

労働安全衛生総合研究所技術資料

TECHNICAL DOCUMENT

OF

THE NATIONAL INSTITUTE OF OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH

JNIOOSH-TD-NO.8 (2022)

化学物質の危険性に対するリスクアセスメント等
実施のための参考資料
— 異常反応による火災・爆発を防止するために —



独立行政法人労働者健康安全機構
労働安全衛生総合研究所

本資料作成の背景と目的

2011 年以降、連続して発生した火災・爆発による重大災害の原因・背景に係る共通点として、取り扱う物質の化学反応に対する理解不足等により、当該物質を取り扱う際のリスクアセスメントが不十分となり、非定常作業時等を想定しての設備の設定等が不適切であったこと等が指摘されている。

しかし、災害につながる化学反応等を把握することは、その化学反応によって発生する熱量やガス発生量等の実測が必要になる等から困難であることが多い。また、論理的で効果的なリスク低減措置を検討することができる詳細なリスクアセスメント手法では、多くの専門的知識や労力が必要となる。さらに、反応特性等の把握及びシナリオ同定、リスク低減措置の検討それぞれに専門的知識が求められるため、化学物質そのものの特性等についてのみ着目し、設備や装置の不具合、作業による不適切な作業・操作¹を見逃す可能性や、化学反応の反応特性等の情報が引き継がれず、重要なシナリオ等が見逃される可能性がある。

そこで、労働安全衛生総合研究所で取りまとめた技術資料 JNIOOSH-TD-No.5 (2016)「プロセスプラントのプロセス災害防止のためのリスクアセスメント等の進め方」（「安衛研手法」と呼ばれる）に沿って、**異常反応（ここでは、「暴走反応」と「混合危険」に対象を絞る）を検討する際に参考となる情報を提供する**²。それによって、異常反応を想定しての火災・爆発等が生じる危険性³に対するリスクアセスメント等を的確に実施する際のポイントを示す。

本資料の位置づけ

本資料は、技術資料 JNIOOSH-TD-No.5 (2016)「プロセスプラントのプロセス災害防止のためのリスクアセスメント等の進め方」（「安衛研手法」と呼ばれる）に沿ってリスクアセスメント等を進める際に、異常反応の検討に参考となる情報を提供する。そのため、技術資料 JNIOOSH-TD-No.5 と併せてご覧いただきたい。

本資料の対象

本資料では、化学物質等を取り扱うプロセスプラント・設備のうち、バッチ／セミバッチプロセスを対象として、異常反応（暴走反応及び混合危険）による火災・爆発等の災害防止のためのリスクアセスメント等について示す。読者としては、バッチ／セミバッチプロセスにおける異常反応による火災・爆発等の災害防止のためのリスクアセスメント等を実施する際の安全管理担当者を含むリスクアセスメント等の実施者を想定している。

¹ 労働安全衛生総合研究所技術資料 JNIOOSH-TD-No.5 (2016)で「作業・操作に関する不具合」と記載している引き金事象を、本資料では「不適切な作業・操作」と記載する。

² 化学物質の危険性としては火災及び爆発があるが、本資料では、化学プラント内外への影響が大きい毒性ガス等の漏洩も対象とする。

³ この資料では、危険性は化学物質の物理化学的危険性を意味する。

リスクアセスメント等の実施者

事業場のトップ（事業の実施を統括管理する人）を安全管理の責任者として、安全管理担当者が中心となり、リスクアセスメント等の実施を推進する。安全管理担当者のみで行うのではなく、関係者全員（例えばプロセス等の開発者、ライン技術者（スタッフ）、管理者・監督者・職長等、製造プロセス・設備を含む現場での製造を理解している技術者、安全管理担当者、現場をよく知る運転員、保全員等）がそれぞれの視点から意見を出し合うことで、網羅的にリスクアセスメント等を実施する⁴。

リスクアセスメント等の実施方法

安衛研手法は、厚生労働省の指針⁵等での進め方に準拠しており、これに従って実施する。図 i に安衛研手法の概要図を示す。以下、それぞれの STEP について説明する。

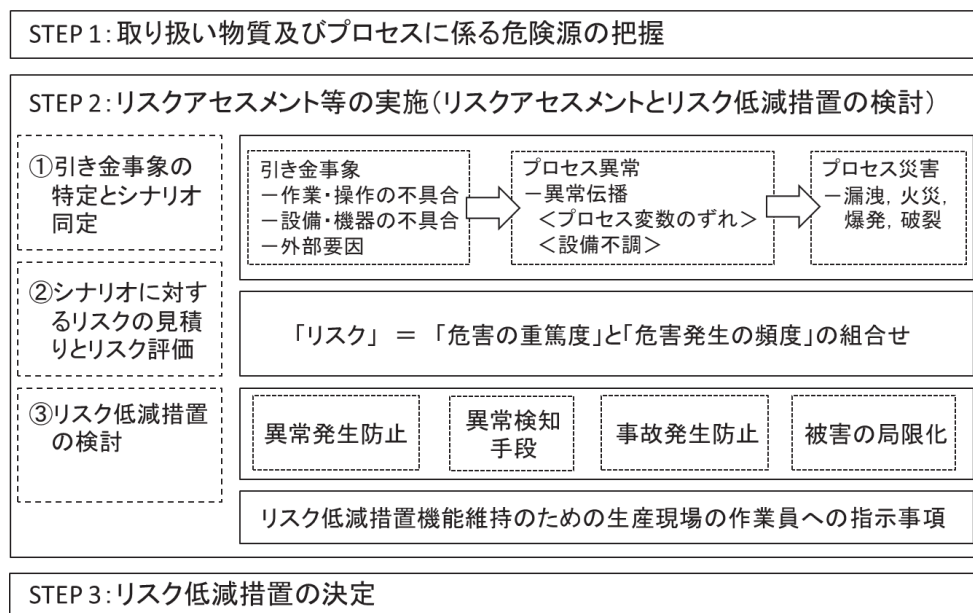


図 i 安衛研手法の概要

○ STEP 1

事前に簡単な質問に答える形で、火災・爆発の発生等の危険源を把握するとともに、リスクアセスメント等を実施する際の留意点を知る。

○ STEP 2

- ① 火災・爆発等の発生の原因となり得る事象（不適切な作業・操作や設備・装置の不具合、外部要因等）を想定して、危険源を顕在化させる引き金事象を特定する。
- ② 引き金事象からプロセス異常（プロセス変数のずれ等）発生、火災・爆発等の発

⁴ リスクアセスメント等に関する技術的な助言を得るため、外部の専門家の活用を図ることが望ましい。

⁵ 化学物質等による危険性又は有害性等の調査等に関する指針（平成 27 年 9 月 18 日付け危険性又は有害性等の調査等に関する指針公示第 3 号）

生までのシナリオを同定し、火災・爆発等発生のリスクレベルを求める。

- ③ リスクレベルが高い（許容レベルを超えている）シナリオについては、追加のリスク低減措置を検討し、再度リスクレベルを求める。提案した追加のリスク低減措置の実施可否を判断する。リスクレベルが許容範囲に収まるまで複数のリスク低減措置の検討を繰り返す。

現場作業者に伝えておくべき事項等を記録し、注意を促す。残留リスクがある場合には、対応を明確にしておく。

○ STEP 3

様々なシナリオについての検討結果をまとめ、実施すべきリスク低減措置を検討するための優先順位付けを行う。優先順位に従って、技術面・コスト面等を踏まえ、リスク低減措置を決定する。

関連する法令等^{6,7,8,9,10}

- 労働安全衛生法 第 28 条の 2（事業者の行うべき調査等）、第 5 章第 2 節（危険物及び有害物に関する規制）
- 労働安全衛生規則 第 1 編第 2 章の 4（危険性又は有害性等の調査等）、第 1 編第 3 章第 2 節（危険物及び有害物に関する規制）、第 2 編第 4 章（爆発、火災等の防止）
- 化学プラントにかかるセーフティ・アセスメントに関する指針（平成 12 年 3 月 21 日付け基発第 149 号）
- 危険性又は有害性等の調査等に関する指針（平成 18 年 3 月 10 日付け危険性又は有害性等の調査等に関する指針公示第 1 号）
- 危険性又は有害性等の調査等に関する指針について（平成 18 年 3 月 10 日付け基発第 0310001 号）
- 化学物質等による危険性又は有害性等の調査等に関する指針（平成 27 年 9 月 18 日付け危険性又は有害性等の調査等に関する指針公示第 3 号）
- 化学物質等による危険性又は有害性等の調査等に関する指針について（平成 27 年 9 月 18 日付け基発 0918 第 3 号）
- 「化学設備の非定常作業における安全衛生対策のためのガイドライン」の改正について

⁶ ここでは、以下の資料を参考にして、厚生労働省における化学物質の危険性に関する法令等、及び消防庁、経済産業省における火災・爆発の予防に係る法令等を抜粋して示した。

・労働安全衛生総合研究所技術資料、プロセスプラントのプロセス災害防止のためのリスクアセスメント等の進め方、JNIOOSH-TD-No.5, p. iii (2016).

・日本化学工業協会、化学物質の危険性初期リスク評価ツール、平成 28 年 4 月。

⁷ 当該箇所所示した法令等は、化学物質の危険性に関するものを網羅したものではないことに留意する。また、各法令等の解釈は、社内の法令担当者や窓口と相談する他、関係省庁に確認すること。

⁸ 厚生労働省における化学物質の危険性に関する法令等、及び消防庁、経済産業省における火災・爆発の予防に係る法令等の詳細は、以下のホームページ等で参照されたい。

・厚生労働省関係：http://www.jaish.gr.jp/user/anzen/hor/horei_index.html

・消防庁関係：https://www.soumu.go.jp/menu_hourei/shoubou.html

・経済産業省関係：https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/sangyo/hipregas/horei/index.html

⁹ 安全工学会編、安全工学便覧（第 4 版）、コロナ社（2019）、pp. 1104-1157 に、安全を確保するための法規・規格・基準が簡潔にまとめられており、参考となる。

¹⁰ 2021 年 12 月 21 日現在での情報である。

(平成 20 年 2 月 28 日付け基発第 0228001 号)

- 化学プラントの爆発火災災害防止のための変更管理の徹底等について（平成 25 年 4 月 26 日付け基発 0426 第 2 号）
- 消防法第 14 条の 2（予防規程）、第 14 条の 3 の 2（定期点検）
- 危険物の規制に関する規則第 60 条の 2（予防規程に定めなければならない事項）
- 製造所等の定期点検に関する指導指針の整備について（平成 3 年 5 月 29 日付け消防危第 48 号）
- 高圧ガス保安法第 26 条（危害予防規程）、第 35 条の 2（定期自主検査）
- 一般高圧ガス保安規則第 63 条（危害予防規程の届出等）
- 高圧ガス保安協会, 第一種製造者 一般の事業所用 危害予防規程の指針, KHKS 1800-2 (2020)
- 高圧ガス保安協会, 定期自主検査指針 一般高圧ガス保安規則関係（スタンド及びコールド・エバポレータ関係を除く）, KHKS 1850-1 (2017)
- 石油コンビナート等災害防止法第 18 条（防災規程）
- 「防災規程及び共同防災規程の作成指針と概説等について」¹¹の一部改正について（通知）（平成 26 年 10 月 23 日付け消防特第 221 号）
- 消防庁特殊災害室, 石油コンビナートの防災アセスメント指針（平成 25 年 3 月）

注記（資料の取り扱い、引用等について）

用語については、できるだけ現場で使われ、理解しやすい用語を用いているため、法規制で用いられている用語とは一致しない場合がある。

本資料に掲載されている参考情報はあくまで事例であり、各事業場特有の作業・操作、設備・装置等がある場合には、それに合わせて各事業場で修正されるべきものである。

本資料の内容は、事業場におけるリスクアセスメント等の教育等に利用してよい。なお、利用する際は出典を明記すること。

（出典記載例）

労働安全衛生総合研究所技術資料「化学物質の危険性に対するリスクアセスメント等実施のための参考資料 ―異常反応による火災・爆発を防止するために―」, JNIOOSH-TD-No.8 (2022), pp.○-○より引用（又は抜粋）

¹¹ 防災規程及び共同防災規程の作成指針と概説等について（通知）（平成 19 年 3 月 20 日付け消防特第 34 号）

本資料作成のための検討委員会

本資料作成にあたり、次の委員会を設置して討議検討が行われた。

異常反応による災害防止リスクアセスメント等手法検討委員会 (平成 30 年度～令和元年度)

	氏名	所属
委員長	淵野哲郎	東京工業大学 物質理工学院
委員	伊里友一朗	横浜国立大学 大学院環境情報研究院
	岡田 賢	(国) 産業技術総合研究所 安全科学研究部門
	篠原 誉	エーザイ株式会社 メディシン開発センター
	森安宏一	化成品工業協会
	山上高史	田辺三菱製薬株式会社 サプライチェーン本部
	山口忠重	コンサルオフィス「山口」
	渡辺智明	クミアイ化学工業株式会社 生産資材本部
事務局	板垣晴彦	(独) 労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所 化学安全研究グループ
	島田行恭	(独) 労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所 リスク管理研究センター
	佐藤嘉彦	(独) 労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所 研究推進・国際センター

異常反応による災害防止リスクアセスメント等支援策検討委員会 (令和 2 年度～令和 3 年度)

	氏名	所属
委員長	淵野哲郎	東京工業大学 物質理工学院
委員	伊里友一朗	横浜国立大学 大学院環境情報研究院
	岡田 賢	(国) 産業技術総合研究所 安全科学研究部門
	菊池武史	株式会社住化分析センター マテリアル事業部
	篠原 誉	エーザイ株式会社 エーザイデマンドチェーンシステムズ (令和 2 年度) サラヤ株式会社 グローバル生産本部 日本生産本部 (令和 3 年度)
	山上高史	田辺三菱製薬株式会社 サプライチェーン本部
	山口忠重	コンサルオフィス「山口」
	渡辺智明	クミアイ化学工業株式会社 生産資材本部
事務局	板垣晴彦	(独) 労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所 化学安全研究グループ
	島田行恭	(独) 労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所 リスク管理研究グループ
	佐藤嘉彦	(独) 労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所 化学安全研究グループ

目 次

本資料作成の背景と目的	i
本資料の位置づけ	i
本資料の対象	i
リスクアセスメント等の実施者	ii
リスクアセスメント等の実施方法	ii
関連する法令等	iii
注記（資料の取り扱い，引用等について）	iv
本資料作成のための検討委員会	v

概 要	1
-----	---

Abstract	2
----------	---

用語の説明	3
-------	---

第 1 章 はじめに	8
------------	---

1.1 化学物質の危険性に対するリスクアセスメント等に係る背景	8
1.2 リスクアセスメント等において異常反応を考慮する上での課題	8
1.3 異常反応を想定しての化学物質の危険性に対するリスクアセスメント等の 的確な実施に対する支援策	10

第 2 章 安衛研手法及び参考情報の概要	12
----------------------	----

2.1 安衛研手法の概要	12
2.2 参考情報の概要	16

第 3 章 暴走反応による災害防止のためのリスクアセスメント， リスク低減措置検討の際の参考情報	18
---	----

3.1 「リスクアセスメント等実施に必要となる情報の収集」に関する参考情報	18
3.2 「取り扱い物質及びプロセスに係る危険源の把握」に関する参考情報	25
3.3 「引き金事象の特定とシナリオ同定」に関する参考情報	27
3.4 「リスク低減措置の検討」に関する参考情報	48

第 4 章 混合危険による災害防止のためのリスクアセスメント， リスク低減措置検討の際の参考情報	65
---	----

4.1 「リスクアセスメント等実施に必要となる情報の収集」に関する参考情報	65
4.2 「取り扱い物質及びプロセスに係る危険源の把握」に関する参考情報	67

4.3 「引き金事象の特定とシナリオ同定」に関する参考情報-----	70
4.4 「リスク低減措置の検討」に関する参考情報-----	78
第5章 「シナリオに対するリスクの見積りとリスク評価」	
に関する参考情報-----	96
5.1 リスクの見積り及びリスク評価の基準の例-----	96
5.2 暴走反応での熱平衡破綻の可能性及び熱平衡破綻により生じる 設備破壊等の可能性の考え方-----	100
第6章 おわりに-----	102
添付資料1 爆発火災データベースにおける暴走反応による火災・爆発災害事例-----	103
添付資料2 暴走反応のシナリオモデル（第3章 図3-2～図3-4の統合版）-----	108
添付資料3 シナリオモデル及びシナリオ整理表の読み方-----	109
添付資料4 爆発火災データベースにおける混合危険による火災・爆発災害事例-----	114
添付資料5 事故影響（放射熱，爆風圧，毒性ガス濃度）の指標の例-----	117

図表一覧

図1-1 本資料の構成-----	10
図2-1 安衛研手法の概要-----	12
図2-2 本資料に示す情報と安衛研手法のSTEPとの関係-----	17
図3-1 想定したプロセスの概要-----	28
図3-2 反応の発熱と反応系から放熱のバランスが崩れることによって発生する 暴走反応のシナリオモデル-----	30
図3-3 過去の災害で発生したシナリオの，暴走反応のシナリオモデル上での図示化---	39
図3-4 暴走反応に関するシナリオに対するリスク低減措置の例-----	51
図4-1 混合危険マトリクスの例-----	68
図4-2 混合危険に関するシナリオを検討する際の着眼点を示したプロセスの概要-----	71
表2-1 プロセス災害防止のためのリスクアセスメント等実施シート（様式）-----	14
表2-2 プロセス災害防止のためのリスクアセスメント等実施結果シート（様式）-----	15

表 3-1	リスクアセスメント等の実施に必要となる情報（関連資料）	18
表 3-2	対象とする反応を考慮する上での基本的な観点，必要なデータ及びデータの 入手方法	22
表 3-3	各種反応容器の大きさと単位重量当たりの冷却能力	24
表 3-4	容器の代表的な熱損失の値	24
表 3-5	過去の災害で発生した，発熱と放熱のバランスが崩れるシナリオの整理表	47
表 3-6	リスク低減措置の種類（優先順位）及び目的	50
表 4-1	混合危険を考慮する上で考慮すべき物質の例	66
表 4-2	混合危険に関するシナリオを検討する際の着眼点の例	75
表 4-3	混合危険に関するリスク低減措置の例	81
表 5-1	安衛研手法におけるリスク見積りのための基準例	97
表 5-2	暴走反応による設備破壊等の可能性に関する評価基準の例	101
図 A3-1	暴走反応のシナリオモデル（抜粋）	111
表 A3-1	過去の災害で発生した，発熱と放熱のバランスが崩れるシナリオの整理表 （抜粋）	113
表 A5-1	放射強度と放射の影響	117
表 A5-2	爆風圧と爆風圧によって生じる建屋等の損壊の程度	118
表 A5-3	鼓膜に損傷を及ぼす一般的な圧力	118
表 A5-4	緊急時等に用いられる化学物質の有害性に関する代表的な指標	119
表 A5-5	AEGL 及び ERPG のレベルとその定義	120

化学物質の危険性に対するリスクアセスメント等実施のための参考資料
－異常反応による火災・爆発を防止するために－
(概 要)

佐藤嘉彦¹²，島田行恭¹³，板垣晴彦¹²

2011 年以降，大規模化学工場を含む事業場において，連続して発生した異常反応をきっかけとした火災・爆発による重大災害の原因・背景に係る共通点として，取り扱う物質の化学反応に対する理解不足等により，当該物質を取り扱う際のリスクアセスメントが不十分であったこと等が指摘されている．このことから，化学物質のリスクアセスメント等を的確に実施するためには，取り扱う物質の化学反応に対する理解も促進していく必要がある．

しかし，化学反応による熱やガスの発生挙動等についての情報は，実測が必要になることが多い等から入手が困難である．また，論理的で効果的なリスク低減措置を検討することができる詳細なリスクアセスメント手法では，多くの専門的知識や労力が必要となるために，シナリオやリスク低減措置の検討等が的確になされない可能性がある．さらに，反応特性等の把握とシナリオ同定，リスク低減措置の検討のそれぞれに専門的知識が求められるため，化学物質そのものの特性等についてのみ着目し，設備や装置の不具合，作業による不適切な作業・操作を見逃す可能性や，化学反応の反応特性等の情報が引き継がれず，重要なシナリオ等が見逃される可能性がある．その結果，的確なリスクアセスメントが妨げられる可能性がある．そのため，リスクアセスメント等を的確に実施し，より安全な作業環境を構築するためには，化学反応に関する危険性の特定を支援する情報や，災害につながる化学反応に関係するシナリオ及びシナリオの進展を防止するためにリスク低減措置の例等の情報を，論理的なリスクアセスメント等の進め方に沿って提供する必要がある．

本資料は，医薬を含むファインケミカルプラントで多く採用されているバッチ／セミバッチプロセスを対象として，暴走反応及び混合危険を考慮したリスクアセスメント等を検討する際に参考になる情報を提供することを目的としている．労働安全衛生総合研究所で取りまとめた火災・爆発等防止のためのリスクアセスメント等の進め方（安衛研手法）¹⁴に沿ってリスクアセスメント等を実施することを前提として，安衛研手法に沿って，暴走反応及び混合危険に関する検討を行う際に参考となる情報，典型的なシナリオや，シナリオを検討する際の着眼点，リスク低減措置の例等の具体的な情報をまとめている．また，暴走反応及び混合危険に関する危険を特定する際に参考となる支援ツールやデータベース，災害事例を紹介している．

¹² 化学安全研究グループ

¹³ リスク管理研究グループ

¹⁴ 労働安全衛生総合研究所技術資料，プロセスプラントのプロセス災害防止のためのリスクアセスメント等の進め方，JNIOHS-TD-No.5 (2016)．

Reference material for carrying out risk assessment on the hazards of chemicals
in order to prevent fires and explosions owing to runaway reactions and incompatibility
(Abstract)

Yoshihiko Sato¹⁵, Yukiyasu Shimada¹⁶, Haruhiko Itagaki¹⁵

Since 2011, many major chemical companies have reported several major fire and explosion accidents. This indicated that risk assessment in terms of chemical handling was insufficient, owing to a lack of understanding of their chemical reactions, which was a common point of the cause and background of the major accidents. Therefore, it is necessary to promote a proper understanding of the chemical reactions of these substances to carry out an appropriate risk assessment.

However, obtaining information on heat and gas generation resulting from chemical reactions is often difficult due to lack of sufficient resources to actual measurements. In addition, a detailed risk assessment method that considers logical and effective risk-reduction measures requires significant specialized knowledge and effort; therefore, there is a possibility that scenarios that lead to fires and explosions (hereinafter called scenarios) and risk-reduction measures will not be effectively studied. Further, since specialized knowledge is required to identify the chemical reactivity hazards and to examine the scenarios and risk-reduction measures, effective communication of the information regarding such studies may not be conducted. As a result, it is difficult to implement the measures outlined in the appropriate risk assessments of the chemicals, to prevent fires and explosions. Therefore, to carry out more appropriate risk assessments and thereby establish a safe working environment, it is necessary to provide the following information at the implementation stage of a logical risk assessment and risk reduction: the identification of chemical reactivity hazards and a list of sample scenarios and risk-reduction measures.

This document provides the reference information for carrying out risk assessments to prevent fires and explosions owing to runaway reactions and incompatibility, targeting the batch/semi-batch processes. Based on the premise that the risk assessment and risk-reduction measures are carried out following the procedure compiled by JNIOOSH, this document compiles the following reference information at the implementation stage of the risk assessment and risk reduction: the identification of chemical reactivity hazards, sample viewpoints on considering the scenarios, typical scenarios, and risk-reduction measures to prevent fires and explosions owing to unintended chemical reactions. It also introduces support tools, databases, and accident cases that can be used when identifying the chemical reactivity hazards and scenarios in fires and explosions owing to runaway reactions and incompatibility.

¹⁵ Chemical Safety Research Group

¹⁶ Risk Management Research Group

用語の説明

- **Benson グループ**：分子中の原子，結合又は原子団に物性値の寄与値を与えて，対象とする分子の物性をその構造から算出する手法（加成性則）の 1 つとして，**Benson** らによって，隣接原子の効果を考慮したグループに生成エンタルピー寄与値を割り当て，対象とする分子の構造に応じてそれらを加算することにより，生成エンタルピーを算出する方法が提案された．ここではそのグループを **Benson グループ** と呼び，そのグループごとの生成エンタルピー寄与値をデータベースとしてまとめた．
- **CRW (Chemical Reactivity Worksheet)**：米国海洋大気庁 (NOAA) により開発され，現在は米国化学工学会／化学プロセス安全センター (AIChE/CCPS) により管理・運用されている，混合危険マトリクス作成ソフトウェア．複数物質の混合危険マトリクスを作成するとともに，内蔵しているデータベースから混合危険の予測を行うことができる．また，代表的な吸収剤や構造材についての混合危険に関する情報も内蔵されている．
- **ETA (Event Tree Analysis)**：あるシステムの故障をもたらす事象を左端に配置し，その事象の進展を阻止するための機能を右側に列挙し，「成功」「失敗」の 2 通りの分岐により結んでいくことでイベントツリー (Event Tree) を作成し，最終的な事象である事故が発生する頻度を算出する手法．
- **FTA (Fault Tree Analysis)**：あるシステムの故障を頂上として，故障を発生させる可能性のある事象を下位に向かって列挙し結んでいくことでフォールトツリー (Fault Tree) を作成し，それぞれの事象によりシステムが故障する頻度を算出する手法．
- **GHS (The Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals)**：化学品の分類及び表示に関する世界調和システム．危険有害性に関する情報を伝達し，使用者がより安全な化学品の取り扱いのため，自ら必要な措置を実施できるように国連において開発されたシステム．
- **HAZOP (Hazard and Operability Study)**：プロセスの逸脱を調査するための一連のガイドワードを使用して，プロセスの危険性と潜在的な操作上の問題を特定して評価するための定性的ハザード分析手法．
- **SDS (Safety Data Sheet)**：安全データシート．化学品の安全な取り扱いを確保するために，化学品の危険有害性等に関する情報を記載した文書．事業者間で化学品を取引する際に，化学品の危険有害性や適切な取り扱い方法に関する情報等を供給者側から受け取り側の事業者へに伝達する．

- 異常反応：意図せずに熱，エネルギー，及び有害物質を生成する可能性のある単一の化学物質又は混合物の反応．このような反応としては，暴走反応，混合危険及び自己反応性物質の分解が挙げられるが，ここでは SDS 等によって危険性の概要を把握することが難しいことが多い暴走反応と混合危険を対象とする．
- 化学プラントにかかるセーフティ・アセスメント：石油コンビナートにおいて相次いで火災・爆発が発生したことを踏まえ，化学プラントの新設，変更等の際に安全性の事前評価を行うための手法として，労働省により昭和 51 年に策定され，平成 12 年に改正された指針に示されている安全性評価手法¹⁷．
- 火災・爆発防止のための化学物質リスクアセスメント手法（JISHA 手法）：平成 18 年にリスクアセスメントの実施が努力義務となったことを踏まえ，一般的に化学物質を取り扱う事業場の作業に照準を合わせて中央労働災害防止協会（中災防，JISHA）によって開発されたリスクアセスメント手法¹⁸．
- 危害：人の受ける身体的障害もしくは健康障害，又は財産もしくは環境の受ける害．ここではプロセス災害（火災・爆発等）のことを指す．
- 危険源：危害の潜在的な源¹⁹．労働者への労働災害（負傷又は疾病）又はプロセス災害を生じさせる潜在的な根源．ハザード²⁰と呼ばれることもある．
- 混合危険：化学物質が，意図せずに他の化学物質等と混合又は接触した時に発生する反応で，制御不能となることや，人に危害を及ぼすこと．
- 混合危険マトリクス：取り扱っている化学物質同士の反応性をマトリクスとして整理した表（評価対象は 2 物質の組み合わせに限定される）．合成反応等に使用する物質だけではなく，様々な流体（空気，水，熱媒等），廃棄物，装置材料等も考慮し，もれなく検討することが重要である．
- 示差走査熱量測定（DSC）：対象物質と参照物質を制御された温度プログラムにかけて，対象物質と参照物質へのエネルギー入力の差もしくは対象物質と参照物質の温度差を温度の関数として測定する手法．
- シナリオ：引き金事象の発生からプロセス異常（中間事象）を経て，プロセス災害（火

¹⁷ 化学プラントにかかるセーフティ・アセスメントに関する指針（平成 12 年 3 月 21 日付け基発第 149 号）

¹⁸ 中央労働災害防止協会，化学物質による爆発・火災を防ぐ，pp. 108-152，中央労働災害防止協会（2018），中央労働災害防止協会，テキスト 化学物質リスクアセスメント，pp. 131-169，中央労働災害防止協会（2016）で紹介されている．

¹⁹ ISO/IEC Guide 51: 2014 では，「危害の潜在的な源（a potential source of harm）」．ISO 12100-1: 2014 では，「危害を引き起こす潜在的根源」と説明されている．

²⁰ ハザードという用語は，起こる可能性のある危害の発生源又は性質を定義するために用いることが一般的に認められている（例えば，感電，押しつぶし，切断，毒性によるもの，火災，おぼれ等のハザード）．

災・爆発等) 発生及び労働災害発生に至る一連の過程.

- シナリオモデル: 災害に至る複数の代表的なシナリオをまとめたもの. ここでは, バッチ/セミバッチ運転に対する暴走反応に関するシナリオについて, 既存の FTA, ETA, ボウタイ分析等の解析例をまとめて, 1 つのシナリオモデルとして構築した.
- 許容²¹可能なリスク: 社会における現時点での評価に基づいた条件下で, リスク許容基準を下回るリスク.
- セミバッチプロセス: 反応開始時に, 溶媒を含むいくつかの反応原料を反応器に加え, その後所定の温度まで昇温又は降温させ, 反応中に制御された方法で 1 つ又は複数の他の反応原料を加えて反応させ, 製品を得る工程.
- 多重防護: 異常発生防止対策, 異常発生検知手段, 事故発生防止対策, 被害の局限化対策の区分けで, 火災・爆発等発生に対するリスク低減措置. それぞれの目的を明確にした複数の対策を実施するのが望ましい.
- 断熱温度上昇: 反応によって発生するエネルギーがすべて反応系の温度上昇に使われた時の, その温度上昇. 反応熱を系の比熱で除すことによって計算できる.
- 熱化学方程式: 化学反応による熱の出入りを付加した化学反応式. 化学量論に基づき反応系における反応原料及び生成物の量的関係を特定した上で, その反応原料と生成物のエンタルピー差である反応エンタルピー (反応熱) を推定する.
- 熱平衡破綻: 反応系において, 発熱速度が冷媒及び周囲への熱の散逸速度を超えること (「暴走反応」を参照のこと). ここでは, 暴走反応に関するシナリオを検討する際の開始事象として, 一連の典型的なシナリオ (シナリオモデル) を構築した.
- 望ましい反応: 合成反応等の, 意図した生成物を得るための反応. 異常反応を考慮する際には, 望ましい反応だけではなく, 副反応, 二次的反応等の望ましくない反応についても考慮する必要がある.
- バッチプロセス: 反応開始時に, 溶媒を含むすべての反応原料を反応器に加え, 所定の温度まで昇温又は降温させ, 反応させて製品を得る工程.
- 反応エンタルピー: 化学反応によって発生もしくは吸収される熱エネルギー. 反応熱とも呼ばれる.

²¹ ISO/IEC Guide 51: 1999 では, 安全が「受容不可能なリスクがないこと」と定義されていたが, ISO/IEC Guide 51: 2014 では, 「許容不可能なリスクがないこと」と定義されたため, ここでは「許容」可能なリスクとした. ISO/IEC Guide 51: 2014 の解説では, 読者によって「受容可能なリスク」と「許容可能なリスク」の大小の受け取りが異なるため, 便宜上, 両者を同義語として取り扱うとされている.

- 反応速度：反応原料の転換が行われる速度。
- 引き金事象：危険源を顕在化させる事象。設備や装置の不具合、不適切な作業・操作、自然災害や大規模停電等の外部要因。本資料では、設備や装置の不具合、不適切な作業・操作をきっかけとする火災・爆発等発生について取り上げる。
- 標準生成エンタルピー：標準状態（25 ℃，1 気圧）で安定な単体から、標準状態にある化合物 1 mol を生成する時の反応熱。生成熱とも呼ばれる。
- プロセス：化学物質を製造・取り扱い・使用する工程²²。
- プロセス異常：流れ（流量等）、温度、圧力、液レベル、組成のずれや、設備・装置の異常状態のこと。
- プロセス災害：化学物質取扱設備において、火災・爆発等が発生すること。
- プロセスプラント：原料から製品を得る主要設備。化学プラントとも呼ばれる。
- プロセスプラントのプロセス災害防止のためのリスクアセスメント等の進め方（安衛研手法）：リスクアセスメント等を実施する際の課題となるシナリオ同定等について、リスクアセスメント等の実施手順に従って丁寧に検討するように、労働安全衛生総合研究所によりまとめられたリスクアセスメント等の進め方²³。
- 暴走反応：発熱速度が冷媒及び周囲への熱の散逸速度を超えているために制御不能となる反応。
- 暴走反応熱量計（ARC）：ほぼ断熱条件下での化学物質の自己発熱速度と圧力データを測定する手法を用いた分析装置。この測定手法は、暴走反応の条件とその結果を保守的に推定する。
- ボウタイ分析：想定される異常を中心に原因と結果を左右に配置して蝶ネクタイのような図を使用するリスク分析の手法（本資料では縦に記述した）。
- リスク：危害発生の頻度と危害の重篤度の組み合わせ。
- リスクアセスメント：リスク見積り及びリスクの評価からなるすべてのプロセス。危険源を顕在化させる引き金事象を想定し、火災・爆発等発生に至るシナリオを同定すると

²² 業種によっては、目的とする化合物を恒常的に必要量（多くの場合大量に）製造する方法の開発及び製造のことを「プロセス化学」と呼ぶが、ここでは、化学物質を製造・取り扱い・使用する工程のことを指す。

²³ 労働安全衛生総合研究所技術資料，プロセスプラントのプロセス災害防止のためのリスクアセスメント等の進め方，JNIOOSH-TD-No.5 (2016)。

ともに、シナリオに沿ったリスクを見積り、リスクレベルを決定（評価）すること。

- リスクアセスメント等：リスクアセスメントとリスク低減措置の検討・実施のこと。
- リスク許容基準：個人又は組織が関連する活動から得られる便益と引き換えに引き受ける用意がある、定性的又は定量的なリスクのレベル²⁴
- リスク低減措置：本質安全対策，工学的対策（保護装置等），保護具，使用上及び据え付け上の情報並びに機器の適切な保全，訓練によるリスク低減策等の管理的対策を含む．保護方策²⁵，緩和措置ともいう．
- リスク評価：リスク見積りに基づき，リスクの順位付けとともに，許容可能なリスクに到達したかどうかを判定する過程．
- リスク見積り：利用可能な情報を体系的に用いてハザード²⁶を特定し，リスクを見積ること．リスク分析ともいう．
- リスクレベル：リスクの大きさ．数値（Ⅰ～Ⅳ等）で表されることが多い．事前に設定された基準を基に，危害発生の頻度と危害の重篤度から求められる．

²⁴ 化学工学会安全部会監訳，リスクに基づくプロセス安全ガイドライン，丸善出版（2018），p. xviii より引用

²⁵ リスクを低減するための手段．「保護方策」とは，リスクを低減するための手段．本質安全設計，保護装置，保護具，使用上及び備え付け上の情報並びに訓練によるリスクの低減策を含む．

²⁶ 「危険源」の説明を参照のこと．

第 1 章 はじめに

1.1 化学物質の危険性に対するリスクアセスメント等に係る背景

2011 年以降、大規模化学工場を含む事業場において、火災・爆発による重大災害が連続して発生した。これらの事故の原因・背景に係る共通点として、異常反応や事故等の緊急時を想定してのリスクアセスメントが不十分であったこと、注意を要する危険物等の危険源や取り扱う物質の化学反応に対する理解不足（副反応や残留物の取り扱いを含む）により、当該物質を取り扱う際のリスクアセスメントが不十分であったこと、リスクアセスメントが不十分であった結果、非定常作業時や緊急時を想定しての設備（計測装置、安全装置）の設計・設定、マニュアルの作成や体制の整備等が不適切であったこと等が指摘されている²⁷。

一方、平成 28 年（2016 年）6 月 1 日より、労働安全衛生法第 57 条第 1 項の政令で定める物及び通知対象物に対するリスクアセスメントの実施が義務化された²⁸。ここでは、事業場における化学物質等による危険性又は有害性等をリスクアセスメント等の対象とすることとされている。すなわち、有害性に係るリスクアセスメントだけでなく、化学物質の危険性に係るリスクアセスメントも行う必要がある。この際、火災・爆発等を引き起こすのは爆発性の物、発火性の物、引火性の物等の化学物質単独だけではなく、化学物質同士の反応を伴う相互作用も原因として考える。そのため、労働安全衛生法の改正に伴い厚生労働省より交付された指針²⁹では、化学プラント等の化学反応のプロセス等による災害のシナリオを仮定して、その事象の発生可能性と重篤度を考慮したリスクの見積りが考慮に入れられている。なお、リスクアセスメントの実施が義務化された化学物質は「危険性又は有害性がある」ことが明確になっている物が選択されているが、それ以外の物質に「危険性又は有害性がない」と結論付けているわけではない。条件さえ整えば、火災・爆発等を引き起こす可能性があることを認識する必要がある。また、平成 27 年（2015 年）に高圧ガス保安協会から発行されたリスクアセスメント・ガイドライン³⁰でも、リスクアセスメント・リスクマネジメントの実施の前に理解しておくべき基本事項として、反応危険（予想しなかった発熱反応による反応が暴走することや、2 種類以上の物質が混合することによる発熱・発火や爆発性混合物を形成すること）が挙げられており、化学物質のリスクアセスメント等を的確に実施するためには、取り扱う物質の化学反応に対する理解も促進していく必要がある。

1.2 リスクアセスメント等において異常反応を考慮する上での課題

厚生労働省の指針で示された化学物質のリスクアセスメント等の進め方において、「危険性又は有害性の特定」では国際連合から勧告として公表された「化学品の分類及び表示に関

²⁷ 内閣官房、総務省消防庁、厚生労働省、経済産業省、石油コンビナート等における災害防止対策検討関係省庁連絡会議 報告書、平成 26 年 5 月

²⁸ 労働安全衛生法の一部を改正する法律（平成 26 年法律第 82 号）

²⁹ 化学物質等による危険性又は有害性等の調査等に関する指針（平成 27 年 9 月 18 日付け指針公示第 3 号）

³⁰ 高圧ガス保安協会、リスクアセスメント・ガイドライン（Ver. 1）、平成 27 年 3 月（平成 27 年 6 月改訂）、リスクアセスメント・ガイドライン（Ver. 2）、平成 28 年 2 月

する世界調和システム（GHS）」又は日本産業規格 JIS Z 7252 に基づき分類された化学物質等の危険性又は有害性（SDS を入手した場合には、当該 SDS に記載されている GHS 分類結果）に即して危険性又は有害性を特定することとされている。SDS には、その物質単体の安定性、反応性や有害性についての記載事項があるが、SDS は作成時までには化学物質製造メーカーが知り得た情報を記載したものであり、物質によっては十分な知見が得られていないものもある。さらに、物質単体の情報に加えて化学反応によって発生する熱量やガス量等は理論的に見積ることは可能であるものの、物理的变化による熱の出入り、溶媒へのガス等の吸収、副反応の存在等を考慮すると、理論的に見積った熱量やガス量等は現実のそれと異なるため、実測が必要である。しかし、実測には十分な資源（作業員、試験設備、調査・分析時間等）が必要となり、すべての事業場が対応することは難しい。このため、災害につながる化学反応等を見落とし、的確なリスクアセスメント等が妨げられる可能性がある。災害につながる化学反応等をできる限り把握するためには、化学反応によって発生する熱量の測定事例や予測ツール及び混合危険を予測するツールの紹介・提供、並びに異常反応による災害事例の提供等が必要である。

また、「リスクの見積り」では、化学プラント等の化学反応のプロセス等における災害のシナリオを仮定して、その事象の発生可能性と重篤度を考慮する方法等によって、化学物質等によるリスクを見積ることとされている。プロセスプラントの安全性評価手法としては HAZOP やフォールトツリー解析（FTA）等、既に確立された手法がある。厚生労働省関連では、化学物質の危険性に対するリスクアセスメント実施のための手法として、化学プラントにかかるセーフティ・アセスメント³¹（労働省方式）、爆発・火災防止のための化学物質リスクアセスメント手法³²（JISHA 手法）、プロセスプラントのプロセス災害防止のためのリスクアセスメント等の進め方³³（安衛研手法）が既に提供されている。これらの手法では、論理的で効果的なリスク低減措置を検討することができる一方、詳細な分析を行うためには化学物質や反応プロセスだけでなく、プラント・設備、作業・操作、防災対策等に関する専門的知識が必要となり、さらに多くの労力（時間・コスト等）が必要となる。そのことにより、シナリオの同定やリスク低減措置の検討等が的確になされず、的確なリスクアセスメント等が妨げられる可能性がある。特に詳細な分析を行うための資源（詳細な分析を行うための人員、時間、コスト等）を十分に割けない中小規模事業場において、その可能性が顕著になると思われる。シナリオやリスク低減措置を的確に検討するためには、異常反応に関する典型的なシナリオやシナリオを検討する着眼点、示したシナリオの進展を防止するためのリスク低減措置の例を具体的に提供する必要がある。

³¹ 化学プラントにかかるセーフティ・アセスメントに関する指針（平成 12 年 3 月 21 日付け基発第 149 号）

³² 中央労働災害防止協会、化学物質による爆発・火災を防ぐ、pp. 108-152、中央労働災害防止協会（2018）。

³³ 労働安全衛生総合研究所技術資料、プロセスプラントのプロセス災害防止のためのリスクアセスメント等の進め方、JNIOH-TD-No.5（2016）。

1.3 異常反応を想定しての化学物質の危険性に対するリスクアセスメント等の確な実施に対する支援策

安衛研手法により火災・爆発等を防止するためのリスクアセスメント等を実施することを前提として、その手法の段階ごとに異常反応（「暴走反応」と「混合危険」）を検討する際に参考になる情報を提供することによって、異常反応を想定しての火災・爆発等が生じる危険性に対するリスクアセスメント等を的確に実施することができるのではないかと考えた。ここでは、バッチ／セミバッチプロセスを対象として、情報を整理し、提供することとした。本資料の構成を図 1-1 に示す。本資料では、以下のような構成で情報を提供する。

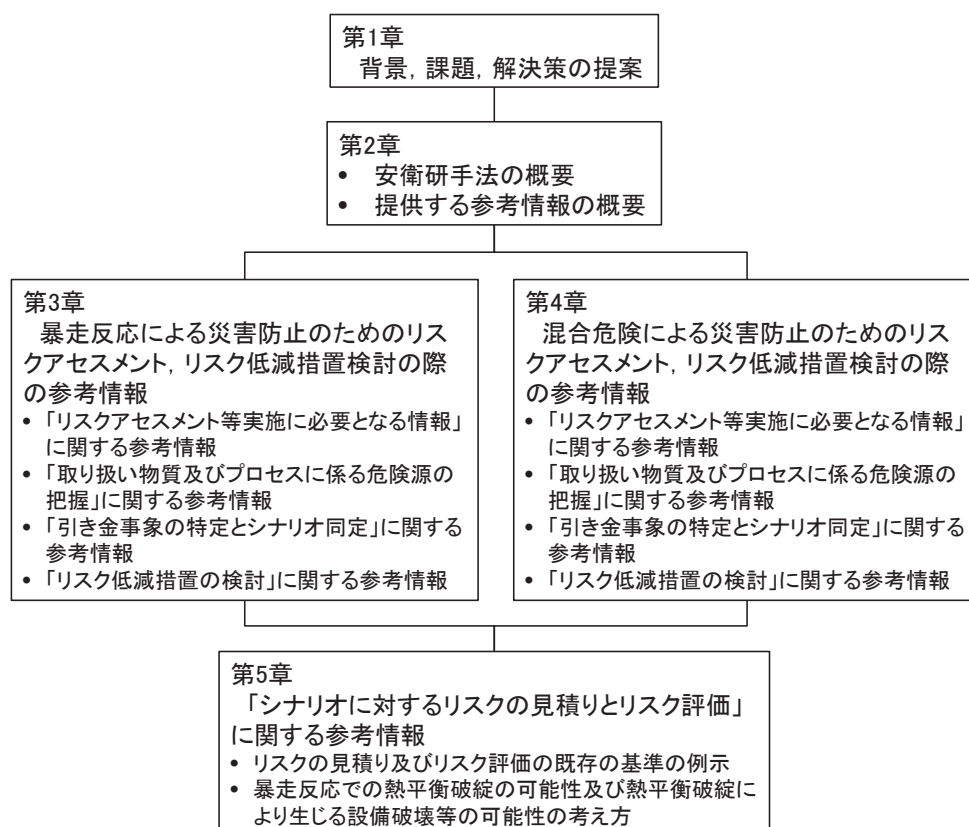


図 1-1 本資料の構成

- ・ 第2章では、安衛研手法の概要を示すとともに、本資料で説明する参考情報の概要について述べる。
- ・ 異常反応としては「暴走反応」と「混合危険」を取り上げ³⁴、それぞれについてリスクアセスメント、リスク低減措置検討の際の参考情報をまとめる。
- ・ 第3章では、安衛研手法の流れに沿って、暴走反応に関する検討を行う際に必要となる

³⁴ 異常反応としては、他に自己反応性物質の分解が挙げられる。自己反応性物質の分解は、SDS等によって当該物質の危険性の概要を把握できることが多いため、ここでは、SDS等によって危険性の概要を把握することが難しいことが多い暴走反応と混合危険を対象とした。

情報、異常反応に関する質問を検討する際の考え方、暴走反応の原因から結果に至る過程を示す典型的なシナリオ及びリスク低減措置の例をまとめる。

- 第4章では、安衛研手法の流れに沿って、混合危険を検討する上で考慮すべき物質の例、複数の物質が混合した際の現象を検討する際に参考となるデータやツールの例、混合危険に関するシナリオを検討する際の着眼点、リスク低減措置の例を示す。
- 第5章では、「暴走反応」と「混合危険」の双方に共通する事項として、リスクアセスメントのための基準を各事業場等で決定することを支援するために、いくつかの基準の例を示す。
- 添付資料では、第3章から第5章での参考情報の補足資料として、以下の資料をまとめる。
 - 爆発火災データベースにおける暴走反応による火災・爆発災害事例
 - 暴走反応のシナリオモデル（統合版）
 - シナリオモデル及びシナリオ整理表の読み方
 - 爆発火災データベースにおける混合危険による火災・爆発災害事例
 - 事故影響（放射熱，爆風圧，毒性ガス濃度）の指標の例

第 2 章 安衛研手法及び参考情報の概要

2.1 安衛研手法の概要³⁵

労働安全衛生総合研究所では、主に化学プラント・設備における火災、爆発、漏洩、破裂等のプロセス災害を防止することを目的としたリスクアセスメント等の進め方（安衛研手法）を技術資料にまとめている。安衛研手法の概要を図 2-1 に示す。図 2-1 に示すように、以下の 3 つの STEP でリスクアセスメント等を進めることとしている。

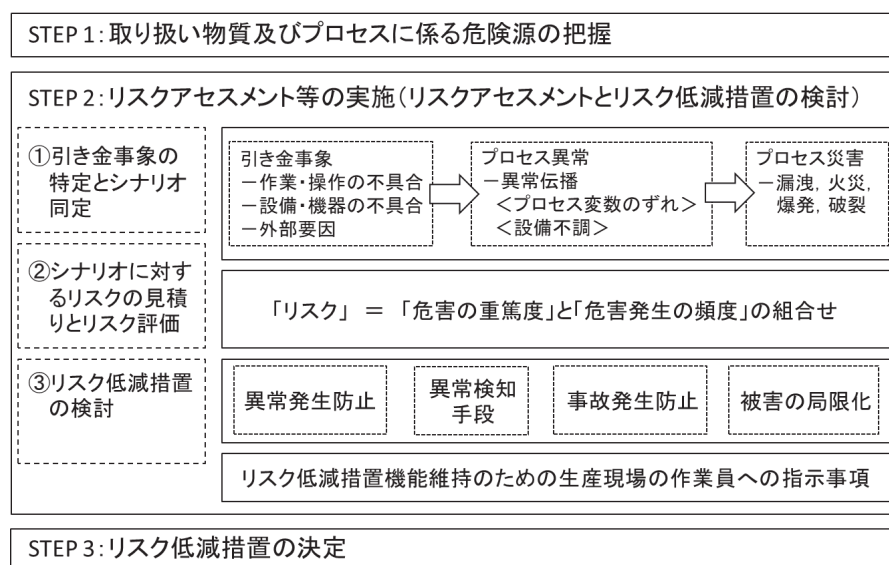


図 2-1 安衛研手法の概要³⁶

- ・ **STEP 1**：化学プラント・設備で取り扱われる物質及びプロセスに係る危険源と、想定されるプロセス災害を質問票により把握する。物質及びプロセスに係る危険源と想定されるプロセス災害等を念頭に置いて、STEP 2 以下のリスクアセスメント等を実施する。
- ・ **STEP 2**：以下の①～③を繰り返し、様々なシナリオを同定するとともに、リスクの見積り及びリスク評価を行い、必要なリスク低減措置の検討等を行う。
 - ① 対象プロセスに潜在する危険を顕在化させる事象（引き金事象）を特定するとともに、STEP 1 での把握結果等を参考にして、引き金事象からプロセス災害発生に至るシナリオを同定する。
 - ② シナリオに対するリスクを見積り（リスクレベルを求め）、許容可能なリスクレベルを超えているかを判定する。既存のリスク低減措置が実施されている場合には、その有効性を確認するために、リスク低減措置が存在しないと仮定した場合（その 1）とそのリスク低減措置が機能する場合（その 2）についてリスクを見積る。

³⁵ ここでは、労働安全衛生総合研究所技術資料、プロセスプラントのプロセス災害防止のためのリスクアセスメント等の進め方、JNIOSSH-TD-No.5 (2016)の進め方の概要を示している。

³⁶ JNIOSSH-TD-No.5, p. 9 (2016)より転載

③ リスクレベルが高い（許容レベルを超えている）シナリオについては、追加のリスク低減措置を検討し、再度リスクレベルを見積る（その3）。提案された追加のリスク低減措置の実施可否を判断する。リスク低減措置の機能を維持するために、現場作業者に伝えておくべき事項等がある場合には、注意を促す。残留リスクがある場合には、対応を明確にしておく。許容可能なリスクレベルに収まるまで、複数のリスク低減措置の検討を繰り返す。

- ・ **STEP3**：シナリオごとの検討結果をまとめ、実施すべきリスク低減措置を検討するための優先順位付けを行う。優先順位に従って、技術面・コスト面等を踏まえ、リスク低減措置を決定する。

以上のリスクアセスメント等を実施する際には、以下の2種類の記録シートを用意し、結果を記録する。

- ・ プロセス災害防止のためのリスクアセスメント等実施シート（表 2-1）

この実施シートには、引き金事象の特定からシナリオ同定、リスク見積り及びリスク評価、リスク低減措置の立案とリスク低減措置を実施した場合に現場の作業者に伝え、共有しておくべき情報等を順番に記載する。すなわち、本シートには1つのシナリオに対するリスクアセスメント等の結果が記録される。

- ・ プロセス災害防止のためのリスクアセスメント等実施結果シート（表 2-2）

シナリオごとの検討結果が記載されたリスクアセスメント等実施シートを集め、表 2-2 に示す1つの実施結果シートにまとめる。この実施結果シートを基に、技術面、コスト面等を考慮して、実施するリスク低減措置を決定する。

すなわち、リスクアセスメント等を実施して、リスクアセスメント等実施結果シートを作成し、実施するリスク低減措置を決定することが目標となる。

本資料は、上記のリスクアセスメント等を実施する際に参考となる情報を取りまとめたものである。

表 2-1 プロセス災害防止のためのリスクアセスメント等実施シート（様式）³⁷

実施日	○年○月○日
実施者（記載者）	○○○○

STEP 1 取り扱い物質及びプロセスに係る危険源の把握

取り扱い物質及びプロセスに係る危険源の把握結果	質問票で「はい」に○が付いた項目
-------------------------	------------------

STEP 2 リスクアセスメント等の実施

作業・操作、設備・装置とその目的		(作業・操作、設備・装置) (目的)			
① 引き金事象特定とシナリオ同定	引き金事象 (初期事象)				
	プロセス異常 (中間事象)				
	プロセス災害 (結果事象)				
②既存のリスク低減措置の確認		・ ○○○ <目的><種類>			●リスク低減措置実施(実装)の種類 A) 本質安全対策 B) 工学的対策 C) 管理的対策 D) 保護具着用 ●リスク低減措置の目的 a) 異常発生防止 b) 異常発生検知 c) 事故発生防止 d) 被害の局限化
②リスク見積りと評価 (その1) 既存のリスク低減措置が無いと仮定した場合		重篤度	頻度	リスクレベル	
		○△×	○△×	I II III	
②リスク見積りと評価 (その2) 既存のリスク低減措置の有効性確認		重篤度	頻度	リスクレベル	
		○△×	○△×	I II III	
③追加のリスク低減措置の検討 & ③リスク見積りと評価 (その3) 追加のリスク低減措置の有効性確認		イ) ○○○ <目的><種類> ・ 追加リスク低減措置ごとにリスクを見積り、評価する			重
		ロ)			頻
		ハ)			リ
		ニ)			
③追加のリスク低減措置の実装可否		イ) ~ ニ)			
③リスク低減措置の機能を維持するための現場作業員への注意事項等		イ) ~ ニ)			
③その他、生産開始後の現場作業員に特に伝えておくべき事項		残留リスクの有無の確認: 残留リスクへの対応方法:			
備考					

³⁷ 労働安全衛生総合研究所技術資料，JNIOOSH-TD-No.5 (2016)，表 2 より転載。ただし，読者の混乱を防止するため，参考する表番号を削除。

表 2-2 プロセス災害防止のためのリスクアセスメント等実施結果シート (様式) 38

取り扱い物質及びプロセスに係る危険源の把握結果				作業・操作、設備・装置とその目的				実施担当者と実施日				実施担当者と実施日					
								〇〇 〇年〇月〇日									
No.	①引き金事象特定とシナリオ同定			②既存のリスク低減措置の確認	②リスク見積りと評価 (その1) 既存のリスク低減措置が無い と仮定した場合			②リスク見積りと評価 (その2) 既存のリスク低減措置の有効性確認			③追加のリスク低減措置の検討	③リスク見積りと評価 (その3) 追加のリスク低減措置の有効性確認			③追加のリスク低減措置の実装可否	③リスク低減措置の機能を維持するための現場作業 者への注意事項等	③その他、生産開始後の現場作業者に特に伝えておくべき事項
	引き金事象 (初期事象)	プロセス異常 (中間事象)	プロセス災害 (結果事象)		重篤度	頻度	リスクレベル	重篤度	頻度	リスクレベル		重篤度	頻度	リスクレベル			

38 労働安全衛生総合研究所技術資料, JN10SH-TD-No.5 (2016), 表 3 より転載.

2.2 参考情報の概要

2.1 節に示したリスクアセスメント等の進め方に従って、異常反応が関係する火災・爆発等の災害を防止するためのリスクアセスメント等を的確に行うには、以下のことを明確にする必要がある。

- (1) 想定する反応（合成反応，反応原料・生成物・中間生成物等の熱分解等）によって災害が生じ得るかを把握すること
- (2) 異常反応が生じ，プロセス災害に至るシナリオを的確に同定すること
- (3) 異常反応が関係する重大シナリオに対して的確なリスク低減措置を検討すること

上記のことを検討するための参考情報を取りまとめ，安衛研手法の各 STEP と対応させて本資料及び関連するツールやデータベースで示している。本資料では，異常反応として「暴走反応」と「混合危険」を取り上げ，それぞれについて参考情報をまとめた。本資料に示す参考情報と安衛研手法の STEP との関係を図 2-2 に示す。なお，STEP3 は，STEP2 でのリスクアセスメント等実施の結果に基づき，事業者自身が技術面・コスト面等を踏まえ，実施すべきリスク低減措置を決定する STEP であることから，ここでは取り上げない。



図 2-2 本資料に示す情報と安衛研手法の STEP との関係³⁹⁾

³⁹⁾ リスクアセスメント等は STEP1, STEP2①, ②, ③, STEP3 の順番で進められるが, 本資料では「暴走反応」と「混合危険」の双方に共通する事項として, 同定したシナリオに対するリスクの見積り及びリスク評価を行うのに参考となる情報を第 5 章としてまとめた。

第3章 暴走反応による災害防止のためのリスクアセスメント、

リスク低減措置検討の際の参考情報

3.1 「リスクアセスメント等実施に必要となる情報の収集」に関する参考情報

リスクアセスメント等を実施するための情報として、表 3-1 に示す資料等を入手し、活用する。

表 3-1 リスクアセスメント等の実施に必要となる情報（関連資料）⁴⁰

種類	具体例	必要とする理由
物質の情報	<input type="checkbox"/> 安全データシート（SDS）	・取り扱う化学物質の特性（物理化学的性質，有害性等）GHS 分類を確認する。
プロセスの情報	<input type="checkbox"/> 反応条件 <input type="checkbox"/> 運転条件 <input type="checkbox"/> 物質の取扱量	・流量，温度，圧力，濃度等の正常なプロセス挙動，運転条件等を把握する。
機器の情報	<input type="checkbox"/> 機器・装置リスト	・対象内に存在する設備・装置等を確認し，それらの不具合要因を抽出する。 ・設備・装置の構成を確認し，異常伝播の構造を把握する。 ・現有設備のリスク低減措置を確認する。
マニュアル類	<input type="checkbox"/> 作業標準 <input type="checkbox"/> 作業手順書（工程表） <input type="checkbox"/> 操作手順書	・作業方法・手順等の文書類を確認し，それぞれに対する作業・操作ミス，記載漏れ等，考えられる事項を抽出する。
図面類	<input type="checkbox"/> プロセスフロー図 <input type="checkbox"/> 配管計装図 <input type="checkbox"/> 機器設備のレイアウト等，作業の周辺の環境に関する情報 <input type="checkbox"/> インターロックの Cause & Effect 図（検出端と操作端の組合せ）	・設備・機器の構成を確認し，異常伝播の構造を把握する。
その他	<input type="checkbox"/> 類似事事故事例データベース <input type="checkbox"/> 災害統計（データ） <input type="checkbox"/> リスクアセスメント等の実施に当たり参考となる資料等	・過去に発生した類似のプロセス災害に関する情報を得る。

⁴⁰ 労働安全衛生総合研究所技術資料，プロセスプラントのプロセス災害防止のためのリスクアセスメント等の進め方，JNIOHS-TD-No.5 (2016)を基に作成。

リスクアセスメント等を実施するための情報として、安全データシート (SDS)、反応条件、運転条件、物質の取扱量等を入手することとされている。これはプロセス設計の情報を入手することと同じことであり、安全なプロセスを設計するための手順はこれまでによく検討されている。これまでに公開されている文献の例を以下に示す。

(邦文)

- 1) 松永猛裕編, 化学物質の爆発・危険性ハンドブック 評価と対策, 丸善出版 (2020).
- 2) 安全工学会編, 安全工学便覧 (第4版), コロナ社 (2019).
- 3) 安全工学会監修, 実践・安全工学 シリーズ 1「物質安全の基礎」, 化学工業日報社 (2012).
- 4) 三宅淳巳監訳, 化学プロセスの熱的リスク評価, 丸善出版 (2011).
- 5) ジョン・バートン&リチャード・ロジャース編著, 反応暴走ー安全な化学プロセス開発のためにー, 化学工業日報社 (2002).
- 6) 田村昌三編, 化学プロセス安全ハンドブック, 朝倉書店 (2000).
- 7) 産業安全技術総覧編集委員会編, 産業安全技術総覧, 丸善 (1999).

(英文)

- 8) F. Stoessel, Thermal Safety of Chemical Processes: Risk Assessment and Process Design, Second, Completely Revised and Extended Edition, Wiley-VCH (2020).
- 9) R.W. Johnson, S.W. Rudy, and S.D. Unwin, Essential Practices for Managing Chemical Reactivity Hazards, CCPS/AIChE (2003).
- 10) HSE, Designing and Operating Safe Chemical Reaction Processes, HSG143 (2000).
- 11) CCPS/AIChE, Guidelines for Process Safety in Batch Reaction Systems (1999).
- 12) J. Barton and R. Rogers, Chemical Reaction Hazards, A guide to Safety, Second Edition, IChemE (1997).
- 13) CCPS/AIChE, Guidelines for Chemical Reactivity Evaluation and Application to Process Design (1995).
- 14) CCPS/AIChE, Guidelines for Safe Storage and Handling of Reactive Materials (1995).

物質の情報として、労働安全衛生総合研究所では各種反応性物質の発熱挙動を測定した結果を、特別研究報告⁴¹や安全資料⁴²としてまとめている。さらに、それらの測定結果をデジタルデータとして労働安全衛生総合研究所ホームページ⁴³で公開している。

⁴¹ 産業安全研究所特別研究報告, 反応性物質の熱安定性に関する研究 ー熱分析及び断熱測定ー, RIIS-SRR-83-1 (1983).

⁴² 産業安全研究所安全資料, 反応性物質の DSC データ集, RIIS-SD-87, No. 1 (1987).

産業安全研究所安全資料, 反応性物質の DSC データ集(2), RIIS-SD-89 (1990).

⁴³ 労働安全衛生総合研究所ホームページ, 化学物質の危険性に対するリスクアセスメント, https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/houkoku/houkoku_2021_03.html (2021 年 12 月 21 日現在). 当該ホームページの URL は、情報が追加されるたびに新たな URL で公開される。

【反応性物質の DSC, ARC データの概要】

労働安全衛生総合研究所では、反応性物質の熱的危険性の予測に資することを目的として、様々な官能基を有する 828 種類の反応性物質の発熱挙動を、示差走査熱量計 (DSC) によって測定した結果を安全資料にまとめ、発刊している。また、主要な 29 種類の反応性物質の断熱条件下での発熱挙動を、暴走反応熱量計 (ARC) によって測定した結果を特別研究報告にまとめ、発刊している。それらの測定結果の画像データからデジタルデータに変換した。デジタルデータを利用することで手持ちの DSC, ARC データとの比較や物質同士の特性の比較等、データの解析を自由に行うことができる。

また、表 3-1 の「その他」に示したように、過去に発生した類似の災害に関する情報を得ることが参考になる。労働安全衛生総合研究所で公開している「爆発火災データベース」から、暴走反応によると考えられる火災・爆発災害の事例を抽出した結果を添付資料 1 に示す。

【爆発火災データベースの概要】

労働安全衛生総合研究所で収集している災害情報の中から、爆発、火災、破裂、高温物との接触に分類される災害を抽出し、掲載内容を調整した上で 2012 年 6 月から Excel によるデータベースとして、その内容の公開を行っている。現在、1955 年から 2010 年までの災害事例が収録されており、総件数は 6430 件となっている。

Excel による事例の検索と抽出方法の解説と併せて、労働安全衛生総合研究所ホームページの以下のサイトで公開されている。

https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/houkoku/houkoku_2020_05.html⁴⁴

表 3-1 には、解析対象とする反応の情報についての記載が明示されていないため、ここでは対象とする反応を考慮する上での基本的な観点、必要なデータ及びデータの入手方法を示す。熱平衡破綻が原因となる暴走反応を考慮する場合は、対象とする反応が暴走反応を起こし得るかを考慮する必要がある。詳細な評価手法は 19 ページに示した文献に詳しく示されている。その中で、対象とする反応を考慮する上での基本的な観点が表 3-2 のように示されている。また、ガス発生量を入手し、暴走反応の結果どのようなことが起こるか（特に反応器が破損するか）を検討するために、表 3-2 に示すデータをできるだけ入手する。これらのデータは、できる限りプロセスの運転条件を模擬した条件でのデータを実測により得る

⁴⁴ 2021 年 2 月の第 6 次公開の際の URL。当該ホームページの URL は、情報が追加されるたびに新たな URL で公開される。

ことが必要である。これらのデータは専ら 3.3 節「「引き金事象の特定とシナリオ同定」に関する参考情報」におけるシナリオの検討時に用いられる。検討方法の概要は、3.3 節に示す。これらの情報は最初から用意できることが望ましいが、リスクアセスメント等を実施していく中で揃えてもよい。

以上のデータについて考えることは、「対象とする反応の熱化学方程式」を考慮することに等しい⁴⁵。例えば、反応原料 A(液体)及び B(液体)から、C(液体)及び D(気体)が生成する反応（反応エンタルピーは ΔH ⁴⁶）について、以下のような熱化学方程式を想定する。すべての反応について考慮することは困難であるが、表 3-2 に示す反応（望ましい反応（合成反応）、望ましくない反応（副反応、二次的反応（熱分解等））及び反応に関わる主要な物質（反応原料、反応中間体（主要なもの）、生成物）の熱分解）についてはできる限り考慮した方がよい⁴⁷。



⁴⁵ 特に合成分野において、反応原料と目的とする生成物のみを化学反応式として記載することがあるが、ここでは、化学量論に基づいた熱化学方程式を考える必要がある。その際、化学分野の専門家の助力を得るとよい。

⁴⁶ 反応エンタルピーは、反応によって物質が変換される際に系に生じるエンタルピー変化であり、ここでは系の温度上昇に寄与する効果を正とする。すなわち、エンタルピーの符号はマイナスとなる。一般的に使用される単位質量当たりの反応熱量 Q'_r は、系の反応エンタルピー ΔH 、濃度 C 、密度 ρ により、以下のように表される。すなわち通常は符号がプラスで表現される。

$$Q'_r = \frac{C(-\Delta H)}{\rho}$$

⁴⁷ 熱分解等の意図しない反応においては、化学式は厳密には得られないため、物質の各元素が最も安定な化合物となる（N→窒素分子等）と考えて化学反応式を推測する。詳細は、19 ページに挙げた文献 6), 13)等を参照のこと。

表 3-2 対象とする反応を考慮する上での基本的な観点,
必要なデータ及びデータの入手方法⁴⁸

	観点	必要なデータ	データの入手方法
1	<ul style="list-style-type: none"> ・ 望ましい反応（合成反応）によってどれだけ温度が上昇する可能性があるか. ・ 温度の上昇速度はどの程度か. ・ その結果どうなるか. ・ 最大圧力はどれだけか. 	<input type="checkbox"/> 合成反応の反応エンタルピー（反応熱） <input type="checkbox"/> 合成反応の反応速度 <input type="checkbox"/> 反応液の比熱 <input type="checkbox"/> 溶媒の蒸気圧 <input type="checkbox"/> ガス発生量	<ul style="list-style-type: none"> ・ 文献 ・ 熱力学データ ・ 計算による推定 ・ 熱分析 ・ デュワー瓶試験 ・ 反応熱量計（耐圧反応容器を使用） ・ 温度・圧力測定 ・ 断熱熱量計, ベントサイジング熱量計⁴⁹ ・ 流量計によるガス量測定
2	<ul style="list-style-type: none"> ・ 望ましくない反応（副反応, 二次的反応（熱分解等））によってどれだけ温度が上昇する可能性があるか. ・ 温度の上昇速度はどの程度か. ・ その結果どうなるか. ・ 最大圧力はどれだけか. 	<input type="checkbox"/> 1 のデータ <input type="checkbox"/> 望ましくない反応の反応エンタルピー（反応熱） <input type="checkbox"/> 望ましくない反応の反応速度	1 の方法
3	<ul style="list-style-type: none"> ・ 反応原料が蓄積する可能性があるか. ・ その結果どうなるか. 	<input type="checkbox"/> 1 のデータ <input type="checkbox"/> 通常状態での濃度 <input type="checkbox"/> 反応速度	<ul style="list-style-type: none"> ・ 反応熱量計と機器分析の同時測定 ・ 蓄積の結果生じ得るエネルギーは熱分析で測定 ・ ベントサイジング熱量計⁴⁹
4	<ul style="list-style-type: none"> ・ システムの物理的状態に起因してどれだけ温度が上昇するか. 	<input type="checkbox"/> 伝熱データ（除熱能力, 還流能力等） <input type="checkbox"/> 攪拌機による入力 <input type="checkbox"/> ポンプによる入力 <input type="checkbox"/> 熱放射	<ul style="list-style-type: none"> ・ 設計データ

⁴⁸ CCPS/AIChE, Guidelines for Chemical Reactivity Evaluation and Application to Process Design, p. 130, Table 3.4 (1995) を基に作成.

⁴⁹ 米国化学工学会（AIChE）の DIERS プロジェクト（1976～1984 年）で開発された断熱熱量計で、実装置と同じ条件での圧力逃し装置の吹出し実験や暴走反応の中断実験等が可能である.

反応エンタルピーを計算により推測するには、反応原料、生成物等の生成エンタルピーを入手する必要がある。しかし、それらのデータは各種文献に散在していることや、そもそも生成エンタルピーが不明な物質がある等、入手には多くの労力を要する場合がある。そのため、既知の生成エンタルピーや、生成エンタルピーが不明な物質の生成エンタルピーを予測するための **Benson** グループの寄与値のデータを取りまとめ、**Excel** のデータシートとして整理し、反応エンタルピー及び生成エンタルピーの簡単な計算機能を付与した支援ツールを作成した⁵⁰。

【反応エンタルピー推計支援ツールの概要】

労働安全衛生総合研究所では、化学物質の既知の生成エンタルピーや、生成エンタルピーが不明な物質の生成エンタルピーを予測するための **Benson** グループの寄与値のデータを取りまとめ、**Excel** のデータシートとして整理した。また、生成エンタルピー及び反応エンタルピーを推定するための以下の機能を有している。

- ・ 反応原料の生成エンタルピーの総和と生成物の生成エンタルピーの総和の差をとって反応エンタルピーを推計する機能
- ・ **Benson** グループごとの寄与値をデータベース化し、当該データを用いて加減性則により生成エンタルピーを推計する機能
- ・ **CAS** 登録番号⁵¹あるいは **InChIkey**⁵²を入力することで、自動的に化学構造から **Benson** グループの同定を行う機能

一方、反応速度は計算により推測することは極めて困難であり、多くは実測することが求められる。特に、二次的な反応としてよく生じる分解反応は、推測が難しいため、熱分析等で実測により発熱速度等を得る必要がある。それらのデータの入手方法は、19 ページで示した文献に詳しい。

プロセスの冷却速度は設計データから得ることになるが、設計データがない場合、冷却速度及び自然冷却による熱損失の例⁵³が表 3-3 及び表 3-4 のように示されているので、参考にされたい。

⁵⁰ 労働安全衛生総合研究所ホームページ、「化学物質の危険性に対するリスクアセスメント」で公開予定、https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/houkoku/houkoku_2021_03.html (2021 年 12 月 21 日現在)。当該ホームページの URL は、情報が追加されるたびに新たな URL で公開される。

⁵¹ 米国化学会の一部門である **Chemical Abstracts Service (CAS)**が運営・管理する化学物質登録システムから付与される物質固有の識別番号のこと。

⁵² 国際純正・応用化学連合 (**IUPAC**) 及び米国国立標準技術研究所 (**NIST**) が策定した化学物質の化学構造を機械可読な文字列として記述する識別子 (**International Chemical Identifier, InChI**) を暗号化技術により 25 文字に短縮化した文字列のこと。

⁵³ ここでの「冷却速度」は、反応器壁を通じた冷媒（冷水等）との強制対流により反応物が冷却する速度を示しており、反応器内の攪拌による強制対流や、冷媒の物性や流速等の効果を考慮したものである。一方、「熱損失」は自然対流や放射により反応物が冷却する速度を示しており、反応器内の攪拌による強制対流や、冷媒の物性や流速等の効果を考慮しない。

表 3-3 各種反応容器の大きさと単位質量当たりの冷却能力^{*,54}

規模	反応容器の 体積 [m ³]	単位質量当たりの冷却能力 [W/(kg・K)]	代表的な冷却能力 [W/kg]
ベンチスケール	0.001	9	450
パイロットスケール	0.1	3	150
実機	1	0.9	45
実機	10	0.4	20

* 単位質量当たりの冷却能力は、総括熱伝達係数が 300 W/(m²・K)、密度 1000 kg/m³ の物質が満杯に容器に入っており、冷媒との温度差が 50 K として計算した。

表 3-4 容器の代表的な熱損失の値⁵⁴

反応器の体積 [m ³]	単位質量当たりの熱損失 [W/(kg・K)]	冷却時間の半減期 [h]
2.5	0.054	14.7
5	0.027	30.1
12.7	0.020	40.8
25	0.005	161.2

⁵⁴ 三宅淳巳監訳，化学プロセスの熱的リスク評価，p. 46，丸善出版（2011）を基に作成

3.2 「取り扱い物質及びプロセスに係る危険源の把握」に関する参考情報⁵⁵

ここでは、安衛研手法における STEP1 の質問票での質問 10（対象とするプロセスプラントは、意図的に反応（副反応・競合反応等も含む）を起こしているか？）を検討する際の考え方を示す。当該質問において「意図的な反応」とは、出発原料とは異なる化学組成を持つ製品を合成するために起こす化学反応のことをいう。通常、製品を合成するための反応は、プロセス内で適切に制御され、安全に進行し、終了する。しかし、何らかの原因でその制御が逸脱した場合、異常な事象が進展し、最終的に火災・爆発等の災害に至る可能性がある。

「意図的に反応を起こしている」プロセスの例と、「意図的に反応を起こしていない」プロセスの例を以下に示す。

- ・「意図的に反応を起こしている」の例：反応操作（操作の方法（バッチ、セミバッチ、連続）、装置の種類、反応の種類等は問わない）
- ・「意図的に反応を起こしていない」の例：ろ過、吸着、粉碎、ふるい分け、乾燥、混合、溶解、蒸留、抽出、蒸発、吸収、晶析、保管、包装

「意図的に反応が行われている」時に起こる現象の例を以下に示す。

- ・気体や固体残渣が生成する
- ・温度が上がる⁵⁶、又は温度が下がる
- ・色が変わる
- ・出発原料の量が減少する
- ・化学構造が出発原料と異なる物質の量が増加する

ただし、発熱や吸熱は、混合や希釈等によっても生じ、必ずしも化学反応が起こっていることを示すものではないことに注意する。

また、混合、溶解、蒸留、抽出、吸収等の操作においては意図的な化学反応を伴う場合があるため、化学の専門家等の知見を得て検討する必要がある。

以上のように、「意図的な反応」を起こしている状態では、何らかの原因でその制御が逸脱した場合、異常な事象が進展し、最終的に火災・爆発等の災害に至る可能性がある。そのシナリオは多岐にわたり、災害までに生じる反応も多岐にわたる可能性があるため、反応に関する詳細な情報を収集するとともに、詳細なリスクアセスメントを実施し、的確なリスク低減措置を実施する必要がある。

⁵⁵ R.W. Johnson, S.W. Rudy, and S.D. Unwin, Essential Practices for Managing Chemical Reactivity Hazards, CCPS/AIChE (2003) を参考に作成

⁵⁶ 除熱、冷却が必要な箇所は、その箇所が発熱していることを示しており、「意図的に反応が行われている」可能性があるため、重要な箇所として検討する。

(補足)

物質の合成に使用される反応の多くは、物質が生成する際に熱を放出する発熱反応である。プロセスを制御するためには冷却することにより放熱し、熱のバランスを保っているが、何らかの原因で発熱と放熱のバランスが崩れると、系内に放出された熱が蓄積し、物質の気化や熱分解が急激に起こり、火災・爆発等の災害に至る可能性がある。

一方、物質が生成する際に熱を吸収する反応が吸熱反応である。吸熱反応の場合は、反応を続けるためには熱を加える必要があるため、発熱反応のような暴走反応にはならない。しかし、エネルギーが加えられることによって、生成物の内部エネルギー量は反応原料よりも大きくなり、生成物自体が潜在的な危険源となる可能性がある。また、吸熱反応はある条件下で可逆的である可能性があるため、潜在的に発熱反応をもたらす可能性がある。さらに、分解反応は吸熱反応であることが多いが、何らかの原因で加熱され続ける条件となると、分解により発生した気体により内圧が上昇し、火災・爆発等の災害に至る可能性がある。これらのことから、発熱反応だけでなく吸熱反応も災害に至る可能性を考慮する必要がある。

また、「意図的な反応」が制御から逸脱した場合、様々なシナリオによって火災・爆発等の災害に至る可能性がある。その災害に至る過程では、「意図的な反応」が制御から逸脱したことによって生じる別経路の反応（副反応等）や熱分解等、「意図的な反応」以外の反応も危険源として考慮する必要がある。

以上の反応、特に「意図的な反応」以外の反応をすべて理解することは極めて困難であるが、のちにシナリオや、災害に至るシナリオに対するリスク低減措置を検討する際には反応の詳細がわかっている必要があるため、できる限り多くの情報を集めることが重要である。

3.3 「引き金事象の特定とシナリオ同定」に関する参考情報

(1) 暴走反応に関する典型的なシナリオ（シナリオモデル）の例示

安衛研手法においては、リスクアセスメント等は2.1節（安衛研手法の概要）に示した手順に従って行われるが、リスクアセスメント等を実施する資源が限られた事業場においては、手法自体が難解であるとされることが多い。そのため、プロセス内の危険源や災害に至るシナリオの検討を支援することが必要である。

シナリオの検討については、災害の原因・要因を掘り下げ、それらの因果関係を明らかにするために、FTA、ETA、ボウタイ分析等の、事象の因果関係を検討する方法が用いられている。暴走反応に関するシナリオについて、既にいくつかの解析例が示されており、それらをまとめることによって、暴走反応に関するシナリオ及び事象の進展を防止するための対策を検討する際の参考にできる情報となる。

そこで、それらの暴走反応に関するシナリオ⁵⁷や、HAZOPのガイドラインに掲載されているバッチ運転に対するHAZOP事例⁵⁸を参考にして、様々な典型的なシナリオを1つのシナリオモデルとして構築した。ここで、想定している現象は、反応の発熱と反応系からの放熱のバランスが崩れることによって発生する暴走反応である。現状を鑑みると、安全面からバッチプロセスよりもセミバッチプロセスが採用されることが多いと考えられるため、ここではセミバッチプロセスを想定した。暴走反応に関するシナリオモデルをまとめるために想定したプロセスの概要を図3-1に示す。想定した運転の概要は以下のとおりである。

- ・不活性ガスで置換する。
- ・原料等計量槽で原料Aを計量し、反応器に仕込む。
- ・ホッパーから触媒を仕込む。
- ・溶媒貯槽から溶媒を反応器に仕込む。
- ・攪拌機を起動し、攪拌する。
- ・ジャケットを加温し、所定の温度に昇温する。
- ・原料貯槽から原料Bを所定の流量で添加し、反応させる。
- ・反応終了後、液を次工程に移送する。

構築したボウタイ形式のシナリオモデルを図3-2に示す⁵⁹。なお、リスク低減措置を含めたシナリオモデルの全体図を添付資料2に示す。

⁵⁷ 以下の資料のFTA, ETA, ボウタイ分析結果を参考にした。

- ・ N. Paltrinieri and F. Khan, Dynamic Risk Analysis in the Chemical and Petroleum Industry, Butterworth-Heinemann (2016).
- ・ S. Banerjee, Industrial Hazards and Plant Safety, Taylor & Francis (2003).
- ・ C. Rajagopal and Col A. K. Jain, Def. Sci. J., 44(4), 323-330 (1994).
- ・ C. S. Kao and K. H. Hu, J. Loss Prev. Process Ind., 15, 213-222 (2002).

⁵⁸ F. Crawley and B. Tyler, HAZOP: Guide to Best Practice, Guidelines to Best Practice for the Process and Chemical Industries, Third Edition, Elsevier, pp. 123-138 (2015)を参考にした。

⁵⁹ 各シナリオに対するリスク低減措置の例については、3.4節に詳しく示す。

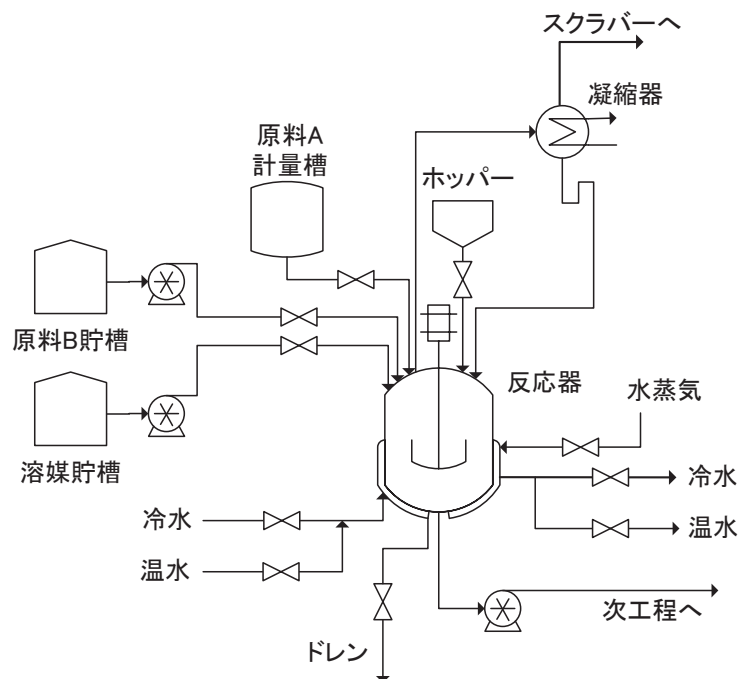


図 3-1 想定したプロセスの概要

火災・爆発等防止のためのリスクアセスメント等を実施するには、災害に至るシナリオを網羅的に同定する必要があるが、シナリオを検討することが難しい場合に、本シナリオモデルに示した暴走反応に関する典型的なシナリオを参照することができる⁶⁰。なお、本シナリオモデルは、図 3-1 に想定したプロセスに対する典型的なシナリオを示したものであり、すべてのシナリオを網羅するものではない。抜けている箇所や余分な箇所があれば、それぞれのプロセス等に応じて修正していくべきものである。

シナリオ同定の際には、法令で定められた措置を含め、既存のリスク低減措置は設置されていないものとして検討する⁶¹。

本シナリオモデルの検討の開始事象は、「反応の発熱と反応系から放熱のバランスが崩れること」（図 3-2(1/8)では「熱平衡破綻」と表示）である。

① 熱平衡破綻が生じてから災害発生までのシナリオ

図 3-2(1/8) は、熱平衡破綻が生じてから災害が発生するまでのシナリオを示している。

- ・ 【図 3-2(1/8)中の「熱平衡破綻」から図 3-2(1/8) 中の「反応器破損」までの過程】：反応の発熱と反応系からの放熱のバランスが崩れることにより、反応の進行とともに系内の

⁶⁰ 本シナリオモデルは、セミバッチプロセスを想定している。バッチプロセスを想定する場合には、反応開始前に溶媒を含むすべての反応原料を反応器に加えるため、反応中の反応原料 B の流量に関する不具合の部分は考慮しなくてもよい。

⁶¹ 暴走反応を防止するために種々の安全対策が施されていると考えられるが、図 3-2 に示すように、種々の原因により発熱速度及び冷却速度は変わり得る可能性があるため、少なくとも図 3-2 に示す典型的なシナリオは検討し、同定する必要がある。一方、安全対策が施されていることにより、熱平衡破綻の起こりやすさや、暴走反応が生じた際の設備等破壊の起こりやすさは変化すると考えられる。すなわち、各シナリオに対するリスクの見積りと評価を実施する際に、同定したシナリオの起こりやすさを検討する場合、安全対策の効果を検討することとなる。解析対象とする反応での熱平衡破綻の起こりやすさの考え方及び熱平衡破綻により生じる設備等破壊の起こりやすさの考え方を 5.2 節に示す。

温度やガス発生速度（反応液の蒸気圧上昇，反応によるガス発生）が上昇することによって反応器の圧力が上昇し，反応器の破損⁶²に至る．

- ・ 【図 3-2(1/8) 中の「熱平衡破綻」から「内容物発火」までの過程】：温度上昇による内容物の発火に至ることもある．
- ・ 【図 3-2(1/8) 中の「反応器破損」から「衝撃波・飛散物発生」までの過程】：反応器破損の結果として，衝撃波・飛散物の発生が生じ得る．
- ・ 【図 3-2(1/8) 中の「反応器破損」から「火災」，「蒸気雲爆発」を經由して「放射熱発生」，「衝撃波・飛散物発生」までの過程】：反応器破損の結果として，内容物が可燃性物質である場合は可燃性物質が漏洩し，着火することによって火災・爆発が生じ得る．
- ・ 【図 3-2(1/8) 中の「反応器破損」から「人体有害性」までの過程】：毒性物質である場合は，健康や環境への被害が起こり得る．

② 熱平衡破綻が生じる原因から，熱平衡破綻が生じるまでのシナリオ

図 3-2(2/8) ～ (8/8) は，熱平衡破綻が生じる原因から，熱平衡破綻が生じるまでのシナリオを示している．

- ・ 反応の発熱と反応系からの放熱のバランスが崩れる要因としては，発熱速度の増加又は冷却速度の低下がある．
- ・ 発熱速度増加の要因としては反応原料の温度の異常や反応原料等の添加等における不具合，反応原料の蓄積，ホットスポットの生成，内容物の二相分離後の攪拌機の復旧が考えられる．
- ・ 冷却速度低下の要因としては，混合の不具合や冷却機能の低下が考えられる．
- ・ 要因については，不適切な作業・操作や，設備・装置に関する不具合，又は初期状態における流量，温度，圧力，液レベル，組成等のプロセスパラメータの正常運転範囲からの逸脱まで展開した．

③ 本シナリオモデルの使い方

図 3-2 は，安衛研手法の「引き金事象の特定とシナリオの同定」の検討の際に活用できる．

まず，初期事象として，熱平衡破綻につながる要因（不適切な作業・操作や，設備・装置に関する不具合，又は初期状態における流量，温度，圧力，液レベル，組成等のプロセスパラメータの正常運転範囲からの逸脱）を図 3-2(2/8) ～図 3-2(8/8) から選択する．

その後，プロセス異常（中間事象）として，選択した要因から図 3-2 の線を上にたどって，プロセスの温度・圧力等のずれや，設備装置の異常状態等の進展を確認する．

プロセス災害（結果事象）として，最後に起こり得る事故影響を図 3-2(1/8) から選択する（「放射熱発生」，「破裂・衝撃波発生」，「飛散物発生」等）．

攪拌機の不具合に関係する部分を抽出して，本シナリオモデルの読み方を説明した資料を添付資料 3 に示す．

⁶² 反応器が破損する際には，平衡破綻型爆発（高圧の容器内で，液体とその液体の蒸気が平衡状態にあったが，容器が破壊することにより平衡が破れ，急激に液体が気化することにより発生する爆発）が生じることも考えられるが，その結果として「衝撃波・飛散物発生」，「蒸気雲爆発」が生じることとなる．

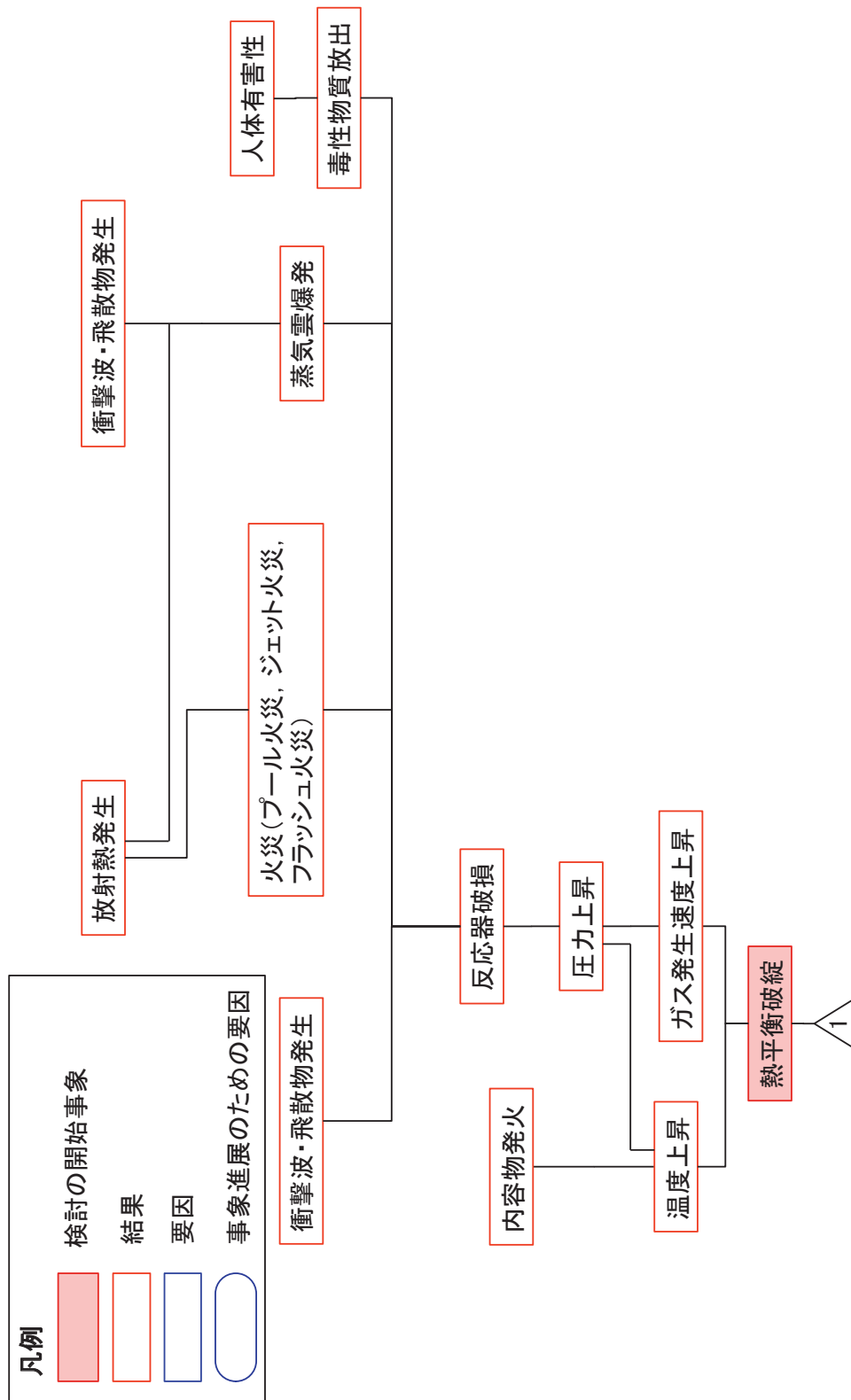


図 3-2(1/8) 反応の発熱と反応系から放熱のバランスが崩れることによって発生する暴走反応のシナリオモデル
(熱平衡破綻が生じてから災害発生までのシナリオ)

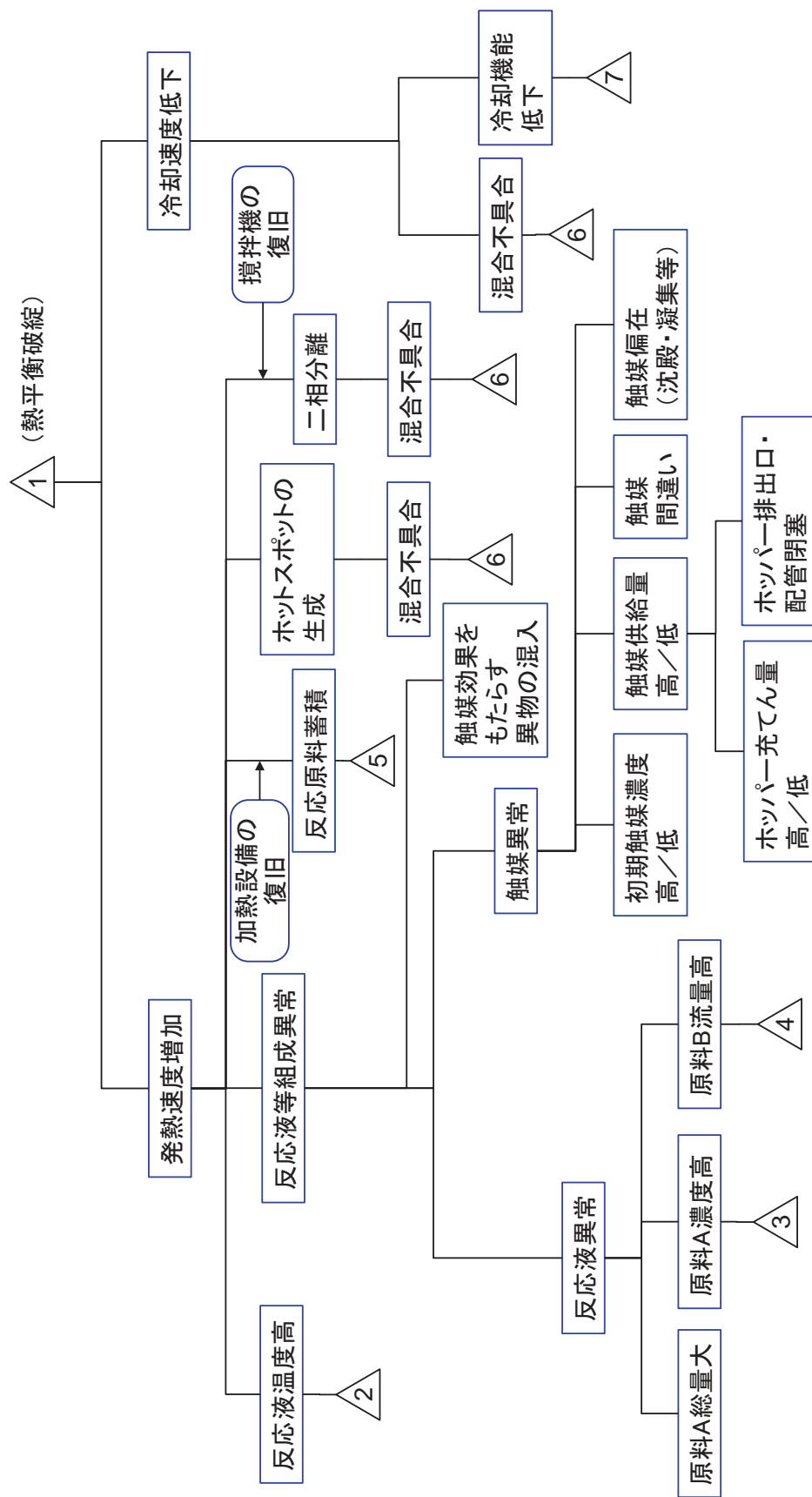


図 3-2(2/8) 反応の発熱と反応系から放熱のバランスが崩れることによって発生する暴走反応のシナリオモデル
(熱平衡破綻が生じる原因から、熱平衡破綻が生じるまでのシナリオ (その1))

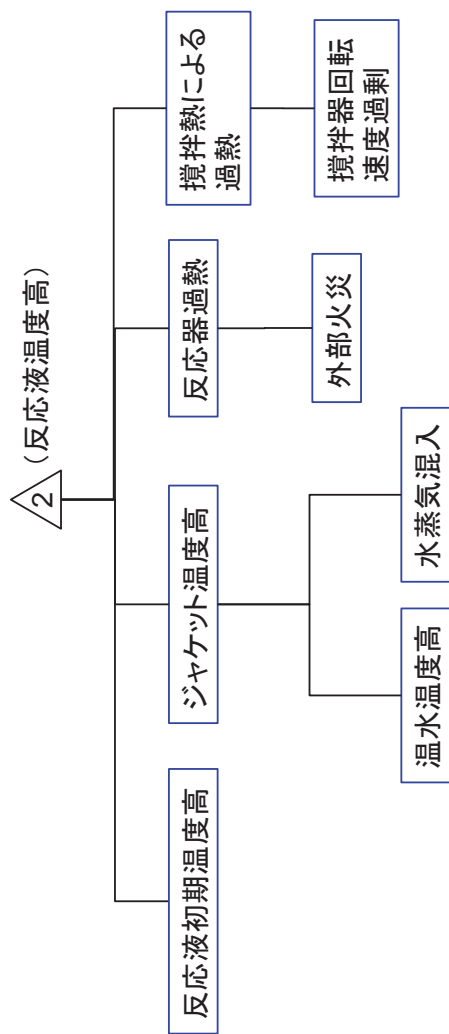


図 3-2(3/8) 反応の発熱と反応系から放熱のバランスが崩れることによって発生する暴走反応のシナリオモデル
(熱平衡破綻が生じる原因から、熱平衡破綻が生じるまでのシナリオ (その 2))

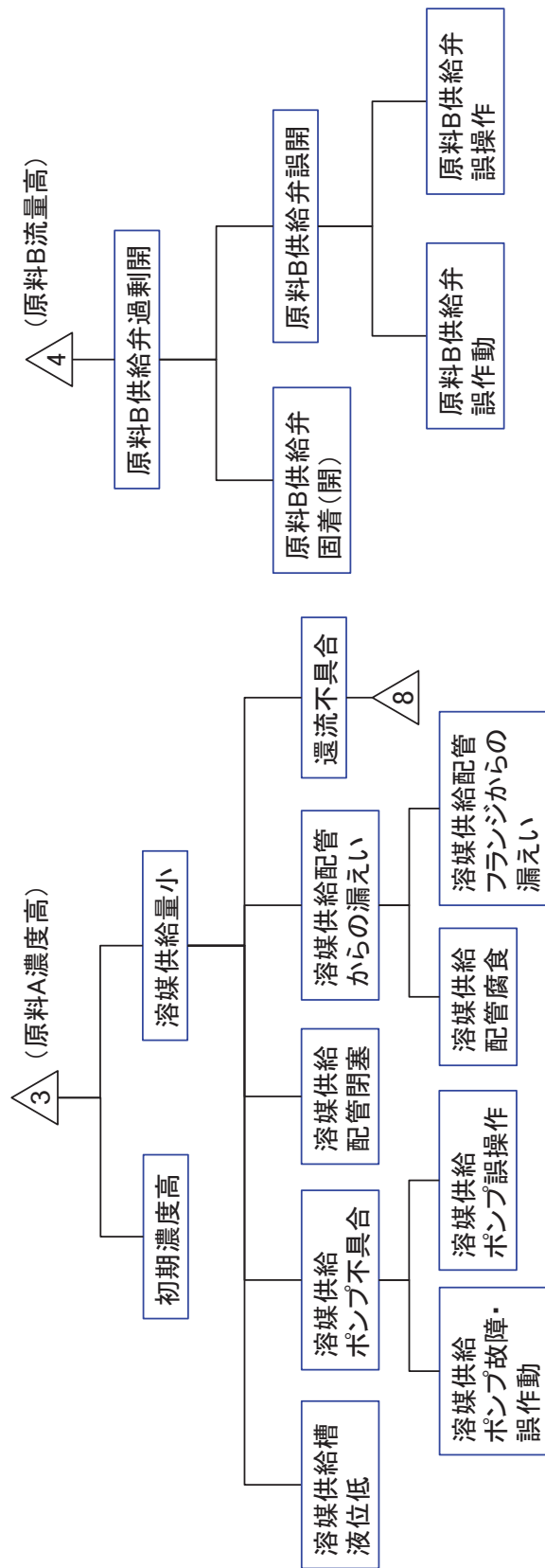


図 3-2(4/8) 反応の発熱と反応系から放熱のバランスが崩れることによって発生する暴走反応のシナリオモデル
(熱平衡破綻が生じる原因から、熱平衡破綻が生じるまでのシナリオ (その 3))

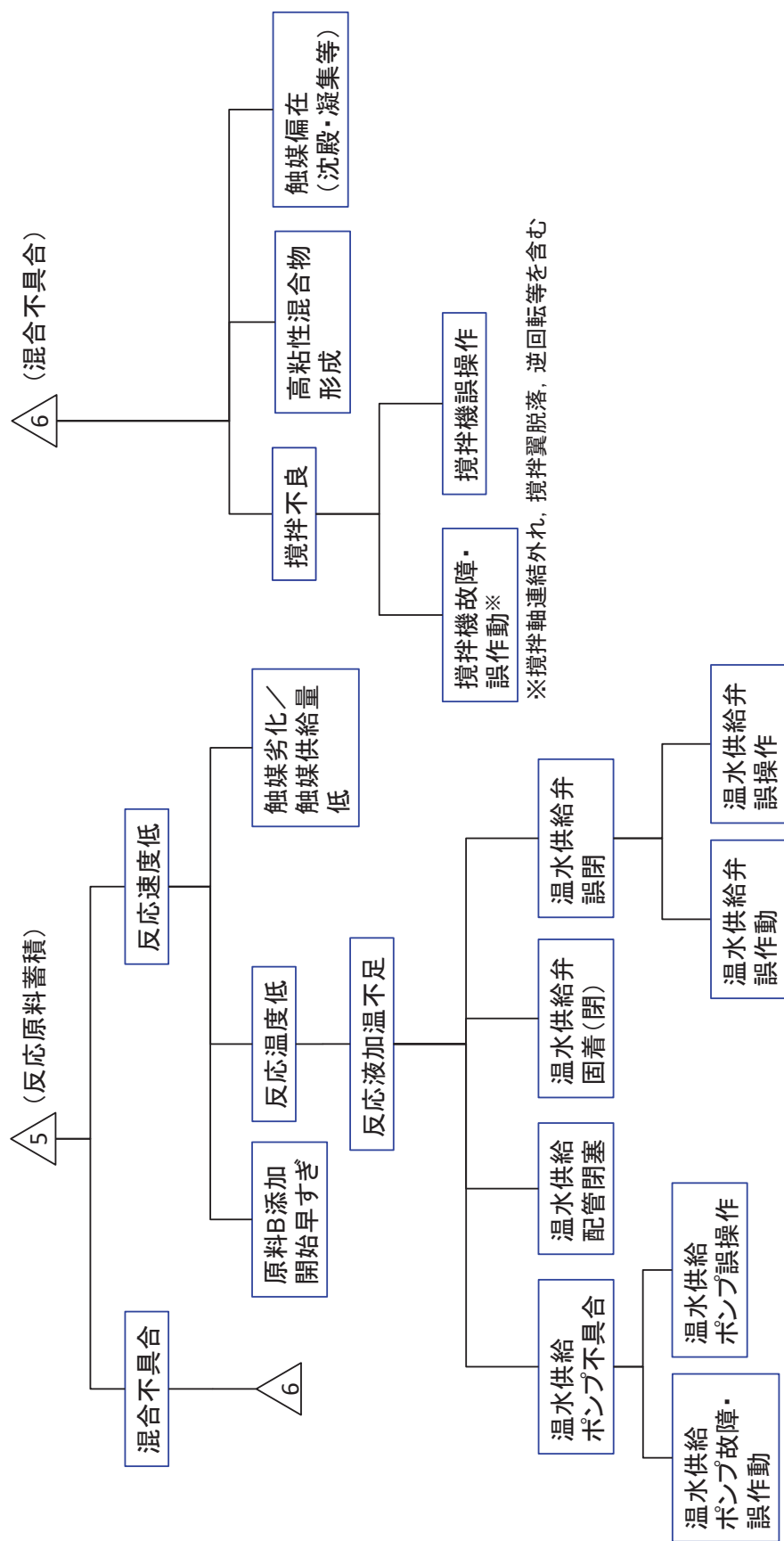


図 3-2(5/8) 反応の発熱と反応系から放熱のバランスが崩れることによって発生する暴走反応のシナリオモデル
(熱平衡破綻が生じる原因から, 熱平衡破綻が生じるまでのシナリオ (その 4))

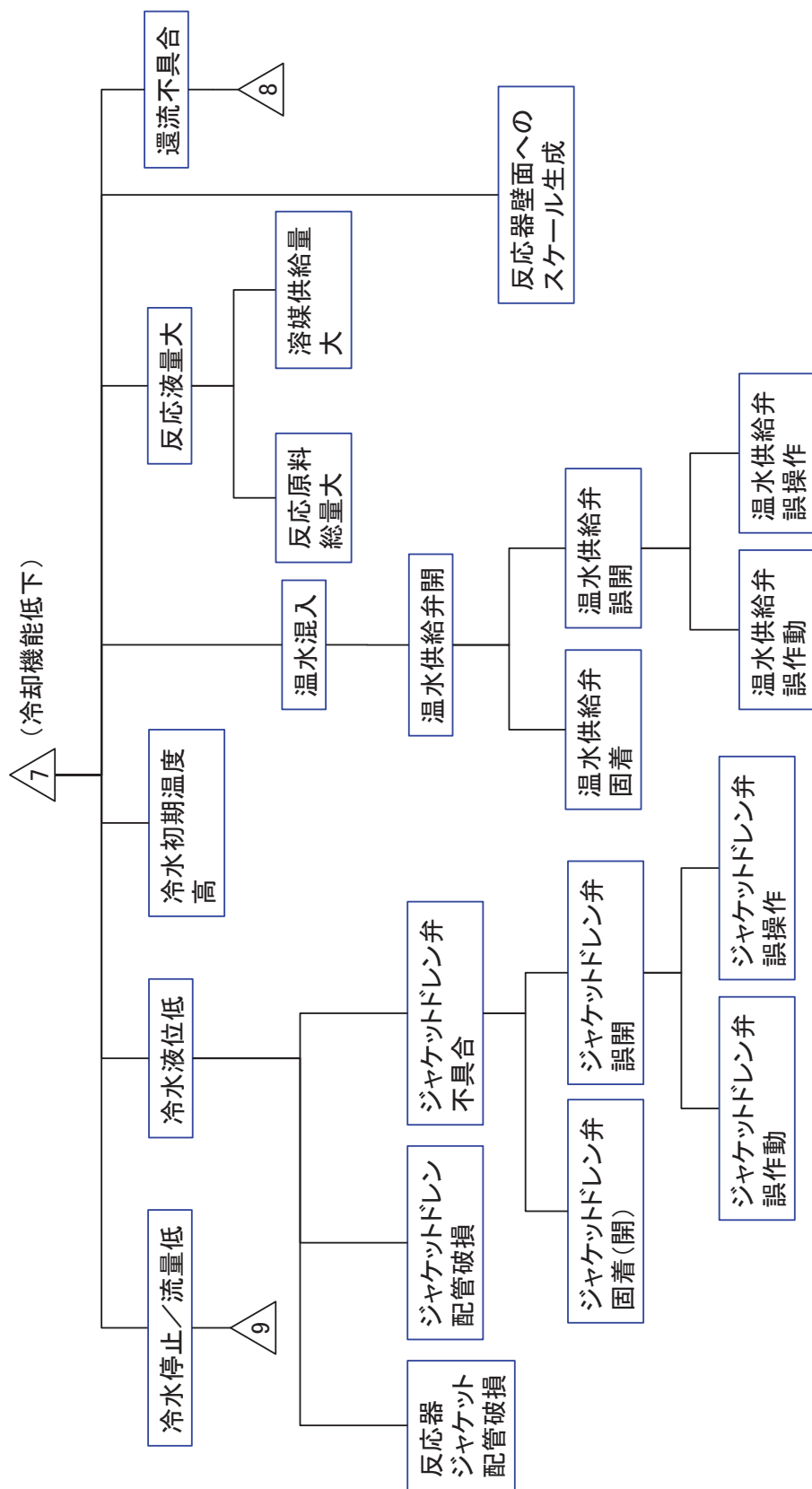


図 3-2(6/8) 反応の発熱と反応系から放熱のバランスが崩れることによって発生する暴走反応のシナリオモデル
(熱平衡破綻が生じる原因から，熱平衡破綻が生じるまでのシナリオ (その 5))

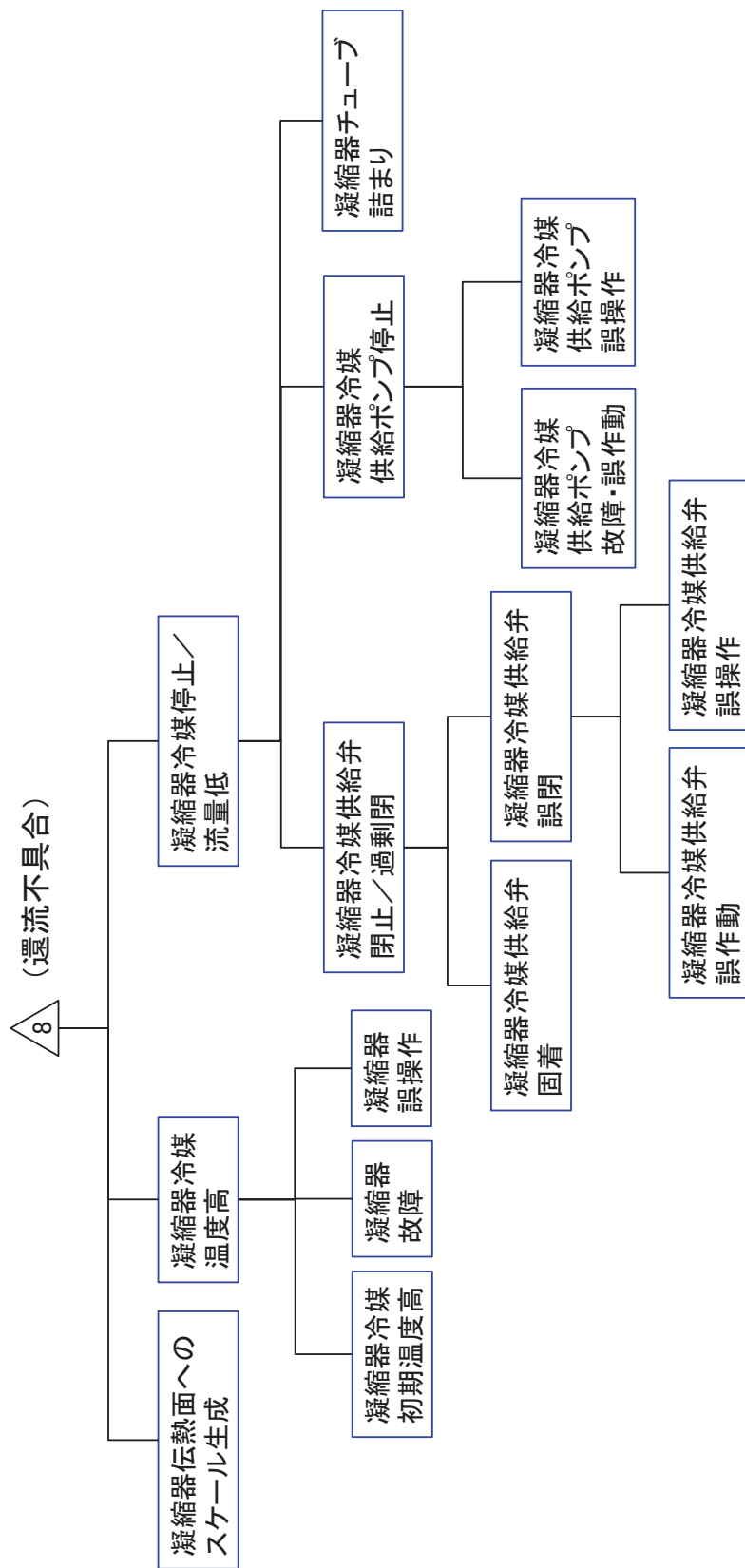


図 3-2(7/8) 反応の発熱と反応系から放熱のバランスが崩れることによって発生する暴走反応のシナリオモデル
(熱平衡破綻が生じる原因から，熱平衡破綻が生じるまでのシナリオ (その 6))

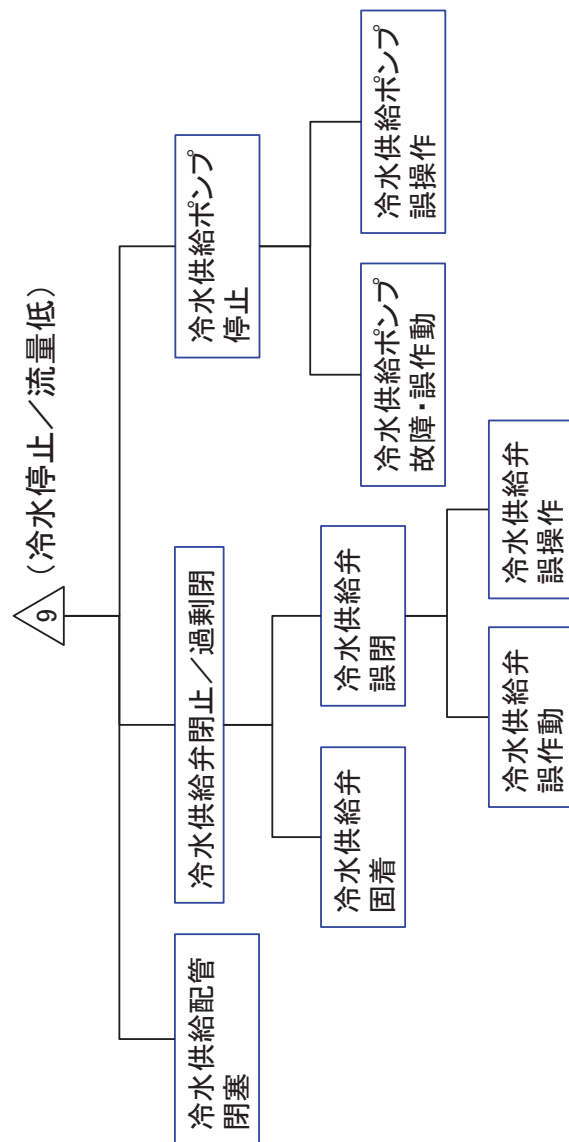


図 3-2(8/8) 反応の発熱と反応系から放熱のバランスが崩れることによって発生する暴走反応のシナリオモデル
(熱平衡破綻が生じる原因から，熱平衡破綻が生じるまでのシナリオ (その 7))

(2) シナリオモデルのうち、過去の災害で生じたシナリオの抽出

過去に起こった災害の同種災害を例示することを目的として、構築したシナリオモデルを用いて過去の暴走反応による火災・爆発災害事例をトレースした。トレースする災害事例は、RISCAD⁶³に掲載されていたバッチプロセスでの事例を抽出し、PFA (Progress Flow Analysis)⁶⁴解析結果が記載されている事例⁶⁵、及び「化学物質・プラント事故事例ハンドブック」⁶⁶に掲載されていた、暴走反応が原因となったと考えられる事例とした。ただし、1つの事例で複数の原因が考えられる場合には、それぞれのシナリオをトレースした。

トレースされたシナリオを、図 3-2 に示したシナリオモデル上で図示したものを図 3-3 に示す。図 3-3 の線の太さがシナリオの件数の多さに相当する。

図 3-3 中の実線で示されたシナリオは、過去の災害で実際に起こったシナリオであり、同種災害として起こり得る可能性があるシナリオである。そのため、ここで示したシナリオについては、同種災害としてあり得ることとして、想定外とすることなく検討する。実線で示したシナリオをリスクアセスメント等実施シート等に記載するシナリオの形で整理したものを表 3-5 に示す。表 3-5 の左には引き金事象から熱平衡破綻に至るまでのシナリオ、右には熱平衡破綻からプロセス災害に至るまでのシナリオを示す。表 3-5 の左と右のシナリオを組み合わせることで、引き金事象からプロセス災害に至るまでの一連のシナリオを検討する。いずれも件数の多いシナリオから順番に記載している。

一方、点線で示されたシナリオは、災害シナリオとして解析されていなかったシナリオであるが、理論的には起こる可能性があるシナリオであるため、扱っているプロセスの現状に応じて検討すべきである。

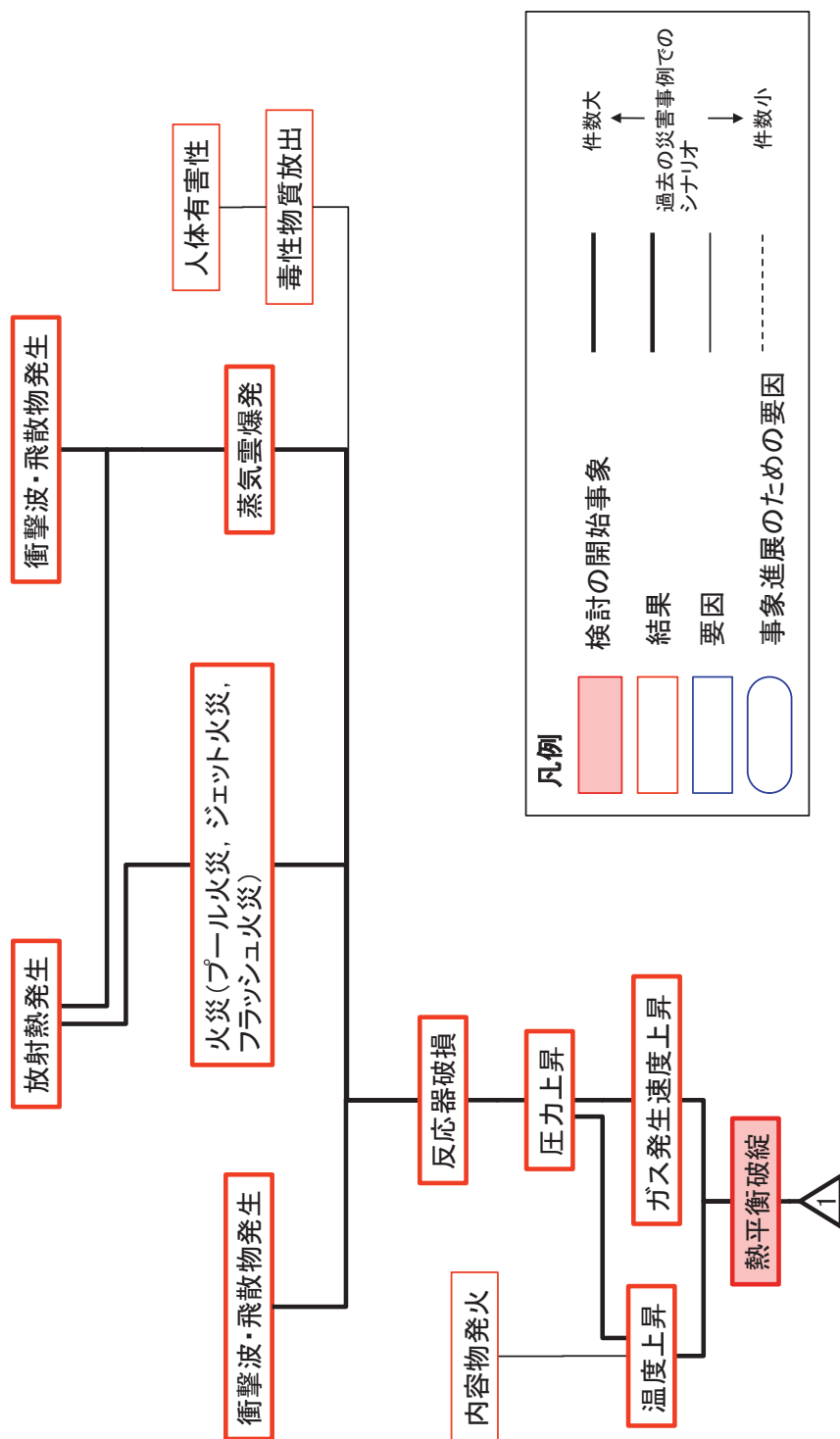
なお、リスク低減措置を含めたシナリオモデルの全体図を添付資料 2 に示す。

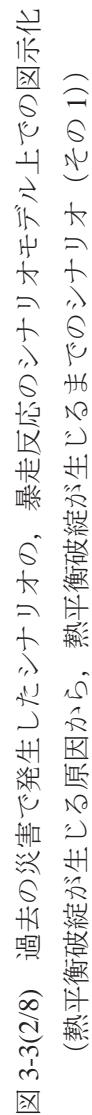
⁶³ 産業技術総合研究所，リレーショナル化学災害データベース，<https://r2.aist-riss.jp/>（2021 年 12 月 21 日現在メンテナンス中）

⁶⁴ 産業技術総合研究所で開発された事故分析手法。事故やヒヤリハット等を時系列で整理し、問題のある事象から原因を見つけ出し、安全対策の検討，教訓化へとつなげる手法のこと

⁶⁵ 2019 年 2 月 19 日に閲覧し，事例 ID36，54，71，6555，7028，7538，8137，8317，8828 の事例を選択した。

⁶⁶ 田村 昌三編，化学物質・プラント事故事例ハンドブック，丸善（2006）。





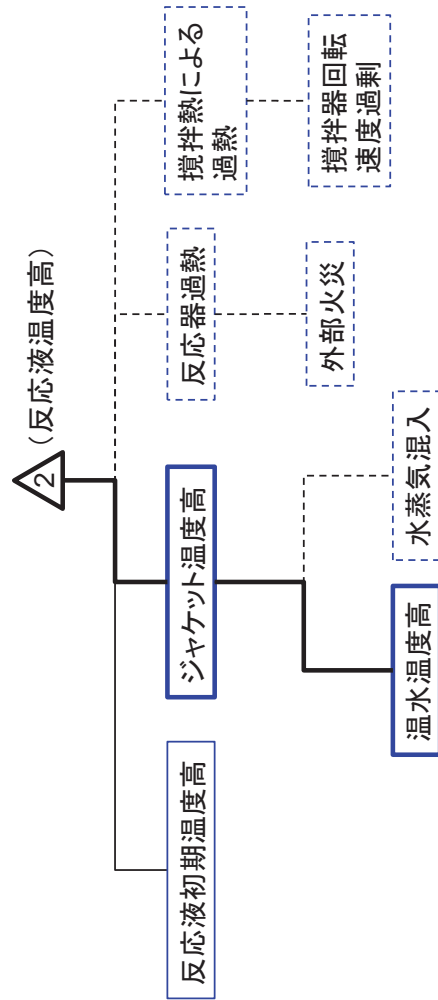


図 3-3(3/8) 過去の災害で発生したシナリオの，暴走反応のシナリオモデル上での図示化
(熱平衡破綻が生じる原因から，熱平衡破綻が生じるまでのシナリオ (その 2))

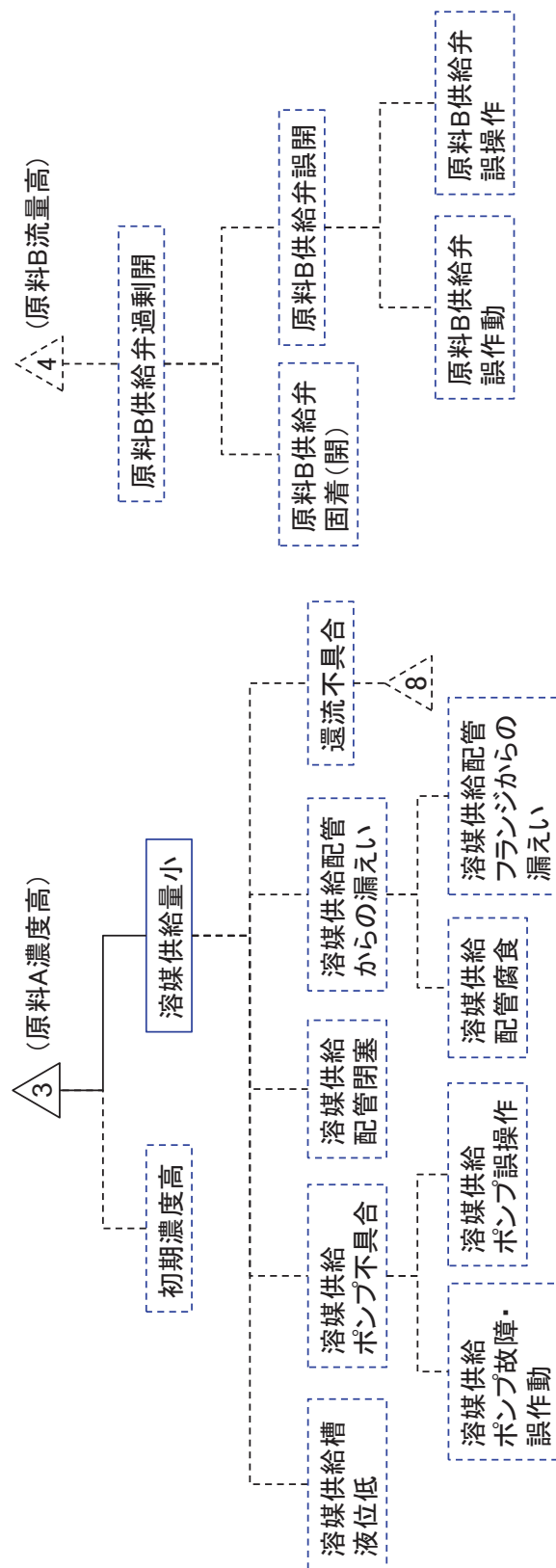


図 3-3(4/8) 過去の災害で発生したシナリオの、暴走反応のシナリオモデル上での図示化
(熱平衡破綻が生じる原因から、熱平衡破綻が生じるまでのシナリオ (その 3))

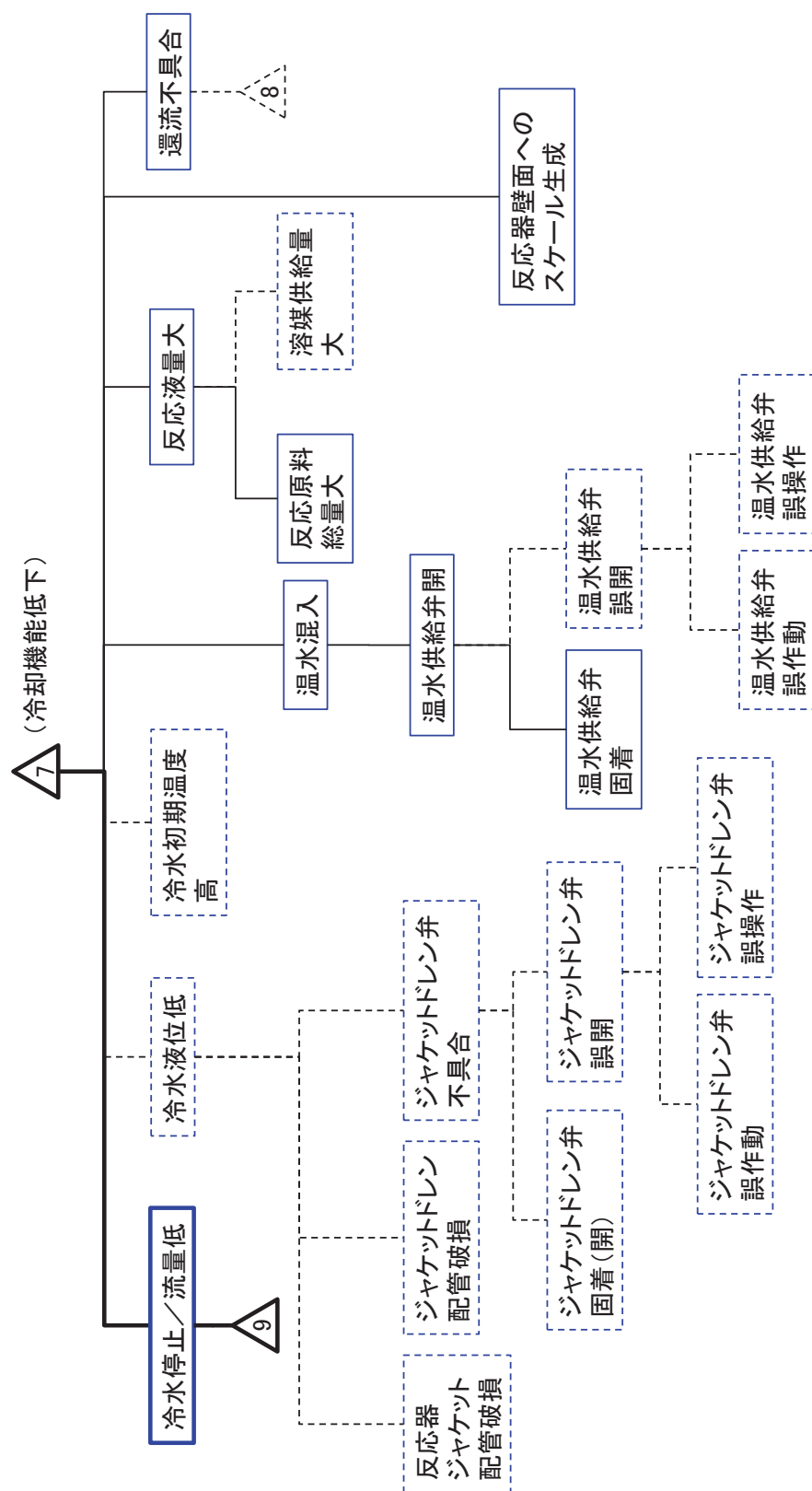


図 3-3(6) 過去の災害で発生したシナリオの、暴走反応のシナリオモデル上での図示化
(熱平衡破壊が生じる原因から、熱平衡破壊が生じるまでのシナリオ (その 5))

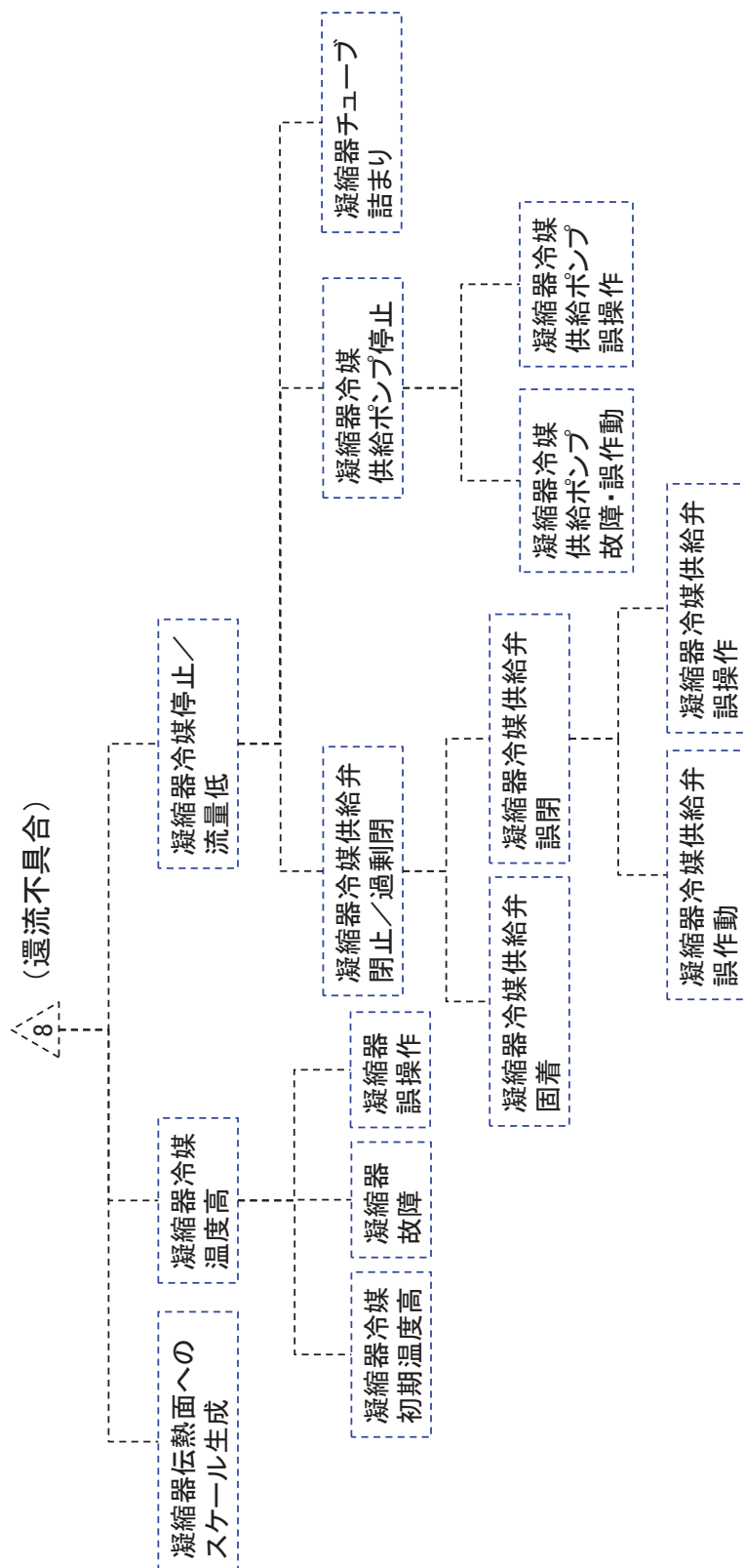


図 3-3(7/8) 過去の災害で発生したシナリオの、暴走反応のシナリオモデル上での図示化 (熱平衡破壊が生じる原因から、熱平衡破壊が生じるまでのシナリオ (その 6))

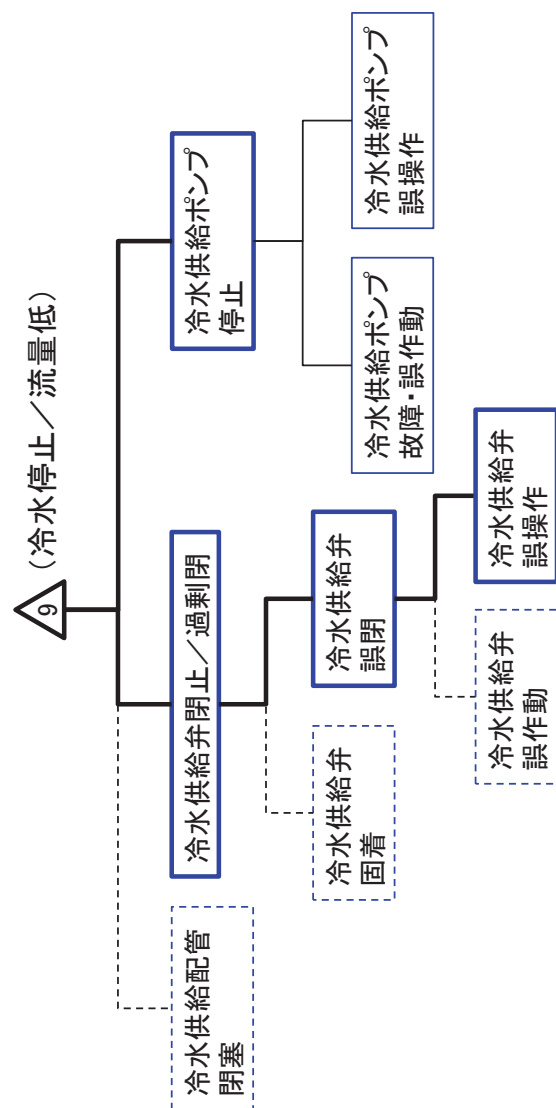
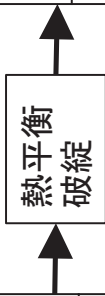


図 3-3(8/8) 過去の災害で発生したシナリオの，暴走反応のシナリオモデル上での図示化
(熱平衡破綻が生じる原因から，熱平衡破綻が生じるまでのシナリオ (その 7))

表 3-5 過去の災害で発生した、発熱と放熱のバランスが崩れるシナリオの整理表

要因	プロセス異常（中間事象、熱平衡破綻の原因）	プロセス異常（中間事象、熱平衡破綻後の事象進展）	プロセス災害（結果事象）
<ul style="list-style-type: none"> ・ 攪拌機の誤操作（停止／搅拌速度減少） ・ 攪拌機の故障（停止／搅拌速度減少） 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 反応液の混合が不十分となり、冷却速度が低下することで熱平衡が破綻する ・ 反応液の混合が不十分となり、反応液が二相分離する。その後攪拌機が復旧し、再び搅拌した時に発熱速度が増加することで熱平衡が破綻する ・ 反応液の混合が不十分となり、ホットスポットが生成し、発熱速度が増加することで熱平衡が破綻する ・ 反応原料が蓄積し、その後加熱設備が復旧し、再び加熱した時に発熱速度が増加することで熱平衡が破綻する 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 熱平衡破綻後、反応器内の温度・圧力が上昇し、反応器が破損する。破損した箇所から可燃性物質が漏えいし、蒸気雲を形成したところで、蒸気雲に着火する ・ 熱平衡破綻後、反応器内の温度・圧力が上昇し、反応器が破損する。破損した箇所から可燃性物質が漏えいし、蒸気雲を形成する前に着火する ・ 熱平衡破綻後、反応器内の温度が上昇し、内容物の発火点に達して内容物が発火する 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 蒸気雲爆発 ・ 火災（ジェット火災、フラッシュ火災、プール火災等）
<ul style="list-style-type: none"> ・ 冷水供給弁の誤操作（閉止／過剰開） ・ 冷水供給ポンプの故障／誤操作 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 冷水供給弁が閉止／過剰に閉まることで冷水が停止／流量が低下し、冷却機能が低下する。冷却速度が低下することで熱平衡が破綻する ・ 冷水供給ポンプが停止することで冷水が停止／流量が低下し、冷却機能が低下する。冷却速度が低下することで熱平衡が破綻する 		
<ul style="list-style-type: none"> ・ 温水の温度が高い ・ 反応液の初期温度が高い 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ジャケット温度が高くなり、反応液が過熱され、発熱速度が増加することで熱平衡が破綻する ・ 反応液の初期温度が高く、発熱速度が増加することで熱平衡が破綻する 		
<ul style="list-style-type: none"> ・ 温水供給弁の誤操作（閉止／過剰開） ・ 温水供給弁の誤操作（開） 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 反応液の加温が不足し、反応温度が低下する。そのため反応速度が低下し、反応原料が蓄積する。その後加熱設備が復旧し、再び加熱した時に発熱速度が増加し、熱平衡が破綻する ・ 温水供給弁が開くことで温水がジャケットに混入し、冷却機能が低下することで冷却速度が低下し、熱平衡が破綻する※ 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 熱平衡破綻後、反応器内の温度・圧力が上昇し、反応器が破裂する 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 衝撃波・飛散物発生
<ul style="list-style-type: none"> ・ 触媒の劣化 ・ 触媒の供給量が少ない 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 触媒の劣化等により反応速度が低下し、反応原料が蓄積する。その後加熱設備が復旧し、再び加熱した時に発熱速度が増加し、熱平衡が破綻する 		<ul style="list-style-type: none"> ・ 毒性により人体に影響を及ぼす
<ul style="list-style-type: none"> ・ 反応原料の総量が多い ・ 触媒の供給量が多い／少ない ・ 溶媒の供給量が少ない 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 反応原料の総量が多い／触媒の供給量が多い／少ないことで反応液の組成が変わり、発熱速度が増加することで熱平衡が破綻する ・ 溶媒の供給量が少ないことで反応液の濃度が高くなり、反応液の組成が変わることで発熱速度が増加し、熱平衡が破綻する ・ 反応原料の総量が多いことで反応液量が多くなり、冷却機能が低下し、冷却速度が低下することで熱平衡が破綻する 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 熱平衡破綻後、反応器内の温度・圧力が上昇し、反応器が破損する。破損した箇所から毒性物質が放出される 	
<ul style="list-style-type: none"> ・ 触媒効果をもたらす異物の混入 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 触媒効果をもたらす異物が反応液に混入することで発熱速度が増加し、熱平衡が破綻する 		
<ul style="list-style-type: none"> ・ 反応器壁面へのスケール生成 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 反応器壁面にスケールが生成することで冷却機能が低下し、冷却速度が低下することで熱平衡が破綻する 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 熱平衡破綻後、反応器内の温度が上昇し、内容物に着火する 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 内容物の発火、火災



※ 温水でなく、高温の熱媒の場合は冷水と接触した時点で水蒸気爆発の可能性がある



3.4 「リスク低減措置の検討」に関する参考情報

暴走反応についてのリスク低減措置の例を示す。まず、法令に定められた措置がある場合にはそれを必ず実施する⁶⁷。安衛研手法の STEP2①で同定されたシナリオについてリスクレベルを決定し、法令に定められた措置を含めた現状のリスク低減措置が機能しても目標とするリスクレベルに達していないと評価されたシナリオについて、追加のリスク低減措置を検討し、実施する必要がある。検討したリスク低減措置は、その「種類」と「目的」を明確にしておく必要がある。安衛研手法で示しているリスク低減措置の「種類」と「目的」の説明を表 3-6 に示す。

リスク低減措置の「種類」とは、厚生労働省の指針⁶⁸に示されたリスク低減措置検討・実施の優先順位であり、A)本質安全対策、B)工学的対策、C)管理的対策、D)保護具の着用の順番で検討する。検討の際には、A)～D)の 4 種類のリスク低減措置でどれかに偏ることなく、バランスを考えて検討する⁶⁹。

リスク低減措置の「目的」とは、異常発生を防止すること、プロセス災害（火災・爆発等）発生を防止すること、万が一発生した場合にも被害を許容可能なレベルまで下げること等を目的とした多重防護の考え方に基づいたリスク低減措置の分類を示している⁷⁰。検討・実施の際には、a)異常発生防止対策、c)事故発生防止対策、d)被害の局限化対策の目的を満足するリスク低減措置を、バランスよく実施することが望ましい。なお、a), c), d)のリスク低減措置を実施し、機能させるためには、プロセス内でどのような異常が発生しているかを検知するためのセンサー（温度、圧力、流量等）や異常発生を知らせるための警報システム等が必要になるため、b)の異常発生検知手段をセットで検討する。

リスク低減措置の検討は、以上のように行われるべきであるが、具体的にどのようなリスク低減措置を考えればよいかを考えることが難しい。そのため、3.3 節で示した反応の発熱と系からの放熱のバランスが崩れることによって発生する暴走反応に関するボウタイ形式のシナリオモデル（図 3-3）に、対応するリスク低減措置の例を記載したものを図 3-4 に示す。なお、リスク低減措置を含めたシナリオモデルの全体図を添付資料 2 に示す。

図 3-4 中の  及び表に示している内容が、各シナリオに対するリスク低減措置の例を示している。 で示している内容は、シナリオの進展を防止するためのリスク低減措置の例、図中の表に示している内容は、図 3-4 中に示した要因そのものを防止するためのリスク低減措置の例を表している。また、括弧内にリスク低減措置の種類及び目的を表 3-6 で表した記号で示している。図 3-4 で示したリスク低減措置の例は、あくまで 1 つの参考例であり、それぞれの事業場がプロセスの内容、取り扱っている物質の危険性等を考慮し

⁶⁷ 労働安全衛生規則の第 2 編「安全基準」第 4 章には、爆発・火災等発生の防止措置が示されている。また、一般社団法人日本化学工業協会により、労働安全衛生規則第 4 章等の規定を確認する方法として、「化学物質の危険性初期リスク評価ツール」が平成 28 年 4 月に公開されており、参考にすることができる。

⁶⁸ 化学物質等による危険性又は有害性等の調査等に関する指針（平成 27 年 9 月 18 日付け危険性又は有害性等の調査等に関する指針公示第 3 号）

⁶⁹ リスク低減措置の検討の段階では、実施できるかどうかに関係なく、考えられるすべての対策を提案し、検討する。

⁷⁰ 多重防護の考え方で分類したリスク低減措置の事例が技術資料 JN10SH-TD-No.5、表 10、p. 31 (2016)に示されているので、その事例も併せて検討する。

て、それぞれのシナリオに対するリスク低減措置を検討する必要がある。リスクレベルが許容範囲に収まるまで複数のリスク低減措置の検討を行った上で、リスクレベルの高いシナリオに対するリスク低減措置から順番に、技術面・コスト面等を踏まえ、リスク低減措置を実施する⁷¹。

⁷¹ リスクレベルが許容できない範囲（例えばリスクレベルがⅢ）にあるシナリオの発生が懸念される施設・設備、作業等については、いかなる理由であっても正当化されず、事業の継続をすべきではない。リスクレベルを下げることでできるリスク低減措置を必ず実施する。合理的に実行可能な限り、できるだけリスクレベルを低くするための追加のリスク低減措置を実施したにもかかわらず、リスクレベルが許容可能な範囲ではあるが、リスクレベルが高い範囲（例えばリスクレベルがⅡ）のシナリオが存在する場合には、火災・爆発等発生可能性があることを意識させるとともに、現場でどのように対応するかを決め、リスクアセスメント等実施シート「③その他、生産開始後の現場作業者に特に伝えておくべき事項」に記載する。また、現場の作業員への伝達事項等は、作業手順書等にも記載しておくことで、確実に対応されるようにする。

表 3-6 リスク低減措置の種類（優先順位）及び目的⁷²

(a) リスク低減措置の種類（優先順位）

優先順位	リスク低減措置の種類	説明
1	A) 本質安全対策	危険性もしくは有害性が高い化学物質等の使用の中止又は危険性もしくは有害性のより低いものへの代替 化学反応のプロセス等の運転条件の変更, 取り扱う化学物質等の性状の変更等による, 負傷が生じる可能性の度合い又はばく露の程度の低減
2	B) 工学的対策	化学物質等に係る機械設備等の防爆構造化, 安全装置の二重化等の工学的対策又は化学物質等に係る機械設備等の密閉化, 局所排気装置の設置等の衛生工学的対策
3	C) 管理的対策	作業手順の改善, マニュアルの整備, 教育訓練・作業管理等の管理的対策
4	D) 保護具の着用	静電安全靴, 保護メガネ, 保護マスク, 保護手袋等の個人用保護具の使用

(b) リスク低減措置の目的

リスク低減措置の目的	説明
a) 異常発生防止対策	主に初期事象の発生を防止するための対策であり, 異常を発生させない, あるいは異常が発生しても封じ込めシステムの適切な設計等で, 正常な運転状態に保つ. ※ 通常の運転状態 (Normal) からの逸脱を回避することが目的.
b) 異常発生検知手段	異常が発生した場合のプロセス変数 (流量, 温度, 圧力, 液レベル, 組成等) のずれ発生を検知する. 検知した結果を基に, a)異常発生防止対策, c)事故発生防止対策, 又は d)被害の局限化対策, でどのように対応するかを考える.
c) 事故発生防止対策	主に初期事象発生からプロセス災害発生までの異常伝播 (中間事象) を防ぐための対策であり, 危険源が顕在化しても, 事故まで発展させないようにする.
d) 被害の局限化対策	主にプロセス災害発生後の影響 (被害) を減らすための対策であり, 事故が発生しても事故の拡大を阻止する, 又は避難計画を策定する等により被害を許容可能なレベルまで下げる.

⁷² 労働安全衛生総合研究所技術資料, JNIO SH-TD-No.5, (2016) 表 11 を基に作成

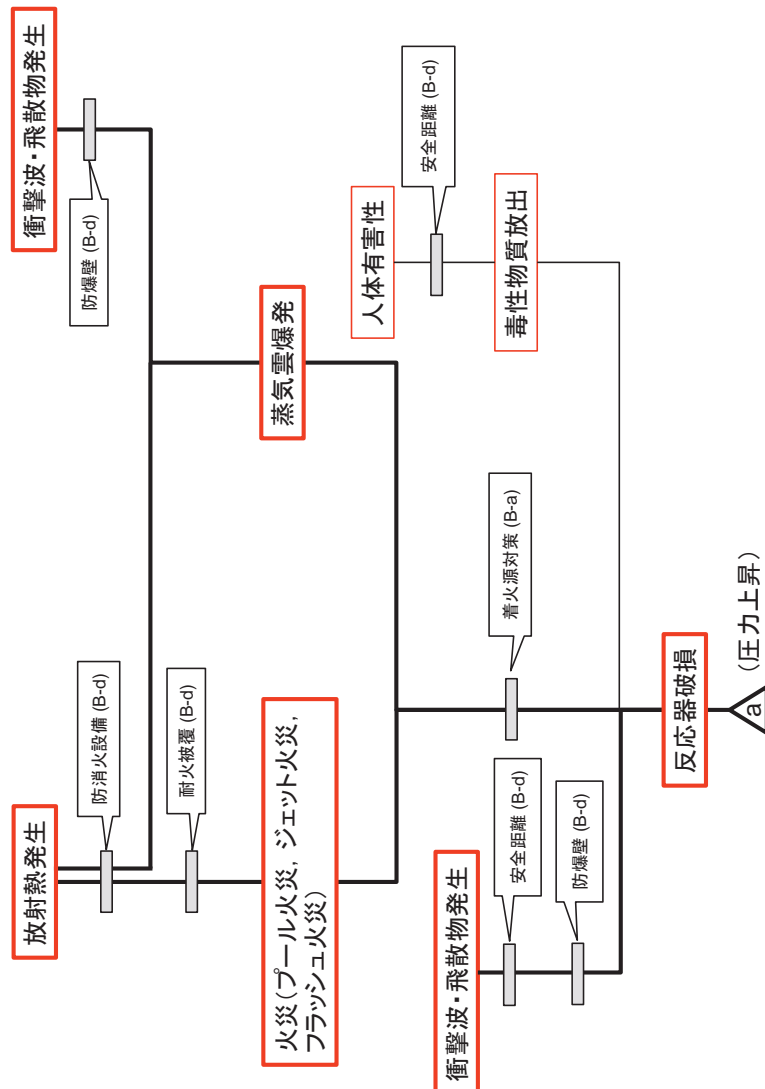
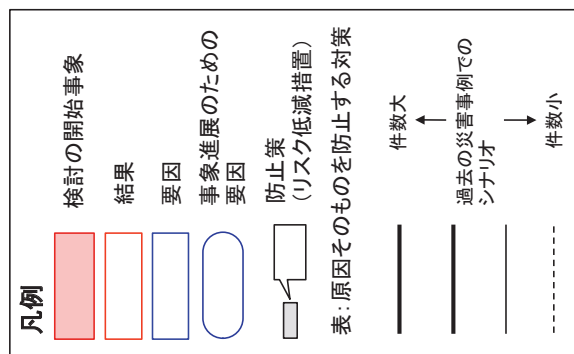


図 3-4(1/8-a) 暴走反応に関するシナリオに対するリスク低減措置の例⁷³
(熱平衡破綻が生じてから災害発生までのシナリオ (その1))

⁷³ 図番号の括弧内の数字は、図 3-2、3-3 における数字と合わせて記載している。数字の後に枝番号として表記しているアルファベット (1/8-a 等) は、図の表記の関係で、(1/8)が分割されていることを意味する。移行記号 (△) 内の数字は、図 3-2、3-3 における数字と合わせて記載している。移行記号内のアルファベットは、移行記号内の移行記号を示している。

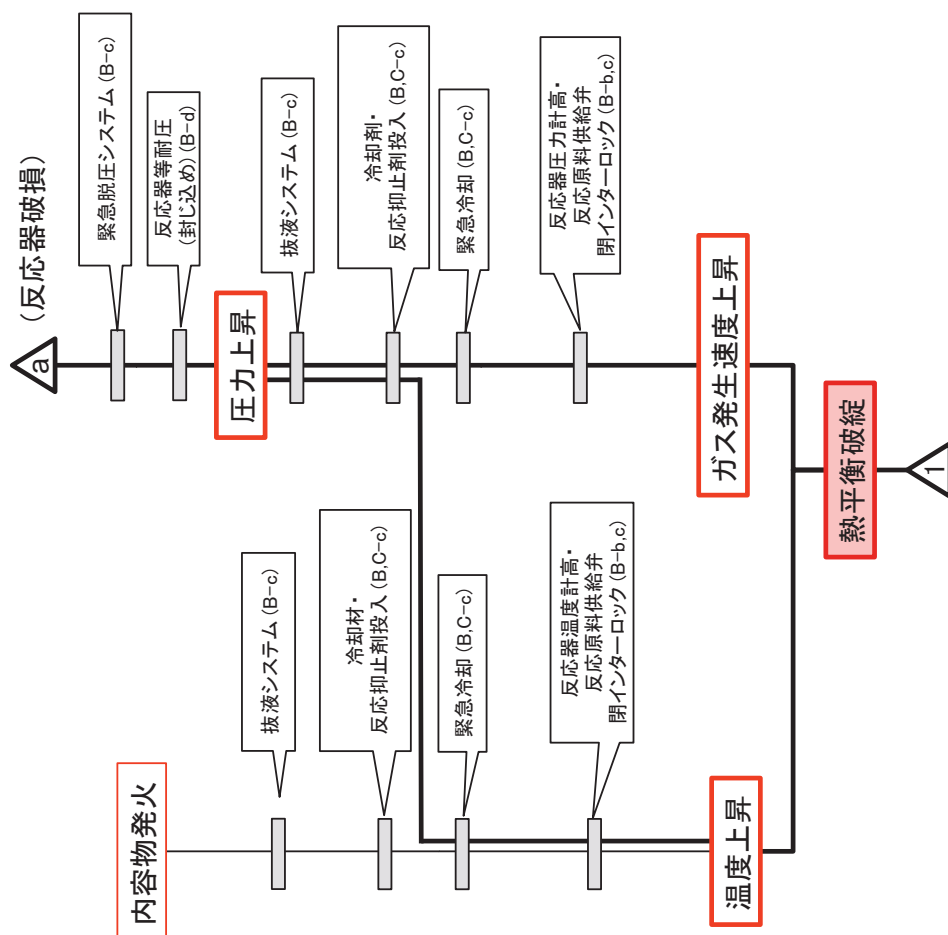


図 3-4(1/8-b) 暴走反応に関するシナリオに対するリスク低減措置の例
(熱平衡破綻が生じてから災害発生までのシナリオ (その 2))

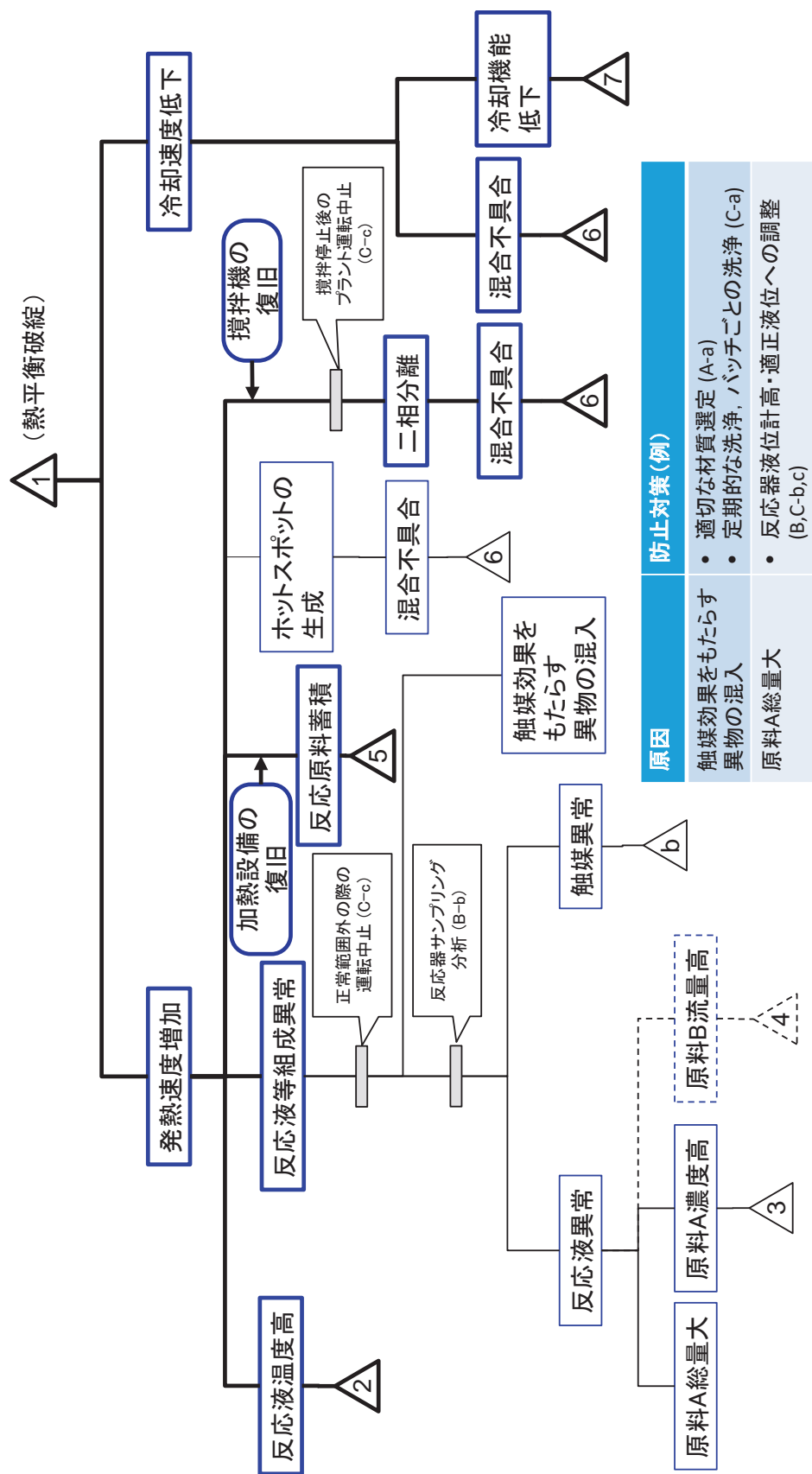
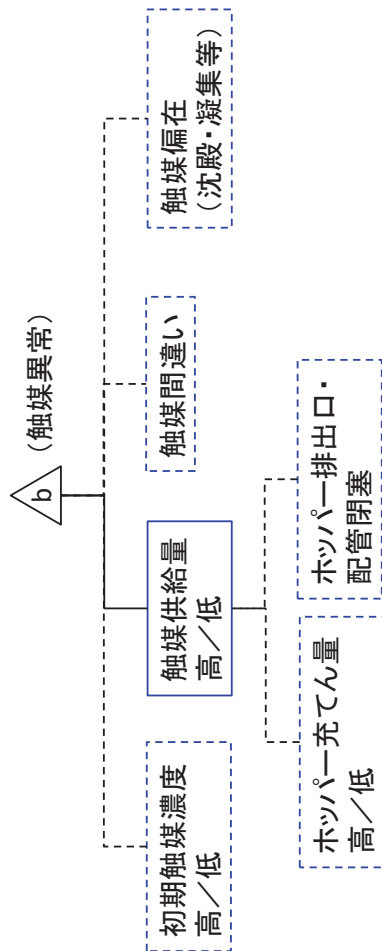


図 3-4(2/8-a) 暴走反応に関するシナリオに対するリスク低減措置の例
(熱平衡破綻が生じる原因から、熱平衡破綻が生じるまでのシナリオ (その1))



原因	防止対策(例)
初期触媒濃度高/低	<ul style="list-style-type: none"> 触媒初期濃度の分析 (C-b)
ホッパー充填量高/低	<ul style="list-style-type: none"> 計量器付きホッパーの導入 (B-a) 触媒供給量のクロスチェック (C-a)
ホッパー排出口・配管閉塞	<ul style="list-style-type: none"> 触媒排出に適した仕様のホッパーの導入 (B-a) ホッパー・配管内部のバッチごとの点検・整備 (C-a)
触媒間違い	<ul style="list-style-type: none"> 触媒ごとに独立した供給システムの導入 (B-a) 供給する触媒種類のクロスチェック (C-a)
触媒偏在(沈殿・凝集等)	<ul style="list-style-type: none"> 均一に分散する物性の触媒、溶媒の導入 (A-a) 分散剤の導入 (A-a)

図 3-4(2/8-b) 暴走反応に関するシナリオに対するリスク低減措置の例
(熱平衡破綻が生じる原因から、熱平衡破綻が生じるまでのシナリオ (その 2))

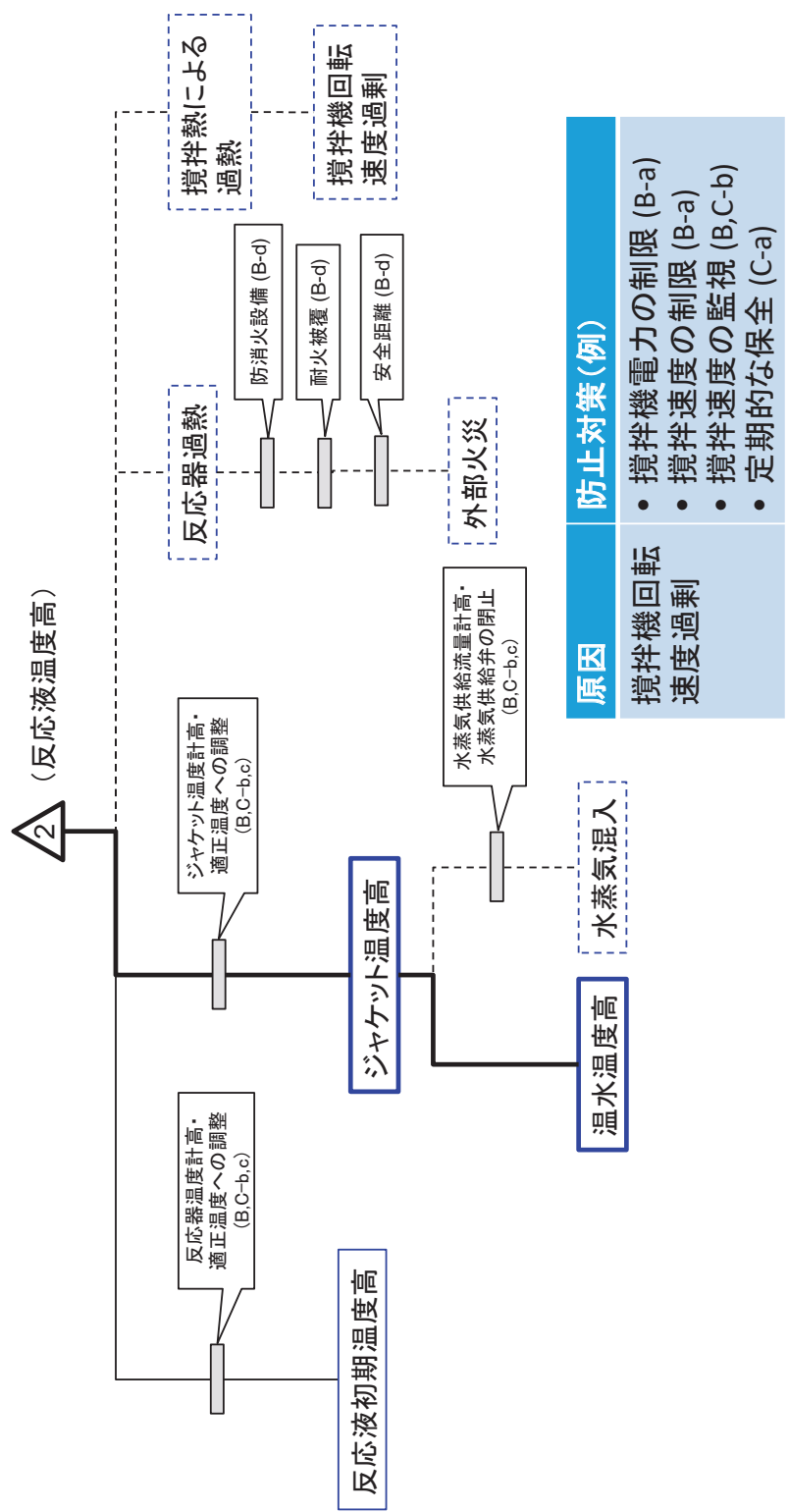
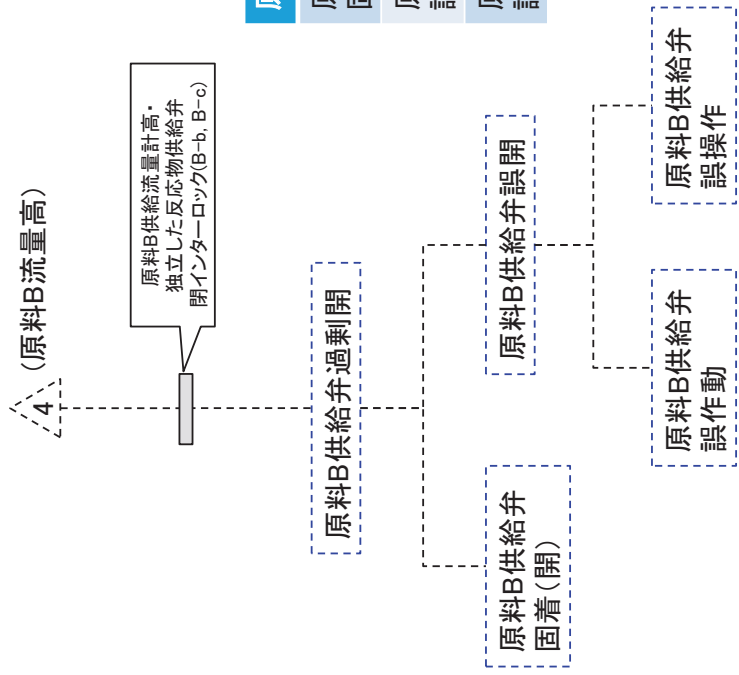
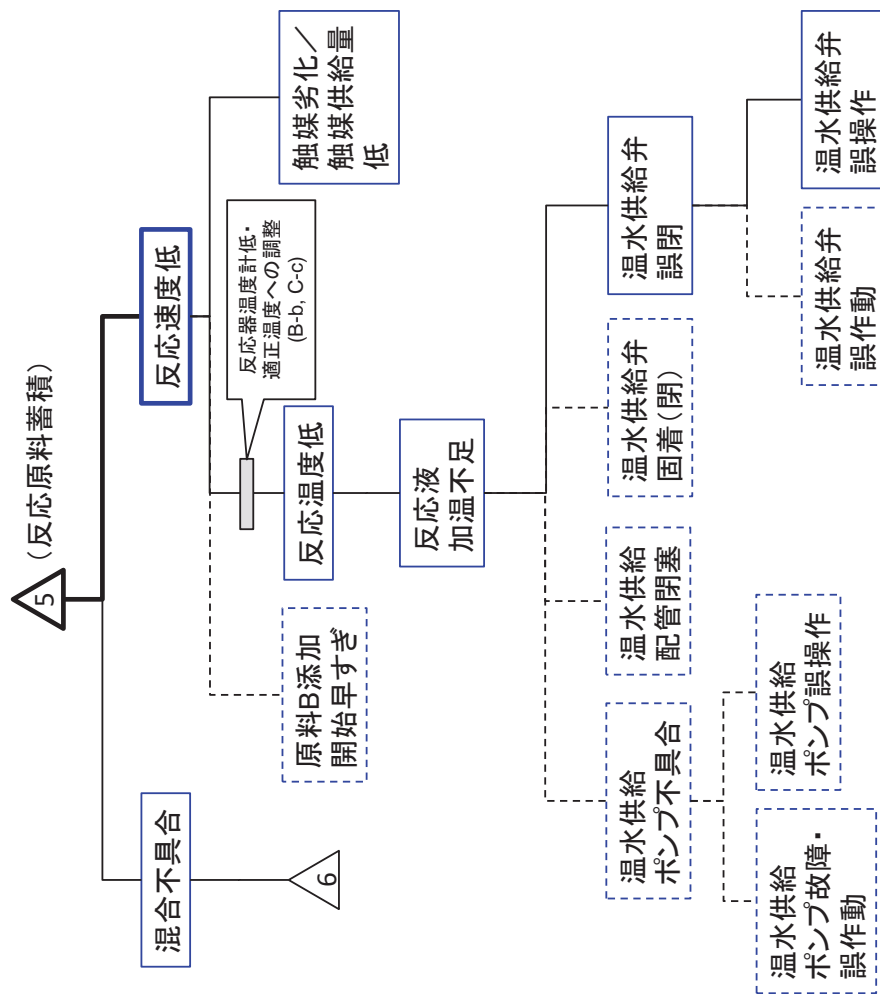


図 3-4(3/8) 暴走反応に関するシナリオに対するリスク低減措置の例
(熱平衡破綻が生じる原因から、熱平衡破綻が生じるまでのシナリオ (その3))



原因	防止対策(例)
原料B供給弁固着(開)	<ul style="list-style-type: none"> 定期的な保全 (C-a)
原料B供給弁誤作動	<ul style="list-style-type: none"> システムの健全性の確保 (C-a)
原料B供給弁誤操作	<ul style="list-style-type: none"> 誤操作防止設計 (A-a)

図 3-4(4/8-b) 暴走反応に関するシナリオに対するリスク低減措置の例
(熱平衡破綻が生じる原因から、熱平衡破綻が生じるまでのシナリオ (その 5))



原因	防止対策(例)
原料B添加開始早すぎ	<ul style="list-style-type: none"> 添加開始温度の遵守 (C-a)
触媒劣化／触媒供給量低	<ul style="list-style-type: none"> 触媒の分析 (C-b)
温水供給ポンプ故障・誤作動	<ul style="list-style-type: none"> 定期的な保全 (C-a)
温水供給ポンプ誤操作	<ul style="list-style-type: none"> 誤操作防止設計 (A-a)
温水供給弁固着(閉)	<ul style="list-style-type: none"> 定期的な保全 (C-a)
温水供給弁誤作動	<ul style="list-style-type: none"> システムの健全性の確保 (C-a)
温水供給弁誤操作	<ul style="list-style-type: none"> 誤操作防止設計 (A-a)

図 3-4(5/8-a) 暴走反応に関するシナリオに対するリスク低減措置の例
(熱平衡破綻が生じる原因から、熱平衡破綻が生じるまでのシナリオ (その 6))

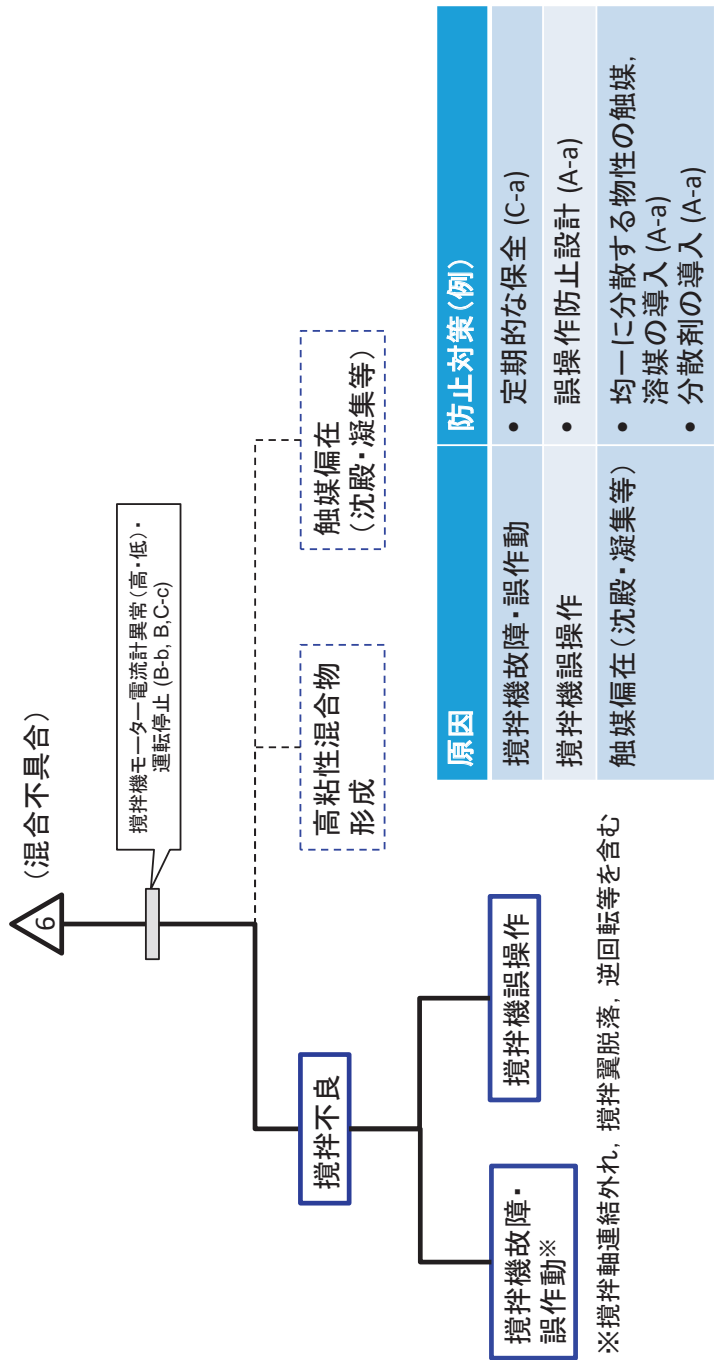


図 3-4(5/8-b) 暴走反応に関するシナリオに対するリスク低減措置の例
(熱平衡破綻が生じる原因から, 熱平衡破綻が生じるまでのシナリオ (その7))

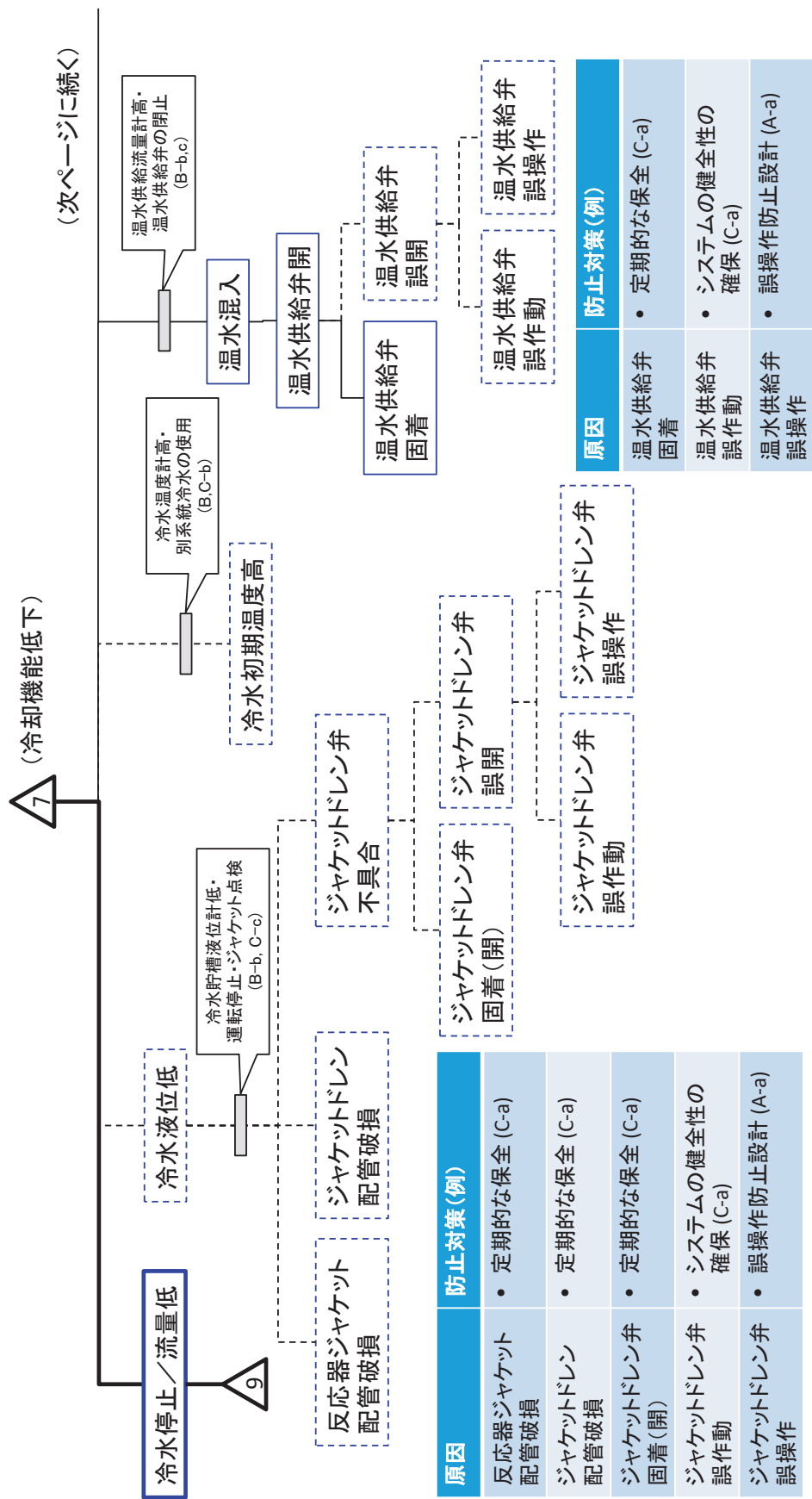


図 3-4(6/8-a) 暴走反応に関するシナリオに対するリスク低減措置の例
(熱平衡破綻が生じる原因から、熱平衡破綻が生じるまでのシナリオ (その 8))

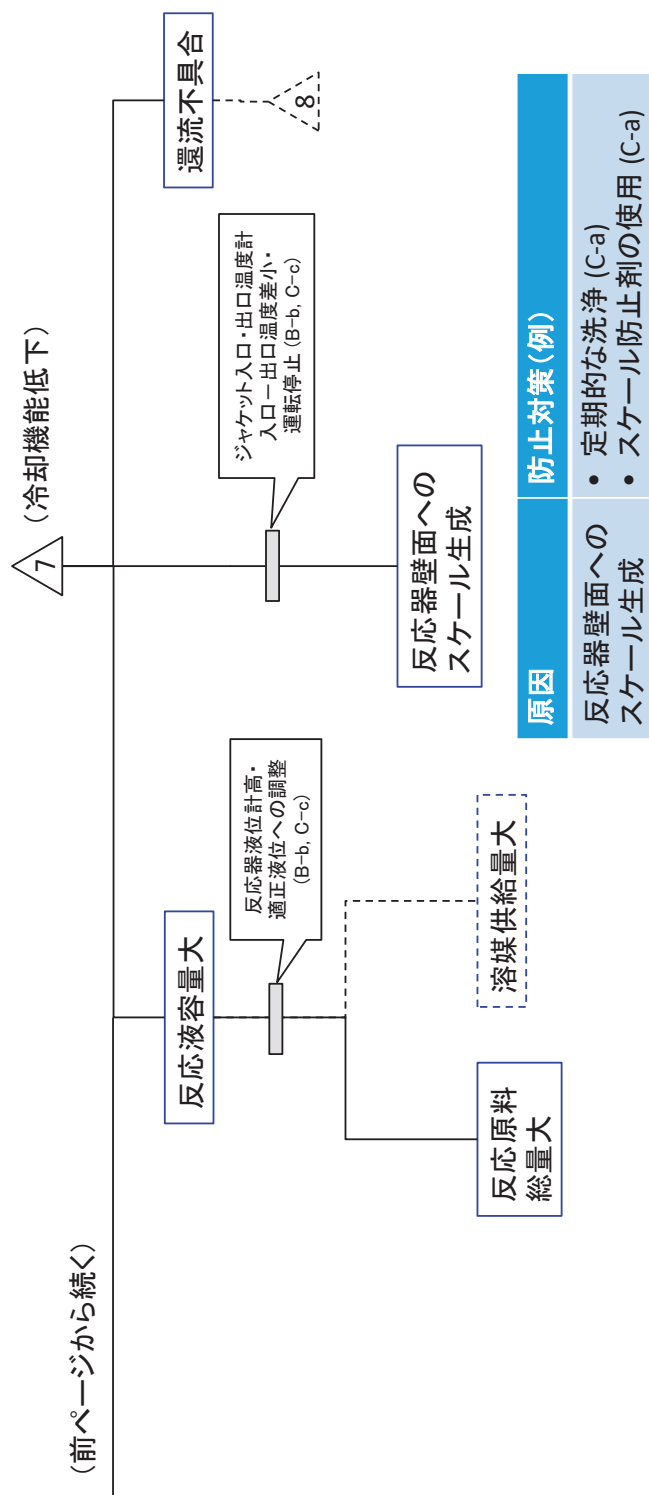


図 3-4(6/8-b) 暴走反応に関するシナリオに対するリスク低減措置の例
(熱平衡破綻が生じる原因から, 熱平衡破綻が生じるまでのシナリオ (その9))

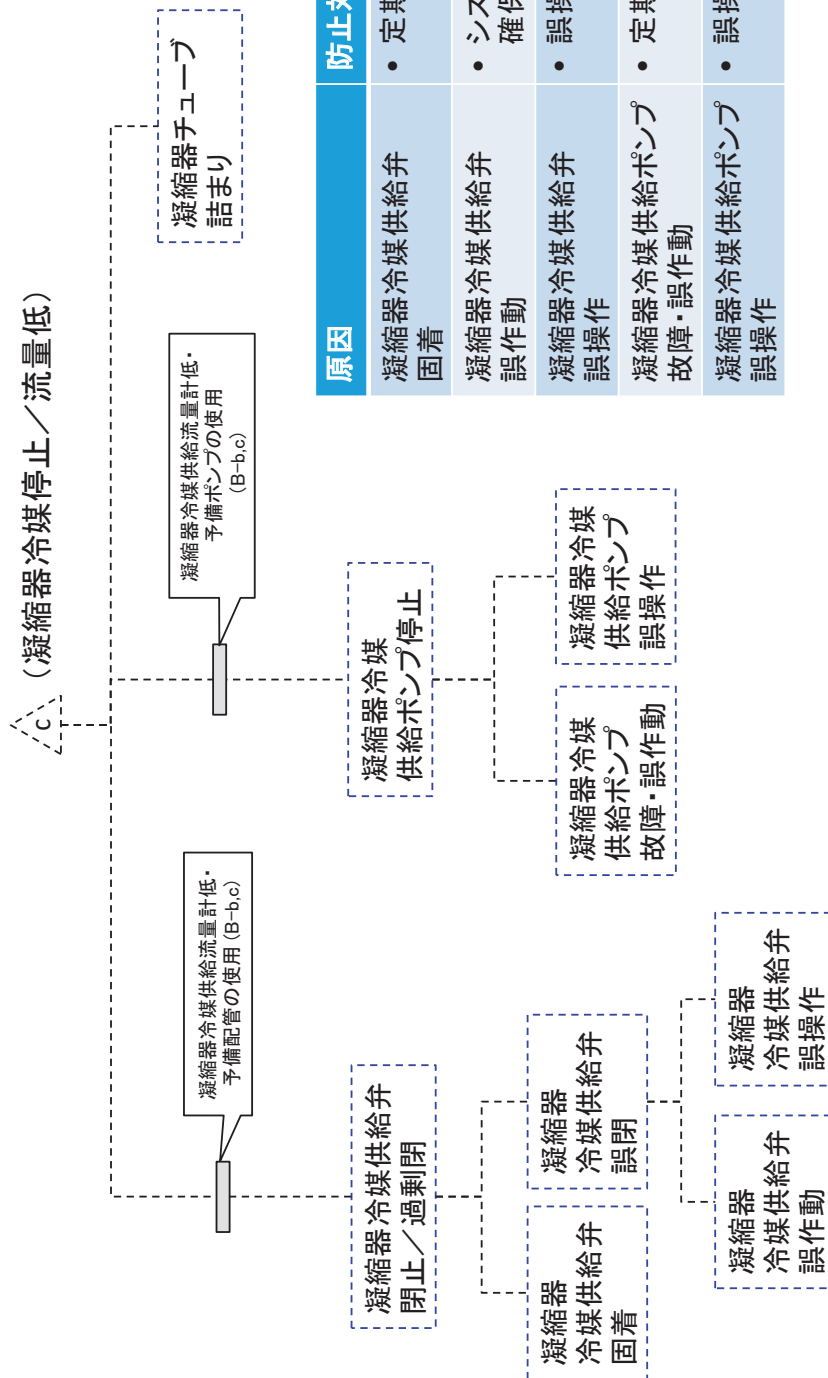


図 3-4(7/8-b) 暴走反応に関するシナリオに対するリスク低減措置の例
(熱平衡破綻が生じる原因から、熱平衡破綻が生じるまでのシナリオ (その II))

原因	防止対策(例)
冷水供給弁固着	<ul style="list-style-type: none"> 定期的な保全 (C-a)
冷水供給弁誤作動	<ul style="list-style-type: none"> システムの健全性の確保 (C-a)
冷水供給弁誤操作	<ul style="list-style-type: none"> 誤操作防止設計 (A-a)
冷水供給ポンプ故障・誤作動	<ul style="list-style-type: none"> 定期的な保全 (C-a)
冷水供給ポンプ誤操作	<ul style="list-style-type: none"> 誤操作防止設計 (A-a)

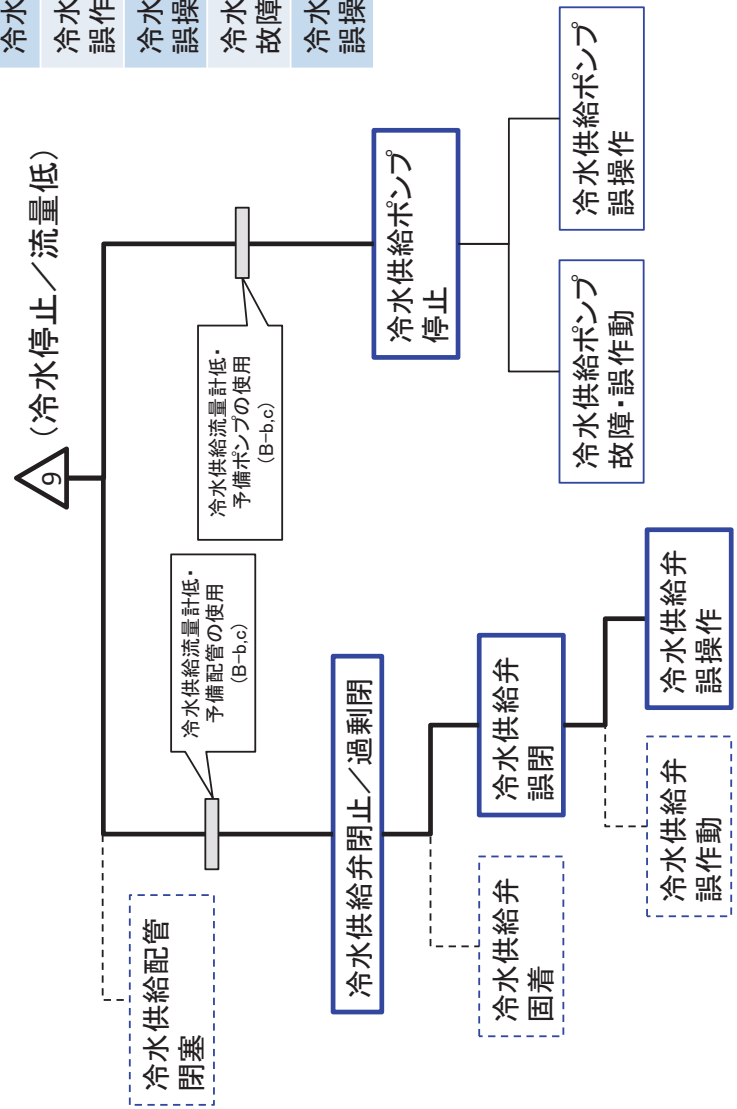


図 3-4(8/8) 暴走反応に関するシナリオに対するリスク低減措置の例
(熱平衡破綻が生じる原因から，熱平衡破綻が生じるまでのシナリオ (その 12))

第4章 混合危険による災害防止のためのリスクアセスメント,

リスク低減措置検討の際の参考情報

4.1 「リスクアセスメント等実施に必要となる情報の収集」に関する参考情報

リスクアセスメント等を実施するために必要な情報は、原則、暴走反応の場合と同様であるが、混合危険を考慮する場合、混合する2種以上の物質の組み合わせの多様さや、混合の結果生じる現象の多様さ、物質を取り扱う条件（温度、圧力、濃度、湿度等）による挙動の変化の大きさ等から、2種以上の物質が混合した際に危険な状態となるかを知ることのモデル化は難しい。

一方、その困難さをカバーするために、複数の物質が混合することで火災・爆発等が起こり得るかの検討が、これまでに多数行われ、様々な成書、ツール等でその情報がまとめられている。それらの情報の概要は、4.2節に示す。

安衛研手法では、「取り扱い物質及びプロセスに係る危険源の把握」の段階で複数の物質が混合することで火災・爆発等が起こり得るかどうかの検討を行う。その準備として、「リスクアセスメント等実施に必要となる情報」を収集する時点でプロセス内において使用されている物質をすべて列挙しておく。

この際、見落としがちな以下の点に注意して列挙する。

- ・ 反応中間体、生成物、副生成物のように反応中に変換される物質（不安定物質が生成する場合がある）
- ・ 取扱量が微量な物質（金属のアジ化物や金属アセチリド等が生成すると、微量であっても激しい爆発を起こす）
- ・ 空気、水、油等の、プロセスにおいて合成に使用している物質以外の物質（考慮すべき物質の例を表4-1に示す）

表 4-1 混合危険を考慮する上で考慮すべき物質の例 ⁷⁴

水との反応性がある物質と雰囲気中の水との接触
自然発火性物質と空気との接触
プロセス物質／試薬
不純物，混入物等
熱媒，冷媒
構造材
構造物，構造物の腐食生成物
断熱材
消火剤
洗浄剤
ガスケット
シーリング材
充てん剤
ライニング
封止流体
潤滑油
計器内流体（オイル等）

また，複数の物質が混合したことが危険源になるかどうかを検討するにあたって，過去に発生した類似の災害に関する情報が参考になる．労働安全衛生総合研究所で公開している「爆発火災データベース」⁷⁵から，混合危険によると考えられる火災・爆発災害の事例を抽出した結果を添付資料 4 に示す．

⁷⁴ CCPS/AIChE, Guidelines for Safe Storage and Handling of Reactive Materials, pp. 138-144 (1995)を基に作成

⁷⁵ 労働安全衛生総合研究所ホームページ，爆発火災データベースの公開（第 6 次），https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/houkoku/houkoku_2020_05.html．当該ホームページの URL は，情報が追加されるたびに新たな URL で公開される．

4.2 「取り扱い物質及びプロセスに係る危険源の把握」に関する参考情報

安衛研手法における STEP1 の質問票での問 12「対象とするプロセスプラントは、意図した物質の混合や、意図していない物質の混入により、以下のいずれかの可能性があるか？」に回答するための参考情報を示す。

(1) 複数の物質が混合したことで危険な状態になり得るかを検討するための文献及び「化学薬品の混触危険ハンドブック」データ編のデータシート

複数の物質が混合することで火災・爆発等が起こり得るかについては、これまでに多数の検討が行われ、様々な成書、ツール等でその情報がまとめられている。例えば、以下の様な成書があり、検討の際に参考にできる。

- ・ 田村 監訳, プレスリック危険物ハンドブック 第5版, 丸善 (1998).

原著は P. G. Urben による”Bretherick's Handbook of Reactive Chemical Hazards”という洋書であり、現在は第 8 版⁷⁶が 2017 年に発行されている。当該書籍は、上記書籍の第 5 版を日本語訳したものである。

本書には、約 5000 の元素及び化合物について、事故例に基づいて自己反応性、自然発火性、合成危険性、火災危険性、爆発危険性、過酸化生成の可能性、混合危険性等が記載されている。また、化学物質の類似の構造単位での上記の危険性に関する記載もある。

- ・ 東京消防庁編, 化学薬品の混触危険ハンドブック 第2版, 日刊工業新聞社 (1997).

本書には、複数物質を混合した際の熱量を計算するプログラム REITP⁷⁷を用いて約 8000 種の物質の組み合わせについて、最大反応熱とその時の混合割合を計算したデータをまとめている。また、生じる現象が判明している組み合わせについては、その現象も記載されている。

いずれの書籍も既に絶版となっており、新たに入手することが困難である。そのため、「化学薬品の混触危険ハンドブック」に掲載されている、物質の組み合わせごとの最大反応熱とその時の混合割合、生じる現象についてのデータを Excel データシートにまとめた⁷⁸。

⁷⁶ P.G. Urben, Bretherick's Handbook of Reactive Chemical Hazards, Eighth Edition, Elsevier (2017).

⁷⁷ 東京消防庁の委託により、東京大学で開発されたエネルギー放出危険予測プログラム。以下の機能を装備している。

- ① 単一化合物の分解熱計算
- ② 2 種類の化合物の最大反応熱とその混合割合
- ③ 混合割合を指定した時の反応熱
- ④ 保管庫内の薬品の危険な組み合わせの探索

⁷⁸ 労働安全衛生総合研究所ホームページ、「化学物質の危険性に対するリスクアセスメント」で公開予定、https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/houkoku/houkoku_2021_03.html (2021 年 12 月 21 日現在)。当該ホームページの URL は、情報が追加されるたびに新たな URL で公開される。

(2) 混合危険マトリクス作成ソフトウェア CRW (Chemical Reactivity Worksheet)

複数の物質が混合したことが危険源となるかどうかの検討をする際には、プロセス内において使用する物質をすべて列挙し（中間体、微量な物質、空気、水、油等のプロセス周りで使用されている物質等も含む）、図 4-1 に示すようなマトリクス（混合危険マトリクス）を作成し、もれなく検討することが重要である。

1,3-ブタジエン						
塩素	火災, 毒性ガス発生					
フッ化水素	発熱, 急激な重合反応	発熱, 毒性蒸気の放出				
アンモニア	発熱, 急激な重合反応	三塩化窒素 (爆発性) の生成, 発熱	発熱, 毒性蒸気の放出			
炭素鋼	—	250 °C 以上で発火 (不純物があれば 100 °C 以上)	界面における水素膨れ	—		
1 MPa 水蒸気	酸化防止剤の消費, 重合反応に至る可能性	—	発熱, 毒性蒸気の放出	発熱, 毒性蒸気の放出	—	
	1,3-ブタジエン	塩素	フッ化水素	アンモニア	炭素鋼	1 MPa 水蒸気

図 4-1 混合危険マトリクスの例⁷⁹

物質の数が多くなると、そのすべての組み合わせについて文献や実験で調査することは、場合によっては多大な労力を要する。その検討を支援するために、米国では混合危険マトリクスを作成するソフトウェア CRW (Chemical Reactivity Worksheet) が開発され、無償で公開されている⁸⁰。以下に、CRW の概要を示す。

CRW は、米国海洋大気局 (U. S. National Oceanic and Atmosphere Administration, NOAA) により開発されたソフトウェアであり、現在は管理と運用が米国化学工学会化学プロセス安全センター (AIChE/CCPS) に移行し、最新の CRW 4.0 が公開されている。CRW は、化学物質を、反応性のある化学構造によって、68 種類の反応性グループに分類し、物質そのものではなく反応性グループの組み合わせから混合した際の現象を予測する。ユーザーが物質を登録することもできるが、必ず反応性グループを指定する必要がある。CRW では、反応によって約 420 J/g を超える反応熱を生じるか、そもそも可燃性又は爆発性を持つか、

⁷⁹ CCPS/AIChE, Guidelines for Safe Storage and Handling of Reactive Materials, Figure 4.2, p. 110 (1995)より作成

⁸⁰ <https://www.aiche.org/ccps/resources/downloadinstall> より入手可能 (2021 年 12 月 21 日現在)

反応によって可燃性又は毒性物質を生成する場合を、危険な組み合わせとして判定する。これらの予測は、実験データを一切使用せず、文献情報のみに基づいたものである。

本ソフトウェアは、穏やかな条件（＜100 ℃，＜0.3 MPa）での最悪のシナリオを予測するため、保守的な予測結果となっている。また、反応の不活性化剤や重合禁止剤等の効果を考慮していないため、過大評価となる傾向がある。明らかに過大評価であることが、ユーザーが所有する実験データ等によって確認できた場合は、結果を修正できる。

また、一般的に使用される吸着剤や装置等の構造材についての混合危険に関する情報が収納されている。ただし、この情報は、混合危険マトリクスの評価には含まれない。

複数の物質が混合することで火災・爆発等が起こり得るかどうかの検討を支援するために、この混合危険マトリクス作成ソフトウェア **CRW** の使用方法の説明資料を作成した⁸¹。

⁸¹ 労働安全衛生総合研究所ホームページ，「化学物質の危険性に対するリスクアセスメント」で公開予定，https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/houkoku/houkoku_2021_03.html（2021 年 12 月 21 日現在）。当該ホームページの URL は、情報が追加されるたびに新たな URL で公開される。

4.3 「引き金事象の特定とシナリオ同定」に関する参考情報

混合危険を考慮する際には、4.2 節で示した「取り扱い物質及びプロセスに係る危険源の把握」の段階で把握した混合危険を基に、危険性のある化学物質同士が混合するシナリオを「不適切な作業・操作」、「設備・装置に関する不具合」、「外部要因」から網羅的に検討することが原則である。また、同定したそれぞれのシナリオについて、多重防護の考え方に基づき、必要なリスク低減措置を検討する。混合危険については、以下の理由から、事象の因果関係を 1 つのシナリオモデルとしてまとめることは困難である。

- ・ 混合危険が引き起こされる原因や混合危険によって引き起こされる影響が様々であること
- ・ 物質の種類や量も多様であり、そのことによって影響が様々に変わり得ること

また、詳細な検討を行うための資源を十分に割けない等の事情により網羅的な検討が困難となることも考えられる。

そのため、混合危険に関するシナリオを検討する際の参考とするために、既存の文献等に表示されている、シナリオ検討の際の着眼点の例を示した⁸²。図 4-2 に示した(a)～(f)における着眼点の例を表 4-2 に示している。なお、表 4-2 に示した着眼点の例は、典型的な混合危険の原因についての着眼点を示したものであり、すべての混合危険に関するシナリオを網羅するものではない。抜けている箇所や余分な箇所があれば、それぞれのプロセス等に応じて修正していくべきものである。

⁸² 以下の文献を基に作成

- ・ CCPS/AIChE, Guidelines for Process Safety in Batch Reaction Systems (1999).
- ・ R.W. Johnson, S.W. Rudy, and S.D. Unwin, Essential Practices for Managing Chemical Reactivity Hazards, CCPS/AIChE (2003).

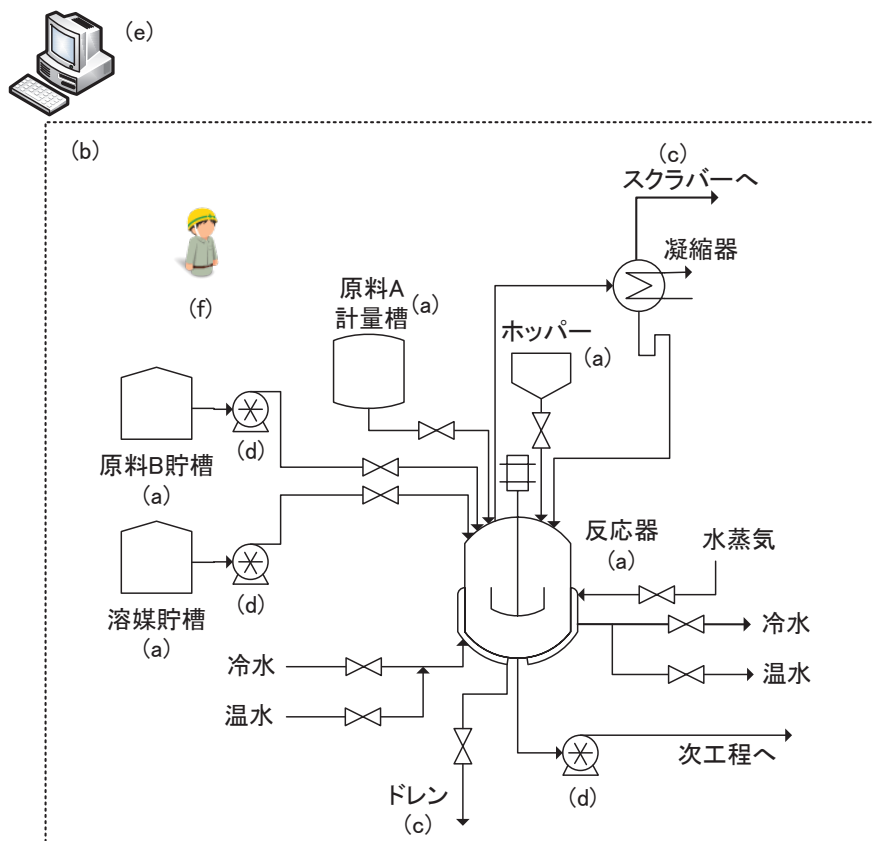


図 4-2 混合危険に関するシナリオを検討する際の着眼点を示したプロセスの概要

図 4-2 に示した(a)～(f)の概略の説明を以下に示す。

(a) 反応器等

反応器，及び原料貯槽，中間貯槽，製品貯槽，廃液貯槽等の貯槽．反応器や貯槽にある危険性のある物質が，混合してはならない物質の混入等により，潜在的なエネルギーが放出される可能性がある．

(b) 機器構成・レイアウト

設備・装置の構成や配置．共用の設備・装置や，排水溝，堰等では危険性のある化学物質同士が接触する可能性がある．また，危険なプロセスが近接していると，事故時に近接のプロセスに影響を及ぼし，事故影響がより大きくなる可能性がある．

(c) ベントライン・ドレン

排ガス制御装置を含むベントラインやドレンは，見逃されがちであるが，安全上重要な設備・装置である．十分な注意が払われていないと，混合してはならない物質同士の接触が生じる可能性がある．

(d) 移送機器・充てん機器

プロセス物質の移送・充てんはバッチ運転に必要不可欠な操作である．運転員の作業が多く介在し，物質の誤混入等が起こりやすい．

(e) 計装・制御系

計装・制御系は、プロセスプラントを動作させるための装置等からなるシステムであり、典型的に検出端（圧力計等）、論理処理部（分散型制御システム（DCS）等）又は制御ユニット、及び操作端（制御弁等）から構成される。プロセスの安全な運転には、計装・制御系により連続してモニタリングを行う必要がある。バッチプロセスの場合、運転条件が頻繁に変わるため、連続プロセスよりも計装・制御系の不具合が多くなる傾向がある。また、運転員によりプロセスプラントを動作させることも多くあるが、それらの運転操作は「(f) 運転作業」において注目する。

(f) 運転作業（監視を含む）

バッチプロセスにおいて、運転員はプロセスの監視及び制御に欠かせない要素であり、安全な運転に必要な管理的対策は運転員によって行われる。連続プロセスよりも頻繁に制御に関する決定や操作が求められ、その決定や操作の数が多くなるほど不適切な作業・操作が多くなる可能性がある。

以下、Rouse らの「うっかりミス」の発生過程の人の情報処理段階ごとに着眼点を示す⁸³。

(f-1) システム状態の観察段階

読み取り間違い、読み取った値の間違った解釈等

(f-2) 仮説の選択・検証段階

観測された状態変数の値を説明できない仮説の選択、結論に行きつく前の検証の停止等

(f-3) 目標・手段の選択段階

間違っただ目標の選択、完全には目標を達成しない手段の選択等

(f-4) 手段の実行段階

必要な手順の除外、必要な手順の不必要な繰り返し、実行の遅れ、間違っただ手順の実行等

(f-5) その他

上記の観点以外の着眼点

(g) その他の観点

図 4-2 に示すことができない着眼点をその他の観点として示した。

また、運転員による不適切な作業・操作については、作業手順書等のルールがあってもそれを守らない「違反」によって生じることもある。「引き金事象の特定とシナリオ同定」の段階においては、「うっかりミス」による不適切な作業・操作であっても、「違反」による不適切な作業・操作であっても、生じる引き金事象及びシナリオは変わらない。例えば、「バ

⁸³ CCPS/AICHE, Guidelines for Process Safety in Batch Reaction Systems, Chapter 6, pp. 127-128 (1999), W. Rouse and S. Rouse, IEEE transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-13(4), pp. 539-549 (1983) を参考にした。

バルブ〇〇を間違って開けた」という「うっかりミス」でも、「作業の効率を優先してバルブ〇〇を開けた」という「違反」であっても「バルブ〇〇を開けた」という引き金事象は変わらない。そのため、「引き金事象の特定とシナリオ同定」の段階では、「うっかりミス」や「違反」といった理由にこだわらず不適切な作業・操作を検討し、「リスク低減措置の検討」の段階で、不適切な作業・操作の理由を検討するようにする。

本来、危険性のある化学物質同士が混合するシナリオを「不適切な作業・操作」、「設備・装置に関する不具合」、「外部要因」から網羅的に検討する必要があるが、詳細な検討を行うための資源を十分に割けない等の事情により困難である場合に、表 4-2 に示した着眼点を基にシナリオを検討する。表 4-2 の(a)から(d)に示した着眼点は、「引き金事象（初期事象）」又は「プロセス異常（中間事象）」に該当する内容を記載しているため、記載された着眼点から、「その現象はどのような不具合により起こるか」「その現象により、どのような影響が生じ得るか」を検討する。また、表 4-2 の(e), (f)に示した着眼点は、「引き金事象」（「不適切な作業・操作」、「設備・装置に関する不具合」）の要因となるものを記載しているため、記載されている着眼点から、「不適切な作業・操作」、「設備・装置に関する不具合」を想定し、その後「その不適切な作業・操作／設備・装置に関する不具合によりどのような現象が生じるか」「その現象により、どのような影響が生じ得るか」を検討する。

以下に、表 4-2 (a)～(d)に示した着眼点を考慮したシナリオの検討例、及び表 4-2 (e), (f)に示した着眼点を考慮したシナリオの検討例を示す。

○ 表 4-2 (a)～(d)に示した着眼点を考慮したシナリオの検討例

表 4-2 (a) 「反応器、貯槽について」の「自然発火性物質が存在するところに空気が入る」の着眼点から、「その現象はどのような不具合により起こるか」を検討し、「バルブ〇〇を閉め忘れた」といった不適切な作業・操作や、「バルブ〇〇の内部漏れ」等の設備・装置に関する不具合（引き金事象（初期事象））を特定する。また、「その現象により、どのような影響が生じ得るか」を検討し、「内容物の着火、開口部からの火炎の吹き出し」等のプロセス災害（結果事象）を想定する。以上の引き金事象（初期事象）からプロセス災害（結果事象）に至るまでの経路をシナリオとして同定する。

○ 表 4-2 (e)に示した着眼点を考慮したシナリオの検討例

表 4-2 (e) 「計装・制御系について」の「計装系に異物が混入し、誤作動を起こす」の着眼点から、「バルブ〇〇が閉まらない」等の不具合（引き金事象（初期事象））を特定する。次に、事前に「化学薬品の混触危険ハンドブック」データシートや混合危険マトリクス作成ソフトウェア CRW 等により調べた、物質を混合した際に生じる現象等を参考にして、「その現象により、どのような影響が生じ得るか」を検討する。以上の引き金事象（初期事象）からプロセス災害（結果事象）に至るまでの経路をシナリオとして同定する。

○ 表 4-2 (f)に示した着眼点を考慮したシナリオの検討例

表 4-2 (f) 「運転作業（監視を含む）について」の「プラント／プロセスごとに表示／配色の規則が異なる」の着眼点から、「タンクに入っている原料を誤認し，正常の操作と異なるバルブ〇〇を開にし，異なる物質を反応器に投入する」等の不具合（引き金事象（初期事象））を特定する．次に，事前に「化学薬品の混触危険ハンドブック」データシートや混合危険マトリクス作成ソフトウェア **CRW** 等により調べた，物質を混合した際に生じる現象等を参考にして，「その現象により，どのような影響が生じ得るか」を検討する．以上の引き金事象（初期事象）からプロセス災害（結果事象）に至るまでの経路をシナリオとして同定する．

表 4-2 混合危険に関するシナリオを検討する際の着眼点の例

(a) 反応器，貯槽等について
自然発火性物質が存在するところに空気が侵入する
禁水性物質が存在するところに水が侵入する
間違った物質を反応器に供給する
前の運転から適切に洗浄／ドレン抜きしていない機器を使用する
熱媒／冷媒の漏洩により反応液等と接触する．腐食生成物等の異物が混入し，反応液等と接触する
混合直後には異常がなくても，生成物が蓄積すると異常反応の原因となる
(b) 機器構成，レイアウトについて
共用のベントラインで混合危険物質同士が接触する
共用のユーティリティ供給系で，ユーティリティ系の汚染により混合危険物質がプロセス側に侵入する
共用の機器（配管，ポンプ，スクラバー等）で混合危険物質同士が接触する
共用の移送系で混合危険物質同士が接触する
液体が漏洩し，排水溝，堰で混合危険物質同士が接触する
異なるプロセスに供給する化学物質が近接していることで，誤ったプロセスに当該物質を供給する
(c) プロセスベント及びドレンについて
スクラバー液が反応器等に逆流する
反応液等が真空系，スクラバー系に引き込まれる
(d) 移送及び充てん機器について
運転の融通性を確保するために一時的な接続を行い，誤った物質の送液，誤った容器への充てんを行う
移送及び充てん機器に，不適切な材質を使用している（配管接続部（フランジ，ガスケット等）の材質を含む）
汚染物質が混入する可能性がある
不適切な化学物質を使用し，洗浄不良等で除去していない（除去しきれしていない）可能性がある

(e) 計装・制御系について
計装系に異物が混入し、誤作動を起こす
検出器（流量計等）の洗浄が不十分となり、混合危険物質同士が接触する
検出器（流量計等）からの漏洩や検出器の破損により、混合危険物質同士が接触する
制御ソフトウェアの不具合により、装置が誤作動する
電源が喪失し、計装・制御系が動作しなくなる
電氣的干渉、電磁干渉、電波障害により制御システムが誤動作する
調節弁の故障で目的外の物質が混入する

(f) 運転作業（監視を含む）について
(f-1) システム状態の観察段階
プラント／プロセスごとに表示／配色の規則が異なる
化学物質の識別に商品名を使用することで物質を同定しづらい
同じ物質の異なるグレードのものを使用する
化学物質に誤った表示や一貫性のない表示をする
(f-2) 仮説の選択・検証段階
当該バッチ操作はまれにしか実施しない
(f-3) 目標・手段の選択段階
間違った物質を反応器に供給する
操作手順書を補足する「参考手順」を使うことで、運転員が間違っただ手順を選ぶ、又は「参考手順」を使うのを忘れる
(f-4) 手段の実行段階
交替勤務引継時のコミュニケーションエラーにより、タンク内等の物質が把握されていない
同じ機器での複数の操作の実行、又は複数の機器で同じ操作を実行することで、正常な操作と異なる操作を行う
運転員が操作手順を間違える、又は必要な操作をし忘れる
必要な手順の実行が遅れる
(f-5) 人間工学的観点
周辺の照明が表示等の配色に影響を及ぼす
計装パネルに類似の操作スイッチが接近して設置されている
計装の Tag No.が誤解されやすい（類似の）数字になっている

（次のページに続く）

(前のページから続く)

(f-6) その他の観点
処理に可搬型装置や一時的な接続を使用する
異なるプロセスに供給する化学物質が近接していることで、誤ったプロセスに当該物質を供給する
設備・装置の日常的な分解・組み立てを行う際に、組み立てを間違えたり、異物が混入したりする
バッチ運転中に行うべき様々な作業に対して、運転員の高度な訓練が不足しており、操作を間違える
運転員により頻繁に行われる操作があり、操作を間違える
運転員の経験のないプロセスで運転操作を行い、操作を間違える
反応途中のバッチ、又はオフスペックのバッチの廃棄等の際に、混合危険物質同士が接触する

(g) その他の観点
漏洩した液体が周辺の物質や容器と接触する
相互接続した配管が開いたままになっている
間違った物質又は間違った濃度の物質を供給元から受け入れる
廃棄物を同じタンク又は容器に入れる
廃液をプラントの排水処理システムに入れる
外部応力により、隣接したタンク又は容器が同時に、又は続けて壊れる（地震、クレーン操作、火災、爆発等）

4.4 「リスク低減措置の検討」に関する参考情報

暴走反応の場合と同様に、まず、法令に定められた措置がある場合にはそれを必ず実施する。安衛研手法の STEP2①で同定されたシナリオについてリスクレベルを決定し、法令に定められた措置を含めた現状のリスク低減措置が機能しても目標とするリスクレベルに達していないと評価されたシナリオについて、許容可能なリスクレベルを達成していなければ、追加のリスク低減措置を検討し、実施する必要がある。その際には、リスク低減措置検討・実施の優先順位及びリスク低減措置の多重防護の考え方にに基づき、表 3-6 に示すリスク低減措置を検討する⁸⁴。

表 3-6 リスク低減措置の種類（優先順位）及び目的（再掲）

(a) リスク低減措置の種類（優先順位）

優先順位	リスク低減措置の種類	説明
1	A) 本質安全対策	危険性もしくは有害性が高い化学物質等の使用の中止又は危険性もしくは有害性のより低いものへの代替 化学反応のプロセス等の運転条件の変更, 取り扱う化学物質等の性状の変更等による, 負傷が生じる可能性の度合い又はばく露の程度の低減
2	B) 工学的対策	化学物質等に係る機械設備等の防爆構造化, 安全装置の二重化等の工学的対策又は化学物質等に係る機械設備等の密閉化, 局所排気装置の設置等の衛生工学的対策
3	C) 管理的対策	作業手順の改善, マニュアルの整備, 教育訓練・作業管理等の管理的対策
4	D) 保護具の着用	静電安全靴, 保護メガネ, 保護マスク, 保護手袋等の個人用保護具の使用

⁸⁴ リスク低減措置の「種類」及び「目的」の説明、リスク低減措置の検討の考え方は 3.4 節を参照

(b) リスク低減措置の目的

リスク低減措置の目的	説明
a) 異常発生防止対策	主に初期事象の発生を防止するための対策であり、異常を発生させない、あるいは異常が発生しても封じ込めシステムの適切な設計等で、正常な運転状態に保つ。 ※ 通常の運転状態（Normal）からの逸脱を回避することが目的。
b) 異常発生検知手段	異常が発生した場合のプロセス変数（流量、温度、圧力、液レベル、組成等）のずれ発生を検知する。検知した結果を基に、a)異常発生防止対策、c)事故発生防止対策、又はd)被害の局限化対策でどのように対応するかを考える。
c) 事故発生防止対策	主に初期事象発生からプロセス災害発生までの異常伝播（中間事象）を防ぐための対策であり、危険源が顕在化しても、事故まで発展させないようにする。
d) 被害の局限化対策	主にプロセス災害発生後の影響（被害）を減らすための対策であり、事故が発生しても事故の拡大を阻止する、又は避難計画を策定する等により被害を許容可能なレベルまで下げる。

リスク低減措置の検討は、以上のように行うべきであるが、具体的なリスク低減措置を考えることは難しい。ここでは混合危険に関するリスク低減措置を検討する際の参考にするために、混合危険に関するシナリオを検討する際の着眼点に関連付けて示した混合危険に関するリスク低減措置の例^{85,86}を表 4-3 に示す。(f) 運転作業（監視を含む）については、「うっかりミス」による不適切な作業・操作に対するリスク低減措置の例を示す。表 4-3 で示したリスク低減措置の例は、あくまで 1 つの参考例であり、それぞれの事業場がプロセスの内容、取り扱っている物質の危険性等を考慮して、それぞれのシナリオに対するリスク低減措置を検討する必要がある。

なお、(f) 運転作業（監視を含む）において、運転員による不適切な作業・操作については、作業手順書等のルールがあってもそれを守らない「違反」によって生じることがある。運転員がルール違反を犯す時、その要因には以下の 3 つが挙げられる。

- ・ルールについての知識・理解不足
- ・ルールの故意の不遵守
- ・職場風土の要因

各作業のルール違反を想定する場合、すべての要因を想定した上で、違反に関するすべて

⁸⁵ 以下の文献を基に作成

・ CCPS/AIChE, Guidelines for Process Safety in Batch Reaction Systems (1999).

・ R.W. Johnson, S.W. Rudy, and S.D. Unwin, Essential Practices for Managing Chemical Reactivity Hazards, CCPS/AIChE (2003).

⁸⁶ 多重防護の考え方で分類したリスク低減措置の事例が技術資料 JNIOSSH-TD-No.5, 表 10, p. 31 (2016)に示されているため、その事例も併せて検討する。

の対策が実施できているかどうかを検討する⁸⁷。

着目するプロセスの箇所は以下のとおりである。

- (a) 反応器，貯槽等
- (b) 機器構成，レイアウト
- (c) プロセスベント及びドレン
- (d) 移送及び充てん機器
- (e) 計装・制御系
- (f) 運転作業（監視を含む）
- (g) その他の観点

表 4-3 にそれぞれのリスク低減措置の種類（A）本質安全対策，B）工学的対策，C）管理的対策，D）保護具の着用）及び目的（a）異常発生防止対策，b）異常発生検知手段，c）事故発生防止対策，d）被害の局限化対策）を併せて示す。3.4 節で示したように，追加のリスク低減措置を検討する場合は，表 4-3 に示したそれぞれのリスク低減措置の種類及び目的を参考にして，リスク低減措置の種類で優先順位の高いものほど，リスク低減措置の機能として信頼性が高いことに留意し，優先順位の高いものから順番に検討するとともに，多重防護の考え方に基づき，a), c), d) の目的を満足するリスク低減措置をバランスよく実施する。なお，a), c), d) のリスク低減措置を機能させるためには，プロセス内でどのような異常が発生しているかを検知するためのセンサーや異常発生を知らせるための警報システム等が必要になるため，b) 異常発生検知手段をセットで検討する。

リスク低減措置の検討に当たっては，リスクレベルが許容範囲に収まるまで複数のリスク低減措置の検討を行った上で，リスクレベルの高いシナリオに対するリスク低減措置から，技術面・コスト面等を踏まえ，リスク低減措置を決定する⁸⁸。

⁸⁷ 作業・操作に関する引き金事象（ヒューマンエラー）を想定したシナリオに対するリスク低減措置の検討についての詳細は，労働安全衛生総合研究所技術資料，化学物質の危険性に対するリスクアセスメント等実施のための参考資料－開放系作業における火災・爆発を防止するために，JNIOOSH-TD-No.7 (2021), pp.61-68 (3.3 「うっかりミス」によるヒューマンエラーと「意図的なルール違反」によるヒューマンエラー）を参照のこと。

⁸⁸ 残留リスク（例えばリスクレベルがⅡ以下の引き金事象，シナリオ）が存在する場合には，火災・爆発等発生の可能性のあることを意識させるとともに，現場でどのように対応するかを決め，リスクアセスメント等実施シート「③その他，生産開始後の現場作業者に特に伝えておくべき事項」に記載する。また，現場の作業員への伝達事項等は，運転マニュアル等にも記載しておくことで，確実に対応されるようにする。

表 4-3 混合危険に関するリスク低減措置の例

(a) 反応器，貯槽等について

着眼点	リスク低減措置	種類・目的※
自然発火性物質が存在する ところに空気が侵入する	反応進行中に反応器を開放するのを防止するための管理システム（タグ付け）又はインターロックを使用する	B,C)-a)
	系内の酸素濃度の検出により緊急パージ及び／又は遮断を起動する	B,C)-b,c)
	機器を遮断するための遮断弁を設置する	B)-c)
	火災及び爆発抑制システムを設置する	B)-d)
	空気を遮断した供給システムを設置する	B)-a)
	爆発放散口を設置する	B)-d)
禁水性物質が存在する ところに水が侵入する	冷却媒体／加熱媒体としての水の使用を避ける	A)-a)
	反応器の洗浄への水／水蒸気の使用を避ける	A)-a)
	反応器に直接水配管を接続しない	A)-a)
	スクラバーから反応器への水の逆流を防止する	B)-c)
	メカニカルシールの封止液としての水进行避ける	A)-a)
	水との反応性物質を供給する前に貯槽（容器）を洗浄及び乾燥する	C)-a)
	乾燥圧縮ガスを供給する	B)-c)
	事前に代替の不活性ガス供給源が乾燥していることを確認する	C)-a)
	事前に供給する原料が乾燥していることを確認する	C)-a)
	防火要件及び手順を事前に計画する	C)-d)
	本質安全機器を使用する（例：多管式熱交換器の代わりにジャケット付き容器）	A)-a)
	水や水蒸気をユーティリティとして使用する場合，適切な検査・保全計画を実施する	C)-a)

※ リスク低減措置の種類：A) 本質安全対策，B) 工学的対策，C) 管理的対策，D) 保護具の着用
 リスク低減措置の目的：a) 異常発生防止対策，b) 異常発生検知手段，c) 事故発生防止対策，d) 被害の局限化対策

着眼点	リスク低減措置	種類・目的※
間違った物質を反応器に供給する	専用の供給槽と反応器を使用する	A)-a)
	反応原料の識別と品質を二重チェックするための手順を作成する	C)-a)
	原料を正しい順序で供給するため、二重チェックする手順を作成する	C)-a)
	貯槽（又は容器）間の適切な、又は許可された接続を記述した操作手順書を作成する	C)-a)
	配管に適切なカラーコードの表示を取り付ける	C)-a)
	反応原料専用の保管場所／荷下ろし施設を設置する	B)-a)
	専用の接続及び／又は専用の接続継手を使用する	A)-a)
	混合危険物質の接続点を物理的に分離する	A)-a)
	化学物質の特定の組み合わせの添加を防止するためのインターロックを設置する	B)-a)
	可能であれば制御システムでバッチシーケンスを使用する	B)-a)
	反応原料の分析証明書を要求する	C)-a)
	供給する前に分析を行う	C)-a)
前の運転から適切に洗浄／ドレン抜きしていない機器を使用する	洗浄し、準備状態を検証するための操作手順書を作成する	C)-a)
	チェックリストによる検証を実施する	C)-a)
	使用する洗浄溶剤を分析する	C)-a)
熱媒／冷媒の漏洩により反応液等と接触する、腐食生成物等の異物が混入し、反応液等と接触する	反応液と反応しない、又は反応を抑制しない加熱／冷却媒体を使用する	A)-a)
	外部ヒーター／クーラーを使用する	A)-a)
	生じ得る最高温度を適切に考慮した電気加熱を使用する	B)-a)
	漏れた場合にプロセス側への漏れ込みを避けるために低圧の加熱又は冷却媒体を使用する	B)-d)
	反応液がユーティリティに漏れた場合の影響を考慮するとともに、検知手段を講じる	B)-b)
	運転前のジャケット、コイル又は熱交換器の気密／圧力試験手順を作成する	C)-a)
	緊急冷却を設置する	B)-c)
	希釈剤を保有したダンプタンクへ反応液を抜液する	B)-c)

※ リスク低減措置の種類：A) 本質安全対策，B) 工学的対策，C) 管理的対策，D) 保護具の着用

リスク低減措置の目的：a) 異常発生防止対策，b) 異常発生検知手段，c) 事故発生防止対策，d) 被害の局限化対策

着眼点	リスク低減措置	種類・目的※
混合直後には異常がなく ても、生成物が蓄積すると 異常反応の原因となる	異常反応が起こるかを事前に実験室で確認し、発生条件を外した生成条件にする	A)-a)
	フローリアクターを採用する	A)-a)
	小スケールで取り扱う	B,C)-d)
	生成物を除去する	B)-c)
	生成物の分析を定期的実施する	C)-b)

※ リスク低減措置の種類：A) 本質安全対策，B) 工学的対策，C) 管理的対策，D) 保護具の着用

リスク低減措置の目的：a) 異常発生防止対策，b) 異常発生検知手段，c) 事故発生防止対策，d) 被害の局限化対策

(b) 機器構成及びレイアウトについて

着眼点	リスク低減措置	種類・目的※
共用のベントラインで混合危険物質同士が接触する	混合危険物質を同じベントラインへ接続することを避けるよう設計する	A,B)-a)
	爆発抑制システムを設置する	B)-d)
	逆流／蓄積を防ぐようなベントラインを設計する	B)-a)
	ベントヘッドに移送する前にベントラインを事前に洗浄する	C)-a)
	循環ユーティリティシステムの汚染を監視する	C)-b,c)
共用のユーティリティ供給系で、ユーティリティ系の汚染により混合危険物質がプロセス側に侵入する	プロセス側へ混合危険物質を持ち込むような共有ユーティリティ供給ヘッド及び／又はシステムを避けるよう設計する	A,B)-a)
	供給配管への逆流防止装置を設置する	B)-a)
	ユーティリティシステムの汚染を防ぐための適切な検査・保全計画を実施する	C)-a)
	循環ユーティリティシステムの汚染を監視する	C)-a)
共用の機器（配管、ポンプ、スクラバー等）で混合危険物質同士が接触する	混合危険物質を保有する共有装置の使用を回避又は最小限に抑えるよう設計する	A)-a)
	相互汚染を防ぐための混合危険物質間での適切な洗浄手順を実施する	C)-a)
	共用機器へ移送する前に、配管を事前に洗浄又は前処理する	C)-a)
共用の移送系で混合危険物質同士が接触する	共用移送システムでの混合危険物質の使用を回避する	A)-a)
	洗浄手順に従っていることを確認する	C)-a)
	配管の液溜り部を回避する	A,B)-a)
	専用移送システムを設置する	A)-a)
液体が漏洩し、排水溝、堰で混合危険物質同士が接触する	混合危険物質を分離して貯蔵する	A)-a)
	同じ堰内で混合危険物質を貯蔵することを禁止する	C)-a)
	排水システムを分離する	A)-a)
	システムを洗浄する	C)-a)
	着火の可能性を最小化する	A,B,C)-c)
	漏洩の可能性を最小化する	A,B,C)-a)
異なるプロセスに供給する化学物質が近接していることで、誤ったプロセスに当該物質を供給する	貯槽の設置場所を分離する	A)-a)
	プロセスを分離する	A)-a)
	専用の充てん装置を使用する	A)-a)

※ リスク低減措置の種類：A) 本質安全対策，B) 工学的対策，C) 管理的対策，D) 保護具の着用
 リスク低減措置の目的：a) 異常発生防止対策，b) 異常発生検知手段，c) 事故発生防止対策，d) 被害の局限化対策

(c) プロセスベント及びドレンについて

着眼点	リスク低減措置	種類・目的※
スクラバー液が反応器等に逆流する	反応器へのスクラバー液のサイホンを防ぐためにバキュームブレイカーを設置する	B)-a)
	液体を捕集するために、真空源又はスクラバーシステムと反応器の間に空容器を設置する	B)-a)
反応原料等が真空系、スクラバー系に引き込まれる	同伴した液体を捕集するために、真空源又はスクラバーシステムと反応器の間に空容器を設置する	B)-a)
	同じ真空システム又はスクラバーシステムに送られる様々なプロセス流体の混合危険を調査した上で、配管を分離する	B)-a)
	真空源と反応器の間の真空度を監視するとともに、真空度低下時に運転を停止する	B)-b,c)

※ リスク低減措置の種類：A) 本質安全対策，B) 工学的対策，C) 管理的対策，D) 保護具の着用

リスク低減措置の目的：a) 異常発生防止対策，b) 異常発生検知手段，c) 事故発生防止対策，d) 被害の局限化対策

(d) 移送及び充てん機器について

着眼点	リスク低減措置	種類・目的※
運転の融通性を確保するために一時的な接続を行い、誤った物質の送液、誤った容器への充てんを行う	可能な限り常設配管を使用する	A)-a)
	貯槽に出入りするすべての配管に明確な表示を設置する	C)-a)
	適切な操作手順書を作成し、それに基づく訓練を実施する	C)-a)
移送及び充てん機器に、不適切な材質を使用している（配管接続部（フランジ、ガスケット等）の材質を含む）	用途を変更する前に、構造材質の要件と既存の材質を確認する	C)-a)
	パイロット／開発／スケールアップ中に腐食テストピースを使用して検討し、実装置の適切な材質を選定する	B)-a)
汚染物質が混入する可能性がある	使用後に機器を洗浄及び点検する	C)-a)
	混合危険のない材質で設計する	A)-a)
	システムの健全性を維持する	C)-a)
	緊急脱圧システムを設計する	B)-d)
不適切な化学物質を使用し、洗浄不良等で除去していない（除去しきれない）可能性がある	取り扱い物質を配管、ポンプ及び弁に表示する	C)-a)
	一時保管場所を使用する	C)-a)
	バッチシートを基に表示を確認する	C)-a)
	適切な流路弁を設定する	B,C)-a)
	二重チェックシステムを使用する	C)-a)
	操作手順書を作成し、それに基づく訓練を実施する	C)-a)
	物質ごとに異なる梱包を使用する	C)-a)

※ リスク低減措置の種類：A) 本質安全対策，B) 工学的対策，C) 管理的対策，D) 保護具の着用
 リスク低減措置の目的：a) 異常発生防止対策，b) 異常発生検知手段，c) 事故発生防止対策，d) 被害の局限化対策

(e) 計装・制御系について

着眼点	リスク低減措置	種類・目的※
計装系に異物が混入し、誤作動を起こす	フィルタ等の異物除去機器を設置する	B)-a)
	定期的な計器の保全を実施する	C)-a)
検出器（流量計等）の洗浄が不十分となり、混合危険物質同士が接触する	定期的な洗浄を行う	C)-a)
	定期的な保全を行う	C)-a)
	供用前に点検を行う	C)-a)
検出器（流量計等）からの漏洩や検出器の破損により、混合危険物質同士が接触する	耐腐食性の検出器を使用する	A)-a)
	タンクよりも大きい圧力定格の検出器を使用する	A)-a)
	検出器につながる管・ノズルを適切に支持する	B)-a)
	温度計に適切な保護管を使用する	A)-a)
	検出器の必要性を検討する（必要不可欠でない検出器は設置しない）	A)-a)
	筐体の中に計器を設置する	B)-a)
制御ソフトウェアの不具合により、装置が誤作動する	仕様要件、ソフトウェア設計、コーディング、テスト、変更等を厳格に管理する	C)-a)
	不正なソフトウェアアクセスや変更を防ぐためのシステムを導入する	B)-a)
	妥当性が確認された冗長性のあるソフトウェアを使用する	B)-a)
	ソフトウェアに依存しないマニュアル制御を準備する	B)-c)
	基本プロセスシステム（BPCS）から独立した重要アラーム及び安全システムを設置する	B)-c)
	ソフトウェア変更後に、無害な化学物質を用いた確認テストを行う	C)-a)
電源が喪失し、計装・制御系が動作しなくなる	信頼性のある動力源（電源、空気等）を使用する	B)-a)
	制御系をフェイルセーフ設計とする	B)-a)
	計装用空気のバックアップを用意しておく	B)-a)
	無停電電源装置を使用して、正常にシャットダウンする時間、又は信頼できる電源に代替する時間を確保する	B)-a)

※ リスク低減措置の種類：A) 本質安全対策，B) 工学的対策，C) 管理的対策，D) 保護具の着用

リスク低減措置の目的：a) 異常発生防止対策，b) 異常発生検知手段，c) 事故発生防止対策，d) 被害の局限化対策

着眼点	リスク低減措置	種類・目的※
電氣的干渉, 電磁干渉, 電波障害により制御システムが誤動作する	電氣的干渉の影響を最小限にするように計装系の設計, 設置, 選択を行う	A)-a)
	干渉源を除去／隔離する	B)-a)
	定期的に接地を確認する	C)-a)
	適切な避雷を行う	B)-a)
	可搬型の電子機器が使用可能な区域を明示する	C)-a)
調節弁の故障で目的外の物質が混入する	重要な計器は信頼性を高くする	B)-a)
	定期的な検査を行う	C)-a)
	供用前に点検, 校正を行う	C)-a)
	定期的な洗浄を行う	C)-a)

※ リスク低減措置の種類：A) 本質安全対策, B) 工学的対策, C) 管理的対策, D) 保護具の着用

リスク低減措置の目的：a) 異常発生防止対策, b) 異常発生検知手段, c) 事故発生防止対策, d) 被害の局限化対策

(f) 運転作業について

着眼点	リスク低減措置	種類・目的※
(f-1) システム状態の観察段階		
プラント／プロセスごとに表示／配色の規則が異なる	配色のみで識別しない	C)-a)
	適切な表示を使用する	C)-a)
	使用前に原料を確認する	C)-a)
化学物質の識別に商品名を使用することで物質を同定しづらい	明確で一義的な表示規則を使用する	C)-a)
	複数の運転員又は監督者が物質を確認する	C)-a)
	バーコード等を使用する	C)-a)
	専用の一時的保管場所を使用する	C)-a)
同じ物質の異なるグレードのものを使用する	異なるグレードの数を最小化する	A)-a)
	明確で一義的な表示規則を使用する	C)-a)
	複数の運転員又は監督者が物質を確認する	C)-a)
	バーコード等を使用する	C)-a)
	専用の一時的保管場所を使用する	C)-a)
	正常状態からの逸脱に対処する操作手順書を策定する	C)-a)
化学物質に誤った表示や一貫性のない表示をする	明確で一義的な表示規則を使用する	C)-a)
	分析証明書を要求する	C)-a)
	製造で使用する前に各ロットを分析する	C)-a)
	正常状態からの逸脱に対処する操作手順書を策定する	C)-a)

※ リスク低減措置の種類：A) 本質安全対策，B) 工学的対策，C) 管理的対策，D) 保護具の着用

リスク低減措置の目的：a) 異常発生防止対策，b) 異常発生検知手段，c) 事故発生防止対策，d) 被害の局限化対策

着眼点	リスク低減措置	種類・目的※
(f-2) 仮説の選択・検証段階		
当該バッチ操作はまれにしか実施しない	各プロセスに対して詳細な操作手順書を作成する	C)-a)
	運転員の訓練の際に詳細な操作手順書を使用する	C)-a)
	製造計画実施前に、プロセスの手順とプロセスに関連する危険性について運転員と確認する	C)-a)
	再訓練を実施する	C)-a)
	まれなバッチ操作を処理するための操作手順書を作成する	C)-a)
	技術スタッフにより支援する	C)-a)
(f-3) 目標・手段の選択段階		
間違った物質を反応器に供給する	正常状態からの逸脱に対処する操作手順書を策定する	C)-a)
	明確な物質表示を実施する	C)-a)
	操作手順書を作成する	C)-a)
	複数の運転員が確認する	C)-a)
	物質ごとに異なる包装を使用する	C)-a)
	バーコード等を使用する	C)-a)
	専用の一時的保管場所を使用する	C)-a)
	混合危険物質について、保管場所を分離する	B)-a)
操作手順書を補足する「参考手順」を使うことで、運転員が間違った手順を選ぶ、又は「参考手順」を使うのを忘れる	重要な操作手順を原本に組み込む	C)-a)
	操作手順書に基づく訓練を実施する	C)-a)
	製造記録書等に「参考手順」を組み込み改訂する	C)-a)

※ リスク低減措置の種類：A) 本質安全対策，B) 工学的対策，C) 管理的対策，D) 保護具の着用

リスク低減措置の目的：a) 異常発生防止対策，b) 異常発生検知手段，c) 事故発生防止対策，d) 被害の局限化対策

着眼点	リスク低減措置	種類・目的*
(f-4) 手段の実行段階		
交替勤務引継時のコミュニケーションエラーにより、タンク内等の物質が把握されていない	交替勤務引継時に責任を安全に移行できるように、コミュニケーション（口頭及び書面）が十分であることを確認する	C)-a)
	文書で承認する	C)-a)
	交替勤務引継時の変更は書面でコミュニケーションする	C)-a)
	逸脱が生じた場合、その内容を製造記録書等に記録する	C)-c)
	次の交替勤務員が設備・装置の状態を確認する	C)-a)
	交替勤務中に完了できない場合、又は次の交替勤務時間まで延長して実行できない場合は、特定の操作手順の開始を禁止する	C)-a)
	操作手順を自動化する	B)-a)
同じ機器での複数の操作の実行、又は複数の機器で同じ操作を実行することで、正常な操作と異なる操作を行う	実行中の操作を明確に表示する	C)-a)
	パネルへ操作名を表示する	C)-a)
	表示灯を設置する	B)-a)
運転員が操作手順を間違える、又は必要な操作をし忘れる	重要な操作手順は複数人で確認する	C)-a)
	重要な手順が適切な順序で実行されることを確認するためのインターロックを設置する（インターロックの変更には許可が必要）	B,C)-a)
	操作手順を自動化する	B)-a)
必要な手順の実行が遅れる	操作手順を自動化する	B)-a)
	重要な操作手順は複数人で確認する	C)-a)

※ リスク低減措置の種類：A) 本質安全対策, B) 工学的対策, C) 管理的対策, D) 保護具の着用

リスク低減措置の目的：a) 異常発生防止対策, b) 異常発生検知手段, c) 事故発生防止対策, d) 被害の局限化対策

着眼点	リスク低減措置	種類・目的※
(f-5) 人間工学的観点		
周辺の照明が表示等の配色に影響を及ぼす	配色のみで識別しない。他の識別手段と組み合わせる	C)-a)
計装パネルに類似の操作スイッチが接近して設置されている	パネルの操作スイッチを適切な配置に変更する	A)-a)
計装の Tag No. が誤解されやすい（類似の）数字になっている	誤操作に配慮して計装の Tag No. を決定する（安易な変更は誤操作を招くため、Tag No. の変更には許可が必要）	A)-a)
(f-6) その他の観点		
処理に可搬型装置や一時的な接続を使用する	専用の接続と継手を使用する	A)-a)
	システム／操作手順書の修正／変更に対して変更管理を適用する	C)-a)
	予想される耐用年数に準じてホース／継手を交換する	C)-a)
	必要に応じて、接続する前に複数の運転員／監督者が確認する	C)-a)
	供用前に接続箇所を圧力試験する	C)-a)
	可搬型装置／一時的な装置を使用する前にハザード分析する	C)-a)
	設置／接続のための安全な操作手順を実行する	C)-a)
	迅速接続継手に対して二重固定を使用する	B)-a)
	フレキシブルホースの使用を最小化する	A)-a)
	規格化された／専用の接続継手を使用する	A)-a)
異なるプロセスに供給する化学物質が近接していることで、誤ったプロセスに当該物質を供給する	貯槽の設置場所を分離する	A)-a)
	プロセスを分離する	A)-a)
	専用の充てん装置を使用する	A)-a)

※ リスク低減措置の種類：A) 本質安全対策，B) 工学的対策，C) 管理的対策，D) 保護具の着用

リスク低減措置の目的：a) 異常発生防止対策，b) 異常発生検知手段，c) 事故発生防止対策，d) 被害の局限化対策

着眼点	リスク低減措置	種類・目的※
設備・装置の日常的な分解・組み立てを行う際に、組み立てを間違えたり、異物が混入したりする	槽内作業手順書、施錠／札掛手順書、閉止手順書、洗浄手順書、配管締切手順書、組立及び解体手順書を作成，規定化，及び実施する	C)-a)
	使用前に設備・装置を圧力試験する	C)-a)
	開放前に安全を確認するためのインターロック手順書を作成する	B,C)-c)
	適切な保全手順書を作成し，実施する	C)-a)
	簡単に組立／解体できる設備・装置を選択する	A,B)-a)
	組立／解体のための正しい工具を使用する	C)-a)
	必要に応じて，複数人で確認する	C)-a)
	セルフシール継手を使用する	B)-a)
	フィルタ交換時等，定期的にガスケットを交換する	C)-a)
	起動前に，非危険物（水）を使った試運転を実施する	C)-a)
	チェックリストを使用する	C)-a)
バッチ運転中に行うべき様々な作業に対して，運転員の高度な訓練が不足しており，操作を間違える	より頻繁な訓練／再訓練を実施する	C)-a)
	運転開始前の訓練を実施する	C)-a)
	訓練頻度を決定する際に運転員の熟練度を考慮する	C)-a)
	不具合からの復旧について，What-if 分析 ⁸⁹ ，KYT ⁹⁰ 等による運転員の訓練を実施する	C)-a)
運転員により頻繁に行われる操作があり，操作を間違える	操作を自動化する	A)-a)
	詳細な操作手順書を作成する	C)-a)
	定期的な訓練を実施する	C)-a)
	作業設計や作業分析を実施する（運転員の過負荷の防止）	C)-a)

※ リスク低減措置の種類：A) 本質安全対策，B) 工学的対策，C) 管理的対策，D) 保護具の着用

リスク低減措置の目的：a) 異常発生防止対策，b) 異常発生検知手段，c) 事故発生防止対策，d) 被害の局限化対策

⁸⁹ 「もし・・・であるならば」等の正常状態と異なった事象が発生したことを想定した質問を繰り返し，解析対象の問題点等を洗い出し，リスク低減措置を検討する手法のこと。

⁹⁰ 作業等における危険要因とそれが引き起こす現象について，状況を示したイラスト等を使用して，小集団で話し合い，危険要因を洗い出し，重点実施項目を検討する手法のこと。

着眼点	リスク低減措置	種類・目的※
運転員の経験のないプロセスで運転 操作を行い、操作を間違える	新しいプロセスのプロセスハザード分析に運転員を参加させる	C-a)
	操作手順を分析する	C)-a)
	各製造計画を実施する前に運転員と技術スタッフで審査する	C)-a)
	適切な訓練を実施する	C)-a)
	新しいプロセスを最初に運転する際、又は頻度の低い製造計画を実施する前に、技術スタッフが支援する	C)-a)
	熟練運転員と経験の浅い運転員を組み合わせ、二人一組で運転する	C)-a)
	運転開始前に非危険物（水）による試運転を実施する	C)-a)
反応途中のバッチ、又はオフスペックのバッチの廃棄等の際に、混合危険物質同士が接触する	運転員に対し、必要な時の技術支援を提供する	C)-a)
	規格外の製品／廃棄物等が発生した場合に化学的特性と潜在的な影響を理解する	C)-a)

※ リスク低減措置の種類：A) 本質安全対策，B) 工学的対策，C) 管理的対策，D) 保護具の着用
 リスク低減措置の目的：a) 異常発生防止対策，b) 異常発生検知手段，c) 事故発生防止対策，d) 被害の局限化対策

(g) その他の観点

着眼点	リスク低減措置	種類・目的※
漏洩した液体が周辺の物質や容器と接触する	液体の漏洩を防止する	B)-a)
	漏洩が想定される範囲で、混合・接触すると危険な状態となる物質を使用しない	A)-a)
	漏洩検知装置を設置する	B)-b)
	漏洩した物質を速やかに除去する	C)-c)
相互接続した配管が開いたままになっている	相互接続を使用せず、独立した配管を使用する	A)-a)
	双方の配管に弁を設置する。頻繁に使用するものは二重弁を設置し、間にパージ弁を設置する	B)-a)
	送液する際に双方の配管の一方の弁が閉じていることを確認する	C)-a)
間違った物質又は間違った濃度の物質を供給元から受け入れる	受け入れ時に検査成績書を確認する	C)-a)
	受け入れ時に分析を行い、物質及び濃度を確認する	C)-c)
	使用前にラベルを確認する	C)-c)
廃棄物を同じタンク又は容器に入れる	廃棄物の分析・試験を行い、混合・接触すると危険な状態となる物質は別容器に保管する	C)-a)
	タンクに温度計・圧力計等を設置し、温度・圧力等を監視する	B,C)-b)
	タンクに爆発放散口を設置する	B)-d)
廃液をプラントの排水処理設備に入れる	廃液の管理手順を作成し、遵守する	C)-a)
	排水処理システムを定期的に洗浄する	C)-c)
	排水の分析を行い、混入物を検知する	C)-b)
外部応力により、隣接したタンク又は容器が同時に、又は続けて壊れる（地震、クレーン操作、火災、爆発等）	壊れたタンク・容器及びその破片が隣接するタンク・容器を破壊しないように、タンク・容器同士の距離をとって設置する	B)-a)
	混合・接触すると危険な状態となる物質は、混合・接触しないように離れたタンク・容器に保管する	C)-c)

※ リスク低減措置の種類：A) 本質安全対策，B) 工学的対策，C) 管理的対策，D) 保護具の着用
 リスク低減措置の目的：a) 異常発生防止対策，b) 異常発生検知手段，c) 事故発生防止対策，d) 被害の局限化対策

第5章 「シナリオに対するリスクの見積りと リスク評価」に関する参考情報

安衛研手法では、「不適切な作業・操作」，「設備・装置の不具合」，「外部要因」を想定して引き金事象を特定し，その引き金事象から火災・爆発等の発生までのシナリオを同定する．その同定されたシナリオに対して，リスクの見積り（危害の重篤度及び危害発生の頻度の検討）及びリスク評価（リスクレベルの決定）を行うが，この際に作業の種類や内容，作業条件等は，業種や事業場・作業内容等により異なるため，一般的なリスクアセスメントに関する説明書や資料等で紹介されている手法やツールで設定されている基準をそのまま適用するのは適切でない場合がある．例えば，極端に実施頻度が低い作業や極めて危険な化学物質を取り扱う作業に対して，既存の手法やツールで用いられている点数化やレベル分けと同じ基準で見積るのは適切ではない．既存の基準はあくまで例であり，本来，リスクの見積り及びリスク評価のための基準は，各事業場や各プラントで独自に決めるものである．また，決定するには解析チーム⁹¹内で合意できる値を採用すべきである．

リスクの見積り及びリスク評価のための基準の検討の際に参考になる情報として，リスクの見積り及びリスク評価の基準の例及び基準が掲載されている文献を示す．リスクの見積り及びリスク評価の具体的な事例については，それぞれの文献を参照されたい．また，暴走反応を考慮するにあたって，解析対象とする反応での熱平衡破綻の可能性の考え方及び熱平衡破綻により生じる設備等破壊の可能性の考え方を示す．さらに，危害の重篤度を見積るために事故影響（放射熱，爆風圧，毒性ガス濃度）を定量的に評価する際の参考として，事故影響（放射熱，爆風圧，毒性ガス濃度）の指標を添付資料5に示す．

5.1 リスクの見積り及びリスク評価の基準の例

安衛研手法におけるリスク見積りのための「(a)危害の重篤度」，「(b)危害発生の頻度」，及び「(c)リスクレベル（Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ）」の基準の例⁹²を表5-1に示す．リスクの見積りの結果を基に，許容可能なリスクレベル（例えば，リスクレベルⅢとなるシナリオをなくすこと）を達成しているかどうかを判定する（リスクを評価する）．

⁹¹ ii ページの「リスクアセスメント等の実施者」を参照のこと．

⁹² 詳細は，労働安全衛生総合研究所技術資料，プロセスプラントのプロセス災害防止のためのリスクアセスメント等の進め方，JNIOOSH-TD-No.5 (2016)を参照のこと．

表 5-1 安衛研手法におけるリスク見積りのための基準例

(a) 危害の重篤度

危害の重篤度（災害の程度）	災害の程度・目安
致命的・重大（×）	<ul style="list-style-type: none"> ・死亡災害や身体の一部に永久的損傷を伴うもの ・休業災害（1 ヶ月以上のもの）、一度に多数の被災者を伴うもの ・事業場内外の施設、生産に壊滅的なダメージを与える (例：復旧に1年以上かかる)
中程度（△）	<ul style="list-style-type: none"> ・休業災害（1 ヶ月未満のもの）、一度に複数の被災者を伴うもの ・事業場内の施設や一部の生産に大きなダメージがあり、復旧までに長期間を要するもの (例：復旧に半年程度かかる)
軽度（○）	<ul style="list-style-type: none"> ・不休災害やかすり傷程度のもの ・事業場内の施設や一部の生産に小さなダメージがあるが、その復旧が短期間で完了できるもの (例：復旧に1 ヶ月程度かかる)

(b) 危害発生頻度

危害発生頻度	発生頻度の目安
高い又は比較的高い（×）	<ul style="list-style-type: none"> ・危害が発生する可能性が高い (例：1年に一度程度、発生する可能性がある)
可能性がある（△）	<ul style="list-style-type: none"> ・危害が発生することがある (例：プラント・設備のライフ（30～40年）に一度程度、発生する可能性がある)
ほとんどない（○）	<ul style="list-style-type: none"> ・危害が発生することはほとんどない (例：100年に一度程度、発生する可能性がある)

(c) リスクレベル

		危害の重篤度		
		致命的・重大 (×)	中程度 (△)	軽度 (○)
危害発生 の 頻度	高い又は比較的高い (×)	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ
	可能性がある (△)	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ
	ほとんどない (○)	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ

(d) リスクレベルの説明

リスク レベル	優先度	生産開始への留意点
Ⅲ	直ちに解決すべき、又は重大なリスクがある。	措置を講ずるまで生産を開始してはならない。 十分な経営資源（費用と労力）を投入する必要がある。
Ⅱ	速やかにリスク低減措置を講ずる必要のあるリスクがある。	措置を講ずるまで生産を開始しないことが望ましい。 優先的に経営資源（費用と労力）を投入する必要がある。
Ⅰ	必要に応じてリスク低減措置を実施すべきリスクがある。	必要に応じてリスク低減措置を実施する。

その他、これまでに公開されている文献で、リスクの見積り及びリスク評価の基準の例が記載されているものを下記に示す。

- ・ 中央労働災害防止協会，化学物質による爆発・火災を防ぐ，pp. 108-152，中央労働災害防止協会（2018）。
- ・ 中央労働災害防止協会，テキスト 化学物質リスクアセスメント，pp. 131-169，中央労働災害防止協会（2016）。

これらの文献には、「危険源要素発生の可能性 (P)」、「異常現象が発生する頻度 (F)」、「影響の重大性 (S)」に関してのリスクを見積り、それぞれの評点を乗算したリスクポイントの大きさからリスクレベルを判定する。それらのリスクの見積り及びリスク評価の基準の例が記載されている。

- ・ 高圧ガス保安協会，リスクアセスメント・ガイドライン (Ver. 1) (平成 27 年 3 月)，
 - ・ 高圧ガス保安協会，リスクアセスメント・ガイドライン (Ver. 2) (平成 28 年 2 月)
- これらの文献には、引き金事象の発生頻度と安全対策による低減率、事故の起こりやすさ（事象の発生頻度）の解析方法及び分類例、事故の影響度の分類例、発生頻度及び影響度に基づいたリスクレベルの判定基準の例が記載されている。

- ・ 危険物施設における火災・流出事故に係る深刻度評価指標について（消防危第 203 号，平成 28 年 11 月 2 日）
- ・ 危険物施設における火災・流出事故に係る深刻度評価指標の一部改正について（消防危第 287 号，令和 2 年 12 月 7 日）

上記通知の中で，重大事故や軽微な事故といった深刻度に応じた事故の分類を行うための深刻度評価指標が示されている．当該指標は，危害の重篤度を見積るための基準設定の参考にすることができる．

5.2 暴走反応での熱平衡破綻の可能性及び熱平衡破綻により生じる設備破壊等の可能性の考え方

暴走反応を防止するためには、温度上昇の元となる反応熱を抑制するための合成ルートの変更、反応原料の蓄積を防止するためのセミバッチプロセスの採用、反応液の温度上昇を抑制するための溶媒の選定及び還流器の設置等の安全対策を実施する。しかし、図 3-2 に示すように、様々な原因により発熱速度及び冷却速度は変わり得る可能性があり、少なくとも図 3-2 に示す典型的なシナリオは検討する必要がある。

一方、既存のリスク低減措置が機能した場合の各シナリオに対するリスクの見積りと評価を実施する際には、同定されたシナリオについて、上記の安全対策が機能した場合の危害発生の頻度及びそれによる危害の重篤度を検討することとなる。以下、解析対象とする反応での熱平衡破綻の可能性の考え方及び熱平衡破綻により生じる設備破壊等の可能性の考え方について示す。

・ 解析対象とする反応での熱平衡破綻の可能性の検討

反応の発熱と反応系からの放熱のバランスが崩れる原因としては、発熱速度の増加又は冷却速度の低下がある。3.1 節 表 3-2～表 3-4 のデータを用いて、プロセスにおける発熱速度と冷却速度を評価し、発熱速度と冷却速度を比較することで、熱平衡破綻の可能性を検討する。発熱速度が冷却速度を上回っていれば熱平衡は破綻する。発熱速度と冷却速度の差が小さければ、熱平衡破綻が起こりやすい。一方、冷却速度が発熱速度を大きく上回れば、熱平衡破綻が起こりにくい。ただし、図 3-2 のシナリオモデルに示すように、様々な原因により発熱速度及び冷却速度は変わり得ることに留意する。

・ 熱平衡破綻により生じる設備破壊等の可能性の検討

解析対象とする反応の反応熱量⁹³、及びそれに比例する断熱温度上昇は、暴走反応として制御不能なエネルギー放出による設備等破壊の可能性を示す端的な指標であり、表 5-2 に示す評価基準の例が示されている。評価基準で「高（壊滅的、危機的）」となる反応については、図 3-2 (1/8)に示すシナリオが起こる可能性は高い。一方、「低」となる反応については図 3-2 (1/8) 中の「反応器破損」が起こる可能性が低くなる。例えば、トルエンの硫酸によるスルホン化反応の反応熱量は 100 °Cにおいて約 40 kJ/mol-トルエン⁹⁴（約 440 J/g-トルエン）であるが、熱平衡破綻が生じると仮定すると、表 5-2 によれば暴走反応による設備破壊等の可能性は高いと考えられる。

⁹³ 脚注 46 (p. 21) を参照のこと。

⁹⁴ 宮田他，安全工学，37(3)，pp. 164-171 (1998)から引用。

表 5-2 暴走反応による設備破壊等の可能性に関する評価基準の例⁹⁵

簡易評価	拡張評価	断熱温度上昇 (K)	反応熱量の程度 (kJ/kg)
高	壊滅的	> 400	> 800
	危機的	200 – 400	400 – 800
中	中程度	50 – 200	100 – 400
低	無視し得る	< 50 で圧力発生なし	< 100

⁹⁵ 三宅淳巳監訳，化学プロセスの熱的リスク評価，丸善出版，p. 65，表 3.1 (2011) を抜粋（ただし，「簡易評価 中」における断熱温度上昇を，誤記と思われる 50-100K から 50-200 K に修正）．この評価基準は，ファインケミカル工業に一般的に用いられる指標である．すなわち，合成反応等の反応器内での反応を対象としている．反応性物質等の熱分解に対しては，別の指標を用いる必要がある（3.1 節（p. 19）に示した文献 6), 13)等を参照のこと）．

第6章 おわりに

火災・爆発等の災害防止及び災害による影響の低減のためには、リスクアセスメントやその結果に基づくリスク低減措置の検討・実施が必要であるが、取り扱う物質の化学反応に関する基礎知識や、設備・プロセス条件の変更等の情報の更新と共有が的確なリスクアセスメント等への課題となっていることが指摘されている。そのため、リスクアセスメント等を的確に実施するために、災害につながるような反応危険を理解した上で、設備・装置の不具合や不適切な作業・操作を考慮して災害に至るシナリオを同定し、各シナリオについてリスク低減措置を検討・決定することが望まれる。

本資料は、医薬を含むファインケミカルプラントで多く採用されているバッチ／セミバッチプロセスを対象として、火災・爆発等を防止するためのリスクアセスメント等の進め方に沿って、暴走反応及び混合危険に関する検討を行う際に参考となる情報、典型的なシナリオや、シナリオを検討する際の着眼点、リスク低減措置の例等の具体的な情報をまとめた。また、暴走反応及び混合危険に関する危険性を特定する際に参考となる支援ツールやデータベース、災害事例を紹介した。これらの情報を活用することによって、火災・爆発等を防止するためのリスクアセスメント等の進め方に沿ったリスクアセスメントの実施の手助けになる。本資料に示した情報は典型的な事例を示したものであり、それぞれのプラント・プロセスに応じて適宜修正し、網羅性を高めていくことが求められる。そのような取り組みを繰り返し行っていくことによって、少しずつでもリスクを下げていくことが、安全を担保する上で重要なことである。

添付資料 1 爆発火災データベースにおける暴走反応による火災・爆発災害事例⁹⁶

西暦	死亡	負傷	概況
2007	0	0	化学繊維工場の作業室において、事業場の移転のため不要薬品の廃棄処分と機器や器具類の片付けをしていた。不要な自己反応性物質（約 500 g）を不活性化させるため、溶媒に溶かしスチーム乾燥器で加熱処理をしていた。反応に伴う窒素ガス発生が緩やかになったので監視を止め、作業室から退出中、爆発が起きて作業室の窓ガラス 50 枚が破損した。原因は、加熱していたビーカーからガスが急激に発生し、溶媒の蒸気が爆発したと推定された。
2007	0	3	化学プラントにおいて、協力会社の労働者が不純物の除去のため、まず反応器に中和剤となる水酸化カリウムを約 3 t 入れた。次に原料の粗 5 フッ化プロパノールを投入中、約 2 t（予定の約 25%）を入れた時にポンプが故障し投入を中断した。その後、突然反応器が爆発し、別棟の実験室にいた 3 名が負傷（不欠）した。工場周辺の民家 22 棟に被害があった。原因は、原料中の不純物であったニトロエタンが水酸化カリウムと反応し、不安定物質（ニトロエタンカリウム塩）を生成して蓄熱し、爆発したと推定された。
2007	0	1	化学工場において、1,2-エポキシオクタンを製造していた。反応後の溶液を水洗後、油層（製品）と水層（廃水）を分離した。水層を蒸留受槽に移したところ、槽内温度が急激に上昇して破裂した。飛散した蒸留受槽が約 40 m 先のヘキサンタンクに衝突し、ヘキサンが漏出して火災となった。蒸留受槽の異常に対処中の 1 名が飛散物により負傷した。原因は、水層中の過酸化水素濃度が高く、これとギ酸が蒸留受槽内の錆に接触して急激に分解ガスを発生したためとみられる。
2004	0	4	4 フッ化エチレン精製設備において、停電による緊急停止があり、各所の点検を終えて運転再開作業中、2 本の精留塔で爆発、火災が発生し、半径 500 m に飛散物が生じて、社内外の 4 名が負傷した。原因は、精留塔を連結しているポンプの冷却不足により、ポンプ内で気化した 4 フッ化エチレンが、重合禁止剤供給ポンプの流量不安定が重なり、自己分解反応（小爆発）を起こし、配管を通じて伝播し 2 本の精留塔が爆発して破壊したと推定された。

⁹⁶ 労働安全衛生総合研究所、爆発火災データベース
https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/houkoku/houkoku_2020_05.html から、暴走反応による火災・爆発災害事例を検索、抽出した。

西暦	死亡	負傷	概況
2000	4	11	化学工場のヒドロキシルアミンの再蒸留工程において、設備の運転を停止し、真空ポンプのオイルを交換した。設備の再起動から約 40 分後、ヒドロキシルアミンが爆轟を起こし、再蒸留設備は跡形もなくなり、工場建屋や事務所等も破損。工場周囲の店舗や民家等にも被害があった。化学反応の原因としては、鉄イオン、熱発火、異物の噛み込み、結晶の析出が挙げられたが、特定はされなかった。
2000	0	0	染料中間体の製造工場において、半製品のジニトロ- <i>p</i> -クレゾールを製造する硝化機でのニトロ化工程の反応温度が設定値を超え、原料の滴下を停止したが、さらに温度は上昇し爆発した。原因は、粘度の変化等の要因で反応熱に冷却が追いつかずに内部温度が上昇し、発生したガスに非常放散ラインと NO _x ラインの能力が対応できずに最終的には分解爆発したもの。
1996	0	1	農薬製造工場の中間体の濃縮工程において、送液ポンプの故障修理後に内容物を送液することを失念していたために、中間受槽内に放置中の農薬中間体（ジメチルチオホスホルアミド）が過熱されて自己分解し、約 12 時間後に受槽が爆発した。中間受槽の破片が最大 13 m 飛散し、約 10 m 先の計器室の窓ガラスがすべて破損して、近くにいた作業者が被災した。
1994	0	0	医薬品中間体を合成し、製品を遠心分離した後のろ液から溶媒を蒸留により回収した。蒸留残渣を蒸留釜内に残したままで帰宅したところ、翌日早朝に爆発し火災となった。工場が全壊した。原因は、2 基ある蒸留用熱媒加熱用ヒーターの電源のうち 1 つを切り忘れたために蒸留釜内の残渣が加熱され続けて溶媒が留去され、残渣が自己発熱分解し、爆発を起こしたものと推定された。
1992	0	0	N,N-ジエチル- <i>m</i> -ニトロアニリンの合成中、温度が下がり固化して攪拌機が止まったため、スチーム加熱したが回らず、内容物を溶解しようと残りのジエチル硫酸を投入した。反応熱による昇温のため水冷却したが、昇温が抑えられなくなり、じきに反応釜からガスが噴出し、作業員避難後に爆発し、反応釜の蓋が吹き飛び、内容物が噴出した。原因は、過負荷によるヒューズだけではなく配線も断線して攪拌不能であるのに、多量の第 2 成分を投入し反応が暴走したため。
1992	0	3	反応槽にてセカンダリーブチルリチウムを合成中に破裂板が破裂し、槽内温度が低下したのでこれを交換中、槽内溶液の沸騰を感じたので避難した直後、金属リチウムとシクロヘキサンが噴出して着火し、3 名が被災した。原因は、温度センサーの位置が悪く、温度が低めに表示された結果、過剰の塩化ブチルが槽内に蓄積し、ある時点で急激に反応を始め、その後も投入が続いたので発熱反応が継続したためと思われる。

西暦	死亡	負傷	概況
1990	0	0	セラミックスコンデンサー用の原料転換の製品テスト中、異常反応により、硝酸アンモニウムが大量に発生し、付近一帯が白煙に覆われた。
1989	0	0	スチレンモノマー用重合禁止剤の製造工程において、温水式乾燥機に製品を入れて乾燥後、窒素を充てんして静置中、突然乾燥機のマンホールの蓋が飛び、噴出した内容物が静電気か蓋が飛散した時の衝撃火花等によって着火爆発し、プラントの一部を破壊した。原因は、製品が酸ないしアルカリ共存下では発熱的に重縮合を起こしやすく、作業員がこの点を十分に認識してなく、前回の乾燥機の洗浄後のアルカリ除去が不十分だったためと思われる。
1988	0	27	薬品工場において、N-ニトロソ-N-メチル尿素の合成後、100 g ずつ 51 のポリ袋に封をせずにに入れて冷蔵庫に保管中、扉下部から白煙が漏れているのに気付いたが、やがて発火し建物が全焼した。原因は、除去不十分の硫酸が水分蒸発により濃縮され、また製品の乾燥品は特に不安定であるので、発熱反応が生じ自然発火したためと推定された。
1986	0	0	工場内の合成反応工程で、常圧反応槽にニトロフェニルヒドラジンを仕込み、水加ヒドラジンの滴下を開始した。昼食後、温度が 124 °C になったので滴下を中止したが昇温し続け、手当のため現場を離れたところ、大爆発を起こし、建屋が全壊した。原因は、過去 2 回の約 2 倍を仕込んだため、蓄熱効果が増し昇温傾向が強まったにもかかわらず、分解危険を知らず、冷却操作を行わなかったため。事故後の測定により暴走反応を起こすことが確認された。
1984	0	0	製造工室でのグリシジルアニリンの合成工程において、クロロヒドリン化物に水酸化ナトリウムを加えて中和してから真空蒸留後、製品受槽に保管中、槽が突然爆発した。原因は、中和の水酸化ナトリウム量が錯誤により不足したため中和不完全となり、残存したクロロヒドリン化物が蒸留時に加熱され、静置中に熱分解が進行して蓄熱し、分解暴走反応を起こしたものと推定される。
1983	0	3	研究所実験室でアミノ酸中間体（ニトロ酢酸メチル）の有機合成化学実験のため、ドラフトチャンバー内において 5 リットル 4 ロフラスコを用いて反応後、攪拌を止めて反応液をドライアイスで冷却していたところ、約 5 分後に 4 ロフラスコが破裂し、ドラフトチャンバーの前面ガラスの破片で周囲の 3 名が負傷した。原因は、攪拌停止中で中心部の温度は高く、反応生成物が急激な分解反応を起こしたものと考えられる。

西暦	死亡	負傷	概況
1980	0	3	5-クロロチアジアゾール（5CT）と液体アンモニアから 5-アミノチアジアゾール（5AT）を製造する工程において、反応器の圧力が 15 気圧を超えたので手動に切替え、圧力調整弁の調整及び 5CT 供給の停止を行った。計器室に戻り反応圧力を見ると異常に高いので、アンモニアの供給を停止すべく現場に戻り、しばらくして反応器への 5CT 配管が分解反応によって爆発した。配管が開裂してバルブや配管が 3～10 m 飛散した。原因は、バルブ閉止で閉塞状態となって昇温昇圧が続き、ついには 5AT の分解爆発が起きたとみられる。
1980	0	0	土壌殺菌剤（ペンタクロロニトロベンゼン）の製造工場内において、定期修理後のスタートアップ時に塩素の装入系統でヒューズが飛び、装置が停止した。修理専門業者が点検修理を行い、運転を再開してから約 13 時間後、反応工程の塩化反応器が突然爆発した。塩化反応器が大破して反応器のカバーが約 30 m 飛散した。スレート屋根と鉄骨が破損した。原因は、修理作業の際、修理作業者が気付かぬ間に冷却水のスイッチに接触して冷却水が止まってしまい、塩化反応器内の反応がそのまま継続されたため暴走反応が起こり、爆発したと推定された。
1976	0	1	化薬工場のニトログリセリン、ニトログリコールの製造工程において、硝化反応開始準備中、操作室の硝化酸圧力タンクレベルが異常に低下した。タンクヤードでタンク、弁、配管等を点検後、圧力タンクレベルが規定に達したので硝化反応作業を開始した。その直後、同タンクのレベル低下警報が鳴り、送給停止操作を開始したが冷却器が爆発した。原因は、硝化酸供給系統の正常復帰を確認せず、硝化作業を開始したため暴走反応が起きたとみられる。
1974	0	1	医薬品製造工程の排液から硫酸ヒドロキシルアミンを回収するため、実験室において反応蒸留器に排液と希硫酸を仕込み、反応、冷却、減圧濃縮をした。加熱を停止し減圧下で 30 分放置後、内容物がゼリー状なので再加熱した際、内部で音がした後に爆発し反応器上部が吹き飛んだ。工場の屋根も吹き飛んだ。減圧濃縮中に反応器内壁にメチルイソブチルケトンオキシムが付着し硫酸とともに加熱されたため異常反応（ベックマン転移）が生じ、この反応による高温で硫酸ヒドロキシルアミンが分解発火したと推定される。
1973	0	9	工場内において、メタノールに苛性ソーダを溶解し、これに <i>o</i> -ニトロクロロベンゼンを加えながら攪拌して <i>o</i> -ニトロアニソールを製造する工程で、苛性ソーダ溶解時に攪拌機モーターが故障したが、そのまま <i>o</i> -ニトロクロロベンゼンを仕込んだ。このあとモーターの修理を終え攪拌の再開をしたところ反応が急に進み、反応器内の温度・圧力が上昇し、安全弁から噴出した内容物が静電気により着火、爆発した。

西暦	死亡	負傷	概況
1972	0	0	工場内において、中間染料製造のため混酸タンクからパイプで硝化槽へ連絡している酸を送るパイプの途中についているバルブを閉め忘れたため、硝酸が過剰に流れこみ、そのためナフタレンスルホン酸のニトロ化工程中で異常反応が生じ、内圧が上昇して硝化槽が爆発した。
1971	0	1	研究所の実験室において、ドラフトチャンバー内でストロンチウムの定量分析作業中、ビーカーにエタノールを加える際に誤って加えすぎたので、加熱し蒸発濃縮を繰り返したところ、どろどろした状態になり過熱気味になったので、ヒーターからおろして台上に置いた瞬間爆発した。原因は、蒸発濃縮を繰り返したため、爆発性化合物か、爆発性混合物が生じ、衝撃で爆発したものらしい。
1970	4	15	硝酸グアニジンの製造工場内において、硝酸アンモニウムとジシアンジアミドを反応槽に仕込んで硝酸グアニジンの製造を開始したところ、突然反応槽が爆発した。原因は、反応工程を自動化した直後で温度制御機器と攪拌機のバランスがとれず、溶融していない熱せられた原料を無理に攪拌し、また温度制御系統に故障が生じ、高温で鋭感性となった硝酸アンモニウムが何らかの原因で化学反応を起こし爆発したものと推定される。

添付資料 2 暴走反応のシナリオモデル（第 3 章 図 3-2～図 3-4 の統合版）

差し込み資料を参照のこと．

添付資料 3 シナリオモデル及びシナリオ整理表の読み方

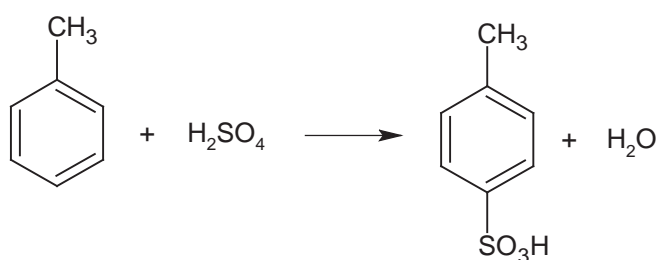
第3章 図 3-2～3-4 に示したシナリオモデル及び表 3-5 に示したシナリオ整理表の読み方を、事例を用いて説明する。

(1) 事例の概要

プロセス・反応の概要

第3章 図 3-1 で示したプロセスを想定する。

トルエンをスルホン化し、*p*-トルエンスルホン酸を製造する。



スルホン化反応の代表的な反応エンタルピーは-150 kJ/mol（スルホン化の反応試剤やその濃度によって-150～-60 kJ/mol）⁹⁷，CHETAH Ver. 8.0 による計算値（物質は気相と仮定，100 °C における値）で-62 kJ/mol，既往の研究におけるトルエンの硫酸によるスルホン化の反応エンタルピーは 100 °Cにおいて約-40 kJ/mol⁹⁸であり，発熱反応である。

(2) シナリオモデルの読み方

ここでは、攪拌機の不具合に関する部分について説明する。シナリオモデルで関係する部分を抜粋して図 A3-1 に示す。

まず、攪拌機に不具合が生じる原因として、「攪拌機故障・誤作動」、「攪拌機誤操作」がある（下図の一番下の部分）。それらからシナリオが始まり、「攪拌不良」となる。

「攪拌不良」のため「混合不具合」となる。「混合不具合」は、以下のように、「発熱速度増加」と「冷却速度低下」双方の原因となる。

- ・ 「混合不具合」により、「反応原料蓄積」、「ホットスポットの生成」が生じる。また、「二相分離」の後、「攪拌機の復旧」があることによって、「発熱速度増加」となる。
- ・ 「混合不具合」により、反応器内の熱流動が変化し、「冷却速度低下」となる。

「発熱速度増加」又は「冷却速度低下」が生じることで、「熱平衡破綻」となる。

太線を確認すると、「攪拌機誤操作」による「冷却速度低下」で熱平衡が破綻するシナリオが過去の事例で多く見られたものであることが分かる。

⁹⁷ 三宅淳巳監訳，化学プロセスの熱的リスク評価，丸善出版（2011），p. 37 から引用

⁹⁸ 宮田他，安全工学，37(3)，pp. 164-171（1998）から引用

「熱平衡破綻」が生じることによって、内容物の「温度上昇」及び「ガス発生速度上昇」が生じる。「温度上昇」によって、「内容物発火」が生じることがある。また、「温度上昇」及び「ガス発生速度上昇」が生じることで、反応器内の「圧力上昇」が生じ、「反応器破損」に至る。

「反応器破損」が生じることで、以下の様々な影響が生じる。

- ・ 圧力が解放されることにより、「衝撃波・飛散物発生」が生じる。
- ・ 内容物が毒性物質であると、「毒性物質放出」が生じ、「人体有害性」が発現する。
- ・ 内容物が可燃性物質であると、可燃性物質に着火し、「火災」や「蒸気雲爆発」が生じる。「火災」によって「放射熱発生」が生じる。また、「蒸気雲爆発」によって、「放射熱発生」及び「衝撃波・飛散物発生」が生じる。

また、それらのシナリオの進展を防止するには、図中に以下の対策が例として挙げられている。

- ・ 「攪拌機故障・誤作動」に対しては「定期的な保全」を実施する。
- ・ 「攪拌機誤操作」に対しては「誤操作防止設計」を行う。
- ・ 「攪拌不良」が生じ、「混合不具合」となることの防止のために、「攪拌機モーター電流計異常（高・低）」を検知し、「運転停止」する。
- ・ 二相分離後に「攪拌機の復旧」を行い、急激に反応が進むことを防止するために、「攪拌停止後のプラント運転中止」を行う。
- ・ 「温度上昇」、「ガス発生速度上昇」が生じ、「圧力上昇」となることの防止のために、「反応器温度計／圧力計高・反応原料供給弁閉インターロック」を設置する。「緊急冷却」を行う。「冷却剤・反応抑止剤投入」を行う。「抜液システム」を設置する。
- ・ 「圧力上昇」が生じ、「反応器破損」となることの防止のために、「反応器等耐圧（封じ込め）」を確保する。「緊急脱圧システム」を設置する。
- ・ 「反応器破損」による「衝撃波・飛散物発生」防止のために「防爆壁」を設置する。「安全距離」を確保する。
- ・ 「毒性物質放出」が生じ、「人体有害性」が生じることの防止のために「安全距離」を確保する。
- ・ 「反応器破損」が生じ、漏洩した可燃性物質の着火による「火災」、「蒸気雲爆発」防止のために、「着火源対策」を行う。
- ・ 「火災」、「蒸気雲爆発」による「放射熱発生」防止のために、「耐火被覆」を施す。「防火設備」を設置する。
- ・ 「蒸気雲爆発」による「衝撃波・飛散物発生」防止のために、「防爆壁」を設置する。

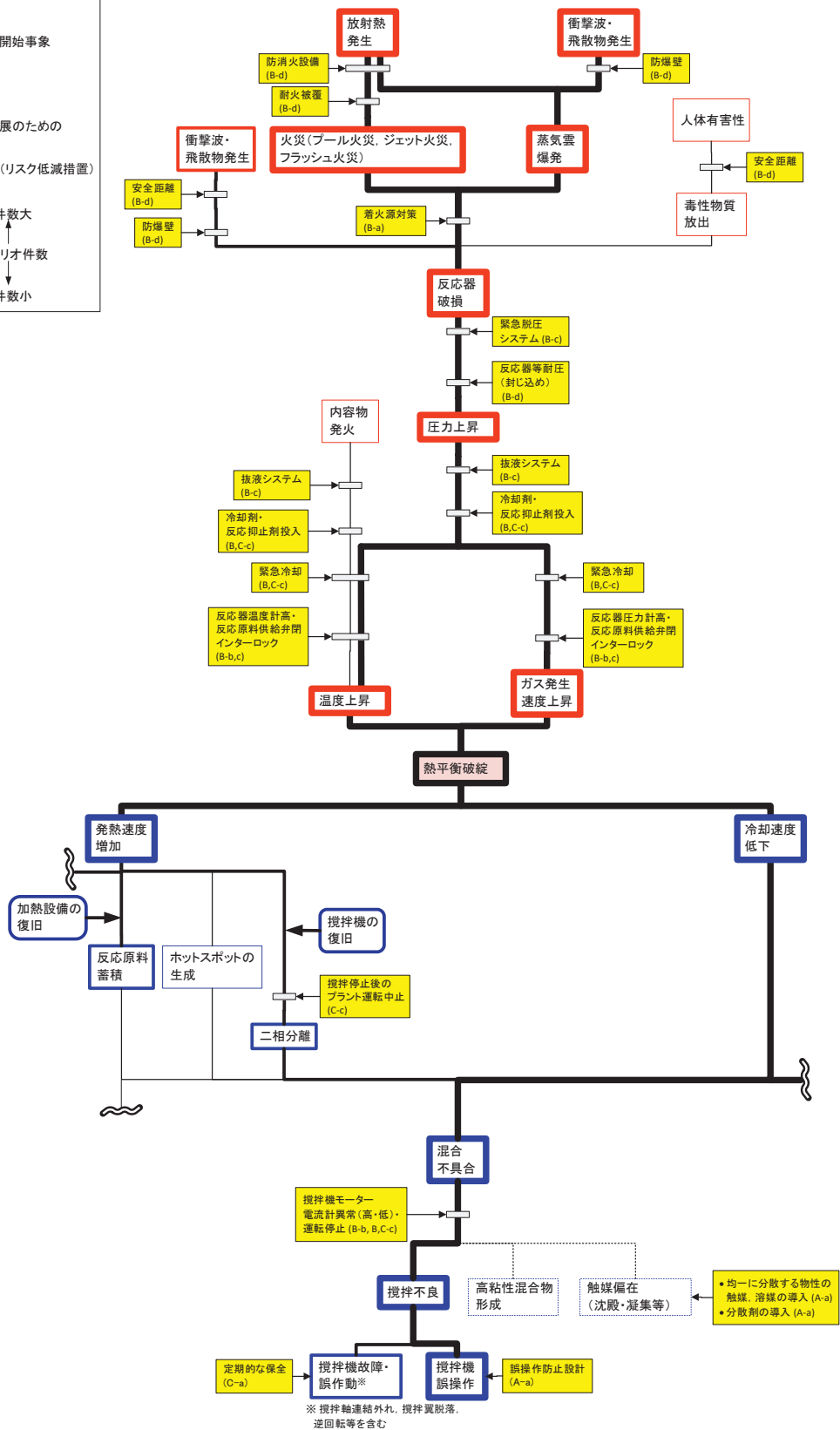
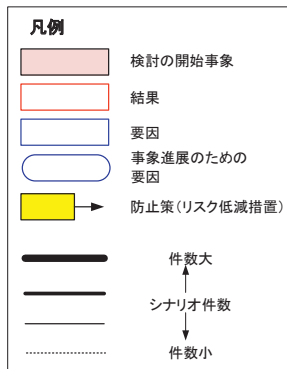


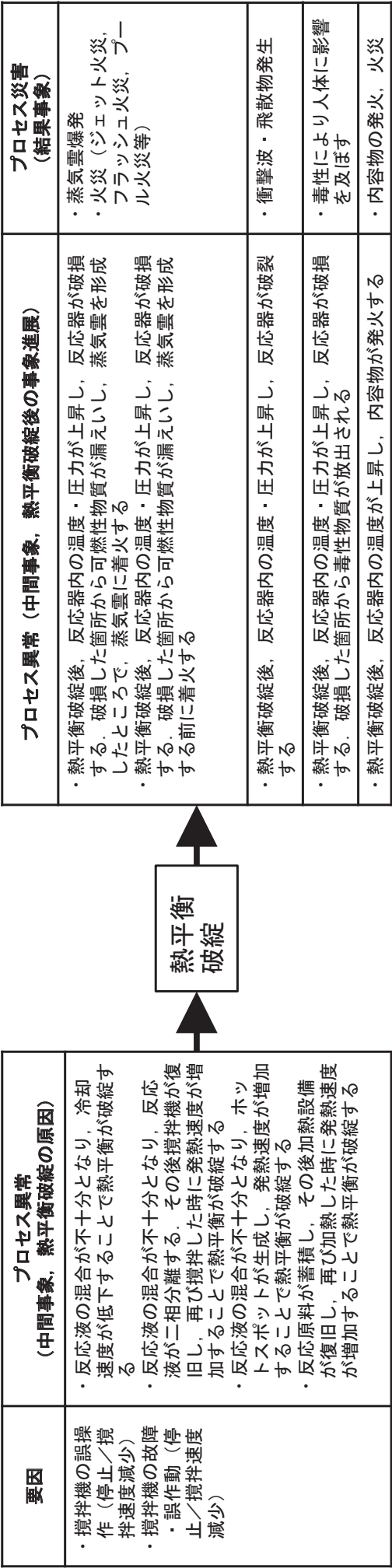
図 A3-1 暴走反応のシナリオモデル (抜粋)

(3) シナリオ整理表の読み方

シナリオ整理表で、攪拌機の不具合に関する箇所を抜粋して表 A3-1 に示す。シナリオ整理表に示しているシナリオは、過去の災害で実際に起こったシナリオである。そのため、同種災害としてあり得ることとして、必ず検討する。

引き金事象及び熱平衡が破綻するまでの事象進展が、表 A3-1 の左側（「要因」及び「プロセス異常（中間事象，熱平衡破綻の原因）」の欄）に記載されている。表 A3-1 の右側（「プロセス異常（中間事象，熱平衡破綻後の事象進展）」及び「プロセス災害（結果事象）」の欄）には、熱平衡が破綻してからの事象進展及びその結果としてのプロセス災害が記載されている。

表 A3-1 過去の災害で発生した，発熱と放熱のバランスが崩れるシナリオの整理表（抜粋）



添付資料 4 爆発火災データベースにおける混合危険による火災・爆発災害事例⁹⁹

西暦	死亡	負傷	概況
2008	0	1	化学工場においてトリメチルインジウムを製造していた。その工程のうちの製品を含む混合物から原料であるトリメチルアルミニウムを除去する処理中、使用していた小型圧力容器（16L）が破裂し、飛散物により1名が負傷（不休）した。原因は、容器の投入ホッパー部のフランジ部から外気が徐々に流入して蓄積し、この空気とトリメチルインジウムが反応して圧力が上昇し、ついには破裂したと推測された。
2007	0	4	アルキルアルミニウム工場のトリエチルアルミニウム蒸留装置において、定期修理後のスタートアップ作業をしていた。蒸留槽循環ポンプの吐出弁を徐々に開放したところ、配管が破裂し、トリエチルアルミニウムが噴出して火災が発生し、付近にいた4名が熱傷を負った。原因は、配管内の水分除去が不十分であったため、トリエチルアルミニウムが加水分解し、急速に圧力が上昇した。ついには配管が破裂し、空気と触れたトリエチルアルミニウムが自然発火したと推定された。
2001	0	3	食品工場において、生産停止のため、オキシ塩化リンの貯槽及び配管を洗浄しようと、張り込んだ水の循環を始めたところ、約10分後に圧力計基部の枝管（銅製）部分と屋外ローリー用フレキシブル配管部分が破裂し、飛散物等で3名が負傷した。原因は、残留していたオキシ塩化リンと水が反応して塩化水素ガスが激しく発生し、配管が圧力上昇により破裂したと思われる。到達圧力は、約15 MPaと推定。
1994	0	6	研究施設において、オキシ塩化リンの廃液が入っていた3Lのビンに誤って水を混合してしまい、その対処のために運搬中、研究棟内の階段踊り場付近でビンが破裂し、周囲の作業者が負傷した。原因は、化学反応によってリン酸と塩化水素ガスが発生して、ビンの内圧が上昇したためとみられる。

⁹⁹ 労働安全衛生総合研究所、爆発火災データベース
 （https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/houkoku/houkoku_2020_05.html）から、混合危険による火災・爆発災害事例を検索、抽出した。

西暦	死亡	負傷	概況
1993	0	0	トラックターミナルにおいて、屋外保管していたジフェニルメタンジイソシアネート（MDI）及びポリエーテルの廃液をメーカーに送り返すため、集配会社が集荷し保管中、ドラム缶 5 本のうち 1 本が破裂し、スレート屋根を突き破って 10 m 飛散した。原因は、屋外保管中に湿った外気が入って結露水が溜まり、これが整理・運搬時の振動で攪拌され MDI が水との化学反応で発生した二酸化炭素の圧力でドラム缶が破裂したと思われる。静置時は尿素化合物の薄い皮膜ができ、反応が進まなかった。
1992	0	0	モノメチルヒドラジン製造プラントを再稼働するため、反応器に水加ヒドラジン（HH）を張り込んでおいたところ、突然反応器が爆発した。原因は、塩化メチル（MC）配管の弁が完全に閉じておらず、MC が反応器に入り、局部的に MC 過剰となりトリメチルヒドラジンが生成して配管が閉塞した。同時に反応熱が蓄積して昇温したため HH が分解し、発生ガス圧により反応器が破裂したものである。
1990	0	1	使用済みのナトリウムの入ったドラム缶を熱処理（焼却）し、2、3 日放置した後、スチーム洗浄するため移動した時、完全に処理されなかったナトリウムが湿気（水滴）と反応し、爆発した。
1982	0	4	水処理剤製造施設でのトリクロロイソシアヌル酸（TCCA）の製造工程において、水溶液中に懸濁した TCCA の脱水を行う遠心分離機が故障した。この分離機の点検修理を行っていた時、電源操作の誤りにより、洗浄水が气流乾燥機を通して TCCA が入っていた製品受槽にまで侵入したため、TCCA と水とが爆発的な分解反応を引き起こし、製品受槽が破壊して塩素ガス等が発生した。この爆発により 9 名中 4 名が塩素中毒になるとともに飛散物や墜落で負傷した。
1981	0	3	チタン精製工場において、バッチ式電気炉の昇温工程中、内筒に誤って回収した屑マグネシウム（塩化マグネシウムを含む）が入れてあったため、マグネシウムがこの屑に含まれていた水分との化学反応を起こして急激に水素等が発生、内圧が急上昇して爆発し、内筒が約 10 m 飛び上がり屋根に激突して同炉付近に落下した。この時、炉の前にいた作業員 1 名が熱風により被災、近くにいた他の 2 名も火傷を負った。
1978	0	0	o-キシレンの空気酸化を行う無水フタル酸製造施設において、定期点検時に使用したスチームが逆流し、無水フタル酸捕集器内に入った。この水が昇温により無水マレイン酸と反応して、フタル酸、マレイン酸となり、さらにこれらが鉄と反応して低温発火物を生成した。運転中にこれらが自然発火して、廃ガススタックから黒煙を放出したもの。

西暦	死亡	負傷	概況
1971	0	0	化学工場内において、アントラキノン法により高濃度の過酸化水素を製造運転中、過酸化水素中間タンクが爆発して蓋板が飛散し、火災となった。原因は、パッキンの老化や締め付け不良のためタンク内に混入した触媒により過酸化水素が異常反応により分解し、溶媒（キシレンとジイソブチルカルビノールの混合物）蒸気による爆発性混合気体が爆発したと思われる。
1971	0	0	製薬会社の研究所試製室において、2-ニトロフェニルスルフェニルクロリドを合成していた。濃縮工程として四塩化炭素を減圧蒸留で除いた後、常圧にもどすためエアコックを開いたところ、数分後にこのコックから白煙が噴出し、反応釜が爆発した。原因は、空気中の水分と塩化硫黄が反応して塩化水素を生じ分解爆発したか、空気中の酸素のため異常反応を起こしたものと思われる。
1970	0	4	混合工場において、トルエン、アルコール類、フタル酸樹脂、ニトロセルロース、黄鉛をボールミルに入れ約10分間回転させ塗料の混合をし、スイッチを切ったが10分後に爆発した。原因としては、原料投入口の蓋を閉める時の衝撃火花か摩擦火花でニトロセルロースに着火し、徐々に燃えて有機溶剤蒸気にも着火、無水クロム酸やトリエチルアミン等の異物混入による反応、有機溶剤を仕込む際の静電気火花、が挙げられた。
1967	0	4	金属チタンの精製のための塩化工程において、煙道内面に付着した四塩化チタンを含む塩化鉄をシュートによりかき落とし作業中、かき落とした塩化鉄の入ったドラム缶に誤って水洗用の水をシュートから流し込んだ。このため、そのドラム缶を押し倒して内容物を処理した時、四塩化チタン、塩化鉄、水が反応して爆発を起こし、4名が被災した。
1966	0	1	半導体工場での金と銀合金の接点の分析において、分析された沈殿物をピーカー（本来は磁性るつぼ）に入れて、一晚乾燥機に入れ、翌朝スイッチを切って乾燥機の前蓋を開いたところ、ピーカーが割れ粉末がこぼれていたため、粉末を刷毛でかき集めていた際に爆発した。原因は、分析作業で沈殿物の中和と洗浄が不十分であり、雷金という爆発性物質が生じて、この雷金に衝撃、摩擦が加えられたものと思われる。
1965	0	1	化学工場において、ニトロトルエンのスルホン化で反応釜にて反応後、ジャケットに冷却水の注入を開始する際に反応釜の異常高温に気付き、注水を停止して直ちに反応原料を排出し終えた頃、反応釜が爆発した。原因は、反応釜の排出口付近に亀裂を生じ、ドレンと釜内容物が接触発熱したものと思われる。

添付資料 5 事故影響（放射熱、爆風圧、毒性ガス濃度）の指標の例

危害の重篤度を見積る際に参考になる事故影響（放射熱、爆風圧、毒性ガス濃度）の既存の指標の例を以下に示す。

(1) 放射熱の指標の例

可燃性物質に着火し、火炎が生じた場合、火炎から受ける放射熱に対しては、表 A5-1 に示すしきい値がある。

表 A5-1 放射強度と放射の影響¹⁰⁰

放射強度 (kW/m ²)	放射の影響
0.9	太陽（真夏）放射熱強度
1.3	人が長時間ばく露されても安全な強度
1.6	長時間さらされても苦痛を感じない強度
2.3	露出人体に対する危険範囲（接近可能） 1 分以内で痛みを感じる強度
4.0	20 秒で痛みを感じる強度。皮膚に水疱を生じる場合があるが、致死率 0%
4.6	10～20 秒で苦痛を感じる強度 古い木板が長時間受熱すると引火する強度
8.1	10～20 秒で火傷となる強度
9.5	8 秒で痛みの限界に達し、20 秒で第 2 度の火傷（赤く斑点ができ水疱が生じる）を負う
11.6～	約 15 分間に木材繊維等が発火する強度
12.5	木片が引火する、あるいはプラスチックチューブが溶ける最小エネルギー
25.0	長時間ばく露により木片が自然発火する最小エネルギー
37.5	プロセス機器に被害を与えるのに十分な強度

(2) 爆風圧の指標の例

爆風圧による建屋等への影響に対しては、表 A5-2 に示すしきい値がある。なお、爆発によって生じる、破砕された容器等や、爆源近くにある物体等の飛散物によって、人体に被害を及ぼす。爆発したものと直接接している容器等の破砕によって生じる飛散物や、破損した

¹⁰⁰ 消防庁特殊災害室，石油コンビナートの防災アセスメント指針，平成 25 年 3 月，p. 48，表 5.17 を基に作成。

ガラスは、人に対して特に大きな損傷を与える。

表 A5-2 爆風圧と爆風圧によって生じる建屋等の損壊の程度¹⁰¹

圧力 (kPa)	損壊の程度
1	ガラスが破壊される一般的な圧力
2.8	建物の小さな被害
3.5～7	大・小の窓ガラスが普通破壊される
5	家屋が多少の被害をうける
7	住めなくなる程度に家屋の一部が破壊される
9	建物の鋼鉄製の枠がわずかに変形する
14	家の壁や屋根が一部崩壊する
14～21	未強化コンクリートやブロック壁が破壊される
16	建物の大きな被害
28	軽量建築物が破壊される
35～50	家屋がほぼ全壊する

その他に、爆風圧は、人体の中で特に鼓膜と肺に損傷を与える。鼓膜に損傷を及ぼす一般的な圧力が表 A5-3 のように示されている。肺が損傷するしきい値は、70 kPa 程度の爆風圧とされている。

表 A5-3 鼓膜に損傷を及ぼす一般的な圧力¹⁰²

鼓膜破裂率 (%)	ピーク過圧 (kPa)
1	20.7
2	24.5
5	33.8
10	45.7
20	62.1
50	103.6
99	513.0

(3) 毒性ガス濃度の指標の例

反応器の破損等によって毒性物質が放出された場合、周囲にいる作業員や敷地外の住人が急性中毒となるおそれがある。具体的には、ガス状の化学物質が漏洩した場合は、当該ガスが拡散することで作業員等が当該ガスにばく露し、中毒を引き起こすおそれがある。また、

¹⁰¹ 中村，中山編著，爆発物探知・CBRNE テロ対策ハンドブック，丸善（2016），p. 78，表 5.2 を基に作成。

¹⁰² 中村，中山編著，爆発物探知・CBRNE テロ対策ハンドブック，丸善（2016），p. 89，表 5.4 を基に作成。

液状の化学物質が漏洩した場合は、液面から揮発した化学物質にばく露すること等で、同様に中毒を引き起こすおそれがある。化学物質の漏洩等の緊急時における急性中毒リスクを評価するため、表 A5-4 に示す様々な指標が提唱されている。

表 A5-4 緊急時等に用いられる化学物質の有害性に関する代表的な指標 ¹⁰³

指標	機関	指標の意味	目的
IDLH ^{*1}	NIOSH ^{*5}	生命を脅かす又は回復不能な健康への影響を生じる可能性が高い、あるいは避難の能力を妨げる濃度	労働者の防護
AEGL ^{*2}	EPA ^{*6}	有害性物質の公衆に対するしきい値濃度	一般公衆の防護
ERPG ^{*3}	AIHA ^{*7}	緊急時の避難計画策定のための指針値	
SPEGL ^{*4}	NAS/NRC ^{*8}		

*1 IDLH (Immediately Dangerous to Life or Health): 脱出限界濃度

*2 AEGL (Acute Exposure Guideline Level): 急性ばく露ガイドライン濃度

*3 ERPG (Emergency Response and Planning Guideline): 緊急避難計画作成ガイドライン

*4 SPEGL (Short-Term Public Emergency Guidance Level): 短期間公衆緊急ガイダンス濃度

*5 NIOSH (National Institute of Occupational Safety and Health): 国立労働安全衛生研究所 (米国)

*6 EPA (Environment Protection Agency): 環境保護庁 (米国)

*7 AIHA (American Industrial Hygiene Association): 米国工業衛生協会

*8 NAS/NRC (National Academy of Science/National Research Council): 科学アカデミー (米国) / 研究評議会 (米国)

なお、AEGL 及び ERPG については、1 つの化学物質に対して想定する健康被害によって 3 つのレベルで分類されている。また、AEGL については 5 つのばく露時間（10 分、30 分、1 時間、4 時間、8 時間）に応じて定められており、ERPG については 1 時間のばく露時間で定められている。それぞれのレベルの定義を表 A5-5 に示す。

¹⁰³ 原子力規制庁，第 3 回原子炉制御室の居住性に係る有毒ガス影響評価に関する検討会，資料 3-1 検討会における議論のまとめ，平成 28 年 4 月 8 日，<https://www.nsr.go.jp/data/000146617.pdf>，安全工学会監修，実践・安全工学 シリーズ 2「プロセス安全の基礎」，化学工業日報社 (2012)，pp. 219-221 を基に作成

表 A5-5 AEGL 及び ERPG のレベルとその定義¹⁰⁴

名称	レベル	定義
AEGL	AEGL-1	不快・刺激等が予測される物質濃度 ただし一時的なものでばく露の中止と同時に回復し得る
	AEGL-2	不可逆的又は長期にわたる有害な健康被害が予測される濃度
	AEGL-3	生命が脅かされる健康影響又は死亡すると予測される濃度
ERPG	ERPG-1	不快感やわずかな刺激が生じない最大濃度
	ERPG-2	恒久的な健康障害や行動能力の低下が生じない最大濃度
	ERPG-3	致死又は恒久的な障害が生じない最大濃度

それぞれの機関による定義の違いによって、ばく露限界量は大きく異なってくる。また、毒性影響評価の指標として広く認められているものはない。しかしながら、消防庁から公開されている「石油コンビナートの防災アセスメント指針」では、防災アセスメントにおける毒性ガスの基準値として、IDLH あるいは AEGL (AEGL-2 又は AEGL-3) を用いることが妥当と示されている。また、米国 EPA, FEMA (連邦緊急事態管理庁) 及び DOT (運輸省) から公表されているガイドラインの中では、比較的短時間の事象で、公衆を防護する目的では、SPEGL あるいは ERPG-2 の値を採用することが提案されている。公開されている基準値が記載されている文献等を以下に示す。

・ IDLH

National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH), Immediately Dangerous To Life or Health (IDLH) Values, Table of IDLH Values, <https://www.cdc.gov/niosh/idlh/intridl4.html>¹⁰⁵

・ AEGL

Environmental Protection Agency (EPA), Access Acute Exposure Guideline Levels (AEGIs) Values, <https://www.epa.gov/aegl/access-acute-exposure-guideline-levels-aegls-values#chemicals>¹⁰⁵

・ ERPG

American Industrial Hygiene Association (AIHA), 2020 Emergency Response Planning Guideline™ & Workplace Environmental Exposure Levels™, AIHA Guideline Foundation (2020). American Industrial Hygiene Association (AIHA), Emergency Response Planning Guidelines™, <https://www.aiha.org/get-involved/aiha-guideline-foundation/erpgs>¹⁰⁵

¹⁰⁴ 横浜国立大学大学院環境情報研究院／安心・安全の科学研究教育センター，亜急性毒性・亜慢性毒性情報の入手方法に関するテクニカルガイダンス，http://www.anshin.ynu.ac.jp/renkei/pdf/guide_4.pdf, p. 5, 表 1 より抜粋。

¹⁰⁵ 2021 年 12 月 21 日確認

労働安全衛生総合研究所技術資料 JNIOSH-TD-NO. 8(2022)

発行日 令和4年3月2日

発行者 独立行政法人労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所

〒204-0024 東京都清瀬市梅園1丁目4番6号

電話 (042)491-4512(代)

印刷所 株式会社 アトミ

TECHNICAL DOCUMENT
OF
THE NATIONAL INSTITUTE OF OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH

JNIOSH-TD-NO.8 (2022)

Reference material for carrying out risk assessment
on the hazards of chemicals in order to prevent fires and explosions
owing to runaway reactions and incompatibility



JNIOSH

NATIONAL INSTITUTE OF
OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH, JAPAN
1-4-6, Umezono, Kiyose, Tokyo 204-0024, JAPAN