

提 言

老朽・遺棄化学兵器の廃棄における 先端技術の活用とリスクの低減



平成20年(2008年)7月24日

日本学術会議

総合工学委員会・機械工学委員会合同

工学システムに関する安全・安心・リスク検討分科会

この提言は、日本学術会議総合工学委員会・機械工学委員会合同工学システムに関する安全・安心・リスク検討分科会 遺棄および老朽化学兵器の安全な廃棄技術に関する小委員会の審議結果を取りまとめ公表するものである。

日本学術会議総合工学委員会・機械工学委員会合同
工学システムに関する安全・安心・リスク検討分科会

委員長	松岡 猛	(連携会員)	宇都宮大学工学部機械システム工学科 教授
副委員長	永井 正夫	(連携会員)	東京農工大学大学院共生科学技術研究院 教授
幹事	管村 昇	(連携会員)	工学院大学教授
幹事	鎌田 実	(特任連携会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
	小林 敏雄	(第三部会員)	財団法人日本自動車研究所副理事長・ 研究所長、東京大学名誉教授
	土井美和子	(第三部会員)	株式会社東芝研究開発センター技監
	古川 勇二	(第三部会員)	東京農工大学大学院技術経営研究科 研究科長・教授
	矢川 元基	(第三部会員)	東洋大学計算力学研究センター センター長・教授、東京大学名誉教授
	相澤 清人	(連携会員)	独立行政法人 日本原子力研究開発機構 特別顧問
	芦田 讓	(連携会員)	京都大学大学院工学研究科教授
	井口 雅一	(連携会員)	前宇宙開発委員会委員長、東京大学名誉教授
	石井 浩介	(連携会員)	スタンフォード大学工学部機械工学科 教授
	井上孝太郎	(連携会員)	(独)科学技術振興機構上席フェロー
	圓川 隆夫	(連携会員)	東京工業大学教授・ イノベーションマネジメント研究科長
	大須賀美恵子	(連携会員)	大阪工業大学工学部生体医工学科教授
	垣本由紀子	(連携会員)	立正大学大学院心理学研究科非常勤講師、 NPO 法人航空・鉄道安全推進機構
	河田 恵昭	(連携会員)	京都大学防災研究所長、教授
	木村 逸郎	(連携会員)	(株)原子力安全システム研究所・技術 システム研究所長
	草間 朋子	(連携会員)	大分県立看護科学大学学長

國島 正彦	(連携会員)	東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授
久米 均	(連携会員)	東京大学名誉教授
小長井一男	(連携会員)	東京大学生産技術研究所教授
佐藤 知正	(連携会員)	東京大学大学院情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻教授
関村 直人	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
高橋 幸雄	(連携会員)	東京工業大学大学院情報理工学研究科 教授
田中 英一	(連携会員)	名古屋大学大学院工学研究科 機械理工学専攻教授
成合 英樹	(連携会員)	独立行政法人原子力安全基盤機構理事長
萩原 一郎	(連携会員)	東京工業大学理工学研究科 機械物理工学専攻教授
波多野睦子	(連携会員)	(株)日立製作所中央研究所主管研究員
藤本 元	(連携会員)	同志社大学工学部教授
古崎新太郎	(連携会員)	東京大学名誉教授
松尾亜紀子	(連携会員)	慶應義塾大学助教授
水野 毅	(連携会員)	埼玉大学教授
向殿 政男	(連携会員)	明治大学理工学部教授・理工学部長
大和 裕幸	(連携会員)	東京大学大学院新領域創成科学研究科 人間環境学専攻教授
渡辺美代子	(連携会員)	(株)東芝 研究開発センター グループ長
石川 博敏	(特任連携会員)	科学警察研究所交通科学部長

遺棄および老朽化学兵器の安全な廃棄技術に関する小委員会

委員長	古崎新太郎	(連携会員)	東京大学名誉教授
幹事	朝比奈 潔		(株)神戸製鋼所 CMD プロジェクト部 主監
幹事	水野 光一		(独)産業技術総合研究所 環境管理技術研究部門研究顧問
委員	小林 敏雄	(第三部会員)	(財)日本自動車研究所副理事長・ 研究所長、東京大学名誉教授
	木村 逸郎	(連携会員)	(株)原子力安全システム研究所・技術 システム研究所長、京都大学名誉教授

久米 均	(連携会員)	東京大学名誉教授
石井 一弘		筑波大学大学院人間総合科学研究科講師
藤原 修三		(独)産業技術総合研究所 安全科学研究部門研究顧問
山内 博		北里大学大学院医療系研究科教授
山口 芳裕		杏林大学医学部教授
割石 博之		九州大学大学院農学研究院 森林資源科学部門教授

報告書及び参考資料の作成にあたり、以下の方々にご協力いただきました。

鵜沢 浩隆	(独)産業技術総合研究所バイオニクス研究センター 研究チーム長
江沢 直也	(株)日立製作所 ディフェンスシステム事業部 専門部長
奥村 昭彦	(株)日立製作所中央研究所 主任研究員
瀬戸 康雄	警察庁科学警察研究所 法科学第三部 部付主任研究官
花岡 成行	元(財)化学物質評価研究機構 東京事業所環境技術部 課長
二又 政之	埼玉大学理学部理工学研究科教授
和田 丈晴	(財)化学物質評価研究機構 東京事業所環境技術部 副長

要 旨

1 作成の背景

1997年4月29日に発効した「化学兵器の開発、生産、貯蔵及び使用の禁止に関する条約（通称、化学兵器禁止条約）」に基づいて、第二次世界大戦終了時に中国に遺棄された化学兵器についてはわが国が廃棄する義務がある。一方、神奈川県寒川町などの国内における老朽化学兵器による被害が発生し、また、先の終戦時に福岡県苅田港に海洋投棄された老朽化学兵器の回収・廃棄も進められており、安全でかつ効率的な廃棄技術が要望されている。

わが国の老朽・遺棄化学兵器は地中に埋められ、あるいは水域に投棄されており、長期間の放置のため腐食や破損が著しい。また、爆発感度の高いピクリン酸やヒ素を含んだ化学剤の使用など、廃棄処理に当たって世界的にもまれな課題を抱えている。このため、放置による周辺環境や住民への影響が憂慮され、また廃棄作業における化学剤、火薬などに伴う労働災害を未然に防止するリスク評価やリスク管理も求められる。廃棄事業における確実な安全性と高い効率を両立するためには、化学兵器の発掘回収から無害化、排ガス・廃水・廃棄物の浄化までの工程に対して先端技術の活用が期待されている。

今般、遺棄化学兵器の廃棄が近い将来開始される見通しであるので、科学技術的な観点から安全な実施に向けての意見を述べる必要がある。これまでに日本学術会議では3つの対外報告を発表し、一般社会へのこの問題の重要性のアピール、多くの分野の学術からの参加・協力の必要性の提唱、リスク評価とリスク管理の必要性を提言してきた。現時点において専門家集団及びこの分野の研究者に対し最近の技術の進展を訴え、一層の技術的展開とこの分野の学術研究の進展を図ることが求められている。

2 現状及び問題点

化学兵器禁止条約での取決めに従い、わが国や中国の老朽・遺棄化学兵器を安全かつ効率的に廃棄処理するためには、わが国の学術分野からの緊急な支援が必須である。

廃棄技術は、埋められた化学兵器の発掘・回収から化学弾の解体・無害化、発生する気体・液体・固形廃棄物の浄化と処分という一連のシステムである。これまでに、個々の要素技術としての発掘・回収や解体・無害化、及び廃棄物の処分について一定の知識や経験が蓄積されてきた。

しかし、一連のシステムとして捉えた効率的な廃棄や効果的なリスク管理のために、化学兵器の廃棄技術を一層充実することが望まれる。特に、個別の要素技術については、旧日本軍の製造した化学兵器はヒ素を含むという特徴があり、その検知技術、無毒化技術が進展していることに鑑みて、これらを的確に活用することが必要である。また、爆薬にもピクリン酸という衝撃に敏感な薬剤が使用されており、火薬と化学剤との同時処理において、より効率的で安全な廃棄技術への進展が期待される。さらに、化学兵器の廃棄は多くの作業者を必要とする大規模な事業であるため、事故による緊急医療やヒト

への健康影響について充実した体制整備が不可欠とされる。

このような状況において、関連する先端技術をよく評価して、これらを廃棄技術に取り入れることが望ましく、その上でヒ素や化学剤によるヒトの健康への影響並びに暴露を受けた被害者の救急医療に関する医学的なリスク評価やリスク管理について、学術的知見を蓄積・整理することが重要である。

3 提言の内容

中国の遺棄化学兵器の処理が近い将来始まる見通しに鑑み、化学兵器の廃棄を担当する政策当局及び専門家集団、関係する研究者集団に対し、以下の3つの提言を行う。

これらを念頭において、安全かつ迅速に遺棄及び老朽化学兵器の廃棄処理を進めることが是非とも必要である。

(1) 廃棄事業における先端技術の活用

近年の分析技術は著しく進歩してきた。微量物質の検出に関しては、質量分析装置が著しく進展し、前処理を不要とする簡易な同定法が利用できるようになった。また、検知やモニタリングの手段においても特定の物質を選択的に、超高感度であるいは迅速に認識する技術が広く研究され進展してきた。ヒ素の有機化による無毒化技術も進展してきている。このような先端技術を取り入れた迅速、簡易、高精度で安全な廃棄技術の開発を図るべきである。また、廃棄処理によって回収されるヒ素に対する対策についても、無毒化を含め、望ましい方法を充分検討すべきである。

(2) 化学剤の生体への影響調査と救急医療体制の整備

旧日本軍の化学兵器の多くはヒ素を含有するため、ヒトに対する急性毒性や慢性毒性、発がん性などの生体への影響が懸念される。同様の老朽化学兵器を持つ諸外国での廃棄事業にもその成果を活用しうよう、ヒ素化合物及びその他の化学剤による生体への影響についての調査、解明を推進すべきである。また、今後進められる廃棄事業に対しては、作業関係者の健康管理及び救急医療の体制を早急に構築すべきである。

(3) リスク評価手法を活用したリスク管理

リスク評価の手法がこれまでにいろいろと開発されてきた。なかでも FMEA (Failure Mode and Effect Analysis)、PHA (Process Hazard Analysis) は有効である。安全な廃棄を目指してこれら適切なリスク評価手法を活用し、具体的なリスク管理を実現すべきである。

目 次

はじめに.....	1
1 分析技術の最近の進歩について.....	3
(1) 質量分析装置 (MS) の進歩.....	3
(2) センサー技術.....	4
(3) 大気中化学剤の高感度リアルタイムモニタリング.....	4
2 ヒ素の廃棄技術.....	5
(1) 廃棄で発生する無機ヒ素の危険性と無毒化の必要性.....	5
(2) 無毒化したヒ素に対する国際的な認知.....	6
(3) 無機ヒ素の無毒化処理方法と現状の課題.....	6
(4) 無毒化ヒ素 (アルセノベタイン) の保存と自然への還元.....	7
3 化学剤による健康被害と人体毒性.....	8
(1) 化学剤の検出事例と人体の健康被害への影響.....	8
化学剤とその崩壊物の分析方法の概要.....	8
健康影響から見たヒ素化合物の新規の安全基準と検出方法.....	9
(2) 人体毒性と救急医療.....	9
(3) 作業者の健康管理と救急医療の体制.....	9
4 廃棄処理プロジェクト実施にあたってのリスクの評価とリスクの管理.....	11
(1) リスクの事前解析.....	11
目的.....	11
デザイン・レビュー (DR).....	11
Failure Mode and Effect Analysis (FMEA).....	12
Process Hazard Analysis (PHA).....	12
(2) 作業現場の管理.....	13
(3) 事故の事後対策.....	13
(4) 化学兵器処理におけるリスクアセスメントとリスク管理の手順.....	13
(5) 化学兵器処理におけるリスク低減に向けて.....	14
5 提言.....	15
(1) 廃棄事業における先端技術の活用.....	15
(2) 化学剤の生体への影響調査と救急医療体制の整備.....	15
(3) リスク評価手法を活用したリスク管理.....	16

< 参考資料 1 >	17
A 1 最近の分析装置の進歩	17
A1.1 質量分析装置 (MS)	17
A1.2 表面増強ラマン散乱法 (SERS)	18
A1.3 鋳型反応を利用した検出方法	19
A1.4 大気中化学剤の高感度リアルタイムモニタリング	20
A 2 無機ヒ素化合物からアルセノベタインへ変換する反応事例	22
A 3 化学剤の分解過程、並びに人体への中毒症状と治療	23
A3.1 化学剤の分解過程	23
A3.2 汚染媒体における化学剤の検出方法	23
A3.3 化学剤によるヒトの中毒症状と治療	24
A 4 化学兵器処理におけるリスクアセスメントとリスク管理の例	28
A4.1 包括的な安全性達成の手法	28
A4.2 リスクアセスメント	28
A4.3 リスク管理	30
< 参考資料 2 >	32
総合工学委員会・機械工学委員会合同工学システムに関する安全・安心・リスク検討分 科会並びに遺棄および老朽化学兵器の安全な廃棄技術に関する小委員会の審議経過	32
< 付録 >	33
参考文献	33
用語の説明	35

はじめに

中国において旧日本軍が遺棄したとされる化学兵器は吉林省ハルバ嶺に30～40万発、その他中国各地に数万発に上ると推定される。これらの処理については1997（平成9）年発効の化学兵器禁止条約（＜付録＞用語の説明を参照）により、日本が資金や技術を提供して主体的に廃棄処理を行うことになっている。その期限は当初は条約発効後10年以内ということであったが、状況に鑑みて2012（平成24）年4月末までと5年間の延長が、化学兵器禁止機関（OPCW）において認められた。これらの化学兵器（砲弾、発煙筒等）は地中に埋められたり水域に投棄されて長年放置されたことにより、腐食や変形しているものも少なくなく、処理に当たっては細心の注意が必要となる。旧日本軍の化学兵器はマスタードの他にルイサイト、ジフェニルシアノアルシン、ジフェニルクロロアルシンなどのヒ素を含む物質を用いているのが特徴である。これらの化学剤を各種の廃棄方法で分解しても、ヒ素は元素として残留し毒性の化合物として残され、回収される。また、信管付きで発見される化学弾の数は少ないものの、爆薬にはピクリン酸が使用されており、わずかの衝撃により激しく爆発する特徴を有している。

ハルバ嶺にある遺棄化学兵器は、廃棄プラントを建設し、また、各地に分散しているものは、第3次報告書（2005年3月23日対外報告；「老朽・遺棄化学兵器のリスク評価と安全な高度廃棄処理技術の開発」）に記した移動式処理装置により廃棄処理されることが2007（平成19）年4月の日中首脳会談で合意され、現在廃棄処理の準備が進められており、今般ようやく実施の段階に達したといえる。

ひるがえって、日本国内においても老朽化した化学兵器があちこちで発見され、近年では神栖市において井戸水から化学兵器由来と思われるヒ素中毒も起きている。北九州市の南の苅田港において発見された化学兵器をこれまでに2000発以上を処理したが、残存する化学兵器の廃棄処理は現在も続けられている。なお、これらの国内の老朽化学兵器も中国の遺棄化学兵器と基本的には同じ種類のものである。

以上のように、中国においてはまさにこれから化学兵器の処理が始まろうとする時期であり、日本においてもまだ処理が続いている状態である。これらの処理においては予期せぬ爆発に対する慎重な配慮と、化学剤とともにヒ素による作業員の被毒と環境への漏出の防護をなさなければならない。また、既に土壌中にヒ素などの有害物質が漏出していることも十分考えられ、それらの無害化も検討の対象となる。

日本学術会議では第18期以来この課題について活動してきた。すなわち、第18期から第20期の日本学術会議では国内にある老朽化学兵器及び中国の遺棄化学兵器の廃棄事業に関する委員会を設置し、学術の観点から安全で効率的な事業の支援を行ってきた。第18期では、「遺棄化学兵器の安全な廃棄技術に向けて」（2001年7月13日）と「遺棄化学兵器の廃棄技術に対する科学的リスク評価とリスク管理を目指して」（2002年11月26日）という2つの対外報告を公表した。また、第19期では、対外報告「老朽・遺棄化学兵器のリスク評価と安全な高度廃棄技術の開発」（2005年3月23日）を公表した。

第 18 期の 2 つの対外報告では、中国遺棄化学兵器の現状を紹介し廃棄に活用できる主な既存技術を述べるとともに、爆薬や化学剤のリスク評価とリスク管理の重要性を指摘した。第 19 期の対外報告では、遺棄化学兵器とともに国内の老朽化学兵器まで対象を広げ、さらに、医科学の視点から生体影響や救急医療というリスク評価やリスク管理の現状を述べた。すなわち、上記の第 18 期と第 19 期の 3 つの対外報告においては、化学兵器廃棄の意義と国際的な貢献、研究者・技術者の交流、廃棄に当たってのリスク評価とリスク管理の位置づけ、将来に向けた成果蓄積と研究者ネットワークの維持、理工系と医学系の交流、人文・社会科学を含めたあらゆる科学技術の発展と成果の活用などを提言したといえる。

以上の成果として、国内において化学工学会、計測自動制御学会、日本ロボット学会でセッションや講演会が開催されるなど、関係する研究者や技術者の交流が広がっている。また、総合科学技術会議では社会基盤分野における重要な研究開発課題として「テロ対策・治安対策」が取り上げられた(2006年3月28日)。さらに、科学技術振興調整費「生物化学テロにおける効果的な除染法の開発」が2006年度に採択されるなど、大学・産業界・公的研究機関の共同研究が立ち上がり、理工学と医科学との融合研究が進められている。

中国に遺棄された化学兵器廃棄の実行段階に臨み、化学剤の漏洩、爆発事故、ヒ素廃棄時の環境汚染などの課題を回避しながら廃棄処理を滞りなく進捗させるには、既往の技術を有効に活用すると同時に、化学物質の検知、分析、ヒ素の処理に最新の成果を取り入れることも必要に応じて考えるべきである。本提言においてはこれまでの対外報告を踏まえて、その後の検知技術やヒ素の無毒化など最近の技術開発を紹介しつつ処理の際のリスク管理の留意点及び関連新技術を調査した結果を報告し、関係各位の注意を喚起して新しい先端技術の研究の推進と活用を提言するものである。

1 分析技術の最近の進歩について

化学兵器を廃棄する際には、化学剤の分析、作業時のモニタリング、埋められた化学弾の探査、回収された化学弾の鑑定、大気・廃水・土壌中の化学剤と関連物質の分析など多くの計測技術が使われる。特に化学剤は微量での検出が必要なため、対外報告書「老朽・遺棄化学兵器のリスク評価と安全な高度廃棄技術の開発」(2005年3月23日)では、質量分析装置(MS)などの現在実用されている化学剤の検出器を解説した。ここでは、近年急速に進歩してきた質量分析装置の超高感度な分析技術を概説すると同時に、化学兵器の廃棄現場で要望の高いオンサイトの計測やモニタリングに応える最新の検出素子について述べる。新しい先端的な技術を活用することは、地中・水中に埋もれた遺棄・老朽化学兵器の探索、発掘及び、処理後の環境の維持改善には極めて重要である。以下に最近進展の著しい分析、検知技術を紹介する。

(1) 質量分析装置(MS)の進歩(参考資料A1.1)

微量の化学剤を同定したり定量する分析手法には質量分析装置(<付録>用語の説明を参照)が確立されており、化学兵器禁止機関(OPCW: Organisation for the Prohibition of Chemical Weapons)で化学剤及びその崩壊物を分析する標準的な装置として使われるなど、世界各国でこの方法は定着している。質量分析装置は感度の高い分析能力があり、これまでにPCBやダイオキシンなどの超微量で複雑な分子構造をもつ化学物質を検出した実績をもつ。このため、環境や健康に係る微量物質の検出について豊富な経験があるといえる。

しかし、化学剤をはじめ多くの有害物質の大気、水、土壌などの媒体への混入は微量であるため、試料を質量分析装置にかける前には前処理が必要である。これは、化学剤を媒体から分離・抽出した上で、試料中の化学剤を十分な検出感度を得るまで濃縮し、妨害する不純物を除去などの操作であるが、多くの場合、この前処理には数日から1週間程度の日数がかかるため、本来の質量分析装置での作業時間に比べて長く煩雑な前処理手順を要するとされている。

近年、従来の質量分析装置、例えばGC-MS(<付録>用語の説明を参照)やLC-MS(<付録>用語の説明を参照)を超えるフーリエ変換イオンサイクロトロン共鳴型質量分析装置(FT-ICR-MS: Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance Mass Spectrometry)が出現した。これらを活用すればこれまでの質量分析装置では得られない超高精度(1 ppm以下、<付録>用語の説明を参照)、超高分解能(100,000以上)、超高感度(0.1 フェムトモル以下、<付録>用語の説明を参照)の分析が可能となる。

試料の前処理を必要とせず、極く微量の化合物分子を検出できるこの方法の活用は化学兵器の廃棄処理において有用であろう。本法の詳細と小委員会で検討した実験結果を参考資料A1.1(図A1)に記す。

(2) センサー技術 (参考資料 A1.2、A1.3)

センサーとは力、変位、速度などの物理量を電気信号などに変換するデバイスや素子を指す。化学兵器の廃棄では化学弾の探査から化学剤や火薬の同定や定量、連続監視 (モニタリング) まで多くの作業でセンサーが不可欠である。

超微量の物質を検出するセンサー素子が最近急速に進展しており、化学剤の検出に適用できるという大きな期待がかけられてきたが、最近のこの分野の進歩としては、表面増強ラマン散乱法 (文献[1]) や、ホスト - ゲストの鑄型結合を利用する検出法を挙げることができる。超微量の分子を測定できる潜在性をもつ分析装置の詳細、及び毒素の検出例については参考資料 A1.2 及び A1.3 に記載してあるが、このような手段も化学兵器の処理、環境への安全性の確保などのために重要である。

(3) 大気中化学剤の高感度リアルタイムモニタリング (参考資料 A1.4)

化学兵器の廃棄においては、周辺環境や作業環境における大気中の化学剤を迅速で高感度にモニタリングすることが不可欠である。従来からこのようなモニタリング装置は使用されてきたが、より高感度で連続測定が可能な測定装置が要望されている。

最近、質量分析装置の一種であるタンデム型質量分析装置を用いて、1 秒以内で測定できるモニタリング装置が開発された。この検出装置では $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ オーダー以下の濃度の大気中の化学剤を検出でき、現在その $1/10$ 以下の濃度でもモニタリングできる装置を技術開発中という。化学剤ではマスタード、ルイサイトなどの他サリンなどの神経ガスも測定可能である。なお、本装置はダイオキシン類や PCB などの一般的な有害化学物質のモニタリングにも実績をもつ。

2 ヒ素の廃棄技術

廃棄技術とは、発掘・回収した化学弾を(1)火薬、化学剤、弾殻などへ解体し、(2)無害化処理したあと、(3)発生する気体、液体、固形廃棄物を浄化または処分する一連のプロセスを指す。最近(1)の解体と(2)の無害化を一体にしたプロセスも実用化されてきた。過去の対外報告では、前2者の解体及び化学剤の無害化についての概略を記述したが、廃棄作業によって回収されるヒ素をどのようにして安全でかつ安心な形態にするのか、ということは大変重要な課題である。ポーランドではアダムサイト(＜付録＞用語の説明を参照)のヒ素を毒性の極めて低い金属ヒ素の形態で回収してガラス固化を行い、ガラス工芸品の形で一般利用に供するという方法がとられている。本章では、固形廃棄物に存在する化学剤由来のヒ素化合物の処分について最近進展のみられる有望な知見を取り上げる。

(1) 廃棄で発生する無機ヒ素の危険性と無毒化の必要性

わが国と中国内にはレイサイトやジフェニルヒ素化合物というヒ素を含有する化学剤を持つ老朽化された、あるいは遺棄された化学兵器が存在する。回収された化学兵器に対して加熱爆破、制御爆破、燃焼などの処理を行った結果、無機ヒ素や金属ヒ素を含む廃棄物が生成される。金属ヒ素も廃棄物として二次燃焼で酸化されると無機ヒ素に変化する(＜付録＞用語の説明を参照)。

今日、無機ヒ素による健康影響は、職業性暴露よりも、自然由来の無機ヒ素摂取(井戸水の長期摂取)による問題が深刻であり、アジア諸国を中心に地球上の被害者は約8,000万人、中国の被害者は推定300万人とされる(文献[2]、[3])。化学兵器に用いられるレイサイトやジフェニル化合物を無機ヒ素に変換しても、それは急性・慢性毒性、さらに、発がん性を有する猛毒な毒物とするのみで、何ら根本的な解決に至ってはいない。かえってヒトへの健康影響の危険性は増大し、特に、無機ヒ素による肺がんや皮膚がん、膀胱がんの原因ともなり(文献[4])、新たにリスクが増えることとなる。自然由来の無機ヒ素と化学兵器処理で発生する無機ヒ素とは区別が難しく、中国内に多数ある無機ヒ素の地下水汚染と混同させない対策を講じる必要がある。また、石炭を燃料として化学兵器を燃焼処理するならば、石炭に含まれる高濃度のヒ素がヒューム、粉塵、灰に残存することになる。実際、中国の貴州省では、石炭燃焼から放出された無機ヒ素により、約20万人の慢性ヒ素中毒患者が発生している(文献[2])。

金属・無機系の有害物質の無害化処理において、ヒトと隔離する処置を採用しているのが通常の方法である。すなわち、無機ヒ素の水質や土壌汚染、産業界での廃水処理などでは、基本的には凝集と沈殿(ポリ塩化アルミニウム、硫酸第一鉄)吸着剤(セリウムやランタン系吸着剤、活性アルミナ)の使用、ろ過(砂)、微生物の作用によるバイオレメデーションなどの利用が検討されているが、全てに共通することは単に無機ヒ素を高濃度に集積、蓄積するという処理に止まっており、本質的なヒ素の有害性や危険性がなくなる訳ではない。

20世紀の時代から今日まで、無機ヒ素（三酸化ヒ素、酸化ヒ素）はその時代に応じた大口需要があり、ヒ素農薬、除草剤・枯れ葉剤、白蟻駆除剤（CCA; Cu-Cr-As）、そして、液晶基板ガラス製造時の気泡除去剤などに使用されてきた。ところが、2006年制定のEUの有害化学物質規制に関連して、無機ヒ素の使用が急速に減少しており、化学兵器処理から将来発生する無機ヒ素に、再利用としての新たな産業用の用途を望むことは難しくなるものと考えられる。

すなわち、化学兵器処理から生成される無機ヒ素は、ヒトへの健康影響を増大させるリスクが高いこと、自然由来のヒ素中毒の原因と混同される可能性が十分あること、そして、処理後の無機ヒ素に対する新たな産業用の需要は少ないものとする。

(2) 無毒化したヒ素に対する国際的な認知

1970年代後半から、ヒ素化合物は化学構造と化学形態の違いにより毒性は大きく異なるという研究成果が報告され、海洋生物と哺乳動物には無機ヒ素に対するメチル化経路の存在が証明され、その作用が解毒機序につながると推定されている（文献[3]）。また、ヒトが食している食品のうち魚介類と海藻類には高濃度のヒ素化合物が含まれているが、日本人健常者は一日に約0.15 mgの総ヒ素を摂取しているにも拘らず（文献[5]）何人にも健康被害は生じていない。その主な理由は魚介類と海藻類に含有するアルセノベタインやアルセノ糖が関係し、特にアルセノベタイン（半致死量10 g/kg）の毒性は無機ヒ素（0.03 g/kg）に比較して1/300と低いことにある（文献[6]）。この魚介類や海藻類に含まれる無毒なヒ素による健康障害が発生しない機構は、国際的に共通して認識されている（文献[7]）。

海洋生物においては、海水中のごく微量な無機ヒ素を植物性プランクトンがアルセノ糖に変換し、さらに、動物性プランクトン、魚介類に移行する過程でアルセノ糖がアルセノコリンへ、そして最終的にアルセノベタインが生成される（文献[7]）。これに対して、アルセノベタインはヒトや哺乳動物では生成されず、したがってヒトの尿中に含まれる高濃度（約0.1 mg/L）のヒ素の全ては魚介類等に由来する有機ヒ素である。

現在、アルセノベタインを人工的に安全で効率的に化学合成する方法は確立されていない。しかし海洋生物が保有している無機ヒ素のメチル化能力をもとに、人工的なアルセノベタインの化学合成が実現すれば、化学兵器処理から発生する無機ヒ素に対する無毒化処理につながるものと期待できる。

(3) 無機ヒ素の無毒化処理方法と現状の課題

無機ヒ素からアルセノベタインへの合成法の基本理論は、ビタミンB₁₂酵素が保有するメチル基転移反応の活用を想定している。天然のビタミンB₁₂酵素が持つ活性中心を模倣し改良したものが修飾ビタミンB₁₂酵素であり、構造が単純化されている。後述の参考資料1、A2に無機ヒ素のアルセノベタインへの代謝過程を示したように、メチル化疎水性ビタミンB₁₂をメチル基転移酵素として、さらに還元型グルタチオン

(GSH)を補助還元酵素とした反応系に無機ヒ素(三酸化二ヒ素)を作用させることにより、トリメチルヒ素化合物(トリメチルアルシンオキシド)を合成できる。次いで、GSH存在下で温和な中性水溶液中において、ヨード酢酸をトリメチルアルシンオキシドに反応させると、最終生成物であるアルセノベタインが人工的に合成される。

この方法の本格的な実用化にあたり、無機ヒ素からトリメチルアルシンオキシド合成におけるメチル化の効率化が課題であり、その解決策の一つにバイオインスパイアード触媒(ビタミンB₁₂-TiO₂ナノハイブリッド触媒)の利用が候補として挙げられる。その他、実験室規模から段階的にスケールアップするための検証や、本システムで生成したアルセノベタインの毒性評価も信頼性のある普及に向けた課題で、この分野の研究を一層進展させることが望まれる。

(4) 無毒化ヒ素(アルセノベタイン)の保存と自然への還元

化学合成された無毒のアルセノベタインは常温で安定であり、例えば、1億年を経過した魚の化石中のアルセノベタインが変質していないという未公開の研究結果も存在する。しかし、300以上の加熱により熱分解し、また、活性汚泥など特殊な微生物の組み合わせの作用により脱メチル化が段階的に引き起こされる。このような特殊な条件である高温加熱や微生物の侵入を制御できれば、アルセノベタインを極めて長期間安定的に保存することが期待される。

化学兵器処理で生成されるアルセノベタインは、高温による分解や微生物の侵入を制御する目的で滅菌し特殊ガラス容器内に窒素充填して封印(液体窒素で冷却)すれば、地上の一般的な建造物や地中(砂地)に保管・保存が可能で、ガラスの耐久年数を考慮すると数千年間は安定と推測される。通常、無機ヒ素はコンクリート固化させ処理・保存されるが、コンクリートの耐久年数が30-50年であるため、長期的には安全とはいえない。そこで、ヒ素を含む廃棄物を長期にわたって処分・保管できる新たな技術が望まれている。ここで紹介したヒ素をアルセノベタインの形態で保存・処分する方法は大きな可能性がある。

アルセノベタインは魚介類に高濃度に含有されている。本来、ヒトや家畜は魚介類を摂取し尿中へアルセノベタインを排泄し、それらが自然環境や下水施設に移行し、自然な形で環境循環サイクルに戻されている。さらに、魚介類も死により海底生物の餌になり、また、微生物の分解で新たに海水中に拡散し自然の循環サイクルに組み込まれるものである。このような自然の仕組みに倣い、将来的には、国際的な合意に基づき、地球規模での自然循環によるアルセノベタインの自然回帰・自然還元に向けて、特別な保管や保存施設が不要の革新的な無毒化処理方法を目指すべきであろう。

この方法は、化学兵器由来のヒ素の処分の他に、一般の廃棄物や飲料水、廃水に含まれるヒ素の浄化や、またアジア各地における天然の地下水によるヒ素中毒の防止にもつながることが期待される。

3 化学剤による健康被害と人体毒性

(1) 化学剤の検出事例と人体の健康被害への影響

化学剤とその崩壊物の分析方法の概要

旧日本軍の化学剤漏洩や汚染が疑われる場合、分析対象となる主要な化学剤は5物質（マスタード、ルイサイト、ジフェニルシアノアルシン、ジフェニルクロロアルシン、及び2-クロロアセトフェノン）である。実際に遺棄化学剤による汚染実態を明らかにするには、その分解物や原料、副生成物なども検出対象になる。表1に旧日本軍による遺棄化学剤の関連物質22種を示す（文献[9]）。びらん剤のルイサイトやマスタードは水との反応性が高く、速やかに分解されるが、ルイサイトの分解物（クロロビニルアルシンオキシド、クロロビニル亜アルソン酸）はルイサイトと同等のびらん作用があり、取り扱いに注意が必要である。一方、ジフェニルシアノアルシン（DC）、ジフェニルクロロアルシン（DA）も速やかに加水分解され、中間体のビス（ジフェニルアルシン）オキシド（BDPAO）から徐々に安定なジフェニルアルシン酸（DPAA）になり、土壤中に残留または地下水中等により拡散すると考えられている（参考資料1、A3）。

表1 化学剤関連化合物（22物質）と分析方法

化学剤	化学剤およびその崩壊物質などの分析対象物質			分析方法（注1、注2）			
	物質名（俗称を含む）	略称 (NATO/US コードなど)	化学式	溶媒抽出	シリル化	チオール化	前処理不要
				GC/MS	GC/MS	GC/MS	LC/MS/MS
マスタード	ビス（2-クロロエチル）スルフィド	HD	(ClCH ₂ CH ₂) ₂ S				
	1,2-ビス（2-クロロエチルチオ）エタン	Q	ClCH ₂ CH ₂ SCH ₂ CH ₂ SCH ₂ CH ₂ Cl				
	ビス（2-クロロエチルチオエチル）エーテル	T	(ClCH ₂ CH ₂ SCH ₂ CH ₂) ₂ O				
	ビス（2-クロロエチル）ジスルフィド	マスタードジスルフィド	(ClCH ₂ CH ₂) ₂ S ₂				
	1,4-ジチアン		C ₄ H ₈ S ₂				
	チオジグリコール		((OH)CH ₂ CH ₂) ₂ S				
ルイサイト (注3)	2-クロロビニルジクロロアルシン	ルイサイト1	(ClCH=CH)AsCl ₂				
	ビス（2-クロロビニル）クロロアルシン	ルイサイト2	(ClCH=CH) ₂ AsCl				
	トリス（2-クロロビニル）アルシン	ルイサイト3	(ClCH=CH) ₃ As				
	2-クロロビニル亜アルソン酸	CVAA	(ClCH=CH)As(OH) ₂				
	2-クロロビニルアルシンオキシド	CVAO	(ClCH=CH)AsO				
	2-クロロビニルアルソン酸	CVAOA	(ClCH=CH)AsO(OH) ₂				
	ビス（2-クロロビニル）亜アルソン酸	BCVAA	(ClCH=CH) ₂ As(OH)				
ジフェニルクロロアルシン および ジフェニルシアノアルシン	ジフェニルクロロアルシン	DA	(C ₆ H ₅) ₂ AsCl				
	ジフェニルシアノアルシン	DC	(C ₆ H ₅) ₂ AsCN				
	ビス（ジフェニルアルシン）オキシド	BDPAO	(C ₆ H ₅) ₂ AsOAs(C ₆ H ₅) ₂				
	ジフェニルアルシン酸	DPAA	(C ₆ H ₅) ₂ AsO(OH)				
	トリフェニルアルシン	TPA	(C ₆ H ₅) ₃ As				
	フェニルアルソン酸	PAA	(C ₆ H ₅)AsO(OH) ₂				
2-クロロアセトフェノン	フェニルアルシンオキシド	PAO	(C ₆ H ₅)AsO				
	2-クロロアセトフェノン	CN	(C ₆ H ₅)COCl				
	アセトフェノン		(C ₆ H ₅)CHO				

注1) 分析方法について、○：最適、△：適、□：可、空白：不可を表す。

注2) 分析方法の上段は試料の前処理方法、下段は測定手法を示す。GC/MS：ガスクロマトグラフ/質量分析、LC/MS：液体クロマトグラフ/質量分析

注3) ルイサイトは、2-クロロビニル基が1個から3個まで含まれた3種類の化合物があり、いずれもびらん剤である。

健康影響から見たヒ素化合物の新規の安全基準と検出方法

DPAA の体内動態試験や毒性暴露試験では、以下の結果が得られた。(1)生体毒性は5価無機ヒ素と同等かそれよりやや低いこと、(2)生体内代謝を比較的受けにくく尿中や糞中に排泄されること、(3)中枢神経 特に小脳・脳幹 (<付録>用語の説明を参照) が標的臓器であること、(4)中枢神経系への残留性が高いこと、特にラットやマウスなどの齧歯類(げっしるい)と比べて霊長類で残留性が高いこと、(5)生殖発生毒性、発がん性、免疫系への影響は不明であった。また、(6)慢性暴露の影響は現時点で不明であり、今後の研究での解明を期待したい。

化学剤処理における作業環境基準及び排出基準は既出報告書で述べられている通りである(文献[10])。一方、処理事業にあたる作業者の暴露モニタリングも処理する化学剤がヒ素剤中心であるので尿中総ヒ素量の変化が採用されている。しかしながら、海産物を多く摂取する邦人の特殊性や、フェニルヒ素化合物の標的臓器が中枢神経系で、中枢神経系への残留性が高いことなど、有機ヒ素の生体内動態が無機ヒ素とは全く異なることが明らかになり、尿中総ヒ素量のモニタリングなど無機ヒ素で代用した従来の基準で作業者の健康リスク管理を行うことは、科学的根拠が不十分であるといえる。このため、DPAA の生体への安全基準値の設定、尿中有機ヒ素化合物の形態別定量分析法の導入が必要と考えられる。

(2) 人体毒性と救急医療

化学兵器による健康被害は戦後、散発的に報告されてきた。国内では、2002年9月神奈川県寒川町旧海軍相模工廠跡地における地中掘削工事中に発生したマスタードとクロロアセトフェノンによる障害、2003年4月に神奈川県平塚市の旧相模海軍工廠実験部跡地で起こったシアン化水素などによる呼吸障害、さらに2003年3月にはあか剤の原料であるジフェニルアルシン酸による地下水汚染と健康被害などである。国外では、2003年8月の中国黒竜江省チチハル市で起きた旧軍化学剤マスタードガスによる被害では不幸にも43名の被害者が発生し、1名が死亡している。これらの事例より、廃棄作業における化学剤の暴露リスクを回避するためにも、化学剤の急性中毒症状や慢性中毒症状の診断(及び治療)に関する情報を得ることが重要である。旧日本軍による製造が確認されている化学剤であるびらん剤(マスタード、ルイサイトなど) くしゃみ・嘔吐剤(ジフェニルクロロアルシン、ジフェニルシアノアルシン) 催涙剤(クロロアセトフェノン) 窒息剤(ホスゲン) 血液剤(シアン化水素、シアン化塩素)に関する急性中毒症状及び慢性中毒症状について参考資料1、A3.3に示すが、これらを化学兵器の廃棄事業のリスク管理に生かすことが実施の際に重要である。

(3) 作業者の健康管理と救急医療の体制

国内の老朽化学兵器及び中国の遺棄化学兵器の廃棄処理が実行されるに当たり、廃棄事業に携わる作業者が化学剤に暴露されるリスクがある。したがって、定期的な健

康管理体制が不可欠である。このため、(1)医師並びに医療従事者が中心となる医療チームの編成並びに(2)必要な健康診断機器・施設の完備が望まれる。さらに、(3)作業者の健康履歴を保存し、各種の症例を参照できるデータベースも不可欠であり、同時に、(4)様々な医療専門家と意思疎通を図るネットワークも構築されるべきであろう。

また、万一不幸にして化学剤の被ばくや作業事故による負傷が発生する場合に備えた救急医療にも上記の体制が機能を発揮できる。この場合、(5)現地の警察、消防署等との連絡体制が必要であり、さらに(6)負傷者を輸送できる準備にも目配りが望まれる。

4 廃棄処理プロジェクト実施にあたってのリスクの評価とリスクの管理

化学兵器の廃棄処理プロジェクトの実施にあたっては、作業現場の地域的特性、言語の違い、行政・法規、風俗、生活習慣の違いなどをよく理解し、そこで発生するリスクの分析とその軽減対策をあらかじめ講じておくことが必要である。以下においてリスクの事前解析、作業現場の管理の手法についてごく簡単に紹介するが、詳細については成書によるべきである。更に、万一事故が発生した場合の対応方法の概要を述べ、また、実際の化学兵器遺棄に対しリスク評価を行った例を記述する（<付録>用語の説明を参照）。

(1) リスクの事前解析（文献[11]）

目的

リスクの事前解析にはデザイン・レビュー、FMEA（Failure Mode and Effect Analysis）、PHA（Process Hazard Analysis）などが有効である。これらの方法の目的は以下の通りである。

- 1) これまでのフィールドにおける技術、新しい技術の開発など、プロジェクトの計画・実施に必要なより多くの情報を獲得する。
- 2) プロジェクトの実施上の要求事項に対する客観的評価を行なう。
- 3) 処理設備の据付、運転、廃棄物の輸送に対する要求を明確にする。
- 4) 潜在する事故・不安全に対する考慮を強化する。
- 5) 地域・環境に対する影響の程度を明らかにし、プロジェクト計画の改善項目について優先順位を定める。
- 6) リスクを下げるための推奨事項及び必要な対策事項の実施の推移をオープンにし、これらを体系的に確実にこなすことにより、リスクを低減し、事故、損失の発生を防止することができる。

デザイン・レビュー（DR）

プロジェクトの実施にあたって、その計画は技術的要求事項、コスト、安全性、信頼性、作業性、周囲への影響、保全性、法規にわたるすべての要請を満たしていなければならない。

すべての技術的問題が計画部門で解明できるのであればよいが、現実には計画部門だけでは十分な対応が困難な問題が少なくないのが普通である。新しい現場、新しい設備、新しい作業方法で作業が行われる場合には思ってもみなかった所でトラブルが発生することが少なくない。DRは担当者の知識や情報の不足、あるいは「思い込み」による計画不具合を摘出し、これを解決して、プロジェクトの品質を確保するとともに効率よく実施するための活動である。

DRを行なう人々は、そのプロジェクトに関する手続き・設備・輸送・作業・保守・最終処分・関連法規などのそれぞれの分野において、グループとしてプロジェクトのすべての要素に熟知し、責任をもっている人たちで構成される。大規模で複雑なプロジェクトの場合には、「プロジェクトのすべての要素」に通じている個人

は得難いことであるが、個別の専門知識はたいていの場合どこかの部門で得ることができる。これらの知識を組織的にうまく活用することが DR のねらいであり、レビューの段階・内容に応じて、設計業務部門と関連部門の専門家、組織外の専門家や知識人、更には顧客の関係者など広範なメンバーから構成される体制が望ましい。

Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

リスク低減の間口を広げるものがデザイン・レビュー (DR) であるのに対して、その奥行を深めるものが FMEA である。知識と経験の豊富なレビューアーに恵まれた場合は DR の効果は極めて大きい。しかし、このようなレビューアーに恵まれることは常に期待できることではなく、技術的に新しい分野に挑戦する場合はなおさらそうである。このような場合は、これまでの経験を組織的に集めて、可能な限り洞察を深めることを図らなければならない。このための手法の一つに FMEA がある。

FMEA の基盤は故障モードの概念にある。故障のモード (failure mode) とは、故障の状態の形式分類で、故障原因そのものではなく、故障原因からもたらされた不具合事象の様式分類である。一方、故障モードは故障そのものではない。故障をもたらす不具合事象の様式分類でもある。故障の原因、故障モード、故障の関係を図 1 に示す。



図 1 故障、故障モード、原因の関係

故障モードとは故障とその原因の間にある不具合事象である。

現実に発生し得る事故はハードウェアの故障に限らず、ヒューマン・エラーなどを含めて、多岐多様にわたっており、それらを体系的に解析するためには、事故の現象をできるだけ共通的に把握できる事象が必要で、故障のモード、より広くはエラー・モードの概念を設けることによりこれが可能になる。故障モードを核にその影響と原因を同定していくことにより、多岐にわたり、一見亡漠とした事故の予測を系統的に統一的行なうことが可能になるのである。

DR、FMEA の詳細については専門書、例えば章末に示す参考文献に委ねたい。

Process Hazard Analysis (PHA)

FMEA が構成部品の故障モードから始まる帰納的方法に対し、PHA はまず最終事象を仮定し、これを引き起こすと考えられる事象を探し出す演繹的方法である。化学兵器の廃棄に関していえば、危険源 (hazard) となる化学剤や火薬類に起因する化学剤の漏れや弾の爆発という最終事象を仮定し、その原因を探し出して無くしていくという手法である。

(2) 作業現場の管理 (文献[12])

リスクの軽減には、事前のリスクの分析に合せて、現場の作業を確実に実施する体制の構築が必要である。これらには以下の活動が含まれる。

- 1) 作業の標準化： リスクの分析の結果に基づき、仕事を確実に効率よく行なうための作業を標準として定め、文書化する。
- 2) 教育・訓練： 上記標準に基づき、作業監督者、作業者の教育・訓練を行う。
- 3) 購入品・資材管理： 現場で購入・使用する資材の品質管理、数量管理、先入れ・先出し管理を行う。
- 4) 設備保全： 設備の故障、劣化による性能低下を防ぐための保安全管理を行う。
- 5) 変更管理： 現場の作業においては作業者の変更その他多くの変更が発生し、これが事故をもたらすことが少なくない。変更を正しく行なうための管理体制を制定し実施する。
- 6) 異常報告制度： 作業に異常が発生した場合の報告方式を定め、原因の除去、再発防止を行う。
- 7) 現場からの改善提案： 計画段階では気付かなかった問題に対する改善提案を歓迎し、優秀提案を表彰する。

(3) 事故の事後対策 (文献[12])

「事後」のという表現を誤解してはならない。ここでいう「事後対策」は「事後の対策」を「事前に」策定するという意味である。各種の防災訓練は、事故が発生した場合を想定して行なう安全活動の仮想的な実施・実行であり、事故発生時におけるその対策の効果をより確実にするためのものである。事後の安全確保対策の中核は、いわば「事中の安全確保対策」ともいべきものであり、各種訓練の狙いの多くもそこにある。とりわけ、事故発生に際しての「情報ネットワーク」の予めのプログラム化は、事中の安全確保において決定的な意義をもつことが多い。

(4) 化学兵器処理におけるリスクアセスメントとリスク管理の手順

ISO 14121 (JIS B9702) (文献[13]) によれば、機械装置の安全性達成のための反復的プロセスは、図2に示すように主に危険源の同定、リスクの見積り及びリスクの評価であり、リスクの低減(管理)が続く(文献[14])。この場合、リスクの定量化とリスクの許容レベルの明確化がリスクの低減対策の要否と程度の決定に重要となる。PHA法に関しベルギー国防省で行われている定量評価方法を用いて、化学兵器の制御爆破技術のリスク評価とリスク管理例を参考資料1、A4に具体的に示した。

ここでは、制御爆破の手順ごとのリスク(R)を事故の確率(P)、作業頻度(F)、事故の重大性(C)の積として表し、P、F、Cを定量化することによりRも具体的な点数として把握し、その値に応じて「限定的で許容可能」なレベルから「全ての作業を即中止」まで5段階の処置を講じるよう求めている。こうして図2のプロセスを繰り返すことによりリスクを許容範囲内に収めるのである。

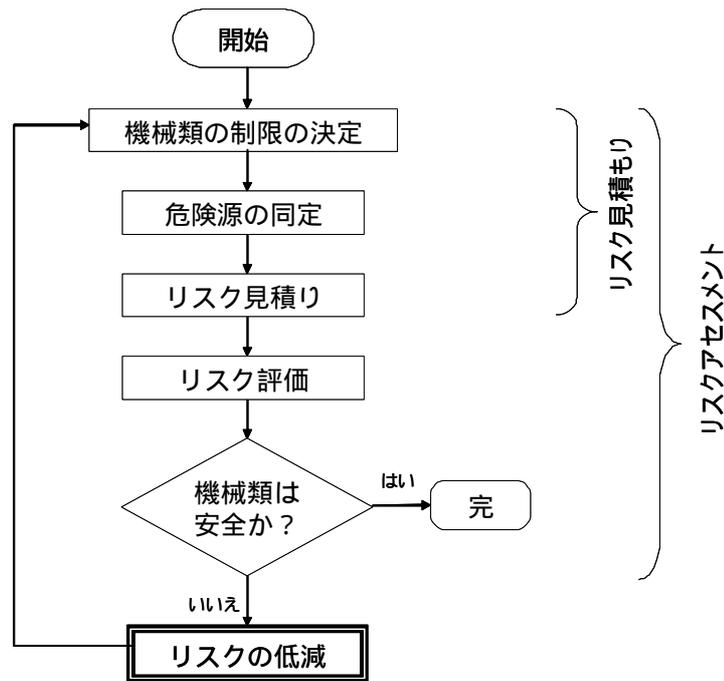


図2 安全性達成のための反復的プロセス

注：ISO 14121 (JIS B9702) (文献[13]) に基づいて一部を改変

(5) 化学兵器処理におけるリスク低減に向けて

システムの運転状況を把握するためのモニターとして配管中に差込まれていた温度計の保護パイプが振動による疲労のため折損し、中を流れていたナトリウム溶液が折損部から洩れて、システムの運転が長期間不能になった例がある。ありふれた古い技術でもその適用を誤ると大きな事故につながる。技術開発では新しい技術に関わる部分の機能、性能に関心が集中しがちであるが、リスクの解析においては、故障の影響の大きさの観点から考察を行なうことが必要である。

また運転員の安全意識の向上の観点から、爆発事故を想定して、その未然予防対策を皆で考えさせるというPHA的アプローチも重要となってくる。この場合、(4)のリスクアセスメントとリスク管理の手順で前述したように評価を定量的に行うことにより、議論をより具体的に行うことができる。また、廃棄事業は多人数が経験の少ない特殊な作業を行うため、事前に共通マニュアルを作成し教育訓練を実施することはリスクの低減につながる。

なお、上記の範囲を超えたリスクとして、発掘回収のリスク、暴風雨などの自然災害のリスクなどがある。また、当事業のように、計画から設計、建設、運転までが長期に亘るものは、安全性達成の反復プロセスの時間軸が長すぎ、計画まで遡ることが出来ないことも予想される。その意味で、最初の設計条件の設定そのものの妥当性のチェックもリスク管理の重要な点となる。一旦事故が発生した際にはわが国や中国の廃棄事業そのものが停止し、ひいては世界中で行われている化学兵器の廃棄事業の停止に広がる懸念があることも念頭に、リスク管理に万全を期すべきであろう。

5 提言

緒言で述べたように、老朽・遺棄化学兵器の廃棄に関連するわが国の科学技術は近年目覚ましく進展した。本提言では特に、分析・検知技術とヒ素の無毒化を中心に、最近の科学技術の進展を明らかにし、また緊急医療のシステム整備と作業に当たってのリスク管理の重要性を示した。いうまでもなく廃棄事業の実行段階にあたっては、より安全で効率の高い廃棄の実施が求められる。そこで、政策当局、専門家集団並びに関係する研究者集団に対して以下の3項目を提言する。これらの提言は同様の課題を持つ諸外国にとってもまた、有用であると信じる。

(1) 廃棄事業における先端技術の活用

科学技術基本法の制定により科学技術への重点化政策が実行されて久しいが、世界的にもライフサイエンス分野、情報通信分野、ナノテクノロジー分野、環境分野などをはじめとする科学技術が急速な勢いで発展してきた。このため、物質の微量検出方法、分子生物学によるヒト健康への影響の評価法、有害物質のリスク評価手法などでも多くの先端技術が生まれつつある。このような新技術は化学兵器の廃棄技術に対しても超高感度の分析、ヒトの健康への影響の評価、より安全なヒ素の廃棄処分などにつながる潜在性が高い。

特に分析・検知技術に関しては、1章に述べたように、微量物質の検出に威力を発揮する質量分析装置が著しく進展し、前処理を不要とする簡易な同定法が利用できるようになった。また、検知やモニタリングの手段においても特定の物質を選択的に、超高感度で、あるいは迅速に認識する技術が広く研究され進展してきた。

さらに、2章で論じたように、古くから知られているヒ素の毒性についても、最近新たな知見が得られた。すなわち、生体での代謝を詳しく調べた結果では、海産物に含まれるアルセノベタインやアルセノ糖類は毒性が非常に低いことが判明した。化学兵器由来の無機ヒ素化合物が高い毒性をもつものに対して、無毒な有機ヒ素化合物に変換することにより発生するヒ素の廃棄がより容易となる可能性がある。

このように進展の著しい分析・検知技術、またヒ素の無毒化法などの研究を更に発展させ、新規の廃棄技術を一層進捗させるべきである。すなわち、このような先端技術を取り入れた迅速、簡易、高精度で安全な廃棄技術の開発を図ることが必要である。

(2) 化学剤の生体への影響調査と救急医療体制の整備

3章で述べたように、化学兵器の廃棄では火薬類の爆発事故とともに、化学剤の漏洩による作業員への被害や周辺環境への影響が懸念される。特に旧日本軍の化学兵器の多くはヒ素を含有するため、急性毒性や慢性毒性、発がん性など、生体への影響の解明、データの構築を推進すべきである。これらの知見は同様の老朽化学兵器を持つ諸外国に対しても有用である。

また、神奈川県寒川町や中国黒竜江省チチハル市、茨城県神栖市における化学剤及

び関連物質の被害者の治療において、特に救急医療の必要性が明らかになった。わが国では過去にサリン事件で医学的措置の経験をもち、最近ではテロ発生に備えて国による研究が行われている。今後も、生体の影響や救急医療に関わる医科学の一層の進展を図る必要がある。

今後進められる予定の廃棄事業に関しては、救急医療に関する知見を活用すると共に、廃棄に携わる作業者の定期的な健康管理並びに万一発生する事故に備えた救急医療の体制を早急に整備すべきである。

(3) リスク評価手法を活用したリスク管理

4章で述べたように、老朽・遺棄化学兵器はマスタード、ルイサイトなどの化学剤と爆発性の高い火薬とがひとつの砲弾に組み込まれている上に、地中に埋められたり、海中に投棄されている。また、60年以上経過して砲弾の腐食が著しいものがあるため、発掘回収から廃棄処分までの多くの作業工程で危険性（リスク）が存在する。幸いにしてこれまでは事故もなく良好な廃棄の実績があるものの、今後も多くの化学兵器を廃棄するに当たって、これまでの経験を加味してリスク評価をより科学的に分析して、安全なリスク管理に向けて作業工程を解析する必要がある。具体的には、化学兵器の廃棄に際してこれまでにあまり考慮されてこなかったデザイン・レビュー（DR）、Failure Mode and Effect Analysis（FMEA）、Process Hazard Analysis（PHA）などのリスク評価手法を積極的に活用すべきである。同時に、教育訓練を含めた作業現場の管理を徹底し、各種の防災訓練を行うとともに、事故発生に際しての情報ネットワークをあらかじめプログラム化しておくべきである。

化学兵器の廃棄に際しては、爆破処理の際のリスクのみならず発掘回収のリスク、保管・輸送中の暴風雨などによる自然災害のリスクなどがある。一旦事故が発生した際にはわが国や中国の廃棄事業そのものが停止するというリスクがあり、ひいては世界中で行われている化学兵器の廃棄事業の停止にも広がる懸念があることを付言しておきたい。

これらを念頭において、安全かつ迅速に廃棄処理を進めることが是非とも必要である。

<参考資料1>

A1 最近の分析装置の進歩

A1.1 質量分析装置 (MS)

経年変化を受けた化学兵器剤あるいは自然界に流出した化学兵器剤の網羅的な定性・定量分析は決してたやすくはない。このような環境分析の問題点を解決する技術が生物学より生まれようとしている。

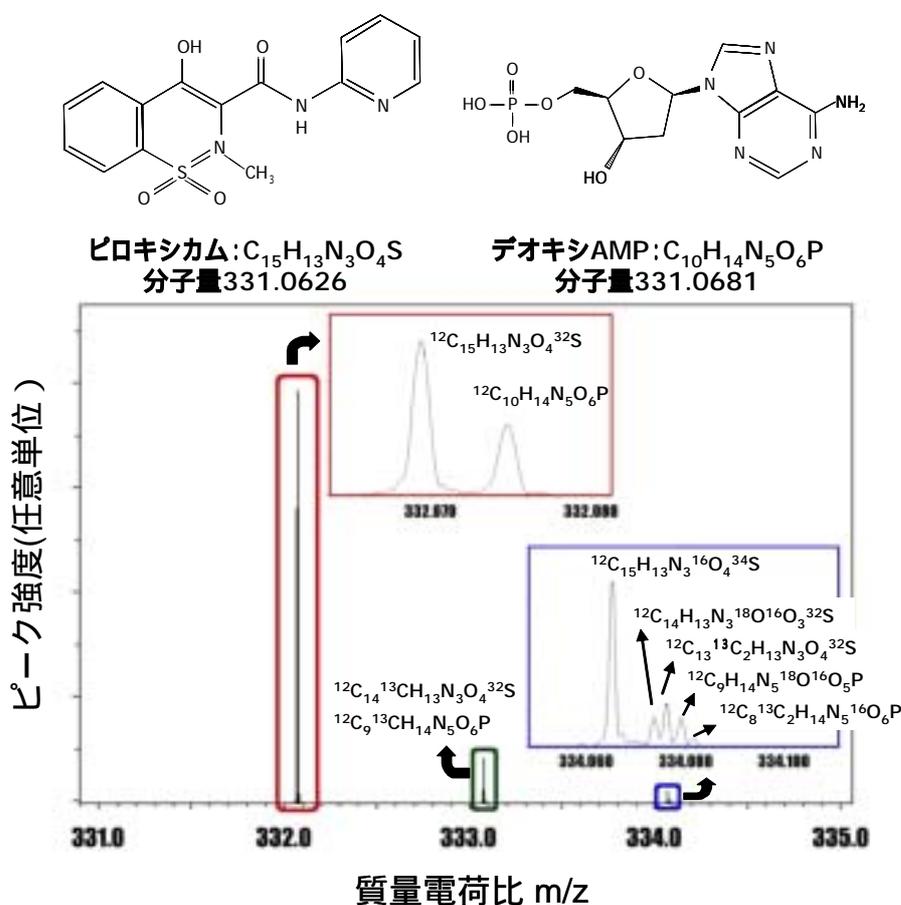
生物のゲノム全塩基配列が次々に解読されたことに伴い、ポストゲノミクス技術として発現遺伝子・タンパク質・代謝物の網羅的な定性・定量解析技術が発展してきている。特に、全代謝産物 (メタボローム) を対象にした解析 (メタボロミクス) では、細胞内に存在する低分子量有機化合物の網羅的な同定を目指している。メタボロームが最初に提唱されたのは 1998 年であり、最初は微生物を対象に始まり、その後、代謝物の多い植物や、病態解析・創薬に直結する人を対象にしたメタボロミクスが台頭してきた。メタボロミクスに向けてイムノアッセイ (<付録>用語の説明を参照) や核磁気共鳴装置などが考案・進展しているが、主要な計測装置は複雑な構造を持つメタボロームを直接計測できる質量分析装置 (MS) である。このため、多種類の混合物を分離しながら分析できる GC-MS (ガスクロマトグラフ - 質量分析装置) LC-MS (液体クロマトグラフ - 質量分析装置) CE-MS (キャピラリー電気泳動質量分析装置) 等の質量分析装置が進展してきた。しかし、これらの装置では物質の同定に標準試料 (<付録>用語の説明を参照) が必要であるが、生体物質の標準試料は少なく、多くは一次代謝産物に限られているのが現状である。分析の網羅性向上に向け、標準試料の質量分析データライブラリーの構築が行われているものの、登録化合物数は実際のメタボロームサイズより圧倒的に小さい。そこで現在、標準試料非依存型のメタボロミクス技術の開発に期待が寄せられている。

この新技术を支える超高精度・超高分解能・超高感度分析が可能な質量分析装置が最近出現した。フーリエ変換イオンサイクロトロン共鳴型質量分析装置 (FT-ICR-MS: Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance Mass Spectrometry) である。本装置では、イオン化された化合物を ICR セルに導入し、超電導磁石による磁場によりそれぞれのイオンを発生するローレンツ力 (<付録>用語の説明を参照) を向心力として円運動 (イオンサイクロトロン運動) をさせ、周波数データとして取り込む。質量電荷比 $m/z = B/2\pi f$ (f は周波数、 B は磁束密度で一定値) であることから、フーリエ変換後、周波数データから m/z を求めることができる。この方式により積算測定が可能となり、これまでの質量分析装置では得られない超高精度 (1 ppm 以下、<付録>用語の説明を参照) 超高分解能 (100,000 以上)、超高感度 (0.1 フェムトモル以下、<付録>用語の説明を参照) な分析が可能となる。

この装置の第 1 の利点は、超高分解能に由来している。わずかに質量の異なる化合物も明瞭に分離され、別々にイオンを検出することが可能である。また、検出されるそれぞれのイオンについて小数点第 5 桁までの精密質量が得られ、アイソトープピークも明瞭に分離される。精密質量を与えるモノアイソトピックピークと ^{13}C 、 ^{15}N 、 ^{34}S 由来のピーク強度より、それぞれの組成式を決定することができる。したがって、標品を必要としない構

造推定に威力を発揮するものと期待されている。高感度を得るため、100回の積算を行っても、1試料の分析が数分以内に完了することも大きな魅力である。第2の利点は、混合物の分離を必要としない点にある。このため、クロマトグラフなどによる化合物の分離段階を経ることなく、サンプル粗抽出液を直接分析装置に導入できるため迅速な分析や同時に多数の化合物が分析できる。

図A 1にピロキシカム（分子量: 331.0626）とデオキシAMP（分子量: 331.0681）の混合物をFT-ICR-MSで測定した結果を示す。このように分子イオンピークが分離されて測定される以外に、アイソトピックピークが分離測定される（図はアイソトピックピークのみを示す）。これらFT-ICR-MSの特性は、精密質量分析を必要とするすべての研究領域で利用可能であり、環境中より得られる試料の一斉分析や経年変化により分解・再縮合を起こした資料の分析に威力を発揮するものと期待される。



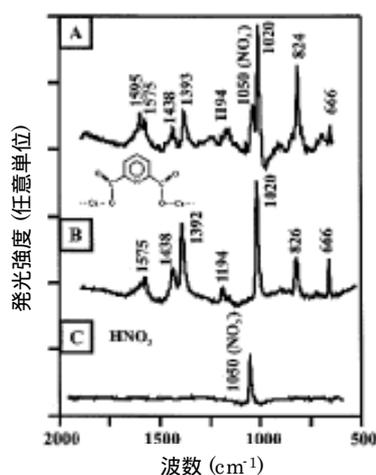
図A 1 12 T (T = テスラ: 磁場の単位) 超電導磁石搭載型 FT-ICR-MS によるほぼ同じ分子量をもつ2種類の化合物の同時分析 (図は小委員会にて作成) [化合物: ピロキシカム (分子量: 331.0626) とデオキシAMP (分子量: 331.0681)]

A1.2 表面増強ラマン散乱法 (SERS)

紫外・可視光を金属ナノ粒子に照射して反射したラマン散乱光が増強し高強度の赤外スペクトルを得る現象を表面増強ラマン散乱 (SERS: Surface-Enhanced Raman

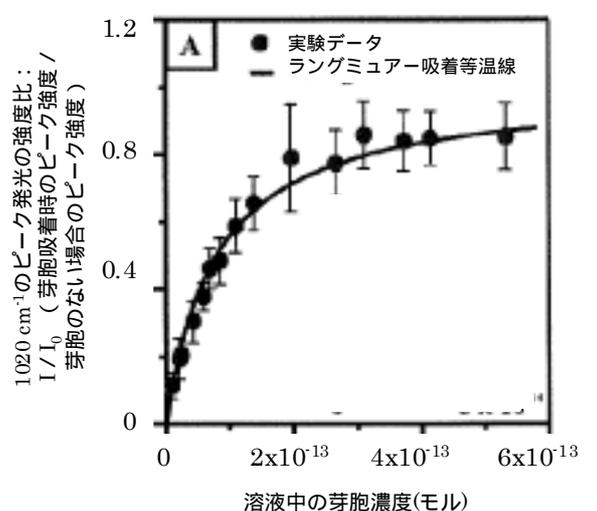
Scattering) と呼ぶ(文献[1])。対象金属には銀、金、銅、白金などが試みられ、数 10~数 100 ナノメートル (nm、<付録>用語の説明を参照) の均一な金属粒子は SERS 効果を出す。ナノ金属ナノ粒子の作成方法として、(1)リソグラフィ法(Nanosphere Lithography)、(2)電子ビームリソグラフィ法、(3)その他の金属錯体の化学処理による三角柱型、プリズム型、立方体型のナノ構造体作成法が報告されている。ガラス基板上に均一に配置された金属ナノ粒子に紫外・可視光を照射してラマン散乱光が発生するメカニズムは現在でも明確ではないが、ナノ粒子内での強い電磁場効果(局在表面プラズモン)及びナノ粒子間の接点における電荷移動という2つの学説が有力である。なお、ラマン光の増強には塩素イオンなどに促進作用があるとされる。

生物剤の検出に関する報告例では、Zhang, Van Duynne らの炭疽菌の検出結果がある(文献[15])。ガラス基板上にナノ粒子(高分子)を塗布し、真空蒸着により銀を付着させた、粒径 390 nm、厚さ 200 nm 程度の銀粒子を規則的に並べた検出素子(AgFON)を作成する。検出素子に炭疽菌(孢子)から抽出されたジピコリン酸カルシウム(calcium dipicolinate: CaDPA)水溶液を接触させて CaDPA を素子表面の銀粒子に吸着させ、400-900 nm のハロゲンランプを照射しラマン光(赤外スペクトル)を測定すると 1020 cm^{-1} (<付録>用語の説明を参照)などのピークが検出される(図A2)。同様に、炭疽菌(孢子)水溶液でもピークが検出された。水溶液の濃度は 10^{-13} モルという極微量でも検出できる(図A3)。更にまた、SERS 法は単一分子でも検出の可能性があるとされ、今後の展開が期待されている。



A: 3.1×10^{-13} M 芽胞懸濁液 (0.2 mL, 0.02 M 硝酸水溶液中 3.7×10^4 の芽胞) を AgFON 検出素子に接触
 B: 5.1×10^{-13} M の CaDPA に接触
 C: 0.02 M 硝酸水溶液 0.2 mL に接触
 励起波長 = 750 nm、励起入力 P = 50 mW、積算時間 = 1 分、SERS 検出波長 = 600 nm

図A2 炭疽菌胞子の SERS



図A3 SERS スペクトル解析による水溶液からの炭疽菌の吸着等温線

A1.3 鋳型反応を利用した検出方法

ベロ毒素 (<付録>用語の説明を参照) は病原性大腸菌の 1 グループであり、食中毒で被害

の多い O-157 はこの範疇に含まれる。一般に生体内でのタンパク質はリボソーム中の tRNAs (<付録>用語の説明を参照) に結合してタンパク質を合成するが、生体内に侵入したベロ毒素は tRNAs に特異的に結合するためタンパク質の合成を阻止し、毒素として働く。

ベロ毒素の生体への作用を巧みに利用した O-157 (志賀毒素) の微量検出技術が最近報告された。すなわち、tRNAs を構成するグロボピオシル (Gb2) セラミド (globobiosyl ceramide) がベロ毒素と結合することに着目し、セラミドに類似した人工合成化合物 penta-O-acetyl-D-galactopyranose の単分子層を鋳型として水晶結晶表面上に L-B 法 (<付録>用語の説明を参照) で吸着させ、検出素子を作成した。O-157 水溶液を単分子層 penta-O-acetyl-D-galactopyranose に接触させると、O-157 が選択的に結合し素子の重量が増加するため、水晶微量天秤 (QCM : Quartz Crystal Microbalance) 法により微小重量の変化を測定できる。これにより、検出素子を O-157 毒素溶液に接触して 1 時間以内に定量され、1 nmol (ナノモル、 <付録>用語の説明を参照) 程度の濃度まで志賀毒素 Stx-1 及び Stx-2 を検出することができた (図 A 4) (文献[16])。

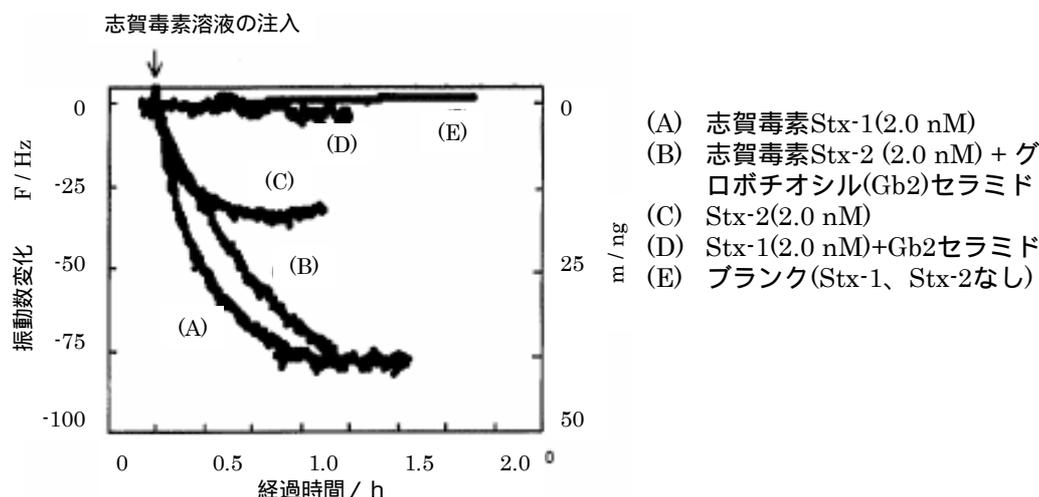


図 A 4 志賀毒素 Stx-1 と Stx-2 の吸着による QCM 検出素子の振動数変化

A1.4 大気中化学剤の高感度リアルタイムモニタリング

警察庁科学警察研究所と株式会社日立製作所等との共同研究グループにより、大気圧化学イオン化タンデム質量分析装置を用いた大気中化学剤のリアルタイムモニタリング技術が開発されている (文献[17])。大気圧化学イオン化法は、GC-MS 法で汎用されている電子イオン化法などに比べてソフトなイオン化法であり、分子を壊すことなくイオン化 (親イオン化) できる特徴がある。生成される親イオンを、イオントラップ型のタンデム質量分析装置を用いて多段階に解裂し、フラグメントイオンを検出する。例えばサリンの場合、プロトン付加分子 ($m/z=141$) → 1 次フラグメントイオン ($m/z=99$) → 2 次フラグメントイオン ($m/z=97$) へと 2 段階に解裂して検出する。このように、親イオンを生成し、かつその解裂パターン (したがって分子構造) による識別を実施することにより、高い特異性を実現している。そのため、GC などの前段分離手段は必ずしも必要では無く、リアルタ

イム（1秒以下）での連続測定が可能である。

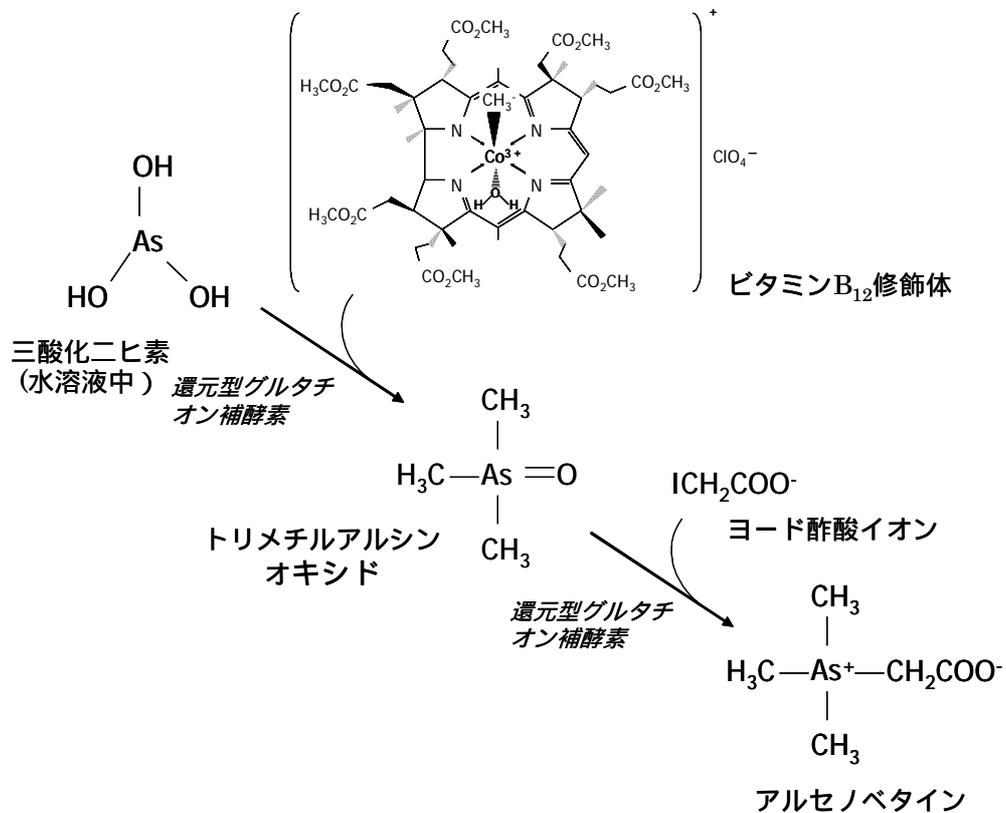
測定対象は広く、揮発性化学剤（神経ガス、びらん剤）に加えて難揮発性化学剤（くしゃみ剤、催涙剤）も測定できる。検出下限濃度は、化学剤のイオン化効率などに依存するが、約1秒の測定間隔で概ね $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ オーダー以下である。積算を実施すれば、検出の即時性は若干損なわれるものの、さらに低濃度まで検出できる（2～3分の積算により1/10の濃度まで検出可能）。また、現在の装置では三次元四重極型のイオントラップが用いられているが、これを最近開発されたりニアトラップ型（文献[18]）に置き換えることにより、さらなる感度向上が見込まれる。

化学剤処理施設における作業員及び周辺住民の安全確保を目的とした大気中化学剤のモニタリングでは、環境基準あるいは作業環境基準レベル（ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ レベル以下）の化学剤を検出する必要がある。従来このような高感度検知には、吸着管濃縮-加熱脱離-GC（またはGC-MS）法が用いられてきたが、本方式が適用されれば、従来よりも高速で高感度な化学剤モニタリングが実現されると期待される。

本方式は、ダイオキシン前駆体やPCBのモニタリング装置として既に実用化されており、室内空気のみならず排ガス中での使用実績もある。化学剤検知に対する夾雑物の影響については別途試験する必要があると思われるが、特に影響の大きい水分に関しては湿度依存性データを保有して濃度補正することで対処可能と思われる。化学剤処理施設で想定される他の夾雑物については影響評価を実施して許容条件等を明確化する必要がある。

A 2 無機ヒ素化合物からアルセノベタインへ変換する反応事例

無機ヒ素のアルセノベタインへの変換におけるビタミン B₁₂ 修飾酵素の作用を図 A 5 に示す (文献[19],[20])。

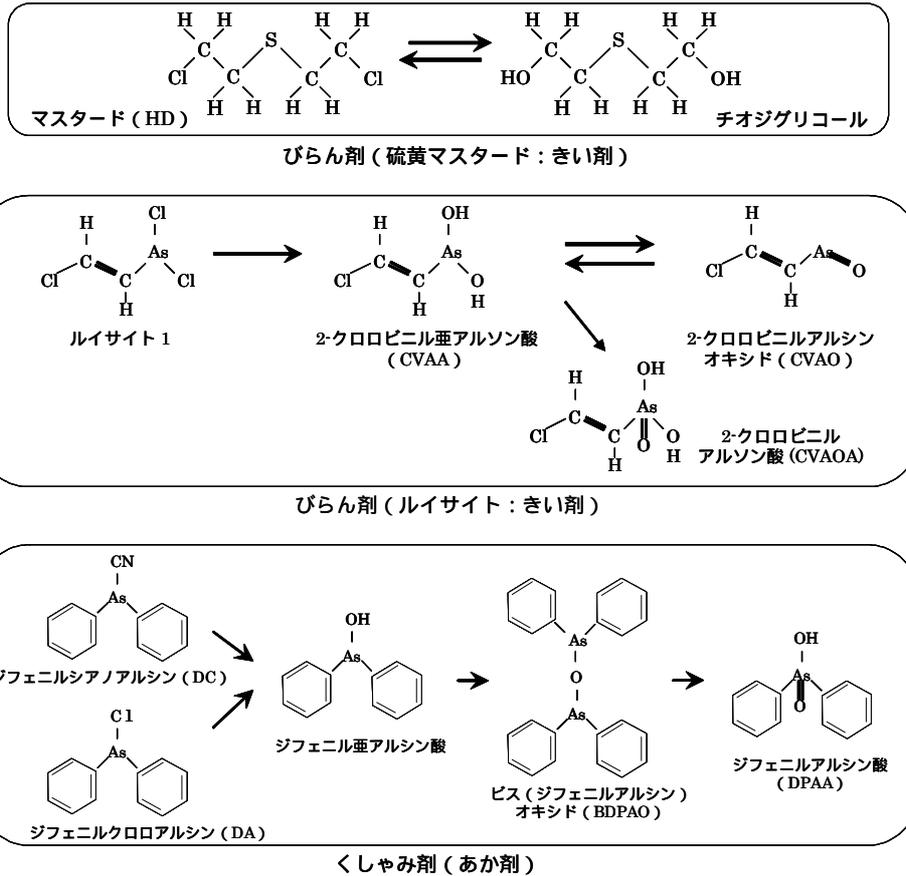


図A 5 メチル化疎水性ビタミン B₁₂ を用いた無機ヒ素のアルセノベタインへの変換 (文献[19],[20])

A 3 化学剤の分解過程、並びに人体への中毒症状と治療

A3.1 化学剤の分解過程

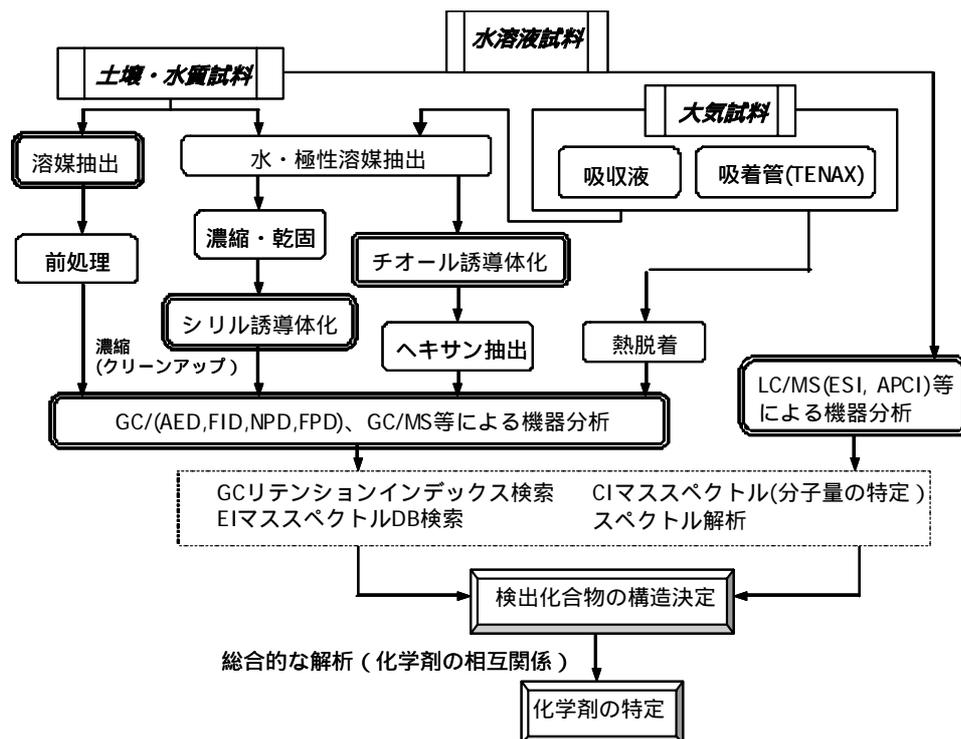
以下に旧日本軍の使用した化学剤の分解過程を示す。地中などに埋められた間に化学剤が右に示す化合物へと変化する。地下水などを汚染するのはこれらの物質である。この中でチオジグリコールは塩酸を加えると化学剤のマスタードに可逆的に戻るため、化学兵器禁止条約ではマスタードの前駆物質として生産と使用が限定される表2剤（<付録>用語の説明を参照）に登録されている。



図A 6 旧日本軍が製造した主要化学剤とその分解反応

A3.2 汚染媒体における化学剤の検出方法

旧日本軍化学剤及びその関連化合物の分析法として、溶媒抽出-GC/MS法、シリル誘導体化-GC/MS法、チオール誘導体化-GC/MS法、LC-ICP/MS及びLC/MS/MS法（<付録>用語の説明を参照）の4方法がある。地下水中の化学剤は比較的容易に測定できるが、土壌などに含まれる化学剤はその特性を考慮して適切な抽出法を選択する必要がある（文献[9]）。近年、茨城県神栖市においてDC、DAの原材料であるDPAAの集団経口暴露が発生したが、この事案での研究成果として、生体試料（血液、尿、髪、爪）からDPAA及び代謝物のLC-ICP/MS、LC/MS/MSによる同定・高感度定量法が確立した（図A 7）。



図A 7 環境試料中の化学剤関連化合物の分析ダイアグラム（＜付録＞用語の説明を参照）

A3.3 化学剤によるヒトの中毒症状と治療

ここでは、化学剤による急性及び慢性中毒の症状を記し、それらに対する治療方針を説明する。

（1）急性毒性の症状と治療（文献[21]-[24]）

窒息剤： ホスゲン（CG）を代表とし、その他ジホスゲン（DP）、塩素（CL）が対象となる。分解が比較的速いガスまたは液体（ホスゲンダイマー）であるが、非腐蝕性の密閉容器内に充填されていた場合には、分解を免れて十分毒性を発揮する可能性がある。吸入により呼吸器系（咽頭喉頭、気管粘膜、肺など）の粘膜において塩酸を発生し組織傷害を起こす。

初発症状として、眼、鼻、咽頭の刺激症状や悪心・嘔吐を起こすが、主要障害は肺水腫である。初発症状から肺水腫が顕在化するまでの潜伏期の長さは、吸収した量に依存し、大量暴露の場合には1-4時間、少量では8-24時間である。

肺水腫の症状として、息切れ、呼吸困難、胸部圧迫感、咳がまず出現し、循環血液量の減少にともない脈拍数は増加し、頻呼吸となる。咳と泡沫状の痰が増加し、胸部の聴診で喘鳴や水泡性ラ音（＜付録＞用語の説明を参照）が聴取される。チアノーゼと血圧低下は予後不良の徴候である。死亡例の多くは24時間以内で、死因は肺水腫であるが、大量暴露の場合には、喉頭けいれんにより数分で死亡する。

治療は対症療法で、特異的な解毒剤や拮抗剤はない。気道管理、酸素投与、人工呼吸を必要に応じて行う。気管支拡張薬の吸入を適宜行う。循環血液量の減少に対して輸液が必

要となるが、過剰輸液により肺水腫を悪化させないように注意する。喀痰検査により感染が確認されれば抗生剤を投与し二次感染対策に努める。肺水腫と二次感染が予後を左右する。

まったく症状がなくても、暴露が疑われれば、最低6時間は経過観察が必要である。24時間以上の無症状期間後に肺水腫を生じることがあり、暴露後3日間は入院観察が必要である。

血液剤： シアン化水素(青酸ガス)と、塩化シアン(ハロゲン化シアン)が代表である。シアン化水素(青酸ガス)は沸点26℃、塩化シアン(ハロゲン化シアン)は沸点12.8℃である。遺棄化学剤処理作業において非腐蝕性の密閉容器内に充填されていた場合には、分解を免れて毒性を発揮する可能性がある。常温で気化し、呼吸器より吸入され、肺から循環血液中にシアンイオンとして溶解し、さらに各臓器に運ばれて毒性を示す。シアン塩(シアン化ナトリウム、シアン化カリウム)は経口摂取により消化管から吸収されて、毒性を発現する。毒性は内窒息すなわち細胞内呼吸に重要なチトクロームオキシダーゼ酵素の Fe^{3+} に可逆的に結合し、細胞内ミトコンドリアでのブドウ糖からのエネルギー産生を阻害する。従って、ブドウ糖依存度が高い、脳や心臓が障害される。遺棄化学剤処理作業において非腐蝕性の密閉容器内に充填されていた場合には、分解を免れて十分毒性を発揮する可能性がある。

症状は、中枢神経症状、呼吸器症状、循環器症状が主体である。中枢神経症状としては、失神、興奮、めまい、痙攣、意識障害などがあり、重症では昏睡となる。死因は呼吸中枢作用による呼吸停止である。呼吸症状としては、最初の呼吸促迫から急速に呼吸抑制に陥り、呼吸停止にいたる。ただし、チアノーゼは呈さないことが多い。循環器症状としては、一過性の血圧上昇の後、血圧が下降し、頻脈となり循環不全となる。高濃度暴露では、15秒以内に呼吸数が増加し、30秒で痙攣がおり、2-4分で呼吸停止、4-8分で心停止となる。

治療は、呼吸循環管理と解毒剤の投与である。理論的には細胞は酸素を利用できないが、酸素投与は有用である。重症例では、迅速な解毒剤の投与が救命のカギとなる。解毒剤としては、ヒドロキソコバラミン(＜付録＞用語の説明を参照)または亜硝酸塩を用いる。

そのほか、アシドーシス、痙攣、不整脈、低血圧に対し、対症的に治療が必要となる。患者は、すべての症状が改善するまで、あるいは少なくとも24時間の入院・経過観察が必要である。

びらん剤： マスタード(HD)、レイサイト(L)が対象となる。毒性発現機序は、びらん剤が皮膚・粘膜に付着後に分解され中間代謝物を生成し、これがDNA、RNA、膜タンパクをアルキル化して皮膚などの組織障害を起こすことによると考えられている。両方とも水との反応性が高く、速やかに分解されるが、レイサイトの分解物はなお同等のびらん作用を有するため、注意が必要である。レイサイトは暴露直後に疼痛と水泡が出現するが、マスタードでは症状の発現が2-24時間遅れる。

マスタードに暴露すると、皮膚・粘膜から吸収され、数分以内に不可逆的なアルキル化が

おこり、皮膚及び消化管・気道の粘膜障害や骨髄障害が発生する。初発症状は、くしゃみと流涙、鼻出血もよく見られる。悪心・嘔吐・下痢も出現する。主要症状は、眼と皮膚の障害で、眼が最も鋭敏である。結膜炎によるヒリヒリ感や流涙が次第に増強し、結膜浮腫により開眼が困難となる。結膜は充血し、角膜混濁から潰瘍となり、失明にいたることもある。一方、皮膚は数時間の潜伏期の後、接触部位に紅斑を生じ、水泡（小水疱から次第に融合傾向を示す）や浮腫を経てびらん・潰瘍を形成する。潰瘍病変は疼痛が激しく、治癒傾向に乏しい。

ルイサイトに暴露した場合には、まずびらん剤として作用し、続いて呼吸器系への刺激作用、さらに全身のヒ素中毒を起こす。臭気を感じする濃度以下でも眼や粘膜を刺激し、またマスタードより揮発性が高いので、影響はより広範囲に及ぶ。暴露から症状出現までの速さは暴露量にもよるがマスタードは数時間から半日程度、ルイサイトは暴露直後から症状が出現する。

治療は、迅速な除染が重要である。暴露後直ちに、暴露部位（皮膚・眼）を大量の水で洗浄する。呼吸器症状が早期から出現する症例は重症であるので、必要に応じて呼吸管理を行う。ルイサイトには、特異的解毒剤（BAL）（＜付録＞用語の説明を参照）がある。

眼に対しては、抗生剤軟膏、ステロイド軟膏の塗布、皮膚には、熱傷に準じた治療を行う。そのほか、輸液、感染対策、骨髄抑制対策など対症療法を行う。体表面積の5%以上の暴露では、入院加療が必要である。

くしゃみ・嘔吐剤： ジフェニルシアノアルシン（DC）、ジフェニルクロロアルシン（DA）が対象となる。エアロゾルとして拡散、吸入または付着して気道粘膜を刺激傷害する。催涙剤に類似した作用を発現するが、毒性は催涙剤より強い。

症状は、暴露数分後に、眼刺激、流涙、激しいくしゃみ、咳が出現し、ついで、激しい頭痛、嘔気、嘔吐を催す。これらは通常1-2時間で緩解するが、高濃度暴露では肺水腫などから死亡することもある。

治療は、洗浄のほか、呼吸循環管理、制吐剤、鎮痛剤など対症的に行う。特異的な解毒剤・拮抗剤はない。喘息など肺疾患の既往歴のある患者では、注意深い経過観察が必要である。

催涙剤： クロロアセトフェノン（CN）が対象となる。粉末またはエアロゾルとして噴射あるいは、爆破で拡散させて使用される。眼に対して鋭敏で、眼痛、流涙、結膜充血をおこす。眼瞼腫脹や眼瞼痙攣のため開眼が不能となる。呼吸器症状として、咳、くしゃみ、鼻水、皮膚症状として、発赤、灼熱感がおこり、通常1時間くらい持続する。

治療は、眼、皮膚に対しては大量の流水による洗浄を行う。呼吸困難や喘鳴に対しては、酸素投与や気管支拡張薬など対症的に行う。特異的解毒剤・拮抗剤はない。催涙剤の作用は一過性であり、通常、患者を新鮮な空気環境に移すと約30分で鎮静化する。

（2）慢性毒性の症状

シアン化物の慢性毒性： 非致死濃度での長期暴露にて、神経変性疾患類似の症状が出現する。例えばパーキンソン症状、筋萎縮性側索硬化症様症状（＜付録＞用語の説明を参照）、視神経障害（弱視）末梢神経障害などが報告されている。今後の更なる研究が待たれる。

マスタードの慢性毒性： マスタードは突然変異誘発性があり、発がん性を有する。数ヶ月から数年を経た慢性の低濃度長期暴露により、慢性気管支炎、喘息、嚔声、失声、気道過敏性の亢進などがみられ、さらに気道の易感染症状を引き起こす。咽頭がん、喉頭がん、肺がんが増加するとの報告もある。また、皮膚の異常色素沈着や皮膚がんを発生させる可能性がある。

ジフェニルシアノアルシン、ジフェニルクロロアルシン及びジフェニルアルシン酸などの有機ヒ素化合物による慢性毒性は現在のところ充分には明らかになっていない。今後、更なる研究が必要である。

A 4 化学兵器処理におけるリスクアセスメントとリスク管理の例

A4.1 包括的な安全性達成の手法

本文の図2に示したように安全性達成のための主なステップは、危険源の同定、リスクの見積り及びリスクの評価であり、リスクが大きいと判断されればリスクの低減策がとられる(文献[14])。以下には、制御爆破技術による化学兵器の廃棄を例として安全性達成に Process Hazard Analysis (PHA) 法を適用した具体例を解説する。

危険源の同定からリスクを見積もり、リスクの評価までのリスクアセスメントを実行するに当たり、リスクの定義を式(1)で示す。

$$R = P \cdot F \cdot C \cdots \cdots (1)$$

ここに、R = リスク、P = 作業時の事故の確率、F = 作業頻度、C = 事故の重大性(危険のひどさ)を示す。

当然のことながら、P、F、Cの評価点及びリスクに応じた処置はそれぞれの国、組織・企業の業種、業務形態、経験によって異なる。PHAを化学兵器処理に適用するに当たっての具体例として、ベルギー国防省のP、F、Cの評価点及びリスクRに応じた処置を表A1に示す。

表A1 リスクの評価点と許容可能なリスク

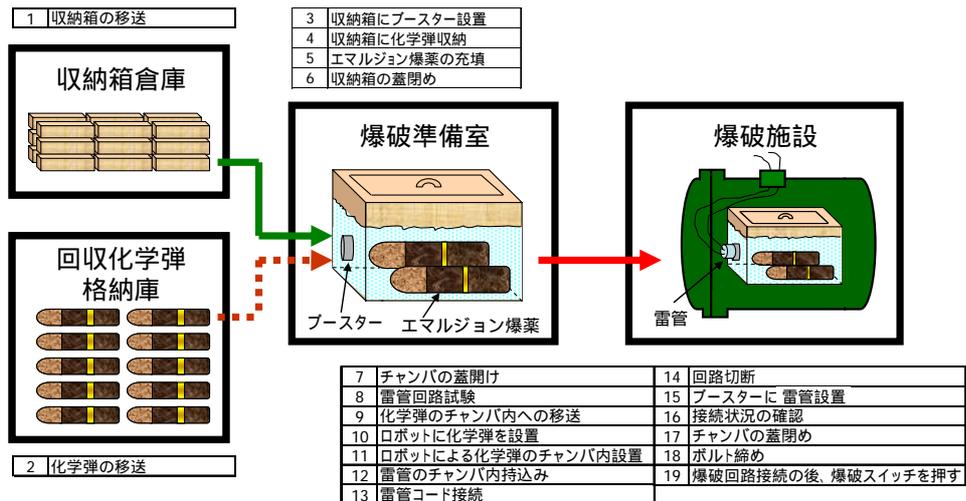
Pの評価点(事故の確率)		Fの評価点(作業頻度)	
起りえない	0.1	非常に稀(年1回未満)	0.5
実際に起りえない	0.2	稀(年1回程度)	1
起りえるが、考えにくい	0.5	月1回	2
考えにくいが場合によっては起りうる	1	週1回	3
普通は起らない	3	毎日	6
起りうる	6	連続	10
予測できる	10		

Cの評価点(事故の重大性)		リスク(R)に応じた処置	
人的損害なし	1	R < 20	限定的で許容可能
一時的に障害あり	3	20 < R < 70	特別な注意が必要
一部に障害が残る	7	70 < R < 200	対策が必要
1人致命傷	15	200 < R < 400	緊急な対策が必要
複数致命傷	40	R > 400	全ての作業を即中止

ベルギーは第一次大戦で化学兵器を用いた戦場となったため、各国の多種多様な老朽化学兵器を実際に数多く処理した数少ない国の一つであり、表A1のリスク数値は長い廃棄処理の経験に基づいて構築されたものである。同様の手法を用いる他の国ではP、F、Cの区分の仕方やリスク評価点及びリスクに応じた処置方法が異なっている。

A4.2 リスクアセスメント

機械の使用状況の特定： 機械が使用される状況を特定し、正しい使用と操作、誤使用や誤動作で予測される結果などを特定する。図A8には制御爆破装置による化学兵器の廃棄プロセスを示す。



図A 8 制御爆破による化学兵器の廃棄プロセスの事例

危険源及び危険状態の同定： 化学兵器を取り扱う場合、主な危険源 (hazard) は、化学剤、火薬類の他に、検査のための放射線源、爆発後ガス中の有毒成分、燃料、酸素ガスなどがある。ここでは、化学兵器特有の主な危険源として化学剤と火薬類に焦点を絞った。

リスクの見積り： 化学剤は化学弾に封入され漏洩していない限り、人に危害を及ぼすことはない。従って化学剤に関しては、化学剤が、(1)化学弾から漏れない状態を確保すること、(2)漏れた場合はそれを確実に検知できること、(3)漏れた化学剤の拡散防止処置を講ずること、及び(4)漏れを想定した作業員の保護具の着用などによりリスクを回避できる。一方、火薬類は落下、衝撃、摩擦、高温、火気を排除することが安全上重要である。従って化学弾の取扱い、処理工程においてこれ等の事象が加わらないようにする方策を講じることとした。

リスクの評価： 式(1)に基づいて、P、F、Cの評価点を廃棄プロセスの各ステップに配点し、リスクRを求めた結果を表A2に示す。この作業で得られたリスクの評価結果により安全性が達成されたか否かが判定される。表の事例では、火薬類を危険源としたステップ3(収納箱にブースター設置)、4(収納箱に化学弾収納)、5(エマルジョン爆薬の充填：<付録>用語の説明を参照)でR値が24となり、表A1によれば「特別な注意が必要」の範囲となるためリスクを低減する必要性が判明した。

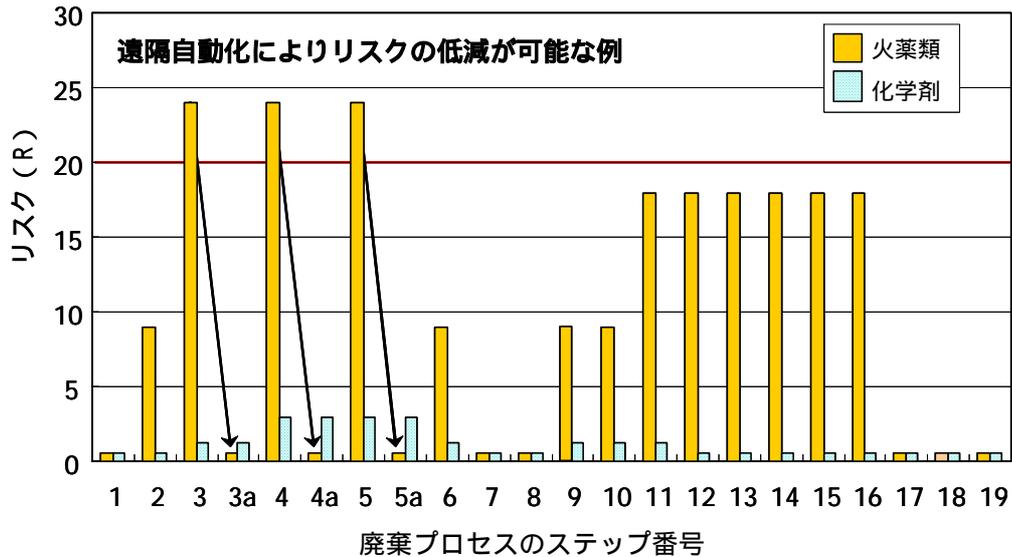
表A 2 リスクアセスメントの結果

施設	廃棄プロセスのステップ	危険源の種類							
		火薬類				化学剤			
		P	F	C	R	P	F	C	R
収納箱倉庫	1 収納箱の移送	0.1	6	1	0.6	0.1	6	1	0.6
回収化学弾格納庫	2 化学弾の移送	0.1	6	15	9.0	0.1	6	1	0.6
爆破準備室	3 収納箱にブースター設置	0.1	6	40	24.0	0.2	6	1	1.2
	4 収納箱に化学弾収納	0.1	6	40	24.0	0.5	6	1	3.0
	5 エマルジョン爆薬の充填	0.1	6	40	24.0	0.5	6	1	3.0
爆破施設	6 収納箱の蓋閉め	0.1	6	15	9.0	0.2	6	1	1.2
	7 チャンバの蓋開け	0.1	6	1	0.6	0.1	6	1	0.6
	8 雷管回路試験	0.1	6	1	0.6	0.1	6	1	0.6
	9 化学弾のチャンバ内への移送	0.1	6	15	9.0	0.2	6	1	1.2
	10 ロボットに化学弾を設置	0.1	6	15	9.0	0.2	6	1	1.2
	11 ロボットによる化学弾のチャンバ内設置	0.2	6	15	18.0	0.2	6	1	1.2
	12 雷管のチャンバ内持込み	0.2	6	15	18.0	0.1	6	1	0.6
	13 雷管コード接続	0.2	6	15	18.0	0.1	6	1	0.6
	14 回路切断	0.2	6	15	18.0	0.1	6	1	0.6
	15 ブースターに雷管設置	0.2	6	15	18.0	0.1	6	1	0.6
	16 接続状況の確認	0.2	6	15	18.0	0.1	6	1	0.6
	17 チャンバの蓋閉め	0.1	6	1	0.6	0.1	6	1	0.6
	18 ボルト締め	0.1	6	1	0.6	0.1	6	1	0.6
	19 爆破回路接続の後、爆破スイッチを押す	0.1	6	1	0.6	0.1	6	1	0.6

A4.3 リスク管理（＜付録＞用語の説明を参照）

上記のリスクアセスメントから示唆されたリスクを低減する方策が取り組まれことになる。以下にはその実例を述べる。

火薬類のリスク管理（文献[14]）： 式（1）によれば、R（リスク）を低減するにはP、FまたはCを下げる必要がある。すなわち、ステップ3、4、5を完全に遠隔自動化（ロボット化）できれば、爆発による事故の重大性（C）を「人的被害なし」に抑えることが可能となる。しかし、老朽化学兵器の爆破のような手順を自動化する場合、まず化学弾の状況に応じた手作業の経験を積まずいきなり自動化しても、そのことが新たな故障・ミスの原因ともなりかねない。国内における廃棄作業では、実作業を通して、化学弾の箱への収納方法の改善、エマルジョン爆薬のプレパック化による充填作業の単純化、ブースター取付け方法の改良などを行い、爆発の危険性のある手作業を一人で行うための作業手順を確立し、実施した。これにより、Cの値が40から15まで下がり、Rの値を24から「限定的で許容可能」となる9まで低減できた。この実績に基づいて、今後、遠隔自動化に向けて手順の改良箇所を更に点検・改善することによりCの値を1にまで下げることができ、Rの値は9から0.6にまで低減することが可能となる（図A9のステップ3a、4a、5a）。



図A9 リスク管理前後のリスク評価の比較

注：ステップ番号 3a、4a、5a はそれぞれ化学弾取り扱いを遠隔自動化した場合のリスク

その他のリスクの管理の例（文献[14]）

- 1) 制御爆破チャンバの耐疲労構造設計と疲労損傷度の予測： 爆破チャンバについては、構造設計上及び製造上の工夫によりチャンバ材料の疲労強度を強化できる。加えて、各爆破（ショット）ごとにチャンバの強度上重要な位置の歪サイクルの測定を介して疲労損傷度を解析し、チャンバ使用開始以来の累積損傷度を評価することにより、クラック発生に至るショット数を予測できる。
- 2) 複数サイト間での運転経験の共有システム： 複数のサイトで得られた運転上の貴重な経験を多くの関係者が共有してリスク低減を行うべく、数時間の遅れのタイミングで他のサイトの運転条件、チャンバの損傷度情報、メンテナンス・修理情報、異常運転情報などを、インターネットを通じて相互にアクセス可能なシステムが有効である。このシステムは構成機器の予防保全のための部品交換時期などを運転員に知らせる機能も併せ持つ。
- 3) 要員の教育・訓練： 国内外の化学兵器処理の専門家及び有識者による安全教育、海外の化学兵器処理施設での訓練等を通じて、リスク管理意識の維持・向上を図ることができる。
- 4) 想定事故訓練： 地方自治体、警察、消防、支援病院等との連携による想定事故訓練は重視すべきである。

<参考資料2>

総合工学委員会・機械工学委員会合同工学システムに関する安全・安心・リスク検討分科会並びに遺棄および老朽化学兵器の安全な廃棄技術に関する小委員会の審議経過

平成 19 年

- 3月22日 日本学術会議幹事会(第34回)
遺棄および老朽化学兵器の安全な廃棄技術に関する小委員会設置及び委員の決定
- 5月28日 遺棄および老朽化学兵器の安全な廃棄技術に関する小委員会(第1回)
20期の活動方針について審議
- 9月27日 同小委員会(第2回)
遺棄化学兵器の廃棄処理の現状
- 12月17日 同小委員会(第3回)
ヒ素の無毒化

平成 20 年

- 2月29日 同小委員会(第4回)
報告書案について
- 3月3日 工学システムに関する安全・安心・リスク検討分科会(第5回)
対外報告「老朽・遺棄化学兵器の廃棄における先端技術の活用とリスクの低減」について承認
- 3月25日 総合工学委員会拡大役員会(第4回)で審議
- 4月22日 総合工学委員会拡大役員会(第5回)で審議
- 5月23日 遺棄および老朽化学兵器の安全な廃棄技術に関する小委員会(第5回)
報告書案について経過報告ならびに修正審議
- 5月30日 総合工学委員会拡大役員会(第6回)で承認
- 6月24日 総合工学委員会(第7回)で承認
- 7月24日 日本学術会議幹事会(第60回)で承認

<付録>

参考文献

1章に関する文献

- [1] 石川満、二又政之 第14章 “単一分子感度ラマン分光技術のデバイス化及び生体分子分析への応用”、山田淳編 “プラズモンナノ材料の設計と応用” シーエムシー、2006.

2章に関する文献

- [2] G. F. Sun, J. Liu, T. V. Luong, D. Sun. L. Wang, “Endemic arsenicosis: A clinical diagnostic manual with photo illustrations, UNICE, 2004, pp3-59.
- [3] 日本学術会議対外報告、“老朽・遺棄化学兵器のリスク評価と安全な高度廃棄処理技術の開発”、pp.10-14、荒廃した生活環境の回復研究連絡委員会、遺棄化学兵器に対する高度処理技術の開発専門委員会、平成 17 (2005) 年 3 月 23 日.
- [4] USEPA, Arsenic in drinking water, <http://www.epa.gov/safewater/arsenic.html>
- [5] H. Yamauchi, K. Takahashi, M. Mashiko, J. Saito, Y. Yamamura, “Intake of different chemical species of dietary arsenic by the Japanese and their blood and urinary arsenic levels,” Appl. Organometal. Chem., 1992, 6, pp.383-388.
- [6] T. Kaise, S. Watanabe, K. Ito, “The acute toxicity of arsenobetaine,” Chemosphere, 1985, 14, pp.1327-1332.
- [7] H. Yamauchi, B. A. Fowler, “Arsenic in the Environment.” John Wiley & Sons Inc, 1994, pp35-53.
- [8] J. S. Edmonds, K. A. Francesconi, “Transformation of arsenic in the marine environment,” Experientia, 1987, 43, pp.553-557.

3章に関する文献

- [9] 花岡成行、“旧日本軍化学剤関連化合物の分析とその課題”、The Chemical Time, 2004, No.4, 194号, pp.11-16.
- [10] 日本学術会議対外報告、“遺棄化学兵器の廃棄技術に対する科学的リスク評価とリスク管理を目指して”、pp.42-44、荒廃した生活環境の回復研究連絡委員会、遺棄化学兵器の安全な廃棄技術の研究促進小委員会、平成 14 (2002) 年 11 月 26 日.

4章に関する文献

- [11] 久米 均、“設計開発の品質マネジメント”、日科技連出版社、1999.
- [12] 日本学術会議対外報告、“安全学の構築に向けて”、安全に関する緊急特別委員会、平成 12 (2000) 年 2 月 28 日.
- [13] ISO 14121 “Safety of machinery – Principles of risk assessment,” :JIS B9702 “機械類の安全性—リスクアセスメントの原則”.
- [14] ISO 12100-1 ”Safety of machinery – Basic concepts, general principles for design

– Part 1: Basic terminology, methodology”; ISO 12100-2 ”Safety of machinery – Basic concepts, general principles for design – Part 2: Technical principles.”

参考資料 1、A 1 に関する文献

- [15] X. Zhang, A. Matthew, A. Young, O. Lyandres, and R. P. Van Duyne, “Rapid detection of an anthrax biomarker by surface-enhanced Raman spectroscopy,” *J. Am. Chem. Soc.*, 2005, 127 pp.4484-4489.
- [16] H. Uzawa,, S. Kamiya, N. Minoura, H. Dohi, Y. Nishida, K. Taguchi, S. Yokoyama, H. Mori, T. Shimizu, and K. Kobayashi, “A quartz crystal microcrystal balance method for rapid detection and differentiation of Shiga toxins by applying a monoalkyl globobioside as the toxin ligand,” *Biomacromolecules* 2002, 3, pp.411-414.
- [17] 瀬戸康雄、山口慎太郎、朝田隆二、大森毅、金森美江子、大沢勇久、柘浩一郎、奥村昭彦、橋本宏明、高田安章、江沢直也、“逆流型大気圧化学イオン化質量分析法による大気中猛毒性化学剤のリアルタイム高感度検知”、第69回分析化学討論会公演要旨集、2008、p41.
- [18] Y. Hashimoto, H. Hasegawa, T. Baba, I. Waki, “Mass Selective Ejection by Axial Resonant Excitation from a Linear Ion Trap” *J. Am. Soc. Mass Spectrom.*, 2006, 17, pp685-90.

参考資料 1、A 2 に関する文献

- [19] K. Nakamura, Y. Hisaeda, L. Pan, H. Yamauchi, “Methyl-group transfer reaction of arsenic trioxide mediated by hydrophobic vitamin B₁₂,” 投稿準備中.
- [20] K. Nakamura, Y. Hisaeda, L. Pan, H. Yamauchi, “Transformation of arsenic trioxide into arsenobetaine by biomimetic methylation with vitamin B₁₂ derivatives,” 投稿準備中.

参考資料 1、A 3 に関する文献

- [21] C. G. Hurst and W. J. Smith, "Chronic Effects of Acute Low-Level Exposure to the Chemical Warfare Agent, Sulfur Mustard" in "Chemical Warfare Agents: Toxicity at Low Levels" ed. by M. S. Somani and J. A. Romano, CRC Press, 2001, pp. 245 - 255.
- [22] 内藤裕史、“中毒百科(事例・病態・治療)45 化学兵器 - 改訂第2版”、南江堂、2001、pp.197-220.
- [23] 生物化学テロ災害対処研究会、“必携 生物化学テロ対処ハンドブック”、診断と治療社、2003.
- [24] “Advanced Hazmat Life Support (AHLs) Instructor Manual,” 2nd Edition, Arizona Emergency Medical Center, 2000.

用語の説明

単位

- ナノメートル： nano-meter、通常 nm と表記する。1メートルの十億分の一、すなわちメートルを表す長さの単位。
- ppm： part per million の頭文字であり、百万分の一、すなわち 10^{-6} を表す濃度の単位。
- ナノモル： nano mol、通常 nM または nmol と表記する。十億分の一、すなわち 10^{-9} を表す濃度の単位。
- フェムトモル： femto mol、千兆分の一、すなわち 10^{-15} モルを表す濃度の単位。
- cm^{-1} ： 電磁波の単位の表記方法のひとつで、カイザーまたは波数 (Wavenumber) と呼ぶ。分光学の分野では波長の逆数のことであり、たとえば波長 $10\ \mu\text{m}$ の赤外線は波数 $1000\ \text{cm}^{-1}$ と表記される。

専門用語

化学兵器禁止条約：p.1

正式には「化学兵器の開発、生産、貯蔵及び使用の禁止並びに廃棄に関する条約」と呼び、1997年4月29日に発効した。2008年7月までに184カ国が批准し、世界の人口・面積のおよそ98%を占める。イスラエル、ミャンマーなど4カ国は署名したが批准はこれからであり、イラク、北朝鮮など7カ国は署名していない。この条約のポイントは以下の通りである。いかなる場合においても、化学兵器の開発、生産、保有、使用等を行わない。化学兵器及び化学兵器生産施設を保有している場合は、原則として条約が発効してから10年以内、つまり2007年までに廃棄する(5年間の延長となった)。老朽化学兵器及び遺棄化学兵器も同様に廃棄する。化学兵器用に用いられる可能性の高い物質(表剤)に対する製造等の規制を行う。化学兵器保有、生産施設、表剤製造施設等の申告を行う。申告された施設の化学兵器禁止機関による査察を行う。条約違反の疑いがある施設に対するいわゆるチャレンジ査察を行う。これに対応して、日本の国内法では「化学兵器の禁止及び特定物質の規制等に関する法律」が1995年4月5日に公布された。

質量分析装置：p.3

Mass Spectrometry または Mass Spectroscopy と呼ばれ、MS と略称される。真空中で物質に高電圧をかけると正電荷と負電荷にイオン化し、通常は正電荷のイオンを電氣的・磁氣的に作用させるとイオンの質量電荷比 m/z に応じて分離することができる。分離したイオンを検出し、横軸を m/z 、縦軸を検出強度とするマススペクトルを作成することにより、出発物質の同定や化学構造の決定を行う。装置は、試料導入部、イオン源、分析部、検出部、データ処理部で構成される。分子構造が複雑な有機化合物や生化学物質には多用され、有効な分析手法とされる。

試料導入部では試料が気体、液体、固体によりそれぞれ装置内への導入方法が異なる。

後述の GC-MS、LC-MS は試料導入部の前に混合試料を分離する装置が付属している。イオン源は物質をイオン化する部位であり、EI (電子衝撃) 法、CI (化学イオン化) 法、FD (電界脱離) 法、FAB (高速原子衝突) 法、MALDI (マトリックス支援レーザー脱離イオン化) 法、ESI (エレクトロスプレーイオン化) 法、APCI (大気圧化学イオン化) 法などがある。分析部ではイオン源で発生した複数のイオンについて電氣的・磁氣的に作用させることにより、質量電荷比 m/z に分離する。分解能、質量範囲などの要求に応じて、磁場偏向型、四重極型、イオントラップ型、飛行時間型、フーリエ変換イオンサイクロトロン共鳴型、タンデム型に分かれる。検出部では分離されたイオンを電子増倍管やマイクロチャンネルプレート、ファラデーカップで検出する。データ処理部では分析部で検出された信号よりマススペクトルを作成する。なお、多くの化合物についてマススペクトルのデータベースが作成されているので、未知物質はこれと比較することもできる。化学剤のデータベースについては化学兵器禁止機関 (OPCW : Organisation for the Prohibition of Chemical Weapons) が OCAD (OPCW Central Analytical Database) を保有している。

GC-MS : p.3

ガスクロマトグラフ - 質量分析装置 (Gas chromatograph-Mass spectroscopy) という分析装置である。気体などの揮発性のある試料を注入すると、まず GC 部にて試料中の目的物質が共存物から分離され、MS 部にて目的物質が検出される。

LC-MS : p.3

液体クロマトグラフ - 質量分析装置 (Liquid chromatograph-Mass spectroscopy) という分析装置である。GC-MS と同様の原理により、液体試料を注入すると、まず LC 部にて試料中の目的物質が共存物から分離され、MS 部にて目的物質が検出される。

アダムサイト : p.5

嘔吐剤 (くしゃみ剤) として第一次大戦中に開発された有機ヒ素化合物で、分子式は $\text{HN} \cdot (\text{C}_6\text{H}_4)_2 \cdot \text{AsCl}$ である。ドイツで最初に合成されたが、米国のロジャー・アダムズ博士が開発し、化学剤の名称は開発者にちなむ。後遺症があまり残らないとされるが、現代ではあまり使われない。

ヒ素化合物の種類と毒性 : p.5

ヒ素 (元素記号 As : 英名 arsenic) は、一般に、有機ヒ素化合物、無機ヒ素化合物及び金属ヒ素に分類される。有機ヒ素化合物は原則的にヒ素原子と炭素原子を分子構造の基本骨格にもつ化合物を総称する。これに対して、無機ヒ素化合物は炭素原子を含まないヒ素化合物を総称する。金属ヒ素はヒ素原子だけで構成された金属光沢をもつ安定な物質で、灰色ヒ素とも呼ばれる。

ヒ素化合物は化学構造や化学形態の違いにより毒性が異なる。ヒト生体試料 (臓器、血液、尿) や自然環境試料 (大気、土壌、水)、海産物 (海藻類、魚介類) から検出されるヒ

素は、無機ヒ素化合物と有機ヒ素化合物の一群であるメチルヒ素化合物（モノメチル化ヒ素、ジメチル化ヒ素、アルセノ糖、アルセノベタイン等）とに大別できる。毒性は無機ヒ素化合物がメチルヒ素化合物より強い。メチルヒ素化合物は有機ヒ素化合物であるが、化学兵器に用いたジフェニルクロロアルシンとは化学構造と毒作用が異なり、同様にレイサイトとも異なる。地球規模で発生している慢性ヒ素中毒の原因は無機ヒ素化合物であるが、これに対して、魚介類に豊富に含まれ多食しているアルセノベタインは、ヒトへの健康影響が認められず、無毒であると認識されている。このように、有機ヒ素化合物はレイサイトやジフェニルクロロアルシンのような物質からアルセノベタインなどの生体由来物質まで、毒性が大幅に異なることに注意すべきである。

脳幹：p.9

中枢神経系を構成する器官の集合体であり、脳は大腦、小脳、脳幹から成る。脳幹は延髄、橋、中脳、間脳に分かれていて、多種の神経核から構成されている。自律神経機能の中枢で、意識と覚醒についての重要な神経回路があるとされる。また、感覚神経路、運動神経路があり、姿勢反射の中枢でもある。

リスクに関する用語について：p.11

最近、リスクに関する用語が様々使われているが、多少混乱がある。世界保健機関（WHO）では、化学、薬学、毒性学など12以上の分野に属する専門家へのアンケートに基づいて、用語の定義について整理が試みられた。以下には、再定義されたリスクの用語（仮訳）を紹介する（Harmonization Project Document No.1, “IPCS Risk Assessment Terminology,” 2004, WHO. 本資料は<http://www.who.int/ipcs/methods/harmonization/areas/ipcsterminologyparts1and2.pdf> からダウンロードが可能）、本提言では、概ねWHOで再定義された用語に基づいて記述した。

リスク分析 (risk analysis)：生体、システムまたは集団が有害物質 (hazard) に被曝する状態を制御するプロセスを指す。リスク分析はリスクアセスメント、リスク管理、リスクコミュニケーションという3つの要素から成る。

リスクアセスメント (risk assessment)：付随する不確実性の同定及び対象物質の暴露を含めた、特定の生体、システムまたは集団が受けるリスクの計算または見積もりを行うプロセスを指す。対象物質の暴露については、その生来の特徴や被曝を受けるシステムの特徴を考慮する。リスクアセスメントのプロセスは危険源の同定、危険源の特性 (characterization：dose-response アセスメントに関連して)、暴露アセスメント、及びリスク特性 (risk characterization) という4つの要素から成る。

リスク管理 (risk management)：特定の危険源に関連するリスクアセスメント情報に基づいて、政策的、社会的、経済的及び技術的要因を考慮した意志決定プロセスを指す。この意志決定は、規制及び未規制の選択肢を発展、分析、比較することにつながり、危険源への適切な規制対応を選択して、実施することを目指す。

リスクコミュニケーション (risk communication): リスク評価者、管理者、報道メディア、関心をもつ集団及び一般大衆の間で取り交わされる、(健康または環境の)リスクに関する情報の対話型意見交換を指す。

リスク見積もり (risk estimation): 特定の物質が生体、システムまたは集団に実際上または予測上の暴露により特定の悪影響に引き起こることに関して、定量的な確率を指し、この確率には付随する不確定性を含む。

リスク評価 (risk evaluation): 特定の物質の暴露についてリスクと便益 (benefit) との定性的及び定量的関係を確立することを指す。リスク - 便益の関係の確立には、同定された危険源の重要度を決定する複雑なプロセス、暴露により影響を受けるシステムのリスク見積もり、その物質により引き起こされる便益の重要性が関与する。リスク評価はリスク管理の一要素であり、リスク - 便益と同義語である。

イムノアッセイ : p.17

抗原と抗体の反応を利用して血清や尿のような生物学的試料に含まれる物質のレベルを測定する生化学的試験方法を指す。適切に選ばれた抗体は抗原に対して選択的な親和性を持つため、もし抗原が存在する場合は極めて高い割合の抗原が抗体と結合する。検出した抗原または抗体を蛍光体や放射性物質で標識して定量する。

標準試料 : p.17

一般に未知試料中に存在する物質の同定またはその含有量の定量を行う際に、保証された物質または含有量をもつ試料との比較を行う。後者の保証された試料を標準試料と呼ぶ。標準物質は国際標準化機構 (ISO) で管理・供給する一方で、各国にも公的組織があり、日本の場合は日本工業規格 (JIS) などに基づいて経済産業省と関連組織で管理・供給することが基本である。しかし、膨大な種類の物質があるため、独自に産業界で標準物質・標準試料を供給する場合も多い。

ローレンツ力 : p.17

電磁場中で荷電した粒子が受ける力を意味する。例えば、真空中で一方向に飛行する荷電粒子 (イオン) に対してその直角方向に磁場がかかると、荷電粒子の飛行方向が変化する。この飛行方向を変えるのがローレンツ力であり、荷電粒子の質量と電荷の大きさに依存して飛行方向の変化が異なるため、質量 (分子量) の異なる物質を区別する質量分析装置が生まれた。

ベロ毒素 : p.19

腸管出血性大腸菌 (EHEC, enterohaemorrhagic *E. coli*) が産生し、菌体外に分泌する毒素タンパク質のことを指し、菌体そのものではなく菌体から産生する物質に毒性がある。赤痢菌の一種が産生する志賀毒素と同一であるため、志賀 (様) 毒素とも呼ばれる。

tRNAs : p.20

生体内物質のリボ核酸 (RNA: Ribonucleic Acid) の一群に属し、運搬 RNA、転移 RNA、トランスファー RNA と呼ばれ、t は transfer の意味。細胞内でタンパク質合成の翻訳をする際に、特定のアミノ酸をリボゾームに取り込む働きをする RNA である。74-93 の塩基で構成される。

L-B 法 : p.20

発明者の名前に由来したラングミュアプロジェクト (Langmuir-Blodgett) 法のことであり、一般に、固体表面 (本文中では水晶結晶表面) 上に機能性物質 (本文中では penta-O-acetyl-D-galactopyranose 分子) を一分子層の膜として固定する方法を指す。出来上がった膜は L-B 膜と呼ぶ。

表 2 剤 : p.23

化学兵器禁止条約で対象となる化学剤は附属書に表剤 (scheduled chemicals) として記載され、表 1 剤、表 2 剤及び表 3 剤に区分されている。最も厳しい規制を課せられる表 1 剤はマスタード、ルイサイト、サリンなどの 8 種類の毒性化学物質とそれらの合成に使われる前駆物質である。民生用には殆ど使われることはなく、平和的目的等を除き生産や保有が認められない。表 2 剤は BZ、アミトン、PFIB の 3 種類の毒性化学物質とチオジグリコールなど 11 種類の前駆物質であり、表 3 剤はホスゲン、青酸など 4 種類の毒性化学物質と 13 種類の前駆物質である。表 2 剤から表 3 剤に行くほど民生用途が多くなり、生産、加工、消費の量に応じて申告や国際的な査察を受ける義務が課せられる。詳細は第 18 期日本学術会議の対外報告「遺棄化学兵器の安全な廃棄技術に向けて」(2001 年 7 月 13 日) にも述べている。

LC/MS/MS : p.23

液体クロマトグラフ - 質量分析装置 (LC-MS) の一種で、後段の MS を 2 台直列に組み込んだタンデム型分析装置である。生体試料など複雑な成分の場合、MS 部での物質のイオン化を 2 度行うことで共存物質を排除して、目的物質の同定精度を上げることが可能となる。

ESI、APCI : p.24

質量分析装置のイオン源で述べた物質のイオン化方法であり、LC-MS における MS 側のイオン化に使われ pg (ピコグラム : 1 兆分の 1 グラムすなわち 10^{-12} グラム) オーダーの濃度を測定できる。ESI はエレクトロスプレーイオン化法と呼ばれ、加熱された溶液をノズルから霧状にイオン化室に噴霧し、数 kV の電場によりイオン化する。APCI は大気圧化学イオン化法と呼ばれ、溶液を加熱して気化したあと放電によりイオン化する。イオン化した気体はスキマーという狭いピンホールを通過して高真空の分析部に導入される。

AED、FID、NPD、FPD：p.24

これらはガスクロマトグラフ(GC)の検出器である。MSと比較して小型で安価な検出器には、気体の熱伝導の相違を利用した熱伝導度型検出器(TCD)、可燃性物質を対象とした水素炎イオン化検出器(FID)などが常用されている。近年、化合物を構成する元素に対して選択的で高感度な検出器が開発されてきた。

AEDは原子発光検出器と呼ばれ、対象物質が高温のヘリウムプラズマと反応して励起状態のヘリウムが基底状態となる際の発光を検出する原理であり、炭素、塩素、硫黄、リンを含む化合物に感度が高い。FIDは水素ガスの燃焼炎(水素炎)に試料を導入してイオン化し、発生する電流を測定する検出器である。NPD(別名FTD)は窒素リン検出器と呼ばれ、名称の通り窒素やリンを含む化合物に高い感度を示す検出器であり、水素炎下でルビジウムと試料に含まれる窒素やリンとが化学反応した際発生する電流を測定する原理である。FPDは炎光光度型検出器と呼ばれ、水素炎下で試料に含まれる元素の発光を測定する検出器であり、硫黄とリンを含む化合物に対して高い感度を持つ。

水泡性ラ音：p.24

聴診器を胸にあてて、肺の呼吸により聞こえる音をすべてラ音というが、粗い「ゴロゴロ・ブツブツ」という水泡音を水泡性ラ音という。

ヒドロキソコバラミン：p.25

英文名 Hydroxocobalamin。ビタミン B₁₂ を構成する。ビタミン B₁₂ は水溶性で、体内では補酵素として働き、脂肪・たんぱく質の代謝、核酸、赤血球の生成に重要な役割を演じる。これが不足すると悪性の貧血になるといわれる。一般に酢酸塩の形で供給されている。

BAL：p.26

British Anti-Lewisite の略称で“バル”と呼ばれ、ルイサイトの解毒剤として英国で開発された。化学名 2,3-ジメルカプトプロパノール、分子式 CH₂(SH)-CH(SH)-CH₂OH で、一般名称ではジメルカプロールと呼ばれる。ルイサイトのようなヒ素化合物の中毒に対するほかに、水銀、鉛、アンチモンなどの中毒にも適用される。

筋萎縮性側索硬化症：p.27

通称 ALS (amyotrophic lateral sclerosis) とも呼ばれる神経変性疾患で、重篤な筋肉の萎縮と筋力低下をきたす。きわめて進行が速く、半数ほどが発症後 3 年から 5 年で呼吸筋麻痺により死亡する。日本では特定疾患に認定された指定難病で、有効な治療法は確立されていない。米国のプロ野球選手ルー・ゲーリックが患った病気のため、ルー・ゲーリック病とも呼ばれる。

エマルジョン爆薬：p.29

乳化剤、乳化安定剤、燃料油、ワックス、中空球体などを酸化剤溶液と混合した爆薬で、

紙筒、ポリ袋、ポリチューブ（ソーセージタイプ）などの使用目的に応じた形状、状態を選択できる。

機械類の安全基準：p.30

本文図2に示したリスクアセスメントに関連して、機械装置について包括的な安全基準の指針が2007年7月に労働基準局から通達された。指針の背景であるISO 12100-1及びISO 12100-2では、本文4章(4)に述べたJIS B9702(ISO 14121)のリスク評価に加えて、リスクを低減するためのリスク管理が詳しく述べられている。すなわち、リスク管理に向けた手法として、(1)本質的な安全設計、(2)安全防護や先進的な防護方策、(3)使用上の情報によるリスク低減方策が述べられている。これらのリスク管理を施した上で、さらに繰り返しリスク評価を行い、可能な限りリスクを低減することが求められている。