報告

老朽・遺棄化学兵器廃棄の安全と環境の保全に向けて

令和元年（２０１９年）９月２０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

この報告は、日本学術会議第 23 期および第 24 期総合工学委員会・機械工学委員会合同工学システムに関する安全・安心・リスク検討分科会老朽及び遺棄化学兵器の廃棄に係るリスク評価とリスク管理に関する検討小委員会での審議結果を踏まえ、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・リスク検討分科会において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	須田　義大	（連携会員）	東京大学生産技術研究所教授
副委員長	野口　和彦	（連携会員）	横浜国立大学リスク共生社会創造センター長、大学院環境情報研究院教授
幹　事	水野　毅	（連携会員）	埼玉大学大学院理工学研究科人間支援・生産科学部門教授
幹　事	宮崎　恵子	（連携会員）	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所海上技術安全研究所知識・データシステム系副系長
	遠藤　　薫	（第一部会員）	学習院大学法学部教授
	望月　眞弓	（第二部会員）	慶應義塾大学病院薬剤部長・薬学部教授
	大倉　典子	（第三部会員）	芝浦工業大学工学部教授・学長補佐
	柴山　悦哉	（第三部会員）	東京大学情報基盤センター教授
	桑野　園子	（連携会員）	大阪大学名誉教授
	柘植　綾夫	（連携会員）	日本工学会顧問・前会長
	辻　佳子	（連携会員）	東京大学環境安全研究センター教授
	中川　聡子	（連携会員）	東京都市大学工学研究科教授
	永井　正夫	（連携会員）	一般財団法人日本自動車研究所代表理事・研究所長、東京農工大学名誉教授
	萩原　一郎	（連携会員）	明治大学研究知財戦略機構特任教授、東京工業大学　名誉教授
	平尾　雅彦	（連携会員）	東京大学工学系研究科教授
	松尾　亜紀子	（連携会員）	慶應義塾大学理工学部教授
	松岡　猛	（連携会員）	宇都宮大学基盤教育センター非常勤講師
	宮崎　久美子	（連携会員）	東京工業大学環境・社会理工学院イノベーション科学系教授、放送大学客員教授
	向殿　政男	（連携会員）	明治大学名誉教授
	矢川　元基	（連携会員）	公益財団法人原子力安全研究協会会長、東京大学名誉教授
	成合　英樹	（特任連携会員）	筑波大学名誉教授

	藤原　修三	（特任連携会員）	国立研究開発法人産業技術総合研究所名誉リサーチャー

第24期「老朽及び遺棄化学兵器の廃棄に係るリスク評価とリスク管理に関する検討」小委員会

委員長	藤原　修三		国立研究開発法人産業技術総合研究所、安全科学研究部門名誉リサーチャー
副委員長	横田　　真		日本ゼオン株式会社執行役員
幹　事	岸田　伸幸		事業創造大学院大学教授
	松岡　　猛	（連携会員）	宇都宮大学基盤教育センター非常勤講師
	朝比奈　潔		元株式会社神戸製鋼所主監
	新井　　充		東京大学教授
	桑原　保人		産業技術総合研究所地質調査総合センター活断層・火山研究部門長
	髙木　和広		国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構農業環境変動研究センター主席研究員、東京農業大学大学院教授（連携方式）
	古崎新太郎		東京大学名誉教授
	水野　光一		国立研究開発法人産業技術総合研究所元研究顧問
	山内　　博		聖マリアンナ医科大学客員教授
	山口　芳裕		杏林大学教授

本件の作成にあたり、以下の方に御協力いただいた。
　第22、23期小委員会委員　秋山一朗　元化学兵器禁止機関査察局長

本報告の作成にあたり、以下の職員が事務及び調査を担当した。

事務	犬塚　　隆志	参事官（審議第二担当）
	五十嵐久留美	参事官（審議第二担当）付参事官補佐
	横田　真理江	参事官（審議第二担当）付審議専門職付

要　　　　旨

１　作成の背景

化学兵器の廃棄は化学兵器禁止条約が定める 2022 年の処理期限に向けて内外で進展している。我が国の懸案である中国遺棄化学兵器処理事業も、ハルバ嶺処理場の本格稼働に向け現場の課題解決に注力している。これらを踏まえて、今後の本事業の進展や国内の老朽化学兵器の発見・回収・廃棄などで想定される様々なリスクを公衆並びに社会一般と共有し、本事業に対する今後の学術の貢献に資するべく、本報告を作成した。

２　現状及び問題点

ハルバ嶺事業の期限内完了のための設備増強を含む処理能力の向上が喫緊の課題であるが、並行して老朽化学兵器を含めた共通課題として、爆発、化学剤被曝、その他リスクの対策が求められている。そして、緊急医療体制は、現場で応急処置する一次部署と充実した高度医療を行う二次機関に、明確に階層化する必要がある。更に、中高年作業者が多いため、各種ストレスや生活習慣病などに係る保健・医療体制が望ましい。また、処理に伴い発生するヒ素など有害物質を含む汚染残渣の処分方法を選定する必要がある。なお、ヒ素をはじめ弾薬など由来の有毒物質が埋設坑などの周辺土壌に浸潤して残留する可能性があるが、処理事業によって生じたと特定される汚染については、日本側の負担で処理することが決まっている。そうした土壌浄化の技術的方法の検討が望ましい。

３　報告の内容

(1)　世界的な化学兵器廃棄処理の進展と環境問題への回帰

諸外国は化学兵器禁止条約が定める 2022 年のストックパイルの廃棄処理期限を達成できる見込みである。代わって欧州を中心に近年注目されている海洋投棄化学弾や非化学兵器由来有毒物質による環境問題については、我が国の化学兵器処理事業経験が貢献できる分野である。化学兵器禁止機関（OPCW）などの国際機関をハブとして、バルト海沿岸諸国や中国などの専門家・研究者との国際協力の強化が期待されている。

(2)　旧日本軍化学兵器廃棄に伴うヒ素処理・処分手段

廃棄作業に伴い発生するヒ素を含む処理残渣の処分には、日本では管理型地表処分に実績があるほか、米独で実績がある地中処分が有用である。廃岩塩坑での処分も妥当な選択肢の一つである。また、地表処分向のガラス固化法も研究が進んでおり今後の実用化が期待できる。

(3)　処理作業員の緊急医療体制と日常的健康管理

老朽および遺棄化学兵器処理には「爆発影響リスク」、「化学剤漏洩リスク」および「その他リスク」の３種のリスクがある。高度医療機関と適確に分業した緊急医療体制が必

要である。処理作業員の慢性的ヒ素被害防止には、長期発がん性を考慮した基準設定と日常的な尿中ヒ素濃度の管理が不可欠である。

(4)　土壌浄化技術

化学兵器廃棄後に埋設坑などの周辺に残留が懸念される化学物質などの土壌汚染については、技術的に種々の方法について予め検討しておくことが重要である。従来の物理・化学的処理方法（焼却、固化・安定化、洗浄）のほか、微生物による分解と植物濃縮を利用したバイオ／ファイトレメディエーション法がコスト面や環境負荷の観点から有望である。

(5)　その他のリスク要因

ハルバ嶺埋設抗に混入した通常弾の安全な発掘については沖縄の不発弾対策が参考になる。そして、発掘された通常弾は速やかに中国に引き渡し、分別管理することが必要である。また、ライフライン供給などを周辺地域に依存することから、処理場を広域システムと捉えた事業継続計画の策定が有用である。

目　　　次

１　はじめに 1
２　世界の化学兵器処理の現状 3
(1)　主要国の化学兵器処理の現状 3
①　化学剤使用の歴史と化学兵器禁止条約 3
②　ストックパイルの現状 3
③　ノンストックパイルの現状 3
④　危険・有害化学物質への関心の高まり 4
⑤　今後の日本の果たすべき役割 5
(2)　化学兵器禁止機関(OPCW)の活動 5
①　化学兵器禁止条約締約国での化学兵器廃棄および処理の状況 5
②　OPCW が直面する化学兵器処理に係わる課題 6
３　老朽・遺棄化学兵器処理における安全と環境の保全 8
(1)　ヒ素廃棄物の環境基準と処理方法 8
①　ヒ素およびヒ素化合物の環境基準 8
②　ヒ素廃棄物の処理と処分 9
(2)　老朽および中国遺棄化学兵器処理経験に基づく緊急医療体制のあり方 11
(3)　化学兵器廃棄処理作業員健康管理におけるヒ素対策 12
(4)　処理終了後の処理場跡地の環境保全 14
①　跡地利用と周辺開発動向 14
②　生物学的浄化技術 15
③　処理作業終了後の跡地の化学的浄化 16
(5) その他のリスク因子 17
①　爆発リスク関係 17
②　地震リスク 18
４　まとめ 20
＜用語の説明＞.. 21
＜参考文献＞.. 23
＜参考資料１＞審議経過 30
＜参考資料２＞シンポジウム開催 32
６　付録 33
＜付録１＞　バルト海における海洋投棄化学兵器の現状 33
１　バルト海沿岸の最近の動向 33
２　バルト海への化学兵器投棄の歴史的背景と実態 33
３　バルト海の海洋生物への影響 34
４　バルト海沿岸国の環境調査に選定されたパイロットサイト 34
＜付録２＞　化学兵器禁止機関(OPCW)の活動 36
１　OPCW の概要 36

２　OPCW 締約国での化学兵器廃棄および処理の状況 36
３　OPCW が直面する化学兵器廃棄に係わる課題 38
＜付録３＞　ヒ素廃棄物の処理と処分 39
１　地中処分 39
２　地表処分に向けたヒ素廃棄物の固化・安定化技術 41
３　地表処分と地中処分の比較 50
＜付録４＞　化学兵器廃棄処理作業員健康管理におけるヒ素対策 52
１　職業性ヒ素暴露と健康障害 52
２　ヒ素暴露職場における作業環境管理 53
３　ヒ素暴露の生物学的モニタリングと交絡因子 53
４　尿中ヒ素の分析機器と結果の解析・評価法 55
５　作業者への作業管理 56
６　中国の慢性ヒ素中毒の原因ヒ素と処理事業から発生するヒ素による混乱の問題　57
７　まとめ 57
＜付録５＞　ハルバ嶺処理場跡地周辺の環境浄化基準設定のための周辺開発動向調査　58
１　はじめに 58
２　敦化市の概況 58
３　二道河谷周辺の土地利用動向 59
４　亜光湖国家湿地公園造成と環境保全強化 59
５　まとめ 61
＜付録６＞　延辺州の地震リスク 62
１　延辺州における地震リスクの状況 62
２　確認済／推定断層による直下型震災リスク 64
＜付録７＞　大規模処理設備 65
１　大規模処理設備の処理方法候補 65
２　制御爆破方式 65
３　加熱爆破方式 66
＜付録８＞　苅田港プロジェクトの概要 68
１　苅田港での化学兵器発見とその後の展開 68
２　苅田プロジェクトに関する技術開発 68
３　今後国内で発見される化学兵器への対応（案） 70

１　はじめに

1997 年に発効した化学兵器禁止条約（CWC）は、締約国による化学兵器の製造、保有および使用を禁じている。また、過去において化学兵器を他国に遺棄した場合も、それを遺棄した締約国に、廃棄することを義務付けている。中国に残されている旧日本軍の化学兵器はこの対象であり、日本と中国の間に結ばれた協定によって日本が廃棄することになっている。中国における遺棄化学兵器の分布は中国西部の地域を除いて広きにわたっている[1]が、特に東北部（吉林省、黒竜江省）に多い。中国各地に残置されたものは数十万発とされているが、中でも吉林省敦化市郊外のハルバ嶺においては、その大部分の約 33 万発が埋設されていると推定されている。現在、内閣府の事業としてこれらの廃棄処理が進められているが、南京、武漢、石家荘、ハルバ嶺などにおいてこれまでに行われた処理数は、2018 年１月末の時点において 49,607 発である（内、ハルバ嶺では約 4,000 発）。[2][3][4][5] 化学兵器の処理の方法はハルバ嶺以外では制御爆破、ハルバ嶺では制御爆破と加熱爆破の両方が採用されている。[6][7] なお、旧日本軍の化学兵器に限らず、投棄された化学兵器は世界中に未だに存在し、アドリア海、バルト海の海底にも数多く沈んだままになっていることを追記しておく。

一方、日本国内にも旧日本軍の化学兵器が地下あるいは湖沼や海の中から発見されている（国内において発見された化学兵器は、化学兵器禁止条約上の定義により、中国にある遺棄化学兵器と区別し、老朽化学兵器と称される。）。[8] 中でも九州北部の苅田港の浚渫海域からは約 3,000 発の化学弾が回収され、それらの処理が行われた。2009 年には、千葉市内で化学弾が 176 発発見され 2012 年中に処理されている。[9][10][11]

旧日本軍によって製造された化学兵器の主な特徴は、爆薬にピクリン酸を使用していることと、化学剤にヒ素が含まれていることである。ピクリン酸は金属と結合した場合に特に爆発し易く危険が増大する。また、ヒ素は急性および慢性の毒性があり、慢性的には発がんのおそれもあることが知られている。従って、化学兵器の廃棄処理には、作業員の安全はもとより、処理中および処理後の周辺環境への影響がないよう配慮しなければならない。

日本学術会議荒廃した生活環境の先端技術による回復研究連絡委員会（第 18、19 期）および総合工学委員会工学システムに関する安全・安心・リスク検討分科会（第 20 期以降）においては 2000 年（第 18 期）以来、遺棄および老朽化学兵器の廃棄について、「荒廃した生活環境の回復」という観点からこれが人類社会にとって重要な意義があると考え、これまで継続して学術の立場から広く活動を行い、報告、提言書としてまとめてきた（表１）。

これらを受けて、第 23～24 期総合工学委員会工学システムに関する安全・安心・リスク検討分科会の活動としては、中国における発掘回収および処理の進捗が見られ、またハルバ嶺における試験的な廃棄処理も進捗している現状に鑑み、現時点から最終段階に向けての課題ならびに、将来廃棄処理を終了した後の環境回復について議論を行ってきた。その中で、万一環境が汚染されていた場合の廃棄処理後の環境回復・保全の必要性、またヒ素による健康障害と無毒化処理対策における研究技術の最近の進展を踏まえ、国際的な技術交流の必要性を議論した。本報告はそれらの成果を広く一般社会に公表し、それにより遺

棄および老朽化学兵器の廃棄処理事業の必要性ならびにそれに向けた科学技術の活用について、社会全体の理解が進展するよう期待して作成されたものである。合わせて、関連する学協会、諸団体に参考となるデータや情報を提供することを目的としている。本報告が化学兵器の処理を通じて、荒廃した生活環境の回復に寄与することを期待するものである。

表１　これまでの報告、提言

題名	公表時期
荒廃した生活環境の先端技術による回復研究連絡委員会『遺棄化学兵器の安全な廃棄技術に向けて』（対外報告）	2001 年　7 月 23 日
荒廃した生活環境の先端技術による回復研究連絡委員会『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』（対外報告）	2002 年 11 月 26 日
荒廃した生活環境の先端技術による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『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』（対外報告）	2005 年　3 月 23 日
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『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』　（提言）	2008 年　7 月 24 日
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『老朽・遺棄化学兵器の廃棄処理の実施における保安対策―中国の遺棄化学兵器処理の開始に当たって―』　（提言）	2011 年　6 月 2 日

２　世界の化学兵器処理の現状

標記の件について関心がある全ての公衆並びに社会一般のため、以下のとおり報告する。

(1)　主要国の化学兵器処理の現状

①　化学剤使用の歴史と化学兵器禁止条約

化学物質を戦いに用いるという意味での化学兵器は既に紀元前 11 世紀に遡る[1]。但し、現在の化学兵器禁止条約で禁止されているマスタードガスが初めてドイツ軍によって使用されたのは第一次世界大戦中の 1917 年７月 12 日、ベルギーのイープル市郊外であった。この大戦での化学兵器による連合軍とドイツ軍の犠牲者は 50 万人に及ぶと言われている。その後 1925 年のジュネーブ議定書を経て、1997 年化学兵器禁止条約が結ばれ化学兵器の開発、製造、貯蔵、使用が禁止された。

初めての化学兵器使用から約 100 年を経た 2018 年現在、締約国は 192 ヶ国におよび、未加盟は４ヶ国のみとなった。国連加盟国が 193 ヶ国であることを考慮すると如何に国際的コンセンサスが得られているかが分る。使用のため保有された化学兵器はストックパイル[2]と呼ばれ、保有する締約国は申告して廃棄する義務がある。戦場に残った不発弾や、水中に投棄あるいは地下に埋設または遺棄されたノンストックパイル[3]は回収されて化学兵器と鑑定されて初めて条約の対象となり、地下や水中にある限り条約上の廃棄義務はない。

②　ストックパイルの現状

1997 年の条約発効以来、申告された化学兵器は７ヶ国で約 72,304 トンに達するが、化学兵器禁止機関（OPCW）と加盟各国の国際協力の下、2017 年 12 月現在、約 96.3%（カテゴリー１[4]）が廃棄された。[12] 残るのは米国のみであり、自国の大型処理施設で 2022 年までに廃棄が完了する見通しである。

特筆すべきは、内戦下のシリアのカテゴリー１化学兵器廃棄対応で、国連の下での OPCW 査察、国外搬出、海上輸送など、９ケ国の直接支援および多くの国の資金援助により、2014 年地中海の米国艦船上において安全に処理されたことである。

③　ノンストックパイルの現状

ア　ノンストックパイル処理の社会的要求

ノンストックパイルの回収・処理にはストックパイルに比べ膨大な費用がかかる。放置して社会インフラ整備に弊害となる場合、その必要性は経済効果から判断しやすい。しかし、環境問題由来の動きは被害が顕在化するまで進展しにくいのが現状

---

[1] 既に紀元前 11 世紀に中国で使用、殺傷力という意味では紀元前 5 世紀にスパルタ軍の亜硫酸ガス使用、紀元前 4 世紀にアレキサンダー大王がカリウム窒酸塩と硫黄などに火をつけて攻撃などの記録があるが、近代では第一次世界大戦の西部戦線において 1915 年ドイツ軍が初めて塩素ガスやフォスゲンガスを使用した。
[2] 用語の説明を参照。
[3] 用語の説明を参照。
[4] 用語の説明を参照。

であり、発見されて初めて、回収・処理が行われるのがこれまでの実態である。

イ　陸上のノンストックパイル

陸上のノンストックパイルの回収・処理は、第一次世界大戦のヨーロッパ西部戦線（ベルギーとフランス国境地帯）からの不発弾が主である。ベルギーでは今までに 18,000 発以上が回収、その殆どが処理された。現在は、新たに発見される回収化学兵器を処理する程度である。フランスでは、過去に回収された化学兵器の処理プラントが建設の最終段階にあり、慎重な試運転を経て間もなく実弾処理が可能となる予定である。米国では過去に使用された国内の旧軍事基地内に埋設されたものの一部が回収・処理されている。今後も種々の計画はあるが、本格的事業には至っていない。

ウ　水中のノンストックパイル

水中のノンストックパイルの回収・処理は、ヨーロッパでは英国などの海岸で発見されたものを回収・処理した例はあるが、これまで積極的に探査、回収・処理された大規模例はなかった。しかし、バルト海沿岸では、第二次世界大戦後に連合国がドイツで押収し、バルト海に大量に投棄したドイツ製化学兵器が、魚網に掛かるなどして沿岸諸国の漁民の被害が報告されるにおよび、関係国が国連を巻き込んで所要の対策を検討している。（付録１）

米国やカナダではハワイ沖、大西洋沿岸や湖水などのものがローカルには問題視されてはいるが、具体的プロジェクト化の動きは無い。

要するに海外では、福岡県苅田港プロジェクトで実施されたような大規模な化学兵器の探査・回収・処理プロジェクトは未だ行われていない。（付録 8）

④　危険・有害化学物質への関心の高まり

ストックパイルの 96%以上が廃棄された現在、化学兵器の脅威は大きく低減された。しかし、化学兵器禁止条約の対象外で化学兵器以上に爆発性や毒性のある一般産業用化学物質が日常的に製造、貯蔵、輸送、使用されており、その量は現存のストックパイルの比ではない。それらの誤った取り扱いは直接一般市民に大きな被害を及ぼす可能性があり、またこれ等の化学物質はそのライフサイクルのあらゆる過程においてテロの対象となり得る。しかもこれらの脅威とその被害に国境は無い。このような状況の下、化学兵器廃棄で築いた国際協力体制と蓄積した技術ノウハウを危険・有害化学物質にも拡大活用する機運が高まっている。例えば、2016 年４月に The International Center for Chemical Safety and Security（ICCSS）[5]が、業界、行政、規制当局、研究機関、住民の代表などの関係者を集めて、化学物質の安全・安心に関する国際会議

[5] ポーランド政府系の NPO/民間非営利組織。

(CHEMSS2016)[6]を開催し、国際機関と 47 ヶ国の代表を含む 400 人以上の参加を得た。また、G7 の Global Partnership Working Group の Chemical Security sub-Working Group[7]においても、その重要性が確認されている。

⑤　今後の日本の果たすべき役割

社会的関心がノンストックパイルの環境問題に移る中で、日本は中国遺棄化学兵器や苅田港における海中よりの回収弾処理など世界でも類を見ない大規模なノンストックパイル処理の経験がある。

また国際会議では、化学兵器の枠組みを越えた危険・有害化学物質の誤操作や事故の可能性に加え、計画的な化学テロの防止対策と被害の最小化策が議論されている。これに関しては、史上最大級の地下鉄サリンテロ事件（1995 年 3 月 20 日）での迅速な対応経験がある。

本分科会もこれらの蓄積されたノウハウを基に、今後世界が直面するであろう新たな問題の解決に向けて、国際的に貢献することが可能と考えられる。

(2)　化学兵器禁止機関(OPCW)の活動

①　化学兵器禁止条約締約国での化学兵器廃棄および処理の状況[8]

OPCW は、化学兵器禁止条約の締約国が保有するストックパイルは、同条約検証付属書 IV 条(A)に基づき各締約国からの申告内容を現地査察によって検証するとともに、当該年度に計画された化学兵器の廃棄状況を現地査察（常駐）によって監視(monitoring)している。また、老朽・遺棄化学兵器は、同条約検証付属書 IV 条(B)に基づき、加盟各国から年次申告された回収・保管および廃棄の状況を現地査察によって検証している。ストックパイルに関しては、2017 年 12 月末の時点でこれまでに申告された合計 72,304 トンのうちの約 96.3%(カテゴリー１)の廃棄を現地査察(常駐)によって検証した。今後も 2022 年に予定されている廃棄完了に向けて残る唯一の保有国である米国に対する検証を継続する。[12]

１）米国は、現在稼働中のコロラド州 Pueblo 廃棄施設（中和法＋バイオ分解法でマスタードを処理）に加えて、2017 年にケンタッキー州 Blue Grass 廃棄施設（中和法＋超臨界水による酸化処理法により GB,VX,マスタード[9]を処理）の試運転を開始した。2018 年中には実処理を開始し、廃棄を加速する計画である。[13]

２）ロシアは、2017 年９月、Udmurt 共和国 Kiznir 廃棄施設において約 5,745 トンの神経剤などを中和処理し、ロシア国内の全ての化学兵器の廃棄を完了した。[12][14][15]

6 用語の説明を参照。
7 用語の説明を参照。
8 各国の化学兵器処理の詳細については付録 2 を参照。
9 用語の説明を参照。

3） リビアに関しては、国内の治安上の懸念から未処理であった原料化学物質を国外で処理をすることが 2016 年６月に OPCW および国連安保理で決定された。これを受けて、ドイツの Muenster の GEKA 処理施設において、2016 年に 2-黒露エタノール（燃焼法）とリブチルアミン（プラズマアーク法）が処理され、2017 年には塩化リン、および 塩 化チオニル （いずれも加水分解法）が廃棄され、これをもってリビアの全ての化学兵器の処理が完了した。[12][16]

4） シリアについては、同国が 2013 年９月 14 日に CWC に加盟した際に提出された保有する化学兵器等に関する冒頭申告を受け、該当地域が「紛争地域」であったため、申告内容の検証と使用の疑義に係わる調査を OPCW と国連がジョイントミッションとして実施した。これまでにシリア国内で一部の原料化学物質や未充填砲弾等、移動式および固定式製造施設（27 ヶ所のうち 25 ヶ所）を検証し廃棄した。[17][18] シリアはサリン自体を保有するのではなく毒性の低い前駆物質である DF[10]と汎用化学原料であるイソプロピルアルコールを使用の直前に混合してサリンを合成する「バイナリー」方式を採用していた。そのため、それらの主要な原料である化学物質 DF とマスタードを国外で処理をすることが OPCW および国連安保理で決定された。更にマスタードや DF が CWC により他国への移転が禁止されていることから、公海上にて処理装置（苛性ソーダや塩素酸ナトリウム等を使用する２台の野外展開式加水分解処理システム）を搭載した船上（公海上）にて 600 トンが処理され、発生した残渣および廃液はドイツおよびフィンランドに移送されて産業廃棄物処理施設にて最終処理された。[19][20] また、それ以外の原料化学物質は英国および米国の産業廃棄物処理施設にて処理された。

老朽・遺棄化学兵器は、それらが常続的に発見されるため、締約国による年次申告に基づき OPCW が申告内容と処理状況の現地査察を実施している。

老朽化学兵器に関しては、OPCW は 2016 年度に６回、2017 年度には７回の現地査察を実施した。[12][21] その対象は、現在でも年間約 2,000 発が発見されるベルギーおよび第一次世界大戦の戦場であったドイツやフランス、旧射撃試験場や海中から化学砲爆弾が発見される事例のある日本や英国等である。

遺棄化学兵器に関しては、日本が中国で実施している大規模な発掘・回収および処理施設での処理を実施している「遺棄化学兵器の発掘回収・処理事業」について、OPCW は 2016 年度に 11 回、2017 年度に 11 回の現地査察を実施した。[12][21][22]

② OPCW が直面する化学兵器処理に係わる課題

OPCW はストックパイルの廃棄が９割以上に進捗したため、化学兵器査察の専門家を

---

10 DF: メチルホスホニルジフルオリド

削減して産業査察の専門家を増加させている。しかし、シリアにおける塩素ガス等の毒性産業化学物質の兵器目的での使用が新たな脅威となったことを受け、改めて「化学兵器の検証および対処」の出発点に立ち戻り、国連と共同して化学兵器禁止および化学テロ対処のノウハウを集約した「対処センター」とする構想案が議論されている。

3　老朽・遺棄化学兵器処理における安全と環境の保全

(1)　ヒ素廃棄物の環境基準と処理方法

標記の件に関連、関心がある全ての研究者、技術者、研究開発管理者、事業者ほか社会一般に対し、以下のとおり報告する。

毒性の高いヒ素を安全に廃棄する処理や処分は過去に様々な方法が取り組まれ、現在でも新規技術が開発されている。銅鉱山や金鉱山から採掘時に発生するヒ素は、これまでヒ素が多く利用されてきた農薬・除草剤や木材保存剤（クロム化ヒ酸銅： chromated copper arsenate、CCA と略される）向けの利用が中止されたため、今後は廃棄物としての処理や処分が重視される時代となった。

①　ヒ素およびヒ素化合物の環境基準

有害物質による環境汚染は大気、水質、汚染土壌に分けられるため、環境基準は排出源での１）大気への排出量、2) 水質への溶出量、並びに 3) 汚染土壌からのヒトへの被ばく量で定められる。また、4) 廃棄物処分場については、別途、排出口での水質基準が定められている。これに従ってヒ素についても環境基準が定められる。本節では土壌汚染と付随する地下水の汚染を中心に記述する。なお、大気汚染に係るヒ素およびその化合物の指針値は 6 ng-ヒ素/m^3以下(ng は 10 億分の 1g) と定められている。

固形有害廃棄物に対するヒ素の環境基準値は表 2 にまとめられる。この基準の考え方は、廃棄物が降雨等で溶出して地下水の汚染を引き起こすことを想定しており、日米中は共通している。基準値は各国で異なり、日本の基準値が最も厳しい。

表 2　日中米のヒ素の廃水と土壌への溶出基準

（単位：mg/L）

有害物質	固形有害廃棄物			土壌汚染		
	日本 1)	米国 2)	中国 3)	日本 4)	米国	中国
ヒ素	0.3	5	5	0.01	0.06	---
シアン	1	含有量 250mg/kg	5	不検出	0.2	---

（出典）　1) 燃え殻、ばいじん、鉱さい、汚泥、金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準を定める省令 別表 1、第 5、第 6

2) 40 CFR(Code of Federal Register) §261,24 Toxicity characteristic Table 1. およびその他のデータ

3) 中国 GB 5085.3-2007 危険廃棄物判定基準 溶出毒性判定

4) 環境省告示第 18 号、平成 15 年 3 月 6 日

これに対して、土壌汚染の場合は日米で異なる考え方が採られる。米国の場合、Health Based Environmental Standards と称する、複数のヒトへの汚染経路を設定し、１）地下水への溶出による飲料水からの摂取だけではなく、2) 汚染物質の蒸発や飛散による呼吸による摂取、3) 汚染物質の皮膚付着による吸収などを積算して評価する方式

である（図１）。このような複雑な評価は専門家以外には算出できないが、米国環境保護庁（EPA）では簡易な評価手段をインターネット[11]で公開している。

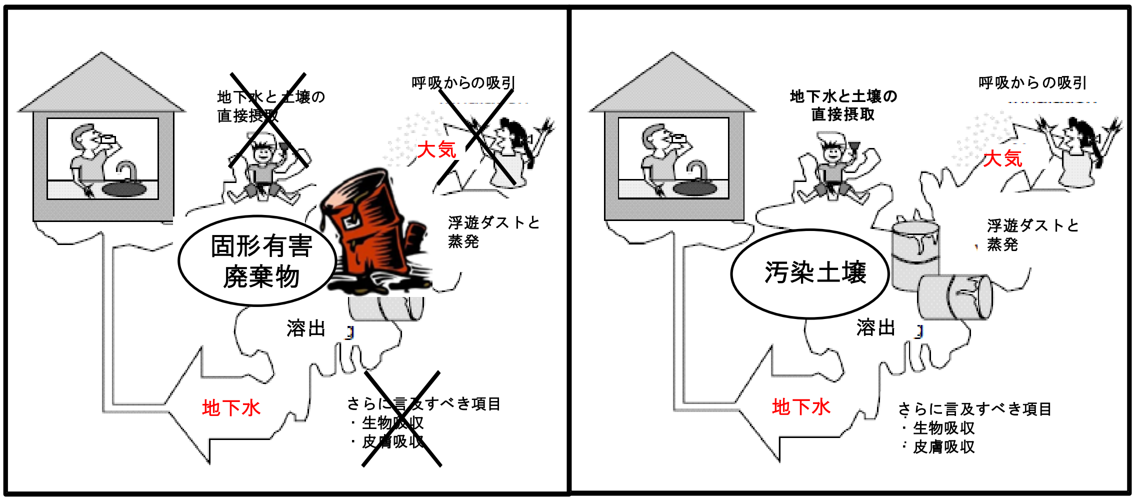


図１　固形有害廃棄物と土壌汚染の評価に関する米国の考え方

左の固形有害廃棄物では、地下水飲用のみがヒトへの汚染経路と想定するのに対し、右の汚染土壌では、汚染された土壌や水との直接接触、蒸散された大気や飛散したダストの吸入などの汚染経路も想定する。

日本の場合は、汚染物質の 1)飲料水への溶出と 2)含有量で基準（第一基準）を設定し、この基準を超えた場合でも 3)第二基準を設定し、汚染土壌の浄化を促している（表 3）。なお、中国の土壌汚染の環境基準は再検討中であるが、遺棄化学兵器の処理事業に関しては、過去に設定された基準ＧＢ１９０６２－２００３に従って管理することが取決められている。

表 3　ヒ素の土壌汚染基準（日本）

	第一基準			第二溶出量基準
特定有害物質の種類	土壌溶出基準 (mg/L)	土壌含有量基準 (mg/kg)	地下水基準 (mg/L)	土壌溶出基準 (mg/L)
ヒ素およびその化合物	検出されないこと	150 以下	0.01 以下	0.3 以下

②　ヒ素廃棄物の処理と処分

ヒ素廃棄物を人間活動から「隔離」する処分の方法は概ね以下の方法が採られる。

１）地表処分：一般的に廃棄物処理場であり、多数の処分場が建設、運用されてきたため、経験は豊富であることが長所となる。ヒ素廃棄物をより溶解性が低下させる事前処理（例えば、酸化カルシウムなどの添加）やヒ素廃棄物の溶出試験（Toxicity

[11] https://www.epa.gov/chemical-research/toxicity-estimation-software-tool-test（2019 年 1 月 3 日確認）

Characteristic Leaching Procedure、通称 TCLP)、埋設後の定期点検や管理などが必要とされるので、複雑で長期の準備期間を要し、コストがかかる。

降雨と地下水に晒されてヒ素成分が溶出する処分施設においては、①二重の遮水シートの敷設(地下水侵入の阻止)、②排水口における有害物質濃度の測定と③基準を超えた場合に備えた排水処理装置の設置が義務付けられている。

降雨に晒される廃棄物中のヒ素溶出量を抑制させるためには、①溶出濃度の低いヒ素化合物に変換することと、②セメント等のバインダーと混合して固化体とし、処分場にヒ素廃棄物を固化する方法が採られる。

ヒ素廃棄物の「固化・安定化」とは、土壌中に埋める廃棄物が液体や気体ではなく、セメントなどと混合して“固体化”してヒ素の拡散を防ぐことを意味する。処分場の周辺環境による埋められた固形廃棄物中のヒ素が降雨により溶出することを防ぐことで、“安定化”も目的とする。廃棄物中のヒ素の水への溶出濃度を基準値以下に抑える方法は、①溶解度の低いヒ素化合物の選択、②ヒ素の溶出を抑える物理的方法の選択などに分けられる。(付録 3)

2) 地中処分:地表から数百メートル程度以下の深さに処分する方法である。地表から隔絶した環境下へ有害物質を保管するため、有害物質が漏洩しても地表への影響は少なく、固体や液体の有害物質の格納容器は厳格さを求めないで済むことが長所である。他方、地割れや落盤、地下水侵入などの地中の周辺状況の正確な監視は難しく、事故が発生すると放棄する場合もある。また、地中に存在する適切地が限られるため、処分場の容量には限度はある。

米国では石油採掘井戸跡に液体の廃棄物を注入する方法“Underground Injection”が五大湖周辺やテキサス州等の南部を中心に行われている。ヒ素含有廃棄物については地中での漏洩に伴う汚染の拡散に対する環境影響も評価されている。ヒ素廃棄物については、地中からの漏洩による環境影響を評価している。また、ドイツを中心に岩塩やカリウム、鉄鉱石の地下採掘跡を廃棄物の処分場に活用することが実施されている。[12]

ヒ素は銅鉱山や金鉱山を採掘する際に副産物として産出される。そのため、鉱山からの副産物ヒ素含有残渣は沈殿池やシックナーなどで固液分離したあと、中和・凝集工程へ進む。中和ではヒ素含有の廃水に消石灰(水酸化カルシウム)を添加して廃水の pH を調整し溶存する重金属を除く工程を経て、凝集剤を加えてヒ素を含有した汚泥として処理する。発生したヒ素含有汚泥は、坑道中で保管されるものもある一方、処理場で処分されているものもあると考えられる。

鉱山以外の一般のヒ素含有廃棄物では様々な方法で固化や安定化され、ヒ素の溶出濃度を測定して基準値以下と判定されると、処分場へ搬入が許可される。代表的なヒ

[12] 付録 3 を参照。

素である三酸化ヒ素（化学式　As_2O_3）は溶解度が 18 g/L（Solubility Table[13]より）であり、溶出基準値を遥かに超える。このため、セメント（主成分は酸化カルシウム CaO)、生石灰（酸化カルシウム)、消石灰（水酸化カルシウム $Ca(OH)_2$）などを混合して固化・安定化する方法が実施されている。しかし、溶出は様々な要因が関与することから、本手法の妥当性については、現実の状況に合わせて常に検証することが必要である。

セメントやスラグを混合したヒ素の高温溶融法やガラス固化法など、ヒ素の溶出を物理的手法で抑制する技術が最近発展してきたので、今後は化学的手法にも広がることが期待できる。

③ヒ素化合物の有害性（ハザード）について

一般的にヒ素化合物は有害性（ハザード）が周知されており、遺棄化学兵器の廃棄処理を実施する際には取り扱い作業者の健康被害には注意が必要である。表 4 は米国の国立労働安全研究所（通称 NIOSH）にて策定されたヒ素およびヒ素化合物に対する半数致死濃度 LD50、取扱い作業者への暴露限度（Permissible Exposure Limit: PEL）が設定されている。また、米国労働省（Department of Labor）管轄する労働安全衛生庁（Occupational Safety and Health Administration、通称 OSHA）では、生命や健康への危険性のある非常時の事故に対して IDLH（Immediately Dangerous to Life or Health、生命または健康に対する差し迫った危険）という基準が設定されている。表 4 の 3 種類のヒ素化合物の間では差異が認められず、いずれに対してもヒ素の廃棄に当たる作業者の防護を徹底することが求められている。

表 4　ヒ素化合物の有害性比較

ヒ素化合物	As_2O_3	$Ca_3(AsO_4)_2$	$Mg_3(AsO_4)_2$
LD_{50} (rat, oral)	14.6 mg/kg	20 mg/kg	―
PEL TWA	0.010 mg/m^3	0.010 mg/m^3	0.010 mg/m^3
IDLH as As	5 mg/m^3	5 mg/m^3	5 mg/m^3

(2)　老朽および中国遺棄化学兵器処理経験に基づく緊急医療体制のあり方

標記の件につき関連、関心がある全ての作業者、業務管理者、事業者、医療関係者、医科学者ほか社会一般に対し、以下のとおり報告する。

救急医療の体制整備に当たっては、処理作業に係る「爆発影響リスク」、「化学剤漏洩リスク」および「その他リスク」を想定し、それらのリスクを引き起こす直接要因を抽出する。そして、その直接要因が発生する作業工程を分析し、導き出された「当該時刻に」「当該区域に」「存在する作業者の人数」といった具体的な条件が、救急医療計画を

[13] https://en.wikipedia.org/wiki/Solubility_table（2019 年 1 月 9 日確認）

立案する際の最も基本的な前提条件となる。また、実際に進められている処理事業に伴う事故の発生状況を鑑みて、リスク評価には適宜修正が加えられる必要がある。正当なリスク評価に基づいた妥当性のある救急医療の体制（医療水準・規模等）の構築を図ることが重要である。

① 主たる二つのリスク

本処理作業にあたり準備すべき救急医療は、爆発事故に対する医療対処および化学剤被害に対する医療対処の二つから構成される。これらの想定される重大事故によって発生する健康被害に対して、現場の一次医療施設で施行することは、除染を除けば応急処置などに限定される。一方、皮膚・粘膜および呼吸器を中心とした重篤な症状が顕在化するのは事故発生から 12-24 時間以降と予想される。開胸・開腹術、皮膚移植術、集中治療等、集学的治療を必要とする可能性があるため、二次医療機関には高度の医療水準が求められる。従って、救急医療体制を明確に階層化し、一次医療施設では応急処置と搬送中の安定化のみを行い、固定翼を含めた広域搬送を実施して、根本的治療は信頼に足る高次医療機関に委ねることが適切である。

② 軽視されがちな三つめの健康リスク

処理作業に係る「その他リスク」として、以下の３点が挙げられる。

１）作業において使用する機器や装置の使用や運転に伴う外傷等のリスク
２）作業環境による生理的および心理的ストレス
３）高温・多湿、低温、大気汚染等の環境がもたらす事故等のリスク

南京市における処理事業（平成 22 年 10 月 12 日-平成 25 年８月 28 日）の期間中に実施された 7 回の健康調査によれば、業務の特殊性から作業者には高齢者も多く、心疾患、高血圧、糖尿病、高尿酸血症等の基礎疾患を有する割合が高い。作業では長時間にわたり慢性的な緊張状態を強いられるため、基礎疾患の悪化のほか、心理的ストレスにより不眠症等の発生も見られる。また、夏の猛暑時に防護衣を装着して作業することによる熱中症リスクや、冬の低体温症、大気汚染による呼吸器疾患のリスクなど、特異な気象および作業環境に対する緊急医療も具備すべきと思われる。

⑶ 化学兵器廃棄処理作業員健康管理におけるヒ素対策

標記の件につき関連、関心がある全ての作業者、業務管理者、事業者、医療関係者、医科学者、労働衛生関係者ほか社会一般に対し、以下のとおり報告する。

老朽・遺棄ヒ素化学兵器処理作業は制御爆破と加熱燃焼方式にて実施されるが、想定される作業者への暴露は無機ヒ素が主たるものになると推測される。無機ヒ素による職業性暴露からの健康障害は、国内外の銅製錬、非鉄精錬、三酸化ヒ素製造などに従事した作業者を対象とした症例研究や疫学研究が参考となる。[22]健康障害は無機３価ヒ素

（三酸化二ヒ素（As_2O_3））、無機５価ヒ素（五酸化二ヒ素（As_2O_5））が主な原因ヒ素で、ともに強い毒物である。ヒ素中毒学の経験則から、職業性暴露は経気道暴露が主体であり、口腔内汚染により嚥下からヒ素は消化管にて吸収（経口暴露）される経路もあるが、無機ヒ素の皮膚からの体内吸収は確認されていない。これらの知見は、作業者への無機ヒ素暴露の防止対策として重要である。職業性無機ヒ素暴露からの健康障害においては、急性中毒はなく、慢性ヒ素中毒が問題となる。

慢性ヒ素中毒の発生は暴露量と時間により決まり、最小毒性量（LOAEL）は一日に700 μgを連続して数年間の暴露である。しかし、一日の暴露量が3000 μgを越えると数ヶ月と短時間で発症する。なお、無影響量（NOAEL）は体重55 kgで44 μg/日との試算値がある。[22]慢性ヒ素中毒の特徴的な症状は皮膚障害で発症部位にも特徴があり、躯幹部（日光の当たらない部位）に色素沈着と色素脱失が雨滴状に混在して発症し、重症者では掌と足の裏に限局して強い痛みを伴う角化症の発生から労働や日常生活が困難となる。さらに、患者の一部に皮膚がんが認められる（付録４）。国際癌研究機関（IARC）は無機ヒ素暴露と皮膚がん、肺がん、膀胱がん、肝がんなどとの因果関係を認め、最上位の発がん性物質としてグループ１に分類し、発がんまでの潜伏期間を約 30 年と推定している。[23]

職業性無機ヒ素暴露における作業環境中ヒ素の許容濃度は、米国産業衛生専門家会議（ACGIH）の基準値、一日８時間週40時間の時間荷重平均濃度（TLV-TWA）0.01 mg/m^3（ヒ素として）が最も国際的に認知され[24]、中国もこの値にて管理している。なお、我が国では発がん性の生涯リスクを考慮した日本産業衛生学会の値、0.003 mg/m^3を用いている。作業環境中ヒ素の許容濃度の遵守は基本であるが、年に数回の作業環境中無機ヒ素濃度の測定のみでは健康障害の予防対策として不十分である。この様な背景があり、一般的に職場環境では様々なスポット暴露が繰り返して起こることが推測され、作業者への暴露実態の解明や評価に際して、ACGIHが推奨する尿中ヒ素の化学形態別測定による生物学的モニタリング法の運用が規定されている。ACGIHは無機ヒ素暴露の生物学的暴露指標値として、無機ヒ素とその代謝産物であるモノメチルアルソン酸（MMA）とジメチルアルシン酸（DMA）の合計値、35 μg/Lの尿中ヒ素濃度による管理を推奨している（付録４）。[24] なお、中国では尿中ヒ素の化学形態別の暴露評価法は国としての運用の実績はないが、本事業において積極的な活用が有用と考えられる。

1980 年代以降、アジアや中南米諸国では水系伝染病の防止に微生物汚染の少ないポンプ式井戸水（地下15-20 m）が、国際機関（世界銀行、国際協力機構（JICA）等）の支援･推進により普及した。一方、ヒ素について充分な環境アセスメントなしに井戸水を使用したことにより、大規模な慢性ヒ素中毒が発生し現在も根絶には至っていない。[22][25] 中国では文化大革命（1966年～1976年）以後、農村地域において開放政策から各家庭においてポンプ式井戸の利用が急速に普及した。一時期、慢性ヒ素中毒患者（ハイリスク者を含む）の発生は約300万人と推測され、代表的な発生地域は山西省や内蒙古自治区、これに中国の東北地方も含まれた。さらに、中国では井戸水の無機ヒ素汚染以外にも、貴州省において石炭燃焼の煙中ヒ素が原因した重篤な慢性ヒ素中毒も発生し

た。[26]すなわち、中国では国土の至る所に自然由来（地下水）や生活廃棄物（石炭燃焼物）による無機ヒ素汚染源があり、本事業から発生する無機ヒ素と区別して扱うべきとの認識の共有化と、識別鑑定の技術を事前に準備しておく必要があるといえる。

当該処理事業において、運営者や管理者における最上位の責務の一つは健康障害のうち発がん性の生涯リスクの軽減や防止であり、発がんの潜伏期間が約 30 年であることも考慮した事業計画の構築と運営が必要である。また、制御爆破方式による砲弾等の処理では、ナノ粒子状物質の生成が理論的に推測される。ナノ粒子状物質の健康影響は国際機関や研究機関において急速に研究が進んでいるが、健康影響の予防対策に関しては的確な方法が提案されていない。尿中ヒ素の化学形態別の検査は、当該作業者に対する未知のナノ粒子状物質暴露からの健康影響の危険性のレベルを間接的に把握する機会にもなり得ることから、尿中ヒ素による適切な検査を包括的に遂行する必要があると考えられる。

(4)　処理終了後の処理場跡地の環境保全

標記の件につき関連、関心がある全ての科学者、技術者、研究開発管理者、事業者ほか社会一般に対し、以下のとおり報告する。

埋立てや保管した化学兵器の無害化処理が完了したあと、残される課題は「土地の活用」と「処理作業で汚染された土壌等の浄化」である。

この２つの課題は相互に関連しており、土地活用の範囲や内容が決まれば土壌の浄化度が決まる関係にある。逆に、土地の浄化が困難な場合は、土地活用に限界あるケースもある。例えば、日本における土壌環境基準では、農用地（田に限る）に活用する場合、「ヒ素の溶出量 0.01 mg/L 以下（ヒ素として）、土壌中の含有量が 15 mg/kg 未満　（ヒ素として）」とされ、厳しい基準となる。これに対して、住宅地等の一般の土壌ではヒ素廃棄物の第一基準は溶出量が“mg/L 以上で検出されないこと”であるが、含有量基準は 150 mg/kg という高い値である。

中国に残された旧日本軍の化学兵器の場合、中国各地に埋設された砲弾等とともに、ハルバ嶺地区には埋設された大量の砲弾等、および広大な森林地域に散乱した砲弾等が対象となり、ともに土壌汚染の可能性をもつ。前者の大量の砲弾等処理では比較的限定された地域の汚染であるため、人為的に浄化することは可能である。しかし、後者の広範囲の汚染の処理は容易ではなく、バイオ技術などの新技術の開発が望ましい。

また、旧日本軍は毒性が懸念されているピクリン酸を火薬として使用してきたので、そのことにも留意する必要がある。

①　跡地利用と周辺開発動向

ハルバ嶺処理事業完了後の処理場跡地の土壌などの環境浄化基準を適切に設定するには、跡地並びに周辺地区が今後どのように利用されるのかを考慮することも有用である。処理場が所在する延辺朝鮮族自治州では、近年観光産業が成長している。敦化市をはじめ関係中国当局は、処理場の隣接地を国定自然公園「亜光湖国家湿地公園」

として開発を進めており、今後も観光資源、並びに官学共同生態系研究拠点として整備および運営を続ける姿勢を明らかにしている（付録５）。

よって、未汚染の近隣同等地の調査などを通じ、本事業後に環境中へ残留が懸念されるヒ素など汚染源物質の環境基準を見極めること、また、当該基準レベル迄浄化が可能で、且つ、生態系を攪乱する懸念のない環境技術の探索と開発を進めることが有益と考えられる。

② 生物学的浄化技術

処理終了後に周辺土壌のヒ素汚染（有機ヒ素、無機ヒ素）が懸念される。現在、処理が行なわれている吉林省のハルバ嶺などでは、処理事業終了後の跡地利用も見据えた、浄化技術や環境保全対策を検討することが有用と考えられる。

旧日本軍が製造、遺棄したあか剤（ジフェニルクロロアルシン（DC）やジフェニルシアノアルシン（DA））の分解生成物ジフェニルアルシン酸（DPAA）による土壌、地下水汚染が日本各地で顕在化している。2003 年、茨城県神栖市ではあか剤の中間原料である有機ヒ素化合物による地下水汚染が起きた。その結果、地下水から高濃度のDPAAが検出され、それを井戸水として利用していた住民の間に集団的な健康被害が生じた[27]。現在、遺棄化学兵器処理が行なわれているハルバ嶺周辺において、神栖市と同様なことが生じないよう留意する必要があると考えられる。

バイオレメディエーションは生物機能（特に微生物の分解能）を利用した土壌・地下水汚染の浄化技術の１つである。従来の物理化学的処理法（焼却、固化・不溶化、洗浄）に比べ、低コストで環境に優しく、土壌の植物生産機能が維持されるいという特徴を有する。このため、比較的低濃度（ppm レベル）で広範囲に汚染されたサイト（例えば農耕地や緑地）の浄化法として期待されている。

国立研究開発法人　農業・食品産業技術総合研究機構　農業環境変動研究センター（旧国立研究開発法人　農業環境技術研究所）では、中国科学院南京土壌研究所と共同し、科学技術振興機構（JST）の支援で（有機）ヒ素汚染土壌修復技術の開発に取り組んできた（2009 年１月～2012 年３月）。本技術はジフェニルアルシン酸（DPAA）またはDPAA の分解物であるフェニルアルシン酸（PAA）として土壌に蓄積される有機ヒ素化合物を分解細菌（神栖汚染土壌から単離した *Sinorhizobium* sp. L2406 株[28]の強化株(L2401-F1 株)）により無機化（ヒ酸に変換）した後、無機ヒ素高集積シダ植物（モエジマシダ、Pteris Vittata）に吸収させる（モエジマシダは農地外に持ち出し焼却処分する）2 段プロセスの バイオ/ファイト（植物）レメディエーション法である（図２）。なお、L2401 株は根粒 菌の一種のため安全性には問題がない。また、モエジマシダの有機ヒ素の吸収能は無機ヒ素と比べ極めて弱い。[29]

L2401-F1 株の汚染土壌への投入には、国立研究開発法人　農業環境技術研究所が実用化した木質炭化素材（pH、比表面積、細孔分布を細菌のすみかとして最適化した木炭）を培養菌液に一晩浸漬させた資材(分解菌集積炭化素材)を用いる。本素材に関しては、シマジン分解細菌群 CD7(３種の細菌で構成)を木質炭化素材 A100（pH7.8, BET

比表面積 100 ㎡/g）に高密度で集積させ、ゴルフ場の下層土（－15cm）に敷き詰めた野外実証試験が 2000 年 10 月から２年間行われた。その結果、年２回(計４回)散布された除草剤シマジン（水質汚濁性農薬）は CD7 集積炭化素材に吸着されその後速やかに分解された。２年間のシマジン分解除去率は 60～92%となり、本素材の野外条件での高性能が実証された。[30][31]

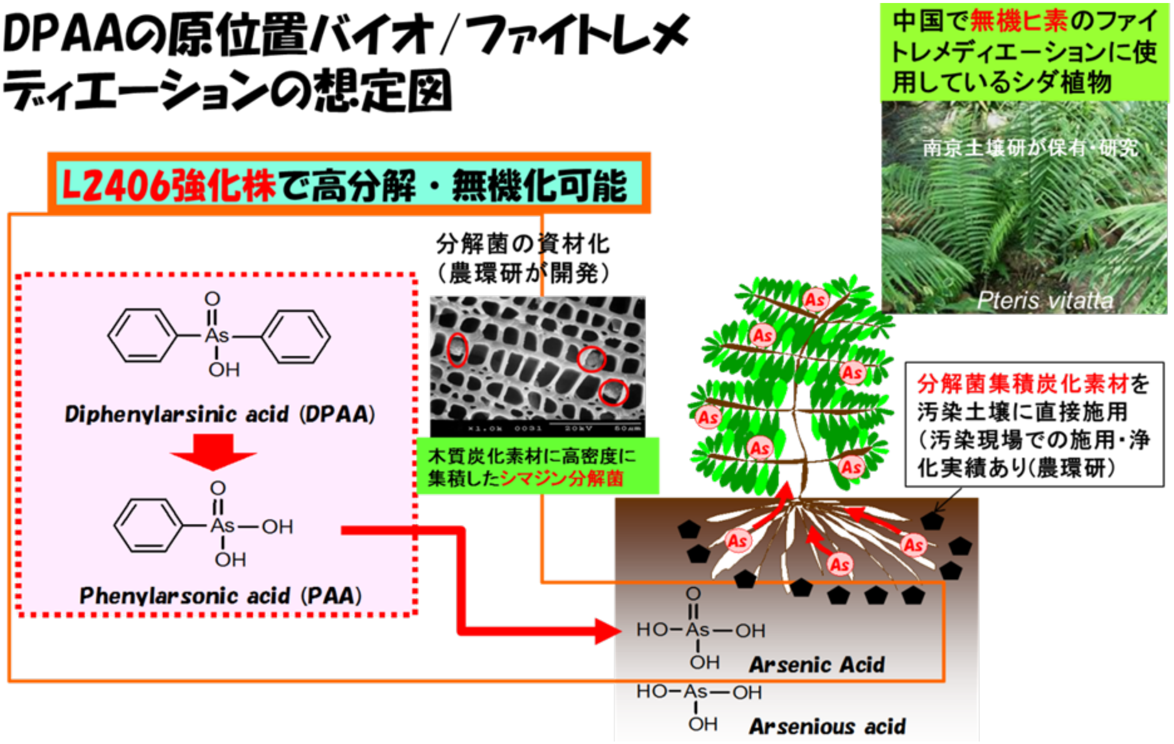


図２　バイオ／ファイトレメディエーション法による土壌浄化想定図

L2401-F1 株の炭化素材を用いた資材化や DPAA 分解野外実証試験は今後の研究課題であるが、南京土壌研で無機ヒ素吸収実証試験が成功したシダ植物との組み合わせによる DPAA 汚染土壌の浄化技術は、安全、安価な技術として、ハルバ嶺など OACW 埋設地への応用が期待できる。現地実証試験を行なう際には、現場の土壌および気象条件等に詳しい中国人研究・技術者との連携が不可欠である。

③　処理作業終了後の跡地の化学的浄化

長期にわたり埋められた化学砲弾等の埋設地は、砲弾等中の化学剤の漏洩による汚染とともに、廃棄作業による汚染が引き起される可能性がある。汚染物質はびらん剤のマスタードやルイサイトの外に、催涙剤の DC や DA であるが、これらが分解して土壌に残留したヒ素化合物も浄化の対象となる。

これまで汚染土壌を浄化した実施例としては、神奈川県寒川町での浄化技術が参考となる。

１） 汚染土壌中の化学剤は水酸化ナトリウム等にて中和処理で分解させる。

２） ルイサイトとDC、DAから発生して土壌中に残留するヒ素については、土壌を（ロータリー）キルンにて空気気流下で500 ℃以上にて加熱する。この操作により、残留ヒ素が三酸化ヒ素（As_2O_3、沸点465℃）まで酸化されるとともに、蒸発してキルンの後部に配置した排ガス処理装置にトラップすることができる。これにより土壌中のヒ素含有量を基準以下とする。

３） なお、土壌中の残留ヒ素が溶出基準を超える場合は、生石灰（酸化カルシウム）等を混合することにより土壌からのヒ素の溶出量を抑制することも可能である。

以上のように、様々な手段を活用して、土壌中の化学剤やそれらから派生するヒ素を環境への影響を低減させる事例は蓄積されている。しかし、遺棄化学兵器の場合は化学兵器の埋設と保管の数量が膨大であり、これまでの日本国内での処理・処分と規模が異なること念頭にいれて事業を進めることが必要といえる。

また、将来の跡地の環境修復作業には、下記のような準備を進めておくことが望ましいと考えられる。

１） 汚染された土壌等の汚染源の種類と定量的な２次元地表面～地中深度まで含めた３次元の汚染マップの作製。
２） 事業開始前の本来の自然起源のヒ素等の濃度マップの入手と推定評価。
３） 汚染回復のための土壌環境基準値の設定（中国では現在でも土壌汚染の環境基準値が示されていない）。
４） 汚染土壌の浄化手法について①候補技術の収集と整理、②有力候補技術に対する小規模な基礎的データの実施（パイロット試験）並びに③技術の長短所比較。
５）土壌中ヒ素の旧軍化学兵器由来か現地自然環境起源かを同定する技術の確立。

(5) その他のリスク因子

① 爆発リスク関係

標記の件に関連、関心がある全ての科学者、技術者、研究開発管理者、作業者、業務管理者、事業者ほか社会一般に対し、以下のとおり報告する。

旧日本軍の化学兵器には、伝爆薬や炸薬としてピクリン酸が使用されているものが多い。ピクリン酸を含む弾薬の発火・爆発性等の取扱時における危険性についての研究は、旧工業技術院物質工学工業技術研究所極限反応部ならびにこれを継承して平成14年４月に設立された産業技術総合研究所爆発安全研究センターで実施され、その成果はすでに学術会議報告書等に紹介されている。[32][33][34] ピクリン酸は金属と接触すると金属塩が生成し、特に重金属塩は摩擦・衝撃等に鋭敏であることから、鉄塩等についての生成機構、外部刺激等に対する危険性評価の総合的研究も並行して行わ

れ、同報告書に掲載されている。

ハルバ嶺の旧日本軍の遺棄化学兵器埋設地域には、化学兵器とは異なる大型の不発弾や未使用弾が埋設されている可能性がある。日中政府間の取決めにより、ハルバ嶺で発掘される旧日本軍の遺棄化学兵器以外の埋設物は、すべて中国側で処理することになっている。しかし、発掘を行い、発掘したすべての砲弾等の鑑定を正確に行い、できればダブルチェックの上で日本側処理対象外の埋設物を中国側に引き渡す間は、そうした不発弾なども日本側で扱わざるを得ない。例えば 500 ポンド（250 kg弾に相当）級の不発弾の場合、爆発が起こると周囲の遺棄埋設化学弾への殉爆危険性ほか、広範囲の被害が想定される。老朽・遺棄化学兵器処理に関してのこれまでの報告書では、大型の不発弾等に対しての扱い、危険性、爆発威力等に関しては記載されていない。沖縄では、現在でも第二次大戦中の大型の爆弾や砲弾が不発弾として発見され、近隣住民の避難対策措置後、自衛隊による発掘・移動・処理が行われている。近年の内閣府沖縄不発弾等対策協議会専門部会ワーキングチーム報告書[35]に、250 kg爆弾（爆薬量：TNT、121 kg 相当）が爆発した場合の計算機シミュレーションが様々な角度で行われ、近隣建物等の被害が予測されており、近隣住民の避難対策も提案されている。これまで検討されてきた化学弾等、化学兵器に使用されている火薬類の量は多くとも 10kg 程度[14]である。100kg を超える大型の不発弾が爆発した場合、周囲への影響は広範におよび、爆風、地震動の他、弾殻破片が高速飛翔し周囲へ被害及ぼすことが想定される。大型不発弾の存在が想定される場合、沖縄の不発弾処理対策を参考にして、遺棄化学兵器処理作業を行うことが適切と考えられる。

②　地震リスク

標記の件について関連、関心がある全ての科学者、技術者、業務管理者、事業者、防災専門家ほか社会一般に対し、以下のとおり報告する。[36][37]（付録６）

ア　ハルバ嶺処理場がある延辺州に於ける地震の状況

吉林省延辺朝鮮族自治州の地震活動は、日本と比較すると極めて少ない。ハルバ嶺処理場を中心とするおよそ 100　km の範囲で見ると、周辺に大きな被害を及ぼすような、マグニチュード(M)６以上で比較的震源の浅い地震（いわゆる直下型地震）は、西暦 1900 年以後では、1902 年に M6.6 の地震が１回報告されているだけである。但し、ハルバ嶺を含む地域では縦横に断層の存在が確認または推定されており[38]、中国地震局の発行する今後 50 年間の地震による揺れの強さ（最大加速度）の予測地図によればハルバ嶺周辺では 100 gal(gal は加速度の単位：cm/sec^2)程度の地震動が 10%の確率であり得るとされている。[例えば 35] 最大加速度と日本で使用している気象庁震度階級の関係は１対１に対応するものではないが、文献[40]などを参照すると、この地域では日本の震度階級で５強～６弱程度を想定したおいた

[14] （財）日本国際問題研究所軍縮・不拡散促進センターの「旧日本軍保有化学砲弾等図面集、平成 10 年４月（改定)」によれば、旧日本軍には最大 50kg の投下化学弾があるが、内部の爆薬量は 2kg 程度である。

方が良いと思われる。また地震対策が不十分な古い建物が多い市街地では、震度５弱程度の中規模地震でも相当の被害が生ずることがある。なお、延辺州では東日本大震災があった2011年に地方法案「延辺朝鮮族自治州防震減災条例」（以下、新条例）を制定し、多方面の地震防災対策を講じている。［41］ また注意すべき点として、中国から発行されている地図集などでは周辺で２回の M7 級を含む６回の大規模地震が報告されているが[38]、そのうち５回は震源の深さ400～600 ㎞の深発地震であり、地図上に震央位置がプロットされていてもその周辺での被害は全くないものである。[39]

イ　ハルバ嶺処理場の耐震基準と事業継続計画

ハルバ嶺処理場の発掘・回収施設の地震対策は、日中協定に従い中国基準で設計、構築され、その中の処理プラントは日本国内の同種施設に準じて行われている。震度６弱程度と想定される同地最大級の地震では、日本の耐震基準に準じた処理設備に大きな被害が生じる可能性は低いと考えられる。しかし、万一想定を超える大規模震災が発生した場合に備え、人命や設備等の損失、付帯して発生するかもしれない環境汚染などを防ぎ、被害を最小限に留める方策が有用と考えられる。

また、本事業では、想定内の地震災害の発生に際して、処理業務の迅速な復旧を考慮したリスク対策が重要と考えられる。そのためには周到な事業継続計画[15]が必要である。熊本地震（2016年４月）や新潟県中越地震（2004年10月）などの事例に鑑み、処理場のみでなく、中国側が建設と運営を担当している周辺関連施設、周辺道路、電気、水道、熱水などのライフラインほかの耐震性や抗たん能力も考慮した事業継続計画の策定が有益である。処理システム本体に被害がなくても、周辺サブシステムの脆弱性が原因で操業再開が遅れることが懸念されるためである。省、市などの地方政府や軍など関係機関の防震減災計画と連係のとれた、処理場の地震災害緊急対応計画および事業継続計画の策定が望ましいと考えられる。

ウ　敦化市での直下型震災リスクへの対応

本事業の日本側要員は原則として敦化市街地の専用宿舎に居住し処理場へ通勤している。即ち、処理場の西北30 ㎞以上離れた敦化市街も、本事業の広域システムの一部である。敦化市街近傍には断層の存在が推定されており[38]、2011年新条例以前の建築物が多数存在するこの地域が震災に見舞われた場合、宿舎建物や居住する作業員らが無事でも、敦化市街がハルバ嶺処理場の策源地として機能しない事態が懸念される。直下型地震では予想外の被害が生じることがあり、処理場のみならず敦化市で直下型地震が発生した場合についても考慮しておく必要があるといえる。

---

[15] 用語の説明参照。

４　まとめ

分科会では、中国ハルバ嶺での遺棄化学兵器処理が本格化していることを受けて、処理の安全な進捗ならびに処理に伴う環境保全と回復を目標とした調査ならびに審議を行った。また、2015～2018 年開催の安全工学シンポジウムにおいて、海外の化学兵器処理の現状や、ヒ素の処理等の特定課題について専門家の講演と討議を行った。

本報告は、これら前期および今期の主な調査・審議結果を、公衆、並びに、社会一般と共有するために作成された。本報告の内容を要約すると以下のとおりである。

(1) 世界の化学兵器処理の現状

2018 年時点において化学兵器禁止条約締約国は 192 ヶ国であり、化学兵器保有国は申告し廃棄処理を行う義務を有する。化学兵器は、ストックパイル（保管されているもの）と地下や水中等に投棄されたノンストックパイルに区分され、前者はカテゴリー１の全申告量の 96.3%が処理されたが、後者は処理が遅れていることが判明した。

また、化学兵器処理の進行とともに危険・有害化学物質への関心が高まり、近年、関連した国際会議が開催されている。我が国も国内および海外での化学兵器処理で蓄積されたノウハウを基にして国際貢献することができると考えられる。

そして、国際機関である化学兵器禁止条約機関（OPCW）の近年の活動状況（ストックパイルならびに遺棄化学兵器処理）を紹介し、ストックパイルの９割以上が廃棄処理されたことから、OPCW が直面する今後の課題等を紹介した。

(2) 旧日本軍老朽・遺棄化学兵器処理における留意点

ヒ素対策：旧日本軍化学兵器に含まれるヒ素廃棄物について、世界のヒ素およびヒ素化合物の環境基準を調査し日本の基準値が最も厳しいことを指摘した。またヒ素廃棄物の処分方法として、世界で行われている地中処分、地表処分についての留意すべき点を論じ、ヒ素廃棄物の固化・安定化技術が重要なことを指摘した。

旧日本軍化学兵器廃棄処理に係る作業員の健康管理上の各種のヒ素対策について紹介し、特にヒ素暴露は発癌リスクが高く潜伏期間が 30 年程度と推定されているゆえ、作業後、30 年先を視野に入れた対策が必要であることを指摘した。

処理終了後の処理場跡地の環境保全に関して、ヒ素による土壌汚染の日米の環境基準ならびに土壌および地下水の有望な浄化技術（バイオレメディエーション）を紹介した。

これまで当委員会で検討されていなかった新たなリスク因子として、爆発リスク関係として、500 ポンド級（250 kg 弾相当）の大型不発弾が化学兵器と混在して埋設されている場合の安全上の留意点・対策、また、ハルバ嶺地区で想定すべき地震リスクについての調査・検討を行い、その対策を紹介した。

＜用語の説明＞

CHEMSEA プロジェクト

The Chemical Munitions Search & Assessment の略称。EU の「バルト海域プログラム 2007-2013」の資金を基に沿岸諸国の研究機関が中心となり 2011～2013 年に実施した研究プロジェクト。報告書は CHEMSEA Findings として公表されている。

CHEMSS2016

The Summit on Chemical Safety and Security 2016 の略称。2016 年 4 月にポーランド/キエルツェ市で開催。この種のサミットは世界初で、第一回にも係わらず、UN、EU、NATO、INTERPOL、OPCW 等多くの国際機関と中東、アフリカを含む 47 ヶ国・地域代表など、400 人以上が集まった。そのテーマは以下のように多岐に及んだ。

・事故時初期対応/ 緊急支援/ 緊急指令管理
・化学物質安全関連規制、輸送規制と業界自主基準
・サイバーセキュリティと産業用制御システムの信頼性
・危険化学物質の最新処理方法
・環境の安全性と環境影響評価
・地域住民の意識、責任、協力と対応
・国連安保理決議 1540/大量破壊兵器拡散防止関連
・セベソ III 指令/大規模事故災害安全基準
・国際協力体制

化学兵器関連物質略語一覧

略語	化学物質の名称	旧日本軍の呼称	備考
DA	ジフェニルシアノアルシン	あか剤	くしゃみ剤（嘔吐剤）。
DC	ジフェニルクロロアルシン	あか剤	くしゃみ剤（嘔吐剤）。
DF	メチルホスホニルジフルオリド	（保有せず）	GB（サリン）の前駆物質。
DPAA	ジフェニルアルシン酸	（呼称なし）	DAやDCの加水分解物。
GB	イソプロピルメチルフルオロホスホネート	（保有せず）	神経剤；サリンとして知られる。
QL	イソプロピルアミノエチルメチル亜ホスホン酸エステル	（保有せず）	VXの前駆物質。
VX	O-エチル-S-（2-ジイソプロピルアミノエチル）メチルホスホノチオラート	（保有せず）	神経剤。
マスタード	2,2'-硫化ジクロロジエチル	きい１号剤	びらん剤；イペリットとしても知られる。略号HD。
ルイサイト	2-クロロエテニルジクロロアルシン	きい２号剤	びらん剤；きい１号剤の一部に混合使用。略号L。

G7/Global Partnership Working Group（GPWG）

2016 年は日本が G7 の議長国であり、GPWG は１月と９月に２回東京で開催され、Chemical、Biological、Nuclear and Radiological の 3 sub-Working Group に分かれて討議が行われ

た。また、別にChemical sub-Working Groupが、４月と11月に日本以外でも開かれた。

事業継続計画

災害時に特定された重要業務が中断しないこと、また万一事業活動が中断した場合に目標復旧時間内に重要な機能を再開させ、業務中断に伴う諸般の悪影響から事業を守るための経営戦略。バックアップシステムの整備、バックアップオフィスの確保、安否確認の迅速化、要員の確保、生産設備の代替などの対策を実施する。Business Continuity Plan: BCP と略称する。単なる計画書ではなく、マネジメント全般を含むニュアンスで用いられる。

カテゴリー１およびスケジュール１化学兵器

カテゴリー１は締約国が申告する時に主に用いられる分類で、化学剤分類のスケジュール１およびそれを包蔵する弾殻等の部品、コンポーネントを含めた化学兵器として分類したもの。廃棄する段階をも規定したもので、締約後２年以内に廃棄を開始し、10年以内に完了するまでの段階ごとの達成率（%）などが決められている。カテゴリー２以下は１より短期間の廃棄が義務付けられ、2017年末現在すでに全量処理されている。

スケジュール１は化学剤の種類の定義で、条約に照らしてレベルの高い以下のものをいう。

１）化学兵器として開発、生産、取得、保有、または使用されたもの
（サリン、ソマン、タブン、VX、硫黄マスタード、窒素マスタード、ルイサイトなど）
２）上記１）と構造が似ているか毒性が同等程度のもの
３）あと１技術工程で上記１）を生産できる前駆物質（DF、QL、クロロサリンなど）

ストックパイルとノンストックパイル

化学兵器のうち、使用を目的としてストックされているものは、一般的にストックパイル（備蓄化学兵器）と呼ばれ、化学兵器禁止条約上は申告して廃棄の義務がある。一方、使用目的ではなく、海中や地下に投棄又は埋設されたものや、不発弾となったもの、更に遺棄化学兵器などはノンストックパイルと呼ばれ、積極的に探査・回収する義務は無い。しかし、一旦回収されればリカヴァード・ミュニション（回収弾）と称してストックパイルとは区別し、製造年代や効力の度合いに応じて廃棄せねばならない。

＜参考文献＞

[1] 遺棄化学兵器担当室、遺棄化学兵器処理事業、内閣府、2014 年. [http://wwwa.cao.go.jp/acw/index.html (cited 2018-Aug-24)].

[2] 遺棄化学兵器担当室、中国各地における発掘・回収事業について、内閣府、2017 年. [http://wwwa.cao.go.jp/acw/pdf/kaigi_17shiryo_1.pdf (cited 2018-Aug-24)].

[3] 遺棄化学兵器担当室、ハルバ嶺における事業について、内閣府、2018 年. [http://www.cao.go.jp/acw/pdf/kaigi_18shiryo_3.pdf (cited 2018-Aug-24)].

[4] Tang C. Destruction of Japanese Abandoned Chemical Weapons Discovered in China: Progress and Challenges. CWD2018 Conference Abstracts, London: Chemical Warfare Demilitarization Conference, 2018: 14.

[5] Novad J. The United States' Chemical Demilitarization Program: Stockpile Destruction in the States of Colorado and Kentucky. CWD2018 Conference Abstracts, London: Chemical Warfare Demilitarization Conference, 2018: 13.

[6] 北村竜介. 化学兵器等の処理における DAVINCH システムの最新の稼動状況. 安全工学シンポジウム 2015 予稿集: 日本学術会議総合工学委員会, 2015: 232-235.

[7] 武馬啓祐, 大淵靖規, 矢野和志, 蓑島邦臣. 加熱爆破方式による遺棄化学兵器の廃棄処理. 安全工学シンポジウム 2015 予稿集: 日本学術会議総合工学委員会, 2015: 240-251.

[8] 環境省、国内における旧軍毒ガス弾等に関する取組について、環境省. [http://www.env.go.jp/chemi/gas_inform/ (cited 2018-Aug-24)].

[9] 環境省、千葉市内で発見された化学弾の無害化処理に関するお知らせ、環境省、2012 年. [http://www.env.go.jp/chemi/gas_inform/local/chiba/progress.pdf (cited 2018-Aug-24)].

[10] JFE エンジニアリング株式会社都市環境本部環境プラント事業部 ACW プロジェクトチーム. 千葉市の事案における旧軍老朽化化学兵器の無害化処理について. 環境省, 2012. [https://www.env.go.jp/chemi/gas_inform/sonota_singi/gas/23_05/mat08-3.pdf (cited 2018-Aug-27)].

[11] 環境省, JFE エンジニアリング株式会社、旧軍老朽化化学兵器無害化処理施設のご案内、環境省, JFE エンジニアリング株式会社、2011 年. [https://www.env.go.jp/chemi/gas_inform/sonota_singi/gas/23_04/app01.pdf (cited 2018-Aug-24)].

[12] OPCW. EC-88/CRP.1 (25 April 2018) Draft Report of the OPCW on the Implementation of the Convention on the Prohibition of the Development, Production, Stockpiling and Use of Chemical Weapons and on their Destruction in 2017, Hague: OPCW, 2018.

[13] OPCW. OPCW deputy director general visit Russia to mark closure of Kiznir chemical weapons destruction facility. Hague: OPCW, 2017.

[www.opcw.org/news/article/opcw-deputy-director-general-visit-russia-to-mark-closure-of-kiznir-chemical-weapons-destruction-facility/(cited 2018-Aug-25)].
[14] OPCW. EC-83/5(11 November 2016) Report of the Eighty-Third Session of the Executive Council. Hague: OPCW, 2016. [https://www.opcw.org/fileadmin/OPCW/EC/ 83/en/ec8305_e_.pdf (cited 2018-Aug-25)].
[15] Krueger A. Destruction of Libya's Remaining Chemical Weapons Precursors. CWD2018 Conference Abstracts. London: Chemical Warfare Demilitarization Conference, 2018: 16,
[16] Pavlasek F. Update on Chemical Demilitarization Programs. CWD2018 Conference Abstracts. London: Chemical Warfare Demilitarization Conference, 2018: 11.
[17] OPCW. EC-84/DG.4 (23 November 2016) Note by the Director-general: Progress in the Elimination of the Syrian Chemical Weapons Programme. Hague: OPCW, 2016. [https://www.opcw.org/fileadmin/OPCW/EC/84/en/ec84dg04_e_.pdf (cited 2018-Aug-25)].
[18] Pavlasek F. Update on Chemical Demilitarization Programs. CWD2018 Conference Abstracts. London: Chemical Warfare Demilitarization Conference, 2018: 11.
[19] OPCW. Syria and the OPCW. OPCW, 2018. [https://www.opcw.org/special-sections/syria/ (cited 2018-Aug- 25)].
[20] OPCW. Report: Lessons Learned from the OPCW Mission in Syria. OPCW, 2015. [https://www.opcw.org/fileadmin/OPCW/PDF/Lessons_learned_from_the_OPCW_Mission_in_Syria.pdf (cited 2018-Aug- 25)].
[21] OPCW. C-22/4 (29 November 2017) Report of the OPCW on the Implementation of the Convention on the Prohibition of the Development, Production, Stockpiling and Use of Chemical Weapons and on their Destruction in 2016. Hague: OPCW, 2017. [https://www.opcw.org/fileadmin/OPCW/CSP/C-22/en/c2204_e_.pdf (cited 2018-Aug-25)].
[22] ATSDR. Toxicological Profile for Arsenic. Atlanta: U.S. Department of Health and Human Service Public Health Service Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2007. [https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp2.pdf (cited 2018-Aug- 25)].
[23] IARC. Arsenic and Arsenic Compounds. Overall Evaluations of Carcinogenicity (IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk of Chemicals to Humans suppl. 7). Lyon: International Agency for Research on Cancer, 1987: 100-106.
[24] ACGIH. Biological Exposure Indices (BEI®) Introduction. Cincinnati: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2016.

[http://www.acgih.org/tlv-bei-guidelines/biological-exposure-indices-introduction (cited 2018-Aug- 25)].
[25] Flanagan SV, Johnston RB, Yan Z. Arsenic in Tube Well Water in Bangladesh: Health and Economic Impacts and Implications for Arsenic Mitigation. Bulletin of the World Health Organization. Geneva: WHO, 2012. [http://www.who.int/bulletin/volumes/90/11/11-101253/en/ (cited 2018-Aug- 25)].
[26] Sun G, Liu J, Luong TV, Sun D, Wang L. Endemic Arsenicosis: A Clinical Diagnostic Manual with Photo Illustration. New York: Unicef, 2003. [https://www.unicef.org/eapro/Endemic_arsenicosis.pdf (cited 2018-Aug- 25)]
[27] 石井一弘, 作田学. 有機ヒ素中毒の発見をめぐって. 脳と神経 2003; 55, 12: 1065-1072.
[28] Harada N, Takagi K, Baba K, Iwasaki A. Biodegradation of diphenylarsinic acid to arsenic acid by novel soil bacteria isolated from contaminated soil. *Biodegradation* 2010; 21: 491-499.
[29] Maki T, Tsutsumibata R, Tunekawa D, Kakimoto T, Hasegawa H, Ueda K. Effects of Chemical Species and Microbial Activity on Arsenic Accumulation in the Hyperaccumulator Fern. Journal of Ecotechnology Research 2007; 13: 15-19.
[30] 髙木和広ら. 植物防疫 2003; 57, 9: 24-28.
[31] 髙木和広. 第3編, 第1章, 第3節 複合細菌による難分解性農薬の分解・無機化技術の開発と汚染源場への適用. 土壌・地下水汚染の浄化および修復技術. NTS, 2008: 148-160.
[32] 日本学術会議 荒廃した生活環境の先端技術による回復研究連絡委員会、提言「遺棄化学兵器の廃棄技術に対する科学的リスク評価と管理を目指して」平成 14 年 11 月 26 日.
[33] 日本学術会議 荒廃した生活環境の先端技術による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、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」平成 17 年３月 23 日.
[34] 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、提言「老朽・遺棄化学兵器の廃棄処理の実施における保安対策」平成 23 年６月２日.
[35] 沖縄不発弾等対策協議会 専門部会 ワーキングチーム、「不発弾の処理時等における安全化対策等の検討結果報告書（案）平成 27 年３月. [http://www.dc.ogb.go.jp/Kyoku/kengyo/fuhatudan/H27/kyogikai_first/H27_1st_05_3anzentaisaku_report_proposed.by_wt.pdf (cited 2018-Aug- 25)].
[36] プロジェクトマネジメント協会. プロジェクトマネジメント知識体系ガイド（PMBOK®）, Newtown: Project Management Institute, 2013.
[37] 中島秀隆, 浅見淳一. プロジェクトマネジメント理論編: 総合法令出版, 2009.
[38] 吉林省地図集編纂委員会. 吉林省地図集. 北京: 中国地図出版社, 2009.

[39] 桑原保人，石川有三．中国吉林省周辺の地震火山リスクについて．日本学術会議「老朽および遺棄化学兵器の廃棄に係るリスク評価とリスク管理に関する検討」小委員会に於ける講演資料、2017 年２月 13 日．
[40] 藤本一雄，翠川三郎．日本地震工学会論文集 2010；10，2：1-10.
[41] 延辺朝鮮族自治州地方志編纂委員会．延辺年鑑2012．長春：吉林人民出版社，2012.
[42] Chemical Munitions, Search and Assessment project. CHEMSEA Findings. Sopot: Institute of Oceanology of the Polish Academy of Sciences, 2013.
[43] United Nations. Resolution adopted by the General Assembly on 20. December 2013, on the report of the Second Committee (A/68/438). [https://www.unisdr.org/files/resolutions/ARES68211E.pdf (cited 2018-Aug- 25)]
[44] HELCOM CHEMU. Report on Chemical Munitions Dumped in the Baltic Sea, Report to the 16th Meeting of Helsinki Commission 8-11 March 1994 from the Ad Hoc Working Group on Dumped Chemical Munition (HELCOM CHEMU). Copenhagen: Danish Environmental Protection Agency, 1994. [http://www.helcom.fi/Lists/Publications/Report%20on%20chemical%20munitions%20dumped%20in%20the%20Baltic%20Sea.pdf (cited 2018-Aug- 26)].
[45] HELCOM CHEMU. Final Report of the ad hoc Working Group on Dumped Chemical Munition (HELCOM CHEMU) to the 16th Meeting of the Helsinki Commission (March 1995). Helsinki: Baltic Marine Environment Protection Commission, 1995. [http://www.helcom.fi/Lists/Publications/Final%20Report%20of%20the%20ad%20hoc%20Working%20Group%20on%20Dumped%20Chemical%20Munition%20(HELCOM%20CHEMU).pdf (cited 2018-Aug- 26)].
[46] Marine Technology Society Journal 2009; 43, 4: Covers.
[47] Rapsch HJ, Fischer U. Munition im Fischernetz. Taschenbuch: Isensee Florian, 2000: 16.
[48] HELCOM. Chemical Munitions Dumped in the Baltic Sea. Baltic Sea Environment Proceedings No.142. Helsinki: HELCOM-Baltic Marine Environment Protection Commission, 2013: 54.
[49] Beldowski J, Lang T, et.al. Decision Aid for marine munitions-Baltic approach to sea dumped chemical weapons. Presentation at CWD2018. London: Chemical Warfare Demilitarization Conference, 2018.
[50] Chemical Munitions, Search and Assessment project. CHEMSEA Findings. Sopot: Institute of Oceanology of the Polish Academy of Sciences, 2013: 43-52.
[51] OPCW-UN Joint Investigative Mechanism. Third report of the Organization for the Prohibition of Chemical Weapons-United Nations Joint Investigative Mechanism. New York: United Nations Security Council, 2016. [http://www.securitycouncilreport.org/atf/cf/%7B65BFCF9B-6D27-4E9C-8CD3-CF6E4FF96FF9%7D/s_2016_738.pdf (cited 2018-Aug- 26)].

[52] OPCW Secretariat. Note by the Secretariat: Detailed Verification Measures for the Application of usability Criteria for Chemical Weapons produced between 1925 and 1946. Hague: OPCW, 2000. [https://www.opcw.org/fileadmin/OPCW/S_series/2000/en/S_231_2000-EN.pdf (cited 2018-Aug- 26)].
[53] United States Environmental Protection Agency. Class I Underground Injection Control Program: Study of the Risks Associated with Class I Underground Injection Wells. Washington: US EPA, 2001. [https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/study_uic-class1_study_risks_class1.pdf (cited 2018-Aug- 26)].
[54] Ozarslan A, Martens PN, Olbrich T, Rohrrlich M. Underground Disposal of Hazardous Wastes in German Mines. Ankara: 17th Mining Congress and Exhibition of Turkey-IMCET 2001, 2001. [http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/ac48664b7886cf4_ek.pdf (cited 2018-Aug- 27)].
[55] GRS. Workshop; Underground Disposal of Hazardous Waste. Cologne: Gesellschaft fur Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH, 2010.
[56] K+S Kali GmbH. [http://www.ks-entsorgung.com/en/pdf/acceptance_criteria_utd_zielitz.pdf. (cited 2018-Aug- 26)].
[57] Krause E, Ettel VA. American Mineralogist 1988; 73: 850 – 854.
[58] 環境省、最終処分場跡地形質変更に係る施行ガイドラインについて、環境省、平成17年6月6日.
[59] Twidwell LG, Mehta AK. Disposal of arsenic bearing copper smelter flue dust. Nuclear and Chemical Waste Management 1985; 5, 4: 297 -303.
[60] Twidwell LG, Plessa KO, Comba PG, Danhke DR. Removal of arsenic from wastewaters and stabilization of arsenic bearing waste solids: Summary of experimental studies. J. Hazardous Materials, 1994; 36, 1: 69-80.
[61] US Patent. Method and Composition for Sequestration of Arsenic. Patent No. US 2014/0107389 A1, Pub. Date: Apr. 17 2014 (公開), Filed: Sept 4, 2013 (出願).
[62] 食品安全委員会、食品中のヒ素、化学物質・汚染物質評価書、内閣府、2013年. [http://www.fsc.go.jp/fsciis/evaluationDocument/show/kya2009031900k (cited 2018-Aug- 26)].
[63] 食品安全委員会、英国食品基準庁(FSA)、高濃度の無機ヒ素を含むヒジキの摂取を避けるようにという助言を再確認、内閣府、2010 年. [http://www.fsc.go.jp/fsciis/foodSafetyMaterial/show/syu03180050160 (cited 2018-Aug- 26)].
[64] Aposhian HV1, Zakharyan RA, Avram MD, Sampayo-Reyes A, Wollenberg ML. A review of the enzymology of arsenic metabolism and a new potential role of

hydrogen peroxide in the detoxication of the trivalent arsenic species. Toxicol Appl Pharmacol 2004; 198: 327-335.
[65] 山内博, 高田礼子. 金属および金属化合物の取り扱い；有害金属と生体影響、健康管理. 産業医ガイド. 日本医事新報社, 2016: 187-193.
[66] 岸田伸幸, 中国吉林省延辺州の産業開発に関する調査研究―農林業から観光業への山林資源利用遷移に伴う事業創造環境変化を中心として―. 事業創造大学院大学紀要 2018; 9, 1: 169-184.
[67] 李徳潤主編. 延辺朝鮮族自治州地名通覧. 長春: 吉林大学出版社, 2012.
[68] 高璋・盛連喜主編. 中国長白山動物. 延吉, 北京: 延辺人民出版社, 北京科学技術出版社, 2002.
[69] 祝延成, 厳仲鎧, 周守標主編. 中国長白山植物. 延吉, 北京: 延辺人民出版社, 北京科学技術出版社, 2003.
[70] 金石柱主編. 長白山地区旅遊資源与可持続発展. 延吉: 延辺大学出版社, 2011.
[71] Li J, Wang Y, Chen H, Lin L. Risk assessment study of fire following an earthquake: a case study of petrochemical enterprises in China. Nat. Hazards Earth Syst. Sci 2014: 14, 4: 891-900.
[72] Takahashi K. ACW Destruction Projects in China. Presentation at the CWD2014. London: Chemical Warfare Demilitarization Conference, 2014.
[73] 藤原修三. 遺棄・老朽化化学兵器の処理技術. 平成 27 年度工業技術院主要成果報告書: 産業技術総合研究所, 2016 年.
[74] 武藤啓祐ら. 加熱爆破方式による遺棄化学兵器の廃棄処理. 安全工学シンポジウム 2015 講演予稿集: 日本学術会議, 2015.
[75] 北村竜介. 化学兵器の処理における DAVINCH 処理システムの最新の稼動状況. 安全工学シンポジウム 2015 講演予稿集: 日本学術会議, 2015.
[76] Takahashi N. Disposal of Fragment after Destruction. Presentation at the CWD2011. Interlaken: Chemical Warfare Demilitarization Conference, 2011.
[77] Asahina J. Enlarged Application of Davinch to the Special Munitions not Suitable for OB/OD. Presentation at the CWD2012. Glasgow: Chemical Warfare Demilitarization Conference, 2012.
[78] 朝比奈潔. 化学兵器処理に関するヨーロッパの状況. 安全工学シンポジウム 2016 講演予稿集: 日本学術会議, 2016.
[79] Asahina J. Recovery of Chemical Weapons from the Sea and Arsenic Toxicity in Marine Species. Presentation at the CWD2008. Interlaken: Chemical Warfare Demilitarization Conference, 2008.
[80] Asahina J, Shirakura T. Detonation chamber of chemical munitions - Its design philosophy and operation record at Kanda, Japan. Proceeding of ASME Pressure Vessels and Piping Div. Conference, July, 2006, Vancouver: ASME, 2006.

[81] Garrett T. Static Detonation Chamber. Presentation at the CWD2017. London: Chemical Warfare Demilitarization Conference, 2017.
[82] DYNASAFE. Demil systems - Dynasafe. www.dynasafe.com/demil-systems [Video]: Dynasafe, 2015 [http://www.dynasafe.com/demil-systems (cited 2018-Aug- 26)].
[83] Stock T, et al. Dynasafe mobile d solution for new non-stockpile chemical weapons. Presentation at the CWD2017. London: Chemical Warfare Demilitarization Conference, 2017.
[84] Kitamura R. Recovering and destruction of chemical weapons, a relook into Kanda operation. Presentation at the CWD2016. London: Chemical Warfare Demilitarization Conference, 2016.
[85] Asahina JK, Shimoyama S, et al. How Safe is Safe Enough for Chemical Weapons Destruction System? Marine Technology Society Journal 2012; 46, 1: 92-101.
[86] Asahina JK, Tamai K, et al. Detection System of Chemical Weapons in the Sea and New Diving Equipment against HD+L. Presentation at the CWD2003. Prague: Chemical Warfare Demilitarization Conference, 2003.
[87] Asahina JK, Shimoyama H, et al. Detection, Recovery and Destruction System for Sea-Disposed Chemical Munitions, Port Kanda, Japan. Marine Technology Society Journal 2009; 43, 4: 116-126.
[88] Asahina JK, Hishida T, Outline of Destruction of Chemical Weapons of Lake Kussharo Project in Japan. Presentation at the CWD2001. Gifu: Chemical Warfare Demilitarization Conference, 2001.
[89] Sunami A. Japan’s ACW Destruction Projects in China-Progress and Challenges. CWD2018 Conference Abstracts, London: Chemical Warfare Demilitarization Conference, 2018: 12.

＜参考資料１＞審議経過

平成27年

３月 11 日　第 23 期「老朽および遺棄化学兵器の廃棄に係るリスク評価とリスク管理に関する検討」小委員会（第１回）

役員の選出、今期の活動方針について

９月２日　小委員会（第３回）

今期の目標について

12 月　８日　小委員会（第４回）

今期の目標について

平成28年

６月６日　小委員会（第６回）

今期提言等とりまとめについて

８月 22 日　小委員会（第７回）

今期表出文書のとりまとめについて

10 月 17 日　小委員会（第８回）

今期表出文書のとりまとめについて

12 月　１日　小委員会（第９回）

今期表出文書案について

平成29年

２月 13 日　小委員会（第 10 回）

報告書案について

４月 24 日　小委員会（第 11 回）

報告書案について

８月 24 日　小委員会（第 12 回）

来期の活動方針について

12 月 25 日　工学システムにおける安全・安心・リスク検討分科会（第１回）
役員の選出、今後の進め方について

平成 30 年

４月 26 日　第 24 期「老朽及び遺棄化学兵器の廃棄に係るリスク評価とリスク管理に関する検討」小委員会（第１回）
第 24 期の活動方針について、表出文書編纂について

６月 26 日　小委員会（第２回）
報告書案について

９月 12 日　工学システムに関する安全・安心・リスク検討分科会（第３回）
報告書案について検討

10 月９日　小委員会（第３回）
報告書案について承認

平成 31 年

3 月 20～26 日　工学システムに関する安全・安心・リスク検討分科会（第４回）
報告案「老朽・遺棄化学兵器廃棄の安全と環境の保全に向けて」
（メール審議にて承認）

７月 25 日　　日本学術会議幹事会（第 280 回）
報告案「老朽・遺棄化学兵器廃棄の安全と環境の保全に向けて」について承認

＜参考資料２＞シンポジウム開催

平成 27 年７月３日　安全工学シンポジウム 2015、オーガナイズセッション 11
「老朽および遺棄化学兵器の廃棄に係るリスク評価とリスク管理」
OS-11-1　DAVINCH システムの最新の稼動およびメンテナンス状況
OS-11-2　化学兵器の環境問題に関するヨーロッパの動き
OS-11-3　加熱爆破方式による遺棄化学兵器の廃棄処理
OS-11-4　ヒ素の扱い

平成 28 年７月７日　安全工学シンポジウム 2016、オーガナイズセッション４
「老朽および遺棄化学兵器の廃棄に係るリスク評価とリスク管理」
OS-4-1　化学兵器―Stockpile から Non-stockpile へ―
OS-4-2　TNT 汚染土壌のバイオレメディエーション
OS-4-3　職業性ヒ素暴露の生物学的モニタリング法と無機ヒ素の無毒化処理への実践的応用
OS-4-4　化学兵器の廃棄から発生するヒ素含有廃棄物の処理と処分

平成 29 年７月６日　安全工学シンポジウム 2017、オーガナイズセッション８
「老朽・遺棄化学兵器廃棄の安全と環境の保全」
OS-8-1　化学兵器に関する欧米の状況
OS-8-2　中国における遺棄化学兵器の処理事業について
OS-8-3　老朽・遺棄化学兵器の爆破処理
OS-8-4　化学兵器の廃棄に伴うヒ素の処理・処分技術
OS-8-5　職業性・環境性・食事由来ヒ素曝露からの生体影響と生物学的モニタリング法

平成 30 年７月６日　安全工学シンポジウム 2018、オーガナイズセッション 09
「老朽・遺棄化学兵器廃棄の安全と環境の保全」
OS-09-1　世界の化学兵器処理状況
OS-09-2　中国における遺棄化学兵器処理事業について
OS-09-3　遺棄化学兵器処理事業の安全と運営について
OS-09-4　老朽化・遺棄化学兵器の制御爆破処理
OS-09-5　第 24 期報告書の概要

６　付録

＜付録１＞　バルト海における海洋投棄化学兵器の現状

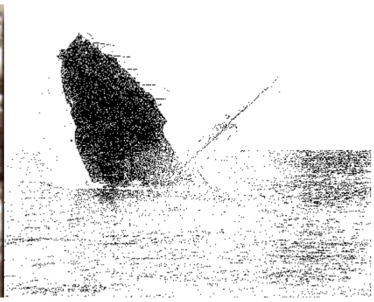
１　バルト海沿岸の最近の動向

第二次世界大戦後に連合国によりドイツで押収、バルト海に大量に投棄されたドイツ製化学兵器（付図 1-2～1-3）に関しては、魚網に掛かるなどして沿岸諸国の漁民の被害が報告されるにおよび、2011 年、バルト海の沿岸諸国は、CHEMSEA プロジェクト[16]を立ち上げ、化学兵器の存置地域とその種類および海洋生物への影響を調査し報告書[42]にまとめ、海洋生物への影響を明らかにした。これを受けて 2013 年 12 月の国連総会は海洋汚染に関する決議[43]を採択した。その後 2015 年に開始された DAIMON プロジェクト[17]はバルト海沿岸の 5 地点を選び、その特殊性を考慮した環境調査、リスク評価を行い、環境改善の具体的方法と関係官庁の意思決定支援システムを 2019 年に提供すべく進行中である。

これと並行して、ポーランド政府は排他的経済水域内の化学兵器を安全に回収・処理する小規模のパイロットプロジェクトを計画している。これと DAIMON の成果を基に合理的な環境回復がバルト海全域に展開されることが期待される。

２　バルト海への化学兵器投棄の歴史的背景と実態

ポツダム会議において、英、米、ソはドイツの保有する化学兵器を海洋投棄することに決めた。当時、化学剤は海水により中和されると考えられ、また安価な方法だったからである。3 ヶ国の指揮の下、押収された化学兵器は Skagerrak 海峡とバルト海の予め指定された海域に指定ルートで運搬し投棄された。Skagerrak 海峡では 170,000 トンが船ごと沈められ、バルト海では、50,000 トン（化学剤にして 15,000 トン）が Bornholm Basin と Gotland Deep の指定海域に単体もしくはコンテナごと投棄された。[44][45] 付図 1-1～1-3 に当時の投棄状況を示す。[46][47]



付図 1-1　舷からの直接投棄　付図 1-2　廃船への積載作業　付図 1-3　廃船ごとの廃棄

また、ドイツは大戦末期に自らキール沖の Little Belt に投棄したが、水深が浅かった

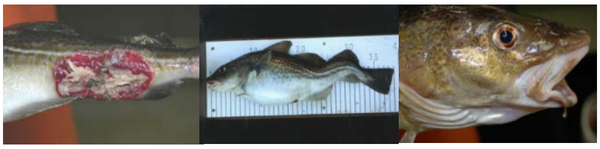
[16] 用語の説明を参照
[17] Decision Aid for Munition Management の略称。EU の地域プロジェクトで、2015～2019 年に亘り実施される。

ため、戦後回収し上述の３海域に再投棄した。ポーランドのGdansk Deepは指定海域ではなかったが、1954年マスタード弾が漁網に掛り投棄海域と判明した。[48] また、投棄は指定海域ではなく、指定ルートや、指定ルート以外の最短コースを航行中に行うこともあった。投棄は1950年代まで続いたが、記録は正確ではなく、実態は未だ十分に把握されていない。付図1-4に判明している投棄海域を示す。

付図 1-4　判明している投棄サイト[49]

３　バルト海の海洋生物への影響

鱈を対象とした健康パラメター調査では、化学兵器投棄海域と他のエリアとに顕著な差は認められないが、頭肝臓病,リソソームと呼ばれる細胞小器官を包む生体膜の安定性,遺伝毒性バイオマークなどいくつかの魚病インデックスにおいては、非投棄エリアに比べ、投棄海域、中でも特にBornholm Basinでの罹患率が高かった。[50] 付図1-5に鱈のサンプル例を示す。



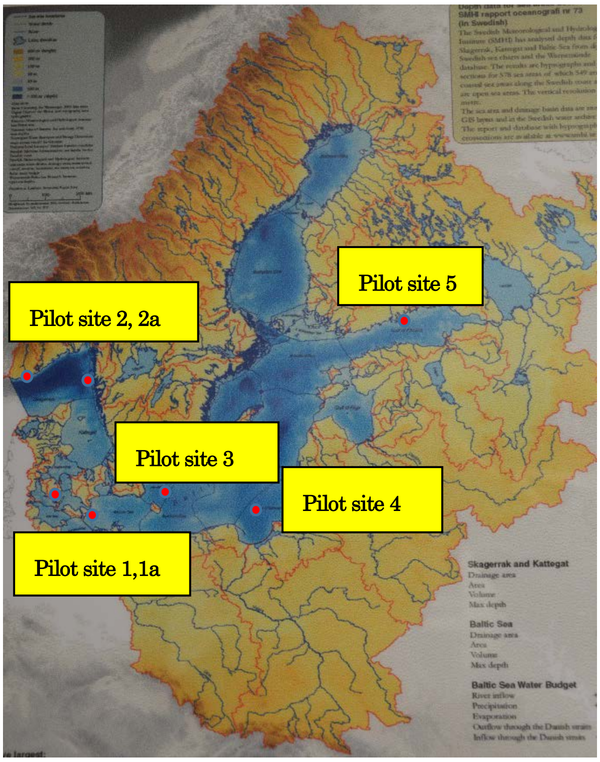
付図 1-5　採取された鱈の異常サンプル例

４　バルト海沿岸国の環境調査に選定されたパイロットサイト

DAIMONプロジェクトでは環境調査のパイロットサイト（PS）として以下の５サイトを選び、投棄弾の現状調査、漏洩のモデル化、堆積物と海水のサンプリング、生物相影響評価を行う。主要沿岸国の排他的経済水域内の投棄サイト４ヶ所に加え、リファレンスとして投棄海域でないFinland GulfもPSに選ばれている。

PS 1,1a　Little Belt（リトルベルト海峡南方の入口：ドイツ）
PS 2,2a　Skagerrak（スカゲラク海峡：スウェーデン）

PS 3　　Bornholm Basin（ボーンホルム海盆：デンマーク）
PS 4　　Gdansk Deep（グダニスク海淵：ポーランド）
PS 5　　Finland Gulf（フィンランド湾:フィンランド）



付図 1-6　パイロットサイト（PS）の位置

＜付録２＞　化学兵器禁止機関(OPCW)の活動

１　OPCW の概要

1997 年４月 29 日に発効した化学兵器禁止条約（CWC）に基づき設立された 2016 年度の職員数約 500 名、年度予算約 68.1 百万ユーロ（約 81.2 億円；１ユーロ＝119.30 円換算）、締約国 192 ヶ国の国際機関（本部：オランダ王国ハーグ市）で、締約国の安全保障と国益を担保しつつ化学兵器の廃棄と非生産に関する信頼性・透明性のある検証の実施、化学兵器に対する防護と援助の提供、化学の平和利用についての国際協力、および締約国の増加と条約履行能力の向上を主眼として活動している。化学兵器は締約国が実施主体として廃棄し、OPCW は締約国の廃棄を現地査察により検証する。

２　OPCW 締約国での化学兵器廃棄および処理の状況

１）　OPCW は、CWC の締約国が保有するストックパイル(stockpile CW)に関しては、同条約検証付属書 IV 条(A)に基づき各締約国からの申告内容を現地査察によって検証するとともに、当該年度に計画された化学兵器の廃棄状況を現地査察（常駐）によって監視(monitoring)している。また、老朽・遺棄化学兵器(old and abandoned CW)に関しては、同条約検証付属書 IV 条(B)に基づき、加盟各国から年次申告された回収・保管および廃棄の状況を現地査察によって検証している。また、廃棄に係わる最新の技術動向を把握するため、保有国や廃棄関連企業が最新技術を紹介する CWD2018 等の年次フォーラムに参加している。[16]

２）　ストックパイルに関しては、2017 年 12 月末の時点でこれまでに申告された合計 72,304 トンのうちの約 96.3%（カテゴリー１）の廃棄を現地査察（常駐）によって検証し、今後も 2022 年に予定されている廃棄完了に向けて残る米国に対する検証を継続する。

３）　米国は、現在稼働中のコロラド州 Pueblo 廃棄施設（中和法＋バイオ分解法でマスタードを処理）に加えて 2017 年にケンタッキー州 Blue Grass 廃棄施設（中和法＋超臨界水による酸化処理法により GB,VX,マスタードを処理）の試運転を開始した。2018 年中にも実処理を開始し廃棄を加速する計画である。[5][14]

また、ロシアは、約 5,745 トンの神経剤などを Udmurt 共和国 Kiznir 廃棄施設において中和処理し、2017 年９月にロシア国内の全ての化学兵器の廃棄を完了した。[12][14][13]

リビアに関しては、国内の治安上の懸念から未処理であった原料化学物質を国外で処理をすることが 2016 年６月に OPCW および国連安保理で決定され、ドイツの Munster の GEKA 処理施設において、2016 年に燃焼法により 2-chloroethanol が、プラズマアーク法により tributylamine が処理された。2017 年には特別に設けられた加水分解法によ

り phosphorous trichloride、および thionyl chloride が廃棄され、これをもってリビアの全ての化学兵器の処理が完了した。[12][15]

化学兵器の処理は当事国の責任であるが、処理経費についてリビアからの要請を受けて OPCW 締約国からの資金提供を募り、4ヶ国から 84.8 万ユーロ（前述のレートで約1億 100 万円が提供された。[14]

4） シリアの化学兵器処理（OPCW-UN Joint Mission）については、シリアが 2013 年9月 14 日に CWC に加盟した際に提出された保有する化学兵器等に関する冒頭申告を受け、該当地域が「紛争地域」であったため、申告内容の検証と使用の疑義に係わる調査を OPCW と国連との Joint Mission として実施し、これまでにシリア国内で一部の原料化学物質や未充填砲弾等、移動式および固定式製造施設（27 ヶ所のうち 25 ヶ所）を検証し廃棄した。[16][17]

シリアはサリン自体を保有するのではなく毒性の低い前駆物質である DF (methylphosphonyldifluoride)と汎用化学原料である isopropanol を使用の直前に混合しサリンを合成する「バイナリー」方式を採用していたので、保有していた DF とそれらの主要な原料である化学物質およびマスタードを国外で処理をすることが OPCW および国連安保理で決定された。マスタードや DF が CWC により他国への移転が禁止されていることから、公海上にて処理装置（苛性ソーダや塩素酸ナトリウム等を使用する2台の野外展開式加水分解処理システム）を搭載した船上（公海上）にて 600 トンが処理され、発生した残渣および廃液はドイツおよびフィンランドに移送されて産業廃棄物処理施設にて最終処理された。[19][20] また、それ以外の原料化学物質は英国および米国の産業廃棄物処理施設にて処理された。

化学兵器の処理は当事国の責任であるが、処理経費についてシリアからの要請を受けて OPCW 締約国からの資金提供を募り、11 ヶ国＋EU から 7.8 百万ユーロ（約 9.3 億円）が提供された。[14]

なお、アレッポ（Aleppo）周辺等の化学物質の兵器目的での使用疑惑に関し、国連と共同して現地調査(Fact Finding Mission)を 2016 年 10 月までに実施した。[51]

5） 老朽・遺棄化学兵器は、それらが常続的に発見されるため、締約国による年次申告に基づき OPCW が申告内容と処理状況の現地査察を実施している。

老朽化学兵器に関しては、現在でも年間約 2,000 発が発見されるとされるベルギーおよび第一次世界大戦の戦場であったドイツやフランス、旧射撃試験場や海中から化学砲爆弾が発見される事例のある日本や英国等に対し、OPCW は 2016 年度に6回、2017 年度には7回の現地査察を実施した(なお、OPCW の「使用可能判定基準(Usability Criteria)」[52] に基づき使用不可能と判定される 1925 年以前に製造された化学砲爆弾等および 1925～1945 年に製造された化学砲爆弾等は検証の対象外となるため、それらの処理には現地査察が実施されない。)。[21][22]

遺棄化学兵器に関しては、現時点では日本が中国で実施している大規模な発掘・回収

および処理施設での処理を実施している「遺棄化学兵器の発掘回収・処理事業」が唯一であり、OPCW は 2016 年度に 11 回、2017 年度に 11 回の現地査察を実施した。[21][22] 2017 年 11 月 15 日にハルバ嶺での「大規模処理設備」[18]の入札が実施され、2020 年の完成を目途に処理施設の建設が進められているが、この大規模処理設備の稼働段階で、その廃棄状況の確認のための現地査察が逐次実施されることになる。

３　OPCW が直面する化学兵器廃棄に係わる課題

OPCW は「現存する化学兵器を 10 年間で廃棄し同時に不拡散を担保する」ために 1997 年に設立されたが、遅延はしたものの漸くカテゴリー１の全申告量の 96.3％の廃棄に到達し、2022 年にはストックパイルは（CWC 未加入の保有国を除き）ゼロとなる見込みである。

その結果、OPCW は化学兵器査察の専門家を削減しつつ化学産業査察の専門家を増加させて、「化学兵器の検証」主体から「不拡散（化学産業）の検証」を主体とする検証体制へと転換途上にある。その途上でシリアが CWC に加盟したことにより、化学兵器査察の専門家不足が課題となっている。また、シリアでの塩素ガス等の毒性産業化学物質(Toxic Industrial Chemicals)の兵器目的での使用が新たな脅威となったことを受け、改めて「化学兵器の検証と対処」の出発点に立ち戻り、国連と共同して OPCW を化学兵器禁止と化学テロ対処のノウハウを集約した「対処センター」とする構想案も議論されている。

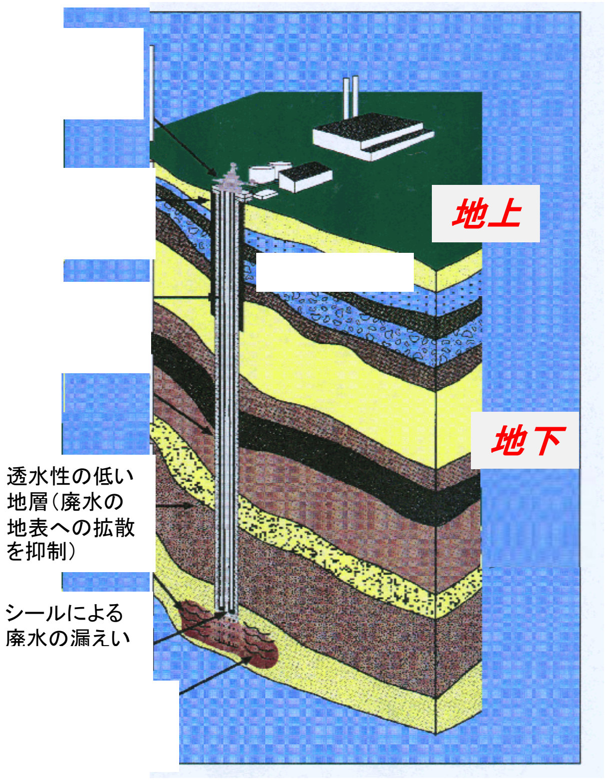
[18] 付録７参照。

＜付録３＞　ヒ素廃棄物の処理と処分

１　地中処分

最近、米国やヨーロッパ諸国で有害廃棄物や一般廃棄物を地中に処分するサイトが増加している。

米国では、石油・天然ガスの採掘に伴って併産される岩塩を含む廃水（salt water）を元の井戸に注入する技術（Underground Injection Control、以下“UIC“と略称）が 1930 年代から行われていた。（付図 3-1）［53］ 2003 年時点で 80,000 ヶ所以上の採掘井戸に多くの廃棄物を投入されている。現在では、class Ⅰから class Ⅵ までの 6 種類の井戸に分けられ、有害廃棄物の注入は class Ⅰに分類される。2017 年度のデータでは合計約 520,000 件の全井戸への注入件数のうち class Ⅰへ注入した全廃棄物は 712 件であるが、このうち有害廃棄物は 132 件に過ぎなく、残りは非有害性廃棄物の 680 件であった。なお、大量に注入された廃棄物は class Ⅱ(石油・天然ガス)と class Ⅳ(非有害廃棄物)で合計 696,861 件（全注入件数の約 96%）である。2015 年度と 2016 年度はほぼ同様の値であるが、それ以前の数値は公表されていない。

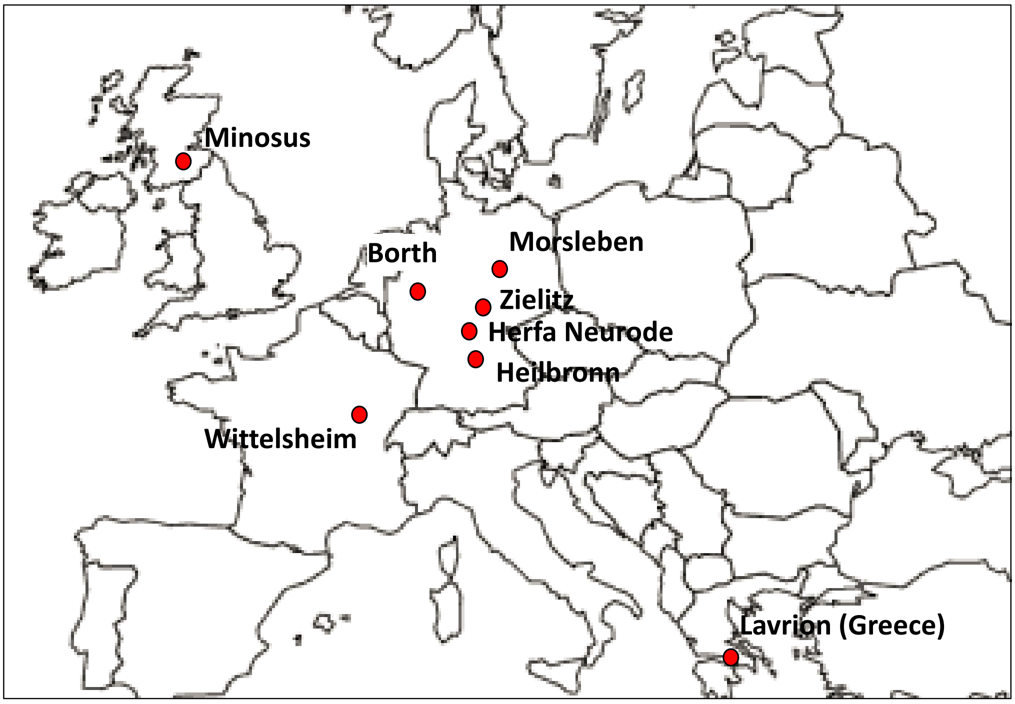


付図 3-1　米国における石油・天然ガスの採掘坑跡皮を利用した流体の注入施設
（Underground Injection Control Well）［53］

注入した有害廃棄物流体が井戸近傍の飲料用地下水（USDW: Underground Source of Drinking Water）を汚染する事故が 1900 年代からしばしば頻発してきた歴史がある。このため、class Ⅰ井戸の所有者や管理者に対して USEPA（米国環境保護庁）側が「地中に注入

した廃棄物流体が漏えいして近隣の飲料用地下水を汚染する事故を起こさないために、少なくとも10,000年間保証する請願（No Migration Petition)」などを求めた（2012年40 CFR 148.20[19])。このため、class I井戸の所有者や運転者側が有害廃棄物ではなく無害な廃棄物の受け入れに傾いたものと思われる。

他方、ヨーロッパでは世界で第4位の岩塩生産量を誇るドイツを中心に、岩塩やカリウムの採掘鉱を有害廃棄物地中処分として利用されてきた。図3-2は現在のヨーロッパにおける廃棄物処分に活用されている代表的な廃棄物の地下処分場である。K+S Kali GmbHなどの企業が岩塩を採掘するとともに、肥料、薬品などの製品に加工して販売する。このような岩塩鉱等の空洞が廃棄物の処分場として使われ始め、Herfa-Neurodeでは1972年に開設した。(図3-3)



付図3-2 ヨーロッパ諸国の代表的な地中処分施設
[54][55]より作成

[19] CFR (Code of Federal Regulations) とは、米国連邦政府により連邦官報の中で公布される一般的かつ永続的な規則・規定を集成した法典である。

付図 3-3 ドイツ Zielitz における廃棄物の処分施設[56]

以上のように、ヨーロッパ諸国では岩塩鉱等の跡地を活用した有害廃棄物の地中処分が進展している一方で、米国では2012年の米国環境保護庁による"No Migration Petition"の反響が大きく有害廃棄物の地中処分の先行きは憂慮される。なお、米国 UIC の有害廃棄物処分サイトの適正判断には「地震活動の検討（seismicity study）」の検討項目があり、我が国では鉱山跡地を地中処分場に転用することには課題がある。

２　地表処分に向けたヒ素廃棄物の固化・安定化技術

地表処分は一般的に廃棄物処理場で行われる。これまでも多数の処分場が建設、運用されてきたため、経験は豊富であることが長所となる。ヒ素廃棄物をより溶解性が低下させる事前処理（例えば、酸化カルシウムなどの添加）やヒ素廃棄物の溶出試験（TCLP）、埋設後の定期点検や管理などが実施され処分場外への汚染の拡散の防止に努めてきた。

ヒ素は銅鉱山や金鉱山を採掘する際に副産物として産出され、沈殿池やシックナーなどに固液分離したあと、中和・凝集工程を経て処理する。発生したヒ素含有汚泥は、坑道中や処理場で処分されてきたので、多くの経験や技術が蓄積されてきた。

ヒ素廃棄物を含めた有害廃棄物処分技術は施設の設計や運転が普及するとともに、操業規則の制定とその遵守が一般化している。このため、現在では安全で安定した有害廃棄物の処分が進められている。特に、地表に埋め立てられた廃棄物は降雨と地下水に晒されて廃棄物中の有害成分が溶出・拡散して周辺住民の健康被害や生活環境の劣化を最小化することが重視される。

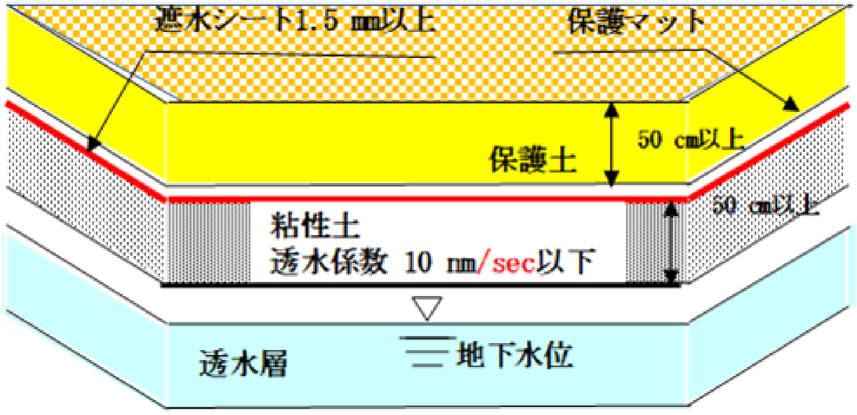
(1) 地表処分場

地表処分場は最も普及している廃棄物処分場であり、多くの経験に基づいて技術や管理の経験や技術が蓄積・普及された廃棄物の処分方法である。特に、地表に埋め立てた廃棄物に対しては①雨水と②地下水に晒されて有害物質が処分場外に拡散する危険性を防止することが重点である。地下水の場合、流速 10～100 m/日であり、年間平均降水量（日本）は 1,718 mm/年とされ、雨水の降水量に比べて地下水は 2,000～20,000 倍の水量である。

(2)　地下水の侵入防止

膨大な量の地下水の侵入を防ぐため、標準的構造は、①処分場は地下水位以上に設置し、②その上に透水性の低い粘土層を敷設した上で、③さらに遮水シート（二重の場合もある）を敷設する構造が採られる。

付図 3－4 に、代表的な埋め立て処分場の構造を示す。



付図 3-4　有害廃棄物処分に向けた代表的な埋め立て処分施設場の構造

(3) 雨水への防護

特殊な処理場を除いて廃棄物処分場は屋根を設置することが経済的にもできないため、廃棄物は雨水に晒されることになる。このため、①溶出濃度の低いヒ素化合物に変換することと、②セメント等のバインダーと混合した固化体としてヒ素等の溶出を低下させる方法が採られ、これらはヒ素廃棄物の「固化・安定化（solidification and stabilization)」と呼ばれ、土壌中に埋める廃棄物が液体や気体ではなく、セメントなどと混合して“固体化”してヒ素の拡散を防ぐことを意味する。処分場の周辺環境による埋められた固形廃棄物中のヒ素が降雨により溶出することを防ぐことで、“安定化”も目的とする。この目的は以下の 2 項目で要約される。

1）　雨水への溶解度の低いヒ素化合物の選択（付表 3-1）
2）　雨水が固化体への侵入（“透水性”と呼ばれる）の抑制

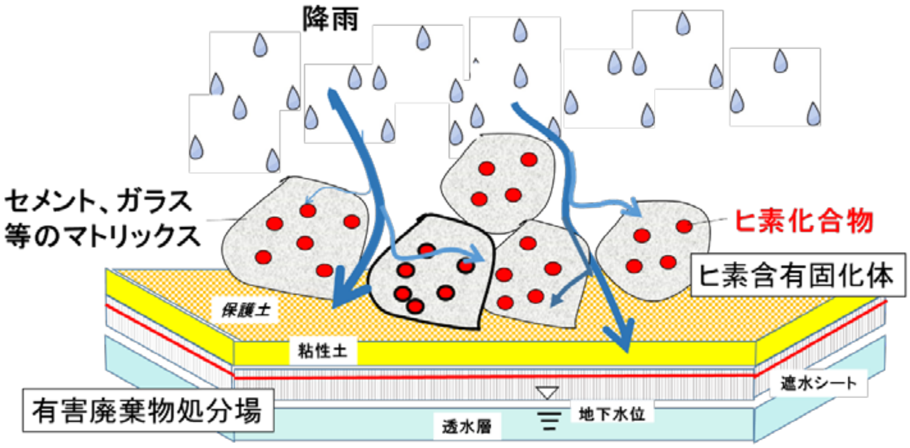
項目①については、付表 3-1 のヒ素化合物からヒ酸カルシウム（化学式 $Ca_3(AsO_4)_2$）が最も妥当な化合物の一例とされる。なお、付表 3－1 ではヒ酸鉄 FeAs04 の溶解度が最も低いとされるが、データの信頼性は低い。

項目②は、付図 3-5 に描かれるようにヒ素化合物が細礫、粗粒粘土、アスファルト、セメントと混合して形成された固化体について、雨水に晒された場合のヒ素の溶出量を比較した。粒子径の異なる一連の土壌粒子では、土壌の粒子径 D_{20}値が小さいほど透水係

数 ***k***（cm/s）が低くなることが知られている。このため、雨水に晒されるとしても固化体の内部に侵入する雨水の透水量は少なくなる。セメントは固化後 1,000 日経過すると透水係数 ***k*** 値が 10^{-11} cm/sec まで低下することが報告されており、固化体内部への雨水の透水はますます困難になること意味する。

付表 3-1　代表的なヒ素化合物の水へ溶解度（中性 pH7）

ヒ素化合物		溶解度（20℃付近、g/L
三酸化二ヒ素	As_2O_3	18.0
五酸化二ヒ素	As_2O_5	658.0
ヒ酸カルシウム	$Ca_3(AsO_4)_2$	0.003629
ヒ酸マグネシウム	$Mg_3(AsO_4)_2$	0.39
ヒ酸鉄	$FeAsO_4$	0.00000000147
カコジル酸	$(CH_3)_2AsO(OH)$	667.0



付図 3-5　セメント等で固化したヒ素廃棄物体の降雨による溶出モデル

付表 3-2　ヒ素の固化材料による降雨の透水係数

固化材料	透水係数 k_i cm/sec	透水係数比[1)]	粒径 D_{20}, mm
細礫	1.80	180,000,000,000	20
粗粒粘土	$3.00*10^{-6}$	300,000	0.005
アスファルト	$2.98*10^{-6}$	298,000	---
セメント	$1*10^{-11}$	1	---
1) セメントを1とした相対値			

遮断型の汚染廃棄物の処分施設においては、①二重の遮水シートの敷設（地下水侵入の阻止）、②排水口における有害物質濃度の測定と③基準を超えた場合に備えた排水処理装置の設置が義務付けられている。

処分場に埋設するヒ素廃棄物は、降雨に晒される廃棄物中のヒ素溶出量を抑制させるためには、①溶出濃度の低いヒ素化合物に変換することと、②セメント等のバインダー

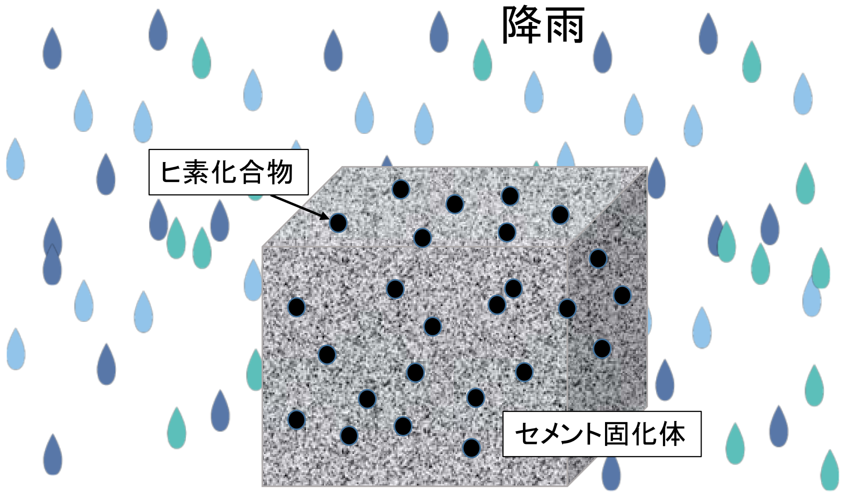
と混合して固化体とし、処分場にヒ素廃棄物を固化する方法が採られる。

鉱山以外の一般のヒ素含有廃棄物では様々な方法で固化や安定化され、ヒ素の溶出濃度を測定して基準値以下と判定されると、処分場へ搬入が許可される。代表的なヒ素である三酸化ヒ素（化学式 As_2O_3）は溶解度が 18 g/L（Solubility Table[20]より）であり、溶出基準値を遥かに超える。このため、セメント（主成分は酸化カルシウム）、生石灰（酸化カルシウム CaO）、消石灰（水酸化カルシウム $Ca(OH)_2$）などを混合して固化・安定化する方法が実施されている。しかし、溶出は様々な要因が関与することから、本手法の妥当性については、現実の状況に合わせて常に検証することが必要である。

ヒ素廃棄物の「固化・安定化（solidification and stabilization)」とは、土壌中に埋める廃棄物が液体や気体ではなく、セメントなどと混合して“固体化”してヒ素の拡散を防ぐことを意味する。処分場の周辺環境による埋められた固形廃棄物中のヒ素が降雨により溶出することを防ぐことで、“安定化”も目的とする。廃棄物中のヒ素が水へ溶出濃度を基準値以下に抑える方法は、

3） 雨水への溶解度の低いヒ素化合物の選択（付表 3-1）
4） 雨水が固化体への侵入（“透水”と呼ばれる）の抑制

を組み合わせる手法が知られている（付図 3-6 のセメントによる固化参照)。



付図 3-6　ヒ素化合物を含有したセメント固化体の降雨による透水モデル

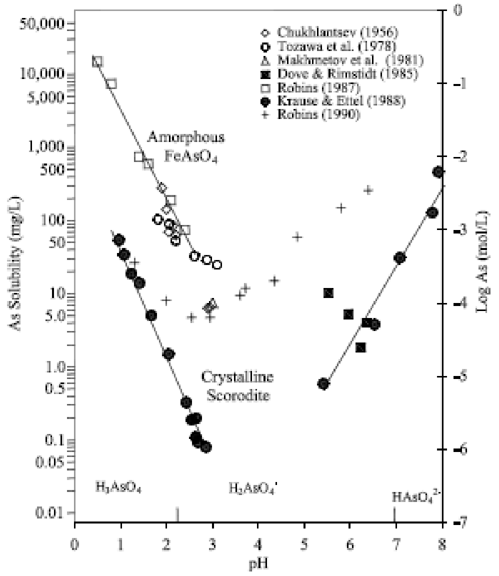
(4) 溶解度が低いヒ素化合物の選択

水への溶解度はヒ素化合物の種類により大幅に異なり五酸化二ヒ素（化学式:As_2O_5）のように高い溶解度を持つ化合物からヒ酸鉄（同：$FeAsO_4$,　“Scorodite”とも呼ばれ

[20] 脚注 14 に同じ。

る）のように非常に低い化合物もある（付表 3-1)。

溶解度は水溶液の pH により大きく左右される（付図 3-7)。例えばヒ酸鉄を水溶液に浸すとやや酸性の pH3.5 付近で最小の溶解度を示すが、これよりも酸性やアルカリ性にすると結晶性のヒ酸鉄でも大幅に溶解し、ヒ素原子の溶出量が基準値を超えるという欠点がある。処分場における雨水や地下水という pH7 前後の中性水へヒ素廃棄物がさらされる条件下での利用においては慎重な検討が必要である。



付図 3-7　Scorodite の溶解度に対する水溶液の pH 依存性[57]

現段階ではヒ素の溶出基準を下まわるヒ素化合物は見出されていない。このため、ヒ素の溶出を低減させることが重要となる。

(5) ヒ素の溶出を抑える物理的手法の選択

①　地表処分場におけるヒ素等の有害化学物質の溶出抑制手法について

日本を始めとして多くの国々では有害廃棄物を地表の処分場に埋立て処分されてきた。付図 3-4 は処分場の構造であるが、埋立て処分した有害廃棄物に関して重視すべき点は、ヒ素などの有害物質が地下水と降水に晒されて溶解し、環境への流失が起こることである。地下水の流速 10～100 m/日であり、年間平均降水量（日本）は 1,718 mm/年とされ、降水量に比べて地下水は 2,000～20,000 倍の水量である。

ア　地下水へのヒ素の溶出抑制

地下水への侵入を防ぐためには、

１）　処分場を地下水位より高い位置に建設、

２）　透水係数[21]の低いベントナイトなどの透水性（透水係数 10^{-7}cm/sec 以下）の低い粘性土の敷設、

３）　遮水シートの施工

などを行うことがガイドラインとして奨励され、地下水が廃棄物と接触しない構造が採られている。[58]

イ　降雨によるヒ素の溶出抑制

処分場に置かれたヒ素廃棄物は雨水に晒されるため、ヒ素の溶出を抑えるには、廃棄物をセメントなどの固化材料と混合する方法が採られる。土壌粒子で示されるように、固化材料の粒子径 D_{20}値が小さいほど透水係数ｋ（cm/s）が低くなる。このため、雨水に晒されるとしても固化体の内部に侵入する雨水の透水量は少なくなる。付表 3-2 に代表的な固化材料と透水係数を示すが、セメントは固化後 1,000 日経過すると透水係数ｋ値が 10^{-11} cm/sec まで低下する。

なお、「２　地表処分に向けたヒ素廃棄物の固化・安定化技術」の付表 3-1　代表的なヒ素化合物の水への溶解度」ヒ素化合物の水への溶解度（pH7）」に示すように、処分するヒ素化合物は水への溶解度が低いヒ酸鉄（$FeAsO_4$）やヒ酸カルシウム（$Ca_3(AsO_4)_2$）を選択するのが望ましいと考えられる。

以上のように、ヒ素化合物などの有害廃棄物はセメントなどと混合して固化体にすると、最終処分場では雨水に晒されても固化体内部まで雨水が透水し難くなる。このため、ヒ素化合物の水への溶出量を大幅に低減することができる。

付表 3-2　ヒ素の固化材料による降雨の透水係数

固化材料	透水係数 k_i cm/sec	透水係数比[1)]	粒径 D_{20}, mm
細礫	1.80	180,000,000,000	20
粗粒粘土	$3.00*10^{-6}$	300,000	0.005
アスファルト	$2.98*10^{-6}$	298,000	---
セメント	$1*10^{-11}$	1	---
1) セメントを1とした相対値			

[21] 「地層の透水性の程度を示す係数。地層の多孔体中の層流に関する基本則のダルシーの法則を、q=KI と表したとき、q を比流束（またはダルシー流速）、I を動水勾配（こうばい）、比例定数 K を透水係数という。q と K はともに速度の次元をもつ。物理的には、多孔体中で流れの方向に直角な単位断面積を、単位の動水勾配の下で単位時間内に通過する水の量と定義される。」出典：日本大百科全書（ニッポニカ）, https://kotobank.jp/dictionary/nipponica/, 2018/7/25 最終確認。なお、動水勾配Ｉ＝ｈ／Ｌ（但しｈ：水頭差［m］、Ｌ：距離［m］）。

なお、透水係数 *k* 値は水の圧力を考慮すると *cm/sec・kg* の単位であるが、ここでは大気圧下の雨水であり圧力変動は小さく、*kg*を省略した。

② セメントやスラグを混合したヒ素の高温溶融

ヒ素廃棄物を高温処理して溶出を低下させた実施例では Montana Tech（現在の University of Montana College of Technology）の Prof. L.G. Twidwell の研究グループが特筆した成果を得ている（付表 3-3)。

付表 3-3　ヒ素汚染物質のセメント固化―加熱によるヒ素の安定化[57]

ヒ素含有量、%	セメント／ヒ素廃棄物の混合比	溶出試験 (TCLP，mg/L)	pH
1.3	3	5.02	11.3
	3R*	0.11	11.4
	1	15.8	11.0
	1R	0.43	11.5
	0.5	39.9	11.6
	0.5R	0.45	11.5
17.8	3	5.0	11.8
	3R	0.99	11.7
	1	72.2	11.4
	1R	10.8	10.3

なお、付表 3-3 の R*は 700℃で 1 時間焼成した試料を意味する。例えば、「3R」はセメント／ヒ素廃棄物の重量比が 3 で混合し、700℃で 1 時間焼成した試料である。R がない試料は 700℃焼成を行わない。

付表 3-4 は、銅精錬炉で発生する飛灰中（Copper Flue Dust）の重金属を安定化した例である。飛灰にはヒ素の他に銅、亜鉛、鉛、カドミウムなど多種類の金属成分が含まれている。これを精錬工程から副生するスラグ（成分は酸化ケイ素が 35 − 40 %、酸化カルシウムが６−７ %、酸化鉄が 40 − 45 %）を母材として混合し、200～400℃にて加熱処理した後 1,200℃～1,400℃まで昇温して溶融する。このプロセスで得られる 23.5%のヒ素を含有する固化物からのヒ素溶出量は基準値の５ mg/L（米国、中国）を満足する。

付表 3-4　同量精錬スラグに高温溶融したヒ素の溶出量[59]

		Extraction (mg/L)[a]			
Arsenic Content (%)		43 h	1,846 h	8,304 h	61,300 h (7 Years)
8.8	(doped with $Ca_3(AsO4)_2$	0.10	0.19	0.48	1.720
13.5	(doped with $Ca_3(AsO4)_2$	0.13	0.65	0.00	0.869
18.4	(doped with $Ca_3(AsO4)_2$	0.02	(2112 h) 0.40	0.22	7.680
19.5	(doped with $Ca_3(AsO4)_2$	0.00	(1251) 0.23	1.80	6.300
19.5	(doped with $Ca_3(AsO4)_2$	0.03	(2040) 0.09	1.21	9.200
8.8	(doped with $FeAsO4_4$	0.04	(1171 h) 0.00	0.03	0.575

溶融固化法では銅精錬で副生するスラグに相当する母材が必要であり、材料は酸化

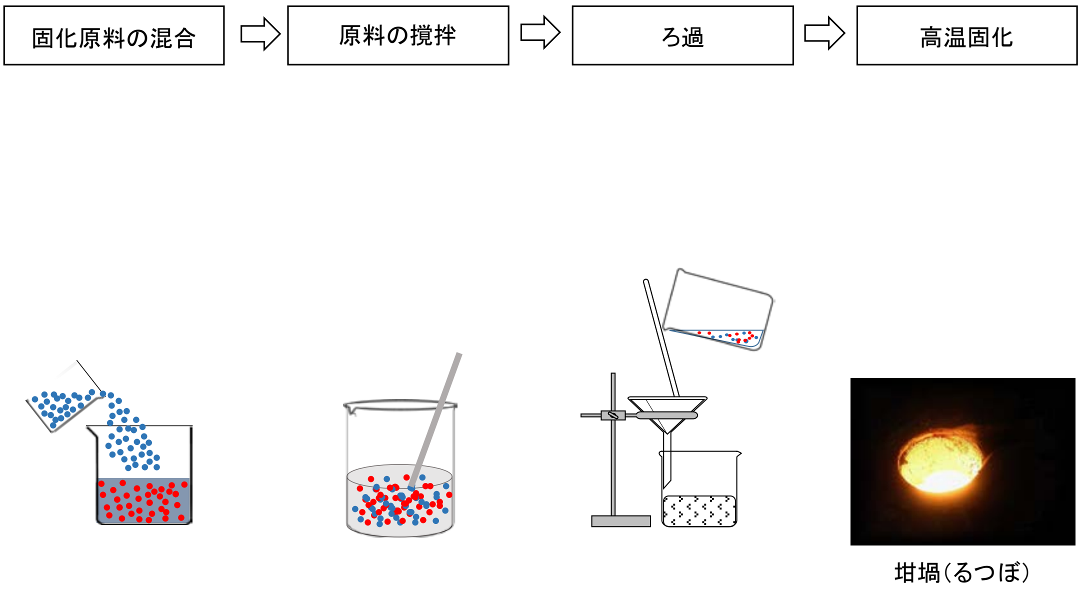
ケイ素（ガラスカレットやケイ石、水ガラスなど）が主体で、酸化アルミニウムや酸化カルシウムなどを添加することになる。

③　ガラス固化

ガラスは非晶質な構造をもつ固体であり、通常の物質とは異なり融点や沸点ではなく軟化点（softening point）、作業点（working point）などでガラスの特性が表現される。古代のガラス製品が作成時の状態で発掘されるように、ガラスは水に溶け難い。

ガラス固化で物理的にヒ素を固化や封じ込める方法は技術的に可能と推察されてきたが、近年、本技術が実用化に一歩前進した。この技術を開発したカナダのケベック州に所在する Dandee Sustainable Technology 社は、ヒ素のガラス固化に関し 2013 年９月４日に米国に特許出願し、2014 年４月 17 日に公開された。同社は主に鉱山技術をベースとし、銅鉱や金鉱の発掘や精錬について技術開発や実施・管理を専門とする。

同社で開発したヒ素化合物をガラスへ封入して固化体を形成するプロセスを付図 3-8 に示す。



付図 3-8　ヒ素廃棄物のガラス固化の原理[60]

ヒ素のガラス固化の原理は、以下の通りである。

1）　ヒ素化合物を取り込むにはガラスの作業点以上の温度が必要であり、ソーダガラスで 1,005℃、ホウケイ酸ガラスで 1,189～1,252℃である。

2）　他方、ヒ酸カルシウム（$Ca_3(AsO_4)_2$）は融点 1,455℃であり、ガラスの作業点で

は分解や蒸発しない。

3） ヒ酸カルシウムを得るプロセスは、以下の通りに要約される。

Step-1：ヒ素廃棄物から亜酸化ヒ素（As_2O_3）を得る。

Step-2：得られた As_2O_3 を混合した水溶液に、軟マンガン鉱（MnO_2）または赤鉄鉱（Fe_2O_3）などの酸化剤を混合し+5 価のヒ素に転化する。

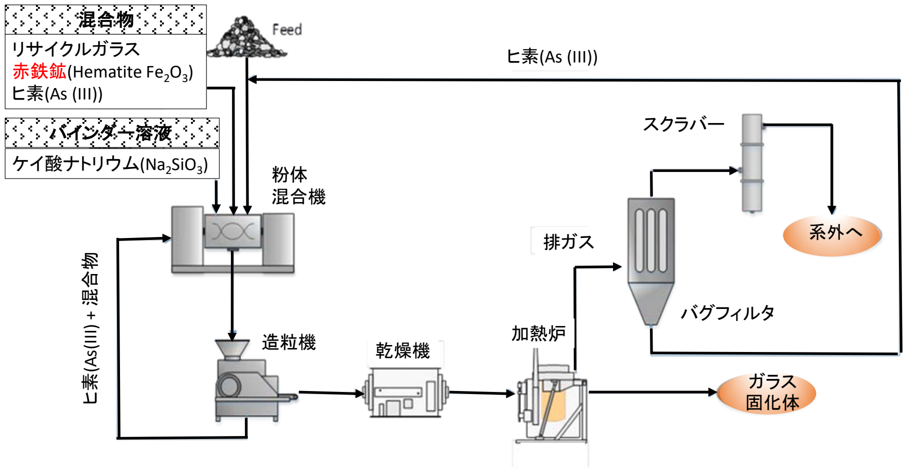
Step-3：水酸化カルシウム（$Ca(OH)_2$）を加え、ヒ酸カルシウム（$Ca_3(AsO_4)_2$）を得る。なお、Step-2 と Step-3 は同時に行ってもよい。

Dandee 社の特許[61]によれば、ヒ素の溶出試験（TCLP: Toxicity Characteristic Leaching Procedure）では 0.0036 mg/L という非常に低い値であった。

なお、かつて液晶パネルとして使われるガラス製造プロセスでは、ガラスの泡を消して透明度を高めるために消泡剤として三酸化ヒ素（As_2O_3）が使われた。液晶パネルへの三酸化ヒ素の含有量は重量比０～１%、パネル１台当たり０～５ g とされる。溶出試験では最大 0.51 mg/L のヒ素が検出されたが、三酸化ヒ素 As_2O_3 の水への溶解度（溶出試験に相当する）は 16 mg/L である。

これに対して今回の Dandee 社の試験では、ガラス固化したヒ酸カルシウム $Ca_3(AsO_4)_2$ のヒ素溶出試験では 0.0036 mg/L（その後１ヵ月追試でも溶出濃度は変わらない）という低い値であったのに対して、ヒ酸カルシウムの水への溶解度（溶出試験に相当する）は 0.0709 mg/L である。このことは、水中に晒されたヒ素化合物に比べて透水性が低いガラス固化体に取り囲まれたヒ素化合物は水と接触する機会が減少するためと考えられる。

パイロットプラント（付図 3-9）による試験結果は以下の通りであった。



付図 3-9　ヒ素化合物のガラス固化のフローチャート

（出典） Dandee 社 HP より。

1） 2016 年３月、規模 500 トン/年のヒ素のガラス固化プラント試験が成功裏に終了。

2） ヒ素含有量は 20%程度まで可能。

3） コスト比較：スコロダイト（FeAs04）法に比べて 1/10 程度に低減できた。

Dandee 社は更に改良を加え、ヒ素化合物中のヒ素原子を３価から５価に酸化する酸化剤を軟マンガン鉱からより安価な赤鉄鉱（Fe_3O_4）に代替することで、最終的に $536/ton-$As_2O_3$ まで低下させる経済性の試算を行った。

付図 3-10 ヒ素（As_2O_5 に換算して）20%含有のガラス固化体
（出典） Dandee Sustainable Technologies 社 Home Page より。

以上のように、ヒ素の溶出を物理的手法で抑制する技術は発展してきたので、今後は化学的手法にも広がることも期待したい。

３ 地表処分と地中処分の比較

上記のように、地表の埋め立て処分と地中への処分があるが、両者を比較すると、以下の違いがある。

1）砲弾の事前解体とヒ素廃棄物の取り扱い：地表の埋め立てでは規定上爆発物を埋設できないので、火薬を砲弾内の火薬を事前に分離が必要である。また、化学剤の無害化処理後に発生するヒ素は次亜塩素酸などで酸化処理し５価のヒ素として分離するため、多少複雑な工程となる。他方、爆破処理では砲弾そのものを爆破することで内部の化学剤を無害化したあと、爆破残差を指定の容器に入れて処分場に持ち込むことができるため、処分に至る工程が少ない。

2）処分施設：地表の埋め立て処分場は従来から多数立地し、2006 年現在の調査によれば我が国では管理型処分場は 10,974 万m^3の残存容量とされ、地表処分の候補数は多い。他方、ヨーロッパ諸国を中心とした岩塩鉱跡地等の地下処分場が主要であり、必ずしも候補地が多い訳ではない。

＜付録４＞　化学兵器廃棄処理作業員健康管理におけるヒ素対策

１　職業性ヒ素暴露と健康障害

老朽・遺棄ヒ素化学兵器処理作業は制御爆破と加熱燃焼方式にて実施されるが、想定される作業者への暴露は無機ヒ素が主たるものになると推測される。無機ヒ素による職業性暴露からの健康障害は、国内外の銅製錬、非鉄精錬、三酸化ヒ素製造などに従事した作業者を対象とした症例研究や疫学研究が参考となる。[22] 健康障害は無機３価ヒ素（三酸化二ヒ素（As_2O_3））、無機５価ヒ素（五酸化二ヒ素（As_2O_5））が主な原因ヒ素で、ともに強い毒物である。ヒ素中毒学の経験則から、職業性暴露は経気道暴露が主体であるが、口腔内汚染により嚥下からヒ素は消化管にて吸収（経口暴露）される経路もあり、しかし、無機ヒ素の皮膚からの体内吸収は確認されていない。

職業性無機ヒ素暴露からの急性ヒ素中毒の発生は極めて希である。急性ヒ素中毒は、一回の無機ヒ素経口摂取量が 20mg を越えると初期症状である嘔気･嘔吐･下痢など消化器症状が認められ、その後、中・重症者では循環障害として低血圧、頻脈、虚脱、ショック状態、肝機能障害、皮膚障害（紅斑性発疹)、末梢神経障害などが出現する。自殺や他殺の事例から致死量は成人で約 300mg と推定されている。

慢性ヒ素中毒の発生は暴露量と時間により決まり、最小毒性量（LOAEL）は一日に 700μg を連続して数年間である。しかし、一日の暴露量が 3000μg を越えると数ヶ月と短時間でも発症する。なお、無影響量（NOAEL）は体重 55kg で 44μg/日との試算値がある[22]。慢性ヒ素中毒の特徴的な症状は皮膚障害で発症部位にも特徴があり、躯幹部（日光の当たらない部位）に色素沈着と色素脱失が雨滴状に混在して発症し、重症者では掌と足の裏に限局して強い痛みを伴う角化症の発生から労働や日常生活が困難となる。さらに、患者の一部に皮膚がんが認められる（付図 4-1)。国際癌研究機関（IARC）は無機ヒ素暴露と皮膚がん、肺がん、膀胱がん、肝がんなどとの因果関係を認め、最上位の発がん性物質としてグループ１に分類、そして、発がんまでの潜伏期間を約 30 年と推定している。[23]

色素沈着･色素脱失

手掌の角化症

皮膚がん

付図 4-1　慢性ヒ素中毒患者における皮膚障害（色素沈着・色素脱失、角化症、皮膚がん）

他方、特殊なヒ素による健康障害として、ヒ素化学兵器に用いられるルイサイトや三塩化ヒ素には無機ヒ素とは異なる重篤な皮膚障害が認められる。これらのヒ素化合物は皮膚

に接触すると加水分解から塩酸が生じ、その塩酸により表皮が糜爛状に傷害され真皮から無機ヒ素が体内吸収され、急性中毒そして死亡につながる特殊な作用機序がある。

2　ヒ素暴露職場における作業環境管理

ヒ素取り扱い職場における作業環境中ヒ素の許容濃度は、国際的に最も汎用している米国産業衛生専門家会議(ACGIH)による指針では[24]、一日８時間週 40 時間の時間荷重平均濃度（TLV-TWA）で 0.01mg/m^3（ヒ素として）、なお、中国における TLV-TWA は同様に 0.01mg/m^3 である。しかし、我が国では発がん性の生涯リスクを強く考慮した日本産業衛生学会の許容濃度の 0.003mg/m^3 を用いている。

作業環境中ヒ素濃度の測定方法は、空気捕集器にろ紙を装着し、捕集したヒ素を酸分解して、ヒ素を元素として測定する原子吸光光度計や誘導結合プラズマ分析－質量分析機（ICP-MS）など高感度な分析機器にて実施されている（付図 4-2）。

付図 4-2　ヒ素の化学形態別測定に用いる分析機器

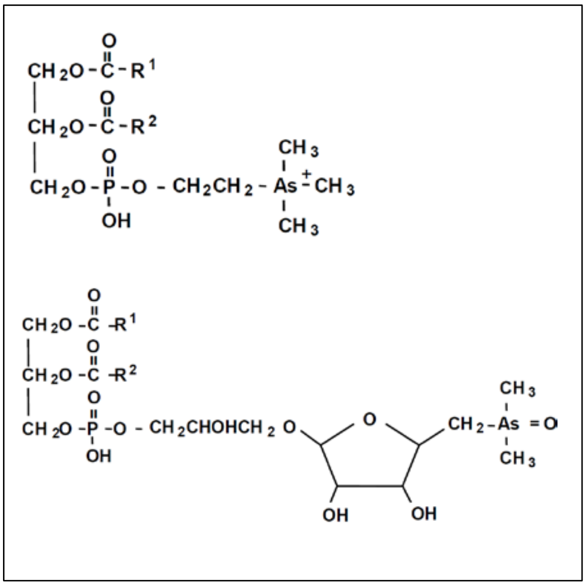
左：水素化発生—液体窒素捕集—原子吸光光度計　右：高速液体クロマトグラフ（HPLC）装着誘導結合プラズマ分析質量計（HPLC-ICP-MS）

3　ヒ素暴露の生物学的モニタリングと交絡因子

尿中ヒ素の化学形態別測定による無機ヒ素暴露の生物学的モニタリング法は、血液や毛髪中ヒ素の測定に比較して感度と信頼性がより高いという特徴がある。なお、毛髪に外部付着した無機ヒ素は毛髪成分のケラチンと強い結合作用があるため、毛髪に数ヶ月にわたり残存する特性を利用し、作業環境中の無機ヒ素汚染のモニターとして利用することも可能である。

ACGIH や日本産業衛生学会を含めて国際機関が推進している、尿中ヒ素濃度の化学形態別測定による評価に際して、食事から取り込まれるヒ素化合物が交絡因子として強く影響することが指摘されている。食事から取り込んだヒ素摂取量が職業性ヒ素暴露量に加算され、正確な職業性曝露量の算出を困難にする問題である。海産物を多食する国民では、食事からのヒ素摂取量が数百 μg /日と極めて高くさらに頻度も高くなる傾向にあり、検査値の評価をより困難にしている。

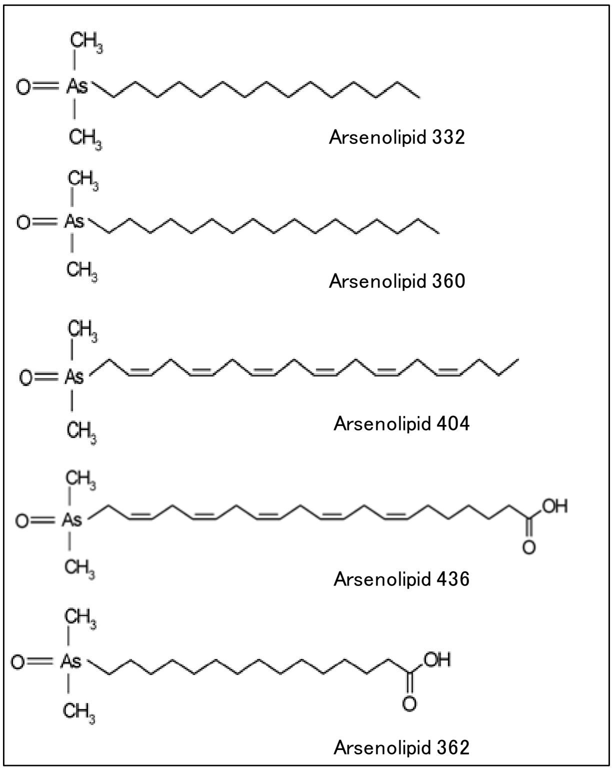
食事から取り込まれるヒ素に関する最近の研究から（付図 4-3）、人は食事から無機ヒ素、メチルヒ素化合物、脂質性ヒ素化合物（As-lipid）を摂取しており、これらのヒ素化合物の体内取り込み量は海産物の摂取量により増加することが明らかになった。



アルセノシュガー類（As-sug）

昆布

海苔



脂質性ヒ素化合物（As-lipid）

付図 4-3　海藻類中アルセノシュガー類（As-sug）と魚介類中脂質性ヒ素化合物（As-lipid）に関する代表的な化学形態

海産物中ヒ素の化学形態と濃度に関する情報を整理すると、海藻類（昆布、海苔、ヒジキ等）と魚介類中ヒ素濃度は数 ppm から数百 ppm と、陸上で生産されている野菜、果実、肉類などに比較して 1000 から 10000 倍の高値である。海産物中ヒ素の化学形態についての研究成果から、市販の乾燥海藻類や海藻類を餌とする魚介類にはジメチルヒ素化合物であるアルセノシュガー類（As-sug）、魚介類にはアルセノベタイン（AsB）と As-lipid がそれぞれ高濃度に含有していることが明らかになった。[62] しかし、As-sug や As-lipid に関する毒性や代謝機序について情報が乏しく、そのなかで化学構造の骨格がジメチルアルシン酸（DMA）であることから、DMA の半致死量（マウス経口投与、1500 mg/kg）に類似すると推測されている。しかし、As-sug や As-lipid の体内中間代謝物のなかには、無機ヒ素の毒性（半致死量；30 mg/kg）に近似するとの研究成果もあり、海産物中のヒ素化合物の毒性については充分な情報収集が必要である。関連する情報として、我が国では伝統的に有益な食材として広く食されている海藻にヒジキがある。今日、ヒジキには数百 ppm もの極めて高濃度の無機ヒ素が含有されることから、日本を除く欧米先進国ではヒジキは毒物として認識され摂取禁止が法規制されている。[63]

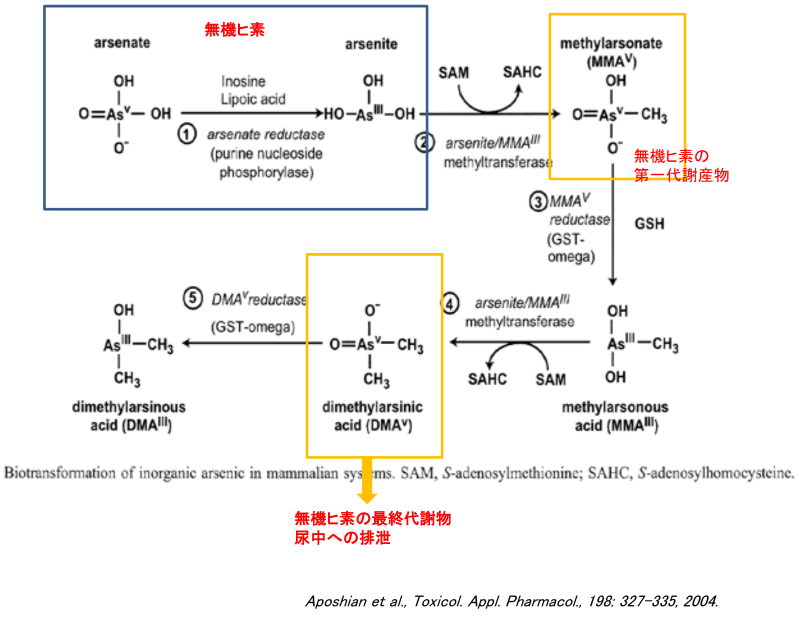
4　尿中ヒ素の分析機器と結果の解析・評価法

(1)　ヒ素の化学形態別の分析機器

尿中ヒ素の化学形態別分析方法として（付図 4-2）、高速液体クロマトグラフ（HPLC）と誘導結合プラズマ分析ー質量分析機（ICP-MS）を組み合わせた HPLC-ICP-MS 法、そして、水素化物発生ー液体窒素捕集–原子吸光光度法などが推奨されている。HPLC-ICP-MS 法では検査に用いる尿は超純水にて希釈するのみで分析に供することが可能で、また、検査に要する時間は約 10 分である。

(2)　結果の解析・評価法と食事中ヒ素化合物（交絡因子）からの影響の軽減

人は経口および経気道的に無機ヒ素を体内に取り込むと、肝臓中でメチル化され毒性の軽減と尿中への排泄促進が行われる。無機ヒ素の第一代謝物はモノメチルアルソン酸（MMA）、最終代謝物が DMA となり、この代謝機序の知見が暴露評価の解析作業において重要であり基本情報となる（付図 4-4）。[64]



付図 4-4　人と哺乳動物における無機ヒ素の代謝機序

現在、ACGIH は無機ヒ素暴露の生物学的暴露指標値を尿中の無機ヒ素と MMA、DMA の合計値として 35 μg/L を推奨している。[24] なお、日本産業衛生学会の生物学的暴露指標値は、尿中の無機ヒ素と MMA の合計値として 15 μg/L を推奨し、DMA 濃度を加算していない。なお、中国では職業性ヒ素暴露の生物学的モニタリング法に尿中ヒ素の化学形態別の評価方法は用いていないが、当該事業の推進には ACGIH が推奨する方法を活用すべきである。本来、作業者への無機ヒ素の暴露量は、ACGIH が推奨する尿中

ヒ素を化学形態別に測定することにより正確に予測できるが、主に食事から取り込まれる海産物中ヒ素が交絡因子として強く作用することから測定値の信頼性が損なわれ検査の意義も失われる可能性がある。評価に際して問題となるのが尿中DMAの検出背景である。DMAには二つの検出の背景が存在し、一つは無機ヒ素、もう一つはAs-sugやAs-lipidの代謝物で、現在の分析技術では双方由来のDMAを明確に区別することは困難であるが、一方、尿中から検出されるヒ素（無機ヒ素、MMA、DMA、アルセノベタイン（AsB））の動態を総合的に評価すると、職業性ヒ素暴露と食事由来のヒ素とを高い精度にて判別は可能である。

無機ヒ素による急性・慢性ヒ素中毒患者、そして、職業性ヒ素暴露作業者での検査事例から、典型的な無機ヒ素の暴露・摂取における被験者の尿中ヒ素の動態を見ると、暴露初期の数時間は無機ヒ素濃度と割合が MMA や DMA に比較して高い傾向を示し、そして、時間の経過に従いMMAの比率が増え、暴露後12時間を過ぎると最終代謝物であるDMAの濃度と割合が上昇し、逆に無機ヒ素の濃度と割合が顕著に低くなる傾向が明らかになっている。非職業性暴露の事例では、海藻類や魚介類からAs-sugやAs-lipid、アルセノベタイン(AsB)を摂取した場合、尿中の無機ヒ素濃度の上昇を伴わないでDMA濃度がほぼ単独で上昇するパターン、さらに、尿中DMAに並行してAsB濃度も顕著に上昇する傾向などが認められ、職業性無機ヒ素暴露の尿中ヒ素の排泄動態とは明確に異なることも明らかである。[65]

すなわち、ヒ素取り扱い作業者においては、ヒ素を豊富に含有する海産物の過剰摂取は生物学的モニタリングに際して検査値に対する交絡因子になること、さらに、海産物中のAs-sugやAs-lipidに関する毒性情報が乏しい現在、作業者に対する健康管理においては海産物の過剰摂取に対する危険性の認識も含めて衛生教育が必要である。尿中ヒ素の検査に際して交絡因子の影響を軽減する措置として、被験者は検査前48時間から海藻類や海藻類含有加工食品の摂取禁止、さらに、中国伝統医学で使用する中国漢方薬には硫化ヒ素が使用される実態があり、服薬に関する情報を的確に把握や禁止する処置も必要である。

５　作業者への作業管理

作業者は許容濃度を遵守した作業環境においても保護具の着用は必要であり、マスク内のヒ素汚染を除去する有効な手立てがない装着型粉塵マスクより、使い捨て式の防塵マスク（DS2 規格）が望まれる。使い捨て式のマスクで顔との密着を丁寧に保持し、無機ヒ素の体内取り込み量の軽減の工夫が必要となる（付図 4-5）。しかし、厳重なマスクや防護服の長時間の着用義務付けは、作業者の肉体的（熱中症、疲労）と精神的ストレスが増す事態となり、逆に事故の可能性が増える事も危惧されるため充分な検討が求められる。

無機ヒ素の更なる暴露量の軽減対策として、作業により汚染される部位（手、口腔、鼻腔、毛髪）を把握して、日常的な飲食・帰宅前の丁寧な手洗い、口腔や鼻腔内洗浄の励行、さらに、作業に基づき異常なヒ素汚染の懸念がある場合における入浴やシャワーによる汚染除去の徹底などが必要である。すなわち、作業者と管理者には作業管理について継続的

な実践学での衛生教育、そして、日々の業務において問題点の把握と予防･防止対策など高度化につなげる工夫と努力が重要である。[24]

付図 4-5　無機ヒ素粉塵暴露に対する保護マスク

６　中国の慢性ヒ素中毒の原因ヒ素と処理事業から発生するヒ素による混乱の問題

1980 年代以降、アジアや中南米諸国では水系伝染病の防止に微生物汚染の少ないポンプ式井戸水（地下 15-20m）が、国際機関（世界銀行、JICA 等）の支援･推進により普及した。一方、ヒ素について充分な環境アセスメントなしに井戸水を使用したことにより、大規模な慢性ヒ素中毒が発生し現在も根絶には至っていない。[22][24]　中国では文化大革命以後、農村地域において開放政策から各家庭においてポンプ式井戸の利用が急速に普及した。一時期、慢性ヒ素中毒患者（ハイリスク者を含む）の発生は約 300 万人と推測され、代表的な発生地域は山西省や内蒙古自治区、これに東北地方（吉林省、遼寧省）も含まれた。さらに、中国では井戸水の無機ヒ素汚染以外にも、貴州省において石炭燃焼の煙中ヒ素が原因した重篤な慢性ヒ素中毒も発生した。[26]　すなわち、中国では国土の至る所に自然由来（地下水）や生活廃棄物（石炭燃焼物）による無機ヒ素汚染源があり、本事業から発生する無機ヒ素と区別して扱うべきとの認識の共有化と、識別鑑定の技術を事前に準備しておく必要がある。

７　まとめ

老朽･遺棄ヒ素化学兵器処理作業における運営者や管理者における最上位の責務の一つは、健康障害のうち発がん性の生涯リスクの軽減や防止であり、発がんの潜伏期間が約 30 年であることも考慮した事業計画の構築と運営が求められる。また、制御爆破方式による砲弾等の処理では、ナノ粒子状物質の生成が理論的に推測される。ナノ粒子状物質の健康影響は国際機関や研究機関において急速に研究が実施されているが、健康影響の予防対策に関しては的確な方法は提案されていない。尿中ヒ素の化学形態別の検査は、当該作業者に対する未知のナノ粒子状物質暴露からの健康影響のレベルを間接的に把握する機会にもなり得ることから、尿中ヒ素による適切な検査を包括的に遂行すべきと考える。

＜付録５＞　ハルバ嶺処理場跡地周辺の環境浄化基準設定のための周辺開発動向調査

１　はじめに

ハルバ嶺処理事業完了後の処理場跡地の土壌などの環境浄化基準を適切に設定するには、跡地並びに周辺地区が今後どのように利用されるのかを考慮することも有用である。処理場が所在する延辺朝鮮族自治州では、近年観光産業が成長している。敦化市をはじめ関係中国当局は、処理場の隣接地を国定自然公園「亜光湖国家湿地公園」として開発を進めており、今後も観光資源、並びに官学共同生態系研究拠点として整備および運営を続ける姿勢を明らかにしている。

よって、未汚染の近隣同等地の調査などを通じ、本事業後に環境中へ残留が懸念されるヒ素など汚染源物質の環境基準を見極めること、また、当該基準レベル迄浄化が可能で、且つ、生態系を攪乱する懸念のない環境技術の探索と開発を進めることが望ましいと考えられる。

このような問題意識の下、2016 年９月に実施した延辺州での地誌的調査／視察研究成果[66]に基づき論じ、現地ニーズに合致した処理場事後処理を考えるための参考に供する。

２　敦化市の概況

ハルバ嶺処理場は、中国吉林省東南部の延辺朝鮮族自治州中部の、敦化市と安図県境界中央部の敦化市側にある。この境界線は、北朝鮮国境に主峰がある広大な長白山系の支脈により形成されている。この支脈はハルバ嶺処理場の近傍を流れる二道河[22]の浸食作用などで分断され、主峰長白山に至る西側が牡丹嶺、黒竜江省境に至る東側がハルバ嶺と呼ばれる。そして、ハルバ嶺の処理場は、長さ 70km 以上に及ぶハルバ嶺の西南端、牡丹嶺と隔てる二道河谷の東斜面に位置している。これら山脈の西北に敦化盆地、東南に安図盆地がある。[38][67]

敦化市は面積 1,957 ㎡の吉林省最大の県級市[23]で、人口は約 48 万人、今世紀初以来微増で推移している。四周を山に囲まれ、西南部の牡丹嶺から発する牡丹江が流れる中央部の平地に中心市街がある。敦化には旧満州時代に王子製紙系パルプ工場が置かれるなど林業で知られるが、自然林伐採が 2015 年３月末で禁止されるなどの国レベルの政策変化を受けて、生態系を重視した農林業に転換中である。2011 年の統計では地区工業総生産 208 億元中、木製品が 27.9%、58 億元と首位を占め、同 18.1%の食品、同 11.6%の医薬品が続いた。同年の地区生産高では、大豆、米、玉蜀黍、煙草、漢方薬種などの第一次産業 42.6 億元を第三次産業 69.7 億元が超え、中でもエコツーリズムを重視した観光産業が注目されている。[41]

2014 年に延辺州は“生態天国、魅力延辺”ブランド育成を掲げて 25 件の観光建設プロジェクトを推進し、累計 6.9 億元を投資した。敦化周辺の観光資源は、六頂山などの渤海

[22] 「にどう」河、または「アルダオ」河。
[23] 中国の都市は行政上、省と同格の直轄市（北京、上海、天津、重慶）、省都が該当する地区級市、省に属する農村だった県が都市として認定を受けた県級市の３種に区分される。

関係史跡や、アジア最大を謳う 2011 年完成の正覚寺大仏などだが、2015 年に開通した長春経由高速鉄道や、2016 年に開通した大連起点の高速道路など交通の便を活かし、長白山系に散在する観光地を周遊する内外旅客を吸引する目論みである。中国国家観光局は 2015 年 10 月に初めて国家級観光休暇区リストを公表し、その筆頭に長白山を登載した。国内並びに韓露旅客を狙った観光開発の流れは当面続くと思われる。

３　二道河谷周辺の土地利用動向

処理場が所在する大石頭鎮は敦化市街東南東約 30km に位置し、二道河谷と、敦化市に属するハルバ嶺西半部山林の土地利用は、大石頭林業局が管轄している。ハルバ嶺は中央部でも海抜 800～1,000m、相対標高 300～700m 位で山容も緩やかである。西端の二道河谷側は更に低く、最高点でも海抜 800m を超えないが、斜面は浸食が進んで溝や谷が縦横に錯綜し、谷底は沼沢が多い。[38] 処理場もそうした一帯にある。

二道河谷も本来は叢林や灌木が散在する湿原だったとされる。但し、文化大革命期の 1970 年に大石頭林業局が二道河中流に着工し、1987 年に竣工させた土堤ダム大林水庫により水量を制御して湿原を干上げ、土地開発を試みた。[67] 処理場に近い中流域は当局土地資源評価上「二等農地・二等林業・二等牧業適地」の判定を得る[38]に至っている。しかし、計画上水田灌漑１万３千畝（約 866ha）に対し統計上実績は３千畝（約 200ha）に留まり[67]、2016 年９月の視察時も河沿いに点在する集落周辺や道路脇に畑地がある外は草原となり、若干の牛馬が放牧されていた。地元筋の話によると、林業局は二道河谷草地の土地使用権を分譲せず、現状は地元農民の放牧用に無料開放しているとことであった。

他方、前述した延辺州全般の観光産業振興の波は二道河谷にも及んでいる。処理場と大石頭鎮のほぼ中間にある三河村が、2015 年秋に吉林省から生態系親和的な先進モデル農村「美しい郷村」の表彰を受けており、アグリツーリズム資源として今後発展する可能性がある。

４　亜光湖国家湿地公園造成と環境保全強化

現在、大林水庫と周辺一帯は、「亜光湖国家湿地公園」として国定自然保護区に指定されている。中国国家林業局は 2009 年 12 月 23 日に同公園を国家湿地公園のテストケースとして正式決定した。そして、同 26 日付吉林省政府吉政函[2009]183 号文件に基づき、敦化市は大林水庫水源保護の公告を出した。その主旨は以下のとおりである。

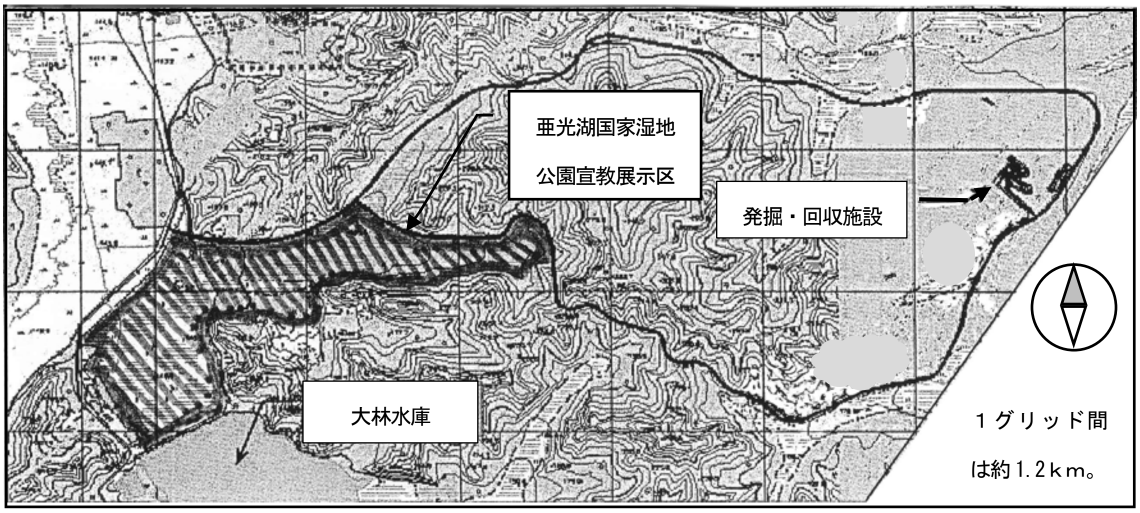
１）　ダム湖周辺と流入する河川３千ｍ上流迄の周辺山地稜線内側を水源保護区とする。

２）　水源保護区内に進入する全ての人員と車両は管理当局への登記検査が必要で、検査を拒む者と釣具漁網類を持ち込む者の進入は禁止される。

３）　水源保護区内は､水源の保護や利用に無関係な建物の新築､改築､増築は禁止される。

（以下略）

これらにより亜光湖と名付けられた大林水庫を含む一帯 2,291 平方 km が国定公園になった。同公園内で一般入園者の受け入れを見込むエリアである宣教展示区と、本事業発掘・回収施設との位置関係を付図５に示す。現在は、発掘・回収現場から約 6km 西の、大林水庫ダム堤を望む西側約三分の一のみが一般公開されている。本公園の宣教展示区は処理場を巡る環状道路南側の沼沢地・湿原林（斜線部）と同南側山稜から成り、公園総面積上は 25.9%に留まる。公園は更に南のダム湖全体と二道河上流の周辺山地一帯を占めている。



付図５　ハルバ嶺発掘・回収施設と大林水庫・亜光湖国家湿地公園宣教展示区位置図

（出典）　図 2.3、p.8、「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」、日本学術会議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 年３月 23 日　に加筆し作成。

公園紹介に拠れば、園内に国家一級１種（白鶴）、国家二級 26 種の国家保護動物を含む野生動物 241 種という、長白山区野生動物種の 65%が生息し、国家二級保護植物５種を含む 248 種の野生植物が自生している。東北虎、梅花鹿、長白松、松茸など希少種はないが、固有種の黒竜江林蛙や五味子など漢方薬で珍重される種は少なくない。但し、公園の内外を問わず、野生動植物を許可なく狩猟・採取することは、現在は禁止されている。[41][68][69]

なお、宣伝教展示区内では、ダムのため湿原の生態系が一旦破壊された地域を、大石頭林業局と北華大学（吉林市）が官学共同で湿原の再生に取り組んでいる。その成果である、一般来訪者が入場できる園内宣教展示区の沼沢／湿原林中には、尾瀬沼を思わせる入園者向の木道が設置されており、木道を外れて湿地を通過し奥地に踏み入ることは困難である。つまり、処理場周辺は水源保護の省令で法的に守られているだけでなく、春夏秋は復元された湿地帯が、冬は厳寒と積雪とが、来訪者の処理場への接近を物理的に妨げている。復元作業と公園整備は現在も継続しており、亜光湖国家湿地公園を敦化地区の観光資源の一つとして運営し、今後も発展させようとする中国側の意志と実践は明らかといえる。[70]

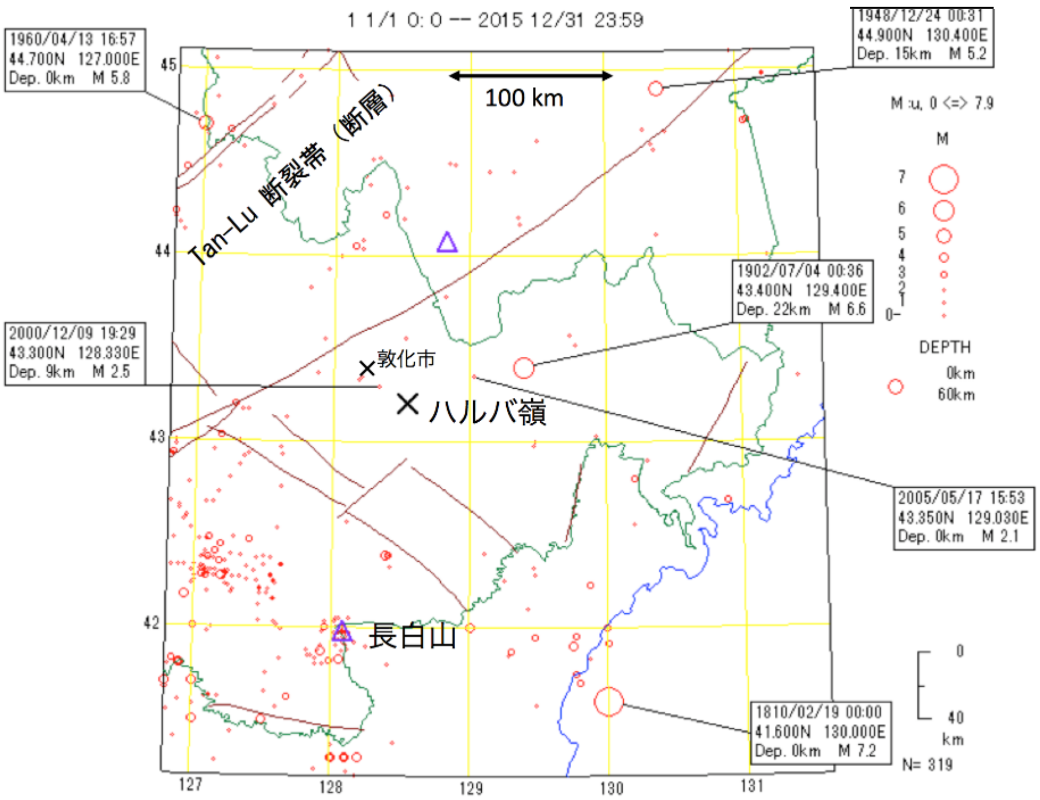
５　まとめ

敦化市は観光産業を重視しており、中国関係機関等は処理場近隣の亜光湖国家湿地公園を有力拠点として今後も開発運営する姿勢である。このため、近隣の未汚染土壌の調査などにより土壌汚染が懸念される物質の残留基準を見極めること、また、その基準レベル迄浄化可能で、且つ、環境ホルモンや催奇性などによる生態系攪乱の懸念がない環境技術の探索と開発が望ましいことが示唆された。

＜付録６＞　延辺州の地震リスク

１　延辺州における地震リスクの状況

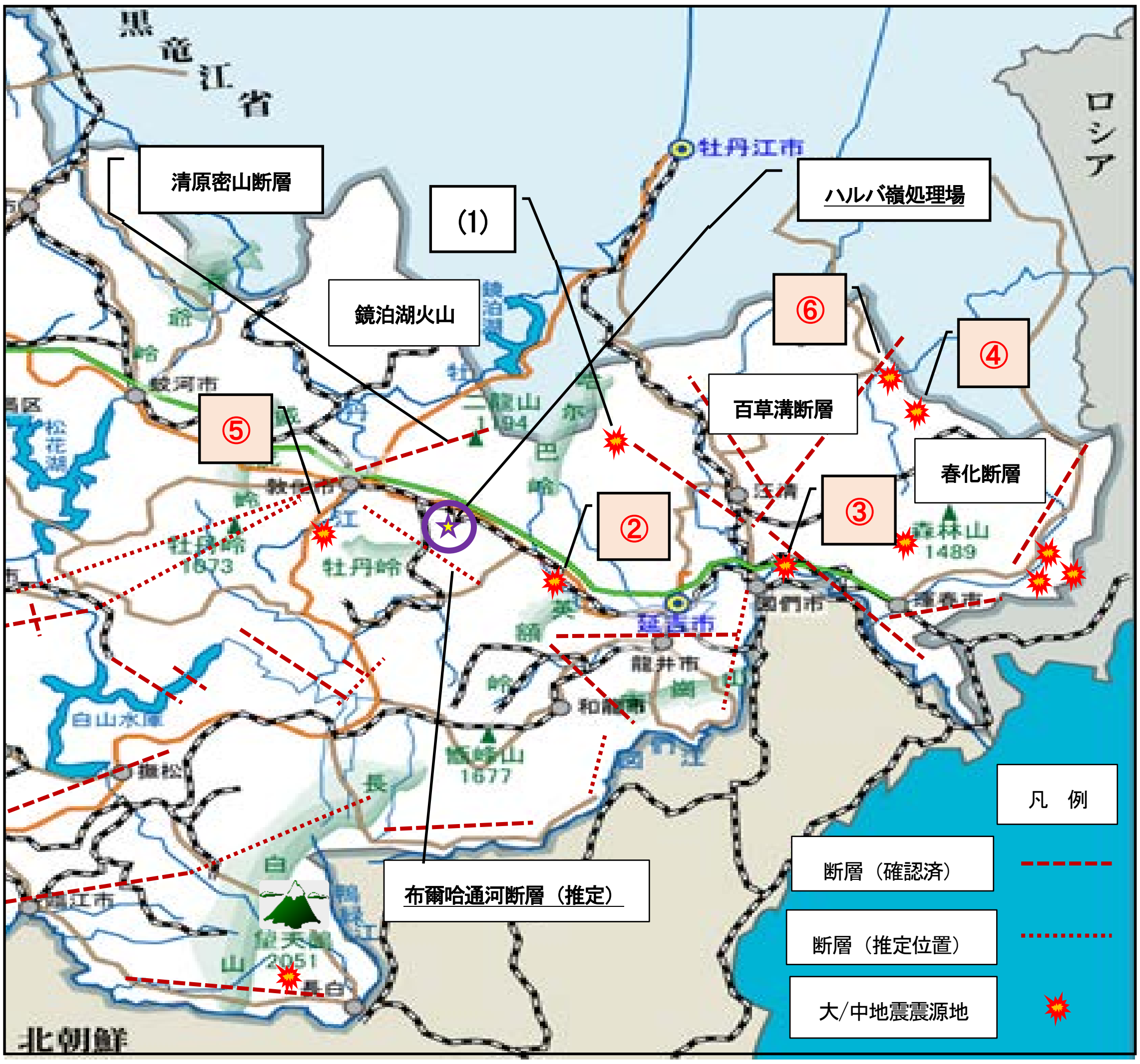
付図 6-1 はハルバ嶺処理場(X 印)周辺地域の西暦元年から 2015 年までの地震の発生状況と活断層の位置関係を、中国の文献やデータベース等を基に作成したものである。地震計が開発される 1900 年頃よりも古い過去の地震については、古文書等の被害の記述から地震の位置や大きさを推定したものがほとんどである。また 1990 年代からはＭ（マグニチュード）２以下の非常に小さな地震も決定されるようになっている。ハルバ嶺からおよそ 100km 圏内では、1902 年７月に処理場の北東約 75km の汪清県内で起きた M6.6 の地震が、震源が約 20km と浅く震災被害が出ている。しかしこの地域は、地震の頻度が日本列島の平均の数百分１程度と、極めて地震の少ない地域であると言える。



付図 6-1　ハルバ嶺周辺に於ける西暦元年～2015 年の期間での深さ 60km より浅い地震の分布と断層位置の関係図[39]

一方、一般に流布されている地震活動の図では付図 6-2 のようにハルバ嶺よりも主に西側に M7 級地震が複数報告されているものがある。これらの多くは震源が地下 400km を超える深発地震で、震源地付近の地表への影響はほとんどないものである。[39] またこの地域には縦横に断層の存在が確認または推定され、Tan-Lu 断層帯と呼ばれる地震帯の一部とされている。この断層帯近傍では、400～500km 程度南の渤海湾周辺で 1975 年海城地震(M7.3)や 1976 年唐山地震(M7.5)などが発生しており、中国の中でも有数の活動的な断層

帯とされている。これらのことから、中国地震局の発行する今後 50 年間の地震による揺れの強さ（最大加速度）の予測地図によればハルバ嶺周辺では 100gal(gal は加速度の単位：cm/sec2)程度の地震動が 10%の確率であり得るとされている。[38][39][71]



付図 6-2　延辺州の近代主要地震震源地および断層位置関係図

丸付番号で示した地震は、震源の深さ(H)が 400km 以上の深発地震で、被害はないもの。なお、2013 年 10～11 月に被害地震が発生した松原市は本地図の西北枠外にある。

（1）被害地震：1902/7/3 23:36 （M6.6） H=20km
② 深発地震：1905/8/25 （M6.75） H=470km
③ 深発地震：1918/2/10 （M6.5） H=450km
④ 深発地震：1918/4/10 （M7.2） H=570km
⑤ 深発地震：1976/4/11 （M4.0） H=542km
⑥ 深発地震：1999/4/8 （M7.0） H=565km

（出典）　「吉林省地図」(http://www.allchinainfo.com/, 2016.11.19 ダウンロード）へ、「地震災害」、p.59[36]に基づき加筆して作成。

同じ吉林省内でハルバ嶺から北西約 360km の松原市で 2013 年 10 月 31 日から 11 月 23 日にかけて震度５前後の地震が計４回発生し、これらの地震で松原市は 26 万戸に被害が生じ、うち 310 戸が全壊したほか、１万 6000 戸が大規模な被害を受け、４万戸が半壊状態となった。防震対策が不備な古い建造物が多い地区では、震度５弱の中規模地震でも災害になる懸念がある。[39]

東日本大震災が起きた 2011 年には、こうした環境下の延辺州官民の地震防災への関心が高まり、吉林省地震局のイニシアチヴによる地方法案「延辺朝鮮族自治州防震減災条例」（以下、新条例）が成立した。新条例に基づき、州内地震観測能力の向上、防災体制整備５ヵ年計画、市民への防災教育・避難訓練などの強化、各級地方政府の防災計画の統合など、多方面の地震防災対策が講じられている。[41]

ハルバ嶺処理場の中核プラント設備を除く諸施設は、中国側の責任で現地の防災基準で建設／運営されている。従って、2009 年国家基準や 2012 年新条例に従って建築された施設と今後設置される施設には、一定の耐震性を期待してよい。しかし、それ以前の建築に係る施設、宿舎や通勤経路の周辺老朽建造物、中国側ライフラインにより引き込まれている処理場の電気、水道、熱水などに関する既設インフラストラクチャーについては、地震リスクの慎重な再点検が望まれる。

２　確認済／推定断層による直下型震災リスク

吉林省発行の地図[38]では、敦化市に於いて東北東の黒竜江省境から敦化盆地を通過して西南西に走る清原密山断層が示されている（付図 6-2）。一方、中国地震局から発行される活断層地図等のデータでも付図６の実線で示される位置に断層が示されており、清原密山断層とほぼ同じ位置に断層が通過している。先に述べたように、中国地震局によれば、今後 50 年間では震度５強～６弱 程度の揺れが 10%の確率であり得るとされおり、敦化市街地での直下型地震リスクを考慮すべきである。新潟県中越地震や熊本地震の経験が示すよう、直下型地震では予想外の被害が生じることがある。

なお、ハルバ嶺処理場がある二道河谷に沿った布爾哈通河断層[24]の存在を推定する中国側文献もある[38]が、本断層は中国地震局のデータでは示されておらず、それが将来地震を起こしうるものなのか現時点では不明である。

[24] 「プルハトン」河断層。布爾哈通は満語で柳の意味。

＜付録７＞　大規模処理設備

１　大規模処理設備の処理方法候補

化学兵器の処理方法には中和処理、燃焼処理、爆破処理などの方法がある。中国遺棄化学兵器の処理に当たっては、試験廃棄処理設備段階で、以下の二つの処理方式が採用された。[72]

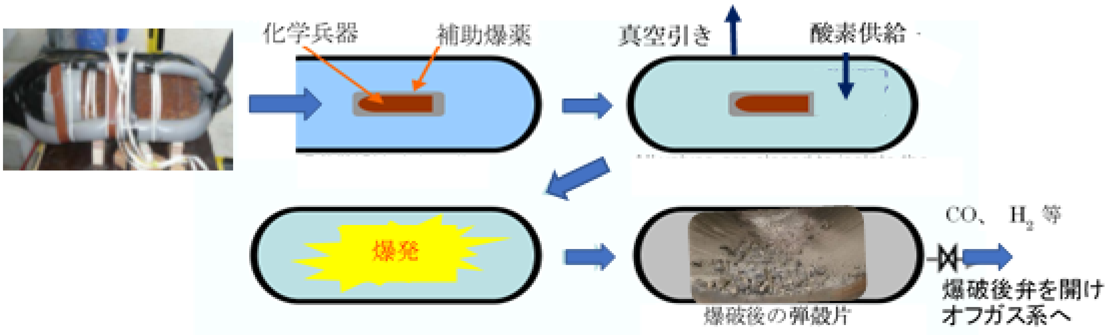
1）　加熱爆破方式：鋼製縦型円筒状容器内に化学兵器を供給、400～500℃に加熱し、火薬類の発火・燃焼と化学剤の高温熱分解を行い、発生したガスおよび分解仕切れなかった化学剤を後段のオフガス系に導き燃焼させる方式。[73][74]

2）　制御爆破方式：化学兵器の周囲をエマルジョン爆薬等の産業用爆薬（補助爆薬）で覆い、密閉型鋼製爆破容器内で爆発させ、爆発時に発生する超高圧衝撃波で化学剤を圧縮・加熱分解させるとともに化学兵器内の火薬類（伝爆薬、炸薬）も殉爆させる方式。[73] 大規模処理設備には本方式が採用された。

以下に両方式の詳細を述べる。

２　制御爆破方式

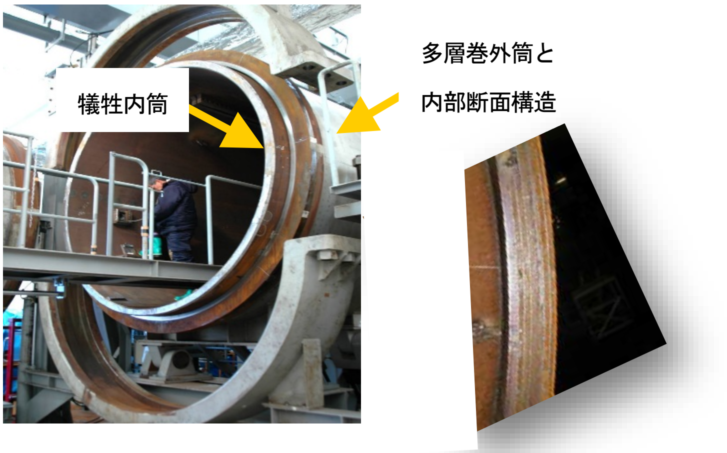
本方式は産業技術総合研究所/爆発安全研究センターと（株）神戸製鋼所が共同開発した日本独自のもので、DAVINCH（Detonation of Ammunition in Vacuum Integrated Chamber）と命名された。付図 7-1 に爆破の手順を示す。処理対象物を容器内に設置後、蓋を閉じ、爆破後のオフガス量と衝撃荷重低減のため、容器内の空気を真空引きする。その後、火薬類の威力を十分に発揮させるため容器内に酸素を供給する。爆破時に発生する H2 および CO などのガスは、爆破毎にバッチ方式で真空ポンプによりオフガス処理系に導かれ、低温プラズマ炉で H2O、CO2 に酸化される。容器内に残った弾殻片は磁石による遠隔作業又は作業員により取り除かれる。



付図　7-1　爆破手順

爆破容器は、爆破時に発生する超高速飛翔体（弾殻片）による運動エネルギーと超高

圧によるポテンシャルエネルギーに耐えるべく横型円筒形の内筒と外筒を併せ持つ二重構造である。爆破容器の内部構造を付図 7-2 に示す。

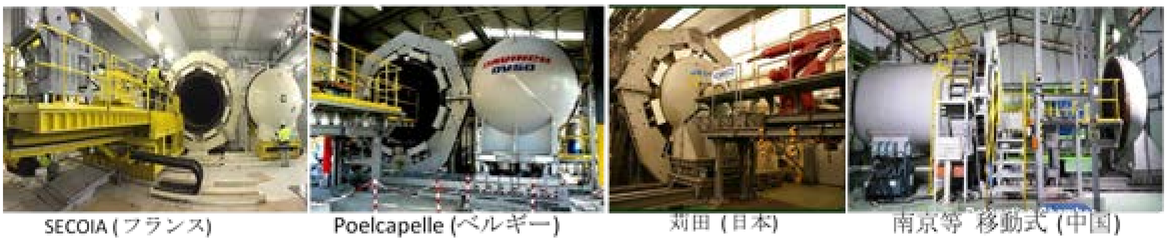


付図 7-2　爆破容器の二重構造

内筒は弾殻片が外筒を傷つけないための高張力鋼製犠牲内筒（Sacrificial shell）で、損傷度合いにより容易に取替え可能である。外筒は爆発による衝撃圧力とそれに伴う超高周期振動に耐えられるよう、多数の板をバウムクッヘン状に巻いた多層巻構造の圧力容器である。この構造により、損傷メカニズムとして考えられるクラックが最内層に発生しても、構造の不連続性のため次の層に進展することが無く、外筒が壊滅的な破壊に至ることは無い。又、一層目の貫通クラックは、特殊な検知孔により定期検査で検知でき、補修が可能である。この外筒設計思想は ”Leak before Burst mode of failure” と呼ばれている。[73][75][76]

DAVINCH は、フランス SECOIA プロジェクト、ベルギー/Poelcapelle, 九州/苅田港、中国/南京などで採用されている。[72][75][77][78][79][80]

付図 7-3 に各国での実施例を示す。



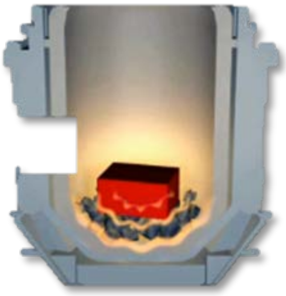
付図 7-3　DAVINCH の実施例

3　加熱爆破方式

本方式はスウェーデンの Dynasafe 社が開発したもので、加熱爆破処理法と呼ばれているが[74]、以下に述べるように、学術的には「加熱燃焼処理」[73]で、米国では、加熱に

より爆発は起こらないことを実証することにより、安全性が高まったとして炉への許容供給量を増やしている。[81]

化学兵器の処理手順は以下の通りである。処理対象弾は専用のトレーに入れて固縛され、投入コンベアに並べられる。トレーは遠隔自動によりコンベア、リフタを経て投入装置により、炉の頂部から、炉内に投入される。炉内部は電気加熱ヒータにより予め一定温度に保たれており、弾は炉内で加熱されて炸薬は燃焼、化学剤は弾殻から漏れ出して燃焼するか、高温環境下で熱分解される。スクラップは貯まれば定期的に取り出される。付図 7-4 に炉内燃焼の概念図を示す。[82]



付図　7-4　加熱爆破炉の概念

炉は排ガス処理系と直接繋がっており、燃焼によって発生するガスや炉内で燃焼しきれなかった化学剤は連続的に排ガス系に導かれ、これらを完全に燃焼する為の二次燃焼炉、および排ガス浄化用のスプレードライヤ、クエンチ/スクラバ、バグフィルタ、更に HEPA/活性炭フィルタと触媒式脱硝装置などを通して大気に放出される。[72][81]

加熱爆破炉はドイツ・ムンスタ、米国・アニストン、リビア、国内では千葉県で発見された老朽化学兵器の処理にも実績がある。

付図 7-4 に実施例を示す。[11][72][83]

Munster の炉（ドイツ）　ハルバ嶺試験設備の炉（中国）　千葉の炉のオフガス処理系（千葉）

付図 7-5 加熱爆破システムの実施

＜付録８＞　苅田港プロジェクトの概要

１　苅田港での化学兵器発見とその後の展開

苅田港プロジェクトは 2000 年、大型船舶の入港を可能にする浚渫工事中に発見された 18 個の不審物が化学弾と判明したことに端を発する。戦時中、近隣の旧軍施設に化学兵器が備蓄されており、発見された化学弾は、終戦直後に苅田港沖に投棄されたものの一部であった。

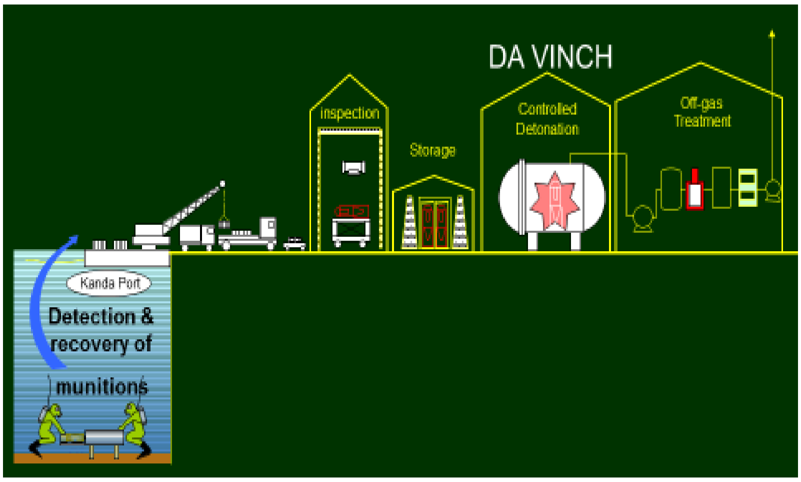
浚渫工事は直ちに中断され、苅田港全体における化学弾の探査、回収、処理方法の検討が開始された。2003 年までに新しい磁気探査技術が開発され、2004 年には処理施設が運転を開始した。この一連の作業は苅田港をいくつかの工区に分け、先行探査作業と後続の回収・処理作業を工区ごとに 1 年ずつずらして実施することを繰り返した。予定工区 23km^2 の作業が終了する 2013 年までに約 3,000 発の化学弾が回収・処理され、処理設備は 2014 年に解体・撤去された。[84]

その後も探査は続けられ、当該工区とその範囲外との境界付近で弾が発見されることがある。

２　苅田プロジェクトに関する技術開発

積極的な海からの化学兵器の回収は世界でも例がなく、投棄弾の探査方法、化学兵器回収用の耐化学剤潜水システム、水中 X 線装置、回収弾用の二重安全輸送容器および回収化学兵器の爆破処理システムなど一連の技術が開発された。[85]

ここに、海洋投棄化学兵器の探査、回収、輸送、処理という世界初の一貫システムが完成した。これにより、探査・回収作業の時間と費用の大幅削減およびその後の浚渫工事の安全に大きく寄与するとともに、化学弾の安全な輸送・処理にも住民の理解が得られた。付図 8-1 にシステムイメージを示す。



付図　8　苅田港プロジェクトの一貫システム

(1) 高精度磁気探査システム

当時の磁気探査方法では、鉄などの金属による磁気異常点は検知できても、それが化学弾のものか否かは識別できなかった。その為、磁気異常のパターンを、明らかに弾でないものと弾らしきものとを判別する高精度磁気探査システムが開発された。[86][87] これにより、全ての磁気異常点を耐化学剤潜水服で接近し確認するのではなく、疑わしき点のみに当該装備で潜水し、弾か否かを目視確認して弾のみを回収するシステムが確立された。これにより化学兵器を想定した潜水作業と除去後の通常潜水作業を分けることができた。

(2) 耐化学剤潜水システム

外国製化学兵器用潜水システムは重量が重く耐ルイサイト性の保証がなかった。その為、苅田プロジェクト用に新たに耐ルイサイト、耐マスタード性潜水システムを開発した。[86][87] 表は傷つきにくく、裏はダイバーに優しい二重構造の軽い素材を選定し、米国の研究所において米国基準に従試験を行った。100%のルイサイトとマスタードによる浸透率測定で、6時間後にも検出限界以下を確認した。

呼吸用空気の排気は逆止弁を通して海中に放出し、ダイバーの位置が常時確認できるのも本システムの特徴である。

(3) 水中X線装置

弾回収時に信管の有無の確認のため水中X線装置が開発された。X線の映像はポンツーン上からリアルタイムで防衛省に送られ、信管のついているものは専門の自衛隊員が回収する手順が確立された。[85][87]

(4) 二重安全輸送容器

回収される化学弾を水中からいきなり揚収すると、海底と大気圧との差により内部の化学剤が噴出する恐れがある。その為、海底の圧力を掛けたまま回収する二重容器が開発された。[85][87] この容器は化学弾を海水ごと収納する内筒と、海水が漏れた場合に貯蔵する外筒からなり、輸送中に万一化学弾が爆発しても、人体に致命的損傷を与えないよう設計されている。

(5) 大型制御爆破システム (DAVINCH)

国内初の化学兵器処理である屈斜路湖プロジェクトでは、化学弾中の化学剤を抜き出し中和、残りの弾殻と火薬類は小型チャンバー内爆破という方式がとられた。[88] しかし将来の中国遺棄化学兵器処理を考慮すると弾ごと爆破すれば大幅コスト低減に繋がるとの考えから、苅田港では弾ごと爆破する新しい制御爆破装置 (DAVINCH) が開発・採用された。[89] 詳細は付録7参照。

３　今後国内で発見される化学兵器への対応（案）

第１節で述べた、その後の作業で発見された化学弾については、二重容器に収納して一時海中保管の上、処理装置を再び設けて処理するなどの手を打たねばならない。

苅田港に限らず広く目を全国に転じると、過去の調査から今後も海の近くで化学兵器が発見される可能性がある。その時、その都度処理方法を検討し設備を整えるには時間と費用を要する。また処理までの期間、安全に保管せねばならない。更に処理場立地には常にNIMBY (Not In My Back Yard)問題が付きまとう。

従って、国内の投棄地に海が多いことを考慮し以下の方法が一案と考えられる。

・小型の処理装置をポンツーンに積載し常時母港に係留

・弾発見時、ポンツーンを現場近くに曳航し、洋上・オンサイト処理

・陸地で発見された場合は、弾を二重密封容器に収納しポンツーン[25]まで輸送し処理

世界の目がnon-stockpileに注がれつつある現在、このような柔軟に対応可能なシステムをあらかじめ準備しておくことは、周囲を海で囲まれた国土の利点を生かした機動的対策として有効であると考えられる。

---

[25] Pontoon (英)。はしけ、箱舟、浮舟などとも呼ばれる底が平らな舟、大型台船。連結するなどして水上作業台や浮橋等として使用することもある。ここでは所謂pontoon boatとは異なり、エンジンが付いていないものを想定している。