

産業施設のリスクアセスメント評価手法の概観（その1）

— 基本的フレームとガス拡散影響予測の技術的視点から —

伊 藤 勝*

1. はじめに

1.1 リスクアセスメントの展開

リスクアセスメントは原子力産業の発展に伴い研究が進み、1975年のReactor Safety Study (WASH-1400)は、最大級のメルクマールと言える。この中で、ETA (Event Tree Analysis) やFTA (Fault Tree Analysis) は体系化された。

このようなリスクアセスメントの考え方は、化学産業の安全性評価のために援用されるようになった。我が国においては、防災・保安アセスメントとして、苫小牧東部工業基地開発計画に際して適用された。苫小牧東部開発では、環境アセスメントの要綱に基づいた環境アセスメントが実施されたことは言うまでもない。その後、工業再配置計画に基づき、東京湾等の工業基地への基幹産業（石油精製、石油化学等）の立地に際して、環境、防災・保安、海上交通などへのアセスメントが実施された。

現在は、環境アセスメントは法制化され、地方自治体においても条例化、戦略的アセスメントへの展望が開けてきた段階になっている。防災や保安に関しては、消防庁の石油コンビナートの防災アセスメントの指針が出るなど、「安全・安心」の視点から重要な政策となっている。

1.2 リスクアセスメントの目的

アセスメント (assessment) とは、assess の名詞形で、assess は ad (傍に) + sedere (座る) の合成された意味である。assessment は、『領主が統括地域「全体」に渡る租税配分率等を、地域ごとの諸条件を勘案して、予め設定する行為』をさしていた。つまり、「アセスする」ということは、必然的に対象事項を「予め評定する」とこと、「総合的な視点で見る」ことが必要である。

従って、リスクアセスメントにおける危険度評価の目的は、同定された危険を定量化することと、危険を減少させることといえる。危険度評価は、求められた数値が「目的」ではなく、危険度評価の過程で明らかになった要因（防災・保安行動、設計思想など）への対応であり、危険事象の同定やリスクの減少につながることである。換言すれば、唯一の「答え」（値）よりも、それを導き出す比較検討や過程がきわめて重要なことといえる。また、アセスメントの対象は、環境や安全性に直接的に影響を与える事物だけではなく、それらに著しい影響を与えると考えられる人間行為や活動全般とそれらのインパクトも含まれる。

1.3 危険度評価手法のスキーム

評価対象プロセスは複雑なシステムである場合が多い。それを構成する装置群の中から、危険度の高い装置（以下、ユニットと記す）を選び出すことから始める。選ばれたユニットの異常とは如何なる状況か、どのような災害に拡大し、周辺地域への影響の程度を評価する。この手順と考え方

2007年11月30日受付

* 江戸川大学 ライフデザイン学科教授 環境アセスメント

を以下に述べる。

- ① 評価対象プロセスを構成するユニットごとの潜在危険性の評価を行う。このために、ユニットの洗い出しと諸元を整理する。その資料に基づきユニットごとの危険度を求める。筆者が関係したプロセスにおいては、後述するダウケミカル社のF&EI（Fire & Explosion Index）を用いた。
- ② 対象プロセスに類似しているプロセスの事事故例を解析し、異常発生頻度、原因、被害の程度、防災活動（災害拡大防止活動）を明らかにする。この項目の解析結果は、FTA（Fault Tree Analysis）の基礎資料のみならず、詳細に解析できた場合は、発生確率が推算でき、確率的リスクアセスメントへ（PRA）の展開が出来る。
- ③ プロセスのレイアウト案に基づき、第三者への接近性を調べる。所謂「保安距離」の妥当性（第三者が危険と評価された場合は、レイアウトの変更や保安設備の設置が施される）の確認といえる。
- ④ 以上の手順を踏んで、潜在危険性の高く、事事故例が多く、被害程度が高く、影響が第三者に及ぶ可能性の高いユニットを選び出す。当該ユニットの機器、配管、供用特性（温度、圧力、物質、化学反応特性等）及び、周辺ユニットとの連関性等を明らかにする。
- ⑤ これらのユニット群から、特性の類似性、F&EI（2.2参照）、レイアウトを考慮し、災害モードの検討ユニット決め、ETAを行う。このときの引金事象の発現の想定にFTAを用いる。ETAの結果から災害モードを決定する。原子力施設の場合は、放射性物質の漏洩モードであり、石油化学プロセスでは、火災、爆発、漏洩などの災害モードである。
- ⑥ 災害モードの規模を規定する漏洩物（混合物のモル比と漏洩量）、爆発関与物質（混合物のモル比と関与量）、放射性物質（物質ごとの放射能と漏洩量）等を、事故箇所の仕様等を用いて推算する。これらの特性値（災害寄与の条件と量等）を用いて、影響範囲の推

算を行う。

なお、原子力施設関係に関しては、環境（地球温暖化対策）やエネルギー政策上、新たに重要な位置づけがなされると思われるが、危険度等の評価に関しては、当該分野の資料を参考にさせていただくとして、放射性ガス（微粒子を含む）を多く取り扱うウラン濃縮プラントの「異常放出特性」に限定して記載する。従って、他の項目に関しては、筆者が実際行ってきた、石油精製、石油化学プラントを基本とした事項の記載に止める。

2. 潜在危険度（リスク）評価手法

2.1 評価システムの選定

プロセスの安全確保のために、色々な危険度評価手法が提案されている。これらの種々ある手法のうちから、選択する必要がある。危険度評価を行うとき、まず検討する事項がある。

- ① どのような手法があるか
- ② どのような分野で使われているか
- ③ 評価組織（体制）はどのように運用されているか

などである。例えば、少量の危険物を取り扱う中程度の危険性を有する事業計画には、定性的な評価手法であるチェックリスト方式等で十分と考えられる。高温高圧の危険物や有害物質などを多く取り扱う施設では、定量的な評価が必要になる。また、類似施設との危険性の比較も、社会的要請から必要になる。つまり、アセスメントの基本は手続きであり、情報公開と利害関係者とのコミュニケーション（リスクコミュニケーション）が求められるからである。リスクアセスメントを行おうとする（対象になる）施設は、大規模で、危険物の取扱量が多く、高温高圧設備や十分な管理が必要な反応装置など擁する場合が多い。

このようなことから、コストパフォーマンスを考慮しつつ、評価手法の選定の考え方が提案されている。考え方の例をシナリオライティング方式で以下に記す（■はユニットの危険度評価法の選択を意味する）。この場合、折扱い危険物・有毒物の種類と取扱量、高温・高圧の装置の有無など

が基本指標となる。

- ① 当該事業計画は、重大な危険性を有しているか？（⇒有していれば、⑥へ）
- ② 中程度の危険性以下であるならば、チェックリスト方式を選択する。■
- ③ 中程度であるならば、爆発や有毒物質の漏洩の可能性はあるか？（⇒低い場合⑤へ）
- ④ 爆発・漏洩制御に複雑な制御システムを擁するときは、FTAを行う。■（⇒プロセスが大きな系統に組み込まれていれば、ETAを検討する）■
- ⑤ 対策が可能である場合は、FMEAを行う。■
- ⑥ 重大な危険性を有し、大幅なプロセスやレイアウトの変更が出来ない。（⇒直ちにFTAを行い、プロセス全体の危険性評価の検討を行う）■
- ⑦ プロセスやレイアウトの変更によって爆発や有毒物質漏洩の制御は可能か？（⇒高度な制御が必要な場合は、⑨へ）
- ⑧ 高度な制御は不必要で、対策可能であればFMEAを行う。■
- ⑨ 爆発・漏洩制御に複雑な制御システムを擁するときは、FTAを行う。■

上記のようなユニットに対する評価結果に基づき、プロセス系統全体の危険度評価の実施の適否を判断する。

2.2 ダウケミカル法

危険度評価の高いユニットを擁するプロセス系統に対しては、系統を構成するユニット個々の危険度を定量的に導き出し、系統としての安全確保が必要になってくる。その手法として、筆者はダウケミカル社の「DOW'S FIRE & EXPLOSION INDEX HAZARD CLASSIFICATION GUIDE」（7版：1994）を用いた。1994年以前は、評価実施時期に対して最新の版を用いてきた。以下は、7版に基づいて記述する。その他の評価システムの概要は次節で紹介することとする。

手順としては、図2-1に示す。ダウケミカル法は⇒のところから MPDO (Maximum Proba-

ble Days Outrage：最大見込み物的損害)まで求めることが出来るような評価システムである。筆者が実施したことは、リスクコミュニケーションの基本資料作りであることから、火災・爆発指数 (F&EI)、損害係数 (Damage Factor)、暴露半径 (Radius of Explosion) の3指標までとした。投資額や事故による機会損失は事業者にとっては重要なファクターであるが、リスクコミュニケーションとしての位置づけは高くないと判断したことによる。

以下、手順に従って概説する。

- ① プロセス系統全体を適切なユニットに分割する。
- ② 各ユニットが有する物質明らかにし、NFPA (National Fire Protection Association) の分類評価 (毒性, 可燃性, 反応性) に基づく物質係数 (MF: Material Factor) を、稼動条件により MF を修正する (混合物の場合はモル比を用いる)。
- ③ 共通的なプロセス危険係数 (F1) として、ユニットにおける化学反応 (発熱反応, 吸熱反応), 物質の取扱と輸送 (移送), ユニット設置位置の閉鎖性, 緊急時の接近可能性 (距離), 漏出液の制御性によって決定する。
- ④ 特殊なプロセス危険係数 (F2) は、取扱物質の有害性, 運転圧 (負圧), 運転温度 (着火可能性), 粉塵爆発の可能性, 圧力逃がし弁等の存在 (防爆対策), 延性や脆性繊維温度との関係, 可燃性物質や不安定物質の保有量, 腐食性, ジョイントや伸縮継手などの有無 (漏洩可能性), 火炎の利用 (着火元), 熱媒油を用いた熱交換器の有無, 回転機器の存在などを用いて求める。
- ⑤ ユニットの危険係数 (F3) は、共通的なプロセス危険係数 (F1) と特殊なプロセス危険係数 (F2) の積 ($F3 = F1 \times F2$) として求める。
- ⑥ F&EI (火災爆発指数) は、ユニット危険係数 (F3) と物質係数 (MF) の積として求める (F&EI)。この指数は、プロセス制御の失敗, 装置の破壊または応力疲労 (振動

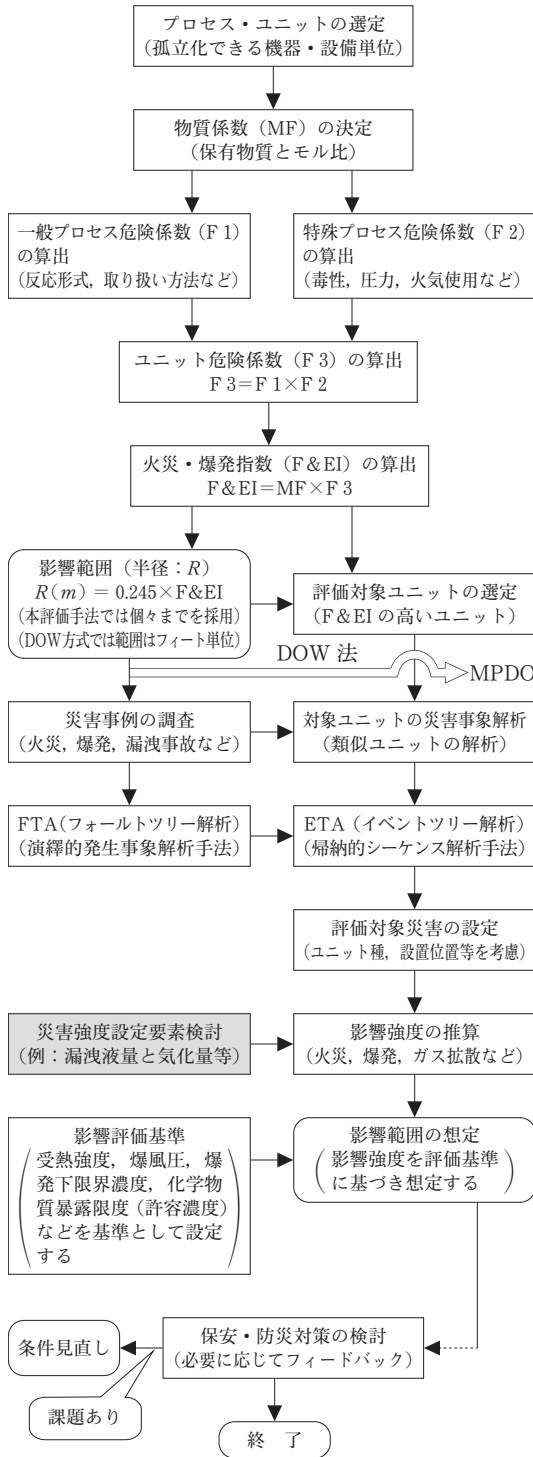


図 2-1 ダウケミカル社の F & EI と
リスクアセスメントの手順

等による) などによる, 燃料またはエネルギーの放出の大きさ及びその可能性を示している (なお, 対策の効果としての評価は, クレジット指数として求めるが, 本稿では省略する)。

⑦ 損害係数 (DF) と暴露半径 (ER) は, 引火物の放出及び着火により起こる火災からの輻射熱, 可燃性物質の空気混合系の爆発の二次的影響として, 爆発衝撃波 (爆風圧), 爆熱などが挙げられる。

⑧ F&EI に基づく危険度ランクとして, 60 以下は危険性殆どなし, 61 から 96 は軽微な危険性, 97 から 127 は中位な程度の危険性, 128 から 158 は危険性大, 159 以上は重大な危険性を有する, と分類される。

以上の評価事例の結果を例示的に示す。石油精製プロセスでの評価対象装置系は, 常圧蒸留装置系 (フラッシュ塔, 蒸留塔), 重質油分解装置系 (反応塔), 重質油脱硫装置系 (反応塔, 加熱炉), 重質油改質装置系 (水素化槽, 改質炉系), 貯槽類 (原油タンク, ガソリンタンク) などである。 () に示したユニットは, 相対的に高い危険度評価になったユニットの例である。

石油化学プロセスでは, 同様に, エチレン製造系 (熱分解炉, 脱エタン, 脱プロパン, 脱ブタン, プロパジエン水添, プロピレン精製, アセチレン水添), ポリマー製造系 (エチレンオキシド反応, エチレンオキシド分離, ポリプロピレン重合, アクリロニトリル合成, アクリロニトリル精製, オクタノール酸化, ブタジエン精製), 貯槽類 (プロピレンタンク, エチレンオキシドタンク, C4 留分タンク, 塩ビポリマー受入タンク) などが挙げられる。

以上の結果に基づき, F&EI の高いユニットに関して, レイアウト計画での位置, その特性 (反応塔, 蒸留塔, 加熱路, 貯槽など), 暴露半径の広がり, 損害係数の大きさ等を勘案し, 次章で述べる FTA や ETA の解析対象ユニットとする。

2.3 その他の評価手法とその特徴

我が国での安全評価に関する施策としては, 厚

生労働省（労働安全衛生法）、消防庁（石油コンビナート防災指針）などがあり、企業独自や高压ガス保安協会なども指針などを作成している。海外では、アメリカ化学者協会（MCA）、デュポン社、シュブロンケミカル社、アライドケミカル社、エクソン社などのチェックリスト法、ICI（Imperial Chemical Industries）社の Mond Fire Explosion & Toxicity Index などのシステム工学的評価法がある。

(1) ICI-Mond 法

上記のダウケミカル法に類似した評価手法である。ユニットへの分割はダウケミカル手法と同様に行い、ユニット指数は以下のように求める。

$$\begin{aligned} & \text{ユニット指数 (D)} \\ & = \text{物質係数 (B)} \\ & \quad \times (1 + \text{特定物質危険度 (M)}/100) \\ & \quad \times (1 + \text{一般危険度 (P)}/100) \\ & \quad \times \{1 + (\text{特定プロセス危険度 (S)} \\ & \quad + \text{量的危険度 (Q)} \\ & \quad + \text{配置危険度 (L)}/100 \\ & \quad + \text{毒性危険度 (T)}/100)\} \end{aligned}$$

上記各項に示してある係数を用いて、火災負荷指数 (F)、ユニット毒性指数 (U)、主毒性事故指数 (C)、爆発指数 (E)、気体爆発指数 (A) を規定された各計算式により求める。これらの指数を用いて全体危険性 (R) を求める。プロセス改善や予防手段等（容器危険性、管理、安全態度、防火、物質隔離、消防活動）によって、全体危険性を見直し、修正危険指数を求める。この過程で、プロセス改善、予防手段が必要な危険項目を明らかにする。

(2) DuPont 社

チェックの大項目は、貯蔵タンク、人体防護、運転制御、廃棄、サンプリングなどで構成される。これらの大項目毎に複数の項目が設けられ、潜在危険性のチェックポイントは示されている。これらの視点として、管理的、工学的、技術的が挙げられている。

人体防護を例として示す。人体防護は、防護施設、換気、暴露性、用役、危険物取扱、環境で構成され、危険物取扱のチェックポイントは、毒性、可燃性、反応性、腐食性で、視点は技術的である。暴露性のそれは、隣接施設、公衆、作業環境で、視点は管理的である。

これらのチェックは、熟練者であることを前提としていることから、チェックポイントは少ない。しかし、基本的な化学反応上の欠陥、プロセス制御上の問題点に踏み込んでの評価は難しい反面、機械的性質、装置、脱圧装置などからの緊急時に備える総合的評価が出来るので、初期の検討に適している。

(3) MCA

事故防止を目的とし、チェックポイントは 280 余と多く、広範囲で、広い視野からの記載されている。チェックポイントは、人間に対する安全性（立地条件、建築物、作業場所、構内）、電気安全設計、ボイラーと機械装置、消防火装置などの大項目で構成されている。これらの大項目は分化された立地条件は、「近隣から／に対して、災害・爆発・騒音・大気汚染。水質汚染の危険性はないか?」、「急カーブなどの交通標識等は適切に処置されているか?」などの設問で構成され、YES/NO で回答する形式である。

定性的な評価が基本となっていることから、評価者群に依存した結果を得るため、比較評価には不適であるが、プロセスの新設、増設、改善などに適用できる。

3. 災害事象の想定手法

3.1 システム工学的手法の概説

原子力施設や石油精製・石油化学プラントシステムの災害影響を評価するためには、前章で選出した装置、原子力施設の場合は最大想定事故、石油化学等の場合は潜在危険度（ダウケミカル法では、F&EI）の高いユニットを対象に、如何なる原因で、如何なる災害事象が発生し、どのように災害事象が拡大するか、を明らかにする必要がある。

ある。その把握手法として多くのシステム工学的手法がある。

それらの主な手法は、大別され、「原因—結果型解析法」と「結果—原因型解析法」がある。前者には、ETA (Event Tree Analysis), FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis) などがあり、後者には、FTA (Fault Tree Analysis), MORT (The Management Oversight and Risk Tree) などがある。OS (Operability Analysis) は両者の性質を持っている。以下、筆者が良く用いた石油精製プロセスや石油化学プロセスの FTA と ETA について記載する。

3.2 ETA (Event Tree Analysis)

石油・化学プラントの各種装置において、何らかの引金的事象（初期事象）を原因事象とし、その災害が拡大していく経過を予測する手法である。災害の潜在的に大きな装置と当該装置の災害事象の想定を可能にする。

この解析法の特徴は、①引金事象が大規模災害に至る経路のシナリオライティング、②展開されるイベント（災害事象＝事故事象）に対する保安・防災行動やシステム（以下、保安・防災行動と記す）の成功／失敗関係の図示、③後述する FTA のトップ事象の設定、④部分的な成功／失敗を考慮しない論理的解析などである。

事例として図 3-1 に示す。災害事象「A」に対して行われる保安・防災行動「a」の成功／失敗を枝分岐させる。成功すれば、この災害事象は「沈静化」されたことになる。失敗すれば次の災害事象「B」へ展開（拡大）され、次の保安・防災行動「b」を行う。この「b」の成功・失敗を考慮し、災害の展開（拡大）のシナリオが作り上げられる。「a」などの保安・防災行動の成功確率を想定（事例に基づく）することにより、災害事象の発生（発現）確率を計算することも出来る。

我が国のように地震災害の多発する場合は、引金事象の発現の原因に「地震」を組み込む事例が殆どである。このときの地震災害の発生確率は、立地周辺地域の大規模な被害地震の発生確率を想定する。

この手法は、アメリカの原子力発電所の事故シーケンス（事故の災害発現過程）の決定に使われ、PRA (Probability Risk Assessment) として紹介されている。我が国の石油コンビナート防災アセスメントにおいては、石油タンクや石油精製プロセス、石油化学プロセスの分野への適用が言及されている。石油化学プロセス及び関連施設の石油コンビナートがある都道府県の防災計画や、基幹装置の新設・増設・更新などに際しても、安全性評価の基礎資料作りに用いられている。

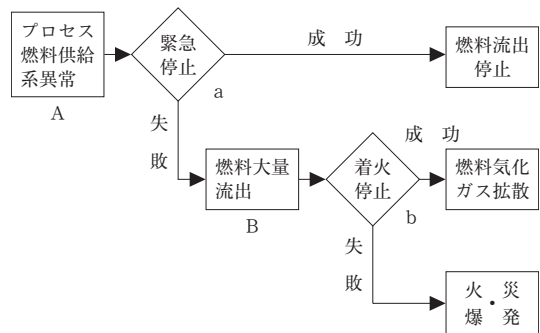


図 3-1 ETA の参考図

3.3 FTA (Fault Tree Analysis)

前述の ETA など、想定された最も危険と思われる災害事象などを頂上事象と定義する。ETA では、災害事象と保安・防災行動の組み合わせであるが、FTA は各種の論理記号を用いる。これらの論理記号で災害事象発現への論理的因果関係を構築する方法である。論理記号は、「ゲート事象・コマンド故障」、1次故障、2次故障、AND 論理ゲート、OR 論理ゲート、制約論理ゲートなどが用いられる。

論理記号による解析であるから、①事故発生の論理的原因の明確化、②新たな事故原因の発見や定量的（確率論的）発生確率の想定が可能、③脆弱箇所や改善すべきプロセスの同定、④想定できる事故は「想定内」（＝論理記号で構築できる範囲に限定）、⑤事故発生までの時間的展開に弱点などが特徴である。

また、FTA を構築するには、解析対象であるシステムへの理解が不可欠である。システム構成

（システム要素）、それらの機能、操作、動作特性などである。従って、頂上事象（想定災害事象）に関連するプロセスシート、配管・計装系統図、電源系統図、防災システムなどが基礎資料となる。これらと、災害事例に基づき、頂上事象に繋がる一次要因と外部要因を明らかにし、論理記号を用いて解析樹を作成する。この作業を二次要因などの範囲に展開し、最終的なFTAを作り上げる。事故要因、外部要因（条件）の発生確率を組み合わせることにより、頂上事象の発生確率を推算することが出来る。

例示的に簡単なFTAの事例を図3-2に示す。故障などの発生確率を確率密度関数で表されれば、モンテカルロ・シミュレーションによって、頂上事象の発生確率密度関数として求めることが出来る。

3.4 その他の手法

主要な危険度評価手法の基本的考え方を以下に記載する。

3.4.1 FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis)

FMECAは、プロセスやシステム設計時に、考えられる限りの故障を取り上げ、これらを故障モードとして解析する。得られた結果から、プロセス運用に及ぼす影響を定性的に明らかにし（FMEA=Failure Mode Effects Analysis）、安全性に致命的な影響を与える故障箇所とモードを定量的に決定する（CA=Criticality Analysis：致命度指数）2段階の評価方法である。

特徴は、設計の初期段階で、重要構成要素（装置）の同定、災害モード検知システムの設計、致命度指数から保安投資優先順位の決定等が可能になることである。

3.4.2 MORT (The Management Oversight and Risk Tree)

FTAに類似するリスクツリーを作成し、管理上の過失や欠点を明らかにする手法である。事故

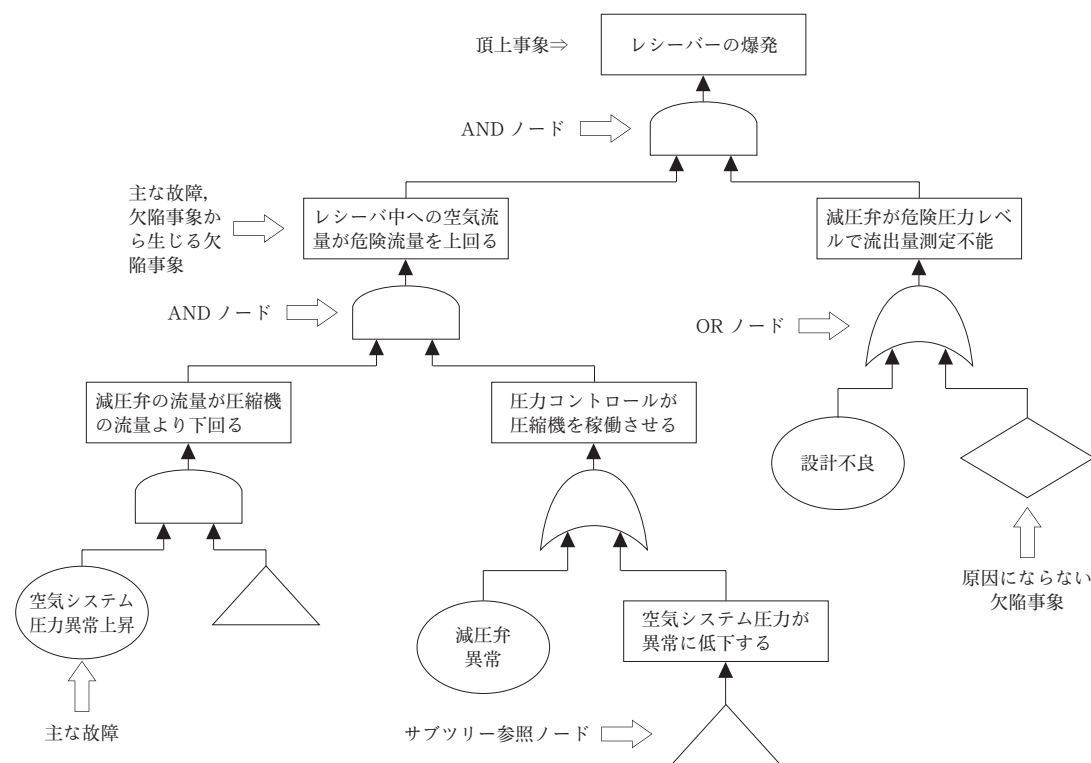


図3-2 FTAの参考図

発生の原因を、Man, Machine, Management, Media の4要素（M）の組み合わせとして解析する。これまで重要性が明らかにされてこなかったソフトの対策を組み込むことにより、総合的に事故原因を究明する手法である。

この手法では、異常現象（incident）とは「望ましくないエネルギーが移動すること」、事故（accident）とは「人間に傷害、施設に損害あるいは運転中のプロセスの性能低下を引き起こす異常事象」と定義している。

この手法は、安全に関わる手落ち、エラー、手抜きを防止し、潜在リスクに対して適切な対策を施すことによって管理レベルの確保を図り、安全管理上の人的、設備的な最適配分を可能にする。労働安全の確保の視点から開発された方法である。

3.4.3 OS (Operability Study)

この手法は、ICI 社によって開発された定性的な危険度評価手法である。「生産プロセスに、正常な状態からのズレが生じ、その原因が未知である場合」を想定し、当該ズレの予防対策を検討し、安全対策を評価する手法である。

具体的には、「もし、○○○○が起こったらどうなるか」の設問からはじめ、その原因を推測し、その影響範囲や程度、対応策を検討する。既設プラントの安全性の改善、運転基準の改正、新設プラントや増設の設計に反映するとき有効である。しかし、定性的評価手法であることから、他の生産プロセスとの比較が出来ない。

4. 災害関連物質の想定手法

4.1 災害事象の種類と量的推算式

4.1.1 漏洩・流出

(1) 気体流出

容器内物質が気相で存在する物質の流出率は、容器の容積に対して流出孔が十分小さく、気体の噴出に際して熱的变化が無いものとして、以下の式によって求める。

① 流出速度が音速未満である場合：

$$(p_0/p > \gamma_c)$$

$$Q_G = c \times a \times p \times \sqrt{\frac{2M}{Z \times R \times T}} \times \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \times \left\{ \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right\}^{\frac{1}{2}} \dots (\text{式 4-1})$$

ここで、

Q_G ：気体流出率（ m^3/s ）

c ：流出係数（不明の場合は0.5と仮定する）

a ：流出孔面積（ m^2 ）

p_0 ：大気圧（Pa）

p ：容器内圧力（Pa）

γ ：気体の比熱比

M ：気体のモル重量（ kg/mol ）

Z ：気体の圧縮係数（理想気体の場合は1.0とする）

R ：気体定数（ $8.314 \text{ J}/\text{mol} \cdot \text{K}$ ）

K ：容器内温度（K）

T ：容器内温度（K）

$$\gamma_c = (2/(\gamma+1))^{\gamma/(\gamma-1)}$$

② 流出速度が音速以上である場合：

$$(\gamma_c \geq p_0/p)$$

$$Q_G = c \times a \times p \times \sqrt{\frac{M}{Z \times R \times T}} \times \sqrt{\gamma \times \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \dots (\text{式 4-2})$$

ここで、

$Q_G, c, a, p, \gamma, M, Z, R, K, T, \gamma_c$ は(式 4-1)と同じ。

(2) 液体流出

液相物質の貯蔵容器や容器近接の付属配管が破損した場合（容器の容積に対して流出孔が十分小さく、液体が継続流出する間、液面の高さの変化は無い／微小であると仮定する）、長い配管が破損した場合（配管内壁と流体との摩擦による圧力損失はない（安全側評価）ものと仮定する）の流出率は、(式 4-3)と(式 4-4)によって求める。

これらの液体が圧縮液化ガスであるときは、流出液体は大気圧下で急速に気化する。気化した液量と流出した液量の比（フラッシュ率）は、(式

4-5a, b)の式で求める。液化天然ガスのような液体 (-164℃) は、流出からの時間の関数として(式4-7)で求める。なお、揮発性液体の蒸発量の推算是省略させていただく。

① 貯蔵容器 (液面変化の無い場合)

$$Q_L = c \times a \times \sqrt{2gh + 2 \times \frac{p - p_0}{\rho}} \dots\dots\dots (式 4-3)$$

ここで、

- Q_L : 流体流出率 (m³/s)
- ρ : 液密度 (kg/m³)
- g : 重力加速度 (9.8 m/s²)
- h : 液面と流出孔の高さの差 (m)
- c, a, p, p_0 は(式4-1)と同じ。

② 配管 (内壁の圧力損失が無い場合)

$$Q_L = c \times a \times \sqrt{V^2 + 2 \times \frac{p - p_0}{\rho}} \dots (式 4-4)$$

ここで、

- Q_L : 流体流出率 (m³/s)
- V : 配管内の流速 (m/s)
- p : 送出圧力 (Pa)
- c, a, p_0 は(式4-1)と同じ。

③ 液化ガスのフラッシュ量 (加熱, 加圧)

$$f = (H_{T_1} - H_{T_2}) / L \dots\dots\dots (式 4-5a)$$

ここで、

- f : フラッシュ率
- H_{T_1} : 液体の温度 T_1 におけるエンタルピー (J/kg)
- H_{T_2} : 液体の沸点 T_2 におけるエンタルピー (J/kg)
- L : 液体の蒸発潜熱 (T_2 における気・液エンタルピーの差 (J/kg))

記載に用いる値を変えて書き換えれば、

$$f = C_p \times (T - T_b) / h_b \dots\dots\dots (式 4-5b)$$

ここで、

- T : 流出前の温度 (K)
- T_b : 大気圧での沸点 (K)

C_p : 液体の比熱 ($T_b \sim T$ の平均: J/kg)

h_b : 沸点での蒸発潜熱 (J/kg)

上記のフラッシュ率と流出量から、気化ガス量を下記の式を用いて求める。

$$Q_G = \frac{Q_L \times f \times \rho \times R \times T}{M \times p_0} \dots\dots\dots (式 4-6)$$

ここで、

- Q_G, R, T, M, p_0 は(式4-1)と同じである。
- Q_L, ρ は(式4-3)と同じである。

④ 低温液化ガス

$$W = \frac{1}{h_b} \times \sqrt{\frac{k_s \times \rho_s \times c_s}{\pi}} \times \left(\frac{T_g - T}{\sqrt{t}} \right) \dots\dots\dots (式 4-7)$$

ここで、

- W : 蒸発率 (kg/cm²s)
- h_b : 沸点での蒸発潜熱 (J/kg)
- k_s : 流出先基質の熱伝導率 (J/s・m・K)
- ρ_s : 流出先基質の密度 (kg/m³)
- c_s : 流出先基質の比熱 (J/kg・K)
- T_g : 流出先基質の温度 (K)
- T : 液体の温度 (K)
- t : 流出後の時間 (s)

(3) 火災

1) 地上液面火災

火災から任意の位置にある面が受ける受熱強度 (放射熱) は次式で示される。

$$E = \Phi \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \dots\dots\dots (式 4-8a)$$

ここで、

- E : 受熱強度 (放射熱強度: J/m²・s)
- Φ : 形態係数 (0.0~1.0: 無次元数)
- ε : 放射率
- σ : ステファン・ボルツマン定数 (5.6703 × 10⁻⁸ J/m²・s・K⁴)

実用上は、燃焼液体が同じであれば火災温度と放射率は変わらないとして仮定し、放射熱発散度 ($R_f = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$) を求め、簡易的に(式4-8b)で求める。

$$E = \Phi \cdot R_f \dots\dots\dots(式 4-8b)$$

形態係数 Φ は、浮き屋根式タンクの全面火災や漏洩可燃性液体火災 (ダイク火災) を想定して、円筒形火災と方形火災を以下に示す。

① 円筒形火災

円筒形タンクの上部全面火災、液体が平らな地面に流出した場合、防液堤が正方形に近い場合に用いる。なお、地面に流出した場合は、液体の燃焼量と流出率が均衡した最大半径の火災として推算する。

$$\begin{aligned} \Phi = & \frac{1}{n \times \pi} \times \tan^{-1} \left(\frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \right) + \left(\frac{m}{\pi} \right) \\ & \times \left[\frac{A - 2n}{n \times \sqrt{A \times B}} \times \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{A \times (n-1)}{B \times (n+1)}} \right) \right. \\ & \left. - \frac{1}{n} \times \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{n-1}{n+1}} \right) \right] \dots\dots(式 4-9) \end{aligned}$$

ここで、

$$A = (1+n)^2 + m^2$$

$$B = (1-n)^2 + m^2$$

m = (火災の高さ H : m) / (火災の底面半径 R : m)

n = (火災底面中心から受熱面間での距離 L : m) / R

② 方形火災

防液堤などの囲いが、長方形の場合に用いる。

$$\begin{aligned} \Phi = & \frac{1}{2 \times \pi} \times \left[\frac{X}{\sqrt{X^2 + 1}} \times \tan^{-1} \left(\frac{Y}{\sqrt{X^2 + 1}} \right) \right. \\ & \left. + \frac{Y}{\sqrt{Y^2 + 1}} \times \tan^{-1} \left(\frac{X}{\sqrt{Y^2 + 1}} \right) \right] \\ & \dots\dots\dots(式 4-10) \end{aligned}$$

ここで、

X = (火災高さ H : m) / (火災前面から受熱面間での距離 L : m)

Y = (火災前面幅 W : m) / L

③ 火災の想定

液体が平らな地面に流出した場合は、次式で火災面

積を求め、底面半径の3倍の高さの火災を想定する。

$$\begin{aligned} S (\text{火災面積 } m^2) \\ = & \frac{Q_L (\text{液体流出率 } m^3)}{V_B (\text{液体の燃焼速度 } m/s)} \\ & \dots\dots\dots(式 4-11) \end{aligned}$$

円形火災も火災底面半径の3倍の火災高さとして仮定する。正方形に近い防液堤内全面火災の場合は、正方形の面積に対応する円筒火災として仮定し、当該相当円筒の火災の半径の3倍とする。長方形にダイク火災は火災前面幅の1.5倍と仮定する。

なお、浮き屋根式タンクの火災の地上での受熱強度を求めるような場合は、タンク側面の分の形態係数を減じて放射熱を求める。また、空気供給の不足から黒煙が発生することから、放射発散度が低減するため、火災底面積を考慮した低減率を用いる。

2) 海上液面火災

ローディングアーム等から可燃物が流出・着火した場合は、上記の液体が平らな地面に流出した場合に対応した計算を行う。液面半径も流出率と燃焼量が均衡する最大火災を想定する。

3) その他の火災事故

① ファイヤーボール

漏洩した可燃性ガスが空気と混合し、可燃性蒸気雲を形成し、着火した場合に形成されることがある。ファイヤーボールを形成に寄与するガス量は、可燃性ガス量と酸化に必要な酸素量の合計である。寄与可燃性ガス量を想定することにより、ファイヤーボールの直径、継続時間、球形と想定した放射熱を求める。

② BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion)

液化ガス貯槽が流出液火災に曝され、高圧となり、貯槽が破損し、大量なガスが大気中に放出される場合に発生する。このときは、強烈的放射熱強度とともに、破損容器片の飛翔 (ミサイル) も考慮する必要があるが、未解明な点が多い。

③ フラッシュ火災

流失した可燃性物質が空気と混合し、可燃性蒸気雲を形成し、燃焼する災害モードであるが、この場合は、火災伝播速度が比較的遅く、持続時間

も短いため、流出物質の爆発下限界濃度又はその1/2を危険範囲と評価する。したがって、後述するガス拡散濃度に基づき危険判定に用いる。

④ ガス火災

高压容器から可燃性ガスが噴出し、ガスに着火した場合に形成される。火炎放射状になり、発熱量と流出量の積の平方根に比例した範囲が危険区域と想定される。

(4) ガス爆発

可燃性ガスが流出し、着火すると爆発的に燃焼（爆燃、爆轟）することがある。爆薬を爆源とする爆発によって生じる爆風圧は、『爆薬量との関係として、スケール化距離とピーク圧は、「ホプキンソンの3乗根法則」が「スケール則」として成り立つ』ことが知られている。このことから、ピーク圧は爆薬量の3乗根に比例した距離（換算距離）と同一となる。

可燃性ガスを爆源する場合、爆風圧推算に際して、TNT爆発との比較からTNT収率から求める方法が使われている（高压ガス保安法）。つまり、所定のピーク圧から換算距離（λ）を求め、この換算距離と等価TNT火薬量（ W_{TNT} ）の3乗根の積から影響距離が求められる。等価TNT火薬量は、ガスの流出量（ W_G ）、燃焼熱量（ Q_G ）、爆燃係数（φ）、フラッシュ率（f）、TNT収率（r）の積をTNT火薬の燃焼熱量（ Q_T ）で除した値である。コンビ則では物質別温度別にK値を示しており、簡便化した次式で保安距離を定めている。

$$R = 0.04 \times \lambda \times (K \cdot W_G)^{1/3} \dots\dots\dots(式 4-12)$$

ここで、

R：爆心からの影響距離（m）

λ：換算距離

K：コンビ則による値

W_G ：可燃性ガスの流出量（kg）

(5) 海上流出・拡散

海上に石油類などが流出した場合、海面上を流出液は拡がる。この拡がり（拡散）を円筒状の層を形成し、重力加速度と粘性摩擦による抑止を受

けて同心円状に周辺に広がっていくと仮定する。海面上の液層の容積Vは、流出液容積 V_0 、海水の比重 ρ_s 、流出液の比重 ρ_o を用いて求めることができる。

$$V = (\rho_s - \rho_o) / \rho_s \times V_0 \dots\dots\dots(式 4-13)$$

この式に、位置エネルギーの変化式、運動エネルギー変化式、粘性エネルギー変化式、表面張力変化式を用い、液蒸発による液体の蒸発速度から変化量（減量）を求め、拡散半径を求めることが出来る。

なお、本稿において、海上液面からの蒸気拡散の推算式は言及しないこととする。

4.2 揮発性物質のガス化

石油化学においては、C10以下の炭化水素を主な原料としている。そこで、C10以下の炭化水素類を表4-1に示す。物質によりモル分率に従

表 4-1 炭化水素の種類（一部省略）

	炭素数	炭化水素名	参 考
n パ ラ フ イ ン	C1	メタン	
	C2	エタン	
	C3	プロパン	
	C4	ブタン	
	C5	ペンタン	
	C6	ヘキサン	
	C7	ヘプタン	
	C8	オクタン	
	C9	ノナン	
	C10	デカン	
イ ソ パ ラ フ イ ン	C4	イソブタン	メチルプロパン
	C5	イソペンタン (ネオペンタン)	メチルブタン
			ジメチルプロパン
	C6	イソヘキサン (ネオヘキサン)	メチルペンタン
ジメチルブタン			
C7	イソヘプタン	メチルヘキサン	
中 略			
ナ フ テ ン	C5	シクロペンタン	
	C6	シクロヘキサン	メチルシクロペンタン
C7	シクロヘプタン		
中 略			
芳 香 族	C6	ベンゼン	
	C7	トルエン	
	C8	キシレン	o-キシレン
			m-キシレン
p-キシレン			
		エチルベンゼン	
以 下 略			

わないものもあるが、これらの炭化水素類の混合物の蒸発潜熱や定圧比熱はモル分率に基づくものと仮定する。

蒸発潜熱の推算であるが、基本的手順は図4-1に示す通りで行う。アントワンの式を用いて蒸発潜熱を推算するためには、気体と液体の圧縮因子の差を求めておく必要がある。この圧縮因子は、飽和蒸気圧と臨界圧力の比と、流出前の液温と臨界温度の比を用いて求めることができる。飽和蒸気圧は、アントワンの定数を用いて求めることができる。

臨界温度は、炭化水素の沸点とその炭化水素の

分子形状による温度に係る加算因子を用いてJobackの方法を用いて求める。また、臨界圧力は、炭化水素の分子量と圧力の係る加算因子を用いて、推算することができる。

以上の計算を行うことに混合炭化水素の分子ごとに蒸発潜熱を求め、混合炭化水素のモル分率から、加圧された加熱混合炭化水素の蒸発潜熱を求める。

定圧比熱は、図4-2に示すパラコールと分子屈折を求めて、物質に対応する定数A、Bを用いて20°Cの値を求めることができる。（任意の温度、圧力の値の求め方は省略）

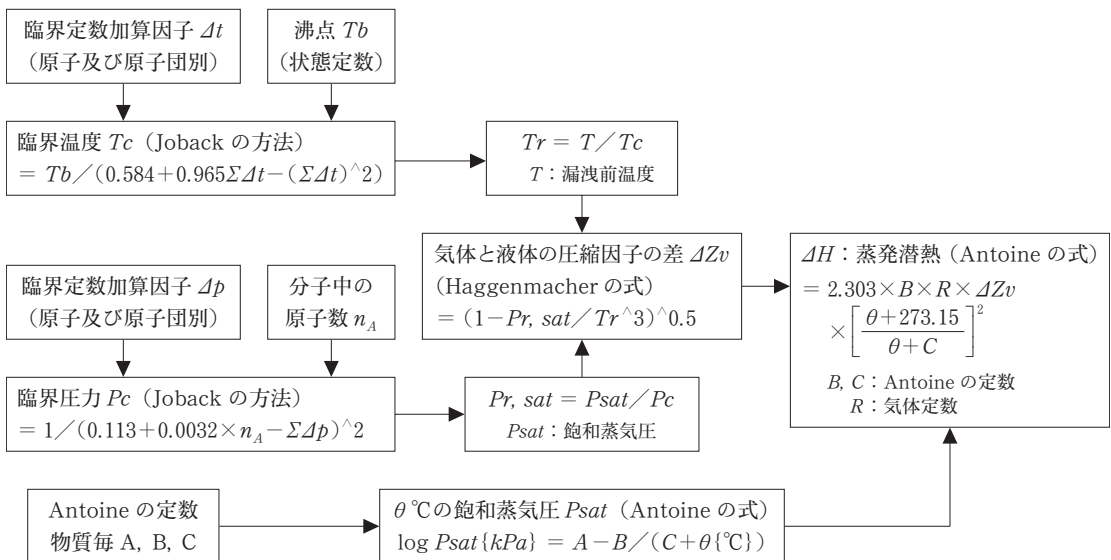


図 4-1 簡易的に求める蒸発潜熱推算手順

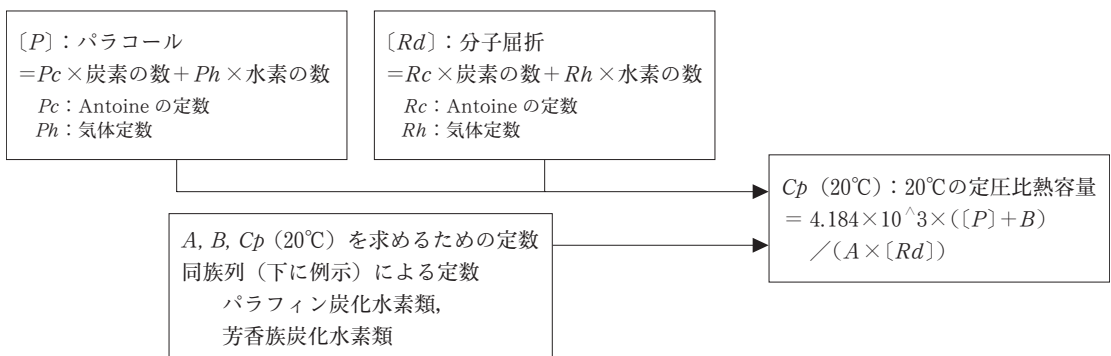


図 4-2 簡易的に求める定圧比熱容量推算手順

4.3 放射性物質

我が国の原子力関連施設として、立地数は原子力発電所が最多である。スリーマイルアイランド原子力発電所、チェルノブイリ原子力発電所の事故は、世界に多大な影響（環境的にも、社会的にも）を及ぼした。これらの事故はシビアであるが、発生確率は少ない。本稿では、事故発生の確率を無視することが出来ない、放射性気体や液体を用いるウラン濃縮施設（遠心分離方式）を取り上げる（放射性物質に関わる異常時）。どの施設で、どのような異常が発現し、如何なる物質を、どの程度漏洩するか、という視点で、資料（ERDA-1543）に基づき紹介する。

(1) 想定ウラン濃縮施設の概要

天然ウランと使用済み核燃料の再処理工場で精製された減損ウランを用いる施設を想定する。製品の低濃縮ウランの濃縮度として、3.2%、2.7%、2.0%の濃縮製品とする。廃棄材ウラン（劣化ウラン）の濃度は0.3%と想定する。分離作業量は年間約8,750 ton-SWUである。

(2) 異常時の想定

① 臨界事故

遠心分離濃縮装置は、低濃縮ウランをガス状（UF₆）で使用する事から、臨界事故の可能性は極めて低い。何らかの異常が発生し、減速材存在下でウランが局所的に集中した場合、臨界事故の可能性もある。似たような事故は、取扱物質は液体ではあったが、東海村の核燃料材製造事業所で発生している（作業規則違反などによる）。低濃縮ウランの熱中性子のエネルギーレベルは0.0025 eV 程度である。崩壊熱（熱放出）も1 kWh 程度である。建屋内の汚染にとどまるが、FP (fission products) の除染は必要になる。

② フッ化コバルトトラップの事故

使用済燃料を再処理工場で処理し、回収されたウランやプルトニウムを濃縮ウラン製造の原料にする場合は、原料に含まれているFP等を取り除くため、フッ化コバルト（CoF₂）で精製する。

半年程度使用したフッ化コバルトトラップ（容量：約0.07 m³）は、新しいトラップと交換され、トラックで処理設備（埋設）へ輸送する。事故は、輸送中トラックからのトラップ落下に伴うバルブ破損する事故、何らかの原因によりトラップが破壊し、充填物が全量放出する事故が考えられる。トラップ内気相は約1%であるので、前者の事故による重大な問題は発生しない。後者の事故では、放射性物質はフッ化コバルトに吸着されているので短時間に解放される放射性物質は少なく、放出される放射線もわずかである。ただし、フッ化コバルトの化学的特性から、強雨時の場合は別途検討する必要がある。

フッ化コバルトに吸着された核種は精製したウラン量などにより異なるが、最大量として、Np-237, Pu-239, Ru-106（3核種で約930億Bq）その他Zr, Nb, Cs, Ceなどで、約11億Bqとしている。

③ 原料供給系の事故

濃縮施設での最も厳しい事故は、オートクレーブ内のUF₆シリンダーの破損である。オートクレーブ内の温度は約82℃、シリンダーガス圧は約2.6気圧である。この条件で放出した場合、シリンダーは15分程度で液状UF₆は全量流失する。オートクレーブは耐圧設計されていることから、UF₆を格納できるが、オートクレーブも破損した場合は建屋内に放出される。

液状のUF₆が漏洩した場合は、固化する過程でUF₆の気体と固体を発生し、このとき、液状UF₆の7.5トン程度は気体に、0.06トン程度の固体となる。気体UF₆は空気中の水分と反応し、UO₂F₂が生成すると同時に、HF（フッ化水素）が生成され、大気中に放出される。

原料用UF₆シリンダーからの放出核種と放出量の主なものは、天然ウラン使用14tonシリンダーからは、U-234, U-238, U-235で1.4Ci程度となる。使用済みウランを用いたシリンダー（10ton）の主な核種と放出量は、U-238, U-236, U-234, U-237で約480億Bq、その他U-232, U-235, Tc-99, γ-F.P.などである。

④ 製品抜き出し系の事故

製品液体 UF₆ はトラップとアキュムレーターを経由し、輸送用シリンダーに充填される。アキュムレーターとシリンダー間は接続と取外しを繰り返すフレキシブルジョイントを用いることから、漏洩の可能性は高い。3.2%濃縮製品用シリンダー（25 ton）へのジョイントでの漏洩は、15分間で、約1,200億 Bq（多い順に、U-235, U-234, U-237, U-234）である。大気中の水分と反応し、生成される HF は 300 kg 程度の放出となる。

⑤ 廃棄材抜き出し系の事故

UF₆ ガスの漏洩は、プロセス配管の破裂、圧縮機の軸封部破損の2通り考えられる。最も圧力が加わる圧縮機の配管が破損した場合は、数分間で14~16 kg の UF₆ が建屋内に放出される。空中の水分と反応して生成される UO₂F₂ の約40%は大気中に放出される。漏洩が10分程度続くと、HF は 36 kg 大気中に放出される。

廃棄材抜き出し系の圧縮機器軸封部破損した場合の放出量（10分間）は、U-238 が最大で、U-234, U-236, U-235 の順である。総計は約22億 Bq（Uとして110 kg 程度）の放出が考えられる。

⑥ 遠心分離機の事故

遠心分離機の集合体であるカスケード本体（それぞれプロセス建屋に設置）は、負圧（大気圧以下）運転である。カスケード配管に破損が生じた場合、空気がカスケード内に流入する。逆拡散により UF₆ は建屋内に流出するが、建屋外への放出は無視できる。

⑦ 自然災害を起因とする事故

我が国では地震を考慮する必要がある。この最大被害は建屋の破壊とこの事象に伴うオートクレーブ、カスケード、シリンダー等の破損が生じる。破損の想定が必要で、放出 UF₆ 量が最大になる可能性もあると思われるが、被害想定が出来ないため（事例が無い）、本稿では省略する。

以下、次号に続く。

5. ガス拡散影響強度の想定手法

- 5.1 拡散想定条件
- 5.2 拡散計算式

6. 影響評価指標

- 6.1 可燃性ガス拡散の評価
- 6.2 火災等の放射熱の評価
- 6.3 爆発の評価
- 6.4 有毒物質の評価
- 6.5 プロビット法（確率単位法）

終章

資料 試算例示集

参考文献

- 1) AIChE: "DOW's Process Safety Guide," 1966
- 2) AIChE: "AIChE Pilot Plant Safety Manual," 1972
- 3) AIChE: "DOW's Safety and Loss Prevention Guide Hazard Classification and Protection," 1973
- 4) AIChE: "Fire & Explosion Index Hazard Classification Guide" 6th Edition, 1987
- 5) AIChE: "DOW's Fire & Explosion Index Hazard Classification Guide" 7th Edition, 1994
- 6) ERDA-1543: "Environmental Statement - Expansion of U. S. Uranium Enrichment Capacity," 1975
- 7) Lewis, D. J.: "The Mond Fire, Explosion and Toxicity Index - A Development of DOW Index," Paper presented at the AIChE Loss Prevention Symposium, Houston, 1979
- 8) Lees, F. P.: "Loss Prevention in the Process Industries". 1980（井上威恭, 上原陽一監訳, 産業安全工学ハンドブック（1989）, 海文堂
- 9) 安全工学協会: 新安全工学便覧, 1999
- 10) 井上威恭: ETA 安全工学, 総合安全工学研究所, 日本工業新聞社, 昭和54年
- 11) 大橋親愛: ダウケミカルの危険度（第4版）評価の活用, 高圧ガス, 16(5), 229-253, 1979
- 12) 化学工学会: 改訂六版 化学工学便覧（第五刷）, 平成18年
- 13) 神奈川県石油コンビナート等防災本部: 神奈川県石油コンビナート等防災計画（資料編）, 平成16年
- 14) 高圧ガス保安協会: 安全管理システムの解説とリスクアセスメントの実際, 平成18年
- 15) 高圧ガス保安協会: 欧米諸国におけるリスクマネジメントの現状, 昭和56年度海外保安情報調査報告書, pp. 284-336, 昭和58年

（参考文献：次号に続く）