象に備えるための、より強固な業界ガイダンスが必要である。

33. アルケマ・クロスビー施設は過去40年間にわたり洪水の被害を受けてきたが、長年勤務している従業員の記憶では、ハリケーン・ハービー以前に洪水が2フィート（約60cm）を超えたことはなかった。その結果、アルケマは安全システムの浸水を発生確率の高いリスクとは考えていなかった。しかし、100年洪水や500年洪水のリスクを評価する際、個々の従業員の経験のみに頼るのでは、リスクレベルを適切に判断するには不十分である。例えば、アルケマ・クロスビー施設の長年の従業員は、2001年の熱帯暴風雨アリソンが、同施設における過去の洪水の最高水位基準だったと記憶していた。しかし、洪水記録によると、クロスビー施設においては、1994年のハリケーン・ローザによる降雨や、2015年の無名の嵐による降雨の方がアリソンよりもより深刻な洪水をもたらしていた。ハリケーン・ハービーでは、アルケマ・クロスビー施設の一部で5フィート（約1.5メートル）を超える浸水が発生した。企業は、過去の外部事象に基づいた施設リスクをより適切に記録するためのシステムを構築し、重要な事故の概要情報を保持しておく必要がある。洪水のような外部事象は発生確率が低いものの、重大な健康被害や安全リスクをもたらす可能性がある。
34. ハリケーン・ハービーによる洪水は、500年氾濫原の標高を超えて広がった。この洪水レベルは同地域において前例のないものであったが、異常洪水は定期的に発生していた。1994年以降、アルケマ・クロスビー施設に最も近い水位計は、3回の100年洪水を記録しており、そのうちの1回は500年洪水基準に近い水位に達していた。近年、異常な降雨による洪水の発生頻度は増加しており、2015年のEPAの報告書によると、この傾向は今後も続く予測されており、米国の多くの地域で洪水リスクが高まっている。このEPAの報告書では、テキサス州は将来の洪水被害の潜在リスクが全米で最も高い地域のうちの一つであることを示している。
35. 避難区域を二分する形的高速道路90号線は、緊急対应当局によって避難区域が設定された後も東行き車線が通行可能なままだった。統合司令部にとってこの判断は困難なものであったが、東方向に移動するハリケーン・ハービーの進路に関連して、人員および資源の移動を確保するために高速道路90号線を開放することで、緊急対応要員が最初の火災発生後も施設の近くを通過して通行できるようにしていた。しかし、クロスビー施設の状況が不安定になり、有機過酸化物の分解が進行する可能性があるとして報告された時点で、緊急対应当局は高速道路90号線を閉鎖し、代替ルートを確認すべきであった。この判断により、少なくとも21人が、燃焼中の冷蔵トレーラーや有機過酸化物からの分解生成物と煙に曝露した。ハリケーン・ハービーの緊急対応要員には、高速道路90号線以外で、重要な輸送ルートを確認するための選択肢が限られていた。有機過酸化物を積載したトレーラーの遠隔測定データには燃焼の兆候は示されていなかったが、警察官たちは白煙の中を走行し、蒸気の臭いを感じ、曝露症状を経験したことから、化学物質の放出を報告した。緊急時には、データが不完全であったり、相反する情報が得られたりすることが多いため、緊急対応要員は、できる限り安全側な判断を行い、自身と一般市民の安全を確保すべきである。
36. 英国では、環境庁が、規制対象施設が洪水対策計画を実施するのに役立つガイダンスを公開している。この洪水対策ガイダンスでは、企業がすべての施設における洪水リスクを把握し、洪水モデリング結果を取得し、洪水対策計画を策定し、洪水レジリエンスを向上させることを推奨している。また、このガイダンスでは、企業が洪水発生前に洪水対策計画を策定・実施できるようにすることや、各計画には作業員の保護、危険なプロセスの安全対策、危険物の安全確保の手順を含めることを推奨している。アルケマ・クロスビー施設の事故に関連す

る事項として、環境庁の洪水対策ガイダンスでは、洪水の影響を受けやすい化学製品の安全対策の実施や、電力供給や液体窒素などの主要なユーティリティの保護を、先を見越して実施することについて、具体的に記載している。

1.3. 業界に対するガイダンス

37. 本件の事故を受け、アルケマはクロスビー施設の、施設内の関連地点の標高を把握するための敷地高調査および、ハリケーンなどの異常気象時に起こりうる洪水状況を評価するための水文学的調査を委託した。アルケマはこれらのデータを活用し、さまざまな深刻度の洪水に対するリスクを評価することで、今後起こり得る冷却システムの喪失による有機過酸化化合物製品の分解に備えた対策を講じることができる。
38. アルケマが事故後に講じた積極的な対応を踏まえ、CSBは、洪水などの異常気象の影響を受けやすい地域において、化学物質の製造、取扱い、または保管を行う施設を持つ企業に向けたガイダンスを以下の通り示す。
 - 該当する施設は、異常気象への脆弱性を評価するための分析を実施するべきである。企業は、プロセス安全情報プログラムの一環として、洪水マップなどの重要な安全情報を収集すべきである。この重要な安全情報を評価し、施設のどの部分が100年氾濫原または500年氾濫原に含まれるのかを判断すべきである。さらに企業は、地震ハザードマップを評価して地震リスクを把握し、強風などの他の異常気象リスクも考慮する必要がある。
 - 企業は、リスク評価および関連する安全対策の適切性を、施設のプロセス安全マネジメントプログラムを活用（例えばプロセスハザード分析や施設配置など）して検証すべきである。施設は、異常気象シナリオによる潜在的影響を評価し、緩和策を講じる際には、十分に安全側のリスクマネジメントアプローチを適用するよう努めるべきである。
 - 施設は、重要な安全対策および設備が一般的な故障モードに対して脆弱にならないようにすべきである。洪水を想定する場合、施設が冠水する水位に達した際にも機能する、独立した安全防護層を確保する必要がある。

1.4. 勧告事項の概要

39. 本報告書は、本事故の状況とその原因の詳細を明らかにし、重要な安全上の教訓を提示するとともに、同様の事故を防止することを目的として、産業界向けに安全ガイダンスを提示するものである。CSBは本調査の結果を受けて、アルケマ・クロスビー施設の管理者、アルケマ社、米国化学工学会／化学プロセス安全センター（CCPS）、およびテキサス州ハリス郡当局に対し、安全勧告を行う。CSBは、本書に記載された主要な安全上の教訓とガイダンスを、各企業が自社施設への適用を検討し、既存のプロセス安全マネジメントの業務慣行と設備設計を評価したうえで改善を検討することを強く求める。

2. アルケマ・クロスビー事業の背景情報

40. アルケマ・グループは、年間売上90億ドルを誇るグローバルな化学メーカーであり、約50カ国で事業を展開し、全世界で約20,000人の従業員を擁している [4]^a。同社は、2004年にトタル社の化学品部門が再編された際に設立された [5]。
41. 北米では、アルケマ・グループは、ペンシルベニア州キング・オブ・プルシア（KOP）に本社を置く子会社 Arkema Inc.（アルケマ）の下で事業を展開している [6]。この地域子会社は約6,000人を雇用し、米国、カナダ、メキシコ、ブラジルに48の事業所を運営している [6]。
42. アルケマは多様な化学製品を製造しており、その中には「Luperox®」と呼ばれる各種有機過酸化化物製品が含まれる^b。これらの有機過酸化化物の多くは輸送規制により航空輸送が禁止されている。その結果、アルケマ・グループ全体では、これらの有機過酸化化物製品を9カ国で現地生産している [7]^c。子会社のArkema Inc.は、米国、メキシコ、ブラジルの3カ国で有機過酸化化物製品を生産している。
43. 米国内では、アルケマは以下の3カ所で有機過酸化化物製品を製造している。
 - テキサス州クロスビー（アルケマ・クロスビー） [8]
 - バージニア州フランクリン [9]
 - ニューヨーク州ジェネシオ [10]

2.1. 有機過酸化化物

44. テキサス州クロスビーにあるアルケマの施設では、約50人の従業員が約30種類の有機過酸化化物製品を製造し、ポリマー製造業者に販売している [11, p. 2]。販売された有機過酸化化物製品は、人工大理石のカウンタートップ、ポリスチレンのカップやプレート、ポリ塩化ビニル（PVC）のプレートやカップ、自動車部品（ホース、ガスケット、ヘッドライトアセンブリ等）など、さまざまな消費者向け製品の製造に使用されている [12]。アルケマの前身は1960年にクロスビー工場の敷地を購入し、1960年代に化学製造プロセスを確立した^d。
45. 有機過酸化化物は不安定な化学薬品であるため、重合開始剤や硬化剤として商業的に重要な役割を果たしている [13, p. 219]。この不安定性のため、有機過酸化化物の保管と取扱いには特別な注意が必要である [13, p. 219]。有機過酸化化物の不安定性は、ペルオキシ基として知られる酸素-酸素（-O-O-）結合に由来する [14, p. 3] ^e。このペルオキシ基は熱によって分解し、熱や副生成物を発生させるとともに、商業的に有用な化学反応を引き起こす [14, p. 3] ^g。

^a 売上高はアルケマが報告した75億ユーロを、2017年9月の為替レート（1ユーロ=1.2ドル）で換算 [4]。

^b 「有機過酸化化物は、汎用ポリマー（低密度ポリエチレン、PVC、ポリスチレンの反応開始剤）、アクリルポリマー、不飽和ポリエステル、ゴム架橋などさまざまな分野で使用される開始剤である。[アルケマ・グループの社内推定によれば]、この分野では世界第2位である。主な競合企業は AkzoNobel および United Initiators である [214, p. 24]」

^c [アルケマは、有機過酸化化物製品Luperoxの製造を、米国、メキシコ、ブラジル、ドイツ、イタリア、インド、中国、韓国、日本（合弁会社）で行っている \[7\]](#)。

^d アルケマは、長年にわたって化学製品の生産設備と倉庫施設を拡張してきた。

^e アルケマの記録によると、クロスビーの敷地はもともと Wallace & Tiernan 社が所有していた。1969年に Wallace & Tiernan 社は Pennsalt 社と合併し、Pennwalt 社となった。その後、1990年に Elf Aquitaine 社に買収されるまで、クロスビー施設は Pennwalt 社のものであった。2004年のアルケマ設立に伴い、同施設は Arkema Inc. の一部となった。

^f 官能基とは、分子に特定の化学的性質を与える原子の集合体である。『[The Functional Group Explained](#)』（[官能基の説明](#)） [215]。

^g AkzoNobel 社は、『[Crosslinking Polymers with Organic Peroxides](#)』（[有機過酸化化物による架橋処理](#)） [175]、『[Free Radical Polymerization](#)』（[フリーラジカル重合](#)） [174]、『[Unsaturated Polyester Resin Curing](#)』（[不飽和ポリエステル樹脂の硬化](#)） [173] など、有機過酸化化物の産業用途を紹介する複数の動画を公開している。

46. 有機過酸化物は、温度に応じた速度で継続的に分解する [13, p. 219]。各有機過酸化物にはそれぞれ異なる分解速度があり、品質や安全上の理由から低温保管が必要なものもある [14, p. 3]、[11, p. 2]、[15, p. 71]^a。
47. 有機過酸化物が分解すると熱が発生し、発生した熱が周囲への放熱速度を上回ると、有機過酸化物の温度が上昇し、残存する過酸化物の分解が促進される可能性がある [13, p. 219]。温度が上昇すると、この反応は自己加速分解温度に達して暴走反応を引き起こす可能性がある [13, p. 219]、[16, p. 4]^b。
48. 有機過酸化物の安全性を評価する上で重要な指標の一つが、自己加速分解温度（SADT：Self-Accelerating Decomposition Temperature）である。SADTは、輸送時の包装状態において自己加速分解を起こす最低温度を指す [17, p. 7]^c。有機過酸化物はSADT以下の温度でも分解するが、その分解速度は十分に遅いため、自己加速分解には至らない [17, p. 8]。図2は、アルケマの安全ビデオから抜粋したもので、自己反応性分解による激しい反応を示している [18]^e。

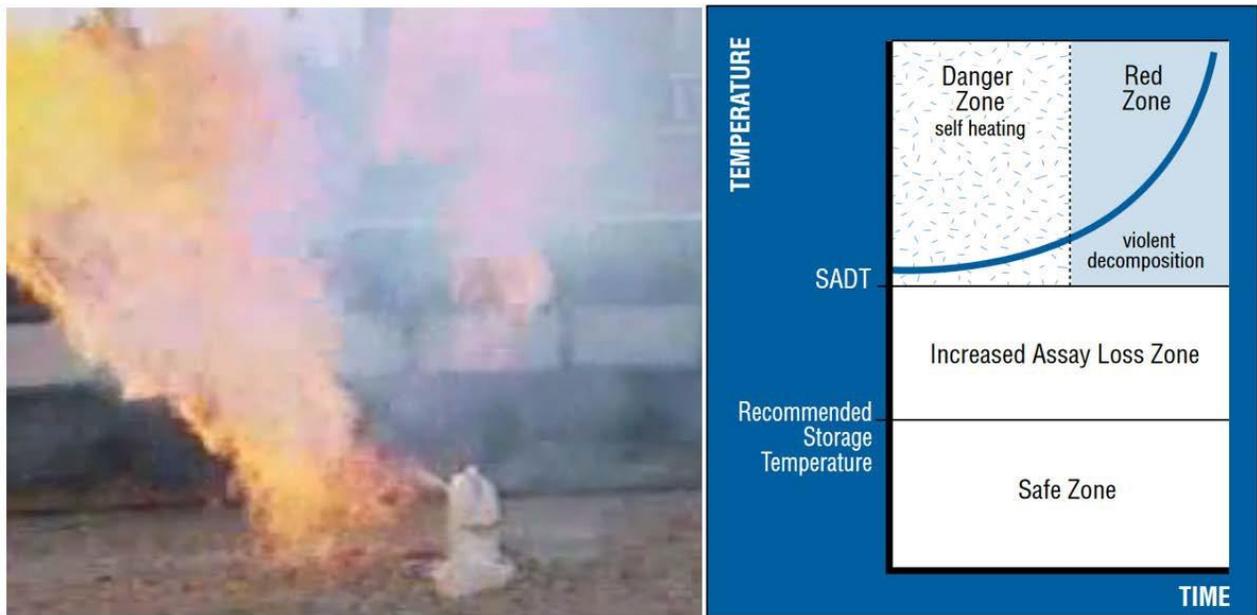


図2：有機過酸化物の分解。左の画像は、自己加速分解を起こしている有機過酸化物の容器の様子を映したビデオの一場面 [18]。右の図は、有機過酸化物製品が「推奨保管温度」以下では安全であり、温度がSADTを超えると制御不能な分解反応が起こることを示すアルケマ作成の説明イラストである [11, p. 3]。

49. 事故当時、アルケマ・クロスビーの施設では、低温倉庫に冷蔵が必要な有機過酸化物製品が約367,000ポンド（約170トン）保管されていた。これらの製品は、SADTが23°F（-5°C）から113°F（45°C）の範囲にあるため、冷蔵を必要とする11種類の有機過酸化物が含まれていた

^a 有機過酸化物の分解では蒸気（ガス）が発生する。この蒸気の一部は可燃性であるが、過酸化水素の分解とは異なり、有機過酸化物は一般的に酸素を放出しない [14, p. 17]。

^b 熱暴走は以下のように説明される。「発熱反応が熱暴走を引き起こす可能性がある。熱暴走は、反応によって発生する熱量が除去される熱量を超えたときに始まる。蓄積した余剰熱が反応物の温度を上昇させ、その結果として反応速度が上昇する。これにより、熱の発生速度が加速され、熱暴走が起こる [176, p. 1]。」

^c SADTは、包装された状態で試験された有機過酸化物が1週間以内に自己加速分解を示す最低温度である。したがって、SADTは有機過酸化物の組成だけでなく、その包装形態にも依存する [14, p. 16]。

^d 「SADTは、標準的な包装に入った製品が自己加速分解を起こす最低温度である。この反応は激しく進行することがあり、通常は包装を破裂させ、過酸化物、液体および気体の分解生成物が広範囲に飛散する。発生した熱は可燃性蒸気を自己発火させる可能性がある。一般に、SADTに達してから分解が激しくなるまでには一定の時間がかかるが、その時間の長さは、SADTをどの程度超過しているかによって異なり、超過温度が高いほど急速に分解が進行する [153, p. 1]。」

^e [オリジナルビデオ](#)はアルケマの公式ウェブサイト [236] で公開されている。

^a。これらの有機過酸化物製品は危険であるが、米国運輸省（DOT：Department of Transportation）の規制では最も危険なクラスの有機過酸化物には指定されていない^b。これらの有機過酸化物は爆発する可能性があるものの、最終製品としての包装状態では、長期的に冷却が停止するような潜在的な加熱シナリオなどにより、火災の方がより可能性のあるハザードである [19]。有機過酸化物に関するその他の情報は、付録Bに記載されている。

2.2. 有機過酸化物の貯蔵施設

50. アルケマ・クロスビー施設には、9棟の有機過酸化物貯蔵棟がある。このうち7棟は低温倉庫と呼ばれる冷蔵保管施設であり、これらの低温倉庫は、貯蔵される有機過酸化物の要件に応じて、 -20°F （約 -29°C ）から 0°F （約 -18°C ）の範囲で温度管理されている（図3）。1棟は常温で運用される有機過酸化物保管施設である。最終有機過酸化物の保管施設はアルケマ・クロスビー施設内で最大の保管施設であり、その内部は複数の区画に分かれており、 40°F （約 4°C ）から常温の範囲で温度管理されている。



図3：クロスビーの低温倉庫。アルケマ・クロスビー施設にある7つの低温倉庫のうち3つがこの写真に写っている。（出典：CSBの写真）

2.3. 冷蔵設備

51. 7棟の低温倉庫は、それぞれ電力駆動の冷却装置を使用して冷蔵している（図4）。各低温倉庫には少なくとも2つの冷却装置が設置されており、そのうちの1つはバックアップ用である。アルケマで扱っている有機過酸化物の一部は自己加速分解温度以下に維持するために冷却が必要なため、同社の手順では、冷蔵設備に問題が発生した場合に迅速に対応することの重要性が強調されている。

^a アルケマの各有機過酸化物製品の必要保管温度は、SADTよりもかなり低く設定されている。

^b [49 C.F.R. §173.128 \(b\) \(2004\)](#)。

^c 有機過酸化物の安全データシートでは、C～Fのタイプの有機過酸化物に対して炎のピクトグラムと「加熱により火災の危険性あり」というハザード警告が表示されている。タイプAおよびBの有機過酸化物には爆発の危険性がある [19]。



図4：アルケマ・クロスビー施設の低温倉庫の保冷に使用されている標準的な冷蔵設備。左の写真は、低温倉庫の内部から熱を除去するために使用される冷却用蒸発器である。右の写真は、冷媒から熱を除去するための冷凍凝縮装置と、冷却装置および照明などの建物用電気機器に電力を供給する電源装置である^a。（出典：CSBの写真）

52. アルケマの手順書には、低温倉庫の温度上昇が発生する可能性のあるさまざまなシナリオに沿った対応措置が詳述されている。対応策として、以下の措置が挙げられる。
- 冷蔵設備の問題に対するメンテナンスの迅速化
 - 有機過酸化物品の別の低温倉庫への移動
 - 予備電力を供給するための非常用発電機の始動
 - 代替冷蔵源としての液体窒素の使用
 - 有機過酸化物品の冷蔵トラックトレーラーへの移動

2.4. 非常用発電機

53. アルケマ・クロスビー施設では、7基のディーゼル式非常用発電機が設置されており、施設内の建物や設備にバックアップ電力を供給している（図5）。このうち2基は、アルケマの低温倉庫にバックアップ電力を供給している。

^a 冷却に関する基本的な説明については、[『HOW IT WORKS: Refrigerators』](#)（冷蔵庫の仕組み）を参照のこと [208]。



図5：アルケマ・クロスビー施設にある7台の非常用発電機のうち1台。発電機21-GN-1は、アルケマの7棟の低温倉庫に非常用電力を供給する2基の発電機うちの1基である。発電機の底部（コンクリート基礎の上部）は地面から約2フィート（約60cm）の高さにある。（出典：CSBの写真）

2.5. 液体窒素システム

54. アルケマ・クロスビー施設では、液体窒素システムを使用して、低温倉庫のためのバックアップ用緊急冷却源を供給している（図6）。電源やバックアップ電源の喪失など、冷却システムに重大な問題が発生した場合、作業員は短いホースを接続し、バルブを開くことで、有機過酸化低温倉庫のいずれかに液体窒素を注入し、冷却源を供給することができる。これは、電力に依存しない冷却手段である。各低温倉庫には、液体窒素専用の配管が設置されている。通常、この配管にはキャップが取り付けられ、誤使用を防ぐためにシステムはロックされている。注入された液体窒素は、極低温であることに加え、酸素濃度を低下させるため、作業員に窒息ハザードを生じさせる。



図6：アルケマ・クロスビー施設の液体窒素タンク。このタンクには最大40,000ポンド（約18トン）の液体窒素が貯蔵されており、有機過酸化物の低温倉庫に注入することでバックアップ用の冷却源とすることができる。（出典：CSBの写真）

2.6. 冷蔵トレーラー

55. 低温倉庫内の温度が上昇する事態に対する最終的なバックアップ手段として、有機過酸化物製品を可搬型の冷蔵トラックトレーラーへ移すことができる（図7）。アルケマは、これらの冷蔵トレーラーを主に有機過酸化物製品の顧客への輸送に使用しているが、アルケマの手順書では、緊急時や低温倉庫の冷却システムの修理中に限り、これらのトレーラーを一時的な保管場所として使用することを認めている。これらの冷蔵トレーラーの燃料タンクは、冷却ユニットに電力を供給するコンテナの下に設置されている。満タンであれば、一般的に適切な低温状態を1週間以上維持することが可能である。



図7：冷蔵トラックトレーラー。アルケマは、有機過酸化化物製品の顧客への輸送や、低温倉庫の一つまたは複数で低温状態を維持できない場合の一時的な保管場所の提供を目的として、このような冷蔵トラックトレーラーを約12台使用していた。（出典：CSBの写真）

2.7. 製品用トート容器

56. 低温貯蔵を必要とする有機過酸化化物製品は、一般的に1ガロン（約3.8リットル）または5ガロン（約19リットル）のプラスチック容器、またはトート容器に梱包されている。顧客は少量の有機過酸化化物を使用することが多いため、トート容器は顧客にとって利便性が高い包装形態である。このような有機過酸化化物トート容器はパレットに積み重ねられ、シュリンク包装されるため、作業員が施設内で製品を容易に移動させることができ、輸送時の安定性も確保される（図8）。



図8：積み重ねられた有機過酸化物のトート容器。この写真は、シュリンク包装された5ガロン容器がパレット上に積み重ねられた例である。（出典：アルケマの写真）

3. 事故の概要

57. 国立ハリケーンセンターは、ハリケーン・ハービー^aとそれがもたらした大雨についてまとめた報告書を作成した。ハリケーン・ハービーは、テキサス州中部の海岸沿いに上陸する前の時点でカテゴリー4の暴風雨だった [20, p. 1]。この嵐は停滞し、その結果、「テキサス州南東部に60インチ（約152cm）を超える歴史的な降雨量をもたらした [20, p. 1]」。ハリケーンの進路を以下の図9に示す。図9に示すとおり、ハリケーンは2度上陸し、テキサス州南東部付近に長時間留まったことで、この地域に大量の降雨をもたらした。

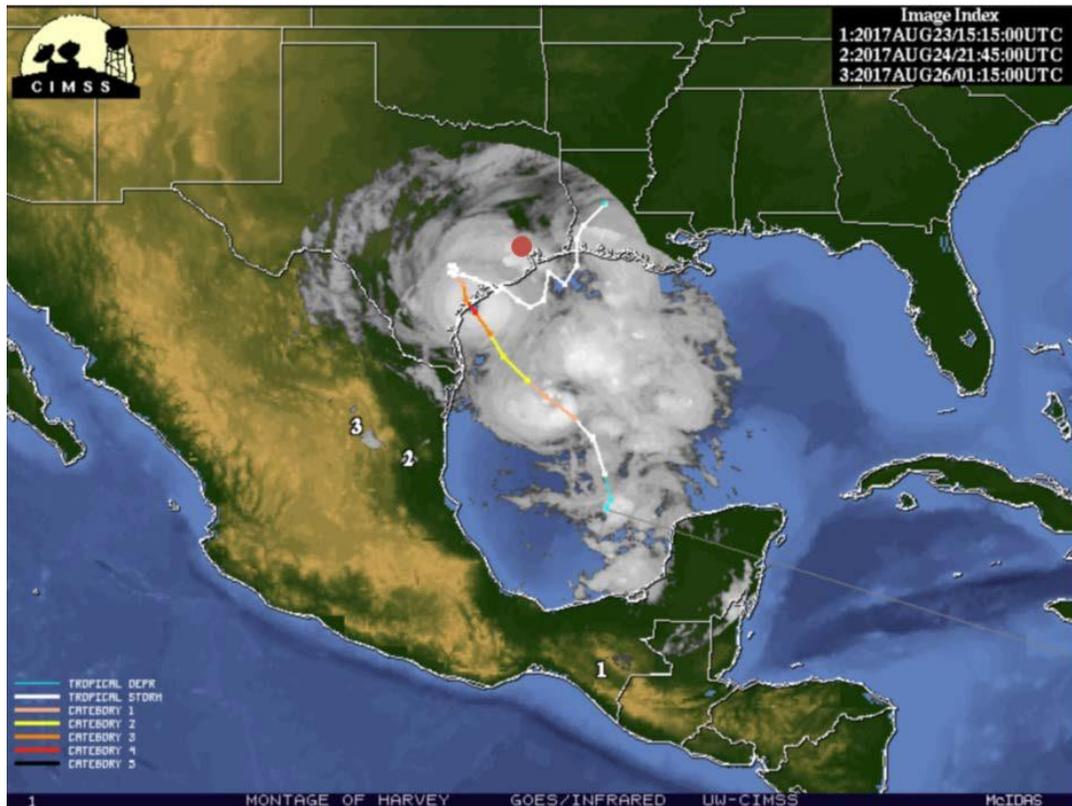


図9：ハリケーン・ハービーの進路。赤い丸は、アルケマ・クロスビー施設のおおよその位置を示している。（出典：Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies [21]、CSBによる編集画像）

58. ハリケーン・ハービーに関する国立ハリケーンセンターの『Tropical Cyclone Report』（熱帯低気圧レポート）は、被害状況を次のように記している。

この豪雨により壊滅的な洪水が発生し、ハービーは米国史上2番目に大きな被害額を出したハリケーンとなった（1250億ドル）^b。これは、インフレ調整後の評価で、ハリケーン・カトリーナ（2005年）に次ぐ規模である。テキサス州では少なくとも68人が暴風雨の直接的な影響で死亡しており、これは1919年以来、同州で最も多くの死者を出した熱帯低気圧となった [20, p. 1]。

59. 降雨に関して報告書は、「ハービーは、1880年代頃に信頼できる降水記録が始まって以来、その降雨範囲とピーク降水量の両面において、米国の歴史上最も重大な熱帯低気圧による降

^a 2018年4月、世界気象機関は嵐の名称リストから「ハービー」を除外した。これは、ハービーが非常に壊滅的な被害をもたらしたため、今後同じ名前を使用することが不適切と判断されたためである。1953年以降、合計86の暴風雨名が廃止されている [234]。

^b 国立ハリケーンセンターの報告書は、米国海洋大気庁（NOAA）が作成した被害推定値を使用している [20, p. 9]。『Billion - Dollar Weather and Climate Disasters: Table of Events』 [224] を参照のこと。

雨事象であった [20, p. 6]』とした。報告書はまた、この暴風雨により4万人が危険地域から退避または避難し、30万以上の建造物が浸水し、約50万台の車両が損壊したと指摘している [20, p. 9]。図10と図11は、ハリケーンによる降水の影響が最も大きかった地域を示している。

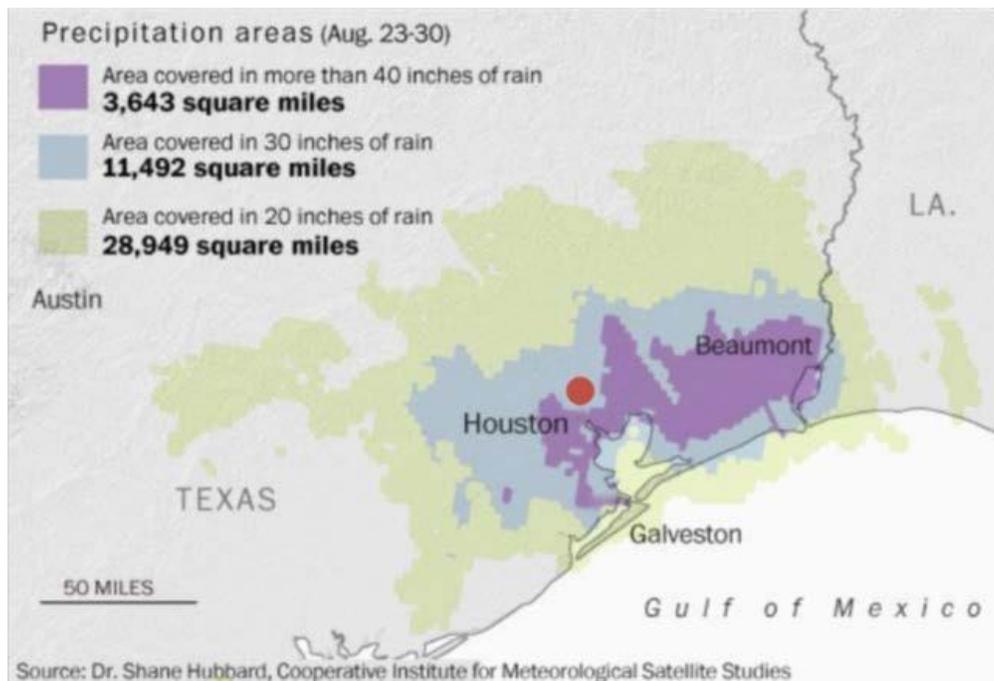
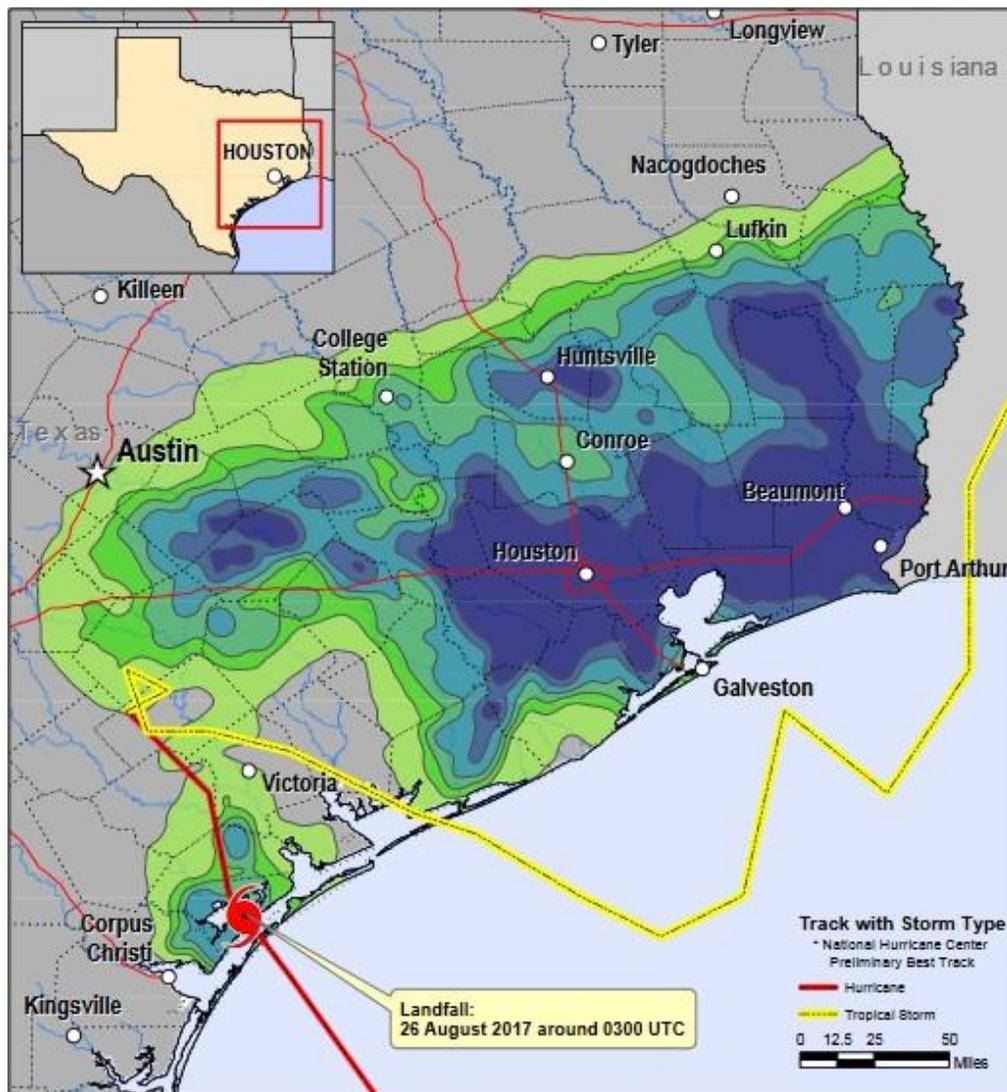


図10：ハリケーン・ハービーによる降水量（テキサス州南東部）。赤い丸はアルケマ・クロスビー施設のおおよその位置を示している [22]。（出典：CSBによる編集画像）



Hurricane Harvey, 25 - 31 August 2017
Annual Exceedance Probabilities (AEPs) for the Worst Case 4-day Rainfall

図11：NOAA米国気象局が作成した、年間発生確率に対する降水量の超過を示す地図（ハリケーン・ハービー、テキサス州南東部）。地域ごとにハービー級の降水量が年間で発生する確率を示し、色分けしている [23]、[24]。

60. 表1に示すように、予測降水量はハリケーン・ハービー襲来までの数日間増加し続け、上陸後も増加した。

表1：ハリケーン・ハービーによるヒューストン地域の予測降水量。

日付	テキサス州南東部における予測総降水量
8月24日（木）	12～30インチ
8月25日（金）	15～35インチ
8月26日（土）	15～40インチ
8月27日（日）	15～50インチ

61. 最終的に、アルケマ・クロスビー施設の雨量計は、ハリケーン・ハービーの期間中に39インチ（約100cm）を超える降雨量を記録した（図12）。

Arkema Crosby - Rain Gauge Data - Hurricane Harvey

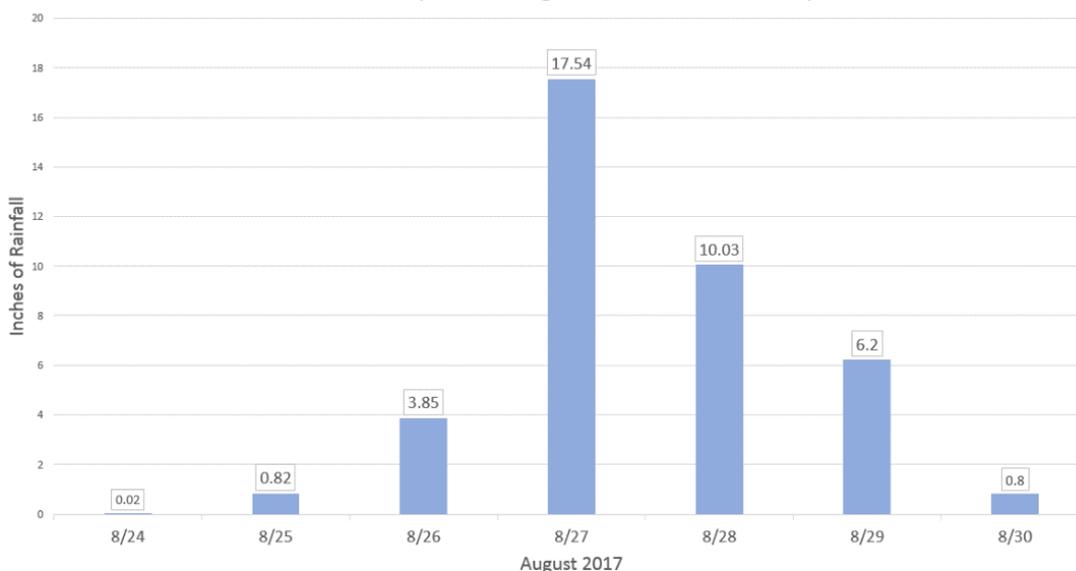


図12：アルケマ・クロスビー施設の雨量計データ。アルケマの施設では、ハリケーン・ハービーの影響を受けた数日間に39インチを超える降雨を記録した。

3.1. 2017年8月24日（木）

62. ハリケーン・ハービーは、メキシコ湾を10日以上にわたって移動した後、テキサス州の中部および北部沿岸部に影響を及ぼし、最終的にはテキサス州南東部地域で停滞する可能性が高いことが明らかになった [1]。2017年8月24日（中部夏時間）午前10時、国立ハリケーンセンターは最新情報を発表し、ハリケーン・ハービーが勢力を強めており、暴風雨による深刻な洪水を引き起こすことが予測されると警告した。発表された最新情報では、以下のように述べられている。

ハービーは今朝急速に勢力を強め、上陸時には大型ハリケーンとなり、テキサス州沿岸の一部に生命を脅かす高潮、豪雨、強風をもたらす見込みである。熱帯暴風雨級の強風がハリケーンや高潮の警戒区域に到達するのは金曜日であるため [2]、生命と財産を守るための準備は本日中に完了しておく必要がある。

金曜日から来週初めにかけて、テキサス州沿岸の大部分で12～20インチ（約30～51cm）、一部地域では最大30インチ（約76cm）の大雨による、生命を脅かすほどの洪水が予想されている。

63. ハリケーン・ハービーが翌日（2017年8月25日金曜日）に上陸することを見越して、アルケマ・クロスビー施設の職員は嵐への備えを開始した。アルケマ・クロスビー施設にはハリケーン計画があり、ハリケーン発生前、発生中、および発生後における従業員と施設の保護方法が詳細に記されていた。この計画の実施を担当するチームは、ハリケーンシーズンの始まり（6月1日）以降、定期的に会議を開き、メキシコ湾で形成される、またはメキシコ湾に移動する暴風雨を監視していた。また、アルケマ・クロスビー施設は、潜在的な嵐の脅威について本社部門のスタッフと連絡を取り合い、協力しながら、ハリケーンが発生している間は施設に留まって対応に当たるスタッフで構成される現場対応チームをいつ稼働させるかを決定した。現場対応チームは、ハリケーンの間、施設の安全確保と状況の変化を監視する責任を負う。現場対応チームは以下の構成となっている。

- 管理者（2名）
- オペレーター（4名）

- 冷却設備専門技術者（1名）
 - 保守担当（3名）
 - 機械・電気技師（2名）
64. 木曜日、アルケマの職員は、ハリケーンがクロスビー施設に影響を与えることを想定し、工場の準備を整える必要があると判断した。施設の担当者は数日前からハリケーン・ハービーの進行状況を監視しており、ハリケーン対策計画の実施準備が整っていた。現地の天気予報に基づき、アルケマの施設管理担当者は、ハリケーンがクロスビー施設の南を通過すると予想し、ハリケーンの間、施設では10～15インチ（約25～38cm）の雨が降ると見積もっていた。施設の管理チームは会合を開き、施設が深刻な影響を受けた場合に備えて、適切な施設のシャットダウン方法および最善のハリケーン対策について協議した。
65. 2017年8月24日（木）午後10時（中部夏時間）、国立ハリケーンセンターは、「テキサス州の中部および北部沿岸地域において、壊滅的かつ生命を脅かす洪水が発生する可能性があり、15～25インチ（約38～64cm）の豪雨が予想される。一部地域では最大35インチ（約89cm）に達する可能性がある [25]」と予測した。その日の終わりには、クロスビー地域の降水量予測は15～18インチ（約38～46cm）と天気予報が告げており、アルケマ・クロスビーの管理チームは本格的な準備作業を開始した。
66. これまでの経験に基づき、アルケマ・クロスビー施設の従業員は、このレベルの雨は道路を冠水させるのに十分であり、作業員の出入りが困難になるため、現場対応チームの出動が必要になることを認識していた。クロスビー施設の職員は、40インチ（約100cm）の降水があると、施設内には1～2フィート（約30～60cm）の浸水が発生し、施設内の移動は困難になるが、安全システムには影響がないと想定していた。アルケマの物流部門は、サプライヤーや顧客に電話し、同施設が原料を必要としないことや生産が中断する可能性が高いことを伝えた。

3.2. 2017年8月25日（金）

67. 2017年8月25日（金）の朝の時点で、クロスビー施設の区域の天気予報は、ハリケーンの期間中、降水量は15～25インチ（約38～64cm）に達し、一部地域では最大35インチ（約89cm）に及ぶ可能性があるとして伝えていた [26]。連邦緊急事態管理庁（FEMA：Federal Emergency Management Agency）はテキサス州緊急事態管理局や他の機関と協力し、ハリケーンの影響を管理するための物資や人員を事前に配置した [27]。その日の終わりには、FEMAはこの状況を「大規模災害」と正式に宣言した [28]。
68. 降水量の増加が予測されたことで、地域の道路が冠水する可能性が高くなり、12名で構成される現場対応チームの招集が必要であると判断された。しかしながら、施設の停電や、冷蔵された有機過酸化物質製品への潜在的な影響についての懸念は持たれていなかった。
69. 2017年8月25日（金）午後2時、ハリケーン・ハービーはカテゴリー3のハリケーンへと変わり、金曜日の夕方にはカテゴリー4のハリケーンへと発達し、風速は時速130マイル（約210km）に達した [1]。この日一日でハービーが沿岸部に接近し、ハービーの外側の雨雲がクロスビー施設周辺で降雨をもたらした（図13）。

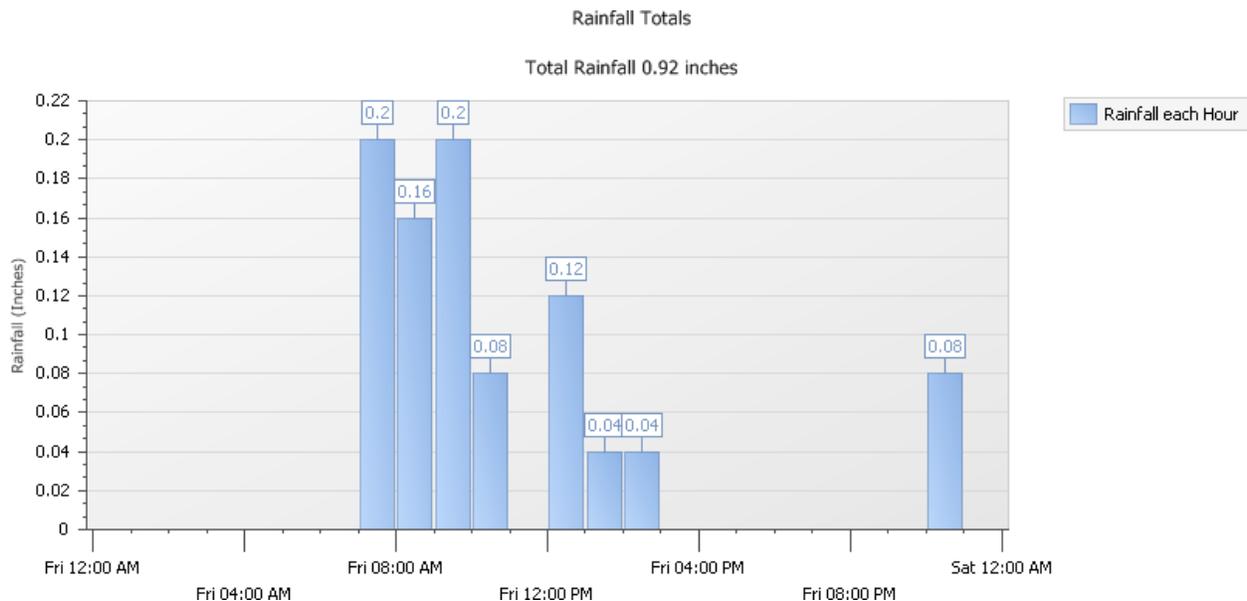


図13：ハリケーン・ハービーによる、2017年8月25日（金）の1時間ごとの降水量。アルケマ・クロスビー施設の北東約2.5マイルにあるシーダーバイユー観測ステーション1740が8月25日に測定した、ハリケーン・ハービーによる降雨の1時間ごとの降水量グラフ [29]。

70. アルケマは、ハリケーン・ハービーの接近に伴い、クロスビー施設での生産を停止した。工場の従業員は、以下の対策を含めたハリケーンへの準備を開始した。
- 暴風雨による飛散や洪水で流されることを防ぐため、足場や空の製品用トート容器など、緩んでいる資材を固定。
 - ポータブル機器（コンプレッサーなど）を高所に移動させ、洪水の影響を受けないように配置。
 - プロセスシャットダウン（プロセス機器を空にして洗浄する作業も含む）の完了。
 - オフロードフォークリフトやボートを含む暴風雨対策用の機材を施設内に配置。
 - ポンプ、ホース、土嚢などの機材を適所に配置。
 - 非常用発電機および冷蔵トレーラーのディーゼル燃料タンクに燃料を補充。
 - 液体窒素タンクが満充填であることを確認。
 - 暴風雨のシナリオと是正措置について現場対応チームのメンバーと確認。
 - 大雨に備えて排水処理設備の水位を下げる。
71. 金曜日、アルケマ・クロスビー施設に降った雨は1インチ（約2.5cm）程度であったが、嵐の勢力は強まりつつあった（図13） [29]。午後10時頃、ハリケーン・ハービーの目が、テキサス州南部湾岸にあるコーパスクリスティの北東約30マイルの地点に上陸した [1]。暴風雨がテキサス州内に進むにつれて、国立ハリケーンセンターは、テキサス州の中部および北部の沿岸部全域で15から30インチ（約38から76cm）の大雨が降り「壊滅的で生命を脅かす洪水」が発生すると予測し、一部の地域では40インチ（約100cm）に達すると警告した [30]。

3.3. 2017年8月26日（土）

72. 午前10時の時点で、国立ハリケーンセンターからの予報は変わらず、15～30インチの大雨、一部地域では40インチに達する大雨との予報であった [31]。ヒューストン地域で雨が降り続

く中、クロスビー施設では浸水が始まり、（クロスビー施設がある）シーダーバイユー流域では水位が約13フィート（約4m）上昇した（図14）。

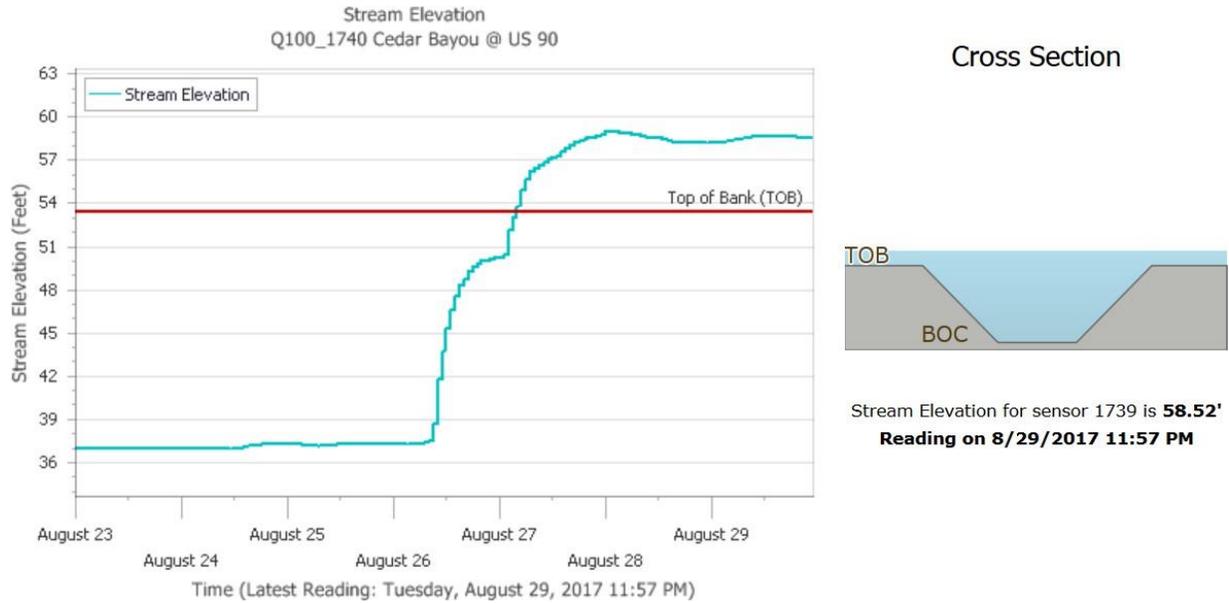


図14：ハリケーン・ハービーによるシーダーバイユー流域の水位を示す観測ステーション1740のグラフ。水位は、2017年8月26日（土）の一日を通して、徐々に上昇し続けた [29]^{a b}。

73. アルケマが施設を停止し、現場対応チームを始動させると、クロスビーの現場対応チーム12名は嵐の間、施設内に留まった。その後、事態が進展し、現場対応チームは有機過酸化物質製品をクロスビー施設内の安全な場所に移動させる作業を開始した。施設内の水位が上昇する中、現場対応チームは工場の状態を監視し、特に工場のユーティリティと廃水処理システムが増加する負荷に対応できるかを確認した。現場対応チームは施設周辺を巡回し、風や水で移動する恐れのある物がないか確認するとともに、施設の状況を把握した。今後時間が経過し、増水が続くようであれば、現場対応チームは、各建物の電源用変圧器を含む電気設備への通電を事前に遮断し、ショートしないようにする必要があるだろう。
74. 現場対応チームは、主に各設備が地面からどの程度の高さに設置されているかを評価することで、施設内の電気設備の浸水リスクを分析した。低温倉庫の480ボルト変圧器の浸水は、その故障が設備の損壊だけでなく付近の作業員を感電させる危険性もあるため、最大の懸念事項であった。現場対応チームは、低温倉庫（あるいは他の建物）において水の影響を受けやすい電気機器に浸水が到達するリスクがあると判断すると、その時点で、水が電気機器に到達する前に手で建物全体の電源を切った。
75. 土曜日の夜、暴風雨のために工場の電話システムが機能停止したが、現場対応チームは携帯電話を使うことができた。一日中降り続いた雨により施設の浸水状況は悪化し、低温倉庫周辺には停滞水が広がった。現場対応チームのメンバーは、水位がさらに上昇すれば、低温倉庫の一部が停電し、それに伴い冷却能力を失うため、有機過酸化物質製品を移動させる必要があることを認識した。しかし、この時点では、現場対応チームは、事態は管理可能であり、ハリケーンが施設運営に与える影響も最小限に留まると考えていた。

^a 水路底（BOC：Bottom of Channel）とは、バイユーの最も低い地点の標高を指す。堤防頂部（TOB：Top of Bank）とは、大雨の際に水が溢れ出す可能性のある場所における堤防の高さを指す。特定の河川の水深を求めるには、堤防頂部の測定値から水路底の標高を差し引く [139]。

^b 高速道路90号線のシーダーバイユーでは、堤防頂部は53.4フィート（約1.8m）、水路底は36.09フィート（約1.1m）である [29]。

76. アルケマ本社の担当者は、嵐の進路上にあるテキサス州のアルケマ施設における豪雨対応を支援するため、全社危機管理チームを招集した。危機管理チームは、あらゆる種類の危機的状況の際に支援を提供し、コミュニケーションを調整する。危機管理チームのメンバーはこの時点ですでに会合を開いていたが、クロスビー施設（および同地域の他のアルケマ施設）の現場対応チームならば、洪水の水位上昇が止まりさえすれば、施設で起こるいかなる種類の流出や事故も防ぐことができると考えており、また、水位の上昇も間もなく止まるだろうと予想していた。
77. 午後10時、国立ハリケーンセンターは最新情報を発表し、2017年8月31日までにさらに15～25インチの降雨量、一部地域では合計40インチに達する降雨量の予測を報告した [32]。この最新情報には、テキサス州南東部の大部分で「生命を脅かす」洪水の危険が続くという警告が含まれていた [32]。2017年8月26日（土）の終わりまでに、アルケマ・クロスビー施設付近では約5インチの雨が降った（図15） [29]。

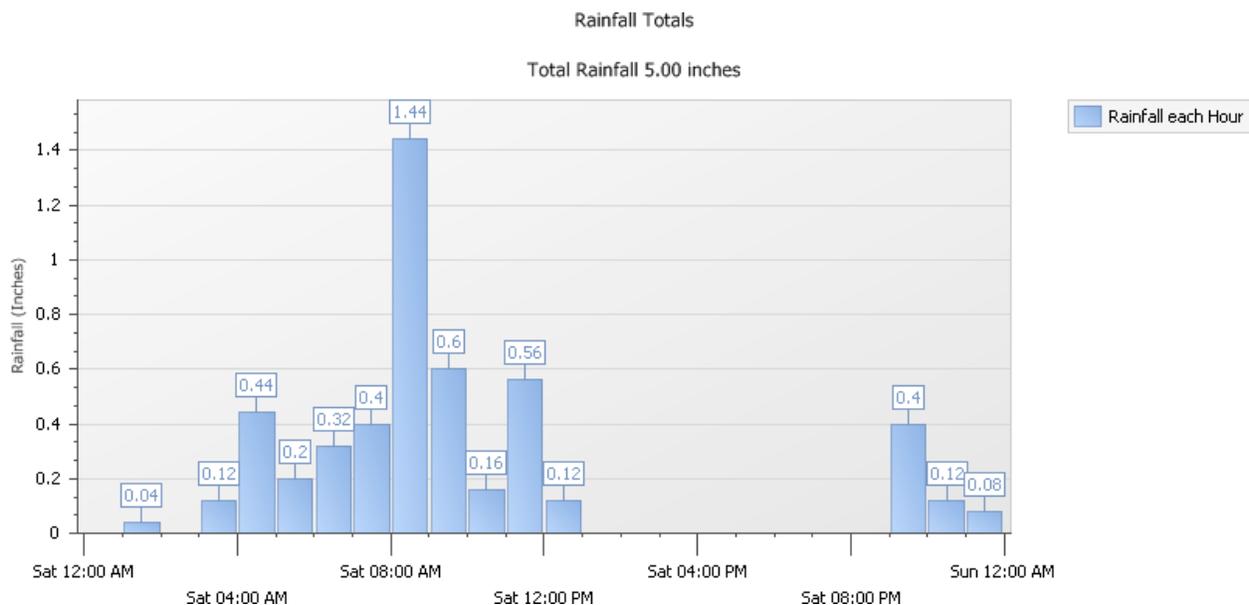


図15：ハリケーン・ハービーによる、2017年8月26日（土）の1時間ごとの降水量。シーダーバビュー観測ステーション1740が8月26日に測定した、ハリケーン・ハービーによる降雨の1時間ごとの降水量グラフ [29]。

78. 雨は降り続き、ハリケーン・ハービーがテキサス州南東部に停滞する中、アルケマ・クロスビー施設の水位は上昇し続けた。ハービーによる前例のない降雨がテキサス州南東部全域に降り注ぎ、下流の水位も上昇し続けたため、施設内の水位の上昇速度が加速し始めた（図14）。しかし、現場対応チームは、気象予報が最大30インチの降水を予測していることを確認し、その範囲であれば対応可能であり、低温倉庫を含めた施設に深刻な影響を及ぼすことはないと判断していた。実際、その日の正午頃、現場対応チームの管理者は、現場対応チームの解散及び数日以内に通常の人員配置と操業に戻す計画について議論するため、電子メールを送った。しかし、土曜日の夜になっても嵐は予想通りには収束せず、施設内の水位は依然として上昇し続けたため、管理チームは運用上の意思決定を「1日ごとに判断する」方針に変更した。

3.4. 2017年8月27日（日）

79. 午後10時、国立ハリケーンセンターは最新情報を発表し、「ハービーはテキサス州南東部上空で蛇行を続けており、壊滅的で生命を脅かすほどの洪水を引き起こす雨を降らせている [31]と報告した。また、今後数日間で、さらに15～25インチ（約38～64cm）の降雨が予想され、

一部地域では総雨量が50インチ（約130cm）に達する可能性があるとして予測した [3]。この最新情報の中で、「安全のため、不要不急の外出は控えるように」との警告が出された [3]。

80. 日曜日の早朝、大規模な洪水が発生し、現場対応チームのメンバーは、水位が電気設備に達する前に、一部の低温倉庫の電源を予防的に遮断した。図16は、アルケマ・クロスビー施設のGoogle Earthによる俯瞰画像である。この画像では、左下（南西部）が低地であり、右上（北東部）に向かうにつれて地盤が高くなっている。午後2時の時点で、施設の一部には4フィート（約1.2m）の水が溜まっていた。水位の上昇に伴い、低温倉庫（図16中の左から右へ番号1～7）の運用に影響が及び、現場対応チームによってほぼその番号順に倉庫への電源が遮断され、有機過酸化物品は低温倉庫から冷蔵トレーラーへと移動された。



図16：ハリケーン・ハービーが襲来する前のアルケマ・クロスビー施設のGoogle Earth俯瞰画像。この図は、施設の主要な設備の配置を示しているが、建物や発電機に振られている番号は実際の設備番号とは一致しない。（出典：CSBによる編集画像）

81. アルケマ・クロスビー施設は、他のアルケマ有機過酸化物品製造施設向けに、有機過酸化物品の低温保管機能を提供する、地域の流通センターとして機能していた。中心的な流通拠点として同施設には11台の冷蔵トレーラーが配備されており、バックアップ保管用の貯蔵庫として使用されていた。図16には、低温倉庫2の隣に冷蔵トレーラーが多数見える。
82. 水位の上昇に伴い、作業員が低温倉庫の電源を切ると（図17）、現場対応チームは7棟ある低温倉庫のうち6棟から有機過酸化物品を取り出し、別の低温倉庫または施設内にある11台の冷蔵トレーラーのうちの1台へ移動させた。日曜日の午後早くには、作業員は3棟の低温倉庫の電源を遮断した。低温倉庫1は、浸水が電気部品に達する恐れがあったため、最初に手動で電源を落とした。次に低温倉庫2と低温倉庫3の電源が手動で遮断され、そこに保管されていた有機過酸化物品は別の場所に移された。現場対応チームはフォークリフト（図18）を使って、これら3棟の低温倉庫から約20パレットの有機過酸化物品を2台の冷蔵トレーラーに

移し、その後、それらを高台にあるレイダウンエリアに移動させた^a。この最初の3棟の低温倉庫が空になった後、現場対応チームは「現場では他の倉庫の冷却能力が失われる可能性はないと考えているが、もしそうなった場合、十分に（有機過酸化物を）保管できる能力（冷蔵トレーラー）は確保できない可能性がある。」との報告を送った。現場対応チームの想定とは異なり、洪水の水位は下がることなく、むしろ上昇し続けた。その結果、他の低温倉庫も電源を失い、作業員は有機過酸化物製品を別の場所へ移動する作業を継続することとなった。



図17：低温倉庫の裏に設置された空調設備。空調設備に重ねて引かれた赤い線は、アルケマ・クロスビー施設の最終的な浸水水位を示している。（出典：CSBの写真）

^a クロスビー施設にはセミトレーラートラック（「ヤードミュール」と呼ばれる）が2台配備されており、作業員はこれを使って冷蔵トレーラーを施設内で移動させていた。



図18：現場対応チームが使用したフォークリフト。この画像に示されているフォークリフトは、現場対応チームのメンバーが、浸水水位の上昇に伴い電源を遮断した保管施設から有機過酸化物のパレットを移動させるために使用したものである。（出典：アルケマの写真）

83. 洪水の水位が上昇したため、現場対応チームは低温倉庫だけでなく、工場内の他の建物の電源も遮断した。他の建物への電力供給が停止されたことで、現場対応チームは廃水処理施設など一部のシステムを遠隔監視する能力を失った。その結果、現場対応チームは工場の重要なデータを1時間ごとに手作業で記録するようになり、危険な天候にさらされる機会が増え、12名の対応チーム全体の作業負荷も増大した。
84. 水位がさらに上昇したため、施設の給水ポンプおよび消火用水ポンプの電源を切る必要が生じた。上昇した水位はバックアップ発電機の一部にも達し、現場対応チームはその電源も遮断することになった。電源を切った発電機には図16の低温倉庫1、2、3にバックアップ電力を供給していた発電機（図19）も含まれていたが、現場対応チームメンバーの安全を確保するためにはそうせざるを得なかった。なお、すでに手動で電源を落としていた低温倉庫については、バックアップ発電機の供給も不要である。



図19：低温倉庫にバックアップ電力を供給する非常用発電機。左の写真は、2017年8月29日（火）に洪水標高が発電機の下半分を覆った様子を示している（黄色の楕円部分）。右の写真は、事故後に撮影された同じ発電機の様子である。（出典：CSBが修正したアルケマ社の写真（左）、CSBの写真（右））

85. 水位が上昇し、施設内の車両の移動が困難になり始めたため、現場対応チームのメンバーは浸水を避けるため、自家用車を高台に移動した。
86. 前述したように、液体窒素のタンクは、低温倉庫の冷却能力喪失や電力喪失に備えたアルケマの安全対策の一つであった。作業員は液体窒素を冷蔵保管施設に直接注入して温度を下げるができる。しかし、日曜日には、施設全体の電力が完全に失われる危険性が明確になったため、現場対応チームは液体窒素システムが確実に使用できるように準備することを決定した。液体窒素の配管システムにより、必要に応じて各低温倉庫に1カ所ずつ窒素を注入することが可能であったが、しかし、増水によって配管が水没し始め、システムの利用が困難になり始めた。この状況を受け、現場対応チームのメンバーが、現時点でもアルケマ・クロスビー施設内を走行可能な、車高を上げて大型タイヤを装備した自家用車を持つ工場監督者を呼び寄せた。現場に到着した工場監督者は、浸水水位が上昇してもアクセスできるように、窒素配管システムに1フィートの延長部分（図20）を追加した。その後、工場監督者は現場を離れる前に、さらに有機過酸化物品を冷蔵トレーラーに移すのを手伝った。



図20：液体窒素配管の延長。工場監督者は、有機過酸化物品が保管されている低温倉庫に現場対応チームが液体窒素を注入する必要がある場合に備え、接続ポイントが洪水標高より上に維持されるよう液体窒素の配管を延長した。しかし、この延長された接続部も十分な高さではなく、水位のさらなる上昇により最終的には浸水してしまった。（出典：CSBの写真）

87. 現場対応チームは、低温倉庫の電源を切った後、そこに保管されていた有機過酸化物品を、まだ電源が供給されている他の低温倉庫か冷蔵トレーラーに移動した。その後、冷蔵トレーラーは、施設の北端にあるレイダウンエリアに移された（図21）。日曜日の夜までに、現場対応チームは低温倉庫7を除くすべての低温倉庫の電源を手動で遮断し、その後、6棟の低温倉庫から搬出した有機過酸化物品を、工場北端のレイダウンエリアで稼働していた6台の冷蔵トレーラーに移し替えた。

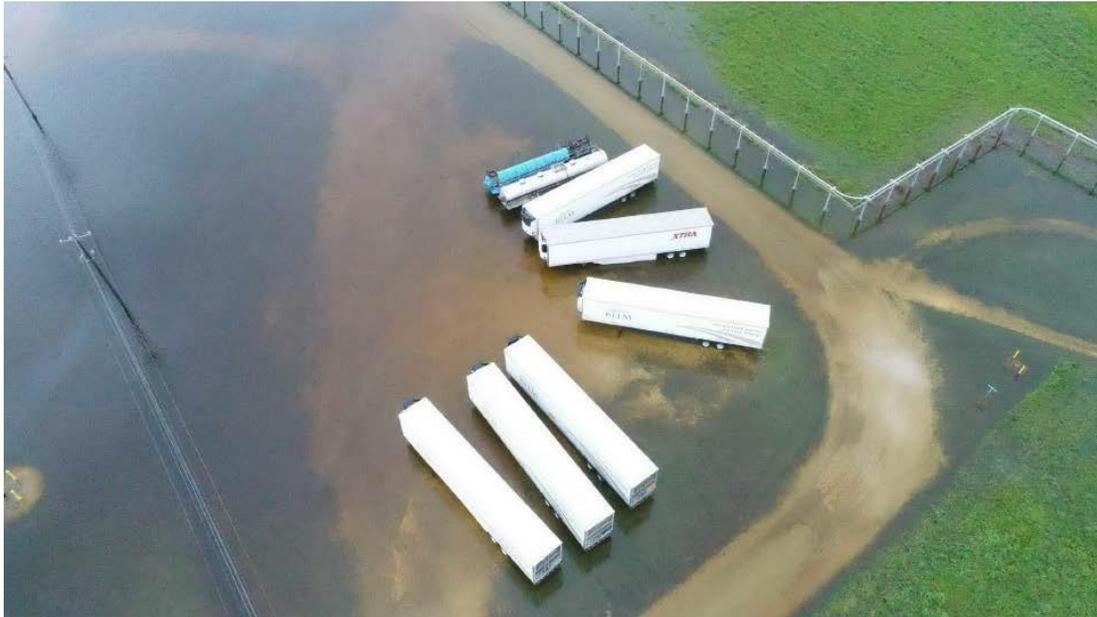


図21：レイダウンエリアに配置された冷蔵トレーラー。この写真は、アルケマ・クロスビー施設に停められた、有機過酸化物品を積んだ6台の冷蔵トレーラーを示している。写真上部には空のタンカートレーラー2台も確認できる。（出典：アルケマ社提供写真）

88. ハリケーン・ハービーの一連の出来事を通して、現場対応チームの管理者は、アルケマ社の全社危機管理チームと継続的に連絡を取り合い、工場の状況を共有していた。アルケマ・クロスビーの工場長は、工場の状況を詳細に記した電子メールを毎日、本社の担当者に送り、低温倉庫の喪失など重要な事象が発生した際には携帯電話で連絡を取った。現場対応チームはアルケマ本社に現場の状況を伝え、低温倉庫の冷却システムが機能しなくなった際には、最善の対応方法について助言を求めた。
89. テキサス州南東部の広範囲では日曜日いっぱい豪雨が続いた。数時間の間、ハリケーン・ハービーは東南東にゆっくりと移動し、メキシコ湾北西部では豪雨帯の形成が続き、テキサス州の北部沿岸部やルイジアナ州南西部へと流れ込んでいた。ヒューストン広域圏では、すでに20～27インチ（約51～69cm）の降水量が記録されており、さらに今後数日間で15～25インチ（38～64cm）の降水量が予測されていた。一部の地域では累積降水量が50インチ（約130cm）に達する可能性があるとして、地域史上最大級の降水量になると予測されていた。図22に示すように、この日、アルケマ・クロスビー施設周辺では、ハリケーン・ハービーによる一日降水量の最大値（約23インチ（約58cm））が記録された [29]。

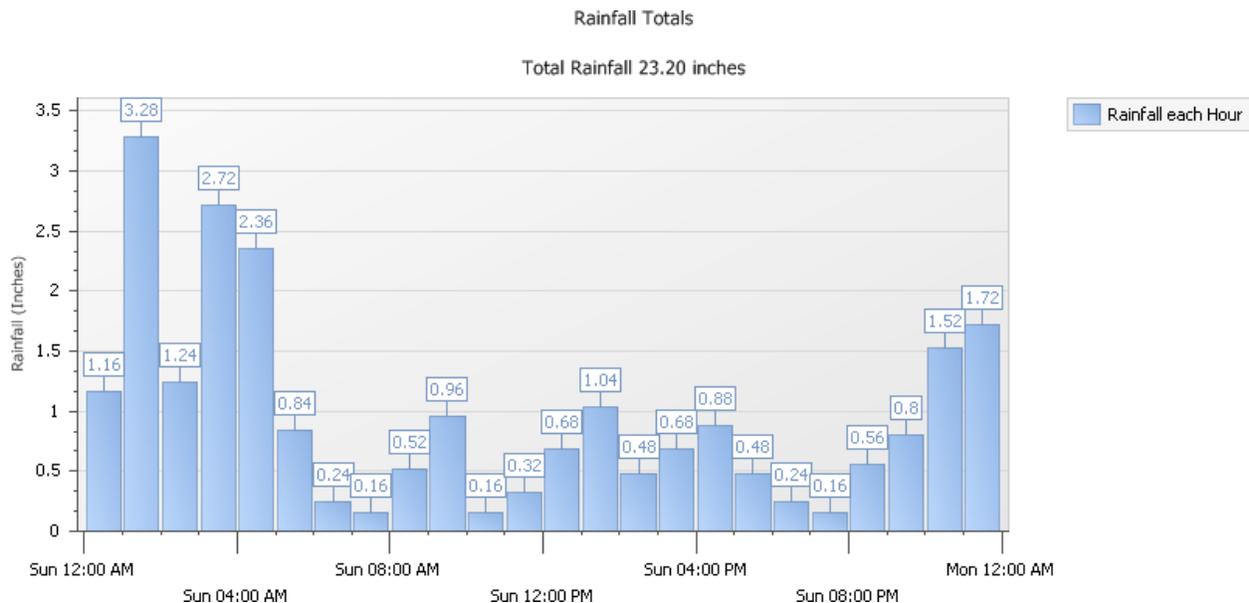


図22：ハリケーン・ハービーによる、2017年8月27日（日）の1時間ごとの降水量。シーダーバイユー観測ステーション1740が8月27日に測定した、ハリケーン・ハービーによる降雨の1時間ごとの降水量グラフ [29]。

3.5. 2017年8月28日（月）

90. ハリケーン・ハービーによる雨はこの地域で降り続き、施設の浸水は終日上昇し続けた。アルケマ・クロスビー施設では、降雨が長時間途切れることもあったが、周辺地域ではすでに大量の水が溜まっていたため、工場内の水位は上昇し続けた（図23）。

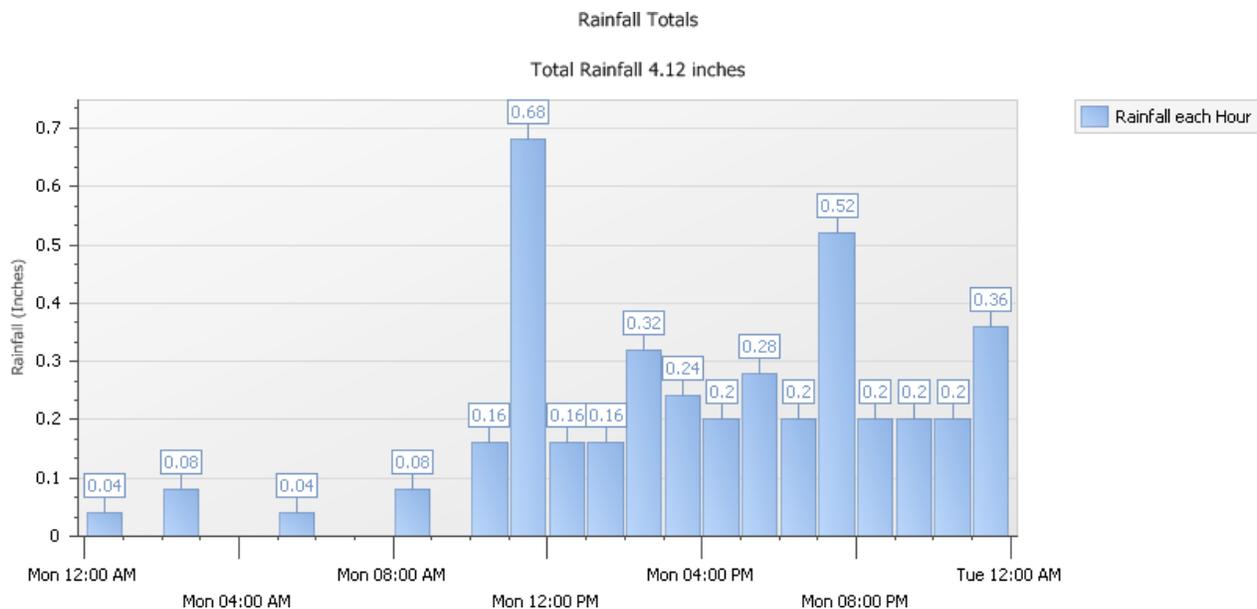


図23：ハリケーン・ハービーによる、2017年8月28日（月）の1時間ごとの降水量。シーダーバイユー観測ステーション1740が8月28日に測定した、ハリケーン・ハービーによる降雨の1時間ごとの降水量グラフ [29]。

91. 午前2時頃、CenterPoint社^aの主変圧器（図24）が増水により故障した。残っていた2台の発電

^a CenterPointは、アルケマ・クロスビー施設に電力を供給していた電力会社である。

機（図16、発電機2および3）がこの時点で作動し、唯一稼働していた有機過酸化物の低温貯蔵棟である低温倉庫7に電力を供給した（図25）。その後、発電機の1台が浸水により故障したが、もう1台の発電機は稼働を続け、低温倉庫7に電力を供給していた。施設には一次電源がなく、非常用発電機も長くはもたないだろうと判断した現場対応チームは、午前3時頃、低温倉庫7内の有機過酸化物製品を建物の外に停めてあった2台の冷蔵トレーラーへ移動させる作業を開始した。その残りの低温倉庫には10万ポンド（約45トン）を超える有機過酸化物製品が保管されており、現場対応チームは低温状態を維持できる可能性のある冷蔵トレーラーに製品を移す必要性を認識していた。



図24：アルケマ・クロスビー施設のCenterPoint社製変圧器。これらは、アルケマ・クロスビー施設にあるCenterPoint社の主変圧器である。（出典：CSBの写真）



図25：非常用発電機。これは、アルケマ・クロスビー施設の停電時に自動的に作動する非常用発電機の一つである。（出典：CSBの写真）

92. 午前4時頃、電源喪失により廃水処理ポンプが作動不能となった。その結果、施設はプロセス機器と廃水タンクを囲む防液堤の排水ができなくなり、廃水処理用の防液堤には、廃水が溜まり始めた。この状況は、低温有機過酸化物製品の冷却が失われることに対して直接の影響はなかったが、現場対応チームの作業負担を増大させ、その業務をより複雑にした。
93. 月曜の朝5時頃、洪水がさらに増水し続ける中、現場対応チームは、電気設備への影響を防ぐため、先手を打って最後の非常用発電機（図25）を停止した。これにより、いずれの低温倉庫にも電力が供給されていない状態となった。
94. 月曜日の朝、現場対応チームが液体窒素冷却システムを点検したところ、前日に工場監督者が追加した1フィート（約30cm）の配管延長部が完全に洪水に浸かっており、システムが使用不能となっていた。クロスビー施設で40年近くの経験を持つ工場監督者は、この延長によって接続部が予想される洪水標高より十分に高くなると考えていた。しかし、水位はそれを上回る高さまで上昇し、配管延長部は最終的に完全に水没した。
95. 午前中、冷蔵トレーラーや有機過酸化物製品のパレットを移動させるために作業員が使用していた機器（フォークリフトやセミトレーラートラック）の電気系統が浸水の影響で次々と故障し始めた。この時点から、現場対応チームは有機過酸化物のパレットを持ち上げることも、冷蔵トレーラーをレイダウンエリアへ移動させることもできなくなった。その結果、3台の冷蔵トレーラーが保管倉庫のそばに取り残された（図26）。さらに、低温倉庫周辺の水位は胸の高さまで達し、現場対応チームの移動や作業は一層困難になった。また、まだ有機過酸化物製品を積み込んでおらず、レイダウンエリアへ移動させる予定だった空の冷蔵トレーラーも、燃料タンクに水が入り込み、使用不能になった。その結果、今回の事故中に有機過酸化物製品を保管できた冷蔵トレーラーは、11台中9台のみだった。

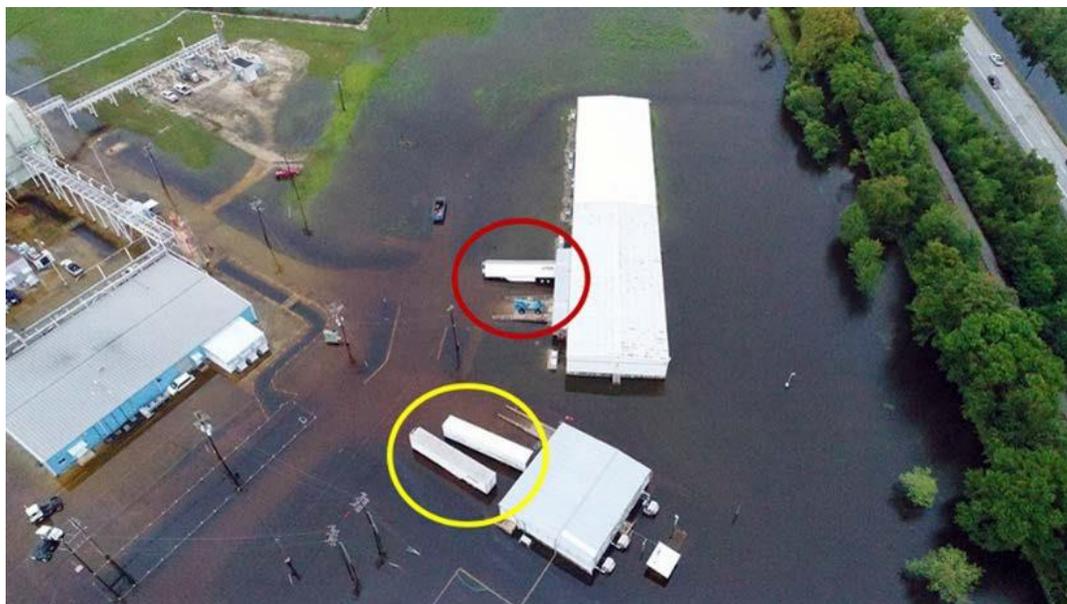


図26：高台へ移動できなかった3台の冷蔵トレーラー [33]。この航空写真は、アルケマ社の現場対応チームが避難した後、2棟の有機過酸化物製品保管倉庫の近くに取り残された3台の冷蔵トレーラー（黄色と赤の円）を示している。（出典：CSBによる編集写真）

96. 月曜日の朝、アルケマの全社危機管理チームは、低温保管が必要な有機過酸化物製品を安全に管理するためのシナリオを検討した。チームの最優先事項は、有機過酸化物製品の発火を防ぐことであり、そのためには、冷蔵トレーラーに冷蔵システムの稼働に十分な燃料があることの確認、冷却の維持、冷蔵トレーラーを低温保管が可能な別のアルケマ施設または他の

有機過酸化物メーカーの施設へ移動する選択への調整も必要となる。しかし、全社危機管理チームは、敷地外での保管の可能性を検討したものの、輸送用の車両や運転手がクロスビー施設に到達できないと判断した。

97. しかし、もしアルケマが有機過酸化物製品を敷地外に移動させたいと考えていたのであれば、そのような決定はかなり早い段階、可能であればハリケーン・ハービーが上陸する前の段階で行うべきであった。運輸省の規制では、危険物を輸送する運転手に対し、危険物輸送資格付きの商業運転免許の取得を義務付けている [34]。有機過酸化物は危険物に分類されるため、アルケマはこの資格を持つ運転手を確保する必要があった。しかし、特にハリケーンのような緊急事態では、この要件を満たす追加の運転手を確保し、さらに輸送手段を手配するには、数日から数週間を要したであろう。
98. 図16に示されている低温倉庫7には、約50パレット分の有機過酸化物製品が残っていた。低温倉庫の電源が完全に失われ、冷却機能も停止したため、作業員はこれらのパレットを移動させる必要があった。現場対応チームのメンバーは、低温倉庫7内のパレットを分解し、個々の有機過酸化物容器を手作業で近くの建物に停めた冷蔵トレーラーへ移した。最終的に現場対応チームは、合計約2,160個の有機過酸化物容器を低温倉庫7から最後の冷蔵トレーラーまで手作業で移動した。この作業は深夜まで続き、現場対応チームは懐中電灯を頼りに暗闇の倉庫内で作業を完了させた。
99. 月曜日の終わりまでに、作業員は、低温保管が必要な11種類の有機過酸化物製品（約10,500個の個別容器に収納され、総重量350,000ポンド（約160トン）以上）を9台の冷蔵トレーラーに移した。図27と図28は、9つの冷蔵トレーラーの最終的な位置を示している。施設の南端近くにあった3台の冷蔵トレーラーは、4,000個以上の有機過酸化物容器を収納していたが、依然として浸水したままであり、現場対応チームはこれらのトレーラーは稼働し続けることができず、収容している有機過酸化物製品を冷蔵し続けることができないのではないかと懸念していた。



図27：有機過酸化物品を積載した9台の冷蔵トレーラーの配置。（出典：Google Earthの画像をCSBが加工）



図28：有機過酸化物品を積載した9台の冷蔵トレーラーの写真。（出典：アルケマ提供の写真をCSBが加工）

100. 図29に示されているように、洪水は最終的に一部の低温倉庫の床面を超える高さまで上昇した。しかし、その時点までに現場対応チームは、これらの低温倉庫からすべての有機過酸化物品を搬出し終えていた。もし、有機過酸化物品が倉庫内に残されていた場合、バックアップ安全システムの有無にかかわらず、温かい水によって急速に加熱され、発火したであろう。



図29：アルケマ・クロスビー施設の低温倉庫。赤い線は、洪水の最高水位を示しており、地上から約5フィート（約1.5メートル）の高さに達していた。（出典：CSBの写真）

101. 月曜日の夜まで、施設内を移動する最も実用的かつ安全な方法はボートであった（図30）。現場には2隻のボートがあった。1隻は小型のボートで、アルケマの工場におけるハリケーン対策計画の一環として事前に用意されていたもの。もう1隻は、洪水標高の上昇に伴い、現場

対応チームのメンバーの親族が持ち込んだ全長16フィート（約4.9メートル）の大型ボートである。



図30：現場対応チームがアルケマ・クロスビー施設内を移動するために使用したボート。写真に写っているのは、洪水の中で施設内を移動するために使用された16フィートのボートに乗った現場対応チームの2人のメンバーである。（出典：アルケマの写真）

102. 現場対応チームが状況の深刻さをアルケマの全社危機管理チームに報告した後、全社危機管理チームはハリス郡の緊急対応要員に対し、クロスビー施設での化学物質の流出や火災の可能性のあることを警告した。また、アルケマの全社危機管理チームは、レイダウンエリア以外に配置された冷蔵トレーラーが停電した場合、トレーラー内の有機過酸化物質製品が発火する可能性があることを想定し、対応準備を開始した。全社危機管理チームが実施した分析の結果、冷蔵トレーラーが機能を失った場合、内部の製品は数日以内に自己加速分解温度（SADT）に達し、発火する可能性が高いことが判明した。

3.6. 2017年8月29日（火）

103. 深夜頃、心配した家族が地元当局に通報したため、ハリス郡の緊急対応要員が現場対応チームのメンバー1名を避難させた。残りの現場対応チームメンバーは、避難する前に、現場を確認し、明るくなってから冷蔵トレーラーの状態を再評価するために残った。
104. 火曜日の朝、現場対応チームは、夜間の間に1台の冷蔵トレーラーが部分的に傾き、建物にもたれかかっているのを発見した（図31）。この傾きは、洪水による水流がトレーラーのサポートを倒すほど強かったか、トレーラーが有機過酸化物質製品を過積載していたか、あるいはその両方の状況が重なったために起こったと思われる。全社危機管理チームのメンバーは、現場対応チームから図31の写真を受け取り、クロスビーの施設では有機過酸化物質製品の分解が原因で少なくとも1件の火災が発生する可能性が高いと推察した。少なくとも冷蔵トレーラーのいくつか（レイダウンエリアに移動できなかったもの）は電力を維持できず、最終的には冷却ができなくなるだろう。アルケマ社の全社危機管理チームは、ハリス郡の緊急対応要員に現場対応チームの避難を要請することを決定した。



図31：2017年8月29日（火）朝のクロスビー施設の状況。この写真は、現場対応チームが全社危機管理チームに送信したもので、左側のトレーラーが傾いている様子を示している。（出典：アルケマの写真をCSBが編集したもの）

105. 火曜日の午前中、現場対応チームは、施設の状況を確認して、アルケマの全社危機管理チームおよび緊急対応要員へ最新情報を提供するため、最後にもう一度ボートで施設内を巡回した。正午頃、ハリス郡の緊急対応要員がボートで現場対応チームを避難させ、近くの消防署に移送した。
106. 図31に示されている3台の冷蔵トレーラーは、現場対応チームが高台にあるレイダウンエリアへ移動できなかったトレーラーである。図31に示された3台の冷蔵トレーラーの冷却システムは、高水位が原因で故障した可能性が高い。一方で、レイダウンエリアにあった6台の冷蔵トレーラーは、依然として稼働し、有機過酸化化物製品の冷却を維持していた（図32）。



図32：高台に置かれた有機過酸化化物用の冷蔵トレーラー。この写真は、2017年8月29日（火）、ハリケーン・ハービーによる高水位の洪水の中、有機過酸化化物製品を収容し、アルケマ・クロスビー施設北側の高台に設置されていた冷蔵トレーラーである。この場所にあった6台のトレーラーは2017年9月3日の管理燃焼の際にすべて焼却された。（出典：アルケマの写真）

107. 日中、クロスビー施設では、洪水標高が廃水タンクを囲む二次防壁の上端を超え、有機液体

が洪水水に流出した。二次防壁内に設置されていた2基の廃水タンクは大気に開放されており、過度の降雨によって内部の液体が溢れ出た。アルケマは、約23,000ポンド（約10,400kg）の有機化合物が洪水水に流出したと報告した（表2）。

表2：洪水水中に放出された化学物質。アルケマの廃水タンクが溢れた際、以下の化学物質（およびその数量）が、ハリケーン・ハービーによる洪水水へ流出した。

化学物質	数量 (ポンド)
tert-アミルアルコール	2,026
tert-ブチルアルコール	2,026
ジ-tert-ブチル過酸化物	507
ジ-tert-アミル過酸化物	507
2,5-ジメチル-2,5-ジ- (tert-ブチル過酸化物) ヘキサン	507
エチルベンゼン	405
ナフタレン	405
ナフサ（重質および軽質）	6,089
キシレン	405
1,2,4-トリメチルベンゼン	2,229
ミネラルスピリット	8,106

108. 午後、アルケマは9台の冷蔵トレーラーのうち6台から遠隔測定データの受信を開始した。このデータは、6台の冷蔵トレーラーの製造メーカーから提供されたものであった。他の3台のトレーラーは別のメーカーから供給されたもので、遠隔測定データ機能はなかった。遠隔測定データには、冷蔵トレーラー内の空気温度や、冷却システムが作動しているかどうかの情報が記録されていた。アルケマは、このデータを緊急対応要員に提供し、冷蔵トレーラーがいつ燃え始めるかを推定するために使用した。積載されていた有機過酸化物製品の種類に基づく冷蔵トレーラーのSADTの推定値は、19°F（約-7°C）から70°F（約21°C）の範囲であった。ただし、注意すべき点として、遠隔測定データで得られた温度は、各冷蔵トレーラー内部の「空気の温度」であり、有機過酸化物製品そのものの温度を直接測定したものではなかった。また、暴風雨の中、積み込み作業が慌ただしかったため、現場対応チームのメンバーは各冷蔵トレーラーにどの種類の有機過酸化物製品が積載されているのかを正確に特定することができなかった。そのため、遠隔測定データは、トレーラーの冷却がいつ停止し、内部の温度がどの程度上昇しているかを把握する参考にはなかったが、このデータから冷蔵トレーラーやその内容物がいつ発火するかを正確に判断することはできなかった。
109. 現場対応チームがクロスビー施設から避難した際、工場長は緊急対応要員に対し、施設の概要と冷蔵トレーラーの状態について、当時の状況を理解している範囲で説明した。また、工場長は、多くの冷蔵トレーラーが電力を失い、冷却機能を維持できない状態であることを緊急対応要員に伝えた。また、アルケマは、事故発生中を通じて緊急司令センターにスタッフを常駐させ、緊急対応要員に最新情報を伝えた。
110. アルケマ・クロスビー事故を担当した緊急対応要員は、同施設周囲1.5マイル（約2.4km）を避難区域に設定した（図33）。FEMA、米国環境保護庁（EPA：Environmental Protection Agency）、およびハリス郡消防局を含む緊急対応機関は、冷蔵トレーラーの燃焼を前提とし

た分析とシミュレーションを実施した。この分析では、二酸化硫黄貯蔵タンクからの流出、イソブチレン貯蔵タンクからの流出、燃烧した冷蔵トレーラーからの降灰が評価された。分析結果によると、冷蔵トレーラーの燃烧による煤煙や粒子状物質の影響を考慮した場合、1マイル（約1.6km）の避難区域で十分であると判断された。しかし、保守的に考えて、地域住民の安全を高め、資源を効率的に配分することを考慮し、緊急対応機関は避難区域を1.5マイル（約2.4km）に拡大する決定を下した。この決定プロセスにおいて、アルケマ本社の全社危機管理チームと協議が行われた結果、同危機管理チームも、有機過酸化物の燃烧が避けられないという想定のもと、1.5マイルの避難区域が妥当であると同意した。その結果、緊急対応要員が避難区域内の住民の避難を開始し、約205人の住民が自宅から避難した。

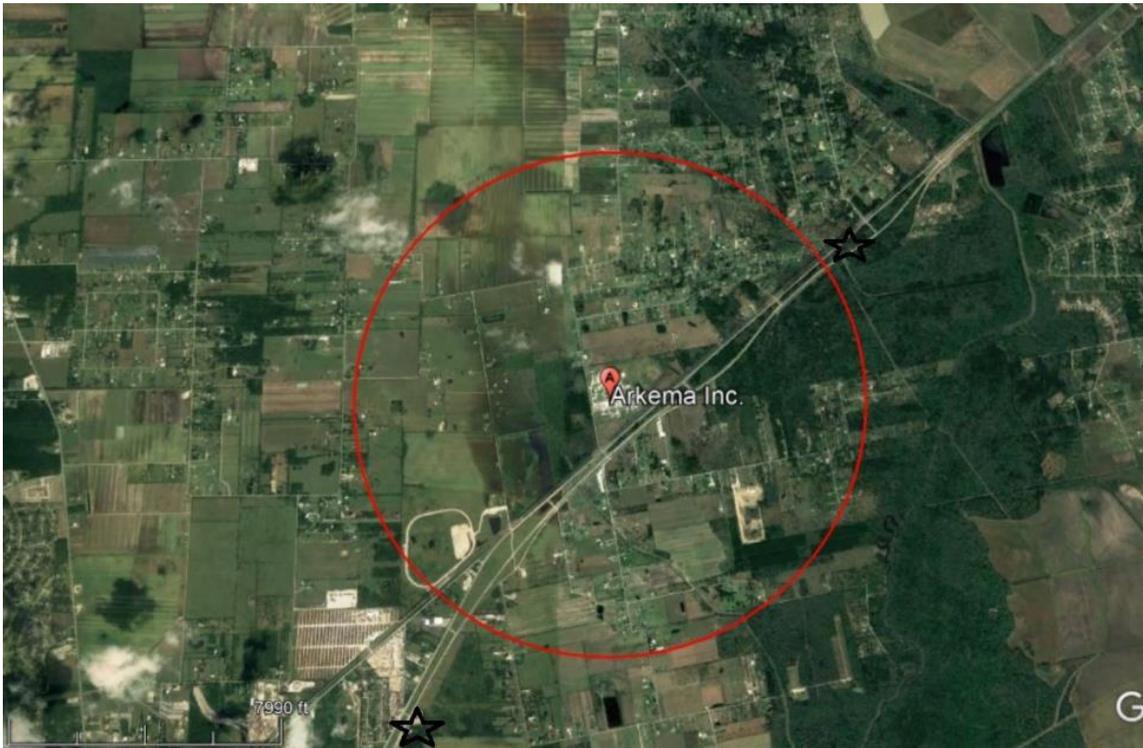


図33：避難区域の拡大。アルケマ・クロスビー施設周辺の1.5マイルの拡大避難区域が赤丸内に表示されている。（出典：Google Earthの画像をCSBが加工）

111. 午後4時50分、アルケマは施設から避難したことを一般に知らせる公式声明を発表し、現在の状況について警告を行った。同声明は、事故について以下のように述べた。

現在、クロスビー地域ではこれまでにない水位の上昇により、有機過酸化物製品保管用の予備コンテナの冷却機能が損なわれている。アルケマとしては、嵐が収まるまでは、施設の現状に対してできる対応が限られている。当社は、各冷蔵コンテナの温度を遠隔監視している。現時点では、直ちに危険が差し迫っているとは考えていないが、施設内で化学反応が発生し、火災や爆発につながる可能性がある [35]。

3.7. 2017年8月30日（水）

112. 緊急対応要員は住民の避難と避難区域の維持を継続した。避難区域につながる道路を監視するために、多くの連邦機関や地方機関が人員を提供した。緊急対応要員には、アルケマ・クロスビー施設で「爆発の可能性が差し迫っている」との警告が伝えられていた。避難した地域住民の中にも、工場での事故が差し迫っていると考え、避難を急いだ者がいた [36]。
113. クロスビー施設での対応のため、国家インシデント管理システム（NIMS：National Incident

Management System) の手順に従い、統合司令部が設置された。統合司令部は、ハリス郡消防署長事務所、クロスビー・ボランティア消防団、ハリス郡保安官事務所および警察官、ハリス郡公害管理局、アルケマ社、EPA、テキサス州環境品質委員会 (TCEQ : Texas Commission on Environmental Quality) で構成され、事故の後半にはヒューストン市爆発物処理班も加わった。クロスビー・ボランティア消防団が事故指揮を担当し、指揮所はクロスビー消防署に設置された。

114. 図34は、避難区域周辺に配置された緊急対応要員の位置を示している。避難区域への立ち入りを防ぐため、戦略的な地点に道路封鎖が設置された。避難区域の周辺には、燃焼生成物を検査するための大気モニタリングステーションが設置された。

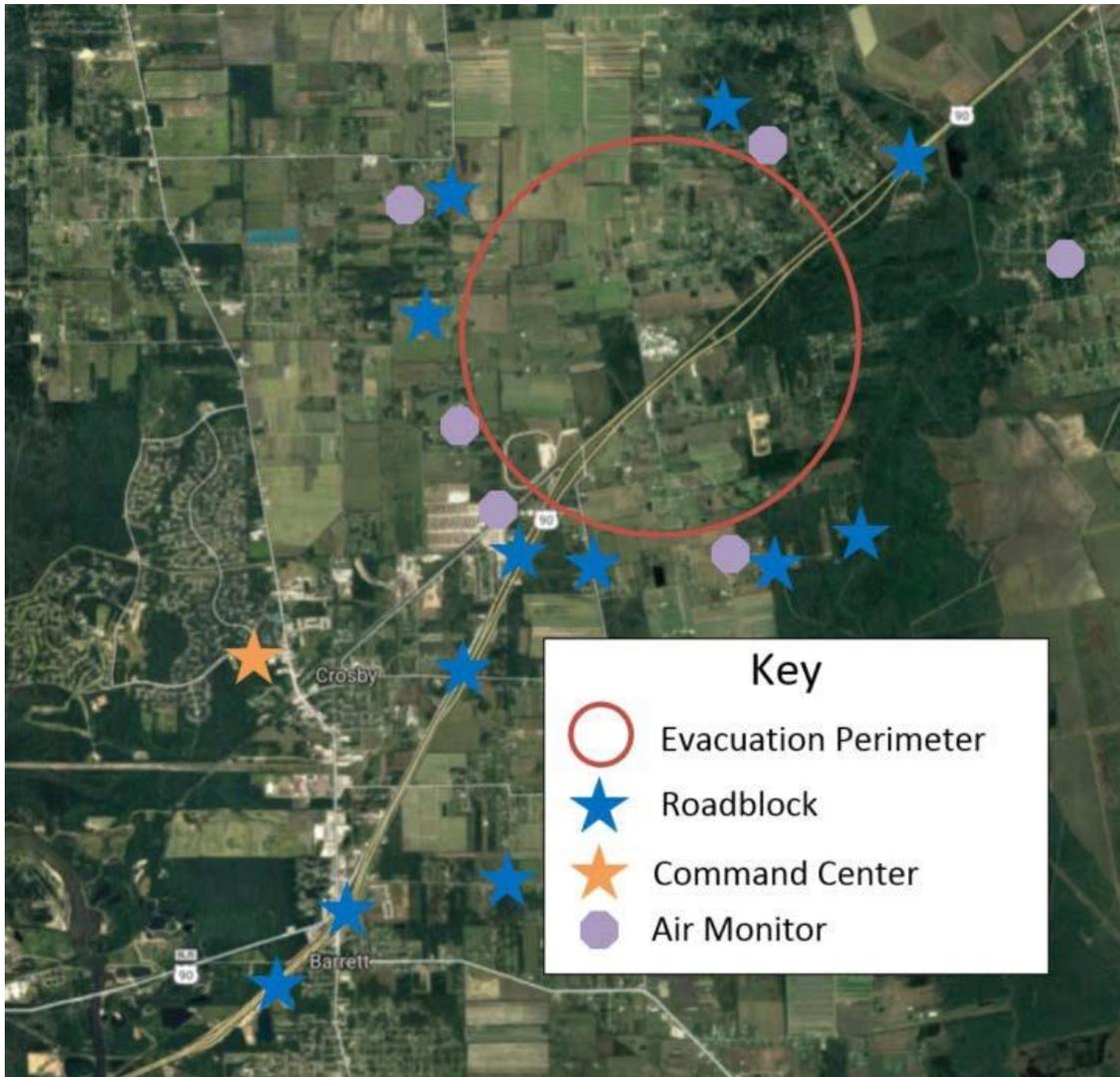


図34：避難区域と主要な待機場所。避難区域（赤丸）は、緊急対応要員の待機場所（道路封鎖、司令センター、大気モニタリングステーションなど）に囲まれている。（出典：Google Earthの画像をCSBが加工）

115. 統合司令部は、アルケマ・クロスビー施設での事故発生が避けられない状況であることを認識し、緊急対応要員はその対応計画を進めていた。しかし同時に、ハリケーン・ハービーに対する大規模な緊急対応作業も進行中であった。ハリケーンがヒューストン地域からボーモント地域へ移動するにつれ、緊急対応要員も移動を余儀なくされた。嵐による降雨で州間高速道路10号線が冠水し通行不能となったため、アルケマ・クロスビー事故の避難区域の中央を通る高速道路90号線が、資源輸送の唯一のルートとなった（図35）。この状況から人員や

機材を必要な地域へ輸送することを優先し、避難区域が設定されている間も高速道路90号線はその目的のために通行可能とされた。統合同司令部は、冷蔵トレーラーの燃焼が確認された時点で、緊急対応要員を配置して道路を封鎖した。周辺道路が冠水していたため、高速道路90号線が閉鎖されると、避難区域を迂回するには数時間を要する状況であった。

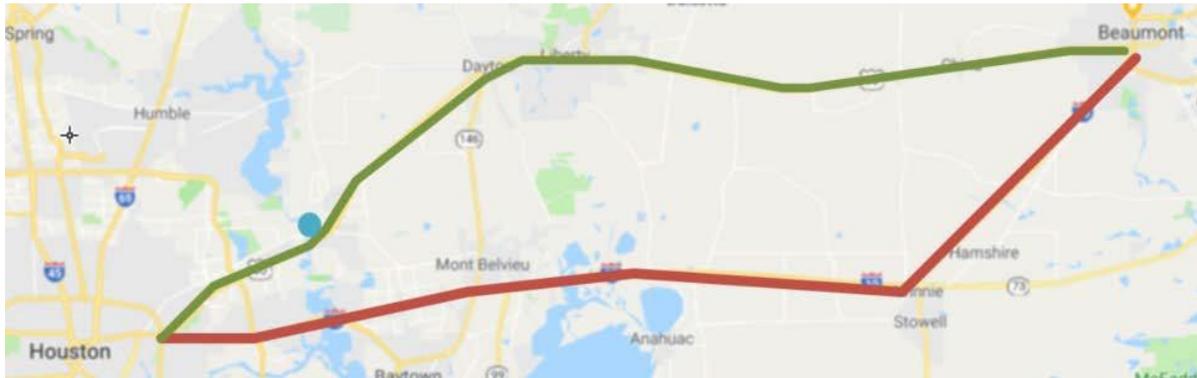


図35：ヒューストンとボーモント間の主要ルート。このGoogleマップに示されているように、州間高速道路10号線（赤線で示す）が冠水したため、高速道路90号線（緑線で示す）がヒューストンとボーモントの間でハリケーン救援物資を運ぶための重要な輸送路となった。アルケマ・クロスビー施設の位置は青い丸で示されている。（出典：Googleマップの画像をCSBが編集）

116. アルケマ社は引き続き統合同司令部に遠隔測定データを提供し、冷蔵トレーラー内の温度を追跡した。また、アルケマと緊急対応要員は、施設の状況や次の対応について話し合うため、日中に定期的な会議を開いた。アルケマは、冷蔵トレーラーの現場配置図と、それぞれのトレーラーに積載されている有機過酸化物品の概算リスト、および各トレーラー内の製品の推定SADTを統合同司令部に提供した。統合同司令部のメンバーは、冷蔵トレーラー内部の温度データを基に、どのトレーラーがいつ燃焼するかを予測できると考えていた。しかし、3台の冷蔵トレーラーは遠隔測定データの送信機能がなく、アルケマも緊急対応要員も、これらのトレーラー内部の温度を把握することができなかった。さらに、アルケマは各トレーラーに積載されている製品を完全には把握していなかったため、SADTの数値はあくまで推定値であった。
117. 深夜直前、避難区域の周辺を監視するよう任命された警察官のうち2人が、上司から高水位警報への対応を求められた。2名の警察官は、アルケマ・クロスビー施設の北東に配置されていたが、対応のため持ち場を離れて高速道路90号線を西に走行中、アルケマ工場の近くに差し掛かった際に「大きなガス雲」の中に突入し（図36）、このガス雲は警察車両を包み込み、車内にも流入した（図37）。警察官は直ちに車両を反転させ、元の場所であるアルケマ・クロスビー施設の北東へと撤退した。ガス雲には化学物質特有の臭気があり、警察官たちは曝露による健康被害（目、皮膚、喉、呼吸器の刺激）を受けた^a。そのため、このガス雲を化学物質の流出と判断し、高速道路90号線の封鎖を開始した。その後、警察官たちはこの化学物質の流出を統合同司令部に報告した。

^a 2名の警察官のうち1名は呼吸用保護具を所持していたが、曝露があまりにも急に発生したため、使用する時間がなかった。この警察官は、特殊対応グループに所属しており、その装備として呼吸用保護具を携行していた。特殊対応グループは、抗議行動などに対応するための訓練を受けた少数精鋭の警察官部隊であり、あらゆる状況に対処できる装備と準備を整え、平和的な解決を促進する役割を担っている [237]。



図36：警察車両のドライブレコーダー映像に映る白煙。左のドライブレコーダー映像には、2017年8月30日午後11時52分頃、アルケマ・クロスビー施設付近に発生した白煙の雲^aが写っている。右の画像は、白煙がない状態のドライブレコーダー映像であり、比較のための基準となる。（出典: テキサス州ハリス郡）

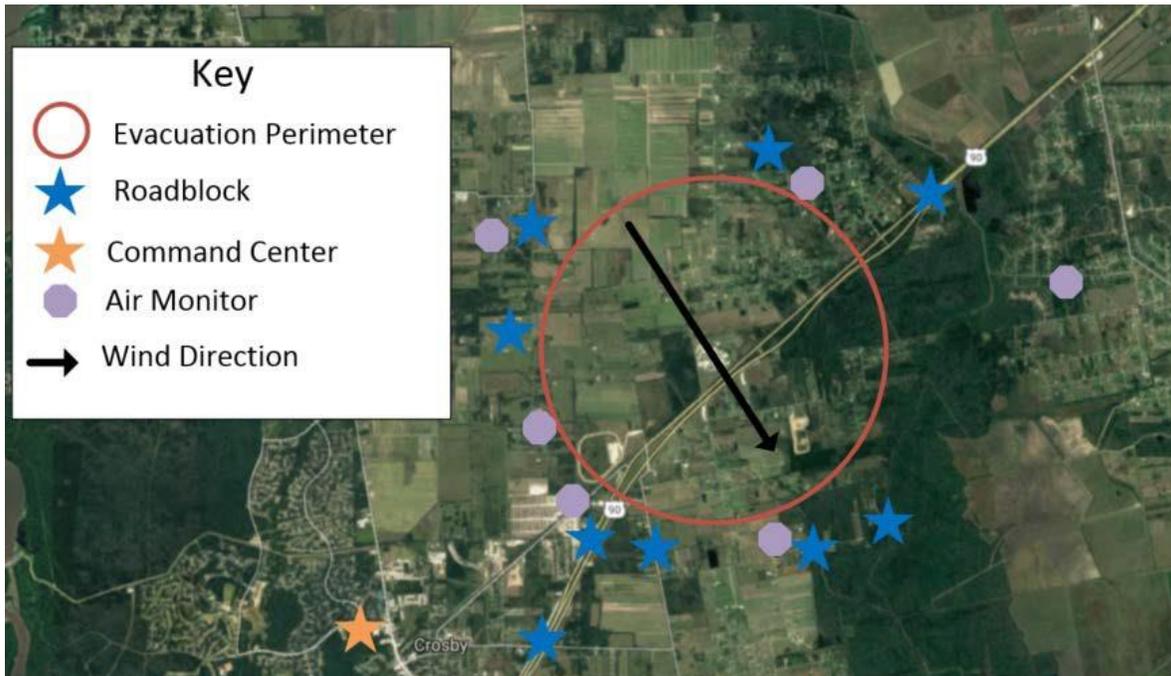


図37：2017年8月30日の推定風向。白煙の雲に最初にさらされた警察官は、高速道路90号線の北東の道路封鎖地点から高速道路90号線を西に走行していた。（出典：Google Earthの画像をCSBが加工）

3.8. 2017年8月31日（木）

118. 真夜中頃、アルケマの工場で煙が上がっているとの通報を受け、統合司令部は活動拠点となっている消防署で緊急対応要員とともに安全ブリーフィングを実施した。各部隊は工場の状況について説明を受け、潜在的な化学物質の放出に対して風上に位置するよう指示された。
119. 利用可能な遠隔測定データには、冷蔵トレーラー内の温度の急上昇は示されていなかったため、統合司令部はクロスビー・ボランティア消防団の隊員2名を派遣し、クロスビー施設内で火災が発生しているかどうかを確認させた。消防団員は施設での有機過酸化物の分解を示す現象は確認できず、その旨を指揮所に報告した。午前0時30分、アルケマの施設で火災や煙は確認されなかったため、当局は当初報告された白煙は「低く漂う気象雲」とであると判断し、高速道路90号線の通行を再開した。遠隔測定データや大気モニタリングデータにも燃焼の兆

^a 白煙の中心は、警察車両のドライブレコーダーの記録では、北緯29.947683度、西経95.018305度付近で高速道路90号線を横切った。

候は示されておらず、前述の通り、高速道路90号線は支援が必要なボーモント地域へ緊急対応要員を輸送するための重要な交通ルートであった。司令センターは遠隔測定データを頼りに、冷蔵トレーラー内の有機過酸化物が分解し始めた場合には警告として活用できると考えていた。しかし、この時点で統合司令部は、白煙を発生させた可能性が高い冷蔵トレーラーには遠隔測定データの送信機能がないことを把握していなかった。

120. 最初に雲の中を運転したと報告した警察官は、それが化学物質の流出であると考えており、他の警察官に対し、自分たちの車両のドライブレコーダーに雲が記録されており、それは報告した流出を示すものであることを伝えた。その後、他の3人の警察官が、最初の警察官とドライブレコーダーの映像を確認するため、高速道路90号線を車で走行した。この3人の警察官も、アルケマ施設の近くを通り過ぎるとき、アルケマ施設から発生した雲の中を走行することとなった。彼らはエアコンを切ったにもかかわらず、白煙が車両内部に侵入した。
121. 3人の警察官は避難区域の北東端に到着すると、最初の警察車両のドライブレコーダー映像を確認した。そこには、白煙が映っていた。直近で白い雲の中を走行した3人の警察官は、目のかゆみと喉の痛みを訴えた。彼らは直ちに、自分たちもアルケマ施設から流出した化学物質に曝露したと考えた。さらに、彼らの位置から高速道路90号線の上空にアルケマ施設から発生した黒煙が見えた（図38）。黒煙と体調の異変に、付近の道路の浸水状況と警察官たちの迅速な医療処置を求める気持ちが重なり、警察官たちは指揮所と浸水していない病院へ向かって高速道路90号線を西へ走行した。合計5人の警察官が4台の警察車両で高速道路90号線を走行した。避難区域の南端に到達した警察官たちは、電話で医療支援を要請した。



図38：警察車両のドライブレコーダー映像に映る黒煙。黄色の円で囲まれた部分は、2017年8月31日午前1時30分頃、アルケマ・クロスビー施設から発生した黒煙を示している。この画像が記録されたとき、警察車両はアルケマ・クロスビー施設の北東約2.5マイル地点、シェイディレーン近く的高速道路90号線上に駐車していた。（出典：テキサス州ハリス郡、CSBによる編集画像）

122. 警察車両が高速道路90号線を西に走ると、警察官たちは再びアルケマ施設から発生した雲に曝露した。5人の警察官の健康状態は悪化し始め、避難区域の南端に到着する頃には、吐き気と激しい頭痛に襲われた。他の緊急対応要員が、曝露を訴える警察官に除染処置を施し、露出した皮膚を水で洗い流した。
123. 前線指揮所に到着した警察官たちは、そこにいた緊急対応要員に自らの曝露経験を報告した。その結果、当局は高速道路90号線の通行を封鎖した。それ以降、高速道路90号線は、9月4日に警報解除が出るまで通行止めとなった。
124. 救急医療技術者（EMT：emergency medical technician）が警察官の支援のために出動した。EMTが現場に向かう途中、彼らの車両も雲の中を通過した。EMTが現場に到着した時点で、すでに多くの警察官が曝露症状を訴えており、嘔吐する者もいた。到着直後、EMTのうち3人も曝露症状を訴えた。最終的に、21人の緊急対応要員が、アルケマ・クロスビー施設から発

生じた煙への曝露に関する医療評価を受けるために病院へ搬送された。

125. 午前2時頃、火曜日の朝に傾いた冷蔵トレーラー内の有機過酸化物製品に分解が生じて燃え出し、冷蔵トレーラーが炎上した。図39は、燃えたトレーラーの翌朝の様子である。図には、低温倉庫7の外にあった2台の冷蔵トレーラーも写っている。これら2台の冷蔵トレーラーは、次に分解が生じ、燃え出すだろうと統合司令部が予想したものである。



図39：アルケマ・クロスビー施設で最初に燃焼した冷蔵トレーラー。この画像は、最初に燃焼した冷蔵トレーラーが建物21の外で燻っている様子を示している [37]。

126. 午後、EPAはクロスビー施設の上空を飛行し、大気モニタリングを実施した。モニタリングの結果、夜間に燃えた冷蔵トレーラーのすぐ風下で、低濃度の過酸化物が検出された。ただし、この飛行調査は高い高度で実施されたため、必ずしも地上の状況を反映したものではないことに留意されたい。
127. 午後4時55分、アルケマはクロスビー施設の状況について声明を発表した [38]。声明の一部は以下の通りである。

現在、工場には記録上最大の6フィート（約1.8メートル）の浸水が発生している。主電源と2つの非常用バックアップ電源を失った。その結果、敷地内の化学物質に対する重要な冷却機能が失われ、貯蔵されている物質が爆発し、激しい火災を引き起こす可能性がある。この高水位と電力喪失のため、我々にはこれを防ぐ手立てがない [38]。

3.9. 2017年9月1日（金）

128. アルケマは地域住民向けに記者会見を開いて最新情報を提供し、ハリス郡公害管理局は以下の声明を発表した。

曝露リスクを低減するため、住民は屋内に留まり、すべての窓とドアを閉め、エアコンを停止して外気の取り込みを遮断すること。どうしても外出が避けられない場合は、煙の流れを避けて移動し、屋外での活動（仕事、運動、遊び）を最小限にすること [39]。

129. 日中、ハリス郡のヘリコプターがアルケマ・クロスビー施設の状況調査を行った。ヘリコプターは、冷蔵トレーラーの上空を飛行し、燃焼の兆候を確認するとともに、クロスビー施設のリスク管理計画におけるワーストケースシナリオ評価の要因である、イソブチレンおよび

二酸化硫黄の原料タンク^aの調査を行った。午前10時の時点で施設の状況は落ち着いており、有機過酸化物を積載した残りの冷蔵トレーラー8台には燃焼の兆候は見られなかった。

130. 午後5時頃、さらに2台の冷蔵トレーラーが発火し、火災が発生した。この時点で、8月28日（月）の洪水のために高台に移動できなかった3台の冷蔵トレーラーはすべて焼失した。一方、残り6台の有機過酸化物を積載した冷蔵トレーラーはレイダウンエリア（高台）にあり、燃焼していなかった。図40は、燃焼中の2台の冷蔵トレーラーから発生する煙の様子を示し、図41は、焼失した2台の冷蔵トレーラーの残骸を示している。



図40：燃えている2台目と3台目の冷蔵トレーラー。2017年9月1日にアルケマ・クロスビー施設で燃焼している2台の冷蔵トレーラーから火と煙が見える [40]。



図41：有機過酸化物製品を保管する2台のトレーラーを焼失させた2度目の火災の残骸。2回目の火災で、有機過酸化物製品を保管する冷蔵トレーラー2台が焼失した後の画像。（出典：CSBの写真）

^a これらのタンクに関する追加情報は、セクション11.1および11.2を参照のこと。

3.10. 2017年9月2日（土）

131. 2017年9月2日（土）の時点で、冷蔵された有機過酸化物を積載したトレーラーは6台のみが残っていた（図42）。これらの6台の冷蔵トレーラーは、冷却装置が稼働している可能性は高かったが、分解と燃焼が発生するまでにどれくらい持つのかは不確かであった。



図42：最後に残った6台の冷蔵有機過酸化物トレーラーの位置 [41]。（出典：CSBによる編集写真）

132. 午後1時20分頃、統合司令部は、施設上空の再偵察飛行を実施した。この飛行調査により、少なくとも1台の冷蔵トレーラーが冷却能力を失っていることが判明した。また、残るトレーラーの周囲には分解した物質や煙が確認されたが、火災は発生していなかった。赤外線カメラの画像によると、冷蔵トレーラーの少なくとも1台から漏れ出している物質は高温であった。この物質を特定するためにアルケマの担当者に問い合わせたところ、正確な組成を特定することはできなかったが、漏出物は有機過酸化物の分解による副生成物である可能性が高いと推測された。
133. 避難が続く中、避難区域に入ることができない住民からは、自宅の確認や所持品の回収ができないことへの心配の声が上がりはじめた。住民たちは避難解除とクロスビー施設の状況改善を求め、当局に対して圧力をかけるようになった。これを受けて、避難の終結を促進するため、統合司令部は午後6時頃、地域対応チームと会合を開き、残る6台の冷蔵トレーラーの管理燃焼の実施可能性について議論した。関係者は管理燃焼の計画を策定し、最終承認を得るためにアルケマへ提案を行った。午後7時までに、アルケマを含む統合司令部内のすべての関係者がこの計画を承認した。
134. 管理燃焼を実施するにあたり懸念されたのは、レイダウンエリア内の最も近い冷蔵トレーラーから約40ヤード（約36.6メートル）の距離に位置するイソブチレン貯蔵タンクの安全性であった（図43）。この懸念は、6台の冷蔵トレーラーの管理燃焼によりイソブチレン貯蔵タンクが加熱され、場合によっては化学物質の放出や爆発を引き起こす可能性があることから生じていた。緊急対応要員は、タンクとの距離が十分に確保されていること、ならびにタンクの換気が適切であることから、大きな事故にはつながらないと判断した。しかし、実際の管理燃焼の計画では、5台の冷蔵トレーラーを先に燃焼させ、最後の1台がイソブチレン貯蔵タンクの熱遮蔽として機能するように燃焼させることで、安全性を確保する方針がとられた。

この最後のトレーラーは、他の5台の燃焼が完了した後に、単独で燃焼させる計画となった。



図43：アルケマ・クロスビー施設のイソブチレン貯蔵タンク。イソブチレン貯蔵タンクは、レイダウンエリア内で6台の冷蔵トレーラーの管理燃焼が実施される場所から約40ヤードの距離にあり、安全性への懸念があった。（出典：CSBの写真）

3.11. 2017年9月3日（日）

135. 統合司令部は日曜日に再び施設上空の偵察飛行を実施し、冷蔵トレーラーからさらなる物質の漏出を確認した。これは、冷蔵トレーラー内で依然として何らかの化学反応が進行中であることを示していた。この情報を踏まえ、緊急対応要員は、冷蔵トレーラーに近づいたり、内部の物質を取り扱ったりするのは危険と判断した。
136. 統合司令部は午前10時頃に再招集され、今後の対応について協議を行った。緊急対応要員は、冷蔵トレーラー内で断続的に進行している分解反応と、次に発生しうる事象に関する情報が不足していることを懸念していた。また、すべての有機過酸化化物製品の燃焼スケジュールが明確になっていないことも懸念事項となった。一方、避難住民は自宅に戻ることを切望していた。このような状況の下、管理燃焼を実施することが迅速かつ確実に事故を収束させる妥当な方法であると判断され、前夜に策定された管理燃焼計画を進めることが決定された。
137. アルケマは、タンクの位置によるハザードと放出のリスクの評価に役立てるため、二酸化硫黄およびイソブチレンの貯蔵タンクに関する情報を統合司令部に提供した。この情報をもとに、統合司令部は、管理燃焼中に二酸化硫黄タンクやイソブチレンタンクから物質が放出される可能性は低いと判断した。
138. 午後12時45分、管理燃焼計画について、突入班に対するブリーフィングが実施された。管理燃焼の実施前に、まず分解した有機過酸化化物がイソブチレンタンク付近に漏れていないことを確認するため、一つの突入班がタンク周辺の目視偵察を行う。このような漏出がある場合、トレーラー燃焼時に着火し、イソブチレンタンクへの接炎の危険性があるためである。タンク付近で漏出物が確認された場合、計画を見直し、管理燃焼を実施する前にタンクの排出方法を検討することとし、タンク付近に漏出物が確認されなかった場合は、計画通りに管理燃焼を開始することとされた。

139. 目視偵察チームは、管理燃焼の実施は安全であると判断した。管理燃焼のため、ハリス郡の緊急対応要員は、レイダウンエリアにある6台の冷蔵トレーラーそれぞれに、遠隔操作可能な発火装置を設置した。また、突入班メンバー全員は、冷蔵トレーラーから漏出する未知の分解生成物による健康リスクに備え、自給式呼吸器を装着した。
140. 午後3時40分頃、緊急対応要員は有機過酸化物を積載した残る6台の冷蔵トレーラーの管理燃焼を開始した。ハリス郡消防署長事務所は、間もなく実施される管理燃焼に関して市民に警告する公式声明を発表した [42]。
141. 午後9時頃、避難区域内で追加の大気モニタリングが実施されたが、いずれの測定値も基準値を超えるものはなかった。この結果を受け、緊急対応チームは、地域社会に対する健康リスクがもはや存在しないと判断し、アルケマ・クロスビー施設の人員体制が整い次第、避難区域の解除が可能とされた。

3.12. 2017年9月4日（月）

142. 午前1時頃、統合司令部は避難区域の解除を承認し、住民の帰宅を許可した。

4. 洪水に関する情報

143. アルケマ・クロスビー施設は、テキサス州ハリス郡に位置している。ハリス郡洪水管理地区^aによると、洪水はこの地域における自然災害の主要な懸念事項である。その要因として、平坦な地形、水を吸収しにくい粘土質の土壌、年間平均降水量48インチ（約122cm）などが挙げられる [43]。
144. 米国海洋大気庁（NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration）は、「高潮は常に潜在的な脅威ではあるものの、過去30年間でより多くの人々が命を落としたのは内陸部での洪水によってである」として、ハリケーンによる内陸部での洪水を「しばしば最も致命的な」影響をもたらすと指摘している [44]。また、NOAAは、総降雨量が特に多くなるケースとして、勢力の弱い嵐が移動速度を落とす、または特定の地域で停滞する状況を挙げている [44]。熱帯暴風雨は激しい降雨を伴うことがあるため、ハリケーンは沿岸から数百マイル離れた内陸部にも重大な影響を及ぼす可能性がある [44]。そのため、NOAAは、沿岸部の洪水リスクがある地域の住民や事業者に対し、「ハリケーン」と聞いたら内陸部の「洪水」を思い浮かべるよう提言している [44]。
145. ハリケーン・ハービーは、1961年以降でテキサス州を襲った最も強力なハリケーンであり、米国に上陸したカテゴリー4のハリケーンとしては2004年以降で初めてのものであった [45]。ハリス郡洪水管理地区の報告によると、ハリケーン・ハービーによる4日間にわたる降雨の影響で、約1兆ガロン（約3.8兆リットル）の雨水がハリス郡に降り注いだ [46]。この雨量は、ハリス郡全域（1,800平方マイル≒4,662平方キロメートル）を33インチ（約84cm）の水で覆うことができる規模であった [46]。この暴風雨によって、13万6千以上の建造物が浸水被害を受けた [46]。
146. ハリス郡洪水管理地区は洪水警報システムを運用しており、センサーが備え付けられた154カ所の観測ステーションを設置し、降雨量と水位のデータを送信している [47]（図44）。この観測システムは、1983年に13基の測定器で始まり、その後拡張されて現在の154基に至っている [47]。

^a テキサス州議会は、1929年および1935年の壊滅的な洪水を受け、1937年に[ハリス郡洪水管理地区](#)を設立した [127]。同洪水管理地区の使命は、「地域社会および自然環境の価値を適切に考慮しながら、洪水被害を軽減するプロジェクトを提供すること [127]」である。

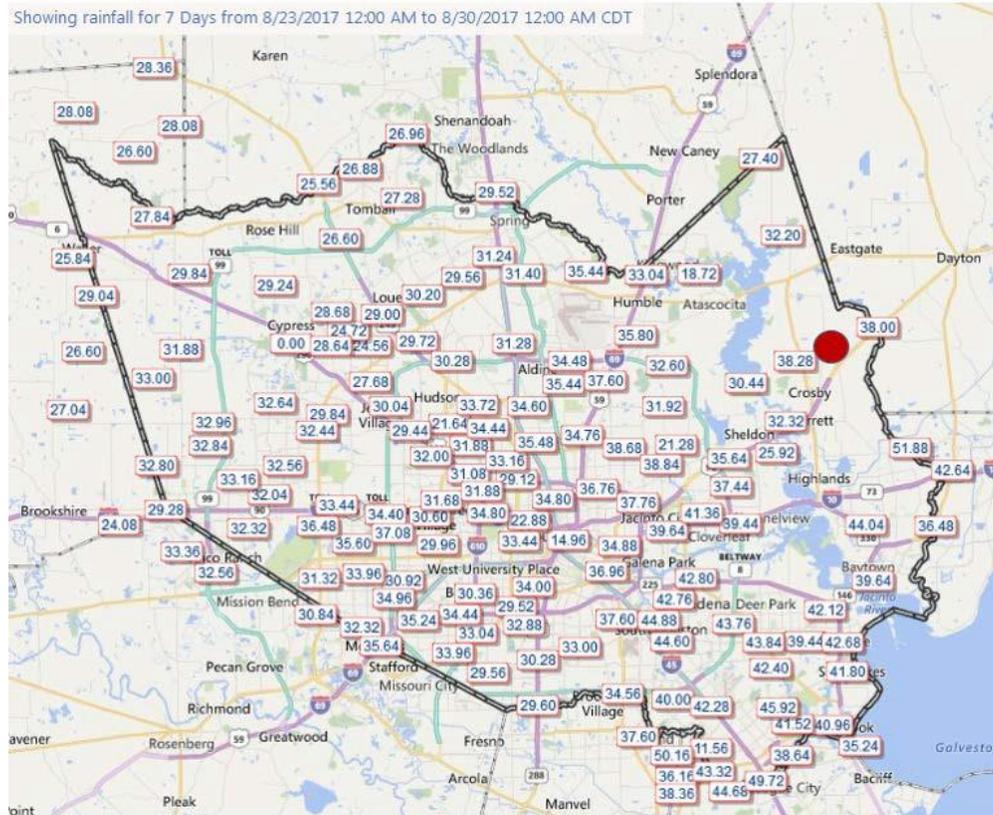


図44：ハリス郡洪水管理地区の観測ステーションマップ。このマップは、ハリケーン・ハービーによる7日間の累積降雨量（単位：インチ）を示している [48]。赤い丸は、アルケマ・クロスビー施設のおおよその位置を示している。（出典：CSBによる編集画像）

147. ハリス郡にはガルベストーン湾に注ぐ22の流域^aがある [49]^b。アルケマ・クロスビー施設は、そのうちのシーダーバイユー流域に位置している（図45）。このシーダーバイユー流域には約37,000人が住んでおり、流域面積は202平方マイル（約523平方キロメートル）で、流域内には128マイル（約206キロメートル）にわたる開水路が含まれている [50]。シーダーバイユーの本流は約40マイル（約64キロメートル）の長さがあり、南へ流れ、最終的にガルベストーン湾へと注いでいる [50]。

^a 流域 (watershed) とは、河川や小川などの共通の水路へと水が流れ込む地理的領域である。ハリス郡には22の主要な流域がある [139]。

^b 詳細は、洪水保険調査『Flood Insurance Study: Harris County, Texas and Incorporated Areas: Volume 1 of 12』（2017年1月6日）[49]の21ページにあるハリス郡の流域の項を参照のこと。洪水保険調査の第1巻（番号48201CV001E）を閲覧するには、[FEMAの洪水地図サービスセンターのウェブサイト](#)にアクセスし、アルケマ・クロスビー施設の住所（18000 Crosby Eastgate Rd., 77532）を入力してから、「Show all products for this area」をクリックする。続いて、「Effective Products」フォルダを選択し、「FIS Reports」をクリックしてから、「Product ID」列に地図「48201CV001E」が表示されるまでページを下にスクロールする。

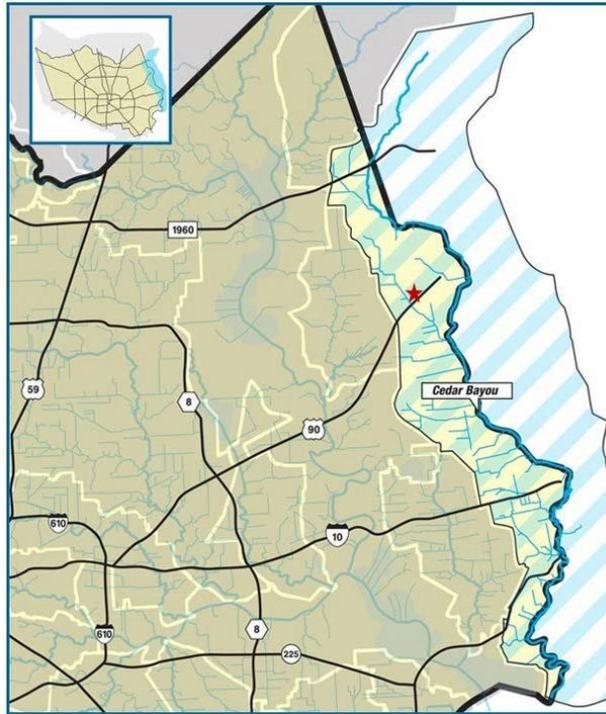


図45：テキサス州ハリス郡のシーダーバイユー流域の地図。右側の白と青の縞模様部分がシーダーバイユー流域である。赤い星印はアルケマ・クロスビー施設のおおよその位置を示す [50]。（出典：CSBによる編集画像）

148. 連邦議会は、1968年に国家洪水保険プログラムを設立し [51, p. 1]、その後、1970年代後半には連邦保険局が洪水保険調査を担当するようになった [52, p. 1]^a。現在、このプログラムは連邦緊急事態管理庁（FEMA）が運営している [51, p. 2]。その進展の一環として、洪水保険調査（FIS：Flood Insurance Studies）グループは、洪水保険や氾濫原開発規制の基礎となる地図や報告書の提供を開始した [52, p. 2]。これらの地図には、洪水保険料率地図（FIRM：Flood Insurance Rate Map）が含まれる [52, p. 3]。FIRMは、以下のような作業に使用される。

- 不動産が氾濫原にあるかどうかを判断する。
- 不動産の洪水保険区域を示す。
- 不動産のおおよその基準洪水標高を設定する [52, p. 13]^b。

149. シーダーバイユー流域には、過去に洪水が発生した記録がある [50]。図46は、アルケマ・クロスビー施設が氾濫原内に位置していることを示している^d。アルケマ・クロスビー施設の北

^a 1954年、テネシー川流域開発公社（TVA：Tennessee Valley Authority）は、地域の洪水ハザード情報を提供する最初の連邦機関となった [52, p. 1]。

^b 1989年以降、洪水保険料率地図（FIRM）には、氾濫原がどのように洪水流域と洪水外縁部に区分されているか、どのような点において河川が詳細に調査されているかなどを示す情報等が追加された。『[Utilizing Information from Flood Hazard Studies](#)』の6-15および6-16ページを参照のこと [52]。

^c **基準洪水標高**（BFE：Base Flood Elevation）は、特定の地域で任意の年に1%以上の確率で発生する洪水の水位を指す。BFEは、基準洪水または100年洪水とも呼ばれる [61, p. 1]。

^d **氾濫原（floodplain）**とは、河川や小川に隣接し、自然に洪水が発生しやすい地域である [128]。「湿地帯の流れの緩やかな川（バイユー）や小川は、時折、大雨によって自然に水位が上昇し、堤防を超えて隣接する土地を浸水させることがある。こうした浸水区域が**氾濫原**と呼ばれる [139]。」（ハイパーリンクを追加。）「これは、一連のパラメータ（想定された時間にわたって流域で発生する仮定の降雨など）に基づいて、バイユーや小川から**洪水が発生する可能性のある地域を予測してマッピングした氾濫原に過ぎない**。実際の降雨時には、自然条件によって想定以上の降水や流出が発生し、FEMAの洪水保険料率地図（FIRM）で示されるよりも洪水標高が深く、範囲が広がる可能性がある [127]。」（ハイパーリンクを追加。）

および東にはシーダーバイユーと名称不明の支流が流れ、西側にはアドロング水路（Adlong Ditch）がある。アドロング水路はアルケマ施設から南東へ約3マイル（約4.8km）流れ、シーダーバイユーと合流する。アルケマ・クロスビー施設での洪水の発生は、当該地域の降雨量と、アドロング水路およびシーダーバイユーがその降水をガルベストーン湾へ排水する能力などの複数の要因に依存している^a。

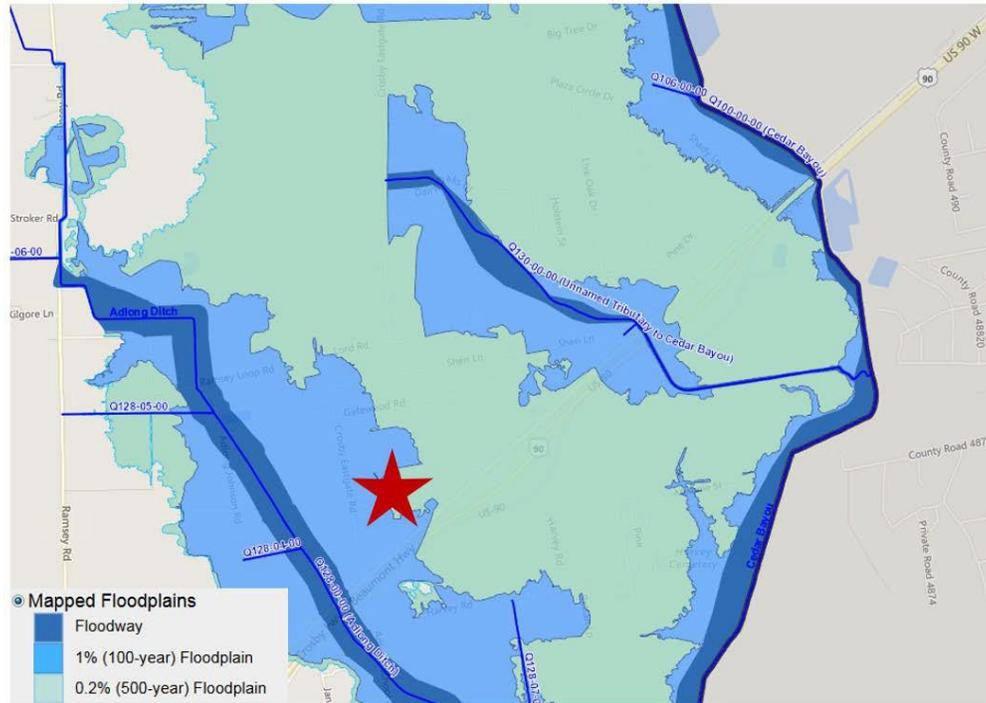


図46：アルケマ・クロスビー施設付近のおおよその氾濫原マップ。赤い星印で示されたアルケマ・クロスビー施設は、アドロング水路（Adlong Ditch）とシーダーバイユー（Cedar Bayou）の支流（名称不明）の洪水流域^b間に位置している。また、この施設は100年氾濫原^cおよび500年氾濫原^dの両方の中にある [53]。
（出典：CSBによる編集画像）

150. ハリス郡洪水管理地区の観測ステーション1740（図47）は、アルケマ・クロスビー施設の北東約3マイル（約4.8km）の位置にあり、シーダーバイユーが高速道路90号線の下を通る地点に設置されている（図48）。

^a USGSは、100年洪水の決定方法や、年間超過確率（AEP：Annual Exceedance Probability）が1%と言ったときの（つまり100年洪水の）精度について等の追加的な洪水情報を提供している [216]。

^b 洪水流域（floodway）は、100年洪水に備えて侵入堆積が生じないように確保すべき区域[128]であり、侵入堆積（encroachment）とは、水の流れを妨げるような氾濫原の開発のことをいう [129]。

^c 「1%（100年）氾濫原」は、連邦緊急事態管理庁（FEMA）の洪水保険料率地図（FIRMまたは氾濫原地図）において「特別洪水危険区域」とも呼ばれるが、これは1%（100年）洪水時にバイユーや小川などの水路が溢れ出すことによる洪水の危険性がある地域である。1%（100年）氾濫原に位置する構造物は、1年間に最低でも1%の確率で洪水に見舞われる可能性がある。統計的には、1%（100年）氾濫原に位置する構造物は、多くの住宅ローンの期間である30年間に、最低でも26%の確率で洪水に見舞われる。また、構造物が高架でないと仮定した場合、バイユーや小川に近づくほど洪水リスクは高くなる。地図上に示された1%（100年）氾濫原は、市または郡によって土地開発が規制されている地域である [139]。」（ハイパーリンクを追加。）

^d 「0.2%（500年）氾濫原」とは、0.2%（500年）洪水時にバイユーや小川などの水路が溢れることにより洪水が発生する危険のある区域である。0.2%（500年）氾濫原に位置する構造物は、1年間に最低でも0.2%の確率で洪水に見舞われる可能性がある。統計的には、0.2%（500年）氾濫原に位置する構造物は、多くの住宅ローンの期間である30年間に、最低でも6%の確率で洪水に見舞われる。また、構造物が高架でないと仮定した場合、バイユーや小川に近ければ近いほど洪水リスクは高くなる [139]。」（ハイパーリンクを追加。）



図47：観測ステーション1740。この観測ステーションは、バブラーシステムを使用し、シーダーバイユーが高速道路90号線と交差する地点（アルケマ・クロスビー施設の北東約3マイル）の水位を測定する^a。（出典：CSB写真）

^a 「[バブラー](#)は、ハリス郡全域の観測ステーションで使用されている3種類のリアルタイム水位測定装置の一つである。バブラーシステムは水中に設置され、オリフィスラインと呼ばれる開口部のあるチューブを使用する。このチューブは、観測ステーションの送信機から、装置の水中部分にあるチューブ開口部まで伸びており、圧力を測定することにより水位を決定する。チューブ内に一定量の空気を流し、管内の空気の内圧と管外の水の外圧の差を測定することにより水位を算出する [139]。」（ハイパーリンクを追加。）

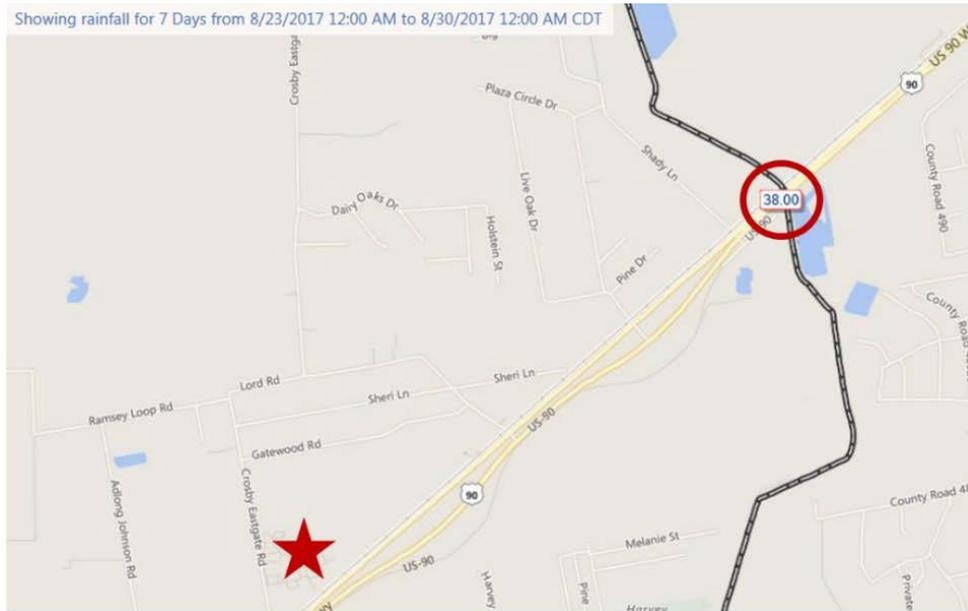


図48：アルケマ・クロスビー施設とシーダーバイユー観測ステーション1740。この地図は、アルケマ・クロスビー施設（赤い星印）と最寄りのシーダーバイユー観測ステーション（赤い丸印）の近接を示している。観測ステーション1740は、クロスビー施設の約3マイル北東にある [48]。（出典：CSBによる編集画像）

151. ハリケーン・ハービーの際、観測ステーション1740は総降水量38インチ（約96.5cm）を記録し（図49）、その結果、シーダーバイユーの水位は約59フィート（約18メートル）となり（図50）、1984年の観測ステーション設置以来、最高水位を記録した [29]^a。この降雨は、ヒューストン地域の年間平均降水量の約80%が、わずか数日間で降り注いだことに相当する [54]。2017年8月27日、この観測ステーションは約21.5インチ（約54.6cm）の降雨を記録し、ハリス郡の12時間および24時間の500年確率降雨量を2インチ以上も上回った^b。

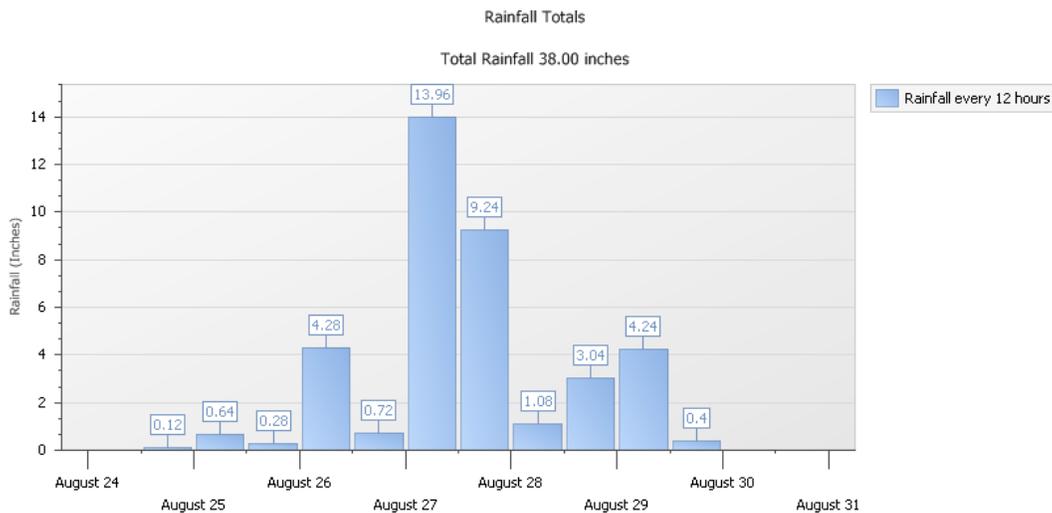
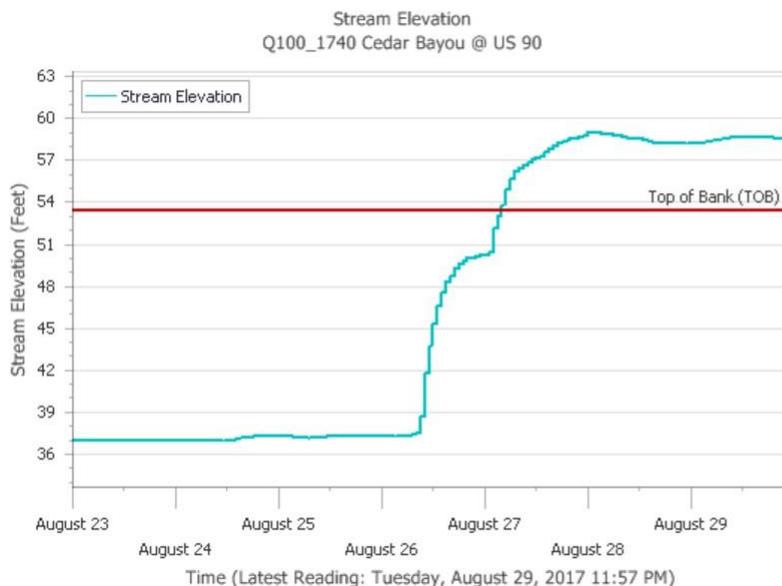


図49：ハリケーン・ハービー時の総雨量。シーダーバイユー観測ステーション1740は、ハリケーン・ハービーによる降雨量を記録した [29]。2017年8月27日午前中には、12時間最大降雨量約14インチを観測した [29]。

^a [観測ステーション1740](#)の「Stream Elevation」タブをクリックすると、過去の暴風雨による水位データが閲覧可能 [29]。

^b ハリス郡では、[0.2%（500年確率）降雨量](#)は24時間で約19インチ（約48.3cm）である。[1%（100年確率）降雨量](#)は、24時間で13インチ強、12時間で約11インチ弱である [217]。アルケマ・クロスビー施設（ハリス郡シーダーバイユー流域）における500年確率降雨量は、24時間で19.3インチ、2日で20.7インチ、4日で22.3インチである [49, p. 33]。図49に示すように、ハリケーンハービーの降雨量は、これらの500年確率降雨量の水準基標をすべて上回った。



Cross Section



Stream Elevation for sensor 1739 is **58.52'**
Reading on 8/29/2017 11:57 PM

図50：観測ステーション1740の河川水位データ。このグラフは、ハリケーン・ハービーによるシーダーバイユーの水位変化を示している [29]。2017年8月28日午前1時33分頃に記録された最高水位は、約59フィートであった [29]^a。

152. シーダーバイユーの水位が59フィートに達したことは、0.2%確率の洪水（500年洪水）で予測されていた約57フィートという水位を超えていたことになる（表3） [29]^b。その結果、ハリケーン・ハービー後にアルケマ・クロスビー施設で発生した洪水は、500年洪水の想定水位を上回った。クロスビー施設が位置する氾濫原を考慮すると、この規模の洪水が50年間に発生する可能性は約10%である [55]。

表3：洪水発生確率ごとの予測水位。これらの洪水発生確率ごとの水位予測値は、シーダーバイユー（観測ステーション1740）における推定データである [29]。

Flood Frequency	Elevation
10% (10-year)	52.60'
2% (50-year)	54.30'
1% (100-year)	54.90'
.2% (500-year)	56.80'

153. ハリス郡洪水管理地区は、各観測ステーションの測定値履歴を保持している。ハリケーン・ハービー以前におけるシーダーバイユー（観測ステーション1740）の最高水位は、1994年に記録された約56フィートであった（表4） [29]。

^a 高速道路90号線付近のシーダーバイユー（観測ステーション1740）において、堤防頂部（TOB：Top of Bank）は53.4フィート、水路底（BOC：Bottom of Channel）は36.09フィートである [29]。「Stream Elevation」タブをクリックすると、[観測ステーション1740](#)の過去の情報を閲覧可能 [29]。

^b [観測ステーション1740](#)の「Stream Elevation」タブをクリックすると、過去の河川水位データが表示される [29]。

表4：過去の暴風雨時の水位データ。これらはシーダーバイユー（観測ステーション1740）における過去の水位を示している [29]。なお、ハリス郡洪水管理地区のウェブサイトには明記されていないが、1994年の洪水はハリケーン・ローザによるものである可能性が高い。

Historical Storm

Date	Event	Elevation
10/18/1994		56.08'
5/20/2000		50.08'
9/13/2008	Ike	53.70'
10/31/2015		55.10'
6/4/2016		50.40'
8/27/2017	Harvey	59.00'

High water mark elevations are approximate.

4.1. アルケマ・クロスビー施設における洪水保険料率地図（FIRM）の歴史

154. アルケマ・クロスビー施設の現在および過去2回の洪水保険料率地図（FIRM: Flood Insurance Rate Map）は、FEMAの洪水地図サービスセンターのウェブサイトから閲覧可能である。これらの地図では、クロスビー施設の洪水リスクが時間の経過とともに高まっていることが示されている。閲覧可能な版の洪水保険料率地図における主な特徴は以下のとおりである。

- 1985年9月：この版では、クロスビー施設の大部分が「ゾーンC：最小浸水区域」に指定されていた [56]^a。
- 1996年11月：この版では、クロスビー施設の大部分が「その他の地域（ゾーンX）：500年氾濫原外とされた地域」に位置するとされていた [57]^b。また、施設の南西隅にあるごく一部が「ゾーンA：100年洪水で浸水する特別洪水危険区域」に分類されたが、基準洪水標高は設定されていなかった [57]。
- 2007年6月：この現行版では、クロスビー施設全体が100年氾濫原または500年氾濫原に含まれるとされている [58]^c。

155. これらの地図の改訂の中でも、2007年6月の更新は、アルケマ・クロスビー施設全体が氾濫原に含まれることが明確になった点で特に重要である（図51）。施設の一部は100年氾濫原に、残りの部分は500年氾濫原にある。

^a 1985年9月27日の洪水保険料率地図（番号4802870240D）を閲覧するには、[FEMAの洪水地図サービスセンターのウェブサイト](#)にアクセスし、アルケマ・クロスビー施設の住所（18000 Crosby Eastgate Rd., 77532）を入力してから、「Show all products for this area」をクリックする。続いて、「Historic Products」フォルダ、「FIRM Panels」の順にクリックしてから、「Product ID」列に地図「4802870240D」が表示されるまでページを下にスクロールする。

^b 1996年11月6日の洪水保険料率地図（番号48201C0535J）を閲覧するには、[FEMAの洪水地図サービスセンターのウェブサイト](#)にアクセスし、アルケマ・クロスビー施設の住所（18000 Crosby Eastgate Rd., 77532）を入力してから、「Show all products for this area」をクリックする。続いて、「Historic Products」フォルダ、「FIRM Panels」の順にクリックしてから、「Product ID」列に地図「48201C0535J」が表示されるまでページを下にスクロールする。

^c 2007年6月18日の洪水保険料率地図（番号48201C0535L）を閲覧するには、[FEMAの洪水地図サービスセンターのウェブサイト](#)にアクセスし、アルケマ・クロスビー施設の住所（18000 Crosby Eastgate Rd., 77532）を入力してから、2つの「地図画像」アイコンの一方をクリックして表示またはダウンロードする。

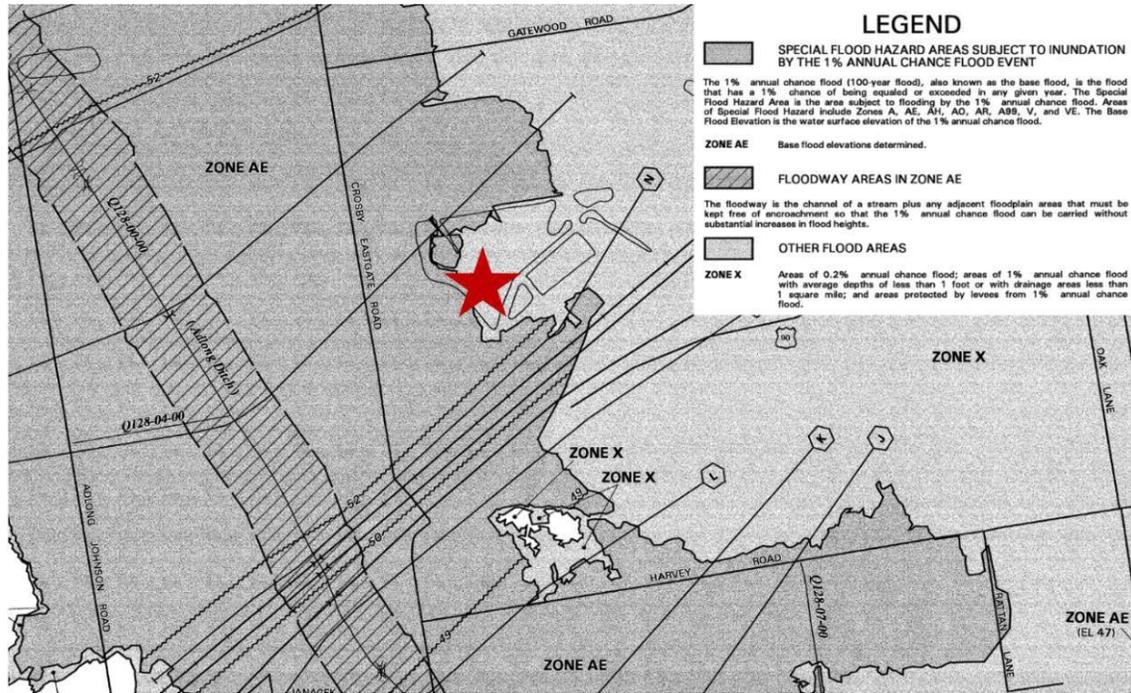


図51：2007年6月の洪水保険料率地図（FIRM）の抜粋。FIRMのこの部分は、アルケマ・クロスビー施設が100年氾濫原および500年氾濫原内に位置していることを示している [58]。（出典：CSBによる編集画像）

156. FEMAの洪水地図サイトでは、デジタル版の洪水地図画像も提供されている。図52は、アルケマ・クロスビー施設のデジタル洪水地図を示しており、この地図から、アルケマの電力供給設備と有機過酸化物の低温倉庫は100年氾濫原内にあることがわかる。



図52：100年氾濫原にあるアルケマ・クロスビー施設南部。このデジタル画像は、アルケマの電力供給設備および有機過酸化物の冷蔵施設がある南部の区域が、100年氾濫原に含まれることを示している。地図の青色部分は「ゾーンAE：100年氾濫原」を示している [58]^a。

^a 2007年6月18日の洪水保険料率地図（番号48201C0535L）のデジタル版を入手するには、[FEMAの洪水地図サービスセンターのウェブサイト](#)にアクセスし、アルケマ・クロスビー施設の住所（18000 Crosby Eastgate Rd., 77532）を入力し、「View Web Map」アイコンをクリックする [58]。

157. さらに、アルケマの保険会社であるファクトリーミューチュアル保険会社（FM Global）が2016年9月に発行した報告書によると、アドロング水路はアルケマ・クロスビー施設に対する洪水リスク要因であると指摘されている。FM Globalの報告書では、施設の一部が100年氾濫原に、残りの部分が500年氾濫原に分類されていることが確認されている。

4.2. 洪水保険調査

158. FEMAは、洪水保険料率地図（FIRM）を提供するだけでなく、各地域に対して洪水保険調査を実施し、洪水標高の詳細地図である「洪水プロファイル」を含む報告書も提供している（図53） [59]。テキサス州ハリス郡の洪水保険調査には、アルケマ・クロスビー施設付近の河川であるシーダーバイユー、アドロング水路、および施設北東に位置する名称不明の支流に関する詳細な洪水標高地図が含まれている [59]^a。

^a ハリス郡の洪水保険調査は全12巻から成るが、アルケマ・クロスビー施設の洪水リスクを理解する上で特に関連性が高いのは第1巻および第8巻である。[FEMAの洪水地図サービスセンターのウェブサイト](#)上では、第1巻の製品識別番号は48201CV001E、第8巻は48201CV008Dである[49]、[60]。これらの文書を閲覧するには、[FEMAの洪水地図サービスセンターのウェブサイト](#)に移動し、アルケマ・クロスビー施設の住所（18000 Crosby Eastgate Rd., 77532）を入力してから、「Show all products for this area」をクリックする。続いて、「Effective Products」フォルダを選択し、「FIS Reports」をクリックする [59]。

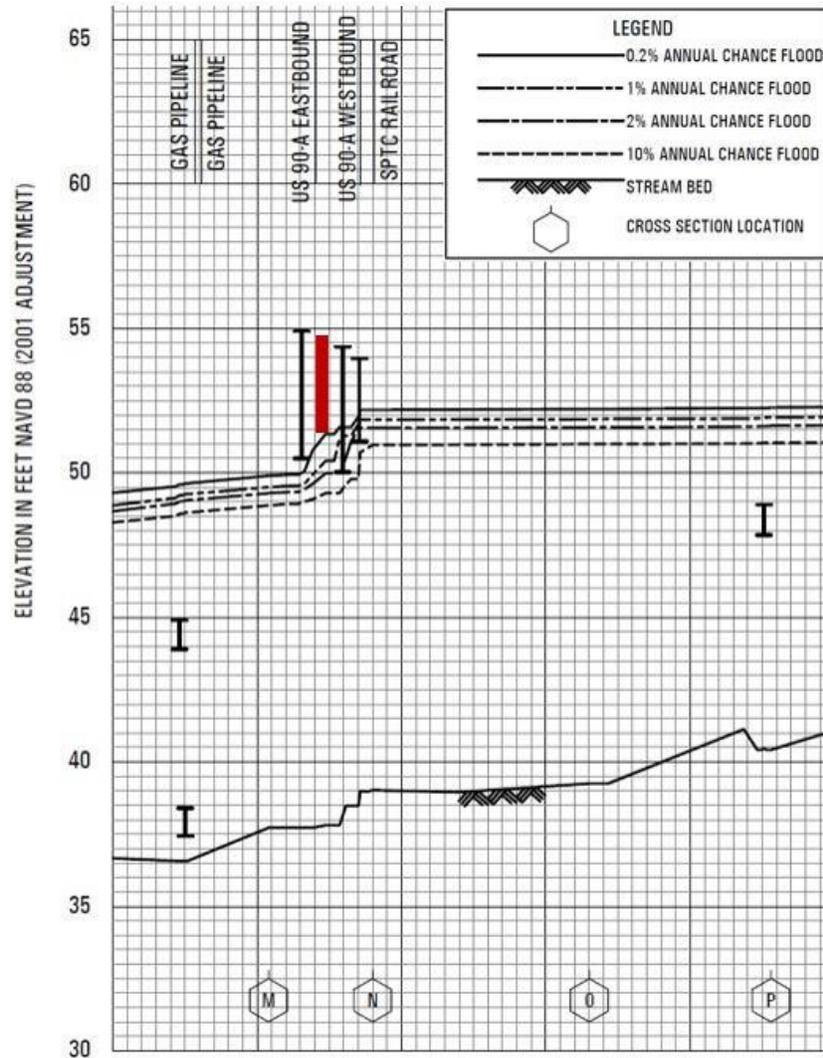


図53 : アドロング水路の洪水プロファイルの抜粋。この図は、アドロング水路の洪水プロファイルの抜粋であり、アルケマ・クロスビー施設周辺の洪水確率ごとの予測水位を示している [60, p. 35]。赤い長方形はCSBによって追加されたもので、ハリケーン・ハービーによる洪水のおおよその水位が500年洪水標高を2フィート以上上回ったことを示している。100年洪水と500年洪水の水位差が1フィート未満であることを考慮すると、500年洪水標高を2フィート超過したことは極めて重要な事象である。(CSBによる編集画像)

4.3. 基準洪水標高

159. 図54に示されているとおり、洪水保険料率地図 (FIRM) では、アルケマ・クロスビー施設における基準洪水標高 (100年洪水標高に相当) は52フィートと定められている [58]。

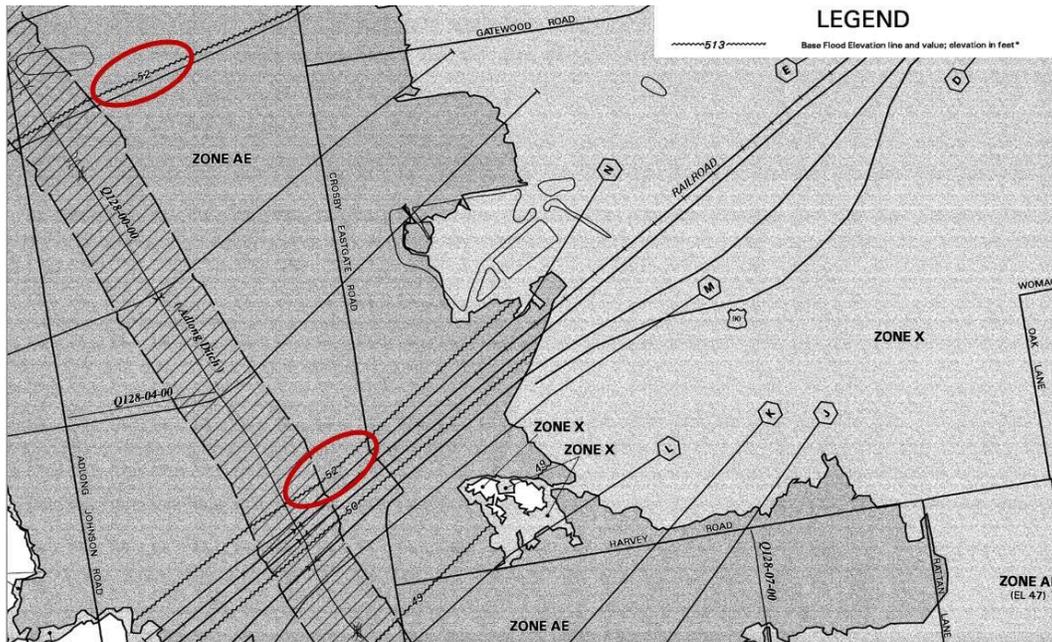


図54：アルケマ・クロスビー施設における基準洪水標高。洪水保険料率地図（FIRM）には、クロスビー施設の基準洪水標高が52フィートと示されている [58]。（CSBにより編集した地図）

160. 図55は、アルケマ・クロスビー施設内に複数ある標高測量標のうちのひとつを示している。基準洪水標高は、この測量標の標高よりも6インチ高い位置にある。



図55：液体窒素貯蔵タンク付近の標高測量標。コンクリートブロック上に設置された金属プレートには、標高が51.5フィートであり、基準洪水標高よりも約6インチ低いことを示している。ハリケーン・ハービーの際の洪水標高は、この測量標の高さより3フィート以上高かった。（出典：CSBの写真）

161. FEMAによると、実際の洪水では基準洪水標高を超える洪水となる場合も多い。FEMAは、近

年のハリケーン（カトリーナ、アイク、サンディなど）において、地域によっては洪水標高が基準洪水標高を数フィート上回り、洪水の範囲も洪水保険料率地図（FIRM）に示された範囲を大幅に超えて広がったと警告している [61]。

4.4. 2016年の保険報告書が洪水リスクを特定・評価

162. FM Globalは、ロードアイランド州に本社を置き、世界中に拠点を有する保険会社であり、大企業向けに損害防止保険を提供している。FM Global^a のエンジニアは、顧客企業の施設を訪問する際に、洪水、強風、地震のハザードマップを確認し、自然災害による損失リスクを評価する [62, p. 21]。
163. ハリケーン・ハービーの1年前、FM Globalのエンジニアはアルケマ・クロスビー施設を訪問し、クロスビー工場の工場長と面談した上で、クロスビー施設は他の保険リスクに加えて洪水リスクの影響を受けやすいとの報告書を作成した^b。2016年9月のFM Global報告書では、アドロング水路がアルケマ・クロスビー施設に対する洪水リスク要因であると明確に指摘されていた。また、同施設が100年氾濫原および500年氾濫原の両方に位置していることも確認された。さらに、FM Globalは100年洪水と500年洪水について物的損害と事業中断損失の見積もりを作成し、その結果、500年洪水が発生した場合、100年洪水と比較して、物的損害は5倍、事業中断損失は16倍に拡大する可能性があることを示した。
164. FM Globalによると、同社のエンジニアは毎年10万件以上の現地調査を実施し、700種類のデータを収集している [63]。FM Globalはこれらのデータを分析し、保険損失が発生する可能性の高い施設や、損失が顕在化しやすい要因を特定している [63]。また、FM Globalは顧客企業に報告書を提供し、リスク改善策の優先順位を決定するための支援を行っている [63]。FM Globalのリスク評価ツールの一つであるベンチマークツール「RiskMark」は、評価対象施設のリスク品質を100点満点のスコアで測定する [63]。RiskMarkのスコアが高いほどリスク品質が高いことを表し、リスク管理が適切に行われ、損失リスクが低い施設とされる [64]。RiskMarkには、自然ハザード（洪水など）を含む4つの構成要素が含まれている [62, p. 21]。FM Globalの報告によると、RiskMarkのスコアが最も低い施設は、RiskMarkスコアが高い施設に比べ、損失発生率が7倍高い [63]。さらに、FM Globalは、RiskMarkスコアが低い拠点は、RiskMarkスコアが高い拠点よりも損失が30倍深刻であると報告している。
165. 2016年のFM Globalの報告書はアルケマの経営陣にもRiskMarkスコアを提供した。クロスビー施設のスコアは、他のアルケマ施設や、FM Globalが保険を提供する他の危険物製造施設と比較して、下位25%グループ（最もリスクが高い）に位置していた。クロスビー施設は、洪水などの自然ハザードのスコアが低かった。FM Globalはアルケマ・クロスビー施設の洪水リスクを認識したが、FM Global報告書ではアルケマに対して洪水リスクを軽減するための具体的な推奨策を提案しなかった。さらに、アルケマが報告書を基に行った変更について、FM Globalは満足していたとされる。なお、FM Global報告書ではクロスビー施設の複数の問題点が指摘されており、施設側はその多くの問題に対応していた。

^a FM Globalは、2017年より前まではアルケマ・クロスビー施設の保険会社であったが、アルケマは2017年に保険会社を変更したため、ハリケーン・ハービー発生時にはFM Globalは保険契約会社ではなかった。

^b 2016年9月にFM Globalの担当者と面談した工場長は、2017年初頭にアルケマを退職していた。その後に暫定的な役割を担ったアルケマのマネージャーは、FM Globalの報告書を知らなかった。

5. アルケマ・クロスビー施設の洪水設計

166. CSBの調査によると、アルケマ・クロスビー施設には特定の洪水設計基準は存在しなかったが、同施設のハリケーン対策計画、緊急対応計画、プロセスハザード分析（PHA）、ワーストケースシナリオ、およびハリケーン・ハービーによる洪水に関してアルケマが発表した書面声明などを通じて、施設がどのように洪水の影響を認識していたかを把握できる。事故後のアルケマの声明で示された見解は、アルケマの従業員がCSBの調査官に対して述べた内容とも一致している。同施設は過去に洪水を経験しており、ハリケーン・ハービー以前に多くの従業員が施設内で確認した最大の水位は約2フィートであった。

5.1. ハリケーン対策計画

167. アルケマ・クロスビーのハリケーン対策計画では、洪水対策として以下の対策が記載されている。
- 可能な範囲で貯蔵タンクを満タンにし、浮きあがりを防ぐ。
 - ゴミ収集コンテナを水で満たし、浮きあがりを防ぐ。
 - 数フィートの浸水の中でも移動可能な、大型トラクター用タイヤを装備したオフロードフォークリフトを調達する [65]。
 - 浅瀬でも航行可能な平底ボートを購入する [66]。
 - 個人用保護雨具の一つとして、防水長靴を備蓄する。

5.2. 緊急対応計画

168. アルケマ・クロスビーの緊急対応計画には、以下を含めさまざまな緊急事態の可能性について記載されている。
- 有機過酸化物の分解
 - 電力の喪失
 - 洪水などの異常気象現象
169. 緊急対応計画の洪水および高水位に関するセクションでは、ハリケーン・ハービー時のような大規模な洪水は考慮されていない。アルケマはこの緊急計画を作成する際、明示されていないものの、より低い水位の洪水を前提としていた。緊急対応計画には以下のように記されている。

設備、作業場、制御室、事務所などに水が入らないよう注意を払うこと。激しい暴風雨の際は、これらのエリアを点検し、損害や人的被害を防止すること。必要に応じて、必須でない人員を退避させること。

大雨の際には、以下の項目を点検すること。

- タンクのすべての二次防壁の水位を監視する。
 - 必要に応じて、雨水貯留ゲートを開放する。
 - 必要に応じて、すべての容器および設備を固定する。
 - 衛生用下水槽の水位を監視する。
170. 緊急対応計画では、事前の対策や異常気象時の作業員の安全確保に重点を置いている。しか

し、アルケマの緊急対応計画には、洪水が電力喪失を引き起こし、それに伴う冷却機能の喪失が有機過酸化物の分解を招く可能性は記載されていない。

5.3. 貯蔵施設の安全ガイドライン

171. アルケマ・クロスビー施設には、有機過酸化物の保管に関するガイダンス、制約、およびプロセス安全情報を提供するための方針が文書化されていた。この方針には、低温倉庫の電力が喪失した場合に有機過酸化物製品の冷却を行うために、オペレーターが取るべき行動等が詳細に記されていた。この方針は2016年に改定され、低温倉庫への電力供給が失われた際にバックアップ発電機が作動しなかった場合には、有機過酸化物製品を冷蔵トレーラーに移動するよう、作業員に指示した。液体窒素システムは、「他に代替手段がない場合」に使用することとされていた。ハリケーン・ハービーの際に試みられたように、500年洪水の水位の場合、冷蔵トレーラーに積載してレイダウンエリアに配置していれば、有機過酸化物製品の冷却が十分に維持され、分解事故を防げたかもしれない^a。

5.4. プロセスハザード分析

172. アルケマがクロスビー施設の低温倉庫に対して実施したプロセスハザード分析（PHA）では、洪水リスクについての記録がなかった^b。仮にアルケマのPHAが洪水リスクを評価していたとしても、当時の業界における洪水対策ガイダンスは限られており、ハリケーン・ハービーによる洪水のハザードに対して、具体的かつ十分に安全側の対策を講じるには不十分であった。しかしながら、洪水リスク評価がなかったにもかかわらず、クロスビー施設には、100年洪水に対しては低温倉庫の冷却能力を維持するための十分な安全対策が整っていたように見受けられる。
173. 低温倉庫のPHAが実施された当時のアルケマの全社PHA方針では、洪水が潜在的な起因事象の一つとして含まれていたが、クロスビー施設のPHAでは洪水リスクについての記録がなかった。一方で、低温倉庫を対象としたアルケマのPHAでは、低温倉庫内の温度上昇を引き起こす可能性のあるシナリオとして以下の3つが特定されていた。
- コンプレッサー故障による冷却機能の喪失
 - 冷媒漏れによる冷却機能の喪失
 - 電力の喪失
174. 電力喪失の可能性に対処するため、クロスビーのPHAチームは以下の安全対策を特定した。
- すべての低温保管施設に電力を供給する非常用発電機
 - 代替冷却手段としての液体窒素供給
 - 2時間ごとの手動温度チェック、および影響を受けた低温保管施設から、冷却機能を提供

^aハリケーン・ハービーの際、アドロング水路の水位は約54.5フィートに達した。レイダウンエリアの標高は52フィートであり、冷蔵トレーラーの燃料タンクは地上から3フィート5インチの高さにあった。もしすべての冷蔵トレーラーがレイダウンエリアに配置されており、作業員が現場に留まって監視できていた場合、冷却機能を失わずに済んだかもしれない。

^bアルケマの低温倉庫に関するPHAは2013年11月に完了している。アルケマは、リスク評価およびリスク低減プログラムにおいて、「合理的に実行可能な限り低減（ALARP：As Low As Reasonably Practicable）」の原則を用いている。化学プロセス安全センター（CCPS）はALARPを、次のように定義している。「リスク低減の努力は、追加的な犠牲（コスト、時間、労力、またはその他の資源の消費）が、達成されるリスク低減の度合いに対して著しく不均衡になるまで続けられるべきという考え方である。「合理的に達成可能な限り低減（ALARA：As Low As Reasonably Achievable）」という用語も同義で使用されることが多い [178]。」

可能な別の倉庫または移動式の冷蔵トレーラーに有機過酸化物品を移動する能力

175. PHAプロセスにおける安全対策の有効性の評価では、ハリケーン・ハービー級の洪水は想定していなかった。アルケマの企業方針も業界基準も、ハザードの起因事象に依存しない安全対策を求めている。しかし、ハービーによる洪水は、クロスビー施設の電力喪失を引き起こしただけでなく、アルケマが安全防護層として想定していた安全対策にも以下のような共通の故障モードをもたらした。
- 非常用発電機が浸水し、使用不能になった
 - 液体窒素配管が浸水し、使用不能になった
 - 冷蔵トレーラーのディーゼル燃料タンクが浸水し、使用不能になった
176. クロスビー施設は、ハリケーン・ハービーにより生じた洪水の規模に対応できる独立した十分な安全防護層を欠いていたため、適切に保護されず、有機過酸化物品が分解する事態に至った。アルケマ・クロスビーPHAに対する追加の詳細分析については付録Cを参照のこと。

5.5. プロセス安全のワーストケースシナリオ

177. アルケマの各事業所では、最も重大なハザードに対する社員の意識を高めるため、プロセス安全におけるワーストケースシナリオのリストを作成している。アルケマでは、これらのハザードについて従業員に伝えるため、安全オリエンテーション研修や定期的な安全会議を通じて情報共有を行っている。
178. アルケマの管理者は、各施設のPHAを評価し、プロセス安全のワーストケースシナリオのリストを作成した。クロスビー施設におけるワーストケースシナリオの作成では、火災、爆発、化学物質の流出、異常気象など、さまざまなハザードカテゴリーを評価した^a。アルケマの管理者が文書化した異常気象には、さまざまな自然災害が含まれていたが^b、洪水は含まれていなかった。

5.6. アルケマの声明

179. アルケマは、事故後の声明文書において、同社のクロスビー施設における歴史は1960年に遡ることを強調した。クロスビーでの57年の歴史の中で、多くのハリケーンや熱帯暴風雨が同施設に影響を与えた。アルケマは、現在の従業員の中には40年間クロスビー施設に勤務している者もあり、過去の最悪の洪水時でもピックアップトラックで敷地内を走行できたと述べた。これらの長年の従業員は、2001年の熱帯暴風雨アリソン [67] を、クロスビー施設における過去最大の洪水の指標として認識していた。また、アルケマは、2008年のハリケーン・アイク [68] や2005年のハリケーン・リタ [69] などの近年のハリケーンはハービーよりもクロスビーに近い地点に上陸し、両ハリケーンとも大雨をもたらしたが、ハービーのような大規模な洪水には至らなかったと述べている。
180. CSBの指摘によると、アルケマが言及した過去の嵐のいずれも、ハリケーン・ハービーの降水量を超えてはいなかったが、1994年のハリケーン・ローザ (Rosa) および2015年の無名の暴風雨は、アルケマ・クロスビー施設付近でハリケーン・アイクやリタを上回る降水量を記録していた。アルケマ・クロスビー施設付近で記録された2日間合計の最高降雨量は以下の通りである。

^a 異常気象には、ハリケーン、干ばつ、竜巻、吹雪、洪水が含まれる [240]。

^b これらの自然災害には、竜巻、雷、異常高温などが含まれていた。

- ハリケーン・ローザ（1994年）：23インチ
- 熱帯暴風雨アリソン（2001年）：2.7インチ
- ハリケーン・リタ（2005年）：3.8インチ
- ハリケーン・アイク（2008年）：6.5インチ
- ハリケーン・ハービー（2017年）：26.5インチ

181. ハリケーン・ハービー以前において、ハリス郡洪水管理地区の雨量計データによると、アルケマ・クロスビー施設でハービーに匹敵する降水量を記録した最も直近の事象は2015年10月の無名の暴風雨であり、2日間で合計13インチの降水量を記録していた [29]^a。
182. アルケマの記録によれば、2015年10月の暴風雨ではクロスビー施設では浸水が発生したものの、低温倉庫および非常用発電機は浸水しなかった。また、この暴風雨による化学物質の流出や火災は発生しなかった。

^a 2015年の暴風雨の最大雨量は、同年10月31日に記録された。

6. 洪水対策のガイダンス

183. 施設における洪水ハザードへの対処方法については、複数の異なる機関からガイダンスが提供されている。しかしながら、仮にアルケマがハリケーン・ハービーの到来前にこれらのガイダンスを適用していたとしても、本件の事故を防ぐことは困難であったと考えられる。この結論は、米国では、より強固な洪水対策ガイダンスが必要であることを示唆している。

6.1. 米国土木学会

184. 米国土木学会（ASCE：American Society of Civil Engineers）は、洪水ハザード地域における建物および構造物の立地選定、設計、建設の基準として、ASCE 24『洪水耐性設計と建設（Flood Resistant Design and Construction）』を発行している [70, p.1]^a。ASCE 24は、商業施設、住宅、工業施設、教育施設、医療施設、および重要施設も対象としている [70, p.1]。また、ASCE 24は、建物の用途や公共またはコミュニティの機能への潜在的リスクに基づき、洪水設計クラスを定めている（表5） [70, p. 8]。

表5：洪水設計クラス。各ASCE洪水設計クラスは、建物の用途と公衆に対する潜在的リスクで決まる [70, p.8]。

Flood Design Class	Public Risk or Community Disruption	Building Example
1	Minimal	Temporary Buildings, and Vehicle Parking Structures
2	Moderate	Residential, Commercial, or Industrial Buildings
3	High	Museum, Church, or Community Centers
4	Substantial	Air Traffic Control, Police Station, or Hazardous Chemical Manufacturing or Storage

185. 洪水設計クラス4には、「洪水による故障や機能停止、損傷が発生した場合、地域社会全体に重大なリスクをもたらす建物」が含まれる [70, p. 8]。また、このクラスには、アルケマ・クロスビー工場のような「危険な燃料や化学物質および有害廃棄物などの物質の製造、処理、取扱い、保管、使用、または廃棄を行う施設」も該当する [70, p. 8]。
186. ASCE 24は、基準洪水標高に加え、洪水設計クラスと洪水ハザード区域の特性に応じた基準洪水標高からの追加高さを規定している [70, p.4]。洪水設計クラス4の建物および構造物は、基準洪水標高+2フィート、または500年洪水の水位まで、基礎部分を高くするか保護措置を講じる必要がある [70, p. 4]。アルケマ・クロスビー施設の基準洪水標高は52フィートであるため、ASCE 24に従った新規建設では、54フィート以下の建物や構造物には洪水に耐性のある材料を使用し、すべての機器やユーティリティを54フィート以上に配置することが求められる [70, p. 4]。しかし、ハリケーン・ハービーによる洪水標高を考慮すると、この基準では低温倉庫やそのバックアップシステムを十分に保護することはできなかった。

6.2. 化学プロセス安全センター

187. 米国化学工学会（AIChE：American Institute of Chemical Engineers）の化学プロセス安全センター（CCPS：Center for Chemical Process Safety）は、化学、製薬、石油産業におけるプロセ

^a ASCE 24は建築基準法の対象となる建物および構造物に適用される最低要件を定めており、国際建築基準（International Codes®）から参照されている規格である [70, p. 1]。

ス安全性の課題を特定し、対応するための法人会員制組織である。CCPSは、これらの業界で広く使用されている一連のガイダンス文書を発行している。

6.2.1 化学物質の倉庫保管に関する安全ガイドライン

188. CCPSはその書籍『化学物質の倉庫保管に関する安全ガイドライン（Guidelines for Safe Warehousing of Chemicals）』の中で、化学物質の保管は「負傷、疾病、環境被害、物的損害、事業中断などの潜在的なハザードを含む」と述べている [71, p. 1]。また、自然災害（洪水を含む）がこれらのハザードの引き金となる可能性があるとも指摘している [71, p. 1]。CCPSは企業に対し、これらのリスクを評価するよう注意を促しつつ、「化学品の倉庫保管に伴うリスクを十分に理解し、適切な措置を講じて損失を防止または軽減することが極めて重要である」と述べている [71, p. 1]。
189. CCPSは、洪水による化学物質の環境流出の可能性を指摘している [71, p. 59]。洪水リスクを理解するために、CCPSは企業に対し、FEMAの資料（洪水保険調査や洪水保険料率地図）を参照するよう求めている。また、CCPSは、「100年洪水の発生間隔とそれに関連する洪水標高は、洪水ポテンシャルの推定に最も広く使用されている基準である」とも述べている [71, p. 59]。
190. CCPSは、包括的な倉庫保管リスク管理戦略の重要性を強調しており、緊急事態計画ではさまざまな緊急事態シナリオを考慮することを推奨している [71, p. 135]。また、化学物質の流出につながる分解反応を、企業の緊急事態計画で考慮すべきシナリオの一つとして挙げている [71, p. 135]。さらに、洪水によって引き起こされる化学物質流出の見込みを緊急事態計画に組み込むことを推奨している [71, p. 136]。
191. 『化学物質の倉庫保管に関する安全ガイドライン』の中でCCPSは、洪水被害を軽減する目的で、企業向けに、設計および緊急時の保護対策に関して以下を含めたガイダンスを提供している。
- 倉庫の床面を基準洪水標高より高く設計する
 - 適切な余裕高（フリーボード）を考慮した堤防や洪水防壁を建設する^a
 - 防水閉鎖装置、洪水対策用ドア、窓用シールドを設置する
 - 冷却が必要な化学物質を移動させる [71, p. 106]
192. CCPSのガイダンスでは、建築物を「基準洪水標高より高い位置」に建設することが推奨されているが、この条件は100年洪水標高よりも高いことを意味すると解釈できるであろう。しかし、重要な設備を基準洪水標高よりどれだけ高くすべきかについての具体的な基準が明示されていないため、このCCPSのガイダンスだけではアルケマ・クロスビー事故を防ぐには不十分であったかもしれない。

6.2.2 反応性物質の安全な保管および取扱いに関するガイドライン

193. CCPSは、その書籍『反応性物質の安全な保管および取扱いに関するガイドライン（Guidelines for Safe Storage and Handling of Reactive Materials）』の中で、反応性化学物質に関するガイダンスを提供している。反応性化学物質とは、自己反応性を持ち、分解してより単

^a 「[フリーボード \(freeboard\)](#) は、安全係数として一定の洪水標高より数フィート分（一般的には1~3フィート）上に設定される追加の高さであり、特に重要施設に適用される。フリーボードは、波の影響、橋の開口部の収縮、流域の都市化による水文学的影響など、洪水時の水位上昇に寄与しうる多くの未知の要因を補正するための措置である [228, p. 1]。 」

純な分子に分かれる物質のことを指す [13, p. 2]。CCPSは特に有機過酸化物について言及し、これらの化学物質は「特有の安定性の問題を抱えており、工業化学物質の中でも特に危険性が高い [13, p. 3]」と指摘している。また、有機過酸化物は、「分解の速度が加速し続け、最終的に制御不能な高速度反応（「暴走」分解反応）に至る可能性がある」と述べている [13, p. 3]。

194. CCPSは、設備設計者に対し「安全な施設を設計するための出発点として、既存の規格や基準の使用を考慮する」ことを推奨している [13, p. 138]。その理由は、「規格や基準には、過去の経験や事故から得られた技術的知見や教訓が豊富に組み込まれている [13, p. 138]」からである。さらに、多くの規格が危険化学物質の特性や管理システム（例：緊急計画と対応）について規定していると指摘している [13, p. 138]。

195. CCPSは、アルケマ・クロスビー事故に関連する有機過酸化物の分解によるハザードについて、以下を指摘している。

「有機過酸化物は不安定であるため、その貯蔵と取扱いには特別な注意が必要である [13, p. 219]。」

「有機過酸化物の安全な貯蔵と取扱いにおける主なハザードは熱感受性であり、多くの場合、可燃性または引火性である [13, p. 219]。」

「ほとんどの有機過酸化物は、一度着火すると激しく燃焼し、一部の物質は、分解時に希釈されていない状態（例：乾燥した過酸化ベンゾイルなど）や密封された状態である場合には、爆ごうを起こす可能性がある [13, p. 219]。」

196. CCPSは、有機過酸化物の分解特性についても以下のように説明している。

有機過酸化物はすべて熱に対する感受性を持ち、その感受性は過酸化物の反応性が高くなるほど増加する。有機過酸化物は常に分解を受け、その速度は物質の温度に依存する。分解熱から得られる熱エネルギーが周囲への放熱速度を上回ると、温度の上昇によって残りの過酸化物の分解が加速される。このプロセスが進行して制御不能になると、典型的な「暴走反応」の分解になる。クメンヒドロペルオキシドなど、一部の有機過酸化物では、この分解が自己触媒的であるため、暴走の危険性が高まる。すなわち、分解生成物がさらなる分解を促進し、反応が自己加速的に進行する [13, p. 219]。

197. CCPSは、洪水の可能性がある場合、反応性化学物質の容器を高い位置に保管することを検討するよう推奨している [13, p. 156]。しかし、予想洪水標高をどの程度上回る高さに保管すべきかについての具体的な基準は示されていない。

6.2.3. 現場での緊急事態に対する技術計画に関するガイドライン

198. CCPSは、その書籍『現場での緊急事態に対する技術計画に関するガイドライン（Guidelines for Technical Planning for On-Site Emergencies）』の中で、企業が緊急事態計画を策定する際のガイダンスを提供している [72, p. 153]。緊急事態計画のガイダンスには、「発生が想定される事故の特定、利用可能なリソースの評価、対応戦術の考案、適切な組織化、必要なリソースの定義、が含まれる」 [72, p. 153]。さらに、CCPSは、特定のハザードごとの対応手順の策定に関するガイダンスも提供しており、これにはハリケーンおよび洪水に関する対応手順も含まれている [72, pp. 172-177]。

199. CCPSは、施設が氾濫原内に位置している場合、洪水の可能性がある場合、または過去に洪水があった場合には、企業が洪水対応手順を策定することを推奨している [72, p. 177]。CCPSは企業に対し、洪水の予測水位の考察に資する、利用可能な洪水調査情報を求めるよう指摘し

ている [72, p. 177]。

6.3. 連邦緊急事態管理庁

200. 連邦緊急事態管理庁（FEMA : Federal Emergency Management Agency）は、アルケマ・クロスビー施設のような重要施設における非常用電源システム（および電力供給先の機器）を、予測される最大の洪水標高に対して保護することを推奨している。具体的には、以下のいずれかの基準を満たすことが求められる [73, pp. 6-12]。

- 基準洪水標高+2フィート
- 地方自治体が採用した設計洪水標高+1フィート
- 500年洪水標高+1フィート [73, pp. 6-12]

201. 前述のとおり、ハリケーン・ハービーの際の水位は、基準洪水標高を2フィート以上上回っていた。この水位を考慮すると、FEMAのガイダンスのみでは、低温倉庫およびバックアップシステムを十分に保護するには不十分であった。

6.4. 米国環境保護庁の施設設計基準

202. 米国環境保護庁（EPA : Environmental Protection Agency）は、異常気象に対する建物のレジリエンスを強化するために、施設設計基準を策定している [74]。EPAは、洪水ハザード区域にある重要な建物については、100年洪水標高より3フィート高い位置に建設することを推奨している [74]。

203. もしアルケマがこのガイダンスをハリケーン・ハービー前に適用していた場合、事故を防ぐことができた可能性がある。しかし、このEPAの基準はEPAの対象となる建物に対する指針であり、一般的な業界ガイダンスとして意図されたものではない。

6.5. FM Global

204. FM Globalは、企業向けに洪水対策のガイダンスを提供するために『洪水緊急対応計画の策定（Creating a Flood Emergency Response Plan）』を発行している [75]。FM Globalは、洪水に備えておくことで、洪水被害や事業中断を軽減できると確信している [75, p. 1]。また、成功の要因は、洪水発生前に十分な時間をかけて洪水対策計画を策定することにあると考えている [75, p. 1]。

205. 安全性を高めることに加え、洪水への備えは適切な経営判断でもある。FM Globalの損害履歴によると、「適切に整備された洪水緊急対応計画を持つ施設は、計画がない、または計画が不十分な施設と比較して、被害額が約70%少なく、事業の再開も早い」と報告されている [75, p. 1]。

206. FM Globalの洪水対策ガイダンスでは、重要設備の高所設置が洪水リスク軽減の重要な施策であるとされている。重要設備を高所に移設することは、洪水発生時の人的介入の必要性を低減し、重要かつ恒久的なリスク軽減につながるからである [75, p. 1]。

207. FM Globalは、洪水対策の一環として以下の行動を取ることを推奨している。

- 洪水リスクを評価し、潜在的な被害を把握する
- 信頼性の高い洪水警報システムを導入する
- 洪水警報の発令時間と対応時間のバランスを取る（洪水対応行動を開始するのに利用可能な時間と、スタッフがその行動をとるのに必要な時間とのバランスをとる）。

- 重要設備を高所に移設する、恒久的な防水壁を設置するなど、洪水リスクを恒久的に低減する施策を特定し、導入する
- 一時的な防水壁の設置、重要在庫の移動、高価な移動式機器の移設など、効果的な緊急対応策を確立する
- 文書化された洪水対策計画を作成し、その使用方法について従業員訓練を実施し、定期的に計画全体のシミュレーションを行う [75, p. 2]

208. FM Globalのガイダンスでは、効果的な洪水計画の他の要素として以下を挙げている [75, pp. 2-3]。

- 計画の発動、生産資源の再配置、運転の停止の権限を持つ責任者の明確化
- 電気設備の安全な停止・隔離、重要な資材や設備の高所設置・移設手順の文書化
- 主要な建物や区域への浸水を防ぐための信頼性の高い手段・方法の確立
- 洪水が長期化した場合に従業員やその家族を支援するための方策
- 洪水の影響を受けにくい地域に住む従業員に対して特に依頼する体制の構築
- 設備、人員、事業活動の変化に応じた洪水計画の定期的な見直しと更新

209. FM Globalのガイダンスは一般的な内容であり、アルケマがクロスビー施設の事故を防ぐために効果的に活用することは困難であった。

6.6. 英国環境庁

210. 英国では、環境庁が『洪水への備え – EPRおよびCOMAHに基づく規制対象施設向けガイド (Preparing for Flooding – A guide for sites regulated under EPR and COMAH)』を公表し、規制対象施設が洪水対策計画を策定し、環境許認可および関連規制を遵守するための支援を行っている [76]^a ^b。英国では、ハリス郡と同様に洪水が頻繁に発生する。環境庁の洪水対策ガイダンスでは、規制対象の企業に対し以下の措置を講じるよう推奨している。

- 自社の施設が洪水リスクのある地域に位置しているかどうかを確認する。
- 洪水の発生が差し迫っているかどうかを把握する。
- 洪水警報の仕組みを理解する。
- 敷地の地形情報を入手し、より詳細な洪水シミュレーションを実施する。
- 洪水対応計画を策定する。
- 以下の方法により、施設の洪水レジリエンスを向上させる。
 - a. 洪水から業務を保護するための対策を講じる。
 - b. 洪水を阻止する、遅らせる、またはそらすため、以下を含む防護措置を適用する。
 - i. 排水システムの余剰容量を確保する

^a EPRは、イングランドおよびウェールズにおける[環境許認可規則 \(Environmental Permitting Regulations\)](#)の略称である [147]。COMAHは、英国の化学産業に適用される[重大災害ハザード規制 \(Control of Major Accident Hazards\)](#)を指す [242]。[健康安全局 \(HSE: Health and Safety Executive\)](#)、[環境庁 \(EA: Environment Agency\)](#)、および[スコットランド環境保護庁 \(SEPA: Scottish Environmental Protection Agency\)](#)は、それぞれこれらの規則の施行を担当する英国の所轄官庁である [148], [149], [150]。

^b 環境庁は、企業向けに洪水対策の一般的な手引書として『[Would your business stay afloat? \(あなたのビジネスは洪水に備えられるか?\)](#)』も発行している [219]。

- ii. 調整池などの排水技術を活用する
 - iii. 地面を高くするか、高台を設ける
 - iv. 排水および洪水管理システムの維持管理を適切に行う [76]
211. 化学製品倉庫について、環境庁は、洪水の影響を受けやすい製品（有機過酸化化物など）を、予測される洪水標高より高い場所に移動させることを推奨している。また、環境庁は、取り外し可能な防水壁などの洪水対策を採用することを企業に推奨している。さらに、環境庁は、洪水対策製品の選択肢や供給業者の情報を掲載したウェブサイトを企業に案内している [76, pp. 1-4]。
212. 環境庁のガイダンスは、洪水対策計画は施設の事故対応計画や緊急対応計画の一部として策定すべきであると記している [76, p. 2]。また、適切な洪水計画には、作業員の安全確保、危険なプロセスの安全措置、資材の安全確保を含めるべきであると推奨している [76, p. 2]。さらに、企業は洪水発生までの時間内に計画を確実に実行できるように準備しておく必要がある [76, p. 2]。
213. 環境庁の洪水計画ガイダンスは、企業に対し、洪水警報が発令されても対応時間が限られる可能性があること、またすべての洪水対策が機能するとは限らないことを認識し考慮するよう警告している [76, p. 2]。
214. 環境庁の洪水計画ガイダンスでは、「効果的な計画は、その工場の設備および運転方法に特有の洪水リスクの十分な理解に基づくべきである」と述べている [76, p.3]。また、特に重大災害ハザード規制（COMAH：Control of Major Accident Hazards）規制の対象となる施設では、洪水ハザード・オペラビリティ（Hazop）分析を実施することを推奨している [76, p. 3]。
215. アルケマ・クロスビー事故との関連性がある点として、環境庁の洪水対策ガイダンスでは、電力や液体窒素などの主要なユーティリティについて具体的に言及している。洪水対策ガイダンスは、次のように述べている。
- 電力（施設内の変圧器や変電所を含む）、ガス、蒸気、加熱装置、冷却装置、水供給システムを、予測される洪水標高より高い位置に配置するか、洪水耐性を持たせるか、洪水発生前に安全に隔離または遮断できるようにすべきである。ユーティリティの喪失は長期間に及ぶ可能性があるため、重要設備のバックアップシステムの導入を検討すべきである。
216. また、アルケマ・クロスビー事故に関連する点として、環境庁の洪水対策ガイダンスでは、倉庫内の影響を受けやすい製品を、予測される洪水標高より高い位置に移動することを推奨している [76, p. 4]。
217. 環境庁のガイダンスでは、企業が洪水対策計画を策定する際に以下の要因を考慮することを推奨している。
- 洪水で設備が浸水することによって生じるハザード
 - 電力供給などのユーティリティの短期的および長期的な喪失
 - 重要な安全装置の喪失
 - ハードウェア、操作手順、技能、および訓練を考慮に入れた手動操作の実施能力
 - 運転を安全に停止し、要員を移動させ、化学物質を安全な状態とするために必要な時間 [76, p.3]。

218. 環境庁の洪水計画ガイダンスは、適切な行動や必要な情報の特定を含め、洪水が予測された場合に行動を起こすことの重要性を強調している。環境庁は、優れた洪水計画には以下の構成要素が含まれるとしている。

- 訓練を受けた作業員への洪水対応業務の割り当て
- 洪水警報、天気予報、洪水標高の情報源の特定
- 運転の停止、設備の隔離、作業員の避難など、事前に決めておいた対応を開始するための「トリガーポイント」の設定（降水量、河川水位、洪水警報など）
- 運用方法も含めた、洪水防御設備の設計詳細
- 緊急対応に必要な資源（ポンプ、発電機、清掃用機材など）の供給元の連絡先と契約状況
- 洪水後の対応（排水作業、工場や設備の健全性の確認、実地棚卸のチェックによる汚染物質・危険物・放射性物質の紛失確認を含む。） [76, p. 3]

219. また、環境庁の洪水計画ガイダンスでは、異常気象時の限られた時間や少ない資源を考慮した上で、職員がその責任遂行に備え、必要な行動が実際に行えるようにするため、定期的な訓練の実施と見直しを推奨している [76, p.3]。

6.7. 英国化学工業協会

220. 英国の化学業界団体である化学工業協会（CIA：Chemical Industries Association）^aは、その報告書『気候変動の中で化学事業を防御する - 気候変動適応計画の立て方（Safeguarding Chemical Businesses in a Changing Climate – How to Prepare a Climate Change Adaptation Plan）』の中で、気候変動によって英国の化学施設は、激しい降雨により頻繁かつ深刻な洪水のリスクが増加する状況に直面する可能性があることを認めている [77, p. 4]^b。

221. この報告書では、異常気象に備えることは、気象リスクが増大する中で事業継続を可能にする観点からも有益であると述べられている [77, p. 7]。米国の気象現象と同様に、洪水は英国で最も頻繁に発生する自然災害である [77, p. 7]。しかし、米国とは異なり、英国では、環境保護システムの一環として、洪水に対する備えを特に化学施設に義務付けている [77, p.7]。

222. 洪水リスク評価の初期段階として、化学工業協会は、企業に対して以下の質問に対する検討を行うことを推奨している。

- 施設は洪水の影響を受けやすいか？
- 施設は過去に洪水の被害を受けたことがあるか？
- 気候変動は将来の洪水リスクに影響を与えるか？ [77, p. 7]

223. この報告書は、3つの施設に影響を与えた2013年の洪水事象をレビューしている。この事象から得られた主な教訓として、洪水防御対策は機能しない可能性もあることを認識した上で、洪水対策計画を策定することが不可欠であるという点が挙げられる [77, pp. 12-13]。

^a [化学工業協会 \(Chemical Industries Association\)](#) [192]。英国・化学工業協会は、健康、安全、環境、セキュリティの問題を網羅するレスポンシブル・ケア・プログラムを英国で実施している [77, p. 10]。米国では、米国化学工業協会（ACC：American Chemistry Council）が、アルケマ [232] などの会員企業にレスポンシブル・ケア [233] の遵守を求めている。

^b 本報告書は、[化学ビジネス協会 \(CBA：Chemical Business Association\)](#) [193]、[化学工業協会 \(CIA\)](#) [192]、[非鉄アライアンス \(Non-Ferrous Alliance\)](#) [194]、および[英国環境庁の気候対応支援サービス \(Climate Ready Support Service\)](#) [196]のパートナーシップによって作成された [77]。注：[環境庁は2016年3月に気候変動対応プログラムを終了した](#) [195]。

6.8. 国連防災機関

224. 2015年3月、国際連合（UN）は、既存のリスクを軽減し、自然災害および人為的災害に対するレジリエンス^aを強化するため、世界的な災害リスク管理に関する文書を発表した [78]。

225. 結論の一つとして、国連は次のように述べている。

（2005年から2015年の間）、災害は引き続き甚大な被害をもたらし、その結果、人々、地域社会、さらには国家全体の福祉と安全に影響を及ぼしてきた。災害によって70万人以上が命を落とし、140万人以上が負傷し、約2,300万人が家を失った。全体として、15億人以上が何らかの形で災害の影響を受け、その中でも特に女性、子供、弱い立場にある人々がより不当な影響を受けている。経済的損失の総額は1兆4,000億ドル以上であった。さらに、2008年から2012年の間に、災害によって1億4,400万人が避難を余儀なくされた [78, p. 10]。

人、地域社会、国、そしてその暮らし、健康、文化、遺産、社会経済的資産、そして生態系をより効果的に守り、レジリエンスを強化するためには、災害リスクを事前に予測し、計画し、軽減することが緊急かつ重要である。

226. 国連報告書では、災害リスク要因には地域的、国家的、または世界的な範囲のものがあるが、地域特有のリスクを理解することが災害リスク軽減には不可欠であると指摘している [78, p. 13]。また、発生前に災害リスクを軽減する方が、発生後の対応や復旧に頼るよりも費用対効果が高いとも指摘している [78, p. 13]。災害発生前にリスクを軽減するには、関連データの収集と分析が不可欠であり、リスクマップを含むこれらのデータは、適切な意思決定者、一般市民、および災害にさらされる地域社会に対して共有されるべきである [78, p. 15]。災害リスクを評価するため、基準（ベースライン）を定期的に見直すべきである [78, p. 14]。報告書は、災害後の復興においては、「より良い復興」を行い、災害リスク教育と意識向上によって、将来の災害リスクを軽減することが重要であると指摘している [78, p. 14]。

227. 国連は、地方政府および国家政府に対し、災害の発生を予防し、既存のリスクを軽減し、レジリエンスを強化することを目的としたリスク軽減戦略と計画を採用することを推奨している [78, p. 16]。政府においても、既存の規制を遵守させるための仕組みやインセンティブの確立を「促進」とともに、災害リスク管理に十分重点を置くように規制を更新すべきである [78, p. 17]。

228. ただし、この国連文書はあくまで一般的なガイダンスを提供するものであり、ハリケーン・ハービーの襲来前にアルケマが適用すれば事故を防げたと思われるような具体的な規定は含まれていなかった。

^a 国連はレジリエンス（resilience）を、「システム、コミュニティ、社会が危険にさらされたとき、その影響に適時かつ効率的に抵抗、吸収、適応、転換、回復する能力であり、リスク管理を通じた基本的な構造や機能の維持および回復が含まれる。[220]」と定義している。

7. 規制の分析

7.1. 洪水ハザード

229. 前節で述べたように、アルケマのような企業が異常気象に備える際に役立つ、産業界で利用可能な確固とした洪水リスクガイダンスは存在しないに等しい。CCPSに対するCSBの勧告は、このギャップを埋めることを目的としている。

7.1.1. 米国のアプローチ

230. 既存の業界ガイダンスにおける弱点と同様に、連邦安全規制においても、企業が洪水などの異常気象をどのように評価し、対応すべきかに関する具体的な要件や詳細なガイダンスが不足している。

7.1.1.1. OSHAのプロセス安全管理基準

231. アルケマは、クロスビー施設における有機過酸化物の製造プロセスは、OSHAのプロセス安全管理（PSM：Process Safety Management）基準^aの適用対象であると見なしている。これは、施設内で使用または保管されている化学物質の量によるものである^b。さらに、アルケマは、有機過酸化物を保管する建物のうち1棟が、OSHAのPSM基準の適用対象であると認識している。7棟の低温倉庫については、PSM基準の適用対象とは考えていなかった。ただし、アルケマは「ベストプラクティス」として、PSMプログラムを施設全体に適用していた。
232. 1990年の大気浄化法改正により、OSHAにはPSM基準の公布が義務付けられ、同時にEPAにはリスク管理計画（Risk Management Plan）規制の策定が義務付けられた [79]。OSHAが導入したPSM基準の主な目的は、規制対象の化学物質を一定量以上保管する施設において、高度に危険な物質の意図しない放出を防止することである。特に、作業員が当該化学物質による重大な危険にさらされる可能性がある施設の安全性を確保することに重点を置いている。PSMは、14の要素を通じて、プロセス安全を体系的に管理することを目的としている [79]^c。PSMは、化学プロセス全体の安全性を確保するための基本的な原則に基づいており、これらは規制要件として正式に定められている。具体的には、プロセスハザード分析の実施、適切な運転手順の確立、従業員の十分な訓練と関与の確保、プロセス設備の機械的健全性の維持、そして意図しない流出事故発生時に備えた十分な緊急対応計画の確保などが求められる^d。
233. OSHAは、PSM基準の長所はそのパフォーマンスベースの性質にあると考えている [80]。具体的には、PSM基準自体に明記されていなくても、OSHAのガイダンスを通じてプロセス安全情報の多くの例を提供していると主張している [80]。さらに、洪水に関連する文書（FEMAの洪水地図や洪水保険調査など）はPSM基準にプロセス安全情報として明示的に示されていないが、OSHAは、洪水リスクのある施設ではこれらの情報をプロセス安全情報とみなすことができるとし、それにより管理変更レビューの必要性を促すことができると述べている [80]。また、PSM基準では、施設の立地要件が明確に定義されていない。しかし、OSHAは、これは企業が洪水リスクや洪水ハザードを施設立地のレビューで考慮する必要がないことを意味するわけではないと主張している [80]。しかしながら、PSM基準には、企業が洪水保険

^a [29 C.F.R. §1910.119](#)

^b PSM基準は、化学組成と量（付録Aに記載）、または引火特性（引火点が100°F未満）のいずれかにより危険とみなされた化学薬品を対象としている。アルケマ・クロスビー施設には、PSM対象（十分な量の）化学薬品があった。これらは、付録Aに記載された化学物質または引火点が100°F未満の化学物質である。

^c [29 C.F.R. §1910.119](#)

^d [29 C.F.R. §1910.119](#)

料率地図や関連調査をプロセス安全情報として考慮することを義務付ける明示的な規制要件は含まれていない。また、洪水リスクや洪水ハザードをPHA（プロセスハザード分析）や施設立地レビューで考慮することも含まれていない。さらに、CSBの調査では、洪水リスクや洪水ハザードに関する最新で適用可能なOSHAのガイダンスは確認できなかった。

234. OSHAが業界向けに提供するPSMガイダンスでは、PHAは「プロセスに影響を及ぼす可能性のある外部要因」を分析すべきであると述べている [81]。企業がPHAの中で洪水リスクを外部要因として分析することは可能であるが、この限定的なガイダンスでは、洪水や洪水リスクについての具体的な議論や評価をPHAチームに促すには不十分であろう。

7.1.1.2. EPAリスク管理プログラム

235. アルケマは、クロスビー施設においては、二酸化硫黄とイソブチレンの2種類の化学物質が、EPAのリスク管理計画（RMP : Risk Management Plan）規則^aの適用対象であると認識している。しかし、低温倉庫はRMP規則の適用対象外であると考えている。アルケマ・クロスビー施設は、2014年に最新のRMPをEPAに提出した。
236. EPAのRMP規則は、化学事故の防止を目的として策定された。この規則では、施設に対し、化学物質流出のワーストケースの潜在的影響だけでなく、より発生の可能性が高い、一般市民にも影響を与えるシナリオについても評価することを求めている。この規則では、施設の種類に応じて、対象プロセスの潜在的ハザードの分析、従業員の訓練の実施、運転手順の文書化、対象プロセスの機械的健全性の維持、事故流出等の事象の調査、および事故防止プログラムの定期的な再評価を、施設に対して義務付けている^b。また、施設は、事故発生時に取るべき手順について緊急対応要員と調整し、施設のRMPにすべての遵守手順をまとめなければならない。RMP規則はまた、施設の所有者および運営者が、規制対象物質を一定量以上保管している場合、政府に登録し、一定の情報を提供することを義務付けている。特に、企業は、規制対象物質の事故流出が周辺環境に与える影響について、ワーストケースを想定して分析した結果を提出しなければならない。企業はまた、施設内の化学物質の性質と影響範囲に関する詳細データ、事故履歴データ、当該化学物質の流出を防ぐための適切な企業プログラム、事故流出時の緊急対応情報など、多くのデータを文書化しなければならない^d。
237. EPAがRMP規則を制定した際、PHAの要件は、OSHAのPSM規則と整合性を持たせることを意図していた。1996年の新たなRMP規則に関するコメントへの対応としてEPAは、RMPのPHA要件に関する以下のガイダンスを提供した。「通常、適切に実施されたPHAにおいては、地震、洪水、強風などの外的要因による損傷に対する脆弱性を検討し、これらの事象によってプロセスの健全性が損なわれた場合の潜在的な影響を評価する。[82]」。また、EPAの一般RMPガイダンスでは、Program 2^e に該当する施設向けに考慮すべき事項として、「内部故障

^a [40 C.F.R. §§68.150-68.195.](#)

^b [40 C.F.R. Part 68.](#)

^c [40 C.F.R. Part 68.](#)

^d [40 C.F.R. §§68.150-68.195.](#)

^e RMP規則に基づき、アルケマはProgram 3施設に分類される。RMP規則において、Program 2施設とは、Program 1およびProgram 3施設の適格要件を満たさない施設を指す。（[40 C.F.R. § 68.10\(c\)](#)）。Program 1施設とは、次の要件をすべて満たす施設を指す。「(1) RMP提出前の5年間において、規制物質の偶発的な放出により、当該物質、その反応生成物、当該物質に関係する爆発により発生した過圧、または当該物質に関係する火災により発生した輻射熱に暴露したことにより、施設外で(i)死亡、(ii)負傷、または(iii)環境受容体の暴露に対する対応または修復活動のいずれかに至った事故がなかった。(2) サブパートBおよび§68.25に基づいて行われたワーストケースの流出事故評価における有毒物質または可燃性物質のエンドポイントまでの距離が、§68.30で定義されるいかなる公共受容体までの距離よりも短い。(3) 発生源となる定置型施設、地域の緊急計画、対応機関の間で緊急対応手順が調整されている。」（[40 C.F.R. § 68.10\(b\)](#)）。Program 3施設とは、次のいずれかの要件を満たす施設である。「対象となるプロセスは、本節の(b)項の

だけでなく、合理的に予測される外的要因。地震、ハリケーン、洪水の影響を受けやすい地域にある場合、規制対象物質を流出させることなく当該プロセスがこれらの自然災害に耐えられるかを検討する必要がある。」 [83, pp. 6: 10-11]」とも記している。

238. EPAは、規制間の矛盾を避けるため、次のようにコメントしている。「OSHA PSMとの整合性を確保するため、EPAは、PHAに関するOSHAの文言を採用した。そのため、EPAは、外的要因の考慮に関する文言を本規則に追加していない。しかしEPAは、適切なリスク管理プログラムにおいて、発生源として外的要因によって生じるハザードを考慮しなければならないことを認めている。適切に実施されたPHAでは、通常、プロセスが地震、洪水、強風などの外的要因による損傷を受けやすいかどうかを考慮し、これらの事象によってプロセスの健全性が損なわれた場合の潜在的な影響を評価するべきである。（1996 RMP RTC, 9-23） [82, 84]。」。
239. EPAは、次のようにも説明している。「内部故障だけでなく、合理的に予測される外的要因も考慮すべきである。地震、ハリケーン、洪水の影響を受けやすい地域にある場合、プロセスが規制対象物質を放出せずにこれらの自然災害に耐えられるかどうかを検討する必要がある（RMP一般ガイダンス、6-10～6-11ページ [83, 84]）」。
240. EPAはまた、企業のプロセスを検討する際、「考慮すべき事項は、化学物質やプロセスに依存し、本質的に施設ごとに異なる。そのため、規制は、各施設が当該ハザードに適切に対処できるよう、独自の措置を決定することを求めている。その際、業界のコンセンサス規範や基準のような、業界のグッドプラクティスや、広く認められ一般的に受け入れられているエンジニアリングに関するグッドプラクティス（RAGAGEP: recognized and generally accepted good engineering practices）を活用する必要がある [84]」。しかし、前述のとおり、業界のコンセンサス規範や基準には、洪水リスクに関して効果的なガイダンスが十分に整備されていない。したがって、限られたOSHAガイダンスや不十分な業界基準に依存したり、業界基準が存在しない状況の中で、EPAの本来の意図を満たすためには、OSHAのガイダンスの不備を補う新たなガイダンスが必要である。
241. 連邦政府の安全要求事項には、両方の規制枠組みにおいて、指定された危険物質を対象とする規定が存在し、また、現行の規制構造内で洪水リスクを分析する潜在性があるにもかかわらず、PSM基準およびRMP規則のいずれの規定においても、プロセス安全と関連付けた洪水リスクの評価を明確かつ具体的に義務付ける規制要件は存在しない。

7.1.2. 欧州連合（EU）のアプローチ

242. 米国のアプローチとは対照的に、欧州連合（EU）では、主要な化学事故リスクは「セベソ指令」によって規制されている。この指令は、特定の危険物質を使用、取扱い、または保管する産業活動に適用される [85, p. 53]。セベソ指令では、大量の危険化学物質を製造または保管する一部の施設に対し、安全報告書の作成を義務付けている。この報告書では、施設が重大事故防止方針を有していること、事故シナリオが特定されリスクが軽減されていること、を説明する必要がある [85, p. 53]。また、セベソ指令では、施設が工場の地理的要因によって増大するリスクにも適切に対応することを求めている。したがって、アルケマ・クロスビー施

要件を満たさない場合、かつ以下のいずれかの条件を満たす場合にProgram 3に分類される：(1) プロセスがNAICSコード32211、32411、32511、325181、325188、325192、325199、325211、325311、または32532のいずれかに該当する、または(2) プロセスがOSHAのプロセス安全管理基準（29 C.F.R. §1910.119）の適用対象である。(e) いずれかの時点で、対象プロセスがそのProgramレベルの適格基準を満たさなくなった場合、所有者または運営者は、新たに適用されるProgramレベルの要件を遵守し、§68.190に従ってRMPを更新しなければならない。(f) 本パートの規定は、40 C.F.R. 55.2で定義される外大陸棚（OCS：Outer Continental Shelf）の発生源施設には適用されない」（40 C.F.R. §68.10(d)）。

設のような有機過酸化物を製造する施設がEU内に所在し、セベソ指令の適用対象となる場合、同指令の下で作成が義務付けられる安全報告書には、ハリケーンによる洪水リスクも含める必要があった。

243. EUは、過去の事故を踏まえ、2012年にセベソ指令を改正し、異常気象リスクへの対応を強化した。セベソ指令は現在、洪水や地震などの自然災害について、企業が安全報告書で定期的に特定・評価することを義務付けている [85, p. 54]。

7.2. 反応性ハザード

244. 2017年8月にアルケマ・クロスビー施設で発生した事故は、反応性事故であった。反応性事故とは、制御不能な化学反応に伴う突発的な事象であり、温度や圧力の著しい上昇、または大量のガス発生を伴い、人、財産、または環境に深刻な危害をもたらす潜在性がある [86, p. 103]。CSBは、2002年9月、重大ハザード調査を完了し、『反応性ハザード管理の改善 (Improving Reactive Hazard Management)』という報告書を発表した [86]。CSBは、反応性事故を防止するには、良好な反応性ハザードの管理が必要であると結論づけた [86], [87, p. 4]。

245. 『反応性ハザード管理の改善』において、CSBは次のように記している。

対象物質リストを作成する際、EPAは、化学物質が暴露によって深刻な脅威をもたらすかどうかのみを考慮した。毒性と可燃性に関しては明確な基準が用いられた。しかし、現場特有の要因やプロセス条件は複雑であるため、EPAは反応性の指標となる固有の特性を決定することができなかった。EPAは、当時、「反応性物質を特定するための基準策定に十分な技術情報がなかった」と結論づけた。その結果、1994年1月のRMPの130の規制対象化学物質リストには、反応性ハザードに基づいてリストアップされた物質は含まれていない [86, p.60]。

246. CSBが2002年に行った『反応性ハザード管理の改善』調査では、「過去の事故の半数以上は、(有機過酸化物と同様に) OSHAとEPAのプロセス安全規則から除外されている化学物質が関与していた」ことが判明した^a。そこで同調査は、「EPAの事故流出防止規則 (40 CFR 68) は、反応性ハザードの適用範囲に重大な欠陥がある [86, p.87]」と結論づけた。

247. その結果、CSBはEPAに対し、反応性物質の適用範囲と規制を拡大するための勧告 (勧告番号2001-1-H-R3) を行った。この勧告には次のように記されている。「事故流出防止要件 (40 CFR 68) を改定し、自己反応性化学物質や化学物質の組み合わせ、プロセス固有の条件によって引き起こされるものを含め、一般市民に深刻な影響を及ぼす可能性のある壊滅的な反応性ハザードを明確に規制対象に指定すること。本報告書に示した、反応性ハザードの適用範囲に関するOSHAへの勧告を考慮すること。規制改正に必要であれば、議会権限を求めると [86]」。

248. しかし、EPAはCSBの勧告通りの対応を行わなかった。その代わりにEPAは、2003年の円卓会議への参加、反応性物質データ収集の改善を目的とした事故報告システムの改定、CCPSとの協力の下での化学反応性ハザード管理に関する出版物の発行 (2003年)、反応性物質に関する2つの安全警告の公表 (2004年および2005年) など、反応性ハザード管理の強化に役立つと考えられる他の多くの措置を講じた。EPAはまた、大気浄化法の一般義務条項に基づく権限を引き続き行使し、「極めて危険な物質」の製造、加工、取扱い、貯蔵を行う施設にRMP要件を適用するとCSBに通知した。しかし、CSBは、これらの代替措置は不十分であり、勧告

^a これらの事故に関与した特定の化学物質がOSHAやEPAの規則の直接的な規制対象とはなっていなかった場合でも、同じプロセス内で使用される他の化学物質が対象となれば、全体として連邦安全規制の対象となった可能性がある。

2001-1-H-R3で提案された規制の変更が引き続き必要であると考え、この勧告を「未対応 – 不適切な対応 [88]」に指定した。CSBは現在、事故防止に向け、EPAに対してこの勧告の再提示を行っている。何よりもまず、CSBは、反応性化学物質は当初勧告された方法でRMPの対象とすべきであると引き続き考えている。第二に、アルケマの事故にとってより重要なことであるが、もし反応性化学物質がRMPの対象であり、アルケマがRMPの要件に従って、必要な施設外の影響分析（ワーストケースと代替シナリオの両方）を実施していたならば、同社はクロスビー施設現場の洪水脆弱性に関連するハザードを特定し、より高いレベルのリスクベース思考プロセスを通じて、施設内に保管されていた有機過酸化物に対し、引き続き起こりうる脅威を特定できたかもしれない。

8. 企業が自社施設の洪水リスクを評価する方法

249. OSHA、EPA、または既存の化学産業規格において洪水リスクに関するガイダンスが不足していることを踏まえると、企業は自社施設の洪水リスクを評価するための適切な手法を確立できていないかもしれない。
250. 本件の事故を受け、アルケマはクロスビー施設の敷地高調査を実施し、施設内の関連地点の標高を把握するとともに、ハリケーンなどの異常気象時に起こりうる洪水状況を評価するための水文学的調査を委託した。アルケマはこれらのデータを活用し、さまざまな深刻度の洪水に対するリスクを評価することで、今後の冷却システムの喪失による有機過酸化物製品の分解に備えた対策を講じることができる。
251. 2007年、FEMAはアルケマ・クロスビー施設が含まれる地域の洪水関連文書を更新した。FEMAは、有機過酸化物を保管する低温倉庫が所在する地域の洪水指定地図を変更し、当該倉庫を500年洪水区域から除外し、100年洪水区域に再分類した。また、FEMAは基準洪水標高を52フィートと定めた。しかし、アルケマは、この新たな情報をプロセス安全管理システムに反映せず、洪水リスクの再評価を行わなかった。
252. プロセス安全情報とは、企業が施設のプロセス安全上のハザードを特定し理解するために必要なすべての情報を広義に表現したものである^a。OSHAは最低限のプロセス安全情報要件として「適用する設計コードおよび基準」などを含むデータを定めているが、FEMAの洪水地図や洪水保険調査をプロセス安全情報として明確に特定してはいない^b。さらに、洪水リスクの考慮をも含むと読み取れるような、プロセス安全情報に関する他の小見出しは見られない。にもかかわらず、OSHAは、洪水リスクのある施設においては、FEMAの洪水地図や洪水保険調査を必要なプロセス安全情報と見なすことができるという立場を取っている [80]。
253. 企業が洪水地図や洪水保険調査をプロセス安全情報と見なさない場合、これらの文書はプロセスハザード分析や施設立地レビューの際に考慮から外れるかもしれない。また、洪水関連の重要な情報文書が更新されても、企業は変更管理レビューの必要性を認識しないかもしれない。その結果、企業のプロセス安全管理システムにおいて、重要な洪水リスク情報が見落とされるリスクがある。実際、本件において、アルケマがプロセス安全情報の収集に使用したチェックリストには、洪水地図や洪水保険調査が考慮されていなかった。
254. 施設立地レビューの際に洪水リスクを評価することは、企業がプロセス安全ハザードを引き起こす可能性のある洪水リスクを評価する上で有効なアプローチの一つとなる。OSHAのPSM基準またはEPAのRMP規則の適用対象となる化学製造施設は、プロセス安全管理システム内のプロセスハザード分析項目の一つとして、施設立地の評価を実施することが求められている^c。
255. しかし、OSHAおよびEPAのいずれの規制機関も、企業が施設立地ハザードを評価する際に網羅すべき具体的な要件を定義していない。そのため、CSBの調査では、企業の施設立地レビューにおいて洪水リスク評価を求める既存の要件を特定することはできず、また、クロスビー施設においては、洪水リスク評価が文書化されていた形跡はなかった。OSHAの見解は、PSM基準では施設の立地要件が明確に定義されていないが、それは企業が洪水リスクや洪水ハザードを施設立地のレビューで考慮する必要がないことを意味するわけではない、というものだ [80]。

^a [29 C.F.R. §1910.119\(d\)](#)

^b [29 C.F.R. §1910.119\(d\)](#)

^c [29 C.F.R. §1910.119](#)および[40 C.F.R. §§68.150-68.195](#)

256. 業界の施設立地ガイダンスは、一般に、プロセスプラント近隣の建物に居る人々を脅かす可能性のある爆発、火災、有毒化学物質の流出のハザードの評価と管理に重点を置いている [89]。ここに焦点が当てられている理由は、2005年にテキサス州テキサスシティーのBP社の製油所で発生した爆発事故などの事故に端を発している。この事故では、異性化装置の近くに置かれていたトレーラー付近にいた15名の作業員が死亡した [90]。CSBがBPテキサスシティー事故に関する調査結果を発表したことを受け、米国石油協会（API：American Petroleum Institute）や化学プロセス安全センター（CCPS）などの業界団体は、施設立地ハザードを評価するためのガイダンス文書を作成した [89]。
257. API推奨規格752（API RP 752）『プロセスプラントの常設建造物の立地に関連するハザード管理（Management of Hazards Associated with Location of Process Plant Permanent Buildings）』は、2009年に関連部分が更新され、OSHAのPSM基準の適用対象となる施設を運営する企業に対して、新規または既存の施設内の作業員を爆発、火災、有毒物質の流出から保護するためのリスク管理に関する追加ガイダンスを提供している [91, p. 1]。API RP 752では、新規および既存の建物の立地評価を行うための体系的なプロセスが示されている [91, p. 5]。しかし、API RP 752では、有機過酸化製品を保管するアルケマの低温倉庫のような貯蔵施設は対象から除外されている。これは、倉庫は主に物質を保管するためのものであり、作業員が常駐する建物ではないためである [91, p. 5]。
258. CCPSは、その書籍『ハザード評価手順ガイドライン（Guidelines for Hazard Evaluation Procedures）』の中で、施設の立地について以下の3つの重複する側面を挙げている。
- 周辺環境に対する施設の位置
 - 施設のレイアウトと設備および建物の配置間隔
 - 居住建築物における人員の保護 [92, p. 288]。
259. 『ハザード評価手順ガイドライン』では、洪水ハザードの評価を排除してはいないものの、企業が洪水リスクを評価する方法についての具体的なガイダンスは提供されていない [92]。ただし、CCPSは、図で表した仮想的な施設を用いて概念的に施設ハザード分析を説明している。施設の近くに河川があるという前提の下で、ハザードレビューチームが洪水発生によって引き起こされるであろう施設への損傷を、洪水リスクへの質疑を通して検討するものである [92, pp. 330-336]。
260. CCPSのガイドラインでは、異常気象の重要性について次のように説明している。
- フェンスラインの外で発生した原因事象については、しばしば後付けのように議論される。洪水、停電、強風、地盤変動、その他の自然の力は、発生時期や規模を正確に予測することは困難であるが、プロセスへの影響はある程度予測可能である。このような予測可能な影響に対しては、適切な対策を講じることで、人々、財産、および環境を保護することが可能である。 [92, p. 202]
261. CCPSは、『施設立地およびレイアウトのガイドライン（Guidelines for Facility Siting and Layout）』の中で、多くの州や地区が、洪水による損害を最小限に抑えるためにゾーニング規制を導入していることに言及している [93, p.32]。これらの規制は、企業が洪水の発生しやすい地域に施設を建設することを制限するかもしれないし、特定の標高における設備の設置を制約するかもしれない [93, p. 32]。CCPSは、企業が新たな用地を選択する際に確認・検討すべき洪水情報として、以下を特定した。
- 過去の洪水履歴情報（発生日時、総降水量、洪水深度を含む）の取得

- 当該地域の洪水管理組織の有無の確認、および洪水管理設備の運用・維持管理責任者の特定
 - 当該地域の洪水モデルの開発状況の確認 [93, p. 157]
262. 施設立地^aに関連するハザードを評価するために、アルケマの技術的PHAチームメンバー（少なくとも1名のオペレーターを含む）が、「流出により職場や地域社会の人々に影響を与える化学物質の種類と規模を定性的に特定する」ための施設立地のチェックリストをレビューした。しかし、このチェックリストには、洪水や洪水リスクに関して気づきを与える項目は一切含まれていなかった。
263. 企業は、PHAプロセスを施設の洪水リスクを評価するための適切な手段と考えることもあるが、実際には、PHAチームに洪水リスクの専門知識を有するメンバーが含まれていないことが多い。土木技術者は、洪水リスクに関する高度な専門知識を有する専門家グループの一つに相当するため、洪水リスクの特定と評価を行うチームには土木技術者を加えることが望ましい [94]。
264. 業界ガイダンスには潜在的な洪水リスクの評価を含めるべきであり、PHAチームが施設の洪水リスクを認識した場合は、洪水リスクに関する専門知識を有する者を少なくとも1名は追加し、チームの専門性を強化すべきである。
265. OSHAのPSM基準では、PHAチームに関して以下の要件が規定されている。
- エンジニアリングとプロセスの運転の専門知識を有するチーム
 - 評価対象プロセスに特化した経験と知識を持つ、少なくとも1名の従業員
 - 使用する特定のPHA手法に精通した者1名^b
266. OSHAはPHAチームに必要な工学分野を特定していないが、化学技術者が関与することが最も多い。化学技術者の中には洪水リスクに精通している者もいるが、企業は、包括的な洪水リスクアセスメントを実施するために、化学技術者に研修を提供するか、土木技術者や関連する洪水評価の経験を有する他の専門家など、外部の専門技術者の支援を確保する必要がある。

^a アルケマは、施設立地（facility siting）を、「対象プロセスのハザードと工場内の人間との位置関係、隣接するプロセス工場の建物に影響を及ぼす可能性のあるハザードの特定、およびそれらのハザードに関するリスクの管理」と定義している。

^b [29 C.F.R. §1910.119\(e\)\(4\)](#)

9. その他の洪水事故

267. 長年にわたって多くの洪水事故が産業施設に影響を与えてきた。本節では、アルケマ・クロスビー事故と関連性のある2つの事例として、福島原子力発電所事故とサンジャシント・パイプライン事故について簡単に取り上げる。福島の事故はクロスビーの事故よりもはるかに深刻なものであったが、産業界は両事故から得られた教訓を活かし、将来の異常気象による被害を防ぐことができる。

9.1. 福島第一原発事故報告書

268. 2011年3月11日に発生した東日本大震災はマグニチュード9.0を記録した。この地震により発生した津波は、日本の東北沿岸を襲い、一部では30フィート（約9メートル）を超える高さの波が押し寄せた [95, p. 1]。この地震と津波により、15,000人以上が死亡し、6,000人以上が負傷した。日本の東北沿岸では、建物やインフラが甚大な被害を受けた [95, p. 1]。
269. 地震と津波の影響で、東京電力福島第一原子力発電所で原子力事故が発生した [95, p. 1]。この事故は、1986年のチェルノブイリ原発事故以来、最悪の原発事故となった。福島原発での放射性核種の放出により、半径20キロメートル（12.5マイル）圏内にいた10万人以上の人々が避難を余儀なくされた [95]。
270. 福島事故を受けて、国際原子力機関（IAEA : International Atomic Energy Agency）は、「人的、組織的、技術的な要因を考慮し、事故の原因と背景を詳細に分析し、必要な教訓を得て行動に移すことができるようにする [95]」ことを目的とした調査を実施した。この報告書では、原発の設計、緊急事態への備え、深刻な事故への対応策、ならびに対応体制の課題が浮き彫りになった [95]。調査結果ではさらに、「原子力発電所においてすべての電力が長時間喪失することはないという前提があった」こと、また「大規模な自然災害と同時に原子力事故が発生する可能性に対する備えが不十分であったこと」が指摘された [95]。福島事故とアルケマ・クロスビー事故では影響の規模に大きな違いがあるものの、両事故から得られる教訓には共通点がある。
271. 東日本大震災は福島施設の電力供給に損害を与え、引き続いて発生した津波は所内のインフラにも甚大な被害をもたらした。この複合的な障害により、敷地外および敷地内の電力が完全に失われ、稼働中の3基の原子炉および使用済み核燃料プールの冷却機能が失われた [95]。発電所の作業員による懸命な対応にもかかわらず、3基の原子炉の炉心が過熱し、核燃料が溶融（メルトダウン）し、3つの格納容器が損傷した。さらに、水素ガスの放出により爆発が発生し、作業員が負傷し、放射性核種が環境中に放出された [95]。図56は、津波による福島第一原発の水位上昇を示している。この水位は、主要電気設備（スイッチギア）とバックアップシステム（ディーゼル発電機）の両方の高さを超えていた。

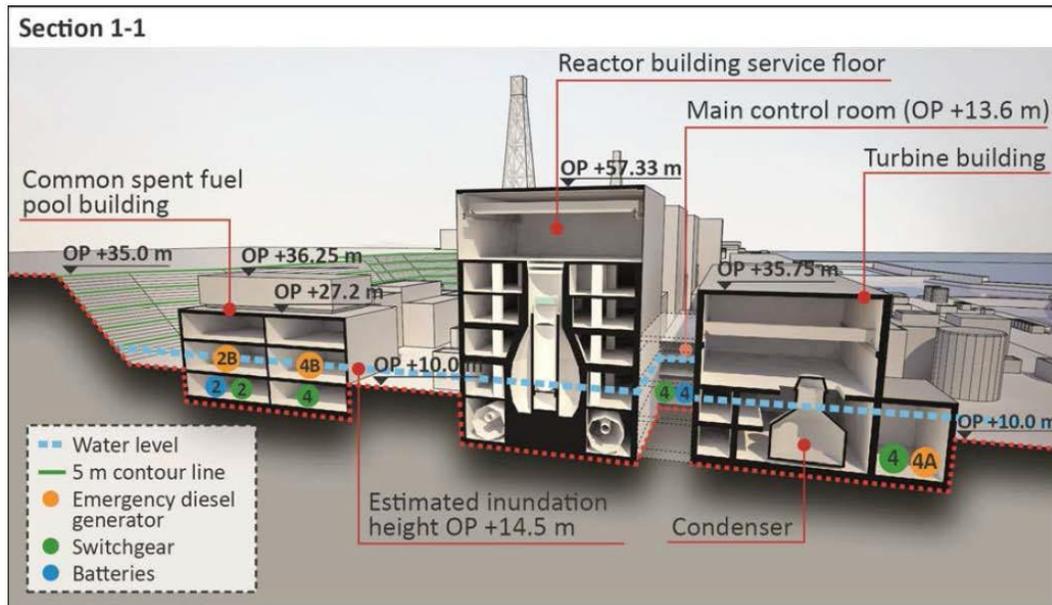


図56：福島第一原発の水位。このIAEAの図は、東日本大震災による津波の影響で福島第一原発が浸水した水位を示している [95]。

272. ハリケーン・ハービーによる洪水と同様に、東日本大震災による地震と津波は、福島原発が当初設計された際のハザード想定を大幅に上回った [95, p. 3]。当初の設計で考慮された地震ハザードと波高は、主に過去の気象データと地震データに基づいて評価されていた [95, p. 3]。さらに、事故前の時点では、この地域はマグニチュード8クラスの地震の可能性があると分類されており、マグニチュード9の地震は信憑性がないと判断されていた [95, p. 3]。
273. IAEAの報告書には、異常気象に備える化学施設にも適用可能な以下のような知見が示されている。

自然ハザードの評価は、十分に安全側である必要がある。原子力発電所の設計基準を策定する際に、主に過去のデータに基づいて検討するだけでは、極端な自然ハザードのリスクを正しく評価することはできない。包括的なデータが利用可能であっても、観測期間が比較的短いため、自然ハザードの予測には依然として大きな不確実性が残る [95, p. 4]。

自然ハザードの評価では、複数のハザードが同時または連続して発生する可能性と、それらが原子力発電所に及ぼす複合的な影響を考慮する必要がある。また、複数の原子炉ユニットへの影響も考慮する必要がある [95, p. 4]。

274. 危険物を取り扱う化学施設と同様に、原子力発電所もリスクを低減するために複数の独立した安全防護層を設けている。福島第一原発では、放射性核種の環境中への放出を防ぐために、4つの安全防護層が存在していた。これらの安全防護層は、幅広い潜在的なハザードから保護するために作られたが、津波や洪水といった外的ハザードは十分に考慮されていなかった [95, p. 5]。その結果、洪水により3つの安全防護層が同時に機能不全に陥ったが、これはすべてが同一の共通原因によって機能不全に陥ったことになる。IAEA報告書は次のように結論づけている。

複数の安全システムが共通原因により故障したことは、設計時には想定されていなかったプラントの状態を引き起こした。その結果、深層防護の第四層である、重大事故の進行防止および影響緩和のための防護手段が機能せず、原子炉の冷却を回復し、格納容器の健全性を維持することができなかった。電力の完全喪失、監視装置の不作動による安

全関連パラメータ情報不足、制御装置の喪失、運用手順の不十分さが相まって、事故の進行を止めることができず、その結果、事故の影響を抑えることが不可能になった [95, p. 5]。

275. 福島施設が当初設計・建設された1960年代および1970年代には、地震や洪水などの外的ハザードを推定する際、過去の気象データと地震データを用いるのが原子力業界の慣行であった [95, p. 50]。事業者は、どのような災害事象についても施設に最も近い場所で発生する可能性を想定し、記録された災害の最大レベルをさらに増加させることにより、検討には安全側な想定をしていたであろう [95, p. 50]。福島第一原発でも、公式のデータを基にした安全側な推定値を用いて、最大地震強度および津波の波高を設定していたが、2011年3月11日に実際に発生した地震や津波はその想定値を上回った。例えば、津波の最大波高は、1960年に発生したチリ地震のデータを基に海拔約10フィート（約3メートル）と推定された。しかし、実際に福島第一原発を襲った津波の高さは、その約3倍に相当した [95, p. 50]。2009年の再評価により、津波の波高は海拔約20フィート（約6メートル）と再評価され、これに応じて施設では特定のポンプのモーターの設置位置を高くする措置がとられた [95, p. 51]。しかし、この再評価後でもバックアップ発電機の高所移動は行っておらず、対策としては不十分であった [95, p. 51]。

9.2. サンジャシント・パイプライン洪水事故

276. 1994年10月、ハリケーン・ローザによる大気中の湿気の影響で、テキサス州ヒューストン近郊のサンジャシント川流域が大規模な洪水に見舞われた [96], [97]。サンジャシント流域は、アルケマ・クロスビー施設の西方数マイルに位置し、同施設があるシーダーバイユー流域に隣接している [97]。この洪水により、8本のパイプラインが損壊し、29本のパイプラインが損傷を受けた [98, p. v]。その結果、35,000バレル以上の石油製品が川に流出した [98, p. v]。河川に放出された炭化水素の引火により、547人が火傷や煙の吸入により負傷した [98, p. v]^a。（図57）。

^a [サンジャシント川火災の地元ニュース報道の映像](#) [222]



図57：1994年のサンジャシント川火災。この地元ニュースの写真は、1994年10月にパイプラインの破裂により石油製品が流出した結果、発生したサンジャシント川の火災を示している [99]。

277. 1994年10月中の1週間、ハリケーン・ローザの影響が続いたテキサス州南東部では、ヒューストン近郊のサンジャシント川周辺で15～20インチ（約38～50cm）の降雨が記録された [98, p. 2]。この降雨により発生した洪水は、極めて危険な洪水であった [96]^a。洪水により14,000人が避難を余儀なくされ、20人が死亡した [98, p. v]。パイプラインの流出事故への対応には700万ドル以上の費用がかかり、推定物的損害額は約1,600万ドルであった [98, p. v]。
278. 1994年10月19日、洪水の影響で最初のパイプライン（直径8インチの液化石油ガスパイプライン）が破損した [98, p. 4]。翌日の10月20日には、ガソリンを輸送していた直径40インチおよび36インチのパイプラインを含む多数のパイプラインが破損した [98, pp. 4-6]。1994年10月20日、流出したガソリンが引火し、5回の爆発が引き起こされた [98, p. 6]。この事故を受け、パイプラインの流出地点を中心に半径9マイルの避難区域が指定された [98, p. 7]。1994年10月23日、緊急対応チームは未燃焼の流出石油製品の管理燃焼を実施した [98, pp. 13-17]。
279. 国家運輸安全委員会（NTSB：National Transportation Safety Board）はこの事故を調査し、1996年に報告書を公表した [98]。調査の一環として、NTSBは1991年から1993年の3年間に米国内で発生した洪水によるパイプライン破損事故を調査した [98, p. 35]。その結果、合計21件のパイプライン破裂が確認されたが、その中には天然ガスパイプライン13件、「高揮発性液体」を含むパイプライン3件が含まれていた [98, pp. 35-36]。この調査の結果、NTSBは同様の事故の再発防止のため、9件の安全勧告を公表した [98, p. v]。
280. NTSBの調査報告では、11の結論が示されており、そのうち少なくとも以下の2点はアルケマ・クロスビー施設の洪水事故にも適用できる。
1. 洪水によって損壊または破裂した大半のパイプラインの設計基準には、氾濫原調査が考

^a 米国運輸安全委員会（NTSB）の報告書には、ヒューストン周辺の過去の洪水状況が詳細に記されており、この地域は洪水の常襲地帯として知られ、1907年から1996年の間に17回の洪水が発生していたことが示されている [98, p. 4]。

慮されていなかった。むしろ、事業者は、パイプライン設置当時の一般的な設計基準のみを使用していた [98, p. 47]。

2. 氾濫原を横断するパイプラインを設計するための基準は、パイプラインに襲いかかる複数の脅威を定義し、パイプラインを設計するための調査・研究・将来的な検討を行い、運用期間中に設計の健全性を定期的に再評価するために必要である [98, p. 47]。

10. 緊急対応活動

281. アルケマ・クロスビー事故が発生する前から、緊急対応コミュニティはハリケーン・ハービーへの対応に追われていた。ハービーによる被害は、テキサス州史上最大規模の災害対応を要した [27]。緊急対応要員は、82機の航空機と100隻以上のボートを使用して、12万件以上の救助活動を実施した [27]。また、300万食以上の食料と水が被災者に配布され、2万4000人以上の避難者がホテルに收容された [27]。さらに、2万1000人以上の連邦職員がハリケーン・ハービーの救援活動に派遣され、テキサス州とルイジアナ州に向けて5万3000ポンドの医療機器および物資が輸送された [100]。この連邦職員の中には、動員された6,300人以上の現役軍人も含まれていた [100]。
282. ハリケーン・ハービーがテキサス沿岸に到達すると、EPA、TCEQ（テキサス州環境品質委員会）、米国沿岸警備隊、テキサス州土地管理局による統合司令部が組織され、すべての緊急対応活動を統括した [101]。統合司令部は、州兵および連邦都市捜索救助隊からの支援も受けた [101]。統合司令部は、コーパスクリスティ、ヒューストン、ボーモントの3つの作戦拠点に分かれて活動した [101]。ヒューストン地域では、ハリス郡が統合司令部を支援し、ハリス郡消防署長事務所およびハリス郡消防局を含む緊急対応リソースを提供した。
283. 米国陸軍工兵隊は150人以上の要員を派遣し、緊急対応において洪水対策およびインフラ復旧作業を担当した [100]。
284. 事故発生中、EPAは、航空機搭載型スペクトル測光環境収集（ASPECT: Airborne Spectral Photometric Environment Collection Technology）システムを搭載した航空機を投入し、空気中の有害化学物質を監視した [101]。ASPECTによる測定では、有機過酸化物を積載した冷蔵トレーラーが燃焼した際にも、空気中の化学物質濃度は基準値を超えるレベルには達していなかった [101]。また、EPAは、冷蔵トレーラー内の有機過酸化物の分解が進行する一連の事象の中で、煙と大気質を監視し、周辺地域でさらなる火災が発生する可能性を評価した。さらに、クロスビー施設から流出する可能性のある有機化学物質を検出するため、下流の表層水のサンプルを4カ所で採取した [101]。アルケマ・クロスビー施設では、有機過酸化物を積載した9台のトレーラーが燃焼するなどの化学物質の放出が報告されたが、EPAの水質検査では、これらのサンプルから有機過酸化物やその分解生成物は検出されなかった。

11. 避難区域

285. 1.5マイルの避難区域を設定する際、緊急対応当局は、避難区域を維持するための人員配置要件、冷蔵トレーラーに一時保管されている有機過酸化物品の燃焼による大気質への影響可能性、そしてEPA規制対象の化学物質でありアルケマのリスク管理計画に記載されている二酸化硫黄およびイソブチレンの流出可能性等、複数の要因を考慮した。アルケマは、有機過酸化物品の製造のために二酸化硫黄とイソブチレンを貯蔵・使用している。

11.1. 二酸化硫黄

286. アルケマ・クロスビー施設の二酸化硫黄貯蔵タンク（図58）は、イソブチレン貯蔵タンクから300フィート（約90メートル）以上、有機過酸化物品を保管していた最も近い冷蔵トレーラーから約400フィート（約120メートル）の距離にあった。放出の可能性は低いにもかかわらず、緊急対応当局は、タンクの圧力開放装置が開放され、そのまま開放状態が継続するシナリオに基づいて、1時間当たり16,000ポンド（約7.3トン）の二酸化硫黄放出をモデル化した。なお、この事故では二酸化硫黄は放出されなかった。



図58：クロスビー施設の二酸化硫黄貯蔵タンク。アルケマ・クロスビー施設の二酸化硫黄貯蔵タンクは、事故当時、イソブチレンタンクから約300フィート、有機過酸化物品を貯蔵していた最も近い冷蔵トレーラーから約400フィートの距離にあった。（出典：CSBの写真）

287. モデリングでは、二酸化硫黄の濃度が急性曝露ガイドライン（AEGL）のレベル2（AEGL-2）およびレベル3（AEGL-3）に達する可能性のある風下方向への影響範囲を評価した。AEGLの値の定義は以下の通りである。

- AEGL-3（死亡の可能性）：この濃度を超えると、一般の人（影響を受けやすい個人を含む）が生命を脅かす健康被害を受ける、または死亡する可能性がある [102, p. 394]。
- AEGL-2（負傷の可能性）：この濃度を超えると、一般の人（影響を受けやすい個人を含む）が不可逆的または重篤で長期的な健康被害を受ける、あるいは避難行動に支障をきたす可能性がある [102, p. 394]。

288. モデルでは、二酸化硫黄に4時間暴露した場合のAEGL値として、0.75ppm（AEGL-2）と19ppm（AEGL-3）が用いられた [102, p. 397]。

289. モデリングの結果、AEGL-3（生命を脅かすレベル）の二酸化硫黄濃度は、アルケマ・クロスビー施設から約1マイル以上には及ばないことが示された。一方、AEGL-2（健康被害の可能性のあるレベル）の濃度は、アルケマ施設から数マイルにわたって広がる可能性があった。しかし、緊急対応当局はこのシナリオを現実的ではないと判断し、この可能性を考慮しての避難区域の拡大は行わなかった。

11.2. イソブチレン

290. アルケマ・クロスビー施設のイソブチレン貯蔵タンク（図59）は、有機過酸化物品を保管していた最も近い冷蔵トレーラーから100フィート（約30メートル）以上の距離があった。イソブチレンの潜在的危険性を評価するため、緊急対応当局は、イソブチレン貯蔵タンクの爆発シナリオをモデル化した。モデリングの結果、予測される爆風圧の影響はアルケマ・クロスビー施設内に集中することが示された。



図59：アルケマ・クロスビー施設のイソブチレン貯蔵タンク。アルケマ・クロスビー施設のイソブチレン貯蔵タンクは、有機過酸化物品が入った最も近い冷蔵トレーラーから100フィート以上離れた場所にあった。（出典：CSBの写真）

11.3. アルケマ施設で発生した有機過酸化物品の流出と燃焼による、未だ不明な潜在的な健康影響

291. CSBは、有機過酸化物品の分解によって発生した蒸気雲や、有機過酸化物品の包装材や冷蔵トレーラーの燃焼で生じた煙に曝露したことによる、クロスビー地域の住民や初期対応者の長期的な健康影響について、現時点では把握していない。CSBは、この事故によって空気中に拡散した物質の毒性や潜在的な健康影響について断定的な見解を示すことができない。一部の緊急対応要員や地元住民は、有機過酸化物品の分解によって発生した蒸気雲や、有機過酸化物品の燃焼やアルケマが一時的にこれらの製品を保管していた冷蔵トレーラーの燃焼によって発生した煙による健康への影響を懸念していた。CSBは、アルケマが提供した関連する安全データシート（SDS）の情報を確認したが、既存のSDSには、蒸気雲に含まれる未知の物質の成分や量、あるいは低温倉庫から移動された有機過酸化物品を保管していたトレーラーの燃焼生成物に関する情報は含まれていなかった。
292. 前述のとおり、EPAは、あらゆる物質の流出による大気および水質に対する影響を監視する

ために、この事故のために要員と機材を投入した。EPAの航空機によるASPECT試験および地表水の検査では、有機過酸化物の痕跡は検出されなかった。また、EPAは、大気質指標（AQI：Air Quality Index）とそれに基づく手法を適用し、有害な空気を吸入した人が経験するかもしれない潜在的な健康影響を判断しようとした。例えば、有機過酸化物製品や冷蔵トレーラーからの不完全燃焼による煤煙粒子を吸い込んだり、関連する粒子状物質を吸い込んだりすると、健康に悪影響を及ぼす可能性がある。

293. AQIは、有害な空気を吸った後、数時間または数日以内に人々が経験する可能性のある健康影響を表すために使用される指標である [103, p. 2]。EPAの担当者は、有機過酸化物製品や冷蔵トレーラーの不完全燃焼により発生すると予測される煤粒子の評価を行った。このような粒子汚染または粒子状物質は、AQIの基準汚染物質の一つとされている^a。EPAのパンフレット『大気質指標：大気質と健康の指針（Air Quality Index: A Guide to Air Quality and Your Health）』には、「心臓や肺に疾患のある人、高齢者^b、子供は影響を受けやすいため、リスクが高いと考えられる [103, p.3]」と記されている。クロスビー事故で発生した可能性のある有害な大気状態を評価するため、EPAの担当者は、EPAのAQIレベルを使って、不健康、非常に不健康、危険の3段階からなる大気による健康懸念のモデルを開発した。EPAによるこれらの大気質カテゴリーの説明は以下のとおりである。

- 不健康：AQI値が151～200の間になると、すべての人が健康への影響を受ける可能性があり、特に影響を受けやすい人はより深刻な影響を受ける可能性がある。
- 非常に不健康：AQI値が201～300の間になると、健康警報が発令され、すべての人がより深刻な健康影響を受ける可能性がある。
- 危険：AQI値が300を超えると、緊急事態の健康警告が発令され、一般住民全員が深刻な健康影響を受ける可能性が高まる。 [103, p. 3]

294. EPAの担当者はまた、AQIスコアの上昇に伴い、潜在的な健康リスクが増大することを示す3段階のカテゴリーを使用して、AQIを組み込んだモデルを開発しようと試みた。しかし、アルケマ・クロスビー事故における予測拡散モデルは、実際の拡散状況を正確に反映しておらず、その他の実務上の困難もあったため、AQIを基に継続的または長期的に健康影響を分析するEPAの試みは、決定的な結論を導き出すに至っていない。事故で放出された蒸気や煙は、数時間から数日以内に拡散し、消失したため、クロスビー事故での大気排出物に関する裏付けとなる追加データが不足している。このため、CSBはこの問題について意味のある結論を出すことができていない。そこで、本報告書では、アルケマ・クロスビー施設で発生した有機過酸化物の分解による健康影響についての詳細な分析はせず、事故後に医療機関を受診した人々が経験した短期的な健康影響について、この事故の重要な側面の一つとして言及する。

11.4. 人員配置

295. 二酸化硫黄、イソブチレン、大気質のシナリオを評価した結果に基づき、緊急対応当局は半径1マイルの避難区域が必要であると判断した。しかし、ハリス郡全域でハリケーン・ハービーの洪水に対する救援活動が行われており、緊急対応要員の需要が高かったため、人員配置が重要な要素となった。1マイルの避難区域を維持するために必要な人員を評価する際、

^a 大気質指標の基準汚染物質には、他に地表オゾン、一酸化炭素、二酸化硫黄が含まれる [103, p. 2]。

^b 「通常の加齢プロセスにより、高齢者は有害な空気にさらされることにより健康リスクが高まる可能性がある。研究によると、60代半ばから空気汚染に対する感受性が増すことが示されている。しかし、心臓発作のリスク、およびそれに関連する粒子汚染によるリスクは、男性では40代半ば、女性では50代半ばから始まる可能性がある [103, p. 3]。」

地域の道路配置を考慮すると、1.5マイルの避難区域とするほうが少ない人員で対応可能であることを緊急対応当局が発見した。避難区域を0.5マイル拡大することで、より広範で安全な避難区域が確保できるうえに、必要な緊急対応要員の数を削減できるため、当局は1.5マイルの避難区域とすることを決定した。

11.5 高速道路90号線の通行維持

296. 避難区域が設定された後も、避難区域の中央とクロスビー施設の近くを通る高速道路90号線は交通規制されることなく開放されていた。統合司令部がこのような決定を下したのは、ハリケーン・ハービーによる深刻な洪水被害を受けていたボーモント地域へ、ヒューストン方面から人員や機材を輸送するための主要幹線道路が高速道路90号線しか残っていなかったからである。この状況は、すべての緊急対応要員と統合司令部にとって難しい決断を迫った。一方で統合司令部は、冷却が不十分となり、加速度的に分解が進んでいる可能性のある有機過酸化物の潜在的な危険性を考慮する必要があるがあった。他方、ハリケーン・ハービーが東へ移動するのに合わせて、緊急対応要員やその他の資源も同様に移動しなければならなかったため、高速道路90号線は極めて重要な輸送経路であった。緊急対応要員は、クロスビー施設の状況を監視し、冷蔵トレーラーでの火災や化学物質の流出の兆候が確認された場合には、直ちに高速道路90号線を閉鎖する計画を立てていた。
297. 2017年8月30日（水）以降アルケマは、有機過酸化物を積載した6台の冷蔵トレーラーの空気温度が上昇しており、そのうち3台では製品の推定SADTを超えていることを示す遠隔測定データを統合司令部に提供した。しかし、最初に発火した冷蔵トレーラーには遠隔測定データを生成する機能がなく、緊急対応要員はそのトレーラー内の有機過酸化物製品が分解し始める時間を正確に予測できなかった。また、現場対応チームは、各冷蔵トレーラー内に積載された有機過酸化物製品の推定リストを作成したものの、トレーラーへの積み込み作業が慌ただしかったため、リストの正確性を保証できなかった。その結果、最初に燃焼した冷蔵トレーラー内の有機過酸化物が急速な分解・燃焼を開始するのに十分な高温に達したときも、高速道路90号線は依然として通行可能な状態であった^a。
298. 2017年8月30日（水）午後11時50分頃、有機過酸化物の分解が最初の冷蔵トレーラー内で始まったとみられる時点で、2人の警察官がアルケマ・クロスビー施設から発生した白い煙の中を車で通過した。警察官が白煙の通報を行った後、緊急対応要員は高速道路90号線を閉鎖したが、その後、クロスビー施設での分解が目視確認されなかったことや、遠隔測定データが分解の進行を示していなかったことから、緊急対応要員は高速道路90号線を再び通行可能とした。アルケマ施設で白煙が目視確認できなかったため、緊急対応要員は、警察官が通過した煙の正体は「低層の気象雲（おそらく霧）」であったと結論づけた。最初の有機過酸化物の分解が確認されなかったため、緊急対応要員は高速道路90号線を再開通させた。確かに難しい決断ではあったが、高速道路90号線を再開通させたことで、より多くの緊急対応要員や一般市民が化学物質の雲にさらされる可能性が生じた。後になって、有機過酸化物の分解が確認された後、緊急対応要員により高速道路90号線のすべての車線が閉鎖された。
299. この事故は、緊急対応時に選択肢を吟味することの難しさを示している。アルケマ・クロスビーの事故は、ハリケーン・ハービーによって引き起こされた大規模な緊急事態の中で起きていた。避難区域の厳格な施行を担当する当局者のニーズと、ハリケーン・ハービーへの対応を優先する当局者のニーズは相反していた。緊急事態当局は当然のことながら、当初は高

^a 冷蔵トレーラーには複数の種類の有機過酸化物製品が保管されており、燃焼時には酸素が限られていたため、分解の進行はそれぞれ異なっていたと考えられる。このため、この事故で放出された化学物質の正確な組成を特定することはできない。

速道路90号線を開通させていた。しかし、クロスビー施設の状況が不安定になり、有機過酸化物の分解が進行する可能性があるとして報告された時点で、緊急対応当局は高速道路90号線を閉鎖し、適切な代替ルートを確認すべきであった。緊急事態においては、データは不完全であることが多く、矛盾していることさえある。そのため、緊急対応要員は、慎重な判断を優先し、安全側に立った対応を取り、それにより、自分自身および一般市民の安全を最大限に確保するよう行動すべきである。

12. 洪水災害の発生頻度とコスト

300. 長い再現期間を持つ洪水（100年洪水や500年洪水など）の発生頻度推定には不確実性が伴う [54, p. 2]。
301. 欧州委員会共同研究センターが2004年に発表した報告書によると、米国における自然災害による損害額は、1970年の年間45億ドルから、1999年には年間60億～100億ドルに増加した（すべて1970年基準のドル換算） [104, p. 2]^a。自然災害の発生率が増加すれば、施設のレジリエンスを強化するための適切な措置が取られない限り、その影響を受ける化学施設では、事故の頻度や損害コストが増加する可能性がある。
302. 近年、極端な降雨による洪水の発生が増加しており、EPAの気候専門家の中には、この傾向は今後も続き [105, 106]、その結果、米国の多くの地域で洪水リスクが高まる [106] と予測する者もいる。将来予測によれば、テキサス州は、全米で最も大きな洪水被害を受けるとされている（図60） [106]。

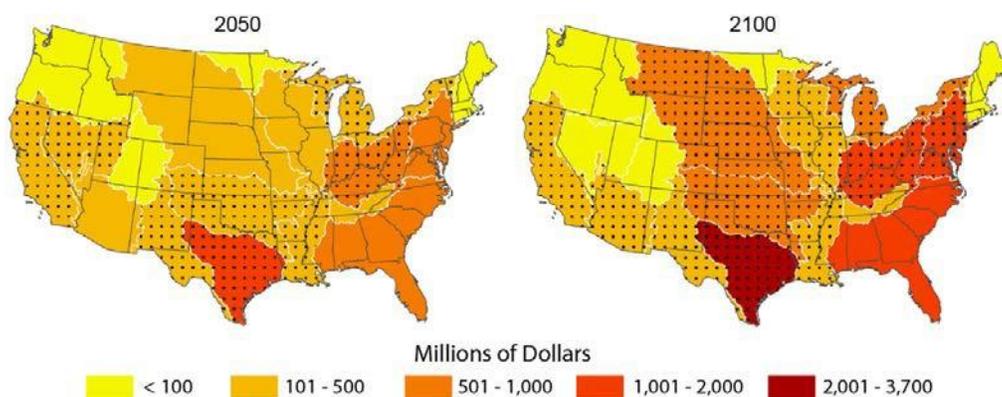


図60：気候変動が抑制されなかった場合の将来の洪水被害 [106]^b。この予測では、2014年の米ドルを基準として将来の被害額を推定している。

303. 国際的な保険会社であるスイス・リーが行った2017年の調査によると、地震、暴風雨、洪水、山火事などの自然災害の増加したため、災害による世界的な保険損失^dが2016年の保険金請求を急増させた [107]。同報告書によれば、2016年の保険損失の42%は自然災害に起因するものであった。また、人為的災害の減少とは対照的に、自然災害は増加し続けている（図61および図62） [108]。北米では2016年、災害事象による保険損失が最も大きく、その主な原因はハリケーン、雹（ひょう）、雷雨、深刻な洪水であった [108]。

^a 2017年のドル価値に換算すると、1970年の損失額は284億ドルであったが、1999年までに631億ドルに増加した [223]。

^b 「詳細については、EPAの『[Climate Change in the United States: Benefits of Global Action](#)』を参照のこと」 [182]。（ハイパーリンクを追加）。

^c 「[気候変動](#)とは、長期間にわたる気候の指標における重大な変化を指す。言い換えれば、気候変動には、気温、降水量、風のパターンなどの大きな変化が含まれ、数十年またはそれ以上をかけて生じる」 [229]。（ハイパーリンクを追加）

^d この報告書では、大災害（カタストロフィ）を「1億900万ドルを超える保険損失をもたらす事象、あるいは少なくとも20人の死者、50人の負傷者、2,000人の避難者を出す事象」と定義している [108, p. 2]。

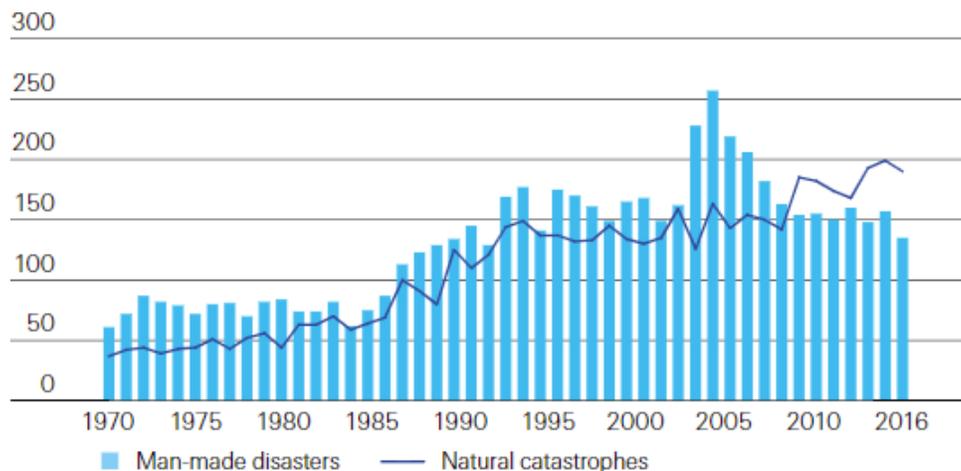


図61：スイス・リーによる保険損失に関する調査。国際的な保険会社であるスイス・リーは、1970年から2016年までの災害に起因する保険損失を調査した [108, p. 2]。

Figure 3
Insured catastrophe losses 1970–2016 in USD billion, at 2016 prices

- 1 1992: Hurricane Andrew
- 2 1994: Northridge earthquake
- 3 1999: Winter Storm Lothar
- 4 2001: 9/11 attacks
- 5 2004: Hurricanes Ivan, Charley, Frances
- 6 2005: Hurricanes Katrina, Rita, Wilma
- 7 2008: Hurricanes Ike, Gustav
- 8 2010: Chile, New Zealand earthquakes
- 9 2011: Japan, New Zealand earthquakes, Thailand flood
- 10 2012: Hurricane Sandy

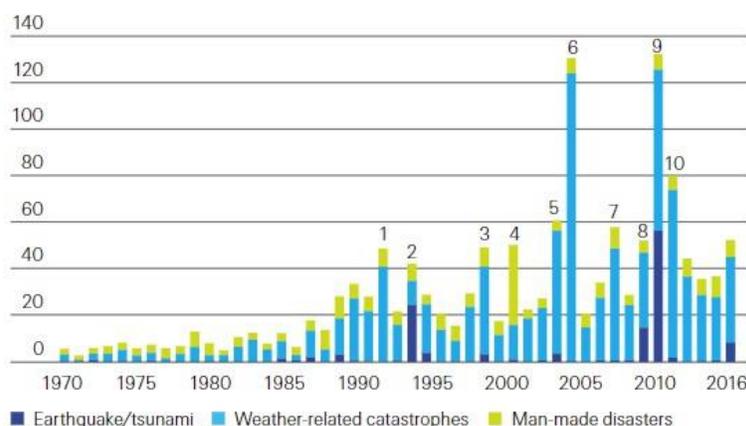


図62：1970年から2016年までに発生した大災害による保険損失。スイス・リーは、1970年～2016年の間に発生した災害による保険損失額を調査した（単位は10億米ドル、2016年の価値に換算） [108, p.4]。

304. 2016年のスイス・リーの報告では、洪水が、米国において保険が不十分な状態のリスクとなっていることが指摘されている [108]。この指摘は、人々や産業界が洪水リスクを十分に認識していない可能性を示唆している。同報告書は、「米国は依然として洪水リスクに対して極めて脆弱な状況にある」と指摘している [108, p. 14]。特にヒューストン都市圏については、氾濫原に建設された都市であり、大雨時に洪水の影響を受けやすいことに言及した上で、「2016年と2015年の2度にわたる内陸洪水でヒューストンは数十億ドルの損失を被ったが、これは決して予測不可能な事態ではなかった [108, p.15]」と指摘している。
305. スイス・リーは、米国の洪水に対する保険が不十分な状況は、「個別事象の選択が不適切なために損失の経験が不足し」、「根底にあるリスクの本当の規模を十分に把握できない [108, p. 16]」ことが原因であると説明している。要するに、多くの人々は過去の洪水の記憶をもとにリスクを判断しているが、これでは洪水リスクの程度をきちんと認識する適切な評価方法とは言えないと結論付けている。このような姿勢はアルケマ・クロスビー施設でも見られ、従業員は、自分たちの、過去の降雨とそれによる施設への影響の記憶をもとに洪水リスクを想定していたが、数百年の範囲も考慮したシナリオに基づくリスク評価と比較すると、数十年の個人的な経験のみに依存するリスク評価は信頼性が低いリスク評価方法と言わざるを得ない。数十年に一度しか起こらない洪水といった、影響は大きいが高頻度の低い事象は、十分に把握できない可能性がある。このような現実的な見通しをもってしても、スイス・リーは、



米国における洪水保険の請求額は年間150億ドル程度と予想していたが、スイス・リーがレポートを発表したわずか数ヵ月後にハリケーン・ハービーが引き起こした洪水被害額は200億ドルを超えた。

13. Natechリスクアセスメントとマネジメント

306. 世界各地で発生した異常気象（1999年のトルコ地震、2002年の欧州全域の洪水に始まる）に伴う数多くの化学物質の流出事故を受け、欧州委員会は、京都大学防災研究所などの機関と協力し、今後このような事故をどのように防ぐことができるか分析を開始した [104, p. 1]。この研究グループは、異常気象（Natech^a の一種）発生時における産業事故のリスクに関する情報がほとんど存在しないことを明らかにした [104, p. 1]。
307. 欧州委員会共同研究センター（EU-JRC）が発刊した異常気象による産業事故に関する最新の書籍には、次のように記されている。

近年、自然災害の発生件数は過去最多を記録し、産業施設やインフラに前例のない被害をもたらした。2011年の東日本大震災（地震と津波）に加え、最近の主な例としては、2012年のハリケーン・サンディによる複数の炭化水素の流出や下水の放出、2011年のタイの洪水による工業団地の損害、2005年のハリケーン・カトリナおよびリタによるメキシコ湾沖の石油・ガスインフラの壊滅的な被害などが挙げられる。これらの出来事は、危険な施設や、危険な物質を処理、貯蔵、輸送するその他のインフラにおいて、自然ハザードが火災、爆発、有害物質や放射性物質の放出を引き起こす可能性があることを明確に示した。自然ハザードによって引き起こされるこうした技術的な「二次的影響」は、「Natech」事故と呼ばれる。このような事故は、多くの自然災害において繰り返し発生しているにもかかわらず、見過ごされがちな特徴であり、その社会的、環境的、経済的影響も重大で長期にわたることが多い [85, p. 1]。

308. Natechハザードは、すでに異常気象に対処している住民の負担を増大させ、広範囲にわたる有害化学物質の同時流出を引き起こす可能性がある [85, p. 1]。EU-JRCは、異常気象によるリスクの評価が難しい理由として、このテーマが多く専門分野に関わるものであり、従来の専門分野の枠を超えた学際的なアプローチが必要であることを指摘している [85, p. 3]。例えば、クロスビー施設で発生した洪水は、主に土木工学の問題であるが、洪水によって有機過酸化化物製品の冷却ができなくなったため、化学工学や電気工学とも関連する問題となった。さらに、異常気象によるリスクは比較的新しいものと見なされており、最近の事故を受けてようやく注目されるようになってきた段階である [85, p. 3]。適切な対応をさらに複雑にしているのは、「従来の」産業事故を防止するための既存の保護対策や安全防護層が、異常気象事故も防御してくれるという認識が根強い点である [85, p. 3]。
309. EU-JRCのNatech報告書は、異常気象を想定したシナリオ検討においては、緊急対応要員と関連資源の不足を想定しなければならないことを指摘している。なぜなら、緊急対応要員はすでに異常気象による影響の多くに対処中である可能性が高く、有害化学物質の放出が発生した場合、緊急対応要員自身が危険にさらされるとともに、その重要な業務遂行が妨げられる可能性があるからである [85, p. 4]。異常気象、特に洪水は、事故が発生している施設へのアクセスを困難にする可能性がある。道路のアクセスや通行ができなくなると、緊急対応要員が施設に到達できず、地域住民が避難できない事態が発生する可能性がある [85, p. 4]。
310. 異常気象に対するリスク軽減計画は効果的である [85, p. 35]。EU-JRCの報告では、当然のことながら、リスク軽減策を事前に実施し、異常気象に特化した設計を行っている企業のほうが、異常気象発生時に被害を抑制し、操業を継続できる可能性が高いと報告されている [85, p. 35]。しかし、産業界および当局の多くは、異常気象リスクを過小評価している、と同報告書

^a Natechは、あらゆる種類の自然災害によって引き起こされる技術上の災害（technological disaster triggered by any type of natural disaster）と定義される [104, p. 1]。

は指摘している。また、異常気象リスクにどのように対処すべきかについてのガイダンスがないことも指摘されている [85, p. 35]。

311. EU-JRCは、企業にとって最も深刻な課題は、安全システムの故障そのものではなく、自然ハザードに対する備えが不十分であることであると指摘している [85, p. 35]。この報告書は、化学施設が安全措置の基礎として一般的な設計基準を用いることが多く、立地ごとの異常気象リスクを十分に評価していないと結論づけた [85, p. 35]。
312. 施設が洪水に見舞われると、複数の要因により運転上の障害や化学物質の流出が発生する恐れがある。例えば、洪水によって貯蔵タンク（特に大気圧貯蔵タンク）が基礎から浮き上がると、内容物が流出する恐れがある。浮き上がったタンクは、内容物を放出してより深刻な事故につながるだけでなく、他の安定したタンクや浮いているタンクにも影響を与える可能性がある。水の流れが配管に負荷をかけるため、配管接続部が破損する可能性もある [85, p. 40]。例えば、アルケマ・クロスビー施設のように、水が電気設備に侵入して停電を引き起こし、それが間接的に事故を引き起こすこともある。洪水は広範囲に影響を及ぼしやすく、流出した危険な化学物質が広い地域に拡散する可能性がある [85, p. 42]。洪水が引き起こす複合的なリスクは、施設周辺の地域社会と環境の両方に深刻な脅威をもたらす。

14. ハリケーン・ハービーによるその他の産業流出事故

313. ハリケーン・ハービー対応の一環として、263人のEPA職員が救援活動に従事した [101]。ハリケーン・ハービーの影響を受けた地域には、合計41カ所のスーパーファンド対象地（EPAによる指定汚染区域）が存在していた [101]。EPAは、2017年9月2日時点で、そのうち13カ所が浸水または暴風雨に起因すると思われる被害を受けたと報告した [109]。この13カ所のうち11カ所は、洪水のためにハリケーン発生中にはアクセスができず、EPA職員が試料採取を行えたのは洪水が引いた後だった [109]。EPAが試料採取の後に分析した結果、1カ所を除き、スーパーファンド対象地の汚染状況はハリケーン発生前と同様であったと判断された [110]。
314. サンジャシント川廃棄物埋立地のスーパーファンド対象地には、有毒なダイオキシンが含まれていた [111]。この対象地はハリス郡にあり、1960年代に製紙工場の廃棄物を処理するために建設された廃棄物貯留池だった [112]。この貯留池の広さは約34エーカー（約13.8ヘクタール）で、サンジャシント川の西岸にあった。ハリケーン後にEPAが調査を行ったところ、保護カバー（廃棄物の流出を防止するために設置）が洪水で損傷し、下の廃棄物が露出していたことが判明した [113]。この対象地に関してEPAが推奨するダイオキシンの浄化レベルは1キログラムあたり30ナノグラムだった。しかし、採取された試料は70,000ナノグラム以上の濃度を示した [113]。その後の分析で、洪水が保護カバーの下の川底を12フィート浸食したことが判明した [114]。
315. ハリケーン・ハービーの最中およびその後に、EPAはヒューストン南東部の製油所付近で大気モニタリング試験を実施したが、通常の大気レベルを超える有害化学物質は検出されなかった [101]。しかし、バレロ・ヒューストン製油所では、ハリケーン・ハービーの影響で軽質原油貯蔵タンクが破損し、ベンゼンやその他の有機化合物が流出した [101]。このタンクは、洪水によって基礎から浮き上がり、タンクの底部と側壁が分離して破損した。
316. 米国沿岸警備隊が運営する国家対応センターは、米国内で石油、化学物質、放射性物質、生物学的物質、および病原性物質の環境への放出を報告するための連邦政府指定連絡窓口となっている [115]。産業施設が化学物質を環境に流出させた場合、国家対応センターに通知し、その流出を報告する義務がある^a。
317. ハリケーン・ハービー期間中の国家対応センターのデータによると、産業施設から環境への流出が102件報告され、そのすべてが何らかの形でハリケーンの影響を受けたものであった [116]。このうち44件は、施設のフレアを使用した「管理された」放出であり、ハリケーン到来前のシャットダウン作業中およびハリケーン通過後の再稼働時に発生した [116]。米国エネルギー省の推計では、ハリケーン・ハービーが上陸する直前に、米国内の石油生産量の24.5%、メキシコ湾の天然ガス生産量の25.9%、メキシコ湾岸の石油精製能力の43% [117]（米国の精製能力の12%）が予防的措置として操業停止された [118]。最大規模の環境汚染は、ハリケーン・ハービーによる洪水で被害を受けた大型貯蔵タンクから発生した [116]。
318. 例えば、テキサス州ガリーナパークで発生した流出事故は、マゼラン・ミッドストリーム・パートナーズL.P.社の施設で発生した。2017年9月1日午前0時過ぎ、マゼラン社は、同社のガリーナパーク施設が洪水の影響で、未知の量の「ガソリン系の製品」を流出させたと通知した [116]。12時間後の更新情報でマゼラン社は、洪水により1,000バレル（42,000ガロン）のガソリンが流出したと報告した [116]。さらに、その2日後、マゼラン社は、流出が近隣の水域に到達したと報告した [116]。流出事故から4日後の2017年9月5日、マゼラン社は、ガソリンの推定流出量を10,988バレル（約46万1,000ガロン）に修正した [116]。

^a [40 C.F.R. §302.6](#)

319. マゼラン・ミッドストリーム社のガリーナパークターミナルの原油貯蔵タンクの容量は720万バレルである [119]。このターミナルは、ヒューストンやテキサスシティーの製油所だけでなく、この地域の他のターミナルやパイプラインにもサービスを提供している [120]。ハリケーン・ハービーによる洪水で、施設内の2基の貯蔵タンクが破損し、内容物が流出した [121]。流出したガソリンの回収作業を行ったが、回収できたのは約20%にとどまり、残りの大部分は地面に浸透するか、蒸発したと考えられる [121]。

15. 勧告

CSBは、42 U.S.C. §7412(r)(6)(C)(i)および(ii)に基づく権限により、米国の化学産業の安全な操業を促進し、将来の事故から労働者および地域社会を保護するために、以下の安全勧告を行う。

15.1. 反応性物質研究からの環境保護庁への再勧告

2001-1-H-R3^a

40 CFR 68（リスク管理計画）の偶発的放出防止要件を改定し、公衆に深刻な影響を与える可能性のある壊滅的な反応性ハザードを明示的に対象とすること。これには、自己反応性化学物質や化学物質とプロセス固有の条件の組み合わせによって発生するハザードを含めること。反応性ハザード規制の適用範囲に関するOSHAへの報告書『反応性ハザード管理の改善』の勧告を考慮すること。規制の改正が必要な場合には、議会の承認を得ること。

15.2. アルケマ・クロスビー施設

2017-08-I-TX-R1

洪水リスクを合理的に実行可能な限り低減（ALARP）すること。洪水に対する安全対策が独立した安全防護層の要件を満たすようにすること。

15.3. アルケマ社

2017-08-I-TX-R2

18ヵ月以内に、アルケマおよびその子会社のうち、有機過酸化物を製造またはを閾値量以上の高危険性化学物質（HHC）^bを取り扱うプロセスを持つ会社に対し、該当施設がハリケーンや洪水などの異常気象に関するリスクにさらされているかどうかを定期的に（PHAサイクルに応じて）評価することを義務付ける方針を策定すること。

2017-08-I-TX-R3

有機過酸化物を製造する施設、または閾値量以上の高危険性化学物質（HHC）^cを取り扱うプロセスを有する施設に対し、異常気象（ハリケーンや洪水を含む）発生時にバックアップ電源などの重要な安全対策が意図した通りに機能するよう、企業としての要件を確立すること。

15.4. 化学プロセス安全センター（CCPS）

2017-08-I-TX-R4

米国内の化学施設におけるあらゆる種類の異常気象リスクを幅広く包括的に評価するためのガイダンスを作成すること。ガイダンスでは、本報告書で特定された問題を取り上げ、異常気象に備えるために必要な行動、異常気象時の物理的インフラおよび人員のレジリエンスおよび保護、そして適切な場合には異常気象後の復旧作業を対象とすべきである。このガイダンスには、以下の内容を網羅すること。

- 異常気象（洪水を含むがそれに限定しない）を原因とする、重要な安全装置または機器の共通要因による機能不全リスクに対応すること。洪水シナリオにおいては、洪水の水

^a 2001-1-H-R3の現在のステータスは、「未対応 – 不適切な対応 [88]」である。本CSB勧告に対するEPAの対応の詳細と概要については、「[勧告ステータス変更概要](#)」を参照のこと。

^b [29 C.F.R. §1910.119 Appendix A](#)

^c [29 C.F.R. §1910.119 Appendix A](#)

位が施設に到達した場合にも、十分な独立した安全防護層が維持されるよう設計すべきである。

- 施設の異常気象リスクに対する脆弱性を評価すること。洪水地区のような関連する安全情報を、プロセス安全情報として組み込むべきである。
- リスク評価およびプロセスハザード分析を実施する際に、どのような施設に対しても正確で信頼性の高い評価が行えるよう、関連する専門分野（工学を含む）の専門家を参加させること。

15.4. ハリス郡

2017-08-I-TX-R5

アルケマ・クロスビー事故で得られた教訓を活かして緊急対応訓練を更新し、避難区域を管理する職員への有害化学物質の暴露を防ぐこと。危険物質放出時に、避難区域内での緊急機材・人員の安全な移動を確保するため、既存のプロトコルを更新し、分析ツールの使用、大気モニタリング、および個人防護具の使用に関する訓練カリキュラムを改定すること。定期的な再訓練プロセスを制度化すること。

16. 参考文献

- [1] 米国気象局, 『Major Hurricane Harvey - August 25-29, 2017』 (2017年) (オンライン) 入手先 : http://www.weather.gov/crp/hurricane_harvey (閲覧日 : 2017年10月31日)。
- [2] 国立ハリケーンセンター, 『Tropical Storm Harvey Discussion Number 16 - August 24, 2017 at 10:00 am』 (2017年8月24日) (オンライン) 入手先 : <http://www.nhc.noaa.gov/archive/2017/al09/al092017.discus.016.shtml?> (閲覧日 : 2017年12月30日)
- [3] 国立ハリケーンセンター, 『Tropical Storm Harvey Discussion Number 29 - August 27, 2017 at 10:00 am』 (2017年8月27日) (オンライン) 入手先 : <http://www.nhc.noaa.gov/archive/2017/al09/al092017.discus.029.shtml?>
- [4] アルケマ, 『Arkema Group at a glance』 (オンライン) 入手先 : <https://www.arkema.com/en/arkema-group/profile/> (閲覧日 : 2017年9月20日)。
- [5] アルケマ, 『Arkema is independent』 (2006年5月16日) (オンライン) 入手先 : <https://www.arkema.com/en/media/news/news-details/Arkema-is-independant/> (閲覧日 : 2017年9月20日)。
- [6] アルケマ, 『Arkema in the Americas at a glance』 (オンライン) 入手先 : <http://www.arkema-america.com/en/arkema-america/at-a-glance/>
- [7] アルケマ, 『Luperox organic peroxides FAQ (frequently asked questions)』 (オンライン) 入手先 : <http://www.luperox.com/en/FAQ/> (閲覧日 : 2017年12月30日)
- [8] アルケマ, 『Crosby, Texas production plant』 (オンライン) 入手先 : <http://www.arkema-america.com/en/arkema-america/united-states/crosby-tx/> (閲覧日 : 2017年10月31日)。
- [9] アルケマ, 『Franklin, Virginia production plant』 (オンライン) 入手先 : <http://www.arkema-america.com/en/arkema-america/united-states/franklin-va/> (閲覧日 : 2017年10月31日)。
- [10] アルケマ, 『Geneseo, New York production plant』 (オンライン) 入手先 : <http://www.arkema-america.com/en/arkema-america/united-states/geneseo-ny/> (閲覧日 : 2017年10月31日)。
- [11] アルケマ, 『Organic Peroxides - Their Safe Handling and Use』 (2007年) (オンライン) 入手先 : <https://www.luperox.com/export/sites/organicperoxide/.content/medias/downloads/literature/their-safe-handling-and-use.pdf>
- [12] アルケマ, 『Plant Overview - Crosby, Texas』 (2015年12月8日) (オンライン) 入手先 : <http://www.arkema-america.com/export/sites/america/.content/medias/downloads/arkema-in-the-america/arkema-inc-crosby-texas-overview.pdf> (閲覧日 : 2017年10月31日)。
- [13] 化学プロセス安全センター (CCPS), 『Guidelines for Safe Storage and Handling of Reactive Materials』, 米国化学工学会 (AIChE : American Institute of Chemical Engineers) : ニューヨーク (1995年)
- [14] SPI (米国プラスチック工業協会) 有機過酸化物質生産者安全部, 『Safety and Handling of Organic Peroxides』 (2012年) (オンライン) 入手先 : <http://www.plasticsindustry.org/sites/plastics.dev/files/AS-109%20v%206%2021%202013.pdf> (閲覧日 : 2017年12月30日)
- [15] R. W. Johnson, S. W. Rudy, S. D. Unwin, 『Essential Practices for Managing Chemical Reactivity Hazards』, 米国化学工学会/化学プロセス安全センター: ニューヨーク州ニューヨーク (2003年)

- [16] HSE, 『The Storage and Handling of Organic Peroxides』 (1998年) (オンライン) 入手先 : <http://www.hse.gov.uk/pUbns/priced/cs21.pdf>
- [17] AkzoNobel, 『Safety of Organic Peroxides』 (2011年) (オンライン) 入手先 : https://polymerchemistry.akzonobel.com/siteassets/brochures/akzonobel_safety_of_organic_peroxides_low-res_protected_june2011.pdf
- [18] jschanna, 『Self Accelerating Decomposition Temperature』 (2008年11月2日) (オンライン) 入手先 : <https://www.youtube.com/watch?v=98jOeCr06Xs> (閲覧日 : 2017年12月30日)。
- [19] ネブラスカ大学リンカーン校, 『Safe Operating Procedure - Organic Peroxides Chemical Hazards & Risk Minimization』 (2013年1月) (オンライン) 入手先 : https://ehs.unl.edu/sop/s-organic_peroxides_chem_haz_risk_min.pdf
- [20] D. A. Zelinsky, E. S. Blake, 『National Hurricane Center Tropical Cyclone Report: Hurricane Harvey (AL092017)』 (January 2018年1月23日) (オンライン) 入手先 : https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL092017_Harvey.pdf (閲覧日 : 2018年1月26日)。
- [21] 気象衛星共同研究所 (CIMSS), 『Hurricane Harvey Montage Archive (Gulf Only)』 (2017年) (オンライン) 入手先 : http://tropic.ssec.wisc.edu/storm_archive/montage/atlantic/2017/HARVEY17-track.part.gif (閲覧日 : 2017年3月16日)。
- [22] T. W. Channel, 『Historic Hurricane Harvey's Recap』, The Weather Channel (2017年9月2日) (オンライン) 入手先 : <https://weather.com/storms/hurricane/news/tropical-storm-harvey-forecast-texas-louisiana-arkansas> (閲覧日 : 2018年3月16日)
- [23] NOAA, 『Hurricane Harvey, 25 - 31 August 2017: Annual Exceedance Probabilities (AEPs) for the Worst Case 4-day Rainfall』 (2017年11月16日) (オンライン) 入手先 : ftp://hdsc.nws.noaa.gov/pub/hdsc/data/aep/201708_Harvey/AEP_HurricaneHarvey_August2017.pdf (閲覧日 : 2018年4月9日)
- [24] NOAA, 『NOAA's National Weather Service: Hydrometeorological Design Studies Center: Exceedance Probability Analysis for Selected Storm Events』 (2017年4月21日) (オンライン) 入手先 : http://www.nws.noaa.gov/oh/hdsc/aep_storm_analysis/ (閲覧日 : 2018年4月9日)。
- [25] 国立ハリケーンセンター, 『Hurricane Harvey Discussion 19 - August 24, 2017 at 10:00 pm』 (2017年8月24日) (オンライン) 入手先 : <http://www.nhc.noaa.gov/archive/2017/al09/al092017.discus.019.shtml?>
- [26] 国立ハリケーンセンター, 『Hurricane Harvey Advisory Number 21 - August 25, 2017 at 10:00 am』 (2017年8月25日) (オンライン) 入手先 : <http://www.nhc.noaa.gov/archive/2017/al09/al092017.public.021.shtml?> (閲覧日 : 2017年12月30日)
- [27] FEMA, 『Historic Disaster Response to Hurricane Harvey in Texas』 (2017年9月22日) (オンライン) 入手先 : <https://www.fema.gov/news-release/2017/09/22/historic-disaster-response-hurricane-harvey-texas> (閲覧日 : 2018年1月3日)
- [28] FEMA (オンライン) 入手先 : <https://www.fema.gov/disaster/4332> (閲覧日 : 2018年1月5日)。
- [29] HCFCF, 『Gauge Station 1740 Data』 (2017年) (オンライン) 入手先 : <https://www.harriscountyfws.org/GageDetail/Index/1740?span=24%20Hours&v=rainfall> (閲覧日 : 2017年12月31日)
- [30] 国立ハリケーンセンター, 『Hurricane Harvey Discussion Number 23 - August 25, 2017 at 10:00 pm』 (2017年8月25日) (オンライン) 入手先 : <http://www.nhc.noaa.gov/archive/2017/al09/al092017.discus.023.shtml?>

- [31] 国立ハリケーンセンター, 『Hurricane Harvey Discussion Number 25 - August 26, 2017 at 10:00 am』 (2017年8月26日) (オンライン) 入手先 : <http://www.nhc.noaa.gov/archive/2017/al09/al092017.discus.025.shtml?>
- [32] 国立ハリケーンセンター, 『Tropical Storm Harvey Discussion Number 27 - August 26, 2017 at 10:00 pm』 (2017年8月26日) (オンライン) 入手先 : <http://www.nhc.noaa.gov/archive/2017/al09/al092017.discus.027.shtml?>
- [33] アルケマ, 『At Arkema Chemicals. Crosby, TX.』 (2017年8月31日) (オンライン) 入手先 : <https://www.facebook.com/ArkemaGroup/photos/pcb.1440874039292495/1440865229293376/?type=3&theater> (閲覧日 : 2018年5月3日)
- [34] テキサス州公共安全局, 『Texas Commercial Motor Vehicle Drivers Handbook』 (2014年6月) (オンライン) 入手先 : <https://www.dps.texas.gov/internetforms/Forms/DL-7C.pdf> (閲覧日 : 2018年4月19日)。
- [35] アルケマ, 『Arkema Crosby Press Updates』 (オンライン) 入手先 : <https://www.arkema-americas.com/en/social-responsibility/incident-page-2/previous-update-statements/> (閲覧日 : 2018年1月17日)。
- [36] KHOU, 『KHOU.COM』 (オンライン) (閲覧日 : 2018年1月8日)。
- [37] R. Gold, E. Ailworth, 『Chemicals Catch Fire at Plant Flooded by Harvey』 (2017年8月31日) (オンライン) 入手先 : <https://www.wsj.com/articles/explosions-reported-at-arkema-chemical-plant-1504173125> (閲覧日 : 2018年5月3日)。
- [38] アルケマ, 『Comments from Rich Rowe, President & CEO, Arkema Inc on our Site in Crosby, Texas』 (2017年8月30日) (オンライン) 入手先 : <https://www.arkema-americas.com/en/social-responsibility/incident-page-2/presidents-message/> (閲覧日 : 2017年12月30日)。
- [39] テキサス州ハリス郡, 『Harris County Pollution Control Response to Arkema Fire』 (2017年9月1日) (オンライン) 入手先 : <http://www.readyharris.org/News-Information/Ready-Harris-News/Post/26812> (閲覧日 : 2017年12月30日)。
- [40] A. Berzon, 『Questions Arise About Health Hazards From Chemical-Plant Explosions』 (2017年9月9日) (オンライン) 入手先 : <https://www.wsj.com/articles/questions-arise-about-health-hazards-from-chemical-plant-explosions-1504962592> (閲覧日 : 2018年5月3日)。
- [41] M. Evans, C. M. Matthews, 『New Fires Erupt at Arkema Plant Outside Houston』 (2017年9月1日) (オンライン) 入手先 : <https://www.wsj.com/articles/new-fires-erupt-at-arkema-plant-outside-houston-1504307845> (閲覧日 : 2018年5月3日)。
- [42] ハリス郡消防署長事務所, 『Statement Regarding Arkema Incident』 (2017年9月3日) (オンライン) 入手先 : <https://pbs.twimg.com/media/DI1BoPGUMAAVjyO.jpg> (閲覧日 : 2017年12月30日)。
- [43] HCFCD, 『About The District』 (2017年) (オンライン) 入手先 : <https://www.hcfcd.org/about/>
- [44] USNOAA, 『Hurricane Flooding: A Deadly Inland Danger - Think Inland Flooding』 (オンライン) 入手先 : <https://www.weather.gov/media/owlie/InlandFlooding.pdf>
- [45] USDOE, 『Hurricane Harvey: Event Report (Update #1)』 (2017年8月26日) (オンライン) 入手先 : <https://energy.gov/sites/prod/files/2017/10/f37/Hurricane%20Harvey%20Event%20Summary%20%231.pdf> (閲覧日 : 2017年12月20日)。
- [46] HCFCD, 『Hurricane Harvey: Harris County Has Never Seen A Storm Like Harvey』 (2017年9月17日) (オンライン) 入手先 : <https://www.hcfcd.org/hurricane-harvey/>
- [47] HCFCD, 『About FWS (Flood Warning System)』 (2017年) (オンライン) 入手先 : <https://www.harriscountyfws.org/About>

- [48] HCFCFD, 『Harris County Flood Warning System』 (2017年) (オンライン) 入手先 : <https://www.harriscountyfws.org/> (閲覧日 : 2018年1月1日)。
- [49] FEMA, 『Flood Insurance Study: Harris County, Texas and Incorporated Areas: Volume 1 of 12』 (2017年1月6日) (オンライン) 入手先 : <https://msc.fema.gov/portal/search> (閲覧日 : 2018年1月1日)。
- [50] HCFCFD, 『Cedar Bayou』 (2017年) (オンライン) 入手先 : <https://www.hcfcfd.org/projects-studies/cedar-bayou/>
- [51] FEMA, 『Chapter 10: The National Flood Insurance Program』 (オンライン) 入手先 : <https://training.fema.gov/hiedu/docs/fmc/chapter%2010%20-%20the%20national%20flood%20insurance%20program.pdf>
- [52] FEMA, 『Chapter 6: Utilizing Information from Flood Hazard Studies』 (オンライン) 入手先 : <https://training.fema.gov/hiedu/docs/fmc/chapter%206%20-%20utilizing%20information%20from%20flood%20hazard%20studies.pdf> (閲覧日 : 2018年1月1日)。
- [53] HCFCFD, 『Flood Education Mapping Tool』 (2017年) (オンライン) 入手先 : <http://www.harriscountyfemt.org/> (閲覧日 : 2018年1月1日)。
- [54] USDOJ, 『Technique for Estimating the Magnitude and Frequency of Floods in the Houston, Texas, Metropolitan Area』 (1980年4月) (オンライン) 入手先 : <https://pubs.usgs.gov/wri/1980/0017/report.pdf> (閲覧日 : 2018年1月1日)。
- [55] 米国気象局, 『Flood Return Period Calculator』 (オンライン) 入手先 : https://www.weather.gov/epz/wxcalc_floodperiod (閲覧日 : 2018年1月1日)。
- [56] FEMA, 『FEMA Flood Map Service Center: FIRM 4802870240D』 (1985年9月27日) (オンライン) 入手先 : <https://msc.fema.gov/portal> (閲覧日 : 2018年1月1日)。
- [57] FEMA, 『FEMA Flood Map Service Center: FIRM 48201C0535J』 (1996年11月6日) (オンライン) 入手先 : <https://msc.fema.gov/portal> (閲覧日 : 2018年1月1日)。
- [58] FEMA, 『FEMA Flood Map Service Center: FIRM 48201C0535L』 (2007年6月18日) (オンライン) 入手先 : <https://msc.fema.gov/portal>
- [59] FEMA, 『Flood Insurance Study』 (2017年3月7日) (オンライン) 入手先 : <https://www.fema.gov/flood-insurance-study>
- [60] FEMA, 『Flood Insurance Study: Harris County, Texas and Incorporated Areas: Volume 8 of 12』 (2017年1月6日) (オンライン) 入手先 : <https://msc.fema.gov/portal> (閲覧日 : 2018年1月1日)。
- [61] FEMA, 『Designing for Flood Levels Above the BFE [Base Flood Elevation] After Hurricane Sandy』 (2013年4月) (オンライン) 入手先 : https://www.fema.gov/media-library-data/1381405016896-8bdeadf634c366439c35568a588feb24/SandyRA5DesignAboveBFE_508_FINAL2.pdf (閲覧日 : 2018年1月1日)。
- [62] FM Global, 『2017 Resilience Index Annual Report』 (2017年) (オンライン) 入手先 : https://www.fmglobal.com/~media/Files/FMGlobal/Resilience%20Index/Resilience_Methodology.pdf?la=en
- [63] FM Global, 『Using Predictive Analytics, FM Global Takes the Guesswork Out of Risk Management』 (2017年) (オンライン) 入手先 : <https://www.fmglobal.com/products-and-services/services/predictive-analytics>
- [64] AFM, 『Benchmarking Risk Quality』 (2018年) (オンライン) 入手先 : <http://www.affiliatedfm.com.au/About/News/envision-11-2-risk-quality.aspx>

- [65] NITCO, 『Types of Forklifts: Selecting the Right Equipment for the Job』 (オンライン) 入手先 : <https://www.nitco-lift.com/blog/types-of-forklifts/> (閲覧日 : 2017年10月27日)。
- [66] Sundance, 『Flat Bottom Boat Advantages』 (2017年) (オンライン) 入手先 : <http://www.sundanceboats.com/flat-bottom-boat-advantages/> (閲覧日 : 2017年10月31日)。
- [67] HCFCD, 『Tropical Storm Allison』 (2017年) (オンライン) 入手先 : <https://www.hcfcd.org/storm-center/tropical-storm-allison-2001/>
- [68] HCFCD, 『Hurricane Ike』 (2017年) (オンライン) 入手先 : <https://www.hcfcd.org/storm-center/hurricane-ike-2008/> (閲覧日 : 2018年1月1日)。
- [69] Hurricanes: Science and Society, 『2005 - Hurricane Rita』 (2015年) (オンライン) 入手先 : <http://www.hurricanesociety.org/history/storms/2000s/rita/> (閲覧日 : 2018年1月1日)。
- [70] ASCE, 『Highlights of ASCE 24-14: Flood Resistant Design and Construction』 (2014年) (オンライン) 入手先 : https://www.fema.gov/media-library-data/1436288616344-93e90f72a5e4ba75bac2c5bb0c92d251/ASCE24-14_Highlights_Jan2015_revise2.pdf
- [71] CCPS, 『Guidelines for Safe Warehousing of Chemicals』, 米国化学工学会 (AIChE) : ニューヨーク (1998年)
- [72] CCPS, 『Guidelines for Technical Planning for On-Site Emergencies』, 米国化学工学会 (AIChE) : ニューヨーク (1995年)
- [73] FEMA, 『Emergency Power Systems for Critical Facilities: A Best Practices Approach to Improving Reliability』 (2014年9月1日) (オンライン) 入手先 : https://www.fema.gov/media-library-data/1424214818421-60725708b37ee7c1dd72a8fc84a8e498/FEMAP-1019_Final_02-06-2015.pdf
- [74] USEPA, 『Best Practices for Increasing Resiliency at EPA Facilities』 (2017年1月12日) (オンライン) 入手先 : https://19january2017snapshot.epa.gov/greeningepa/best-practices-increasing-resiliency-epa-facilities_.html (閲覧日 : 2017年10月21日)。
- [75] FM Global, 『Creating a Flood Emergency Response Plan』 (2017年3月) (オンライン) 入手先 : <https://www.fmglobal.com/~media/Files/FMGlobal/Nat%20Haz%20Toolkit/P0589.pdf> (閲覧日 : 2018年1月1日)。
- [76] 環境庁, 『Preparing for flooding: A guide for sites regulated under EEP and COMAH (June 2015)』 (2015年6月) (オンライン) 入手先 : https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/439863/LIT_7176.pdf (閲覧日 : 2018年1月1日)
- [77] 米国化学工業協会, 『Safeguarding chemical businesses in a changing climate: How to prepare a Climate Change Adaptation Plan』 (2015年3月) (オンライン) 入手先 : http://www.chemical.org.uk/downloads/5300/0/Climate_Change_Adaptation_guidance_Final_March2015.pdf.aspx (閲覧日 : 2017年9月23日)
- [78] 国連防災機関, 『Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030』 (2015年3月18日) (オンライン) 入手先 : http://www.unisdr.org/files/43291_sendaiframeworkfordrren.pdf (閲覧日 : 2018年1月1日)。
- [79] 米国労働省 (USDOL) / 米国労働安全衛生局, 『Process Safety Management Guidelines for Compliance- OSHA 3133』 (1994年) (オンライン) 入手先 : <https://www.osha.gov/Publications/osha3133.html> (閲覧日 : 2018年2月21日)。
- [80] USDOL, 『OSHA Comments on CSB Draft Investigation Report of the Arkema Crosby Incident』 (2018年)

- [81] USDOL, 『Process Safety Management Guidelines for Compliance: OSHA 3133』 (1994年 (再版)) (オンライン) 入手先 : <https://www.osha.gov/Publications/osha3133.pdf> (閲覧日 : 2017年1月22日)。
- [82] USEPA, 『Risk Management Plan Rule, Summary and Response to Comments』 (1996年)
- [83] USEPA, 『General Risk Management Program Guidance: Chapter 6: Prevention Program (Program 2)』 (2004年4月) (オンライン) 入手先 : <https://www.epa.gov/sites/production/files/2013-11/documents/chap-06-final.pdf> (閲覧日 : 2018年4月19日)。
- [84] USEPA, 『EPA Comments on CSB Draft Investigation Report of the Arkema Crosby Incident』 (2018年)
- [85] E. Krausman, A. M. Cruz, E. Salzano, 『Natech Risk Assessment and Management』, Elsevier: オックスフォード (2017年)
- [86] USCSB, 『Hazard Investigation: Improving Reactive Hazard Management: 2001-01-H』 (2002年10月) (オンライン) 入手先 : <https://www.csb.gov/improving-reactive-hazard-management/> (閲覧日 : 2017年1月22日)。
- [87] USCSB, 『Fire and Explosion: Hazards of Benzoyl Peroxide - Report No. 2003-3-C-OH』 (2003年10月) (オンライン) 入手先 : <https://www.csb.gov/file.aspx?DocumentId=5587>
- [88] USCSB, 『Recommendations Status Change Summary: Improving Reactive Hazard Management: 2001-1-H-R3』 (2014年3月11日) (オンライン) 入手先 : https://www.csb.gov/assets/recommendation/status_change_summary_reactives_r3.pdf (閲覧日 : 2017年2月19日)。
- [89] N. Prophet, 『The Benefits of a Risk-Based Approach to Facility Siting』 『Global Congress on Process Safety』 (2012年)
- [90] USCSB, 『Urgent Trailer Siting Recommendation』 (2005年10月25日) (オンライン) 入手先 : https://www.csb.gov/assets/1/20/bp_recs_2.pdf?13853 (閲覧日 : 2018年4月18日)。
- [91] 米国石油協会 (API : American Petroleum Institute), 『API Recommended Practice 752, Management of Hazards Associated with Location of Process Plant Permanent Buildings』, API: ワシントンD.C. (2009年)
- [92] CCPS, 『Guidelines for Hazard Evaluation Procedures』, 第三版、Wiley-Interscience: ニューヨーク (2008年)
- [93] CCPS, 『Guidelines for Facility Siting and Layout』, Wiley-Interscience: ニューヨーク (2003年)
- [94] Exponent, 『Flood Hazard Analysis』 (オンライン) 入手先 : <https://www.exponent.com/services/practices/engineering/civil-engineering/capabilities/water-resources/flood-hazard-analysis/?serviceId=179e99e8-7fd8-4725-a8a4-6c74a7b74915&loadAllByPageSize=true&knowledgePageSize=3&knowledgePageNum=0&newseventPageSize=3> (閲覧日 : 2018年2月8日)。
- [95] 国際原子力機関 (IAEA) 事務局長, 『The Fukushima Daiichi Accident』 (2015年) (オンライン) 入手先 : <http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1710-ReportByTheDG-Web.pdf> (閲覧日 : 2018年1月1日)。
- [96] USDOI, 『Floods in Southeast Texas, October 1994』 (1995年1月) (オンライン) 入手先 : <https://pubs.usgs.gov/fs/fs-073-94/pdf/FS-94-073.pdf> (閲覧日 : 2018年1月18日)。
- [97] HCFCD, 『Harris County's Watersheds: A Web of Watersheds and Sub-Watersheds』 (2017年) (オンライン) 入手先 : <https://www.hcfcd.org/drainage-network/harris-countys-watersheds/>
- [98] USNTSB, 『Evaluation of Pipeline Failures During Flooding and of Spill Response Actions, San Jacinto River Near Houston, Texas, October 1994』 (1996年9月6日) (オンライン) 入手先 : <https://permanent.access.gpo.gov/lps109479/SIR9604.pdf> (閲覧日 : 2018年1月18日)。

- [99] Channel 13 Eyewitness News (ヒューストン), 『River of Fire: Remembering the Flood of 1994』 (2016年10月20日) (オンライン) 入手先: <http://abc13.com/news/fire-and-rain-remembering-the-flood-of-1994/1563118/#gallery-17> (閲覧日: 2018年1月18日)。
- [100] USDHS (米国国土安全保障省), 『Federal Government Continues Response to Hurricane Harvey』 (2017年9月1日) (オンライン) 入手先: <https://www.dhs.gov/news/2017/09/01/federal-government-continues-response-hurricane-harvey> (閲覧日: 2018年1月5日)。
- [101] USEPA, 『EPA's Response to Hurricane Harvey』 (2017年) (オンライン) 入手先: <https://epa.maps.arcgis.com/apps/MapJournal/index.html?appid=fadbae6b2832436fb65ca497bd75b9a6> (閲覧日: 2018年1月11日)
- [102] 急性曝露指針レベル委員会, 毒性学委員会, 米国科学アカデミー附属研究会議, 『Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals: Volume 8』 (2010年) (オンライン) 入手先: https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-11/documents/sulfurdioxide_final_volume8_2010.pdf (閲覧日: 2018年1月23日)
- [103] USEPA, 『Air Quality Index: A Guide to Air Quality and Your Health』 (2014年2月) (オンライン) 入手先: https://www3.epa.gov/airnow/aqi_brochure_02_14.pdf (閲覧日: 2018年1月23日)。
- [104] A. M. Cruz, L. J. Steinberg, A. L. Arellano, J.-P. Nordvik, F. Pisano, 『State of the Art in Natech Risk Management』 (2004年) (オンライン) 入手先: http://www.unisdr.org/files/2631_FinalNatechStateofthe20Artcorrected.pdf (閲覧日: 2018年1月24日)。
- [105] USEPA, 『Climate Action Benefits: Water Resources』 (2015年6月22日) (オンライン) 入手先: <https://www.epa.gov/cira/climate-action-benefits-water-resources> (閲覧日: 2018年1月23日)。
- [106] USEPA, 『Climate Action Benefits: Inland Flooding』 (2015年6月22日) (オンライン) 入手先: <https://www.epa.gov/cira/climate-action-benefits-inland-flooding> (閲覧日: 2017年10月21日)。
- [107] Swiss Re, 『Global insured losses from disaster events were USD 54 billion in 2016, up 42% from 2015, latest Swiss Re Institute sigma says』 (2017年3月28日) (オンライン) 入手先: http://www.swissre.com/media/news_releases/nr20170328_sigma_2_2017.html (閲覧日: 2017年12月18日)。
- [108] Swiss Re Institute, 『Natural catastrophes and man-made disasters in 2016: a year of widespread damages』 (2017年2月10日) (オンライン) 入手先: http://media.swissre.com/documents/sigma2_2017_en.pdf (閲覧日: 2017年12月18日)。
- [109] USEPA, 『Status of Superfund Sites in Areas Affected by Harvey』 (2017年9月2日) (オンライン) 入手先: <https://www.epa.gov/newsreleases/status-superfund-sites-areas-affected-harvey> (閲覧日: 2018年1月11日)。
- [110] USEPA, 『Hurricane Harvey 2017』 (2018年) (オンライン) 入手先: https://response.epa.gov/site/doc_list.aspx?site_id=12353 (閲覧日: 2018年1月11日)。
- [111] USEPA, 『San Jacinto River Waste Pits Superfund Site』 (2017年12月) (オンライン) 入手先: <https://www.epa.gov/tx/sjrwp> (閲覧日: 2018年1月11日)。
- [112] USEPA, 『San Jacinto River Waste Pits Site: Harris County, Texas』 (2016年9月) (オンライン) 入手先: https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-10/documents/100001061_1.pdf (閲覧日: 2018年1月11日)。
- [113] USEPA, 『San Jacinto Waste Pits Superfund Site - Update』 (2017年10月12日) (オンライン) 入手先: <https://www.epa.gov/newsreleases/san-jacinto-waste-pits-superfund-site-update> (閲覧日: 2018年1月11日)。

- [114] USEPA, 『Additional Repairs Planned for San Jacinto Waste Pits Superfund Site』 (2017年10月19日) (オンライン) 入手先 : <https://www.epa.gov/newsreleases/additional-repairs-planned-san-jacinto-waste-pits-superfund-site> (閲覧日 : 2018年1月11日)。
- [115] USEPA, 『National Response Center』 (2017年6月1日) (オンライン) 入手先 : <https://www.epa.gov/emergency-response/national-response-center> (閲覧日 : 2018年1月11日)。
- [116] USCG, 『Welcome to the National Response Center』 (2018年) (オンライン) 入手先 : <http://www.nrc.uscg.mil/> (閲覧日 : 2018年1月11日)。
- [117] USDOE, 『Hurricane Harvey: Event Report (Update #5)』 (2017年8月28日) (オンライン) 入手先 : <https://energy.gov/sites/prod/files/2017/10/f37/Hurricane%20Harvey%20Event%20Summary%20%235.pdf> (閲覧日 : 2018年1月11日)。
- [118] USDOE, 『Hurricane Harvey: Event Report (Update #1)』 (2017年8月26日) (オンライン) 入手先 : <https://energy.gov/sites/prod/files/2017/10/f37/Hurricane%20Harvey%20Event%20Summary%20%231.pdf> (閲覧日 : 2018年1月11日)。
- [119] Magellan, 『Crude Products』 (2018年) (オンライン) 入手先 : <https://www.magellanlp.com/WhatWeDo/CrudeProducts.aspx> (閲覧日 : 2018年1月11日)。
- [120] Magellan, 『Texas Crude Oil and Condensate Logistics and Export Opportunities』 (2017年5月) (オンライン) 入手先 : <https://www.magellanlp.com/Investors/~media/D813687464FF4252B3BA8C7241BD8769.ashx?db=master> (閲覧日 : 2018年1月11日)。
- [121] TCEQ, 『Air Emission Event Reporting Data: Galena Park Terminal』 (2017年9月12日) (オンライン) 入手先 : <http://www2.tceq.texas.gov/oce/eer/index.cfm?fuseaction=main.getDetails&target=266754> (閲覧日 : 2018年1月11日)。
- [122] アルケマ, 『Products and Raw Materials on site in Crosby, Texas』 (2017年) (オンライン) 入手先 : <http://www.arkema-america.com/en/social-responsibility/incident-page-2/products-and-raw-materials/> (閲覧日 : 2017年12月31日)。
- [123] NFPA, 『NFPA 432: Code for the Storage of Organic Peroxide Formulations』 (2002年) (オンライン) 入手先 : <http://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=432>
- [124] アルケマ, 『Safety Data Sheet: Luperox 221』 (2015年10月18日) (オンライン) 入手先 : http://www.quickfds.com/cmt_bin/wfds-affform2?compte=ATO?US_PI.EN&langue=EN&transaction=181400109204877&client=&societe=&code_fds=
- [125] 米国海洋大気庁 (NOAA), 『Exceedance Probability Analysis for Selected Storm Events』 (2017年9月21日) (オンライン) 入手先 : ftp://hdsc.nws.noaa.gov/pub/hdsc/data/aep/201708_Harvey/AEP_HurricaneHarvey_August2017.pdf (閲覧日 : 2018年4月3日)
- [126] CCPS, 『Layer of Protection Analysis - Simplified Risk Assessment』, New York: 米国化学工学会 (AIChE) : ニューヨーク, 2001.
- [127] HCFCD, 『Hurricane Harvey FAQs』 (2017年9月17日) (オンライン) 入手先 : <https://www.hcfcd.org/hurricane-harvey/hurricane-harvey-faqs/>
- [128] USACE, 『Flood Risk Management: Floodplains and Floodways』 (2012年6月8日) (オンライン) 入手先 : <https://www.youtube.com/watch?v=Pqyessf4xBA>

- [129] Souther Tier Central Regional Planning & Development Board, 『Floodway Encroachments』 (オンライン) 入手先 :
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEwi6ncfJ6q3WAhXn8YMKHRd4CqUQFgguMAE&url=https%3A%2F%2Fwww.floods.org%2Ffiles%2Foutreach%2FFP_Facts_12_Floodway_Encroachments.doc&usg=AFQjCNHus-WSsPPUq9pVliKFyD_cfzbZjg
- [130] J. M. Wright, 『Floodplain Management: Principles and Current Practices』 (2007年) (オンライン) 入手先 :
<https://training.fema.gov/hiedu/docs/fmc/cover.pdf>
- [131] FEMA, 『Chapter 4: Risk Assessment』 (オンライン) 入手先 :
<https://training.fema.gov/hiedu/docs/fmc/chapter%204%20-%20flood%20risk%20assessment.pdf>
- [132] FEMA, 『Chapter 1: Floods and Floodplains』 (オンライン) 入手先 :
<https://training.fema.gov/hiedu/docs/fmc/chapter%201%20-%20floods%20and%20floodplains.pdf>
- [133] FEMA, 『Chapter 2: Types of Floods and Floodplains』 (オンライン) 入手先 :
<https://training.fema.gov/hiedu/docs/fmc/chapter%202%20-%20types%20of%20floods%20and%20floodplains.pdf>
- [134] FEMA, 『Selected References』 (オンライン) 入手先 :
<https://training.fema.gov/hiedu/docs/fmc/selected%20references.pdf>
- [135] FEMA, 『Chapter 5: Delineating Flood-Prone Areas』 (オンライン) 入手先 :
<https://training.fema.gov/hiedu/docs/fmc/chapter%205%20-%20delineating%20flood-prone%20areas.pdf>
- [136] FEMA, 『Chapter 3: Evolution of Policies and Approaches to Address Flooding』 (オンライン) 入手先 :
<https://training.fema.gov/hiedu/docs/fmc/chapter%203%20-%20evolution%20of%20policies%20and%20approaches%20to%20address%20.pdf>
- [137] J. M. Wright, 『The Nation's Responses to Flood Disasters: A Historical Account』 (2000年4月) (オンライン) 入手先 : http://www.floods.org/PDF/hist_fpm.pdf
- [138] FEMA, 『Unit 3: NFIP Flood Studies and Maps』 (オンライン) 入手先 :
https://www.fema.gov/pdf/floodplain/nfip_sg_unit_3.pdf
- [139] HCFCD, 『Harris County Flood Warning System - Glossary of Terms』 (2017年) (オンライン) 入手先 :
<https://www.harriscountyfws.org/Glossary>
- [140] USDOJ, 『Guidelines for Determining Flood Flow Frequency: Bulletin # 17B of the Hydrology Subcommittee』 (1982年3月) (オンライン) 入手先 : https://water.usgs.gov/osw/bulletin17b/dl_flow.pdf
- [141] パデュー大学, 『Plan Today For Tomorrow's Flood: A Flood Response Plan for Agricultural Retailers』 (オンライン) 入手先 : <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/PPP/PPP-87.pdf>
- [142] Silver Jackets, 『Emergency Action Plan Guidebook』 (2015年1月) (オンライン) 入手先 :
<http://www.lrh.usace.army.mil/Portals/38/docs/civil%20works/Emergency%20Action%20Plan%20Guidebook.pdf>
- [143] A. Whitfield, 『Assessing and Reducing Flood Risks on Major Hazard Sites』 (2003年) (オンライン) 入手先 :
https://www.icheme.org/communities/subject_groups/safety%20and%20loss%20prevention/resources/hazards%20archive/~media/Documents/Subject%20Groups/Safety_Loss_Prevention/Hazards%20Archive/XVII/XVII-Paper-11.pdf
- [144] Floodline - スコットランド環境保護庁, 『Prepare for flooding: A guide for Regulated Sites in Scotland』 (2015年5月) (オンライン) 入手先 : http://www.floodlinescotland.org.uk/media/4141/regulated_sites_guide.pdf

- [145] 米国防火協会, 『NFPA 921: Guide for Fire & Explosion Investigations』 (2017年) (オンライン) 入手先 : <http://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards?mode=code&code=921>
- [146] USCSB, 『Board Order 040: Investigation Protocol』 (オンライン)
- [147] 英国国立公文書館, 『The Environmental Permitting (England and Wales) Regulations 2016』 (2016年) (オンライン) 入手先 : <http://www.legislation.gov.uk/ukxi/2016/1154/made>
- [148] 英国労働安全衛生庁 (HSE), 『About HSE』 (オンライン) 入手先 : <http://www.hse.gov.uk/aboutus/>
- [149] 英国環境庁, 『Environment Agency』 (オンライン) 入手先 : <https://www.gov.uk/government/organisations/environment-agency>
- [150] スコットランド環境保護庁, 『SEPA - Scottish Environment Protection Agency』 (オンライン) 入手先 : <https://www.sepa.org.uk/>
- [151] FEMA, 『Freeboard,』 (2017年3月7日) (オンライン) 入手先 : <https://www.fema.gov/freeboard>
- [152] アルケマ, 『Safety Data Sheets』 (オンライン) 入手先 : http://www.quickfds.com/cmt_bin/wfds-affform2?compte=ATO%A7US_PI.EN&langue=EN&transaction=181751930121166&client=&societe=&code_fds=
- [153] アルケマ, 『Organic Peroxides - Storage Temperature, SADT, and Storage Stability』 (2007年) (オンライン) 入手先 : <http://www.luperox.com/export/sites/organicperoxide/.content/medias/downloads/literature/storage-temperature.pdf>
- [154] アルケマ, 『Recommended Disposal Method for Organic Peroxides』 (2007年) (オンライン) 入手先 : <http://www.luperox.com/export/sites/organicperoxide/.content/medias/downloads/literature/recommended-disposal-methods.pdf>
- [155] アルケマ, 『Dialkyl Peroxides』 (2007年) (オンライン) 入手先 : https://intranet.ssp.ulaval.ca/cgpc/fsss/fichiers/LUPEROX%20101XL45_dialkyl-peroxides%20tech.pdf
- [156] アルケマ, 『Organic Peroxides』 (オンライン) 入手先 : <https://www.arkema.com/en/arkema-group/organization/high-performance-materials/performance-additives/functional-additives/>
- [157] CCOHS, 『Organic Peroxides - Hazards』 (2017年9月29日) (オンライン) 入手先 : https://www.ccohs.ca/oshanswers/chemicals/organic/organic_peroxide.html
- [158] ChemicalSafetyFacts.org, 『Organic Peroxide』 (2017年) (オンライン) 入手先 : <https://www.chemicalsafetyfacts.org/organic-peroxide/>
- [159] EHS, 『Organic Peroxide』 (オンライン) 入手先 : <http://www.ehsdb.com/organic-peroxide.php>
- [160] AkzoNobel, 『AkzoNobel Safety Services Organic Peroxides』 (2015年6月22日) (オンライン) 入手先 : <https://www.youtube.com/watch?v=OrGXltyUvFc>
- [161] SLAC, 『Organic Peroxides Safe Handling Guideline』 (2013年5月20日) (オンライン) 入手先 : <http://www-group.slac.stanford.edu/esh/eshmanual/references/chemsafetyGuidePeroxides.pdf>
- [162] C. M. McCloskey, 『Safe Handling of Organic Peroxides: An Overview』, 『Plant/Operations Progress』, Vol. 8, No. 4, pp. 185-188 (1989年10月)

- [163] CAMEO Chemicals, 『Organic Peroxide Types D, E, F』 (オンライン) 入手先 : <https://cameochemicals.noaa.gov/chemical/19079>
- [164] D. E. Clark, 『Peroxides and Peroxide-Forming Compounds』, 『*Chemical Health & Safety*』, pp. 12-22 (2001年)
- [165] AB Chemitrans, 『Organic Peroxide's Safe Handling and Use』 (オンライン) 入手先 : http://abchemitrans.com/dokumenty/Brochure_ORGANIC_PEROXIDES.pdf
- [166] AkzoNobel, 『Storage of Organic Peroxides』 (2011年) (オンライン) 入手先 : https://polymerchemistry.akzonobel.com/siteassets/brochures/akzonobel_storage_of_organic_peroxides_low-res_protected_june2011.pdf
- [167] HSE, 『The Control of Major Accident Hazards Regulations 2015』 (2015年) (オンライン) 入手先 : <http://www.hse.gov.uk/pUbns/priced/1111.pdf>
- [168] NFPA, 『NFPA 400: Hazardous Materials Code』 (2016年) (オンライン) 入手先 : <http://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=400>
- [169] NFPA, 『NFPA 110: Standard for Emergency and Standby Power Systems』 (2016年) (オンライン) 入手先 : <http://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=110>
- [170] NFPA, 『NFPA 111: Standard on Stored Electrical Energy Emergency and Standby Power Systems』 (2016年) (オンライン) 入手先 : <http://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=111>
- [171] NFPA, 『NFPA 495: Explosive Materials Code』 (2013年) (オンライン) 入手先 : <http://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=495>
- [172] NFPA, 『Standard System for the Identification of the Hazards of Materials for Emergency Response』 (2017年) (オンライン) 入手先 : <http://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=704>
- [173] AkzoNobel, 『Unsaturated Polyester Resin Curing』 (2017年2月14日) (オンライン) 入手先 : <https://www.youtube.com/watch?v=ZEjXmHwEWFc&t=94s>
- [174] AkzoNobel, 『Free Radical Polymerization』 (2016年7月20日) (オンライン) 入手先 : <https://www.youtube.com/watch?v=0yOJajPJptA>
- [175] AkzoNobel, 『Crosslinking Polymers with Organic Peroxides』 (2016年7月20日) (オンライン) 入手先 : <https://www.youtube.com/watch?v=dXT1r5WA6SM&t=1s>
- [176] HSE, 『Chemical Reaction Hazards and the Risk of Thermal Runaway』 (2014年8月) (オンライン) 入手先 : <http://www.hse.gov.uk/pubns/indg254.pdf>
- [177] R. W. Johnson, 『Introduction to Layer of Protection Analysis (LOPA)』 (オンライン) 入手先 : <https://www.aiche.org/academy/videos/introduction-layer-protection-analysis-lopa>
- [178] CCPS, 『CCPS Process Safety Glossary』 (オンライン) 入手先 : <http://www.aiche.org/ccps/resources/glossary> (閲覧日 : 2017年2月1日)。
- [179] J. Melillo, T. C. Richmond, G. Yohe, 『Climate Change Impacts in the United States』 (2014年) (オンライン) 入手先 : http://s3.amazonaws.com/nca2014/high/NCA3_Climate_Change_Impacts_in_the_United%20States_HighRes.pdf

- [180] USEPA, 『Climate Change in the United States: Benefits of Global Action』 (2017年1月18日) (オンライン) 入手先 : <https://www.epa.gov/cira>
- [181] USEPA, 『Climate Action Benefits: Key Findings』 (2015年6月22日) (オンライン) 入手先 : <https://www.epa.gov/cira/climate-action-benefits-key-findings#national-highlights> (閲覧日 : 2017年10月21日)。
- [182] USEPA, 『Estimated Flood Damages Due to Unmitigated Climate Change』 (オンライン) 入手先 : <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/flooding-fig-1-download.png>
- [183] 合衆国地球変動研究プログラム, 『Water Resources』 (2014年) (オンライン) 入手先 : <http://nca2014.globalchange.gov/report/sectors/water>
- [184] USEPA, 『Climate Change in the United States: Benefits of Global Action』 (2015年) (オンライン) 入手先 : <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/cirareport.pdf>
- [185] USEPA, 『Climate Change: Basic Information』 (2017年5月9日) (オンライン) 入手先 : <https://archive.epa.gov/epa/climatechange/climate-change-basic-information.html>
- [186] C. A. Challener, 『Hurricane Season Rapidly Approaches: Lessons Learned and Tips for Weathering the Next Storm』 (2006年5月22日) (オンライン) 入手先 : <http://www.chemalliance.org/featured/?sec=5&id=7017>
- [187] Louisiana Chemical Association, 『KatRita』 (2006年) (オンライン) 入手先 : <https://web.archive.org/web/20061208080941/http://www.lca.org:80/documents/Learings%20Final%202002%2017%2006.pdf>
- [188] Louisiana Chemical Association, 『Storm Preparation Document Version 2』 (2006年5月30日) (オンライン) 入手先 : <https://web.archive.org/web/20060923061107/http://www.lca.org/documents/Storm%20Preparation%20Document%20Version%202.pdf>
- [189] USDOE, 『Is Your Plant Prepared for a Hurricane?』 (2006年7月) (オンライン) 入手先 : <https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/pdfs/40324.pdf>
- [190] 環境庁, 『Flood Risk Assessment in Flood Zones 2 and 3』 (2017年2月27日) (オンライン) 入手先 : <https://www.gov.uk/guidance/flood-risk-assessment-in-flood-zones-2-and-3#assessments>
- [191] ASCE, 『Highlights of ASCE 24-05: Flood Resistant Design and Construction』 (2010年12月) (オンライン) 入手先 : https://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1643-20490-4974/asce24_highlights_dec2010.pdf
- [192] CIA, 『Chemical Industries Association』 (2017年) (オンライン) 入手先 : <https://www.cia.org.uk/>
- [193] CBA, 『Chemical Business Association』 (2017年) (オンライン) 入手先 : <http://www.chemical.org.uk/home.aspx>
- [194] NFA, 『Non-Ferrous Alliance』 (オンライン) 入手先 : <http://www.nfalliance.org.uk/>
- [195] The Guardian, 『Environment Agency Closes Climate Change Advice Service』 (2016年4月14日) (オンライン) 入手先 : <https://www.theguardian.com/environment/2016/apr/14/environment-agency-closes-climate-change-advice-service>
- [196] 環境庁, 『Climate Ready』 (2014年1月16日) (オンライン) 入手先 : <http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20140328084915/http://www.environment-agency.gov.uk/research/137557.aspx>

- [197] S. Kuzydym, S. Noll, 『Inside the Confusion and Contradictions Surrounding the Arkema Chemical Explosion』 (2017年9月) (オンライン) 入手先 : <http://www.khou.com/news/local/inside-the-confusion-and-contradictions-surrounding-the-arkema-chemical-explosion/470447818>
- [198] USEPA, 『Guidelines for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI)』 (2006年5月) (オンライン) 入手先 :
<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P1006KOQ.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2006+Thru+2010&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=>
- [199] USEPA, 『Process for Developing Acute Exposure Guideline Levels (AEGLs)』 (2016年9月6日) (オンライン) 入手先 : <https://www.epa.gov/aegl/process-developing-acute-exposure-guideline-levels-aegls>
- [200] USEPA, 『Acute Exposure Guideline Levels for Airborne Chemicals』 (2017年1月31日) (オンライン) 入手先 : <https://www.epa.gov/aegl>
- [201] USEPA, 『Sulfur Dioxide Results - AEGL Program』 (2016年9月1日) (オンライン) 入手先 : <https://www.epa.gov/aegl/sulfur-dioxide-results-aegl-program>
- [202] HCFCD, 『IKE Day 1, Day 2, and Storm Total Rainfall』 (オンライン) 入手先 : https://www.hcfc.org/media/1239/hurricane_ike_rainfall_report.pdf
- [203] 熱帯暴風雨アリソン復興プロジェクト, 『Off The Charts: Tropical Storm Allison Public Report』 (2002年6月) (オンライン) 入手先 : https://www.hcfc.org/media/1351/ts-allison_pubreportenglish.pdf
- [204] R. D. Knabb, D. P. Brown, J. R. Rhome, 『Tropical Cyclone Report: Hurricane Rita - 18-26 September 2005』 (2006年3月16日) (オンライン) 入手先 : http://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL182005_Rita.pdf
- [205] USEPA, 『List of Regulated Substances Under the Risk Management Plan (RMP) Rule』 (オンライン) 入手先 : <https://www.epa.gov/rmp/list-regulated-substances-under-risk-management-plan-rmp-program>
- [206] USEPA, 『Risk Management Plan (RMP) Rule』 (2017年8月28日) (オンライン) 入手先 : <https://www.epa.gov/rmp> (閲覧日 : 2017年10月27日)。
- [207] USDOL, 『1910.119 App A: List of Highly Hazardous Chemicals, Toxics and Reactives (Mandatory)』 (2011年12月27日) (オンライン) 入手先 : https://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARDS&p_id=9761
- [208] Documentary Tube, 『How it Works: Refrigerators (720p)』 (2015年6月22日) (オンライン) 入手先 : <https://www.youtube.com/watch?v=wzqTWv8zGIM>
- [209] KPRC, 『Crosby Arkema Plant Has History of Recent Violations』 (2017年8月31日) (オンライン) 入手先 : <https://www.click2houston.com/news/crosby-arkema-plant-has-history-of-recent-violations>
- [210] CBS SF Bay Area, 『Fire Burns at Crosby, Texas Chemical Plant』 (2017年9月1日) (オンライン) 入手先 : <https://www.youtube.com/watch?v=DpO4BJSgCe0>
- [211] 国立ハリケーンセンター, 『Tropical Storm Harvey Discussion Number 33 - August 28, 2017 at 10:00 am』 (2017年8月28日) (オンライン) 入手先 : <http://www.nhc.noaa.gov/archive/2017/al09/al092017.discus.033.shtml>
- [212] 米国運輸安全委員会, 『Evaluation of Pipeline Failures During Flooding and of Spill Response Actions, San Jacinto River Near Houston, Texas, October 1994』, ワシントンD.C. (1996年)

- [213] 米国気象局, 『weather.gov』 (オンライン) 入手先 : http://www.weather.gov/crp/hurricane_harvey (閲覧日 : 2017年10月31日)。
- [214] アルケマ, 『Reference Document 2016: Including the Annual Financial Report』 (2017年3月30日) (オンライン) 入手先 : <https://www.arkema.com/export/sites/global/.content/medias/downloads/investorrelations/en/finance/arkema-2016-reference-document.pdf> (閲覧日 : 2017年12月30日)。
- [215] FuseSchool, 『The Functional Group Explained』 (2013年5月23日) (オンライン) 入手先 : <https://www.youtube.com/watch?v=nMTQKBn2Iss> (閲覧日 : 2017年12月30日)。
- [216] USGS, 『100-Year Flood - It's All About Chance』 (2010年4月) (オンライン) 入手先 : https://pubs.usgs.gov/gip/106/pdf/100-year-flood_041210web.pdf (閲覧日 : 2018年1月1日)。
- [217] HCFCD, 『Glossary』 (2018年) (オンライン) 入手先 : <https://www.hcfcd.org/glossary/> (閲覧日 : 2018年1月1日)。
- [218] (オンライン)
- [219] 環境庁, 『Would your business stay afloat? A guide to preparing your business for flooding』 (オンライン) 入手先 : https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/410606/LIT_5284.pdf (閲覧日 : 2018年1月1日)。
- [220] 国連防災機関, 『Disaster Risk Reduction Terminology: Resilience』 (2017年2月2日) (オンライン) 入手先 : <https://www.unisdr.org/we/inform/terminology#letter-r> (閲覧日 : 2018年1月17日)。
- [221] A. Yung, D. Barrett, 『Rain by the Cubit: The Great Southeast Texas Flood of 1994』 (オンライン) 入手先 : <https://semsub.epa.gov/work/06/9108108.pdf> (閲覧日 : 2018年1月18日)。
- [222] Channel 13 Eyewitness News (ヒューストン), 『San Jac River Fire 1994』 (2014年10月7日) (オンライン) 入手先 : <https://www.youtube.com/watch?v=2kYmXxxHLX4> (閲覧日 : 2018年1月18日)。
- [223] FinanceRef/Alioth LLC., 『Inflation Calculator』 (2017年) (オンライン) 入手先 : <http://www.in2013dollars.com/1970-dollars-in-2017> (閲覧日 : 2018年1月24日)。
- [224] NOAA全米環境情報センター (NCEI : National Centers for Environmental Information), 『Billion - Dollar Weather and Climate Disasters: Table of Events』 (2018年) (オンライン) 入手先 : <https://www.ncdc.noaa.gov/billions/events/US/1980-2017> (閲覧日 : 2018年1月26日)。
- [225] H. Tabuchi, N. Popovich, B. Migliozzi, A. W. Lehren, 『Floods Are Getting Worse, and 2,500 Chemical Sites Lie in the Water's Path』, New York Times (2018年2月6日) (オンライン) 入手先 : <https://www.nytimes.com/interactive/2018/02/06/climate/flood-toxic-chemicals.html?hp&action=click&pgtype=Homepage&clickSource=g-artboard%20g-artboard-v4&module=second-column-region®ion=top-news&WT.nav=top-news> (閲覧日 : 2018年2月6日)。
- [226] 化学プロセス安全センター (CCPS), 『Guidelines for Auditing Process Safety Management Systems』, 第二版, Wiley: ニューヨーク (2011年)
- [227] ABS Group, 『Evaluation and Compliance with Facility Siting Regulations in the US』 (オンライン) 入手先 : <http://media.arpel2011.clk.com.uy/XX/23Fitzgerald.pdf> (閲覧日 : 2018年2月6日)
- [228] FEMA, 『Critical Facilities and Higher Standards』 (オンライン) 入手先 : https://www.fema.gov/media-library-data/1436818953164-4f8f6fc191d26a924f67911c5eaa6848/FPM_1_Page_CriticalFacilities.pdf (閲覧日 : 2018年2月21日)

- [229] USEPA, 『Climate Change: Basic Information』 (オンライン) 入手先 : <https://archive.epa.gov/epa/climatechange/climate-change-basic-information.html> (閲覧日 : 2018年2月21日)。
- [230] 化学プロセス安全センター (CCPS), 『CCPS Pamphlet Series: Recovery from Natural Disasters』 (2014年) (オンライン) 入手先 : https://www.aiche.org/sites/default/files/docs/summaries/natural_disaster_pamphlet-11-14-2014.pdf (閲覧日 : 2018年3月6日)。
- [231] C. Clements, 『The Structured What If / Checklist: A New Twist On An Old Approach』 (2012年4月3日) (オンライン) 入手先 : <https://www.aiche.org/academy/videos/conference-presentations/structured-what-ifchecklist-new-twist-on-old-approach> (閲覧日 : 2018年3月7日)。
- [232] アメリカ化学協議会, 『Responsible Care: About: Member Companies』 (2018年) (オンライン) 入手先 : <https://www.americanchemistry.com/Membership/MemberCompanies/> (閲覧日 : 2018年4月10日)。
- [233] アメリカ化学協議会, 『Responsible Care: Program Elements』 (2018年) (オンライン) 入手先 : <https://responsiblecare.americanchemistry.com/ResponsibleCare/Responsible-Care-Program-Elements.aspx> (閲覧日 : 2018年4月10日)。
- [234] NOAA, 『Harvey, Irma, Maria and Nate Retired by the World Meteorological Organization』 (2018年4月12日) (オンライン) 入手先 : <http://www.noaa.gov/media-release/harvey-irma-maria-and-nate-retired-by-world-meteorological-organization> (閲覧日 : 2018年4月13日)。
- [235] FMCSA, 『How to Comply with Federal Hazardous Materials Regulations』 (2014年12月17日) (オンライン) 入手先 : <https://www.fmcsa.dot.gov/regulations/hazardous-materials/how-comply-federal-hazardous-materials-regulations> (閲覧日 : 2018年4月17日)。
- [236] アルケマ, 『Luperox Organic Peroxide Safety Precautions』 (オンライン) 入手先 : <https://www.luperox.com/en/safety/> (閲覧日 : 2018年4月17日)。
- [237] テキサス州ヒューストン市, 『Police Department: Special Operations - Special Response Group (Srg)』 (2018年) (オンライン) 入手先 : http://www.houstontx.gov/police/special_operations/special_response_group.htm (閲覧日 : 2018年4月19日)。
- [238] HCFCD, 『Gauge Station 1740 Data』 (2017年) (オンライン) 入手先 : <https://www.harriscountyfws.org/GageDetail/Index/1740?From=8/29/2017%2011:00:00%20PM&span=2%20days&v=rainfall>
- [239] USEPA, 『Understanding the Link Between Climate Change and Extreme Weather』 (2016年) (オンライン) 入手先 : https://19january2017snapshot.epa.gov/climate-change-science/understanding-link-between-climate-change-and-extreme-weather_.html (閲覧日 : 2018年5月3日)。
- [240] 米国環境教育財団 (NEEF : National Environmental Education Foundation), 『Extreme Weather 101』 (2018年) (オンライン) 入手先 : <https://www.udemy.com/extreme-weather-101/learn/v4/overview> (閲覧日 : 2018年5月3日)。
- [241] J. Johnson, 『Texas Flood Shows Need for Chemical Safety Rule, Advocates Say』 (2017年9月7日) (オンライン) 入手先 : <https://cen.acs.org/articles/95/i36/Texas-flood-shows-need-for-chemical-safety-rule-advocates-say.html> (閲覧日 : 2018年5月3日)。
- [242] 米国国立公文書館, 『The Control of Major Accident Hazards Regulations 2015』 (2015年) (オンライン) 入手先 : <http://www.legislation.gov.uk/uksi/2015/483/contents/made>
- [243] USEPA, 『General RMP Guidance』 (2004年4月) (オンライン) 入手先 : <https://www.epa.gov/sites/production/files/2013-11/documents/chap-06-final.pdf> (閲覧日 : 2018年4月18日)。

付録B: 有機過酸化物に関する追加情報

320. 表6は、アルケマ・クロスビーの事故に関与した有機過酸化物に関する情報であり、製品の商品名、有機過酸化物の種類、最大保管温度、自己加速分解温度、および各製品のハザードカテゴリ（タイプ）を示す。

表6：冷蔵有機過酸化物の在庫と特性。有機過酸化物の特性は、安全性データシート（SDS）から抜粋した [122]^a。Luperox™ は、アルケマが有機過酸化物製品の販売に使用している商品名である。

Luperox™	Peroxide Chemical Family	Maximum Storage Temperature (°F)	SADT (°F)	Hazard Category (Type)
10	Peroxyester	14	70	D
10M75	Peroxyester	14	81	D
11M45	Peroxyester	32	113	D
11M75	Peroxyester	32	84	C
188M75	Peroxyester	5	59	D
221	Peroxydicarbonate	-9	23	C
233M75S	Peroxydicarbonate	14	68	D
223S	Peroxydicarbonate	0	59	C
223V75	Peroxydicarbonate	14	77	D
225M60	Peroxydicarbonate	14	50	C
546M75	Peroxyester	14	77	D
	Total Inventory (Pounds)	367,000		

321. DOT規制では、有機過酸化物の危険度に基づいて7つのカテゴリ（「タイプ」）を定めており、この分類は、有機過酸化物の特性に加え、包装形態（容器のデザインやサイズ）も考慮している^b。有機過酸化物はタイプAからタイプGに分類され、タイプAが最も危険性が高く、タイプGが最も危険性が低い^c。表6に示すように、アルケマ・クロスビーの事故に関与した有機過酸化物はタイプCおよびタイプDである。これらの有機過酸化物は危険性があるが、最も危険なカテゴリには該当しない。タイプCやタイプDの有機過酸化物は爆発の可能性があるが、最終製品の包装状態の場合、長期的に冷却が停止するような潜在的な加熱シナリオでは、火災の方が起こりやすい [19]^d。
322. アルケマの冷蔵有機過酸化物に関する追加情報は、全米防火協会（NFPA）432「有機過酸化物製剤の保管に関する規定（Code for the Storage of Organic Peroxide Formulations）」の保管クラスとともに、同社のウェブサイト提供されている [11]。2007年、アルケマは『有機過酸化物 — その安全な取扱いと使用』を発行した [11]。この安全ガイダンスによると、クロスビー事故に関与した冷蔵有機過酸化物製品には、クラスI、II、IIIの有機過酸化物が含まれてい

^a 個々の製品の安全データシート（SDS）と、アルケマが発行した『[Organic Peroxides— Their Safe Handling and Use \(有機過酸化物 — その安全な取扱いと使用\)](#)』の安全ガイダンス文書との間に温度の不一致があることに注意すること。

^b [49 C.F.R. §173.128 \(b\) \(2004\)](#)

^c [49 C.F.R. §173.128 \(b\) \(2004\)](#)

^d タイプCからタイプFまでの有機過酸化物のSDSでは炎のピクトグラムが使われ「加熱により発火する恐れがある」警告文が記載されている。タイプAおよびタイプBの有機過酸化物には爆発の危険性がある [19]。

た [11, pp.6-7]。このガイダンス文書を作成するにあたり、アルケマは、1997年版のNFPA 432を使用し、潜在的な危険性に基づいて有機過酸化物を以下のように定義した。

- クラスI – 「爆ごうはしないが、爆燃の可能性がある製剤」^a
- クラスII – 「非常に急速に燃焼し、重大な反応性ハザードを有する製剤」
- クラスIII – 「急速に燃焼し、中程度の反応性ハザードを有する製剤 [123]」^b

323. アルケマの安全ガイドラインでは、有機過酸化物を表6の適正保管温度以下に維持することの重要性が強調されている [11, pp. 4-5]^c。クロスビー事件に関連した有機過酸化物のうち、Luperox™ 221は最も低い保管温度（-9°F（約-23°C））が必要であった [124]^d。Luperox™ 221はクラスIの有機過酸化物でもあり、特定条件下で爆燃する可能性がある [11, pp. 6-7]。Luperox™ 221は、クロスビー施設での在庫が最も少量（3,000ポンド（約1360kg）未満）であったが、SADT（自己加速分解温度）が23°F（約73°C）と低く [124]、施設内で唯一この高リスクカテゴリーに分類される製品であり、特に温度管理が不十分な場合に分解のリスクが高かった [124]。

^a 爆燃と爆轟は、爆発の一種である。爆轟は通常、爆燃よりも高い圧力を発生させ、より大きな被害をもたらす。

^b NFPA 432の2002年版に記載の定義は、1997年版の定義と同じである。NFPA 432は2009年に廃止され、その内容はNFPA 400「[Hazardous Materials Code](#)（危険物規定）」に統合された [168, p. 1]。

^c この安全ガイダンス文書と個々の製品のSDSとの間には温度設定の不一致があることに注意すること。

^d アルケマ・クロスビー施設ではLuperox™ 221を製造していないが、ニューヨーク州ジェネシオで製造され、顧客に販売されるまでの一時保管のためにクロスビー施設に出荷される有機過酸化物の一つである。

付録C: 冷却喪失リスクの評価

324. アルケマは、クロスビー施設の有機過酸化物質貯蔵に関するプロセスハザード分析（PHA）を2013年11月に実施した。PHAは、管理者（レビューリーダー）、安全技術者、プロセス技術者、生産施設のオペレーター、および有機過酸化物質の冷蔵倉庫での作業経験を持つ出荷担当オペレーターで構成されたチームによって実施された。PHAの実施手法として構造化されたWhat-If分析が用いられた。
325. 一般的に、企業はリスク評価にリスクマトリックスを使用する。図63は、その一例を示している^a。アルケマのリスクマトリックスを使用し、PHAチームは各ハザードのリスクを以下の3つの評価段階で分析した。
- 既存の安全対策がすべて利用できない場合のリスク（潜在的）
 - 既存の安全対策が利用できる場合のリスク（現在）
 - 既存の安全対策と提案された追加対策が利用できる場合のリスク（最終）

		Generic Risk Matrix					Level of Risk	
Frequency Level	Very Frequent	7	Yellow	Red	Red	Red	Red	Intolerable
	Frequent	6	Yellow	Yellow	Red	Red	Red	Evaluate Options
	Occasional	5	Green	Yellow	Red	Red	Red	Tolerable
	Possible	4	Green	Green	Yellow	Red	Red	
	Rare	3	Green	Green	Yellow	Yellow	Red	
	Extremely Rare	2	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	
	Unlikely	1	Green	Green	Green	Green	Yellow	
				1	2	3	4	5
			Moderate	Serious	Extensive	Very Extensive	Catastrophic	
			Severity Level					

図63：一般的なリスクマトリックス。この図は、企業がリスクを評価する際に、潜在的なハザードを頻度と重大度の関数として表現するのに利用できる一般的なリスクマトリックスの例を示している。アルケマのリスクマトリックスと同様、このリスクマトリックスでは、許容可能（緑）、選択肢を検討（黄）、許容不可能（赤）の3つのリスクレベルが使用されている^b。

326. 低温倉庫のレビューでは、温度上昇をもたらす可能性のある以下の3つの潜在的シナリオが評価された。
- コンプレッサー故障による冷却機能の喪失
 - 冷媒漏れによる冷却機能の喪失
 - 電源喪失
327. アルケマのPHA報告書には、PHAチームが洪水シナリオを検討した記録は残されていないかつ

^a このリスクマトリックスの例は、『[Layer of Protection Analysis: Simplified Process Risk Assessment](#)（安全防護層分析：簡易プロセスリスク評価）』[126, p. 23]で提供されている例に基づいている。

^b このリスクマトリックスの例は、『[Layer of Protection Analysis: Simplified Process Risk Assessment](#)（安全防護層分析：簡易プロセスリスク評価）』[126, p. 23]を参考にしている。

た^a。低温倉庫のPHAが実施された時点では、企業のPHA要件には、すべてのPHAチームが洪水シナリオを検討することを義務付ける規定はなかった。2014年、アルケマは、企業のPHA方針を改定し、PHAチームに洪水のような自然災害の特定と評価を義務付けた。

328. 電源喪失を想定したシナリオについて、低温倉庫のPHAでは、事業上の結果と安全上の結果の両方が文書化されていた。冷却機能の喪失を伴う電源喪失のシナリオでは、PHAチームは安全上の結果を「製品の分解による火災リスク」として、その影響を「人的傷害の可能性」として文書化した。チームはさらに、冷蔵倉庫の内部温度がSADTに達するには、電源喪失が4時間以上続く必要があると記録した。
329. アルケマのプロセスに従い、PHAチームはまず、いかなる安全対策もない状態での電源喪失による潜在的影響を評価した。チームは、この評価結果に対して、頻度レベル6（頻繁）を割り当てた。シナリオの頻度は、アルケマの社内データベース、ベンダーのデータ、プラントの運用実績に基づいて評価された。アルケマは「頻繁」の定義を「設備のライフサイクルの10年間に数回起こる可能性のある事象」とした。チームはまた、このシナリオの重大度レベルを「3（甚大）」と評価した。
330. アルケマは、重大度レベルをさらに4つのカテゴリーに細分化している。
- 安全 – 施設内
 - 安全 – 施設外
 - 環境
 - 財務（ドルまたはユーロ）
331. PHAには、重大度レベル3（甚大）が選択された要因は詳述されていない。アルケマのPHA方針によると、重大度レベル3という結果は、「不可逆的な影響を伴う曝露／負傷」または施設外の一般市民への影響として「公共の避難所待機措置」に相当する。
332. 図64に示す一般的なリスクマトリックスで、頻度レベル6（頻繁）と重大度レベル3（甚大）の組み合わせを適用すると、「許容不可能」なリスクと判定される。業務上の機密情報の関係で示していないが、アルケマのリスクマトリックスを用いた結果も同様である。

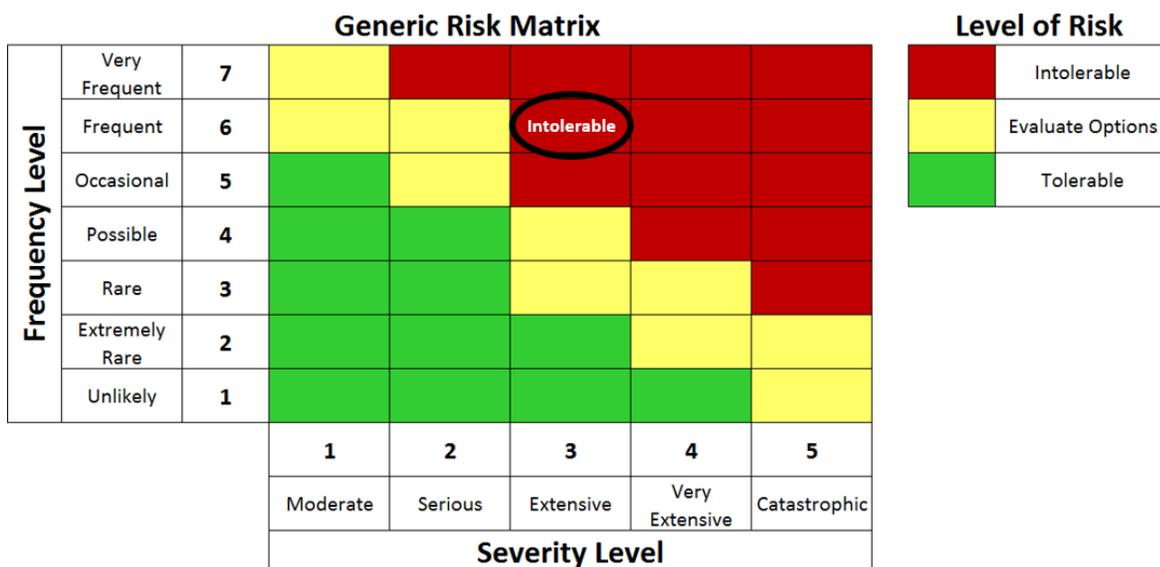


図64：低温倉庫の電源喪失に関するリスク評価例（リスク低減効果を考慮しない）

^a PHA報告書では洪水について議論されていない。

場合)。このリスク評価例は、アルケマの低温倉庫の電源喪失に関する潜在的リスクを、安全対策によるリスク低減効果を考慮せずに推定したものである。

333. アルケマでは、図64に示される「許容不可能なリスク（赤）」に該当するシナリオ、または重大度レベルの高い「選択肢を検討（黄）」に分類されるシナリオについては、必ず安全防護層分析（LOPA: Layer of Protection Analysis）を実施することが求められる。LOPAは、リスクを分析・評価するための半定量的な手法である。LOPAを用いるとPHAチームは、すでに実施されている安全対策に着目し、それらがリスク低減にどの程度有効かを判断する。シナリオの複雑さによっては、PHAチームが実施する場合もあれば、別のチームが後日、詳細な分析を実施することもある。
334. 次に、PHAチームは、既存の安全対策を特定し、それぞれにリスク低減効果の値を割り当てる。低温倉庫のPHAの電源喪失シナリオでPHAチームが特定した安全対策には以下が含まれる。
- すべての低温倉庫に電力を供給する非常用発電機
 - 代替冷却手段としての液体窒素供給
 - 2時間ごとに実施される手動温度チェック、および、影響を受けた低温倉庫から別の冷蔵施設または移動式冷蔵トレーラーへの有機過酸化物の移動能力のチェック
335. PHAチームは、非常用発電機に2段階、液体窒素システムに1段階、有機過酸化物在庫の再配置能力に1段階のリスク低減効果を割り当てた。合計でPHAチームは、これらの既存の安全対策に対して4段階のリスク低減効果を割り当てた。
336. 図65に示すように、既存の安全対策による4段階のリスク低減効果を適用することで、リスクレベルは「許容不可能」から「許容可能」へと低下した。同マトリックスにおける「許容可能なリスク」は、アルケマにとって長期的に受け入れ可能なリスクレベルであると判断されたため、PHAチームはこれ以上のリスク低減策を推奨しなかった。

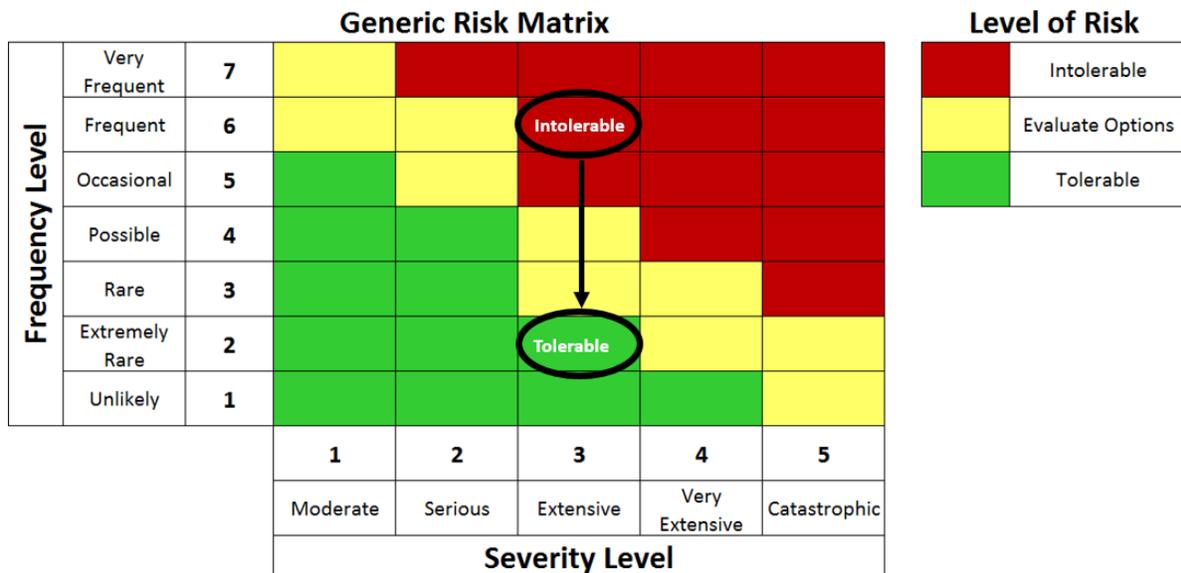
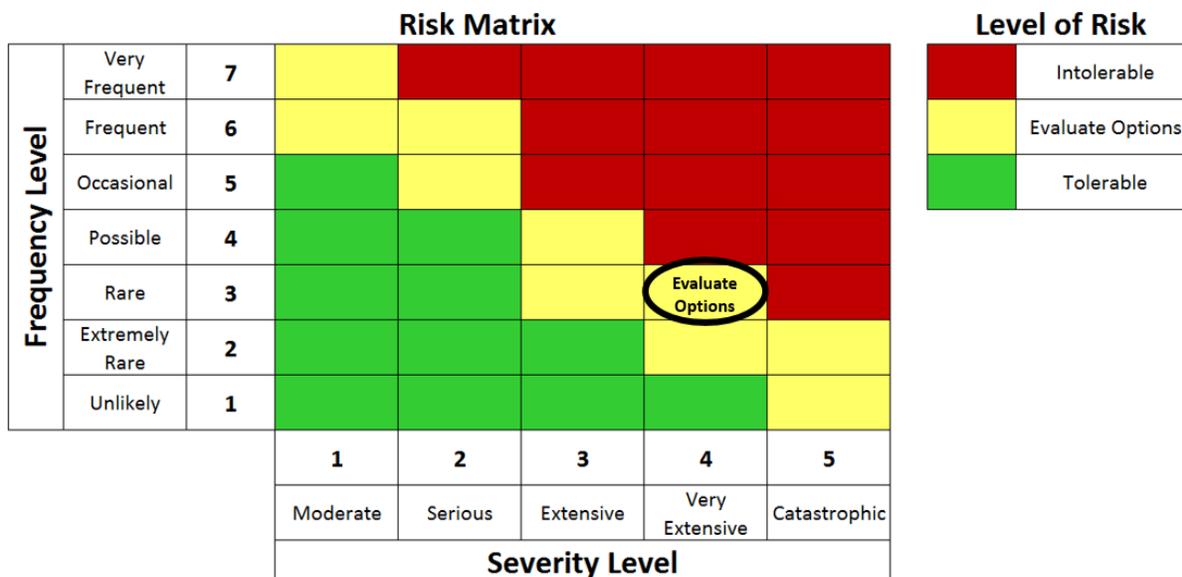


図65：低温倉庫の電源喪失に関するリスク評価例（リスク低減効果を考慮した場合）。このリスク評価例は、アルケマの低温倉庫の電源喪失に関する潜在リスクを、同社の既存の安全対策に対して4段階のリスク低減効果を適用して推定したものである。

ハービー洪水 — シミュレーションによるリスク評価

337. ハリケーン・ハービーによる有機過酸化物の分解事故から学んだ知識と、アルケマのPHA実施要件を基に、ハービー級の洪水に対する既存の安全対策を考慮したシミュレーションを用いてリスク評価を行うことができる。このシミュレーションを用いたリスク評価の目的は、このレベルの異常気象が化学施設に及ぼす潜在的な影響を示すことである。
338. 500年洪水時の水位を大きく超える降雨現象は、頻度レベル4（起こりうる）または頻度レベル3（まれ）と評価できる。アルケマのPHA方針では、「起こりうる」事象は、100年に1回から1,000年に1回の頻度での発生が予想されるものと定義されているが、氾濫原に関して入手可能な最も低い頻度のものは500年洪水であり、ハービーの洪水はその水位を2フィート以上超えてしまった。さらに、米国海洋大気庁（NOAA）の降雨量推定によると、ハービー時の降雨量は1,000年に1回未満の発生確率であったとされている [125]。この頻度は、アルケマのPHA方針においては「まれ」に相当する。この情報を基に、ハービー級の洪水の頻度を「まれ」と想定する。
339. アルケマの詳細な重大度ガイドラインを用いると、避難措置が実施されたハリケーン・ハービーによる有機過酸化物の分解事故は、重大度レベル4（極めて甚大）に該当する。アルケマの重大度ガイドラインでは、一般市民の避難を伴う事象は重大度レベル4（極めて甚大）であると明確に定義されている。
340. 図66は、ハリケーン・ハービー時の降雨によるアルケマのリスクを推定したものである。洪水による電源喪失の頻度レベル3（まれ）と、一般市民の避難を伴う影響の重大度レベル4（極めて甚大）を組み合わせて評価したところ、安全対策を考慮しない場合のリスクレベルは2（選択肢を検討）となった。



342. アルケマのPHAにはLOPAが含まれている。これは広く認知されたハザード分析手法であり、特定のハザードや事故シナリオに対して安全防護層が十分に機能するかどうかを判断するものである。CCPSは、その書籍『安全防護層分析：簡易プロセスリスク評価（Layer of Protection Analysis: Simplified Process Risk Assessment）』の中で「安全防護層分析（LOPA）は、リスクを分析・評価するための半定量的手法である」[126, p. 1]と説明している^a。
343. ハリケーン・ハービー規模の洪水（500年洪水を大幅に超える規模）シナリオにおいて、洪水による電源喪失が発生した場合、アルケマにはリスクを低減するための十分な安全対策がなかった。施設の電源喪失を引き起こした洪水は、アルケマが安全防護層として想定していた以下の安全対策は、共通の故障モードの影響を受けた。
- 非常用発電機が浸水し、使用不能になった
 - 液体窒素配管が浸水し、使用不能になった
 - 冷蔵トレーラーのディーゼル燃料タンクが浸水し、使用不能になった
344. 安全防護層分析（LOPA）において、リスク低減効果が適用されるのは、特定の基準を満たす特別な安全対策に限られる [126, p. 80]。CCPSはこれらの特別な安全対策を「独立安全防護層（independent protection layers）」またはIPLと呼んでいる [126]。CCPSによる要件では、独立安全防護層として認められるためには、デバイス、システム、またはアクション（各種安全対策）が以下を満たす必要がある [126, p. 80]。
1. 設計通りに機能した場合、最終事象を防止する効果があること（有効性）
 2. 起因事象および、同じシナリオで既に使用されている他の独立安全防護層の構成要素から独立していること（独立性）
 3. 検証可能であること — 想定される有効性（最終事象の防止、必要時の故障確率）が、文書化、レビュー、試験など何らかの方法によって検証可能であること（検証性） [126, p. 80]
345. LOPAにおいては、すべての独立安全防護層（IPL）は安全対策であるが、すべての安全対策が独立安全防護層であるわけではない [126, p. 76]。
346. 確立されたCCPS要件では、安全対策が独立安全防護層として機能し、LOPAのリスク低減効果を提供するためには、起因事象から独立している必要がある [126, p. 80]。しかし、ハービー洪水では、施設の電源喪失を引き起こした洪水が、非常用発電機、液体窒素システム、冷蔵トレーラーにも被害を与えた。最終的に、アルケマの安全対策は、ハービー級の洪水時においては、CCPSが求める独立安全防護層の要件を満たすものはなかった。このリスクを低減できる独立安全防護層がなかったため、同社はPHAで特定されていない、レベル2（選択肢を検討）のリスクを知らずのうちに抱えることになった。このシミュレーション例では、アルケマのPHA方針は、リスクを「合理的に実行可能な限り低減」するための追加的なリスク低減策を、LOPAの適用を通じて検討することを求めている。
347. アルケマの安全防護層分析の実施方法を詳述したマニュアルでは、起因事象を「望ましくない結果につながる一連の事象の最初の事象」と説明している。アルケマの安全防護層分析マニュアルでは、起因事象の例として、特に洪水、ハリケーン、地震などの自然現象が挙げられている。
348. アルケマの安全防護層に関する内部ガイダンスでは、起因事象が安全対策の安全機能の遂行

^a CCPSは「半定量的 (semi-quantitative)」を、「結果、発生確率、またはリスクレベルのある程度の定量化を含むリスク分析手法 [178]」と定義している。CCPSの引用文は「semiquantitative」を「semi-quantitative」に修正している。

を妨げる可能性がある場合、その安全対策を独立安全防護層として認めないと規定している。同ガイダンスでは、独立安全防護層の条件として、当該の安全対策は「起因事象や他の（安全対策の）性能に関係なく、危険なシナリオの進行を防止できること」が求められている。したがって、アルケマの安全防護層分析ガイダンスでは、非常用発電機、液体窒素システム、移動式冷蔵トレーラーなどの安全対策は、洪水によって機能不全になることを理由に、ハービー規模の洪水シナリオにおける安全防護層として適用できないとされる。

349. 将来的にハリケーン・ハービー規模の洪水が発生した場合においてもアルケマが企業リスク目標を達成できるようにするためには、クロスビー施設が高い洪水標高でも保護されるようにするか、高水位の洪水下でも安全機能を発揮できるように安全対策を改善する必要がある。考えられる対策の一例として、低温倉庫、電気系統、および非常用発電機の設置高さを上げること、あるいはハリケーンへの準備段階で冷蔵トレーラーを配置できるよう、敷地内に高台エリアを確保することが挙げられる。

異常気象に対するレジリエンス

350. ハリケーン・ハービーに伴う洪水は、アルケマの安全対策が備えていた設計上の能力を超えたが、CSBの調査は、アルケマの安全対策は100年洪水に対しては十分な保護機能を提供できたであろうと結論づけた。
351. 基準洪水標高が52フィートの100年洪水では、バルブや配管接続部が水没する可能性があるため、クロスビー施設の液体窒素システムは使用不能になるであろうが、他の安全対策は設計通りに機能するであろう。非常用発電機は基準洪水標高より高い位置にあり、おそらく使用可能であろう。加えて、100年洪水時の水位では、有機過酸化物品を冷蔵トレーラーに移設する能力が損なわれる可能性は低い。さらに、100年洪水時でも利用できるように液体窒素システムの構造を改良すれば、さらなるリスク軽減が可能である。
352. アルケマの安全対策は100年洪水に対して一定の耐久性を持つと考えられるが、アルケマは、ハリケーン・ハービーの際の洪水標高やその他の異常気象による将来の洪水に対するレジリエンスを確保するための選択肢を評価するにあたり、プログラムの徹底的な見直しを行い、より頻繁に発生する洪水に対しても安全対策が確実に機能するようにすべきである。



Members of the U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board:

Vanessa Allen Sutherland, J.D./M.B.A.
Chairperson

Manuel Ehrlich
Member

Richard Engler
Member

Kristen Kulinowski, Ph.D.
Member