

第31回ふげん廃止措置技術専門委員会資料集

Document Collection of the 31st Technical Special Committee
on Fugen Decommissioning

忽那 秀樹 山崎 浩一 門脇 春彦 井口 幸弘

Hideki KUTSUNA, Koichi YAMAZAKI, Haruhiko KADOWAKI and Yukihiro IGUCHI

バックエンド研究開発部門

原子炉廃止措置研究開発センター

Fugen Decommissioning Engineering Center

Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

June 2015

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発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。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 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
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, 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

第 31 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

バックエンド研究開発部門

原子炉廃止措置研究開発センター

忽那 秀樹、山崎 浩一※、門脇 春彦、井口 幸弘

(2015 年 3 月 31 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 27 年 3 月 13 日に開催した第 31 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”、“ダイヤモンドワイヤーソーによる実機材切断に係る基礎データの取得”、“トリチウム除去の進捗及び常温真空乾燥の効率評価”及び“「ふげん」における知識マネジメントシステム構築の取り組み方針について”について、資料集としてまとめたものである。

Document Collection of the 31st Technical Special Committee on Fugen Decommissioning

Hideki KUTSUNA, Koichi YAMAZAKI[※], Haruhiko KADOWAKI and Yukihiro IGUCHI

Fugen Decommissioning Engineering Center
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management
Japan Atomic Energy Agency
Myojin-cho, Tsuruga-shi, Fukui-ken

(Received March 31, 2015)

Fugen Decommissioning Engineering Center, in planning and carrying out our decommissioning technical development, has been 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”, “Applicability Test for Dismantling with the Diamond Wire Saw Using Equipments Used in Fugen”, “Status of the Tritium Removal and Evaluation of the Efficiency of the Room-temperature Vacuum drying” and “Integration Policy of Knowledge Management System for Fugen”, presented in the 31st Technical special committee on Fugen decommissioning which was held on March 13, 2015.

Keywords: FUGEN, Decommissioning, Diamond Wire Saw, Tritium Removal, Knowledge Management

※ Collaborating Engineer

Contents

1.	The 31st Technical Special Committee on Fugen Decommissioning	1
1.1	Introduction	1
1.2	Agenda.....	2
1.3	Members of the Technical Special Committee on Fugen Decommissioning.....	3
2.	Decommissioning Technology Development Report.....	4
2.1	The Current Situation of Fugen Decommissioning	5
2.2	Applicability Test for Dismantling with the Diamond Wire Saw Using Equipments Used in Fugen.....	11
2.3	Status of the Tritium Removal and Evaluation of the Efficiency of the Room-temperature Vacuum Drying.....	19
2.4	Integration Policy of Knowledge Management System for Fugen	27
3.	Review.....	39

This is a blank page.

1. ふげん廃止措置技術専門委員会(第 31 回)

1.1 はじめに

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 27 年 3 月 13 日に開催した第 31 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”、“ダイヤモンドワイヤーソーによる実機材切断に係る基礎データの取得”、“トリチウム除去の進捗及び常温真空乾燥の効率評価”及び“「ふげん」における知識マネジメントシステム構築の取り組み方針について”について、資料集としてまとめたものである。

1.2 議事次第

第 31 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 31 回ふげん廃止措置技術専門委員会 議事次第

第 31 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 27 年 3 月 13 日 13 : 20～16 : 15
2. 開催場所	独立行政法人日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 原子炉廃止措置研究開発センター 第 1, 2, 3, 4 会議室
3. 出席者	(委員) 石樽主査、井口委員、石倉委員、伊藤委員、友澤委員、中安委員、仁木委員、 宇野代理 (藤井委員代理)、山本委員、土田委員 (ふげん) 高橋所長、森下技術開発部長、打它計画管理課長代理 他
4. 次第	(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) ダイヤモンドワイヤーソーによる実機材切断に係る基礎データの取得 (6) トリチウム除去の進捗及び常温真空乾燥の効率評価 (7) 「ふげん」における知識マネジメントシステム構築の取り組み方針について (8) ご講評 (9) ご視察 (タービン建屋) (10) 次回の委員会について

1.3 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	石樽 顕吉	東京大学名誉教授
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	(一財)エネルギー総合工学研究所 参事 工学博士
委員	伊藤 英一郎	東京電力(株) 福島第一廃炉推進カンパニー プロジェクト計画部 廃棄物対策グループ 課長
委員	荻込 敏	日本原子力発電(株) 廃止措置プロジェクト推進室 調査役
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 主任教授
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	藤井 大士	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	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 バックエンド研究開発部門 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 原子力科学研究部門 量子ビーム応用研究センター 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31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

計画管理課 忽那 秀樹

- 「ふげん」の廃止措置スケジュール
- 平成26年度作業計画・実績
- クリアランス制度の運用に向けた取り組み
- 解体撤去工事
- 汚染の除去工事
- 設備維持管理の合理化
- 国際会議等報告



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 31-3-1

Fugen Decommissioning Project



「ふげん」の廃止措置スケジュール

運転 期間		廃止措置 準備期間								使用済燃料搬出期間								原子炉周辺設備 解体撤去期間						原子炉本体解体撤去期間								建屋 解体 期間		
H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	H31	H32	H33	H34	H35	H36	H37	H38	H39	H40	H41	H42	H43	H44	H45		
▼ 運転終了(H15/3/29)														第3期中期計画期間																				
▼ 廃止措置計画認可(H20/2/12)																																		
▼ 変更届(H23/3/22)																																		
使用済燃料搬出																																		
														重水・ヘリウム系、使用済燃料貯蔵プール 等の汚染の除去																				
														原子炉冷却系統施設、計測制御系統施設 等解体																				
														核燃料物質取扱施設、重水系 等解体																				
														原子炉領域 等解体																				
														換気系 等解体																				
														実施済み																				建屋解体

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 31-3-2



平成26年度作業計画・実績(1)

項目	年 月	平成26年										平成27年		
		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. クリアランス														
(1) 測定・評価方法の認可申請													申請 ▽...	審査 ...
2. 重水の搬出														
(1) 重水搬出														
(2) 重水搬出準備作業														
3. 解体撤去工事														
【タービン設備等の機器の解体撤去】														
(1) 復水器の解体撤去														
4. 汚染の除去工事														
【重水系・ヘリウム系等の汚染の除去】														
(1) 原子炉補助連壓機器のトリチウム除去														
① 重水浄化系														
② 劣化重水貯槽、重水貯槽等														
(2) 原子炉連圧機器のトリチウム除去														
① カランドリアタンク等														

■ : 実績 □ : 計画

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 31-3-3



平成26年度作業計画・実績(2)

項目	年 月	平成26年										平成27年		
		4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	
5. 「ふげん」を用いた研究開発														
(1) 高経年化等のための調査研究														
① ダイヤモンドワイヤソーの評価研究														
6. 汚染状況等の調査														
7. 設備・機器等の維持管理														
(1) 第27回施設定期検査														
(2) 設備の自主点検及び自主検査														
8. 国際協力等														
(1) OECD/NEA技術諮問グループ会議														
(2) CEA情報交換会議														
(3) KAERI情報交換会議														
(4) IAEAコンサルタント会合														

■ : 実績 □ : 計画

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 31-3-4



クリアランス制度の運用に向けた取り組み

H27.2.13：放射能濃度の測定及び評価方法の認可申請

原子力規制委員会URL: http://www.nsr.go.jp/disclosure/law/WST/20150213_01.html

《主な申請内容》

1. 対象物
「ふげん」の解体撤去工事で発生する解体撤去物のうちタービン建屋から発生する金属 約1,000トンを対象
2. 測定及び評価する放射性物質の種類
評価する放射性物質は、コバルト(Co-60)、トリチウム(H-3)等の重要10核種
3. 測定及び評価方法
・専用の放射線測定装置でγ線を測定することにより、コバルト(Co-60)の放射能濃度を評価
・その他9核種はサンプル分析結果に基づいて放射能濃度を評価



自動除染装置の設置(H26年度)



手動除染装置の設置(H22年度)
■H24年度～:除染作業

主な仕様

- 方式:ウェットブラスト
- 処理能力:～2トン/日
- プラスト材:ステンレス鋼(グリッド形状)

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)

主な仕様

- 方式:ウェットブラスト
- 処理能力:～0.5トン/日
- プラスト材:ステンレス鋼(グリッド形状)

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)



解体撤去物の一時保管状況
(H20年度～)



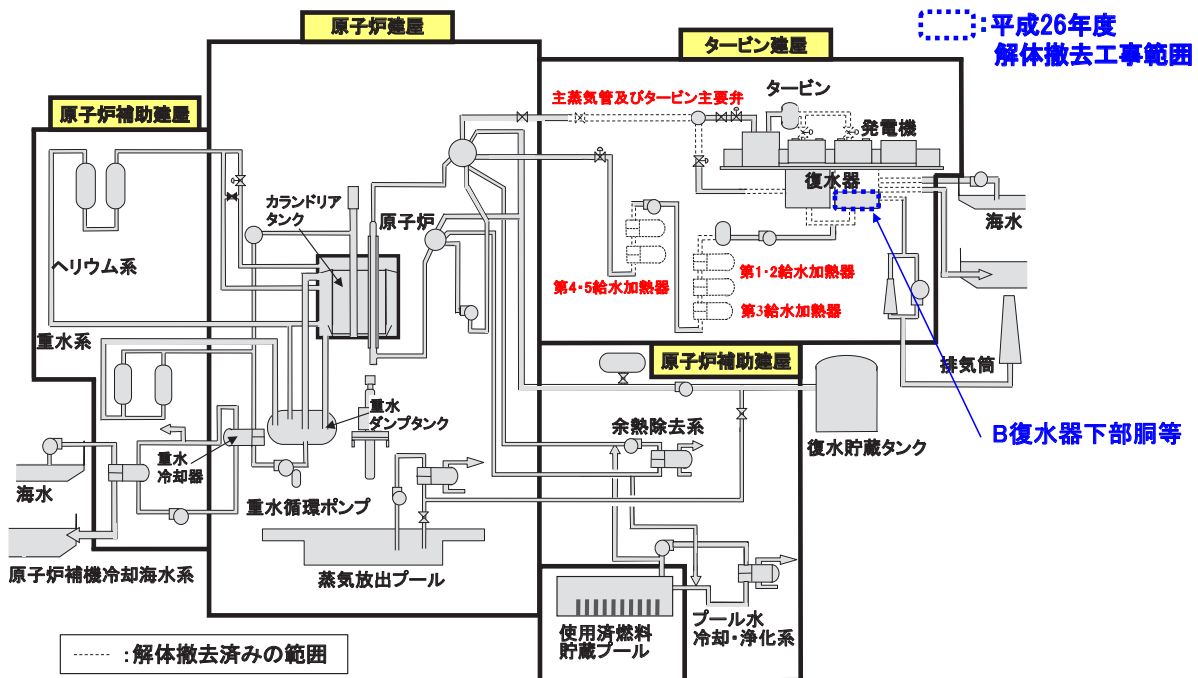
モニタ設置(H21年度)
■H22年度～性能データ等取得等

- 主な仕様
- 型式:トレイ型放射線測定装置
- 測定能力:～270トン/年
- 検出器:プラスチックシンチレーション(上下8個)

資料 31-3-5



解体撤去工事の実施範囲

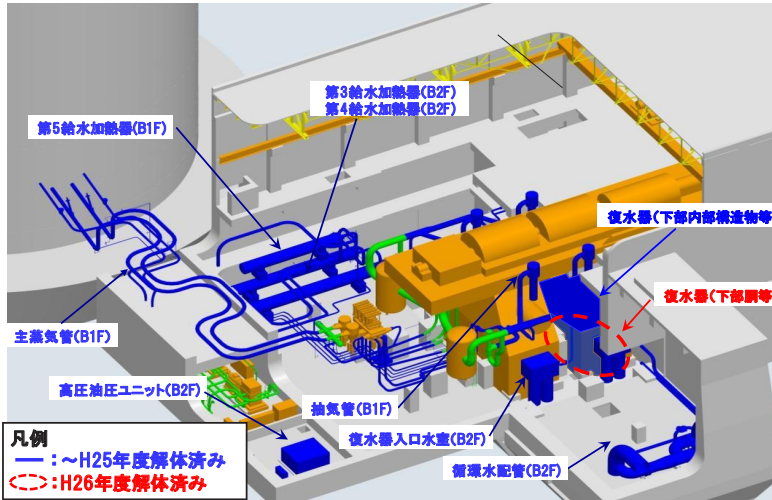


ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター(ふげん)

資料 31-3-6



解体撤去工事の実績



解体撤去物等の実績(トン)

年度	～H25年 度	H26年度 予想	H26年度 実績*1	合計*1
種類				
金属	821.1	48	54.8	875.9
保温材	32.8	0	0.0	32.8
コンクリート等	38.8	34	34.5	73.3
合計	892.2	83	89.3	982.0
二次廃棄物	30.5	9	11.0	41.5

(端数処理に伴い合計値が一致しないことがある。)

解体撤去作業等人工数(人・日)*2

～H25年度	H26年度 予想	H26年度 実績*1	合計*1
14,367	1,100	1,168	15,535

*1: データはH27年2月末現在

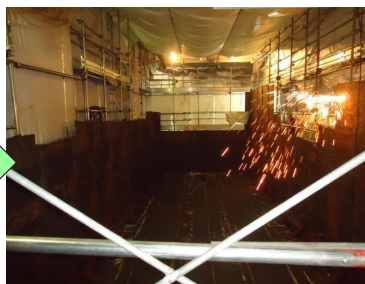
*2: 人工数は付帯作業を含む。



B復水器の解体撤去工事状況



解体撤去前のB復水器内部



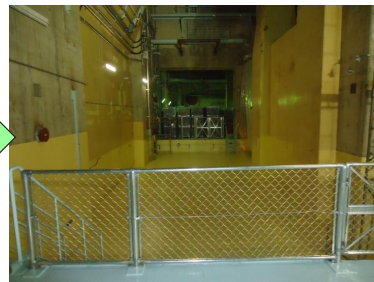
側壁部の解体撤去



底部の解体撤去



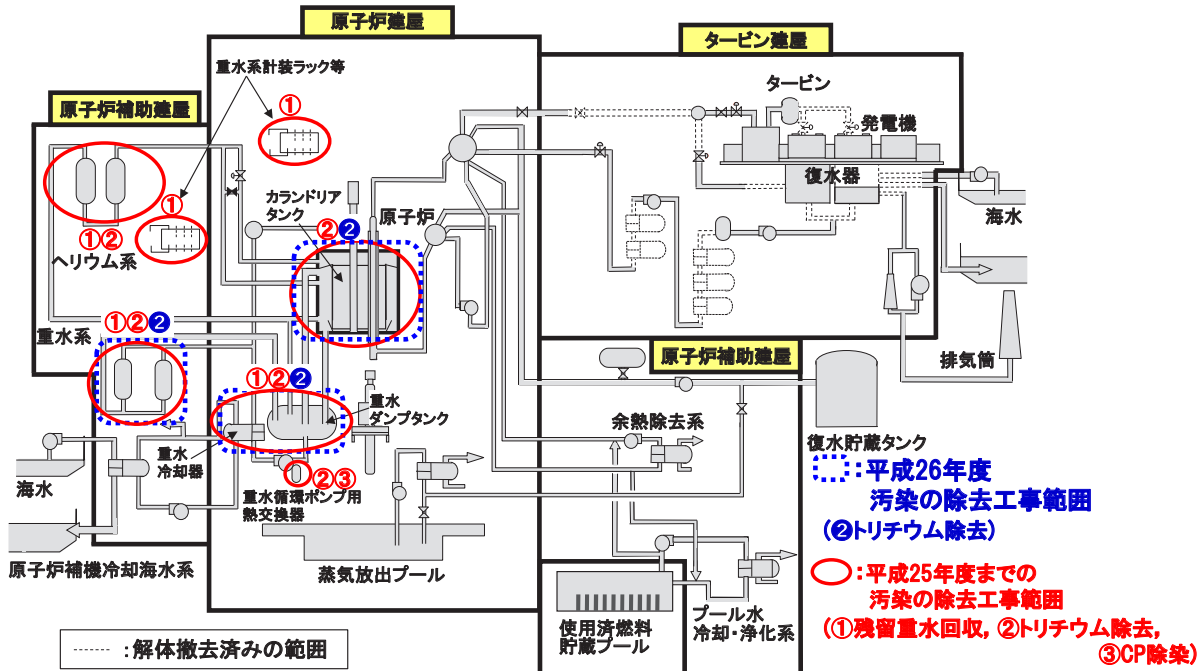
基礎コンクリートの解体撤去



解体撤去終了後



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 31-3-9



汚染の除去工事(残留重水回収、トリチウム除去)の作業状況

	作業概要	作業状況 (H27.2月末現在)
残留重水回収	弁操作によるドレンアウト後に、フランジの開放、配管の切断等により内部に残留する重水を回収	【H26.3作業完了】 残留重水回収量 2,139 リットル
トリチウム除去	加熱真空乾燥、加熱通気乾燥、常温通気乾燥、常温真空乾燥等により対象系統内のトリチウムを除去・回収	実施中



劣化重水貯槽、重水貯槽等のトリチウム除去作業の状況



カランドリアタンク等のトリチウム除去用真空ポンプ(4台)

原子炉建屋			原子炉補助建屋				
			: 作業完了				
主な機器	残留重水回収量 (リットル)	トリチウム除去	階	系統・エリア	主な機器	残留重水回収量 (リットル)	トリチウム除去
◆カランドリアタンク ◆重水冷却器 ◆ダンプタンク	107.8※	実施中	3F	ヘリウム浄化系室	◆再結合器 ◆脱湿器	10.0	完了
				ボイズン供給系	◆ボイズン溶解槽	20.9	完了
				計装ラック	◆計装配管	0.4	今後実施予定
◆重水循環ポンプ用熱交換器	0.3	完了	2F				
◆R/B重水ドレンタンク	119.9	実施中	1F	重水浄化系室	◆重水浄化塔 ◆ボイズン除去塔	61.5	完了
			B1F	劣化重水貯槽室	◆劣化重水貯槽 ◆浄化系重水貯槽 ◆計装ラック	601.8	実施中
			B2F	重水貯槽室	◆重水貯槽室 ◆A/B重水ドレンタンク	1216.5	実施中

※カランドリアタンク等のトリチウム除去装置による回収を一部含む。

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 31-3-10



設備維持管理の合理化

所内補助ボイラー合理化

- ボイラー使用開始：S50年度～
- プラント運転期間：ボイラー 2基供用
(蒸気供給先)
・プラント起動停止時の蒸気タービンの軸封用(運転終了後不要)
・廃液処理加熱用
・空調暖房用 等

➤ 開放検査周期認定制度の適用

- 開放検査周期(2年)認定(H18年度)
- 開放検査周期(4年)認定(H23年度)

➤ 燃料変更

- 軽油 ⇒ 灯油(H20年度)

➤ ボイラー更新

- 1基撤去(H24年度)
- 撤去エリアに小型ボイラー4基設置(H26年度)



新たに設置した小型ボイラー外観

ボイラー仕様比較表

	既設ボイラー	新規ボイラー
法規区分	ボイラー	小型ボイラー
型 式	水管式パッケージボイラー	小型貫流ボイラー
基 数	2基	4基
最高使用圧力	0.96 MPa	0.98 MPa
使用圧力	0.69 MPa	0.69 MPa
蒸発量	7,500 kg/h/基	1,670 kg/h/基

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 31-3-11

国際会議等報告



OECD/NEA技術諮問グループ会議(TAG57)

OECD/NEA廃止措置協力計画のもとで開催される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実施

- 開催期間：平成26年10月13日～17日
- 開催場所：Joint Research Center, Ispra(イタリア)

[主な報告例]

- Jose Cabrera NPP(スペイン)
 - PWR(160MW)は2006年に運転を終了し、廃止措置を実施中。原子炉冷却ポンプをワイヤーソーにより解体済み、水中でのバンドソーによる原子炉圧力容器(RPV)の解体を現在実施中
- KNK(ドイツ)
 - 高速実験炉は1991年に運転終了して廃止措置に移行。現在はミリング切削・把持・吊り上げ等の多機能遠隔装置を開発し、鋳鉄製の1次遮へい体の遠隔解体作業を実施中
- Bohunice A1(スロバキア)
 - 重水減速ガス冷却炉は1999年から廃止措置開始。これまでに、運転中に発生した放射性廃液及びスラッジを貯蔵していた屋外タンクの除染・解体撤去を実施

[現場調査]：Joint Research Center Ispraサイト

- 放射性廃棄物の回収と安全貯蔵
 - 老朽タンク等に保管されている中レベル放射性廃棄物を回収し、安全な貯蔵タンクに移し替える作業を実施。空になった容器を今後解体する予定
 - 過去にサイト内に埋設した中低レベル固体廃棄物を掘り起こして回収する作業を実施中。今後リコンディショニングして最終処分体にする。
 - 中低レベル固体廃棄物のサイト内中間貯蔵施設(ISF : Interim Storage Facility)を建設。最終処分場に搬出するまでの間、安全貯蔵を行う。
- 燃料試験炉の廃止措置
 - 燃料試験炉ESSOR(熱出力25MWの重水減速有機材冷却炉、1968年に運転、1983年に恒久停止)は廃止措置準備中。重水は海外機関へ搬出済み、環境評価(安全評価)の後、廃止措置を開始予定

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）

CEAとの情報交換会議

原子力機構とフランス原子力・代替エネルギー庁(CEA)との間で締結されている「原子力の包括的協力協定」に基づく、「解体と廃止措置」及び「廃棄物処理技術」の2つの特定分野に関する情報交換会議において、意見交換を実施

- 開催期間：平成26年11月17日～21日
- 開催場所：JAEA 原子力科学研究所、レーザー共同研究所並びに原子炉廃止措置研究開発センター
- レーザー切断技術について意見交換
 - ふげんの原子炉本体解体時のレーザー切断技術開発状況について発表
 - 切断時の粉塵挙動や遠隔解体技術、水中切断試験について意見交換
 - JAEAレーザー共同研究所設備を視察
- ふげんの現場視察
 - タービン建屋の解体物保管状況、復水器解体状況等を視察

KAERIとの情報交換会議

韓国原子力研究所(KAERI)とJAEAとの間の原子力の平和利用分野における協力のための取り決めに基づき開催される情報交換会議において、意見交換を実施

- 開催期間：平成26年9月15日～19日
- 開催場所：KAERI(Daejeon)、KORAD(Gyeongju)
- 環境汚染状況評価及び除染技術について意見交換
 - 東電福島第一原発事故におけるサイト周辺環境の除染について、除染技術や作業現場の状況について発表
 - 汚染サイトの土壌表層から深さ0.5mにおける汚染状況の評価技術について意見交換
- KORAD(低レベル廃棄物処分場)の現場視察
 - 廃棄物の処分状況等を視察

資料 31-3-12

2.2 ダイヤモンドワイヤーソーによる 実機材切断に係る基礎データの取得

Fugen Decommissioning Project



ダイヤモンドワイヤーソーによる 実機材切断に係る基礎データの取得

報告概要

技術開発部 技術調査課 山崎浩一

- > 目的
- > ダイヤモンドワイヤーソーについて
- > 作業内容
- > データ評価
- > まとめと今後の課題



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 31-4-1

目的

Fugen Decommissioning Project



- ダイヤモンドワイヤーソーを活用して「ふげん」の実機材を切断し、廃止措置等の解体作業への適用性を検討するための基礎データを取得（株式会社クリハラントとの共同研究）

- ① コールド試験：材質が異なる原子炉構造模擬材を切断し、切断効率とダイヤモンドワイヤーの耐久性のデータを取得
- ② ホット試験：従来の切断工法では困難であった大型構造物への適用性を確認するため、「ふげん」実機材を切断し、切断効率と人工数や作業時間等の実績データ、二次廃棄物の発生量データを取得

◆ ダイヤモンドワイヤーソーの特長

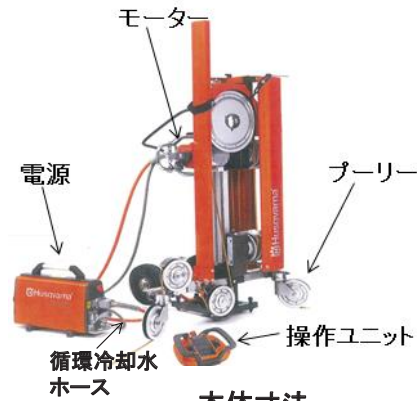
- ① 様々な材質・形状の物を切断可能
- ② 狭隘な場所でも安全に切断可能

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）

資料 31-4-2



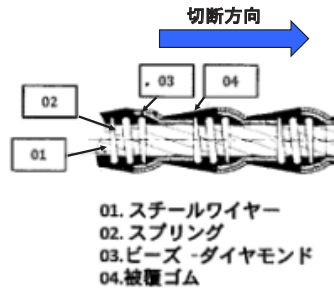
ダイヤモンドワイヤーソーの仕様



本体寸法
幅1.0m × 奥行き0.6m × 高さ1.9m

出力: 13kW
回転速度: 0-1200rpm
初期トルク: 100Nm
重量: 135kg

●従来はコンクリートの切断が主流であったが、近年ダイヤモンドワイヤーの開発に伴い金属の切断が可能となった。



- ・ビーズ間隔: 11.0mm 約92ビーズ/m
- ・ビーズ切断部直径: 10.0mm
- ・ビーズ間のゴム被覆: ビーズの偏りを防ぎ、ビーズ間隔及び柔軟性を維持
- ・ジョイント部: 疲労劣化するため、切断時間約1時間で交換
- ・重量: 約0.3kg/m

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 31-4-3



コールド試験について

- 「ふげん」原子炉解体への適用性を確認するために、基礎データとして原子炉構造材を対象に切断効率とダイヤモンドワイヤーの耐久性のデータを取得
 - ・切断効率試験・・・各試験片の切断面積と切断時間を測定
 - ・切断耐久試験・・・ワイヤー1本(10m)で切断可能な切断面積と切断時間を測定

作業ステップ

- ・作業要領書の確認
- ・作業前教育
- ・作業着手前調査
- ・資機材の搬入(1日間、計5人)
- ・切断作業準備(2日間、計9人)
- ・切断作業(4日間、計20人)
- ・後片付け(2日間、計10人)

◆作業エリアの安全対策

- ・切断対象物の転倒防止用に固縛措置を実施
- ・切粉の飛散防止のためG/Hを設置
- ・ワイヤーの飛び跳ねの対策として防護ネット、防護フェンスを設置
- ・火気作業のため消火器の設置、難燃シート、防災シートの使用
- ・火災警報(煙感知器)の誤作動対策として集塵機の設置



固縛措置



G/H設置状況



集塵機



使用した外部電源

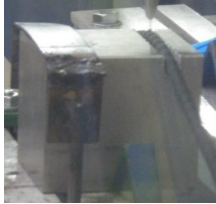
ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 31-4-4



コールド試験(切断対象物)

コールド試験は、以下の試験片で実施



断面寸法 100X100mm 断面寸法 内管: $\phi 127$ $t=16\text{mm}$
外管: $\phi 190$ $t=10\text{mm}$

ステンレス鋼: カランドリアタンク、延長管等

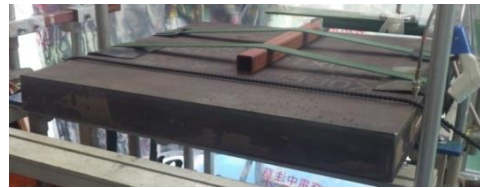


断面寸法 内管: $\phi 126$ $t=4\text{mm}$
外管: $\phi 160$ $t=2\text{mm}$

ジルコニウム合金: 圧力管、カランドリア管



断面寸法 150X100mm



*耐久試験用 断面寸法 1000X100mm

*ダイヤモンドワイヤーの耐久性のデータを取得

クロムモリブデン鋼: 軽水炉圧力容器

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 31-4-5

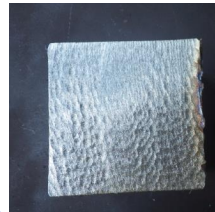


コールド試験(切断結果)

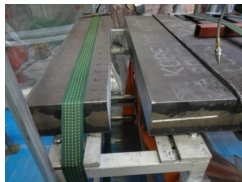
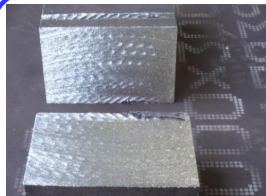
試験条件

	ワイヤー速度 (m/s)
クロムモリブデン鋼(角材)	10~12
クロムモリブデン鋼(角材)	9
<耐久試験>	
ステンレス鋼(角材)	10~12
ステンレス鋼(二重管)	10~12
ジルコニウム合金(二重管)	7~9

・ジルコニウム合金は切粉の燃焼を防止するため速度を7~9m/sとした。

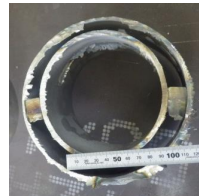


ステンレス鋼: カランドリアタンク、延長管部等



*耐久試験用

クロムモリブデン鋼: 軽水炉圧力容器



ジルコニウム合金: 圧力管、カランドリア管

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 31-4-6



ホット試験について

- 大型構造物である「ふげん」の実機材を切断し、基礎データとして切断効率と人工数や作業時間等の実績データ、二次廃棄物の発生量データを取得

作業ステップ

- ・作業要領書の確認
- ・作業前教育
- ・作業着手前調査
- ・資機材の搬入(1日間、計5人)
- ・切断作業準備(3日間、計14人)
- ・切断作業(7日間、計34人)
- ・後片付け(3日間、計15人)

◆作業エリアの安全対策

- ・切断対象物の転倒防止用に固縛措置を実施
- ・G/Hの設置
- ・ワイヤーの飛び跳ねの対策として防護ネット、を設置
- ・火気作業のため消火器の設置、難燃シート、防災シートの使用
- ・局所排風機、ダストサンプラー設置
- ・G/H内での作業はD装備一式、全面マスク、タイベックスーツ、赤長靴を装備

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）



実機材（給水管逆止弁）
の運搬作業



固縛措置



設置したG/H



プーリー調整作業

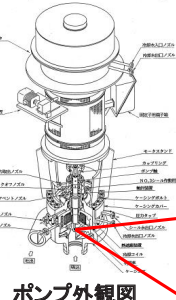
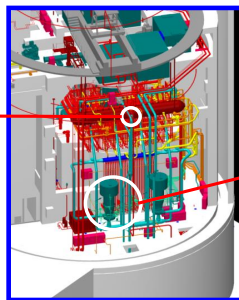
資料 31-4-7



ホット試験（切断対象物）

- 作業場所：原子炉建屋

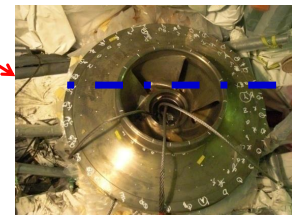
- 実機材の切断対象物は 大きさ、形状、材質、肉厚等を考慮して、以下の原子炉冷却給水管逆止弁とAループ原子炉再循環ポンプインペラーを選定した。



給水管逆止弁

—: 切断位置

- ・給水管逆止弁(SCS16A)
幅 約600mmX高さ 約800mm
肉厚 最大箇所170mm
- ・インペラー(SCS13)
幅 約950mmX高さ 約400mm
肉厚 最大箇所60mm



インペラー

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 31-4-8



ホット試験(切断結果)

試験条件

	ワイヤー速度 (m/s)
SCS16A(給水管逆止弁)	9~13
SCS13(インペラー)	8~12



・給水管逆止弁



・インペラー

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 31-4-9



切断効率試験及び切断耐久試験結果

◆切断効率試験結果

	試験 内容	切断面積 (cm ²)	切断時間 (min)	切断効率 (cm ² /min)
ステンレス鋼(角材)	コールド	100	10	10.0
ステンレス鋼(二重管)	コールド	110	19	5.8
ステンレス鋼(インペラー)	ホット	700	121	5.8
ステンレス鋼(給水管逆止弁)	ホット	1840	482	3.8
クロムモリブデン鋼(角材)	コールド	150	14	10.7
ジルコニウム合金(二重管)	コールド	26	9	2.9

◆切断耐久試験結果(コールド試験) ワイヤー速度:9m/s

	切断面積 (cm ²)	切断時間 (min)
クロムモリブデン鋼(角材)	1500	315

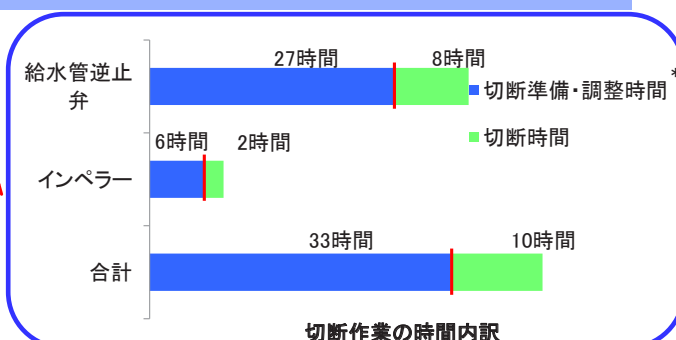
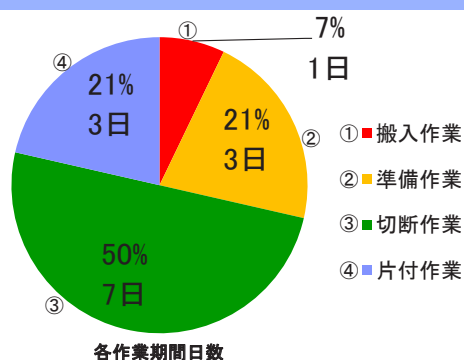
ワイヤー1本(10m)で切断できた
切断面積と切断時間

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 31-4-10



作業実績データ①



*切断準備・調整時間ではプーリー位置の手動調整等を行う。

- 現場作業責任者1名、副責任者(作業オペレーター)1名、放射線管理員1名、作業員2名の計5名で作業を実施
- 作業期間14日間、そのうち切断作業実施期間は7日間
- 切断作業に要する時間は延べ43時間、そのうち実切断時間は10時間切断準備・調整時間が切断作業に要する時間の約80%を占める。
- オペレーターはG/H外から遠隔操作し、切断完了すると装置は自動停止する。



作業オペレーターによる遠隔操作

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 31-4-11



作業実績データ②

	切断面積 (cm ²)	切粉発生量(計算値)* (kg)	切粉発生量(実測値) (kg)
給水管逆止弁	1840	14.68	20.95
インペラー	700	5.59	

*: 切断面積×ワイヤー径で算出

- 切断面積から算出された切粉発生量20.27kgに対して、G/H内を清掃し回収した切粉量は20.95kgとほぼ同等となった。
- 局所排風機、ダストサンプラーを使用しているが、切粉の発生量が計算値と実測値でほぼ同等であることから、ダイヤモンドワイヤーソーでの切断作業では切粉は床面に落ち、舞い上がりにくいと推測される。そのため、汚染物や放射化した部材の切断の際にもG/H内に拡散するおそれは低いと考えられる。
- 今回の作業での計画線量は、過去の実績等から1.00人・mSvとしたが、約1/4の0.23人・mSvであった。このうち切断作業は、空間線量<0.01mSv/hの環境で行い、0.07人・mSv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 31-4-12



熱的切断工法(スターカッテンド)との比較

- 厚肉の給水管逆止弁との比較例として、過去に実施した熱的切断工法作業で厚肉(120mm程度)のSUS材を切断した例:再循環ポンプ溶断(H21年度作業)

■コールド試験データ

切断工法	スターカッテンド	ダイヤモンドワイヤーソー
必要機器	溶接機、酸素ボンベ、ヒュームコレクター	ダイヤモンドワイヤーソー、冷却水(装置循環)
切断効率	材質 SUS304 切断面積 10X15cm 切断時間 3min 効率 50.0cm ² /min  *作業は屋外で熱線工が実施	材質 SUS304 切断面積 10X10cm 切断時間 10min 効率 10.0cm ² /min  *コールド試験でのデータ

■スターカッテンドでの実機材(再循環ポンプ)の切断作業



防火対策エリア



二重ハウス



溶断①



溶断②

- ・防火対策として鉄板等を用いた切断エリアを作成し、それを覆う二重ハウスを設置するため、作業エリアが余分に必要
- ・ヒュームが発生するため、ヒュームコレクターの設置が必要
- ・溶断を行う作業員やその補助を行う作業員には防火装備が必要
- ・切断効率はダイヤモンドワイヤーソーの5倍程度

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 31-4-13



まとめ

- ダイヤモンドワイヤーソーで厚肉のSUS材である「ふげん」実機材の切断ができることを確認した。
- 「ふげん」において厚肉のSUS材の切断は、過去に熱的切断工法(スターカッテンド)を用いた実績はあったが、ダイヤモンドワイヤーソーによる機械的切断工法について初めて基礎データを取得した。
- 切断耐久試験の結果、切断に必要な作業時間が推測できる見通しを得た。
- 切断作業では、切断準備・調整作業が約80%と大半の作業時間を占める。
- 発生する二次廃棄物(切粉)は断面積とワイヤー径から推測が可能である。
- ヒュームがほとんど発生しないのでヒュームコレクターや防火対策用の二重ハウスの設備が不要であり、小型G/Hでの作業が可能である。

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 31-4-14



今後の課題

- 切断作業時間の約80%を占める、準備・調整作業の効率化、作業時間の短縮を検討する。
- 今回のホット試験は小型G/Hで作業したが、解体対象機器等が設置されている狭隘な場所での作業を想定した更なる作業エリアの縮小、G/H小型化が可能か検討する。
- 再循環ポンプ等、複数の部材で構成されている構造物を分解工程を省き、設置場所で一度に切断可能か検討する。

2.3 トリチウム除去の進捗及び 常温真空乾燥の効率評価

Fugen Decommissioning Project



トリチウム除去の進捗及び 常温真空乾燥の効率評価

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
- 重水回収・トリチウム除去の実績のまとめ
- 実効真空排気速度の計算の精度・誤差の検証
- 常温真空乾燥作業の計画及び進め方
- まとめと今後の予定

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）

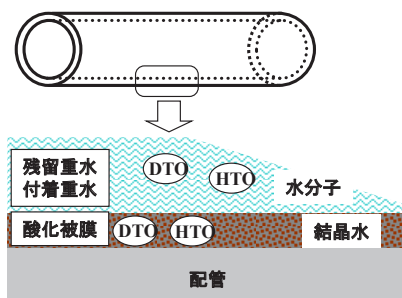
資料 31-5-1

Fugen Decommissioning Project



「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： 2.6×10^8 Bq/cm³（平成15年3月-運転停止時）



○トリチウムの状態

- ・残留重水及び付着重水（水分子）と
酸化被膜中重水（結晶水）

○酸化被膜中トリチウム

- ・付着重水除去後に空気中に拡散

○トリチウム放出率（常温環境下）

- ・付着重水除去直後： $\sim 10^2$ Bq/cm²/hour
- ・2,000時間～3,000時間経過後： $\sim 10^{-2}$ Bq/cm²/hour



このよう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

- ① フランジ開放及び穿孔等による残留重水の回収
- ② 通気乾燥、真空乾燥及び軽水洗浄による残留重水・付着重水の除去
- ③ 空気置換による酸化被膜中トリチウムの除去

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 31-5-2



重水回収・トリチウム除去の方法

ステップ1 残留重水の回収

目的: 重水の再利用とステップ2におけるトリチウム汚染の防止
方法: 弁操作、フランジ開放、配管穿孔及び切断



ステップ2 残留重水・付着重水の除去

目的: ステップ3におけるトリチウム汚染の防止
方法: トリチウム除去対象に通気乾燥装置を接続し通気乾燥を実施
または真空乾燥装置を接続し真空引きを実施
必要に応じて対象をリボンヒーター等により加熱
その他、必要に応じて部分的な軽水洗浄を実施



ステップ3 酸化被膜中トリチウムの除去

目的: トリチウム防護具(エアラインマスク)の着用無しで解体撤去が可能なレベル
(作業環境空气中濃度: 8×10^{-2} Bq/cm³)にトリチウム放出を抑える。
方法: 通気、真空引き、及び、必要に応じて部分的な軽水洗浄

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 31-5-3



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	平成 25年度	平成 26年度	平成 27年度
(1)通気乾燥及び真空乾燥の実機適用性評価試験	重水循環ポンプ用熱交換器(系統から取り外し) ・常温通気乾燥 ・加熱通気乾燥 ・加熱真空乾燥							
(2)-1 原子炉建屋の系統のトリチウム除去(残留重水の回収含む)	カランドリアタンク等 ・常温通気乾燥						カランドリアタンク等 ・常温真空乾燥	
(2)-2 原子炉補助建屋の系統のトリチウム除去(残留重水の回収含む)	He浄化系 ・加熱真空乾燥		ポイズン供給系 ・加熱真空乾燥		重水浄化系 ・常温真空乾燥			
					重水浄化系 ・常温通気乾燥		劣化重水貯槽、重水貯槽等 ・常温真空乾燥	

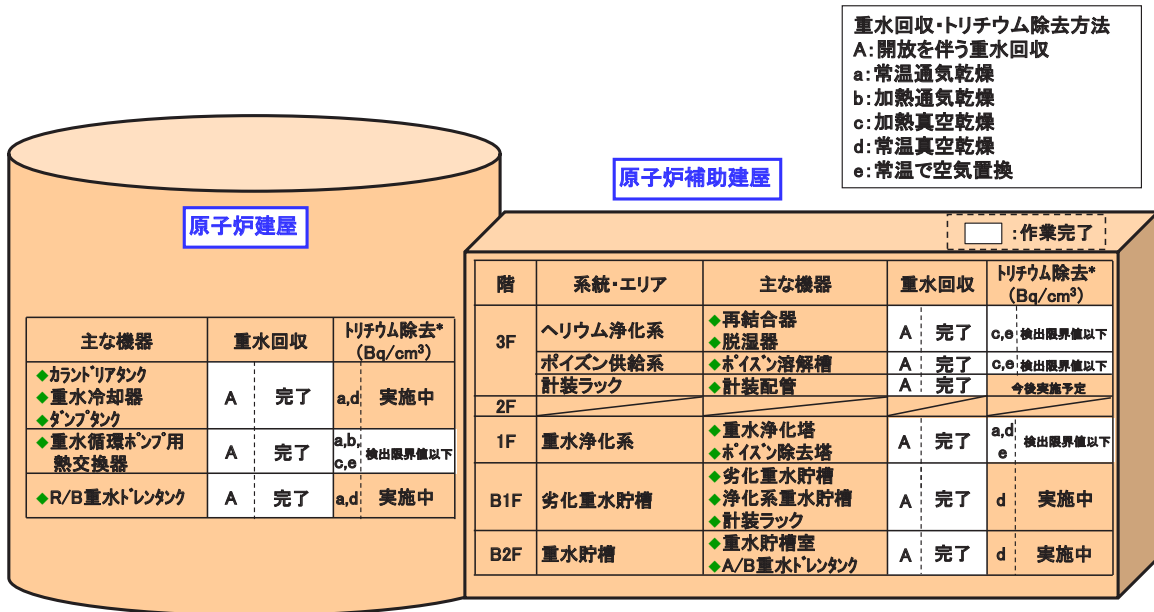
ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター (ふげん)

資料 31-5-4



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27年2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 31-5-5



常温真空乾燥の効率評価の検討

状況 これまでの検討で、系統の残留重水・付着重水の除去に対し、常温真空乾燥が実用的であることを確認した。また、この真空乾燥において実効真空排気速度*が大きく影響することを示した。

*真空ポンプの排気速度、配管の口径・長さ及び圧力から求められる値



課題 この実効真空排気速度は乾燥速度に直結する。真空乾燥装置の設計の段階においてトリチウム除去の工程を計画するには、様々な条件における実効真空排気速度の計算精度を確認しておく必要がある。



本検討 ①常温真空乾燥の実施条件が異なる幾つかのデータを用いて、真空ポンプ及び配管の条件から計算される実効真空排気速度（乾燥速度）と、実際の乾燥速度を比較し、計算の精度・誤差を評価する。

②常温真空乾燥では残留重水への入熱に限界があるため、乾燥効率には上限がある。本件では対象規模の大きさに応じた、適切な真空乾燥装置の仕様（構成）を見出す。

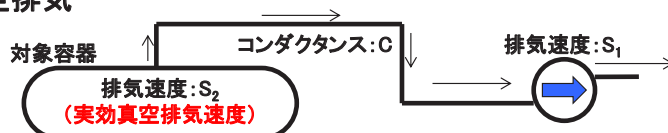
ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター（ふげん）

資料 31-5-6



対象の実効真空排気速度及び乾燥速度の計算

対象の実効真空排気
速度の計算



コンダクタンス計算 (流体の流れやすさの指標)

$$\text{実験式 } C = a \times P \times D^4 / L$$

C:コンダクタンス [m³/min]

P:配管内の流体の圧力 [Pa]

D:配管直径 [m]

L:配管長さ [m]

a:係数 [1/Pa・min]

実験式の適用条件

配管長さ / 配管直径 > 10を満たす

温度が20℃程度するとき

a = 80940

真空排気速度計算

$$\text{実験式 } 1/S_2 = 1/S_1 + 1/C$$

S₂:対象の排気速度 [m³/min]

S₁:真空ポンプの排気速度[m³/min]

C:コンダクタンス [m³/min]

$$1/S_2 = 1/S_1 + 1/(80940 \times P \times D^4 / L)$$

参考: アルバック販売株式会社, “粘性流領域のコンダクタンス計算”

https://www.ulvac-es.co.jp/corp/products/compo/pump/13_haiki_teiko.html

乾燥速度の計算

気体状態方程式

$$n = (P \times V) / (8.314 \times T)$$

n:残留重水の乾燥速度 [mol/min]

P:重水蒸気圧[Pa]

V:真空排気速度計算値 [m³/min]

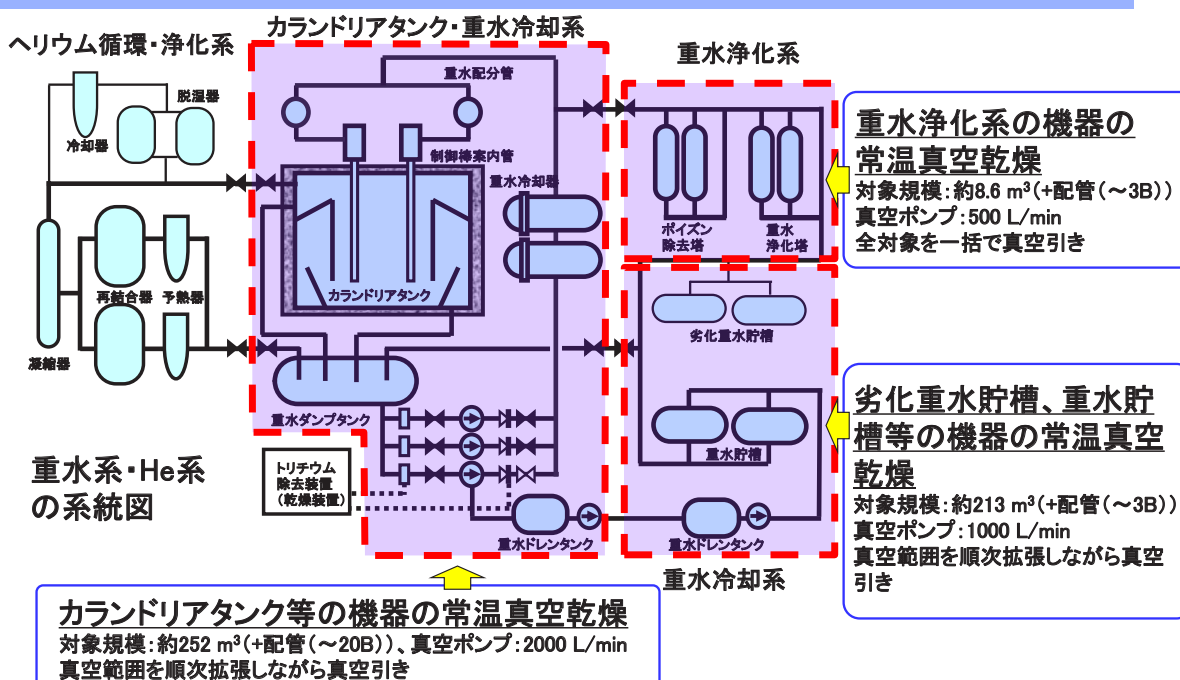
T:温度 [K]

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 31-5-7



常温真空乾燥による残留重水・付着重水の除去の対象範囲

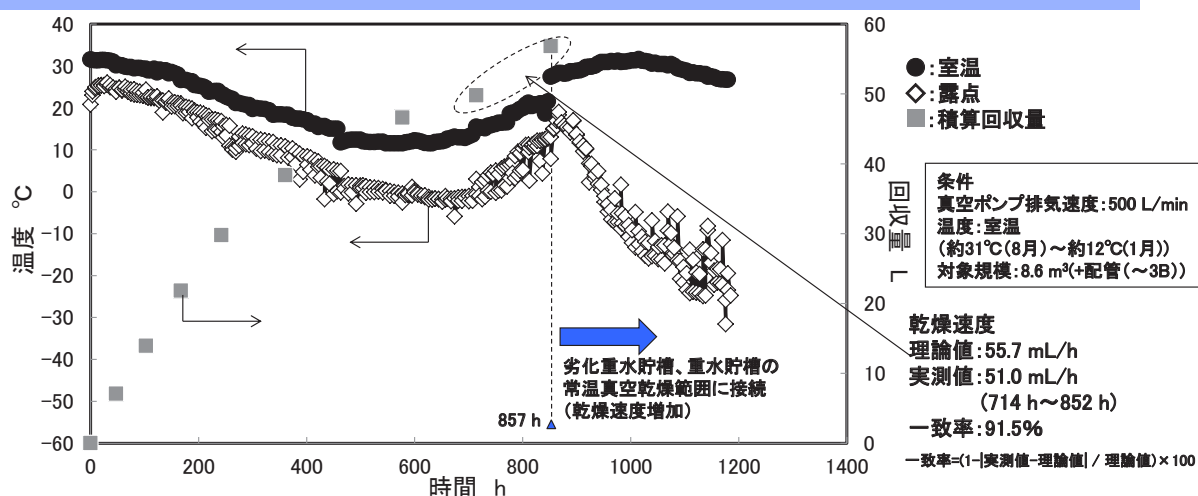


ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター (ふげん)

資料 31-5-8



重水浄化系の残留重水・付着重水の除去の結果



重水浄化系の機器の常温真空乾燥における室温、露点及び重水の乾燥回収量の経時変化

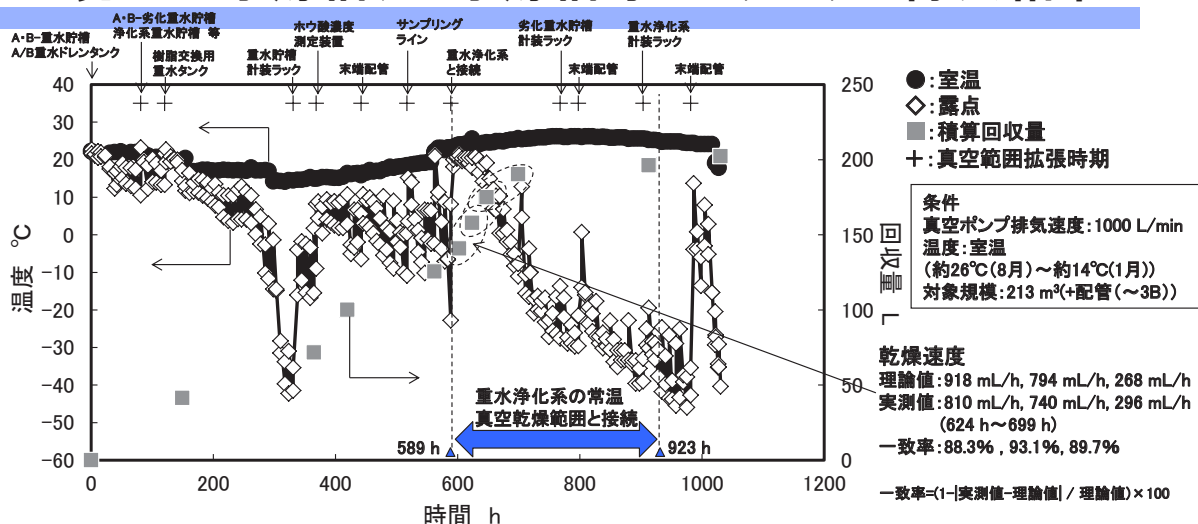
重水浄化系(8.6 m³(+配管))を常温真空乾燥することにより、積算回収量が増加した。乾燥速度について理論値と実測値は概ね一致した(一致率:91.5%)。なお、857 h時点において乾燥速度を上げるため、実効真空排気速度が高い劣化重水貯槽、重水貯槽の真空乾燥範囲に接続した(重水浄化系の真空排気速度(概算値):50 L/min→600 L/minに増加)。1180 hにおいて対象全体の露点が-20°C以下に到達し、これにより常温真空乾燥を完了して第3ステップの系統の空気置換に移行した。

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 31-5-9



劣化重水貯槽、重水貯槽等のトリチウム除去結果



劣化重水貯槽、重水貯槽等の機器の常温真空乾燥における室温、露点及び重水の乾燥回収量の経時変化

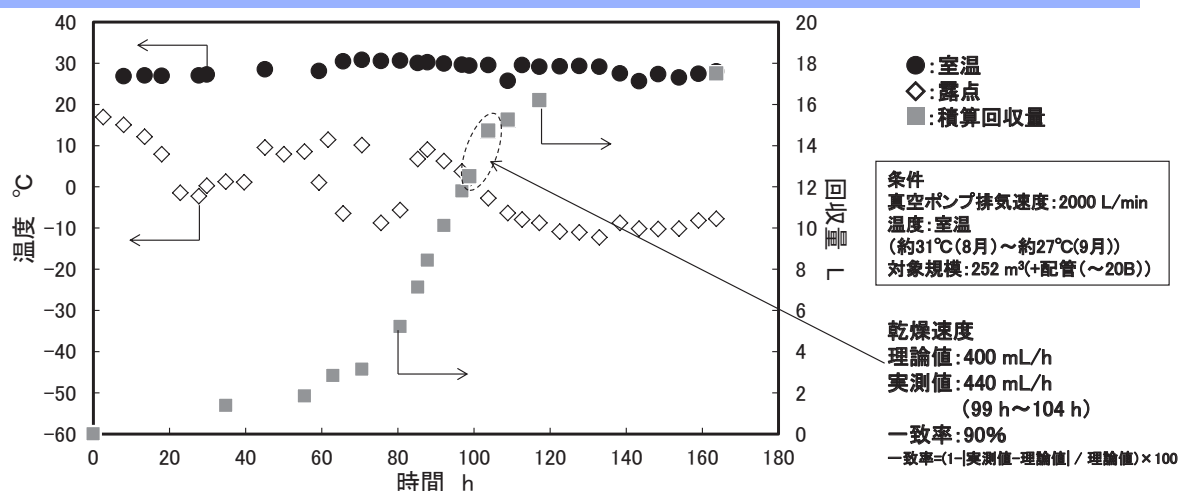
本対象は規模が大きいため、真空範囲を順次拡張しながら真空引きした。拡張することにより露点が上昇し、積算回収量の増加が大きくなる傾向が見られた。乾燥速度について、理論値と実測値は概ね一致した(一致率:88.3%～93.1%)。これにより対象の条件や真空ポンプの排気速度の条件が変わっても、乾燥速度を推定する計算に適用できることを確認した。なお、589 h時点において重水浄化系の真空乾燥の効率化のため、当該系を真空排気速度が高い本系に接続した。

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 31-5-10



カランドリアタンク等の機器のトリチウム除去結果



カランドリアタンク等の機器の常温真空乾燥における室温、露点及び重水の乾燥回収量の経時変化

本系について、H21年～H26年に常温通気乾燥を実施し、構成機器の大部分は乾燥済みの状態である。今回の真空引きにおいて、露点は真空乾燥初期では17°Cであったが、約120 h後に-10°C程度に低下した。乾燥速度について理論値と実測値は概ね一致した(一致率: 90%)。本条件においても乾燥速度を推定する計算を適用できることを確認した。

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 31-5-11



計算の精度・誤差の検証

計算の精度

実効真空排気速度と気体状態方程式から求めた重水の乾燥速度について、重水浄化系、劣化重水貯槽・重水貯槽、及び、カランドリアタンク等の機器のそれぞれの実測値において、計算精度は90%程度を示した。このことから、本計算による乾燥速度の評価は異なる条件においても高い計算精度をもつことが示された。これにより本計算を活用することで、適切な真空ポンプ及び接続配管を選定し、また、対象規模(重水残留量)と乾燥速度から作業期間を設定できることが示された。

誤差要因

実際に真空乾燥を進めているときに、乾燥速度(重水の積算回収量)の計算誤差は工程の進捗管理に悪影響を及ぼす。従って、より良い工程管理のためには誤差を小さくする必要がある。以下に誤差になる要素とその改善法を列挙した。

・真空度

真空度が低い条件では、系統の真空引きにより真空乾燥装置系統に空気の流れが生じ、これによって冷却凝縮器での重水蒸気の回収が妨げられるため、重水回収量が減少する。真空引き初期やインリークがある場合に大きく影響する。
→乾燥速度の計算誤差を小さくするためには、対象の真空度が上がった状態のデータで評価する必要がある。

・真空乾燥装置の冷却器能力

重水蒸気が液体に凝縮するとき、2526 kJ/L(liquid)の凝縮潜熱の除去が必要になる。真空乾燥装置の冷却器の性能が凝縮潜熱の量に見合わない場合には、重水蒸気が一部凝縮されずに排気系に移送され、乾燥回収量が低くなる。
→誤差を小さくするためには、真空乾燥装置の冷却器には凝縮潜熱に対し十分な冷却能力を持つものが必要である。

・接続配管の口径

真空排気速度は配管口径・配管長さが影響するが、対象を広範囲に設定すると様々な配管口径・配管長さが設定される。これにより機器ごとの真空排気速度が異なり、計算の誤差となる。
→誤差を小さくするためには、可能な範囲で大口径の配管でラインを構成し、真空度が上昇(重水蒸気圧が低下)した場合においても実効真空排気速度の減衰を抑える必要がある。

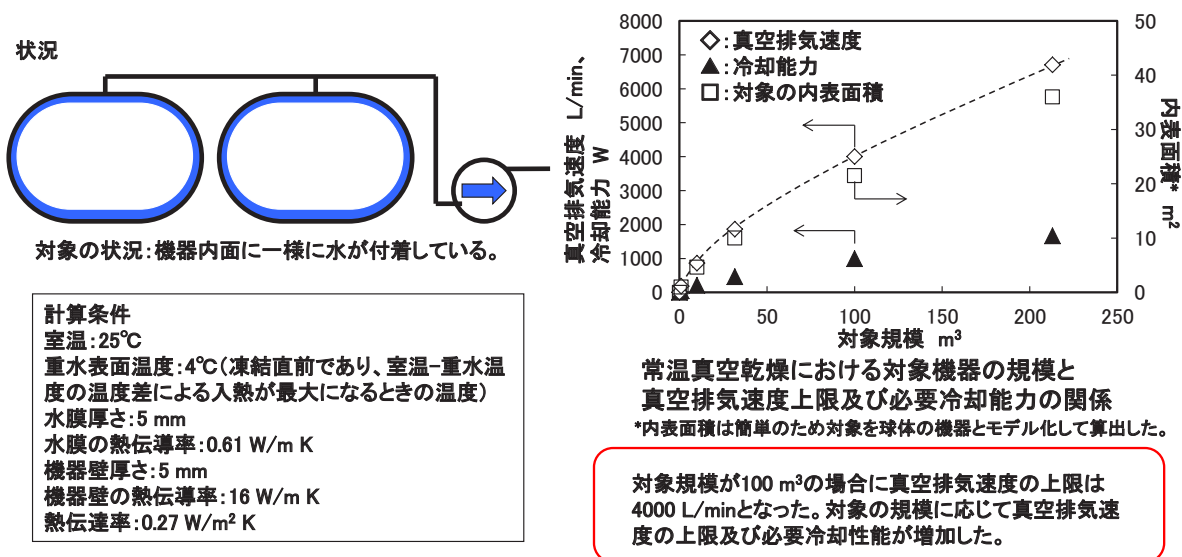
ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター (ふげん)

資料 31-5-12



常温真空乾燥における真空ポンプの排気速度の上限

常温真空乾燥において、重水は蒸発潜熱により冷却され、また機器の外部から入熱される。一方で、この入熱の速度を超えて真空乾燥すると重水表面が凍結し乾燥効率が極端に低下する。ここでは入熱速度の制限から真空ポンプの排気速度の上限及び重水蒸気の凝縮時の冷却に必要な性能を検討した。



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 31-5-13



常温真空乾燥作業の計画及び進め方

対象システムの規模や真空乾燥装置の排気速度が変わっても、実効真空排気速度(乾燥速度)を精度よく推定できることが示された。この評価方法は、常温真空乾燥によるトリチウム除去作業の作業工程の立案や進捗管理に資するものである。以下に例を記す。

対象システムの選定

- ①対象システムの規模(重水残留量、入熱速度)
- ②接続配管の口径及び長さ(コンダクタンス)



真空乾燥装置の設計

- ①対象システムの規模を考慮し、必要な実効真空排気速度(乾燥速度)を計算する。
- ②この実効真空排気速度を達成できる、真空ポンプと接続配管を選定する。
- ③吸引される重水蒸気の凝縮熱量に見合った冷却器を選定する。

※現場において、線量が高い場所では作業を避ける、狭隘箇所になっている等、様々な状況があり、設置作業や運転作業に制限がある。実際の真空乾燥装置の設計では、上記の状況や、真空乾燥装置の大きさ、設置・操作のし易さ、真空ポンプ等の価格を考慮して当該装置の性能を決定する。



作業工程の立案

- ①対象システムの規模(重水残留量)と真空乾燥装置の実効真空排気速度(乾燥速度)から作業工程を設定する。



現場作業及び工程の進捗管理

- ①システムに真空乾燥装置を接続する。
- ②常温真空乾燥を実施する。
- ③常温真空乾燥のデータ(露点、乾燥速度等)を評価し、工程の進捗を管理する。

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 31-5-14

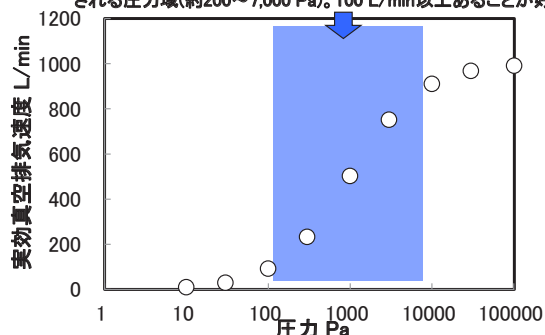


実効真空排気速度の計算及び工程設定の例

状況 トリチウム除去未実施の重水貯槽抜出槽(2 m³)、劣化重水貯槽用抜出槽(2 m³)について、劣化重水貯槽、重水貯槽等のトリチウム除去(常温真空乾燥)のラインに接続して乾燥処理する。

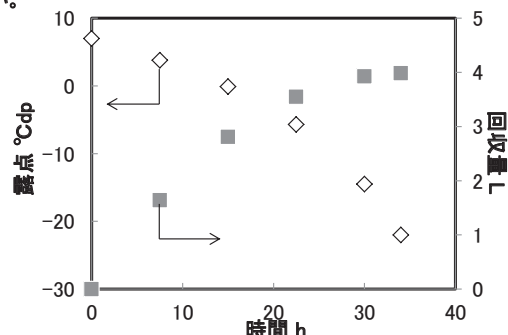
条件 対象規模: 4 m³ (2 m³ + 2 m³)、重水残留量: 4 L
真空ポンプ排気速度: 1000 L/min
配管: (真空ポンプ)→50A 25m→15A 5m×2本→40A 10m→25A 20m→(対象)
室温: 25℃、系統内湿度: 32% (露点: 7℃dp)で真空引き開始

排気成分中において重水蒸気の比率が高く、真空乾燥の効果が発揮される圧力域(約200～7,000 Pa)。100 L/min以上あることが好ましい。



系統内圧力と実効真空排気速度の関係

圧力が3000 Paのときは実効真空排気速度が750 L/minあるが、100 Paに減少したときに92 L/minに減少した。本系は小口径配管(15A)を通過するため排気速度の減衰が大きい。ただし、圧力100 Paにおいても推奨速度(100 L/min)に近い排気速度を持つことから、真空乾燥においては十分な乾燥速度が期待できる。



露点及び乾燥回収量の経時変化

露点は7℃dpから34時間後に-22℃dpに下がった。回収量について時間ごとに回収量の増加幅が低下した。これは乾燥が進むにつれて露点(重水蒸気圧)が低下し、実効真空排気速度が低下したために因る。本作業において、残留重水4 Lの乾燥回収には34時間要すると推定した。このことから真空引きの作業工程は、推定時間34時間と誤差10%を合わせた37時間を見込む。

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 31-5-15



まとめと今後の予定

まとめ

常温真空乾燥のデータを用いて乾燥速度の理論値と実測値を比較した。この結果、約90%の精度で乾燥速度を予測できること、本計算が真空ポンプ性能や接続配管の選定に有用であることを確認した。また、この評価法が作業工程の立案や進捗管理に適用できることを示した。

今後の予定

劣化重水貯槽、重水貯槽等の機器(213 m³)、及び、カランドリアタンク等の機器(253 m³)について、順次真空範囲を拡張し、常温真空乾燥を継続する。常温真空乾燥データを取得し、作業進捗管理等への本評価の有用性を評価する。

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 31-5-16

2.4 「ふげん」における知識マネジメントシステム構築
の取り組み方針について

Fugen Decommissioning Project



「ふげん」における知識マネジメント システム構築の取り組み方針について

技術開発部 井口幸弘

報告概要

- 1.はじめに
- 2原子力知識マネジメント(NKM)について
- 3.既存の廃止措置に関する知識の特定
- 4.知識マネジメントシステムの構築方針
- 5.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 31-6-1

1. はじめに

Fugen Decommissioning Project



- ・ **原子力知識マネジメント(NKM: Nuclear Knowledge Management)**とは、知識マネジメントという**経営工学的手法**を**原子力に応用**するもの
- ・ これに含まれる主要な項目は、専門知識・技術の保存と伝承、暗黙知の伝承、知財管理、原子力技術者の教育などである。
- ・ 組織の知識を特定、管理及び共有化し、組織目的の達成に役立つように、人の集団に新しい知識を共同で創造させることができるようにする、総合的でシステムのなアプローチ(IAEA安全用語集より)
- ・ 「ふげん」では、建設、運転時の**経験豊富な職員**の多数が退職しつつあり、**彼らの知識を継承することが急務**
- ・ 建設、運転時の知識マネジメントは多く実践されているが、**廃止措置**については、**実績が少ない**。
- ・ 国内で通常の発電炉では、4基の**廃止措置**が進行中だが、今後の**増加が予測され、手法の確立が必要**

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 31-6-2



2. 原子力知識マネジメント(NKM)について

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 31-6-3



原子力知識マネジメント(NKM)の経緯

- **2002年**: 国際原子力機関(IAEA)が、原子力知識マネジメント(NKM: Nuclear Knowledge Management)の**重要性を勧告**
- 2004年: 組織改編(INIS課→INIS & NKM課)…現在はNKM課として独立(John de Grosbois課長)
- 2004年: サクレーでのNKM国際会議
- 2005年: トリエステでワークショップ
- 2006年: 日本(東工大)でワークショップ
- **18の文書類を発行、教育支援活動、E-Learning**
- **OECD/NEAの処分関係の記録・知識、記憶の保存に関するプロジェクト(2011～2017)**
- **一方、廃止措置については、KMの検討が不足**
- **2014.7.14-17 カールスルーエで、廃止措置等における知識マネジメントの課題に関するコンサルタント会合を開催**



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 31-6-4



IAEAの会合の概要

正式名称: IAEA: Consultancy Meeting on Knowledge Management Issues in Decommissioning, Waste Management and Remediation of Nuclear Facilities
(原子力施設の廃止措置、廃棄物管理及び環境修復における知識マネジメントの課題に関するコンサルタント会合)

開催日: 平成26年7月14(月)～17日(木)

開催場所: ドイツ・カールスルーエ (KIT: カールスルーエ工科大学、北キャンパス)

出席者: 合計24名/IAEA: 5名、OECD/NEA: 1名、ドイツ: 7名(大学、設計会社など)、イタリア: 1名(元IAEA)、フランス: 1名(大学)、ノルウェー: 1名(ハルデン)、ロシア: 2名(民間会社)、スロバキア: 1名(大学)、米国: 1名(設計会社)、日本: 4名(大学、JAEA、メーカ)

会議の流れ

- ・各出席者の発表(全20件、日本から4件)
- ・グループ討議1: 知識マネジメント戦略、知識伝達・継承(Transfer)の確立、教育
- ・グループ討議2: 情報システム、先進技術(3Dなど)、全体討議の準備
- ・全体討議: IAEAの役割、報告書の方向性、提案など

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 31-6-5



IAEA会議のまとめ

- ・ 東京電力福島第一原子力発電所事故以降、緊急時対策のような要素もあり、知識マネジメントは変わってきた。特に、Competency(力量)の維持における知識マネジメントの役割は重要である。
- ・ IAEAの役割は安全だけでなく、コスト面も考慮しなければならない。完全な知識はなく、限界があることを認識すべき。形式知もたくさんあり、その場合の専門家の活用方法、意思決定支援システムなどを準備する必要がある。
- ・ 停止しても維持する設備があり、運転時の知識も廃止措置で活用するものもある。しかし、新しいタスクがあり、異なるスキルもあるのでどのような知識を残していくか、さらに時間スケールの問題もある。また、市場にも専門的知識は存在するなど実体的な課題を検討する必要がある。
- ・ IAEAとしては今後、戦略的に高度な文書と技術的、実際的な下位文書をまとめていくこととされた。また、より多くの事例を集めるなど、ケーススタディについても実施していく予定。
- ・ なお、東京電力福島第一のような事故後の廃止措置については、知識マネジメントは通常の廃止措置の場合と異なり、いろいろなケースを考えるべきことについても合意が得られた。

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 31-6-6



3. 既存の廃止措置に関する知識

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 31-6-7



廃止措置に係る国際的な知識源

- IAEAの安全基準文書、TECDOCなどの諸報告書
- 廃棄物安全条約の国別報告書
- OECD/NEAで策定された文書
- 米国原子力規制委員会の法令などの諸文書
- 米国エネルギー省の諸文書
- 欧州委員会の諸文書
- IAEAの主催する国際会議の文書
- ANS(米国原子力学会)、Waste Management(WM)、ICONEなどの学術的な国際会議
- 学会資料、一般図書や雑誌類(例: ASME Decommissioning Handbook)
- その他各国の規制当局、開発機関、廃止措置事業者の文書 など



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 31-6-8



廃止措置に係る国内の知識源

- ・ 国の法律、原子力規制委員会規則及び内規
- ・ 学協会規格(日本原子力学会の廃止措置標準)
- ・ 国(原子力委員会、旧原子力安全委員会、旧原子力安全・保安院)における廃止措置に関連する委員会の報告書類
- ・ 旧JNES(原子力安全基盤機構)の廃止措置関連報告書
- ・ 旧NUPEC(原子力発電技術機構)の廃止措置関連報告書、廃止措置技術ハンドブック(2007)等
- ・ エネルギー総合工学研究所の報告書
- ・ RANDEC(原子力バックエンド推進センタ)一の技術誌や報告書
- ・ 諸学会誌、学会報告資料、一般図書、雑誌類 など
- ・ その他の関係機関、廃止措置事業者の文書 など

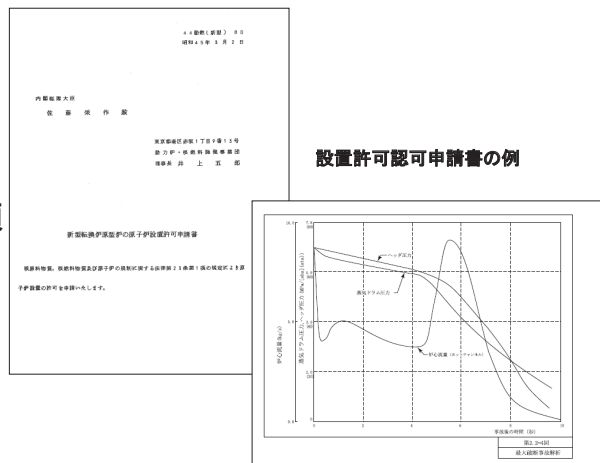
→ これらを知識マネジメントの観点で、重要な情報を必要な時に参照できるようにシステム化する必要



「ふげん」における文書類

施設の建設、運転時から極めて大量の文書が存在する(以下例)

- － 設置許可認可申請書
- － 工事計画認可申請書
- － 廃止措置計画認可申請書
- － クリアランス申請書
- － 保安規定
- － 品質保証計画書・関連下部要領
 - ・ 保守管理要領
 - ・ 廃止措置管理要領
 - ・ 廃棄物管理要領
 - ・ 品質記録管理要領
 - ・ その他
- － 放射線障害予防規定
- － 廃止措置管理要領
- － その他のマニュアル類
- － 上記の規定やマニュアル等にもとづいて作成された大量の記録類

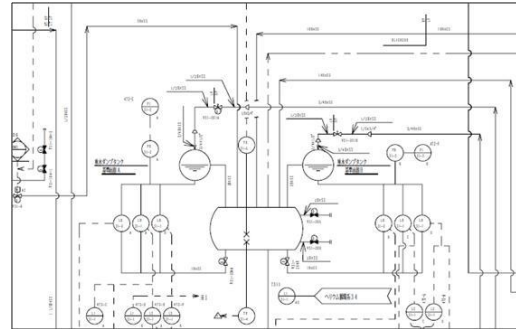




「ふげん」におけるその他のデータやシステム等

施設の建設、運転、廃止措置に関する大量のデータ、情報、システム

- － 前記の文書における数値や図面等のデータや情報
- － 設計図書におけるデータや情報
- － 単線結線図
- － 展開接続図
- － アイソメ図
- － 配管計装系統図 (P&ID)
- － 3次元CADのデータ
- － 保守管理システム
(設備台帳、故障データ、作業データ等)
- － 品質マネジメントシステム(QMS)
- － その他廃止措置の実施に必要なデータや支援システム(放射能データ、廃棄物管理データ、作業量評価結果等)



P&IDの例

→これらを知識マネジメントの目で検討し、きちんと位置付けて整備していくことが重要

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 31-6-11



「ふげん」における暗黙知について

- ・ 属人的な知識が**施設の職員等に潜在**している。
 - － 設備に関する知識
 - － 原子力やプラントに関する一般的知識
 - － 分からない時にも何を調べればよいかという知識
 - － 誰に聞けばよいかという知識
 - － 問題が発生した時にどう対処すればよいかというノウハウ
 - － 今まで積み重ねてきた人生経験における「**知恵(Wisdom)**」
- ・ 上記のうち明示化(**形式知化**)できる「**暗黙知**」もあるが、それでも、**伝えられない暗黙知**が残らざるを得ない。
 - － 知識やノウハウを書き出してほしいといっても**すぐには出てこない**。
 - － 問題発生時の対処方法などは、**深い知恵**に基づくものであり、現在は存在しない。
 - － そもそも「人生経験」などは、**他人には理解できない**。
 - － **集団的知性**ともいえる知識もある。

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 31-6-12



4. 知識マネジメントシステムの構築方針

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 31-6-13



知識マネジメントシステムの必要性

廃止措置に必要とされる「知識」は、建設、運転時とは以下のように異なる特徴を有する。

- 廃止措置は一回だけの作業で、起動、停止等を繰り返す運転時と異なる状況
- 設計、運転時の知識が必要。しかし全てが必要ではない。
- 廃止措置の開始までに数十年、廃止措置開始から完了までが長期
- 運転初期の経験者が順次退職していく状況
- 汎用の知識であれば、他の施設の廃止措置に知見を反映可能
→世代間で知識を受け渡していく必要あり
- 合理的に（低リスク、低コスト、短期間で）実現するための「ノウハウ」（知見や経験といった使える知識）が重要
→知識マネジメント自体の経済合理性も重要な観点

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 31-6-14



暗黙知の獲得及び継承

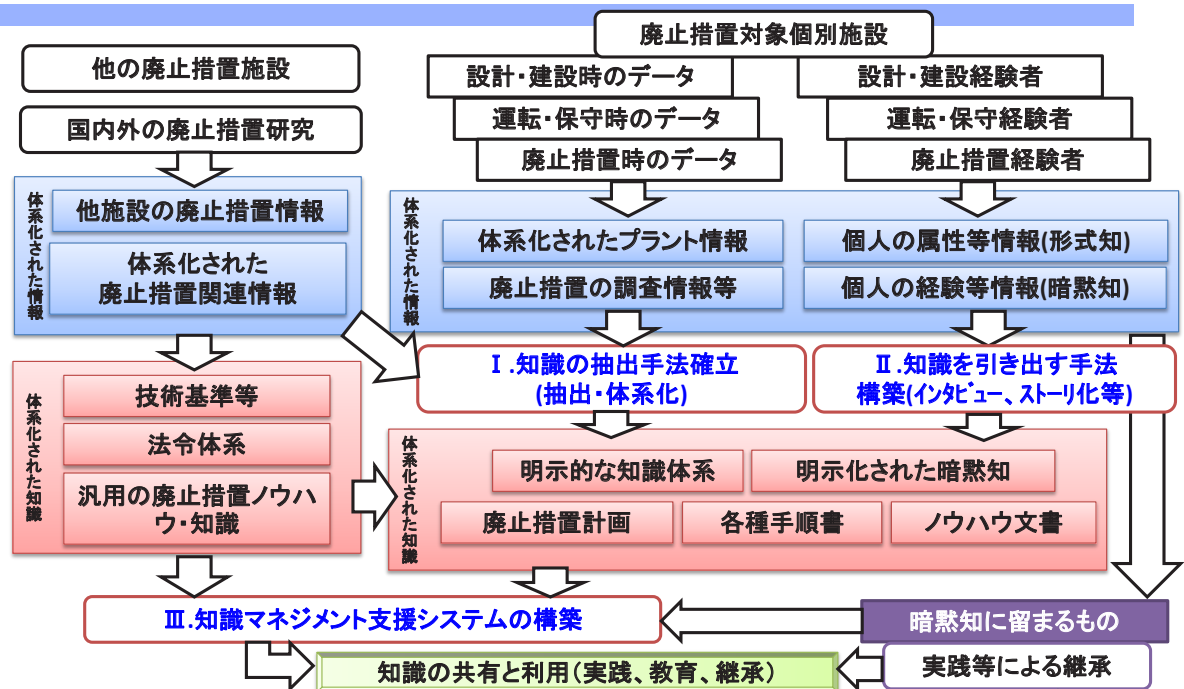
- ・ 属人的な知識を可能な限り明示化し形式知とすることが必要
 - － 知識、ノウハウの文書化、システム化の推進
 - － 品質マネジメントシステムを知識マネジメントシステムに増強
 - － CADやVRなどの先進的な情報システムを使った管理
 - － 教育体系の充実
 - － アンケートやインタビューによる「教訓」などの知識獲得
 - － 在職者、退職者の経歴や専門リストの作成(記録のINDEXとなる)
- ・ 簡単に明示化できない暗黙知も可能な限り継承していく取り組みが必要
 - － 問題発生時のケーススタディやシミュレーションの実施
 - － 施設の(歴史的な)情報の文書化(必ずしも、廃止措置に役立つとは限らないものでも)
 - － 退職者から在職者への特別なOJT教育
 - － 退職者に過去の経緯を聞くことのできる仕組み
 - － 退職者との定期的な交流

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 31-6-15



廃止措置における知識マネジメントシステムの構築



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 31-6-16



廃止措置知識マネジメントシステムの構築の方針(1/2)

I. 廃止措置において必要となる知識の抽出手法の確立

- － 廃止措置に必要な知識を、設計、建設、運転、保守時における膨大なデータや情報、国内外の廃止措置の研究成果や実際の廃止措置現場の情報等を明示的な情報として整理し、組織化、体系化
- － 膨大な情報等から、廃止措置に必要な記録や情報を同定し、有効かつ本質的な知識を抽出する効率的な手法を確立
 - ① データ及び情報等の整理
 - ② データ及び情報等の体系化
 - ③ データ及び情報からの知識の抽出手法の確立
 - ④ 歴史的文書や経験談の整理

II. 廃止措置に必要な経験者等の知識を引き出す手法の構築

- － 施設の職員や経験者から効率的に知識を引き出す手法を構築する。
 - ① 経験職員等の情報のデータベース化
 - ② 経験職員等の知識やノウハウを引き出す手法の構築

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 31-6-17



廃止措置知識マネジメントシステムの構築の方針(2/2)

III. 廃止措置に必要な知識マネジメントを支援するシステムの構築

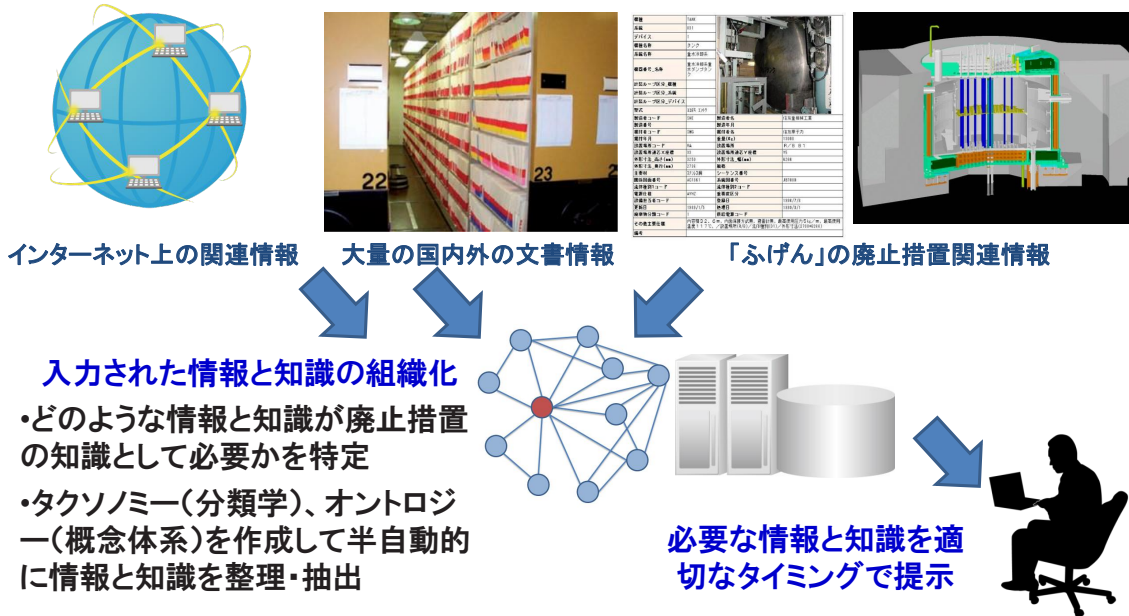
- － 上記の取り組みによって抽出された知識は、実際の廃止措置に有効に活用する必要がある。このため、廃止措置における知識マネジメントを効率的に支援するシステムを構築する。
 - ① 現役職員のコミュニケーションの強化支援
 - ② 現役職員の知識の内面化(暗黙知の強化)の支援
 - ③ 知識(特に暗黙知)を伝承する方法の検討
 - ④ 品質マネジメントシステムに知識マネジメントを組み込む方法の検討
 - ⑤ 知識を伝承する教育システムの構築
 - ⑥ 閲覧システムの高度化
 - ⑦ 知識マネジメントを支援する計算機支援システムの検討
 - ⑧ 他施設等との情報交換・共有のしくみ
 - ⑨ 廃止措置知識の標準化

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 31-6-18



知識マネジメント支援システムの例(既存知識の活用)

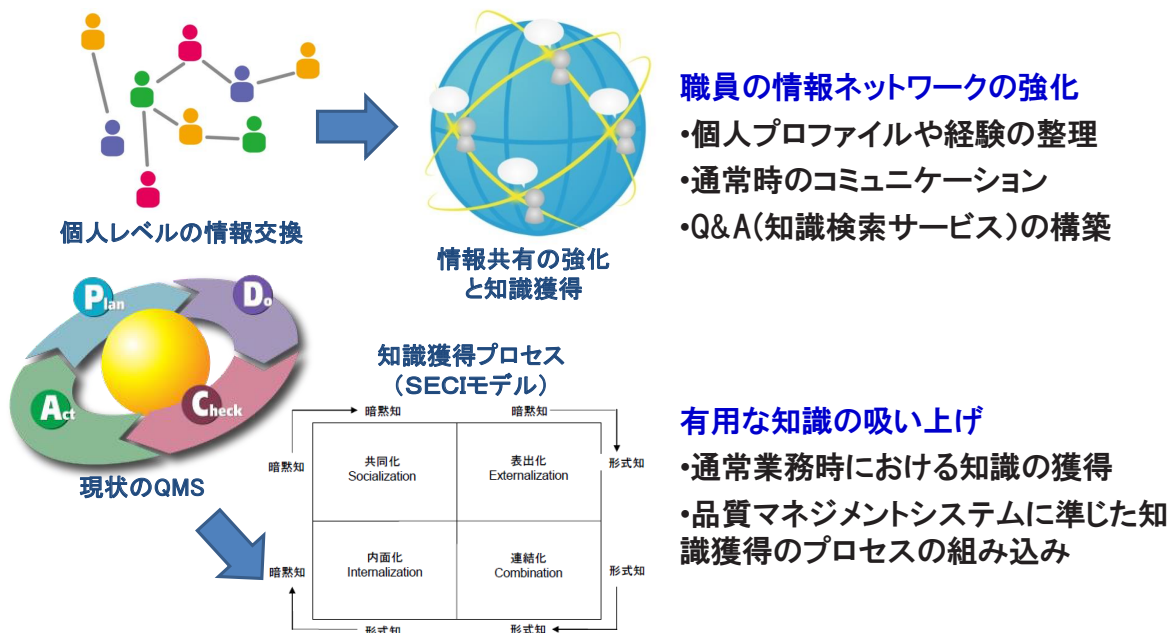


ふげん廃止措置情報 目的外使用・複製・開示禁止 原子力機構 原子炉廃止措置研究開発センター(ふげん)

資料 31-6-19



知識マネジメント支援システムの例(SNSの活用等)



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)

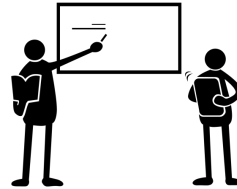
資料 31-6-20



知識マネジメント支援システムの例(知識継承等)

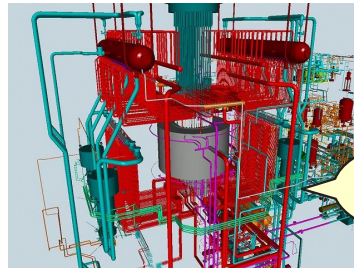
退職していく職員の知識の継承

- ・古参職員へのアンケートやインタビュー
- ・勉強会やマンツーマンの知識継承
- ・机上や現場での教育



VR(仮想現実)やAR(拡張現実感)などを利用した支援システム

- ・廃止措置に必要なデータ、情報、知識の仮想モデルへの埋め込み
- ・廃止措置計画・実施時に必要な知識を提供する機能



材質:SUS316
高汚染配管
米国に解体事例あり

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 31-6-21



知識マネジメントシステム構築の概略工程(案)

	26年度	平成27年度	平成28年度	平成29年度
全体	推進チーム、検討グループ発足(3/1)		福井大学との共同研究	
1. 知識の抽出手法の確立	検討・手法構築		知識の抽出・整理	評価・まとめ
2. 経験者等の知識を引き出す手法の構築		検討・手法構築 試行	知識の抽出・整理	評価・まとめ
3. 知識マネジメント支援システムの構築	予備検討	システム検討	システム開発・構築・試運用	評価・まとめ 運用・改良

所内の推進チームと各課メンバーの検討グループを発足し、全所的に構築を進めていく。

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 31-6-22



5. まとめ

- 廃止措置に**知識マネジメント(KM)**は**必要**であり、**重要**
- 「ふげん」として、**退職していく職員**の**有用な知識**(形式知、暗黙知)を**獲得していくことが急務**
- 廃止措置と同様に、KMも**効率的である必要**
- KMの方法は**運転時とは異なる**。同じ知識ではない。
- まずは、**記録、そしてルール化、システム化**。QMSなど**既存の管理システムに準じた仕組み**が**効率的**
- このための(先進的な)**情報システム技術は有効**である。
- 「ふげん」として、最新の技術を応用し、**効率的に知識を利用する知識マネジメントシステムの構築**や**支援システムの開発**を行っていく。
- これらの取り組みを「ふげん」として**所内体制を構築**して開始

3. 講評

本委員会の石樽主査より、以下のご講評を頂いた。

- ・「ふげん」の廃止措置は、少しずつではあるが進捗していることが確認できた。クリアランス認可申請は重要なプロセスであり、一つの進展である。今後は、クリアランスしたもの用途を開拓し、一般社会で利用されるよう道を開く努力をお願いしたい。
- ・「ダイヤモンドワイヤーソーによる実機材切断に係る基礎データの取得」に関しては、微量な浮遊粉じんの放射性核種データ等、ホット試験によってのみ得られる様々な貴重なデータを採取して頂きたい。
- ・「トリチウム除去の進捗及び常温真空乾燥の効率評価」に関しては、事象を定量的に分析、解析することは非常に重要であり、更に事象の理解を深めて高度化に繋げて頂きたい。
- ・「「ふげん」における知識マネジメントシステム構築の取り組み方針について」に関しては、完全なものを目指し、使えるものにしようとする大変な作業である。最初は小さなテーマからケーススタディ的に取り組むことも考えられる。例えば、放射性廃棄物でない廃棄物（NR）の取扱いについては、従前から知識マネジメントが重要になると言われているので、テーマとして取り上げることなども検討して頂きたい。また、これまで蓄積してきたデータを残すだけでなく、分析や解析により深く精査し取りまとめていくことが、知識マネジメントに繋がると思う。

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량	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 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
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	キログラム毎立方メートル	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 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	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	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)	°C		K
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照射度	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
酸素活性化	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のみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてののみ使用される。

(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 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
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	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 s A
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
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 s A
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 5. SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	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=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ 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	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=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
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm 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。
ベレル	B	
デシベール	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	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 =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオット	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≡ (10 ³ /4π) A m ⁻¹

(a) 3 元素の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 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15℃」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
ミクロン	μ	1 μ =1 μm=10 ⁻⁶ m

