# 日本核物質管理学会第 40 回年次大会

# The 40th Annual Meeting of INMM Japan Chapter

# 論文集

2019 年 11 月 19 日・20 日

東京国際交流館　プラザ平成

（メディアホール・会議室１）

# 東京国際交流館案内図

（昼食）
ダイバーシティ
東京プラザ

交流大学村 東京国際交流館 ■住所： 〒135-8630 東京都江東区青海2-2-1

## 交 通

<電車>
・ゆりかもめ「東京国際クルーズターミナル」
東出口より徒歩3分
・りんかい線「東京ﾃﾚﾎﾟｰﾄ駅」
B出口より徒歩15分

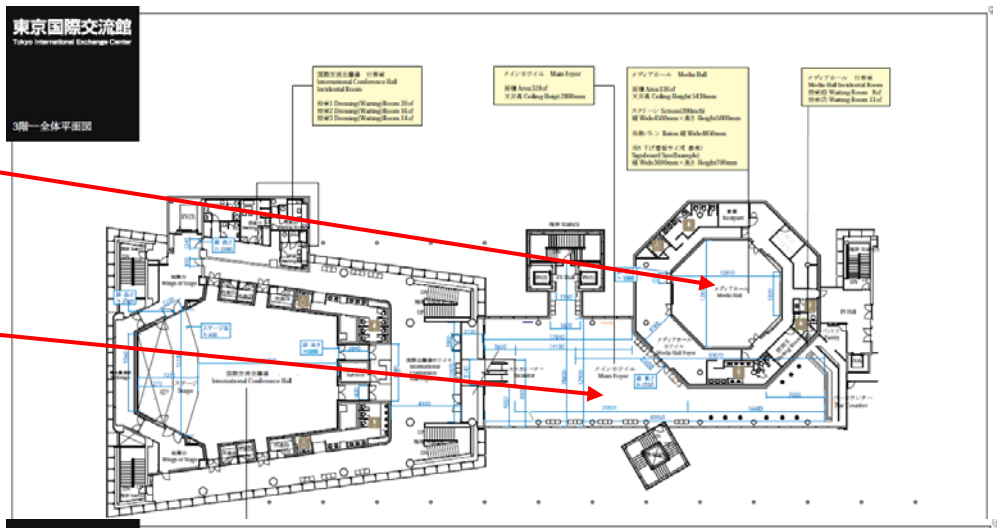
<車>
・首都高速湾岸線東行「臨海副都心」
・首都高速湾岸線西行「有明」
・首都高速11号台場線「台場」
より約5分

## 東京国際交流館へのアクセス図

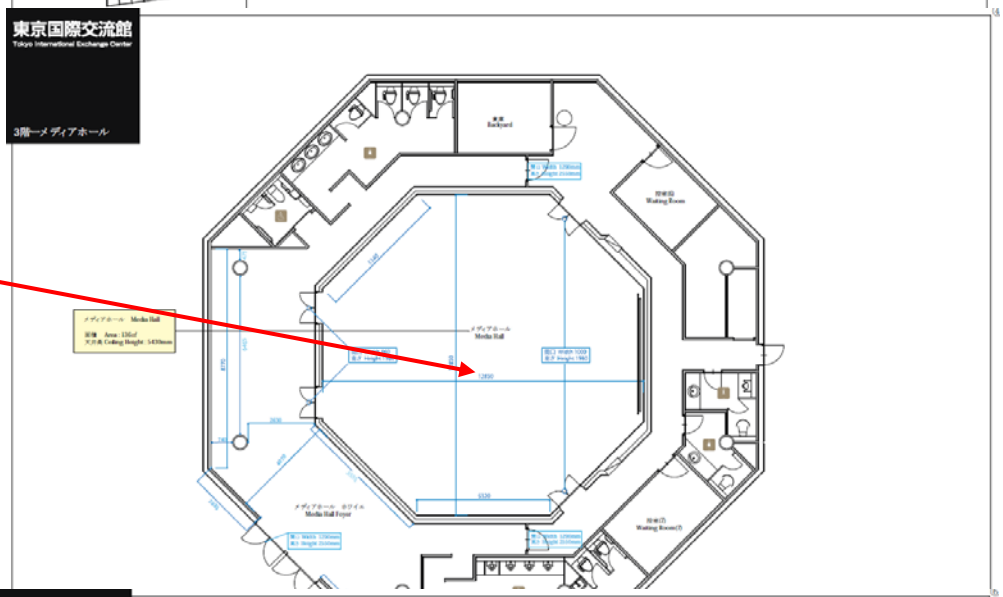
#

メデイアホール
（３Ｆ）

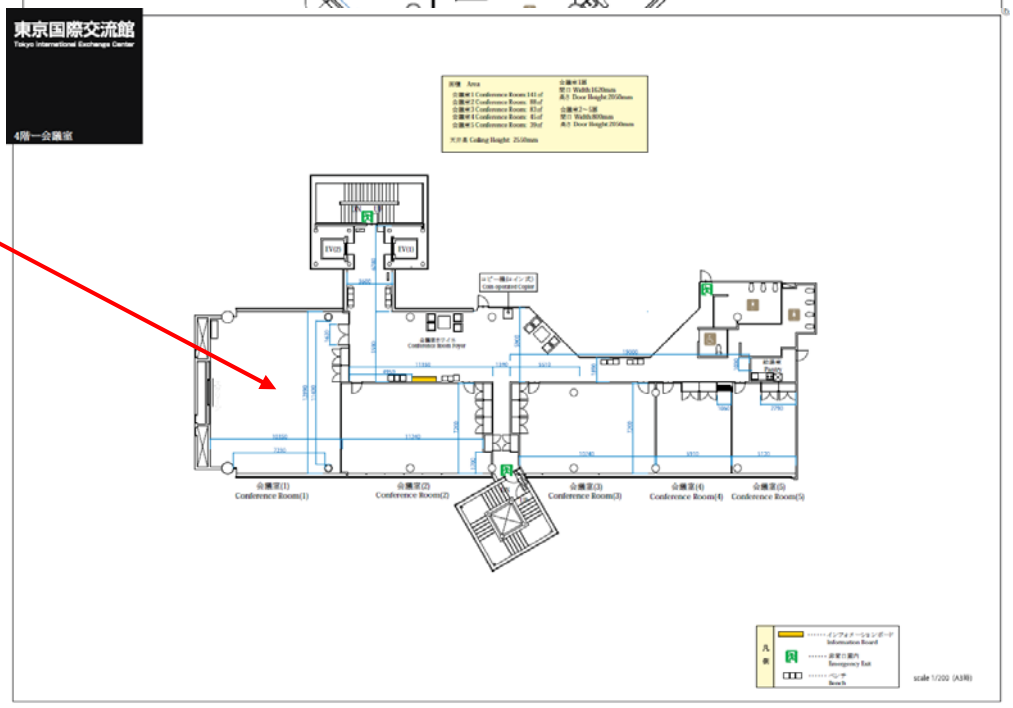
メインホワイエ
（３Ｆ）




メディアホール
（３Ｆ）




会議室１
（４Ｆ）



会場割当表【 1日目：11月19日（火）】

| 開始時刻 | メデイアホール | 会議室１ | メインホワイエ | |
|---|---|---|---|---|
| 9:30 | 登録受付 | | | |
| 9:40 | | | | |
| 9:50 | | | | |
| 10:00 | 開会セッション | | | 企業展示（10:00-17:30） |
| 10:10 | | | | |
| 10:20 | 事務連絡 | | | |
| 10:30 | 招待講演Ｉ | | | |
| 10:40 | | | | |
| 10:50 | | | | |
| 11:00 | | | | |
| 11:10 | | | | |
| 11:20 | | | | |
| 11:30 | 休憩 | | | |
| 11:40 | | | | |
| 11:50 | | | | |
| 12:00 | | | | |
| 12:30 | | | | |
| 13:00 | ポスターショートプレゼンテーション | | | |
| 13:10 | | | | |
| 13:20 | | | | |
| 13:30 | | | ポスターセッション（13:30-14:45） | |
| 13:40 | | | | |
| 13:50 | | | | |
| 14:00 | | | | |
| 14:10 | | | | |
| 14:20 | | | | |
| 14:30 | | | | |
| 14:40 | | | | |
| 14:50 | | | | |
| 15:00 | セッションＡ（15:00-16:40） | セッションＢ（15:00-15:40） | | |
| 15:10 | | | | |
| 15:20 | | | | |
| 15:30 | | | | |
| 15:40 | | | | |
| 15:50 | | | | |
| 16:00 | | セッションＣ（16:00-17:00） | | |
| 16:10 | | | | |
| 16:20 | | | | |
| 16:30 | | | | |
| 16:40 | | | | |
| 16:50 | | | | |
| 17:00 | | | | |
| 17:10 | 総会（17:10-17:40） | | | |
| 17:20 | | | | |
| 17:30 | | | | |
| 17:40 | | | | |
| 17:50 | | | | |
| 18:00 | | | 懇親会/表彰式（功労賞）（18:00-20:00） | |
| 18:10 | | | | |
| 18:20 | | | | |
| 18:30 | | | | |
| 18:40 | | | | |
| 18:50 | | | | |
| 19:00 | | | | |
| 19:30 | | | | |
| 20:00 | | | | |

会場割当表【　２日目：11月20日（水）】

| 開始時刻 | メデイアホール | 会議室１ | メインホワイエ | |
|---|---|---|---|---|
| 9:30 | 招待講演Ⅱ | | | |
| 9:40 | | | | |
| 9:50 | | | | |
| 10:00 | | | | |
| 10:10 | 特別講演Ⅰ | | | |
| 10:20 | | | | |
| 10:30 | | | | |
| 10:40 | | | | |
| 10:50 | 企画セッション | | | |
| 11:00 | | | | |
| 11:10 | | | | |
| 11:20 | | | | |
| 11:30 | 休憩 | | | |
| 11:40 | | | | |
| 11:50 | | | | |
| 12:00 | | | | |
| 12:30 | | | | |
| 13:00 | セッションD<br>（13:00-14:40） | セッションE<br>（13:00-14:40） | | |
| 13:10 | | | | |
| 13:20 | | | | |
| 13:30 | | | | |
| 13:40 | | | | |
| 13:50 | | | | |
| 14:00 | | | | |
| 14:10 | | | | |
| 14:20 | | | | |
| 14:30 | | | | |
| 14:40 | 休憩 | | | |
| 14:50 | | | | |
| 15:00 | 招待講演Ⅲ | | | |
| 15:10 | | | | |
| 15:20 | | | | |
| 15:30 | | | | |
| 15:40 | | | | |
| 15:50 | | | | |
| 16:00 | 表彰式<br>閉会の時 | | | |
| 16:10 | | | | |
| 16:20 | | | | |
| 16:30 | | | | |
| 16:40 | | | | |
| 16:50 | | | | |
| 17:00 | | | | |
| 17:10 | | | | |
| 17:20 | | | | |
| 17:30 | | | | |
| 17:40 | | | | |
| 17:50 | | | | |
| 18:00 | | | | |
| 18:10 | | | | |
| 18:20 | | | | |
| 18:30 | | | | |
| 18:40 | | | | |
| 18:50 | | | | |
| 19:00 | | | | |
| 19:30 | | | | |
| 20:00 | | | | |

# 第 40 回日本核物質管理学会年次大会プログラム

（プログラムは予告なく変更されることがありますが予めご了承願います）

全体会合司会　日本原子力研究開発機構　中村　仁宣

## 第 1 日目（11 月 19 日）

メディアホール

**09:30～**　登録受付開始

**10:00-10:20**　開会セッション

10: 00 - 10:05　開会の辞　プログラム委員長　中村　仁宣

10: 05 - 10:20　開会挨拶　日本核物質管理学会会長　千崎　雅生

**10:20-10:25**　事務連絡

**10:30-11:30**　招待講演　座長：日本核物質管理学会理事　田尻　寛

招待講演　Ⅰ：我が国における核物質防護の現状

講師：原子力規制庁核セキュリティ部門安全規制管理官

（核セキュリティ担当）付管理官　補佐（総括担当）

奥　博貴

**11:30-13:00**　休　　憩

**13:00-13:30**　ポスターショートプレゼンテーション

座長：東京工業大学　相楽　洋

P4001　高い固有安全・核セキュリティ・核不拡散性を有する革新的中小型軽水炉の研究
(1) MA および回収ウランを用いたシリサイド燃料
発表者　東京工業大学　三星　夏海

P4002　高い固有安全性・核不拡散性を有する軽水炉用燃料の研究
(2) U-Pu シリサイド燃料
発表者　東京工業大学　天野　宰

P4003　溶融塩高速炉の核不拡散性に関する研究
発表者　東京工業大学　青柳　涼

P4004　核鑑識のための軽水炉由来照射済燃料核種組成の基本特性と判別指標の研究
(1)研究計画
発表者　東京工業大学　加賀山　雄一

P4005　制動放射スペクトルガンマ線を用いた PFRR 法の高濃縮 U 検知への適用性研究
発表者　東京工業大学　Chin Kim Wei

P4006　パッシブγ線断層撮影法を用いた画像再構成技術の開発
(2)モックアップ燃料集合体中γ線源分布の画像再構成
発表者　東京工業大学　柴　茂樹

P4007　多様な放射性廃棄物内核物質量測定への DDSI 法の適用可能性
(1)研究計画
発表者　東京工業大学　中岫　翔

P4008　パッシブγ・中性子線断層撮影法を用いた非破壊測定技術の研究
(1)使用済燃料由来パッシブ中性子線断層撮影法の部分欠損検認への適用の研究計画
発表者　東京工業大学　徳田　崇哉

P4009　日印原子力協力における核燃料サイクルのシナリオ
発表者　東京工業大学　Saurabh Sharma

## メインホワイエ

**10:00-17:30**　企業展示

**13:30-14:45**　ポスターセッション
セッションコーディネーター　東京工業大学　相楽　洋

## メディアホール

**15:00-16:40**　セッション A：核不拡散技術・核セキュリティ技術等
座長：日本原燃株式会社　清水　純治

#4010
15:00-15:20
次世代核燃料サイクルの合理的な保障措置に向けた制度的・技術的方策に関する研究(1) 研究計画
発表者　東京工業大学　筒井　康二

#4011
15:20-15:40
Development of a user-friendly interface for atmospheric dispersion database and its application for nuclear emergency preparedness- Application for optimizing measurement points for effective detection of released radioactive nuclides
発表者　日本原子力研究開発機構　Hamza El-Asaad

#4012
15:40-16:00
六ヶ所再処理工場における保障措置機器の保守性および冗長性向上のための改善
発表者　日本原燃株式会社　森　賢仁

#4013
16:00-16:20
計量分析の品質管理における査察試料の共同分析試料としての有効利用について
発表者　日本原子力研究開発機構　岡﨑　日路

#4014
16:20-16:40
Nuclear safety policy awareness in six OECD countries
Some text mining results
発表者　東京工業大学　池上　雅子

## 会議室１

**15:00 -15:40**　セッション B：教育
座長：日本原子力研究開発機構　田崎真樹子

#4015
15:00-15:20
東京工業大学 原子力規制人材育成プログラム
「原子力安全・核セキュリティ・保障措置教育の体系化と実践」
(4) 2019 年度実施状況
発表者　東京工業大学　江幡　修一郎

#4016
15:20-15:40
東工大における原子力規制人材育成プログラム
「原子力安全・核セキュリティ・保障措置教育の体系化と実践」
(5) 放射線災害対応実習
発表者　東京工業大学　韓　治暎

**16:00 -17:00**　セッション C：先進非破壊測定技術
座長：日本原子力研究開発機構　長谷　竹晃

#4017
16:00-16:20
東海再処理施設における高放射性固体廃棄物中核物質の非破壊測定法適用に係る検討
発表者　日本原子力研究開発機構　高峰　潤

#4018
16:20-16:40
核共鳴蛍光散乱を用いた同位体比の測定
発表者　日本原子力研究開発機構　Mohamed Omer

#4019
16:40-17:00
使用済燃料直接処分施設に適用する保障措置・核セキュリティ技術の検討
発表者　日本原子力研究開発機構　芝　知宙

**16:40 - 17:00**　会場設営（於：メディアホール）

**17:10 - 17:40**　日本核物質管理学会総会（於：メディアホール）

**18:00 - 20:00**　懇親会／表彰式（功労賞）
（於：メインホワイエ）

## 第 2 日目（11 月 20 日）

### メディアホール

**09:30 – 10:10**　招待講演　　座長：日本核物質管理学会理事　　堀　雅人

招待講演Ⅱ：GIF がリードする第 4 世代炉開発の国際協力と核不拡散への取組
講師：日本原子力研究開発機構
高速炉・新型炉研究開発部門　副部門長
上出　英樹

**10:10－10:55**　特別講演　　座長：日本核物質管理学会理事　　堀　雅人

特別講演Ⅰ：「変革時代の原子力、どうする？」－国家安全保障と原子力－
講師：東京工業大学名誉教授　齊藤　正樹

**11:00－11:40**　企画セッション　座長：日本核物質管理学会理事　　岩本　友則

**11:00－11:20**　報告Ⅰ：第 60 回 INMM 年次大会報告、プルトニウムの歴史
報告者：日本核物質管理学会　会長　千崎　雅生

**11:20－11:40**　報告Ⅱ：　第 9 回　INMM/ESARDA 合同ワークショップ概要報告
報告者：日本核物質管理学会プログラム委員　長谷　竹晃

**11:40-13:00**　休　　憩

### メディアホール

**13:00-14:40**　セッション D：核セキュリティ
座長：日本原子力研究開発機構　中村　仁宣

#4020
13:00-13:20
ダーティーボムを用いたテロ発生時の線量分布予測に関する研究
発表者　警察庁 科学警察研究所　田辺　鴻典

#4021
13:20-13:40
核セキュリティ事象初動対応のための機械学習を応用したガンマ線スペクトル解析 −検出器シミュレーションによる学習データの構築及び核種判定アルゴリズムにおける有用性の検討−
発表者　日本原子力研究開発機構　木村　祥紀

#4022
13:40-14:00
核セキュリティ文化醸成活動と意識調査結果について
発表者　日本原子力研究開発機構　山田　博之

#4023
14:00-14:20
プルトニウム燃料技術開発センターにおける核セキュリティ文化醸成活動
発表者　日本原子力研究開発機構　鈴木　弘道

#4024
14:20-14:40
シングルデプス画像からの畳み込みニューラルネットワークによる手元動作識別
発表者　東京大学　　出町　和之

会議室１

**13:00-14:40**　セッション E：政策

座長：東京工業大学　池上　雅子

#4025
13:00-13:20
非核化達成のための要因分析に関する研究
(1) 南アフリカ：核開発と非核化の動機及び非核化の特徴について
発表者　日本原子力研究開発機構　田崎　真樹子

#4026
13:20-13:40
非核化達成のための要因分析に関する研究
(2) 南アフリカ：非核化の方法及び検証方法について
発表者　日本原子力研究開発機構　木村　隆志

#4027
13:40-14:00
非核化達成のための要因分析に関する研究
(3) リビアの非核化の経緯と成功要因
発表者　日本原子力研究開発機構　玉井　広史

#4028
14:00-14:20
非核化達成のための要因分析に関する研究
(4) イラク：非核化の特徴について
発表者　日本原子力研究開発機構　田崎　真樹子

#4029
14:20-14:40
非核化達成のための要因分析に関する研究
(5) イランの核問題と核合意について
発表者　日本原子力研究開発機構　清水　亮

**14:40-15:00**　休　憩

メディアホール

**15:00– 16:00**　招待講演

座長：日本原子力研究開発機構　浅野　隆

招待講演Ⅲ：「海は我が人生」
～ヨットマンとしての考えはエネルギー問題に通ずる～
講演者：小説家　鈴木　光司　（代表作：リング、らせん）

**16:00-16:15**　表彰式（優秀ポスター発表賞、優秀論文賞（第 39 回、第 40 回））

プログラム副委員長　相楽　洋

**16:15–16:20**　閉会の辞　プログラム副委員長　相楽　洋

# Program Schedule for the 40th Annual Meeting of the Institute of Nuclear Materials Management Japan Chapter

(The program will be changed without notification)

Plenary Meeting Host: Hironobu Nakamura, Japan Atomic Energy Agency

## Day 1 (19 November)

**Media Hall**

**09:30～** **Registration**

**10:00-10:20** **Opening Session**

| | | |
|---|---|---|
| 10: 00 - 10:05 | Opening Remarks | Hironobu Nakamura, Chair, Program Committee |
| 10: 05 - 10:20 | Welcome Remarks | Masao Senzaki, President, INMM Japan Chapter |

**10:20-10:25** **Administrative message**

**10:30-11:30** **Invited Lectures** **Chair：Hiroshi Tajiri, INMMJ Member at Large**

**Invited Lectures I：Current status of nuclear material protection in Japan**
**Guest Lecturer：Hirotaka Oku**
**Deputy Director, Division of Nuclear Security,**
**The Secretariat of Nuclear Regulation Authority, Japan**

**11:30-13:00** **Lunch Break**

**13:00-13:30** **Poster Short Presentation**

**Chair：Hiroshi Sagara, Tokyo Institute of Technology**

| | |
|---|---|
| P4001 | Feasibility study on innovative small and medium modular reactor with inherent nuclear safety, security, and non-proliferation features (1) Silicide fuel with MA and/or RepU<br>Presenter: Natsumi Mitsuboshi, Tokyo Institute of Technology |
| P4002 | Feasibility study on light water reactor fuel with inherent safety and non-proliferation features (2) U-Pu Silicide Fuel<br>Presenter: Tsukasa Amano, Tokyo Institute of Technology |
| P4003 | Nonproliferation features of molten salt fast reactor<br>Presenter: Ryo Aoyagi, Tokyo Institute of Technology |
| P4004 | Characteristics of Nuclide Composition in Spent Nuclear Fuel from Light Water Reactors for Nuclear Forensics Research Plan for finding out new discrimination indices<br>Presenter: Yuichi Kagayama, Tokyo Institute of Technology |
| P4005 | Applicability Study of Photofission Reaction to Identify High-Enriched Uranium by utilizing the Bremsstrahlung Spectrum Photon<br>(2) Selection of incident electron energies and validation of PFRR principle<br>Presenter: Chin Kim Wei, Tokyo Institute of Technology |
| P4006 | Development of Image Reconstruction Technology using Passive Gamma Emission Tomography (2) Reconstruction of Gamma-ray Sources in Mock-up Fuel Assembly<br>Presenter: Shigeki Shiba, Tokyo Institute of Technology |
| P4007 | Feasibility of Application of DDSI Assay Technique for Nuclear Material Quantification in Various Radioactive Waste Forms (1) Research Plan<br>Presenter: Sho Nakaguki, Tokyo Institute of Technology |

| | |
|---|---|
| P4008 | A study of the NDA Technology using Passive Gamma and Neutron Emission Tomography(1) The research plan of application to Passive Neutron Emission Tomography for partial defect verification<br>Presenter: Takaya Tokuda, Tokyo Institute of Technology |
| P4009 | Nuclear Fuel Cycle Scenario Study for the India-Japan Civil Nuclear Cooperation<br>Presenter: Saurabh Sharma, Tokyo Institute of Technology |

## Main Foyer

**10:00-17:30** **Exhibition by Business Enterprises**

**13:30-14:45** **Poster Session**
**Session Coordinator: Hiroshi Sagara, Tokyo Institute of Technology**

## Main Foyer

**15:00-16:20** **Session A：Nuclear Nonproliferation Technology・Nuclear Security**
**Chair：Junji Shimizu, Japan Nuclear Fuel Limited**

| | |
|---|---|
| #4010<br>15:00-15:20 | Institutional and Technical Measures for Rational Nuclear Safeguards of Next Generation Nuclear Fuel Cycle (1) Research Plan<br>Presenter: Koji Tsutsui, Tokyo Institute of Technology |
| #4011<br>15:20-15:40 | Development of a user-friendly interface for atmospheric dispersion database and its application for nuclear emergency preparedness -Application for optimizing measurement points for effective detection of released radioactive nuclides-<br>Presenter: Hamza El-Asaad, Japan Atomic Energy Agency |
| #4012<br>15:40-16:00 | An Improvement of Maintainability and Reliability for Safeguards Equipment in RRP<br>Presenter: Masahito Mori, Japan Nuclear Fuel Limited |
| #4013<br>16:00-16:20 | Effective use of inspection samples as intercomparison samples for the quality control in accountancy analysis<br>Presenter: Hiro Okazaki, Japan Atomic Energy Agency |
| #4014<br>16:20-16:40 | Nuclear safety policy awareness in six OECD countries<br>Some text mining results<br>Presenter: Masako Ikegami, Tokyo Institute of Technology |

## Conference Room 1

**15:00 -15:40** **Session B：Education**
**Chair：Makiko Tazaki, Japan Atomic Energy Agency**

| | |
|---|---|
| #4015<br>15:00-15:20 | Nuclear Regulation Human Resource Development Program in Tokyo Tech<br>"The Advanced Nuclear 3S Education and Training (ANSET)"<br>– (4) Implementation Status FY2019 -<br>Presenter: Shuichiro Ebata, Tokyo Institute of Technology |
| #4016<br>15:20-15:40 | Nuclear Regulation Human Resource Development Program in Tokyo Tech<br>"The Advanced Nuclear 3S Education and Training (ANSET)"<br>－(5)Radiation Disaster Response Exercise－<br>Presenter: Chi Young HAN, Tokyo Institute of Technology |

**16:00 -17:00** **Session C：Advanced Nondestructive Assay Technology**
**Chair：Taketeru Nagatani, Japan Atomic Energy Agency**

| | |
|---|---|
| #4017<br>16:00-16:20 | Feasibility study on nondestructive assay of nuclear material in high radioactive solid waste in Tokai Reprocessing Plant<br>Presenter: Jun Takamine, Japan Atomic Energy Agency |
| #4018<br>16:20-16:40 | Testing enrichment meter based on nuclear resonance fluorescence<br>Presenter: Mohamed Omer, Japan Atomic Energy Agency |
| #4019<br>16:40-17:00 | Study on technologies for nuclear safeguards and security applied to direct disposal facilities for spent fuel<br>Presenter: Tomooki Shiba, Japan Atomic Energy Agency |

**16:40 - 17:00** **Preparation for Business Meeting (Media Hall)**

**17:10 - 17:40** **INMM Japan Chapter Annual Business Meeting (Media Hall)**

**18:00 - 20:00** **Reception/Distinguished Service Award Ceremony (Main foyer)**

## 第 2 日目（11 月 20 日）

**Media Hall**

**09:30 – 10:10** **Invited Lectures** **Chair：Masato Hori, Director, INMM Japan Chapter**

**Invited LectureⅡ：International cooperation in the development of Gen IV reactors and efforts for non-proliferation that GIF leads**
**Guest Lecturer：Hideki Kamide, Japan Atomic Energy Agency**

**10:10 – 10:55** **Special Lectures** **Chair：Masato Hori, Director, INMM Japan Chapter**
**Special LectureⅠ：Nuclear Energy in an Age of Reformation, How Manage it ?**
**-National Security and Nuclear Energy-**
**Guest Lecturer：Masaki Saito**
**Professor Emeritus, Tokyo Institute of Technology**

**11:00 – 11:40** **Planning Session** **Chair：Tomonori Iwamoto, Director, INMM Japan Chapter**

**11:00－11:20** **ReportⅠ：Report on the 60th INMM Annual Meeting & The history of plutonium**
**Presenter：Masao Senzaki, President, INMM Japan Chapter**
**11:20－11:40** **ReportⅡ：Report on the 9th INMM/ESARDA/INMMJ Joint WS**
**Presenter：Taketeru Nagatani, Japan Atomic Energy Agency**

**11:40 - 13:00** **Lunch Break**

**Media Hall**

**13:00-14:40** **Session D：Nuclear Security**
**Chair：Hironobu Nakamura, Japan Atomic Energy Agency**

#4020 13:00-13:20 Study of the dose distribution predictions in the case of terrorism using dirty bomb
Presenter: Kosuke Tanabe, National Research Institute of Police Science

#4021 13:20-13:40 Machine-Learning based Gamma-ray Spectrum Analysis for Initial Response on Nuclear Security Event- Development of Training Data Set by Detector Simulation and Usability Evaluation for Radioisotope Identification Algorism -
Presenter: Yoshiki Kimura, Japan Atomic Energy Agency

#4022 13:40-14:00 Relationship between nuclear security culture promotion and awareness survey results
Presenter: Hiroyuki Yamada, Japan Atomic Energy Agency

#4023 14:00-14:20 Report on Activities Related to Fostering Nuclear Security Culture
Presenter: Hiromichi Suzuki, Japan Atomic Energy Agency

#4024 14:20-14:40 Hand Motion Recognition from Single Depth Images by Convolutional Neural Network
Presenter: Kazuyuki Demachi, The University of Tokyo

## Conference Room 1

**13:00-14:40** **Session E：Policy**

**Chair：Masako Ikegami, Tokyo Institute of Technology**

#4025 Research on Factor Analysis for Achieving Denuclearization
13:00-13:20 (1) South Africa: Motivations for Nuclear Weapons Development, Incentives for Denuclearization and Characteristics of its Denuclearization
Presenter: Makiko Tazaki, Japan Atomic Energy Agency

#4026 Research on Factor Analysis for Achieving Denuclearization
13:20-13:40 (2) South Africa: Denuclearization and Verification methods
Presenter: Takashi Kimura, Japan Atomic Energy Agency

#4027 Research on Factor Analysis for Achieving Denuclearization
13:40-14:00 (3) Denuclearization at Libya: Process and Success Factors
Presenter: Hiroshi Tamai, Japan Atomic Energy Agency

#4028 Research on Factor Analysis for Achieving Denuclearization
14:00-14:20 (4) Iraq: Characteristics of Iraq's Denuclearization
Presenter: Makiko Tazaki, Japan Atomic Energy Agency

#4029 Research on Factor Analysis for Achieving Denuclearization
14:20-14:40 (5) Iran's nuclear program and Iran nuclear deal
Presenter: Ryo Shimizu, Japan Atomic Energy Agency

**14:40-15:00** **Break**

## Media Hall

**15:00– 16:00** **Invited Lectures：Chair:：Takashi Asano, Japan Atomic Energy Agency**

**Invited LectureⅢ：The sea is my life**
**～A way of thinking as a yachtsman connects with energy issue～**
**Guest Lecturer：Koji Suzuki, Novelist (RING, RASEN)**

**16:00-16:15** **Poster Presentation and Excellence Paper Awards**
**Hiroshi Sagara Vice-Chair, Program Committee**

**16:15–16:20** **Closing Remarks**
**Hiroshi Sagara Vice-Chair, Program Committee**

# 日本核物質管理学会第 40 回年次大会　開会挨拶

2019 年 11 月 19 日

日本核物質管理学会　会長　千崎雅生

皆様、おはようございます。日本核物質管理学会会長の千崎でございます。
第 40 回年次大会にご参加いただきまして、誠にありがとうございます。開会にあたりまして一言ご挨拶をさせていただきます。まず、最初に、今年 7 月 18 日 72 歳の生涯を終えられました、IAEA の天野之弥（ゆきや）事務局長の御逝去（ごせいきょ）に、心から哀悼（あいとう）の意を表します。12 月 17 日 11 時から帝国ホテルで、「故天野之弥 IAEA 事務局長を偲ぶ会」が開催されます。皆様、ご承知の通り天野事務局長は、北朝鮮やイランの核問題といった、国際的な核不拡散・核セキュリティ課題に精力的な取組を進めたのみならず、原子力平和利用の進展など、多くの分野で多大な貢献がなされ、更には、幅広い趣味をもった人生を送られました。後任の IAEA の新事務局長に在ウイーン国際機関アルゼンチン政府代表部のグロッシ大使が選任されましたが、天野事務局長の路線が継続されることを期待するところであります。

さて、皆様、今年の年次大会は令和元年にふさわしい、第 40 回記念の年次大会となりました。本学会は、エネルギー資源の乏しい我が国が、原子力の平和利用と言う基本理念の下、核燃料サイクル技術開発を本格的に開始していた 1977 年 7 月に、米国核物質管理学会（INMM）における、世界で初めての日本支部として、核物質管理センター初代専務理事の川島芳郎（かわしま　よしろう）氏が初代会長となり、会員が 10 名程で設立されました。そして、現在、日本核物質管理学会は、INMM の世界一の会員数、現在約 150 名を持つ国際支部として、INMM 米国本部、米国政府、米国国立研究所、日本政府、原子力関係機関、原子力産業界、学界、そして IAEA や欧州共同体（EC）などから、本学会の活動が高く評価されているところでございます。

先ず、最初に簡単に、第 1 回の年次大会の概要を振り返りたいと思います。皆様、第 1 回年次大会は「核物質管理講演会」と称して、1979 年 9 月 28 日に赤坂パークビルにおいて開催されました。当時の川島芳郎会長は、開会挨拶の中で、「原子力の開発が進み、原子力事業が成長してくると、核物質管理は年ごとに重要になってくる。特に日本では、保障措置の関連で早くからこの問題に関心がもたれてきたが、核物質管理に関して意見交換する場を設けてはどうかという考えは、色々な機会に話し合われてきた。今回の講演会は、日本支部としては最初のものであるが、講演会、研究発表会、あるいは年次大会というように名称は変わることはあっても、核物質管理に関する意見交換の場として、今後、長きにわたって毎年開かれていく会合の記念すべき、第 1 回会合であると考えている」と述べています。

また、第 1 回のプログラムとしては、東京大学教授の清瀬量平先生から「第 20 回 INMM 年次大会に参加して」、科学技術庁保障措置課から、「日本における核物質管理」、動燃事業

団の柴田隆昭氏から「動燃事業団における核物質管理」、日本電子機器の後藤和隆氏から「核物質防護機器について」、それぞれ報告がありました。そして、特別講演として、日本原子力発電の今井隆吉氏から「核物質管理と国際問題」がありました。　次の講演として、日本原子力研究所の黒井英雄氏から「遠隔監視システムについて」、日本コンピューター・ビューロの河野　淳氏から「情報処理について」、日本ニュークリア・フュエルの長部猛氏から「燃料加工メーカーにおける核物質管理」、そして、動燃事業団の小泉忠義氏から「東海再処理施設 保障措置技術実証、TASTEX について」の講演がなされました。

皆様、ご存知のように長部様は、本学会創設時から核物質管理学会日本支部のために長年貢献をされ、現在は顧問をお願いして、大変お世話になっております。長部様、引き続きよろしくお願いいたします。

皆様、本日、40 周年記念の年次大会を開催できることとなりましたことは、大変喜ばしいことと思います。このことは、これまでの諸先輩方の多大なご努力、また、学会活動を支えていただいています、賛助会員の皆様や関連組織の多大なるご理解・ご支援、そして何よりもこれまでの、学会員皆様の努力の賜物であると大変感謝している次第であります。

さて、東日本大地震、東電福島第一原発事故以来、我が国の原子力開発は停滞し、現時点においても再稼働した原子力発電は、未だ 9 基に過ぎません。また高速増殖炉「もんじゅ」の廃止と、今後の高速炉開発課題、六ヶ所再処理工場の稼働に向けた取組、原子力施設の廃止措置、福島処理水やデブリなどの問題、放射性廃棄物処分、さらには特定重大事故の対処など、原子力発電と核燃料サイクルの円滑な推進に向けて、大きな課題に直面しています。

他方、国際的には、核軍縮について世界の核兵器の 9 割以上を有するアメリカとロシアは政治的に対立し，中距離核戦力(Intermediate-range Nuclear Forces :INF)全廃条約の失効や新戦略兵器削減条約（新 START）の失効が懸念されるなど，両国による核軍縮は遅々として進んでおりません。また来年 5 月の NPT 運用検討会議に向けた、本年の第 3 回準備会合が決裂し、来年の運用検討会議の成功が危ぶまれています。そして再び北朝鮮やイランの核問題への懸念が増大していることなど、核不拡散、核軍縮についても先行き不透明な状況にあります。また、核セキュリティ分野おいても、例えばサイバーセキュリティやインサイザーへの対処、ドローンなどの飛行物体への対処、AI などの活用、情報管理、人材育成など、多くの課題が出てきております。

皆様ご承知のように、本年 9 月の国連気候行動サミットにおける、地球温暖化を食い止める具体的な行動について、若者世代から厳しい批判が噴出しております。その様な中、国際原子力機関（IAEA）は 10 月 7 日から 11 日まで、経済協力開発機構・原子力機関（OECD／NEA）との協力により、「地球温暖化と原子力の役割に関する国際会議」を開催しました。この問題について直ちに行動を起こすことを求める市民が急増していることから、本件国際会議では初日の内容を、「温室効果ガスの削減が可能なエネルギー源はすべて検討する必要があり、適切なエネルギー・ミックスのみがパリ協定に設定された、CO2 削減目標の達

成を可能にする」と総括しました。そして、IAEA のフェルータ事務局長代行も、「（この国際会議の）盛況ぶりは、緊急を要する地球温暖化の重大性や規模に対する、国際社会の認識の高さを反映したものとして、この取組みの中で原子力技術が果たす貢献についても理解が深まりつつあること」、また「今後数 10 年の間に原子力発電を相当量増やすこと無く、この CO2 削減目標をどのように達成できるか想像することは難しい」と指摘しました。

今後、私達はこのような地球温暖化、核不拡散や核軍縮、そして核セキュリティなどの問題や課題にどのように考え、取組むべきでしょうか？

今、私たちは、地球規模の非常に大きな課題である温暖化問題、資源問題、などへの貢献をしっかり行う必要があります。依然、我が国の原子力平和利用の状況には大変厳しいものがありますが、国際エネルギー機関や IAEA などの最近の報告によれば、世界的には原子力平和利用は進展しています。私は、人類が発見した核物質は、遠い将来まで期待出来る大変貴重なエネルギー資源であり、原子力平和利用に対し人類が一層知恵を出して技術革新を行い、不幸な核兵器ではなく、安全、核不拡散、核セキュリティを一層高め、世界の平和と人類の幸福に貢献させる必要があると思います。また、これらの分野における若い世代の持続的な人材育成も欠かせません。我が国としても、原子力関係者も、私ども日本核物質管理学会としても、そうなるよう一層しっかり努力を続けるべきではないでしょうか？

私は、この年次大会がこのような点についても、大いに議論がなされる機会となることを期待しているところであります。

さて皆様、今年 10月7 日から 10日に、お台場の東京国際交流センターにおいて、米国核物質管理学会（INMM）、欧州保障措置研究開発協会（ESARDA）、及び日本核物質管理学会（INMMJ）の共催により、第 9 回ワーク ショップを開催しました。これはシリーズの 9 回目のワークショップで、日本における開催は、今回が 3 回目となります。この WS は、大変盛況で日本、そして海外からは 15 か国と IAEA、合計約 120 名の参加があり、特に米国から 75 名の参加がありました。WS のテーマとして「国際保障措置と核セキュリティの強化のための挑戦」として、具体的には国際保障措置の挑戦、核セキュリティの一層の強化、そして福島第一発電所を踏まえた原子力施設の廃止措置に係る核セキュリティ、及び保障措置に関し、4 つの WG に分かれて議論しました。大変活発な議論が行われ、良い成果報告書をまとめることが出来るのではないかと思います。成果報告は当学会の WEB にアップしたいと思っています。

さて、本日この後、招待講演としまして、原子力規制庁核セキュリティ部門安全規制管理官補佐（総括担当）の奥博貴様から、「我が国における核物質防護の現状」についてのご講演をいただきます。明日の招待講演としまして、原子力機構の上出 英樹様から「GIF がリードする第 4 世代炉開発の国際協力と核不拡散への取組」と題するご講演を、また東京工業大学名誉教授で、現在当学会理事の齊藤正樹先生から、「変革時代の原子力、どうする？－国家安全保障と原子力」と題する大変興味のあるご講演をいただきます。そして、企画

セッションとしまして、私の方から今年 7 月に開催されました、米国での第 60 回 INMM 年次大会について、今回は 60 回記念の大会ということから、興味あるテーマのプレナリーやパネルなどの特別企画が多く開催されました。その中で特に「プルトニウムの歴史」と題するパネルが開催されましたので、その様子を簡単にご紹介いたします。その後、原子力機構の、本学会プログラム委員をお願いしています、長谷竹晃さんから、 第 9 回 INMM/ESARDA/日本核物質管理学会合同 WS の結果についてご報告していただきます。

そして皆様もよくご存じかと思いますが、明日の午後 15 時から招待講演を、小説家 鈴木光司先生にお願いしています。代表作として、「リング」や「らせん」などがございますが、今回は「海は我が人生～ヨットマンとしての考えはエネルギー問題に通ずる～」と題してご講演をいただきます。大変興味のあるお話が聞けると思います。本年次大会に、是非最後まで、皆様のご参加をお願いいたします。

今後の INMM 年次大会は、来年 7 月にはアメリカのバルチモア、そして 2021 年の大会は 8 月にウイーンで開催されます。INMM 年次大会が米国以外で開催されるのは初めてとなります。皆様、奮って、参加や発表などの準備をお願いいたします。日本核物質管理学会は、今年度新たに学生部会を設置いたしますが、INMM 本部等との連携の一層強化、理事会、企画委員会、プログラム委員会などの活動強化、戦略会議における将来ビジョンや計画の議論を活発に行います。これからも一層、国内外における活動を強化しまして、正念場にある日本の原子力平和利用、核燃料サイクルの進展、そして核不拡散/保障措置、核セキュリティなどの核物質管理にしっかり貢献してまいりたいと思っています。当学会がこれからも継続発展するよう、是非、引き続き皆様のこれまで以上の当学会へのご支援、ご協力を賜りますよう、お願い申し上げまして、私のご挨拶とさせていただきます。ありがとうございました。 （以上）

# 招待講演　Ⅰ

## 我が国における核物質防護の現状

原子力規制庁核セキュリティ部門安全規制管理官
（核セキュリティ担当）付管理官　補佐（総括担当）
奥　博貴

NRA , Japan
Nuclear Regulation Authority

第40回日本核物質管理学会年次大会

# 我が国における核物質防護の現状

令和元年１１月１９日

原子力規制庁長官官房放射線防護グループ
核セキュリティ部門管理官補佐（総括担当）
奥　博貴

# 目次

1. 原子力規制委員会の概要
2. 規制当局と関係機関の役割と責務
3. 核物質防護に関する法的・規制的枠組み
4. 核物質防護に係る原子力規制検査
5. 核物質防護検査官の教育・資格認定制度
6. ３Ｓ（Safety, Security and Safeguards）の調和
7. 核セキュリティ文化の醸成

# 1. 原子力規制委員会の概要

# 原子力規制委員会

- 原子力規制を一元的に実施する規制機関
- 2012年9月19日に環境省の下に設立
- 委員長と4人の委員で構成
  - 多数決で意思決定
- 予算：590億円（2018年度）
- 職員数：1,027人（2018年10月時点）

更田 豊志
委員長

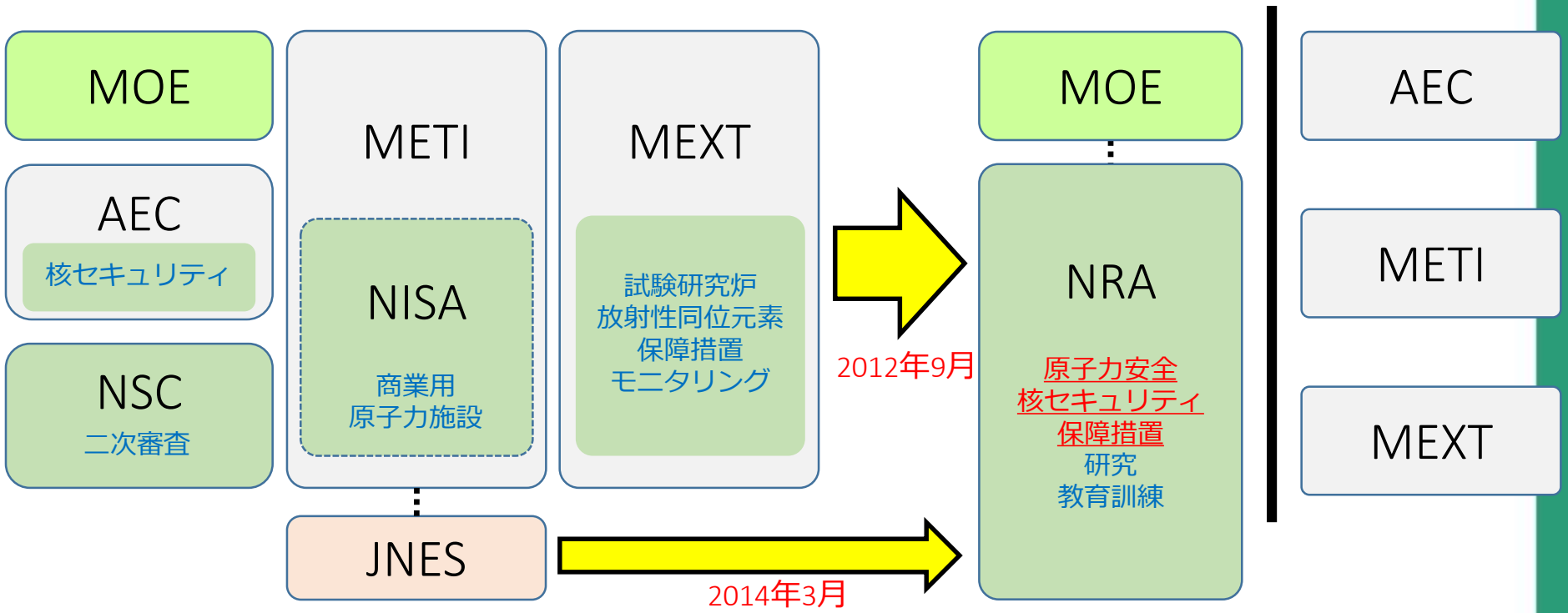
田中 知
委員

山中 伸介
委員

伴 信彦
委員

石渡 明
委員

# 原子力規制の一元化




AEC　：原子力委員会（Atomic Energy Commission）
METI　：経済産業省（Ministry of Economy, Trade and Industry）
MEXT　：文部科学省（Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology）
MOE　：環境省（Ministry of Environment）
NISA　：原子力安全・保安院（Nuclear and Industrial Safety Agency）（廃止）
NSC　：原子力安全委員会（Nuclear Safety Commission）（廃止）
JNES　:原子力安全基盤機構（Japan Nuclear Energy Safety Organization）（技術支援機関、廃止）

# 原子力規制委員会の独立性

- 原子力規制委員会に環境大臣から独立して規制を実施する権限の付与
- 原子力規制委員長に、職員を採用・配置する権限の付与
- エネルギー特別会計において原子力規制に必要な予算を確保する措置

# 原子力規制委員会の任務

原子力規制委員会設置法（抜粋）

（任務）
第三条　原子力規制委員会は、国民の生命、健康及び財産の保護、環境の保全並びに我が国の安全保障に資するため、原子力利用における安全の確保を図ること（核セキュリティ、保障措置に係る規制を含む）を任務とする。

# 2. 規制当局と関係機関の役割と責務

# 原子力規制委員会の所掌事務

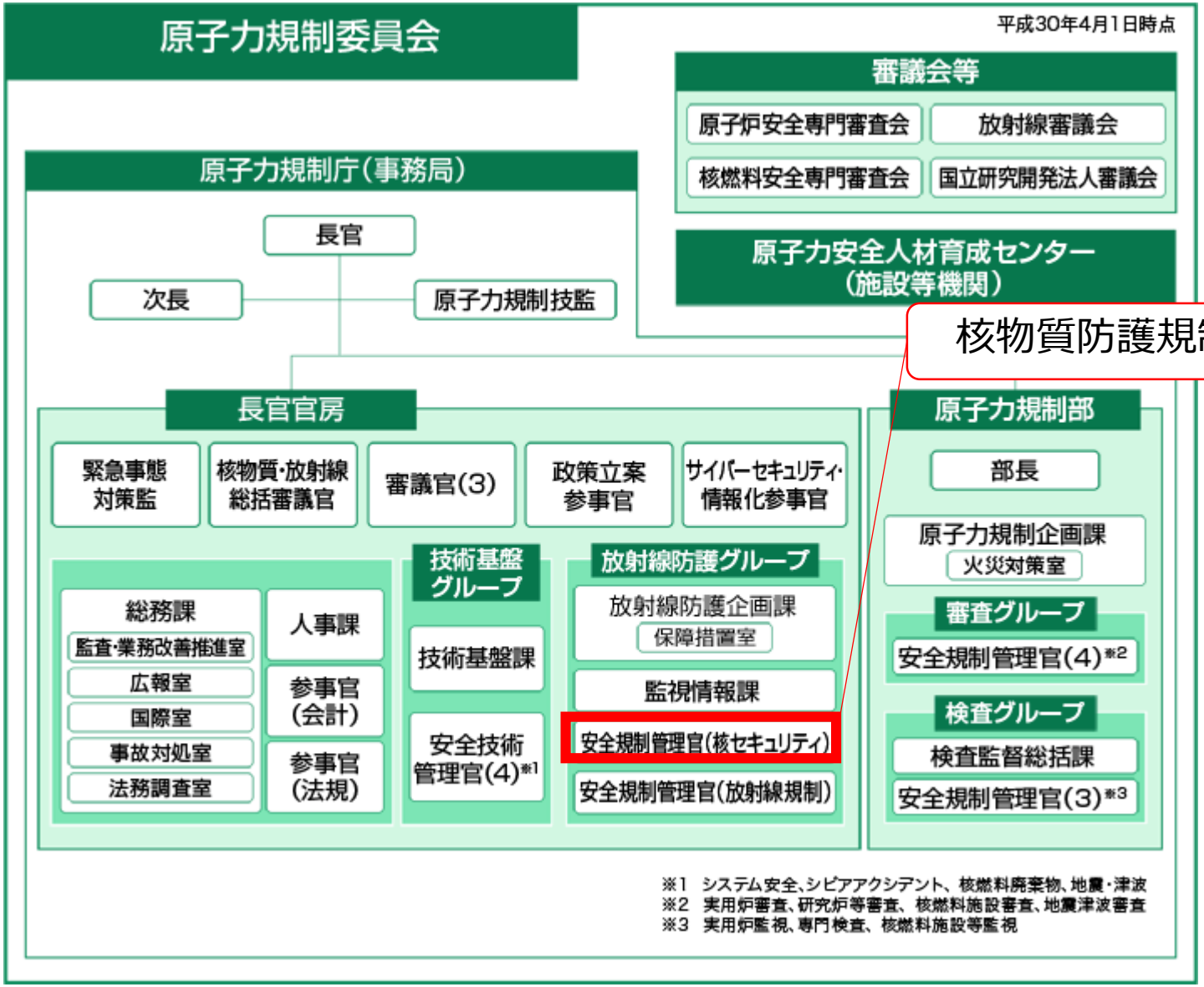
## 原子力基本法（抜粋）

- ✓ 原子力利用における安全の確保を図るため、別に法律で定めるところにより、環境省の外局として、原子力規制委員会を置く。（第３条の２）

## 原子力規制委員会設置法（核物質防護関係抜粋）

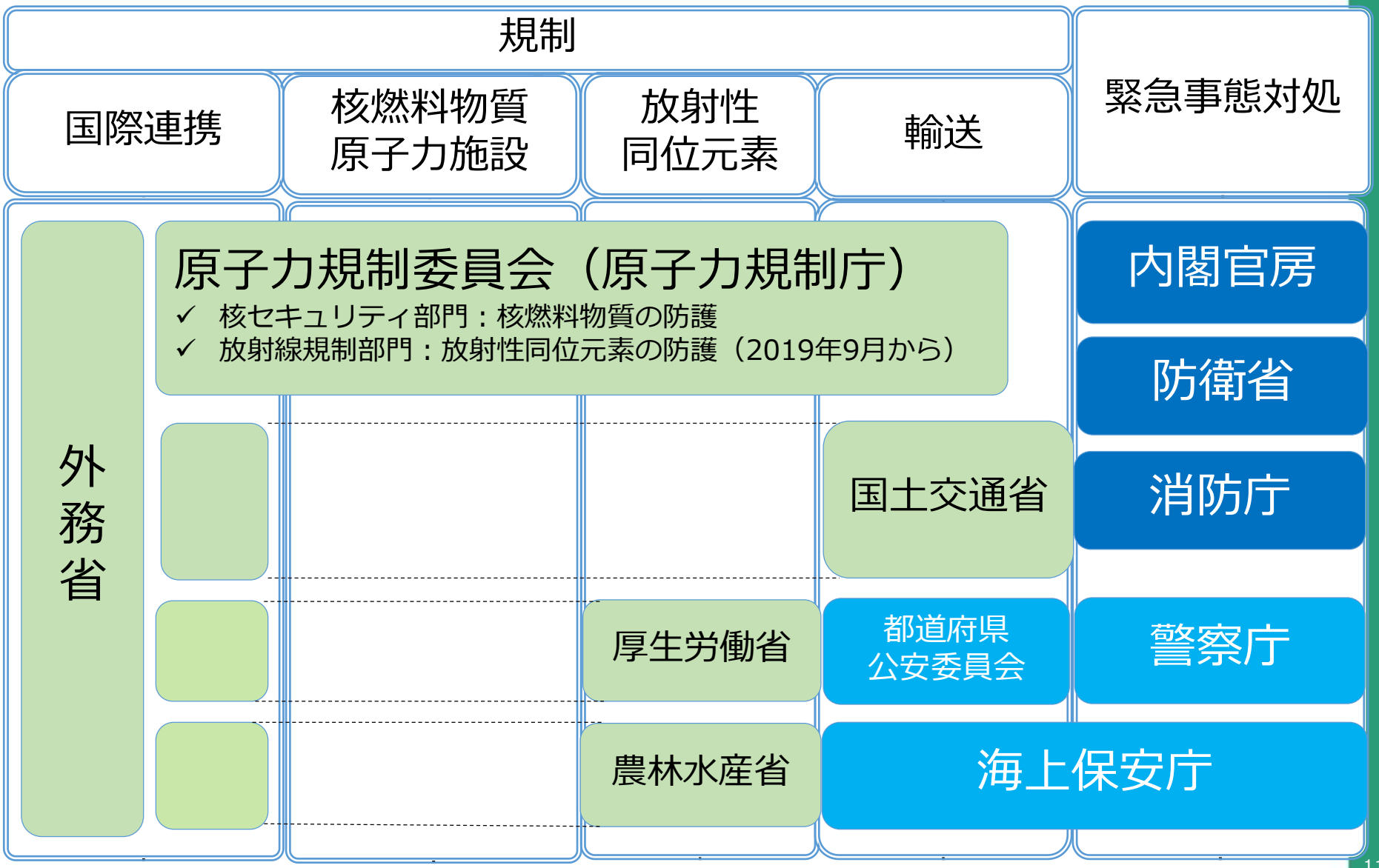
- ✓ 原子力に係る製錬、加工、貯蔵、再処理及び廃棄の事業並びに原子炉に関する規制その他これらに関する安全の確保に関すること。（第４条第１項第２号）
- ✓ 核原料物質及び核燃料物質の使用に関する規制その他これらに関する安全の確保に関すること。（第４条第１項第３号）
- ✓ 核燃料物質その他の放射性物質の防護に関する関係行政機関の事務の調整に関すること。（第４条第１項第９号）

# 原子力規制委員会の組織構成




核物質防護規制を担当

# 核セキュリティの国家的枠組み



# 3. 核物質防護に関する法的・規制的枠組み

# 国際的責務

（１）多国間条約

- 「核兵器の不拡散に関する条約」（1976年締結）
- 「原子力事故の早期通報に関する条約」、「原子力事故又は放射線緊急事態の場合における援助に関する条約」（原子力事故関連2条約）（1987年締結）
- 「核物質の防護に関する条約」（1987発効、1988年加入）
- 「原子力の安全に関する条約」（1994年締結）
- 「爆弾テロ防止条約」（1997採択、2001年発効）
- 「使用済燃料管理の安全及び放射性廃棄物管理の安全に関する条約」（2003年締結）
- 「核テロリズム防止条約」（2005採択、2007年発効）
- 「核物質防護条約の改正」（2005採択、2014年国会承認）

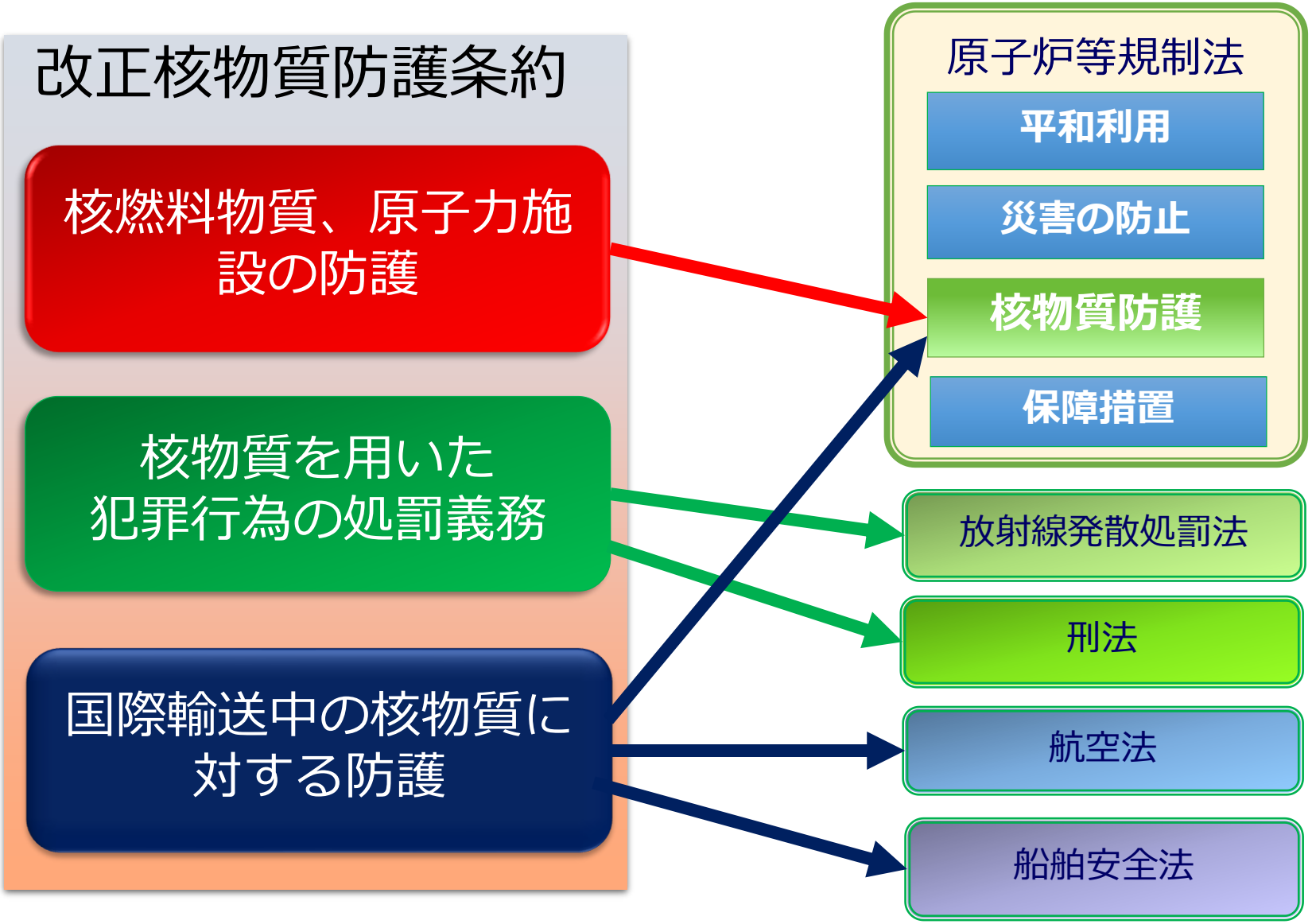
（２）二国間協定

- 原子力協定（核物質防護の履行）
- 締結国等：米国，英国，カナダ，豪州，フランス，中国，ユーラトム，カザフスタン，韓国，ベトナム，ヨルダン，ロシア，トルコ，ＵＡＥ，インド

（３）IAEAの核セキュリティ・シリーズ文書

- 核物質及び原子力施設の防護に関する核セキュリティ勧告（INFCIRC/225/Rev.5）（2011年発行）　etc.

# 法律による改正核物質防護条約の担保



# 原子力規制法令の構成

原子力基本法

↓

原子炉等規制法

↓

原子炉等規制法施行令

↓

## 原子力規制委員会規則

**製錬事業に関する規制**

- 核原料物質又は核燃料物質の製錬事業に関する規則

**加工事業に関する規制**

- 核燃料物質の加工の事業に関する規則

**原子炉に関する規制**

- 実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則
- 研究開発段階にある発電の用に供する原子炉の設置、運転等に関する規則
- 試験研究の用に供する原子炉等の設置、運転等に関する規則

**福島第一原子力発電所に対する特例に関する規制**

- **東京電力株式会社福島第一原子力発電所原子炉施設の保安及び特定核燃料物質の防護に関する規則**

**使用済燃料貯蔵に関する規制**

- 使用済燃料の貯蔵の事業に関する規則

**再処理事業に関する規制**

- 使用済燃料の再処理の事業に関する規則

**廃棄の事業に関する規制**

- 核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第一種廃棄物埋設の事業に関する規則
- 核燃料物質又は核燃料物質によつ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
- 核燃料物質又は核燃料物質によつて汚染された物の廃棄物管理の事業に関する規則

**使用に関する規制**

- 核燃料物質等の使用等に関する規則

**受託貯蔵に関する規制**

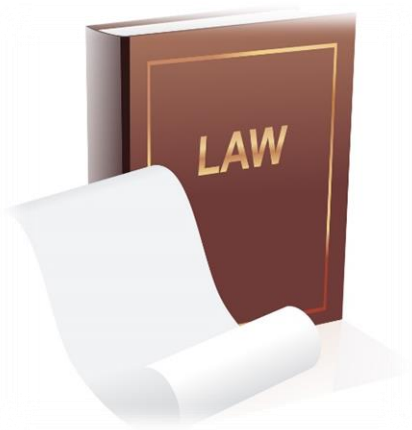
- 核燃料物質の受託貯蔵に関する規則

**運搬に関する規制**

- 核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則

# 原子力利用における公共の安全の確保

- 原子力の利用は、産業の振興、生活水準の向上等に貢献する一方、災害の発生等により公共の安全を損なう危険性を有する。
- 原子炉等規制法では、国民の生命、健康及び財産の保護、環境の保全並びに我が国の安全保障に資することを目的として、原子力の利用による災害を防止し、核燃料物質を防護して公共の安全を図るとともに、国際約束を実施するための必要な規制を行っている。



# 核物質防護対策の枠組み

1　特定核燃料物質の不法移転の防止
（核爆発装置等への転用防止）

2　原子力施設等に対する妨害破壊行為の防止
（受容できない放射線影響の防止）

公共の安全を図るため、特定核燃料物質を取り扱う事業者に対して、防護措置を規制要求

# 等級別手法の適用

① 核燃料物質の取扱量に応じた規制要求

- ✓ 特定核燃料物質を取り扱う施設に対して、不法移転を防止するための防護措置を規制要求
- ✓ 防護区分Ⅰ～Ⅲ

② 設計基礎脅威（ＤＢＴ）を考慮した規制要求

上記施設のうち、

- ✓ 特定核燃料物質の不法移転が懸念される施設に対して、不法移転を防止するための防護措置を規制要求
- ✓ 設計基礎脅威において許容できない放射線影響を与える可能性がある施設に対して、妨害破壊行為を防止するための防護措置を規制要求

# 核燃料物質の取扱量に応じた規制要求

| 防護対象核燃料物質の定義 | | | 防護区分 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 核燃料物質（未照射） | | 重量 | Ⅰ | Ⅱ | Ⅲ |
| Pu | | ＞15g | ≧ 2 kg | ＞ 500 g<br>＜ 2 kg | ＞ 15 g<br>≦ 500 g |
| U-235 | ≧20% | ＞15g | ≧ 5 kg | ＞ 1 kg<br>＜ 5 kg | ＞ 15 g<br>≦ 1 kg |
| | ＜20%<br>≧10% | ＞1kg | | ≧ 10 kg | ＞ 1 kg<br>＜ 10 kg |
| | ＜10%<br>＞NU | ≧10kg | | | ≧ 10 kg |
| U-233 | | ＞15g | ≧ 2 kg | ＞ 500 g<br>＜ 2 kg | ＞ 15 g<br>≦ 500 g |

＜１メートル離れた地点で毎時１グレイを超える照射燃料等について＞

- 区分Ⅰ、区分Ⅱの燃料は区分を１ランク下げることが可能
- 天然ウラン、劣化ウラン、トリウム、濃縮ウラン10%未満の燃料は、区分Ⅱとする。
- ガラス固化体は、区分Ⅲとする。

# 原子炉等規制法における核物質防護関連規定

| | |
|---|---|
| 第１章（総則） | ○目的・定義 |
| 第２章（製錬の事業に関する規制） | ○施設規制<br>• 事業等の許可・指定<br>• 設計・工事方法の認可<br>• 使用前検査　等<br>○保安規制<br>• 保安規定の認可<br>• 保安検査<br>• 核燃料取扱主任者等の選任等　等<br>○核物質防護規制<br>• 防護措置<br>• 核物質防護規定、<br>• 核物質防護管理者　等<br>○廃止規制<br>• 廃止措置<br>• 廃止措置計画の認可　等 |
| 第３章（加工の事業に関する規制） | |
| 第４章（原子炉の設置、運転等に関する規制） | |
| 第４章の２（貯蔵の事業に関する規制） | |
| 第５章（再処理の事業に関する規制） | |
| 第５章の２（廃棄の事業に関する規制） | |
| 第５章の３（核燃料物質等の使用等に関する規制） | |
| 第５章の４（原子力事業者等の責務） | |
| 第６章（原子力事業者等に関する規制等） | 事業所外廃棄、運搬、受託貯蔵、譲渡・譲受制限、クリアランス等 |
| 第６章の２（国際規制物資の使用等に関する規制等） | 国際規制物資使用の許可、計量管理規定の認可、保障措置検査等 |
| 第７章（雑則） | 事故届、報告徴収、立入検査、秘密保持義務、国家公安委員会等との関係等 |
| 第８章（罰則） | （防護措置義務等違反に対する罰則） |
| 第９章（外国船舶に係る担保金等の提供による釈放等） | － |

# 事業者責務と規制委員会の権限（防護関係）

| 事業者の責務 | 原子力規制委員会の権限 |
| --- | --- |
| • 特定核燃料物質の防護措置 | • 是正措置命令 |
| • 核物質防護規定の策定<br>• 核物質防護規定の遵守 | • 核物質防護規定の認可核物質防護規定の変更命令 |
| • 核物質防護規定遵守状況の検査の受査義務 | • 核物質防護規定遵守状況の定期検査 |
| • 核物質防護管理者の選任と届出 | • 核物質防護管理者の解任命令 |
| | • 事業指定の取消し又は事業の停止命令<br>• 報告徴収<br>• 立入検査 |

# 核物質防護規定の審査及び遵守状況の検査

- ✓ 防護措置に係る設備・運用にほころびがあれば、それが脆弱性となり重大な事態につながることから、国は審査・検査により事業者が法令に基づいて防護措置を講じていることを確認する。
- ✓ 核物質防護対策官は、核物質防護規定の認可に係る審査及び認可された核物質防護規定の遵守状況の検査を担う。

原子力規制委員会が
審査を経て認可

## 核物質防護規定

＜実用炉規則第96条等＞

- 防護に関する組織・体制
- 核物質防護管理者
- 防護措置（区域設定、巡視、監視、出入管理等）
- 防護設備の維持
- 緊急時対応計画
- 機微情報の管理
- 定期的評価・改善　等

## 防護措置

＜実用炉規則第91条等＞

○防護区域等の設定
○防護区域等の出入管理
○特定核燃料物質の管理・運搬
○防護対象枢要設備の防護
○情報システムへのアクセス遮断
○防護設備の点検・保守
○個人の信頼性の確認　等

## 核物質防護検査

＜実用炉規則第97条等＞

- ✓ 核物質防護対策官が毎年１回事業所等へ立入り、必要な物件の検査、関係者への質問等を実施。
- ※ 原子力規制委員会は、事業者に対して、核物質防護規定の遵守状況を確認するため、定期的に検査を行っている。

検査における指摘事項を踏まえ、
事業者が変更認可申請

# 実用炉規則に規定する核物質防護措置

実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第91条第2項（抜粋）

１号　防護区域の設定
２号　周辺防護区域の設定
３号　立入制限区域の設定（2011年改正）
４号　防護区域等の巡視
５号　防護区域等への人の立入り
６号　防護区域等への業務車両以外の車両の立入禁止
７号　防護区域等の駐車場の設置
８号　防護区域等の出入口の措置
９号　特定核燃料物質の管理
１０号　特定核燃料物質の運搬
１１号　監視装置の設置
１２号　出入口の施錠
１３号　中央制御室及び緊急時制御室の防護
１４号　中央制御室外停止装置等の防護
１５号　防護区域内防護対象枢要設備の防護（2012年改正）
１６号　防護区域外防護対象枢要設備の防護（2012年改正）
１７号　特定重大事故等対処施設の防護
１８号　情報システムに対する外部からのアクセス遮断（2012年改正）
１９号　情報システムセキュリティ計画の作成（2012年改正）
２０号　非常用電源設備及び無停電電源装置の設置
２１号　防護設備の点検及び保守
２２号　防護のための連絡
２３号　見張人詰所の代替措置
２４号　教育及び訓練
２５号　防護体制の整備
２６号　緊急時対応計画の作成
２７号　秘密の管理
２８号　個人の信頼性の確認（2016年改正）
２９号　妨害破壊行為等の脅威への対応
３０号　定期的な評価、必要な改善

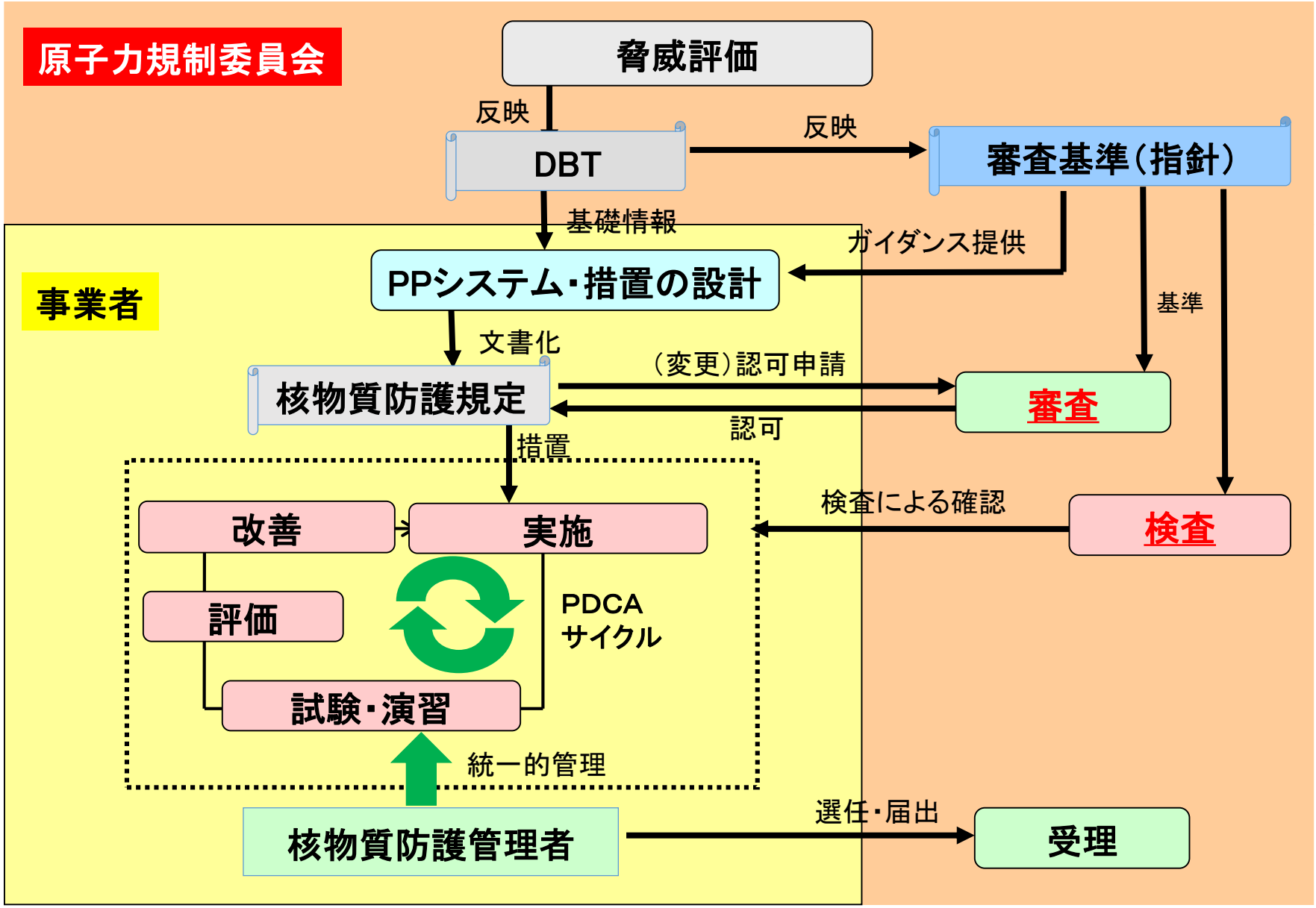
# 原子力施設情報システムセキュリティ対策ガイドライン

- 「原子力施設情報システムセキュリティ対策ガイドライン」（平成３０年３月原子力規制庁セキュリティ部門）は、国内外の動向を踏まえ、事業者自身がセキュリティ対策の継続的な改善を行う上で参考となる資料として策定したもの。（委員会規則、審査基準を補足するもの。規制要求ではない。）
- 本ガイドラインを踏まえ、事業者の情報システムセキュリティ対策の実施状況について確認及び指導を実施する。

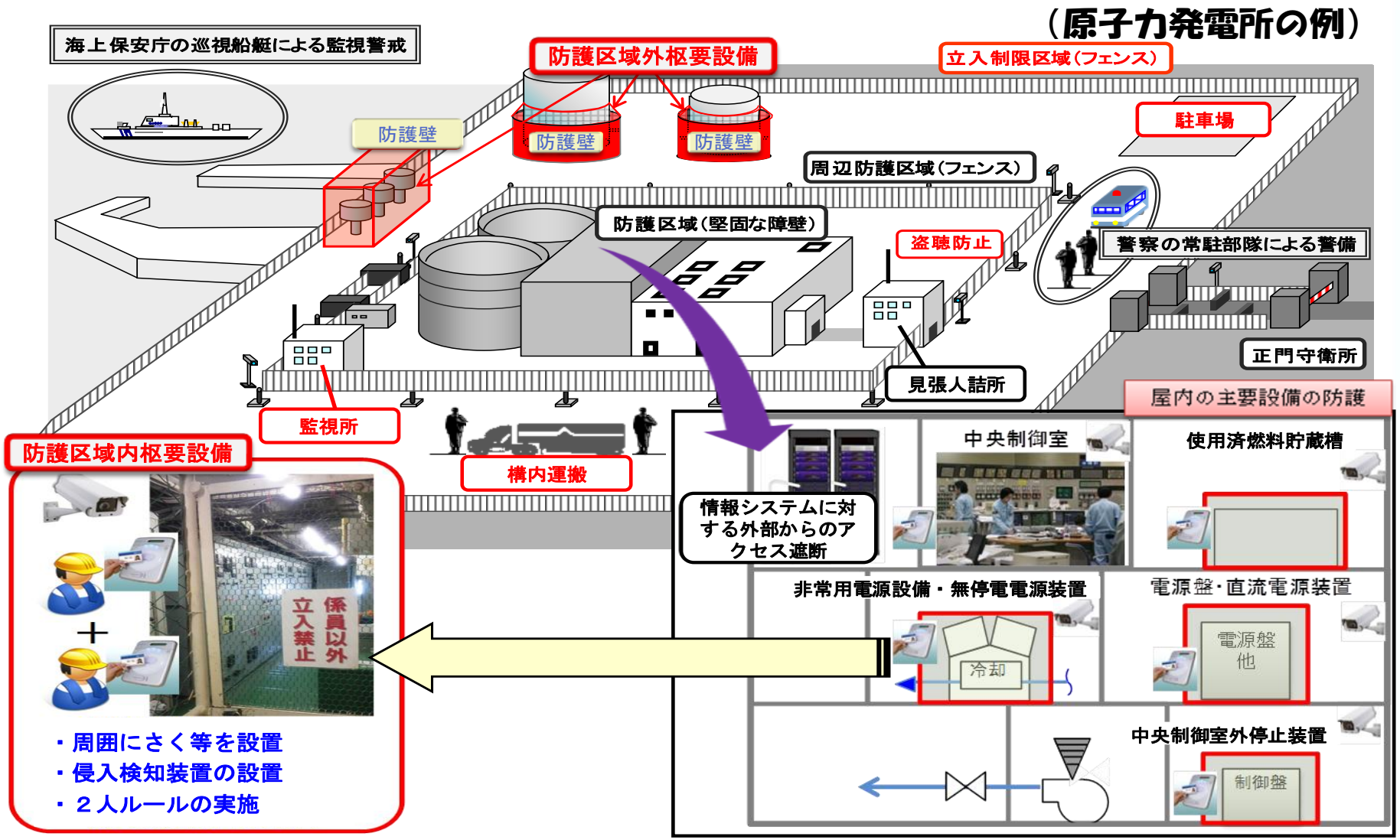
**構成**

（１）はじめに
　　背景、構成、適用対象、目的、留意点
（２）用語の定義
（３）情報システムセキュリティ計画
（４）対策編
　①脅威及び脆弱性情報の評価
　②管理的対策（体制、教育、訓練、調達）
　③技術的対策（システム構成、データ入力制限、外部からの不正なアクセスの排除、ライフサイクル管理等）
　④異常時対応（異常時対応計画、運用継続対策、バックアップ）
　⑤防護措置の有効性評価
（５）別冊資料
　　情報システムセキュリティ対策例

# 核物質防護規制の手続き



# 核物質防護対策のイメージ



# 4. 核物質防護に係る原子力規制検査

平成２９年４月の原子炉等規制法改正により、
原子力事業者等の責務を明確化（令和２年４月施行）

原子炉等規制法第５７条の８（概要）

- 原子力事業者等は、この法律の規定に基づき、原子力の研究、開発及び利用における安全に関する最新の知見を踏まえつつ、核原料物質、核燃料物質及び原子炉による災害の防止及び特定核燃料物質の防護に関し、原子力施設の安全性の向上又は特定核燃料物質の防護の強化に資する設備又は機器の設置、保安教育の充実その他必要な措置を講ずる責務を有する。

# 核物質防護に係る原子力規制検査

【従来】
- 核物質防護規定に従って講じた措置を遵守しているかどうかを検査。
- 検査の結果、原子力規制委員会規則の規定に違反していると認めるときは、是正その他必要な措置を命令。

【新検査制度】
- 検査を一本化し、核物質防護については下記の措置の実施状況を検査。
  - ✓ 核物質防護規定に従って講じた措置
  - ✓ 各規則に定められた防護措置
  - ✓ 法第５９条第１項に規定する特定核燃料物質の運搬に関する防護措置
- 検査の結果に基づき、総合的な評定を実施。評定に当たっては、事業者が最新の知見を踏まえつつ、措置を検証し、改善を図っているかどうかについても勘案。
- 検査及び評定の結果を事業者に通知・公表。
- 検査又は評定の結果に基づき、必要と認めるときは、指導、勧告その他必要な措置を講じる。

# 原子力規制検査における核物質防護の監視・評価

## 原子炉等規制法（目的）

第一条　この法律は、原子力基本法（昭和三十年法律第百八十六号）の精神にのっとり、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の利用が平和の目的に限られることを確保するとともに、原子力施設において重大な事故が生じた場合に放射性物質が異常な水準で当該原子力施設を設置する工場又は事業所の外へ放出されることその他の核原料物質、核燃料物質及び原子炉による**災害を防止**し、及び**核燃料物質を防護**して、公共の安全を図るために、製錬、加工、貯蔵、再処理及び廃棄の事業並びに原子炉の設置及び運転等に関し、大規模な自然災害及びテロリズムその他の犯罪行為の発生も想定した必要な規制を行うほか、原子力の研究、開発及び利用に関する条約その他の国際約束を実施するために、国際規制物資の使用等に関する必要な規制を行い、もつて国民の生命、健康及び財産の保護、環境の保全並びに我が国の安全保障に資することを目的とする。

## 監視領域（大分類）

- 原子力施設安全
- 放射線安全
- 核物質防護

## 監視領域（小分類）・・・発電用原子炉の場合

（上記大分類を、深層防護の考えを踏まえ、事業者のパフォーマンスを監視・評価するための詳細の小分類として以下の7つを設定する。）

- 発生防止
- 拡大防止・影響緩和
- 閉じ込めの維持
- 重大事故等対処及び大規模損壊対処
- 公衆に対する放射線安全
- 従業員に対する放射線安全
- 核物質防護

【核セキュリティ文化醸成活動、安全文化とのインターフェースに係る活動を含む。】

## 横断領域

（安全確保や核セキュリティを達成する様々な活動にとって共通的に重要な要素（横断領域）として、この活動を担う組織と個人が確実に活動を行うことができる基本となる①価値認識、②遂行能力、③業務プロセスを取り上げ、それぞれ①「安全文化醸成活動（核セキュリティとの調和に係る活動を含む。）」、②「要員の業務遂行能力」、③「問題の把握と解決」を設定する。）

- 安全文化醸成活動（核セキュリティ文化とのインターフェースに係る活動を含む。）
- 要員の業務遂行能力
- 問題の把握及び解決

# 原子力規制検査に関する規則等の文書体系

規則

解釈・要領

ガイド

原子力施設の保安のための業務に係る品質管理に必要な体制の基準に関する規則

（核燃料施設の）技術基準に関する規則

施行規則
【施設種別毎及び事業所構外運搬・廃棄等】

**許認可関係**

原子力施設の保安のための業務に係る品質管理に必要な体制の基準に関する規則の解釈

（核燃料施設の）技術基準に関する規則の解釈

○○施設の保安規定審査基準

○○施設の設置（変更）許可、事業許可・指定に係る運用ガイド【施設種別毎】

○○施設の設計及び工事の計画の認可等に係る運用ガイド【施設種別毎】

保安規定の認可に係る運用ガイド

**原子力規制検査関係**

原子力規制検査実施要領

共通事項に係る検査ガイド

検査計画及び報告作成ガイド

個別の検査項目に係る検査ガイド

原子力規制検査における対応措置ガイド

特別検査ガイド

安全実績指標（PI：Performance Indicator）に関するガイド

原子力規制検査における個別事項の安全重要度評価プロセスに関するガイド

検査気付き事項のスクリーニングに関するガイド

**事業者が実施する活動関係**

保安のための措置に係る運用ガイド（施設管理、使用前事業者検査、定期事業者検査、保守管理、高経年化対策等）

**法定確認行為に係る手続き関係**

使用前事業者検査に関する原子力規制委員会の確認等に係る運用ガイド

廃棄物埋設に関する原子力規制委員会の確認等に係る運用ガイド（廃棄物埋設施設確認）
廃棄物埋設に関する原子力規制委員会の確認等に係る運用ガイド（廃棄物確認）

工場又は事業所の外における廃棄に関する原子力規制委員会の確認に係る運用ガイド

工場又は事業所の外において運搬される核燃料輸送物に関する原子力規制委員会の確認等に係る運用ガイド

工場等において用いた資材その他の物に含まれる放射性物質についての放射能濃度に関する原子力規制委員会の確認に係る運用ガイド

廃棄物埋設に係る坑道の閉鎖に関する原子力規制委員会の確認等に係る運用ガイド

※検査制度の継続的改善に係る運用については今後検討

# 5. 核物質防護検査官の教育・資格認定制度

# 新たな検査官等の資格付与制度

✓ 原子力規制委員会は、ＩＡＥＡの総合規制評価サービス（ＩＲＲＳ）における提言等を踏まえ、2017年10月に新たな検査官等の資格付与の制度を導入した。

**ＩＲＲＳ報告書（2016年4月）における提言:**

● 原子力規制委員会は、検査官の検査能力、関連する判断と意識決定を向上させるため、検査官の教育訓練の改善を検討すべき。

**従来の資格制度**

✓ 1、2週間の研修（集団学習）
✓ 数年の関連業務経験

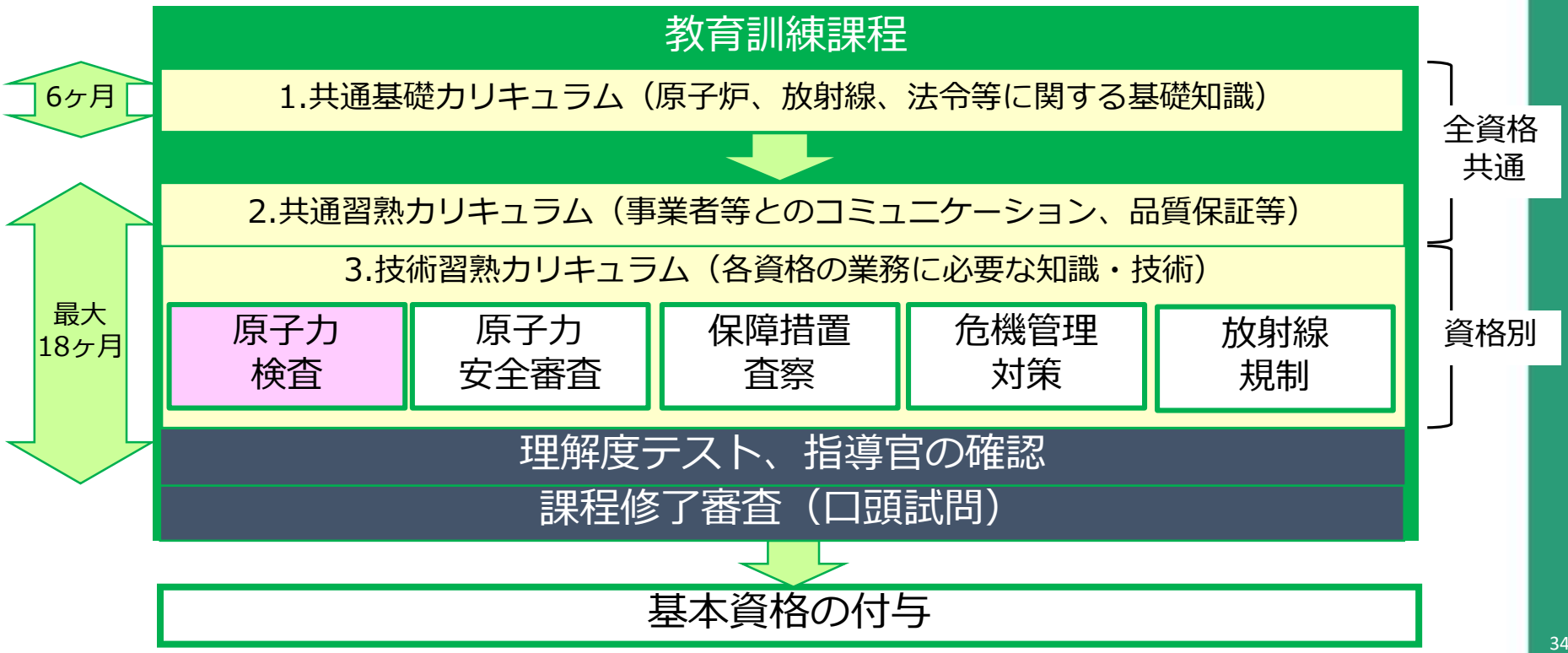
→

**新たな資格付与制度**

✓ 数ヶ月～数年間にわたる教育訓練（集団学習、個人学習、ＯＪＴの組み合わせ）
※ 米国ＮＲＣの研修システムを参考にした教育訓練コース

# 新たな資格付与制度の概要

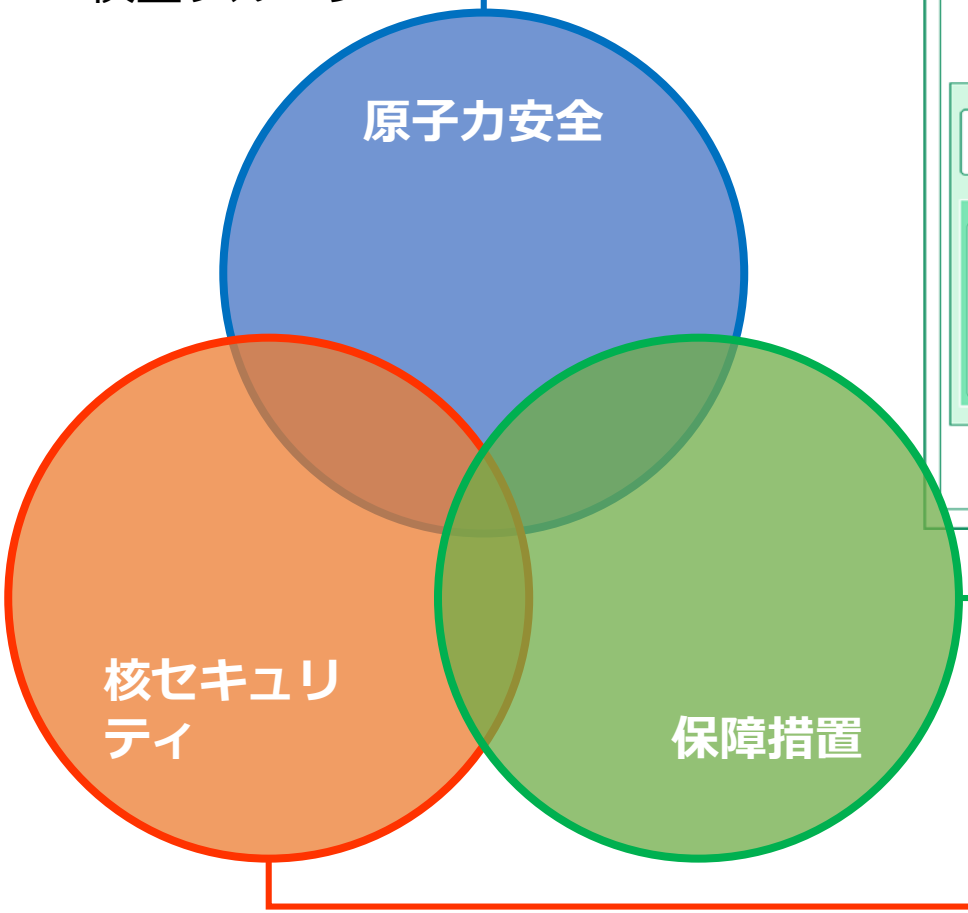
- ✓ 5つの資格（核物質防護検査官の資格は、原子力検査官資格と関連づけられている。）
- ✓ 3つのレベル（基本、中級、上級）（中級原子力検査官資格には、サイバーセキュリティに特化した資格を設ける）
- ✓ 3段階に階層化された教育訓練課程の履修
- ✓ 資格付与された検査官等には、3年ごとに訓練を継続実施

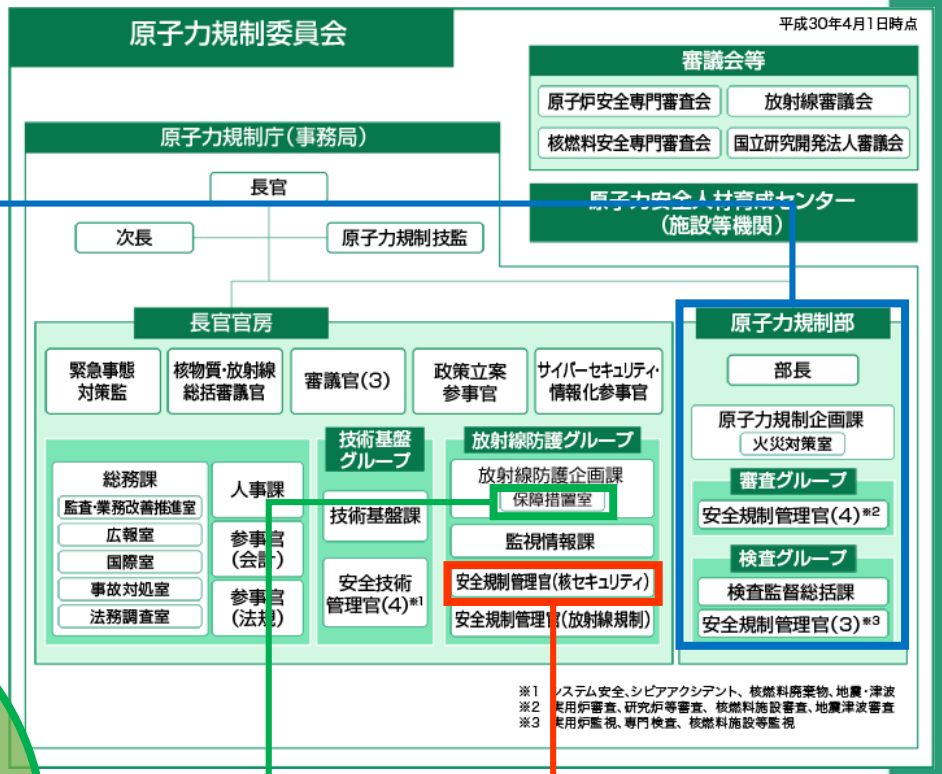


# 6．3 S（Safety, Security and Safeguards）の調和

# 原子炉等規制法に基づく3S規制の担当

原子力規制部
- 原子力規制企画課
- 審査グループ
- 検査グループ




放射線防護グループ
- 保障措置室

放射線防護グループ
- 核セキュリティ部門

# IAEA INSAG-24

✓ IAEAのINSAG（国際原子力安全諮問グループ）が2010年に発行したINSAG-24（原子力発電所における安全とセキュリティのインターフェース）では、原子力安全と核セキュリティを統合するための注意事項等を示している。

- 安全とセキュリティは公衆と環境の防護という共通の目的があり、プラントの設計における特徴は両者の強化に役立っている。しかし、一方の目的を高める措置が、他方に悪影響を与える可能性もある。両者の専門家が相互に支え合い、補強しあう関係の下で、総合的な判断ができることが求められる。
- 両者を統合するために注意すべき差異
  - セキュリティ上の情報の機密保持と、安全情報の公開性・透明性
  - 要員の経歴傾向がセキュリティの場合は軍隊、警察であり、安全の場合は一般人（工学、機械、運転に関する専門知識に着目）
- 安全文化とセキュリティ文化の促進と、共存、相互強化を経営管理者は留意すること。

# 原子力規制委員会の行動指針（３Ｓ調和関係）

✓ 原子力規制委員会の行動指針は、原子力安全と核セキュリティの調和に努めることを明記している。

**核セキュリティ文化に関する行動指針（2015年1月）（抜粋）**

行動指針　２．　安全との調和

　核セキュリティと原子力安全は、それぞれ別個に存在するのではなく、互いに依存し、干渉するものであることを認識する必要がある。職員は、双方の措置の調和に努め、幹部職員は責任をもって最適な方法を選択しなければならない。

**原子力安全文化に関する宣言（2015年5月）（抜粋）**

行動指針　８．核セキュリティとの調和

　安全と核セキュリティは、それぞれ別個に存在するのではなく、互いに依存し、干渉するものであることを認識する必要がある。安全と核セキュリティに従事する 職員は、相互の考え方を尊重し、双方の措置の調和に努め、幹部職員は責任をもって最適な方法を選択しなければならない。

# ３Ｓの調和への取組

- ✓ 原子力規制委員会は、国際原子力機関（ＩＡＥＡ）の総合規制評価サービス（ＩＲＲＳ）における提言を踏まえ、３Ｓの調和に向けた取組を推進している。

**ＩＲＲＳ報告書（2016年4月）における提言:**

- ✓ 原子力安全とセキュリティに対する規制がより一層統合された形で行われるような仕組みを構築すること。

# 相互干渉事例（安全と核セキュリティ）

## 原子力安全 → 核セキュリティ

- ✓ 火災防護対策のため周辺防護区域外の森林を伐採し地面をモルタルで固める措置を実施した。
- ✓ その結果、このモルタル措置により地面が高くなり、結果的に周辺防護区域境界のフェンスを乗り越えやすい状態となったため追加の防護措置を実施した。

## 核セキュリティ → 原子力安全

- ✓ 中央制御室の扉の取替工事に係る核物質防護規定変更認可の審査において、当該工事による中央制御室の遮蔽性能、耐震性等への影響が個々に示されていなかった。
- ✓ 庁内関係部局による情報共有が行われなければ、安全への影響が十分に確認されない可能性があった。

# 相互干渉事例（原子力安全と保障措置）

## 保障措置 → 原子力安全

- ✓ 保障措置機器の保守のため、ＩＡＥＡ査察官が機器を確認したところ、電池に焼痕があり、公設消防により火災と判断された。仮に延焼に至った場合、施設の安全に影響を及ぼす可能性があった。
- ✓ ＩＡＥＡによる調達の不備により、非正規品の電池が使用されていた。

## 原子力安全 → 保障措置

- ✓ 新規制基準適合への対応に伴い施設内で実施される耐震補強作業等が監視装置の視野障害等、保障措置活動の妨げとなる事例がある。

# 相互干渉事例（核セキュリティと保障措置）

核セキュリティ → 保障措置

- ✓ ＩＡＥＡが査察活動として施設の写真撮影を行う場合がある。
- ✓ 撮影された写真は、事業者の核物質防護担当部署が核物質防護情報が含まれていないことを確認した上でＩＡＥＡに提供されるが、確認に時間を要したためにＩＡＥＡから写真改ざんの疑義を掛けられる可能性や、防護情報が含まれていることを理由にＩＡＥＡに提供できない事例がある。

# 3S調和に向けた取組

## 既存の取組

- 「核セキュリティ文化に関する行動指針」及び「原子力安全文化に関する宣言」において、原子力安全と核セキュリティの調和に努めることを行動指針としている。
- 原子力安全と核物質防護の調和に係る実務の基本的な考え方を取りまとめ、安全施設等への影響に関する要件・評価のポイントに留意しながら被規制者の措置の実施状況を確認。
- 核セキュリティに関する審査において、担当部局間で情報共有を実施。

2018年　4月　職員の信頼性確認
2018年　7月　安全に関する審査における情報共有を開始
2018年10月　新検査制度の試運用開始

## 今後の取組

### 審査

- 原子力安全に係る審査及び核セキュリティに関する審査において、3Sの担当部局間で情報共有を引き続き実施。また必要に応じてIAEAとも情報共有を行う。
- 3Sの調和に係る要求について、知見や事例を蓄積しながら、制度上の明確化に係る検討を進める。（規制基準／審査手続き、設置許可の段階／後段規制の段階等）

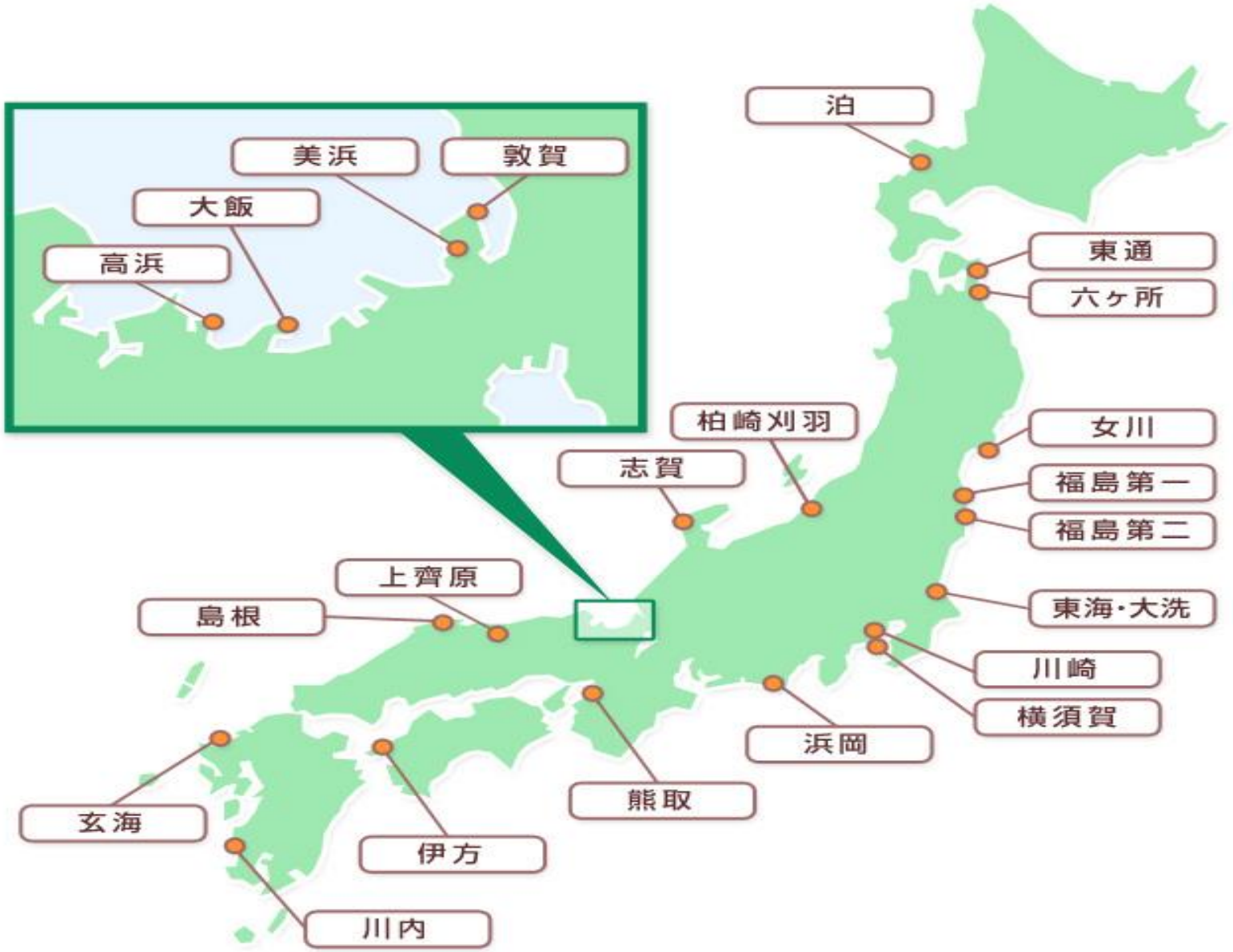
### 検査

- 新検査制度の下での現地検査官等の所掌の範囲や役割分担を整理。
  - 現地検査官は、当面は現状通り安全に関する検査等を主に実施。
  - 現地検査官が安全に係る検査等を実施する中で、核セキュリティ、保障措置に関する気付き事項があった場合には担当部署に連絡。2018年10月から順次開始。
- 問題に気付いた際の情報の流れや管理等を明確化。

### その他

- 被規制者に3Sの調和を図る一義的責任があることを認識させ、対応を促した。
- 職員への研修等の具体策や、信頼性確認制度の指定範囲を検討。

# 原子力規制事務所（全国22箇所）



# 7. 核セキュリティ文化の醸成

# 核セキュリティと核セキュリティ文化

定義：

- 核セキュリティ：核物質、その他の放射性物質又はその関連施設が絡む盗取、妨害破壊行為、無許可立入、不法移転又はその他の悪意のある行為の防止、検知及び対応。（参照：INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Nuclear Security Series Glossary, Version 1.3, IAEA, Vienna (2015).）
- 核セキュリティ文化：効果的な核セキュリティの確保に資する組織や個人の特性と姿勢の総体。（参照：INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Nuclear Security Culture, Implementing Guide, IAEA Nuclear Security Series No. 7, IAEA, Vienna (2008).）

求められる特性・姿勢：

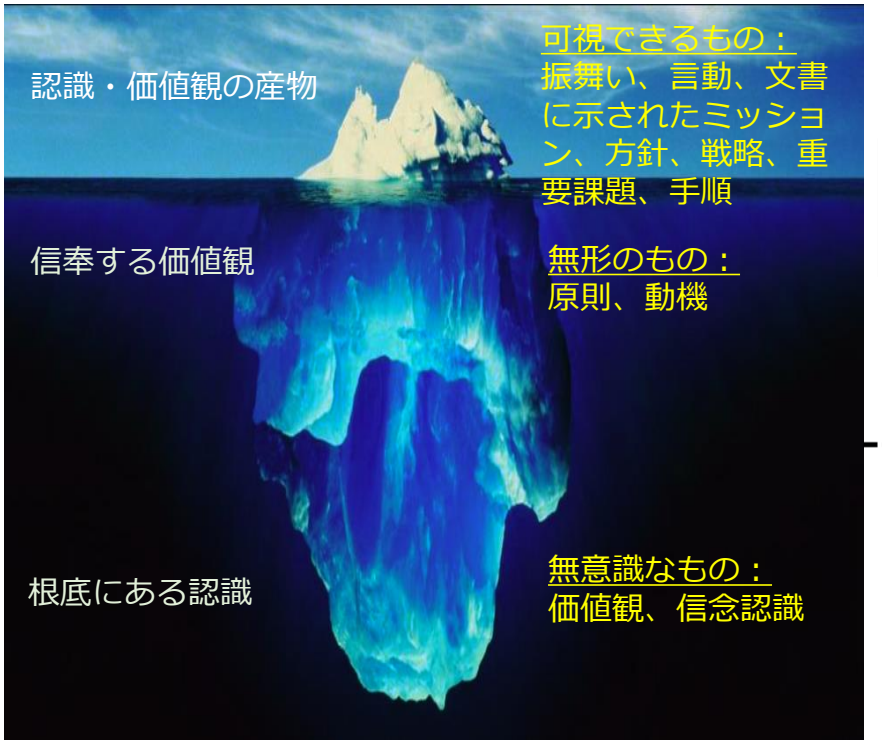
- 核セキュリティには「人の悪意」が関与するために、核セキュリティ文化においてはその「人の悪意による行為」からの「防護」に資する特性と姿勢が求められる。

# 核セキュリティ文化に関するIAEAの概念

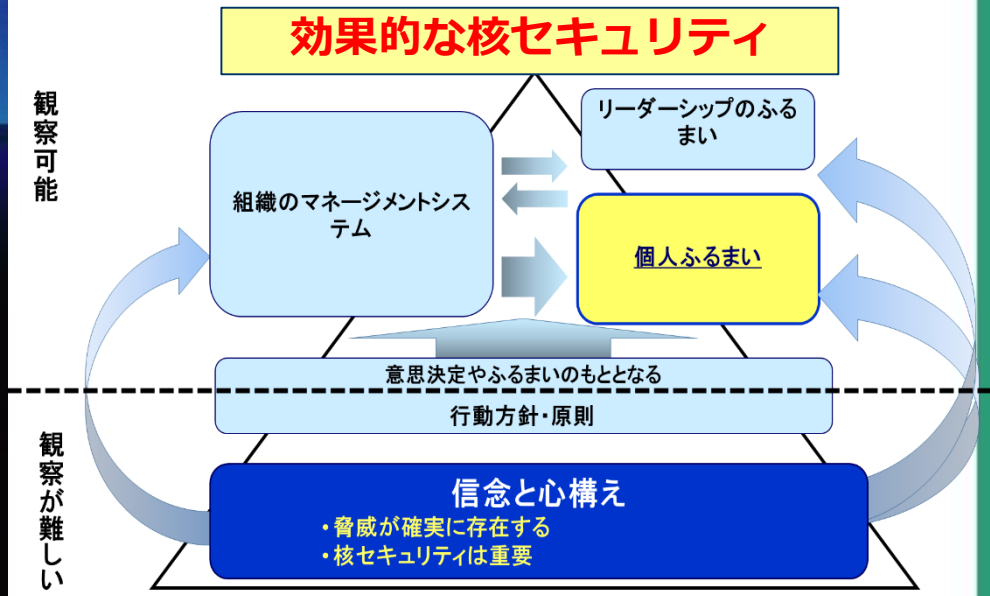
## 組織文化の一部としての核セキュリティ文化：

- 核セキュリティ文化は、原子力安全文化と同様に組織文化の一部。
- それは氷山に喩えられるように、振舞い・言動・方針・システムなど一部の観察できる部分と信念・心構え・価値観など観察が難しい部分で構成される。
- 振舞い・システムなどは、根底にある信念や心構えなど観察が難しい無意識なものの現れである。

組織文化のイメージ




核セキュリティ文化についてのIAEAモデル




＊ 参照：IAEA Implementing Guide on Nuclear Security Culture (NSS No. 7)

# 核セキュリティ文化に関する行動指針

平成２７年１月　原子力規制委員会

核セキュリティ文化の醸成及び維持は、原子力に携わる者全ての務めである。
原子力規制委員会としては、自らの核セキュリティ文化の醸成のための活動に関する行動指針を明らかにし、その更なる向上に努めることとした。
また、原子力規制委員会は、本指針に基づき行動することにより、我が国の核セキュリティ文化の醸成に寄与していく。

**行動指針**

１．脅威に対する認識
核セキュリティ上の脅威は常に存在することを認識し、それに対する防護の重要性を忘れてはならない。

２．安全との調和
核セキュリティと原子力安全は、それぞれ別個に存在するのではなく、互いに依存し、干渉するものであることを認識する必要がある。職員は、双方の措置の調和に努め、幹部職員は責任をもって最適な方法を選択しなければならない。

３．幹部職員の務め
幹部職員は、核セキュリティを重視する姿勢を率先して示し、核セキュリティ文化の浸透、醸成について検証する必要がある。また、目標設定やそれに伴う評価を通じて、組織の在り方を常に点検しなければならない。

４．教育と自己研鑽
業務を牽引する有能な職員の育成は組織の義務であり、原子力規制委員会は、核セキュリティに関する教育を適切に実施する。一方、職員は、常に核セキュリティに関する問題意識を持って、自ら進んで研鑽に努めなければならない。

５．情報の保護と意思疎通
核セキュリティに関する機微な情報の保護に努めつつ、あわせて、我が国の核セキュリティ文化の醸成のために必要な意思疎通は積極的に行うものとする。

# 法令上の規定（核セキュリティ文化関係）

事業者による核セキュリティ文化の醸成の取組を
法令により義務付けている。

- 実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則

第九十六条　法第四十三条の三の二十七第一項の規定による核物質防護規定の認可を受けようとする者は、工場又は事業所ごとに、次に掲げる事項について核物質防護規定を定め、これを記載した申請書を原子力規制委員会に提出しなければならない。

一　（略）

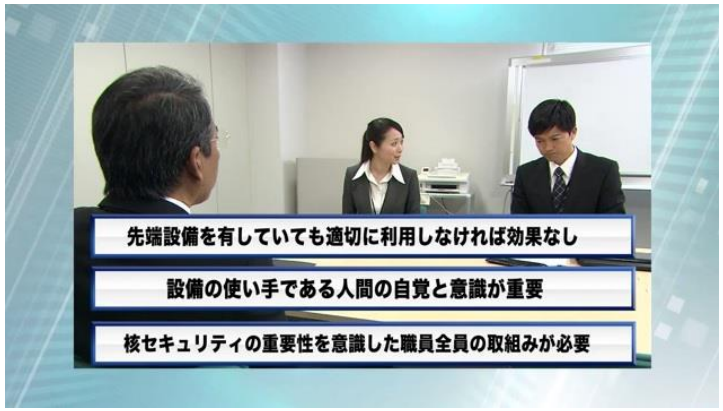
二　核セキュリティ文化を醸成するための体制（経営責任者の関与を含む。）に関すること。

三～二十　（略）

# 核セキュリティ文化映像コンテンツ

【導入編】

https://www.youtube.com/watch?v=Gvi1YWTQ2aU

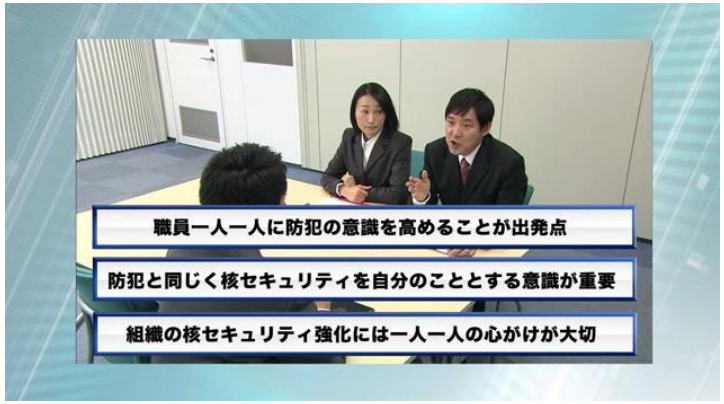



【経営者・管理者 編】

https://www.youtube.com/watch?v=XHZPWQnA02w

【職員編】

https://www.youtube.com/watch?v=epB4fpUMhpE



御清聴いただき、
ありがとうございました。

# 招待講演　Ⅱ

## GIF がリードする第 4 世代炉開発の国際協力と核不拡散への取組

日本原子力研究開発機構
高速炉・新型炉研究開発部門　副部門長
上出　英樹

# GIFがリードする第4世代炉開発の国際協力と核不拡散への取組

# *International cooperation in the development of Gen IV reactors and efforts for non-proliferation that GIF leads*

***Hideki KAMIDE, GIF Chair***

***November 20, 2019***

***Tokyo, Japan***

# 第4世代原子力システム国際フォーラムとは

## 第4世代原子力システム国際フォーラム
（Generation-IV International Forum)

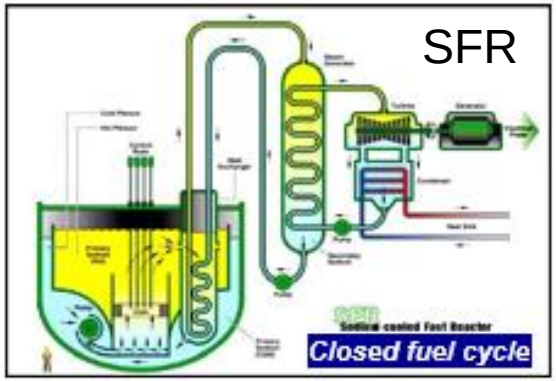
- ***第4世代原子力システム*の研究開発を多国間協力で推進することを目的に2001年7月に発足した国際協力の枠組み**
- ***第4世代原子力システムとしての*開発目標*を設定**
- ***13ヶ国1機関（アルゼンチン、豪州、ブラジル、カナダ、フランス、日本、中国、韓国、南アフリカ、ロシア、スイス、英国及び米国及びユーラトム）が参加。***

引用元: https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9260/public

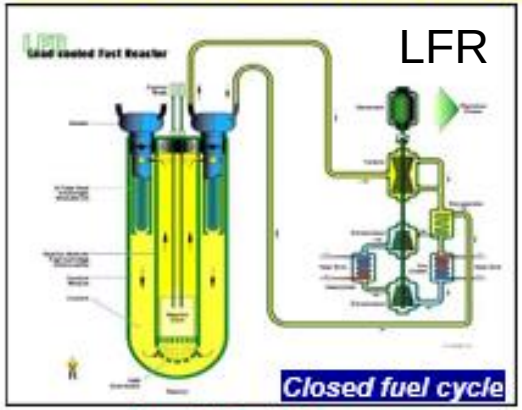
# 第４世代炉の６つの炉システム

GEN IV International Forum

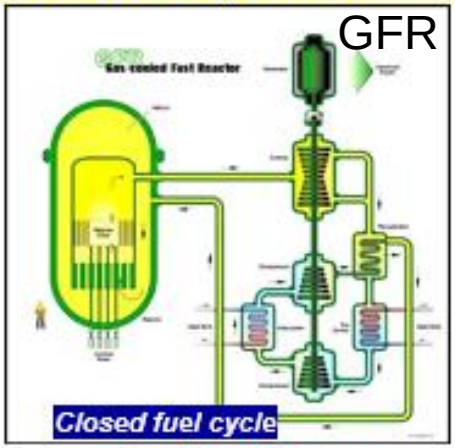
## GIF Selection of six Nuclear Systems



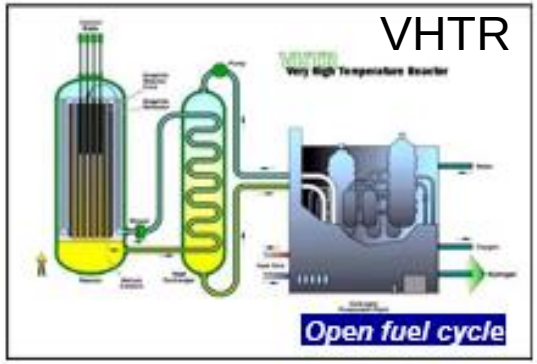

Sodium Fast Reactor



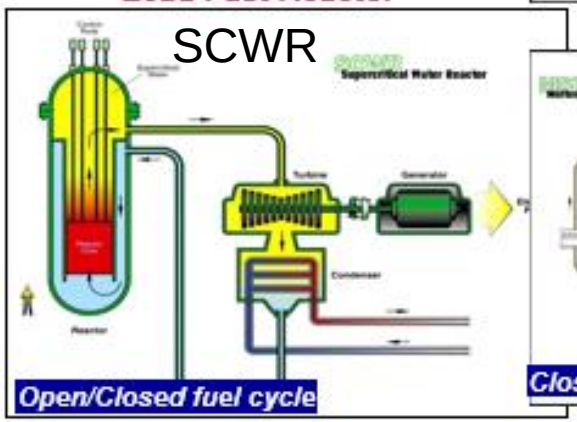

Lead Fast Reactor



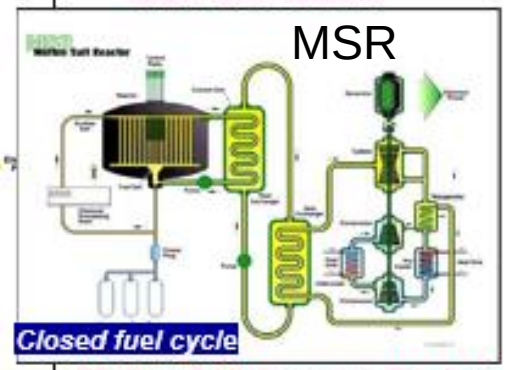

Gas Fast Reactor




Very High Temperature Reactor (thermal spectrum)

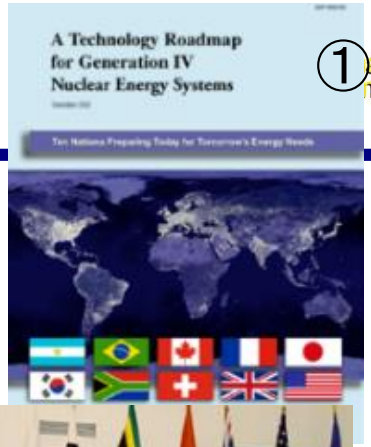



Super Critical Water Reactor (only thermal concept in GIF)




Molten Salt Reactor (Fast or thermal spectum)

# GIFの経緯・歴代のGIF議長



これまでの経緯：

2001年　GIF憲章の署名

2002年　6つの革新的原子力システム選定
GIF技術ロードマップの完成 ＜①＞

2005年　枠組協定（FA）の署名 ＜②＞

2006～2010年　6つのGIFシステム全てについて、
「取決め」或いは「覚書」を署名

【歴代のGIF議長】

2003年～　初代議長
米国　マグウッド氏
元DOE原子力局長
元NRC委員
OECD/NEA事務局長

2006年～　第2代議長
仏国　故ブシャール氏
元仏原子力庁（CEA）
長官付特別顧問

2010年～　第3代議長
日本　佐賀山氏
文部科学省参与
元JAEA次世代部門長
GIF名誉議長

2013年～　第4代議長
米国　ケリー氏
元DOE原子力局次官補代理
ANS現会長
GIF名誉議長

2016年～　第5代議長
仏国　ゴーシェ氏
仏CEA
原子力開発前局長

2019年～　第6代議長
日本　上出氏
文部科学省参与
JAEA高速炉・新型炉部門
副部門長

# 各国の６炉システムにかかる協力への参加状況

| | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SFR | | | ● | ● | ● | ● | ● | | | ● | ● | ● |
| VHTR | ● | ● | ● | ● | ● | ● | | | ● | ● | ● | ● |
| LFR | | | Planned Oct 2019 | | ● | ● | ● | | | ● | | ● |
| SCWR | | ● | ● | | ● | | ● | | | | | ● |
| GFR | | | | ● | ● | | | | | | | ● |
| MSR | ● | ● | | ● | | | ● | | ● | ● | | ● |

● : signatory of System Arrangement
● : signatory of Project Arrangement
● : signatory of MoU

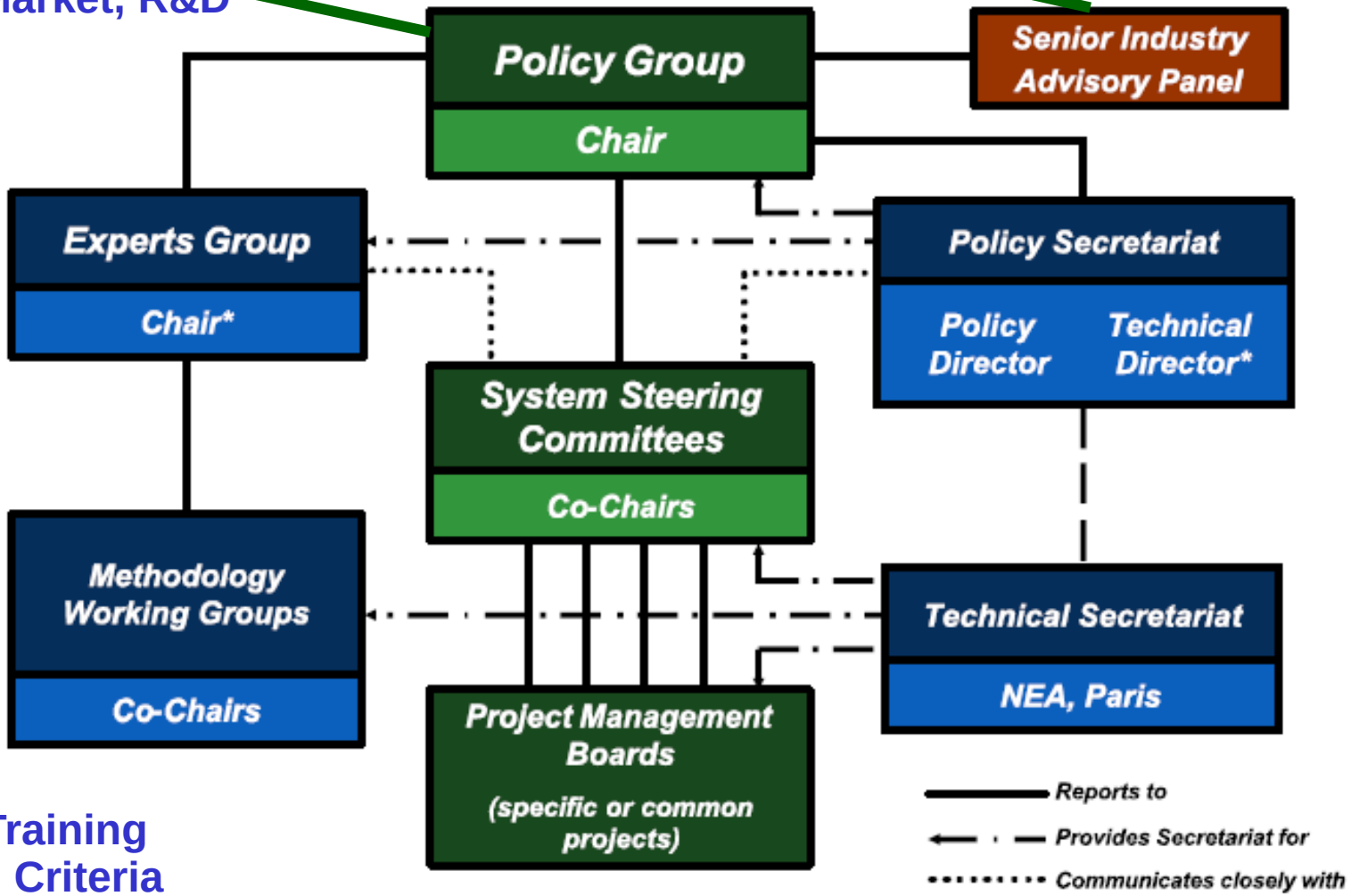
# GIFが掲げる第4世代炉の開発目標

| | |
|---|---|
| 安全性と信頼性 | **SR-1　安全性と信頼性**<br>・優れた操業時の安全性及び信頼性を有すること |
| | **SR-2　炉心損傷**<br>・炉心損傷の頻度が極めて低く、その影響も極めて小さいこと |
| | **SR-3　緊急時対応**<br>・事故収束をプラント敷地内で図り、プラント敷地外での緊急時対応が不要になること |
| 持続可能性 | **SU-1　資源有効利用**<br>・大気汚染を伴わない持続可能なエネルギー供給源であること。また、世界規模のエネルギー供給において、長期にわたる安定したシステムの利用が可能であり、効率的な燃料の利用が可能であること |
| | **SU-2　廃棄物の最小化と管理**<br>・放射性廃棄物の発生を最小限に抑えることで、それに伴う将来の長期的な負担を大幅に軽減すること。また、それにより、公衆の健康確保、環境保全が容易になること。 |
| 核拡散抵抗性と核物質防護 | **PR&PP　核拡散抵抗性と核物質防護**<br>・拡散及び盗難されにくく、並びに転用が困難であること。また、テロ行為に対する物理的防護がなされていること。 |
| 経済性 | **EC-1　平均コスト**<br>・他のエネルギー源よりもライフサイクルコストで優位性をもつこと |
| | **EC-2　資本のリスク**<br>・他のエネルギープロジェクトと同程度の財務リスクであること |

# GIFの組織構成

Led by Chair and Vice Chairs (Regulation, Market, R&D collaboration)

Market needs, Industrial requests etc.




WGs:
- Economics,
- PRPP,
- Risk & Safety

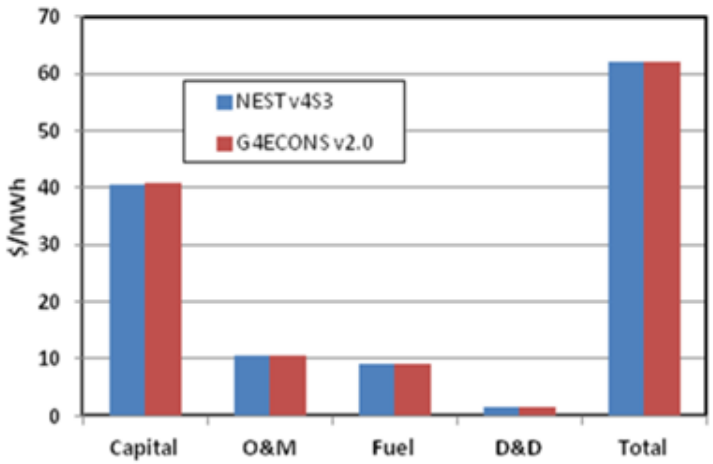
TFs:
- Education & Training
- Safety Design Criteria
- R&D infrastructure

Six reactor systems & R&D projects

# 手法開発WGとTF

## EMWG – Economics Modelling WG

- だれでも利用できる第４世代炉の経済性評価ができるG4ECONS手法を開発。
- 第４世代炉の コスト評価、コストアップ要因の特定に使える評価ガイドライン




**Benchmarking (G4ECONS vs. IAEA NEST)**

See: https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9364/economics
Including “Cost Estimating Guidelines” & “Impact of Increasing Share of Renewables”

## PRPPWG – Proliferation Resistance and Physical Protection WG

- 炉の設計の初期段階で使える、PRPP特性を評価、向上させる手法を開発。
- 各炉システムの運営委員会と協力してPRPP白書を作成

ACCIDENT INITIATORS → SYSTEM RESPONSE → CONSEQUENCES

THREATS → SYSTEM RESPONSE → OUTCOMES

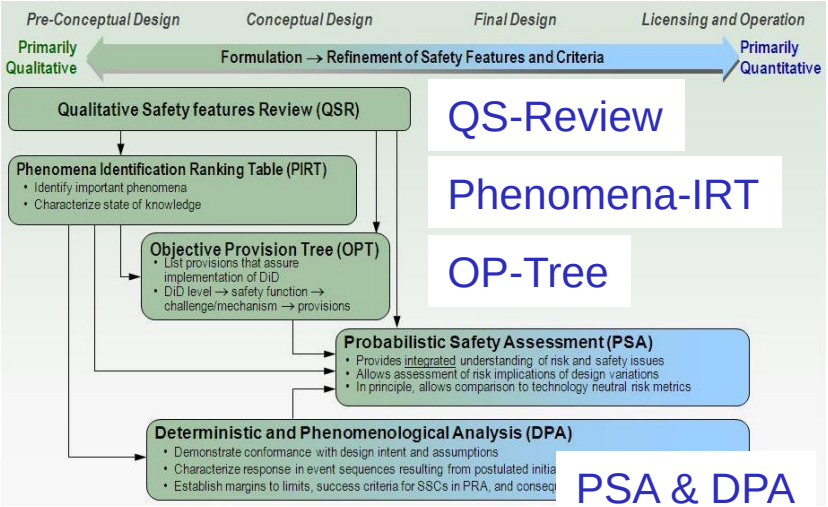
- *Safety and PR&PP should be considered from the earliest stages of design*
  - *Flow diagrams: preliminary safety hazard and PR&PP target identification and categorization*
  - *Physical arrangement: external events shielding, access control*

See: https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9365/pr-pp
Including “Evaluation Methodology Report”, “Workshop materials” & “Case Study Report of ESFR”

# 手法開発WGとTF

## RSWG – Risk and Safety WG

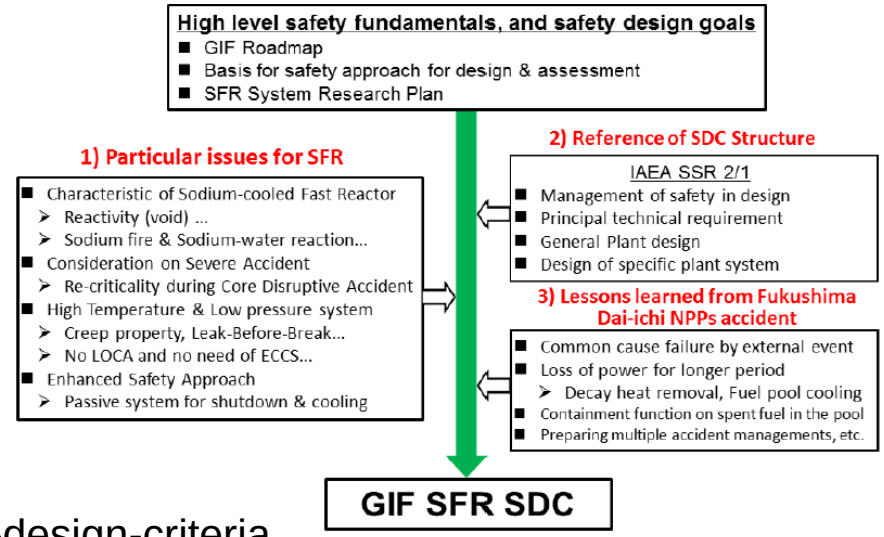
- Integrated Safety Assessment Methodology (ISAM)の開発
- 各炉システムに対するISAMの適用と安全系にかかる白書の作成




See: https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9366/risk-safety
Including "ISAM Guideline" & "Safety Assessment Reports: 5 Systems"

## SDC-TF - Safety Design Criteria TF

- ナトリウム冷却炉に関する安全設計要件とガイドラインの作成
  - IAEA, OECD/NEA WGSAR、各国規制機関からのレビューとコメント対応
- LFR、VHTRなど他の炉システムへの拡張を実施中




See: https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_93020/safety-design-criteria
Including "SFR SDC" & "Safety Approach and Design Conditions, SFR SDGs"

# Education and Training TF – ETTF

Webinar:
(ネットを介した
Interactive Lecture)

テーマ：炉、サイクル、手法、様々な開発プロジェクトとその教訓

講演者：エキスパートから博士研究員まで

**Series 1: Atoms for Peace - The Next Generation**

- Webcast: 29 September 2016
  Presenter: Dr. John Kelly, Department of Er
  gy, USA

Watch WEBCAST | DOWNLOAD PRESENTATION | VIDEO

**Series 2: Closing the Fuel Cycle**

- Webcast: 19 October 2016
  Presenter: Prof. Myung Seung Yang, Institu
  of Energy and Environment
  Youngsan University, Republic of Korea

Watch WEBCAST | DOWNLOAD PRESENTATION | VIDEO

**Series 3: Introduction to Nuclear Reactor Design**

- 22 November 2016
  Presenter: Dr. Claude Renault, CEA, Franc

Watch WEBCAST | DOWNLOAD PRESENTATION | VIDEO

**Series 4: Sodium Cooled Fast Reactors**

- 15 December 2016
  Presenter: Dr. Bob Hill, ANL, USA

Watch WEBCAST | DOWNLOAD PRESENTATION | VIDEO

**Series 33: Gen IV Coolants Quality Control**

25 September 2019
Presenter: Dr. Christian Latge, CEA, France

Watch WEBCAST | DOWNLOAD PRESENTATION

**Series 34: Passive Decay Heat Removal System**

23 October 2019
Presenter: Dr. Mitchel Farmer, ANL, USA

REGISTERHERE ▶

**Series 35: Czech Experimental Program on MSR Technology Development**

12 November 2019 (8:30 am EDT)
Presenter: Dr. Jan Uhlir, Research Centre Řež, Czech Republic

**Series 36: TRISO Fuel**

December 2019
Presenter: Dr. Madeline Feltus, DOE, USA

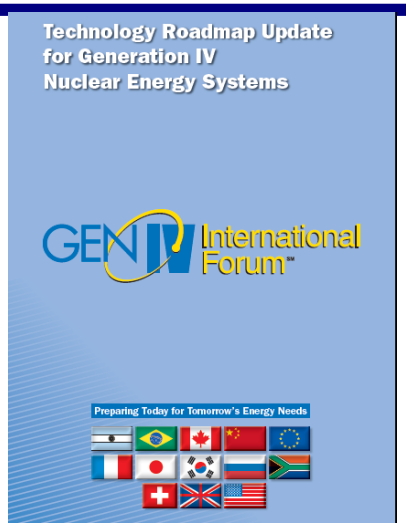
**Series 37: Thermal-Hydraulics in Liquid Metal Fast Reactors**

January 2020
Presenter: Dr. Antoine Gerschenfeld, CEA, France

https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_84279/webinars

# GIFの成果物（公開）

- ***Technology Roadmap Update 2014***
  - 各炉システムの開発協力の進展と次の10年のマイルストーン
- ***Annual Reports***
  - 年報：各炉システムの開発協力のハイライト、炉型横断の手法開発WG、TFの成果
- ***R&D Outlook 2018***
  - 今後10年をみた各炉システムの開発協力にかかる主要目標と研究開発活動
- ***IAEA会議：Climate  Change and the Role of Nuclear Power****, 7 to 11 October 2019*
  - *"Development and deployment of advanced nuclear power technologies to increase the use of low-carbon energy," Hideki KAMIDE, Sylvestre PIVET,*



www.gen-4.org/gif

# 外部機関との連携

- IAEA, OECD-NEA WGSAR: 市場、安全、研究開発協力
  - ***13th GIF-IAEA annual Interface meeting (2019),***
  - ***Working Group on the Safety of Advanced Reactors (WGSAR)***

- 政府レベルの国際機関
  - IFNEC, NICE Future
- 多国間研究協力計画
  - EU Horizon 2020 (PUMMA, BONSAI)
- 企業との連携
  - SMR Vendor, Innovations

NICE Future; Breakthrough side event of CEM10, 2019

# PRPP WGの取り組み

# GIF PRPP WGの概要

- GIF PRPP目標
  - 原子力システムが、転用や核兵器利用物質の盗取について、全く非魅力的で、もっとも望ましくないという保証を高め、さらに、テロ行為に対する核物質防護を増強する。
- WGのミッション
  - GEN IV原子力システムの核拡散抵抗性 (PR)と核物質防護 (PP)についてシステマティックな評価のための評価手法を開発、実証する。
- 参加国・組織
  - 米国、カナダ、EU、フランス、英国、日本、韓国、IAEA（オブザーバー）、ロシア、中国、南アフリカ
- Co-Chairsはイタリア人 (G.Cojazzi)、米国人 (L. Cheng、B.Cipiti)
- 第1回全体会合：2002年12月
  - 全体会合：年1回（2006までは年3回）、
  - テレコン：月1回（2009までは隔週）
  - アウトリーチを目的としたワークショップ、等

# GIFにおけるPRPP評価の目的

- 次世代原子力システムの概念設計の可能なもっとも早期の段階で設計プロセスにPRPP特性を導入する
- 設計と保障措置の進展に伴って、詳細情報が増え、これがPRPP評価モデルに組み込まれる：設計と共に進展(詳細化)
- PRPPは安全性や経済性と共に検討されるべき
- PRPP評価結果は政策立案者による選択のベースとなる

# 評価の枠組

標準的な安全性評価アプローチと同じ

**チャレンジ**
- 脅威の定義

例）
PR:秘密裏転用/不正使用
　ブレイクアウト,秘密裏施設
PP:盗取、サボタージュ

↓

**システム応答**
- システム要素の特定
- ターゲットの特定と分類
- パスウェイの特定と精緻化
- 指標値の見積もり評価 (Estimation)

内在的特性:
　原子力に係る技術そのものが持つ特性

外在的措置:
　制度的取り決め、協定

↓

**結　果**
- パスウェイの比較
- システム評価及び結果の提示

指標と尺度による表現

# 拡散抵抗性６　指標

- **核拡散の技術的困難性**　（ＴＤ，Proliferation　Technical Difficulty）
  技術が本来内包する拡散行為に対する困難性。セル等の核物質の取り扱いの困難性等。
- **拡散コスト**　（ＰＣ，Proliferation Cost）
  既存施設あるいは新規施設を用いる拡散行為に必要とされる経済的・人的投資。
- **拡散時間**（ＰＴ，Proliferation Time）
  拡散行為にかかる時間。
- **核分裂性物質のタイプ**　（ＭＴ，Material Type）
  核爆発装置に利用する際に影響する核物質の特性。

主として内在的特性によって決まる

- **検知確率**（ＤＰ，Detection Probability）
  拡散行為を（保障措置により）検知する確率。
- **検知リソースの効率**　（ＤＥ，Detection Resource Efficiency）
  国際保障措置を適用するのに必要な人、装置、資金。

内在的特性と外在的措置の両方によって決まる

# 核物質防護３　指標

- **敵の成功確率**　（PAS: Probability of Adversary Success)

  敵がパスウェイを成功裡に完遂し、結果を発生させる確率。

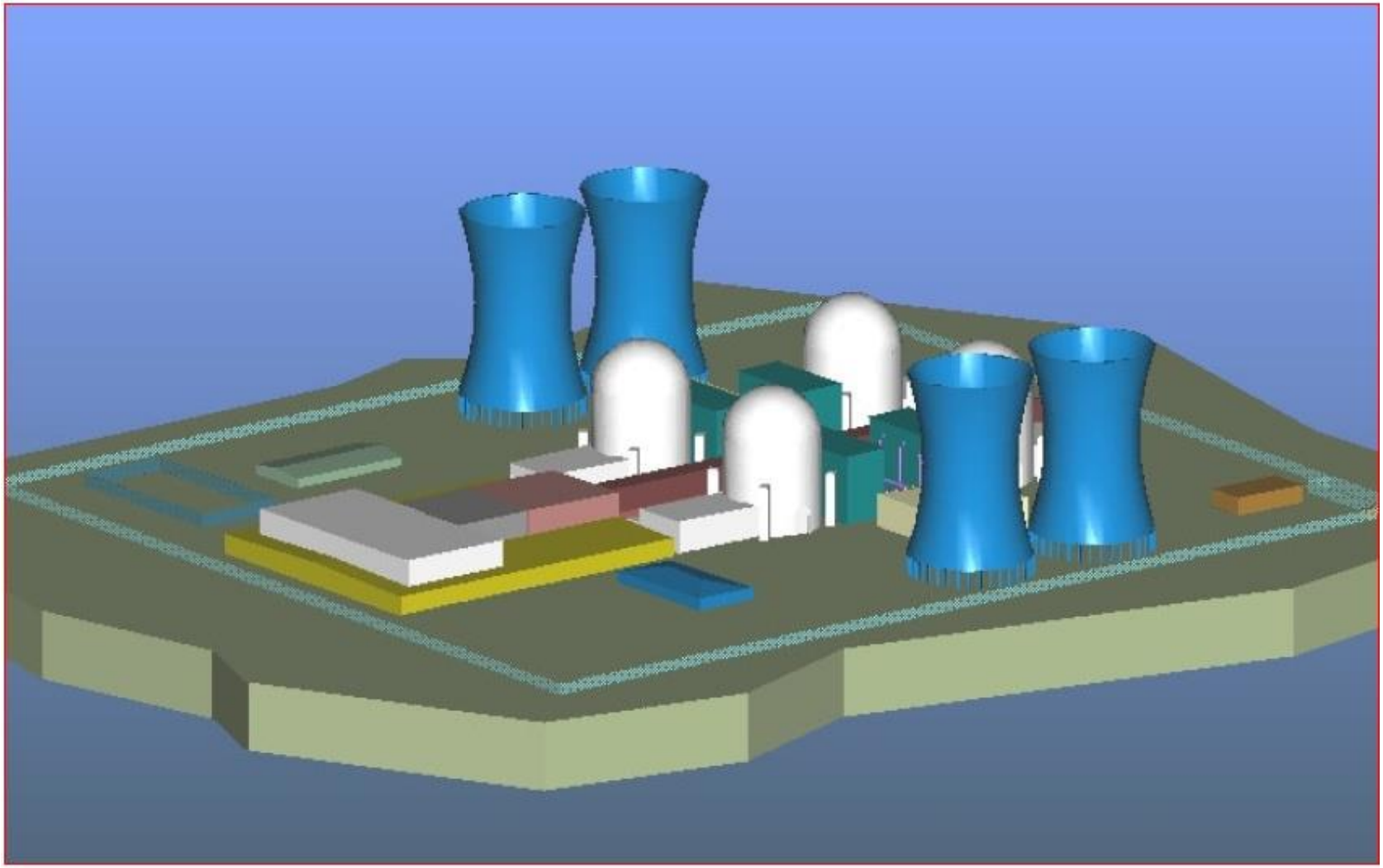
- **結果影響**　（C: Consequences）

  敵がパスウェイを成功裡に完遂することから生じる影響

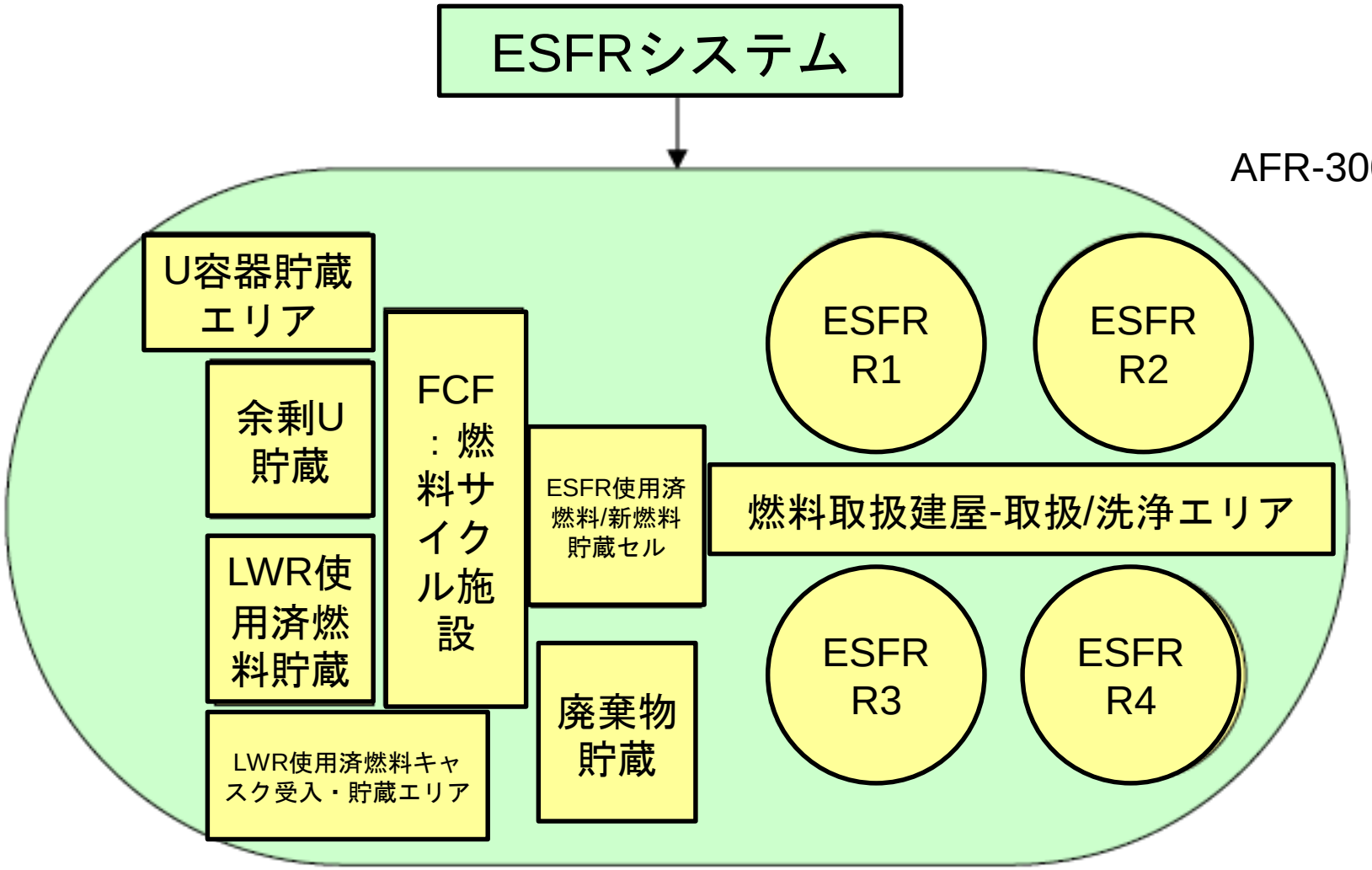
- **核物質防護リソース**(PPR: Physical Protection Resources)

  バックグランドスクリーニング、検知、妨害、緩和のようなPPを提供するのに必要な人員、能力、コスト、及び脅威の高度化に応じて変化するリソース需要の感度。

# ESFR（仮想ナトリウム冷却炉）のデモスタディ



# ESFRシステム要素


ESFRシステム
AFR-300
U容器貯蔵エリア
余剰U貯蔵
LWR使用済燃料貯蔵
LWR使用済燃料キャスク受入・貯蔵エリア
FCF：燃料サイクル施設
ESFR使用済燃料/新燃料貯蔵セル
廃棄物貯蔵
ESFR R1
ESFR R2
燃料取扱建屋-取扱/洗浄エリア
ESFR R3
ESFR R4

# ESFRケーススタディ

- 主な目的
  - ✓ GIFのPRPP手法を第IV世代の原子炉／燃料サイクル全体に実施
  - ✓ 様々な設計オプションを比較することにより、本手法が特に設計者や意思決定者のために有意の結果を生成できることを実証する。
  - ✓ 本手法の将来のユーザーのためにPRPP評価の事例を提供する。
- 対象シナリオ
  1. 秘密裏の物質転用
  2. 秘密裏の施設不正使用
  3. ブレイクアウトをした上で公然の転用又は不正使用
  4. 兵器利用可能物質の盗取又は施設システム要素への妨害破壊行為
- 使用するアプローチ：定性的アプローチ（専門家によるジャッジメントを利用して抵抗性指標を評価する）
- 設計バリエーション
  - ✓ TRU転換比（0.73、0.22、1.00、1.12）
- 報告書を2010年に公開(OECD/NEAサイト上）

# ケーススタディからの知見

（転用、不正使用、ブレイクアウト、盗取・サボタージュ）

1. PRPP評価は定性的解析から始めるべき
   評価(研究)、仮定の脅威、ターゲットの特定、システム要素などの範囲が明確になる
   ⇒定性的解析の詳細なガイダンスが必要
2. 専門家の役割が必須
   ⇒PRとPPの専門家と専門家聴取技術が必要
3. 定性的解析は予備設計レベルで貴重な結果を提供する。TD,PD, PC, MTについては直接的な表現が可能。DEと(特に)DPは定量化が難しい

# 日本の新型炉・サイクルシステム開発の観点からの課題と方向性

- 設計者との共同作業の重要性
  - ✓ 拡散抵抗性評価及び抵抗性強化のための検討は設計者と核拡散抵抗性・保障措置専門家の共同作業が必須
  - ✓ 日本は非核兵器国で唯一大規模燃料サイクルを保有し、運転する国
  - ✓ その確立の過程における保障措置分野での開発、適用の経験に基づく共同作業により得られる成果・知見は国際的にも貴重
  - ✓ 一方で機微情報、知的財産権、商業機密問題があり国際枠組み下での検討は難しいのが現状

# PRPP白書への取り組み

# PRPP白書

- 第4世代炉のさらなる研究開発のために、現在におけるPRPPの特性を示した白書を時機に応じて発行している。
- （厳密に）手法を適用するものではない
- 前回の発行は2011年
- PRPP WGと各炉システムのSSC（運営委員会）が共同で執筆
- 日本は超高温ガス炉（VHTR）を担当

# 今回の改定における内容

- システム要素図の提示（次項）
- 核拡散抵抗性(PR)の特長の説明
  - ✓ 秘密裏に行う核物質の転用または生産
  - ✓ ブレイクアウトの検討
  - ✓ 秘密施設の建設の可能性
- 核物質防護(PP)の特徴
  - ✓ 核兵器を作るための核物質の盗取
  - ✓ サボタージュの可能性

# 結論の一例

- VHTRの特徴である高次化が進んだプルトニウム、および TRISO燃料が全てのシステム要素の核拡散抵抗性・（サボタージュを除いた）核物質防護性を向上させる大きな長所となる

# まとめと今後の要望

- PRPP性能に顕著にする設計概念の特徴をとらえるべく、白書を鋭意執筆中
- 将来の原子力システムに有用な設計特性を勧告したい
- 炉設計だけではなく、PRPP特性のような、システム全体の長所・短所を明らかにするような研究・開発が今後求められる

# 招待講演 Ⅲ

## 「海は我が人生」

～ヨットマンとしての考えはエネルギー問題に通ずる～

小説家　鈴木　光司
（代表作：リング、らせん、楽園など）

# 特別講演Ⅰ

## 「変革時代の原子力、どうする？」
## －国家安全保障と原子力－

東京工業大学名誉教授　齋藤　正樹

日本核物質管理学会第 40 回年次大会（2019 年 11 月 19 日,20 日）

# 変革時代の原子力、どうする？

## −国家安全保障と原子力−

## 【特別講演要旨】

東京工業大学　名誉教授

齊藤正樹

# 目次

「第１部」はじめに
1. 原子力を取り巻く情勢
2. 原子力１２の危機
3. 第１３番目の原子力の危機

「第 2 部」国民の理解と信頼の回復
4. 福島第一原子力発電所事故
4.1 国としての責任（反省）の明確化
4.2 事故検証（学習）の実施
5. 原子力災害即応支援部隊の創設（克服）
6. 原子力の多様性

「第 3 部」国家安全保障への貢献
7.「国家安全保障」と「経済力」及び「技術革新力」
8. 海洋都市（多目的原子力船団群コロニー）構想
8.1 多目的原子力船団群の特徴
8.2 多目的長寿命原子力船（軽水炉、He ガス炉）の概要
9. 「核兵器のない世界」に向けて（核不拡散の深化）
9.1 プルトニウムの核拡散抵抗性と分離プルトニウム
9.2 ウランの核拡散抵抗性と回収ウラン

「第４部」まとめ

# 「第１部」はじめに

## １．　原子力を取り巻く情勢

### 「国内情勢」

- 原子力船「むつ」、新型転換原型炉「ふげん」、高速増殖原型炉「もんじゅ」、何れの原子力国家プロジェクトも、残念ながら実用化に結び付かなかった。日本の原子力政策に大きな欠陥があるのではないか？（現状のままでは、「高温ガス炉」の実用化も困難？）
- 再稼働は遅々として進まない。
  （「新知見反映（バックフィット）」の課題など）
- 運転年数の長い原発は時期が来れば徐々に廃炉になるが、新規増設の見込みは皆無である。
- 国内では電力の自由化・競争激化。海外では輸出戦略が大きく後退。この様な状況が続けば、日本の原子力産業は弱体化し、人材が散逸。産業の統廃合が避けられない。
- 分離プルトニウム問題（原子力委員会は自主的に「保有量の上限」を設定。→再処理施設の稼働に影響）
- 政府は、2018 年第 5 次「エネルギー基本計画」で、再生可能エネルギーを「主力電源」に、原子力の依存は「可能な限り低減」させると公表。
- 原子力の国家戦略の将来が見えない。非常に不透明。責任のある「司令塔」がない。
- 福島第一原子力発電所の事故処理（多額の経費と長期間）
- 原子力研究・開発施設の廃止措置（多額の経費と長期間の研究・開発人材投入（研究・開発費と人材不足で研究・開発の停滞））
- 社会や若者が原子力に“未来（夢）”を感じなくなった。優秀な学生が原子力に来なくなりつつある。
- 大学の原子力教育資源の危機。大学の原子力教育の危機。
- 少子高齢化。（優秀な若者の獲得をどうするか？）

### 「国際情勢」

- 核拡散問題
  ・北朝鮮の核・ミサイル問題。
  ・米国のイラン核合意からの離脱問題。

・米ロの中距離核戦力（INF）条約の廃止問題。

### ➢ エネルギー地政学の変化

（米国）

・「シェールガス革命」により輸入依存から脱却し、エネルギー余剰戦略「世界のエネルギー支配」に移行。中東やロシアのエネルギー戦略に対抗できる。

（中国）

・2009 年に、米国を抜いて、「世界最大のエネルギー消費国」となり、その差は年々広がっている。

・「エネルギーの安定確保」が成長の絶対条件で、原子力開発や革新的なエネルギー技術開発は重要な国家戦略。

・「一帯一路」も資源・エネルギー確保とそれを運ぶ海上輸送路を確保する重要な国家戦略。

・中国経済が平成の後半（2010 年）に日本を追い越した。令和の時代には、米国も超える情勢である。

## ２．原子力１２の危機

原子力を取り巻く情勢より、以下の様な危機が挙げられる。

① 原子力政策の危機
② 原子力技術開発の危機
③ 原子力教育（次世代人材育成）の危機
④ 既設発電所再稼働遅延の危機
⑤ 新規増設が見通せない危機
⑥ 海外戦略行き詰まりの危機
⑦ 原子力関連企業が撤退しつつある危機
⑧ 社会や若者から見放されつつある危機
⑨ 政治家が後ろ向きになりつつある危機
⑩ 原子力先進国から脱落しつつある危機
⑪ 朝鮮半島の危機
⑫ 中東一触即発の危機

## ３．第 13 番目の原子力の危機

第５次「エネルギー基本計画」では、2030 年に向けて、再生可能エネルギーを「主力電源化」に、原子力は、「依存度を可能な限り低減させる」方針の下に、エネルギーミックスにおける電源構成比率（再生可能エネルギー：22～24%、原子力：20～22%）の実現を目指すとしている。

何故、「可能な限り原子力依存度を低減」させる？　これはまさに「第 13 番目の原子力の危機」である。

日本の原子力は、まさに「変革の時代」に突入した。
どうする？

# 「第 2 部」　国民の理解と信頼の回復

## ４．福島第一原子力発電所事故

### 4.1　国としての責任（反省）の明確化

事故後、これまでの原子力安全行政を見直し、独立性の高い原子力規制委員会等を新設したが、事故当時の政権いかんに係らず、過去に、国が原子力発電所の安全審査・認可したのは事実である。このような事態をもたらしたことについて、国民に対して国としての責任を明確にすべきである。

### 4.2　事故検証（学習）の実施

これほど悲惨な災害になった原因（地震や津波だけが原因か？住民避難対応も含めて）や事故（炉心溶融）進展状況などの検証を国としてどうすべきか？

事故現場のクリーンアップは重要で、（特に発電所の外は）急ぐ必要であるが、この事故は「人類の共有教材」であり、未だに事故（炉心溶融）進展状況など不明な点が多々ある。米国 TMI 事故の国際チームは長年かけて、最終的に溶融炉心物質が原子炉容器内で保持できたメカニズムを解明した。

事故の貴重なデータが散逸する前に、事故当時の運転情報やサンプル

を「第３者機関」が管理し、分析・検証すべきである。決して犯人探しではなく、人類にとって「貴重な教材が消えてゆくのを防ぐ」ためである。

平成 17 年 4 月 25 日に発生した「福知山線列車脱線事故（107 名が死亡、562 名が負傷）」、昭和 60 年 8 月 12 日に発生した「日本航空 123 便墜落事故（乗客乗員 524 名のうち、520 名が死亡）」、1986 年 1 月 28 日に発生した「チャレンジャー号爆発事故（7 名の乗組員が死亡）」など、いずれも「第３者機関」が検証することによって貴重な再発防止策を学んできた。

「提言」

① 「国会事故調査委員会」の後続として、国会内に、IAEA を含む各国の専門家による「国際技術検証委員会（仮称）」を早急設置する。

② 先ずは、「福島原子力発電所事故検証基本計画（事故検証１００年の計）」を策定し、その基本計画に基づいて、事故進展の技術的な検証を進めるべきである。

③ この「事故検証基本計画（事故検証１００年の計）」に基づいて、事故現場のクリーンアップを進めるべきである。

## ５．原子力災害即応支援部隊の創設（克服）

福島第一原子力発電所事故後、原子力基本法が改正され、「原子力規制委員会」と「原子力防災会議」が設置されたが、国民の原子力に対する信頼は回復した？

原子力文化振興財団の世論調査（2017 年 10 月）によると、原子力のイメージは否定的（危険（68.5%）、不安（57.3%））である。

原子力発電の再稼働は住民の信頼・安心を取り戻すことが最優先であり、地方自治体は、住民の信頼・安心の回復なしに再稼働の同意は困難である。また、原子力防災訓練などの負担が大きい悩みもある。

原子力施設の安全性の強化は当然である。事故は起こることを前提に常に備えるべきである。しかし、浜岡原子力発電所の津波対策（海抜 22m の巨大壁）の総工費は約１５００億円で、東京五輪の主会場となる新国立競技場（１４９０億

円）とほぼ同額である。しかも、それで十分なのか？と住民に不安が残る。

火災が発生したら消防が、事件が発生したら警察が、テロが発生したら警察・消防・海上保安庁・自衛隊が連携して公衆を保護する。原子力災害発生防止は第１に事業者の責任ではあるが、大災害に発展した場合は、事業者だけでは対応が不可能であることは福島原子力発電所の事故で経験した。

一方、原子力規制委員会はテロ対策用「特定重大事故等対処施設」が設置期限までに未完の場合は、翌日から原子炉を停止と通告した。期限までに間に合わなかったとしても、リスクが格段に増大する訳ではない。翌日から稼働停止させなければならない「相応の根拠」がわからない。規制機関は規制の在り方（何故そのような規制をする必要があるか）について「説明責任」がある。

原子力施設に対する核テロは、電気事業者や従業員が憎いわけではない。核テロは国家に対する敵対行為であり、国家が前面に出て対応すべき課題である。従って、他省庁（防衛省、外務省、海上保安庁、警察庁など）と強い連携が重要である。単なる追加設備による防御だけでなく、各省庁との連携により、原子力施設を標的にした飛翔体等の敵対行為は、確実に迎撃する防御策（「代替案」）もある。それが、「核テロに対する強い抑止力」にもなる。

特に、テロ対策には「想定外を想定」する必要がある。いつ、何が起こるか予測は難しい。従って、「想定外事象」にも対応する優れた”指揮官（リーダー）”と常に鍛えられた強い「緊急時即応支援部隊」の常設が不可欠である。（この部隊は、自然災害時には自治体を支援し、住民の保護・救助も任務とする。）

「提言」

① 「国民の防護」、「自治体の支援」、「事業者の支援」、「国の危機管理能力の強化」等を目的とする「原子力災害即応支援部隊」の創設を提案する。
② 特に、原子力施設への「サイバー攻撃」に対する対応が急務である。
③ 原子力規制委員会は「独立性」が認められている。しかし、決して「孤立した機関」にならないことを期待する。「多重防護」の考え方に基づく「“合理的”な安全規制」が重要である。

## 6. 原子力の多様性

原子力は「環境負荷低減（環境安全保障）」や「エネルギー安全保障」だけでなく、「医療・福祉への貢献」、「農業・食料・水資源への貢献」、「宇宙開発、海洋開発への貢献」など「多様性」がある。

日本は、領海及び排他的経済水域の面積（海外の領土を含まない場合）では、アメリカ合衆国、ロシア、オーストラリア、インドネシア、カナダに次いで第 6 位（447 万 $km^2$：国土の約１２倍）である。体積（海外の領土を含まない場合）では、アメリカ合衆国、オーストラリア、キリバスに次いで第 4 位（15.8 百万 $km^3$）を誇る世界有数の「海洋国家」である。

2019年11月1日に公表された「第11 回科学技術予測調査」によると、“海洋ポテンシャルを利用し、海に新しいエコシティと新しいエコライフスタイルを実現する「海洋都市」の建設技術”の科学技術的実現の見通し時期は2033年である。社会的実現の見通し時期（日本を含む世界のどこかでの科学技術的な実現に続き、日本で社会的に実現する時期）は2048年である。

我が国の「持続可能社会」と「国家安全保障」のために、領海及び排他的経済水域（海上、海中、海底）の開発及び利活用が将来の大きな課題である。
（第8章に「海洋都市建設」に向けた構想提案を記述する。）

一方、「第 11 回科学技術予測調査」によると、“長期的視点に基づく、人類の生息空間拡大のための、宇宙空間や月及び火星での「宇宙基地」の建設技術”の科学技術的実現の見通し時期は 2040 年である。社会的実現の見通し時期は 2052 年である。今世紀半ばに、人類は宇宙空間へと活動の領域を広げる。その活動には、太陽エネルギーの利用は当然であるが、太陽の届かない場所や火星及び深宇宙では原子力利用が不可欠である。（原子力の宇宙開発への貢献については、非常に重要な課題であるが、別の機会に譲る。）

以上の様に、原子力分野は、エネルギー分野に包含されるのではなく、その外に食み出している分野がある。この食み出した分野は、再生可能エネルギーでは絶対対抗出来ない。

また、気象条件に頼る再生可能エネルギーは、大きな気象変動や異常気象（気象危機）が“通常”に成りつつある現状を考えると、将来はその「信頼性に大きな問題」があり、「分散的な補助電源（地産地消）」としては理解できるが、我が国のベース電源としては、「リスクが非常に大きい選択肢」であることを理解すべきである。【国のエネルギー政策の問題点①】

「原子力発電所」の賛否は自由だが、「原子力」を否定することは病気になっても、「レントゲン撮影、CT 断層撮影、PET 断層撮影」などによる診断を否定すること、また、飛行機に搭乗する際の「手荷物の X 線検査」を否定することに等しいことを、原子力を反対する人は理解すべきである。

人類が受けてきた太陽の恵みは測り知れない。しかし、太陽も巨大な原子炉。近づけば危険である。要は、人間社会が“原子力とどう向き合ってゆくか？”である。

「提言」

① 原子力は、再生可能エネルギーでは太刀打ちのできない「多様性」を持っている。$CO_2$ フリーのエネルギーとしての利用のみならず、「医療・福祉」、「農業・食料・水資源」、「海洋開発」、「宇宙開発」などの「多様な分野」の研究・開発の推進も、「我が国や国際社会の平和、安定、福祉そして繁栄」の実現に多いに貢献する。

② 特に、領海及び排他的経済水域の面積では、世界第 6 位、その体積では、世界第 4 位の「海洋国家」である日本は、「国家安全保障」のために、領海及び排他的経済水域（海上、海中、海底）の開発及び利活用が重要である。（第 8 章に「海洋都市建設」に向けた構想提案を述べる。）

# 「第 3 部」国家安全保障への貢献

## 7.「国家安全保障」と「経済力」及び「技術革新力」

日本の国益と国家安全保障の目標が、以下の様に公表されている。(外務省 HP)

「国益」

- 日本の平和と安全を維持し、その存立を全うすること。

- 日本と国民の更なる繁栄を実現し、我が国の平和と安全をより強固なものとすること。
- 普遍的価値やルールに基づく国際秩序を維持・擁護すること。

「目標」

- 抑止力を強化し、我が国に脅威が及ぶことを防止する。
- 日米同盟の強化、パートナーとの信頼・協力関係の強化等により地域の安全保障環境を改善し、脅威発生を予防・削減する。
- グローバルな安全保障環境を改善し、平和で安定し、繁栄する国際社会を構築する。

「国家安全保障」の対応には、確かに「軍事力」は非常に重要な要素ではあるが、近年は、「経済力」や「技術革新（イノベーション）力」等の「経済安全保障」の方がより密に関係し、重要である。最近の新しい戦い方は、従来の様に空母やステルス戦闘機、巡航ミサイルを使うわけではなく、「経済戦争」や情報・通信・AI・サイバーを含む「技術革新（イノベーション）戦争」である。（貿易摩擦、ハイテク覇権争い、輸出管理・禁輸措置、経済封鎖、関税措置など。）

また、「軍事力」は、経済や「術革新（イノベーション）に大きく依存し、強い「経済力」や高い「技術革新（イノベーション）力」がないと、より高度な「軍事力」は維持できない。

政府は、2020 年 4 月から、外交・安全保障政策の司令塔である国家安全保障局に経済分野を専門とする「経済班」を立ち上げることを決めた。「経済」と「外交・安全保障」が密接に絡む問題に対処する。当面は次世代通信規格「５G」で先行する中国などを念頭に米国と連携して、知的財産の流出や最先端科学技術流出防止を狙う。

わが国の「エネルギーの基本計画」においては、地政学的リスク「日本を取り巻く国際情勢（米国と中国の激突危機の時代）、北朝鮮の核・ミサイル危機、中東の一触即発危機など）」を十分に考慮したエネルギー政策（原子力政策）を立てることが重要である。

第 5 次「エネルギー基本計画」の 2030 年における目標で、火力（LNG、石油、石炭）の電源構成比率は半分以上の 56%で、その全てが海外の天然資源に依存

している。【国のエネルギー政策の問題点②】

将来に向けて、「原子力の依存度を可能な限り低減する」のではなく、「海外の化石燃料の依存度を可能な限り低減する」こと、更に、そして国家の安全保障上最も重要なエネルギーの安定供給（自給率の向上、更に将来は自給から輸出へ）」が我が国の新しいエネルギー国家戦略（「国家安全保障」）の基本である。【先に大戦では、日本はエネルギーを求めて始まり、悲惨な事態で終わった。】

原子力の「多様性」並びに「原子力基本法」及び我が国の国是である「非核3原則」の基に、「核軍縮」と「原子力平和利用と核不拡散」の積極的な推進は、我が国の国益である「我が国の平和と安全をより強固にし、我が国と国民の更なる繁栄を実現し、平和で安定した国際社会を構築する」ためには不可欠である。

特に、国際間の条約や協定【国家間の意志】に加えて、「核物質」や「核燃料サイクル技術」の核拡散抵抗性の向上【核不拡散の深化】は、「我が国の安全保障」のみならず、「国際社会の安全保障」や「核兵器なき世界」の実現に向けて非常に重要な課題である。

「提言」

① 将来に向けて、「原子力の依存度を可能な限り低減する」のではなく、「海外の化石燃料の依存度を可能な限り低減する」こと。
② そして「国家の安全保障上最も重要なエネルギーの安定供給（自給率の向上、更に将来は自給から輸出へ）」がエネルギー国家戦略の基本である。【その方策例を第8章で述べる。】
③ 我が国の国益（「国家安全保障」）のために、「原子力基本法」及び我が国の国是である「非核三原則」の基に、「核軍縮」と「原子力平和利用と核不拡散の両立」政策を積極的な推進すること。
④ 特に、核不拡散の深化（「核物質」や「核燃料サイクル技術」の核拡散抵抗性の向上）は、「我が国の安全保障」のみならず、「国際社会の安全保障」や「核兵器なき世界」の実現に向けて、非常に重要な課題である。【その具体的なアプローチ（方策）を第9章で述べる。】

## 8. 海洋都市（多目的原子力船団群コロニー）構想

戦後の復興は、「勤勉な国民」の「技術力向上（教育）」による優れた”「モノ」

つくり“とその「輸出」により外貨を稼ぎ、「経済力」をつけ、国の豊かさを得てきた。天然資源の乏しい我が国では、「輸出」が重要な国家の経済戦略の１つである。

また、「国家の安全保障上最も重要なエネルギーの安定供給（自給率の向上、更に将来は自給から輸出へ）」がエネルギー国家戦略の基本である。

前章で述べたように、日本は、領海及び排他的経済水域の面積（海外の領土を含まない場合）では、世界第 6 位であり、その体積（海外の領土を含まない場合）では、世界第 4 位を誇る世界有数の「海洋国家」である。

本章では、【ハード（原子力発電所）】を輸出するのではなく、【ソフト（エネルギー（電気、水素）、水、海洋資源など）】を輸出する新しい構想を提案する。それを可能にする「発電、水素製造、海水淡水化、海洋資源（生物・鉱物）研究開発、魚介類養殖など」を目的とした「海洋都市（多目的原子力船群コロニー）構想」について述べる。

## 8.1 多目的原子力船団群の特徴

① 地震や津波に対して強い安全性【耐震構造や津波対策低減:コスト削減】
② 緊急用冷却水（海水）が豊富：海が膨大なヒートシンク　【更なる安全性向上】
③ 万が一の緊急時には、移動して居住地域から離脱が可能【住民が避難するのではなく、発電所が移動する！】
④ 海外の沿岸だけでなく、我が国の離島、僻地、被災地域の「領海」や「排他的経済水域」及び「公海上」にも設置可能。

等が挙げられ、【新しい国内外のマーケットの開拓】の可能性がある。

また、以下の我が国の既存の技術が活用できる。

① 原子力船「むつ」の技術の活用
② メガフロートの技術の活用
③ 大型タンカー（LNG、石油、石炭鉱石など）の技術の活用
④ 大型客船の技術の活用

⑤ 「いずも型」護衛艦の技術の活用
⑥ 漁業・養殖の技術の活用
⑦ 海底ケーブルの技術の活用
⑧ 海洋探査技術の活用
⑨ 海水ウランの回収技術の活用
⑩ AI 技術の活用（自動化、省力化、無人化など）
⑪ 水中ドローンの技術の活用（船体の点検と周辺海域の監視など）

## 8.2 多目的長寿命原子力船（軽水炉、He ガス炉）の概要

① 発電（海底ケーブルで送電）、水素製造（液化タンカーで輸送）、海水淡水化、漁業・養殖、海洋資源開発等を目的とする。
② 領海内の場合は、沿岸に停泊し、電気と水を供給。（必要なら水素も）
③ 排他的経済水域や公海上の場合は、発電した「電気で水素を製造」し、大型タンカーで日本を始め各国に輸送。客船を従業員・家族の居住（病院、学校、郵便局、レストラン、劇場など）区域とする海洋都市（原子力船団群コルニー）を構築する。
④ 「小型長寿命モジュール炉システム」を開発する。（後述のマイナーアクチナイド（MA）の「可燃性毒物と親物質（Pu238 生成・燃焼）効果」を利用すると長寿命化が可能）【30 年以上燃料交換不要：30 年に一度、燃料交換と保守点検のため日本の母港に戻り、新燃料を積んだ新しい原子力船と交代する。】
⑤ 燃料に MA を添加すると、燃料中に Pu238 が生成するため高い核拡散抵抗性を有する。【核不拡散性が高い】
⑥ トリチウム水を（小型モジュール）軽水炉の冷却材として活用（領海外）できる。【トリチウム水問題の解決】
⑦ MOX 燃料でなくウランフリー母材（Zr 系や高温ガス炉用 SiC 系燃料）を使うと、プルトニウムの非常に効果的な燃焼（Deep Burning）が可能である。【分離プルトニウム問題の解決】

この構想は、経済産業省が掲げる「原子力イノベーションの課題」（①更なる安全性向上、②核不拡散、③放射性廃棄物対策、④エネルギーの多目的利用、⑤機動性、⑥自由化市場での経済性の追求）の他に、現在、我が国が抱えている「ト

リチウム水」、「分離プルトニウム」や「新規立地」などの問題も解決する。

特に、原子力施設や核燃料物質を海外に供給するのではなく、エネルギー（電力や水素）などを輸出するので、「核不拡散」への貢献も大きい。

例えば、北朝鮮の非核化後の日本の経済支援の一つとして、以前の様に軽水炉発電所を支援するのではなく、「多目的原子力船でエネルギー（電気や水素）を供給する国際貢献」も可能である。

世界的な化石燃料の枯渇は近い将来に必ず訪れる。すでに、自動車は水素を利用し始めているように、将来は航空機や大型船も「水素エンジン」或いは“非化石燃料からの水素と$CO_2$で生成した炭化水素燃料”（前述の「第11 回科学技術予測調査」によると、社会的実現の見通し時期は2039年）で駆動している可能性が高い。大量の水素利用時代が必ず訪れる。

また、海水中に無尽蔵（45億トン(鉱山ウランの1000倍）な海水ウランを回収し、原子炉の燃料として用いて、電気で海水から水素を生成することにより、「海水が無尽蔵のエネルギー資源」となる未来社会が必ず訪れるだろう。

「提言」

① 関係機関（文科省（研究開発)、経産省（実用化、水素製造、海洋資源（鉱物))、国土交通省（新しい船舶技術開発)、原子力規制庁（海上原子力発電所の安全規制・審査)、農水省（海洋水産資源)、外務省（国際法：公海上での営業)、防衛省・海上保安庁（護衛)、電力業界、自動車業界（水素)、原子力プラントメーカー、化学プラントメーカー、造船業界、海運業界、商社など）で構成する「多目的原子力船研究会（仮称)」を早急に設立すること。

② 多目的原子力船の「国内外のニーズ・市場調査」、「各市場の要件に適合するシステム概念」、「建造コスト（陸上原子力発電所と概要比較)」などの検討を実施し、新しい「政策提言（エネルギー自給・輸出基本戦略)」としてまとめること。

③ 世界第4位の海水量を有する「海洋国家」日本が、世界に先駆けて、海水から水素を生成し、輸出する経済的な技術インフラ【海上都市】（多

目的原子力船団群コロニー）を構築し、将来の世界エネルギー戦略を主導する。【海水が無尽蔵のエネルギー資源となる】。

## 9. 「核兵器のない世界」に向けて（核不拡散の深化）

2013年12月17日に公表された「国家安全保障戦略」において、“我が国は、国際協調主義に基づく積極的平和主義の立場から、国際社会の平和と安定のため、積極的な役割を果たしていく。”こと、及び、そのための「軍縮・不拡散」に係る政策について、 以下の様に謳っている。

① 我が国は、世界で唯一の戦争被爆国として、「核兵器のない世界」の実現に向けて引き続き積極的に取り組む。

② 北朝鮮による核開発及び弾道ミサイル開発の進展がもたらす脅威や、アジア太平洋地域における将来の核戦力バランスの動向、軍事技術の急速な進展を踏まえ、‥（略）‥‥北朝鮮による核・ミサイル開発問題やイランの核問題の解決を含む軍縮・不拡散に向けた国際的取組を主導する。

戦後、日本は原子力分野に関する研究は禁止された。1952 年に「サンフランシスコ講和条約」が発効し、停止状態にあった我が国の主権が回復した。「Atoms for Peace 」（1953 年）を受けて、1955 年「原子力基本法」等を制定し、原子力平和利用に向けた研究、開発、利用が開始した。

戦後一貫して平和国家としての道を歩み、専守防衛に徹し、他国に脅威を与えるような軍事大国とはならず、非核三原則（1968年）を堅持し、「核兵器不拡散条約（Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons(NPT)）条約」（我が国は1976年に批准）や「包括的核実験禁止条約(Comprehensive Nuclear-Test Ban Treaty(CTBT))」（我が国は1997年に批准）の基に、「原子力の平和利用」と「核軍縮と核不拡散」を推進してきた。

本章では、「核兵器のある現実の世界」から「核兵器のない世界」の実現に向けて、これまでの「外交的・政治的なアプローチ」を支える「科学技術的なアプローチ（核兵器に転用困難な核拡散抵抗性の高い原子力平和利用技術）」について紹介する。

### 9.1 プルトニウムの核拡散抵抗性と分離プルトニウム

#### （１）プルトニウムの核拡散抵抗性

北朝鮮の非核化が朝鮮半島、更に、北東アジアの非核化（即ち、日本の核燃料サイクル技術）に飛び火する可能性や米国のイラン核合意からの離脱などを考

慮すると、核不拡散の観点から、我が国の核燃料サイクルに対する国際環境は厳しい。米国は、我が国に対して、プルトニウムの適切な管理を求めてくるのは当然の流れ。（ウラン濃縮を含め日本を特別扱いができなくなってきている。）

我が国の「分離プルトニウム保有量」は、2016 年末時点で 46.9 ト（国内 9.8 トン、英仏 37.1 トン（再処理保管））である。しかし、自主的に「プルトニウム保有量上限値の設定」や「海外保有 Pu の削減（放棄？）」が、賢明な対応策か？

核兵器不拡散条約（NPT)において、核兵器国（米、ロ、中、仏、英)は、誠実に核軍縮交渉を進める義務があり、非核兵器国は、締約国の「奪い得ない権利」として、原子力平和利用（核燃料サイクルも含めて）の権利が認められている。但し IAEA の査察を受ける義務がある。日本は IAEA 査察の優等生である。

にも拘らず、我が国は、①核物質の保有、②施設（核燃料サイクル）の保有、③原子力技術（能力）の保有のため、海外（特に近隣の東北アジア）から、「“潜在的”核兵器国」と懸念されている。

しかし、プルトニウムの自発核分裂中性子数の基づく B.Pelloud（元 IAEA 事務次長）の基準[(1)]を基に評価すると、「“高燃焼度”の軽水炉級プルトニウム」は、核兵器には「実質的に使用できない(“Practically Unusable”) プルトニウム」である。

プルトニウムの軍事転用の問題は、「量」より「質」の問題である。[(2)、(3)、(4)]

プルトニウムの質（核拡散抵抗性）を科学的に評価しないで、我が国が保有する分離プルトニウムの量を単に削減すれば良いという方針は「合理的な政策」ではない。逆に、海外の懸念を認めてしまうことになりかねない。

「約 47 トンの分離プルトニウムは原子爆弾約 6 千発に相当する」という表現も科学的には正しくない。そういう報道は国民や国際社会を「ミスリード」する。マスメディアは慎重に科学的根拠に基づいた真実を報道すべきである。

使用済み燃料から回収したプルトニウムをウラン燃料と混合して、混合酸化物（MOX)燃料として、再度軽水炉（プルサーマル炉）で Pu239 を燃焼しても、U238 から新たに Pu239 が生成するため減量には限界がある。寧ろ、プルサーマル炉での燃焼は、プルトニウムの量を低減するよりも、装荷した「プルトニウムの核拡散抵抗性を更に向上（質を変化)」させるためと理解すべきである。

### （２）革新的なプルトニウムの核拡散抵抗性向上技術[(5)、(6)、(7)]

「プルトニウムの質」を飛躍的に向上させる方法が今世紀になって見つかった。“核のゴミ”と言われている“マイナーアクチナイド（MA：Np や Amなど）を燃料に少量添加すると、核拡散抵抗性の高い Pu238（多くの自発核分裂中性子数（2,600 個/g/s：Pu239 の約 13 万倍）と多量の崩壊熱(570W/kg：Pu239 の約 300 倍)を放出し、プルトニウムの核拡散抵抗性は飛躍的に向上する。

この核反応メカニズムは、日本（常陽）と米国（アイダホ国立研究所の照射用原子炉：Advanced Test Reactor(ATR)）で、文部科学省の支援により、筆者らが既に実験的に実証している。

MA の核変換によってプルトニウムの核拡散抵抗性を飛躍的に向上するこの新しい科学技術は、国際原子力機関（IAEA）も関心を持ち、各国の専門家を集めて「諮問会議」を 2 回開催（2003 年と 2006 年）している。(筆者がその議長を務めた。）また、この新しい科学技術に関して、2006 年の IAEA 年報に、東京工業大学との共同研究について記載されている。

**ＭＡは､決して“核のゴミ”ではなく､人類にとっての貴重な“宝”！**

（因みに、Albert Einstein は”It is easier to denature plutonium than it is to denature the evil spirit of man”と述べている。）

## 9.2　ウランの核拡散抵抗性と回収ウラン

回収ウランに含まれる U236 は、原子炉で照射すると中性子を吸収して Np237 を介して Pu238 を生成し､前述の様にプルトニウムの核拡散抵抗性を高めるが、ウランの核兵器への転用も困難にする。

回収ウランを再濃縮すると、U236 が U235 と一緒に濃縮されるため、「U235 が９０％以上の核兵器級高濃縮ウランの製造が困難」である可能性が高い。【この理論的予測は実験での確認が必要である。】

回収ウランを再濃縮した低濃縮ウラン燃料を、再び原子炉で燃焼すると、当然 U235 が燃焼してエネルギーを放出して減少するが、2 回目の燃焼後の U236 の含有量は、1 回目の燃焼後に比べて更に増加する。これを繰り返すと、回収ウランの核拡散抵抗性が益々増加し、「U235 の 90%以上の高濃縮ウランの製造が更に困難」になる。

## 回収ウランは「貴重な資源（宝）」である！

「提言」

① 「核拡散抵抗性の高い核燃料【核兵器に転用できないプルトニウムやウラン】サイクル新技術（核不拡散の深化技術）」を世界に先駆けて実用化し、国際社会の平和と安定のために、我が国が積極的に貢献すること。

② 先ずは、この新しい科学技術を、海外からの懸念を払拭するために、現行の軽水炉やプルサーマル炉に順次適用し、使用済み燃料中のプルトニウムを核兵器に転用困難な「更に核拡散抵抗性の高いプルトニウム」に変換してゆくすること。

③ また、この科学技術を高速増殖炉のブランケットに適用し、核兵器に転用困難な核拡散抵抗性の高いプルトニウムを「増殖」する次世代原子炉の研究・開発ロードマップを、至急、策定し、国際協力（日・仏・米）で研究・開発を開始することを提案する。【高速炉に関する日仏共同研究（ASTRID）計画が中止となった。】

④ 更に、「核兵器のある現実の世界」から「核兵器なき世界」実現に向けて、我が国は、使用済み燃料中の核分裂生成物以外、U、Pu、MA すべてをリサイクルして有効利用する「次世代の「核拡散抵抗性の高い核燃料【核兵器に転用できないプルトニウムやウラン】サイクル新技術」を世界に先駆けて実用化すべきである。

## 「第 4 部」　まとめ

本講演資料は、「変革の時代」を迎えた原子力の「エネルギー安全保障」、「環境安全保障」、「国家安全保障」、「国際社会安全保障」への貢献、更に、「核兵器のある現実の世界」から「核兵器のない世界」の実現に向けて、皆さんのお叱りを覚悟の上で、筆者なりの「大胆な提言（アプローチ）」についてまとめたものである。

国民の理解と信頼の回復にために、先ず、政府は福島原子力発電所事故の国としての責任（反省）を明確にすべきである。

また、国会内に、IAEA を含む各国の専門家による「国際技術検証委員会（仮称）」を早急設置し、「福島原子力発電所事故検証基本計画」を策定し、その基本計画に基づいて、「貴重な教材」が失われる前に、事故進展の技術的な検証を進めるべきである。

この「事故検証基本計画」に基づいて、事故現場のクリーンアップを進めるべきである。

また、「国民の防護」、「地方自治体の支援」、「事業者の支援」、「国の危機管理能力の強化」等を目的とする「原子力災害即応支援部隊」を創設すべきである。特に、原子力施設への「サイバー攻撃」に対する対応が急務である。

原子力規制委員会は「独立性」が認められている。しかし、決して「孤立した機関」にならないことを期待する。「多重防護」の考え方に基づく「“合理的”な安全規制」が重要である。

原子力は、再生可能エネルギーでは太刀打ちのできない「多様性」を持っている。$CO_2$ フリーのエネルギーとしての利用のみならず、「医療・福祉」、「農業・食料・水資源」、「海洋開発」、「宇宙開発」などの「多様な分野」も、「我が国や国際社会の平和、安定、福祉そして繁栄」の実現に多いに貢献する。

特に、領海及び排他的経済水域の面積では、世界第 6 位、その体積では、世界

第４位の世界有数の「海洋国家」である日本は、「国家安全保障」のために、領海及び排他的経済水域（海上、海中、海底）の開発及び利活用が非常に重要な課題である。

気象条件に頼る再生可能エネルギーは、大きな気象変動や異常気象（気象危機）が“通常”に成りつつある現状を考えると、将来はその「信頼性に大きな問題」があり、「分散的な補助電源（地産地消）」としては理解できるが、「我が国のベース電源としては、リスクが非常に大きい選択肢」である。

戦後の復興は、「勤勉な国民」の「技術力向上」による優れた”「モノ」ものつくり“【ハード】とその「輸出」により外貨を稼ぎ、「経済力」をつけ、国の豊かさを得てきた。天然資源の乏しい我が国では、「輸出」が重要な国家戦略【安全保障】の１つである。

我が国の「国家安全保障のためには、将来に向けて「原子力の依存度を可能な限り低減する」のではなく、「海外の化石燃料の依存度を可能な限り低減する」ことが非常に重要である。更に、国家の安全保障上最も重要なエネルギーの安定供給（自給率の向上、更に将来は自給から輸出へ）」がエネルギー国家戦略の基本である。

そのために、【ハード（原子力発電所）】を輸出するのではなく、【ソフト（エネルギー（電気、水素）など）】の輸出を目的とした「海洋都市（多目的原子力船群コロニー）構想」の実現が望まれる。

この構想は、原子力施設や核燃料物質を海外に供給するのではなく、エネルギー（電力や水素）などを輸出するので、世界の「核不拡散」への貢献が大きい。

例えば、北朝鮮の非核化後の我が国の経済支援の一つとして、以前の様に軽水炉発電所の支援ではなく、多目的原子力船でエネルギー（電気や水素）を供給する国際貢献も可能である。

世界的な化石燃料の枯渇は近い将来に必ず訪れる。すでに、自動車は水素を利用し始めているように、将来は航空機や大型船も「水素エンジン」などで駆動し

ている可能性が高い。大量の水素利用時代が必ず訪れる。

将来の世界エネルギー戦略を主導するために、世界第 4 位の海水量を有する「海洋国家」日本が、世界に先駆けて、海水から水素を生成し、輸出する経済的な技術インフラ【海上都市】（多目的原子力船団群コロニー）を構築することが重要である。

海水中に無尽蔵（45億トン(鉱山ウランの1000倍）な海水ウランを燃料とした原子力発電の電力を用いて海水から水素を生成することにより、「海水が無尽蔵のエネルギー資源」となる未来社会が必ず訪れるだろう。

科学技術は人類に多くの貢献をもたらした。しかし、20 世紀の科学技術は人類の全てを抹消することが可能である化け物「核兵器」を生んだ。そして今、それが拡散している。

我が国の国益（「国家安全保障」）のために、「原子力基本法」及び我が国の国是である「非核三原則」の基に、「核軍縮」と「原子力平和利用と核不拡散の両立」政策を、今後も積極的に推進すべきである。

特に、核不拡散の深化（「核物質」や「核燃料サイクル技術」の核拡散抵抗性の向上）は、「我が国の安全保障」や「国際社会の安全保障」の実現に向けて、非常に重要な課題である。

21 世紀を迎えて、我が国に「原子力の平和利用と核不拡散の両立の深化」を可能とする新しい科学技術（「核拡散抵抗性の高い核燃料【核兵器に転用できないプルトニウムやウラン】サイクル技術」が生れている。

先ずは、この新しい科学技術を、海外からの懸念を払拭するために、現行の軽水炉やプルサーマル炉に順次適用し、使用済み燃料中のプルトニウムを核兵器に転用困難な「更に核拡散抵抗性の高いプルトニウム」に変換してゆくすることを提案する。

また、この科学技術を高速増殖炉のブランケットに適用し、核兵器に転用困難

な核拡散抵抗性の高いプルトニウムを「増殖」する次世代原子炉の研究・開発ロードマップを、至急、策定し、国際協力（日・仏・米）で研究・開発を開始することを提案する。【高速炉に関する日仏共同研究（ASTRID）計画が中止となった。】

更に、「国際社会の平和と安定」のために、「核兵器のある現実の世界」から「核兵器なき世界」実現に向けて、我が国は、使用済み燃料中の核分裂生成物以外、U、Pu、MA すべてをリサイクルして有効利用する「次世代の「核拡散抵抗性の高い核燃料【核兵器に転用できないプルトニウムやウラン】サイクル新技術」を世界に先駆けて実用化すべきである。

これが我が国の将来に向けた「新しい原子力基本戦略（国家 100 年の計）」である。

変革時代の原子力、どうする？
変革への対応力、即応力が望まれる。

ノアの方舟はいつ作られたか？
正解は、「洪水が来る前！」

Make Nuclear Great Again！

---

「参考文献」


(1) B. Pellaud. “Proliferation Aspects of Plutonium Recycling”. Journal of Nuclear Materials Management, Vol. XXXI, No. 1, Fall 2002

(2) 齊藤正樹、“プルトニウムの軍事転用問題－21 世紀の最新の科学技術を基づく速報—”、エネルギーレビュー、2019.2

(3) “核兵器転用が不向きな日本のプルトニウム－「量」とともに「質」で管理を－”、エネルギーフォーラム、December 2018

(4) 滝純一、“核兵器に使えないプルトニウムも、量より「質」が問題－科学者の目— “、日本経済新聞　電子版、2019.2.11

(5) 齊藤正樹、“高い核拡散抵抗性を有するプルトニウム”、日本原子力学会 ATOMOΣ、Vol.58、No.2、2016
(6) M. Saito, “Protected Plutonium Production by Transmutation of Minor Actinides “, 58th Annual Meeting, Institute of Nuclear Materials Management, 2017
(7) “プルトニウム〝核兵器に転用しにくく〟—技術実証ー”、NHK おはよう日本、2008 年 9 月 16 日

（２０１９年１１月３日記）

# 企画セッション

報告Ⅰ：第 60 回 INMM 年次大会報告、プルトニウムの歴史

報告者：日本核物質管理学会　会長　千崎　雅生

報告Ⅱ：第 9 回　INMM/ESARDA 合同ワークショップ概要報告

報告者：日本核物質管理学会プログラム委員　長谷　竹晃

# 第60回INMM年次大会の報告

（2019年7月14日-18日）

## 「パネル：プルトニウムの歴史」等の概要

**報告者：千崎雅生**

2019年11月19日、20日
第40回年次大会
日本核物質管理学会

（第60回INMM年次大会会場）

# 1. はじめに

**□ 今年は60周年記念のINMM年次大会。INMMは1958年5月に設立、第1回年次大会は1959に開催。**

**（当時の主な状況）**

- 1953年：12月米国アイゼンアワー大統領の「Atoms for Peace」演説
- 1955年：10月米国原子力学会設立
- 1955年：12月原子力基本法、原子力委員会設置法など成立、
- 1956年：1月原子力委員会発足。6月日本原子力研究所、8月原子燃料公社発足。10月IAEA 憲章採択。
- 1957年：7月放医研発足、11月JRR-1が臨界、11月日本原電発足
- 1958年：ユーラトム条約発効
- 1959年：2月 日本原子力学会創立、8月原研初のPu分離に成功
- 1960年：12月 国連、核拡散防止決議案採択

**<u>なお、INMM日本支部は1977年設立</u>**

# □第60回記念INMM年次大会の特徴

従来のOpening とClosingのPlenaryに加えて、開催日の全てにPlenaryセッションが設けられた。また、多くの企画セッションやパネルセッションが持たれた。

## ● 主なプレナリーセッション

**（1）Opening：**

①CTBTOの活動（Ms. Tammy Tailor, Director of International dater Center )

②IAEA保障措置の取組（Ms. Therese Renis, Director of Division of Concepts and Planning, IAEA)

**（2）Morning Plenary：**

①ユーラトムSGの歴史・現状など

② サイバーセキュリティ

**（3）Closing ：Got INSIDERS in Nuclear Security?**

## ● 主な企画セッション（パネルなど）

①Strengthening SSACs, Portal Monitoring

②Insider Threat Mitigation,

③Advanced Nuclear and Engagement with the INMM(新型炉の保障措置・核セキュリティ）、

④Pu History Ⅰ＆Ⅱ

⑤ Virtual Reality （核不拡散の教育・訓練利用）、

⑥Verification（核軍縮への利用・強化）」など

# Panel: Pu History

# Introduction to Plutonium: A Hanford Perspective

## Pu History 1

- A Hanford Perspective of the Manhattan Project

David Meier, Joel Tingey, PNNL

## Pu History 2

- A Brief Overview of Plutonium Reprocessing

  Matthew K. Edwards and Joel Tingey, PNNL

- Plutonium Chemistry and Characterization in the Context of Historic Flowsheets

  Lucas Sweet, Cal Delegard, PNNL

# 2. Panel: Pu History

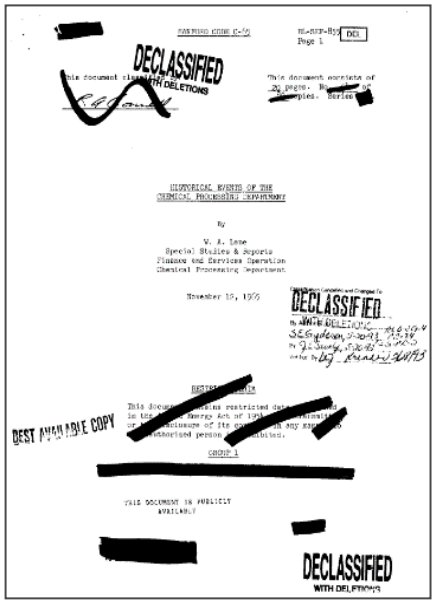
## その1：　Hanford Perspective of the Manhattan Project

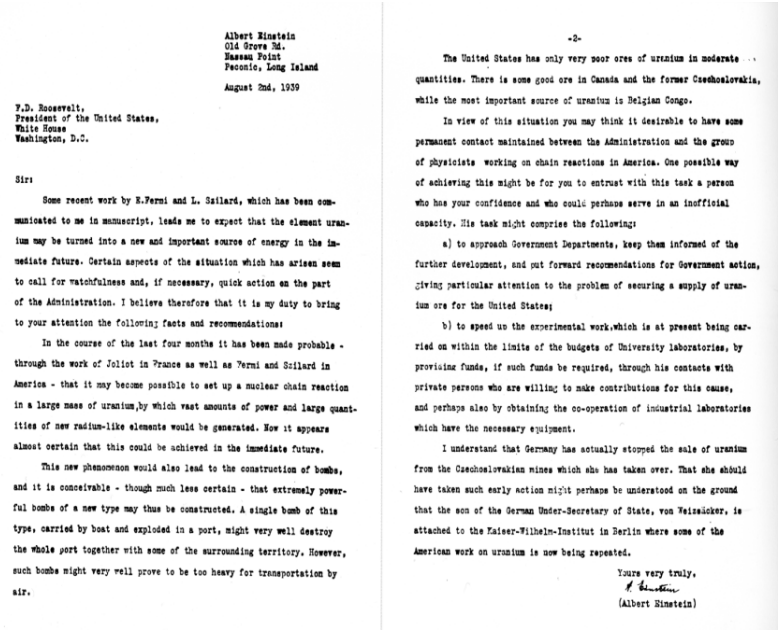
歴史的観点、背景、成果、Puプロセスへの挑戦、再処理、Puの科学と特徴、現在のHanfordの取組など。

David Meier, Joel Tingey, Pacific Northwest

# Leading into World War II

- Discovery of Fission
- Einstein – Szilard Letter
- Uranium supply (6000 tons)
  - An Englishman, Belgian, and an American meet in an African Mine
    - ✓Site X ~ 4200 tons
  - Canada and Colorado
    - ✓Site W and Met Lab ~ 1800 tons



Albert Einstein
Old Grove Rd.
Nassau Point
Peconic, Long Island

August 2nd, 1939

F.D. Roosevelt,
President of the United States,
White House
Washington, D.C.

Sir:

Some recent work by E.Fermi and L. Szilard, which has been communicated to me in manuscript, leads me to expect that the element uranium may be turned into a new and important source of energy in the immediate future. Certain aspects of the situation which has arisen seem to call for watchfulness and, if necessary, quick action on the part of the Administration. I believe therefore that it is my duty to bring to your attention the following facts and recommendations:

In the course of the last four months it has been made probable - through the work of Joliot in France as well as Fermi and Szilard in America - that it may become possible to set up a nuclear chain reaction in a large mass of uranium,by which vast amounts of power and large quantities of new radium-like elements would be generated. Now it appears almost certain that this could be achieved in the immediate future.

This new phenomenon would also lead to the construction of bombs, and it is conceivable - though much less certain - that extremely powerful bombs of a new type may thus be constructed. A single bomb of this type, carried by boat and exploded in a port, might very well destroy the whole port together with some of the surrounding territory. However, such bombs might very well prove to be too heavy for transportation by air.

-2-

The United States has only very poor ores of uranium in moderate quantities. There is some good ore in Canada and the former Czechoslovakia, while the most important source of uranium is Belgian Congo.

In view of this situation you may think it desirable to have some permanent contact maintained between the Administration and the group of physicists working on chain reactions in America. One possible way of achieving this might be for you to entrust with this task a person who has your confidence and who could perhaps serve in an inofficial capacity. His task might comprise the following:

a) to approach Government Departments, keep them informed of the further development, and put forward recommendations for Government action, giving particular attention to the problem of securing a supply of uranium ore for the United States;

b) to speed up the experimental work,which is at present being carried on within the limits of the budgets of University laboratories, by providing funds, if such funds be required, through his contacts with private persons who are willing to make contributions for this cause, and perhaps also by obtaining the co-operation of industrial laboratories which have the necessary equipment.

I understand that Germany has actually stopped the sale of uranium from the Czechoslovakian mines which she has taken over. That she should have taken such early action might perhaps be understood on the ground that the son of the German Under-Secretary of State, von Weizsäcker, is attached to the Kaiser-Wilhelm-Institut in Berlin where some of the American work on uranium is now being repeated.

Yours very truly,
A. Einstein
(Albert Einstein)

アインシュタインから
米国ルーズベルト大統領あての書簡
（1939年8月2日）

# アインシュタインから米国ルーズベルト大統領あての書簡（1939年8月2日）

## この手紙の作成をシラードが依頼

Albert Einstein
Old Grove Rd.
Nassau Point
Peconic, Long Island

August 2nd, 1939

F.D. Roosevelt,
President of the United States,
White House
Washington, D.C.

Sir:

Some recent work by E.Fermi and L. Szilard, which has been communicated to me in manuscript, leads me to expect that the element uranium may be turned into a new and important source of energy in the immediate future. Certain aspects of the situation which has arisen seem to call for watchfulness and, if necessary, quick action on the part of the Administration. I believe therefore that it is my duty to bring to your attention the following facts and recommendations:

In the course of the last four months it has been made probable - through the work of Joliot in France as well as Fermi and Szilard in America - that it may become possible to set up a nuclear chain reaction in a large mass of uranium,by which vast amounts of power and large quantities of new radium-like elements would be generated. Now it appears almost certain that this could be achieved in the immediate future.

This new phenomenon would also lead to the construction of bombs, and it is conceivable - though much less certain - that extremely powerful bombs of a new type may thus be constructed. A single bomb of this type, carried by boat and exploded in a port, might very well destroy the whole port together with some of the surrounding territory. However, such bombs might very well prove to be too heavy for transportation by air.

-2-

The United States has only very poor ores of uranium in moderate quantities. There is some good ore in Canada and the former Czechoslovakia, while the most important source of uranium is Belgian Congo.

In view of this situation you may think it desirable to have some permanent contact maintained between the Administration and the group of physicists working on chain reactions in America. One possible way of achieving this might be for you to entrust with this task a person who has your confidence and who could perhaps serve in an inofficial capacity. His task might comprise the following:

a) to approach Government Departments, keep them informed of the further development, and put forward recommendations for Government action, giving particular attention to the problem of securing a supply of uranium ore for the United States;

b) to speed up the experimental work,which is at present being carried on within the limits of the budgets of University laboratories, by providing funds, if such funds be required, through his contacts with private persons who are willing to make contributions for this cause, and perhaps also by obtaining the co-operation of industrial laboratories which have the necessary equipment.

I understand that Germany has actually stopped the sale of uranium from the Czechoslovakian mines which she has taken over. That she should have taken such early action might perhaps be understood on the ground that the son of the German Under-Secretary of State, von Weizsäcker, is attached to the Kaiser-Wilhelm-Institut in Berlin where some of the American work on uranium is now being repeated.

Yours very truly,
A. Einstein
(Albert Einstein)

手紙では、ウランによる連鎖反応が近々実現され、それが強力な爆弾となりうることを指摘した上で、政府の注意の喚起と研究の支援、そして政府と物理学者とを仲介する仕組み作りを訴え、最後にナチス・ドイツの核エネルギー開発を示唆する事実を指摘

# Highlights

- June 3rd, 1940 – Glenn T. Seaborg expressed interest in pursuing Np and possibly Pu
- October 29th, 1940 – Seaborg concentrates on Pu
- October 20th, 1942—Plutonium (specifically, plutonium-238) was first produced and isolated on,– Seaborg weighs first 2.77 µg Pu
- September 30th, 1944 – B Reactor goes critical
- Feb 2nd, 1945 – LANL receives first batch of Hanford Pu
- July 16th, 1945 – Trinity
- August 9th, 1945 – Fat Man deployed

カリフォルニア大学バークレー校の教授、研究者。加速器を用いて多くの新元素を発見、超ウラン元素の合成および研究の功績により、1951年度のノーベル化学賞をエドウィン・マクミランとともに受賞。マンハッタン計画に参加し、原子爆弾に用いるプルトニウムの分離に関わった

# Manhattan Project Timeline

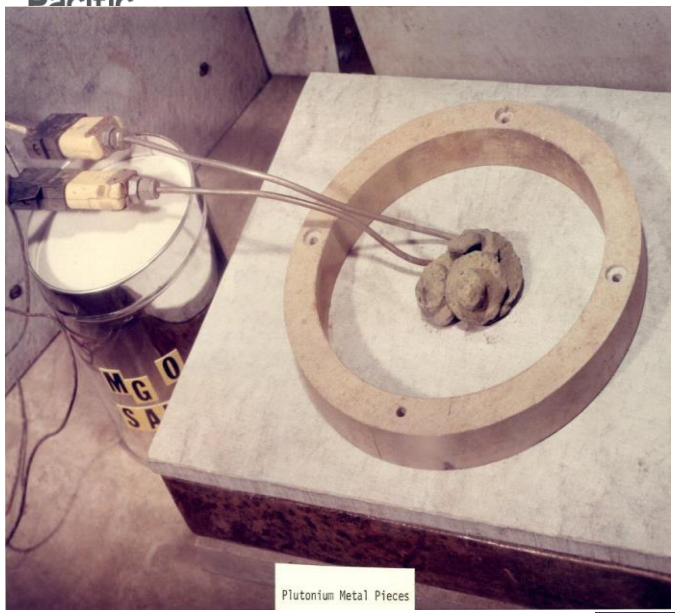
- **1930's**
  - **Fission discovered**
  - **Einstein/Szilard letter to Roosevelt**
- **1940**
  - **Uranium (U-Nat - 0.72% U-235)**
  - **Uranium enrichment discussions**
  - **University led research on critical chain reactions and neutron induced alchemy**
- **1941**
  - **Earnest Lawrence – Np**
  - **Glenn Seaborg – Pu**
    - **February – Pu identified**
    - **May – Research indicated that Pu-239 was potentially better than U-235**
- **1942**
  - **Sites located for LANL (November) and ORNL (September)**
  - **December – Chicago Pile 1 goes critical**
- **1943**
  - **January – Hanford Site located**
  - **February – X-10 reactor – pilot plant for Hanford**
  - **February – Y-12 – Electro-magnetic Isotope Separation (Calutron)**
  - **April – LANL established**
  - **June – K-25 – Gaseous Diffusion Plant**
  - **June – T Plant ground breaking (BiPO4)**
  - **July – B Plant ground breaking (BiPO4)**
  - **August – Hanford B Reactor ground breaking**
  - **November – X-10 reactor goes critical**
  - **November – Hanford D Reactor ground breaking**
  - **November – Hanford F Reactor ground breaking**

- 1944
  - April – First Pu sample from X-10 studied (Pu-240 evident)
  - July – S-50 Liquid Thermal Diffusion construction began
  - September – B-Reactor goes critical
  - December – T Plant begins operations
  - December – D-Reactor goes critical

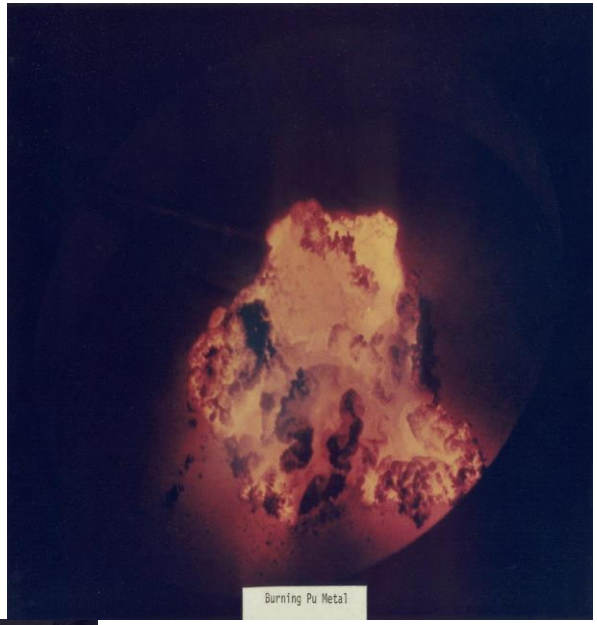
- 1945
  - January – 231 Z operational
  - February – First Pu processed at Hanford is shipped to LANL
  - February – F-Reactor goes critical
  - March – S-50/K-25/Y-12 operational at ORNL
  - April – T Plant begins operations
  - July – Trinity
  - August – Little Boy/Fat Man

# Challenges Working with Plutonium

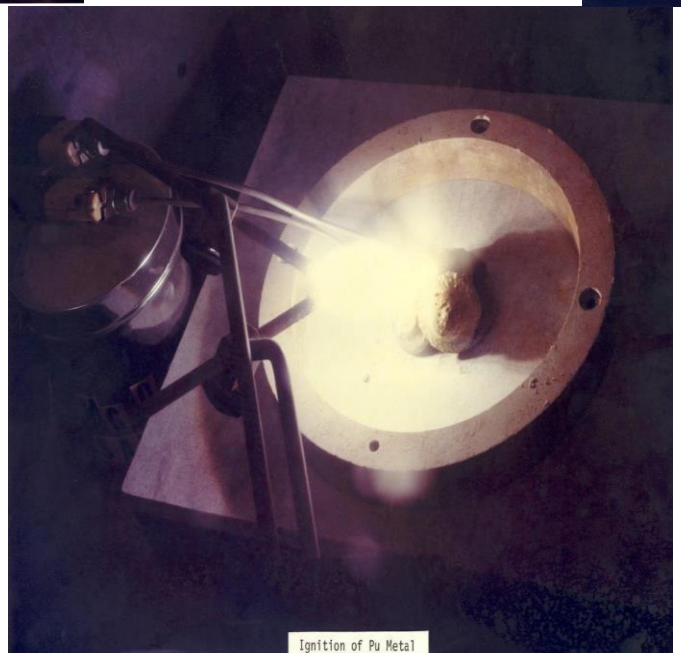
Pu Metal Pieces




Burning Pu Metal

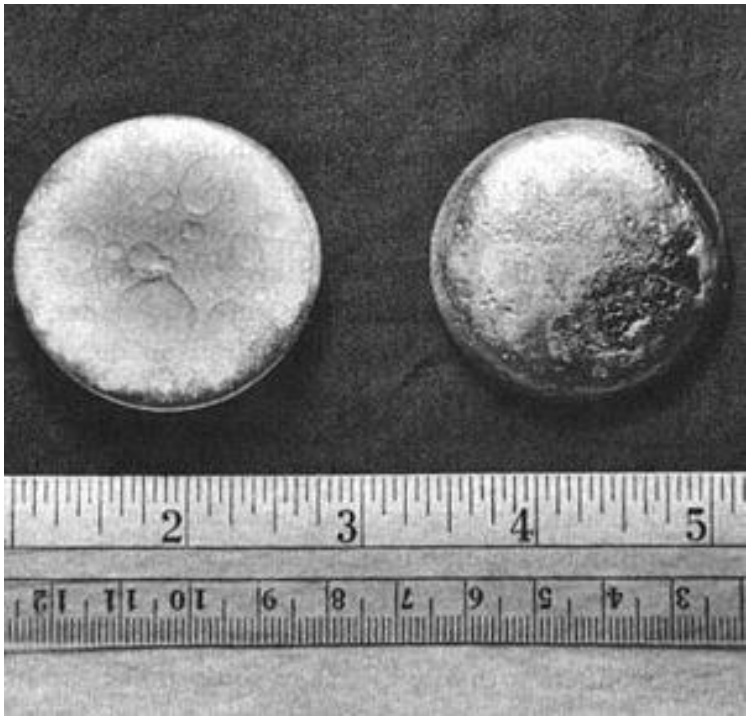



Ignition of Pu Metal
With Carbon Arc Torch



**Worker holding a plutonium button**

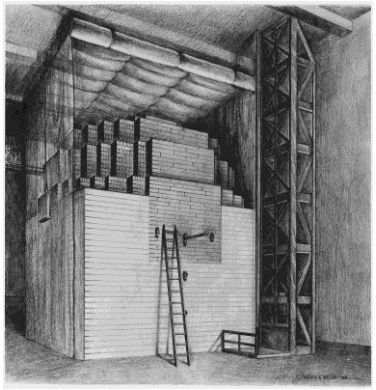
# Pu Metal



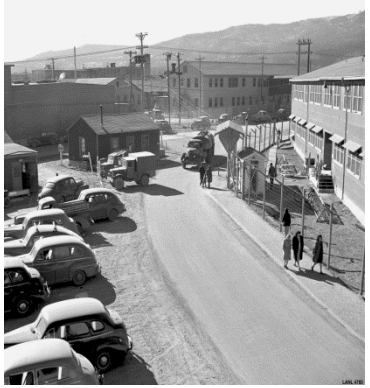
These buttons of refined plutonium metal were used in the core of the Fat Man bomb dropped on Nagasaki.
(Image: © U.S. Department of Energy)

A ring of weapons-grade 99.96% pure electro refined plutonium, enough for one bomb core. The ring weighs 5.3 kg, is ca. 11 cm in diameter and its shape helps with criticality safety

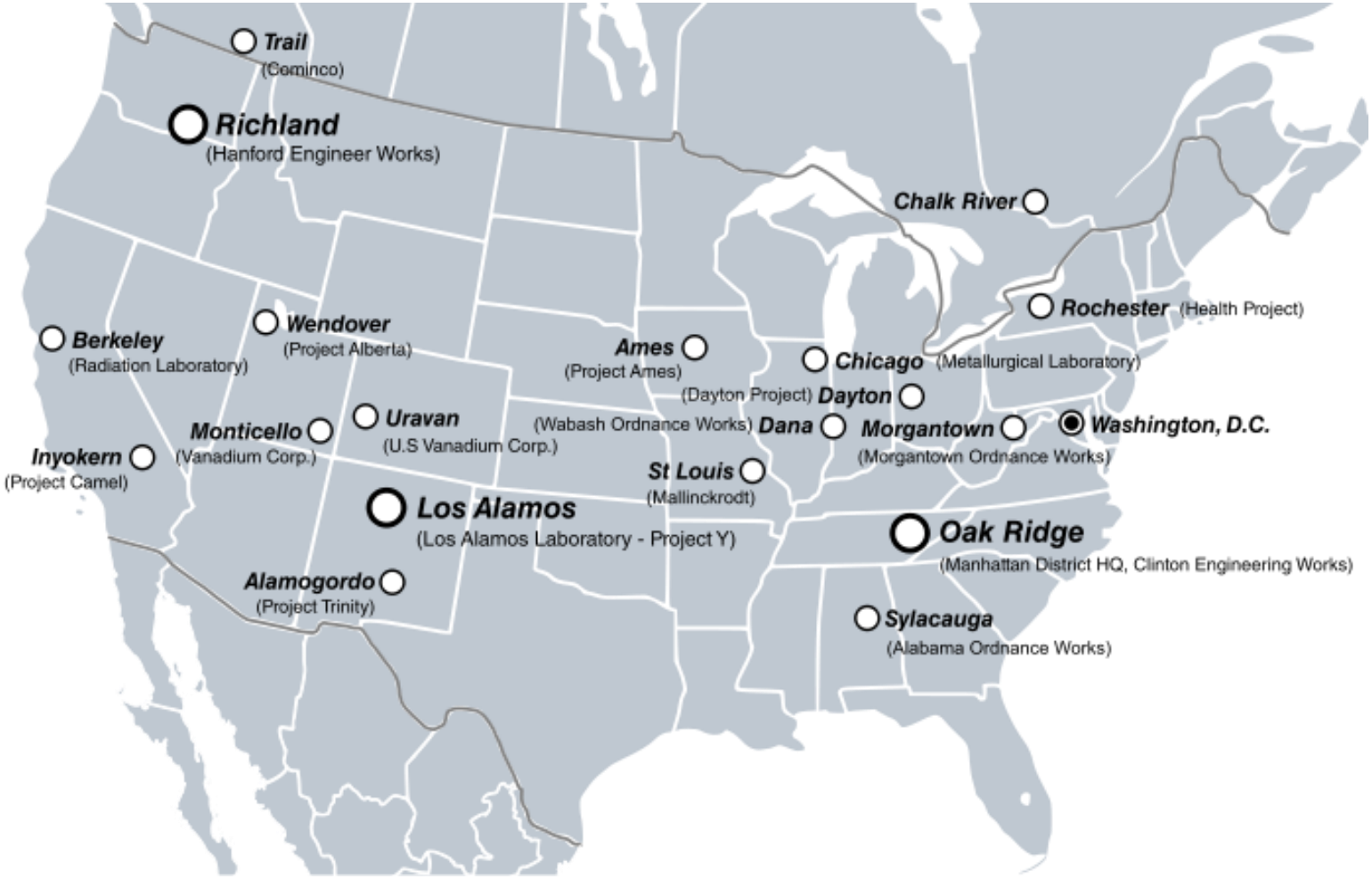
# Manhattan Project Sites



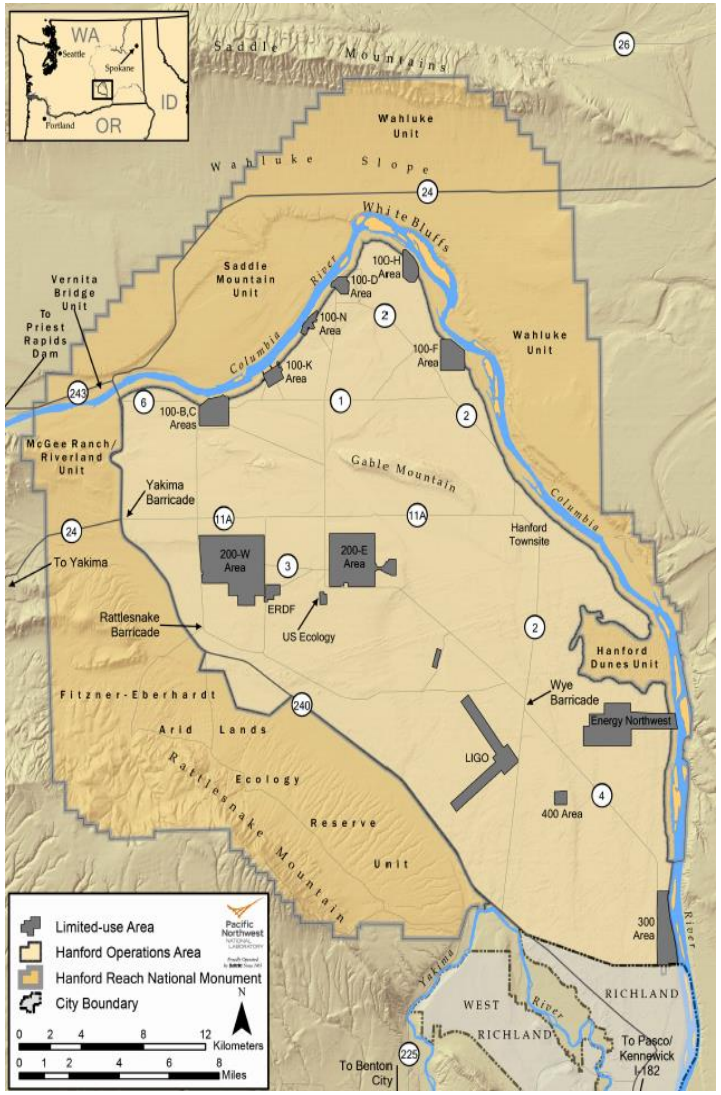
- <u>Sites:</u>
- X – Oak Ridge, TN
  - Uranium Separation
    - ✓ Electromagnetic – Y-12
    - ✓ Gaseous Diffusion – K-25
    - ✓ Thermal Diffusion – S-50
  - X-10 reactor
- Y – Los Alamos, NM
  - Plutonium Metal Fabrication
  - Bomb development and manufacture
- W – Hanford, WA
  - B, D, and F reactors
  - T and B Plants
  - 231 Z
- Met Lab – Chicago, IL
  - Chicago Pile – 1



# 北米でマンハッタン計画において重要な役割を果たした場所



# Hanford Site



# Size of Hanford (*a matter of perspective*)

- PNNL campus occupies approximately 0.1 square miles
- Richland – 39 square miles
- D.C – 68 square miles
- Tri Cities area – 127 square miles
- Seattle – 143 square miles
- New York City – 486 square miles
- **Hanford Site – 586 Square Miles**
- London, UK – 606 square miles

**1マイルは１．６Km**

**現在のサイト**

# Hanford Production Timeline

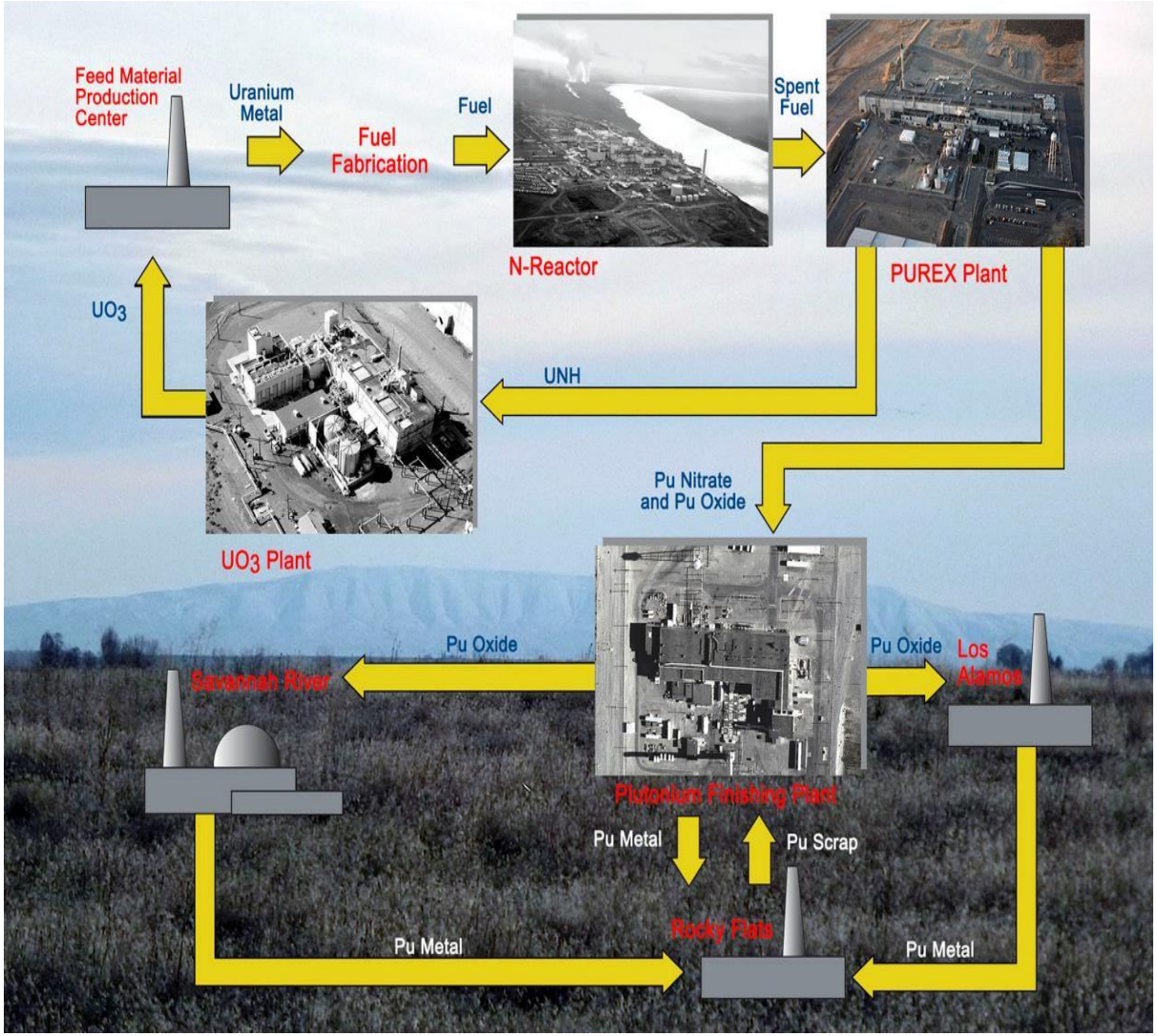
- 1943
  - Groundbreaking
    - ✓T/B-Plant
    - ✓B/D/F Reactors
- 1944
  - Fuel elements produced in 300 Area
  - B-Reactor went critical
    - ✓Xenon poison
  - D Reactor went critical
  - T-Plant $BiPO_4$ processing mission in 200-W – Operational
- 1945
  - January – 231-Z Operational

# End of World War II and the Beginning of the Cold War

- 1945
  - Plutonium transferred to the Army
  - First shipment of plutonium delivered to Los Alamos Scientific Laboratory
  - F Reactor went critical
  - B Plant operational in 200 E
  - July – Hanford plutonium used in Trinity device
  - August – Hanford plutonium used in Fat Man device

- Z Plant (PFP) operational – July 1949
- REDOX Plant operational – January 1950
- PUREX operational – January 1956 ($BiPO_4$ off-line within 6 months)

# Hanford's Role in the Defense Material Complex



# Reactors

B:黒鉛型原子炉

C

D/DR：黒鉛型原子炉

K
E

KW

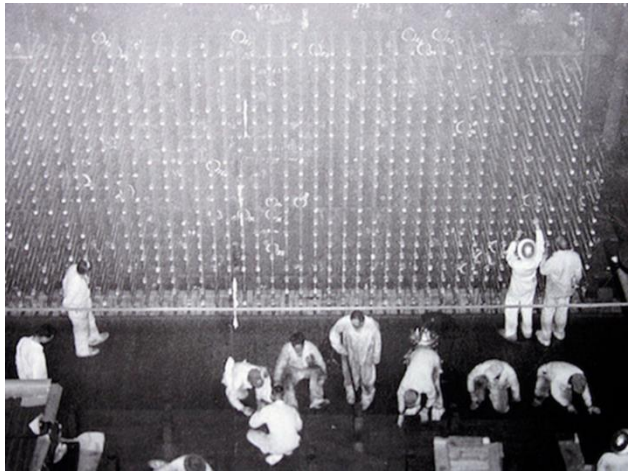
N

H

F:黒鉛型原子炉

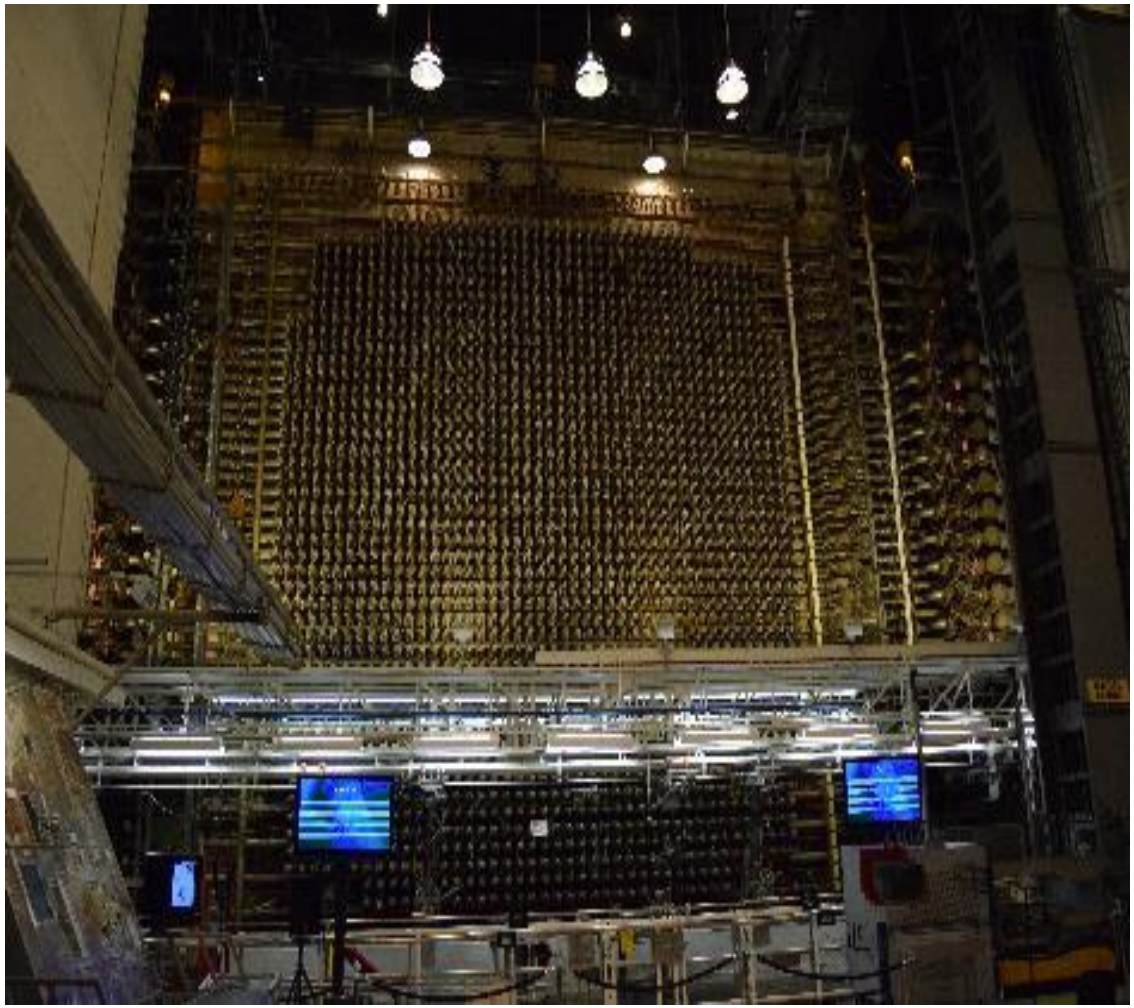
# Reactor Operations

| Reactor | Dates |
|---|---|
| B | 1944–68 |
| D | 1944–67 |
| F | 1945–65 |
| DR | 1950–64 |
| H | 1949–65 |
| C | 1952–69 |
| KW | 1955–70 |
| KE | 1955–71 |
| N | 1963–87 |



**B Reactor – 9/26/1944**

# B Reactor Operations

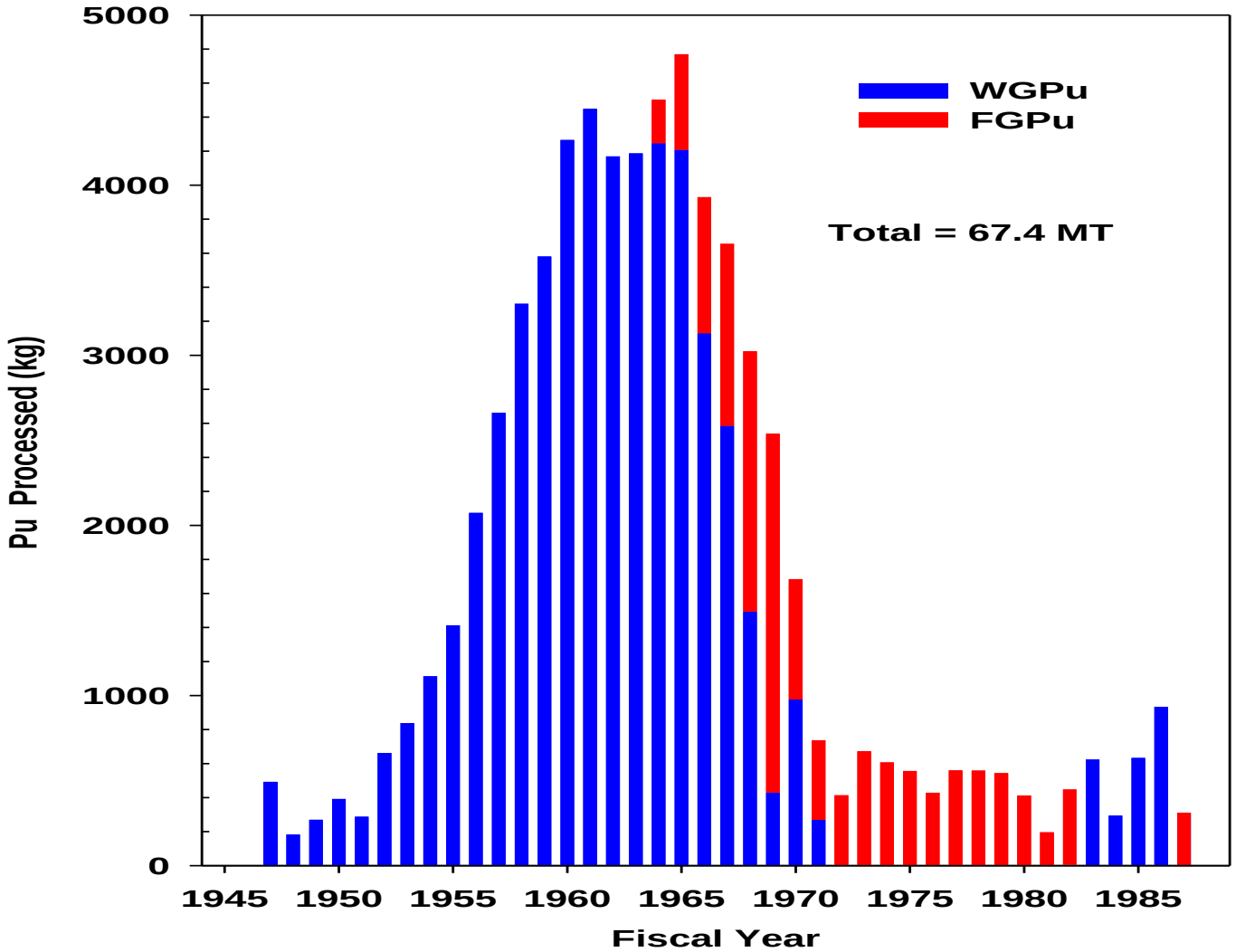


# Nuclear Processing

Hanford Pu Production

WG(Weapon Grade): 54.5MT

FG(Fuel Grade):12.9MT



# Chemical Processing

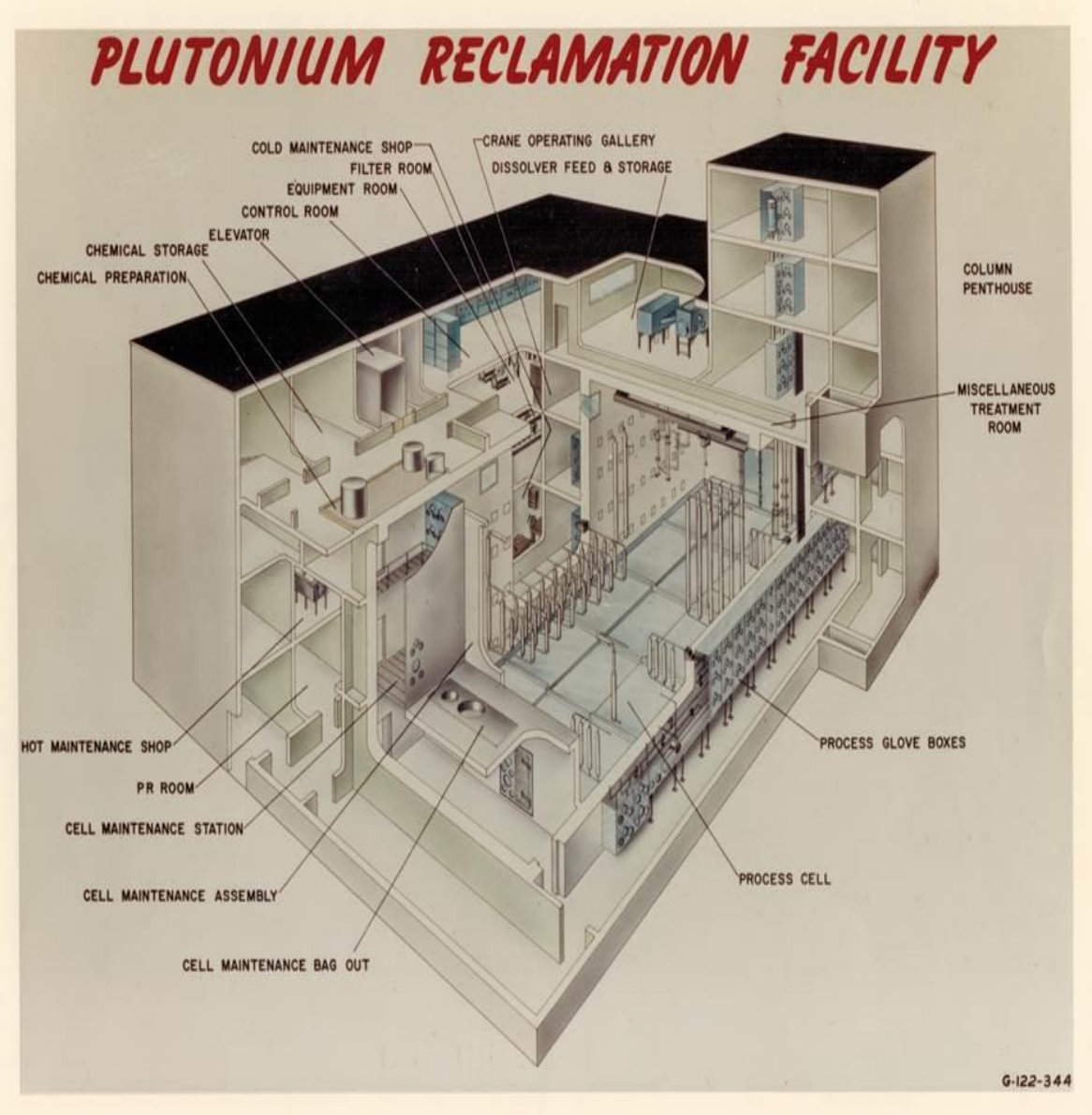
- **Bismuth Phosphate**
  - **1944-1956**
  - **Co-Precipitation**
  - **Batch Processing**
  - **8000 gallons of waste / MT**
- **REDOX**
  - **1951-1966**
  - **Solvent Extraction**
  - **Continuous operation**
  - **500 - 1500 gallons of waste / MT**
- **PUREX**
  - **1956-1990s**
  - **Solvent Extraction**
  - **Continuous operation**
  - **264 - 1300 gallons of waste / MT**

T-Plant

REDOX

PUREX

# Memory Lane


PLUTONIUM RECLAMATION FACILITY
COLD MAINTENANCE SHOP
FILTER ROOM
EQUIPMENT ROOM
CONTROL ROOM
ELEVATOR
CHEMICAL STORAGE
CHEMICAL PREPARATION
CRANE OPERATING GALLERY
DISSOLVER FEED & STORAGE
COLUMN PENTHOUSE
MISCELLANEOUS TREATMENT ROOM
HOT MAINTENANCE SHOP
PR ROOM
CELL MAINTENANCE STATION
CELL MAINTENANCE ASSEMBLY
CELL MAINTENANCE BAG OUT
PROCESS GLOVE BOXES
PROCESS CELL
G-122-344

Pacific Northwest
NATIONAL LABORATORY

Pacific Northwest
NATIONAL LABORATORY

# Legacy

- 67 MT of plutonium produced
- 60 million gallons of radioactive waste

EXTRA The Villager EXTRA

IT'S ATOMIC BOMBS

News Spreads Slowly, Surprises Everyone Here

Jubilation And Satisfaction Follows Revelation Of Product Manufactured Here

Development Of Bomb Traced

Begun In 1939; Plant Expanded In June, 1942

President Truman Releases Secret of Hanford Product

Information Is Made Public This Morning

How Much Damage?

Richland Gets Ready To Entertain Press

THE HANFORD ENGINEERING WORKS Being V-J DAY CLOSER!

EXTRA The Villager EXTRA

PEACE!

OUR BOMB CLINCHED IT!

Plant Will Not Close!

Japs Surrender

Message from W. O. Simon

Food & Drug Stores Close Tomorrow

Only Essentialized And Service Facilities Open

"Our Bomb" Does the Job

"It's Peace"

Report Last Nite Avalon Village

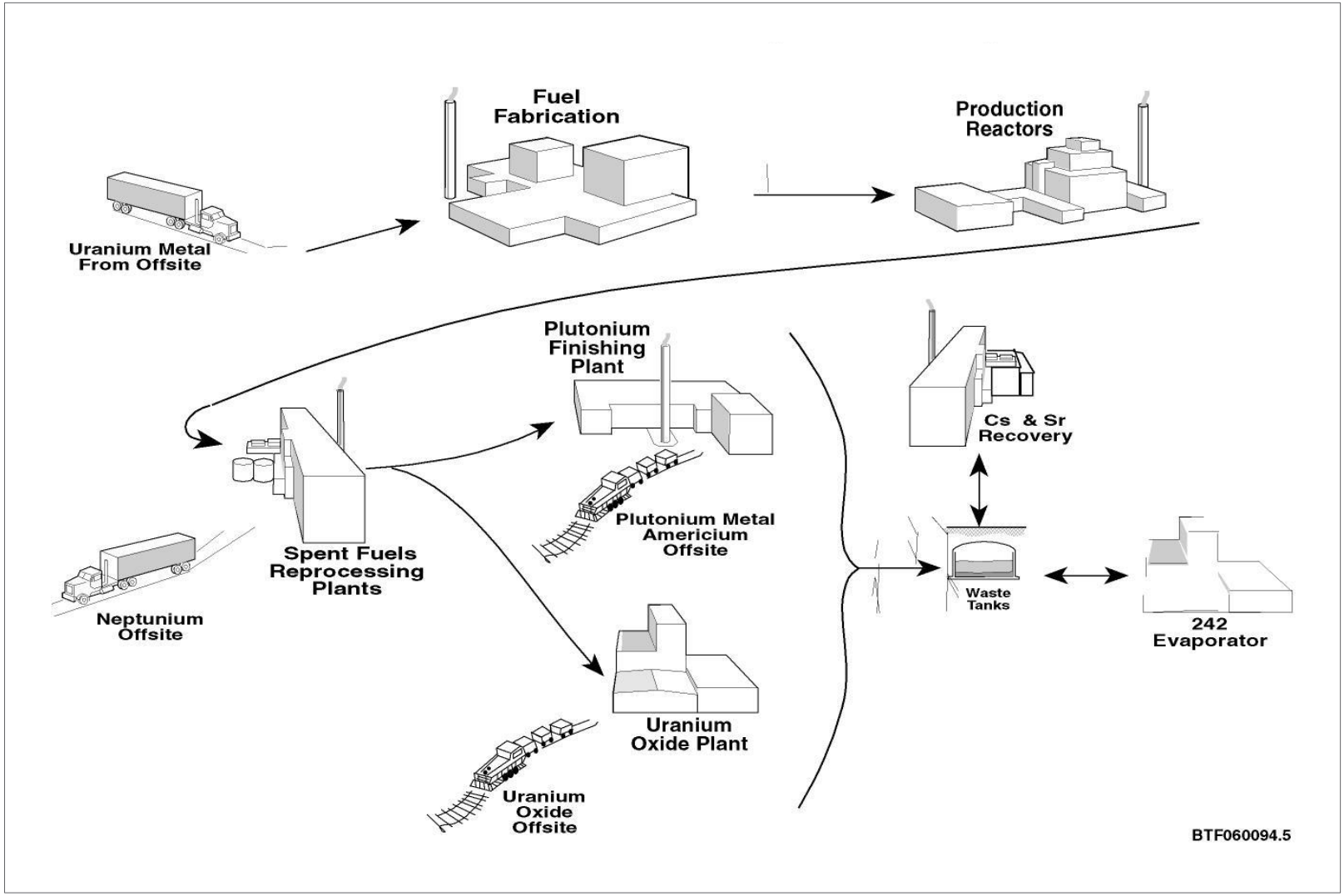
# その2: A Brief Overview of Post –reactor Plutonium Reprocessing & an Overview of Plutonium Chemistry

Matthew K, Edwards and Lucas E. Sweet ;PNNL

## Test Your Knowledge

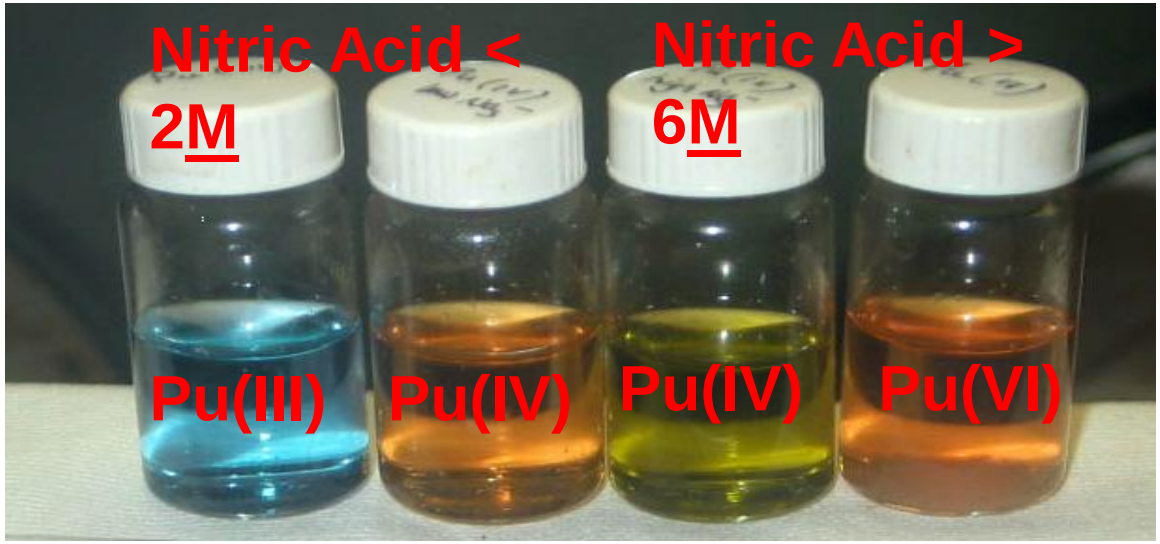
- What are the steps necessary for Plutonium Reprocessing?
  - On the "Post-its" provided, write down the steps you can think of that would be required to obtain plutonium metal from reactor fuel
  - Compare and discuss the steps you identified with those around you
  - As a group, put the steps in order based on your best guess.
    - Irradiation
    - Fuel clad removal and dissolution
    - Chemical Separation
    - Purification
    - Conversion
      - Precipitation
      - Calcination
      - Fluorination
    - Metal Reduction and casting

# Hanford Defense Production Facilities (1944 – 1990)

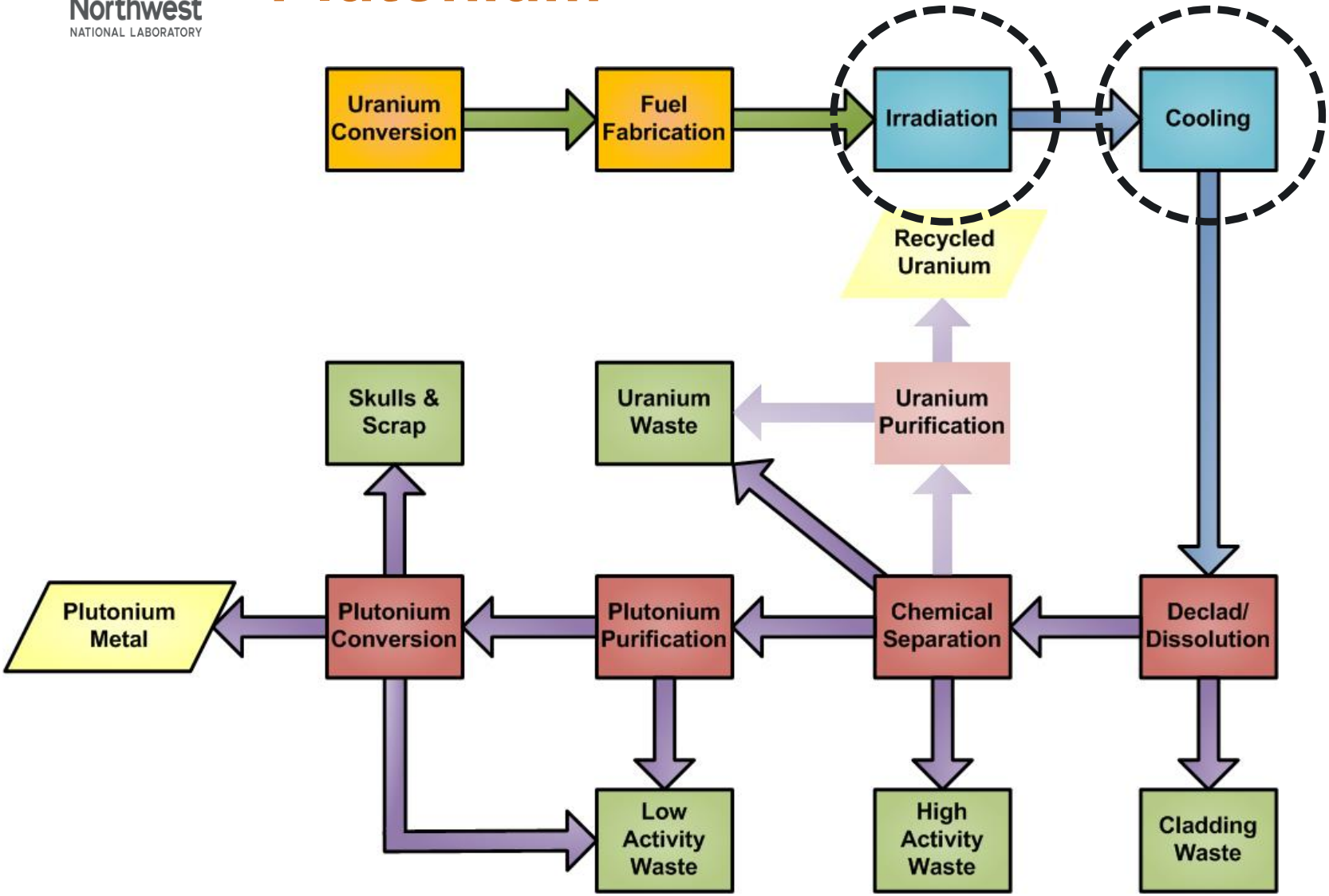


# Controlling Plutonium Oxidation States

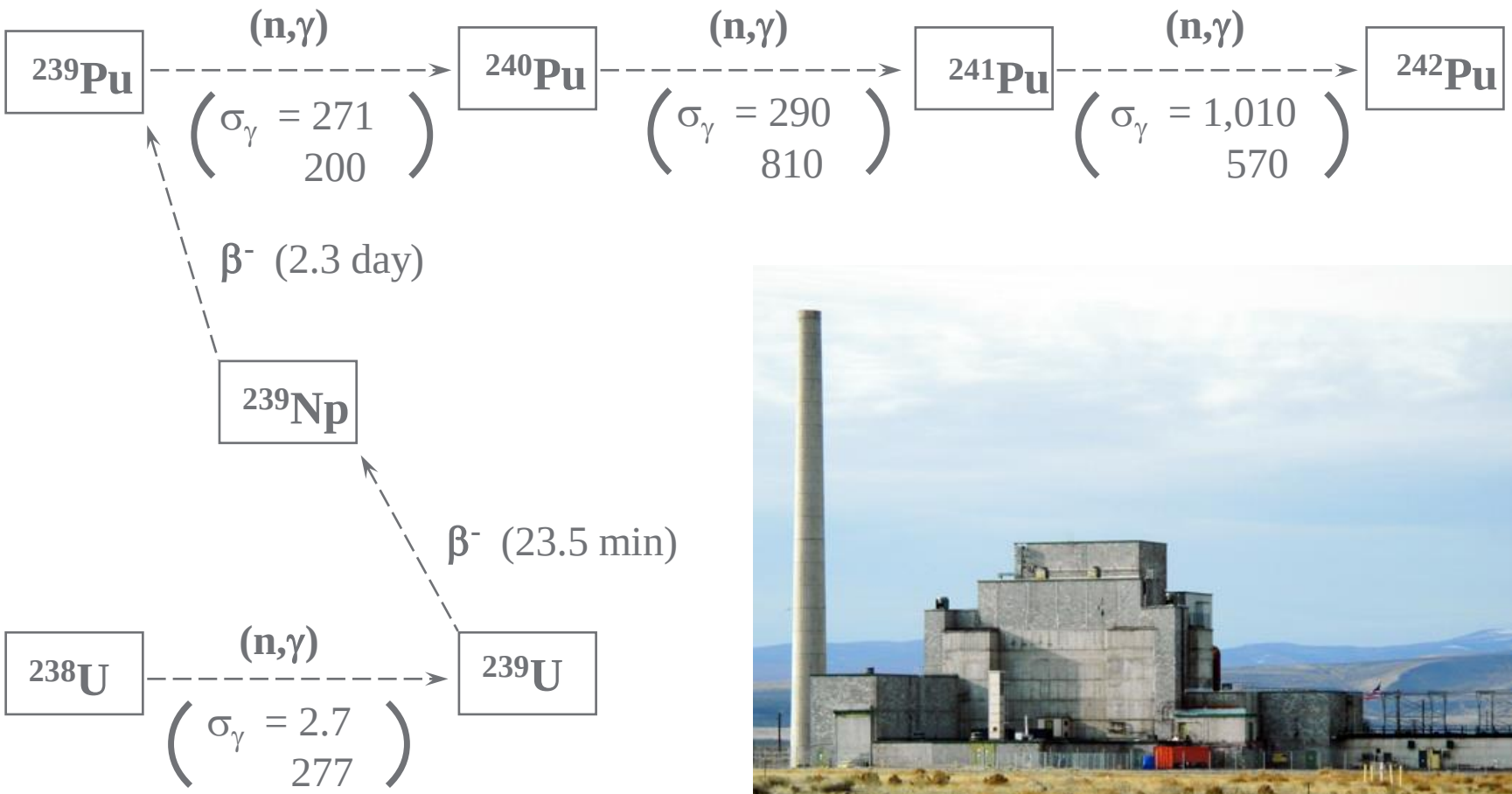
- Pu(IV) is the most stable oxidation state in $HNO_3$
- All oxidation states may be found in solution at the same time
- Pu must be in the correct oxidation state during reprocessing or losses will result
- Use of oxidants or reductants are required to achieve single oxidation state in solution



# Production of Weapons-grade Plutonium



# Plutonium Production Pathway



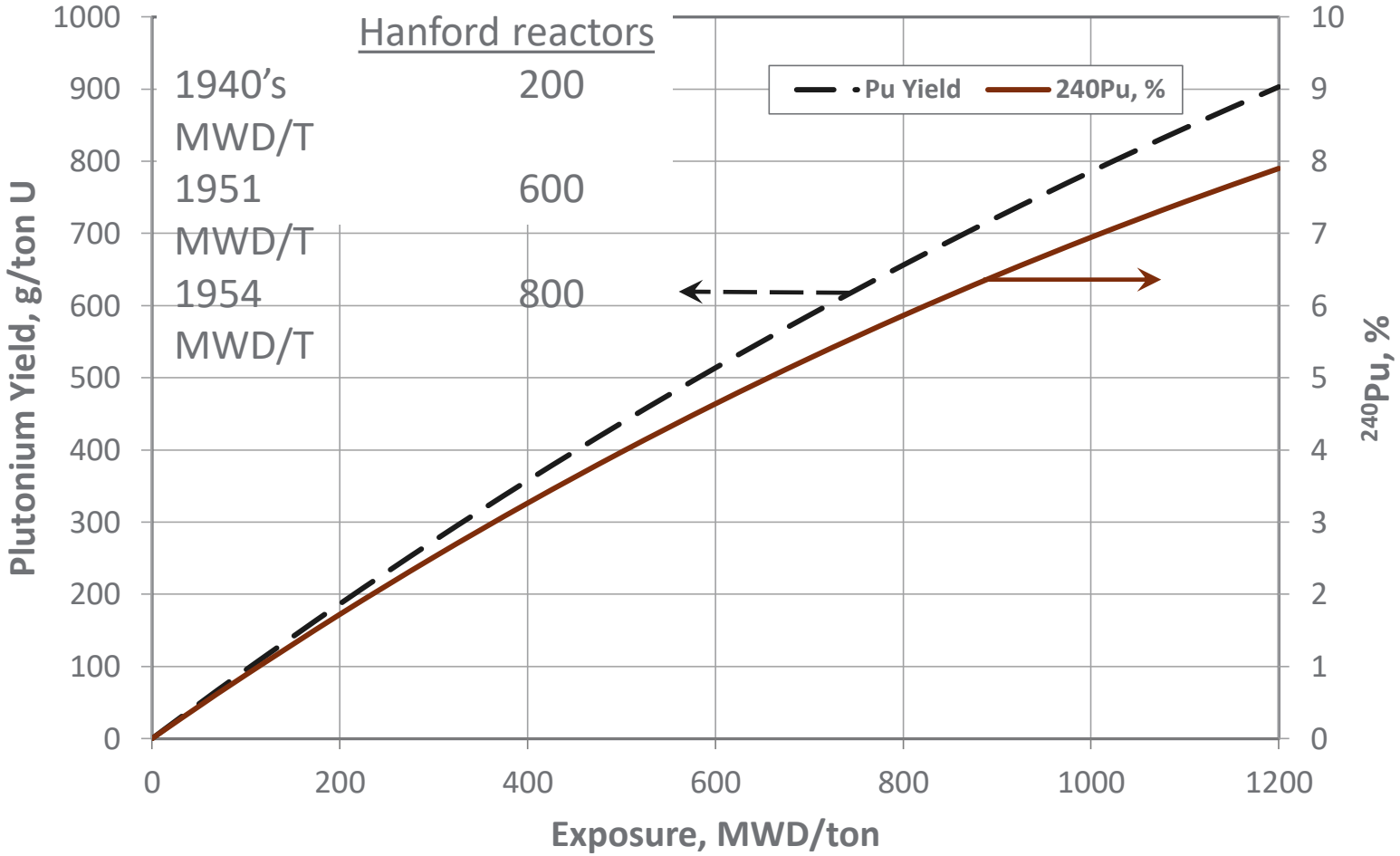
# プルトニプルトニウム-239（$^{239}$Pu）

- 半減期　2.411万年
- 崩壊方式
- アルファ線を放出して、ウラン-235（235U、7.04億年）となる。
- 生成と存在

  天然では、ウラン鉱石中にごく微量が存在するが、問題になる量ではない。

  地球上にあるものはすべて人工放射能とみてよい。
- 人工的には、ウランの中性子照射でつくられる。ウラン-238（238U）の中性子捕獲で生じるウラン-239（239U、23.45分）がベータ崩壊してネプツニウム-239（239Np、2.356日）が生まれ、その崩壊で生成する。
- 核兵器の材料と原子炉燃料として用いられる核物質である。
- 原子炉運転とプルトニウムの生成
- 原子炉を運転すると、プルトニウム-239が生成し、核分裂するとともに中性子を捕獲してプルトニウム-240（240Pu、6,564年）などが生じる。したがって、原子炉内に蓄積するプルトニウムは、いくつかの同位体の混合物である。

# Plutonium Yield and Quality in a Hanford Single-Pass Reactor




*Quality and Quantity of Plutonium Shipped to Rocky Flats 1952-1967 (HAN-99519, 1968)*
*Recommended Factors for Predicting Plutonium Yield and Quality (HW-31295, 1954)*

UNCLASSIFIED

# Fuel Clad Removal and Dissolution



- Removal of cladding
  - Mechanical or chemical
- Dissolution of the fuel
  - Nitric acid
  - Metric tons of U with kilograms of Pu
  - Fission products produce majority of the dose
- Metal Fuel

$$U + 4\ HNO_3 \longrightarrow UO_2(NO_3)_2 + 1.8\ NO + 0.05\ N_2 + 0.1\ NO_2 + 2\ H_2O$$

$$Pu + 6\ HNO_3 \longrightarrow Pu(NO_3)_4 + NO + NO_2 + 3\ H_2O$$

- Oxide Fuel

$$UO_2 + 6\ HNO_3 \longrightarrow 2\ UO_2(NO_3)_2 + NO + NO_2 + 3\ H_2O$$

$$PuO_2 + 4\ HNO_3 \longrightarrow Pu(NO_3)_4 + 2\ H_2O$$

# Early and Alternative Separation Processes

Pacific Northwest NATIONAL LABORATORY
Proudly Operated by Battelle Since 1965

- Processes previously used include:
  - $BiPO_4$-precipitation process used at Hanford, bismuth phosphate
  - REDOX-solvent extraction process used at Hanford, methyl isobutyl ketone
  - BUTEX-solvent extraction process used in England, dibutyl oxydiethyl ether
  - Acetate-precipitation process used in the former Soviet Union, sodium uranyl acetate

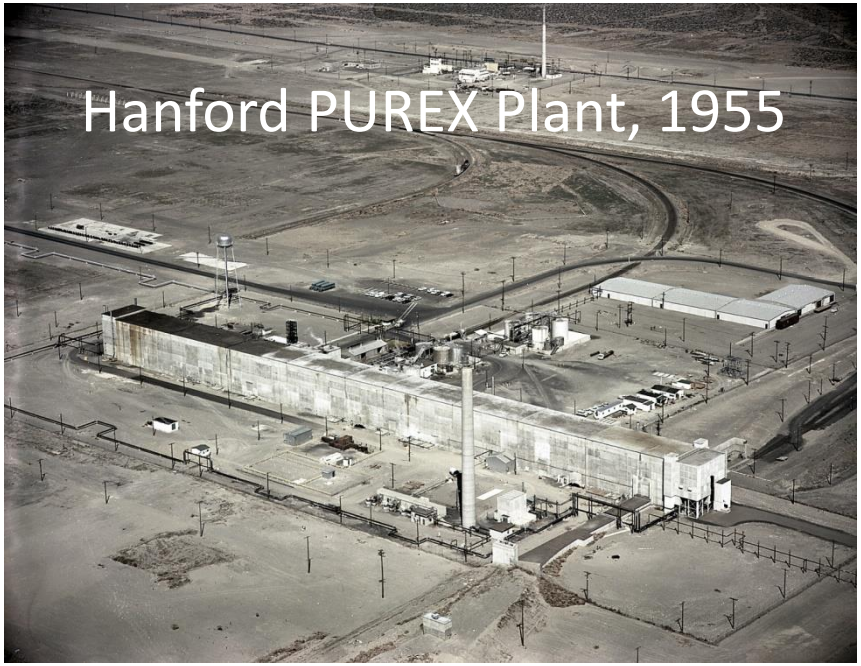
Hanford T Plant, 1945

Hanford REDOX Plant, 1950

# Chemical Separation of Plutonium

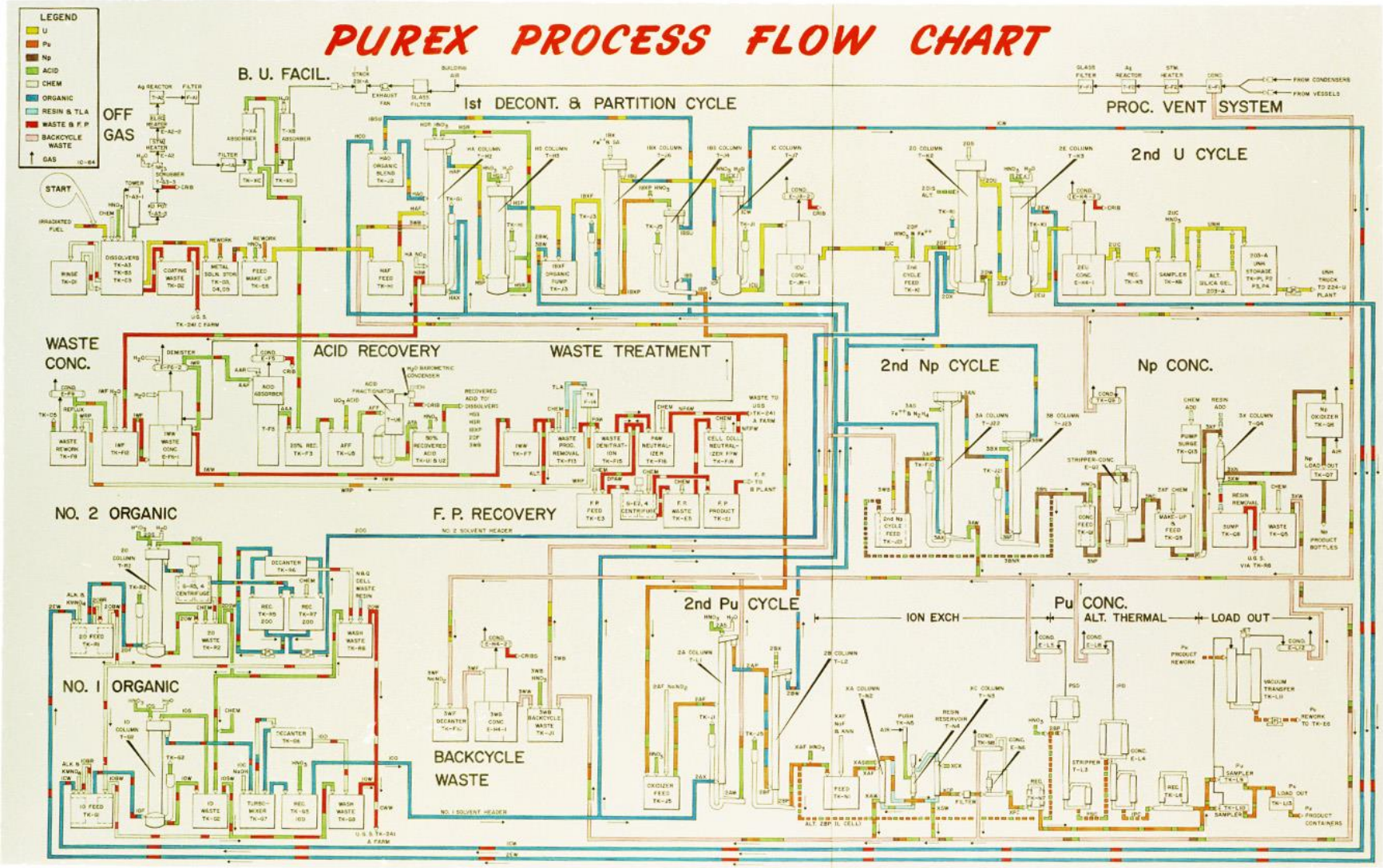
Pacific Northwest NATIONAL LABORATORY
Proudly Operated by Battelle Since 1965

- Primary process is PUREX, which is a solvent extraction process
  - Organic and aqueous phases (liquid/liquid separation)
  - Chemical separation of Pu and U and fission products
  - Multiple oxidation states and neutral complexes of U and Pu permit selective extraction of U and Pu into the organic phase
- High Pu recovery rates (99%) and separation efficiencies ($10^9$)
- Additional extraction processes
  - Purification of U
  - Separation of Np
- Reagent Recovery
  - Solvent Recyle
  - Acid (evaporation/distillation/Fume Scrubbing/Sugar Denitration)



# Purex Process Flow Chart





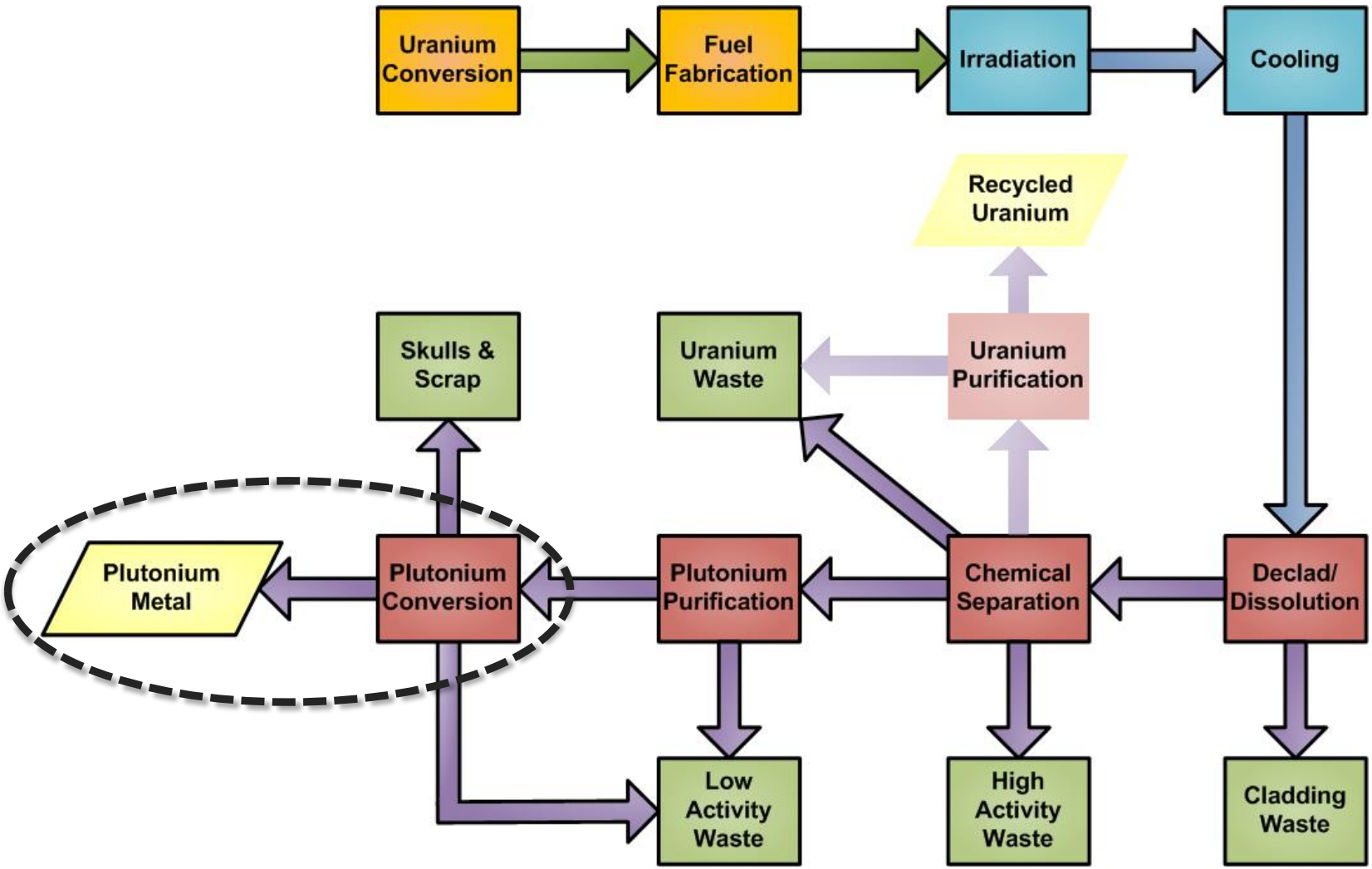
# Alternative/Advanced Aqueous Methods

Pacific Northwest NATIONAL LABORATORY
Proudly Operated by Battelle Since 1965

- PUREX process with adjustments to oxidation chemistry
- Current strategies
  - Separate U and Pu together (proliferation resistant processes)
  - Selective separations and recycling of actinides (reduce toxicity of the waste streams)
  - Combined extraction and recycling of actinides (both proliferation-resistant processes and reduced toxicity of the waste streams)

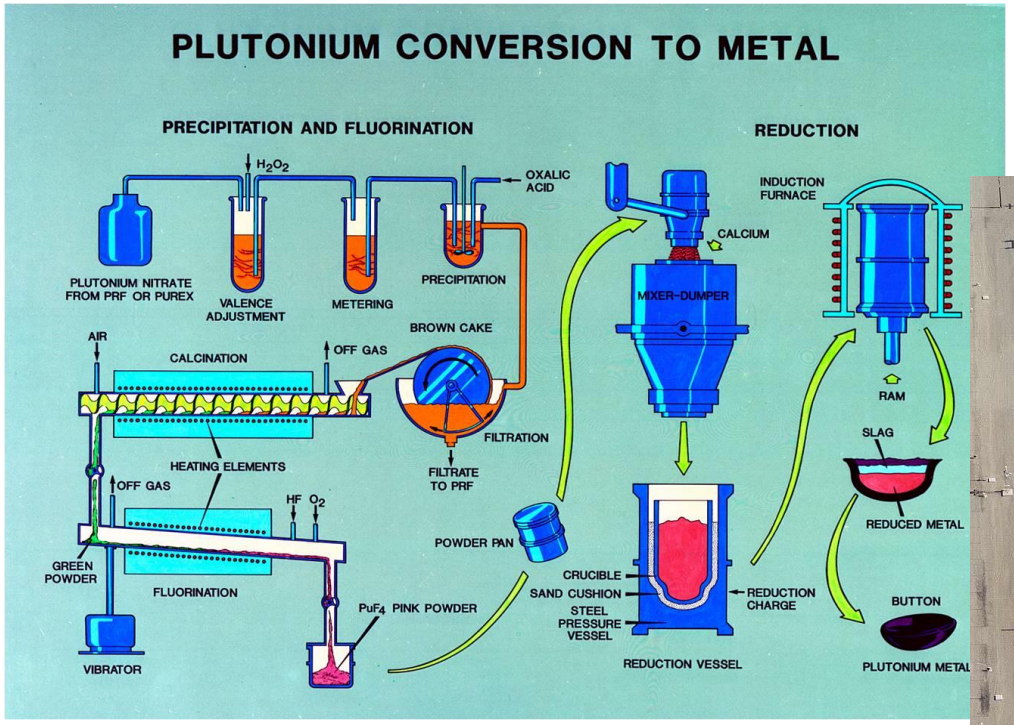
| METHOD | DESCRIPTION | SEPARATED PRODUCTS |
|---|---|---|
| UREX | Solvent Extraction | U & Pu+Np & Am+Cm &Sr & Tc & Cs |
| COEX | Solvent Extraction | U+Pu+Np & Tc & I |
| NEXT | Solvent Extraction | U & Pu+Np & Am+Cm |
| GANEX | Solvent Extraction | U+Pu+MA |
| TRPO | Solvent Extraction | Am+Cm+RE |
| TRUEX | Solvent Extraction | Am & Cm & FP |
| DIAMEX-SANEX | Solvent Extraction | Am &Cm |
| TOGDA | Solvent Extraction | Am &Cm |
| FPEX | Solvent Extraction | Cs+Sr |
| TALSPEAK | Solvent Extraction | Am &Cm |
| CYANEX | Solvent Extraction | Am |
| Ion Exchange | Adsorption IX | U & Pu & Np & RE |
| Fluoride Volatility | Distillation | U & Pu & Np & MA & RE &Cs & Sr |

# Production of Weapons-grade Plutonium



# Plutonium Precipitation and Conversion To Metal, Hanford Continuous process

Pacific Northwest NATIONAL LABORATORY
Proudly Operated by Battelle Since 1965




*"Chart – Plutonium Conversion to Metal." HW-66447. Hanford Atomic Products Operation, General Electric Company, Richland, WA, 1960.*

**Conversion Facility, began processing 1949**

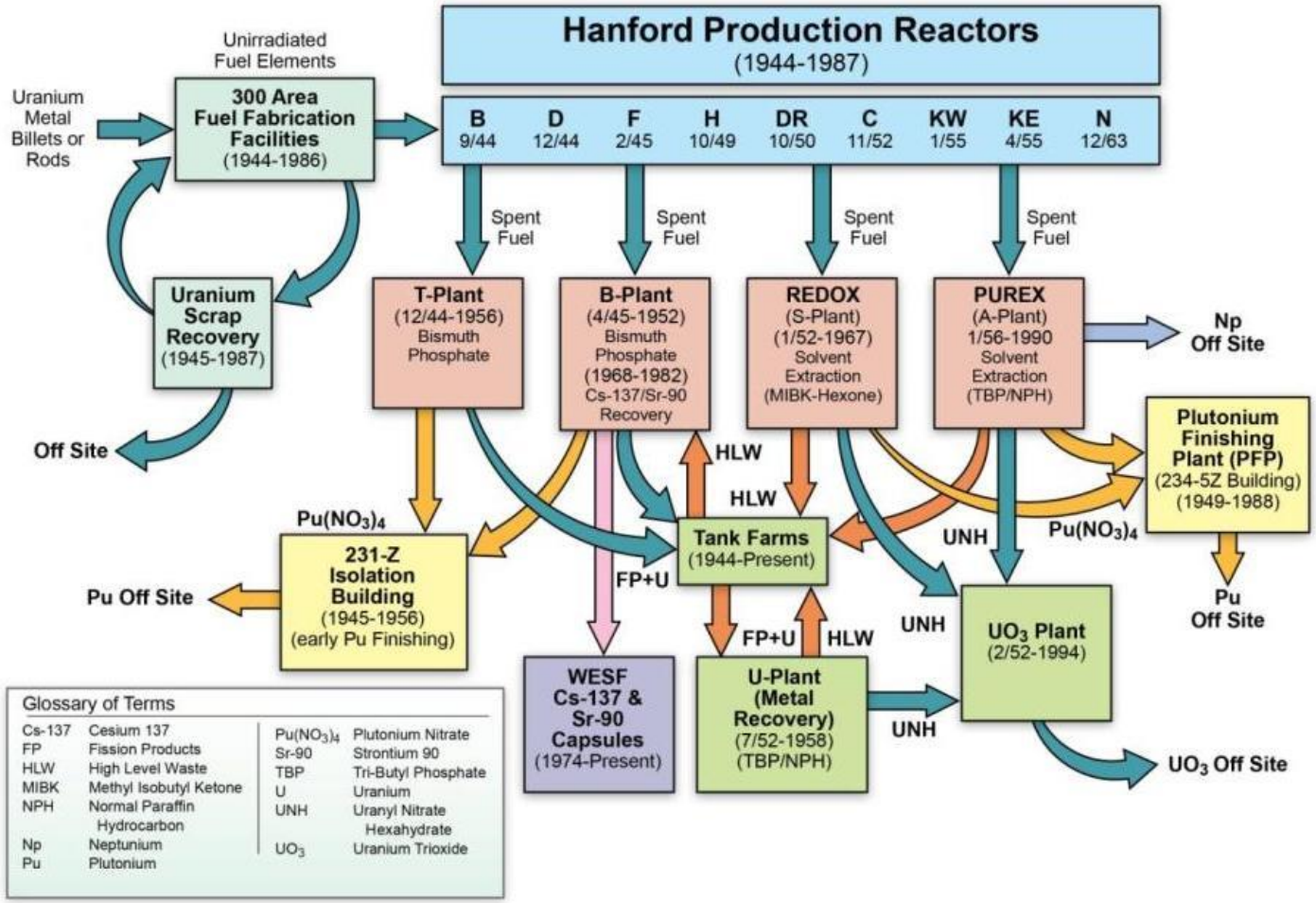
# Alloying/Casting

- Induction Furnace
  - Molten plutonium metal
  - Temperature > 640°C
- Graphite mold
- Shape similar to final component

# Production and Process Overview

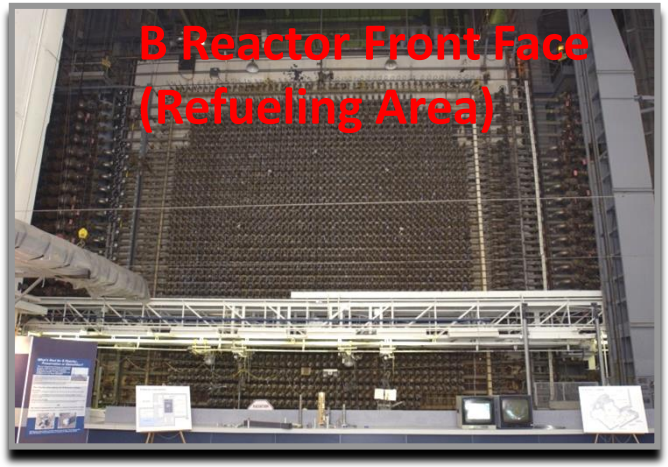
Pacific Northwest NATIONAL LABORATORY
Proudly Operated by Battelle Since 1965

## Hanford Major Production Processes and Facilities




UNCLASSIFIED

Pu Button


B Reactor Front Face
(Refueling Area)

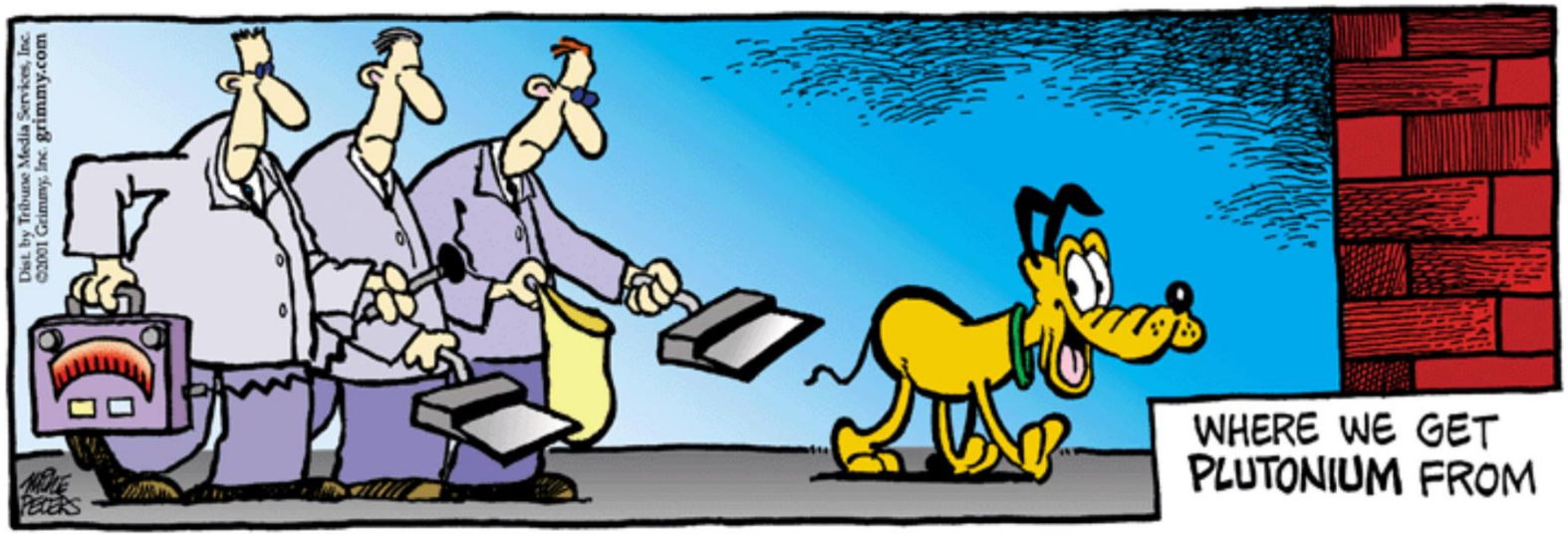
Conversion Facility

PUREX Plant

# Plutonium Chemistry and Characterization in the Context of Historic Flowsheets

Lucas Sweet, Cal Delegard, PNLL

**"…we can compare plutonium processing to digestion…"**
**– attributed to Sue Clark**




- Somehow, used nuclear fuel must be converted to useful solids.

"…the reactors and the reactor people make a big bunch of radioactive materials that can't be used. *We bring it to form.*" – Don Orth, Savannah River Site

# Parts per million concentrations to Pu feed stock solutions

T-Plant, Hanford, WA – Dec. 1945

*(World's 1st industrial scale reprocessing facility)*

*(W*

- US Methods
  - Bismuth Phosphate (1944-1956)
    - Precipitation
    - Batch
  - REDOX (1951-1966)
    - Solvent Extraction – MIBK
    - $Al(NO_3)_3$ salting agent
    - Continuous
  - PUREX (1956 - early 1990s)
    - Solvent Extraction – TBP
    - Recyclable ($HNO_3$) salting agent
    - Less volatile / better

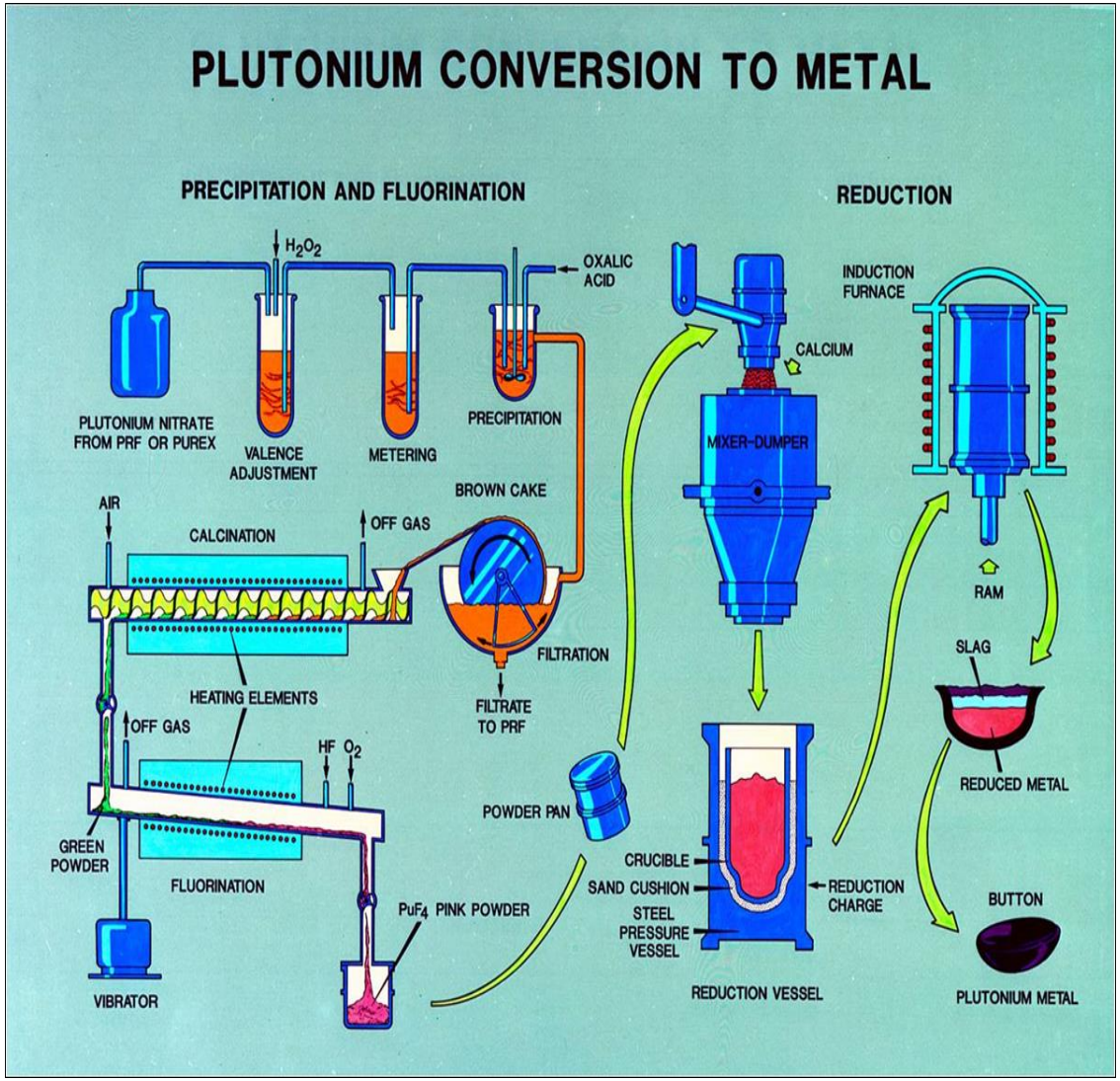
# ハンフォード再処理PUREXプラント

*Hanford's PUREX Plant.*

# Plutonium Research Facility Today

325 building
Radiochemical Processing Laboratory
Located on the southern end of the Hanford site
1953-today

# Historical Depiction of Hanford Plutonium Conversions




McCue, WP. "Chart – Plutonium Conversion to Metal." HW-66447. Hanford Atomic Products Operation, General Electric Company, Richland, WA, 1960

# Plutonium Conversions Chemistry Today

Pacific Northwest NATIONAL LABORATORY

Plutonium nitrate

Oxalic acid

Ascorbic acid

Pu (III) oxalate

Δ

130°C - <480°C

$PuO_2$

Oxalic acid

Hydrogen peroxide

Pu (IV) oxalate

Δ

130°C - <480°C

Δ

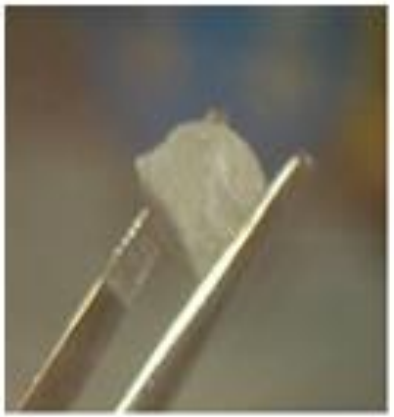
~500°C

HF

$PuF_4$

Calcium metal

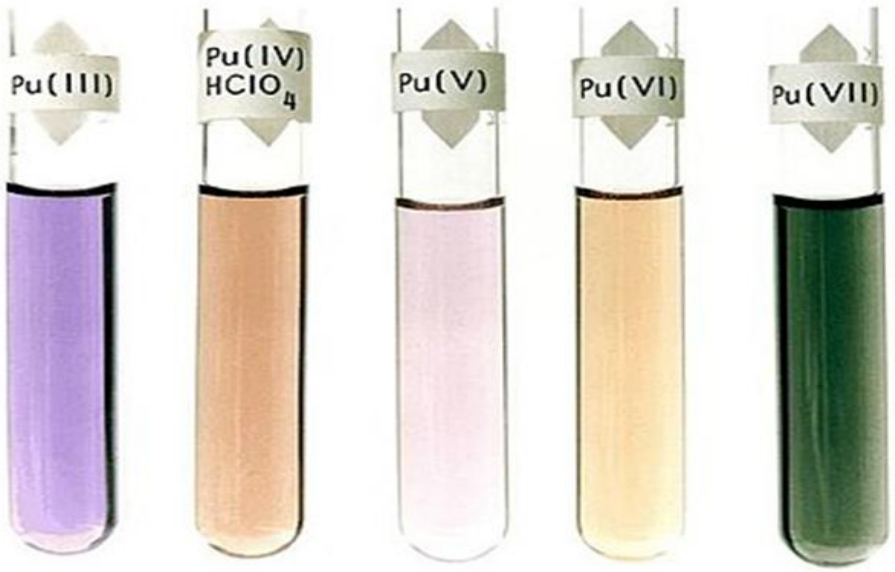
Δ



Plutonium metal

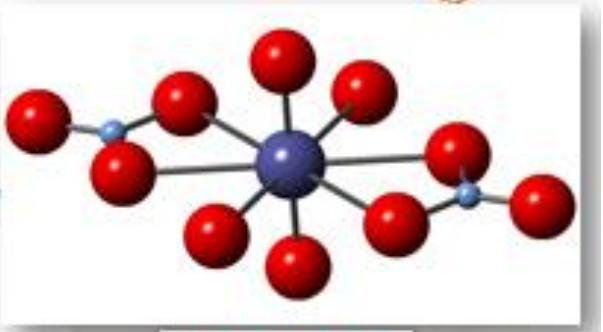
## ◆プルトニウム塩

**水溶液中では以下の5種類の酸化数を取りうる。プルトニウム塩はさまざまな色を示す。プルトニウム塩水溶液の色は、酸化数だけでなく配位する陰イオンの種類にも依存する。**

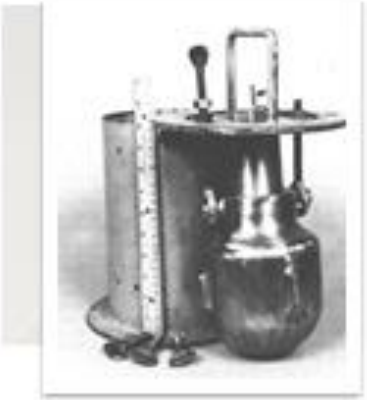



1. +III価 - 青紫色
2. +IV価 - 黄褐色
3. +V価 - ピンク色と考えられている。+V価のイオンは溶液中では不安定で、と に不均化する。さらにその は を に酸化し、自身は になる。このためプルトニウム塩の水溶液は時間が経過すると と の混合物に変化する傾向がある。
4. +VI価 - ピンク・オレンジ色
5. +VII価 - 暗赤色のイオンであり、極端な酸化性雰囲気でのみ生成する。

# Plutonium Conversions Chemistry Today

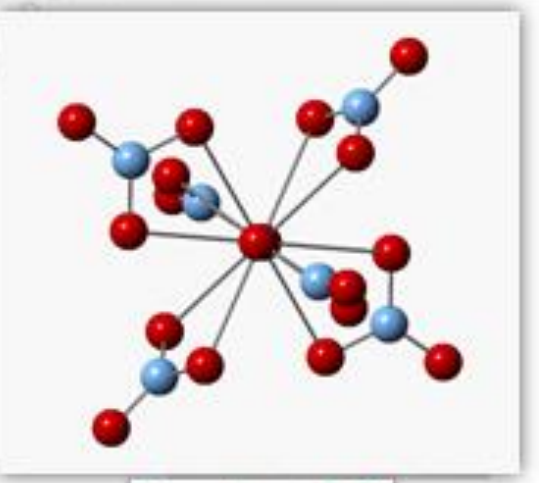


$PuO_2(NO_3)_2$



Pu(III)

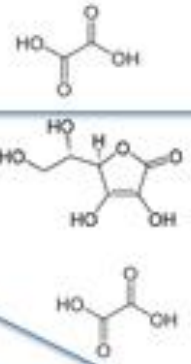
$[Pu(NO_3)_x]^{4-x}$



$[Pu(NO_3)_6]^{-2}$

# Plutonium Oxalate

Plutonium nitrate




HOOH

Pu (III) oxalate

Δ

130°C- 900°C

Pu (IV) oxalate

Ca metal

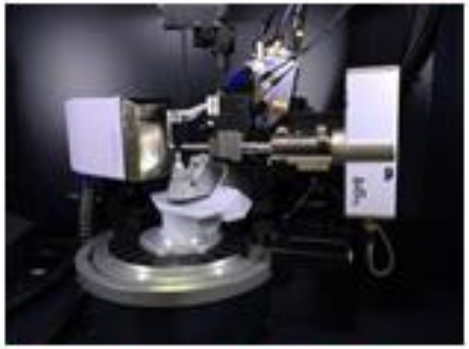
Δ

Pacific Northwest

# Plutonium Oxalate

Raman Spectroscopy

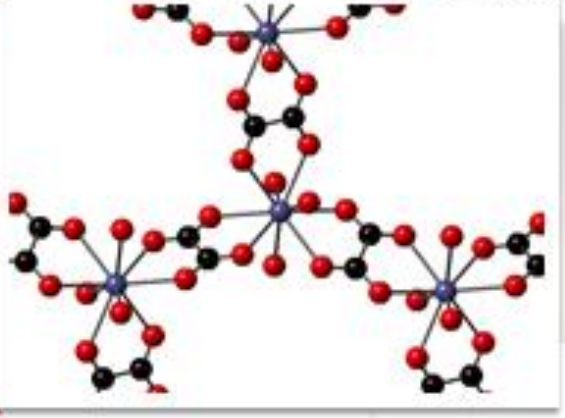
**Pu (IV) oxalate ?????**



Single Crystal X-Ray Diffraction

Pu (III) oxalate

Pu (IV) oxalate



$Pu_2(C_2O_4)_3(H_2O)_6$



Pacific Northwest NATIONAL LABORATORY

# Plutonium Conversions Chemistry Today

Plutonium nitrate

Oxalic acid

Ascorbic acid

Pu (III) oxalate

Δ

130°C - <480°C

$PuO_2$

Oxalic acid

Hydrogen peroxide

Pu (IV) oxalate

Δ

130°C- <480°C

Δ

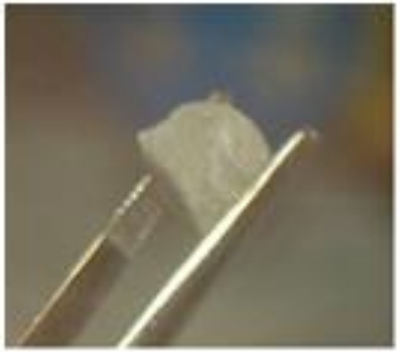
~500°C

HF

$PuF_4$

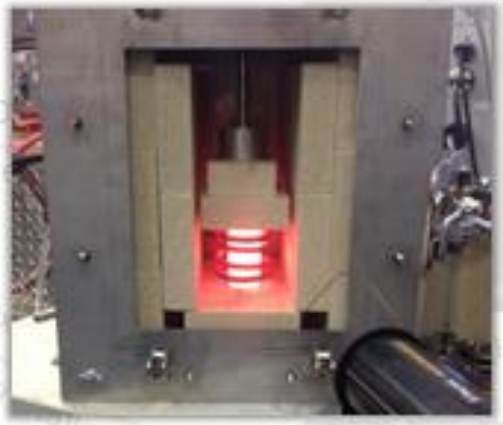
Calcium metal

Δ



Plutonium metal

# Plutonium Metal



Induction Furnace

*Induction furnace (from Baker 1946). Photo IM-9:1824 courtesy of LANL*

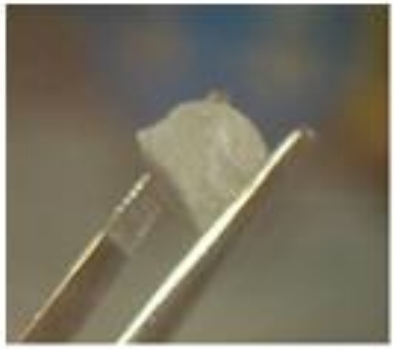
Plutonium nitrate

oxalate

$PuO_2$

HF

Pu (IV) oxalate



Plutonium metal

Calcium metal

Δ

$PuF_4$

# ~70 Years of Chemistry

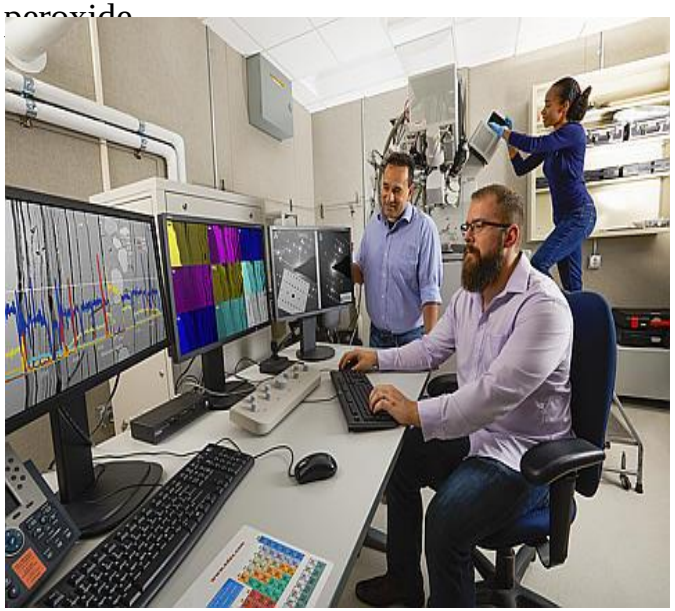
Pacific Northwest NATIONAL LABORATORY
Proudly Operated by Battelle Since 1965

- Complex redox chemistry
- Complex structure and bonding
- Few characterized compounds

**Plutonium Compound Precipitate Slurries.**
Top – left to right – Pu(III) oxalate, Pu(IV) oxalate, Pu(III) fluoride, Pu(IV) fluoride.

Bottom – left to right – Pu(IV) sulfate, Pu(IV) peroxide

325 building
Radiochemical Processing Laboratory



# 第９回INMM-ESARDA-INMMJ Joint Workshop

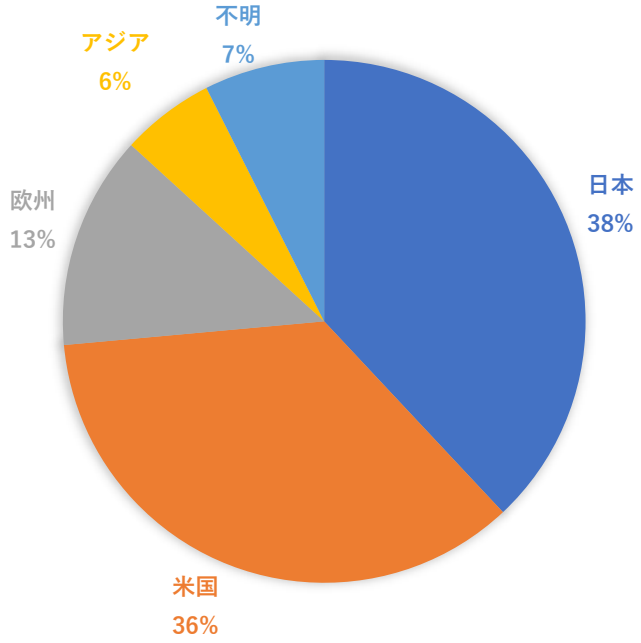
## -Future challenge for the enhancement of International Safeguards and Nuclear Security-

# 概要報告

日本核物質管理学会　長谷　竹晃

# 日時・参加者数など

日程：2019年10月7-11日
場所：東京国際交流館　プラザ平成
参加者：121名
参加者内訳：



# 過去の会合

| | 開催年 | メインテーマ | 開催場所 |
|---|---|---|---|
| 第1回 | 1996 | Science and Modern Technology for Safeguards | Arona, Italy |
| 第2回 | 1998 | Science and Modern Technology for Safeguards | Albuquerque, USA |
| 第３回 | 2000 | Science and Modern Technology for Safeguards | Tokyo, Japan<br>（参加者数93名） |
| 第4回 | 2003 | Safeguards Perspectives for Future Nuclear Environment | Como, Italy |
| 第5回 | 2005 | Changing the Safeguards Culture | Santa Fe, USA |
| 第6回 | 2008 | Meeting Safeguards Challenges in an Expanding Nuclear World | Tokyo, Japan<br>（参加者数116名） |
| 第7回 | 2011 | Future Direction For Nuclear Safeguards Verification | Aix-en, Province, France |
| 第8回 | 2015 | Building International Capacity | Jackson Lake, USA |

- ２～４年周期開催。開催国は、欧州、米国、日本で持ち回り。
- 次回は、2021～2023年に、欧州で開催予定

# プログラム

| | 1日目 | 2日目 | 3日目 | 4日目 |
|---|---|---|---|---|
| 午前 | **開会演説**<br>➢ 開会の辞<br>➢ 招待講演 | ワーキンググループセッション(WG-1,2,3)* | **全体会議（WG-4）** | ➢ WG-1まとめ<br>➢ WG-2まとめ<br>➢ WG-3まとめ<br>➢ **閉会の辞** |
| 午後 | **全体会議（1F）**<br><br>ワーキンググループセッション(WG-1,2,3)* | ワーキンググループセッション(WG-1,2,3)* | ワーキンググループセッション(WG-1,2,3)* | 福島見学ツアー（翌日まで） |
| お楽しみ会 | レセプション（主催：日本核物質管理学会会長） | バンクエット（晩餐会） | | |

*ワーキンググループセッション(WG-1,2,3)は、三会場に分かれ、平行して実施

ワーキンググループ1:　国際保障措置
ワーキンググループ2:　核セキュリティ
ワーキンググループ3:　核不拡散と軍備管理
ワーキンググループ4:　知識保持

# 開会演説(１日目)

➢開会の辞:

## ◘日本核物質管理学会会長（Masao Senzaki）

✓IAEA天野事務局長への哀悼の意
✓福島第一事故後の日本の原子力平和利用の状況、Pu利用政策、３Sの取組の重要性等
✓日本核物質管理学会の活動の現状
✓2020年東京オリンピック・パラリンピックに向けた核セキュリティに関するIAEAとの協力

## ◘INMM副会長（Susan Pepper）

✓INMMの活動状況と今後の課題
✓2021年のINMMの年次大会は、ウィーンで開催予定（米国外での開催は初の取り組み）

## ◘ESARDA会長（Willem Janssens）

✓ESARDA活動紹介
✓2019年5月の６0周年記念シンポの結果
✓今後の活動計画

# 開会演説(１日目)

- 招待講演:
  - O. Aruga (JSGO) “IAEA safeguards in Japan and its challenges”
    - ✓IAEAの20%の作業量が日本で費やされている
    - ✓Challenges：1F、廃止措置、SG実施の効果と効率化
    - ✓SLAでは、アプローチの最適化を図り、作業量を少なくし、効果を上げることを目標と主張
  - T. Renis (IAEA) “Implementation of State Level Approach”
    - ✓2014年からSLAの適用を開始し、現在、130か国、97%のNMをカバー
    - ✓SLAのキーワード：Acquisition path analysis, performance target, verification level, Effectiveness evaluation
    - ✓2019-2021年SLA projectを発足　7か国を対象にtesting・refiningを行う

# 全体会議(1日目)

1Fの現状、査察対応、R&Dについて、以下の報告

- K. Takeda (TEPCO) “Current status and challenges at 1F decontamination and decommissioning”
- B. Chesnay (IAEA) “1F Safeguards : current status and future challenges”
- N. Okuzumi (IRID) “Overview of IRID R&D for fuel debris retrieval technologies at 1F”

<u>取り出された燃料デブリの計量管理・検認技術が課題</u>

# WG-1 国際保障措置(１-4日)

- 議長: M. Hori (JAEA), J. Oddu (CTE)
- テーマ: 将来の保障措置の課題
  - ① 保障措置におけるデータの取り扱い・情報管理
  - ② 新型炉・新しい核燃料サイクル、廃止措置・長期間管理が必要な廃棄物への保障措置
  - ③ 保障措置のための核データ、保障措置に関連するコミュニケーションの強化
- サマリー：19件の発表と課題に関する議論を実施
  - ① 脳科学、ブロックチェーン等のデータ科学の活用、新技術の活用における開発者とエンドユーザーのインターフェースについて議論
  - ② 新しい燃料サイクル等に対する保障措置アプローチ作成、設計者や建設者へSGDの理解促進、保障措置終了に関連する廃棄物測定装置の開発等の必要性について議論
  - ③ 保障措置で用いられている核データの再評価の必要性について議論、地域の保障措置コミュニーケーションに関してAPSNの経験を共有。

今後のアクションとして、核データの再評価をESARDAのDA/NDA WGで検討、ESARDAに設置された地層処分に関するWGで廃止措置の保障措置を検討、INMMが2020年4月に開催するデジタル技術に関するワークショップでデータ科学の活用について議論を行うこと等を確認した。

# WG-2 核セキュリティ(1-4日)

- 議長: A. Atkins(DOE), Y. Naoi(JAEA)
- テーマ:
  - ① トレーニングセンター（NSSC、COE、VRの活用等）
  - ② 放射性物質に対するセキュリティ
  - ③ 新たな課題と対策
  - ④ 核セキュリティと保障措置の相乗効果（NMAC）
- サマリー：
  - ① VRによるトレーニングのコストパフォーマンス向上
  - ② 机上訓練、ロールプレイング訓練の有効性
  - ③ 次世代サイクルや廃止措置に対するSafeguards and Security by Designの重要性

# WG-3 核不拡散と軍備管理（1-4日）

- 議長: K.Naito(JEF), M. Dreicer(LLNL)
- テーマ:
  ① 既存の体制の軍備管理検認への活用、
  ② 新たな技術、ビッグデータ/データ処理・解析技術の応用
  ③ 戦略的輸出入管理
  ④ 将来の方向性への提言　など
- サマリー：今後の方向
  ① 不拡散・軍備管理検認関連査察等手法の改善・新手法の開発
  ② ビッグデータ/データ処理・解析技術の利用の推進
  ③ 新たな意思決定の枠組みの必要性
  ④ 次のステップ、成功に向けたESARDA-INMMの関与の検討

# WG-4 知識保持（3日目）

- 議長: M.Saito(TIT), D. Drury(IAEA)
  - Part 1: 知識維持: 手法、経験、教訓、提言
  - Part 2: 過去のイラクにおける拡散事例に基づく知識維持
- サマリー:

  Part 1
  - バークレー大学, LANL, JAEA, NRC, Witwatersrand大学,東工大より、知識の伝承に向けた取り組みついて紹介
  - 齊藤議長より、東工大が実施している３Sに関する国際人材育成の取り組みについて紹介がなされ、Global Young Networkの構築について、推奨

  Part 2
  - イランの事例を参考に、技術的側面、法律的側面、政治的側面の３つのグループに分かれ、知識の伝承について、議論

# 閉会の辞(4日目)

✓Michael Whitaker(INMM国際保障措置技術部議長)
✓Julie Oddou (ESARDA副会長)
✓Tomonori Iwamoto (日本核物質管理学会理事)

トピックス

✓本会合開催に向けた岩本理事への尽力に対し感謝
✓2022年にIAEAシンポジウムを予定。2023年に第10回Joint Workshopを欧州で開催予定。
✓台風１９号の予報を説明

# 福島ツアー

- 1Fサイト内を見学
- Jビレッジに宿泊
- 23名が参加
- 台風１９号の影響を考慮し、12名がキャンセル

# 集合写真

ご清聴ありがとうございました。
このような発表の機会を頂き、感謝します。

# ポスターセッション

# 高い固有安全性・核セキュリティ性・核不拡散性を有する革新的中小型軽水炉の研究
# （1）MA および回収ウランを用いたシリサイド燃料

Feasibility study on innovative small and medium modular reactor with inherent nuclear safety, security, and non-proliferation features
(1) Silicide fuel with MA and/or RepU

*三星　夏海[1]，相楽　洋[1]
[1]東京工業大学
*Natsumi Mitsuboshi[1], Hiroshi Sagara[1]
[1]Tokyo Institute of Technology

Silicide fuel has high heavy metal density, thermal conductivity and chemical stability, and these features are expected to improve the performance of safety, security and non-proliferation of light water reactors without deteriorating reactor operation performance. The purpose of this study is to design the small and medium modular reactor with inherent nuclear safety, security, and non-proliferation features by utilizing silicide fuels. In this paper, we report neuronics analysis results of silicide fuel using MA and RepU in the reactor.

## 1. 緒言

近年、僻地や電力網から外れた地域、大量の電力を消費する施設におけるエネルギー供給源として、中小型炉の利用が期待され実用化研究が進められている。中小型炉は、分散型かつ安定的なエネルギー供給を可能にする。一方で、分散型中小型炉の世界的な普及により、国際保障措置活動の総量増加が見込まれる。さらに、大型発電所並みの安全や核セキュリティ規制が要求された場合、事業者のコスト負担が大きくなるため、固有安全機能の積極導入によるシステムの簡素化が求められる。

シリサイド（$U_3Si_2$）燃料は、ウラン密度が大きくかつ熱伝導率も高いという性質を有している[1]。これにより、除熱性能が向上し、事故時や妨害破壊行為時における耐性を高めることが期待される。さらにシリサイド燃料は、その化学的安定性ゆえに Pu 単体分離を技術的に困難にし、不正転用を防止することにより核不拡散性および核セキュリティ性を高めることが期待される[2]。またシリサイド燃料の高ウラン密度は、運転期間の長期化にも貢献する。

マイナーアクチニド（MA）や回収ウラン[3]（Reprocessed U、以下 RepU）には、原子炉内核変換により $^{238}$Pu 等の偶数番号 Pu 同位体を生成し、Pu の Material Attractiveness (不正利用価値[4]) を低減させる核種が含まれている。これらの核種をシリサイド燃料に加えることで Pu 同位体の点からも核不拡散性を向上させることが期待される。物理的防護のレベルを下げる。セキュリティ。安全性が核セキュリティにつながる。

本研究は、シリサイド燃料を用いた高い固有の安全性・核セキュリティ性・核不拡散性を有する中小型軽水炉の原子炉概念を構築することを目的とする。本論文では特に MA や回収ウランを用いたシリサイド燃料の原子炉内核特性に対して報告を行う。

## 2. 評価手法

MA や回収ウランを利用したシリサイド燃料の特性を評価するため、(1)基本核特性評価、(2)核・熱的安全性評価、(3)国家および非国家主体の核拡散脅威に対する不正利用価値評価を行う。

本研究では中性子輸送計算に対して連続エネルギー法に基づくモンテカルロ計算コード MVP、燃焼計算に対しては MVP-BURN を用いた。また、核データライブラリには JENDL-4.0 を用いた。基準とするシリサイド燃料（以下、$U_3Si_2$ 燃料）として、密度 11.6 g/cm$^3$、$^{235}$U 濃縮度 4.11 wt%と仮定した。

今回は基準とする $U_3Si_2$ 燃料に加え、$^{241}$Am 添加および回収ウランを用いた $U_3Si_2$ 燃料に対して燃焼計算を行い、基本的な燃焼特性評価を行った。

MA 代表核種である $^{241}$Am は、中性子毒物としての働きだけでなく、$^{238}$Pu を娘核種として持つ。

回収ウランには天然ウランには含まれていない $^{236}$U が含まれている。$^{236}$U は中性子吸収断面積が大きく、反応度を減少させる性質を持つ。さらに $^{241}$Am と同様に $^{238}$Pu を娘核種として持つ。今回は、回収ウランと濃縮ウランを混合することによって、再濃縮するブレンディング法を想定した。

## 3. 結果

**図 1** に $U_3Si_2$ 燃料、$^{241}$Am 0.5 wt%添加 $U_3Si_2$ 燃

料（以下、$^{241}$Am 燃料）および回収ウランを用いた $U_3Si_2$ 燃料（以下、RepU 燃料）の燃焼反応度曲線を示した。また**図 2** には $U_3Si_2$ 燃料と $^{241}$Am 燃料に対して、燃焼初期（0 EFPD）、中期（150 EFPD）、末期（1347 EFPD）における各核種の正味の中性子生成率を示した。核種 $i$ の正味の中性子生成率 $C_i$は式（1）のように定義した。

$$C_i = \left(\nu_i \sigma_{i,f} + 2\sigma_{i,(n,2n)} + \cdots - \sigma_{i,a}\right) N_i \emptyset \qquad (1)$$

$\nu$ は核分裂反応 1 回あたりに発生する平均中性子数、$\sigma$ は反応における微視的断面積[cm²]、$N$は原子数密度[/cm³]、$\phi$ は中性子束[/cm²/s]を示している。**図 1** 中の FP は核分裂生成物を指している。

$^{241}$Am 燃料の初期無限増倍率は $U_3Si_2$ 燃料よりも、約 20 %減少し $^{241}$Am による初期余剰反応度の抑制が確認された。また燃焼初期から中期にかけて、$^{241}$Am 燃料の無限増倍率が増加した。これは $^{241}$Am の減少とともに、核分裂性核種である $^{242m}$Am が増加したためと考えられる。

$U_3Si_2$ 燃料および RepU 燃料の燃焼曲線を比較すると、燃焼サイクル全体を通して RepU 燃料の無限増倍率が $U_3Si_2$ 燃料よりもわずかに低くなることが分かった。これは $^{236}$U の中性子吸収によって RepU 燃料における反応度が減少したためと考えられる。

また Pu の不正利用価値を評価する上で重要な $^{238}$Pu の同位体比を導出するために、短半減期親核種も考慮に入れた式(2)用いた。燃焼末期における $^{238}$Pu 同位体比は、$U_3Si_2$ 燃料においては 3 %となったのに対して、RepU 燃料においては 5 %となった。$^{241}$Am 燃料におけ $^{238}$Pu の同位体比は、燃焼期間を通して 10 %以上の $^{238}$Pu の同位体比を有していた。

$$R_{^{238}Pu} = \frac{^{238}Pu + ^{242}Cm + ^{242}Am \times 0.827}{^{238,239,240,241,242}Pu + ^{239}NP + ^{242}Cm + ^{242}Am} \qquad (2)$$

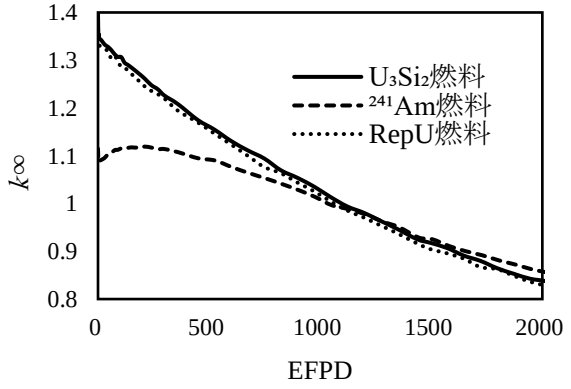



**図 1　各燃料における燃焼反応度曲線**

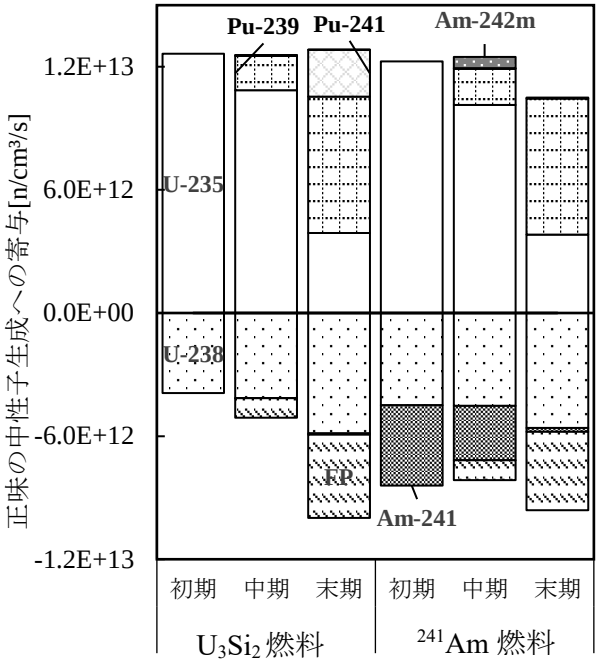



**図 2　各核種による反応度への寄与**

## 4. 結言

本論文では MA や回収ウランを用いたシリサイド燃料の原子炉内核特性を明らかにした。$U_3Si_2$ 燃料に $^{241}$Am の添加により、初期余剰反応度が大幅に抑制され、かつ燃焼末期における反応度の向上を確認した。これにより反応度制御性を高めること、また燃焼期間の延長につながる。さらに、$^{241}$Am の添加によって $^{238}$Pu の同位体比の大幅な向上が見込まれることを確認した。また、回収ウランを用いた $U_3Si_2$ 燃料においては、燃焼サイクル全体を通して反応度をやや減少させ、$^{238}$Pu の同位体比を向上させた。これは Pu の Material attractiveness を低減させ、核不拡散性および核セキュリティ性を高めることにつながる。今後は他 MA 核種や回収ウランを用いた $U_3Si_2$ 燃料の燃焼特性、および核不拡散性、核セキュリティ性の定量評価を行う。

### 引用・参考文献

[1] Kyle D. Johnson et al. "Fabrication and microstructural analysis of UN-U3Si2 composites for accident tolerant fuel applications", J.Nucl. Mat. 477., (2016).

[2] 藤縄主税 et al.,“高い固有安全性・核不拡散性を有する軽水炉用燃料の研究”, AESJ 2018 Ann. Mtg.

[3] K. Fukuda, H. Sagara et al., ”Feasibility of Reprocessed Uranium in LWR Fuel Cycle for Protected Plutonium Production”, J. NUCL. SCI. TECHNOL., (2008)

[4] C.G. Bathke, H. Sagara et al., “Summary of a joint US-Japan study of potential approaches to reduce the attractiveness of various nuclear materials for use in a nuclear explosive device by a terrorist group”, Global2013.

# 高い固有安全性・核不拡散性を有する軽水炉用燃料の研究
# （2）U-Pu シリサイド燃料

Feasibility study on light water reactor fuel with inherent safety and non-proliferation features
(2) U-Pu Silicide Fuel

*天野宰, 相楽洋 韓治暎
東京工業大学
*Tsukasa Amano, Hiroshi Sagara, Chi Young Han
Tokyo Institute of Technology

After Fukushima nuclear power plant accident, it is socially demanded that the intensive 3Ss(Safety/Security/Safeguards) characteristics of nuclear system are studied. Silicide fuel has characteristics of high fissile density, high thermal conductivity and chemical stability, and 3Ss characteristics are expected to enhanced with the use of silicide fuel. The purpose of this study is to reveal the effect of U-Pu silicide fuel on the enhancement of 3Ss features in light water reactors by evaluating neutronics, safety and non-proliferation features. Currently, the fundamental neutronics calculation results show better performance when using U-Pu silicide fuel compared to MOX fuel due to its higher fissile density. The effect on non-proliferation features and safety will be evaluated as future works.

## 1. 緒言

福島第一原子力発電所事故以降、原子力システムの 3S 特性(Safety・Security・Safeguards)の向上が社会から求められている。軽水炉の安全性向上を狙ったシリサイド燃料* 研究やその燃料サイクル研究が進められており[1-2]、高重金属密度、高熱伝導性、化学的安定性などの固有特性により、ウラン燃料において酸化物に対する優位性を示してきた[3]。本研究では、既存の軽水炉に U-Pu シリサイド燃料を用いた場合の(1)PWR における基本核特性、(2)安全性、(3)核不拡散性の向上効果を明らかにすることを目的とする。前発表では、シリサイド燃料の Pu 単体抽出困難性による核不拡散性向上効果の初期検討を発表した。本発表では、(1)(3)について従来の MOX 燃料との比較結果を報告する。

## 2. 研究手法

U-Pu シリサイド燃料として、Pu 富化度 7wt.% $(U,Pu)_3Si_2$ を評価対象燃料とした。基本核特性では、MVP/MVP-BURN 及び核データライブラリ JENDL-4.0 を用い、U-Pu シリサイド燃料の燃焼特性を、従来の MOX 燃料と比較した。
核不拡散性評価では、対国家並びに対非国家主体を想定し、核物質の物性そのものによる核爆発装置 (NED) への転用困難性を示す Material Attractiveness(不正利用価値)[4]を用い評価する。想定した脅威(国家主体、または非国家主体)に対し、核物質の「取得」、NED 利用の最終形態(金属 U または金属 Pu)まで転換する「処理」、そして NED を製造する「使用」の各段階で重要な核物質の物性値を求める。求められた物性値の評価における指標は、あらかじめ定義された 4 段階のグレードに分けられた NED への転用困難性と照合することで定量的かつ包括的に評価する。

## 3. 結果

図 1 に結果の例として、Pu 富化度 5.5wt.%MOX 燃料、5.5%U-Pu シリサイド燃料及び、5.5%PuMOX 燃料と余剰反応度が等しい 8%U-Pu シリサイド燃料の燃焼反応度曲線を示す。横軸の燃焼度は、燃焼期間を示す EFPD(Effective Full Power Day)で示した。$k_{inf}$=1 となる燃焼度を求めた結果、5.5%PuMOX 燃料が 900[EFPD]であるのに対して、5.5%Pu と等価な U-Pu シリサイド燃料の場合は 1005[EFPD]であり、最大取り出し燃焼期間が 12%向上した。また、8%PuU-Pu シリサイド燃料の場合は 1432[EFPD]となり、MOX 燃料と比較して 59%向上した。シリサイド燃料の固有特性の一つである重金属密度の高さによって、同じ Pu 富化度でも燃焼期間を向上させることを明らかにした。

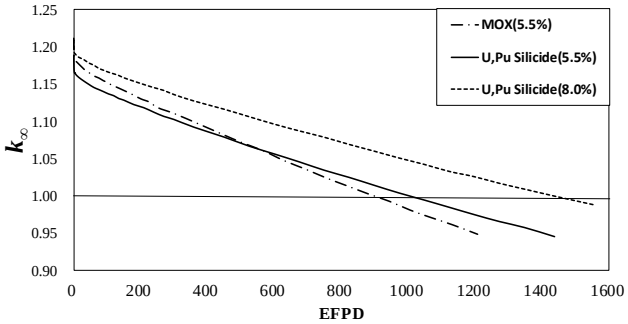



図 1. MOX 燃料及び U-Pu シリサイド燃料の燃焼反応度曲線

## 4. 結言

本研究では、U-Pu シリサイド燃料の基本的核特性評価を行い、重金属密度の高い U-Pu シリサイド燃料は従来の MOX 燃料と比較して、燃焼期間を向上させることを明らかにした。

今後は、まず核不拡散性の評価を行い、U-Pu シリサイド燃料の化学的安定性による向上効果を明らかにする。また、安全性評価として、ドップラー温度係数や減速材温度係数を評価する核的安全性評価と、事故時を想定した非定常状態での挙動解析等の熱的安全性評価を予定している。

## 参考文献


[1]. **C. EYSSERIC et al.**, "Status of silicide fuels reprocessing at La Hague plant", 298-307, RRFM2014.

[2]. **Kyle D. Johnson et al.** "Fabrication and microstructural analysis of UN-U3Si2 composites for accident tolerant fuel applications", 18-23, Journal of Nuclear Materials 477 (2016).

[3]. 藤縄主税, “高い固有安全性・核不拡散性を有する軽水炉用燃料の研究”, 2A06, 日本原子力学会 2018 年春の年会.

[4]. **C.G. Bathke, H. Sagara et al.**, “Summary of a joint US-Japan study of potential approaches to reduce the attractiveness of various nuclear materials for use in a nuclear explosive device by a terrorist group”, 230-236, Global2013.


* ウランと珪素の化合物であるシリサイド燃料は、酸化物燃料と比較して重金属密度が高く、古くから試験研究炉用燃料として用いられてきた。また熱伝導性の良さから事故耐性燃料の一つとして研究開発が進められている。

# 溶融塩高速炉の核不拡散性に関する研究

Nonproliferation features of molten salt fast reactor

*青柳涼[1]、Sunil S. Chirayath[2]、相楽洋[1]

[1]東京工業大学　[2]テキサス A&M 大学[2]

*Ryo Aoyagi[1], Sunil S. Chirayath[2], Hiroshi Sagara[1]

[1] Tokyo Institute of Technology [2] Texas A&M University

Molten Salt Fast Reactor (MSFR) is a bulk Special Nuclear Material (SNM) handling facility. This is different from the traditional item handling of light water and fast reactors. This aspect of bulk SNM handling put forth challenges in formulating nuclear safeguards approaches for MSFR. Since MSFR is in the development stages, a safeguards-by-design philosophy is appropriate in formulating the safeguards approach. The nuclear fuel is in the molten form in MSFR, which is mixed with the coolant and several flow loops are containing SNM (thorium-$^{233}$U fluorides mixed with lithium fluoride). As a basic safeguards approach, it is important to perform SNM concentration and volume measurements at the exit and entrance of each SNM molten salt flow loop such as core recirculation, blanket recirculation as well as the SNM reprocessing flow loops. Hybrid K-Edge Densitometer (HKED) can be used for SNM concentration measurements for concentration measurements. HKED concentration measurements along with volume measurements using Isotope Dilution Mass Spectrometry (IDMS) can account for the SNM in MSFR. We will discuss the progress made at Tokyo Institute of Technology in developing MSFR safeguards approaches including calculations of SNM flow rate in loops, Material Unaccounted For (MUF) and MUF uncertainty ($\sigma_{MUF}$).

## 1. 緒言

溶融塩炉は第 4 世代原子力システムの候補原子炉の一つであり、中でも溶融塩高速炉は優れた中性子経済性から高燃料増殖性や高核変換率が期待され、燃料として①Th-$^{233}$U、②$^{235}$U-$^{238}$U③Pu-MA を用いた研究開発が世界各国で進められている[1,2]。原子炉システム概念については研究開発が進められているが、保障措置概念検討は行われておらず、通常原子炉と異なるバルク施設としての困難性から、Safeguards by Design を取り入れ多くの研究開発を必要とする。

本研究では、溶融塩燃料として Th-$^{233}$U フッ化物を用いた溶融塩高速炉システムの保障措置アプローチを検討し、その技術的要件を定量的に明らかにすることを目的とする。本論文では、保障措置アプローチに重要な原子力システム内の核物質フローダイアグラムを例示し、研究計画を提示する。

## 2. 研究手法

バルク施設としての溶融塩高速炉の保障措置を検討するにあたり、原子炉溶融塩の炉心再循環、ブランケット再循環、更に Th-$^{233}$U 再処理フローループなど、各配管出入口における核物質の濃度・容積測定が重要である。密度測定には、Hybrid K-Edge Densitometer (HKED)を使用し、体積の測定には、Isotope Dilution Mass Spectrometry (IDMS)を使用することを想定する。各測定器の不確かさとして International Target Value 2010[3]を参照する。各循環・ループ内の Th-$^{233}$U の流入量計算、不明核物質量の計算(MUF)、およびその不確かさの計算($\sigma_{MUF}$)を実施する。MUF の主要な原因として溶融塩燃料の配管内構造物との化学反応による腐食が想定され、本研究では腐食率

をパラメータとして MUF への影響解析を行う。平衡炉心の燃料組成、システム内マスバランスを、MCNP6.2 の燃焼オプションを用いて計算する。

## 3. 結果と今後の計画

図 1 に、参考文献[1,2]のデータを参照し、代表的な溶融塩高速炉における核物質のフローダイアグラムを作成した。本データを足掛かりに、本研究で計算する燃料組成と濃度、測定機器を組み合わせ、保障措置アプローチを具体化させる。

更に、溶融塩燃料の Material Attractiveness （不正利用価値）を定量評価し、保障措置への要求のみならず核セキュリティ要求も定量化する予定である。

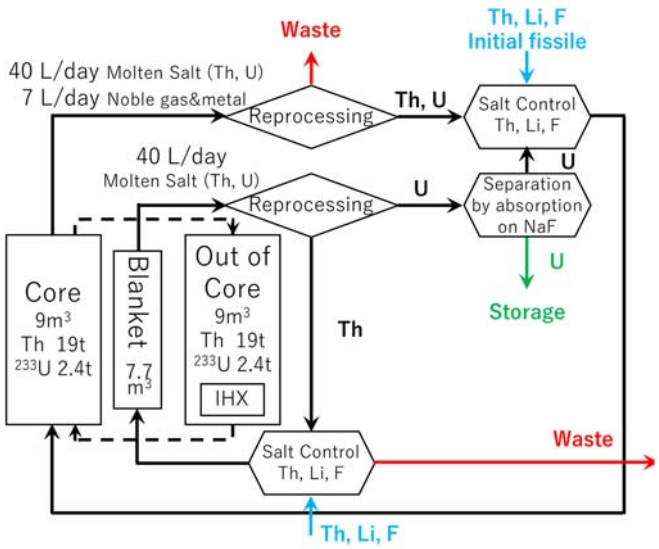



図 1　溶融塩高速炉の核物質フローダイアグラム

## 4. 結言

本研究では、溶融塩燃料として Th-$^{233}$U フッ化物を用いた溶融塩高速炉システムの保障措置アプローチを検討し、その技術的要件を定量的に明らかにすることを目的とし、手始めに保障措置アプローチに重要な原子力システム内の核物質フローダイアグラムを例示した。今後、各循環・ループ内の Th-$^{233}$U の流入量計算、核種組成計算、核物質の不正利用価値、MUF、および $\sigma_{MUF}$ の計算を実施し保障措置アプローチへの技術的要件を明らかにしていく。

### 引用・参考文献


[1]. M. BROVCHENKO et al., “Neutronic benchmark of the molten salt fast reactor in the frame of the EVOL and MARS collaborative projects”, EPJ Nuclear Sci. Technol. 5, 2 (2019) published by EDP Sciences, (2019). https://doi.org/10.1051/epjn/2018052.

[2]. L.L.W. Frima et al, “BURNUP IN A MOLTEN SALT FAST REACTOR”, Delft University of Technology (2013)

[3]. IAEA, “International Target Values 2010 for measurement uncertainties in safeguarding nuclear materials”, STR-386, Vienna, November (2010).

# 核鑑識のための軽水炉由来照射済燃料核種組成の基本特性と判別指標の研究 (1)研究計画

Characteristics of Nuclide Composition in Spent Nuclear Fuel from Light Water Reactors for Nuclear Forensics
Research Plan for finding out new discrimination indices

*加賀山 雄一[1], 相楽 洋[1], 韓 治暎[1]
[1]東京工業大学
*Yuichi Kagayama[1], Hiroshi Sagara[1],and Chi Young Han[1]
[1]Tokyo Institute of Technology

Nuclear forensics is one of the effective measures of nuclear security by analysis of seized nuclear or radioactive materials to prevent and respond to the illegal acts. As one of the important analytical parameters in nuclear forensics, nuclide composition in spent nuclear fuel from light water reactors is being studied to distinguish the reactor and fuel type, by establishing multi-variance comprehensive database with burnup analysis calculation. And, new discrimination indices will be discussed in the future study. In the present paper, the detail research plan is described.

## 1. 緒言

核鑑識は核物質に係る不法行為に対抗するための技術であり、大きく分析技術と起源を特定するためのデータベース構築からなる。欧州、米国で活発に進められ、現在は核鑑識国際技術作業部会や国際原子力機関を中心に世界各国で開発が進められている。わが国では日本原子力研究開発機構や科学技術警察研究所が精力的に進めているが、実際の運用までには様々な課題が残り、データベースの構築もその一つである[1,2]。

本研究では、核鑑識の重要パラメータの一つである核種組成について、現行広く利用されている軽水炉型、燃料型毎の基本特性を理解し、これらの相関性を包括的に分析するための数値解析を用いた多変量データベースの構築と判別指標の検討を行うことを目的とする。本発表では、研究計画を述べる。

## 2. 研究手法

### 2-1 軽水炉用燃料の基本特性調査

典型的な PWR、BWR 用 U 酸化物燃料、MOX 燃料の基本情報として、U 濃縮度、Pu 富化度と同位体比、水ボイド率、Gd 等の毒物について、公開文献[3]等を参考に調査する。また、わが国の軽水炉の運転情報、平均燃焼度、冷却期間等を参考にし、本解析での計算パラメータを得る。

### 2-2 軽水炉用使用済燃料の核種組成データベースの構築

軽水炉使用済燃料の核種組成データベースを燃焼計算コードを用いて構築する。計算コードとして SCALE6.2 や ORIGEN2.2UPJ 等を用い、SFCOMPO[4]の実際の高浜 3 号機、福島第二発電所二号機の燃料の破壊分析結果の再現計算を行い、計算体系の妥当性検証を行う。続いて検証された計算体系を用い、PWR、BWR 用 U 酸化物燃料、MOX 燃料について、U 濃縮度、Pu 富化度と同位体比、水ボイド率、Gd 等の毒物、燃焼度、冷却期間をパラメータとした燃焼計算を行う。これらより核種組成データベースを構築する。

### 2-3 判別指標の検討

2-2 で構築した核種組成データベースを用い、軽水炉型、燃料型を判別する指標の検討を行う。具体的には目的変数を軽水炉型、燃料型とし、説明変数として構築した核種組成データベースの中の各種パラメータを設定した主成分分析等の多変量解析を行い、指標の抽出を試みる。既に日本原子力研究開発機構において開発された Pu-242/Pu-240 と U-235/U-total の同位体比等の指標との適用性の違いを確認する。

## 3. 研究計画

本研究の研究計画と流れを作成した(図 1)。研究の流れとしてまず、公開文献を参考にして PWR、BWR 用 U 酸化物燃料、MOX 燃料の基本特性を調査する。次に、多変量データベースを構築するために、計算コードを用いて妥当性検証と様々なパラメータを変えて燃焼計算を行う。最後に、燃焼計算の結果から得られた核種組成データベースを用いて、判別指標の抽出を行う。

## 4. 結言

核鑑識の重要パラメータの一つである核種組成について、現行広く利用されている軽水炉型、燃料型毎の基本特性を理解し、これらの相関性を包括的に分析するための数値解析を用いた多変量データベースの構築と判別指標の検討を行うための研究計画を立案した。

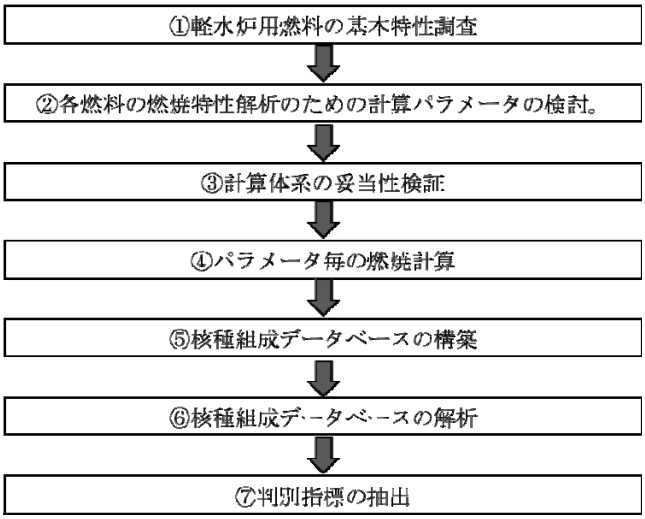



図 **1.** 研究の流れ

**引用・参考文献**

[1]木村 祥紀・篠原 伸夫・大久保綾子, “核セキュリティのための核鑑識技術の動向と最近の成果”, 日本原子力学会誌 ATOMOΣ, 2015 年 12 月

[2]木村 祥紀・篠原 伸夫・舟竹 良雄, “核鑑識に関する技術開発 (5)核鑑識ライブラリによる属性評価手法の検討と今後の課題”, 日本原子力学会 2014 秋の大会

[3]片倉 純一・片岡 理治・須山 賢也・神 智之・大木 繁夫, “JENDL-3.3 に基づく ORIGEN2 用断面積ライブラリセット：ORLIBJ33”, 日本原子力研究所, 2004 年 11 月

[4]中原 嘉則・須山 賢也・須崎 武則, “軽水炉使用済み燃料の燃焼度クレジットに関する技術開発”, 日本原子力研究所, 2000 年 10 月

# 制動放射スペクトルガンマ線を用いた PFRR 法の高濃縮 U 検知への適用性研究

Applicability Study of Photofission Reaction to Identify High-Enriched Uranium by utilizing the Bremsstrahlung Photon

(2) Selection of incident electron energies and validation of PFRR principle

*チン　キム　ウェイ [1]，相楽 洋 [1]，韓 治瑛 [1]，木村 礼 [1]

[1] 東京工業大学

*Kim Wei Chin[1], Hiroshi Sagara[1], Chi Young Han[1] and Rei Kimura[1]

[1]Tokyo Institute of Technology

The principle of photofission reaction ratio (PFRR) method was proposed and validated by an ideal Gaussian photon source simulation previously. In this research, Bremsstrahlung photon source was applied to the method to identify high-enriched uranium by numerical analysis. We have investigated the applicability of the Bremsstrahlung photons for PFRR. Based on the previous study, the combination of 6 and 11 MeV Gaussian photon energy was selected to measure uranium enrichment because the difference of photofission cross sections between U-235 and U-238 at these two energies varies significantly. To achieve the similar photofission reaction rate by Bremsstrahlung photons, a parametric study has been performed by altering the electrons energy injected into tantalum converter target, and finally 7.0 and 13.5 MeV were selected for 6.0 MeV and 11.0 MeV photon energies respectively. The created Bremsstrahlung photon sources were injected to a 1 mm thick parallelepiped uranium metal target with varied uranium enrichment. The PFRR and its sensitivity with uranium enrichment was evaluated as its linear relationship. To put it laconically, it was confirmed besides the Gaussian photons, the Bremsstrahlung photons generated from 7.0 and 13.5 MeV electrons could validate the principle of PFRR methodology as well.

## 1. Introduction

PFRR method is one of the active non-destructive assay (NDA) technologies utilizing photofission reaction of fissionable nuclides, and its principle was proposed and validated by using an ideal Gaussian photon source simulation previously [1]. This methodology is based on a characteristic difference of photofission cross sections among heavy metals. Providing Gaussian photon sources requires a high-quality beam and high-cost facility. However, Bremsstrahlung photon sources can be realized in practical scale or portable size. We have validated the principle of PFRR method by using Bremsstrahlung photons from gold target [2].

Generally, the PFRR simulation consists of:

(1) photon generation by a high energy electron beam from linear accelerator injection to tantalum,

(2) photofission reaction by photon injection to a heavy metal target, and

(3) measurement of photofission reaction rate.

## 2. Methodology

In Figure 1, the particle transport calculations of (1) was performed with PHITS3.0 code with JENDL 4.0 library while (2) and (3) were performed with MCNP6.0 code with ENDF VII.1 library. Based on previous study, the combination of 6.0 and 11.0 MeV Gaussian photon energy was chosen to measure uranium enrichment because the difference of photofission cross sections between $^{235}$U and $^{238}$U at these two energies varies significantly.

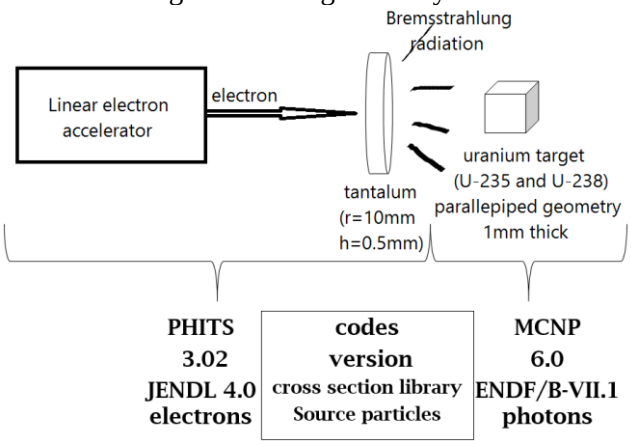



Figure 1 Conceptual simulation setup

### 2-1. Bremsstrahlung photons simulation model

The simulation geometry with tantalum as the target material is in Figure 2. The particle histories is $10^8$ (100 batches of $10^6$ particles).

### 2-2. Photofission reaction calculation model

The photon flux created from PHITS acts as a source flux at origin impinging the uranium target along x-axis. In Figure 3, the target has a parallelepiped geometry with a thickness of 1 mm and a height of 10 mm. The energy bins of photon flux is grouped with a difference of 1% of lethargy starting from 3.25 MeV (threshold energy for photofission in ENDF library). For statistical point of view, the

histories given is $10^8$ photons with relative error as low as 0.0002 in average. Different enrichment of $^{235}U$: 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% and 90% are simulated.

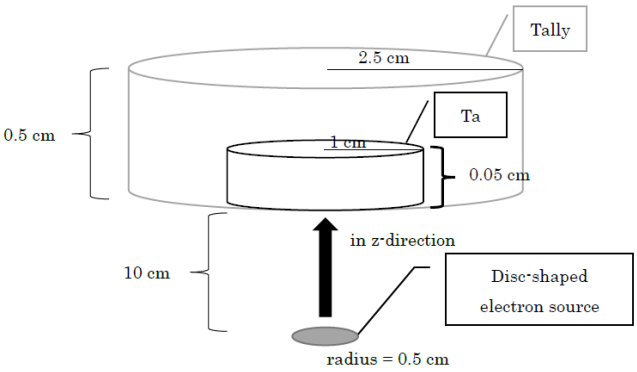



Figure 2 Simulation model with tantalum target

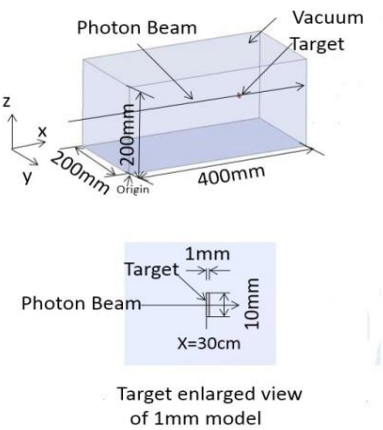



Figure 3 Calculation model for photofission reaction

## 3. Results and Discussion

### 3-1. Parameter survey of Bremsstrahlung energies

To achieve the similar photofission reaction rate by Bremsstrahlung photons, a parametric study has been performed by altering energy of electron injected into tantalum converter target. For lower energy range, 6, 7, 7.5 and 8 MeV are simulated. While for higher energy, 11, 12, 13, 13.5 and 14 MeV are simulated.

From the energy spectrum datasets created, we chose 7.0 and 13.5 MeV for their reaction peaks matching 6 and 11 MeV respectively. The summarized results of opted incident electron energies photon flux and reaction comparing to that of Gaussian photon source can be seen in Figure 4.

### 3-2. PFRR sensitivity to uranium enrichment

The created Bremsstrahlung photon sources were injected to a 1 mm thick parallelepiped uranium target with varied uranium enrichment. The PFRR and its sensitivity with uranium enrichment was evaluated. Due to the small relativity errors from MCNP, the propagated error calculated is around 1%. Table 1 shows the sensitivity results of 10, 20, 70, 80 and 90% enrichment. An increasing value of PFRR along the enrichment increment can be observed.

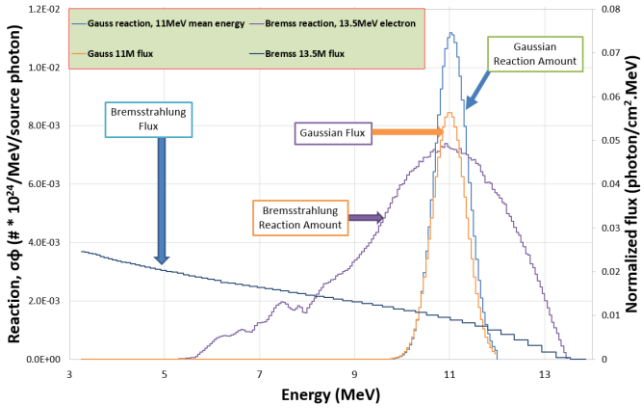



Figure 4 Summary of selected flux energy 13.5 MeV and reaction comparing to that of Gaussian.

Table 1 Sensitivity of PFRR to uranium enrichment

| Enrichment of U-235 (%) | Photofission reaction rate of different incident electron beam energy | | Ratio of reaction rate | Propagated error (relative std. dev. from MCNP) | Error percentage (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| | 7 MeV | 13.5 MeV | 13.5M / 7M | | |
| 10 | 2.0838E-02 | 1.2279E-01 | 5.8924E+00 | 0.056758 | 0.963242 |
| 20 | 2.0602E-02 | 1.2759E-01 | 6.1931E+00 | 0.060317 | 0.973924 |
| 70 | 1.9382E-02 | 1.4932E-01 | 7.7040E+00 | 0.079663 | 1.034046 |
| 80 | 1.9129E-02 | 1.5329E-01 | 8.0138E+00 | 0.083950 | 1.047573 |
| 90 | 1.8872E-02 | 1.5717E-01 | 8.3280E+00 | 0.088416 | 1.061667 |

## 4. Conclusion

The applicability of the PFRR methodology has been studied to identify HEU by switching the photon source from the Gaussian photons in previous work to a more practical Bremsstrahlung photons by numerical analysis. To achieve the similar photofission reaction rate by Gaussian photons, a parametric study has been performed by altering the electrons energy injected into tantalum converter target, and finally 7.0 and 13.5 MeV are selected for producing 6.0 MeV and 11.0 MeV photon energies respectively. The PFRR and its sensitivity with uranium enrichment was evaluated as a linear relationship.


## Acknowledgement

The author thanks deeply the resources provided by Tokyo Institute of Technology in conducting the research.


## References


[1] Kimura et al., J. Nuc. Sci. and Tech. (2016)
[2] C. Kim Wei, et al., Proc. 39th Ann. Mtg. INMMJ, (2018)

# パッシブγ線断層撮影法を用いた画像再構成技術の開発
# (2) モックアップ燃料集合体中γ線源分布の画像再構成

Development of Image Reconstruction Technology using Passive Gamma Emission Tomography
(2) Reconstruction of Gamma-ray Sources in Mock-up Fuel Assembly

*柴　茂樹，相楽　洋
東京工業大学
*Shigeki Shiba and Hiroshi Sagara
Tokyo Institute of Technology

Passive Gamma Emission Tomography using maximum likelihood-expectation maximization（MLEM）was developed for advanced verification tool applicable for either nuclear safeguards or nuclear waste management in future. As a demonstration, passive gamma-ray source distribution in mock-up fuel assembly was reconstructed.

## 1. 緒言

パッシブγ線断層撮影法（PGET: passive gamma emission tomography）は、ガンマ線源の 3 次元分布計測手法として開発が進められており、保障措置における使用済燃料の検認技術の高度化や、廃棄物管理等への応用[1]が期待されている。日本による保障措置技術支援（JASPAS: JAPAN support program for agency safeguards）の一環として PGET を用いた検認への適用性について検討を進めているが、パッシブγ線の測定であるため測定時間に大きく依存し、工学応用のためには、測定時間の短縮化やバックグランドノイズ低減が求められる。

本研究では、最尤推定-期待値最大化(MLEM: maximum likelihood-expectation maximization)法[2]を用いた画像再構成技術[3,4]を開発し、モックアップ燃料集合体内のパッシブγ線源分布の再構成を実施した。

## 2. 燃料集合体中γ線源分布再構成

### 2-1. モックアップ燃料集合体の投影データ

MLEM 法を用いたモックアップ燃料集合体内のパッシブγ線源分布の再構成を実施するためには、投影データが必要である。本研究では、BWR モックアップ燃料集合体のパッシブγ線投影データ（サイノグラム、図 1 参照）を用いた。同データは、タングステンコリメータ付きの CdTe 検出器を用いてモックアップ燃料集合体中心に検出器を 1.0 度毎に回転させ（合計 360 方向）、その都度燃料集合体に沿って 174 点の走査を行って取得したものである[5]。

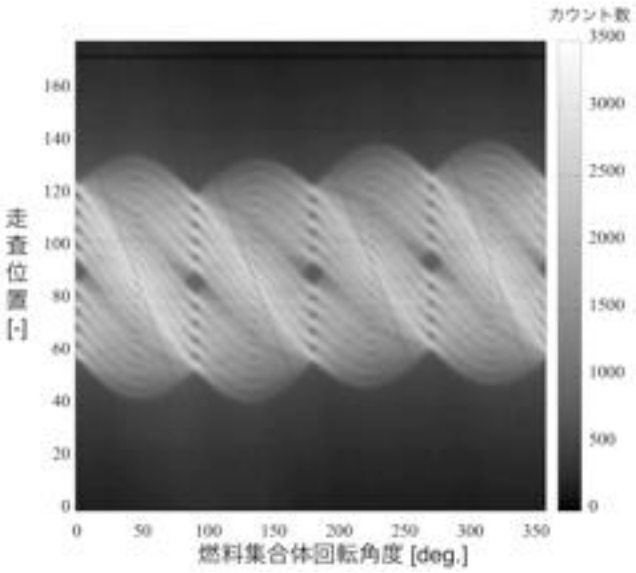



図 1　モックアップ燃料集合体のパッシブγ線投影データ [5]

### 2-2. 最尤推定-期待値最大化法に基づく再構成

統計学的モデルに基づいた逐次的処理により画像再構成を行う MLEM 法は、式（1）に基づき投影、逆投影、比較、更新を行う方法である。

$$f_j^{k+1} = \frac{f_j^k}{\sum_i C_{ij}} \sum_i \frac{p_i C_{ij}}{\sum_m C_{im} f_m^k} \qquad (1)$$

ここで、

$f_j^{k+1}$：反復回数 $k+1$ における $j$ 番目の画素値
$f_j^k$：反復回数 $k$ における $j$ 番目の画素値
$p_i$：$i$ 番目の検出器における投影値
$C_{ij}$：　$i$ から $j$ の検出確率
$m$：　画素の番号

本研究では、BWR モックアップ燃料集合体の投影データ及び MLEM 法を用いてパッシブγ線源分布の再構成を実施する。なお、減弱補正については、事前に減弱係数分布が分かっていないことから考慮しない。

MLEM 法による再構成画像の定量的な評価を実施するため、平均絶対誤差（MAE: Mean absolute error）を使用する。以下に反復回数 $k$ における MAE を示す。

$$MAE^{(k)} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\left|f_j^k - f_j^{Real}\right| \qquad (2)$$

ここで、

$N$：画素数

$f_j^{Real}$： $j$ 番目の画素の真値

$f_j^k$：反復回数 $k$ における $j$ 番目の画素値

## 2-3. 解析結果

MLEM 法による再構成画像（180 × 180）の MAE の反復回数特性及び 10, 50, 100, 150 回時点の再構成画像をそれぞれ図 2 及び図 3 に示す。反復回数 10 回では、収束が図れておらず、全体的にボケが生じており十分なコントラスが得られていないことがわかった。反復回数 50 回では、燃料棒周囲にぼけが生じているが、燃料棒を判別できる程度の再構成画像が得られていることが分かった。概ね収束したと考えられる反復回数 100 回及び 150 回では、燃料棒間のボケが低減されており、燃料棒境界を明確に判断することができた。したがって、反復回数は 100 回以上が必要であると考えられる。

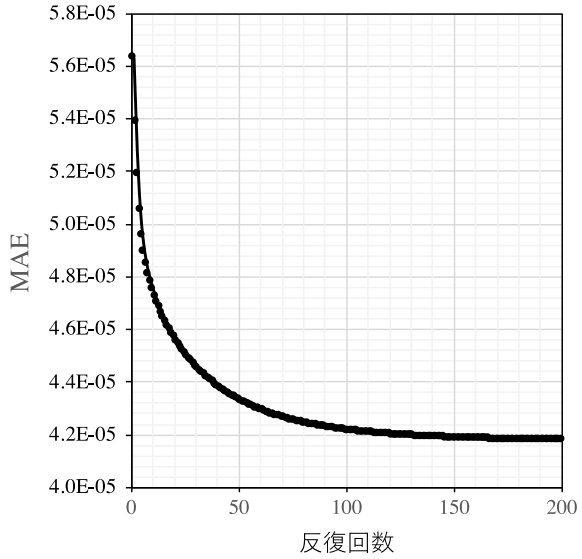



図 2　MAE の反復回数依存性

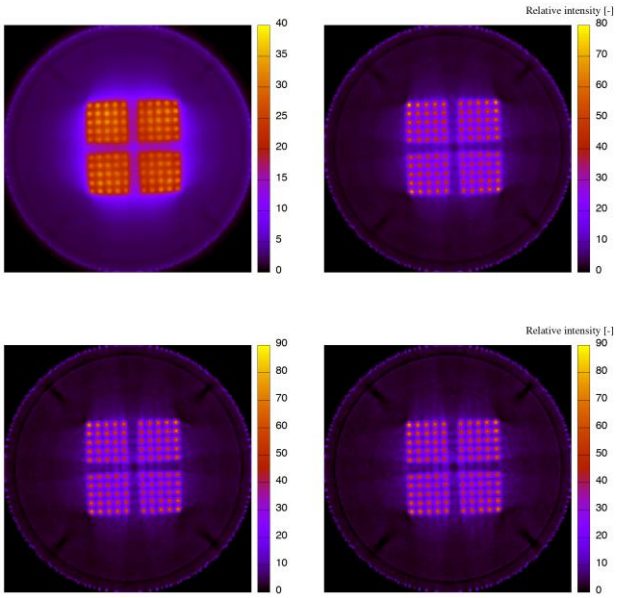



図 3　MLEM 法によるモックアップ燃料集合体の画パッシブγ線源分布の再構成
（左上：10 回、右上：50 回、左下：100 回、右下：150 回）

## 3. 結論

使用済燃料の保障措置における検認への適用を目指し、不完全なデータであってもスムーズな光源分布可視化が可能な新たな画像再構成技術を開発し、モックアップ燃料集合体内のパッシブγ線源分布の再構成を実施した。

MLEM 法では、180 × 180 サイズの線源分布の再構成画像を得るために 100 回程度の反復回数が必要であることが分かった。このため、MLEM 法を高速化した ordered subset expectation maximization method （OSEM）法[6]を導入し再構成計算の高速化を図る。また、燃料棒以外の領域におけるノイズは依然として抑制されていないため、ノイズを効率よく抑制するペナルティ関数を用いたベイズ型逐次近似法を検討する予定である。


## 謝辞

本研究は科研費(JSPS Kakenhi Grant Number JP17K07005「核不拡散・核テロ防止のための非破壊測定技術開発に重要な核データの研究」)の成果を含む。


## 参考文献

[1] L. Eric Smith, et al., PNNL-25995, Oct. 2016.
[2] Dempster AP, et al.: Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm. J R Stat. Soc. Series B39:1-138, 1977.
[3] S. Shiba, H. Sagara, Ann. Nucl. Energy (submitted for publication).
[4] S. Shiba et al., "Development of Image Reconstruction Technology using Passive Gamma Emission Tomography," Proc. Tokyo, Japan, Nov. 21-22, 2018, p.2, INMMJ (2018).
[5] T. Honkamaa, et al., IAEA Safeguards Symposium (2014).
[6] Hudson HM, et al. : Accelerated image reconstruction using ordered subsets of projection data. IEEE Trans Med Imaging MI-13:601-609, 1994.

# 多様な放射性廃棄物内核物質量測定への DDSI 法の適用可能性
# （1）研究計画

Feasibility of Application of DDSI Assay Technique for Nuclear Material Quantification in Various Radioactive Waste Forms
(1) Research Plan

*中岫 翔[1]，相楽 洋[1]，韓 治暎[1]
[1]東京工業大学
*Sho NAKAGUKI[1], Hiroshi SAGARA[1], and Chi Young HAN[1]
[1]Tokyo Institute of Technology

Radioactive wastes generated in nuclear fuel cycle or in decommissioning of nuclear facilities contains a certain amount of nuclear materials. The technology of nuclear material quantification applicable for simple in-situ measurement of such nuclear materials is very important for non-proliferation. A feasibility study on application of the Differential Die-Away Self-Interrogation (DDSI) assay technique is being performed for nuclear material quantification in various radioactive waste forms. This paper describes the research planning of numerical analysis modeling and its validation, and DDSI applicability for drums of radioactive wastes.

## 1. 緒言

世界の核不拡散・核セキュリテイ強化は喫緊の課題であり、核物質の適正管理技術として非破壊測定技術開発が強く求められている。再処理施設で生じる放射性廃棄物には単体では少量ながら総体としては無視できない量の核物質が含まれ、また、燃料デブリなど事故後の廃止措置時の放射性廃棄物には大量の核物質が含まれる。組成や形状等の仕様が不明な中で、簡便に核物質量を推定できる手法の開発が重要となる。

現在、外部中性子源が不要であり使用済燃料や廃棄物自身の内部中性子源を活用する Differential Die-Away Self-Interrogation（DDSI）法の研究が進められている。DDSI 法は核物質による自発核分裂中性子と誘発される核分裂中性子の中性子消滅時間の差を利用し、弁別することで実効質量を求める方法であり、大規模装置や放射線源を必要としない簡便さから、核物質管理の現場への適用が期待されている[1]。

本研究では、DDSI 法による放射性廃棄物内核物質量推定への適用可能性を検討する。本発表では研究計画ついて述べる。

## 2. 研究手法

### 2-1. 計算コード

DDSI 法を用いた計算を行うために、中性子同時計数値が計算可能な MCNP6.2 を使用する。核データライブラリ ENDFB-VII.0 に基づく endf70 シリーズを用いる。

### 2-2. 解析モデルの検討

DDSI 法を用いた先行研究として使用済燃料集合体を用いた解析モデル[2]を参照し、本研究のモデルを検討する。図 1 に PWR 使用済燃料集合体及びポリエチレンに囲まれた He-3 中性子検出器を用いた引用解析体形図を示す。本解析モデルを参考とし、全中性子（シングル）計数率、中性子同時（ダブル）計数率の計算を行うインプット作成を行い、参照モデルの自発核分裂性中性子数と比較することで DDSI 計算体系の妥当性を確認する。

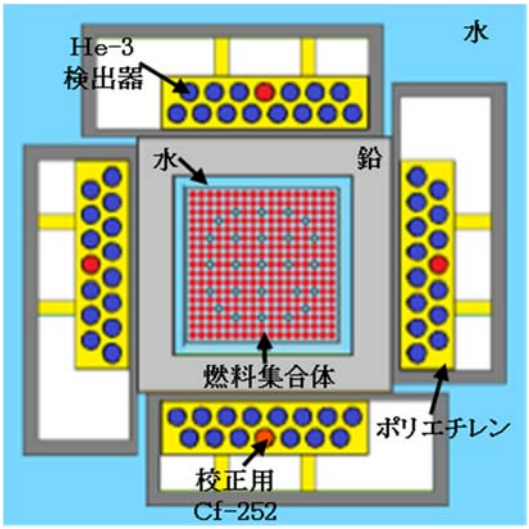



図 1　DDSI モデルの解析体系図(XY)[2]

### 2-3. 放射性廃棄物ドラムに対する適用性検討

構築した解析モデルを用い、放射性廃棄物ドラ

ムへの適用性を検討する。放射性廃棄物の例として、PWR 使用済燃料の再処理工程から生じる HULL を想定し、Cm-244 の実効質量を導出することを目的とする。パラメータとして、核物質及び超ウラン元素の HULL への移行率、充填率、水分残存率、燃焼度などを想定する。

## 3. 研究計画

本研究での流れは下記の通りである。

### （1） DDSI 解析モデルの構築と妥当性検討

PWR 燃料集合体に対して実施された解析モデルを参考に、DDSI 解析モデルを構築し計算体系の妥当性を検討する。

### （2） 放射性廃棄物モデルの構築と DDSI 適用性検討

放射性廃棄物ドラムと内容物のモデルとパラメータを設定し、(1)で構築した解析モデルを用いた解析を行う。

### （3） 破壊分析結果との比較による精度検証

過去に実施された放射性廃棄物の破壊分析結果から Cm-244 量を参照し、本 DDSI モデルによる解析結果を比較し、精度検証を行う。

以上より、結論を導出する。

## 4. 結言

DDSI 法の放射性廃棄物への適用可能性の検討を目的として、解析モデルの構築及び妥当性の検討、放射性廃棄物ドラムへの適用性評価の研究手法、計画を立案した。

## 引用・参考文献

[1] T. NAGATANI *et al.*, “Characterization Study of Four Candidate Technologies for Nuclear Material Quantification in Fuel Debris at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station,” *Energy Procedia*, vol. 131, p.258–263 (2017).

[2] A. C. TRAHAN *et al.*, “Characterization Measurement with the Differential Die-Away Self-interrogation Instrument,” *Proc. 55th Ann. Mtg. INMM*, (2016).

# パッシブγ・中性子線断層撮影法を用いた非破壊測定技術の研究
# (1)使用済燃料由来パッシブ中性子線断層撮影法の部分欠損検認への適用の研究計画

A study of the NDA Technology using Passive Gamma and Neutron Emission Tomography
(1) The research plan of application to Passive Neutron Emission Tomography for partial defect verification

*徳田 崇哉[1]，柴 茂樹[1]，相楽 洋[1]
[1]東京工業大学
*Takaya Tokuda[1]，Shigeki Shiba[1]，Hiroshi Sagara[1]
[1]Tokyo Institute of Technology

Passive Gamma and Neutron Emission Tomography (PGET and PNET) are two of the nondestructive assay (NDA) methods used to survey the geometrical distribution of gamma-ray and neutron-ray sources in spent nuclear fuel. PNET were examined as a tomography tool for safeguards application for spent nuclear fuel stored in dry condition, expected to provide the better imaging performance than PGET due to the longer mean-free-path of fast neutrons. In the present paper, research plan was described with research components of reproduction of spent fuel composition with SCALE/ORIGEN-ARP code, neutron detection calculation with MCNP6.2 code, and image reconstruction.

## 1. 緒言

パッシブγ・中性子線断層撮影法は、核物質内のγ線源および中性子線源の位置情報を知るために用いられる、非破壊測定手法の一つである。特にパッシブγ線断層撮影法は、保障措置での部分欠損の検認や、廃棄物管理等への応用が期待されており、現在世界で幅広い研究が進められている[1]。しかし、使用済燃料を対象とした場合、燃料内部の物質によるγ線の減衰等が生じてしまい、燃料内部が不明瞭になる問題が生じてしまう。一方、使用済燃料由来の高速中性子は燃料内部を高い確率で透過することが予想され、結果として前述のような問題は生じにくいと考えられる。そこで本研究では、使用済燃料に対する断層撮影としてまず、中性子線を用いたパッシブ中性子線断層撮影法の検討を行う。そして、γ線および中性子線を用いた両者のケースを比較し、画像再構成で得られる線源位置分布の明瞭度合いや手法の実現可能性について考察を進めていく。本発表ではまず中性子断層撮影法に関する研究計画を述べる。

## 2. 手法

### 2-1. パッシブ中性子線投影データを用いた画像再構成

使用済燃料内部における放射線源の位置情報を得るためには、使用済核燃料から直接入射する放射線を複数の位置で計測し、得られた強度分布を用いて画像再構成を行う。精度の高い情報を得るためには、線源から発せられる放射線の強度が高くかつ、それら粒子を可能な限り多く減衰させずに直接検出する必要がある。一般的に、使用済燃料から発せられる放射線の中で外部の検出器まで到達が可能なものは、核分裂生成物の崩壊由来の高エネルギーγ線と中性子線である。中性子線は主に Pu、Cm の自発核分裂やアクチノイド由来のα粒子が燃料内酸素と(α,n)反応を起こすことによる高速中性子である。一方で、放射線が燃料中を通過し検出器に到達するまでに物質と相互作用する確率は、気中であればγ線の方が高速中性子よりはるかに大きく、集合体内部の核燃料情報は検出されやすい。よってパッシブ中性子断層撮影法の方が、より鮮明な断層画像を得られることが期待される。

### 2-2. 解析手法

図１に本研究における解析の流れを示す。3 つの段階で進める。各項で詳しい説明を行う。

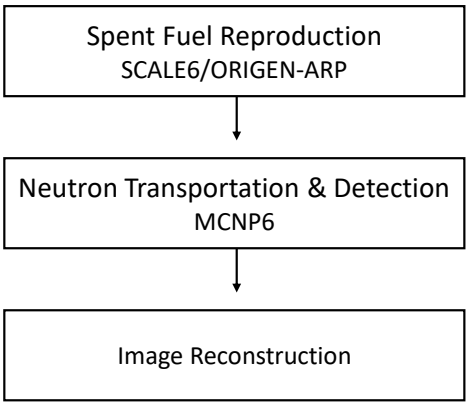



図 1 研究の流れ

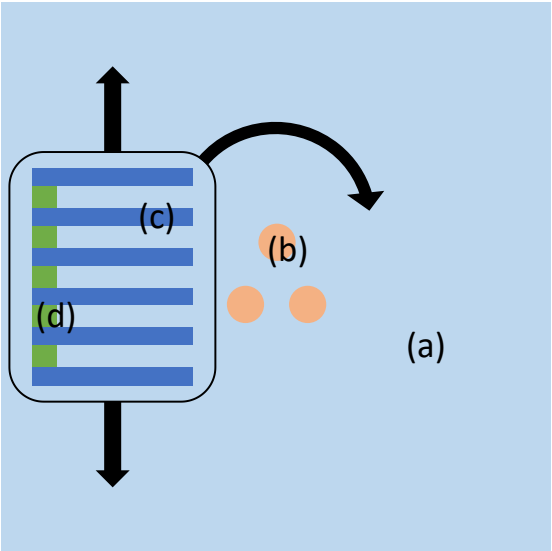
### 2-2-1. 使用済燃料における核種組成分布の作成

使用済燃料中の核種組成分布をSCALE6.2/ORIGEN-ARPを用いて計算し、線源情報を取得する。

### 2-2-2. 中性子の位置差分検出結果の取得

使用済燃料中の中性子源分布の再構成を行うためには、使用済燃料を取り囲む複数の位置で測定した中性子線強度分布を取得する必要がある。2-2-1項で得られた計算結果を用い、MCNP6.2で輸送計算を行い、検出領域に入射する中性子の計数率を求める。

本研究では、パッシブ中性子断層撮影法の適用性を確認するために、図２に示す簡易モデルを設定した。図2は当該モデルを上から見た様子を示しており、使用済燃料棒(b)を空気中(a)に配置し、中性子吸収体(c)のコリメータ（計算上は黒体を想定）付き検出領域(d)による気中測定を想定している。なお、 (c)と(d) は、矢印のように使用済燃料棒の外周を1周させながら、ある角度ごとに中性子線計測をすることで、中性子強度分布の位置差分情報を取得する。




### 2-2-3. 線源位置分布の画像再構成

2-2-2 項で得られた中性子線強度分布を用いて使用済燃料中の中性子源強度分布の再構成を実施する。再構成手法等については、今後の検討課題である。

## 3. まとめ

本報告では、使用済燃料に対する従来のγ線断層撮影法に加え中性子線を用いたパッシブ中性子線断層撮影法の研究計画を立案した。今後、使用済燃料の詳細（燃料タイプ並びに燃焼度及び冷却期間）について検討を進めるとともに、最適な画像再構成手法の検討を進める予定である。

### 引用・参考文献

[1] 柴茂樹, 相楽洋, ”パッシブγ線断層撮影法を用いた画像再構成技術の開発 (1)統計的逐次近似法による使用済BWR燃料集合体中γ線源分布の画像再構成”, 第39回日本核物質管理学会年次大会論文集(2018).

# 日印原子力協力における核燃料サイクルのシナリオ

## Nuclear Fuel Cycle Scenario Study for the India-Japan Civil Nuclear Cooperation

サウラブ シャルマ [1], 池上 雅子 [1, 2]
[1] 東京工業大学, 池上 研究室
環境・社会理工学院, イノベーション科学系
[2] 東京工業大学, 環境・社会理工学院,
融合理工学系, 原子核工学コース
Saurabh Sharma[1], Masako Ikegami[1, 2]
[1]Ikegami Laboratory, Department of Innovation Science
School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology, Japan
[2]Nuclear Engineering Course, Department of Transdisciplinary Science and Engineering
School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology, Japan

The present research is a comprehensive study of nuclear fuel cycle scenarios for the India-Japan Civil Nuclear Cooperation. Authors explained the nuclear fuel cycle strategies. This paper extensively covers the role and importance of the Thorium fuel cycle to be explored as a part of future nuclear fuel cycle in the implementation phase under the India-Japan Civil Nuclear Cooperation. In this research, authors are emphasizing on the common factors to be evaluated in the nuclear fuel cycle for the Indian and Japanese nuclear power programmes. This paper examines the Indian and Japanese nuclear fuel cycle scenarios. The authors have discussed the mutual offerings between India and Japan in detailed manner to develop the civilian nuclear fuel cycle jointly.

## 1. INTRODUCTION

The present research focuses on the feasibility and relevancy of the ongoing and proposed future nuclear fuel cycle strategies to develop the nuclear fuel cycle scenarios for the India-Japan Civil Nuclear Cooperation [1, 2, 3, 4, 5]. In general, two types of nuclear fuel cycle strategies are in trends worldwide, namely, a) open fuel cycle or once through cycle (OTC), b) closed fuel cycle or twice through cycle (TTC). The difference between these two options of fuel cycle depends on the behavior of spent nuclear fuel after the reactor and it is explained in the nuclear fuel cycle section of the paper. A study on the future of nuclear fuel cycle published by MIT has covered the various kinds of innovative nuclear fuel cycle options to be implemented in future nuclear energy scenarios [6]. Secondly, according to India's three stage nuclear power programme [7], Thorium has significant role to play as India is full of Thorium resources and it can be predicted that Thorium based fuel cycle can be helpful to solve the issue of shortage in Uranium based nuclear fuel supply in the future. Thus, broadly present paper would explore the commonly used Uranium fuel based nuclear fuel cycle in Indian and Japanese nuclear energy systems as well as prospective implementation of innovative nuclear fuel cycle based on Thorium fuel. While analyzing the Indian and Japanese nuclear fuel cycle scenarios, the investigation of the mutual offerings in nuclear fuel cycle technologies between India and Japan can bring the important findings of present research paper to be proposed.

## 2. NUCLEAR FUEL CYCLE

Typically, there are two kinds of nuclear fuel cycle strategies, i.e., a) open fuel cycle or once through cycle (OTC), b) closed fuel cycle or twice through cycle (TTC). Figure 1 [8] depicts the in general layout of the nuclear fuel cycle which describes both open and closed nuclear fuel cycles. In open fuel cycle option, spent nuclear fuel after the reactor goes to the final disposal via spent fuel storage facility.

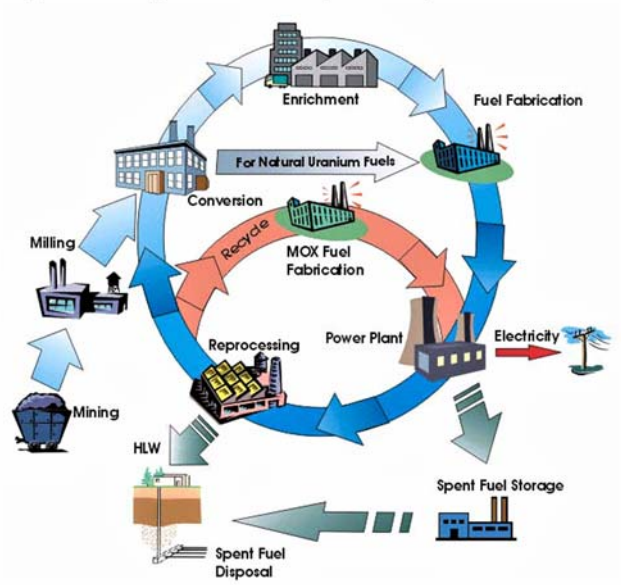



Figure 1 Illustration of Nuclear Fuel Cycle (Open and Closed) [8]

In closed fuel cycle option, after the reactor nuclear fuel goes to the fuel reprocessing facility and this reprocessed fuel is reused in nuclear reactors.

## 3. INDIAN NUCLEAR FUEL CYCLE SCENARIO

To understand the established and future Indian nuclear fuel cycle scenario, study of India's three stage nuclear power programme is extremely essential. According to the India's three stage nuclear power programme, there are three stages which explain the timeline of India's nuclear power programme since its inception including the various nuclear fuel and nuclear fuel cycles. Thus, in Figure 2 [7], it is quite easy to recognize the flow of Indian nuclear power progamme and it can be identified that Thorium based fuel plays major role in India's nuclear power strategy.

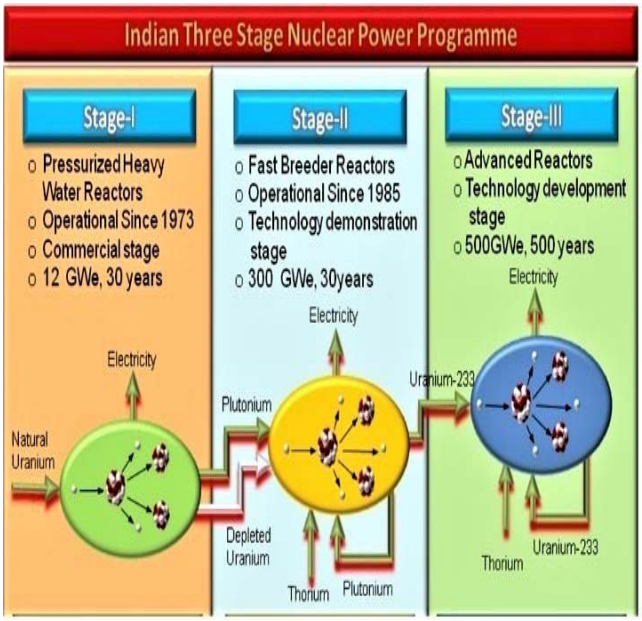



Figure 2 India's Three Stage Nuclear Power Programme [7]

India follows the closed nuclear fuel cycle policy [9].

## 4. JAPANESE NUCLEAR FUEL CYCLE

This section explains Japan's nuclear fuel cycle policy. Figure 3 explains Japan's nuclear fuel cycle policy and it is clear that Japan implemented the closed fuel cycle policy due to the insufficient natural resources [10].

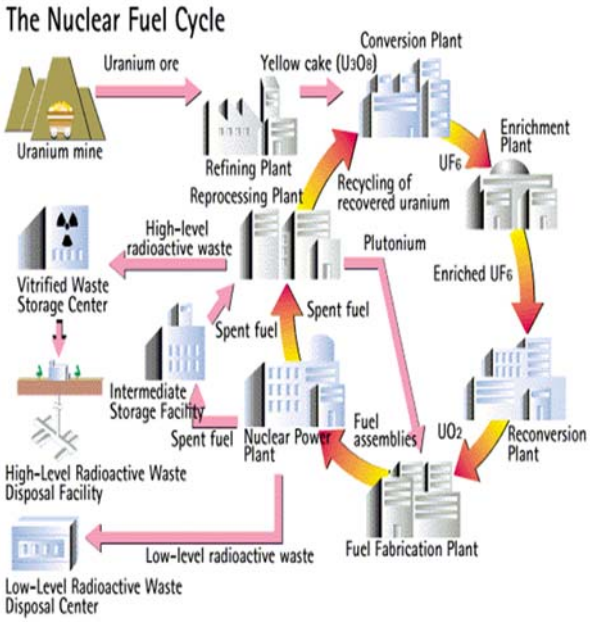



Figure 3 Japanese Nuclear Fuel Cycle [10]

## 5. MUTUAL OFFERINGS THROUGH INDIA-JAPAN CIVIL NUCLEAR COOPERATION

The authors argue thoroughly on three effective ways of the mutual offerings between India and Japan:, i) sharing the advanced development in the common area of civilian nuclear fuel cycle which is already established and functioning currently with high precision in both countries, ii) supporting in each other's individual ambitious future civilian nuclear fuel cycle scenarios through knowledge exchange and to be benefitted mutually, iii) close collaboration to co-develop and further propose the unique and innovative approaches in the field of civilian nuclear fuel cycle not only for Indian and Japanese nuclear power sector but also for the rest of the world towards the promotion of peaceful uses of nuclear energy.

For both countries the closest commonality in nuclear fuel cycle strategy is, the closed fuel cycle policy, which has the significant potential to offer in terms of already established fuel cycles and advancing in the future of nuclear fuel cycle. Secondly, India's fast reactor programme has good success story and it can support the Japanese fast reactor research and development. Thirdly, the exploration of the Thorium fuel and its nuclear fuel cycle unlocks the gate to wide range of opportunity to work together under the regime of the India-Japan Civil Nuclear Cooperation.

## 6. RESULTS

As the results of the present study, it can be observed that India and Japan have the vast scope to collaborate

in the field of nuclear fuel cycle because the most commonality between both countries is, the closed fuel cycle policy, which provides the window to share the experiences in operating closed fuel cycle in an efficient way. Secondly, due to the abundant mutual offerings, both countries are potentially in the position to lead the regional civilian nuclear cooperation in the future in Asia.

The major policy-based recommendations can be offered to governments, academics, industries and other nuclear stakeholders in the directions of innovative fuel cycle development using the Thorium, and further speed up the commercialization of fast breeder reactors.

In the future work, the results of the present research would be helpful towards the development of regional civilian nuclear cooperation in Asia in the leadership of India and Japan. The regional civilian nuclear cooperation in Asia would facilitate the regional nuclear power growth for the peaceful uses and further would assure the nuclear fuel supply to the member countries.

## 7. CONCLUSION

The conclusion comes that there is a lot to offer to each other in terms of sharing the knowledge, supporting the country-wise nuclear fuel cycle advancement, and finding the innovating and unique nuclear fuel cycle approaches together towards the promotion of peaceful uses of nuclear energy through India-Japan Civil Nuclear Cooperation Agreement.

## BIBLIOGRAPHY

[1] Saurabh Sharma, Masako Ikegami, "Research Review on India-Japan Civil Nuclear Cooperation Agreement towards the Progress of Peaceful Uses of the Nuclear Energy", Abstract Proceedings of the 39th Annual Meeting of Institute of Nuclear Materials Management (INMM) Japan Chapter, The University of Tokyo, Japan, November 20-21, 2018.

[2] Saurabh Sharma, Masako Ikegami, "A Study on the Lessons Learned from Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident towards the Future Implementation of the India-Japan Civil Nuclear Cooperation", Abstract at the Thermodynamic Characterization Of Fuel Debris and Fission Products based on Scenario Analysis of Severe Accident Progression at Fukushima Dai-Ichi NPS (TCOFF) OECD/NEA WORKSHOP: Materials Science for Severe Accident and Fukushima Dai-Ichi Decommissioning Fukushima, Japan, July 10-12, 2019.

[3] Singh, Anoop and Sharma, Saurabh and Kalra, M. S., Levelised Cost of Electricity for Nuclear Power Using Light Water Reactor Technology in India (March 10, 2018). Economic & Political Weekly, MARCH 10, 2018 vol. LII no. 10.

[4] Agreement between the Government of India and the USA on cooperation in peaceful uses of Nuclear Energy (2008), Department of Atomic Energy (DAE), Government of India, 10 October 2008.

[5] Department of Atomic Energy (DAE), Government of India, http://www.dae.nic.in/

[6] The Future of the Nuclear Fuel Cycle (2011), AN INTERDISCIPLINARY MIT STUDY, ISBN 978-0-9828008-4-3, 2011, Massachusetts Institute of Technology, 2011.

[7] India Nuclear Business Platform (INBP), http://www.nuclearbusiness-platform.com/india/nuclear-industry/india-nuclear-spotlight-prototype-fast-breeder-reactor/

[8] Nuclear Fuel Cycle Information System, A Directory of Nuclear Fuel Cycle Facilities, 2009 Edition, IAEA-TECDOC-1613, IAEA, 2009.

[9] Country Nuclear Fuel Cycle Profiles (2005), TECHNICAL REPORTS SERIAL No. 425, Second Edition, IAEA, 2005.

[10] The Federation of Electric Power Companies of Japan, https://www.fepc.or.jp/english/library/power_line/detail/02/

# 発表セッション

# 次世代核燃料サイクルの合理的な保障措置に向けた制度的・技術的方策に関する研究
# (1) 研究計画

Institutional and Technical Measures for Rational Nuclear Safeguards of Next Generation Nuclear Fuel Cycle
(1) Research Plan

*筒井 康二，相楽 洋
東京工業大学
*Koji Tsutsui，Hiroshi Sagara
Tokyo Institute of Technology

The importance of international safeguards is expected to increase in response to the expansion of nuclear activities in the world in the future. Nevertheless, financial and human resources of International Atomic Energy Agency (IAEA) have become tight in recent years, and the rational nuclear safeguards would be the crucial matter. Many efforts to improve the efficiency of safeguards implementation have been made by IAEA while maintaining or strengthening its effectiveness such as New Partnership Approach (NPA) in corporation with EURATOM since 1992, Integrated Safeguards Approach since early 2000s, and State-Level Safeguards Approaches (SLA) based on State-Level Concept (SLC) since 2013. In this research, institutional and technical measures for rational nuclear safeguards are investigated for a hypothetical non-nuclear weapon state with a next generation complex nuclear fuel cycle; measures to apply NPA, a theory and modeling to evaluate the efficiency under SLC, and the impact of next generation nuclear fuel cycle with high proliferation resistance. The research plan is proposed and discussed in the present paper.

## 1. 緒言

国際原子力機関（IAEA）は 2050 年には世界の原子力開発規模は現在の 2 倍以上に拡大する可能性があると予測しており[1]、国際保障措置の重要性は今後ますます増加していく見込みである。一方、国際保障措置を実施する IAEA の資源は近年逼迫してきており[2]、保障措置に投入する資源を増加させることができない可能性が高い。このため、IAEA は保障措置の効果を維持しつつ効率を上げるための方策として、1992 年からはユーラトムとの New Partnership Approach（NPA）の実施[3][4]、2000 年代初頭からは拡大結論が得られた国に対する統合保障措置手法の適用、2013 年以降は統合保障措置手法を発展させた国レベル概念（State-Level Concept: SLC）に基づく国レベル保障措置手法（State-Level Safeguards Approach : SLA）の開発を行っている[2]。しかし SLA により今後どの程度の査察の効率化が実現するかは未知数であり、国際社会は、引き続き国際保障措置の持続可能性を確保するため、保障措置の効果を維持しつつ査察を合理化するための方策を検討すべきという課題がある。

IAEA による 2018 年版の The Safeguards Implementation Report（SIR）[5]によると、IAEA は 182 ヶ国に対して保障措置活動を実施したが、その全体の査察人日（Person-days of inspection: PDI）のうち約 20%が実に日本一ヶ国のみに対して投入されている。なお、日本約 20%に続く国としては、イラン約 15%、加約 12%、独約 5%、印約 4%、韓約 3%である。日本に約 20%の PDI が投入されている理由は、日本が他の非核兵器国よりも原子力活動の規模が大きく、濃縮や再処理も含めた複雑な核燃料サイクルが存在する国だからである。このため、仮に日本における査察の合理化が実現できた場合、他の非核兵器国でも応用が可能と考えられる。

よって、本研究においては、次世代核燃料サイクル技術を有する仮想非核兵器国家を想定し、保障措置の効果を維持しつつ査察頻度を合理化するために行うべき方策の提案を制度面、技術面から行う。また、保障措置の効率化を定量化する手法の提案を行う。本論文では研究計画を提案する。

## 2. 研究手法

以下(1)～(3)を実施する。

(1) IAEA がユーラトムと実施した NPA によりユーラトム加盟国に対する査察人日がどれくらい減少したかに関し、IAEA による NPA に関する報告書[3][4]や、1991 年から 2009 年の期間における SIR などを評価する。次に NPA の、次世代核燃料サイクル技術を有する仮想非核兵器国家（単一国家）への適用性について検討する。ここで、国の査察当局と IAEA とで適切に役割分担することにより査察頻度を合

理化することを検討する。

(2) 次に、2013 年から IAEA が開発している SLA の適用により実現している PDI の合理化に関し、2013 年から 2018 年の期間の SIR を評価する。その上で、次世代核燃料サイクル技術を有する仮想国家における原子炉に対する SLC による効果を検討する。具体的には、以下①、②を実施する。

① 文献[6]では、使用済燃料を直接処分するワンス・スルー方式を行う仮想国家（100 万キロワット級で運転中の 4 基の実用発電用軽水炉を持つ国と、2 基の研究炉、医療・産業用の同位体を扱うための 4 つのホットセル、100 万キロワット級で運転中の 2 基の実用発電用軽水炉、1 つの研究開発用濃縮施設、1 つの転換施設、1 つの材料試験用原子炉・軽水炉用の燃料加工施設、国内のウラン採鉱能力を持つ国）における軽水炉の査察頻度が、それぞれ SLC 下ではどうなるかについて、式(1)の計算モデルが検討されている。本研究では、このモデルの妥当性の検証及び精緻化に関する検討を過去の事例調査に基づき行う。

$$T_{\mathrm{goal},p} = (T_{\mathrm{APA},p} - T_{\mathrm{lead},p})P_{\mathrm{absence},p} + T_{\mathrm{convert},p}(1 - P_{\mathrm{absence},p})$$

$T_{\mathrm{goal},p}$：目標とする査察の間隔（適時性）
$T_{\mathrm{APA},p} - T_{\mathrm{lead},p}$：取得経路における転用検知の時間枠
$P_{\mathrm{absence},p}$：未申告活動が無い確率
$T_{\mathrm{convert},p}$：施設の核物質を兵器に使用可能な形式に変換するのに要する時間

② ①を踏まえ、次世代核燃料サイクル技術を有する仮想国家における原子炉に対する査察頻度が SLC 下ではどうなるかを検討するための計算モデルを提案し、それを用いて査察頻度の効率化を推定する。

(3) 核拡散抵抗性（PR）には、保障措置などの制度的な抵抗性と、核物質や施設そのものに核拡散に対する固有の強い抵抗性を持たせる技術的な抵抗性がある。両者は必ずしも完全に独立しておらず、仮に核物質や施設に高い PR 技術を導入した場合、制度的な抵抗性の一つである保障措置（査察）を減らせる可能性がある。よって、次世代核燃料サイクルに高 PR 技術を導入した場合の保障措置効率化に関する効果、すなわち査察頻度の合理化の幅に関して予測を行う。

## 3. 研究の流れ

下記図 1 の流れで研究を行う。

## 4. まとめ

本研究においては、次世代核燃料サイクル技術を有する仮想国家における保障措置の効果を維持しつつ査察頻度を合理化するために行うべき制度的・技術的方策の提案及びその減少幅の定量的な試算を行う手法の提案が目的であり、その研究計画を作成した。本研究では、過去の事例調査に基づき、査察頻度モデルの妥当性を確認する。次に次世代核燃料サイクル施設に対する査察頻度の予測に適用し、最終的に査察頻度を合理化するための方策を提言する。

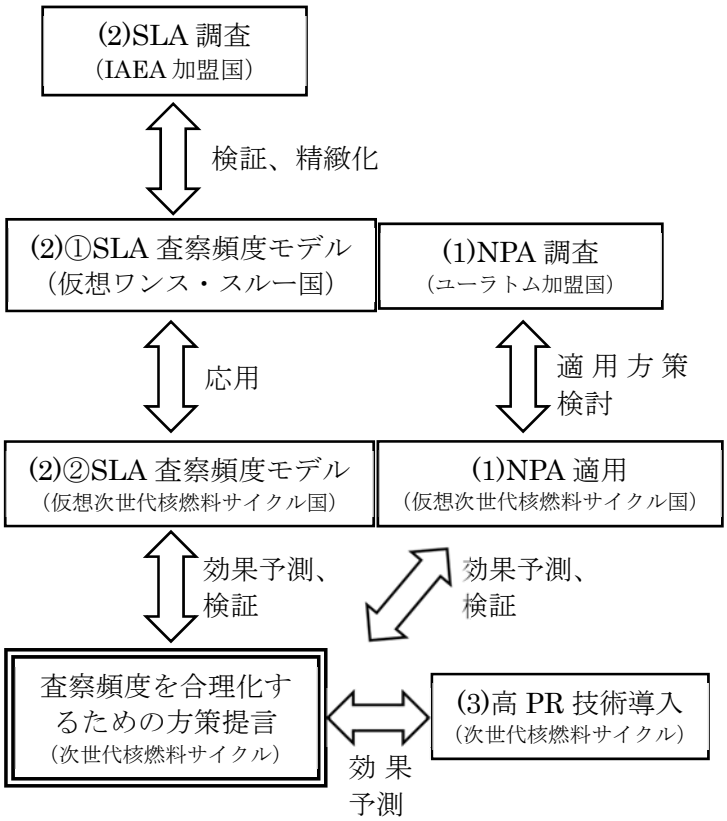



図 1 ：研究の流れ


**引用・参考文献**

[1] Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050 (2017 Edition), IAEA, 2017

[2] Safeguards Statement for 2018, IAEA, June 2019

[3] IMPLEMENTATION OF THE NEW PARTNERSHIP APPROACH (NPA) BETWEEN THE INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA) AND THE EUROPEAN ATOMIC ENERGY COMMUNITY (EURATOM) FOR THE APPLICATION OF SAFEGUARDS PURSUANT TO INFCIRC/193, GOV/INF/793, 5 June 1996
[4] Sven Thorstensen and Kaluba Chitumbo, "Safeguards in the European Union: The New Partnership Approach", IAEA BULLETIN, 1/1995
[5] The Safeguards Implementation Report for 2018, GOV/2019/22, IAEA, 6 May 2019
[6] Ken Jarman, Ty Otto, Mark Schanfein, Ben Wilson, "Examining Inspection Frequency under the State-Level Concept", IAEA Safeguards Symposium on International Safeguards, 2018

# Development of a user-friendly interface for atmospheric dispersion database and its application for nuclear emergency preparedness- Application for optimizing measurement points for effective detection of released radioactive nuclides

*Hamza EL-ASAAD [1], Hiroshi SAGARA [2], Chi Young HAN[2], Haruyasu NAGAI[1]
[1] Japan Atomic Energy Agency
[2]Tokyo Institute of Technology

A user interface has been developed using a database of atmospheric dispersion of radioactive nuclides to provide a user-friendly and quick information fetching platform for nuclear emergency preparedness. The output of the user interface comes in different forms, depending on the purpose of the user; for example, comprehensible tables highlighting important values, such as maximum dose levels, its locations and distance from source, and insightful figures of plume horizontal dispersion and distribution. This interface was applied to optimize monitoring post installations for emergency preparedness by investigating various types of plume dispersions and dose distributions.

## 1. Introduction

In case of a post detonation scenario experts in the field of monitoring post installations would like to determine the best location and cost-effective installations of monitoring posts (MP). This study will demonstrate the functionality of a tool created by the author to assist the experts in effective monitoring post installations by means of computer simulation.

## 2. Methodology

### 2-1. Dose Level and Distribution Analysis

The first part of the methodology we investigate areas within a 30km vs. outside a 30km zone from source point (denotation point) to analyze the radioactivity of the air dose rate and the flection of the deposition and concentration resulting from the plume dispersion.

### 2-2. Plume Pattern Analysis

In the second part of the methodology we analyze the shape and direction of the plume within the 30 km zone to determine monitoring post locations in high dose areas.

### 2-3. Air Dose Rate Prediction

Several areas of 20 x 20 km are selected to predict the air dose rates of the plumes after detonation. Equation 1 predicts the air dose rate and equation 2 calculates the discrepancy

$$D_{MP}(x,y) = \sum_{i=1}^{N_{MP}} w_i(x,y)\, D_{MP_i} \quad (1)$$

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N_{Grid}} \left[e_w(x_j,y_j) - \bar{e}\right]^2}{N_{Grid} - 1}} \quad (2)$$

$D_{MP}(x,y)$ is the air dose rate at location (x,y) predicted from monitoring post measurements [μSv/h]. The discrepancy of $D_{MP}(x,y)$ is e (x,y), and it used to calculated the standard deviation for the selected area denoted $\sigma_e$.

## 3. Results

An atmospheric transport model (ATM), WSPEEDI, was used to predict air dose rates in areas around the Fukushima Daiichi power plant. The Fukushima nuclear dispersion was used in this case study. From the ATM prediction a Distance-Weight interpolation was derived to predict monitoring post installation results. Figure 1 shows plume dispersion on March 15, 2011, in a 20x20 km area, 30 km west and 35 south of the source point.

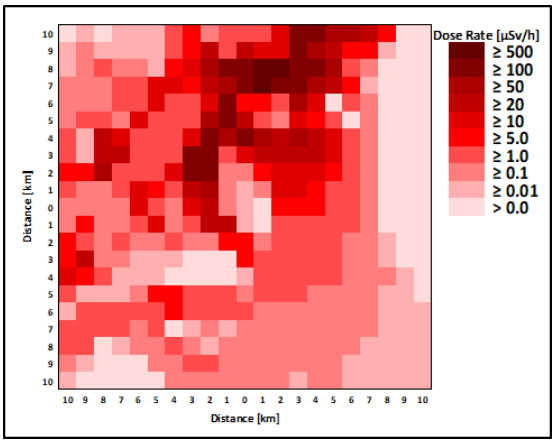



Figure 1: Air dose rate

Figure 2 shows the predicted air dose rate with he Distance-Weight interpolation by using only four monitoring posts. Figure 3 shows the discrepancy between figure 1 and 2. The discrepancy is due to the lack of monitoring posts predicting air dose rates with high precision.

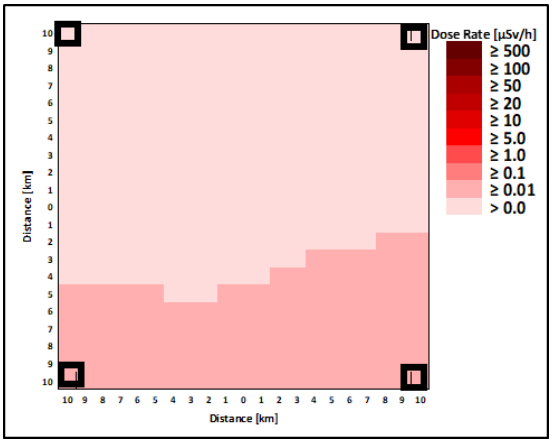



Figure 2: Predicted air dose rate- four MP

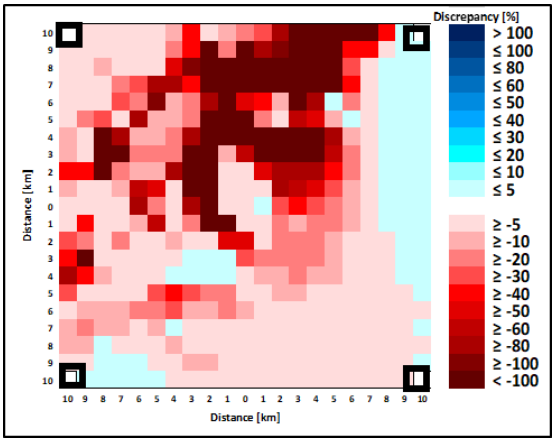



Figure 3: Discrepancy of four MP

Figures 4 and 5 show the predicted air dose using nine MP with the discrepancy, respectively. Comparing figure 3 with the discrepancy of figure 5, the prediction of the air dose rate in figure 5 is getting closer to the actual air dose rates in figure 4. Therefore accuracy is improving. Moreover figures 6 and 7 show the predicted air dose rates using 25 MP along with the figure of discrepancy.

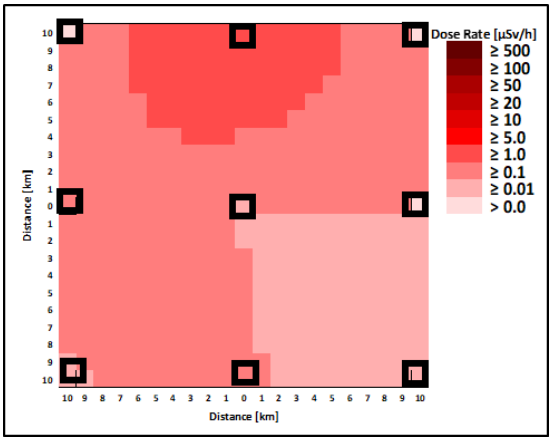



Figure 4: Predicted air dose rate- nine MP

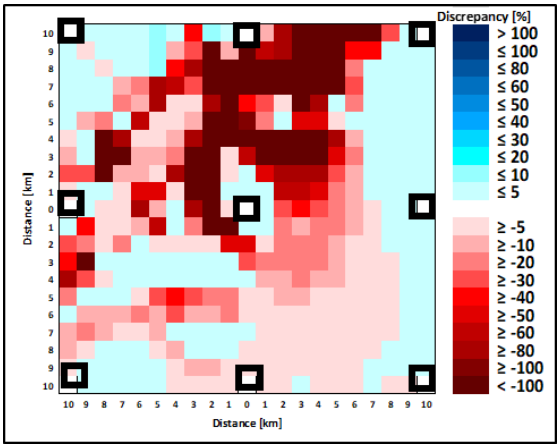



Figure 5: Discrepancy of nine MP

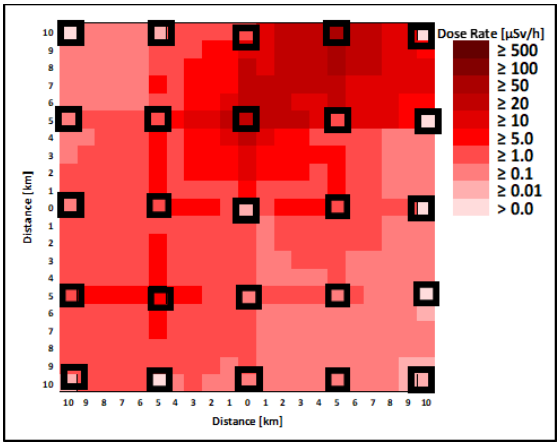



Figure 6: Predicted air dose rate- 25 MP

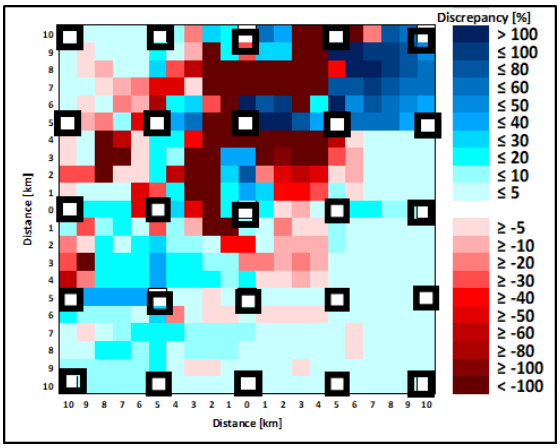



Figure 7: Discrepancy of 25 MP

## 4. Conclusion

In the example provided in this paper, the air dose rate predicted by 25 MP came the closest to the actual air dose rate. However, this is not always the case, different scenarios, locations and plume characteristics produce different outcomes. Therefore, experts in the field of MP installations can use this tool to assist them in predicting cost-effective installations.

## References


1. H. El-Asaad, "User Interface of Atmospheric Dispersion Simulations for Nuclear Emergency Countermeasures," *Energy Procedia,* pp. 279-284, 2017.
2. C. Nakanishi, "WSPEEDI-II System User's Manual for a Nuclear or Radiological Emergency," JAPAN Atomic Energy Agency, 2011.
3. H. Nagai, "Updating source term and atmospheric dispersion simulations for the dose reconstruction in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident," *EPJ Web Conf.,* vol. 153, p. 7, 25 September 2017.

# 六ヶ所再処理工場における保障措置機器の保守性および冗長性向上のための改善

An Improvement of Maintainability and Reliability for Safeguards Equipment in RRP

*森　賢仁[1]，山寺　豊宏[1]
[1]日本原燃株式会社　再処理事業部　核物質管理部　核物質管理課
*Masahito Mori[1]，Toyohiro Yamadera[1]
[1]Japan Nuclear Fuel Limited

At the Rokkasho reprocessing plant, a large amount of bulk plutonium are treated. In order to meet accurate material accounting in timely manner and smoothly verification by inspectorates, Plutonium Inventory Measurement System (PIMS) has been introduced. And, it is necessary to keep spare electronics component for this system in a healthy state at all time and it is vital that immediate repair should be conducted when a problem occurs. However, this system was imported in 2000, and now spare components are to meet end of production. Therefore, JNFL is starting to develop new electronics components and improvement of SG equipment for completion of system installation in 2021 with the cooperation of IAEA and JSGO.

## 1. 緒言

六ヶ所再処理工場におけるウラン・プルトニウム混合脱硝建屋では、大量のプルトニウム粉末を取り扱う。このため、施設計量管理および査察側による保障措置検認の効果的且つ効率的な実施の観点から、グローブボックス内のプルトニウム量を測定するため、プルトニウム在庫量非破壊測定装置（以下、PIMS）を導入した。

PIMS は、主に He-3 中性子検出器、光ケーブルおよび HUB と呼ばれる電気信号をデジタル変換するための装置から構成される。

現在 PIMS は設置して 20 年近く経過しており、短期間での電気的故障回数が増加しはじめている。加えて、電子計装品の生産終了、故障箇所の特定や補修へ時間を要することなど、PIMS の保守性と冗長性向上のために改善が必要となった。このため JNFL では、英国 International Nuclear Services 社（以下、INS）および開発元の Cavendish Nuclear Limited 社（以下、CNL）協力の下、PIMS の改善に着手した。

PIMS 構成図を図 1 に示す。

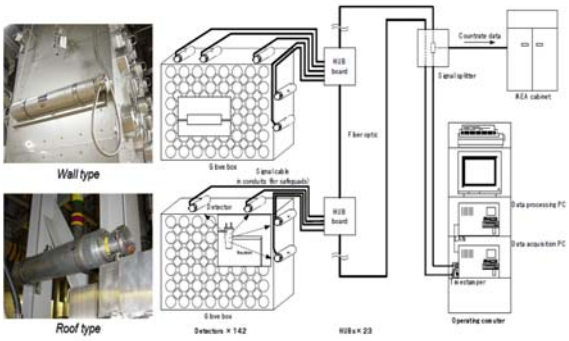



図 1　PIMS 構成図

## 2. 改善計画および背景

### 2-1. HUB について

PIMS は 2006 年から実施したアクティブ試験より運用を開始しており、10 年程経過したころから HUB の故障頻度が増加傾向にあり、計量管理および保障措置検認に支障をきたす恐れがあった。このため保守については、事前に予備の HUB を購入しておき、不具合が発見されたら直ぐに交換することとしていた。しかしながら、HUB 購入価格が高価であることや HUB の入手に 10 ヶ月程度要することを踏まえ、効果的かつ効率的な HUB の保守を目指し、過去に発生した故障原因追及のために HUB の調査を行った。

その結果、殆どの故障原因が HUB に組み込まれている電源ユニット（以下、PSU）の利用時間が平均故障時間を超過していたためであることが分かった。

本 PSU は幸いにも安価であり、国内でも調達可能である。このことから、HUB 故障の予防の観点として全ての PSU 交換を 2016 年に実施した。

HUB と PSU の関係を図 2 に示す。

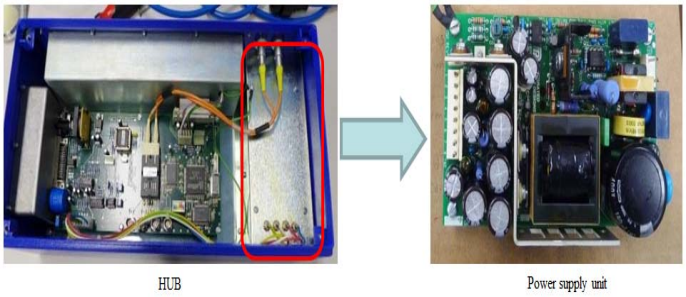



図 2　PSU 電源交換写真

## 2-2. 電子計装品について

PIMS は多数の電子部品で構成されており、この基本設計は 20 年以上前のものである。本電子部品についても調査を行ったところ、構成品の殆どが 2017 年頃に生産終了を迎えており、部品調達が難しいことから、今後、保守等の予備品調達が不可能となることが分かった。このため、PIMS の計量管理機器および検認機器としての延命化を図るとともに、これまでの不具合対処の経験から、保守性や冗長性向上を図る目的で PIMS 用電子構成機器の新規設計を開始した。

## 2-3. 光ネットワーク伝送方法について

現行の光ネットワーク伝送方法は、単一方向のループ方式を採用しており、HUB が故障した場合は信号断絶が発生し、PIMS が停止する。このため、本計画では既に設置されている予備の光ネットワークケーブルを新たに使用し、伝送方法を双方向とすることで PIMS の連続測定が可能となる方法を検討する。本検討方法が採用できれば、仮に図 3 に示すような中間点にある HUB-22 が故障した場合であっても、他の HUB が健全であるため、HUB-22 以外の信号を光ネットワークで受け取ることが出来る。これにより、HUB-22 を除いた継続的な PIMS 測定が可能になることに加えて速やかな故障箇所の特定（HUB-22 が故障していること）が可能になる。

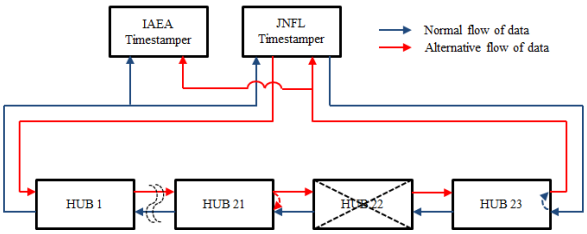



図 3　光ネットワーク双方向伝送概念図

## 2-4. 改善スケジュール

PIMS は原子力規制庁保障措置室（以下、JSGO）および国際原子力機関（以下、IAEA）による保障措置検査で検認機器としても利用されているため、本計画については、査察側への影響も大きい。そのため査察側協力の下、INS/CNL と装置改善に関する概念設計を 2018 年 5 月より開始した。また、本改善計画にあたっては、これまでの背景を考慮し、改善に伴う現状の装置への影響を最小限にした上で保守性や冗長性の向上を目的とする以下の項目とした。

- 保守性向上のための USB 接続による個々の HUB の自己診断機能
- 保守性向上のための PSU 交換方法の簡素化
- 保守性向上のための光ネットワーク断絶時の不良箇所表示機能
- 冗長性向上および装置への影響を考慮した現光ファイバーケーブル接続方法の採用
- 装置への影響を考慮した現信号線の再利用（HUB－検出器間）

なお、設置工事、査察側による確証試験を RRP 操業の 2021 年度を目標とし、現在は基本設計を行っている。

本改善スケジュール全体を図 4 に示す。

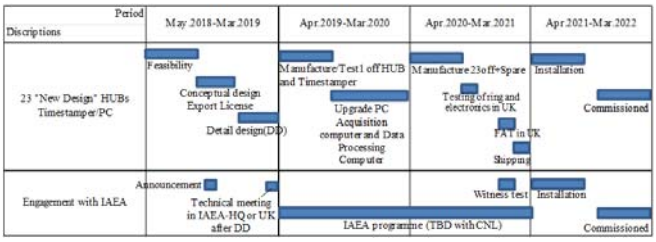



図 4　改善スケジュール

## 3. 結論

PIMS に使用している電子計装品の生産終了に伴いシステムの改善が必要になった。これまで JNFL では過去の PIMS 運用経験を活かし、故障時の迅速な復旧が可能となるような保守性や冗長性向上のために様々な検討および調査を行った。

本改善計画は JNFL として PIMS の保守性および冗長性が向上される非常に有意義なものであり、現在2021年の設置工事完了を目指している。

PIMS は施設計量管理機器としての利用だけではなく、査察側も検認機器として利用している。少なからず改善にあたっては査察側へ影響を及ぼす可能性があるため、今後とも査察側である JSGO および IAEA へタイムリーな設計情報を継続的に提供し、協力しながら新しい PIMS を完成させる所存である。

### 引用・参考文献

[1] Y. Noguchi, et al., “Application of Plutonium Inventory Measurement System (PIMS) and Temporary Canister Verification System (TCVS) at RRP”, The 25th Annual Meeting of INMM Japan Chapter, 2004.

[2] Y. Noguchi, et al., “Material Accountancy and NDA approach for U-Pu Co-Denitration Area at Rokkasho

Reprocessing Plant (RRP)", The 44th Annual Meeting of INMM, 2005.

[3] T. Tamura, et al., "AN IMPROVEMENT OF MAINTAINABILITY AND RELIABILITY FOR SAFEGUARDS EQUIPMENT IN RRP", 2018 Symposium on International Safeguards: Building Future Safeguards Capabilities.

# 計量分析の品質管理における 査察試料の共同分析試料としての有効利用について

Effective use of inspection samples as intercomparison samples for the quality control in accountancy analysis

*岡﨑　日路[1]，角　美香[1]，茅野　雅志[1]，松山　一富[1]，鈴木　徹[1]，Erwin Kuhn[2]
[1] 日本原子力研究開発機構　プルトニウム燃料技術開発センター，[2] コンサルタント
*Hiro Okazaki[1], Mika Sumi [1], Masashi Kayano[1], Kazutomi Matsuyama [1], Toru Suzuki [1], Erwin Kuhn [2]
[1]Plutonium Fuel Development Center of Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories, Japan Atomic Energy Agency,
[2]Vienna, Austria

For the effective and efficient implementation of international Safeguards, it is essential that the Operator's measurement system is maintained at a level of high quality and improved, as necessary. Besides the internal quality control, it is important to have elements of Quality Assurance (QA) in place, such as external intercomparison. However, there were no intercomparison programs with Plutonium samples available in Japan because of very few users and difficulties in the shipmentof such samples from foreign laboratories. To cope with these difficult situations, intercomparison by using actual safeguards samples containing Plutonium and Uranium was started. Inspection samples are selected and prepared for shipment to the Safeguards laboratories together with other samples. Safeguards laboratories receive and analyze them as inspection samples as well as intercomparison without additional cost for analysis operation or sample transportation. These intercomparison samples are prepared from actual verification samples, they have no reference value and results of each participant are compared with the grand mean of results in all laboratories.The practicality and effective use of this DA intercomparison, which is operated since more than 20 years, will be explained.

## 1. 緒言

日本原子力研究開発機構（JAEA）プルトニウム燃料技術開発センター（PFDC）では、これまで高速炉用や新型転換炉用の燃料製造試験を実施しており、核燃料物質を取り扱ってきた。国内で核燃料物質を取り扱う施設では、日・IAEA 保障措置協定に基づき、施設の定められた区域で一定期間に搬入・搬出される核物質の増減、そして現在の核物質の在庫の量を厳密・正確に管理し、国へ報告しなければならない。このような核燃料物質の在庫量の管理を計量管理と言い、核燃料物質の在庫量を正確に報告するために、高精度で分析を行うことが求められている。

計量分析の品質管理には、外部分析所との共同分析等による比較評価が有効である。しかし、PFDC におけるプルトニウムの取り扱いが開始された当時は、海外からの核燃料物質の輸送が困難であり海外の共同分析に参加できなかったこと、また国内でプルトニウムを用いた共同分析は存在しなかったことにより、PFDC における核燃料物質の測定で発生したバイアスを検知するには有効な比較評価の手段がなかった。そのため、PFDC は国内でプルトニウムを用いた共同分析の開発に取り組んだ。

本報告では、共同分析の取組み及び成果等について報告する。

## 2. JAEA-PFDC における計量分析手法

操業当初は、PFDC の 3 つの施設（プルトニウム燃料第一開発室、プルトニウム燃料第二開発室（PFFF：Plutonium Fuel Fabrication Facility）、プルトニウム燃料第三開発室（PFPF　：Plutonium Fuel Production Facility））の計量管理に、絶対分析法である電位差滴定法、重量法、又は定電位電量分析法などの異なる分析方法を採用していた。しかし、これらの分析方法は核燃料物質中に存在するアメリシウム、ネプツニウムや不純物の影響を受け易い。PFPF におけるもんじゅ燃料の製造に伴い、施設内のプルトニウム取扱量が増える前に、不純物等の影響を受けずにプルトニウムを高精度で測定するため、分析手法の改良及び共同分析による分析精度の維持、管理について IAEA 査察官より提案された。

この提案を受け、IAEA 査察官との協議を重ね、共同分析の開発に取り組むとともに、PFDC における計量分析手法に、他の分析法と比較して不純物等の影響を受けにくいことから IAEA 保障措置分析所で既に使用されている質量分析（MS）及び同位体希釈質量分析（IDMS）を採用することが合意された。これらの分析設備は PFPF に導入され、PFDC の 3 施設で計量管理対象となる試料すべての測定のプルトニウム及びウランの同位体組成及び含有率の測定を 1998 年より開始した。[1]

## 3. DA 試料を用いた共同分析

### 3-1. 共同分析の概要

PFDC における分析精度を向上させ、核燃料物質の測定で発生したバイアスを検知するため、1994 年に IAEA、核物質管理センター（NMCC）、及び JAEA が参加した保障措置に関する会合において、査察で収去される試料を用いた共同分析を実施することが IAEA より提案され、合意した。参加施設は、PFFF, PFPF のほかに東海再処理工場（TRP），転換施設（PCDF）を含めた 4 施設で行われ、それぞれの施設から試料が収去される。

共同分析試料は、ランダム査察（F-RII: Fixed day Random Interim Inspection）又は実在庫検認（PIV: Physical Inventory Verification）において、4 施設で収去された試料から調製し、参加者に配布することで、年 4 回の共同分析が実施されることとなった。

### 3-2. 共同分析試料の調製

査察で収去された試料（DA 試料）は、査察側分析所（IAEA-NML、NMCC）へ輸送するため、航空輸送可能な核物質量となるように、施設側において溶解、分取、乾固等の前処理を行う。この作業を DA トリートメントと呼び、年に 1～2 回、各施設で実施している。

査察側分析所以外の参加者が測定するための共同分析試料は、この DA トリートメントにおいて、収去試料を調製（溶解、分取）した残りの溶液から分取され、硝酸塩乾固物として参加分析所へ配布される。なお、新型転換炉（ATR）ペレットの場合は、プルトニウム含有量が少量のため、調製作業なくペレットを粉砕、分取し、粉末として輸送される。

共同分析試料は各施設 4 本ずつ受け取り、3 本を濃度測定に用い、残りの 1 本を同位体組成測定に用いる。図-1 に DA 試料及び共同分析試料の調製フローを示す。

### 3-3. データ評価

DA 試料を用いた共同分析の開始当初は、国内分析所の測定結果を NMCC が取りまとめ、IAEA へ報告し、IAEA において評価が行われた。2008 年以降は全分析所の測定結果を NMCC で取りまとめ、評価を行っている。

本共同分析は、燃料ペレットや原料粉末などの実試料を用いて行われており、標準試料のように基準値を持つものではないため、参加者からの報告値の全平均値を基準値とし、分析所の平均値との差を評価している。また、測定結果は全て、収去された日又は DA トリートメントによる試料調製日に対して崩壊補正され、評価される。共同分析の評価結果は、NMCC が主催する委員会で報告

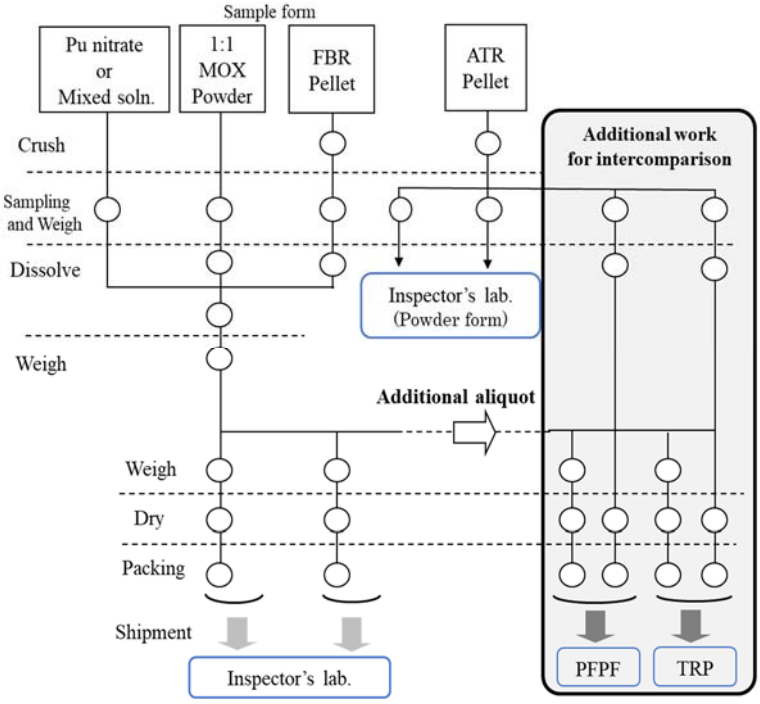



図-1　共同分析における試料調製フロー

され、議論される。図-2 に DA 試料を用いた共同分析の比較結果を示す。

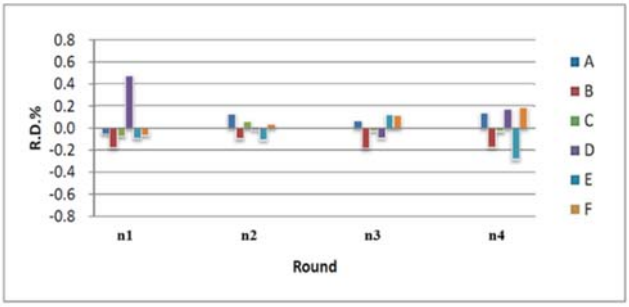



図-2　DA 試料を用いた共同分析の比較結果

### 3-4. DA 試料を共同分析に用いる利点

これまで国内でプルトニウムを用いた共同分析は存在しなかったが、本共同分析により、査察側と“同一試料”を用いることで、測定結果を比較、評価することができ、PFDC における核燃料物質の測定で発生したバイアスを検知できるようになった。

共同分析試料として収去試料を用いていることから、施設側は、収去試料を調製した残りの溶液から追加分取、乾固を行うだけで測定が可能であり、大きな負担ではない。さらに査察側は、一切追加の負担がかからず輸送等が可能となる。

また、査察で収去された試料を共同分析試料として用いているため、長期的な分析の傾向を見ることができるとともに、実試料の測定結果を他分析所と比較できることから、我々にとって重要な品質管理要素の一つとなっている。査察側にとっても、施設の分析品質を定期的に評価できることから、計量分析の健全性を確認するうえでも有用な手段となっている。[2]

また、共同分析の有効性が IAEA に認められ、2009 年から IAEA の六ヶ所 On Site Laboratory（Rokkasho-OSL）及び日本原燃六ケ所再処理工場（JNFL-RRP）が測定に参加することが提案され、6 施設間で共同分析が行われている。

## 4. 結論

PFDC における核燃料物質の分析において、プルトニウムの取り扱いが開始された当初は、核燃料物質の測定において発生したバイアスを検知するための手段が存在しなかった。しかし、IAEA の協力を得て、査察で収去された試料を用いた共同分析を開始し、外部分析所と測定結果を比較評価できるようになり、PFDC の計量分析における品質管理が精度よく行えるようになった。また、これまで 20 年間近く共同分析を継続し、PFDC の計量管理における品質管理の維持を実現している。

**謝辞**

本共同分析の主催者である IAEA、JSGO 及び NMCC の皆様には、これまで多くのご協力をいただきましたこと深く感謝申し上げます。

**引用・参考文献**

[1]M. Yoshida (Sumi), T. Suzuki, et.al (JNC) “Experience of determination of Plutonium and Uranium Contents in MOX Fuel by IDMS (IAEA-SM-367/5/04)”, 2002

[2] M. Sumi,H. Okazaki, M.Kayano,et.al(JAEA), E. Kuhn, “Effective use of Inspection samples as intercomparison samples for the quality control in safeguards analysis in Japan” 60th INMM,2019

# Nuclear safety policy awareness in six OECD countries
## Some text mining results

*Masako Ikegami [1], Saurabh Sharma [1], Zijian Wang[2]
[1] Tokyo Institute of Technology, [2] Center for Pacific Asia Studies, Uppsala, Sweden

This study aims to investigate nuclear safety policy awareness in six OECD countries (i.e. Japan, France, Germany, Sweden, the UK, and the US) during the last decade through text mining on related government documents. Our results show that Germany was the only country that had heightened its policy awareness of both nuclear safety and accident from 2010 to 2012. Moreover, the UK and the US had heightened their policy awareness of nuclear accidents from 2011 to 2012. On the other hand, French policymakers had been less willing to attach great importance to nuclear safety after the Fukushima accident. From 2013 to 2016, Japanese policymakers had been showing a declining emphasis on nuclear safety despite the fact that Japan had been deeply victimized because of the Fukushima nuclear disaster. The findings of this study may help enrich the current nuclear policy discourse.

### 1. Background

Nuclear safety policy aims to encompass the achievement of proper nuclear facility operating conditions, prevention of nuclear accidents and mitigation of accident consequences [1]. With the devastating 3.11 Fukushima nuclear accident, public awareness of the severe consequences of nuclear disasters has scaled unprecedented heights in those OECD countries where nuclear energy technologies and facilities are essential to energy supply. In actual practice, nuclear safety is inseparable from nuclear security when it comes to the prevention and detection of, and response to, theft, sabotage, unauthorized access, illegal transfer or other malicious acts involving nuclear material, other radioactive material or their associated facilities [1], although people tend to conceive nuclear terrorism as a low-probability high-consequence threat. This study aims to investigate nuclear safety policy awareness in six OECD countries (i.e. Japan, France, Germany, Sweden, the UK, and the US) where nuclear energy has played a pivotal role in national energy sources.

### 2. Methodology, data and results

#### 2-1. Methodology

Text mining is the technical process of deriving novel information from a collection of texts [2]. In this study, we perform text mining on related government documents of six OECD countries to examine implicit nuclear safety policy awareness before and after the Fukushima nuclear accident to see if there is a common trend in nuclear safety policy shift. To that end, we first identify the use of nuclear safety-conscious terms in the policy texts and extract four keywords (i.e. safety, accident, security, and terrorism) from the texts based on the occurrence of these keywords. Second, we specify certain coding rules for revealing the awareness of nuclear safety (i.e. regarding some particular expressions as a proxy for the concept of safety) in each country's policy text by tracking the nuanced occurrences of these keywords.

#### 2-2. Data

We collect the policy texts from the documents released by Japan Nuclear Regulation Authority (NRA), the French Nuclear Safety Authority [*Autorité de sûreté nucléaire*], the German Federal Office for Radiation Protection [*Bundesamt für Strahlenschutz*], the Swedish Radiation Safety Authority [*Strålsäkerhetsmyndigheten*], the U.K. Office for Nuclear Regulation (ONR), and the U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC). The policy texts we collected concern themes such as nuclear power plant safety and security, safety of nuclear power generators, control and safe management of fissionable materials and other radioactive materials, disposal of nuclear waste, vulnerability of nuclear facilities to terrorist sabotage, and limitations on exposure to radiation to protect workers, the public and the environment from undue radiation risks.

#### 2-3. Results

Our initial text content processing provides us with a word-frequency distribution: “safety”, “accident”, “security” and “terrorism” rank the top four among those typical words that are semantically related to nuclear safety policy awareness.

Table 1. Keyword frequency counts

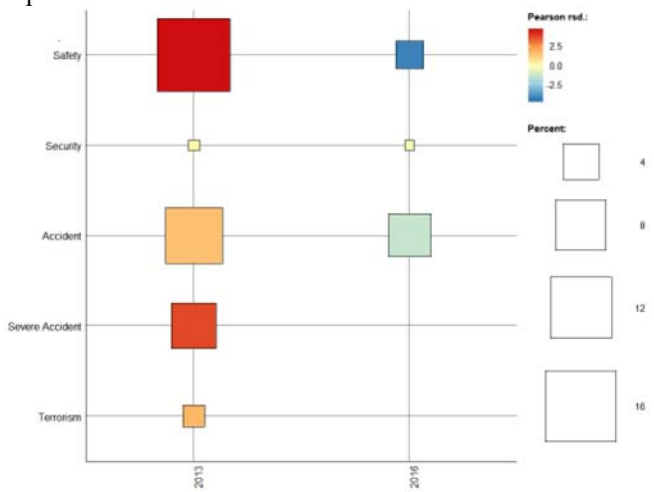
| | *Safety* | *Accident* | *Security* | *Terrorism* |
|---|---|---|---|---|
| Japan | 57 (28.5) | 54 (27) | 2 (1) | 3 |
| France | 410 (45.5) | 4 (0.4) | 8 (0.9) | 1 |
| Germany | 2107 (191.5) | 344 (31.3) | 89 (8.1) | 2 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Sweden | 1527 (138.8) | 207 (18.8) | 2 (0.2) | 13 |
| U.K. | 2712 (226) | 645 (53.8) | 414 (34.5) | 3 |
| U.S. | 426 (85.2) | 101 (20.2) | 71 (14.2) | 0 |

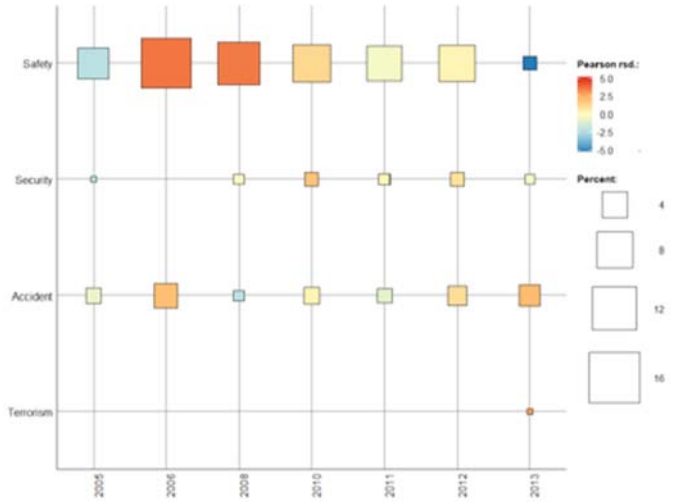
*Notes*: For Japan, the frequency counts were based on two documents (2013, 2016); France, nine documents (2005-2006, 2008, 2010-2013); Germany, 11 documents (2005, 2008, 2010-12, 2015, 2017-18); Sweden, 11 documents (2006-2011); U.K., 12 documents (2011, 2013-2018); U.S., five documents (2006, 2008, 2010, 2012, 2014). Keyword frequency counts per document in parentheses.

From Table 1, it is clear that the UK and Germany have a heightened policy awareness of nuclear safety, accident and security when compared with the other countries, because these three keywords appear more frequently in the UK and German sources. Among the other countries, Sweden had outshone the US, France and Japan by communicating a better nuclear safety policy awareness up to the time of the Fukushima accident. On the other hand, French policymakers have shown a mediocre ability to attach great importance to nuclear safety, security and accident. The Fukushima accident had a profound effect on Japan. All Japanese nuclear reactors had been shut down from 2011 to 2013 [3]. Japan has been mostly reliant on fossil fuel imports to fill the gap. In 2015, the Japanese government adopted a policy for nuclear energy to comprise 20-22% of the electricity mix in 2030. When trying to revitalize the nuclear power industry, the Japanese policymakers seem to be untroubled by the dire circumstances of Fukushima. In Table 1, one can observe this low policy awareness of nuclear safety—the keyword “safety” appeared much less frequently in the Japan NRA documents, which reflects a relatively weak point in Japan's current nuclear policy discourse. We further examine the co-occurrence of those typical words related to nuclear safety policy awareness and try to reveal the local meaning of the keywords in each country's policy text by specifying certain coding rules of word association. We find that some particular expressions of “safety”, “security” and “accident” strongly co-occur in each country's policy text.

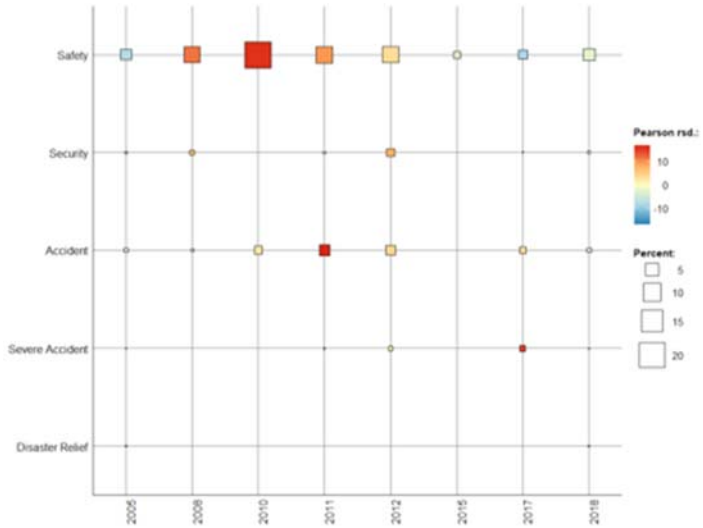
Japan




France




Germany



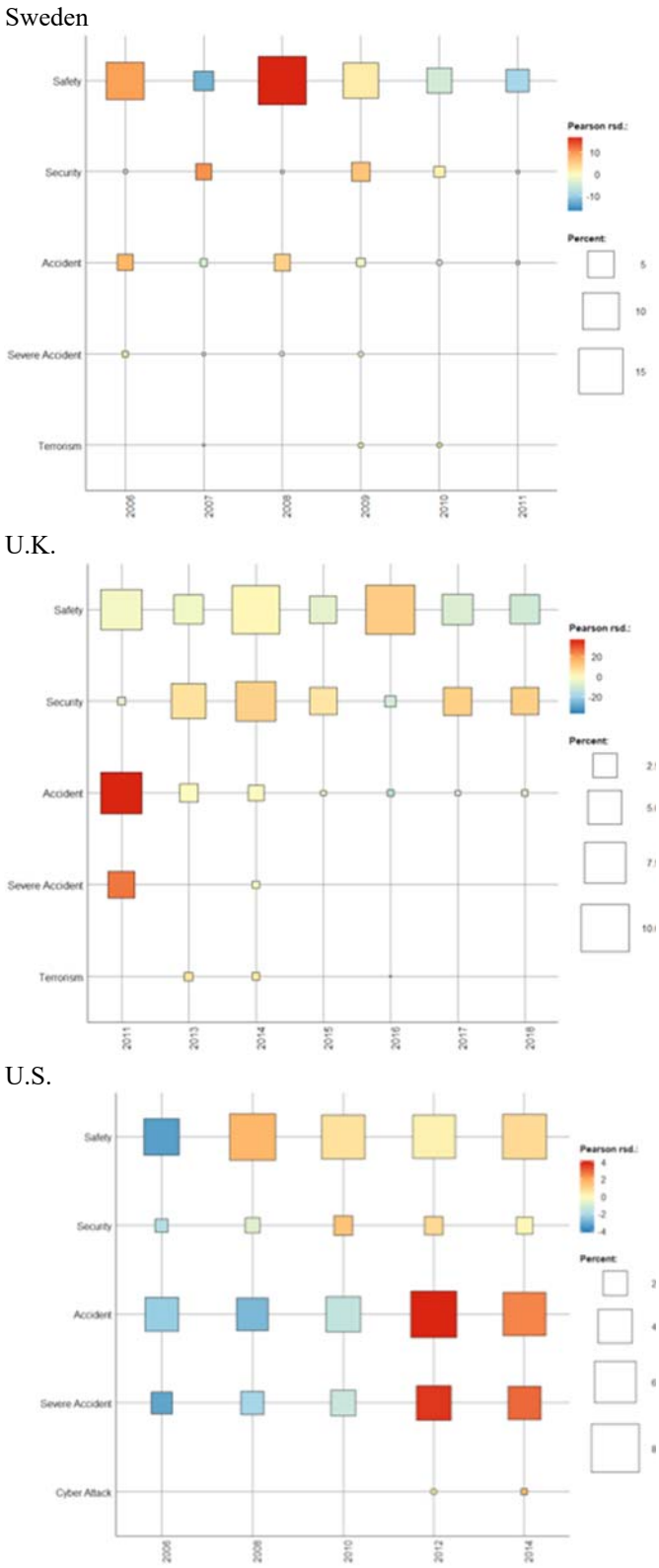



Figure 1. Occurrence of keywords, various years

*Notes*: "Percent" denotes the percentage of policy text sentences containing one of the keywords; Pearson rsd" (standardized Pearson residuals) are the difference between the observed and expected counts of the occurrence of a keyword divided by the square root of the expected counts; positive (negative) Pearson rsd indicate that there were more (less) occurrence of that keyword than expected [4].

Figure 1 shows the percentage of policy text sentences containing the keywords and the standardized Pearson residuals. Positive (negative) residuals indicate that there were more (less) occurrence of a keyword than expected. Residuals that are more than 2.0 (less than -2.0) indicate that the number of keyword counts is significantly larger (smaller) than would be expected with a significance level of 0.05. In Japan's case, the counts of "safety" was significantly larger (smaller) than would be expected in 2013 (2016); this reflects a decreasing sense of nuclear safety on the side of Japanese policymakers. Among the other countries, Germany, the UK and the US had heightened their policy awareness of nuclear accidents around 2011-2012. French policymakers, on the other hand, had been less willing to attach great importance to nuclear safety after the Fukushima accident in spite of the country's strong reliance on nuclear power. We further made a distinction between "accidents" and "severe accidents" whenever possible to capture the impact of the Fukushima accident. We find that Germany, the UK and the US had heightened their policy awareness of severe nuclear accidents at once after the Fukushima accident. There are obvious distinctions when it comes to the policy awareness of nuclear terrorism: Sweden, Japan, France and the UK had sounded an occasional alert for nuclear terrorism; the US, on the other hand, had become increasingly concerned for cyberattacks.

## 3. Conclusions

Among the six countries, Germany was the only one that had ever heightened its policy awareness of both nuclear safety and accident from 2010-2012. This finding may help to explain the country's commitment to phasing out nuclear power in the post-Fukushima accident period. After the Fukushima accident, Germany, the UK and the US all heightened their policy awareness of nuclear accidents. This finding shows that the Fukushima accident was a common lesson to these three countries. Japan had been deeply victimized because of the Fukushima nuclear disaster. Our text mining results, however, show that Japanese regulators have a relatively low policy awareness of nuclear safety. This weak point in Japan's nuclear

policy formulation should be addressed by raising the concern about nuclear safety among policymakers and stakeholders.

**Acknowledgments**

The author acknowledges financial support from the Japanese MEXT [*Monbu Kagakusho*] Grant-in-Aid for Scientific Research (C) [Project/Area Number 17K03581]. Kengo Takeda undertook responsibility for processing data as a research assistant.

**References**

[1] International Atomic Energy Agency, *IAEA Safety Glossary: 2018 Edition*, IAEA, Vienna (2019).

[2] Nisbet R, Miner G, Elder J. (2009). *Handbook of Statistical Analysis and Data Mining Applications.* London: Academic Press.

[3] Ikegami M, Wang Z (2016) The long-run causal relationship between electricity consumption and real GDP: evidence from Japan and Germany. J Policy Modeling 38:767–784.

[4] Agresti A (2002). *Categorical Data Analysis* (second ed.). New York: Wiley.

# 東京工業大学 原子力規制人材育成プログラム「原子力安全・核セキュリティ・保障措置教育の体系化と実践」(4) 2019 年度実施状況

Nuclear Regulation Human Resource Development Program in Tokyo Tech
"The Advanced Nuclear 3S Education and Training (ANSET)" – (4) Implementation Status FY2019 -

*江幡修一郎[1]，韓治暎[1]，相楽洋[1]，松本義久[1]，千葉敏[1]，林崎規託[1]，池上雅子[1]，尾本彰[1]，竹下健二[1]，片渕竜也[1]，木倉宏成[1]，鷹尾康一郎[1]
[1]東京工業大学
*Shuichiro Ebata[1], Chi Young Han[1], Hiroshi Sagara[1], Yoshihisa Matsumoto[1], Satoshi Chiba[1], Noriyosu Hayashizaki[1], Masako Ikegami[1], Akira Omoto[1], Kenji Takeshita[1], Tatsuya Katabuchi[1], Hiroshige Kikura[1], and Koichiro Takao[1]
[1]Tokyo Institute of Technology

In Tokyo Institute of Technology, the nuclear human resource development program, "the Advanced Nuclear 3S Education and Training (ANSET)", was established in 2017, supported by Nuclear Regulatory Authority. This paper introduces the reports of our activity in FY2018 and the current implementation status in FY2019.

## 1. 緒言

東京工業大学は、2017 年より原子力規制人材育成事業「原子力安全・核セキュリティ・保障措置教育の体系化と実践」を遂行している [1]。事業概要及び 2018 年度で実施した講義・実習・インターンシップについて報告する。また 2019 年度に実施予定の内容についても報告する。

## 2. 概要

### 2-1. 事業の目的

本事業は、原子力安全 (Safety), 核セキュリティ (Security), 保障措置 (Safeguards) の 3S を俯瞰・主導出来る人材の育成を目的とすると共に、3S 教育拠点の構築も目的としている。

### 2-2. 2018 年度事業実施報告

3S 個々の専門性と 3S を全体的に理解する為に、既存の原子力安全工学と新設する講義科目と実習科目を準備し、加えてより実践性を高めた人材育成の為に、国内外のインターンシップも準備してきた。2018 年度実施した講義科目では「核不拡散・核セキュリティ学概論」「核時代の国際政治と核不拡散」「リスク評価と管理」が開設され、各々 10 名、32 名、19 名が履修した。実習科目では「核不拡散・核セキュリティ学実習」「放射線災害対応実習」が開設され、各々10 名、9 名が履修した。国内インターンシップでは核物質管理センター(NMCC)へ 7 名を 2 週間派遣、国外インターンシップでは IAEA の原子力安全、原子力セキュリティ部門へ 3 か月間と 6 か月間で 1 名ずつ計 2 名を派遣した。本事業の教育課程修了者には修了認定証を発行しており、2018 年度は 8 名に授与した。

## 3. 2019 年度開設 3S 科目

### 3-1. 3S 講義科目

講義科目は 3S 個々の基礎的な専門性を理解し、原子力安全との協働関係を有機的かつ一体的に理解する目的で開設した科目群である。

(1) 核不拡散・核セキュリティ学概論

核セキュリティについてその経緯と法的枠組み、核物質及び放射性物質の特性とその重量・放射線量や不正利用価値に基づく等級別規制、物理的防護システム設計と評価、安全性と核セキュリティ・核不拡散の共通性と相反性、安全文化と核セキュリティ文化について解説する。

図 1　授業(核不拡散・核セキュリティ学概論)

(2) 核時代の国際政治と核不拡散

3S のうち特に核不拡散･核セキュリティの関心拡大の為、原爆開発・使用から冷戦に至る核軍拡競争の中で IAEA・NPT、核物質管理政策など核不拡散体制が確立した経緯、新しい核兵器拡散問題や汚い爆弾等を用いた核テロリズム、将来期待される核兵器解体検証など、関連するその歴史や現代国際政治情勢を広く解説する。2019 年度は 25 名の履修生があった。

図 2　授業(核時代の国際政治と核不拡散)

(3) 危機管理

我が国が直面するかもしれない危機への対応を考える機会を提供するため、この問題に取り組んで来ている各界の専門家を招聘して講義と討議を行う。授業では原子力施設でアクシデントがあった事を想定して、事業者側と一般市民と役割を分けて、危機対応について討論を行った。2019年度は29名の履修生があった。

図 3　授業(危機管理)

### 3-2. 3S 実習科目

実習科目は、3S 講義科目群により 3S を体系的に理解した上で、実習や実験を通じ更に理解を深める為に開設した科目群である。3S のインターフェースを有機的かつ一体的に扱う事を目的としている。

(1) 核物質環境動態実習

事故及び核テロ等に起因する原子力災害時に放出される放射性物質への即座の対応を講じる素養として、小規模及び大規模拡散に影響する諸因子(気象条件、放射性核種の種類、地形や都市環境条件)の特性を定量的に理解する能力を養うために、実験式を用いた簡易評価の導入及び環境線量情報予測システムを使ったシミュレーション実習を行う。2019 年度は 8 名の履修生があった。

図 4　シミュレーションコードの説明と実施風景

(2) 原子炉過酷事故対応実習

座学により、過酷事故と原子炉格納容器の健全性に脅威を与える過酷事故現象の概要を、原子力安全・核セキュリティ両面から鑑み、習得する。また、過酷事故解析について簡易手法を用いた概要理解を行った上で、コードの概要についても習得する。さらに福島第一原子力発電所事故の概要と事故経過の分析結果について理解する。 原子炉過酷事故シミュレーションの実習では、沸騰水型軽水炉の過渡・事故・過酷事故のシミュレーションを体験し 過酷事故経過の特性を理解することで、規制に重要なエビデンスに基づく判断を行うためのプロセスを学習する。

図 5　シミュレーション施設と実機見学の風景

### 3-3. 3S インターンシップ科目

インターンシップ科目はより実践的な能力を高める人材の為に準備した科目であり、講義科目群と実習科目群の特定の履修条件を満たした本学に所属する学生を派遣する。

(1) 国内インターンシップ

規制の実務を担う関係省庁、実施組織（NMCC）や事業者（JAEA (日本原子力研究開発機構) 等）に派遣し、3S の実務活動の経験修得を目的とする。2019 年度は JAEA の複数施設への派遣を想定している。

(2) 国外インターンシップ

3S 実務に関係する IAEA (国際原子力機関) 等の国際機関に派遣し、専門や国籍を超えた 3S に係る様々な関係者と交流する機会を提供し、実務体験を目的とする。2019 年度では UNSCEAR(原子放射線の影響に関する国連科学委員会)への派遣も想定している。

### 4. 結論

東京工業大学の原子力規制人材育成事業では、3S の体系的な教育カリキュラムを構築し、実施している。授業アンケートの集計から 3S に関して興味を持った学生が 87.5%あり、また授業内の発表にからも 3S を総合的に評価する姿勢がみられる様になった。本事業の教育課程修了認定者は 8 名あった。卒業した履修生の 6 名が原子力関連の企業に、内 1 名は規制庁に就職した。2019 年度は講義科目「危機管理」を開講し、実習科目は「核物質環境動態実習」「原子炉過酷事故対応実習」を開講した。新しい国内外のインターンシップ派遣先も開拓した。3S 教育拠点構築と維持の観点から事業を見ると、本校の教員のみですべての講義・実習を対応する事は現状難しく、本分野の外部専門家との連携により学術性および実学性の品質確保が重要である。また、授業内容の精査と共に、本校教員の 3S に関する専門知識及び講義技術の獲得が必要である。

**謝辞**

本事業は、平成 30 年度「原子力人材育成等推進事業費補助金（原子力規制人材育成事業）」を受けたものです。

**参考文献**　[1] http://www.ne.titech.ac.jp/kiseijinzai

# 東工大における原子力規制人材育成プログラム「原子力安全・核セキュリティ・保障措置教育の体系化と実践」(5) 放射線災害対応実習

Nuclear Regulation Human Resource Development Program in Tokyo Tech
"The Advanced Nuclear 3S Education and Training (ANSET)"
(5) Radiation Disaster Response Exercise

*韓治暎 [1]，江幡修一郎 [1]，片渕 竜也 [1]，千葉敏 [1]，相楽洋 [1]
[1] 東京工業大学
*Chi Young HAN [1], Shuichiro EBATA [1], Tatsuya KATABUCHI [1], Satoshi CHIBA [1], and Hiroshi SAGARA [1]
[1] Tokyo Institute of Technology

This paper introduces the exercise on "Radiation Disaster Response Exercise" of the nuclear regulation human resource development program, "the Advanced Nuclear 3S Education and Training (ANSET)", in Tokyo Tech.

## 1. 緒言

東京工業大学は、2017 年より原子力規制人材育成事業「原子力安全・核セキュリティ・保障措置教育の体系化と実践」を遂行している [1]。本事業は、3S (Safety, Security, Safeguards) 講義科目、3S 実習科目、3S インターンシップ科目を新設、体系的かつ実践的な教育カリキュラムを構築した。3S 実習科目は、実習や実験を通じて更に 3S を体系的に理解する為に開設している。ここでは 3S 実習科目の一つである「放射線災害対応実習」について紹介する。

## 2. 実習内容

### 2-1. 概要

「放射線災害対応実習」は、核セキュリティ事象を起因とする放射線災害 (妨害破壊行為、核燃料物質・RI 盗取、RDD の使用等) に対する緊急事態の対応能力や危機管理能力、また災害対応に重要なチームワーク、コミュニケーションなどの能力を修得することを目的としている。

2018 年度行った実習では、米国 TAMU (テキサス A&M 大学)・TEEX (Texas A&M Engineering Extension Service) と連携して、一般的な災害対応が困難な状況における核セキュリティ事象を起因とする放射線災害を想定し、放射線緊急事態対応チームとして不明な核物質や放射性物質の検知・検認・回収を計画・実行する集中講義・実習を実施した。東工大では、放射線計測原理学習及び放射線測定のための「放射線計測器と測定」の実習を行った。本学が所有するガンマ線スペクトロメータ、中性子検出器、ガンマ線源及び中性子線源を用いた。米国では、TAMU の核セキュリティ・保障措置関連各種機器や世界最大級規模の災害訓練施設である TEEX Disaster City の施設 (実物のがれき、倒壊した建物、鉄道車両等) を使用し、「ウラン濃縮度検認」、「建物内の放射性物質の位置特定」、「放射線緊急事態対応」の実習を行った。

### 2-2. 放射線計測器と測定 (東工大)

放射線災害対応の概要、放射線災害対応のプロトコル、放射線検出器の種類と原理等の講義の後、NaI / HPGe / He-3 計測器を用いたガンマ線及び中性子測定の実習を行った。

図 1 ガンマ線・中性子測定

### 2-3. ウラン濃縮度検認 (TAMU)

保障措置機器についての講義の後、NaI / HPGe 計測器を用いて、Co-57 及び Co-60 と Cs-137 及び Eu-152 の組み合わせで計測器のキャリブレーション、そして $UO_2$ サンプルの濃縮度 (0.31%、0.71%、1.27%、3.2%、4.1%) 検認の実習を行った。

図 2 NaI/HPGe 計測器を用いた U 濃縮度検認

## 2-4. 建物内の放射性物質の位置特定 (TAMU)

国家核安全保障検知システムについての講義の後、放射線検知バックパックシステム (Thermo-Fisher PackEye Backpack) を用いて建物内部の放射線を探索するの実習と NaI / LaBr 計測器を用いて対象部屋の外で内部の放射線源 (Cs-137) の位置を特定する実習を行った。

図 3 バックパックシステムを用いた建物内探索

図 4 対象部屋の外で内部の放射線源の位置特定

## 2-5. 放射線緊急事態対応 (TAMU)

実習のシナリオ及びミッションは、地震発生による建物 (研究所) が破壊、建物内には人や放射線源があったが地震後には確認できてない状態である。放射線源が確認されるまでに災害対策チームは建物に立入不可であり、実習参加者は放射線専門家 (2 人 1 組) として、放射線計測器を用い、放射線源を検知・回収する。

図 5 GPS 車両検索システムを用いた検知

図 6 放射線量マッピングと探索経路の計画

図 7 深層探索と放射線源の識別・回収

図 8 ミッション報告・議論と修了証授与

## 2-6. 発表・議論 (TAMU)

TAMU で行った実習について結果及び成果の発表と議論を行った。

図 9 実習結果及び成果の発表・議論

## 3. 結論

本実習を通じて 1) 核セキュリティ事象を起因とする放射線災害の緊急事態時における総合的・体系的な思考・対応能力、2) 放射線計測原理の理解及び放射線災害対応時に使用する放射線計測器の適切な取扱方法、3) 迅速な放射線災害対応に必要な技術能力 (放射性物質の検知・検認・特定等)、4) 放射線災害対応のチームワーク力とコミュニケーション力を習得することができた。

**謝辞**

本事業は、平成 30 年度「原子力人材育成等推進事業費補助金 (原子力規制人材育成事業)」を受けたものです。

**参考文献**

[1] http://www.ne.titech.ac.jp/kiseijinzai

# 東海再処理施設における高放射性固体廃棄物中核物質の非破壊測定法適用に係る検討

Feasibility study on nondestructive assay of nuclear material in high radioactive solid waste in Tokai Reprocessing Plant

*高峰　潤,　清水　靖之,　伏見　隆,　竹田　誠一,　高橋　直樹,　北尾　貴彦
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
*Jun Takamine, Yasuyuki Shimizu, Takashi Fushimi, Seiichi Takeda, Naoki Takahashi, Takahiko Kitao
Japan Atomic Energy Agency

This work describes the current storage status of high active solid waste in Tokai Reprocessing Plant (TRP) and the applicability of neutron and gamma ray measurements to quantitative determination of nuclear materials in the waste. In addition, we report the prospective for quantitative methods of the nuclear material contained in the waste using nondestructive measurement when treatment of the waste for final disposal is performed in the future.

## 1. 緒言

東海再処理施設（TRP）内の高放射性固体廃棄物貯蔵庫（HASWS）には、使用済燃料の再処理に伴い発生した高放射性固体廃棄物（HASW）を収納したステンレス製 350ℓ 容器（ハルドラム）が保管されている。HASW には、核物質が僅かながら付着しており、ハルドラム中の核物質量を正確に把握することは、将来の処理処分における HASW の計量管理の改善や保管管理に質することから、非破壊測定（NDA）技術の確立が必要と考えられている。しかしながらハルドラムは、その内容物の構成が一様でないこと、ハルドラム内は水で満たされていることから、現状では既存の NDA による核物質定量は困難であると考えられる。本検討では、TRP における HASW の現状を紹介すると共に、粒子輸送シミュレーションを用いた現状のハルドラムに対する中性子及びガンマ線測定の適用性評価の結果及び課題について報告する。また、将来、HASW を処理する施設における HASW 中の核物質定量のための NDA 技術の適用について海外の例をもとに考察した結果を報告する。

## 2. 高放射性固体廃棄物の現状

TRP の前処理工程において、使用済燃料集合体のせん断に伴い発生する被覆管片（ハル）は核燃料とともに溶解槽に投入される。僅かな核燃料は溶解せずハルに残存する。図 1 に示すように、ハルは単独でハルドラムに収納される場合もあるが、使用済燃料集合体の両端部の廃材（エンドピース）や前処理工程のメンテナンスで発生する雑固体廃棄物と共に収納されるものもあり、内容物の構成は個体毎に異なる。また、ハルドラムは被覆管の材料であるジルカロイの微粉末に起因する発火防止等の観点から、内部は水で満たされている。ハルドラムは、計量管理上、保管廃棄物に移転（TW）され、HASWS にて湿式保管される。ハルドラム中の核物質定量には破壊分析（DA）または NDA の適用が考えられるが、固体廃棄物に付着している核物質の分布は不均質であり、測定試料の代表性が無いため DA の適用は難しい。このため、測定試料の代表性の影響を受けない NDA による測定技術開発の確立が求められている。

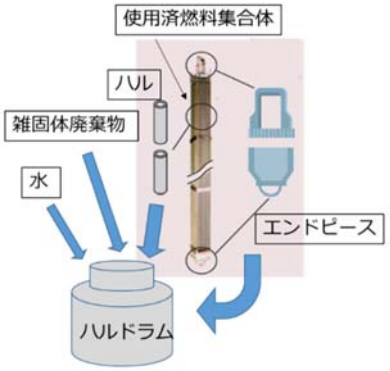



図 1　ハルドラムの内容物［1］

## 3. バックグラウンド放射線の影響

HASW 中の核物質定量を目的とした、核物質から自発的に放出される中性子やガンマ線の NDA 手法（以下、パッシブ中性子法及びパッシブガンマ法とする）において、HASW に付着した使用済燃料由来の核分裂生成物（FP）及びマイナーアクチノイド（MA）から放出されるバックグラウンド放射線の影響によって、U や Pu からの直接放射線の測定が阻害される。パッシブ中性子法による核物質定量においては通常、Pu-240 からの自発核分裂中性子の測定が考えられるが、MA の一つである Cm-244 の自発核分裂

中性子の強度は、Pu-240 の 100 倍以上となり支配的であり、それぞれ検出されるシグナルが同様であるため、Pu-240 由来の中性子を弁別することは困難である[2]。一方、パッシブガンマ法については通常、高純度ゲルマニウム検出器（HPGE）等による U-235 の 185.72keV、及び Pu-239 の 413.69keV 等の主要なガンマ線ピークの分析が考えられる。しかし、FP のガンマ線ピークが高エネルギー側に存在し、FP の代表的核種である Cs-137 のピーク強度は、上記の U-235 及び Pu-239 のピークより $10^7$ 倍以上高い。例として、図 2 に照射済み燃料集合体（PWR、平均燃焼度 32GWd/t、冷却時間 9 ヶ月）のガンマ線スペクトルを示す。図 2 に示すように、Cs-137 等の FP のコンプトンバックグラウンドによって、U-235 及び Pu-239 のピークは完全に隠れてしまう[2]。

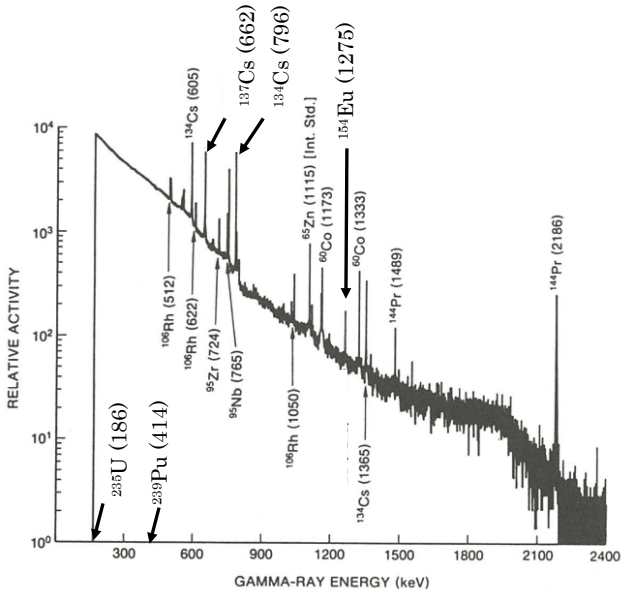



**図 2　照射済み燃料集合体（PWR、平均燃焼度 32GWd/t、冷却時間 9 ヶ月）のガンマ線スペクトル[2]**

これらの事から、一般的に計量管理等で用いられている、パッシブ中性子法及びパッシブガンマ法をハルドラムに対して適用する場合、Cm-244 の自発核分裂中性子、及び FP のガンマ線ピーク以外を測る事は困難である。したがって、核物質から直接放出される放射線を測定し、定量することは困難であるが、Cm-244 又は FP の定量値と HASW に付着する使用済核燃料の燃焼度や冷却時間から、U・Pu の同位体の量を間接的に算出できる可能性がある。ハルドラム毎の核物質の燃焼度や冷却時間が、廃棄物の履歴から得られない場合は、$^{134}$Cs、$^{137}$Cs、$^{154}$Eu のピークを分析し（図 2 参照）、$^{134}$Cs /$^{137}$Cs 同位体比から燃焼度、$^{154}$Eu /$^{137}$Cs 同位体比から冷却時間を算出できる可能性がある[2]。

## 4. 粒子輸送シミュレーションによる適用性評価

3 項の考察から、ハルドラム（内径 74.9 ㎝、内側の高さ 79.4 ㎝、壁厚 0.3 ㎝）に対するパッシブ中性子法による Cm-244 の定量及びパッシブガンマ法による FP の定量への適用性を評価するため、モンテカルロコード MCNP6[3]を用いて中性子及び光子の輸送シミュレーションを行った。本検討では、現状のハルドラムに対する予備評価として TRP に保管されている HASW を収納したハルドラムの内部を単純化した解析モデルを作成した。水平及び鉛直断面図を表 1 に示す。廃棄物の NDA においては、内容物の放射線への影響が大きく、測定対象となる線源の分布による感度差が問題となる。そこで、ハルドラム内で核物質（放射線源）が中心に集約している場合（直径 5 ㎝、高さ 5 ㎝）をケース 1、全体に均質分布しているものをケース 2、表面から 5 ㎝厚さで分布しているものをケース 3 とし、分布が大きく異なる 3 つのケースを比較することで線源分布による影響を評価した。また、ハルドラムの内容物は、ハルと水の質量比を 1：1 とし、均質分布とした。本構成は、実際に保管しているハルドラムの中で内容物の放射線への影響が最も少ないものを選択した。中性子源のエネルギーを Cm-244 の自発核分裂スペクトルとし、ガンマ線については、主要な FP である Cs-137 の 661.7keV とし、それぞれ放出分布を等方とした。ケース間の比較のため、全解析において、線源粒子あたりのハルドラム外部に放出される粒子を計数した。

**表 1　解析モデルの水平及び鉛直断面図と熱・高速中性子及びガンマ線計数比**

| | ケース1 | ケース2 | ケース3 |
|---|---|---|---|
| 鉛直断面図 | | | |
| 水平断面図 | | | |
| 熱中性子計数比（< 0.3eV） | 1 | 10.7 | 11.2 |
| 高速中性子計数比（> 1MeV） | 1 | 21.5 | 55.1 |
| ガンマ線計数比（661.7keV） | 1 | 38.4 | 110 |

放射線源部

ケース 1～3 において、ハルドラム外部に放出される中性子のエネルギースペクトルの算出結果を図 3 に示す。図 3 に示すように、全エネルギー領域において、ケース 2 と 3 の差に比べ、ケース 1 と 2 の差が顕著である。また、エネルギーが高くなるに従い、各々の差異が顕著となる。これらの結果から、中心部から放出される高速中性子の多くは熱中性子に減速され、ハルドラム外部に出る前に水素原子核等によって吸収されると考えられる。また、熱中性子領域（<0.3eV）及び高速中性子領域（>1MeV）におけるケース 1～3 の計数比を表 1 に合わせて示す。熱中性子領域（<0.3eV）については、ケース 2 とケース 3 の間に大きな計数の差異はないが、ケース 2 はケース 1 に対し 10 倍以上の計数となった。一方、高速中性子領域（>1MeV）ではケース 2 はケース 1 の 20 倍以上、ケース 3 はケース 1 の 50 倍以上の計数となった。このように線源分布によって生じる大きな計数差から、パッシブ中性子法による熱中性子又は高速中性子測定により Cm-244 の量を推定することは困難であると考えられる。また、外部中性子源による誘導核分裂由来の高速中性子を測定するアクティブ中性子法[4]は、核分裂性核種から直接放出される中性子を測定できるが、パッシブ中性子法と同様に線源分布による大きな感度差が生じる事が予想される。したがって、ハルドラム中の核物質定量へパッシブ又はアクティブ中性子法の適用を考える場合は、感度差補正法を開発する必要がある。表 1 に示すように、線源の分布毎に高速中性子と熱中性子の比が異なるので、位置感度差補正のパラメータとして利用できる可能性があり、今後検討が必要と考える。

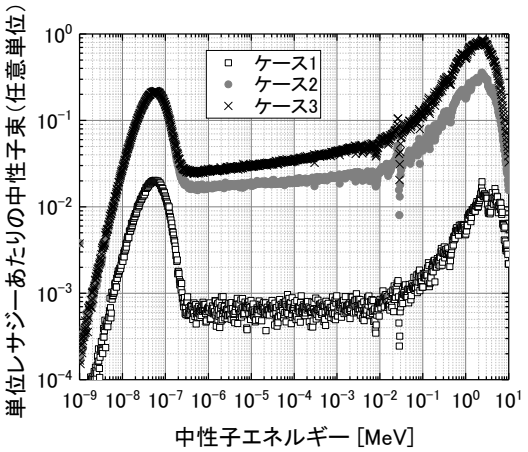



図 3　ハルドラム外部に放出される中性子のエネルギースペクトル

次に、ケース 1～3 において、ハルドラム外部に放出される 661.7keV のガンマ線の計数比を表 1 に合わせて示す。ケース 2 はケース 1 の 30 倍以上の計数となり、ケース 3 はケース 1 の 100 倍以上の計数となった。これらの結果から、Cs-137 の 661.7keV のガンマ線は、高速中性子よりも線源分布による感度差が大きく、FP の定量への適用は困難である事が分かった。ただし、表面近傍に分布する Cs-134、Cs-137、Eu-154 の測定は可能であり、測定対象となるハルドラム内核物質の燃焼度、冷却時間が全て均一であれば、2 項で述べたように、これらの値を算出することができると考えられる。近年開発が進んでいる遅発ガンマ測定法[5]は、外部中性子源による誘導核分裂によって生じる核分裂生成物のベータ崩壊に伴う遅発ガンマ線を測定する手法であり、核分裂性核種（U-235、Pu-239、Pu-241 等）の同位体比を決定できる手法である。この手法は、パッシブガンマ法と同様に表面近傍に分布する核物質から放出される遅発ガンマ線を測定できる可能性がある。

## 5.　将来 HASW を処理する施設における非破壊測定技術の適用性

3 項及び 4 項の考察の結果から、現状では、既存の非破壊測定技術によるハルドラム内の核物質の定量測定は困難であることがわかった。一方で将来、HASW を処理する施設において、ハルドラムの内容物を処理する際、ハル・エンドピースは、他の可燃物、大型の不燃物と分別され、水は取り除かれることが想定される[6]。可燃物は焼却処理され焼却灰となり、焼却灰や取り除かれた水は均質化が可能なので、DA の適用が考えられる。また、分別されたハル・エンドピース等の不燃物は、水分が極めて少ないことから、中性子の相互作用が少なくなり、アクティブ、及びパッシブ中性子法における核物質分布による感度差が大幅に軽減されると考えられる。パッシブガンマ法については、ハル・エンドピースによる減衰により、核物質分布による感度差が無視できないことが予想されるが、表面部の Cs-134、Cs-137、Eu-154 の測定は可能であり、測定対象内核物質の燃焼度、冷却時間が全て同様であれば、2 項で述べたように、燃焼度、冷却時間を算出することができると考えられる。また、遅発ガンマ測定もまた、パッシブガンマ法と同様に表面部のガンマ線測定が可能なので、核分裂性核種の同位体比を決定できる可能性がある。

フランスのラ・アーグ再処理工場では、ハル・エンドピースの圧縮処理前に圧縮缶に収納されたハル・エンドピースを、パッシブ中性子法、アクティブ中性子法、及びパッシブガンマ法によって測定している[7]。ここでは、2 項で述べたように、パッシブガンマ法によって燃焼度、冷却時間を、パッシブ中性子法により Cm-244 の定量し、全α核種量を定量する。更にアクティブ中性子法によって核分裂性核種量を定量し、これらの値を組み合わせることによって、核物質やその他の放射性核種の定量を行っている。これらの測定値は、保管管理や、中間処分場及び海外への返還廃棄物の品質保証データとして用いられている。圧縮後の数体の圧縮体は、図 4[8]に示すように、CSD-C と呼ばれる地層処分用のキャスクに封入され、圧縮前と同様の手法で測定され、処理前後の核物質測定値を比較し、許容誤差範囲で一致している事を確認している。TRP においても、将来 HASW を処理する施設において処理前後に非破壊測定を実施することにより施設の計量管理や HASW の保管管理データに適用できると考える。

図 4　CSD-C に封入されたハル･エンドピースの圧縮体（切断面）[8]

## 6.　結論と今後の展望

TRP で保管されているハルドラムに収納された HASW は、Cm-244 及び FP からの中性子及びガンマ線の影響で、核物質から自発的に直接放出される放射線を測定することは困難である。本研究では、Cm-244 及び FP の定量値から間接的に核物質を定量できる可能性に着目し、ハルドラムの内容物を簡略化して設定したモデルを対象にモンテカルロシミュレーションによって Cm-244 及び FP を定量するための中性子、及びガンマ線測定について検討した。結果として、ハルドラムの内容物の影響で、線源分布による計数の差が非常に大きく、既存測定法による Cm-244 及び FP の定量は困難であることがわかった。しかし、中性子測定に関しては、線源の分布毎に高速中性子と熱中性子の放出比が異なるので、線源分布による感度差補正のパラメータとして利用できる可能性があることが確認された。

また、ハルドラムの表面近傍に分布する核種については、ガンマ線の測定が可能であり、ハルドラム内の核種組成が均質であれば、パッシブガンマ法による燃焼度、冷却時間の決定や遅発ガンマ測定法による、核分裂性核種の同位体比決定ができる可能性がある。

一方で、ハルドラム内容物の廃棄体化処理の前処理として、ハル・エンドピース等の主要な固体廃棄物を可燃物や水と分別し、圧縮処理を行う場合、廃棄物分別後を測定対象とした既存のパッシブ中性子法及びアクティブ中性子法が適用可能となると考えられる。

今後、ハルドラムに対する NDA 技術の研究開発として、位置感度差補正法や現在開発段階にある遅発ガンマ測定法等の新技術の適用性評価を継続するとともに、将来建設予定の HASW を処理する施設における処理手順に NDA 技術を用いた HASW 中の核物質定量を考慮した設計を勘案する等、合理的な解決策を検討する予定である。

**参考文献**


[1] https://www.numo.or.jp/chisoushobun/radioactive_waste/05.html（参照 2019-8-19）

[2] Doug Reilly et all, “Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials”, pp. 529-562, NUREG/CR-5550 LA-UR-90-732(1991)

[3] J.T. Goorley, et al., "Initial MCNP6 Release Overview - MCNP6 version 1.0", LA-UR-13-22934 (2013).

[4] A.-C. Raoux et all., “Tranceuranic waste assay by neutron interrogation and online prompt and delayed neutron measurement” Nucl.Insr. and Meth. B 207 (2003) pp.186-194

[5] D. C. Rodriguez et al., “Utilizing Delayed Gamma Rays for Fissionable Material Measurement in NDA,” In 37th Annual Meeting of the European Safeguards Research & Development Association, EUR 27342, May 2015.

[6] H. Kojima et al., “Safety evaluation for hull waste treatment process in JNC”, WM’02 Conference, February pp.24-28, 2002

[7] H. Toubon et al., “Innovative nuclear measurement techniques used to characterize waste produced by COGEMA’s new compaction Facility”, WM’01 Conference, February 25-March 1, 2001

[8] https://inventaire.andra.fr/families/colis-de-dechets-compactes-csd-c-oranola-hague（参照 2019-8-19）

# Testing enrichment meter based on nuclear resonance fluorescence

*Mohamed Omer[1], Toshiyuki Shizuma[1,2], Ryoichi Hajima[1,2], Mitsuo Koizumi[1]

# 核共鳴蛍光散乱を用いた同位体比の測定

*モハマド．オマル [1], 静間俊行 [1,2], 羽島良一 [1,2], 小泉光生 [1]

[1] Japan Atomic Energy Agency, [2] National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

Nuclear resonance fluorescence (NRF) is a phenomenon that a nuclide-specific γ-ray is resonantly absorbed and re-emitted. This method is considered useful for the nondestructive detection of nuclear materials. In order to demonstrate how accurate the NRF method is able to measure the isotopic abundance, we performed NRF experiments on natural tungsten as a surrogate of nuclear materials at the High Intensity γ-ray Source (HIγS) facility, Duke University. Our results show that the relative deviations between the reference and measured abundances are less than ±4%.

## 1. Introduction

Gamma-ray spectroscopy is a typical passive method for the detection of radioactive isotopes in a nondestructive manner, however, in case of nuclear materials, e.g., U-235, the emitted low-energy γ-rays can be obscured by self-absorption and/or matrix-shielding. Nuclear resonance fluorescence (NRF) interaction overcomes this limitation because of the high-energy γ-rays involved in the interaction, which are able to penetrate considerable thicknesses through the material [1].

NRF is one of the fourteen nondestructive assay (NDA) techniques proposed by the Next Generation Safeguards Initiative's (NGSI) [2]. NRF involves exciting a specific nucleus by the absorption of γ-rays of certain energy and subsequently detect the γ-rays emitted via the deexcitation. The emitted γ-rays are a signature of the isotope.

Here we perform a quantitative test of the NRF method by measuring the natural abundance of tungsten isotopes. This test ensamples an enrichment meter for nuclear materials based on NRF method.

## 2. Method

### 2-1. Experimental setup

An energy-tunable γ-ray source is available at the High Intensity γ-ray Source (HIγS) facility, Durham, NC, USA. A tungsten target of 2.5 cm in diameter and 0.4 cm in thickness was irradiated by a γ-ray beam of central energy of 3.12±0.09 MeV. The energy of the beam was selected to excite three isotopes of tungsten simultaneously. A flux of the incident γ-ray beam of approximately $3\times10^7$ ph./sec irradiated the tungsten target continuously for 7 hours. NRF photons were detected by six high-purity germanium (HPGe) detectors.

The intensity profile of the incoming photon beam was monitored using an additional HPGe detector, herein denoted by the flux monitor. This flux monitor was positioned downstream the tungsten target to measure the energy distribution of the beam. However, the monitor was rotated at an angle of 11.8° and was set to detect Compton-scattered radiation off a copper plate positioned 138 cm downstream the target position. The absolute intensity of the incident γ-ray beam was extracted from the Compton-scattered spectra using a Monte Carlo simulation [3,4].

### 2-2. Data analysis

The abundance of the resonating isotope $i$ is given by:

$$\chi_i = \frac{NM_i}{I_i \epsilon(E) W(\theta,\phi) \Phi(E) \rho N_A \lambda_{tt} db}, \qquad (1)$$

where $N$ is the dead-time corrected counting rate in the NRF photo-peak, $M_i$ is the molecular mass of the resonating isotope, $I_i$ is the NRF integrated cross section, $\epsilon(E)$ is the detector efficiency at the resonant energy $E$, $W(\theta,\phi)$ is the angular distribution function, $\Phi(E)$ is the absolute number of incident photons whose energy is $E$, $\rho$ is the density of the target, $N_A$ is Avogadro's number, $\lambda_{tt}$ is the thick target correction, $d$ is the target thickness, and $b$ is the branching ration of the exited NRF level.

The thick target correction is given by:

$$\lambda_{tt} = \frac{1 - \exp\{-[\sigma_D + \sigma_e(1 + sec\theta)]n\}}{[\sigma_D + \sigma_e(1 + sec\theta)]n}, \quad (2)$$

where $\sigma_D$ is the Doppler-broadened NRF absorption cross section, $\sigma_e$ is the total atomic attenuation cross section, $\theta$ is the angle at which NRF events are measured with respect to the incident beam, and $n$ is the atomic density of the target.

The absolute intensity of the incident γ-ray beam is a significant factor regarding the accurate estimate of the isotopic content using NRF. Therefore, we followed a specific procedure to estimate the flux of the incident γ-ray accurately. Firstly, the γ-ray beam parameters are obtained from a direct measurement of the beam profile by locating the flux monitor in beam. During this measurement, copper absorbers attenuated the beam was to keep the counting rates at reliable values. Fig.1 shows the direct measurement of the γ-ray beam. We then simulate the incident γ-ray using the obtained profile along with the accurate dimensions of the γ-ray detector. Fig.1 also shows the simulation results of the detector response to the incident γ-ray beam. The agreement between the simulated and measured beam profiles is better than 3%.

The final intensity profile of the incident beam was obtained from the profile which reproduced the detector response for Compton-scattered radiation. Fig. 2 shows the measured and simulated spectra for Compton-scattered radiation. The difference between the measured and simulated spectra is ≤ 4%.

## 3. Results and Discussion

The NRF spectrum obtained from irradiating the tungsten target, summed over the six detectors, is shown in Fig. 3. Three isotopes of tungsten were excited within the energy of the incident beam.

W-182 resonantly absorbed and re-emitted γ-rays of energy 3.163 MeV. Some of the absorbed photons are deexcited to the first excited state (of energy 0.1 MeV) of W-182, producing a γ-rays of energy 3.063 MeV. In the estimation of the abundance of W-182, we excluded the peak at 3.063 because of its low statistics. Four peaks are observed for W-184 at 3.071, 3.088, 3.125, and 3.13 MeV. The first peak was excluded for the low statistics, while the third and fourth peak were excluded due to their overlapping and the difficulty to separate them. Two levels of W-186 were excited. The peak at 3.036 MeV may have interfered with the excitation levels of 3.031 and 3.041 MeV of W-183. Therefore, we only exploit the peak at 3.172 MeV to determine the abundance of W-186. Note that the peak at 3.05 MeV is a deexcitation to the first ground state of W-186 from the level of 3.172 MeV.

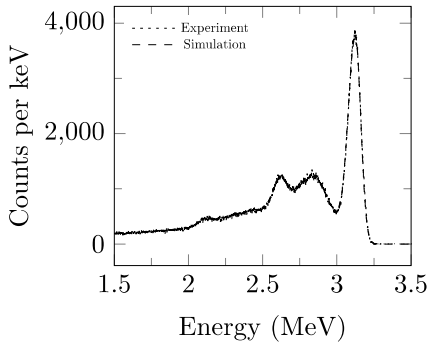



Fig. 1: The incident γ-ray beam profile. The dotted curve is the measured profile, while the dashed curve is the simulated profile.

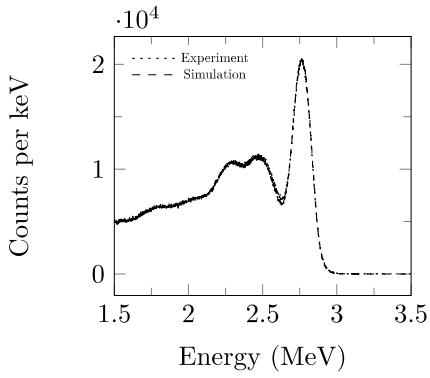



Fig. 2: The Compton-scattered beam profile. The dotted curve is the measured profile, while the dashed curve is the simulated profile.

The height of each peak is proportional to the NRF cross section and branching ratios as well as the content of the isotope within the sample. The natural abundance of each isotope, $\chi_{mes.}$, was calculated from Eqs. 1 and 2. The values of these abundances are listed in Table 1, along with the reference abundances taken from mass spectrometry measurement, $\chi_{ref.}$, [5]. The relative

difference between the measured and reference abundances is also shown in Table 1.

As indicated in Table 1, the relative difference between the measured and reference abundances is less than 4%. This demonstrates how accurate the non-invasive NRF technique compares to the destructive mass spectrometer technique.

The uncertainties of the measured abundances are approximately 15%, most of which are systematic uncertainties arising from the uncertainties in the NRF integrated cross-section data and branching ratios [6] as well as uncertainty in the efficiency of the detectors.

Table 1. Measured abundances of the isotopes considered in the present study.

| Isotope | E (MeV) | $\chi_{ref.}$ (%) | $\chi_{mes.}$ (%) | R (%) |
|---|---|---|---|---|
| W-182 | 3.163 | 26.5 | 27.2 | 2.4 |
| W-184 | 3.084 | 30.7 | 31.8 | 3.7 |
| W-186 | 3.172 | 28.4 | 29.2 | 2.9 |

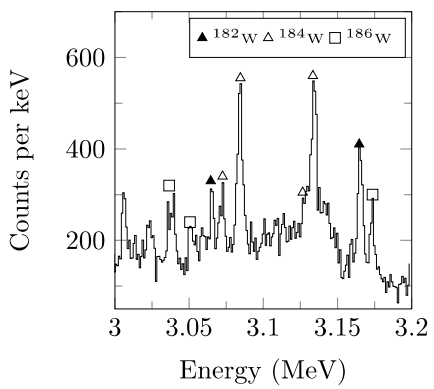



Fig. 3: The measured spectrum from W target at a photon energy of 3.12 MeV summed over the six detectors. The energies of each isotope are labeled.

The integrated NRF cross section and the thick target correction are the significant factors that may be different if the target is replaced by a nuclear material such as uranium of polonium. The minimum NRF integrated cross section in the present experiment is 7.9 eV b. This is comparable with the NRF integrated cross sections of nuclear materials. Fig. 4 shows a comparison between the NRF strengths of some nuclear materials to the tested material. The NRF strengths of these nuclear materials were taken from Ref. [7,8].

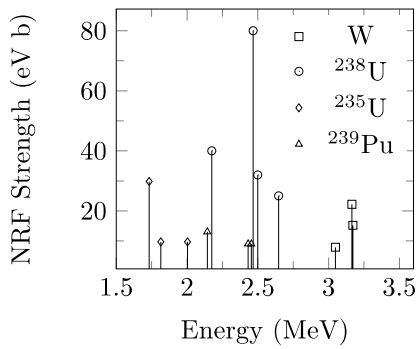



Fig. 4: Comparison among the NRF cross sections of some nuclear materials.

The thick target correction is a function of atomic absorption attenuating the incident and scattered beam. So the atomic absorption is a significant factor which must be taken into account when comparing our results with a scenario that involves a nuclear material. For example, the atomic attenuation of 3 MeV photons by 1 cm of tungsten is approximately 56%. On the other hand, atomic attenuation of 1.7 MeV photons (NRF level of U-235) by 1 cm of uranium is approximately 64%. Note that the density of the tungsten is very close to the density of uranium. Keeping in mind that the efficiency of the γ-ray detector is higher at lower energies, the difference in energy at which the NRF occur would have a minimal effect on detecting the nuclear material using NRF.

The present work demonstrated that NRF technique is capable of determining enrichments in the range of 30% within 7 hours of measurements. The smaller the enrichment, the longer time of measurement would be required. However, higher γ-ray beam fluxes such as proposed by Extreme Light Infrastructure – Nuclear Physics (ELI-NP facility [3], might reduce the measurement time to minutes. This is because the proposed flux of ELI-NP is three orders of magnitude higher than the flux used in the present experiment.

## 4. Conclusions

NRF measurements were performed to determine the isotopic abundances of the natural tungsten isotopes as a surrogate of nuclear materials. Abundances of three isotopes were obtained within 4% of the standard reference values. Nondestructive determination of the enrichment of U-235 is feasible using the same experimental conditions described in the present work.


## Acknowledgments

The authors are grateful to the Duke University FEL staff for delivering excellent beams. This work was a part of a study of the nuclear resonance fluorescence aiming at nuclear security and safeguards applications, being supported by the subsidiary for "promotion of strengthening nuclear security or the like" of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science, and Technology (MEXT), Japan.


## References


[1] R. Hajima et al., J. Nucl. Sci. Technol., vol. 45, pp. 442-451, 2008.

[2] M. A. Humphrey and K.D. Veal, J. Nucl. Mater. Manag., vol. 40, No. 3. No. 3, pp.6-11, 2012.

[3] G.V. Turturica et al., Nucl. Inst. Meth. Phys. Res., A, vol. 921, pp. 27-32, 2019.

[4] S. Agostinelli et al., Nucl. Inst. Meth. Phys. Res., A, vol. 506, pp. 250-303, 2003.

[5] J. Völkening et al., Int. J. Mass Spectrom. Ion Proc., vol. 105, pp. 361-368, 1991.

[6] R.-D. Herzberg et al., Nucl. Phys. A, vol. 563, pp. 445-456, 1993.

[7] W. Bertozzi et al., Phys. Rev. C, vol. 78, pp. 041601(R), 2008.

[8] S. L. Hammond et al., Phys. Rev. C, vol. 85, pp. 044302, 2012.

# 使用済燃料直接処分施設に適用する保障措置・核セキュリティ技術の検討

Study on technologies for safeguards and nuclear security
applied to direct disposal facilities for spent fuel

*芝　知宙[1]，富川　裕文[1]
[1] 日本原子力研究開発機構
*Tomooki SHIBA[1]，Hirofumi TOMIKAWA[1]
[1]Japan Atomic Energy Agency

In the scenario that spent fuels (SFs) are disposed of in a geological repository after encapsulation in disposal canisters with rim welding, one of concerns is to re-verify the SF's Continuity of Knowledge. JAEA focused on observation of the inside weld zone using an ultrasonic inspection technique and studied its applicability. Since the closed weld can incorporate unique natural characteristics such as blowholes, they may be used for canister identification, and therefore become a useful safeguards tool. As a result of simulation analyses, it was found that characteristic in the inside of weld and ultrasonic technique have applicability to utilize as an ID verification measure of disposal canister. In addition, methodologies to examine inventory of spent fuel and to derive the ambient dose equivalent from it were studied as a technique in the purpose of nuclear security.

## 1. 緒言

わが国では資源の有効利用を目的として全量を再処理し、発生する高レベル放射性廃液をガラス固化体として最終処分することを基本方針として研究開発を実施してきている。しかしながら、原子力利用における柔軟性を確保しつつ今後のバックエンド対策を着実に進めていくために、これまでに蓄積されてきたガラス固化体の処分に関する技術的知見および諸外国における直接処分に関する技術的知見ならびに他の考えられる代替処分オプションに関する調査・検討事例を利用し、わが国における使用済燃料の直接処分についての技術的な検討および他の代替処分オプションの技術的な検討が進められている。原子力機構では経済産業省資源エネルギー庁からの委託を受け、使用済燃料の直接処分についての技術的課題などの把握およびそれを実現するために必要な技術開発を実施している。

使用済燃料については、保障措置および核物質防護に係る国際的な要件を考慮することが求められる。特に、IAEA の保障措置終了要件を満たすガラス固化体と異なり、使用済燃料の直接処分においては保障措置要件を考慮する必要があるため、保障措置技術に関する研究として、使用済燃料の非破壊検認技術、封じ込め・監視技術、設計情報検認技術、及び使用済燃料の再検認技術などについて検討を実施した。直接処分施設では、使用済燃料は処分容器に挿入後、処分容器の胴体部と蓋とが密封溶接され、廃棄体として管理される。廃棄体には二重 C/S（種類の異なる二種類の C/S（封じ込め・監視）手段を講ずること）が基本となり、C/S が故障等により機能しなかった場合は廃棄体中の使用済燃料の再検認を行う必要性が生じる。しかし、廃棄体から使用済燃料を取り出すことは現実的ではないため、廃棄体の固有性及び未開封（溶接部を切断して使用済燃料を取り出した後再溶接を行うという転用シナリオに対応するもの）の確認技術が求められる。我々の検討では、詰替施設と処分場が一体で立地した場合および詰替施設と処分場が別々のサイトに立地した場合とで、保障措置システム概念を検討している。そのような検討を行った中で、本報告では、そういった保障措置を実現させるための候補技術として、溶接の健全性を確認するために広く利用されている超音波探傷技術の適用可能性を検討した成果を紹介するものである。

加えて、原子力施設に適用する核セキュティのレベルは、施設で取り扱う核物質の種類や量、またはそれらが持つ線量により決定されるため、特に長期間にわたって使用済燃料が埋設される地層処分施設については、経時変化するインベントリや放射線量に応じた核セキュリティ・保障措置対策の見直しを行う必要が生じる可能性がある。このため、使用済燃料が持つインベントリおよびそれらが持つ線量の時間変化を解析することは、地層処分施設の核セキュリティを考える上で重要であると考えられる。本報告は、その解析手法の検討結果を述べる。

## 2. 超音波探傷技術の保障措置への適用可能性

廃棄体は地下処分場に長期間定置される可能性があるため、同定・識別や未開封確認を行うためには耐改ざん性、時間的安定性及び測定の再現性が高い技術を適用する必要がある。廃棄体表面に施された刻印などは腐食等により時間経過とともに喪失する可能性があるが、廃棄体溶接部の

内部に自然に生成されるブローホールなどの特徴（以下、「自然特徴」）、または放電加工などにより人工的に付与するスリットなどの特徴（以下、「人工特徴」）は複製が困難で長期間にわたって変化しないことから、これを読取・照合することで同定・識別や未開封確認を行うことができる超音波探傷技術は適用可能な保障措置技術の候補のひとつであると考えられる。このため、溶接内部の特徴を超音波探傷技術によって測定した場合の識別性、測定の再現性をシミュレーション解析により検証した。なお、自然特徴は超音波探傷技術で測定可能な大きさや配置で発生するとは限らないことから、適用可能性に疑問があるため、本研究では溶接内部に付与する人工特徴を解析対象とした。

## 2-1. 解析条件

超音波探傷技術による人工特徴の識別性を確認するため、市販の三次元有限要素コード（伊藤忠テクノソリューションズ製 ComWAVE8）を用いてシミュレーション解析を実施した。解析モデルは炭素鋼材質中に人工特徴として4カ所のスリットを設けたモデルとし、スリットの大きさ、深さ、配置、離間隔、さらに発信する超音波周波数をパラメータとした 18 ケースを設定してシミュレーション解析を実施した。測定の再現性に関する解析は、超音波探傷技術によって行われる廃棄体の同定・識別及び未開封確認のための検認が、処分容器の蓋を溶接した直後に実施する測定の結果（1 回目）と、経年経過後に廃棄体を回収したときに実施する再測定の結果（2 回目以降）とを比較することによって行われることを考慮して実施した。解析における超音波周波数は 2MHz とし、人工特徴は大きさ 2mm、表面からの深さ 50mm、110mm、離間隔 20mm として 4 カ所設定した。図 1 に、超音波探傷技術による人工特徴の検出可能性を評価するシミュレーションモデルの例を記載する。

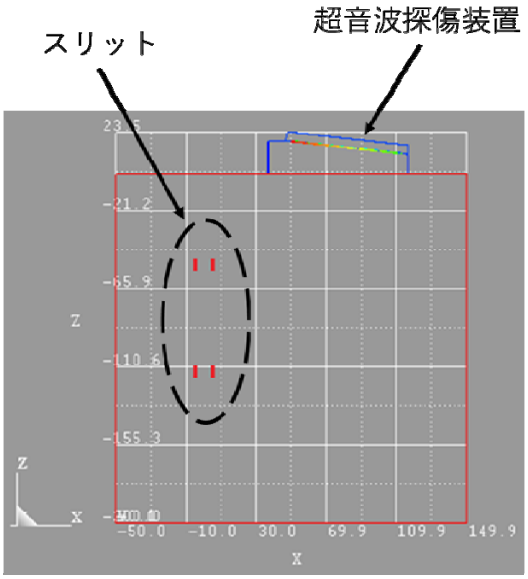



図 1　超音波による人工特徴の検出シミュレーションモデル

## 2-2. 結果および考察

炭素鋼製の処分容器溶接部に人工的に付与した特徴を超音波探傷技術により計測することで、保障措置上の要件である廃棄体の固有性確認、同定・識別、未開封確認の実施可能性を検討した。

シミュレーション解析の結果から、2 mm 以上の大きさの特徴が 10 mm 以上離れて付与されていれば超音波探傷により検知できる可能性があること、溶接した直後の測定と経年経過後の再測定において同じ条件で計測できない場合であっても、計測結果を相対的に評価することで比較できる可能性があることがわかった。このことから、廃棄体の固有性確認、同定・識別、未開封確認に超音波探傷技術を適用できる可能性があることが示唆された。

しかし、実際に超音波探傷測定を行って得られたデータが少ないため、処分容器の設計、溶接方法などが具体化された際に、特徴の付与方法も含めてデータを蓄積していくことが重要である。

## 3. 使用済燃料が持つインベントリおよびそれらが持つ線量の解析手法

(1) インベントリの解析

核種崩壊生成計算コード ORIGEN2 用の断面積ライブラリセット(ORLIBJ40)を用いて、インベントリの解析を行う。また、それらにより放出される中性子および光子（18 群）を導出する。

(2) 中性子および光子フラックスの導出

粒子輸送モンテカルロ・コードである PHITS

を用いて、使用済燃料付近の光子及び中性子フラックスを導出する。

(3) 線量の導出

文献[1]にある H* (10)を(2)で得られたフラックスに乗じて、周辺線量当量を導出する。

## 4. 結言

廃棄体の固有性確認、同定・識別、未開封確認に超音波探傷技術を適用できる可能性があり、有用な保障措置手段となり得ることが示唆された。また、使用済燃料が持つインベントリおよびそれらが持つ線量の解析手法を検討した。今後、実際に解析を行い、手法の妥当性を確認していく。

**謝辞**

本研究は、原子力機構が経済産業省資源エネルギー庁から受託した「地層処分技術調査等事業（使用済燃料直接処分技術開発）（平成 25～26 年度）」、「地層処分技術調査等事業（直接処分等代替処分技術開発）（平成 27～29 年度）」、「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（直接処分等代替処分技術高度化開発）（平成 30 年度）」における成果の一部である。

**引用・参考文献**

[1] 日本原子力学会標準、放射線遮へい計算のための線量換算係数 2010

# ダーティーボムを用いたテロ発生時の線量分布予測に関する研究

# Study of the dose distribution predictions in the case of terrorism using dirty bomb

田辺 鴻典，土屋 兼一，秋葉 教充，角田 英俊
警察庁 科学警察研究所
Kosuke Tanabe，Ken'ichi Tsuchiya，Norimitsu Akiba，Hidetoshi Kakuda
National Research Institute of Police Science

要旨

放射性物質又は核物質を用いたテロが国際的な懸念事項となっている。特に、ダーティーボムによるテロが懸念されているが、世界でも未遂事件が起きているのみであるため、具体的な被害状況の想定が困難な現状にある。そこで、我々は、ダーティーボムによるテロ発生時の線量分布を予測するため、新たなシミュレータの開発を行っている。2種類の数値解析手法により、爆発に伴う放射性物質の飛散分布の導出を行い、モンテカルロ計算コードであるPHITSと組み合わせることで、線量分布予測を実施したので、その結果について報告する。開発したシミュレータにより、ダーティーボムによる具体的な被害想定が可能になるため、効果的なテロ対処訓練等への活用が今後期待される。

## １．緒言

近年、放射性物質又は核物質（RN 物質）を用いたテロが国際的な懸念事項となっている。特に RN 物質を爆発物により飛散させる、いわゆるダーティーボムによるテロが懸念されており、2020 年東京オリンピック・パラリンピック開催を控える日本においては、公衆及び初動対応者の安全を確保するための対策が急務である。ダーティーボムを用いたテロ事案が発生した場合、爆発に伴い飛散したそれぞれの RN 物質（放射性残さ）から放射線が放出されるため、現場は非常に複雑な線量分布になることが想定される。しかし、このようなテロは世界中でも未遂事件が起きているのみであるため、具体的な被害状況の想定が困難なのが現状である。

放射線の拡散状況を予測するシミュレータとしては、SPEEDI［1］や HotSpot［2］等があるが、これらは風向や地形情報を利用した大気拡散に特化したシミュレータであり、爆発現象を扱うことができない。近年、医療及び工業分野等で金属製の放射性同位元素（RI）の利用が拡大しており、これらを用いたテロ事案の発生も十分に考えられる。金属製 RI の場合、風の影響に比べ、爆発に伴う直接的な飛散の影響が大きいことが想定されるため、爆発現

象を扱える新たなシミュレータの開発が必要となる。そこで、我々は放射線挙動シミュレーションコード PHITS（日本原子力研究開発機構等開発）[3]をベースとした、RN 物質を用いたテロに伴う放射性物質の拡散状況を予測するシミュレータの開発を行ってきた[4]。線量分布の導出には、詳細な放射性残さ分布の情報が必要不可欠であるが、実験の困難さから知見がほとんどない現状にある。従って、本研究では、2 種類の数値解析手法により放射性残さ分布の導出を行い、線量分布予測を実施したので、その結果について報告する。

## ２．方法

本研究では、後述する 2 種類の数値解析手法により放射性残さの飛散分布を導出し、得られた残さ分布に基づき、PHITS を用いて放射線挙動シミュレーションを実施することで、ダーティーボム爆発後の線量分布の導出を行った。特に、建物等が密集した都市部におけるテロ事案を想定し、図 1 のように構造物が配置された 300 m 四方の体系において線量分布予測を行った。

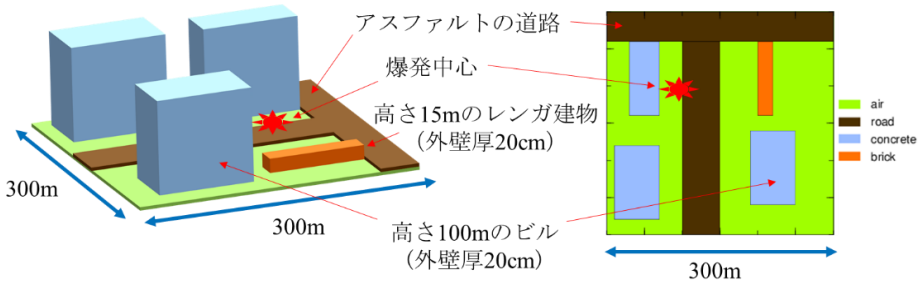



図 1　線量予測シミュレーションの体系

### ２．１　空気抗力及び重力を考慮した運動学的手法（手法 1）

まず始めに、爆発物の周囲に設置された RN 物質が、爆発に伴い等方的に飛散する場合を想定した。一般に、質量 $m$ [kg]、初速度 $v$ [m/s]（$v_x$：水平成分、$v_y$：鉛直成分）で角度 $\theta$ 方向に放射された物体は、空気抗力及び重力の影響を受け、以下の運動方程式に従い飛散する[5]。$C_D$ は物質の形状に依存した係数であるが、本研究では、RN 物質の形状として球体を仮定し、以降の計算を行った[6]。

$$m\frac{dv_x}{dt} = -\frac{C_D A\rho}{2}v^2 \cos\theta \qquad (1)$$

$$m\frac{dv_y}{dt} = -mg - \frac{C_D A\rho}{2}v^2 \sin\theta \qquad (2)$$

$C_D$: 抗力係数　$A$: 平均断面積 [m$^2$]　$\rho$: 空気密度 [kg/m$^3$]

上式について、数値解析手法の一つである 4 次のルンゲ・クッタ法により近似解を求めることで、放射性残さの飛散軌道及び落下位置の導出を行った。RN 物質としては、医療用の Co-60 線源（Φ=0.893 mm）を仮定し、爆発に伴い、初速度 2000 m/s で等方的に飛散する場合について解析を行った。

### ２．２　流体解析と粒子系の運動解析を組み合わせた手法（手法 2）

次に、手法 1 で行った粒子系の運動解析に流体解析（CFD：Computational fluid dynamics）を組み合わせた粒子飛散解析コード ERI-CFDDPM-IDG（株式会社 爆発研究所製）[7]を用いて、放射性残さ分布の導出を行った。本解析コードは、爆源近傍での爆風圧と固体粒子との相互作用を扱える上に、風及び周囲の構造物の影響も扱うことができる。従って、手法 1 に対して、より詳細な放射性残さ分布の導出が可能となる。

図 2 に示すように、立方体状（1 辺 18 cm）の TNT（トリニトロトルエン）爆薬の周囲に、金属製の RI を模擬したコバルト粒子及び粉末状の RI を模擬した土砂粒子を爆薬表面に均等に配置したモデルを想定し、爆発に伴う放射性残さ分布の導出を行った。土砂粒子の粒径については、平均径 1 mm、標準偏差 0.2 mm のガウス分布で定義した。

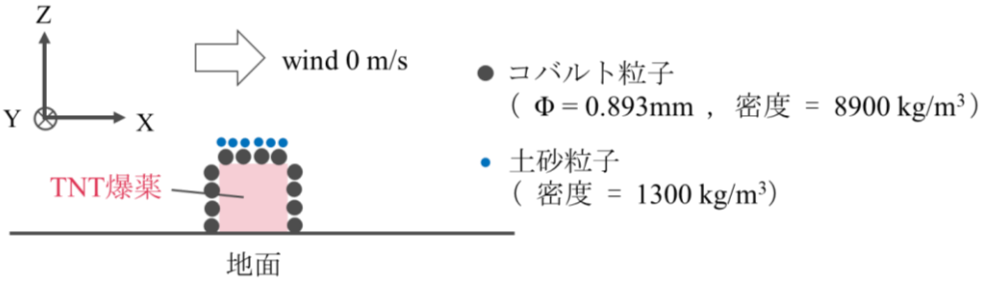



図 2　ERI-CFDDPM-IDG のシミュレーションモデル

## ３．結果

手法 1 により求めた放射性残さの飛散軌跡（15 度毎）及び落下位置の密度分布（棒グラフ）を図 3 に示す。密度分布は、一定の距離幅に落下した放射性残さの個数について、合計を 1 とした際の割合で表記している。この結果から、爆発に伴い、等方的に飛散すると仮定した場合、放射性残さの約 50 %が爆発中心から約 70 m以上の距離に分布するような、特殊な分布となることが分かった。

図 3 の放射性残さ分布に基づいた線量予測シミュレーションの結果を図 4 に示す。X印で示した場所において、ダーティーボムが爆発した際の、爆発後の線量分布を示している。残さ分布を PHITS に入力する際は、爆発中心から残さの最大到達地点までの距離を 10 分割した残さ分布に基づき、線源を配置し、シミュレーションを実施した。なお、本論文においては、結果の単位を全て粒子フラックス[1/cm$^2$/source]で示す。粒子フラックスに線量

率換算係数を乗ずることにより、線量率への変換が可能であることから、粒子フラックス分布の各位置の相対強度比は線量率分布の相対強度比を概ね表すと考えられる。従って、本論文においては、以降、粒子フラックスを線量率と解釈し、各地点の相対強度についてのみ議論する。

図 4 を見ると、爆発中心（X印）から離れた箇所にも局所的に線量率の高い場所が存在することが分かる。つまり、周囲に配置された構造物による遮蔽・散乱の影響も加わり、爆発中心から距離に応じて線量率の低下する単純な場に対して、ダーティーボムを使用した場合、より複雑な線量分布となることが示された。

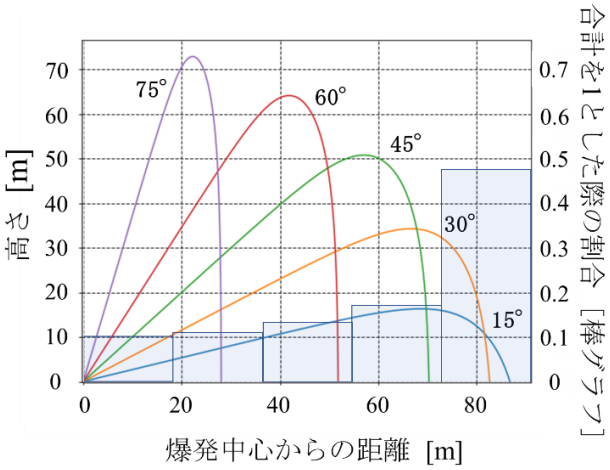



図 3　手法 1 により導出した飛散軌道及び放射性残さの密度分布

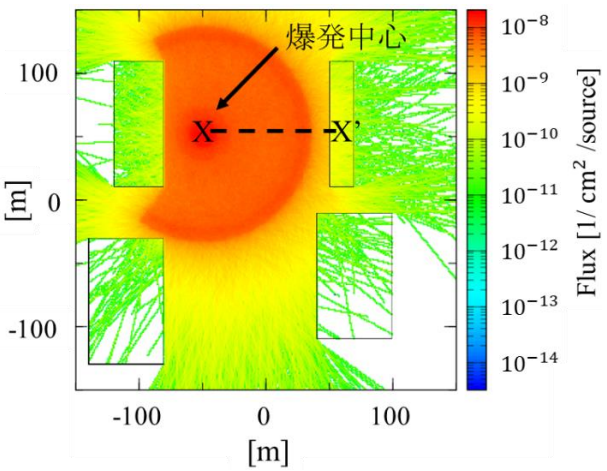



図 4　手法 1 により導出した放射性残さ分布に基づいた線量分布

次に、手法 2 の解析結果について述べる。図 2 のモデルで各粒子を飛散させた際の飛散状況の解析結果を図 5 に示す。コバルト粒子が爆発に伴い広範囲に飛散する一方で、土砂粒子は爆発中心近傍で舞い上がる様子が確認された。この結果から、金属製 RI の場合は、爆発に伴う直接的な飛散が主であるのに対し、粉末状 RI については、風による拡散が支配的であることが分かり、爆発物による拡散の仕方は、RI の種類及び形状等に大きく依存することが確認された。

また、図 5 について、各粒子の落下位置（Z = 0）を基に導出した、動径方向の放射性残さ分布を図 6 に示す。手法 1 と同様に、爆発中心から離れた位置に偏って残さが分布する様子が分かる。図 6 の残さ分布に基づいた、線量予測の結果を図 7 に示す。手法 1 と同様に、ダーティーボムを用いた拡散の場合、爆発中心から離れた場所においても、線量の高い箇所が広範囲にわたり存在することが確認できる。さらに、線量分布について、図 4 中の X-X'断面図及び図 7 中の Y-Y'断面図を図 8 に示す。比較のため、爆発中心から単純に線量率の低下する例として、TNT の爆薬量と換算距離の関係式[8]を基に定めた、標準偏差 21.3 m

のガウス分布で放射性残さを拡散させた場合の線量分布も示している。数値解析により導出した線量分布では、爆発中心から 60 m 以上離れた位置においても、広範囲にわたり線量の高い場所が存在する。つまり、爆発中心から距離に応じて線量が低下すると仮定し、初動対応に従事した場合は、公衆及び初動対応者の被ばくの危険性があることが示唆された。

本解析では、両手法で概ね整合性のとれた結果が得られた。従って、単純な系においては、初速度等の正確な初期条件が既知であれば、手法 1 を用いても拡散状況の予測が概ね可能であるといえる。しかし、実際は RI の形状及び爆発物周囲への設置位置に、初速度及び放射角度は大きく依存することが考えられる。従って、今後は手法 2 を用いて、爆薬の種類及び量等が異なる、様々なケースについて、風及び構造物の影響も含め、拡散状況の検討を行っていく必要がある。

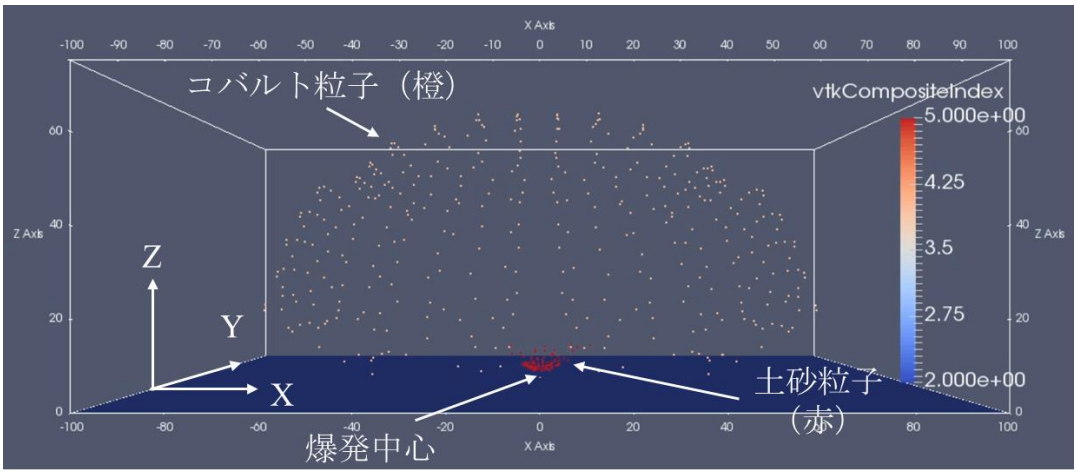



図 5　爆発から 1.0 s 後のコバルト粒子及び土砂粒子の飛散状況

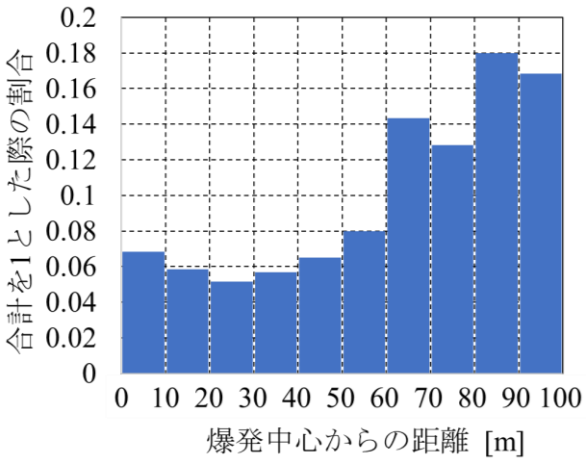



図 6　手法 2 により導出した動径方向の放射線残さ分布

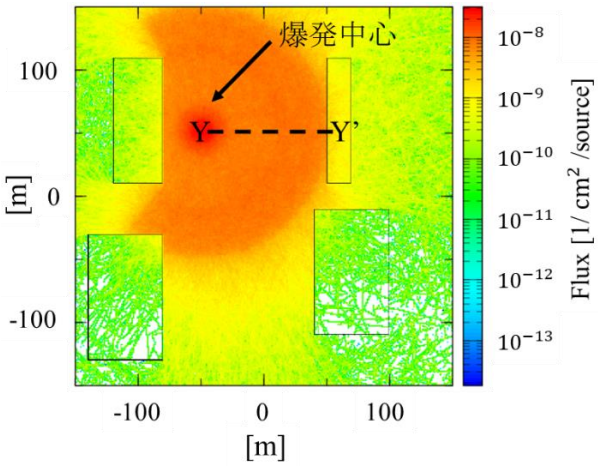



図 7　手法 2 により導出した放射性残さ分布に基づいた線量分布

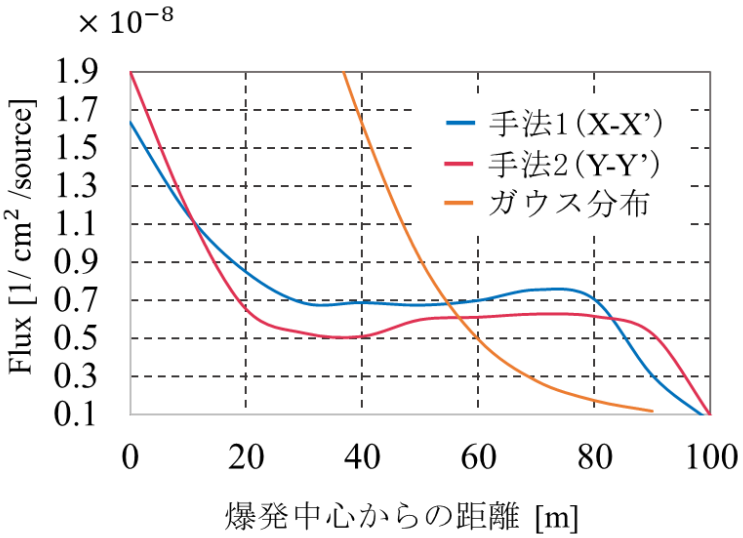



図 8　線量分布の X-X'断面図（図 4）及び Y-Y'断面図（図 7）

## ４．考察及び今後の展望

従来、多くの初動対応訓練[9]で使用されてきた同心円状のゾーニングに対し、本研究結果は新たな初動対処方針の必要性を示すものである。ダーティーボム事案の現場においては、爆発中心から距離に応じて線量が低下する単純な場合との違いを認識した上で、放射線量測定をより密に行う必要性があるといえる。

今後は、実線源を用いた実験及び爆発実験等の結果との比較により、開発したシミュレータの妥当性の評価を行う予定である。また、本シミュレータにより、詳細な核セキュリティ事案の被害想定が可能となることから、スマートフォンを用いた教育・訓練用仮想放射線測定システム「USOTOPE」[10]等と組み合わせることで、より効果的な訓練が実現できると考えられる。さらに、このようなテロ事案発生前の利用に限らず、発生後の実用面を考えると、いかなる場所におけるテロ事案にも即座に対応できるように、シミュレータの迅速化が今後の大きな課題となる。そこで、我々は、3 次元 CAD（Computer-aided design）情報を介し、PHITS の入力形式へ変換することで、3 次元地図情報[11]を基に、任意の場所の体系を迅速に構築する手法の検討も行っている。これにより、迅速なシミュレータが実現されれば、テロ発生現場における公衆の迅速安全な避難誘導に関する研究等への発展が期待される。

本研究で開発したシミュレータは、金属製 RI を用いたテロ発生現場近郊の線量予測に特化したものであるが、SPEEDI など既存の大気拡散シミュレータと組み合わせることで、より汎用性の高い運用も可能になると考えられる。

【引用・参考文献】
［1］https://prodas.jaea.go.jp/?WSPEEDI-Ⅱ
［2］https://narac.llnl.gov/hotspot
［3］T.Sato, et al.,“Features of Particle and Heavy Ion Transport Code System (PHITS) version 3.02”, J. Nucl. Sci. Technol. 55, 684-690 (2018)
［4］田辺鴻典 他「シミュレーションを用いた放射線量予測に関する研究」日本法科学技術学会第 24 回学術集会（2018）
［5］火器弾薬技術ハンドブック（改訂版），防衛技術学会（2003）
［6］Faith A. Morrison, “Data Correlation for Drag Coefficient for Sphere”, Department of Chemical Engineering, Michigan Technological University, Houghton, MI（2016）
［7］http://bakuhatsu.jp
［8］爆発物探知ハンドブック，火薬学会（2010）
［9］内閣官房国民保護ポータルサイト　http://www.kokuminhogo.go.jp/kunren/
［10］土屋兼一 他「仮想放射線測定システム“USOTOPE”の開発」第 39 回核物質管理学会日本支部年次大会論文集 #3914（2018）
［11］https://www.zenrin.co.jp/index.html

Abstract

Terrorism using radioactive or nuclear materials, such as “dirty bomb”, has become international concerns. In the dirty bomb case, there are only attempted incidents in the world, so it is difficult to assume specific damage situations. We have developed a dose prediction simulator based on PHITS (Monte Carlo particle transmission simulation Code) for countering terrorism using dirty bomb. This paper introduces the results of dose distribution prediction using two types of numerical analysis methods. This simulator will allow for specific damage assumptions from dirty bombs, so it is expected to be used for an effective training against radiological threat.

# 核セキュリティ事象初動対応のための機械学習を応用したガンマ線スペクトル解析 － 検出器シミュレーションによる学習データの構築及び核種判定アルゴリズムにおける有用性の検討 －

# Machine-Learning based Gamma-ray Spectrum Analysis for Initial Response on Nuclear Security Event - Development of Training Data Set by Detector Simulation and Usability Evaluation for Radioisotope Identification Algorism -

*木村 祥紀 [1], 土屋 兼一 [2]
[1] 日本原子力研究開発機構, [2] 科学警察研究所
*Yoshiki Kimura[1], Ken'ichi Tsuchiya[2]
[1] Japan Atomic Energy Agency, [2] National Research Institute of Police Science

A nuclear security event involving nuclear and other radioactive materials out of regulatory control (MORC) has potential severe consequence on public health, environments, economics and society. When a nuclear security event caused by MORC would be occurred, it is essential to identify the hazardous substances such as nuclear materials and radioisotopes as the initial response activity at the event scene. In this study, automated radioisotope identification algorism by Machine-Learning (ML) based gamma-ray spectrum analysis using handheld type detectors have been developed. The training data set for ML-based algorism has been developed based on detector simulation and the usability of the simulation-based data set for ML model training to perform radioisotope identification has been discussed.

## 1. 緒言

近年、規制外の核物質やその他放射性物質（MORC）に関連する犯罪行為や核・放射線テロ行為といった核セキュリティ事象の脅威が国際的な懸念事項になっている。特に我が国においては、2020 年の東京オリンピック・パラリンピックをはじめとした大規模イベントの開催を控え、核セキュリティ事象を含むテロ行為等への対応能力整備が進められている。MORC に起因する核セキュリティ事象の現場では、現場初動対応者の被ばくリスク低減やすみやかな事後対応のために、原因物質を迅速に把握することが必要不可欠となる。

核セキュリティ事象の現場で原因核種を特定するための資機材として、放射線検出器を使用した携帯型核種判定装置（RIID）が広く使用されている。RIID による核種判定にはガンマ線スペクトルから核種特有のピークエネルギーとピーク面積の解析が必要となるが、コストと計数効率の関係から携帯型 RIID では NaI(Tl)に代表される低分解能の検出器が使用されることが多く、核種判定性能が限定的となってしまう技術的な課題が存在している。一方、実験室等で使用される HPGe 検出器に代表される高分解能検出器については、核種判定精度は高いが、冷却が必要、価格が非常に高価であるといった理由から初動対応現場で広く普及していない。NaI(Tl)のような安価な携帯型 RIID を使用して精度の高い核種判定を行うためには、放射線測定やスペクトル解析などに関する十分な経験と高度な知識が必要となるが、核セキュリティ事象の初動対応者にこれらを習得させることは困難である。

本研究では、機械学習アルゴリズムに基づくガンマ線スペクトル解析によって、放射性核種の判定を迅速かつ自律的に行うための携帯型 RIID の開発を最終目標とし、機械学習手法に基づいた核種判定のためのガンマ線スペクトル解析手法に関する基礎技術を開発している。

本発表においては、核種判定アルゴリズムの学習において最も大きな課題のひとつである学習データの整備に関して、MCNP コードを使用した検出器シミュレーションによる学習データベースの構築と、核種判定アルゴリズムにおける機械学習モデルに対するシミュレーションに基づく学習データの有用性について議論する。

## 2. 手法

### 2.1 シミュレーションによる学習データの構築

機械学習に基づく核種判定アルゴリズムの対象として、携帯型の HPGe 検出器である ORTEC MicroTrans [1]を選択した。MCNP6[2, 3]により対象検出器の点線源に対する計数スペクトルをシミュレーションした結果をもとに学習データを構築した。判定の対象核種については、$^{57}$Co,

$^{60}$Co, $^{133}$Ba, $^{137}$Cs, $^{152}$Eu の 5 核種とし、これらに NORM(自然起源放射性物質)の要因となる $^{40}$K を加えた 6 核種の放射能強度を乱数で与えて線源に対する計数スペクトル（線源スペクトル）を作成した。その後、MCNP6 のバックグラウンド（BG）ソースライブラリをベースにして、日本の主要国土をカバーする座標領域での BG スペクトル（$^{40}$K のガンマ線ピーク及び散乱線を除く）のシミュレーションを行い、上記の線源スペクトルに対して BG スペクトルを合成することで学習データとなる模擬計数スペクトルを作成した。図 1 に本手法で作成した模擬計数スペクトルと実測スペクトルとの比較を示す。本手法で模擬したスペクトルについては、約 100keV 以上のエネルギー領域において、線源核種に起因するガンマ線ピークや散乱線、バックグランドに起因する計数スペクトルを精度よく模擬できることを確認した。

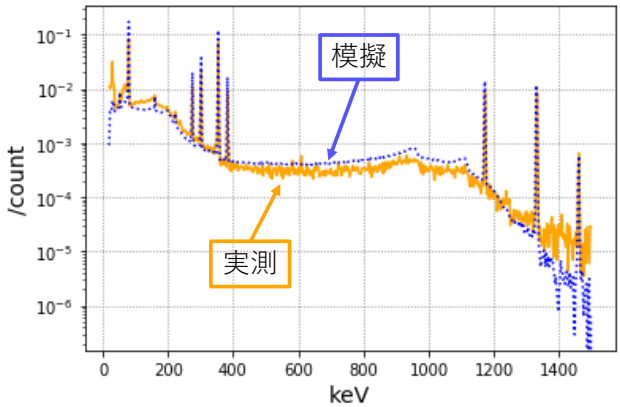



図 1：実測スペクトルとの比較
（$^{60}$Co (25kBq, 20cm)+$^{133}$Ba (201kBq, 40cm)）

### 2.2 機械学習による核種判定アルゴリズム

計数スペクトルに基づいて線源核種の検出判定を行うアルゴリズムについては、機械学習手法において回帰・分類推定性能及び汎用性が比較的高いことが知られる、人工ニューラルネットワーク（Artificial Neural Network: ANN）と勾配ブースティング木（Gradient Boosting: GB）のアンサンブル回帰推定モデルを使用したアルゴリズムについて検討した。計数スペクトルのうち 20-1500keV を解析対象エネルギー領域（Region of Interest: ROI）とし、ROI における全計数に対する各ソース（$^{57}$Co, $^{60}$Co, $^{133}$Ba, $^{137}$Cs, $^{152}$Eu, [$^{40}$K+BG]）に起因する計数の割合（Count Contribution Ratio: CCR）を目的変数とする多変数回帰推定モデルを構築した。本アルゴリズムでは、線源核種となる 5 核種の相対的な CCR を ANN に基づく回帰モデルで推定し、線源核種の CCR 合計値とバックグラウンド（$^{40}$K+BG）の CCR の相対比を GB に基づく回帰モデルで推定する。各ソースの CCR を推定後、[$^{40}$K+BG]の CCR を超える線源核種を存在核種として判定する（図 2）。そのため、検出核種の判定だけでなく、各核種に起因する相対的な計数強度の比も推定することができる。各モデルの学習においては、目的変数の組み合わせを乱数で与えて作成したスペクトルそれぞれに対して、検出器のエネルギー校正のずれを考慮するためにチャンネルをずらしたスペクトルデータを作成し、合計 $4\times10^5$ 個のスペクトルを学習データとした。回帰推定モデルのハイパーパラメータはベイズ最適化法を使用してチューニングを行った。

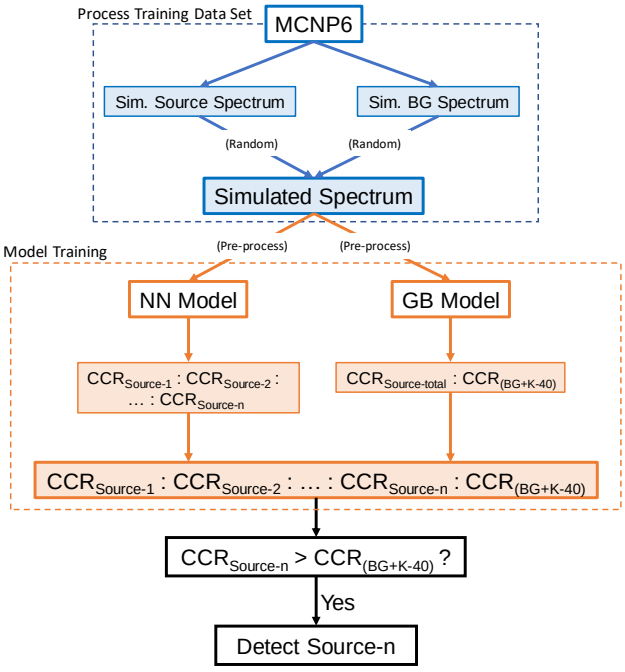



図 2：核種判定アルゴリズムフロー

## 3. 結果

ORTEC MicroTrans を使用して検出対象核種（$^{57}$Co, $^{60}$Co, $^{133}$Ba, $^{137}$Cs, $^{152}$Eu）の標準線源を測定した計数スペクトルについて、本研究で開発した機械学習に基づくガンマ線解析アルゴリズムによる核種判定性能の評価を行った。図 3 に ANN 及び GB のアンサンブルモデルによる CCR 推定結果の例を示す。シミュレーションによる模擬スペクトルで学習したモデルにより、実測のスペクトルについても高精度で CCR を推定できることを確認した。また、検出対象核種を単体

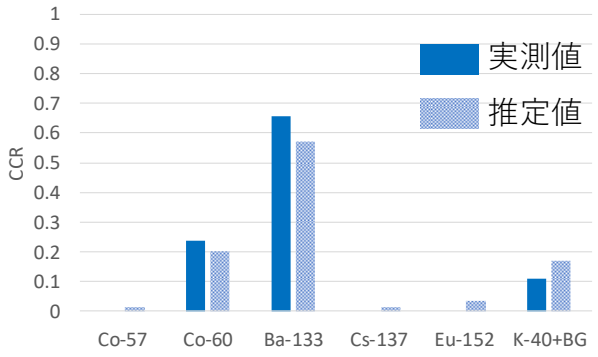
また複数測定した 16 ケースの計数スペクトル（線源単体での線量率＞0.06 μSv/h, 測定時間 300s）[4, 5]について、以下に示す F-score [6]により性能を評価した結果、F-score＞95 となり高い性能で検知核種を正しく判定できることを確認した。

$$\mathrm{F-score} = 100 * \frac{2 * p * r}{p + r} \quad (1)$$

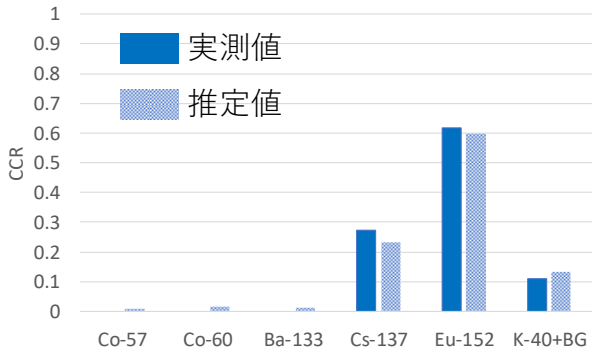
$$\mathrm{p} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

$$\mathrm{r} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

p: precision, r: recall,
TP: true positive, FP: false positive,
FN: false negative.




(a) $^{60}$Co (25kBq, 20cm) +$^{133}$Ba (201kBq, 40cm)




(b) $^{137}$Cs (260kBq, 20cm) +$^{152}$Eu (230kBq, 40cm)

図 3：回帰モデルによる CCR 推定結果

## 4. まとめと今後の課題

機械学習手法に基づいた核種判定のためのガンマ線スペクトル解析手法に関する基礎技術開発として、MCNP6 を使用した検出器シミュレーションにより作成した模擬スペクトルデータを使用して ANN 及び GB によるアンサンブル回帰推定モデルを学習させた、核種判定アルゴリズムを開発した。アンサンブルモデルで推定した CCR について高い精度で推定が可能であることがわかり、モデルを使用したアルゴリズムの核種判定性能についても高い性能で判定が可能であることを確認した。以上により、機械学習アルゴリズムにおける技術的な課題のひとつである学習データの構築について、モンテカルロシミュレーションによる学習データの構築が有効であると考えられる。また、本研究で開発した手法を用いて、より多数の核種を対象とした核種判定アルゴリズムの開発も可能であると考えられる。

今後の課題として、BG など統計精度が低いスペクトルに対するモデル推定精度の向上について検討する。また、本研究の最終目標である低分解能ガンマ線検出器を対象とした核種判定アルゴリズムの開発のため、低分解能スペクトルに対する機械学習のための特徴量抽出手法についても検討を進める。本研究により、放射線計測分野において機械学習を応用した実用的な技術として、事象対応の迅速性が求められる核セキュリティ事象の現場において、放射線計測に関する知識がない現場初動対応者が測定環境の悪い状況下でも自律的に原因核種の判定を行うことが可能な技術を目指す。

**謝辞**

本研究は、JSPS 科研費（18K04646）の助成を受けたものです。

**引用・参考文献**

[1] (https://www.ortec-online.com/-/media/ametekortec/brochures/micro-trans-spec.pdf)
[2] C.J.Werner et.al., LA-UR-18-20808 (2018).
[3] Shiba, T., et al., Energy Procedia, 131 (2017) 250-257.
[4] DHS-DNDO, 500-DNDO-117250v0.00 (2011).
[5] IEEE, ANSI N42.34-2003 (2004).
[6] DHS-DNDO, SAND2016-2854R (2016).

# 核セキュリティ文化醸成活動と意識調査結果について

Relationship between nuclear security culture promotion and awareness survey results

*山田　博之，栗林　敏広，中村　仁宣
国立研究開発法人　日本原子力研究開発機構
*Hiroyuki Yamada, Toshihiro Kuribayashi, Hironobu Nakamura
Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

Promoting nuclear security culture is necessary for effective nuclear security. As one of the activities for stimulating the nuclear security culture, we educate and deliver lectures to provide awareness on nuclear security. In order to confirm the effects of promoting nuclear security culture, we periodically conduct awareness survey for employees at JAEA. As a result, it was concluded that the education provided about threats and the importance of nuclear security are effective.

## 1.　緒言

2012 年 3 月の法令改正において、原子力事業者に対して核セキュリティ文化を醸成するための体制（経営の関与を含む）の構築が義務化された。原子力機構においては、2012 年 10 月から経営の関与を明確にした上で核セキュリティ文化醸成活動を開始した。2014 年度からは、核セキュリティ文化醸成活動の一環として核セキュリティに係る意識調査を毎年度実施している。本発表では、原子力機構の核セキュリティに係る意識調査と核セキュリティ文化醸成活動の関係について報告する。

## 2.　核セキュリティに係る意識調査

原子力機構では、原子力規制庁が 2014 年度提示したモデル質問及び核セキュリティ文化に係る WINS Best Practice Guides[1]で示された質問を参考に意識調査の設問を作案している。設問に対する回答選択肢は「そう思う」、「どちらかというとそう思う」、「分からない」、「どちらかというとそう思わない」、「そう思わない」などとしているが、本発表では分かり易い様に「そう思う」、「分からない」、「そう思わない」の 3 区分で意識調査の結果を示す。

2014 年から 2019 年までに実施した原子力機構における核セキュリティに係る意識調査の実施規模を表に示す。意識調査はイントラネット上のシステムを用いて電子的に実施している。2016 年度と 2017 年度に実施した意識調査は、安全文化に関する意識調査と同時に実施した。また、2018 年度からは意識調査前に核セキュリティに係るオンライン教育も実施している。

**表　意識調査の実施規模**

| 実施時期 | 回答者概数 |
|---|---|
| 2014年7月 | 4, 200名 |
| 2015年6月 | 5, 300名 |
| 2016年9月 | 3, 800名 |
| 2017年6月 | 3, 700名 |
| 2018年7月 | 4, 100名 |
| 2019年7月 | 4, 400名 |

## 3.　意識調査結果からの活動

意識調査を実施した 2014 年度から 2019 年度までにおいて、「核物質防護（核セキュリティ）は重要だと思いますか」との質問を継続して設けている。この意識調査結果を図 1 に示す。2014 年度の意識調査結果では、核物質防護（核セキュリティ）は重要だと思う者が約 60%であることが分かる。また、2014 年度に実施した意識調査の結果から、核セキュリティという言葉の意味を知っていると回答した割合が約 45%であることが分かっている（図 2）。

この結果に着目して、2014 年度に実施した意識調査の後にイントラネットを活用した核セキュリティ教育を 2015 年 1 月に実施した。この教育資料の抜粋を図 2～図 6 に示す。この教育では、核セキュリティという言葉の認知度の紹介（図 2）や教育目的の明確化（図 3）、核セキュリティの意味の説明（図 4）、核セキュリティの重要性（図 5 及び図 6）などを強調する内容とした。

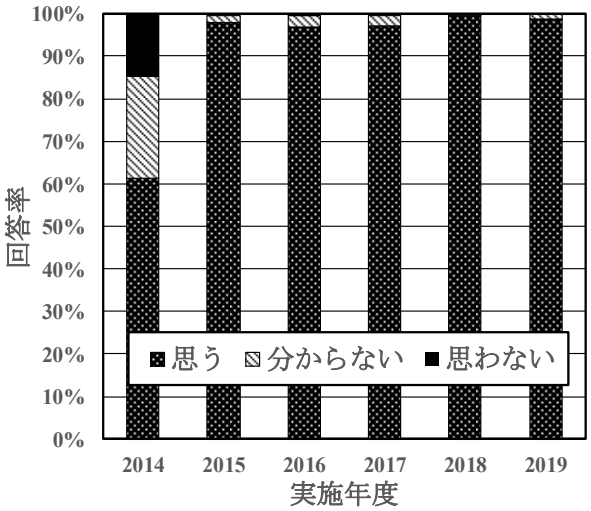



図１　意識調査結果の推移

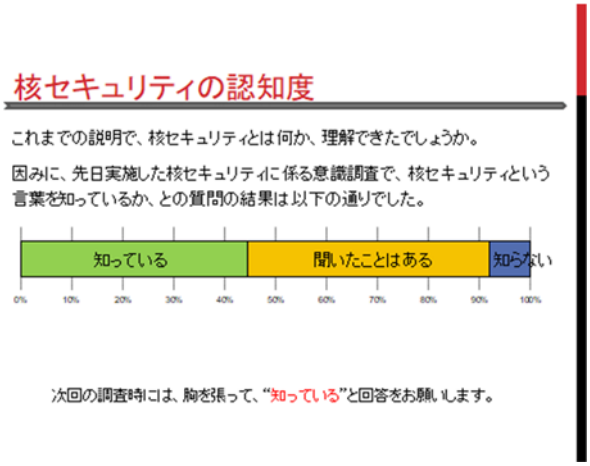



図２　教育資料（認知度の紹介）

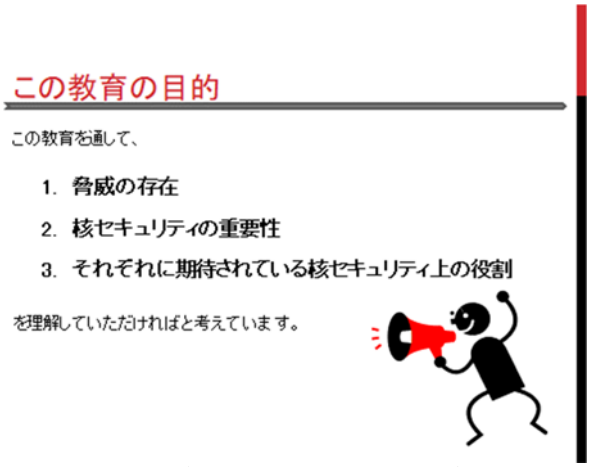



図３　教育資料（教育目的の明確化）

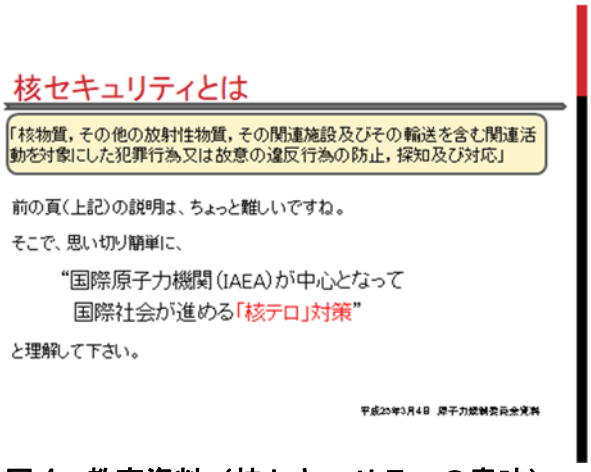



図４　教育資料（核セキュリティの意味）

図５　教育資料（核セキュリティの重要性 1）

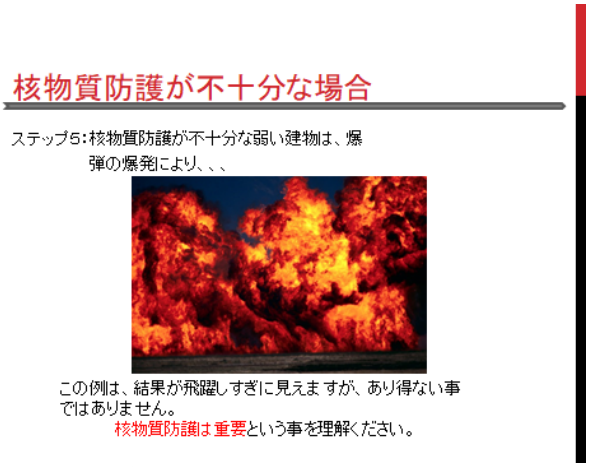



図６　教育資料（核セキュリティの重要性 2）

この教育を行った後に実施した意識調査の結果として、図 1 の通り、2015 年度の核物質防護（核セキュリティ）は重要だと思う者の割合が 95%以上を占めており、従業員の意識が大幅に向上しており、また、2016 年度以降も同程度の割合を維持していることが分かる。これは、2014 年度の意識調査結果を踏まえて、従業員に対して必要と思われる事項を教育内容へ反映した核セキュリティ文化醸成活動の成果であると考えられる。

この取り組みから、従業員の意識を向上させる方法の一つとして、脅威の存在や核セキュリティの重要性、一人ひとりの責任と役割を中心とした教育の実施が、意識改革に有効と考えられる。さらに、継続的な教育及び意識調査を行うことで、異動等で人員が交代するような状況になっても、意識レベルを高く維持することができると考えられる。意識調査の結果は、組織の強みや弱みを知ることができるので、その結果を考慮した核セキュリティ文化醸成活動を行うことが有効であると考えられる。

## 4. 講演会の実施と意識の変化

機構では、核セキュリティ文化醸成活動の一つとして、内部講師のみならず、治安機関の方を外部講師として招いて講演会を開催している。2017 年度及び 2018 年度に開催した講演会では、「外部講師（治安機関）による講演」、「核セキュリティ文化」、「内部脅威対策の必要性」をテーマにそれぞれの講師が講演を行っている。この講演会は 2017 年度では原子力機構の福井県敦賀地区、2018 年度では原子力機構の茨城県東海地区と異なる地方で開催しており、聴講者も異なっている。

この講演会を開催した際に聴講者へアンケートを行い、「脅威への意識」及び「内部脅威への意識」について、講演会前後での意識の変化の確認を行っている。アンケートでは選択式で回答を求めており、それぞれの意識に係る選択肢とアンケート回答結果を以下に示す。

(1) 「脅威への意識」に対する選択肢

① 脅威はどこにもない
② 脅威は海外にはあるが、日本には存在しない
③ 脅威は日本に存在するが、自身の職場にはない
④ 脅威は日本に存在し、自身の職場にもある
⑤ 脅威は日本に存在するが、自身の職場に関係するかは考えたことが無い
⑥ 脅威について考えたことが無かった

「脅威への意識」に対する 2017 年度及び 2018 年度の回答結果を、図 7 及び図 8 に示す。

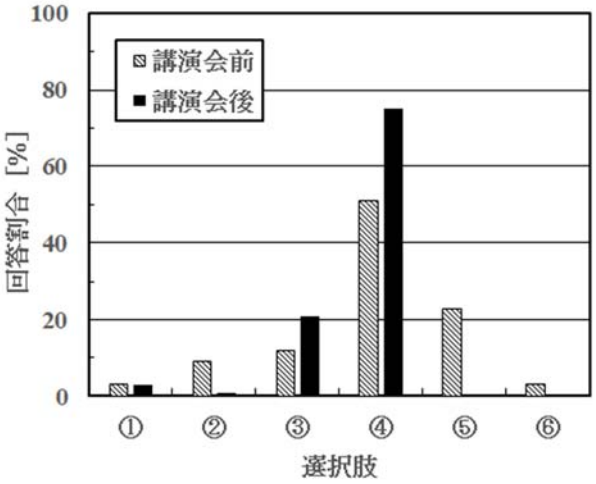



**図 7 「脅威への意識」（2017 年度）**

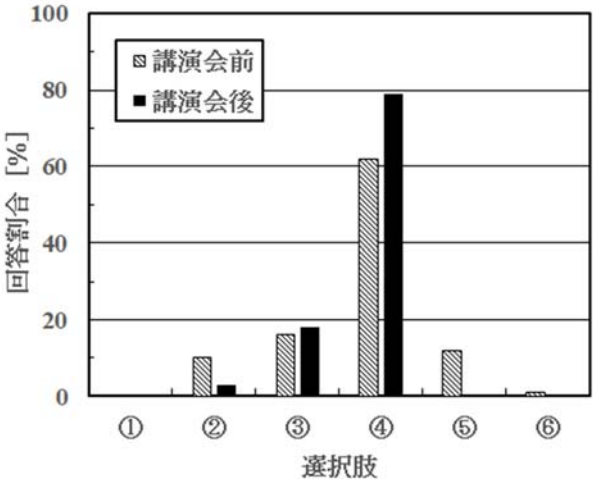



**図 8 「脅威への意識」（2018 年度）**

2017 年度及び 2018 年度ともに講演会の前後で、日本に脅威は存在しないと思っていたり、自身の職場に関係するかどうか考えたことが無いと考えていたりした者の割合が減少し、自身の職場にも脅威はあると意識している割合が増加していることが分かる。また、脅威は日本に存在することを認識するなど、同様の意識の変化があることが分かる。

(2)「内部脅威への意識」に対する選択肢

① 内部脅威者はどこにもいない
② 内部脅威者は海外には存在するが、日本には存在しない
③ 内部脅威者は日本に存在するが、自身の職場にはない
④ 内部脅威者は日本に存在し、自身の職場にもある
⑤ 内部脅威者は日本に存在するが、自身の職場に関係するかは考えたことがない
⑥ 内部脅威者について考えたことが無かった。

「内部脅威への意識」に対する 2017 年度及び 2018 年度の回答結果を図 9 及び図 10 に示す。

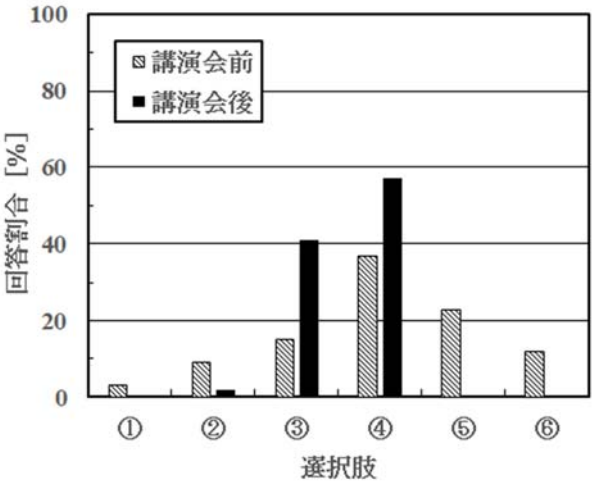



**図 9 「内部脅威への意識」(2017 年度)**

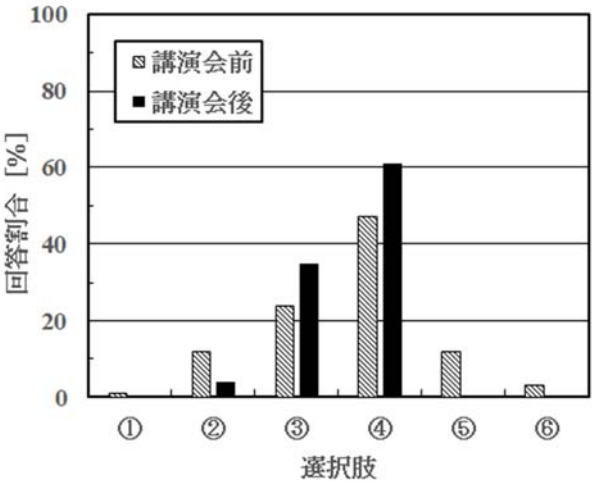



**図 10 「脅威への意識」(2018 年度)**

「脅威への意識」への回答結果と同様の傾向で、2017 年度及び 2018 年度ともに講演会の前後で、内部脅威の存在をより身近にあると意識する者の割合が増加していることが分かる。

講演会前後で「脅威への意識」及び「内部脅威への意識」への意識の向上が見られており、また、異なる事業所であっても同様の傾向を示していることから、講演会の実施は、核セキュリティ文化醸成活動として有効であると考えられる。ただし、意識の変化は講演会参加者に限られることから、確実に講演会内容を共有することが大事である。

## 5. 結論

原子力機構でこれまでに実施した核セキュリティに関する意識調査の結果と核セキュリティ文化醸成活動について紹介した。核セキュリティに係る意識調査を活用することで、必要な核セキュリティ文化醸成活動の具体的事項を検討したり、実施している核セキュリティ文化醸成活動の有効性を確認したりすることができると考えられる。

今後も核セキュリティに関する意識調査を継続し、核セキュリティ文化醸成活動の有効性を高めるために活用したいと考えている。

### 引用・参考文献

[1] World Institute For Nuclear Security, “WINS BEST PRACTICE GUIDE”, GROUP1: Nuclear Security Programme Organisation, 1.4 Nuclear Security Culture, 2011.

# プルトニウム燃料技術開発センターにおける核セキュリティ文化醸成活動

Report on Activities Related to Fostering Nuclear Security Culture in Plutonium Fuel Development Center

*鈴木 弘道、佐藤 光弘、田口 祐介、影山 十三男、蜷川 純一、白茂 英雄
（国）日本原子力研究開発機構
*Hiromichi Suzuki, Mitsuhiro Sato, Yusuke Taguchi, Tomio Kageyama, Juichi Ninagawa, Hideo Shiromo
Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

Ensuring robust nuclear security measures are required for the facilities located Plutonium Fuel Development Center as one of licensees of nuclear facilities that have multiple category I facilities. In order to continuously ensure and strengthen nuclear security measures in those facilities, an active cultivation of nuclear security culture implemented by both entire organization and individual persons is vitally essential.

Therefore, Plutonium Fuel Development Center has conducted various activities such as case-study education and training, yearly posters and patrolling the site by upper-level management that all employees hold a deep-rooted belief that there is a credible insider and outsider threat, and that nuclear security is important. These activities are conducted in order to establish the foundation of beliefs and attitudes of effective nuclear security culture.

This report introduces our activities fostering nuclear security culture in Plutonium Fuel Development Center that the evaluation and the continuous improvement of bidirectional activities by both top-down from multiple management levels and bottom-up from individual employee.

## 1. 緒言

日本原子力研究開発機構（以下「原子力機構」という。） プルトニウム燃料技術開発センター（以下、「プルセンター」という。）は、日本における唯一のMOX燃料製造技術開発施設であり、核物質防護上の防護区分Ⅰ、Ⅲを含む6 施設（建屋）を有し、各建屋に保有する核物質量及び取扱い形態に応じて、原子力規制庁が定める使用施設に係る要求要件を満足する防護措置を確実に実施するとともに、施設の核セキュリティを継続的に維持する必要がある。

本報告では、プルセンターにおいて取り組んでいる核セキュリティ文化醸成活動の具体例について紹介するとともに、さらなる改善にむけた取り組みについて紹介する。

## 2. 原子力機構における核セキュリティ活動方針

原子力機構では、施設の核物質防護に係る活動の実施にあたって理事長による年間活動方針を定めており、原子力機構内の各事業拠点は、この年間活動計画に基づく活動及び評価改善を継続的に実施している。プルセンターは、核燃料サイクル工学研究所（以下、「サイクル研」という。）の活動計画に従い活動を実施している。

以下に令和元年度の原子力機構の核セキュリティ文化醸成活動に係る年間活動方針及び活動施策を示す。

- 法令等の趣旨を理解して、法令及びルール（自ら決めたことや社会との約束）を守る。
  - 自らの業務に関連するルールについて、改めて法令等との適合性を確保して、確実に遵守する。
  - 内部脅威対策を確実に実施する。
  - 核セキュリティ上の課題（情報システムセキュリティ等）を共有し、その経験からの学習を活動に反映する。
- 脅威の存在と核セキュリティの重要性を認識する。
  - 核セキュリティ事象の情報共有により、脅威の存在に対する意識の向上を図る。
  - 継続的な教育により、核セキュリティの重要性の理解を促進する。
- 核セキュリティにおける自身の役割を自覚し、責任を果たす。
  - 核セキュリティにおける一人ひとりの役割を確認し、責任意識の浸透とスキルの向上を図る。
  - 巡視や意見交換を通じた、経営層の取り組み姿勢を明確にする。

## 3. プルセンターにおける核セキュリティ文化醸成活動

プルセンター全体の核物質防護措置を適切に機能させるためには、物理的な核物質防護措置のみでなく、従業員個人及び組織において、核セキュリティの重要性に係る価値観が共有され、同じ価値観に基づいて業務が遂行される文化の醸成が必要不可欠である。

また、核セキュリティ文化を醸成するための基礎となる信念は、「確実な脅威の存在の認識」及び「核セキュリティの重要性の認識」であり、全従業員が同じ価値観を共有し、その価値観に基づく行動を取ることである。

これを実現するため、サイクル研全体では、年間活動計画（主に核セキュリティ教育、他拠点等の核物質防護に関する情報共有及び自主的な改善、ポスターの掲示、活動方針等を記載した携帯用カードの配布及び周知等）を定め展開しているとともに、推進活動期間（2ヶ月間）を設定し集中的に活動を実施している。

プルセンターにおいては、これらの取り組みに加え、自主的な活動項目に重点を置き、上記の信念を根付かせるための諸活動を推進している。主な自主的な活動内容を以下に示す。さらに、幹部が積極的に関与し、核セキュリティに関する従業員等への声かけ、現場巡視及び幹部が作成した行動目標の掲示を行い、従業員等に対して取り組む姿勢を示している。

① 核物質防護に係る危険予知活動（4RKY）

従業員一人ひとりが脅威の存在と自身の役割を認識するためには、自らの業務に係る核セキュリティ上のリスクを事前に想定し、必要な対応を行う姿勢が重要である。このため、各課室のチーム又は班単位の少人数で、4ラウンド危険予知（4RKY）法を用いた核物質防護上のリスクの洗い出しと、自らの役割についてグループ討議を行っている。また、この活動の結果を提出させ、優秀な作品を選定し、表彰を行い、モチベーションアップを図っている。

② 脅威の存在に対する認識向上活動

外部及び内部脅威が身近に存在することを認識させるとともに、核セキュリティに関するルールの重要性を理解させるため、以下の活動を実施している。

・出入許可証の点検
・大型特殊物品の管理状況の確認
・金属探知機による相互点検状況確認
・2人ルールの遵守状況の確認
・通信連絡設備（PHS）の管理状況確認
・臨時立入者の管理（エスコート者の対応）状況の確認
・写真の管理状況確認
・各種要領等の教育や機器の取扱訓練

③ 警備員に対する活動

警備員においても、従業員と同様に①②の活動を警備員の目線で実施し、脅威の存在に対する意識の向上及び一人ひとりの役割と責任意識の浸透を図っている。

また、外部脅威の存在に対する意識の向上や役割を認識させるため、様々な侵入事案等のシナリオによる机上訓練を定期的に実施し、対応能力の向上を図っている。

## 4. まとめ

プルセンターにおいて実施している多角的な核セキュリティ文化醸成に係る活動は、本格的な活動の開始から約7年が経過した。これまで実施してきた文化醸成活動の効果の確認例として、核セキュリティに係る教育後の理解度確認及び教育前後の意識の変化の自己評価データに基づくと、平成29年度は、「十分に理解しており、意識があがっている」が92.4%であったが、平成30年度、令和元年度では、それぞれ93.4%、99.6%と年々上昇している。

本結果より、核セキュリティ文化、脅威の存在について、従業員一人ひとりの理解と意識の向上が年々浸透していることが確認され、本活動の効果が表れているものと評価できる。

文化醸成活動は、「人」の意識や認識を向上させる活動であり、効果がすぐに可視化できない特性を持つことを踏まえ、継続的な活動を実施するとともにPDCAサイクルの維持を図る必要がある。

今後の取り組みには、内部脅威及び情報セキュリティ（サイバーセキュリティ）に関する更なる認識向上と対策の重要性の理解促進を図る。

# シングルデプス画像からの畳み込みニューラルネットワークによる手元動作識別

Hand Motion Recognition from Single Depth Images by Convolutional Neural Network

*出町 和之，陳 実
東京大学
*Kazuyuki Demachi，Shi Chen
The University of Tokyo

A deep learning model has been proposed to recognize hand motion to detect sabotage behavior for nuclear security. In this paper, we trained a Convolutional Neural Network (CNN) model for five kinds of hand motions. The training data is the time-series data of the angles of each joint of human hand. The time-series data of the angles were 2-dimensinally arranged like an image, and used as the input data for CNN. The hand motion recognition accuracy exceeds 89%.

## 1. 緒言

福島第一原子力発電所事故は、原子力施設が潜在的にテロの魅力的なターゲットとなる可能性があることを示唆した。原子力発電所にとっての最たる脅威は妨害破壊行為[1]であり、とくにアクセス権限や知識を有する内部脅威者による妨害破壊行為には一層の注意が必要である。

内部脅威者の妨害破壊行為は通常の保全作業等に紛れて行われるが、原子力施設の膨大な数の作業員すべてを人の眼で監視することは現実的でなく、「技術の眼」による監視の補完が必要である。とくに、動作の中の大部分を占める手元動作を自動認識する技術の開発が急務であるが、手には関節が密集しているため複雑性が高く、動作認識の難易度が高い。一般的な手元動作認識の手法の多くはRGB-Dカメラという距離画像(D)を得られる特殊なカメラを使用している。

著者らによる既往研究では、RGB-D カメラの一種であるKinect-2を用いて測定された手元形状から5本の指先3次元座標の時系列データを取得し、これをStacked-Auto-Encoder(SAE)により学習することで、リアルタイムに手元動作を識別することに成功した[2]。しかし、実際に原子力施設やセキュリティの現場で主に使われているのはRGB（シングルデプス）カメラであるため、そのまま現場に適用することは出来ない。

そこで本研究では、新たにシングルデプスカメラで取得した動画データから手元の動作を自動認識する手法を、深層学習の一種である畳み込みニューラルネットワーク(Convolutional Neural Network, CNN) [3] を用いて開発した。

## 2. 手法

### 2-1. 手の関節角度のヒートマップ取得

動画データからの手元データ抽出には、オープンソースプログラムの hand3d[4]を用いた。これにより、シングルデプスカメラで得たデータから片手当たり指の関節など 26 箇所の三次元座標を取得できる。得られた三次元座標から、各指の第一関節、第二関節および付け根の片手当たり計 14 箇所の角度を解析的に計算した。

次に、撮影された動画のフレーム毎に 14 箇所の関節の角度を計算し、これを1次元配列とした。1つの動画は1秒当たり30フレームで構成されるため、関節角度の 1 次元配列を横に結合することで、1 秒の動画から 14 行×30 列の行列データが作成できる。これを、動作識別のための CNN における学習データとした。なお、過学習による識別確率の低下を避けるため、得られる 14 行×30 列の行列データにランダムノイズを付与し、1 つの動画あたり 20 個の行列データを作成した。

図1は1秒間の関節角度行列データをヒートマップとして図示した例である。横軸は時間で1マスが 1/30 秒に相当し、縦軸は親指から小指までの 14 個の指関節で、マスの色は指関節角度(0~180 deg.)を表している。

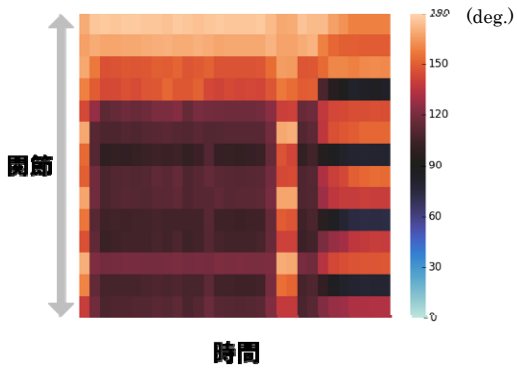



図 1　Heat map of finger joint angle matrix for 1 second

また、今回の検知対象とする妨害破壊行為に関連する 7 つの手元動作：

① （キーボードを）タイプする
② (工具などを) 握る
③ (工具などを) 離す
④ (配線や USB メモリなどを) つまむ
⑤ (配線 USB メモリなどを)　離す
⑥ (ボタンなどを) 押す
⑦ (弁などを) 回す

のヒートマップの例を示したものが図 2 である。動作毎に大きな差があることが判る。

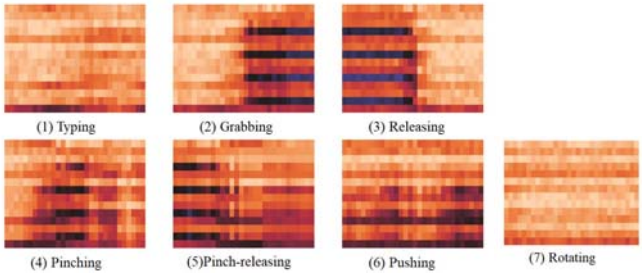



図 2　Heat map of joint angle matrix of 7 kinds of hand motion

## 2-2. 畳み込みニューラルネットワーク(CNN)による手元動作識別

時系列データ解析においては回帰ニューラルネットワーク(Recurrent Neural Network, RNN) [5]を用いるのが一般的である。しかし人間の動作は同じ動作であっても早さも動き方も一定ではなく、そのような差異に対するロバストな認識が求められる。CNN[3]ではデータの絶対値ではなく構造や分布から特徴抽出を行うため、要件となるロバスト性を満たすことが期待される。

図 3 に、今回用いた CNN のアーキテクチャを示す。畳み込み層は二つあり、フィルタのサイズは 3×3 とした。また、畳み込みにおけるストライドの幅は 1 とした。特徴抽出の後、分類のために全結合層を三層とした。活性化関数には ReLU 関数を用いた。

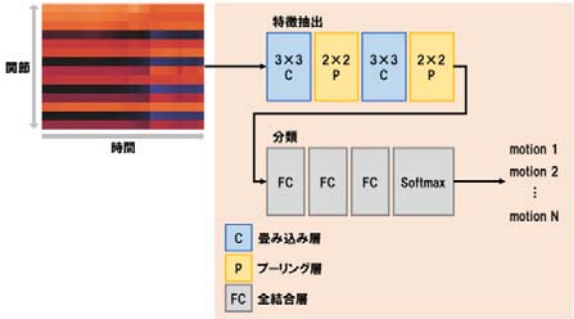



図 3　Proposed CNN architecture

## 3. 手元動作推定結果

学習後の CNN を用いた手元動作認識結果の正解率を表 1 に示す。全動作の平均正解率は 85.6 % であった。比較的高い正解率が得られたものの、更なる向上が必要である。

表 1 Recognition Accuracy for 7 hand motions

| Hand Motion | Accuracy |
|---|---|
| Typing (e.g., computer) | 81.4(%) |
| Grabbing (e.g., wrench, hammer) | 81.0 |
| Releasing | 80.2 |
| Pinching (e.g., short-circuit, jumper-out ) | 90.5 |
| Pinch-releasing | 88.6 |
| Pushing (e.g., button) | 90.2 |
| Rotating (e.g., valve) | 87.1 |
| Average | 85.6 |

## 4. 結論

原子力施設における内部脅威者の妨害破壊行為対策のための、動画データから手元動作を認識するための手法を開発した。今後は、学習用データの増加、手首や全身を組み合わせた認識技術の実装、アーキテクチャの改良による高速処理の実現などが課題となる。

## 引用・参考文献

[1] N. E. R. Headquarters, “Government of japan. 2011. Report of the japanese government to the iaea ministerial conference on nuclear safety the accident at tepcos fukushima nuclear power stations.
[2] Kazuyuki Demachi and Shi Chen, “Development of Malicious Hand Behaviors Detection Method by Movie Analysis”, Conference proceeding, 10.1115/ICONE26-81643 (2018)
[3] A. Krizhevsky, I. Sutskever and G. E. Hinton, “ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks”, Neural Information Processing Systems (NIPS2012)
[4] Christian Zimmermann and Thomas Brox, “Learning to Estimate 3D Hand Pose from Single RGB Images”, University of Freiburg, 2017.
[5] T. N. Sainath, O. Vinyals, A. Senior and H. Sak, “Convolutional, Long Short-Term Memory, fully connected Deep Neural Networks”, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (2015).

# 非核化達成のための要因分析に関する研究
# (1) 南アフリカ:核開発と非核化の動機及び非核化の特徴について

Research on Factor Analysis for Achieving Denuclearization
(1) South Africa: Motivations for Nuclear Weapons Development, Incentives for Denuclearization and Characteristics of its Denuclearization

*田崎 真樹子，木村 隆志，清水 亮，玉井 広史，中谷 隆良，須田 一則
日本原子力研究開発機構

*Makiko TAZAKI, Takashi KIMURA, Ryo SHIMIZU, Hiroshi TAMAI, Takayoshi NAKATANI, and Kazunori SUDA
JAPAN ATOMIC ENERGY AGENCY

South Africa had developed, manufactured, and possessed nuclear weapons, but later dismantled them all together with related facilities and equipment. After joining Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons as a non-nuclear weapon state and concluding a Comprehensive Safeguards Agreement with the Atomic Energy Agency (IAEA), it started peaceful use of nuclear energy. In that sense, South Africa's denuclearization is one of good examples of past denuclearization in the world, although the South Africa's specific policy of apartheid had been deeply connected with its nuclear weapons development and denuclearization. Analysing South Africa's motivations for nuclear weapons development, incentives for denuclearization, and characteristics of its denuclearization could serve as a good reference for not only preventing nuclear weapons development but also considering their denuclearization in current and future states.

## 1. 緒言

南アフリカ(南ア)は、自ら核兵器を開発し、6発の核兵器を製造・保有するに至ったが、後にそれを全て廃棄して、非核兵器国として国際原子力機関(IAEA)の検認を受けた後、国際社会に復帰し、現在は平和目的の原子力利用(原子力発電等)を行う稀有な国である。南アの非核化は、アパルトヘイト政策の存在という南アの特殊性を考慮しなければならないが、非核化の成功事例の1つである。同国の非核化の分析は、現在、そして今後起こり得る国々や地域の核開発の防止及び非核化の参考事例となると考えられる。本稿ではまず南アの核開発及び非核化の経緯を辿り、次に南アの核開発と非核化の動機を考察し、最後に南アの非核化の特徴について分析を行う。

## 2. 核開発と非核化の経緯(1940年～1990年代)

1940～1990年代の約50年に亘る南アの核開発及び非核化の経緯は以下の通りである[1],[2],[3]。

### 2-1. 1940～1963年:ウラン濃縮能力の開発

南アは1948年に原子力法を制定、また原子力委員会を設立し、金鉱山で副産物として産出されるウランを米英に供給する見返りに、両国から原子力関連資機材及び技術の提供を受けることで原子力開発を開始した。うちウラン濃縮につき、1961年に独自にヴォルテックス・チューブ法の開発を開始した。国際的には1957年に設立されたIAEAに加盟し、アフリカ地域の指定理事国となった。一方で南アが1948年に決定したアパルトヘイト政策に対し、1950～1960年代にかけて米国を中心に公民権運動が活発化する中で国際的な批判が高まり、国際社会からの孤立が始まった。

### 2-2. 1965～1976年:核開発の開始

南アは、1967年にヴォルテックス・チューブ法の実験規模の実証に成功し、同技術を用いたパイロット施設(Yプラント)の建設を開始した。南アは上記を秘密裡に実施したが、1970年にはこれを公表、しかし技術情報の漏洩や通常業務の効率性が阻害される可能性を理由に、同施設をIAEAの保障措置下に置くことを事実上拒否した。1974年にはガンバレル型核爆発装置の縮尺模型を用いた実験に成功し、南ア首相は核爆発装置の開発を承認、核実験場の建設を企図した。一方で1966年、国連は南アのアパルトヘイト政策を「人道に対する罪」として非難し、1970年には国連通常総会への参加を拒否した。さらに1974年のクーデターでポルトガルがアンゴラとモザンビークから撤退し、翌年両国は独立したが、南アはアンゴラに軍事介入し、ソ連とキューバは南アと対立するアンゴラの組織への軍事援助を拡大させ、キュ

ーバ軍のアンゴラ駐留が始まった。また 1976 年に米国はアンゴラ不介入を決定、南アを巡る安全保障環境が悪化する中で、南アの国際社会からの孤立が深まった。

### 2-3. 1977～1987 年:核開発の本格化

南アは 1977 年までに核実験場と高濃縮ウラン(HEU)部分を除いた核爆発装置を完成させ、コールドテストの実施を予定していたが、米英等の反対で実験は中止、核実験場の廃棄を余儀なくされた。同年、IAEA のアフリカ地域の指定理事国から外され、また国連安全保障理事会(国連安保理)は反アパルトヘイト活動弾圧を理由に、南アに対する強制的な武器禁輸措置の導入と、全ての国が核兵器の製造・開発につき南アとの協力を拒否すべき旨を採択した。一方 1979 年、南ア政府の核兵器政策に関するハイレベル運営委員会は、後に政府方針となる「信頼性ある抑止能力獲得」のため配備可能な核兵器製造を勧告した。同年南アは HEU を組み込んだ核爆発装置を完成させ、核兵器の研究開発製造施設の建設を開始した。1982 年には爆撃機による運搬が可能な核兵器を完成させ、この後 1989 年までに 6 発の核兵器を製造するに至る。一方国際社会は、核兵器不拡散条約(NPT)未加盟の南アの核能力を懸念し、1985 年の NPT 運用検討会議で南アに NPT 加盟と包括的保障措置協定(CSA)の締結を要請した。米国は翌年、包括的反アパルトヘイト法を成立させ(これは南アの非核化を目的としたものではない)、対南ア輸出入や投資の禁止、また政府援助の停止等の制裁を強化した。

### 2-4. 1988～1995 年:非核化の実施と IAEA の検証

1988 年、東西冷戦の緩和を受けて、アンゴラ、キューバ及び南アは和平協定を締結し、キューバ軍がアンゴラから撤退、南アを巡る安全保障環境が改善した。1989 年、国内政治を正常化し南アが国際的な信頼を回復して国際社会に復帰するには、アパルトヘイト政策の廃止と核兵器の廃棄が必要との強い信念を抱き大統領となったデ・クラークは翌年、自らが組織した政府の専門委員会の勧告に従い、全ての核兵器の解体・廃棄と核物質の融解を指示し、それらの完了後の 1991 年に NPT に加盟、IAEA と CSA を締結した。IAEA は CSA 発効後、南アの冒頭報告に基づき査察を開始した。またデ・クラークは、非核化と並行して、1990 年にネルソン・マンデラを釈放、1991 年にアパルトヘイトの廃止を宣言した。そして 1993 年 3 月、デ・クラークは過去の核開発と核廃棄を公表し、IAEA が非核化の検証を実施、9 月に IAEA は一部を除き南アの原子力施設及び核物質の査察結果が冒頭報告と一致する旨を総会に報告した。その後 1995 年、南アは IAEA のアフリカ地域の指定理事国に復帰した。

## 3. 核開発の動機

南アは、1970 年代から核開発を本格化させたが、その背景には 1 つに南アを巡る安全保障環境の変化と 2 つにアパルトヘイト政策に起因する国際社会からの孤立がある。

まず 1979 年の「信頼性ある抑止能力獲得」のための核兵器保有について、1975 年にアンゴラとモザンビークは植民地支配から独立したが、それはアパルトヘイト体制を掲げる南アの政治体制とは相反し、またそれに続くキューバ軍のアンゴラ駐留は、背後にソ連の存在を鑑みると安全保障上の懸念であり、南アはそのための抑止として核兵器の必要性を主張した。

しかし一方で南アには、中東のイランやイラクにとってのイスラエルや、インド・パキスタン両国のように近隣に核兵器を有する国はなく、現実問題としてソ連が南アを核攻撃することも考えにくい。加えて南ア自身もアフリカの大国として相応の通常戦力を有しており、これらを鑑みると南アのいう「信頼性ある抑止能力獲得」としての核兵器保有は説得力に欠ける。この点多くの者が指摘するのは、アパルトヘイト政策を起因とする南アの国際社会からの政治的な孤立(国連安保理によるアパルトヘイト非難決議、武器禁輸措置、国連通常総会への参加拒否など)の反動として南アが核兵器開発に向かったというものである[1],[2]。リーバーマンは、孤立した国は核取得を目指す主要な候補国となる旨[4]、またストンフ(南ア元原子力公社総裁)も、国際的な政治的孤立は核拡散の個々の事例を封じ込める手段であるが、孤立の中では実際には逆効果となり、核拡散者を全面的な核拡散に向かわせる可能性を指摘している[5]。

## 4. 非核化の動機

南アの非核化の動機としては、幾つかが挙げられる。まず 1 つは、1988 年の東西冷戦の緩和とキューバ軍のアンゴラ撤退など、南アの安全保障上の懸念が改善されたことである。つまり南アの言

う「信頼性ある抑止能力獲得」の「抑止力」の対象が喪失した。また現実問題として南アが核攻撃を受ける可能性が殆ど考えにくい状況では、南アは、自国の判断のみで非核化を実施できた。

2 つに、アフリカにおける植民地支配からの独立と公民権運動、そして何よりも南アのアパルトヘイト政策に対する国際社会の非難及びその経済制裁により、南ア国内において同政策を基盤とする白人政権の維持に限界が見え、同政策の廃止とその必然的な結果として黒人政権への移行が不可避であることが容易に予測されたこと、また政権移行に伴う核兵器の行く末が懸念されたことである[2]。2-1.で述べた通り、南アは 1948 年にアパルトヘイト政策を決定し、また原子力法と原子力委員会を整備し、アパルトヘイト政策と原子力を並行して推進してきた。後者については、独自技術で HEU の生産及び核兵器の製造を成功させるなど高い技術力を有するに至った。それらを主導してきたのは、アパルトヘイト政策に立脚する白人政権であり、両者は間接的だが密接に関連している。結果論ではあるが、デ・クラークが大統領就任後、NPT への加盟及び CSA の締結、検証の受け入れ等の非核化を矢継ぎ早に進めたのは、将来的に黒人政権の成立が不可避であり、また政権及びアパルトヘイトを含む諸政策の変更に伴って生じる可能性がある社会的混乱を鑑みると、次の政権に核兵器の管理を委ねることに必ずしも肯定的でなかったためとも考えられる。

そして 3 つに、国際社会も、南アのアパルトヘイト政策の廃止と共に、1985 年の NPT 運用検討会議で示された通り、南アの NPT への非核兵器国としての加盟と CSA の締結を求めていたことである。つまり、南アがアパルトヘイトの廃止と非核化の双方を完遂しなければ、南アの孤立を解き、また国際社会への復帰を認めなかったと思われる。特に 1990 年前後は、東西冷戦が終了し米ソの余剰核兵器が生じたこと、旧ソ連の崩壊に伴う核拡散が懸念されたこと、またイラクや北朝鮮の核開発が懸念されたこと等により、NPT を基軸とする核不拡散体制の強化の必要性がそれ以上に希求された時期であった。加えて南アの核開発疑惑で条約化が遅れていたアフリカ非核兵器地帯条約(通称ペリンダバ条約)は、同国が非核化し、条約に署名・批准することにより条約化に弾みがつくことが期待された。その後、NPT は 1995 年に無期限延長が決定し、ペリンダバ条約は 1996 年に署名、2009 年に発効した。この条約の通称名が南アの核兵器開発研究所の所在地であったペリンダバを冠していることは、いかに南アの非核化が同条約に重要であったかを物語っている。

## 5. 南アの非核化の特徴

南アの核開発及び非核化の動機から南アの非核化の特徴を探ると、まず 1 つは、南アの核開発の動機も非核化の動機も共に南アを巡る安全保障環境の変化を起因としていることである。核開発の要因の 1 つは、ソ連を背景にしたキューバ軍のアンゴラ駐留に起因する安全保障環境の悪化であり、非核化の要因の 1 つは、キューバ軍の撤退による安全保障環境の改善であった。

2 つに、そして最も大きな特徴として、南アのアパルトヘイト政策と核開発は相補的な関係にあり、同じく同政策の廃止が余儀なくされるのであれば、非核化も併せて実施せざるを得ない状況にあったことである。南アは核兵器の開発・保有の時点で NPT には加盟しておらずその行為は NPT 違反を形成しないが、国際社会は人道主義に反するものとして南アのアパルトヘイト政策の方を非難し、経済制裁を課し、国際社会から孤立させ、結果として同政策の廃止と共に南アの非核化も誘引した。

3 つに国際社会の連携である。上述の通り国際社会は NPT を根拠に南アの核活動を縛ることはできないが、少なくとも南アのアパルトヘイト政策は人道に反するものとして国際社会がこぞって反対・非難し、それが間接的に南アの非核化に有効的に作用した。

4 つに、南アの非核化の自主性である。南アの非核化は、イラクやリビアのそれとは異なり、戦争の敗北や条約・協定違反により強制的に課されたものではなく、南ア自身が国際社会の要求に沿い、自ら選び取ったものである。故に戦争も起こらず、為政者もその後の新政権や国際社会から追われることなく、その意味では非核化がイラク等に比し平穏に実施された。そのような南ア自身の選択を可能ならしめたのは、前述の安全保障環境の改善や南アの近隣に核兵器を保有する直接の脅威となる国が無く、敵対国を牽制する必要がなかったことが挙げられる。加えて国際社会の変化と要求を見極め、現実的な観点からアパルトヘイト政策の廃止と黒人政権への交代の必然性を甘受・是認し、非核化に果敢に取り組む信念を抱いて大統領となったデ・クラークの存在も大きい。彼は自らが組織した政府の専門委員会に NPT に

加盟することの是非を検討させ、また軍を含む安全保障重視派を説得し、非核化を成し遂げた。

そして 5 つに、南アが非核化を自主的に行うに当たり、核不拡散体制の基軸である NPT が要求する手続きに忠実に従い、IAEA による非核化の検証にも協力的だったことである。南アは、非核化を自ら実施した上で NPT に非核兵器国として加盟し、IAEA と CSA を締結し、外国の核兵器専門家を含む IAEA チームの査察・検証を受け入れると共に、必要に応じて彼らに「理由があれば、どこでもいつでもアクセス(anywhere, anytime access within reason)」[6]を提供し、自身での非核化の透明性と信頼性の確保に努めた。核兵器廃棄後のこのような南アの行動は、北野のいう「NPT の普遍的な価値の基準を示す規範力」の強さを示すことに貢献し[1]、引いては南アの国際社会への速やかな復帰につながったと考えられる。南アは、1989 年のデ・クラークの大統領就任から、僅か 6 年の短期間で 1995 年に IAEA のアフリカ地域の指定理事国に返り咲き、国際社会への復帰を果たした。一方で南アの対応と顕著な対比を成すのがイラクの対応である。イラクは湾岸戦争に敗北し国連安保理決議に基づく非核化を受け入れざるを得ず、核活動の申告、査察や検証等に係り IAEA 等の検証機関に必ずしも協力的でなかった。イラクの場合は、湾岸戦争後もフセイン体制が継続し、また核兵器開発以外の大量破壊兵器の解体・廃棄検証が必要とされた等の事情もあるが、同国が経済制裁を解かれて国際社会に復帰したのは 2003 年のイラク戦争及び 2006 年のフセイン処刑後のことであり、南アより長期間を要した。

## 6. 最後に

2020 年は NPT 発効から 50 年、そして無期限延長決定から 25 年となるが、その存在にも拘わらず、世界には未だ核開発を進める国々が存在する。そのような国々における非核化の仕組みや方法、手段を考察する上では、自ら開発・製造した核兵器を自ら解体・廃棄するという大英断を下し、それを完遂し、NPT に加盟し、IAEA の検証を受け、国際社会に復帰した南アの非核化事例は、同国固有のアパルトヘイト政策の廃止と非核化との関係を考慮する必要はあるものの、有用な参考事例となると思われる。

### 参考・引用文献


[1] 「核拡散防止の比較政治」、北野充、ミネルヴァ書房

[2] 「核の巻き返し(Nuclear Rollback)」決定要因分析：南アフリカを事例として、堀部純子、国際公共政策研究、第 11 巻第 1 号

[3] 「南アフリカにおける原子力開発」、佐藤千鶴子、アフリカ研究　80:33-30(2012)

[4] Peter Liberman, “The rise and fall of the South African Bomb”, International Security, Vol.26, No.2 (Fall 2001)

[5] Waldo Stumpf, “Birth and death of the South Africa nuclear weapons programme”, USPID, URL: https://fas.org/nuke/guide/rsa/nuke/Stumpf.htm

[6] “Joint Comprehensive Plan of Action (JCPOA): Non-Proliferation, Inspections, and Nuclear Constraints”, Testimony of David Albright, President of the Institute for Science and International Security (ISIS) before the Senate Foreign Relations Committee, August 4, 2015

# 非核化達成のための要因分析に関する研究
# (2) 南アフリカ：非核化の方法及び検証方法について

Research on Factor Analysis for Achieving Denuclearization
(2) South Africa: Denuclearization and Verification methods

*木村 隆志，田崎 真樹子，清水 亮，玉井 広史，中谷 隆良，須田 一則
日本原子力研究開発機構
*Takashi KIMURA, Makiko TAZAKI, Ryo SHIMIZU, Hiroshi TAMAI, Takayoshi NAKATANI, and Kazunori SUDA
JAPAN ATOMIC ENERGY AGENCY

This is the summary of research result of methods for denuclearization and IAEA verification after the denuclearization in South Africa. South Africa had developed and possessed nuclear weapons, and dismantled them including the related facilities and equipment etc. by itself secretly in the past. The method for the denuclearization and the verification is unique in the world. This report could give us the lessons to investigate how to denuclearize and to verify them.

## 1. 緒言

過去に核兵器の開発や保有をし、非核化に至った国々のうち、南アフリカの非核化の方法及び検証方法について報告する。

南アフリカは自国にて核兵器を開発及び保有した後、自ら核兵器を解体した。その後、非核兵器国として核不拡散条約(NPT)へ加盟するとともに IAEA と包括的保障措置協定(CSA)を締結し、非核化の検証を受け入れた。このような手順を辿った国は、南アフリカが唯一であり、非核化の方法や検証方法を調査及び分析することで、今後の非核化検討の教訓となり得るものと考えられる。

## 2. 南アフリカの非核化の検証に係る経緯

1990 年 2 月の南アフリカのデ･クラーク大統領による核爆発装置の秘密裏の解体等の指示後、南アフリカは 1991 年 7 月に NPT 加盟、9 月に CSA を発効し、10 月に冒頭報告を実施した。これに対し、同年 11 月から IAEA は南アフリカに対する査察や訪問を開始し、1992 年 9 月の IAEA 総会にて、冒頭報告が不完全との証拠は見いだせないと結論付けた。

その後、1993 年 3 月 25 日のデ・クラーク大統領が以前の核兵器プログラムの存在とその後の放棄に関して発表したことにより、南アフリカが核兵器を開発及び保有し、自国にて核兵器を解体したことが初めて公になった。その後、IAEA 及び核兵器国の専門家による非核化の検証が開始され、同年 9 月の IAEA 総会にて核兵器関係は機微なものは残っていない等の結論を報告した。

これら一連の経緯の概略[1] [2][3]を以下に示す。

- ✓ 1990 年 2 月 26 日：デ･クラーク大統領は、NPT 加盟に備え、すべての核爆発装置を解体し、核物質を溶かして南アフリカの原子力公社(AEC)に戻すよう指示した。
- ✓ 1991 年 7 月 10 日：南アフリカの NPT に加盟した。
- ✓ 1991 年 9 月 16 日：南アフリカは CSA を発効した。
- ✓ 1991 年 9 月 20 日：IAEA 総会にて、事務局長による南アフリカの原子力施設及び核物質の在庫の完全性を検証すること及びその結果を総会へ報告することが決定された。
- ✓ 1991 年 10 月 30 日：南アフリカが IAEA へ冒頭報告を提出した。
- ✓ 1991 年 11 月：特定査察が開始された。
- ✓ 1992 年 8 月 20 日：保障措置協定に定める補助取極の総論部が発効され、その後の施設附属書が順次発効された。
- ✓ 1992 年 9 月 4 日：IAEA 総会にて、南アフリカの冒頭報告の内容が不完全であるという証拠を見いだせなかった旨の結論が報告された。
- ✓ 1993 年 3 月 24 日：以前の核兵器プログラムの存在とその後の放棄についてデ・クラーク大統領が発表した。
- ✓ 1993 年 4 月から 8 月：以前の核兵器プログラムの状況を評価するため、IAEA チーム及び核兵器国の専門家により南アフリカへの訪問が実施された。
- ✓ 1993 年 9 月 9 日：IAEA 総会にて、一部を除き、冒頭報告の量と一致し、核兵器関係は機微なものは残ってない等旨の結論が報告された。

## 3. 南アフリカの核兵器の廃棄[2]

デ・クラーク大統領は、NPT に加盟することを前提としていたことから、NPT 加盟前に南アフリカ独自で秘密裡に核兵器を廃棄する「do-it-yourself」を唯一の方法として採用した。

NPT 加盟前に「do-it-yourself」廃棄とする理由は以下のとおりとしている。

(1) NPT では核兵器国と非核兵器国のみの区分のみであること。
(2) INFCIRC/153 型保障措置協定(CSA)下での核兵器廃棄は認められないこと。
(3) NPT 加盟後の核兵器廃棄の場合、非核兵器国の核兵器保有は条約違反であること。
(4) 核兵器を「平和的核爆発装置」として再分類することは不可能であること。
(5) NPT 加盟前の南アフリカに対し、機微な核兵器情報へのアクセスも含め、IAEA が保障措置上で直接的に関与する可能性について不確実さがあること。

ただし、NPT 加盟前の「do-it-yourself」廃棄とする場合のメリットとして「非核兵器国」として南アフリカの原子力活動のための NPT 加盟が可能であるものの、デメリットとして IAEA による非核化検証の複雑化や兵器級高濃縮ウラン(HEU)の隠蔽(未申告)の疑惑が発生することも懸念される。

## 4. 南アフリカの非核化の検証方法

上記項目 3 のとおり、南アフリカは自国で秘密裡に NPT 加盟前に核兵器の廃棄を実施し、その後、NPT 加盟、CSA 締結、冒頭報告提出等を通じ、IAEA による原子力施設及び核物質の在庫の完全性や核兵器の廃棄等の検証を受けた。

以下、同在庫の完全性や核兵器の廃棄等の検証に係る 1992 年及び 1993 年 IAEA 総会での事務局長報告に基づき、その非核化の検証方法の概要を示す。

### 4-1 1992 年 IAEA 総会事務局長報告[3]

(1) 目的

南アフリカの原子力施設及び核物質の在庫の完全性の確認。

(2) 結論

1991 年 10 月に南アフリカが IAEA へ提出した冒頭報告に記載の施設リストに対し、不完全であるという証拠を見つけられないこと、及び未申告の施設及び核物質の存在を示すその他情報を事務局は保有していないこと、並びに当該冒頭報告に記載の濃縮ウラン(EU)及び劣化ウラン(DU)の在庫について 15 年間の記録の評価の困難性や当時の計量管理システム品質を考慮すると、これら歴史的な記録と一致していると考えられ、当該在庫が不完全という証拠を見いだせない旨、結論付けた。

(3) 検証方法

冒頭報告のU在庫及びU235の収支の正確性確認並びに冒頭報告の完全性確認を実施するため、以下のような検証活動が実施された。IAEA が査察を実施した又は訪問した施設は、U 転換施設、燃料製造プラント、U 濃縮施設、廃棄物貯蔵施設などである。

① 冒頭報告に記載の施設やそれ以外の IAEA が選択した施設への訪問
② 施設の目視確認、関係者への施設運転状況等の質問、環境サンプリング、核物質の多数の破壊分析(DA)及び非破壊分析(NDA)
③ 計量記録及び運転記録の一貫性確認(保障措置協定で求める記録の保存期間は少なくとも 5 年であるが 1970 年代までの記録が存在)
④ 財務管理目的の在庫差(MUF)の履歴の確認など

(4) 検証上の課題

U 濃縮試験プラント(Y プラント)の U235 の収支計算に明らかな不一致及び濃縮実証プラント(Z プラント)の LEU の U235 収支計算に明らかな不一致が見られ、それについて以下のような原因が報告された。

① EU 製品の計量方法は現在の計量方法と一致するも、U235 収支の主要構成要素である DU に関しては、 DU の低い経済的価値に起因し、正式な計量管理プログラムが存在しないことが原因。
② また、プロセスの U 滞留物(ホールドアップ)の適切な測定機器がないことも原因。

### 4-2 1993 年 IAEA 総会事務局長報告[1]

(1)目的

目的は 2 つあり、1 つ目は在庫の完全性の確認、2 つ目は核兵器の廃棄等の確認である。2 つ目の目的の詳細要件は以下のとおりである。

① 核兵器プログラム使用のすべての核物質が平和利用に戻され、IAEA の保障措置下にあるという保証の入手
② 構成部品破壊、プログラム関連研究所等の完全廃止、放棄又は平和利用転換、兵器特有装置の破壊、その他装置の平和利用転換の評価
③ 廃棄プログラム、設計製造情報破棄、核兵器解体後の方針に関する情報入手
④ 核兵器プログラムの時期及び範囲、核兵器の開発、製造及び廃棄に関する南アフリカ提供情報の完全性及び正確性の評価
⑤ カラハリ実験立て坑の無能力化の解釈の取り決めの協議及び最後の立会
⑥ 核兵器プログラム関与施設への訪問、当該施設が核兵器プログラム目的に使用されてないことの確認
⑦ 核兵器能力の再構築されない保証維持の将来の戦略についての協議

(2) 結論

1 つ目の目的である在庫の完全性の確認に対する結論として、Z プラントの LEU の U235 収支の明らかな不一致に関する査察活動は進行中であるとした。(本件、後の 1995 年付の 1994 年保障措置年次報告(GC(39)/3)[4]にて記録監査及びサンプル分析により一致したと評価している)

Y プラントの HEU、LEU 及び DU の U235 収支の明らかな不一致は、評価の結果、U 供給量と一致していると結論付けるのが合理的とし、また、当該プラントの生産能力の評価では、当該プラント生産の HEU 量は冒頭報告の申告量と一致していると結論付けることが合理的とした。

2 つ目の目的である核兵器の廃棄等の確認に対する結論を以下に示す。

① 関連記録の監査は、核兵器プログラムのすべての HEU が AEC に戻され、保障措置協定発効時に保障措置の対象であったことを示した。同様に、SAFARI-1 研究炉用の燃料製造に関連して AEC によって製造され、南アフリカの武器開発製造公社(ARMSCOR)の Circle 施設で処理されたすべての濃縮物質は、AEC に戻され、保障措置協定発効時に保障措置の対象となっていた。核兵器プログラムで使用された相当量の DU や NU が未計量であることを示す兆候はなかった。

② 記録、施設、廃棄及び解体された核兵器の残りの非核部品の調査及び Y プラント生産の HEU 量の評価の結果、核兵器プログラムの申告された範囲と一致した。無能力化や平和利用転換されていない核兵器プログラムの機微部品の残存を示すものはなかった。

③ 将来、IAEA は、透明性の繰り返しの方針の下、以前の核兵器プログラム関連場所へのフルアクセスのための南アフリカへの継続的な訪問を計画した。

(3) 検証方法

1 つ目の目的である在庫の完全性の確認に対する検証方法を以下に示す。IAEA が査察を実施した又は訪問した施設は、U 転換施設、燃料製造プラント、U 濃縮施設、廃棄物貯蔵施設などである。

① 1991 年 10 月提出の冒頭報告に基づき、1991 年 11 月、保障措置協定に基づく特定査察(ad hoc)で開始され、その後 IAEA は南アフリカで 22 の査察任務を実施した。月 1 回の査察任務は、個々の施設で 150 以上の査察を伴った。

② 1992 年初めからの保障措置クライテリアの完全実施により、その年の全原子力施設の保障措置対象全核物質について査察目標の量的要素を達成した。これに関連し、実在庫検証が 1992 年 8 月に行われ、1993 年 10 月にも予定された。

③ 補助取極の総論部は 1992 年 8 月 20 日に発効した。それ以降 6 つの施設附属書(FA)が発効し、残りの 8 つの FA は作業進行中であった。南アフリカ当局は、保障措置実施において IAEA に広範な協力を提供した。

④ 1992 年総会報告(GC(XXXVI)/1015)にて、2 つの濃縮プラントで計算した U235 収支の明らかな不一致を報告した。以降、特に Y プラント生産の HEU の U235 収支に関する明らかな不一致をさらに調査することを目的に、南アフリカへの追加訪問を 4 回実施した。AEC との協議や運転期間及び停止期間の履歴記録の詳細な再調査を通じて、Y プラントの稼働以来、当該プラントの U235 収支における明らかな不一致の度合いの大幅削減をもたらすことを解明した。(本件、後にプロセス滞留物(ホールドアップ) の除染、サンプル分析による U235 量の測定によって対応したとしている[5])

⑤ 申告された HEU 製品と Y プラントの生産能力との一貫性評価の過程で、AEC 提供のプラントの運転と停止の期間に関する何千もの記録を調査した。また、Y プラントの生涯期間中に作成された原本記録の代表例や技術報告書の写しとともに、数千の記録の写しを AEC が IAEA に提供した。これら報告に、プラントの生産量に影響を及ぼす化学的損失のような現象が記載されていた。(例、化学的損失はフィルターへの沈着によるものとしている[5])

⑥ Z プラントの LEU の U235 収支における明らかな不一致に関する調査活動の優先順位は低かった。この明らかな不一致を明確にするための努力が続けられている。必要な活動は、可能な限り、定期の査察と併せて実施され、結果が評価された。(本件、後の 1995 年付の 1994 年保障措置年次報告(GC(39)/3)[4]にて記録監査及びサンプル分析により一致したと評価している)

2 つ目の目的である核兵器の廃棄等の確認に対する検証方法を以下に示す。

IAEA 査察官チームは核兵器国の専門家の支援を受け以下のことを確認する等した。また、IAEA や核兵器国の専門家が訪問した施設は、核兵器に係る研究所、実験立て坑、爆発物試験施設、軍事施設の保管庫、射爆場などである。

① 核兵器プログラムの時期及び範囲

プログラムに関与する公式文書、記録、施設等での関係者からの情報に基づき時期及び範囲を要約するなど。

② 核兵器の廃棄及び解体

- ✓ 1991 年 9 月までに核兵器から取り出された HEU は溶解され、保障措置協定発効前に他施設へ移送されたこと。
- ✓ 1993 年 4 月の IAEA 訪問までに核兵器の廃棄及び解体、技術文書の破棄はほぼ完了されたこと。
- ✓ 核兵器弾頭の HEU の廃棄記録と計量記録による量の相関性があること。
- ✓ 非核兵器部品の廃棄の記録があること。
- ✓ 解体され残存する物品と記録の整合性があること。
- ✓ 既存の研究所の研究状況の現地確認など

③ 核物質回収と平和利用返還

兵器級 HEU の AEC と ARMSCOR の間の移管記録の監査(保障措置協定発効時には AEC に返却され保障措置下にあった)など

④ 核兵器プログラム関与施設

要求したすべての施設へのアクセス実施など。未申告施設の情報はない。

⑤ カラハリサイトの実験立て坑の無力化

1993 年 8 月 11 日に現場訪問を実施した。砂で埋め戻し、溶かした金属の流し込み等の対策により実験立坑を無能力化したと結論付けた。

⑥ 核兵器プログラムに使用された機器

装置等の廃棄・除染、商業用使用への転換がなされたこと。

## 5. まとめ

(1) 検証の成功の要素[3][6]

① 当事国の全面的協力

査察を受ける国の当局及び事業者からの完全な協力及び透明性は、未解決の問題を解決する上で不可欠であり、南アフリカの政策である「理由があれば、いつでもどこでものアクセス」は検証作業において重要であった。南アフリカはまた、さまざまな段階で兵器プログラムに係り働いていた人々と協力し、それらへのアクセスを提供した。また、冒頭報告以外の施設等へのフルアクセスや 15 年にわたる運転記録等の提供(保障措置上の記録保存義務は少なくとも 5 年)も大きな協力と言えよう。

② 検証活動への核兵器国の専門家の参加

核兵器国の専門家が検証活動に参加し、核兵器が廃棄等されたことの検証や非核兵器部品の平和利用転換の検証について、技術面から信頼できる検証が得られるものと考えられる。

(2) 廃棄後検証の困難さに対する将来に向けての解決策

核兵器の廃棄等が終了した後の検証であるため、核兵器や関連装置の実物がなく、申告施設や核物質の確認や計量、解体記録や残存する廃棄品の確認等に留まる。

この解決策として、検証は核兵器の廃棄等と同じタイミングに行うことが検証の容易化に繋がるとともに、検証の正確性及び完全性の向上にも繋がると考えられる。

(3) 検証前廃棄による核物質の隠蔽(未申告)の可能性への将来に向けての対応策

核兵器の廃棄等が終了した後の検証であるため、核物質の隠蔽(未申告)の疑惑が発生することが懸念される。

この解決策として、検証後、CSA のみならず、未申告の核物質や活動の探知を目的とした追加議定書(AP)を当該国が締結することが、核物質の隠蔽(未申告)の探知をもたらすと考えられる。

また、この AP 締結は、当該検証後の当該国による再度の核兵器開発の抑止やその兆候の探知に繋がると考えられる。

## 参考文献


[1] IAEA, “THE DENUCLEARIZATION OF AFRICA” GC(XXXVII)/1075, 9 September 1993

[2] ISIS, “Revisiting South Africa's Nuclear Weapons Program Its History, Dismantlement, and Lessons for Today”, July 2016

[3] IAEA, “SOUTHAFRICA’S NUCLEAR CAPABILITIES”, GC(XXXVI)/1015, 4 September 1992

[4] IAEA, “1994 IAEA annual report” GC(39)/3, July 1995

[5] Olli Heinonen, “Lessons learned from dismantlement of South Africa's biological, chemical, and nuclear weapons programs”, September 2016

[6] NPEC, “NUCLEAR WEAPONS MATERIALS GONE MISSING: What Does History Teach?” November 2014

# 非核化達成のための要因分析に関する研究
# (3)リビアの非核化の経緯と成功要因

Research on Factor Analysis for Achieving Denuclearisation
(3) Denuclearisation at Libya: Process and Success Factors

*玉井 広史，清水 亮，田崎 真樹子，木村 隆志，中谷 隆良，須田 一則
日本原子力研究開発機構

*Hiroshi Tamai, Ryo Shimizu, Makiko Tazaki, Takashi Kimura, Takayoshi Nakatani, and Kazunori Suda
JAPAN ATOMIC ENERGY AGENCY

Libya's denuclearisation, named 'the Libya model', is regarded as one of good practices in cooperation of the international community and measures that have a sense of speed with the countries and institutions involved. Success factors of the denuclearisation are the Libya's relatively low technological progress despite the procurement of extensive nuclear materials and components due to the delay of detecting the nuclear programme, prompt implementation with the close collaboration of countries concerned, and Libya's cooperation facing to the economic sanctions and the regime collapse by the Iraq war. Precious lessons will be learned towards the prevention and the denuclearisation in other countries.

## 1. 緒言

長らくリビアを支配していた独裁者カダフィ大佐の下で秘密裏に行われた核開発は、同国が原子力活動を開始した 1980 年代には進められていたが、その存在が実際に明らかになったのは 2000 年代に入ってからであった。幸い、核開発の進捗が遅かったため、核兵器保有といった深刻な事態にはほど遠い状況であり、その後、米英を中心とした国際社会の機敏な対応により、核開発の進展の防止と速やかな非核化を達成することができた。これを以って、数ある非核化の中で特徴的な成功例として「リビアモデル」と称されているが、この事例から学ぶことは、今後起こり得る国々の核開発の防止あるいは非核化に有用であろう。このような観点から、リビアの非核化が成功裏に導かれた要因について多角的な分析と取りまとめを試みた。

本稿は、リビアの原子力活動と核開発計画の概要、同計画の発覚と国際社会の迅速な対応、その後の非核化の取組み、核開発の動機と非核化のインセンティブ、リビアモデルについて論考を行い、核問題の解決に敷衍しうる教訓の案出を試みる。

## 2. 原子力活動の開始と秘密の核開発計画

ソ連の支援を受けたリビア初の研究炉 IRT-1(10MWt)の完成は 1979 年、運転開始は 1981 年であった。この後、同炉における研究・訓練・運転・管理がソ連の協力の下に実施された。並行して 1981 年から 1985 年にかけて加圧水型軽水発電炉 VVER-440(440MWe)の調達をソ連と協議したが、こちらは合意に至らなかった。

前後して 1978 年から 1981 年に隣国ニジェールよりウラン精鉱 2,263 MT を輸入している。1985 年にはイエローケーキ約 100 kg をソ連に送りウラン酸化物及びウランフッ化物に転換してリビアへの返送を受けている。また、1983 年から 1989 年にかけて未申告施設におけるウラン転換を試みているが $UF_6$ の製造には至らなかった。

原子力資機材の闇市場であるいわゆるカーンネットワークとの接触も早くから行われた。1980 年代から 1990 年代にかけ初期のウラン濃縮機材である L-1 型ガス遠心分離器の取得を試み、設計文書と部品の提供を同ネットワークから受けている。1990 年代後半には、L-1 型の完成品と大量の部品を取得し、更に 2000 年代初頭には L-1 型の後継機種である L-2 型ガス遠心分離器の部品を大量に入手したが、いずれも遠心分離システムの完成には至らなかった。

リビアが国際原子力機関（IAEA）との間で包括的保障措置協定（CSA）を締結したのは 1980 年であり（INFCIRC/282）、こうした一連の核活動は IAEA に未申告であったことから、秘密の核計画が進行していたことになる。しかしながら、リビアの核活動においては熟練した専門家が少なく、殆どが資機材の供給相手国任せであり、進展度が低かったことが、後に IAEA によって明らかにされている。

## 3. 核開発の発覚と迅速な対応

リビアの大量破壊兵器（WMD）計画については、かねてより国際社会から疑いをもたれていたが、2003 年 3 月、英国に留学中のリビア人学生が英国情報当局員に「リビアの WMD 計画の噂を払拭したい」とのリビア政府の意向を伝えたことを契機に、その全容解明と破棄のための協議が米英等の関係国と開始されたものの、核開発計画については明らかではなかった。しかし、同年 10 月、ドイツ船籍の BBC-China 号が地中海にて臨検を受けた際、積み荷の中にリビア向けのウラン濃縮資機材があることが判明し、これがリビアの秘密裏の核開発計画に関する動かぬ証拠となり、非核化への動きが一気に進むこととなった[1]。

同年 10 月から 12 月にかけ、米英の技術チームがリビアにて立入調査を行い、核開発計画の存在を突止め、ウラン濃縮の資機材調達、化学兵器の開発状況についても明らかにした。そして、核開発計画等の破棄のためにリビアが取るべき措置を取りまとめ、同計画に関わる全資機材の国外撤去をリビアに約束させた（2003 年 12 月 19 日、リビアは WMD の廃棄の実施を宣言）。その上で、米英チームはリビアがこの決定を覆す可能性を懸念し、迅速に非核化を進める必要性を強調した。

## 4. 非核化の取組み

2004 年 1 月、リビアの WMD 破棄に係る役割について IAEA と米英は協議を行い、IAEA は核兵器不拡散条約（NPT）の下での核検認(リビア-IAEA 間で締結されている CSA に基づく核物質の検認)、米英は関連物品のリビア国外への搬出を担当すること、互いに調整しつつ迅速に進めることを決定した[2]。この時点ではリビアの追加議定書は発効していなかったが、IAEA の核検認を前に 2003 年 12 月 29 日、リビアは、IAEA に対し追加議定書と同等の無制限のアクセス権を与えた。並行して IAEA の技術専門家チームは未申告の核活動に関連した 9 ヶ所のサイトを訪れ、未申告の核物質、設備、施設、及び活動に対する検認プロセスを開始した。

更に、2004 年 1 月、核兵器及び遠心分離技術に詳しい専門家を含む IAEA 査察チームは検認プロセスを継続し、機微な核物質・部品の所在を確認し封印を行った。更に IAEA の監視下で米英が機微な物品の撤去を行った。この初期の段階で、核兵器開発に直結する機微な物品の殆どは国外に搬出されたため、以後はリビアの非核化が確実に達成されたことを明らかにするための検認活動が主なミッションとなった。そこで、引き続き、査察チームはリビアが申告した原子力関連施設全てについて核検認を実施した。

図 1 に同国から申告された核開発関連のサイトを示す（2004 年 3 月の理事会報告に記載 [3]）。この検認活動の進捗状況は同年 3 月、6 月、9 月の各理事会で、原子炉関連（重水製造施設、核燃料サイクル施設の設計）、核物質関連（ウラン精鉱、$UF_6$、その他のウラン化合物）、転換関連（実験施設、大規模プラント）、濃縮関連（規模の異なるガス遠心分離器ごと）、他の核燃料サイクル関連（燃料加工、再処理、ガラス固化の研究施設）、核兵器関連（核爆発装置の設計・製造）の 6 つの分野ごとに報告された[3-5]。

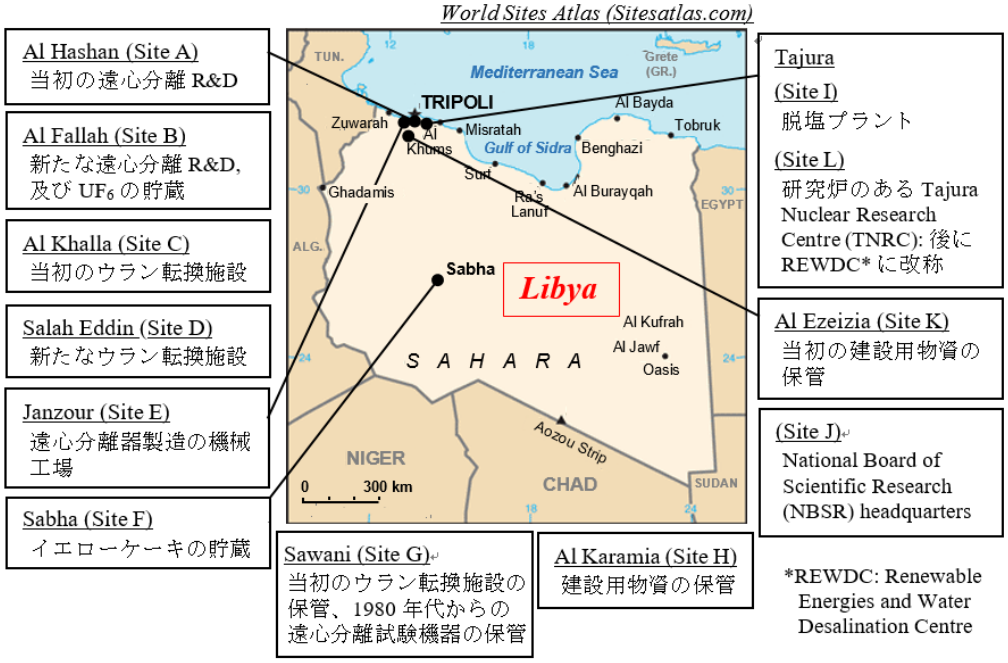



図 1 リビアが申告した原子力関連施設
（所在地が判明したサイトは地図中に示した）

以降、2004 年から 2007 年まで IAEA の保障措置実施年次報告書においても進捗の最新情報が理事会に提供された。そして、2008 年 9 月理事会において、リビアの核開発に係る検認活動を総括し、未申告核物質・活動、及び核兵器開発関連活動等が存在しないことを報告し[6]、一連の検認活動は終了した。

## 5. 核開発の動機、非核化のインセンティブ [1,7]

中東地域においては、リビアと対立するイスラエルが核兵器保有国と見なされており、アラブ諸国を標的にしていることへの対抗意識がカダフィ政権樹立の初期からあったとされている。クーデターによって政権を奪取したカダフィ氏は、国内の支配体制を強固なものとするためにも、あるいはアラブ諸国内での指導的地位を確立するためにも、核兵器をはじめ WMD の取得を望んでいたと考えられる。また、核開発の動機を個別の政治リーダーの信念に着目して分析した研究では、『抵抗的ナショナリスト（oppositional nationalist）と呼ばれる国家指導者は、対外的な敵の存在によって脅威や威信を醸成し、戦略的な計算に基づかずに核兵器への希求を高めるため、国内外に核開発に対する様々な障害があってもその考えを撤回しない傾向が強い』（ジャックハイマンズ仮説）としている[8]。以上のような歴史的背景及び指導者の性向分析から鑑みて、カダフィ氏自らの地位の保全と相対的な地位向上が核開発の大きな動機と考えられよう。

リビアは 1980 年代半ばに引き起こした航空機テロ事件に対して国連から課された経済制裁、及び WMD（主に生物・化学兵器）計画に対して米国から課された経済制裁によって、長らく重要な国家収入である石油輸出が激減し、国民生活に深刻な支障が出ていた。1999 年、リビア政府は航空機テロの責任を正式に認め賠償等の措置をとったことで、2003 年 9 月に国連制裁が全面解除されたものの、WMD 計画に対する米国制裁が残っていた。こうした中で、大量の核物質や資機材等を調達したが思惑どおりに核開発が進捗しない状況にあって、WMD 計画の破棄の一環として核開発を断念することと引き換えに、米国からの経済制裁の解除という恩典を得られることは大きなインセンティブとなったであろう。更に、2003 年のイラク戦争により、同じく WMD の取得を試みたとされるサダム・フセイン体制が瓦解したことに対し、自らも同じ運命をたどる可能性について恐怖感を持ったことは自然であろう。このような国内外の状況から、速やかな非核化に応じたものと考えられる。

## 6. リビアモデル

リビアの核開発計画は、長期にわたって秘匿されながらも大きな進捗がなかったこと、非核化の決定からその実施まで関係国・機関の緊密な連携によって速やかに進められたこと、当事国のリビアが協力的な姿勢にあったこと、非核化後の不可逆性も確保されたことなど、様々な要素がいわゆるリビアモデルとして成功事例と称される所以と考えられる。改めて、リビアモデルの特徴をまとめると以下のようになろう。

- 核開発計画の疑惑がありながらその動きに対する歯止めがうまく働かず、顕在化には船舶の臨検という半ば偶発的な事件が契機となったこと（WMD 計画に関しては、事前に留学生による情報リークがあったが、資機材を押収したことが核開発計画の直接的な証拠となった）
- 長期にわたる核開発計画の進行により、核物質・資機材の調達は様々なルートを経由して多岐にわたったが、リビア国内の科学的基盤及び人材の不足により、技術の進捗度は低く、核兵器の取得には遠かったこと
- 核開発計画の露見後、関係国・機関の緊密な協力のもとで速やかに非核化のプログラムが立案され実施に移されたこと
- 経済制裁が奏功して、非核化の実施に対しリビアが協力的であったこと
- イラク戦争がほぼ同時進行で起こり、WMD 計画の代償としての指導者の末路に見せしめ的な効果があったこと
- 核兵器開発の動機が、指導者個人の性格や思考によるところが大きかったため、一旦非核化を決断した後の政策転換が容易であったこと

以上のように、様々な要素が絡み合って非核化の実現に成功したのが、リビアモデルといえよう。

## 7. 結語

最後に、リビアの非核化から得られた知見について、現在あるいは将来の核問題の解決に敷衍しうる教訓を考えたい。

先ず、非核化の対価として経済制裁の解除及び国際社会への復帰が見込めることを示したこと

は、当事国の核開発計画の破棄に対するインセンティブとして大きな効果をもたらすと考えられる。次に、非核化の決断からその実現まで、関係国・機関が緊密に連携しスピード感を以って実施に当たったことである。変化の激しい国際情勢下では、非核化の機運の高まりを逃さず一気に実行に移すことが重要であろう。

一方、カダフィ氏自身は非核化後も指導者としての地位を保全されたが、その後に起こった民主化運動によって政権を打倒され悲惨な末路を辿っている。もし、核開発計画を手放さなければ、権威と権力の象徴として用い政権を維持できたのではないか、との負のメッセージを発信する可能性もあながち否定できない。この点については因果関係の精緻な分析と切り分けを行い、例えば経済制裁、国際社会への復帰に加えて体制保証等のインセンティブを与え、非核化の決断を促すことも、特に独裁的指導者に対しては有効ではなかろうか。

国際社会の一致した取組み、非核化へのインセンティブの明確化、プロセスの透明性は、今後の他の国々の非核化に向けた良好事例となることを期待したい。

**参考文献**


[1] ‘Countering WMD -The Libyan Experience’, Robert G. Joseph, National Institute Press, 2009.

[2] ‘IAEA, US and UK Discuss Libya’, IAEA Press Release on 2004/1/19.

[3] Implementation of the NPT Safeguards Agreement in the Socialist People’s Libyan Arab Jamahiriya, GOV/2004/12 (20 Feb. 2004).

[4] Implementation of the NPT Safeguards Agreement in the Socialist People’s Libyan Arab Jamahiriya, GOV/2004/33 (28 May. 2004).

[5] Implementation of the NPT Safeguards Agreement in the Socialist People’s Libyan Arab Jamahiriya, GOV/2004/59 (30 Aug. 2004).

[6] Implementation of the NPT Safeguards Agreement in the Socialist People’s Libyan Arab Jamahiriya, GOV/2008/39 (12 Sep. 2008).

[7] 核拡散防止の比較政治（北野 充 著、ミネルヴァ書房）

[8] 核不拡散の起源（向 和歌奈 著、東京大学学術機関リポジトリ、URL: https://repositry.dl.itc.u-tokyo.ac.jp）

# 非核化達成のための要因分析に関する研究
# (4) イラク:非核化の特徴について

Research on Factor Analysis for Achieving Denuclearization
(4) Iraq: Characteristics of Iraq's Denuclearization

*田崎　真樹子，清水 亮，木村 隆志，玉井　広史，中谷 隆良，須田 一則
日本原子力研究開発機構

*Makiko TAZAKI, Ryo SHIMIZU, Takashi KIMURA, Hiroshi TAMAI, Takayoshi NAKATANI, and Kazunori SUDA
JAPAN ATOMIC ENERGY AGENCY

Iraq, defeated by the Gulf War, had to accept denuclearization under UN Security Council Resolution (UNSCR) 687, but did not immediately and accurately report all its past nuclear activities to the IAEA. IAEA, as an internationally authorized nuclear inspection and verification organization to Iraqi denuclearization by the UNSCR 687, gradually revealed existence and the whole picture of Iraqi clandestine nuclear activities and verified destruction of weapon related facilities and equipment as well as removal of nuclear materials outside Iraq. Analyzing Iraq's characteristics of denuclearization could serve as a good reference for not only preventing nuclear weapons development but also considering their denuclearization in current and future states.

## 1. 緒言

イラクは 1970 年代前半から秘密裡の核開発に着手し、1981 年のイスラエルによるイラク原子炉空爆後に核開発を本格化させたが、1990 年のクウェート侵攻に起因して始まった湾岸戦争に敗北し、1991 年の国連安全保障理事会(安保理)決議(UNSCR)687 に基づき非核化を受け入れざるを得なかった。しかしイラクは、同国の非核化に係る査察・検証を実施することになった IAEA に対して自らの核活動の全容を申告したわけではなく、IAEA は、国連大量破壊兵器廃棄特別委員会(UNSCOM)の支援と協力を得て、現地査察や情報分析等を通じてそれを徐々に明らかにした。そして 1994 年迄に、核関連の施設や機器の廃棄と核物質のイラク国外への搬出の検証を終え、1997 年に湾岸戦争以前のイラクの核開発に係る「技術的に整合性のある全体像」が見えてきた旨を安保理に報告した[1],[2]。しかし IAEA は、イラクが核兵器を生産に係る「物理的・実用的能力を保持する兆候はないが、それは当該能力が存在しないことと同じではなく、どんなに包括的な査察であっても検証プロセスに不確実性はある」との立場の下、監視・検証活動を継続した[3]。2001 年の 9.11 米国同時多発テロを経て 2003 年、ブッシュ大統領(子)は、イラクによる核を含む WMD(大量破壊兵器)の保有・開発及びアルカイダとの共謀の可能性等を理由にイラク戦争を開始しフセイン体制を崩壊させた。このようにイラクの非核化は、南アフリカ(南ア)やリビアの非核化とは多くの面で異なる。しかし今日改めてイラクの非核化を振り返ることは、現在そして今後も起こり得る秘密裡の核開発の防止や非核化に有用と考えられる[4]。本稿ではイラクの核開発の動機、核活動の概要、非核化の国際的枠組み、主に 1991～92 年の IAEA による査察・検証活動を概観し、最後にイラク非核化の特徴を考察する。

## 2. 核開発の動機と秘密裡の核活動の概要

イラクは、旧ソ連から研究炉と高濃縮ウラン(HEU)燃料の供給を受けて、1968 年に同国初の研究炉 IRT-5000(当初 2MW、後に 5MW に改造)の運転を開始した。同年イラクは旧ソ連の要求に沿い核不拡散条約(NPT)に署名し、1972 年に IAEA と包括的保障措置協定(CSA)を締結したが、1973 年に原子力委員会委員長に就任したサダム・フセインは、1975 年に核開発計画の作成を指示した。核開発の動機については、フセイン自身が「イスラエルが既に保有している核兵器に対抗するためにアラブ諸国も核兵器を持つべき」、「イラクはアラブ諸国として初の核武装を目指す」と発言しており[5]、イスラエルへの対抗、またはアラブ世界をリードするイラクの地位確立を目指したことが伺える。加えてアッバス党がクーデターにより政権を樹立し、フセインが党内の政敵を押さえて大統領となった経緯を鑑みると、核保有を成し得たというステータスを得て国及び党内での自らの地位を盤石・不動なものにすることを意図していたとも考えられる。

その後イラクは、1976 年に仏国と 2 基の原子炉(タンムズ 1 号機(40MW)及び 2 号機(500kW))と HEU の供給、そして伊国とは研究規模の再処理施設等の供給に係り合意した。タンムズ 1 号機は、仏国のオシリス原子炉と同じもので、効率的なプルトニウム(Pu)の製造が可能であった[5]。一方イスラエルは、イラクが将来的にタンムズ 1 号機からの Pu を用いて核兵器製造に至ることを危惧し、1981 年、燃料初装荷直前の同炉を空爆、破壊した。これを契機にフセインは、核兵器の材料を Pu に依拠せず、イラク自ら HEU を生産し核兵器の開発・製造を行うこととし、1987 年に義息のフセイン・カメルを責任者として核開発を本格化させた。

2004 年の米国イラク調査グループ(ISG)の報告書[6]等によれば、イラクの核開発計画は、主に電磁法及び遠心分離法で HEU を製造し、それを核兵器に利用することを意図し、図 1[7]のとおり各地に種々の施設を建設した。

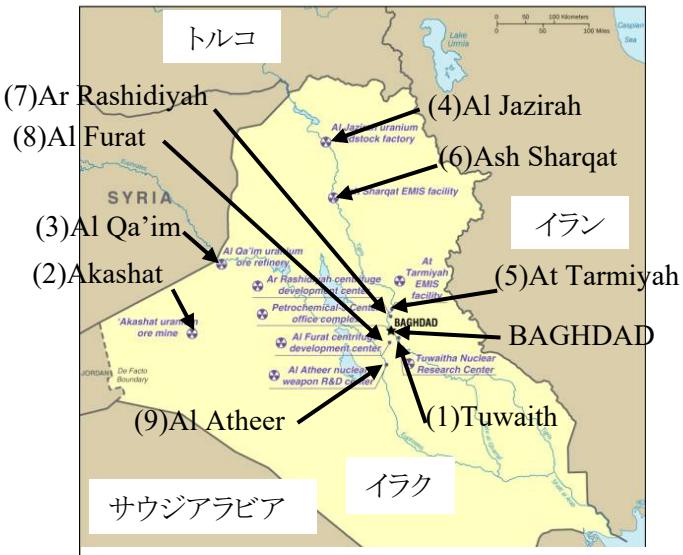



図 1 イラクの核関連施設

イラクの核活動を概観すると、露国、仏国及び伊国からの原子炉及び施設を含め、基礎的な研究を実施した(1)Tuwaith 原子力研究所を中心とし、(2) Akashat の鉱山でウランを含むリン鉱石を産出し、(3)Al Qa'im のリン酸工場でリン酸肥料の製造工程の副産物としてウランを回収し、(4)Al Jazirah の転換施設で電磁法によるウラン濃縮用に酸化ウランを四塩化ウランに転換、また遠心分離法によるウラン濃縮用に酸化ウランを六フッ化ウランに転換し、(5)At Tarmiyah で、ユーゴスラビアの企業との契約に基づくウラン電磁法施設で HEU を製造、さらに(6)Ash Sharqat には(5)と同様のウラン電磁法施設を建設し、(5)と共に稼働させる予定であった。またウラン遠心分離法について、(7)Ar Rashidiyah の施設で遠心分離機器の設計及び試験を実施し、(8)Al Furat の産業規模の施設では、遠心分離機の設計、製造、組立て、試験を企図していた。さらに(9)Al Atheer の施設では核兵器の開発・試験・製造を行うことを企図した[6],[8],[9]。

## 3. 非核化の国際的枠組み

湾岸戦争後の 1991 年 4 月に採択された UNSCR687 は、イラクに対して非核化に係り、①NPT に基づく義務を改めて確約すること、②核兵器または核兵器に使用できる材料や研究・開発・製造施設を入手または開発しないことに無条件で同意すること、③核兵器に利用可能な物質や資機材、関連する研究、開発、支援、製造施設等に係り、全ての場所、量、種類を IAEA に申告すること、④核兵器に使用可能な全ての核物質等を IAEA の排他的な管理下に置くこと、⑤IAEA による現地査察、核物質や施設等の廃棄、撤去、無能力化を受け入れること、またその後も IAEA の監視・検証活動を受け入れること等を要求した。

また UNSCR687 に基づき、イラクにおける核兵器以外の WMD 廃棄の査察・検証機関として新たに UNSCOM が創設された。一方 IAEA は、UNSCR687 により UNSCOM の支援と協力を得て、イラクの核活動に対する査察・検証(申告の正確性及び完全性の検証、核関連の物質、施設及び機器等の廃棄、撤去、無能力化等の査察・検証を含む)を実施することとなった。また IAEA は、非核化の査察・検証に係り、イラクの上記申告と、UNSCOM が指定した追加的な場所に現地査察を行うことが可能であった。

## 4. IAEA によるイラク非核化の査察・検証活動

ISG の報告書[6]によれば、1991 年の湾岸戦争の初端である多国籍軍による「砂漠の嵐」作戦は、イラクの図 1 の(1) Tuwaith、(2) Akashat、(3)Al Qa'im、(4)Al Jazirah、(5)At Tarmiyah の施設の一部及び(6)Ash Sharqat の施設の多くを破壊した。このことは、米国を中心とする多国籍軍が、衛星写真を含む諜報機関の情報等により、上記施設の存在を認知していたことを示す。一方 IAEA の査察・検証活動は、主に 1991 年 5 月～1992 年 3 月迄に実施された第 1 次～第 10 次査察で集中的に行われた[10]~[12]。その間イラクは、IAEA に対して常に完全かつ十分な情報を提供したわけで

はなく、また現地査察に必ずしも協力的でなかったが、それでも IAEA は、UNSCOM からの事前情報に基づき、1991 年 6 月～7 月にかけての第 2 次査察で、電磁法で用いられる巨大なカルトロン(電磁法で用いる濃縮装置)を、また 9 月の第 6 次査察で核兵器計画の構想に係る文書を発見した[11]。またこの間、イラクがウラン濃縮に係り実施していた遠心分離法に係る施設((7)Ar Rashidiyah と(8) Al Furat)の目的やその実態、イラクが実施していたガス拡散法、化学法(仏国の CHEMEX 法、旭化成のイオン交換法)及びレーザー法(分子法及び AVLIS)の研究の概要、ドイツ人技術者の関与を含む遠心分離技術や機器の製造に必要な資機材や設計図等の調達プロセスの概要、更に(9)Al Atheer サイトが核兵器の開発・製造を目的であったこと等が明らかになった。そして IAEA は、1992 年末迄に、(7) Ar Rashidiyah、(8) Al Furat 及び(9)Al Atheer の施設の廃棄及び無能力化の検証、また 1994 年末迄に未照射及び照射済燃料の国外搬出の検証を実施した。1995 年に核兵器開発の責任者であったフセイン・カメルの亡命後、イラクは核兵器を含む WMD に係り、「完全かつ最終的な開示(FFCD: Full, Final and Complete Disclosure)」を行い、より多くの文書を IAEA 及び UNSCOM に提出した。それにより、保障措置が適用されていた IRT-5000 及びタンムズ 2 号機の HEU 燃料から HEU を取り出し、一部をさらに遠心分離法で濃縮して HEU を製造し、核兵器の材料としようとしていた「クラッシュ・プログラム」の存在も明らかとなり、イラクの核開発計画の全容が解明されていった[6]。ただしイラクの FFCD は必ずしも十分なものではなく、その後も追加的な FFCD が提出され、それに応じ査察・検証も行われた。このような経緯を経て 1997 年 10 月、IAEA は、イラクの湾岸戦争以前の核開発に係り「技術的に整合性のある全体像」が見えてきたことを安保理に報告した[1]。同報告によれば、イラクは湾岸戦争以前に電磁法により濃縮度 4%のウラン 0.5kg 以下を製造したのみであり、Pu に関しても IRT-5000 の照射済燃料を(1) Tuwaith の放射化学施設のホットセルで再処理し 5g の Pu を抽出したのみであり、総じてイラクが核兵器製造に成功した兆候はないと結論付けている[1],[2]。

また ISG の報告書[6]は、湾岸戦争後のイラクの活動について、フセインが核開発に携わった主要な核科学者を軍事産業委員会(MIC)等に配置し核兵器知識の維持を助けたこと、また 1990 年からイラクに課せられている経済制裁が解除されれば、核計画を再構築する可能性があった活動を見出したとしているが、それは意図のみであり、実際にはウラン濃縮能力を含む核開発能力の再構築は行われていないこと、イラクの核計画は 1991 年以降頓挫しており、生物・化学兵器の備蓄も一切無く、さらに米国がイラクによる核計画の再構築の証拠の 1 つとして主張していた 1991 年以降のニジェールからのウラン調達に関しても証拠を見いだせなかったと結論付けている。

## 5. イラクの非核化の特徴

イラクの非核化は、南アやリビアのそれとは異なる以下を含む特徴がある。

まず 1 つは、イラク自身の非核化に対する姿勢である。南アは自ら非核化を決断・実施したが、イラクは 1991 年の湾岸戦争に敗北し、UNSCR687 に基づく非核化を受け入れざるを得なかった(ただしイラクは NPT 加盟国であり、IAEA と CSA を締結しており、非核化は当然の義務である)。また南アは、非核化の査察・検証に際し、必要に応じて IAEA に「理由があれば、どこでもいつでもアクセス」を提供し、自身の非核化の透明性と信頼性の確保に努めたが、イラクは自身の核活動を直ちにかつ完全に IAEA に申告したわけではなく、また IAEA の査察・検証活動に必ずしも常に協力的であったわけではなく、むしろ IAEA が 1991～92 年に UNSCOM の支援と協力を得て、イラクの申告を実際の査察や情報分析、聞き取り調査等で検証しつつ、イラクの秘密裡の核開発の存在とその全容を徐々に明確にしていった。

2 つに、3.で述べたとおり、UNSCR687 によりイラク非核化の国際的枠組みとして、新たに UNSCOM が創設され、また、イラクの核活動が未申告・秘密裡に実施されていたことから、IAEA には、原子力関連施設や関連情報へのアクセス権拡大など、追加的な権限が付与されたことである。このような権限は、ブリックス曰く、「従来の CSA に基づく IAEA の権限とは異なり、IAEA の査察官はイラクが申告した場所だけでなく、あらゆる施設に立ち入ることができ、またあらゆる人物に面会できるという無制限のアクセス権限を持つ」もので[2]、後に追加議定書として結実した。

一方、UNSCOM は、安保理の直接管理下に置かれ国連事務総長に対して一定の独立性を保つことが保証されており、また UNSCOM の人材と機材は国連加盟国から任意に提供されスタッフ

の採用も国連のそれとは異なった。つまりUNSCOMは、国連主要国の情報機関の支援(情報提供)を受けることが期待できた。この点は、より多くの情報を必要としたIAEAには利点であったが、反面UNSCOMが主要国の強い政治的影響を受けるであろうことも当初から懸念された。後にイラクからそのような反発を受けて UNSCOMは1999年にUNSCR1284により国連監視検証査察委員会(UNMOVIC)に改編せざるを得なかった。

3つは、経済制裁の効果である。南アやリビアの非核化においては、同国に対する経済制裁が功を奏した。一方イラクについて、1990年8月のイラクのクウェート侵攻直後、安保理はUNSCR661で加盟国にイラクに対する全面禁輸措置を要求し、UNSCR687ではWMD及びその開発計画が完全に廃棄された後に経済制裁が解除されると認識された。米国議会レポート[13]によれば、1988年のイラン・イラク戦争後のイラクの輸入額は150億ドル超で、輸入額は100億ドル弱であったが、UNSCR661以降の1991年中盤から輸出入ともに4～6億ドルにまで落ち込み、食料の70%を輸入していたイラクに打撃を与え、翌月の9月からは早くも食料配給となりイラク国民生活を直撃した。一方で、石油の大規模な不法販売も行われ、政権幹部等は生活に必要な物資を得ていたと言われる[2]。また1996年からは、石油食料交換プログラム(OFF)が導入され、食料や医薬品等のいわゆる人道物質の購入が可能となるよう石油輸出が限定的に認められた。当初、石油の輸出額は上限が定められていたが、1999年に撤廃され、2000年の輸出総額は137億ドルに達し、イラン・イラク戦争後の水準を超えるに至った。つまり、国連安保理による経済制裁は、必ずしもイラクの非核化の圧力手段としては機能しなかった[2]。ISGの報告書[6]は、フセインがOFFで得られた財源で原子力委員会等の予算や、以前の核科学者やエンジニアが関与したプログラムの財源を増大させ、その意図は不明であるが、イラクによる核計画の再構築の懸念を招いたとしている。

4つは、イラクの核開発、非核化のきっかけ及び核兵器を含むWMD廃棄の完遂は、武力行使または戦争であったことである。南アの場合、核開発及び非核化の動機は、安全保障環境の変化であったが、他国による南アへの直接的な武力行使や戦争が引き金となったわけではなく、リビアの場合も2003年のBBC-China号の臨検である。一方イラクの場合、同国が核開発を本格化させたのは、1981年のイスラエルによるタンムズ1号機の空爆であり、1991年のイラクの非核化を決議したUNSCR687も、1990年のイラクのクウェート侵攻及び1991年の湾岸戦争に起因する。さらに米国等は、イラクによるUNSCOMに対する査察妨害を理由に1998年に「砂漠の狐」作戦を行い、その後、2003年に「イラクの自由作戦」でイラク戦争を開始し、フセイン体制は崩壊した。

## 6. 最後に

5.で述べたとおり、イラクの非核化は、非核化のモデルと称されるリビアや南アのそれとは多くの異なる特徴がある。それは必ずしも理想的な非核化モデルではないとしても、現在そして今後も起こり得る個別具体的な国々の核開発の防止や非核化への対処を考察していく上では参考となる事例と思われる。本稿では紙面の制約上、より踏み込んだ議論はできなかったが、今後さらに詳細な分析を試みたい。

## 引用・参考文献


[1] “Note by the Secretary-General”, UN Security Council, S/1997/779, 8 October 1997

[2] 「イラク大量破壊兵器査察の真実」、ハンス・ブリックス 著、伊藤真 訳、DHC

[3] “Iraq's Nuclear File: Still Open”, Mohammed ElBaradei, 1 June 1989, NCI ホームページ、URL: http://nci.org/a/a6198.htm

[4] 「核拡散防止の比較政治」、北野充 著、ミネルヴァ書房

[5] 「イスラムの核爆弾」、スティーブ・ワイスマン他、大原進 訳、日本経済新聞社

[6] “DCI Special Advisor Report on Iraq’s WMD”, Central Intelligence Agency, 2004

[7] テキサス大学ホームページ、URL: https://legacy.lib.utexas.edu/maps/middle_east_and_asia/iraq_nuclear_2002.jpg の地図に地名を付した

[8] “Development of the Al-Tuwaitha Site”, David Albright et al, ISIS, April 26, 1999

[9] “Iraq’s program to make highly enriched uranium and plutonium for nuclear weapons prior to the Gulf War”, David Albright, ISIS, October 2002

[10] “The IAEA in Iraq – Past activities and findings”, Barry B. Dillon, IAEA Bulletin, 44/2/2002

[11] “IAEA nuclear inspections in Iraq”, Leslie Thorne, IAEA Bulletin, 1/1992

[12] “IAEA inspections and Iraq’s nuclear capabilities”, IAEA, April 1992

[13] “Iraq’s trade with the word: Data and analysis”, CRS Report, Vivian C. Jones, Updated March 25, 2005

# 非核化達成のための要因分析に関する研究
# （5） イランの核問題と核合意について

Research on Factor Analysis for Achieving Denuclearization
(5) Iran's nuclear program and Iran nuclear deal

*清水 亮, 木村 隆志, 田崎 真樹子, 中谷 隆良, 玉井 広史, 須田 一則
日本原子力研究開発機構
*Ryo SHIMIZU, Takashi KIMURA, Makiko TAZAKI, Takayoshi NAKATANI, Hiroshi TAMAI, Kazunori SUDA
JAPAN ATOMIC ENERGY AGENCY

Despite international accusations, Iran pursued uranium enrichment capacity. But through unprecedented strong economic sanctions, Iran accepted the restrictions on uranium enrichment capacity and agreed to accept the additional protocol. Nuclear program of Iran and nuclear deal are good precedents for denuclearization that has solved peacefully through multilateral negotiations, its process and lessons are compiled.

## 1. 緒言

過去に核兵器の開発や保有をし、非核化に至った国々のうち、イランの非核化の方法及び検証方法について報告する。ただし、米国の包括的共同作業計画（JCPOA：Joint Comprehensive Plan of Action）離脱後の最近の状況については、本研究の範囲としない。

イランは、原子力の平和利用の権利を掲げ、度重なる国連安保理による制裁決議にも拘わらずウラン濃縮を主とした原子力活動を拡大したが、米国の強力な金融制裁を始めとする国際的圧力により、2015 年 7 月 14 日に JCPOA に合意した。

本合意は、イランに原子力の平和利用の権利を将来的に認める代わり、同国の原子力活動を NPT 及び IAEA の保障措置下に置くことで、核兵器開発を阻止しようとするものである。イランは一定期間、信頼性醸成のために濃縮を始めとする原子力活動の制限を受け入れるが、最終的には制限が解除される。特に、制裁及び原子力利用の制限が解かれる期限・条件を明確にした点が合意を導いたポイントと考えられ、今後の他国のケースで非核化交渉の教訓となり得るものと考えられる。

## 2. イランの核問題の経緯

### 2-1. 核兵器開発の経緯

イランは、イラン・イラク戦争（1980~1988）で国際社会からほぼ孤立無援となったことを機に核兵器開発に着手したと考えられ、カーンネットワーク等から濃縮技術の入手を図ると同時に、核兵器に必要な要素の自主開発も進めたとされる。ただし、2002 年に秘密裏に行っていたウラン濃縮施設建設及び重水炉建設が反体制派に暴露された後は、核兵器開発に関する部分は中断されたと評価されている[1]。

### 2-2. 秘密裏の原子力施設建設等の発覚

イランは、2002 年に反体制派に暴露された原子力施設は平和目的であるとして、ナタンズの濃縮施設やアラクの重水炉建設計画の存在を認め IAEA に申告するとともに、査察に応じたが、IAEA は検証活動等を通じ、イランの申告や主張の矛盾点を指摘し、イランが長年にわたり、ウラン濃縮やプルトニウム分離を含む活動を IAEA に申告することなく行ってきたことをイランに認めさせた。

イランは不正確な申告により、自らの核兵器開発への疑惑を深める結果となり、イランは IAEA に対して、自らの原子力活動に関する包括的かつ正確と期待される申告書を 2003 年 10 月に提出するに至った[2, 3]。本件は、IAEA の検証活動の重要性と、検証能力の高さを示す結果となった。

この時明らかとなった主なイランの保障措置に関する違反事例は以下の通り。

1) ナタンズ濃縮施設及びアラク重水炉建設

原子力施設の初期設計情報の早期提出は、1992 年以降 IAEA が加盟国に要請し、後に補助取極 code3.1 が改訂されていたが、イランはそれを適用せず、暴露されるまで両施設の情報を IAEA に申告していなかった。明確な違反ではないが、暴露が無かった場合、申告されたかについて疑念が残り、イランに対する疑惑を深める結果となった。

2) ウラン濃縮開発

IAEA は、遠心分離機の開発が行なわれていた Kalaye 電気会社の環境試料分析で、高濃縮ウランと低濃縮ウランを検出し、その出所等を追求する中で、イランは、カーンネットワークから遠心分離機を調達したことと、ウラン試験を実施していたことを認めた。さらに、P2 型遠心分離機の設計情報を入手していたことを認めた。

3) 核物質の輸入

1991 年に中国から輸入したウラン化合物（1,000kg の $UF_6$、400kg の $UF_4$、400kg の $UO_2$）を始めとする核物質の海外からの入手について未申告であった。

また、この核物質の収支の説明についても虚偽の申告があったことが、IAEA の検証活動の中で明らかとなった。

4) ウラン濃縮（レーザー濃縮）

金属ウランの用途についてイランを追求する中で、イランは原子レーザー法（AVLIS）の開発を行い、ウラン試験を行っていたことを認めた。

5) プルトニウム分離試験

7kg の劣化ウラン $UO_2$ から焼結ペレットを作成し、テヘラン研究炉（TRR）で照射を行い、3kg の照射済みペレットからプルトニウム（200mg）を抽出したことを認めた。

## 2-3. 多国間交渉とイランのウラン濃縮の拡大

イランの核兵器開発への疑惑が明らかになった翌年の 2003 年、英、独、仏（E3）が仲裁に乗り出し、イランは、核問題に関する協議の期間中、ウラン濃縮活動の停止と追加議定書への署名を約束し（テヘラン合意）、後に署名したものの、イラン国会は追加議定書を批准せず、また、合意後にウラン濃縮関連活動（ウラン転換試験）を行ったことから、国際社会のイランへの懸念が高まった。

こうした中、2004 年 11 月、E3 とイランは、ウラン濃縮関連活動・再処理活動自発的に停止するパリ合意に達し、E3 とイランの間で長期的取り決めに向けた交渉が開始された。

しかし、原子力平和利用（濃縮）の権利等、イランの主張が認められなかったことから、イラン国内の欧米諸国に対する反発が強まり、2005 年 8 月に保守強硬派のアフマディネジャード大統領が就任すると、イランは合意を覆しウラン濃縮活動を再開した。

これに対し、英国、フランス、ドイツだけではなく、国連安保理常任理事国である米国、ロシア、中国を加えた 6 カ国と、国連安保理から交渉調整役を委任された EU のハビエル・ソラナ共通外交・安全保障政策上級代表（当時）（E3/EU＋3）による、イランの核問題解決のための合同協議がスタートしたが、協議は進展しなかった。

イランに対し、ウラン濃縮・再処理・重水関連の活動の停止を要請する安保理決議 1737(2006)、1747(2007)、1803(2008)、1929(2010)を決議し、核及び弾道ミサイル関連資機材、武器の取引の禁止、関係者の渡航禁止等、核及び弾道ミサイル開発に対する制裁を強化したもののイランの態度に変化はなく、イランはウラン濃縮能力を拡大し、生産した濃縮ウラン量も増加していった。

## 2-4. イランのウラン濃縮活動

2007 年 2 月よりイランはナタンズの燃料製造施設（FEP）でウラン濃縮を開始すると、順次その規模を拡大。規模が最大となった 2014 年には約 9000 台の遠心分離機を稼働させて低濃縮ウランを製造した。

2009 年 9 月、衛星監視によりイランのフォルドに新たな地下濃縮施設の建設が発覚した[4]。

2010 年 2 月、イランはナタンズのパイロットウラン濃縮施設（PFEP）で 20%までの濃縮ウランの製造に着手した。2014 年には PFEP 及びフォルドウラン濃縮施設（FFEP）の約 1000 台の遠心分離機で 20%までの濃縮ウランの製造を行った。

ただし、20%までの濃縮ウランの貯蔵量は TRR 燃料に加工するなど、兵器級濃縮ウラン製造に必要な量の $UF_6$ 量（レッドライン）を超えない量に留め、軍事攻撃を警告するイスラエル等とぎりぎりの駆け引きを行なった。

## 2-5. イランへの制裁の強化

IAEA は、2011 年 11 月の事務局長報告でイランの核兵器開発疑惑について初めて具体的な根拠を示し、「深刻な懸念」を表明した[5, 6]。

これを受けて、米国はイランと取引のある金融機関へ制裁を強化し、イランとの石油取引に圧力を加え、EU も独自に石油の輸入を停止する等圧力を強化した。これにより、イランの石油収入は大幅に減少し、国内のインフレ等に伴う国民の不満から保守穏健派のロウハニ大統領へ交代することとなった。

これまでも、核開発や弾道ミサイル開発の阻止を目的とした国連制裁は強化されてきていたが、核開発等を妨害することは出来ても、ウラン濃縮を行うというイランの意思を変えるには不十分であった。

一方、米国がイランに課した制裁、特に「2012 年度国防授権法」は、イラン中央銀行等と取引した金融機関に対し、米国金融機関との取引を禁止することにより、実質、ドルを基軸とする国際金融システムから締め出すもので、世界中の金融機関がイランとの取引を停止したことにより、イランの石油取引を困難にした。シェール革命による原油価格暴落とも相まって、イラン経済に大きなダメージを与え、初めてイランを交渉の席に着かせることに成功した。

## 2-6. JCPOA

2013 年 10 月から 11 月にかけ、スイス・ジュネーブ

で、E3/EU＋3 とイランによる協議が行われ、暫定的な「ジュネーブ合意」が締結され、イランの核問題の包括的解決に向けた「共同作業計画」(Joint Plan of Action)が発表された。

イランと 6 カ国は最終合意を目指して協議を継続し、2015 年 4 月 2 日、スイス・ローザンヌで長期的枠組みの決定に至り、7 月 14 日、オーストリアのウィーンで具体的な点を明らかにした最終合意「包括的共同作業計画(JCPOA)」に署名した。

JCPOA は、イランの核開発問題に対し、交渉による平和的な解決を成立させた点、特に原子力の平和利用を認める条件を明確にした点が評価される。

協議に関する E3/EU＋3 側の狙いは、イランの核兵器開発の可能性をゼロとすることにあり、イラン側の目的は経済制裁の解除にあった[7]。

合意は、一定期間(10 年～25 年間)イランの核開発能力を制限し、国際社会はイランが合意内容を履行していることを確認できる間は制裁を中断し、最終的にはイランは追加議定書を批准し、IAEA の監視の元、イランへ原子力の平和利用を認めるもの。

ウラン濃縮については、一年以内に核兵器用核物質(高濃縮ウラン)を製造できないよう、遠心分離機の台数の上限(5060 機)、低濃縮ウランの濃縮度の上限(3.67%)及び保有量の上限(300kg)を定めた。

アラク重水炉については、プルトニウム生成量を削減するため設計を変更、重水生産については保有量に上限(130 トン)を設定し、再処理に関わる研究開発を含む活動は行わないとした。

そして、合意が遵守されていることをいつでも確認できる仕組み(合同委員会)が定められた。

JCPOA 合意後 8 年または IAEA が「イランの全ての核物質が平和的活動に使われている」と結論付けた日(拡大結論)のいずれか早い日に米・欧の独自制裁は終了し、一方イランは追加議定書の批准に向け努力する。そして、10 年後には、JCPOA を承認した安保理決議の期限を迎える。ただし、イランの原子力活動に関わる制限は期限後も 15 年目まで継続する。

全ての制限が解除されたのちも、イランは追加議定書を批准することになるので、IAEA の保障措置下に置かれることで、イランの原子力の平和利用は担保される。

## 3. イランの非核化のまとめ

イランの核問題と核合意に至った経緯から得られた教訓をまとめると以下の通り。

(1) イランの秘密裏の核開発が明らかになった後に実施された IAEA による 2003 年の査察時に、IAEA の高い検証能力がイランの核開発の隠ぺいを暴いた。このことは、IAEA の検証活動の重要性を示した事例である。

(2) JCPOA は、イランに原子力の平和利用の権利を認め、原子力利用に関する制限を解除する条件を定めたことが画期的であった。出口が設定されたことが、イランの濃縮能力の制限や重水炉の設計変更等を受け入れる譲歩を引き出した要因と言える。

(3) 核・ミサイル開発とその関係者・団体等に対象を絞った国連制裁は、イランにウラン濃縮を断念させる効果はなかった。

一方、米国独自の制裁は、米国の国際金融での地位を背景に国外の金融機関にも強制力を有し、イラン経済に非常に大きな影響を与え、イランの譲歩を引き出した。第三国に対しても強制力を持ち、制裁逃れを許さない強力な制裁は、経済制裁も有効であることを示した例ではあるが、この圧力を行使できるのが現在は米国に限られており、米国の意向に左右されることの弊害も懸念される。

(4) イランの非核化は、イランが追加議定書を締結し、IAEA の保障措置活動を受け入れれば、秘密裏の核開発は抑え込むことが出来るとの前提に成り立っている。したがって、今後も、IAEA 検証能力をより向上させるための技術開発や、衛星情報等の情報収集能力の向上が重要である。

## 引用・参考文献


[1] Annual Threat Assessment of the Intelligence Community for the Senate Select Committee on Intelligence, Director of National Intelligence, 12 February 2009

[2] GOV/2003/63, 26 August 2003

[3] GOV/2003/75, 10 November 2003

[4] GOV/2009/74, 16 November 2009

[5] GOV/2011/65, 8 November 2011

[6] イランの核問題の最近の動向, 核不拡散ニュース No.0170, 2012.02.09, https://www.jaea.go.jp/04/iscn/nnp_news/0170.html

[7] EU MAG Vol. 44 (2015 年 10 月号), http://eumag.jp/questions/f1015/

# 日本核物質管理学会賛助会員

（2019 年 10 月 1 日現在）

日本核物質管理学会賛助会員（2019 年 10 月 1 日現在：32 社）

- ✧ 北海道電力株式会社
- ✧ 東北電力株式会社
- ✧ 東京電力ホールデイングス株式会社
- ✧ 中部電力株式会社
- ✧ 北陸電力株式会社
- ✧ 関西電力株式会社
- ✧ 中国電力株式会社
- ✧ 四国電力株式会社
- ✧ 九州電力株式会社
- ✧ 日本原子力発電株式会社
- ✧ 電源開発株式会社
- ✧ 国立研究法人日本原子力研究開発機構
- ✧ 日本原子力防護システム株式会社
- ✧ 仁木工芸株式会社
- ✧ 株式会社ニューテック
- ✧ 三菱原子燃料株式会社
- ✧ 株式会社グローバル・ニュークリア・フユエル・ジャパン

- ✧ 原子燃料工業株式会社
- ✧ 日本原燃株式会社
- ✧ 原燃輸送株式会社
- ✧ 東芝エネルギーシステムズ株式会社
- ✧ 日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社
- ✧ リサイクル燃料貯蔵株式会社
- ✧ 日本原燃分析株式会社
- ✧ 株式会社日立製作所電力ビジネスユニット
- ✧ 富士電機株式会社
- ✧ 三菱重工業株式会社
- ✧ 株式会社ジェイテック
- ✧ 株式会社 IHI ／IHI Corporation
- ✧ 三菱電機株式会社
- ✧ 丸紅ユティリティ・サービス株式会社
- ✧ オラノ・ジャパン

【日本核物質管理学会第 40 回年次大会開催協力企業】

株式会社永木精機

コーンズテクノロジー株式会社

近藤工業株式会社

太平電業株式会社

三菱重工業株式会社

ミリオンテクノロジーズ・キャンベラ株式会社

株式会社アトックス

仁木工芸株式会社

*MORE SAFETY*
*MORE SPEEDY*
*MORE STRONG*

Since 1946

# NAGAKI

# We can do it

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 本社・工場 | 〒574-0045 | 大阪府大東市太子田3丁目4番31号 | TEL.(072)871-3456(代) | FAX.(072)871-7167 |
| むつテクノセンター | 〒035-0021 | 青森県むつ市大字田名部字赤川ノ内並木100番19 | TEL.(0175)31-1206(代) | FAX.(0175)31-1205 |
| 六ヶ所村工場 | 〒039-3214 | 青森県上北郡六ヶ所村大字平沼字二階坂92番1号 | TEL.(0175)75-3455(代) | FAX.(0175)75-2125 |
| 仙台営業所 | 〒984-0042 | 仙台市若林区大和町5丁目18番7号オフィスバリュー大和町2FA | TEL.(022)782-3465(代) | FAX.(022)237-1240 |
| 東京営業所 | 〒141-0031 | 東京都品川区西五反田8丁目7番11号アクシス五反田ビル8F | TEL.(03)5719-5600(代) | FAX.(03)5496-4877 |
| 関東メンテナンスセンター | 〒116-0014 | 東京都荒川区東日暮里5丁目3番1号瀬ロビル1F | TEL.(03)3801-3456(代) | FAX.(03)3801-1234 |
| 海外事業部 | 〒542-0081 | 大阪市中央区南船場1丁目10番12号ラインビルド南船場9F | TEL.(06)6484-5418(代) | FAX.(06)6263-3764 |
| 広島営業所 | 〒732-0052 | 広島市東区光町2丁目4番8号ヒロテツ光町ビル6F | TEL.(082)567-2668(代) | FAX.(082)567-2577 |
| 九州工場 | 〒816-0921 | 福岡県大野城市仲畑2丁目14番17号 | TEL.(092)502-2011(代) | FAX.(092)584-2022 |

NAGAKI Safety Tool and Equipment

株式会社 永木精機

URL http://www.ngk-nagaki.com

No.0558-ISO9001 No.E554-ISO14001
六ヶ所村工場
JAB CM002

# 世界最高クラス 耐放射線カメラシステム

*Mirion Technologies (IST) Ltd. is an industry leader in supply of Radiation Tolerant Cameras and specialist CCTV & imaging systems for the Nuclear Industry.*

## 「HYPERION」
## 高性能ソリッドステートセンサ搭載 耐放射線(1MGｙ)カラーカメラシステム

- 耐放射線性： 1MGy／100Mrad (Gamma)
- 高性能 100 万画素 CMOS センサ採用
- 標準メンテナンスで長寿命
- 優れた画像ジオメトリ
- 高感度で低ノイズ
- 新たに設計されたパンチルト機構（ステンレス鋼製）
- 気中だけでなく、水中利用にも対応
- 既存の撮像管式カメラと互換性を持ち容易に置き換えが可能

## 「R93/R94x シリーズ」
## 高耐放射線性(2MGy)を持つ原子力カメラ

- 耐放射線性: 2MGy (2 x $10^8$ rad), 1kGy/hr dose rate
- 解像度: 600 TV lines 垂直方向 (中心域)
- R93 Mk3： Fixed NB レンズ (9mm 標準, 50°水平)
  R941： NB 8mm to 24mm (57.6° to 20.8° 水平)
  R940： NB 22mm to 90mm (23° to 6° 水平)
  R942： NB 12mm to 72mm (40° to 7° 水平)

## 「R981 Compact」
## 実績豊富な耐放射線(1MGy)カメラシステム

- 耐放射線性： 1MGy ($10^8$ rad), 1kGy/hr doze rate
- 解像度： 550 TV lines 水平方向
- ズームレンズ： 6:1 - 12mm to 72mm, 40° wide, 7° narrow
  6:1 - 24mm to 144mm, 21° wide, 3.5° narrow
  3:1 - 8.0mm to 24mm, 58° wide, 21° narrow

## 「DotCam-HR」
## 小型カラー耐放射線(1kGy)カメラ

- 耐放射線性： 1kGy ($10^5$ rad), 300Gy/hr doze rate
- 解像度： 350 TV lines (NTSC)
- 標準レンズ： 3.1mm f/5.0 (FOV 90°)
- 画角（FOV）： 98.3° 対角, 76.4° 水平 (NTSC)


CORNES Technologies コーンズ テクノロジー株式会社

**【お問い合わせ先】 コーンズ テクノロジー株式会社 特機プロジェクト営業部**
〒550-0005 大阪市西区西本町 1-13-40
Tel: 06-6532-1015
e-mail: ctl-systems@cornes.jp
URL: https://www.cornestech.co.jp/tech

原子力の未来を拓く

近藤工業(株)は、日本初の原子力施設である、東海村の日本原子力研究所新設への参画を皮切りに、原子力の安全利用のために、アブソリュート・フィルタが空調の分野で現在もなお貢献しています。

原子力発電所及び原子力関連施設のほか、企業や大学、医療機関等におけるラジオ・アイソトープ（RI）施設などに、アブソリュート・フィルタをはじめ、周辺機器の設計、製作、販売に努めています。

さらに半導体などのクリーンルーム、製薬、食品、一般ビル空調等の各種業界に欠かせない『エアフィルタ』を製造・販売する総合メーカーです。

【業務内容】

・各種エアフィルタの製造、販売
・原子力関連機器の設計、製作
・微粒子計数器、集中監視システムの販売、校正
・CR、BCR、バイオハザード機器の設計、製作、販売
・そのほか

アブソリュート・フィルタ
（HEPA）

近藤工業株式会社

本社 :〒105-0014 東京都港区芝 3-14-2 芝ケンブリッジビル

Tel: (03) 6400-5011 (代) Fax: (03) 6400-5022

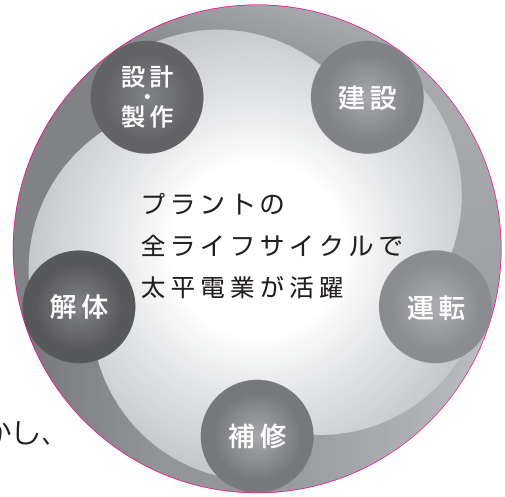
http://www.cambridgefilter.com

大阪営業所 :Tel (06) 6444-0008 ／名古屋営業所 :Tel (052) 222-1060 ／九州営業所 :Tel (092) 262-6436

東北営業所 :Tel (022) 217-2211 ／六ヶ所営業所 :Tel (0175) 72-4428

# 豊かな社会とこれからも
# 社会の「当たり前」を支える

## BUSINESS&TECHNOLOGY




原子力発電とこれからどう向き合い、共存していくかは、

日本の未来にとって大きな課題です。

太平電業は、長年にわたり蓄積されたノウハウと技術力を活かし、

安定稼働のためのメンテナンス作業、

安全な廃止措置に全力で取り組んでいます。

LLOYD'S REGISTER・LRQA ISO 9001 UKAS MANAGEMENT SYSTEMS 001
Cert.No.YKA0957590


太平電業株式会社

〒101-8416　東京都千代田区神田神保町2-4
Tel:03-5213-7211(代表)
https://www.taihei-dengyo.co.jp/

時代の声を聴き、明日のその先にある未来に挑む。つねに社会に求められる存在をめざし、たえまない変革を続け、世界を一歩ずつ前へ。陸、海、空、そして宇宙に、三菱重工グループ。

MOVE THE WORLD FORWARD

MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES GROUP

三菱重工

三菱重工業株式会社　パワードメイン　原子力事業部
〒100-8332　東京都千代田区丸の内 3-2-3　TEL. 03-6275-6200　www.mhi.com/jp

MIRION TECHNOLOGIES

# 迅速なサイト特性評価を実現

## HPGe検出器、CZT検出器、ISOCSシステムで迅速なサイト特性評価

- ISCOS™は線源不要の効率校正ソフトウェア。
  測定現場における高精度な効率校正を迅速に行います。
- ボーリング孔、コンクリート壁
  （深さ方向のプロファイリングを目的としたスペクトロスコピー）
  - コア採取技法、ボーリング孔に挿入するHPGe検出器やCZT検出器などのスペクトロスコピーに斬新なガンマイメージングを連結させる技術を含みます。
  - HPGe検出器やCZT検出器とISOCSシステムで非侵襲的（対象物に直接検出器を挿入しない）測定も可能
- 屋外における広範囲なエリアサーベイ
  - ヘリコプターからの航空探査
  - ISOCSを用いた種々のガンマ線分析システム
  - 移動実験室に配備された可搬型の線量率計

**現地における放射線計測**
ISOCSを用いたHPGeにより大型土のう袋を計測

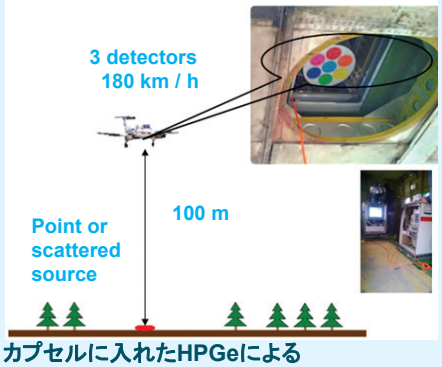
### 深さ方向のプロファイリング

**孔内スペクトロスコピーによるBq/gの測定**
**種々の測定技術が適用可能**
- HPGeシールドプローブ（UHVクライオスタットと共に電気冷却式機能を持つ金属製容器に封入）
- 孔内（壁面/床面/土壌）の種々の深さにおいて測定が可能

### 深さ方向のプロファイリング

**CZT In-Situ 超小型ガンマ線検出システム**
- 検出器部に高分解能CdZnTe結晶を採用
- 1mSv/hr程度の高BGでも使用可能
- D&D現場でよく使用される測定対象物に最適なISOCSテンプレート

### 航空探査

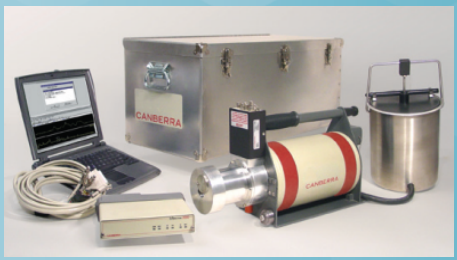



**カプセルに入れたHPGeによる**
**航空測量マッピング**
- 検出器を束ねて高効率にした装置をヘリコプターに積載
- 相対効率1300%、検出下限19nCi@1m (1分測定)

## 保障措置用分析システム

**Aegis**
**可搬型HPGeスペクトロメータ**

**JCC-51型**
**アクティブWell型**
**中性子コインシデンスカウンタ**



**IMCA**
**ウラン濃縮度分析システム**

**ミリオンテクノロジーズ・キャンベラ株式会社**
URL: http://www.canberra.com/jp/　E-mail: jp-sales@mirion.com
東京本社　TEL：03-5835-5402　　大阪営業所　TEL：06-4806-5662

# 国内外の叡智をたずさえ、
# 原子力産業再生の最前線へ。

社会と産業を支えるクリーンエネルギー原子力。
アトックスは、その安全と安定した運転に欠かせないさまざまなメンテナンス事業を展開しています。
原子力発電所、原子燃料サイクル施設、ラジオアイソトープ（RI）事業所などを対象に
放射性汚染除去、産廃物処理、放射線管理施設の保守・補修業務をはじめ
質の高いトータルメンテナンスを提供しています。
アトックスはこれからも、人と地球を見つめ、
安全・清潔・便利さを追求し続けます。

＜業務内容＞

**■福島復興事業**

●放射線管理　●環境修復　●除染作業　●滞留水処理　●下水処理　●廃棄物処理

**■原子力発電関連施設・原子燃料サイクル施設のトータルメンテナンス**

●放射線管理　●放射性汚染除染　●廃棄物処理　●ランドリー　●清掃・区域管理
●設備／装置運転・点検保守　●輸送　●分析　●各種工事

**■RI使用施設関連業務及び医療事業関連業務**

●放射線管理　●放射性汚染除去　●廃棄物処理補助　●管理区域内清掃　●施設／設備運転・点検保守
●加速器運転　●フィルター交換　●デコミッショニング・設備工事　●放射性薬剤取扱業務　●同位体販売

人×技術でNext Stageへ

ATOX

株式会社 アトックス

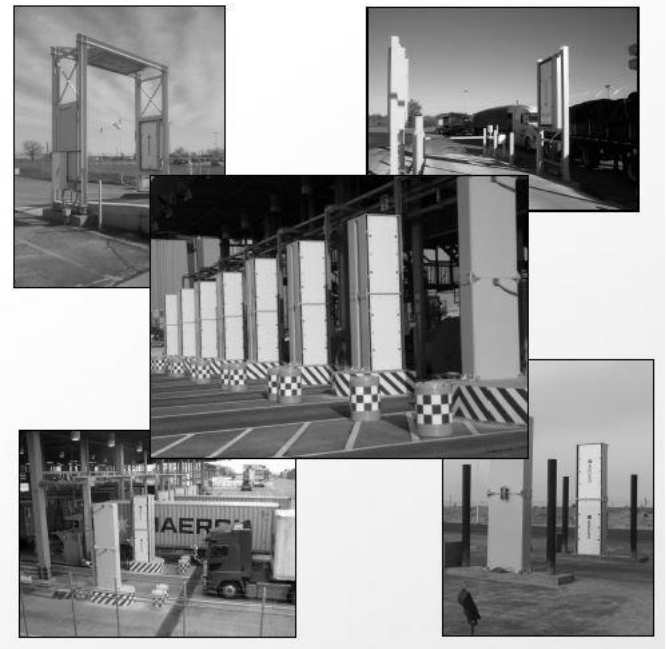
URL：http://www.atox.co.jp/（本社）　http://www.atox-isotope.jp/（同位体販売）


●本　　社：〒108-0014　東京都港区芝4-11-3 芝フロントビル　TEL.(03)6758-9000　FAX.(03)3453-3821
●事 業 開 発 部：〒108-0014　東京都港区芝4-11-3 芝フロントビル　TEL.(03)6758-9004　FAX.(03)3453-3821
●技術開発センター：〒277-0861　千葉県柏市高田1201　TEL.(04)7145-3330　FAX.(04)7145-3649
●RI・医療事業部署：東海営業所　TEL.(029)282-1662／大洗営業所　TEL.(029)266-1331／東京営業所　TEL.(04)7141-1321
大阪営業所　TEL.(06)6384-6730／玄海事業所　TEL.(0955)52-3241

NUCSAFE

**NUCSAFE 社は 1991 年旧ソビエト連邦崩壊後の核物質拡散を監視する目的のために米国テネシー州オークリッジに 1999 年設立された会社です。NUCSAFE は国境警備、港湾セキュリティ、移動監視、航空機監視、特殊携帯機器等の実用製品を提供しています。**

## 通過型車両放射能検査装置



| | |
|---|---|
| 国内実績 | 東京港・横浜港（γ）80 式以上稼働中 |
| | 横浜港 MI パイロットプロジェクト 11 式（γ・中性子） |

通過型車両放射能検査装置は、海上輸送用コンテナからの放射線を迅速に検知し RI の有無並びに天然核種・医療用・工業・特殊核のカテゴリを判断します。
時速 8km で通過しながら測定するので物流を滞らせることがありません。

◆　検出方法

| | |
|---|---|
| ガンマ線 | プラスチックシンチレータ |
| | Option: NaI(Tl)シンチレータ |
| 中性子 | Option: Li6 中性子検出器 |

◆　導入事例

通過型車両放射線脳検査装置は対象物に応じたシステムを提案します。
□　海上輸送用コンテナ（20/40/45ft）
□　一般車両（自家用車、商用ライトバン等）
□　鉄道貨物車両
□　航空輸送用コンテナ
□　機内預け入れ貨物

## 通過型歩行者放射能検査装置

通過型歩行者放射能検知装置は英国ヒースロー空港等に設置されています。本装置はウオークスルー型ですので歩行者の通行を妨げません。また特許技術により前後の歩行者の影響を排して測定が実施されます。

◆検出方法

| | |
|---|---|
| ガンマ線 | プラスチックシンチレータ |
| | Option: NaI(Tl)シンチレータ |
| 中性子 | Option: Li6 中性子検出器 |

◆　導入事例

□　歩行者・旅客者
設置場所
□　空港
□　波止場
□　鉄道駅
□　イベント会場
□　重要施設（政府機関、発電所、変電所等）

**低温・バイオ**
・低温用温度コントローラ
・HTc/LTc DC SQUID、応用製品
・ヘリウムクライオスタット
・液体窒素クライオスタット
・連続流型クライオスタット
・ヘリウム閉サイクルクライオスタット
・超電導マグネット付きクライオスタット
・NbTi 超電導マグネット
・Nb3Sn 高磁場超電導マグネット
・超電導ヘリウム液面計
・超電導マグネット用バケットデュワー
・半導体検出器用 LN2 デュワー
・FRP 製デュワー
・$^{3}$He-$^{4}$He 希釈冷凍機
・無冷媒 3He 冷凍機
・生物試料保管用液体窒素容器
・医療生体試料保管用液体窒素容器
・研究用液体窒素保管容器
・高温超電導電流リード
・液体ヘリウムデュワー
・磁気シールドルーム
・磁気シールド材料
・高温超電導体（MgB2）
・原子力間電子顕微鏡（AFM）
・GM・パルス管冷凍機
・スターリング冷凍機
・コンピュータフリーザ
・操作型電子顕微鏡

**放射線計測・材料**
・高純度ゲルマニウム検出器
・Ge・ガンマ線イメージャ
・CdZnTe 半導体検出器
・SDD/Si(Li)/Si 検出器
・$^{3}$He 中性子検出器
・NIM/VME エレクトロニクス
・マルチチャネルアナライザー
・アルファ線スペクトロメータ
・低 BGα/β 計測器
・液体シンチレーションカウンター
・X 線・中性子用ゴニオメーター
・X 線・中性子用スペクトロメータ
・X 線/中性子用モノクロメータ
・X 線用 CCD カメラシステム
・バクテリア検出装置
・マリネリ容器
・SiPM
・光電子増倍管
・GM 管
・サーベイメータ
・車両放射線検知装置
・後方散乱 X 線非破壊検査装置
・X 線ポリキャピラリ
・アルミナ蛍光板
・圧電素子
・スーパーインシュレータ
・ベリリウム窓
・研究・工業用各種材料
　金属、プラスチック、
　セラミック、複合材料

仁木工芸株式会社

URL　：　http://www.nikiglass.co.jp
Email：　sales@nikiglass.com

東京支社　〒108-0073 東京都港区三田 3 丁目 9 番 7 号　TEL (03)3456-4700 (代)FAX (03)3456-3423
大阪営業所　〒592-0002 大阪府高石市羽衣 5 丁目 16-8　TEL (072)242-7611(代) FAX (072)242-7622

# イベント等のご案内

# 米国本部　年次大会のご案内

# 日本核物質管理学会（Institute of Nuclear Materials Management-INMM）について

## *核物質管理とは*

核物質は平和的な利用によりエネルギー資源として多くの利益が得られる一方、軍事的な用途への転用や、非国家主体による核テロへの悪用等、害悪をもたらすリスクを含んでいます。従って、原子力の平和利用を推進するためには、安全確保はもとより、このような核物質の不正利用の抑止、防止および対応のための制度的・技術的手段を含む核物質管理システム（Nuclear Materials Management System） の開発とその運用が不可欠です。

## *核物質管理学会とは*

核物質管理技術の開発と人材育成を目的に 1958 年に米国で創設された非営利団体で、米国国家核安全保障局、米国エネルギー省、米国国立研究所、国際原子力機関、ロシア物理・動力技術研究所、ヨーロッパ原子力共同体、日本原子力研究開発機構、韓国原子力研究所、電力事業者、大学等が参加する国際的な組織です。

INMM の主な研究分野には、軍備・軍縮、国際保障措置、核物質の計量および管理、核物質の分析・測定、核物質の不正使用や不正取引の抑止と対応手段としての核セキュリテイと核物質防護、核物質の輸送、廃棄物の処理処分のためのシステムや技術開発ならびに人材育成のための教育・訓練が含まれています。

現在、INMM は６つの米国内支部、11 の国際支部および 21 の学生支部により活発な学会活動を行っています。

1976 年に支部として創立された日本核物質管理学会（INMMJ）は世界最大の約 130 名の会員を擁しています。

## *主たる学会活動*

- 年次大会

学会では関連分野に関する研究発表と情報交換の場として年次大会を開催しています。

本部の年次大会は、毎年 7 月頃に米国内で開催され、900 名近い参加者の下に核物質管理の分野における著名人による講演、500 件以上の研究発表が行われるほか、学会の各種技術部会の会合、最新の測定機器、核物質防護関連機器、コンピュータソフトウェア等の企業展示、学生のためのキャリアフェア、表彰、学会員の資格認定、学会の年次総会等が開催されます。

日本核物質管理学会の年次大会は毎年秋に開催され、国内外関係者の特別講演、30 件以上の研究発表、ポスター発表、優秀論文表彰、日本支部年次総会等が開催されます。

- 学会では、年数回のワークショップ（研究会や技術セミナー等）を開催します。また、使用済燃料管理セミナー、INMM とヨーロッパ保障措置研究開発機構との合同ワークショップ等が定期的に開催されます。日本核物質管理学会ではタイムリーなテーマを採りあげ、年 4 回程度の研究会や技術セミナーとして開催しています。
- 学会誌・論文集

学会活動や核物質管理の最新情報が掲載された学会誌(Journal of Nuclear Materials Management)が年４回発行されます。また、学会ウエブサイトの会会員ページでは年次大会で発表された論文が公開されるほか学会活動をまとめた会報が掲載されます。

## *学会員*

原子力や核物質管理に興味を持っている人は誰でも入会し、学会活動に参加できます。学会には、一般会員、学生会員、賛助会員の他、学会員の核物質管理に関する知識レベルや学会への貢献度等によって、上級会員（Senior Member）やフェロー（Fellow）等の資格認定制度があります。

## *学会員の特典*

一般会員・学生会員

- 学会誌と年次大会論文集にウエブサイト上でアクセスできます。
- 学会が開催する年次大会、各種ワークショップ、セミナー等の開催案内が配布されます。
- 米国本部年次大会および日本核物質管理学会年次大会の参加に学会員割引が受けられます。
- 学会ホームページの会員ページにアクセスできます。
- 各種の学会活動を通じて核物質管理の専門家と知り合えます。
- 学会功労賞、優秀論文賞、優秀ポスター発表賞等の表彰が受けられます。
- 学生会員は、米国本部の学生会員表彰プログラムに参加することができます。
- 学生会員は、米国本部のメンター制度を活用できます。

賛助会員

- 参加口数１口あたり１名様に限り、年次大会に会員割引が適用されます。
- 年次大会、各種セミナー等の開催案内が配布されます。
- 日本核物質管理学会が刊行する核物質管理時報が配布されます。
- 学会が開催する年次大会、各種ワークショップ、セミナー等の開催案内が配布されます。
- 参加口数１口毎に日本核物質管理学会年次大会論文集が各１部配布されます。

## *学会費（2019 年 10 月 1 日現在）*

一般会員：　¥12,000
学生会員：　¥2,000
賛助会員：　１口¥100,000
（何れも入会金は不要）

## *入会方法等*

日本核物質管理学会のウエブサイト（http://www.inmmj.org）の入会案内から入会申込書（英語と日本語）をダウンロードし、所要事項を記入の上、日本核物質管理学会事務局あてにメール（jimukyoku@inmmj.org）または FAX（03-6371-5808）にて提出してください。

その他、学会についてのご質問は、03-6371-5830 にお願いします。

**是非この機会にご入会をご検討ください。**

改訂（6）171024

# 核物質管理学会（INMM）入会申請書

ご入会々員種別：一般会員 ☐　　学生会員 ☐　　どちらかに☑を入れて下さい。

- 入会申申請は「INMM Membership Application(英文)」も記入の上、本書と併せて日本核物質管理学会事務局に提出下さい。年会費のお支払等は登録完了後に別途ご連絡いたします。
- ①所属組織および②自宅住所等の両方を記入願います。

| 入会申請者氏名(ﾌﾘｶﾞﾅ)： | 入会申請日（西暦）： |
|---|---|

ご希望の連絡先・資料送付先に☑を入れて下さい。　①所属組織 ☐　②自宅住所 ☐

① 所属組織：

住所:　〒

所属組織名または学校名：

所属部課または所属学科：

役職名：

電話番号：　　FAX 番号：

E-mail：

②自宅住所等

住所：　〒

電話番号：　　FAX 番号：

E-mail：

その他学会への連絡事項等

核物質管理学会についてのお問い合わせ先
〒100－0011　東京都千代田区内幸町 2 丁目 2－3
日比谷国際ビル　日本原燃(株)内
電話：03-6371-5830　FAX：03-6371-5808
E-mail：jimukyoku@inmmj.org

INMM
TITUTE OF NUCLEAR MATERIALS MANAGEMENT

# Membership Application – JAPAN CHAPTER

Date:

First/Given Name: _____ Last Name: _____

Designation: _____ Job Title: _____

(e.g.Jr., III, PhD, MSc, etc.) (e.g. Engineer, Scientist, etc. If Currently student, indicate "Student")

Institution: _____

Street Address: _____

City: _____ ZIP/Postal Code: _____ Country: JAPAN

Phone: _____ Fax: _____

Email: _____

**Membership:** ☐ Regular $75 ☐ Student $30

**Type of Organization**

☐ Academia (Faculty/Staff)
☐ Academia (Undergraduate/Graduate Student)
☐ Commercial Utility
☐ Consultant/Research
☐ Equipment Manufacturer
☐ Government Contractor
☐ Government or International Agency
☐ Military
☐ Nuclear Material Processing
☐ Others

**Fields/Subjects of Expertise:** _____

**Job Description:** _____
(i.e. "Student" or a brief explanation of your professional responsibilities as related to your current job title)

**Total Number of Years Work Experiense in the field:** _____

**Please Number Your Top Three Area of Interest 1-3:**

___ ANSI Standards
___ Facility Operations
___ International Safeguards
___ Material Control & Accountability
___ Non-Proliferation & Arms Control
___ Nuclear Security and Physical Protection
___ Packaging, Transportation & Disposition

Membership in Other Societies: _____
(e.g. ESARDA, WINS, ANS, etc.)
Honors/Honorary Societies: _____
Other Experience or Training: _____
_____

**Indicate School**

Indicate Degree & Major: _____
Indicate Date Degree Obtained/Anticipated: _____
Collage or University: _____
Graduate School: _____
Post Graduate School: _____

# 第 40 回日本核物質管理学会年次大会プログラム委員会

| | |
|---|---|
| 委員長 | 中村　仁宣 |
| 副委員長 | 相楽　洋 |
| 委員 | 出町　和之 |
| 委員 | 長谷　竹晃 |
| 委員 | 中村　慎宮 |
| 委員 | 田崎　真樹子 |
| 委員 | 芝　知宙 |

日本核物質管理学会（INMMJ）事務局
〒100-0011
東京都千代田区内幸町二丁目２－３
日比谷国際ビル２F
日本原燃東京支社内 220 号
TEL 03-6371-5830
FAX 03-6371-5808