JAEA-Technology
2007-057

原子力施設の廃止措置費用評価手法の検討

Study on Cost Evaluation Methods for Decommissioning of Nuclear Facilities

白石 邦生　立花 光夫　石神 努　富居 博行

Kunio SHIRAISHI, Mitsuo TACHIBANA, Tsutomu ISHIGAMI and Hiroyuki TOMII

バックエンド推進部門
廃止措置技術開発グループ

Decommissioning Technology Development Group
Nuclear Cycle Backend Directorate

September 2007

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは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/index.shtml）より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っております。

〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4
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
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

*〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4　日本原子力研究開発機構内

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

JAEA-Technology 2007-057

原子力施設の廃止措置費用評価手法の検討

日本原子力研究開発機構
バックエンド推進部門　バックエンド技術開発ユニット
白石　邦生・立花　光夫・石神　努・富居　博行+

（2007 年 7 月 9 受理）

各種原子力施設の特徴を整理し、廃止措置費用の概略を短時間で効率的に計算できる評価手法を作成した。本評価手法は、費用評価項目毎に原子力施設の機器・構造物の重量等に応じた換算係数を用いて廃止措置費用を評価する。評価に必要な換算係数は、日本原子力研究所（以下「原研」という）で実施した JPDR 等の解体実績及び核燃料サイクル開発機構（以下「JNC」という）の再処理工場等で実施した改造工事等の経験をもとに作成した。

本報告では、各種原子力施設の廃止措置計画を合理的に進めるために原研と JNC の統合前に作成した原子力施設の廃止措置費用評価手法について換算係数の見直しを行い、新たな廃止措置費用評価手法として整備した。

また、本評価手法を検証するために既に廃止措置を終えた JPDR を対象に、本評価手法を用いて廃止措置費用を計算し、その適用性について評価した結果、本評価手法が妥当なものであることが分かった。

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
+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

Study on Cost Evaluation Methods for Decommissioning of Nuclear Facilities

Kunio SHIRAISHI, Mitsuo TACHIBANA, Tsutomu ISHIGAMI and Hiroyuki TOMII+

Nuclear Cycle Backend Technology Development Unit
Nuclear Cycle Backend Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 9, 2007)

A method for evaluating decommissioning cost efficiently and in a short time was made based on the features of various types of nuclear facilities.

The evaluation method can calculate decommissioning cost using conversion factors corresponding to weight of components and structures of nuclear facilities, etc.

The conversion factors were made based on the experience of the JPDR decommissioning projects in the Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) and of replacements of the reprocessing plant of the Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC).

In this report, the decommissioning cost evaluation method of nuclear facilities that had been made before unification of JAERI and JNC was revaluated as a new decommissioning cost evaluation method to reasonably advance decommissioning plans of various nuclear facilities.

Moreover, the decommissioning cost of JPDR to which the decommissioning had already been finished was calculated to evaluate the applicability of the new evaluation method. As a result, it was found that the evaluation method is effective to calculate the decommissioning cost of nuclear facilities.

Keywords: Decommissioning Cost, Evaluation Method, Conversion Factor, Dismantling, Decontamination

---

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

目　次

Contents

図表リスト

Tables and Figures Captions

1. はじめに

日本原子力研究開発機構（以下「原子力機構」という）は、昭和30年代以降に建設され、これまで原子力研究開発に供してきた原子炉施設、核燃料使用施設、研究施設等の多種多様な原子力施設を有している。これらの原子力施設の中には、既にその使命を終え、廃止措置の時期を迎えた施設や今後廃止措置に移行する施設がある。原子力施設の廃止措置の実施にあたっては、廃止措置費用や残存放射能量の評価、廃止措置に伴って発生する廃棄物の処理･処分等の課題があり、長期展望を踏まえた適切な時期での解体作業の実施と解体作業における合理化対策等を含めた適切な廃止措置計画を作成し進めていく必要がある。

平成15年4月、日本原子力研究所（以下「原研」という）と核燃料サイクル開発機構（以下「JNC」という）の二法人統合後のバックエンド対策に向けた活動を推進するために、両法人によりバックエンド対策推進室が設置された。その中に原子力施設の廃止措置計画を立案する廃止措置対策グループが設けられ、新法人の事業計画に基づく原子力施設の廃止措置費用の評価が進められた[1),2)]。

原子炉施設の廃止措置費用の評価には、COSMARD[3),4)]が開発されており、COSMARDを用いて主に原子炉施設を対象とした廃止措置計画に基づく詳細な管理データ等（作業人工数、廃棄物発生量、廃止措置費用等）の計算が可能である。しかし、多種多様で多数の原子力施設を対象にCOSMARDを用いて廃止措置費用を評価するには、計算の準備として評価対象施設の機器・構造物に関する膨大な物量データの作成や施設の種類に応じた換算係数の作成等に多くの時間を必要とする。このため、COSMARDを用いて多数の施設の廃止措置費用を短時間で評価することは現実的でない。

そこで、原子力施設の特徴を整理し、短時間で効率的に廃止措置費用を計算できる評価手法を作成した。本評価手法は、COSMARDの評価手法の考え方に基づいて、費用評価項目毎に原子力施設の機器・構造物の重量等に応じた換算係数を用いて廃止措置費用を評価する。評価に必要な換算係数は、原研で実施したJPDR等の解体実績[5),6)]及びJNCの再処理工場等で実施した改造工事等の経験[7)]をもとに作成した。

本報告では、二法人統合前に廃止措置対策グループで作成した原子力施設の廃止措置費用評価手法[1),2)]について換算係数の見直しを行い、各種原子力施設の廃止措置計画を合理的に進めるための新たな廃止措置費用評価手法として再整備した。

また、本評価手法の検証のために、既に解体を終えたJPDRを対象に、本評価手法を用いて廃止措置費用を計算し、その妥当性について検討した。

2. 施設分類

原子力施設には、規模、種類、残存放射能量、汚染核種等の異なる多種多様の施設が存在し、これらの合理的な廃止措置計画を立案するためには、その特徴や規模等により分類し、分類した施設に応じた廃止措置費用評価手法を確立することが重要である。そこで、次のような考え方に基づいて施設分類を行い、廃止措置費用評価手法の検討を行った。

国際原子力機関（IAEA）の定めた廃止措置に関する安全指針[8),9),10)]での分類（①原子力発電所・研究炉、②核燃料サイクル施設、③医療・産業・研究施設）に、一般施設を加え、施設の特徴や構造、解体工法の類似性を考慮して、廃止措置費用を同一の手法により評価可能と推測できる下記の施設に分類した。解体を考慮した施設分類とその特徴を**表 1** に示す。

① 原子炉施設
② 核燃料使用施設 ：ウラン取扱施設、再処理関連施設、MOX 取扱施設、廃棄物処理施設等
③ 研究施設 ：ホットラボ、加速器等、非密封放射性物質取扱施設等
④ 一般施設 ：倉庫、貯蔵施設、照射施設、第 2 種管理区域施設等[*1]

2.1 原子炉施設

原子炉施設では、使用済燃料を撤去した後には、施設内に残存する主要な放射性核種は、^{60}Co や ^{54}Mn を基調とした$\beta\gamma$線放出核種である。また、原子炉施設には、原子炉容器や生体遮へい体等のように大型で堅牢な機器・構造物が存在する。

原子炉施設は、機器・構造物の物量により大型施設と小型施設に分類される。大型施設は、実用発電炉（解体廃棄物発生量の試算例[11)] 110 万 kW 級の BWR : 55 万 ton、110 万 kW 級の PWR : 50 万 ton）と同等の機器・構造物の物量（20 万 ton 以上）を有するものである。小型施設は、実用発電炉の 1/2（20 万 ton）以下の機器・構造物の物量を有する。

原子力機構の場合、大型施設としてふげん（557MWt、35.1 万 ton）、常陽（140MWt、27.7 万 ton）、もんじゅ（714MWt、71.4 万 ton）が挙げられる。なお、ふげんの重水精製装置やトリチウム除去装置、常陽のメンテナンス建屋や燃料貯蔵施設は規制区分上、原子炉施設と分類が異なるが各原子炉施設に付随するものであり、解体期間中に原子炉施設と一体で解体されることになるため、それぞれ該当する原子炉施設に含めた。

小型施設には、出力規模や解体廃棄物発生量に応じて、高温工学試験研究炉の HTTR（30MWt、12.1 万 ton）から臨界実験装置の VHTRC（10Wt、0.15 万 ton（既に撤去済みの機器を除く））までが含まれており、機器・構造物の物量の幅は大きい。

[*1] 密封放射性物質又は X 線発生装置等を扱う区域で、外部放射線のみが対象となり、3 月間につき 1.3mSv を超え、又は超えるおそれのある区域

2.2 核燃料使用施設

核燃料使用施設は、取扱う放射性物質の種類・量、主要な設備・機器及び構造等の違いを考慮して、ウラン取扱施設、再処理関連施設、MOX 取扱施設、廃棄物処理施設等の 4 種類に分類した。さらに、廃棄物処理施設等は、取扱っている放射性核種の種類によりβγ取扱施設及び TRU 取扱施設に分類した。

ウラン取扱施設

ウラン（U）を主に取扱っている施設であり、ウラン濃縮施設や精錬転換施設等が該当する。これらの施設では、操業等に伴って、U 核種を含む低レベル放射性廃棄物が発生する。施設を構成する設備・機器は、主に遠心分離機、塔槽類、配管等であり、それらの設備・機器に放射化汚染はなく、その表面線量当量率も極めて低い。

再処理関連施設

比較的多量の使用済燃料等を非密封状態あるいは溶解液や廃棄物等の状態で取扱う施設であり、施設内部には高線量区域も存在する。解体作業に当たっては、作業者の外部被ばく防止や汚染拡大防止のための閉じ込め措置に留意を要する。施設を構成する設備・機器は、主に塔槽類、配管等であり、各設備・機器は再処理プロセスの工程により、固体状あるいは溶液状 U 及び Pu で汚染されている。

MOX 取扱施設

Pu や U・Pu 混合酸化物粉末（MOX 粉末）及び Pu 廃棄物を取扱うグローブボックスを有する施設である。設備・機器には、複雑な構造のものが多く、構成材も多種多様であるが、その大きさは小さい。燃料製造設備は、主としてグローブボックスに内装され、U・Pu 混合酸化物が表面に付着した状態で汚染されている。

廃棄物処理施設等

βγ取扱施設：主に原子炉施設で発生したβγ線放出核種を含む廃棄物を取扱う施設であり、グローブボックス、フード、塔槽類等から構成され、作業環境の空間線量当量率が低い施設である。

TRU 取扱施設：多種多様な TRU 核種を含む廃棄物を取扱う施設であり、グローブボックス、フード、塔槽類等から構成される。取扱量は微量であり、作業環境の空間線量当量率も低い施設である。

2.3 研究施設

研究施設には、規模、設備・機器等に応じて多種多様のものが存在する。ここでは、取扱う放射性物質、放射能量、設備・機器、保守方式等の違いを考慮して、ホットラボ、加速器等及び非密封線源取扱施設等に分類した。

ホットラボ

ホットラボは、燃料集合体から少量の使用済燃料や放射化部材等を非密封状態或いは溶解液や廃棄物の状態で取扱うホットセル等を有する施設である。ホットセルには、遮へい壁の外側から安全に実験が行えるようにマニピュレータ等の遠隔操作設備が取り付けられている。

加速器等

加速器と JT-60 等の核融合施設が対象である。これらの施設には、表面線量当量率が低くクリアランスレベル以下の設備・機器が多い。加速器には、照射装置、発振装置類やターゲット等の設備・機器があり、これらの設備・機器は運転中の照射により放射化しているが、二次的な汚染が少なく、作業環境の空間線量当量率も低い区域が多い。

非密封放射性物質取扱施設等

非密封放射性物質取扱施設等は、化学分析等による実験や研究を行うためのフード、実験装置類から構成された第 1 種管理区域[*2]のある小規模の実験施設であり、少量の放射性物質を非密封状態あるいは溶解液や廃棄物等の状態で取扱う。

2.4 一般施設

一般施設は、倉庫、貯蔵施設、照射施設、第 2 種管理区域施設等の密封された廃棄物の貯蔵施設や密封の放射性物質取扱施設等である。一般施設では、取扱う核燃料物質等は、密封・封入状態又は検出限界以下等であり施設に汚染はない。一般施設の主要な設備・機器は、実験設備、ドラム缶、角型容器、UF_6 シリンダ、密封線源等である。

[*2] 空気中の放射性物質濃度又は表面密度が科学技術庁告示に規定する管理区域に係る値を超え、又は超えるおそれのある区域

3. 施設の解体方法

原子力施設の廃止措置費用の評価を行うために、施設の分類に応じた解体方法を検討した。

廃止措置に適用する解体方法は、機器・構造物の材質や汚染状況、汚染核種の種類等によって異なるが、これまでの原研及びJNCにおける解体作業（図1参照）や改修工事の実績から、施設分類毎に適用が想定される解体方法を検討した。**表2**に施設の特性に応じた解体方法を示す。

3.1 原子炉施設

炉内構造物や原子炉本体等は、高度に放射化しているので、作業者の被ばく低減のため、遠隔解体装置を用いて水中又は気中で解体する。

原子炉本体周辺等の高線量区域又は低線量区域の設備・機器については、グリーンハウスを設置し、エアーライン等の重装備を着用して、既存工法により解体する。

比較的に表面線量当量率の低いβγ系の設備・機器については、グリーンハウスを設置し、全面マスク等の保護具を着用して､バンドソーやガス切断機等の一般的な切断工法により解体する。

また、汚染のない設備・機器、クリアランス以下の設備・機器や非管理区域の設備・機器については、半面マスク等の保護具を着用し、ガス切断機等の一般的な切断工法により解体する。

燃料貯蔵プール等の内面に敷設されているライニングについては、ライニング全体をグリーンハウスで覆い既存工法により解体する。

放射線遮へい体等のコンクリート構造物については、予想される作業区域の空間線量当量率のレベルに応じて、遠隔解体装置により気中で解体するか、又は全面マスク等の保護区を着用した作業者がブレーカ等を用いて直接解体撤去するか、重機を用いて解体撤去する。

設備・機器の撤去後、建屋コンクリートの除染を行い、放射線測定により建屋に汚染のないことを確認し、管理区域の解除を行う。

管理区域解除後、重機を用いて鉄筋コンクリート製の建屋を解体撤去する。

3.2 核燃料使用施設

ウラン取扱施設

汚染のない設備・機器については、半面マスク等の保護具を着用し、ガス切断等の一般的な切断工法により解体する。

TRU系の設備･機器については､グリーンハウスを設置して､全面マスク等の保護具を着用し､ガス切断等の一般的な切断工法により解体する。なお、TRU系の設備・機器の解体作業では、内部被ばく防止に対する配慮が必要となる。

ウラン濃縮施設の遠心分離機については、同形のものが多数存在するため、既存工法により同一場所で効率的に解体する。

設備・機器の撤去後、建屋コンクリートの除染を行い、放射線測定により建屋に汚染のないことを確認し、管理区域の解除を行う。

管理区域解除後、ジャイアントブレーカ等の重機により鉄筋コンクリート及び鉄骨スレート造

りの建屋を解体する。

再処理関連施設

再処理関連施設の高線量区域では、空間線量当量率の低減に解体前除染が効果的であるため、設備・機器の内部に残留する核燃料物質や高放射性廃棄物等を回収する系統除染や既設のマニピュレータを用いたセル内部の設備・機器の表面や床のウェス等による拭き取り除染（セル除染）を行う。

なお、解体前除染により作業者による直接解体が可能となるまで空間線量当量率の低減が期待できないセル内部の設備・機器については、マスタースレーブ・マニピュレータやパワー・マニピュレータ等のロボットにより解体する。解体作業は、施設の運転のために設置されている既設のマニピュレータで行うが、マニピュレータが設置されていない場合には、新たにロボットを設置して行う。

高線量区域又は低線量区域にある設備・機器については、作業者がエアラインスーツ等の重装備を着用してセル内に立ち入り、バンドソー等の一般的な切断工法を用いて解体する。重装備による解体作業では、動作の制限を受けるため、作業者の時間管理を適切に行い、被ばく線量の抑制に努める必要がある。

汚染のない設備・機器、クリアランスレベル以下の設備・機器や非管理区域の設備・機器については、半面マスク等の保護具を着用し、ガス切断機等の一般的な切断工法を用いて解体する。

TRU 系の設備･機器については､グリーンハウスを設置して､全面マスク等の保護具を着用し、ガス切断機等の一般的な切断工法により解体する。なお、TRU 系の設備・機器の解体作業では、内部被ばく防止に対する配慮が必要となる。

セル内部の汚染防止や塔槽類からの漏洩廃液受けのためのライニングやグローブボックスについては、既存工法により解体する。

設備・機器の撤去後、建屋コンクリートの除染を行い、放射線測定により建屋に汚染のないことを確認し、管理区域を解除する。

管理区域解除後、ジャイアントブレーカ等の重機により鉄筋コンクリート造りの建屋を解体する。

MOX 取扱施設

MOX 取扱施設では、多量の U・Pu 混合酸化物を取扱っているため、解体作業にあたっては、厳重な計量管理、臨界安全管理、汚染拡大防止のための閉じ込め措置に留意を要する。

汚染のない設備・機器、クリアランスレベル以下の設備・機器や非管理区域の設備・機器については、半面マスク等の保護具を着用し、ガス切断機等の一般的な切断工法により解体する。

βγ系/U 系の設備・機器については、グリーンハウスを設置して、全面マスク等の保護具を着用し、ガス切断機等の一般的な切断工法により解体する。

TRU 系の設備･機器については､グリーンハウスを設置して､全面マスク等の保護具を着用し、ガス切断機等の一般的な切断工法により解体する。TRU 系の設備・機器の解体作業では、βγ/U 系の設備・機器の解体作業に比べて内部被ばく防止に対する配慮が必要となる。

グローブボックスの内装設備は、複雑な構造のものが多く、構成材も多種多様であるが、寸法が小さいため、グローブボックスの設置場所にグリーンハウスを設置して、内装設備とグローブボックスを一緒に解体する。なお、定型のグローブボックス（$9m^3$）は専用の解体設備に移動して解体する。

設備・機器の撤去後、建屋コンクリートの除染を行い、放射線測定により建屋に汚染のないことを確認し、管理区域を解除する。

管理区域解除後、ジャイアントブレーカ等の重機により鉄筋コンクリート造りの建屋を解体する。

廃棄物処理施設等

βγ取扱施設：汚染のない設備・機器、クリアランスレベル以下の設備・機器や非管理区域の設備・機器については、半面マスク等の保護具を着用し、ガス切断機等の一般的な切断工法により解体する。

βγ系/U系の設備・機器については、グリーンハウスを設置して、全面マスク等の保護具を着用し、ガス切断機等の一般的な切断工法により解体する。

低線量区域の設備・機器については、グリーンハウスを設置して、作業者がエアラインスーツ等の重装備を着用し、バンドソー等の一般的な切断工法により解体する。

セル内部にある遮へいコンクリートは、全面マスクを着用し、既存工法により解体撤去する。

汚染の可能性のあるコンクリート構造物については、空間線量当量率の高い区域では、全面マスクを着用し、作業者により解体撤去し、空間線量当量率の低い区域では、重機により解体撤去する。

設備・機器の撤去後、建屋コンクリートの除染を行い、放射線測定により建屋に汚染のないことを確認し、管理区域を解除する。

管理区域解除後、ジャイアントブレーカ等の重機により鉄筋コンクリート造りの建屋を解体する。

TRU取扱施設：汚染のない設備・機器、クリアランスレベル以下の設備・機器や非管理区域の設備・機器については、半面マスク等の保護具を着用し、ガス切断機等の一般的な切断工法により解体する。

TRU系の設備・機器は、グリーンハウスを設置して、全面マスク等の保護具を着用し、ガス切断機等の一般的な切断工法により解体する。なお、TRU系の設備・機器の解体作業では、βγ/U系の設備・機器の解体作業に比べて内部被ばく防止に対する配慮が必要となる。

高線量区域又は低線量区域にある設備・機器については、作業者がエアラインスーツ等の重装備を着用し、バンドソー等の一般的な切断工法により解体する。重装備による解体作業では、動作が制限されるため、作業者の時間管理を適切に行い、被ばく線量の抑制に努める必要がある。

セル内面に敷設されたエンクロージャ、セル内の汚染防止、塔槽類からの漏洩する放射性

廃液の受け等のライニングやグローブボックスについては、既存工法により撤去する。

設備・機器の撤去後、建屋コンクリートの除染を行い、放射線測定により汚染のないことを確認し、管理区域を解除する。

管理区域解除後、ジャイアントブレーカ等の重機により鉄筋コンクリート製の建屋を解体する。

3.3 研究施設

ホットラボ、加速器等、非密封線源取扱施設等の 3 種類の研究施設の解体方法及びその際の留意事項を以下に示す。

ホットラボ

作業区域の空間線量当量率を低減するため、マニピュレータによりセル内部の設備・機器の表面やセルの床をウェス等により拭取り除染する。

解体前除染であるセル除染を行っても、作業者による直接解体が可能となるまで作業区域の空間線量当量率の低減が期待できないセル内設備・機器については、施設の運転のために設置されているマスタースレーブ・マニピュレータやパワー・マニピュレータ等のロボットにより解体する。マニピュレータが設置されていない場合には、新たにロボットを設置する。

高線量区域又は低線量区域にある設備・機器については、作業者がエアラインスーツ等の重装備を着用し、バンドソー等の一般的な切断工法により解体する。重装備による解体作業では、作業者の動作が制限を受けるため、作業者の時間管理を適切に行い、被ばく線量の抑制に努める必要がある。

汚染のない設備・機器、クリアランスレベル以下の設備・機器や非管理区域の設備・機器については、半面マスク等の保護具を着用し、ガス切断等の一般的な切断工法により解体する。

$\beta\gamma$ 系/U 系の設備・機器については、グリーンハウスを設置して、全面マスク等の保護具を着用し、ガス切断機等の一般的な切断工法により解体する。

セル内面に敷設されたセル内の汚染防止、塔槽類から漏洩する放射性廃液の受け等のステンレス製のライニングについては、既存工法により撤去する。

セル内にある遮へいコンクリートについては、全面マスク等の保護具を着用し、既存工法により撤去する。

汚染の可能性のある管理区域内のコンクリート構造物については、グリーンハウスを設置して、空間線量当量率の高い区域では、全面マスクを着用し、作業者により解体撤去し、空間線量当量率の低い区域では、重機により解体撤去する。

設備・機器の撤去後、建屋コンクリートの除染を行い、放射線測定により汚染のないことを確認し、管理区域を解除する。

管理区域解除後、ジャイアントブレーカ等の重機により鉄筋コンクリート造りの建屋を解体する。

加速器等

汚染のない設備・機器、クリアランスレベル以下の設備・機器や非管理区域の設備・機器については、半面マスク等の保護具を着用し、バンドソーやガス切断機等の一般的な切断工法により解体する。

βγ系/U 系の設備・機器については、グリーンハウスを設置して、全面マスク等の保護具を着用し、ガス切断機等の一般的な切断工法により解体する。

金属製の遮へい設備については、梱包した後、大型重機及びクレーンにより撤去する。

放射能レベルの高い設備・機器や空間線量当量率の高い区域の設備・機器については、遠隔解体装置により気中で解体する。

遮へいコンクリートについては、全面マスク等の保護具を着用し、既存工法により撤去する。

汚染の可能性のある構造物については、空間線量当量率の高い区域では、グリーンハウスを設置して、全面マスクを着用し、既存工法により解体撤去し、空間線量当量率の低い区域では、重機により解体撤去する。

設備・機器の撤去後、管理区域を解除し、ジャイアントブレーカ等の重機により鉄筋コンクリート製の建屋を解体する。

非密封放射性物質取扱施設等

汚染のない設備・機器、クリアランスレベル以下の設備・機器や非管理区域の設備・機器については、半面マスク等の保護具を着用し、ガス切断機等の一般的な切断工法により解体する。

βγ系/U 系の設備・機器については、グリーンハウスを設置して、全面マスク等の保護具を着用し、バンドソーやガス切断機等の一般的な切断工法により解体する。

低線量区域にある設備・機器については、グリーンハウスを設置して、エアラインスーツ等の重装備を着用し、バンドソー等の一般的な切断工法により解体する。重装備による解体作業では、動作が制限されるため、作業者の時間管理を適切に行い、被ばく線量の抑制に努める必要がある。

汚染の可能性のあるコンクリート構造物については、空間線量当量率の低い区域では、重機により解体撤去する。

設備・機器の撤去後、管理区域を解除し、ジャイアントブレーカ等の重機により鉄筋コンクリート造りの建屋を解体する。

3.4 一般施設

汚染のない設備・機器、クリアランスレベル以下の設備・機器や非管理区域の設備・機器については、半面マスク等の保護具を着用し、ガス切断機等の一般的な切断工法により解体する。

全ての放射線源を撤去した後、管理区域を解除し、ジャイアントブレーカ等の重機により鉄筋コンクリート又は鉄骨スレート造りの建屋を解体する。

4. 費用評価項目の抽出と費用評価手法の検討

4.1 費用評価項目の抽出

廃止措置の費用評価項目は、(財)エネルギー総合研究所での廃止措置費用の試算例 [12)]を参考に、次の項目とした。

①調査・計画費	：解体物量の調査・整理、解体計画の立案、放射能インベントリ評価、廃止措置計画書等の作成に係る費用
②安全貯蔵費	：施設の残存放射能を減衰させるための安全貯蔵に係る費用
③解体前除染費	：作業環境の空間線量当量率を低減し、作業者の被ばくを抑制するために解体前に実施する除染に係る費用
④機器解体費	：設備・機器（金属）の解体に係る費用
⑤建屋除染費	：建屋コンクリートの除染に係る費用
⑥確認測定費	：放射性廃棄物でない廃棄物の放射線測定や建屋の管理区域解除のための放射線測定に係る費用
⑦建屋・構造物解体費	：建屋・構造物（コンクリート）の解体に係る費用
⑧設備・資材費	：解体作業に使用する一般資材、遠隔解体装置、廃棄物容器の設計・製作、購入に係る費用
⑨作業管理費	：解体作業中の放射線管理、解体作業の管理に係る費用
⑩解体中の維持管理費	：解体作業に使用する既存設備・装置類の維持管理に係る費用
⑪諸経費	：現場管理の経費として労務管理費、従業員給与、租税公課、保険料、法定福利費、事務用品費、通信交通費等

4.2 費用評価の考え方

4.1 で抽出した廃止措置費用項目の中で、除染、解体、測定等の作業に関する費用の評価にあたっては、作業に要した人工数を求める必要がある。このためには、解体作業での実績データ等を分析して作業の種類に応じた単位作業係数を作成することが有用である。これに関して、COSMARD では、JPDR 解体作業に要した人工数の分析結果に基づき、単位作業項目に対し以下の分類に基づいて人工数を計算するための単位作業係数が用いられている [13)]。

- 在来工法による解体作業：機器重量を指標とした計算
- 遠隔装置による解体作業：装置性能を指標とした計算
- 建屋の除染・測定作業　：建屋の面積を指標とした計算
- 建屋の解体作業　　　　：建屋重量を指標とした計算
- 準備・後処理作業　　　：作業条件により適当な値を選択する計算

そこで、COSMARD に適用されたこれらの分類を参考に、廃止措置における費用評価手法を①

重量依存型費用、②面積依存型費用、③数量依存型費用、④使用量依存型費用及び⑤付随型費用の 5 つの項目に分類し、各項目を以下のとおり評価することとした。

① 重量依存型費用（Yw）：機器・構造物の重量と人工数との相関関係に基づいて、機器・構造物の解体作業に係る費用を次式で評価する。本費用評価手法は、機器解体費、確認測定費のうち放射性廃棄物でない廃棄物の放射線測定費、建屋･構造物解体費の評価に適用される。

$$Yw = M \times W \times CFw$$

M：人件費単価（円／人・日）

W：機器・構造物の解体重量（ton）

CFw：重量依存型の換算係数（人・日／ton）

② 面積依存型費用（Ya）：作業対象の領域面積と人工数との相関関係に基づいて、解体作業に係る費用を次式で評価する。本費用評価手法は、解体前除染費のうちセル除染費、建屋除染費、確認測定費のうち管理区域解除の放射線測定費、建屋・構造物解体費のうち鉄骨スレート費の評価に適用される。

$$Ya = M \times S \times CFa$$

S：領域面積（m^2）

CFa：面積依存型換算係数（人・日／m^2）

③ 数量依存型費用（$Y\ell$）：系統の数（数量）と人工数との相関関係に基づいて、解体前除染に係る費用を次式で評価する。本費用評価手法は、解体前除染費のうち系統除染の評価に適用される。

$$Y\ell = M \times L \times CF\ell$$

L：系統数（本）

$CF\ell$：数量依存型の換算係数（人・日／本）

④ 使用量依存型費用（Yn）：解体に使用する設備・資材の使用量に応じて費用を次式で評価する。本費用評価手法は、設備・資材費のうち遠隔解体装置や廃棄物容器に係る費用の評価に適用される。

$$Yn = CFn \times N$$

CFn：設備・資材の単価（円/台）

N：設備・資材使用量（台）

⑤ 付随型費用（Ys）：本費用評価手法は、調査・計画費、安全貯蔵費、設備・資材費のうち一般資材、管理費、解体期間中の維持管理費、諸経費の評価に適用される。解体作業等の費用に対して一定の割合により費用を次式で評価する。

$$Ys = (Yw + Ya \ \cdots) \times CFs$$

CFs：付随型の換算係数

4.3　費用評価手法の検討

費用評価項目毎に費用評価の考え方に基づいて、廃止措置費用を算出する評価手法の検討を行った。**表 3**、**表 4** に廃止措置費用の評価式と評価のための換算係数を示す。

(1)　調査・計画費

調査・計画費は、解体物量の調査・整理、解体計画の立案、放射能インベントリ評価、廃止措置計画書の作成等に係る費用である。解体物量の調査・整理とは、解体計画を立案するために必要な、解体対象となる機器・構造物の個々の数量、重量、材質等の調査・整理である。解体計画の立案とは、機器・構造物の詳細な切断手順等を記載した解体技術設計書等の作成である。放射能インベントリ評価とは、計算コードを活用した炉心部周辺の放射化放射能の評価及びサンプリング・分析等による施設全域の汚染放射能の測定・評価である。廃止措置計画書の作成とは、廃止措置計画書の作成と規制当局とのヒアリング等である。

調査・計画費は、次式のように解体作業費に対して一定の割合（付随型の換算係数）で評価する付随型費用である。

調査・計画費（円）＝（解体作業費＋設備・資材費＋作業管理費）（円）×CFs

ここで、解体作業費とは、解体前除染費、機器解体費、建屋除染費、確認測定費、建屋・構造物解体費、設備・資材費、作業管理費の総和であり、解体作業を実施する際に直接必要となる費用である。

調査・計画費の付随型の換算係数（CFs）は、OECD/NEA の廃止措置費用に関するタスクグループの評価結果 [14)]を参考に、原子炉施設及び核燃料サイクル施設に対して、それぞれ 3.0%、5.0% とする。

(2)　安全貯蔵費

安全貯蔵費は、原子炉施設や加速器等で、機器・構造物の残存放射能を減衰させるために行う安全貯蔵に係る費用である。本費用は、安全貯蔵を実施するための系統隔離（弁閉止措置、アイソレーション)、浮遊粉塵の固定等の準備作業に係る費用及び安全貯蔵期間中の管理費用（安全貯蔵後に使用する既存設備・機器の維持管理）であり、次式のように解体作業費等に対して一定の割合で評価する付随型費用である。

安全貯蔵費（円）＝（調査・計画費＋解体作業に係る費用－解体前除染費）（円）

×安全貯蔵期間（年）×CFs（/年）

昭和 60 年に通産省における商業用発電用原子炉（BWR）の廃止措置費用評価に適用された換

算係数の値[15)]は、解体作業に係る費用のうち密閉管理（安全貯蔵）に係る割合が 2.5%であった。また、資源エネルギー庁の総合エネルギー調査会原子力部会報告書[16)]における標準工程では、安全貯蔵の期間を 5～10 年としている。ここでは安全貯蔵の期間を 5 年とし、年間の安全貯蔵費の付随型の換算係数（CFs）を、2.5%の 1/5 である 0.5%とした。

(3)　解体前除染費

解体前除染費は、解体前に作業区域の空間線量当量率を低減し、作業者の被ばくを抑制するために行う除染作業に係る費用である。除染の内容に応じて、系統機器を化学的に除染する系統除染と、高度に汚染されたセル内部をマニピュレータにより除染するセル除染に係る費用に分類した。

1) 系統除染

再処理関連施設を対象に、高度に汚染された蒸発缶等の塔槽類を化学的に除染する系統除染に係る費用である。本費用は、次式のように系統除染を行う系統の数と人工数の相関関係に基づいて評価される数量依存型費用である。

系統除染費（円）＝CFℓ×系統数（本数）×作業者人件費単価（円/人･日）

系統除染の数量依存型換算係数（CFℓ）は、JNC の分離精製工場における酸回収蒸発缶除染実績データを参考に 420（人・日/本数）とした。

なお、原子炉施設では、主蒸気系統等に対する系統除染が考えられるが、例えば、ふげん原子力発電所では、運転中の維持管理として既に系統除染が行われているため[17)]、廃止措置段階での系統除染を考慮していない。

2) セル除染

既設のマニピュレータを用いてセル内の設備・機器の表面やセルの床をウェス等により拭き取り除染するセル除染に係る費用である。本費用は、次式のようにセルの床面積と人工数の相関関係に基づいて評価される面積依存型費用である。

セル除染費（円）＝CFa×セルの床面積（m^2）×作業者人件費単価（円/人･日）

セル除染におけるセルの床面積と人工数の相関関係について、JNC の分離精製工場等での実績データを整理、分析した結果を図 **2** に示す。これから、面積依存型の換算係数（CFa）を、40.7（人・日/m^2）とした。

(4)　機器解体費（金属）

機器解体費は、設備・機器の解体に係る作業者の人件費である。なお、設備・機器の解体に係る放射線管理者や作業管理者の人件費は、作業管理費として別途評価される（(9)参照）。

機器解体費は、解体方法や設備・機器の特性に応じて、一般機器解体作業、重装備による解体作業、特殊機器の解体作業、遠隔解体作業に分類して評価される。

1) 一般機器解体作業

一般機器解体作業は、空間線量当量率が低い作業区域での解体作業に適用され、解体作業の中で最も多用されるものである。同作業では、グリーンハウスを設置して、軽装備（半面マスク又は全面マスク、タイベック又はビニールアノラック）の作業者がバンドソーやガス切断機等の一般的な切断工法により設備・機器を解体し、廃棄物容器に収納する。

一般機器解体作業に係る機器解体費は、次式のように解体する設備・機器の重量に応じて評価される重量依存型である。

機器解体費（円）＝CFw×機器重量（ton）×作業者人件費単価（円/人･日）

重量換算係数（CFw）は、作業者による設備・機器の直接解体作業に係る係数であり、解体対象物の種類（βγ/U 系、TRU 系）や廃棄物の種別（放射性廃棄物、クリアランス物）に応じて 3 種類に分類される。

① 汚染のない設備・機器

汚染のない設備・機器、クリアランスレベル以下の設備・機器や非管理区域の設備・機器の解体作業（廃棄物容器に収納しない）に係る機器解体費の評価に適用する。JPDR における汚染のない設備・機器の解体作業における実績データ [5]を用いて、設備・機器の重量と人工数の関係を分析した結果を図 **3** に示す。これより、汚染のない設備・機器の解体作業に係る機器解体費における重量依存型の換算係数（CFw）を次式とした。

CFw＝5.6（人･日/ton）

② βγ系／U 系の設備・機器

グリーンハウスの中で全面マスク等の保護具を着用し、βγ系/U 系の設備・機器を解体する場合の機器解体費の評価に適用する。設備・機器の重量と人工数の相関関係を JPDR 解体作業における低レベル放射能の設備・機器の解体作業での実績データ [6]を用いて分析した結果を図 **4** に示す。これより、βγ系／U 系の設備機器の解体作業に係る機器解体費における重量依存型の換算係数（CFw）を、次式とした。

CFw＝15.1（人･日/ton）

③ TRU 系の設備・機器

グリーンハウスの中で全面マスク等の保護具を着用し、TRU 系の設備・機器を解体する場合の機器解体費の評価に適用する。設備・機器の重量と人工数の相関関係を JNC における再処理関連施設の分離精製工場の冷却水配管、製錬転換施設の精製液受槽等での実績データを用いて分析した結果、図 **5** に示すような結果が得られた。これより、TRU 系の設備・機器の解体作業に係る機器解体費における重量依存型の換算係数（CFw）は、次式のように評価した。

CFw＝36.0（人･日/ton）

2) 重装備による解体作業

再処理関連施設やホットラボ等において作業者がエアラインスーツ等の重装備を着用してセル内に立ち入り、バンドソー等の一般的な切断工法を用いて設備・機器等を解体する場合の機器解体費の評価に適用する。

重装備による機器解体費は、次式のように解体する設備・機器の重量に応じて評価される重量依存型の費用である。

機器解体費（円）＝CFw×機器重量（ton）×作業者人件費単価（円/人・日）

重装備による解体作業では、作業者が高線量区域或いは低線量区域で行われるかに応じて、被ばく線量の管理時間が相違し、作業者の動作が制限を受けることになる。そこで、換算係数を高線量区域と低線量区域に分けて次のように評価する。

<u>高線量区域での解体作業</u>

高線量区域での重装備による解体作業に係る重量依存型の換算係数（CFw）を求めるためには、JNC での再処理関連施設の塔槽類や配管等の改修作業での実績データを用いて、設備・機器の重量と人工数の相関関係を分析した。分析結果を図 **6** に示す。これから、換算係数として 376.7（人・日/ton）が得られた。ただし、ここでの作業は、廃棄物を大型コンテナに収納するものであった。そこで、ドラム缶への収納を考慮した場合に適用可能とするために、細断作業として JNC の WDF での実績データ（170（人・日/ton））を用いて補正した結果、次のような換算係数が得られた。

CFw＝546.7（人・日/ton）

なお、分離精製工場の Pu 溶液蒸発缶の改修作業（セル内の除染、機器除染が含まれている）については、既存設備の養生に非常に時間を要したため、今回の評価では対象外とした。

<u>低線量区域での解体作業</u>

低線量区域での重装備による解体作業に係る機器解体費における重量依存型の換算係数（CFw）を求めるために、原研の再処理特別研究棟におけるホットケーブ、サブケーブ、143 号室の設備・機器の解体作業での実績データ [18]を用いて設備・機器の重量と人工数の相関関係を分析した。分析結果を図 **6** に示す。これから、換算係数として 64.0（人・日/ton）が得られた。この換算係数の中には放射線管理者に係る人工数が含まれているため、JPDR での実績データ（作業者 8 名のうち 1 名が放射線管理者）を用いて、その分を補正（7/8 倍）した結果、次の換算係数が得られた。

CFw＝56.0（人・日/ton）

3) 特殊機器の解体作業

ライニング、濃縮施設の遠心分離機、グローブボックス及び加速器のブッロクの撤去については、同種の機器の解体作業の事例が多い又はその反対に極めて少ないことから、他の機器・設備

と分離して、各設備・機器毎に評価手法を検討した。特殊機器の解体作業に係る機器解体費は、次式のように解体する設備・機器の重量に応じて評価される重量依存型の費用である。

機器解体費（円）＝CFw×機器重量（ton）×作業者人件費単価（円/人･日）

① ライニング撤去作業

原子炉施設、再処理関連施設やホットラボ等のセル内面及び燃料貯蔵プール内側に敷設されたエンクロージャ、セル内汚染防止、塔槽類から漏洩する放射性廃液の受け等のライニング撤去作業に係る機器解体費の評価に適用する。JPDR 解体作業で行われた燃料プール解体作業における実績データを用いてライニングの重量と人工数の相関関係を分析した。分析した結果を図 **7** に示す。これより、ライニング撤去作業に係る機器解体費における重量依存型の換算係数（CFw）を次式とした。

CFw＝45.0（人･日/ton）

② 遠心分離機解体作業

ウラン取扱施設等の遠心分離機の解体作業に係る機器解体費の評価に適用する。JNC の濃縮工学施設の遠心分離機等の解体作業に係る実績データを用いて遠心分離機の重量と人工数の相関関係を分析した。分析した結果を図 **8** に示す。これより、遠心分離機の解体作業に係る機器解体費における重量依存型の換算係数（CFw）を次式とした。

CFw＝7.6（人･日/ton）

③ グローブボックス解体作業

グローブボックスの解体作業に係る機器解体費の評価に適用する。大型グローブボックス（$9m^3$）の解体作業については、JNC における Pu 第 3 開発室の予備焼結炉等の解体作業に係る実績データ、その他の小型グローブボックスの解体作業については、JNC における Pu 第 1 開発室の Pu 廃棄物焼却設備等の解体作業の実績データが利用可能である。これらのデータを用いてグローブボックスの重量と人工数の相関関係を分析した結果を図 **9** に示す。これより、グローブボックスの解体作業に係る機器解体費における重量依存型の換算係数（CFw）を次式とした。

大型グローブボックス（$9m^3$）

CFw＝286.5（人･日/ton）

小型グローブボックス

CFw＝159.8（人･日/ton）

④ ブロック（金属）撤去作業

加速器で用いられている遮へい設備の撤去に係る機器解体費の評価に適用する。

遮へい設備の撤去手順は、鉄骨工事の現場建方工事の加速器で用いられる遮へい設備の撤去

と同様な作業手順である。このため、ブロック撤去に係る機器解体費における重量依存型の換算係数（CFw）は、鉄骨工事の運搬・建方・本締め費における現場建方を参考[19]に以下のように評価した。

CFw＝0.23（人・日/ton）

4) 遠隔解体作業

遠隔解体作業は、ホットラボ等のロボットによるセル内の設備・機器の解体作業と原子炉施設の炉内構造物等の遠隔解体作業である。遠隔解体作業による機器解体費は、次式のように設備・機器の重量と人工数の相関関係に基づいて評価する重量依存型費用である。

機器解体費（円）＝CFw×機器重量（ton）×作業者人件費単価（円/人・日）

① ロボットによるセル内解体作業

解体前除染（セル除染）を行っても、作業者による直接解体が可能となるまで空間線量当量率の低減が期待できない場合に、セル内設備・機器のマスタースレーブ・マニピュレータやパワー・マニピュレータ等のロボットを用いて行う解体作業に係る費用である。

ロボットによるセル内解体作業に係る機器解体費における重量依存型の換算係数（CFw）の評価には、JNC での高放射性廃液蒸発缶と濃縮ウラン溶解槽を対象とした遠隔解体装置の技術開発での結果[20),21]、照射燃料集合体施設の既設マニピュレータによる設備・機器の解体作業での実績データが利用可能である。これらのデータを用いてセル内設備・機器の重量と人工数の相関関係を整理・分析した結果を**図 10** に示す。ここに、遠隔解体装置の技術開発での結果は、切断片を大型コンテナに収納するものであり、ドラム缶に収納する細断作業は含まれていない。そこで、細断作業に関する JNC の WDF での実績データ 170（人･日/ton）を用いて補正を行った。その結果、ロボットによるセル内解体作業における重量依存型の換算係数を次式とした。

CFw＝413.8（人･日/ton）

なお、ロボットとしては、施設の運転のために設置されている既設マニピュレータを利用することを基本とするが、既設マニピュレータが設定されていない場合には、新たにロボットを設置する必要がある。この際、ロボットの設計・製作に係る費用は、設備・資材費の遠隔解体装置の項目で計上する。

② 遠隔解体装置による解体作業

原子炉施設等での放射能レベルの高い設備・機器や空間線量当量率の高い区域の設備・機器を対象とする気中又は水中での遠隔解体装置による解体作業に係る費用である。

遠隔解体装置による解体作業に係る機器解体費における重量依存型の換算係数（CFw）の評価には、気中での解体作業の場合、JPDR における原子炉圧力容器接続配管の成型爆薬切断工法及びディスクカッター切断工法による解体作業、生体遮へい体の機械的切断工法及び水ジェット切断工法による解体作業での実績データ[6]、水中での解体作業の場合、JPDR における炉内

構造物のマニピュレータ型及びマスト型プラズマアーク切断工法、原子炉圧力容器のアークソー切断工法による解体作業での実績データ [6]が利用可能である。これらのデータを用いて機器・構造物の重量と人工数の相関関係を分析した。分析結果を図 **11** に示す。これより、遠隔解体装置による解体作業における重量依存型の換算係数（CFw）を次式とした。

<u>気中での解体作業</u>

CFw＝92.3（人・日/ton）

<u>水中での解体作業</u>

CFw＝252.1（人・日/ton）

(5) 建屋除染費（コンクリート）

建屋の汚染コンクリートの剥離作業に係る建屋除染費の評価に適用する。建屋除染費は、次式のように除染を行う建屋コンクリートの面積に応じて評価される面積依存型費用である。

建屋除染費（円）＝CFa×管理区域延床面積（m^2）×作業者人件費単価（円/人･日）

建屋除染においては、放射能インベントリ評価の結果に基づいた建屋コンクリートの汚染深さに応じてコンクリート表面の剥離作業を行う。JPDR 解体作業で行われた建屋除染における実績データ [6,22]を用いて除染面積と人工数の相関関係について分析した結果を図 **12** に示す。これより、剥離深さに応じた表面剥離：0.5（人・日/ m^2）、深層剥離：1.0（人・日/ m^2）の換算係数が得られた。この換算係数の中には放射線管理者に係る人工数が含まれているため、JPDR での実績データ（作業者 8 名のうち 1 名が放射線管理者）を用いて、その分を補正（7/8 倍）した。さらに、延床管理区域面積と除染面積の関係を求めると、JPDR での除染面積が管理区域延床面積の 1.27 倍（表面剥離）及び 0.38 倍（深層剥離）であることを考慮した結果、次の換算係数が得られた。なお、施設における放射能インベントリが既知の場合は、その結果に応じた面積により評価したほうが良い。

<u>建屋除染</u>

CFa＝0.9（人・日/m^2）

ここで、表面剥離とは、汚染コンクリートをコンクリートカンナ、プレーナ、ショットブラスト等により表面から約 0.5cm を剥離することをいう。深層剥離とは、汚染コンクリートをチッピングハンマ、ブレーカ、スキャブラ等により表面から数 cm の浸透汚染を剥離することをいう。

(6) 確認測定費

解体に伴って発生する放射性廃棄物でない廃棄物に対する念のための放射線測定や建屋の管理区域を解除するための放射線測定に係る確認測定費の評価に適用する。

① 放射性廃棄物でない廃棄物の放射線測定作業

管理区域内で発生する放射性廃棄物でない廃棄物は、汚染のないことを放射線測定により確

認する。放射線測定作業は、既存のサーベイメータを用いた作業者による直接測定とする。

放射性廃棄物でない廃棄物の放射線測定作業における確認測定費は、測定対象物の重量に応じて評価する重量依存型費用であり、JPDR 解体作業で行われた金属を対象とした放射性廃棄物でない廃棄物の放射線測定作業における実績データ [5)]を参考に評価した結果、次式で評価できる。

確認測定費（円）＝CFw×機器重量（ton）×作業者人件費単価（円/人・日）

ここで、

CFw＝0.1（人・日/ton）

② 管理区域解除に係る放射線測定作業

管理区域解除に係る放射線測定作業における確認測定費は、測定対象物の面積に応じて評価する面積依存型費用である。

JPDR 解体作業で行われた管理区域における実績データ [22)]を用いて延べ床面積と人工数の相関関係を分析した結果を図 **13** に示す。これから、換算係数として 0.52（人・日/m^2）が得られた。この換算係数の中には放射線管理者に係る人工数が含まれているため、JPDR での実績データ（作業者 8 名のうち 1 名が放射線管理者）を用いて、その分を補正（0.52×7/8）した結果、次の換算係数が得られた。

確認測定費（円）＝CFa×管理区域の延床面積（m^2）×作業員人件費単価（円/人･日）

ここで、

CFa＝0.5（人･日/m^2）

(7) 建屋・構造物解体費（コンクリート）

建屋・構造物解体費は、管理区域内外にある構造物と建屋の解体に係る人件費である。

1) 構造物の撤去作業

本費用は、管理区域内外にある構造物の重量に応じて次のように評価する重量依存型費用である。

建屋・構造物解体費（円）＝CFw×機器重量（ton）×作業者人件費単価（円/人･日）

① 遠隔解体作業

原子炉施設の炉心本体に対する解体作業のように作業環境の空間線量当量率が高くなることが想定される場合には、遠隔解体装置を用いて気中で解体作業（遠隔解体作業）を行う。JPDR 解体作業で行われた機械的切断工法、水ジェット切断工法を用いた気中での生体遮へい体の解体作業における実績データ [6)]を用いて構造物の重量と人工数の相関関係を分析した結果を図 **14** に示す。これから、換算係数として 113.7（人･日/ton）が得られた。この換算係数の中には放

射線管理者に係る人工数が含まれているため、JPDR での実績データ（作業者 8 名のうち 1 名が放射線管理者）を用いて、その分を補正（7/8 倍）した結果、次の換算係数が得られた。

CFw＝99.5（人･日/ton）

② ブロック撤去作業

ホットラボ、廃棄物処理施設等でのセルを構成している遮へいコンクリート及び加速器で用いられる遮へいコンクリートの撤去作業に係る建屋・構造物解体費の評価に適用する。

ホットラボ等の遮へいコンクリート

ホットラボ等でセルを構成している遮へいコンクリートの解体作業に係る重量依存型の換算係数（CFw）は、再処理特別研究棟の分析セル、Pu セルの遮へい体の撤去に係る実績データ[23),24)]を用いて遮へいコンクリートの重量と人工数の相関関係について分析した結果を図 **15** に示す。これから、以下の換算係数が得られた。ここで、実績データは、グリーンハウス内での作業時間のみであるため、1 日あたりの作業時間を 1.5 時間、当該作業に要した 1 日あたりの作業者数を 3 人として、人工数(人･日)を補正したものであり、作業前の準備等が含まれていないため換算係数は低めの評価となっている。

CFw＝10.8（人・日/ton）

加速器で用いられている遮へいコンクリート

加速器で用いられている遮へいコンクリートを梱包後、大型重機及びクレーンで吊出し撤去する作業に係る建屋・構造物解体費の評価に適用する。加速器で用いられている遮へいコンクリートの撤去作業に係る重量依存型の換算係数（CFw）は、梱包に先立ってワイヤーソー等によりブロック状に切断するか、切断せずに一括撤去するかにより評価が異なる。

ワイヤーソー等により切断する場合は、建築施工単価でのワイヤーソーイング工法のデータを参考に評価し、一括撤去する場合には建築施工単価での鉄骨工事の現場建方工事でのデータを参考に評価し、次式とした。

<u>ワイヤーソー切断</u>

CFw＝1.0（人・日/ton）

<u>一括撤去</u>

CFw＝0.2（人・日/ton）

2) 建屋の撤去作業

建屋の撤去作業は、管理区域内構造物の撤去と管理区域を解除した後の建屋及び管理区域外建屋（一般建屋）の撤去に分けて評価する。

① 管理区域内構造物の撤去作業

汚染の可能性のある管理区域内構造物の撤去作業に係る建屋・構造物解体費の評価に適用する。管理区域内構造物の解体に係る建屋・構造物解体費は、次式のように構造物の重量に応じて評価する重量依存型費用である。

建屋・構造物解体費（円）＝CFw×構造物重量（ton）×作業員人件費単価（円/人・日）

換算係数（CFw）について、JPDR 解体作業における生体遮へい体内面部及び残存部での解体作業での実績データを用いて構造物の重量と人工数の相関関係を分析した結果を図 **16** に示す。生体遮へい体内面部の解体では、爆破工法を使用しているが、主要な破砕作業は作業者によるブレーカを用いた作業である。このため、この分析結果を管理区域内構造物の作業者による撤去作業の評価に使用した。また、残存部の解体作業は爆破工法によりコンクリート構造物を脆弱化した後、重機により細かく破砕する作業であった。そこで、残存部についての分析結果を管理区域内構造物の重機による撤去作業の評価に適用した。

<u>作業者による撤去作業</u>

CFw＝12.3（人・日/ton）

<u>重機による撤去作業</u>

CFw＝3.5（人・日/ton）

② 建屋の撤去

管理区域解除後の建屋及び管理区域外建屋（一般建屋）の解体に係る建屋・構造物解体費の評価に適用する。本費用は、建屋の構造により鉄筋コンクリート及び鉄骨スレートに分類し、次のように評価する。

鉄筋コンクリート

鉄筋コンクリート造りの

建屋の解体に係る建屋・構造物解体費は、次式のように建屋構造物の重量に応じて評価する重量依存型費用である。

建屋・構造物解体費（円）＝CFw×建屋重量（ton）×作業者人件費単価（円/人・日）

JPDR 解体作業での建屋解体における実績データ [5)]を用いて建屋の重量と人工数の相関関係を分析した結果を図 **17** に示す。これより、鉄筋コンクリート造りの建屋の撤去作業に係る重量依存型の換算係数（CFw）を次式のように評価した。

<u>堅牢な建屋解体作業</u>

CFw＝0.4（人・日/ton）

<u>一般的な建屋解体作業</u>

CFw＝0.2（人・日/ton）

ここで、堅牢な建屋とは、壁厚のある原子炉建屋や液体廃棄物処理建屋であり、一般的な建屋とはタービン建屋や制御建屋のことである。

鉄骨スレート

ウラン取扱施設等の鉄骨スレート造りの建屋を重機により解体するための建屋・構造物解体費の評価に適用する。本費用は、次式のように建屋構造物の床面積に応じて評価する面積依存型費用である。

建屋・構造物解体費（円）＝CFw×床面積（m^2）×作業員人件費単価（円/人・日）

人形峠環境技術センターでの実績データ及び JPDR 解体作業における燃料貯蔵建屋の解体作業における実績データを用いて建屋の床面積と人工数の相関関係を分析した結果を図 **18** に示す。これより、鉄骨スレート造りの建屋の撤去作業に係る建屋・構造物解体費における面積依存型の換算係数（CFw）を次式のように評価した。

CFw＝3.4（人・日/ m^2）

(8)　設備・資材費

設備・資材費は、次のように解体作業等に使用する設備・資材に係る費用の評価に適用する。設備・資材には、一般的な解体設備や足場資材等に加え、遠隔解体作業に用いる遠隔解体装置の設計・製作を考慮する。

設備・資材費（円）＝一般資材費＋遠隔解体装置費＋廃棄物容器費

一般資材費

一般資材費は、一般的な解体設備及び解体中の足場資材等の仮設設備の設置に係る付随型費用であり、次のように解体作業に係る人件費に対して一定の割合で評価する。

一般資材費（円）＝解体作業に係る人件費（円）×CFs

ここで、解体作業に係る人件費とは、解体作業に要する直接の人件費で、解体前除染費、機器解体費、建屋除染費、確認測定費、建屋・構造物解体費、作業管理費の総和である。

原子炉施設での付随型費用の換算係数（CFs）は、BWR 型原子炉の解体撤去に要する費用の内訳 [15)]に基づいて評価した結果、0.59 とした。ただし、原子炉施設の一般資材費には、遠隔解体に用いる切断装置の設計・製作・設置にかかる費用を含む。

核燃料使用施設での付随型費用の換算係数（CFs）は、JNC での実績データより求めた人件費と資材費との相関関係を図 **19** に示す。人件費と一般資材費の割合結果は 0.22 であった。なお、核燃料使用施設の一般資材費には、遠隔解体作業に伴う遠隔解体装置の費用は含まれていない。

研究施設での付随型費用の換算係数（CFs）は、原子力科学研究所の研究 3 棟等での実績デ

ータより求めた人件費と資材費との相関関係より 0.21 とした。

一般施設での付随型費用の換算係数（CFs）は、公共建築工事積算基準のコンクリート類とりこわしに基づいて、$1m^3$ 当たりの地上部鉄筋コンクリート撤去に係る割合より 0.69 とした。なお、一般施設の解体では、重機等の大型機械を用いて解体するため、重機等のリース費用が含まれるため、設備・資材費の占める割合が大きい。

遠隔解体装置費

遠隔解体装置に係る設備・資材費は、使用する装置の台数に応じて次のように評価する数量依存型の費用である。原子炉施設で使用する遠隔解体装置の設計・製作・設置に係る費用は、一般資材費に含まれている。

遠隔解体装置費（円）＝CFs×装置台数（台数）

解体作業に使用する遠隔解体装置に係る設備・資材費は、再処理施設の高レベル廃液貯槽のような高線量区域における遠隔解体装置であり、JNC での研究開発の結果より、50（億円/台数）とした。

廃棄物容器費

廃棄物容器に係る設備・資材費は、使用する廃棄物容器の台数に応じて次のように評価する数量依存型の費用である。

廃棄物容器費（円）＝CFs×容器個数（個数）

廃棄物容器に係る設備・資材費は、放射性廃棄物の収納容器として、これまでの使用実績を基に、キャスク（遮へい付収納容器）、$1m^3$ 容器、200ℓドラム缶（エポキシ塗装、溶融亜鉛メッキ、コンクリート内張）の製作・購入に係る費用を考慮した。**表 5** に廃棄物容器の種類と充填率を示す。

キャスク（遮へい付収納容器）は、原子炉施設、TRU 取扱施設、再処理関連施設、MOX 関連施設から発生する高度に放射化或いは汚染した解体廃棄物を収納するための容器として使用するものであり、CFs＝1,000 万円とした。

$1m^3$ 容器は、一般施設を除く他の施設で解体廃棄物を収納する容器として使用するものであり、CFs＝20 万円とした。

200ℓドラム缶は、全施設の解体作業から発生する放射性廃棄物を収納する容器として使用するものであり、ドラム缶Ⅰ（エポキシ塗装）では CFs＝0.56 万円、ドラム缶Ⅱ（溶融亜鉛メッキ）では CFs＝0.9 万円とした。核燃料使用施設から発生する高レベル放射性廃棄物の収納に用いるコンクリート内張のあるドラム缶Ⅲは、CFs＝2.6 万円とした。

(9) 作業管理費

作業管理費は、放射線管理と現場管理に係る付随型費用である。放射線管理費は、解体作業における放射線管理者に係る費用であり、原子炉施設及び研究施設では JPDR での実績データ、

核燃料使用施設はJNCでの実績データを適用した。現場管理費は、解体作業を円滑に確実に実施するために、解体作業に直接関わらない管理者に係る費用であり、原研及びJNCの実績データを採用した。

作業管理費は、解体作業等の費用に対して一定の割合で以下のように費用を評価する。

作業管理費（円）＝解体作業費（円）×｛CFs1×（放射線管理者）＋CFs2 ×（管理者)｝

ここで、解体作業費とは、解体作業に要する費用で、解体前除染費、機器解体費、建屋除染費、確認測定費、建屋・構造物解体費、設備・資材費、作業管理費の総和である。

TRU核種等を含む放射線管理とβγ核種が主となる放射線管理との相違を考慮し、核燃料使用施設のようにTRU核種を取り扱う放射線管理を行う場合、CFs1＝0.2とし、βγ核種を取り扱う放射線管理を行う場合、CFs1＝0.1とした。現場管理費に係るCFs2は、0.2とした。

(10) 解体期間中の維持管理費

解体作業で使用する施設の設備・装置類の維持管理に係る付随型費用であり、次のように解体作業に係る全ての費用に対して一定の割合で評価する。

維持管理費（円）＝（調査・計画費＋安全貯蔵費＋解体作業費＋作業管理費）×CFs

ここで、CFsはOECD/NEAの廃止措置費用に関するタスクグループでの評価結果[14)]を参考に、核燃料使用施設はCFs＝0.1、原子炉施設はCFs＝0.05、その他の施設はCFs＝0.025とする。

(11) 諸経費

現場管理上の諸経費として労務管理費、従業員給与手当、租税公課、保険料、法定福利費、事務用品費、通信交通費等を考慮する。なお、従業員給与手当のうちの現場管理者の人工は、作業管理費において計上しているので諸経費には含めていない。また、一般管理費（役員報酬、従業員給与手当、退職金、通信交通費、調査研究費等の解体作業を担当する会社の本支店において必要な経費等）及び宿泊施設費は人工単価に含むものとする。

一般管理費を除く現場経費（現場管理者費用は除く）は、一般産業と同様に標準工事歩掛要覧での評価方法[25)]を参考に設定した。諸経費率は、JPDRでの実績データを参考に評価した結果、7.046%となった。なお、諸経費率は1億円の工事費に対して求めたものであり、廃止措置費用（消費税を除く）の金額の大きさにより異なり、費用が大きくなると指数関数的に減少する傾向にある。

諸経費（円）＝（解体作業に係る人件費－作業管理費）×CFs×C $^{-0.065}$

ここで

CFs（諸経費率）: 0.07046

C（費用割合）:（消費税を除く廃止措置費用）÷1億円

5. 廃止措置費用の評価例

3章で検討した施設毎の解体方法と4章で検討した評価手法を用いて、原研で行われたJPDR（動力試験炉）の廃止措置について費用評価を行い、作成した評価手法の妥当性について検討した。

5.1 計算条件

計算の対象は、原研が1986年から1996年に実施したJPDRの解体作業とする。JPDRは、熱出力90MWtのBWRであり、機器・構造物の物量は約2.4万tonの小型の原子炉施設である。

表6にJPDRを対象とした廃止措置費用評価時の計算条件を示す。施設の安全貯蔵期間は、0年とした。

本計算におけるJPDRの解体手順は、実際の解体手順を参考に、次の通りとした。

放射化した機器・構造物（炉内構造物や原子炉圧力容器）は、遠隔解体装置を用いて放射能レベルに応じて気中（118 ton）及び水中（44 ton）で解体し、遮へい付きのキャスク又は1m^{3}容器に収納する。

78 tonの放射性の設備・機器及び23 tonのライニングは、放射能のレベルに応じた装備を着用した作業者により既存工法を用いて解体する。

建屋コンクリートは、23,800 m^{2}についてスキャブラ等により表面剥離を行い、ブレーカ等により浸透汚染部の深層剥離を行う。

建屋・構造物は、21,439 tonのうち143 tonの高放射化した生体遮へい体を遠隔解体装置により解体し、1,477 tonの低放射化コンクリートである生体遮へい体の外面部はブレーカ等を用いて作業者により解体撤去し、524 tonの生体遮へい体の残部は、重機により解体撤去する。

解体作業を通して、発生した865 tonの放射性廃棄物でない廃棄物については、念のための放射線測定を行う。

設備・機器の撤去、建屋コンクリートの除染を終了した後、23,800 m^{2}の建屋コンクリート表面に対して管理区域解除の測定を実施する。

管理区域解除後、建屋（19,295 ton）は重機により撤去する。

なお、費用の算出にあたって、作業者の人件費単価を3.6万円/人･日、管理者の人件費単価を5.3万円/人･日とした。

5.2 計算結果

JPDRを対象とした廃止措置費用の評価結果の内訳を**表7**に示す。全廃止措置費用の計算結果は、約100億円となり、機器解体費が約13%、建屋・構築物解体費が約13%であり、設備・資材費が約35%と一番多くの費用を費やしていることが分かった。

実際のJPDRでの廃止措置費用の約230億円から本評価で考慮していない研究開発費を除いた金額が約174億円となり、この値と計算結果を比べると計算結果は低めの値ではあるが、JPDRは研究開発の要素が大きく、放射化した機器・構造物毎の遠隔解体装置を製作し、解体撤去したことを考えると、適切に評価できていると言える。

6. まとめ

原子力機構が有する原子力施設の廃止措置費用評価手法の検討を通して以下の結果が得られた。

○施設の特徴や構造、解体方法の類似性を考慮して、廃止措置費用を同一の手法により評価可能と推測できるように、原子炉施設、核燃料使用施設、研究施設、一般施設に分類し、施設の特性に応じた解体方法を検討、整理した。

○原子力施設の廃止措置費用を評価するため、重量依存型費用、面積依存型費用、数量依存型費用、使用量依存型費用、付随型費用の評価手法を作成した。

○原子力施設の廃止措置費用の評価項目として、①調査・計画費、②安全貯蔵費、③解体前除染費、④機器解体費、⑤建屋除染費、⑥確認測定費、⑦建屋・構造物解体費、⑧設備・資材費、⑨作業管理費、⑩解体中の維持管理費、⑪諸経費の 11 の項目を抽出した。

○施設の分類毎に抽出した費用項目に応じた具体的な費用評価手法を作成した。

○整備した評価手法を用いて既に廃止措置を実施した JPDR を対象として費用評価を実施した結果、ほぼ妥当な数値であることがわかった。

謝 辞

本報告書をまとめるにあたって、バックエンド推進部門、バックエンド技術部の諸氏に種々の助言や援助をいただきました。また、二法人統合前のバックエンド対策推進室の廃止措置対策グループの諸氏に種々の助言を頂きました。ここに、深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

1) 富居博行、松尾浄、白石邦生他 “原子力施設における廃止措置費の費用評価手法”、デコミッショニング技報、第 31 号、pp.11-20 (2005)
2) Kenji KUDO, Shinji KAWATSUMA, Hiroshi RINDO, et al., ”Comprehensive Cost Estimation Method for Decommissioning”, Proc. ICONE14, ICONE14-89586, Florida, USA, 2006
3) 柳原敏他： “原子炉デコミッショニング管理のための計算コードシステムの開発・Ｉ”、JAERI-M94-005 (1994)
4) 大島総一郎、白石邦生、島田太郎他：“原子炉解体に係る廃止措置費用評価手法の検討 －COSMARD を用いた廃止措置費用の計算－”、JAERI-Tech2005-046 (2005)
5) 白石邦生他：“動力炉（JPDR）の解体廃棄物データの分析”、JAERI-Data/Code 99-050（2000）
6) 白石邦生他：“動力炉（JPDR）の解体における作業データの分析”、JAERI-Data/Code 98-010（1998）
7) 斉木秀男他：“核燃料サイクル施設の廃止措置費用の評価手法”日本原子力学会、2004 年秋の大会
8) “Decommissioning of Nuclear Power Plants and Research Reactors Safety Guide, Safety Standards Series, No. WS-G-2.1, IAEA, Vienna (1999)
9) “Decommissioning of Nuclear Fuel Cycle Facilities Safety Guide, Safety Standards Series, No. WS-G-2.4, IAEA, Vienna (2001)
10) “Decommissioning of Medical, Industrial, and Research Facilities Safety Guide, Safety Standards Series, No. WS-G-2.2, IAEA, Vienna (1999)
11) 石榑顕吉：“わが国の商業用原子力発電施設の廃止措置”、原子力工業、第 43 巻、第 10 号、pp.2-9 (1997)
12) “実用発電用原子炉廃炉技術調査報告書　平成 9 年度”、（財）エネルギー総合工学研究所、（平成 10 年 3 月）
13) 助川武則、大島総一郎、白石邦生他：“原子力施設の解体作業に関する管理データ計算モデルの開発”、JAERI-Data/Code 99-005 (1999)
14) “Report from the Task Group on Decommissioning Costs”、OECD/NEA Co-operative Programme on Decommissioning, CPD/DC/91/03 (1991)
15) 上村雅一:“わが国商業用原子力発電所の廃止措置のあり方”、エネルギーレビュー、第 5 巻、9 号、pp.2～8、昭和 60 年 9 月
16) “商業用原子力発電施設の廃止措置に向けて”、資源エネルギー庁 総合エネルギー調査会原子力部会、(1997 年 1 月)
17) 森田聡、青井正勝、相澤大和他：“酸化還元除染法による「ふげん」原子炉冷却系 B ループの系統化学除染結果”、サイクル機構技法、No7、資料番号 1(2000.6)
18) “平成 11 年度　再処理施設解体技術開発　成果報告書”、日本原子力研究所(平成 12 年 3 月)
19) 積算資料　建築施工単価　(財)経済調査会（99 年 1 月調）

20) 私信（1999 年 3 月）
21) 私信（1996 年 3 月）
22) 畠山睦夫、立花光夫、前田真吾他：私信（1996）
23) “平成 13 年度　再処理施設解体技術開発　成果報告書”、日本原子力研究所（平成 14 年 3 月）
24) “平成 14 年度　再処理施設解体技術開発　成果報告書”、日本原子力研究所（平成 15 年 3 月）
25) “標準工事歩掛要覧　改訂 9 版”、工事歩掛研究会編、(財) 経済調査会

表 1 解体を考慮した施設分類とその特徴

施設分類			施設の特徴 全 般	放射能	主要設備	廃止措置技術
原子炉施設	大型施設 (実用発電炉並)		使用済燃料を撤去すれば、施設内に残存しているTRU 等の長半減期核種の量は極めて少なく、Co や Mn 等の$\beta\gamma$核種が主要因となる。設備規模は実用発電炉並である。	極低～高放射性	放射線遮へい体 原子炉容器	系統除染による作業環境改善の可能性あり。安全貯蔵のメリットあり。高放射化部は遠隔操作にて解体。
	小型施設		使用済燃料を撤去すれば、施設内に残存しているTRU 等の長半減期核種の量は極めて少なく、Co や Mn を基調とした$\beta\gamma$核種が主要因となる。	極低～高放射性	原子炉容器 放射線遮へい体	安全貯蔵のメリットあり。高放射化部は遠隔操作にて解体。
核燃料使用施設	ウラン取扱施設		取扱う核燃料物質等は、ウラン系核種が主体の施設。線量率が極めて低い施設であるため、外部被ばくによる影響は小さい。内部被ばく防止のための考慮が重要である。	極低～低放射性	遠心機、塔槽類、配管等	グリーンハウス等を設置し、各種設備の解体撤去が効果的。
	再処理関連施設		比較的多量の使用済燃料等を非密封状態あるいはこれらを溶解液や廃棄物等の状態で扱う施設であり、外部被ばく防止や閉じ込め措置に留意を要する施設。	中～高放射性	塔槽類、配管等	除染による線量低減が効果的。セル構造の解体を要する。
	MOX 取扱施設		U・Pu 酸化物の MOX 粉末を取扱う施設であり、臨界安全、汚染拡大防止のための閉じ込め措置に留意を要する。外部・内部被ばくへの考慮が必要である。	U・Pu 高汚染	グローブボックス	グローブボックスと内装機器を解体撤去するため、グリーンハウスによる設置場所解体と解体設備による集中解体があり、解体方式はエアライン装備による直接解体とマニピュレータやロボット等による遠隔解体がある。
	廃棄物処理施設等	$\beta\gamma$ 取扱施設	取扱う核燃料物質等は、$\beta\gamma$系核種が主体の施設。線量率が比較的低い施設であるため、外部被ばくによる影響は小さい。	極低～低放射性	グローブボックス、フード、塔槽類等	グリーンハウス等を設置し、各種設備の解体撤去が効果的。
		TRU 取扱施設	取扱う核燃料物質等はTRU 核種で多様だが、取扱量は微量または線量率が比較的低い施設である。内部被ばく防止のための考慮が重要である。	極低～低放射性	グローブボックス、フード、塔槽類等	グリーンハウス等を設置し、各種設備の解体撤去が効果的。

表 1　解体を考慮した施設分類とその特徴（続き）

<table>
<tr><th colspan="2" rowspan="2">施設分類</th><th colspan="4">施設の特徴</th></tr>
<tr><th>全　般</th><th>放射能</th><th>主要設備</th><th>廃止措置技術</th></tr>
<tr><td rowspan="3">研究施設</td><td>ホットラボ</td><td>比較的少量の使用済燃料等を非密封状態あるいはこれらを溶解液や廃棄物等の状態で取扱う施設であり、外部被ばくや閉じ込め措置に留意を要する施設。</td><td>中～高放射性</td><td>ホットセル等</td><td>マニピュレータ等の遠隔操作設備を用いたセル内機器撤去が効果的。</td></tr>
<tr><td>加速器等</td><td>照射による放射化があるが、二次的な汚染は少ない施設である。</td><td>極低～中放射性</td><td>装置、ターゲット</td><td>放射化のみであるとともに線量率が低く、一般機械による解体が可能。</td></tr>
<tr><td>非密封放射性物質取扱施設等</td><td>比較的少量の使用済燃料等を非密封状態あるいはこれらを溶解液や廃棄物等の状態で取扱う施設であり、外部被ばくや閉じ込め措置に留意を要する施設。小規模施設である。</td><td>低～中放射性</td><td>フード、実験装置</td><td>グリーンハウス等を設置し、各種設備の解体撤去が効果的。</td></tr>
<tr><td>一般施設</td><td>倉庫・貯蔵施設・照射施設・第 2 種管理区域施設等（汚染の恐れのない施設）</td><td>取扱う核燃料物質等は密封、封入状態または検出限界以下等であり、施設内の汚染は考えられない施設。
線源を搬出すれば、一般建屋並の解体作業である。</td><td>非放射性</td><td>ドラム缶、角型容器、UF_6 シリンダ、密封線源等</td><td>除染不要。一般建屋並の解体。</td></tr>
</table>

表 **2**　施設の特性に応じた解体方法と評価項目の関係

	解体方法	評価項目	原子炉施設	核燃料施設					研究施設			一般施設
				ウラン取扱	再処理関連施設	MOX取扱	廃棄物処理施設等		ホットラボ	加速器等	非密封放射性物質取扱	
							βγ取扱	TRU取扱				
解体前除染		系統除染			○							
		セル除染			○				○			
機器解体（金属）	一般機器解体作業	汚染のない設備・機器	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		βγ系/U系の設備・機器	○			○	○		○	○	○	
		TRU系の設備・機器		○	○	○		○				
	重装備による解体作業	高線量区域	○		○			○	○			
		低線量区域	○		○		○	○	○		○	
	特殊機器の解体作業	ライニング	○		○			○	○			
		遠心分離機		○								
		大型グローブボックス				○						
		小型グローブボックス			○	○		○				
		ブロック（金属）								○		
	遠隔解体作業	ロボットによるセル内解体作業			○				○			
		気中での解体作業	○							○		
		水中での解体作業	○									
建屋・構造物解体（コンクリート）	構造物の撤去作業	遠隔解体作業	○									
		ブロック撤去					○		○	○		
	建屋の撤去作業	作業員による撤去	○				○		○	○		
		重機による撤去	○				○		○	○	○	
		鉄筋コンクリート	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		鉄骨スレート		○								○

○印は、各施設の解体作業において該当する解体方法に対する費用評価項目を示す。

表 3　廃止措置費用の評価式

費用項目		評価式
1. 調査計画費		（解体作業費＋設備・資材費＋作業管理費） × CFs
2. 安全貯蔵費		（解体作業に係る費用 － 解体前除染費 ＋ 調査・計画費） × 安全貯蔵期間 × CFs
3. 解体前除染費	1) 系統除染	$CF\ell$ × 系統数 × 人件費単価
	2) セル除染	CFa × セルの床面積 × 人件費単価
4. 機器解体費 (金属)	1) 一般機器解体作業	CFw × 機器重量 × 人件費単価
	2) 重装備による解体作業	CFw × 機器重量 × 人件費単価
	3) 特殊機器の解体作業	CFw × 機器重量 × 人件費単価
	4) 遠隔解体作業	CFw × 機器重量 × 人件費単価
5. 建屋除染費(コンクリート)		CFa × 管理区域述床面積 × 人件費単価
6. 確認測定費	1) 放射性廃棄物でない廃棄物の放射線測定作業	CFw × 機器重量 × 人件費単価
	2) 管理区域解除に係る放射線測定作業	CFa × 管理区域延床面積 × 人件費単価
7. 建屋・構造物解体費 (コンクリート)	1) 構造物の撤去作業	CFw × 機器重量 × 人件費単価
	2) 建屋の撤去作業	
	① 管理区域内構造物の撤去作業	CFw × 機器重量 × 人件費単価
	② 建屋の撤去作業	
	a. 鉄筋コンクリート	CFw × 機器重量 × 人件費単価
	b. 鉄骨スレート	CFw × 床面積 × 人件費単価
8. 設備・資材費	1) 一般資材費	解体作業に係る人件費 × CFs
	2) 遠隔解体装置費	CFn × 装置台数
	3) 廃棄物容器費	CFn × 容器個数
9. 作業管理費		解体作業費 × ｛CFs1 × （放射線管理者） ＋ CFs2 × （管理作業者）｝
10. 解体中の維持管理費		（調査・計画費＋安全貯蔵費＋解体作業費＋作業管理費） × CFs
11. 諸経費		（解体作業費＋設備・資材費） × CFs

※解体作業費＝解体前除染費＋機器解体費＋建屋除染費＋確認測定費＋建屋・構造物解体費
解体作業に係る人件費＝解体前除染費＋機器解体費＋建屋除染費＋確認測定費＋建屋・構造物解体費＋作業管理費
解体作業に係る費用＝解体前除染費＋機器解体費＋建屋除染費＋確認測定費＋建屋・構造物解体費＋設備・資材費＋作業管理費

CFw：重量依存型の換算係数、CFa：面積依存型の換算係数、$CF\ell$：数量依存型の換算係数、CFs：付随型の換算係数

表 **4**　廃止措置費用評価のための換算係数

評価項目	係数	単位	評価項目	係数	単位
1. 調査・計画費			② ブロック撤去作業		
1) 原子炉	3.0	%	a. ホットラボ等	10.8	人・日/ton
2) 核燃料サイクル施設	5.0	%	b. 加速器		
2. 安全貯蔵費	0.5	%/年	ワイヤーソー切断	1.0	人・日/ton
3. 解体前除染費			一括撤去	0.2	人・日/ton
1) 系統除染	420.0	人･日/本数	2) 建屋の撤去作業		
2) セル除染	40.7	人･日/m^2	① 管理区域内構造物		
4. 機器解体費（金属）			a. 作業者による撤去	12.3	人・日/ton
1) 一般機器解体作業			b. 重機による撤去	3.5	人・日/ton
① 汚染のない設備・機器	5.6	人・日/ton	② 建屋		
② βγ 系/U 系の設備・機器	15.1	人・日/ton	a. 鉄筋コンクリート		
③ TRU 系の設備・機器	36.0	人・日/ton	堅牢な建屋	0.4	人・日/ton
2) 重装備による解体作業			一般的な建屋	0.2	人・日/ton
① 高線量区域	546.7	人・日/ton	b. 鉄骨スレート	3.4	人･日/m^2
② 低線量区域	56.0	人・日/ton	8. 設備・資材費		
3) 特殊機器の解体作業			1) 一般資材費		
① ライニング撤去作業	45.0	人・日/ton	① 原子炉施設	0.59	
② 遠心分離機解体作業	7.6	人・日/ton	② 核燃料使用施設	0.22	
③ グローブボックス解体作業			③ 研究施設	0.21	
a. 大型グローブボックス	286.5	人・日/ton	④ 一般施設	0.69	
b. 小型グローブボックス	159.8	人・日/ton	2) 遠隔解体装置等	50	億円/式
④ ブロック(金属)撤去作業	0.23	人・日/ton	3) 廃棄物容器費		
4) 遠隔解体作業			① キャスク	1,000	万円/個
① ロボットによるセル内解体作業	413.8	人・日/ton	② $1m^3$ 容器	20	万円/個
② 遠隔解体装置による解体作業			③ ドラム缶Ⅰ（エポキシ塗装）	0.56	万円/本
a. 気中での解体作業	92.3	人・日/ton	④ ドラム缶Ⅱ（溶融亜鉛メッキ）	0.9	万円/本
b. 水中での解体作業	251.1	人・日/ton	⑤ ドラム缶Ⅲ（コンクリート内張）	2.6	万円/本
5. 建屋除染費（コンクリート）			9. 作業管理費		
1) 建屋除染	0.9	人・日/m^2	1) 放射線管理		
			① TRU 核種の放射線管理	0.2	
6. 確認測定費			② βγ 核種の放射線管理	0.1	
1) 放射性廃棄物でない廃棄物	0.1	人・日/ton	2) 作業管理	0.2	
2) 管理区域解除	0.5	人･日/m^2	10. 解体期間中の維持管理費		
7. 建屋・構造物解体費（コンクリート）			① 核燃料使用施設	0.1	
1) 構造物の撤去作業			② 原子炉施設	0.05	
① 遠隔解体作業	99.5	人・日/ton	③ その他の施設	0.025	
			11. 諸経費	7.0458	%

表 **5** 廃棄物容器の種類と充填率

容器の種類	充填率		減容比
キャスク(遮へい付き)		1ton / 個	－
1m^3 容器	核燃料取扱施設	500kg / 個	－
	その他の施設	1ton / 個	－
200ℓドラム缶Ⅰ (エポキシ塗装)		200kg / 本	－
200ℓドラム缶Ⅱ (溶融亜鉛メッキ)	可燃/難燃物	30kg / 本	3 / 100
	不燃物	100kg / 本	1 / 3
200ℓドラム缶Ⅲ (コンクリート内張)	可燃/難燃物	18kg / 本	3 / 100
	不燃物	60kg / 本	1 / 3

表 6　JPDR を対象とした廃止措置費用評価時の計算条件

評価項目		計算条件
安全貯蔵期間		0 年
設備・機器の重量	汚染のない設備・機器	2,189 ton
	βγ 系の設備・機器	78 ton
	ライニング	23 ton
	低放射化機器	118 ton
	高放射化機器	44 ton
建屋除染の面積	表面・深層剥離	23,800 m^2
確認測定の面積	放射性廃棄物でない廃棄物の測定	865 ton
	管理区域解除のための確認測定	23,800 m^2
建屋・構造物の重量	高放射化コンクリート（生体遮へい体内面部）	143 ton
	低放射化コンクリート（生体遮へい体外面部）	1,477 ton
	建屋・構造物（生体遮へい体残部）	524 ton
	建屋	19,295 ton
廃棄物容器の使用量	キャスク	44 個
	1m^3 鋼製容器	261 個
	200ℓ ドラム缶	3,030 個
	設備・資材費に係る数量依存型の換算係数	0.59

表 7　JPDR を対象とした廃止措置費用の計算結果

評価項目	費用（百万円）	割合（%）
① 調査計画費	265	2.7
② 安全貯蔵費	0	0
③ 解体前除染費	0	0
④ 機器解体費	1,311	13.2
⑤ 建屋除染費	771	7.8
⑥ 確認測定費	432	4.3
⑦ 建屋・構造物解体費	1,309	13.2
⑧ 設備・資材費	3,441	34.6
⑨ 作業管理費	1,147	11.5
⑩ 解体中の維持管理費	421	4.2
⑪ 諸経費	382	3.8
⑫ 消費税	474	4.8
合　計	9,952	

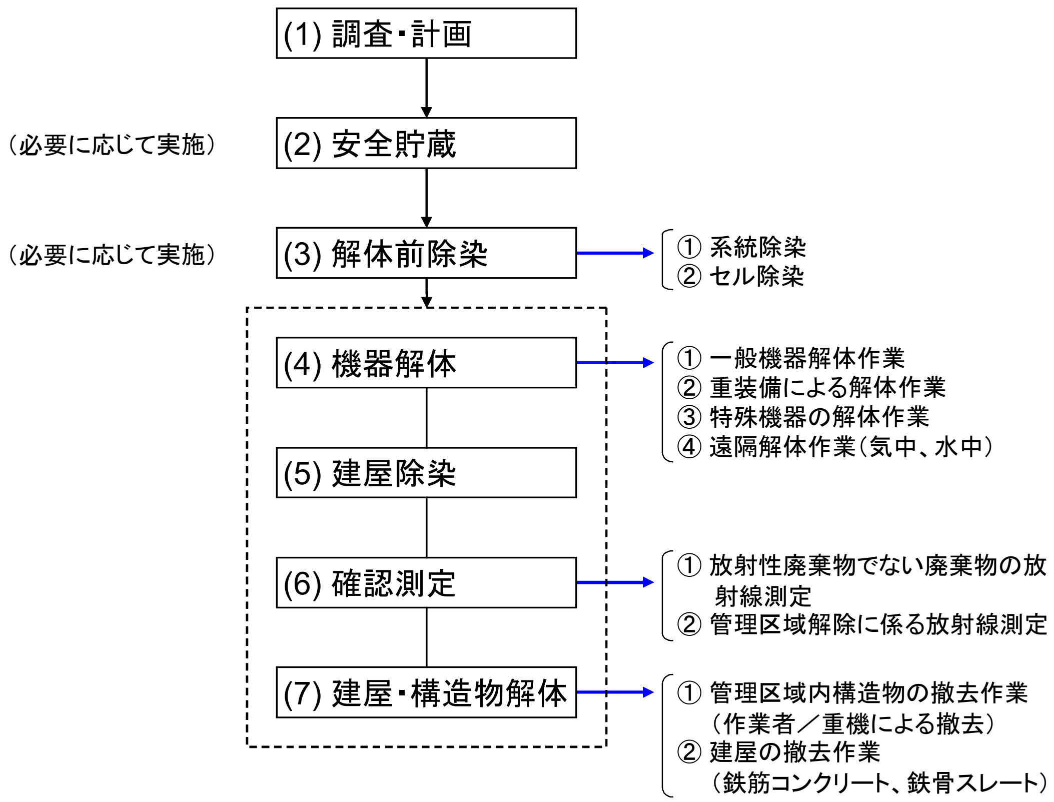

図 1　解体作業の流れ

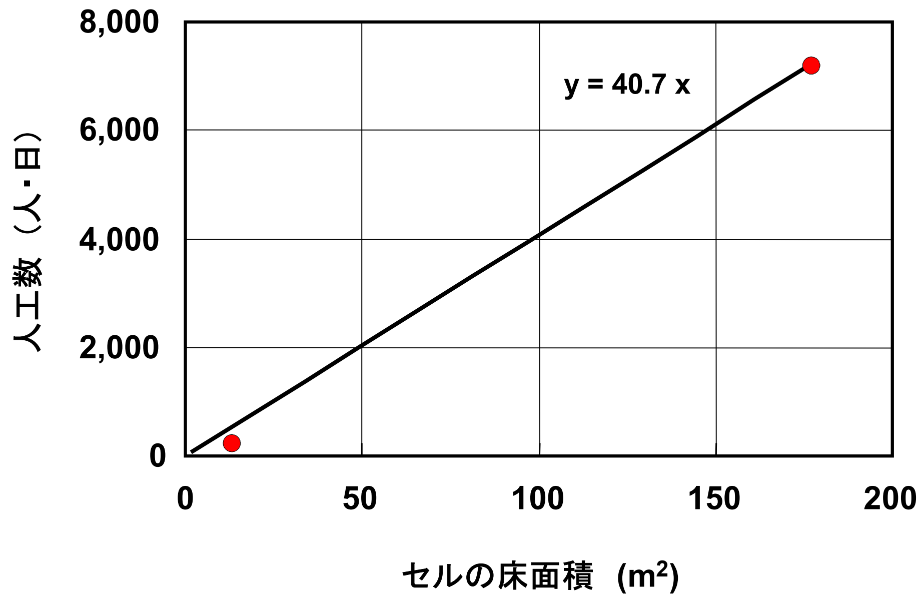

図 2　セル除染におけるセルの床面積と人工数の関係

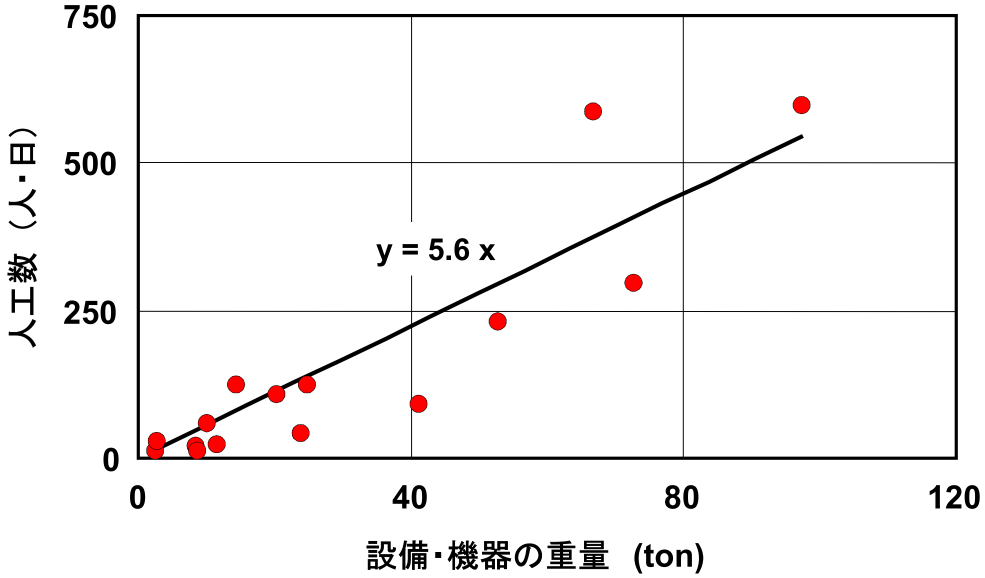

図 3　解体作業における汚染のない設備・機器の重量と人工数の関係

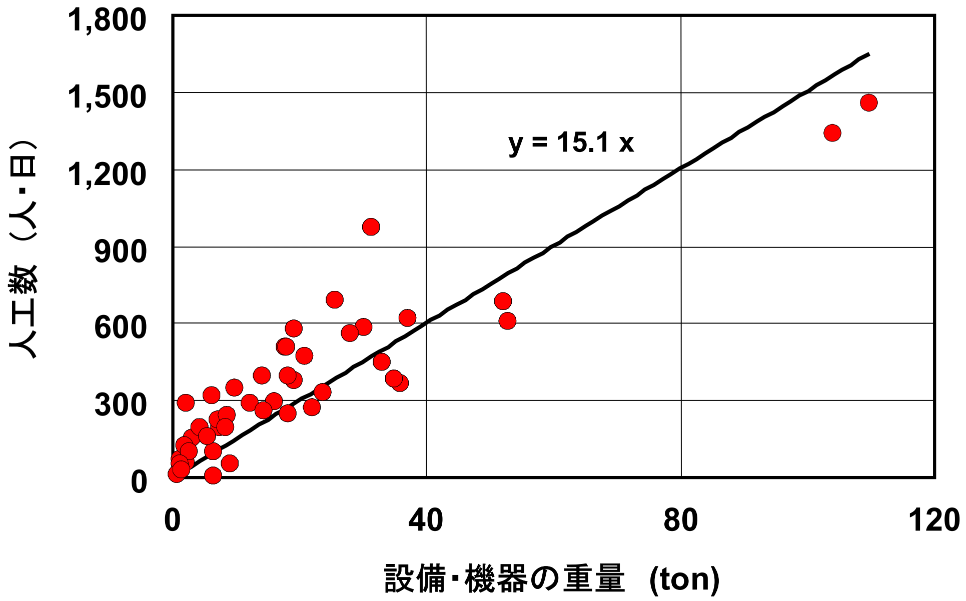

図 4　解体作業におけるβγ系/U 系設備・機器の重量と人工数の関係

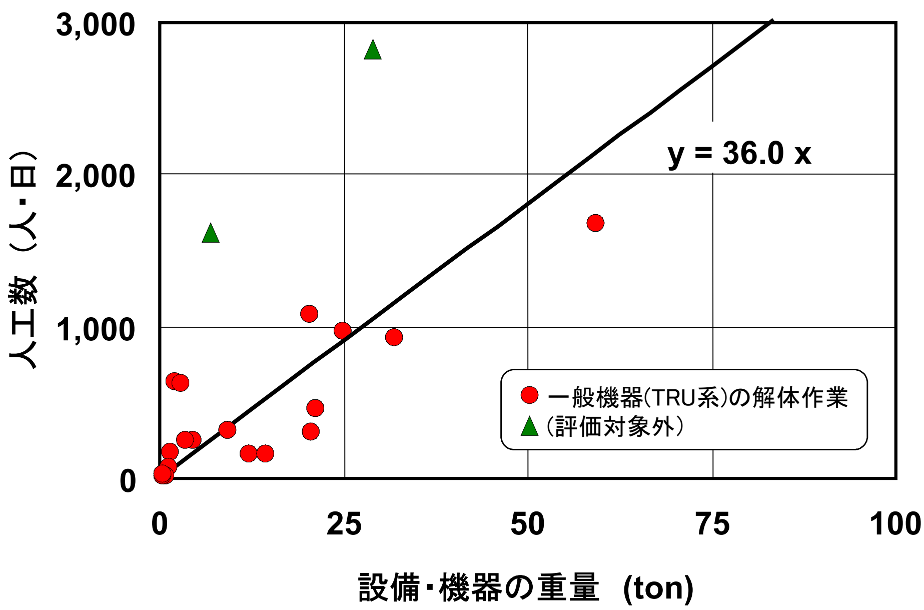

図 5　解体作業における TRU 系設備・機器の重量と人工数の関係

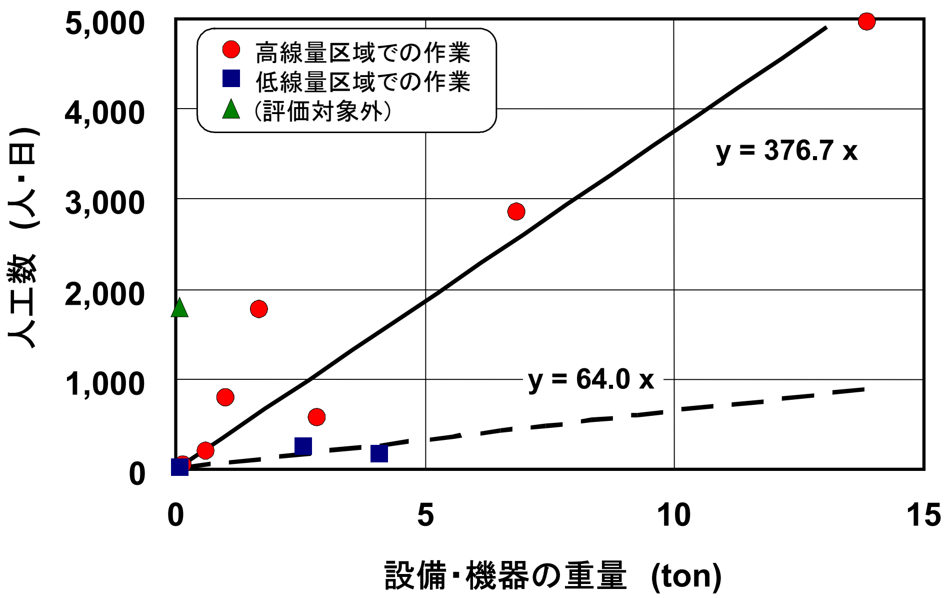

図 6　重装備による解体作業における設備・機器の重量と人工数の関係

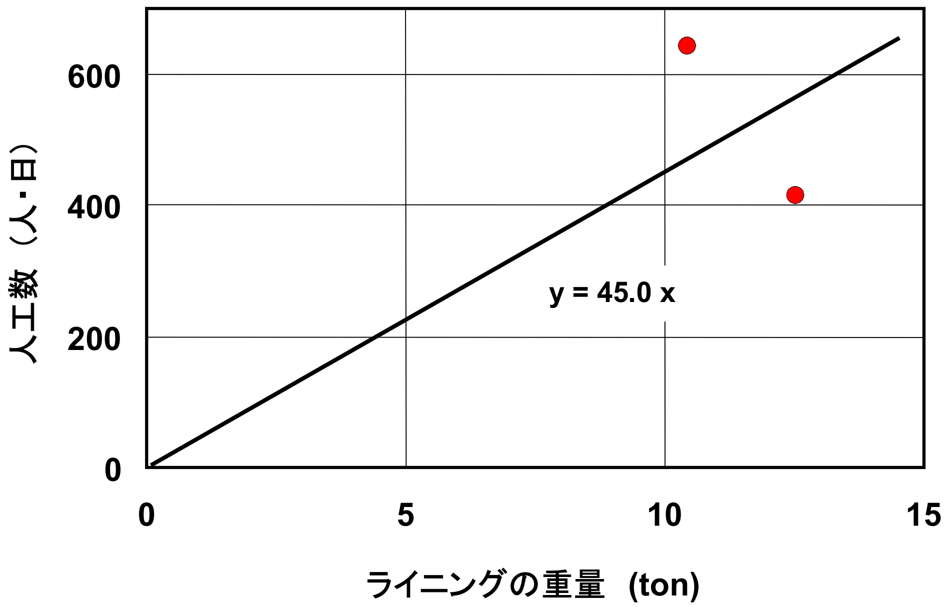

図 7　ライニング撤去作業におけるライニングの重量と人工数の関係

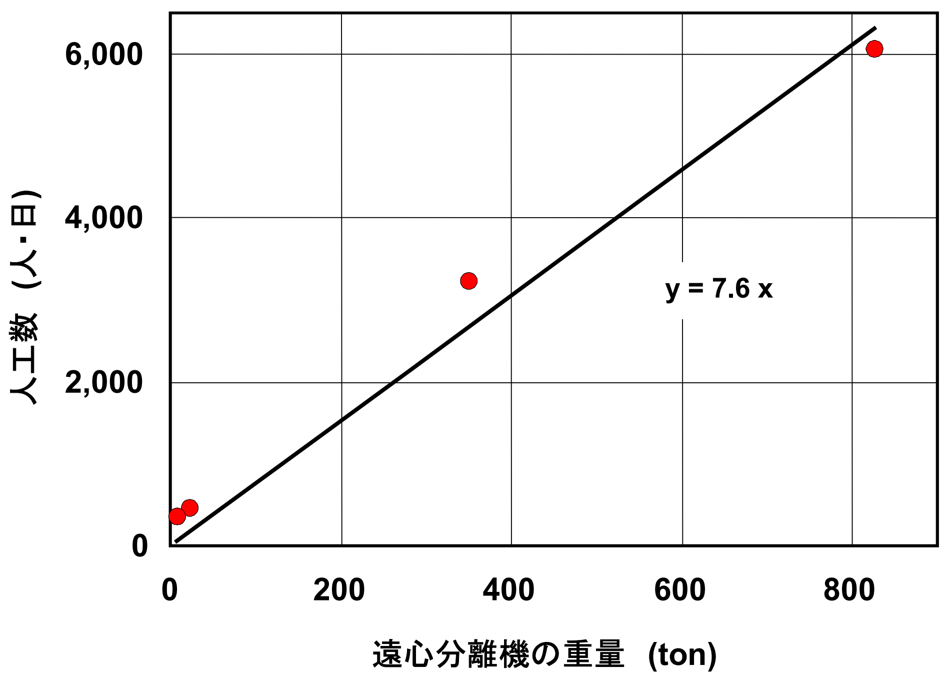

図 8　遠心分離機の撤去作業における遠心分離機の重量と人工数の関係

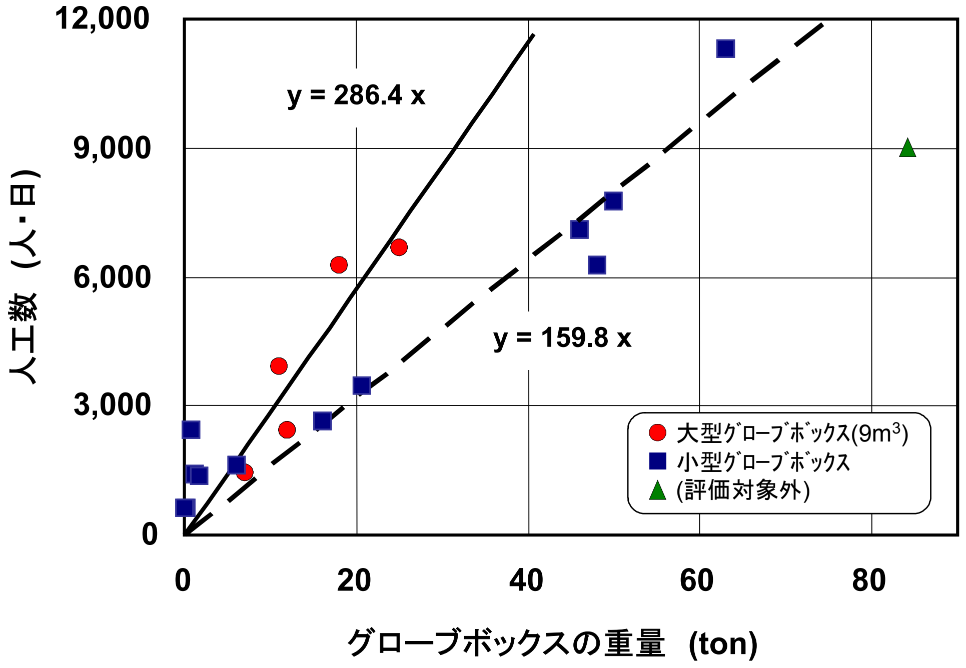

図 9　解体作業におけるグローブボックスの重量と人工数の関係

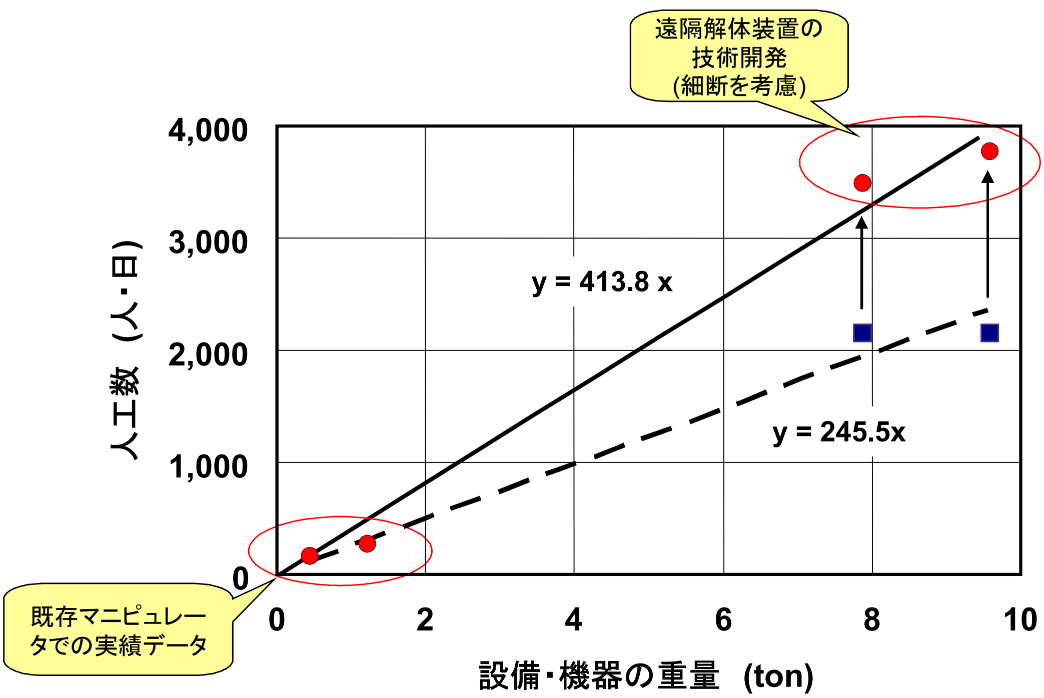

図 10　ロボットによる解体作業におけるセル内設備・機器の重量と人工数の関係

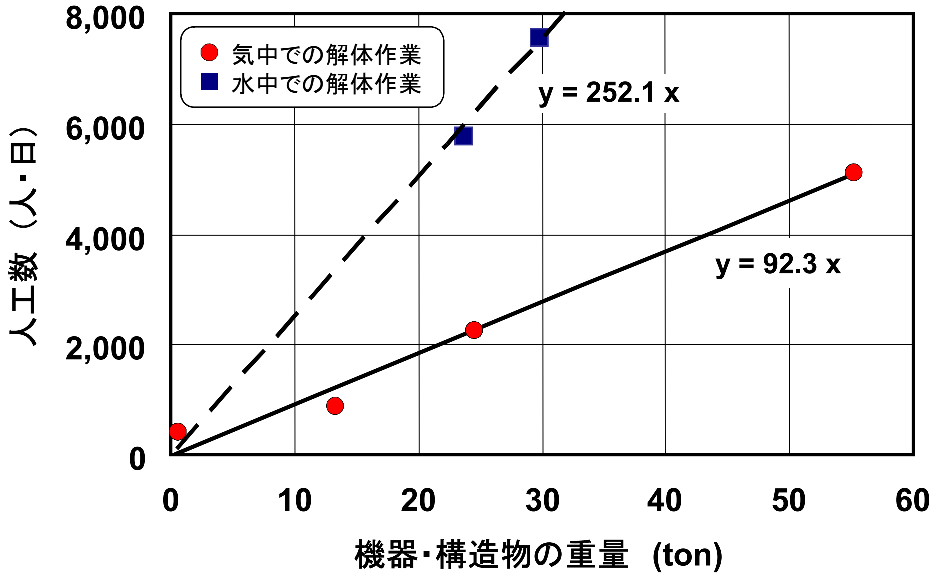

図 11　遠隔解体作業における機器・構造物の重量と人工数の関係

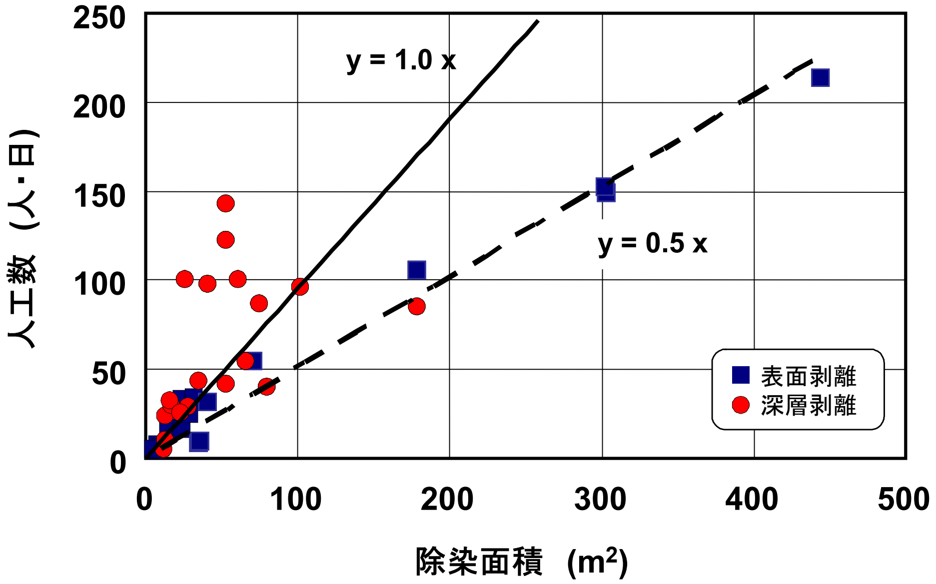

図 12　建屋除染作業における除染面積と人工数の関係

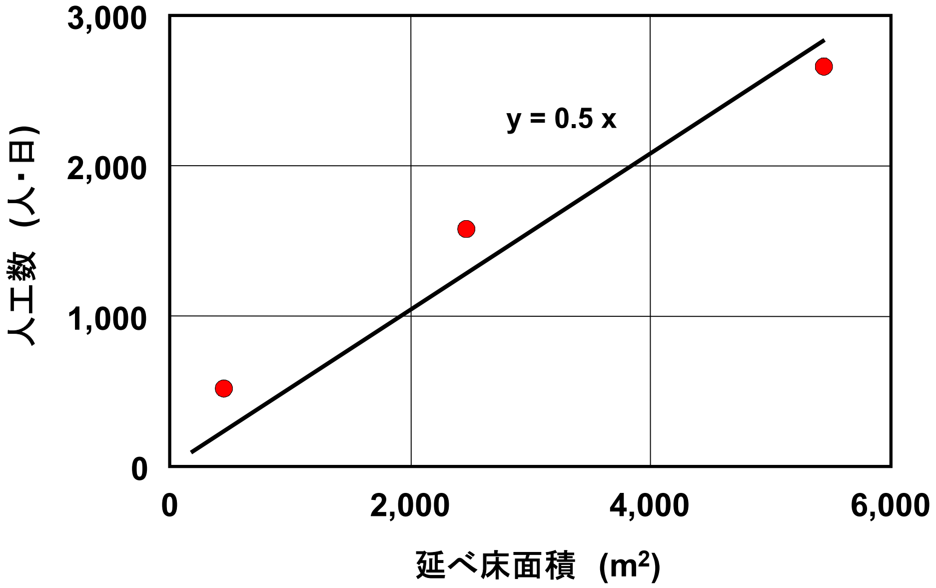

図 13　確認測定作業における延べ床面積と人工数の関係

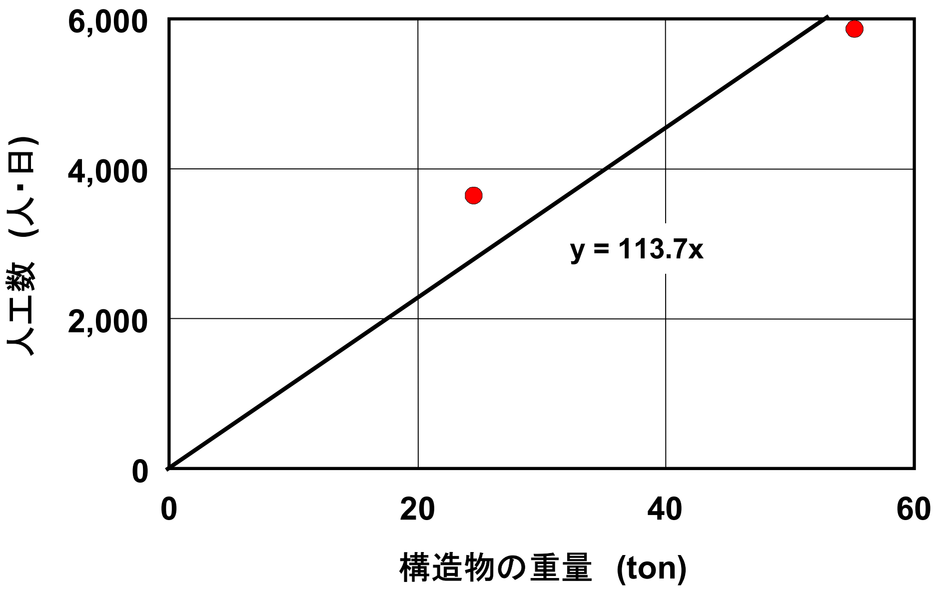

図 14　解体作業における構造物の重量と人工数の関係
(気中遠隔解体)

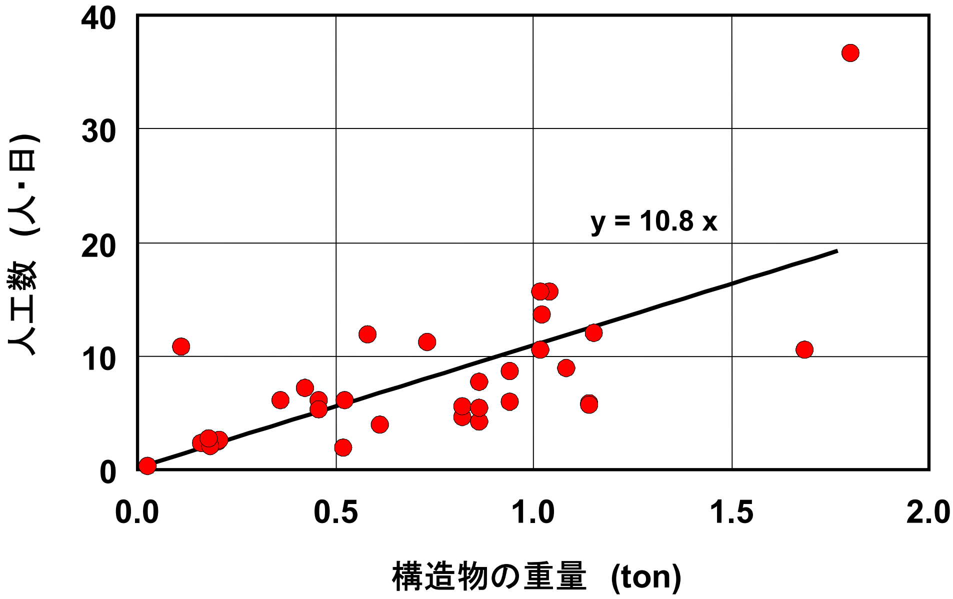

図 15　解体作業におけるセル構造物の重量と人工数の関係

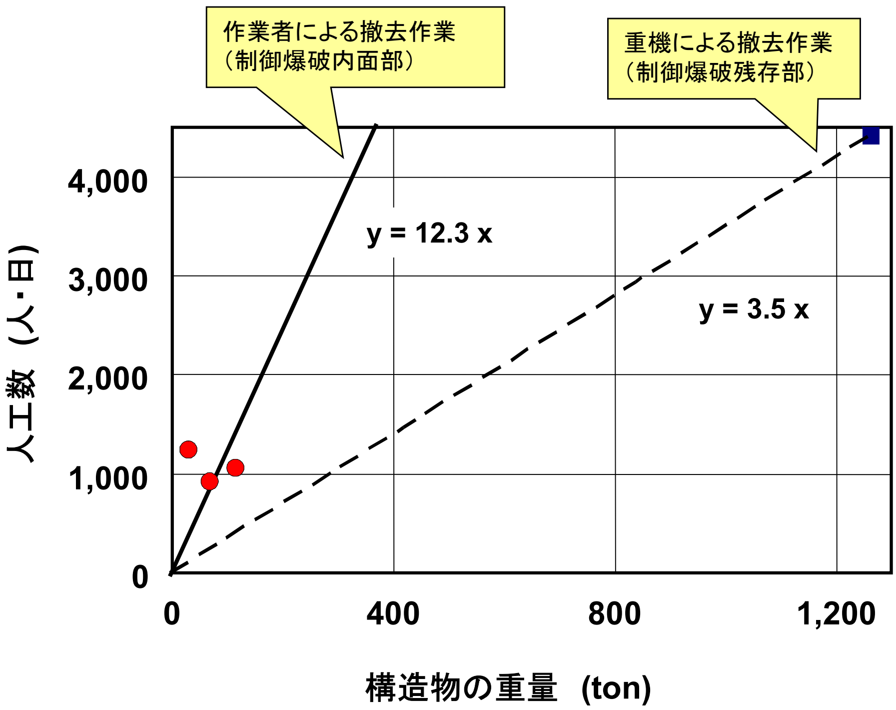

図 16　解体作業における管理区域内構造物の重量と人工数の関係

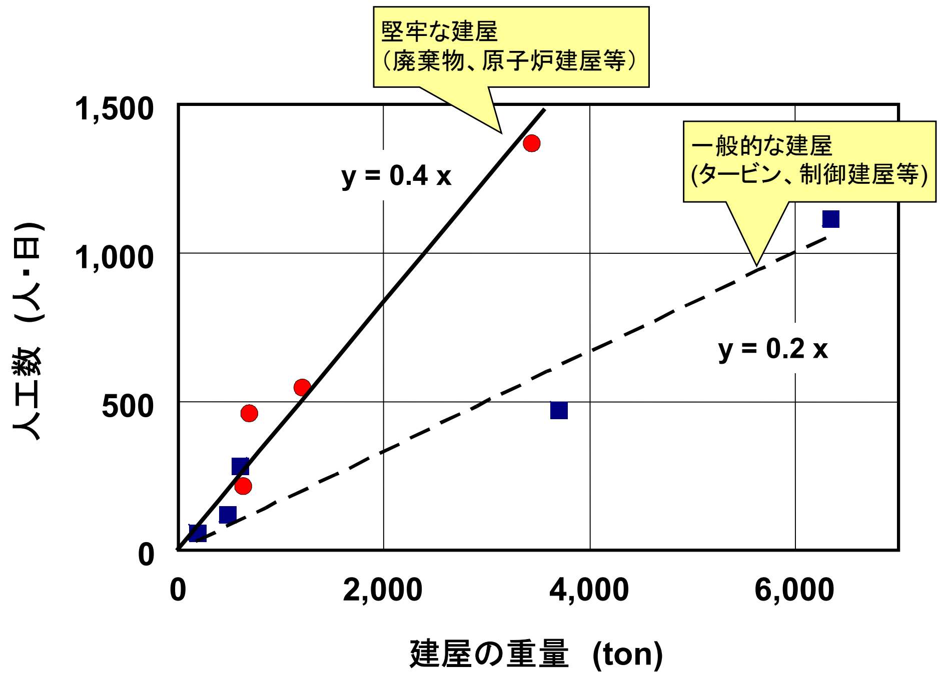

図 17　解体作業における建屋（鉄筋コンクリート）の重量と人工数の関係

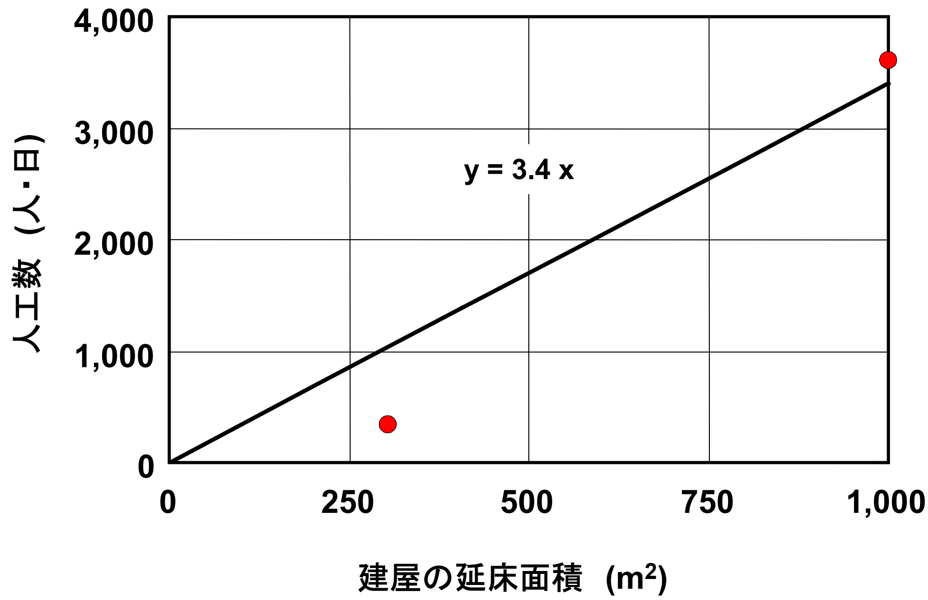

図 18　解体作業における建屋（鉄骨スレート）の床面積と人工数の関係

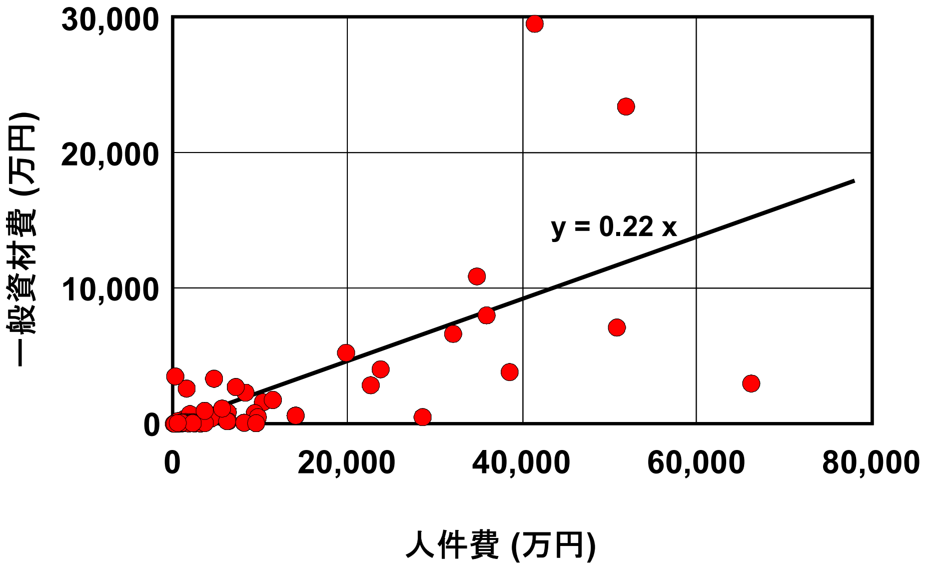

図 19　一般資材費と人件費の関係

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	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^{2}
体積	立法メートル	m^{3}
速さ，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	毎メートル	m-1
密度（質量密度）	キログラム毎立法メートル	kg/m^{3}
質量体積（比体積）	立法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
（物質量の）濃度	モル毎立方メートル	mol/m^{3}
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^{2}
屈折率	（数の）1	1

表５．SI 接頭語

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}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表３．固有の名称とその独自の記号で表される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[a]	rad		$m\cdot m^{-1}=1$[b]
立体角	ステラジアン[a]	sr[c]		$m^{2}\cdot m^{-2}=1$[b]
周波数	ヘルツ	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m\cdot kg\cdot s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^{2}	$m^{-1}\cdot kg\cdot s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N・m	$m^{2}\cdot kg\cdot s^{-2}$
工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^{2}\cdot kg\cdot s^{-3}$
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	$m^{2}\cdot kg\cdot s^{-3}\cdot A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2}\cdot kg^{-1}\cdot s^{4}\cdot A^{2}$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^{2}\cdot kg\cdot s^{-3}\cdot A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\cdot kg^{-1}\cdot s^{3}\cdot A^{2}$
磁束	ウエーバ	Wb	V・s	$m^{2}\cdot kg\cdot s^{-2}\cdot A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^{2}	$kg\cdot s^{-2}\cdot A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^{2}\cdot kg\cdot s^{-2}\cdot A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[d]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd・sr[c]	$m^{2}\cdot m^{-2}\cdot cd=cd$
照度	ルクス	lx	lm/m^{2}	$m^{2}\cdot m^{-4}\cdot cd=m^{-2}\cdot cd$
（放射性核種の）放射能	ベクレル	Bq		s^{-1}
吸収線量，質量エネルギー分与，カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^{2}\cdot s^{-2}$
線量当量，周辺線量当量，方向性線量当量，個人線量当量，組織線量当	シーベルト	Sv	J/kg	$m^{2}\cdot s^{-2}$

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表４に示されている。
(b) 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“１”は明示されない。
(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
(d) この単位は、例としてミリセルシウス度m℃のようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表６．国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

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=86400 s
度	°	1° =(π/180) rad
分	’	1’ =(1/60)° =(π/10800) rad
秒	”	1” =(1/60)’ =(π/648000) rad
リットル	l、L	1l=1 $dm^{3}=10^{-3}m^{3}$
トン	t	1t=10^{3} kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2)ln10(Np)

表７．国際単位系と併用されこれに属さない単位で SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49)×10^{-19}J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10^{-27}kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10^{11}m

表８．国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1海里=1852m
ノット		1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 $dam^{2}=10^{2}m^{2}$
ヘクタール	ha	1 ha=1 $hm^{2}=10^{4}m^{2}$
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10^{5}Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10^{-10}m
バーン	b	1 b=100$fm^{2}=10^{-28}m^{2}$

表４．単位の中に固有の名称とその独自の記号を含む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	$m^{-1}\cdot kg\cdot s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N・m	$m^{2}\cdot kg\cdot s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg\cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s^{2}	$m\cdot m^{-1}\cdot s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^{2}	$kg\cdot s^{-3}$
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^{2}\cdot kg\cdot s^{-2}\cdot K^{-1}$
質量熱容量（比熱容量），質量エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg・K)	$m^{2}\cdot s^{-2}\cdot K^{-1}$
質量エネルギー（比エネルギー）	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2}\cdot s^{-2}\cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	$m\cdot kg\cdot s^{-3}\cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^{3}	$m^{-1}\cdot kg\cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m\cdot kg\cdot s^{-3}\cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m^{3}	$m^{-3}\cdot s\cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^{2}	$m^{-2}\cdot s\cdot A$
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3}\cdot kg^{-1}\cdot s^{4}\cdot A^{2}$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m\cdot kg\cdot s^{-2}\cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^{2}\cdot kg\cdot s^{-2}\cdot mol^{-1}$
モルエントロピー，モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	$m^{2}\cdot kg\cdot s^{-2}\cdot K^{-1}\cdot mol^{-1}$
照射線量（Ｘ線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1}\cdot s\cdot A$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^{2}\cdot s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^{4}\cdot m^{-2}\cdot kg\cdot s^{-3}=m^{2}\cdot kg\cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^{2}\cdot sr)$	$m^{2}\cdot m^{-2}\cdot kg\cdot s^{-3}=kg\cdot s^{-3}$

表９．固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10^{-7} J
ダイン	dyn	1 dyn=10^{-5}N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm^{2}=0.1Pa・s
ストークス	St	1 St =1$cm^{2}/s=10^{-4}m^{2}/s$
ガウス	G	1 G ˆ10^{-4}T
エルステッド	Oe	1 Oe ˆ(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ˆ10^{-8}Wb
スチルブ	sb	1 sb =1$cd/cm^{2}=10^{4}cd/m^{2}$
ホト	ph	1 ph=10^{4}lx
ガル	Gal	1 Gal =1$cm/s^{2}=10^{-2}m/s^{2}$

表10．国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	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
X線単位		1X unit=1.002×10^{-4}nm
ガンマ	γ	1γ=1 nT=10^{-9}T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=$10^{-26}W\cdot m^{-2}\cdot Hz^{-1}$
フェルミ		1 fermi=1 fm=10^{-15}m
メートル系カラット		1 metric carat = 200 mg = 2×10^{-4}kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	
ミクロン	µ	1 µ =1µm=10^{-6}m

（第７版，1998年改訂）