

廃止措置分野における日米研究協力の成果

Outcome of Cooperative Program between JAEA and US DOE
on Decommissioning

島田 太郎 白石 邦生 立花 光夫 石神 努

Taro SHIMADA, Kunio SHIRAISHI, Mitsuo TACHIBANA and Tsutomu ISHIGAMI

安全研究センター

原子力エネルギー関連施設安全評価研究ユニット

Nuclear Facility Safety Research Unit

Nuclear Safety Research Center

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

廃止措置分野における日米研究協力の成果

日本原子力研究開発機構
安全研究センター 原子力エネルギー関連施設安全評価研究ユニット
島田 太郎・白石 邦生⁺¹・立花 光夫⁺²・石神 努⁺²

(2009年4月22日受理)

原子力機構（旧日本原子力研究所）では1988年に原子力施設の廃止措置に係る協力協定を米国エネルギー省と締結し各種情報の収集を進めてきた。また、2001年には、旧原研と米国エネルギー省との間の研究協力に関する包括協定の下に、新たな廃止措置分野での研究協力が開始された。この間、米国では1989年から開始された環境管理計画（マンハッタン計画等で使用された原子力施設の解体・除染、クリーンアップ）が進展し、新規技術の開発や現場での適用及び改良が試みられ、その有効性が確認された。本協力においては、米国エネルギー省からは研究用原子炉CP-5及びマウンド施設を、旧原研からはJRR-2と再処理特別研究棟を主要な研究協力対象施設として、新たな技術開発を含めた廃止措置に関する技術情報の交換を行うとともに、各種施設の廃止措置及び環境管理計画全体の進捗状況、革新的技術の実証試験（大規模実証配備プログラム）の成果等を取得した。本報告書は、これまでの協力関係の下で得られた、CP-5、マウンド施設の廃止措置活動、米国における技術開発の成果、環境管理計画の進展についてまとめたものである。

原子力科学研究所（駐在）：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

+1 東海研究開発センター 原子力科学研究所 バックエンド技術部

+2 バックエンド推進部門 バックエンド技術開発ユニット

Outcome of Cooperative Program between JAEA and US DOE on Decommissioning

Taro SHIMADA, Kunio SHIRAI SHI⁺¹, Mitsuo TACHIBANA⁺² and Tsutomu ISHIGAMI⁺²

Nuclear Facility Safety Research Unit
Nuclear Safety Research Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 22, 2009)

The Japan Atomic Energy Agency (JAEA: the former Japan Atomic Energy Research Institute) has been collecting wide variety of information on decommissioning nuclear facilities by the cooperative program with US Department of Energy (DOE) since 1988. In the course of the cooperation, the cooperative program has continued under the newly established specific memorandum in the field of decontamination and decommissioning nuclear facilities since 2001 on the framework agreement of USDOE and JAERI. On the other hand, the US DOE environmental management program, which was initiated in 1989, has developed resulting in achievement of dismantlement & decontamination and cleanup of nuclear facilities mainly used for Manhattan project and demonstration of various technologies developed for this program. In the cooperative activities, information on decommissioning activities including innovated technology developments has been exchanged with CP-5 and Mound plant as designated main facilities of DOE, and with JRR-2 and the reprocessing test facility of JAERI. The experiences and technologies applied in the environmental management program are expected to contribute to planning and implementing decommissioning nuclear facilities in JAEA.

This report describes the summary of the information on decommissioning activities and technology development & deployment of the environmental management program in DOE obtained through the cooperation under the specific memorandum agreement.

Keywords: Decommissioning, USDOE, Environmental Management

+1 Department of Decommissioning and Waste Management, Nuclear Science Research Institute, Tokai Research and Development Center

+2 Nuclear Cycle Backend Technology Development Unit, Nuclear Cycle Backend Directorate

目 次

1.はじめに.....	1
2.廃止措置に関する日米協力の経緯.....	2
2.1 本協定締結の経緯.....	2
2.2 2001年までの協力.....	2
2.3 2001年以降の協力.....	2
3.研究協力対象施設の廃止措置.....	4
3.1 アルゴンヌ国立研究所.....	4
3.2 マウンド施設.....	6
4.米国における環境管理計画.....	9
4.1 環境管理計画の概要.....	9
4.2 大規模実証配備プログラム.....	10
4.2.1 アルゴンヌ国立研究所における技術開発.....	10
4.2.2 マウンド施設における技術開発.....	12
4.2.3 その他の代表的な技術開発.....	13
4.3 環境管理計画の現状.....	15
5.まとめ.....	19
謝辞.....	20
参考文献.....	20
付録A 2001年までの協力によって得られた主な廃止措置プロジェクトの概要.....	40
付録B アルゴンヌ国立研究所における研究活動の現状.....	41

Contents

1. Introduction	1
2. Cooperative Program on Decommissioning between US DOE and JAEA	2
2.1 Progress of the Cooperative Program.....	2
2.2 Cooperation before 2001	2
2.3 Cooperation after 2001.....	2
3. Decommissioning of Nuclear Facilities Designated to the Cooperative Program	4
3.1 Argonne National Laboratory	4
3.2 Mound Site	6
4. Environmental Management Program in US.....	9
4.1 Outline of Environmental Management Program.....	9
4.2 Large Scale Demonstration and Deployment Program	10
4.2.1 Technology Development in Argonne National Laboratory	10
4.2.2 Technology Development in Mound site	12
4.2.3 Other Technologies	13
4.3 Current Status of Environmental Management Program.....	15
5. Summary	19
Acknowledgment	20
References.....	20
Appendix A	40
Appendix B	41

図表リスト

- 表1 アルゴンヌ国立研究所における廃止措置プロジェクト
- 表2 環境管理計画における対象サイト
- 表3 現場事務所と担当サイト
- 表4 EM予算年度推移
- 表5 大規模実証配備プログラム（LSDDP）で適用された各種技術
- 表6 CP-5の解体で適用された各種技術（LSDDP）
- 表7 CP-5跡地利用の際の想定被ばく経路
- 表8 マウンド施設で適用された各種技術（LSDDP）

- 図1 米国エネルギー省全体組織図
- 図2 環境管理局内組織図
- 図3 RESRADファミリーコード群

- 表B 現在アルゴンヌ国立研究所が運用する施設一覧

List of Tables and Figures

Table 1 Decommissioning projects in ANL

Table 2 Object sites in EM project

Table 3 Field offices and corresponding sites

Table 4 Annual budgets

Table 5 Technologies applied in LSDDP

Table 6 Technologies applied in dismantling of CP-5

Table 7 Postulated exposure pathway in use of land after completion of decommissioning

Table 8 Technologies applied in Mound facilities

Figure 1 Organization chart of DOE

Figure 2 Organization chart of Office of Environmental Management

Figure 3 Family of RESRAD computer codes

Table B Facilities operated in ANL

1. はじめに

我が国で原子力開発が開始されてから約半世紀を経た現在、開発当時に建設された試験研究用の施設は老朽化し、その多くが廃止措置を迎えるようとしている。日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）においては中期計画において34施設について廃止措置を進めることにし、そのための準備及び実施作業が進められている。これらの施設に係る廃止措置をより効率的に行うために、国内外の廃止措置情報を収集し分析しておくことが必要である。

原子力機構では、旧日本原子力研究所（以下、旧原研）の時代から、将来、我が国の原子力施設の廃止措置が必要になることを勘案して、各種施設の廃止措置や関連する技術開発（動力試験炉（JPDR）解体計画⁽¹⁾及び再処理特別研究棟（JRTF）解体計画⁽²⁾など）を進めるとともに、世界各国の廃止措置に関する情報収集を実施し、廃止措置作業等に役立てることとした。このような背景において、1988年に米国エネルギー省（DOE）と旧原研との間で原子力施設の廃止措置に関する協力協定が締結され、協力を進めてきた。本協力においては、廃止措置に関する活動を進めている代表的な施設を取りあげ、それらの施設で行われている廃止措置に関する活動を中心に情報の交換等を進めることとした。米国DOEからはシッピングポート原子力発電所、アルゴンヌ国立研究所の沸騰水型実験原子炉 EBWR、及び、ウェストバレー再処理施設を対象施設として取りあげ、その計画の情報交換が進められた。また、2001年からは、旧原研と米国DOEとの研究協力に関する包括協定の下、廃止措置に関する特定覚書を締結して、旧原研側からはJRR-2及びJRTFを、米国DOEからはアルゴンヌ国立研究所の重水減速冷却実験炉（CP-5）及びオハイオ州・マイアミスバーグ地区のマウンド施設を対象施設として取りあげ、これらの廃止措置プロジェクトに関する技術情報、日米各国の廃止措置に関するデータベース等の情報等の交換を進めてきた。

さらに、米国においては、上記の個別の廃止措置に加えて、米国全土にわたる核兵器製造に係る施設やサイト等を対象として1989年から環境管理（Environmental Management）計画が開始された。米国DOEは専門の環境管理局を立ち上げ、管轄施設を中心に老朽化した放射性物質取扱施設の解体、汚染施設や土壤のクリーンアップが進められた。また、この環境管理計画の一環として、関連する技術開発を抽出し、それらを実際の作業に適用して開発した技術の評価を行う「大規模実証配備プログラム（LSDDP: Large Scale Demonstration and Deployment Program）」が進められた。環境管理計画は産官学一体となって、40年の歳月と計2200億ドルの費用を要する大規模な廃止措置プロジェクトであり、世界各国からその進捗が注目されている。

廃止措置の経験・知見及び技術開発及び適用性試験結果は、原子力機構のみならず、我が国における原子力施設の廃止措置を安全かつ効率的に進めるために役立つものと考えられ、解体作業から発生する放射性廃棄物の管理やクリアランスに係る技術課題の解決に有用なものである。

本報告書は、研究協力に基づいて得られたCP-5をはじめとするアルゴンヌ国立研究所(ANL)、マウンド施設における廃止措置活動の内容を、また、米国の環境管理計画の情報として、環境管理計画の全体像とLSDDPの概要についてまとめたものである。

2. 廃止措置に関する日米協力の経緯

2.1 本協定締結の経緯

旧原研と米国 DOE との原子力施設の廃止措置に関する協力協定は、廃止措置独自の協定として 1988 年に締結された。本協定は、当時、米国 DOE 及び旧原研において、それぞれシッピングポート原子力発電所及び JPDR の廃止措置作業が進められており、これらの作業及び技術開発に係る情報交換を目的にして実施したものであり、人員の派遣等を含め密接に交流した。その後、シッピングポート原子力発電所の廃止措置が 1989 年までに終了し、一方、JPDR の廃止措置は 1996 年までに終了した。また、旧原研ではそれらの作業に関する分析や知見に基づく新たな解体技術の高度化等の研究開発が一段落した。その後の展開として、旧原研からは、JRTF、JRR-2 などの廃止措置、米国 DOE からは EBWR (Experimental Boiling Water Reactor)、ウェストバレー再処理施設の廃止措置等に係る情報交換を中心とした協力を進めた。

1990 年代後半においては、米国 DOE と旧原研との間で廃止措置以外の分野における研究協力に関する包括協定が別途締結されており、特定覚書を締結することによって、廃止措置に関する特定分野における研究協力として組み入れることが可能となった。旧原研では原子力施設の廃止措置に関して全所的に取り組む観点から、これまでの廃止措置に関する協定をいったん廃止し、特定覚書を締結することによって、廃止措置に関する研究協力を包括協定に組み入れることとした。この結果、2001 年 6 月には包括協定の下に「原子力施設の除染と廃止措置に関する日本原子力研究所とアメリカ合衆国 DOE との特定覚書取決め」が締結され、引き続き研究協力が進められることとなった。さらに、2005 年に旧原研と旧核燃料サイクル開発機構が統合して原子力機構が設立された後も、協力は継続された。しかし、近年、上記特定覚書取決めの中で設定された対象施設 (アルゴンヌ国立研究所の CP-5、マウンド施設) の主要な廃止措置が終了したこと等のため、協力活動を終了した。

2.2 2001 年までの協力

廃止措置の協力協定の下では、日本及び米国における情報交換会議及びワークショップの実施、旧原研職員の米国における廃止措置サイト (シッピングポート及び EBWR など) への派遣等の活動を通じて、原子力施設の廃止措置の経験及び知見、新たな解体技術の開発に関する情報を共有してきた。特に、シッピングポートや EBWR などの廃止措置プロジェクトが実施された時期は JPDR 解体作業が進められた時期と一致しており、JPDR から技術員を同プロジェクトに派遣し、解体作業に参加して、実際の作業を経験することができた。派遣された職員は帰国後 JPDR を始めとする旧原研における原子力施設の解体作業に従事し、米国における経験を反映して安全で効率的な廃止措置の実施に貢献した。

2.3 2001 年以降の協力

包括協定下の特定覚書においては、研究協力対象施設として、米国 DOE が進める廃止措置計画の中から、旧原研の東海研究所において進められていた JRR-2 の廃止措置に対応してアルゴンヌ

国立研究所で解体中であった CP-5 を、JRTF に対応してマウンド施設を選定した。これは、CP-5 が JRR-2 の原型となった研究炉であり、設備・機器の特徴が類似していること、また、マウンド施設においては、トリチウムや超ウラン元素で汚染した機器の除染及び解体作業が行われて、JRTF や今後行う核燃料使用施設等の廃止措置に有用な知見の取得が期待されることを考慮したものである。

旧原研からは、JRR-2 におけるトリチウムで汚染された冷却系配管の除染や撤去作業に関するデータ、JRTF における超ウラン元素で汚染した機器の除染、解体作業において得られる知見、シミュレーションを含む遠隔解体技術の成果等を米国 DOE に提供した。さらに、旧原研で進められていた廃止措置に係るデータベースの構築に関して、解体技術の適用性、作業管理データやコスト評価方法等の検討結果を提供した。

米国 DOE からは後述するように、研究協力対象施設での廃止措置計画、実施状況、技術開発、安全性評価及び安全確保策等、多岐にわたる情報に加え、DOE が全米各地で実施、管轄している環境管理計画の方針、廃止措置活動の実施状況、LSDDP における技術開発及び適用結果等について情報提供を受けた。

これら CP-5 及びマウンド施設におけるトリチウム除染、解体撤去方法及び解体廃棄物の処理方法の状況は、日米の考え方の相違を認識しつつ、JRR-2 廃止措置の除染手法の検討、解体廃棄物の取扱等に反映された。また、マウンド施設における TRU にも汚染された機器の解体撤去方法、解体廃棄物の処理・処分方法等の情報は、JRTF 廃止措置における除染作業及び適用工法の検討等に役立てられた。さらに、CP-5 での遠隔解体装置の適用性については、原子炉解体高度化技術開発における解体作業シミュレーションシステムの開発に参考となった。

以下では、研究協力で得られた技術情報について、その詳細を記述する。

3. 研究協力対象施設の廃止措置

3.1 アルゴンヌ国立研究所

アルゴンヌ国立研究所でこれまでに実施された廃止措置プロジェクトの一覧を表 1 に示す⁽³⁾。本表に示すように、アルゴンヌ国立研究所では、EBWR（1996 年廃止措置終了）、JANUS（生物照射用原子炉）、Juggernaut(軽水減速・冷却/黒鉛反射体)、ZPR-6/9、ATSR（炉物理、計測等用）等の原子炉施設、Pu グローブボックス等の核燃料取扱施設、サイクロトロンの加速器施設等、多くの原子力施設が存在したが、主要な施設の廃止措置をすでに完了し、2009 年（会計年度）には、環境管理計画に係る大部分の作業を終了することになる。以下に、CP-5 を中心に原子力施設の廃止措置の結果について記述する。

(1) CP-5 の解体⁽⁴⁾

施設の概要

CP-5 (Chicago Pile 5) 原子炉は、5MW の熱出力を持つ重水減速冷却型の高濃縮ウラン燃料を用いた研究用原子炉である。1954 年から運転を開始し、原子炉より取り出した中性子を用いて主に原子核物理及び物質科学的研究が実施された。CP-5 は 25 年に及び連続的に運転を続け、1979 年に永久停止し、燃料取り出しが行われた。1980 年にすべての燃料及びプロセス系よりドレンした重水をサイト外へ運搬した。解体作業が開始される 1990 年まで休止状態を維持し、最小の維持作業を継続した。この間、地表水の漏えいや建屋の劣化、生体遮へいコンクリートからのトリチウム蒸気の放出等の可能性があるため、放射線モニターでの監視を継続した。

解体作業

解体作業は 1990 年に開始された。解体作業には大規模実証配備プログラムにおいて開発された様々な革新的解体技術（23 技術）が適用されたが、なかでも、双碗型マニピュレータ（DAWP⁽⁵⁾）を使用した原子炉本体の撤去では、作業員の被ばくを抑えるとともに、作業効率、安全性ともに向上した。DAWP で解体撤去された対象物は、黒鉛レンガ 27 トン、鉄 0.91 トン、アルミニウム 0.77 トン、鉛 0.64 トン、ボーラル（中性子吸収性能を高めた遮蔽材料で、炭化ホウ素とアルミニウムを混合焼結したもの）0.28 トンであった。この解体作業では、受動的振動低減技術によって、DAWP の揺動時間（swing time）を 60% にまで抑えることができ、つり下げ荷重の取扱時に安全性と取扱効率が向上した。一方、遠隔操作を行うオペレータの訓練には、多くの時間を必要とした。また、複数のカメラやマスタースレーブ方式によるマニピュレータの操作に向かない者もいて、あらかじめ適性を判断してから訓練に入ることが望ましい等の知見も得られた。

適用技術

BROKK 社製 BM250⁽⁶⁾は、先端ツールを交換し遠隔操作可能な小型重機であり、コンクリート構造物の破碎やコンクリートガラの撤去に適用された。これにより作業効率の向上が報告されている。ホットセルのコンクリート解体には BM250 を用いることが可能であったが、一部に設置されていた遮へい用重コンクリートの撤去には適用できなかった。

この他、在来工法を利用した例は次のとおりである。

- ・貯蔵タンクの解体に酸素アセチレントーチを使用
- ・熱交換器は開口部を閉止し、一体ものとして撤去
- ・汚染拡大防止のために簡易テントを設置（負圧管理）
- ・燃料プールの一部はダイアモンドケーブルソーを用いて分割
- ・上記作業では、切り込みの作成にスティッヂドリルで穴を開け、ケーブルソーを使用
- ・エレベータールーム天井表面の除染に、HEPA フィルタ付属の可搬式のスクラバを使用

2000 年までにトリチウムをはじめとする放射能汚染の除染作業及び機器の撤去は全て終了し、残存建屋に最終的に放射能がないことを確認する測定が実施された⁽⁴⁾。オークリッジ科学教育研究所 (Oak Ridge Institute for Science and Education (ORISE)) による第三者検証サーバイが実施され、その結果、接近可能な領域ではバックグラウンドレベルであったが、接近不可能な領域にホットスポット汚染が残存することが指摘された。この結果、無制限解放を断念することとし、2000 年 7 月、産業利用限定とした限定解放の形をとって、廃止措置が公式に終了し、敷地は DOE 管轄から地主へ委譲された。

(2) その他の廃止措置

Juggernaut: 本原子炉は軽水減速冷却黒鉛反射型で熱出力 250kW の研究炉であり、1962 年から 1970 年まで中性子束を供給した。永久停止時に原子炉燃料は原子炉本体から撤去され、冷却系は全てドレンされた。原子炉、ポンプ室、ピットを解体して、建屋の除染を実施した。

301 建屋ホットセル: 本施設は 1950 年代初めに建設され、施設を用いて核燃料物質の研究開発が行われた。1971 年に装置の陳腐化のために利用を停止し、予備的なクリーンアップを行ったが、高レベルの汚染が施設全体にわたって広がっていた。一方で施設停止後にウラン酸化物を利用した溶融冷却実験 (MACEs) が 1990 年初頭まで実施され、さらにウラン、プルトニウム、Cs-137 等の汚染を拡大させていった。2000 年より貯蔵タンクの除染と撤去を皮切りに廃止措置が開始されたが、2007 年時点ではホットケーブ (Cave-5) の除染と撤去、実験室 (D-109) の除染、補助エリア機器の撤去及び建屋床面の一部の除染作業が完了した。2008 年現在、廃止措置を完了させるために必要な十分な資金が確保されるまで、プロジェクトを一時停止している。建屋解体撤去までの残作業に関して再度環境評価を 2007 年 2 月に実施して安全性を確認した⁽⁷⁾。これにより解体撤去作業の再開が期待されている。敷地は無制限利用ができるように土壤の除染も実施する予定となっている。

ZPR-6/9: ゼロ出力の原子炉で、ZPR-6 は平和利用エネルギーのための高速炉物理研究用に、ZPR-9 は原子力ロケット用の高速炉研究用に、1960 年代から 1982 年まで供用された。ZPR-6 の制御盤が 1997 年に撤去された。ZPR-9 は制御盤及び原子炉の一部も撤去された。セル 4 及び 5 に U-238, Th-234, Cs-137 を主とする汚染があり、残存放射能の総量は 7.0×10^{10} Bq 以下であることが調査に

よって判明した。2006年にZPRの解体作業が終了し、最終確認サーベイも実施された。2006年9月に第三者機関としてORISEが最終確認サーベイの検証測定を実施した⁽⁸⁾。

ATSR:本原子炉は高濃縮燃料を用いた原子炉物理研究用の実験炉であり、1960年代から1982年まで供用された。ウランとプルトニウム燃料で燃料集合体の中性子特性等の研究に用いられた。その後、原子炉、プロセス系及び関連機器のクリーンアップと解体が実施された。ATSRは1998年7月に廃止措置にかかる作業を開始し4ヶ月で解体撤去を終了した。32.8m³の低レベル放射性廃棄物（放射能量：1.82GBq）と2.7m³の混合廃棄物が発生し、総費用は61万ドルであった⁽⁹⁾。

なお、上述した施設等の廃止措置作業からは多くの知見がまとめられている。その一例を以下に示す。

- ・ 鉛の撤去を行う際、鉛ダストの吸入を防ぐための呼吸保護具の着用は有効であった。
- ・ 原子炉容器分割のための切断では電気のこぎりを使用する際、ゴム手袋の上の革手袋の着用は鋭利な切断面によるけがの防止に有効であった。
- ・ 特殊形状の機器に専用の収納容器を作成することは、準備時間及びコスト等に影響があるが、解体撤去作業の時間短縮と被ばく線量の低減に効果的である。

3.2 マウンド施設

(1) 概要

マウンド施設は、1947年マンハッタン計画の一つであるデイトンプロジェクトとして、オハイオ州マイアミスバーグに核兵器の研究開発及び製造施設として誕生し、1949年に核兵器の中性子源の製造を主として施設の運転が開始された。また、人工衛星に搭載されるプルトニウム電池の研究開発が行われたことでも有名な施設である。さらに、水素爆弾用のトリチウムの回収と精製が行われた。この製造に関わった施設は、T Building及びR(Research)/SW(Semi-Work)Buildingsの2つに大きく分類できる⁽¹⁰⁾。

1995年にマウンド施設が環境管理計画に移行されるまで国防計画エネルギー局が管理していたが、環境管理計画を進めるに当たり、国防計画エネルギー局はマウンド施設における全ての製造作業を他の米国DOEの原子力サイトへ移行させ、所有権も環境管理計画へ移行させた。現在のマウンド施設における環境管理計画の使命は、マウンドサイトの土地、機器、施設を非原子力産業のために安全かつ経済的に利用できるようにすることであった。これには、大規模な環境修復、商業利用のための施設の遷移、及び、廃棄物管理の継続が含まれる。

マウンドサイト全体の廃止措置計画は、以下の区分で進められた。

- ∉ メインヒルプロジェクト（トリチウム取扱施設の廃止措置を含む）
- ∉ プルトニウム取扱施設エリアプロジェクト（Pu取扱施設の廃止措置を含む）
- ∉ 土壌修復プロジェクト

研究協力対象施設はこのうちメインヒルプロジェクトのトリチウム取扱施設であり、トリチウム取扱施設における、主要4建屋の廃止措置作業の概要を述べる。

(2) 各建屋の概要と終了形態

Technical Building: 本施設は強度に補強された地下施設で、1948～72年までPo-210の分離・加工が実施された。その後装置類が撤去された。また、その跡にトリチウム取扱施設が新たに設置され1982～98年まで運転された。汚染がすべて除去された後、残存建屋は地元に譲渡された。

Semi Work Building: オールドケーブと呼ばれる1000ft²の広さを持つ部屋において、1951～55年まで、核燃料の再処理、核分裂生成物の物性研究及びRa-226, Ac-227の抽出と精製が実施された。オールドケーブに残存する放射能量はAc-227が 1.85×10^{11} Bq、Ra-226が 4.44×10^{11} Bqであった。その後、稀少自然アイソトープ(Th-229, Th-230, Pa-231)の分離が1995年まで行われた。また、トリチウムの加工・処理が1998年まで実施されたが、トリチウムに汚染された2ℓの水銀が発生した。廃止措置は1998年から開始され、オールドケーブの一部はそのまま埋めることとし、建屋は解体撤去された。

Research Building: 本施設は1948～52年にはPo-210の物性研究が、1951～55年にはRa-226, Ac-227の物性研究・分離が実施された。その後、1958～80年にはPu-238の物性研究・分析が、1960～70年にはU-234の分離が、また、1957～98年にはトリチウムの物性研究・加工が実施された。Semi Work Buildingと同様に建屋は解体撤去された。

Hydrolysis House Building: 本施設は1948～58年にはPo-210/Bi-209の分離・加工が、1960～70年には稀少自然アイソトープの抽出が、また、1965～95年にはHe-3からトリチウムを分離する作業が実施された。廃止措置は1998年に開始され2000年までに完了した。

(3) 廃止措置の方法及び手順

マウンドサイトに存在するトリチウム取扱施設には、トリチウムによる汚染の他にも、床ドレンやダクト等に α 核種の汚染が残存しており、解体作業にあたっては α 核種に対応した厳しい安全防護措置が必要とされた。また、マウンド施設の廃止措置においては、環境保護局により周辺公衆への被ばく線量が100μSv/y以下と定められており、並行して実施されている他施設の廃止措置を考慮して、被ばく線量を10μSv/y以下に抑えることが求められた。そのため、当初の廃止措置計画を見直し、取り壊し作業の前に、高度に汚染した機器・構造物を撤去する新しい計画が作成された。この結果、廃止措置作業は以下の手順によって実施された。

第1段階: 機器残存トリチウムのHT、HTOへの転換

第2段階: 配管の除染

第3段階: トリチウム移送プロセス配管の撤去

第4段階: トリチウム取扱主要機器の解体

第5段階: 補助真空ポンプの撤去

第6段階: 閉じこめ補助装置の撤去

第7段階: 機器撤去後のグローブボックス及びフードの除染

第8段階: グローブボックス及び真空ポンプ排気系統の撤去

第9段階：シーランド容器への収納

なお、廃止措置に適用された主要な解体技術、放射性廃棄物の取扱は以下の通りである。

解体技術：グローブボックス、ヒュームフード、マニピュレータボックス及び関連機器・配管等の撤去が、BROKK 社の遠隔ロボット解体システム等を用いて実施された。また、トリチウムプロセス用の細管の切断に関しては次の工法が適用された。まず、配管を径方向に圧縮して内部空隙を消滅させ、その後圧縮した部分を切断することにより管内汚染の外部への放出を最小限に抑制する。

放射性廃棄物の取り扱い：費用低減を考慮しトリチウム取扱施設から発生する解体廃棄物の再利用は考慮されず、すべてネバダ州の処分場へ送られた。処分費用は 1m^3 当たり 406 ドルということであった。トリチウム廃棄物の処分形態は輸送に関する規制により、LSA-II(Low Specific Activity Type II)と NOS(No other Specification)とに分類される。ここで、LSA-II ではトリチウム(HTO)25ℓ をコンクリート等で固化するため高放射能密度で処分することが可能である。一方、NOS 廃棄物はドラム缶へ直接収納され、廃棄物中のトリチウムを固定化しないため、ドラム缶が収納されたコンテナを輸送作業員が開いたときに吸入する空気のトリチウム濃度が制限されており、ドラム缶周りにトリチウム漏洩防止のためのライナーやオーバーパックを追加せざることが必要となる。このため、輸送容器は LSA-II に比べ割高となる。そこで、トリチウム汚染機器を加熱等のベーキングし除染して通常のドラム缶(NOS)に収納し、除染過程で発生したトリチウムを回収して LSA-II へ封入することとした。これによって大幅なコスト削減を図った。

4. 米国における環境管理計画

4.1 環境管理計画の概要

(1) 環境管理計画の経緯

米国では過去 50 年にわたる核兵器の製造と原子力エネルギーの研究・開発によって、多量の放射性物質、使用済み燃料、放射性廃棄物及び有害廃棄物が発生し、その結果、それらを実施した幾つかの施設、サイトの土壤及び地下水において放射能汚染を生ずることとなった。これらの残存物は将来にわたって、公衆及び環境へリスクを与え続けることになるため、放射性物質を早期に撤去することが求められていた。そこで 1989 年、米国 DOE はこれらの負の遺産を一掃することを目的として、表 2 に示すように合衆国内全体の 100 を超えるサイトを対象に、その役割を終えた原子力施設の廃止措置、土壤及び地下水のクリーンアップ作業等を行う環境管理計画を開始した⁽¹¹⁾。

環境管理計画の対象となる主な施設は、原子炉施設、ウラン濃縮施設、再処理施設、廃棄物処理施設等であり、種々の放射性核種を含む多量の放射能が残存する機器・構造物を安全に撤去することが求められている。2002 年初めまでに、74 サイトのクリーンアップ作業がすでに終了したが、サバンナ・リヴァーサイト、アイダホ国立研究所、ハンフォードサイトでは、当初予定の作業完了時期より遅れて、それぞれ 2038 年、2050 年、2070 年と長期にわたると見込まれた。

計画立案当時、本計画を全て達成する期間及び費用は、75 年間で 3500 億ドルと見積もられたが、実際に作業を開始すると当初の計画通り進捗せず、作業計画が遅延することによりさらに費用は増大すると見込まれた。特に上述した長期にわたる施設のクリーンアップは、スケジュール及びコストの面で不確定要素が大きく、対策を予め用意しておく必要が求められた。

そこで、米国 DOE の長官直属として環境管理計画再評価チームが結成され、2000 年から 18 ヶ月をかけて環境管理計画の徹底した再評価が行われた。最終的に 2002 年に環境管理計画の大幅な修正案を示した報告書が作成された⁽¹²⁾。それによると、これまで実施された計画は、リスクマネイジメントに主眼が向けられており、10 年を超える作業で投入したコストに対して作業従事者や公衆及び環境への被ばくリスクが現実的に十分に低減されていないことが問題視された。最終報告では、当初の計画における上記の問題点を見直し、環境管理計画の実行能力を改善するため、リスクの低減を優先するという提案が行われた。リスクの高い施設の廃止措置を前倒しで実施することにより、敏速かつ目に見えたクリーンアップと閉鎖措置における実効性が改善される見通しが明らかにされた。特に、ロッキーフラッグ、ファーナルド、マイアミスバーグ（マウンド施設を含む）の環境管理計画については、2006～2010 年にサイトの閉鎖まで達成するという大幅な前倒しを行うこととした。また、この見直しにより作業従事者、周辺公衆及び環境へのリスクが 2012 年までに大きく低減され、プロジェクト終了年は 2035 年に、費用も 2200 億ドル程度に圧縮されることになった。

(1) 環境管理計画に係る実施体制

米国 DOE の組織体制表を図 1 に示す⁽¹³⁾。米国 DOE は核物質関連の防衛担当、原子力をはじめとする民生用エネルギー及び環境担当の 2 部門に大きく分類できる。エネルギー及び環境部門は、

原子力、化石エネルギー担当に始まり、それらに関連する科学技術、廃棄物管理等から構成され、環境管理計画もその一部門を担っている。米国 DOE 長官、副長官及びエネルギー、科学及び環境担当次官の下、環境管理局は環境管理計画担当次官補を筆頭に組織されている。現在の環境管理計画の組織体制表を図 2 に示す⁽¹⁴⁾。また、各現場事務所の担当サイトを表 3 に示す。16 の現場事務所が 39 のサイトあるいはプロジェクトを担当している。

(2) 環境管理計画の予算

1992 年から 2008 年の間の環境管理計画に要した費用の年度推移(主要地域別)を表 4 に示す⁽¹⁵⁾。1992 年からの 10 年間で年間総費用は 50%程度増加した。当初はリッチランドへの比重が高かつたが、1996 年あたりからサバンナリバーへ重点が移行した。全体に対する割合はそれほど高くないものの、ロッキーフラツツサイトへの投入費用は 4 倍近い伸びを示している。

上述した再評価の結果から当初計画が見直され、2012 年までに被ばくリスクの比較的高い作業を終了させ、2035 年までに全てのサイトにおいて作業を終了させることになった。これらクリーンアップ及び閉鎖措置作業の加速により総額 1300 億ドルの費用圧縮が見込まれている。各対象サイトは 5 年の中期計画の目標を作成し、それに基づいて各予算年度が割り当てられる。

4.2 大規模実証配備プログラム

大規模実証配備プログラム (LSDDP¹) は、原子力施設の廃止措置や施設・土壌等のクリーンアップ作業に適用できる可能性のある革新的技術あるいは改良技術を大学、産業界から募り、実際の解体作業等に適用して、それら技術を実証試験で検証するものである⁽¹⁶⁾。本プログラムは 1996 年から開始され、2003 年に一連の適用がほぼ終了した。この実証試験から得られたデータは、今後の使用者がその技術を採用するか否かを判断する上で、費用や性能に関する有用な情報を含むものである。

LSDDP で適用された技術を表 5 に示す。1996 年からの第一ラウンドでは、CP-5、ファーナルド施設及びハンフォード C 原子炉の 3 つの施設を対象に、ロボット、切断、測定、除染技術等の実証試験が実施された。1998 年からの第二ラウンドではロスアラモス国立研究所の超ウラン廃棄物施設、マウンド施設、サバンナリバーの燃料製造施設及びアイダホ国立工学環境研究所の燃料貯蔵施設を対象に、除染、測定技術等の実証試験が実施された。2001 年からの第三ラウンドでは、ウェストバレーのホットセル、ロスアラモス国立研究所のトリチウム取扱施設、アイダホ国立工学環境研究所の燃料プールを対象に実証試験が実施された。

各技術の試験結果について、米国 DOE の定めた事項（要約、技術の概要、性能、適用性及び競合技術との比較、コスト評価、規制との適合性及び安全性、知見とまとめ）を記述した革新的技術要約報告書 (Innovative Technology Summary Report シリーズ) が公開されている⁽¹⁷⁾。

4.2.1 アルゴンヌ国立研究所における技術開発

アルゴンヌ国立研究所で適用された LSDDP 技術を表 6 に整理した。ここに挙げたのは 22 の技

¹ Large Scale Demonstration and Deployment Program

術で、その内訳はサーベイ等の特性評価技術が8件、除染技術が8件、解体技術が4件、作業者安全技術が2件である。これらの技術開発結果は、CP-5等の廃止措置に実際に適用され、その評価も行われている。主要な技術開発について以下にまとめる。

双腕マニピュレータ（DAWP: Dual Arm Work Platform）

CP-5の解体作業では、スタッドボルトの撤去、アルミニウム製の原子炉容器の分割、黒鉛ホウ素生体遮へいや鉛遮へいブロックの撤去等の作業は、双腕型マニピュレータ等から構成されるDAWPを用いて実施された。また、DAWPの操作には遠隔でオペレータによる手動操作方式が適用された。本技術は、国立研究所（オークリッジ及びアイダホ）とロボット製造業者（シリング・ロボット・システムズ及びレッドゾーンロボティクス）が一体となって製作したものである。プラットフォームは遠隔操作される天井クレーンにつり下げられることを想定して設計された。

遠隔作業による実証試験の結果、高線量率環境下で重装備の必要な作業員による効率よりもはるかに作業性が向上し、被ばく線量の低減が図られた。しかしながら、一方で、特別な装備のない作業員の手作業による解体よりも一般的に多くの時間を要すること、DAWP遠隔操作員の訓練が非常に重要で膨大な時間を要すること等の知見が得られた。さらに、ロボットシステムの動作速度が遅く、可動範囲が限定される等、複雑なアルゴリズムで非効率的な点も否めないことが明らかとなった。

これらの弱点を克服するために、上記知見を反映して、ロボット操作に関する制御技術の向上を目的とした技術開発が進められている。動的なロボットアーキテクチャー、半自動遠隔操作、外部センサー基盤、双腕マニピュレータの協調制御、信頼性のあるソフトウェアの開発が主要な課題である。

被ばく線量評価コード RESRAD-BUILD⁽¹⁸⁾

本評価コードは、わずかに放射性物質が残存した建屋及び構造物をある特定の目的（居住、工業的利用等）に再利用した場合に、利用者の受ける被ばく線量を評価するものである。クリーンアップ基準及び被ばくシナリオが仮定されている。また、サイトに特有なパラメータは個々の計算条件設定時にユーザーが入力する。被ばく線量の計算では、3つのコンパートメント、10個の放射線源の幾何学的配置、及び、10人の被ばく対象者の配置のみに計算条件が限定され、以下の6つの被ばく経路を対象に計算が実施される。

- ・ 従来から存在する放射性核種からの直接外部被ばく
- ・ 再付着した放射性物質からの直接外部被ばく
- ・ 空気中に浮遊した放射性物質からの直接外部被ばく
- ・ 空気中に浮遊する粒子状放射性物質の吸入
- ・ 室内ラドン子孫核種エアロゾルの吸入
- ・ 放射性物質の経口摂取

直接外部被ばく経路の被ばく線量評価では、放射線源と被ばく対象者との間に遮へい物を配置することも可能である。また、モデルの入力パラメータを調整することによって、仮想的な被ばくシナリオを取り扱うことも可能である。なお、放射性物質が土壤を通り地下水へ移行するとい

うシナリオは本コードでは評価対象としていない。地下水への移行を評価するには RESRAD-SOIL コードをあわせて利用することが望ましいとされている。RESRAD ファミリーは図 3 に示すように多数のコード群から構成される。

RESRAD を用いた CP-5 取り壊し後の影響評価

RESRAD を使用して、トリチウムで汚染された CP-5 コンクリート建屋撤去後の環境影響評価が実施された。CP-5 コンクリート建屋は将来取り壊しが行われることが決定しているが、ペデスタルトンネル床面コンクリートに比較的高い汚染が残存しており、その除去方法が 2 種類検討されている。一つはペデスタルトンネル床面をサイト内に残し、粉碎したコンクリートで覆ってしまう方法で、もう一つは汚染部分を撤去する方法である。前者の方法をとった場合の潜在的な放射能の影響を評価する目的で本評価が実施された。

本評価では、サンプリング結果（最終サーベイレポートに記載）から、ペデスタルトンネル床面のコンクリート部分で平均 $1.48 \times 10^4 \text{Bq/g}$ の放射能濃度があり、全体で $1.83 \times 10^{11} \text{Bq}$ のトリチウム汚染があるものとした。被ばくシナリオとして工業利用と家族経営農場の 2 ケースが検討された。被ばく経路は、各被ばくシナリオに対してそれぞれ表 7 に示すように設定され、トリチウムの半減期 12.3y を考慮して、100 年後までの年間被ばく線量が算出された。その結果、工業利用の場合に最大 $11.4 \mu\text{Sv/y}$ 、家族経営農場の場合に $169.4 \mu\text{Sv/y}$ の被ばく線量であった。両者とも飲料水の摂取による被ばく経路が全体の 90% 以上を占めた。また、年間被ばく線量が最大となるのは 13 年後と報告されている。

4.2.2 マウンド施設における技術開発

マウンド施設の廃止措置作業に適用された LSDDP の技術を表 8 に示す。トリチウム取扱施設の特徴を反映した技術が採用され、その適用性が実証されている。マウンド施設の特徴は、グローブボックスなど、比較的小型の機器や装置が多数配備されていることであり、このため、これらの装置や設備の解体に当たって、安全で効率的な作業を進める上での技術の改良や工夫がなされている。以下に主な技術の概要を示す。

ポータブルシンチレータ計数器⁽¹⁹⁾

本計数器はトリチウムから発生する低エネルギーの β 線を検出するために開発された携帯用単管液体シンチレーションカウンターである。装置には光電子増倍管と手動サンプルチャンバーを用い、内蔵電源あるいは AC110V 電源で使用することが可能である。

水凝固剤⁽¹⁰⁾

本凝固技術はポリマーベースの吸収剤（Waterworks SP-400）を使用し、水に溶解した廃棄物を凝固させて処理することを目的に開発されたものである。吸収剤量に対する液体の吸収割合が大きいが、体積膨張はほとんどない。また、吸収反応の促進のために機械的に混合する必要がなく、ジェル状の状態で高い保持力を持つ特徴を有している。

油凝固剤⁽²⁰⁾

本凝固技術は石油ベースの液体吸収剤であり、高品質ポリマー（NOCHAR Petrobond）を用い、汚染した油を凝固させて処理することを目的に開発されたものである。本凝固剤は非常に素早く凝固し、体積膨張もほとんどない。低レベル放射性廃棄物の貯蔵、輸送、処分において自由液体の制御に利用できる。

トリチウム清浄カート⁽²¹⁾

本装置は、可搬型のトリチウム処理システムで、触媒を用いてトリチウムを酸化させることにより洗浄処理を行う。本装置には湿度モニター及び温度制御装置が内蔵されている。分子ふるい乾燥機にトリチウム水を集積して、毎分 45ℓ の流量で 1000 以上の除染係数を得ることができる。ユニット囲いは、通常運転時には排気フードとして利用されるが、トリチウム濃度が設定値より高濃度を検出した場合、自動的に隔離される機能を有している。

配管切断捲縮装置⁽¹⁰⁾

本装置は小型手持ちバッテリー駆動型の切断装置で Burndy Product 社が開発したものである。U 字型のダイスが切断部先端に内蔵されている。バッテリーによって水圧ポンプを駆動し、10000psi の圧力をかけることが可能である。また、1 回の充電で 30 回の切断操作が行える。小型で軽量なので、狭い場所での切断に適している。

4.2.3 その他の代表的な技術開発

LSDDP の対象となった技術は、環境管理プログラムに関する各種施設の解体作業、特性評価作業など、多くの分野に渡って適用されている。以下は、アルゴンヌ国立研究所及びマウンド施設以外で適用された技術の幾つかをまとめたものである。

AeroGo 空気噴射移動パレット⁽²²⁾ (ロスアラモス)

ロスアラモス国立研究所では、既に容器に収納されている特大金属機器の研究所内の固体廃棄物処分エリアで処分するための基準及び廃棄物隔離パイロットプラント(WIPP)へ輸送するための基準に合致させるために、それらの詰め替え作業を実施している。ファイバーガラスで補強され、最高 40 フィートの長さを持つ様々なサイズの合板製の木箱が輸送容器として用いられる。AeroGo 社製の空気パレットシステムは、上述した輸送容器など重量物を移動する装置である。本システムは、底面から空気を噴出して宙に浮き、床面との摩擦がなくなるため、作業員に負担をかけることなく滑るように移動することが可能である。本システムにより、輸送容器が非破壊分析器を通過し、除染、減容、再収納施設へ容易に輸送されることが期待された。

実証試験では、1999 年 6 月にロスアラモスの固体廃棄物処理施設テクニカルエリア 54-G で最高 5600 ポンド（約 2.5 トン）の輸送容器を非破壊分析装置に通し、デモンストレーションのために迷路の中を移動し、位置決めを行った。装置の移動操作は AeroGo 社員の指示の下、固体廃棄物処理施設のスタッフのみで行われた。試験の結果、AeroGo 社員による 1 時間以下の簡単な訓練

を行えば、複雑な経路でも容易に運搬することが可能であり、フォークリフトの使用回数が減り、安全性及び作業効率性が向上することが実証された。

液体窒素冷却ダイヤモンドワイヤーカッター⁽²³⁾ (ハンフォード)

機械的切断装置を利用する際、これまで刃の冷却のために冷却水を使用し、この水が液体の放射性廃棄物として発生することが問題となっていた。そこで、液体窒素を冷却剤として利用したダイヤモンドワイヤーカッターの適用性を検証した。冷却を液体窒素で行う以外は従来の技術を利用したものである。ダイヤモンドワイヤーは長さ 0.9m、直径 7.6cm のパイプハウジング内の液体窒素で冷却される。液体窒素は使用後に気化するため、汚染された液体廃棄物が発生することがないのが利点である。

水圧式の駆動ホイールとワイヤーの設置作業は、最小の訓練を受けた作業者によって比較的短時間で実施された。実証試験では、切断中、冷却水がないために多量のコンクリートダストが作業空間に飛散し、これらの制御が必要であることがわかった。

本装置の作業効率は $0.78\text{m}^2/\text{hr}$ であり、比較参考となる冷却水利用型のダイアモンドカッターでは $1.11\text{m}^2/\text{hr}$ 、円盤ソーでは $0.45\text{m}^2/\text{hr}$ であった。コスト面では従来の水冷却と比較して 189% 増という結果となった。なお、この値は水冷却の場合の液体廃棄物の処理費用は考慮されていない。また、従来の円盤ソーとの比較では、310% 増という結果であった。コスト削減のための改良を行うことにより、液体廃棄物処理も含めたコストで比較すると競争可能な技術になりうるものと思われる。

個人用氷冷却スーツ⁽²⁴⁾ (ファーナルド)

全身スーツ型の防護服を着用して作業を行う場合、防護服内部に熱がたまり、作業員の体温及び血圧が上昇して作業量が制限され、短時間の作業後でも十分な休息を快適な空間でとる必要がある。そこで、水道水から作成した氷を冷却剤として、スーツ内面に張り巡らせたチューブ内に水を循環させて、体温調節を行う全身型の防護スーツが開発された。

本装置では氷を入れた 2 リットルのボトル（重さ：12 ポンド）を個人用防護装置スーツの内部あるいは外部に取り付け、あわせて、スーツ着用者は循環ポンプが装備されたユニットを背中に背負う。また、スーツ内部の放射線モニタリングも行われる。スーツ内部に汚染がなければ、洗って再利用する（数百回の洗濯が可能）ことができる。装置一式のコストは 1406 ドルで、年間の維持費用（500 時間ごとに一般メンテナンス、2000 時間使用毎にオーバーホール）は 170 ドルである。

遠心分離ショットブラスト⁽²⁵⁾ (ファーナルド)

ファーナルドサイトの建屋の解体では、Tc-99 で汚染されたコンクリート表面を 1 インチの深さで除去することが求められていた。過去の経験からこのような作業を安全、安価、しかもダストを飛散させないように行うことは非常に困難と想定された。Tc-99 は原子炉運転中に生成される FP 核種で水に溶解しやすく、処分施設外へ浸透する可能性があるので、施設から Tc-99 を除去することが重要である。

本システムは、強化鉄の微粒子（ショット）を 220ft/sec の高速で床面に打ち付け、セメントを粉々に粉碎し、それらをダスト集塵機で回収するものである。微粒子はリバウンドと真空のメカニズムを利用して回収し、再利用される。回収された微粒子は遠心分離装置に入り、空気清浄システムによってコンクリートダストと分離される。ダスト集塵機には 1,700ft³/min の流量をもつ FARR 社製改良型 model mark IV が採用されている。微粒子は、コンクリートダストと同じサイズになるまで再利用することができる。

実証試験は、第 8 プラントで 1998 年 6~9 月に実施された。試験の結果、本システムでは表面から 3/16 インチまでのコンクリートは除去できるが、それ以上の深さの除去には適していない、また、除去できる範囲であれば、削った後の表面は比較的平坦で、新たに塗装等の措置は必要ない、さらに、鉄筋やワイヤーメッシュ等の障害にも対応することが可能である等の知見が得られた。作業効率は 17.7ft²/h で、そのコストは 34.25 ドル/ft² であった。同等（比較可能な）技術としてロータリードラムプレーナを第 9 プラントにおいて同様な条件で適用し、52.2ft²/h、9.44 ドル/ft² という結果が得られている。

4.3 環境管理計画の現状

(1) 概要

環境管理計画が開始されてから 19 年が経過し、これまでの様々な活動により、幾つかのサイトにおいて廃止措置やクリーンアップ作業を終了している。例えば、2006 年度には、ロッキーフラッグ、ローレンスリヴァモア国立研究所、カンザスシティプラントのクリーンアップ作業が完了した。また、2007 年度末までにさらに 5 つのサイト（ファーナルド、コロンバス、アシュタブラ、マイアミスバーグ、ローレンスバークレイ国立研究所）のクリーンアップ作業が完了した。加えて、他のサイトにおいても以下のような大きな進展があったことが報告されている。

- ・ プルトニウム残留物、金属及び酸化物の処分へ向けた安定化と廃棄体化（ハンフォード）
- ・ 高レベル放射性液体廃棄物からガラス固化体（2000 体以上）の製造（ウェストバレー）
- ・ コロンビア川保護のため、ハンフォードサイトにおいて K 流域から 2100 ton の使用済み燃料の処分に向けた取り出しと廃棄体化
- ・ 幾つかのサイトにおいて合計約 40000m³ の TRU 廃棄物の特性を評価し WIPP へ輸送
- ・ 約 100 万 m³ の低レベル及び混合低レベル放射性廃棄物の処分
- ・ 接近が危険と判断された 13 エリアのうち、11 エリアのリスクを低減
- ・ オークリッジ保存地区のメルトンバレーのクリーンアップとガス拡散建屋(K-29, 31, 33)の除染と廃止措置を完了（オークリッジ）
- ・ ポーツマス（オハイオ州）で発生した 8500 トン以上のスクラップ金属を処分

以下では、主要な廃止措置活動を終了した研究協力対象施設のアルゴンヌ国立研究所及びマウンド施設における現在の活動状況と、廃止措置及びクリーンアップ作業に関する新たな課題に対して環境管理計画で進めている技術開発の概要を述べる。

(2) アルゴンヌ国立研究所

アルゴンヌ国立研究所では、原子力開発の黎明期から多くの研究用原子力施設を有し、原子力の平和利用に貢献してきた。しかし、既にそれらの施設は老朽化し、また、時代遅れの施設となつたことなどから、同研究所では 1990 年代から不要施設の廃止措置を精力的に進めてきた。現在では殆どの廃止措置作業が終了し、自らが有する老朽化施設の廃止措置や放射性廃棄物の処理処分に係る課題からは開放され、基礎科学、エネルギー源、環境などをテーマにした先端的研究開発に取組んでいる（付録 B）。また、現在では 1000 名の科学者及び技術者を含む 2900 名の職員を有し、運営費は 4 億 7500 万ドルで 200 の研究プロジェクト（原子レベルから地球規模の気候変動まで）を実施している⁽²⁶⁾。また、これまでの廃止措置や放射性廃棄物処理処分に係る実際の作業や研究開発の経験に基づいて、米国で進められている環境管理計画の進展に貢献するプログラムが提供されている。例えば、廃止措置に係る研修コースの開設、RESRAD を用いた評価などを挙げることができる。

以上のように、アルゴンヌ国立研究所は主要な原子炉施設を撤去し、負の遺産を解消するとともに、基礎科学、エネルギーをキーワードとする大規模なフォトンソースを建設し、原子力で培ってきた科学技術力をベースに、最先端研究を実施する世界の研究拠点として新たな出発を遂げている。

(3) マウンド施設

マウンド施設の廃止措置、放射性廃棄物の運び出し、サイトにおける環境整備などの作業は 2006 年の 7 月までに終了した。その後、米国 DOE による残存放射性核種のサーベイが続けられている。これらの作業は 2009 年（会計年度）までに終了する計画であり、その後、これらの区域はマイアミズバーグ・マウンド・共同体改善組合に移管されることになる。ただし、2 地域（米国 DOE が使用する建屋 126 と隣接する土地及び掘返しなしの制度的制限を加えた埋戻し地区）を除く。

また、マイアミズバーグ・マウンド・共同体改善組合はマウンド先端技術センター（Mound Advanced Technology Center）を設立した。同センターは約 260 人を雇用する 16 の技術指向の企業から構成される。これらの企業の幾つかは、ハイテク製品やサービスを提供し、飛躍的な科学研究や商業革新に寄与するものとされている。代表的な技術には以下のものが挙げられている⁽²⁷⁾。

- レーザー微細加工材料処理
- 表面科学と分子分析
- ミサイルシステム用電子制御アーム装置の製造
- 次世代燃料電池試験装置

このように、マンハッタン計画の一環として使用されたマウンドサイトは、現在は、非原子力の産業・工業施設のためのサイトに生まれ変わっている。

(4) 技術開発

これまでに幾つかのサイトで廃止措置活動やクリーンアップ活動が進展したが、ハンフォード、サバンナリバー、アイダホ等のクリーンアップ作業にはまだ大きな課題が残っている。環境管理

計画では、前章で記述した技術開発に加えて、新たな課題に対する技術開発に関しても検討を進めている⁽²⁸⁾（6分野13技術）。必要とされる革新技術は次の通りである。

高レベル放射性廃棄物の処理：廃棄物貯蔵技術の改良、信頼ある効率的廃棄物復旧技術、タンク閉鎖技術の高度化、次世代溶体化前処理、安定化技術の高度化

地表水と土壤の修復：試料採取と特性評価の改良、予測能力の向上、修復技術の高度化

解体技術：サイト特有及び複雑広範囲な廃止措置用途に適用した技術

使用済み燃料：使用済み燃料の貯蔵、安定化、廃棄前処理技術の改良

取扱困難な物質の処理：貯蔵、監視、安定化システムの高度化

分野横断的技術：長期的評価と監視技術の高度化、使用済み燃料・TRU 廃棄物・核物質の充填化技術の高度化

以下に幾つかの技術の開発項目の具体例を示す。

(a) 廃棄物処理

サバンナリバー・タンク中に残存する有機物の分解

流動化ベッド水蒸気改質法（Fluidized Bed Steam Reforming (FBSR)）と湿空気酸化法（Wet Air Oxidation (WAO)）の2種類が選択され、タンク中の模擬有機物を対象としたコールド試験では双方とも99.0%以上の有機物が分解された。今後耐久性等の適用試験評価が行われる。

誘導加熱用るつぼ (CCIM)

最終処分用の安定ガラス固化を目的に、ロシアとの国際的協力の下、CCIMの廃棄物荷重の増加可能性に係る検証を進めている。本検討では、サバンナ・リヴァーサイトの軍事用廃棄物処理施設（DWPF）が達成した38%wtに対して、60%wtの廃棄物荷重を示した。さらに、ガラス耐久性が参考ガラスよりも高いことが確認された。CCIMによって生じた高いプロセス温度によって、アルミニウム供給がスムーズになる可能性がある。

液体放射性廃棄物のより安全な廃棄体作成法開発

アイダホ国立研究所のクリーンアップ作業を対象として開発した技術である。アイダホ国立研究所では、放射性廃棄物管理複合施設から掘り起こされた埋設ドラム缶の中に、ロッキーフラットで実施された分析及び実験で発生した液体廃棄物の容器が見つかった。そこで、これらの液体廃棄物に対して、最終処分に適切な廃棄体を形成するため、既に開発されている液体廃棄物吸着剤の能力を検証した。本吸着剤はMSEテクノロジーアプリケーション社が開発したものであり商業的に利用可能である。試験では、が可燃物、酸、酸化剤、塩素系溶剤、硫化塩等を含む様々な化学物質に対する吸着剤の利用可能性を調べた。また、液体を安定化させるため多くの吸着剤を混合した試験も行われた。ブレンド吸着剤は、貯蔵、埋設の条件に耐える能力を持つことが確認されている。

高レベル廃棄物前処理での部分的結晶化技術

本技術は実験室及び工学規模で確立した部分結晶化技術の拡張に関するものである。本技術は高レベル放射性廃棄物の容積を大きく減容するためのものであり、10億ドルの輸送コスト削減につながる可能性がある。ハンフォードでは、177の地下貯蔵タンクから放射性廃棄物を回収、処理し、処分場で処分（永久貯蔵）している。本技術に関して1/5スケールの実証施設がサバンナ・リヴァーサイトに建設中である。現在、実験室レベルで低レベルのナトリウム塩除去試験への適用試験が行われている。また、専門家による技術のレビューの結果、パイロット試験の強化が提唱された。

(b) 地表水及び土壤の修復技術

地表水プルーム評価とマッピングツール

本技術開発には放射能汚染したプルーム（大規模水溜り）の評価とマッピング機能の作成が含まれている。本技術により特定場所の汚染の種類とその程度に係る情報等が提供される。同時に現在進行中の修復アプローチも示される。マッピング機能は、特定の地表水情報を視覚的に表示するものである。マップには、放射能汚染の位置と程度、汚染物質の種類、現在の修復活動が表示される。プルーム評価機能は、プルームの位置と規模、作業実施請負業者、主要汚染物質、サイト外への移行に関連した状況、規制状況、取扱状況、地表水汚染の評価と取扱必要性等の詳細を提供するものである。現在、このツールには7つの米国DOEの原子力サイトに関して67プルームの情報が含まれ、毎年更新されている。

(c) 廃止措置技術

化学除染による安全性の向上とTRU廃棄物の低減

ロッキーフラツツサイト（核兵器製造工場）には様々な放射性同位元素の処理に利用された900個以上のグローブボックスが、また、数百個以上のプルトニウムやアクチニド溶液が貯蔵されたタンクが存在した。これら高濃度TRUで汚染された機器はWIPPで受け入れられる1.9m³の標準容器あるいは55ガロンのドラム缶には収まらず、分割・切断等の作業が必要であったが、作業には安全性の問題があった。もし、輸送基準の表面汚染密度まで除染することが可能となれば、切断分割することなしに30m³の容器に収納することができる。そこでロッキーフラツツではTRUの化学除染技術を開発した。これをグローブボックスとタンクの除染に適用することにより、TRU廃棄物の発生を17500m³から12500m³へ30%減少させることができるとともに、作業者への放射線学的及び工学的リスクへの暴露時間を数千時間も低下させることができる。

最近の検討では今後8年間にわたって3000万ドルを技術開発に支出すれば、その30倍もの支出が抑えられ、コスト低減につながるという予測も発表されている。

5. まとめ

旧原研と米国 DOE との間の研究協力に関する包括協定の下に、廃止措置に関する研究協力に関する覚書が締結され、2001 年から新たな体制で協力が開始された。本協力においては、米国 DOE はアルゴンヌ国立研究所 CP-5 とマウンド施設を、旧原研は JRR-2 と JRTF を主要な対象施設として提示し、新たな技術開発を含めた廃止措置に関する技術情報の交換を行ってきた。新たな協力関係の下で得られた米国 DOE の廃止措置に関する主要な情報は以下の通りである。

- ・ アルゴンヌ国立研究所における CP-5 の解体では、遠隔手動操作による双腕型マニピュレータを用いた原子炉本体の解体が実施され、作業従事者の被ばく低減に貢献した。2001 年までに廃止措置作業を終了し、汚染を撤去した残存建屋は現在特別な管理は行われていない。また、LSDDP として、解体作業終了後に残存施設を再利用する際の利用者の被ばく線量評価等を行う計算コード（RESRAD-BUILD）が適用され、建屋の再利用に関する検討が行われた。さらに、CP-5 解体に係る知見に基づいて、半自動制御双腕マニピュレータの制御アルゴリズムの検討等が実施された。これらの結果、アルゴンヌ国立研究所では不要となった原子炉施設を撤去し、負の遺産を解消することにより、大規模なフォトンソースの運転など最先端研究を実施する世界の研究拠点として発展を続けている。
- ・ マウンド施設では、トリチウムに汚染された液体の固化及びトリチウム測定等に関する新しい技術が適用され、その有効性が実証された。また、発生した解体廃棄物を再利用せず処分場へ送ることとし、トリチウム汚染された機器をベーキング等で除染して回収したトリチウムを LSA-II として輸送することによって大幅なコスト削減を図ることが可能になった等、多くの知見が得られている。
- ・ 核兵器製造や原子力平和利用のための試験研究等に用いられた原子力施設の廃止措置は、米国 DOE 環境管理局が統括する環境管理計画として進められている。本計画は 114 の原子力施設に対して、70 年以上の歳月と総額 3500 億ドルをかけた大規模なプロジェクトとして始められたが、2002 年に行われた計画の大幅な見直しにより、2003 年以降 2012 年までのクリーンアップ作業の集中化及び短縮化が行われることになった。これにより 35 年の期間短縮と 1300 億ドルのコスト削減が可能とされた。
- ・ 原子力施設の廃止措置では、在来工法による解体作業だけでなく、各施設の特色に応じて既存、新規を問わずに様々な技術の可能性を探る大規模実証配備計画（LSDDP）が行われた。LSDDP で適用された廃止措置技術の導入により、コスト、作業時間及びリスクが低減された。

本協力で得られた上記の廃止措置技術情報は、これまでに実施された JPDR, JRR-2, JRTF の廃止措置のみならず、今後の原子力機構におけるさまざまな核種で高度に汚染した多種多様な施設の廃止措置の安全かつ効率的な進展に貢献するものと期待される。

謝辞

本報告書をまとめるにあたって、バックエンド技術部及びバックエンド推進部門の諸氏に種々の助言や援助をいただきました。また、日米協力を行うにあたって、アルゴンヌ国立研究所及びマウンドサイトの廃止措置担当者の方々に多くの協力を頂きました。ここに、深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 宮坂靖彦他："JPDR 解体実地試験の概要と成果", 日本原子力学会誌、Vol.33, No.6, pp553-576 (1996).
- (2) 三森武男、宮島和俊："原研再処理特別研究棟の解体計画", デコミッショニング技法、第 12 号 (1995)
- (3) Argonne National Laboratory : Decontamination & Decommissioning Nuclear Engineering Division at Argonne, available from <http://www.dd.anl.gov/index.html> (accessed 16Feb2009)
- (4) Argonne National Laboratory : Chicago Pile-Five (CP-5) Facility, available from <http://www.dd.anl.gov/projects/cp5.html> (accessed 16Feb 2009)
- (5) Mark W. Noakes: ""CP-5 Reactor Remote Dismantling Activities: Lessons Learned in the Integration of New Technology in an Operations Environment, ORNL/CP-97762, (1998)
- (6) L. S. Seifert: "Robotic Dismantlement Systems at the CP-5 Reactor D&D Project", ANL/TD/CP-96600, (1999)
- (7) USDOE: Environmental Assessment Proposed Decontamination and Demolition of Building 301 at Argonne National Laboratory", DOE/EA-1585, (2007)
- (8) ORISE: "Final Report – Verification Survey of the Buiding 315 Zero Power Reactor-6 Facility", (2007), available from <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/925702-sC3kqD/925702.PDF> (accessed 16Feb2009)
- (9) Argonne National Laboratory : <http://www.dd.anl.gov/projects/atsr.html> (accessed 16Feb2009)
- (10) Dick Blauvelt et. al., "The Mound Plant Tritium D&D Large Scale Demonstration and Deployment Project", Proc. of WM '01 Conference, 2001, <http://www.wmsym.org/abstracts/2001/10B/10B-29.pdf> (accessed 16Feb 2009)
- (11) USDOE: EM History, available from <http://www.em.doe.gov/pages/History.aspx> (accessed 16Feb 2009)
- (12) USDOE: Top-to-Bottom Review Team: "A Review of the Environmental Management Program". 2002. available from <http://www.em.doe.gov/pdfs/16859ttbr.pdf> (accessed 16Feb2009)
- (13) USDOE: Department of Energy Organization Chart, available from <http://www.energy.gov/organization/orgchart.htm> (accessed 16Feb2009)
- (14) USDOE: Organisation Chart of EM available from <http://www.em.doe.gov/Pages/OrgStructure.aspx>

(accessed 16Feb 2009)

- (15) USDOE: Budget Documents, available from <http://www.em.doe.gov/Pages/budgetdocs.aspx> (accessed 16Feb2009)
- (16) http://www.external.ameslab.gov/cmst/CMSTSite/PubPages/p_itsrs.html(accessed 16Feb2009)
- (17) <http://www.p2pays.org/ref/14/13979.htm>(accessed 16Feb2009)
- (18) Yu, C., et al., : "RESRAD-BUILD: A Computer Model for Analyzing the Radiological Dose Resulting from the Remediation and Occupancy of Buildings Contaminated with Radioactive Material", ANL/EAD/LD-3, Argonne National Laboratory, Argonne, Ill. USA. (1994)
- (19) DOE/EM-0596: "Lumi-Scint Liquid Scintillation Counter" 2001
- (20) Ward G. Brunkow et. al., "The NOCHAR® Technology Deployment Program, Proving a Proven Method Worldwide for Waste Solidification and Stabilization", Proc. WM '02, 2002
- (21) DOE/EM-1089: " Portable Tritium Cleanup Cart", 2002
- (22) J. McFee, J. Langsted: "Risk Reduction Benefits from Innovative Technology Use in the Los Alamos Large Scale Demonstration and Deployment Project", Proc. WM '04 Conference, 2004
- (23) DOE/EM-0392: " Liquid Nitrogen- Cooled Diamond- Wire Concrete Cutting", 1998
- (24) DOE/EM-0393: " Personal Ice Cooling System (PICS)", 1998
- (25) DOE/EM-0441: " Centrifugal Shot Blasting", 1999
- (26) Argonne National Laboratory : availbale from <http://www.anl.gov/> (accessed 16Feb2009)
- (27) Mound Advanced Technology Center : available from http://www.mound.com/html/index_frames.htm (accessed 16Feb2009)
- (28) USDOE: available from http://www.em.doe.gov/pdfs/DOE_EM_9-07final.pdf (accessed 16Feb2009)

表1 アルゴンヌ国立研究所における廃止措置プロジェクト

プロジェクト	施設概要	最終状態	備考	費用(千USドル)	完了年
EBWR	熱出力100MW電気出力5MWの沸騰水型原子炉	再利用無制限解放	超ウラン廃棄物貯蔵施設への転用	20868.3	1996
200建屋W wing ホットセル除染	トリウム増殖炉の使用済み燃料分析	-	95%以上のラドン放出減少と入戻可能なレベルまでのセル除染	5814.8	1996
212建屋 ブルトニウムグローブボックス	原子炉燃料開発及びアクチニド金属特性調査	再利用無制限解放	61体のグローブボックス撤去後、DOEによる確認測定実施	7192	1996
JANUS	高中性子束生物実験用原子炉	再利用無制限解放	遮へい地下室及び研究室スペースは利用可能	2122.3	1997
アルゴンヌ熱中性子源原子炉	軽水減速型高濃縮ウラン燃料原子炉(10kWt)	再利用無制限解放	ロボット研究室への施設転用	576.3	1998
579建屋 廃棄物イオン交換施設	わずかに汚染された放射性液体の処理に使用	建屋解体	DAWPによる遠隔解体 等	156.5	1998
CP-5	重水減速冷却型研究用原子炉	再利用無制限解放	DAWPによる遠隔解体 等	29614	2000
60インチ サイクロトロン	重水素、ヘリウムイオン及び荷電水素分子ビーム生成	再利用無制限解放	遮へい保管室及びケーブ付きホットラボ	3626.1	2001
310建屋貯蔵タンク群	余剰タンク	無制限再利用	サービスプロアの余剰タンクの撤去	1470.4	2002
Juggernaut原子炉	軽水冷却減速型研究炉(250kW)	無制限再利用	2005年9月ORAU/ORISEによる確認測定実施	2328.7	2005
301建屋ホットセル	原子炉燃料の構成と物質にかかる研究に使用	無制限再利用	再利用可能	6757.9+ζ	未定
EBR-II	液体ナトリウム冷却高速增殖炉の実験炉	未定	冷却材撤去後、安全貯蔵中	-	未定
ZRP 6及び9原子炉	低出力実験炉でウラン及びブルトニウム燃料を使用	無制限再利用	耐爆破遮へいセルの再利用	4317.2+ζ	未定

表2 環境管理計画における対象サイト（1/3）（完了分）

番号	州	サイト	完了年度	
1	NE	ネブラスカ	Hallam Nuclear Power Facility	1969
2	OH	オハイオ	Piqua Nuclear Power Facility	1969
3	NM	ニューメキシコ	Bayo Canyon	1982
4	NJ	ニュージャージー	Kellex/Pierpont	1982
5	CA	カリフォルニア	University of California	1982
6	NM	ニューメキシコ	Acid/Pueblo Canyons	1984
7	NM	ニューメキシコ	Chupadera Mesa	1984
8	PA	ペンシルベニア	Canonsburg	1986
9	NJ	ニュージャージー	Middlesex Municipal Landfill	1987
10	NY	ニューヨーク	Niagara Falls Storage Site Vicinity Properties	1987
11	NM	ニューメキシコ	Shiprock	1987
12	IL	イリノイ	National Guard Armory	1989
13	UT	ユタ	Salt Lake City	1989
14	WY	ワイオミング	Spook	1989
15	IL	イリノイ	University of Chicago	1989
16	UT	ユタ	Green River	1990
17	OR	オレゴン	Lakeview	1990
18	WY	ワイオミング	Riverton	1990
19	AZ	アリゾナ	Tuba City	1990
20	CO	コロラド	Durango	1991
21	TN	テネシー	Elza Gate	1992
22	ID	アイダホ	Lowman	1992
23	NM	ニューメキシコ	Pagano Salvage Yard	1992
24	OR	オレゴン	Albany Research Center	1993
25	NY	ニューヨーク	Baker and Williams Warehouses	1993
26	PA	ペンシルベニア	Aliquippa Forge	1994
27	TX	テキサス	Falls City	1994
28	CO	コロラド	Grand Junction Mill Tailings Site	1994
29	IL	イリノイ	Granite City Steel	1994
30	AZ	アリゾナ	Monument Valley	1994
31	AK	アーカンソー	Project Chariot	1994
32	CA	カリフォルニア	Salton Sea Test Base	1994
33	CT	コネチカット	Seymour Specialty Wire	1994
34	OH	オハイオ	Alba Craft	1995
35	NM	ニューメキシコ	Ambrosia Lake	1995
36	OH	オハイオ	Associate Aircraft	1995
37	PA	ペンシルベニア	C. H. Schnoor	1995
38	MA	マサチューセッツ	Chapman Valve	1995
39	MI	ミズーリ	General Motors	1995
40	OH	オハイオ	Herring-Hall Marvin Safe Co.	1995

表2 環境管理計画における対象サイト(2/3)(完了分)

番号	州	サイト	完了年度
41	NM ニューメキシコ	Holloman Air Force Base	1995
42	HI ハワイ	Kauai Test Facility	1995
43	UT ユタ	Mexican Hat	1995
44	FL フロリダ	Peak Oil PRP Participation	1995
45	OH オハイオ	B&T Metals	1996
46	OH オハイオ	Baker Brothers	1996
47	CO コロラド	Gunnison	1996
48	TN テネシー	Oak Ridge Associated Universities	1996
49	CA カリフォルニア	Oxnard Facility	1996
50	NM ニューメキシコ	South Valley Superfund Site	1996
51	IL イリノイ	Fermi National Accelerator Laboratory	1997
52	CA カリフォルニア	Geothermal Test Facility	1997
53	NM ニューメキシコ	Inhalation Toxicology Laboratory	1997
54	NJ ニュージャージー	New Brunswick Site	1997
55	CO コロラド	New Rifle	1997
56	CO コロラド	Old Rifle	1997
57	FL フロリダ	Pinellas Plant	1997
58	IL イリノイ	Site A/Plot M	1997
59	CO コロラド	Slick Rock Old North Continent	1997
60	CO コロラド	Slick Rock Union Carbide	1997
61	MA マサチューセッツ	Ventron	1997
62	ND ノース・ダコタ	Belfield	1998
63	ND ノース・ダコタ	Bowman	1998
64	PR プエルトリコ	Center for Energy and Environmental Research	1998
65	CO コロラド	Maybell	1998
66	CO コロラド	Naturita	1998
67	IA アイオワ	Ames Laboratory	1999
68	NJ ニュージャージー	Princeton Plasma Physics Laboratory	1999
69	CA カリフォルニア	Sandia National Laboratories	1999
70	OH オハイオ	Columbus Environmental Management Project-King Avenue	2000
71	UT ユタ	Monticello Remedial Action Project	2000
72	ID アイダホ	Argonne National Laboratory-West	2001
73	CA カリフォルニア	General Atomics	2001
74	CO コロラド	Grand Junction Office	2001
75	MO ミズーリ	Weldon Spring Site	2002
76	KY ケンタッキー	Maxey Flats Disposal Site	2003
77	MS ミシシッピー	Salmon Site	2003
78	AK アーカンソー	Amchitka Island	2005
79	CA カリフォルニア	Laboratory for Energy-Related Health Research	2005

表2 環境管理計画における対象サイト (3/3) (完了分／現在進行分)

番号	州	サイト	予定年度
80	MO ミズーリ	Kansas City Plant	2006
81	CA カリフォルニア	Lawrence Livermore National Laboratory - Main Site	2006
82	CO コロラド	Rocky Flats Environmental Technology Site	2006
83	OH オハイオ	Fernald Environmental Management Project (Note 1)	2007
84	OH オハイオ	Ashtabula Environmental Management Project (Note 2)	2007
85	CA カリフォルニア	Lawrence Berkeley National Laboratory (Note 3)	2007
86	OH オハイオ	Miamisburg Environmental Management Project (Note 4)	2007
87	OH オハイオ	Columbus Environmental Management Project - West Jefferson (Note 5)	2007
88	NM ニューメキシコ	Inhalation Toxicology Laboratory 2008	2007
89	CA カリフォルニア	Lawrence Livermore National Laboratory - Site 300	2008
90	TX テキサス	Pantex Plant	2008
91	CA カリフォルニア	Sandia National Laboratories - NM (Note 6)	2008
92	IL イリノイ	Argonne National Laboratory - East	2009
93	CA カリフォルニア	Stanford Linear Accelerator Center (Note 7)	2009
94	CA カリフォルニア	Energy Technology Engineering Center (Note 7)	2009
95	NY ニューヨーク	Brookhaven National Laboratory (Note 8)	2009
96	NY ニューヨーク	West Valley Demonstration Project (Note 9)	2010
97	CA カリフォルニア	General Electric Vallecitos Nuclear Center	2012
98	NY ニューヨーク	Separations Process Research Unit	2014
99	TN テネシー	Oak Ridge Reservation	2014
100	NM ニューメキシコ	Los Alamos National Laboratory	2015
101	OH オハイオ	Portsmouth Gaseous Diffusion Plant	2015
102	NV ネバダ	Nevada Test Site	2025
103	UT ユタ	Moab (Note 10)	2027
104	KY ケンタッキー	Paducah Gaseous Diffusion Plant	2028
105	SC サウス・カロライナ	Savannah River Site (Note 11)	2030
106	ID アイダホ	Idaho National Laboratory	2031
107	NM ニューメキシコ	Waste Isolation Pilot Plant	2035
108	WA ワシントン	Hanford Site; excluding ORP	2035
109	WA ワシントン	Office of River Protection (Note 12)	2042

Note 1: Physical completion was declared on October 2006 and DOE acceptance in January 2007.

Note 2: Physical completion was accepted by DOE in December 2006.

Note 3: A one-year delay in the closure date due to regulatory closeout issues.

Note 4: The Conference Report accompanying the Energy and Water Development Appropriations Act, 2006 requires additional remediation work (OU-1) at Miamisburg which delayed the scheduled closure date.

Note 5: Physical completion in June 2006, DOE agreement with site owner on completion in January 2007.

Note 6: A three-year delay in the closure date due to regulatory issues.

Note 7: This date reflects the current baseline; delays due to regulatory issues possible.

Note 8: Two-year delay possible on facility D&D workscope.

Note 9: Reflects interim end state.

Note 10: The revised end date from 2011 is an estimate, pending validation of the baseline.

Note 11: Revised end date based on current tank waste processing estimates.

Note 12: The new Waste Treatment Plant baseline results in a seven-year delay to site completion.

表3 現場事務所と担当サイト

番号	事務所名	担当サイト
1	CH シカゴ	アルゴンヌ国立研究所 ブルックヘヴン国立研究所 シカゴオペレーション事務所 ローレンス・バークレイ国立研究所 スタンフォード線形加速器センター
2	ID アイダホ	アイダホ国立研究所
3	KC カンザスシティ	カンザスシティ・プラント
4	LA ロスアラモス	ロスアラモス国立研究所
5	LS ローレンスリヴァモア	ローレンス・リヴァモア国立研究所
6	NN	エネルギー技術工学センター 元アルバカーキ管理事務所 元オーケランド管理事務所 ジェネラル・アトミックス 吸入毒性研究所 エネルギー関連健康調査研究所 分離過程研究ユニット サウス・ヴァレー・スーパーファンドサイト
7	NV ネヴァダ	ネヴァダサイト事務所 ネヴァダテストサイト
8	OH オハイオ	アシュタブラEMプロジェクト コロンバスEMプロジェクト ファーナルドEMプロジェクト マイアミスバーグEMプロジェクト オハイオ現場事務所 ウェストヴァレー実証プロジェクト
9	OR オークリッジ	オークリッジ保護
10	PP パドゥカー・ポーツマス	パドゥカーガス拡散プラント ポーツマスガス拡散プラント
11	PX パンテックス	パンテックスプラント
12	RF ロッキーフラツツ	ロッキーフラツツ環境技術サイト
13	RL ハンフォード	ハンフォードサイト
14	RP リヴァー・プロテクション	河川保護事務所
15	SN サンディア	サンディア国立研究所
16	SR サバンナ・リヴァー	サバンナ・リヴァーサイト

(単位：千米国ドル)

表4 EM予算年度推移（1992-2001）(1/2)

予算年度	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	10年計
アルバカーキ	384,266	453,536	431,878	381,092	402,050	357,278	316,734	203,549	200,241	217,163	
カールスバッド	140,963	150,716	178,864	175,804	183,240	187,840	173,700	185,405	181,417	194,498	
シカゴ	55,309	71,499	75,234	76,541	68,780	67,056	49,776	53,922	53,702	38,827	
アイダホ	296,194	431,787	462,684	455,191	443,223	420,012	415,556	431,504	402,029	451,259	
ネバダ	39,882	62,161	63,732	57,749	64,017	73,044	68,918	80,081	87,471	90,212	
オークランド	101,251	122,431	127,367	105,006	121,240	102,378	95,467	86,831	82,761	86,482	
オーリンジ	535,502	669,451	769,467	769,671	715,993	621,954	547,258	515,250	540,949	620,050	
オハイオ	378,566	507,036	491,211	430,145	499,405	496,823	486,272	497,799	510,975	524,975	
リッチランド	1,018,039	1,360,096	1,433,319	1,404,862	1,247,034	982,052	951,397	691,584	719,759	726,280	
河川保護事務所	0	0	0	0	0	0	0	0	310,445	338,457	382,139
ロッキーフラット	174,379	276,687	460,516	556,804	564,766	487,385	632,100	657,200	664,675	664,675	
サバンナリバー	540,044	757,109	709,202	734,629	1,224,094	1,148,168	1,127,923	1,219,552	1,199,144	1,266,884	
Multi-Site	229,440	337,223	358,761	312,345	184,657	105,328	113,053	86,677	87,511	47,000	
Ur/Th返還	0	0	40,600	41,848	42,000	34,000	40,000	30,000	30,000	30,000	
基金出資	0	0	129,805	133,700	350,000	376,648	388,000	398,088	420,000	420,000	
Program Direction	139,813	173,922	235,893	246,205	315,768	411,011	345,000	337,073	358,409	359,888	
科学技術	278,413	329,933	351,592	359,358	381,690	351,919	269,213	236,715	239,342	196,548	
2000年問題対応	0	0	0	0	0	0	0	0	13,840	0	0
保健研究	0	0	0	0	0	0	0	0	12,000	0	0
PD/FFT/FID Reprog Reserve	0	0	0	0	0	0	0	0	12,918	0	
SUBTOTAL	4,312,061	5,703,587	6,320,125	6,240,950	6,807,957	6,222,896	6,020,367	6,047,515	6,129,760	6,316,880	60,122,098
民営化	0	0	0	0	0	0	330,000	200,000	260,357	232,282	540,092
FFTFF Transfer to NE	0	0	0	0	0	0	0	41,727	0	0	0
D&D Fund Contribution	0	0	(129,805)	(133,700)	(350,000)	(376,648)	(388,000)	(398,088)	(420,000)	(420,000)	
請負業者旅費節約	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(9,700)
Uncosted Offsets (Defense)	(25,162)	(165,646)	(170,788)	(274,613)	(329,248)	(165,398)	(11,253)	(29,447)	(4,111)	(34,317)	
Uncosted Offsets (Non-Def)	0	(17,614)	(19,520)	(23,381)	(24,411)	(11,657)	0	(9,565)	(7,597)	0	
Uncosted Offsets (Privatization)	0	0	0	0	0	0	0	(32,000)	(44,000)	(25,092)	
SR Pension Fund	0	0	0	0	(37,000)	(8,000)	0	0	(8,700)	(50,000)	
計(千・米国ドル)	4,286,899	5,520,327	6,000,012	5,809,256	6,067,298	5,991,193	5,862,841	5,838,772	5,877,634	6,317,863	57,572,095

表 4 EM 予算年度推移 (2001-2008) (参考 : 予算要求資料) (2/2)

予算年度	2001	2002	2003 要求額	2003 要求額	2004	2005 要求額	2006	2007	2008 要求額
アルバカーネ	158,499	138,362	95,304	—	—	—	—	—	—
カールスバッド	497,886	183,437	193,228	210,484	208,751	231,612	228,331	213,278	219,739
シカゴ	54,377	33,057	23,856	39,660	41,356	44,055	—	—	—
アイダホ	440,427	458,126	367,172	484,709	512,383	418,590	538,083	519,604	509,426
ネバダ	87,203	84,967	57,860	—	—	—	—	—	—
オーケランド	81,741	74,125	56,320	—	—	—	—	—	—
オークリッジ	451,985	442,316	379,418	415,435	461,440	495,318	502,246	471,335	409,690
ハドウカ	100,785	109,824	93,199	112,213	188,779	156,510	154,262	131,776	134,042
ポートマス	119,844	174,254	167,852	187,590	294,660	289,122	268,358	223,535	227,181
オハイオ	532,447	508,399	509,746	554,728	565,255	532,218	—	—	—
リッチランド	716,036	695,513	556,937	816,752	929,889	1,027,005	818,525	839,559	887,422
河川保護事務所	792,077	1,027,198	903,113	1,117,820	1,087,934	1,038,570	848,334	964,127	963,443
ロッキー・フット	616,808	620,504	634,407	672,599	654,468	664,494	—	—	—
サン・ナリバー	1,158,457	1,064,414	961,103	1,222,581	1,330,406	1,254,243	—	—	—
EM cleanup reform	0	0	80,000	—	—	—	—	—	—
UTR返还	72,842	1,000	1,000	—	—	—	—	—	—
基金出資	419,076	420,000	420,000	432,731	449,333	463,000	446,490	452,000	463,000
Program Direction	372,053	369,234	358,227	279,723	276,510	271,059	241,386	291,216	309,760
科学技術	203,378	204,732	9,200	—	—	—	—	—	—
safeguard and security	273,109	275,394	265,421	—	—	—	281,189	295,840	273,381
余剰施設	0	8,374	3,141	—	—	—	—	—	—
multi-Site	91,361	142,593	38,871	—	—	—	—	—	—
技術開発	—	—	—	113,679	66,116	60,142	29,047	21,389	21,389
ワシントン本部	—	—	—	298,621	268,758	270,172	52,075	57,981	53,146
カンザスシティ	—	—	—	2,257	2,066	3,506	—	—	—
リヴィアモア	—	—	—	29,360	27,922	32,758	—	—	—
ロスアラモス	—	—	—	100,802	114,100	121,645	—	—	—
ネヴァダ	—	—	—	90,291	90,036	93,404	—	—	—
NNSAサイト	—	—	—	77,180	59,174	54,892	299,932	233,093	273,035
Pantexサイト	—	—	—	14,911	21,133	24,521	—	—	—
高レベル廃棄物提案	—	—	—	0	0	350,000	—	—	—
ウェストバレー実証計画	—	—	—	—	—	—	76,329	73,400	54,395
その他のサイト	—	—	—	—	—	—	88,730	86,674	69,575
EM予算の小計	7,059,083	7,189,360	7,160,574	7,259,245	7,629,336	7,522,275	6,589,532	5,828,038	5,655,351
計(千・米国ドル)	(646,589)	(646,589)	(646,589)	(466,236)	(642,884)	(463,143)	(632,808)	(452,000)	(463,000)
計(千・米国ドル)	6,412,494	6,699,557	6,714,227	6,793,009	7,007,585	7,433,653	6,589,532	5,828,038	5,655,351

表 5 大規模実証配備プログラム (LSDDP) で適用された各種技術(1/4)

技術	種類	内容
Mega Tech Blade Plunging Cutter:	Dismantlement	ポータブル油圧式切断装置である。デモンストレーションでは、グローブボックスのような大きな金属対象物から脚部、付属品を効果的に撤去し、効率面でも從来の可変速レシプロソーよりも、コストも同等であった。
NT Vision:	Characterization	NTビジョンシステムは低レベル放射性廃棄物が容器に収納される様子をビデオ撮影してデモンストレーションされました。容器に収納された廃棄物の永久的な保管文書を与えるものである。デモンストレーションの成功の結果、ロスアラモス研究所では、本システムを導入して、TRU及びLLW容器の内容物の永久的保管文書を作成する予定である。
RACESCAN:	Worker Safety	RaceScan通信システムは、ブリトニウム汚染のグローボックスを含むガラス繊維強化クレートを削る作業者の間のコミュニケーションに用いるものである。通常、フルフェイスの呼吸器を着用し重い研削装置を用いている作業員は作業中の騒音で互いのコミュニケーションがとりづらいため、手信号を用いる。自動車レースで使用されるドライバーとピットクルーとの通信方法を取り入れた本システムの使用により、容易にコミュニケーションをとることが可能となる。
AeroGo Air Pallets:	Worker Safety	本パレットは床面に対して空気を噴射することによって、仮想的に摩擦のない空気層を作り出す。摩擦が少なく全方向への移動が可能なため、オペレータは、限られた作業スペースの中で、荷物を正確な位置に配置できる。システムの柔軟性を示すために迷路をぬけ、また、最大5600バウンドの容器が非破壊検査システム上に移動し位置決めされるというデモンストレーションをIANIで1999年6月に実施した。
Vehicle and Cargo Inspection System (VACIS):	Characterization	強力がンマ線イメージングシステムを持つ車両カーゴ検査システムである。グローブボックス中の機器、フィルターなど等の品目を明瞭に見ることができる。
Fog and Strip:	Decontamination	空気中浮遊の放射性汚染物を表面に固定させる霧状スプレーと汚染を除去するストリッパブルコーティングの技術を組み合わせたものである。ロッキーフラットやハンフォードでの除染に利用された。

表 5 大規模実証配備プログラム (LSDDP) で適用された各種技術(2/4)

C Reactor Interim Safe Storage at Hanford		
技術	種類	内容
Laser Assisted Ranging and Data System (LARADS):	Characterization	放射線検出システムと測定データを電子ファイルとして蓄積する機能を有する改良型自動トラッキング土木測量機である。
Gamma Ray Imaging system:	Characterization	ガンマスペクトロスコピー、レーザ照準機、及びビデオを有する、ガンマ線感度の高い遮へい及びコリメータ付き検出器である。
Mobile Integrated Temporary Utilities System (MITUS):	Worker Safety	交信、緊急時の警報、照明の機能を備える可搬式の電力供給装置である。廃止措置(作業のために電源を切る必要が生じたときに有用である)。
Position Sensitive Radiation Detector:	Characterization	By及びαの汚染測定装置であり、1m ² あたり400点の測定ができる。測定結果は、自走式カートに置かれたPCIに記録され、グラフや画像データとして出力される。
Self Contained Pipe Cutting Shears:	Dismantlement	ハッテリを内蔵したポーテブルの油圧せん断装置であり、直径1~2.5インチの配管を切断できる。
System for Tracking, Remediation, Exposure, Activities and Materials (STREAM):	Worker Safety	生産性、安全性、ALARA原則、法令遵守、コミュニケーションと訓練の向上を図るとともに、エンジニアリング、計画立案、廃棄物取扱等のプロジェクト全体のマネージメントを支援する、マルチメディアベースである。
Heat Stress Monitoring System:	Worker Safety	作業者の潜在的熱ストレスを回避するために、体温、心拍数及び作業量をモニターするオンラインモニタである。
Sealed Seam Sack Suits:	Worker Safety	熱ストレスの回避を支援するための防護服である。使い捨てで、呼吸可能と防水の機能を有する。
RESRAD-BUILD:	Characterization	放射性物質で汚染された建屋に居住する仮想住民の被ばく線量を予測するコンピュータプログラム
Concrete Shaver:	Decontamination	自走式電気駆動のダイアモンドシェービングであり、コンクリート表面の除染が可能である。
Wireless Remote Monitoring System:	Characterization	ベータ・ガンマ線の線量率と線量を測定・表示する、個人用の電子エリア線量計である。
2-D Linear Motion System:	Characterization	さまざまな作業モジュールを装備することのできる2次元の線形動作壁面システムである。
Concrete Diamond Grinder:	Decontamination	軽量手持ちのコンクリート・塗装除去装置で、5インチのダイヤモンド研削砥石とダスト回収用の吸気ポートがついている。平面の壁及び床に適している。
Concrete Spaller:	Decontamination	吸気ポート付きの取り外し可能なシェラードのついた手持ちのコンクリート・塗装除去装置で、アルファ及びベータ・ガンマ除染用である。
Compact Subsurface Investigation System:	Characterization	土壤サンプルを採取するためのポータブルでコンパクトな土壤サンプラーである。燃料貯蔵コンクリート床面下からの土壤採取が可能である。
Automatic Demolition Dust Suppression System:	Characterization	解体作業で発生するコンクリート粉じんを制御する自動粉じん抑制システムである。
Reactor Surface Contamination Stabilization:	Decontamination	原子炉表面等の解体時に放射性物質が浮遊するのを防止するために、表面の汚染を固定しておく必要がある。これに関して、様々な皮膚の安定性の評価と複雑な表面の完全被覆が可能な技術である。
Liquid Nitrogen-Cooled Diamond Wire Concrete Cutter:	Dismantlement	ダイアモンドコングリート切断ワイヤー冷却用に液体窒素を用いて、厚いコンクリート壁、床、構造物を切断する
High Speed Clamshell Pipe Cutter:	Dismantlement	軽量の配管旋盤で、通常直径16~24インチの一列に並んだ配管を切断あるいは斜角を付けるものである

表5 大規模実証設備プログラム（LSDDP）で適用された各種技術(3/4)

Plant 1 Complex Decommissioning at Fernald Environmental Management Project		
技術	種類	内容
Steam Vacuum Cleaning (Tech ID 1780):	Decontamination	ケリー除染システムでは、デブリから表面汚染を取り除くために過熱加工水の運動エネルギーを利用している。廃棄物は液体分離器、デミスタ、HEPAフィルタを通して汚染物を取り除いた後、大気に放出される。
Soft Media Blast Cleaning (Tech ID 1899):	Decontamination	機械的な研磨と汚染物吸収を利用して、やわらかなプラスチック媒体を表面に打ち付ける。研磨剤の吹きつけには圧縮空気が使用され、ホースノズルを通して放出される。
VecLoader HEPA Vacuum Insulation Removal (Tech ID 1784):	Dismantlement	15inchHgの真空度で毎分1700立方フィートの排気量を持つ強力隔離除去システムである。
Oxy-Gasoline Cutting Torch (Tech ID 1847):	Dismantlement	本酸素ガソリントーチは十分に成熟した技術で、商業的に利用されている金属切断トーチ代替可能である。金属廃棄物の解体や減容処理に用いられる酸素アセチレントーチである。
Field-Portable Raman Spectroscopy (Tech ID 873):	Characterization	現場用の持ち運び可能なラマンスペクトロメトリは、表面にレーザー光を照射し、非弾性散乱で戻ってきた光を検出することによって動作する。この非弾性散乱(ラマン効果として知られている。非弾性散乱光の波長はコモンバンドに応じて変化するという特性がある。散乱光の強度)により汚染物の定量化がなされる。
Laser Induced Fluorescence (Tech ID 1999):	Characterization	レーザー誘起蛍光システムはウラン酸化物分子を広範囲にサーベイするもので、2ft×2ft分割のエリアを一度に測定するものである。物理的に拭き取るものとは異なり、直接表面から採取することなく、10m離れた位置から測定が可能である。
Piping Inspection (Tech ID 1811):	Characterization	カメラとその他の装置を使って視覚的に配管を検査し、プロセス残留物の有無を検証する
Low Density Cellular Concrete Void Filling (Tech ID 1846):	Dismantlement	容器内の空隙を膨張する物質で満たすことによって、過積載による圧縮荷重に耐えることが可能。
Urethane Foam Void Filling (Tech ID 1816):	Dismantlement	ウレタン製の空隙充填剤で、ポリウレタン発泡を使用しており、商業的に利用可能な技術である。ポリマーセンサのジフェニルメタン・ジイソシアートビポリオールブレンドの2種類の化学液体を混合することによってボリウレタン発泡が形成される。
Personal Ice Cooling System (Tech ID 1898):	Worker Safety	PICSは体温調節システムであり、氷道水から作成した氷を冷却材に使用し、耐久性と快適性のある全身衣服にチューブを張り巡らせその中を低温水が循環する仕組みとなっている。
Centrifugal Shot Blasting (Tech ID 1851):	Decontamination	遠心分離型ショットブラストは、コンクリート床面表面に強化鉄を秒速220フィートの高速で打ち付ける。ショットが床面にあたったあと、その衝撃でセメントが粉々に粉碎され、それらはダスト集塵系で捕集される。
Advanced Excavation Monitoring System, Mobile Work Platform (Tech ID 2243):	Dismantlement	移動可能な作業プラットフォームは配管や溝の撤去用に開発された遠隔操作機器である。本プラットフォームはスケジュール40以下の炭素鋼配管を把持、支持、捲縮、切断することが可能である。また、地表面から30ftまでの配管を切断して分離することができる。

表 5 大規模実証設備プログラム (LSDDP) で適用された各種技術(4/4)

Savannah River 321-M Fuel Fabrication Facility		
技術	種類	内容
E-PERM:	Characterization	EPERMは金属表面の汚染を測定する装置であり、クリアランスレベルから高いレベルまでの汚染測定が可能である。本技術により、低レベル汚染測定についての感度と精度が改良されるとともに、作業員の被ばく低減とコストの削減が図られる。
ALARA 1146 Strippable Coating:	Decontamination	ルース汚染を低減する除染技術である。6種の剥離性塗装技術について、適用と除去の容易さ、除染係数、永続性、及びコストの比較評価が行われた。 α 汚染と汚染についてALARA 1146の平均の除染係数は、それぞれ6.68と5.55であった。除染面積が3408ft ² 以下では、剥離性塗装技術の方が従来の技術に比べて低コストとなる。
Portable X-Ray, K-Edge Heavy Metal Detector:	Characterization	本システムは重金属中のX線の吸収特性を利用して、X線ビームが物質中を通過すると、K殻の電子結合エネルギーに対応する物質固有のエネルギーでX線トランジミッジョンが大きく減少する。エネルギー感受の良い高純度ゲルマニウム検出器が放出されたビームを分析する。
Long Range Alpha Detection (LRAD):	Characterization	アルファ粒子が空気と相互作用することによって生成される電離空気分子を検出することによって表面のアルファ汚染を測定する。入力フィルタユニット、コンポーネントチャンバー及び検出ユニットの3つのモジュラユニットから構成される。プローブが入らないかったり、スマアできない配管内面のような領域を測定できる。測定結果をプリントアウトでき、手動測定よりも時間がかかるないという利点もある。
Size Reduction Machine:	Dismantlement	手動で移動する油圧せん断機で、汚染機器を切断する際に運転員にかかるせん断機の重量を軽減する。床面より1フィート低いところから16~18フィート高いところまでの範囲での切断が可能であり、床面や壁面を4インチ以内に切断できる。3インチ平方のSSアンダル、4インチのスケジュール40配管、3.5×0.5 inch ² の平板を切断できる。この機械により、解体作業及び廃棄物取り扱い作業の安全性と効率化が図られる。廃棄物のサイズが小さくなることにより、取り扱いが容易になるとともに、廃棄物容器の発生量も少なくなる。

表 6 CP-5 の解体で適用された各種技術(LSDDP) (1/2)

Chicago Pile 5 Test Reactor Decommissioning at Argonne National Laboratory (1)			
技術	種類	内容	
Advanced Recyclable Media System (ARMS):	Decontamination	ARMSは、再利用可能な媒体を用いたプラスト技術である。この媒体は、さまざまな研磨度のウレタン発泡体から構成されている。	
Centrifugal Shot Blast:	Decontamination	遠心分離型ショットブラストは、コンクリート床面表面に強化鉄を高速で打ち付ける。ショットが床面にあたつたあと、その衝撃でセメントが粉々に粉砕され、それらはダスト集塵系で捕集される。	
Dual Arm Work Platform:	Dismantlement	双腕作業プラットフォームは、クレーンから吊り下げられ遠隔操作されるものどなっている。プラットフォームには2つのマニピュレータを操作するために必要なさまざまな電気及び油圧システムが内蔵されている。現在のシステムは直接視界のきかない条件でも250フィート遠隔から操作できる。	
Empore TM Membrane Separation Cartridge:	Decontamination	この技術は、高流量で汚染物質を検知レベルまで除去することができる。	
Field-Transportable Beta Counter/Spectrometer:	Characterization	PC制御で現場に運搬可能なベータスペクトロメーターには、固体シンチレーション、同時計数、低ノイズ光電子増倍管が使用されている。	
FRHAM-TEX Anti Contamination Suit:	Worker Safety	FRHAM-TEX冷却スーツは一体型のディスポーザブルで呼吸可能な防水作業服である。不織布でチレン／ポリハイドロフックフィルムに結合されている。防水、漏れ防止、及びジロックシステムを有す。	
GammaCam TM :	Characterization	GammaCamは放射線場を測定し、マッピングできるガンマ線イメージングシステムである。白黒の視覚画像に放射線場の2次元の疑似カラー画像を重ねたものを生成する。	
In-Situ Object Characterization System (ISOCS):	Characterization	ISOCSは現場用ガンマスペクトロメトリシステムである。原位置でほぼリアルタイムの分析データが得られる。	
ROTO-PEEN Scaler and VAC-PAC® System:	Decontamination	ROTO-PEENスケーラーVAC-PACシステムは、コンクリート上の汚染した塗料、及び、床、壁、天井及び構造物に取り付けられた鋼鉄上の汚染した塗料を除去するものである。本システムには局所排気のついた手持ちのROTO-PEENスケーラーが使用されている。除去されたデブリは同時に高効率のHEPA真空ドラムシステムで回収される。	
Mobile Automated Characterization System (MACS):	Characterization	MACSはハッティー駆動の自立式ロボットで、レーザー位置決めシンチレーション検出器を内蔵している。MACSはアルファ及びベータ汚染を検出でき、毎秒1インチの速さで床面上を移動する。	
NuFab Anti Contamination Suit:	Worker Safety	本スーツは一体型のディスポーザブルで呼吸可能なプロトンジルバーの付いた防水作業服である。継ぎ目の密封されたこのスーツは、不織布のポリプロピレン及び微小孔性フィルム層を用いたトリミネーテッドの複合材料でできている。	

表 6 CP-5 の解体で適用された各種技術(LSDDP) (2/2)

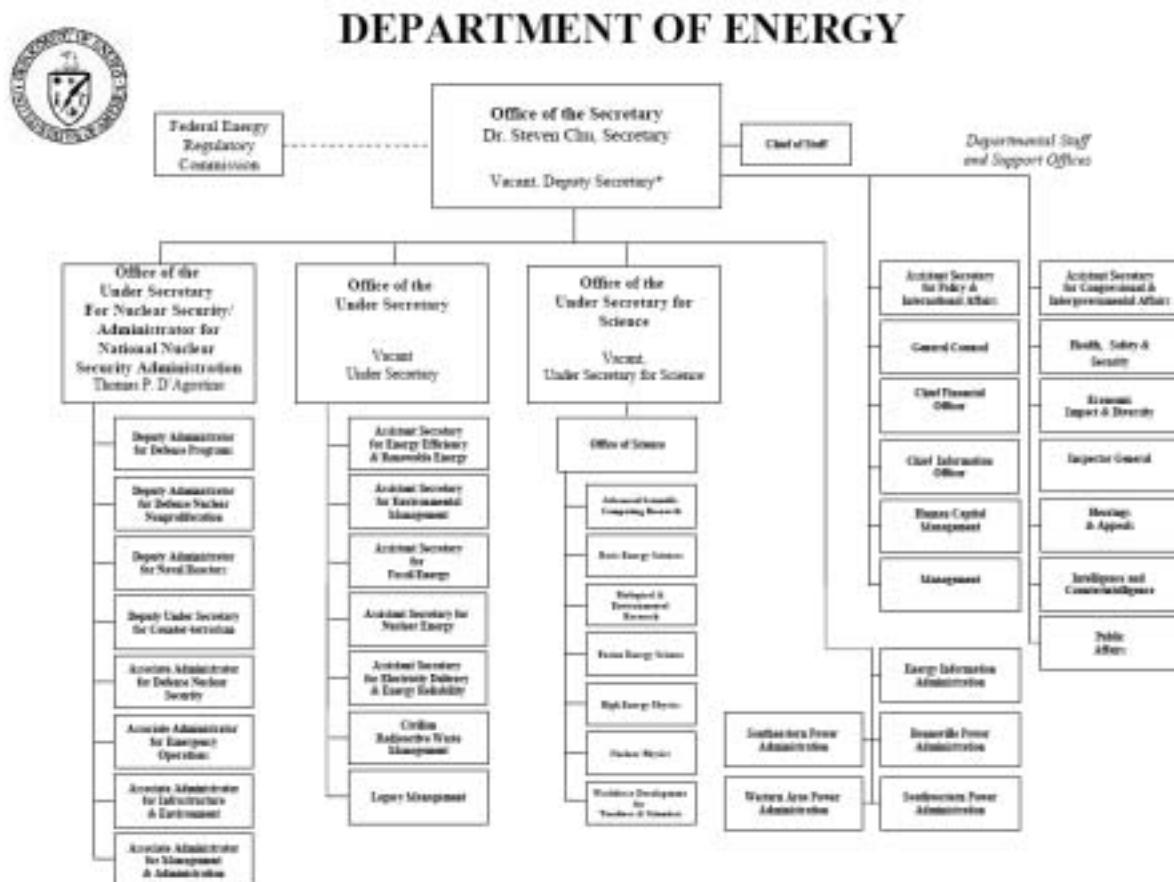
Chicago Pile 5 Test Reactor Decommissioning at Argonne National Laboratory (2)		
技術	種類	内容
Pegasus Coating Removal System:	Decontamination	本システムは、化学系の塗装除去システムである。アルキド、ラテックス塗料、エポキシ、ウレタン、塩素系ゴム、エラストマー、マスチックその他の化学耐性塗料に利用可能である。
Pipe Crawler™ Radiological Surveying System:	Characterization	本システムは、すぐに使える状態の配管検査、除染及び測定作業に利用するために開発された。本機は車輪のついたロボットに薄いGM検出器を取り付けている。
Pipe Explorer™ Surveying System:	Characterization	本システムは、さまざまなサーベイツールを配管やダクト内に移送するための装置である。本システムで利用可能なツールは、アルファ、ベータ、ガンマの放射線検出器、ビデオカメラ、及び配管位置標識である。
Portable X-Ray Fluorescence Detector/HEPA Filter:	Characterization	固体、液体、薄膜及び粉体サンプルに対して、非破壊及びリアルタイムで元素分析を行うものである。
Remote Controlled Concrete Demolition System:	Dismantlement	Brokk(は遠隔制御のコンクリート解体システムで、さまざまなものアタッチメントを持つブームを持つブームをもつて、ハンマーを動かせるようになっている)、腕の長さは15フィートある。Brokk(は400フィート離れた場所から、あるいは、テレビモニターのある部屋から操作することが可能で、最大30°の傾斜上でも作業できる。
Remotely Operated Scabbler:	Decontamination	コンクリート床面及び厚板の表面を掘り起こす遠隔操作のスキャブラーであり、スキャブリングヘッドの集合体、HEPAシステム、及び輪車台から構成される。
Rosie Mobile Robot Work System:	Dismantlement	Rosie(はオペレーターが直接視界のきかない最大500フィート離れた場所から操縦し効果的に作業させる遠隔操作システムである)。
Rotary Peening with Captive Shot:	Decontamination	コンクリート及びその床面塗装を取り除く技術である。真空度が安全基準値より低下すると電源が切れるとになっている。ラップ上に支持されたダングステンカーバイドショットが回転し、塗装が打ち砕かれる。除去された粒子状物質は、発生と同時に集塵機で回収される。
SRA Surface Contamination Monitor:	Characterization	位置精度の高いガス比列計数管を使用し、床面表面のアルファ及びベータ汚染を測定する。測定データは5cm角領域で採取でき、最高5mまたはそれ以上まで変化させることが可能である。
Starboldt™ Flashlamp System:	Decontamination	本システムは内蔵型の特許システムであり、ゼノンフラッシュランプを用いて、下地から塗装の除去・除染を行う。
Swing Reduced Control and Remote Crane Operation Upgrades:	Dismantlement	振り抑制クレーン制御システムは、クレーンで移動される荷重によって誘起される振れを最小化するとともに、オペレーターが荷重の遠隔位置決めの制御能力を高めるシステムである。NoSwayクーンコントローラーが振れを制御し、これによりオペレーターは正確にクーン操作することが可能となる。

表 7 CP-5 跡地利用の際の想定被ばく経路

被ばく経路	工業利用シナリオ	家族経営農場シナリオ
γ線による外部被ばく	○	○
ダストの吸入	○	○
ラドンの吸入	×	×
食物摂取	×	○
食肉摂取	×	○
牛乳の摂取	×	○
魚介類の摂取	×	○
土壤の摂取	○	○
水飲用	○	○

表 8 マウンド施設で適用された各種技術(LSDDP)

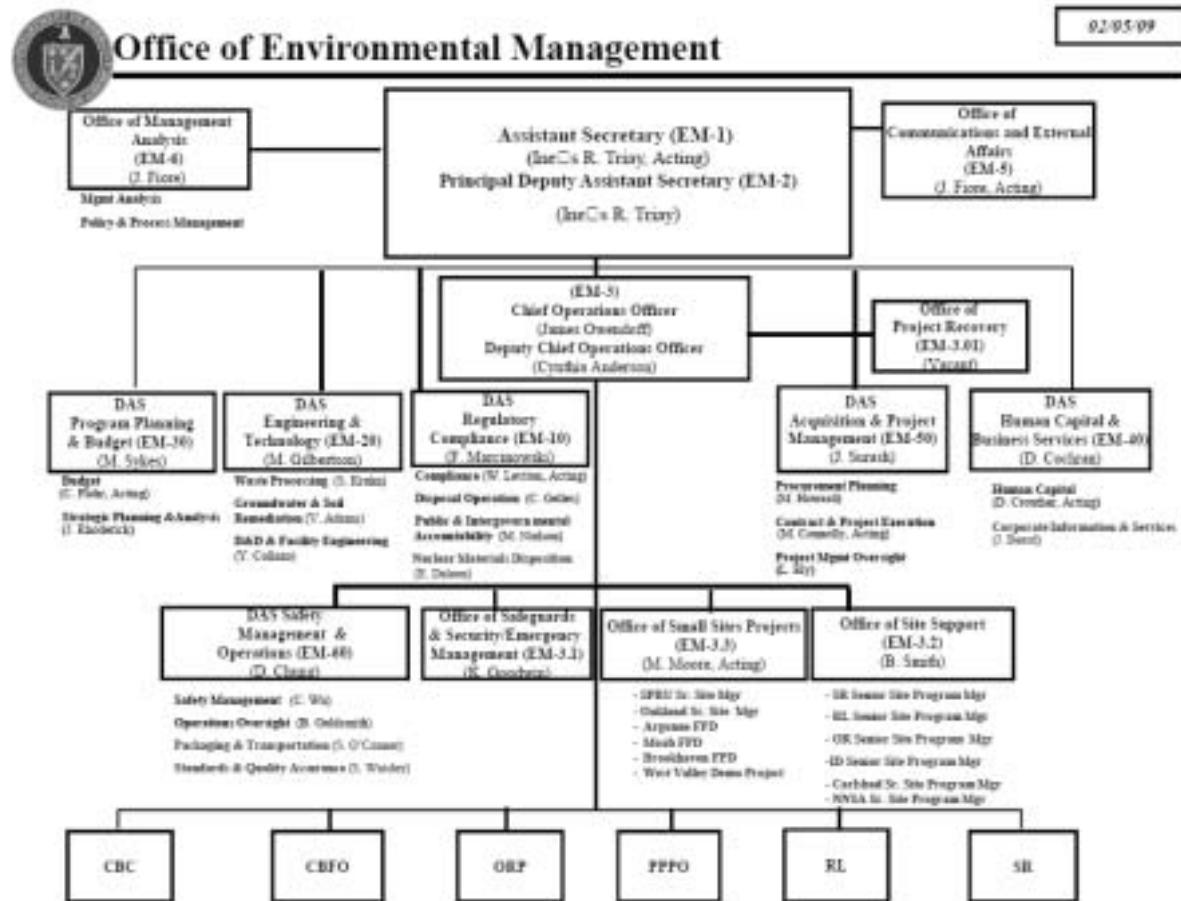
Mound Tritium Facilities		
技術	種類	内容
Lumi-Scint Portable Liquid Scintillation Counter (OSI/TMS ID 2311):	Characterization	持ち運びができる単管の液体シンシンカウンタであり、トリチウムからの低エネルギー・ガンマ線に応答することができる。光電子増倍管とマニユアルサンプルチャンバーを使用している。内蔵バッテリーあるいは110VAC電源で動作する。本ユニットにはプリンターや取り付けることができ、電気的に蓄えられたデータのハードコピーが印刷される。デモンストレーションではリアルタイム現場測定に対する本装置の有効性が示された。
WaterWorks Crystals Aqueous Liquid Solidification Agent (OSI/TMS ID 2312):	Dismantlement	本技術は、液体廃棄物の固化化に使用可能なポリマー・ベースの吸着剤を用いるものである。吸着率が高いこと、吸着を促進するのに機械的な混合作業が不要であること、吸着剤を加えてでも体積の増加がないこと、そして、ジェル状物質中の保持能力が高いことが利点としてあげられる。デモンストレーションでは、50対の吸着比などが示された。この結果、最終廃棄体は、振動及び衝撃テストをパスしたのに加え、処分場の廃棄物許容基準を満足した。
NOCHAR Petro Bond Absorbent Polymer Oil Solidification Agent (OSI/TMS ID 2313):	Dismantlement	本汚染油固化化技術(NOCHAR Petrobond)は高品質のポリマーである。ペトロバンドはわずかな体積増加で高速に吸収する。低レベル廃棄物の貯蔵、運搬、処分における自由液体制御に利用できる。低放射能のトリチウムに汚染されたオイルを使用したデモンストレーションでは、この技術が汚染オイルを効果的に高速に固化化できることが示された。全ての試験でTLCP値が埋設施設基準の7~8折低いこともわかった。
Pipe Crimping and Cutting System (OSI/TMS ID 2955):	Dismantlement	AC電源利用の油圧圧着工具である。圧着ヘッドの重量は8ポンド以下で25フィートの長さのホースに連結している。作業場所間を容易に移動でき、ホースを用いて入り組んだ場所にある管まで辿ることができる。12トンの力で1000psiの圧力を圧着金型にかける事ができる。標準金型に対して2つの平行合わせくぎを金型に取り付けるという改良が施された。この改良により、圧着力があわせくぎに作用し、密閉性が良くなる。この平行あわせくぎは、圧着対象の管に対して直角にセットされる。直径3/8~3/4インチまでの一重あるいは二重壁を持つ円管を圧着することが可能である。
Tritium Clean-Up Cart (OSI/TMS ID 2974):	Decontamination	トリチウムクリーンアップカートは、1990年代はじめからJLJNLで利用されており、除染作業場所間の移動が容易な可搬型トリチウム洗浄機である。このクリーン・アップカートは、スタンダロンとして利用でき、大型タンク、グローブボックス等からのトリチウム液体廃棄の除染を行つ。次世代のカートは、より大きく複雑なD&D作業に最適化された設計となっている。デモンストレーションでは、グローブボックスの除染に非常に効果的であることが示された。



* The Deputy Secretary also serves as the Chief Operating Officer

21 Jan 09

図 1 米国エネルギー省全体組織図



CBC: Consolidated Business Center
CBFO: Carlsbad Field Office
ORP: Office of River Protection
PPPO: Portsmouth Paducah Project Office
RL: Richland
SR: Savannah River

図 2 環境管理局内組織図

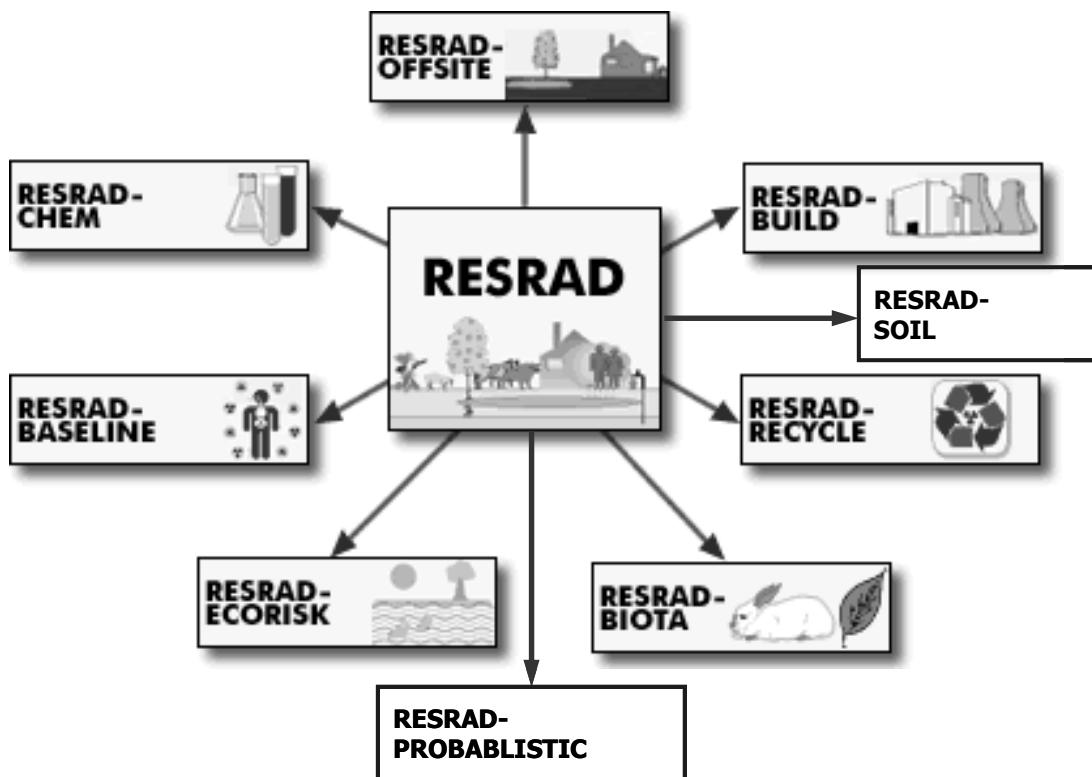


図 3 RESRAD ファミリーコード群

付録 A 2001 年までの協力によって得られた主な廃止措置プロジェクトの概要

シッピングポート原子力発電所

米国 DOE による最初の除染と廃止措置 (D&D) プロジェクトとしてシッピングポート原子力発電所の解体が 1985 年から 1989 年まで行われた。本発電所は、1957 年～1982 年まで運転された 72MWe の出力を持つ PWR 実証炉であった。即時解体撤去でサイトを無拘束解放する方針で作業が進められた。特に、原子炉圧力容器の一括撤去工法が採用され、圧力容器の細断を行わず炉内構造物を入れたまま、外側の中性子遮へいタンクと一緒にパッケージ化して一括撤去した。このパッケージを水上輸送等で運搬しワシントン州ハンフォードにある DOE の放射性廃棄物処分場へ埋設した。解体作業により発生した放射性廃棄物は約 4185 トンであった。

EBWR 解体作業

EBWR はアルゴンヌ国立研究所 (ANL) における原子炉解体プロジェクトである。本プロジェクトは即時解体撤去方式で 1986 年に作業が開始され 1996 年に終了した。EBWR は JPDR と同じ沸騰水型の原子炉 (20MWt [5MWe] 後に改造を行い 100MWt) であり、1957 年～1967 年まで運転された。炉内構造物は使用済み燃料プールでプラズマアーク及びギロチンソー等によって切断された。原子炉圧力容器は水ジェット、機械的切断等が用いられた。解体作業によって発生した放射性廃棄物は約 360 トン（金属 168 トン、コンクリート 86 トン、その他 106 トン）、また無拘束レベル廃棄物は約 120 トン（金属約 103 トン、コンクリート約 16 トン）であった。作業従事者の集団被ばく線量は 209 人・mSv で、総コストは約 20,000,000US ドルであった。

ウェストバレー再処理施設の解体

ウェストバレー再処理施設の解体作業は 1980 年から開始され、施設の除染、廃液処理、解体作業が進められている。本プロジェクトでは、核種で汚染された機器・構造物の除染及び解体作業を世界に先駆けて実施した。本施設はガラス固化処理の遅れのため、廃止措置完了予定が 2012 年まで引き延ばされた。

付録 B アルゴンヌ国立研究所における研究活動の現状

2008年現在の研究計画：アルゴンヌ国立研究所の研究は以下の5つに分類される。

基礎科学

広範囲の科学的挑戦の解決を模索し、物質科学、物理、化学、生物学、高エネルギー物理学及び数学、計算科学の実験的及び理論的研究を行う。これらの基礎研究によって、将来の技術的突破口となる基礎を構築し、社会的価値をもたらすことになる。

フォトンソース利用研究

フォトンソースは先進的なアメリカの科学的リーダーシップに寄与している。莫大な費用が必要なため、単一の会社や大学では実施が困難な洗練された研究施設の設計、建設、運転を本研究所が実施している。フォトンソース施設はアルゴンヌだけでなく、産業、大学、他の国立研究所、さらには外国研究者にも頻繁に利用されている。この他、大強度パルス中性子源、タンデム線型加速器システム等も運転している。

エネルギー資源研究

効率的でクリーンなエネルギーの供給を保証する研究で、原子炉、電池、燃料電池、輸送、電力生成と貯蔵等、様々な高度技術システムの開発を行っている。

環境管理

国家的な環境問題の管理と解決、そして環境の監督と報告の責務の促進に関する研究である。この分野の研究には代替エネルギー系統、環境リスクと経済的影響評価、危険廃棄物サイト分析、修復活動の立案、使用済み燃料処分のための電気冶金学的処理、老朽化した原子炉の除染及び廃止措置のための新技術開発が含まれる。

国家安全

国家安全保障に関する研究が近年急速に増加している。ANLで他の目的のために開発された技術が、テロの脅威に対抗するための技術開発に役立っている。燃料サイクル、生物学、化学、システム分析及びモデリングの専門的知識により、化学、生物及び放射性物質の脅威に対して、高感度の機器及び技術の開発を援助している。その他、兵器拡散あるいは現実の攻撃を検知及び阻止する技術の研究等も実施されている。

また、産業技術開発は重要な活動であり、国の技術基礎を強化するため、技術移転を行っている。さらにアルゴンヌの教育プログラムは、大学から地元の中学校の生徒にまで広範囲の教育機会を提供しており、その参加人数も他の研究所における同様のプログラム参加者に比べ圧倒的に多い。

表 B 現在アルゴンヌ国立研究所が運用する施設一覧

No	施設名	
1	Advanced Photon Source,	先進フォトンソース
2	Argonne Tandem Linear Accelerator System,	アルゴンヌタンデム線型加速器
3	Atmospheric Radiation Measurement Climate Research Facility,	大気放射線測定気候研究施設
4	Center for Nanoscale Materials,	ナノスケール物質センター
5	Electron Microscopy Center,	電子マイクロスコピーセンター
6	Intense Pulsed Neutron Source, and	大強度パルス中性子源
7	Structural Biology Center.	構造バイオセンター
8	2-MeV Linac	2MeVリニアック加速器
9	3-MeV Van de Graaff Accelerator	3MeVバーンデグラフ加速器
10	Actinide Facility	アクチノイド施設
11	Advanced Computing Testbed	先進コンピューティングテストベッド
12	Advanced Powertrain Test Facility	先進パワートレイン(駆動)実験施設
13	Aerosol Laboratory	エアロゾル研究室
14	Analytical Chemistry Laboratory	分析化学実験室
15	Atmospheric Boundary Layer Experiments (ABLE)	大気境界層実験施設
16	Atmospheric Field Measurement Facility	大気現場測定施設
17	Auto Shredder Residue Laboratory	自動車シュレッダーダスト施設
18	Basic Energy Sciences Synchrotron Radiation Center	基礎エネルギー科学シンクロトロン放射線センター
19	Battery Test Facility	バッテリー実験施設
20	Cobalt-60 Source (20,000 curies)	Co-60放射線源(20000キューリー)
21	Diesel Engine Test Facility	ディーゼルエンジン実験施設
22	District Heating and Cooling Simulator	加熱冷却シミュレータ
23	Electrochemical Energy Storage	電気化学エネルギー貯蔵
24	Electrodialysis Pilot Facility	電気透析パイロット施設
25	Electron Microscopy Laboratory — Argonne-West	電子マイクロスコピーリサーチ室(アルゴンヌ西地区)
26	Engineering Development Laboratory	エンジニアリング開発研究室
27	Froth Flotation Separation Pilot Facility	フロス浮選分離パイロット施設
28	Fuel Cell Test Facility	燃料電池実験施設
29	Fuel Conditioning Facility	燃料調整施設
30	General Medicine and Cancer Institutes Collaborative Access Team	一般薬ガン共同研究チーム
31	High-Temperature Electrolyte Furnace Facility	高温電解質電気炉施設
32	Hot Fuel Examination Facility	高温燃料試験施設
33	Irradiated Materials Laboratory	照射物質研究室
34	Laser Applications Laboratory	レーザー応用研究室
35	Laser Laboratory	レーザー研究室
36	Magnetic Imaging Facility	磁気イメージ施設
37	Magnetic Resonance Imaging Facility	磁気共鳴イメージ施設
38	Melt Attack and Coolability Experiments (MACE)	溶融物衝撃冷却性試験施設(MACE)
39	Micro-mass Spectrometer Laboratory	マイクロマススペクトロメトリ研究室
40	Millimeter Wave Laboratory	ミリ波研究室
41	Neutron Radiography Reactor	中性子ラジオグラフィー原子炉
42	Nondestructive Evaluation Laboratories	非破壊評価研究室
43	Nondestructive -Evaluation Test Load Frame Facility	非破壊荷重フレーム施設
44	Nondestructive -Evaluation Microscope Facility	非破壊 マイクロスコープ施設
45	Premium Coal Sample Facility	プレミアム炭サンプル施設
46	Powertrain and Emissions Laboratory	パワートレイン放出研究室
47	Pulsed Electron Linac	パルス電子ライナック
48	RDT&E Dilute Facility	RDT&E 希釈施設
49	Reactor Simulation Facility	原子炉シミュレーション施設
50	Robotics Laboratory	ロボット研究室
51	Safety Analysis Training Center	安全解析教育センター
52	Saltcake Facility Pilot Plant	ソルトケーキ施設パイロットプラント
53	Structural Biology Center	構造バイオセンター
54	Tribology Laboratory	トライボロジー研究室

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位	
基本量	SI 基本単位
名称	記号
長さ	メートル
質量	キログラム
時間	秒
電流	アンペア
熱力学温度	ケルビン
物質量	モル
光度	カンデラ

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	メートル	m ⁻¹
密度、質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a)	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) とも呼ばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ²
仕事を、工率、放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷、電気量	クーロン	C		s A
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラード	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束密度	ウエーブ	Wb	Vs	kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリリー	H	Wb/A	m ² kg s ² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C	K	
光束	ルーメン	lm	cd sr ^(f)	cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ルクス ^(d)	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
吸収線量、比エネルギー分率、カーマ	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。

(b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。

(c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。

(d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。

(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す數値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で "radioactivity" と記される。

(g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表面張力	ニュートン每メートル	N/m	kg s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度、放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量、エンタルピー	ジュール每ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量、比エンタルピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール每立方メートル	J/m ³	m ¹ kg s ²
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン每立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
電密度、電気変位	クーロン每平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
誘電率	フーリー每メートル	F/m	m ⁻² sA
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール每モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー、モル熱容量	ジュール每モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量(X線及びγ線)	クーロン每キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射強度	ワット每ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット每平方米メートル每ステラジアン	W/(m ² sr)	m ³ m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
醇素活性濃度	カタール每立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ⁻²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼット	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L	1L=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で表される数値

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm ²) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパル	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルリ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	fm	1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット	Torr	1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1 cal=4.1858J (15°Cカロリー), 4.1868J ((IT)カロリー)
ミクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

