



動力試験炉 (JPDR) の解体における
建家表面の除染と放射能測定
(受託研究)

1997年12月

畠山睦夫・立花光夫・柳原 敏

29-12



日本原子力研究所

Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力公済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1997

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 刷 (株)高野高速印刷

動力試験炉（JPDR）の解体における
建家表面の除染と放射能測定
（受託研究）

日本原子力研究所東海研究所バックエンド技術部
畠山 陸夫・立花 光夫・柳原 敏

（1997年11月10日受理）

原子力発電所の廃止措置においては、跡地を無拘束で再利用することを考えると、その最終段階で建家を解体する必要がある。建家は膨大な量の鉄筋コンクリートで作られているため、その解体作業から発生するコンクリート廃棄物を全て放射性廃棄物として処分することは合理的でない。すなわち、放射性廃棄物と「放射性廃棄物でない廃棄物」を分離するための作業が必要となる。JPDRの解体実地試験においては、原子力安全委員会の考え方に従って、解体から生じる廃棄物を「放射性廃棄物でない廃棄物」として扱うことを前提にした建家解体のための手順について検討し、その結果を次のように実施した。まず、原子炉の運転記録から定性的に汚染の可能性のない領域を区分した。続いて、建家表面の放射能測定を実施し、定性的な区分方法が測定結果と一致していることを確認した。さらに、放射性廃棄物と「放射性廃棄物でない廃棄物」を分離するため、安全余裕を加味した除染範囲を設定し、この部分を除去した。これにより、発生する廃棄物を「放射性廃棄物でない廃棄物」として扱い、建家を解体できるものと考えたが、念のため、表面汚染計による建家表面の全面測定、及び、試料採取による放射能測定を実施し、原子炉の運転で生じた放射性核種が残存しないことを確認した。

本報告書は、JPDRの解体実地試験における建家表面の除染と放射能測定に関する手順の検討結果、及び、その実施結果について記述したものである。

本研究は、特別会計による科学技術庁からの受託研究（平成6年度～平成7年度）として実施したものである。

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

**Decontamination and Radioactivity Measurement on Building Surfaces
Related to Dismantling of Japan Power Demonstration Reactor (JPDR)
(Contract Research)**

Mutsuo HATAKEYAMA, Mitsuo TACHIBANA and Satoshi YANAGIHARA

**Department of Decommissioning and Waste Management
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken**

(Received November 10, 1997)

In the final stage of dismantling activities for decommissioning a nuclear power plant, building structures have to be demolished to release the site for unrestricted use. Since building structures are generally made from massive reinforced concrete materials, it is not a rational way to treat all concrete materials arising from its demolition as radioactive waste. Segregation of radioactive parts from building structures is therefore indispensable. The rational procedures were studied for demolition of building structures by treating arising waste as non-radioactive materials, based on the concept established by Nuclear Safety Commission, then these were implemented in the following way by the JPDR dismantling demonstration project. Areas of the JPDR facilities are categorized into two groups : possibly contaminated areas, and possibly non-contaminated areas, based on the document of the reactor operation. Radioactivity on the building surfaces was then measured to confirm that the qualitative categorization is reasonable. After that, building surfaces were decontaminated in such a way that the contaminated layers were removed with enough margin to separate radioactive parts from non-radioactive building structures. Thought it might be possible to demolish the building structures by treating arising waste as non-radioactive materials,

This study was conducted during 1994 through 1995 under contract with Science and Technology Agency of Japan.

confirmation survey for radioactivity was conducted to show that there is no artificial radioactive nuclides produced by operation in the facility.

This report describes the procedures studied on measurement of radioactivity and decontamination, and the results of its implementation in the JPDR dismantling demonstration project.

Keywords :Decontamination, JPDR Decommissioning Program, Radioactive Waste, Control Area, Nuclear Power Plant, Decommissioning, Measurement of Radioactivity, Confirmation Survey of Radioactivity.

**NEXT PAGE(S)
left BLANK**

目 次

| | |
|---|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. JPDR 廃止措置プロジェクトの概要 | 2 |
| 2.1 JPDR | 2 |
| 2.2 JPDR 廃止措置プロジェクト | 3 |
| 2.3 放射性廃棄物でない廃棄物として建家を解体するための手順 | 4 |
| 3. 放射能の測定方法 | 5 |
| 3.1 汚染特性の把握 | 5 |
| 3.2 確認測定 | 6 |
| 4. 建家表面汚染分布の評価結果 | 8 |
| 4.1 使用履歴の調査 | 8 |
| 4.2 汚染平面図の作成 | 9 |
| 5. 除染作業 | 10 |
| 5.1 基本的な考え方 | 10 |
| 5.2 作業手順 | 11 |
| 5.3 除染作業 | 11 |
| 6. 放射能の確認測定 | 12 |
| 6.1 直接測定による測定結果 | 12 |
| 6.2 試料採取による測定結果 | 13 |
| 7. 考 察 | 14 |
| 7.1 汚染分布の評価方法に関する検討 | 14 |
| 7.2 作業の効率化に関する検討 | 14 |
| 7.3 作業手順に関する検討 | 15 |
| 8. 結 論 | 16 |
| 謝 辞 | 17 |
| 参考文献 | 18 |
| 付録Ⅰ 「放射性廃棄物でない廃棄物」として区分するための基本的な考え方の概要 .. | 37 |
| 付録Ⅱ 表面汚染簡易測定装置の概要 | 38 |
| 付録Ⅲ 表面汚染検査計（スケアラ方式）の検出限界計数率の算出方法 | 38 |
| 付録Ⅳ 代表的な除染装置の概要 | 39 |

Contents

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Outline of JPDR Decommissioning Project | 2 |
| 2.1 JPDR | 2 |
| 2.2 JPDR Decommissioning Project | 3 |
| 2.3 Procedures for Segregation of Radioactive Parts from Building Structures | 4 |
| 3. Method of Radioactivity Measurement | 5 |
| 3.1 Characterization of Contamination | 5 |
| 3.2 Confirmation Survey | 6 |
| 4. Distribution of Contamination on Building Surfaces | 8 |
| 4.1 Survey of Operation Records | 8 |
| 4.2 Mapping of Contamination | 9 |
| 5. Decontamination | 10 |
| 5.1 Basis for Decontamination | 10 |
| 5.2 Work Procedures | 11 |
| 5.3 Results of Decontamination | 11 |
| 6. Confirmation Survey of Radioactivity | 12 |
| 6.1 Direct Measurement | 12 |
| 6.2 Measurement by Samplings | 13 |
| 7. Discussions | 14 |
| 7.1 Evaluation of Contamination Distribution | 14 |
| 7.2 Evaluation of Work Efficiency | 14 |
| 7.3 Evaluation of Work Procedures | 15 |
| 8. Conclusions | 16 |
| Acknowledgments | 17 |
| References | 18 |
| Appendix I Basic Concept for Segmentation of Non-radioactive Waste | 37 |
| Appendix II Outline of Simplified Contamination Detector | 38 |
| Appendix III Method for Deriving of Detection Limit of Surface Contamination Detector | 38 |
| Appendix IV Outline of Decontamination Device | 39 |

1. はじめに

平成9年8月現在、我が国では51基の商業用原子力発電所が運転されている。これらのうち、最初に建設された東海発電所（炭酸ガス冷却炉）は既に30年以上の運転を経ており、主に経済的な理由により平成10年3月末までには運転を終了することが決められている。それ以外の原子力発電所についても、その寿命が30～40年と考えられており、早い時期に運転を始めたものについては、21世紀の初頭（2010年以降）には運転を停止して廃止措置をする必要があるものと考えられている⁽¹⁾。

このような背景において、将来の商業用原子力発電所の廃止措置を考慮し、日本原子力研究所（原研）のJPDR（動力試験炉：Japan Power Demonstration Reactor）を用いた廃止措置プロジェクトが昭和56年から開始された⁽²⁾。本プロジェクトは原子力発電所の廃止措置に必要となる技術の開発（第1期計画）と、開発した技術を適用してJPDRを解体する解体実地試験（第2期計画）に分けられる。第2期計画は昭和61年12月から開始され、平成7年及び8年には建家の解体を行い、その跡地の整地を平成8年3月までに終え、解体実地試験を完了した⁽³⁾。

解体実地試験は、JPDRに存在する放射化あるいは放射能汚染した機器や構造物を全て取り除き、主要な建物を撤去し、その跡地を他の目的に使用可能な状態に出来ることの実証を目的とした。このため、炉心部近傍の機器は各種切断装置と遠隔操作機器を用いて解体し、容器に収納した後、原研の廃棄物管理施設に保管した。また、管理区域に存在したタービン、ポンプ、タンク等の機器についても、放射性廃棄物として取り扱う必要があるものについては、容器に収納するか、大型の機器は梱包して、上述した廃棄物管理施設に保管した。

しかし、原子炉格納容器やタービン建家のように建家構造物については、その全てを放射性廃棄物として取り扱うことは合理的でない。すなわち、建家表面の汚染部分を除去することにより、放射性物質を取り除いた後の構造物については「放射性廃棄物でない廃棄物」として取り扱うことを前提にして解体することがより合理的である。本プロジェクトが開始された当初は、放射性廃棄物と「放射性廃棄物でない廃棄物」とを区分するための「区分値」が将来決められることを想定して、施設内の放射能汚染を詳細に調査した。しかし、本プロジェクトの期間中には「区分値」は決定されず、原子力安全委員会により「放射性廃棄物でない廃棄物」を分離するための基本的な考え方のみが示された⁽⁴⁾。この考え方は、必ずしも「放射性廃棄物でない廃棄物」を放射性廃棄物と分離するための実際的な方法を示すものではない。

一方、解体実地試験の最終工程では、建家を解体するに当たり、放射性廃棄物と「放射性廃棄物でない廃棄物」を分離するための実際の手順が必要であった。そこで、機器や構造物全体の放射能の測定以前に、定性的に「放射能汚染の可能性のない領域」を特定することを試みた。その後、建家の全表面に対して詳細な放射能測定を行い、定性的に特定した「放射能汚染の可能性のない領域」が測定結果と一致していることを確認するとともに、汚染領域については汚染の特徴を評価するための詳細測定を実施した。さらに、この結果に基づいて、明らかに汚染がないと考えられる領域のみを残すために汚染領域に安全余裕を加味した除染範囲を設定し、各種工具を用いて除染作業を実施した。これにより、残存する建家構造物を「放射性廃棄物でない廃棄物」とすることを前提に解体することが可能になったと考えたが、念のため、表面汚染計により建家全表面の放射能測定を行い、除染が予定通り実施出来ていることを確認した。さらに、特定領域から試料を採取し、その放射能測定により3

Bq/kg までの範囲で、運転によって生じた放射性核種が残存しないことを確認した。これにより、建家を解体し、その廃棄物を「放射性廃棄物でない廃棄物」として扱うことが可能になった。また、最終的には監督官庁により、測定結果の確認及び部分的な放射能測定が行われ、その結果、建家の解体に伴って発生する廃棄物を「放射性廃棄物でない廃棄物」として扱うことが了承された。

本報告書は、JPDR 廃止措置プロジェクトの最終段階における建家表面の除染と放射能測定に関する手順の検討結果、及び、作業の実施結果についてまとめたものである。

2. JPDR 廃止措置プロジェクトの概要

2.1 JPDR

JPDR は、熱出力が 45MWt (JPDR-II は 90MWt)、電気出力が 12.5MWe の、我が国で初めて建設された沸騰水型発電用原子炉である。JPDR 建設の目的は以下の通りである。

- 動力炉プラントの建設、運転及び保守に関して一貫した実際の経験を得る。
- 動力用原子炉系の特性を把握するための試験を行う。
- 燃料要素の性能試験、国産部品の特性試験、寿命試験を行う。

JPDR は、昭和 38 年 8 月の初臨界から昭和 51 年 3 月の運転停止まで約 17,000 時間 (1.3EFPY) 運転され、この間の発電量は約 140MWe 時であった。JPDR の運転期間は昭和 38 年 8 月から昭和 44 年 3 月まで (JPDR-I) と昭和 47 年 2 月から昭和 51 年 3 月まで (JPDR-II) に分類することができる。JPDR-I の運転終了後、その出力を倍にするために強制循環ポンプの増設等の改造工事を行い、JPDR-II として再度運転を開始した。この改造に伴い、発電に使用しない熱 (タービンはそのままのものを使用) を放出するためのダンプコンデンサを増設した。JPDR-II は昭和 51 年 3 月まで運転を継続したが、制御棒駆動装置の故障、ダンプコンデンサ減温管の破損など多くのトラブルを経験し、最終的には JPDR が新しい型の軽水炉を対象にした研究には合致せず、その役割を既に終了したと判断されたことから運転の最終停止が決められた。

表 1 に JPDR の主要な仕様、また、図 1 に JPDR 施設の概略を示す。JPDR は、原子炉格納容器、制御建家、タービン建家、廃棄物処理建家 (I, II)、排風機建家 (I, II)、燃料貯蔵建家、緊急用建家、非常用換気建家、ダンプコンデンサ建家から構成されている。なお、ダンプコンデンサ建家は JPDR-II の改造時に建設されたものである。建家の概略を以下に記す。

- 原子炉格納容器：原子炉圧力容器、生体遮へい体の他、主蒸気系、燃料プール水浄化系、制御棒シール水系、強制循環水系等の配管及びそれに付属する機器から構成される。
- 制御建家：中央制御室、電源設備を収納した電気室、水質分析のための化学実験室、放射線管理のための測定室、点検保守のための工作工場から構成される。
- タービン建家：タービン発電機、主蒸気系、給水系、復水系、原子炉水浄化系等に関する機器や配管から構成される。
- 廃棄物処理建家 (I, II)：廃水系、汚水系の放射性液体を処理する機器等から構成される。

- 排風機建家：排風機、ダクトチャンバー、主排気筒から構成される。
- 燃料貯蔵建家：使用済燃料貯蔵プール、プール水の浄化系、換気系から構成される。
- 緊急用建家：二次スプレイ系復水器、既設消火系ポンプ、クーリングタワー等から構成される。
- ダンプコンデンサ建家：主蒸気系、給水系、復水系等に関する機器・配管から構成される。
- 非常用換気建家：異常時における原子炉格納容器の換気用ファン、フィルタチャンバー等から構成される。

2.2 JPDR 廃止措置プロジェクト

JPDR 廃止措置プロジェクトは 2 段階に分けて実施された。第 1 期計画では、解体に係わる各種要素技術の開発を行い、第 2 期計画では、第 1 期計画で開発した技術を適用して発電炉の安全な解体が可能であることを実証するための解体実地試験を行った。以下に各計画の概要を記す。

(1) 第 1 期計画（原子炉解体技術開発）

運転を終了した原子炉施設には、放射化あるいは放射能汚染した機器・構造物が存在するため、これらを解体する場合には、作業員の被ばく低減、解体作業の効率化等を図る観点から、遠隔解体技術を中心とする種々の解体技術が必要となる。このため、JPDR の解体に先立ち、8 項目からなる原子炉解体技術の開発を行った⁽⁵⁾。開発項目は以下の通りである。

- 解体システムエンジニアリング：原子炉施設の解体計画の作成、解体管理データの予測に適用する計算コードシステムの開発、JPDR 解体作業データの収集と分析
- 放射能インベントリ評価技術：原子炉施設内に存在する機器の放射化量を計算するプログラムの開発及び汚染放射能の測定による評価
- 放射能汚染非破壊測定技術：配管内部の放射能汚染の非破壊測定技術、遠隔操作法による炉内構造物の放射能測定技術の開発
- 解体工法・解体機器：プラズマアーク切断、アークソー切断、成型爆薬、水ジェット切断等、遠隔による金属機器及びコンクリート構造物の解体工法の開発
- 解体関連除染技術：化学除染を中心とした系統除染技術、マイクロ波によるコンクリート表面の除染技術等の開発
- 解体廃棄物の処理・処分技術：金属廃棄物の圧縮減容技術、表面汚染の固定技術等の開発、廃棄物の発生量の予測評価等
- 放射線管理技術：搬出物品自動汚染測定装置、高放射線量率遠隔測定装置等の開発、及び、放射能の環境影響評価等
- 解体遠隔操作技術：高放射線環境下での作業を遠隔操作で行う解体作業ロボットの開発

以上の原子炉解体技術の開発の結果については、開発から 5 年を経過した時点、すなわち解体実地試験が開始される前に原研内部に設けられた検討委員会によって評価が行われた。この結果、これらの技術は JPDR の解体に適用可能であるとの結論が得られた。これに基づき昭和 61 年からこれらの技術を用いて JPDR の解体実地試験を開始した。

(2) 第2期計画（解体実地試験）

第1期計画の技術の成果を踏まえて、昭和61年12月に解体実地試験を開始した。解体実地試験では、まず、炉内構造物や原子炉压力容器等の高放射化物を解体する準備として、解体物の収納スペースの確保、作業員の被ばく低減のための解体前系統除染等を行った。続いて、原子炉格納容器3階のサービスフロアに遠隔解体装置を据え付け、炉内構造物、原子炉压力容器接続配管、原子炉压力容器、生体遮へい体の撤去を順次行った。また、遠隔解体装置を用いたこれらの解体作業と並行して、各建家の残存機器を撤去した。その後、建家表面の除染を行い、有意な放射性汚染が存在しないことを確認した後建家を撤去した。また、建家の地下構造物の撤去部分は埋め戻し、跡地を整地して美観を整えた⁽³⁾。

2.3 放射性廃棄物でない廃棄物として建家を解体するための手順

解体実地試験において、22,000トン以上の解体廃棄物が発生し、その大部分は建家構造物のコンクリートで占められることが予想された。これらの多くは放射能汚染しておらず、また、放射化もしていないことが明らかであり、これらを全て放射性廃棄物として取り扱うのはあまりにも非効率的であった。そこで、原子力安全委員会によって示された考え方を根拠にして「放射性廃棄物でない廃棄物」と放射性廃棄物を分離する方法を検討した。

この結果、建家の解体に際して、JPDRの運転から生じた放射性核種を施設に残さないこととし、このためには、汚染した部分とそうでない部分とを明らかに分離することとした。また、最終的には、原子炉の運転によって生じた放射性核種が十分に撤去されていることを測定によって確認することとした。そこで、表面汚染計により建家全面の測定を行い、全表面の測定値が表面汚染計の検出限界表面密度以下（約0.3Bq/cm²）であることを確認した。さらに、「環境放射線モニタリングに関する指針について」に例示されている「土壌・海底土についての定量可能レベル（3Bq/kg）の放射能濃度を検出できる装置を用いて二次的汚染による核種が検出されないこと」⁽⁶⁾を適用して上述した表面汚染計の測定結果を再度確認することとした。

上述した手順を実施する上で、放射能測定の効率化を図り、また、汚染の存在する領域のみを除染することが必要である。そこで、合理的な放射能の測定方法及び建家表面の除染方法について検討し、以下の項目毎に作業を実施することとした。

- 施設の使用履歴に基づく非汚染領域の同定
- 放射能測定による汚染領域の特定とその特性の評価
- 汚染部の分離（除染）
- 放射能の確認測定

ここで「放射能測定による汚染領域の特定とその特性の評価」においては、採取した試料の放射能濃度の測定により汚染領域を決定した後、その汚染の深さの程度、また汚染核種を決定した。この結果は、「汚染部の分離」作業の計画作成に反映するとともに、除染作業では、汚染深さの程度に応じて十分に余裕を持って汚染部分を分離した。この作業により、運転によって生じた放射性核種を全て除去したものと考えたが、念のため、その確認測定を行った。「放射能の確認測定」は、建家表面に

二次的な汚染のないことを確認するためのものであり、除染の終了した領域を含め管理区域内の全表面について表面汚染計による直接測定を行った。また、この結果を検証するために試料採取による測定法も用いた。解体作業（原研）において測定を行って運転によって生じた全ての放射性核種が除去されていることを確認した後、再度、監督官庁によりチェックがなされた。この検査により、上述した条件が満たされていることを確認し、保安規定を変更して建家の解体を実施した。なお、建家の解体によって発生した廃棄物はすべて「放射性廃棄物でない廃棄物」として取り扱った。

3. 放射能の測定方法

第2章で述べた、発生する廃棄物を「放射性廃棄物でない廃棄物」とすることを前提に建家を解体撤去する手順においては、建家表面の除染を実施する前の汚染特性の把握、また、その後における放射能の確認測定等、合理的かつ精度良い放射能測定が必要である。そこで、スコーピング測定、詳細測定の2段階を経て除染範囲を決定するとともに、除染作業後は確認測定により、原子炉の運転で発生した放射性核種が十分に除去されていることを明らかにした。放射能測定に関しては2段階の手順を経ており、重複する部分もあるが、これは基本的な測定結果が十分に精度あるものかを確認する目的で実施している。本章ではこれらの放射能の測定方法について述べる。

3.1 汚染特性の把握

(1) スコーピング測定

建家表面の汚染特性を明らかにするスコーピング測定では以下の方法により放射能を測定した。すなわち、床面の放射能測定では格子状に約2m間隔に1点、壁面の放射能測定では床面からの高さ約1mの位置で約2m間隔に1点、ドリルによりそれぞれ1cm深さのコンクリート粉（約10～15g）を採取した。試料は施設全体で約2,000箇所から採取し、採取したコンクリート粉は全て放射能測定用の容器に詰め、測定試料とした。試料の放射線測定にはNaI(Tl)型検出器—計数装置（アロカ社製のサンプルチェンジャー型：JDC-R74-1456）を用い、30keVから2,000keVの範囲の γ 線を測定し、その結果を ^{60}Co の放射能濃度に換算した。試料に汚染があると判断した場合には、その試料を採取した場所の深さ方向について更に1cm分の試料を採取し、深さ方向に関する汚染分布の情報を取得した。なお、測定装置の校正には、試料と同等の型状をしたコンクリート粉（10g）に既知放射能濃度（376Bq）の ^{60}Co を均一に混ぜて作成した線源を用いた。

他方、試料の測定結果を基準値（バックグラウンドレベル：コンクリート中に存在する天然の放射能）と比較することにより有意な汚染の有無を判定した。基準値は次のように測定した。すなわち、JPDR施設の各所（管理区域を含めた汚染の可能性のない部分）から20個の試料を採取し、この試料に関して全 γ 放射線を測定してその結果を ^{60}Co の放射能濃度に換算した。

(2) 詳細測定

除染計画の作成においては、上述したスコーピング測定で十分な情報を得ることができたが、施設内の汚染の特性（核種、汚染深さ）を詳細に調べることを目的にし、汚染深さと放射性核種の特性を

実施した。まず、汚染が無いことが判明した領域において、機器の配置状況や領域の構造上、その領域の中で最も汚染の可能性のある箇所を選定し、その箇所の約 0.5m^2 ($70\text{cm} \times 70\text{cm}$) について約 2mm 厚さで建家表面を研削し、粉状の試料を採取した。採取した試料は、良く混合した後、四分法⁽⁷⁾を用いて縮分した。放射能測定用の試料は 1kg とし、ポリエチレン容器 (高さ約 150mm 、直径約 100mm) に入れて測定した。

スコーピング測定により汚染があると判断した領域においては、その中で最大の浸透深さを示す箇所の近くから内径約 47mm のボーリング機を用いて $100\sim 150\text{mm}$ の深さで試料を採取した。採取した試料は、表面から 20mm の範囲については、 1mm 毎に研削により粉状試料に、それ以降については 10mm 毎に切断により円盤状試料に加工した。試料の採取方法と試料の形状を図 2 に示す。採取した試料は、ピュアゲルマニウム半導体検出器一波高分析器 (Canberra 社製、型式:7229P7500S-2019) を用いて $30,000$ 秒から $80,000$ 秒間の放射能測定を行った。表 2 に放射線測定装置の性能を、また、表 3 に検出限界値を示す。

3.2 確認測定

確認測定とは、建家表面の除染が終了した後、汚染部分が完全に除去されていること、すなわち、原子炉の運転で生じた放射性核種が除去されていることを確認するための放射能測定である。測定は直接測定と試料採取測定に分けられる。ここで直接測定とは表面汚染計 (表面汚染検査計、大面積表面汚染検査計、表面汚染簡易測定装置^{註1}) により建家表面の全面について実施した測定であり、 β 及び γ 線を測定した (β 線の機器効率約 20% 、 γ 線の検出効率は数%である)。試料採取測定とは領域毎に試料採取してその γ 線スペクトル分析により核種毎の存在量を定量したものである。汚染部分が完全に除去されていることを確認するためには直接測定で十分であり、この方法による測定結果が信頼できることを確認する目的で試料採取測定を実施した。以下に 2 種類の測定方法の詳細を記す。

(1) 直接測定

直接測定には、原研が開発した表面汚染簡易測定装置 (検出器寸法: $90\text{cm} \times 90\text{cm}$)、大面積汚染表面汚染検査計、市販の表面汚染検査計を用いた。測定は以下の手順により実施した。

- 測定の対象となる全施設について測定計画図 ($80\text{cm} \times 80\text{cm}$ のグリッド図) の作成
- 真空掃除機 (HEPA フィルター付き)、紙タオル等による測定対象領域の清掃
- 黒墨等による測定計画線 ($80\text{cm} \times 80\text{cm}$) の作成
- 測定対象面の放射能測定

なお、測定計画図において測定区画を $80\text{cm} \times 80\text{cm}$ にしたのは、表面汚染簡易測定装置を用いた測定において各方向に 5cm オーバーラップさせることを前提としたためである。また、コンクリート中に含まれるウラン、トリウム等の壊変系列核種 (主にガス状の生成核種及びその壊変系列核種) の影響を受け、建家内の自然計数率が上昇するため、測定開始 1 時間前に仮設の換気装置を作動した。

^{註1} 本装置の仕様に関しては付録 II 参照。

表面汚染検査計を用いた場合は、一区画(80cm×80cm)内を約1~2分程度スキャンしながら、最大計数率を示すポイントを探し、そのポイントで約30秒間の測定を行い、その測定値を記録した。測定に適用した各表面汚染計の性能を表4に示す。

表面汚染計による汚染の有無は、自然計数率の統計的変動と区別して検出できる最少の計数率(以下「検出限界計数率」という)を超えないことを基準として判定した。主に測定に用いた表面汚染検査計(レートメーター方式)の検出限界計数率は、(1)式により求めた。なお、他の汚染検査計(スケラ方式)の検出限界計数率の算出方法は付録Ⅲに示すとおりである。

$$n_d \geq \frac{k}{2} \left[\frac{k}{2\tau_s} + \sqrt{\left[\frac{k}{2\tau_s} \right]^2 + 2n_b \left[\frac{1}{\tau_s} + \frac{1}{\tau_b} \right]} \right] \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

- n_d : 検出限界計数率 (cps)
- τ_s : 試料測定時の時定数 (10秒)
- τ_b : 自然計数率測定時の時定数 (10秒)
- n_b : 自然計数率 (cps)
- k : 3 (検出限界計数率を自然計数率の標準偏差の3倍に相当する計数率と定義するため)

汚染の有無は次式により判定した。

$$n_d \geq n_s - n_b \dots\dots\dots (2)$$

ここで n_s は測定値である。尚、検出限界表面密度は n_d を用いて次式により求めた。

$$A_d = \frac{n_d}{\epsilon_i \times W \times \epsilon_s} \dots\dots\dots (3)$$

- ここで、 A_d : 検出限界表面密度 (Bq/cm²)
- ϵ_i : 機器効率 (=0.27)
- ϵ_s : 線源効率 (=0.25)
- W : 検出窓面積 (=164cm²)

なお、 ϵ_i は、⁶⁰Co の標準線源を用いて求め、 ϵ_s は ⁶⁰Co のβ線の最大エネルギー 0.318MeV (<0.4MeV) から0.25とした。

(2) 試料採取測定

上述した直接測定の検出限界表面密度は約0.3Bq/cm²であった。この結果、建家の表面密度は検出限界表面密度以下であることを証明できるが、原子炉の運転で生じた放射性核種を含まないということは不可能である。そこで、試料採取による放射能測定を行い、より低いレベルまで放射性核種がないことを確認した。試料採取による測定は、領域毎にコンクリート粉を採取し、その放射能濃度をビュアゲルマニウム半導体検出器・波高分析器により測定した。表5に測定装置の仕様を示す。試料の採

取は以下の領域とした。

- 埋設配管等の影響で検出限界計数率を越える測定区画
- 1cm 以上の浸透除染領域について 10m² 毎
- 表面除染領域の代表点表面 (80cm×80cm)

なお、コンクリート粉はそれぞれの箇所から表面研削機を用いて採取した。すなわち、上述した領域の全面に対して均等に試料を集めたことになる。採取した試料から 300g のコンクリート粉をプラスチック容器 (高さ約 6cm、直径約 9.5cm) に入れ約 8,000 秒間測定した。この測定時間は、「環境放射線モニタリングに関する指針について」に例示されている「土壌・海底土についての定量可能レベル(3Bq/kg)の放射能濃度を検出できる装置を用いて二次的汚染による核種が検出されないこと」⁽⁶⁾ を満足する条件として定めたものである。

4. 建家表面汚染分布の評価結果

4.1 使用履歴の調査

建家表面の汚染は、系統機器から漏洩した放射性媒体によって生じることが多いと考えられるため、原子炉の運転記録から「漏洩に関する事象」を領域毎に抜粋し、これらの記録に基づいて「汚染の可能性のある領域」と「汚染の可能性がない領域」とに区分した。ここで「漏洩に関する事象」とは、JPDR 施設内で発生した系統機器のポンプ、グランドシール部 (パッキン押さえ)、弁のパッキング部及び監視用計器等からの漏水や定期点検、燃料交換等の作業に伴って発生した床・壁・天井の汚染の可能性のある事象である。これらの事象を調査するため、機器の設置状況と、JPDR 原子炉運転記録 (約 25,000 頁)^{註1}、JPDR 四半期報告書 (約 4,000 頁)^{註1}、技術速報 (約 3,000 頁)^{註1}に記載されていた記録の中から「漏洩に関する事象」を領域毎に抜粋した。なお、これらの記録は昭和 38 年の原子炉運転開始から昭和 60 年までのものを対象とした。原子炉の運転状況と月別の「漏洩に関する事象」の発生件数を図 3 に示す。

抜粋した「漏洩に関する事象」は施設全体で 1,290 件であった。その内訳についてみると、原子炉の運転期間中には、主蒸気系、タービン系、制御棒シール系弁類のグランドシール部からの漏洩が主であり、原子炉停止中には、原子炉停止時熱交換器系、燃料プール水浄化系、液体廃棄物処理系のポンプや弁類のグランドからの漏洩が主であった。これらの系統からの漏洩は全体の 56% を占めた。

なお、汚染が明らかであった事象はこのうち 211 件 (全体の 16%) であり、それは原子炉の運転期間中に限らず満遍なく発生していた (図 3 参照)。その特徴についてみると、汚染は原子炉の運転中に一次冷却水系弁から漏洩した放射性液体に起因するものと、定期検査や自主点検時に誤って放射性液体等を施設に拡散させたものが主であった。これらの汚染は短期間で取り除かれ、一部を除いて、

註1 これらの報告書は JPDR の運転期間中における運転・試験等の記録をまとめたものであり、未公開の資料として JPDR に保管されている。

汚染区域と特定する必要がなかったものである。空気汚染は次に示す原因で生じていた。

- 通常運転時の主蒸気系からの漏洩
- 破損燃料検出試験時の低出力運転（原子炉压力容器の上蓋開放）
- 原子炉停止直後の燃料体の交換作業

JPDR 運転の報告書によると、上記汚染は系統機器から漏洩した放射性媒体の放射能濃度によってその程度に大きな相違があった。床汚染については、漏洩液体の放射能濃度が $3.7 \times 10^3 \text{Bq/cm}^3$ から $3.7 \times 10^2 \text{Bq/cm}^3$ の範囲、表面密度が $1.6 \times 10^1 \text{Bq/cm}^2$ から $3.3 \times 10^0 \text{Bq/cm}^2$ の範囲にあり、比較的半減期の短い ^{24}Na 、 ^{42}K 、 ^{51}Cr 、 ^{56}Mn 、 ^{58}Co 、 ^{60}Co 、 ^{64}Cu が主であった。また、空気汚染については、漏洩部近傍のガスの放射能濃度が $3.7 \times 10^2 \text{Bq/cm}^3$ から $3.7 \times 10^5 \text{Bq/cm}^3$ 、ダストの放射能濃度が $3.7 \times 10^0 \text{Bq/cm}^3$ から $3.7 \times 10^5 \text{Bq/cm}^3$ であり、ガス中の放射性核種は ^{13}N 、 ^{18}F 、及び Kr と Xe の放射性同位体、ダスト中の放射性核種は Rb と Cs の放射性同位体が大部分を占めた。

「漏洩に関する事象」の調査結果を基にして、領域（一般的には部屋）の幾つかの部分、すなわち、床、壁（4面）、天井について「汚染のないことが明らかな部分（以下「汚染の可能性のない部分」という）」と「汚染がないことが明らかとは言えない部分（以下「汚染の可能性のある部分」という）」とに分類した。この分類においては、機器の使用状況と設置場所に関する情報から、汚染機器が存在しない領域で、かつ、汚染の履歴のない床・壁・天井を抽出した。これに相当する領域としては電気室、制御室をあげることができる。他方、汚染機器が存在する領域については、次のような事象が確認された場所を「汚染の可能性のある部分」とした。

- 放射性の液体が滴下した事象がある場合は、その散乱の可能性のある床
- 放射性の液体が漏出した事象がある場合は、その領域の床全体と壁の一部
- 放射性の蒸気が噴出した事象がある場合は、その領域全体（床・壁・天井）

以上のような事象が存在しない領域については、内面の汚染が認められる機器が存在していても「汚染の可能性のない部分」に分類した。この結果、原子炉格納容器、タービン建家、廃棄物処理建家の殆どの領域が汚染の可能性のある部分であり、制御建家の殆どの領域が汚染の可能性のない部分として分類できた。表6に「漏洩に関する事象」の調査結果のうち汚染のある可能性が明らかであった例（タービン建家地下1階領域）を示す。また、表7に「汚染の可能性のある部分」と「汚染の可能性のない部分」との分類結果の例を示す。

4.2 汚染平面図の作成

上述した使用履歴に基づく「汚染の可能性のある部分」の分類結果の信頼性を確認するため、スクーピング測定及び詳細測定による結果から汚染平面図を作成した。以下にその結果を示す。

(1) 汚染判定基準値

試料の採取により領域毎に汚染の有無を判定するためには、天然放射性核種の存在量を明らかにする必要がある。そこで、管理区域内では「汚染の可能性のない部分」、非管理区域では電気室等から

試料を採取し、その放射能濃度（バックグラウンド）を測定した。結果を表 8 及び図 4 に示す。この結果、バックグラウンドに寄与する主な天然の放射性核種は ^{40}K であった。また、バックグラウンド全体の放射能濃度を ^{60}Co の放射能濃度に換算すると平均 0.093Bq/g （標準偏差 0.030Bq/g ）であった。この結果から、平均放射能濃度に標準偏差の 3 倍を加えた値（ 0.183Bq/g ）を汚染判定基準値とした。

(2) スコーピング測定の結果

全 γ 放射能の測定により、「汚染の可能性がある部分」について汚染の範囲と深さを特定した。スコーピング測定用のサンプルは面積 4m^2 （ $2\text{m} \times 2\text{m}$ ）の領域から各 1 個を採取しているため、この精度で汚染分布の評価が可能となった。図 5 に汚染分布図の例を示す。

(3) 詳細測定の結果

γ 線スペクトル分析により汚染核種を同定するとともに、汚染深さ（浸透汚染深さ）及び汚染の範囲をより詳細に評価した。この結果、汚染核種は、 ^{60}Co と ^{137}Cs であることが分かった。但し、 ^{137}Cs は、液体廃棄物処理系、燃料プール水処理系等の一部でのみ検出された。また、スコーピング測定で汚染が無いと判断した $2\text{m} \times 2\text{m}$ の範囲について、さらに汚染部分が存在しないかを調べた。この結果、スコーピング測定で汚染無しと判断した領域の約 2%において汚染が測定された。その汚染の深さは大部分が 2mm 以下であった。例えば、廃棄物処理建家ポンプ室壁では、小面積（約 1m^2 ）の汚染が測定され、その領域では、表面の塗膜層とその下部数 mm が汚染していた。しかし、殆どの領域では塗膜層においても汚染が検出されなかった。他方、浸透汚染部は、塗膜層が不完全な部分に多く見られ汚染深さは最大でも 4cm であった。

図 6 にスコーピング測定の結果とその近傍から採取したコア試料の放射能測定結果を示す。本図に示すように、汚染の核種は ^{60}Co と ^{137}Cs であり、その床表面の浸透深さは明らかに限定していた。すなわち、コンクリート構造物の汚染については、放射性核種の存在部分とそうでない部分とを測定により明確に分離できることが明らかになった。スコーピング測定及び詳細測定の結果を基にして、JPDR の全施設に関して領域毎の汚染マップを作成した。図 7 に汚染マップの例を示す。

5. 除染作業

5.1 基本的な考え方

前述したように、JPDR 施設の全域について、床・壁・天井の単位面積（ 4m^2 ： $2\text{m} \times 2\text{m}$ ）とその深さ方向に対して、放射能汚染の有無を同定することができた。そこで、この同定した汚染領域を効率良く分離するため、各種除染工具を用いて除染作業を行った。作業の基本的方針は以下の通りである。

- 詳細測定で汚染が検出されなかった領域の深さ 2mm を剥離する。
- 詳細測定で汚染が検出された領域は、汚染の検出されなくなった深さの 2 倍を剥離する。
- 浸透汚染部については、スコーピング測定で特定した汚染深さに 5mm を加えた層を剥離する。

浸透汚染に関しては、スコーピング測定と詳細測定の結果を比較し、前者が常により深い汚染深さを示していることから、余裕をとってスコーピング測定の結果を基本とすることとした。なお、「汚染の可能性のない部分」の床についても、念のため表面を除染することとした。

5.2 作業手順

除染作業においては、剥離により発生するコンクリート粉塵による再汚染を防止することが必要である。このため、粉塵飛散防止用の集塵機能を具備したスクャブラ^{註1}、ショットブラスト^{註1}、サンドブラスト^{註1}、プレーナー^{註1}及びニードルガン^{註1}の各除染装置と局所集塵機を付加したグラインダ、ブレーカ等の既存工具を用いた。作業手順は以下の通りである。

- 除染領域の再汚染を防止するため、グリーンハウス及び局所換気装置を設置した。
- グリーンハウス内にダストモニタを設置し、再汚染の監視を行った。
- 領域毎に除染計画書に基づき剥離範囲及び深さのマーキングを行った。
- 予め作成したマーキング（塗布したペイント）が除去されるまで除染した。
- 除染が終了した領域については、ロープ等により人の立ち入り制限を行った。

なお、マーキングについては、表面のみを剥離する部分では、表面にスプレーペイントで、また、浸透汚染部は剥離深さをドリリングし、穴底にペイントを塗布した。除染作業では、剥離片の拡散による再汚染を防止するため、浸透汚染部と表面のみ剥離する部分を分けて行った。まず、浸透汚染を優先し、領域毎に放射能濃度の高い部分から行った。つづいて、表面のみを剥離する部分では、天井、壁、床等、位置的に高い部位から行った。最終的に領域の清掃及び片づけを行って作業を終了した。

除染作業を行う作業員は、汚染したコンクリート粉塵を吸入したり、体に付着するのを防止するために、汚染の程度や除染工法にあわせて全面マスク又は半面マスクを付け、タイベックスーツを着用した。

5.3 除染作業

図8に建家別の除染面積の内訳を示す。除染面積はJPDR施設全表面積（23,817 m²）の約43%に当たる10,135 m²であり、その内訳は、タービン建家が23.2%、制御建家と排風機建家が各々10.6%、廃棄物処理建家が8.4%、原子炉格納容器が5.8%、緊急用建家が1.0%で屋外が残りの34.9%であった。また、除染を行った部位別では、床が約7,300 m²（屋外の管理区域を含む）、壁が約2,500 m²、天井が約280 m²であった。

他方、表面のみを剥離した部分と浸透汚染を剥離した部分の建家毎の部位別の除染面積の内訳を図9に示す。表面のみを剥離した面積は、全除染面積（10,135 m²）の約84%であり、浸透汚染を剥離した面積は全体の約16%であった。原子炉格納容器についてみると、表面のみを剥離した部分と浸透汚染を剥離した部分が半分ずつであった。ただし、床の大部分が浸透剥離部分であった。また、浸透汚染を剥離した部分は、タービン建家が他の建家に比べて多くなっているが、タービン建家の面積が大

^{註1} これらの除染工法の概要は付録IVに示す通りである。

きいため、建家全体の約 10%であった。

除染作業では、作業場所や剥離深さにあわせて各種の装置を選定した。平坦で表面の剥離を行う場合には、駆動力のある半自動化されたショットブラストやブレーナーを使用し、剥離の深い部分は、手動操作のブレーカーやスクャブラを使用した。また、基礎架台の周辺やコーナー部分の除染には、取扱の容易なニードルガンやグラインダーを使用した。サンドブラストは、主に壁、天井の剥離を行う場合に使用した。

一般的には、除染作業は通常の解体作業とほぼ同様の作業員構成（監督：1人、放管：1人、作業員：3人）で実施した。このうち作業員は、除染装置本体の操作、集塵機の運転と補助者に分けられる。

一方、サンドブラストは、他の装置と異なり、一カ所に装置を設置し、ブラストホースと粉塵回収用のホースの2本を除染対象エリアまで運ぶことにより作業を行った。しかし、サンドブラスト装置を運転するには、装置の操作、ホースの引き回し、ブラストガンの操作とその補助者の5人が必要であった。

除染に使用した装置の効率を表9に示す。表面のみを剥離した時の各除染装置の効率は、ショットブラスト、サンドブラスト、グラインダーの順で良かった。ただし、ショットブラストでみると広い部分では、このように良いが装置の仕様上狭いところでは使用できない。

表10に浸透汚染の剥離に用いた装置の効率を示す。表からブレーカーが最も効率の良いことがわかる。しかし、ブレーカーによる除染では、コンクリート表面数cmにあるモルタル層全てを一気に剥離してしまい、作業は短時間に終了したが、廃棄物量を増大する事となった。また、スクャブラは、使い勝手が良かったため、1cm以上の深さに対する除染には出来る限りスクャブラを用いていたが、除染速度がかなり落ちるため、既存のブレーカー等を併用した。また、隅部等の作業は、グラインダ、ニードルガン等を用いたが、他の部分の除染作業に比べて、予想以上に時間を要した。

図10に建家別の除染作業の効率を示す。除染作業で要した作業員数は、11,219人・日であった。このうちタービン建家での除染作業は34.8%で、原子炉格納容器では20.8%、廃棄物処理建家では、12.7%であった。

6. 放射能の確認測定

6.1 直接測定による測定結果

直接測定による確認測定の結果を表11に示す。本表に示すように屋外も含めてJPDR全施設を測定の対象とし、その面積は約23,800m²であり、また、その測定点数は約67,800点であった。図11に測定結果の一例を示す。本図に示すように、直接測定においては、汚染有無の判定基準となる自然計数率が領域及び測定対象面毎に微妙に異なることが判明した。そのため、統一した自然計数率を用いて汚染の有無を判定することは、正確性を欠くことになるかと判断し、測定対象領域の床、壁及び天井毎にその自然計数率の平均値を用いた。

また、測定時に建家の換気系が作動していないとコンクリート中のウラン、トリウム等の壊変系列核種の影響を受け、建家内の自然計数率が上昇し真の表面密度を得ることができなかった。そのため、

測定領域の容積や換気系の能力等により異なるが、測定を開始する約1時間前から仮設の換気装置を作動させておく必要があった。なお、生体遮へい体の解体作業において、作業員がダストモニタの点検を終え、管理区域を退出する際に、ハンドフットモニタによる測定においても同様の理由による異常が認められた。

直接測定によって汚染が検出された箇所は以下の特徴を有していた。

廃棄物処理建家濾過物貯蔵タンク（1A室）の隅部

過去に汚染が生じたが、除染が不可能であったため、床に約10cmのモルタルを敷き詰めた箇所があった。スコーピング測定により汚染の深さ等の情報を得て汚染部分を剥離した。床の隅部には側溝があり、この表面も除染したが、さらに下方に古い側溝が残っており、この汚染が検出された。

タービン建家地下1階床の一部

直接測定によって床の一部にスポット状の汚染が検出された。この原因は、除染作業の終了後、放射性液体で満たされた多数のポリエチレン瓶をビニール袋に入れてこの領域に一時的に保管しており、その際に放射性液体が漏洩したことによると考えられる。これらは炉内構造物の一部から採取した試料を酸で溶解したものである。保管した床には外径約1cm、深さ約4cmの大きさに酸と反応した痕跡が数点認められた。

タービン建家コンタミトンネル壁の一部

この領域では、原子炉水ブローダウン系バルブから放射性液体が漏洩し、床が汚染した事象が確認された。スコーピング測定においては、床からの高さ1mの位置で測定を行い、汚染が検出されなかったが、直接測定では床からの高さが1m以上の位置で汚染が確認された。

6.2 試料採取による測定結果

測定の結果、 ^{60}Co は全ての試料から検出されなかった。しかし、一部の領域では ^{137}Cs の検出された箇所が存在した。これらの箇所における使用履歴の調査及び汚染測定から判断して、検出された ^{137}Cs は、すべてフォールアウトに起因するものであった。また、直接測定では、一部の領域で自然計数率以上の値を記録したが、その場合は試料採取によってその原因を検討した。この結果、埋設配管の影響を受けて周辺の放射線強度が上昇する場合には直接測定による方法では精度ある表面密度の確認が困難なことが分かった。

本方法による測定結果については、試料採取位置、放射能測定結果（核種毎の放射能濃度）、 γ 線スペクトルを図や表に整理し、その後の監督官庁によるチェックのための資料とした。図12、13に測定試料の採取位置、 γ 線スペクトルの例を示す。また、表12に放射能測定結果の例を示す。

7. 考察

7.1 汚染分布の評価方法に関する検討

原子力発電所の建家内面積（床、壁、天井を含める）は非常に広大である。これらの建家内面の汚染分布を調べるために、直接測定や試料採取法を用いて全ての面について測定することは必ずしも効率的でない。そこで、解体実地試験においては、第 4.1 節で示したように全施設について「汚染の可能性のある領域」と「汚染の可能性のない領域」に分類した。すなわち、汚染機器が存在しない領域では明らかに汚染の可能性はなく、また、隣接する汚染区域の汚染特性から判断しても床を除く壁・天井は汚染の可能性は考えられなかった。他方、汚染機器が存在する領域では、過去に少なからずバルブ等から放射性の液体が漏洩する事象があった。この場合には、汚染機器の配置や漏洩事象の特徴に応じて漏洩部近傍の床・壁・天井を汚染の可能性のある部分と判定した。この結果、JPDR 建家内面（総面積 23,800m²）のうち約 43%に当たる領域において汚染の可能性があると明らかになった。

以上のように定性的な判断による結果を測定結果と比較した場合、「汚染の可能性のない領域」と判断した部分では、測定によっても有意な放射能は検出されなかった。このことから、使用履歴や機器の配置から汚染の可能性のある領域を特定する方法の正しさが証明されたことになる。従って、領域毎にその構成機器等の使用状況、汚染事象などを考慮して、汚染の可能性のある領域の巾を定性的に絞り込むことは、その後の作業量を考えると有効であるといえる。

ただし、JPDR 原子炉運転記録等では、汚染の特性（浸透深さ、広がり）を定量的に評価することは不可能であり、測定によって汚染特性を評価した上で除染計画を作成する必要がある。解体実地試験の開始当初は、表面汚染計により汚染の広がりを連続して測定することを試みたが、系統機器からの放射線等により正確な表面密度を把握することができなかった。そこで、スコーピング測定（試料採取測定）を実施した。

スコーピング測定では、2m×2m の範囲で試料を採取して汚染の特性を評価した。床については、この汚染測定により評価できた。壁については、床から 1m の高さでのみ試料を採取したため、部分的に 1m 以上の汚染が検出された。すなわち、汚染事象が頻繁に発生した壁で 1m より高い位置で汚染特性を調べる必要があるといえる。スコーピング測定では、10mm 毎に汚染深さを特定することができた。しかし、次節に示すように、廃棄物の発生量低減の観点からコンクリートの剥離量を少なくするために、さらに細かく汚染深さを特定することを考える必要がある。

7.2 作業の効率化に関する検討

「放射性廃棄物でない廃棄物」として建家を解体するための作業は、大きく、汚染測定、除染及び確認測定に分類される。以下にこれらの作業に関する効率について記す。

汚染測定においては、平面上の広がり及び深さ方向について汚染分布を評価した。建家表面における汚染部の除去については、平面上の広がり及び深さ方向について考慮する必要がある。表面のみが汚染している（表面汚染）では、汚染の深さが表層のみに限られることから、非常に薄い層を削り取ることにより汚染が取り除かれるので、平面上の汚染広がりのみを精度良く評価して、その部分を剥離すればよい。これに対して深さ方向に汚染が浸透している（浸透汚染）場合には、汚染深さの程度に

応じて、削り取る層の厚さを決める必要がある。すなわち、表面汚染と浸透汚染では剥離の方法が異なることになる。また、表面を剥離する場合と、浸透汚染部を剥離する場合の作業の効率を比較すると表面の剥離作業の方がより効率的である。従って、表面汚染と浸透汚染を区分することは、除染作業効率の観点から有効であるといえる。他方、深さ方向に汚染分布を細かく評価することは、廃棄物低減の観点からも有効であった。当初は、管理区域内全域を 1cm 厚さの余裕を持って剥離することとしたため発生する廃棄物量が約 800 トンと推定した。しかし、汚染の詳細測定によってコンクリート面の汚染測定を 2mm 厚さ単位で詳細に把握し、当初の余裕厚さを小さくできたことにより廃棄物量が 800 トンから約 360 トンになり、発生する廃棄物量、人工数の低減が可能となった。

汚染領域は、精度良く判定しそれに併せて除染範囲を決定した方が廃棄物量の低減上有効である。しかし、詳細な測定には、時間を要する。本試験では、試料の採取、 γ 線スペクトル分析により核種の同定を行ったために、多くの時間を要することとなった。

除染後の確認測定では、施設内の全面について直接測定を実施した。測定作業は、足場の設置、測定面に対する区画、清掃、測定、測定データの整理、後片づけ等からなる。確認測定の当初は、全ての範囲を測定しその記録を作成した。このため、表面汚染計により 0.8m×0.8m の範囲の測定を行うのに約 30 分を要した。そこで、3.2(1)に記述した手法を用いることによって効率的に作業を実施した。さらに、表面汚染簡易測定装置を開発し、広い領域に適用した。この結果、確認測定の効率は 0.202 人・日/m²となった。

図 14 に JPDR の解体作業における作業人工数の割合を示す。このうち、除染と確認測定は、全作業の 13.6%であった。なお、汚染測定は技術開発の中で実施したものであるが、約 3250 人・日を要した。これらの作業効率は、除染が 1.106 人・日/m²、確認測定が 0.202 人・日/m²であった。除染と確認測定においては、さらに作業の効率化を図るために狭隘部に対する効率的な除染装置の開発、外部線源の影響下における信頼性のある測定方法の確立、測定データの処理の効率化等が必要であると考えられる。

7.3 作業手順に関する検討

第 4 章から第 6 章では、原子力安全委員会が提示した基本的な考え方に基づいて、建家を「放射性廃棄物でない廃棄物」として取り扱い、在来工法により解体撤去する手順について検討するとともにその実施結果について述べた。この手順を図 15 に示す。本図に示す手順に基づいた作業から以下の結果が得られた。

- 施設の運転記録から領域毎に汚染の可能性のある部分を区分することが可能であった。ただし、汚染の可能性のある部分では、浸透汚染か、表面汚染かを判別しなくてはならず、試料の採取による測定が必要であった。
- 表面汚染部では、その表面を削って汚染を除去し、残りは「放射性廃棄物でない廃棄物」として取り扱うことが可能になった。
- 浸透汚染部では、浸透深さを判定し、その深さに 5mm の余裕を加えて削ることにより、残りを「放射性廃棄物でない廃棄物」として取り扱うことが可能になった。
- 以上の作業により、建家を「放射性廃棄物でない廃棄物」として取り扱うことが可能になったが、念のため、放射能の確認測定を実施した。

以上に示した作業は以下の3段階に分類することができる。

- ①汚染特性の把握（測定及び資料調査）
- ②除染作業
- ③放射能の確認測定

ここで、①と③に関する測定においては2種類の方法を用いた。すなわち、①ではスコーピング測定と詳細測定を、③では直接測定と試料採取測定を採用した。各段階における2種類の測定では、重複してデータを取得している部分があり、本来は、①スコーピング測定、②除染、③直接測定、により建家を「放射性廃棄物でない廃棄物」として扱い、在来工法により解体撤去するという最終的な目的を達成できると考えられる。この手順を図16に示す。ただし、①に関してみると、試料のサンプリング範囲の最適化に関する検討が必要になる。また、③に関してみると、バックグラウンドレベルが変動するため事前に一定の検出限界値を設定できない問題がある。試料のサンプリング範囲の問題については、前節で述べた通りである。検出限界値の設定に関しては以下の問題がある。

直接測定では、表面汚染計を用い、その検出限界値以下であるか否かを判定の基準とした。但し、この値は作業環境のバックグラウンドに影響される。JPDRの施設内でも自然計数率が変動することから、表面汚染計の検出限界値を一律に定めることは不可能であった。このため、測定対象となる領域の部位毎に80cm×80cmの単位面積に対して測定を行い、その結果を平均して自然計数率を定めることにより、検出限界値を算出した。「測定結果の平均値を自然計数率とする」考え方は、全ての汚染が除去されていることを前提とし、対象領域の測定結果の平均値に対して変動の幅を超える部分を疑わしいとしたものである。検出限界値以上の測定値を記録した単位面に対しては、再度測定を行いその原因を究明した。すなわち、確認測定により特別に設定した基準（施設開放基準）を満足するか否かを判定した訳ではない。このため、非常に大きなマージンを取って除染作業を実施した。明らかに汚染がないと考えられる領域においても2mmの厚さで表面を剥離した。廃止措置作業の効率的な実施には、施設開放基準を定めることが必要と考えられる。

8. 結論

JPDRの解体実地試験は我が国で初めての原子力発電所の解体作業であり、この中でも建家を「放射性廃棄物でない廃棄物」として取り扱うための作業は、初めての経験であった。建家表面の汚染特性の評価、除染、放射能の確認測定の各段階を経て実施した作業により得られた結論を以下に示す。

- (1) JPDR原子炉運転記録に基づいて作成した汚染分布情報は、測定により評価した結果と良く一致していた。このことから、領域毎の汚染の可能性の有無に関する判定は原子炉運転記録から定性的に判断することが可能である。
- (2) 建家表面における汚染の核種は ^{60}Co と ^{137}Cs であり、その浸透深さは数cmまでに限定されてい

た。従って、汚染の浸透深さを特定し、その汚染部分に余裕を加えた領域を取り除くことにより、他のコンクリート構造物を「放射性廃棄物でない廃棄物」として取り扱うことが可能となった。

- (3) 除染作業は、表面汚染と浸透汚染を区別することにより、作業は効率良く実施できた。
- (4) 除染後の直接測定においては、自然計数率とその標準偏差の3倍のレベルまでの値を基準として、汚染の有無を確認することができた。ただし、建家の全表面に対して測定を行うことにより、多くの時間と人工数が必要であった。
- (5) 直接測定により自然計数率以上の汚染が取り除かれていることを評価したが、試料採取により、3Bq/kgのレベル以下まで原子炉の運転により生じた⁶⁰Coと¹³⁷Csの放射性核種が存在しないことを確認した。
- (6) 建家を「放射性廃棄物でない廃棄物」として取り扱う手順を確立し、在来工法により建家を解体した。これは、汚染特性の把握のための測定、汚染コンクリートの除去、放射能の確認測定からなる。
- (7) 本報告書で述べた手順を用いた場合多くの人工数や時間が必要になった。より合理的に建家を解体撤去するためには、建家開放基準のようなレベルを設定し、放射性廃棄物として取り扱う必要のない放射能レベルを設定する必要がある。

謝 辞

本報告書をまとめるにあたり、「放射性廃棄物でない廃棄物」の取扱いに関して、科学技術庁、東海研究所保健物理部、バックエンド技術部の関係者の方々から貴重な御助言、御指導を頂いた。また、本報告書に関する作業は当時の原子炉解体技術課清木義弘課長の下で実施されたものであり、作業の実施に当たり多くの御指導を頂いた。

ここに深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 石樽頭吉, 他 : デコミッショニング技術の現状と課題, 日本原子力学会誌, Vol.33, No.5, pp.410~446(1991)
- (2) Ishikawa, M., Kawasaki, M., Yokota, M. : JPDR decommissioning program - plan and experience, Nucl. Eng. Des., 122, 358~364 (1990)
- (3) 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.38, No.7, 553~576 (1996)
- (4) 原子力安全委員会月報, 12 [3], 124 (1989)
- (5) バックエンド技術部 : 原子炉解体技術開発成果報告書-JPDR の解体と技術開発-, JAERI-Tech97-001, 1997年2月
- (6) 科学技術庁原子力安全局原子力安全調査室 (監修) : 環境放射線モニタリングに関する指針について, 原子力安全委員会安全審査指針集, 大成出版社, 平成元年3月
- (7) 日本工業規格 : 粉塊混合物のサンプリング方法通則, JIS M8100, 1973

表1 JPDRの主要な仕様

| | |
|---------------------|--|
| 原子炉型式 | 沸騰水型(BWR) |
| 熱出力 | 90 MWt (初期 45 MWt) |
| 電気出力 | 12.5 MWe |
| 原子炉圧力容器 寸法 材質 | 内径:約2m, 高さ:約8m, 板厚:73mm 低合金鋼(ASTM-A302Gr.B) |
| 生体遮へい体 厚さ 材質 | 約1.5~3m 鉄筋コンクリート |
| 燃料 | UO ₂ (濃縮度2.6%) |
| 平均熱中性子束 | 3.8 x10 ¹³ n/cm ² -sec |
| 原子炉運転時間 | 17,110hours |
| 発電電力量 | 136,957MWh |

表2 放射線測定装置(詳細測定)の仕様

| | |
|-----------------|---------------------------------------|
| ピュアゲルマニウム半導体検出器 | (CANBERRA社) |
| 型式 | : 同軸型 |
| 分解能 | : 1.9keV(at 1332keV) |
| 相対効率 | : 20% |
| ピークコンプトン比 (:1) | : 44 |
| 波高分析器 | (CANBERRA社 シリーズ90) |
| 測定エネルギー範囲(keV) | : 40-2000 |
| チャンネル数 | : 4000 |
| 遮へい体 遮へい厚さ | : 鉛:120mm, 鉄:50mm, 銅:5mm, アクリル:5mm |
| データ解析装置 | |
| 計算機 | : PDP 11/23 (DEC社) |
| γ線スペクトル解析プログラム | : スペクトランF (CANBERRA社) |

表3 放射線測定装置(詳細測定)の検出限界値

| 放射線核種 測定条件等 | ^{60}Co | | | ^{137}Cs | | |
|----------------|------------------|--------|--------|-------------------|--------|--------|
| | 定量エネルギー(keV) | 1173.2 | | | 661.6 | |
| 試料重量(g) | 1,000 | 30 | 3 | 1,000 | 30 | 3 |
| 測定時間(sec) | 80,000 | 30,000 | 30,000 | 80,000 | 30,000 | 30,000 |
| 自然計数率(cps) | 0.070 | 0.014 | 0.012 | 0.120 | 0.055 | 0.040 |
| 計数効率 | 0.0021 | 0.011 | 0.0065 | 0.0029 | 0.017 | 0.012 |
| 検出限界値(Bq/g) | 0.0014 | 0.0067 | 0.11 | 0.0016 | 0.0096 | 0.13 |

ピュアゲルマニウム半導体検出器
CANBERRA社, 型式: 7229P7500S2019

表4 表面汚染計の性能

| 特性 | 種類 | 表面汚染検査計 | 大面積表面汚染検査計 | 表面汚染簡易測定装置 |
|-----------------------------------|----|-----------------|-----------------|------------------|
| 形式 | | ガスフロー型 比例計数管 | ガスフロー型 比例計数管 | プラスチック シンチレータ |
| 検出窓面積(cm ²) | | 164 | 1,800 | 900 x 3個 |
| 自然計数率(cps) | | 7~10 | 65~75 | 35~40 |
| 測定時間(sec) | | 30 | 60 | 60 |
| 検出限界計数率 (cps) | | 3.08 | 5.38 | 2.76 |
| 検出限界表面密度 (Bq/cm ²) | | 0.28 | 0.32 | 0.18 |

表面汚染検査計: コンタマツトFHT111M, FAG Kugelfischer Georg Schafer KGaA
大面積汚染検査計, 表面汚染簡易測定装置: 原研製作品

表5 放射線測定装置(確認測定)の仕様

| | GMX-192 | GMX-127 | GMX-197 |
|----------------|---|----------------------------------|--|
| 半導体検出器 | (EG&G ORTEC社) | (CANBERRA社) | (CANBERRA社) |
| 型式 | : スインウインドー同軸型 | : クロスドエンド同軸型 | : スインウインドー同軸型 |
| 分解能 | : 2.1keV | : 1.9keV | : 1.9keV |
| 相対効率 | : 43 % | : 27% | : 51% |
| ピークコンプトン比 (:1) | : 61 | : 64 | : 69 |
| 波高分析器 | | | |
| 測定エネルギー範囲(keV) | : 10-2000 | : 60-2000 | : 20-2000 |
| チャンネル数 | : 4000 | : 4000 | : 4000 |
| 遮へい体 | | | |
| 遮へい厚さ | : 鉛:100mm, 鉄:50mm, 銅:5mm, アクリル:5mm | : 鉛:150mm, 銅:5mm, アクリル:5mm | : 鉛:130mm, SS41:50mm, Cd:1mm, OF Cu:5mm アクリル:5mm |
| データ解析装置 | | | |
| 計算機 | : VAX 4000 Model 90 (DEC) | : VAX 4000 Model 90 (DEC) | : VAX 4000 Model 90 (DEC) |
| γ線スペクトル解析プログラム | : スペクトランF (EG&G ORTEC) | : スペクトランF (EG&G ORTEC) | : スペクトランF (EG&G ORTEC) |

表6 漏洩に関する事象のうち汚染の明らかな例

| 発生日 | 系統 | 汚染に係る事象 | 運転記録No. |
|------------|---------|------------------------|---------|
| 1964.8.9 | DDS | DDS のオーバーフロー | 12 |
| 1967.1.17 | 原子炉水浄化系 | 原子炉ブローダウン系からの漏洩による床面汚染 | 29 |
| 1967.4.1 | 主蒸気系 | 主蒸気系弁からの凝縮水の漏洩による床面汚染 | 30 |
| 1968.2.23 | 復水系 | 復水脱塩器再生室からの漏洩による床面汚染 | 37 |
| 1971.12.20 | 復水系 | 復水脱塩器再生室からの漏洩による床面汚染 | 58 |
| 1972.5.1 | DDS | DDS No.2 のオーバーフロー | 60 |
| 1975.11.21 | 主蒸気系 | 原子炉ブローダウン系からの漏洩による床面汚染 | 82 |
| 1976.1.8 | 主蒸気系 | 主蒸気系弁からの凝縮水の漏洩による床面汚染 | 83 |
| 1976.1.26 | フロアドレン | フロアドレン配管からの漏洩による床面汚染 | 83 |
| 1976.3.23 | CDS | CDS底部からの漏洩 | 84 |

注) • DDS: Dirty Drain Sump(汚水収集サンブ)
• CDS: Clean Drain Sump(廃水収集サンブ)
• 運転記録は、No.1~No.123(昭和60年11月) までである。

表7 使用履歴の調査による分類結果の例
(タービン建家)

| 領域名称 | 部位 | 床 | 壁 | 天井 |
|-------------|----|---|---|----|
| 発電機室 | | ○ | ○ | ○ |
| 送風機室 | | ○ | ○ | ○ |
| コンプレッサ室 | | ○ | ○ | ○ |
| オフガス室 | | ○ | ○ | ○ |
| コンデンサ室 | | ● | ● | ● |
| 給水ポンプ室 | | ▲ | ▲ | ○ |
| 復水脱塩器室 | | ● | ○ | ○ |
| 復水脱塩器再生室 | | ● | ● | ● |
| 原子炉水浄化脱塩器室 | | ○ | ○ | ○ |
| 再生・非再生熱交換機室 | | ● | ▲ | ○ |
| アンローディングベイ室 | | ○ | ▲ | ○ |
| 地下1階 | | ▲ | ▲ | ▲ |
| コンタミトンネル | | ● | ▲ | ○ |
| ホールドアップエリア | | ● | ○ | ○ |
| オフガスタンク室 | | ▲ | ○ | ○ |
| ケーブルトンネル | | ○ | ○ | ○ |
| 排気ダクト | | ● | ● | ● |

○:汚染の可能性がない部分
▲:一部に汚染の可能性のある部分
●:汚染の可能性のある部分

表8 汚染の可能性のない領域及び非管理区域から採取した試料の全γ放射能測定結果

| No. | 試料採取箇所 | 部屋 | 区分 | 部位 | 全γ放射能濃度* (Bq/g) |
|-----|--------|-----------|-------|----|--------------------|
| 1 | 制御建家 | 電気室 | 管理区域 | 床 | 0.127 |
| 2 | 制御建家 | 電気室 | 管理区域 | 床 | 0.085 |
| 3 | 制御建家 | 電気室 | 管理区域 | 壁 | 0.130 |
| 4 | 制御建家 | ディーゼル発電機室 | 非管理区域 | 床 | 0.130 |
| 5 | 制御建家 | ディーゼル発電機室 | 非管理区域 | 壁 | 0.056 |
| 6 | 制御建家 | 地下1階 | 管理区域 | 床 | 0.127 |
| 7 | 制御建家 | 地下1階 | 管理区域 | 床 | 0.059 |
| 8 | 制御建家 | 地下1階 | 管理区域 | 壁 | 0.130 |
| 9 | タービン建家 | 給水ポンプ室 | 管理区域 | 床 | 0.070 |
| 10 | タービン建家 | 給水ポンプ室 | 管理区域 | 床 | 0.127 |
| 11 | タービン建家 | 給水ポンプ室 | 管理区域 | 壁 | 0.067 |
| 12 | タービン建家 | コンプレッサ室 | 管理区域 | 床 | 0.059 |
| 13 | タービン建家 | コンプレッサ室 | 管理区域 | 床 | 0.130 |
| 14 | タービン建家 | コンプレッサ室 | 管理区域 | 壁 | 0.059 |
| 15 | タービン建家 | コンプレッサ室 | 管理区域 | 壁 | 0.118 |
| 16 | タービン建家 | 地下1階 | 管理区域 | 床 | 0.100 |
| 17 | タービン建家 | 地下1階 | 管理区域 | 床 | 0.056 |
| 18 | タービン建家 | 地下1階 | 管理区域 | 床 | 0.089 |
| 19 | タービン建家 | 地下1階 | 管理区域 | 壁 | 0.063 |
| 20 | タービン建家 | 地下1階 | 管理区域 | 壁 | 0.074 |
| 平均値 | — | — | — | — | 0.093 |

*: ⁶⁰Co換算値

表9 除染に使用した装置の除染効率(表面汚染)

| 除染機器 | 項目 | 除染深さ(cm) | | | 除染効率(m ² /h) | | | 操作方式 |
|-----------|----|----------|-----|----|-------------------------|------|------|------|
| | | 最小 | 平均 | 最大 | 最小 | 平均 | 最大 | |
| コンクリートカンナ | | - | 0.2 | - | 0.2 | 0.7 | 1.6 | 手動 |
| ニードルガン | | - | 0.2 | - | 0.1 | 0.9 | 2.3 | 手動 |
| グラインダー | | - | 0.2 | - | 0.3 | 2.2 | 4.7 | 手動 |
| プレーナー | | - | 0.5 | - | 1.2 | 1.7 | 2.1 | 半自動 |
| サンドブラスト | | - | 0.5 | - | 2.7 | 6.0 | 11.8 | 半自動 |
| ショットブラスト | | - | 0.5 | - | 5.5 | 26.9 | 47.9 | 半自動 |

表10 除染に使用した装置の除染効率(浸透汚染)

| 除染機器 | 項目 | 除染深さ(cm) | | | 除染効率(m ³ /h) | | | 操作方式 |
|----------|----|----------|------|------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|------|
| | | 最小 | 平均 | 最大 | 最小 | 平均 | 最大 | |
| ハンドスクャブラ | | 0.1 | 0.4 | 1.5 | 6.00x10 ⁻⁶ | 6.60x10 ⁻⁵ | 3.48x10 ⁻⁴ | 手動 |
| スーパーケレン | | 0.5 | 0.6 | 1.5 | 4.26x10 ⁻³ | 5.46x10 ⁻³ | 6.60x10 ⁻³ | 手動 |
| ハンマドリル | | 0.5 | 0.5 | 1.5 | 8.04x10 ⁻³ | 1.13x10 ⁻² | 1.51x10 ⁻² | 手動 |
| チップングハンマ | | 0.5 | 2.3 | 10.0 | 1.14x10 ⁻³ | 1.92x10 ⁻² | 1.46x10 ⁻¹ | 手動 |
| プレーカー | | 2.0 | 15.2 | 18.0 | 1.36x10 ⁻¹ | 4.20x10 ⁻¹ | 7.36x10 ⁻¹ | 手動 |
| 大型スクャブラ | | 0.3 | 0.8 | 2.5 | 2.28x10 ⁻³ | 2.01x10 ⁻² | 5.45x10 ⁻² | 手動 |

表11 確認測定(直接測定)の面積と測定点数

| 建家名称 | 床 (m ²) | 壁 (m ²) | 天井 (m ²) | 測定面積 (m ²) | 測定点数 |
|---------|------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------------|--------|
| 原子炉格納容器 | 549 | 1,392 | 630 | 2,571 | 6,708 |
| タービン建家 | 1,716 | 3,227 | 1,724 | 6,667 | 20,296 |
| 制御建家 | 1,016 | 1,572 | 1,016 | 3,604 | 10,606 |
| 廃棄物処理建家 | 473 | 1,284 | 465 | 2,222 | 6,843 |
| 燃料貯蔵建家 | 304 | 1,176 | 304 | 1,784 | 3,899 |
| 排風機建家 | 217 | 1,155 | 197 | 1,569 | 6,174 |
| 緊急用建家 | 89 | 132 | 89 | 310 | 1,216 |
| 屋外 | 3,965 | 1,050 | 75 | 5,090 | 12,049 |
| 合計 | 8,329 | 10,988 | 4,500 | 23,817 | 67,791 |

表12 放射能測定結果(核種毎の放射能濃度)の例

| | | | |
|---------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|
| 施設名:JPDR | 採取日:1994年8月3日 12時00分 | 検出器番号: GE-2(GE-127) | 測定日時:1995年2月5日 21時49分 |
| 採取場所:タービン建家 | 採取量:300g | 校正曲線:92-45 | 計測時間:8,000sec |
| 採取位置:地下1階,床-1 | 試料種類:92-45(300) | 補正計数:100% | |
| 試料番号:334 | 補償効率:100% | 減衰補正:採取-測定 | |

| 核種 | エネルギー (keV) | 減衰補正計数 | 試料放射能 (Bq ± %) | 放射能濃度 (Bq/g) | 補正放射能濃度 (Bq/g) | 検出下限濃度 (Bq/g) | 補正検出下限濃度 (Bq/g) |
|-------------------|----------------|-----------------------|-------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| ⁶⁰ Co | 1332.5 | 9.4 × 10 ¹ | - | - | - | 2.30 × 10 ¹ | 2.46 × 10 ¹ |
| ¹³⁷ Cs | 661.6 | 9.9 × 10 ¹ | - | - | - | 2.25 × 10 ¹ | 2.27 × 10 ¹ |
| ²¹⁴ Pb | 238.6 | 1.0 × 10 ² | 4.58 × 10 ¹ ± 6.5 | 1.53 × 10 ¹ | 1.53 × 10 ¹ | 4.20 × 10 ¹ | 4.20 × 10 ¹ |
| ²¹⁴ Pb | 352.0 | 1.0 × 10 ² | 3.12 × 10 ¹ ± 12.4 | 1.04 × 10 ¹ | 1.04 × 10 ¹ | 4.22 × 10 ¹ | 4.22 × 10 ¹ |
| ²¹⁴ Pb | 583.1 | 1.0 × 10 ² | 1.58 × 10 ¹ ± 12.5 | 5.27 × 10 ¹ | 5.27 × 10 ¹ | 1.94 × 10 ¹ | 1.94 × 10 ¹ |
| ²¹⁴ Bi | 609.3 | 1.0 × 10 ² | 2.72 × 10 ¹ ± 13.7 | 9.08 × 10 ¹ | 9.08 × 10 ¹ | 3.84 × 10 ¹ | 3.84 × 10 ¹ |
| ²¹⁴ Ac | 911.1 | 1.0 × 10 ² | 5.55 × 10 ¹ ± 13.6 | 1.85 × 10 ¹ | 1.85 × 10 ¹ | 7.38 × 10 ¹ | 7.38 × 10 ¹ |
| ⁴⁰ K | 1460.8 | 1.0 × 10 ² | 1.31 × 10 ¹ ± 4.5 | 4.37 × 10 ¹ | 4.37 × 10 ¹ | 1.59 × 10 ¹ | 1.59 × 10 ¹ |

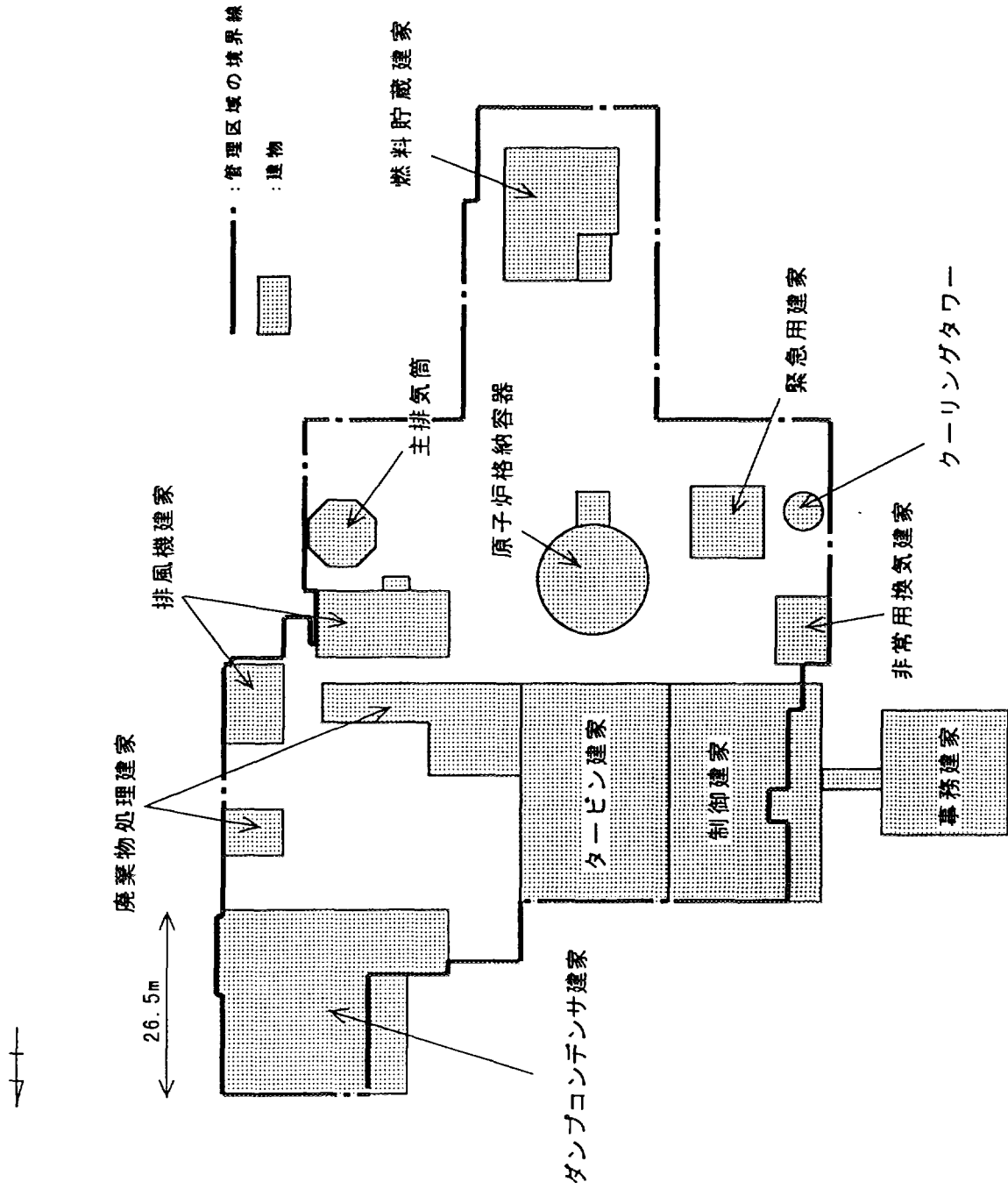


図1 JPDR施設の概略図

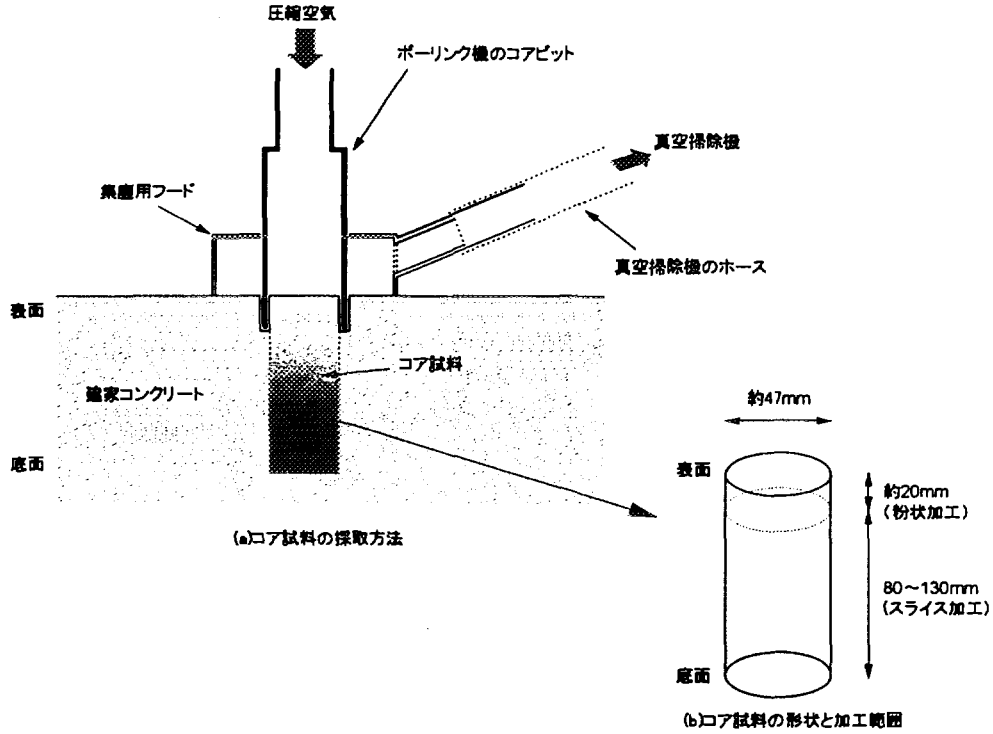


図2 試料の採取方法と試料の形状

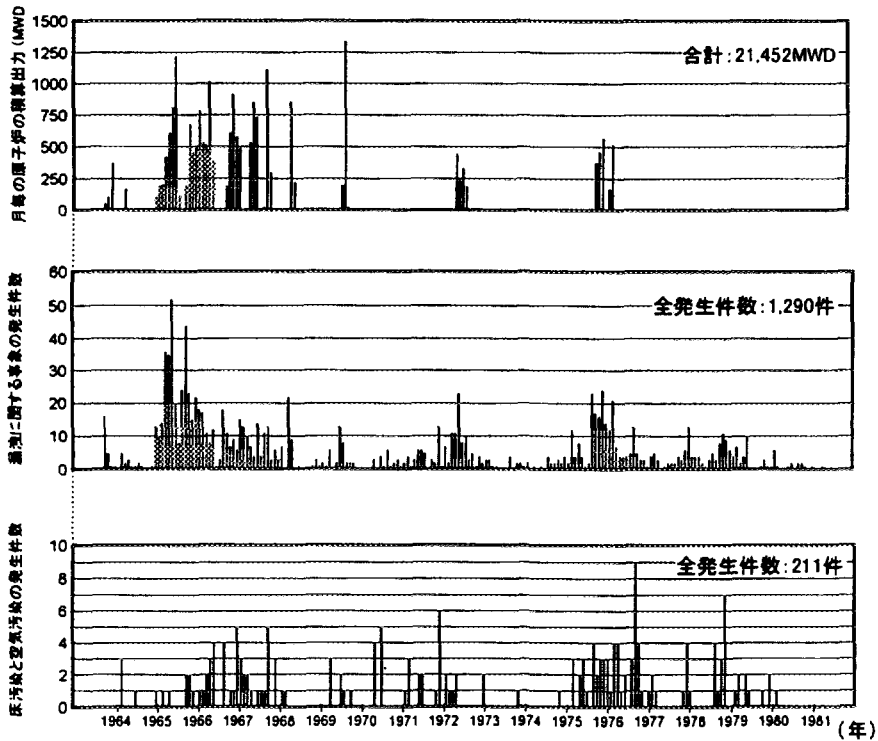


図3 原子炉の運転状況と月別の漏洩に関する事象及び床汚染と空気汚染の発生件数

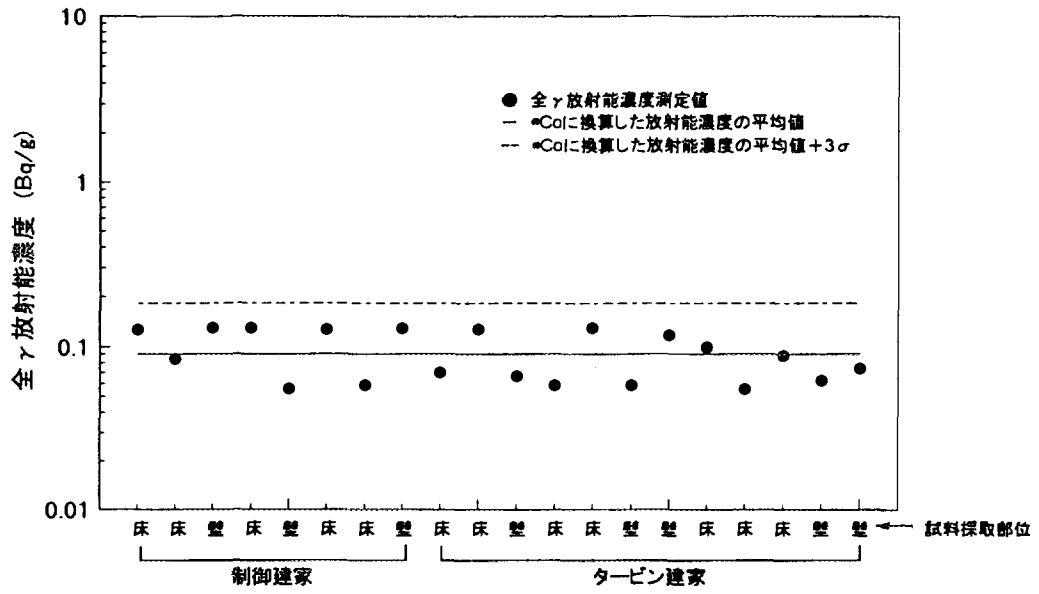


図4 コンクリート試料中の放射能濃度の測定結果

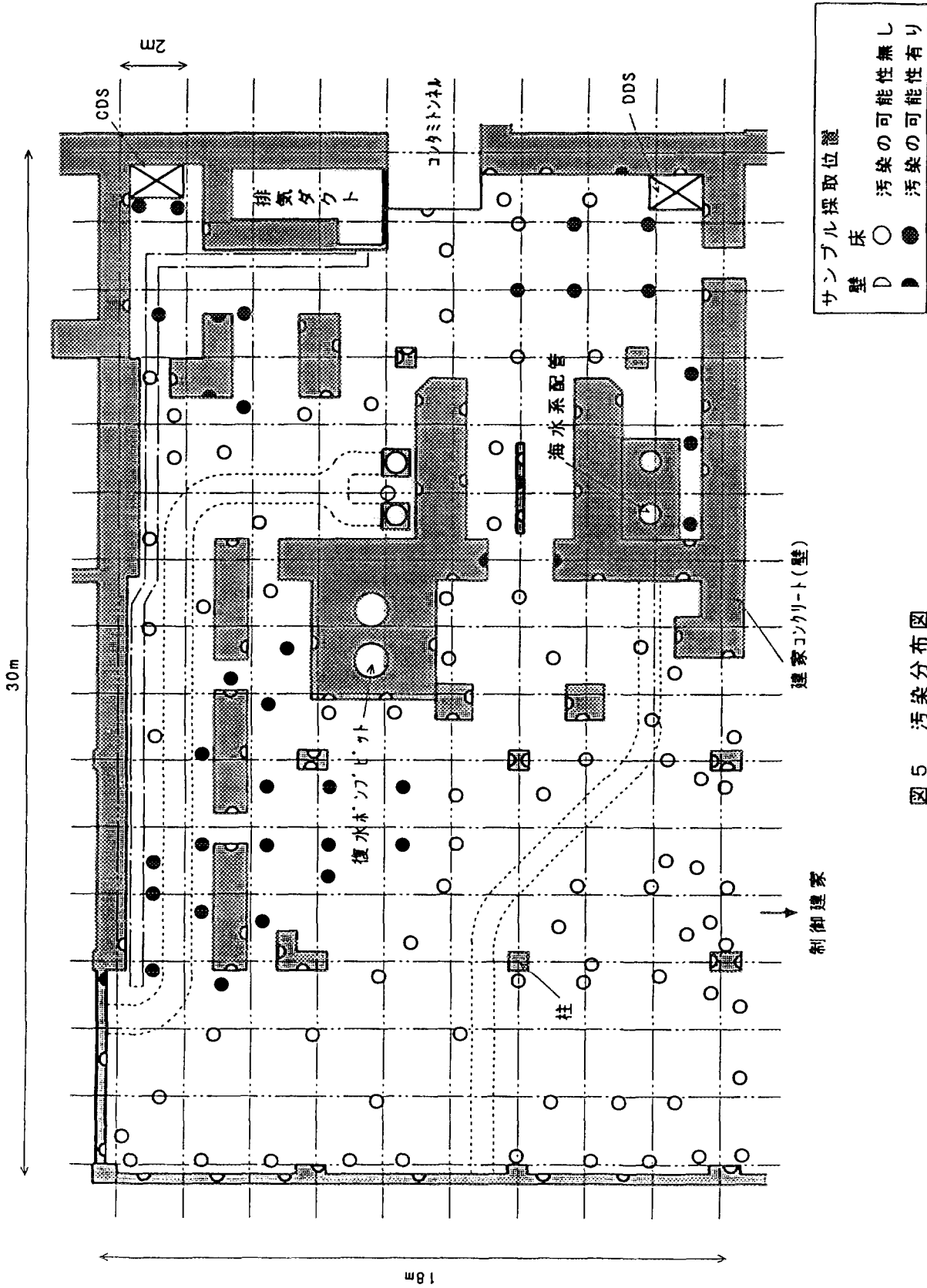


図5 汚染分布図
(タービン建家地下1階)

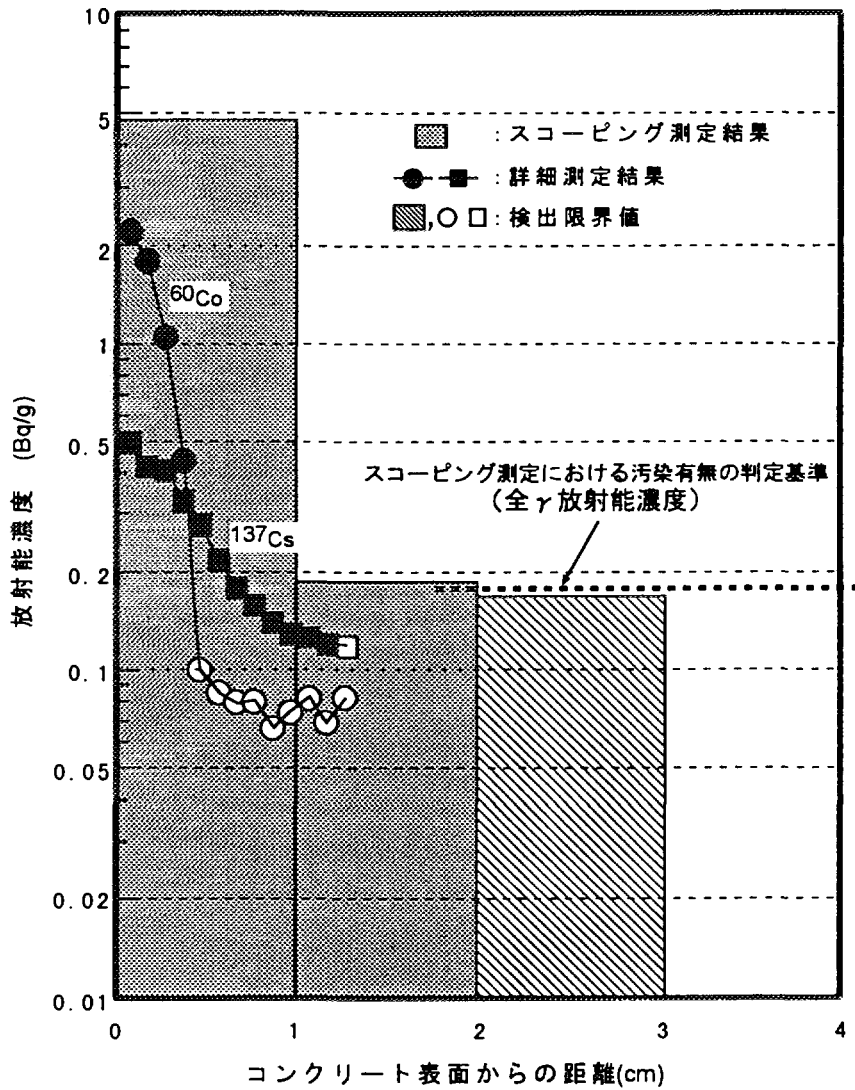


図6 スコーピング測定結果とコア試料の放射能測定結果

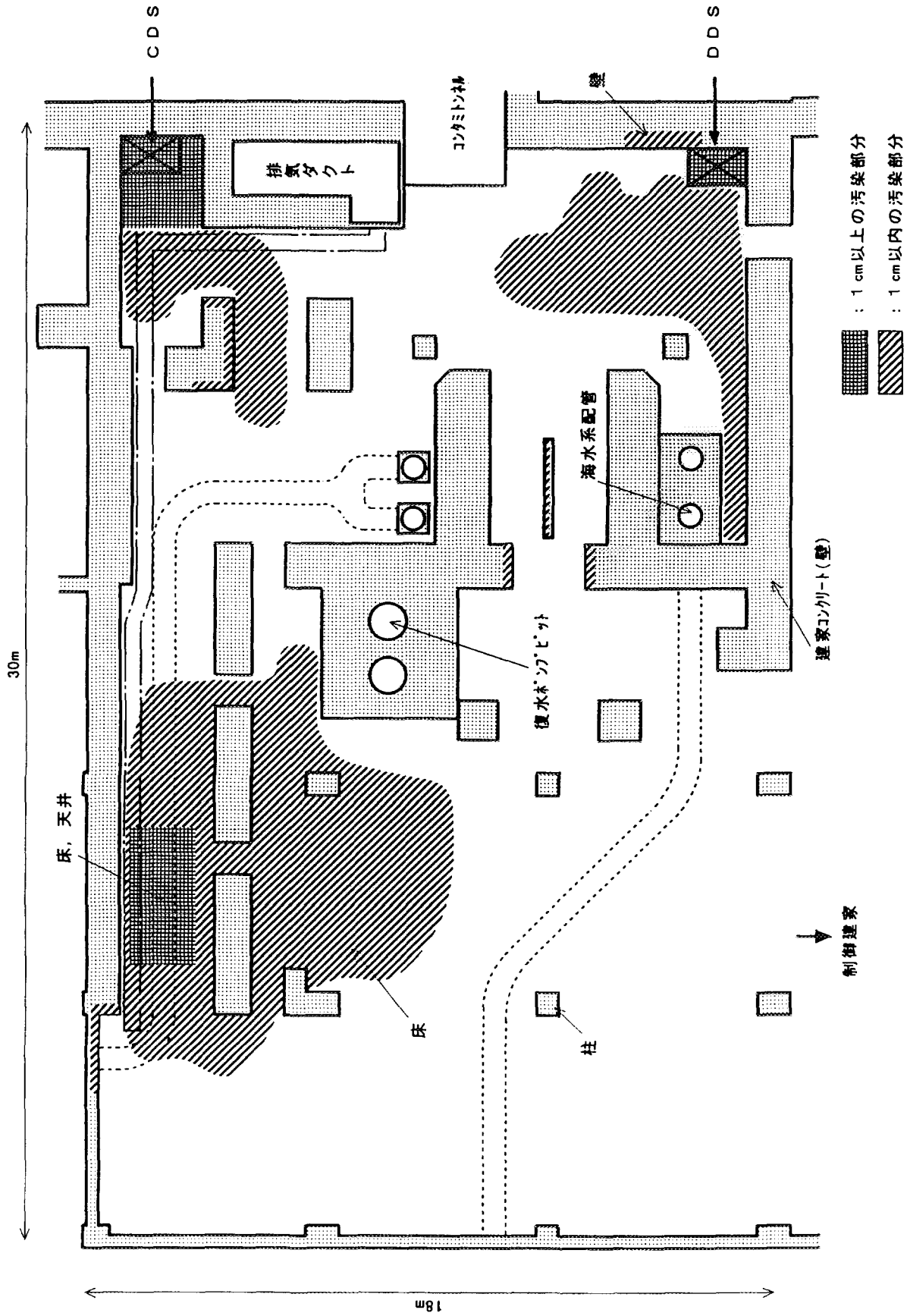


図7 測定による汚染部分
(タワービル建家地下1階)

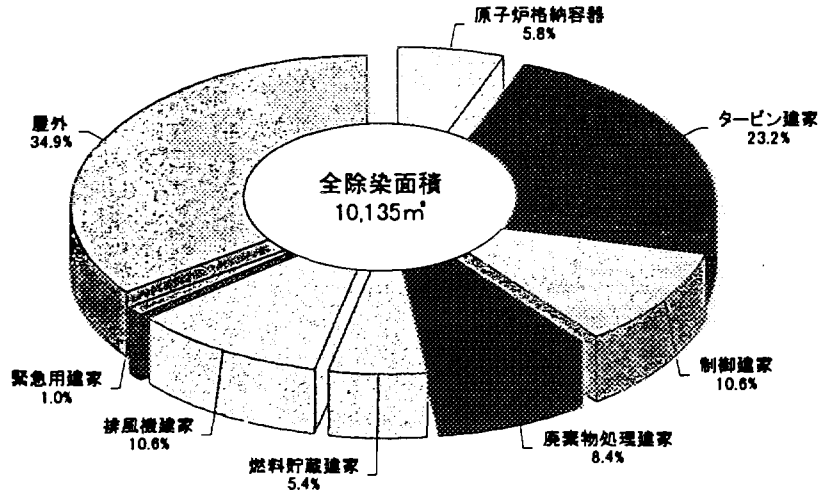
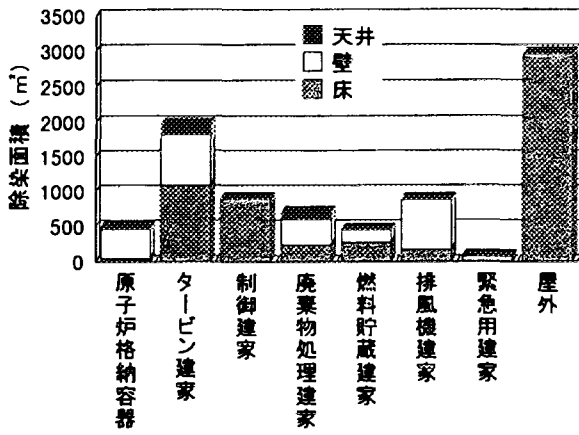
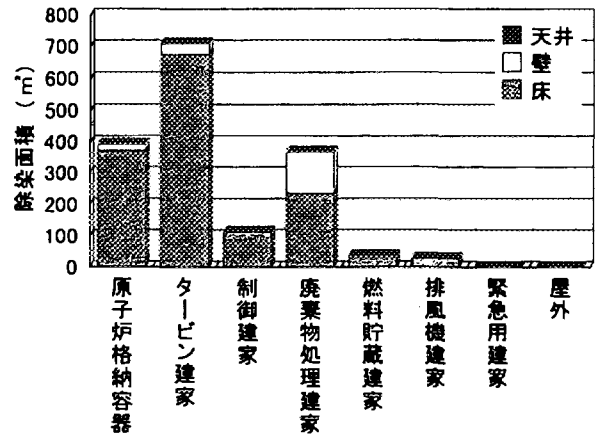


図8 除染面積の内訳(建家別)



(a)表面汚染における除染面積の割合



(b)浸透汚染における除染面積の割合

図9 除染面積の内訳(部別)

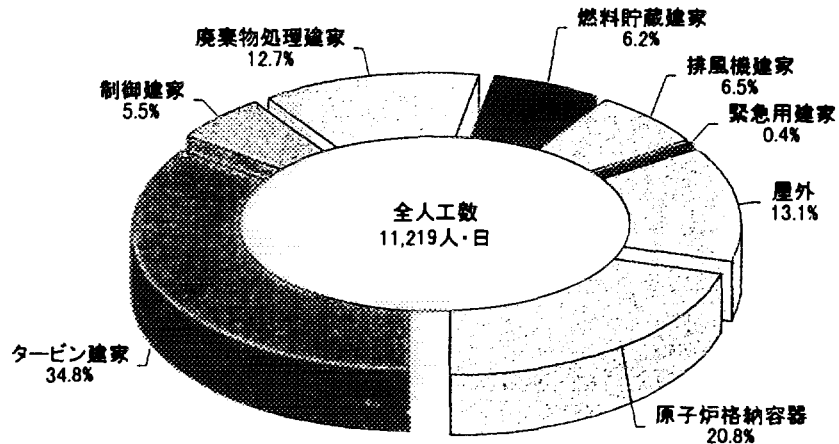


図10 除染作業の効率

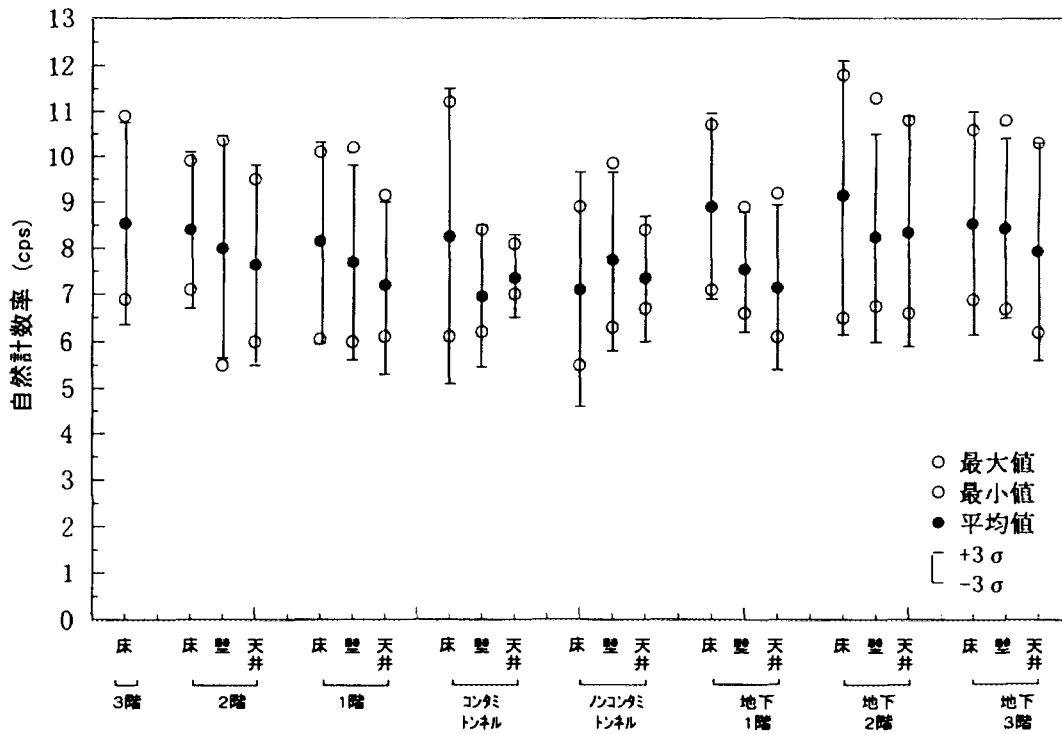


図11 領域及び測定対象部位毎の自然計数率の変動 (原子炉格納容器)

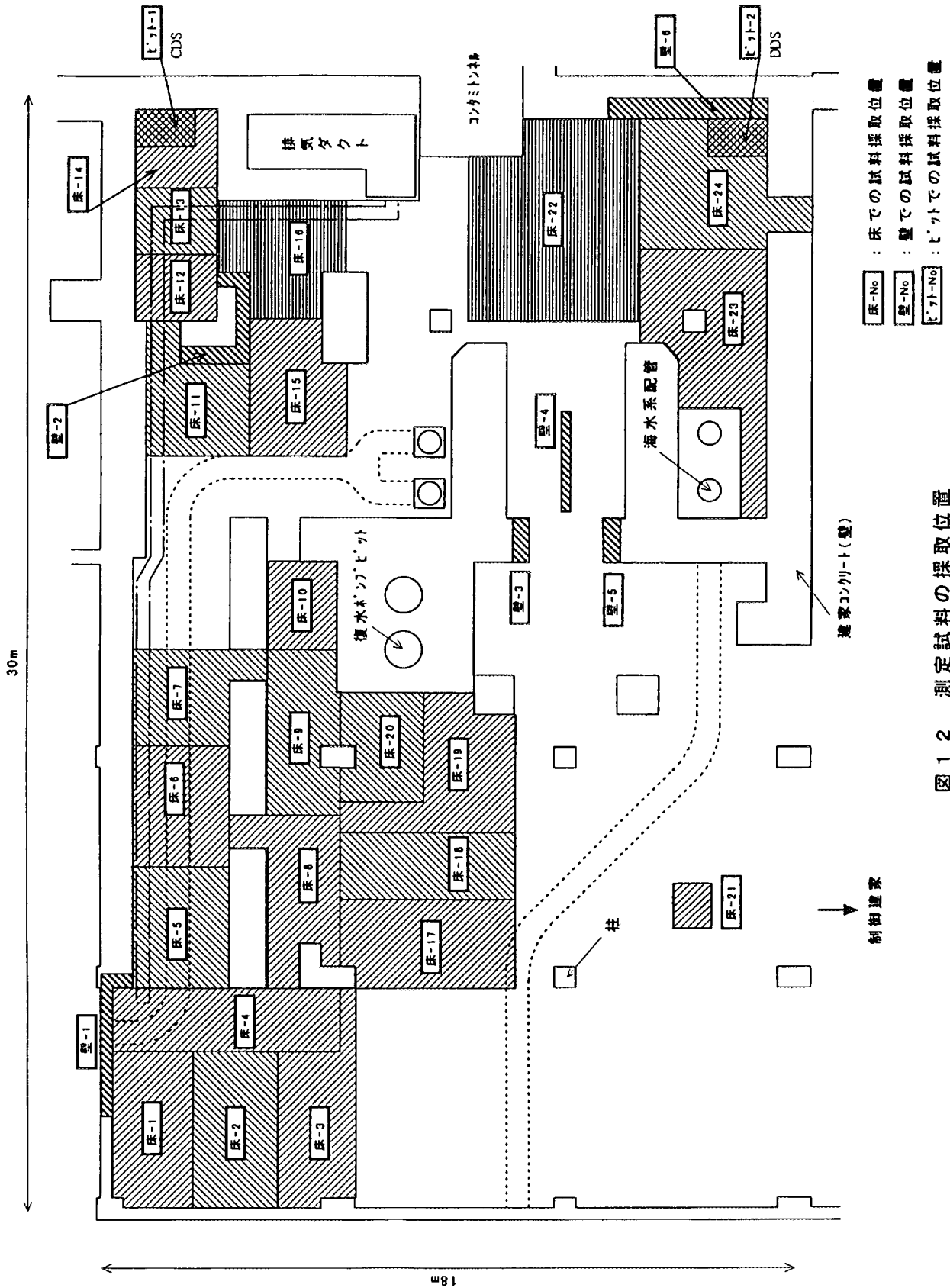


図12 測定試料の採取位置
(タワービン建家地下1階)

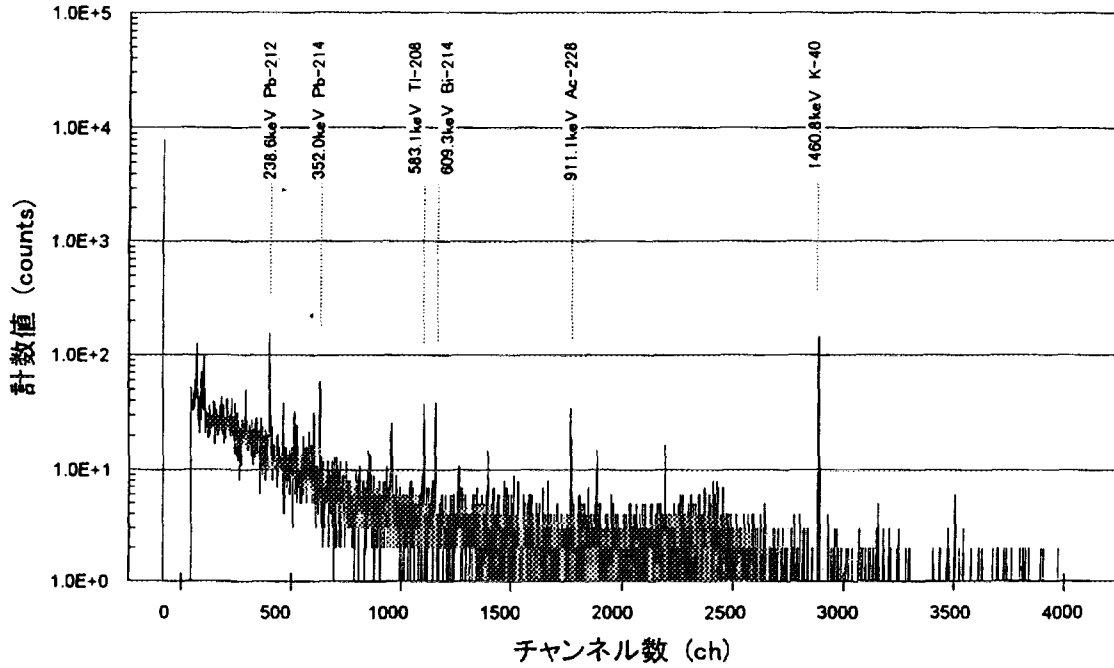


図13 測定試料のγ線スペクトル
(タービン建家地下1階, 床-1)

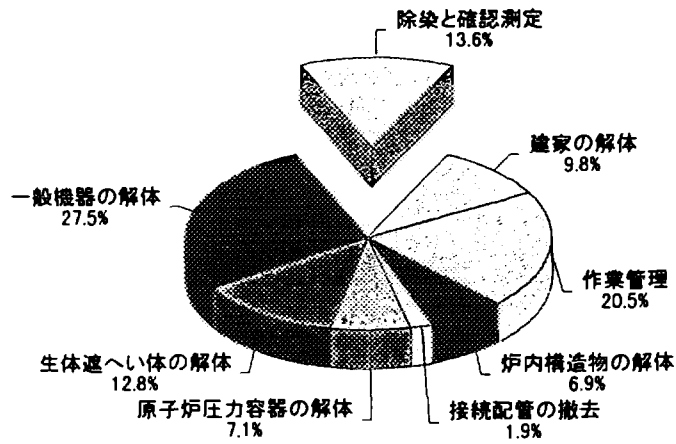


図14 解体作業における作業人工数の割合

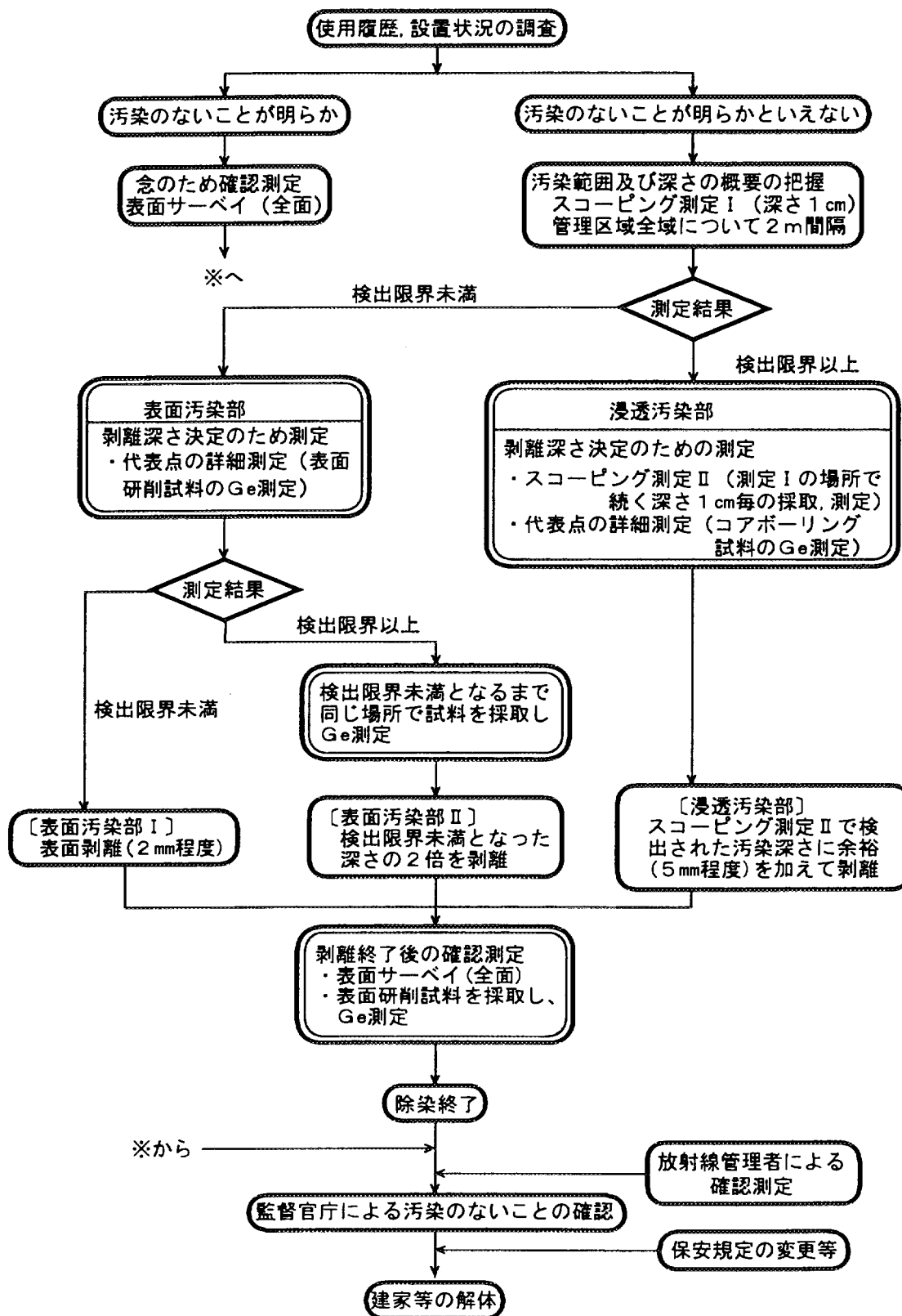


図15 「放射性廃棄物でない廃棄物」の基本的な考え方

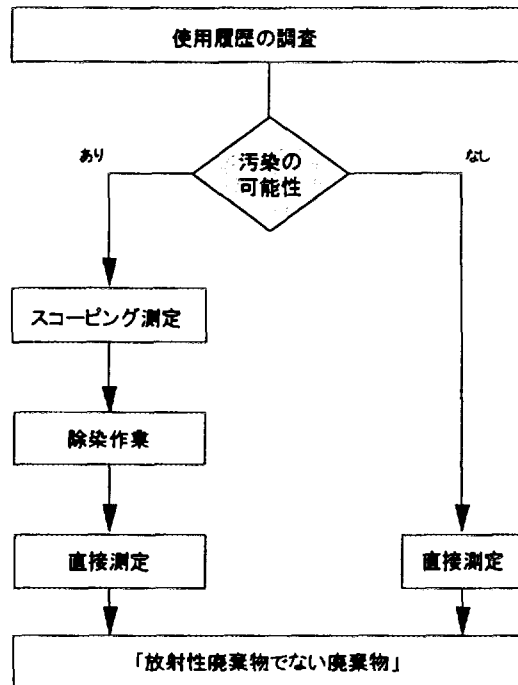


図16 建家を「放射性廃棄物でない廃棄物」として解体するための手順

付録 I 「放射性廃棄物でない廃棄物」として区分するための基本的な考え方の概要

原子力安全委員会は、平成 4 年 6 月 18 日、原子力安全委員会放射性廃棄物安全基準専門部会報告の「低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について（第 2 次中間報告）」を了承した。この報告書の別添に、将来の原子炉施設の解体に伴って大量に発生する固体上の廃棄物については、放射性物質によって汚染された可能性が全くない物、又は、放射性レベルについて自然レベルとの間に有意な差が認められないものについてまで一律に放射性廃棄物とみなすことは合理的でないとして、放射性廃棄物と「放射性廃棄物でない廃棄物」とを区分する際に考慮すべき基本的な考え方が示されている。

この基本的な考え方の概要は、原子力施設の汚染の原因を放射性物質の付着、浸透による二次的な汚染と中性子線による放射化の汚染の 2 つに着目し、その範囲に関する事項を述べている。

放射性物質の付着、浸透による二次的な汚染に関しては、以下のものは「放射性廃棄物でない廃棄物」として扱うことができるとされている。

- ① 使用履歴、設置状況等から、放射性物質の付着、浸透による二次的な汚染がないことが明らかであるもの
- ② 使用履歴、設置状況等から、放射性物質の付着、浸透による二次的な汚染部分が限定されていることが明らかであって、当該汚染部分が分離されたもの

一方、中性子線による放射化の汚染に関しては、以下のものは「放射性廃棄物でない廃棄物」として扱うことが出来るとされている。

- ① 十分な遮へい体により遮へいされた等、施設の構造上、中性子線に放射化の影響を考慮する必要がないことがあきらかであるもの
- ② 計算等により、中性子線による放射化の影響が、一般に存在するコンクリートとの間に有意な差を生じさせていないと評価されたもの
- ③ 計算等により、中性子線による放射化の影響を評価し、一般的に存在するコンクリートとの間に有意な差がある部分が分離されたもの

尚、放射化による放射能が一般的に存在するコンクリートのバックグラウンドとの間に有意な差がないということは、一般的に存在するコンクリートのバックグラウンドとの変動幅（バックグラウンドの測定値の標準偏差の 3 倍）の中に隠れてしまう値以下と同等である（図 I-1 参照）。

付録Ⅱ 表面汚染簡易測定装置の概要

表面汚染簡易測定装置は、今回新たに開発したプラスチックシンチレータ型の検出器であり、JPDRの解体実地試験に適用することを目的に開発したものである。

本装置は、大きく検出部と計測部の2つに分けられる。その概念図を図Ⅱ-1に示す。検出器の計数効率 $\beta + \gamma$ 線に対して20%以上、また γ 線に対して5%以下である。

検出部は、検出器、移動用モーター、測定枠から構成される。計測部は、パーソナルコンピュータ、ディスプレイ、プリンターから構成される。計数値は、随時ディスプレイに表示されるとともに、測定が終了した時点でプリンターに出力され、最終的にはフロッピーディスクに保存される。

確認測定では、測定対象部位が床、壁及び天井であることを考慮して、平滑な面を測定する平滑面用検出器と、コーナー部を測定するコーナー用検出器の2種類を製作した。壁及び天井の測定時には、リフト等に取り付け可能な構造とした。

付録Ⅲ 表面汚染計（スケアラ方式）の検出限界計数率の算出方法

スケアラ方式の表面汚染計を用いた場合の検出限界計数率は以下により求めることができる。

$$n_d \geq \frac{k}{2} \left[\frac{k}{T_s} + \sqrt{\left[\frac{k}{T_s} \right]^2 + 4n_b \left[\frac{1}{T_s} + \frac{1}{T_b} \right]} \right] \dots\dots\dots(1)$$

ここで、

- n_d : 検出限界計数率 (cps)
- T_s : 試料計数の測定時間 (60 秒)
- T_b : 自然計数の測定時間 (300 秒)
- n_b : 自然計数率 (cps)
- k : 3 (検出限界計数率を自然計数率の標準偏差の3倍に相当する計数率と定義するため)

付録IV 代表的な除染装置の概要

スキャブラ

内部のシリンダーを圧縮空気により作動させ、シリンダー先端のビットでコンクリート表面に衝撃を与えることにより剥離する（図IV-1参照）。ビットの数を調整することにより大面積又は小面積の除染作業にも対応可能である。また、スキャブラヘッドをリフターに取り付けることにより壁及び天井の除染作業にも適用できる。図IV-2は、原研が開発した壁用スキャブラを示す。壁用スキャブラは、垂直方向及び水平方向に移動が可能である。垂直方向の移動は、リフターを使用し、水平方向の移動は、圧縮空気を使用した移動機構を使用している。また、スキャブラヘッドを上向きにすることにより天井部の除染も可能である。

プレーナ

電動モーターによりカッターを偏心回転させ、その先端部をコンクリート表面に叩き付けて剥離を行う（図IV-3参照）。

ショットブラスト

駆動用モーターにより高速に回転するインペラーから約1mmのスチールグリッドをコンクリート表面に投射し、その衝撃力により剥離する（図IV-4参照）。投射したスチールグリッドは、コンクリート表面で反射し、粉塵とともにセパレータ内部に吸収される。セパレータ内部では、粉塵とスチールグリッドが重量差で分離され、粉塵は集塵装置に回収され、スチールグリッドは再利用される。

サンドブラスト

高圧（7kg/cm²）の圧縮空気を用いてブラストガン内の極小径のノズルから研掃材（砂又はスチールグリッド）を噴射し、その衝撃力によりコンクリート表面を剥離する（図IV-5参照）。研掃材は、ノズル周囲に取り付けたホースよりコンクリート粉塵と一緒に回収される。研掃材にスチールグリッドを用いた場合には、研掃材選別機において重量差によりコンクリート粉塵と分離され、再利用が可能である。

主な知見

サンドブラストにおいては、ブラストガン先端とコンクリート面を一定に保つ必要があり作業に習熟が必要であった。また、研掃材によりホースの曲がり部が損傷する可能性があり、なるべく曲がり部を作らないようなホースの管理が必要であった。

ショットブラストは、基礎架台、障害物が少ない領域で適用可能であったが、その除染効率は比較的良かった。ショットブラストやプレーナ等は、広い領域の除染に効果的であった。しかし、大部分の汚染領域は、狭くかつ多くの基礎架台等が残っていたため、これらの装置は小型化が必要である。

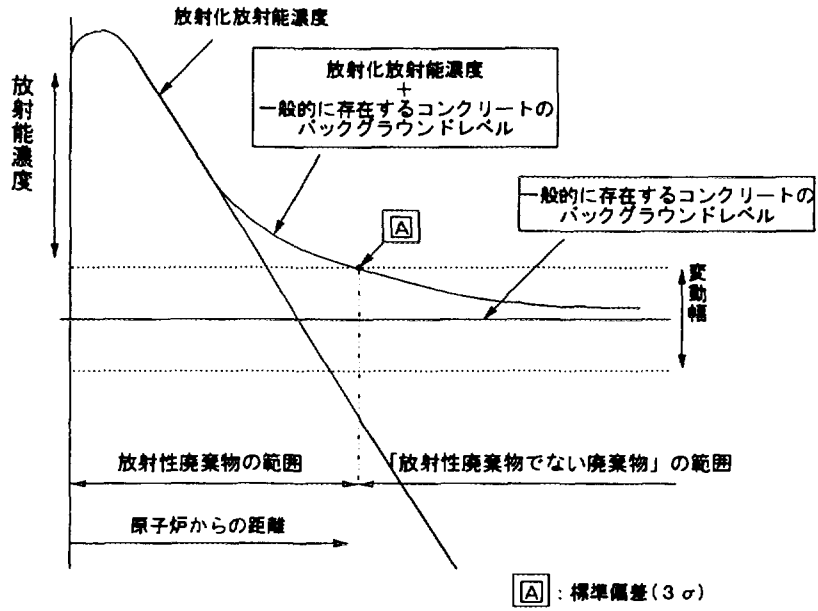


図 I-1 放射化の汚染における放射性廃棄物と「放射性廃棄物でない廃棄物」の区分概念

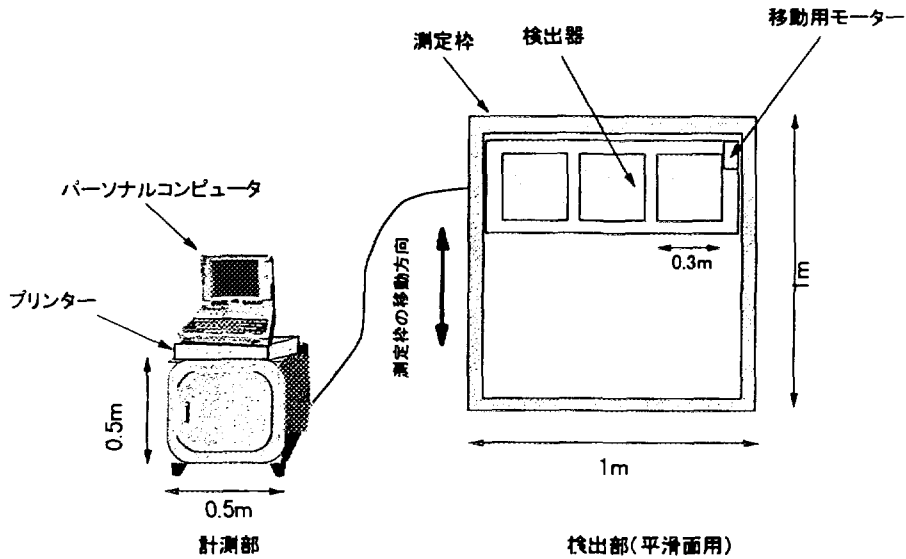
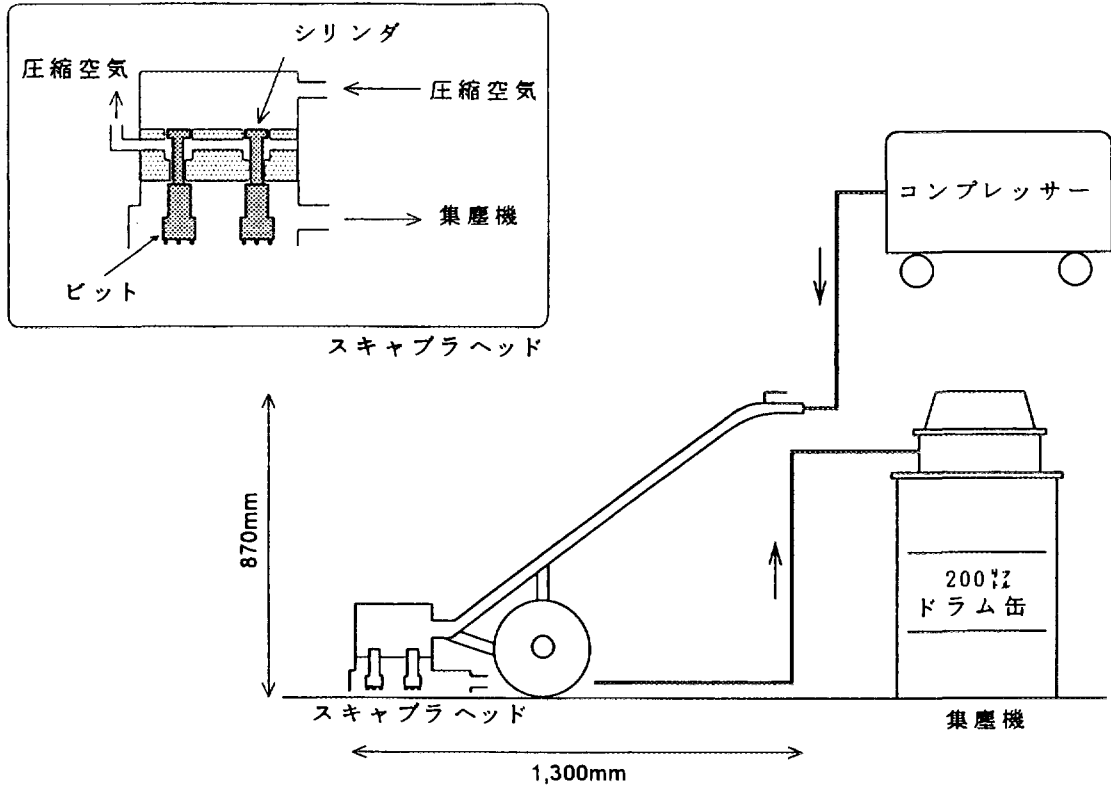
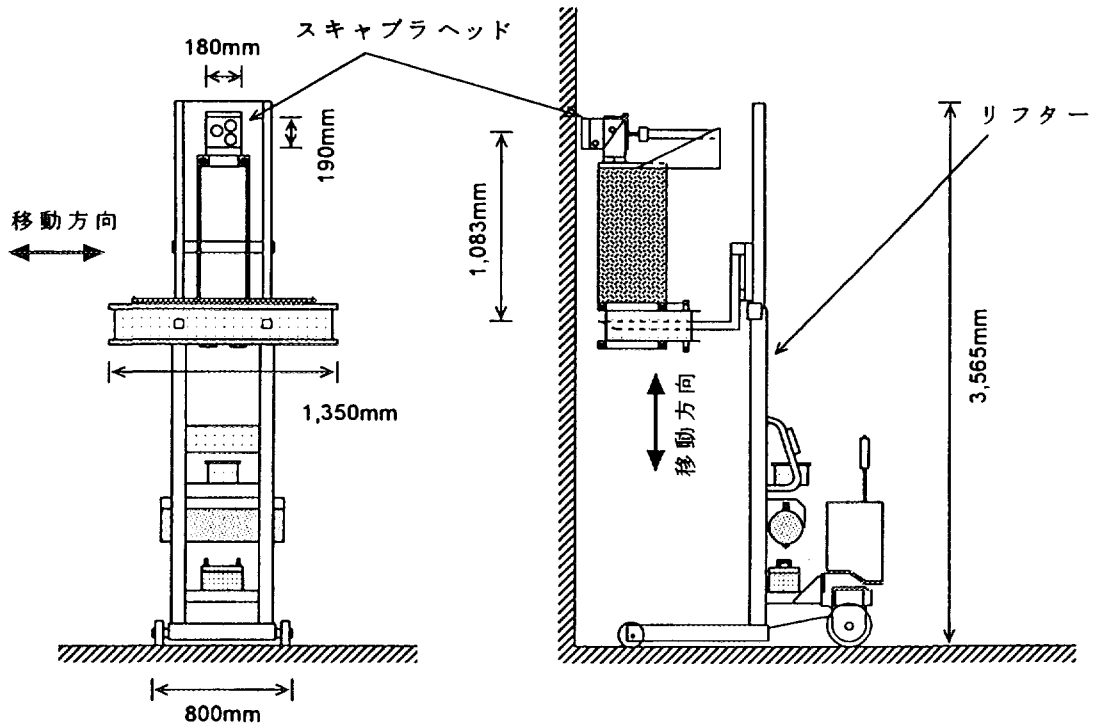


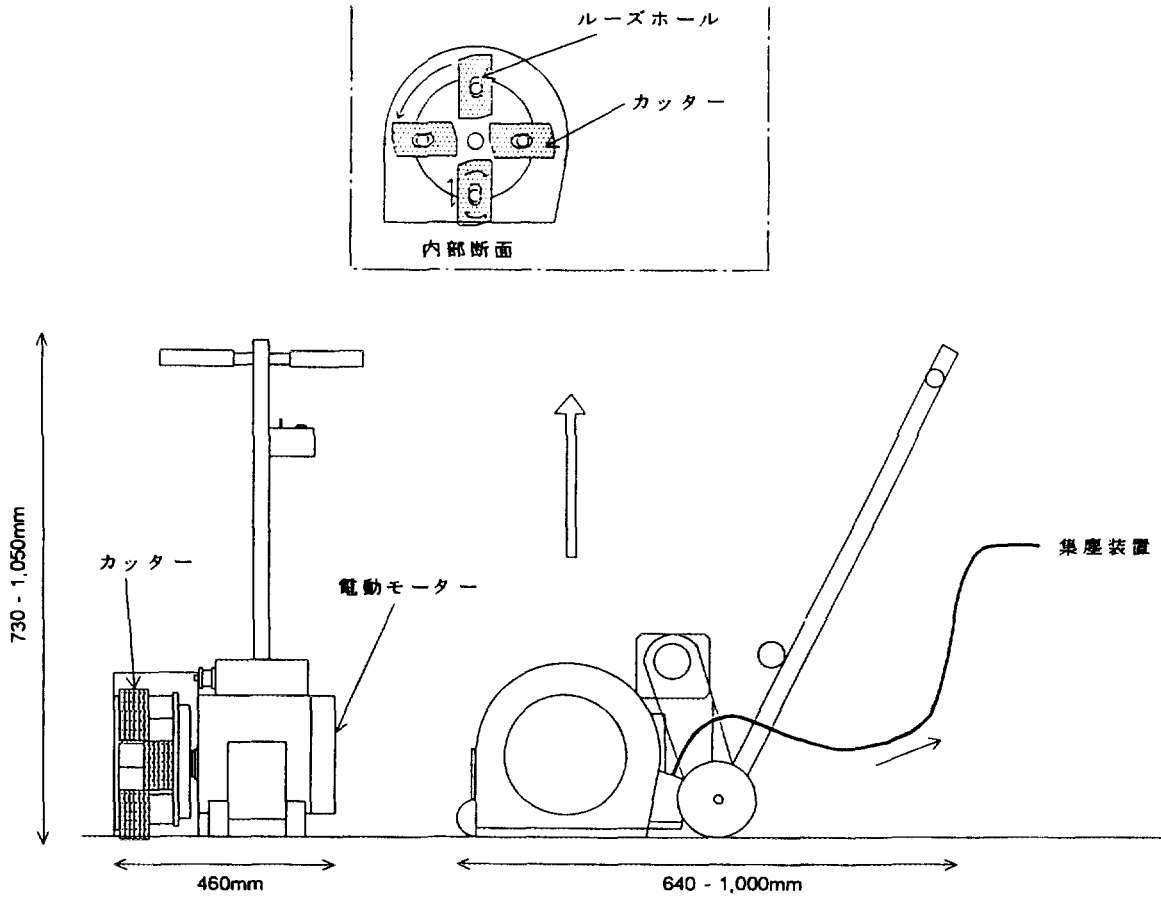
図 II-1 表面汚染簡易測定装置の概念図



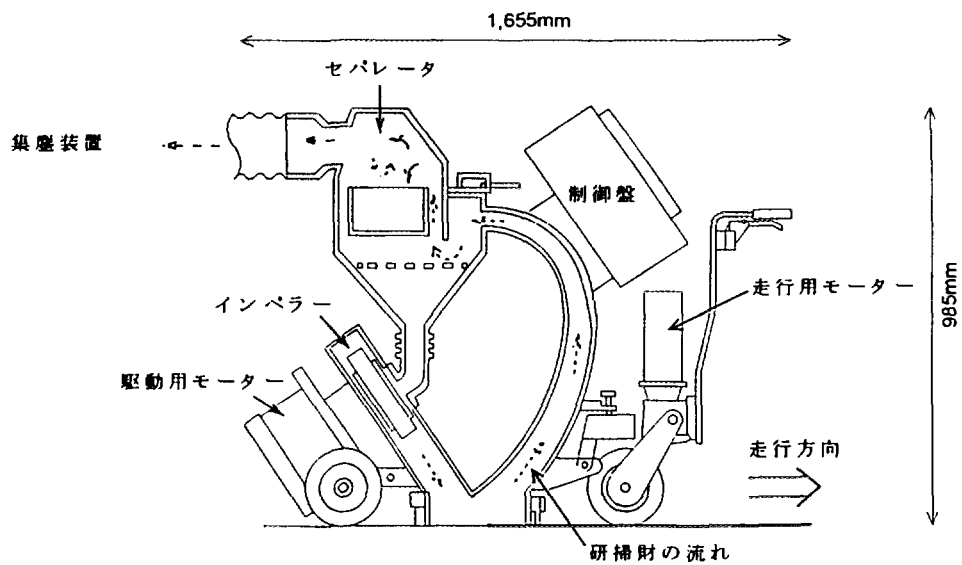
図IV-1 床用スキヤブラの概念図



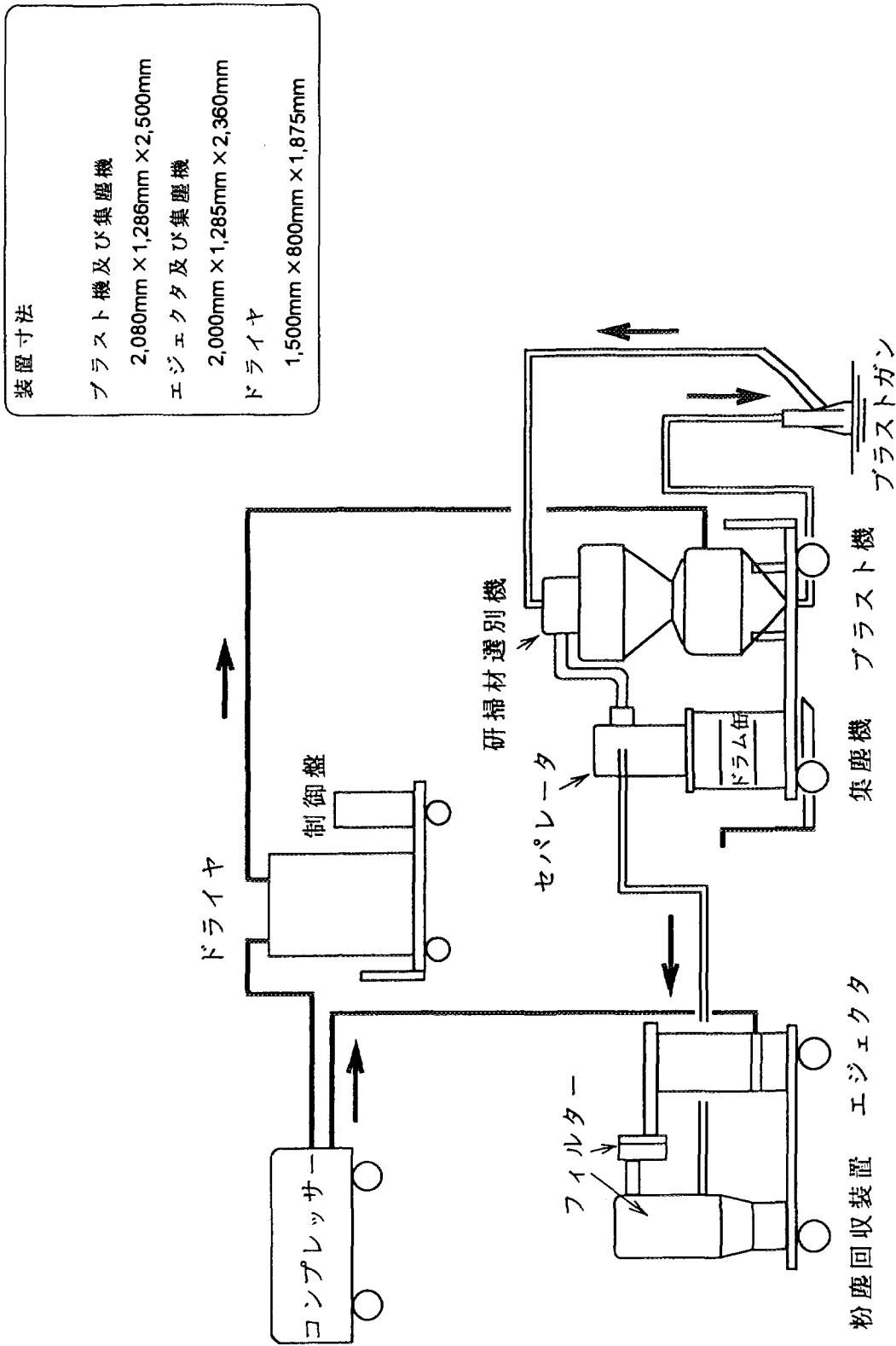
図IV-2 壁用スキヤブラの概念



図IV-3 プレーナの概念図



図IV-4 ショットブラスト装置の概念図



図IV-5 サンドブラストの概念図

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

| 量 | 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 |
| 物質質量 | モル | mol |
| 光度 | カンデラ | cd |
| 平面角 | ラジアン | rad |
| 立体角 | ステラジアン | sr |

表3 固有の名称をもつSI組立単位

| 量 | 名称 | 記号 | 他のSI単位による表現 |
|---------------|--------|----|---------------------|
| 周波数 | ヘルツ | 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 |
| エネルギー, 仕事, 熱量 | ジュール | J | N·m |
| 工率, 放射束 | ワット | W | J/s |
| 電気量, 電荷 | クーロン | C | A·s |
| 電位, 電圧, 起電力 | ボルト | V | W/A |
| 静電容量 | ファラド | F | C/V |
| 電気抵抗 | オーム | Ω | V/A |
| コンダクタンス | ジーメンズ | S | A/V |
| 磁束 | ウェーバ | Wb | V·s |
| 磁束密度 | テスラ | T | Wb/m ² |
| インダクタンス | ヘンリー | H | Wb/A |
| セルシウス温度 | セルシウス度 | °C | |
| 光束 | ルーメン | lm | cd·sr |
| 照度 | ルクス | lx | lm/m ² |
| 放射能 | ベクレル | Bq | s ⁻¹ |
| 吸収線量 | グレイ | Gy | J/kg |
| 線量当量 | シーベルト | Sv | J/kg |

表2 SIと併用される単位

| 名称 | 記号 |
|---------|-----------|
| 分, 時, 日 | min, h, d |
| 度, 分, 秒 | °, ', " |
| リットル | l, L |
| トン | t |
| 電子ボルト | eV |
| 原子質量単位 | u |

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

| 名称 | 記号 |
|----------|-----|
| オングストローム | Å |
| バ | b |
| バール | bar |
| ガリ | Gal |
| キュリー | Ci |
| レントゲン | R |
| ラド | rad |
| レム | rem |

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

| 倍数 | 接頭語 | 記号 |
|-------------------|------|----|
| 10 ¹⁸ | エクサ | E |
| 10 ¹⁵ | ペタ | P |
| 10 ¹² | テラ | T |
| 10 ⁹ | ギガ | G |
| 10 ⁶ | メガ | M |
| 10 ³ | キロ | k |
| 10 ² | ヘクト | h |
| 10 ¹ | デカ | da |
| 10 ⁻¹ | デシ | d |
| 10 ⁻² | センチ | c |
| 10 ⁻³ | ミリ | m |
| 10 ⁻⁶ | マイクロ | μ |
| 10 ⁻⁹ | ナノ | n |
| 10 ⁻¹² | ピコ | p |
| 10 ⁻¹⁵ | フェムト | f |
| 10 ⁻¹⁸ | アト | a |

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC関係理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換 算 表

| 力 | N (=10 ⁵ dyn) | kgf | lbf |
|---|--------------------------|----------|----------|
| | 1 | 0.101972 | 0.224809 |
| | 9.80665 | 1 | 2.20462 |
| | 4.44822 | 0.453592 | 1 |

粘 度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁶ St (ストークス) (cm²/s)

| 圧 | MPa (=10 bar) | kgf/cm ² | atm | mmHg (Torr) | lbf/in ² (psi) |
|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | 1 | 10.1972 | 9.86923 | 7.50062 × 10 ³ | 145.038 |
| 力 | 0.0980665 | 1 | 0.967841 | 735.559 | 14.2233 |
| | 0.101325 | 1.03323 | 1 | 760 | 14.6959 |
| | 1.33322 × 10 ⁻⁴ | 1.35951 × 10 ⁻³ | 1.31579 × 10 ⁻³ | 1 | 1.93368 × 10 ⁻² |
| | 6.89476 × 10 ⁻³ | 7.03070 × 10 ⁻² | 6.80460 × 10 ⁻² | 51.7149 | 1 |

| エネルギー・仕事・熱量 | J (=10 ⁷ erg) | kgf·m | kW·h | cal (計量法) | Btu | ft·lbf | eV | 1 cal = 4.18605 J (計量法) = 4.184 J (熱化学) = 4.1855 J (15 °C) = 4.1868 J (国際蒸気表) |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|--|
| | 1 | 0.101972 | 2.77778 × 10 ⁻⁷ | 0.238889 | 9.47813 × 10 ⁻⁴ | 0.737562 | 6.24150 × 10 ¹⁸ | |
| | 9.80665 | 1 | 2.72407 × 10 ⁻⁶ | 2.34270 | 9.29487 × 10 ⁻³ | 7.23301 | 6.12082 × 10 ¹⁸ | |
| | 3.6 × 10 ⁸ | 3.67098 × 10 ³ | 1 | 8.59999 × 10 ⁵ | 3412.13 | 2.65522 × 10 ⁸ | 2.24694 × 10 ²⁵ | |
| | 4.18605 | 0.426858 | 1.16279 × 10 ⁻⁶ | 1 | 3.96759 × 10 ⁻³ | 3.08747 | 2.61272 × 10 ¹⁹ | 仕事率 1 PS (仏馬力) |
| | 1055.06 | 107.586 | 2.93072 × 10 ⁻⁴ | 252.042 | 1 | 778.172 | 6.58515 × 10 ²¹ | = 75 kgf·m/s |
| | 1.35582 | 0.138255 | 3.76616 × 10 ⁻⁷ | 0.323890 | 1.28506 × 10 ⁻³ | 1 | 8.46233 × 10 ¹⁸ | = 735.499 W |
| | 1.60218 × 10 ⁻¹⁹ | 1.63377 × 10 ⁻²⁰ | 4.45050 × 10 ⁻²⁴ | 3.82743 × 10 ⁻²⁰ | 1.51857 × 10 ⁻²² | 1.18171 × 10 ⁻¹⁹ | 1 | |

| 放射能 | Bq | Ci |
|-----|------------------------|-----------------------------|
| | 1 | 2.70270 × 10 ⁻¹¹ |
| | 3.7 × 10 ¹⁰ | 1 |

| 吸収線量 | Gy | rad |
|------|------|-----|
| | 1 | 100 |
| | 0.01 | 1 |

| 照射線量 | C/kg | R |
|------|-------------------------|------|
| | 1 | 3876 |
| | 2.58 × 10 ⁻⁴ | 1 |

| 線量当量 | Sv | rem |
|------|------|-----|
| | 1 | 100 |
| | 0.01 | 1 |

動力試験船（JPRP）の解体における建家表面の除染と放射能測定（受託研究）