

JAERI-Tech

2001-014



JP0150362



動力試験炉の遠隔解体作業から得られた知見
(受託研究)

2001年3月

立花 光夫・白石 邦生・柳原 敏

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。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 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弘済会資料センター（〒319-1195 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 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

動力試験炉の遠隔解体作業から得られた知見
(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
立花 光夫・白石 邦生・柳原 敏

(2001年1月31日受理)

動力試験炉（JPDR）の解体実地試験では、遠隔解体装置の実証と作業に関する各種データを収集することを目的に解体作業を行った。そこで、作業の内容を分析し、これらの知見を安全性の考慮に関するもの、廃棄物対策に関するもの、作業の効率化に関するものに分類・整理した。例えば、作業の効率化には、施設に関する情報が重要であること、遠隔解体装置の作業手順の検討や問題の解決にはモックアップ試験が有効であること等の知見が得られた。これらの知見は、他の廃止措置作業をより安全で効率的に実施するために有効と考えられる。

本報告書は、JPDR の解体作業に開発した遠隔解体装置を適用する際の主な対策、その結果、解体作業を通して得られた知見をまとめたものである。

本報告書は、電源開発促進対策特別会計法に基づく科学技術庁からの受託研究として、日本原子力研究所が平成4年度から平成12年度までに実施した原子炉解体技術開発の成果である。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

Lessons Learned from Remote Dismantling Activities of JPDR
(Contract Research)

Mitsuo TACHIBANA, Kunio SHIRAISHI and Satoshi YANAGIHARA

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

(Received January 31, 2001)

In the JPDR dismantling demonstration project, the dismantling activities were conducted for the purpose of verification of remote dismantling machines and collection of various kinds of data on work activities.

These lessons were categorized into safety consideration, waste treatment and work efficiency by analyzing the data on work activities. Exemplified are necessities of facility information, efficiency of mock-up tests for evaluation of remote dismantling procedures. There will be useful for implementing other decommissioning projects in safe and efficiency.

This report describes the measure taken for remote dismantling activities and the lessons learned from the dismantling activities.

Keywords: JPDR Dismantling Demonstration Project, Nuclear Power Plant, Plasma-arc, Arc-saw, Disk Cutter, Shaped Explosive, Mechanical Cutting, Water Jet, Control Blasting

This study was conducted under contract with Science and Technology Agency of Japan from 1992 to 2000.

目 次

1.はじめに	1
2.解体実地試験	2
2.1 JPDR	2
2.2 解体技術の開発	2
2.3 解体実地試験	3
2.4 遠隔解体作業	3
3.遠隔解体作業における安全性の考慮・廃棄物対策・作業の効率化	4
3.1 安全性の考慮	4
3.2 廃棄物対策	5
3.3 作業の効率化	6
4.遠隔解体作業の結果	7
5.知見の整理	10
5.1 安全性の考慮	10
5.2 廃棄物対策	10
5.3 作業の効率化	11
6.まとめ	13
謝辞	14
参考文献	14
付録1 プロジェクト管理データ	21
付録2 マニピュレータの概要	23
付録3 プラズマアーク切断装置の概要	25
付録4 成型爆薬工法の概要	27
付録5 ディスクカッターカーク切断装置の概要	29
付録6 アークソーカーク切断装置の概要	31
付録7 機械的切断装置の概要	34
付録8 水ジエット切断装置の概要	36
付録9 制御爆破工法の概要	40

Contents

1. Introduction	1
2. JPDR Decommissioning Project	2
2.1 JPDR	2
2.2 Technology Development	2
2.3 Dismantling Demonstration Project	3
2.4 Remote Dismantling Activities	3
3. Safety Consideration, Waste Treatment and Work Efficiency	4
3.1 Safety Consideration	4
3.2 Waste Treatment	5
3.3 Work Efficiency	6
4. Results of Remote Dismantling Activities	7
5. Arrangement of lessons learned	10
5.1 Safety Consideration	10
5.2 Waste Treatment	10
5.3 Work Efficiency	11
6. Conclusions	13
Acknowledgment	14
References	14
Appendix 1 Data on Project Management	21
Appendix 2 Outline of manipulator	23
Appendix 3 Outline of plasma arc cutting system	25
Appendix 4 Outline of shaped explosive cutting system	27
Appendix 5 Outline of rotary disk knife cutting system	29
Appendix 6 Outline of arc-saw cutting system	31
Appendix 7 Outline of diamond sawing and coring cutting system	34
Appendix 8 Outline of abrasive water jet cutting system	36
Appendix 9 Outline of control blasting	40

図表リスト

- 表 1 JPDR の主要な仕様
表 2 JPDR 解体実地試験に適用した解体工法の性能
表 3 放射性ダストに対する水及びエアカーテンの効果
表 4 爆破工法における安全化対策の結果
表 5 解体実地試験から得られた知見
- 図 1 JPDR の機器・構造物とその解体工法
図 2 JPDR の解体作業の工程
図 3 炉内構造物の構成
図 4 原子炉圧力容器接続配管の構成及びその解体工法

Tables and Figures Captions

- Table 1 Specifications of JPDR
Table 2 Performance of dismantling technologies applied to decommissioning of JPDR
Table 3 Effect of air curtain and water on radioactive dust
Table 4 Results of improvement of safety for blasting methods
Table 5 Lessons learned from JPDR Dismantling Activities

- Fig.1 Components and structures of JPDR and applied techniques
Fig.2 Schedule of JPDR dismantling activities
Fig.3 Configuration of reactor internals
Fig.4 Configuration of pipes connected to reactor pressure vessel and applied techniques

This is a blank page.

1. はじめに

我が国では現在 52 基の原子力発電所が稼働しているが、これらにも寿命があり、いずれ運転を終了する時期が来る。運転を終了した原子力発電所には放射能が存在するため、それを環境に漏洩させないための何らかの処置（廃止措置）が必要となる。そのための作業には、系統除染、機器の解体、建屋表面の除染、放射能測定など多くの要素が含まれているが、これらを安全で効率良く進める上で、廃止措置計画を十分に検討することが大切である。我が国では、日本原子力研究所（以下「原研」とする）において動力試験炉（JPDR: Japan Power Demonstration Reactor）を対象に、発電用原子炉の解体技術を実証するための作業（解体実地試験）が昭和 61 年 12 月から平成 8 年 3 月まで実施された。この結果、原子力発電施設を安全に解体撤去できることが実証されるとともに、適用した各種技術の実用性に関する知見が得られている⁽¹⁾。この後、東海発電所（ガス冷却炉、166MWe）が平成 10 年 3 月に営業運転を停止し、現在、廃止措置の準備が進められている。また、核燃料サイクル開発機構の「ふげん」（重水炉、165MWe）は、平成 15 年までにその運転を終了して、廃止措置される予定であり、そのために必要な技術開発が進められている。他方、軽水型原子力発電所のうち早期に運転を開始したものは、運転期間が既に 30 年を越えており、近い将来廃止措置の検討が不可欠であるし、原研や大学などの幾つかの研究用原子力施設が、既にその目的を終え廃止措置を必要としている。

原子力施設の廃止措置を安全で効率的に進めるためには、実際の廃止措置から得られた経験や知見を整理して、将来の廃止措置計画に反映することが重要である。特に、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撤去であるため、遠隔解体、除染作業など各種作業に関して、作業手順を詳細に検討した上で作業を行うとともに、作業に関する多くのデータを収集した⁽²⁾。特に、開発した技術（遠隔解体技術）を実際の解体作業に適用するにあたって、切断時に発生する放射性ダストや放射線下作業などに対して安全性の考慮、廃棄物対策及び作業の効率化を実施した。これらは、我が国における原子力発電所の初めての経験であったため、それらの処置が必ずしも適切であったかは、作業の実施結果に基づいて評価されるべきものである。また、JPDR の解体実地試験から得られた経験や知見は、将来予想される商業用原子力発電所や、研究用原子炉の廃止措置計画の検討を進める上で有効に活用できるものと考えられる。そこで、JPDR の解体実地試験に関して安全性の考慮、廃棄物対策、作業の効率化の観点から作業の特徴や問題点を調査・整理し、この結果に基づいて、施設に関する情報の重要性、モックアップ試験の有効性、汎用的な遠隔解体装置の必要性、副次生成物の挙動評価の重要性、水中切断における被ばく低減効果などに関する検討を行った。

本報告書は、開発した遠隔解体技術を実際の原子炉の解体作業に適用するにあたって実施した安全性の考慮、廃棄物対策、作業の効率化とその結果及び JPDR の解体実地試験から得られた知見をまとめたものである。

2. 解体実地試験

2.1 JPDR

JPDR は原子力発電所の建設及び原子炉特性の把握、運転保守に関する経験の取得、国産燃料の照射などによる原子力発電技術の国産化への貢献を目的として、我が国で初めて建設された BWR 型の発電用原子炉（出力：45MWt）である。

JPDR は、昭和 38 年 10 月 26 日に発電を開始し、これを記念して「原子力の日」が定められている。その後、昭和 46 年からは出力を倍増（90MWt）して運転を続けたが、昭和 51 年には原子炉を最終停止し、廃止措置に関する研究の準備が始められた。

JPDR の総運転時間は、17,110 時間であり、運転で発生した中性子の照射により放射化した機器・構造物などの放射能インベントリは、 1.74×10^{14} Bq（昭和 61 年 3 月末現在）であった。このうち炉内構造物が 98.8%，原子炉圧力容器が 1.0%，生体遮蔽体が 0.1% であり、殆どが炉内構造物に集中していた。また、施設内には、約 37,500ton の機器・構造物が存在し、その内訳は、炉内構造物、生体遮蔽体などの放射化機器・構造物が 4.68%，ポンプ、タンクなどの機器が 4.01%，発電機、クレーンなどの大型機器が 1.15% であり、建屋構造物等が 90.15% であった⁽³⁾。表 1 に JPDR の主要な仕様を示す。

2.2 解体技術の開発

JPDR の解体実地試験に先立って、「解体システムエンジニアリング」、「放射能インベントリ評価技術」、「解体技術」、「放射線管理」など 8 項目について総合的な技術開発を進めた^{(4)~(7)}。このうち、実際の原子炉の解体作業を進めるにあたっては解体技術の開発が重要であるとの認識に立って、特に、炉心近傍に位置する放射能を帯びた機器（炉内構造物、原子炉圧力容器）及びコンクリート構造物（生体遮蔽体）の安全な撤去を目的に、機器・構造物の特徴に応じた解体装置及び遠隔操作技術を開発した。鋼構造物の解体技術の開発においては、作業スペースの制約による狭隘部での使用、厚肉構造物の切断への適用性などに留意した。コンクリート構造物の解体技術の開発においては、切断性能の向上、粉塵などの副次生成物の発生量の低減などに配慮した。また、強い放射能を帯びた炉内構造物などの解体は、作業者の被ばくの観点から接近して行うことが不可能であり、場合によっては水中での作業が必要となるため、解体装置などを離れた場所から精度良く操作することのできる遠隔操作技術が必要であった。そこで、各種の要素試験を通して解体工法・解体機器の遠隔操作技術に関する経験を積むとともに、装置のシステム化、モックアップ試験を進め、次のように JPDR の解体実地試験に適用した。炉内構造物は、プラズマアーク切断工法により水中で解体し、原子炉圧力容器はアークソー切断工法により水中で解体した。また、生体遮蔽体については、3 工法（機械的切断工法、水ジェット切断工法、制御爆破工法）を用いた。解体技術の開発では、このような技術を開発し、実際の原子炉の解体作業に望んだ。表 2 に JPDR の解体実地試験に適用した解体工法の性能を記す。

2.3 解体実地試験

解体作業は、昭和 61 年 12 月から始められ、まず、原子炉周辺にある機器・構造物を撤去し、遠隔解体装置の設置場所を確保した。続いて、炉内構造物をはじめとする放射化した機器・構造物の解体を行った。図 1 に炉心近傍に位置する機器・構造物の解体に適用した技術の概略を示す。施設内の機器・構造物を撤去した後は、建屋表面の除染と放射能の確認測定が行われた。この後、放射線管理区域を解除して建屋を解体した。解体作業は、平成 8 年 3 月までに全て終了した。図 2 に解体実地試験の工程を示す。

解体実地試験の特徴は、開発した様々な遠隔解体装置を実際の原子炉の解体に適用し、その技術を検証した点にある。他方、合理的な廃棄物管理の重要性を認識して放射能レベルなどの廃棄物の特性に応じ、種々の廃棄物容器を用いるなど効率的な廃棄物の管理を試みた。特に、生体遮蔽体の一部や建屋表面を除染したコンクリート（極低レベルコンクリート）など放射能レベルの低い固体廃棄物については、我が国で初めて原子力施設のサイト内に簡易埋設処分する道を開いた。

2.4 遠隔解体作業

解体実地試験の中では、炉内構造物、原子炉圧力容器接続配管、原子炉圧力容器、生体遮蔽体の解体において、開発した技術を用いた遠隔解体作業を行った。以下に作業の概要を述べる。

炉内構造物の解体

炉心近傍に設置された機器の線量当量率は 10Sv/h を越えることから炉内構造物の解体には、遠隔操作（マニピュレータ又はマスト型遠隔操作装置）による水中プラズマアーク切断工法を適用することとした。炉内構造物の構成を図 3 に示す。解体方法は、各機器の放射能レベルに応じて変更した。即ち、蒸気乾燥器、ライザ中枠、気水分離器、炉心スプレイスパージャなどの比較的放射能レベルの低い機器は、原子炉格納容器 3 階に設置したグリーンハウス内でプラズマによる切断又は一体のままで鋼製容器に収納した。一方、インコアモニタチューブ、炉心シュラウド、下部支持板、上部及び下部グリッド、制御棒ガイドチューブなどの比較的放射能レベルの高い機器は、原子炉圧力容器内で粗断又は一体のまま取り外して使用済燃料プール（以下「燃料プール」とする）に搬送し、燃料プール内で細断又は一体のままで遮蔽容器に収納した。

原子炉圧力容器接続配管の解体

原子炉圧力容器の解体に先だって、原子炉圧力容器に接続する配管（以下「接続配管」とする）の撤去が必要であった。しかも、原子炉圧力容器を水封する円筒を生体遮蔽体との間に設置するため、接続配管は原子炉圧力容器の近傍で撤去する必要があった。しかし、原子炉圧力容器近傍は線量当量率が非常に高く、強制循環系配管のノズル近傍では、 1.3mSv/h に達した。このため、接続配管の切断は遮蔽板を設置した後既存工法で撤去するか又はディスクカッタ一切断や成型爆薬工法を用いて遠隔で撤去した。接続配管の構成と適用した解体工法を図 4 に示す。

原子炉圧力容器の解体

原子炉圧力容器は、分厚い炭素鋼（ASTM-A302Gr.B, フランジ部：242.1mm, 脳部：67mm）で作られ、内面にはステンレス鋼（6.4mm）が内張りされているので、その解体には異種金属を同時に切断でき、かつ厚いものを切断できる装置が必要であった。しかも、原子炉圧力容器は高度に放射化しており、炉心近傍の外周部における線量当量率は最大9mSv/hであったため、遠隔操作により解体撤去した。即ち、生体遮蔽体と原子炉圧力容器の間に円筒を設置して、その中に水を張り、アークソー切断装置により原子炉圧力容器を水中切断した。原子炉圧力容器の切断片は約70～80cmのブロック状とし、それをサービスフロア上で放射能レベルに応じて鋼製又は遮蔽容器に収納した。

生体遮蔽体の解体

原子炉圧力容器撤去後、炉心近傍に位置する生体遮蔽体突出部（以下「突出部」とする）付近の線量当量率は最大2.2mSv/hと低下したが、作業者が長時間接近して作業できる環境ではなかった。そこで、機械的切断装置、水ジェット切断装置により遠隔で突出部を解体した⁽⁸⁾。突出部撤去後、生体遮蔽体内部の線量当量率は最大50μSv/hに低下し、作業者が十分に接近して作業することが可能となった。そこで、その解体には、制御爆破工法を適用した^{(9),(10)}。制御爆破工法では、解体する部分に数十cmおきに穴を開け、その中に爆薬を装填し、わずかな時間差で各々の爆薬を燃焼させてコンクリートにクラックを入れた。制御爆破により生体遮蔽体にクラックを入れた後は、在来工法によりコンクリートを破碎してフレキシブルコンテナに収納し、埋設試験場まで運搬した。

3. 遠隔解体作業における安全性の考慮・廃棄物対策・作業の効率化

遠隔解体装置を実際の解体作業に適用するにあたって、作業者の外部被ばくの低減や放射化した機器・構造物の切断時に発生する放射性ダストに対する安全性の考慮及び切断時に発生するドロス等の廃棄物対策が必要であった。ここでは、放射化した機器・構造物の遠隔解体作業で実施した安全性の考慮、廃棄物対策及び作業の効率化について述べる。

3.1 安全性の考慮

炉心部放射化機器の解体に関する安全性の考慮としては、外部被ばくや放射性ダストの低減に対する水中作業の適用、局所集塵装置の設置、爆破とともに発生する衝撃圧・爆風圧防止策を挙げることができる。以下にその具体例を示す。

水中作業の適用

炉内構造物の切断、切断片の燃料プールへの移送、容器収納の作業は水中で実施した。このうち、切断片の燃料プールへの移送と容器収納作業は作業員がサービスフロアからクレーンなどの機器を操作したため、原子炉圧力容器、キャナル、燃料プール中に水を満たすことによる遮蔽効

果を利用した。また、プラズマアーク切断やアークソー切断では、粒子状の放射性物質が副次的に生成されるが、これらを水中に閉じ込め気中への移行を抑える効果を利用した。

局所集塵装置の設置

切断中に発生する放射性ダストは、局所集塵装置により吸引してフィルタで回収した。さらに、放射性ダストの作業環境への漏洩を抑えるためにグリーンハウスを設置した。特に、炉内構造物の解体では、エアカーテン（給気流量：40m³/min、排気流量：140m³/min）を設置して、放射性ダストの回収及び環境への拡散防止に努めた。エアカーテンは、給気ファンと排気ファンを用いて水面近傍に空気の流れを生成し、給気量と排気量の差（換気率 100m³/min、エアカーテンの下部は常時 50m³/min で排気）により発生する放射性ダストを回収するものである。また、生体遮蔽体の解体では、放射性ダストに加えて冷却水がミストとなって飛散するため、その対策として作業領域全体をグリーンハウスで覆う他に、ミストエリミネータ（吸い込んだ空気の冷却除湿により相対湿度を下げるためのもの）を付加した切断機局所集塵装置を使用した。

衝撃圧・爆風圧防止策

爆薬を使用する成型爆薬や制御爆破工法では、爆破に伴って発生する衝撃圧や爆風圧に対する安全性を考慮した。成型爆薬による水中切断では、爆薬の燃焼によって発生する水中衝撃圧に対する緩和対策として、制御棒ガイドチューブの内部やその周辺に緩衝材を設置した。また、制御爆破工法により発生する爆風圧の緩和対策として、爆破部位を覆うように防爆マット及び防爆シートを設置した。

3.2 廃棄物対策

炉心部機器は放射能レベルが高いこと、また、水中でプラズマアークなどの火器により解体を行ったことから、多くの副次生成物が発生し、これらにより周りの水を汚染するため、プール水を液体廃棄物として処理するなど特別な考慮を必要とした。そこで、これらの廃棄物対策について以下に記す。

液体廃棄物の処理は、原則的にフィルタ（50μm）やイオン交換樹脂の有する既存の処理系を適用することとしたが、要素試験において炉心部機器の解体作業では短期間に多量で性状の異なる液体が発生し、原子炉の運転時を想定した既存の処理系では十分に処理できないことが予想されたため、解体工法に応じた特別な処理系を付加した。即ち、プラズマアーク切断では、ドロスの粒径が 1mm 以上と大きく水中浮遊物の発生量は非常に少なかったのに対して、アークソー切断では、溶融した多量のドロスや微細な粒子が多量に水中に存在した。また、コンクリート構造物の解体では、ソーブレードの冷却や切断用の高圧水が液体廃棄物となるとともに、切断によって発生するスラッジや研磨材などの固体廃棄物が多量に発生した。これらの対策として、解体工法に応じて 3 種類の処理系をそれぞれ付加した。

プラズマアーク切断：ストレーナ（メッシュ幅 0.8mm）とフィルタ（0.5μm）の付いた小型の水

中浮遊物・落下ドロス回収装置を原子炉ウェル内に設置した。

アークソ一切断：微粒子（直径 37 μm の球状）を除去するカートリッジフィルタと粒径の大きなドロス（約 100 μm 以上）を回収するドロス分離槽からなる排水処理装置を地下 2 階（強制循環ポンプ室）に設置し、排水は原子炉圧力容器の強制循環系配管から取り出した。

機械的切断・水ジェット切断：切断に伴って発生するスラリー（水、研磨材、コンクリートなどの混合液）を回収し、研磨材とコンクリートを分離するとともに残った水を中和するスラリー回収処理装置を使用した。

他方、遠隔解体作業では、装置自身の汚染を防ぐため、汚染防止対策を実施した。例えば、グリーンハウス内部や水中に設置した装置は、放射性ダストやドロスなどにより汚染する可能性があるため、その防止対策として、装置全体が汚染の可能性の高い空間（グリーンハウスの内部）に入らないようにし（アークソ一切断）、汚染の可能性の高い水中に没するマニピュレータや切断用架台の表面にはストリッパブルペイントを塗布した（プラズマアーク切断）。

3.3 作業の効率化

JPDR の解体実地試験では、開発した装置の適用性を実証するため、各種データを収集することを 1 つの目的としており、作業の効率化は特に考慮しなかった。しかし、作業は、年度毎に立てた作業工程通りに終了することが必要であり、作業工程が予定より遅れた場合には、2 台の装置を並行して用いるなどにより、その迅速化を図った（プラズマアーク切断、機械的切断）。また、作業の安全性や確実性を増加させるために実施したモックアップ試験では、作業員の習熟が図られ、作業の効率化に繋がった。

モックアップ試験では、実際の解体作業で使用する遠隔解体装置を用いて、模擬機器を切断する試験を実施した。模擬機器は、実際の機器の中から代表的なもの（形状や寸法などが一般的或いは特殊なもの）を選定し、形状、寸法、材質を実際の機器と同一とし、また、近接する構造物も模擬した。本試験では、装置の据え付け、切断、切断完了までの作業内容の把握、据え付け、切断、切断片搬出時の作業空間の確認、ノズルやトーチなどの交換手順の確認、切断や切断片の搬出手順の確認、トーチやソープレードなどの設定精度の確認、最適な切断条件の抽出、装置の習熟度の向上、電源ケーブルの取り扱い方法、などについて検討するとともに、作業時間などに関するデータを取得した。

4. 遠隔解体作業の結果

遠隔解体作業で実施した安全性の考慮、廃棄物対策及び作業の効率化の結果について述べる。

安全性の考慮

水中作業：炉心シラウドを原子炉圧力容器内部から二次切断を行う燃料プールへ水中移送（水深 0.5m）する作業では、作業環境の線量当量率は $500 \mu\text{Sv/h}$ （表面線量当量率：最大 3.7Sv/h ）となり、炉心シラウドの移送中における作業者の被ばくは $0.34 \text{ 人} \cdot \text{mSv}$ と低い値であった。

局所集塵：プラズマアーク切断時のエアカーテン下部に対するエアカーテン上部における気中放射能濃度の割合(%)を表 3 に示す。水深 3.3m での切断では、放射能濃度の割合は、7~26%であるのに比べ、気中切断では、82%であった。水中切断では、放射性ダストの発生量が少なく、排気する体積（エアカーテンと水面までの間の空間）が少ないのでに対して、気中切断では、放射性ダストの発生量が多く、排気する体積も多くなるため、今回使用したエアカーテンは水中切断においては効率的に放射性ダストを回収できる能力を有していたが、気中切断に対しては十分な能力を有していなかったものと考えられる。

一方、成型爆薬を用いて配管を気中切断した場合には、表 3 に示すようにエアカーテン下部のエアカーテン上部に対する気中放射能濃度の割合は 35~59% であった。しかし、非常用復水器系の切断の場合、約 210% と下部より上部の方が高くなかった。これは、爆破により発生した放射性ダストが瞬時にエアカーテンを通り抜けたことによるものと考えられる。また、水ジェット切断中に、キャビティ内部の塵埃を採取し、気中放射能濃度を測定した結果、切断部位の比放射能が高い 2~4 段目の切断時に高い値を示したが、発生したミストは切断機局所集塵装置により $0.877/\text{min}$ の割合で回収できた。ミストの回収率は、モックアップ試験時の値 ($1.86/\text{min}$) に比べると約半分ではあったが、切断機局所集塵装置に取り付けたフィルターの圧力損失の交換が必要なほど高くならなかったことを考えると十分な能力を有していたものと考えられる。

衝撃圧・爆風圧防止策：緩衝材、防爆マット及び防爆シートの効果を調べるために緩衝材の内外での水中衝撃圧及び防護のある時と無いときの爆風圧を測定した結果を表 4 に示す。成型爆薬時に制御棒ガイドチューブの周辺に設置した緩衝材は、爆破時に発生した水中衝撃圧を約 $1/6$ に低減出来ることがわかる。さらに、制御棒ガイドチューブの内部に挿入した緩衝材により、制御棒ガイドチューブ下部フランジ部では衝撃圧による影響をほとんど受けなかった。制御爆破では、爆破区画を囲うように設置した防爆マット及び防爆シートは爆風圧を最大 $1/50$ に低減できた。

廃棄物対策

水中浮遊物・落下ドロス回収装置：プラズマアーク切断においては、終了時点の水中放射能濃度は、作業開始前の約 20 倍に上昇した。炉内構造物の比放射能、切断条件および水中放射能濃度の測定結果などから、切断部の約 $1/1000$ 程度の放射能が水中に移行したと考えられる。炉内構造物を水中切断した後の燃料プールの除染作業（ドロスの回収など）では、水中浮遊物・落下ドロ

ス回収装置を用いたが、水位の低下とともに線量当量率の上昇（サービスフロア上で $150 \mu\text{Sv/h}$ 、約 8m 下にある燃料プールの底は 10mSv/h 以上）が見られ、落下したドロスを十分に回収できなかつた。今回使用した水中浮遊物・落下ドロス回収装置は、十分な能力を有していなかつたものと思われる。同作業により回収した水を既存のフィルターで処理したところ、水中放射能濃度を下げることができなかつた。しかし、既存のイオン交換樹脂を用いて処理を行つた結果、水中放射能濃度は検出限界値以下まで低下することができた。

排水処理装置：アークソーによる原子炉圧力容器の解体作業では、原子炉圧力容器 5 段目の水平切断時において、切断 10 分後の水中放射能濃度は切断前の約 21 倍となつたものの、約 20 時間後の水中放射能濃度は切断開始前の値となつた。また、原子炉圧力容器及び排水処理装置の系統内の水を採取し、切断前後の濁度を測定した結果、切断により水の濁度は、原子炉圧力容器内部で約 37 倍に、系統内部は原子炉圧力容器内部の約 58 倍まで増加したが、約 50 分の排水処理装置の運転によって、最大約 $1/7$ に低下することができた。また、排水処理装置のカートリッジフィルタの負担を軽減するため、大きな粒子が分離されるまで、分離槽のみで循環運転することにより、排水処理装置によってアークソー切断により発生したドロスを効率よく回収することができた。

スラリー回収処理装置：本装置は、機械的切断装置及び水ジェット切断装置により生体遮蔽体を解体した時に発生したスラリーを回収処理したものである。機械的切断装置によって生体遮蔽体（約 9.3ton）を撤去した時には 86.8m^3 の冷却水を処理し、1.7ton のスラッジを回収できた。一方、水ジェット切断装置を用いて生体遮蔽体（28.6ton）などを撤去した時には約 504m^3 （装置洗浄水を含む）の水を処理し、研磨材約 35ton とスラッジで約 10ton（含水率：約 50~70wt%）を回収できた。なお、機械的切断では、生体遮蔽体中に含まれるトリチウムが排水に移行し、切断期間中の平均濃度は 2.5Bq/cm^2 （切断前の約 8 倍）となり、切断終了後約 1 ヶ月間トリチウムが検出された。これは、沈殿槽の底に沈降したスラッジから水にトリチウムが移行したためと考えられる。また、水ジェット切断においても排水のトリチウム濃度（生体遮蔽体 2~4 段目の解体）が切断当初に比べて約 50 倍まで上昇した。

ストリッパブルペイント：プラズマアーク切断作業後の汚染の状態を調べた結果、スレーブアームで把持したプラズマトーチ保持治具の表面密度が最も高かつた。しかし、ストリッパブルペイントの剥離後には、スレーブアームの 1~5 軸で汚染が検出されず、6, 7 軸については汚染が検出された。これらの汚染は、アセトンによる拭き取りにより基準値 (0.4Bq/cm^2) 以下まで除染することができた。

作業の効率化

モックアップ試験は、プラズマアーク切断、アークソー切断の問題点の摘出とその対策に有効であった。以下にその概要を示す。

プラズマアーク切断(1) : プラズマアーク切断を効率的に行うためには、切断対象物とプラズマトーチの間隔を約 5mm に設定する必要があり、このために精度ある遠隔操作が求められた。プラズマトーチを精度良く目標とする位置に移動するためには、トーチ駆動座標系と炉内構造物座標系の関係を精度良く設定することが第一条件となる。そこで、両座標の変換には基準点を設定し、その基準点に対してトーチ駆動座標系への変換係数を求めた。当初、プラズマトーチを目標とする場所に移動させることができなかつたが、上記原因によることを明らかにし、その対策を講ずることにより、目的を達成することができた。

プラズマアーク切断(2) : 炉内構造物の解体作業では、炉内構造物の粗断（又は原子炉圧力容器からの分離）は原子炉圧力容器の内部、また、その細断と容器収納は燃料プール内部と別々の場所（原子炉圧力容器と使用済燃料プール）で実施した。これは、原子炉圧力容器の直径は 2m と狭く、この内で全ての炉内構造物を切断し、容器に収納することが困難であるのに対して、燃料プール内部は事前に全ての機器・構造物を撤去しており、広い空間を有していたことによる。この結果、プラズマアーク切断装置を 2 台使用して切断作業を実施することとなった。なお、同一の切断動作が何度も繰り返される細断作業（二次切断）では、回転の自由度を有する切断用架台を使用し、切断装置の動作を単純化することにより切断作業の効率化を図った。

アークソー切断 : 原子炉圧力容器と同等の寸法を持つ模擬機器により装置の要素試験を行った結果、ソーブレードが大き過ぎたため、原子炉圧力容器の壁面に対してソーブレードを直角に設定できないことが分かった。これは、開発したアークソー切断装置は、100 万 kW 級の原子力発電所の解体作業に適用することを目的にしたものであり、その寸法は JPDR を対象とするものより大きく設計されたためである。そこで、片側に角度を変えてソーブレードを設定したことから、ソーブレードと原子炉圧力容器との幾何形状が左右対称にならず、ソーブレード側面に電流が漏れる現象が認められた。この対策として、ソーブレード側面に絶縁材を取り付けて電流の漏洩防止を図り、垂直切断が可能となった。

機械的切断 : 生体遮蔽体の解体では、カッター式切断機とコアボーリング式切断機によって生体遮蔽体の突出部上部を解体する予定であった。本装置を用いた解体作業を開始した時点において工程が遅れていたため、コアボーリングとカッター式切断機による切断作業を並行して行うこととした。すなわち、開発した装置のカッター式切断機のみを使用し、コアボーリングは別途簡易装置を数台用いた。これにより作業の効率化を図ることができた。すなわち、切断作業を 73 日で計画していたが、実際には 39 日であり作業工程を 34 日短縮できた。

5. 知見の整理

各種対策の結果や遠隔解体作業から得られた経験をもとに、安全性の考慮、廃棄物対策、作業の効率化の観点から作業の特徴や問題点を抽出し、以下のような知見として整理した。表 5は主要な知見をまとめたものである。

5.1 安全性の考慮

遠隔解体作業の有効性

炉心部機器の解体に適用した遠隔解体装置は、作業者の被ばく低減に有効であった。しかし、準備や後処理作業のような人手で行う付随作業で多くの被ばくが認められた。遠隔解体作業を実施するには準備から後処理作業を含めた解体作業の計画を十分に検討し、作業者が放射線に接近する作業を低減するとともに、付随作業についても遠隔作業の適用を検討する必要がある。

爆破作業の安全性

建屋内部の限定された空間で爆薬を使用する場合、切断片の飛散や衝撃圧に対する安全性の考慮が重要である。そのため、緩衝材や防爆マット設置などの各種対策を実施し、安全性を確保した。この結果、爆破に伴う振動、爆風など、作業環境及び周辺に及ぼす影響は少なかった。爆破による解体は、比較的安全で、しかも効率的に機器やコンクリート構造物を解体するには有効な手段である。

放射性ダストの特性評価

炉心部機器の遠隔解体作業では、気体廃棄物を既存の処理系では十分に処理できないため、解体工法に応じた処理系を附加した。これらの処理系のうち、今回使用したエアカーテンは、プラズマアーク切断時の水中切断時に効果を上げたが、空中切断や成型爆薬では効果が得られなかつた。これは、放射性ダストの特性評価やエアカーテンの処理能力が十分ではなかつたことに起因している。作業を安全に進めるためには、放射性ダストなどの特性を正確に把握し、エアカーテンの処理能力などについて十分に検討する必要がある。

5.2 廃棄物対策

水の処理

機械的切断や水ジェット切断では、ソーブレードの冷却や切断などのために多量の水を使用したが、水中切断や冷却材を要する切断を行う場合には、合理的な水処理が必要である。また、生体遮蔽体の解体で発生するスラッジを長期間放置しておくとトリチウムが水に移行するため、発生したスラッジは早めに処理する必要がある。さらに、アークソー切断での水処理は、カートリッジフィルタの負担を軽減するため、大きな粒子が分離されるまで、分離槽のみで循環運転するなど、運転方法を工夫した。遠隔解体作業では、対象となる機器・構造物によって、発生量や水質（pH 又は濁度など）が異なるとともに、その処理に多くの時間が必要となつた。このように、

対象となる機器・構造物毎に水処理方法の効率性などを検討する必要がある。

二次廃棄物の低減

遠隔解体作業では、使用した解体装置や研磨材などを二次廃棄物として処理した。特に、水ジェット切断で使用した多量の研磨材を廃棄したが、研磨材とスラッジの分離により研磨材を再利用することは廃棄物の低減にとって必須の要件となる。また、使用した解体装置は、汚染防止対策（ストリッパブルペイント）や汚染区域に入る部分を減らす対策などにより、再利用すべきである。

さらに、炉心部機器の解体に適用したマニピュレータ、アークソーカット装置、水ジェット切断装置、機械的切断装置は、装置本体を数本のアウトリガーで原子炉圧力容器や生体遮蔽体に固定するものであり、また、付属機器である電源、油圧装置、集塵装置、水処理装置等も基本的な構造などは同一である。二次廃棄物の低減のために機器の共有化が求められる。

ドロスの特性評価

炉心部機器の遠隔解体作業では、固体、液体廃棄物を既存の処理系では十分に処理できないため、解体工法に応じた処理系を附加した。これらの処理系のうち、アークソーカット時の排水処理装置は予想以上の効果を上げたが、プラズマアーク切断時の水中浮遊物・落下ドロス回収装置は十分な効果が得られなかった。これは、ドロスの特性評価が十分ではなかったことに起因している。ドロスの特性を正確に把握し、その処理方法について十分に検討する必要がある。

5.3 作業の効率化

施設情報の重要性

最適な解体計画を作成し、その計画に従って作業を確実に進めるためには、施設情報が重要である。施設情報は、基本的には解体を実施する前に取得するが、解体作業の進捗に伴って施設の状況が変化するため、逐一、施設情報を収集することも必要となる。

一方、作業実施前の施設情報は、図面に頼ることが多いが、現実の機器の細部形状などが図面と異なる場合があるため、可能な限りカメラなどを用いて事前の調査を実施し、切断対象物の形状など十分な情報を得た上で解体作業の計画を入念に立てる必要がある。また、実際の作業を進めるにあたっても、施設情報を収集することは大事である。例えば、プラズマアーク切断では、実際の情報を十分に収集することにより、プラズマトーチの位置決め（二方向からの水中カメラによる監視）や狭い場所における切断部の分離の確認（小型カメラ）を確実に実施できた。一方、ディスクカッター切断では、事前に配管溶接部のバリを発見できずに切断機ヘッド部を切断予定位置まで挿入することが出来なかった。

さらに、施設情報に加えて、放射能インベントリ情報が重要であった。解体実地試験では、放射能インベントリを精度良く評価し、その結果に基づいた解体計画を立て、解体から発生した廃棄物を放射能レベルによって分類することが出来た。最適な解体計画を作成するには、解体作業を実施する前に、施設内に存在する放射能に関する情報を十分に調査・分析する必要がある。

装置の汎用性

遠隔解体装置には、作業計画の変更や様々な付随作業に対応できるような汎用性が必要である。ディスクカッターカットでは、カッターナイフが配管外側に露出した時（切断完了時）に、支持具に接触しないよう切断位置に相当する部分にスリットを設けた。しかし、強制循環系配管の切断では、切断位置を変更する必要があり、予定通りの切断を実施することができなかつたため、カッターナイフが破損した。切断位置の変更にも対応できるようにする必要がある。

一方、水ジェットによる生体遮蔽体の解体では、コンクリートが鉄筋よりも柔らかいため、鉄筋が切れ残った。そこで、この部分を切断するために水と研磨材を切断予定箇所に集中させて噴射することが必要となった。ノズル部を鉄筋に近づける作業はカメラの映像に基づいて遠隔で行ったため、この作業を習熟するまでに多くの時間を要した。作業の習熟に依存しない簡易な操作方法の開発が必要である。

遠隔解体作業では、装置の設置や保守のための作業が必要であり、作業人工数の増大や作業者の被ばくの原因となった。例えば、ディスクカッターカットでは、原子炉圧力容器の外側からカッターナイフを配管内に挿入したため、予め配管を切断するとともに、装置を設置するスペースの確保が必要となった。アークソーカットでは、原子炉圧力容器を水中切断したために、接続配管の原子炉圧力容器近傍での撤去や円筒容器の設置が必要であった。また、機械的切断では、ソーブレードが切断中に突出部上部へ噛み込む事象が発生し（5回），その復旧作業を作業者が直接キャビティ内で行った。このように、遠隔解体作業には、装置の設置・保守に多くの時間を要し、また、これらの作業において作業者が被ばくすることが多いことが分かった。そのため、作業員の被ばくをさらに低減するためには、このような作業にも適用できる遠隔解体装置が必要となる。

作業の重複性

解体実地試験では、開発した解体装置の適用性を実証するために切断対象物毎に解体装置を変更して作業を実施した。従って、プラズマアーク切断装置による炉内構造物の解体、アークソーカット装置による原子炉圧力容器の解体毎に、新たな準備作業や後処理作業が必要になった。作業の効率を考えると、プラズマアークとアークソーカット装置の双方に使用可能なグリーンハウスの設置など、連続した解体作業が可能となる工程や作業計画を作る必要がある。

モックアップ試験の有効性

モックアップ試験は、プラズマトーチの操作に関する問題点の解決やアークソーカットにおける垂直切断時の問題点の解決に有効であった。開発した装置を実際に適用する前に、その装置に関する各種データを取得し、その結果から解体作業の計画を作る必要がある。

並列作業の有効性

プラズマアーク切断では、炉内構造物の粗断は原子炉圧力容器の内部、また、その細断と容器収納を燃料プール内部と別々の場所で実施し、作業の並列化によって切断作業の効率化を図るこ

とができた。また、同一の切断動作が繰り返される細断作業では、切断装置の動作を単純化することにより切断作業の効率化を図ることができた。機械的切断では、コアボーリングとカッターワイヤ式切断機による切断作業を並行して実施することにより作業の効率化を図った。このように、遠隔解体作業を実施する場合、作業の並列化や装置動作の単純化によって作業の効率化について検討する必要がある。

6. まとめ

開発した解体装置を適用した遠隔解体作業の結果などを分析する事により、近い将来予定されている商業用原子力発電所などの廃止措置をより安全で効率的に実施するために有用となる知見を整理した。

安全性の考慮

- 準備から後処理作業を含めた解体作業の計画を十分に検討し、作業者が放射線に接近する作業を低減すると共に、必要な場合には、汎用的な遠隔解体装置の適用などによって、作業者の被ばく低減対策を講じることが大切である。
- 防爆マットなどを設置することによって、爆破によって発生する爆風圧などを低減することができた。爆破による解体は比較的安全で、しかも効率的に機器やコンクリート構造物を解体するには有効な手段である。
- 水中切断やエアカーテンを使用することによって、作業環境への放射性ダストの発生を低減することができた。しかし、エアカーテンの性能を十分に発揮するためには、安全性の観点から放射性ダストの特性の把握、エアカーテンの処理能力などの更なる検討が必要である。

廃棄物対策

- 機械的切断や水ジェット切断では、使用した水や研磨材などの再利用をできる限り実施し、放射性廃棄物量を低減するための処置が必要になる。
- 生体遮蔽体の解体では、発生したスラッジ等からトリチウムが水に移行するため、切断に伴って発生するスラッジ等は早めに処理を行う必要がある。
- 遠隔解体装置毎に付属機器を製作したが、二次廃棄物の低減のためにも機器の共有化が必要である。
- アークソー切断時の排水処理装置は効果を上げたが、今回使用したプラズマアーク切断時の水中浮遊物・落下ドロス回収装置は十分な効果が得られなかった。ドロスの特性を正確に把握し、その処理方法や処理能力について十分に検討する必要がある。

作業の効率化

- 放射能インベントリを精度良く評価した事により、廃棄物を放射能レベル毎に分類する事が可能であった。解体作業を実施する前に、施設内に存在する放射能に関する情報を十分に調査・分析する必要がある。
- 遠隔解体作業の実施においては、解体施設の機器・構造物に関する情報を十分に把握することが重要である。
- 遠隔解体作業を効率的に実施するためには、実際の作業を実施する前に、装置の操作訓練により操作員の習熟度の向上が必要である。または、そのような訓練の必要のない簡易な操作方法の開発が必要である。
- 実際の遠隔解体装置の適用を考えた場合、様々な切断対象物の状況に対応できるような汎用的な装置の開発が必要である。
- 複数の遠隔解体作業を実施する場合、準備や後処理作業などの重複作業を見直すことによって、連続した解体作業が可能となる作業計画を作る必要がある。
- 開発した遠隔解体装置を実際に適用する前に、その装置に関する各種データを取得し、その結果から解体作業の計画を検討したが、モックアップを使用した作業の検討は有効であった。
- プラズマアーク切断では、機器の粗断や細断を別々の場所で実施し、作業の並列化を行うとともに細断では装置の動作を単純化することによって切断作業の効率化を図ることが出来た。

謝辞

本報告書をまとめるにあたって、バックエンド技術部デコミッショニング技術開発室の諸志に種々の助言や援助をいただきました。また、JPDR の解体実地試験は、バックエンド技術部の旧原子炉解体技術課が実施したものであり、データの取得、分析に当たっては当課室の諸氏に多くの協力をいただきました。ここに、深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 宮坂 靖彦, 他: “JPDR 解体実地試験の概要と成果”, 原子力誌, 38[7], 553(1996)
- (2) 白石 邦生, 助川 武則, 柳原 敏: “動力試験炉 (JPDR) の解体における作業データの分析”, JAERI-Data/Code 98-010(1998)
- (3) 白石 邦生, 助川 武則, 柳原 敏: “動力試験炉 (JPDR) の解体廃棄物データの分析”, JAERI-Data/Code 99-050(2000)
- (4) 助川 武則, 大島 総一郎, 白石 邦生, 柳原 敏: “原子力施設の解体作業に関する管理デ

一タ計算モデルの開発”, JAERI-Data/Code 99-005(1999)

- (5) Fujii Y, et. al.: “Development of Multi-Functional Telerobotic Systems for Reactor Dismantlement”, J. Nucl. Sci. Technol., 29[9], 930(1992)
- (6) Katagiri M, et. al.: “Telescopic Measuring Method for Specific Activities of Structural Components in Reactor Pressure Vessel”, J. Nucl. Sci. Technol., 29[8], 735(1992)
- (7) 謙訪 武, 他: “硫酸－セリウム(IV)溶液を用いた原子炉解体用化学除染法の開発 JPDR 強制循環系における実証試験” 原子力誌, 30[11], 1020(1988)
- (8) 横田 光雄, 長谷川 哲雄: “JPDR 放射線遮蔽コンクリート構造物の解体”, デコミッショニング技法, No.5, pp.29~39(1992)
- (9) 原田 実, 柿崎 正義, 小林正邦, 清木 義弘: “制御爆破による放射線遮蔽コンクリート構造物の解体工法(1)”, デコミッショニング技法, No.9, pp.33~40(1993)
- (10)原田 実, 中村 健次郎, 広野 進, 清木 義弘: “制御爆破による放射線遮蔽コンクリート構造物の解体工法(2)”, デコミッショニング技法, No.10, pp.33~41(1994)

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)
生体遮蔽体 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 × 10 ¹³ n/cm ² -sec
原子炉運転時間	17,110hours
発電電力量	136,957MWh

表2 JPDR 解体実地試験に適用した解体工法の性能

解体工法	切断能力
プラズマアーク	厚さ : 230mm, 切断速度 : 50mm/min(気中) 厚さ : 130mm, 切断速度 : 75mm/min(水中)
ディスクカッター	配管12B(肉厚33.3mm), 切断時間 : 28min 配管12B(肉厚17.4mm), 切断時間 : 2.5min
成型爆薬	配管1 1/2B(肉厚5.1mm), 爆薬量 : 10g 配管 3B(肉厚7.6mm), 爆薬量 : 50g
アークソー	厚さ : 200mm, 切断速度 : 40mm/min 厚さ : 250mm, 切断速度 : 60mm/min (120~130mm/min×4/パス)
水ジェット	切断能力 : 1hour/1ブロック切断 (56L×37H×40Wcm)
機械的切断	切断能力 : 12hour/1ブロック切断 (80L×80H×40Wcm)
制御爆破	破碎能力 : 8.8m ³ /hour (作業範囲 : 穿孔位置決め~二次破碎) (365L×250H×90Wcm)

表3 放射性ダストに対する水及びエアカーテンの効果

切断対象物	切断工法	水深 (m)	気中放射能濃度 (Bq/cm ³) エアカーテン下部	エアカーテン上部	割合 (%)
炉心シュラウド	プラズマーカー(500A)	3.3	1.2×10 ⁻⁴	8.5×10 ⁻⁶	7.1
炉心シュラウド	プラズマーカー(300A)	3.3	1.6×10 ⁻⁵	4.1×10 ⁻⁶	25.6
炉心シュラウド	プラズマーカー(500A)	1.8	1.2×10 ⁻⁴	2.4×10 ⁻⁶	20.0
炉心シュラウド	プラズマーカー(300A)	0	2.2×10 ⁻³	1.8×10 ⁻³	81.8
原子炉水位系	成型爆薬	0	1.8×10 ⁻⁵	8.4×10 ⁻⁶	46.7
原子炉水位系	成型爆薬	0	5.1×10 ⁻⁶	3.0×10 ⁻⁶	58.8
非常用復水器系	成型爆薬	0	2.8×10 ⁻⁵	5.9×10 ⁻⁶	210.7
炉心スプレイ系	成型爆薬	0	1.6×10 ⁻⁵	5.7×10 ⁻⁶	35.6

割合は、エアカーテン上下部の気中放射能濃度の比を示す。

表4 爆破工法における安全化対策の結果

切断工法	爆破対象物	爆破条件	安全化対策	爆破位置からの距離	水中衝撃圧/爆風圧*
成型爆薬	制御棒カットチューブ	水中	緩衝材なし	435.4mm(緩衝材外側)	10.86kg/cm ²
成型爆薬	制御棒カットチューブ	水中	緩衝材あり	389.2mm(緩衝材内側)	63.20kg/cm ²
制御爆破	生体遮蔽体	気中	防護あり	15m(グリーンハウス上部)	0.1Pa以下
制御爆破	生体遮蔽体	気中	防護なし	15m(グリーンハウス上部)	最大5Pa
制御爆破	生体遮蔽体	気中	防護あり	2m(キャビティ内中央部)	平均0.9Pa(最大5Pa)
制御爆破	生体遮蔽体	気中	防護なし	2m(キャビティ内中央部)	最大12Pa

*成型爆薬は水中衝撃圧、制御爆破は爆風圧である。水中衝撃圧の測定にはトリマリングージ、爆風圧の測定には圧力計（共和製、PGM-05G/02G）を使用した。

表5 解体実地試験から得られた知見

■安全性の考慮

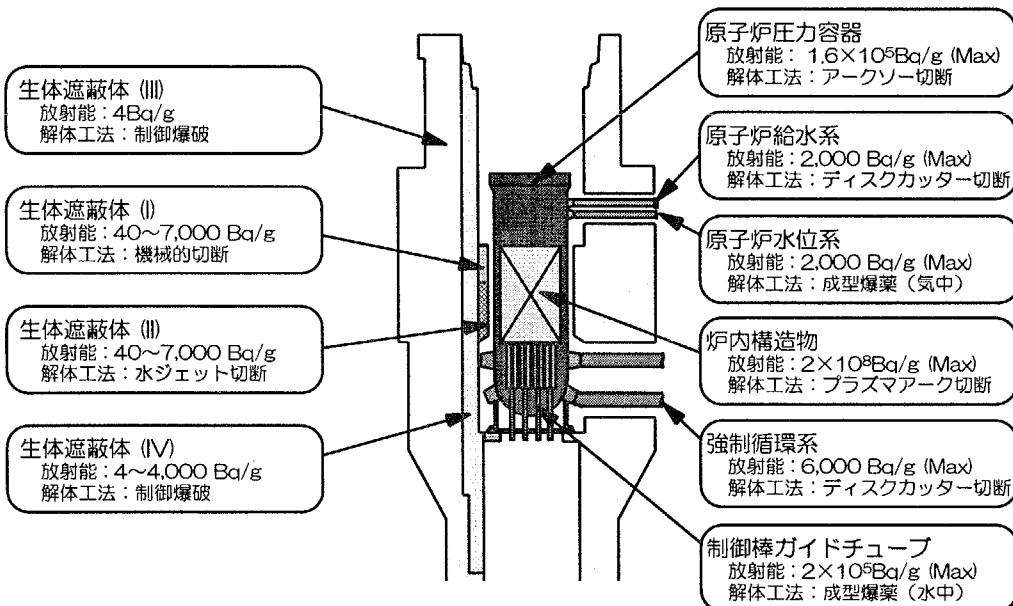
1. 遠隔作業の有効性
 - 作業者の被ばく低減に有効
2. 爆破工法の安全性
 - 成型爆薬では緩衝材が有効
 - 制御爆破では防爆マットと防爆シートが有効
3. 放射性ダストの特性評価の重要性
 - プラズマアーク切断時のエアカーテンは有効（水中切断時）

■廃棄物対策

1. 水の処理
 - 機械的切断、水ジェット切断ではソープレードの冷却や切断により多量の水が発生
 - 生体遮蔽体の解体では発生したスラッジからトリチウムが水に移行
2. 二次廃棄物の低減
 - 水ジェット切断での多量の研磨材
 - プラズマアーク切断でのストリッパブルペイントは有効
 - 遠隔解体装置における多数の付属機器
3. ドロスの特性評価の重要性
 - プラズマアーク切断時の今回使用した水中浮遊物・落下ドロス回収装置は有効ではない
 - アークソー切断時の排水処理装置は有効

■作業の効率化

1. 施設情報の重要性
 - プラズマトーチの位置決めには小型カメラによる確認が有効
 - ディスクカッターカットでの配管溶接部のバリを事前に確認出来なかった
 - 放射能インベントリによる廃棄物の分類が有効
2. 作業の重複性
 - プラズマアーク切断、アークソー切断では各自に準備や後処理作業が必要
3. 装置の汎用性
 - 水ジェット切断では簡易な位置決め方法が必要
 - ディスクカッターカットでは切断位置の変更にも対応できるような配管支持具が必要
 - アークソー切断、機械的切断などでは付随作業を含めた作業の遠隔化が必要
4. モックアップ試験は有効
 - プラズマトーチの操作に関する問題の解決
 - アークソー切断における垂直切断時の問題の解決
5. 並列作業は有効
 - カッター式切断機と既存コアボーリング専用機によるコアボーリング
 - プラズマアーク切断作業での1次切断と2次切断



*: 放射能は、昭和61年3月末の値である。

図 1 JPDR の機器・構造物とその解体工法

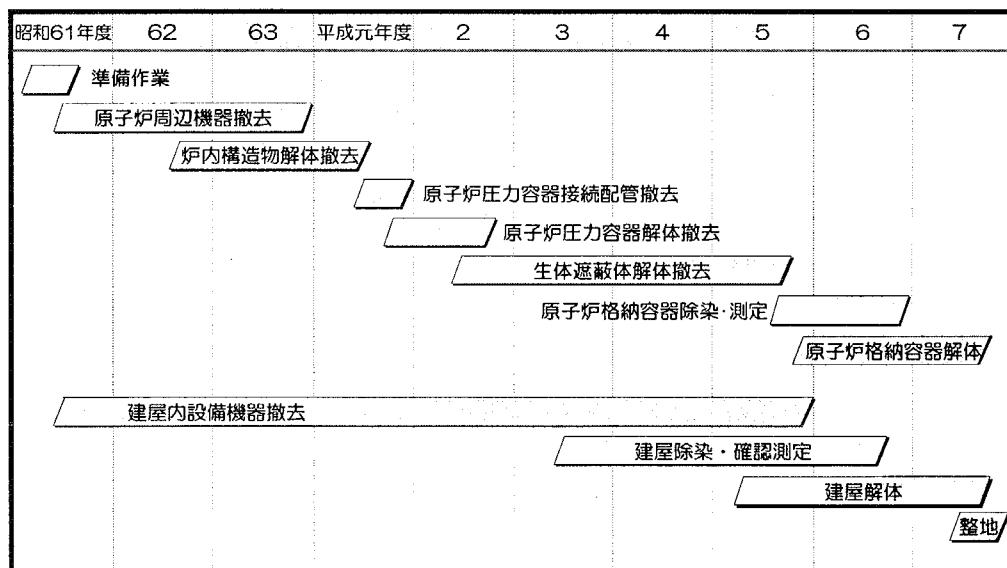


図 2 JPDR の解体作業の工程

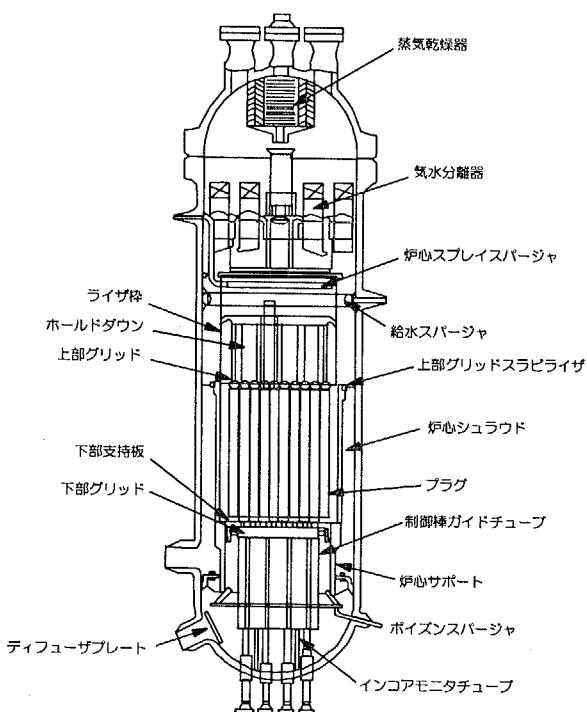


図3 炉内構造物の構成

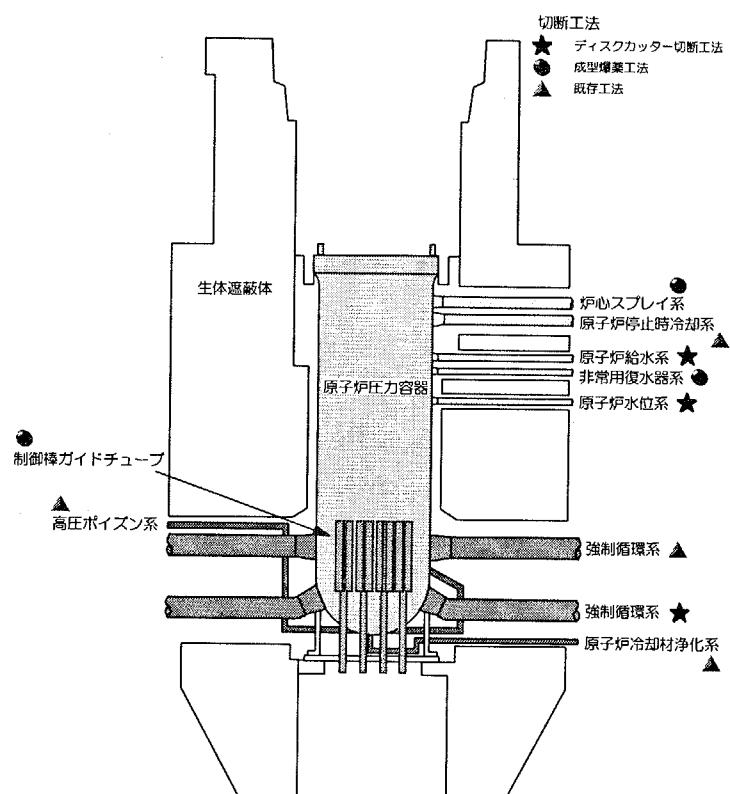


図4 原子炉圧力容器接続配管の構成及びその解体工法

付録 1 プロジェクト管理データ

解体実地試験を通して得られたプロジェクト管理データのうち廃棄物の発生量、人工数、作業者の被ばく線量を以下に示す。

廃棄物の発生量

解体作業で発生した廃棄物については、その材質からコンクリートと金属、また、放射能特性から汚染物と放射化物とに分けて容器に収納した。汚染した廃棄物の収納には、一般に 200t ドラム缶を用いたが、比較的容積の大きな機器などは 1m³ 又は 3m³ 角型鋼製容器に収納した。また、原研敷地内に簡易埋設処分するコンクリート片などを搬送するために、フレキシブルコンテナを用いた。放射化物として発生した廃棄物は、炉心部機器が主なもので、その放射能レベルが比較的高いため、放射能量、形状、寸法に合わせて製作した 6 種類の遮蔽容器に収納した。なお、施設の機器・構造物の他に解体に用いた機器も二次廃棄物として廃棄した。

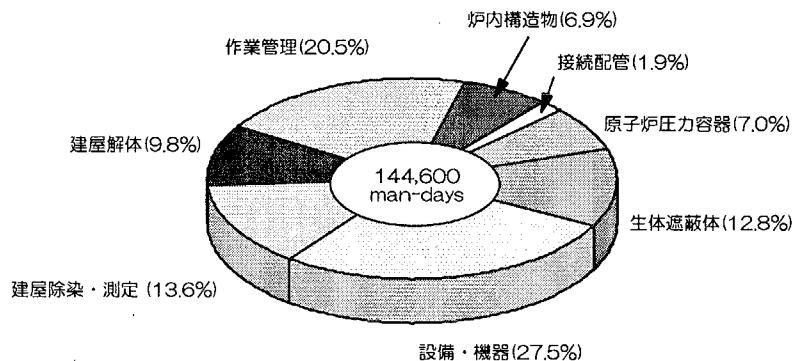
発生した廃棄物容器の数は、7,586 個で、このうち 200t ドラム缶が 62%，フレキシブルコンテナが 19%，1m³ 角型鋼製容器が 7.8%，遮蔽容器が 0.4% であった。

人工数

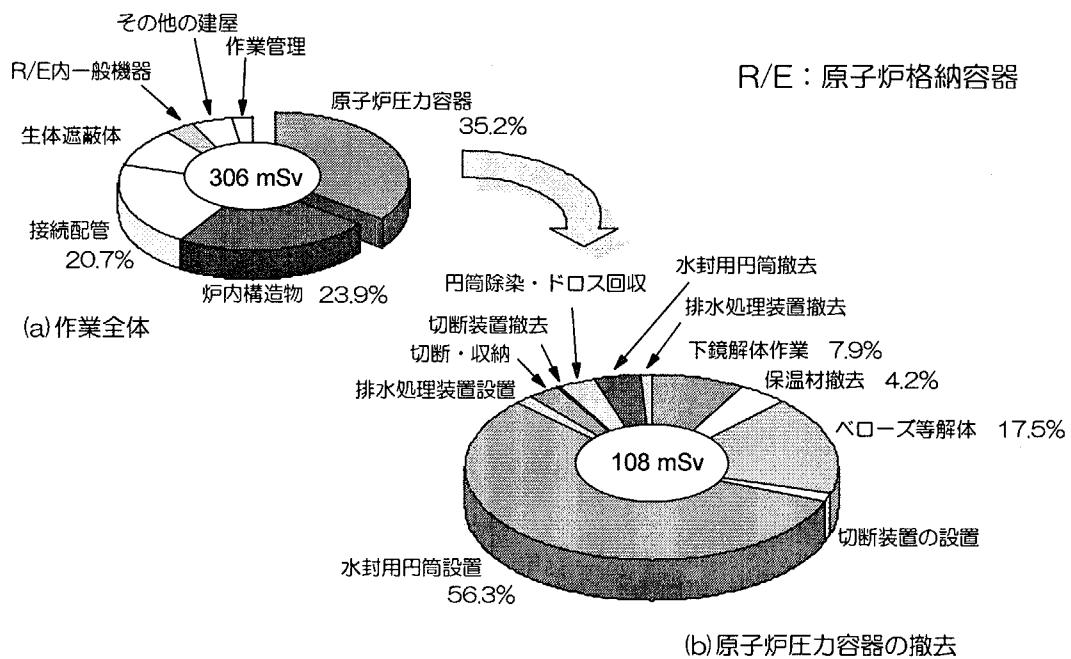
解体作業に携わった人工数（人・日）の内訳を付録 1-1 に示す。全作業において 144,600 人・日の人工数を要したが、この中にはデータの取得などの作業も含まれる。炉心近傍に位置する放射化した機器・構造物の解体作業で全体の約 29% を要した。遠隔解体装置を用いた初めての作業であったため、装置の運転以外に、装置の製作に係わった技術者が現場に参加したことなどにより、炉心近傍に位置する機器・構造物の解体作業で比較的多くの人工数を要する結果となった。また、装置の据え付け・調整などに比較的多くの時間を要したこと、炉心近傍に位置する機器・構造物の解体作業で多くの人工数を要した原因の一つである。他方、建屋の除染と放射能測定において約 14% の人工数を要したが、建屋の全面について放射能測定を実施したことが多くの人工数を要した結果となった。

作業者の被ばく線量

付録 1-2 は作業者の被ばく線量の内訳をまとめた結果である。全作業において 306 人・mSv の被ばくを記録した。炉内構造物や原子炉圧力容器などの比較的放射能レベルの高い機器・構造物の解体で被ばくしているが、これらの解体作業は遠隔で行っているので、解体作業での被ばくは少なく、そのための準備や後片付けのように人手で行う付随作業で多くの被ばくが認められた。



付録 1-1 作業人工数の割合



付録 1-2 作業者被ばく線量の内訳

付録 2 マニピュレータの概要

マニピュレータを用いた炉内構造物の切断作業に用いた装置は、7自由度の電動式マニピュレータ、支持脚、移動機構、制御部から構成される。なお、制御部は、原子炉格納容器から約50m離れた管理区域外に設置された。

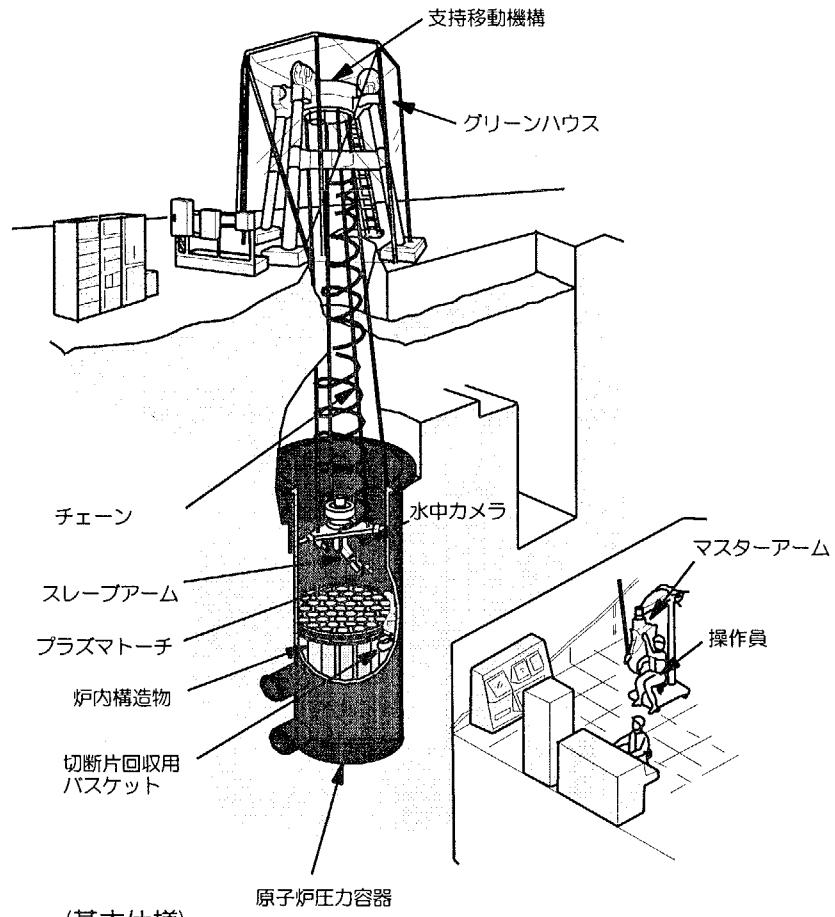
マニピュレータ: 電動式の7つの関節を有するマスター・スレーブ制御方式のロボットである。マスターアームは、原子炉格納容器から約50m離れたところにある計測室内（放射線管理区域外）に設置された。スレーブアームは、原子炉圧力容器上部に設置した支持脚に固定され、その先端には切削用のプラズマトーチが取り付けられた。さらに、マニピュレータは、スレーブアームの全軸に力センサを取り付け、スレーブアームに加わる力をマスターアームに帰す力帰還型バイラテラル方式を採用した。

支持脚: 作業時の反力をスレーブアームが動かないように、原子炉圧力容器内壁を押し付けて固定するものであり、水平3方向に同時伸縮する方式で、その駆動は圧縮空気で行う。支持脚内部の押し付け機構には、リンク機構、楔機構及び圧縮バネを使用し、圧縮空気の減圧を生じた場合でもバネの力で脚を固定できる。

移動機構: 3本のチェーンで吊り下げた支持脚を昇降、旋回させるためのもので、架台固定フレームに取り付けた6個の旋回用ローラーの上に旋回フレームを置き、旋回フレームは外周に張り付けたチェーンの駆動によって旋回し、タイミングベルトを介して駆動される3個のチェーンブロックによって昇降できる。

制御部: 制御方式は、マスター・スレーブモード（操作員がマスターアームを操作し、その動きに従ってスレーブアームが動作）を基本とし、プレイバック・モード、プログラム・モード、さらに補助的な機能として押しボタンモード（アームの各関節を個別に動作）及び姿勢移行モード（アームの各関節を目標値へ同時に動作）を備えている。このうち、プレイバック・モードは、PTP(Point To Point)制御とCP(Continuous Path)制御を採用している。PTP制御では、教示点を直線で結ぶ直線補間及び円弧で結ぶ円弧補間が可能である。

付録2-1にマニピュレータを用いた切削作業の概念と装置の基本仕様を示す。



(基本仕様)

マニピュレータ

	スレーブ・アーム	マスター・アーム
型式	電動式多関節型(7軸)	
全長(mm)	1,830	1,195
重量(kg)	120	65
特徴	水中、気中両用 可搬重量: 25kgwf プレイバック線返精度: ±5mm以内 モータ加熱防止機能付	全軸力フィードバック 操作反力: 2kgwf 自重補償 モータ加熱防止機能付
制御部		
制御方式	1. マスター・スレーブモード 2. ティーチング・プレイバックモード 3. プログラムモード 4. 押ボタンモード	
制御周期	5ms	
信号伝送	光ファイバーによる高速伝送	
支持移動機構		
	支持脚	移動機構
型式	水平3方向同時伸縮方式	電動連続起動方式
全長(mm)	5,600×5,600×4,900	
重量(kg)	5,700	
可動範囲	伸縮: 30cm	昇降: 15m, 旋回: ±180deg
停止精度	—	昇降: ±1cm, 旋回: ±1deg
雰囲気	水中、気中	気中
その他	非常用脱出機構	附加異常警報

付録 2-1 マニピュレータを用いた切断作業の概念と装置の基本仕様

付録 3 プラズマアーク切断装置の概要

プラズマアーク切断装置は、走行移動機構と横行移動機構、旋回機構、昇降機構の4自由度を有し、走行、横行、昇降及び旋回の4つの動作を数値制御により独立に操作することが可能であり、昇降軸の先端に切断用のプラズマトーチが取り付けられている。また、作業を安全に実施するために、発生ガス回収処理装置と水中浮遊物・落下ドロス回収装置を設置した。

走行移動機構：炉心中央部上の軸を中心位置とした支持架台上端のフレームに設置され、支持架台フレームにはポールスクリューが固定され、走行台車にはポールスクリューナットが固定されている。

横行駆動機構：走行駆動機構と直交する形で走行台車上部に横行台車が設置されている。

旋回機構：プラズマトーチを固定している昇降軸を水平面内で旋回させる装置で、横行台車の上部に設置されている。

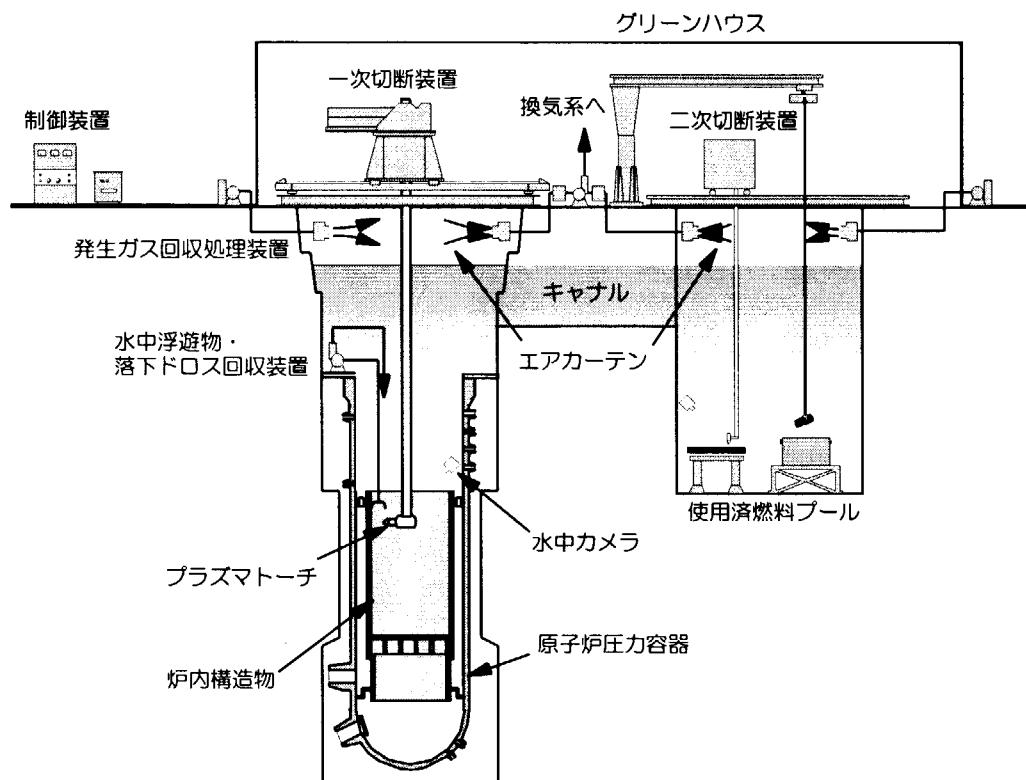
昇降機構：プラズマトーチを固定している昇降軸を上下させる装置で、旋回機構の上部に設置されている。

発生ガス回収処理装置：放射性ダストなどを水面近傍に設置するエアカーテンにより回収し、HEPA フィルタを通して取り除くものである。

水中浮遊物・落下ドロス回収装置：切断に伴い発生する水中浮遊物や落下ドロスを水とともに吸引し、フィルタによりろ過する装置である。

なお、プラズマアーク切断装置は、炉内構造物を原子炉圧力容器内部で粗断するための一次切断装置と粗断した炉内構造物を燃料プール内で細断するための二次切断装置からなる。このうち、一次切断装置の昇降軸は、最大長さ 12m で、2m 毎に継ぎ足す構造となっている。一方、二次切断装置の昇降軸は全長 7m で一体構造をしている。燃料プールには、上部に各種炉内構造物が固定可能な回転テーブルのある切断用架台を設置し、作業の効率化を図った。

付録 3-1 にプラズマアーク切断装置を用いた切断作業の概念と装置の基本仕様を示す。



(基本仕様)

一次切断装置（トーチ駆動装置）			
	移動範囲	最大移動速度	駆動方式
移動方向	走行	2,000mm	1,000mm/min ポールスクリュー
	横行	2,000mm	1,000mm/min ポールスクリュー
	昇降	2,000mm	1,000mm/min ラックピニオン
	旋回	360deg	10deg/sec ギヤーピニオン
ポールスクリュー	外径：40mm	ピッチ：8mm	
減速機	昇降	遊星歯車減速機	減速比：1/70,55
	旋回	サイクロ減速機	減速比：1/289
同時制御軸数	4軸中任意の3軸		
電動機	DCサーボモータ		
位置速度検出器	パルスコーダ方式		
二次切断装置（トーチ駆動装置）			
	移動範囲	最大移動速度	駆動方式
移動方向	走行	3,100mm	1,000mm/min ポールスクリュー
	横行	1,600mm	1,000mm/min ポールスクリュー
	昇降	1,750mm	1,000mm/min ラックピニオン
	旋回	360deg	10deg/sec ギヤーピニオン
ポールスクリュー	外径：40mm	ピッチ：8mm	
減速機	昇降	ウォーム減速機	減速比：1/500
	旋回	二段形減速機	減速比：1/15
同時制御軸数	4軸中任意の3軸		
電動機	ACサーボモータ		
位置速度検出器	パルスコーダ方式		

付録 3-1 プラズマアーク切断装置を用いた切削作業の概念と装置の基本仕様

付録 4 成型爆薬工法の概要

成型爆薬工法では、爆薬を爆破位置へ装着するために、遠隔装着機を使用した。遠隔装着機は、駆動部（成型爆薬把持車、発破母線収納車、走行部）、ケーブル処理部、制御部から構成される。

成型爆薬把持車：爆薬保持器の把持、爆薬保持器による爆破位置への成型爆薬の固定、爆薬保持器との連結状態の解除機能を有している。本装置の前方には配管曲がり部における偏心を防ぐために案内車が設置され、後方には保持機構の作動確認の信号を制御部へ送るためのスイッチが設けられている。

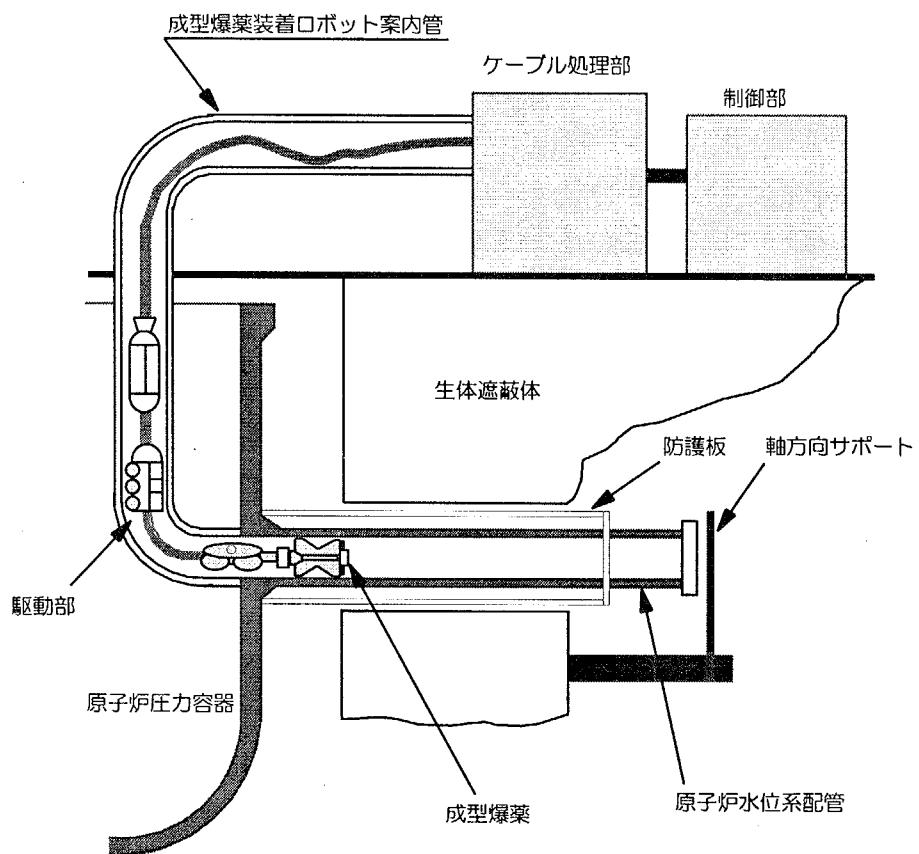
発破母線収納車：発破母線及び命綱を収納しており、成型爆薬を固定後、装置が配管内を後退する際、発破母線を引き出して配管外に導くものである。なお、命綱は、設定位置の誤りなどによって成型爆薬を回収する場合に用いる。また、発破母線に発生する迷走電流及び誘導電流などによる誤爆発対策として、本線の末端に保護抵抗が取り付けてある。本装置は、成型爆薬把持車とフレキシブルシャフトにより連結されている。

走行部：フレキシブルシャフトにより連結されたモータ車、駆動車から成り、配管の曲がり部、内面の段差及び突起部での円滑な走行を確保するため、駆動車を前後2台使用した。

ケーブル処理部：走行部に電流を供給・制御するための制御ケーブルを処理収納するためのものであり、走行部を収納する収納筒、制御ケーブルを収納する収納箱、及び制御ケーブルの送り出しと巻き戻しを行うためのケーブル処理装置から構成される。

制御部：走行部、ケーブル処理部、保持機構の動作を制御し、走行部の動作状態を表示する。

付録4-1に成型爆薬工法を用いた切断作業の概念と遠隔装着機の基本仕様を示す。



(遠隔装着機の基本仕様)

成型爆薬把持車	
寸法(mm)	φ46×92
重量(g)	約295
把持解除	直流ソレノイド方式(DC66V)
把持解除確認	リミットスイッチ方式
発破母線収納車	
寸法(mm)	φ46×115
重量(g)	約335
ルギア ハヤト	寸法(mm) φ12×50 重量(g) 約20
走行部	
寸法(mm)	36×732×42
駆動方式(車輪駆動)	DCサーボモータ
回転数	3,000rpm
トルク	1.6×10 ⁻³ kgm
軸継手	ルギア ハヤト
走行速度(m/min)	0~約0.8
重量(kg)	約1.4
ケーブル処理部	
寸法(mm)	600×700×800
ケーブル処理用モータ	DCサーボモータ
重量(kg)	約50
制御部	
主要寸法(mm)	600×700×800
入力電圧	単相, AC100V, 50Hz
重量(kg)	約100

付録 4-1 成型爆薬工法を用いた切斷作業の概念と遠隔装着機の基本仕様

付録 5 ディスクカッタ一切断装置の概要

ディスクカッタ一切断装置は、油圧によりカッターナイフを配管の内壁に押し付けながら回転する切断機ヘッド部、切断機ヘッド部と駆動部を連結する切断機駆動軸及び油圧モータによりこれらを回転させる駆動部、切断機本体位置決め装置、切断位置決め装置から構成される。このうち、切断機ヘッド部は、配管の寸法に応じて 12B 配管用（強制循環系）と 4B 配管用（給水系）に分けられている。

12B 配管用切断機ヘッド部：カッターナイフ及び中央部に溝のある 2 個の反力ローラーを有し、油圧シリンダで伸縮するピストンロッドによりカッターナイフを配管内壁に押し付け、その反力をローラーで受けている。

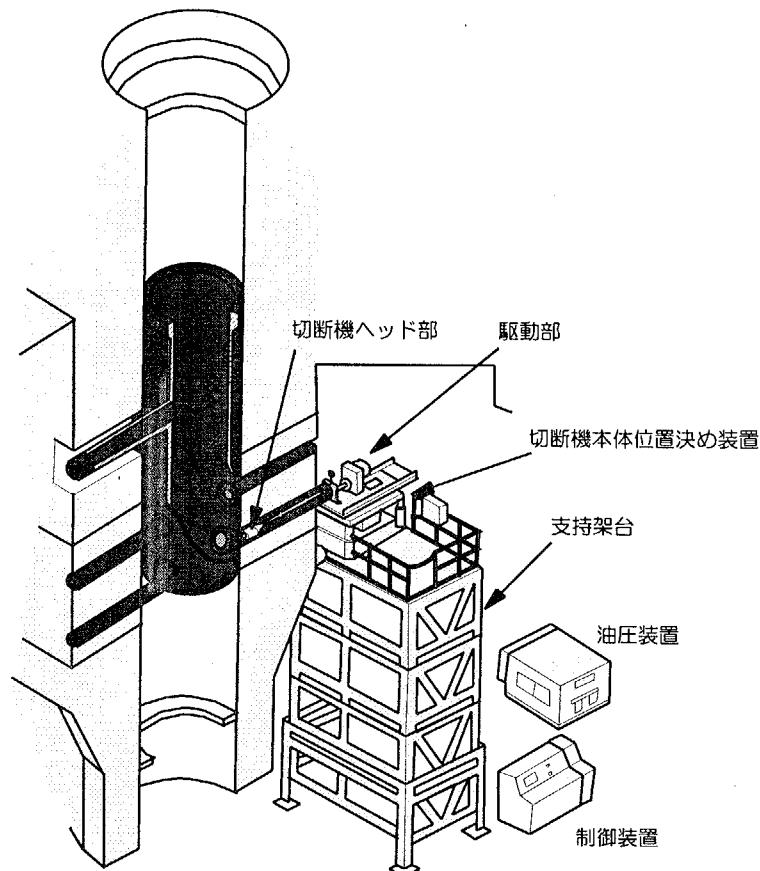
4B 配管用切断機ヘッド部：4 個の反力ローラーを有し、配管軸方向のピストンロッドの伸縮力をスライドロックを介して径方向に変換し、カッターナイフを配管内壁に押し付ける構造である。切断機駆動軸：駆動部からの回転トルクを切断機ヘッド部に伝達する。また、切断機ヘッド部のカッターナイフ押し付け用油圧シリンダに油を供給するホースを有している。12B 配管用切断機駆動軸には、屈曲部を通過して切断位置に切断機ヘッド部を設置するためのユニバーサルジョイント付き切断機駆動軸継ぎ手を採用している。

駆動部：油圧モータ及び減速機などから構成され、切断機駆動軸に回転トルクを与える。

切断機本体位置決め装置：切断機本体の前後、左右方向の微調整、また、上下方向の微調整を行い、切断機ヘッド部を配管内の切断位置に精度良く設定するためのものである。

切断位置決め装置：切断機本体及び切断配管取扱装置を搭載し、上下方向の位置決めを行うための装置であり、切断機駆動装置の昇降及び横行を行う。

付録 5-1 にディスクカッタ一切断装置を用いた切断作業の概念と装置の基本仕様を示す。



(基本仕様)

	強制循環系	給水系
切断機ヘッド部		
カッター刃外径(mm)	φ134	φ58
刃先角度(第1/第2逃げ角)	40deg/13deg	
刃厚(mm)	6	4.6
材質	OT106S(表面浸硫窒化処理)	
押し付け機構		
押し付け方式	油圧シリンダー方式	
シリンダーストローク(mm)	50	25
切断機駆動装置		
減速方式	歯車方式	
回転数(rpm)	5~35	5~100
適用範囲	直管・曲管	直管
切断機本体位置決め装置		
駆動方式	電動方式	
移動速度(Z, X方向)	1.2m/s, 0.7m/s	1.2m/s, 0.4m/s
移動ストローク(Z, X方向)	850, 200mm	350, 270mm
駆動軸回転用ポンプ		
電動機	3相200V, 11kW, 1,500rpm	
可変式ピストンポンプ	320kg/cm ² , 0~20r/min	
配管取扱装置		
把持固定方式	ネジ締め付け方式	
把持能力, 寸法	2,000kg, 40mm	500kg, 20mm
手巻きりげ能力(kg)	300	
切断機位置決め装置		
昇降方式	電動モータ方式	
昇降距離(mm)	280±10	
昇降速度(m/min)	0.4~0.5	

付録 5-1 ディスクカッター切断装置を用いた切断作業の概念と装置の基本仕様

付録 6 アークソーカット装置の概要

アークソーカット装置は、ソーヘッド、支持駆動装置、マスト昇降装置、旋回駆動装置、マスト固定装置、などから成る。

ソーヘッド：油圧モータによりソープレードを回転させるとともに、ソープレードに切断電流を伝達するためのものである。

支持駆動装置：ソーヘッドを軸方向及び周方向に移動させるためのものであり、垂直支持駆動機構、半径支持駆動機構、旋回支持駆動機構からなる。また、ソープレードの姿勢を垂直、水平に切り替える角度変換機構を有している。

マスト昇降装置：ソーヘッド、支持駆動装置を軸方向に移動させるためのものである。

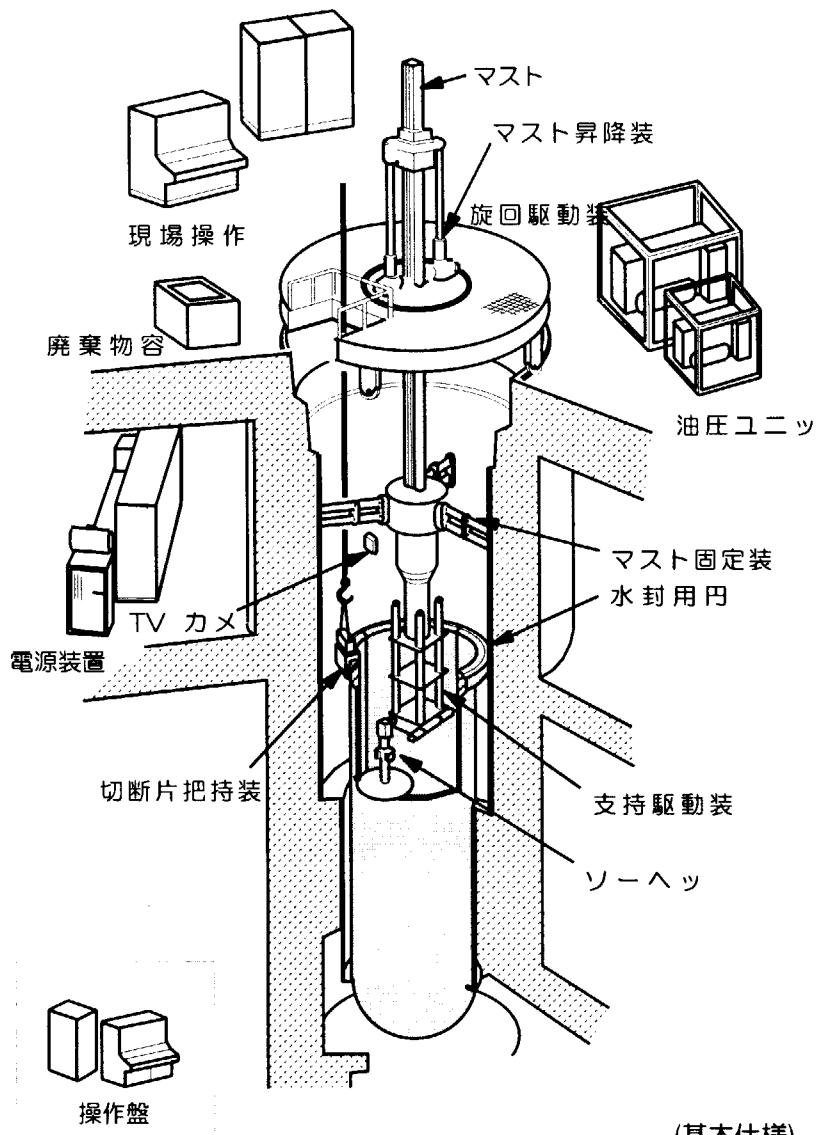
旋回駆動装置：ソーヘッド、支持駆動装置を周方向に回転させるためのものである。

マスト固定装置：切断能力を維持するために、ソーヘッド、支持駆動装置の振動を抑制するためのものである。

ソープレード：軟鋼製の直径約 1,000mm の円板であり、縦切断用にはソープレードの側面に生ずるアーク（サイドアーク）を防止するために、直径 800mm の絶縁性のある積層板（D6R ポリエチレンガラスマット）を取り付けている。

付録 6-1 にアークソーカット装置の構成と基本仕様を示す。

以上の他、切断中に発生するドロスや水中浮遊物を回収するために排水処理装置がある。付録 6-2 に排水処理装置の系統図を示す。約 50 分の排水処理装置の運転により、水の濁度を最大約 1/7 に低下することができた。付録 6-3 は切断期間中の原子炉圧力容器、系統内の濁度の変化を示す。また、原子炉圧力容器の切断時には、水素や放射性ダストが発生するため、旋回駆動装置下部をビニールシートで養生し密封構造として、排風機により円周方向 1 力所に設けた開口から排気を行う。



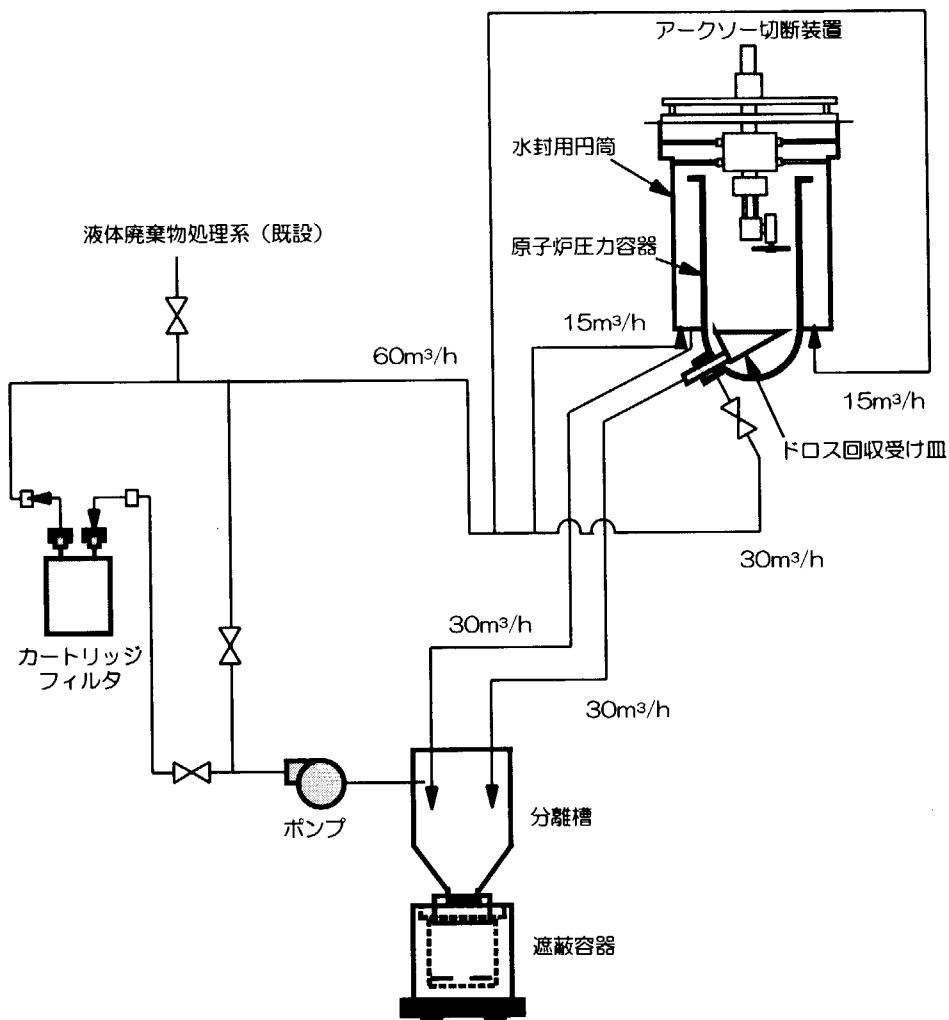
(基本仕様)

ソーブレード	寸法(mm : 外径×板厚)	φ 1,000(1,050)×12 ^①
	材質	積層板付炭素鋼 ^②
	水平切断	炭層鋼
支持駆動機構	動作範囲	垂直方向 1,000mm, 20mm/s
	動作速度	水平方向 400mm, 10mm/s
		旋回方向 100deg, 20mm/s
		角度変換 90deg, 20deg/s
	回転数	1,500rpm
	駆動方式	油圧サーボ方式
マスト昇降装置	昇降ストローク	5,490mm
	昇降速度	10mm/s(上昇), 4mm/s(下降)
	駆動方式	油圧シリンダ
マスト固定装置	伸縮ストローク	200mm
	駆動方式	油圧シリンダ
旋回駆動装置	旋回角度, 速度	max.353deg, max.100mm/s
	駆動方式	油圧モータ
ソーブレード着脱機	締め付けトルク	5kgfm
	駆動方式	空圧モータ, 空圧シリンダ
切断片把持装置	把持方式	摩擦式クランプ, スタッドジベル
	耐荷重	1,500kg

1) 外径1,050mmのソーブレードは、8段目の垂直、水平切断に使用した。

2) 積層板:D6Rポリエチルガラスマット

付録 6-1 アークソーカット装置の構成と基本仕様



付録 6-2 排水処理装置の系統図

付録 6-3 アークソー切断による解体中のプール水濁度の変化

切断位置	原子炉圧力容器内 (mg/ℓ)		系統内 (mg/ℓ)		
	切断前	切断後(<10min)	開始後	20min	50min
1段目(水平切断)	<4.0	214	440	98	92
4段目(水平切断)	7.4	275	423	243	152
6段目(水平切断)	10.9	183	618	268	89

付録 7 機械的切断装置の概要

機械的切断装置は、切断装置本体、操作卓、油圧ホース、ケーブル移動機から構成されている。切断装置本体は、支持駆動装置、切断機支持アーム、吊フレーム、カッター式切断機、コアボーリング式切断機、流下水回収装置、固定装置からなる。各装置の仕様は以下の通りである。

支持駆動装置：方向変換軸（カッター式切断機を水平・垂直方向に 90° 変換）、昇降軸、前後後退軸、旋回軸の 4 つの駆動軸から成っている。

切断機支持アーム：刃先冷却水飛散防止機とカッター式切断機を取り付けるためのカッター式切断機支持アーム、刃先冷却水飛散防止機とコアボーリング式切断機を取り付けるためのコアボーリング式切断機支持アームがある。

吊フレーム：切断装置本体を旋回中心で吊り下げ、旋回時に吊りワイヤにねじれが生じない構造で、ケーブル、ホース及び配管は吊りフレーム内部に内蔵されている。吊りフレームは、上部でポーラクレーンにより吊り下げる構造となっている。

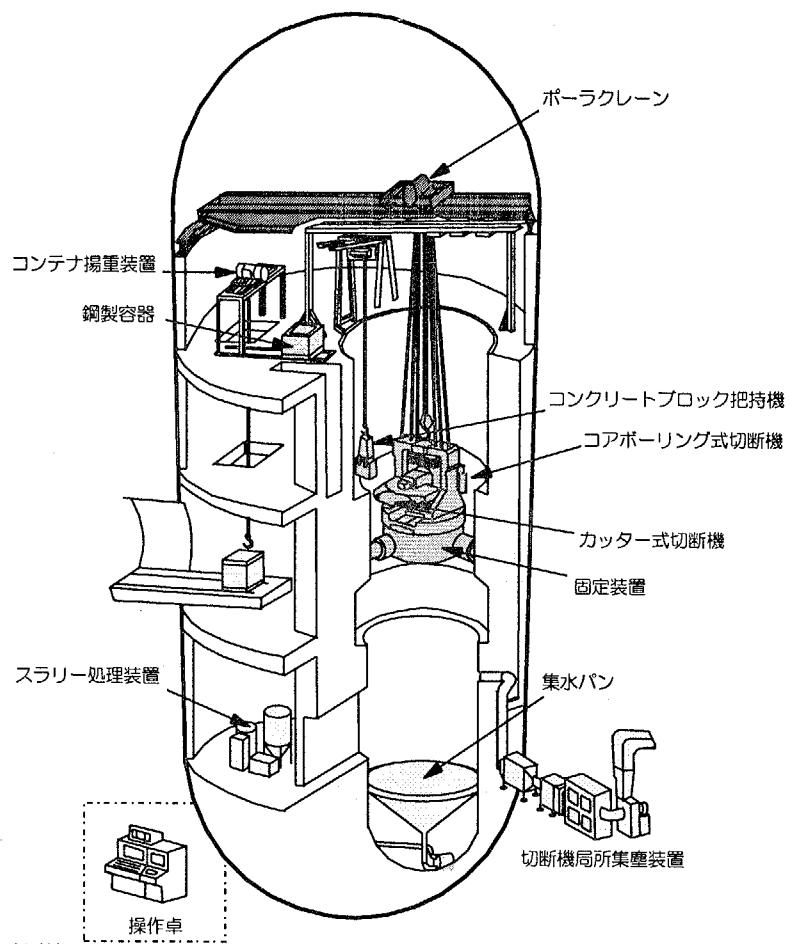
固定装置：支持脚調整機構、水平調整機構から成る。支持脚調整機構は、3 本の支持脚を油圧により壁面に押し付け、切断装置本体を固定する。支持脚の固定は、3 本の支持脚のうち、2 本の脚を位置決め用として設置量だけ伸ばした後油圧回路をロックし、残りの 1 脚を壁面へ伸ばして油圧の供給圧力を保持して行う。水平調整機構は、X、Y 方向に配置した電動スクリュージャッキを伸縮することにより行う。

流下水回収装置：切断装置本体の外周方向に 8 分割された可動パンの先端に取り付けた耐アルカリ性のネオプレンゴムを壁面に押し付け、使用済の刃先冷却水を回収する。

カッター式切断機：ソープレードを電動機により回転させ、生体遮蔽体に押し付け研削する。ソープレードの回転数は、減速器により 2 段階に切り替えることが出来る。

コアボーリング式切断機：ダイヤモンドのコアビットを電動機により回転させ、生体遮蔽体に押し付け穿孔する。コアビットの回転数は、減速器により 8 段階に切り替えることができる。

付録 7-1 に機械的切断装置の構成と基本仕様を示す。



(基本仕様)

カッター式切断機	回転数	2,000rpm
	減速比	2:1(1,140rpm), 3:1(788rpm)
	ソーブレード 寸法	φ1,067×5mm
	材質	ダイヤモンド/立方晶窒化ホウ素
コアボーリング式切断機	回転数	12,000rpm
	減速比	80~7.5:1(150~1,600rpm)
	ピット 寸法	φ152×1,100mm
	材質	ダイヤモンド
刃先冷却水飛散防止機 (カッター式切断機)	旋回範囲	90deg(右かご), 70deg(左かご)
	駆動方式	油圧トルクアクチュエータ
刃先冷却水飛散防止機 (コアボーリング式切断機)	駆動範囲	80mm
	駆動方式	油圧シリンダ
コンクリートブロック把持機	把持方式	把持爪
	把持重量, 厚さ	max.1,200kg, 240~390mm
	重心調整方式	吊り点移動方式
支持駆動装置	昇降移動機 駆動範囲, 速度	1,050mm, max.3,000mm/min
	駆動方式	ボールスクリュー
	前後移動機 駆動範囲	945mm(カタ), 485mm(アボーリング)
	駆動速度	max.3,000mm/min
	駆動方式	ボールスクリュー
	旋回移動機 駆動範囲, 速度	380deg, max.0.5rpm
固定装置	駆動方式	歯車
	切断方向転換機 変換位置	0, 90deg
	駆動方式	歯車
	支持脚調整機構 駆動範囲	0~500mm
把持機移動装置	駆動方式	油圧シリンダ
	水平調整機構 調整範囲	±2deg
	駆動方式	スクリュージャッキ(2点独立駆動)
巻上速度		0.84~8.4m/min
横行速度		1.7~7.0m/min
旋回速度		1.08~5.4m/min

付録 7-1 機械的切断装置の構成と基本仕様

付録 8 水ジェット切断装置の概要

水ジェット切断装置は、ノズル部支持駆動装置、研磨材供給装置、昇降装置、切断片搬出装置、スラリー回収処理装置及び切断機局所集塵装置で構成されている。各装置の主要な仕様は以下の通りである。

ノズル部支持駆動装置：ノズル部を水平、垂直、背面切断の動作を行わせるためのもので、3軸駆動機構、固定機構、昇降機構、架台からなる。ノズル部は、オリフィスとノズルで構成されており、高圧水供給ホースからの高圧水と研磨材供給ホースからの研磨材が混合室内部で混合され先端より突出される。

研磨材供給装置：研磨材をノズル部へ供給するもので、研磨材一次タンク、二次タンク、軽量ホッパ、可変速ミニコンベアで構成されている。

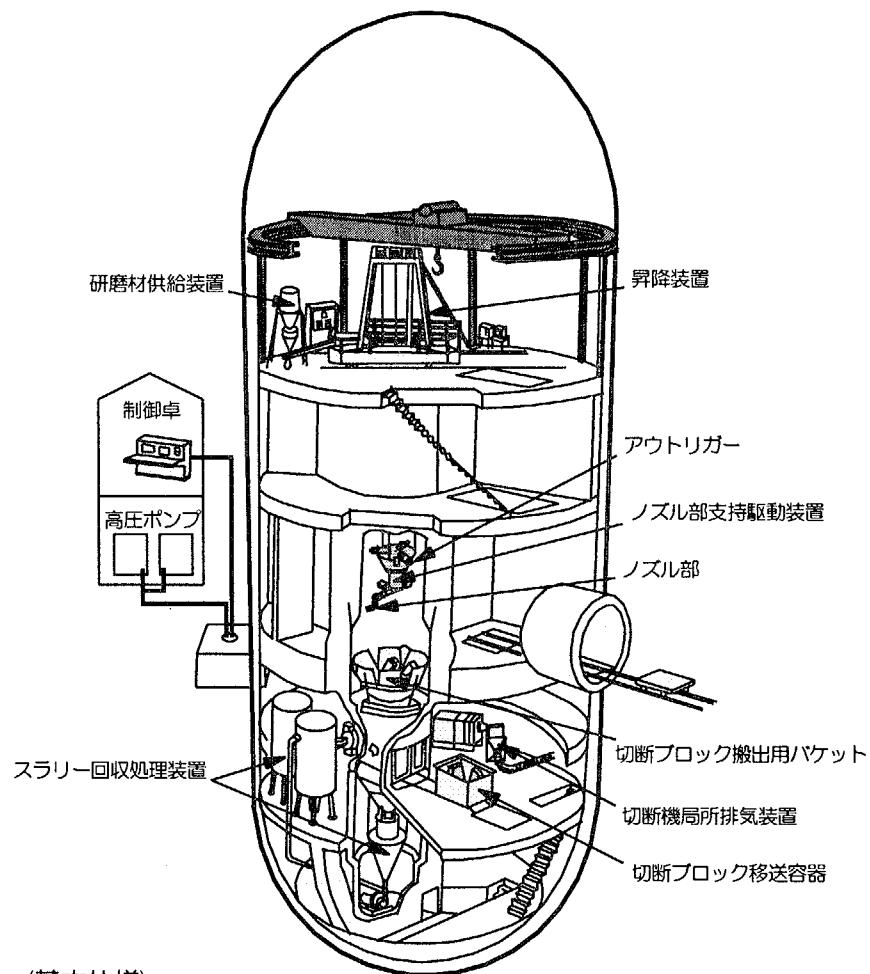
昇降装置：ノズル部支持駆動装置を生体遮蔽体内部へ吊り下げるためのもので、吊り下げられたノズル部支持駆動装置は、固定機構により生体遮蔽体に固定される。

切断片搬出装置：切断したブロックを受け止め、搬出台車に投入するためのものであり、上下2箇所の開閉式でバケットの加速度計により切断ブロックの落下を検出する切断ブロック搬出用バケット、搬出バケット駆動装置から成る。

スラリー回収処理装置：切断に伴って発生するスラリー（水、研磨材、コンクリートの切粉などの混合液）を回収し、研磨材とコンクリートの切粉などを分離するとともに残った水を中和する装置である。スラリー回収処理装置は、集水パン、研磨材分離装置、中和装置、凝集装置、沈殿装置から成る。

切断機局所集塵装置：切断に伴って発生する粉塵、ミストを吸い込み、水分の分離、粉塵の捕集を行うものであり、冷却用熱交換器、ミストエリミネータ、電気ヒータ、フィルタユニット、排風機で構成されている。冷却用熱交換機、ミストエリミネータは、切断部位から吸い込まれた空気中の水分が飽和蒸気量以上になると水滴が浮遊し、微細な粉塵捕集用のフィルタを目指させらる原因となるため、冷却除湿を行った後、再度加熱して相対湿度を下げている。フィルタユニットは、粗大な粉塵捕集用（第1段）と微細な粉塵捕集用（第2段）から成る。

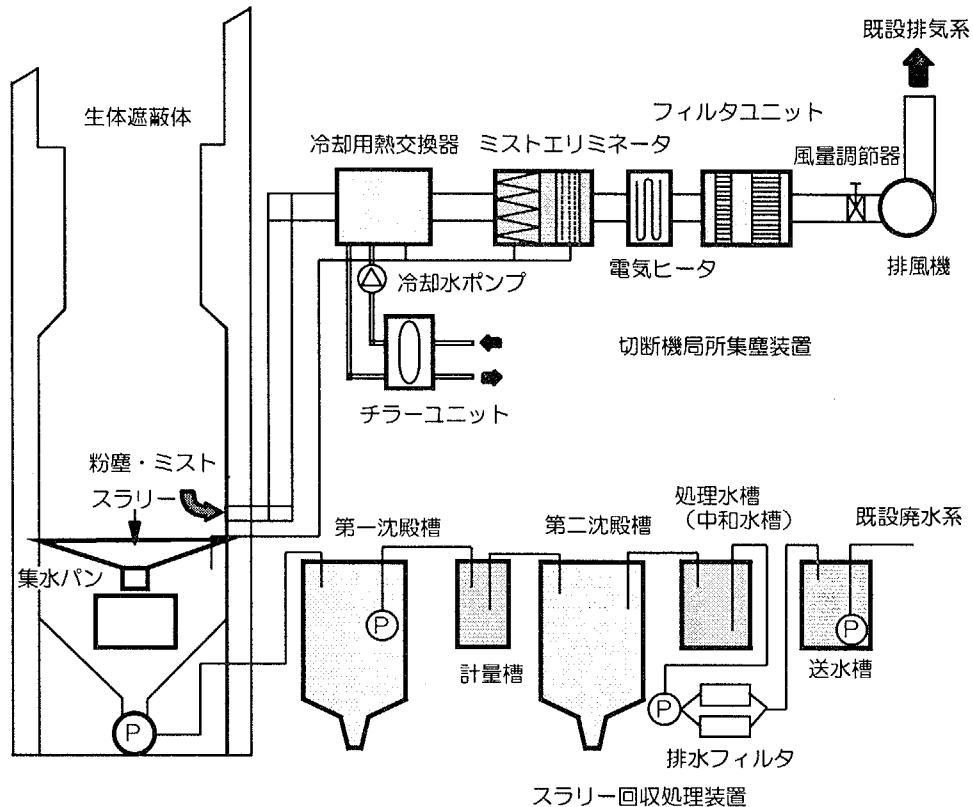
付録8-1に水ジェット切断装置の構成と基本仕様を、付録8-2にスラリー回収処理装置及び切断機局所集塵装置の構成と基本仕様を示す。付録8-3は、水ジェット切断中にキャビティ内部の塵埃を採取し、気中放射能濃度を測定した結果である。



(基本仕様)

ノズル部	ノズル内径、材質 オリフィス内径、材質	$\phi 5\text{mm}$ (タングステンカーバイド) $\phi 1.6\text{mm}$ (ダイヤモンド)	
高圧ポンプ	最高吐出圧力 吐出量	2,100kgf/cm ² 25l/min(2台)	
研磨材供給装置	一次タンク 計量ホッパ 可変速ミニソーラ 二次タンク 研磨材	容量 供給方式 方式 供給能力 容量 供給方式 吸引落下 スチールグリッド#40	600l 手動バルブ 100l 手動バルブ すきま及び速度調整方式 3~7kg/min 600l 吸引落下
ノズル部支持駆動装置	伸縮機構 旋回機構 昇降機構 固定機構 角度可変バル	伸縮範囲 伸縮速度 旋回角度 旋回速度 昇降範囲 昇降速度 固定方式 伸縮範囲 水平、鉛直、背面 方式 巻上能力、揚程	750mm max.20mm/s $\pm 190\text{deg}$ max.90deg/min 700mm max.20mm/min 3点支持 600mm $0, \pm 7.5, \pm 15\text{deg}$ ワイヤ巻上方式 2.8ton, 20m
昇降装置	昇降機構	方式 巻上能力、揚程	

付録 8-1 水ジェット切断装置の構成と基本仕様



(基本仕様)

スラリー回収処理装置		
集水パン	容量	5m ³
スラリーポンプ	容量	200V, 22kW
研磨材分離装置	分離方式	永久磁石
	ドラム寸法	Φ465×518mm, 20m/min
原水貯槽(角型解放)	容量, 寸法	3m ³ , 1,200×1,500×2,100mm
計量槽(角型解放)	容量, 寸法	120×400×850×500mm
反応槽(角型解放)	容量, 寸法	600×850×850×1,000mm
凝集槽(角型解放)	容量, 寸法	400×850×600×1,000mm
沈殿槽(円筒解放)	容量, 寸法	5m ³ , Φ1,800×1,200×900mm
薬品槽(角型密閉)	容量, 寸法	250×550×550×1,000mm
凝集剤槽(角型密閉)	容量, 寸法	250×550×550×1,000mm
高分子凝集助剤槽(角型密閉)	容量, 寸法	500×720×720×1,010mm
処理水槽(角型解放)	寸法	1,200×1,800×2,000mm
原水ポンプ	能力	4m ³ /hour×9m
再利用ポンプ	能力	1.8m ³ /hour×26m
薬品注入ポンプ	能力	7~270cc/min
反応槽攪拌機	回転数	295rpm
薬品槽攪拌機	回転数	295rpm
凝集槽攪拌機	回転数	295rpm
高分子凝集槽攪拌機	回転数	295rpm
処理水ポンプ	能力	40m ³ /hour(水中ポンプ)
切断機局所集塵装置		
冷却用熱交換機	冷却能力	25,000kcal/hour
ミストエリミネータ	形式	折板及びサランロック製
電気ヒータ	形式	横型U字管式シーズヒータ
中性能フィルタ	寸法	610×610×290mm(2枚)
HEPAフィルタ	寸法	610×610×290mm(2枚)
排風機	処理風量	100m ³ /min

付録 8-2 スラリー回収処理装置及び切断機局所集塵機の構成と基本仕様

付録8-3 生体遮蔽体の切断作業におけるキャビティ内部の気中放射能濃度

部位	背面	気中放射能濃度 (Bq/cc)	
		垂直	水平
5段	8.2×10^{-9}	1.04×10^{-8}	2.28×10^{-8}
4段	1.83×10^{-8}	2.19×10^{-8}	3.21×10^{-8}
3段	3.74×10^{-8}	3.25×10^{-8}	1.81×10^{-8}
2段	2.35×10^{-8}	2.68×10^{-8}	1.59×10^{-8}

ダストの回収： ダストサンプラー
測定器： サンプルチェンジャー (Aloka社製： TDC-501)

付録 9 制御爆破工法の概要

制御爆破工法による生体遮蔽体の解体作業では、大部分の作業を作業者の手作業で実施したが、作業効率の向上と作業の安全のために、穿孔用機器、二次破碎用機器、昇降式作業床、廃棄物運搬容器、局所集塵装置を使用した。各装置、機器の仕様は以下の通りである。

昇降式作業床：制御爆破工法による各種工具を用いた穿孔、爆破、二次破碎の一連の作業は、昇降式作業床で行われた。内面部の解体では、昇降式作業床がポーラクレーンに吊られた4本の昇降ワイヤで爆破対象部位まで降ろされ、サービスフロアに設置された作業床昇降架台の4本の固定ワイヤによって吊り下げられた状態で固定された。一方、外面部の解体では、作業を行う高さに応じた仮設作業架台を設置し、その上部に昇降式作業床を固定した。昇降式作業床の中央には開口蓋があり、その下には破碎したコンクリートを収納するために廃棄物運搬容器を取り付けた。

廃棄物運搬容器：破碎したコンクリートを原子炉格納容器から燃料貯蔵建屋に移送するためのもので、2本の専用ワイヤによって昇降式作業床の下部に吊り下げられ、作業床昇降架台上の専用ウィンチによって昇降した。

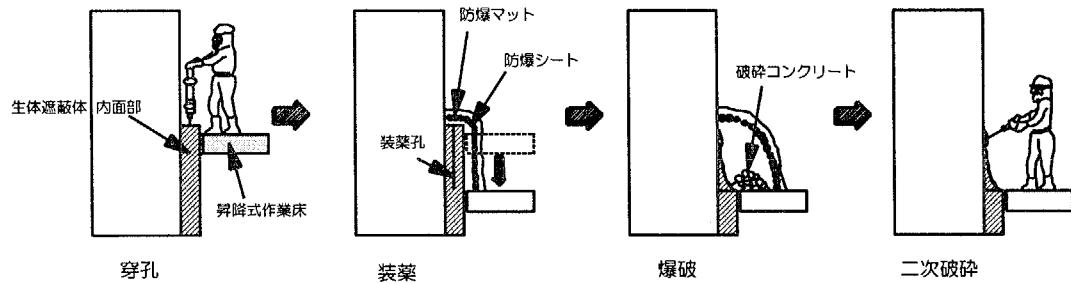
二次破碎用機器：ハンドブレーカ、ガス切断機、バックホウ、ホイールローダーである。ハンドブレーカは、内面部のコンクリートの破碎に、ガス切断機は鉄筋の切断に使用した。バックホウは、外面部の解体において、二次破碎の時間を短縮するためにアームにブレーカを取り付けコンクリートの破碎を行った。さらに、ホイールローダーは、二次破碎したコンクリートのフレキシブルコンテナへの収納に使用した。

穿孔用機器：削岩機及び穿孔機である。削岩機は、可搬型のエア駆動で内面部の穿孔に使用した。穿孔機は、ロッドの長さが2.4mで、本体が360°回転する構造であり、壁厚が厚く、多数の穿孔を行う外面部に適用した。

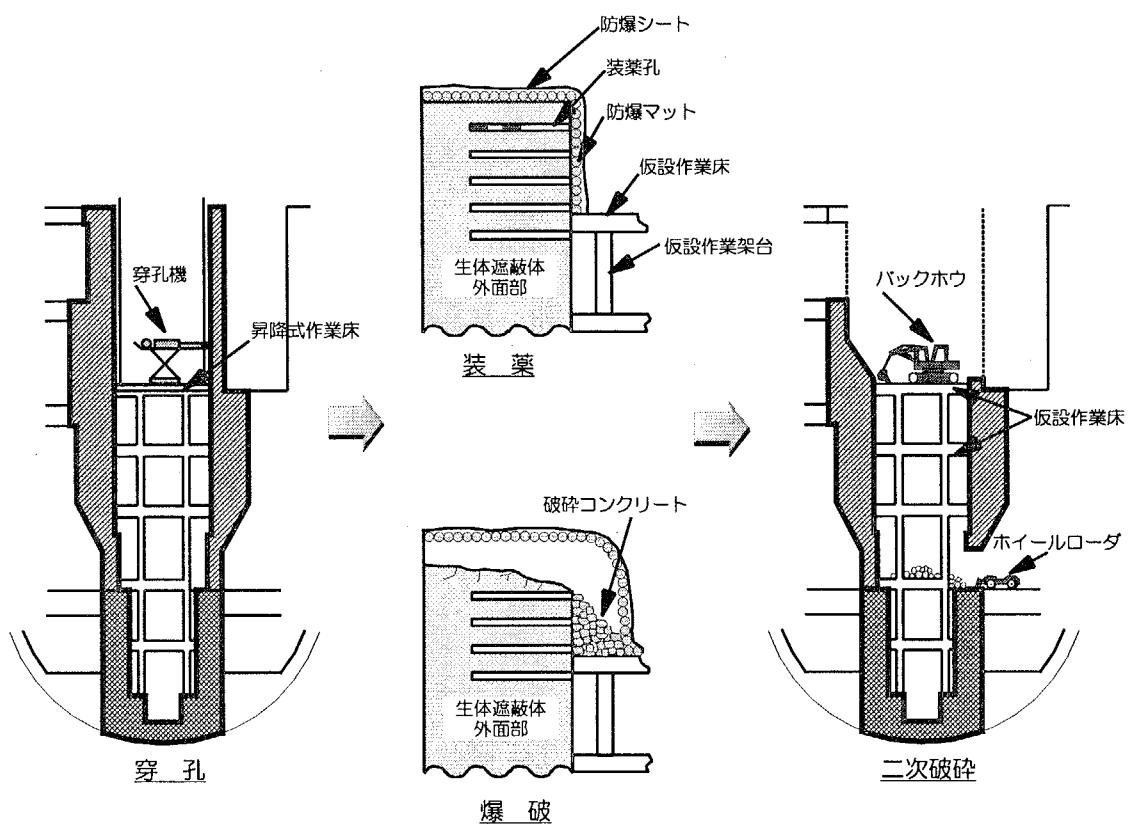
爆薬：コンクリートの飛散が少なく爆破するという点から、低爆速（爆ごう波が定常波として伝播する速さ）で破壊作用の小さいアーバナイトを使用した。アーバナイトは、通常の爆破作業に用いるダイナマイト（桜ダイナマイト：6,000m/sec）に比べ、低爆速（2,000m/sec）であり、爆破の衝撃圧は、通常の爆薬の1/16～1/20である。

局所集塵装置：約100m³/minの換気量でキャビティ内を負圧に保ち、爆破により発生する粉塵を回収処理した。

付録9-1に生体遮蔽体残部の解体手順を、付録9-2に制御爆破工法に使用した機器の基本仕様を示す。



(1) 生体遮蔽体内面部の作業手順



(2) 生体遮蔽体外面部の作業手順

付録 9-1 生体遮蔽体残部の解体手順

— 制御爆破工法 —

付録 9-2 制御爆破工法に使用した機器の基本仕様

昇降式作業床	寸法(mm)	φ3,300
	旋回速度	1m/min
	昇降速度	2m/min
爆薬(アーバナイト)	薬径×薬長(mm)	φ17×170
	仮比重	1.30
	爆速	2,000m/s
	保有エネルギー	4,800kg·m
電気雷管	形式	複合型耐静電気雷管
発破器(DX-50-A)	寸法(mm)	157×82×109
	容量	8μF×600V
解体物搬出装置	寸法(mm)	8,800×6,000×3,640
削岩機(ジャックハンマー)	駆動方式	エア駆動(爆薬装填用)
	ロッド	22mm6角中空銅
	コアピット径	34mm
ハンドブレーカ	駆動方式	エア駆動(コンクリート破碎用)
電動チッパー	駆動電圧	AC100V(コンクリート破碎用)
ガス切断機	材質	鉄筋切斷用
ダイヤモンドカッター	ブレード径(mm)	φ660, φ910(鉄筋コンクリート切斷用)
アークエアガウジング	駆動電圧	AC200V(鉄板ライナー切斷用)
防爆マット	寸法(mm)	750×2,500
	材質	ポリエチレンパイプ+ワイヤーロープ
防爆シート	寸法(mm)	4,000×6,000
	材質	ナイロン特殊帆布
バックホウ	0.3m ³ クラス	12,770×2,100×2,595mm, 6.4ton
	0.1m ³ クラス	4,675×2,100×2,595mm, 3ton
ホイールローダ	0.1m ³ クラス	2,370×890×1,760mm, 870kg
穿孔機	寸法, 重量	3,400×1,500×1,600mm, 1.8ton
	ロッド長	2.4m

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
功率、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	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	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)

1. 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。

2. 表4には海里、ノット、アール、ヘクタ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。

3. barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリに分類されている。

4. EC関係理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁴ 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 = 10⁴ St(ストークス)(cm²/s)

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
0.0980665	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
0.101325	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
1.33322 × 10 ⁻⁴	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
6.89476 × 10 ⁻³	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)	
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 ¹⁹			
3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵			
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹			
1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹			
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸			
1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1			

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem
1	2.70270 × 10 ⁻¹¹	1	0.01	100	1	1	3876	1	100		
3.7 × 10 ¹⁰	1		0.01	1		2.58 × 10 ⁻⁴	1		0.01	1	

(86年12月26日現在)

