JNC TN3410 2001-006

ふげん廃止措置技術専門委員会
第４回委員会資料集

2001年９月

核燃料サイクル開発機構

敦賀本部　新型転換炉ふげん発電所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は，下記にお問い合わせください。

〒914-8510　福井県敦賀市明神町３番地
核燃料サイクル開発機構
新型転換炉ふげん発電所
技　術　課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :
Technical Section,
Fugen Nuclear Power Station
Japan Nuclear Cycle Development Institute
3 Myoujin-cho, Tsuruga-shi, Fukui-ken 941-8510, Japan

©核燃料サイクル開発機構（Japan Nuclear Cycle Development Institute）
2001年

JNC TN3410 2001-006
2001年9月

ふげん廃止措置技術専門委員会　第４回委員会資料集

清田　史功*、東浦　則和**
松井　祐二*、川越　慎司*

要旨

新型転換炉ふげん発電所は核燃料サイクル開発機構法にもとづき、平成15年度までに運転を停止することになっており、現在、廃止にともなう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、サイクル機構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」を平成１１年１２月に設置し、平成１１年１２月１４日に第１回委員会が開催された。平成１３年度も引き続き設置され、平成１３年８月２９日に第４回委員会が開催された。

本書は、第４回ふげん廃止措置技術専門委員会において配布された資料集であり、「ふげん」廃止措置の準備状況、廃樹脂減容安定化処理装置の検討状況、トリチウム除染基礎試験の結果、運転廃棄物の放射能調査についてまとめたものである。

＊　：敦賀本部　新型転換炉ふげん発電所　環境保全課
＊＊：敦賀本部　新型転換炉ふげん発電所　安全管理課

目次

1．「ふげん」廃止措置の準備状況 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1

2．廃樹脂減容安定化処理装置の検討 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3

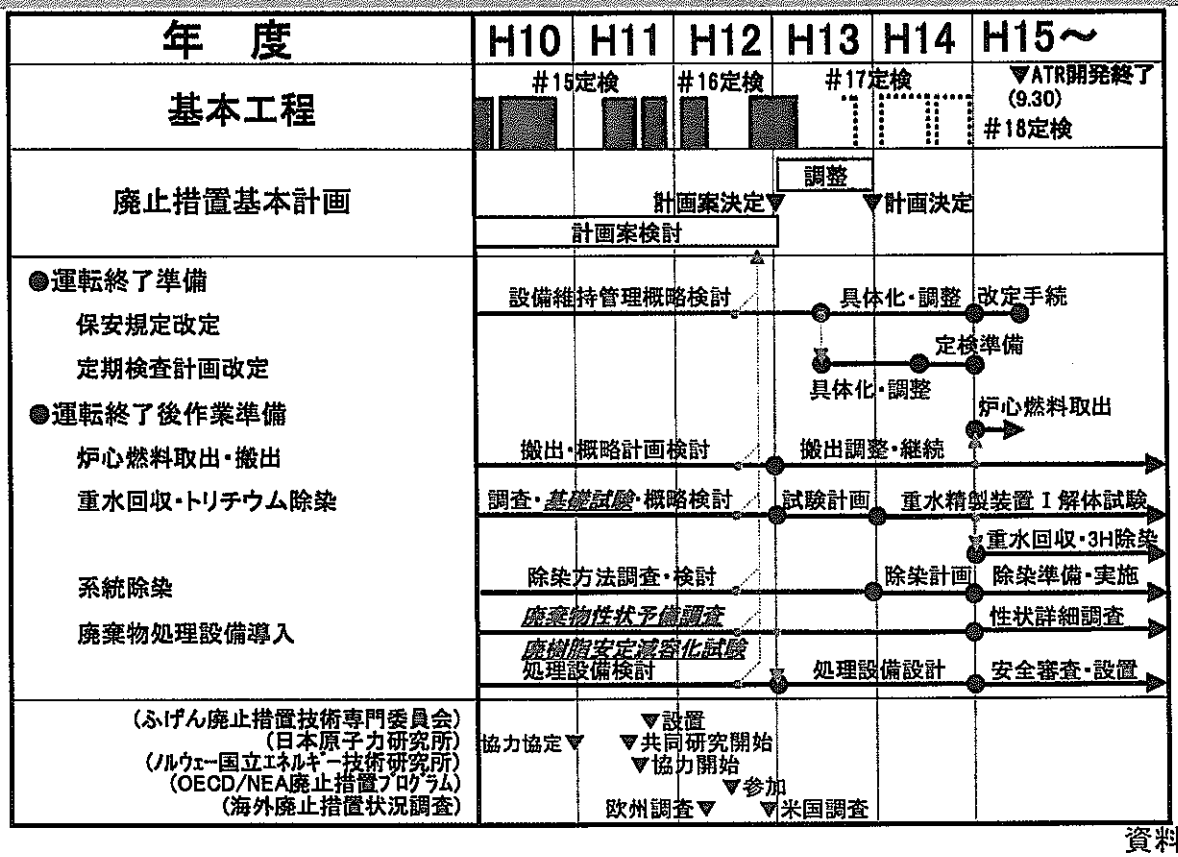
3．トリチウム除染基礎試験の結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 12

4．運転廃棄物の放射能調査 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 22

5．重水精製装置の概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 31

１．「ふげん」廃止措置の準備状況

「ふげん」廃止措置の準備状況



資料 1－1

「ふげん」廃止措置に係る諸活動

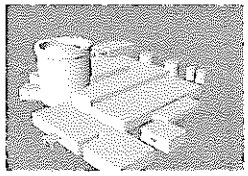
- **OECD/NEA廃止措置協力計画**
  - LC(連絡者委員会)の下、TAG(技術諮問グループ)が運営
  - H12. 11:TAG(仏)にて放射能インベントリ評価状況を報告，EL4(密閉管理)調査
  - H13. 05:TAG(独)にて基本計画案の概要を報告，Greifswald(解体撤去)調査
- **米国廃止措置状況調査(H13.3)**
  - 調査内容:廃止措置計画，廃止措置費用評価手法，廃止措置技術
  - 調査原子力発電所(解体中):Yankee Rowe，Maine Yankee，Haddam Neck
- **外部機関との共同研究・開発協力**
  - 日本原子力研究所: 本年度COSMARDを用いて解体人工数等を評価予定
  - ノルウェー国立エネルギー技術研究所:本年度解体作業をシミュレーションするシステム開発と表示装置整備を予定
- **外部機関との連携**
  - NUPEC，RANDEC等との情報交換
- **低レベル放射性廃棄物等の制度化**
  - 高βγ廃棄物に係る濃度上限値について原子炉等規制法施行令を改正(H12. 12)
  - 原子力安全委員会が重水炉・高速炉等のクリアランスレベル、クリアランスレベルの検認のあり方(原子炉施設)についての専門部会報告を妥当と判断(H13. 7)

資料 1－2

２．廃樹脂減容安定化処理装置の検討

廃樹脂減容安定化処理装置の検討

- 目的
- 廃樹脂処理方法の検討経緯
- ﾛｰﾀﾘｰｷﾙﾝ式熱分解法，減圧酸素ﾌﾟﾗｽﾞﾏ法の概要
- 実証試験装置による処理性能試験結果
- まとめ
- 実機導入に向けての検討



資料2-1

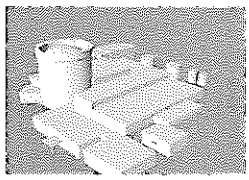
Fugen Decommissioning Project

目　的

下記の技術開発目標に基き、
「ふげん」の廃樹脂処理方法、
及び処理装置を検討する。

［技術開発目標］

- 安定化→埋設処分への適合化
  （キレートの分解等）
- 減容化→処分費の低減化



資料2-2

処理対象廃樹脂

廃樹脂の種類(発生系統)	貯蔵量* (m^3)	Co-60濃度 (Bq／m^3)
重水浄化系	50	1E+12
炉浄化系	65	8E+11
化学除染	35	3E+11
復水脱塩器，廃液脱塩器	110	4E+09
プール水浄化系等(粉末)	35	2E+11
合　計	295	—

＊H30年度末における貯蔵予測量

資料2-3

廃樹脂処理方法の検討経緯

○ 既存技術等の「ふげん」への適用化検討
- 直接固化法 →ｷﾚｰﾄが分解できない。固化体が膨大。
- 核種分離法(酸溶離法) →ｷﾚｰﾄが分解できない。
- 熱分解/水蒸気改質法→設備規模大。(少量処理には不向)
- 直接焼却法 →核種除去のための排ガス処理設備が膨大。
- ﾌﾛｰﾘﾝｸﾞﾁｭｰﾌﾞ方式熱分解法→粒状廃樹脂は処理できず。
- ｾﾗﾐｯｸﾎﾞｰﾙ方式熱分解法→閉塞が懸念される装置内構造
- 超臨界水法→開発途上。

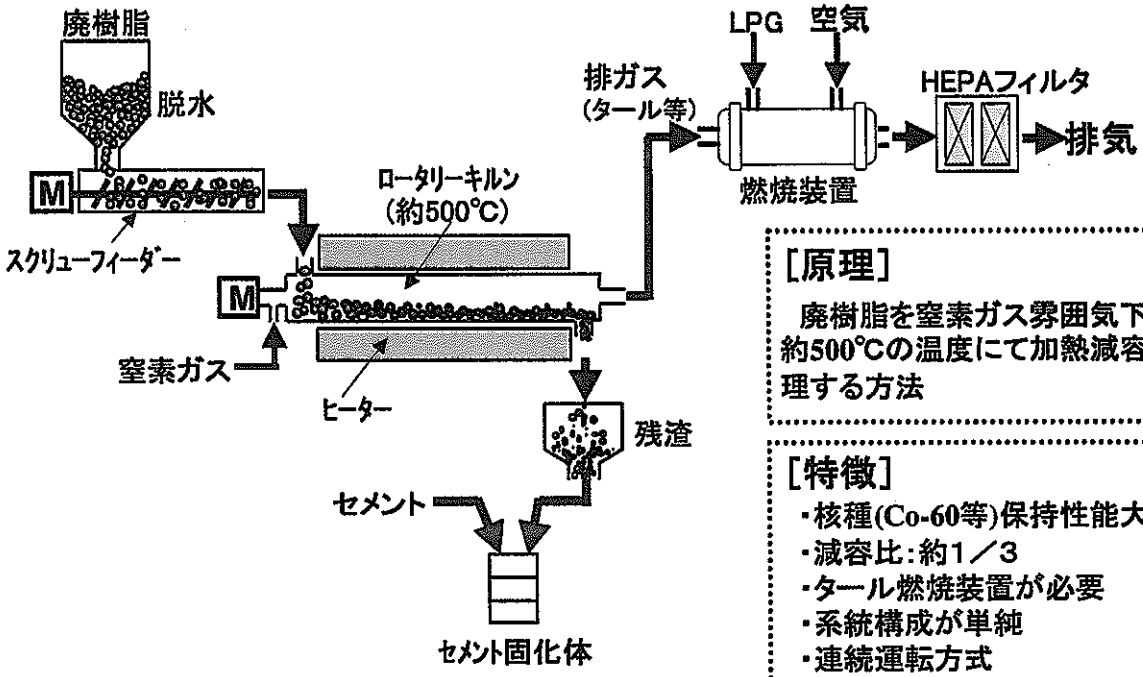
→ ふげんに不適合

↓

○ ｷﾚｰﾄが分解でき、減容化が図れる処理方法
- ロータリーキルン式熱分解法
- 減圧酸素プラズマ法

資料2-4

「ロータリーキルン式熱分解法」の概念図



[原理]

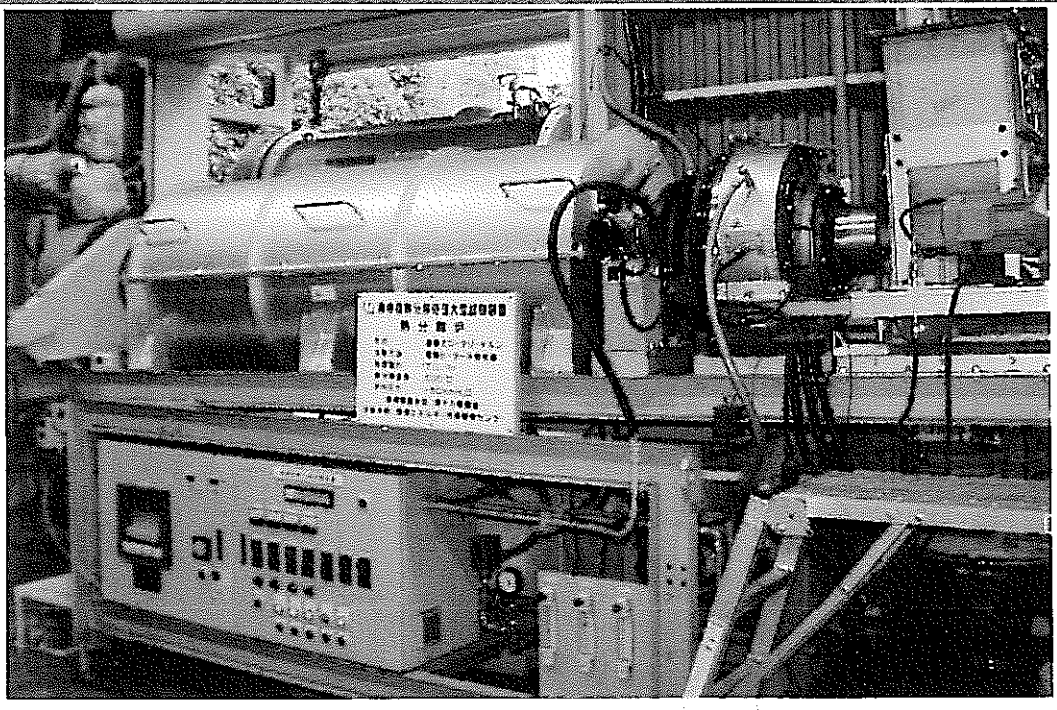
廃樹脂を窒素ガス雰囲気下で約500℃の温度にて加熱減容処理する方法

[特徴]

- 核種(Co-60等)保持性能大
- 減容比:約1／3
- タール燃焼装置が必要
- 系統構成が単純
- 連続運転方式

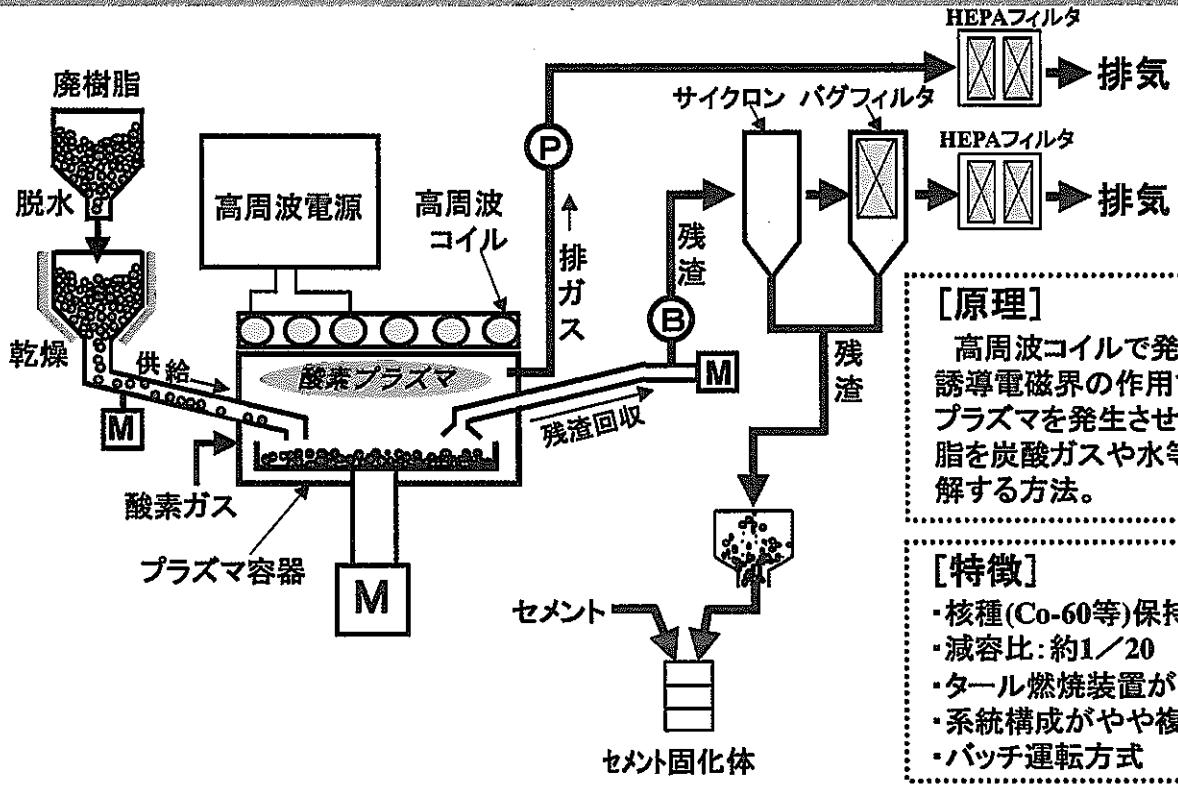
資料2-5

「ロータリーキルン式熱分解法」の実証試験装置



資料2-6

「減圧酸素プラズマ法」の概念図



[原理]

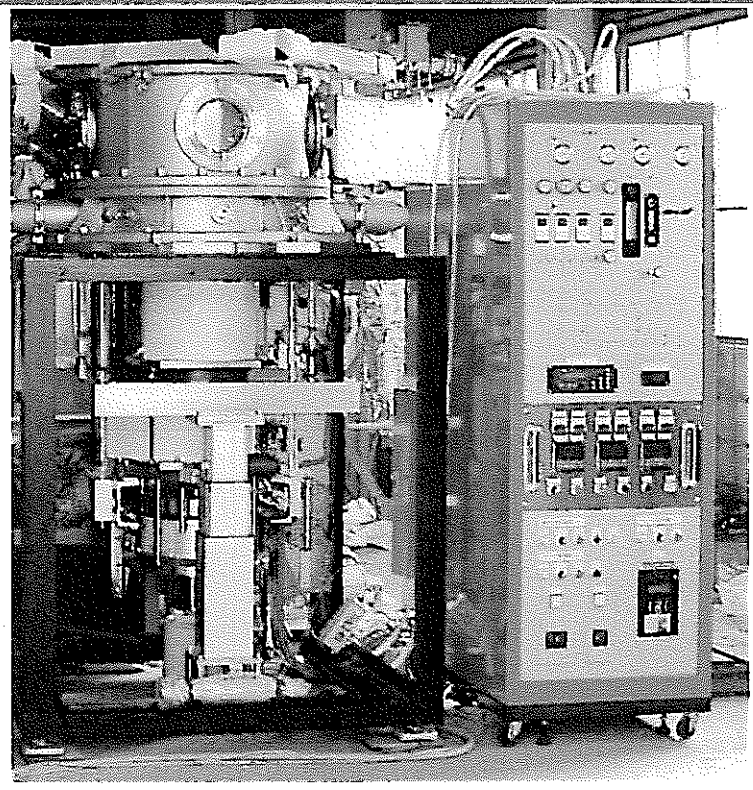
高周波コイルで発生する誘導電磁界の作用で酸素プラズマを発生させ、廃樹脂を炭酸ガスや水等に分解する方法。

[特徴]

- 核種(Co-60等)保持性能大
- 減容比：約1／20
- タール燃焼装置が不要
- 系統構成がやや複雑
- バッチ運転方式

資料2-7

「減圧酸素プラズマ法」の実証試験装置



資料2-8

各実証試験装置の処理能力

項目	ロータリーキルン式熱分解法	減圧酸素プラズマ法
廃樹脂供給方法	連続	バッチ
1日あたりの処理容量	35L/8h	32L/15h
廃樹脂供給量（1日あたり）	7L/h×5h	8L/バッチ×4回
処理パターン	500℃にて連続処理	・1/4減容化(400℃)処理を2.5h×4回実施 ↓ ・高減容化(700℃)処理を5h×1回実施

資料2-9

実証試験装置による処理性能試験

① 減容性能

② 安定化性能

・有害物質(キレート等)の分解性能
・固化体製作性，強度

③ 放射性核種の保持性能

資料2-10

減容性能

項　目	ﾛｰﾀﾘｰｷﾙﾝ式熱分解法	減圧酸素ﾌﾟﾗｽﾞﾏ法
減容比	約1／3 (処理量：35L/8h)	約1／20 (処理量：32L/15h)

＊試験には、「ふげん」の系統で使用しているアニオン，カチオンの混合樹脂を用いた。

［評価］

・処理時間が、ﾛｰﾀﾘｰｷﾙﾝ式熱分解法に比べて約２倍必要であるが、減圧酸素ﾌﾟﾗｽﾞﾏ法の方が高減容化が図れ、処分費用の低減化が期待できる。

資料2-11

安定化性能(その１)

・有害物質の分解性能

分析項目	添加量 (処理前の樹脂中濃度)	ﾛｰﾀﾘｰｷﾙﾝ式熱分解法	減圧酸素ﾌﾟﾗｽﾞﾏ法
キレート (EDTA)	約40000ppm (約40g/L-Resin)	<100ppm*	<1ppm
六価クロム	約500ppm (約0.5g/L-Resin)	10ppm	<0.1ppm

＊ 検出限界濃度が高いが、文献ではキレートは240℃以上で分解されるとある。このため、約500℃で処理を行うロータリーキルンによる熱分解法では十分にキレートは分解されているものと考えられる。

［評価］

・キレートは両方法とも分解。

・六価クロムは、「ﾛｰﾀﾘｰｷﾙﾝ式熱分解法」が若干残留。

資料2-12

安定化性能(その２)

・固化体の製作性、強度

項目	ﾛｰﾀﾘｰｷﾙﾝ式熱分解法	減圧酸素ﾌﾟﾗｽﾞﾏ法
残渣性状	塊状となる場合あり (大きいもので約5cm)	粒が各々独立
水との親和性	良好 (ただし、塊状のものは除く)	良好
固化体圧縮強度	108～340 kgf/cm^2	350～440 kgf/cm^2

[評価]

・固化体の圧縮強度は、両者とも基準の>15 kgf/cm^{2}を満足。

・ﾛｰﾀﾘｰｷﾙﾝ式熱分解法では、残渣が塊状となる場合があることから、残渣の移送性，固化体の製作性に課題が残る。

資料2-13

放射性核種の保持性能

[残渣へのCo-60残留率]

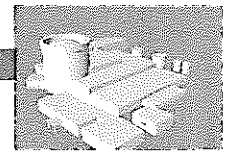
項目	ﾛｰﾀﾘｰｷﾙﾝ式熱分解法	減圧酸素ﾌﾟﾗｽﾞﾏ法
模擬廃樹脂 (実証試験装置)	99.96 %	99.99 %
実廃樹脂 (小規模試験装置)	99.95 %	99.92 %

[評価]

・両者とも、排ガス処理系に影響を与えない程度の、十分な放射性核種の保持性能を有している。

資料2-14

ま と め



性能試験による比較評価の結果、

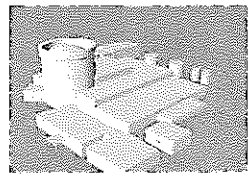
- 高減容化が図れ、処分費用の低減化が期待できる。
- 残渣中のEDTA、六価クロム等の有害物質が検出限界濃度以下である。
- 残渣が粒状で各々独立しているため、残渣の移送性，固化体の製作性が良好である。

等の点において、「減圧酸素プラズマ法」が、「ふげん」で発生する廃樹脂の減容安定化処理技術として有望であることを確認した。

資料2-15

実機導入に向けての検討

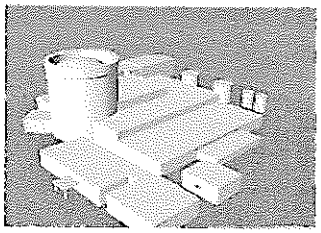
- 放射性核種の排ガスへの移行性の詳細評価
- 安全基準への適合性評価(安全性，耐震性等)
- 運転，保守性の検討



資料2-16

3．トリチウム除染基礎試験の結果

トリチウム除染基礎試験の結果



1. 背景、目的
2. 金属の汚染形態、除染方法
3. 試験装置
4. 使用済配管の調査
5. トリチウム除染の基礎検討
6. まとめ、今後の予定

資料 3-1

1. 背景、目的

背　景

・「ふげん」重水系の解体準備について検討中
・重水中に発生したトリチウムによる配管･機器の二次汚染が懸念

$^{2}H\ (n,\gamma) \rightarrow\ ^{3}H$

目　標

重水系に残留した二次汚染トリチウムを除染

⇩

・重水系の解体撤去作業時の安全性確保

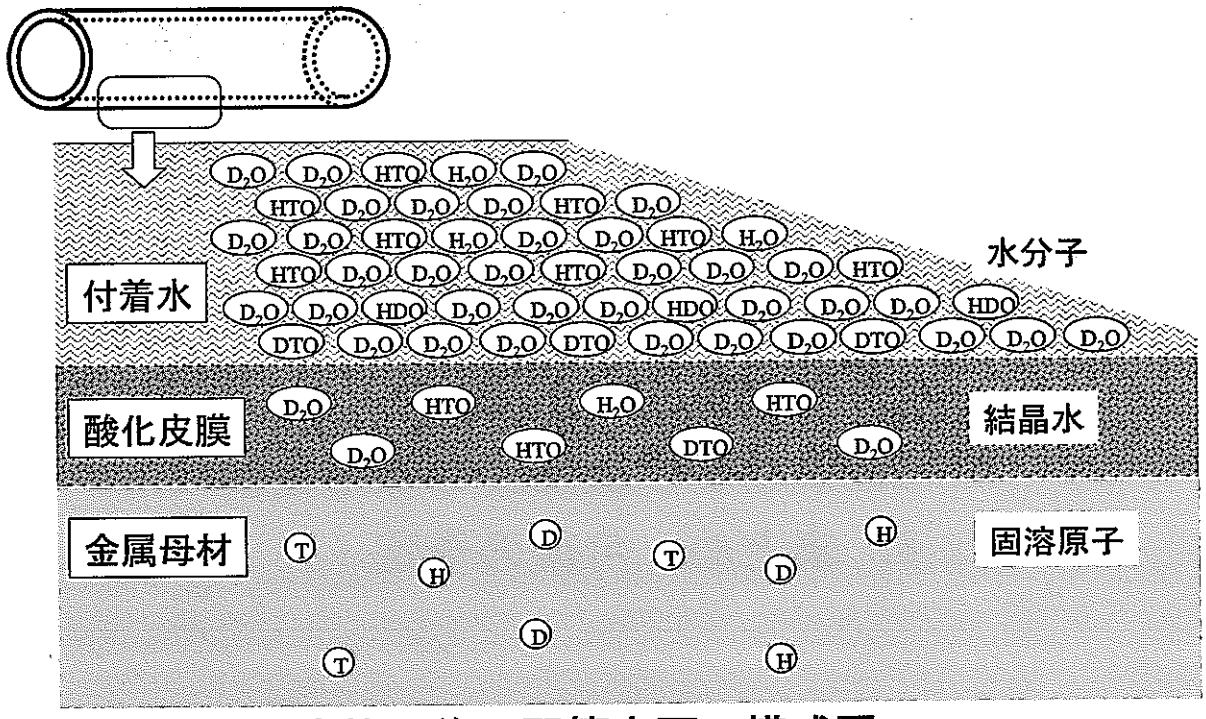
本検討の目的

①「ふげん」重水系のトリチウム汚染状態の調査
②適切なトリチウム除染法を選定するための基礎検討

資料 3-2

2. 金属の汚染形態、除染方法

(1) 金属のトリチウム汚染形態



重水抜取後の配管表面の模式図

資料 3-3

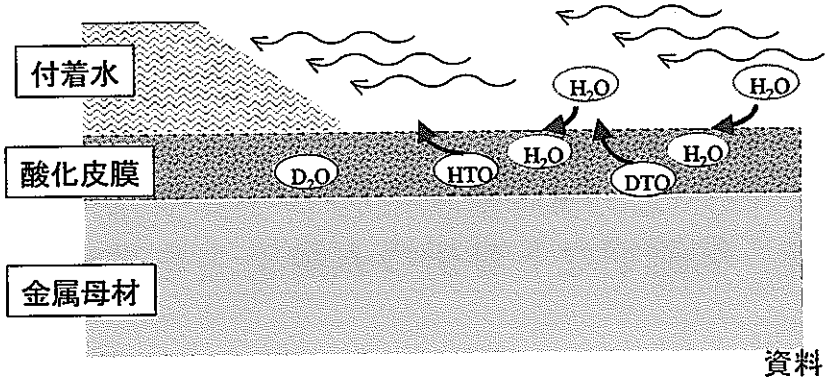
2. 金属の汚染形態、除染方法

(2) トリチウム除染方法の比較

	乾燥法	水蒸気除染	水洗法	化学除染	焼出し法
概要	乾燥気体を通気	軽水蒸気を通気	軽水を通水	酸化皮膜を溶解	高温加熱
範囲	付着水	酸化皮膜	付着水，酸化皮膜	付着水，酸化皮膜	全体（含 母材）
長所	簡易，廃液なし	廃液量小	簡易	トリチウム・CP*同時除染	除染範囲大
短所	除染範囲小	条件未確認	廃液量大	トリチウム入除染液発生	設備が大規模

*CP：腐食生成物(Corrosion Products)

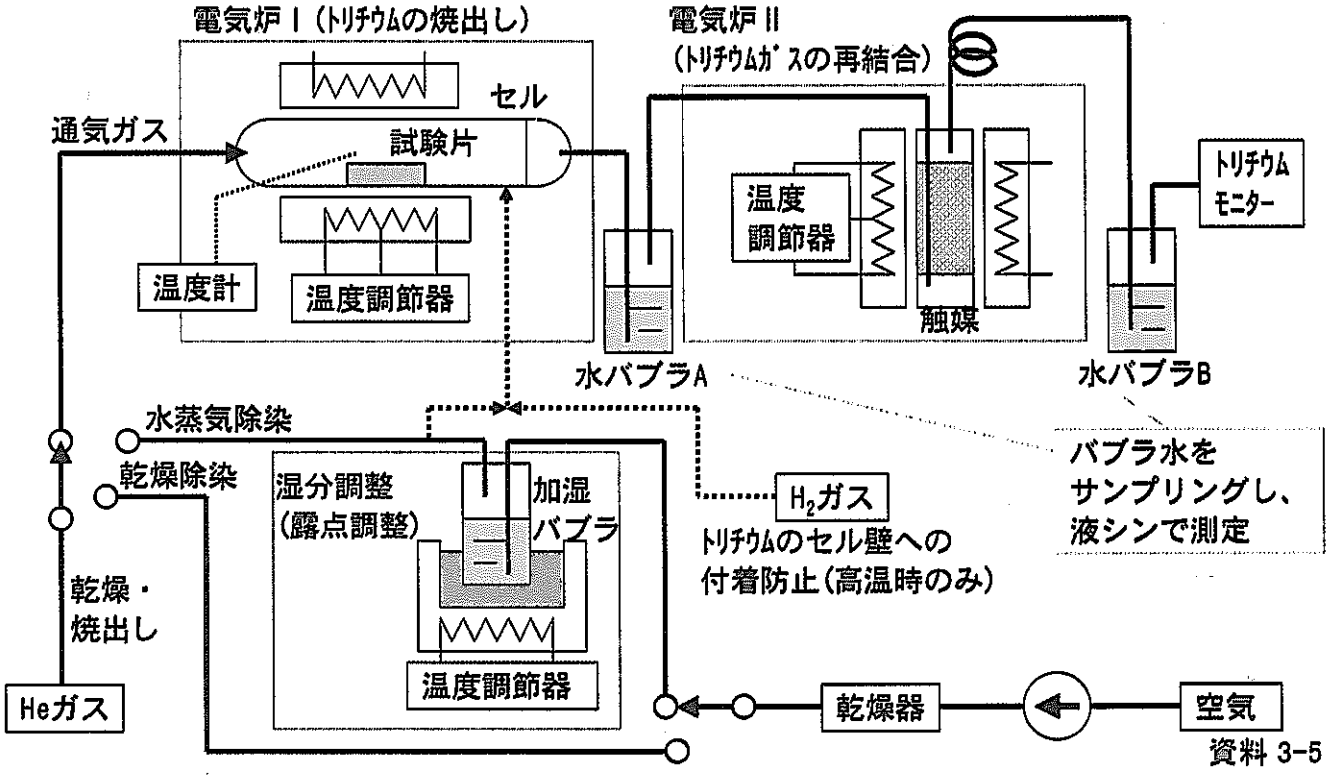
二次廃棄物発生量低減の観点から、廃液量の小さい除染法を検討対象とした



資料 3-4

3. 試験装置

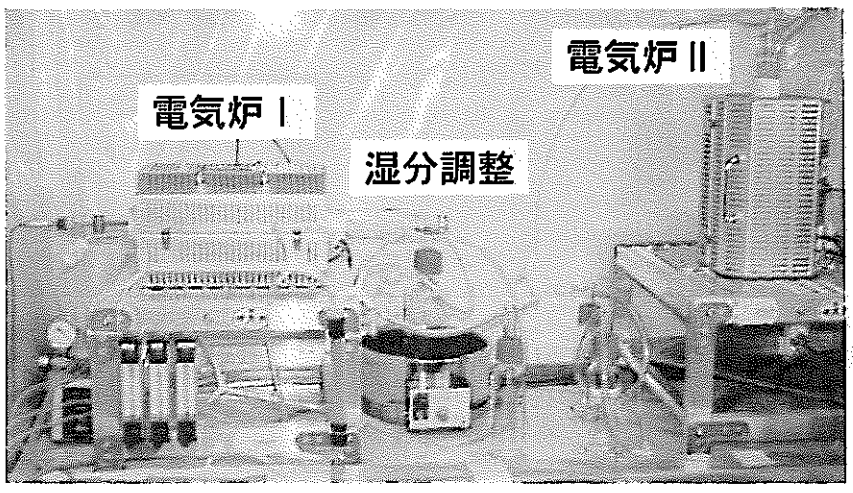
(1) 試験装置の概要



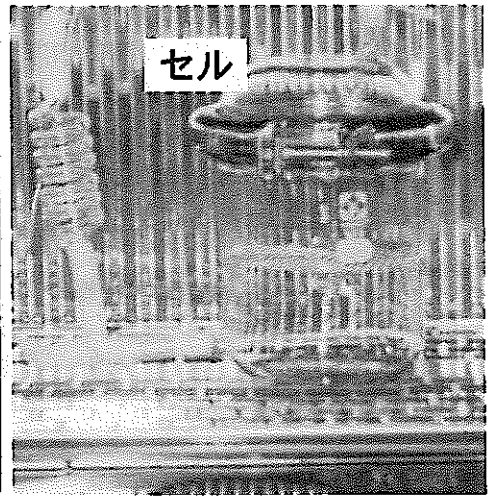
資料 3-5

3. 試験装置

(2) 試験装置の外観



汚染状態調査に使用した装置の外観



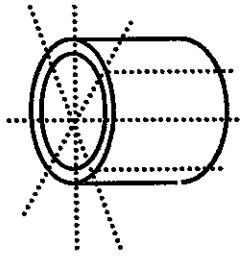
除染試験に使用したセル

資料 3-6

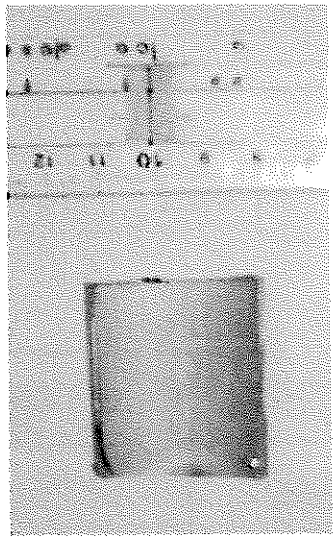
4. 使用済配管の調査

(1) 試験片(使用済配管)

・採取箇所：重水浄化系
・材質：ステンレス(SUS304)
・形状：長さ40mmの3ｲﾝﾁ配管を8等分に切断
　　(長さ40mm×幅34mm×厚さ5mm)



・試験前の状態(再浸漬試験片)：
　設備改造で発生した使用済配管を
　密閉状態で約2年間保管
　⇩
　保管中に汚染状態の変化が懸念
　⇩
　試験片を系統重水に7日間再浸漬し、
　重水抜取り直後の状態を模擬



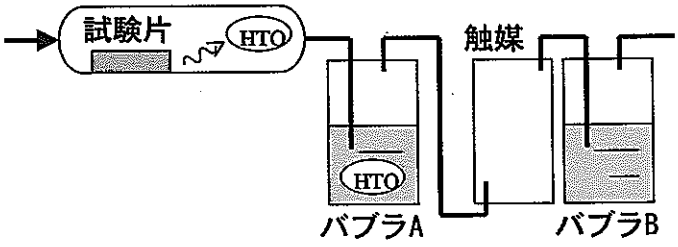
試験片外観

資料 3-7

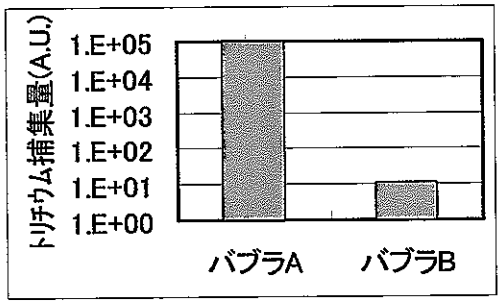
4. 使用済配管の調査

(2) トリチウム形態の調査1 -バブラA･Bの比較-

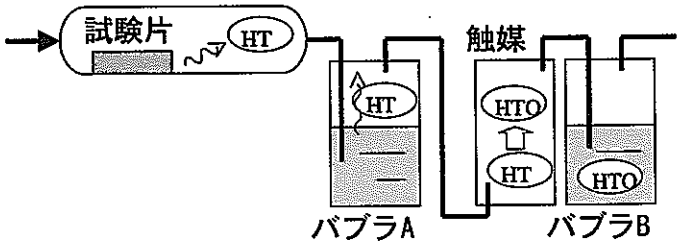
試験片中の水状トリチウム(HTO,DTO等)は、バブラAで捕集



再浸漬試験片の調査結果



水以外の形態のトリチウムのうちガス状(HT,DT等)で放出されたものは、バブラBで捕集



⇩

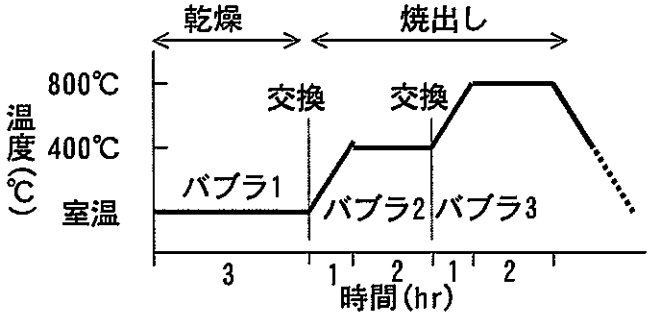
大部分のトリチウムをバブラAで捕集
⇩
再浸漬試験片中のトリチウムの
大部分は水の形態で残留すると予想

資料 3-8

4. 使用済配管の調査

(3) トリチウム形態の調査2 –放出温度の比較–

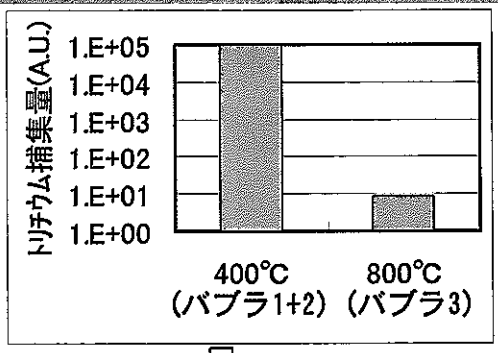
400℃で水状トリチウムを放出させ、
800℃でガス状トリチウムを放出させる



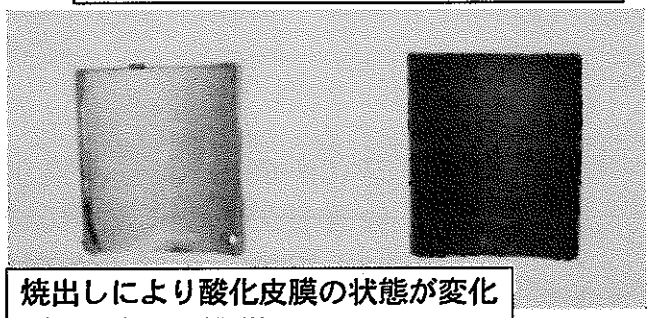
試料分析の昇温パターン

通気ガス流量

	ガス流量(cm³/min)		
	He	空気	H_2
乾燥	100	–	–
焼出し	30	1000	10



やはり、大部分は水の形態と予想



焼出しにより酸化皮膜の状態が変化
(結合水まで離脱)

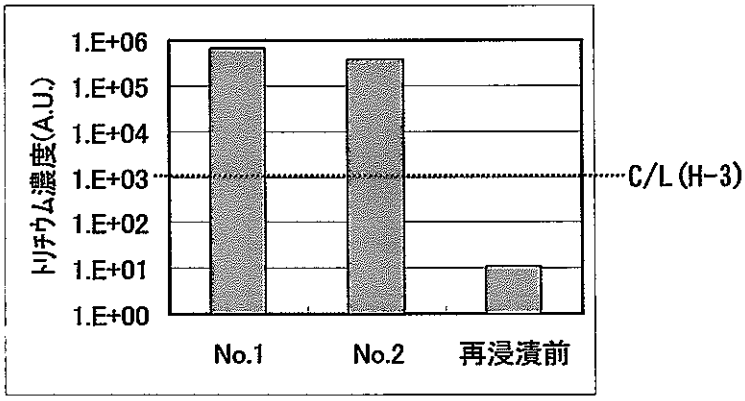
資料 3-9

Fugen Decommissioning Project

4. 使用済配管の調査

(4) トリチウム汚染濃度の調査結果

再浸漬試験片のトリチウム汚染濃度の調査結果



重水抜取り直後の模擬状態でトリチウム濃度が
C/Lを超えているので、除染検討の必要性を再確認

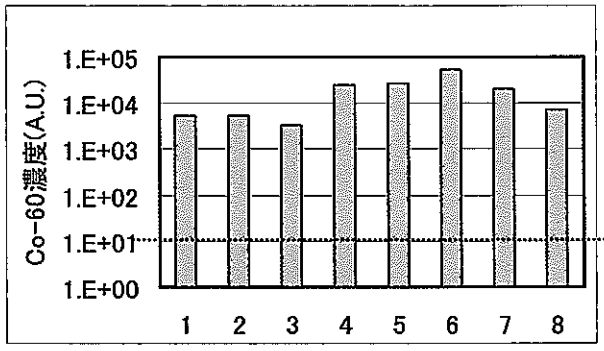
資料 3-10

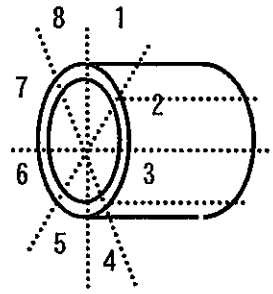
4. 使用済配管の調査

(5) CP(Co-60)汚染濃度の調査結果

*CP：腐食生成物(Corrosion Products)

乾燥試験片のγ線測定
(Ge測定器)





⇩

CP(Co-60)による汚染があるので、
作業者の被ばく低減の観点から
CPも除染したほうが望ましい

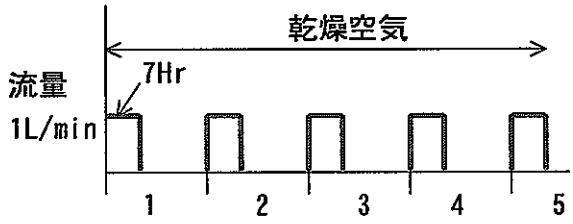
資料 3-11

5. トリチウム除染方法の基礎検討

(1)乾燥法、水蒸気除染の試験条件

共通項目

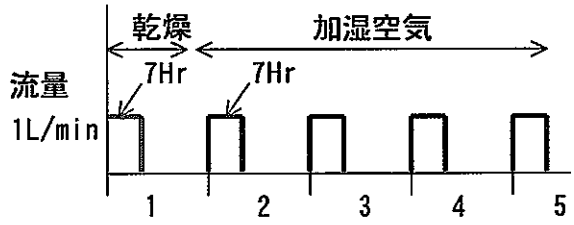
- 試験片　：再浸漬試験片
- 通気ガス　：空気
- 通気ガス流量：1L/min
- ﾄﾘﾁｳﾑ除染量　：水バブラで捕集したﾄﾘﾁｳﾑ量から除染量(放出量)を評価



乾燥法試験の通気パターン

乾燥法

- 試験片温度　：室温
- 通気ガス状態：乾燥空気



水蒸気除染試験の通気パターン

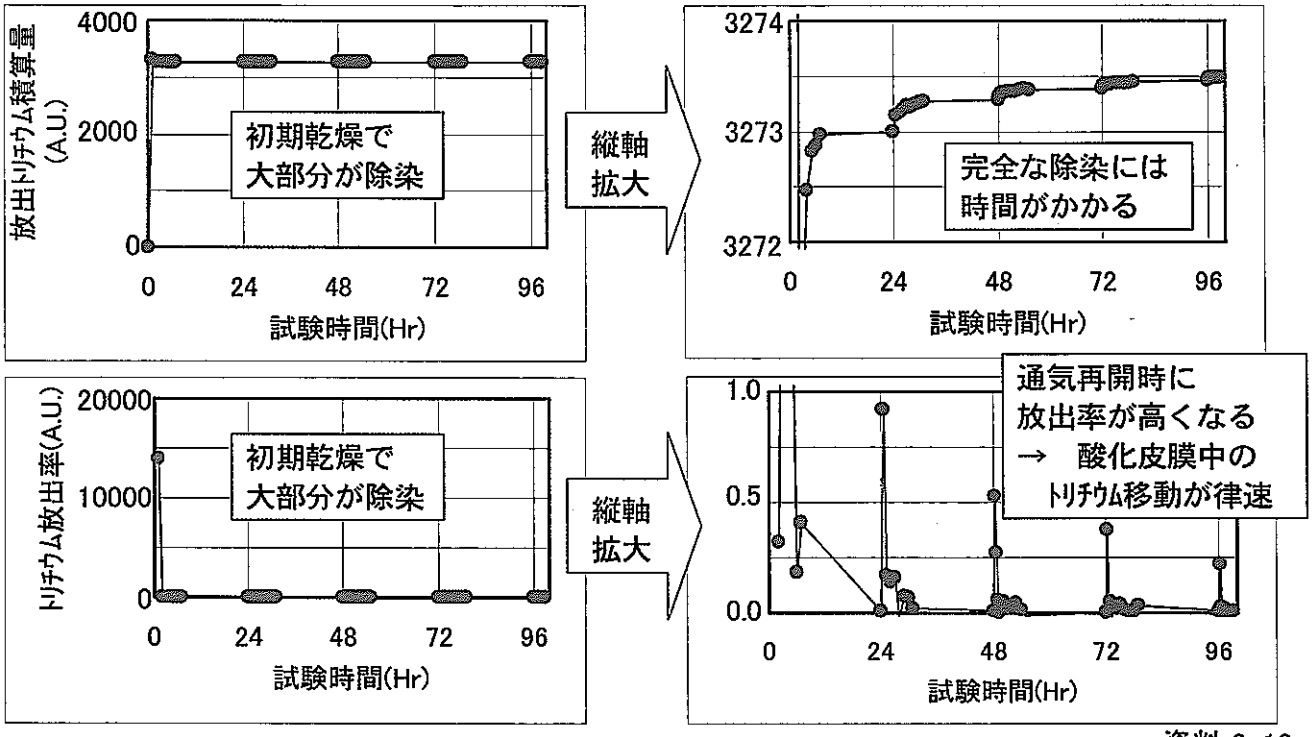
水蒸気除染

- 試験片温度　：40℃
- 通気ガス状態：加湿空気(露点40℃)

資料 3-12

5. トリチウム除染方法の基礎検討

(2) 乾燥法の基礎試験結果

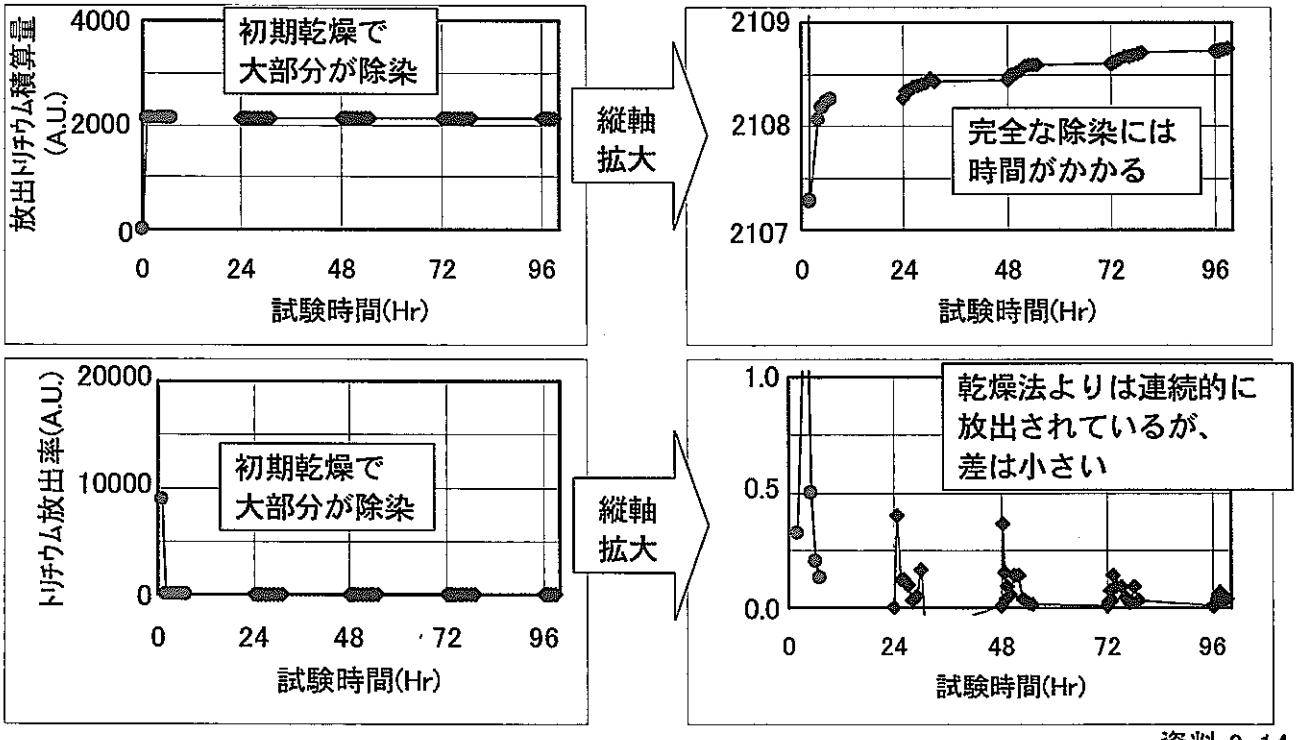


資料 3-13

Fugen Decommissioning Project

5. トリチウム除染方法の基礎検討

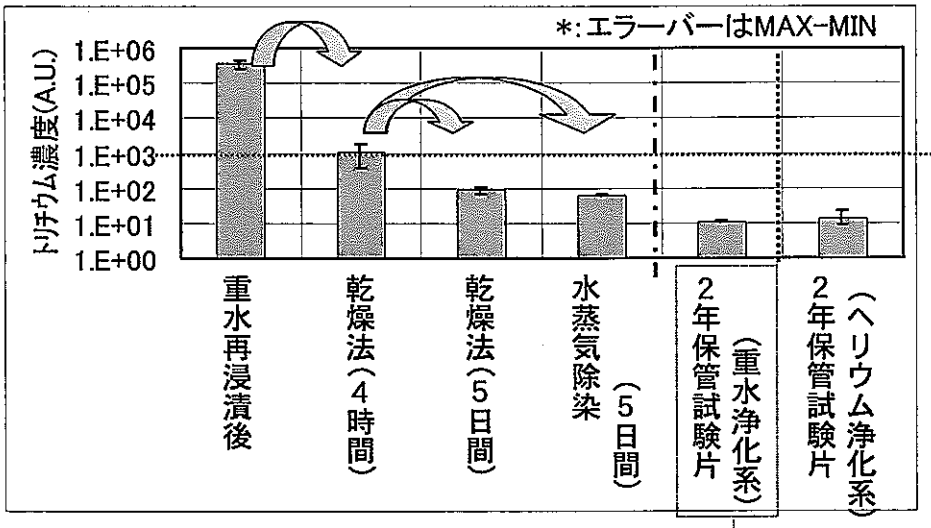
(3) 水蒸気除染法の基礎試験結果



資料 3-14

5. トリチウム除染方法の基礎検討

(4)各ステップにおける残留トリチウム量



エッチング試験
(深さ方向)

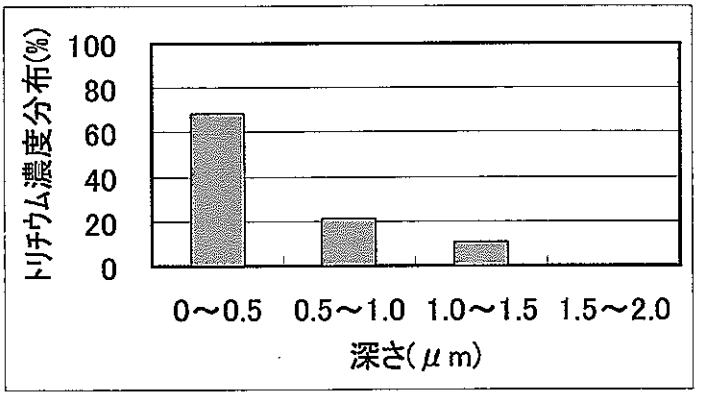
- 乾燥法と水蒸気除染によりトリチウム濃度を3桁以上低減できる可能性あり
- 完全な除染には時間がかかるが、初期除染の効果が大
- 乾燥法でも十分な除染効果が得られている

資料 3-15

5. トリチウム除染方法の基礎検討

(5) 保管試験片のエッチング試験

エッチングにより試験片を表面から0.5μmずつ溶解し、深さ方向のトリチウム濃度分布を調査



母材中のトリチウム濃度が低いので、付着水と酸化皮膜中のトリチウムを除染すれば解体作業の安全性を確保できる

「ふげん」重水系は炉心部でも50～60℃と比較的低温なので、トリチウムは母材まで浸透しにくい

①乾燥法でトリチウムを除染→②化学除染でCPを除染→③解体撤去という工程シナリオを中心に検討

資料 3-16

6. まとめ、今後の予定

(1) まとめ

○「ふげん」重水系のトリチウム汚染状態を調査し、
下記事項を明らかにした。
・重水に再浸漬した試験片はトリチウムで汚染されている
・汚染トリチウムの大部分は水の形態で残留していると予想できる

○適切なトリチウム除染法を選定するための基礎試験を行い、
下記の結果を得た。
・乾燥法と水蒸気除染によりトリチウム濃度を3桁以上低減できる可能性がある
・完全な除染には時間がかかるが、初期除染の効果が大きい
・乾燥法でも十分な除染効果が得られている
・母材中のトリチウム濃度が低いので、付着水と酸化皮膜中のトリチウムを除染すれば解体作業の安全性を確保できる

資料 3-17

6. まとめ、今後の予定

(2) 今後の予定

○ ①乾燥法でトリチウムを除染→②化学除染でCPを除染→③解体撤去
という工程シナリオを中心として、除染の適用性を更に詳しく
評価するために、下記項目の試験・検討を進めていく。
・実機形状機器(配管・ポンプ・弁・タンク等、溶接線継手部)での除染効果、及び、除染時間の評価
・系内にトリチウムを含む重水が残留した場合の影響評価

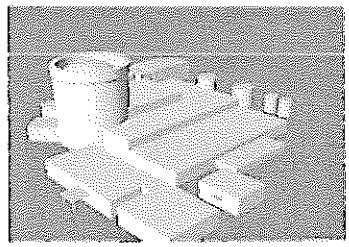
○重水精製装置Ⅰ(休止中)の汚染状態を調査し、除染試験の
モックアップ装置として有効活用することも検討していく。

資料 3-18

４．運転廃棄物の放射能調査

運転廃棄物の放射能調査
―アスファルト固化体―

1. 調査実績・計画、貯蔵状況
2. 軽水炉における評価手法の適用性検討
3. 固化体選定、分析方法
4. 分析結果
5. まとめ、今後の課題



資料 4-1

1. 調査実績・計画、貯蔵状況
(1)放射能インベントリ評価の実績・計画

年　度	H10	H11	H12	H13	H14	H15～
基本工程	運転					運転終了
放射能インベントリ評価 ①運転廃棄物放射能調査 ・アスファルト固化体 ・雑固体廃棄物 ②解体廃棄物放射能調査 ・放射化量調査 ・汚染量調査	サンプリング・測定（10試料/年程度） 中性子測定、機器・コンクリート測定 Co-60、トリチウム等の汚染調査、解析					

資料 4-2

1. 調査実績・計画、貯蔵状況

(2)運転廃棄物貯蔵本数

(H13年7月末現在, 200Lドラム缶換算)

廃棄物種類		第1,2固体廃棄物貯蔵庫 (容量：21,500本)
アスファルト固化体		約1,700本
雑固体	可燃物	約6,000本
	不燃物	約10,500本
合　計		約18,200本

資料 4-3

2. 軽水炉における評価手法の適用性検討

(1)評価対象核種と評価手法（BWRの例）

核種	生成源	評価手法	Key核種
H-3	冷却材中重水素等	平均値法	—
C-14	冷却材中酸素		—
Tc-99	構造材中Mo等		—
Co-60	腐食生成物の放射化	外部計測法	—
Ni-59		理論計算法	—
Ni-63		スケーリングファクタ法	Co-60
Nb-94			
Cs-137	核分裂による生成	外部計測法	—
Sr-90		スケーリングファクタ法	Cs-137
I-129			
全α	U,Pu		

資料 4-4

2. 軽水炉における評価手法の適用性検討

(2)評価手法の適用性確認事項

①平均値法(H-3,C-14,Tc-99)
- 放射能濃度の範囲
- 水質改善などの影響

②理論計算法(Ni-59)
- Ni-63/Ni-59比

③スケーリングファクタ法[ＳＦ法]
(Ni-63,Nb-94,Sr-90,I-129,全α)
- Key核種(Co-60,Cs-137) に対する相関性
- 水質改善、配管材料変更などの影響

資料 4-5

3. 固化体選定、分析方法

(1)サンプル固化体選定にあたっての考慮事項

① 水質改善、配管材料変更による核種組成への影響

内　容	現　象	選　定
配管材料変更('80～)	生成クラッドの核種組成変化	'80～'96までに製作された固化体10本
ｺﾝﾃﾞﾐ３塔→4塔('80～)	浄化能力(ＤＦ)の向上	
高放射性ドレンの濃縮処理('81～)	濃縮廃液の放射能濃度上昇	
水素注入('86～)	プラント構成材量の腐食抑制	
系統化学除染('88～)	酸化皮膜の溶解	

② 広範囲な放射能濃度の固化体を選定
- 1.1E+1～1.7E+3 Bq/g(Co-60)

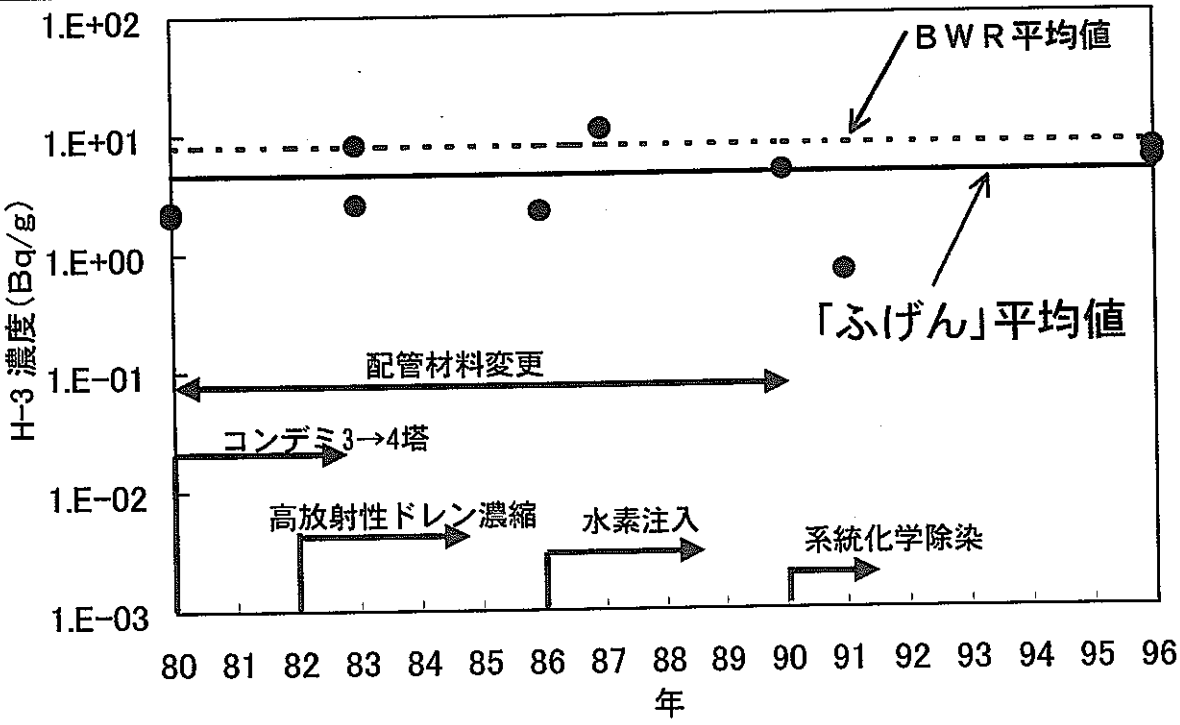
資料 4-6

3. 固化体選定、分析方法
(2)放射化学分析方法

核種	主な分析工程	検出器
H-3	燃焼酸化→コールドトラップ回収	液シンカウンタ
C-14	燃焼酸化→アミン系吸収剤回収	液シンカウンタ
Tc-99	酸溶解→ﾃﾄﾗﾌｪﾆﾙｱﾙｿﾆｳﾑｸﾛﾗｲﾄﾞ沈澱	2πｶﾞｽﾌﾛｰｶｳﾝﾀ
Co-60	酸溶解→溶解液、残渣直接測定	Ge半導体
Ni-59	酸溶解→ｼﾞﾒﾁﾙｸﾞﾘｵｷｼﾑ沈殿	Si(Li)半導体
Ni-63	酸溶解→ｼﾞﾒﾁﾙｸﾞﾘｵｷｼﾑ沈殿	液シンカウンタ
Nb-94	酸溶解→ﾃﾄﾗﾌｪﾆﾙｱﾙｿﾆｳﾑｸﾛﾗｲﾄﾞ沈澱	Ge半導体
Cs-137	酸溶解→ﾘﾝﾓﾘﾌﾞﾃﾞﾝ酸沈殿	Ge半導体
Sr-90	酸溶解→炭酸塩沈殿分離	GMカウンタ
I-129	中性子照射（I-130生成）→I-129換算	Ge半導体
全α	酸溶解→ﾃﾉｲﾙﾄﾘﾌﾙｵﾛｱｾﾄﾝ抽出	2πｶﾞｽﾌﾛｰｶｳﾝﾀ

資料 4-7

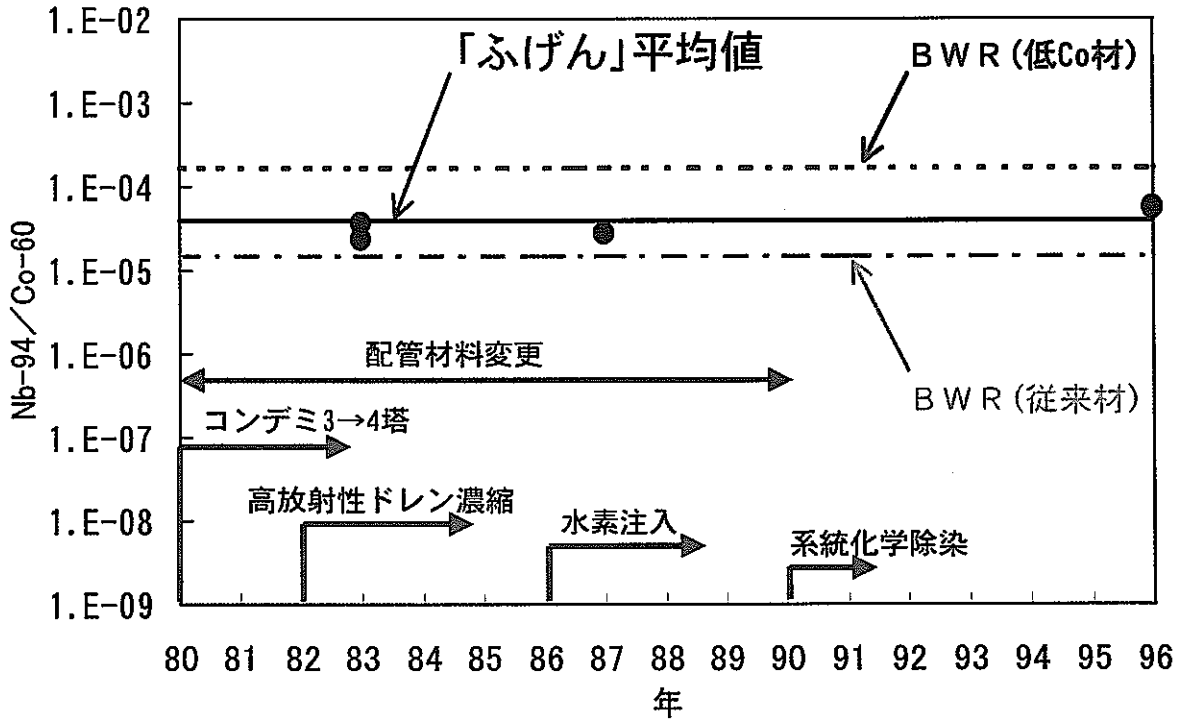
4. 分析結果
(1)H-3の分析結果（平均値法）



資料 4-8

4. 分析結果

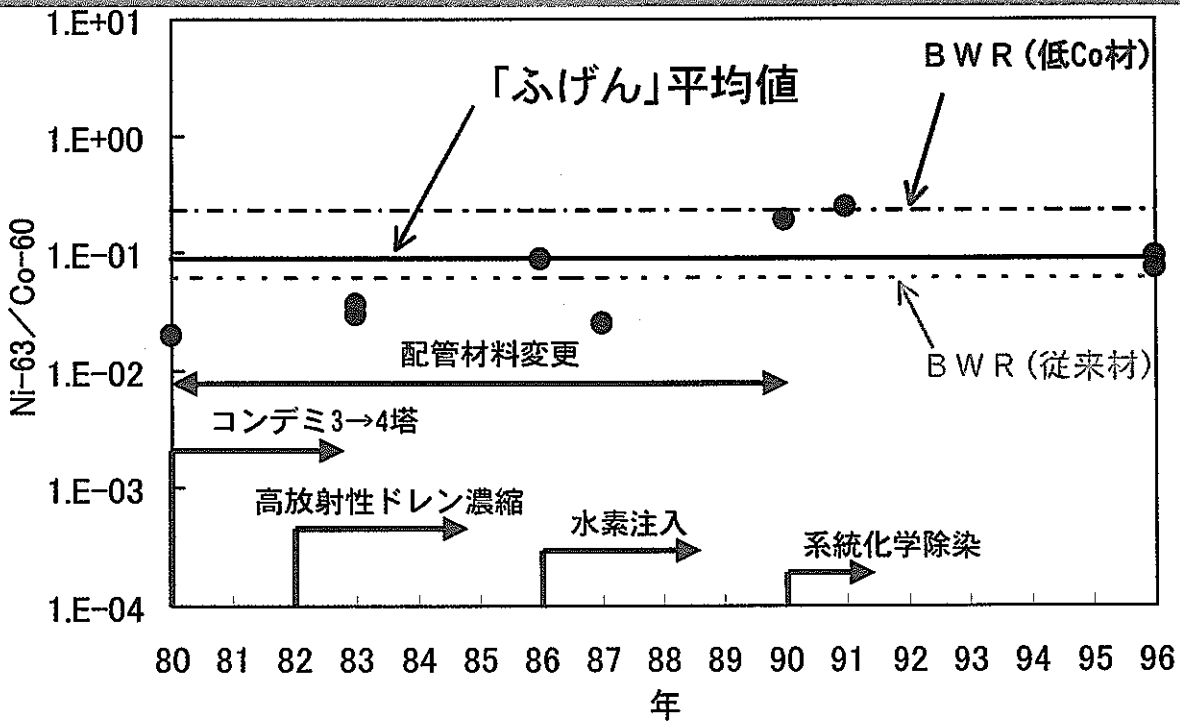
(2)Nb-94／Co-60の分析結果（SF法）



資料 4-9

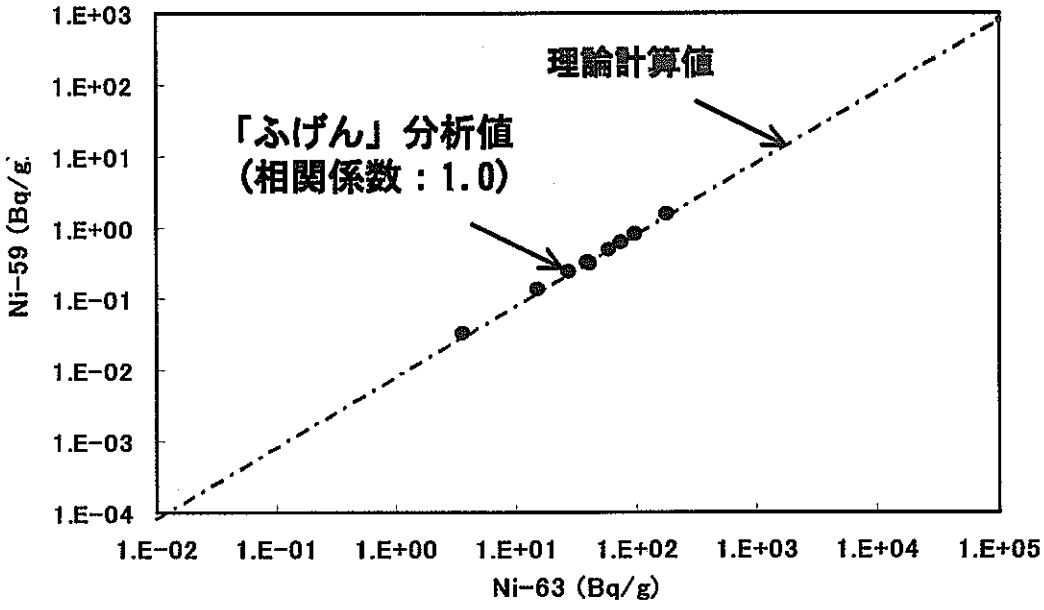
4. 分析結果

(3)Ni-63／Co-60の分析結果（SF法）



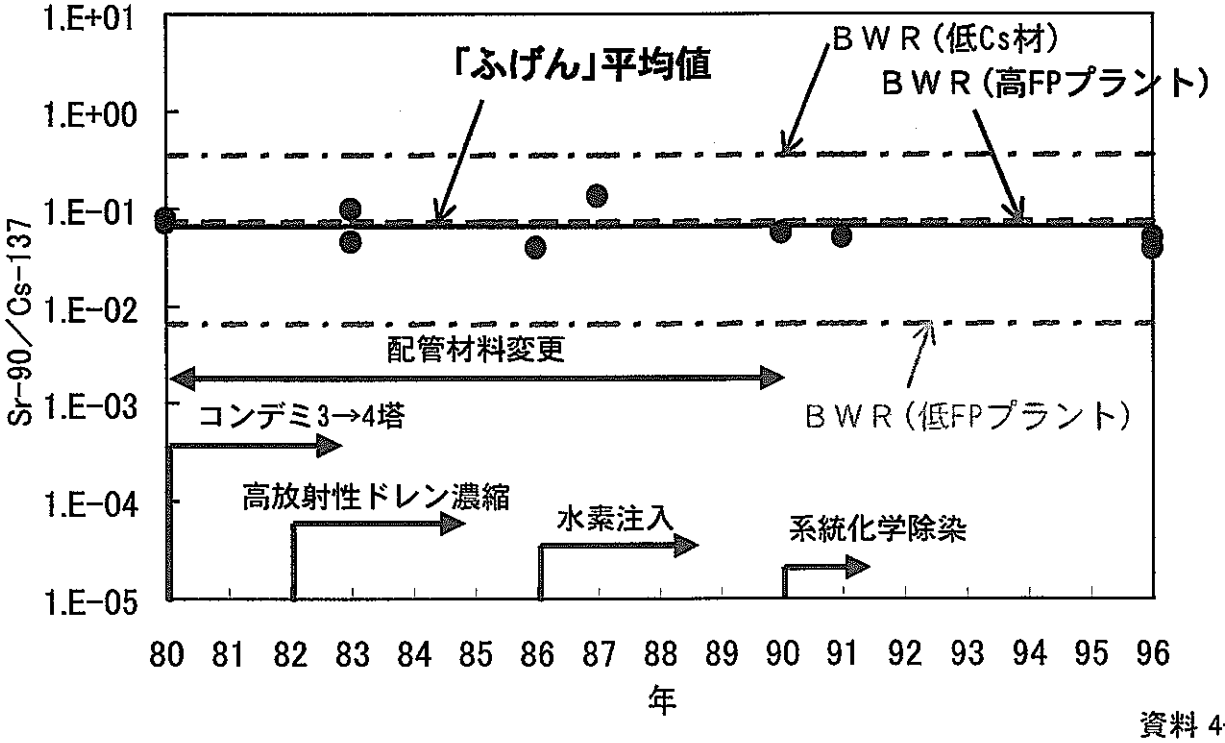
資料 4-10

4. 分析結果
(4)Ni-59とNi-63の相関関係（理論計算法）



資料 4-11

4. 分析結果
(5)Sr-90／Cs-137の分析結果（SF法）



資料 4-12

4. 分析結果
(6)検出されなかった核種

核種	評価手法	対　策
Tc-99	平均値法	検出限界値以下であったことから検出精度を向上させる
全α	ＳＦ法	
I-129	ＳＦ法	燃料破損がないため検出困難

資料 4-13

4. 分析結果
(7)水質改善、材料変更による核種組成への影響

内　容	結　果
配管材料変更('80～)	これまでの調査結果では有意な影響なし
ｺﾝﾃﾞﾐ３塔→4塔('80～)	
高放射性ドレンの濃縮処理('81～)	
水素注入('86～)	
系統化学除染('88～)	

資料 4-14

5. まとめ、今後の課題
(1)まとめ

① H-3、C-14
・平均値法が適用可で軽水炉と同等

② Ni-63、Sr-90、Nb-94
・ＳＦ法が適用可で軽水炉と同等

③ Ni-59
・理論計算法が適用可で軽水炉と同等

④ Tc-99、I-129、全α
・検出限界値以下
・I-129については燃料破損がないことから検出は困難

資料 4-15

5. まとめ、今後の課題
(2)今後の課題

① 検出限界値以下の核種
・ Tc-99、全α：データの取得
・ I-129：ＢＷＲにおけるＳＦ値の使用を検討

② 信頼性向上のための試料数追加

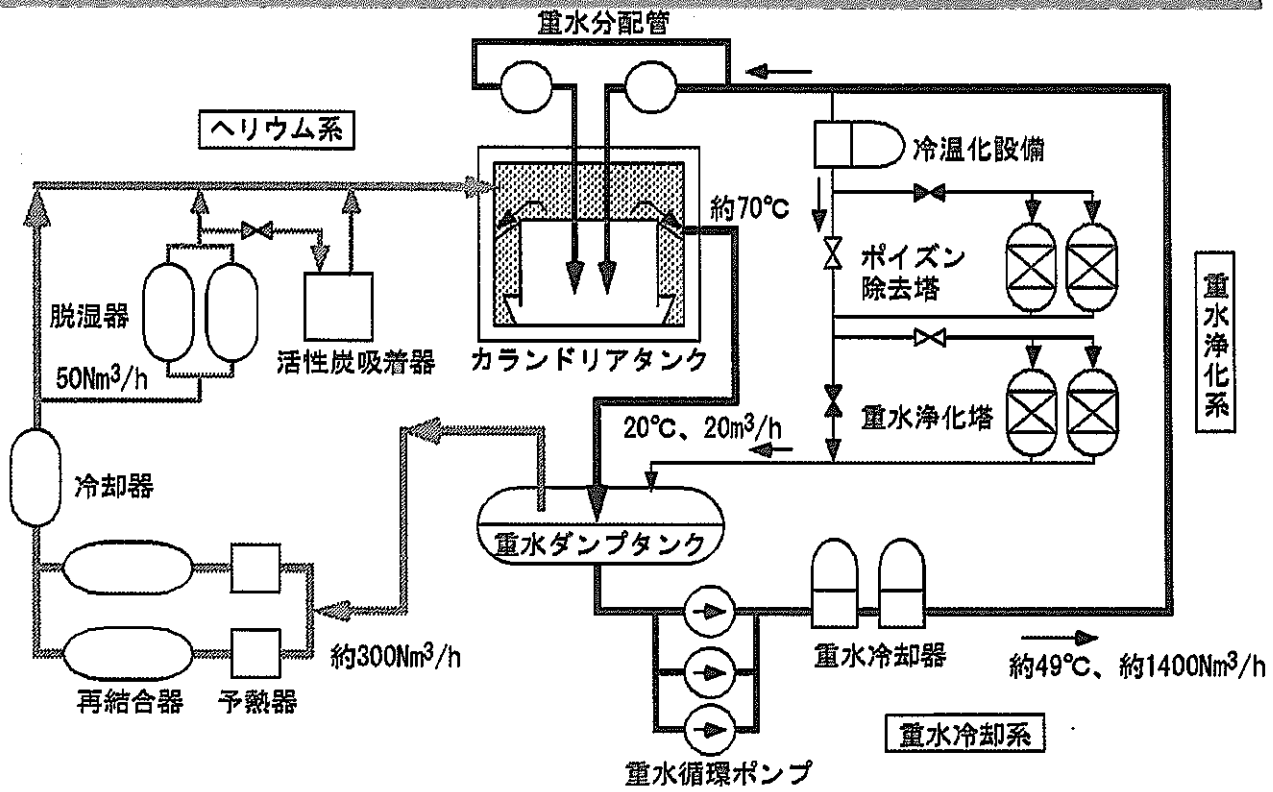
③ 亜鉛注入による核種組成への影響調査

資料 4-16

5．重水精製装置の概要

Fugen Decommissioning Project

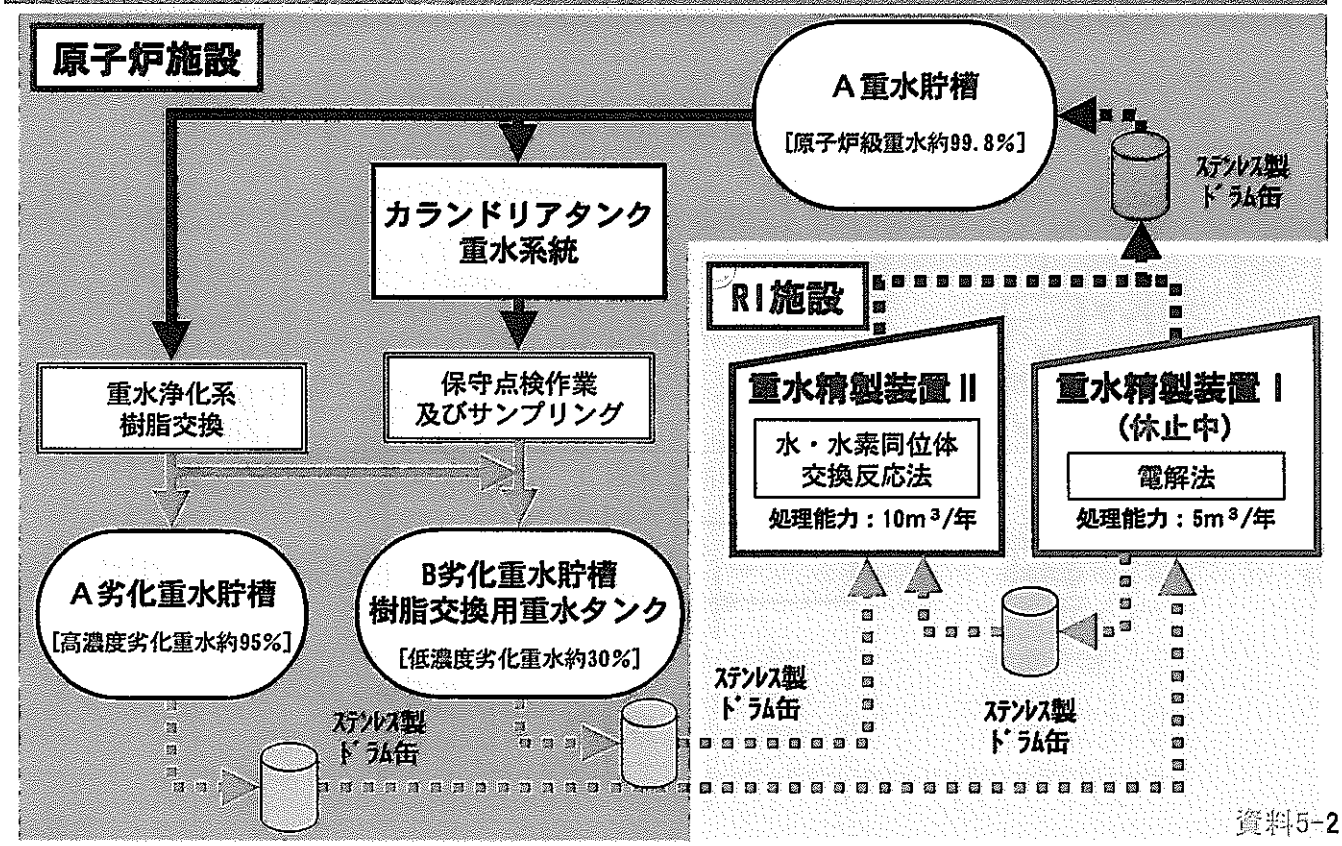
重水ヘリウム系概略系統図



資料5-1

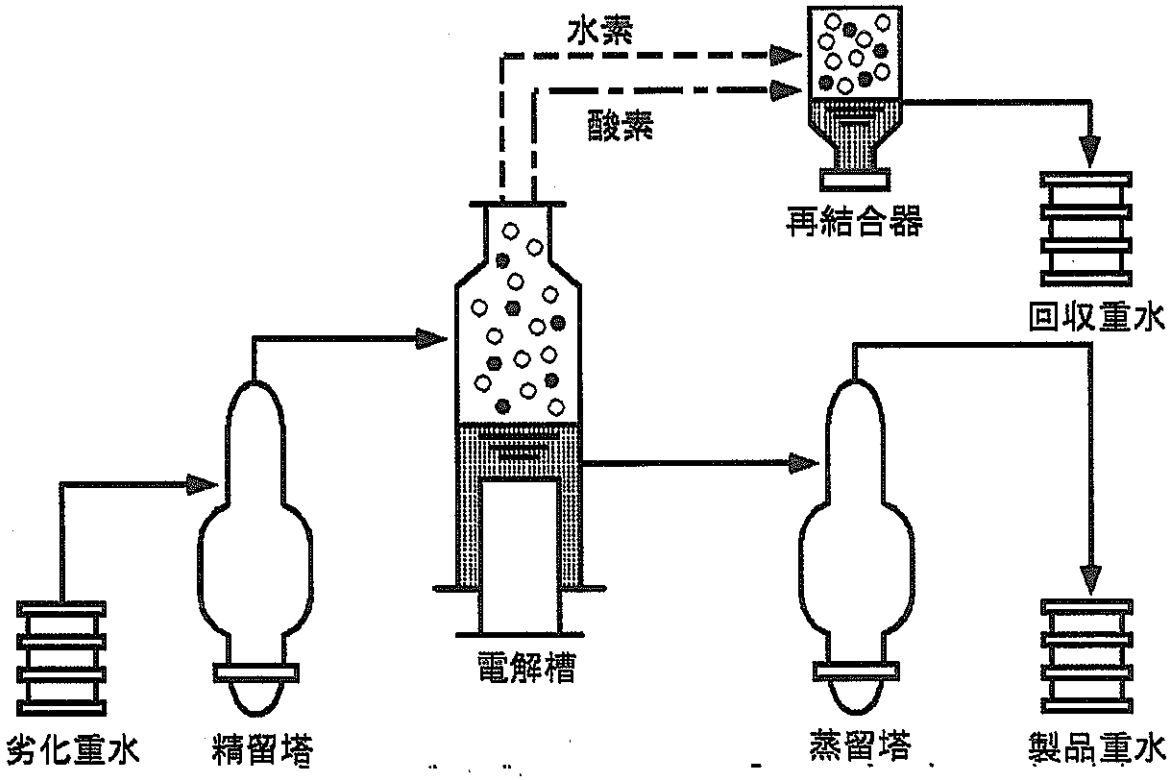
Fugen Decommissioning Project

「ふげん」の重水運用サイクル



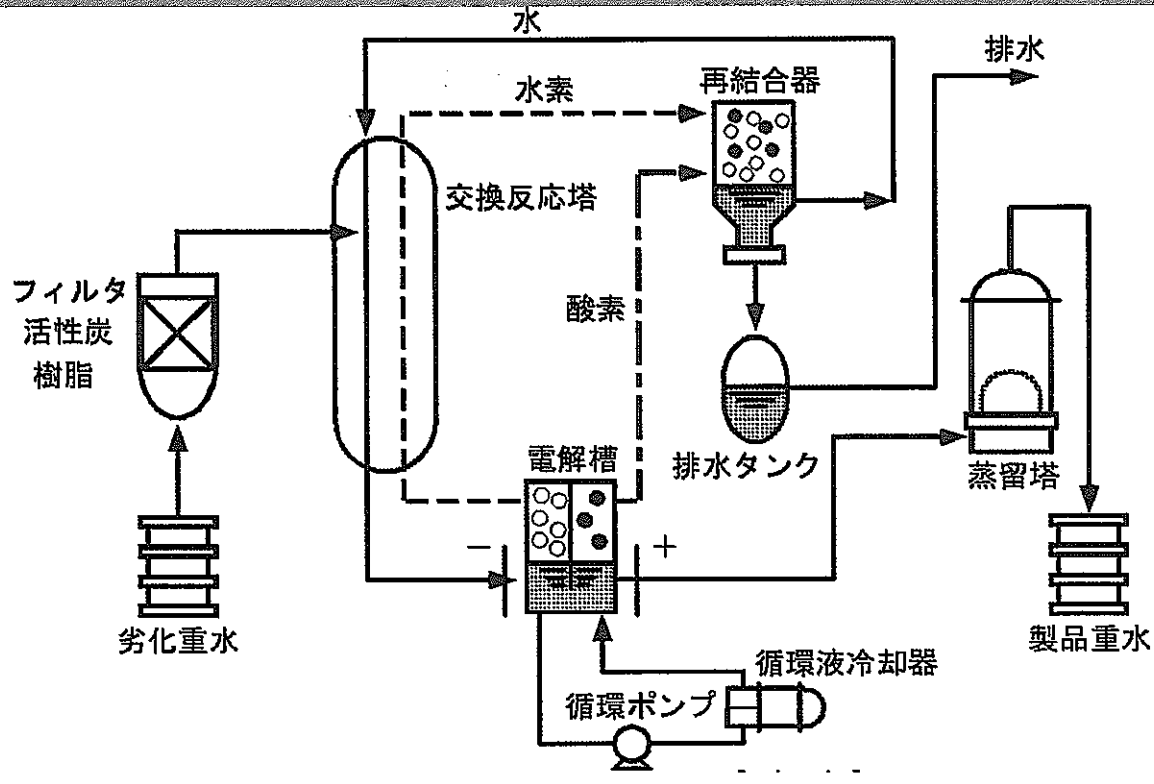
資料5-2

重水精製装置Ⅰ概略系統図



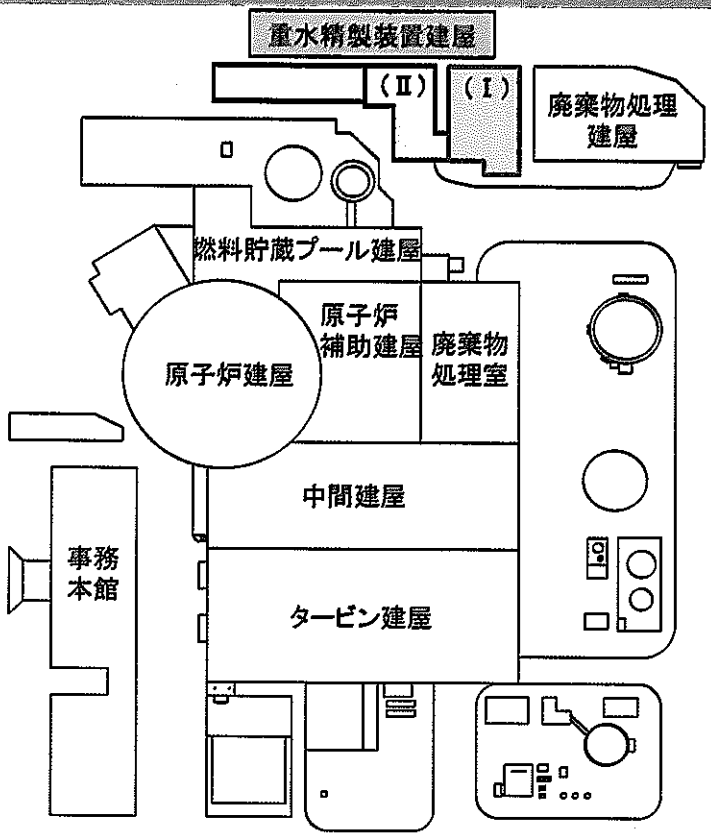
資料5-3

重水精製装置Ⅱ概略系統図



資料5-4

「ふげん」構内配置図



資料5-5