

デコミッショニング技報

Journal of the RANDEC

巻頭言：デコミッショニングの最適化

技術報告：大型槽類遠隔解体装置のモックアップ試験
三菱重工の放射性廃棄物放射能測定技術
原子炉压力容器遠隔切断技術開発
レーザ切断による二次生成物回収処理技術試験

財団法人

原子力研究バックエンド推進センター デコミッショニング技術本部

Radioactive Waste Management and Nuclear Facility

Decommissioning Technology Center

No. **23** 2001

RANDEC

RANDECは、原子力施設のデコミッショニング
(廃止措置)技術の確立をめざして活動しています。

事業の内容

デコミッショニングに関する試験研究・調査を行います。

デコミッショニングに関する技術・情報を提供します。

デコミッショニングに関する人材を養成します。

デコミッショニングに関する普及啓発活動を行います。

デコミッショニング技報

第23号 (2001年3月)

目次

巻頭言

デコミッショニングの最適化	1
川上 泰	

技術報告

大型槽類遠隔解体装置のモックアップ試験	2
明道 栄人、岡根 章五、宮島 和俊	

三菱重工の放射性廃棄物放射能測定技術	17
坂下 章、中田 幹裕、遠藤 保美、若原 道夫	

原子炉圧力容器遠隔切断技術開発	28
渡辺 正秋、宮坂 靖彦、宮尾 英彦、大木 新彦 二宮 敏明、小岩 正巳	

レーザー切断による二次生成物回収処理技術試験	41
原 邦男、宮尾 英彦、中澤 正治 片岡 伸一、名倉 保身、斉木 秀男	

Journal of the RANDEC

No.23 March 2001

CONTENTS

Technical Report

- The Mock-up Test of Remote Controlled Dismantling Apparatus for Large-sized Vessels 2
Masato MYODO, Shogo OKANE, Kazutoshi MIYAJIMA
- Research and Development Activities of Mitsubishi Heavy Industries
for Radioactivity Measurement of Radioactive Waste 17
Akira SAKASHITA, Mikihiro NAKATA, Yasumi ENDO, Michio WAKAHARA
- Technology development for cutting a reactor pressure vessel using a mechanical cutting technique.
..... 28
Masaaki WATANABE, Yasuhiko MIYASAKA, Hidehiko MIYAO
Arahiko OOKI, Toshiaki NINOMIYA, Masami KOIWA
- Secondary Waste Characteristics and ITS Filtration System on Laser Cutting
..... 41
Kunio HARA, Hidehiko MIYAO, Masaharu NAKAZAWA
Sinichi KATAOKA, Yasumi NAGURA, Hideo SAIKI

The Mock-up Test of Remote Controlled Dismantling Apparatus for Large-sized Vessels

Masato MYODO, Shogo OKANE,
Kazutoshi MIYAJIMA

J.RANDEC, No23 (Mar. 2001) page 2 ~ 16, 12 Figures,
10 Tables, 4 Photos

JAERI's Reprocessing Test Facility (JRTF) was operated from 1968 to 1969, and 200g of Pu was recovered by reprocessing spent fuels from JRR-3. About 70m³ of liquid waste was generated from the reprocessing test. These liquid waste was stored in some large-sized vessels (LV-3,4,5,6) in JRTF, and the treatment of liquid waste was completed until 1996.

The large-sized vessels are installed in a narrow cell complicated with pipes and other equipments, and their inside is contaminated with TRU nuclides. It is necessary to dismantle the large-sized vessels efficiently and to reduce the radiation exposure of workers by remote operation.

In JAERI, the JRTF decommissioning project has started in 1996¹⁾. As far, hot-cave and some glove-boxes and so on, were dismantled. The dismantling of these vessels was expected to be main activities in this project. Therefore, the remote dismantling apparatus, which is equipped with multi-unit for functioning of washing, cutting, collection of cut pieces and so on, has been constructed to dismantle the large-sized vessels in JRTF. The mock-up tests were performed to evaluate the applicability of the apparatus to actual dismantling activities by using the mock-ups of LV-3 and LV-5 in the facility. It was confirmed that each unit was satisfactory functioned by remote operation. Efficient procedures for dismantling the large-sized vessel was studied and various data was obtained in the mock-up tests. This apparatus was found to be applicable for the actual dismantling activity in JRTF.

This study was conducted under contract with Science and Technology Agency of Japan.

Research and Development Activities of Mitsubishi Heavy Industries for Radioactivity Measurement of Radioactive Waste

Akira SAKASHITA, Mikihiro NAKATA,
Yasumi ENDO, Michio WAKAHARA

J.RANDEC, No23 (Mar. 2001) page 17 ~ 27, 19
Figures, 1 Table

For final disposal of radioactive waste generated from nuclear power plant and fuel cycle plant, confirmation of their nuclide concentration, whether it shall meet the criteria is one of the most important item. Therefore the technology to identify the nuclide concentration must be developed.

MHI have many experience in construction of nuclear power plant and fuel cycle plant, and have many knowledge of radioactive waste management and the technology for measuring their radioactivity.

This report describes an overview of the radioactivity measurement technology of the radioactive waste, which have been developed by MHI.

Technology Development for Cutting a Reactor Pressure Vessel using a Mechanical Cutting Technique

Masaaki WATANABE, Yasuhiko MIYASAKA,
Hidehiko MIYAO, Arahiko OOKI,

Toshiaki NINOMIYA, Masami KOIWA
J.RANDEC, No23 (Mar. 2002) page 28 ~ 40, 13
Figures, 4 Tables, 5 Photos

On decommissioning of nuclear facilities, the thermal cutting technique such as an oxygen-acetylene gas cutting and a plasma arc cutting are generally used for cutting massive and thick steel structures in consideration with cutting speed and control performance. These techniques generate dust, smoke, aerosol and a large quantity of secondary waste.

Mechanical cutting technique has an advantage of small amount of secondary waste, and the metal chips from the kerf are recovered easily compared with these thermal cutting technique.

The remote mechanical cutting system for highly activated RPV has been developed with the manner which

achieves the safety and cost effectiveness.

The development has been performed on consignment to RANDEC from the Science and Technology Agency of Japan.

Secondary Waste Characteristics and its Filtration System on Laser Cutting

Kunio HARA, Hidehiko MIYAO,
Masaharu NAKAZAWA, Sinichi KATAOKA,
Yasumi NAGURA, Hideo SAIKI

J.RANDEC, No23 (Mar. 2001) page 41 ~52, 10 Figures,
2 Tables

Technology of dismantling nuclear facilities has been developing in various fields for its evaluation and dismantling system.

RANDEC has been studying a remote dismantling system for highly activated equipments such as core internals with a laser using optical fiber.

Recently a high power YAG laser having the advantage of application for remote dismantling on thick metallic material is the stage for practical use, and narrow kerf can bring the reduction of secondary waste as well.

The present paper describes the experimental results and discussion on the laser cutting, including the secondary waste characteristics and its filtration system using the YAG laser.

This study has been performed on consignment to RANDEC from the Science and Technology Agency of Japan.

デコミッションングの最適化



財団法人 原子力研究バックエンド推進センター
専務理事 川上 泰

3月21日、テレビ、ラジオのニュースは日本原子力発電(株)の東海発電所の原子燃料の搬出が終了し、デコミッションングの段階に移行することを伝えた。日本における商用原子力発電所のデコミッションングが開始されることとなる。多くの国々において原子力施設のデコミッションングが実施されているが、それらの経験が蓄積され、多様な展開が行われている。

日本における本格的な原子炉施設のデコミッションングについては、昭和61年に開始され、平成8年に終了した日本原子力研究所のJPDRの解体実地試験が実規模でのデコミッションングの最初のものである。ここでは原子炉圧力容器は細断され、遮へい容器に収納された。細断には、高度な制御システムをもった遠隔操作機器が開発され、実用化された。

同じ頃、アメリカでは SHIPPINGPORT 炉 (PWR、6.8 万 kWe) の解体が進められており、原子炉圧力容器の一体撤去法が採用され、東海岸からパナマ運河を経由して西海岸のハンフォード処分場まで輸送された。当時はアメリカと日本の国情の違いがあり、日本ではこのような方法の適用性はないものと考えていた。その後、アメリカでは一体撤去の考え方が進展し、昨年、実施されたトロージャン炉 (PWR、117.8 万 kWe) の圧力容器の一体撤去では炉内構造物を含み、遮へい体を付加したその総重量は 1020 トンに達している。これを輸送できる輸送インフラストラクチャの容量の大きさ、受け入れる放射性廃棄物処分場の規模もさることながら、その発想と実行力は、まさに、アメリカである。

原子炉圧力容器は「入れ物」としては地上でもっとも強固な物と考えられ、これを廃棄物容器とすることは極めて合理的であると言える。日本でも、このような一体撤去法を可能にするには、何が必要かを考えている昨今である。

原子炉のデコミッションングは最終シャットダウン後、燃料を取り出し、炉内の放射能が減衰するまで管理し、その後、解体を行うというのが基本的な考え方である。この減衰待ちの期間については、例えば、130年を考える英国、10年で解体を考える日本と、各国においてかなりの差がある。それぞれ、理由があって、よく言われる理屈として、長期の管理期間中、資金を銀行に預けておくとその金利で解体費用が賄えるという話がある。日本のゼロ金利では不可能かもしれないが、説得性はある。これらの比較も興味のあるところであるが、最近ではかなり早い時期に解体を開始するケースが増えているように見受けられる。その理由として長期にわたる施設の維持管理のためのコストの問題がある。長期間にわたる原子炉施設の維持管理費用あるいは長期保管後の解体時に作業用のコンテナメントを再構築する費用などを考えると、評価の難しい課題である。さらに、運転時における記録類、運転経験者からの情報等を集約して維持する問題などもある。

原子炉施設のデコミッションングも世界的に多くの経験が蓄積され、最適化が進むものと考えられる。多様な問題に柔軟に対応すること、総合的な最適化を進めることが安全でコストの低い原子力施設のデコミッションングを実現するために必要なことと思われる。

大型槽類遠隔解体装置のモックアップ試験

明道 栄人*¹、岡根 章五*²、宮島 和俊*¹

The Mock-up Test of Remote Controlled Dismantling Apparatus for Large-sized Vessels

Masato MYODO, Shogo OKANE, Kazutoshi MIYAJIMA

JAERI's Reprocessing Test Facility (JRTF) was operated from 1968 to 1969, and 200g of Pu was recovered by reprocessing spent fuels from JRR-3. About 70m³ of liquid waste was generated from the reprocessing test. These liquid waste was stored in some large-sized vessels (LV-3,4,5,6) in JRTF, and the treatment of liquid waste was completed until 1996.

The large-sized vessels are installed in a narrow cell complicated with pipes and other equipments, and their inside is contaminated with TRU nuclides. It is necessary to dismantle the large-sized vessels efficiently and to reduce the radiation exposure of workers by remote operation.

In JAERI, the JRTF decommissioning project has started in 1996¹⁾. As far, hot-cave and some glove-boxes and so on, were dismantled. The dismantling of these vessels was expected to be main activities in this project. Therefore, the remote dismantling apparatus, which is equipped with multi-unit for functioning of washing, cutting, collection of cut pieces and so on, has been constructed to dismantle the large-sized vessels in JRTF. The mock-up tests were performed to evaluate the applicability of the apparatus to actual dismantling activities by using the mock-ups of LV-3 and LV-5 in the facility. It was confirmed that each unit was satisfactory functioned by remote operation. Efficient procedures for dismantling the large-sized vessel was studied and various date was obtained in the mock-up tests. This apparatus was found to be applicable for the actual dismantling activity in JRTF.

This study was conducted under contract with Science and Technology Agency of Japan.

1. はじめに

原研再処理特別研究棟(以下、「JRTF」という)では、昭和43年から昭和44年にかけて、JRR-2の使用済燃料をPUREX法により再処理し、プルトニウム約200gを回収する成果を収めた。この際70m³の廃液が発生し、これらの一部はJRTFの廃液長期貯蔵施設の地下タンク室に設置されている大型槽(LV-3、4、5、6)に貯留管理された。これらの廃液は、平成8年度までにその処理が終了し

ている。

一般的に廃液を貯留する槽類は、遮へいコンクリート等に囲まれたセル内等に設置され、その内部はTRU核種によって汚染されている。これらの槽類の解体にあたっては、遠隔操作による解体装置を開発し、作業者の内外部被ばくの低減、作業の安全性及び効率化を図る必要がある。

原研では、JRTFの解体実地試験を1996年から開始¹⁾し、現在までホットケープ及びグローブボックス等の解体を進めてきた。本解体実地試験

*1 日本原子力研究所 バックエンド技術部 核燃料施設解体技術室 (JAERI)

*2 日本原子力研究所 管理部 プルトニウム技術開発室 (JAERI)

の中でも、上述した大型槽の解体は、主要な作業となることが予想された。そこで、施設内に設置されている大型槽を対象に洗浄、切断、回収等の複数の機能を備えた遠隔解体装置を製作するとともに、本装置の解体実地試験への適用性を検証することを目的に、模擬槽 LV-3 及び LV-5 を用いてモックアップによる解体試験を行った。

試験では、槽内の洗浄、配管及び槽本体の切断、切断片の回収等の性能を確認するとともに、遠隔操作による運転が安全に行えることを確認した。また、作業効率等の各種データを取得し、大型槽の解体手順等を評価することにより、本装置が解体実地試験に適用できる見通しを得た。

本報では、製作した大型槽類遠隔解体装置の概要とモックアップ試験により得られた試験データ等について報告する。

2. 大型槽の概要

昭和43年から昭和44年に実施した再処理試験により発生した廃液の一部は、廃液長期貯蔵施設

の地下タンク室に設置してある大型槽 (LV-3、4、5、6) に貯留された。Fig. 1 に廃液長期貯蔵施設における LV-3 ~ LV-6 の配置図を示す。

これらの大型槽は地下タンク室 (11.6mL × 6.25mW × 4.17mH) 内に横置きに設置されており、LV-3、4 (槽容量 10.5m³) と LV-5、6 (槽容量 16.5m³) の間はコンクリートの堰により隔てられている。これらの大型槽は再処理試験の抽出・分離、溶媒回収、Pu 精製等の各工程から発生した TRU 核種を含む廃液を貯留しており、LV-3、4 の大きさは 1,800mm φ × 4,500mmL で、材質は SUS304L、肉厚は 6mm であり、LV-5、LV-6 の大きさは 2,400mm φ × 4,500mmL で、材質は SS41、肉厚は 12mm で内面にガラスライニングが施されている。

現在は、槽内部に有機物、スラッジ等が残留付着しているものと考えられる。Fig. 2 に地下タンク室における LV-3 ~ LV-6 の設置図を示す。また、Table 1 に LV-3 ~ LV-6 の主な仕様を示す。

LV-3 ~ LV-6 が設置されている地下タンク室内

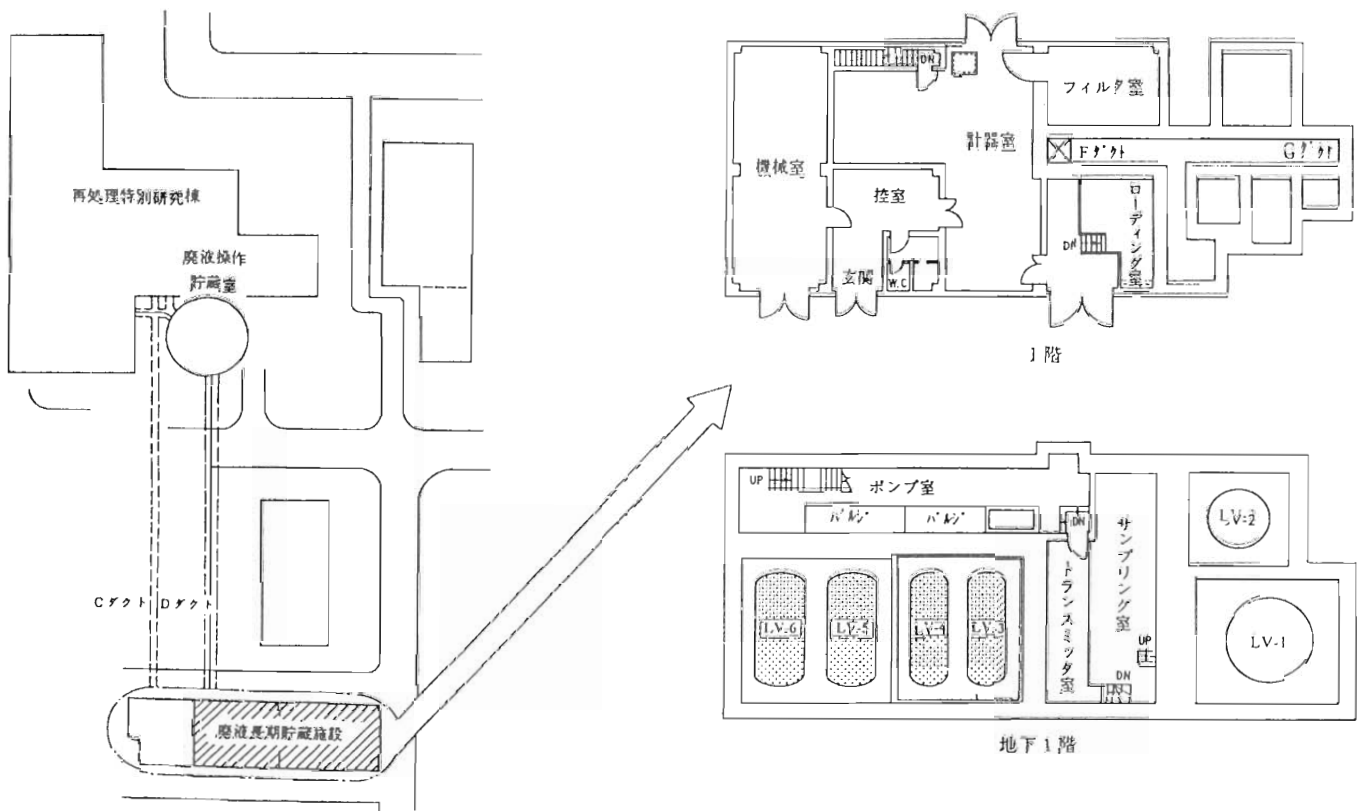


Fig. 1 Layout of LV-3 ~ V-6 in annex building B

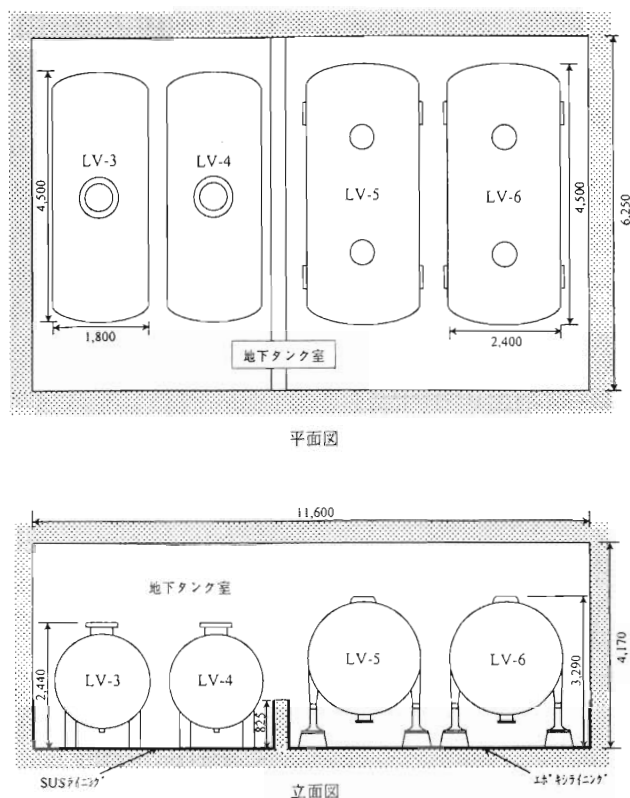


Fig. 2 Layout of LV-3~V-6 in tank room of annex building B

Table 1 Specification of LV-3 ~ LV-6

	LV-3, 4	LV-5, 6
材質	SUS304L	SS41 内面ガラスライニング 外面塗装
寸法	1,800mm φ × 4,500mm L	2,400mm φ × 4,500mm L
肉厚	6mm	12mm
ハンドホール部	500A	600A×2
接続配管 (厚さは Sch80)	移送配管 本数：2本(LV-4は1本) サイズ：40A プロセス配管 本数：6本(LV-4は5本) サイズ：25A ~ 40A ユーティリティ配管 本数：4本(LV-4は3本) サイズ：25A ~ 40A 計装配管 本数：4本 サイズ：6A ~ 10A	移送配管 本数：1本 サイズ：40A ユーティリティ配管 本数：3本 サイズ：40A 計装配管 本数：2本 サイズ：10A

は、大型槽に接続されているプロセス配管、ユーティリティ配管及び計装配管等が密集した状態となっている。接続配管の材質はSUS316、SUS304L

であり、配管サイズは主に6A~40A、肉厚はSch80である。LV-3、4が設置されている床面及び腰壁面はステンレスによりライニングされており、高さ825mm、幅300mmの堰を隔てたLV-5、6の床面及び腰壁面はエポキシライニングが施されている。地下タンク室内は定格風量600m³/hで排気され、室内は常時負圧を保っている。室内の線量当量率は最大約30 μSv/hである。

3. 大型槽類遠隔解体装置

大型槽の解体に必要な機能として、槽内に付着しているスラッジ等を除去する洗浄機能、配管及び槽本体を切断する切断機能、発生する切断片を回収する回収機能を有しているものとし、これらの解体に係わる作業を全て遠隔で実行できる装置を製作することとした。

このような機能を備えた遠隔解体装置を考えた場合、解体装置の概念としては、以下のような方式が考えられる。即ち、車両等が地下タンク室内を自走しながら解体を行う「自走方式」、地下タンク室内の定位置に解体装置を設置し解体を行う「定置方式」、開口部を設けて解体に係る機構のみを室内に搬入し、その他の機構は室外に設置する「室外方式」が挙げられる。

地下タンク室内は大型槽や接続配管が輻輳しているため、非常に狭隘なエリアである。このような内部状況から、地下タンク室内に解体装置を設置する自走方式及び定置方式による解体方法は困難であり、設置した解体装置は解体作業によりほとんど汚染されるため、放射性廃棄物の増加につながる。

一方、室外方式は移動機構部が室外に設置されることから、解体を行う機構の移動範囲が広くなるとともに、室内外に設置される機器等を区分することにより廃棄物の低減化を図ることができる。ただし、この場合は室内外が開放となるため、開口部における汚染拡大防止措置を施す必要がある。

また、解体作業に必要な各機構(洗浄、切断、回収)は、装置の小型化を図る観点から、作業内容に応じて遠隔で着脱可能な構造にすることとした。さらに、遠隔操作による解体作業を助勢する機構として、作業状況を複数のITVカメラで監視

する機構や、解体中における各機構部の消耗品の交換、軽微な修理等を行う機構が必要となる。

以上のことを踏まえて、施設の特徴及び要求される装置の機能等を考慮し、製作した室外方式による遠隔解体装置の特徴について述べる。Fig. 3に大型槽類遠隔解体装置の概念図を示す。

3.1 洗浄機構部

解体対象となる槽は湿式再処理試験後、廃液の処理は実施されたが、槽内は洗浄されていないため、槽の内面にはスラッジや溶媒が付着していると予想される。

そのため、切断時における汚染拡大防止及び火災防止の観点から、ルーズに付着したスラッジ等を事前に除去しておくことが必要である。洗浄機構部は、主に3次元噴射型(3D)ノズルを用いた洗浄ヘッド、槽内の任意の場所に接近するためのパンタグラフ方式(最大ストローク:1,860mm)のアーム部等から構成され、洗浄作業はパンタグラフに沿って取り付けられた高圧配管を通して供給

される高圧水によって行う。最大使用圧力は180kgf/cm²、最大流量は約29L/minである。

3.2 切断機構部

切断機構部は配管の切断を行う把持・シャーリングヘッド、槽本体の切断を行うグラインダヘッド及びプラズマヘッドに分けられる。槽には多数の配管(プロセス配管、計装配管等)が接続されており、配管の総延長が長く切断箇所が多いこと等から、配管の切断は切断ヘッドの小型化及び発生粉塵量の少ない切断工法として、小型で高出力を有する水圧駆動方式による機械的切断(カット閉圧力:最大1,000kgf/cm²)とした。切断された配管は切断時に落下させず、そのまま把持して切断片搬出機構まで移送するものとした。

また、解体対象となる槽の肉厚は6mmと12mmである。槽本体の切断では、廃棄物容器(200Lドラム缶)に収納できる大きさに切断が可能で、かつ切断速度が比較的速い切断工具を使用する観点から、グラインダ(電流値:15A)による切断工

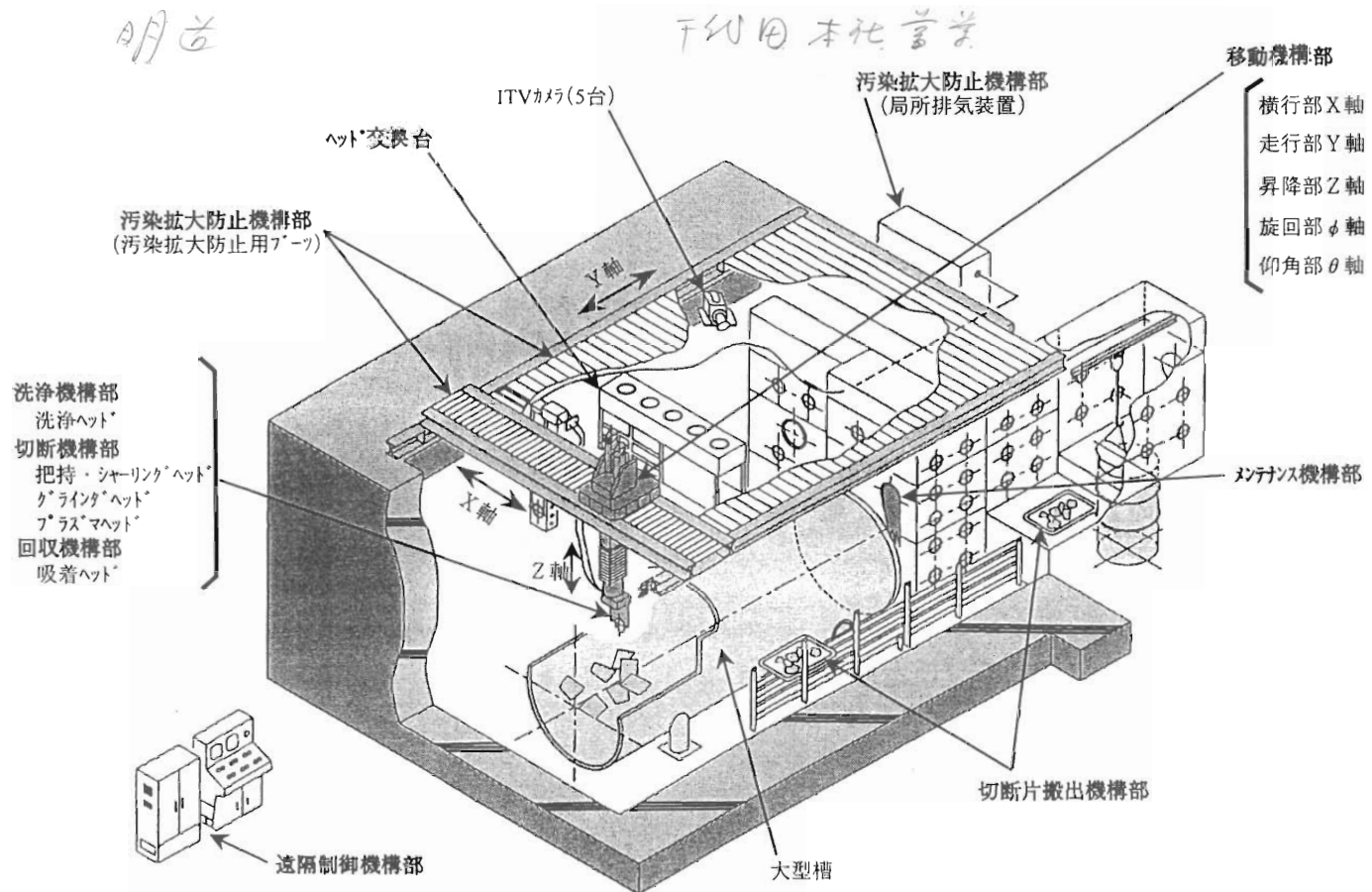


Fig. 3 Construction of remote controlled dismantling apparatus for large-sized vessels

法を選定した。また厚肉部や曲線部分の切断にも対応できるようにプラズマ(電流値:300A)による切断を行うこととした。

3.3 回収機構部

槽の解体により発生する切断片の形状は、配管サポート、ハンドホール部等の不定形のものや切断片の大部分を占める平板のものがある。

前述のように配管の回収については、切断後そのまま移送し搬出が行うが、板状切断片の回収については、その形状から把持して回収することは困難であることから、真空エジェクタを用いてパッド内に真空を発生させ、切断片を吸着回収する方式とした。吸着ヘッドに取り付けたパッドは、表面に凹凸のある切断片についても回収できるように、その材質を天然ゴムとし装着個数は8個(50mmφ/個)とした。

3.4 移動機構部

移動機構による移動範囲は、6.3mL×3mW×4.2mHと広範囲であり、洗浄、切断及び回収作業を行うために、移動機構部には各ヘッドが対象物にアクセスできるよう十分な自由度が必要である。

そのため、移動機構はX軸、Y軸テーブルにZ軸を備えた直行座標方式とし、対象物のアクセスにX軸(横行)、Y軸(走行)、Z軸(昇降)の3自由度に加え、さらに、対象物との角度や方向を調整するためのθ軸(仰角)、φ軸(旋回)を有し、合計5自由度から構成されている。Z軸については高さ方向に長いストロークが必要であることに對し、地下タンク室の天井高さには制約があるため、Z1軸、Z2軸の2段伸縮構造とした。軸の移動速度は最大4,000mm/minとした。

3.5 切断片搬出機構部

解体により発生した配管及び槽本体の切断片は、作業員が直接室内に立ち入ることなく、回収機構部で回収された後、遠隔で室外に搬出する必要がある。

切断片搬出機構部は、切断片を搭載する移送トレイ、切断片の梱包を行う切断片搬出ボックス等から構成されている。移送トレイは切断片を一定

量集積した後、搬出できるようにするため、約300mm角、厚さ12mmのSS製の切断片10枚が移送可能なように最大積載重量を約90kgとした。切断片搬出ボックスは、片側がグローブボックス形式のものであり、切断片はグローブを介して梱包され廃棄物容器に収納される。

3.6 遠隔制御機構部

大型槽類遠隔解体装置では、解体に係る一連の作業を作業員の被ばく防止を図るため、遠隔操作で実施する。

遠隔制御機構部では移動機構部の各軸が単独で動作でき、あらかじめ教示した位置データに基づき、指定した位置に移動後、手動運転またはNCキーボードによる教示で自動運転を行う。また、室内に設置する5台の監視カメラで作業中における移動機構部の位置の確認、切断対象物の位置の確認等の作業状況を監視する。これらの操作は全て操作盤のジョイスティックや各種スイッチ等で実行され、ITVカメラからの映像はテレビモニターに出力される。

3.7 汚染拡大防止機構部

切断作業では、切粉、ヒューム等の二次廃棄物が発生し、それにより放射性物質が飛散することから、これらを吸引しフィルタを介して排気するとともに、粉塵等による室外への飛散防止を図る必要がある。

汚染拡大防止機構部では、局所排気装置(排気風量:6m³/h)を用いて、切断ヘッドの近傍に取り付けた排気ダクトにより、これらを回収するとともに室内を常時負圧に維持することとした。局所排気装置には、パルスジェット式の逆洗機構を設け、フィルタの再使用が可能な構造とした。またX軸、Y軸の開口部には、軸の動きに追従できるように伸縮構造のアコーディオン式ブーツで覆い、粉塵等が室外に飛散することを防止する構造とし、Z軸については、そのほとんどが室内に位置することから、汚染防止のためにジャバラ式ブーツで覆う構造とした。

3.8 メンテナンス機構部

解体に使用する各ヘッドは消耗品の交換、点検

等のメンテナンスが必要になる。これらの作業では、被ばく低減の観点から、作業員が直接入室し実施することは有為ではない。そのため、メンテナンス機構部は、パネル等からなるグローブボックス形式の構造とし、作業員はグローブ操作によってメンテナンス作業を実施することとした。

4. モックアップ試験

製作した大型槽類遠隔解体装置を用いて、装置の性能、安全性及び作業性等を確認するモックアップ試験を実施した。試験では、主に槽内の洗浄試験、配管及び槽本体の切断試験、切断片の回収、試験、局所排気装置による排気試験及びメンテナンス試験を実施した。

試験で使用した大型槽は、廃液長期貯蔵施設に設置されているLV-3及びLV-5をほぼ同等の仕様で模擬したものであり、内部の状況を確認できるように片側を開放としたものである。模擬槽LV-3及びLV-5の概念図をFig. 4、Fig. 5に示す。以下に各試験方法及び試験結果等について述べる。

4.1 槽内の洗浄試験

洗浄試験では、洗浄機構部の3次元噴射型(3D)

ノズルを遠隔操作にて槽内に搬入後、洗浄水を噴射し、感圧紙を用いて圧力測定を行い、3次元的な洗浄範囲の確認を行った。また、槽内に取り付けた試験片(模擬スラッジ及び溶媒を塗布)を用いてスラッジの除去率を測定し、洗浄効果の確認を行った。

4.1.1 洗浄範囲の確認

(1) 試験方法

試験方法は、ビニールに覆った感圧紙を合計17枚(鏡部5箇所、胴体部12箇所)を槽内に張り付け、鏡部に近い方から1列目、2列目、3列目とし、3Dノズルの噴射位置及び噴射時間(サイクル数)を変化させて洗浄水の噴射を行った(噴射ケースI、II及びIII)。Fig.6に感圧紙の配置位置及び洗浄ヘッドの噴射位置を示す。また、Table.2に試験条件を示す。洗浄水の噴射後、圧力換算計を用いて1枚の感圧紙毎に50箇所(1mmφ/1箇所)の圧力測定を行い、その平均を各配置位置の圧力とした。

(2) 試験結果

試験により、噴射ケースIの噴射条件で噴射した場合、噴射時間1サイクル(6分5秒)

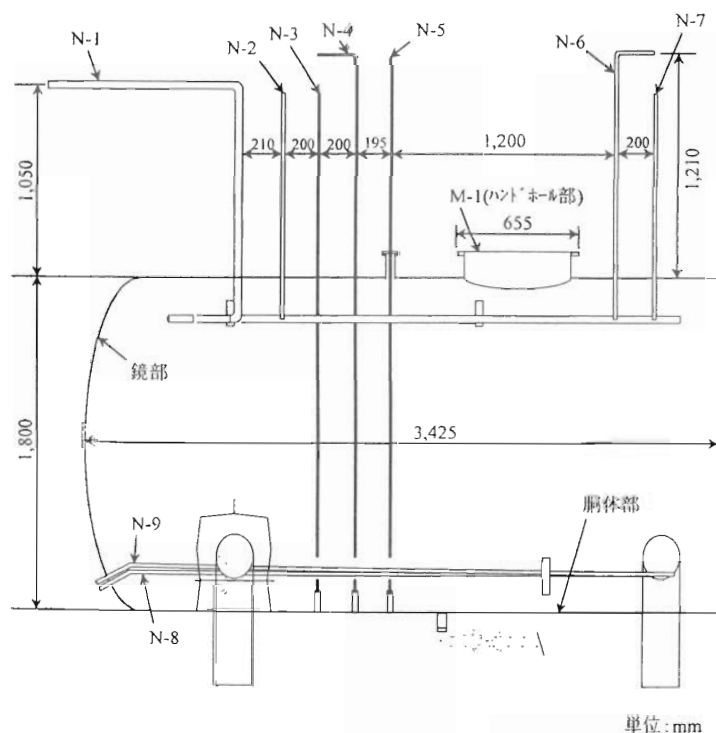
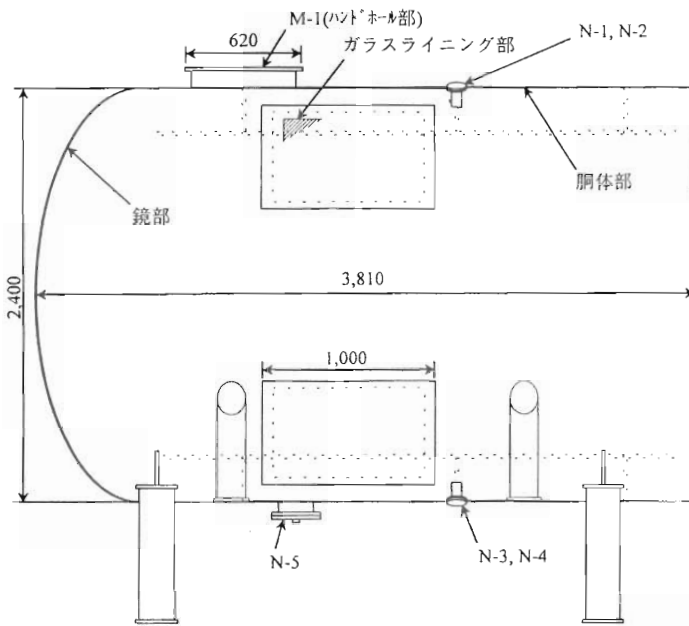


Fig.4 Specification and appearance of LV-3 mock-up tank

模擬槽 LV-3	
材質	SUS304
胴体部	1,800mm φ × 3,425mm L × 6mm t
鏡部	10%皿型、1,800mm φ × 8mm t
ハンドホール部	胴板(500A × 6mm t) フランジ(FF、655mm φ × 26mm t)
その他	槽の片側は覗き窓(アクリル製)付き蓋構造

ノズル番号	口径	材質	LV-3ノズル名称
N-1	40A Sch80	SUS304TP	N-9 スプレー用
N-2	25A Sch80	SUS304TP	N-10 サンフ*ビ*ットより戻り
N-3	10A Sch80	SUS304TP	N-8-2 L1 用
N-4	10A Sch80	SUS304TP	N-8-1 L1 用
N-5	50A Sch80	SUS304TP	N-7 サンフ*用
N-6	25A Sch80	SUS304TP	N-2-1 液入口
N-7	25A Sch80	SUS304TP	N-2-2 液入口
N-8	25A Sch80	SUS304TP	N-11-2 加熱コイル出口
N-9	25A Sch80	SUS304TP	N-11-1 加熱コイル入口
M-1	508 φ × t6	SUS304	N-1 ハンド*ホール

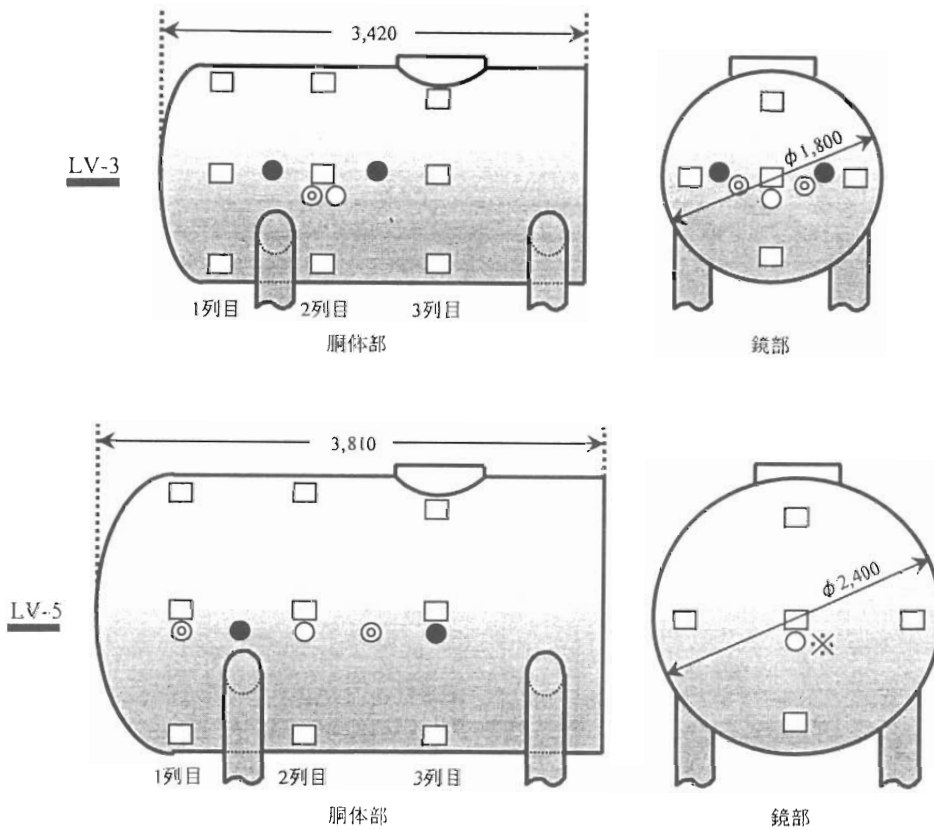


模擬槽 LV-5	
材質	SS400
胴体部	2,400mm φ × 3,810mmL × 12mmt 上下各2箇所ガラスライニング(850mm角 × 1.5mmt)
鏡部	2:1半楕円形 2,400mm φ × 12mmt
ハンドホール部	胴板(450A, Sch40, STPG370) フランジ(620mm φ, JIS10K, SOFF)
その他	槽の片側は覗き窓(アクリル製)付き蓋構造 模擬移動台車を固定するための脚柱付 外表面エポキシ塗料塗装

ノズル番号	口径	材質	LV-5 ノズル名称
N-1	80A Sch80 内部配管 25A	STPG370 SUS316TP	洗浄水パイプ取付口
N-2	80A Sch80 内部配管 25A	STPG370 SUS316TP	洗浄水パイプ取付口
N-3	80A Sch80 内部配管 25A	STPG370 SUS316TP	エアスパージャーパイプ取付口
N-4	80A Sch80 内部配管 25A	STPG370 SUS316TP	エアスパージャーパイプ取付口
N-5	200A Sch80	STPG370	液出口
M-1	450A Sch80	STPG370	マンホール

単位:mm

Fig.5 Specification and appearance of LV-5 mock-up tank



噴射条件		
噴射ケース	噴射位置	サイクル数
I	○	1
II	◎	2
III	●	2

1サイクル=6分5秒
※は◎、●を含む
□は感圧紙

Fig. 6 Position of impact paper and washing unit

Table 2 Washing test condition (the washing range)

噴射位置及び噴射時間	3 ケース、1 サイクル ~ 2 サイクル (Fig. 6 参照)
感圧紙の種類	プレスケール
感圧紙の配置位置	鏡部：中心、上下、左右(計5点) 胴体部：(上下、左右)×3ライン(計12点)
感圧紙の測定範囲	LV-3：0.5 ~ 2.5MPa LV-5：0.2 ~ 0.6MPa、0.5 ~ 2.5MPa
洗浄水の吐出圧力	100kgf/cm ²
洗浄水の吐出流量	22L/min

* 1 サイクル = 6 分 5 秒

で全ての感圧紙において、その圧力は、LV-3では0.8MPa以上、LV-5では0.4MPa以上が得られた。これらの圧力は金属表面、ガラス表面に付着したスラッジ等を除去するために必要な最低圧力である0.7~0.8MPa、0.4~0.5MPaを満足していることから、洗浄効果の確認を行う噴射条件は噴射ケースIとした。

4.1.2 洗浄効果の確認

(1) 試験方法

試験方法は、洗浄範囲の確認で選定した噴射ケースIの噴射条件で、模擬スラッジを塗布した試験片 (LV-3の場合はSUS板、LV-5の場合はガラス板) をFig. 6に示す感圧紙と同様の位置に配置し、スラッジの除去率測定を行った。Table 3に試験条件を示す。洗浄水を

Table 3 Washing test condition (the washing effect)

試験片	材質・寸法	LV-3：SUS板(約120mmL×120mmW×5mmt) LV-5：板ガラス(約120mmL×120mmW×5mmt) ※いずれもスラッジ塗布面積は約100cm ²
	模擬成分	・模擬有機溶媒 TBP：混合割合 30% ドデカ：混合割合 70% DBP ²⁾ ：800ppm ・模擬スラッジ ペマイト(10μm以下程度) ・混練剤 3N硝酸
	塗布条件	・塗布量 溶液塗布量：1.2ml/100cm ² スラッジ塗布量：約0.01g/cm ² (30%wt溶液) スラッジ厚み：約10μm(比重を8として) ・乾燥条件 乾燥温度：200℃(LV-3) 500℃(LV-5) 乾燥時間：30分 ・模擬有機溶媒 塗布量：0.4ml/100cm ²
噴射位置及び噴射時間	洗浄範囲確認試験で選定したケース 噴射ケースI(1サイクル)	
試験片配置位置	洗浄範囲確認試験での感圧紙の配置と同様	
洗浄水の吐出圧力	100kgf/cm ²	
洗浄水の吐出流量	22L/min	

噴射した後、取り出した試験片を強熱し30分間乾燥させ、重量を測定し噴射前後の重量差からスラッジの除去率を測定した。試験回数は2回とした。

(2) 試験結果

噴射ケースIによる試験片の配置位置とスラッジ除去率の関係をFig. 7に示す。LV-5の感圧紙の受けた圧力はLV-3より低かったが、LV-3と比較するとLV-5におけるスラッジ除去率は高く、むしろその値は一定した。これは、ガラス板に付着したスラッジの方がSUS板より付着力が小さく、容易に剥がれやすいためであった。槽全体の除去率は、各試験片のスラッジ除去率を平均するとLV-3が62%、LV-5が65%となった。

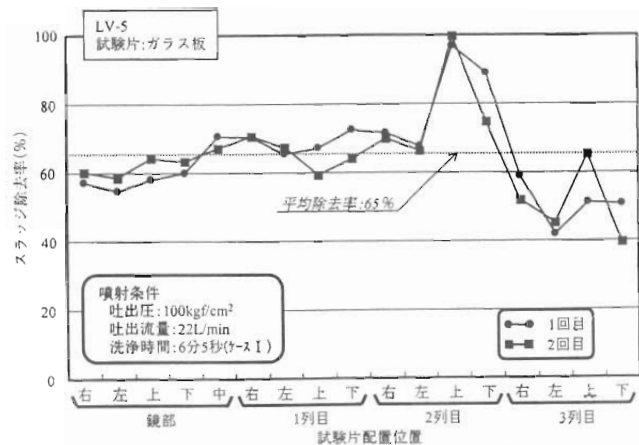
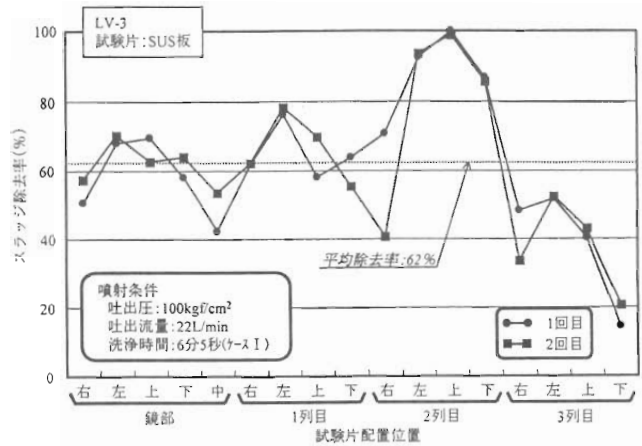


Fig. 7 Relation between impact paper position and sludge removal rate

4.2 配管の切断試験

配管の切断試験では、遠隔操作にて把持・シャーリングヘッドを切断位置に移動した後、切り離される側の配管を把持し切断を行い、切断性能及び切断作業効率の確認を行った。

(1) 試験方法

切断対象とした配管は6A、10A、25A、40Aの4種類(いずれもSch80)とし、切断に要する時間及び圧力を測定した。また、LV-3の内外部配管、LV-5の内部配管を対象に、遠隔操作による配管へのアクセス時間、切断後の切断片搬出トレイへの移送時間を測定した。把持・シャーリングヘッドの把持圧力は200kgf/cm²で、配管の切断長さは移送トレイの大きさを考慮し、約500mm以内とした。

(2) 試験結果

Fig. 8に配管サイズに対する切断時間及び切断圧力の関係を示す。切断時間は、配管サイズが大きくなると増加しており、最もサイズの大きい40A配管で2分弱の切断時間であった。この時の切断圧力は789kgf/cm²であった。Fig. 9に把持・シャーリングヘッドによる配管へのアクセス、切断及び切断片搬出トレイへの移送に要した時間を示す。配管が密集しているLV-3では、外部配管下部で最も時間を要し、切断片搬出トレイまでの移送で34分を要した。LV-5の内部配管の切断では、どの位置においても、ほぼ10分～15分の作業時間で切断片搬出トレイへの移送が完了でき、切断作業効率は平均4.8回/hであった。Photo 1に把

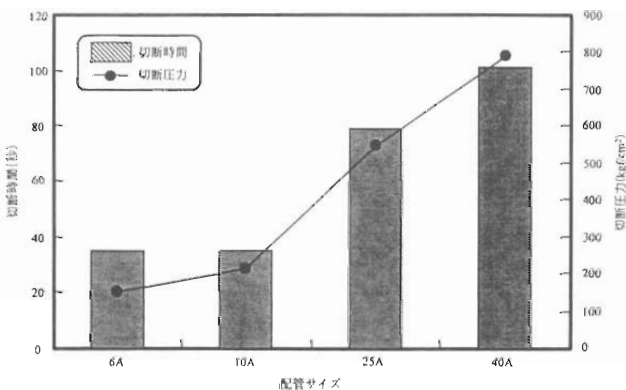


Fig.8 Relation between cutting time and cutting pressure for various pipes

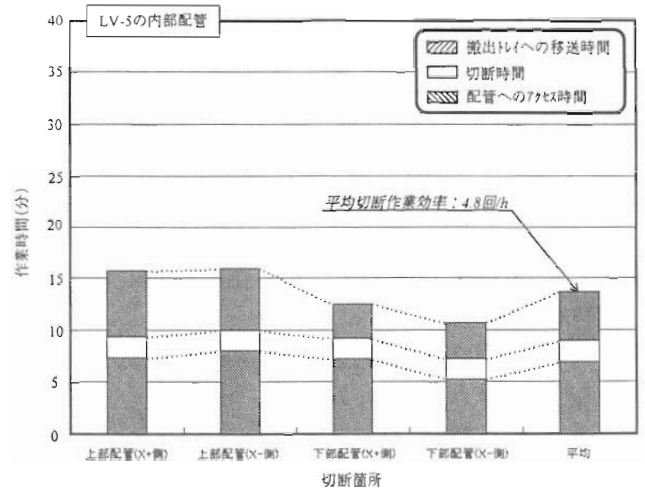
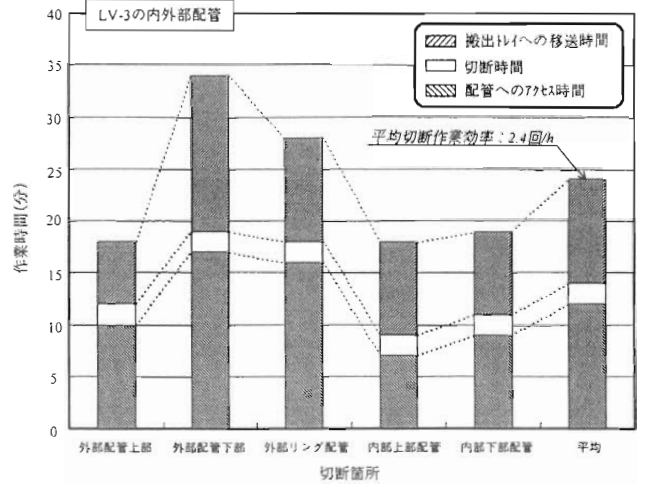


Fig.9 Time required for cutting pipes with grabbing and shearing device

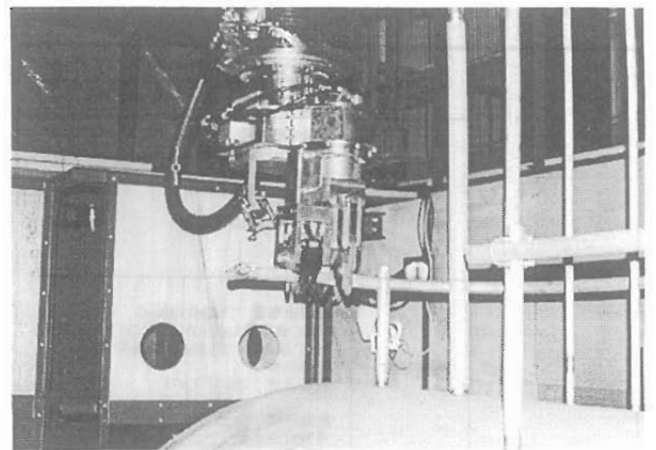


Photo 1 Cutting of pipes with grabbing and shearing device

持・シャーリングヘッドによる切断状況を示す。

4.3 槽本体の切断試験

槽本体の切断試験では、遠隔操作にてグラインダヘッド及びプラズマヘッドを切断位置に移動した後切断を行い、槽本体の切断性能及び解体作業効率等の確認を行った。

4.3.1 切断状況の確認

(1) 試験方法

試験では、胴体部については切断方向を長手方向と円周方向に分類し、鏡部については切断方向を水平方向と垂直方向に分類した。さらにグラインダ切断では、切断状態を通常切断（切断開始から切り込める切断）、中抜き切断（切断開始点において切り込みを入れる必要がある切断）、切り落とし切断（切断終了時に切断片が落下する切断）に分類した。これらの切断状態について切断の可否を確認するとともに、各部における切断時間を測定し切断速度の算出を行った。自動運転の場合、教示方法は円周方向に切断する場合の3点教示（開始点、中間点、終了点）と、長手方向に教示する場合の1点教示（開始点のみ）の2種類とした。なお、グラインダ切断では、モータの定格電流値である15Aを越えないようにジョイスティックにより速度を調整して切断を行った。プラズマ切断では、スタンドオフ値をLV-3では12mm、LV-5では8mmとし、ガス流量はAr:28~30L/min、N₂:5~5.5L/minとした。

(2) 試験結果

Table 4、Table 5にグラインダヘッドによる切断対象物部位毎の平均切断速度、Table 6、Table 7にプラズマヘッドによる切断対象部位毎の切断速度を示す。またPhoto 2、Photo 3にグラインダヘッド、プラズマヘッドによる切断状況を示す。

a. ハンドホール部の切断

グラインダ切断では、LV-3のハンドホール部の肉厚は26mmと厚いため、砥石が挟み込まれる事象が頻繁に発生した。そのため、途

Table 4 Cutting speed with grinder device (LV-3)

切断部位	運転の種類	切断方向	厚み	切断状態	平均切断速度
ハンドホール部	手動	垂直方向	26mm	—	0.4mm/min
胴体部	手動	長手方向	6mm	通常切断	23.4mm/min
				中抜き切断	20.2mm/min
		円周方向	6mm	通常切断	29.3mm/min
				切り落とし切断	18.8mm/min
	自動	長手方向	6mm	通常切断	47.8mm/min
				切り落とし切断	37.2mm/min
自動	円周方向	6mm	通常切断	44.5mm/min	
			切り落とし切断	41.7mm/min	
鏡部	手動	水平方向	8mm	通常切断	23.2mm/min
				切り落とし切断	13.3mm/min
		垂直方向	8mm	通常切断	17.2mm/min
				切り落とし切断	18.9mm/min
	自動	水平方向	8mm	通常切断	—
				切り落とし切断	—
自動	垂直方向	8mm	通常切断	—	
			切り落とし切断	—	

Table 5 Cutting speed with grinder device (LV-5)

切断部位	運転の種類	切断方向	厚み	切断状態	平均切断速度
ハンドホール部	手動	垂直方向	26mm	—	6.4mm/min
胴体部	手動	長手方向	12~16mm	通常切断	19.8mm/min
				中抜き切断	15.2mm/min
				切り落とし切断	20.8mm/min
		円周方向	12mm	通常切断	26.0mm/min
				中抜き切断	—
				切り落とし切断	26.5mm/min
ガラスライニング部	手動	長手方向	13~20mm	通常切断	22.6mm/min
				中抜き切断	14.0mm/min
				切り落とし切断	24.9mm/min
		円周方向	13mm	通常切断	23.8mm/min
				中抜き切断	—
				切り落とし切断	—
鏡部	手動	水平方向	12~23mm	通常切断	17.5mm/min
				中抜き切断	13.0mm/min
				切り落とし切断	21.0mm/min
		垂直方向	12~20mm	通常切断	20.5mm/min
				中抜き切断	—
				切り落とし切断	21.3mm/min

Table 6 Cutting speed with plasma torch device (LV-3)

切断対象部位	切断方向	厚み	切断速度
ハンドホール部	垂直方向	26mm	10mm/min
胴体部	長手方向	6mm	100mm/min
	円周方向		100mm/min

Table 7 Cutting speed with plasma torch device (LV-5)

切断対象部位	切断方向	厚み	切断速度
ハンドホール部(ネック部)	周方向	14mm	70mm/min
胴体部	長手方向	12mm	60mm/min
	円周方向		60mm/min
ガラスライニング部	長手方向	13mm	50mm/min
	円周方向		50mm/min

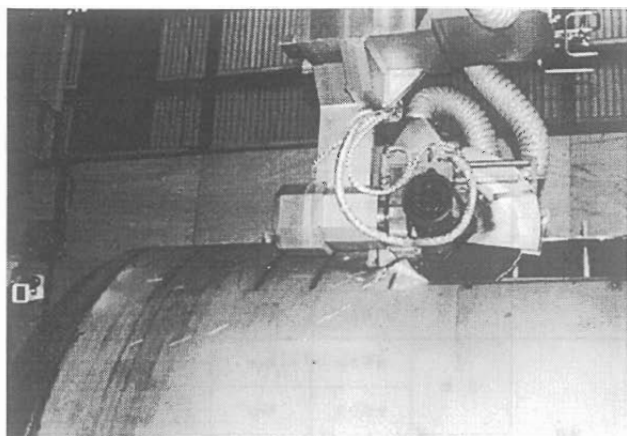


Photo 2 Cutting of vessel with grinder device

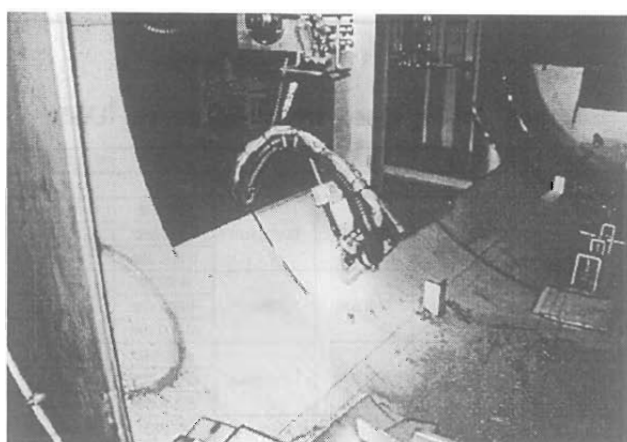


Photo 3 Cutting of vessel with plasma torch device

中で移動軸を前後させたり、Z軸を使用し切り込みを入れる等の操作を行ったが、モータの定格値である15Aを越えることが多く、ほとんど切断が進まない状況であった。LV-5の垂直方向の切断状況は、LV-3と比較すると切断時間は大幅に短くなり、1箇所あたり15分程度で切断できた。LV-3のプラズマ切断では、ハンドホール部の垂直方向への切断速度は10mm/minであり、LV-5では、ハンドホール部(ネック部)の周方向に切断速度70mm/minで良好な切断状況であった。

b. 胴体部の切断

LV-3のグラインダ切断では、通常切断(長手方向)の平均切断速度は、手動及び自動運転で18~48mm/minであり、切り落とし切断では、通常切断より平均切断速度が遅くなった。これは切断片の切り落とし時に、切断対

象部の荷重が砥石にかかり、モータの電流値が上昇し、一定速度で切断できなかったためであった。LV-5の切断では、砥石の向きが長手方向に対し、水平又は垂直であるため切断厚さが増すことから、平均切断速度は切断位置によって大きく変動した。円周方向の切断については切断厚さが常に12mmであり、長手方向の切断速度より比較的速く、平均切断速度は26mm/minであった。プラズマ切断では、LV-3は100mm/min、LV-5は60mm/minの切断速度で切断位置にかかわらず、良好に切断できた。

教示時間は、円周方向から長手方向の連続切断において約26分であり、作業時間の58%を占めた。プラズマ切断においては、グラインダ切断時にモータが突起物等と干渉し、アクセスできなかった狭隙部についても切断することができた。しかし、プラズマ切断時に発生したドロスが胴体部下部に堆積することがあったため、胴体部下部の切断を途中で中断し、スタンドオフ値の再調整を行う必要があった。また、LV-3の切断時には熱影響及び槽の残留応力で切断箇所歪みが生じ、スタンドオフ値にずれが生じた。その結果スタンドオフリミッター(6mm)が作動し、アークの吐き出しが停止することがあった。

c. 鏡部の切断

LV-3のグラインダ切断では、水平方向の通常切断において、平均切断速度が23mm/minであり、切り落とし切断では、平均切断速度は13mm/minに低下した。垂直方向の切り落とし切断は、水平方向より速く19mm/minであった。LV-5では、切断厚さが増しても大幅に低下することなく、20mm/min前後で切断することができた。

4.3.2 解体作業効率

(1) 試験方法

切断位置毎に切断片一枚あたりに要するアクセス時間、教示時間(プラズマヘッドのみ)、切断時間、砥石及びノズルの交換時間を測定した。一枚の切断片に要する作業時間は、2箇所の切断(長手方向から円周方向の切断、又

はその逆)により切断片が発生する場合とした。また一枚の切断片の大きさは約300mm角とした。

(2) 試験結果

Fig.10 に胴体部における切断片の枚数に対するグラインダヘッド及びプラズマヘッドの操作時間を示す。グラインダヘッドによる切断では、切断位置へのアクセス時間が平均5分で、全作業時間の10～15%を占めた。切断時間は、砥石の交換を含めて平均30分であり、解体作業効率は1.4～1.8枚/hであった。一方、プラズマヘッドの切断時間は、ノズルの交換を含めて平均15分程度であったが、軌跡確認を行う教示作業で全作業時間の半分以上の時間を要し、解体作業効率は0.9～1.3枚/hと低下した。

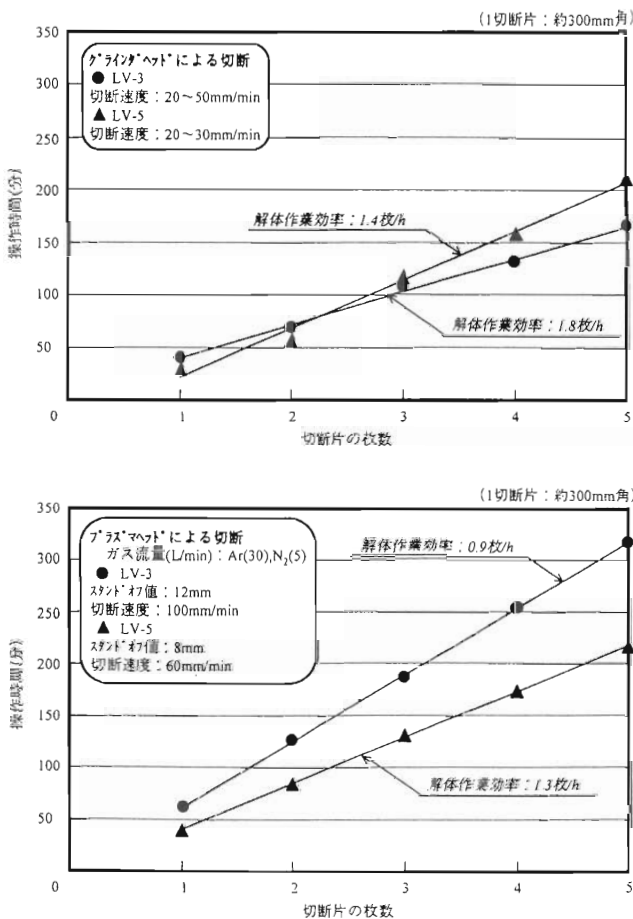


Fig.10 Time required for cutting vessels with grinder device and plasma torch device

4.4 切断片の回収試験

回収試験では、遠隔操作にて吸着ヘッドを回収位置に移動した後回収を行い、切断片の回収性能及び回収の可否について確認を行った。また不定形切断片について、把持・シャーリングヘッドの把持部を利用した回収の可否についても併せて確認した。

(1) 試験方法

発生した板状切断片(約300mm角)について、吸着ヘッドのアクセス時間、回収時間及び切断片搬出トレイへの移送時間を測定した。また、不定形切断片については吸着ヘッドと併せて、把持・シャーリングヘッドに回収を容易にする把持アダプタを取り付けて、同様に試験を行った。Fig.11に発生した主な不定形切断片の外観図を示す。

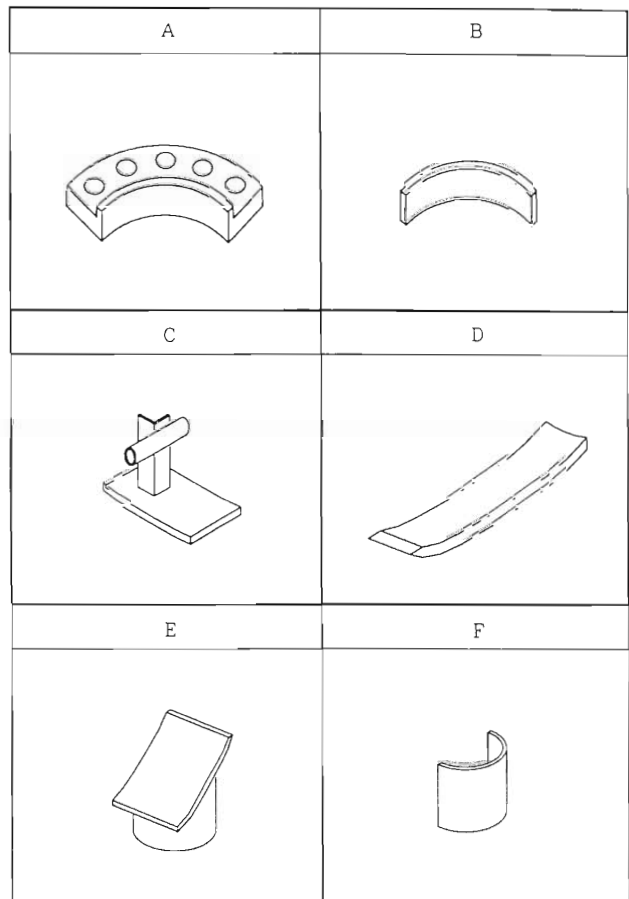


Fig.11 Appearance of various cut pieces

(2) 試験結果

Table 8に吸着ヘッド及び把持・シャーリングヘッドによる不定形切断片の回収結果を示す。不定形切断片の回収では、切断片の形状に応じて、吸着ヘッド及び把持・シャーリングヘッドを併用することにより、全ての切断片を最大でも20分程度で回収できた。ハンドホール部切断片は吸着ヘッドで回収できなかったが、把持・シャーリングヘッドに把持アダプタを取り付けることにより約12分で回収できた。Photo 4に吸着ヘッドによる回収状況を示す。

Table 8 Collection result of various cut pieces with collection unit

把持・シャーリングヘッドによる回収						
回収対象物	不定形物切断片への回収時間	回収時間	ワイヤへの移送時間	合計時間	アダプタの有無	回収結果
ハンドホールフランジ部切断片 (Fig. 11A 参照)	5.7分	1.7分	4.8分	12.2分	有	可
ハンドホールフランジ部切断片 (Fig. 11B 参照)	6.3分	1.5分	2.9分	10.7分	有	可
配管付き胴体部切断片 (Fig. 11C 参照)	13.3分	4.1分	5.7分	23.1分	無	可
鏡部切断片 (Fig. 11D 参照)	9.9分	1.5分	5.1分	16.5分	無	可
脚柱部切断片 (Fig. 11E 参照)	9.6分	1.2分	3.9分	14.7分	無	可
脚柱部切断片 (Fig. 11F 参照)	6.2分	1.5分	4.1分	11.8分	無	可
吸着ヘッドによる回収						
回収対象物	不定形物切断片への回収時間	回収時間	ワイヤへの移送時間	合計時間		回収結果
ハンドホールフランジ部切断片 (Fig. 11A 参照)	4.0分	—	—	—		不可
鏡部切断片 (Fig. 11D 参照)	3.7分	0.8分	2.3分	6.8分		可



Photo 4 Collection of cut pieces with vacuum pad device

4.5 局所排気装置の排気試験

排気試験では、切断工法による差圧上昇変化及び自動逆洗による差圧変化の確認を行った。

(1) 試験方法

試験方法は、プレコート材 (平均粒径 15.7 μm) である人工ゼオライト 1.5kg を 15 秒間 HEPA フィルタに付着させ、これに発生する切粉及びヒューム等を回収した。切断後、マンオメータで切断前後の差圧変化を測定した。またフィルタ差圧が 100mmAq になった時点で自動逆洗を行い、逆洗後の差圧変化を測定した。

(2) 試験結果

Fig.12にLV-5における切断作業のフィルタ差圧と切断長さの関係を示す。また、Table 9にLV-5における切断長さ1mあたりのフィルタの平均差圧上昇率を示す。フィルタの平均差圧上昇率は、ガラスライニング部において、切断時に発生したガラスの微粒子を回収したことから、その表面の切断時が2.7mmAq/mと最も高く、ガラスライニング部裏面、胴体部及び鏡部の順に低下した。また、自動逆洗は、切断作業を通して合計4回行われ、逆洗効果は50～65mmAqであった。

4.6 メンテナンス試験

メンテナンス試験では、メンテナンスボックスを用いて消耗品等の交換を行い、作業性等の確認を行った。

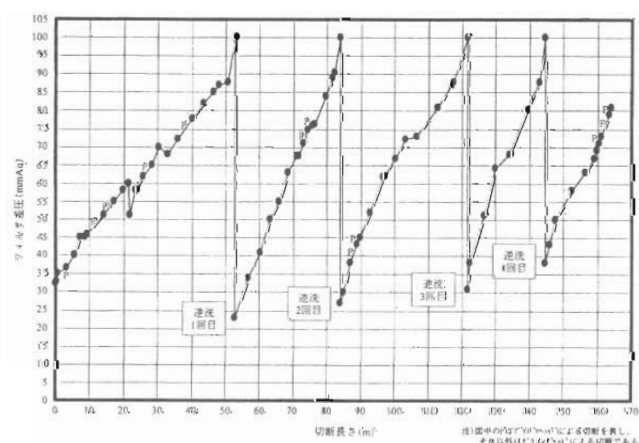


Fig.12 Relation between differential pressure and cutting length on LV-5

(1) 試験方法

試験では、洗浄ヘッド、把持・シャーリングヘッド、グラインダヘッド、プラズマヘッド及び吸着ヘッドについて、グローブ操作により消耗品等の交換を行い、交換の可否を確認するとともに交換時間を測定した。

(2) 試験結果

Table 10 に各ヘッド毎のメンテナンスの試験項目及び作業時間を示す。解体において、比較的交換頻度が多いグラインダヘッドの砥石、プラズマヘッドのノズル、吸着ヘッドのフィルタの交換作業で4～7分の所要時間であり、その他のメンテナンスでも10分程度で終了できた。

しかし、プラズマ電極、吸着ヘッドのヘッド専用局所ITVカメラについては、作業箇所が狭隘で微細な作業が要求されたことから、グローブ操作では交換できなかった。

5. 解体実地試験への適用性

5.1 槽内の洗浄

洗浄作業は、槽本体の切断に先立って、可能な限り槽内に付着したスラッジを除去しておくことが目的であり、強熱固着したスラッジを洗浄した結果、槽全体として、6割の除去率を得たことは、ルーズに付着したスラッジは十分除去されていると考えられる。残ったスラッジは強固に付着していることから、槽本体の切断及び切断片の回収は支障無く行えると期待できる。

5.2 配管及び槽本体の切断

配管の切断において、配管へのアクセス、切断及び移送作業を含む切断作業効率は、外部配管と内部配管で大きな違いが見られた。外部配管のように配管が密集した箇所では、そのアクセスに時間を要したためであった。切断の進捗により残配管が少なくなると、効率的に進めることができ、切断作業効率は高くなった。このことから、解体実地試験では、汚染レベルの低い計装配管等を事前に撤去しておくことが効率的に進める上で重要であると言える。

グラインダ切断では、切断片の切り落とし時に砥石が挟まれ、平均切断速度が遅くなった。このため、水平方向に切断後、垂直方向に切り落とす切断手順を取ることで砥石にかかる負荷を軽減し、砥石の挟み込みを防ぐことができると考えられる。

プラズマ切断では、特に薄い肉厚の切断対象物を切断した場合、熱影響等により切断箇所に歪みが生じ、スタンドオフ値の再設定を行う必要があった。そのため、切断速度自体は速い反面、結果的に解体作業効率(0.9～1.3枚/h)を低下させる一因となった。また、切断時に発生したドロスが槽内下部に堆積することにより、効率的な回収作業が行えないことなどから、槽本体の解体における切断工法の適用性としては、主にグラインダを用いて切断を進めるものとし、プラズマ切断

Table 9 Rising rate of differential pressure for cutting length on LV-5

切断の種類	切断部位	フィルタの平均差圧上昇率 (mmAq/m)
グラインダヘッドによる切断	胴体部及び鏡部	1.8
	ガラスライニング部 (ライニング裏面)	2.3
	ガラスライニング部 (ライニング表面)	2.7
プラズマヘッドによる切断	胴体部	1.1
	ガラスライニング部 (ライニング裏面)	1.5
	ガラスライニング部 (ライニング表面)	2.7

Table 10 Maintenance time required for each device

ヘッドの種類	メンテナンス項目	メンテナンス作業へのアクセス時間	交換時間	メンテナンスに要した合計時間	メンテナンスの可否
洗浄ヘッド	パッキンの交換	2.5分	1分	3.5分	可
	把持・シャーリングヘッド	把持部パッキン着脱	3.5分	9.5分	13分
グラインダヘッド	ヘッド専用局所ITVカメラ交換	3分	1.5分	4.5分	可
	水圧ホースの着脱	2.5分	5.5分	8分	可
	砥石交換	5分	2分	7分	可
プラズマヘッド	局所排気装置パッキン着脱	3分	4分	7分	可
	ヘッド専用局所ITVカメラ交換	2.5分	4分	6.5分	可
	パッキン交換	3.5分	1分	4.5分	可
	電極交換	—	—	—	不可
吸着ヘッド	局所排気装置パッキン着脱	3分	8.5分	11.5分	可
	ヘッド専用局所ITVカメラ交換	3分	1.5分	4.5分	可
	フィルタ交換	2.5分	1分	3.5分	可
	パッキン交換	3分	3分	6分	可
	ヘッド専用局所ITVカメラ交換	—	—	—	不可

は、一部の狭隘部や厚肉部について適用することが有効であると言える。

また、ガラスライニング部の切断におけるフィルタ差圧の上昇は、ガラスライニング部を表面から直接切断する方が大きかった。そのため、差圧上昇を低減させHEPAフィルタを長期的に使用する観点から、ガラスライニング部の切断時には、その裏面から切断することが有効であると言える。

5.3 切断片の回収

試験では槽本体の切断後、切断片が不規則に積み重なっていたが、吸着ヘッド及び把持・シャーリングを併用することにより、全ての切断片を回収できることを確認した。吸着パッドはその材質が天然ゴムであり、柔軟性を有していることから、曲面や表面に凹凸のある切断片でも容易に回収が行え、把持・シャーリングヘッドは、特にハンドホール部切断片に有効であった。

5.4 作業環境及び保守作業

排気性能としては、逆洗後の初期差圧が徐々に上昇したため、逆洗間の切断距離は短くなったが、HEPAフィルタを繰り返し再使用できる十分な逆洗効果を確認した。また、装置の保守では、交換頻度の多かった消耗品等について、短時間で容

易に交換できることを確認した。しかし、交換は無かったものの、プラズマ電極及び吸着ヘッドのITVカメラについては、直接入室し交換を行う必要があるが、地下タンク室内の線量当量率は、約30 μ Sv/hであり、これらの部品等の交換は短時間で終了することから、被ばく上の問題はないと言える。

6. おわりに

製作した大型槽類遠隔解体装置を用いてモックアップ試験を行い、試験により各機構部の性能、作業性等について確認した。試験結果から得られた知見及び検討評価を通し、本解体装置が解体実地試験に適用できる見通しを得た。今後は、平成14年度以降に廃液長期貯蔵施設の一部エリアの整備(既存機器の撤去等)及び装置の構成機器の据付調整を行い、本解体装置を適用する計画である。

参考文献

- 1) M. Myodo, Y. Iwasaki, and T. Mimori: "Outline and Progress of the JRTF Decommissioning Program" Proc. of WM'98 (CD-ROM)
- 2) 植竹直人、他: "再処理溶媒工程における放射性廃棄物低減技術の開発" 日本原子力学会誌 Vol.33 No.1 96 (1991)

三菱重工の放射性廃棄物放射能測定技術

坂下 章^{*1}、中田 幹裕^{*2}、遠藤 保美^{*3}、若原 道夫^{*3}

Research and Development Activities of Mitsubishi Heavy Industries for Radioactivity Measurement of Radioactive Waste

Akira SAKASHITA, Mikihiro NAKATA, Yasumi ENDO, Michio WAKAHARA

For final disposal of radioactive waste generated from nuclear power plant and fuel cycle plant, confirmation of their nuclide concentration, whether it shall meet the criteria is one of the most important item. Therefore the technology to identify the nuclide concentration must be developed.

MHI have many experience in construction of nuclear power plant and fuel cycle plant, and have many knowledge of radioactive waste management and the technology for measuring their radioactivity.

This report describes an overview of the radioactivity measurement technology of the radioactive waste, which have been developed by MHI.

1. はじめに

放射性廃棄物を最終処分するためには廃棄物中に含有される放射性核種の濃度を測定し、これが規定の基準を下回ることを確認する必要がある。確認が必要か、あるいは、必要になると想定される核種は、廃棄物の種類毎（再処理廃棄物、発電所廃棄物、クリアランス廃棄物等）で異なっているが、何れの廃棄物も直接測定できる核種と直接測定が困難な核種があり、測定装置が目指すべきものは、適切な時間で良好な精度にて直接測定できる核種の濃度を得ることにある。

三菱重工は原子力発電所や燃料サイクル施設等の設計・施工に長らく関わり、廃棄物に関する豊富な知識を有し、また、放射線管理のための計測装置の開発経験等により放射性廃棄物の放射能測定装置の開発を行ってきた。

本報告は、当社がこれまで開発してきた放射能測定装置のうち、次の装置について、測定原理、開

発状況、今後の予定等について紹介する。

- (1) 低レベル放射性廃棄物固化体測定技術
- (2) クリアランスレベル測定技術
- (3) α 廃棄物測定技術

2. 低レベル放射性廃棄物固化体（充填固化体）放射能測定技術

原子力発電所で発生する低レベル放射性廃棄物は、平成4年12月より六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センター（以下埋設センターと略す）で埋設されている。埋設に際しては、廃棄物中の核種別放射能濃度を定量し、当該廃棄物の放射能濃度が埋設センターの設置許可申請書に記載されている最大放射能濃度を超えないことを確認（搬出確認）しなければならない。

当社では廃棄物に含まれる γ 核種(Co-60, Cs-137)の定量のために、妥当な精度を保ちながら短時間で廃棄体(200Lドラム缶の均質・均一固化体、充填固化体)を分割測定し含有放射エネルギーを定量す

*1 三菱重工業株式会社 新型炉・燃料サイクル技術部 (Mitsubishi Heavy Industries, LTD)

*2 三菱重工業株式会社 神戸造船所原子力プラント技術部 (Mitsubishi Heavy Industries, LTD)

*3 ニュークリア・デベロップメント株式会社 大宮研究部 (Nuclear Development Corporation)

る簡易な測定システムを開発済である。^{1), 2), 3)} 均質固化体については既に同報第7号⁴⁾ で報告したので、ここでは充填固化体についての測定方法を紹介する。当社の充填固化体向け放射能測定装置は実用に供され、この装置で測定された充填固化体は最大放射能濃度を超えないことを確認したうえで、埋設センターに搬出されている。

(1) 充填固化体の特徴

埋設センターに受入れられる充填固化体は、Fig. 1に示した金属類収納、圧縮体収納、溶融体収納のA廃棄体と、プラスチック類収納のB廃棄体の4種類があり、^{3), 5)} 次の特徴を有している。

- ・密度が多様で均質・均一固化体に比べ密度が大きい。
- ・線源、密度の偏在がある。
- ・我国の埋設が予想されている充填固化体のCs-137/Co-60線源強度比は、均質・均一固化体より小さい。

従って、充填固化体は均質・均一固化体と異なり、密度・線源分布に多様性があるため、放射能分布及び密度分布を一律に設定することは困難である。そこで、放射能測定装置として均質・均一固化体並みの測定精度を簡便な測定法で得るためには、固化体を高さ方向にスライス分割し、光電ピーク計数値（ピーク計数値）及び設定したバンド巾内の散乱線計数値（バンド計数値）や充填固化体の平均密度を利用して線源位置や密度分布の偏在効果の補正を適切に行える機能が必要となる。

(2) 充填固化体の測定方法

充填固化体は密度が高く、また密度・線源偏在があるため、偏在を補正する補正係数を得て評価する必要がある。当社では、この補正をCo-60の2つのピークの計数値比及びバンド計数値比/ピーク計数値比を指標としたコリメータ測定法を開発した。³⁾

① 放射能測定装置の構成

測定装置はFig. 2に示したように、次の構成となっている。

- ・対象廃棄物…200Lドラム缶（鋼製ドラムJIS Z1600 H級）入り充填固化体。密度は約5.0g/cc程度までを対象としている。
 - ・測定方式…検出器を固定し、固化体をスパイラル状に回転昇降し、固化体からの放射線を測定。
 - ・計測方法…ゲルマニウム検出器（以下、Ge検出器）1台にて固化体からのガンマ線を計測。検出器は遮蔽体中に設置され、下記の表面線量率に応じて自動調整させる2種類のコリメータを持つ。コリメータは測定する計測対象領域を限定する様に設計されており、固化体を軸方向に5スライスに分割して放射線を計測するシステムとなっている。
- コリメータ開口巾 固化体の表面線量率
- | | |
|---------------|-----------|
| 70mmL × 20mmH | 1mSv/h 未満 |
| 30mmL × 10mmH | 1mSv/h 以上 |

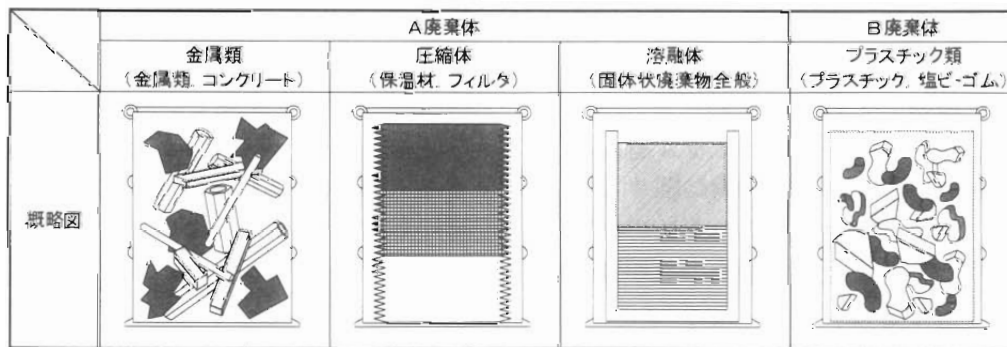


Fig. 1 Categories of Mortar Injected Solidification Monolith of Miscellaneous Solid Wastes

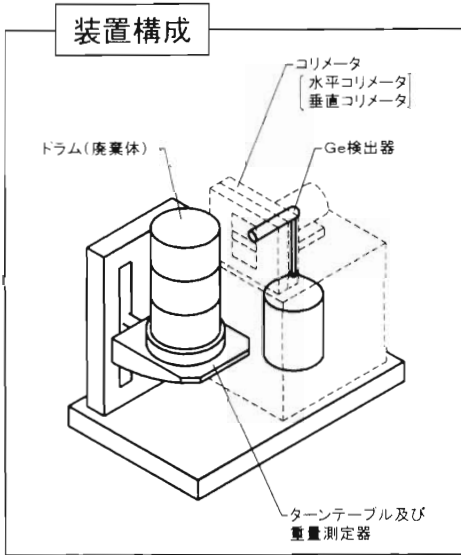


Fig. 2 Construction of Radioactivity Measurement Equipment

・放射能評価対象核種…Co-60, Cs-137

② コリメータ測定法の特徴

Ge検出器1台によるコリメータ測定法は次の特徴がある。

- a. 固化体内に点線源がある場合固化体を回転して計測すると、 γ 線の計数値は密度(ρ :当該スライスの密度)と線源位置(t :固化体表面からの距離)の効果は $\rho \cdot t$ の値でほぼ整理できる。 $\rho \cdot t$ が与えられると計数率の密度・線源位置による減衰効果がほぼ求まる。 $\rho \cdot t$ はCo-60の1.17MeV (N_1)と1.33MeV (N_3)の直接線の計数率比 N_1/N_3 にほぼ対応する。実際には環境 γ 線を遮断するためコリメータを使用しているため、Fig. 3に示す様に平均密度を与えて、線源位置による減衰効果と N_1/N_3 比を対応させている。
- b. 一般的には密度・線源の効果を示す指標として、他に次のものが考えられる。
 - i) グロスの計数値とピーク計数値の比
 - ii) バンドの計数値とピーク計数値の比
 - iii) グロスの線量率とピーク計数率の比
 これらの指標は1つの検出器で測定する限り、上記の N_1/N_3 比と同質の情報しかもたらさない。コリメータ開口巾を変えて測定し、情報量を増やす事も考えられ

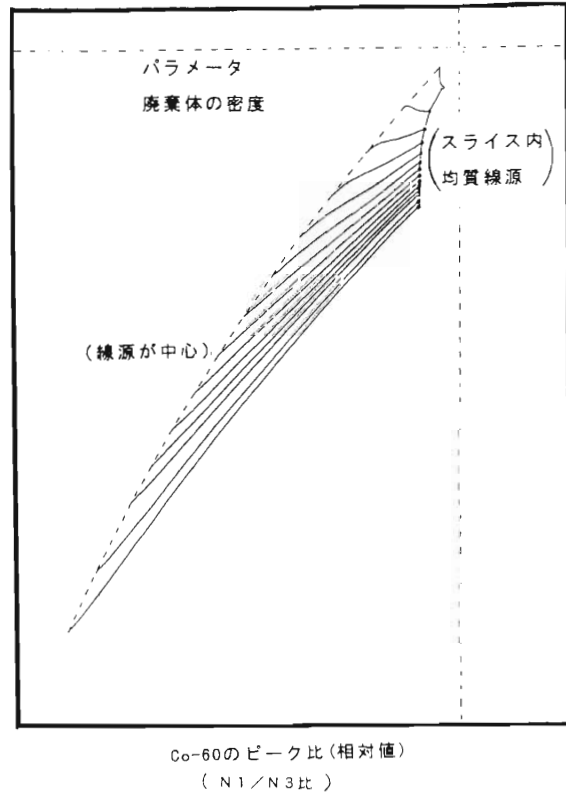


Fig. 3 Ratio of Count Rate of Direct-Ray-Peak and Decrease Rate of 1.33MeV-Peak

るが、装置の操作性の簡便さや計測時間の観点より1種類の開口巾による測定方法とした。

- c. N_1/N_3 比による補正はピーク計数値が低いと精度が悪くなる。この場合はバンド計数値とピーク計数値の比も指標として併用する。
- d. 線源が均等な分布に近づく、とある程度以上密度が高い場合 Fig. 3に示すように N_1/N_3 比はほとんど変化しない。これはドラム缶表面近傍から放出される放射能が計数率の大部分を占めるためである。

③ 放射能評価方法

コリメータ測定法では、コリメータを介してGe検出器により充填固化体からの γ 線をスライス分割した測定により以下のデータを取得し、Fig. 4に示した放射能濃度評価ロジックにもとづき廃棄体中の放射エネルギーを定量する。

- ・Cs-137の0.662MeVのピーク計数値 ($N_c(j)$)
- ・Co-60の1.17MeVのピーク計数値 ($N_1(j)$)
- ・Co-60の1.33MeVのピーク計数値 ($N_3(j)$)

- ・ピーク比 ($P13(j) = N_1(j) / N_3(j)$)
- ・Cs-137のバンド・ピーク比 ($Bcs(j) = Cs-137$ のバンド計数値 / $Nc(j)$)
- ・Co-60のバンド・ピーク比 ($Bco(j) = Co-60$ のバンド計数値 / $N_3(j)$)

データ処理プログラムでは、上記のピーク比、バンド・ピーク比より密度・線源分布の偏在効果が補正できる様実際に製作される充填固化体で予想される範囲³⁾をカバーしたデータベースを所有しており、測定された計数値より偏在効果に対する補正係数を求めて固化体中の内蔵放射エネルギーを定量する。

充填固化体を測定する場合の主な測定誤差の要因として、固化体中の放射能分布・密度分布の違いに起因する誤差(マトリックス誤差)と放射能壊変がランダムであることに起因する誤差(計数値の統計誤差)がある。コリメータ測定法の測定精度を評価するため、固化体製作時の廃棄物の充填の仕方や線源の配置を種々変動させ(ランダムに与え)更に計数値の統計変動を考慮したシミュレーション評価(Fig. 5に示した因子を考慮)により、測定性能の評価・確認を行うと共に、模擬廃棄体を製作し測定試験を行うことにより、コリメータ測定法で求められる放射能が妥当であることの確認を行っている。

(3) 測定性能

密度2~4.5 g/cc範囲での線源を配置した模擬廃棄体の測定やシミュレーション評価から次の結果が得られている。

- ・金属類の充填固化体の測定精度は、固化体の密度や線源の分布・強度といった固化体条件に依存する。模擬廃棄体に対する測定例をTable 1に示す。測定誤差はCo-60で7%、Cs-137で17%程度であった。また、点

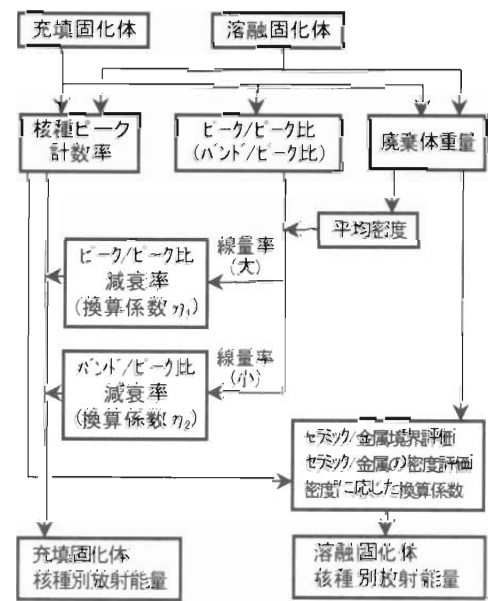


Fig. 4 Logical Diagram of Evaluation of Radioactivity Concentration

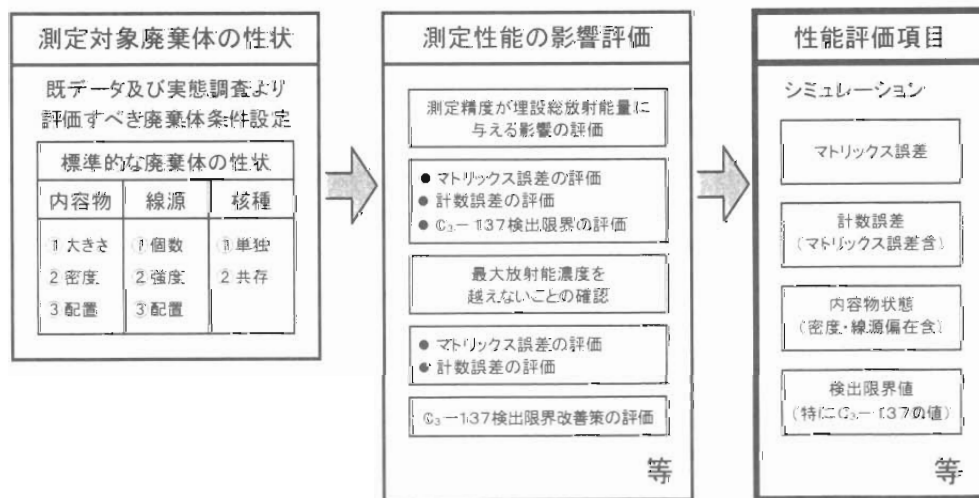


Fig. 5 Applicability Estimation of Collimator Method in Radioactivity Measurement

Table 1 Experimental Result of Measurement for Test Solidified Monolith

項目	内容																			
1. 廃棄体	配管・バルブ・弁線・コンクリート片を入れ、モルタル充填して作成した密度 2.9g/cc の模擬廃棄体。																			
2. 線源強度	Co-60 : 2.3MBq × 10 個、Cs-137 : 1.2MBq × 10 個																			
3. 線源分布	中心から 10.0cm の孔に各 2 個、17.4cm の孔に各 3 個、22.4cm の孔に各 3 個、中心から 26.5cm の孔に各 2 個、高さ方向には等間隔に配置																			
4. 測定	10 分間計測、10 回繰り返し測定																			
5. 測定結果	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Co-60</th> <th>Cs-137</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1) 測定誤差の範囲 (設定値との差)</td> <td>-3%~ -13%</td> <td>-13%~ -22%</td> </tr> <tr> <td>2) 測定誤差 (平均値)</td> <td>-7%</td> <td>-17%</td> </tr> <tr> <td>3) 変動係数 (測定された平均値に対し)</td> <td>2.8%</td> <td>3.8%</td> </tr> <tr> <td>4) 平均的な計数率</td> <td>7.3cps</td> <td>3.6cps</td> </tr> <tr> <td>5) 検出下限値 (Bq/g)</td> <td>0.288Bq/g</td> <td>0.948Bq/g</td> </tr> </tbody> </table>			Co-60	Cs-137	1) 測定誤差の範囲 (設定値との差)	-3%~ -13%	-13%~ -22%	2) 測定誤差 (平均値)	-7%	-17%	3) 変動係数 (測定された平均値に対し)	2.8%	3.8%	4) 平均的な計数率	7.3cps	3.6cps	5) 検出下限値 (Bq/g)	0.288Bq/g	0.948Bq/g
	Co-60	Cs-137																		
1) 測定誤差の範囲 (設定値との差)	-3%~ -13%	-13%~ -22%																		
2) 測定誤差 (平均値)	-7%	-17%																		
3) 変動係数 (測定された平均値に対し)	2.8%	3.8%																		
4) 平均的な計数率	7.3cps	3.6cps																		
5) 検出下限値 (Bq/g)	0.288Bq/g	0.948Bq/g																		

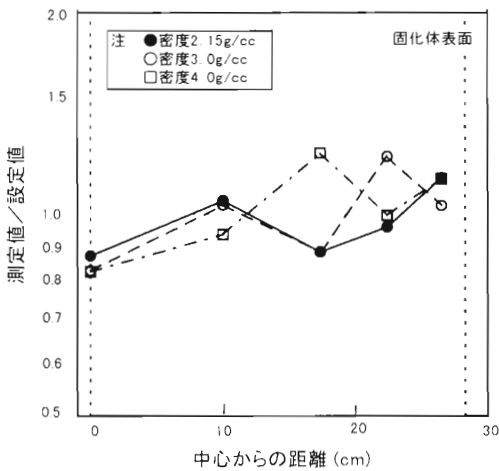


Fig. 6 Evaluation Result of Co-60 Measurement Error

線源の場合でも Co-60 の測定誤差は Fig. 6 に示す様に 20% 程度かそれ以下である。線源強度を変化させたシミュレーション評価 (線源位置、充填物は乱数で与え配置、平均密度約 3g/cc) では Fig. 7 に示す様に測定精度は Co-60 で 10% 以下であり、Cs-137 は Co-60 より若干劣るが、30% 以下の値となっている。

・溶融体では、金属層とセラミック層の 2 層となるが、各層とも密度、線源は均一である。シミュレーション評価では Co-60、Cs-137 の測定精度は、2~4% 程度である。

・繰り返し測定精度 (変動係数 = 標準偏差 (1σ) / 平均値 × 100) は、金属類の充填固化体の場合、Co-60 42MBq/t、Cs-137 22MBq

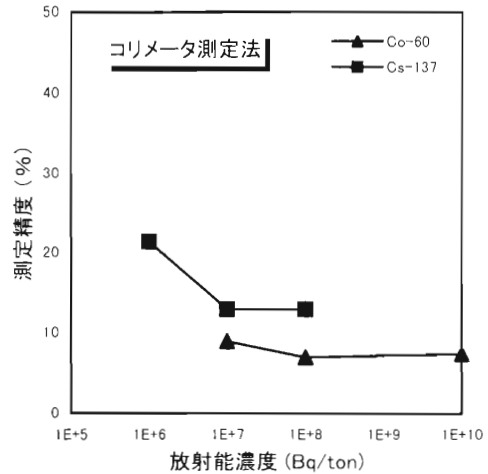


Fig. 7 Evaluation Result of Simulation

/t の放射能濃度において Co-60 で 3%、Cs-137 で 4% 程度である。

・検出限界については、線源・密度の偏在により、得られる値が若干左右される。この傾向は Cs-137 の方が大きくなるが、金属類の充填固化体で Cs-137 / Co-60 の放射能強度比が 1 / 30 以下の場合、測定時間 600 秒において、Co-60 は 0.2 ~ 0.3Bq/g、Cs-137 は 0.7 ~ 1.1Bq/g 程度の検出限界値となる。

(4) 本測定技術の適用

本測定技術は、低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に際して、発電所で行う搬出検査のうちの放射能測定装置に適用されている。既に均質・均一固化体用と充填固化体用として原子力発電所で実際に運用されている。

Fig. 8 に三菱重工の低レベル放射性廃棄物搬出検査装置の概要を示す。装置は 4 ユニットで構成されており、1 ユニットから順次廃棄体 (ドラム缶) をドラムハンドリング装置で移動させて検査する。すべての検査が終了し搬出基準を満足した廃棄体は輸送用のコンテナに収納される方式となっている。放射能量の測定はユニット 2 で行われ、廃棄体の種類に従って放射能量の定量評価コードを使い分ける構成となっている。

3. クリアランスレベル測定技術

(1) 対象廃棄物と測定概要

放射性廃棄物のうち、放射性物質濃度が極

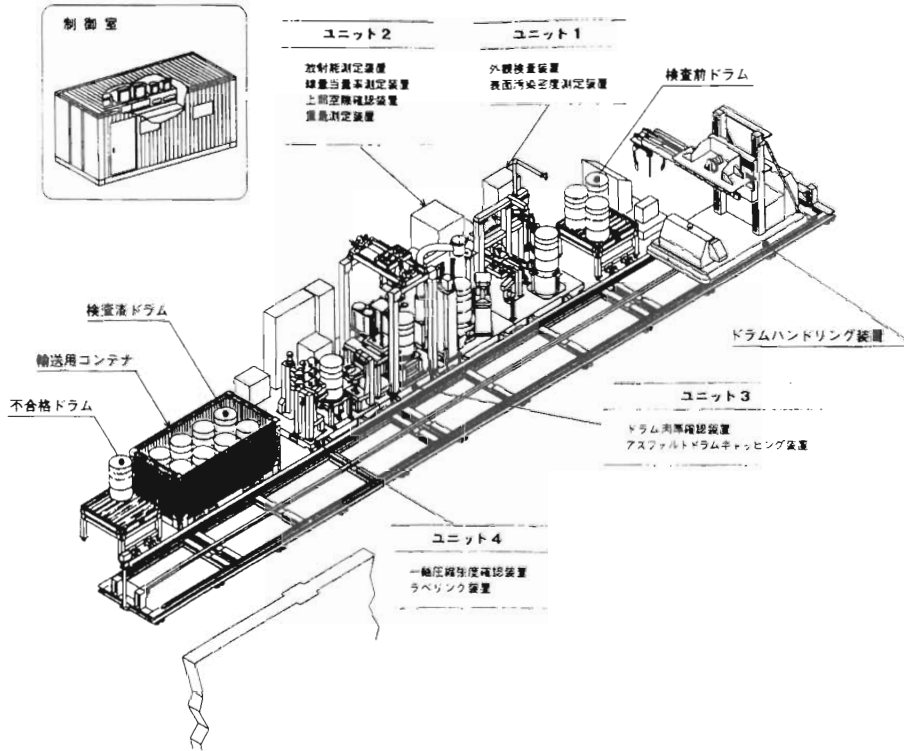


Fig. 8 MHI Low Level Radioactive Waste Transporting Inspection System

めて低く、「放射性物質として取り扱う必要のない物」を区分するための「クリアランスレベル」が、原子力安全委員会放射性廃棄物安全基準専門部会にて報告⁶⁾され(「主な原子炉施設におけるクリアランスレベルについて」平成11年3月)、現在国によってこの制度化が検討されている。この「放射性物質として取り扱う必要のない物」の区分では、安全を確保するために、対象物の放射性物質濃度がクリアランスレベルを下回っていることを、確認することが要求される。また、この確認は、原子力発電所等の作業や廃止措置工事を安全、かつ効率的に遂行するために、精度の良い測定が効率的に実施されることが必要となる。

これに対応するために三菱重工では、現在国などで実施されているクリアランスレベルの検認の検討に基づいて、極低レベル廃棄物の主要核種の測定によるクリアランスレベルの確認を効率的に実施するための測定装置を開発中である。本装置は、対象物の表面から放出される β 線と、対象物全体から放出される γ 線を同時に測定し、発生位置、形状、放射

化の有無、内面汚染の有無などの基本的な事前情報に基づいて、同時に測定した β 線及び γ 線測定データを処理することで、表面汚染、放射化、内部汚染を同時に弁別評価する。また、複数の検出器の組み合わせで構成することで、汚染の分布を確認可能な性能を持つ。対象物の大きさは、最大 $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$ であり、測定に要する時間は対象物の大きさや汚染性状によって異なるが、対象物当たり1分から10分の測定で、 0.1Bq/g または 0.1Bq/cm^2 の検出限界値を得ることが出来る。

また、本装置は表面汚染測定機能を有し、搬出モニタとしての性能を持っており、廃棄物のクリアランスレベル確認に使用しない期間には、搬出モニタとして使用できる。搬出モニタとして使用する場合は、対象物当たり10秒から3分程度の測定で、搬出基準の $1/10$ である 0.4Bq/cm^2 の検出限界値を得ることが出来る。また、クリアランスレベルの確認測定時も、搬出検査を同時にかねることが出来る。本装置の測定部の概念構造を、Fig. 9に示す。

(2) 測定原理

測定部は、 β 線測定のために薄型板状プラスチックシンチレーション検出器と、 γ 線測定のための板状NaIシンチレーション検出器との組み合わせで構成した。プラスチックシンチレーション検出器については、薄型にすることで、 γ 線に対する感度を最小化し、ほぼ β 線のみに感度を持つ状態とした。これらの検出器からの信号処理について、検出面での放射線検出による発光をほぼ均一に光電子

増倍管に送ることと、検出部の軽量化を目的として、シンチレータ内に多数の光ファイバを挿入し光信号を光電子増倍管に送る方式を採用した。また、この方式の採用により、光信号の光電子増倍管への伝送効率が低下するが、検出信号の同時計測などでノイズを低減し、適切な検出信号を得ることが出来た。測定部の例として、光ファイバを挿入した板型NaIシンチレーション検出器を、Fig. 10に示す。Fig. 10において、3個の板からの突出部が、光ファイバの出力端であり、これに光電子増倍管を接続する。また、光ファイバを用いた検出信号処理の概念を、Fig. 11に示す。

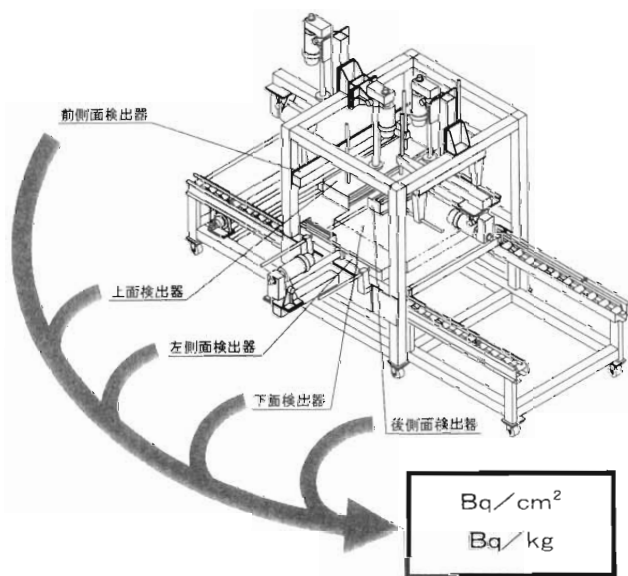


Fig. 9 Schematic view of Clearance Level Measurement Equipment

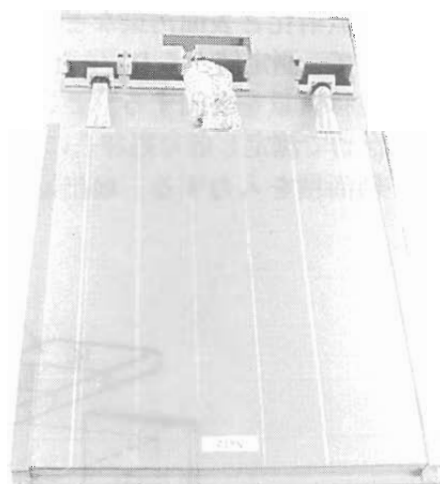


Fig. 10 Detector Part of NaI Scintillator

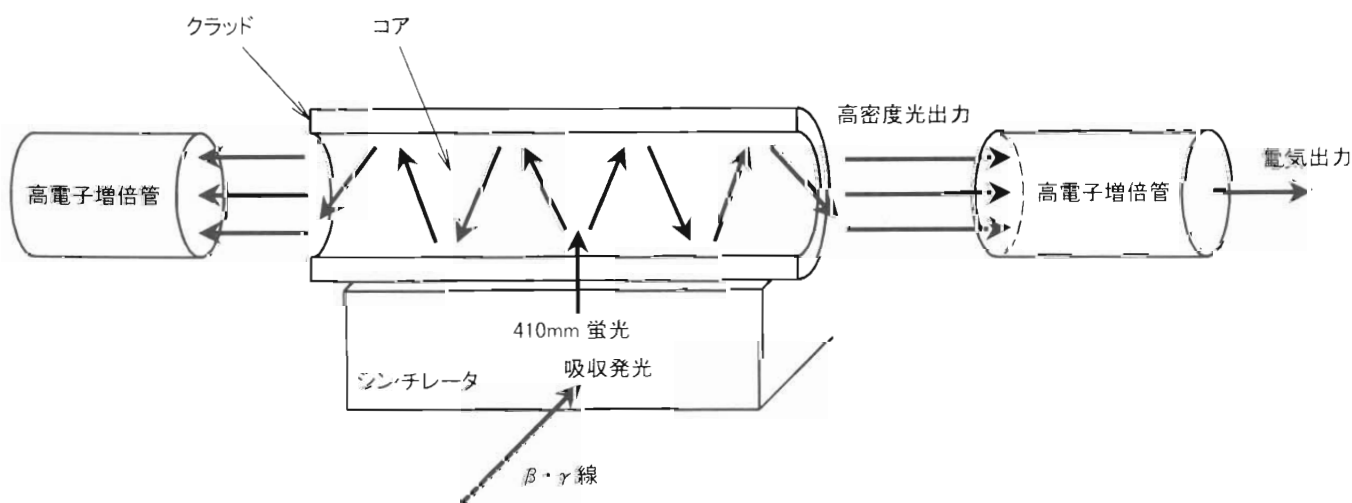


Fig. 11 Processing Principle of Signal Generated by Optical Fiber

この方法の採用により、NaIシンチレーション検出器での約30秒の測定で、 γ 線源に対する測定限界値100Bq/1kgを、プラスチックシンチレーション検出器での60秒の測定で、 β 線源に対する測定限界値10Bq/100cm²を達成した。検出限界値と測定時間の関係を、NaIシンチレーション検出器について、Fig. 12に示す。

検出部については、対象物の周囲6面に検出器を配置し、 β 線測定のために上下、左右および前後の3組の検出器がそれぞれ対象物に自動で接近する方法を採用した。 γ 線もこの時同時に測定する。これらの測定信号は、信号処理系で一括して処理され、信号処理系にゆめ入力した、対象物の材質や形状、汚染性状(例えば放射化と表面汚染など)別の換算係数を用いて、測定値からBq/gとBq/cm²の値で放射性物質量を評価する。ここで、対象物重量は自動で測定し信号処理系に入力され、面積は評価面積を入力する。検出器は、い

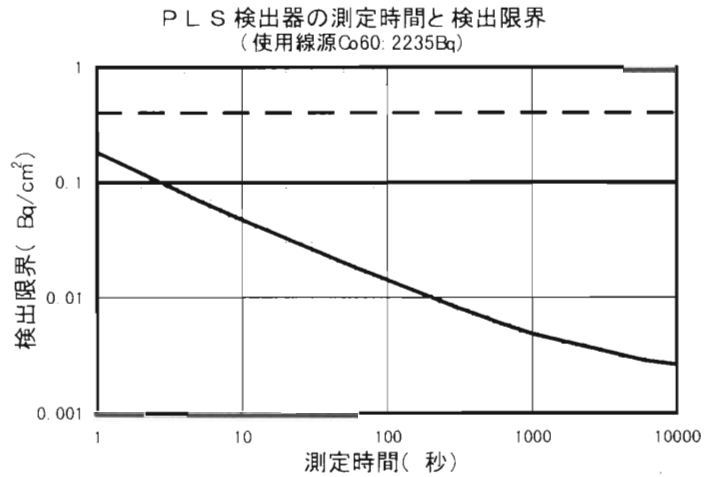


Fig. 12 An Example of Detection Efficiency by NaI

れも33cm×33cmの大きさとし、表面汚染分布をこの33cm×33cmの区分で評価出来るようにした。検出部の構造概念図を、Fig. 13に示す。

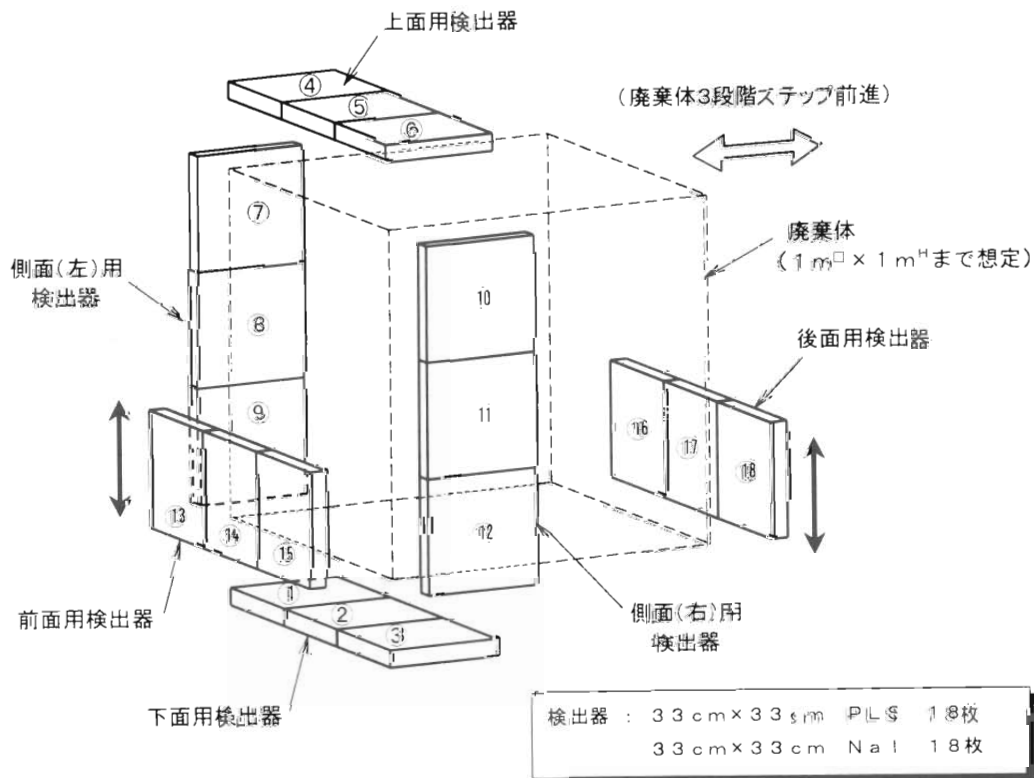


Fig. 13 Schematic Diagram of Structure of Detection Compartment

(3) 開発状況

本装置は試験機を製作済みであり、検出性能および駆動機構の基本試験を終了し性能を確認した。現在本試験機を実機規模に拡張した性能試験を実施中である。また同時に、パソコン規模のCRT付きシステムにて、装置の制御およびデータの処理を簡便に実施できるよう、開発中である。

(4) 今後の計画

本装置は、平成13年度上期には実機規模の装置が完成し、社内で発生する廃棄物や物品の搬出検査に使用しながら、実用化に向けた実証試験を行う予定である。今後は、検出効率のさらなる向上、および対象物形状などの適用性向上を図る計画である。

4. α 廃棄物 (TRU 廃棄物及びウラン廃棄物) 測定技術

再処理施設、MOX加工施設、及びウラン濃縮施設から発生する放射性廃棄物中の放射性核種は使用済燃料に含まれていたものであり、具体的には燃料であるウラン等の核分裂により生成した核種、ウラン等が中性子を吸収して生成した超ウラン核種等が存在する。超ウラン核種を含む放射性廃棄物の処分については、全 α 核種の1GBq/tを区分目安値⁷⁾として、これより低いもの(以下、非 α 廃棄物)は浅地中処分の可能性が考えられ、一方、区分値より高いもの(以下、 α 廃棄物)は地下埋設処分が適当とされている。このうち、 α 廃棄物の処分(地下埋設処分)に要する費用は浅地中処分の費用を上回るものと予想される。このため、上記の区分値(1GBq/t)に対して、これを超える廃棄物については、除染等により α 放射能を低減することにより浅地中処分の対象となり、処分費用の低減が期待できる。

これらの廃棄物について、除染の要否の判断、及び除染後の確認等のために、迅速に、かつ合理的に α 放射能を測定する技術の開発が求められている。

廃棄物の α 放射能の非破壊測定装置として、以下の測定手法が開発されている。

1) パッシブ γ 線法 (Ge/NaI 検出器でU-235、Pu-239、Am-241等を測定)

2) パッシブ中性子法 (^3He 、 BF_3 検出器等でPu-238、Pu-240等を測定)

3) アクティブ中性子法 (中性子発生装置と中性子検出器で核分裂性物質を測定)

4) α 線電離電流測定法 (電離イオンを電離箱で測定)

5) 上記の組合せ

(1) 対象廃棄物と測定のねらい

α 線は飛程が短く紙一枚でも遮へいされるため、廃棄体の内部にある α 放射能は測定できない。このため、 α 放射能の測定は、表面汚染に限定されるが、 α 廃棄物の汚染形態は表面汚染が主体であるため、汚染面を露出させることにより、 α 放射能の測定は充分可能である。

当社では、前述の測定方法の中から検出感度と測定の簡便さから、 α 線電離電流測定法に基づく α 廃棄物識別測定装置 (MLRAD) の開発を実施している。

(2) 測定原理

MLRADの測定原理をFig. 14に示す。高速の荷電粒子がガス中を通過すると、その通路に沿って励起された分子と電離された分子を生成する。中性分子が電離されて生成される陽イオンと自由電子はイオン対と呼ばれる。1イオン対を生成するのに要する電離エネルギーは多くのガス及び種々の放射線に対して極めて一定の値(30~35eV)となる。したがって、1MeVの粒子が完全にガス中に停止した場合には約30000個のイオン対を生成する。ガス中のイオン対が存在する領域に外部電界を印加させた場合、電離過程で生成された電荷を電極に集め電離電流として測定することができる。

MLRADでは、電離チャンバーで生成されたイオン対はガスの流れに乗って電離箱に導かれ電離電流が測定される。この時の電離電流は放射線によって生成されたイオン対の数に比例していることから、電離チャンバー内に設置した廃棄体の放射エネルギーを求めることができる。

廃棄体には α 核種、 β 核種、 γ 核種が存在し、電離チャンバーで各々イオン対を生成す

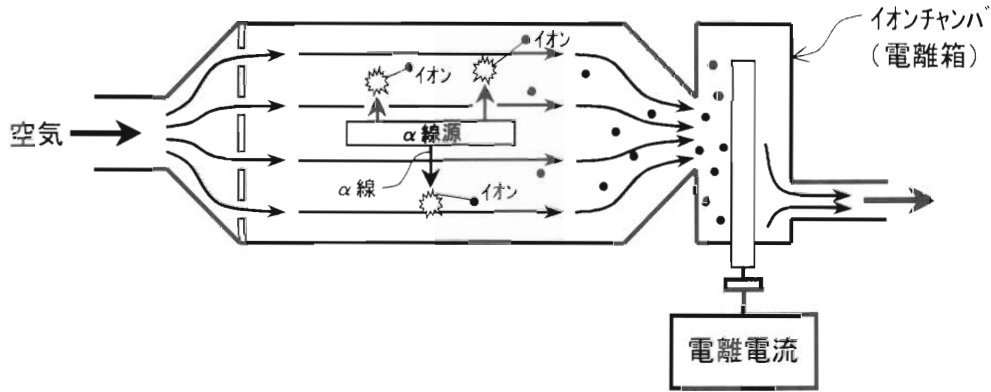


Fig. 14 Measurement Principle of MLRAD

るが、β線、γ線はα線に比べ電離チャンバー内で吸収されるエネルギーが小さい為、α線に比べ感度が低いこととなる。

(3) 開発状況

MLRADの外観をFig. 15に示す。試験装置を用いて、吸引ガス流量、電離チャンバー内の線源設置位置、線源方向の影響について、板状線源を用いて確認した。線源位置の影響はFig. 16に示す様に、電離ガスの上流側、中央、下流側で高さ(電離チャンバーの上段、中段、下段)にウラン標準線源を設置しても安定した電離電流が得られることを確認した。線源方向についてはFig. 17に示す様に、電離ガスの流れに対して線源方向(上向き、下向き、前向き、後ろ向き、右向き、左向き)を変えて設置しても安定した電離電流が得られることを確認した。β放射能のα放射能に対する電離電流の強度比は板状の場合約1/100、γ放射能とα放射能では強度比約1/2000であった。

実機で発生する廃棄体は平板、バルブ、配管、グレーチング等種々の形状をしているため、これらの形状を模擬した線源を製作し、感度確認を行った。製作した模擬線源をFig. 18に、試験結果をFig. 19に示す。平板、口径の大きい配管に比べ口径の小さい配管、バルブ形状等では感度が低い結果となった。今後、更に形状の種類を増加させた試験を行い形状毎の換算係数(放射能量/電離電流)を設定して、廃棄物形状の感度補正を行う予定である。

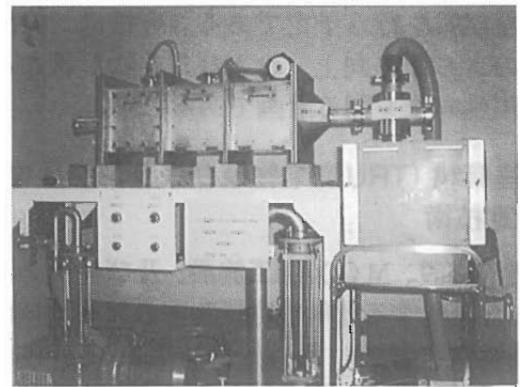


Fig. 15 Experimental setup of MLRAD

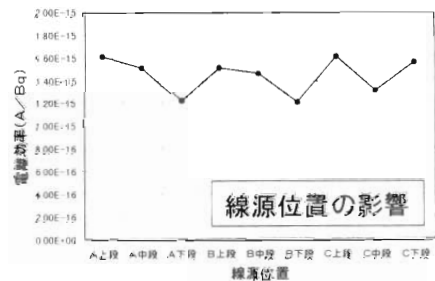


Fig. 16 Experimental result of Effect of Radioactivity Source Setting Position

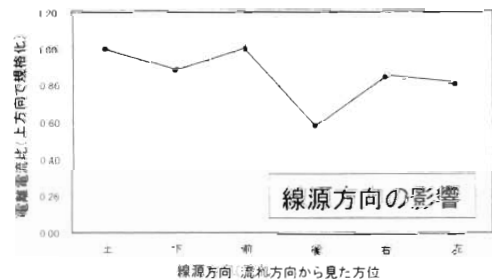


Fig. 17 Experimental result of Effect of Radioactivity Source Setting Direction

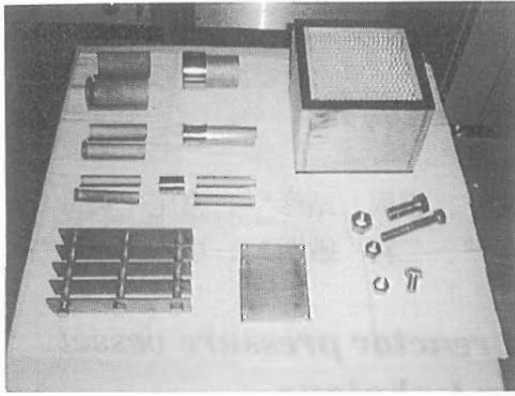


Fig. 18 Outside-view of Test Pieces

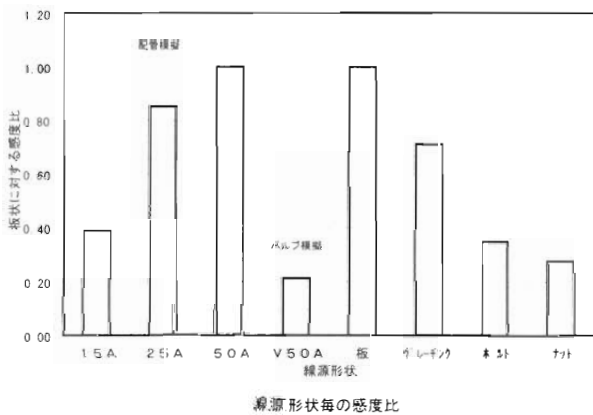


Fig. 19 Experimental Result of Measurement for Test Pieces

5. おわりに

(4) 今後の計画
 現在、廃棄物寸法 330mmH × 330mmW × 440mmL が測定可能な電離チャンバーとデータ処理装置付き電離電流測定装置を備えたパイロット機を製作し、装置化に向けた性能確認試験を実施中である。今後は、α核種で汚染された実廃棄物を測定する等、製品化に向けた試験を引き続き実施する計画である。

5. おわりに

以上述べたように、三菱重工は合理的、かつ精度良く放射性廃棄物の放射能を測定するための測定装置の開発を実施してきた。このうちの一部については既に発電所に設置頂き実際に運用されている。

原子力施設の廃止措置に伴って、短期間に種々のレベルの放射性廃棄物が大量に発生するため、これらの放射性廃棄物を短時間で精度良く測定する技術を確認しておくことが、廃止措置の円滑な推進に重要である。三菱重工は廃止措置の合理化に微力ながらも貢献できるように、今後も測定技術の開発を進めていく所存である。

6. 謝辞

放射性廃棄物の放射能測定技術の開発に際し、電力会社、核燃料サイクル開発機構、及びその他研究機関の方々より多くのご指導を頂きました。ここに記し、深く感謝致します。

参考文献

- 1) 三菱重工業：「非破壊簡易γ線核種測定システムの開発（オートアイリスコリメータ方式）」, Waste Management'89 (1989)
- 2) 三菱重工業：「開度可変コリメータ方式非破壊簡易γ線核種測定システムの開発」, 日本原子力学会春の年会, 予稿集 L25 (1989)
- 3) 原子力環境整備センター「充填固化体に対する放射能測定装置の適用性評価」, 日本原子力学会春の年会, 予稿集 L64 (1998)
- 4) 松田圭一 他：「原子炉廃止措置技術の開発状況－三菱重工の開発状況」デコミッションング技報, 第7号, P15～29 (1993)
- 5) 原子力環境整備センター「低レベル放射性廃棄物処分用廃棄体製作技術について」, 国会図書館, (1996)
- 6) 原子力安全委員会放射性廃棄物安全基準専門部会資料「主な原子炉施設におけるクリアランスレベルについて」(平成11年3月)
- 7) 原子力委員会報告(平成3年7月31日)

原子炉压力容器遠隔切断技術開発

渡辺 正秋*¹、宮坂 靖彦*¹、宮尾 英彦*¹
大木 新彦*²、二宮 敏明*³、小岩 正巳*³

Technology development for cutting a reactor pressure vessel using a mechanical cutting technique.

Masaaki WATANABE, Yasuhiko MIYASAKA, Hidehiko MIYAO
Arahiko OKI, Toshiaki NINOMIYA, Masami KOIWA

On decommissioning of nuclear facilities, the thermal cutting technique such as an oxygen-acetylene gas cutting and a plasma arc cutting are generally used for cutting massive and thick steel structures in consideration with cutting speed and control performance. These techniques generate dust, smoke, aerosol and a large quantity of secondary waste.

Mechanical cutting technique has an advantage of small amount of secondary waste, and the metal chips from the kerf are recovered easily compared with these thermal cutting technique.

The remote mechanical cutting system for highly activated RPV has been developed with the manner which achieves the safety and cost effectiveness.

The development has been performed on consignment to RANDEC from the Science and Technology Agency of Japan.

1. はじめに

原子力施設の廃止措置において、原子炉压力容器に代表されるような高度に放射化された大型で厚肉の鋼構造物の解体（切断）は、切断速度、操作性、技術的成熟度等の観点から、酸素・アセチレンガス切断、プラズマアーク切断、アークエアガウジング切断等の熱的切断工法を適用する事例が多く見受けられる。

熱的切断工法は、一般的に切断速度が速く、切断時の反力が小さく、装置としては小型で小回りが効く等操作性に優れている反面、以下に示すような難点もあり、解決すべき課題も少なくないのが現状である。

- (1) 気中切断の場合、切断時にガス、ヒューム、煤煙等の気体状の副次生成物が大量に発生する。
- (2) 気体状の副次生成物の発生を抑制するため、水中で切断する場合、原子炉压力容器（切断対象物）の外側に水槽を設置する必要があり、この作業に伴う被曝が問題となる他、廃液も大量に発生する。
- (3) 水中切断では、切断カーブ幅内の金属がドロス（溶滓）として大量に発生する。気中切断では周辺に飛散し、周辺の構築物等へ付着（溶着）して汚染の原因となる。また、除染が困難である。
- (4) (1) から (3) に示す気体、液体及び固体状の副次生成物の拡散を防止し、処理するための設備も大がかりなものとなる。

本成果は、科学技術庁より受託している「原子炉解体高度化技術開発」の一部である。

*1 財団法人原子力研究バックエンド推進センター (RANDEC)

*2 武蔵工業大学 (Musashi Institute of Technology)

*3 三菱重工業(株) (Mitsubishi Heavy Industries, LTD)

本技術開発では、熱的切断工法との比較において、切断時に発生する副次生成物の量が少なく、かつ、その性状が明確で、回収し易く、安全性、経済性にも優位と考えられる機械的切断技術の確立を目的として実施したものである。

2. 切断試験装置の概要

切断試験装置の設計にあたり基本的な開発目標を以下のように設定した。

原子炉を原位置（設置されている状態）で垂直方向及び水平方向に任意の大きさに切断する機能を持たせる。また、原子炉压力容器を切断する場合、压力容器の内側から切断する方式と、外側から切断する方式が考えられる。ここでは、切断装置を压力容器の内部に装着し、内側から外側へ向かって切断する方式を採用する。

副次生成物の回収を容易にするとともに、発生量抑制の観点から、切断用刃先工具は無冷却、無潤滑で切断（切削）可能な材質を選定する。

切断試験装置は大きく分類すると以下の機能を受け持つコンポーネントで構成される。

(1) 切断機構部

刃先工具（垂直方向切断にはエンドミル、水平方向切断にはサイドカッタ）の回転軸、前後送り軸及び上下送り軸を駆動する機能を有する。

(2) 旋回機構部

切断機構部を旋回させる機能を受け持つ部分で、水平方向切断時にサイドカッタを旋回させる機能と、垂直方向切断時のエンドミルの切断位置決め機能を有する。

(3) 昇降機構部

切断機構部を上下に移動させる機能を受け持つ部分で、垂直方向切断時にエンドミルを垂直方向に移動させる機能と、水平方向切断時にサイドカッタの切断位置決め機能を有する。

(4) 固定機構部

切断装置を原子炉内に固定する機能を受け

持つ部分で、圧着金具を油圧シリンダを介して原子炉内壁面に圧着し、摩擦力で切断装置を固定する。

上記（1）から（4）に示すコンポーネントは一体構造に組立てられている。

(5) 切り粉回収ユニット

切断時に発生する切り粉を回収する機能と、切断時に切断片を支え、落下を防止する機能を受け持つ部分で、切断用供試体（モックアップ）の下側に設置されている。

(6) テーブルリフタ

切り粉回収ユニットをその頂部に搭載し、切断試験片を取り出す機能を受け持つ部分で、上下及び横方向に移動する機能を有している。

(7) 制御盤・操作盤

切断開始位置及び切断条件（刃先速度、切り込み量、送り速度）の設定並びに切断装置の操作を受け持つ機能を有し、操作はマニュアル又は自動操作を選択できる。

(8) 架台

原子炉胴部を模擬した供試体を固定する機能を受け持つ部分で、供試体とその内部に装着される切断試験装置の荷重を支持する。切断試験装置の構造を Fig. 1、2 に示す。

3. 技術開発の経緯

原子炉压力容器の機械的切断技術を開発するにあたっては、最近の切断（切削）技術の動向調査、欧米における原子炉解体への機械的切断技術の適用事例等の調査及び切削基礎試験の結果を踏まえて、刃先工具の選定、装置化、切断試験の手順で開発を進めた（Fig. 3）。

3.1 切断（切削）基礎試験

切断試験装置の設計に必要な情報を得る目的で、切削技術の動向調査とフライス盤、旋盤等の工作機械を用いた切削性能に係る基礎的な試験を行い、無冷却、無潤滑で切削可能、かつ、切削能率、強度、切り粉排出、汎用性（市場性）等

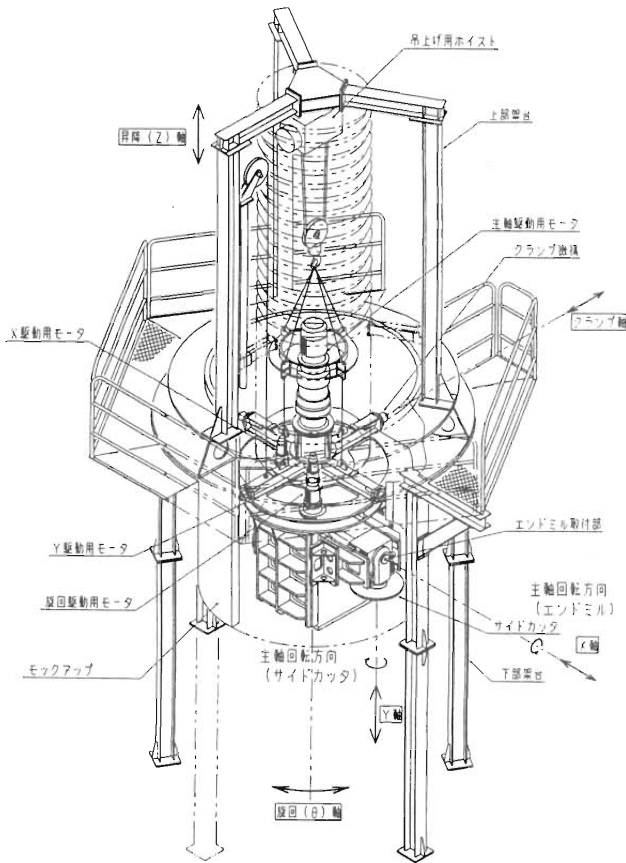


Fig. 1 A bird-eye view of mechanical cutting equipment

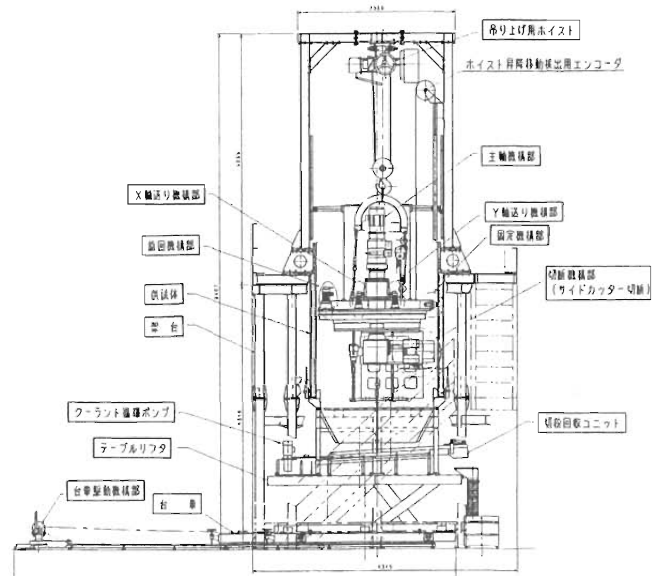


Fig. 2 Structure of mechanical cutting equipment

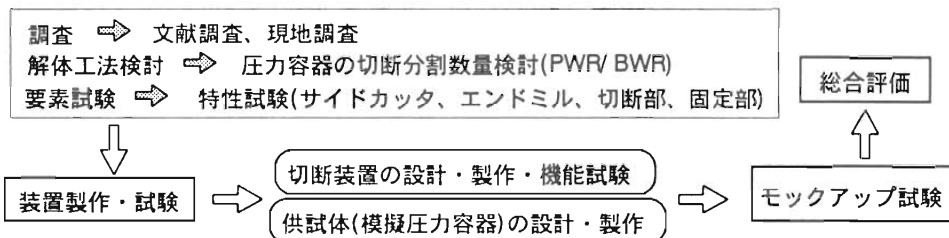


Fig. 3 Program of technology development

の観点から、刃先工具として垂直方向の切断にエンドミルを、水平方向の切断にサイドカッタを選定した。何れの工具もフライス（ミーリング）工具の一種である。

また、切削基礎試験を通して得られた所要動力、所要トルク等のデータをベースとして、切

断試験装置の設計目標仕様を設定するとともに、概念設計を行った。

設計目標仕様を Table 1 に、刃先工具の構造を Fig. 4 (エンドミル)、Fig. 5 (サイドカッタ) に示す。

Table 1 Design specifications of mechanical cutting tool

項目		刃先工具	エンドミル	サイドカッタ
刃先工具の厚さ (又は径)	mm		40	20
刃先速度	m/min.		25 ~ 50	140 ~ 150
1回の切り込み深さ	mm		25 ~ 50	10 ~ 20
送り速度	mm/min.		50 ~ 100	200 ~ 400
折返トルク	N·m		600	550

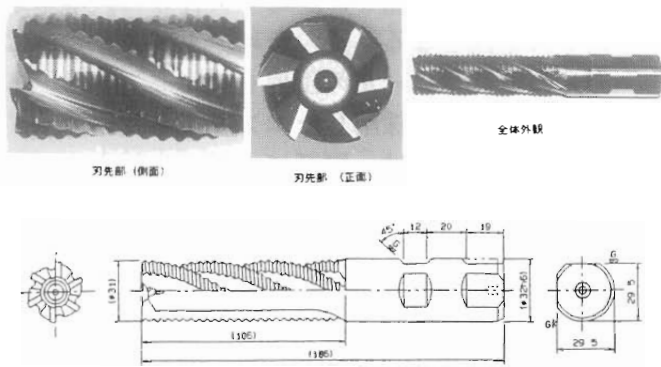


Fig. 4 End-mill

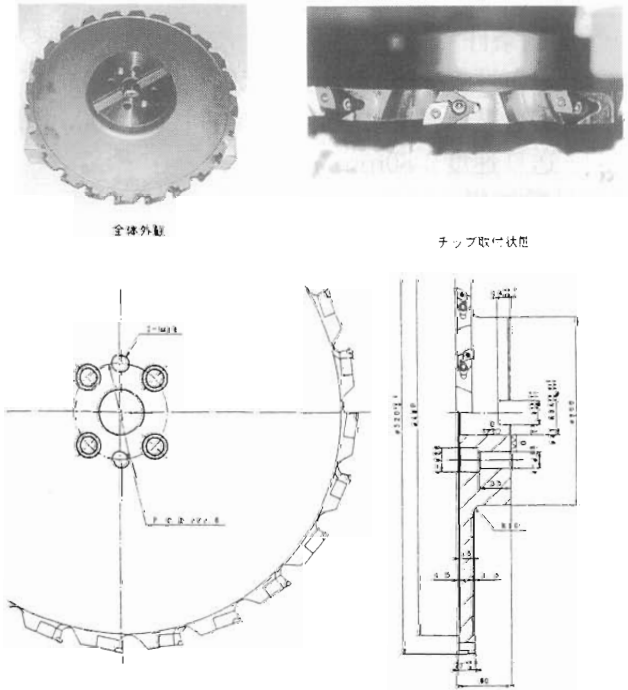


Fig. 5 Side-cutter

3.2 切断試験装置の設計、製作

切削基礎試験の結果と、それに基づいて実施した概念設計を踏まえて、切断試験装置の詳細設計とそれに基づく装置の製作、組立・調整を行い、切断装置の主要構成要素である切断機構部、旋回機構部、昇降機構部、固定機構部等の各軸の作動状況等を確認した。

また、切り粉回収ユニット及びテーブルリフタの詳細設計、製作及び組立を行い、切断試験装置を構成するコンポーネントの製作、組立を完了した。

3.3 機能確認、切断予備試験等

切断試験装置の機能を確認し、モックアップ切断試験に備えて、装置の試運転を行い、切削条件等の確認を行った。

(1) 切断試験装置の機能確認試験

切断試験装置を構成する切断機構部等の総合的な動作機能を確認し、各出力軸の動作範囲、動作速度等が、設計目標値を満足していることを確認した。その結果を Table 2 に示す。

Table 2 Results of function test of mechanical cutting equipment

測定項目 対象	動作範囲		動作速度 (最大)		位置決め精度	
	目標値	測定値	目標値	測定値	目標値	測定値
工機回転軸	—	—	131 ±10rpm	123 rpm	—	—
工機前後軸	440 ±1 mm	440.0 mm	200 ±1mm/min	201 mm/min	±0.05 mm	-0.05 ~0.05
工機上下軸	500 ±1 mm	500.0 mm	200 ±1mm/min	200 mm/min	±0.05 mm	-0.05 ~0.05
装置昇降軸	1400±5 mm	1395 mm	1.0±0.1m/min	1077 mm/min	±5 mm	-2~+5 mm
装置旋回軸	360 ±1 °	360°	534 ±5 mm/min	534 mm/min	±1 °	0°
装置固定軸	50~75 mm	50~75 mm	—	—	—	—
回収装置	—	—	1.1m/min 以上	1150 mm/min	—	—
リフタ	2000±5 mm	2005 mm	2.15m/min 以上	2350 mm/min	—	—

— : 目標値なし

(2) 切断予備試験

切断モックアップ試験に備えて、安定した切断条件 (切削条件) を把握するとともに、切断時に不具合が生ずることがないかを確認し、必要に応じて対応策を検討することを目的として、原子炉胴部を模擬した薄肉 (厚さ 30 mm) 構造の供試体を切断する予備試験を

実施した。

試験は、刃先速度をメーカー推奨値に設定し、切り込み深さ、送り速度をパラメータとして安定した切削条件の範囲を確認した。エンドミル及びサイドカッタ共に、切削条件を厳しくすると、すなわち、切り込み深さを深く、送り速度を大きくすると装置の振動、刃先工具の回転むらが発生することを確認した。それらの結果を Fig. 6、7 に示す。

また、切断試験の開始当初は、装置に大きな振動が発生した。調査の結果、振動発生の原因は、切断装置の固定点と刃先工具までの距離が大きいことにあることが判明し、刃先工具の近傍に固定点を追加する対策をとったことにより、この問題（不具合）を解決した。

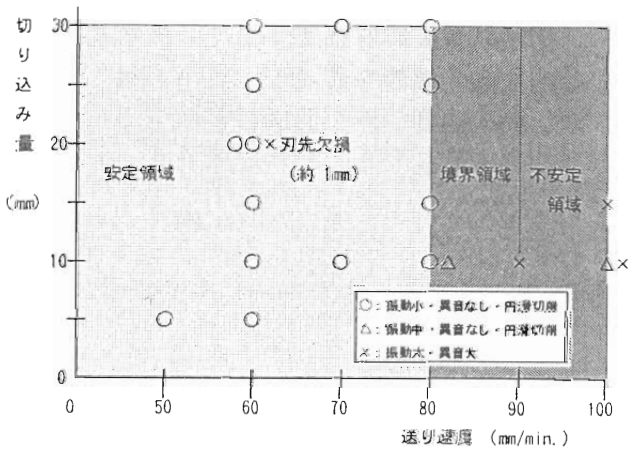


Fig. 6 End-mill cutting test
刃先速度：9.7m/min (刃先径 3/mm φ)
回転数：100rpm

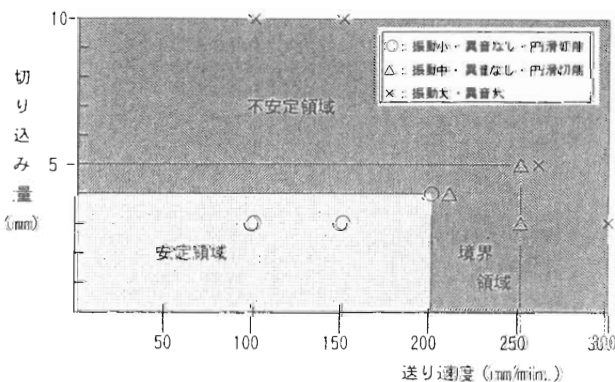


Fig. 7 Side-cutter cutting test
刃先速度：163m/min (刃先径 520mm φ)
回転数：100rpm

4. モックアップ切断試験

原子炉圧力容器を模擬した供試体を切断するモックアップ試験を行い、刃先の耐久性（刃先寿命）、切断所要時間等の作業能率に係るデータを取得し、所期の目的を達成した。

4.1 刃先工具の寿命確認

機械的切断（切削）においては、刃先の磨耗により切削抵抗が増大することによって、所要動力、トルクも増加し、振動や異音等の異常事象発生の原因となる。このため、工具メーカーは刃先の磨耗量に一定の限界を設定している。本切断試験装置で採用したエンドミル及びサイドカッタについては、磨耗により刃先幅が1mmに到達したところを磨耗限界（刃先寿命）の目安として、工具の交換を推奨している。

供試体を切削（切断）し、切削量と刃先磨耗量の関係を調べた。

(1) エンドミルの切削性能

① エンドミルの仕様

- ・材質：高速度鋼 (SKH-7) + 表面セラミックコーティング (TiAlN)
- ・寸法：31mm φ × 刃先長 106mm × 刃数 6 枚

② 切削条件

- ・刃先速度：9.7 m/min (100 rpm)
- ・切り込み深さ：26mm × 4 回 (≒ 100mm)
- ・送り速度：80mm/min

③ 試験結果

- ・1本のエンドミルの切削量は最大 $9.3 \times 10^3 \text{ cm}^3$ であった。厚さ 100mm の供試体を約 3m 切断した量に相当する。

この結果は刃先磨耗量が限界に達したのではなく、エンドミルの折損（破断）により試験を中断するまでの切削量であり、このときの刃先磨耗幅は 0.15mm 程度であった。

- ・エンドミル破断の原因は、2回目以降の刃先の位置合わせが、1回目の切り込み位置と同軸上にアライメントされないため、切削中に刃先が偏ったため、工具の取付け部に横方向のモーメント荷重が繰返し作用したためと推定される。エンドミルの折損状

況を Photo 1 に示す。

- ・仮に、エンドミルが折損しないで刃先磨耗幅の限界値 (1 mm) まで切削できたとした場合、切削量は保守的に見ても $1.5 \times 10^4 \text{cm}^3$ 程度となり、厚さ 100mm の供試体を約 4.8m 程度切断する性能を有しているものと推定できる。

これらの試験結果を Fig. 8 に示す。

(2) サイドカッタの切削性能

① サイドカッタの仕様

- ・材質：超合金チップ+表面硬化コーティング (①TiN+TiAlN ②TiCN+Al₂O₃+TiN) の 2 種類
- ・寸法：直径 520mm ϕ × 厚さ 20mm × 刃数 24 枚 (12 対)

② 切削条件

- ・刃先速度：163m/min (100 rpm)
- ・切込み深さ：3mm/回 × 34 回 (≒ 100 mm)
- ・送り速度：150 mm/min

③ 試験結果

- ・試験結果を Fig. 9 に示す。2 種類の表面硬化コーティングを施した工具について切削試験

を行った。その結果、TiCN+Al₂O₃+TiN の表面硬化コーティングを施した工具が、切削性能 (切削量、耐摩耗性) に優れていることを確認した。

- ・表面硬化コーティングの種類によって切削性能に大きな差のあることを確認した。すなわち、TiCN+Al₂O₃+TiN を表面硬化コーテ

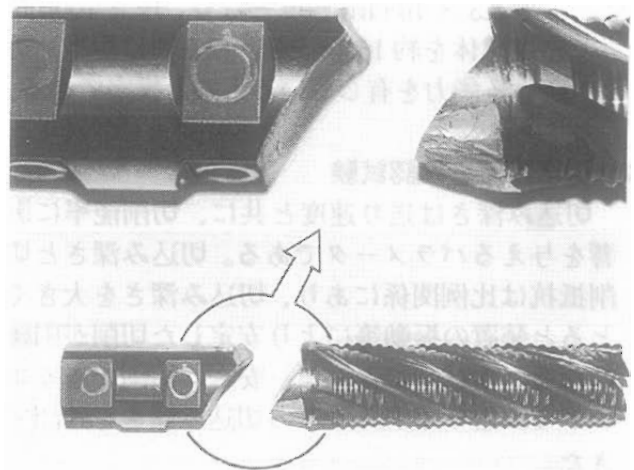


Photo 1 Breakage appearance of end-mill cutter

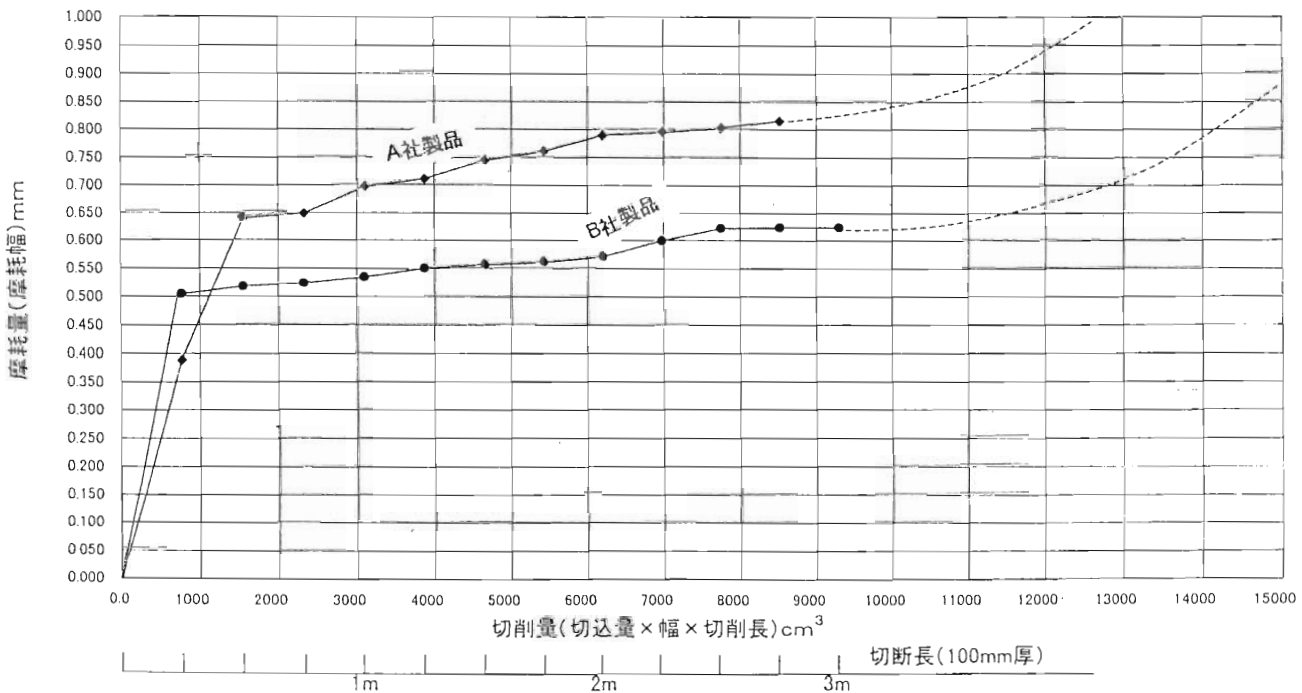


Fig. 8 Durability test of end-mill cutter

グした刃先工具が切削量約 $2.5 \times 10^4 \text{cm}^3$ (供試体を水平方向に2本切断した量に相当)で刃先磨耗量が約0.4mmであるのに対し、TiN+TiAlNの表面硬化コーティングの刃先工具では約1/2の切削量で刃先磨耗量は約2倍となっていることがわかった。

仮に、刃先磨耗幅が限界値(1mm)まで切削したとした場合の切削量は、保守的に見ても $3.3 \times 10^4 \text{cm}^3$ 程度となり、厚さ100mmの供試体を約16.5m程度(2.5周に相当)切断する能力を有しているものと推定できる。

4.2 切込み深さ確認試験

切込み深さは送り速度と共に、切削能率に影響を与えるパラメータである。切込み深さと切削抵抗は比例関係にあり、切込み深さを大きくすると装置の振動等により安定した切削が困難になる。本試験によって、安定に切削できるエンドミルとサイドカッタの切込み深さを確認できた。

(1) エンドミル

切削条件として刃先速度を9.7m/min、送り

速度を80mm/minに設定し、切込み深さを30mmから5mmずつ増加させ55mmまで安定した切削ができることを確認した。円滑な切削は切込み深さが30mm前後にあり、60mm以上では装置の振動、刃先工具の回転むら等が発生した。この結果から、本試験装置のエンドミルによる切削時の切込み深さの上限は55mmであることがわかった。

(2) サイドカッタ

切削条件として刃先速度を163m/min(100rpm)、送り速度を150mm/minに設定し、切込み深さを4mmから1mmずつ増加させ、5mmまで安定に切削ができることを確認した。

円滑な切削は切込み深さは5mm以下であり、6mmになると、わずかに装置の振動、刃先工具の回転むらが認められ、8mmになると振動及び回転むらが顕著になった。したがって、本試験装置のサイドカッタによる切込み深さの限界は5mm以下で切削することが必要条件となることがわかった。

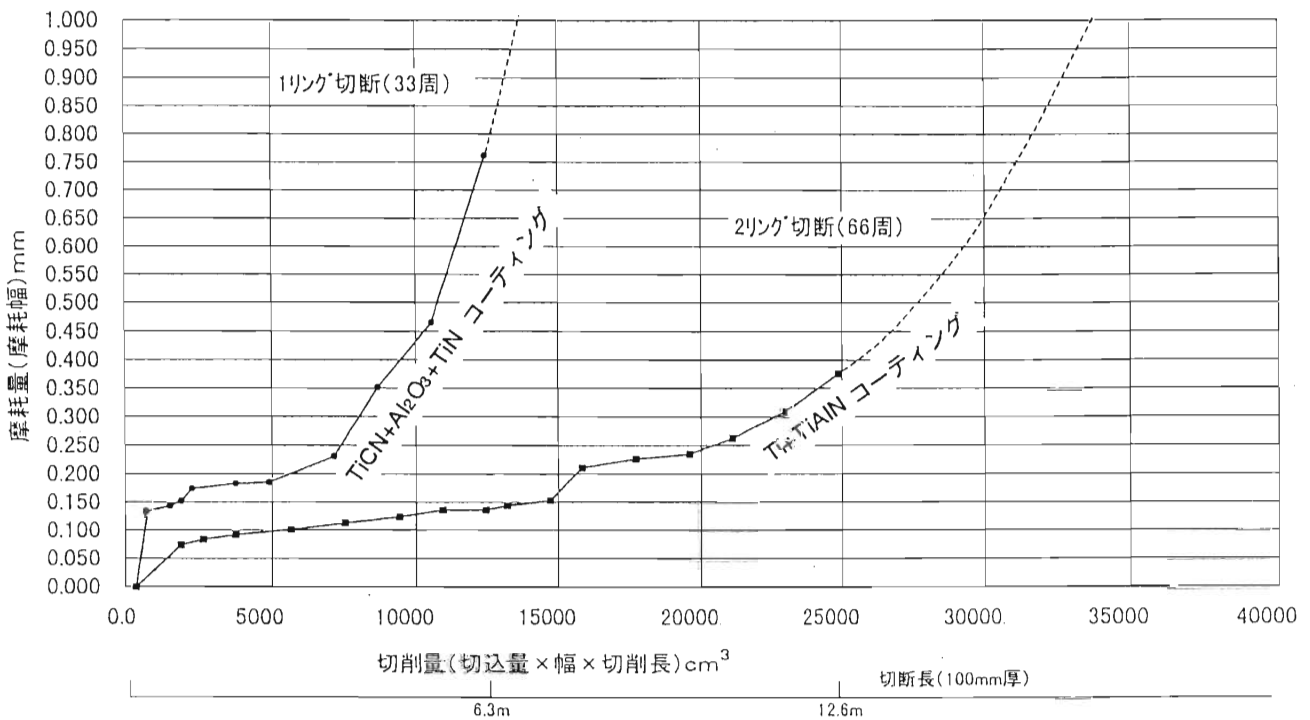


Fig. 9 Durability test of side-cutter

サイドカッタの切削性能は、下表に示すとおり切断試験装置の設計目標の仕様を下回る結果となった。

項目		設計目標仕様	試験結果
切り込み深さ	mm	10 ~ 20	5
送り速度	mm/min	200 ~ 400	150

切り込み深さが設計目標を満足できなかった理由としては、以下のことが考えられる。

- ①試験装置の機能として、垂直方向と水平方向切断ができる機能を持たせた。この結果、装置が複雑な構造となり、寸法的な制約もあって、十分な剛性を確保できなかった。
- ②工具回転軸のトルク及び装置の固定力が不足気味であったため、①の剛性不足と重畳して、切削条件を厳しくすると、装置の振動と刃先工具の回転からの発生につながり、目標とした性能を確保できなかった。

4.3 モックアップ切断試験

原子炉圧力容器胴部を模擬した内径 2000mm × 高さ 2000mm × 厚さ 100mm の供試体を切断するモックアップ切断試験を行い、切断所要時間等作業能率、副次生成物（切り粉）量等に関するデータを得た。供試体の構造を Fig. 10 に、切断試験状況を Photo 2、3 に、発生した切り粉を Photo 4、5 に、試験結果を Table 3 に示す。

4.4 考察

開発目標の一つである無冷却、無潤滑での切削（切断）を行うことができた。これは、副次生成物（二次廃棄物）の発生量抑制と冷却材（液体廃棄物）の処理設備の設置を必要としない点で大きなメリットがある。

また、発生する切り粉の性状（大きさ、厚さ、形状、色調、嵩密度）もそれぞれの刃先工具によって、ほぼ一定の枠内にあり、重力落下することから、回収することは容易であり、モックアップ切断試験において93%程度の回収率をあ

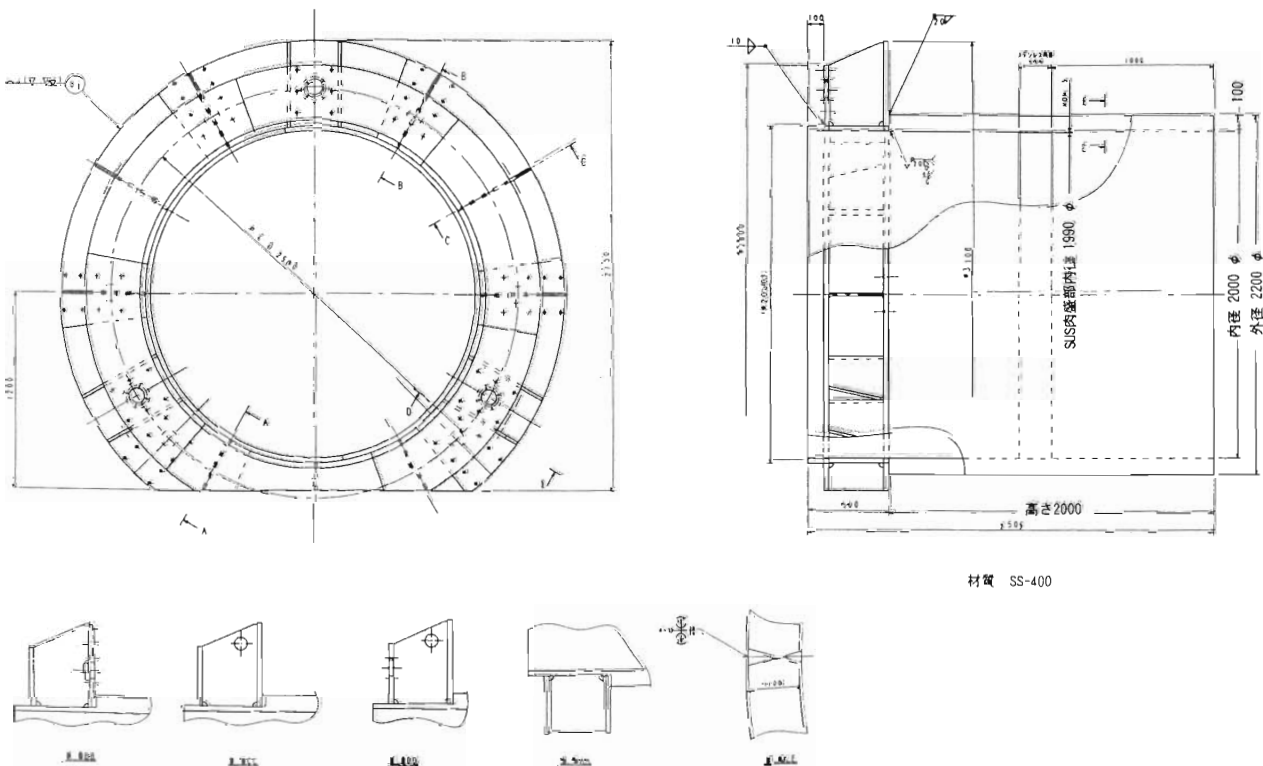


Fig. 10 Test pieces for mock-up test

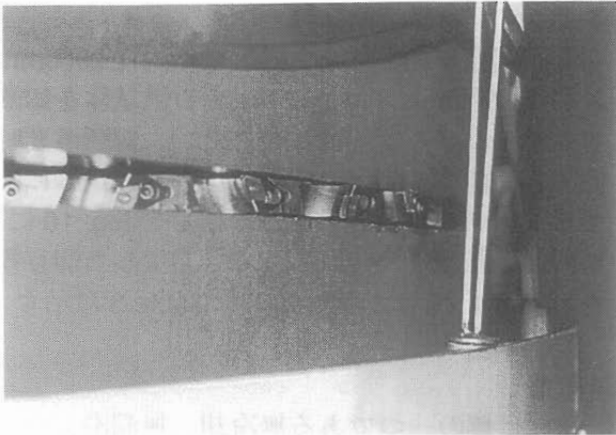


Photo 2 Cutting test using side-cutter

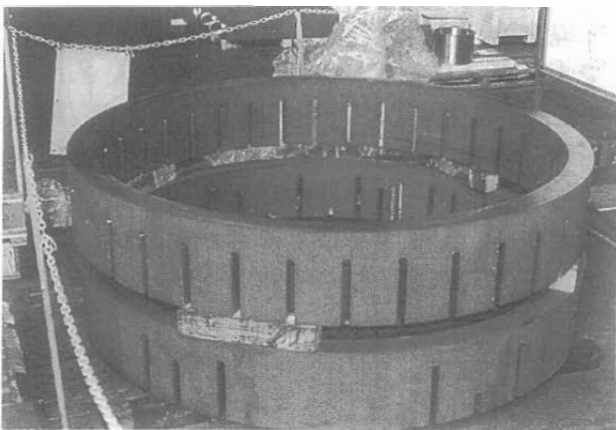


Photo 3 Test pieces cut by side-cutter and end-mill cutter

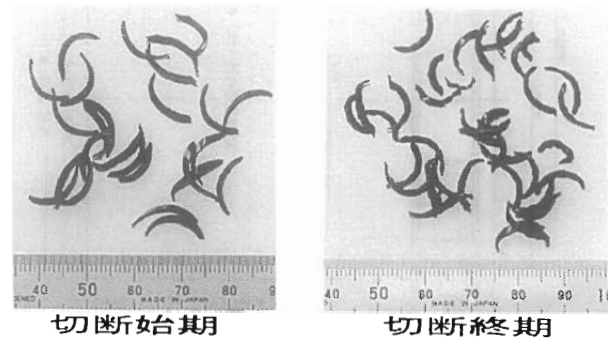


Photo 4 Metal chips from end-mill cutting

げている。真空吸引法を採り入れることによりさらに回収率を向上させることは十分に可能と考えられる。

4.2項に述べたサイドカッタの切削(切断)性能が設計目標を満足できなかった点については、装置の振動、回転むらの原因となった剛性、固

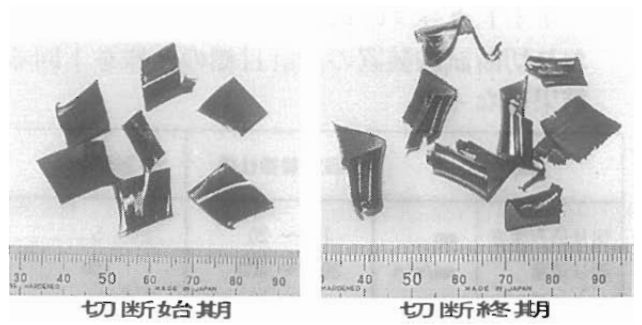


Photo 5 Metal chips from side-cutter cutting

Table 3 Results of mock-up cutting test

試験項目	切断方向	切断方向		
		垂直切断: エンドミル	水平切断: サイドカッタ	
切削条件	・切り込み深さ	mm	26 × 4回	3 × 3 回 + 5 × 19 回
	・切り込み幅	mm	31	20
	・送り速度	mm/min	80	150
	・刃先速度	m/min	9.7(100rpm)	163(100rpm)
	・刃先冷却		なし(自然空冷)	なし(自然空冷)
	・切断長さ	mm	250	6,600 (1周切断)
	・切断量	cm ³	775	13,200
試験結果	所要時間			
	・工具取付け	min	12	60
	・工具位置決め	min	30	60
	・テーパー設定	min	10	—
	・モックアップ切断	min	30	960(16hr)
	・切断片取出し	min	—	30
副次生成物(切り粉)	・発生量/回収量		592 g/550 g	103.6 Kg/96 Kg
	・形状		三日月形	長方形
	・寸法(厚さ×長さ mm)		1.5 ~ 2.0 × 5~13	厚さ0.1 × 幅12×長さ10~17
	・嵩密度 (g/cm ³)		1.5 ~ 2.0	0.24~0.35
	・電流値(A) / 無負荷時		17.5~19.2/11~12	14.3~20.1/11~12

定力、切削トルクの不足分を補強すれば解決するものであり、本質的な問題ではないものと考えられる。

供試体の大きさから切断試験回数を充分にとれなかったため、切断作業の所要時間等の作業能率に係るデータが少ないという問題はある。しかし、これを得られた切断時間、刃先工具の取付時間等のデータを用い、JPDR 解体実地試験時の原子炉压力容器の切断線を機械的に切断した場合を想定し、試算した。

その結果、作業日数、人工数、被曝、二次廃棄物発生量等の何れも本法が小さい値を示している。一方、熱的切断工法との比較においても行

利な工法である可能性を示している (Table 4)。この反面、本法は装置がコスト高になること、作業員に高度な技術的熟練度が要求されること等の問題も残されており、今後の開発課題でもある。

Table 4 Comparison between thermal cutting technique and mechanical cutting technique

項目	工法	熱的切断工法 ^{*)}	機械的切断工法	比 (機械/熱)
作業日数	日	450	300	0.67
所要工数	人日	8,800	4,000	0.46
作業被曝	人・mSv	75	10	0.13
二次廃棄物量	ton	46	10	0.22

注記：*) JPDR解体実地試験時のアークソウ切断を指す。
: 数値はまるめたものである。

5. 商用炉への適用性の検討

モックアップ切断試験等を通して得られた知見から、商用炉の解体に機械的切断工法を適用する場合を想定し、解体手順等の概念検討を行った。

5.1 切断機能について

原位置での切断は、水平方向切断のみとして構造のシンプル化、コンパクト化を図り、必要かつ十分な剛性と切削トルクを有する設計とする。

原子炉は輪切りにして使用済燃料プール等に搬出し、ここで容器収納のため別途設置するバンドソー等の機械的切断装置により細断することが現実的かつ、合理的と考えられる。

5.2 固定機能について

固定力不足は、装置の振動発生の一因となり、切削能力を低下させることをモックアップ試験等を通して経験した。

切削抵抗と切断装置の自重に対し十分な固定力を与えるとともに、固定位置も2段階とし、構造的には刃先工具に近い位置とする。

5.3 解体手順について

代表的な商用炉として、PWR 及び BWR の原子炉圧力容器の解体に、機械的切断工法を適用する場合を想定し、解体手順の概念検討を行った。

PWR 原子炉圧力容器の支持点は、圧力容器上部の一次冷却水ノズル部近傍にあり、BWR 原子炉圧力容器の支持点は、原子炉下部のスカートを通じてペDESTAL部に固定されている。

原位置での切断は、5.1項に述べたように、水平切断のみとし、切断順序はPWRの場合は下から上へ、BWRの場合は上から下への順に行う必要がある。

切断片は、すべての水平方向切断が終了した後に、順次上方へ取り出す。切断片の落下と位置ずれ防止及び刃先工具保護のため、水平方向切断の準備段階ですべての切断予定線に嵩上げ治具を取り付ける。ここでは、これをピッチホールド工法と呼ぶ。

解体手順の概念を Fig. 11、12に、切断装置を炉内に装着した概念を Fig. 13に示す。

5.4 今後の研究・開発課題について

今回のモックアップ切断試験を通して原子炉圧力容器を遠隔操作により機械的に切断し、解体できる見通しが得られた。今回の試験で得られた知見から、実機適用を想定した切断装置の開発に当たっては、機能、構造のシンプル化、コンパクト化を図ると同時に十分な剛性、切削トルク及び固定力を確保する必要がある。

また、装置の設置から切断、切断片の保持、搬出等の一連の解体作業を遠隔操作で行うためのハンドリング、視認 (確認) システムを確立しておくことも必要不可欠であり、今後の研究開発の課題でもある。主な課題を以下に示す。

- (1) 切断装置の炉内装着・撤収システム
- (2) 刃先工具位置合わせ・調整システム
- (3) 刃先工具の自動交換システム
- (4) 切断片の把持 (保持)・取り出しシステム
- (5) 作業状況監視 (視認・モニタ) システム
- (6) 刃先工具の多重化
- (7) 刃先工具の性能 (寿命) 向上

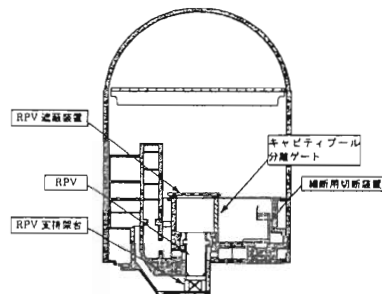
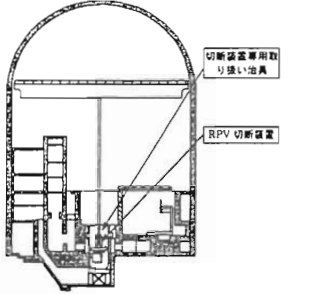
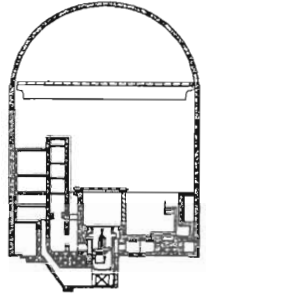
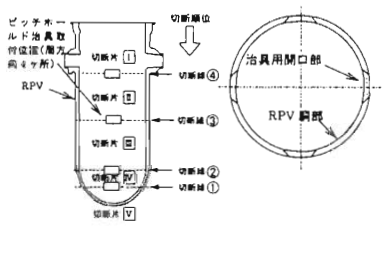
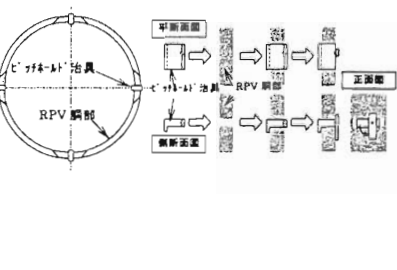
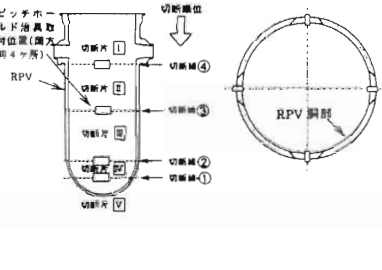
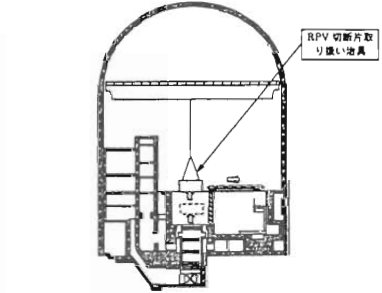
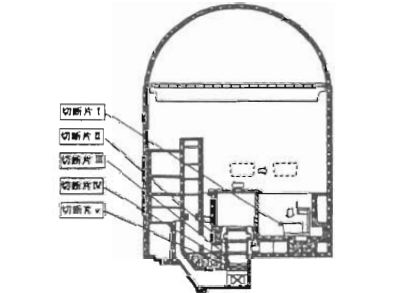
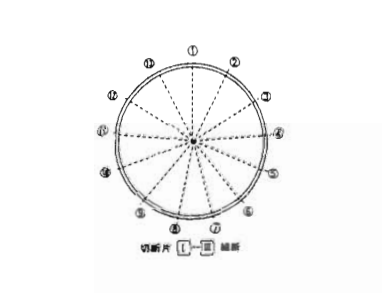
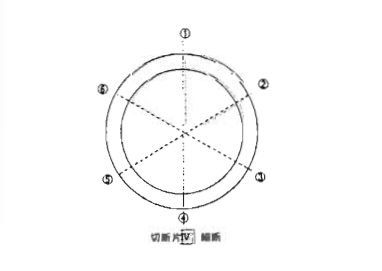

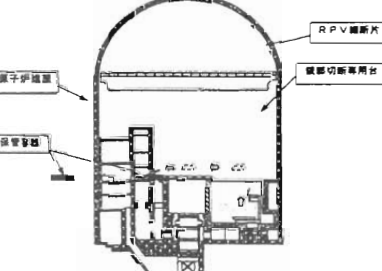
<p>1. 作業準備</p> 	<p>2. RPV 切断装置設置</p> 	<p>3. ビッチホールド治具取付け及び RPV 切断</p> 
<p>RPV 周りの配管類等の解体撤去が完了していることを確認し、RPV 切断装置、RPV 遮蔽装置、補助用切断装置、キャピティブール分離ゲート、RPV 支持架台及び、各種専用治具等必要機材の搬入、組立、調整を実施する。</p>	<p>RPV 遮蔽装置を「開」状態にし、切断装置専用取り扱い器具を使用して、RPV 切断装置を RPV 内に吊り降ろし固定する。</p>	<p>RPV 遮蔽装置を「閉」状態にし、ステップ4～6の要領でビッチホールド治具取付け及び RPV 切断を実施する。</p>
<p>4. ビッチホールド治具用開口部加工</p> 	<p>5. ビッチホールド治具取付け</p> 	<p>6. RPV 切断</p> 
<p>上図に示す軸方向4箇所、周方向4箇所、合計16箇所にビッチホールド治具を取り付ける開口部を切断装置で加工する。</p>	<p>ビッチホールド治具を開口部に挿入し、先端を回転固定し、治具の外れ止め、及び、RPV 切断片の周方向ずれ防止を行う。</p>	<p>上図に示す軸方向4ヶ所の切断位置で RPV 上方から下方へ順次切断を行う。</p>
<p>7. RPV 切断片移動</p> 	<p>8. RPV 切断片細断</p> 	<p>9. RPV 胴部細断</p> 
<p>RPV 遮蔽装置を「開」状態にし、RPV 切断片取り扱い器具をビッチホールド治具で嵩上げされた隙間に挿入し、切断片を下から持ち上げる方式で吊り上げる。</p>	<p>RPV 遮蔽装置を「閉」状態にし、RPV 切断片を炉内構造物位置までピッチに設置した補助用切断装置上に設置し、ステップ9～11の分割要領で細断を実施する。</p>	<p>切断片I～IIIの RPV 胴部に相当する各切断片を周方向13等分に細断する。</p>
<p>10. 下部胴上部細断</p> 	<p>11. 下部胴下部細断</p> 	<p>12. 細断片回収、及び、保管容器への収納</p> 
<p>下部胴上部の1m分に相当する切断片を周方向6等分に細断する。</p>	<p>RPV 最下部の下部胴部を周方向12等分に細断する。</p>	<p>細断片を専用取り扱器具で吊り上げ、収納容器まで移動し収納する。その後、保管容器の蓋を取付け、固定し、汚染が無いことを確認して、原子炉建屋外へ搬出する。</p>

Fig. 11 Cutting procedure of reactor pressure vessel (PWR)

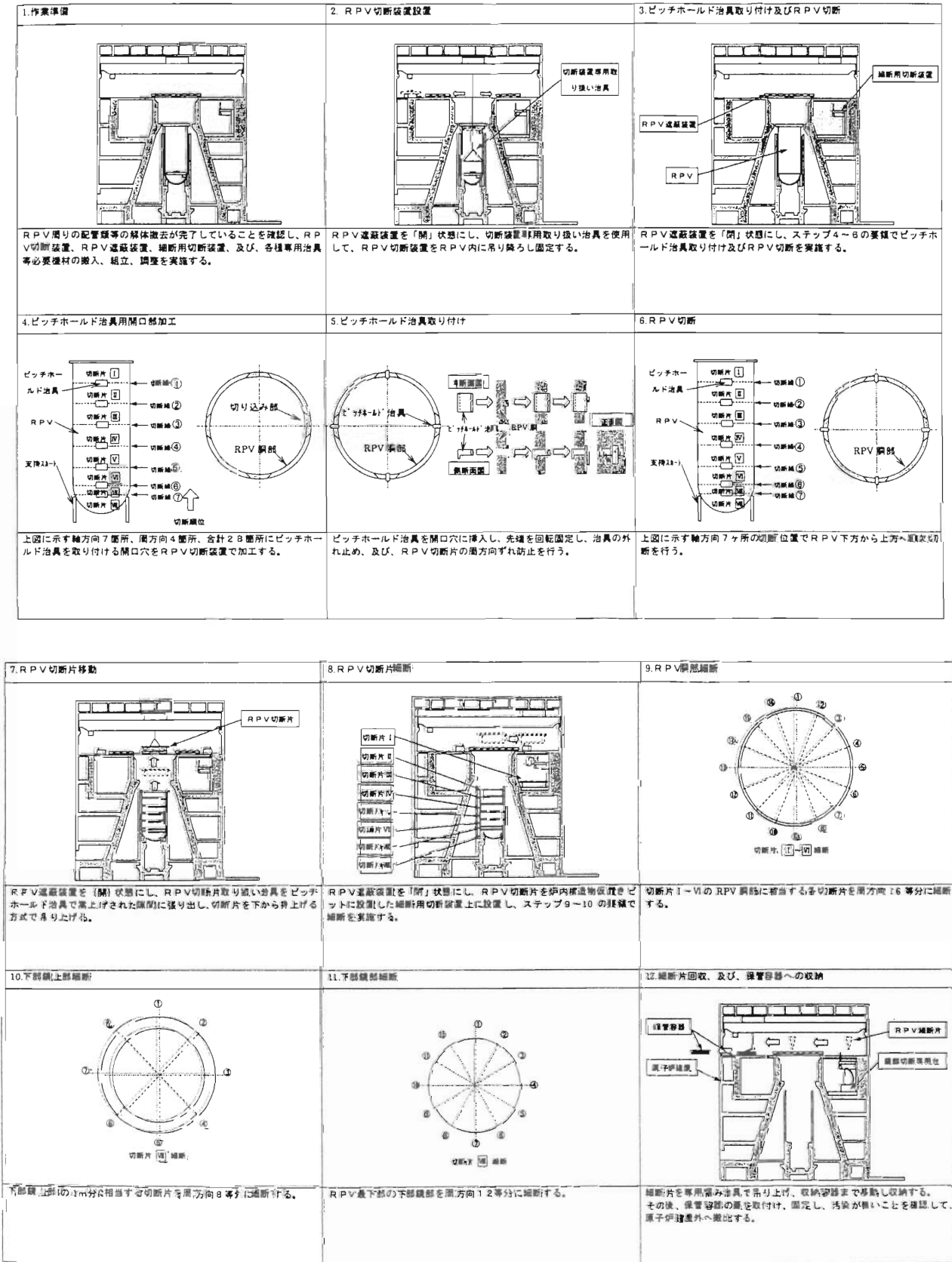


Fig. 12 Cutting procedure of reactor pressure vessel (BWR)

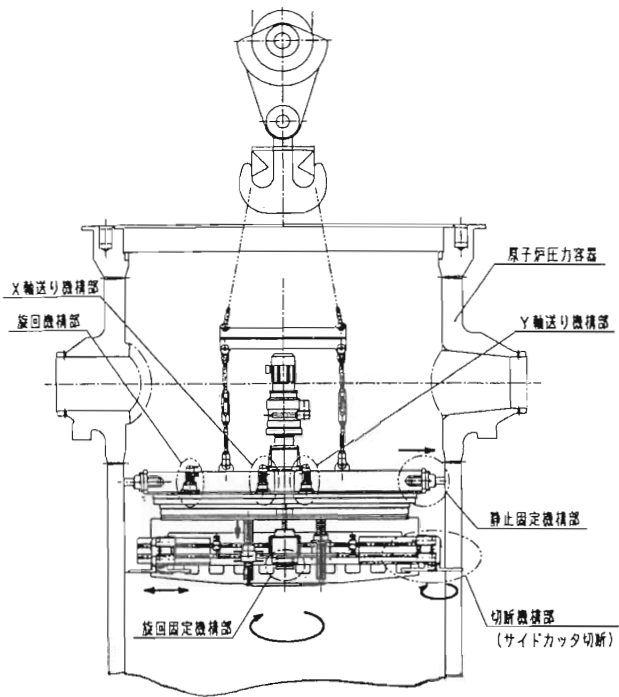


Fig. 13 Concept of setting method of cutting equipment in RPV

6. 評価

- (1) モックアップ切断試験により、原子炉圧力容器を遠隔自動操作により機械的に切断し、解体できる見通しを得た。
- (2) 試験データが少ないことから定量的な評価をできる段階にはないが、今回のモックアップ試験で得られた切断時間等の作業能率に係るデータを用い、所要工数等の試算をしてみると、JPDRの事例との比較において、所要工期、人工数、被曝、二次廃棄物量が少ないという結果が得られた。

副次生成物の発生量が少なく、性状も安定していて取扱い易いこと、拡散防止、処理設備等の設備負担を要しないこと等を総合的に見れば、現時点では、定性的に熱的切断工法より有利と判断される。

- (3) 商用炉への適用可能性について検討し、解体手順の概念を構築した。

切断装置については、切断機能のシンプル化とコンパクト化を図り、装置の概念を構築した。

レーザー切断による二次生成物回収処理技術試験

原 邦男*¹、宮尾 英彦*¹、中澤 正治*²
片岡 伸一*³、名倉 保身*³、斉木 秀男*³

Secondary Waste Characteristics and ITS Filtration System on Laser Cutting

Kunio HARA, Hidehiko MIYAO, Masaharu NAKAZAWA
Sinichi KATAOKA, Yasumi NAGURA, Hideo SAIKI

Technology of dismantling nuclear facilities has been developing in various fields for its evaluation and dismantling system.

RANDEC has been studying a remote dismantling system for highly activated equipments such as core internals with a laser using optical fiber.

Recently a high power YAG laser having the advantage of application for remote dismantling on thick metallic material is the stage for practical use, and narrow kerf can bring the reduction of secondary waste as well.

The present paper describes the experimental results and discussion on the laser cutting, including the secondary waste characteristics and its filtration system using the YAG laser.

This study has been performed on consignment to RANDEC from the Science and Technology Agency of Japan.

1. はじめに

原子炉圧力容器、炉内構造物等の原子炉施設の解体作業は、高線量下の狭隘な作業環境下で安全に行わなければならない。このためには、解体機器の遠隔操作化を図り、小型・軽量化して狭隘な場所でも高率よく解体作業を行う必要がある。また、解体に伴って発生する二次生成物を低減できる解体工法が必要である。

レーザー切断は、切断加工に伴う反力が無いことから遠隔操作性に優れ、加えて最近の技術進歩により大出力化が進んだ結果、厚板材を二次生成物がより少ない条件で切断できる工法の一つとして期待されている。

当センターでは、これらの要件に対応し得る切

断工法としてYAGレーザーを取り上げ、高出力YAGレーザーの厚板水中切断特性を把握するとともに、気中及び水中切断時の二次生成物データを取得し、その回収処理技術を開発した。

本報告は、YAGレーザーによる切断試験結果について概説するものである。

- (1) 高出力YAGレーザーによる厚板材の水中切断試験
- (2) 水中/気中切断における二次生成物特性データ取得試験
- (3) 二次生成物回収処理系の長時間特性試験

2. 高出力YAGレーザーによる厚板材の水中切断試験

高出力YAGレーザーによる切断試験は、Fig. 1に

本誌発表は、科学技術庁より受託した「原子炉解体高度化技術開発」の一部である。

*¹財団法人原子力研究バックエンド推進センター (RANDEC)

*²東京大学 (University of Tokyo)

*³三菱重工業 (株) (Mitsubishi Heavy Industries, LTD)

示す形状のステンレス鋼材 (SUS304) を供試材として用いた。

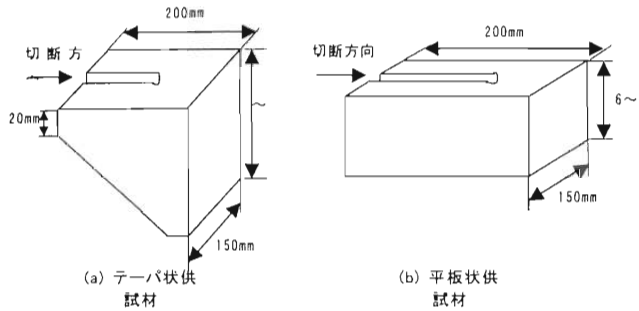


Fig. 1 Dimension of materials used

2.1 試験方法

10kW級の高出力YAGレーザーによる厚板材の水中切断特性を把握するために、試験水槽に供試材を水深0.3mの位置に垂直に立て、それと直角に先端集光光学系（切断ノズル）を設置し、YAGレーザー装置から光ファイバにレーザー光を導

光して切断試験を行った。この試験は、切断能力に及ぼすレーザー出力、切断速度の影響について行った。試験装置、試験条件を以下に示す。

(1) 試験装置

試験装置は Fig. 2 に示すように、YAGレーザー装置、先端集光光学系、供試材駆動装置、上下駆動治具、試験水槽などから構成されている。試験装置の仕様を以下に示す。

- ・レーザー : YAGレーザー (最大発振能力 10kW)
- ・伝送ファイバ : SI (ステップインデックス) 型光ファイバ (コア径 0.8mm)
- ・先端集光光学系 : 出力側焦点距離 200mm
- ・空洞形成ノズル : 水噴流型ノズル (Fig. 3 参照)
- ・アシストガス : 同軸噴流ガスノズルノズル
- ・試験水槽 : 1.5m(l)×1.2m(w)×1.5m(h)

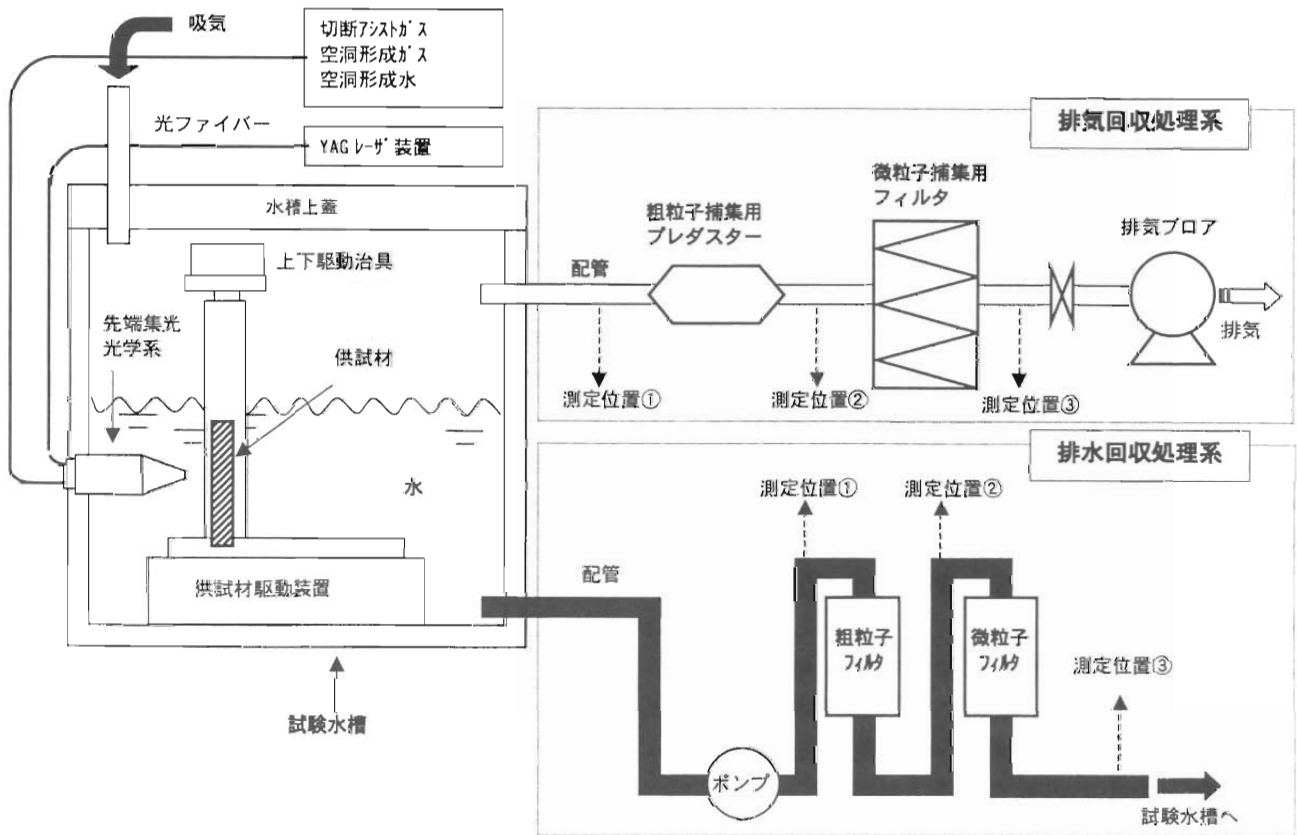


Fig. 2 The facility of laser cutting and secondary waste filtration test

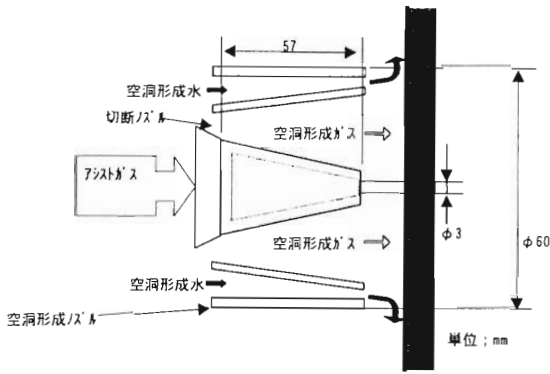


Fig. 3 The laser nozzle

(2) 試験条件

- ・切断環境 : 水深約 0.3m の水中
- ・切断姿勢 : 水平横向き
- ・レーザー出力 : 3、5、7、8kW
- ・切断速度 : 50、100、200mm/min
- ・アシストガス : 100% O₂、模擬空気 (20%O₂-80%N₂)

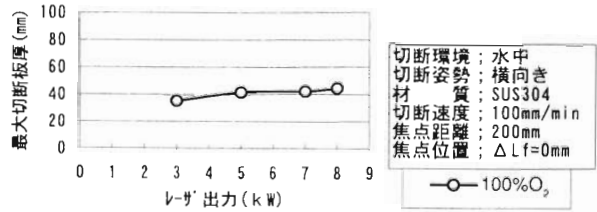
2.2 試験結果と考察

YAG レーザの切断能力を示す最大切断板厚は、レーザー出力と切断速度の影響を受けることが予測されている。その切断試験の結果におけるこれらの関係を Fig. 4 に、切断カーブの断面形状を Table 1 に示す。試験結果は次の通りである。

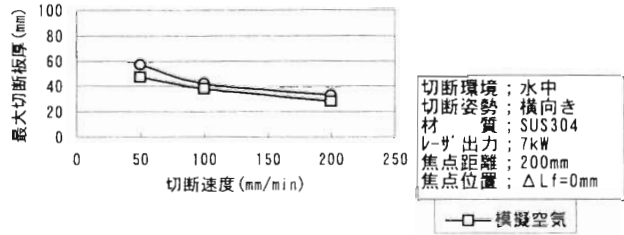
(1) レーザ出力の影響

レーザー出力と切断板厚との関係を Fig. 4(a) に示す。レーザー出力 7kW、アシストガス 100% O₂ における最大切断板厚は、切断速度 100mm/min で 43mm であり、アシストガスが模擬空気の場合は切断能力が低下して 39mm 程度であった。切断速度 50mm/min とした場合の最大切断板厚はそれぞれ 58mm、48mm であった。なお、レーザー出力が最大の 8kW (切断速度 100mm/min、アシストガス 100% O₂) における最大切断板厚は 45mm であった。

レーザー出力を 5kW 以上にした場合、レーザー出力が増加しても最大切断板厚の増加は小さかった。この理由は、供試材の板厚の増加により溶融金属も増加するため、その除去排出により多くのアシストガスを必要とするためである。



(a) レーザ出力の影響 (切断速度: 100mm/min)



(b) 切断速度の影響 (レーザー出力: 7kW)

Fig. 4 The effect of laser energy and cutting speed on cutting plate thickness

Table 1 Crossections of cutting

試験 No.	供試体	切断アシストガス組成	レーザー出力 (kW)	切断速度 (mm/min)	断面カーブ形状	
					表面側	裏面側
1-3	SUS 304	100% O ₂	7	100	[断面形状: 表面側, 裏面側]	
1-5		20% O ₂ + 80% N ₂ (模擬空気)	7	50	[断面形状: 表面側, 裏面側]	

(2) 切断速度の影響

切断速度と切断板厚の関係を Fig. 4(b) に示す。切断速度が低下すると切断に寄与する総エネルギーが増加するため、切断能力が増大する。切断速度 50mm/min の場合、アシストガス 100% O₂ における最大切断板厚は 58mm、模擬空気では 48mm であった。

(3) 切断条件とカーフ

切断条件とカーフの関係を Table 1 に示す。
切断カーフは、切断速度が増加すると減少する傾向を示した。

(4) 供試材表面側の切断カーフは、レーザ出力に関係なく2mm弱でほぼ一定であったが、裏面側は特に100%O₂条件で増加し、7kWの場合には6mm以上に達した。また、切断カーフの断面形状に示すように、供試材の内部が広がっており、特にアシストガスが100% O₂の場合に顕著であった。

また、表面側の切断カーフは、ほぼ一定の2mm弱であることから、供試材内部へのアシストガス供給が制限され、熔融金属の除去能力が低下し、アシストガスが切断に有効に作用しなかったことが考えられる。

3. 水中／気中切断における二次生成物の特性試験

3.1 試験方法

YAGレーザによる二次生成物の特性試験は、Fig. 1に示す形状の厚さ6～40mmのステンレス鋼材(SUS304)および炭素鋼材を供試材に用いた。水中切断試験では、二次生成物として気中に移行した気中浮遊物、水中浮遊物、SUS304供試材の熔融固化物、試験水槽内に飛散落下する固形物などが発生する。試験方法および試験結果を以下に示す。

(1) 試験装置

試験装置は、2.1(1)と同じものである。

(2) 切断条件

前項の切断試験結果を基に、以下の切断条件で試験を行った。

- ・ 供試材 : 板厚6～40mmのステンレス鋼板および炭素鋼
- ・ 環境 : 水深約0.3mの水中あるいは気中
- ・ 切断姿勢 : 水平横向姿勢
- ・ アシストガス : 100%O₂, 模擬空気 (20%O₂-80%N₂)
- ・ レーザ出力 : 1.4～7kW
- ・ 切断速度 : 50～250mm/min

(3) 二次生成物のサンプリング

① 気中浮遊物

水槽の上部に設けた配管を通じて吸引排気し、気中浮遊物を回収した。

② 水中浮遊物

切断後に水槽を攪拌し、配管を通じて水中浮遊物をフィルタに回収した。

③ 固形物

切断後に排水し、水槽に飛散した固形物を回収した。

3.2 試験結果と考察

切断状況および試験結果の概要を以下に示す。

(1) 切断状況

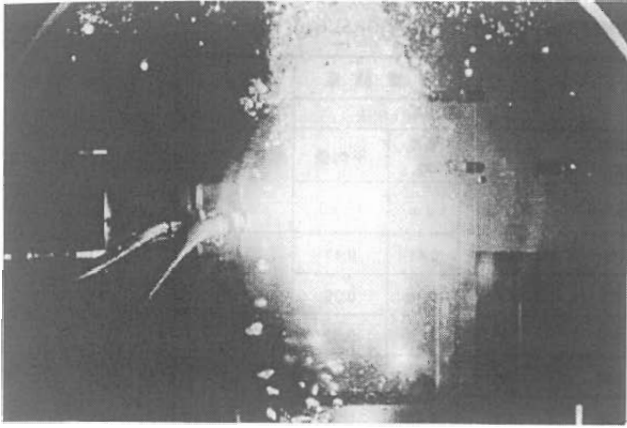
水中でのレーザ切断状況を80cm離れた位置の観察窓から観察した結果をFig. 5の(a)～(c)に示す。(a)および(b)はアシストガスが100% O₂の場合で、水槽内の水は切断開始直後から透視度が低下し、切断長が30cmに達した時点で切断部の目視確認はできなくなった。(c)はアシストガスが模擬空気(20%O₂+80%N₂)の場合で、切断長30cm近傍の切断状況を示す。この場合は50cmに達した時点でも十分に切断部を目視確認することができた。この結果から、アシストガスが水中浮遊物の発生量に及ぼす影響の大きいことが分かった。

(2) 気中浮遊物

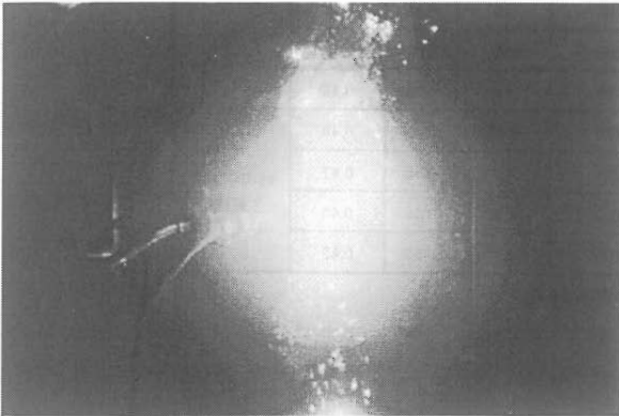
切断条件および気中浮遊物粒径分布を測定した結果をTable 2に示す。また、切断処理速度(cm²/min:板厚cm×切断速度cm/min)に対する気中浮遊物の生成量等をFig. 6に示す。試験結果の概要は次の通りである。

- ① 気中浮遊物の生成率(供試材の切断に伴う溶融飛散による質量損に対する割合)は1%以下であり、切断処理速度の影響は少ない。
- ② 単位板厚当たりの生成速度(g/min/cm)は、100%O₂で0.21～0.35、模擬空気で0.05～0.07程度であった。
- ③ 単位切断長、単位板厚当たりの生成量(g/m/cm)は、厚板材4cm、アシストガス100%O₂で2.1、模擬空気で1.3であり、薄板材(0.6～2cm)のそれぞれの生成量1.4～1.8、0.5～0.7に比較して多い傾向があった。

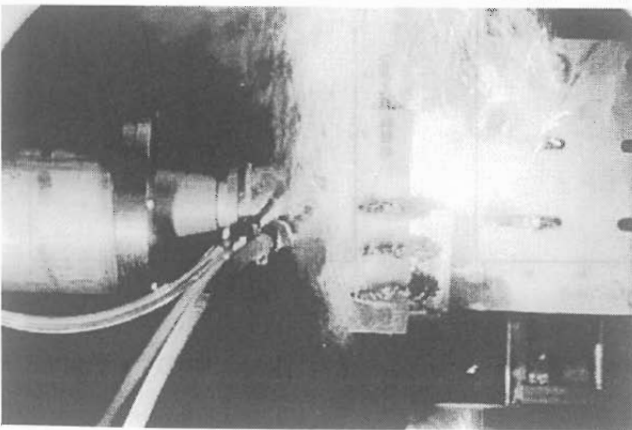
なお、炭素鋼の供試材でアシストガスに模



(a) 切断開始直後
(アシストガス: 100%酸素, 7kW × 100mm/min)



(b) 300mm 切断後
(アシストガス: 100%酸素, 7kW × 100mm/min)



(c) 300mm 切断後
(アシストガス: 模擬空気, 7kW × 50mm/min)

Fig. 5 Underwater cutting

擬空気を使用した場合の水中レーザー切断における気中浮遊物の生成量は、ステンレス鋼に比べて少なく、気中浮遊物も0.12g/m/cmと極めて低い値であった。

炭素鋼の切断カーブは、SUS304に較べて狭いことがわかった。この理由としてFeの酸化反応熱、溶融金属の粘性（炭素鋼は低い等）に依存するものと考えられる。

- ④ LPI法 (Low Pressure Impacter) による頻度径は、厚板材の場合100%O₂で0.41 μm、模擬空気で0.30 μmであった。薄板材の結果と比較すると100%O₂では同レベル、模擬空気の場合はわずかに小粒径側であった。酸素不足の場合には、「煙り燃焼」が生じ、気相析出型の未燃カーボン粒子（非常に細かい粒子）が多くなるといわれている。また、水中切断における気中浮遊物の頻度径は、気中切断に比べて小粒径側であった。

(3) 水中浮遊物

- ① 水中浮遊物の生成率はアシストガスが100% O₂の場合で1.5%、模擬空気の場合0.9%であり、酸化による増量が顕著に認められた。
- ② 単位切断長、単位板厚当たりの生成量 (g/m/cm) は、100%O₂で5.0~7.1、模擬空気で1.7であった。
- ③ SS (Suspended Solid) 濃度 (mg/dm³) は、厚板材の場合6.9、模擬空気で1.7であった。これらは、薄板材のSS濃度が100% O₂で5~6、模擬空気で0.2~0.7であるのに対して、100% O₂の場合は同等レベル、模擬空気の場合は多い結果が得られた。

- ④ 濁度はSS濃度に対応し、アシストガスが100% O₂で6.4NTU*模擬空気で1.5NTUであった。

透視度 (JIS K0101「工業用水試験方法」による) は、アシストガスが模擬空気の場合で100cm以上であったが、酸素の場合60cmであった。この結果は水中レーザー切断状況を80cm離れた位置の観察窓から観察した結果と良く対応している。

(4) 固形物

- ① 固形物の生成率はアシストガスが100% O₂の場合は112%であり、模擬空気の場合の98%に対して高く、酸化による増量が認められる。

* Nephelometric Turbidity Unit の略。濁度指針の1つで JIS K0101「工業用水試験方法」に規定

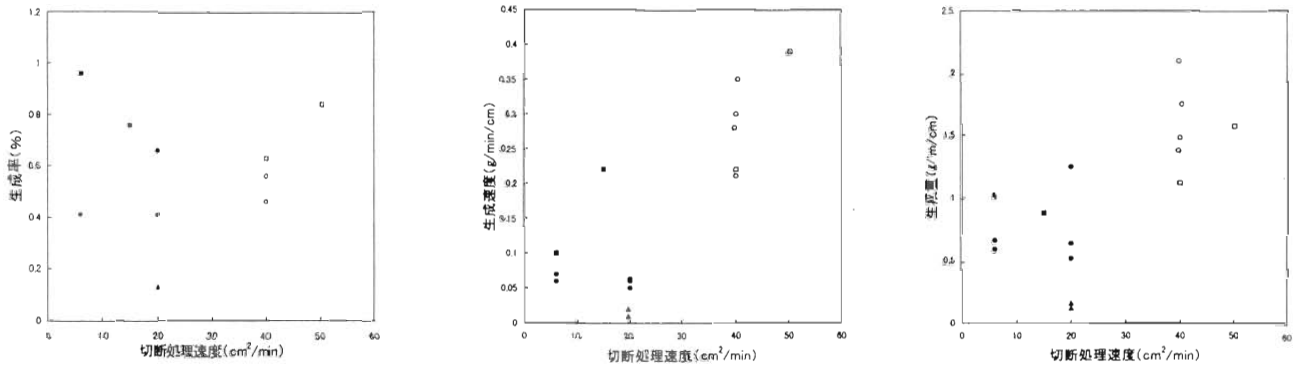
Table 2 The Conditions of laser cutting and the results of aerosol measurement

試験 番号	切 断 条 件							測 定 結 果		備 考
	切断 環境	材 質	板厚 (cm)	アシスト ガス	レーザ出 力 (kW)	切断 速度 (mm/min)	入 熱 (kJ/cm)	LPI法		
								頻度 径 (μ m)	平均 径 (μ m)	
1	水中	SUS304	4	100%O ₂	7	100	42	0.41	0.47	H12年度に 実施
2			4	模擬空気	7	50	84	0.30	0.38	
3	水中	SUS304	2	100%O ₂	3	200	9	0.43	0.52	H11年度に 実施
4			0.6	模擬空気	3	100	18	0.46	0.50	
5			2	100%O ₂	1.4	200	4.2	0.43	0.58	
6			2	模擬空気	3	100	18	0.46	0.56	
7		SS400	2	模擬空気	3	100	18	0.22	0.35	
8	水中	SUS304	2	100%O ₂	3	200	9	0.42	0.56	
9			0.6	模擬空気	3	100	18	0.42	0.46	
10			2	模擬空気	3	100	18	0.52	0.56	
11		SS400	2	模擬空気	3	100	18	0.22	0.46	
12	気中	SUS304	2	100%O ₂	1.4	250	3.36	0.55	0.48	H10年度に 実施
13			2	100%O ₂	1.4	200	4.2	0.55	0.47	
14			0.6	模擬空気	1.4	250	3.36	0.55	0.46	
15			0.6	模擬空気	1.4	100	8.4	0.55	0.42	

注記1: LPI(Low Pressure Impacter)法は0.1~10 μ m程度の幅広い粒径分布が評価できる。

2: 頻度径とは最も個数頻度の多い粒径。

3: 平均径とは重量が50%となるふるい粒径。



(a) 生成率と切断処理速度の関係

(b) 生成速度と切断処理速度の関係

(c) 生成量と切断処理速度の関係

記事

- ・生成速度 (g/min/cm):
生成量(g)/切断時間(min)/板厚(cm)
- ・生成量 (g/m/cm):
生成量(g)/切断長(mm)/板厚(cm)
- ・切断環境: 気中および水中(水深約0.3m)
- ・板厚: 0.6~4(cm)
- ・切断速度: 50~250(mm/min)

○	水中, SUS304, 酸素
●	水中, SUS304, 模擬空気
▲	水中, SS400, 模擬空気
□	気中, SUS304, 酸素
■	気中, SUS304, 模擬空気

Fig. 6 Relation between cutting process speed and aerosol

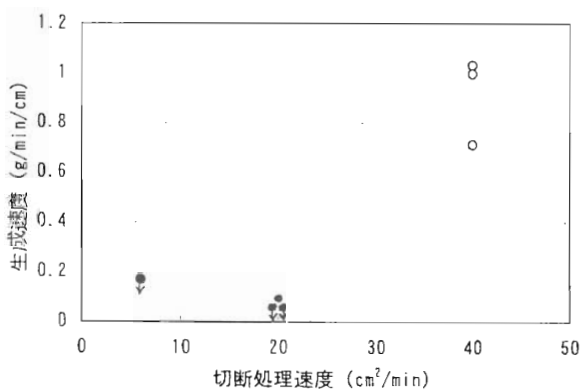
- ②単位切断長、単位板厚当たりの生成量(g/m/cm)は厚板材の場合、アシストガスが100% O₂で519、模擬空気で187であった。薄板材の生成量は、それぞれ281~297、76~129で、厚板材の場合に比較して少なかった。この傾向はこれまでに得られた結果からも、板厚が厚くなるほど発生量が増大する傾向と一致している。¹⁾
- ③固形物が供試材に付着する割合は厚板材の場合、アシストガスが100% O₂で54%、模擬空気で55%であり、薄板材に比較して高い傾向がある。
- ④固形物の95w.%以上が75 μm以上の粒径で、平均径は300~1000 μmで気中切断の場合と同じくアシストガスの影響はなかった。

3.3 二次生成物諸量の考察

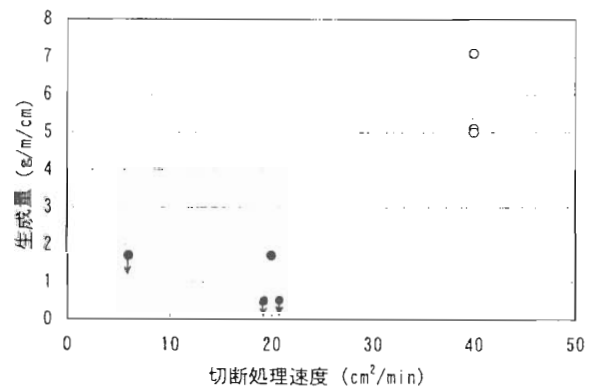
(1) 気中浮遊物の諸量を切断処理速度(板厚×切断速度)で整理した結果を Fig. 6 に示す。この図から、アシストガスが100% O₂の場合は切断処理速度の高い側に、模擬空気の場合は低い側に分布していることを示しており、さらに以下のことがらが認められる。

- ①生成率は切断処理速度の影響が少なく1%以下である。
- ②単位板厚当たりの生成速度は切断処理速度に対応して増加している。
- ③単位板厚、単位切断長当たりの生成量は切断処理速度の影響は少ないと予想されたが、Fig. 6では高い切断処理速度条件の場合に多くなっている。この理由として、高い切断処理速度条件ではアシストガスが100% O₂でもあり、切断カーフが広がったためと考えられる。

(2) 水中浮遊物の諸量を切断処理速度(板厚×切断速度)で整理した結果を Fig. 7 に示す。この図から、水中浮遊物の単位板厚当たりの生成速度および単位板厚、単位切断長当たりの生成量は、切断処理速度の影響よりもアシストガスの影響がより大きい傾向にあることがわかる。これは、100% O₂では酸化雰囲気になるため金属の酸化物が増加し微粒子になりやすいものと考えられる。また、酸化熱の発生によって高温となりやすく、その浮遊物が冷やされて微粒子になるため、水中浮遊物が増加することが考えられる。



(a)生成速度と切断処理速度の関係



(b)生成量と切断処理速度の関係

記事

- ・生成速度(g/min/cm) : 生成量(g)/切断時間(min)/板厚(cm)
- ・生成量(g/m/cm) : 生成量(g)/切断長(mm)/板厚(cm)
- ・切断環境 : 水中(水深約0.3m)
- ・板厚 : 0.6~4(cm)
- ・切断速度 : 50~250(mm/min)

○ SUS304, 酸素
● SUS304, 模擬空気

Fig. 7 Relation between cutting process speed and underwater emission

(3) 固形物の諸量を切断処理速度(板厚×切断速度)で整理した結果をFig. 8に示す。この図から、単位板厚当たりの生成速度は切断処理速度に応じて増加し、単位板厚、単位切断長当たりの生成量も同様の傾向が認められる。

4. YAGレーザーによる水中切断時の二次生成物回収処理系の特性試験

水中YAGレーザー切断における二次生成物を回収するため、排気回収処理系と排水回収処理系で構成する試験設備を製作した。これをFig. 2に示す。これら処理系の特性を把握することを目的に試験を行った。

試験方法および試験結果を以下に示す。

4.1 試験方法

(1) 試験装置

試験装置は、2.1(1)のほか以下のものを用いた。

①排気回収処理系

- ・粗粒子プレダスタ : 電気集じん装置(集じん板面積:5.2m²、電極間隔:10mm)
- ・微粒子フィルタ : HEPAフィルタ

②排水回収処理系

- ・粗フィルタ : ガラス繊維製
- ・微粒子フィルタ : ポリエーテルサルフォーン製

(2) 試験条件

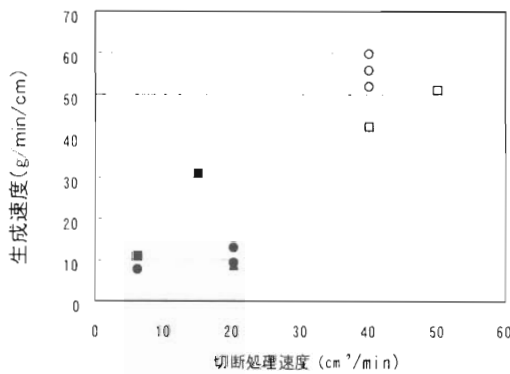
二次生成物の発生量の多い100% O₂をアシストガスとし、下記の切断条件で試験した。

- ・供試材 : 板厚 20 mm の SUS304
- ・切断位置 : 水深約 0.3 m の 水中
- ・切断姿勢 : 水平横向姿勢
- ・アシストガス : 100% O₂
- ・レーザー出力 : 3 kW
- ・切断速度 : 200 mm/min

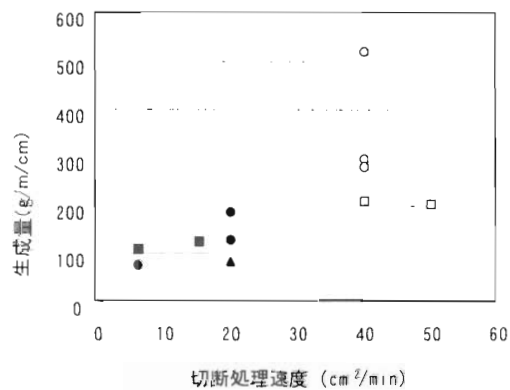
4.2 試験結果

(1) 排気回収処理系

① Fig. 9 に、電気集じん装置 (Electrostatic Precipitator: EP) の諸特性と累積ダスト負荷 (集じん板単位面積当たりのダスト量) の関係を示す。EPの荷電電圧を7kVに設定して開始したが、ダスト負荷約10g/m²付近から放電極の先端付近と対向する集塵極にダストの付着が集中し、電極間隔が狭くなってスパーク電圧が低下し、荷電状態が徐々に悪化した。このため、荷電電圧を3.8～4.2kVに下げた結果、捕集効率は、98～99%から93.7%



(a) 生成速度と切断処理速度の関係



(b) 生成量と切断処理速度の関係

記 事

- ・生成速度 (g/min/cm) : 生成量 (g) / 切断時間 (min) / 板厚 (cm)
- ・生成量 (g/m/cm) : 生成量 (g) / 切断長 (mm) / 板厚 (cm)
- ・切断環境 : 気中および水中 (水深約 0.3m)
- ・板 厚 : 0.6～4 (cm)
- ・切断速度 : 50～250 (mm/min)
- 水中, SUS304, 酸素
- 水中, SUS304, 模擬空気
- ▲ 水中, SS400, 模擬空気
- 気中, SUS304, 酸素
- 気中, SUS304, 模擬空気

Fig. 8 Relation between cutting process speed and sold emission

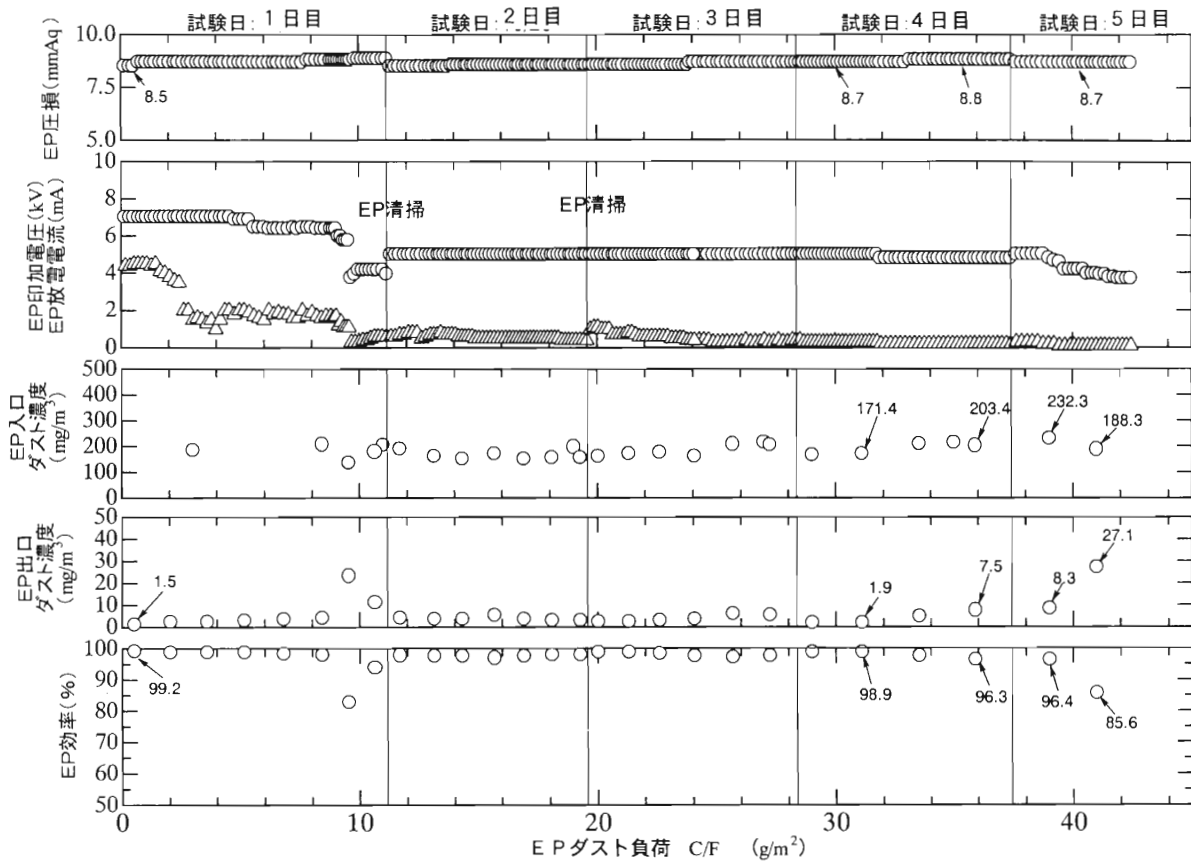


Fig. 9 Relation between EP dust charge and EP conditions

に低下した。

- ②電極に付着したダストをエア吹付けで除去し、スパーク電圧の降下要因である放電極近傍のダストの付着集中を避けるため、荷電電圧を7kVから5kVに下げて試験した結果、荷電の状況が安定し、捕集効率も97～98%に回復した。

- ③以上からEPの寿命、すなわち安定した集じん性能を維持できる限界ダスト負荷は、5kVの荷電条件で約18g/m²であり、このダスト負荷を目安にダストを除去する必要があることがわかった。

なお、EPの圧力損失 ΔP は6時間の連続使用後でも9mmAq程度(運転流量2.9m³/min)であり、メンテナンス無しで長期間供用できることを確認した。

- ④ Fig. 10に、HEPAフィルタの諸特性とダスト負荷(フィルタ単位面積当たりのダスト量)の関係を示す。捕集効率は試験中99.97%以

上の高い効率を維持した。総切断長78.3m(板厚20mm)を切断した後のHEPAフィルタの圧力損失 ΔP は48mmAqで、初期圧力損失20.5mmAqからの増分は27.5mmAqであった。

使用限界圧力損失は供試フィルタの仕様から50.8mmAqであり、YAGレーザ切断時におけるHEPAフィルタの限界ダスト負荷は約3.5g/m²となる。

(2) 排水回収処理系

粗粒子フィルタとしてガラス繊維製の孔径1 μ mのフィルタおよび微粒子フィルタとしてポリエーテルサルフォン製の孔径0.45 μ mのフィルタから構成する回収系に切断液を長時間循環させ、フィルタの経時特性を調査した。

①水質

粗粒子フィルタ入口水の浮遊物質濃度は切断時間と共に増加し、109min後には28mg/

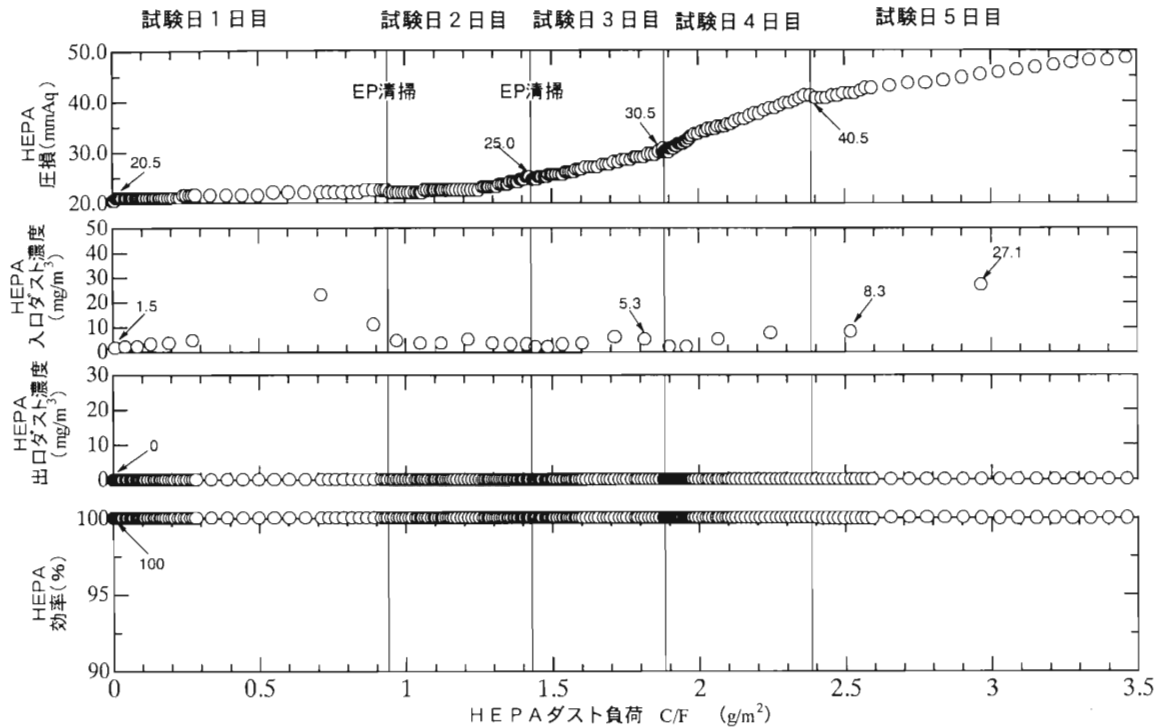


Fig. 10 Relation between HEPA filter dust charge and HEPA filter conditions

dm³に達した。濁度も同様に9.4NTUまで増加し、透視度も14cmに低下した。

フィルタ出口の浮遊物質濃度は、粗粒子および微粒子フィルタとも測定器検出限界の1mg/dm³以下であり、粗粒子フィルタのフィルタ効率は95%以上で非常に良い結果が得られた。また、フィルタ出口の濁度は粗粒子および微粒子フィルタとも0.22～0.32NTU、透視度も全て100cm以上であり、粗粒子フィルタのみで十分清澄な水が得られることを確認した。

②フィルタ寿命

フィルタの差圧は、微粒子フィルタには上昇が認められず、粗粒子フィルタに顕著な上昇が確認された。粗粒子フィルタの差圧寿命を0.2MPaとした場合、浮遊物負荷は過去の結果から140g/m²と予測した*。しかし、本試験において、0.2MPaに到達したときの浮遊物負荷は、実測値で32g/m²となり、粗粒

*過去の成果では、透過流速6.7m/hにおける浮遊物負荷が19g/m²であった。本試験の浮遊物負荷を予測するため、本試験の透過流速0.91m/hから算出すると、19×6.7/0.91≒140g/m²となる。

子フィルタの寿命は予測値を大幅に下まわり1/4となった。

③水中浮遊物の粒径分布

平均粒径は、これまでに行った短時間の切断試験では9μm弱であったが、長時間にわたる切断試験では120μm以上のものが大部分を占め、通液時間の経過とともに粗大化する傾向があった。

また、粒径分布に小径粒子の増加傾向が認められなかったことから、フィルタを透過した切断液に細径粒子が増えることはないと考えられる。

④水中浮遊物の発生量

粗粒子フィルタ入口部の浮遊物濃度は、切断槽内の切断液が十分に攪拌され、かつ平均化されているものとするれば、単位板厚、単位切断長当たりの水中浮遊物の発生量は、平均して4.5g/m/cmであった。

4.3回収処理系の考察

(1)排気処理系

EPのダスト除去およびHEPAフィルタの長

寿命化について検討した。EPの電極に付着したダストの除去法として、槌打法(乾式EPのダスト除去)、振動法(乾式EPのダスト除去)、エアブロー法(トンネルEPのダスト除去法)、水洗法(スプレインズルによる噴霧または超音波除去、湿式EPのダスト除去法)がある。

サブミクロン粒子が大半を占める微細なダストの除去、電極全面の均一なクリーニングの必要条件から水洗法が適切と考えられる。ただし、本法は水洗浄後、電極及びに碍子を乾燥させる必要があるため、EPを2機並列に設置し、切り替えて運用する必要がある。

HEPAフィルタの圧力損失は単位フィルタ面積当たり付着するダスト量で決まり、SUS304を切断した場合、Fig. 10に示すように約3.5g/m²のダスト負荷で使用限界圧力損失に到達した。

HEPAフィルタの寿命を延ばすためには、前段のEPの容積を増加することによって、捕集効率を高めることが極めて有効である。すなわち、EP出口ダストの粒径分布が同じと仮定すると、ダスト濃度を今回の約5mg/m³の1/5に低減させると、HEPAフィルタの寿命を約5倍の寿命にすることが期待できる。

(2) 排水処理系

粗粒子フィルタの寿命は予想値の1/4であった。この理由として、以下のことがあげられる。

①粗粒子フィルタは、フィルタ内部で浮遊物を捕集するデプスタイプで、フィルタ表面のみで捕集するスクリーンタイプに比べ高捕集率と長寿命が特長である。

しかし、今回のような長時間の通液では、浮遊物の粒径が大きいため、フィルタ内部に侵入できず、デプスタイプの特長が活されなかった。

②このため、浮遊物はフィルタ表面で捕捉され、デプスタイプの利点が得られず、この結果差圧上昇が予想より速くなった。

<注記>:デプスタイプ(depth filter)は、粒子を表面近傍のみで捕捉するスクリーンタイプに対し、表面近傍に加えて内部の繊維でも

捕捉できるため、より多くの粒子を捕捉が可能である。

このようなことが一般事象か否かを今後検討する必要はあるが、今回の試験結果から、微粒子フィルタは不要と結論づけられた。

5. 成果および将来に向けた検討

以上の二次生成物の特性試験および回収処理系の長時間特性試験から、以下の成果が得られた。しかし、将来原子炉施設解体作業を行う上で、発生する二次生成物の回収処理システムを構築する際には解決すべき検討課題がある。

5.1 成果

- (1) 高出力YAGレーザーによる厚板材の水中切断試験を実施し、40mm以上の厚板材が切断できることを確認した。
- (2) 二次生成物特性データ取得試験から、気中および水中浮遊物、固形物の粒径分布、生成量等の特性データを得た。
- (3) 粗粒子捕集用EPと微粒子捕集用HEPAフィルタからなる排気系において、EPの経時変化特性を明らかにし、再生使用にあたっての集塵・再生システム案を提案した。また、HEPAフィルタの寿命評価に関する設計データを取得した。
- (4) 粗粒子フィルタ+微粒子フィルタからなる排水処理系において、捕集性能の経時特性を明らかにした。

5.2 検討課題

- (1) 切断技術および二次生成物に関する検討
 - ①二次生成物低減条件の最適化
 - ②適正な水深における切断技術
 - ③各種材料および各種姿勢におけるレーザー切断技術と二次生成物特性の調査
- (2) 二次生成物の性状および回収処理技術に関する検討
 - ①回収処理システム実機対応検討
 - ②ホット試験の実施による放射性物質回収の実証

6. おわりに

本技術開発に関する文献調査では、レーザーのエ

エネルギーを用いた原子力施設廃止措置の二次生成物に関するデータが少なかった。

本試験を通じて、二次生成物の性状や回収処理システムを構築するための情報はかなり明らかになり、将来の実機設計に有用な成果を得た。また、レーザー発生装置の開発が進展し、原子力施設への適用の期待がますます高まってくるものと思われる。

したがって、本試験の成果を活かして実機設計を行うためには、5項に示したような検討課題が残されており、さらに確証等の研究調査を行う必要があるものとする。

参考文献

- 1) 原 邦男 他、“ファイバ導光レーザーによる原子炉解体技術の開発(2)”
デコミッションング技報第21号、2000年3月

訂正のお知らせ

前号発行のデコミッションング技報第22号で誤記がありましたので、お知らせするとともにお詫び致します。

誤	正
3頁、上から17行目および20行目 ICRP 勧告 <u>81</u>	ICRP 勧告 <u>82</u>

RANDEC's Capability

Research Association for Nuclear Facility Decommissioning (RANDEC) plays a key role in establishing overall technology for decommissioning nuclear facilities.

The capability and service of RANDEC are to ;

Implement decommissioning research, development and investigation.



Provide technical information on decommissioning.



Train for decommissioning.



Inform and enlighten the public about decommissioning.

© デコミッションング技報 第23号

発行日 : 平成13年3月30日

編集・発行者 : 財団法人 原子力研究バックエンド
推進センター
デコミッションング技術本部

〒319-1111 茨城県那珂郡東海村舟石川821-100
Tel. 029-283-3010, 3011
Fax. 029-287-0022

ホームページ : <http://www1.sphere.ne.jp/randec/>

E-mail : randec@olive.ocn.ne.jp