JAEA-Review
2011-025

第 22 回ふげん廃止措置技術専門委員会資料集

Document Collection of the 22nd Technical Special Committee on Fugen Decommissioning

忽那 秀樹　松森 亮　泉 正憲　林 宏一　東浦 則和

Hideki KUTSUNA, Akira MATSUMORI, Masanori IZUMI, Hirokazu HAYASHI and Norikazu HIGASHIURA

敦賀本部
原子炉廃止措置研究開発センター
Fugen Decommissioning Engineering Center
Tsuruga Head Office

July 2011

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（http://www.jaea.go.jp）
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構　研究技術情報部　研究技術情報課
〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2011

JAEA-Review 2011-025

第 22 回ふげん廃止措置技術専門委員会資料集

日本原子力研究開発機構　敦賀本部
原子炉廃止措置研究開発センター
忽那　秀樹[+]、松森　亮[*]、泉　正憲[+]、林　宏一[+]、東浦　則和

（2011 年 5 年 16 日　受理）

独立行政法人日本原子力研究開発機構（以下「原子力機構」という。）は、新型転換炉ふげん発電所の新型転換炉原型炉施設の廃止措置計画を平成 18 年 11 月 7 日に認可申請（平成 19 年 12 月 28 日一部補正）し、平成 20 年 2 月 12 日に認可を受けた。これに伴い、新型転換炉ふげん発電所を原子炉廃止措置研究開発センター（以下「ふげん」という。）に改組し、施設の解体撤去作業に着手するとともに、自らの廃止措置に関する技術の開発及びこれに必要な研究（以下「廃止措置技術開発」という。）を実施している。

この廃止措置技術開発を計画・実施するにあたり、「ふげん」を国内外に開かれた技術開発の場及び福井県が目指すエネルギー研究開発拠点化計画における研究開発拠点として十分に活用するとともに、当該技術開発で得られる成果を有効に活用することを目的として、原子力機構内外の有識者で構成される「ふげん廃止措置技術専門委員会」を設置している。

本稿は、平成 22 年 9 月 14 日に開催した第 22 回ふげん廃止措置技術専門委員会において発表した“廃止措置の状況”、“重水系機器を用いた放射性腐食性生物（CP）除染試験”、“管理データ評価システムの「ふげん」への適用”、“クリアランス制度運用に向けた準備状況”について、資料集としてまとめたものである。

原子炉廃止措置研究開発センター：〒914－8510　福井県敦賀市明神町 3 番地
＋ 技術開発部
＊（株）アトックス（2011 年 3 月まで技術開発部に所属）

Document Collection of the 22nd Technical Special Committee on Fugen Decommissioning

Hideki KUTSUNA+, Akira MATSUMORI*, Masanori IZUMI+, Hirokazu HAYASHI+
and Norikazu HIGASHIURA

Fugen Decommissioning Engineering Center
Tsuruga Head Office,
Japan Atomic Energy Agency
Myojin-cho, Tsuruga-shi, Fukui-ken

(Received May 16, 2011)

Japan Atomic Energy Agency applied for approval of decommissioning project of Fugen Power Plant on November 7, 2006 and licensed by safety authority on February 12, 2008. According to the approval, Fugen Power Plant was reorganized to Fugen Decommissioning Engineering Center and started dismantling removal work of the facilities. The technical development and researches concerning the decommissioning are being executed from that period.

In planning and carrying out our decommissioning technical development, "Technical special committee on Fugen decommissioning", which consists of the members well-informed, is established, aiming to make good use of Fugen as a place for technological development which is opened inside and outside the country, as the central point in the energy research and development base making project of Fukui prefecture, and to utilize the outcome in our decommissioning to the technical development effectively.

This report compiles presentation materials "Current Situation of Fugen Decommissioning"," Radioactive Corrosion Products (CP) Decontamination Experiment with Heavy Water System Equipment"," Application of management data evaluation system to Fugen"," Preparatory Situation for Operation of Clearance System" of the 22nd Technical special committee on Fugen decommissioning which held on September 14, 2010.

Keywords: FUGEN, Decommissioning, Radioactive Corrosion Products, Decontamination, PRODIA, Clearance, Radioactive Concentration, Technical Special Committee

+ Technology Development Department
* ATOX Co., Ltd (Technology Development Department until March 2011)

目　次

1. ふげん廃止措置技術専門委員会（第 22 回） 1
1.1　議事次第 1
1.2　委員構成 2

2. 廃止措置技術開発報告 3
2.1　廃止措置の状況 4
2.2　重水系機器を用いた放射性腐食性生物（CP）除染試験 11
2.3　管理データ評価システムの「ふげん」への適用 20
2.4　クリアランス制度運用に向けた準備状況 27
2.4.1　放射能濃度の評価方法の検討 27
2.4.2　クリアランスモニタ性能データ取得 36

3. 講評 43

Contents

1. The 23rd Technical Special Committee on Fugen Decommissioning 1
1.1 Agenda 1
1.2 Members of the Technical Special Committee on Fugen Decommissioning 2

2. Decommissioning Technology Development Report 3
2.1 Current Situation of Fugen Decommissioning 4
2.2 Radioactive Corrosion Products (CP) Decontamination Experiment with Heavy Water System Equipment 11
2.3 Application of management data evaluation system to Fugen 20
2.4 Preparatory Situation for Operation of Clearance System 27
2.4.1 Examination of Method of Evaluating Radioactive Concentration 27
2.4.2 Acquisition of Performance Data of Clearance Monitor 36

3. Review 43

This is a blank page.

1. ふげん廃止措置技術専門委員会(第 22 回)

1.1 議事次第

第 22 回ふげん廃止措置技術専門委員会の議事次第を表１に示す。

表1 第 22 回ふげん廃止措置技術専門委員会 議事次第

第 22 回 ふげん廃止措置技術専門委員会
議 事 次 第

1. 開催日時　　平成 22 年 9 月 14 日　13：30～16：00

2. 開催場所　独立行政法人日本原子力研究開発機構
　　東京事務所　第１会議室

3. 出席者
（委員）石榑主査、石倉委員、浦上委員、山内代理（苅込委員代理)、新保委員、
　　田中委員、仁木委員、山本委員、天野委員、鈴木委員
（ふげん）西村所長、森下次長　田尻計画管理課長 他

4. 議題
(1) 開会挨拶
(2) 委員及び機構出席者の紹介
(3) 前回委員会の議事要旨の確認
(4) 廃止措置の状況
(5) 重水系機器を用いた放射性腐食性生物(CP)除染試験
(6) 管理データ評価システムのふげんへの適用
(7) クリアランス制度運用に向けた準備状況
(8) ご講評他
(9) 次回の委員会について

1.2 委員構成

ふげん廃止措置技術専門委員会の構成員を表２に示す。

表2 ふげん廃止措置技術専門委員会 構成員

主査	石榑 顕吉	（社）日本アイソトープ協会　常務理事
委員	井口 哲夫	名古屋大学　大学院　工学研究科　量子工学専攻　教授
委員	石倉 武	(財)エネルギー総合工学研究所　副参事　工学博士
委員	浦上 学	関西電力(株)　原子燃料サイクル室 サイクル環境グループ　チーフマネジャー
委員	苅込 敏	日本原子力発電(株)　廃止措置プロジェクト推進室　室長
委員	新保 仁	東京電力(株)　原子燃料サイクル部 廃棄物設備グループ グループマネージャー
委員	田中 光雄	福井工業大学　工学部　原子力技術応用工学科　教授
委員	友澤 史紀	東京大学名誉教授
委員	仁木 秀明	福井大学　大学院　工学研究科 原子力・エネルギー安全工学専攻　教授
委員	山本 正史	(公財)原子力環境整備促進・資金管理センター 基準・規格調査研究プロジェクト チーフ・プロジェクト・マネジャー
委員	天野 英俊	(独)日本原子力研究開発機構　東海研究開発センター 原子力科学研究所　バックエンド技術部長
委員	鈴木 庸氏	(独)日本原子力研究開発機構　敦賀本部 レーザー共同研究所　レーザー技術利用推進室長

（以上１２名）

2. 廃止措置技術開発報告

本章は、第22回ふげん廃止措置技術専門委員会における発表資料を取りまとめたものである。

2.1 廃止措置の状況

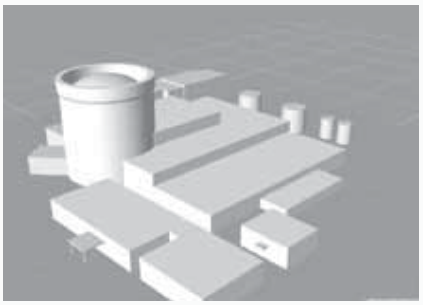
Fugen Decommissioning Project

廃止措置の状況

技術開発部 計画管理課 忽那 秀樹

報告概要

- 平成22年度作業計画・実績
- 平成22年度解体撤去・汚染の除去工事
- 「研究開発段階炉等の廃止措置技術の研究開発等」事業への協力
- 高経年化調査研究事業
- 国際会議等報告
- 地元における取組みと連携

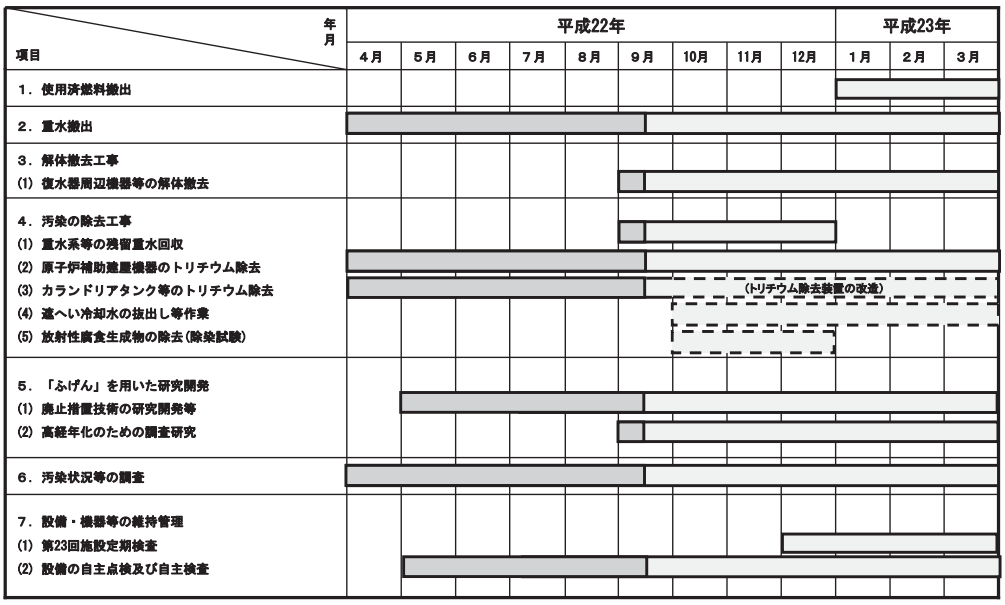


ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-3-1

Fugen Decommissioning Project

平成22年度作業計画・実績



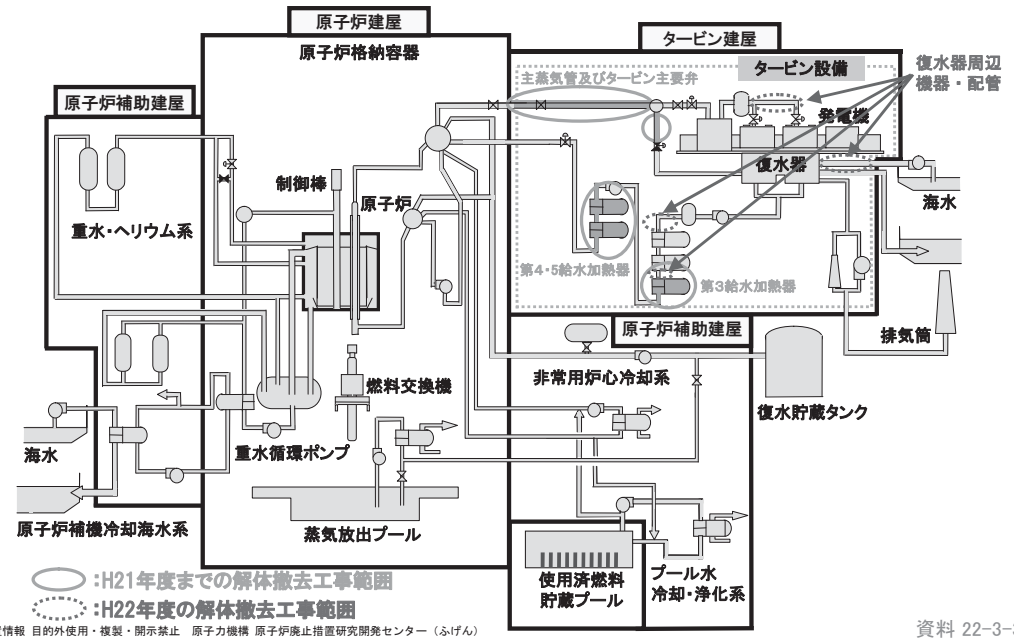
□:計画 ■:実績 ⸢⸣:検討中

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-3-2

Fugen Decommissioning Project

解体撤去工事の実施範囲

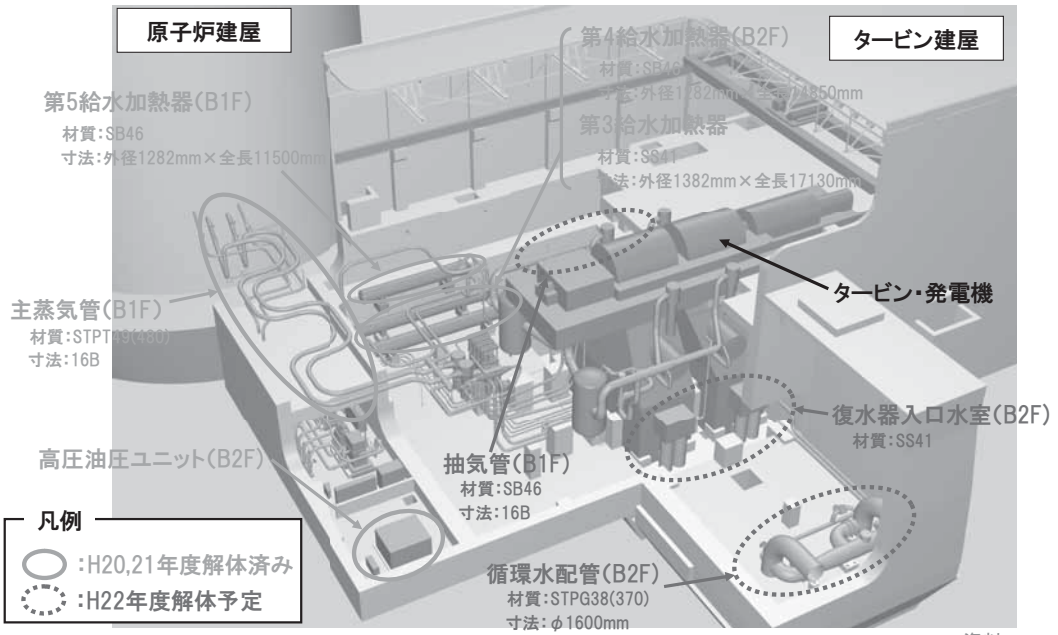


ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-3-3

Fugen Decommissioning Project

解体撤去工事範囲図



ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-3-4

Fugen Decommissioning Project

復水器周辺機器等の解体撤去工事概要

工事対象施設・設備

○復水器
- ●冷却水入口水室

○配管類　他
- ●復水配管
- ●抽気配管
- ●クロスアラウンド配管
- ●復水器冷却用海水配管
- ●タービン補機冷却系海水配管
- ●サポート、弁、電気・計装品 等

解体撤去物等の予想発生量

○金属、保温材
約120トン

○基礎コンクリート、ウエス、ビニールシート等
約10トン

解体作業フロー

※1 解体撤去物等の管理

- 作業準備 ― 養生、足場、資機材準備、供用終了・アイソレーション確認、突起物・狭隘箇所の調査及び安全確保対策
- 解体撤去範囲の識別 ― カラーテープ等でマーキング
- 保温材撤去 ― 保温材と外装板を分別
- 電気・計装品の取外し ― 解線、取外し
- 復水器・配管類の解体撤去 ― 機械的切断（バンドソー、セーバーソー、チップソー等）／熱的切断（ガス溶断、ガソリン酸素溶断、プラズマ溶断）
- 床面等補修塗装 ― モルタル補修、塗装
- 後片付け ― 養生、足場、資機材片付け

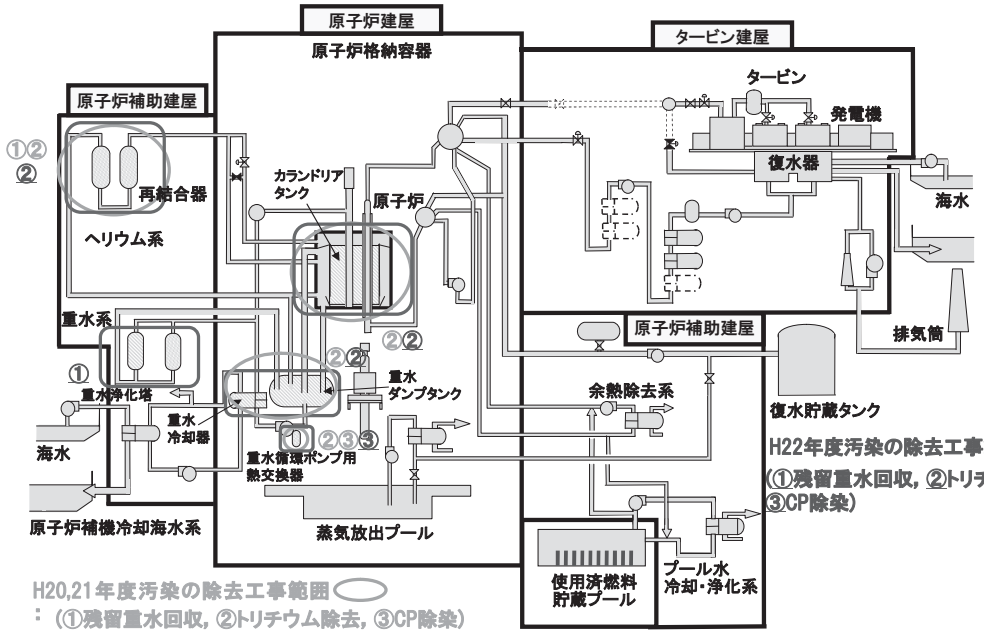
※1：放射能レベル区分・機器種別等に応じて識別（管理シール貼付）、解体撤去物等の管理に係る帳票の作成、一時保管措置

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止　原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-3-5

Fugen Decommissioning Project

汚染の除去工事の実施範囲



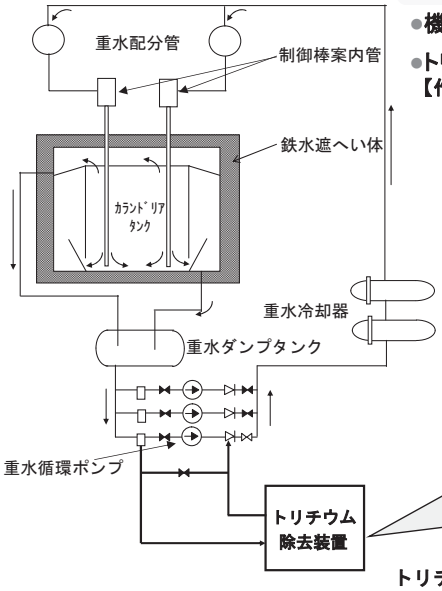
ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止　原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-3-6

Fugen Decommissioning Project

原子炉建屋でのトリチウム除去作業

＜汚染の除去範囲＞



原子炉建屋内の重水系の推定残留重水量：約600リットル

- 機構職員の直営作業で実施
- トリチウムを含む約19リットルの重水を回収（平成22年8月末現在）
  【作業期間：約2ヶ月、1日の平均作業時間：約4時間、延べ作業時間：約114時間】

トリチウム除去作業

【仕様】
除湿形式：乾式除湿
（ハニカムロータ式）
処理能力：500m³/h
装置出口露点：約-20℃

トリチウム除去装置（設置場所：原子炉建屋地下２階）

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-3-7

Fugen Decommissioning Project

「研究開発段階炉等の廃止措置技術の研究開発等」事業への協力

研究開発課題

- ■クリアランスレベル以下を目指した除染技術の調査
- ■効果的な除染のための元素(核種)分析調査

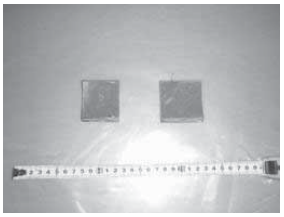
※文部科学省が原子力安全技術センターに委託して実施

「ふげん」にて実施する作業

- ➢試料の採取・加工
  除染試験に供する試料として、供用を終了した設備から採取して試験片に加工
- ➢物理除染試験
  「ウエットブラスト法」により、「ふげん」の系統で除染性能を把握していない系統の配管等の試料を用いた除染性能試験
- ➢化学除染試験
  「有機酸法」により、「ふげん」の系統で除染性能を把握していない系統の配管等の試料を用いた除染性能試験

試料採取作業
（亜鉛注入材料試験装置）

試料加工作業



除染試験試料（5cm×5cm）

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-3-8

Fugen Decommissioning Project

高経年化調査研究事業

事業目的　原子力発電所の高経年化対策の充実を目的として、長期運転に供した「ふげん」の機器・構造物の実機材料データを採取して、保全管理技術の妥当性検証等の研究を行う

安全研究センター

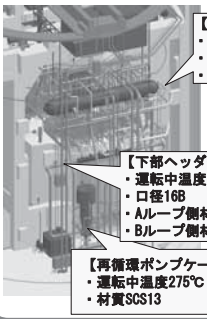
高経年化調査研究の評価
・委員会の運営

連携

ふげん

・材料試料の採取作業
・データ採取作業

(1)ステンレス鋳鋼の熱時効脆化調査
・再循環ポンプ、大型弁が対象



【下部ヘッダ注水弁】
・運転中温度＜40℃
・口径12B
・材質SCS13

【下部ヘッダ逆止弁】
・運転中温度275℃
・口径16B
・Aループ側材質SCS16A
・Bループ側材質SCS13

【再循環ポンプケーシング】
・運転中温度275℃
・材質SCS13

フェライト測定

脆化機構の検証
メゾ・ミクロスケールの現象を考慮した脆化機構のモデル化

機械特性試験
引張・硬度・衝撃・破壊靭性試験

硬化機構の検証
硬化に寄与する因子

破壊モードの検証
硬化→脆化へと至る機構の解明

α相の硬化
スピノーダル分解
析出物(G相など)
ひずみ時効

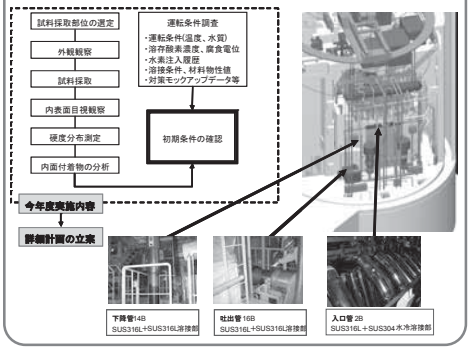
新たな知見

粒界組織
フェライト量とその分布
粒界モード(αγ界面の整合性)

鋳造条件
化学成分・コンタミ(Nなど)
粒界濃度

熱時効条件
温度・時間

(2)SCC対策の検証



ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止　原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

Fugen Decommissioning Project

高経年化分析室(ホットラボ)の運用状況(福井県エネルギー研究開発拠点化計画との連携)

目的

エネルギー研究開発拠点化計画における「安全・安心の確保」への取組みの一環として、高経年化対策研究を推進するため、原子力機構と関西電力が相互に協力して、原子力発電所で使われていた機器や構造物などの劣化状況を分析できる装置を備えた高経年化対策研究施設を設置し、高経年化対策に関する研究を推進する

設置場所:

ふげん内　重水精製建屋第Ｉ棟の1階の一画に整備

スケジュール:

H21　3月　整備工事着手
H21　10月　分析機器等設置
H21　12月　設置完了～分析機器調整
H22　4月　開所式
7月　機構内の研究に使用開始

・PWR模擬環境でのステンレス鋼の応力腐食割れ(SCC)研究
（安全研究センター、ふげん、原子力基礎工学研究部門）
・「ふげん」実機材における熱時効脆化の研究
（安全研究センター、ふげん）
・PWRの蒸気発生器入口管台(SCC発生材)の実試料を用いた研究　（関西電力、原子力安全システム研究所、ふげん）

開所式 (H22.4.22)

「主な分析装置」

集束イオン／電子ビーム加工観察装置(FIB-SEM)

(分析試料の加工状況)

原子プローブ電界イオン顕微鏡(APFIM)

走査透過電子顕微鏡(STEM)

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止　原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

Fugen Decommissioning Project

OECD/NEA技術諮問グループ会議(TAG-48)

OECD/NEA廃止措置協力計画のもとで定期的に開催されるTAG会議において、各国の廃止措置状況に係る意見交換や廃止措置関連施設の調査を通して継続的に情報を収集

- 開催期間：平成22年5月17日(月)～21日(金)
- 開催場所：スウェーデン ストックホルム

○「ふげん」は、第5給水加熱器の解体実績、廃止措置段階における設備の維持管理について報告
○ ドイツ、フランス等の原子炉施設や核燃料サイクル施設の最新廃止措置状況について情報収集
○ Studsvik社の研究用原子炉の廃止措置状況、金属溶融施設、廃棄体中間施設等の現地を調査
金属溶融施設では、海外を含めた発電所から大型の蒸気発生器(SG)等も受入れ、除染・溶融を事業化
(溶融後はクリアランスでフリーリリース)

WAGR(ウィンズケール改良型ガス冷却炉33MWe:イギリス)
・1981年に運転終了
・1983年から廃止措置を開始
・2010年には生体遮蔽を残し、原子炉圧力容器とその周辺の解体を完了予定
・生体遮へい体内の高線量の鉛直配管を対象にカメラによる配管内部のクラッド付着状態等の汚染状況調査を実施中

(WAGR)

ユーリッヒ(実験用高温炉 440MWe:ドイツ)
・1988年に運転終了
・2013年に廃止措置完了予定
・原子炉容器の撤去準備として、原子炉容器の周辺設備の解体とブラスト除染等を実施中
・原子炉容器を中間貯蔵する施設が完成し、2010年に許可を取得

Melusine(プール型研究炉:フランス)
・1993年に運転停止
・1994年から密閉管理処置の後、廃止措置を進行中
・除染及び解体は、ほぼ終了
・2009年6月に規制当局の検査（サーベイ等）を受け、2010年内に施設のライセンスを失効する予定

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-3-11

Fugen Decommissioning Project

英国重水炉(SGHWR)への廃止措置状況調査(1/2)

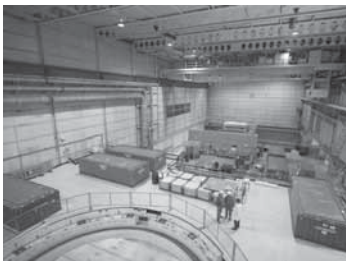
英国・原子力廃止措置機関(NDA)との「放射性廃棄物管理と廃止措置の分野における協力協定」のもとで、「ふげん」から技術者１名をSGHWRへ派遣し、解体撤去等に関する調査や情報収集を実施

- 派遣先:英国、ドーセット州、ウィンフリスサイト(SGHWR)
- 派遣者：ふげん技術者1名
- 派遣期間：平成22年5月4日～7月30日

【SGHWRの状況】 (炉型：重水減速沸騰軽水冷却圧力管型炉、電気出力：100MW、運転期間：1967～1990)

● 2007年までに第２次格納施設内にあるﾀｰﾋﾞﾝ・給水系や燃料取扱系設備の解体、燃料貯蔵ﾌﾟｰﾙの除染等の解体撤去を完了
● 英国の廃止措置を管理しているNDAは、緊急性の観点からセラフィールドの廃止措置に予算を集中化すると判断し、SGHWRについては2023年まで設備の維持管理を行い、2024年から第１次格納施設内にある原子炉本体及び主冷却系の設備の解体に着手する予定

SGHWR外観図



SGHWR施設内

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

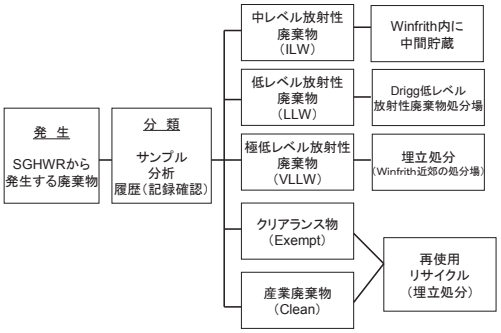
資料 22-3-12

Fugen Decommissioning Project

英国重水炉(SGHWR)への廃止措置状況調査(2/2)

第2次格納施設の解体により発生した廃棄物量

廃棄物区分	重 量
低レベル放射性廃棄(LLW)物	約2400t
極低レベル放射性廃棄(VLLW)物	約60t
クリアランス、産業廃棄物　等	約500t



SGHWRから発生する廃棄物の処分の流れ

■SGHWRがあるWinfrithサイトでは、廃棄物は中レベル（ILW)、低レベル（LLW)、極低レベル（VLLW)、クリアランス対象物（Exempt)、産業廃棄物（Clean)に区分

■ILW（主に原子炉周り）は、英国自体に処分場が決定されておらず、当面はWinfrithサイトに保管予定

■LLWは、英国中部にあるDrigg低レベル放射性廃棄物処分場（コンクリートピット処分場）に処分

■VLLWは、Winfrith近郊の埋立処分場に処分

■Exempt、Cleanの支持構造物や階段等はサイト内で再使用し、ポンプやタンク等は他の産業プラント等で利用するためにリサイクルを行い、コンクリートは埋立て処分

■原子力施設からのリサイクル品については、比較的円滑に地元住民に受け入れられた

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止　原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-3-13

Fugen Decommissioning Project

地元における取組みと連携

原子力機構の地域連携協力への取組み

技術課題解決促進事業(公募型事業)

◆福井県の「エネルギー研究開発拠点化計画」の重点施策として、県内企業との連携を更に強化し、県内企業の原子力産業への参入を支援していくことを目的

◆原子力機構の抱える研究課題等の解決に向け、予め実用化への成立性を見極める事業として、平成22年度に試作・調査を実施

○オープンセミナーの開催

■ふげん関連の研究課題

・配管内残留液体の回収治具の試作・製作
・解体物の遠隔細断用治具の試作・製作
・灰化樹脂のセメント混練固化調査
・クリアランス金属の再生利用製品の試作調査

■参加者

・5/27　敦賀会場(ｱｸｱﾄﾑ)　57名
・5/28　福井会場(福井商工会議所)　55名　合計112名

敦賀会場の状況

福井会場の状況

福井大学との原子力施設の廃止措置に関する共同研究

◆作業計画の策定で重要となる最適化手法に係る研究

平成22年度

第1･2給水加熱器の様な設置場所での解体作業が困難な場合の大型機器の撤去にどの様なシナリオが効率的か

⇩ 高所作業などの作業性を考慮

作業リスク、総人工数、二次廃棄物発生量などをもとに、意思決定法によるシナリオを検討

地元産業界の取組み

敦賀商工会議所「廃止措置研究会」

◆敦賀商工会議所が地元企業の技術力向上・蓄積のために調査研究を実施中

◆「ふげん」は、廃止措置事業の紹介等を実施

【平成22年度活動計画】

解体･除染分科会

・原子炉廃止措置現場(ふげん等)の視察･研修　等

再利用分科会

・解体金属の再利用に関する調査　等

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止　原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

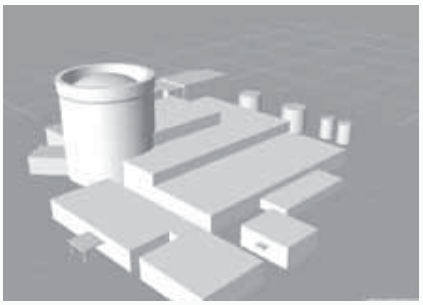
資料 22-3-14

重水系機器を用いた放射性腐食性生物(CP)除染試験

技術開発部 開発実証課 松森 亮

報告概要

- 目的及び目標
- 背景
- 除染方法
- 除染装置構成
- 除染状況
- まとめ
- 今後の予定



ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

目的及び目標

【目 的】

◆被ばく低減

除染による作業環境の線量率低下により、解体作業に係る放射線作業従事者の被ばく線量を低減する

◆知見の取得

除染効果等の確認を行い、得られた知見から重水系機器への適用の可否の見通しを立てる

【目標】

機器表面から1m離れた箇所での線量当量率を0.1mSv/h以下とする

【実施時期】

平成21年1月～3月

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

Fugen Decommissioning Project

解体作業に係る被ばくと汚染除去実施内容

■解体作業に係る被ばく

・重水の放射化により生成されるトリチウム ⇒ 内部被ばく

・機器に付着している放射性腐食生成物 ⇒ 外部被ばく

■汚染除去実施内容

残留重水回収

↓

トリチウム除去

↓

放射性腐食生成物(CP)除去

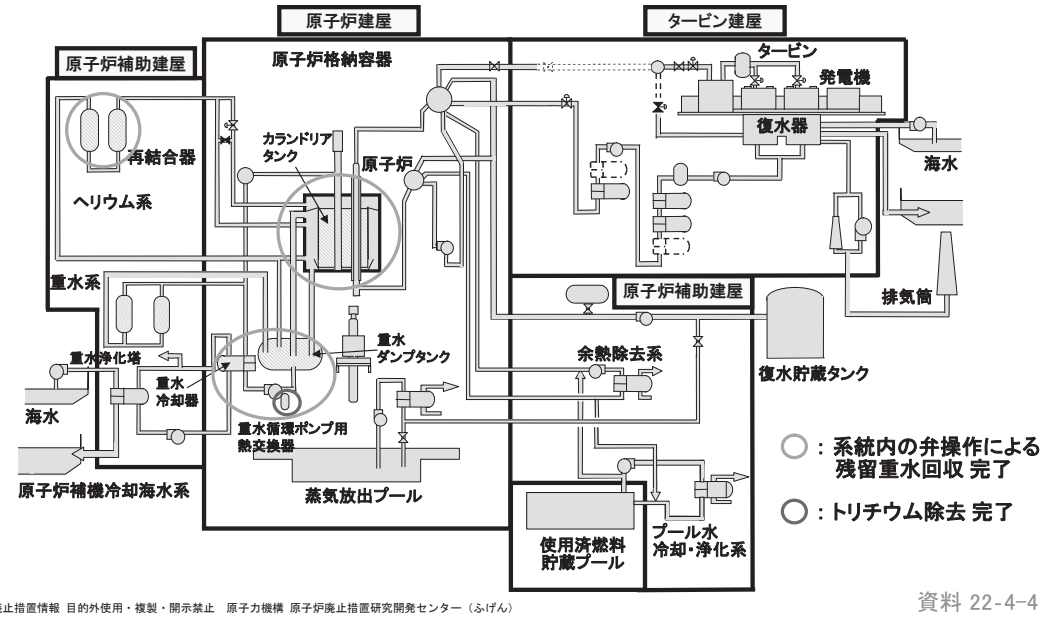
ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-4-3

Fugen Decommissioning Project

汚染の除去工事実績

汚染の除去工事実績(平成 20年度末時点)



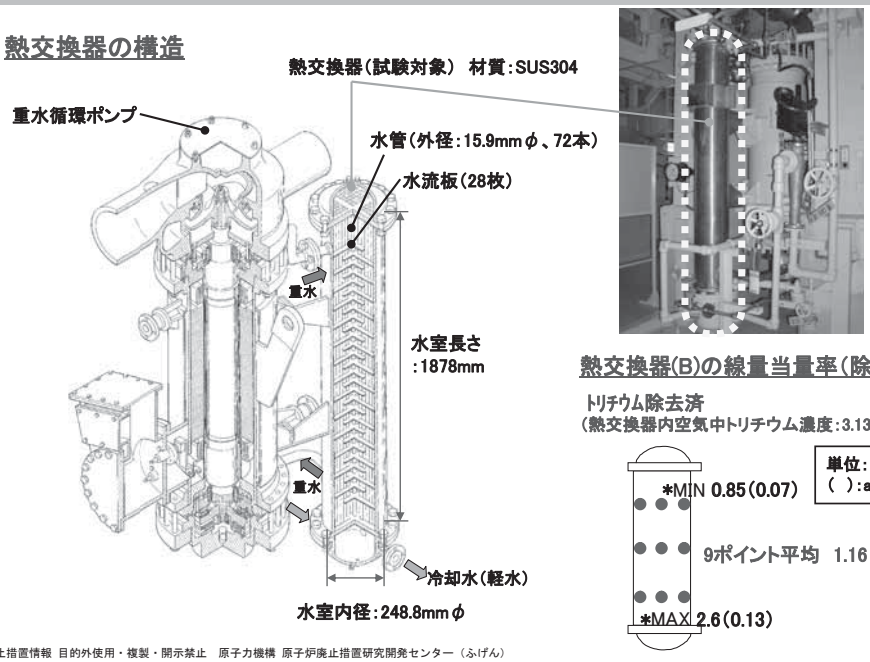
ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-4-4

Fugen Decommissioning Project

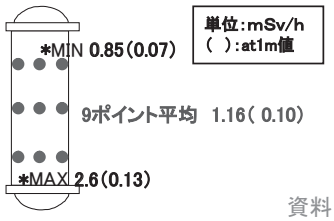
重水循環ポンプ用熱交換器の構造

熱交換器の構造



熱交換器(B)の線量当量率（除染前）

トリチウム除去済
（熱交換器内空気中トリチウム濃度：3.13E-01Bq/cm³）



ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-4-5

Fugen Decommissioning Project

除染方法選択理由

・原子炉運転中の重水系は、過酸化重水素が2～10ppm残存し、酸化雰囲気となっていることから、水素注入していないプラントと同様にクロム含有率が低く、還元除染法で十分な除染効果が得られる。

・重水浄化系配管を用いたCP除染ラボ試験*1において、DF9.7を得ている。この結果は、被ばく低減目的としては十分な効果である。

*1：除染法：還元除染法、除染剤：KD207（シュウ酸系）2000ppm、除染温度：90℃、除染ステップ：1サイクル6時間を2サイクル

●還元除染法
●還元剤 ： シュウ酸 2000ppm
●除染温度 ： 90℃
●除染時間 ： 1サイクル最大6時間、最大3サイクル

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-4-6

Fugen Decommissioning Project

除染作業フロー

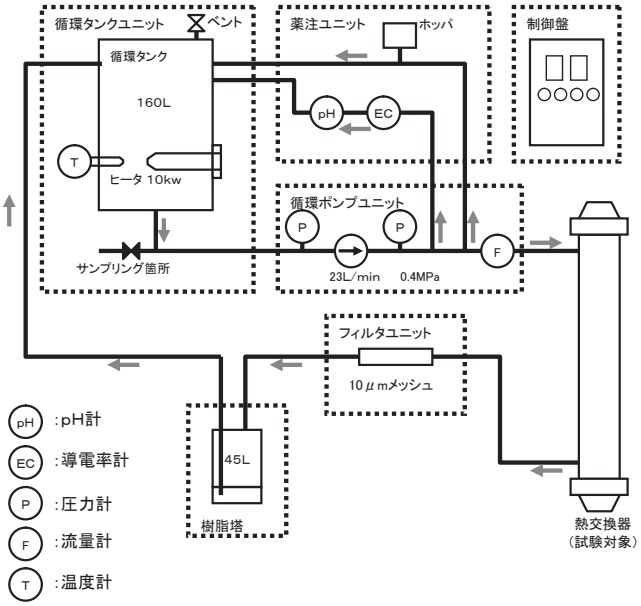
① 水洗（常温純水循環） 1時間
↓
② 昇温（90±5℃） 4時間
↓
③-1 薬注（2000±200ppm） 1時間
↓
③-2 除染 5時間（薬注時間を含む）
↓
④-1 除染液放冷 12時間
↓
④-2 浄化（カチオン樹脂） 100分間
↓
⑤ 浄化（アニオン・カチオン混合樹脂）75分間
↓
⑥除染液排水 2.5日間

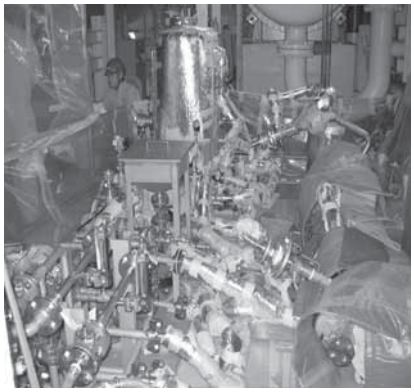
ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-4-7

Fugen Decommissioning Project

除染装置構成





イオン交換樹脂仕様

種類	品名	使用量
カチオン樹脂	SK1B（H形）	45L
混合樹脂	SK1B（H形）	22.5L
	SA10A（OH形）	22.5L

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-4-8

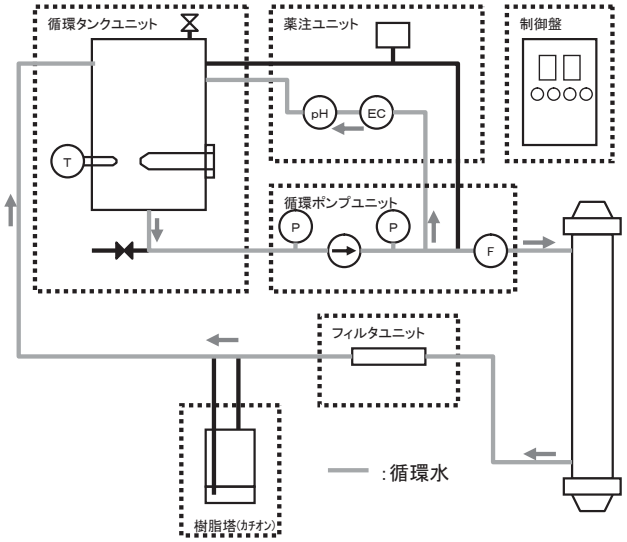
Fugen Decommissioning Project

①水洗

操作
常温の循環水(純水)を循環する。

結果
●70分間循環
●循環水中の放射能濃度
1.93E-01Bq/cm³ (Co-60)
●フィルタの表面線量当量率上昇なし

通水状態図



ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター(ふげん)

資料 22-4-9

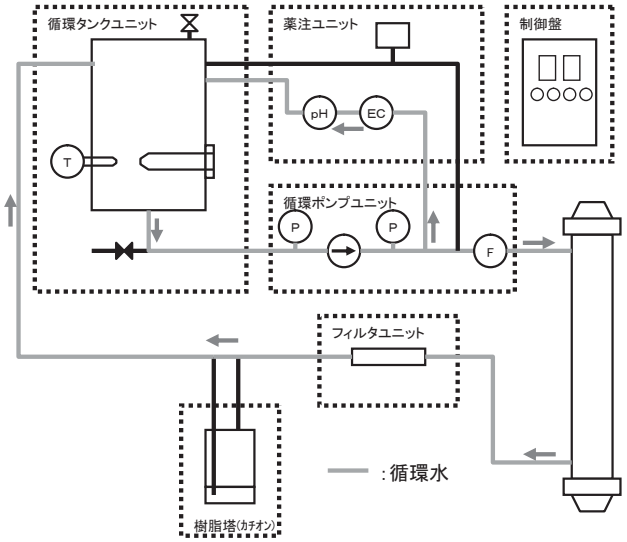
Fugen Decommissioning Project

②昇温

操作
循環水(純水)温度を90±5℃ まで昇温する。

結果
●所要時間4時間
●循環水中の放射能濃度
1.93E-01Bq/cm³⇒3.28E+01Bq/cm³
(Co-60)
●フィルタの表面線量当量率上昇なし
●樹脂塔の表面線量当量率 1.3mSv/h
(循環水温度が60℃となるまでの2時間通水)

通水状態図



ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター(ふげん)

資料 22-4-10

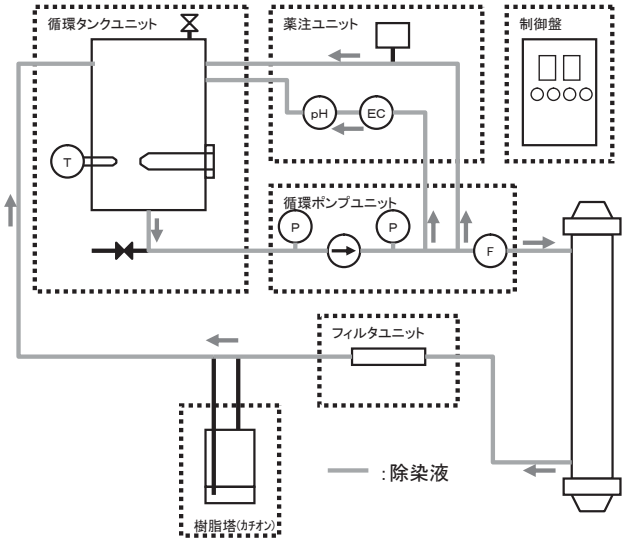
Fugen Decommissioning Project

③還元除染

操作
　シュウ酸濃度を2000±200ppmに調整し、除染液温度を90±5℃で維持しながら循環する。

結果
●除染液中の放射能濃度
3.28E+01Bq/cm^3⇒2.35E+02Bq/cm^3
（Co-60）
　除染開始2時間以降、平衡となったため、5時間で除染を終了
●熱交換器の表面線量当量率
最大値2.6mSv/h⇒1.6mSv/h
●目標『機器表面から1m離れた箇所での線量当量率0.1mSv/h以下』達成
●フィルタ表面線量当量率上昇なし
●樹脂塔の表面線量当量率
1.3mSv/h⇒1.5mSv/h
（除染液温度が60℃となるまでの1時間のみ通水）

通水状態図



ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止　原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-4-11

Fugen Decommissioning Project

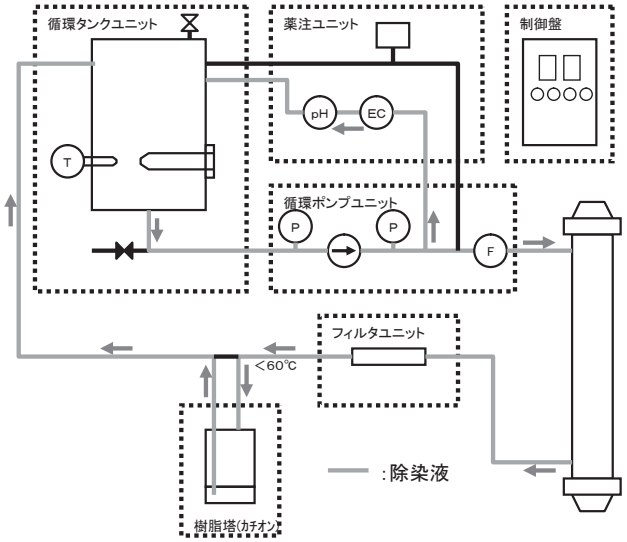
④除染液浄化（カチオン樹脂）

操作
　除染液温度が60℃以下となるまで放冷し、樹脂塔表面線量が平衡 となるまで循環する。

結果
●100分間循環
除染液中の放射能濃度
2.59E+02Bq/cm^3 ⇒ 5.04E+00Bq/cm^3
（Co-60）
●樹脂塔の表面線量当量率
1.5mSv/h⇒2.0mSv/h

◆本ステップ終了時、イオン交換樹脂漏えいの不適合が発生したため、作業を一時中断してこの状態での除染結果の評価を実施
◆除染目標『機器表面から1m離れた箇所での線量当量率0.1mSv/h以下』を達成していたため、1サイクルで除染を終了

通水状態図



ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止　原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-4-12

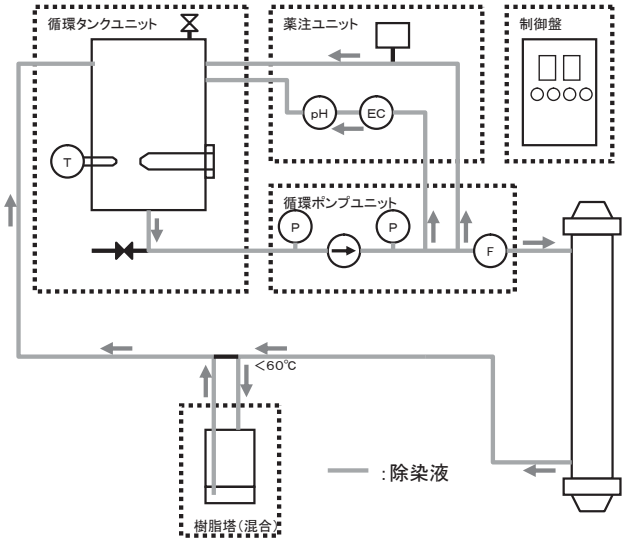
Fugen Decommissioning Project

⑤除染液浄化(ｱﾆｵﾝ･ｶﾁｵﾝ混合樹脂)

操作
除染液の導電率が50μS/cm未満(液体廃棄物処理系への排水基準)となるまで循環する。

結果
- 75分間循環⇒導電率＜50μS/cm
- 除染液中の放射能濃度
  5.04E+00 Bq/cm^3⇒2.42E+00Bq/cm^3
  (Co-60)
- 樹脂塔の表面線量当量率
  0.1mSv/h

通水状態図



ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター(ふげん)

資料 22-4-13

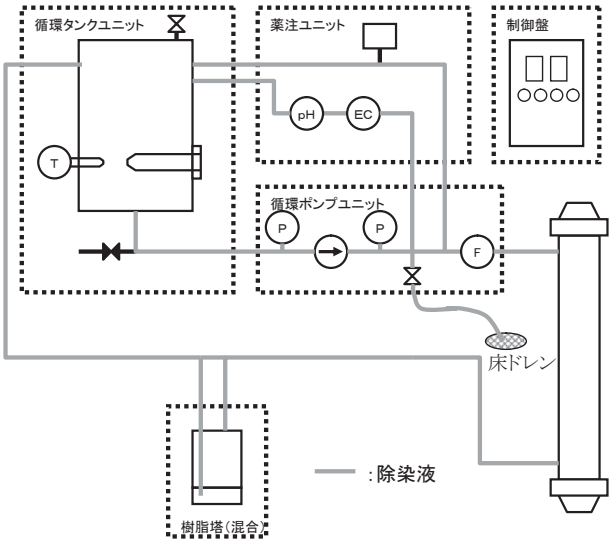
Fugen Decommissioning Project

⑥排水

操作
循環ポンプユニットのドレン弁に排水ホースを接続し、全体の水を既設の液体廃棄物処理設備の床ドレンへ排水する。その後、各ユニットを分離しながら、残液をポリ容器等に抜出し、機器ドレンへ排水する。

結果
- 排水量:235リットル
- 所要日数:2.5日

通水状態図(全体排水時)



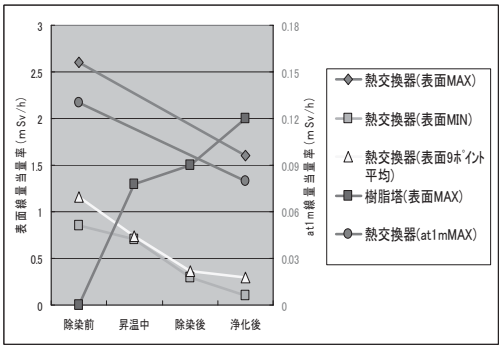
ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター(ふげん)

資料 22-4-14

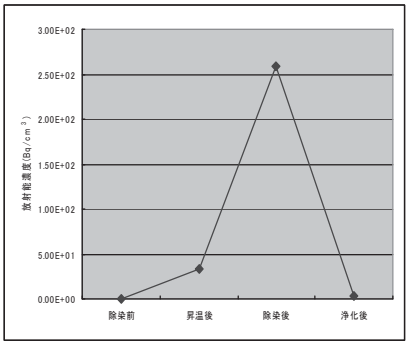
Fugen Decommissioning Project

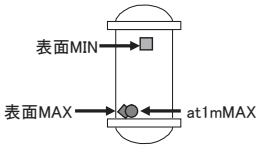
線量当量率及び除染液中の放射能濃度の変化

線量当量率の変化

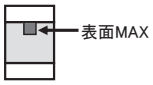


除染液中の放射能濃度の変化





重水循環ポンプ用
熱交換器(B)



カチオン樹脂塔

DF値

9ポイント表面平均線量当量率 (mSv/h)		DF値
除染前	浄化後	
1.16	0.3	3.9

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-4-15

Fugen Decommissioning Project

廃棄物発生量

種類および内容		発生量	線量当量率 (mSv/h)	備考
固体	イオン交換樹脂（カチオン樹脂）	45L	樹脂塔表面最大 2.0	保管中（別途、処理予定）
	イオン交換樹脂（アニオン・カチオン混合樹脂）	45L	樹脂塔表面最大 0.01	保管中（別途、処理予定）
液体	廃水	235L	＜0.001	
二次廃棄物	可燃物	50kg	＜0.001	ポリシート等
	その他	10kg	＜0.001	濡れウエス等

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-4-16

Fugen Decommissioning Project

まとめ

●シュウ酸（2000ppm）による還元除染法を重水循環ポンプ用熱交換器の化学除染に適用し、除染回数1サイクル（5時間）の除染により、DF3.9を得た
また、除染目標「機器表面から1m離れた箇所での線量当量率0.1mSv/h以下」を達成した

【ラボ試験*1(DF9.7)と比較して除染効果が低かった要因】
①還元除染時間の不足
②還元除染ステップで、樹脂塔に通水する除染液を冷却できない装置を用いたことから、カチオン樹脂塔に通水しながらの還元除染をしなかった
⇒除染液中のシュウ酸鉄が増加し、鉄の溶出が抑制された
⇒除染液中のシュウ酸鉄がシュウ酸に再生されず溶出が抑制された

＊1：除染ステップ：1サイクル6時間を2サイクル実施

●シュウ酸に過酸化水素を添加して分解する過程で、突沸が発生することがコールド試験で確認されていたため、シュウ酸をイオン交換樹脂で処理したが、廃棄物低減の観点から、分解処理についても検討する必要がある

●作業日数：19日間
総工数：182工数
総被ばく線量：4.96人・mSv

●還元除染法の重水系機器への適用の可否については、次回のCP除染において、DF、適正樹脂量等の確認を行い、見通しを立てる

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-4-17

Fugen Decommissioning Project

今後の予定

①除染方法簡略化の検討

・ 樹脂性能（交換容量）の温度依存性の確認

②廃棄物低減のためのシュウ酸分解方法の検討

・分解過程で発生する突沸事象の要因調査

③今後のCP除染の予定

・重水循環ポンプ用熱交換器（A）及び（C）について、平成22年度にCP除染を実施し、DF、適正樹脂量等を確認する予定

＊①、②はコールド試験で確認

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-4-18

Fugen Decommissioning Project

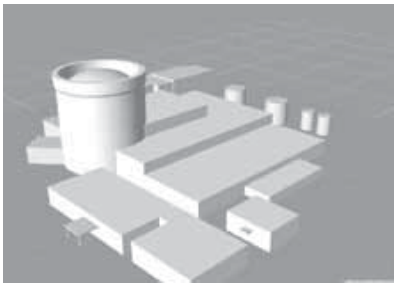
2.3 管理データ評価システムの「ふげん」への適用

管理データ評価システムの「ふげん」への適用
-平成21年度作業実績データの評価及び分析-

報告概要

技術開発部 開発実証課 泉 正憲

- ■目的及び当面の目標
- ■前回報告の概要
- ■給水加熱器解体評価式（粗断）の検討
- ■第5給水加熱器の解体（細断）・実績
- ■給水加熱器解体評価式（細断）の検討
- ■まとめと今後の予定



ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-5-1

Fugen Decommissioning Project

目的及び当面の目標

目　　的

管理データ評価システム※を用いることにより、各作業項目における人工数や被ばく線量、廃棄物量等を算出し、解体作業の作業計画の立案や解体コストの評価に反映する。

当面の目標

解体撤去工事の作業実績データを収集・分析して、従来の評価式を検証、改善もしくは新たな評価式を構築し、本格的解体における管理データ（人工数、被ばく線量、廃棄物量等）の評価精度の向上を図る。

高度化

将来的な展望

原子炉施設の廃止措置における管理データの評価に活用

※管理データ評価システム：PRODIA (PROject Management Data Evaluation Code for DIsmantling Actvities)

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-5-2

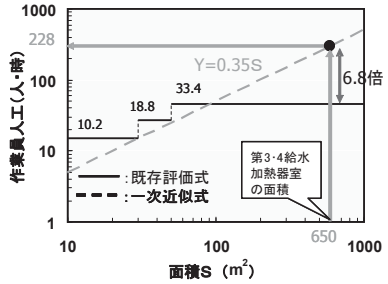
Fugen Decommissioning Project

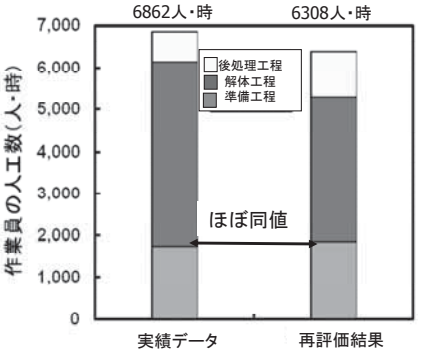
前回報告の概要(第20回報告)

- 第3・4給水加熱器室内の解体作業での準備・後処理において、作業面積の関数(一次近似式)として評価式を整備

■一次近似式による評価式の検討

(準備工程における解体範囲設定の例)





作業員の人工数の再評価結果

JPDRの評価式【準備・後処理工程】

Y(人・時)＝a_{Wi}

評価式(一次近似式)【準備・後処理工程】

Y(人・時)＝$a'_W \times S$

評価式は作業の実績データを10%以内の差異で評価することが可能

a_{wi}, a'_w:単位作業係数(W:作業の種類、i:作業レベル)、S:作業エリア面積(㎡)

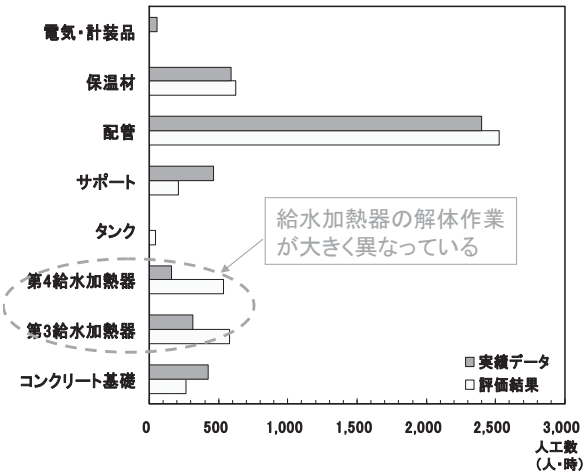
ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター(ふげん)

資料 22-5-3

Fugen Decommissioning Project

第3・4給水加熱器室内の解体作業

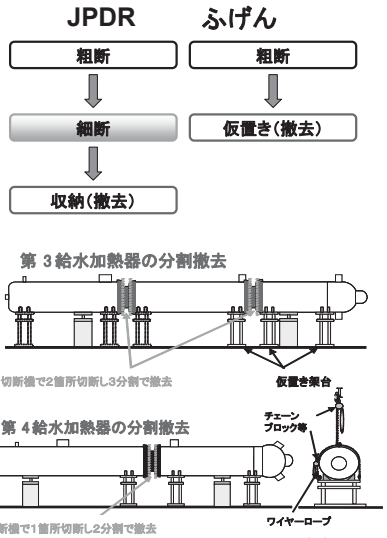
実績データと計算値の比較



人工数の実績データと計算値との比較

実績データとの違いの要因

― 作業構成の違い ―

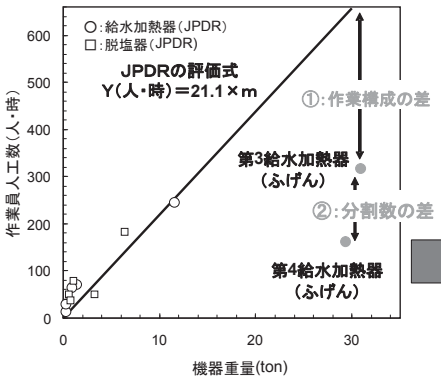


ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター(ふげん)

資料 22-5-4

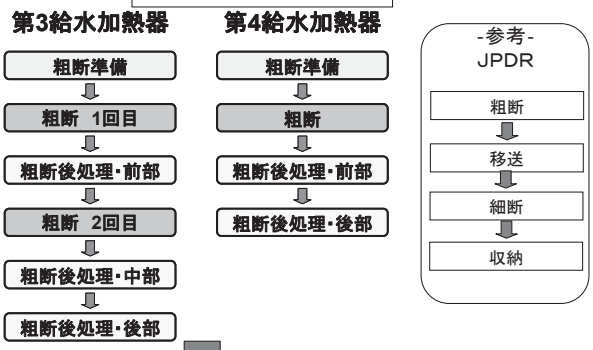
給水加熱器の評価式（粗断）の検討

Fugen Decommissioning Project



「給水加熱器の解体」にかかる作業員人工数

作業フローの整理



JPDRの評価式（給水加熱器）

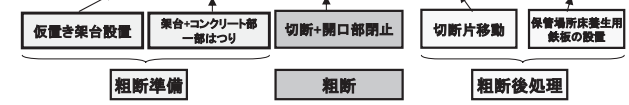
Y(人・時)＝21.1×m

m:機器重量(ton)

評価式（粗断）

作業を構成する要素ごとに評価式を分割して構築

$Y(人・時) = 20.43 \times n + 0.49 \times m + 2.49 \times m \times n + 21.43 \times (n + 1) + 17.50$



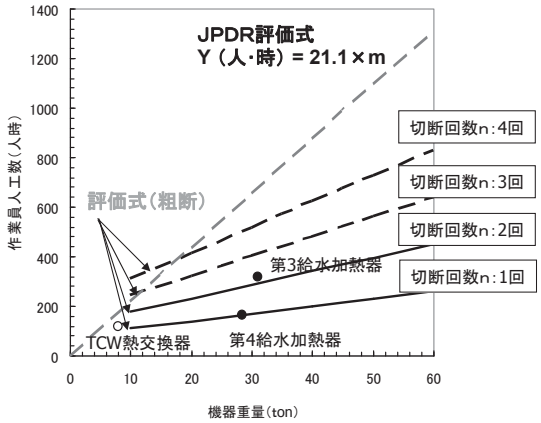
m:機器重量(ton)、n:切断回数(回)

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-5-5

評価式（粗断）の計算結果と実績データの比較

Fugen Decommissioning Project



評価式（粗断）による計算結果

作業実績データとの差異
（計算結果/作業実績データ）

	第3給水加熱器	第4給水加熱器	-参考- TCW熱交換器※
重量(ton)	30.9	28.4	8
切断回数(回)	2	1	1
JPDR評価式	1. 83	3. 29	1. 44
評価式(粗断)	0. 92	1. 02	0. 9

※TCW熱交換器:タービン補機冷却系熱交換器(保全区域)

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

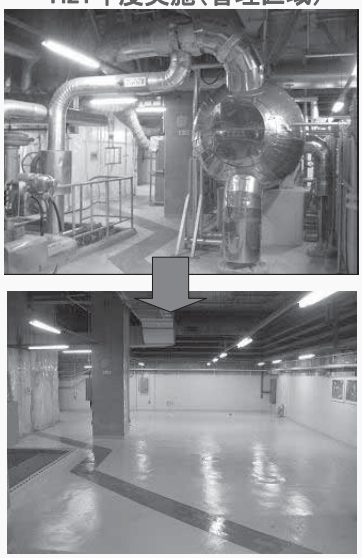
資料 22-5-6

Fugen Decommissioning Project

第5給水加熱器室内の解体作業概要

第5給水加熱器室内の解体撤去工事

H21年度実施（管理区域）



第5給水加熱器室内の解体作業フロー

準備工程
- 作業準備（養生・足場設置・資機材準備）
- 解体撤去範囲の識別

解体工程
- 保温材撤去（保温材と外装板を分別）
- 電気・計装品の撤去（解線、取外し）
- 配管・サポート類の解体
- 給水加熱器の解体
- コンクリート基礎の解体

後処理工程
- 後処理

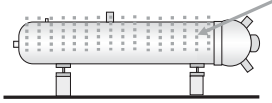
ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止　原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-5-7

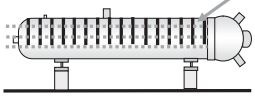
Fugen Decommissioning Project

第5給水加熱器の解体工法（細断）及び手順

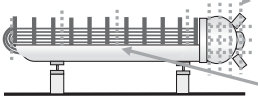
① 外殻上部に切断線入れ



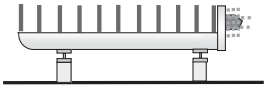
② 50cm角程度に切断



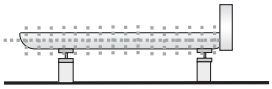
③ ・伝熱管を粗断、撤去・細断
・水室を切断



④ 内部構造物の切断



⑤ 内部構造物の切断後に下部外殻を切断



⑥ 基礎コンクリートを破砕

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止　原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-5-8

計算条件

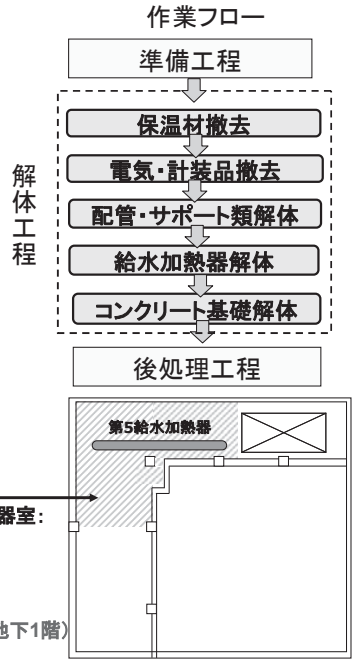
Fugen Decommissioning Project

■作業エリア
第5給水加熱器室　：　170m²

■物量データ
機器数　：44件
機器重量　：41.7 ton

■評価式
準備・後処理工程：作業面積を考慮した評価式
解体工程：JPDRの評価式

■解体方法
ガス切断機による細断

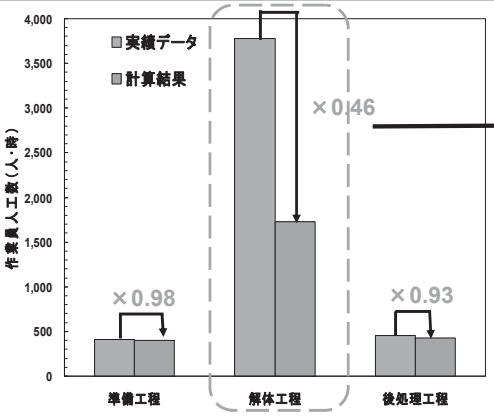


資料 22-5-9

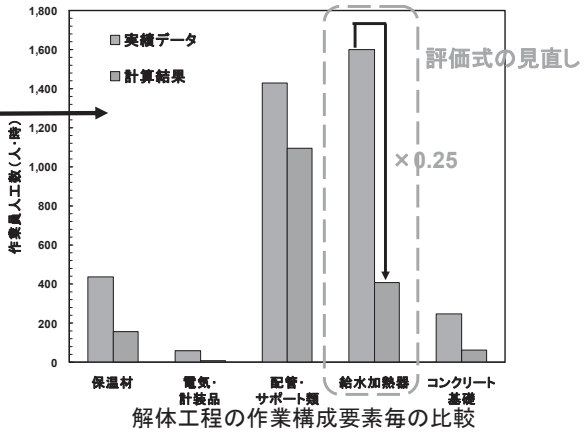
ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止　原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

作業実績データと計算値の比較

Fugen Decommissioning Project



各工程毎の比較



解体工程の作業構成要素毎の比較

- 準備、後処理工程の計算値については、前回報告した作業面積を関数とした評価式（一次近似式）により、良く再現することができた。
- 解体工程については、作業実績データと計算値には大きな差異があった。
- 解体工程の作業構成要素毎に比較すると給水加熱器の解体における違いが大きかった。JPDRの評価式では、第5給水加熱器の解体を再現できなかった。
- 解体工程のうち、給水加熱器の解体（細断）に係る評価式の見直しが必要。

資料 22-5-10

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止　原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

Fugen Decommissioning Project

給水加熱器の解体に係る評価式（細断）の検討①

-「ふげん」とJPDRの給水加熱器の仕様比較-

	ふげん	JPDR
物量	21.7ton	4.3ton(第1)、5.2ton(第2)
寸法	φ1250mm×全長11500mm	φ812mm×全長5600mm
形状	横置円筒	縦置円筒
外殻材質	スチール(SB46)	スチール(SB46B)
外殻の厚さ	16mm	12mm
伝熱管材質	SUS304	ニッケル合金
伝熱管口径	15.9mm	15.9mm
伝熱管本数	750本	180本(第1)、196本(第2)
伝熱管の厚さ	1.245mm	1.25mm
1日の投入作業員人数	平均10名	平均7名
作業日数	95日(内給水加熱器の解体:32日)	25日(内給水加熱器の解体:12日)
作業工具	ガス切断	ガス切断(粗断、細断)
	プラズマ切断	プラズマ切断(細断)
	ガソリン切断	バンドソー切断(粗断)
	バンドソー切断	セーバーソー(粗断)
作業方法及び手順	(原位置) ①上部外殻を粗断・細断 ②伝熱管を撤去、細断 ③下部外殻を粗断・細断	(原位置) ①外殻を粗断撤去 ②外殻の移送 ③伝熱管の粗断撤去 ④伝熱管の移送 ⑤水室の移送 (細断エリア) ⑥外殻の細断 ⑦伝熱管の細断 ⑧水室の移送
切断片の大きさ	50cm角に切断(細断)	$1m^3$容器収容用の大きさに切断(細断)

人工数の違いの要因

・「ふげん」は、JPDRに比べて伝熱管の数が約4倍程多い。

・伝熱管の細断及び処理が異なっている
JPDR:$1m^3$容器に収容できるよう切断
ふげん:クリアランスのための除染等を考慮して50cmの長さに細断

伝熱管の細断を考慮した評価式の検討が必要

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-5-11

Fugen Decommissioning Project

給水加熱器の解体に係る評価式（細断）の検討②

■JPDRの評価式（給水加熱器）

給水加熱器 ＝ 粗断 ＋ 細断 ＋ 収納 ⇒ Y（人・時）＝21.1×m
m：給水加熱器の重量(ton)

■第5給水加熱器の解体について細分化

第5給水加熱器 ＝ 外殻の切断・収納 ＋ 伝熱管の切断・収納

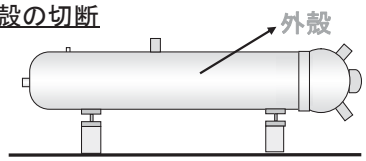
	外殻の切断・収納	伝熱管の切断・収納	合計
実績データ	970 （人・時）	630 （人・時）	1600 （人・時）
重　量(外殻:伝熱管＝6:4)	13.0(ton)	8.7(ton)	21.7(ton)
単位作業係数	74.6(人・時/ton)	72.4(人・時/ton)	73.7(人・時/ton)

第5給水加熱器の実績データから評価式（細断）を導出

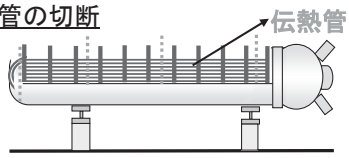
$$Y(人・時) = (74.6 \times m_1) + (72.4 \times m_2) = 73.7 \times m$$

m_1：外殻重量(ton)、m_2：伝熱管重量(ton)
m：機器（給水加熱器）の重量(ton)

外殻の切断



伝熱管の切断



ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-5-12

まとめと今後の予定

Fugen Decommissioning Project

- 第3、4給水加熱器の実績データから給水加熱器の評価式（粗断）を作成した。
- 第3、4給水加熱器の解体から得られた準備工程及び後処理工程の評価式は、第5給水加熱器の解体に係る実績データを10%以下の差異で再現することができた。
- 第5給水加熱器の解体工程については、JPDRの評価式よりも実績データが高い値を示した。これは、クリアランスのための除染等を考慮した細断（50cm角）等を行ったためと考えられる。
- 第5給水加熱器の実績データを基に作成した評価式（細断）は、今後の各種作業への適用も考慮して「外殻の切断・収納」及び「伝熱管の切断・収納」とに分けて作成した。
- 今回作成した給水加熱器の粗断及び細断の評価式について、他の熱交換器等の解体にも適用し、評価式の精度向上を図る。

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止　原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-5-13

2.4 クリアランス制度運用に向けた準備状況
2.4.1放射能濃度の評価方法の検討

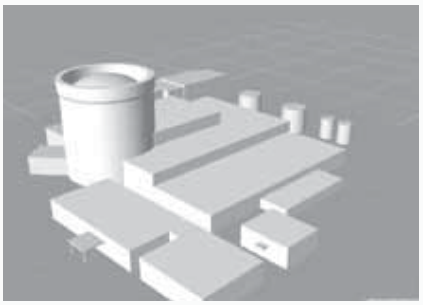
Fugen Decommissioning Project

クリアランス制度運用に向けた準備状況
－放射能濃度の評価方法の検討－

技術開発部　技術開発課　林　宏一

報告概要

- 放射能濃度の評価方法
- 二次的な汚染の対象物に対する核種組成比の設定
- 設定した核種組成比の相関関係の成立性の評価
  平均値の検定（ｔ検定）、相関図の観察
- 相対重要度の評価による分散分析検定（Ｆ検定）の必要性の評価
- 分散分析検定（Ｆ検定）による系統、対象物の分類の必要性評価
- まとめ



ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止　原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-6-1

Fugen Decommissioning Project

放射能濃度の測定及び評価方法の認可申請書の項目

1．氏名又は名称及び住所並びに法人にあっては、
　その代表者の氏名
2．放射能濃度確認対象物が生じる工場等の名称及び所在地
3．放射能濃度確認対象物が生じる施設の名称
4．放射能濃度確認対象物の種類
5．評価に用いる放射性物質の種類
6．放射能濃度の評価単位
7．放射能濃度を決定する方法（今回の報告内容）
8．放射線測定装置の種類及び測定条件
9．放射能濃度確認対象物の管理方法

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止　原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-6-2

Fugen Decommissioning Project

評価に用いる放射性物質の種類、放射能濃度を決定する方法

5. 評価に用いる放射性物質の種類

原子力安全委員会「重水炉、高速炉等におけるクリアランスレベルについて」（平成13年7月16日）において、「ふげん」は、軽水炉と同様の材料が用いられていることから、重要核種についても同じく10核種であるとされている。

推定放射能濃度評価結果を評価対象核種選定フローに従い評価した結果、評価対象核種は、原子力安全委員会で選定された重要核種であることを確認

⇒評価対象核種は、NISA文書に規定の10核種

7. 放射能濃度を決定する方法

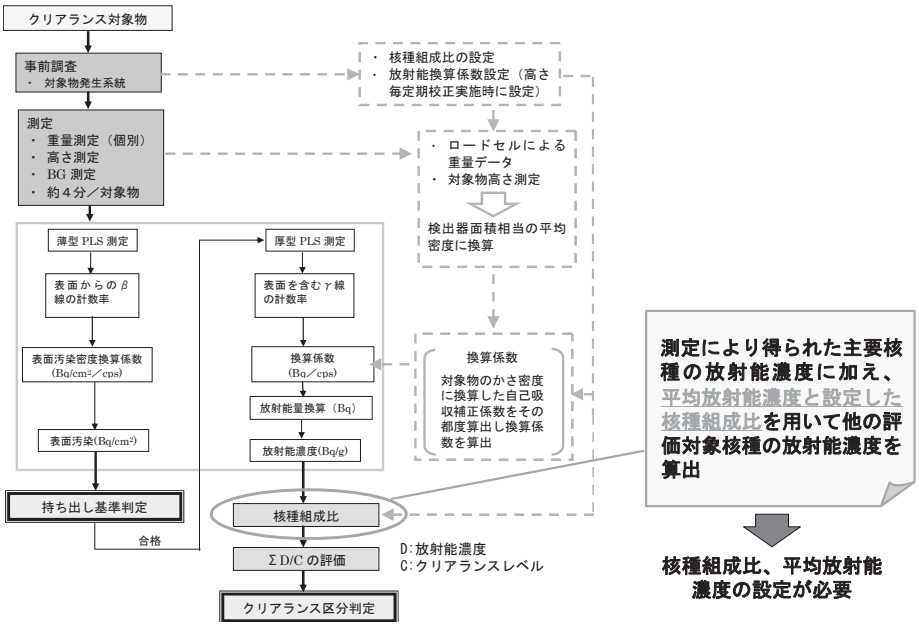
放射性物質	放射能濃度決定方法
H-3	平均放射能濃度法
Co-60	主要核種測定法
Mn-54	核種組成比法（Co-60放射能濃度に対する放射能濃度比）
Sr-90	
Cs-134	
Cs-137	
Eu-152	
Eu-154	
Pu-239	
Am-241	

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-6-3

Fugen Decommissioning Project

クリアランス対象物の放射能濃度の評価フロー

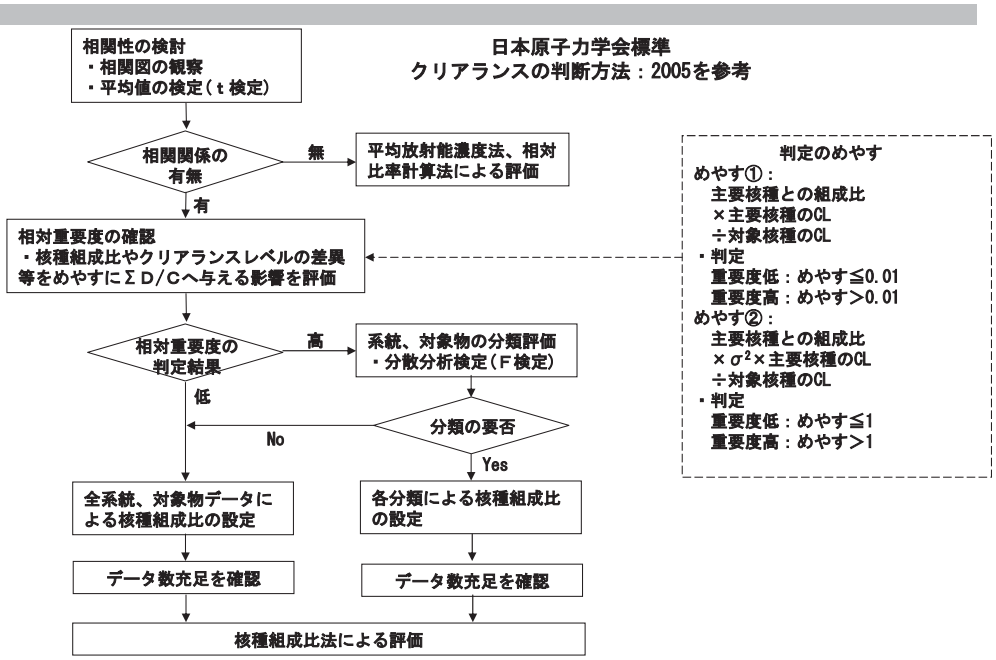


ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-6-4

Fugen Decommissioning Project

二次的な汚染の対象物に対する核種組成比の設定フロー



ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-6-5

Fugen Decommissioning Project

平均放射能濃度、核種組成比の設定方法

設定に用いる放射能濃度データ

◆「ふげん」の施設・設備から代表サンプルを採取し、核種分析を行い取得した放射能濃度データ　⇒原子炉運転終了時点の解列日に減衰補正

◆「ふげん」の埋設処分廃棄体用に低レベル放射性廃棄物の核種分析を行い取得した放射能濃度データ　⇒廃棄物発生日直近の解列日に減衰補正

①平均放射能濃度、核種組成比の設定

②平均値の検定（t検定）による相関関係の成立性の評価

③相対重要度の評価による分散分析検定（Ｆ検定）の必要性の評価

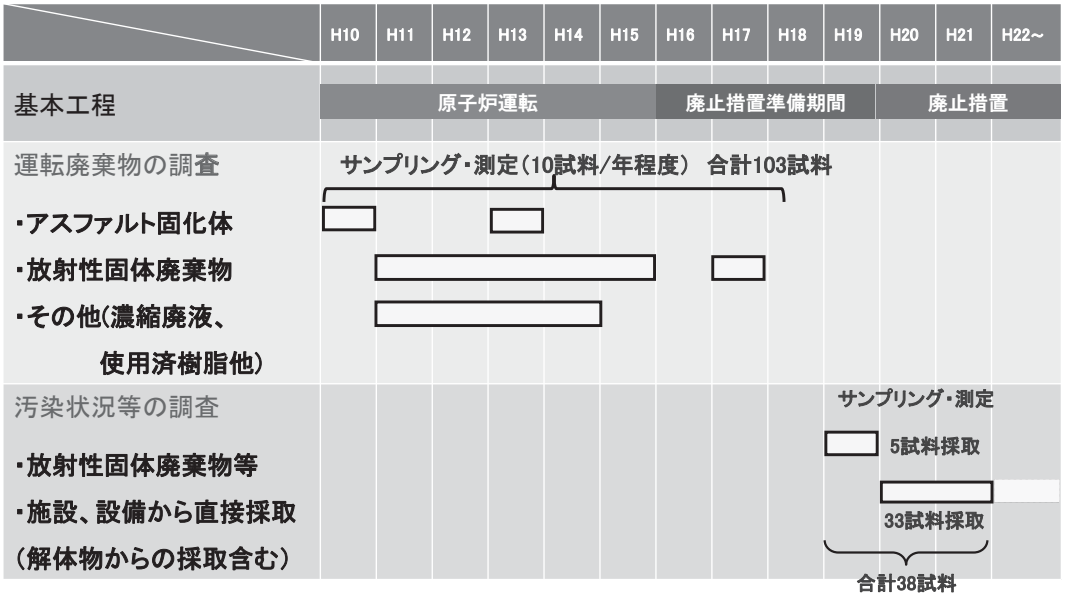
④分散分析検定（Ｆ検定）による系統、対象物の分類の必要性の評価

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-6-6

Fugen Decommissioning Project

これまでの試料分析実績



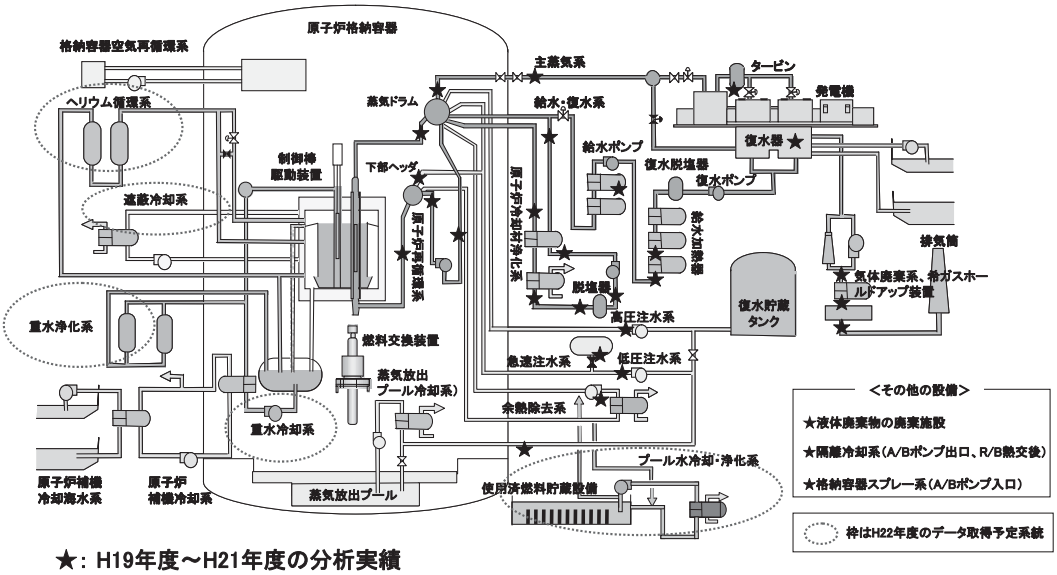
ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-6-7

Fugen Decommissioning Project

汚染状況等の調査における施設、設備からの試料採取箇所

汚染状況等の調査における合計38試料の試料採取箇所



★: H19年度～H21年度の分析実績

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-6-8

Fugen Decommissioning Project

平均放射能濃度、核種組成比の設定

放射性物質		設定値（算術平均値）	相関係数	データ点数	備考
H-3平均放射能濃度		3.03E+1(Bq/g)	ー	17	
Co-60との核種組成比	Mn-54	3.10E-1	0.96	17	
	Sr-90	5.94E-4	0.86	14	
	Cs-134	－	－	0	検出限界値以上の有効データなし
	Cs-137	1.14E-3	0.82	22	
	Eu-152	1.31E-5	0.94	6	
	Eu-154	4.12E-5	0.95	7	
	全α	1.10E-4	－	2	検出限界値以上の有効データ少

設定に用いたデータは解列日時点に減衰補正した値であり、設定値は原子炉運転終了時点（平成15年3月29日）を基準とし減衰補正して使用する。

Cs-134、全α(Pu-239、Am-241)については、
相対比率計算法等の別の方法で評価する必要がある

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-6-9

Fugen Decommissioning Project

設定値(算術平均値)の検定(t検定)について

t検定:相関関係の有無の判定の統計手法

日本原子力学会標準
クリアランスの判断方法：2005より

サンプリング・分析結果である標本母集団データ(評価対象核種と主要核種)に基づき、対象物母集団の相関関係の有無を判定するには、母集団について相関関係の仮設をたててこれを検定する。

ここでは、対象物母集団の評価対象核種と主要核種の間に相関がない(すなわち、対象物母集団の相関係数ρ=0)という仮設をたてて、これを検定する。

一般的には、次式で定義される統計量tsが自由度(n-2)のt分布に従うことを利用して、仮設；“対象物母集団の相関係数ρ=0”を検定するt検定が用いられる。

$$t_s = \sqrt{n-2} \bullet r \Big/ \sqrt{1-r^2}$$

n：データ数

r：サンプルの相関係数

$$r = \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \Big/ \sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \bullet \sum (y_i - \bar{y})^2}$$

ここで、危険率をαとし、この統計量tsが、ts≧t(n-2, α)ならば、仮設：“対象物母集団の相関係数ρ=0”が棄却され、対立仮設：“対象物母集団の相関係数ρ＞0”が受容される。

従って、危険率α（ここでは、α＝1%で評価）で対象母集団の評価対象核種と主要核種は相関関係を有すると判定できる。

なお、t(n-2, α)は、t分布表より求まる自由度n-2、危険率αでのt値である。

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-6-10

Fugen Decommissioning Project

設定値の検定(t検定)による相関関係の成立性の評価結果

核種組成比	t検定の結果		
	t_s値	t(n-2, 1%)	判定
Mn-54/Co-60比	15.0	2.95	相関が認められる
Sr-90/Co-60比	5.97	3.05	相関が認められる
Cs-137/Co-60比	6.54	2.84	相関が認められる
Eu-152/Co-60比	5.64	4.60	相関が認められる
Eu-154/Co-60比	6.95	4.03	相関が認められる

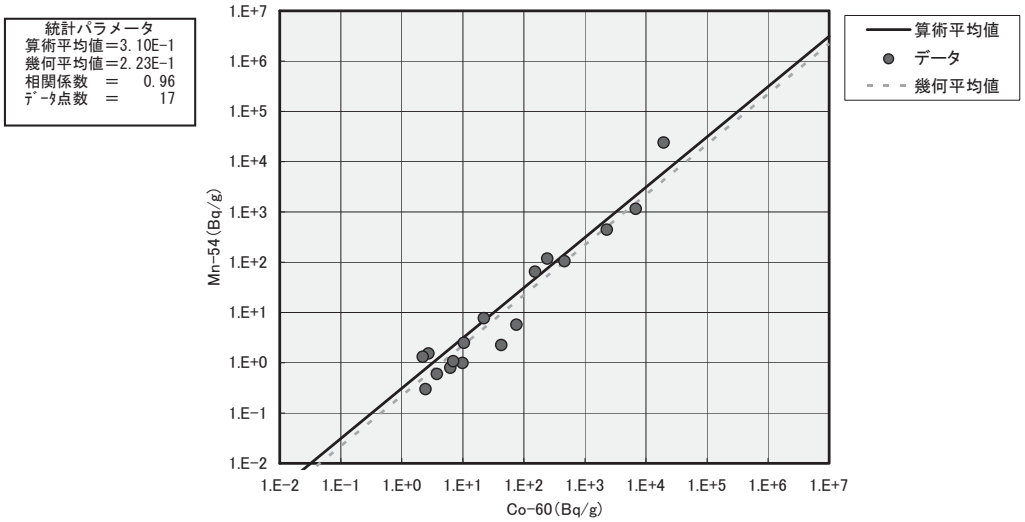
Mn-54、Sr-90、Cs-137、Eu-152、Eu-154の核種について、
Co-60との相関関係の成立を確認

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-6-11

Fugen Decommissioning Project

相関図の観察例(Mn-54)



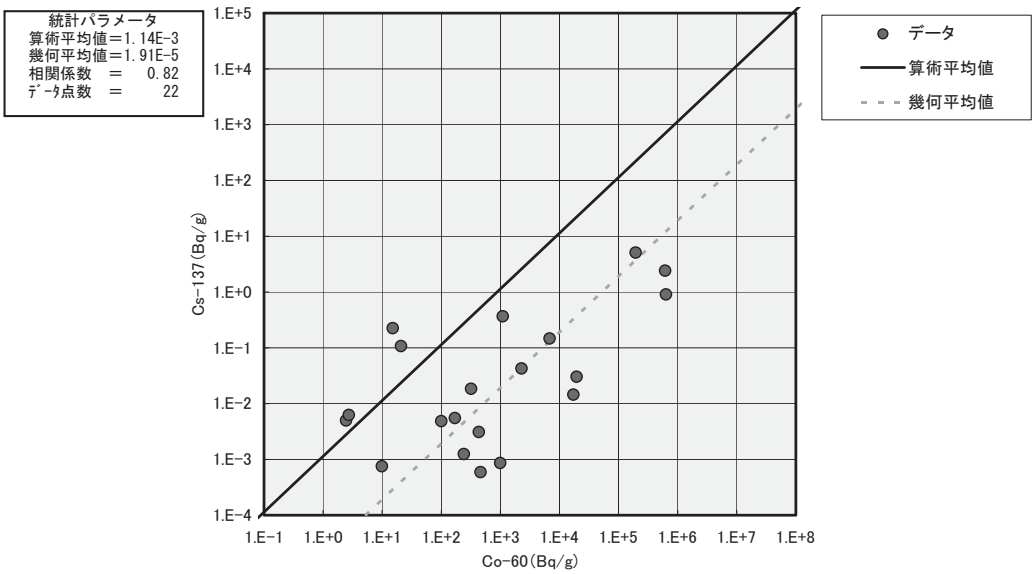
このプロットは、廃棄物発生日直近の解列日、原子炉運転終了時点の解列日に減衰補正したもの

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-6-12

Fugen Decommissioning Project

相関図の観察例(Cs-137)



このプロットは、廃棄物発生日直近の解列日、原子炉運転終了時点の解列日に減衰補正したもの

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止　原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-6-13

Fugen Decommissioning Project

設定した核種組成比の相対重要度の判定のめやす

日本原子力学会標準
クリアランスの判断方法：2005より

めやす①

算術平均組成比より換算したD/Cが主要核種のD/Cの1/100未満であること

原子力安全委員会の「主な原子力施設におけるクリアランスレベルについて」、「原子力施設におけるクリアランスレベル検認のあり方について」では、評価上の最重要核種からD/Cが２桁以内の放射性核種を重要核種としている。このめやすを適用した場合、主要核種が最重要核種である場合でも、D/Cが主要核種の1/100未満であれば評価対象核種からは除外される。また、その場合ΣD/Cへの寄与も1%未満である。

Mn-54の評価例

①（算術平均核種組成比：Mn-54/Co-60比）×（Co-60のCL）／(Mn-54のCL)

めやす②

算術平均組成比の97.5%片側信頼上限値(×ρ^2)より換算したD/Cが主要核種のD/C以下であること

クリアランス判断の裕度の評価では核種組成比及び平均放射能濃度のばらつきを考慮した場合でもΣD/C≦10となる確率が97.5%以上であることを確認しているρ^2倍の裕度を見た場合にD/Cが主要核種のD/C以下であれば、評価対象核種のD/Cが主要核種のD/Cを超える確率は2.5%未満である。最もD/Cの総和が大きくなる場合として主要核種のD/Cがほぼ1とした場合でも、評価対象核種のD/Cが1未満である確率は97.5%以上であり、評価対象核種の寄与によりΣD/Cが1を大幅に超える可能性は無視できる。

Mn-54の評価例

②（算術平均核種組成比：Mn-54/Co-60比）×（標準偏差)^2×（Co-60のCL）／(Mn-54のCL)

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止　原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-6-14

Fugen Decommissioning Project

相対重要度の評価による分散分析検定(F検定)の必要性の評価結果

核種	CL	算術平均値	標準偏差（算術平均）	めやす①*1		めやす②*2	
				めやす①の評価値	判定結果	めやす②の評価値	判定結果
Mn-54	0.1	3.10E-1	2.84E-1	3.10E-1	重要度高	2.50E-2	重要度低
Sr-90	1	5.94E-4	1.50E-3	5.94E-5	重要度低	1.34E-10	重要度低
Cs-137	0.1	1.14E-3	3.23E-3	1.14E-3	重要度低	1.18E-8	重要度低
Eu-152	0.1	1.31E-5	7.53E-6	1.31E-5	重要度低	7.43E-16	重要度低
Eu-154	0.1	4.12E-5	2.84E-5	4.12E-5	重要度低	3.33E-14	重要度低

＊1：めやす①の判定基準（重要度低のめやす≦0.01、重要度高のめやす＞0.01）
＊2：めやす②の判定基準（重要度低のめやす≦1、重要度高のめやす＞1）

Mn-54については、めやす①の評価において相対重要度が高いと判定
Sr-90, Cs-137, Eu-152, Eu-154については、相対重要度が低いと判定

Mn-54について
系統、対象物の分類評価（Ｆ検定）が必要

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-6-15

Fugen Decommissioning Project

分散分析検定(F検定)について

F検定：核種組成比のグループ分類確認用の統計手法

日本原子力学会標準
クリアランスの判断方法：2005より

核種組成比は評価対象核種と主要核種の放射能濃度の比の平均であり、この放射能濃度の比は対数正規分布を示すことから、グループ分類が想定されるような母集団の母平均の差を検定することで、グループ分類の必要性を評価するものである。

分析値の全変化は次式に示す2つの変化に分解される。

$$\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{n_i}(x_{ij}-\bar{x})^2=\sum_{i}^{k}\sum_{j}^{n_i}(x_{ij}-\bar{x}_j)^2+\sum_{i=1}^{k}n_i(\bar{x}_i-\bar{x})^2$$

$$V=V_1+V_2$$

- V：全体の平方和　分析値全体のばらつき（全変化）
- V_1：分類内平方和　同一分類内の分析値のばらつき（分類内変化）
- V_2：分類間平方和　分類平均値間の分析値のばらつき（分類間変化）

分類内変化であるV_1は、同一母集団内の分類間の差の有無に関係なく偶然のバラツキを示すと考えられ、分類間変化であるV_2は、分類ごとに母集団が違うのであれば、バラツキの大部分は各分類ごとの母集団の差と考えられる。従って、分類間変化が分類内変化に比べて偶然と説明できる以上に大きければ、分類間変化は有意であり、分類必要と評価される。この考え方により、次式で示されるＦ検定による分散分析検定で分類の必要性を評価することができる。

$$F_s=\frac{V_2/(k-1)}{V_1/(N-k)}$$

[判定基準；$F_s<F(k-1,N-k,\alpha)$]

N：データ点数
k：分類数
F（k-1, N-k, α）：F分布表より求める
α：危険率（1%とする）

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-6-16

Fugen Decommissioning Project

Mn-54の系統、対象物の分類の必要性の評価結果

系統の分類

①原子炉冷却系・浄化系、②主蒸気・タービン系、③廃棄施設の３分類

対象物の分類

①金属類、②塩ビ・ゴム類の２分類

分類	Fs	F(0.01)	判定
系統	0.65	6.51	有意ではない （分類の必要なし）
対象物	0.15	8.68	有意ではない （分類の必要なし）

$\left[判定基準；F_s < F(k-1, N-k, \alpha)\right]$

F (k-1, N-k, α) :F分布表より求めた
α:危険率(1%とした)

Ｆ検定の結果、分類の必要なし

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止　原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-6-17

Fugen Decommissioning Project

まとめ

- Ｈ21年度までに取得した核種分析結果を用いて、平均放射能濃度、核種組成比を設定し、ｔ検定による相関関係の確認を実施した。
- Mn-54、Sr-90、Cs-137、Eu-152、Eu-154の核種について、Co-60との相関関係の成立を確認した。
- Cs-134、全α(Pu-239、Am-241)の放射能濃度評価方法については、放射能収支計算法等による二次的汚染の推定放射能評価結果より設定する。
- 設定した核種組成比の相対重要度の評価の結果、Mn-54が重要度が高い結果となり、分散分析検定（Ｆ検定）を実施した。
- Mn-54の分散分析検定（Ｆ検定）の結果、分類の必要なしとなった。
- クリアランス対象物の放射能濃度評価に用いる核種組成比の設定の見通しを得た。

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止　原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-6-18

Fugen Decommissioning Project

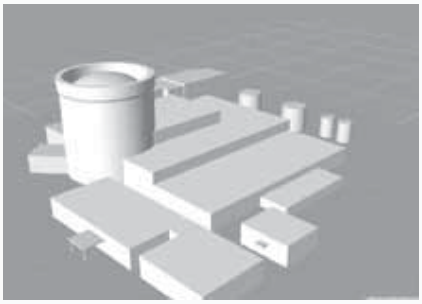
2.4.2 クリアランスモニタ性能データ取得

クリアランス制度運用に向けた準備状況
ークリアランスモニタ性能データ取得ー

環境管理課 東浦 則和

報告概要

- クリアランスモニタの概要
- クリアランスモニタによる測定・評価フロー
- クリアランスモニタ性能データ取得の目的
- データ取得の例
- 検出限界の評価
- 今後の予定



ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-6-19

Fugen Decommissioning Project

放射能濃度の測定及び評価方法の認可申請書の項目

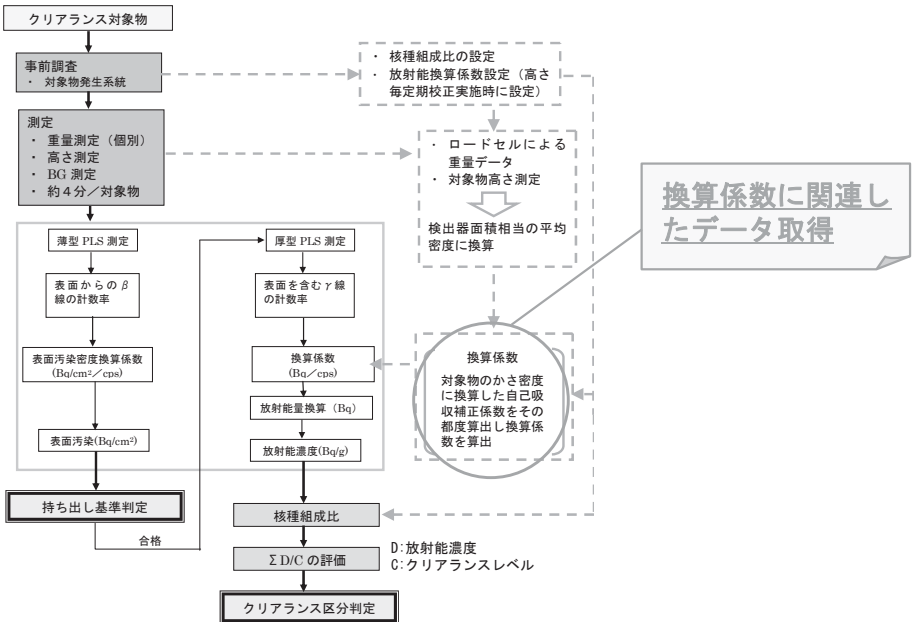
1. 氏名又は名称及び住所並びに法人にあっては、その代表者の氏名
2. 放射能濃度確認対象物が生じる工場等の名称及び所在地
3. 放射能濃度確認対象物が生じる施設の名称
4. 放射能濃度確認対象物の種類
5. 評価に用いる放射性物質の種類
6. 放射能濃度の評価単位
7. 放射能濃度を決定する方法
8. 放射線測定装置の種類及び測定条件（今回の報告内容）
9. 放射能濃度確認対象物の管理方法

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-6-20

Fugen Decommissioning Project

クリアランス対象物の放射能濃度の評価フロー

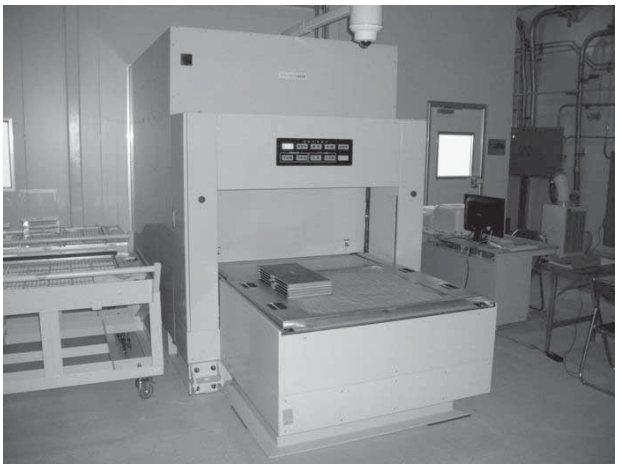


ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止　原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

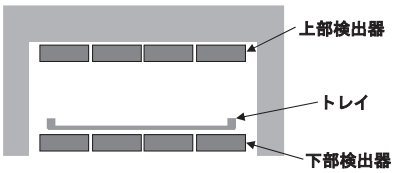
資料 22-6-21

Fugen Decommissioning Project

クリアランスモニタの概要



クリアランスモニタ検出器部概略図（トレイ型）



検出器
- 種類:プラスチックシンチレーション式検出器
- 検出器数量:上部4個、下部4個
- 有効面積(1個当り):250×250mm(t;50mm)

測定対象物
- 寸法：800(W)×800(D)×400(H) mm以下
- 重量：100kg(最大)
- 対象種類：金属類

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止　原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-6-22

Fugen Decommissioning Project

クリアランスモニタによる測定・評価フロー

測　定　（γ核種）

↓

主要核種(Co-60)の放射能 (Bq)の算定

計数率(S^{-1})×換算係数

↓

・核種組成比法等により対象10核種の放射能濃度(Bq/g)を算定
・クリアランス評価（ΣD/C＜1）

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止　原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-6-23

Fugen Decommissioning Project

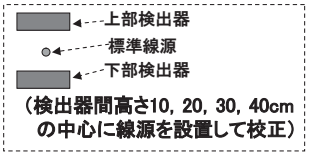
換算係数について

・計数率(S^{-1})×換算係数＝主要核種（Co-60）の放射能（Bq）

・換算係数

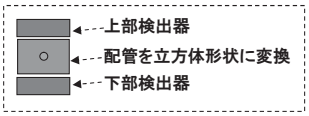
① 校正定数 ⇨ 標準線源（Co-60）により校正

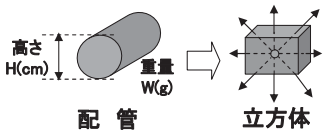
－ 計数率を標準線源の放射能量に換算



② 自己吸収補正係数 ⇨ モニタに計算ソフトが予め入力されている

－ 配管等による放射線の吸収を補正





・25×25×高さH (cm)の立方体形状に変換し、重量W(g)を立方体体積(cm^3)で除して、平均密度(g/cm^3)を計算

・線源が立方体の中心に存在するとして、平均密度と高さの関数で自己吸収補正係数を計算

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止　原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-6-24

Fugen Decommissioning Project

クリアランスモニタ性能データ取得の目的

① 換算係数の妥当性確認

測定値（測定により得られた計数率に換算係数を乗じて算定した放射能）／設定値（標準線源の放射能）

により、データのバラツキ等を評価し、放射能計算に用いる換算係数のうち「自己吸収補正係数」が妥当であるかを確認

② 検出限界の評価

クリアランスレベル 0.1Bq/g(Co-60)を十分下回ることを確認

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-6-25

Fugen Decommissioning Project

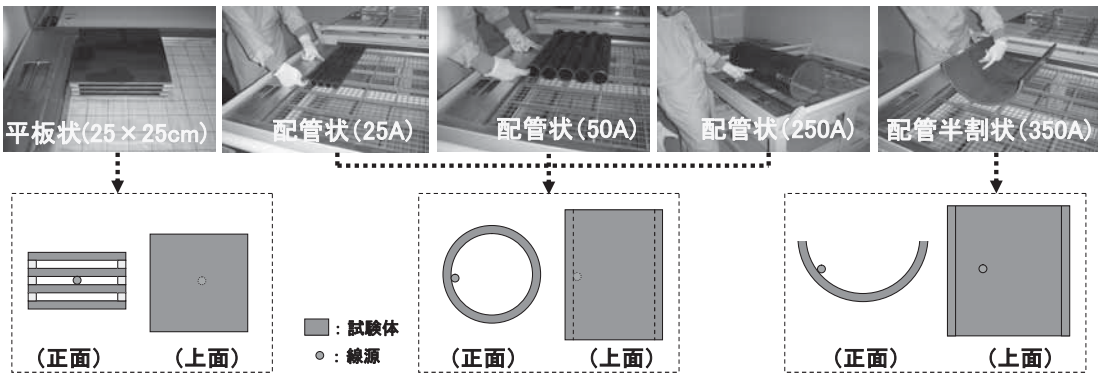
クリアランスモニタ性能データ取得の概要

・換算係数の妥当性等を確認するため、
標準線源（Co-60)と各種の模擬試験体を用いて計測

①平板、配管、バルブ等の模擬試験体の最も自己吸収が大きい位置 に標準線源を設置して計測

②平板、配管、バルブ等の模擬試験体に標準線源を設置しない状態で計測（BG測定）

→ ①，②各々約100パターン（合計約200パターン）を測定



ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-6-26

Fugen Decommissioning Project

データ取得に使用した模擬試験体

種類	寸法 (cm)	データ 取得数*
平板	25×25×厚さ0.9	111
	25×25×厚さ0.6	
配管	φ25A×長さ25	40
	φ50A×長さ25	
	φ250A×長さ25	
	φ350A×長さ25	
半割り配管	φ25A×長さ25	29
	φ50A×長さ25	
	φ250A×長さ25	
	φ350A×長さ25	
バルブ	80A×長さ約30	15

＊ データ取得数（平成22年8月末現在）にはBG測定分，繰返し測定分を含む
線源は10kBq（一部100Bq）のCo-60を使用

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-6-27

Fugen Decommissioning Project

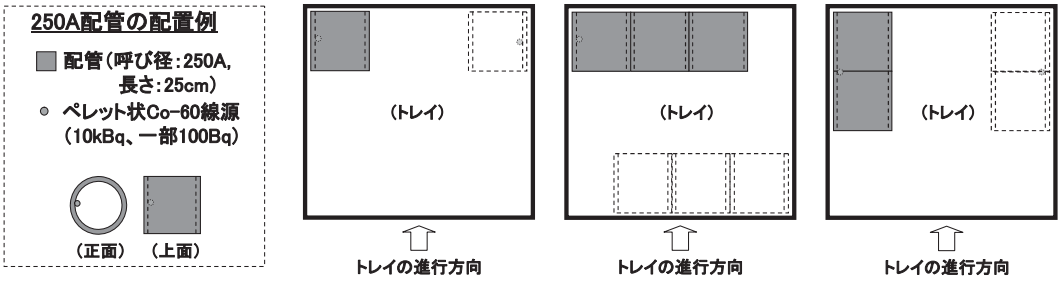
模擬試験体・線源の配置方法の考え方

① 標準線源は、自己吸収が大きくなる位置に設置
⇒試験体の内部の自己吸収が大きくなる位置

② トレイ枠による遮へいの影響を考慮
⇒試験体及び線源位置が、トレイ枠に最も近くなる位置に配置

③ 極力、測定可能重量範囲内「10～100kg」の低・中・高重量を設定
⇒試験体数量を変えて各重量を設定

なお、実際の運用を考慮して、同一試験において配置する試験体は同程度の高さのものとし、試験体同士が重ならないよう配置した。また、想定している測定対象物の最大寸法（約50cm）のものも試験体に含めた。



ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-6-28

Fugen Decommissioning Project

配管を用いたデータ取得の例(50A模擬配管を用いた場合)

(主要核種(Co-60)の放射能算定結果例)

出力年月日　2010年08月18日10時02分20秒

クリアランス測定結果(　テスト　)

1. 測定条件

装置番号	PCL-01
CL測定作業ジョブ番号	CLM170-Z000000
測定単位番号	CLM170-Z000000-M0000
測定前対象物収納容器認識番号	CLM070-Z000000-Y0000
測定済対象物収納容器認識番号	CLM170-Z000000-Y0000
測定者氏名	○○○○　所属　環境管理課
発生場所	―
発生年月日	―
材質	炭素鋼　形状　配管(50A)
除染の有無	―

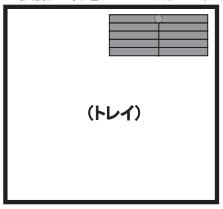
2. 測定結果

測定処理番号	CLM_01201008180958		
測定年月日時刻	2010年08月18日09時58分48秒		
質量(kg)	13.00		
サンプル高さ(cm)	4.80	検出器位置(cm)	11.20
測定時間(s)	60.0	BG測定時間(s)	90.0
全計数率 (s-1)	264.80		
バックグラウンド (s-1)	59.62		
正味計数率 (s-1)	205.18		
検出限界計数率 (s-1)	2.95		
換算係数 (Bq/s-1)	54.66		
主要核種の測定値 (Bq)	11214.94		
主要核種の検出限界 (Bq)	83.95		

換算係数は暫定値

検出限界算定に用いているr_1、r_2値は暫定値

(50A模擬配管を用いた測定の例)



トレイの進行方向 ▪▪▶

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止　原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター(ふげん)

資料 22-6-29

Fugen Decommissioning Project

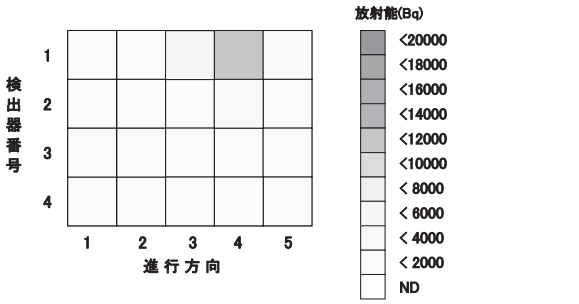
配管を用いたデータ取得の例(50A模擬配管を用いた場合)

(放射能分布の可視化例)

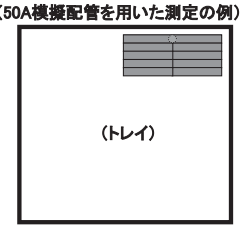
放射能分布測定結果(　テスト　)

放射能分布データ出力結果

測定処理番号	DCM_01201008180958
測定年月日時刻	2010年08月18日09時58分48秒
測定時間(s)	12(1段) 12(2段) 12(3段) 12(4段) 12(5段)



(50A模擬配管を用いた測定の例)



トレイの進行方向 ▪▪▶

放射能分布データ(Co-60 Bq)

進行方向	1	2	3	4	5	検出限界
検出器No 1	284.29	900.18	4876.82	10401.71	3305.70	33.36
2	209.01	508.49	1319.76	2027.04	1076.60	34.60
3	97.25	159.94	214.60	297.65	238.71	34.70
4	61.05	57.50	45.46	109.77	89.52	34.45

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止　原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター(ふげん)

資料 22-6-30

検出限界の評価

Fugen Decommissioning Project

取得したデータを基にr_1， r_2を算出

① r_1：バックグラウンド変動に起因する相対誤差 ←― 標準線源を設置しない状態での計測データ（BG）より算出

② r_2：換算係数の相対誤差 ←― 標準線源を設置しての計測データより算出

検出限界（A_{LD}）の算出 → 検出限界の評価（クリアランスレベル 0.1Bq/g(Co-60)を十分下回ることを確認）

$$A_{LD} = CF \times \frac{\dfrac{k^2}{t_T} + \sqrt{\left(\dfrac{k^2}{t_T}\right)^2 + 4 \times \left(1 - k^2 \times r_2^{\,2}\right) \times k^2 \times \left\{ n_B \times \left(\dfrac{1}{t_T} + \dfrac{1}{t_B}\right) + r_1^{\,2} \times n_B^{\,2} \right\}}}{2 \times \left(1 - k^2 \times r_2^{\,2} \right)}$$

A_{LD}：検出限界（Bq）
k ： 定数（＝3）
t_T ： 対象物の測定時間（S）
n_B ： バックグラウンド計数率（S^{-1}）
t_B ： バックグラウンド測定時間（S）
CF ： 換算係数（Bq/S^{-1}）
r_1 ： バックグラウンド変動に起因する相対誤差
r_2 ： 換算係数の相対誤差

（出典：日本原子力学会標準 クリアランスの判断方法 2005 より）

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-6-31

今後の予定

Fugen Decommissioning Project

① 換算係数の妥当性確認

測定値（測定により得られた計数率に換算係数を乗じて算定した放射能） ／ 設定値（標準線源の放射能）

上記計算値のバラツキを確認し、保守性の観点からも評価
⇒ 現在設定されている「自己吸収補正係数」の妥当性を確認

② 検出限界の評価

r_1，r_2を計算し、検出限界を算出

① r_2が許容される値（最大約0.3）を下回るかを確認
② 検出限界が、クリアランスレベル 0.1Bq/g(Co-60)を十分下回ることを確認（目標：0.01Bq/g）

ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 22-6-32

3. 講評

各報告の後、本委員会の石榑主査より以下のご講評を頂いた。

- 「ふげん」の廃止措置に係る技術開発に関しては、「ふげん」の課題解決に特化することにとどまらず、今後軽水炉での活用も考慮してデータを採取し、評価して頂き、その成果を発信して頂きたい。
- クリアランスの運用基準については、当面は保守側に設けざるを得ないが、クリアランスの実施状況を考慮して合理化していくことも重要である。制度運用の初期段階は大変であるが、より合理的な運用が行えるように取り組んで頂きたい。
- クリアランスされた物については、再利用しなければ道半ばである。再利用は、地域連携も含めて社会の理解を得ながら道筋を作って頂きたい。

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立法メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度[a]，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率[b]	（数字の） 1	1
比透磁率[b]	（数字の） 1	1

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表５．SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L，l	$1L=11=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3$ kg

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン[b]	rad	1 [b]	m/m
立体角	ステラジアン[b]	sr[c]	1 [b]	m^{2}/m^2
周波数	ヘルツ [d]	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m\ kg\ s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[e]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
放射性核種の放射能 [f]	ベクレル [d]	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト [g]	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		$s^{-1}\ mol$

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で”radioactivity”と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	$1\ bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	$1\ Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m$
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	$1\ b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	dB	

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	$1\ erg=10^{-7}\ J$
ダイン	dyn	$1\ dyn=10^{-5}N$
ポアズ	P	$1\ P=1\ dyn\ s\ cm^{-2}=0.1Pa\ s$
ストークス	St	$1\ St=1cm^2\ s^{-1}=10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	$1\ sb=1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$
フォト	ph	$1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$
ガル	Gal	$1\ Gal=1cm\ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	$1\ Mx=1G\ cm^2=10^{-8}Wb$
ガウス	G	$1\ G=1Mx\ cm^{-2}=10^{-4}T$
エルステッド [c]	Oe	$1\ Oe \triangleq (10^3/4\pi)A\ m^{-1}$

(c) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≙」は対応関係を示すものである。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg\ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m\ m^{-1}\ s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg\ s^{-3}$
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	$m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3}\ sA$
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2\ kg\ s^{-2}\ mol^{-1}$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}\ mol^{-1}$
照射線量（X線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1}\ sA$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2\ s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2\ sr)$	$m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	$m^{-3}\ s^{-1}\ mol$

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$
ラド	rad	$1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$
レム	rem	$1\ rem=1\ cSv=10^{-2}Sv$
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10-9T
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	$1\ \mu=1\mu m=10^{-6}m$

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています