

異常反応を考慮したリスクアセスメント等実施のための 参考情報の整備†

佐藤 嘉彦*1 島田 行恭*2 板垣 晴彦*3

化学物質の危険性に係るリスクアセスメント (RA) を実施する際には、化学物質同士の反応を伴う相互作用も考慮する必要がある。化学物質の危険性に係る RA 等を的確に実施するために、災害につながるような異常反応を理解した上で、設備・装置の不具合や不適切な作業・操作を考慮した RA 等を実施できるようにすることが望まれる。そこで、安衛研手法に沿って、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に関する検討を行う際に参考となる以下の情報をまとめた。①暴走反応の危険性・混合危険を把握する上での基本的な観点、暴走反応・混合危険による火災・爆発災害事例、化学物質の意図しない反応による危険を把握するためのデータベース・支援ツール (本文 3.1 節)、②発熱反応が生じて熱平衡破綻に至り、暴走反応が生じる際の要因から災害に至るまでの一連のシナリオ (本文 3.2 節(1))、③反応器周辺における混合危険に関するシナリオを検討する際の着眼点のリスト (本文 3.2 節(2))、④リスク見積り及びリスク評価のための基準の例 (本文 3.3 節(1))、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 (本文 3.3 節(2))、⑤暴走反応・混合危険に関するリスク低減措置の例 (本文 3.4 節)。

キーワード: 化学物質, リスクアセスメント, 異常反応, 暴走反応, 混合危険。

1. はじめに

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 (Risk Assessment ; 以下 RA) の実施が義務化されている。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 RA 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 RA だけでなく、化学物質の危険性に係る RA 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考慮する必要がある。

一方、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 RA 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 RA が不十分であったこと、RA が不十分であった結果、非正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¹⁾。

化学物質の意図しない反応による危険があるかを特定するには、反応によって発生する熱量や発生ガス量等の

放出されるエネルギーを把握する必要があるが、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ことがある。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 RA 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。そのため、化学物質の危険性に対する RA 等を的確に実施するために、災害につながるような異常反応を理解した上で、設備・装置の不具合や不適切な作業・操作を考慮した RA 等を実施できるようにすることが望まれる。

これまでに、労働安全衛生総合研究所では、化学物質による火災・爆発事故を防止するための RA 等の進め方 (以下、安衛研手法) を技術資料としてまとめた²⁾。安衛研手法では、RA 等の対象とする設備・装置の異常状態や作業・操作のミスなどを網羅的に解析することができるのと同時に、既存及び追加のリスク低減措置の効果を確認することができる。そこで、安衛研手法に沿って、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、異常反応を考慮した RA 等を検討する際に参考になる情報を提供することでの確かな RA 等実施の支援ができると考えた。安衛研手法に沿って RA 等を実施することを前提として、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、技術資料³⁾を作成し、発行した。本稿では、安衛研手法に沿って整備した参考情報の概要を示す。

2. 安衛研手法の概要

安衛研手法は、取り扱う化学物質及びプロセスに係る危険源の把握 (STEP1)、RA 等の実施 (STEP2)、リスク低減措置の決定 (STEP3) の 3 つのステップで RA を

† 本報の一部は、安全工学シンポジウム 2021 講演予稿集, pp. 304-307, 安全工学シンポジウム 2022 講演予稿集 pp. 414-417 の記述の一部を加筆修正し、まとめ直したものである。

*1 労働安全衛生総合研究所化学安全研究グループ。

*2 労働安全衛生総合研究所リスク管理研究グループ

*3 労働安全衛生総合研究所化学物質情報管理研究センター

連絡先: 〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6

労働安全衛生総合研究所 化学安全研究グループ 佐藤 嘉彦

E-mail: sato-yoshihiko@s.jniosh.johas.go.jp

進めるものである。以下に、それぞれのSTEPの概要を説明する。

(1) 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と、想定されるプロセス災害（漏洩、火災、爆発、破裂）を質問形式で把握する。

(2) STEP 2 RA等の実施（RAとリスク低減措置の検討）

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引き金事象の特定とシナリオ同定

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での把握結果などを参考にして、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の見積りとリスク評価

シナリオに対するリスクを見積り、許容可能なリスク

レベルに到達しているかを判定する。既存のリスク低減措置が存在しないと仮定した場合と、そのリスク低減措置が機能する場合についてリスクを見積る。

③リスク低減措置の検討

リスクレベルが高い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。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提案を繰り返す。

(3) STEP 3 リスク低減措置の決定

シナリオ毎の検討結果をRA等実施結果シートにまとめ、実装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。



図1 安衛研手法に沿って整備した参考情報の概要

3. 異常反応を考慮した RA 等実施のための参考情報の概要

安衛研手法に従って RA 等を進めるにあたり、異常反応が関係する火災・爆発災害を防止するための RA 等を的確に行うには、以下のことを実施することが必要である。

- ・ 想定する反応（合成反応，反応物・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
- ・ 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
- ・ 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決定すること

上記検討の参考となる情報を，安衛研手法に沿って整備した。ここでは，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。安衛研手法に沿って整備した支援情報の概要を図 1 に示す。なお，STEP 3 は，STEP 2 での RA 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。以下に整備した参考情報の概要を説明する。

3.1. STEP 1 に関連する情報（RA 等実施に必要な情報の収集を含む）

(1) 暴走反応に関する検討

想定する反応によって暴走反応が起こり得るかを把握するのに参考となる以下の情報をまとめた。

1) 暴走反応が生じ得るかどうかを考慮する上での基本的な情報

RA 等の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表としてまとめた。また，データの入手方法等が示されている主要な公開文献のリストをまとめた。

2) 暴走反応による火災・爆発災害事例

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⁴⁾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，リストにしてまとめた。

3) 反応性物質の DSC，ARC の測定事例

旧産業安全研究所にて発刊された「反応性物質の DSC データ集⁵⁾」及び「反応性物質の DSC データ集 (2)⁶⁾」中の DSC (示差走査熱量計) の測定データを，画像データからデジタルデータ (CSV 形式) へ変換し，公開していたが，それに「反応性物質の熱安定性に関する研究—熱分析及び断熱測定—⁷⁾」の ARC (暴走反応測定装置) の測定データを追加するとともに，化学物質の官能基別に表として取りまとめ，検索性を高めた。これらのデジタルデータは労働安全衛生総合研究所のサイト⁸⁾で公開している。

これらのデータは，反応物，生成物，中間生成物等の熱分解による発熱挙動を推測するのに参考となる。また，事業場等で所有している DSC，ARC データとの比較や，反応速度計算，化学物質同士の特性の比較，特性値の新規抽出方法などのデータの解析に活用することができる。

4) 反応熱推計支援ツールの整備

化学物質の既知の生成熱や，生成熱が不明な化学物質の生成熱を予測するための，化合物の骨格原子を中心としたグループ (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，反応熱及び生成熱の簡単な計算機能を付与した反応熱推計支援ツールを作成した。本ツールは，労働安全衛生総合研究所のサイトで公開している。

本ツールは，生成熱及び反応熱を推定するための以下の機能を有している。

- ・ 反応物の生成熱の総和と生成物の生成熱の総和の差をとって反応熱を推計する機能
- ・ Benson の二次加成型則⁹⁾により生成熱を推計する機能



図 2 反応熱推計ツールの構成及び使用の流れ

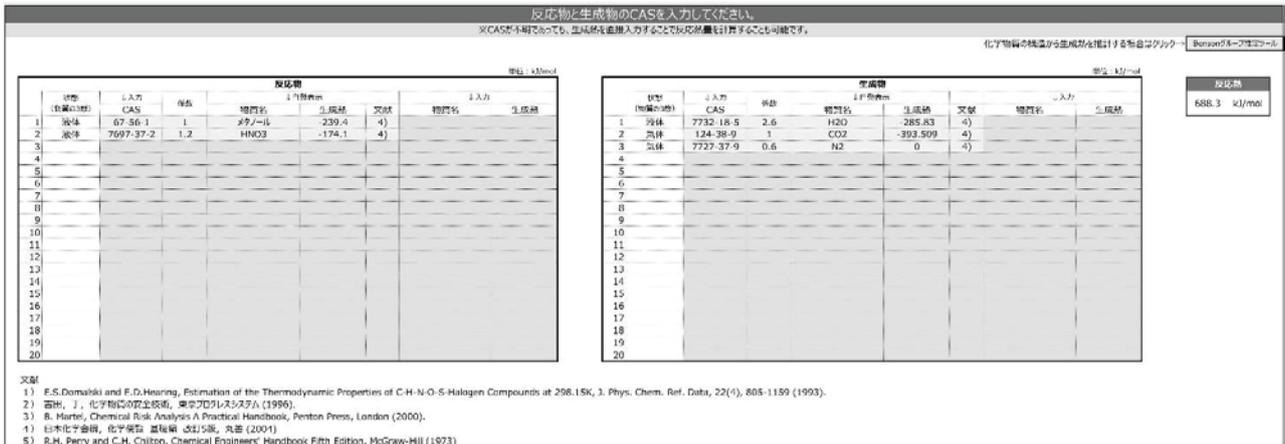


図3 反応熱計算シートの外観

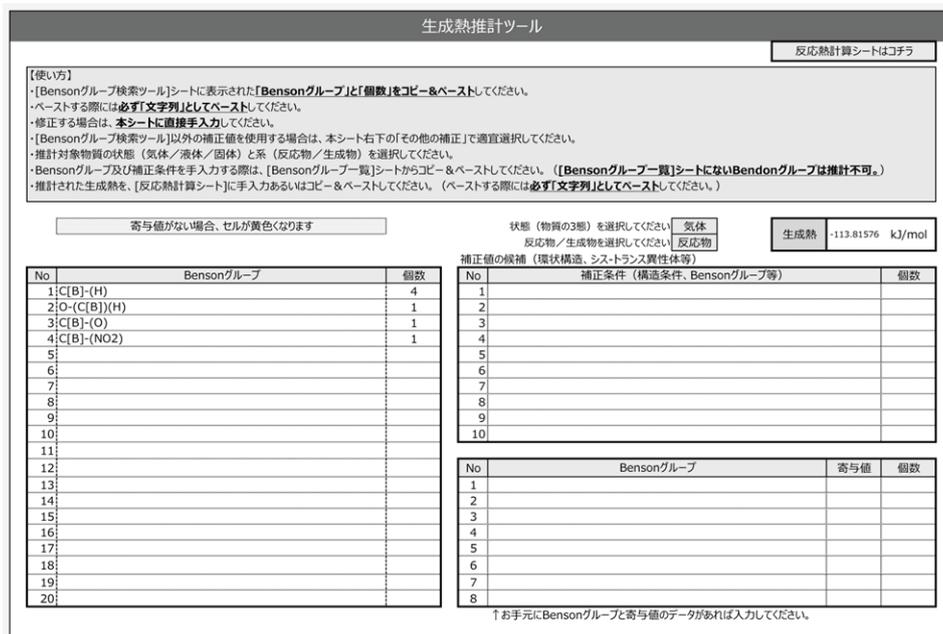
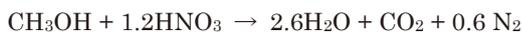


図4 生成熱推計ツールの外観

対象化学物質と、化学構造から自動で推定した Benson グループの組合せを表示する機能

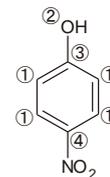
図2にツールの構成及び使用の流れを示す。まず、解析対象の反応の化学反応式を決定した後に、反応物と生成物について、図3に示す反応熱計算シートに対象化学物質の状態(気体、液体、固体)、化学物質の種類及び係数を入力する。ツール内のデータベースに対象化学物質の生成熱がある場合は、自動的に反応熱が計算される。

図3には、メタノールと硝酸との反応で、二酸化炭素、窒素及び水が生成する以下の反応の記入例を示している。



なお、データベースに生成熱データがなく、解析者が生成熱データを有する場合、直接生成熱を入力することで反応熱を計算することが可能である。

対象化学物質の Benson グループとグループの個数を把握している場合は、図4に示す生成熱推計ツールに Benson グループとグループの個数及び補正条件(化学構造を考慮した補正項)を入力し、化学物質の状態(気



構造式中の番号	Bensonグループ	グループ数
①	C[B]-(H)	4
②	O-(C[B])(H)	1
③	C[B]-(O)	1
④	C[B]-(NO2)	1

- C[B]-(H) : Hが結合しているベンゼン環のC
- O-(C[B])(H) : Hとベンゼン環のCが結合しているO
- C[B]-(O) : Oが結合しているベンゼン環のC
- C[B]-(NO2) : NO₂が結合しているベンゼン環のC

図5 4-ニトロフェノールの構造式と Benson グループによる記述

体、液体、固体)と系(反応物、生成物)を入力すると、ツール内のデータベースに Benson グループの寄与値がある場合は、化学物質の生成熱が自動で計算される。図4には4-ニトロフェノールの解析例を示している。4-ニ

トロフェノールを Benson グループにより記述すると図 5 に示すとおりとなるため、それらの Benson グループと個数を入力する。データベースに寄与値データがなく、解析者が Benson グループの寄与値のデータを有する場合、直接 Benson グループ及びその寄与値を入力することで生成熱を計算することが可能である。

対象化学物質の Benson グループとグループの個数を把握していない場合、Benson グループとグループの個数を推定することを支援する Benson グループ推定ツール (図 6) を搭載している。主要な化学物質について、化学構造から自動で推定した Benson グループのデータベースを搭載しており、そのデータベースに Benson グループのデータがある化学物質については、構成される Benson グループとグループの個数の推定結果を表示する。図 6 には 4-ニトロフェノールの検索を InChIKey により行った結果を示している。4-ニトロフェノールの CAS 登録番号は 100-02-7, InChIKey は BTJIUGUIPKRLHP-UHFFFAOYSA-N である¹⁰⁾ので、そのどちらかの情報を入力することにより、4-ニトロフェノールについて構成される Benson グループとグループの個数の推定結果が表示される。表示された Benson グループとグループの個数、補正条件を生成熱推定ツールに入力することで、化学物質の生成熱を計算することができる。ただし、Benson グループ推定ツールで推定された Benson グループ及びグループの個数は、化学構造から自動で推定したものであるため、正しく表記されているかの確認が必要であることに注意する。また、データベースに Benson グループのデータがない場合は、解析者自身で Benson グループとグループの個数を推定する必要がある。

(2) 混合危険に関する検討

対象とする物質が混合した際に火災・爆発等が生じ得るかを把握するのに参考となる以下の情報をまとめた。

- 1) 混合危険を考慮する上での基本的な情報
混合危険を考慮すべき物質の例、混合危険についての情報が示されている主要な公開文献をまとめた。
- 2) 混合危険による火災・爆発災害事例
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、リストにしてまとめた。
- 3) 混合危険マトリクス作成ソフトウェア CRW (Chemical Reactivity Worksheet) の使用方法の説明資料の作成

複数の化学物質が混合したことが危険源となるかを検討する際には、プロセス内において使用する化学物質をすべて列挙し、その混合危険を漏れなく検討する必要がある。化学物質の数が多くなると、そのすべての組合せで混合危険を検討することが多大な労力を要するため、米国では、混合危険マトリクス作成ソフトウェア CRW (Chemical Reactivity Worksheet) が開発され、無償で公開されている¹¹⁾。混合危険についての検討を支援するために、CRW の使用方法について、日本語の説明資料を作成した。本説明資料は、労働安全衛生総合研究所のサイトで公開している。本説明資料に沿って CRW を使用することで、複数の化学物質が混合したことにより異常反応が生じるかの参考情報を得ることができる。

- 4) 化学薬品の混触危険ハンドブックデータ編のデータベース化
化学薬品の混触危険ハンドブック¹²⁾に掲載されている、化学物質の組合せ毎の最大反応熱とその時の混合割合、

Bensonグループ推定ツール

生成熱推定ツールはコチラ

【使い方】

- ・CASまたはInChIKeyを入力すると、データベースに情報があるものは下記にBensonグループと個数が表示されます。
- ・化学構造より自動的に推定したものであるため、**すべての物質でその正確性を保証するものではありません**。必ずご自身でBensonグループが正しいものであるかを確認してください。
- ・**表示されない場合は**、ご自身でBensonグループと個数を**【生成熱推定ツール】シートに手入力**してください。
- ・**表示された場合は**、ご自身で問題が確認のうえ適宜**【生成熱推定ツール】シートにコピー&ペースト**してください。
- ・**【生成熱推定ツール】シートにペーストする際には必ず「文字列」としてペースト**してください。
- ・**修正する場合は**、**【生成熱推定ツール】シートに直接手入力**してください。(本シートでは修正不可)
- ・**本シートの関数は削除しないでください。**

※CASEInChIKeyは同時入力しないでください。正しく推定できません。

CAS	InChIKey	物質名	p-ニトロフェノール
	BTJIUGUIPKRLHP-UHFFFAOYSA-N		

No	Bensonグループ	個数
1:	C(B)-(H)	4
2:	O-(C(B))(H)	1
3:	C(B)-(O)	1
4:	C(B)-(NO2)	1
5:		
6:		
7:		
8:		
9:		
10:		
11:		
12:		
13:		
14:		
15:		
16:		
17:		
18:		
19:		
20:		

補正値の候補 (環状構造、システランシ異性体等)		
No	補正条件 (構造条件、Bensonグループ等)	個数
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

図 6 Benson グループ推定ツールの外観

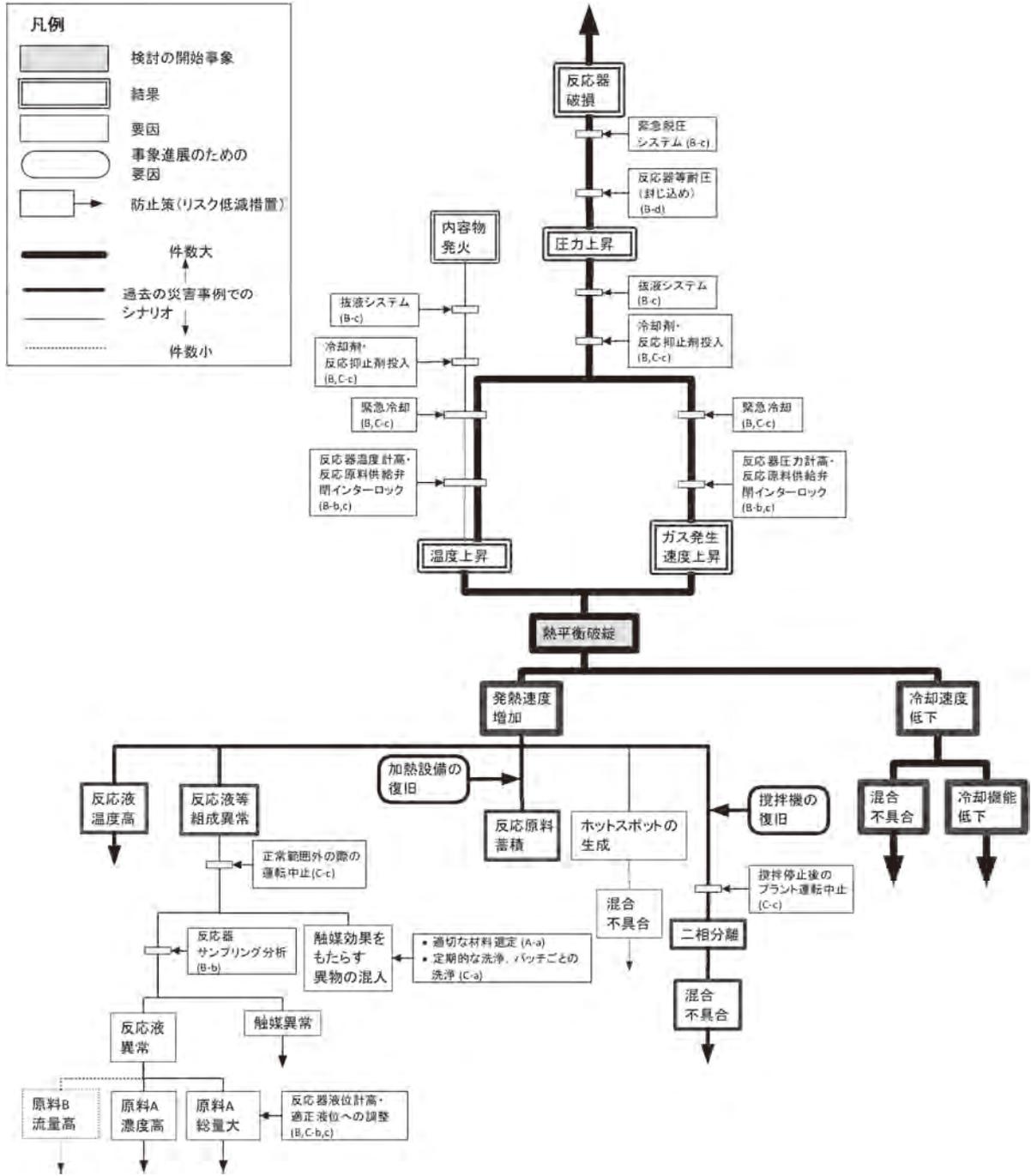


図7 熱平衡破綻による暴走反応のシナリオ図及びリスク低減措置の例 (抜粋)

生じる現象等についてのデータをまとめ、Excel 版のデータベースを作成した。本データベースは、労働安全衛生総合研究所のサイトで公開している。

本データベースは、以下のワークシートを有している。

- ・ はじめに
本データベースの概要、注意事項、免責事項、質問・問い合わせについての事項を記載している。
- ・ 各物質の一般的性質等
収録された化学薬品等について、化学薬品の混触危険ハンドブックのデータシートに記載された一般的性質等をまとめた。

・ 混触危険性データ

化学薬品の混触危険ハンドブックのデータシートに記載された混触発火危険性に関する記載（組み合わせる物質、最大反応熱、最大反応熱を示した際の物質の混合割合、混合した際の、災害事例を基に示した発火危険性等）をまとめた。

3.2. STEP 2 ①に関連する情報

(1) 暴走反応に関する検討

暴走反応が生じ、災害に至るシナリオを的確に同定するのに参考となる以下の情報をまとめた。特に、過去の

火災・爆発災害で生じたことがある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、必ず検討する。

1) セミバッチプロセスにおいて、発熱反応が生じて熱平衡破綻に至り、暴走反応が生じる場合の原因から災害に至るまでの一連のシナリオ

セミバッチプロセスにおける暴走反応に関するボウタイダイアグラムやフォールトツリー、イベントツリー、バッチ運転に対する HAZOP 事例¹³⁻¹⁷⁾などを参考にして、典型的な複数のシナリオを1つのボウタイ形式のシナリオ図として構築した。なお、想定している現象は、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である。シナリオ図について、検討の開始事象である熱平衡破綻を中心とした部分の抜粋を図7に示す。当該シナリオ図を要因から結果にたどることで、シナリオを同定することができる。

2) 上記のシナリオの中で、過去の火災・爆発災害で生じたことがあるシナリオ

過去に起こった災害の同種災害を例示するために、構築したシナリオ図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。RISCAD¹⁸⁾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)¹⁹⁾解析結果が記載されている事例、及び「化学物質・プラント事故事例ハンドブック」²⁰⁾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をトレースした。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。図7中の実線で示されているシナリオは、過去の災害で実際に起こったシナリオであり、線の太さがシナリオの件数の多さに相当する。実線で示されたシナリオは、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ため、ここで示したシナリオについては、想定外とすることなく検討する必要がある。実線で示したシナリオについては、安衛研手法の RA 等実施シート等に記載するシナリオの形でリスト化した。

(2) 混合危険に関する検討

STEP 1 で把握した混合危険を基に、混合危険のある化学物質同士が混合し、災害に至るシナリオを同定する際の参考として、以下のプロセスの箇所等における混合危険に関するシナリオを検討する際の着眼点のリストをまとめた；(a) 反応器等、(b) 機器構成・レイアウト、(c) ベントライン・ドレン、(d) 移送機器・充てん機器、(e) 計装・制御系、(f) 運転作業（監視を含む）。例として、(a) 反応器・貯槽等に関する着眼点の例を表1に、(e) 計装・制御系に関する着眼点のリストを表2に示す。シナリオを検討する際、(a)～(d)の着眼点については、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。一方、(e)及び(f)の着眼点は、記載された着眼点から「設備・装置に関する不具合」、「不適切な作業・操作」を想定し、その後、想定した不具合による事象進展を検討する。

表1 混合反応の原因についての着眼点の例 ((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
不適切な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/冷媒の漏えい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

表2 混合反応の原因についての着眼点の例 ((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）からの漏えい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

3.3. STEP 2 ②に関連する情報

STEP 2 ①で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際の参考として、以下の情報をまとめた。

(1) リスク見積り及びリスク評価のための基準の例

安衛研手法で示されているリスクの見積り及びリスク評価基準の例を示すとともに、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公開文献のリストをまとめた。

(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

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ことから、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をまとめた。

(3) 事故影響の指標の例

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）の既存の指標の例や公開文献のリストをまとめた。

3.4. STEP 2 ③に関連する情報

(1) 暴走反応に関する検討

リスクレベルの高いシナリオに対する追加のリスク低減措置を検討する際の参考として、暴走反応が生じる場

表 3 リスク低減措置の種類及び目的

(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。

合の原因から災害に至るまでの一連のシナリオに対応するリスク低減措置の例をまとめた。構築したシナリオ図 (図 7) に, それぞれのシナリオに対応するリスク低減措置の例を記載している。シナリオ図の実線上に示しているものは, シナリオの進展を防止するためのリスク低減措置, 要因に示しているものは, 要因そのものを防止するためのリスク低減措置を示している。また, リスク低減措置の例には, 安衛研手法で示しているリスク低減措置の種類と目的 (表 3) を示した。これらのリスク低減措置の例を参考に, それぞれのプロセスの内容, 取り扱っている物質の危険性等を考慮して, 最終的にリスク低減措置を決定する。

(2) 混合危険について

リスクレベルの高いシナリオに対する追加のリスク低減措置を検討する際の参考として, 反応器周辺において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た, 混合危険に関するリスク低減措置の例をまとめた。例として, 表 1 に示す「自然発火性物質が存在するところに空気が侵入する」に関するシナリオに対するリスク低減措置の例を表 4 に, 表 2 に示す「検出器 (流量計等) からの漏えいや検出器の破損により, 混合危険物質同士が接触する」に関するシナリオに対するリスク低減措置の例を表 5 に示す。リスク低減措置の例には, そのリスク低減措置の種類と目的 (表 3) を示した。これらのリスク低減措置の例を参考に, それぞれのプロセスの内容, 取り扱っている物質の危険性等を考慮して, 最終的にリスク低減措置を決定する。

表 4 着眼点「自然発火性物質が存在するところに空気が侵入する」に関するシナリオに対するリスク低減措置の例

リスク低減措置	種類・目的*
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)

※ 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

4. おわりに

RA 等を的確に実施することを支援するために, 安衛研手法に沿って, 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 RA 等を実施する際に参考になる情報を整備した。整備した参考情報を以下に示す。

表5 着眼点「検出器（流量計等）からの漏えいや検出器の破損により、混合危険物質同士が接触する」に関するシナリオに対するリスク低減措置の例

リスク低減措置	種類・目的*
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)

※ 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

- 1) RA 等実施に必要な情報の収集及び取り扱い物質及びプロセスに係る危険源の把握に参考となる情報として、暴走反応・混合危険の危険性を把握する上での基本的な観点、暴走反応・混合危険による火災・爆発災害事例、各種データベース、支援ツールを整備した。
- 2) RA 等の実施におけるシナリオ同定について、バッチ/セミバッチプロセスにおいて、発熱反応が生じて熱平衡破綻に至り、暴走反応が生じる際の要因から災害に至るまでの一連のシナリオをボウタイダイアグラム様のシナリオ図としてまとめた。また、それらのシナリオの中で過去の火災・爆発災害で生じたことがあるシナリオを抽出してまとめた。
- 3) RA 等の実施におけるシナリオ同定について、混合危険のある化学物質同士が混合し、災害に至るシナリオを同定する際の参考として、バッチ/セミバッチプロセスの以下の箇所等における混合危険に関するシナリオを検討する際の着眼点のリストをまとめた；(a) 反応器等，(b) 機器構成・レイアウト，(c) ベントライン・ドレン，(d) 移送機器・充てん機器，(e) 計装・制御系，(f) 運転作業（監視を含む）。
- 4) RA 等の実施におけるシナリオに対するリスクの見積りとリスク評価を行う際の参考情報として、リスク見積り及びリスク評価のための基準の例、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、事故影響（放射熱、爆風圧、毒性ガス濃度）の既存の指標の例等をまとめた。
- 5) RA 等の実施におけるリスク低減措置の検討について、リスクレベルの高いシナリオに対する追加のリスク低減措置を検討する際の参考として、暴走反応が生じる場合の原因から災害に至るまでの一連のシナリオに対応するリスク低減措置の例をまとめた。また、バッチ/セミバッチプロセスの反応器周辺において、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

けた、混合危険に関するリスク低減措置の例をまとめた。

以上の参考情報を活用することによって、暴走反応や混合危険を考慮した、安衛研手法に沿った RA 等実施の手助けになると考えられる。以上の参考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ることが、安全を担保する上で重要なことである。また、異常反応を考慮した RA 等の既存の事例は少なく、RA 等実施の事例を積み重ね、安衛研手法の理解と活用を促進していく必要がある。

参 考 文 献

- 1) 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．2014．
- 2) 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．
- 3) 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．
- 4) 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(最終アクセス日 2022年6月18日)
- 5) 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．
- 6) 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．
- 7) 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－熱分析及び断熱測定－．RIIS-SRR-83-1．1983．
- 8) 労働安全衛生総合研究所．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 (最終アクセス日 2022年6月18日)
- 9) 田村編．化学プロセス安全ハンドブック．朝倉書店．2000；31-32．
- 10) NIST Chemistry WebBook．Phenol．4-nitro-．
<https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C100027&Units=SI> (最終アクセス日 2022年6月18日)
- 11) CCPS/AIChE．Chemical Reactivity Worksheet．
<https://www.aiche.org/ccps/resources/chemical-reactivity-worksheet> (最終アクセス日 2022年6月18日)
- 12) 東京消防庁編，吉田，田村監修．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．
- 13) N. Paltrinieri and F. Khan．Dynamic Risk Analysis in the Chemical and Petroleum Industry．Butterworth-

- Heinemann. 2016.
- 14) S. Banerjee. Industrial Hazards and Plant Safety. Taylor & Francis. 2003.
 - 15) C. Rajagopal and Col A. K. Jain. Hazard Assessment of a Nitration Plant using Fault Tree Analysis. Def. Sci. J. 1994; 44 4: 323-330.
 - 16) C. S. Kao and K. H. Hu. Acrylic reactor runaway and explosion accident analysis. J. Loss Prev. Process Ind. 2002; 15: 213-222.
 - 17) F. Crawley and B. Tyler. HAZOP: Guide to Best Practice, Guidelines to Best Practice for the Process and Chemical Industries, Third Edition. Elsevier. 2015; 123-138.
 - 18) 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/> (2022年6月18日現在メンテナンス中) .
 - 19) 西宮, 加藤, 東, 中野, 若倉, 和田. Progress Flow Analysis (PFA)による事故事例分析とその活用. 第42回安全工学研究発表会講演予稿集. 2009; 67-70.
 - 20) 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.