

# デコミッショニング技報

Journal of **RANDEC**

No. **55**  
2017

## 巻頭言

東海再処理施設の廃止措置に向けて

## 技術報告

遠隔操作による切断・除染作業へのレーザー技術の適用

原子力施設の廃止措置における大規模点群・複合現実感技術の可能性

## 研究報告

キャピラリー電気泳動法を用いた放射性試料に対する簡易迅速分析法の開発

アルカリ活性材料固型化材SIAL®の特性試験

人形峠環境技術センターのウラン測定と関連技術の現状

# RANDEC

**RANDECは、原子力バックエンドの確立に向けた技術の調査・研究及び普及・啓蒙活動等の下記の公益目的事業を行っています。**

国内の研究施設等廃棄物の集荷・保管・処理事業の確立

デコミッショニング及び放射性廃棄物処理処分に係る調査・研究

福島県及び関東一円の環境回復に関する技術開発

原子力バックエンドに係わる研究成果の普及

これらの事業を通し、わが国の科学技術及びエネルギー事業の振興に寄与しています。



# デコミッショニング技報

第55号 (2017年3月)

## 目次

### 巻頭言

|                        |       |
|------------------------|-------|
| 東海再処理施設の廃止措置に向けて ..... | 1     |
|                        | 山本 徳洋 |

### 技術報告

|                                |           |
|--------------------------------|-----------|
| 遠隔操作による切断・除染作業へのレーザ技術の適用 ..... | 2         |
|                                | 三井 崇、大脇 桂 |

|                                       |       |
|---------------------------------------|-------|
| 原子力施設の廃止措置における大規模点群・複合現実感技術の可能性 ..... | 8     |
|                                       | 庄司 公明 |

### 研究報告

|  |                        |
|--|------------------------|
| キャピラリー電気泳動法を用いた放射性試料に対する簡易迅速分析法の開発 ..... | 22                     |
|  | 原賀 智子、佐藤 義行、亀尾 裕、齋藤 伸吾 |

|                              |        |
|------------------------------|--------|
| アルカリ活性材料固型化材SIAL®の特性試験 ..... | 28     |
|                              | 小野崎 公宏 |

|                                 |                                   |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| 人形峠環境技術センターのウラン測定と関連技術の現状 ..... | 36                                |
|                                 | 石森 有、横山 薫、早川 友也、秦 はるひ、迫田 晃弘、長沼 政喜 |

# Journal of RANDEC

No. 55 Mar. 2017

## CONTENTS

### Technical Report

|  |   |
|--|---|
| Applicability of Laser Cutting and Decontamination Technologies<br>for Remote Decommissioning Works .....                    | 2 |
| Takashi MITSUI and Katsura OOWAKI  |   |
| Possibility of Applying Large-Scale Point Cloud / Mixed Reality<br>Technology in Decommissioning of Nuclear Facilities ..... | 8 |
| Kimiaki SHOJI  |   |

### Research Report

|   |    |
|---|----|
| Development of Simple and Rapid Analytical Method for Radioactive Samples<br>by Capillary Electrophoresis ..... | 22 |
| Tomoko HARAGA, Yoshiyuki SATO, Yutaka KAMEO and Shingo SAITO  |    |
| Characteristic Test of “SIAL <sup>®</sup> ” of Alkali-Activated Materials .....                                 | 28 |
| Kimihiro ONOZAKI  |    |
| Current Status of Uranium Measurements and Their Related Techniques at JAEA Ningyo-toge .....                   | 36 |
| Yuu ISHIMORI, Kaoru YOKOYAMA, Tomoya HAYAKAWA<br>Haruhi HATA, Akihiro SAKODA and Masaki NAGANUMA                |    |

### **Applicability of Laser Cutting and Decontamination Technologies for Remote Decommissioning Works**

Takashi MITSUI and Katsura OOWAKI  
J. RANDEC, No. 55 (Mar. 2017), page 2~7, 8 Figures

Recently, various cutting and decontamination technologies for remote decommissioning works have been developed and applied. One of the technologies is a laser technology which has good capabilities for such kinds of works. Remote controllability is one of advantages of a laser system. Because in general the laser head is light and compact compared to the other types of cutting and decontamination tools, the head can be easily handled by remote operation equipment such as manipulators, and thus it gives effective and flexible remote works. As the other examples of the advantages, there are no parts of a laser system necessary to be replaced so frequently like blades of mechanical methods and also, it does not generate secondary waste so much like contaminated water generated from waterjet methods. This paper provides outline of the remote laser cutting and decontamination technologies and how those technologies are effective in various kinds of remote decommissioning works.

### **Possibility of Applying Large-Scale Point Cloud / Mixed Reality Technology in Decommissioning of Nuclear Facilities**

Kimiaki SHOJI  
J. RANDEC, No. 55 (Mar. 2017), page 8~21, 25 Figures, 1 Table

After the accident at Tokyo Electric Company's Fukushima No.1 nuclear power plant, decommissioning projects of nuclear power plants exceeding 40 years since the start of operation began to move in full swing. And four nuclear power plants have already been under decommissioning. Several decommissioning engineering systems (ES) have been developed according to these decommissioning projects. Various problems were clarified and many findings were obtained by these efforts. On the other, advanced information technologies and products such as three-dimensional CAD, CG, 3D laser measurement, computer aided engineering (CAE) and mixed reality (MR) are progressing rapidly. By combining these technologies and products, it has become possible not

only to enhance the usefulness of existing 3D CAD data but also to enable high-level digital study that combines reality and virtual models. Furthermore, it can be applied to a wide range of fields such as demolition simulation for dismantling works of nuclear facilities, which is expected to increase in future, human resource development and skill transfer. In this paper, focusing on a video see-through method capable of displaying a virtual object at a correct position of a real image accurately reflecting the positional relationship between the real image and the virtual object, we introduce items that should contribute to the feasibility and usefulness of application to decommissioning of nuclear facilities.

### **Development of Simple and Rapid Analytical Method for Radioactive Samples by Capillary Electrophoresis**

Tomoko HARAGA, Yoshiyuki SATO,  
Yutaka KAMEO and Shingo SAITO  
J. RANDEC, No. 55 (Mar. 2017), page 22~27, 6 Figures

For safe disposal of radioactive wastes generated from decommissioning of nuclear facilities, it is necessary to collect radioactivity concentration data for many waste samples and radionuclides. A simple and rapid analytical method is required for reduction of operating time and radiation exposure during analytical operations, especially for highly contaminated radioactive samples. In this report, we focused on capillary electrophoresis with the advantage of low-consumption of sample solution and short analysis time. We have developed a sensitive and selective analytical method using fluorescent probes for actinides in radioactive waste samples by capillary electrophoresis. This method has a great potential for highly contaminated radioactive samples.

### **Characteristic Test of "SIAL<sup>®</sup>" of Alkali-Activated Materials**

Kimihiro ONOZAKI  
J. RANDEC, No. 55 (Mar. 2017), page 28~35, 13 Figures, 8 Tables

At the present time, liquid or granular low-level

radioactive waste has to be treated and disposed after solidifying into a waste body container in Japan. As a solidification method, a cementation method has been adopted in many cases from the viewpoint of easy handling and so on. However, it has been confirmed that the elution of radioactive elements such as cesium is large in a cement solidified body. Further, in the radioactive waste containing sulfates or borates, there is a concern of a decrease in strength due to the occurrence of chemical corrosion or coagulation inhibition in the solidification with cement. As a solution to the above problems, Fuji Electric Co., Ltd. has been looking into a solidifying material with an alkali-activated material (Geopolymer) as a base material and has been promoting research and development related to SIAL<sup>®</sup>, a geopolymer solidifying material developed by Amec Foster Wheeler which has resulted in actual use in plants. This report describes a summary of SIAL<sup>®</sup> and test results by using simulated waste.

#### **Current Status of Uranium Measurements and Their Related Techniques at JAEA Ningyo-toge**

Yuu ISHIMORI, Kaoru YOKOYAMA,

Tomoya HAYAKAWA, Haruhi HATA,

Akihiro SAKODA and Masaki NAGANUMA

J. RANDEC, No. 55 (Mar. 2017), page 36 ~ 44, 10

Figures, 1 Table

This paper gives an outline of the current status of

uranium measurements and their related techniques at the Ningyo-toge Environmental Engineering Center of Japan Atomic Energy Agency. The JAWAS-N and the Q<sup>2</sup> system have been adopted to evaluate uranium contents in the wastes. About 10 g or more of uranium in a 200 ℓ drum can be evaluated by these systems. The equivalent model developed to correct the evaluation results with Q<sup>2</sup> system is not available to less than dozens of grams of uranium in a 200 ℓ drum. The paper illustrates the advantage of use of the improved equivalent model which evaluates uranium content from full energy peak of 1001 keV and its Compton spectrum in order to correct the inhomogeneous distribution of uranium in measuring objects. The use of model achieved the limit of uranium quantitative determination under one tenth of those of previous evaluation methods. To determine U-235, it was demonstrated that the shielding factor,  $X_{geometry}$  for evaluation of 1001 keV gamma-ray is also possible to use for evaluation of 186 keV gamma-ray. The measurement systems adopting the model have been introduced to other nuclear operators in Japan. In addition, it is also examined to use for clearance. As a related technique, feasibility studies on machine learning algorithms have been performed to classify the waste drums depending on their gamma-ray spectrum.

## 東海再処理施設の廃止措置に向けて



国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構  
核燃料サイクル工学研究所所長  
山本 徳洋

東海再処理施設は我が国初の再処理工場として建設され、1977年にホット試験を開始して以来、1,140 tに及ぶBWRやPWR等の使用済燃料の再処理を行っており、これらの再処理を通して再処理技術の国内定着に先導的役割を果たすとともに、培ってきた様々な技術や経験は六ヶ所再処理工場へ技術移転してきた。世界的には、既に廃止措置が進められているフランスのUP2-400再処理プラントと同様の第二世代の再処理工場と位置付けられ、既に国内に第三世代の六ヶ所再処理工場が立ち上がってきていることや1970年代に建設された既存プラントをフルスケールで新規規制基準へ適合させることが費用対効果の観点から合理的では無いことから、平成26年9月に東海再処理施設を廃止措置に向かわせることを公表させて頂いたところである。

廃止措置を進めるうえで、環境及び従事者の安全を守ること、廃止措置コストを可能な限り下げること、廃止措置を通して発生する廃棄物の量を可能な限り少なく抑えること等は、原子炉施設や再処理施設の廃止措置を進めるに当たって共通的な大原則であるが、再処理施設の廃止措置は原子炉施設の廃止措置と比べ以下のような技術的特徴を有する。

- ・放射化は問題とならないが、多数の施設に収納されている再処理工程内機器の内面は基本的に汚染している。
- ・個々の機器内面の汚染源の種類は、再処理プロセス上の位置に応じて異なるものの推定可能であるが、汚染レベルは除染の程度に大きく依存するので、放射化現象と異なって計算による評価が難しく、過去の改造工事時の実績や実測に基づく評価が必要になると見込まれる。
- ・汚染の種類は、 $\beta$   $\gamma$ 核種 (Cs, Sr/Y, Ba, Ru, I等) のみならず、 $\alpha$ 核種 (U, Pu等) も主要な汚染源であり、Amのビルドアップ現象にも注意を要する。

これらを踏まえた上で、再処理施設の廃止措置は国内初の取組みであるとともに、当面国内では東海再処理施設に限られることから、当該施設の廃止措置の機会を利用して、同様の技術的特徴を有した核燃料施設の廃止措置に係るソフト・ハード両面の技術開発や技術の体系化、また、将来プラントへの技術のフィードバックという観点からの破壊検査等を通じた技術データの蓄積等も考慮しておく必要がある。さらには、世代を跨りつつ進めていくことになるであろう非常に長期にわたる再処理施設の廃止措置に対して、安定的な予算確保の仕組みや投入資源に対する進捗管理の在り方、廃棄物の処分体化処理の進め方、合理的な安全規制の在り方等々、多岐にわたる克服すべき課題も有している。

当面は、海外での先行事例や国内での原子炉や試験研究施設の廃止措置事例等も参考に、廃止措置計画を取纏め、認可を取得することや操業廃棄物の着実な処理、施設・設備の除染等を優先していくことになるが、廃止措置技術や再処理技術の更なる向上に向け、我が国初の再処理プラントの廃止措置の機会をいかに最大限に活用していくか、という観点が極めて重要になると考えている。様々な立場で活躍されている多くの関係者の皆様の御協力や積極的な参画を期待したい。

## 遠隔操作による切断・除染作業へのレーザー技術の適用

三井 崇\*、大脇 桂\*\*

### *Applicability of Laser Cutting and Decontamination Technologies for Remote Decommissioning Works*

Takashi MITSUI\* and Katsura OOWAKI\*\*

遠隔操作が要求される高線量環境下での切断・除染技術は多様化しており、近年様々な技術が開発され、適用されている。その中でもレーザーを用いた切断・除染技術は、この種の用途に高い適応性を示す技術の一つとして注目されている。レーザーを用いる利点として、まず遠隔操作の容易性が挙げられる。一般にレーザー照射ヘッド部は、他の切断・除染ツールと比較して軽量・コンパクトであることから、マニピュレータなどの遠隔操作装置にて比較的容易に取扱うことが可能である。そのため、効率的かつ柔軟に遠隔作業を行うことが可能となる。また、レーザーは機械式ツールにおける切断刃の交換のように頻繁な消耗品の交換がなく、ウォータージェットツールのように大量の二次廃棄物を生じることもない。これらの点についても、他の技術と比較して優位な点といえる。本稿では、高線量環境下で使用される遠隔作業用のレーザー切断・除染システムに関する概要とその有用性を紹介する。

Recently, various cutting and decontamination technologies for remote decommissioning works have been developed and applied. One of the technologies is a laser technology which has good capabilities for such kinds of works. Remote controllability is one of advantages of a laser system. Because in general the laser head is light and compact compared to the other types of cutting and decontamination tools, the head can be easily handled by remote operation equipment such as manipulators, and thus it gives effective and flexible remote works. As the other examples of the advantages, there are no parts of a laser system necessary to be replaced so frequently like blades of mechanical methods and also, it does not generate secondary waste so much like contaminated water generated from waterjet methods. This paper provides outline of the remote laser cutting and decontamination technologies and how those technologies are effective in various kinds of remote decommissioning works.

#### 1. はじめに

近年、ファイバーレーザーの技術進歩による高出力化やビーム品質の安定化に伴い、レーザー加工技術は広範囲の産業界に適用されるようになった。原子力の除染・解体事業における様々な遠隔切断・

除染作業に用いられるようになったこともその一例である。この主な理由は、レーザーが従来の機械式切断・除染、あるいはウォータージェット等、他の代替技術と比べて主に以下の利点を有することが挙げられる<sup>1)</sup>。

\* : ㈱IHI (IHI Corporation)

\*\* : ㈱IHI検査計測 (IHI Inspection & Instrumentation Co., Ltd.)

### (1) 容易な遠隔操作

機械式の場合、マニピュレータ等の遠隔操作装置は、切断や除染作業により対象物から受ける反力を十分許容できるだけの耐性が要求される。一方、レーザーでは、対象物に対して非接触で作業を行うことから、それらの作業による反力は発生しない。そのため、遠隔操作装置をより小型に、より低い取扱荷重に抑えることができる。加えて、遠隔操作装置によりハンドリングされるレーザー照射ヘッドは、一般に機械式ツールなどと比べて軽量・コンパクトである。これらの特徴によって、遠隔操作装置による柔軟なハンドリングや目的とする対象物への容易なアクセス、遠隔操作時の広範囲な視野確保などが可能となる。このように、様々な点でレーザー技術は、遠隔操作を容易に実施する上での優位性を持ち合わせている。

### (2) 高効率作業

遠隔操作による金属の切断作業を行う上でよく悩まされるのは、厚手の鋼板や複雑な形状の構造物の切断である。このような切断作業の場合、切断刃を用いた機械式切断では、頻繁な刃物の交換や切断方向の変更を余儀なくされ、結果的に切断作業に時間を要する。一方、レーザー切断の場合は、刃物等消耗品の頻繁な交換が不要であること、また、多少のスタンドオフの差を十分吸収できるだけの切断能力を有することから、機械式切断等と比べて短時間で高効率な切断作業が可能である。

遠隔除染作業においては、除染対象や配置、周囲環境等に応じて適した除染方式を選定することとなるが、レーザーを用いた除染作業は、主に複雑な形状の金属表面に適しているといえる。非接触での作業となるため、上記切断作業と同様に保守頻度が少なく、頻繁な手順の変更が不要であるため、複雑な形状の金属表面の除染でも効率的に遠隔作業を実施することができる。

### (3) 二次廃棄物発生量低減

二次廃棄物の低減は、切断作業においても除染作業においても、方式の選定に際し考慮すべき重要な点である。ウォータージェットによる切断・除染作業やブラスト材を用いた除染作業では、大量の二次廃棄物が発生することが知られている。

レーザーの場合は、ヒュームのほか、切断作業ではスパッタ、ドロスなども発生するものの、類似技術であるプラズマアーク切断等と比較してもその量は少量であり、二次廃棄物の回収や処理も比較的容易である。

## 2. 遠隔レーザー切断システム

2008年～2013年の間に、ホットセル内の高放射線環境に適用可能な、ファイバーレーザーを用いた遠隔レーザー切断システムの開発が行われた<sup>2)</sup>。高放射線環境下における様々な遠隔操作に適用可能なシステムとして最適化するために、安全性、耐久性、容易性、柔軟性、効率性等をキーワードに開発が行われた。本システムは、既に実際のホットセルにて高度に汚染された種々の廃棄物解体に適用されているものである。

Fig. 1に遠隔レーザー切断システムのシステム構成を示す。本システムは、主にレーザー照射ヘッド、光ファイバーケーブル、レーザー発振器、冷却水ユニットとアシストガス供給ユニットで構成される。このうち高放射線環境下に設置されるレーザー照射ヘッド、光ファイバーケーブルや冷却水ホースなどは、1 MGyの集積線量に対する耐放射線性を有する。レーザー切断時のアシストガスは、主に圧縮空気を使い、厚鋼板の切断の際には必要に応じて酸素も供給可能なシステムとしている。また、非常時の消火用として、窒素供給系統も配備している。

Fig. 2に本システムのレーザー照射ヘッドの外観を示す。本システムのレーザー照射ヘッドは、遠隔操作仕様とすべく、既存の照射ヘッドから様々な工夫が施された。まず、「軽量・コンパクト」を基本設計思想として、従来構造から不要範囲の削除や材質の見直し等を行った。ノズル先端部付近は可能な限りスリム化することによって、先端部周辺視野の拡大及び位置決め作業の向上を図った。また、光ファイバーケーブルは放射線劣化により定期的な交換が必要となるため、マスタースレーブマニピュレータを用いた容易な遠隔交換作業が行えるように、独自のコネクタを開発した。レーザー切断作業を行う遠隔操作装置（パワーマニピュレータ）との取合い部は、複数方向から把持可能

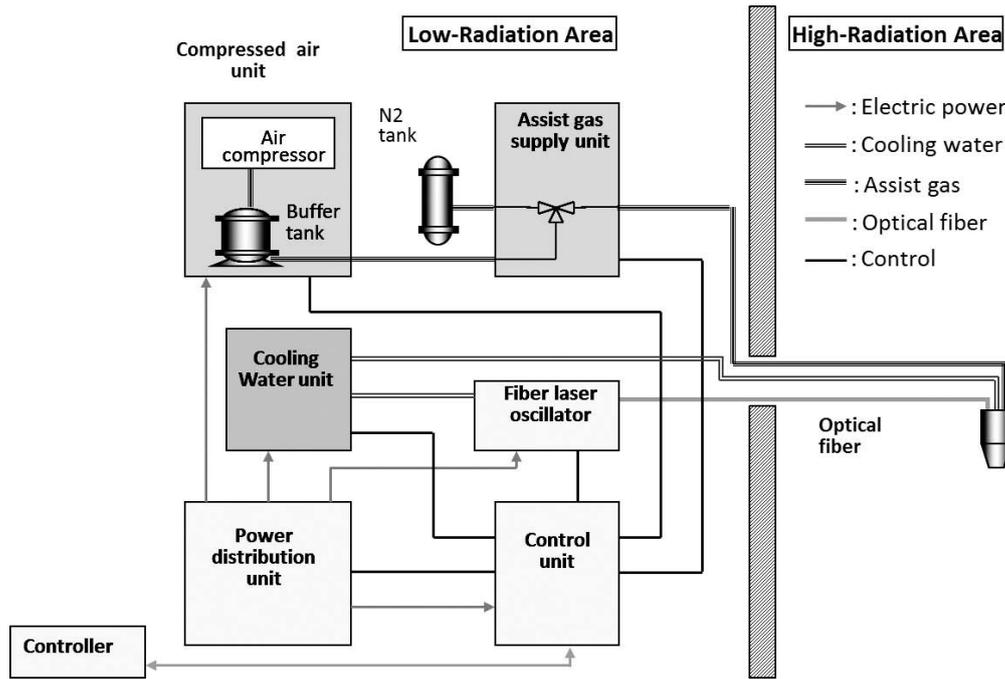


Fig. 1 Overview of remote laser cutting system

な構造とし、安全に切断作業を行うため、レーザ照射ヘッドの確実な把持状態を検知するスイッチを設けた。さらに、レーザ照射ヘッドに敷設されるケーブル・ホース類に関しては、レーザ照射ヘッドのハンドリングにおいて邪魔にならないよう、ヘッド上の整線状態を最適化した。

このようなレーザ照射ヘッドに対する様々なカスタマイズによって、安全かつ容易で自由度の高い遠隔切断作業及び遠隔保守作業を実現可能とした。

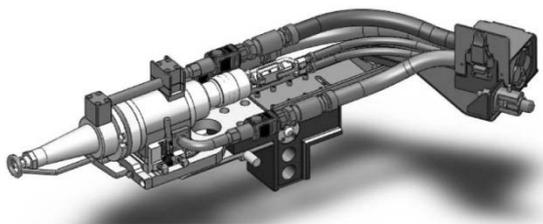


Fig. 2 Laser cutting head

本遠隔レーザ切断システムでは、レーザ照射ヘッド周りの切断対象物以外の構造物を保護するため、独自に開発された安全インターロックシステムを採用している。この安全インターロックシステムは、Fig. 3に示すようにレーザ切断運転時

におけるレーザ照射範囲と保護対象物との干渉を、遠隔操作装置の位置情報を基に3D-CAD上の仮想空間にてリアルタイムに監視するものである。レーザ出力と切断速度に応じた所定のレーザ照射領域内(非安全領域)に保護対象物が入ると、レーザ照射を抑制するインターロックを作動させ、レーザ光による保護対象物の損傷防止を図っている。

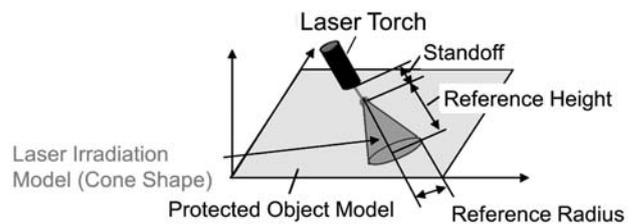


Fig. 3 Concept of safety interlock system for laser irradiation

最高出力10 kWの高出力ファイバーレーザの採用により、本遠隔レーザ切断システムでは様々な金属材料を高速かつスムーズに切断することが可能である。例えば、板厚10 mmのステンレス鋼板は、500 mm/min以上の高速で切断が可能であり、また、機械式切断では容易でない板厚100 mmのステンレス鋼やインコネル管の二重管なども1パス

で容易に切断することが可能である。Fig. 4に本システムによる金属切断の一例を示す。



100 mm thickness stainless steel plate  
(Laser power: 9 kW, Cutting speed: 30 mm/min)



Double Inconel pipe (Outer pipe diameter: 84 mm, t = 5 mm)  
(Laser power: 8 kW, Cutting speed: 150 mm/min)

Fig. 4 Examples of remote laser cutting

### 3. 遠隔レーザー除染システム

遠隔レーザー除染システムは、作業員による直接作業が困難な高線量エリアにて、主に汚染された金属表面を遠隔作業により除染することを主目的とするものである。既存のレーザークリーニング装置を基に、上述の遠隔レーザー切断システムと同様に高効率かつ遠隔操作性の優れたシステムとすべく開発を行っている。レーザークリーニングは、アブレーションと呼ばれるレーザー照射による物質の蒸散を利用する加工プロセスであり、適正なレーザーパラメータを選択することで、母材に損傷を与えることなく安全に汚染層のみを除去することが可能な技術である<sup>3)</sup>。

本システムは、Fig. 5に示すとおり主にレーザー照射装置と除去物回収装置にて構成される。レーザー照射ヘッドと、そこに接続されるケーブル、

ホース以外の主要システム構成部は、可能な限り低線量エリアに配置することを基本思想としている。レーザー照射ヘッドは、Fig. 6に示すように主にレーザー照射を行うための光学ユニットと除去物回収のためのフード及びホース類にて構成される。また、遠隔操作の容易性を考慮し、軽量・コンパクトな構造に加えて、遠隔操作を行う上で指標となる各種センサを搭載している。本システムによる遠隔除染作業では、レーザー照射ヘッドに装着されたフードを、ターゲット表面へ適切な角度と押付け力にて設置し、それらを維持しながら平行に移動することで、汚染表面のレーザークリーニングとフード内の除去物回収を行う。遠隔操作装置の可動範囲の中でターゲット表面の一定のエリアを除染し、それが終わると遠隔操作装置を移動させ、同様に次のエリアの除染を行っていく。

本システムでは、(株)IHI検査計測によって開発されたファイバーレーザーを用いた既存のレーザークリーニング装置「Laserclear<sup>®</sup>」を採用している (Fig. 7)。Laserclear<sup>®</sup>は、Fig. 8に示すような塗膜剥離や錆除去等、様々な金属表面のクリーニングに用いられる装置であり、自動車産業、航空産業、半導体等様々な産業分野に適用されている。Laserclear<sup>®</sup>は、他のレーザークリーニング装置と比較してレーザー照射ヘッドが軽量・コンパクトであり、また、50 W程度の消費電力にて100 mm以上のレーザー照射幅を有し、容易かつ効率的にクリーニング作業が行うことができる。さらに、空冷方式を採用しているため、冷却水設備等も不要である。これらは、遠隔作業を行う上で有利な点であり、遠隔レーザー除染作業に適した装置であるといえる。

### 4. さらなる改善に向けて

ファイバーレーザーの技術進歩は目覚ましく、多様化、長寿命化、高出力化やビーム品質の安定化は日進月歩である。また、近年、このようなファイバーレーザーの汎用化も進み、比較的容易に利用することができるようになった。マニピュレータ等を用いた遠隔作業は、人手による直接作業と比べて圧倒的にやり難いものであり、どんなに優れた性能を持つ装置を用いても、人手のように正確

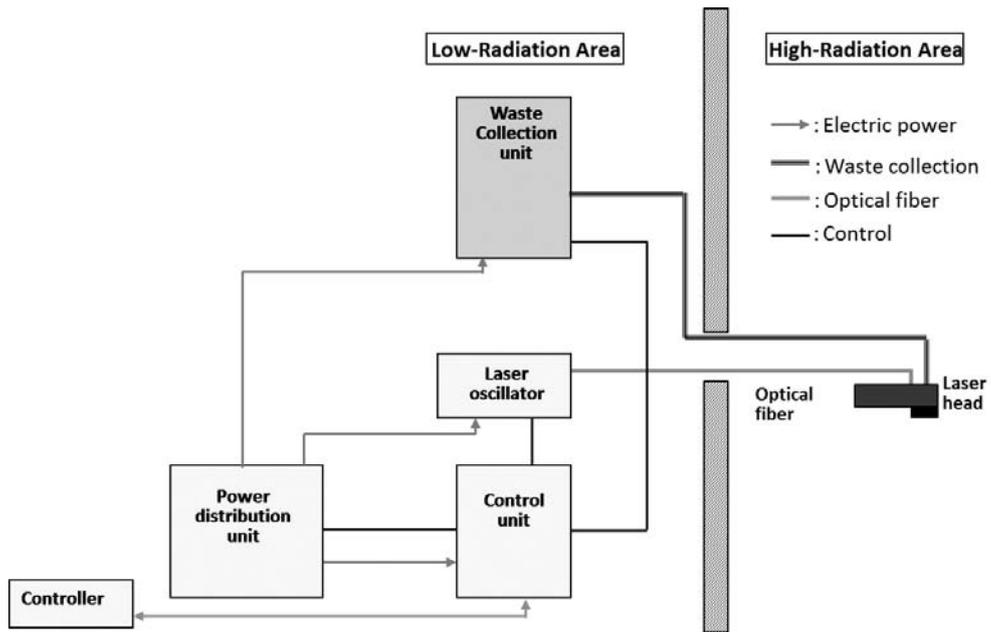


Fig. 5 Overview of remote laser decontamination system

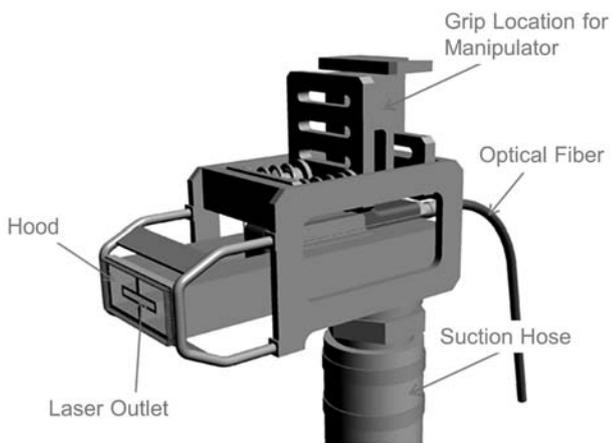
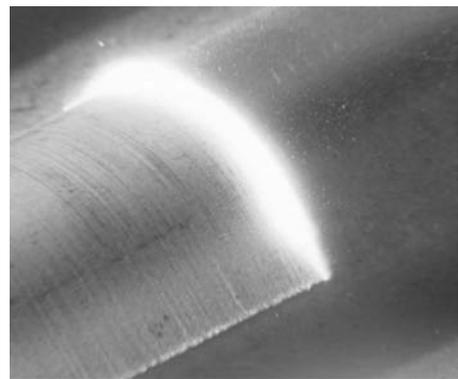


Fig. 6 Laser head for remote laser decontamination system



<Paint stripping>



<Rust stripping>

Fig. 8 Metal surface stripping using Laserclear®

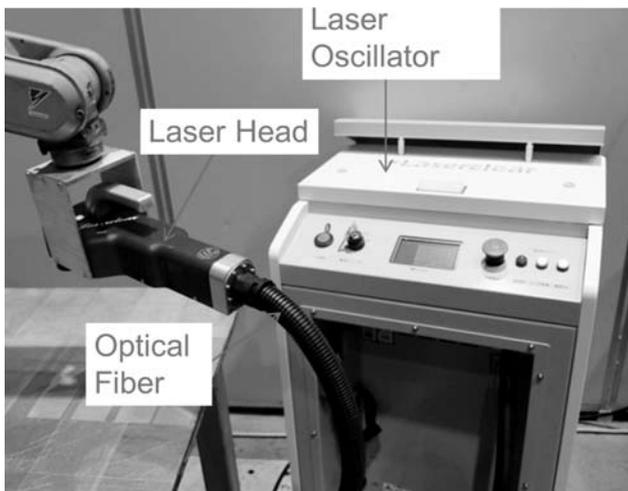


Fig. 7 Laserclear®

で繊細な作業を行うことは容易ではない。したがって、遠隔作業では、一般に直接作業に比べてはるかにラフな操作でも、目的とする性能と作業効率を達成できることが望ましい。高出力レーザーの導入は、このような遠隔作業のやり難さを解消するための一つの有効な手段であるといえる。

遠隔操作によるレーザー切断作業において、作業効率向上のキーとなるのが、切断速度とスタンドオフである。高出力レーザーは、高い切断速度を、また、長いスタンドオフでの切断作業を可能とする。前述の厚鋼板や大口径配管の切断作業も、より高出力のレーザーを適用することでさらに高速で切断作業を行うことができる。また、切断作業においてスタンドオフを長く確保できると、切断時に切断対象物の形状による影響を受け難く、レーザー照射ヘッドを頻繁に方向変換することなく遠隔切断作業を実施することができる。

遠隔レーザー除染に関しても、同様により高出力レーザーの採用は有効な作業効率の改善手段である。前述のLaserclear<sup>®</sup>は、「軽量かつコンパクト」のコンセプトのもとで設計されたものであるが、100 mmのレーザー照射幅は、非常に広範囲な除染対象に対する除染作業としては、十分な値とはいえない場合もある。そこで「軽量・コンパクト」の基本思想を維持したまま、既存装置より高出力のレーザーを適用し、レーザー照射幅を拡大することによって、広範囲な除染対象に対しても除染作業を効率的に実施することが可能となる。一方で、レーザー照射幅が拡大するほど除染ヘッドは大型になるため、遠隔操作性と除去物の回収性能の維持・向上にも配慮しなければならない。これらの

各要素をバランス良く組合せ、全体最適のシステムを構築していく必要がある。

## 5. おわりに

除染・解体事業において、作業員の被ばく低減及び作業負荷低減を図るために、遠隔作業（あるいは半遠隔作業）は、今後一層必要性を増していく。その中で、レーザー技術を用いた遠隔切断・除染法は、非接触・軽量・コンパクト・高効率・低二次廃棄物発生量などの観点から、遠隔作業において優位な点を多く具備し、有用な技術の一つであるといえる。遠隔レーザー切断・除染システムは、今後レーザー技術の急速な進歩に乗じて継続的に改善を重ね、作業効率の向上及び適用範囲の拡大を図ることによって、東京電力福島第一原子力発電所のクリーンアップをはじめとする各種除染・解体事業に適用していく。

## 参考文献

- 1) Hiroshi Kinugawa, Takashi Mitsui, Manabu Kishimoto, et al., IHI Corporation, “Applicability of Laser Cutting and Decontamination Technologies for Remote Decommissioning Work,” WMS Journal, Vol. 1, No.4, 2016.
- 2) Takashi Mitsui, Noriaki Miura, et al., IHI Corporation, “Remote Fiber Laser Cutting System for Dismantling Glass Melter,” Proc. WM2013, Phoenix, USA, Feb. 24-28, 2013.
- 3) 大脇 桂, “金属のドライクリーニング,” 配管技術, 2015. 9.

## 原子力施設の廃止措置における 大規模点群・複合現実感技術の可能性

庄司 公明\*

### *Possibility of Applying Large-Scale Point Cloud / Mixed Reality Technology in Decommissioning of Nuclear Facilities*

Kimiaki SHOJI\*

東京電力福島第一原子力発電所の事故後、運転開始から40年を超える原子力発電プラントの廃止措置が本格的に動き始めた。また、既に4基の原子力発電プラントが廃止措置中である。これまでに廃止措置プロジェクトに応じた幾つかの廃止措置ES (Engineering System) が開発された。これらの取り組みによって、様々な課題が明らかになるとともに多くの知見が得られた。3次元CAD、CG、3次元レーザー計測、CAE (Computer Aided Engineering) やMR (Mixed Reality) など、先進的なIT技術や製品は日進月歩で進歩している。これらの技術や製品を複合的に活用すれば、既存の3次元CADデータの有用性を高めることができるだけでなく、現実と仮想モデルを融合した高度なデジタル検討が可能になる。さらに、今後増加が予想される原子力発電プラントの解体工事のための解体シミュレーションや人材育成、技能伝承など幅広い分野への活用も期待できる。本稿では、現実映像と仮想オブジェクトの前後位置関係を正確に反映した実映像の正しい位置に仮想のオブジェクトを表示することのできるビデオシースルー方式に着目して、廃止措置への適用の実現性や有用性の検討に資すべき事項について紹介する。

After the accident at Tokyo Electric Company's Fukushima No. 1 nuclear power plant, decommissioning projects of nuclear power plants exceeding 40 years since the start of operation began to move in full swing. And four nuclear power plants have already been under decommissioning. Several decommissioning engineering systems (ES) have been developed according to these decommissioning projects. Various problems were clarified and many findings were obtained by these efforts. On the other, advanced information technologies and products such as three-dimensional CAD, CG, 3D laser measurement, computer aided engineering (CAE) and mixed reality (MR) are progressing rapidly. By combining these technologies and products, it has become possible not only to enhance the usefulness of existing 3D CAD data but also to enable high-level digital study that combines reality and virtual models. Furthermore, it can be applied to a wide range of fields such as demolition simulation for dismantling works of nuclear facilities, which is expected to increase in future, human resource development and skill transfer. In this paper, focusing on a video see-through method capable of displaying a virtual object at a correct position of a real image accurately reflecting the positional relationship between the real image and the virtual object, we introduce items that should contribute to the feasibility and usefulness of application to decommissioning of nuclear facilities.

\* : 株式会社インターコア (Intercore Corporation)

## 1. はじめに

東海発電所、ふげん、浜岡発電所1、2号機の、合わせて4基の廃止措置が実施中であるが、東京電力福島第一原子力発電所の事故後、原子力発電所の廃止措置が本格的に動き始め、新たに6基の原子炉の廃止が認可申請された<sup>1)</sup>。これまでに原子炉廃止措置プロジェクトに応じた幾つかの廃止措置ES (Engineering System) が開発された。例えば、ふげん廃止措置エンジニアリング支援システム (DEXUS)<sup>2)~6)</sup>では、VR (仮想現実感)・可視化システムが3次元CADデータと連携した線量率データを有するVR作業空間での作業員の移動シミュレーション等に適用され、また、人形峠環境技術センターの解体ESでは、小規模ながら3次元CADシステムが実際の解体作業のシミュレーションに適用された。このような取り組みによって、以下のような様々な課題が明らかになるとともに、多くの知見が得られた。

- ・ 建設後の改造や機器更新により、図面等が現況を反映していない恐れがある。
- ・ 3次元CADの作成には多くの時間と費用を要する。
- ・ 3次元CADによるシミュレーションは事前の解体手順の把握に効果的である。
- ・ 3次元CADによる解体作業の分析は、主要機器の解体や機器が複雑に設置されたエリアや放射線の強いエリアでの解体に効果的である。

論文「原子力施設廃止措置のためのエンジニアリングシステムと知識継承」<sup>7)</sup>では、原子力施設の廃止措置を安全で合理的に進めるうえで、施設を運転した技術者の有する経験や知識の継承が重要な鍵となるが、廃止措置は長期作業となるため、廃止措置期間中に運転経験を有する技術者が皆無となることが懸念されるとして、廃止措置における知識継承の重要性が指摘され、廃止措置ESの情報を作業員に分かり易く示す技術の速やかな開発の必要性について課題提起がなされている。

複合現実感 (MR: Mixed Reality) システムを用いれば、現場の実映像にCG映像や3次元CADモデル、3次元点群モデルなどによる仮想オブジェ

クトを合成して、あたかも実際の現場に仮想のオブジェクトが存在するように実物大で見せることができ、体験者はこの実物大の仮想空間内に没入して動き回ることができる。作業員の被ばく線量を最小限に抑えるための作業性の検討や事前検証などが求められる原子力プラントの解体シミュレーションへのMRシステムの適用においては、実映像と仮想オブジェクトの前後位置関係を正確に反映した実映像の正しい位置に仮想のオブジェクトを表示できることが重要であって、この点において、MRは最近よく見聞きするVRやAR (Augmented Reality: 拡張現実) とは、要素技術や適用分野、用途などが異なる。MR技術は、製造業の現場や学術分野、医療分野などにおいて適用事例が急速に増えつつあり、今後、活用領域の一層の拡大が予測されている。

MRシステムを上手く活用すれば、自分自身が実寸大の3次元仮想空間の中に入り込むことで、臨場感のある作業体験が可能になる。また、同時に複数の体験者が同じ3次元仮想空間内に同時に入り込むこともでき、この場合、それぞれの体験者が異なる視点で対象物を観察することで、知見の共有やコミュニケーションの活性化を図ることができるなど、更に進んだ活用方法や適用領域の拡大が見込める。

## 2. MRシステム

### 2.1 MRとは

MRとは、現実世界と仮想世界を融合させる映像技術であって、仮想世界のみで表現されるVRから一歩進んだ映像技術として注目を集めている。ARでは、現実世界を背景映像にCGキャラクターや注釈などを重畳して表示することで、ゲームやイベント、エンターテインメントなど生活を楽もうとするものが多く存在する。このARは広義のMRと分類されることもあるが、本稿で述べる厳密な意味のMRの仕組みは、現実映像に、CG、3次元CADモデルや3次元点群モデル等の仮想世界の映像を、前後の位置関係を正確に把握したうえで隠蔽処理を施して映像化するものであって、ビデオカメラからの現実映像とCG等の仮想モデルをリアルタイムで合成したうえで表示する

ビデオシースルー方式と、ハーフミラーなどを用いることにより光学的に現実映像にCG等の仮想モデルを写し込む光学シースルー方式とが存在する。

光学シースルー方式は、その仕組みから、現実世界を時間の遅れなく提示することが出来るものの、仮想世界の表示のための計算時間が現実世界と仮想世界の同期ずれの原因となり、これが位置ずれとして体験者に知覚され易い。また、ハーフミラーを使用のため、現実世界が若干暗く、仮想世界が半透明に表示されることになるとともに、現実世界と仮想モデルの前後関係を隠蔽により表現するのは一般的に困難である。一方、ビデオシースルー方式は、体験者の視線方向とカメラの光軸方向を一致させて撮影した現実世界の映像にコンピュータ処理によって仮想モデルを合成して表示することで実現される。現実世界と仮想モデルを同期して表示できるため、同期ずれによる両者の位置ずれは生じないが、現実世界に仮想モデルを重ね合成するのに要する計算時間のために、合成映像が観察者の動きに遅れて表示され易い。本方式では、現実世界と仮想モデルの前後関係を計算で求めることで、お互いを隠蔽することができ、現実世界と仮想世界との前後関係を正確に反映した位置ずれのない明るく明瞭な合成映像を表示することができるという特長がある。

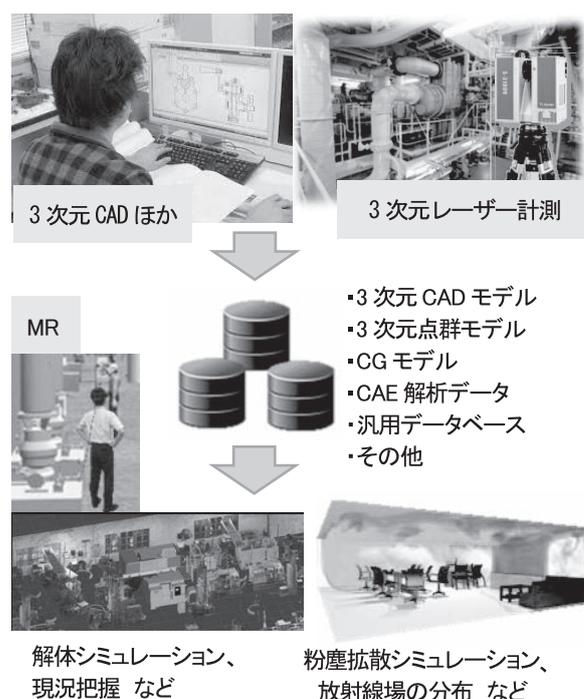
本稿では、その利用目的から、現実映像と仮想オブジェクトの前後位置関係を正確に反映した実映像の正しい位置に仮想のオブジェクトを表示することのできるビデオシースルー方式に着目して、廃止措置業務への適用の実現性や有用性の検討に資すべき事項について紹介する。

## 2.2 CAD・点群融合3次元モデルの有効性

廃止措置ESの一翼を担う技術として、3次元CADデータをベースとした解体シミュレーションやVR・可視化システム活用の有効性が検証・評価<sup>8)~15)</sup>され、今後の機能拡充や適用範囲の拡大が期待されている。ただ、3次元CADの操作には専門的なスキルが必要なため、解体シミュレーション等を解体工事の進捗に合わせて継続的かつ一般的に運用することや解体工事に当たる現場作業員への適用については、大きな制約や困難が懸

念される。さらに、施設・設備の3次元CADモデルの現況維持や新規構築には多くの費用と多大な稼働を要する。

3次元レーザー計測機を使用して取得した3次元点群モデルと3次元CADモデルとの併用を合理的に進めるとともに、MRシステムを有効に活用することで、費用の抑制と適用範囲の大幅な拡大が見込める。例えば、解体工事の進捗の各段階での現況に合った最適な工事手順の検討、現場作業員による解体作業の事前体験とこれによるスキルアップ、現場作業員の被ばく線量の極小化、人材育成・技能伝承や廃止措置に関する立地地域住民のコンセンサス醸成など幅広い応用が想定される。Fig. 1に、CAD、点群、CG、CAE解析結果からなる3次元融合モデルによる仮想空間でのMR活用の概念を示す。



実寸大で、作業員の目線で、複数の関係者が仮想空間を共有して、インタラクティブな操作や検討が可能になる

Fig. 1 Evolutionary approach to decommissioning

## 2.3 3次元点群モデル

高精度3次元レーザー計測の活用は、その利便性が評価され、大規模点群処理ソフトの高機能・高性能化や大規模点群データ処理用PCの高性

能・低価格化と相俟って、プラントの保守・改修、生産ラインの設備更新・改修、ビル空調設備の更新・改修、大型船舶のバラスト水処理装置の設置検討を始め、道路・トンネルの維持管理、橋梁・ダム等のモニタリング、造成・土量算出、歴史的建造物のデジタル現況保存・修復、災害調査や遺跡調査、大震災遺構 3次元デジタルアーカイブ<sup>16), 17)</sup>、交通事故現場の見取り図作成など、多くの分野での様々な場面において急速に広まっている。

3次元点群モデルは、3次元レーザー計測機等を用いて取得した点の集合体である点群 (Point Cloud) データを基に、これを合成処理して生成した3次元デジタルモデルであって数億から数十億以上の点で構成される。各点には相対座標 (X, Y, Z)、色 (R, G, B) やレーザー反射強度などの情報が付与されている。3次元レーザー計測機の性能向上は目覚ましく、全天球スキャンタイプで、データ取得レート毎秒最大100万点、計測距離範囲が30 cmから187 m、距離誤差1 mm、解像度0.1 mmの上位機種なども手軽に入手可能な状況にある。大規模点群データを処理するためのソフトウェアについても、機能や性能の向上は目覚ましく汎用のパソコンで動作するものが多く存在する。

Fig. 2に、3次元レーザー計測機を用いたプラント計測の風景を示す。

Table 1に、プラント計測への適用に適すと考えられる市販の3次元レーザー計測機の仕様の一例を示す。



全天球レーザースキャンが、高解像度モードの場合で、約3分で完了

Fig. 2 3D laser measurement system

Table 1 Specification example of laser measuring machine

|               |                         |
|---------------|-------------------------|
| レーザー安全クラス     | クラス1 (目に入っても安全)         |
| レーザー波長        | 1.5 $\mu\text{m}$       |
| 計測範囲          | 0.3 ~ 187.3 m           |
| データ取得レート      | 最大1,016,000 点/秒         |
| 解像範囲          | 0.1 mm                  |
| 最小誤差 (50 mまで) | $\leq 1$ mm             |
| 解像度 垂直/水平     | 0.0004° / 0.0002°       |
| 精度 垂直/水平      | 0.007° rms / 0.007° rms |
| 計測範囲 垂直/水平    | 320° / 360°             |
| 保護等級          | 防塵、防爆、防水                |
| 動作環境温度範囲      | -10 °C ~ +45 °C         |

## 2.4 大規模点群処理

3次元レーザー計測機で取得した点群データは一般的に数十億点もの大規模なデータ量になる。点群データを基に生成した大規模3次元点群モデルは、施設や設備などの現況を正確に反映 (As-built model)<sup>18)</sup> しているものの、これを日常業務で有効に活用するには用途に適した様々な機能を具備して操作性の良好なソフトウェアが必須となる。近年、複数のベンダーから各種ソフトウェアがリリースされることで現場業務への導入が急速に進んでいる。これらの点群処理ソフトウェアは、大別して、前処理機能、シミュレーション機能、モデリング機能、成果物作成機能など様々な機能を備えている。以下、これらの機能の概要について紹介する。Fig. 3に、3次元点群モデルの一例を示す。

### (1) 前処理機能

#### (a) レジストレーション

レーザー計測機を用いて複数の異なった位置で取得した複数の3次元点群データを、それぞれの点群データ間で形状が一致する共通の特異形状から位置関係を自動認識して合成することで3次元点群モデルを完成させる。位置合せの方法には、計測データ間で共通一致する特異形状を利用する方法のほか、レーザー計測現場に位置合せ用ターゲットを配置して行なう方法やトータルステー

ション（距離と角度を同時に測る測量機）などで計測したレファレンスポイントの座標値を入力して行う方法がある。

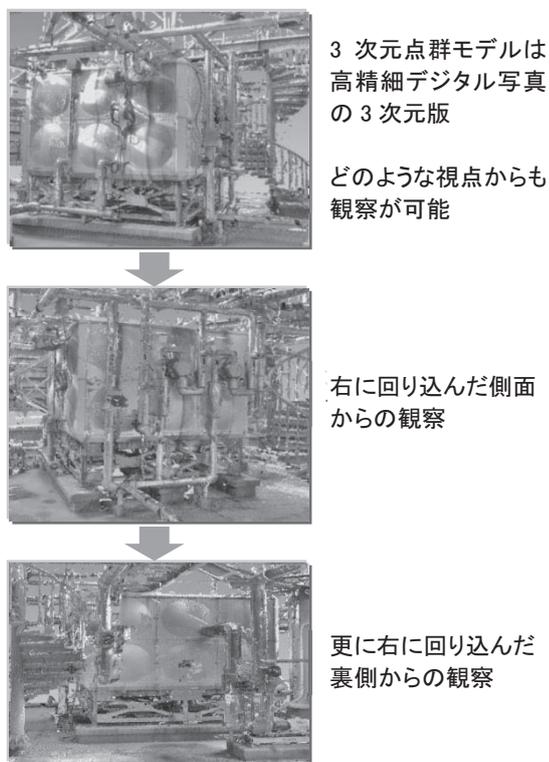


Fig. 3 Example of 3D point cloud model

(b) ノイズ除去

複数のレーザー計測データの合成（レジストレーション）の過程で生じる干渉縞様のノイズやレーザー計測時に偶然に写り込んでしまった人影や車などの不要な点群を自動認識して除去する。自動認識で除去しきれないノイズは、手作業で除去することも可能である。Fig. 4に、干渉縞様のノイズを自動除去した例を示す。

(c) 特徴形状抽出

3次元点群モデルから、壁、床、天井、配管などの形状を自動認識して平面やパイプなどの特徴形状として抽出する。Fig. 5に、点群モデルから配管等の形状を自動抽出した例を示す。

(d) データ軽量化

点群モデルの点間の間隔を指定して、その中間に存在する点を間引きすることで見栄えをそれほど損なわずに配布閲覧用の軽量データを作成する。例えば、しきい値10 mmで間引きして軽量化

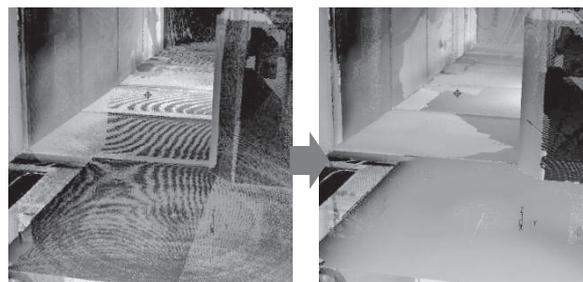


Fig. 4 Noise removal

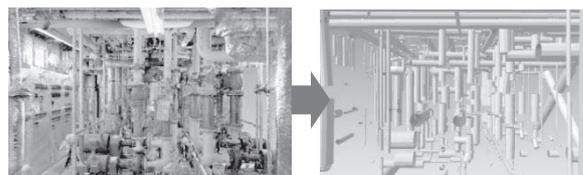


Fig. 5 Feature shape extraction

したときは、2億1千万点（6 GB）が、1千万点（290 MB）になり95 %の軽量化が図れる。

(2) シミュレーション機能

(a) 点群編集

設備などの単位で、3次元点群モデル内の特定の点群をグループ化して操作することができる。グループ化した点群をレイヤーに分類して保存、特定のレイヤーの表示・非表示を切り替えたり、色分けにより強調することができるので、工事対象となる設備の施工順（解体手順）などを指示する資料の作成などに活用できる。

(b) 寸法・距離計測

点群モデル内の任意の2点間の距離や点群モデル内の任意の特定の点と特徴形状抽出した壁・配管等との距離や寸法を計測することができる。点群モデルのみによる現状の寸法計測だけでなく、点群モデルから特定の設備（点群データ）を取り除いた状態での寸法・距離計測やこの取り除かれた箇所に新規設備（CADモデル）を設置したときの周りの施設や設備との距離計測なども可能である。Fig. 6に、点群モデル内での寸法・距離計測の例を、Fig. 7に、点群モデルから一部設備（点群データ）を撤去して、その跡に新規設備（CADモデル）を設置、周辺の施設との距離を計測した例を示す。

(c) 衝突・干渉チェック

3次元CADモデルを3次元点群モデルの中に読み込み、CADモデルと点群モデルとの衝突や干渉の有無について確認することができる。静かな衝突・干渉チェックだけでなく、CADモデルをマウス操作で動かしながらリアルタイムで動的に衝突・干渉箇所を確認することもできる。装置の搬入や搬出のためのルートを検討や装置が所定の場所に設置や仮置きが可能かなどの確認に利用できる。Fig. 8に、点群モデルとCADモデルによる干渉チェックの例を示す。

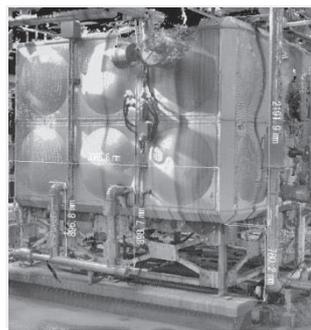
(d) 点群とCADの比較

3次元点群モデルと3次元CADモデルとを重畳比較して、そのズレを自動的に抽出して表示する。現況を計測した点群モデルと設計時のCADモデルとを比較することで、工事が設計通りに施工されているかを確認することや設備の経年変化による変形・劣化を継続的にモニタリングすることなどに活用できる。Fig. 9に、点群モデルをCADモデルと比較することで配管の歪みをチェックしている例を示す。



点群モデル内の2点をマウスクリックすると、引き出し線、寸法線、計測数値が表示される

Fig. 6 Measurement of dimensions and distance

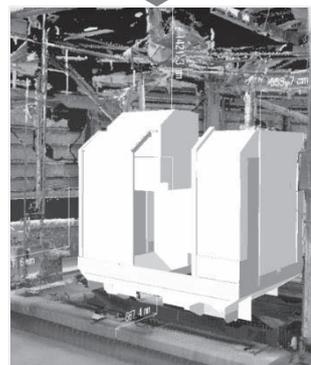


現状の計測点群データ



計測点群データから一部設備(タンク)を除去した状態

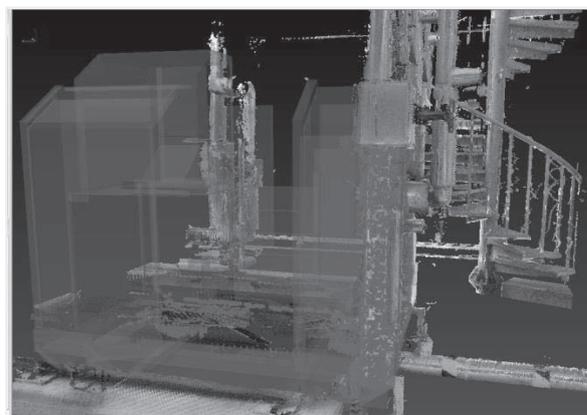
引き出し線、寸法線、計測数値が表示されている



除去個所に新規設備(CAD)を設置

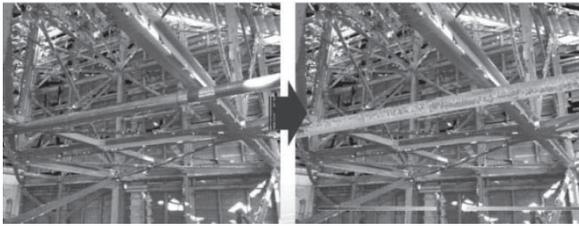
新規設備(CAD)と周辺施設(点群)との距離が表示されている

Fig. 7 Distance measurement between CAD model and point cloud



点群モデル(現状)にCADモデル(搬入装置)が衝突していることが確認できる

Fig. 8 Collision / interference check



点群データ 点群とCADの比較

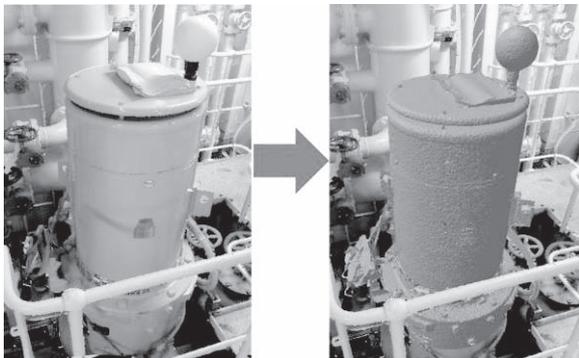
手前の左から右上がりの管が垂れている

Fig. 9 Comparison of CAD and point cloud

(3) モデリング機能

(a) メッシュ生成

レーザー計測によって得られた3次元点群モデルの中の任意の設備や構造物を構成する特定の点群データを指定して、これを自動的にメッシュデータに変換することができる。生成されたメッシュデータは3次元CGフォーマットで出力して各種CADソフトウェアに受け渡すことができるため現場設備の現況の3次元CAD化が簡便に行える。Fig. 10に、点群データからメッシュデータを生成した例を示す。



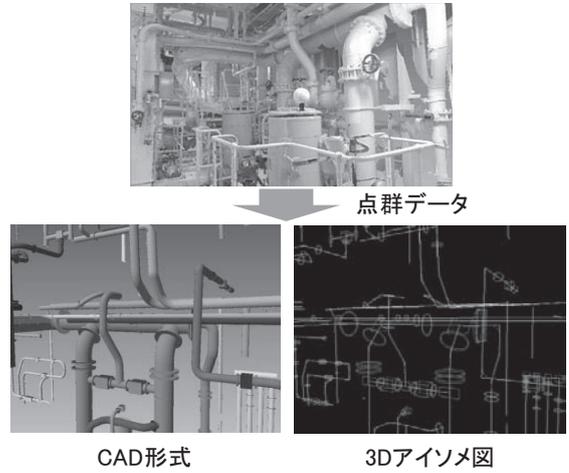
点群データ メッシュデータ

Fig. 10 Mesh generation

(b) 配管モデリング

3次元点群モデルから自動認識によって配管形状をCAD化することができる。抽出された形状を判定して、直管やエルボー、フランジ、ティーなどを規格品(CADデータ)に自動置換することも可能である。計測の際に障害物などによってレーザー光が遮られることで点群データが得られなかった箇所についても半自動で補完する機能なども備える。また、配管の手動による追加も可能

である。モデリングした配管は各種CAD形式やアイソメ図として出力が可能である。Fig. 11に、配管モデリングの例を示す。

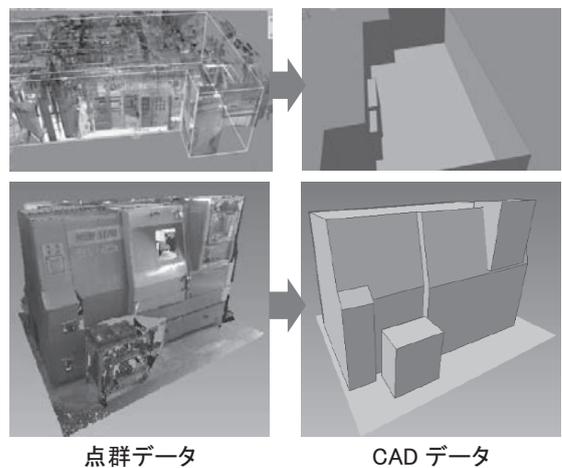


CAD形式 3Dアイソメ図

Fig. 11 Piping modeling

(c) 平面・設備モデリング

3次元点群データから躯体や設備の3次元CADモデルを自動で生成、傾きを補正した上でCADソフトに受け渡すことができる。自動生成されたCADモデルを点群データ内で移動させながら周囲の設備や壁などの干渉や衝突の有無を確認することもでき、最適な搬出ルートを検討などに活用が可能である。この検討結果をもとに施工図を作成することで現場採寸の回数を減らすことができ、業務の効率化が図れる。Fig. 12に、平面・設備モデリングの例を示す。



点群データ CADデータ

Fig. 12 Modeling of planes and facilities

## (4) 成果物作成機能

## (a) ムービー生成

3次元点群モデルを用いたフライスルームービーを生成することができる。ムービーは3次元点群モデル内のフライスルー軌跡の通過点をマウスで指定するだけで自動的に生成される。3次元CADモデルと点群モデルを同時に表示することもでき、工事後の状況や工事の進捗に合わせた各段階での状況をクライアントに説明するなどの場面で有効に活用できる。また、遠隔地間の打ち合わせなどにおいても、参加者全員が現場イメージを共有しながら検討に参加することができるなどのメリットがある。

## (b) 閲覧用ファイル出力

大規模3次元点群の処理のための専用ソフトウェアを要しない閲覧用ファイルを出力することができる。閲覧用ファイルを関係部署や関係業者、取引先などに配布することで、設計作業や工事の円滑な進捗が図れる。使用可能な機能は限定されるが、閲覧用ファイルには点群データやCADデータ(2D/3D)が格納されていて、注記・寸法の閲覧のほか、レイヤーの色付け、レイヤーの表示・非表示、定義パスに沿った断面移動、図面作成、DWG出力、オルソ画像出力、寸法付与、注記付与などの機能については適宜使用可能なようになっている。

## (c) オルソ画像出力

高解像度な歪みのない正射投影画像(無限遠の光源から平面に投影した画像)を縮尺を指定して出力することができる。画像出力時にサイズをピクセル単位で指定することや画像中に任意幅のグリッド線を表示して保存することなども可能である。

## (d) 図面のエクスポート・インポート

3次元点群モデルの断面から、壁や配管等を構成する平面やパイプ形状を自動抽出して基準線を生成、図面線分や寸法計測した結果を2次元CADに図面として出力することができる。2次元CADデータを点群データに読み込んで重ね合わせることで、差異を確認することもできる。Fig. 13に、点群データからの図面出力の例を示す。

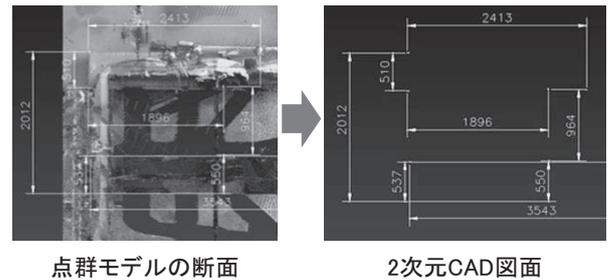


Fig. 13 Export of two-dimensional drawings

## (e) CADデータのインポート・エクスポート

IGES、STEP、DWG、DXF、PARASOLID、CATIA、SAT、JTなど、種々のフォーマットがサポートされている。

## (f) MRシステムへの点群データのエクスポート

レーザー計測で取得して生成した3次元点群モデルをMRシステムにそのままコンテンツデータとして取り込むことで、点群による現況と3次元CADやCGなどが融合して構成される仮想空間での実寸大スケールでのシミュレーションや各種検討などに活用することができる。

## 2.5 MRシステムの機能

MRシステムは、HMD(Head Mounted Display: 頭部装着ディスプレイ)、位置・姿勢センサー(光学式/磁気式等)、マーカー、ジョイスティック(ゲームコントローラー)、PC及びMR処理用ソフトウェアなどで構成され、様々な特長な機能を備えている。以下に、MRシステムが備える代表的な機能について、その概要を紹介する。

## (1) 前後の位置関係が反映される現実映像と3次元モデルの合成

ARや光学シースルー方式のMRでは、その原理から、常に3次元CADモデルが現実映像の前に表示される。ビデオシースルー方式のMRでは、HMDに内蔵のビデオカメラで捉えた現実映像に含まれる複数のオブジェクトについて、その位置を視差により求めたうえで3次元CADモデルと合成するので、現実空間のように、現実映像と仮想の3次元CADモデルの前後位置関係が正しく反映された映像がHMDのディスプレイに表示される。

合成方法には、カラーマスキング法やクロマ

キー法などがある。カラーマスキング法では、現実映像中の特定色（手の肌色や手袋の色、着衣の色などを適宜指定可能）以外の箇所（3次元CADモデルを合成する。このとき、特定色の現実映像と3次元CADモデルとが重なり合う箇所については、それぞれの前後位置関係を計算して後方隠蔽処理によって合成を行なう。クロマキー法では、現実映像中の特定色（ブルーバックやグリーンバックなど）の箇所に3次元CADモデルを合成する。このとき、特定色以外の現実映像と3次元CADモデルが重なり合う箇所については、それぞれの前後位置関係を計算して後方隠蔽処理によって合成を行なう。

MRを用いれば、人体モデルやモーションキャプチャーでは観察が困難な細かな手や体の動き、体格の違いなどによる動作の制約なども正確に確認することができる。Fig. 14に、カラーマスキング法の例を示す。Fig. 14では、右手（現実映像）がCGモデルの陰に隠れ、左手（現実映像）がCGモデルの手前に表示されている。Fig. 15に、クロマキー法の例を示す。Fig. 15では、人物（現実映像）の前方と背景にCGモデルによる施設などが表示されている。



Fig. 14 Color masking method

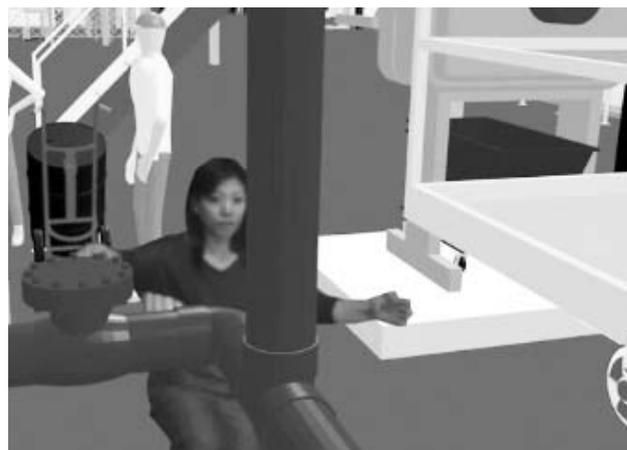


Fig. 15 Chromakey method

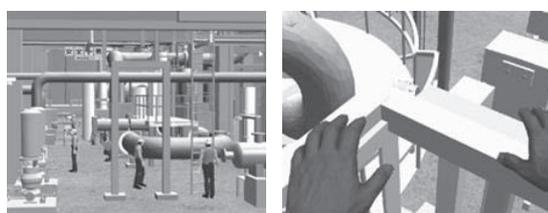
## (2) 実寸大の臨場感で仮想体験

モニター画面に収まり切らない大きな構造物、建築物、施設、設備や景観なども、実寸大の現物を見るような臨場感で観察することが可能である。仮想空間の大きさと同一サイズの観察のための実空間スペースの中をHMDを装着して歩行移動することで、仮想空間での移動や作業を体験することができる。仮想空間のサイズが大きすぎる場合や高所など、観察のための実空間スペースの確保が困難な場合は、ジョイスティック（ゲームコントローラー）などを操作することによって上下前後左右の移動を伴う仮想体験ができる。これらによって、遠近感や移動の距離感などを現実空間と同じ感覚で把握することができるとともに、特定の施設や設備の中に入り込んでの観察や高所での作業など、現実には不可能だったり困難だったりするような環境での仮想の作業体験や観察が可能になる。Fig. 16に、施設内の隅々を見回しながら歩き回る例と、高所から柵や手すりの位置を確認しながら下を覗く例を示す。

## (3) 自由視点による観察と仮想空間の共有

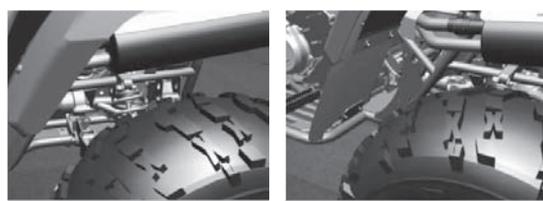
MRが実現する仮想空間では、どのようなスケールや位置・姿勢・視線によっても対象物の観察が可能なので、実空間では不可能な、機械の中や地下空間などへも没入して、その個所や場所の状況を観察することができる。また、複数人が、それぞれ異なった位置・姿勢・視線で同一の仮想空間を同時に観察することで、相互のコミュニケーションを図りながらの検討や知見の共有な

ど、実空間の場合と同様の業務が可能になる。  
**Fig. 17**に、バーチャルモデルのバギーカーを、二人が異なる位置から覗き込んで議論している様子の例を示す。



歩き回る 柵越しに下を覗く

**Fig. 16** Walk around the facility / Look over the railing



左側の観  
察者の視  
点

覗き込む

右側の観  
察者の視  
点



**Fig. 17** Sharing virtual space

#### (4) インタラクティブな操作性

マーカー付きのアイテムやマーカー付き簡易モックアップなどを使用することで、工具の取り扱いの具合、工具と設備との干渉の具合、作業性の評価など、インタラクティブな操作が不可欠な作業の事前の検証が可能になる。また、ジョイスティック（ゲームコントローラー）を用いることで、工具や部品を、掴む、放す、移動させるなどの動作や機械や設備を運転するなど、インタラクティブな操作の擬似体験や検証が可能になる。

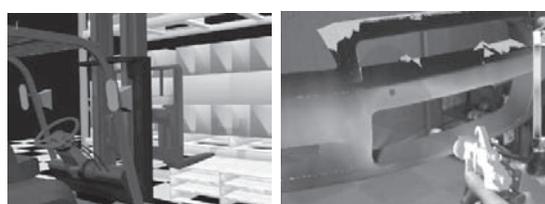
**Fig. 18 (a)** に、電動ドリルとして定義されたマーカー付アイテムを手を持って、工具の操作性や周囲との干渉の有無を確認している様子の例を、**Fig. 18 (b)** に、ゲームコントローラーを用いてバギーカーの部品の取り外し操作を行なっている様子の例を、**Fig. 18 (c)** に、ゲームコントローラーによってフォークリフトの上下動を伴う運転操作するとともにフォーク先端の視認性を確

認している様子の例を、**Fig. 18 (d)** に、トリガー付きのスプレーガンを持って、膜厚を確認しながら塗装シミュレーションを行っている様子の例を示す。



(a) ドリルの操作性と干渉を確認

(b) ゲームコントローラーで掴む、放すなど



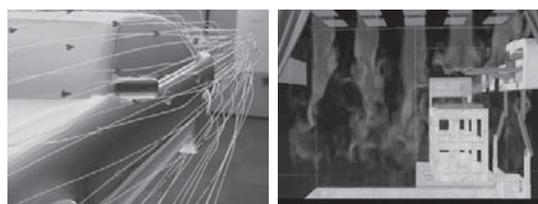
(c) フォークの上下動を操作

(d) 塗装の膜厚を色分け表示

**Fig. 18** Interactive operability

#### (5) CAEなど各種アプリケーションとの連携

エンジニアリングサービス向けソフトウェア、デジタルマニファクチャリング向けソフトウェア、流体・変形・振動・熱解析向けソフトウェアなど、様々な既存のアプリケーションとの連携機能を使用することで、例えば、施設内の放射線場の分布状況や、粒子拡散シミュレーションの結果などを仮想空間に没入して実寸大で、また場合によっては、拡大や縮小して自由な視点で観察することができる。**Fig. 19**に、CAE (Computer Aided Engineering) ソフトウェアによる解析結果の表示の例を示す。



自動車周りの気流を実寸・自由視点で観察

空気の流れとダストの拡散シミュレーション

**Fig. 19** Cooperative simulation with CAE

### 3. MRシステムの活用

MRシステムは製造の現場を中心に、最適な作業姿勢の検証、手や工具のアクセス性の確認、部品の組立・組み付けの検討、ケーブルやホースの配索検討、点群・CAD融合モデルによる工場内設備のレイアウト検討、教育研修のための熟練作業員の動きの記録・再生、流体解析結果の観察・検証、点群データによる現況のアーカイビング、重機の操作訓練<sup>19)</sup>、塗装訓練<sup>20)</sup>など、様々な業務シーンで活用が進んでいる。以下に、MRシステムの代表的な活用の事例を示す。

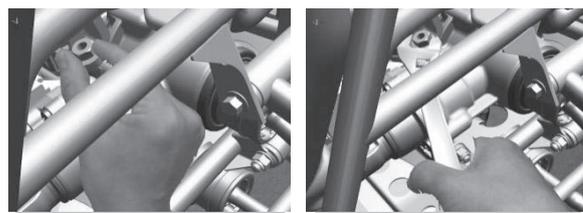
#### 3.1 作業性の検討

現実空間の場合と同様の正しい位置に表示される自分の手や工具を見ながら、手や工具が入るか、作業空間は十分か、工具は重過ぎないか、作業姿勢に無理はないかなどを実際に体感・確認しながら作業性の検討を行う。

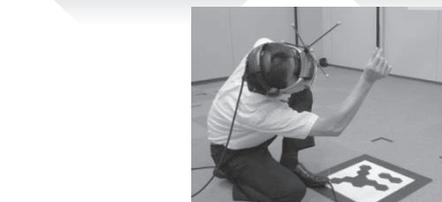
Fig. 20の (a) 及び (b) に、ボルトに手指・工具が届くか、スパナで締め付けが可能か、作業空間に十分なゆとりがあるか、無理のない姿勢で作業が可能かなどの確認のために使用している例を示す。

Fig. 20の (c) に、手に持った電動ドライバーが周りの部品などと干渉せずにボルトに届くか、重い電動ドライバーを手を伸ばした状態で一定時間作業可能かなどの確認のために使用している例を示す。電動ドライバーがボルトに到達したことが、電動ドライバーの振動や音で感知することのできるオプションや、電動ドライバーの到達時にアニメーションでボルトが緩む様子が目視確認できるオプションなども存在する。

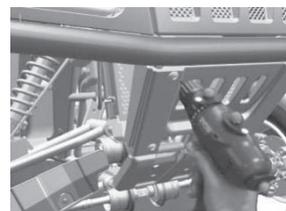
Fig. 20の (d) に、現物と重量を同じにしたマーカー付き簡易モックアップを持ち上げて、実物の重さを体感しながら作業体験することで、無理なく作業が可能かなどを確認している例を示す。HMDを装着した体験者には、簡易モックアップはマーカーによって関連付けられた現物を表現するCG映像に置換されて観察される。



(a) 手指・工具は届くか、作業姿勢に無理は無いか？



(b) カバーが頭に当たるのでしゃがんで作業



↑  
電動ドライバーがボルトに到達



↑  
腕がフレーム(CG)と干渉

(c) アクセス可能か、工具は重過ぎないか



←マーカー付き簡易モックアップ

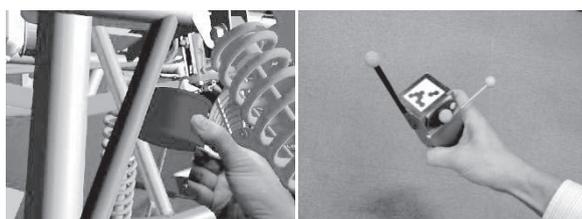
(d) 体験者には簡易モックアップはCGに置換されて見える

Fig. 20 Verification of workability

### 3.2 組み立て・組み付け作業の検討

CADを用いた組み立て・組み付け作業の検討では、部品の挿入パスを自由曲線で定義したうえで、部品をアニメーションで動かして周囲の部品との干渉を確認して行なうことが一般的であるが、CADを用いる方法では、専用CADソフトウェアの操作という専門的スキルが必要なうえ、熟練や勘が作業の精度や効率を左右する試行錯誤によらざるをえないのが現状である。

MRを用いれば、CADなどの専用ソフトウェアの難しい操作スキルなどを要することなく、3次元モデル内で周囲の部品などとの干渉を目視で確認しながらセンサー付きアイテムを動かすことで、複雑な挿入パスの検討が自身の手で直感的に行うことができる。MRを用いて得られた挿入パスはCADモデルへの取り込みが可能になっているため、CADソフトウェアを用いた設計や作業検討にも、その結果を活かすことができる。Fig. 21に、組み立て検討の例を示す。



部品を手にとって、挿入パスを作業視点で確認しながら探索

センサー付きアイテム ← 部品として定義されている

Fig. 21 Verification of assembly

### 3.3 配索の検討

現物を使用して、曲げの具合や周囲との干渉を確認しながら、CADモデルの中でホースやケーブル、ハーネスなどの取り回し方法の検討ができる。Fig. 22に、ホースの配索検討の例を示す。三脚にクリップで取り付けた現物のホースを手で掴んで、周囲の部品との干渉を確認しながら取り回しを試行錯誤している。



強く曲げ過ぎてホースが折れてしまった →

Fig. 22 Review of wiring

### 3.4 設備の配置検討

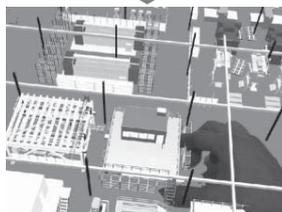
様々な設備のCADモデルをマーカー付きブロックに割り当て、このブロックを机上に配置することで、煩雑な操作を要するCADなどによる配置検討とは違った直感的な設備配置の検討が可能になる。視点を変えての配置検討や複数の参加者による共同検討作業も可能である。

現況を計測した3次元点群データを活用すれば、施設の3次元CADデータが存在しない場合や維持業務が不完全なために3次元CADデータが現況を反映していないような場合にも、施設の現況に合った最適な配置検討を簡便に実施することができる。

Fig. 23に、種々の設備が割り当てられたマーカー付きブロックを使用した配置検討の例を示す。Fig. 24は、既存施設の現況をレーザー計測することで得た3次元点群モデルの中を、マーカーが貼付された台車を押して移動することで、運搬中の設備が搬入動線周辺の設備と干渉しないかを確認するとともに、搬入した設備を所定場所に設置したときの周辺の構造物や既存設備との干渉の具合を確認している例である。



ブロックを自由自在に動かして最適な設備の配置を試行錯誤する



縮小表示の3Dモデルにて設備の配置を直感的に確認できる



実寸大の3Dモデル内を歩き回って設備の配置を検証する

Fig. 23 Study on arrangement of facilities / equipment



マーカーに新設設備のCADモデルを割り当てて移動することで搬入動線や周囲との干渉を確認



点群モデル内で簡易メジャーを用いて寸法計測



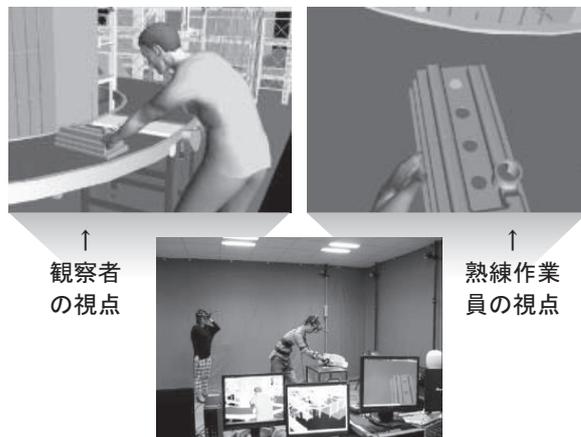
周辺の構造物や設備との干渉を確認

Fig. 24 Layout study using point cloud

### 3.5 熟練作業員の動作の記録

クラスターマーカーを装着した熟練作業員の動作や姿勢を取り込み、これをCGに置き換えて記録する。これを再生した仮想空間の中に研修を受ける作業員がMRを使用して没入することで、熟練作業員の適切な動きや作業姿勢をあらゆる視点

から観察することができる。作業修得の効率を高めることができ、新人の育成や技能伝承などへの活用が期待される。Fig. 25に、熟練作業員の動作を観察しながら、その動作を記録している模様を示す。



↑  
観察者の視点

↑  
熟練作業員の視点

クラスターマーカーとマーカー付き簡易モックアップを用いて作業員の動きや姿勢をトラッキングして記録

Fig. 25 Recording and reproduction of worker's actions

## 4. おわりに

近年、3次元CADソフト、3次元レーザー計測システムやMRシステムなどの先進的な新製品が次々とリリースされているが、ベテランエンジニアの退出と相俟って、製造業の現場を中心にその活用に向けた取り組みが急速に拡大している。その背景は、日進月歩の技術革新の成果として、様々な機能を備え、性能、信頼性、可用性、保守性が良好な製品が低コストで利用できるようなったことにある。このような進歩の目覚ましい先進的技術や製品を有効に活用することで、既存の3次元CADモデルの有用性をさらに高めることができるだけでなく、3次元点群モデルと3次元CADモデルなどによる現実世界と仮想モデルを融合した仮想空間を活用した高度なデジタル検討が可能になる。

原子力発電所の廃止措置の今後の増加が現実となった現状にあって、これらに関わる人材の確保・育成や技能伝承等が益々困難になることが懸念されているが、本稿において紹介の新技术や製

品を有効かつ効率的に活用することが出来れば、課題の多くが解決できるものと期待される。本稿で紹介した先進的な取り組みが廃止措置関係者の発想力を刺激して、廃止措置の計画から実行までの一連のプロセスの安全性、信頼性、効率の向上や解体手順の検討に関するモックアップの省略、教育・訓練、技能伝承、現況のデジタルアーカイビングなど、廃止措置業務の全般について、一層の高度化に寄与できることを願う。

#### 参考文献

- 1) 毎日新聞, 朝刊, 2016年9月28日.
- 2) 森下喜嗣, “「ふげん」の取り組み,” 電気評論, 第633号, 2016年11月.
- 3) 日本原子力研究開発機構 “廃止措置エンジニアリング支援システム (DEXUS) の開発,” 未来を拓く原子力, 2006.
- 4) 飯島隆, 清田史功, 宮本久未, 兼平宣紀, “ふげん廃止措置技術専門委員会 第10回委員会資料集 — 廃止措置エンジニアリング支援システム (DEXUS) の開発状況—,” Fugen Decommissioning Project.
- 5) 井口幸弘, 兼平宣紀, 中條雅博, 藤長佳紀, “廃止措置エンジニアリング支援システムの構築,” サイクル機構技報, No.10, 2001. 3.
- 6) 井口幸弘, 兼平宣紀, 泉正憲, 中條雅博, 浦上浩之, 齊藤明人, “「ふげん」における廃止措置システムエンジニアリング (8),” Augmented Reality System, Proc. VRST '96, 1996.
- 7) 立花光夫, “原子力施設廃止措置のためのエンジニアリングシステムと技術継承,” デコミッションング技報, 第53号, 2016年3月.
- 8) 核燃料サイクル機構, “ふげんデコミニユース,” 第2号, 2004年1月.
- 9) 泉正憲, “拡張現実感技術を使用した施設解体のための支援システム,” 新技術説明会 (AR技術), Fugen Decommissioning Project.
- 10) 石井裕剛, 中井俊憲, 卞志強, 下田宏, 泉正憲, 森下喜嗣, “拡張現実感を利用した原子力発電プラントの解体支援手法の提案と評価,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.13, No.2, 2008.
- 11) 井口幸弘, 大和義明, 兼平宣紀, 白鳥芳武, 清田史功, “「ふげん」の廃止措置における被ばく低減の取り組み,” 保健物理, 38 (2), 2003.
- 12) 井口幸弘, “VR及びAR技術を用いた解体計画支援システムの開発と課題,” SYM-BIO Community.
- 13) 満智遠, “拡張現実感を用いたプラント解体協調作業シミュレーションシステムの開発,” 京都大学エネルギー科学研究科, 平成24年2月9日.
- 14) 青山周平, “拡張現実感を用いた仮置・運搬作業シミュレーションシステムの開発,” 京都大学エネルギー科学研究科, 平成23年2月9日.
- 15) 中井俊憲, “拡張現実感技術を利用した原子力プラントの解体支援手法の提案と評価,” 京都大学エネルギー科学研究科, 平成19年2月13日.
- 16) 東北大学大学院理学研究科, “東日本大震災遺構3次元プロジェクト,” Media, 2013年8月27日.
- 17) 株式会社中庭測量コンサルタント, “東日本大震災遺構3次元クラウドデータアーカイブ構築公開事業,” Tohoku University DRR Actions.
- 18) 堀田浩司, 島山誠, “原子炉廃止措置に向けた技術開発,” 電気評論, 第633号, 2016年11月.
- 19) “巨大な重機が目の前に出現 仮想現実で翌日には再レビュー,” 日経情報ストラテジー, 2015年6月.
- 20) “自動車業界初、MR活用による塗装シミュレーション,” INTERFACE, No.56, 201510.

## キャピラリー電気泳動法を用いた 放射性試料に対する簡易迅速分析法の開発

原賀 智子\*、佐藤 義行\*、亀尾 裕\*、齋藤 伸吾\*\*

### *Development of Simple and Rapid Analytical Method for Radioactive Samples by Capillary Electrophoresis*

Tomoko HARAGA\*, Yoshiyuki SATO\*, Yutaka KAMEO\* and Shingo SAITO\*\*

原子力施設の廃止措置等にもなって発生する放射性廃棄物の処分に向けて、廃棄物試料の放射能データを収集する必要がある。研究施設から発生する廃棄物は、分析対象核種が多く、多数の試料を分析する必要があるため、簡易迅速な分析法の開発が求められている。特に、放射線量の高い試料では、分析者の被ばく量を低減し、作業時間を短縮することが望まれる。そこで本報では、極少量の試料で、迅速、かつ、自動分析が可能な手法として着目したキャピラリー電気泳動法について解説するとともに、放射性試料中のアクチノイドに対する分析法の開発について報告する。本法では、分析対象を高感度かつ選択的に検出するための蛍光性試薬（蛍光プローブ）を開発し、様々な共存物質が含まれる放射性廃棄物試料に適用できることを示す。本法は、従来法では対応が困難な放射線量の高い試料にも適用可能な有望な分析法である。

For safe disposal of radioactive wastes generated from decommissioning of nuclear facilities, it is necessary to collect radioactivity concentration data for many waste samples and radionuclides. A simple and rapid analytical method is required for reduction of operating time and radiation exposure during analytical operations, especially for highly contaminated radioactive samples. In this report, we focused on capillary electrophoresis with the advantage of low-consumption of sample solution and short analysis time. We have developed a sensitive and selective analytical method using fluorescent probes for actinides in radioactive waste samples by capillary electrophoresis. This method has a great potential for highly contaminated radioactive samples.

#### 1. 緒言

原子力施設では、原子炉の運転、核燃料の取扱、研究活動や施設の廃止措置等にもなって放射性廃棄物が発生する。放射性廃棄物の処分に向

けて、その中に含まれる放射性核種の種類と量を把握する放射能評価を行う必要があるため、日本原子力研究開発機構では、安全評価上重要となる放射性核種の選定を進めるとともに<sup>1)</sup>、放射能評価方法を確立することを目的として、廃棄物試料

\* : 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 バックエンド技術部  
(Department of Decommissioning and Waste Management, Nuclear Science Research Institute, Japan Atomic Energy Agency)  
\*\* : 国立大学法人 埼玉大学大学院 理工学研究科 (Graduate School of Science and Engineering, Saitama University)

に対する放射能データの収集を進めている。研究施設から発生する廃棄物は、原子力発電所から発生する廃棄物と比較して、分析対象核種が多く、分析試料数も多いため、効率的に分析を行うことを目的として、簡易迅速な分析法を開発した<sup>2), 3)</sup>。比較的放射線量の低い廃棄物に対しては、すでに実用化し、実際の放射能データ収集に利用されている<sup>4), 5)</sup>。

現在の開発課題は、比較的放射線量が高く、取扱いにおいて被ばくの危険性の高い廃棄物に対する分析技術の確立である。分析対象核種のうち、外部からの非破壊測定が困難なアクチノイドの分析では、分析の妨害となる共存元素や放射性核種との化学分離が必須であり、従来法のイオン交換樹脂や固相抽出樹脂等を用いた化学分離操作を、耐放射線機能を備えたセル等の施設で行うには操作が煩雑であり、分析による二次廃棄物の発生も懸念される。そのため、フードやグローブボックス内での作業を想定し、分析者の被ばく量を低減するために、少量の試料で分析可能な新たな手法の開発が必要である。

近年、極少量の試料で分析が可能な手法として、キャピラリー電気泳動法が注目されている<sup>6)~13)</sup>。ガラス製の毛細管内で化学分離を行う方法であり、金属イオンの分析をはじめ、様々な分野で利用されている。しかしながら、一般的な吸光検出では、検出限界値はppmレベルであり、廃棄物試料で想定される濃度 (ppt~ppbレベル) に適用することは困難である。また、廃棄物試料には、様々な共存元素や放射性核種が含まれることから、これらとの分離も課題である。

そこで本報告では、キャピラリー電気泳動法で利用可能な、アクチノイドを高感度かつ選択的に検出するための蛍光性試薬 (蛍光プローブ) を開発し、廃棄物試料への適用性を確認するとともに、様々な金属イオンが含まれる放射性試料として、使用済燃料溶解液試料中の微量の金属イオンの分析への展開例も報告する。

## 2. キャピラリー電気泳動法

### 2.1 キャピラリー電気泳動法の原理

キャピラリー電気泳動法は、内径50~100  $\mu\text{m}$ 、

長さ50~100 cm程度のガラス製の毛細管 (キャピラリー) を用いる電気泳動法である。導電性の液体 (泳動液) を満たしたキャピラリーに、数nL程度の極少量の試料溶液を注入し、キャピラリーの両端に電圧を印加することによって、イオンの電荷やサイズに起因する移動速度の違いを利用して分離を行う手法である。キャピラリー電気泳動法の概要をFig. 1に示す。本システムは、試料溶液を注入して分離を行うためのキャピラリー、電圧を印加するための電源、検出器等から構成される。キャピラリーの内径が非常に小さいため、圧力を駆動力とする液体クロマトグラフィーのような分離法と異なり、試料成分は栓流 (プラグ流) となるため、高い分離能力を有している。

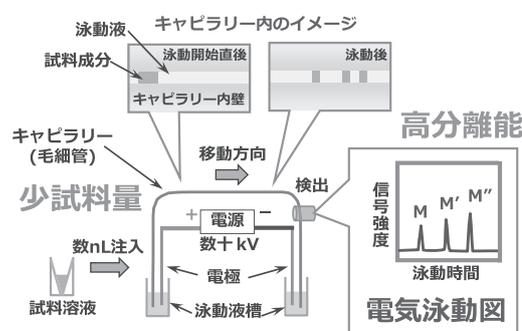


Fig. 1 Outline of capillary electrophoresis

キャピラリー電気泳動法における分離の駆動力は、①電気浸透流と②静電的な力の2つからなり、模式的にはFig. 2のように表される。それぞれの特徴を示すと次のとおりである。

#### ①電気浸透流

キャピラリーの内壁が負に帯電しているため、内壁付近の泳動液は、正の電荷を帯び、泳動中は常に陽極側から陰極側への流れが生じる。これにより、中性の物質も移動が可能となる。

#### ②静電的な力

イオンに対する電気泳動移動度  $\mu_{ep}$  は、以下の式で表される。

$$\mu_{ep} = \frac{q}{6\pi r \eta}$$

ここで、 $q$  はイオンの電荷、 $r$  はイオンの半径、 $\eta$  は溶液の粘度を表す。試料成分は、電荷  $q$  が大きいほど、かつ、イオンの半径  $r$  が小さいほど速

く移動することを表しており、試料成分によって電荷やサイズが異なるため、その差を利用して分離を行うことが可能である。その分離性能の高さから、イオン性の物質の分析に広く利用されている。

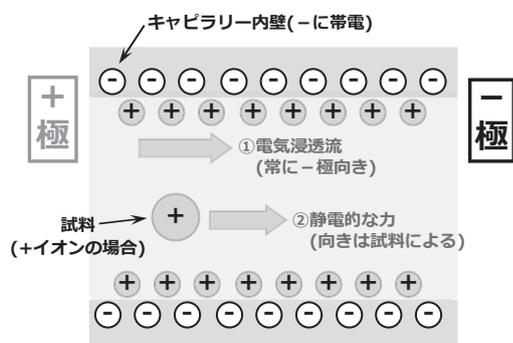


Fig. 2 Driving force of capillary electrophoresis

## 2.2 キャピラリー電気泳動法の利用分野

1980年代、90年代にキャピラリー電気泳動法の分離能力の高さが実証され<sup>6), 7)</sup>、盛んに研究されるようになり、近年では、市販の装置も普及したことから、様々な分野への利用が広がっている。例えば、めっき液の組成管理や廃液の分析<sup>8)</sup>に実用化されている。また、環境分野では、フェノール類、ダイオキシンなどの有害化学物質の分析<sup>9)</sup>、法科学の分野では、薬物や毒物の分析<sup>10)</sup>にも応用されている。さらに、キャピラリー電気泳動法は、2001年に、配合飼料中の有機酸の分析法として、飼料分析基準に採用されているほか、2011年には、日本、米国及び欧州薬局方にキャピラリー電気泳動法の取扱いについての規定が加わり、医薬品の品質試験等に利用されている。ここで示すように、キャピラリー電気泳動法は、少量の試料、多検体を簡便に、かつ、迅速に分析することが求められる分野での応用が進んでいる。

原子力の分野では、キャピラリー電気泳動法をアクチノイドの分析に用いた研究が報告されている。通常、電気泳動分離後のアクチノイドの検出には、吸光検出が用いられ<sup>11), 12)</sup>、近年では、インターフェースの開発が進み、キャピラリー電気泳動法と質量分析計を組み合わせた手法も適用され、トリウム、ウラン、ネプツニウム、プルトニウムなどの分析例が報告されている<sup>13)</sup>。また、

キャピラリー電気泳動法と同様に、微小空間を利用した手法として、マイクロ化学チップを用いた分析法が研究され、再処理施設での工程管理への利用が検討されている<sup>14)</sup>。ここで紹介した手法は、いずれも検出限界値が数十ppb～ppmレベルである。

## 3. キャピラリー電気泳動法を用いた放射性試料に対する簡易迅速分析法の開発

### 3.1 アクチノイド検出用蛍光性試薬(蛍光プローブ)の開発<sup>15), 16)</sup>

放射性廃棄物試料中のアクチノイドの分析においては、試料溶液中に様々な共存元素や放射性核種が含まれる中で微量のアクチノイド (ppt～ppbレベル) を検出することが求められる。そこで、著者らは、アクチノイドを高感度かつ選択的に検出することを目指して、キャピラリー電気泳動法で利用可能な蛍光性試薬 (蛍光プローブ) を開発した<sup>15), 16)</sup>。開発例として、ウラン検出用蛍光プローブの例をFig. 3に示す<sup>16)</sup>。従来の一般的な吸光検出で用いられる試薬では、検出感度が低く、分析対象のウランに対する選択性も低いことが課題であった。開発したプローブには、①高感度検出のために蛍光部位を導入するとともに、②共存元素の影響を低減し、ウランを選択的に結合可能な部位を導入した。

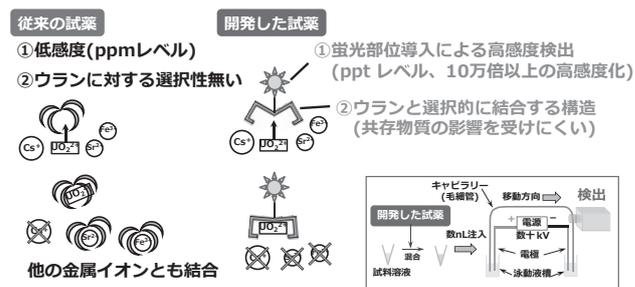


Fig. 3 Development of probe for the detection of uranyl ion by capillary electrophoresis

開発したプローブの具体的な化学構造をFig. 4に示す。本プローブは、蛍光部位、金属イオン結合部位、及びそれらをつなぐスペーサーで構成した。①蛍光部位には、輝度の高い蛍光性物質として知られるフルオレセイン骨格を用いることにより、検出限界値をppmからpptレベルに、10万倍以

上に改善することができた。また、②金属イオン結合部位には、ウランと選択的に結合する構造として見出したフェナントロリンジカルボン酸骨格を用いることにより、共存元素の影響を受けにくい選択的検出を実現した。さらに、③スペーサーは、蛍光部位と金属イオン結合部位を接続するとともに、これらのある程度の距離に保つことによって、重金属イオンに起因する蛍光部位の消光を防ぐ働きを担っており、検出限界が悪化することを防いでいる。

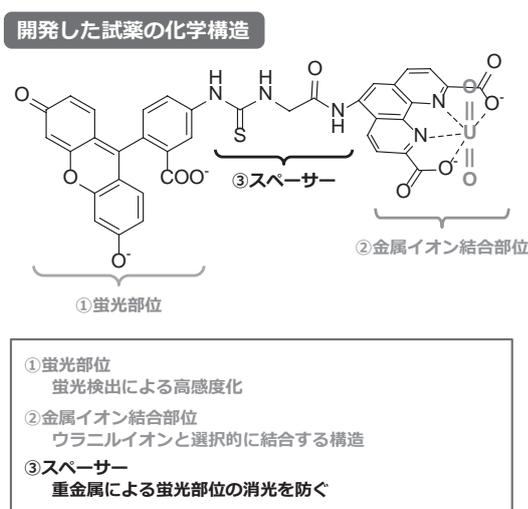


Fig. 4 Chemical structure of probe for uranyl ion

### 3.2 放射性廃液試料への適用

開発した蛍光プローブを用いてウランの検出を試みた例として、得られた電気泳動図をFig. 5に示す<sup>16)</sup>。泳動時間7分付近に、ウラン（ウラニルイオンと蛍光プローブ (=L) との錯体）の鋭いピークを観測でき、開発したプローブをウランの検出に適用できた。また、本泳動条件下では、ほとんどの金属イオンが分析を妨害することはない、蛍光プローブとの反応性を調査した中では、Ca<sup>2+</sup>が妨害となることが懸念されたものの、1万倍以上共存していてもウランの検出に影響しないことを確認した。また、本法を原子力施設から発生した放射性廃液試料中のウランの分析にも適用できることを確認した。

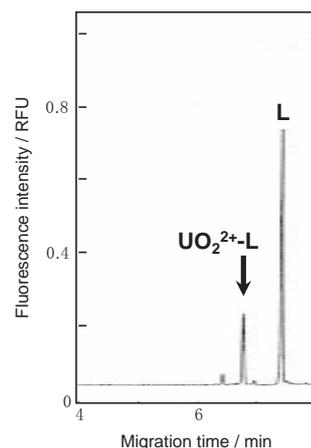


Fig. 5 Typical electropherogram for uranyl-probe complex

### 3.3 使用済燃料溶解液試料への適用<sup>17),18)</sup>

放射性試料に対する適用例の一つとして、使用済燃料溶解液試料中の微量の金属イオン、ネオジムイオンの分析へ展開した例を示す。高レベル放射性廃棄物の主な発生源である使用済燃料中の核種組成を推定するための指標として、ランタノイドのうち、非放射性ネオジムに対する分析法を開発した。試料溶液中には、分析対象の微量のネオジムと比較して、燃料由来の多量のウランが含まれる。これに加えて、ネオジムと化学的性質が類似して相互分離の困難なランタノイド群や核分裂によって生成する様々な金属イオン、さらに、固体試料の溶解に使用した硝酸イオンが多量に含まれるため、これらとの分離が課題である。そこで、著者らは、これまでに開発したアクチノイド検出用蛍光プローブのうち、金属イオン結合部位の構造と性質に着目し、ウラニルイオンとの反応性に乏しく、かつ、ランタノイドイオンの相互分離が可能なプローブを見出した。選択したプローブを用いて、分離条件を最適化することにより、ランタノイド群の相互分離に成功するとともに、様々な共存物質を含む条件で、分析対象のネオジムイオンの検出に成功した。これにより、従来法では2週間程度を要する作業時間を1日に大幅に短縮できた。

本試験で使用した装置をFig. 6に示す。市販のキャピラリー電気泳動装置と外付けの蛍光検出器を光ファイバーで接続したものであり、フードやグローブボックスにも設置可能なコンパクトなシ

システムである。電気泳動装置本体には、サンプルチェンジャーが内蔵されており、調製した測定試料溶液（蛍光プローブを混合したもの）をセットすれば、試料溶液の注入から測定まで自動で分析可能である。外付けの蛍光検出器は、光ファイバーを延長することにより、フード外に設置することも可能である。

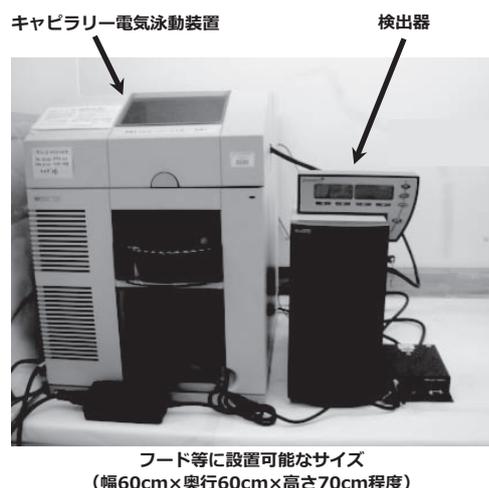


Fig. 6 Electrophoresis system with fluorescence detection

#### 4. 結言

本報告に示すように、放射性廃棄物試料の分析において、分析者の被ばく量低減の観点から、極少量の試料で迅速な分析が見込めるキャピラリー電気泳動法に着目し、原子力施設等から発生する廃棄物試料のように様々な共存物質が含まれる放射性試料中のアクチノイドなどの微量の金属イオンに対する分析法を開発した。

本法により、極少量の試料（試料注入量は数nL、測定試料溶液の調製量は数十 $\mu$ L程度）を用いて、数分～数十分程度で分析が可能となった。従来のイオン交換樹脂等を用いる化学分離法において要する試料量（数mL～数十mL程度）と比較して、大幅に低減するとともに、最大2週間程度を要する作業時間を1日に大幅に短縮できたことから、分析者の被ばく量の大幅な低減が期待できる。さらに、本システムは、放射性試料との接触面も限定的であり、発生する廃液量も従来技術の1/100程度であるため、分析における二次廃棄物

発生量の低減も期待できる。

現在、東京電力福島第一原子力発電所の事故によって発生した放射性廃棄物の処理・処分方策の検討に向けて、汚染水処理後の廃棄物や燃料デブリ等の放射線量の高い試料に対する分析技術開発が急務となっている。本報告で紹介したキャピラリー電気泳動法を用いた分析法は、極少量の試料で分析が可能であり、放射線量の高い試料に適用可能な有望な分析技術である。

※本研究は、日本原子力研究開発機構の先行基礎工学制度及びJSPS科研費JP16K17926の助成を受けたものの成果の一部を掲載しています。

#### 参考文献

- 1) 坂井章浩, 天澤弘也, 仲田久和, 高橋邦明, 木原伸二, “研究施設等廃棄物の埋設処分における安全評価上重要核種の選定 (その3) – RI・研究所等廃棄物に係る主要放射性廃棄物発生施設毎の重要核種の予備評価 –,” JAEA-Technology 2010-021 (2010).
- 2) 亀尾裕, 島田亜佐子, 石森健一郎, 原賀智子, 片山淳, 星亜紀子, 中島幹雄, “研究施設等廃棄物に含まれる放射性核種の簡易・迅速分析法 (分析指針),” JAEA-Technology 2009-051 (2009).
- 3) 亀尾裕, 石森健一郎, 原賀智子, 島田亜佐子, 片山淳, 中島幹雄, 高橋邦明, “研究施設から発生する廃棄物に対する体系的な放射能分析法,” 日本原子力学会和文論文誌, 10, 216–225 (2011).
- 4) A. Shimada, T. Haraga, A. Hoshi, Y. Kameo, M. Nakashima, “Analysis of Th, U, Pu, and Am in Radioactive Metal Waste Using Extraction Chromatography,” *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 286, 765-770 (2010).
- 5) 原賀智子, 飛田実, 高橋重実, 石森健一郎, 亀尾裕, “「ふげん」から採取した金属配管試料の放射能分析 (その4),” JAEA-Data/Code 2015-025 (2016).
- 6) J. W. Jorgenson, K. D. Lukacs, “Zone Electrophoresis in Open-Tubular Glass Capillaries,” *Anal. Chem.*, 53, 1298-1302 (1981).

- 7) F. Foret, S. Fanali, A. Nardi, P. Boček, “Capillary Zone Electrophoresis of Rare Earth Metals with Indirect UV Absorbance Detection,” *Electrophoresis*, 11, 780-783 (1990).
- 8) 柳井博子, “キャピラリー電気泳動装置の原理とめっき液組成の分析事例,” *表面技術*, 54, 263-267 (2003).
- 9) 竹田さほり, “キャピラリー電気泳動法による有害化学物質の分析,” *分析化学*, 50, 721-731 (2001).
- 10) 瀬戸康雄, 片岡美江子, “キャピラリー電気泳動法の法薬毒物分析への応用,” *鑑識科学*, 8, 1-19 (2003).
- 11) A.R. Timerbaev, O.P. Semenova, G. K. Bonn, “Capillary Zone Electrophoresis of Lanthanoid Elements after Complexation with Aminopolycarboxylic Acids,” *Analyst*, 119, 2795-2799 (1994).
- 12) M. Macka, P. Nesterenko, P. Andersson, P. R. Haddad, “Separation of Uranium (VI) and Lanthanides by Capillary Electrophoresis Using On-Capillary Complexation with Arsenazo III,” *J. Chromatogr. A*, 803, 279-290 (1998).
- 13) B. Kuczewski, C. M. Marquardt, A. Seibert, H. Geckeis, J. V. Kratz, N. Trautmann, “Separation of Plutonium and Neptunium Species by Capillary Electrophoresis-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry and Application to Natural Groundwater Samples,” *Anal. Chem.*, 75, 6769-6774 (2003).
- 14) 菅井弘, 池田秀松, 渡慶次学, 水口浩司, 佛坂裕泰, 原田雅幸, 池田泰久, 森田泰治, 松本史朗, 北森武彦, “マイクロチップを用いた PUREX 再処理工程溶液用分析装置の開発 (1) —再処理工程内における主要な分析対象と分析手法の検討—,” 日本原子力学会「2004年秋の大会」予稿集, H52 (2004).
- 15) T. Haraga, Y. Nakano, M. Shibukawa, Y. Kameo, K. Takahashi, S. Saito, “Capillary Electrophoresis with Laser-Induced Fluorescent Detection Method Using Highly Emissive Probes for Analysis of Actinides in Radioactive Wastes,” *Proc. the ASME 14th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (ICEM2011)*, Sept. 25-29, 2011, Reims, France, Paper 59092 (2011).
- 16) 原賀智子, 佐藤義行, 渋川雅美, 亀尾裕, 高橋邦明, 齋藤伸吾, “放射性廃棄物中のウランの分析のための高感度蛍光プローブを用いたキャピラリー電気泳動—レーザー励起蛍光検出法,” 日本原子力学会「2012年秋の大会」予稿集, G07 (2012).
- 17) S. Saito, Y. Sato, T. Haraga, Y. Nakano, S. Asai, Y. Kameo, K. Takahashi, M. Shibukawa, “Highly Sensitive Detection of Neodymium Ion in Small Amount of Spent Nuclear Fuel Samples Using Novel Fluorescent Macrocyclic Hexadentate Polyaminocarboxylate Probe in Capillary Electrophoresis-Laser-Induced Fluorescence Detection,” *J. Chromatogr. A*, 1232, 152-157 (2012).
- 18) T. Haraga, S. Saito, Y. Sato, S. Asai, Y. Hanzawa, H. Hoshino, M. Shibukawa, K. Ishimori, K. Takahashi, “Application of Capillary Electrophoresis with Laser-Induced Fluorescence Detection for the Determination of Trace Neodymium in Spent Nuclear Fuel Using Complexation with an Emissive Macrocyclic Polyaminocarboxylate Probe,” *Anal. Sci.*, 30, 773-776 (2014).

## アルカリ活性材料固型化材 SIAL<sup>®</sup> の特性試験

小野崎 公宏\*

### *Characteristic Test of "SIAL<sup>®</sup>" of Alkali-Activated Materials*

Kimihiro ONOZAKI\*

現在、日本では液体状、粉粒体状の低レベル放射性廃棄物は、廃棄体容器に固化した上で処理・処分をする必要がある。この固化方法については、取り扱いの容易さ等からセメント固化が多く採用されている。しかしながら、セメント固化体ではセシウム等の放射性元素の溶出が大きいことが確認されている。また、硫酸塩やホウ酸塩を含有する廃棄物においては、セメントによる固型化では化学腐食の発生や凝結阻害による強度低下が懸念される。

富士電機株式会社では、上記課題に対する解決策として、アルカリ活性材料（ジオポリマー）を基材とした固型化材に着目し、実プラントでの運用実績を持つ、英国のAmec Foster Wheeler社のジオポリマー固型化材であるSIAL<sup>®</sup>に係る研究開発に取り組んでいる。ここでは、SIAL<sup>®</sup>の概要及び模擬廃棄物の固化試験結果の一例を紹介する。

At the present time, liquid or granular low-level radioactive waste has to be treated and disposed after solidifying into a waste body container in Japan. As a solidification method, a cementation method has been adopted in many cases from the viewpoint of easy handling and so on. However, it has been confirmed that the elution of radioactive elements such as cesium is large in a cement solidified body. Further, in the radioactive waste containing sulfates or borates, there is a concern of a decrease in strength due to the occurrence of chemical corrosion or coagulation inhibition in the solidification with cement. As a solution to the above problems, Fuji Electric Co., Ltd. has been looking into a solidifying material with an alkali-activated material (Geopolymer) as a base material and has been promoting research and development related to SIAL<sup>®</sup>, a geopolymer solidifying material developed by Amec Foster Wheeler which has resulted in actual use in plants. This report describes a summary of SIAL<sup>®</sup> and test results by using simulated waste.

### 1. はじめに

日本においては、液体状の放射性廃棄物や使用済みイオン交換樹脂、焼却灰、スラッジなどの粉粒体状の放射性廃棄物は、固型化材を用いて容器に固型化して処分することが定められている<sup>1)</sup>。固型化材としては、セメント、アスファルト及び

プラスチックが規定されているが<sup>2)</sup>、取り扱いの容易さ、導入費用等の点からセメント固化が多く採用され、既に濃縮廃液等の固型化及び埋設が行われている。

しかしながら、セメント固化体はセシウムや重金属類の閉じ込め性能が低い、硫酸塩やホウ酸塩を含有する一部の廃棄物の固型化が難しい等の問

\*：富士電機株式会社 発電・社会インフラ事業本部 発電プラント事業部 原子力技術部 技術課 (Engineering Sec., Nuclear Power Engineering Dept., Power Plant Division, Power & Social Infrastructure Business Group, Fuji Electric Co., Ltd.)

題もあることがわかっている。

放射性廃棄物の固化体は、長期間の埋設期間において、地下水との接触等により固化体中の放射性核種が漏洩する可能性が考えられるものの、現状、日本においては固化体の閉じ込め性能は求められていない。しかし、環境への影響や将来世代への負担を考慮すれば、固化体の閉じ込め性能は重要な性能であると考えられる。また、廃止措置に向けてはサイト内に保管されている様々な廃棄物の固型化が必要になると考え、富士電機株式会社（以下、「富士電機」という）では、セメントによる固型化における課題の解決方法として、ジオポリマーを用いた固型化材に着目し、この研究開発を行っている。富士電機では、海外で実プラントでの運用実績を有するという点から、ジオポリマー固型化材はAmec Foster Wheeler社の“SIAL<sup>®</sup>”を取り扱っている。

## 2. SIAL<sup>®</sup>の概要

SIAL<sup>®</sup>は、無機アルミノシリケート化合物の重縮合を用いた固型化材で、アルカリ活性材料、いわゆるジオポリマーを用いたものである。Fig. 1にセメントとジオポリマーの固型化プロセスの比較を示す。また、SIAL<sup>®</sup>の赤外スペクトルをFig. 2に、X線回析パターンをFig. 3に示す<sup>3)</sup>。

スロバキアのボフニチェ原子力発電所A-1プラントでは、1976年及び1977年に燃料溶融事故が発生したが、これによって発生した放射性ストロンチウム、セシウム及びTRUで汚染されたスラッジ等をオンサイトで固型化することを目的にSIAL<sup>®</sup>は開発され、主に以下に挙げる放射性廃棄物の固型化を目的で開発された。

- ・スラッジ
- ・使用済みイオン交換樹脂
- ・スラッジとイオン交換樹脂の混合物
- ・有機系化合物（熱媒体）
- ・固体ホウ酸塩

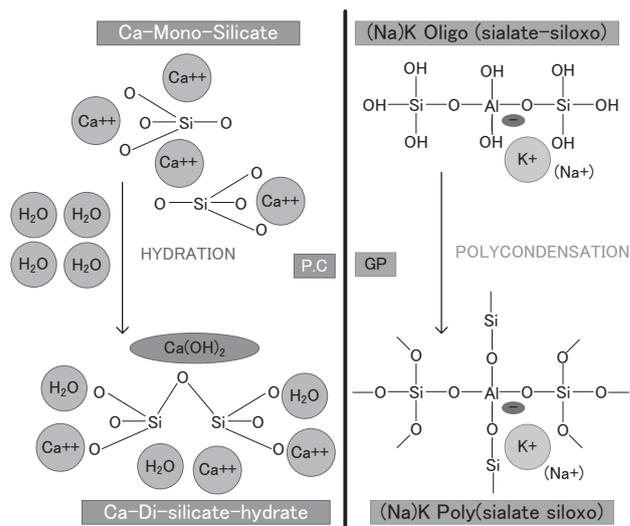


Fig. 1 Solidification by cementation and by the polycondensation processes

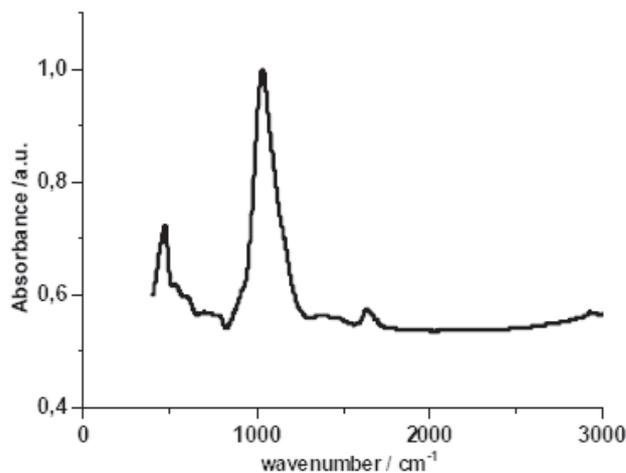


Fig. 2 Infrared spectra of SIAL<sup>®</sup>

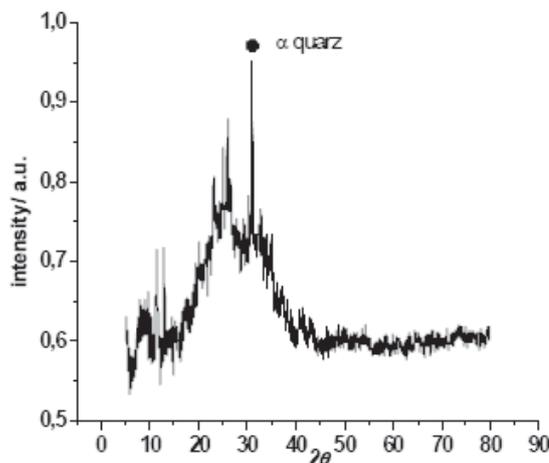


Fig. 3 X-Ray diffraction pattern of SIAL<sup>®</sup> without subtract of background

### 3. SIAL<sup>®</sup>の実績

SIAL<sup>®</sup>は、前述の通り、スロバキアのボフニチェ原子力発電所A-1プラントの事故廃棄物のほか、同原子力発電所のV-1、V-2プラントの運転廃棄物、チェコのドゥコバニ原子力発電所やテメリン原子力発電所の廃棄物でテストされ<sup>3), 4)</sup>、スロバキアでは2003年に、チェコでは2006年に固型化材としてのライセンスを取得している。

ボフニチェ原子力発電所A-1プラントでは、ストロンチウム90、セシウム137及びTRU汚染されたスラッジのほか、700 m<sup>3</sup>を超えるスラッジ、使用済みイオン交換樹脂、ホウ酸結晶をオンサイト固化した実績を持つ。また、ドゥコバニ原子力発電所では、それぞれ200 m<sup>3</sup>を超えるスラッジ、使用済みイオン交換樹脂のオンサイト固化している<sup>3), 4), 5)</sup>。世界で唯一、実際の放射性廃棄物の固型化材として工業的に利用されているものである。

なお、ドゥコバニ原子力発電所では、ビチューメン固化している廃棄物もSIAL<sup>®</sup>に一本化する動きも出ており、英国ではセラフィールドで発生する廃棄物の固型化方法として検討されており、他国でも注目されている固型化材である。

SIAL<sup>®</sup>混練中の様子をFig. 4に、また、混練後の様子をFig. 5に示す。

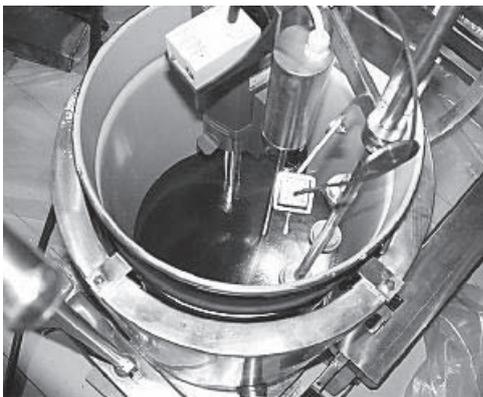


Fig. 4 Kneading of SIAL<sup>®</sup>



Fig. 5 Appearance after kneading

### 4. SIAL<sup>®</sup>の基本特性

SIAL<sup>®</sup>は、固型化材として以下に示す優れた特長を持つ。

- ・セシウムや重金属類の保持性が高い。
- ・物理的、化学的に安定している。
- ・固化対象の幅が広く、廃液、イオン交換樹脂、焼却灰やオイル等の固化が可能である。
- ・廃棄物の充填率を高くできる。
- ・ポルトランドセメントと同等の取扱いが可能であり、加熱不要である。

SIAL<sup>®</sup>混練後の粘度上昇のデータをFig. 6に、温度上昇のデータをFig. 7に示す。中心温度で55℃程度であり、セメントの水和熱に比べると幾分低いことがわかる。

富士電機では、Amec Foster Wheeler社とともに、SIAL<sup>®</sup>の日本国内への適用に向けて、上に挙げた性能の実証と評価を目的とした試験を実施している。ここでは、その試験内容と結果概要を紹介

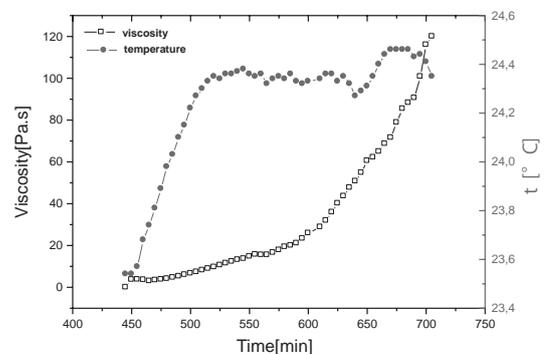


Fig. 6 Increasing of the viscosity in SIAL<sup>®</sup> matrix

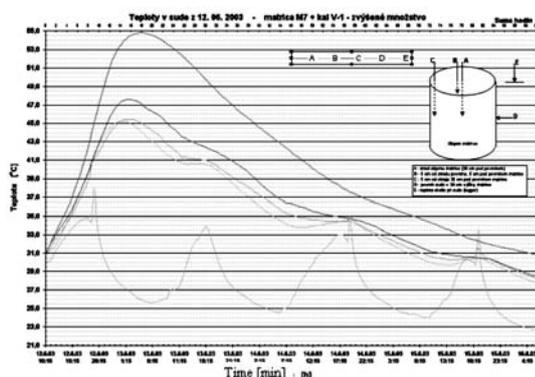


Fig. 7 Increasing of the temperature in SIAL<sup>®</sup> matrix during solidification (200 dm<sup>3</sup> drum)

介する。

#### 4.1 模擬廃樹脂の固型化

SIAL<sup>®</sup>固形体中のセシウムへの閉じ込め性能を評価するため、非放射性のセシウム等を吸着させたイオン交換樹脂を熱処理し、熱処理後の残渣をSIAL<sup>®</sup>を用いて固化し、各種試験を実施した<sup>6)</sup>。

##### (1) 固化対象模擬廃棄物

粒状のイオン交換樹脂（アニオン樹脂：カチオン樹脂＝1：1）にコバルト、セシウム、鉄成分を溶液とした水中でイオン吸着し、この粒状イオン交換樹脂を400℃で熱処理した後の残渣を固化対象とした。熱処理後の模擬廃樹脂における元素濃度をTable 1に示す。

Table 1 Element concentration of ion-exchange resin after thermal treatment

| 元素   | 濃度 [mg/g] |
|------|-----------|
| コバルト | 1.99      |
| セシウム | 9.12      |
| 鉄    | 19.36     |

##### (2) SIAL<sup>®</sup>との混練・固化

廃棄物の充填率の目標値を35 wt%と設定し、秤量した熱処理後廃樹脂に対して、SIAL<sup>®</sup>、水、pH調整剤等を徐々に投入し、混練を行った。最終的な配合をTable 2に示す。

Table 2 Mixture ratio in SIAL<sup>®</sup> sample of Ion-exchange resin after thermal treatment

| 試料                  | 重量 [g] | 割合 [wt%] |
|---------------------|--------|----------|
| 熱処理後樹脂              | 595.0  | 35.0     |
| SIAL <sup>®</sup> 等 | 665.5  | 39.2     |
| 水                   | 415.0  | 24.4     |
| pH調整剤               | 24.5   | 1.4      |
| 合計                  | 1700.0 | 100.0    |

##### (3) 固化状況

SIAL<sup>®</sup>との混練後、熱処理後廃樹脂は膨張等することなく常温にて固化することを確認し、その断面も均質な状態であることを確認した。Fig. 8に固化試料の断面を、Fig. 9に拡大した固化試料断面を示す。

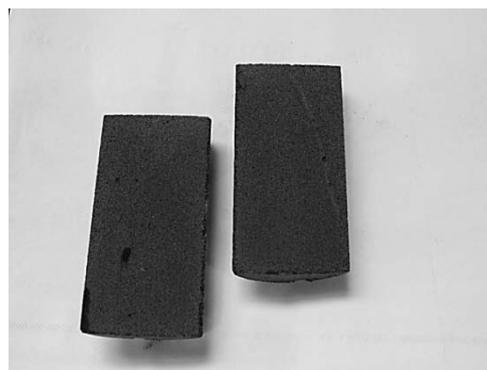


Fig. 8 Cross section of SIAL<sup>®</sup> sample of ion-exchange resin after thermal treatment (φ 5 cm×10 cm)

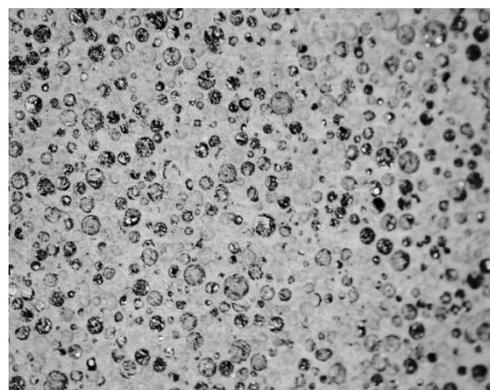


Fig. 9 Enlarged cross section of SIAL<sup>®</sup> sample of ion-exchange resin after thermal treatment

(4) 一軸圧縮強度試験

(2) 項で得られた固化試料について、一軸圧縮強度を測定した。ここでは、非破壊による一軸圧縮強度の測定法であるシュミットハンマー法による計測を実施した。測定器は、Proceq-SA社製 DIGI-SCHMIDT 2000 Model ND/LD を使用した。計測結果を Table 3 に示す。

混練後 2 週間足らずで 15 MPa 以上の強度を発現し、28 日後の段階では 21.5 MPa となった。廃棄物の充填率が比較的高い条件においても、SIAL<sup>®</sup> 固化体が高い強度を発現できることを確認した。

Table 3 Uniaxial compressive strength of SIAL<sup>®</sup> sample of ion-exchange resin after thermal treatment

| 経過日数 | 一軸圧縮強度 [MPa] |
|------|--------------|
| 12   | 16.0         |
| 16   | 17.5         |
| 28   | 21.5         |

(5) 浸出試験

閉じ込め性能は、固化後 28 日後の試験体を用いて、ANSI/ANS-16.1-1986 で規定される浸出試験 Leachability Index (LI) によって評価した。LI の導出式は、以下の通りである。

$$\text{Leachability Index} = \log \left( \frac{1}{D} \right)$$

$$D = \pi \left[ \frac{a_n/A_0}{\Delta t_n} \right]^2 \left[ \frac{V}{S} \right]^2 T$$

- D : 有効拡散係数 [cm<sup>2</sup>/s]
- a<sub>n</sub>/A<sub>0</sub> : 浸出分率 [-]
- Δt<sub>n</sub> : 浸漬間隔 [s]
- V : 供試体体積 [cm<sup>3</sup>]
- S : 供試体表面積 [cm<sup>2</sup>]
- T : 浸漬の平均時間 [s]

浸出試験の結果を Table 4 に示す。固化対象はイオン交換樹脂であるものの、熱処理により交換基は破壊されており、イオン吸着能力は持たない。よって、吸着した元素は容易に溶出する状態

であると考えられるが、この条件においても良好な結果が得られた。

セメントにおけるセシウムの LI は 7 程度であり<sup>7), 8)</sup>、この結果と比べ、高い閉じ込め性能が得られることを確認した。

Table 4 Leaching Index of SIAL<sup>®</sup> sample of ion-exchange resin after thermal treatment

| 元素   | 溶出率 [wt%] | LI    |
|------|-----------|-------|
| コバルト | 0.010     | 12.21 |
| セシウム | 0.683     | 8.72  |
| 鉄    | 0.004     | 13.13 |

(6) まとめ

熱処理後の模擬廃樹脂を SIAL<sup>®</sup> で固化し、圧縮強度試験、浸出試験を実施した結果、良好な結果が得られた。

強度については、早い段階で高い強度を発現し、セメント固化体と同様、徐々に強度が増していくことが確認された。混練後 28 日後の段階で 20 MPa 以上の強度となり、高い強度が得られることを確認した。浸出試験では、SIAL<sup>®</sup> の閉じ込め性能を確認し、セメントと比べて高い閉じ込め性能があることを実証した。これらの結果から、SIAL<sup>®</sup> が熱処理を行った廃樹脂の固型化材として、適用性があることの見通しを得た。

ここで作製した試験体は、現在、固化から約 2 年が経過しているが、固化体に外観上の異常や変化等は見られず、健全な状態を維持している (Fig. 10)。



Fig. 10 SIAL<sup>®</sup> sample of ion-exchange resin after thermal treatment (2 years later)

## 4.2 硫酸塩含有模擬廃液の固型化

硫酸塩を含有する廃棄物に対する SIAL<sup>®</sup> の固型化性能を評価するため、ここでは硫酸ナトリウムを用いた硫酸塩含有模擬廃液の試験を行った<sup>9)</sup>。

### (1) 固型化対象模擬廃棄物

硫酸塩含有模擬廃液として、Table 5 に示す元素を添加した溶液を固型化対象とした。

Table 5 Composition of sodium sulfate imitation liquid waste

| 元素／化合物  | 濃度 [g/kg] |
|---------|-----------|
| 硫酸ナトリウム | ～140      |
| コバルト    | ～21       |
| ニッケル    | ～21       |
| 鉄       | ～21       |

### (2) SIAL<sup>®</sup> との混練・固型化

硫酸塩含有模擬廃液と SIAL<sup>®</sup> の混練に際しては、pH調整剤を少量添加し、沈殿物の形成をするとともに溶液のpHを調整し、その上で混練を行った。最終的な配合は Table 6 に示す。

Table 6 Mixture ratio of SIAL<sup>®</sup> sample of sodium sulfate simulated liquid waste

| 試料                  | 重量 [g] | 割合 [wt%] |
|---------------------|--------|----------|
| 硫酸塩含有模擬廃液           | 100    | 40       |
| pH調整剤               | 18     | 7        |
| SIAL <sup>®</sup> 等 | 130    | 53       |
| 合計                  | 248    | 100      |

### (3) 固型化状況

SIAL<sup>®</sup> との混練後、硫酸塩模擬廃液は常温にて問題なく固型化することを確認し、その断面も均質な状態であることを確認した。Fig. 11 に固型化試料を半割とした外観を、Fig. 12 に拡大した固型化試料断面を示す。

作製後の固型体中の硫酸塩の濃度は、5.6 wt% となった。膨張等は発生せず、問題なく固型化が完了した。

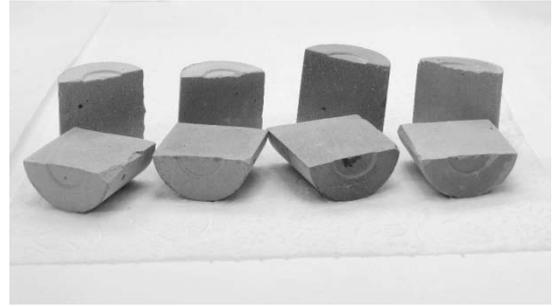


Fig. 11 Cross section of SIAL<sup>®</sup> samples of sodium sulfate simulated liquid waste (φ 4.2 cm, 4 cm)

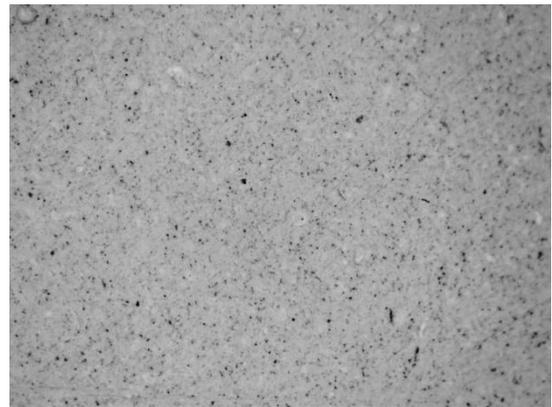


Fig. 12 Enlarged cross section of SIAL<sup>®</sup> sample of sodium sulfate simulated liquid waste

### (4) 一軸圧縮強度試験

得られた固型試料について、STN EN 12390-3:2010 に基づく一軸圧縮強度試験（破壊試験）を実施した。

一軸圧縮強度は、Table 7 に示すように混練後 28 日後の段階で 20.2 MPa となり、十分な強度を発現していることを確認した。この結果より、硫酸塩を含む廃棄物の固型化材として、SIAL<sup>®</sup> が有効なものであることが確認出来たと考える。

Table 7 Uniaxial compression strength of SIAL<sup>®</sup> sample of sodium sulfate simulated liquid waste

| 経過日数 | 一軸圧縮強度 [MPa] |
|------|--------------|
| 28   | 20.2         |

### (5) 浸出試験

閉じ込め性能は、ANSI/ANS-16.1-1986 で規定される浸出試験によって評価した。浸出試験の結果を Table 8 に示す。

コバルト、ニッケルでLI=14.3、鉄ではLI=12.1となり、硫酸塩を含む液体を固型化した際にも非常に高い閉じ込め性能を持つことを確認した。

Table 8 Leaching Index of SIAL<sup>®</sup> sample of sodium sulfate simulated liquid waste

| 評価成分            | 溶出率 [wt%] | LI   |
|-----------------|-----------|------|
| コバルト            | 0.005     | 14.3 |
| ニッケル            | 0.005     | 14.3 |
| 鉄               | 0.06      | 12.1 |
| SO <sub>4</sub> | 1.8~8.4   | —    |

(6) まとめ

硫酸塩含有模擬廃液をSIAL<sup>®</sup>で固化し、圧縮強度試験、浸出試験を実施した結果、模擬廃樹脂を固化した場合と同様、良好な結果が得られた。セメント固形体では、硫酸塩による化学腐食による強度低下が懸念されるが、そのような現象も見られず、硫酸塩含有廃棄物の固型化材として、適用性があるものと考えられる。

ここで作製した試験体は、現在、固化から約1年半が経過しているが、固化体に外観上の異常や変化等は見られず、健全な状態を維持している (Fig. 13)。



Fig. 13 SIAL<sup>®</sup> samples of sodium sulfate simulated liquid waste (1.5 years later)

5. まとめ

以上のように、SIAL<sup>®</sup>は熱処理した廃イオン交換樹脂、及び硫酸塩含有廃液の固化が可能であること、その固形体が優れた強度、閉じ込め性能を持つことを確認した。

廃棄体の作製においては、放射性廃棄物中には放射性核種のみならず、重金属等の有害金属が含まれている場合もあり、これらの漏えいについても考慮すべきとの提言も出ている<sup>10)</sup>。また、廃棄体の健全性の観点から、廃棄物由来の放射線による水素ガス発生を評価すべきとされている<sup>11)</sup>。

今後は、固型化適用対象の拡大に向けた確証試験に加え、放射性分解水素の低減、有害物質閉じ込め性の向上に向けた研究開発を進める計画である。

参考文献

- 1) 核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則。
- 2) 核燃料物質等の第二種廃棄物埋設に関する措置等に係る技術的細目を定める告示。
- 3) P. Lichvar, M. Rozloznik, S.Sekely, “Behavior of Aluminosilicate Inorganic Matrix SIAL<sup>®</sup> during and After Solidification of Radioactive Sludge and Radioactive Spent Resins and Their Mixtures,” IAEA/INIS, RN-44122421 (2013).
- 4) D. Majersky, D. Zavodska, M. Breza, “Application of inorganic SIAL Matrix and Movable Technology in Solidification of the TRU Sludges and Sludge/Resin Mixtures,” 2006 Waste Management Symposium WM’06, Tucson, Feb.29-March 2, (2006).
- 5) P. Tatransky, M. Prazska, D. Harvan, “Solidification of Spent Ion Exchange Resins Into SIAL<sup>®</sup> Matrix at the Dukovany NPP, Czech Republic,” ASME 2013 15th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, (2013).
- 6) 見上 寿, M. Prazska, M. Blazsekova 他, “チェコ・スロバキアで実績のあるジオポリマー固化技術 その2 固化試料の特性,” 日本原子力学会「2014年秋の大会」予稿集, G49, (2014).

- 7) A. El-Kamash, N. M. Sami, M. El-Dessouky, “Leaching Behavior of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{60}\text{Co}$  Radionuclides from Stabilized Waste Matrices,” International Journal of Environmental Engineering Science, Vol. 2, No. 2, July-December, 2011 (2011).
- 8) E. Hwang, S. Hwang, “Determination of the Leachability Index of  $^{137}\text{Cs}$  from Cement Solidified Radioactive Wastes,” Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Articles, Vol.140, No.2 (1990).
- 9) 見上 寿, M. Prazska, M. Blazsekova 他, “チェコ・スロバキアで実績のあるジオポリマー固化技術 ジオポリマー SIAL<sup>®</sup>を用いた硫酸ナトリウム模擬廃液の固化試験,” 日本原子力学会「2015年秋の大会」予稿集, E02 (2015).
- 10) 原子力委員会, “第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方,” 平成22年8月9日.
- 11) 高橋 賢臣, 藤田 智成, “水素ガス発生に及ぼすセメント水和物試料中における水分の存在状態の影響,” 電力中央研究所報告 L11020 (2011).

## 人形峠環境技術センターのウラン測定と関連技術の現状

石森 有\*、横山 薫\*、早川 友也\*  
秦 はるひ\*、迫田 晃弘\*、長沼 政喜\*

### *Current Status of Uranium Measurements and Their Related Techniques at JAEA Ningyo-toge*

Yuu ISHIMORI\*, Kaoru YOKOYAMA\*, Tomoya HAYAKAWA\*  
Haruhi HATA\*, Akihiro SAKODA\* and Masaki NAGANUMA\*

日本原子力研究開発機構人形峠環境技術センターのウラン計測技術とその関連技術の現状について概説する。廃棄物のウラン量評価を目的としてJAWAS-NとQ<sup>2</sup>装置を導入した。これらの測定下限値は200 ℓドラム缶あたり数g程度のウラン量である。Q<sup>2</sup>装置による評価結果を補正するため開発した等価モデルは、数十g程度以下のウラン量には適用できない。この報告では改良した等価モデルのウラン量評価での有効性を示す。これは測定対象物中のウランの不均一な分布を補正するため、1001 keVの光電ピークとその散乱ガンマ線スペクトルを利用する手法である。このモデルの使用により、従来の評価法の1/10を下回るウランの定量下限値を実現した。U-235を定量可能するため、1001 keVのガンマ線を評価するための遮蔽因子  $X_{geometry}$  を186 keVのガンマ線の評価に同様に使用できることを実証した。このモデルを採用した測定装置はすでに国内のほかの原子力事業者でも利用されている。また、クリアランス計測への応用も検討している。関連技術としてガンマ線スペクトルを利用した廃棄物ドラム缶を分類するために、機械学習の適用可能性に係る研究も実施している。

This paper gives an outline of the current status of uranium measurements and their related techniques at the Ningyo-toge Environmental Engineering Center of Japan Atomic Energy Agency. The JAWAS-N and the Q<sup>2</sup> system have been adopted to evaluate uranium contents in the wastes. About 10 g or more of uranium in a 200 ℓ drum can be evaluated by these systems. The equivalent model developed to correct the evaluation results with Q<sup>2</sup> system is not available to less than dozens of grams of uranium in a 200 ℓ drum. The paper illustrates the advantage of use of the improved equivalent model which evaluates uranium content from full energy peak of 1001 keV and its Compton spectrum in order to correct the inhomogeneous distribution of uranium in measuring objects. The use of model achieved the limit of uranium quantitative determination under one tenth of those of previous evaluation methods. To determine U-235, it was demonstrated that the shielding factor,  $X_{geometry}$  for evaluation of 1001 keV gamma-ray is also possible to use for evaluation of 186 keV gamma-ray. The measurement systems adopting the model have been introduced to other nuclear operators in Japan. In addition, it is also examined to use for clearance. As a related technique, feasibility studies on machine learning algorithms have been performed to classify the waste drums depending on their gamma-ray spectrum.

\* : 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 人形峠環境技術センター  
(Ningyo-toge Environmental Engineering Center, Japan Atomic Energy Agency)

## 1. はじめに

1955年にウラン鉱床の露頭が発見されてから、1956年～2001年まで人形峠周辺では探鉱、採鉱、製錬、転換、濃縮技術という核燃料サイクルのフロントエンド技術の開発が行われた。現在は、鉱山施設の跡措置と核燃料関連施設の廃止措置に係るバックエンド技術の開発が行われている。

日本原子力研究開発機構人形峠環境技術センター（以下、「センター」という）では、核燃料物質の在庫差（帳簿在庫量と実在庫量の差：Material unaccounted for）について、1998年頃に国際原子力機関から保障措置上の課題として指摘があった。このため、廃棄物中のウラン量を統一した手法で測定、再評価することが必要となった。

製錬転換施設で保管している廃棄物については、ウラン濃度が高いものがあり、保障措置の観点も考慮して開発を進めた。共存するフッ素や酸素などとの（ $\alpha$ , n）反応で生じる中性子を測定する方法（NWAS）を開発したが、運用には至らなかった<sup>1)</sup>。その後、14MeVの高速中性子を廃棄物に照射してU-235の核分裂中性子測定する方法を適用した装置（JAWAS-N）を開発し、2016年に実運用を開始した。

一方、廃棄物貯蔵庫で保管している廃棄物につ

いては、当時唯一市販されていた廃棄物計測システム「Q<sup>2</sup>低レベル廃棄物ドラム缶測定装置」（CANBERRA社製、以下「Q<sup>2</sup>装置」という）を導入し、2013年までにほぼすべての廃棄物の計測を終了した。その後も廃棄物管理のため、運用を継続している。この間、計測結果を再評価して評価精度を向上させる手法や計測結果を利用して廃棄物管理を支援する手法を開発した。さらに、開発した評価手法を応用した新たな取り組みも進めている。

本稿では、センターで実施している廃棄物や解体物の測定と関連技術開発の現状について紹介する。

## 2. 廃棄物及び解体物の概要

### 2.1 廃棄物等の保管

センターで保管している廃棄物、解体物等をTable 1にまとめた。

操業で発生した廃棄物には、金属、コンクリート、焼却灰、雑固体（フィルター、保温材等）、澱物類（NaF、アルミナ、中和澱物等）があり、ドラム缶（200 l）に封入して保管している。このほか、液体状の廃棄物等についても、ドラム缶（200 l）に封入して保管している。

Table 1 Dismantled materials and wastes stored in the JAEA Ningyo-toge at the end of March 2016

| 施設名                           | 数量                                     | 廃棄物等の来歴           | 計測状況                                  |
|-------------------------------|--|-------------------|---------------------------------------|
| 廃棄物貯蔵庫                        | ドラム缶：14,774本                           | 主に操業で発生した廃棄物      | 2001年～2011年にほぼ全数を計測、Q <sup>2</sup> 装置 |
| 解体物管理施設                       | コンテナ：1,230基                            | 試験精錬所の設備、建屋の解体物   | 2015年～計測中<br>コンテナ測定装置                 |
| 製錬転換施設                        | ドラム缶：1,338本                            | 主に操業で発生した廃棄物      | 2014年～2016年に計測<br>JAWAS-N             |
|                               | ドラム缶：4,881本<br>メッシュコンテナ：390基           | 製錬転換施設内の主要設備解体物など | 未計測                                   |
| 濃縮工学施設※                       | ドラム缶：753本<br>コンテナ：12基<br>メッシュコンテナ：390基 | 遠心機を除く主要設備の解体物など  | 未計測                                   |
| ウラン濃縮原型プラント<br>(廃棄物貯蔵庫、第1貯蔵庫) | ドラム缶：622本                              | 主に操業で発生した廃棄物      | 未計測                                   |
| そのほか廃油貯蔵庫等                    | ドラム缶：113本                              | 操業で発生した液体廃棄物、そのほか | 未計測                                   |

※遠心機を除く。

施設の解体に伴って発生した解体物等は、ドラム缶またはコンテナ (1 m<sup>3</sup>) に封入しているが、将来クリアランスするものは、メッシュコンテナ (1 m<sup>3</sup>) に保管している (Fig. 1)。

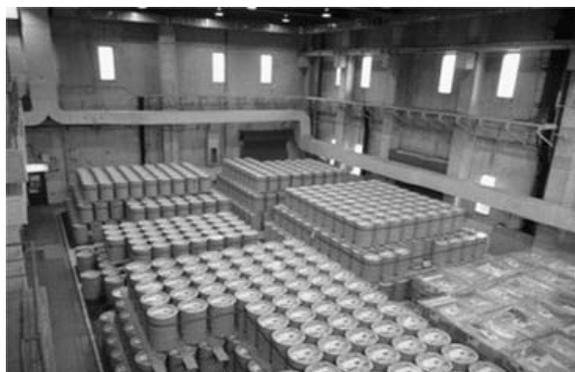


Fig. 1 Storage of dismantled materials in drums and wire containers

## 2.2 廃棄物等の特徴

センターでは、天然のウランを起源とする鉱石処理、粗精錬、製錬、転換、濃縮と使用済み燃料から回収したウランを起源とする転換、濃縮に係る技術開発を行った。このため、発生施設の特徴により、天然ウラン系 (未精製、精製、濃縮、劣化) と回収ウラン系 (濃縮、劣化) の廃棄物等が保管されている。

## 3. 測定の概要

### 3.1 JAWAS-N<sup>2)</sup>

#### (1) 装置

検出器 (25.4 φ×1000 mmのHe-3ガス中性子検出器14台)、ドラム缶回転台、中性子発生管、コンクリート体 (厚さ400~500 mm) 等で構成される



Fig. 2 Appearance of JAWAS-N

装置である (Fig. 2)。中性子発生管 (外寸100 φ×430 mm) は、時間幅10 μsのD-T反応による14 MeVのパルス中性子を1パルスあたり約10<sup>6</sup>個発生する。また、熱中性子化促進のため、ドラム缶にポリエチレン製モデレータ (厚さ20 mm) を装着する。

#### (2) 測定原理と評価方法

高速中性子直接問かけ法 (Fast Neutron Direct Interrogation、以下、「FNDI法」という) は、測定試料に高速中性子を照射して核分裂反応を誘起し、核分裂中性子を計測することで核分裂性物質を定量する方法である。短時間で消滅する照射高速中性子、緩やかに消滅する核分裂中性子、バックグラウンドの中性子が同時に計測されるため、時間スペクトルからそれぞれの成分を分離し、核分裂中性子の積分値を解析する (Fig. 3)。

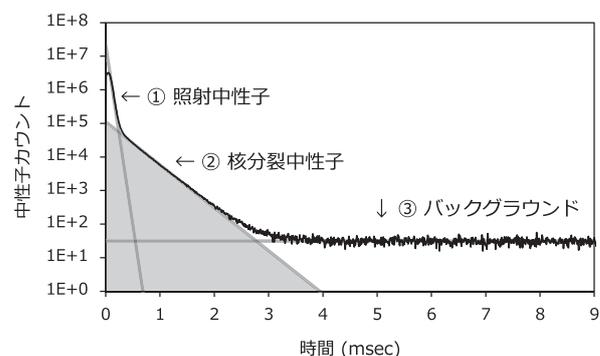


Fig. 3 Typical time spectrum of neutron counts (The hatched area is proportional to U-235 mass in a drum.)

#### (3) 測定

鉄材を用いた模擬廃棄物 (かさ密度0.25~1.2 g/cm<sup>3</sup>)、NaF、CaF<sub>2</sub>、アルミナを用いた模擬廃棄物 (それぞれかさ密度1.0、1.2、0.8 g/cm<sup>3</sup>) とウラン線源 (最大198 g) を使用した試験で校正した。また、シミュレーションでは天然ウラン10 kgまでは、核分裂中性子数がウラン質量に比例することを確認した。2014年以降、製錬転換施設で保管する廃棄物約1000本のドラム缶のU-235量を計測し、ウラン量を評価した。これにより、10分間の計測で、天然ウラン10 g以上で±20%で評価できることを実証した。

#### (4) 適用範囲

JAWAS-Nの評価精度は、ガンマ線計測による

評価と同程度であり、かつ濃縮度が不明な廃棄物に対しては、ガンマ線計測などにより事前に濃縮度を確定する必要があることなどから、当面製錬転換施設の計量管理目的での測定を行うこととしている。

### 3.2 Q<sup>2</sup>装置<sup>3), 4)</sup>

#### (1) 装置

検出器 (W130×D80×L400 mmのNaI(Tl)シンチレーション検出器2台)、重量計付きドラム缶回転台、鉄体 (厚さ100 mm) 等で構成される装置である (Fig. 4)。長尺の検出器を使用して、ドラム缶の軸方向の線源の偏在を平均化している。また、ドラム缶を回転することで、径方向の廃棄物や線源の偏在を平均化して計測する。



Fig. 4 Appearance of Q<sup>2</sup> system

#### (2) 評価方法

CANBERRA社が開発した廃棄物評価ソフトウェア (Genie) では、ドラム缶重量から自己遮蔽効果を補正し、均一な線源分布を仮定して評価する。

#### (3) 測定

もみがら (かさ密度0.25 g/cm<sup>3</sup>)、活性炭 (かさ密度0.55 g/cm<sup>3</sup>)、消石灰 (かさ密度0.80 g/cm<sup>3</sup>)、珪砂 (かさ密度1.4 g/cm<sup>3</sup>) を用いた模擬廃棄物とウラン線源 (最大200 g) を使用した試験で校正した。均一な分布であれば、5分間の計測で、ウラン20 g以上で±10%以下で評価でき、定量下限値はウラン6 gである。鉄材 (かさ密度0.83 g/cm<sup>3</sup>) とウラン100 gを偏在させて収納した模擬廃棄物の試験で、真値に対して50~250%の指示値となった。焼却予定の可燃物、難燃物、大型金属機器などを除き、2013年までに廃棄物貯蔵庫で保管する廃棄物約14,000本のドラム缶を計測し、Pa-234m (1001 keV) のピークからウラン量を評価した (Fig. 5)。ウランはガンマ線の遮蔽効果が小さい澱物類により多く含まれていたが、遮蔽効果が大きい金属廃棄物約4800本のドラム缶の不確かさも考慮して、ウラン量約20 tに対して誤差は550 kgと評価した。

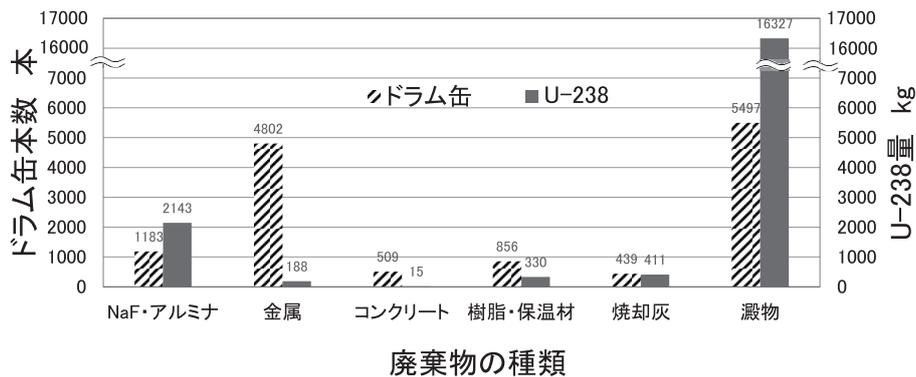


Fig. 5 Uranum-238 contents in various waste drums

4. 関連技術開発

4.1 等価モデル<sup>5)~9)</sup>

Q<sup>2</sup>装置の計測結果を再評価することを意図して開発した。廃棄物密度や線源の不均一な分布を補正するため、エネルギーの異なる2つのガンマ線の透過率の違いを利用する評価方法である。

一般に放出率*i*の線源で、検出効率εの検出器との距離を*r*、線減弱係数をμとすると計数率  $n \propto \frac{\epsilon i e^{-\mu r}}{r^2}$  である。エネルギーの異なる2本のガンマ線*a*、*b*で計数率比の対数について

$\ln\left(\frac{\epsilon_b i_b n_a}{\epsilon_a i_a n_b}\right) \propto r$ となる。計数率*n<sub>a</sub>*への線源位置の影響は $\frac{1}{r^2}$ が主要であると考え、これに比例する  $X_{geometry}$  というパラメータを導入する。

$$X_{geometry} = \frac{1}{\left(\ln\left(k' \frac{n_b}{n_a}\right)\right)^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$\therefore k' = \frac{\epsilon_a i_a}{\epsilon_b i_b}$$

これにより、検量線を作成することができる。

詳細な説明はここでは省略するが、複数線源であっても(1)式を使用することができる。

ウランの定量では、Pa-234mからのガンマ線1001 keV (0.84%)と766 keV (0.29%)\*とを利用する。

4.2 散乱ガンマ線を利用した等価モデル<sup>10)</sup>

等価モデルでは2本のエネルギーの異なるガンマ線を利用するが、この場合、計数率の低いガンマ線の誤差への影響がより大きくなる。このため、等価モデルの測定下限値は200 lドラム缶あたり数十gのウラン量(数Bq/g程度)である(計測時間1800 sec)。より低レベルの計測を精度よく実施するために、計数率の高い散乱ガンマ線の利用を考えた。散乱ガンマ線では放出率などが定義できないため、(1)式で  $k' = 1$  とする。

$$X_{geometry} = \frac{1}{\left(\ln\left(\frac{n_b}{n_a}\right)\right)^2} \dots\dots\dots (2)$$

ウランの定量ではPa-234mからのガンマ線1001 keV付近の計数率と400~600 keV付近の散乱ガンマ線の計数率を利用して  $X_{geometry}$  を計算し、1001 keVのピークからU-238量を決定する。

模擬廃棄物とウラン1 g~10 gを利用して、Q<sup>2</sup>装置の指示値と散乱ガンマ線を利用した等価モデルによる評価値の真のウラン量に対する相対誤差をFig. 6に示す。測定下限値は200 lドラム缶あたり3 g程度のウラン量(0.3 Bq/g程度)まで下げること成功した(計測時間1800 sec)。

\*NaI(Tl)検出器を利用する場合、743 keVから786 keVが分離できないので、766 keV付近の実効的な効率率は0.43%程度である。

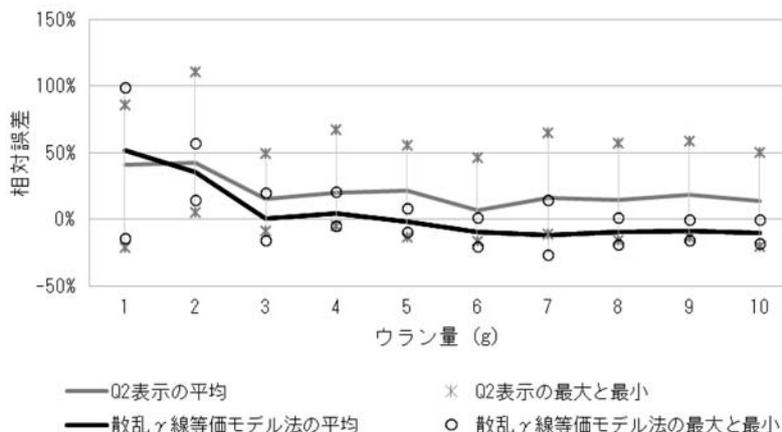


Fig. 6 Comparison of relative errors  
(The evaluation method using Compton spectrum provides smaller differences from true values than those indicated by the Q<sup>2</sup> system.)

### 4.3 U-235評価方法の検討<sup>1)</sup>

U-235の偏在状態は、共存するU-238の偏在状態と同様であるので、U-235とU-238の偏在を表す量は同じ指標で表現できるはずである。様々な濃縮度のウランに対応するため、U-238の定量に利用した $X_{geometry}$ をU-235からの186 keVのガンマ線に適用することを考えた。

全重量200 kg程度の模擬廃棄物にU-235濃縮度3.884 wt%のウラン244.2 gを様々な位置に配置してガンマ線測定(測定時間1800 sec)を行った。1001 keVピークと散乱ガンマ線を用いて計算した $X_{geometry}$ 値と1001 keVと186 keV計数率の相関をFig. 7に示す。回帰直線(決定係数0.98)は、それぞれ、U-235量9.49 g、U-238量234.7 gを示す検量線になる。

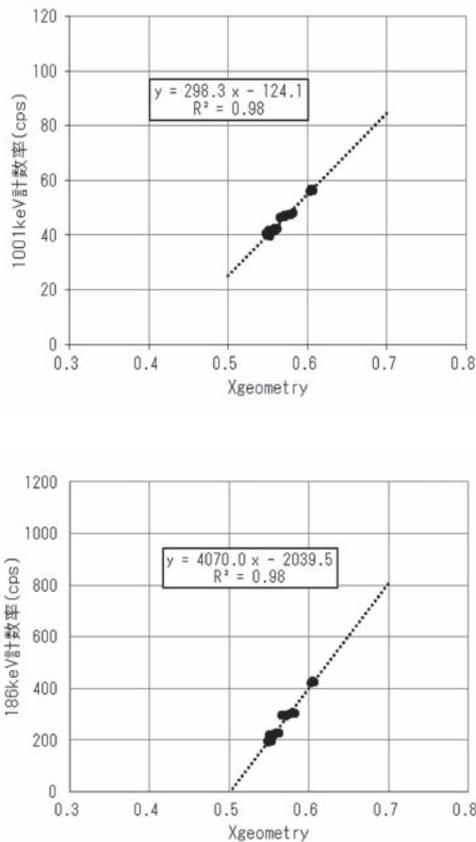


Fig. 7 Relationships between  $X_{geometry}$  evaluated by using Compton spectrum and the count rates in 1001 keV and 186 keV peaks

ドラム缶を測定して計算した $X_{geometry}$ 値での検量線上の計数率に対する、実測した186 keVと1001 keVの計数率のずれを使ってU-235量とU-238量を評価する。U-235量について、ガンマ線の計数誤差によって発生する不確かさを含めて評価した真のU-235量に対する相対誤差は、測定時間1800 secの場合、ほぼ±10%の範囲以内であり、測定時間300 secの場合、ドラム缶中心付近で強く遮蔽を受ける場合に外れ値があるが、ほぼ±20%の範囲で定量できることを確認した。

### 4.4 クリアランス計測への応用<sup>2)</sup>

散乱ガンマ線を利用する等価モデルのクリアランス計測への応用については、平成26年度以降、経済産業省資源エネルギー庁「次世代再処理ガラス固化技術基盤研究事業(低レベル放射性廃棄物の除染方法の検討)」のなかで実施してきた。

ウランに係るクリアランスは、金属について制度化されているが、アルファ線計測上の問題から単純な形状の金属のみに限定して運用されている状況である。国内のウラン加工事業者の金属解体物等のうち約55~70%は複雑形状の部材であり(Fig. 8)、これらについてもクリアランスが可能となれば、廃棄物量の低減や資源の有効利用が可能となり、大きな経済的効果も見込まれる。

従来、クリアランス測定装置として、原子炉施設の放射化によって生成したCo-60の測定を中心に評価するトレイ型測定装置(PLS検出器を使用)が開発されてきた。ウランではガンマ線放出率が低いため、精度を高めるためには、計測対象物量を増やすことが必要であり、ドラム缶など解体物の保管容器を遮蔽体内部に入れ、高効率なNaI検出器で測定する方法が合理的と判断した。クリアランスレベル(全ウラン1 Bq/g)に対し、総量100~200 kg程度、かさ密度1.0 g/cm<sup>3</sup>程度の対象物について、測定下限値0.1 Bq/g程度、計測時間1800 sec~3600 secで評価できることを目標に、散乱ガンマ線を利用した等価モデルを導入した装置の製作を行っている。

遮蔽体厚さ10 cm(材質に鉄を使用)、NaI検出器(結晶サイズ3×5×16インチ)6台、検出器はドラム缶の上部から下部をカバーする配置で、現在装置の基本的な性能評価を行っている(Fig. 9)。

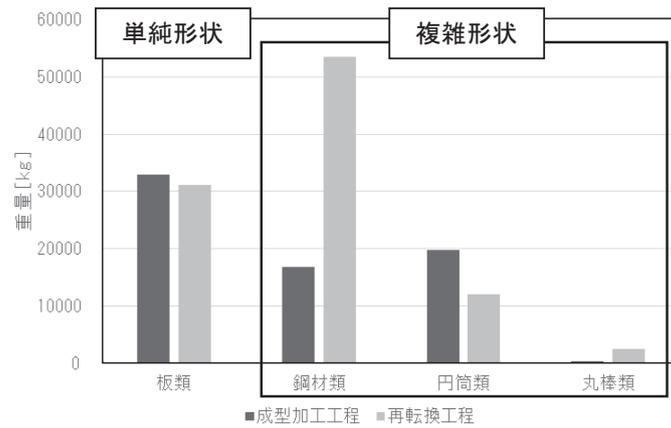


Fig. 8 Various cleared materials supposed to be generated from nuclear facilities in Japan

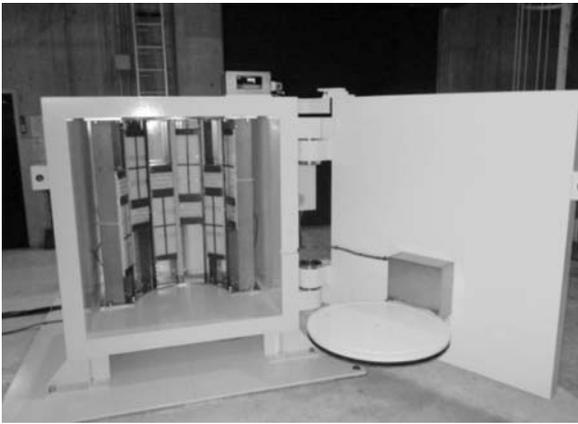


Fig. 9 Appearance of a measurement system for clearance

平成29年度には、詳細な性能評価、実証試験を行いながら、測定手順の決定を行い、機能の付加をして装置を完成する予定である。

#### 4.5 廃棄物分類への機械学習の適用

センターで保管している廃棄物は発生施設の特徴に応じて様々な組成のウラン等を含んでいる。これらをガンマ線スペクトルの特徴によって分類する手法として、機械学習の適用について検討している。機械学習の導入は、短時間で数値として客観的な分類根拠が提示できること、核種組成などデータ間の類似の度合いあるいは相違の度合いを数値的に把握できることなどに利点がある。2値分類法であるサポートベクターマシン (SVM) とアンサンブル学習法であるランダムフォレスト (RF) の2種類のパターン認識法について適用性

確認を行った。検討では、製錬転換施設の廃水処理工程で発生した中和沈殿物を保管しているドラム缶とイエローケーキの溶解工程で発生した珪藻土のドラム缶に添付している分類ラベルとQ<sup>2</sup>装置で計測したガンマ線スペクトルのデータを利用した。

SVM及びRFによる2クラスへの分類については、ラジウムをほとんど含まない中和沈殿物に対して、天然ウラン系と回収ウラン系への分類を試みた<sup>13), 14)</sup>。SVMでは12個の訓練データでも精度よく分類が可能であったが、RFで同程度の精度を得るためには、190個程度の訓練データが必要であった。

3クラスへの分類については、上記の沈殿物とラジウムを比較的多く含む珪藻土に対して分類を試みた<sup>15)</sup>。この場合、誤分類となるものが数多く発生したが、RFではSVMよりも誤分類が少ない傾向があり、RFの方がより柔軟な分類を行っていることが示唆された (Fig. 10)。なお、SVMについては、one vs oneと呼ばれる方法SVM (1 vs 1) と、one vs restと呼ばれる方法SVM (1 vs R) について検討した。前者は2クラスの組合せ毎の決定値を求め、後者は1クラスと残りのクラスの組合せ毎の決定値を求め、比較分類する方法である。

#### 5. おわりに

センターのウラン計測に係る現状を紹介した。

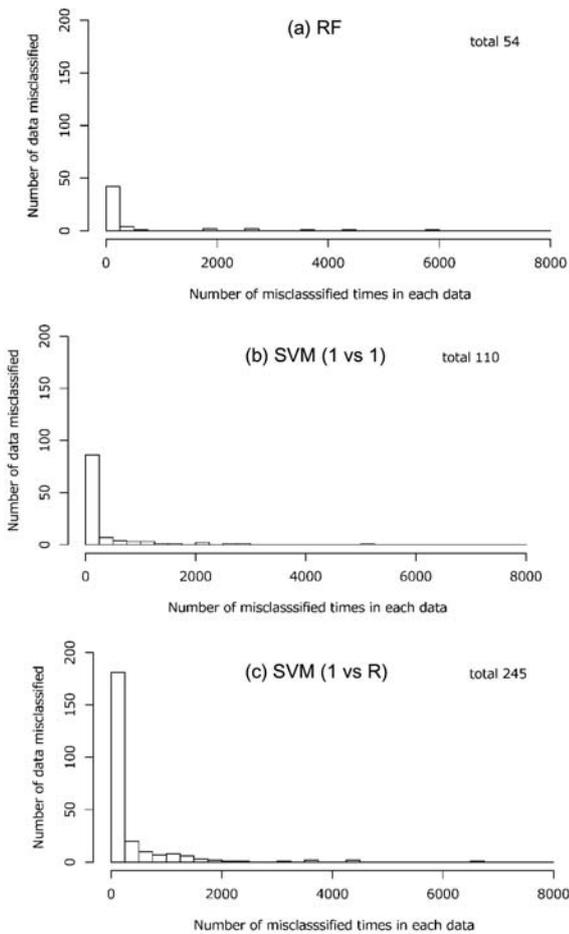


Fig. 10 Distribution of misclassified data in RF and SVM (The number of data misclassified is shown in right upper area in each figure<sup>15)</sup>.)

現在のところ、センターの主要な評価手法として、散乱ガンマ線を用いた等価モデル法を採用することが有望であると考えており、これを中心とした計測技術の標準化を目指している。測定可能なウラン濃度範囲が広く、密度が極端に高い対象物でなければ、事前に内容物に関する情報がなくても精度よく測定が可能である。この手法はすでに国内のウラン取り扱い事業者の廃棄物計測<sup>11)</sup>や福島でのセシウム計測に適用<sup>16), 17)</sup>されており、また、クリアランス計測への応用も期待できる。

散乱ガンマ線領域の評価を妨害する核種が混在する場合にはオリジナルの等価モデルの利用、対象物の密度が高い場合にはJAWAS-Nの利用など、これらは二次的な手法として活用することができる。

計測したガンマ線スペクトルについて、放射性

物質の定量のほか、機械学習による廃棄物分類への利用可能性についても検討した。新たな分類支援ツールとして、今後の実用化に向けた検討をさらに進める予定である。

#### 参考文献

- 1) 在間直樹, 中島伸一, 中塚嘉明, 門一実, 春山満夫, 高瀬操, 大冨章, 呉田昌俊, “ウラン廃棄物ドラム缶のNDA測定の高度化計画, アクティブ中性子測定の導入,” 核物質管理学会 (INMM), 日本支部第33回年次大会論文集 (インターネット), 8 Pages, 2012.
- 2) 大冨章, 米田政夫, 呉田昌俊, 在間直樹, 中塚嘉明, 中島伸一, “高速中性子直接問かけ法による実廃棄物ドラム缶のウラン量非破壊測定システムの実用化研究,” 日本原子力学会和文論文誌, 15(2), 115–127, 2016.
- 3) F. Bronson, “Q<sup>2</sup> — A Very Low Level Quantitative and Qualitative Waste Assay and Release Certification,” In Proc. Of Waste Management '90, February 25-28, 1990, University of Arizona, Tucson, Arizona, Revised, 1994.
- 4) 小原義之, 長沼政喜, 野廣哲也, 吉田公一, 牧田彰典, 坂手光男, 入沢巧, 村下達也, “ウラン廃棄物を対象とした非破壊測定装置の運用実績,” JAEA-Technology 2012-048, 2012.
- 5) 横山薫, 杉杖典岳, “放射性廃棄物収納容器中のウラン放射能簡易定量評価のためのパッシブ線計測,” Radioisotopes, 59(12), 707–719, 2010.
- 6) 横山薫, 杉杖典岳, “放射性廃棄物収納容器中のウラン放射能簡易定量評価のためのγ線計測方法,” Radioisotopes, 60(10), 409–416, 2011.
- 7) 横山薫, 杉杖典岳, 室井正行, 鈴木康夫, “γ線計測による放射性廃棄物収納容器中のウラン238の定量の検証,” Radioisotopes, 62(1), 1–17, 2013.
- 8) 横山薫, 秦はるひ, 小原義之, 杉杖典岳, “CANBERRA製Qualitative and Quantative (Q<sup>2</sup>)装置による廃棄物ドラム缶中のウラン放射能定量試験,” Radioisotopes, 62(11), 833–840, 2013.

- 9) 横山薫, 秦はるひ, 小原義之, 長沼政喜, 杉杖典岳, “廃棄物線分析システムによるウラン238定量結果の検証,” *Radioisotopes*, 63(12), 559–566, 2014.
- 10) 横山薫, 秦はるひ, 長沼政喜, 小原義之, 石森有, “放射性廃棄物中のウラン238量のコンプトン散乱を用いた定量手法の検証,” *Radioisotopes*, 64(11), 687–696, 2015.
- 11) 横山薫, 佐藤克典, 山中貴志, 石森有, “放射性廃棄物中のU-235濃縮度の定量手法の検証,” *Radioisotopes*, 65(11), 441–450, 2016.
- 12) 石森有, 横山薫, 長沼政喜, “形状が様々な解体物のクリアランスのための $\gamma$ 線計測における評価手法の提案,” 日本放射線安全管理学会, 第15回学術大会講演予稿集, 岡山, 2016年11月30日–12月2日, 53, 2016.
- 13) H. Hata, K. Yokoyama, Y. Ishimori, Y. Ohara, Y. Tanaka, N. Sugitsue, “Application of Support Vector Machine to Rapid Classification of Uranium Waste Drums Using Low-resolution  $\gamma$ -ray Spectra,” *Applied Radiation and Isotopes*, 104, 143–146, 2015.
- 14) 秦はるひ, 石森有, “ランダムフォレスト法による $\gamma$ 線スペクトルを用いた放射性廃棄物ドラム缶の分類,” *Radioisotopes*, 66(1), 1–10, 2017.
- 15) 秦はるひ, 石森有 “ウランを含む廃棄物ドラム缶の $\gamma$ 線スペクトルデータに対するランダムフォレスト法とサポートベクターマシン法の分類性能の比較,” *Radioisotopes*, 66(4), 2017 (in press)
- 16) 横山薫, 鈴木敦雄, 石森有, “Cs除染廃棄物中の放射性セシウム定量方法の検証,” *Radioisotopes*, 66(3), 2017 (in press).
- 17) A. Suzuki, Y. Ishimori, K. Yokoyama, “Validation Testing of Radioactive Cesium Measurement in Decontaminated Waste with Scattering Gamma Correction Method,” In Proc. Of WM2017 Conference, Phoenix, Arizona, USA, March 5–9, 2017 (in press).



# RANDEC

Radwaste and Decommissioning Center

RANDEC contributes to establishment of generic nuclear energy backend technology in Japan. The following works are currently intensively involved:

**The establishment of business work of consignment, store and process of radwaste from domestic research, industrial facilities etc. for disposal.**

---

**The research and development of nuclear facility decommissioning technology and radwaste treatment as well as disposal.**

---

**The study on decontamination and environmental restoration of ground in Fukushima and Kanto area.**

---

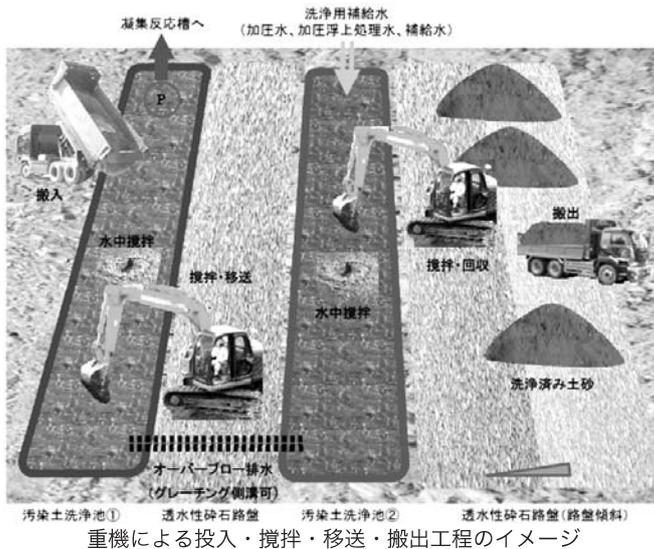
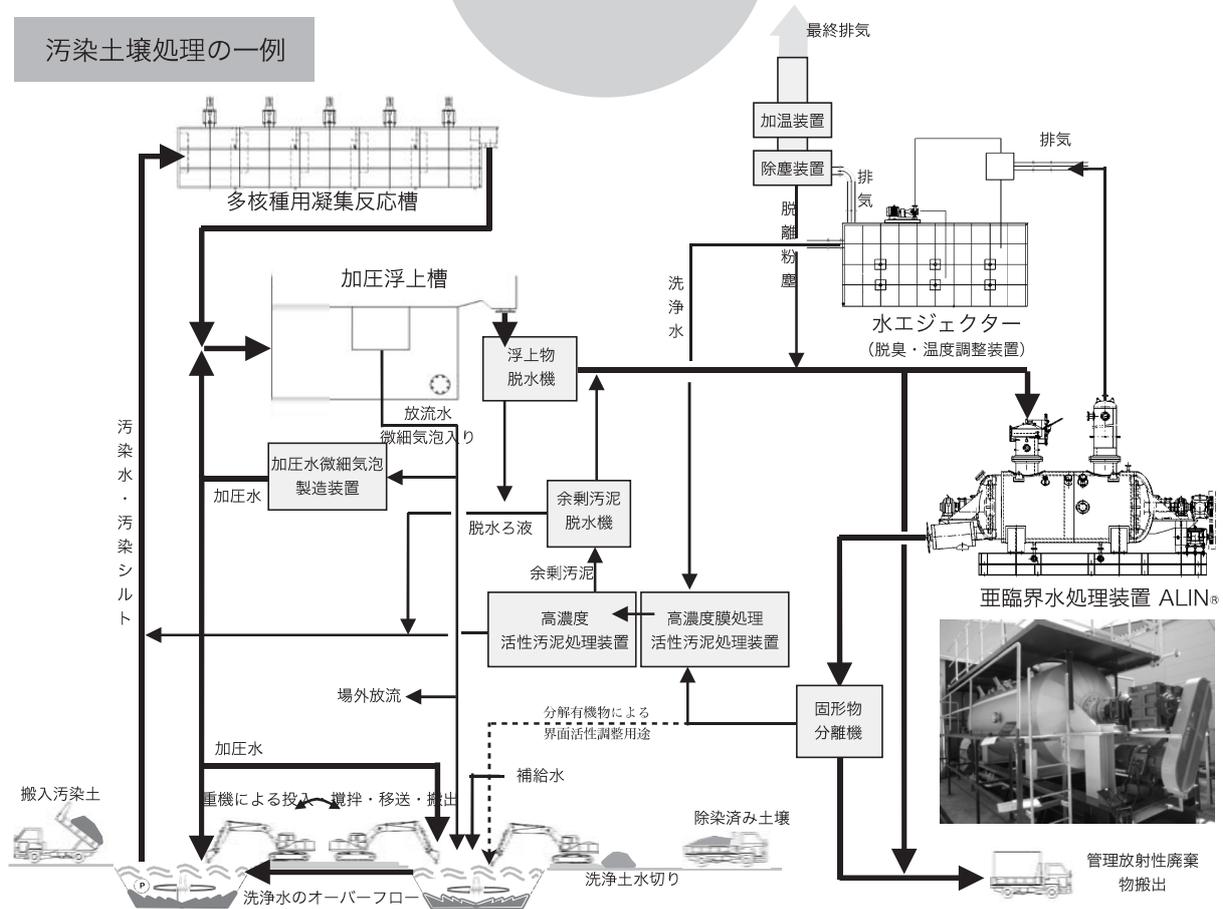
**The dissemination and enlightenment of backend research and development results, and training.**

RANDEC works for advancement of science and technology, and sustainable environmental cleanliness.

# SRICS SYSTEM

PCSの提案するセシウム汚染土壌等の大量処理システム

## 汚染土壌処理の一例



## SRICS SYSTEMの特徴

- ・ 汚染土壌からセシウム等有害物を除去
- ・ 汚染有機物はほとんど消滅 (Pat, Pat. P)
- ・ 汚染した無機有機混合物にも有効

枝葉、衣服、プラスチック、ダンボール等紙類等の有機物や汚泥、糞尿、被覆電線、電子基板、糞尿等の有機無機混合物に適用可能です。

(株) ピーシーエス (PCS : Pollution Control Systems)

〒065-0015

札幌市東区北15条東1丁目1-25 (札幌本社)

電話 011-712-0283 Fax 011-712-0349

URL : <http://www.pcs-sapporo.com>

mail : pcs.co.ltd@outlook.jp (札幌・東京共通)

〒107-0052

東京都港区赤坂4-1-32、赤坂ビル10F

電話 03-6441-2701 Fax 03-6441-2702

mail : pcs.suzuki@aol.com (担当者直通 鈴木)

**JGC**

日揮株式会社

JGC それは日揮のグローバルネーム

<http://www.jgc.com/>

## 饒舌なサムライであれ

そして、完成したプラントに灯がともるとき、饒舌なサムライは初めて寡黙に涙する。

おそらく人類が生み出す最も巨大かつ複雑な装置であるプラント。それらを構成する膨大な機器や資材は世界中の企業から調達する。建設現場ではピーク時には5万人を超える労働者を統率。しかもその国籍は60か国を超えることも。

寡黙では務まらない。饒舌に、言葉を尽くし、国や民族、文化を超えて世界中の技術と人、製品をダイナミックに結びつける。

数年に及ぶプロジェクト遂行中の困難、それに伴う緊張。それは数もスケールも桁違い。それでも時に野武士と呼ばれる。タフな精神と揺るぎない信念で乗り越えてゆく。



## PENTAX®

### プラント現況の 3D モデリングに最適！ 3D Scanning system S-3180V

- 秒間 100 万点 (Max) の高速スキャン性能
- ノイズの少ない高品質の点群データを記録
- 内蔵 HDR カメラでカラーデータを取得
- Class1 アイセーフレーザー使用

TI アサヒ株式会社

特機直販グループ 〒339-0073 埼玉県さいたま市岩槻区上野 4-3-4 TEL.048-793-0009  
国内営業グループ 〒339-0073 埼玉県さいたま市岩槻区上野 4-3-4 TEL.048-793-0018



**ECC**

## 『社会基盤の礎』を担う環境プロフェッショナル

放射能分析をはじめ、環境に関する問題何でもご相談下さい！ (ISO/IEC 17025 認定機関※)

※放射性セシウム (廃棄物、土壌、食品)、土壌中重金属等、ダイオキシン類

- ◆ **調査・分析**  
作業環境測定 (電離放射線含む) / ダイオキシン類 / PCB / アスベスト調査 / 土壌調査 / 大気環境・排水・水質調査 / 放射能核種分析 / 放射性ストロンチウム (文科省測定法シリーズ2に準拠) / MOVING LAB による現地分析 (アスベスト、PM2.5、放射能) / 臭気調査
- ◆ **コンサルティング**  
環境アセスメント / 生活環境影響調査 / 悪臭対策 / 土壌汚染対策 /
- ◆ **試験・研究**  
放射能に関する受託試験 (公的研究機関からの受託実績あり) / レアメタル分析 / ナノマテリアル計測 / 異物分析 / 構造解析

調査・分析から研究開発、アフターフォローまでお客様の様々な環境課題にお応えします！

**45<sup>TH</sup> 株式会社 環境管理センター ECC-R**

本社：〒193-0832 東京都八王子市散田町 3-7-23  
TEL (042) 673-0500(代) FAX (042) 667-6789

営業ご案内：(03) 6206-4321  
<http://www.kankyo-kanri.co.jp/>




**3M** Science.  
Applied to Life.™

スリーエムジャパンは  
「新三本の矢」の一つである  
科学技術イノベーションを推進します。

スリーエム ジャパン株式会社

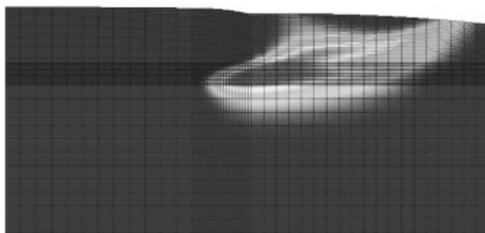
〒141-8684 東京都品川区北品川 6-7-29

<http://www.mmm.co.jp/>

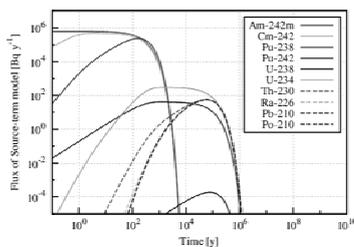
## 原子力関連施設の安全性評価のための解析業務に豊富な実績があります

原子力関連施設の安全性評価では、放射性物質発生量の計算から、人の被ばく線量計算にいたるまで、様々な解析手法を駆使する必要があります。V.I.C.は、関係省庁や各研究機関と協力し、一連の解析手法に関連する技術・知見を積み上げてきています。

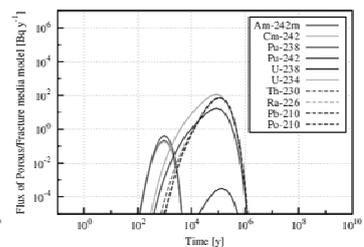
- 廃棄物中の放射エネルギーの計算(燃焼計算、放射化計算)－ORIGEN2
- 放射線輸送計算、遮へい計算－QAD、MCNP、PHITS
- 埋設処分施設の安全性評価(地下水流動解析、核種移行解析、線量評価)  
－3DSEEP、Dtransu、TOUGH2、GSA-GCL、GSRW
- 臨界計算-MVP、SRAC、TWO-DANT、SMORES、OPT-TWO、OPT-DANT、AGNES、AGNES-P



2次元物質移行解析結果例



1次元核種移行解析結果例



**V.I.C.**  
Visible Information Center, Inc.

株式会社ヴィジブルインフォメーションセンター

〒319-1112 茨城県那珂郡東海村村松440

電話 029-282-1654 FAX 029-282-8788 e-mail [call@vic.co.jp](mailto:call@vic.co.jp)

<http://www.vic.co.jp/>



**Space Developer** 

**解体工事を通して美しい景色を作り続けます**

プラント、ビル、公共施設等の解体工事 実績多数

保有重機 180tクラス 2台 160tクラス 1台 100tクラス 4台  
50tクラス 5台 30tクラス 4台 他50台

自走式破砕機、ワイヤソー機、ダンプトラック他

未来へ接近——。

**バンドーレテック株式会社**

本社 〒761-8032 香川県高松市鶴市町1番地  
TEL 087-882-8186 FAX 087-882-7405  
URL <http://www.bando-retec.com/>

東京営業所TEL 03-6256-8896 大阪営業所TEL 06-6232-3450  
広島営業所TEL 082-249-2421 岡山営業所TEL 086-239-2167



# 可搬型放射線モニター IRM-P2

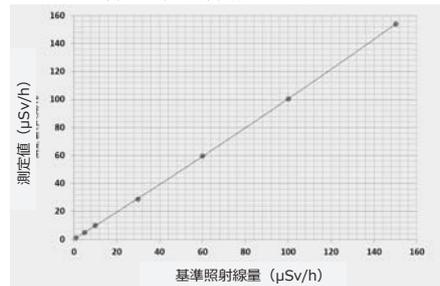


**小型・軽量・高性能!!**  
(寸法300mm×206mm×219mm 重量5.8kg)

## 高機能

- ◆GPSデータ取得機能
- ◆エネルギー補償機能  
(CsIシンチレーション検出器)
- ◆スペクトルデータ取得機能
- ◆データロギング機能
- ◆データ通信機能
- ◆現場表示機能

## 線量率直線性(137Cs線源)



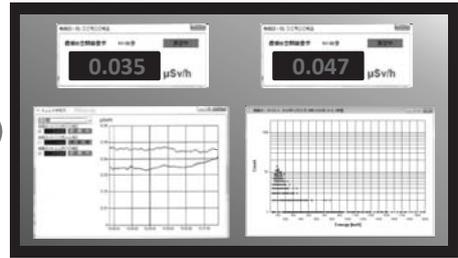
## ワンタッチで測定開始!

- ◆位置情報、日時、線量率データを自動取得
- ◆取得したデータは通信機能により遠隔場所の監視用PCに自動転送され、リアルタイムで監視可能。(空間線量率、トレンド、スペクトル)
- ◆LAN回線(WiFi及び有線)を用いたローカル監視システムの構築も可能。

携帯中継局



監視室のパソコンなどに表示



災害発生時の緊急対応



定置モニタリング



歩行モニタリング



株式会社E & Eテクノサービス  
E&E Techno Service ,Ltd

担当部署 事業展開部  
TEL 029-219-5187

〒312-0003 茨城県ひたちなか市足崎西原1476-19  
ホームページURL <http://www.e-ets.co.jp>

遮蔽体から遠隔自動化設備まで  
原子力関連業界で

◆ 60年以上の経験と実績 ◆

設計・製作から据付・調整まで一貫して可能な、  
当社ならではの調和のとれた設備をご提案



ISO 9001



ASME U

営業品目

- 各種遮蔽機器、設備
  - 放射性物質取扱・処理設備
  - 核燃料、放射性廃棄物輸送容器
  - グローブボックス及び内装設備
- 等々多品目

**木村化工機株式会社**  
エネルギー・環境事業部

☎ 東京営業部:03-3837-1831 大阪営業部:06-6488-2533

## 千代田テクノルから原子力施設等の廃止措置工事に有用な 測定装置を提案致します・・・

### 可搬型β線/α線識別式連続ダストモニタ (iCAM)

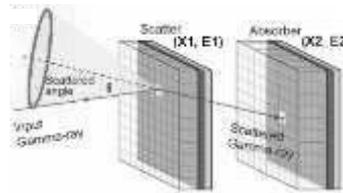


A  
CANBERRA

- 作業環境下の浮遊性放射性物質濃度をβ線/α線を弁別して連続監視する可搬型連続ダストモニタです。
- Si半導体検出器を用いβ線/α線を弁別測定し、連続ろ紙に吸着された粒子状物質中の天然のRn/Tnの影響を自動減算し、高い精度で人工放射性核種の測定監視が可能です。廃止措置工事において特に換気機能が十分に確保でない作業環境での人工放射性核種の連続監視に最適です。
- 充実した機能
  - ・取外し可能な連続ろ紙 (ろ紙送り速度可変)
  - ・高/低流量警報
  - ・連続的に全体の空気流量を記録及び出力
  - ・停電時データ保持用バッテリー内蔵
  - ・RS-485、RS-232インターフェイス内蔵
  - ・本体重量：約 12 kg
  - ・本体寸法：約 245(W)×535(H)×170(D) mm

### ガンマ・キャッチャー (GAMMA・Catcher)

- 原子力施設内で放射性物質の蓄積場所 (いわゆるホットスポット) を可視化する装置です。廃止措置工事の進捗に応じて放射性物質の蓄積/分布状況を迅速に把握するのに最適です。
- シンチレータと高感度半導体検出素子を前後に配置、コンプトン効果を利用して放射性物質の分布状態をイメージ化します。
- 魚眼レンズの採用により一度の測定で広いエリアの蓄積/分布状況を短時間で確認可能です。
- 小型・軽量で簡単に持ち運びができ、どこでも、だれでも、すぐに測定可能です。
  - ・ソフトウェア起動後、直ちに測定可能。
  - ・防じん、防水構造 (IP65)
  - ・魚眼レンズ (視野角140°)
  - ・測定原理より基本的に遮蔽が不要
  - ・本体重量：約 2 kg
  - ・本体寸法：約 150(W)×140(H)×150(D) mm
- 測定データは自動保存され、後で測定データの解析が可能です。



**TECHNOL** 株式会社 千代田テクノル  
原子力事業本部

〒113-8681 東京都文京区湯島1-7-12 千代田御茶の水ビル  
<http://www.c-technol.co.jp> / e-mail: [ctc-master@c-technol.co.jp](mailto:ctc-master@c-technol.co.jp)

# 未来のために、今できること。

情報収集と分析により、社会を真摯に見つめ、有益な知見と有効な対応策を示すことを通じて、技術、制度、組織と社会との良好な関係づくりを支援します。



## 社会との良好な関係づくりを支援する調査、分析、コンサルティング

多様なリサーチ手法、技術的専門性、社会に対する洞察力でお客様固有の課題に応えます。

原子力及び科学技術分野を様々な側面で支援する株式会社ペスコの調査研究、リサーチ・コンサルティングサービスです。調査分析スキルと調査課題に関する専門知識を駆使して、お客様固有の課題に応えます。

お客様の漠然とした問題意識からの課題の明確化、調査の企画・設計及び実施、分析、戦略立案を行います。

エンジニアリング企業としての技術的専門性、事業会社としての社会経験による洞察力、各分野のエキスパートとの連携も強みです。

### 情報・データ収集

リサーチスキルと技術的専門性で的確に収集

- ◆文献調査（統計、報道等）
- ◆技術・学術情報調査
- ◆法令・規制調査
- ◆現地調査

### 社会調査

スタンダードな調査を正しい方法で

- ◆アンケート調査
- ◆ヒアリング、グループインタビュー調査
- ◆オーダーメイドの調査設計

### 分析・解析

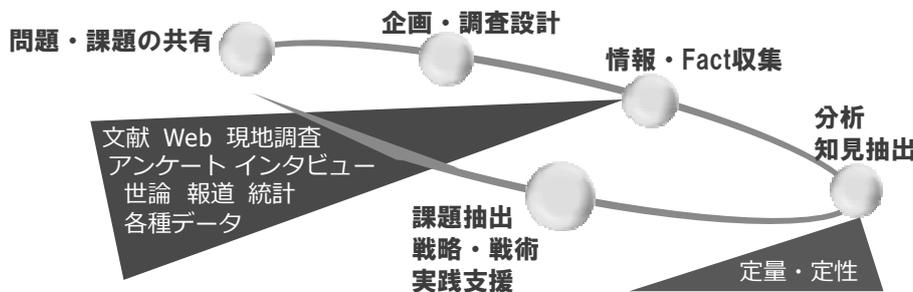
データ・情報から有効な知見を抽出

- ◆統計解析、データ/テキストマイニング
- ◆試算・シミュレーション
- ◆社会心理学的分析
- ◆ビジネスフレームワークによる分析

### コンサルティング

社会との良好な関係づくりを支援

- ◆リスクコミュニケーション支援
- ◆科学技術コミュニケーション支援
- ◆環境、健康、安全問題への対応
- ◆コンプライアンス推進等



### 幅広い対応領域

原子力・放射性廃棄物を中心に、放射線、化学、環境、エネルギー、製品安全、食品、医療、情報技術等の技術領域を得意とします。リスクマネジメント、法務・コンプライアンス、消費者保護など、技術と関連の深い社会制度にも対応いたします。

### お気軽にご相談ください

なんとかしたいが、どうしたらよいかわからない。そんな漠然とした問題意識をお持ちの段階からご相談ください。専門コンサルタントが、お客様の課題を明確化し、解決のための手順を設計します。また、私たちはお客様の課題解決を支援することを一義的な目的としています。調査の必要性の検討や、より費用対効果の高い代替手段も視野に入れてアドバイスさせていただきます。弊社Webサイトの問い合わせフォームもご利用ください。

技術と社会との関係の難しさを正しく認識し、よりよい関係づくりを目指す。

私たちの生活は科学技術の成果の上に成り立っています。しかし、科学技術には正負の両面があります。規制等の法的課題のクリア、リスクとの付き合い方、住民等との相互理解に基づく信頼関係の構築、科学者や供給者の社会的責任など、科学技術と社会との関係は単純ではなく、認識不足からの判断の誤りが思わぬ失敗を招きます。組織や技術をとりまく社会環境を調査、分析し、正しく認識することが社会との良好な関係をつくる第一歩です。

<http://res.pesco.co.jp>

ペスコ 社会環境

検索

株式会社ペスコ **社会環境研究室**

〒105-0021 東京都港区東新橋2-5-12  
Tel 03-3435-9588 Fax 03-3435-9586

© デコミッションング技報 第55号

発行日 : 平成29年3月30日

編集・発行者 : 公益財団法人  
原子力バックエンド推進センター

〒319-1107

茨城県那珂郡東海村豊白一丁目3-37

Tel. 029-283-3010

Fax. 029-287-0022

URL : <http://www.randec.or.jp>

E-mail : [decomi@randec.or.jp](mailto:decomi@randec.or.jp)