

KOYIOW OV

第 26 回ふげん廃止措置技術専門委員会資料集

Document Collection of the 26th Technical Special Committee on Fugen Decommissioning

忽那 秀樹 香田 有哉 芝原 雄司 門脇 春彦

Hideki KUTSUNA, Yuya KOUDA, Yuji SHIBAHARA and Haruhiko KADOWAKI

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

January 2013

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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 7319-1195 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, 2013

第26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⁺¹、香田 有哉⁺¹、芝原 雄司^{+2, +3, *1}、門脇 春彦⁺¹

(2012年10年29日 受理)

原子炉廃止措置研究開発センター(以下「ふげん」という。)は、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24年9月13日に開催した第26回ふげん廃止措置技術専門委員会において報告した "廃止措置の状況"、"タービン系設備の解体撤去工事における各種切断工法等の適用実績"、 "管理データ評価システムを用いた解体作業計画の立案に関する検討"、"重水回収・トリチウム除去作業の実績と知見"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

- +1 技術開発部
- +2 技術開発部 (2012年10月より京都大学原子炉実験所)
- +3 バックエンド推進部門(同上)
- *1 福井大学附属国際原子力工学研究所(同上)

Document Collection of the 26th Technical Special Committee on Fugen Decommissioning

Hideki KUTSUNA⁺¹, Yuya KOUDA⁺¹, Yuji SHIBAHARA^{+2,+3,*1} and Haruhiko KADOWAKI⁺¹

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

(Received October 29, 2012)

Fugen Decommissioning Engineering Center, in planning and carrying out our decommissioning technical development, is establishing "Technical special committee on Fugen decommissioning" which consists of the members well-informed, 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 "The Current Situation of Fugen Decommissioning", "The Application Results of Various Cutting Methods in the Dismantling of the Equipments of the Turbine System", "Study of Work Program on the Dismantling Activities with the Project Management Data Evaluation System", "Record and Knowledge in Working for a Heavy Water Withdraw and a Tritium Removal", presented in the 26th Technical special committee on Fugen decommissioning which was held on September 13, 2012.

Keywords: FUGEN, Decommissioning, Cutting Method, Dismantling, PRODIA, AHP, Heavy Water Withdraw, Tritium Removal, Technical Special Committee

⁺¹ Technology Development Department

⁺² Technology Development Department (Present affiliation: Kyoto University Research Reactor Institute since October 2012)

⁺³ Nuclear Cycle Backend Directorate (same as above)

^{*1} Research Institute of Nuclear Engineering, University of FUKUI (same as above)

JAEA-Review 2012-040

目 次

| 1. | ふげ | ん廃止措置技術専門委員会(第 26 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 | タービン系設備の解体撤去工事における各種切断工法等の適用実績12 |
| | 2.3 | 管理データ評価システムを用いた解体作業計画の立案に関する検討20 |
| | 2.4 | 重水回収・トリチウム除去作業の実績と知見28 |
| | | |
| 3. | 講評 | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | Contents |
| | | |
| | | |
| 1. | The 2 | 26th Technical Special Committee on Fugen Decommissioning |
| | 1.1 A | genda1 |
| | 1.2 M | embers of the Technical Special Committee on Fugen Decommissioning2 |
| | | |
| 2. | | mmissioning Technology Development Report |
| | 2.1 T | he Current Situation of Fugen Decommissioning4 |
| | 2.2 T | he Application Results of Various Cutting Methods |
| | | in the Dismantling of the Equipments of the Turbine System 12 |
| | $2.3~\mathrm{St}$ | tudy of Work Program on the Dismantling Activities |
| | | with the Project Management Data Evaluation System20 |
| | 2.4 R | ecord and Knowledge in Working |
| | | for a Heavy Water Withdraw and a Tritium Removal28 |
| | | |
| 3. | Revie | ew |
| | | |

This is a blank page.

1. ふげん廃止措置技術専門委員会(第26回)

1.1 議事次第

第26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26回ふげん廃止措置技術専門委員会 議事次第

第26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 24 年 9 月 13 日 13:30~16:10
- 2. 開催場所 独立行政法人海洋研究開発機構 東京事務所内 共用会議室 A, B
- 3. 出席者
 - (委員) 石榑主査、井口委員、石倉委員、浦上委員、苅込委員、新保委員、中安委員、 仁木委員、山本委員、小川委員、土田委員
 - (ふげん) 髙橋所長、森下技術開発部長、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) タービン系設備の解体撤去工事における各種切断工法等の適用実績
- (6) 管理データ評価システムを用いた解体作業計画の立案に関する検討
- (7) 重水回収・トリチウム除去作業の実績と知見
- (8) ご講評
- (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 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 友澤 史紀 東京大学名誉教授

委員 中安 文男 福井工業大学 工学部 原子力技術応用工学科 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 小川 弘道 (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 土田 昇 (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26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

報告概要

- ≻廃止措置計画の変更
- ➤平成24年度作業計画·実績
- >解体撤去・汚染の除去工事
- > 「ふげん」を用いた研究開発
- ➢福島支援のための切断技術確証試験
- >国際会議等報告
- ≻フォールアウトの影響による資材等の取扱い
- >地元における取組みと連携

技術開発部 計画管理課 忽那 秀樹

資料 26-3-1

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)

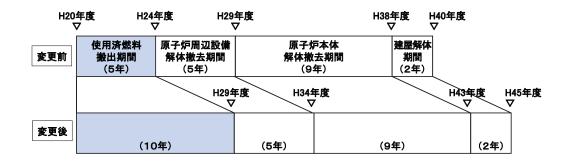
Fugen Decommissioning Project



廃止措置計画の変更

原子力機構東海研究開発センター再処理施設の耐震裕度向上工事等により、 使用済燃料搬出の遅れた期間(5年間)を繰り延べ

▶平成24年3月22日 廃止措置計画の変更届出



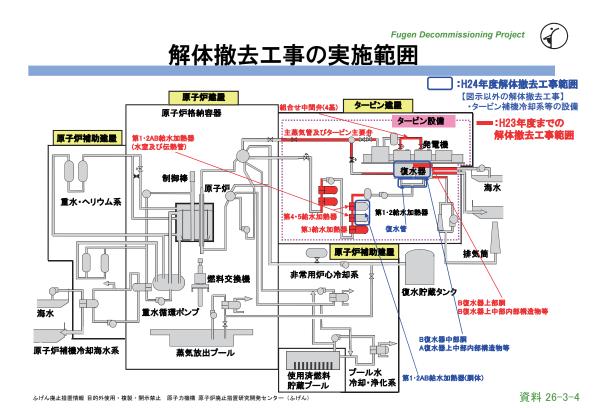


平成24年度作業計画・実績

| 年 | | | | : | 平成244 | ŧ | | | | 3 | 平成254 | ŧ |
|------------------------|----|----|----|----|-------|----|----------|-----|--------------|--------------|-------|----|
| 項目 | 4月 | 5月 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 | 1月 | 2月 | 3月 |
| 1. 重水の搬出 | | | | | | | | | | | | |
| (1) 重水前処理確認試験 | | | _ | ļ | | | $oxed{}$ | | | | | |
| (2) 重水搬出準備作業 | | | | | | | \vdash | ı | | | ı | |
| 2. 解体撤去工事 | | | | | | | | | | | | |
| (1) 復水器等の解体撤去 | | | | | | _ | | | 1 | | 1 | |
| (2) タービン補機冷却系等の解体 | | | | | | | | | | | 1 | |
| 3. 汚染の除去工事 | | | | | | | | | | | | |
| (1) 残留重水回収 | | | | | | | | | | _ | | |
| (2) 原子炉補助建屋機器のトリチウム除去 | | , | | | , | | | | | | | |
| (3) カランドリアタンク等のトリチウム除去 | | | | | | | | | | | | |
| (4) 遠へい冷却水の抜出し等作業 | | | | | | _ | | 1 | 1 | 1 | ı | |
| 4. 「ふげん」を用いた研究開発 | | | | | | | <u> </u> | | | | | - |
| | | | | | | | 1 | | 1 | | - | |
| 5. 汚染状況等の調査 | | | | | | | | | | | | |
| 6. 設備・機器等の維持管理 | | | | | | | | | | | | |
| (1) 第25回施設定期検査 | | | | | | | | | |] | | |
| (2) 設備の自主点検及び自主検査 | | | | | | | | | | | | _ |
| (3) 設備の改造 | | | | | | | | | | | | |
| (4) 欧洲少女是 | | | | | _ | 4 | | | | | 1 | 1 |

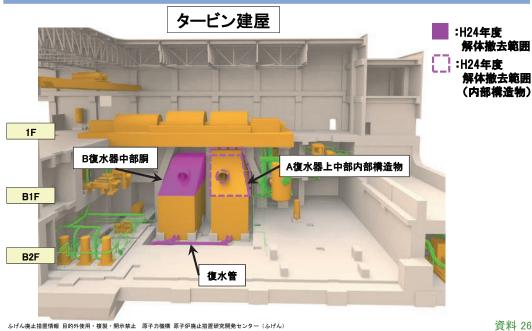
□ :計画 □ :実績

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)





平成24年度 解体撤去工事(復水器)範囲図



資料 26-3-5



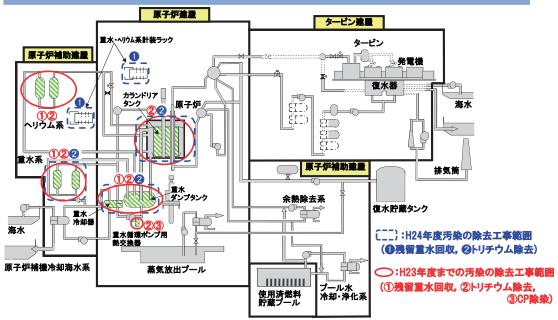
復水器解体撤去の今後の予定(検討案)

| 年度 | H22年度 | H23年度 | H24年度 | H25年度 | H26年度 | H27年度 |
|---------------|-------------------|---|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| 解体撤去対象 | ◆復水器入口水室 ◆周辺配管 | ◆復水器出口水室 ◆B復水器上部胴 ◆第1.2給水加熱器 ◆組合せ中間弁 (4基) | ◆B復水器中部順 (第1,2給水加熱器を 含む) ◆A復水器上中部内 部構造物(第1,2給水 加熱器を含む) | ◆B復水器伝熱管及 び下部内部構造物 | ◆B復水器下部酮 ◆A復水器上中部酮 | ◆A復水器伝熱管及 び下部内部構造物 ◆A復水器下部胴 |
| 物※ | 156トン | 175トン | 約90トン | 約140トン | 約140トン | 約230トン |
| 解体撤去対象範囲図(正面) | B復水器 A復水器 | | 0 | | | |
| [| :解体前 | :内部構造物解体後 | :解体対象 | :内部解体 | ※「物量」は金属 | 類について記載 |

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)



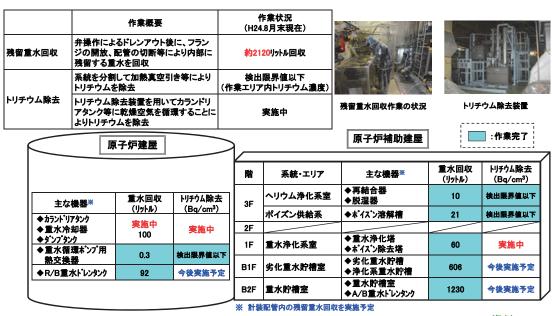
汚染の除去工事の実施範囲



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 26-3-7

Fugen Decommissioning Project (デスタの除去工事(残留重水回収、トリチウム除去)の作業状況



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)



「ふげん」を用いた研究開発(1) 高経年化調査研究事業

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 ・調査研究会1回/年(公開) ・専門部会2回/年

連携





〇材料試料の採取作業 〇データ採取作業

(1) ステンレス鋳鋼の熱時効脆化研究(H24年度)

「ふげん」実機材評価による熱時効脆化発生状況の確認

- 再循環ポンプ、大型弁が対象(材質:SCS13、SCS16A)
- ・実機材の加速熱処理試験と機械特性試験(硬さ、引張、シャル ピー、弾塑性破壊靱性等)
- ・実機材の加速熱処理と微細組織及び破面解析などによる脆化 に寄与する因子の検討・分析評価(3DAP、EBSD等)





(2) SCC対策技術の有効性確認(H24年度)

「ふげん」実機材のSUS316L溶接部のSCC対策技術の効果の重点調査

- 再循環系配管(下降管、吐出管)が対象 (材質: SUS316L)
- ·内表面観察(浸透探傷試験、硬度測定、内表面観察等)
- ・機械特性(硬さ測定、引張試験等)、鋭敏化、組織・微量成分等調査



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 26-3-9

Fugen Decommissioning Project

「ふげん」を用いた研究開発(2) その他外部関係機関等と行う試験研究

レーザー除染試験に関する研究

- ・原子力施設の廃止措置等において、建屋内の高線量部分の除染に実 が 1 7 ms ku が 1 ms ku ms ku
- ・「ふげん」の設備から既に採取 し保管している試料を用い、レ 一ザ除染の性能データを取得



300Wシングルモード Ybファイバーレーザー

低圧ケーブルの経年劣化測定技術の実用化研究

- ・原子カプラントの高経年化対策に資するためマイクロ波誘電吸収法によ -ブル劣化診断の手法※を開発することを目的に、福井工業大学等 と原子力機構が共同研究を実施
- 「ふげん」に敷設する低圧ケーブルを対象に、高精度かつ非破壊で電気 特性データを取得し、実機適用性を検証





マイクロ波琵電吸収測定装置

マイクロ波綸出部

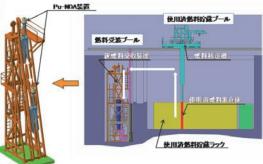
※ マイクロ波誘電吸収測定装置により微小の誘電率変化量を高精度に測定 し、劣化の度合いとの相関関係より、ケーブル劣化を診断する方法

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)

使用済燃料集合体中のPu量非破壊測定装置実証試験

- ·IAEAの使用済燃料の次世代保障措置検認方法の確立を目的に、ロ ス・アラモス国立研究所(LANL)と原子力機構が、「ふげん」の使用済 燃料中のPu量を測定する非破壊測定(NDA)システムの性能評価を共 同で実施
- 既設の新燃料受取装置にNDA装置を設置し、「ふげん」の使用済燃料

を使用して実証試験を実施 平成24年度:非破壊測定装置の設計・製作(LANL) 平成25年度:実証試験(JAEA,LANL)

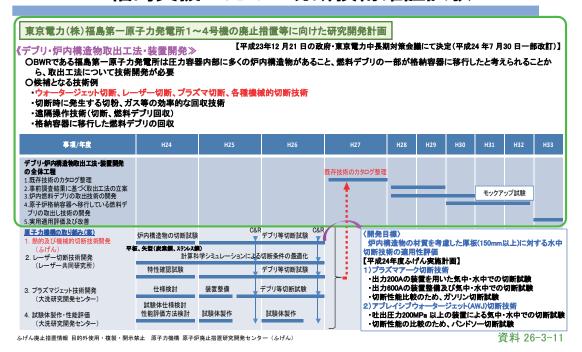


新燃料受取装置

使用済燃料集合体の測定動作



福島支援のための切断技術確証試験



Fugen Decommissioning Project



国際会議等報告(1)

ウィンズケール改良型ガス冷却炉(WAGR)への廃止措置状況調査

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WAGRへ派遣し、原子炉遠隔解体等に関する調査や情報収集を実施

- 派遣先:英国、カンブリア地方セラフィールドサイト
- 派遣期間:平成24年3月19日~6月27日





WAGR (改良型ガス冷却炉100MWt、33MWe)

-1981年 :運転終了

-1983年 :全ての燃料を取出し、廃止措置に移行

■1984~1988年:廃棄物処理ルートの建設 -1989年 : 炉上部燃料交換機撤去

-1990~1992年:原子炉上部ドーム、燃料交換管の撤去 ·1992~1993年:原子炉の遠隔解体装置(RDM)の設置

-1995年 :4基の熱交換器の撤去

1999~2011年:キャンペーン2~10を実施し、生体連へいを 残し原子炉解体完了

| 【WAGR原子炉解体 | キャンペーン】 | |
|------------|-----------|--------------------------------|
| 準備作業(1) | 100 | ホットポックス(3) |
| 中性子道へい(5) | nnannanna | 運転中廃棄物(2) |
| 熱カラム(10) | | 生体達へい |
| 黑鉛炉心(6) | | |
| ループチューブ(4) | | ダイヤグリッド(8) |
| タンディッシュ(8) | | 圧力容器&保温材(9) ()内の数字はキャンペーン番号 |

| キャンペーン | 期間 | 実施内容 | | |
|--------|---------------------|------------|--|--|
| 1 | - | 準備作業 | | |
| 2 | 1999 - 2000(5.5ヶ月) | 運転廃棄物*の撤去 | | |
| 3 | 2000 - 2001(13ヶ月) | ホットボックス | | |
| 4 | 2001 (3.5ヶ月) | ループチューブ | | |
| 5 | 2001 - 2002(7.5ヶ月) | 中性子遣へい体 | | |
| 6 | 2002 - 2003 (9.5ヶ月) | 黑鉛炉心 | | |
| 7 | 2003 (5ヶ月) | 熟進へい体 | | |
| 8 | 2003 - 2004 (9ヶ月) | 下部構造物 | | |
| 9 | 2004 - 2010(67ヶ月) | 圧力容器&保温材 | | |
| 10 | 2010 - 2011 (21ヶ月) | 外部通気膜&熱カラム | | |

※燃料撤去後に炉内に保管していた中性子達へいプラグ、制御棒、サンプリング試料等

国際会議等報告(2)

Fugen Decommissioning Project



【原子炉解体方法について】

線量の低い初期のキ ンは、人のアクセスによる手動解体を組





■ RDMに配備された タ及び3トン ホイストに種々の専用ツ ルを配備し、気中で遠隔解体を実施



【遠隔解体における知見】

- 遠隔解体に係るツールを100以上開発し、解体部位毎に実規模モックア ップ試験を実施し、大部分のツールが実解体で成功 一部の切断機はモックアップでは成功したが、遠隔装置の位置決め精
- 度の問題や炉内構造材の照射硬化による工具損耗により実解体ではう まく動作せず、別の切断機または手動解体への切り替えにより対応
- WAGRのプロジェクトは、NDAにおける予算の優先度から2012年6月に中 断。2031年に再開し、4年間で中レベル廃棄物(WAGRボックス)の中間貯・ 蔵建屋を残し、すべての建屋を解体予定 かげん廃止措置情報 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)

IOECD/NEA技術諮問グループ会議(TAG-52)

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24 年5月21日(月)~25日(金)
- 関催場所・スペイン/タラゴナ
- 〇 「ふげん」からは、廃止措置の進捗状況、使用済燃料搬出 期間を5年間延長したことによる廃止措置計画の変更、原子炉本体解体技術に関連してレーザ切断工法による切断 試験の実施状況を報告
- 〇 スペインの放射性廃棄物管理公社(ENRESA)が廃止措置 を進める「ホセ・カブレラ発電所」では、既存の燃料取替用 プールを利用し、炉内構造物を水中切断により解体作業中。 また、解体された廃棄物を廃棄体とするための遠隔廃棄体 処理設備(コンクリート充填)の設置が完了しており、同設備 の試験運転を実施中

ホセ・カブレラ発電所 (PWR 160MWe:スペイン)

•2006年:運転終了 •2010年:廃止措置開始 •2015年:廃止措置完了予定



資料 26-3-13

Fugen Decommissioning Project

フォールアウトの影響による資材等の取扱い

福島第一原子力発電所の事故により大気中に放出された放射性物質の降下(フォールアウト)により影響を受けた資材等に ついて、クリアランス制度及びNR制度上の取扱いを明確化させるため、原子力安全・保安院による3回の意見聴取会で検討が なされ、フォールアウトを考慮したクリアランス制度の運用、NRの判断及び取扱いを定めた文書(ガイドライン)※1が、平成24年 3月30日に発出された。

※1経済産業省原子力安全・保安院「東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に係るフォールアウトによる原子力施設における資材等の安全規制上の取扱 いについて」(平成24-03-26原院第10号) 平成24年3月30日

「ふげん」の取り組み

- 管理区域外からの資材等廃棄処分の一時停止措置(3/30~)
- 自主的なフォールアウトの影響調査(5/17,18)を実施し、フォー ルアウトの影響が無いことを確認
- 原子炉施設保安規定の変更認可(8/30)
- JNESレポート※2 に基づく、QMS文書の制定(9/7)
- QMSに基づくフォールアウト影響調査を実施(9/10)し、フォー ルアウトの影響がないことを確認

試料採取方法:: スミヤ法により屋内、屋外から14ポイントを採取 測定方法: プラスチックシンチレーション計数装置 測定結果: 理論検出限界計数率未満(<0.07cps)

■ 管理区域外からの資材等廃棄処分の一時停止措置を解除

※2 独立行政法人原子力安全基盤機構,東京電力株式会社福島第一原子力 発電所事故に伴うフィールアウトの影響の有無を判断する測定方法の検討。 JNES-RE-Report Series.JNES-RE-2012-0014,2012.30p

スミヤ採取箇所 □:屋外 10. 原水貯蔵タンク 9. モニタリングポスト ·层内 表面 屋上 11. キャスク搬出入 8. 主排気筒モニター室 室床面 入口近傍床面 12. 原子炉補機冷却系 7. 保物室換気系 サージタンク表面 外気取入口 6. 復水貯蔵タンク表面 13. 主律屋入口床面 5. 純水タンク表面 14. タービン建屋換気系 外気取入口 an O 1. 原子炉補機冷却海水ポンプ 3. 第1固体廃棄物貯蔵庫 2 主要変圧器表面 1階入口床面 出ロストレーナ表面 4. 第2固体廃棄物貯蔵庫 1階入口床面

フォールアウトの影響調査試料採取箇所

資料 26-3-14



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」の基本施 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課題解決に向け、予 め実用化への成立性を見極める事業として、試作・調 査を実施

〇オープンセミナーの開催

- ■「ふげん」関連の研究課題(平成24年度分)
- ・ 狭隘部対応型把持装置の設計・試作
- 狭隘部挿入用治具への駆動機構の試作
- 汚染拡大の防止用養生シートの接着(溶着)方法の 調査·試験

■会場

- -5/30 敦賀会場(敦賀商工会議所) 24社参加
- -5/31 福井会場(福井商工会議所) 23社参加





教賞会場の状況

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

廃棄物建屋に設置されているタンク類について空間線量率が高 い場所での解体作業の場合、どの様な解体シナリオが効率的 かを総人工数、二次廃棄物発生量、被ばく線量などをもとにし た意思決定法によりシナリオを検討

原子力関連業務従事者研修「ふげん」専門講图

【若狭湾エネルギー研究センター主催】

- ◆福井県の「エネルギー研究開発拠点化計画」に基づき、原 子力関連業務への参入や技術力向上を希望する県内企業を
 - •実施時期 : 7/30~8/3 (5日間)
- ·受講者 : 5名 : ふげん ·会 場



地元産業界の取組み

敦賀商工会議所「廃止措置研究会」

実技研修の状況

◆敦賀商工会議所が実施する地元企業の技術力向上・蓄積 のための調査研究の一環として、「ふげん」は廃止措置事 業の紹介等を実施

【平成24年度活動計画】

【平成24平度泊期の100mg。 ・原子炉廃止措置現場(ふげん等)の視察、研修 等 資料 26-3-15

2.2 タービン系設備の解体撤去工事における 各種切断工法等の適用実績

Fugen Decommissioning Project



タービン系設備の解体撤去工事における 各種切断工法等の適用実績

報告概要

- ≥タービン系設備の解体撤去工事に適用した 各種切断工法等
- ≻切断工法評価
- ≫海水配管ライニング(タールエポキシ樹脂)剥離
- >保温材外装板切断
- ➢基礎コンクリート撤去
- ≻まとめ

技術開発部 開発実証課 香田 有哉



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 26-4-1

Fugen Decommissioning Project

タービン系設備の解体撤去工事に適用した各種切断工法等

機器・配管・架台等の解体

海水配管ライニング(タールエポキシ樹脂)の剥離

- 1. 機械的切断工法
- ①ディスクグラインダー
- (サンダー、チップソー)
- ②セーバーソー
- ③パイプソー
- 4)バンドソー ⑤丸ノコ
- 2. 熱的切断工法
- ①ガソリン溶断機
- ②ガス溶断機(手動)
- ③ガス溶断機(自走式) ④プラズマ溶断機
- 3. 可燃性樹脂等の剥離工法
 - ①ディスクグラインダー(サンダー、カップブラシ)
 - ②電動剥離機
 - ③空気式ブラスト装置
 - ④手動ハンマ





資料 26-4-2



タービン系設備の解体撤去工事に適用した各切断工法等

保温材外装板の切断

4. 保温材外装板切断工法

- ①手動ハサミ
- ②電動ハサミ
- ③トルンプシャー

基礎コンクリートの解体

- 5. コンクリート切断・破砕工法
- ①乾式ダイヤモンドワイヤーソー
- ②コンクリートブレーカー
- ③電気ハンマ







資料 26-4-3

Fugen Decommissioning Project



機械的切断工法の比較評価

・これまでのタービン系設備の解体撤去工事において、同一条件(同材質、同サイズ)での切断が可能な給水加熱器伝熱管の切断に主要な機械的切断工法を適用してデータを取得

1. 切断対象

給水加熱器伝熱管 材質 SUS304TB

寸法 外径:15.9mm、肉厚:1.2mm

- 2. 取得データ
 - (1)切断速度
 - (2)切断工具(替刃)の耐久性、コスト
 - (3)切断面の状況





機械的切断工法の比較評価(切断速度、切断刃の耐久性)

| 切断工法 | | 作業状況 | 切断速度 | 度(本/分) | 切断刃の耐久 (1刃で切断可能 | |
|-----------|---|------|------|--------|--------------------|---|
| パンドソー (1) | ·電源:100V ·機器寸法:500×220mm ·本体質量:5.9kg ·周速:80m/min | | 12 | 0 | 175 | 0 |
| チップソー | ・電源:100V ・機器寸法:257×120mm ・本体質量:1.6kg ・回転数:12000回/min | | 4 | 0 | 250 | |
| セーバー ナーバー | ・電源:100V ・機器寸法:500×220mm ・本体質量:3.9kg ・ストローク数:2800回/min | E | 4 | 0 | 5 | Δ |
| サンダー | ・電源:100V ・機器寸法:258×141mm ・本体質量:1.8kg ・回転数:9000回/min | | 4 | 0 | 11 | Δ |
| プラズマ | ・電源 : 200V ・出力電流 : 130A ・圧縮空気 : 1732/min | | 20 | 0 | | |

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 26-4-5

Fugen Decommissioning Project



機械的切断工法の比較評価(切断コスト、切断面の状況)

| 切断工法 | 消耗品(切断刃)費用(千円) 伝熱管1500本切断時に要する費用 | 切断面の状況 | 評価 |
|--------------|-------------------------------------|--------|--|
| パンドソー | 9回交換(単価:2.7) | 6650 | - 切断速度が大きい - 切断面にパリは発生せず、後処理が不要 - 火気養生は不要 - 狭隘部での切断が困難 |
| チッフソー | 6回交換(単価:2.3) | | - 切断刃の耐久性大 - 切断面に一部パリが発生、後処理が必要 - 火気養生が必要 - 切断時の騒音大 |
| セーパーソー | 300回交換(単価:0.5) | | ・パリは発生せず、後処理が不要 ・火気養生は不要 ・狭隘部での切断には有効 ・切断刃の耐久性が低くコスト大 |
| サンダー | 27 136回交換(単価:0.2) | | ・若干のパリが発生するが、後処理は不要 ・火気養生が必要 ・切断時の騒音大 ・切断刃の耐久性が低い |
| (参考) プラズマ溶断機 | | × | ・切断速度が大きい ・切断面にノロが多く発生、後処理が必要 ・火気養生が必要 ・ヒュームの発生が多い |

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)



熱的切断工法の比較評価

・各種熱的切断工法が適用可能な炭素鋼製の給水加熱器本体の切断において、主要な熱的切断工法を適用してデータを取得

1. 切断对象

給水加熱器本体 材質 炭素鋼[SS41(胴部)、SB46(鏡部)]

寸法 薄肉部····16mm(胴部)

厚肉部 - - - 80mm(鏡部)

- 2. 取得データ
 - (1)切断速度
 - (2)切断面の状況
 - (3)切断速度のバラツキ

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 26-4-7

Fugen Decommissioning Project



熱的切断工法の比較評価(切断速度)



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)



熱的切断工法の比較評価(切断面の状況)

| 切り | 斯工法 | 切断面の状況 | 評価 | |
|--------------------|--------------|--------|--|---|
| ガソリン 溶断機 | | C | ・厚肉の部材に対しても切断速度が大きい ・切断面にノロの付着が少ない | 0 |
| ガス溶断機 | | | ・切断面にノロの付着が多い | 0 |
| ガス 溶断機 (自走式) | | 0 | ・切断面にノロの付着が少ない ・切断線が良好 ・一旦機器を設置すれば自動で制御できるため作業員の 負荷が軽減される ・機器の設置に時間を要する | 0 |
| プラズマ溶断機 | 50% FF130 | C | ・ヒュームが多く発生、対策が必要 | 0 |

。 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 26-4-9

Fugen Decommissioning Project



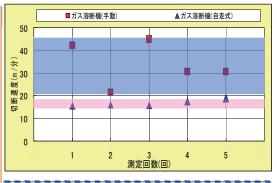
熱的切断工法の比較評価(切断速度のバラツキ)

切断对象:給水加熱器胴(材質:炭素鋼 寸法:16mm)

●両工法ともに5回の切断を行い切断速度の傾向を比較

切断対象(給水加熱器胴) ガス溶断機(手動)切断 ガス溶断機(自走式)切断

切断速度比較結果



■ガス溶断機(手動)での切断速度にバラツキが確認され、そのバラツキは±10m/分程度であった

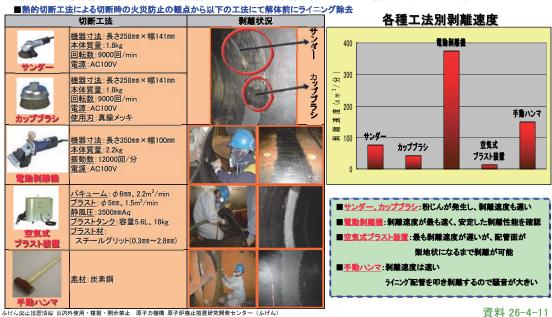
■ガス溶断機(自走式)は装置のセッティングに時間を 要するため、セッティング時間を含めると切断速度は 更に遅くなる

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)

Fugen Decommissioning Project 海水配管ライニング(タールエポキシ樹脂)剥離



■循環水配管、復水器水室等には海水による腐食防止のため内面に可燃性樹脂等(タールエポキシ樹脂、ゴムライニング)が施工



資料 26-4-11

Fugen Decommissioning Project 保温材外装板切断



■保温材に施工されている外装板は、収納容器に収納するために、 一定の大きさに切断することが必要 切断には以下の工法を使用 ①手動ハサミ ②電動ハサミ ③トルンプシャー ●重量:350g ●重量:1.3kg ●重量1.9kg ●全長:248mm ●全長:306mm ●定格電流(A)3.65

●ストローク数約1600/min

●切断能力(仕様)

鋼板:1.6mm、ステン

●把握部:50 ømm

●定格電流:1.25A

●ストローク数

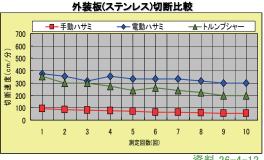
●刃長:65mm

●切断能力(仕様)

ステンレス0.3mm 1200~2000/min アルミ2mm ●切断能力(仕様):鋼板1.0mm

電動ハサミ トルンプシャー 特別な技能が不要 切断回数が増える程、作業員の疲労により切断速度は低下 ■電動ハサミ 切断速度は速く、安定して切断が可能 掴握部が大きく重いので長時間作業は作業員の負担が大きい 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)

外装板(ブリキ)切断比較 ◆ 雷動ハサ3 **▲**−トルンプシャ 700 600 **₹** 500 E 400 100



◆寸法



コンクリートブレーカー等

給水加熱器基礎コンクリート

1500×800×900(mm)・・・2ケ

◆<u>撤去容積</u>:2.16㎡(5.2t)

◆<u>人工数</u>:17(人·日)

基礎コンクリート撤去

- ■平成21年度までの基礎コンクリート撤去では、配筋とコンクリートを分別して回収するために、コンクリートブレ カー等を使った破砕工法を適用
- ■平成22年度の循環水配管基礎コンクリート撤去では、廃棄物低減の観点から、将来的にクリアランス対象物及 びNRとして取り扱うことを視野に入れ、切断時の再汚染防止を考慮して、乾式ダイヤモンドワイヤーソー工法によ りブロック状に切断

◆寸法

乾式ダイヤモンドワイヤー

- ●重量(ベース込):116kg ●電源:AC三相200V
- ●電流:100A
- ●寸法:920×810×1340mm
- ●騒音:65dB 油圧ユニット
- ●重量:135kg
- ●電源:AC三相200V
- ●電流:56A
- ●寸法:730×550×650mm
- ●冷却:ウォータークーラー





ワイヤーソーマシン

■乾式ダイヤモンドワイヤーソー

- ・切断時の粉じん対策用ハウス設置や回収等に多く の時間を要する
- ・作業員負担が少ない

乾式ダイヤモンドワイヤーソー

循環水配管基礎コンクリート

600 × 600 × 700(mm) · · · · 47

600×600×575(mm)・・・・2ケ

1200×1200×575(mm)・・1ケ

◆<u>撤去容積</u>:2.25㎡(5.4t)

◆<u>人工数</u>:12.5(人·日)

- ・配筋も同時に一体で切断可能
- ■コンクリートブレーカー等
- ・振動工具のため作業員の負担が大きい
- ・配筋とコンクリートの分別に多くの時間を要する

資料 26-4-13

設置状況 切断面

Fugen Decommissioning Project



平成20年度から実施しているタービン設備の解体撤去工事 で適用した各種工法に関するデータを取得

今後の予定



まとめ

- ・データの蓄積(データ取得を継続)
- データ項目の充実

(カーフ幅、二次廃棄物量、ランニングコスト等)

•クリアランス制度の適用に向けた小口径配管縦割り工具の実用化



小口径配管の縦割り工具の試作(例)

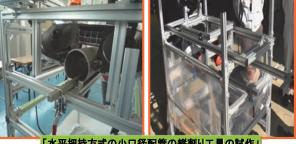
■地元企業との技術協力

- ・解体撤去工事において解体撤去した配管は、 クリアランス制度を適用し搬出することを想定
- ・除染及び汚染密度測定のために"縦割り" を実施し、配管内面(接液部)を露出させること が必要



地元企業の協力のもと4B未満の配管縦割り工 具を試作

- ■両工具ともに小口径配管の切断 が可能
- ■縦割り対象物のセッティング及び 装置の操作は一人で可能
- ■今後の実用化に向けた改良点
 - •軽量化及び小型化
 - •自動化



「水平把持方式の小口径配管の縦割り工具の試作」

2.3 管理データ評価システムを用いた 解体作業計画の立案に関する検討

Fugen Decommissioning Project



管理データ評価システムを用いた 解体作業計画の立案に関する検討

報告概要

- ≫背景と目的
- >管理データ評価システムの「ふげん」への適用性の検証
- ➢最適解体シナリオの選定手法の検討
- >まとめ

技術開発部

芝原 雄司

バックエンド推進部門廃止措置技術開発Gr 福井大学附属国際原子カエ学研究所



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 26-5-1

背景と目的

Fugen Decommissioning Project



背景:

原子力施設の廃止措置:

- ・多様な作業環境(高所, 狭隘, 放射線, 汚染など)
- 解体物の保管場所に制限
- ・大量の廃棄物が短期間に発生
- ・(一般的な工事に比べて)作業コストが多大

作業が多岐にわたり、作業方法に選択肢が多く存在



効果的,効率的に行う必要がある

合理的な作業計画が必要

目<u>的:</u>

「ふげん」を対象とした、大型機器の解体作業に対する 合理的な作業計画(最適解体シナリオ)の選定手法および そのシステム化に関する検討



最適解体シナリオの選定の為に

 想定される複数の解体シナリオに対する(人工数などの) 管理データの計算



- 「ふげん」廃止措置の実績データに基づく、 管理データ評価システムの適用性の検証
- 想定される複数の解体シナリオに対する管理データの計算結果に基づく. 解体作業の状況に応じた最適解体シナリオの選定

複数のパラメータを基にした総合的な判断

·多基準意思決定法(MCDA)の適用の検討 (福井大学との共同研究により実施)

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 26-5-3

Fugen Decommissioning Project

管理データ評価システムの「ふげん」への適用性の

管理データ評価システム:PRODIAコード

PRODIAコードで使用している既存評価式 ⇒JPDRの解体作業の実績データを基に作成

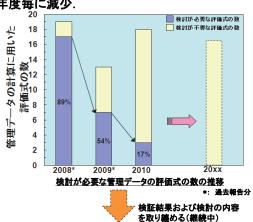
> 施設の種類・規模が変わったときに、 そのまま使えるかを検証する必要がある

JPDR(9万kWt) ⇔「ふげん」(56万kWt) 熱出力が6.2倍異なり,施設規模は大型化 ⇒施設規模の管理データ計算への影響

PRODIA: PROject Management Data Evaluation Code for DIsmantling Activities

検討が必要な評価式の数の推移

「ふげん」で実施された解体作業(給水加熱器 等の解体撤去)の管理データの計算で使用した 評価式のうち、検討が必要な評価式の割合は 年度毎に減少.



大規模(商用)原子炉施設の廃止措置へ応用

資料 26-5-4



最適解体シナリオの選定手法の検討

廃止措置において解体シナリオの選択には多くの制約・条件や 選択肢があり、それらに対して明確な判断基準をもって検討する必要がある.

- ・解体作業は.
- その場で実施 ⇔ 別の場所で実施
- ・作業者の被ばく線量の低減の為に、
 - 除染作業 ⇔ 遠隔解体
- ・発生した廃棄物は.
 - クリアランス制度を適用 ⇔ 廃棄物として処分



複数の解体シナリオの評価に要する管理データの 計算結果に基づいた、MCDAによる最適解体シナリオの選定

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 26-5-5

Fugen Decommissioning Project



最適解体シナリオの選定手法の検討

管理データ: 異なる単位のパラメータが複数存在(人工数,廃棄物発生量など) 最適解体シナリオの選定: 複数のパラメータを基にした総合的な判断

MCDA:

複数のパラメータを費用などの一元尺度に換算する分析方法が一般的に採られる.

⇒非定量的要素・不確定要素(安全性・長期的な展望など)などは、 一元尺度への換算が困難で、考慮しにくい.



一元尺度に換算しない、評価項目ごとの 評価結果を基にした、意思決定プロセス が明確な手法が必要.

最適解体シナリオの選定手法として、 階層分析法(AHP)の適用性を検討



AHPの流れと特徴

① 解決したい問題を,以下に示す階層構造で考察



② 各階層における, 一対比較を用いた数値化による,ウェイトの算出

⇒ 定量化が難しいものでも数値化が可能

——対比較の値の意味

| | 要素 <i>i</i> | 要素 <i>j</i> | ウェイト |
|-------------|-------------------|--------------------|----------------|
| 要素 <i>i</i> | 1 | $w_{ij}=(a_i/a_j)$ | A _i |
| 要素 <i>j</i> | 1/w _{ii} | 1 | A _i |

③ 階層構造全体での数値化による,総合評価点: W_iの算出
⇒ 異なる単位を持つ複数のパラメータを総合的に評価

 w_{ij}の値
 意味

 1
 同等

 3
 要素1が若干重要

 5
 要素1が重要

 7
 要素1がかなり重要

 9
 要素1が絶対的に重要

大型機器の最適解体シナリオの選定に適用

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 26-5-7

Fugen Decommissioning Project



検討した大型機器の解体シナリオ

一括解体: 設置場所で機器を収納容器に収納できる大きさに細断し,収納.

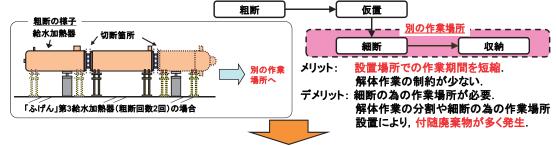
粗断 収納

メリット: 作業場所が分散しない.

デメリット: 設置環境が解体作業の効率に大きく影響.

分割解体: 設置場所で機器を移送できる大きさに粗断した後に仮置き場に移送し,

別の作業場所で収納容器に収納できる大きさに細断し、収納.



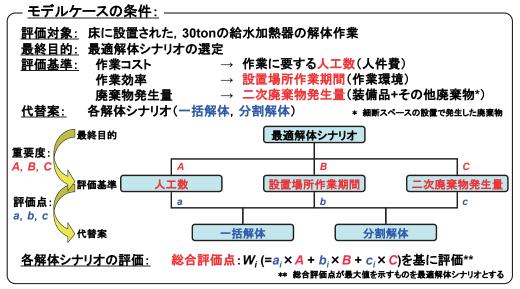
「ふげん」廃止措置で行った管理データの評価式の検証の結果を基に、 大型機器(給水加熱器)の解体シナリオを検討

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)



最適解体シナリオの検討の条件

〇 「ふげん」第3・4給水加熱器の解体作業を基に、以下に示すモデルケースを検討した.



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 26-5-9

Fugen Decommissioning Project



各解体シナリオの評価点の計算-1

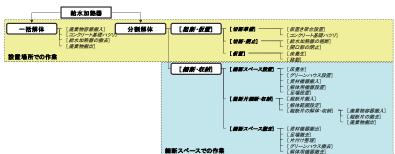
総合評価点: $W_i = (a_i \times A + b_i \times B + c_i \times C)$

評価点 a_i, b_i, c_i: 管理データの計算結果より評価*

*:管理データは,値が小さい方を 高評価とするために,逆数を用いた

管理データの計算の流れ: -

1. 各解体シナリオを想定し、作業階層構造(WBS)と作業項目で表現



- 2. 各作業項目の管理データの計算に用いる評価式を導出*
 - *: 人工数⇒「ふげん」への適用性の検証結果を反映 設置場所作業期間⇒設置場所での作業に要する人工数を反映 二次廃棄物発生量⇒JAEA内での廃止措置の実施実績を反映
- 3. 各解体シナリオに要する管理データを計算

資料 26-5-10



1.6

1.2 (E) 1.0 (B) 0.8 (B) 0.6

0.4

各解体シナリオの評価点の計算-2

分割解体: 細断スペースを新たに設置する. JPDRでの実績を基に、右図を想定

(機器重量と分割数に依存).

管理データの計算

人工数

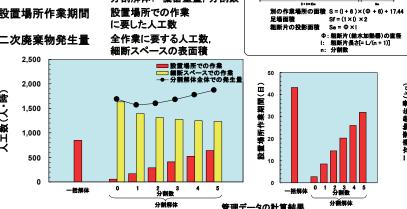
一括解体: 機器重量 分割解体:機器重量,分割数

設置場所作業期間

設置場所での作業 に要した人工数

二次廃棄物発生量

全作業に要する人工数、 細断スペースの表面積



設置場所での作業 機能を含むする。 **⊕** 250 ₩ ₩ 200 一括解体

機器重量(ton) 機器重量と長さおよび直径との関係

管理データの計算結果

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 26-5-11

Fugen Decommissioning Project



管理データの計算結果から評価点

各解体シナリオの管理データの計算結果

| | 人工数 | 設置場所作業期間 | 二次廃棄物発生量 |
|------|-------|----------|----------|
| | (人·時) | (日) | (kg) |
| 一括解体 | 849 | 43 | 84 |
| 分割解体 | 1,695 | 3 | 220 |

管理データの計算結果を基にした評価点の計算

管理データ ⇒ 評価点:一対比較による計算*

*幾何平均法による計算

一対比較による管理データの評価点の計算例(人工数)

| | 一括解体 | 分割解体 | 幾何平均 | 評価点 |
|------|-----------|-----------|-------|---------------------|
| 一括解体 | 1 | 1,695/849 | 1.413 | 0.666(=1.413/2.121) |
| 分割解体 | 849/1,695 | 1 | 0.708 | 0.334(=0.708/2.121) |
| | | 合計 | 2.121 | |

-タの評価点の計算結果

| | 人工数 | 設置場所作業期間 | 二次廃棄物発生量 |
|------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 一括解体 | a₁: 0.666 | b ₁ : 0.060 | c ₁ : 0.727 |
| 分割解体 | a ₂ : 0.334 | b ₂ : 0.940 | c ₂ : 0.273 |

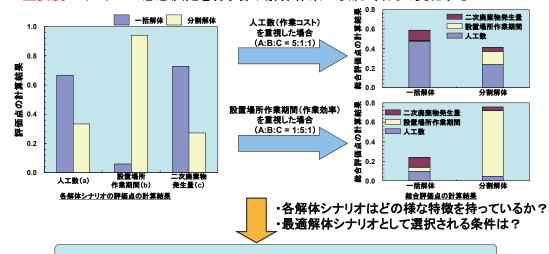
ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター (ふげん)



重要度の影響の評価

総合評価点: $W_i = (a_i \times A + b_i \times B + c_i \times C)$

重要度 A, B, C: 意思決定を行う者や解体作業の状況・目的で変化する



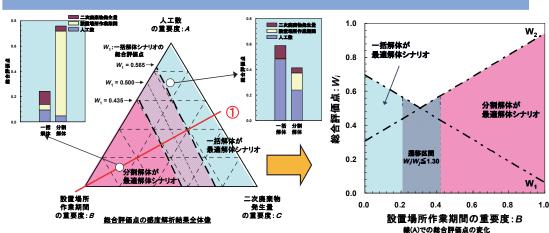
重要度を変数とした感度解析

。 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) <u>---</u> 資料 26-5-13

Fugen Decommissioning Project



重要度の感度解析結果



全体像: 人工数と二次廃棄物発生量との間の重要度の影響は少ない.

線① \rightarrow A:B:C = 1:X:1

設置場所作業期間の重要度B=0.3のときに一括解体・分割解体の総合評価点は逆転する.

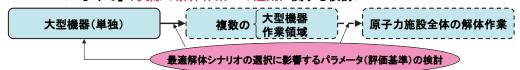
ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター (ふげん)

モデルケースでの最適解体シナリオの検討結果

- モデルケースによる最適解体シナリオの検討により、以下のことが分かった.
 - 1. モデルケースで想定した各解体シナリオの特徴(管理データの変化など)が把握できた。
 - 2. 各解体シナリオが最適解体シナリオとして選択される条件が把握できた.

最適解体シナリオの選定手法として、AHPが有用であることを確認した.

- 最適解体シナリオの選定手法のシステム化に向けて、以下の検討を進める。
 - 1. 最適解体シナリオの選定の為の評価点・重要度の設定方法の検討.
 - (1) 管理データの計算結果に対して、人が実際にどの様に評価点を設定するか.
 - (2) 大型機器の解体作業に対して、どの様に重要度を設定するか、 (同一種でも状況の異なる場合も含む)
 - 2. 「ふげん」の実際の解体作業への適用に関する検討.



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 26-5-15

Fugen Decommissioning Project



- 管理データ評価システムの「ふげん」への適用性の検証 「ふげん」で実施された解体作業を基に評価式の検証を進めている。⇒今後も「ふげん」の解体作業の実績データの分析・評価による検討を進める。
- 〇 最適解体シナリオの選定手法の検討

「ふげん」で行われた解体作業を基に最適解体シナリオの選定に関して、 以下の点について検討した.

- 1. 管理データの計算による各解体シナリオの特徴の把握
- 2. 管理データの計算結果を基にした最適解体シナリオの選定の条件
- ⇒最適解体シナリオへの管理データの影響について評価ができた.

また、選定手法としてのAHPの有用性を確認した.

「ふげん」の解体作業への適用に資する検討を基に,システム化を進める.

2.4 重水回収・トリチウム除去作業 の実績と知見

Fugen Decommissioning Project



重水回収・トリチウム除去作業の実績と知見

報告概要

- ≫ふげんのトリチウム汚染の特徴
- ≻トリチウム除去方法の選定の考え方
- ≫重水回収・トリチウム除去の実績
- >課題抽出
- >まとめと得られた知見・課題
- ≻今後の予定

技術開発部 開発実証課 門脇 春彦



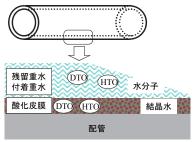
ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター (ふげん)

資料 26-6-1

「ふげん」のトリチウム汚染の特徴



「ふげん」の重水系機器・配管類は原子炉の運転によりトリチウムによって汚染重水中トリチウム濃度:2.6×108 Bq/cm3(平成15年3月-運転停止時)



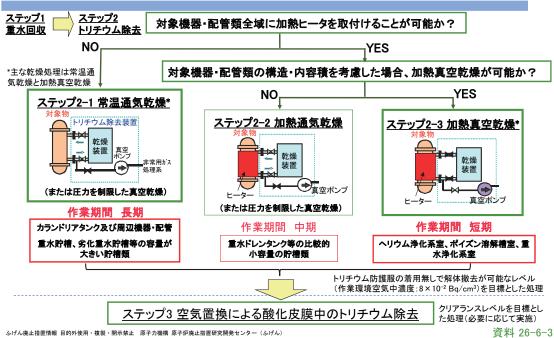
- 〇トリチウムの状態
 - ・残留重水及び付着重水(水分子)と 酸化皮膜中重水(結晶水)
- ○酸化皮膜中トリチウム
 - ・付着重水除去後に空気中に拡散
- 〇トリチウム放出率(常温環境下)
- •付着重水除去直後:~102 Bq/cm2/時
- ·2000時間~3000時間経過後:~10⁻² Bg/cm²/時



- この様な特徴の汚染に鑑みトリチウムの除去には以下の方法が有効
 - ○重水のドレンアウト(重水回収)
 - Oドレンアウト後の通気乾燥や真空乾燥による残留重水・付着重水除去
 - 〇付着重水除去後の酸化皮膜中トリチウムの空気置換

トリチウム除去方法の選定の考え方





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)



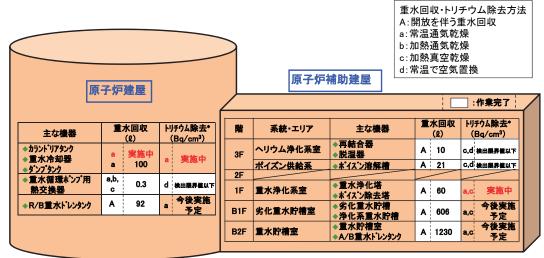
重水回収・トリチウム除去の実績工程

| | 平成 20年度 | 平成 21年度 | 平成 22年度 | 平成 23年度 | 平成 24年度 |
|---|------------|-------------------|------------|------------|------------|
| (1)弁操作による重水の抜き出し | 4 | 一重水回収:約 | 240 m³ | | |
| (2)重水循環ポンプ用熱交換器のトリチウム除去 | | 残留重水·付持 実機適用性評 | | ウム)除去方法の | |
| (3)原子炉補助建屋の残留重水回収・トリチウム除去(系の開放を伴う重水回収を含む) | - | | | | |
| (4)カランドリアタンク等のトリチウ ム除去 | | | | | |

重水回収・トリチウム除去の実績のまとめ



・開放を伴う重水回収と通気・真空乾燥(平成24年8月末における実績)



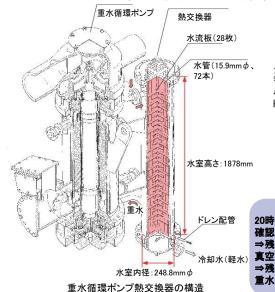
*残留重水・付着重水を十分除去後、系を開放した状態での作業エリア内のトリチウム濃度

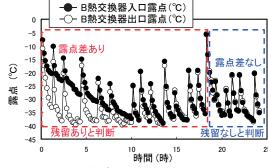
ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター (ふげん)

資料 26-6-5

重水回収・トリチウム除去の実績①

・ステップ2-1 常温通気乾燥の実施例 「重水循環ポンプ熱交換器のトリチウム除去(平成20年度)」





重水循環ポンプ熱交換器の常温通気乾燥における 露点温度の経時変化

20時間以上の通気により、入口及び出口露点の差がなくなったことを

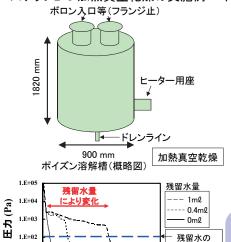
⇒残留重水・付着重水(含トリチウム)が十分に除去できたと判断 真空乾燥で圧力が速やかに数十Paに低下することを併せて確認 ⇒残留重水・付着重水の除去により、トリチウム防護服の着用無しで 重水系機器・配管の解体・撤去が可能

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)



重水回収・トリチウム除去の実績②

・ステップ2-3 加熱真空乾燥の実施例 「ポイズン溶解槽のトリチウム除去(平成22年度)」



参考:真空乾燥における残留水量ごとの容器内 圧力の経時変化(コールド試験データ)

経過時間

1.0E+06 作業停止(真空破壊) →再開(真空乾燥) 1.0E+05 (Ра) 1.0E+04) 世 七 1.0E+03 器 1.0E+02 1.0E+01 残留なしと判認 1.0E+00 5 10 15 20 25 30 35 時間(時)

ポイズン溶解槽の加熱真空乾燥における機器内圧の経時変化

延べ20時間の加熱真空乾燥により、機器内圧が速やかに数十Pa以 下になることを確認

⇒ポイズン溶解槽内に残留重水・付着重水(含トリチウム)が無いこと を確認した

⇒この段階で当該系を開放しても、作業環境中のトリチウム濃度が トリチウム防護服の着用無しで解体・撤去が可能なレベルであった

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 26-6-7

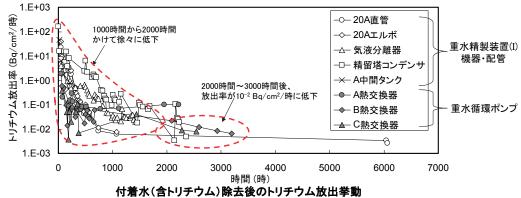
Fugen Decommissioning Project 重水回収・トリチウム除去の実績③



・ステップ3 空気置換によるトリチウム除去の実施例

乾燥が完了

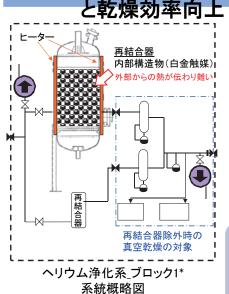
「重水精製装置(I)機器・配管等のトリチウム除去(平成20年度)」 1.E+03



系内を空気置換(比較的容易な作業)するのみで酸化皮膜中のトリチウムの大部分が除去される ⇒本処理により、重水系機器・配管のクリアランスが可能になる ただし、本処理によるトリチウム除去後のサンプルにおいて、残留トリチウム濃度がクリアランスレ ベル以下であることを確認する必要がある



内部構造物がある機器の乾燥状況の把握



*処理ごとに区切った加熱真空乾燥の範囲

1.E+06 1.E+05 Pa 1.E+04 機器内圧 1.E+03 1.E+02 残留なし と判断 1.E+01 時間(時) 再結合器を除外 ヘリウム浄化系_ブロック1の加熱真空乾燥における した時の真空度

〇考察

系内圧の経時変化

当該機器は粒状の充填物(内部構造物)を含むため、この中心部の加熱が困難であり、乾燥に時間を要することが想定された。 ⇒予想通り時間を要したが、乾燥を完了することができた。

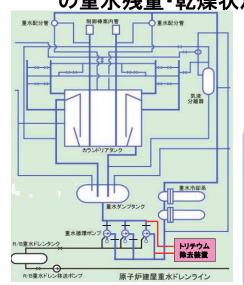
⇒内部構造物を有する対象物を加熱真空乾燥する場合の効率向 上と残留重水量(総乾燥時間)の把握が課題である。

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 26-6-9

Fugen Decommissioning Project

カランドリアタンクを含む重水冷却系(の重水残量・乾燥状況の把握



カランドリアタンクを含む重水冷却系

カランドリア系統の特徴 総容積200 m3以上のタンクと配管の集合系

除去実績:重水回収量 約100 €

乾燥方法:常温通気乾燥(露点温度-20℃、500 m³/時) 乾燥装置運転:145日(平成21年2月~平成24年8月)

常温通気乾燥により重水が回収できている。 ただし、乾燥対象の設備が複雑で大型機器であるた め通気が全域に行き渡っているか不明であり、回収が 進んでいない部分がある可能性がある。また、重水残 量の詳細が不明である。

(当初の重水残量推測値:約200 ℓ~540 ℓ*)

がカランドリアタンク底面に表面張力により重水が残留し、また内壁に一様に重水が付着していると仮定した条件にて試算。残留箇所ごとの水膜厚

⇒残留水量の把握が課題である。*
・現在は条全体を常温通気乾燥中であるが、次のステップの真空乾燥や、機器個別の乾燥に移行するタイミングを判断する必要がある。



まとめと得られた知見・課題

まとめ

- 〇弁操作により約240 m3の重水が回収済みである。(~平成20年度)
- 〇系の開放を伴う重水回収及び常温及び加熱通気乾燥、及び、加熱真空乾燥により約2120 @ (~平成24年8月)の重水を回収した。
- 〇これまでに構築した常温及び加熱通気乾燥、及び、加熱真空乾燥を適用することにより、重水循環ポンプ熱交換器、ポイズン溶解槽、ホットカラム試験装置、ヘリウム浄化系から残留重水・付着重水(含トリチウム)を除去した。カランドリアタンクを含む重水冷却系のトリチウム除去は継続中。
- 〇付着重水除去後の重水精製装置(I)機器・配管において、空気置換により酸化皮膜中のトリチウムを除去し、トリチウム放出率を~10⁻² Bq/cm²/時以下にできた。

得られた知見

- 〇常温及び加熱通気乾燥(露点:-20°C~-40°C程度)と加熱真空乾燥(真空度:数十Pa程度)は単独の機器だけでなく、系統のトリチウム除去にも適用できる。
- 〇酸化皮膜中のトリチウムは、空気置換により放出率を~10-2 Bq/cm2/時程度に低減できる。

課題

〇重水(残留水·付着水)の残量を推測する方法及び乾燥効率の向上等の乾燥方法の高度化 が必要である。

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 26-6-11

今後の予定

Fugen Decommissioning Project



今後の予定

- 〇これまで実績のある常温及び加熱通気乾燥、及び、加熱真空乾燥により、重水・ヘリウム 系設備のトリチウム除去を進める。
- ○重水冷却系の小径配管や原子炉補助建屋に設置されている重水系統のトリチウム除去に 資するため、高分子モジュール式の可搬式除湿装置(到達露点:-80°C)を本年度導入した。 本装置を用いて核融合科学研究所*との共同研究として「ふげん」でトリチウムの乾燥除去実
- 証試験を実施する。 *大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 核融合科学研究所



可搬式除湿装置の外観

高分子モジュール式除湿装置 パージガス の概念図 供給 立文 空気圧縮機 プレクーラー 水分選択透過膜 湿潤空気(中空糸状ポリイミド膜) 特徴 (高分子膜透過ガス+パージガス)

・低露点であるため、湿分の回収効率が高い。

・装置が小型・可搬式であるため、狭隘な場所でもトリチウム除去作業ができる。

乾燥方法の高度化

- ○重水残量の推測方法の開発
- 〇乾燥効率の向上試験

資料 26-6-12

装置仕様

•除湿方式:回収方式

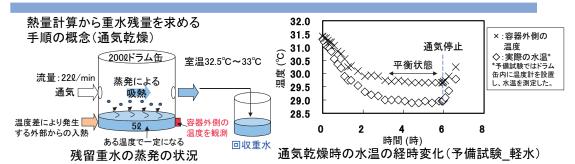
特殊高分子中空子膜 分離(真空ポンプ併用)

·到達露点:-80℃

•風量:50 L/min



課題「残量推測」の解決案① 常温通気乾燥の応用による重水の残量推測



外部からの入熱

(通気時)重水の蒸発:重水の蒸発量×蒸発潜熱

(停止時)重水の温度上昇:重水の残量×比熱×温度変化量 その他、重水の蒸発、機器配管類の温度上昇など

残留水量の推測精度は約60~80%

- ・本推測方法を用いるためには、さらなる精度向上が必要である。
- ・実機では場所によっては温度測定が困難な場合が考えられ、この解決が必要である。

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 26-6-13

Fugen Decommissioning Project



課題「残量推測」の解決案② 真空乾燥(非加熱)の応用による重水の残量推測

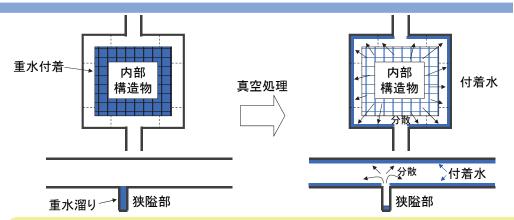
熱量計算から重水残量を求める 手順の概念(真空乾燥) 真空破壊 a点、b点の圧力を観測 Pa) 真空吸引 a点の圧力:3167 Pa <u>6</u> →重水温度 = 25°C 重水が熱を奪って b点の圧力: 1705 Pa 压力 蒸発する →重水温度 = 15°C 重水の温度変化量 器内 10°C 冷える 回収重水 回収時間(時) 残留重水の蒸発の状況 重水残量測定時の回収時間と容器内圧力の関係

重水残量の推測式

- ・ただし、実際の系は理想系と違うため、この推測式は補正を要する。
- (補正項は機器・配管類からの熱移動、容器内圧力から算出される残留重水の温度など)
- ・実機では機器・配管類の強度に応じて真空度が制限される場合があり、この解決が必要である。



課題「乾燥効率の向上」の解決案③ 真空乾燥(非加熱)の応用による重水の分散促進



概念

本法は加熱が困難な部分の乾燥を促進することを目的とする。

重水(蒸気)の分散速度は1/Pに比例する。

機器・配管類の圧力を10000 Pa ~ 3000 Palこ調整し、真空度を一定時間保持する。これにより内部構造物や狭隘部の局所的に残留した重水を系内に分散し、残留重水の分散量を増加させ、乾燥を促進する。

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)

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。

- ・解体撤去工事における各切断工法等の適用実績に関しては、他の原子力施設にも適用する ことを念頭におき切断工法に関するデータを取得して頂きたい。また、被切断物の処理・ 処分を考慮してデータの取得、評価をしていくことが重要である。
- ・解体作業計画の立案に関する検討については、廃止措置の計画は最初に策定するだけでは なく、状況に応じて適宜見直しを行い、精緻化することが重要である。また、最適解体シ ナリオの選定手法の新しい試みについては、実用性に重点を置いて検討を進めて頂きたい。
- ・重水回収・トリチウム除去作業の実績と知見に関しては、トリチウム防護服の着用無しで 解体可能なレベルまでのトリチウム除去というは大変重要である。一方、クリアランス制 度の適用を目指すのであれば、測定・評価方法に関し様々な難しい課題があると思われる。 しかしながら、核融合施設や海外においてもトリチウムを取り扱っている施設は多数ある ので、実用的なトリチウム除去方法が確立できれば非常に役に立つことになる。

国際単位系(SI)

表 1. SI 基本単位

| 基本量 | SI 基本単位 | | |
|-------|---------|-----|--|
| - 本平里 | 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 | Α | |
| 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 | | |
|-----------------------|----------------|--------------------|--|
| 知立重 | 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 | m³/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配号である数字の1は通常は表記しない。

| | | m + h | el. 1 : | Se 17 | - 5- 1 | OTAN - | 337.64 |
|---|----|-------|---------|-------|--------|--------|--------|
| 表 | 3. | 固有の名 | 称とi | 記号で表 | される | oSI組立 | - 単位 |

| よる |
|----|
| |
| |
| |
| |
| |
| |
| |
| |
| |
| |
| |
| |
| |
| |
| |
| |
| |
| |
| |
| |
| |
| |
| |
| |
| |
| |

(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

実際には、使用する時には記ずTauxvosia/10. (a)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、温度差や温度階層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、しばしば融った用語で"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4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例 | | | | | | | |
|------------------------------|-------------------|--------------------|--|--|--|--|--|
| | SI 組立単位 | | | | | | |
| 組立量 | 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 | $m^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$ | | | | |
| 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 | | | | |
| | クーロン毎立方メートル | C/m ³ | m ⁻³ sA | | | | |
| | クーロン毎平方メートル | C/m ² | m ² sA | | | | |
| | 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/m³ | m ⁻³ s ⁻¹ mol | | | | |

乗数 接頭語 乗数 接頭語 記号 記号 10^{24} 10 d 10^{21} 7. 10.2 c 10^{18} Е 10.3

SI 接頭語

m 10^{15} Р 10^{-6} 10^{12} Τ 10^{-9} 10^9 G $10^{\cdot 12}$ р 10^{6} Μ 10^{-15} 10⁻¹⁸ 10³ 10⁻²¹ ゼ h 10^{2} 10.24 10^{1} da

CIII 屋さわいが CIL 併田されて出た

| 表も、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 | |
| 目 | d | 1 d=24 h=86 400 s | |
| 度 | 0 | 1°=(п/180) rad | |
| 分 | , | 1'=(1/60)°=(п/10800) rad | |
| 秒 | " | 1"=(1/60)'=(п/648000) rad | |
| ヘクタール | ha | 1ha=1hm ² =10 ⁴ m ² | |
| リットル | L, 1 | 1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³ | |
| トン | t | $1t=10^3 \text{ kg}$ | |

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

| 名称 | 記号 | 22 1 12 17 17 17 17 17 | | |
|----------|----|--|--|--|
| 電子ボルト | eV | 1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J | | |
| ダルトン | Da | 1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻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)×10 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 | _ | ル | bar | 1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa |
| 水銀 | 柱ミリメー | トル | mmHg | 1mmHg=133.322Pa |
| オン | グストロー | ーム | Å | 1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m |
| 海 | | 里 | M | 1 M=1852m |
| バ | _ | ン | b | 1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ² |
| 1 | ツ | 卜 | kn | 1 kn=(1852/3600)m/s |
| ネ | _ | パ | Np | CI単位しの粉値的か関係は |
| ベ | | ル | В | SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。 |
| デ | ジベ | ル | dB ~ | |

±0 田右の夕新な↓ ○CCC知立単位

| 表 9. 固有の名称をもつUGS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 | $1 \text{ St} = 1 \text{cm}^2 \text{ s}^{-1} = 10^{-4} \text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ | | | |
| スチルブ | sb | 1 sb =1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻² | | | |
| フ ォ ト | ph | 1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx | | | |
| ガル | Gal | 1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻² | | | |
| マクスウェル | Mx | $1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$ | | | |
| ガ ウ ス | G | $1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$ | | | |
| エルステッド ^(c) | Oe | 1 Oe △ (10³/4π)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=3.7×10 ¹⁰ Bq | |
| レントゲン | R | $1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$ | |
| ラド | rad | 1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy | |
| ν Δ | 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 | $1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$ | |