

# デコミッショニング技報

Journal of the RANDEC

巻頭言：OECD/NEA 廃止措置協力が開始されてから25年  
技術報告：浜岡原子力発電所1,2号機廃止措置計画の概要  
発電所から発生する運転中廃棄物の処理処分の  
現状について  
研究報告：レーザー除染装置の開発  
核種移動を考慮した放射能インベントリ評価シ  
ステムの開発  
技術概説：韓国月城原子力環境管理センター（中・低レベ  
ル放射性廃棄物処分施設）建設の現況について

財団法人 原子力研究バックエンド推進センター

Radioactive Waste Management and Nuclear Facility  
Decommissioning Technology Center

# RANDEC

**RANDECは、原子力施設のデコミッションング(廃止措置)技術の確立をめざした活動及びRI・研究所等廃棄物の処分地の立地等処理処分事業に関する調査等を行っています。**

## 事業の内容

デコミッションングに関する試験研究・調査を行います。



デコミッションングに関する技術・情報を提供します。



デコミッションングに関する人材を養成します。



RI・研究所等廃棄物の処分地の立地等処理処分事業に関する調査等を行います。



デコミッションング及びRI・研究所等廃棄物の処分地の立地等処理処分事業に関する普及啓発活動を行います。

# デコミッションング技報

第41号 (2010年 3月)

## — 目 次 —

### 巻 頭 言

OECD/NEA廃止措置協力が開始されてから25年 .....	1
	柳原 敏

### 技術報告

浜岡原子力発電所 1, 2号機 廃止措置計画の概要 .....	2
	仲神元順

発電所から発生する運転中廃棄物の処理処分の現状について .....	13
	松澤俊春、吉田武史、青木 裕

### 研究報告

レーザー除染装置の開発 .....	22
	峰原英介

核種移動を考慮した放射能インベントリ評価システム開発 .....	31
	福村信男、宮本喜晟

### 技術概説

韓国月城原子力環境管理センター (中・低レベル放射性廃棄物処分施設) 建設の現況について .....	41
	鈴木康夫

# Journal of the RANDEC

No.41 Mar, 2010

## CONTENTS

### Technical Report

- The Outline of Decommissioning Plan for Hamaoka Nuclear Power Station's Unit 1 and Unit 2 ..... 2  
Motonori NAKAGAMI
- The State of Disposal of Wastes from Nuclear Power Plants in Operation ..... 13  
Toshiharu MATSUZAWA, Takeshi YOSHIDA, Yu AOKI

### Research Report

- Laser Cleaner Development for Decontamination of the Primary  
Water Cooling System at Nuclear Power Plants ..... 22  
Eisuke MINEHARA
- Development of Radioactivity Estimation System Considering Radioactive Nuclide Movement ..... 31  
Nobuo FUKUMURA, Yoshiaki MIYAMOTO

### Exposition

- Current Construction Status of Korea Wolsong Nuclear Environment Management Center  
(Low and Intermediate Level Radioactive Waste Disposal Facility) ..... 41  
Yasuo SUZUKI

### **The Outline of Decommissioning Plan for Hamaoka Nuclear Power Station's Unit 1 and Unit 2**

Motorori NAKAGAMI

J.RANDEC, No41 (Mar.2010) page2~12, 24 Figures

In Japan, terminated nuclear power stations must be dismantled and removed, and doing this requires establishing a nuclear reactor facility decommissioning plan as based on the Law on the Regulation of Nuclear Source Material, Nuclear Fuel Material and Reactors, and getting the approval of the national government.

Termination Hamaoka Nuclear Power Station's Unit 1 and Unit 2 on January 30, 2009 Chubu Electric submitted an "Application for Approval of Hamaoka Nuclear Power Station's Unit 1 and Unit 2 Decommissioning Plan" to the Minister of Economy, Trade and Industry in keeping with the stipulations of Article 43, Paragraph 3-2-2, of the Law on the Regulation of Nuclear Source Material, Nuclear Fuel Material and Reactors. On June 1, 2009 As the application was authorized on November 18, 2009, Chubu Electric started to dismantle.

The application includes an overall plan for dismantling reactor facilities safely and surely, a description of tasks to be performed during the period Chubu Electric is preparing to dismantle the facilities in the coming years (system decontamination, survey of facility contamination, etc.) and safety assurance measures, among other information.

### **The State of Disposal of Wastes from Nuclear Power Plants in Operation**

Toshiharu MATSUZAWA, Takeshi YOSHIDA,  
Yu AOKI

J.RANDEC, No41 (Mar.2010)page13~21, 12 Figures

We process gaseous, liquid and solid radioactive wastes generated from Nuclear Power Plants (NPPs) in operation by exclusive facilities safely and appropriately, and make effects to reduce them reasonably. Some Low-level radioactive wastes generated from the NPPs have been disposed into the shallow land disposal site. We adapt safety and

reasonable process to reduce the volume of them in the NPPs. For example, concentrated wastewater is reduced by pelletizing and making to the fine particle, and is packaged by solidifying to the drums. The produced waste packages are confirmed to the compatibility with the technological standard by voluntary inspection according to the law, and then are confirmed by JNES(Japan Nuclear Energy Safety Organization). Then waste packages are transported to the Low-Level Radioactive Waste Burial Center. We believe that it is important for decommissioning age in future to process and disposed steady of the radioactive wastes in NPPs in operation now.

### **Laser Cleaner Development for Decontamination of the Primary Water Cooling System at Nuclear Power Plants**

Eisuke MINEHARA

J.RANDEC, No41 (Mar.2010) page22~30, 12 Figures

We recently have performed the feasibility studies to develop laser cleaners utilizing several laser oscillator and amplifier systems like femto-second free-electron lasers, water-jet guided lasers, Q-switched YAG lasers, fiber lasers. Whenever we used to clean the RI-contaminated surface using the lasers, we should focus enough laser power in the surface to evaporate instantly without melting. Therefore, as the contaminated being deeply located into the surface could be removed using any one set of the lasers, we found that every trial of laser cleaning could remove very well the RI contamination being located deeply. Our cold decontamination test using a model sample being Cobalt plated successfully has been performed to show a very high decontamination factor. In order to develop an usable laser cleaner, we plan to develop the prototype laser cleaner next year.

### **Development of Radioactivity Estimation System Considering Radioactive Nuclide Movement**

Nobuo FUKUMURA, Yoshiaki MIYAMOTO

J.RANDEC, No41 (Mar.2010) page31~40, 8 Figures, 3

## Tables

A radioactivity estimation system considering radioactive nuclide movement is developed to integrate the established codes and the code system for decommissioning of sodium cooled fast reactor (FBR). The former are the codes for estimation of radioactivity movement in sodium coolant of fast reactor which are named S a f f i r e , PSYCHE and TTT. The latter code system is to estimate neutron irradiation activity(COSMARD - RRADO). It is paid special attention to keep the consistency of input data used among these codes and also the simplification of their interface. A new function is added to the estimation system, to estimate minor FP inventory caused by the fission of impurities contained in the coolant and slight fuel material attached on the fuel cladding. To check the evaluation system, the system is applied with radioactivity data of the preceding FBR such as BN-350, JOYO and Monju. Agreement between the analysis results and the measurement is well satisfactory. The uncertainty of the code system is within several tens per cent for the

activation of primary coolant (Na-22) and factor of 2-4 for the estimation of radioactivity inventory in sodium coolant.

### **Current Construction Status of Korea Wolsong Nuclear Environment Management Center (Low and Intermediate Level Radioactive Waste Disposal Facility)**

Yasuo SUZUKI

J.RANDEC, No41 (Mar.2010) page41~48, 4 Figures, 1 Table, 2 Photos

Through the RANDEC delegation tour to Korea in Nov. 2009, we have earned new information on recent development of the radioactive waste management in Korea. In this report, we will introduce such development in Korea, focusing on the current construction status of Korean LILW(low and intermediate level radioactive waste) disposal site, now called, Wolsong Nuclear Environment Management Center.

## OECD/NEA廃止措置協力が開始されてから25年



独立行政法人 日本原子力研究開発機構  
バックエンド推進部門  
副部門長 柳原 敏

OECD/NEAにおいて廃止措置の国際協力が開始されたのは1985年、それから既に四半世紀が経過した。当時は原子力開発の初期に建設された幾つかの原子力施設で廃止措置の準備が進められている時期であった。これらの廃止措置プロジェクトを着実に進める上で国際協力が必要であり、各国が代表的な廃止措置プロジェクトを指定して情報交換が進められた。我が国からは日本原子力研究所のJPDR (Japan Power Demonstration Reactor) 解体プロジェクトがこの国際協力に参加した。米国からは SHIPPINGPORT 原子力発電所、ベルギーからは BR-3、ドイツからは ニーダライヒバハ原子力発電所、フランスからは G2、英国からは WAGR などの廃止措置プロジェクトが情報交換の対象となった。現在でも協力は活発に行われている。また、この協力の下に組織された廃止措置の費用評価に係る部会では、標準的な費用項目が整理され、廃止措置に必要な費用評価の標準として役立つ。SHIPPINGPORT や ニーダライヒバハ原子力発電所の解体作業には数年を要し、施設を解体した跡地は更地になり芝が植えられている。WAGR と BR-3 の廃止措置には20年以上が費やされ、現在、解体作業は最終段階を迎えており、ようやく初期の目的を達成しつつある。非常に長い道のりであった。

一方、SHIPPINGPORT 原子力発電所の廃止措置プロジェクト終了と同時期に立ち上げられた米国エネルギー省の環境管理 (EM) 計画は、マンハッタン計画やその後の原爆製造などで発生した放射性廃棄物の処理処分、不要施設の廃止措置、汚染した環境の修復を目的としたものである。多額の予算が費やされてきたが、当初の歩みは遅々としたものであった。近年、ようやくその成果が顕著になってきた。プロジェクトの開始から約20年を経て、マウンド、ファーナルド、ロッキーフラッツなどにおいて環境修復の活動が終了し、原子力施設の跡地は非原子力の工業団地や公園などとして甦っている。

我が国の廃止措置についてみると、JPDR 解体プロジェクトが終了した後、大学や研究機関において小型の研究炉や原子力施設の解体作業が実施された。ふげんの廃止措置も僅かではあるが進捗している。東海発電所の廃止措置では熱交換器の遠隔解体が進んでいる。更に、昨年からは浜岡原子力発電所の1、2号機が廃止措置に入った。これから施設の解体作業が終了するまでには、まだ多くの年月を経ることになる。

OECD/NEA や IAEA などが開催する廃止措置の会議では、原子力施設の施設情報や運転データを長期間保存し廃止措置に有効に適用すること、廃止措置の経験や知見を次の機会に有効に活用することなど、長期間の情報の保持・伝達に関する課題が議論される。廃止措置プロジェクトの大きな特徴といえる。また、上述した例で示すように、廃止措置の開始から終了までに非常に長い期間を経ることがあり、その成果が目に見えるのがプロジェクト後半になるという特徴もある。この間に予算の確保、関係者の士気の維持、技術の進展に伴う計画の見直しなど、廃止措置プロジェクトは比較的短い期間で成果が明らかになる技術開発などとは異なる性質を持つ。

ようやく成果が見えてきた EM 計画、WAGR 及び BR-3 廃止措置プロジェクトの報に接し、長期的展望の下に確実にプロジェクトを進めることの大切さを痛感する。また、長期にわたる廃止措置の合理的な完遂を実現するために検討すべき課題が多く残されていると思われる。



## 浜岡原子力発電所 1, 2号機 廃止措置計画の概要

仲神元順\*

### *The Outline of Decommissioning Plan for Hamaoka Nuclear Power Station's Unit 1 and Unit 2*

Motonori NAKAGAMI\*

わが国では、運転を終了した原子力発電所は解体撤去することとされており、その実施にあたっては、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」に基づき、あらかじめ原子炉施設の廃止措置計画を定め、国の認可を受けることとなっている。

浜岡原子力発電所 1, 2号機は、平成21年1月30日をもって運転を終了したため、平成21年6月1日に「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」第43条の3の2第2項の規定に基づき、「浜岡原子力発電所1号原子炉及び2号原子炉廃止措置計画認可申請書」を経済産業大臣に提出し、平成21年11月18日に認可を得たことから廃止措置に着手した。

本廃止措置計画においては、原子炉施設の解体を安全かつ確実にを行うための全体計画や、至近数年間の解体工事準備期間中に実施する作業（系統除染、施設の汚染状況の調査等）の内容および安全確保対策などを定めている。

In Japan, terminated nuclear power stations must be dismantled and removed, and doing this requires establishing a nuclear reactor facility decommissioning plan as based on the Law on the Regulation of Nuclear Source Material, Nuclear Fuel Material and Reactors, and getting the approval of the national government.

Termination Hamaoka Nuclear Power Station's Unit 1 and Unit 2 on January 30, 2009 Chubu Electric submitted an "Application for Approval of Hamaoka Nuclear Power Station's Unit 1 and Unit 2 Decommissioning Plan" to the Minister of Economy, Trade and Industry in keeping with the stipulations of Article 43, Paragraph 3-2-2, of the Law on the Regulation of Nuclear Source Material, Nuclear Fuel Material and Reactors. On June 1, 2009 As the application was authorized on November 18, 2009, Chubu Electric started to dismantle.

The application includes an overall plan for dismantling reactor facilities safely and surely, a description of tasks to be performed during the period Chubu Electric is preparing to dismantle the facilities in the coming years (system decontamination, survey of facility contamination, etc.) and safety assurance measures, among other information.

\*：中部電力株式会社 発電本部 原子力部 環境グループ

(DECOMMISSIONING & RADWASTE PLANNING GROUP, NUCLEAR POWER DEPT. POWER GENERATION DIV., CHUBU Electric Power Co., Inc)



## 1. 浜岡原子力発電所の概要

浜岡原子力発電所は、昭和51年3月に静岡県小笠郡浜岡町（現静岡県御前崎市）に1号機が営業運転を開始して以来順次増設を行い、現在までに5機の原子炉が設置されている。このうち、1号機及び2号機は、平成21年1月30日をもって運転を終了し、平成21年11月18日より廃止措置を実施中である。また、浜岡原子力発電所リプレース計画等として1号機及び2号機の廃止とともに6号機の建設計画について公表を行った。浜岡原子力発電所の概要をFig.1～3に示す。

### 1.1 1号機及び2号機運転終了までのあゆみ

浜岡原子力発電所は、当社唯一の原子力発電所として、また1号機は当社初めての原子の灯として昭和51年3月以来当社のエネルギー供給拠点という重要な役割を果たしてきた。また、1号機及

び2号機で培った経験は、その後建設・運転される他号機の安全・安定運転に貢献した。

#### (1) 1号機運転終了までのあゆみ

1号機は、出力54万kWの沸騰水型軽水炉で、昭和42年9月に建設申し入れを行い、昭和46年3月着工、昭和51年3月営業運転を開始した。平成13年11月に余熱除去系配管破断に伴い原子炉を停止、平成14年4月より第19回定期検査を開始し、平成23年3月までの予定で炉心シュラウド取替工事、耐震裕度向上工事を実施する計画であったが、経済性の観点等から平成20年12月に浜岡原子力発電所リプレース計画等（1号機及び2号機の廃止、6号機の増設等）の公表を行い、平成21年1月に運転を終了した。初臨界以降平成13年11月に停止するまで、約27年間の運転実績を有している。Fig.4～5参照



Fig.1 Position of Hamaoka Nuclear Power Station



Fig.2 Main Equipment Arrangement

プラント	原子炉型	定格電気出力	営業運転開始
1号機	沸騰水型軽水炉 (BWR)	54万kW	昭和51年3月
2号機		84万kW	昭和53年11月
3号機		110万kW	昭和62年8月
4号機		113.7万kW	平成5年9月
5号機	改良型沸騰水型軽水炉 (ABWR)	138万kW*	平成17年1月
(6号機)		140万kW級	(平成30年代前半)

\* 圧力プレートを設置して運転中のため、現在の出力は126.7万kW

Fig.3 Outline of the Main Equipment

- ◆昭和42年 9月 浜岡1号機の建設申し入れ
- ◆昭和45年12月 原子炉設置許可
- ◆昭和46年 3月 着工
- ◆昭和49年 6月 初臨界
- ◆昭和51年 3月 営業運転開始
- ◆平成13年11月 余熱除去系配管破断に伴う  
原子炉停止
- ◆平成20年12月 リプレース計画等を公表
- ◆平成21年 1月 運転終了
- ◆運転期間(初臨界～停止):約27年

Fig.4 Unit 1 Main Event



Fig.5 Site Panorama of Before Constructing the Hamaoka Nuclear Power Station

(2) 浜岡2号機運転終了までのあゆみ

2号機は、出力84万kWの沸騰水型軽水炉で、昭和47年1月に増設の申し入れを行い、昭和48年6月着工、昭和53年11月営業運転を開始した。平成16年2月に第20回定期検査を開始し、平成23年3月までの予定で炉心シュラウド取替工事、耐震裕度向上工事を実施する計画であったが、経済性の観点等から平成20年12月に浜岡原子力発電所リプレース計画等として1号機とともに、平成21年1月に運転を終了した。初臨界以降平成16年2月に停止するまで、約26年間の運転実績を有している。Fig.6～7参照

- ◆昭和47年 1月 浜岡2号機の増設申し入れ
- ◆昭和48年 6月 原子炉設置変更許可
- ◆昭和49年 3月 着工
- ◆昭和53年 3月 初臨界
- ◆昭和53年11月 営業運転開始
- ◆平成16年 2月 第20回定期検査のため  
原子炉停止
- ◆平成20年12月 リプレース計画等を公表
- ◆平成21年 1月 運転終了
- ◆運転期間(初臨界～停止):約26年

Fig.6 Unit 2 Main Event



Fig.7 Unit 2 Under Construction(this side)

2. 1号機及び2号機の廃止措置計画

2.1 運転終了に伴う措置

1号機及び2号機の運転終了に伴う措置として、平成20年12月22日に電気事業法第9条1項に基づき、浜岡原子力発電所の合計電気出力を488.4万kW(1号機～5号機合計)から1号機及び2号機を除いた350.4万kWに変更する届出を行った。

また、1号機及び2号機は、原子炉内に燃料を装荷しないこと、原子炉の運転を行わないことを原子炉施設保安規定に規定するよう変更認可申請を行い平成21年1月19日に認可を得た。Fig.8(運転終了式の様子：モードスイッチ「停止」位置での操作鍵の取り外し操作)参照。

2.2 廃止措置計画の準備

廃止措置の実施にあたっては、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」に基づき「廃止措置計画認可申請書」を国に提出し、認可を受けるよう規定されている。また、廃止措置



Fig.8 Termination Ceremony

を終了するときにも同法に基づき「廃止措置終了確認申請書」を国に提出し、確認を受けることになっている。

廃止措置計画認可申請書には、

- ・廃止措置の対象となる原子炉の名称
- ・廃止措置対象施設のうち解体の対象となる施設及びその解体方法
- ・核燃料物質の管理及び譲渡し
- ・核燃料物質による汚染の除去
- ・核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の廃棄
- ・廃止措置の工程

などについて、記載することが求められている。

また、計画の認可の基準は、

- ・原子炉の炉心から使用済燃料が取り出されていること
- ・核燃料物質の管理及び譲渡しが適切なものであること
- ・核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の管理、処理及び廃棄が適切なものであること
- ・廃止措置の実施が核燃料物質若しくは核燃料物質によって汚染された物又は原子炉による災害の防止上適切なものであること

となっている。

### 2.3 廃止措置計画認可申請・認可

浜岡原子力発電所リプレース計画等の公表後、廃止措置計画の作成に着手し、平成21年6月1日に「廃止措置計画認可申請書」を国に提出、平成21年9月15日に申請書の一部補正を行い、平成21年11月18日に経済産業大臣より認可を得た。

廃止措置は全体を4段階に区分して実施することとし、今回の申請では

- ・原子炉施設の解体を安全かつ確実にを行うための全体計画
- ・至近数年間の「解体工事準備期間(第1段階)」中に実施する作業(系統除染、施設の汚染状況の調査など)の内容及び安全確保対策などについて記載した。

なお、管理区域内での解体工事(第2段階以降)にあたっては、第1段階中に実施する施設の汚染状況の調査結果等を踏まえ、解体撤去の工法・手

順、放射性廃棄物の処理・管理等について検討し、第2段階(原子炉領域周辺設備の解体撤去)に着手するまでに実施する事項を定め、廃止措置計画に反映し変更認可を受ける計画とした。

廃止措置計画認可申請書については、当社のでんきの科学館、浜岡原子力館で公開している。

### 2.4 廃止措置の全体計画

廃止措置の全体計画をFig.9に示す。

1号機及び2号機とも、平成48年度末までに廃止措置を完了する計画で、約28年間の工程を4段階に区切って進める計画とした。

- ・第1段階：解体工事準備期間で、平成21～26年度までの6年間。

燃料の搬出・譲渡し、汚染状況の調査、系統除染、管理区域外設備・機器の解体撤去などを行う。

Fig.10(廃止措置対象施設から燃料搬出、系統除染が終了した状態)参照。

- ・第2段階：原子炉領域周辺設備解体撤去期間で、平成27～34年度までの8年間。

原子炉領域周辺設備の解体撤去、安全貯蔵、解体撤去物処理設備の設置などを行う。

Fig.11(タービン、主復水器、主蒸気管等を解体撤去した状態)参照。

- ・第3段階：原子炉領域解体撤去期間で、平成35～41年度までの7年間。

原子炉領域(原子炉容器、炉心支持構造物、原子炉容器を取り囲む放射線遮へい体を含む領域)の解体撤去などを行う。

Fig.12(設備、機器を解体撤去した後の状態)参照。

- ・第4段階：建屋等解体撤去期間で、平成42～48年度までの7年間。

建屋内の放射性物質の除去、建屋の解体撤去などを行う。

Fig.13(建屋を解体撤去した後の状態)参照。

### 2.5 廃止措置の基本方針(安全確保対策)

#### (1) 安全確保に必要な施設の維持管理

1号機及び2号機は運転を終了したが、施設内には放射性物質を内包していることから、廃

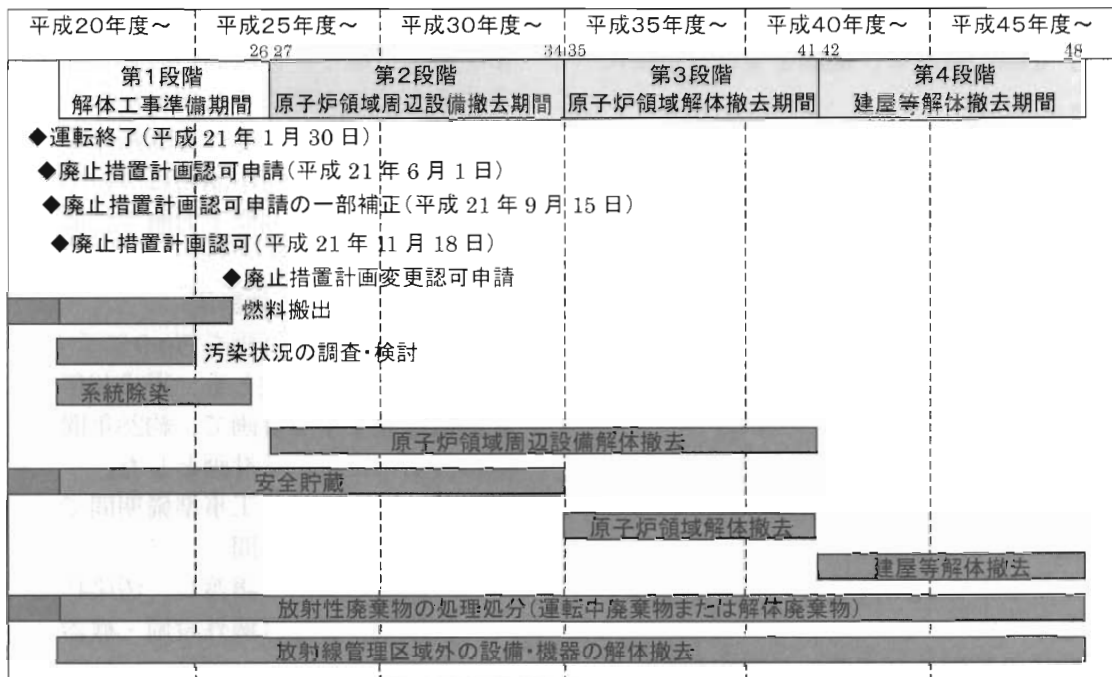


Fig.9 Decommissioning Schedule

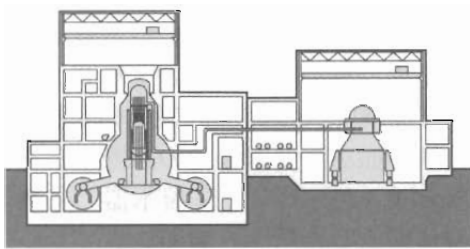


Fig.10 Situation when the First Stage Ends

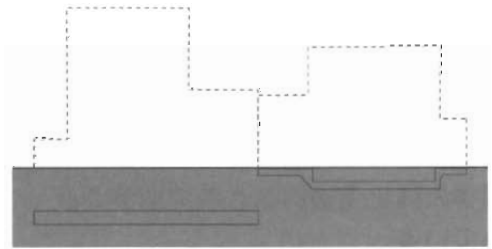


Fig.13 Situation when the Decommissioning Ends

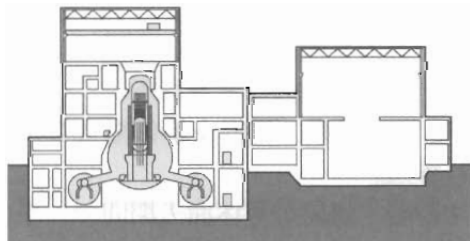


Fig.11 Situation when the Second Stage Ends

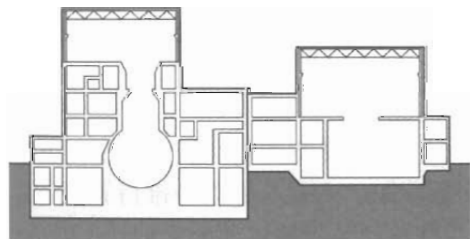


Fig.12 Situation when the Third Stage Ends

止措置期間中の安全確保に必要な施設は、点検や検査を行い、必要な期間、必要な性能・機能を維持管理する。

(2) 放射性物質の漏えい及び拡散防止対策

放射性物質を内包する系統や機器を収納する建屋等については、これらの系統や機器が撤去されるまでの間、外部への漏えいを防止するための障壁としての機能を維持するなど、周辺環境への放射性物質の漏えいや拡散を防止し、周辺環境に影響を及ぼすことがないように対策を講ずる。

(3) 解体作業従事者の放射線防護

配管、容器の内面に付着した放射性物質を、系統除染により除去したり、原子炉領域の解体撤去は安全貯蔵期間終了後に実施するなど、放

放射性物質の減衰により放射能の低減を図る。

また、時間、距離、遮へいといった放射線防護の基本に沿った工法、手順などに基づいて作業を進める。

## 2.6 解体工事の方法

### (1) 第1段階 解体工事準備期間

第1段階は、平成21～26年度末まで約6年間で、解体のための準備として、燃料の搬出・譲渡し、汚染状況の調査、系統除染、供用を終了した管理区域外設備・機器の解体撤去を行う。

#### ①燃料の搬出・譲渡し

1号機及び2号機の燃料プール及び新燃料貯蔵庫にある燃料は、解体工事準備期間中にすべて搬出する。

#### ②汚染状況の調査・検討

施設の汚染状況の調査を行い、その結果に基づき、解体時期の決定、解体方法の策定、解体廃棄物の量の評価、安全貯蔵期間の評価を行う。

#### ③系統除染

配管や容器の内面に付着した放射性物質を、薬品を使って除去する。系統除染は、再循環系、原子炉冷却材浄化系、余熱除去系および原子炉圧力容器を対象とする。Fig.14参照。

#### ④管理区域外設備・機器の解体撤去

管理区域外に設置されている、供用を終了した設備・機器（変圧器など）について順次、解体撤去を行う。

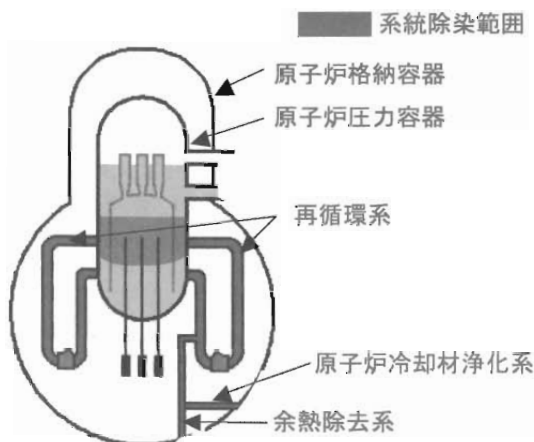


Fig.14 System Decontamination Object

### (2) 第2段階 原子炉領域周辺設備解体撤去期間

第2段階は、平成27～34年度末までの約8年間で、放射能レベルの比較的低い、原子炉領域の周辺設備について、順次、解体撤去を行う。

#### ①原子炉領域周辺設備の解体撤去

放射能レベルの比較的低い原子炉領域周辺設備について順次、解体撤去を行う。なお、廃止措置計画認可申請書では、原子炉領域は、原子炉容器及び原子炉容器を取り囲む放射線遮へい体を含む領域と定義しており、原子炉領域周辺設備は、それ以外のタービン建屋内設備、原子炉建屋内の原子炉冷却系統施設等としている。Fig.15参照。

#### ②安全貯蔵

1号機については、平成13年11月7日に原子炉を停止した以降、平成15年3月6日に冷温臨界試験を行った以外は停止状態であり、安全貯蔵の標準的な期間は既に経過していると考えられるが、解体工事準備期間での評価を踏まえ期間を定めて安全貯蔵を実施する。また、2号機についても、平成16年2月22日に原子炉を停止した以降、原子炉は停止状態にあり、安全貯蔵の標準的な期間は既に経過していると考えられるが、1号機と同様の措置を講ずる。

#### ③解体撤去物処理設備の設置

解体撤去に伴い発生する放射性廃棄物を埋設処分できるよう、廃棄物を切断したり容器へ収納する、解体廃棄物処理設備を設置する計画である。

### (3) 第3段階 原子炉領域解体撤去期間

第3段階は、平成35～41年度末まで約7年間

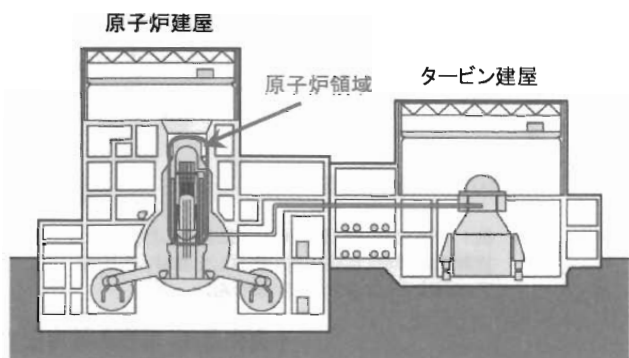


Fig.15 Facilities Peripheral to Reactor Zones

の計画であり、放射能レベルの比較的高い炉心支持構造物、原子炉容器、原子炉容器を取り囲む放射線遮へい体、格納容器等の解体撤去を行う。Fig.16参照。

(4) 第4段階 建屋等解体撤去期間

第4段階は、平成42～48年度末まで約7年間の計画であり、汚染設備の撤去後、建屋内の壁面などに残っている放射性物質を、はつり等の方法で除去する。また、換気系及び放射性物質の廃棄施設を汚染拡大防止等を考慮しながら解体撤去し、汚染状況を確認したうえで管理区域を解除し、建屋を解体撤去する。

2.7 核燃料物質によって汚染された物の廃棄

廃止措置に伴い、1号機及び2号機分合わせて約48万トンの廃棄物が発生する。これらの廃棄物は、合理的に区分し、適切に処分する計画である。廃棄物発生量の概要をFig.17に示す。

(1) 放射性廃棄物でない廃棄物および放射性廃棄物として扱う必要のない廃棄物

1号機及び2号機の廃止措置に伴い発生する廃棄物のうち、放射性廃棄物でない廃棄物が約44.2万トン、放射性廃棄物として扱う必要のない廃棄物(クリアランス対象の廃棄物)が約2.5

万トン、合わせて約46.7万トンで、全体の97%を占める。これらの廃棄物については、資源として可能な限り再生利用するか、または産業廃棄物として適切に廃棄する計画である。

(2) 低レベル放射性廃棄物

1号機及び2号機の廃止措置に伴い発生する廃棄物のうち、低レベル放射性廃棄物は、約1.7万トンで、全体の約3%である。低レベル放射性廃棄物については、法令に基づき、含まれる放射性物質の種類や放射能レベルなどによって区分し、区分に応じて適切に埋設処分する。なお、廃棄先など具体的な処分の方法は、原子炉

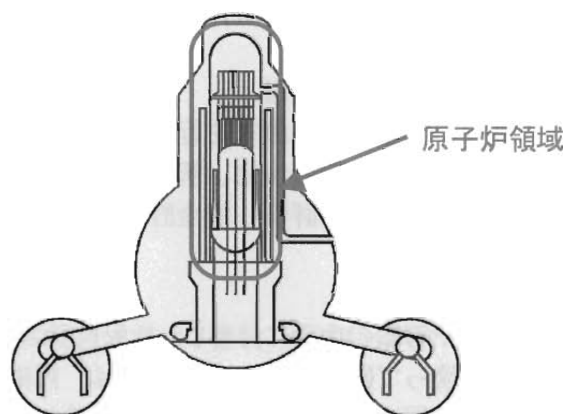
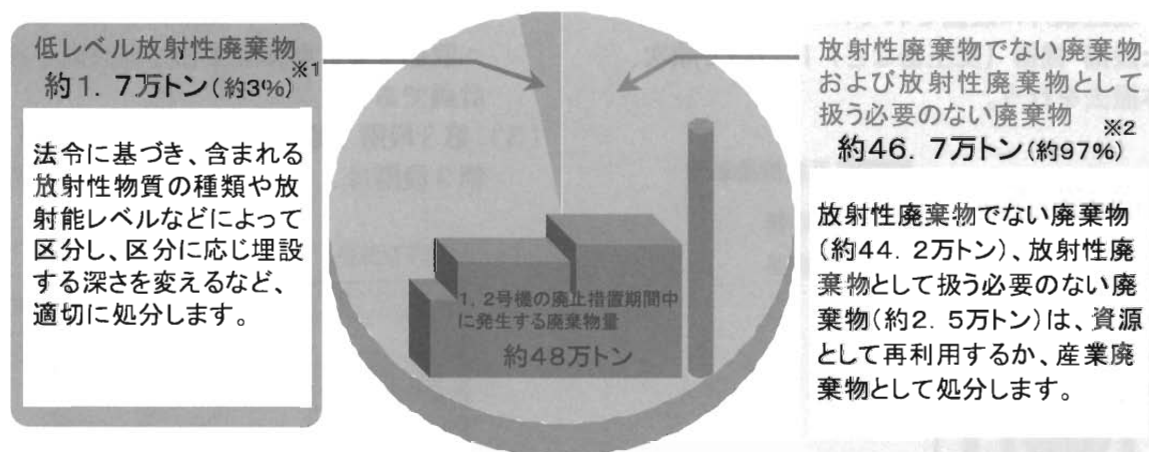


Fig.16 Reactor Zones



※1 約1.7万トンには、運転中などに発生した低レベル放射性廃棄物(点検作業で発生した廃材、使用済フィルタなど)は含まれていません。

※2 約46.7万トンには、建屋基礎などの地下構造物は含まれていません。

\* 発生量は、現在の推定値であり、汚染状況の調査結果により変わります。

Fig.17 Estimated Amount of Solid Radioactive Waste Generated



領域周辺設備の解体撤去工事に着手するまでに定め、廃止措置計画に反映して変更認可を受ける計画である。低レベル廃棄物の区分ごとの発生量を Fig.18 に示す。

①放射能レベルの比較的高いもの (L1 廃棄物)

低レベル放射性廃棄物のうち、放射能レベルの比較的高いもの (L1 廃棄物) には、炉心部の上部格子板やシュラウド、炉心支持板などが該当し 1 号機及び 2 号機あわせて約 200 トン発生する。これらは、「地下 50m 以深に処分していくこと (余裕深度処分)」で関係法令が整備されており、現在原子力安全委員会において安全審査指針の検討が行われている。

②放射能レベルの比較的低いもの (L2 廃棄物)

低レベル放射性廃棄物のうち、放射能レベルの比較的低いもの (L2 廃棄物) には、原子炉圧力容器や、圧力容器内の気水分離器等が該当し 1 号機及び 2 号機あわせて約 2,200 トン発生する。これらは、現在操業中の「低レベル放射性廃棄物埋設センターで行っている浅地中処分と同様な処分を実施していくこ

と (浅地中ピット処分)」で関係法令が整備されている。

③放射能レベルの極めて低いもの (L3 廃棄物)

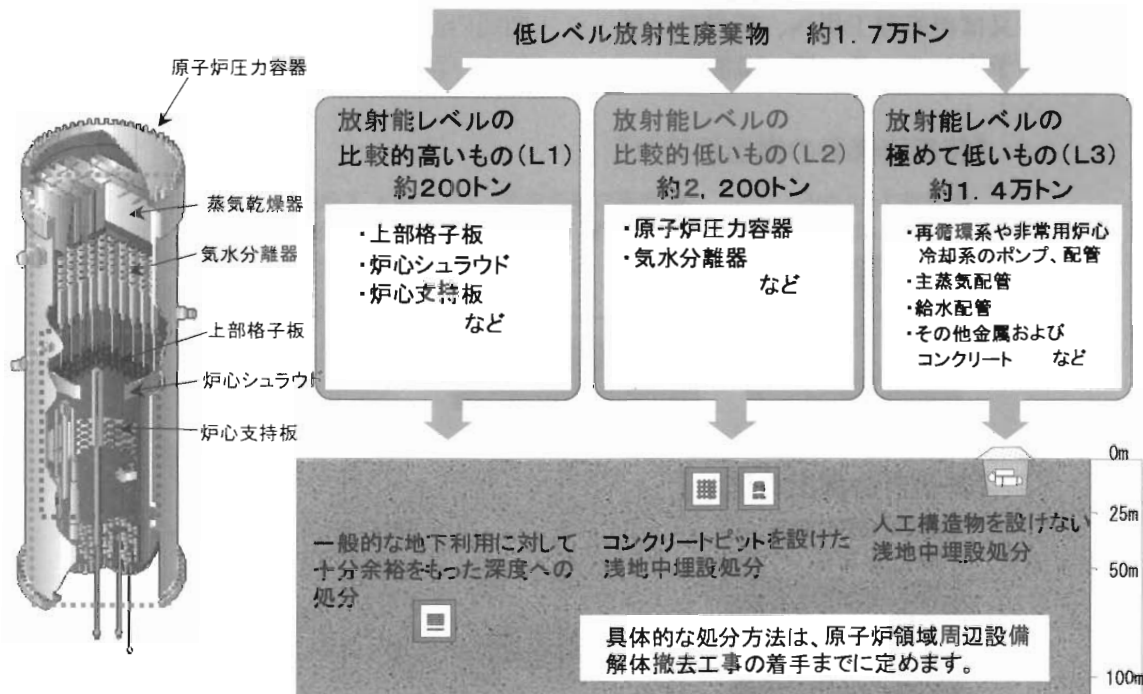
低レベル放射性廃棄物のうち、放射能レベルの極めて低いもの (L3 廃棄物) には、再循環系や非常用炉心冷却系のポンプや配管、主蒸気系や給水系の配管、その他の金属、コンクリートなどが該当し 1 号機及び 2 号機あわせて約 1.4 万トン発生する。これらは、「容器に固型化せず人工構築物を設けない浅地中処分を実施していくこと (浅地中トレンチ処分)」で関係法令が整備されている。

3. 第 1 段階「解体工事準備期間」中における実施計画

第 1 段階では、前述のとおり燃料搬出、汚染状況の調査・検討、系統除染、管理区域外の設備・機器の解体撤去を実施する。第 1 段階「解体工事準備期間」中の実施工程を Fig.19 に示す。

3.1 燃料搬出

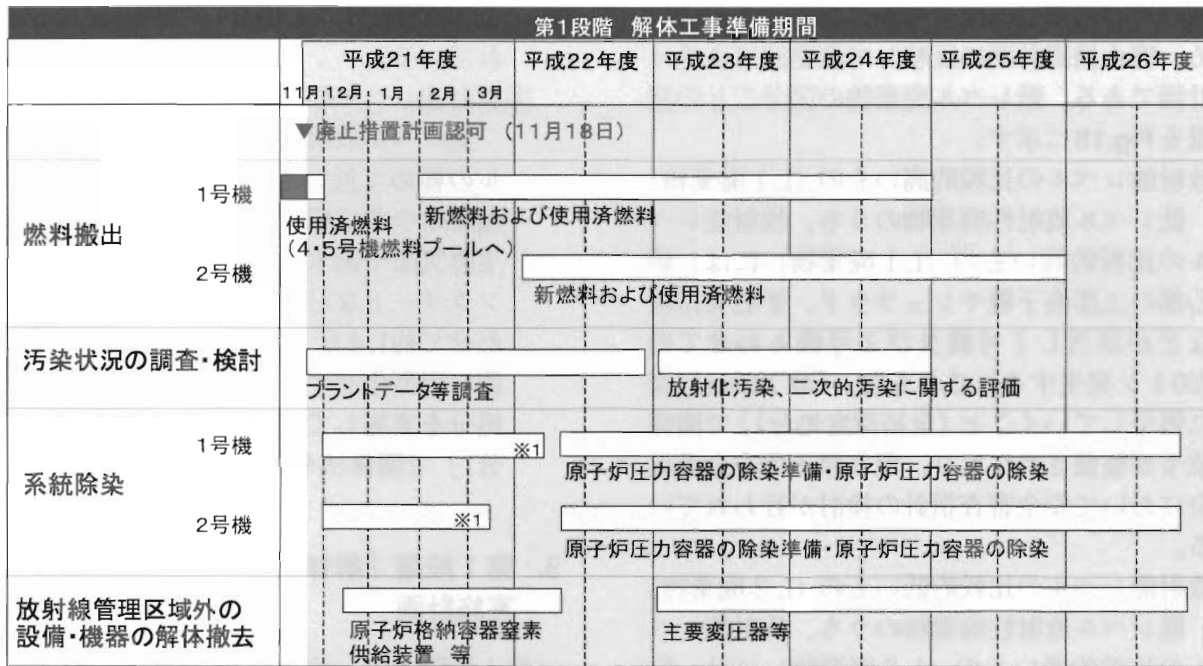
1 号機及び 2 号機には、燃料プールおよび新燃



\* 上記の廃棄物量には、運転中に発生した低レベル放射性廃棄物 (点検作業で発生した廃材、使用済フィルターなど) は含まれていません。

Fig.18 Estimated Amount of Low-level Radioactive Waste Generated





※1 原子炉再循環系、原子炉冷却材浄化系、余熱除去系の除染  
 注) 本計画については、工事の実施状況、検討・評価状況等により変更となる可能性があります。

Fig.19 Enforcement Project in the Preparation Stage

燃料貯蔵庫に使用済燃料及び新燃料が保管されている。これらの燃料は第1段階中にすべて搬出する予定である。搬出先は、使用済燃料は4号機、5号機の燃料プール又は再処理工場へ、新燃料は燃料加工工場などを予定している。Fig.20参照。

### 3.2 汚染状況の調査・検討

管理区域内の設備・機器の解体時期の決定、解体方法の策定、解体廃棄物の量の評価、安全貯蔵期間の評価を行うため、施設の汚染状況の調査を行う。汚染状況調査は、建物、機器及び配管など

#### 【使用済燃料の搬出の流れ】



#### 【新燃料の搬出の流れ】

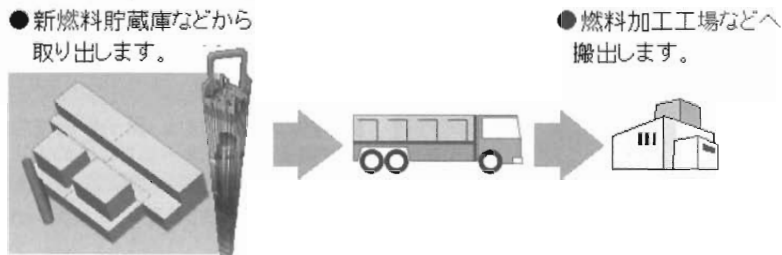


Fig.20 Transportation Flow of Spent Nuclear Fuel



Fig.21 Example of Investigation into the Contamination Status

について、放射化汚染と二次的汚染による放射能濃度を計算により求めるとともに評価精度向上のためサンプルを採取し、放射エネルギーを測定する等の調査を行う。Fig.21 参照。

### 3.3 系統除染

放射線業務従事者及び周辺公衆の被ばく低減、放射性物質の施設内外への漏えい防止及び廃棄物低減の観点から、機器や配管などを解体する前に、配管や容器の内面に付着した放射性物質を除去

去するため系統除染を実施する。対象範囲は、再循環系、原子炉冷却材浄化系、余熱除去系及び原子炉容器である。除染の方法については、原子炉運転中の定期点検において被ばく低減対策として行ってきた経験・実績を活かし、化学的除染法や必要に応じて機械的除染法を適用する。Fig.22 参照。

### 3.4 管理区域外の設備・機器の解体撤去

管理区域外に設置されており、供用を終了した

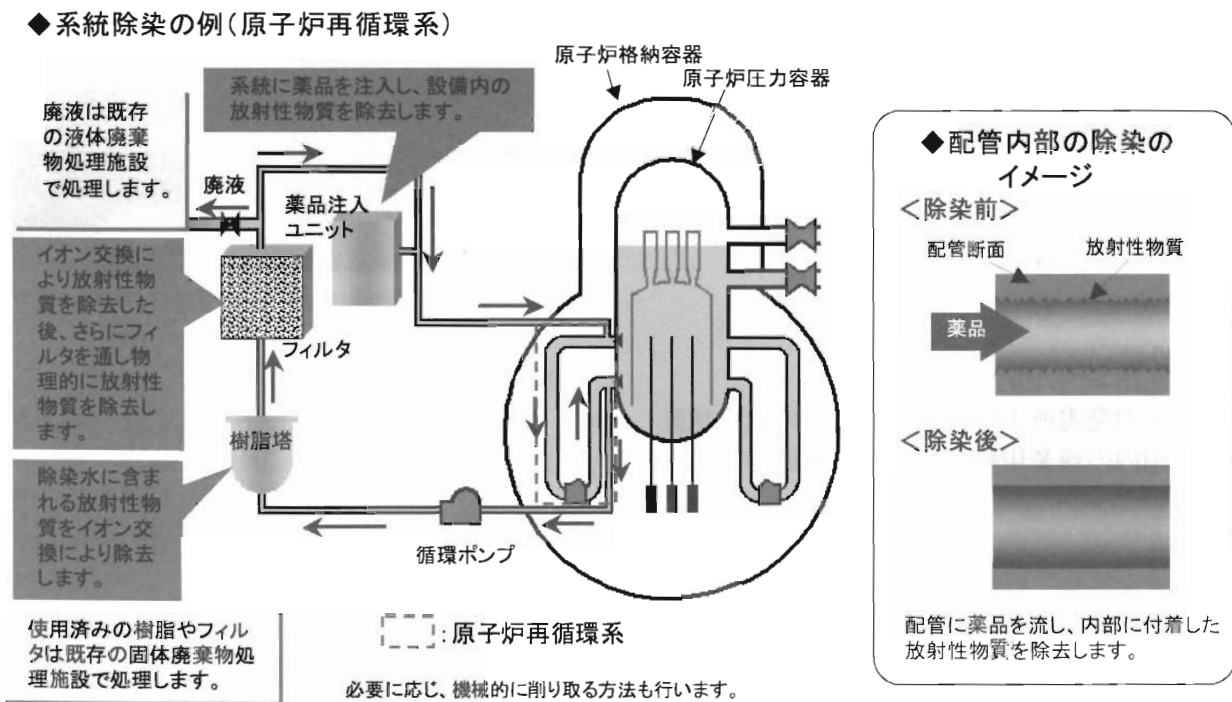


Fig.22 Example of System Decontamination

(解体撤去設備の例)

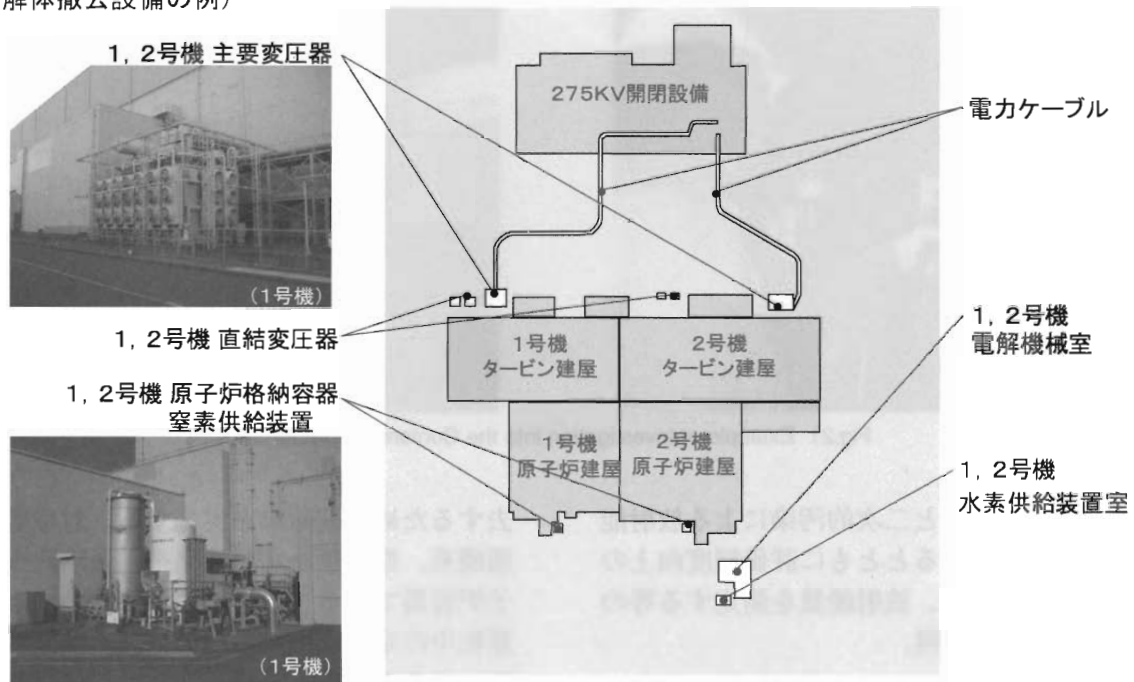


Fig.23 Example of Removing Dismantlement of Equipment outside Radiation Control Area (RCA)

設備・機器（主変圧器、原子炉格納容器室素供給装置など）について順次解体・撤去を行う。Fig.23 参照。

### 3.5 理解活動

廃止措置を進めるにあたっては、地域住民や行政関係者の理解が不可欠なことから、当社ホームページによる情報発信を始め、ダイレクトメール、地区住民への説明会、発電所キャラバン隊（市民対象ミニ説明会）など、理解活動を積極的に実施している。Fig.24 参照。



Fig.24 Appearance of Briefing to Local Populace

## 4. おわりに

浜岡原子力発電所1号機及び2号機の廃止措置計画は、国内の商業用軽水型原子力発電所での初

の廃止措置となる。

廃止措置計画の実施にあたっては、安全を最優先に、着実に進めていく所存である。

## 発電所から発生する運転中廃棄物の処理処分の現状について

松澤俊春\*、吉田武史\*、青木 裕\*

### *The State of Disposal of Wastes from Nuclear Power Plants in Operation*

Toshiharu MATSUZAWA\*, Takeshi YOSHIDA\*, Yu AOKI\*

運転中の原子力発電所からは、気体・液体・固体状の放射性廃棄物が発生し、それぞれ専用の処理設備を用いて安全かつ適切に処理するとともに、合理的な低減対策に取り組んでおります。それら処理の結果、生じる廃棄物のうち、低レベル放射性廃棄物については、ピット処分対象となる廃棄物の埋設処分がすでに開始されており、原子力発電所では安全かつ合理的な減容を考慮した処理を行っております。例えば、濃縮廃液は造粒固化や粉体化による減容処理を施した上でドラム缶に固型化するなどしています。製作した廃棄物は、法令にしたがって技術基準への適合性を自主検査にて確認した後、原子力安全基盤機構による廃棄確認を受けて低レベル放射性廃棄物埋設センターに輸送しています。これら運転中廃棄物の処理処分を進めることは、今後、本格化する廃止措置時代の礎となると考えております。

We process gaseous, liquid and solid radioactive wastes generated from Nuclear Power Plants (NPPs) in operation by exclusive facilities safely and appropriately, and make effects to reduce them reasonably. Some Low-level radioactive wastes generated from the NPPs have been disposed into the shallow land disposal site. We adapt safety and reasonable process to reduce the volume of them in the NPPs. For example, concentrated wastewater is reduced by pelletizing and making to the fine particle, and is packaged by solidifying to the drums. The produced waste packages are confirmed to the compatibility with the technological standard by voluntary inspection according to the law, and then are confirmed by JNES (Japan Nuclear Energy Safety Organization). Then waste packages are transported to the Low-Level Radioactive Waste Burial Center. We believe that it is important for decommissioning age in future to process and disposed steady of the radioactive wastes in NPPs in operation now.

#### 1. はじめに

原子力発電所から発生する放射性廃棄物は、その廃棄物の性状や放射性物質の種類などに応じた適切な管理、又は処分を行うことが求められます。

平成13年に日本原子力発電(株)の東海発電所においては、商業炉として初めて廃止措置計画が国に提出されています。また、平成21年には中部電力(株)浜岡原子力発電所1/2号機の廃止措置計画が提出されるなど、廃止措置への取組みが進められ

\*：東京電力株式会社 (The Tokyo Electric Power Company, Incorporated)

る中、解体に伴って発生する放射性廃棄物の処分について、近年、注目が集まっています。

一方、運転中の原子力発電所からも、多種多様な放射性廃棄物が発生するため、その性状に応じて、適切に管理、又は処理しています。全ての処分方法が確立された訳ではありませんが、一部の固体状の放射性廃棄物については、青森県六ヶ所村にある日本原燃(株)低レベル放射性廃棄物埋設センターに埋設処分しています。

本書では、特に運転中の原子力発電所から発生する放射性廃棄物の処理から、低レベル放射性廃棄物埋設センターに埋設するための処理・処分方法、ならびにその法令適合性確認などについて、ご紹介します。

## 2. 運転中の原子力発電所から発生する放射性廃棄物

運転中の原子力発電所から発生する放射性廃棄物は、大別すると放射性気体廃棄物、放射性液体廃棄物、放射性固体廃棄物といった性状別に分けられ、それぞれに適した方法で適切かつ安全に処理・処分しています (Fig.1)。

## 3. 運転中の原子力発電所から発生する放射性廃棄物の処理

### (1) 放射性気体廃棄物の処理

原子炉にて生成された蒸気の中には、復水器にて凝縮されない放射性希ガスなどが含まれており、その放射性希ガスなどは、活性炭に通気することで放射能を減衰させ、放射能濃度が十分に低いことを確認しながら大気に放出しています。

また、原子力発電所管理区域内の換気にあたっては、換気設備にフィルタを設けて、そのフィルタによって放射性物質を除去し、放射能濃度が十分に低いことを確認しながら大気に放出しています。

### (2) 放射性液体廃棄物の処理

原子力発電所管理区域内の機器・床からの排水や、シャワー・洗濯排水などの放射性物質を含む廃液は、その性状・種類に応じて収集しています。

機器や床などから発生する廃液は、ろ過や脱塩、蒸発濃縮などの浄化処理することにより、放射性物質を除去しています。これらの処理廃液は、基本的に系統内で再利用していますが、一部、放射能濃度が十分に低いことを、測定により確認

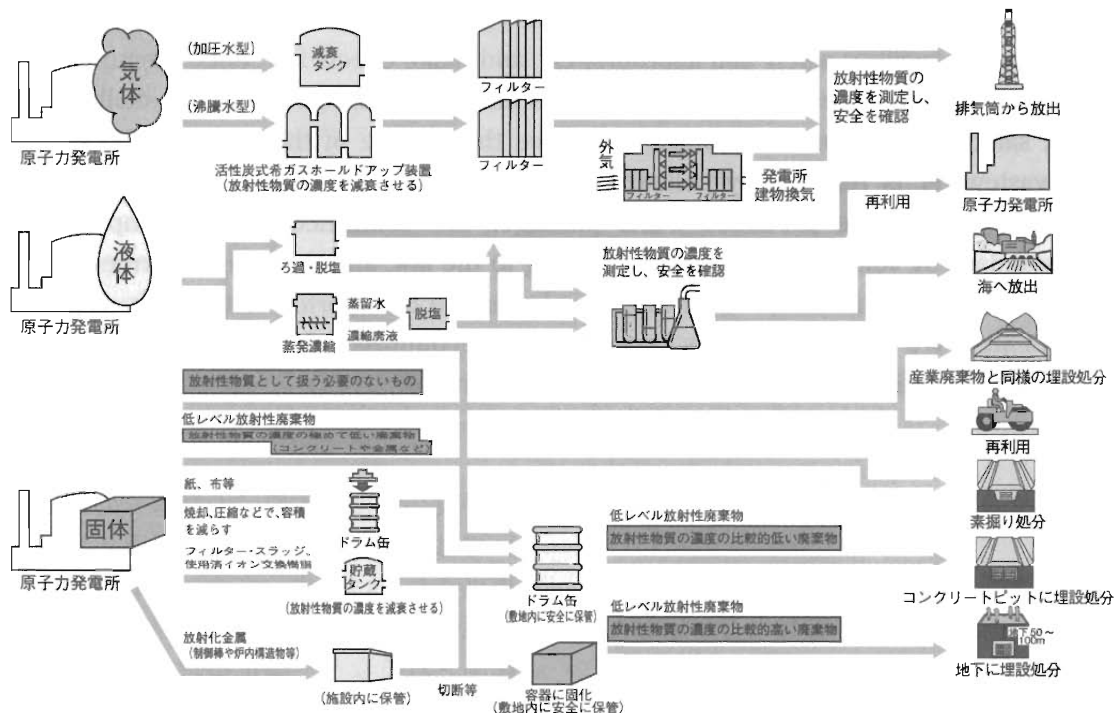


Fig.1 The Processing and Disposal of Waste Generated from Nuclear Power Plants in Operating<sup>1)</sup>

して海水中に放水しています。

(3) 放射性固体廃棄物の処理

原子力発電所の保安・保全活動によって発生する放射性固体廃棄物は、その種類や性状、放射線量などに応じて、専用の廃棄施設に適切に保管します。また、可能な限り、焼却や圧縮などの処理を施すことで、発生した放射性廃棄物を低減することに努めています。

a) 濃縮廃液

放射性液体廃棄物の蒸発濃縮処理により発生する濃縮廃液は、その放射能が減衰するまで専用の貯蔵タンクに保管します。また、固化前には濃縮廃液の造粒固化（福島第一原子力発電所（Fig.2））や粉体化（福島第二原子力発電所）を行っており、これにより固化体発生本数の大幅な低減が図れています。

b) 使用済制御棒など

原子炉内で照射された使用済制御棒、チャンネルボックス、原子炉構造物などの放射性廃棄物は、可能な限り切断などの減容処理を施し、サイトバンカと呼ばれる施設に保管しています。

c) 使用済樹脂など

原子炉冷却材などの比較的、放射能濃度が高い廃液を浄化処理する際に用いた使用済樹脂は、専用の貯蔵タンクにて長期間保管し、その放射能の減衰を待ちます。

一方、復水などを処理する際に用いた使用済

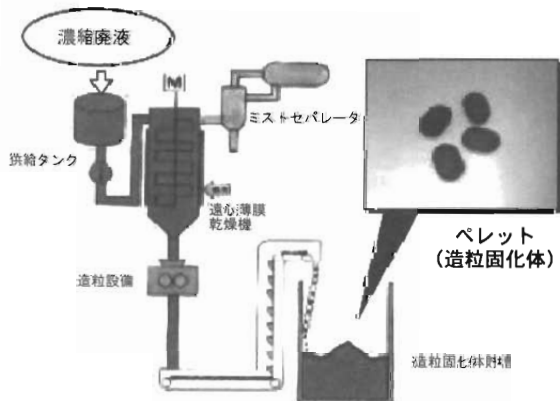


Fig.2 The Pelletizing of Concentrated Wastewater

樹脂は比較的、放射能濃度が低く、焼却が可能なものについては、焼却後、その灰をドラム缶に詰めて、固体廃棄物貯蔵庫に保管しています。

d) 雑固体廃棄物

【可燃・難燃物】

紙、布、ウェスなどの可燃性廃棄物、ならびにゴム手、ビニール類、難燃シートなどの難燃性廃棄物のうち、比較的、放射線量の低いものは、焼却後、その灰をドラム缶に詰めて固体廃棄物貯蔵庫に保管しています。

一方、比較的、放射線量の高いものについては、一旦、固体廃棄物貯蔵庫に保管していますが、放射能を十分に減衰させた後、再度、固体廃棄物貯蔵庫から取り出し、焼却処理します。

【不燃物】

金属やコンクリートなどの不燃性廃棄物は、その種類などに応じ、分別した上でドラム缶に詰めて固体廃棄物貯蔵庫に保管します。

不燃性廃棄物の中でも、排気フィルタなどの圧縮可能なものについては圧縮減容し、それらの固化体発生本数の低減に努めています。また、福島第一原子力発電所においては、不燃性廃棄物のうち、コンクリートや保温材などを高温焼却炉にて焼却減容しております。高温焼却によって生じるスラグ状の残渣は、グラニュールと呼ばれる固化物として回収し、それをドラム缶に詰め、固体廃棄物貯蔵庫に保管しています（Fig.3）。

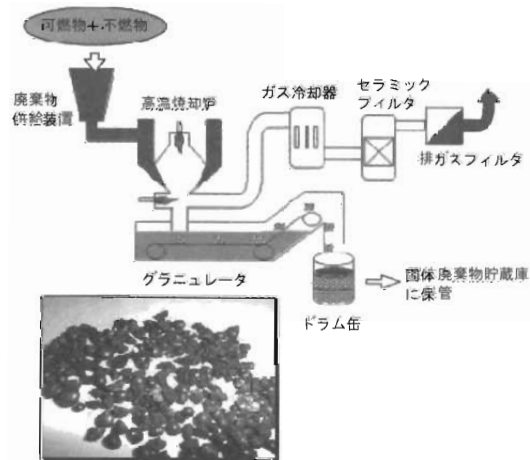


Fig.3 The Granulating of the Residue Generated in High Incinerator



(4) 放射性廃棄物の発生低減への取組み

原子力発電所の保安・保全活動に伴って発生する放射性廃棄物の減容などの処理・処分の他、そもそもの放射性廃棄物の発生を低減させるための取組みも行っており、その一例を紹介します。

放射性気体廃棄物については、活性炭やフィルタなどを取り付けた局所排風機を作業現場に取り付けるなどして、その発生量を低減させることに努めています。放射性液体廃棄物については、復水などの浄化処理に用いるろ過装置の性能を改善するなどにより、その発生量を低減させることに努めています。

放射性固体廃棄物については、原子力発電所管理区域内への物品の持ち込みを制限することや、原子力発電所の定期検査などにて繰り返し使用する資機材(足場材や区画設定器材、工具など)を、管理区域内にて保管・管理するなどしています。また、放射性液体廃棄物の処理の過程で発生する樹脂や濃縮廃液については、液体廃棄物の低減と同様に、浄化処理に用いられるろ過装置の性能向上や、焼却処理可能なものに変更することで、その発生量を低減することに努めています。

4. 低レベル放射性廃棄物の処分区分

原子力発電所の運転に伴い発生する放射性廃棄

物の適切な処理の結果、生じた廃棄物は、埋設処分の区分上、低レベル放射性廃棄物に分類されます。この低レベル放射性廃棄物は、放射能濃度により、さらに区分され、放射能濃度が高い順に余裕深度処分、浅地中ピット処分、浅地中トレンチ処分と呼ばれています (Fig.4)。

また、運転中の原子力発電所から発生した廃材の中には、放射能濃度が極めて低く、人への健康影響が無視できることから、「放射性物質として扱う必要のないもの」もあり、今後、資源循環型社会への貢献に繋がるよう運用方法を築いていきます。

5. 低レベル放射性廃棄物の処分

(1) 余裕深度処分対象廃棄物の処分

発電所の運転に伴って発生した低レベル放射性廃棄物の中で、使用済制御棒やチャンネルボックスなどの比較的、放射能濃度が高いものについては、余裕深度処分と呼ばれる地上または地表から50m以深の地下に設置された施設に埋設処分します。

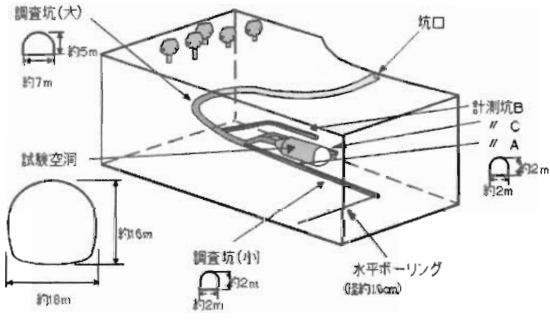
現在、この余裕深度処分施設への埋設実績はなく、それらの埋設施設の設置が可能かどうかを確認するための調査・検討段階にあります。調査としては、地表から約100m程度下までトンネルを



Fig.4 The Disposal of Low-level Radioactive Wastes



掘削しながら調査を実施し、その結果を踏まえ、代表的な位置・深さを選定した上で、施設の安定性を検討するための試験空洞や、地質・地盤・地下水の調査を行うための坑道を掘削して実施しています (Fig.5)。



(a) tunnel image



(b) examination cavity

Fig.5 The Image of Intermediate Depth Disposal Facility<sup>2)</sup>

(2) 浅地中ピット処分対象廃棄物の処分

低レベル放射性廃棄物の中で、比較的、放射能濃度が低いものについては、ピット処分と呼ばれる地上または地表から深さ50メートル未満の地下に設置された施設に埋設処分します。

現在、このピット処分については、平成4年より、青森県六ヶ所村日本原燃(株)低レベル放射性廃棄物埋設センターにおいて実施しており (Fig.6)、2009年3月末現在で、濃縮廃液などの均質・均一固化体を埋設する1号埋設施設には約14万本、充填固化体を埋設する2号埋設施設には約7万本が埋設処分されています (Fig.7)。

a) 均質・均一固化体の処分

原子力発電所から発生する放射性廃棄物のう

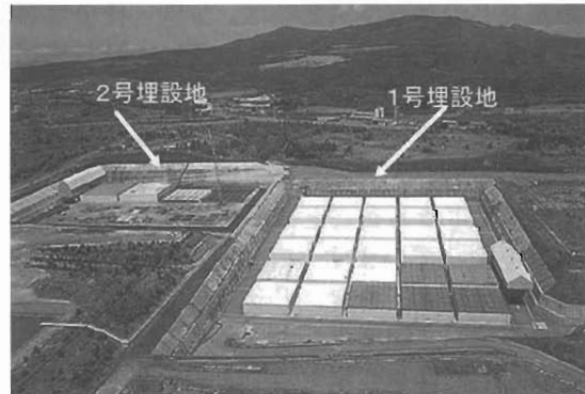
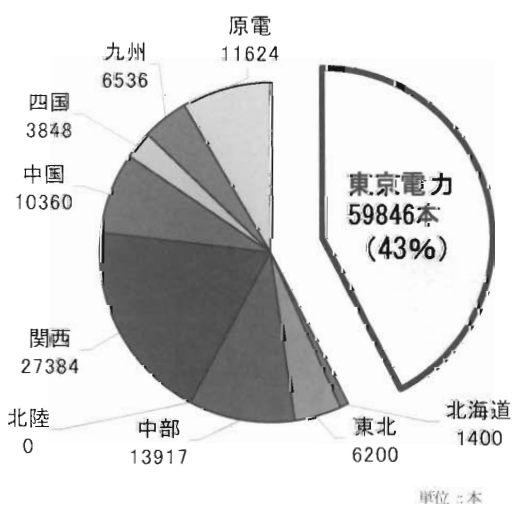
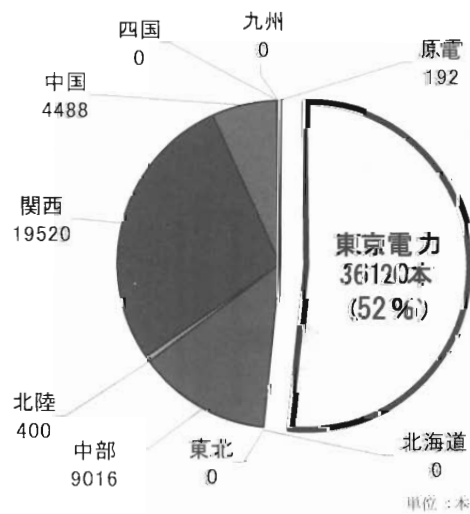


Fig.6 The On-going Near-surface Pit Disposal Facilities<sup>3)</sup>



(a) Homogeneous solidified wastes



(b) Pre-Packed Concrete packages

Fig.7 Amounts Transported to the Low-Level Radioactive Waste Burial Center

ち、濃縮廃液などの均質・均一固化体を1号埋設施設に埋設処分しています。

福島第一原子力発電所においては、濃縮廃液を造粒固化したペレットをセメントと均一に混合して、ドラム缶に均質に固型化しています。

一方、福島第二原子力発電所においては、濃縮廃液を粉体化し、プラスチックを固型化材として用いて均一に混合し、ドラム缶に固型化しています。

この他、均質・均一固化体として扱う放射性廃棄物は、高温焼却炉のスラグを固型化したグラニュールや、通常の焼却炉の残渣である焼却灰などがありますが、これらの廃棄物については、現在、埋設処分するための技術検討中です。

#### b) 充填固化体の処分

金属などの雑固体廃棄物は、分別・仕分けした後、ドラム缶に収納し、そこに均一に練り混ぜたモルタルを充填することで固型化しています。また、福島第一原子力発電所においては、分別した廃棄物の中で、さらに減容が可能な金属類やケーブル類を、ドラム缶ごと高圧圧縮するなど廃棄物の低減を図っています (Fig.8)。なお、高圧圧縮された廃棄体も、再度、ドラム缶に収納し、モルタルを充填して固型化します。

これら廃棄体を製作する上でも重要となる分別作業については、適切な教育を受け力量が認められた現場作業員が1つ1つ手作業で行って

ます。分別においては、基本的に単一物品ごとに分けませんが、その際は埋設施設の健全性に影響を及ぼすような物質、例えばアルミや鉛などを確実に除去するとともに、圧縮または焼却減容が可能な物品についても分別します。ドラム缶への収納についても、現場作業員が1つ1つ手作業で行っており、収納時に著しい空隙が残らないよう注意しながら行っています。

#### c) 自主検査および廃棄確認について

発電所において製作された廃棄体は、“核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第51条の6第2項”の規定にしたがい、技術基準への適合性を確認する必要があります。そのため、発電所では、廃棄体の種類に応じた検査を自主検査として行っています。例えば、廃棄体表面に“著しい破損がないこと”や“最大放射能濃度を超えないこと”などについて、確認しています。

さらに、自主検査に合格した廃棄体は、独立行政法人原子力安全基盤機構により、技術基準への適合性について確認を受けております。

#### e) 低レベル放射性廃棄物の輸送について

発電所において製作した廃棄体は、輸送容器に最大8本収納し、IP-II型輸送物として、低レベル放射性廃棄物専用の輸送船『青栄丸』に積載して、青森県六ヶ所村の日本原燃(株)低レベル放射性廃棄物埋設センターまで輸送しています (Fig.9)。

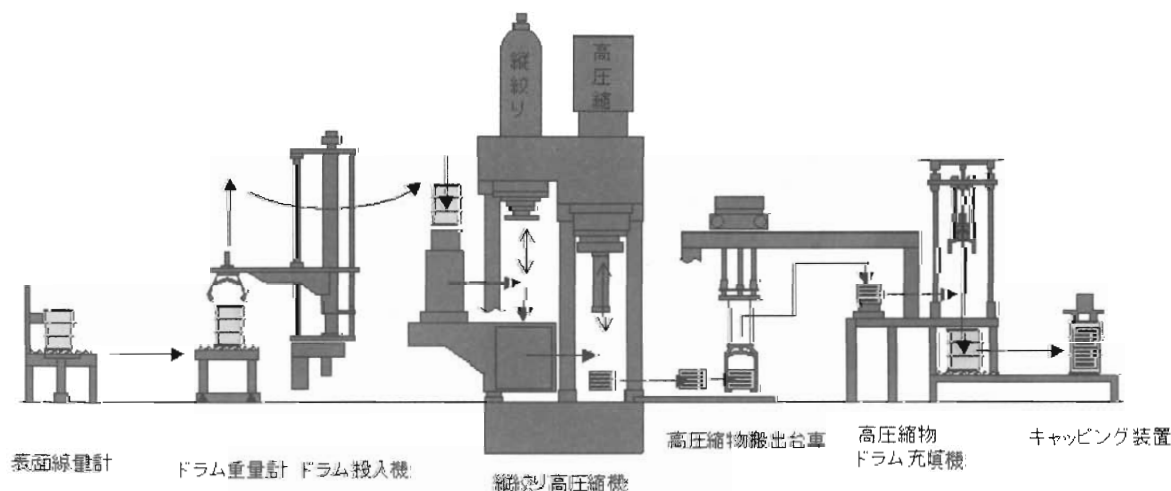
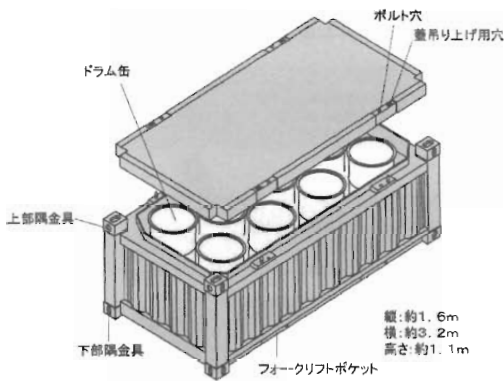


Fig.8 High-Pressure Compactor



(a) Transport container (Type:IP-II)



(b) Transport Ships

Fig.9 Transport Equipment of Low-level Radioactive Waste <sup>4)</sup>

低レベル放射性廃棄物の輸送に際しては、万が一に異常事態が発生したことを想定し、輸送時の異常時対応の手引きを制定するだけでなく、その対応を円滑に進めるための訓練も行っております。

### (3) 浅地中トレンチ処分対象廃棄物処分

低レベル放射性廃棄物の中で、極めて放射能濃度が低いものについては、地上または地表から深さ50メートル未満の地下に埋設処分します。これを、浅地中トレンチ処分と呼びます。現状、運転中の原子力発電所から発生する廃棄物を処分した実績はなく、主に原子力発電所の廃止措置に伴って発生する廃棄物が対象となります。日本国内では、独立行政法人日本原子力研究開発機構の解体廃棄物を埋設処分した実績があります (Fig.10)。

## 6. 資源循環型社会への取り組み

地球環境への負荷低減が望まれる現代社会において、原子力発電所から発生する廃棄物であって

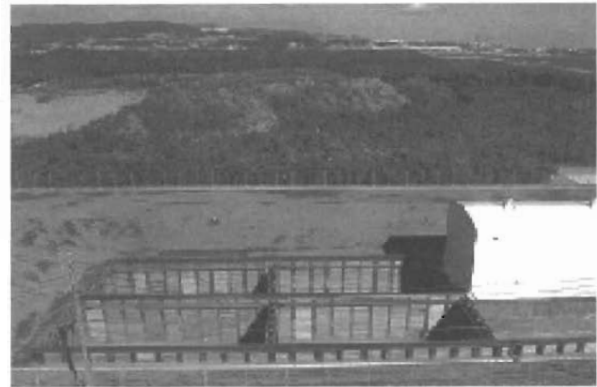


Fig.10 The Near-surface Trench Disposal Facilities <sup>5)</sup>

も、健康影響や環境影響が無視できる物については、資源として有効にリサイクルし、あるいは適正に処分を行っていくことは、資源循環型社会への貢献に繋がると考えております。

原子力発電所管理区域内から発生した放射性廃棄物の中には、放射性物質に汚染していないか、汚染されていてもその放射線量が自然界から受ける線量と比べて十分に低いために、放射性物質として扱う必要がないものが存在します。日常生活の中で、大地や食物などの自然放射線により受ける線量は、年間平均2.4mSvであり、人への健康影響を無視することができるかと国際的にも認められている1年間当たり0.01mSv (自然放射線の1/100以下) を超えないことを目安として、基準値 (クリアランスレベル) が定められています (Fig.11)。

クリアランスレベル以下の物品は、安全上、普通の廃棄物と同じ扱いができ、リサイクルや一般廃棄物としての処分が可能となります。

クリアランスの制度化については、2005年に行われておりますが、現状、運転中の原子力発電所から発生した廃棄物にその制度を適用して、リサイクルまたは処分した実績はありません。一方、日本原子力発電(株)東海発電所の廃止措置に伴って、発生した廃棄物に適用した実績があり、解体廃棄物を遮蔽体やベンチ、ブロックなどにリサイクルしています (Fig.12)。

今後、運転中の原子力発電所から発生する廃棄物についても、クリアランス制度を適用し、リサイクルまたは一般廃棄物として処分するため、様々な検討を実施しています。

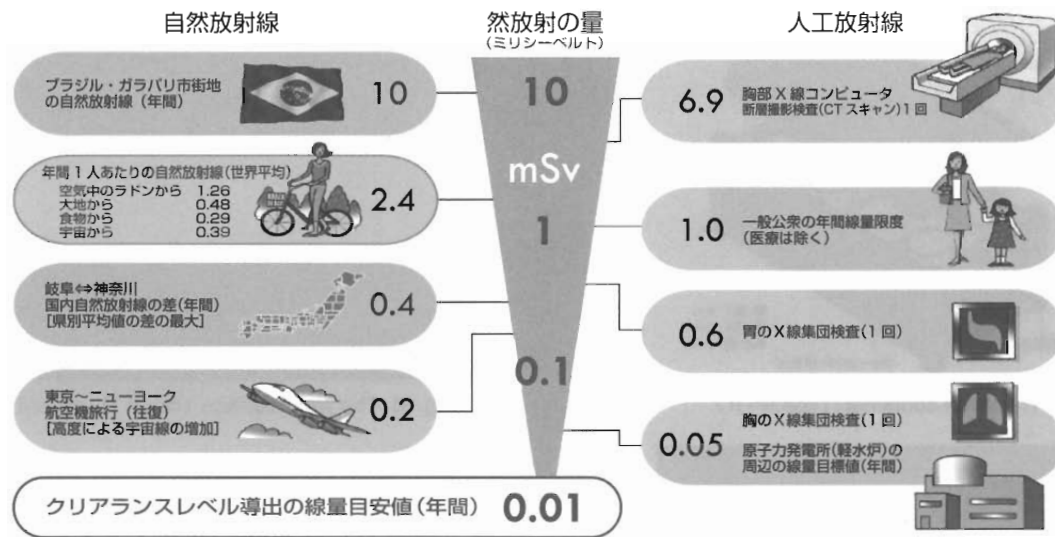


Fig.11 Radiation in daily life <sup>6)</sup>



(a) shield



(b) bench

Fig.12 Recycled Products <sup>7)</sup>

## 7. おわりに

原子力発電所の解体に伴って発生する廃棄物の総量は、110万キロワット級の沸騰水型軽水炉 (BWR) の場合、約53.6万トンと見積もられております。このうち、「低レベル放射性廃棄物」は、

高々 1.3万トン (総廃棄物重量の約 2%) と見積もられており、さらに内訳として「余裕深度処分」対象となる廃棄物が約 0.01万トン、「浅地中ピット処分」対象となる廃棄物が約 0.2万トン、「浅地中トレンチ処分」対象となる廃棄物が約 1万トンと評価されています。

一方、クリアランス制度を適用可能なものが約 2.8万トン (総廃棄物重量の約 5%)、そもそも放射性物質によって汚染されていないものが約 49.5万トン (総廃棄物重量の約 93%) と評価されています。

運転中の原子力発電所から発生する放射性廃棄物の適切な処理・処分を進めることは、これから本格化する原子炉の廃止措置時代の処理処分に向けた礎となるものと考え、今後とも資源循環型社会を目指すとともに適切かつ安全な対応をしていきたいと考えております。

## 参考文献

- 1) 経済産業省 資源エネルギー庁, 「原子力2008 (2008年 5月発行)」.
- 2) 日本原燃株式会社ホームページ「低レベル放射性廃棄物の次期埋設に関する本格調査結果について」.
- 3) 日本原燃株式会社ホームページ「低レベル放射性廃棄物埋設センター (全体図)」.
- 4) 原燃輸送株式会社ホームページ「運搬船」お

- よび「輸送容器」.
- 5) 独立行政法人 日本原子力研究開発機構 埋設事業推進センター パンフレット「研究施設など廃棄物の埋設処分への取り組み」.
- 6) 経済産業省 原子力安全・保安院, パンフレット「原子力施設におけるクリアランス制度の整備について (2009年5月改訂)」.
- 7) 日本原子力発電株式会社ホームページ「東海発電所の廃止措置」.

## レーザー除染装置の開発

峰原英介\*

### *Laser Cleaner Development for Decontamination of the Primary Water Cooling System at Nuclear Power Plants*

Eisuke MINEHARA\*

レーザー除染装置を種々のレーザー発振器装置とその周辺機器を用いて実現する可能性について研究開発を行ってきた。フェムト秒自由電子レーザー、水噴流導光レーザー、QスイッチYAG、ファイバーレーザーなどを用いて行った。レーザーを集光して昇華するために十分なエネルギー面密度にするので使用した上記のすべてのレーザーを用いても表面深く、溶融することなく除去が出来て、RIを用いない汚染模擬体での除染率はきわめて高いものが得られた。これを実用とするために、レーザー除染装置を試作開発する計画を進めている。

We recently have performed the feasibility studies to develop laser cleaners utilizing several laser oscillator and amplifier systems like femto-second free-electron lasers, water-jet guided lasers, Q-switched YAG lasers, fiber lasers. Whenever we used to clean the RI-contaminated surface using the lasers, we should focus enough laser power in the surface to evaporate instantly without melting. Therefore, as the contaminated being deeply located into the surface could be removed using any one set of the lasers, we found that every trial of laser cleaning could remove very well the RI contamination being located deeply. Our cold decontamination test using a model sample being Cobalt plated successfully has been performed to show a very high decontamination factor. In order to develop an usable laser cleaner, we plan to develop the prototype laser cleaner next year.

#### 1. はじめに

若狭湾エネルギー研究センターで現在行われているこのレーザー除染の研究開発が社会経済的どのようなニーズに基づくものであるのかなどを最初に簡単に紹介する。このニーズとはもちろんCO<sub>2</sub>削減、地球温暖化対策として原子力発電の推進である。また研究開発のみで終わるのではな

く、若狭湾エネルギー研究センターの設立趣旨に沿って福井県嶺南地方を中心とする当センターの設立地域の殖産振興に役立つようにこのレーザー除染の研究開発の成果が実用的に用いられ、レーザー除染機器やレーザー除染の役務の企業化が図られるべきである。

全世界が協力して進めているCO<sub>2</sub>削減、地球温暖化対策として原子力発電は不可欠の重要な役割

\*：若狭湾エネルギー研究センター 研究開発部 (The Wakasa Wan Energy Research Center, Research and Development Department)



を担っている。このために原子力発電を推進するためには、多くの放射性廃棄物の処理が必要になる。現在の非効率な小型発電炉の全部、ほとんどの古い中型炉も出来るだけ早期に大型最新鋭軽水炉に交換されるべきであり、そのように計画が進んでいる。今後、数十年に渡り、国内のみならず、欧州、米国、中国、インドで夫々数百基の新規需要とそれに対応した原子炉廃止措置が必要となる。このような原子力発電の推進において最も大きな隘路のひとつは原子炉廃止措置技術開発で、特に高速で2次汚染がないと期待されているレーザー除染技術開発が必要されているが、具体化は遅れていた。またこのようなレーザー除染技術は同様に通常の大小の軽水炉の応力腐食割れ対策工事や種々の修理や高経年化工事などの原子炉1次系個別非密封RIを取り扱う工事に際して要求される除染作業に対して、除染装置費用と除染作業費用(2次汚染物処理費用)の大幅な低減、高速の除染速度による被ばく総量の低減を図ることが出来る。

福井県嶺南地域におけるこのようなレーザー除染装置技術開発は、漁業、農業、林業と原子力企業への人材派遣業が中心であった福井県嶺南地域での原子力発電炉集積地において、求められるべきハイテク産業である半導体製造業を含むレーザー関連の製造業の創造となる。とくにレーザー除染装置製造はレーザー関連から駆動機械部品まですべてを内製化する事によって、レーザー装置の基幹部品である半導体レーザー(LD)から筐体までを県内で国産化したいという長年の県内企業の夢の実現と県内産業の技術力の底上げと雇用の創出が可能となる。

レーザー除染の開発研究が、現在の科学技術の中で、どのような科学技術的な背景を持ち、どのような位置づけとなる研究開発であるのか。またどのような意味合いを持つものであるのかなどを以下に簡単に記載する。発電用軽水あるいは重水原子炉の1次冷却水系の機器は、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{58}\text{Co}$ 、 $^{54}\text{Mn}$ などをふくむ錆や水垢などに汚染されている。燃料棒中の核分裂を起こす核燃料物質が漏出する汚染と除染は考えない、核燃料は健全であることが前提で、実際に核燃料物質の漏出汚染は少なく、主要な汚染ではない、実際の作業はこれらの少数の比較的短半減期のRIに限られるとする。実際

にはレーザー除染はどのようなRI汚染にも将来対応可能ではあるが議論を健全な軽水炉の1次冷却水系に限定する。この冷却水の循環する範囲は通常耐腐食性の高いステンレスや耐蝕合金で構成されている。これを完全に除染するためには、超伝導リニアック駆動自由電子レーザーや水噴流導光レーザーなどがすでに実験的に確立し、特許出願されている(関連特許表参照)。過去、一部で、効果の無いあるいは拡散汚染が起こりやすいレーザー除染の実験が報告されているがこれは除外する必要がある。最近の我々のレーザー除染研究開発によって、通常の安価なパルスレーザー装置でも効率的に完全な、且つ効率的な除去が可能となった。

## 2. レーザー除染の対象

除染の対象は、通常非常に広い。非密封RIを取り扱う全ての施設、放射化物などを取り扱う加速器や核燃料物質を用いる再処理工場や原子炉などの施設の放射線管理区域内で種々の除染が必要となる。ここでは最も需要が多い、主要な汚染である、原子炉それも発電炉の冷却水1次系の $^{60}\text{Co}$ の除染を対象として考える。

発電炉など原子炉で冷却水1次系の除染の対象となる汚染RIは運転停止後ある時間が経過すると殆ど全部がこの $^{60}\text{Co}$ となる。除染対象を現在から将来の重水炉や軽水炉の原子炉廃止措置工事、またはそれほど大規模でない応力腐食割れ対策工事や種々の修理や高経年化工事などの原子炉1次系個別非密封RIを取り扱う工事などで必要となる除染装置と考えている。Table 1に種々の除染方法とそのメリットとデメリットをまとめた。レーザー除染は、最下段にあり、通常の複雑形状が不得意であることも工夫で解決可能とした。

レーザーを用いた表面汚染の除去は、軽水炉の運転に近い方から発案されたアイデアも古くからあり、またレーザー開発者やレーザーの専門家からも応用可能な容易なアイデアとみなされたこともあり、提案や特許や実験も過去に複数存在する。この結果、塗装皮膜剥離用レーザーをこの目的に転用した原子力用レーザー除染機なるものが外国のメーカーで開発されて、国内外で市販され



Table 1 Several Decontamination Methods and their Advantages and Disadvantages.

除染方法	メリット	デメリット
化学除染	除染効果大。除染液が接液していれば複雑形状でも効果有。	除染液の処理・処分に手間がかかる。スポット的な除染に不適。高価。
電解研磨除染	焼き付きや擦り込まれた汚染に対しても除染効果が大。	大規模な装置となる。液体廃棄物が発生する。
超音波除染	複雑形状、狭隘部、孔食、に対しても効果有。遠隔操作に適用可。	大規模な装置になると非常に高価。液体廃棄物が発生する。
水ジェット除染	二次廃棄物少。スポット的な除染に適用可。	強く固着した汚染に不適。複雑形状のものには効果が低。騒音大。
湿式ブラスト除染	除染効果大。スポット的な除染に適用可。	廃液処理が必要。大量のブラスト材が二次廃棄物となる。
乾式ブラスト除染	除染効果大。スポット的な除染に適用可。	ダストによる作業環境悪。大量のブラスト材が二次廃棄物となる。
レーザー除染	除染効果大。二次廃棄物の発生量が少。遠隔操作も可能。スポット的な除染に適用可。孔食、大面積も可能	除染効果小(過去の結果、現在は効果大)。複雑形状のものに不適。工夫で解決可能。

ている。残念ながらこれは肝心の1次冷却水系には効果が無いことがわかっている。また大学や研究所でそのようなものの実現を図る研究も過去複数存在する。しかしながら、国内にある50基以上の軽水炉の運転現場で有効に使用できる、かつ安価で使いやすいレーザー除染装置は現在のところ存在しないというのが、これらの軽水炉運転側からの意見であった。運転現場や行政や装置企業からは、夫々①レーザー除染が現在の機械的方法や化学的方法に変わる除染方法として、除染装置費用、除染処理費用、除染処理速度、除染率、2次汚染量などの評価パラメーターが極めて優れていること、②レーザー除染装置産業を嶺南において企業化するために必要な手順と戦略、③考えられるレーザーおよび関連技術の企業化の隘路を明らかにすることなど3点を明確にすることを求められている。この報告はその全てを具体的には答えていないが、そのすべての基礎となる安価な低出力の工業用レーザー装置による準非熱的昇華が可能であることを確認している。

ここでは日本原子力研究開発機構及び若狭湾エネルギー研究センターなどにおいて、レーザー本体の開発を行いながら、並行して進めてきたレーザー除染装置の開発について現状を纏めて将来を展望したい。

### 3. 種々のレーザーを用いた除染

レーザー除染を行うために、フェムト秒超伝導自由電子レーザー、フェムト秒チタンサファイアレーザー、水噴流導光レーザー、QスイッチYAG、ファイバーレーザー、Qスイッチファイバーレーザーなどを用いて試験を行った。

#### 3.1 フェムト秒極短パルスレーザー

フェムト秒から数ピコ秒域の極短パルスレーザーはいくつか異なる方式のレーザーが存在する。ここでは大出力が可能なフェムト秒自由電子レーザー (Fig.1 参照)、微弱出力だが市販されているフェムト秒チタンサファイアレーザー (Fig.2 参照)の2種類を用いることを想定して除染に使用した場合の期待される特性を実験的に明確にした。

赤外から可視紫外程度の波長で5 ps以下で0.5J/cm<sup>2</sup>程度以下のパルス当り面密度のパルス幅のレーザーを照射すると発生する熱は、周りに伝達される十分な時間が無いために伝達される熱の影響は無視することが出来る。このためレーザーのエネルギーが照射された面は昇華し、周辺は溶融することも無く、低温のまま保持される。このため汚染物質が表面で再溶融して汚染物が何時までも汚染対象物に保持されたり、溶け込んで分離

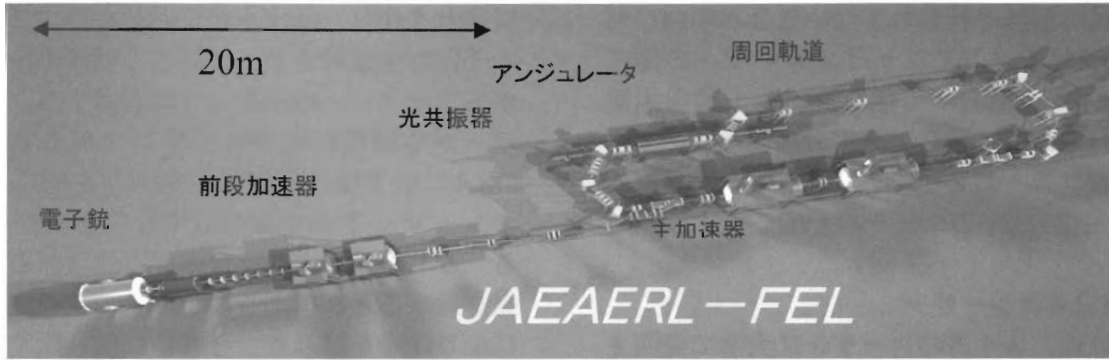


Fig.1 A Typical Example of Femtosecond pulsed and High Average Power Superconducting Accelerator-based Free-electron Laser at JAEA Tokai.

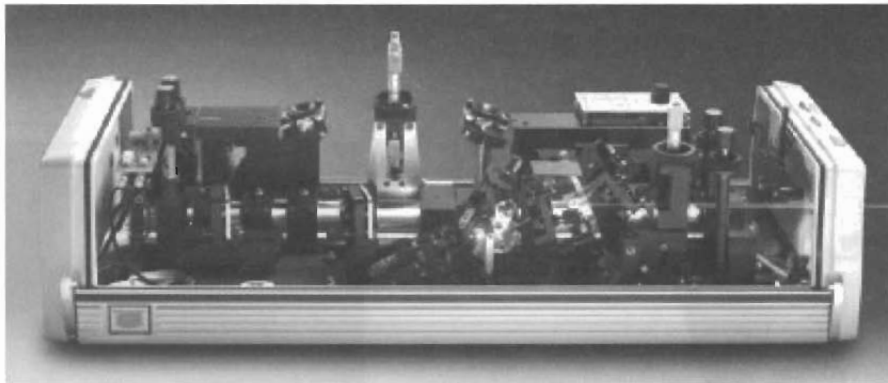


Fig.2 A Typical Example of 0.8W Low Average Power Femtosecond Pulse Ti:Sa laser.

できなくなることはない。つまり除染係数はきわめて高いことが期待される。また、この同じ理由のため蒸散された汚染物の表面から内面まで汚染された部位の物質を空中、あるいは水中などで冷却して捕集すれば、容易に除染物が再汚染されることも無く、捕集もメッシュの細かな金網等を数段に分けて行うのであれば、これらが汚染物となることはなく、繰り返し除染捕集に用いることが

出来る。実際、応力腐食割れや孔食を多数発生したサンプル表面を数十ミクロンから1000ミクロン近くまで非熱的に剥離して除染を行った。このサンプルの写真が Fig.3 にある。

Fig.3左は非熱蒸発、或は昇華の後の写真、右は応力腐食割れSCCが起こった表面を0.7mm程度深く除去した例。

この作業の初期の電顕写真を見ると緩やかな熱

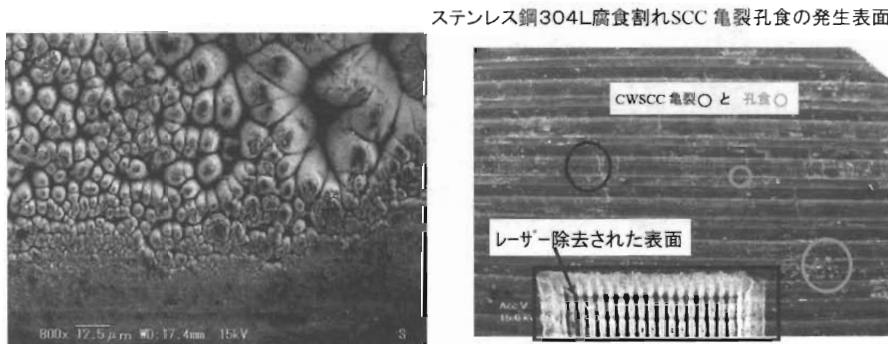


Fig.3 Left Picture shows a Stainless Steel Surface after Non-thermal Evaporation or Sublimation, Right one shows Many SCCs and 0.7mm Deep Laser-removed Rectangular Area in the Stainless Steel Sample Surface.

蒸発で、且つ溶融が行われてないことが明白にわかる。Fig.2はチタンサファイアレーザーの例である。Fig.1は大出力が可能なフェムト秒自由電子レーザーである。通常実験用の高価なレーザー程度の建設コストが必要である。チタンサファイアレーザーも出力当りの単価で考えれば高価である。

### 3.2 水噴流導光レーザー

比較的最近、スイスのローザンヌ大学で発明されたレーザー加工装置である水噴流導光レーザー (Fig.4とFig.5参照) を除染に使用する場合を以下に説明する。直径数十ミクロンから100ミクロン程度の水の噴流、つまりジェットを作り、層流状

に流れを作り、乱流を起こさせない。これを直径の千倍程度延伸させ、この水の噴流中をレーザーが光ファイバーの中のように通過する。このレーザーが水噴流に導かれてサンプルまで移動し、Fig.4に示す様に微細加工を準非熱的に行うものでレーザーでありながら平行に切断が可能である。これを用いて非熱に準ずる熱負荷の小さな蒸発を行うことが出来る。この水噴流導光レーザーにより除染を試みた。きれいに取り除くことができたが、自由電子レーザーほど高価ではないが、通常のレーザーで最も安いQスイッチYAGなどと比べると装置費用が数倍高い。

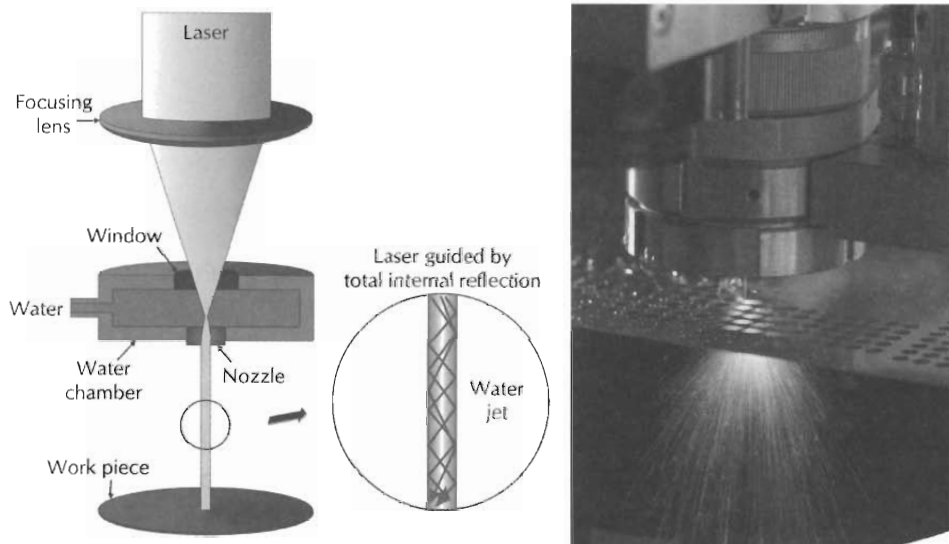


Fig.4 Mechanism of the Micro Water Jet Guided Laser.

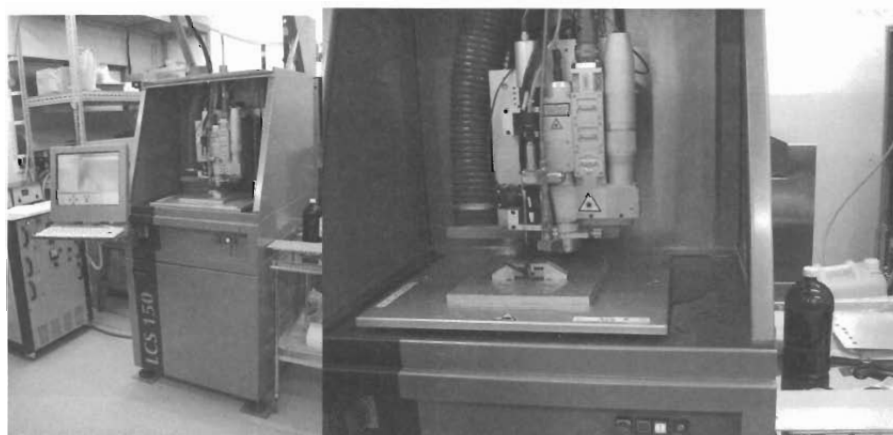


Fig.5 Micro Water Jet Guided Laser Workstation, Left Picture is an Outlook of the System. And, Right One is the Inside.

### 3.3 QスイッチYAG、ファイバーレーザー、Qスイッチファイバーレーザーなど

QスイッチYAG、ファイバーレーザー、Qスイッチファイバーレーザーなどを除染に用いる場合を以下に説明する。

ファイバーレーザーやYAGレーザー等は、溶接と熱切断がもともとの用途である。出力あたりの単価も、装置あたりの単価も安く、装置寿命が長く、使い易い。しかしながら通常の使用方法ではレーザー照射表面が溶融して、汚染RIが溶融物に混入して除染率が上がらない。Fig.6とFig.7にある様にYAG、ファイバーレーザーなどを用いて、レーザー照射面を溶融させずに昇華、蒸散できるエネルギー面密度で、表面から内面の汚染RIを蒸発除去させ、除染を行うことができる。

Fig.6は、縮小光学系を用いたパルス当り高エネルギー面密度でのレーザー除染装置。11：レーザー光源、12：縮小光学系、13：集光光学系制御部、20：ステンレス鋼模擬体あるいは実標本、21：ステンレス鋼内層、22：放射性同位元素を含む表面付着の黒錆、23：RI（放射性同位元素）を含む表面付着の原子炉内1次系の赤錆、24：孔食、亀裂などの表面欠陥。Fig.7は除染効率のパルス当りのエネルギー面密度依存性を示す。Fig.8はスイッチYAGレーザー装置、表面の黒錆のはくり離処理の青白い光が見える。

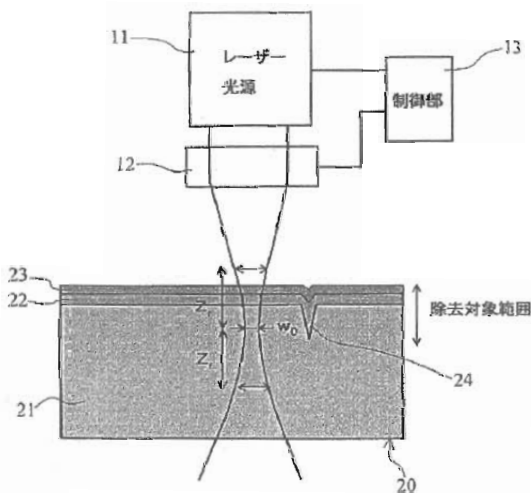


Fig.6 Demagnification Optical and High Laser Energy Density Laser Cleaning System.

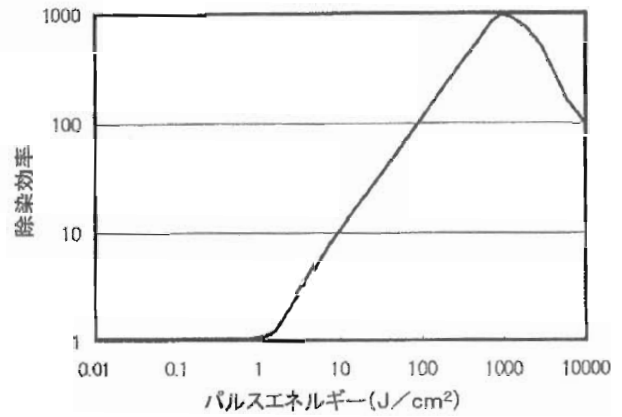


Fig.7 Decontamination Factor and Pulse Energy Density Relationship.

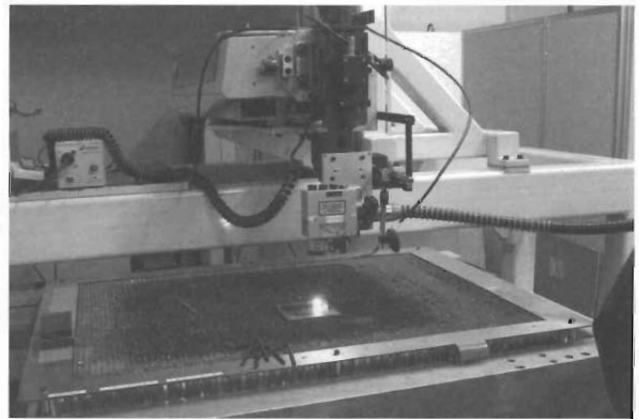


Fig.8 Q-switched YAG Laser removed Iron Oxide Black Film in the Iron Surface.

## 4. レーザー除染の評価

レーザー除染の評価は、以下のような実RI汚染物や人工RI汚染物や模擬安定同位体(SI)汚染物を用いることが考えられる。①実汚染物の場合：<sup>60</sup>Coの放射線量を計測して除染係数を測定して除染能力の評価を行う。②人工汚染物の場合：実汚染物に近いが、ステンレス製のサンプルを原子炉中の汚染と同様なプロセスで汚染させ、これを除染して評価を行う。③RIでない安定同位体SIで原子炉中の汚染と同様なプロセスで表面に付着させ、これを除染して評価を行う。RIでない安定同位体SIで原子炉中の汚染と同様なプロセスで表面に付着させこれがどの程度のこっているかで除染の評価を行った。これは特許出願中でメッキ技術でコバルトのSIを表面の凹凸や亀裂などに付着させて、黒錆や赤錆をその上に載せている。

## 原子炉内汚染模擬体の擬似除染過程

- ①酸化層コバルト層母材層が表面及び亀裂部に上部から順に形成されている原子炉内汚染模擬体。
  - ②大部分の酸化層が除去、一部亀裂部に残留、コバルト層と母材層は変わらず。
  - ③大部分の表面コバルト層が除去、亀裂部に酸化層とコバルト層が残留。
  - ④亀裂部にコバルト層のみが残留。
  - ⑤亀裂部まで剝離・除去。残留する酸化層とコバルト層はない。
- 矢印は除染作業に用いる種々の手段↓と除去↑を表示。

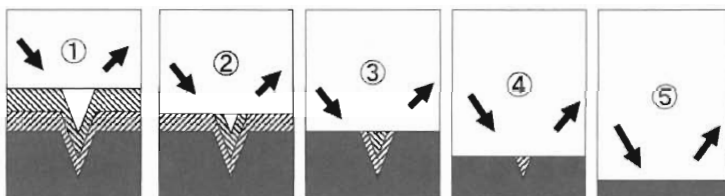


Fig.9 An explanation of the Laser Decontamination Processes.



Fig.10 Mock Contaminated-materials of the Primary Cooling System in the Nuclear Power Reactor.

Fig.9にレーザー除染過程説明を、Fig.10に原子炉汚染模擬体試作品を示す。安定同位体 (SI) で汚染を模擬し、黒錆と赤錆で水垢を模擬した。

Fig.9に示す様に表面を削り取るので除染を平均的に対象とする全面積に行う場合、レーザー除染後に表面の深さ分布を、光学顕微鏡などで計測してこの平均の深さも除染の評価のひとつに用いることができる。

### 5. レーザー除染装置の構成

レーザー除染装置の構成例を以下に考える。比較的大型の装置の場合では、①台車などに乗せる大きさと1-数kW程度以上のレーザー出力の

レーザー装置、②レーザー装置から除染対象までレーザー光を運ぶ、石英光ファイバー伝送装置、③ファイバーで伝送されたレーザー光を集光し、除染対象表面から内面に広い表面積に渡り、高い集光強度を保持して走査するガルバノミラーなどの光学装置、④この③を任意の場所にピンポイントで移動させる自動搬送装置から構成される。勿論比較的小規模或は小面積を手動で除染する場合は多いと思われるが、極めて小規模の電池駆動か、延長線で電力を供給する、パックパックのように背中に背負って使用できる超小型装置では、①100W程度以下の小型レーザー装置、②手元の照射部と背中をつなぐのみだがやはり短いファイバー伝送装置、③簡略な2次元の走査装置、④は手動で人力となる。

Fig.11は自動搬送装置の具体例である。原子炉

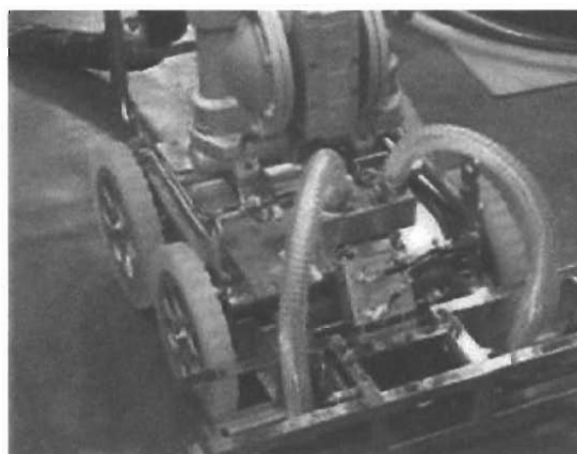


Fig.11 An Example of the Automatically Movable Cleaning Device

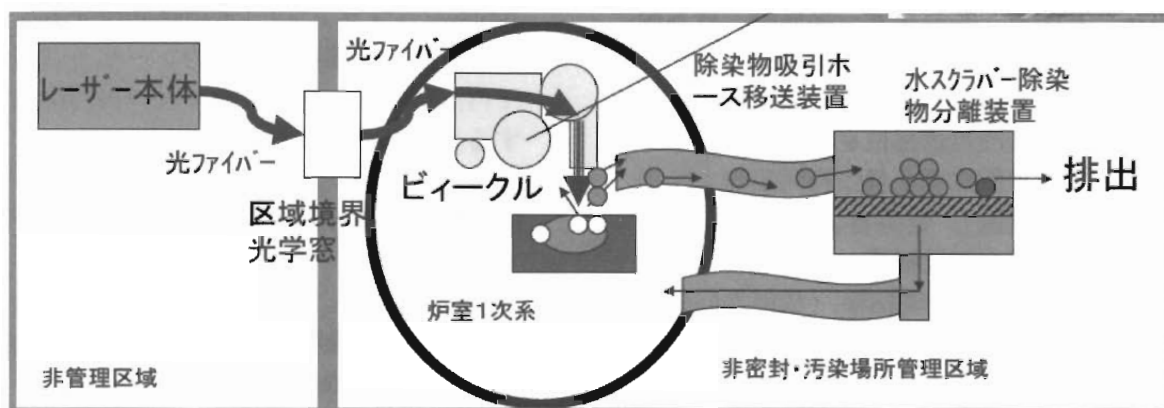


Fig.12 An Explanation of the Automatically Movable Cleaning Device, Fiber, Filter, Laser Device, and Nuclear Power Reactor Facility Layout.

の底や水槽の中で移動しながら除染を行うヴィークル（レーザー搬送用白走装置）である。Fig.12は炉室内を自動走行する自動搬送装置システムの概念説明である。

## 6. レーザー除染装置産業

レーザー装置は内製化が産業振興には必要で、種々の除染に適用可能なレーザーは全て内製化可能である。半導体レーザーを駆動源とする場合、これを内製化するとハイテク産業である半導体製造業が嶺南地区に起業することになる。超伝導自由電子レーザーを除染用レーザー装置に選択すれば加速器製造業が嶺南地区に必要となる。産業振興の意味は薄いだがこれらは部品を購入してノックダウン方式の組立工場から出発することも可能である。装置産業ではないが、これらの前段階としてレーザー除染サービスを先に開始して、装置産業の立ち上げを容易にすることも考えられる。

レーザー除染装置製造業の企業化には、

- ①レーザー除染装置の市場規模予測と嶺南における企業化手順の評価と調査
  - ②除染用レーザー装置製造技術（フラッシュランプ・LDとレーザー結晶製造装置（ターンキーシステム）などの専門商社メーカー調査）の嶺南における企業化の評価と調査
- などの調査も不可欠である。

勿論、レーザー除染装置の開発や性能評価は当然必要不可欠で以下のような内容の実行が必要である。

- ①軽水炉1次系汚染の模擬体と実標本を用いたレーザー除染評価と調査
- ②軽水炉1次系自走式自動レーザー除染装置の必要性能と概念設計
- ③原子炉内・施設内レーザー伝送用超耐放射線光ファイバーの評価と調査

## 謝辞

現在おこなわれている石英光ファイバー伝送を用いたレーザー除染装置の開発を紹介して、議論した。この仕事を行うに当たり、種々協力してくださった方々に感謝の意を表したい。特に株式会社 若狭クリエイト社長 下野俊和、若狭技研工業株式会社 社長 矢野秀夫、株式会社 アトックス技術開発部 部長 加藤正平、(独)日本原子力研究開発機構ふげん技術開発部 部長 清田史功、(独)日本原子力研究開発機構 技術展開推進GL 中島準作、(独)日本原子力研究開発機構レーザー技術利用推進室長 鈴木庸氏などの方々には、多大なる人的物的支援を得た、ここに改めて謝辞を表したい。

## 参考文献

以下に関連する取得特許、出願特許、発表報告をまとめる。

- (1) 特願2009-109050 平成21年「除染能力評価方法及びこれに用いられる評価用模擬試料」、発明者：峰原英介、実施権、日本原子力研究開発機構。
- (2) 特願2009-109062 平成21年 除染装置及び

- 除染方法、発明者：峰原英介、実施権、日本原子力研究開発機構。
- (3) 特願2006-147918号平成18年、「放射性同位元素に汚染された表面近傍部位を非熱的レーザー剥離を用いて再拡散無く、且つ再汚染無く除染する方法とその装置」、発明者：峰原英介、実施権、日本原子力研究開発機構。
- (4) 特願2006-147930号平成18年、「放射性同位元素に汚染された表面を水噴流導光レーザー剥離を用いて低温にて再汚染少無く除染する方法とその装置」、発明者：峰原英介、実施権、日本原子力研究開発機構。
- (5) 除染特許 フランス 2008.8.No.PCT/JP2007/060872 (フランス)「放射性同位元素に汚染された表面近傍部位を非熱的レーザー剥離を用いて再溶融なく、再拡散無く且つ再汚染無く除染する方法とその装置」。
- (6) 学会発表済、「ふげん」廃止措置へのレーザー除染の適用性評価試験」林、峰原他5名、原子力学会2007秋。
- (7) 学会発表済、「水噴流導光レーザーによる放射性汚染物の除染技術の開発」峰原、他4名、原子力学会2009春。
- (8) 学会発表済、「FELやその他のレーザーを用いた原子炉構造材と周辺機器の除染」峰原、原子力学会2009秋。



## 核種移動を考慮した放射能インベントリ評価システム開発

福村信男\*、宮本喜晟\*

### *Development of Radioactivity Estimation System Considering Radioactive Nuclide Movement*

Nobuo FUKUMURA\*, Yoshiaki MIYAMOTO\*

放射化量評価コードシステム (COSMARD-RRADO) と核分裂生成物 (FP)、放射性腐食生成物 (CP) 及びトリチウムの冷却材ナトリウム中の移行量評価コード (SAFFIRE、PSYCHE、TTT) を統合した高速炉廃止措置検討に用いる放射能インベントリ評価システムを開発した。コードの統合に際し、データの一元化やデータ授受の簡素化に留意するとともに被覆管付着燃料からのバックグラウンドFP等の機能追加を行った。本評価システムを用いて、国内外高速炉プラントの放射能インベントリ評価を行った。1次冷却系ナトリウム (Na-22) 放射化量に関しては測定値と比べて数10%、またFP、CP、トリチウムなどの放射能移行量に関してはファクター2~4の計算精度であり、測定値のばらつきの範囲内でほぼ満足の行く結果が得られた。

A radioactivity estimation system considering radioactive nuclide movement is developed to integrate the established codes and the code system for decommissioning of sodium cooled fast reactor (FBR). The former are the codes for estimation of radioactivity movement in sodium coolant of fast reactor which are named S a f f i r e, PSYCHE and TTT. The latter code system is to estimate neutron irradiation activity(COSMARD-RRADO). It is paid special attention to keep the consistency of input data used among these codes and also the simplification of their interface. A new function is added to the estimation system, to estimate minor FP inventory caused by the fission of impurities contained in the coolant and slight fuel material attached on the fuel cladding. To check the evaluation system, the system is applied with radioactivity data of the preceding FBR such as BN-350, JOYO and Monju. Agreement between the analysis results and the measurement is well satisfactory. The uncertainty of the code system is within several tens per cent for the activation of primary coolant (Na-22) and factor of 2-4 for the estimation of radioactivity inventory in sodium coolant.

本報告書は、電源開発促進対策特別会計法に元づく文部科学省からの受託事業としてRANDECが実施した「平成18年度、平成19年度及び平成20年度の各種移動を考慮した放射能インベントリ評価システム開発」の成果です。

\*：(財) 原子力研究バックエンド推進センター (Radioactive Waste Management and Nuclear Facility Decommissioning Technology Center)

## 1. はじめに

原子力施設の廃止措置時には、多量の放射性廃棄物が発生する。この廃棄物については、「放射性廃棄物最小化の原則」、「合理的な処理・処分の原則」等のもとで、適切な区分を行い、それぞれの区分ごとに安全に処理・処分することが重要である。このためには、放射化物質のみならず、汚染物質まで考慮した正確な放射能評価が必要である。100万kWe級の軽水炉(PWR)の30年間運転で、機器等の放射化量は約 $2 \times 10^{17}$ Bg、腐食生成物(CP)量は、約 $2 \times 10^{14}$ Bg、また燃料からの核分裂生成物(FP)量で、約 $8 \times 10^7$ Bgと評価されている。特に液体ナトリウム(Na)冷却型高速炉(FBR)施設では、燃料破損などに由来する核分裂生成物(FP)の漏出・移行、構造材のNa腐食によるCPの生成・移行及び炉心構造材料に対し高い透過性を有するトリチウム(T)の生成・移行の評価が重要である。

このような観点から、放射化物質のみならず、上記の各種放射性物質の生成・移行までを包括し一貫して評価できる放射能インベントリ評価システムを開発した。さらに開発したシステムについて国内外の高速炉で取得されたデータに基づき検証を行った。

## 2. 既存コードの検討

### 2.1 概要

放射能インベントリ評価システム開発は既存の放射化量評価コード(COSMARD<sup>1)</sup>)と放射能移行量評価コード(SAFFIRE<sup>2)</sup>、PSYCHE<sup>3)</sup>、TTT<sup>4)</sup>)を統合して、新たなシステム構築を図ることを基本方針とした。これらの既存コードの内容を調査し、システム構築の観点から必要な改良課題などを整理した。

### 2.2 放射化量評価(COSMARD : Code System for Management of Reactor Decommissioning)

COSMARDコードシステムはJPDRの廃止措置管理データ評価用に開発されたもので廃棄物量評価や作業時被曝量評価など廃止措置計画全体を評価するコード体系である。COSMARD-RRADO (Revised Radioactive Inventory Calculation Code) (放射化量評価部)は、COSMARDコードシステムの部分システムとして放射化量計算を行うことができる。放射能イ

ンベントリ評価システムの放射化量計算部分には既存のCOSMARD-RRADOシステムを用いた。

### 2.3 放射能移行量評価

#### (1) SAFFIREコード (Study of Radioactive Fission Fragment in Reactor Fuel Element)

SAFFIREコードは高速炉の1次冷却系に移行・蓄積する系統内の下記核分裂生成物(FP)量を算出するものである。これは被覆管に漏洩があり、FPが冷却材へ移行した場合を想定している。

- ①燃料ペレット中のFP生成量
- ②ギャップ(燃料ペレットと燃料被覆管)へのFP移行量
- ③1次冷却系へのFP移行・付着量
- ④1次カバーガス系へのFP移行・付着量

燃料からギャップへのFP移行挙動については、反跳、拡散、溶解・蒸発などの燃料温度に依存する現象に応じた評価モデルが組み込まれている。

反跳現象は、燃料ペレット表面近傍で生成したFPが核分裂エネルギーの1部を得てギャップへ飛び出す現象である。拡散現象は、Fickの法則に従って結晶内で生成したFPが結晶粒界(ギャップ)へ拡散・移行する機構である。燃料温度が $1,500^{\circ}\text{C} \sim 2,650^{\circ}\text{C}$ でポイド移動現象がおこる、これはペレット内のポイドが中心部へ移行し、その後結晶が生成されるもので、保持されたFPが開放される現象である。 $2,650^{\circ}\text{C}$ 以上では、熔融・蒸発現象がおこる。これは、燃料が微細な粒子となって熔融・蒸発し、FPがペレット外へ放出されるものである。高速炉の燃料平均温度は約 $1000^{\circ}\text{C}$ 程度と考えられることにより、拡散現象が支配的である。

1次冷却系に移行したFPの冷却系壁面への沈着挙動はChilton-Colburnモデルによる物質移動係数<sup>5)</sup>を用いて評価される。ただし、Csのナトリウム中挙動に関してはNewson<sup>6)</sup>とHooper<sup>7)</sup>が提案したクロマイトモデルが用いられている。

#### (2) PSYCHEコード (Program System for Corrosion Hazard Evaluation)

PSYCHEコードは、高速炉の1次冷却系の保守・補修時被ばく線量評価に資することを意図して、1次冷却系での放射性腐食生成物(CP)特に<sup>58</sup>Co、<sup>60</sup>Co

及び $^{54}\text{Mn}$ 量の生成、移行、沈着挙動を評価する目的で開発された。高速炉では、燃料被覆管(ステンレス鋼)が放射化し、放射化したステンレス鋼がNa腐食を受けて1次冷却材中に溶出してCPとなり、1次冷却系をナトリウムと共に循環する過程で1次冷却系機器・配管表面に沈着する。これらCPは、保守・補修時の被ばくの一因となるものである。PSYCHEコードは、CPの生成、移行、沈着挙動を、溶解・沈着モデルで表している。このモデルでは、溶出側は被覆管の肉減りと管壁内部からの拡散による移行を考慮し、沈着側は管壁表面での析出と内部への拡散を考慮するものである。

### (3) TTTコード (Tritium Transport and Trap)

TTTコードはトリチウムの生成・移行挙動を評価するコードである。移行に関する基本モデルは米国アルゴンヌ国立研究所 (ANL) のR. Kumarが開発した水素 (H-1) とトリチウム (H-3, T) の挙動モデル<sup>8)</sup>に基づいている。高速炉のトリチウムの主な発生源は炉心燃料の核分裂と制御棒中のB-10等の核反応によるものであり、燃料・制御棒で生成したトリチウムの1次冷却系への移行速度を入力として1次冷却系、2次冷却系、水蒸気系への挙動を評価する。主要な除去装置であるコールドトラップでの捕獲評価においては、水素とトリチウムとの同位体交換や共沈等の現象が考慮されている。

## 3. 評価システムの開発

### 3.1 評価システムの構成

核種移動を考慮した放射能インベントリ評価システム(以下本システム)は、Fig.1に示すように、①放射化量評価(COSMARD-RRADO)、②放射能移行量評価とのインタフェース(SPT-CONVERT)、③放射能移行量評価(SPT-Manager)及び④データベース(DATA-BASE)の4部から構成されている。本システムはWINDOWS上での利用を考慮し、LINUX上で作動するよう整備されてきている放射化量評価部(COSMARD-RRADO)からの出力を放射能移行量評価部へ受け渡すためにインタフェース(SPT-CONVERT)を設けた。COS-



Fig.1 System Structure of Evaluation of Radioactive Inventory including Radionuclide Movement

MARD-RRADOは、LINUXで作動するほか、WINDOWS上でも作動する。本システムにおけるWINDOWSとLINUXの関連をFig.2に示す。

### 3.2 放射化量評価 (COSMARD-RRADO)

COSMARDコードシステムの放射化量評価部RRADOは複数のコード(中性子線束輸送計算コードや放射化放射能計算コード等)を有するシステムであり、グラフィックユーザーインタフェース(GUI)画面を用いて別々に作成されたコードの計算結果を接続して一元的に計算することが出来るようにしたシステムである。放射化量評価は、炉心廻りの中性子束分布を求めることが出発点となる。中性子束分布計算は多群輸送計算若しくはモンテカルロ輸送計算のいずれかが用いられる。COSMARD-RRADOでは、Fig.3に示すとおり、評価済み核データファイル (ENDF/B、JENDL) から多群輸送計算 (DORT/TORT) 用に群定数化処理するか若しくはモンテカルロ計算 (MCNP) 用断面積を作成する。続いて組成に依存した領域平均実効マクロ断面積を作成し、中性子束分布を計算する。

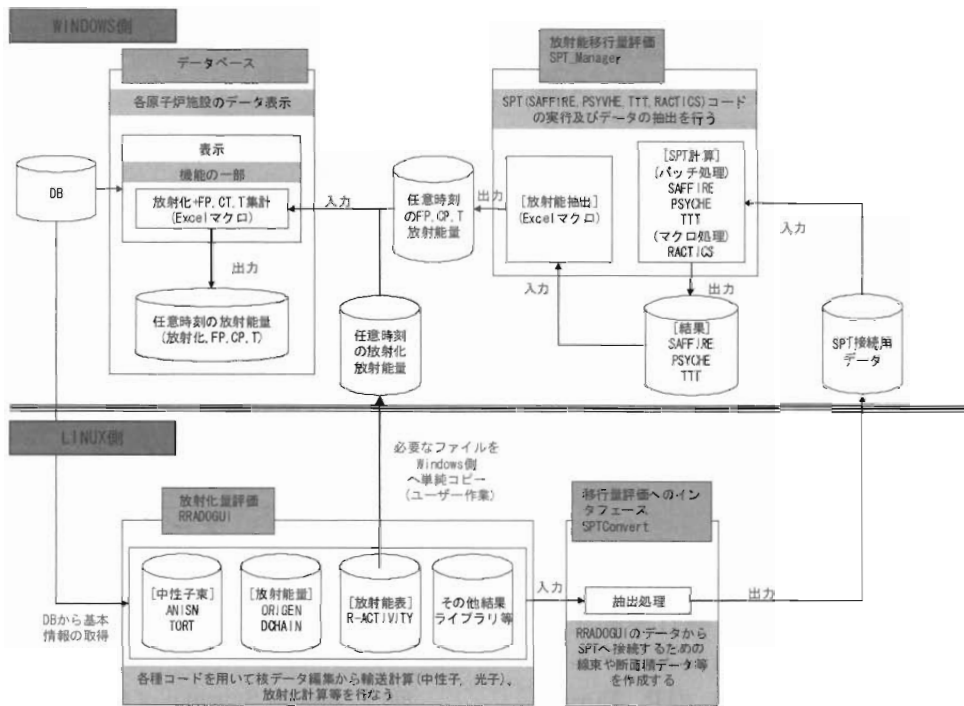


Fig.2 Data Linkage between WINDOWS and LINUX

### 3.3 放射能移行量評価とのインタフェース (SPT-CONVERT)

COSMARD-RRADOで計算した炉心廻り中性子束等の放射能移行量評価部 (SPT-Manager) で使用するデータを、(COSMARD-RRADO)の計算結果から取り出してSPT-CONVERT用に編集する。ここで、COSMARD-RRADOはUNIX (LINUX) 上のシステムであり、一方SPT-ManagerはWINDOWS上のシステムであるため、SPT-CONVERTはUNIX (LINUX) からWINDOWSへのインタフェース上の整合を図っている。インタフェース部で受け渡されるデータはFig.4に示す内容である。

### 3.4 放射能移行量評価 (SPT-Manager)

SPT-Managerは基本的にはFP計算用のSAFFIRE、CP計算用のPSYCHE及びトリチウム計算用のTTTの3コードを起動して放射能インベントリの移行を評価する機能である。また、燃料表面付着ウラン (規制の上限値 $3.1 \times 10^{-7}$  g-u) からの核分裂生成物や冷却材ナトリウムの放射化放射能濃度 (Na中のU不純物量0.05ppm) の推移を評価する機能を有している。各計算コードはSPT-

Managerからメニュー画面を介してバッチ計算として実行される。この際、COSMARD-RRADOからのインタフェースデータはファイル指定により受け渡される。データの受け渡しをFig.5に示す。放射能移行量評価コードの統合に際しては以下の点に留意した。

#### (1) データの一元化

従来のコードでは、炉心内の中性子束分布、CP生成断面積、トリチウム発生量等は別途炉心計算にてコードや手法を変えて評価していた。ここでは、既に放射化放射能を計算しているCOSMARDコード側のデータを有効活用するようにして、中性子束分布、CP生成断面積、トリチウム発生量などを一元化すると共に、それにより省力化を図った。

#### (2) 入力作業の軽減化

単に、3つのコードを結合しただけでは、同じデータの変数名を変えて入力する必要が発生する。これに対しては、炉心データ及びプラントデータのデータベースを構築して、それに基づき、データを作って各コードに受け渡すようにし

COSMARD-RRADOの手順

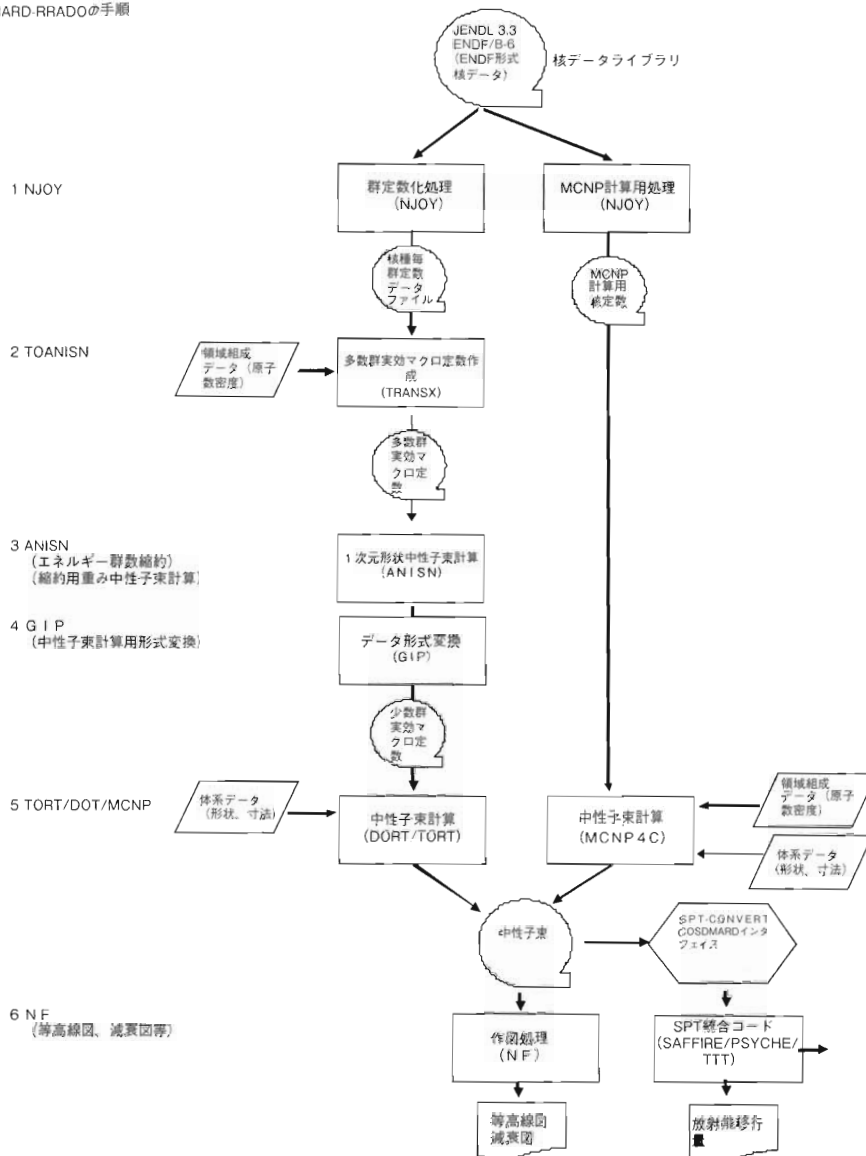


Fig.3 Evaluation Scheme of Radioactivity in COSMARD-RRADO

た。このようにすることで、解析対象のプラントデータの输入が容易になる。

(3) 機能の追加

1次冷却材中の不純物として含まれている核燃料物質や被覆管に付着している核燃料物質の核分裂及び1次冷却材の放射化等により、H-3、Na-22、FPを生成するが、これらの核種の評価機能を今回追加した。

(4) 主要なアウトプット

高速炉の廃止措置時には、1次冷却材及び2次

冷却材のナトリウムは1次系及び2次系の機器・配管からドレンされ、機器・配管にはFP、CP、及びトリチウムなどが表面に付着して残留する。付着して残留する放射能は、COSMARD-RRADO算出の放射化放射能ファイルに加えられる。下記の放射能は放射性廃棄物解体時に作業員が受ける被ばく評価及び解体廃棄物処理処分時の放射能等評価において重要である。

- ・ 1次冷却材の放射化放射能インベントリ：Na-22
- ・ 1次冷却材中並びに機器配管に付着するFP放射能インベントリ：Cs-137、他

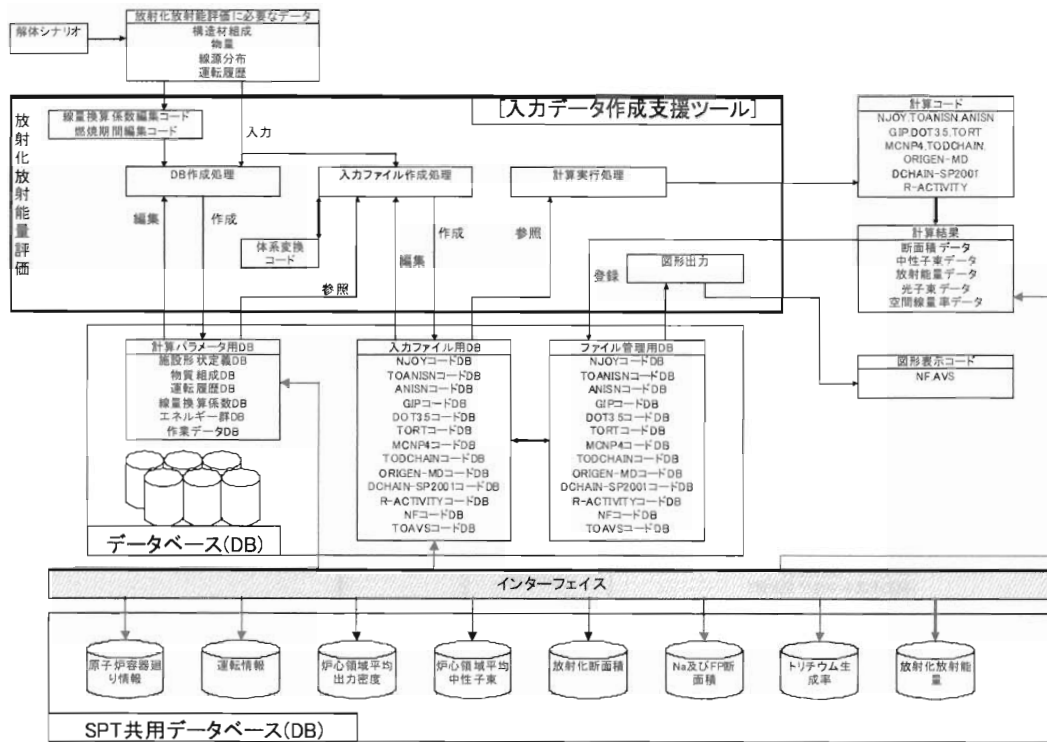


Fig.4 Data Interface between Evaluations of Radioactivity and Radionuclide Movement

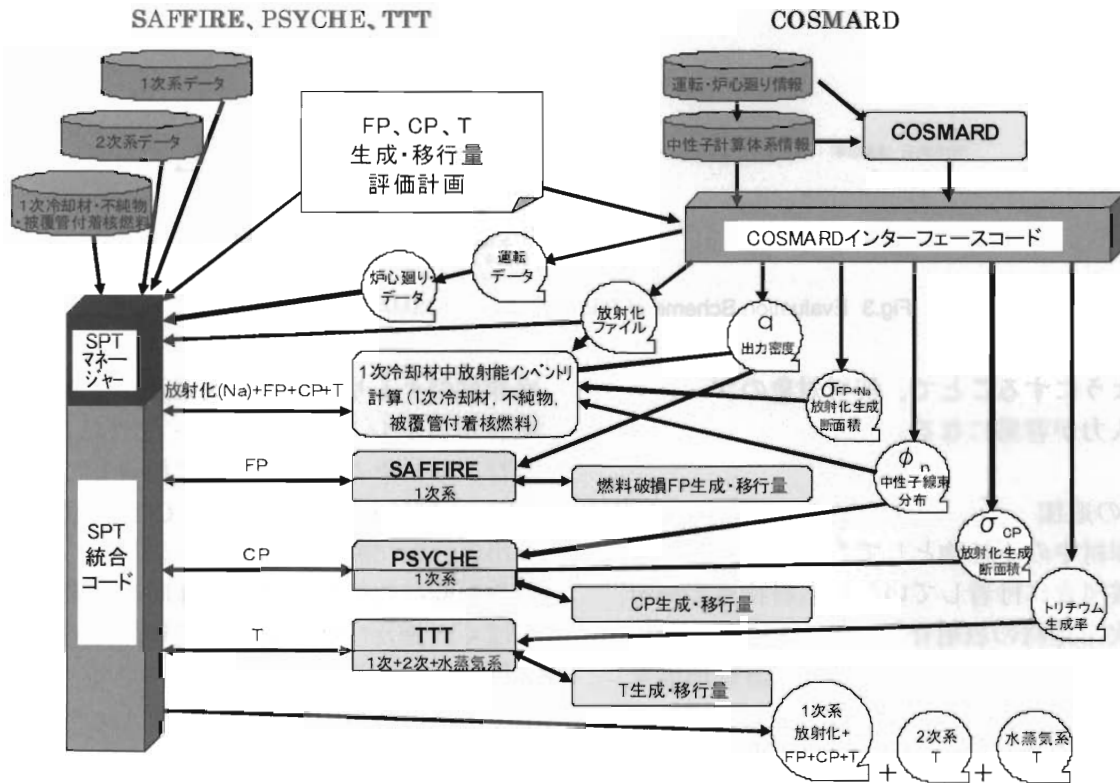


Fig.5 Evaluation Code for Radionuclide Movement (SPT-Manager)



- ・ 1次系機器・配管表面付着CP放射能インベントリ：Cr-51、Mn-54、Fe-55、Fe-59、Co-58、Co-60、Ni-59、Ta-182
- ・ 1次、2次冷却材ナトリウム中、1次・2次系コールドトラップ内及び水・蒸気系のトリチウム (T)

### 3.5 データベース

カザフスタンにある高速原型炉BN-350、高速実験炉「常陽」、高速原型炉「もんじゅ」の調査収集データをまとめ、この結果を統合システムのデータベースとして組み込む作業を行った。データベース化は、プラント基本情報、炉心、原子炉構造、冷却系機器、アルゴンガス系、燃料取扱貯蔵設備等に関連するデータを調査収集し、これらを1次情報として整理した。次に、1次情報から、統合システムを用いて放射能インベントリ評価を行う際に必要となる運転履歴、機器・配管の形状、寸法や組成等のデータを抽出整理し、これらを2次情報として電子データ化した。更に、2次情報から、統合システムの入力データとして使いやすい形に編集加工し、これらを3次情報としてデータベース化した。これらのデータをシステムの機能の一部として位置づけた。

本評価システムを新規プラントに適用する場合には、その新プラントのデータベースをこの枠組みの中に構築してゆくことになる。

## 4. 検証と考察

### 4.1 検証方法

廃止措置計画中のFBRプラントであるBN-350を対象に、1次冷却材ナトリウム放射化量、1次冷却系FP移行量、1次冷却系CP移行量及び1次冷却系・2次冷却系トリチウム移行量について測定結果と本システムによる解析結果とを比較した。但し、BN-350では、1次冷却系CP移行量が未測定であるため、高速実験炉「常陽」MK-II炉心でのCPデータへの適用性を検討して補った。また、高速原型炉「もんじゅ」性能試験時のNa-22放射化量データ等の解析を行った。本システムを用いて放射能移行インベントリを評価する手順は炉心部の放射化量評価と冷却系への放射能移

行量評価の2つの部分に大別される。前段はCOSMARD-RRADO機能を用いて実施した。ここでは、核断面積ライブラリから中性子束分布計算で用いる核反応断面積の処理(群定数化)を行い、続いて群定数化された断面積を用いた中性子輸送計算コードによる中性子束分布計算を実施する。後段はSPT統合コードを用いた放射性腐食生成物やトリチウム等の冷却系への放射能移行計算である。

### 4.2 検証結果

#### 4.2.1 BN-350

##### (1) 1次冷却材放射化放射能

BN-350プラントのNa-22放射化量は1991年10月6日の時点で測定されている<sup>9)</sup>。測定時点に対応したNa-22放射化量を本システムにより計算した。1次冷却材ナトリウムの放射化によるNa-22生成量は $4.1 \times 10^{12}$ Bqである。1次冷却材ナトリウムインベントリを470 tとすると1次冷却材中のNa-22放射能濃度は $8.6 \times 10^6$ Bq/kgとなる。Table 1に示すとおり計算値は測定値と比べて妥当な一致を示している。

##### (2) 1次冷却系核分裂生成物放射能

1次主冷却系における核分裂生成物放射能移行量は1997年11月20日、1999年10月6日及び2001年2月の各時点で1次冷却材中放射能濃度が測定されている<sup>9)</sup>。測定時点に対応したCs-134、Cs-137の1次冷却材中放射能濃度を本システムにより計算した。Table 2に示すとおり計算値は測定値と比べて妥当な一致を示している。

##### (3) トリチウム1次、2次冷却系放射能移行量

1次冷却系及び2次冷却系コールドトラップ(CT)におけるトリチウム蓄積量は1991年に測定

Table 1 Activated Radionuclide in Primary Coolant (BN-350)

(単位; Bq/kg)

放射性核種	1次冷却系放射能濃度	
	測定値*	評価値
Na-22	$7.9 \times 10^6$	$8.6 \times 10^6$

\* (1999年10月6日測定)

(出力: 750MWt、冷却材温度: 炉心入口280℃、炉心出口430℃)

Table 2 Radioactivity of FP in Primary Coolant (BN-350)

(単位 ; MBq/kg)

測定日	評価項目	1次冷却系放射能濃度	
		測定値*	評価値
1997年11月	Cs-134	14.8	20.2
	Cs-137	370	402
	Cs-137/Cs-134	25	20
1999年10月	Cs-134	5.6	10.8
	Cs-137	222	385
	Cs-137/Cs-134	40	36
2001年 2月	Cs-134	5	6.9
	Cs-137	350	374
	Cs-137/Cs-134	70	54

されている<sup>9)</sup>。測定時点に対応したCTへのトリチウム蓄積量を本システムにより計算した。Table 3に示すとおり計算値は測定値と比べて妥当な一致を示している。

Table 3 Amount of Tritium in Cold Trap (BN-350)

(単位 ; Bq)

放射性核種	1次冷却系放射能濃度	
	測定値*	評価値
H-3 (1次系CT)	$3.7 \times 10^{15}$	$1.3 \times 10^{15}$
H-3 (2次系CT)	$3.9 \times 10^{13}$	$1.0 \times 10^{14}$

\* (1999年10月 6日測定)

#### 4.2.2 高速実験炉「常陽」

##### (1) 1次冷却材放射化放射能計算

1次ナトリウム中のNa-22濃度の測定値の推移は、Fig.6に示すとおりである。放射能濃度が安定した運転サイクル後半での測定値は $1.0 \sim 1.3 \times 10^4$  Bq/gの範囲であるが、計算値は熱出力100MWで、運転履歴を考慮して算出し、 $0.8 \sim 1.3 \times 10^4$  Bq/gとなり、良好な一致がみられている。

##### (2) 1次冷却系放射性腐食生成物移行量

1次冷却系配管への放射性腐食生成物移行量の計算値 (C) を測定値 (E)<sup>10)</sup> で除した値 (C/E) の推移をFig.7に示す。Mn-54のC/Eは2~4、一方Co-60のC/Eは0.5~1で概ね良好な一致がみられている。コールドレグ側ではホットレグ側よりも過大評価の傾向がみられる。

#### 4.2.3 高速原型炉「もんじゅ」

##### (1) 1次冷却材放射化放射能計算

1次ナトリウム中のNa-22濃度は、出力試験の運転サイクル8終了時点で数点測定され定格出力運転時へ外挿した値として $8.9 \times 10^{-4}$  mCi/cm<sup>3</sup>と報告されている<sup>11)</sup>。運転サイクル8終了時点での測定値では、 $1.3 \times 10^3$  Bq/g (E) に相当する。一方、同時点の計算値は $9.5 \times 10^2$  Bq/g (C) でありC/E

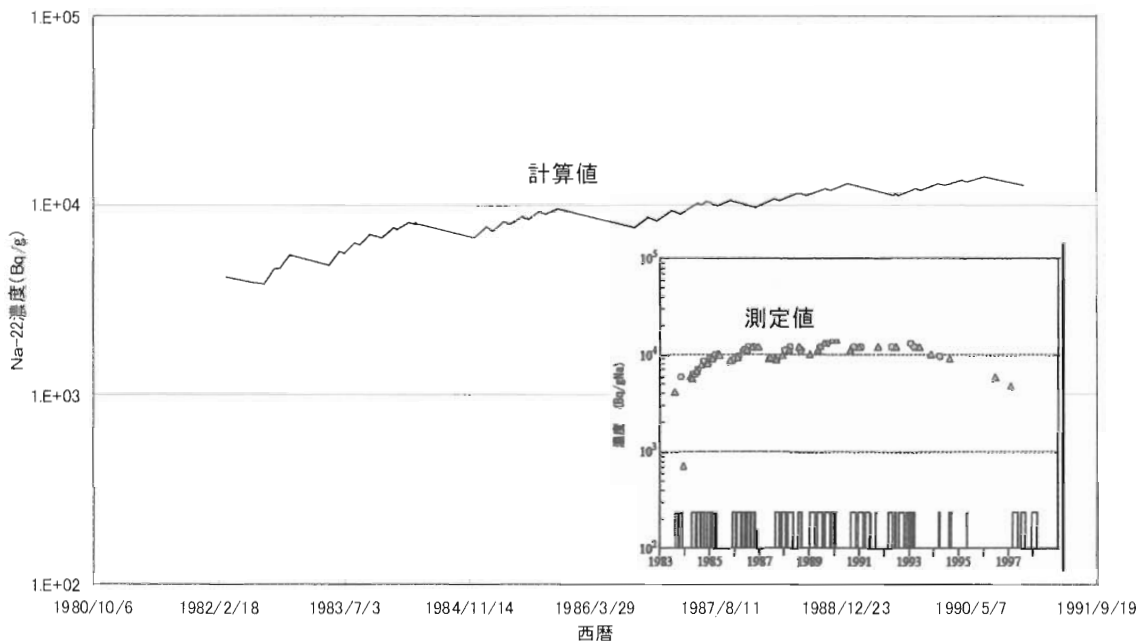


Fig.6 Time-history of Radioactivity (Na-22) in Primary Coolant (MK-II, Joyo)

=0.7と概ね妥当な一致がみられている。

(2) 1次冷却系トリチウム移行量計算

1次系ナトリウム中のトリチウム濃度の測定値の推移は、Fig.8に示すとおりである<sup>12)</sup>。

1次系ナトリウム中のトリチウム濃度の測定値

(E) は、運転サイクル3～8の間で $2 \times 10^9 \sim 3 \times 10^9 \text{Bq/m}^3$ の範囲にある。また、2次系ナトリウム中のトリチウム濃度は $2 \times 10^7 \sim 8 \times 10^7 \text{Bq/m}^3$ である。一方、計算値(C)は1次系で $5 \times 10^9 \sim 8 \times 10^9 \text{Bq/m}^3$ であり、2次系で $5 \times 10^7 \sim 8 \times 10^7 \text{Bq/m}^3$ である。計算値が多少上回っているが上限値と

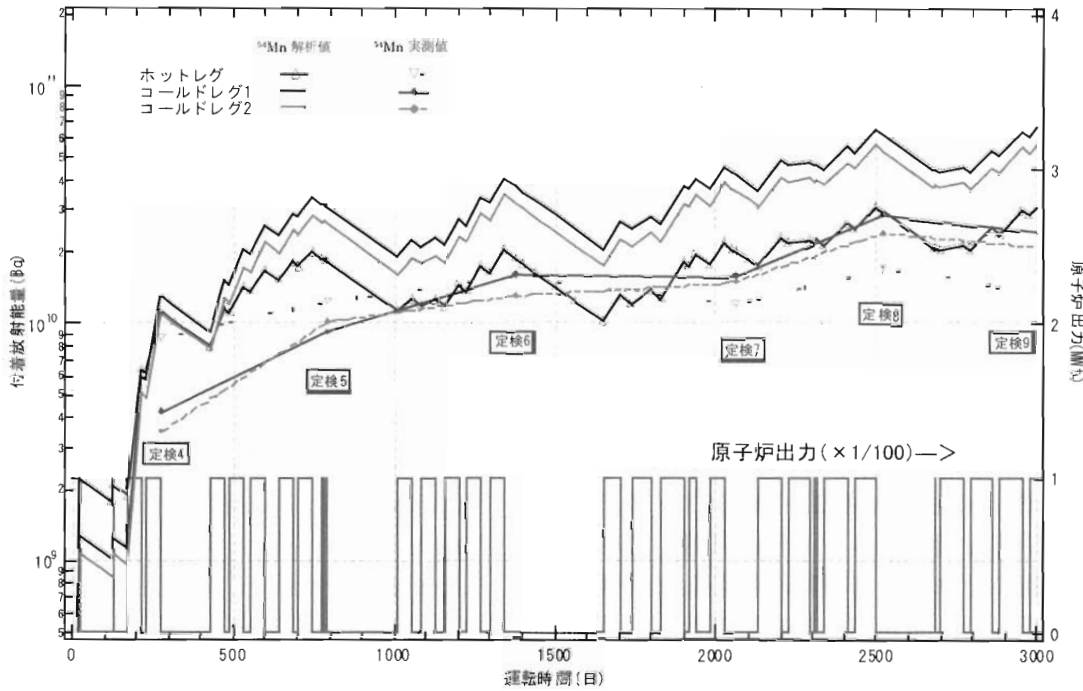


Fig.7 Time-history of CP Inventory (Mn-54) in Primary Coolant (MK-II, Joyo)

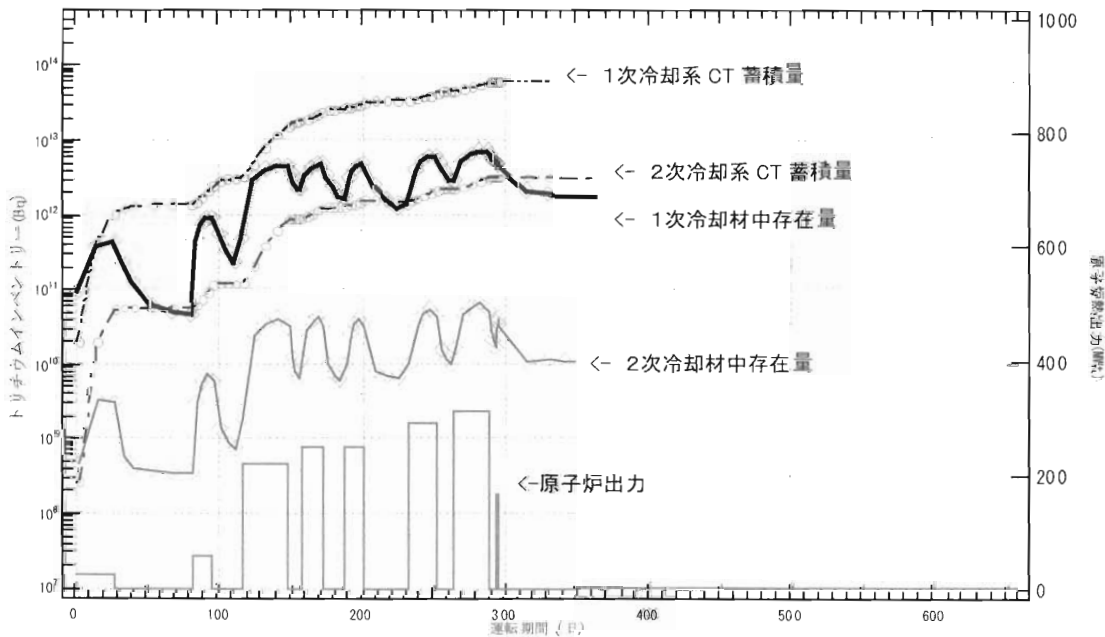


Fig.8 Time-history of Tritium Migration (Monju System Start-up Test)

ファクター 2.5程度の範囲で収まっており概ね良好な一致がみられている。

#### 4.3 考察

開発した本システムを国内外の高速炉プラントに適用した。高速炉廃止措置計画上の主要核種であるNa-22、FP、CP、Tの放射能移行量に関して測定値と計算値を比較したところ、1次系ナトリウムの放射化 (Na-22) に関しては数10%程度の計算精度であることが示された。また、FP (Cs-137)、CP (Mn-54、Co-60) やトリチウムの放射能移行量に関しては、ファクター2~4程度での概ね良好な一致がみられており、本システムを用いてFBR廃止措置計画時の放射能インベントリ評価に用いることの妥当性が示されたと考える。

#### 5. おわりに

核種移動を考慮した放射能移行インベントリ評価システムを既存のCOSMARD-RRADOシステムと放射性核種移行量評価コードSAFFIRE、PSYCHE、TTTを基にそれらを有機的に統合した評価システムを構築した。開発された本システムによる国内外の高速炉プラントでの適用性評価の結果は満足すべきものである。今後、本評価システムを用いて高速炉廃止措置計画立案等に活用されることが期待される。

#### 謝辞

本評価システムを作成するに当たり、ご協力くださいました新型炉技術開発株式会社 (AR-TECH) 及び有限会社科学システム研究所 (SSL) 並びにJAEA等の方々に心から感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 助川武則、大島総一郎、白石邦生、柳原敏、「原子炉施設の解体作業に関する管理データ計算モデルの開発」、JAERI-Data/Code 99-005 (1999年2月)。
- 2) 飯沢克幸、竹内純、吉川暁、漆原広、「高速炉 保修線量評価システムの開発」、JNC TN 2001-007 (2001年9月)。
- 3) 飯沢克幸、「高速炉保修線量評価システム「DORE」の開発—システム構築と「もんじゅ」への適用」、JNC TN4410 2001-001 (2001)。
- 4) 飯沢克幸、鳥居建男、「高速炉トリチウム挙動解析コードの開発」、JNC TN 1340 2001-001 (2001年3月)。
- 5) T.H. Chilton and A.P. Colburn, "Mass Transfer (Absorption) Coefficients", Ind. Eng. Chem., Vol.26, No.11, pp.1183-1187 (1934)。
- 6) I. H. Newson, R.W. Dawson et al., "Studies of Cesium and Zinc Transport and Deposition from Flowing Sodium", Proc. 4th Int. Conf. on Liquid Metal Eng. And Tech., Avignon, pp.627-1~627-4 (1988)。
- 7) Hooper, A.J., "The Behaviour of Fission Product Cesium in LMFBR Primary Circuits: Experiments in a Small Stainless Loop Containing Circulating Sodium", CEGB Report TPRD/B/0935/R87, Feb. 1987。
- 8) R. Kumar, "Tritium Transport in an LMFBR", ANL8089 (1974)。
- 9) IAEA, "BN-350 decommissioning plan for international peer review", (2003)。
- 10) 青山卓史、住野公造、榊井智彦、佐井川拓也、「高速実験炉「常陽」における放射性腐食性生物の付着分布」、PNC TN9410 98-004 (1997.12)。
- 11) 竹内純、他、「高速増殖原型炉もんじゅの建設 (その84) -1次冷却材ナトリウムの放射化量評価」、日本原子力学会1997年秋の年会予稿集 (1997)。
- 12) 飯沢克幸、鳥居建男、「高速増殖炉「もんじゅ」における水素・トリチウム挙動」、JNC TN4400 99-002 (平成11年3月)。

- 1) 助川武則、大島総一郎、白石邦生、柳原敏、「原子炉施設の解体作業に関する管理データ計算モデルの開発」、JAERI-Data/Code 99-005

## 韓国月城原子力環境管理センター（中・低レベル放射性廃棄物処分施設） 建設の現況について

鈴木康夫\*

### *Current Construction Status of Korea Wolsong Nuclear Environment Management Center (Low and Intermediate Level Radioactive Waste Disposal Facility)*

Yasuo SUZUKI\*

2008年に本誌で報告された韓国慶州に建設中の中・低レベル放射性廃棄物処分施設<sup>1)</sup>は現在、月城（ウォルソン）原子力環境管理センター（월성원자력환경관리센터）という名称になり、さらに、韓国の放射性廃棄物の管理は2009年1月に設立された韓国放射性廃棄物管理公団（한국방사성폐기물관리공단；Korea Radioactive Waste Management Corporation）が輸送なども含めて一元的に行うこととなった。こうした状況の変化も踏まえ、2009年11月にRANDEC海外調査団として韓国を訪問した際に得た情報などを元に韓国の放射性廃棄物管理及び中・低レベル処分施設建設の現況について報告する。

Through the RANDEC delegation tour to Korea in Nov. 2009, we have earned new information on recent development of the radioactive waste management in Korea. In this report, we will introduce such development in Korea, focusing on the current construction status of Korean LILW (low and intermediate level radioactive waste) disposal site, now called, Wolsong Nuclear Environment Management Center.

#### 1. はじめに

周知のように、韓国<sup>#1</sup>では2005年に中・低レベル処分施設の建設地が決定し、また韓国は2009年暮にUAE<sup>#2</sup>による中東地域で最初の原子力発電事業プロジェクトの事業者を選定<sup>#3</sup>され、さらに

2010年1月、2030年までに80基輸出の計画を立てていることを明らかにした<sup>2)</sup>。こうした原子力の分野における躍進の礎は、韓国の合理的な放射性廃棄物管理方策の一つ一つにも示されているように思われる。以下、月城原子力環境管理センターの建設状況や廃棄物管理公団の管理方策に着目

\* : 財団法人原子力研究バックエンド推進センター 立地推進部/物流システム事業化準備室  
(Radioactive Waste Management and Nuclear Facility Decommissioning Technology Center)

# 1 : 大韓民国の国土は日本の約4分の1（約100,033km<sup>2</sup>）、人口は日本の約40%（約4,900万人）である（外務省ホームページ参照）。また、経済規模（GDP）は日本の約20%（約9300億ドル、約85兆円）である（日本貿易振興機構ホームページ参照）。

# 2 : UAE (United Arab Emirates、アラブ首長国連邦)の人口は約480万人。GDPは約23兆円（2,531億ドル）。原油埋蔵世界6位、天然ガス埋蔵量世界5位（外務省及び石油天然ガス・金属鉱物資源機構ホームページ及びBP統計参照）。

# 3 : 韓国電力主導の企業連合が、2009年12月27日、フランスと米国・日本の企業連合と競って、アラブ首長国連邦（UAE）が発注した総額400億ドル（約3兆6,472億円）規模の原子力発電事業プロジェクトを受注した。韓国電力企業連合は今回の契約で、140万キロワット級の韓国製原子炉4基を設計・建設・運転・解体までを60年間一括で行うことになる。第1号機は2017年、残り3基は2020年までに完工の予定（駐日韓国大使館ホームページ及び聯合ニュース（YONHAP NEWS）参照）。

し、韓国における2008年以降の放射性廃棄物の管理状況を俯瞰する。

## 2. 韓国における放射性廃棄物管理体制

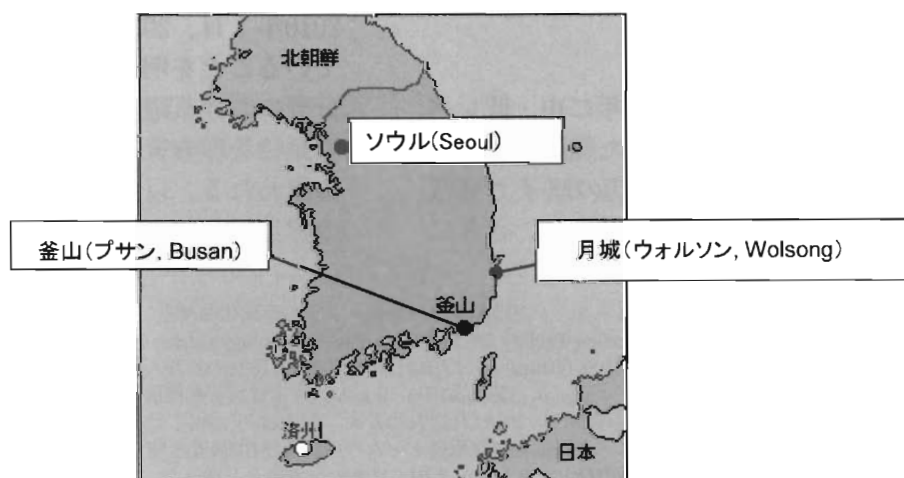
韓国に原子力発電が導入されたのは1970年代であるが、放射性廃棄物処分施設の立地活動が開始されたのは1986年であった。以来19年間処分施設立地は成功しなかったが2005年3月に中・低レベル放射性廃棄物処分場財政支援特別法が制定され、住民投票方式、US 3億ドルの財政支援、使用済燃料中間貯蔵施設との分離、処分実施主体本部の現地への移転等を定めた結果、2005年11月に住民投票賛成率89.5%で慶州市に中・低レベル処分施設の立地が決定した。2008年に放射性廃棄物管

理法が制定され、放射性廃棄物管理のための政府資金を確立することと、放射性廃棄物の国家管理を強化すべく独立機関の設立、発生者と管理者の分離などを決めた。これにより2009年1月に韓国放射性廃棄物管理公団（以下、KRMC）が設立された。(Table 1)

KRMCは放射性廃棄物管理法に基づく特殊法人で、原子力発電所から出る中・低レベル放射性廃棄物、使用済燃料やRI・放射線利用等から発生する中・低レベル放射性廃棄物の貯蔵・処理（使用済燃料を除く）及び処分そして輸送などを事業対象としている。KRMC本部は、月城（ウォルソン）中・低レベル放射性廃棄物処分施設のある慶州市陽北面奉吉里（キョンジュ市ヤンプク面ポンギル里）に設置されている<sup>3)</sup>。(Fig.1)

Table 1 Brief History of Radwaste Management in Korea

- ・放射性廃棄物処分施設立地活動開始（1986年）
- ・放射性廃棄物管理方針（1998年）
  - ⇒政府の直接管理、安全性優先、発生量最小化、発生者負担の原則
  - ⇒放射性廃棄物管理プログラム：中・低レベル廃棄物処分、使用済燃料中間貯蔵
- ・中・低レベル放射性廃棄物処分場財政支援特別法の制定（2005年）
  - ⇒公募・住民投票方式
- ・中・低レベル放射性廃棄物処分施設サイトが慶州市に決定（2005年、住民投票賛成率89.5%）
- ・韓国水力原子力（株）が中・低レベル処分施設建設開始（2008年）
- ・放射性廃棄物管理法制定（2008年）
  - ⇒国家管理の強化（独立機関の設立）、政府資金の確立
- ・韓国放射性廃棄物管理公団（KRMC）設立（2009年1月）



(外務省ホームページ地図を利用)

Fig.1 Position of Wolsong Nuclear Environment Management Center



韓国の原子力行政は、韓国原子力委員会 (AEC)、韓国原子力安全委員会 (NSC)、韓国教育科学技術部 (MEST、日本の文科省に相当)、知識経済部 (MKE、日本の経産省に相当) といった多様な組織により計画・実施されている。

MESTに原子力分野のR&Dを担う韓国原子力研究所 (KAERI) や規制当局である韓国原子力安全院 (KINS) が属している。MKEに韓国電力公社 (KEPCO)、韓国水力原子力 (株) (KHNP) そしてKRMCなどが属している。(Fig.2)

### 3. 月城原子力環境管理センター：2008年までの建設現況等

放廃物技術情報2008年冬号<sup>4)</sup>において、2008年暮れの月城原子力環境管理センターの建設状況は以下のように報告されている。

- ・2008年11月末現在約72.83%の進捗率であり、設計、許認可、機器購買、施工及び試運転、事業管理などの業務を計画通り遂行中。
- ・建設・運営許可の後方業務として、サイロ挙動解析、放射線の流水系の詳細図面及び処分施設敷地の確率論的な地震災害分析 (PSHA)、安全性分析 (SAR) などの報告書改正作業を遂行中。
- ・処分施設事業の設計進展に伴う後方業務として購買仕様書の再発行、図面改正、施工技术仕様書及びその他報告書改正作業と現場条件を反映する現場設計変更 (FCR) の検討/承認などの

作業を遂行中。

- ・事業基本工程票 (PMS, Rev.2)、設計/購買管理基準工程票 (設計, 購買IPS)、施工管理基準工程票 (施工IPS) 及び設計詳細工程票 (EWS)、機資材調達計画書 (MAS) の各々に対するRev.2改正作業と購買詳細工程票 (PDS) Rev.3及び試運転管理基準工程票 (試運転IPS) 草案作成作業を遂行した。
- ・KHNP建設管理システム (RDCMS) に設計情報を入力し、定期的な資料更新を遂行中。
- ・2008年7月31日処分施設の建設・運営許認可を教育科学部 (MEST) から取得した後、建物新築工事、処分洞窟トンネル工事など建設を行い2008年10月末現在の処分施設施工総合進捗率は14.92%。
- ・地上支援施設敷地整地工事は2007年7月に開始し2008年10月末に完了し、試験運営上必須な建屋である引受貯蔵庫、車庫を含む9棟に対する新築工事が円滑に行われており、最初のコンクリートは2008年9月5日に打設。
- ・処分洞窟のトンネル工事は2008年8月に実施され、2010年6月竣工を目標に進行している。
- ・建設洞窟は総1,950m中2008年11月現在97m、運営洞窟は1,415m中76mの進捗状況である。また運営要員の地下施設立ち入り及び各種設備運営のための垂直坑は207m中27mの進捗を見せている。
- ・荷揚げの港湾及び防波堤築造工事については、

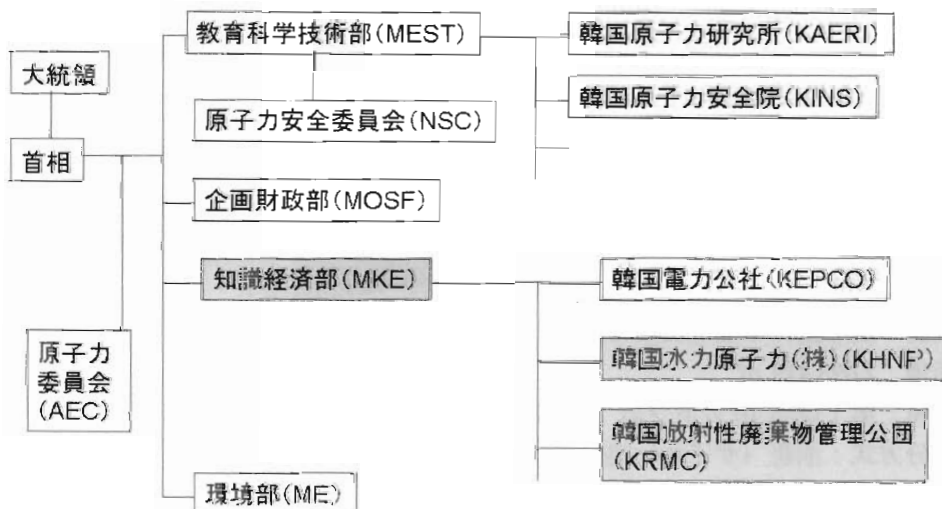


Fig.2 Legislative Framework of Radwaste management in Korea

2006年2月に各発電所別に保管されている中・低レベル廃棄物が満杯になる年度を考慮した段階別事業で基本計画を樹立した。

荷揚げの港湾から処分施設まで安全な廃棄物を陸上輸送するための道路を作るために既存道路現況測量及び道路設計を試験運営に支障がないように行っている。

- ・ 国道31号線移設工事に関し、環境にやさしい設計概念が反映されて、道路路線総3,500m中2,370mがトンネルで形成されている。
- ・ 現在道路工事は2007年11月にトンネル工事が着手されて奉吉(ポンギル)里と羅兎(ナア)里側二つの方向で工事が進んでいるが、羅兎里についてトンネル工事のための進入道路部に対する土地補償請求等で2008年10月に工事用進入道路のための伐木除去工事に着手して、現在トンネル入口部工事のための尾根側で仮設工事が進行中である。
- ・ 奉吉里地域についてはトンネル発破工事を行って順調に進行しており、約500m程度掘削して、ラック、ボルト、補強設置及びショックリートなどの仮設工事を並行しており、2010年6月竣工を目標に作業中であり、現在7.7%の進捗率である。

- ・ 事業予定区域内の土地補償現況については、処分施設本敷地2,063,690㎡は2007年12月末に買収が完了し、国道31号線敷地中未買収土地18,974㎡は協議補償と並行して2008年12月中に受け入れ裁決申請中である。

#### 4. 月城原子力環境管理センター：2009年の建設現況等

2009年11月17日、韓国における中・低レベル放射性廃棄物処分施設に関する調査を目的としてRANDEC海外調査団は月城原子力環境管理センターを訪問し、KRMCの方々から、以下のような新たな情報を得た<sup>5)</sup>(KRMCの事業紹介(映像資料)がKRMCのホームページ：<http://www.krmc.or.kr/>より見られる。(ただし2010年2月現在は韓国語版のみ))。

KHNPが出版したパンフレット<sup>6)</sup>によれば、月城原子力環境管理センター(中・低レベル放射性廃棄物処分施設)の竣工予定時期は2012年12月である。(Fig.3及びFig.4)

当センターは、2009年の1月に発足してから間もないため、まだ運用としては進んでいない部分

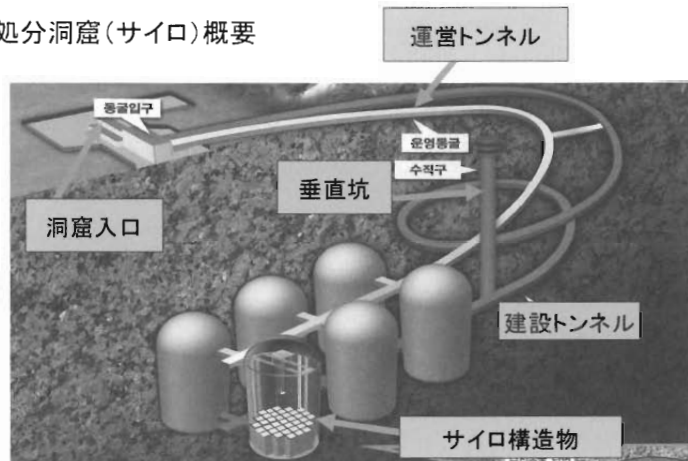
月城原子力環境管理センター概要



- ・ 位置：慶北慶州市陽北面奉吉里
- ・ 面積：2,098,419 ㎡
- ・ 規模：第1段階 10万ドラム(総80万ドラム処分予定)
- ・ 処分方式：洞窟(サイロ)処分方式
- ・ 竣工予定：2012年末

Fig.3 Overview of Wolsong Nuclear Environment Management Center

処分洞窟(サイロ)概要



韓国水力原子力(株)  
ご提供資料  
“깨끗하고 안전한 세계  
최고의 중·저준위방사  
성폐기물 처분시설”  
より

- ・ 深さ：海水面下 80m～130m
- ・ サイロ構造物：高さ 50m、内径 24m
- ・ 各サイロ構造物に 17,000 ドラム (200ℓ) × 6 基

Fig.4 Overview of the Silo Constructure

も多い。処分予定の中・低レベル放射性廃棄物の全体の規模は80万ドラム(200ℓドラム缶)。現在第一段階として10万ドラムを処分できるスペースを建設中である。建設はKRMCがKHNPから委託を受けて行っている。2009年末からは、委託業務は解除されて2010年からKRMCが直接に建設にあたる。敷地選定に19年間活動してきて慶州に決まったが社会的な問題はいまでも発生している。2012年までに第一段階の建設を終了する予定であり、来年からは第二段階の建設に入る予定である。

第一段階は洞窟方式の処分方式になっているが、第二段階については住民との協議によって浅地中処分方式など他の処分方式も含めて検討し、決定していく。

以下、調査内容詳細を列記する。

- ・ 放射性廃棄物の年間発生量：原子力発電所運営中・低レベル放廃物：約5,400ドラム/年、使用済燃料：軽水炉約291トン/年、重水炉約189トン/年。
- ・ 放射性廃棄物の累積保管量：原子力発電所 中・低レベル放廃物：81,779ドラム(200リットルドラム以下同様、2008年12月末)、使用済燃料：10,490トン/20基—軽水炉：4,602トン、重水炉：5,481トン(2008年12月末)。
- ・ 放射性廃棄物の今後の発生予測：総32基運営基準として2070年の中・低レベル放廃物予想量約

94万ドラム、うち原子力発電所運営廃棄物：41.4万、原子力発電所解体廃棄物：34.8万、RI廃棄物：10.8万、原子力研究院：4.7万、原子力発電所燃料：2.31万。

- ・ 放射性廃棄物の分類：原子力発電所運営廃棄物、原子力発電所解体廃棄物、RI廃棄物、原子力研究院廃棄物、原子力発電所燃料廃棄物。
- ・ 月城原子力環境管理センター建設期間：2008年7月31日～2012年12月31日、総合工程率：59.09%(2009年10月末基準)。
- ・ 処分の実施体制：廃棄物発生者が処分事業者(KRMC)に廃棄物引き受け依頼、KRMCは廃棄物発生地(原子力発電所廃棄物の場合臨時貯蔵庫)で予備検査実施、運搬容器に積載および運搬、廃棄物処理場での引受検査、臨時保存後処分。
- ・ 当処分施設では、予定としては総80万ドラム(200リットル換算)を処分する予定である。
- ・ 第一段階として10万ドラムを処分するサイロの建設を行っている。
- ・ 第一段階処分方法：海水面以下80m岩盤に建設されたサイロに廃棄物を処分する洞窟処分方式。処分施設の設計等において参考にはスウェーデン、フィンランド。
- ・ トンネルが二つあり、建設用トンネルと運用トンネルとなっている。(Photo 1)



Photo 1 The Entrance of the Disposal Facility (silos cave)

- ・建設用のトンネルは全長2 kmあるが、いまのところ680mほど掘った。
- ・運用トンネルは全長1.5kmあるが、サイロの上部に通じている。
- ・サイロ一つで16,000ドラム収納可能である。
- ・垂直トンネルはエレベータになっており207mある。
- ・換気に関しても垂直トンネルと通して行う。
- ・6つの環境モニタリングの設備が設置されている。外郭の部分に4つ、外側に2つ設置されている。
- ・放射性廃棄物は蔚珍(ウルチン)発電所、古里発電所、霊光(ヨンガン)発電所の各発電所から輸送船で運搬されて道路を伝って検査する場所まで運搬される。
- ・輸送船は2,600トンの二重エンジンになっており、安全性には十分配慮している。現在、港湾の準備ができている状態である。第一段階では10万ドラム分のサイロを建設しているが、残りの70万ドラムというのは洞窟方式にするかどうかは決定されていない。
- ・トンネルをトラックが通ってサイロまでいくが、サイロの高さは海拔80m~130m、幅は30mになる。
- ・廃棄物が運搬されるときは廃棄物用の容器に入ってくるが、検査が終わってサイロに入れる

- ときはコンクリート固化したものになっている。
- ・2012年に建設が終了する予定であるが、それまでに一度は試験的に廃棄物を搬入する予定である。
- ・コンクリートコンテナはサイロ内に30段積まれる。その際、コンテナ強度に関しては問題はない。
- ・80万ドラムの処分は60年間かけて行う計画である。
- ・廃棄物ドラムの検査 (inspection) は、まず発電所で一度検査を行っている。処分場に廃棄物を持ってきてからまた検査を行う。X線検査により、内容物を確認し、詰り具合を見、核種の濃度を確認し、さらに表面線量率を見る。
- ・長期保存する場合には不適格な物質(あるアルミニウム等)があるが、発生した原子力発電所の方で書類ベースで検査をする。まず処分場で書類検査をしてからX線での検査で発見できるものは発見する。必要に応じては開梱して調べる。
- ・第一段階では10万本を処分するが、その中には、RIとか医療関係の廃棄物も含まれる。10万本中、約1万本は原子力研究所と核燃料から出る廃棄物であり、1万本くらいがRI廃棄物である。
- ・少量発生 of 廃棄物、RI廃棄物は、これまでKHNPで回収していたが、月城処分施設の建設が終了したらKRMCの方に移管されて、KRMC

が回収されるようになる。密封線源の場合は使用者が処分施設まで持ってくる。非密封の場合は、韓国の同位元素協会が回収して処分施設まで持ってくる。

- ・本センター敷地内に処理施設を現在建設中である。(Photo 2)
- ・放射性廃棄物の処理方法：気体廃棄物は減殺タンク、活性炭の遅延台 (delay bed) 等で遅延／崩壊後高効率濾過器 (HEPA Filter) を利用して、放射性物質除去後排出。液体廃棄物は濾過器、イオン交換樹脂または廃液蒸発機などを使って、放射性物質除去後排出。固体廃棄物—湿式廃棄物、廃水紙はPE-HICドラムに乾燥して、パッキング (1,200リットル)、濃縮廃液はパラフィンと混合パッキング (200リットル鉄材ドラム)、廃フィルター：200リットル 鉄材ドラムにパッキング (過去)、現在は長期保存—乾燥廃棄物：200リットル 鉄材ドラムにパッキング (雑固体類)。
- ・新規放射性廃棄物処理設備の開発等：液体廃棄物は蒸発方式でイオン交換方式、逆浸透。
- ・圧方式で改善、固体廃棄物は圧縮 (DAW)、固化 (濃縮廃液)、乾燥パッキング (HIC) してお

り、2009年からDAWと低放射能廃水紙を対象にガラス化設備で処理している。

- ・放射性廃棄物処理設備、施設の設計や建設における課題と対策：建設中の原子力発電所の廃水紙、濃縮廃液処理のためにポリマー固化設備を導入した。
- ・放射性廃棄物 (貯蔵、処理、廃棄等) に関する韓国の規制は放射性廃棄物管理法 (2008年3月28日制定) に基づき、事業管理者は韓国放射性廃棄物管理公団 (KRMC、2009年1月発足) が主体であり、その役務は放射性廃棄物の運搬、保存、処分 (使用済燃料処理業務除外)、管理施設の敷地選定、建設、運営、閉鎖後管理、広報、研究開発、国際協力及び管理基金の運用などである。
- ・第二段階の建設：2010年から設計段階に入る。
- ・第二段階では、住民と相談して方式を決める。第一段階の際も住民との協議で洞窟方式に決定したが、洞窟方式は建設費もかかるし建設期間もかかるので、現在のところ洞窟方式ではなく、日本原燃 (株) 低レベル放射性廃棄物センターと同様な方式の浅地中処分方式を検討している。まだ決定はしていないが、第二段階では、よ



Photo 2 Ground Support Facility (under construction)-Waste Inspections Section

り経済的な方式を採用したいと考えている。

- ・ 第二段階の物量は10万ドラムである。
- ・ 韓国は、ガラス固化中で・低レベルを処分するという技術を開発している。韓国の廃棄物の処理方式は複雑であり、日本では焼却を行っているが、映像資料にあったように韓国ではプレスで圧縮をしている。圧縮して減容化した後に安全にするためにガラス固化をするが、主にガラス固化をする廃棄物は樹脂、雑固体である。いまはガラス固化についてはまだ試験段階にあるので、すべての廃棄物をガラス固化するかどうかは決定していない。
- ・ 日本の原子力発電所の場合では、可燃物は焼却するのが前提となっており、焼却をすればかなり減容できるが、韓国でも焼却の方が減容率が高いのは認識しているが、焼却に対する地域住民の反対があり、焼却処分は行わないことになった。
- ・ プレスの減容率は焼却した後にコンクリートに固化をした場合の5倍くらいの減容率である。
- ・ 慶州で住民との間で発生した社会的トラブルとは、処分場の建設中に地盤の岩質が予想していたものと違って岩質があまりよくなかったために住民から安全性に対して疑問がなげかけられたことである。安全性を確保するための検査で建設期間が長くなってしまった。
- ・ 処分施設を大きく2つに分けると地上施設と地下施設に分かれるが、地上支援施設で廃棄物が船から運搬されてきて検査する。
- ・ その他：極低レベル放射性廃棄物の処分の詳細(処分方法、保管量、保管場所)については、新IAEA勧告公布時、関連法規改正および独自処分検討予定。使用済燃料処分計画：韓国は使用済核燃料を再処理するか、でなければ直接処分するかに対する国家政策が決定されていない。

中間貯蔵している放射性廃棄物等の管理(貯蔵施設及び貯蔵廃棄物)：まだ具体的な計画はない。2010年12月まで管理方案に対する研究を遂行した後その結果を参考にして、具体的な計画を樹立する予定。使用済燃料の中間貯蔵施設、中間貯蔵施設に関する政策：使用済核燃料中間保存に対する政策はやはりまだ決定されていないこと。2010年12月まで管理方案に対する研究

を遂行した後その結果を参考にして、具体的な計画を樹立する予定。中間貯蔵施設、候補地選定等の計画：現時点なし。

## 5. おわりに

冒頭に紹介した韓国の「拳国一致の事業推進」の成功に諸外国が驚愕し、これまであまり知られていなかった韓国の原子力の現状についていまさまざまな局面から詳細な評価がなされている。それと共に、各国は強烈な巻き返し策の検討も行っている。いろいろな意味で、韓国の挑戦は世界の原子力に新たな活力を与えた。

しかし、韓国の今回の世界的躍進の直前に調査団に中・低レベル処分施設の建設などを直に見学した際にもすでに韓国の原子力の活気が伝わってきた。その活気の原因について現地担当者に尋ねてみると、韓国では長年、特に原子力の分野における人材育成に力を注いできたことを強調していた。放射性廃棄物の処分事業は長期にわたるため、「人材育成」、より広くは「教育」が重要であることを改めて認識した。

## 参考文献

- 1) Akihiro SAKAI, Saburo KIKUCHI, Masakatsu MARUYAMA, "Siting History and Current Construction Status of Disposal Facility for Low and Intermediate Level Radioactive Waste in Korea", Journal of RANDEC No.38(Nov.2008).
- 2) 原子力産業新聞2010年2月11日(第2513号).
- 3) (財)原子力環境整備促進・資金管理センターホームページ：  
<http://www2.rwmc.or.jp/overseas/nf/page/20090122.asp>.
- 4) "방폐물 기술정보(2008겨울호)(放廃物技術情報(2008年冬号))", 韓国水力原子力株式会社.
- 5) 平成21年度「海外調査団(韓国)」報告書(2009年11月15日～11月18日)、財団法人原子力研究バックエンド推進センター.
- 6) 『放射性廃棄物CHECK LIST 緑の世界を開く小さな関心』(녹색의 세상을 여는 작은 관심)、韓国放射性廃棄物管理公団.



# **RANDEC's Capability**

**Radioactive Waste Management and Nuclear Facility Decommissioning Technology Center (RANDEC) has contributed to the establishment of decommissioning technology, and promoted the investigation on radwaste treatment and disposal business including selection of disposal places for radwaste from RI facilities, institutes etc.**

**The capability and service of RANDEC are ;**

**to implement decommissioning research, development and investigation.**



**to provide technical information on decommissioning.**



**to train for decommissioning.**



**to investigate radwaste treatment and disposal business including site selection of disposal place for radwaste from RI facilities, institutes etc.**



**to inform and enlighten the public about decommissioning and radwaste treatment and disposal business.**

© デコミッションング技報 第41号

発行日 : 平成22年3月31日

編集・発行者 : 財団法人 原子力研究バックエンド  
推進センター

〒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

ホームページ : <http://www.randec.or.jp>  
E-mail : [decomi@randec.or.jp](mailto:decomi@randec.or.jp)