

第4章 爆発リスクの管理

第4.1節 爆発の機構及び形態

4.1.1 火薬類の反応伝播形態（燃焼、爆燃、爆轟）

火薬類のような爆発反応性物質の爆発リスクを評価及び管理するためには、火薬類がどのようなメカニズムで燃焼や爆発を起こすかという火薬類の反応形態を理解することが重要である。

火薬類は熱力学的に準安定状態物質であり、これに外部より加熱、衝撃等の刺激を一定量以上与えると活性化状態となり、火薬類を構成する原子間の再結合、すなわち化学反応が起こる。化学反応により熱力学的に安定な水や炭酸ガス等が生成するとともに、原子間結合エネルギーの一部が化学反応熱として放出される。一定の時間に一定量以上の反応熱が放出されるようになると、外部より物質・エネルギーが供給されなくても、自身で未反応部の火薬を順次活性化して周囲へ反応を伝播し続けることができる。反応伝播速度は、反応熱の未反応領域への伝わり方に依存する。反応熱の伝播機構は、以下の3種類に大別できる。

液体中の熱伝導 (conduction)

高温気体反応生成物等の対流・拡散 (convection, diffusion)

火薬内を伝播する衝撃波 (shock wave)

熱伝導、拡散、衝撃波が支配的な反応は、各々、燃焼（定常燃焼：combustion）、爆発的燃焼（爆燃：deflagration）、爆轟 (detonation) と言い、各々、 $\sim \text{cm/s}$ 、 $\sim 100 \text{ m/s}$ 、 $\sim \text{km/s}$ の反応伝播速度を持つ。火薬類の威力（パワー）はエネルギー放出速度で表せるので、反応伝播速度の大きい爆轟が最強である。1 kg の高性能爆薬が爆轟した際のパワーは10億 kW 級の巨大なもので、これは日本の発電所をすべて集めた発電出力よりも大であり、このことから高性能爆薬の爆轟反応の凄まじい破壊力が想像できるであろう。

“explosion” は爆燃、爆轟の両方の意を含むが、日本の法規（火薬類取締法）では、燃焼または爆燃するものを火薬、爆轟するものを爆薬、両者を総称して火薬類と定義しており、火薬と爆薬の法規制は異なっている。多くの火薬類は発火後、燃焼し、周囲条件により爆轟へと転移するが、爆轟しか行わないものや発火後容易に爆轟へ転移する火薬類は起爆薬（primary explosive）と呼ばれ、それ以外の通常の爆薬（二次爆薬：secondary explosive）と区別されている。

4.1.2 火薬類の発火・爆発機構の概要（発火・燃焼から爆轟への転移）

火薬類を一定の速度で加熱すると、ある温度で分解が始まり、さらに加熱を続けると発火・燃焼へと移る。火薬類の分解開始温度と、明確な発火が観測される温度^{*1}は火薬類の種類により異なるが、その差は概略 10 内外である。火薬類を分解開始温度に保持しておく、通常、発熱分解反応が始まる。発熱量が火薬表面からの放熱量より大きい場合、蓄熱のため内部温度が上昇し発火に至る。従って、分解開始温度は、熱的安定性を見積もる重要な指標であり、実用に供す火薬類では少なくとも 100 以上高いほど望ましい。注意すべきは、分解開始温度は異物の混在（触媒作用）や雰囲気条件により異なり、低下して思わぬ事故につながることである。

発火した火薬類は、発火場所から、通常は燃焼面が未反応部へ伝播してゆく。火薬類が砲弾のように密閉されていると、燃焼生成ガスが充満して内部の圧力が増大する。火薬類の燃焼速度は圧力の指数乗に比例して増大するので、密閉条件下では相乗的に燃焼面の伝播速度と圧力が増大して、爆燃状態になる。爆薬の場合、さらに内圧が上昇すると、未反応領域の爆薬中に衝撃波が生起し、爆燃から爆轟へと転移する。^{*2}このように発火から爆燃を経て、爆轟に転移する現象を DDT (Deflagration to Detonation Transition) と言い、火薬類爆発事故の典型例の一つである。

爆薬に直接、一定強度以上（臨界圧力）の衝撃波を入射させた場合、衝撃波背後で爆轟が誘起される^{*2}。この現象はSDT (Shock Waves to Detonation Transition) と言い、異種または同一火薬類間の殉爆や砲弾間の殉爆がこれに相当する。爆薬の爆轟には 2 km/s 程度の低速度で伝播する準安定な爆轟と 3~9 km/s の速度の安定な爆轟の 2 種類があり、前者を低速爆轟 (Low Velocity Detonation: LVD)、後者を高速爆轟 (High Velocity Detonation: HVD) と言う。

低速爆轟はニトログリセリンのような液体爆薬、ダイナマイトのようなゼラチン状のものや紛状の高性能爆薬に観測されることが多く、0.1 GPa 程度の低い衝撃波圧力で誘起される。高速爆轟は、爆薬の初期密度に大きく依存するが、これを直接誘起するには、概略、数 GPa 以上の衝撃波圧力が必要である。液体のニトログリセリンで気泡等を含むものは、0.1 GPa 以下の衝撃波圧力でも低速爆轟は誘起されるが、高速爆轟を直接誘起するには 10~15 GPa のかなり強い衝撃波圧力を必要とする。一般に低速爆轟を呈す爆薬は、燃焼、爆燃から容易に低速爆轟へ転移し、低速爆轟を経て高速爆轟に転移することが多い。したがって、ニトログリセリンのように低速爆轟を起こしやすい爆薬は、取扱上、細心の注意が必要である。

4.1.3 外部刺激による反応開始：ホットスポット(Hot Spot)の生成

火薬類に打撃や摩擦等、外部から刺激、すなわちエネルギーを与えた場合、外部からのエネルギーが火薬類全体わたって均等に配分されるとは限らない。例えば、粉

*1) 発火温度は火薬類を一定温度に曝し、5秒経過後に発火する温度が採用されることが多い。

*2) 爆轟を誘起し得る最低衝撃波圧力を臨界衝撃波圧力と言う。

体状の火薬類を打撃する場合、粒子間の接触点に摩擦が起こり、接触点付近の温度が高くなる。このように、火薬類の内部で外部エネルギーが部分的（局所的）に集中され、温度が他の部分よりも高くなった点（微小領域）をホットスポット(Hot Spot)と言う。ホットスポット内の温度が火薬類の分解温度以上であれば分解反応が始まり、ホットスポット内での発熱がその境界での放熱速度以上になると、ホットスポットから周囲への反応伝播により爆燃状態となる。外部より火薬類に刺激（エネルギー）を与えた場合、生成するホットスポットのサイズや温度の他に、数や分布状況等が全体としての発火から爆・不爆への進行を左右する。

ホットスポットは不均一加熱、すなわち局部加熱が起こることを示すもので、液体のような外見上均一な火薬類でも、これに打撃等、外部刺激を与えると、液体内部に含まれる微小な気泡の圧縮加熱に外部エネルギーが集中されホットスポットを生成する。火薬類の取扱において、局部加熱に起因する発火・爆発の防止対策は最も重要な対策の一つである。火薬類の局部加熱すなわちホットスポットの生成原因として考えられる主なものは以下の通りであり、現実にはこれらのいくつかが同時に起きることが多い。

- 微小気泡の断熱圧縮（液体またはゼラチンのような液体類似物質の場合）
- 固体粒子間の接触面での相互摩擦
- 液体・固体の内部摩擦（剪断摩擦、粘性摩擦等）
- 空隙の圧壊（ジェット、スポーリング、摩擦等の発生）
- 衝撃波波面のゆらぎによる相乗加圧効果（密度・組成・反応に関する不均一性等に起因）
- 圧縮下の局所的相転移（発熱相転移を行うもの）
- 結晶内の格子等の欠陥
- 電磁気的効果（静電気放電、誘電破壊等）
- その他

第4.2節 火薬類の安全性評価方法

火薬類の安全性を評価する試験法は以下の2方法に大別される。

化学的・熱的安定性（安全性）の試験

外部刺激に対する応答性（分解・発火・爆発）の試験

外部刺激に対する応答性は感度(sensitivity)と呼ばれ、外部刺激の種類により摩擦感度、衝撃感度等の名称になる。

外部刺激への応答性の試験は感度試験法と呼ばれ、強い刺激を与える試験法と弱い刺激での試験法がある。前者には、衝撃波感度試験（例：カードギャップ試験）、銃撃感度試験、殉爆試験等があり、後者には、落槌衝撃感度試験、摩擦感度試験、電気火花感度試験等、多種多様な試験方法がある。試験法は各国で標準化されており、日本ではJIS規格がこれに当たる。現在、国連を中心として国際統一化が進められている。

第4.3節 燃焼・爆発に伴う火薬類の危険性(Hazards)

火薬類が燃焼・爆発した際に周囲へ与える種々の被害は、住家のような建設物（非生物体）と人体（生体）とを区分して考慮する。主なものを表4.1に掲げ、各々の要点を以下に記す。

表4.1 火薬類の燃焼・爆発の被害

被害の要因	被害（危害）の内容
爆轟生成ガス	動的破壊、高速飛翔体衝突による破壊
爆風	建造物の破壊 人体への影響
クレーター	建造物の破損 岩石・土砂の飛散・衝突
地震動	建造物の破損
飛散物	建造物の破損 人体損傷
爆発生成物	毒性、刺激性、環境汚染
輻射熱	火災・火煙

4.3.1 爆轟（爆燃）生成ガス等による動的破壊：近接破壊

爆薬の爆轟生成ガスが示す温度・圧力は最大で 5000 K 40 GPa にもなり、また、それが急速に膨張するため、爆轟ガス近傍の物体は著しく破壊されるとともに、破片は高速度（～km/s）で飛散し、周囲へ高速飛翔体衝突による2次被害を起こす。高エネルギーの高速飛翔体は防御が容易でなく、また、衝突により、砲弾等に内蔵される他の火薬を起爆させる能力があるので注意を要する。

4.3.2 爆風(Blast Wave)

爆源から離れた場所では、空気中を伝播する強い圧縮波とその背後に存在する負圧力の影響を受ける。爆発に伴い空気中を伝播する圧縮波（背後の波形構造を含む）を爆風と言う。一般に、爆風のピーク圧力（過圧：Over pressure、常圧より増大している値）は、概略、薬量の3乗根に比例し爆源からの距離に反比例することが知られており、50 kPa（約0.5気圧）を超えると人の致死率が1%以上、5 kPaを超えると、建築物に軽微な被害が生じるとされている。遠方で爆風圧力がさらに減衰した場合、騒音としての問題が残る。また、爆風は伝播途中の地形や建造物の影響を受け、その他、気温、風向等の気象状況の影響を受けて、強まることもあるので注意を要する。

4.3.3 クレーター(Crater)

火薬類が地下（地中）や地表、あるいは地表面近傍で爆発すると、クレーターが生

じる。クレーターの体積は、土地の状況（砂、粘土、岩石、含水量等）により異なるが、火薬類が置かれている場所に強く依存し、地中、地表面、地上の順に大きくなる。また、概略、薬量に比例する。建造物がクレーター範囲にある場合、地下構造体を含めた建造物破壊を考慮する必要がある。次に、クレーター内の土砂類は飛散物となって遠方まで飛散する。この場合、一定量以上の運動エネルギーを有する飛散物は落下・衝突時に建造物や人体に被害を及ぼす。

4.3.4 地振動

上記のような爆発の場合、地中・地表面を伝わる波動（弾性波で地振動を起こす）が生じ、地表の建造物は地振動に曝される。地振動の強さは、薬量、距離、地盤（地層）の種類・構造等に依存する。地振動が建物等の建造物に与える破壊効果は、加速度、振動数、変形量等で総合的に評価されるべきものであるが、爆発に伴う振動の場合、変位速度(V)で評価され、建物に被害を与えない値としては $V < 5 \text{ cm/sec}$ が採用されている。

4.3.5 飛散物の人体への影響

前述した飛散物の人体への影響として、飛散物の持つ運動エネルギーで危険性が評価される。眼球とか頭部等、衝突部位により危険度は異なるが、概略、20～25 J（ジュール）以下ならば人体への影響はなく、100 Jを超えると致命的傷害が起こり得るとされている。

4.3.6 爆発生成物の生体（人体）への影響

通常の産業火薬類の爆発生成物は殆どが無害な水、炭酸ガス、窒素等である。しかしながら、一酸化炭素や NOx 類、アンモニア等の有害ガスも一部生成しており、また、煙火（花火）のように炎色反応を利用するものは、Cu、Sr、Ba 等の金属元素を含む有機・無機物が生成物中に存在するので、高濃度の生成物に直接暴露される場合には注意を要する。火薬類を構成する物質の量・組成等を事前にチェックすれば、反応生成物の種類・量をシミュレーションで想定できる。生成物の有害性が無視できない場合、爆発生成物がどのように大気と拡散して行くかを考慮するとともに、その対策が必要である。

4.3.7 輻射熱

火薬類の燃焼や爆燃、爆轟における反応波面の温度は 2,000 ～ 5,000 K 程度であり、1平方メートルの波面表面から、毎秒1万 kJ 程度の熱が放射されるので、周囲への輻射熱被害が想定される。^{*3}燃焼や爆燃のように、伝播速度が遅く、持続時間の長い波面に、人や建造物が暴露される場合、輻射被害を考慮する必要がある。

*3) 絶対温度 T の表面(黒体)から、単位面積あたり毎秒放出される輻射エネルギー W はつぎのシュテファン・ボルツマン式で表せる。 $W = \sigma T^4 \text{ [W]}$, $\sigma = 5.7 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-4}$

4.3.8 その他

爆轟により破壊された高速・高温金属片の衝突による火災、爆燃中の反応物の飛散による火災、火傷等がある。

第4.4節 火薬類そのものの有害性

燃焼、爆発だけでなく、火薬類自身も有害性がある。その第一は、化学物質としての人体（生体）への急性毒性、刺激性、悪臭、皮膚損傷等の速効的なものから、慢性中毒、発ガン性という長期的な健康影響や環境問題である。第二は、反応して金属等を腐食や侵蝕すること、並びに火薬類の反応生成物による金属腐食等の2次の有害性が問題になる場合もある。このように、火薬類を化学物質として捉え、その有害性を総合的に検討・評価することも重要である。ちなみに、ピクリン酸（水溶液を含む）は触れると皮膚や粘膜を着色し、損傷させるので取扱に注意が必要である。

第4.5節 ピクリン酸及び金属塩の安全性

旧日本軍が、炸薬あるいは補助爆薬（伝爆薬）として砲弾等に使用したピクリン酸やその塩類についての安全性に関しては、感度を含め爆発性能等、未だ不明な点が多いが、内閣府遺棄化学兵器処理担当室等の支援により、産業技術総合研究所等で研究が行われ、データの蓄積が進行中である。これまでの結果を整理すると以下のようなになる。

各種のピクリン酸金属塩を合成・分離するプロセスがほぼ確立されたことで、金属塩の同定ならびに安全性評価の信頼度が向上した。

ピクリン酸金属塩は落槌等の衝撃に関して鋭敏であり、ピクリン酸同様に低エネルギーシフトの傾向が見られる。

一部の金属塩は電気火花感度が鋭敏であり（発火エネルギー：1～10 mJ程度）、静電気等対して十分な注意が必要である。

ピクリン酸金属塩は純ピクリン酸よりも低温側で分解反応が始まり、100～150℃で分解を開始する塩もある。

以上の結果は、ピクリン酸、特に重金属塩は取扱に相当の注意が必要であることを示唆している。遺棄化学兵器処理における爆発リスクの予測ならびに適切な対策を構築するためには、今後とも、より広範な安全性データの収集が望まれる。

第4.6節 爆発リスク対策

4.6.1 リスク対策・管理の基本

物質を取り扱うプロセスにおいて、爆発性物質単体や空気・可燃性ガス混合気体のような爆発性混合物が生成しないように、ハード・ソフトの両面から対処するのが爆

発リスク対策の基本である。化学製造プロセス等では、反応におけるこれら爆発性物質の生成の事前予測、温度・物質等各種モニター設置、温度/濃度の制御、自動放圧・冷却システムの採用の他、万が一爆発が起きた場合には被害が最小化・極限化でき得るような対策が講じられている。

火薬類のような爆発性物質そのものを取り扱うプロセスでは、爆発を起こさせない、万が一の爆発が起きた場合、被害の最小化・極限化を図る、わが国の火薬類取締法は、これらの対策がハード・ソフトの両面から徹底して行われることを、公共の安全確保の観点から義務づけている。火薬類取締法で定義される火薬類は、4.1.1項で述べた火薬、爆薬の他に、これらを特定の目的に使用するために加工したものすなわちデバイス化したものとして、火工品があり、砲弾類はこれに属する。遺棄化学兵器である多量の砲弾類を解体し無害化するプロセス(行為)は、法規上、火薬類(火工品)の修理変形という製造行為となるので、わが国で行う場合には厳しい製造規制を受ける。従って、火薬類取締法等の関連法規の遵守は自明の爆発リスク・管理対策である。

しかしながら、法規は概ね最低限度のことしか要求していないので、中国の関連法規をも含む各種法規を基本とし、これに自主基準を付加して安全確保にあたるのがリスク対策・管理の基本であろう。ここで、安全確保のための自主基準の策定が難題である。過大・過酷な基準は多額な資金を要するだけでなく、効率的なプロセス運転を著しく阻害する。適切な基準設定には安全上の各種情報(高信頼性)の他、経験と叡智、決断能力等々を必要とする。

4.6.2 リスク対策の概要

中国遺棄化学兵器処理における爆発リスク対策・管理については、具体的処理プロセス、砲弾類の風化・損傷状況、ピクリン酸およびその金属塩類の安全性等々、未だ不明瞭な事項が多い状況であるが、これまでに得られている情報を基に爆発リスク対策・管理の主要事項を述べる。

第一に、火薬類を含有する砲弾類を発掘から解体、無害化処理までの過程において、爆発を起こさせないシステムにすることが肝要である。これは、火薬類の爆発発生機構等に関して4.1.1~3項で述べた内容を基に、発火と燃焼・爆轟転移に至る要因を洗い出し、適切な防護対策を講ずることである。防護対策は、発火(着火)を起こさせないことを第一とし、発火した場合には、爆燃・爆轟への転移を阻止することを第二の目標とする。難題はピクリン酸重金属塩への対処である。重金属塩の感度は起爆薬と同等で極めて鋭敏と想定されるので、これを含有するものは特別の取扱が必要である。炸薬または伝爆薬として使用されているピクリン酸の一部が臨界量を超えて重金属塩に変質している場合、重金属塩の発火・爆発は、ほぼ100%、砲弾全体の爆発へと進行するであろう。従って、砲弾内部におけるピクリン酸重金属塩の存在の診断と、重金属塩を内蔵する砲弾の適切な取扱方法がリスク管理の最重要事項の一つとなろう。同様に、内蔵物が漏洩した砲弾の周辺におけるピクリン酸塩の存在診断と処置方法も重要である。

第二は、万が一の爆発に対する被害の最小化、局限化対策である。これは、砲弾

相互間の殉爆防止、すなわち、1個の砲弾の爆発により近接の砲弾が殉爆し、結果として一定場所に存在する砲弾すべてが爆発するのを防止することが最重要対策である。具体的には、砲弾の貯蔵、輸送において、各砲弾が殉爆しないような防護措置を講ずるとともに、貯蔵、輸送における1工程での最大薬量（砲弾数）を設定し、相互の殉爆防止に必要な保安距離を確保することである。これは解体・処理施設においても同様である。火薬類取締法では、火薬類の製造は原則として、一つの工程を独立した一つの施設で行い、各施設には最大取扱量、定員を設定するとともに、施設相互間の保安距離を確保することや、施設を土堤で囲む等により施設相互の殉爆防止を義務づけている。また、殉爆防止と周囲への被害を最小化するため、爆発の恐れのある施設は、爆発の際に軽量飛散物となるように施設の構造、材質等を規制している。ハルバ嶺のように冬が極寒となる地域では、温湿度管理のために、施設構造や材料を特別に考慮する必要がある。

第三は、教育・訓練を含めた安全管理体制の構築とその実施である。これは、形骸化、マンネリ化させないことが特に重要である。また、安全に関連した情報は広範に収集するとともに、重要事項は迅速かつ的確にリスク対策に反映されることが重要である。

4.6.3 深刻な爆発リスクの推定

中国遺棄化学兵器処理における爆発リスクの中で、最も深刻な被害が推測されるのはハルバ嶺での砲弾発掘作業であろう。地中孔に化学兵器を主とする各種砲弾が集中埋設されている。したがって、発掘現場では、1個の砲弾の爆発は埋設されているすべての砲弾の瞬時爆発へと進行するリスクがある。現時点ではインプットできるデータの信頼性に欠けるので定量的予測は困難であるが、その可能性を無視することはできない。

いくつかの孔に埋設されているが、どの程度の量の砲弾が瞬時に爆発し得るかを想定し、被害予測と対応策を考慮することが重要である。ハルバ嶺での処理施設建設等は、このリスク評価結果に基づいて行われるべきであろう。

第5章 化学剤のリスク評価と管理

第5.1節 化学剤分析^{*4}

遺棄化学兵器処理事業を適切に実施するためには、処理すべき遺棄化学兵器中に含まれる化学剤等内容物の特定、実処理技術確立のための実験段階での確認、実処理プロセスにおける投入物質・中間生成物・最終生成物確認等のための定性・定量分析が必要となってくる。また、環境面からは発掘・回収および実処理施設における各排出口での監視が、さらに、作業の安全性確保のために、作業環境における化学剤の濃度監視も必要となってくる。

5.1.1 あか筒の分析

(1) 分析方法

あか筒には、セルロイドに含浸させたもの（セルロイドベース）と軽石に含浸させたもの（軽石ベース）との2種類がある。セルロイドベースの分析ではニトロセルロースの妨害をいかに抑えるかが重要となる。また、あか筒成分であるジフェニルアルシン化合物についていえば、極性溶媒中ではジフェニルクロロアルシン（DA：Diphenylchloroarsine）やジフェニルシアノアルシン（DC：Diphenylcyanoarsine）がビス（ジフェニルアルシン）オキシド（BDPAO：Bis(diphenylarsine) oxide）やジフェニルアルシン酸（DPAA：Diphenylarsinic Acid）に分解する。以上のことを考慮し分析手法を設計する必要がある。

実剤の分析においては、抽出溶媒としてアセトニトリルを用い（中国と検討の上決定）有機物を抽出した後、この抽出液をガスクロマトグラフ/質量分析計（GC/MS）、ガスクロマトグラフ/原子発光検出器（AED）でスプリットレス法により分析し、DA,DC,BDPAO,樟脳等の定性・定量を行うとともに、液体クロマトグラフ/質量分析計（LC/MS）、高速液体クロマトグラフ（HPLC）で DPAA 等の定性・定量も行った。一方、アセトニトリル抽出残渣については希塩酸による抽出を行い LC/MS、HPLC で DPAA 等の定量を行っている。

希塩酸抽出の残渣は、一方で元素分析（CHN）を行うとともに、他方で酸分解の後に結合誘導型プラズマ発光分光分析計（ICP）で無機分析を行い全体像を把握した。なお、本分析手法はセルロイドベース、軽石ベースともに共通である。

(2) 分析結果

全ての試料（セルロイドベース 21 種類、軽石ベース 6 種類）から DC および DA が検出されたものの、ほとんどの試料で 3%以下であり、セルロイドベースでは主成分として BDPAO（1%以下～16%）、DPAA（14%～42%）が検出された。一方、軽石ベー

^{*4}本分析は（財）化学物質評価研究機構が内閣府の委託を受けて実施したものである。

すでは BDPAO(29% ~ 42%) が主成分として検出され、DPAA は 3%以下であった。また、水分含有量はセルロイドベースが平均31.5%、軽石ベースが平均17.3%であったことから、セルロイドベースの方が水分の浸透割合が高く、分解が進んだものと考えられる。全体的な傾向として、水分量の多い試料で DPAA の割合が高かった。さらに、一部のあか筒内容物では定量値が明らかに低く、加えて無機分析の結果からも抽出残渣中からかなりの割合でヒ素が検出されていることから、有機ヒ素化合物が重合して残渣中に残っていることが推察された。しかし、この傾向は必ずしも水分や色などの外観との相関はなかった。結果を表5.1に示す。

表5.1 あか筒の分析結果

(単位:%)

		樟脳	DA	DC	TPA	BDPA O	PAA	DPAA	有機砒 素化合 物総量	ヒ素総 量(As)
99式 中赤 筒 6試料	最高	14.5	4.2	6.0	0.6	12.3	0.6	41.7	53.5	12.8
	最低	8.2	1.3	2.5	0.2	2.4	0.1	18.8	31.8	8.4
	平均	11.7	2.6	3.7	0.4	6.9	0.4	30.3	41.7	10.5
発射 式赤 筒軽 6試料	最高	13.1	2.2	1.9	1.9	16.0	0.1	39.8	53.4	11.7
	最低	6.4	0.1	0.3	0.3	0.1	0.0	3.5	4.0	1.7
	平均	10.8	1.2	7.5	1.1	5.9	0.1	21.2	30.2	8.0
98式 小赤 筒 6試料	最高	14.8	0.6	0.8	1.1	0.9	0.1	22.7	26.1	7.9
	最低	8.2	0.1	0.0	0.2	0.0	0.0	1.2	1.4	0.9
	平均	12.4	0.3	0.3	0.6	0.4	0.1	13.5	15.2	4.8
発射 式 赤筒 重 3試料	最高	22.1	3.0	0.7	1.1	4.9	1.0	32.9	39.9	10.7
	最低	10.9	0.4	0.1	0.3	3.0	0.4	6.0	12.9	5.0
	平均	15.5	1.6	0.3	0.7	4.2	0.7	23.0	30.6	8.7
97式 中赤 筒*5 6試料	最高		0.3	7.3	0.2	42.0	0.1	3.0	49.7	15.0
	最低		0.0	0.1	0.1	29.3	0.0	0.6	30.8	10.1
	平均		0.2	1.5	0.1	34.2	0.0	1.2	37.3	11.9

*5) 97式中赤筒は軽石ベース。これ以外はセルロイドベース

5.1.2 あか弾の分析

(1) 分析方法

あか弾はあか剤がそのまま充填されており、あか筒のようにセルロイドまたは軽石という媒体の影響がないため、標準溶液の安定性が確認されたトルエンで希釈し、熱分解の影響が少ないオンカラム注入法で GC 分析が可能である。抽出から測定までの操作は、抽出溶媒をアセトニトリルからトルエンに替えること以外、あか筒と同様である。

(2) 分析結果

これまでに予備試験として 1 試料を分析したのみであるが、DC が主成分 (91%以上) として検出されており、約 8% の BDPAO と微量のトリフェニルアルシンが検出されている。水分も 0.02% と微量であり、トルエン不溶解残渣も 1% 以下でこの残渣中のヒ素含量も低いことから、化学剤がそのままの状態で存在していることが確認された。

5.1.3 きい弾の分析

(1) 分析方法

きい剤はマスタードとルイサイト類の混合物である。マスタードおよび類似化合物は有機ヒ素化学剤に比べ安定であり、基本的にジクロロメタン、ヘキサン等の有機溶媒による前処理が可能である。一方、ルイサイト 1 は速やかにクロロビニルアルシン酸 (CVAA: Chlorovinylarsenous Acid) に加水分解し、アルコール類に容易に反応することに加え、GC 分析に際し加熱すると三量体を形成することが知られている。

また、ルイサイト 1 とその分解物のクロロビニルアルシンオキシド (CVAO: Chlorovinylarsenous Oxide)、クロロビニルアルソン酸 (CVAOA: Chlorovinylarsonic Acid) 等を区別して定量することは難しい。従って、きい剤の分析に際しては、その一成分であるルイサイトの分析に注意を要する。

これらの問題を避け、かつ、きい弾の場合水分の混入がほとんどないことが想定されたため、溶媒にトルエンを用い溶解希釈してマスタードとルイサイト類を直接オンカラム注入法によって GC で分析した。一方で、トルエン希釈液のチオールによる誘導体化を行い、分解物を含むルイサイト類の総量を定量することで、分解物の有無を確認することとした。トルエン溶解残渣は希塩酸抽出して直接および同様な誘導体化を行い LC で定量した。希塩酸抽出残渣は元素分析 (CHN) とイオンクロマトグラフィー (IC) による Cl⁻ 分析を実施している。

(2) 分析結果

これまでに予備試験として、液状および粘稠状の代表試料各 1 検体を分析したところであるが、液状試料でマスタード (38%) およびルイサイト 1 (32%)、ルイサイト 2 (10%) が主成分として検出され、ルイサイト 3 は極微量検出されたのみであった。一方、粘稠状試料では、同様に 3 成分が検出されたもののその定量値はマスタード (8%)、ルイサイト 1 (21%)、ルイサイト 2 (3%) と明らかに低かった。加えて、試料量に対するトルエン不溶解残渣の割合が液状試料の 4% に対し粘稠状では 55% であり、

化学剤の重合化が窺われ、特にマスタードでその傾向が高い。

今後の化学剤分析や実際の分解処理においても、これらの粘稠状成分に対する注意が必要である。

5.1.4 みどり筒の分析

(1) 分析方法

みどり筒の主成分である 2-クロロアセトフェノン (CN) は比較的安定な物質であり、水には不溶であるが有機溶媒にはよく溶ける。文献によるとヒドロキシアセトフェノンに分解するとあるが検出例は殆どなく、アセトフェノンが検出されている程度である。

みどり筒には二つのタイプがあり、一方はセルロイド片に CN を含浸させたものであり、他方は炭水化物に CN を混ぜ、太い線香状にしたものである。あか筒同様セルロイド成分が分析に妨害を与えることが懸念されるものの、CN 自身は熱分解等の影響も受けにくいいため、安定的に GC 分析が可能と考えられる。

実試料では、ジクロロメタンまたはアセトン等の有機溶媒で一次抽出を行い、抽出液と抽出残渣に分ける。抽出液は適宜希釈して GC/MS およびガスクロマトグラフ/水素炎イオン化検出器 (GC/FID) や同電子捕獲検出器 (GC/ECD) で分析し、クロロアセトフェノンを始めとする GC 分析可能な揮発性成分を定性・定量する。残渣については水または極性溶媒 (メタノール等) で二次抽出を行い、これを直接 LC に導入して分析するか、もしくはトリメチルシリル (TMS: Trimethylsilyl) 誘導体化を行って GC 分析に供する。二次抽出残渣は秤量後元素分析 (CHN および IC による Cl) を行うとともに酸分解後に ICP で金属元素の分析を行う。

なお、現段階では実試料を入手していないため、ここでは一般的要領を示すに止めた。

第5.2節 ヒ素の安定化処分

5.2.1 ヒ素処分法とその事例

中国に存在する遺棄化学兵器は、主に硫黄マスタードとルイサイトを主成分とするびらん剤のきい剤と、DC, DA を主成分とするくしゃみ剤のあか剤と呼ばれる化学剤が主成分である。いずれの化合物も、サリンや 等の有機リン剤と比べて、致死量が高く危険性は遥かに低い (日本学術会議第一次報告書「遺棄化学兵器の安全な廃棄技術にむけて」:平成13年7月23日, p6 参照)、熱的・化学的に不安定なため化学変化を受けやすく、そのままでは廃棄処分が出来ない。現在までにこのような有機ヒ素化合物を廃棄するには、化学的に安定な無機体のヒ素化合物にまず変換してから、セメント固化等の方法で遮断型の埋め立て処理をする方法が採用されている。有機ヒ素化合物の無機化には、 燃焼や化学的な酸化により有機ヒ素を無水亜ヒ酸 (As_2O_3) または無水ヒ酸 (As_2O_5) にして処理するか、 還元して金属ヒ素にするかの方法がある。いずれの方法を採用するにしても無機ヒ素化合物は毒性が強く、外部と遮断した貯蔵所で貯蔵するのが一般的な方法である。

世界中で化学兵器中のヒ素化合物を処理した例は少なく、第二次大戦後、世界各

国で化学兵器を分解せずに海洋投棄した例が多い。焼却処分された物も多いが、焼却後どのようにヒ素化合物を貯蔵したかは定かではない。現在までにヒ素を含む化学剤を処理した例として、DPAA とその汚染土壌等を燃焼法で無水亜ヒ酸として処分した例^{*6}（光和精鉱）と、ポーランドで行われたアダムサイトの H_3PO_3 を用いた還元により金属ヒ素に変換した例^{*7}が定量的なヒ素の処理例として知られている。これらの方法の詳細は既に報告されているので参考文献としてのみ挙げる。

5.2.2 処分済ヒ素化合物の取り扱い

遺棄化学兵器から回収されたヒ素化合物は、環境への影響を最小化するために、最終的には不溶化処理を施した上で埋め立て管理するか、あるいは無機化されたヒ素化合物を工業薬品として製品化し、再利用することも考えられる。

溶解度の低いヒ素化合物として、ヒ酸カルシウム ($\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$; 溶解度 0.013)、硫化ヒ素 (As_2O_3 ; 溶解度 5×10^{-5})、ヒ酸鉄 ($\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; 溶解せず) などにすることが工業的に実施されている。しかしヒ酸鉄の反応では、単にヒ素と鉄を反応させたのではヒ素が水酸化鉄 ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) に共沈するだけとなり、ヒ素の溶出が起こり得る。溶解度の低い $\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Scorodite) の形態にするには高温、高圧の条件が必要で、そのため単にヒ素-鉄化合物としたものをセメント固化して保管する方法が取られている。他の方法でもドラム缶詰めあるいはセメント固化等を行って保管しているが、埋立て処分では長年の経時変化で酸化し溶解度が増す恐れがある。従って埋立て処分を行う場合は、大きなプールのような遮蔽型埋め立て処理場を必要とする。セメント固化でヒ素化合物を不溶出にするには大量のセメントを必要とするため、ヒ素量に対し数 10 倍から数 100 倍の体積増となるのは避けられない。

ヒ素を工業薬品として利用する時の化学形態は、酸化ヒ素 (As_2O_3 , As_2O_5)、塩化ヒ素 (AsCl_3 , AsCl_5)、ヒ化水素 (AsH_3)、硫化ヒ素 (As_2S_3 , As_2S_5)、ヒ化ガリウム (GaAs)、ヒ化インジウム (InAs)、ターシャリーブチルヒ素 (TBA: $(\text{CH}_3)_3\text{CAsH}_2$)、トリメチルヒ素 (TMA: $(\text{CH}_3)_3\text{As}$)、トリエトキシヒ素 (TEOA: $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_3\text{As}$)、金属ヒ素 (-As) 等であるが、その出発原料は三酸化ヒ素 (亜ヒ酸: As_2O_3) である。三酸化ヒ素はかつて日本国内でも年間 1,000 t 程度生産されていたが、現在では 100 t 程度にとどまっている。世界の需要は三酸化ヒ素換算で 35,000 t 程度である。日本の需要はガラス消泡剤、電解製錬、半導体材料、工業薬品等で年間約 500 t であるが、この内半導体材料向けが高純度三酸化ヒ素を中心として 300 t である。

*6) 辻 ジフェニルアルシン酸の処理について - 遺棄化学兵器原料の処理 - (遺棄化学兵器第 1 回講演会 予稿集 第 6 章, 化学工学会編, 平成 12 年)

*7) Z. Wertejuk, M. Koch, W. Marciniak Recovered Old Arsenical and Mustard Munitions in Poland, " Arsenic and Old Mustard: Chemical Problems in the Destruction of Old Arsenical and Mustard Munitions, " p.91-104 ed.by J.Bunnnett and M.Mikolajczyk, NATO ASI series, Kluwer Academic, 1998

第5.3節 化学剤のリスク評価と管理

遺棄化学兵器処理事業において処理対象となる化学兵器に含まれる化学剤は、その有害性故に化学兵器として採用されたものであることを考慮すれば、事業の実施に当たり、その取扱いに伴うリスクを適切に評価及び管理し、労働衛生及び環境への悪影響を未然に防止することが重要である。本事業での化学剤の取扱いにおけるリスク評価及び管理については、国内の化学工業における通常のリスクマネジメントアプローチと比較して以下の困難が想定される。

一般の工業及び学術研究分野での使用頻度が低く関連情報の限定される化学剤の物性及び毒性をどのように評価するのか。

製造後 50 年以上を経過した約 70 万発と推定される多数の化学兵器を対象として、発掘・回収・輸送・保管・実処理を行うという先例のない事業であることから、リスク評価の客観性-信頼性をどのように担保するのか。

受容されるリスクレベルに関して日中関係者間の意思統一をいかに行うのか。

通常行われる化学物質のリスク評価と管理においては、理学的・工学的判断に加え政策的判断の要素が含まれるが、日中両国政府が当事者となる本事業においては特にその比重が高い。従って、上記の課題に対しては、条約の期限を念頭に早期に化学兵器の廃棄を完了するという事業目標と安全確保及び環境影響の回避という事業目標の両立を図りつつ、現実的なアプローチにより対処する必要がある。

現実的な解決法としては既存の知見を最大限援用することがポイントとなる。本事業における化学剤リスクの管理に当たっては、化学兵器を大量廃棄した実績を有する米陸軍の事例から多くの情報が得られる。米陸軍の定めた「毒性のある化学物質の安全基準」では、軍関係の毒性化学物質のあらゆる側面に対する安全プログラムとして、以下の諸事項を規定している。

イントロダクション

対象物質に関する情報

対象物質の監視に関する要求事項

個人防護服及び装備

除染及び廃棄処分

対象物質に関する活動の安全基準

人員保護の実際

研究室の安全性

保管

輸送

隔離距離基準

毒性化学物質に関する訓練

1997年にまとめられた同基準は、それ以前の米陸軍における化学剤リスク評価・管理実績の集大成としての性格を有しており、現実的かつ網羅的な安全管理体系として本事業における化学剤リスク評価・管理に関する議論の土台になりうると考えられる。しかしながら、米国における化学兵器処理は従来、ストックパイルを中心に進められており、神経剤を中心に数千トン単位の化学剤を廃棄してきていることから、安全基準についても、本事業との事業特性の相違に留意しつつ検討しなければならない。本事業は、保管状態に不確定要因が大きいノンストックパイルを対象とし多数の砲弾を扱う必要がある一方、処理対象となる化学剤について総量は数百トン単位と見込まれ、またヒ素を含むびらん剤・おう吐剤が中心で神経剤を含まないという事業特性を有する。このため、本事業の安全対策においては、上記の事例を参考としつつ、化学剤リスクと爆発リスクを合わせたリスク管理を如何に行うか、及びヒ素の取扱いに伴うリスク管理を如何に行うかについて、特に検討を深める必要がある。

第5.4節 環境基準と労働衛生基準

化学兵器処理事業における化学剤リスクの管理方法としては、前項で述べたとおり、施設設計、個人装備、操作手順、教育訓練等を含む総合的な安全対策の確立とその適切な運用が不可欠である。すなわち、個別の化学物質に係る環境関連基準値（作業環境基準値、排出基準値等）の設定はあくまで安全対策の一手段であり、設定に当ってはその意味と効果を予め検証する必要がある。このため、事業の実施に際して、煤塵や窒素酸化物にかかわる大気排出基準、ヒ素にかかわる排水基準等、実施地域に適用される既存の環境関連基準を採用することは当然であるとしても、化学剤等特殊な化学物質にかかわる基準を別途設ける必要があるか否かについては、個別政策的な判断に委ねられることとなる。

各国の事例を見ると、米国においては、神経剤やびらん剤にかかわる作業環境基準や大気排出基準を軍規則として設定しつつ関連施設の運転を行っているが、欧州においては通常の産業廃棄物と同様の施設で特別の基準を設けることなく処理事業を行っている国もある。各国の判断の背景には、取扱う化学剤の有害性の程度や量に応じた何らかのリスク評価が介在していると推察される。遺棄化学兵器処理事業において、化学剤等にかかわる環境関連基準をどの範囲で、どのように定める必要があるかについても同様の政策判断が必要となる。

まず、本事業において新規に設定する必要のある基準項目の範囲について考える。化学剤自体にかかわる作業環境基準や排出基準については、化学兵器禁止条約に基づく化学兵器の廃棄という事業目的の確認指標になること、及び一般に化学剤は関連化合物間の相対比較において最も強い毒性を有する物質であると考えられることから、基準値設定に一定の合理性は認めうる。

他方、分解生成物や不純物など化学剤の関連化合物については、化学物質である以上基準を設けることも可能であるが、当該物質の相対的な毒性の低さに加え、本事業における当該物質の取扱量、事業期間などを考慮すれば、かかる基準設定に伴う環境保全及び作業安全対策上の意義は小さいと判断される。

次に、化学剤にかかわる排出基準や作業環境基準の定め方について考察する。一般に、これらの基準を新たに定める場合、対象物質に関する各種調査が行われる。調査項目としては、基礎情報調査（物理化学的性質、用途及び使用実態）、健康影響評価調査（各種毒性、ヒトにおける吸収・代謝及び体内動態）、実態調査（環境濃度、曝露実態、排出源別排出量）、技術調査（対策可能性及び対策効果、測定技術）等が考えられる。これらのうち、どのような情報をどのように用いて基準を導くかについてもさまざまな判断がありうるが、前節でも述べたとおり、既存の知見を最大限援用することが、本事業における現実的な解決方法である。

具体的には、各国における既存の基準、毒性及び物性に関する文献情報に基づけば、本事業に適用される作業環境基準及び大気排出基準について表5.1、5.2のとおりを設定することができる。

各国における既存の基準は、各種調査結果を勘案して定められており、安全確保と対策可能性の双方が検証されていると考えられることから、これを採用するのは現実的な選択である。しかしながら、多くの場合既存基準の設定根拠は明らかにされていないことから、採用に当たっては、健康への影響や環境への影響の観点から安全性の検証を行っておくことが望ましい。

例えば、マスタードの作業環境基準値は米軍の基準として、 $0.003\text{mg}/\text{m}^3$ （8時間平均値）が採用されている。この根拠は明らかにされていないが、前述の「毒性のある化学物質の安全基準」によれば、専ら分析技術（定量下限）に依存することが示唆されている。一方、マスタードについては発ガン性が指摘されていることから、上記米軍基準値レベルの作業環境下で5年間毎日8時間作業を行う作業員の発ガンリスクの確率を、既存の文献情報等から推計すると 2×10^{-5} 程度となる。従って当該基準は作業環境安全確保の観点からも十分なレベルにあると判断される。

表5.2および表5.3において、各国の既存基準を根拠とした基準提案を行っている物質（マスタード、ルイサイト、クロロアセトフェノン、ホスゲン、シアン化水素及び総ヒ素）については、全てかかる安全性の検証を行った上で、世界的に見て厳しい水準の基準値を提案するものである。一方、DA及びDCについて既存の基準はない。当該物質はくしゃみ剤であり致死性の化学兵器として用いられたものではない。このため、各国においては総ヒ素による作業環境管理・排出管理を行うことで安全性の担保は可能であるとの判断から、当該物質にかかわる基準値は定めていないと推測される。

当該物質にかかわる基準が必要という立場に立った場合、毒性情報はある程度限定されるものの、既存の文献からは少なくとも致死性を持つびらん剤であるルイサイトの毒性を上回ることはないとの判断が可能である。従ってDA及びDCについてはルイサイトと同水準の基準を設定することにより安全性は担保できる。

初めに述べたとおり、特定の物質にかかわる基準の設定は、事業における作業環境安全対策及び環境安全対策の一手段である。限られた施設、限られた期間、限られた化学剤量を取り扱う事業であることを踏まえれば、基準値を定める対象物質の拡大や基準値設定のためのデータ収集に拘泥することで、「早期に」かつ「安全確実に」遺棄化学兵器の処理を行うという事業本来の目標を共に見失うことが懸念される。

いかなる実験・調査から基準値を決定するかのみの議論から脱却し、いかにして定めた基準値を生かす総合的な安全及び環境対策を構築するかの議論を深めなければなるまい。議論のための基準案は既に用意されているのである。

なお、基準の策定に当ってはモニタリング技術の確立が必要である。化学剤以外の物質を対象としたモニタリングは、日本の環境関連JIS規格、作業環境測定指針等の方法準拠で対応可能である。しかしながら、化学剤を対象としたモニタリングにおいては、化学剤の特性（加水分解性、高温での分解性、吸着性等）を考慮して、サンプリングから測定までの手法を確立して行く必要がある。また、緊急時の対応を考えると作業環境、排ガスなどは連続測定が望ましく、各種化学剤を連続的（NRT: near real-time）に測定可能な高感度分析機器についても今後の検討が必要である。

表5.2 作業環境基準に関する提案

物質名	基準値(案)	根拠
マスタード	0.003mg/m ³	米軍基準
ルイサイト	0.003mg/m ³	米軍基準
DA	0.003mg/m ³	ルイサイトとの毒性比較
DC	0.003mg/m ³	ルイサイトとの毒性比較
クロロアセトフェノン	0.1mg/m ³	各国基準 + 臭気閾値を考慮
ホスゲン	0.08mg/m ³	英国基準
シアン化水素	0.3mg/m ³	中国基準
総ヒ素	0.01mgAs/m ³	米国基準

表5.3 大気排出基準に関する提案

物質名	基準値(案)	根拠
マスタード	0.03mg/m ³	米軍基準
ルイサイト	0.03mg/m ³	米軍基準
DA	0.03mg/m ³	ルイサイトとの毒性比較
DC	0.03mg/m ³	ルイサイトとの毒性比較
クロロアセトフェノン	3.0mg/m ³	米 EPA ^{*8} の参照濃度 × 10 ⁵
ホスゲン	3.0mg/m ³	中国基準
シアン化水素	1.9mg/m ³	中国基準
総ヒ素	0.5mgAs/m ³	ドイツ基準を準用

*8) 米国環境保護庁 (US Environmental Protection Agency)

第6章 プラント設計と建設に向けた管理

中国における遺棄化学兵器処理のために使われる技術については現在検討中であり、 燃焼による無害化、 湿式反応による化学的無害化、 更には 他の新規開発技術のどの技術を選定するかについては、 その決定を見てはいない。しかし、 これら何れの技術を採用するにしても、 そのための設備（プラント）は、 通常のプラントとは異なり、 危険な爆薬と化学剤を取り扱う設備となる。従って、 そのプラント設計に当たっては、 上記危険物質の取り扱いに対する格段の配慮が要求される。

本章では、 これら化学剤・爆薬を取り扱うに当たって、 特に留意すべき設計上、 運転上のポイントにつき述べる。

第6.1節 プラント設計に際し特に留意すべき要因

6.1.1 考えられるリスク

遺棄化学弾を処理するに際し、 考えられる主たるリスクは、 化学弾に含有される化学剤と爆薬に起因するものである。従って、

砲弾に含有されている化学剤の漏洩
砲弾に含有されている爆薬の予期せぬ爆発

の2つが主要なリスクとして挙げられる。

化学弾を取り扱うに際しては、 所謂「毒ガス」のイメージがあるゆえ化学剤の漏洩に対する恐怖がとかく強調されがちであるが、 実際の危険性は化学弾に含有されている爆薬の予期せぬ爆発の方が大きい。ここではこれら 2 つのリスクに対し、 その危険性と、 考慮すべき事項に付き述べる。

6.1.2 化学剤漏洩のリスク

中国にある遺棄化学兵器はその埋設が長期にわたっていることより、 一部の化学弾では、 酸化・腐食等に起因する充填化学剤の漏洩が起こっている可能性は否定できない。

この漏洩化学剤が、 不用意に人体に触れたり、 大気に放出されたりすることは、 当然のことであるが、 大きな問題となる。ただし、 これら化学剤処理を目的として建設されるプラントは、 設計当初より、 化学剤を取り扱うことを想定して設計されており、 当然化学剤の漏出に対する対応策も考慮されているはずである。即ち、 化学剤漏洩のリスクは、「予期されているリスク」であると言える。

一般にリスクとはその危険事態を予め予測することが出来ず、 何時、 どのような条件で発生するかも判らない場合に存在すると言われる。思いもかけない時に、 思いもかけない場所で危険事態が発生するからリスクなのである。どのような時に、 どのような条件で、 どのような場所で発生するかを予測が出来る場合、 その危険は「予期し

得るもの」と考えられる。危険事態の発生を予測することが出来れば、そのための対応策を講ずることが可能になり、受ける災害の程度は大幅に低減されるか、無視し得る程度にまで災害を低下させることが可能となる。

6.1.3 爆薬爆発のリスク

化学弾の中には、内蔵充填されている化学剤の拡散のための爆薬が存在している。爆薬は、あくまで化学剤を拡散する目的のためであるから、通常の砲弾と比較すれば、その量自体は相対的には少量である。しかし、その量は同時に、付近にいる作業員に対し危害を与えるに十分な量でもある。しかも、一般に爆発事故は予期せぬときに発生する。

リスクはその発生を予期出来ない場合には、管理が困難となり危険性は格段に高くなる。爆薬に係るリスクが化学剤に係るリスクより格段に高いと考えられるのは、この様な理由によるからである。

第6.2節 プラント設計とリスク管理

6.2.1 化学剤漏洩のリスクを考慮した設計

化学剤漏洩事故に対するプラント設計上の対応は主として以下のような方策によって取られる。

学弾処理装置は周辺を密閉された部屋で覆われている。さらに、その部屋を囲うように耐爆壁などで隔離されて、計器室や作業員控室などが配置されている。この周辺配置の計器室/作業員控室は、設備運転中は常に減圧状態で保持されている。また、装置が設置されている内側の部屋は周辺の計器室/作業員控室より更に一段と低い圧力で、減圧保持されている。即ち、化学弾処理装置は二段の減圧下で運転されていることとなる。

上記の設計により、万が一の漏洩事故発生時にも、部屋の外への化学剤の漏洩は発生しないように配慮されている訳である。

更に、化学剤処理操作は、原則として遠隔操作により実施される。処理操作実施時には、室内への作業員の入室は禁止されており、無人で運転が行われる。従って、万が一の処理室内漏洩の場合にも作業員が化学剤に触れることがない様に配慮されている。

処理室からのガスは、常に活性炭フィルターのような、化学剤吸着装置を通して大気放出されるように設計されている。万が一の事故でも、大気中に化学剤汚染ガスが拡散しないように考慮されている。

これを図示すると、以下の様になる。

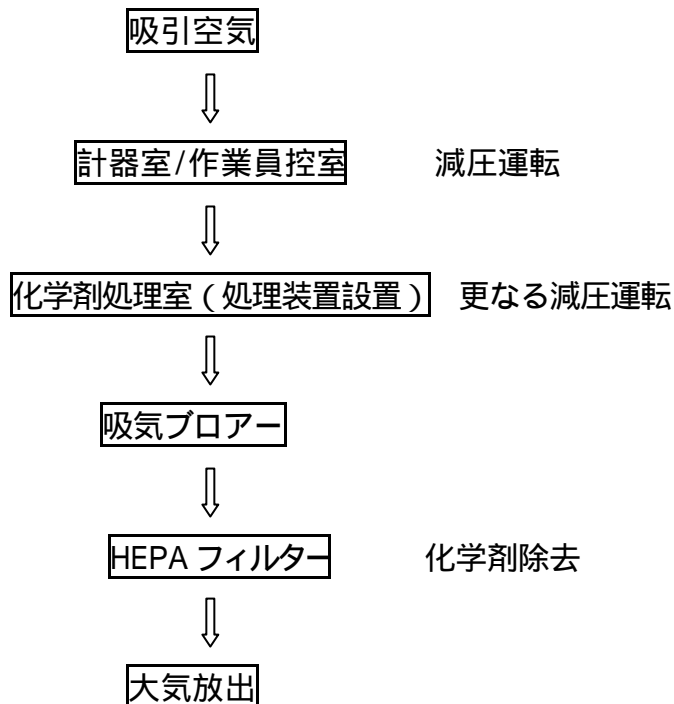


図6.1 実処理プラントにおける化学剤の漏洩防止

6.2.2 中国遺棄化学弾の爆発リスク

一般に砲弾の爆薬は、以下の3種類によって構成されている。

- 起爆薬(信管)
- 伝火薬
- 炸薬

砲弾の爆発を確実にするためには、確実な発火が必要である。そのために鋭敏な起爆薬が用いられるが、通常それだけでは火薬全体の爆発を起こすに十分なエネルギーを保証することは出来ない。従って、起爆薬の発火を確実に伝達する伝火薬が必要とされる。この発火を受けて、最もエネルギーの大きな炸薬本体の爆発が起こるわけである。この中で、通常は、最も鋭敏な起爆薬(信管)は安全確保のため、砲弾にはセットされてなく、砲弾の発射直前にセットされる。

遺棄化学兵器の場合、砲弾の中に化学剤が充填されていること、並びに、爆薬に期待するエネルギーは化学剤の拡散のためのものであり破壊を目的とはしないので爆薬の量が少ないこと、の2点を除き、通常の砲弾と同様である。また、使用前の状態では保管されていたものが埋設されていることから、原則として信管はセットされていない。信管付化学弾が絶無であるということではないが、ほとんどの化学弾に信

管が付いているヨーロッパ諸国の状況とは著しく異なり、処理の観点からは有利な条件といえる。

6.2.3 爆薬の発火と爆発

前述したように、ヨーロッパ諸国における化学弾処理は、その対象物が土中から発見される不発化学弾であり、そのほとんどは信管付である。従って、爆発リスクは格段に大きいのであるが、一般には、人力操作による電動鋸を用いた機械式切断法が取られている。この理由は、その処理量が1発を処理するのに1日ないし数日かける程度で、比較的少量のためである。電動鋸は、多くの切断法の中では、爆発リスクの高い方法であるが、それでもドイツでの例では30年間の処理期間中に人身事故は皆無であると言われている。その理由は、化学弾のセットまでは人力により行なわれるが、電動鋸の切断操作自体は遠隔操作で実施されるためである。従って、万一の化学剤漏洩事故を伴う発火事故が起こった場合でも作業員は安全であったと言える。

また、電動鋸による化学弾切断操作時に発火事故が起こった例は数次に亘り記録されているが、それが所謂爆発事故につながった例はない。化学弾内部の爆薬が暴露された状態での発火は、急速燃焼を起こすことはあっても爆破にまでは至らないからであると考えられる。

6.2.4 爆発リスクを考慮した設計

原則として信管がセットされていないため、ヨーロッパ諸国と比較して中国における遺棄化学弾処理のリスクは相対的に低いが、装置設計に当たっては、爆発リスクについての格段の注意が必要である。具体的な、設計については、現在検討の過程にあり確定はしていないが、基本的な考え方について以下に述べる。

(1) 信管がセットされている化学弾が発見された場合

現在までのところ、信管がセットされている化学弾は発見されていないが、もし信管付き化学弾が発見された場合には通常の処理ではなく別途処理を原則とする(その様なケースは非常に稀であると考えられるが)。処理法は現在検討中であるが、発見場所からの移動を最小限にし、なおかつ、爆破チャンバーの様な安全確実な処理法を採用することとなる。この様な化学弾の数が非常に少数であり、大量の処理を要求されないため、採りうる方策と言える。

(2) 通常の化学弾に対して

爆発リスクは、火薬が密閉された状態にあるときが最も高い。火薬が砲弾の外に暴露されれば、急速燃焼が起こることはあっても爆発が起こることはほとんど無いと考えてよい。従って、化学兵器、特に化学砲弾の実処理における一連の工程、すなわち、前処理(解体) - 本処理(化学剤と火薬の無害化) - 後処理(排ガス、排水、固体廃棄物の処理)の中で爆発に最も注意を要するのは、前処理段階で凍結破砕法

や水ジェット切断法、機械切断法などの諸技術を使って化学弾を解体・破碎する際である。

現在、要求される処理能力を持ち、なおかつ、爆発リスクの少ない破碎法を検討中である。また、万が一の爆発事故発生に対応し、破碎設備及び周辺へのダメージを防止するため、何らかの防爆装置（例えば防爆シリンダーなど）を破碎装置に対して設置することとなる。

破碎操作時に操作室への立ち入りを禁止し遠隔操作によることは、化学剤漏洩リスクへの対応と同様である。

第6.3節 プラント操作と情報管理

6.3.1 情報管理の基本的考え方

プラント操作にかかわる情報管理は、基本的には通常の商業設備に適用されている方式に順ずることとなる。しかし、化学兵器の処理装置という理由で、特別な考慮・対応を求められる場合も考えられる。また、この事業には関係する部署が多い。たとえば、日本政府、中国政府、中国地方政府、中国軍など公的機関が、重要な関係者である。更に当然のことながら、処理設備建設地近傍の一般住民の関心も高いはずである。これら関係機関に対する情報開示努力は大切である。特に、異常時、事故発生時等は、遅滞無く関連情報が両国関連官庁を含む諸機関に通報されるような体制が確立していることが必要である。

このような化学兵器処理事業はわが国では初めての事業であること、また、爆薬や化学剤を扱い一旦事故が起こると被害が大きくなる危険性があること、日中間の国際的共同事業であること、など通常の商業設備とは異なる点も多いためそれらの点にも十分配慮した情報管理体制を確立する事が大切である。

6.3.2 運転操作情報

運転操作にかかわる情報は、コントロールセンターに一括して収集されるようにすべきである。コントロールセンターは、情報収集のみならず、運転操作に関する指示を発令する指令所機能も併せ持つため、爆発などの事故発生時にも確実に機能出来る様に設備されねばならない。即ち、

処理設備から一定の保安距離を保つこと。

コントロールセンター室内は耐圧防火壁等で外部と隔離されていること。

コントロールセンターへの換気用空気は、処理設備より十分距離を持った安全な位置（数 km 程度必要）から供給されること。

コントロールセンターが孤立した場合でも、室内の運転指揮者は十分生命の安全が保障されるべく設備されていること。

等である。

6.3.3 収集されるべき運転操作情報

通常の運転管理情報の他に、処理設備周辺に対する環境保全の観点より、廃水、排ガスに係る有害化学物質分析データの収集は重要である。

汚染された状態の廃水、排ガスの大気への放出は許されないので、プロセス内のしかるべき個所で常時運転状況を監視し、異常がある場合は、直ちに化学剤処理を停止できるように配慮しておく必要がある。

第7章 科学技術が関与する国際的組織とその活動

化学兵器禁止条約に関連する科学者の国際的組織と活動は、平成13年7月23日付けで「遺棄化学兵器の安全な廃棄技術に向けて」と題する報告書（第一次報告書）のp.33-34に記載したが、その後の主な動勢について記述する。

第7.1節 化学兵器禁止機関(OPCW)

1997年4月29日発効の化学兵器禁止条約を受けて、オランダのハーグに化学兵器禁止機関(OPCW: Organisation for the Prohibition of Chemical Weapons)が設置され、2002年9月現在147カ国が加盟している。OPCWは、化学兵器の管理について国際的な中核として機能するものである。

OPCWには、事務局長の諮問を受けて科学的観点から化学兵器の諸課題を審議・答申する科学諮問委員会(SAB: Science Advisory Board)が設置されている。SABには、リシン(ひまし油から得られる化学剤)の生産規制、査察に使用される機器、化学兵器の廃棄技術、化学兵器の分析機器、という4つのワーキンググループが設けられている。SABおよびワーキンググループには日本からも科学者が参加している。

SABは発足以来これまでに5回の会合を行ってきたが、2002年9月に開催された第5回会合における主な話題は以下の通りである。

概要

- ・ ノルウェーのBergenで開催されたIUPACのワークショップ(後述)の重要性
- ・ 科学技術の急速な進歩に伴い将来増える潜在的な毒性物質
- ・ 急増するであろう化学剤をチェックする手法の確立と認定
合成とプロセス
- ・ 可搬型の生産設備やマイクロリアクターなどの出現
- ・ 査察官に対する最新技術の取得
分析
- ・ 将来の毒性物質に対応した分析技術の必要性
- ・ イムノアッセイやGC/MSなどの分析技術の進歩
- ・ 査察に際して迅速な試料の準備
- ・ 指定分析機関の拡充
破壊技術
- ・ 破壊技術の比較と評価
- ・ 破壊に伴うコスト評価、リスク評価、物質フローの重要性
教育
- ・ 「技術 政策」、「技術 外交」間の意思疎通
- ・ 産業、職業集団、資金財団、学会などとの意思疎通

第7.2節 国際純正応用化学連合 (IUPAC)

国際純正応用化学連合 (IUPAC: International Union of Pure and Applied Chemistry) は世界の化学分野に係わる研究者の組織である。化学兵器に関して IUPAC は最近2件の活動を行った。

7.2.1 破壊技術の評価

その一つは、2002年2月に機関誌 Pure and Applied Chemistry に化学兵器の破壊技術に関する評価を発表したことである (“Critical Evaluation of Proven Chemical Weapon Destruction Technologies,” Graham S. Pearson and Richard S. Magee, Pure and Applied Chemistry, Vol.74, No.2, pp.187-316 (2002))。目次は以下の通りである。

- I. 破壊技術の意義
- II. 概要
- III. 問題の性格
- IV. 化学兵器および化学剤の輸送
- V. 化学兵器からの化学剤の分離
- VI. 化学剤の高温破壊
- VII. 化学剤の低温破壊
- VIII. 排出物質の処理
- IX. 回収された旧兵器について
- X. 技術比較
- XI. 技術とその制約

特に化学剤の破壊技術については、焼却法、プラズマ法、熔融金属法、水素化分解法、加水分解法、電気化学的酸化法、溶媒和電子法など10種類の方法について、プロセスの特徴、破壊容量、安全性、環境影響などの項目から評価している。

7.2.2 科学の進歩による化学兵器禁止条約への影響

近年の急速な科学の進歩によって、近未来に想定される化学兵器や化学剤の生産技術や分析技術へ与える正負の効果を討論したワークショップが、ノルウェーの Bergen で2002年6月30日から7月3日に開催された (IUPAC Workshop, “Impact of Scientific Developments on the Chemical Weapons Convention,” Bergen/Norway, June 30-July 3, 2002)。このワークショップは2003年5月に予定されている OPCW のレビュー会議に向けた IUPAC からの提言について検討したものであり、世界から85名以上の研究者が参加し、わが国からも参加と発表があった。討論されたセッションは以下の通りである。

ワークショップの背景

OPCW および SAB の活動の現状、CWA (= Chemical Warfare Agents) と先端

科学および工業技術の関係、CWA の分析と査察、各国政府による化学物質の生産工場に対する組み分けの明確化 (CWA 生産の前駆体を含めて)

最近の化学合成の進歩

化学と生物の組み合わせ合成、製薬過程におけるより高い毒性物質の生成、CWA 合成への新しい触媒の開発など

化学物質の生物学的合成

生物、酵素を用いての新規合成法、遺伝子を用いての毒性物質の生成および生物兵器の開発への可能性について(表7.1)

プロセスと製造技術の進歩

コンビナトリアル化学、マイクロリアクター、ナノテクノロジー、マイクロチップの開発による軽量で何処でも生産可能な設備について

分析技術

- ・ より速く、より簡単な CWA の確認方法： 野外で、移動可能で軽量・簡便な質量分析装置 (MS)、核磁気共鳴装置 (NMR) の開発、新規サンプリング法など、最新分析法に対する情報、毒性物質データベースの必要性等
- ・ 血液、尿、皮膚に対する CWA の簡易分析および DNA やたんぱく質に結合した CWA の確認法： バイオセンサーの開発
- ・ アイソトープを使つての CWA の検出法
- ・ 環境問題からの CWA の破棄技術
- ・ マイクロチップを用いる分析法： 超微量分析
- ・ 致死量に至らない CWA に対する分析

特に注目すべきは2つの点である。第一に、酵素並びにマイクロリアクターを用いた化学物質の合成の進歩である。これは、近い将来には、現段階で既知の化学剤を超える多種類の有毒物質が生産でき、しかも工場規模ではなく小型機器で簡単に合成できる潜在的な可能性がある、という危惧を包含している。第二に、マイクロリアクター、免疫アッセイ、ガスクロマトグラフ質量分析装置 (GC/MS) や NMR の小型化などの進歩により、現時点では分析が困難な化学剤を極めて容易に検出できる可能性が示された。

また、この会議の自由討論では各国から、CWA や BWA (生物兵器剤) を含めて環境問題に対する教育の重要性が強調された。特に米国の大学では必修科目として、これらの問題に取り組んでいるところが増えているとのことである。

表7.1 生物的合成および生物兵器剤（部分的リスト）

炭疽菌	ボツリヌス菌	ブルセラ菌
コレラ菌	ガス壊疽菌群（クロストリジウムウエルシュ菌）	コンゴクリミア出血熱ウイルス
エボラ出血熱	類鼻疽	プラゲー（ペスト等の悪疫群）
Q熱（リケチアの一つ、急性感染症）	リシン（ヒマシ油植物 すなわちリシンの種子「トウゴマ（蓖麻ヒマ）の実」に含まれる猛毒なレクチンおよびヒマグルテン）	リフトヴァレー熱ウイルス
サキストキシン（貝毒類）	痘瘡（天然痘）	ブトウ球菌（エンステロウイルスB）
マイトキシン菌	ツラレミア野兎病菌	ベネズエラエクイネ脳炎（Venezuelan Equine Encephalitis）

第8章 提言

以上に述べてきたように、遺棄化学兵器を安全に廃棄するためには幅広い分野にわたる様々な技術を結集する必要がある。そのためには、わが国におけるこれら多岐に及ぶ分野の研究者、技術者の協力が不可欠である。この意義を広く国民の皆様にも周知することが、日本学術会議の使命と考え以下に提言する。

【関係する研究者、技術者間の意見交換、情報交換の場の設置】

わが国の研究者や技術者にはその学術的ポテンシャルを遺棄化学兵器の廃棄技術へ活用できる場合が少なくないため、多くの分野の学協会において遺棄化学兵器の廃棄技術に関する委員会や研究会が設置されれば、本分野に対する研究者・技術者の認識が広まることにつながり、ひいては実際の廃棄技術に貢献できるであろう。

既に化学工学会では遺棄化学兵器廃棄技術研究会を設置し、2000年11月と2002年1月にシンポジウムを2度開催するなどの活動を行っている。また、計測自動制御学会 SI 部門に安全回復システム部会を設置し、遺棄化学兵器発掘回収の遠隔操作化・自動化に関する調査研究を行っており、2002年12月に開催される部門講演会でオーガナイズドセッションを企画している。さらに、日本ロボット学会では2002年10月開催の学術講演会において、化学兵器や地雷の処理に関するセッションを開催する予定である。

【中核的研究開発機関の整備】

幅広い分野から参画する研究者を活用するためには政府の遺棄化学兵器廃棄体制の中に、基礎研究や実証研究を主体として技術基盤を確立するための中核的研究開発機関を、廃棄が完了する時限として整備することが必要である。この機関においては遺棄化学兵器廃棄事業の推進に関する情報を広く集め提供するとともに、必要に応じて研究開発資金も提供し関連分野の研究者・技術者が協力できる場を与えることが望ましい。関連研究機関相互のコーディネーションも重要な任務である。

以上の2項目は「第一次報告書」で提言した。今回の報告書では、以下の3項目の提言を追加する。

【リスク評価とリスク管理の重要性】

遺棄化学兵器の発掘回収から火薬や化学剤の処理までの多くの作業工程には、作業員や周辺へのリスク（危険性）が存在する。主なリスクには、発掘回収や砲弾解体における砲弾中の火薬による爆発に伴うリスク、化学剤の漏洩による作業員

や周辺地域への暴露に伴うリスク、化学剤の無害化処理で発生する有害物質の廃棄に伴うリスク、が挙げられ、科学的裏付けのあるリスク評価が望まれる。

他方、万一の事故に備えた設備や作業工程を設定するリスク管理には、事故を起こさない方策、万一事故が起こった場合被害を最小化する方策が挙げられ、前記したリスク評価に基づいて適正に管理することになる。

リスク評価やリスク管理の全体的課題について第一に提言すべきことは、環境、安全、原子力発電などの多くの分野において同様な評価や管理の経験や知見が蓄積されており、本事業へ活用できる部分が少なくないため、該当する他の学術分野からの参加と支援が望まれる。また、第二には、このようなリスク評価やリスク管理が本事業の意志決定に深く関わり日中政府間や関係者の合意形成に必要な作業であり、学術の立場から科学的知見に基づくリスク評価やリスク管理が確立されるべきである。

第三に、ピクリン酸金属塩の爆発感度、ごく低濃度でも影響を与える化学剤や中間体など本課題自体の特有なリスクについては個々にリスク評価すべきである点が挙げられる。さらに、第四の提言として、2007年4月までの期限内に適正な経費で廃棄ことを目指して、廃棄のスピードやコストの評価を考慮に入れたリスク管理を行うことが望まれる。

【遺棄化学兵器の廃棄に対する先端技術の活用】

中国における遺棄化学兵器は大量で特殊な状況下で保管されているため、その廃棄技術は世界的にも未経験な部分も多く、先端的な技術を必要とする。

例えば、埋設される量が多量で密度が高く、半世紀以上の経過により著しい腐食が想定されており、爆発リスクや化学剤漏洩リスクを回避するためには、発掘にロボットを活用することが望まれる。また、砲弾の解体におけるリスクを回避するには、遠隔操作が大きな役割を期待され、産業用ですでに活用される技術の転用や技術的改良が必要となる。

また、発掘回収や解体、無害化処理のプロセスでは化学剤の排ガス、廃水への漏洩が作業環境や周辺環境上大きな課題となる。このため、化学剤の特性（加水分解性、高温での分解性、吸着性等）を考慮して、サンプリングから測定までの手法を確立して行く必要がある。さらに、緊急時の対応を考えると作業環境、排ガスなどは連続測定が望ましく、各種化学剤を連続的（NRT: near real-time）に測定可能な高感度分析機器の開発が望まれる。化学兵器禁止機関（OPCW: Organisation for the Prohibition of Chemical Weapons）で最近開催された傘下の科学諮問委員会において、化学剤について新規のサンプリングや測定の技術進歩の重要性が指摘されている。

このような、現代の様々な先端技術の活用による遺棄化学兵器の廃棄技術は、その先端技術自体を進歩させることにもつながる。本事業は単に過去の負の遺産を処分するだけではなく、未来へつながる先端技術を進展することにも大きな意義がある。

【将来に向けた研究の蓄積と研究者組織の維持】

わが国において化学兵器の廃棄に関与する研究者の組織は、当該の「遺棄化学兵器の安全な廃棄技術の研究促進」小委員会とともに、内閣府遺棄化学兵器処理担当室が所管する「遺棄化学兵器処理技術検討調整会議」およびその下の7つの検討会、並びに(財)日本国際問題研究所に所属する「技術支援グループ」がある。また、化学工学会、計測自動制御学会、日本ロボット学会の学協会については前述した活動を行っている。

化学兵器の安全な廃棄技術の開発に関する研究は、将来における平和維持活動への日本の役割に貢献するところが大きく、このような研究活動に対する支援も重要である。

また、研究者や技術者の活動と知見の蓄積は、現状の中国における遺棄化学兵器の廃棄に活用すると同時に、将来に向けても OPCW や IUPAC などの多くの国際的組織に向かって情報の発信と集約を行うべきである。このため、中長期的観点から、得られる研究情報に対して保存する手段を講じ、関連する研究者・技術者のネットワークを維持することを提言する。