

# 「ふげん」廃止措置における 系統除染の影響評価とトリチウム除去手法

## 発表内容

- 「ふげん」の廃止措置工程
- 系統除染の廃止措置への影響評価
- トリチウム除去手法と作業状況



国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構  
原子炉廃止措置研究開発センター  
森田 聡

# 新型転換炉「ふげん」のプラント概要

電気出力 : 16万5千kW

炉型 : 重水減速・沸騰軽水冷却  
圧力管型

燃料 : 混合酸化物(MOX)  
微濃縮ウラン

減速材 : 重水

冷却材 : 軽水

累積発電電力量 : 約220億kW時

平均設備利用率 : 約62%

総発電時間 : 13.7万時間

昭和53年 3月 初臨界(MOX燃料22体の最小臨界)

昭和54年 3月 運転開始

平成15年 3月 運転終了

平成15年 8月 燃料取出完了

平成15年12月 系統化学除染の実施

平成17年 5月 重水搬出開始

平成20年 2月 廃止措置計画認可

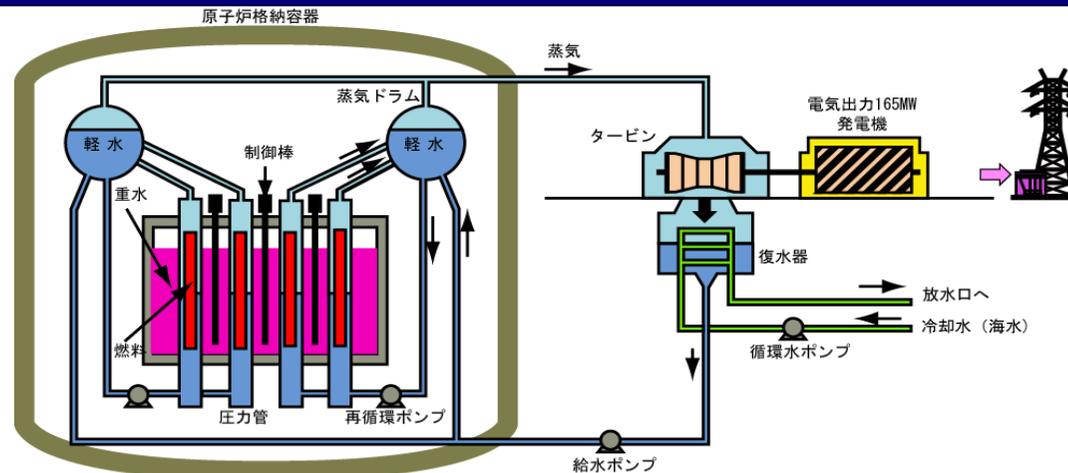
平成20年 5月 重水系トリチウム除去作業着手

平成20年 6月 原子炉冷却系(給水系)解体工事着手

平成24年 3月 廃止措置計画変更

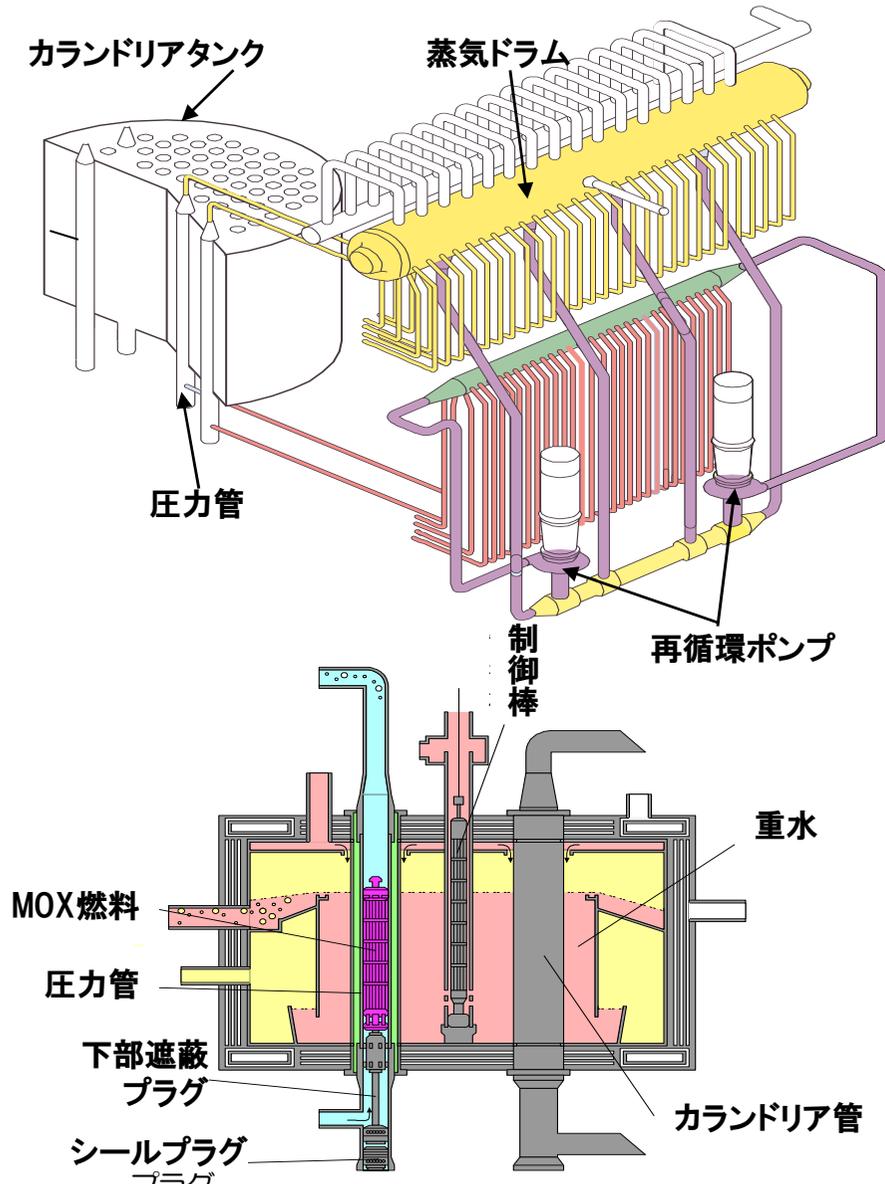
平成26年 4月 重水搬出完了

平成27年 2月 クリアランス測定・評価方法認可申請



熱出力 557MW

# 「ふげん」の特徴と廃止措置技術



## 「ふげん」固有の特徴

- 原子炉本体の構造が複雑
- 減速材に重水を使用

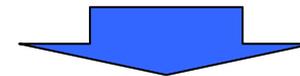


## 固有技術の開発・研究

- ・原子炉本体切断工法の選定
- ・トリチウム除去技術の確立

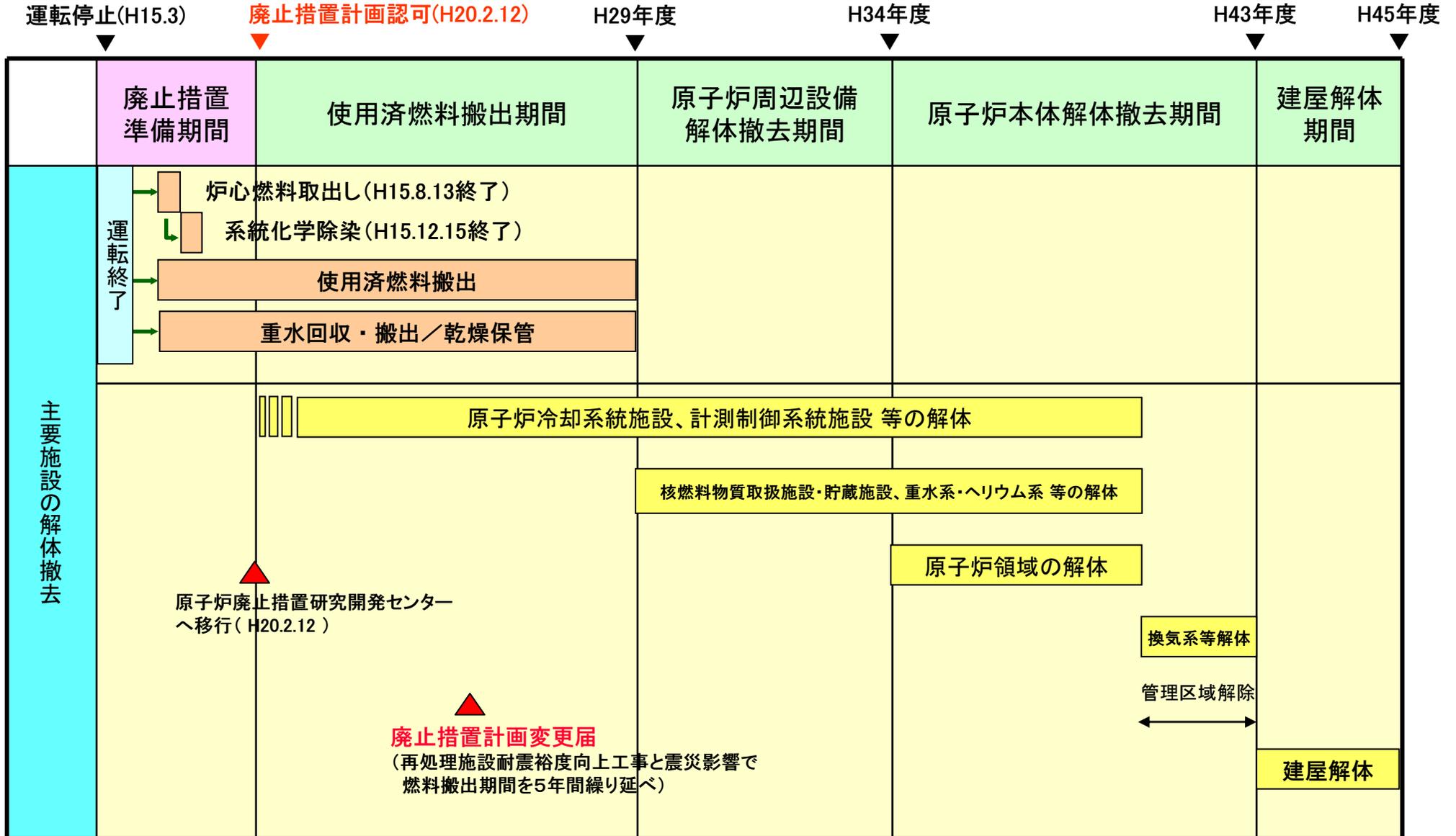
## 軽水炉と共通の技術

- 原子炉本体・重水系以外の設備は軽水炉(BWR)と同様
- 物量、残存放射エネルギーは商業炉並み



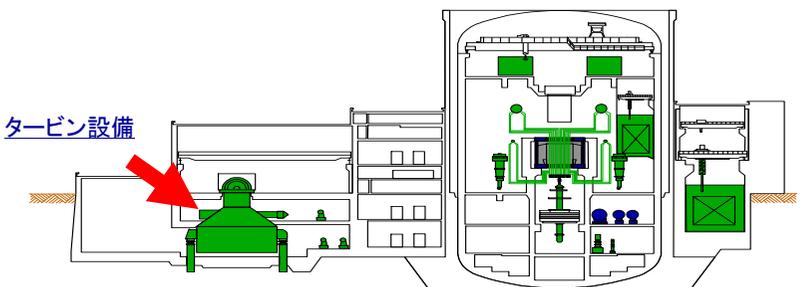
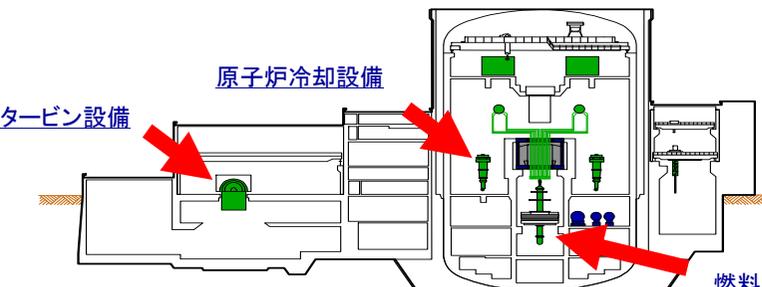
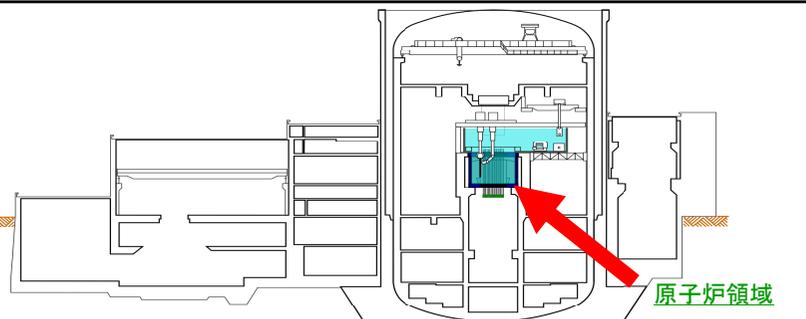
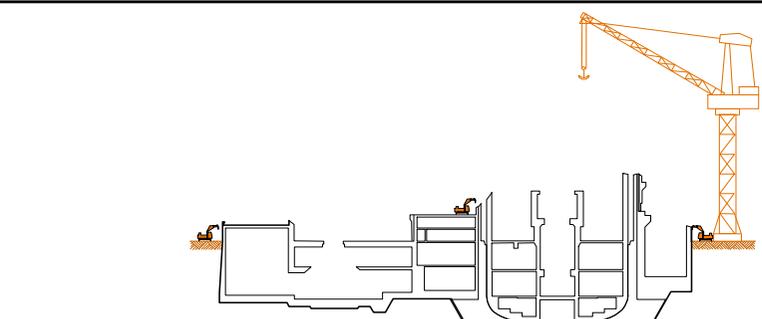
## 既存技術の改良・高度化

# 廃止措置スケジュール



廃止措置計画認可申請書 (H20.2.12認可、H24.3.22変更届)

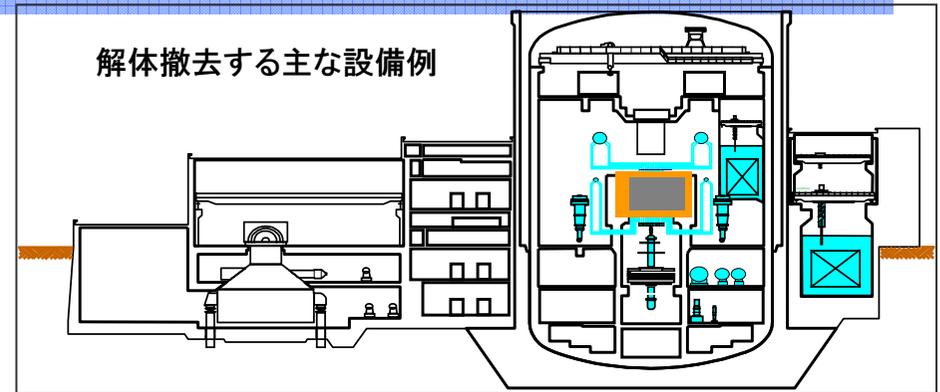
# 原子炉施設の解体撤去のイメージ

<p>① 使用済燃料搬出期間</p>	<p>② 原子炉周辺設備解体撤去期間</p>
 <p>タービン設備</p>	 <p>タービン設備</p> <p>原子炉冷却設備</p> <p>燃料交換装置</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 使用済燃料搬出、重水搬出を実施</li> <li>● 使用済燃料の貯蔵に係る安全確保のための機能を維持管理し、その機能に影響を与えない範囲で、使用しなくなった放射能レベルの比較的低い施設・設備及び汚染のない施設・設備を解体撤去</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 使用済燃料の搬出完了によって使用しなくなった放射能レベルの比較的低い施設・設備及び汚染のない施設・設備の解体撤去</li> <li>● 原子炉領域の解体撤去に用いる遠隔解体装置等の設置範囲にある干渉する設備・機器等の解体撤去</li> <li>● 使用済燃料貯蔵プール、熱交換器類、放射性廃棄物貯蔵タンク等の汚染除去</li> </ul>
<p>③ 原子炉本体解体撤去期間</p>	<p>④ 建屋解体期間</p>
 <p>原子炉領域</p>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 放射能レベルの比較的高い原子炉領域を解体撤去</li> <li>● 汚染したすべての設備・機器等を解体撤去</li> <li>● 汚染したすべての設備・機器を解体撤去後、建屋及び構造物の汚染の除去を行い、すべての管理区域を解除</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 管理区域を解除した建屋及び汚染のない建屋も含め、廃止措置対象施設を解体</li> </ul>

# 「ふげん」から発生する解体撤去物

「ふげん」の廃止措置によって発生する  
廃棄物の量

約361,800トン



放射能レベル区分	汚染分布図の凡例	発生量 (単位:トン)
低レベル放射性廃棄物	放射能レベルの比較的高いもの(レベル1)	約500
	放射能レベルの比較的低いもの(レベル2)	約4,400
	放射能レベルの極めて低いもの(レベル3)	約45,500
放射性物質として扱う必要のないもの		約600
合計		約50,800
放射性廃棄物でない廃棄物 (管理区域外からの発生分を含む)		約141,000
(*) 汚染のない地下の建屋、構造物、事務所、倉庫等		約170,000
(*) 廃止措置計画書記載対象外 総計		約361,800

・放射性廃棄物として処分 (約10,000トン程度)  
 レベル1 ⇒ 余裕深度処分  
 レベル2 ⇒ コンクリートピット処分  
 レベル3 ⇒ トレンチ処分

「埋設処分業務の実施に関する計画(H21.11.13)」  
 ⇒処分のあり方調整  
 ⇒研究施設等廃棄物埋設処分場(第1期)



放射能レベルが基準値より高い  
 放射能レベルが基準値より低い

クリアランス制度\*による確認

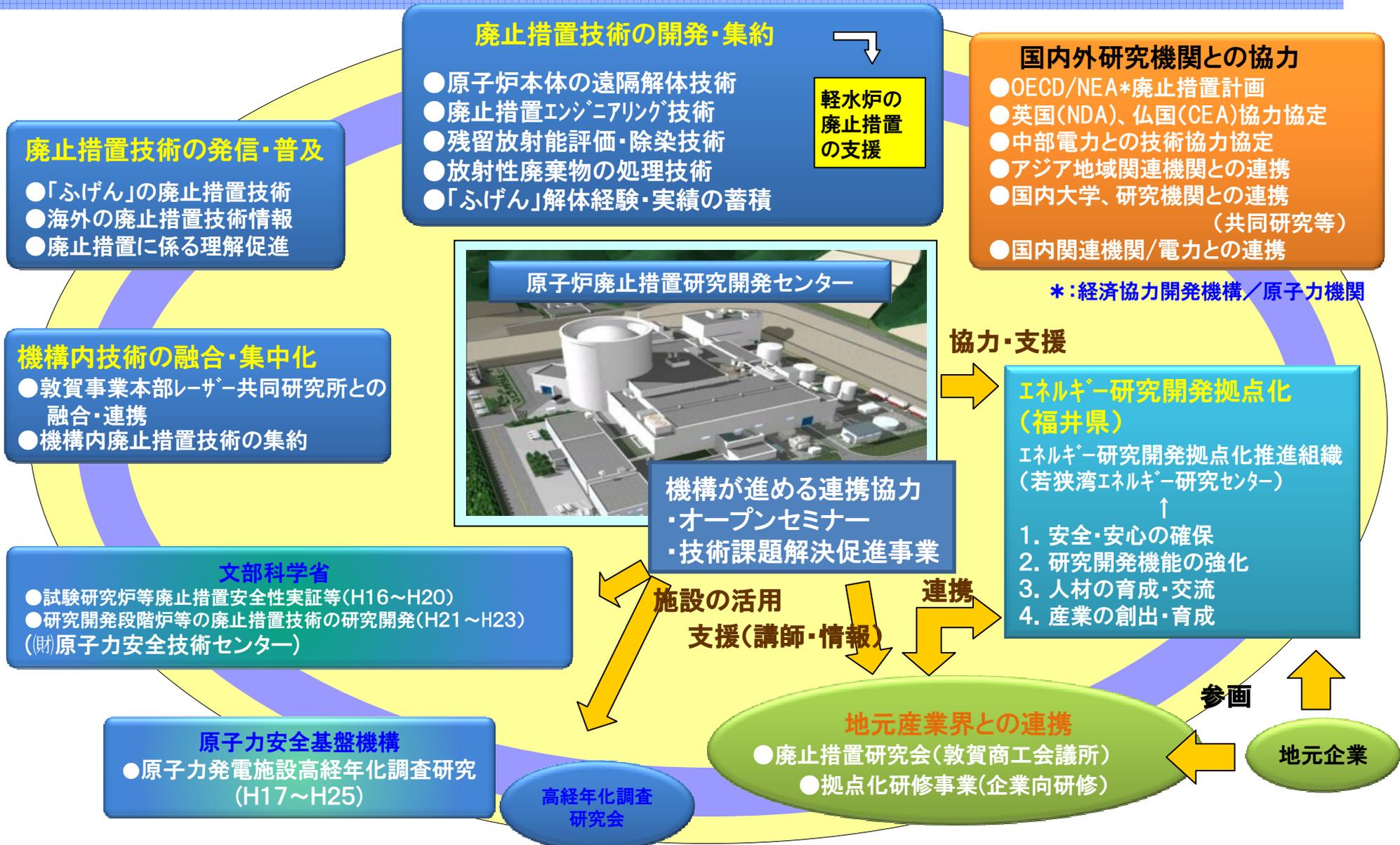
・産業廃棄物と同様な処分  
 ・リサイクル (約352,000トン程度)

\*クリアランスとは？

放射性物質の放射能濃度が極めて低く、人の健康への影響が無視できるものについて、放射性物質として扱わず、普通の産業廃棄物として再利用・処分できるようにする制度

- 推定発生量は、十トン単位で切り上げ、合計値については、百トン単位で切り上げた値である。(端数処理のため合計値が一致しないことがある)
- 放射能レベル区分毎の物量は、除染を考慮していないレベル区分で集計したものである。(今後の除染等により各レベルの数量は変わらう)

# 原子炉廃止措置研究開発センターの取組み



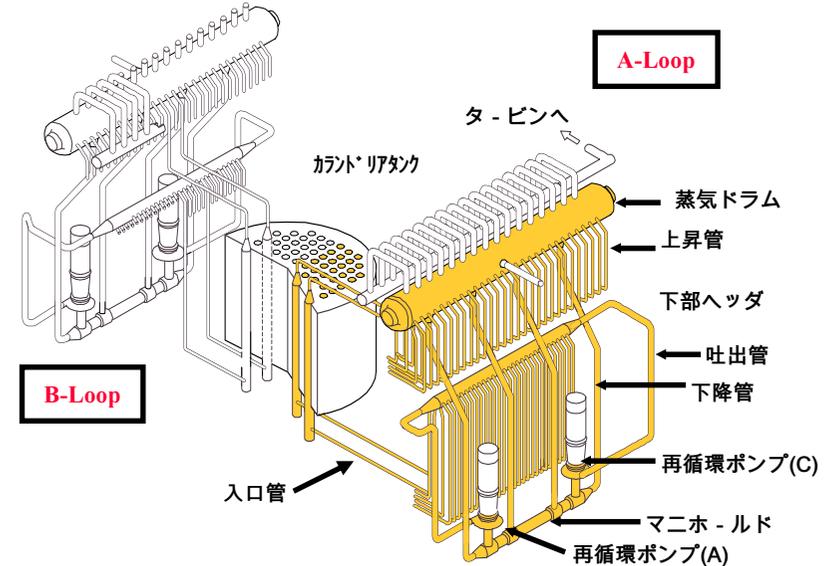
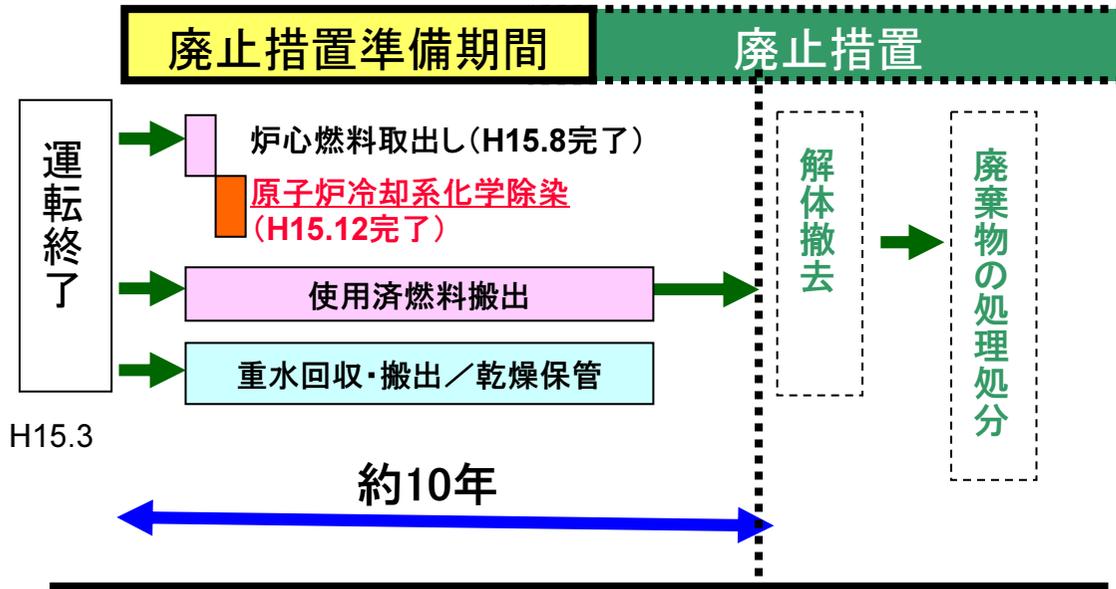
# 系統除染の廃止措置への影響評価

## 【発表内容】

1. 系統化学除染の目的・目標
2. 廃止措置影響評価
  - ・除染による被ばく低減効果
  - ・除染によるコスト低減効果
4. まとめ



# 「ふげん」の廃止措置工程と系統除染



系統化学除染の実施範囲  
(A-Loopの例、B-Loopも同範囲で実施)

- 運転終了直後は、除染作業に使用する既存の**系統設備の健全性**が保たれている。
- 系統設備に精通した**熟練運転員の確保**が容易であり、安全で信頼性の高い除染が可能。
- 原子炉冷却系の内包放射エネルギーの低減による**プラント安全性**の向上

運転終了後直後に原子炉冷却系の系統化学除染を実施

# 除染の目的(必要性)

## 【目的】

今後の廃止措置(解体撤去、廃棄物処理・処分)を合理的に進める。

### ◆ 被ばく低減

系統除染による作業環境の線量率低下により、恒久停止後のプラント管理及び解体作業に係わる被ばく線量を低減する。

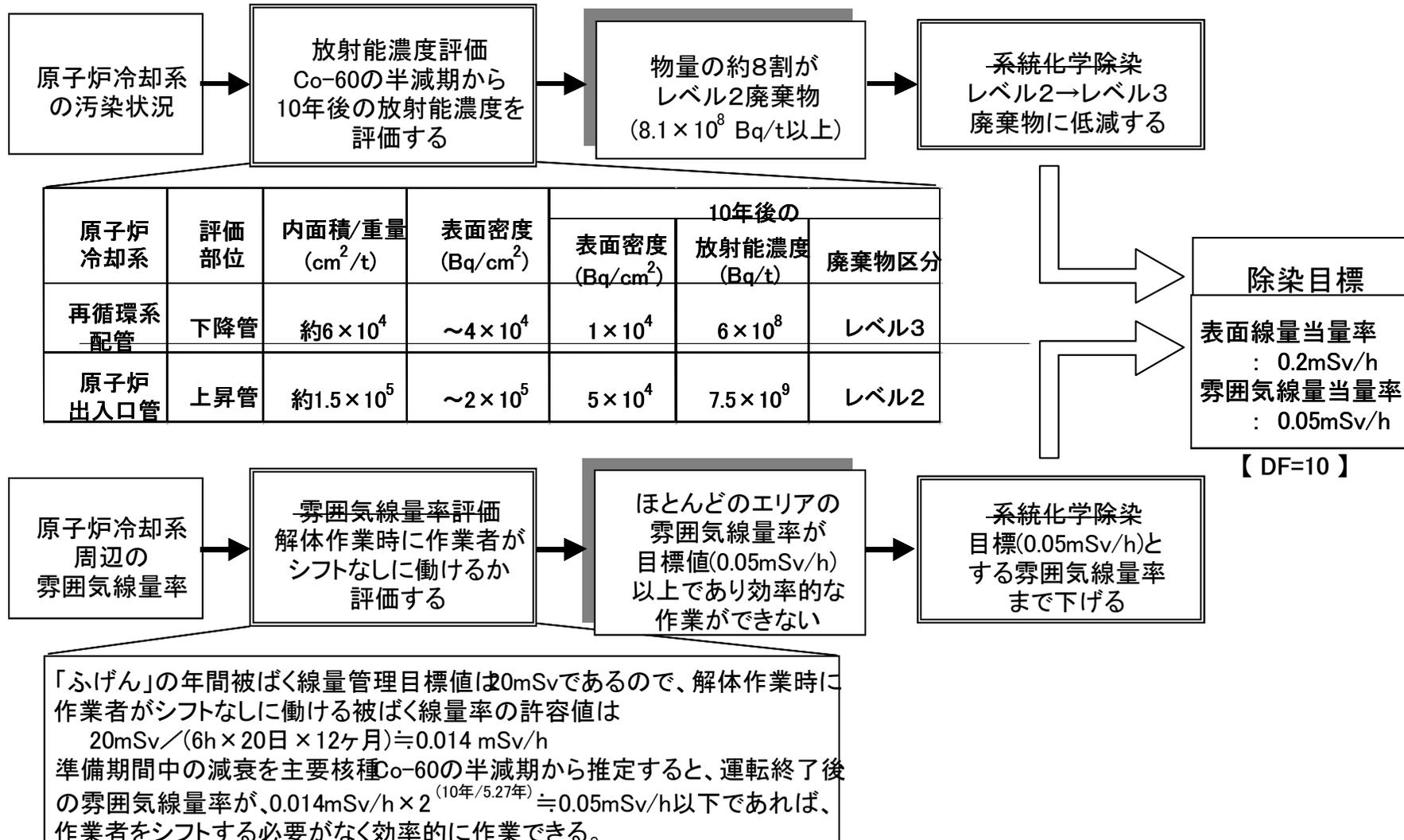
### ◆ コスト低減

解体廃棄物としての放射能レベル区分を下げることにより、廃棄物処理・処分コストを低減する。

## 【目標】

- 機器・配管の表面線量当量率 : < 0.2 mSv/h
- 原子炉建屋内の雰囲気線量当量率 : < 0.05 mSv/h

# 除染目標の設定の考え方



# 化学除染方法

## 供用期間中の系統化学除染とほぼ同等の条件

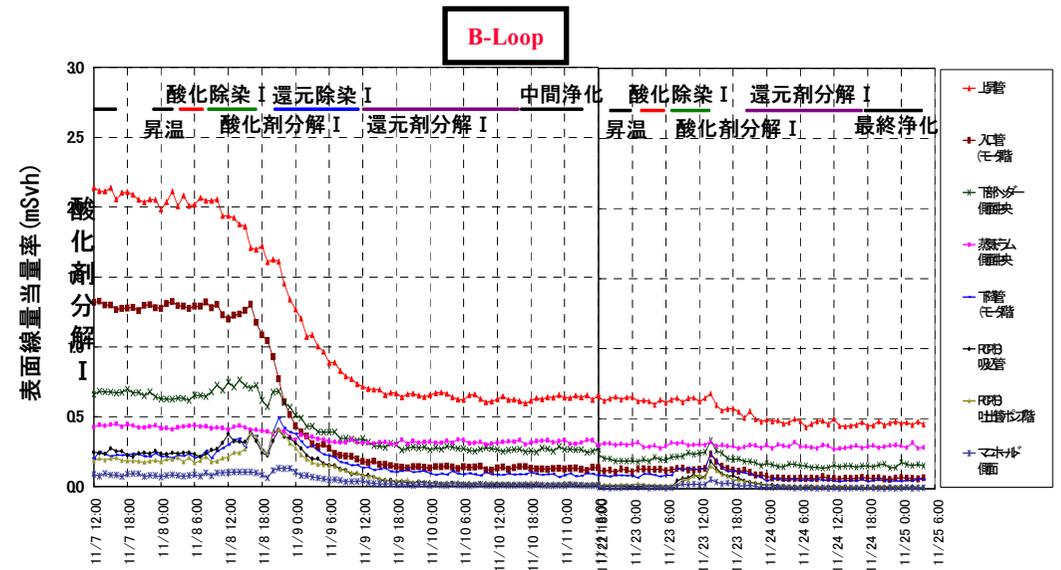
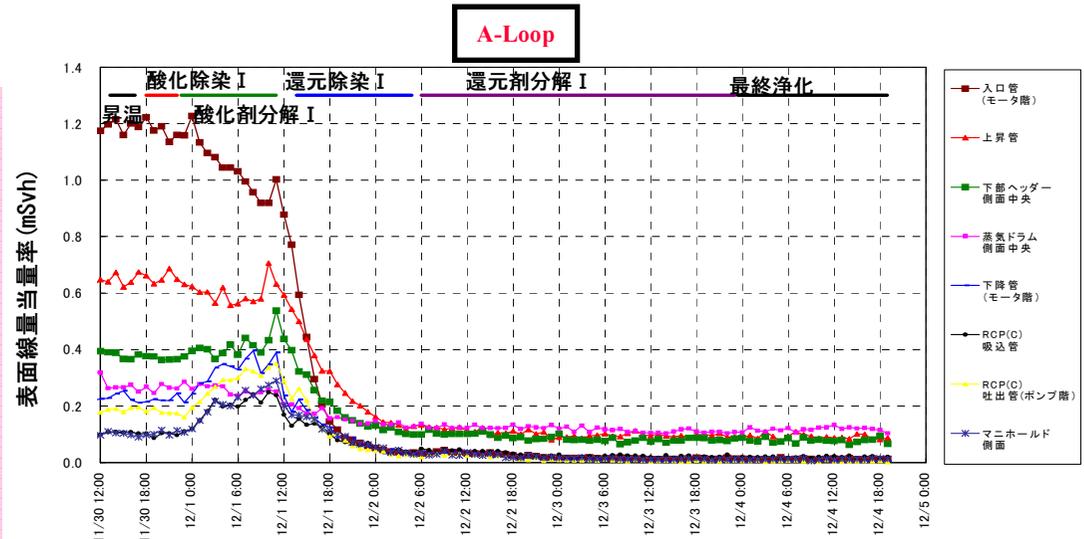
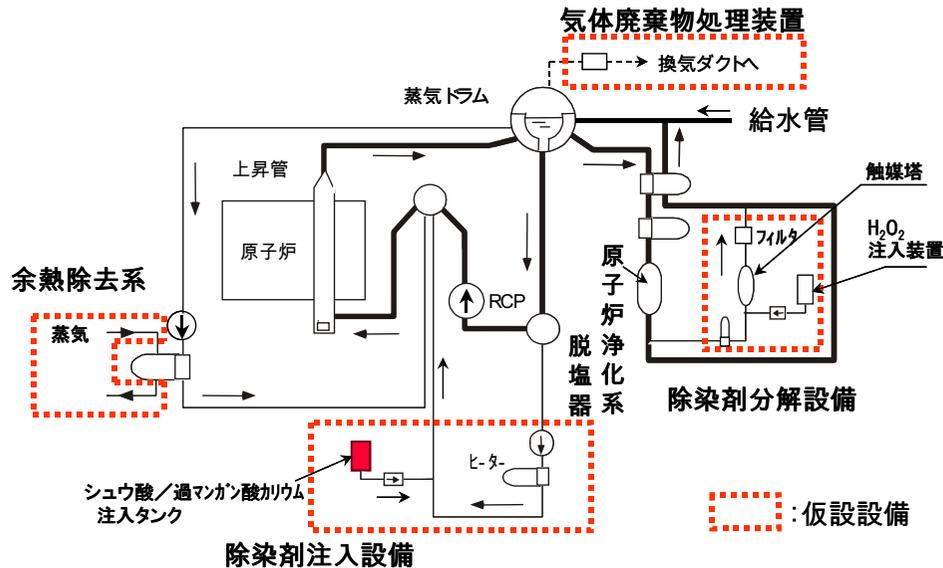
### 化学除染法:HOP法

Hydrazine Oxalic acid Potassium Permanganate

- ・酸化剤 : 過マンガン酸カリウム
- ・還元剤 : シュウ酸
- ・温度 : 90°C±5°C
- ・除染ステップ: 酸化⇒還元⇒酸化⇒還元

### 「ふげん」における運転期間中の系統化学除染実績

- ・第8回定検(H1)、第9回定検(H2): クリデコン方式
- ・第15回定検(H10)、第16回定検(H12): HOP法





# 除染前後の原子炉建屋内雰囲気線量率

測定箇所	各階の平均雰囲気線量率 (mSv/h)				目標雰囲気 線量率 (mSv/h)
	Aグループ		Bグループ		
	除染前	除染後	除染前	除染後	
蒸気ドラム階	0.16	0.05	0.28	0.06	< 0.05
下部ヘッダ階	0.49	0.08	0.95	0.13	
RCPモータ階	0.16	0.02	0.19	0.04	
RCPポンプ階	0.05	<0.01	0.09	0.02	
マニホール階	0.01	<0.01	0.01	0.01	
平均	0.17	0.03	0.30	0.05	



# 除染後の配管表面汚染密度 (Co-60)

測定箇所		測定機器	表面線量率 (mSv/h)	内表面汚染密度 (Bq/cm <sup>2</sup> )
原子炉冷却系 Aループ	吐出管	γ	0.005	8.00E+01
	マニホール <sup>①</sup>	γ	0.02	1.50E+03
	下降管	γ	0.003	1.10E+02
	入口管	電	0.03	1.95E+03
	上昇管	電	0.22	1.67E+04
原子炉冷却系 Bループ	吐出管	γ	0.03	5.20E+02
	マニホール <sup>①</sup>	γ	0.01	4.60E+02
	下降管	γ	0.07	8.60E+03
	入口管	電	0.10	6.50E+03
	上昇管	電	0.39	2.96E+04

γ : Ge半導体検出器により、表面線量率と表面汚染密度を測定

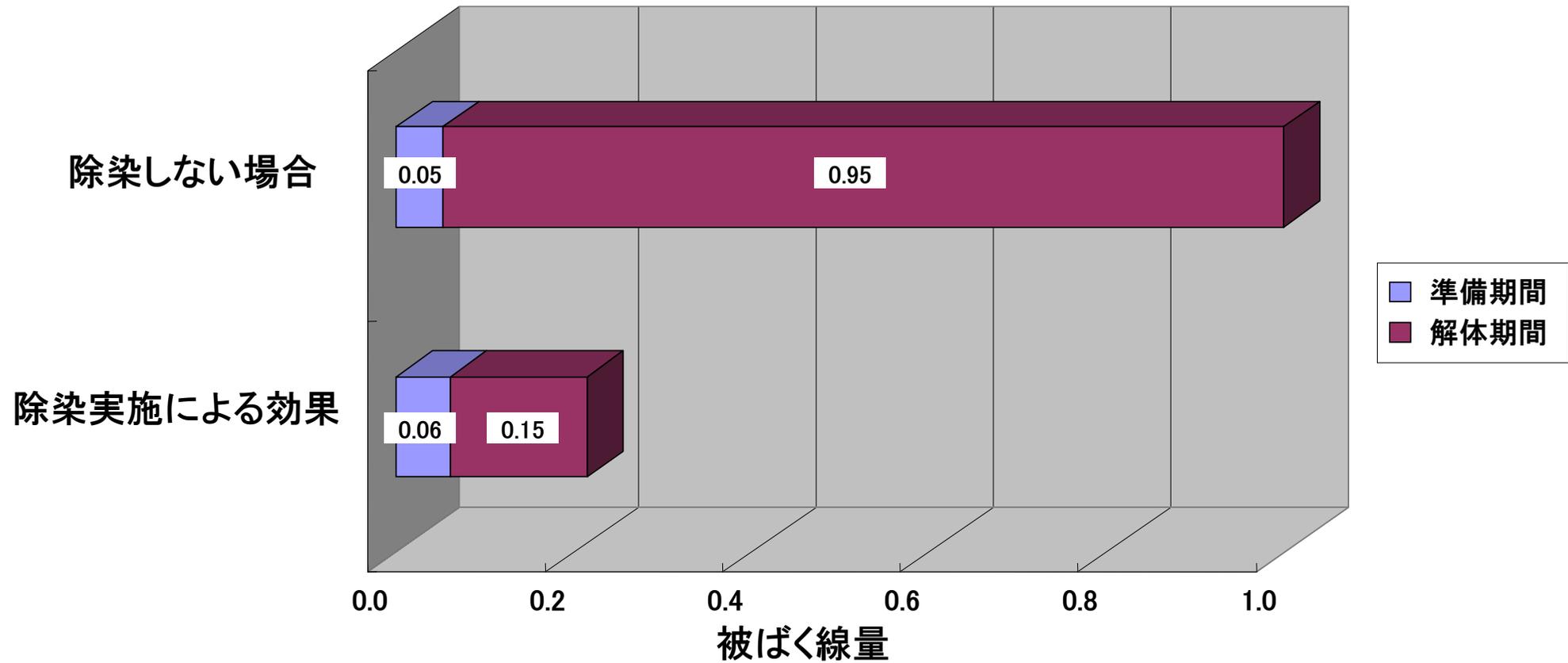
電 : 電離箱サーベイメータにより表面線量率を測定し、遮蔽計算コードを用いて求めた換算係数を使って表面汚染密度を評価

# 除染による影響の基本的考え方

分野	項目	除染による影響の基本的考え方	
		除染しない場合	除染実施による効果
被ばく評価	除染作業員 (系統化学除染)	なし	系統化学除染に携わった全作業員の被ばく線量
	準備期間中作業員 (重水回収・乾燥)	主な作業エリアにおける運転終了後の雰囲気線量率 × 想定作業人工数	除染しない場合と同じ (作業エリアが原子炉冷却系と異なるため)
	準備期間中 パトロール員	1年間の原子炉建屋内パトロール時被ばく線量評価値(平成14年度ベース) × 10年	除染しない場合の被ばく線量 / 除染係数
	原子炉冷却系 解体作業員	除染前の表面線量率平均値 × Co-60減衰率(10年) × 想定作業人工数	除染後の表面線量率平均値 × Co-60減衰率(10年) × 想定作業人工数
コスト評価	原子炉冷却系 解体人件費	想定作業人工数 × 作業単価 + 被ばくによる作業員シフトに掛かる追加コスト	想定作業人工数 × 作業単価 × 除染における合理化率(供用中除染における実績評価値)
	除染費 (系統化学除染)	なし	系統化学除染の作業員人件費、設備費、薬品代の合計値
	原子炉冷却系 解体廃棄物 処理・処分費	除染前の表面汚染密度から評価した10年後の放射能レベル別廃棄物量(蒸気ドラムを除く) × 処分単価	除染後の表面汚染密度から評価した10年後の放射能レベル別廃棄物量(蒸気ドラムを除く) × 処分単価
	除染廃棄物 処理・処分費	なし	除染廃棄物量 × 処分単価

# 除染による被ばく低減効果

被ばく線量は、主に除染作業、運転終了後の原子炉建屋内作業における被ばく線量を見積もった。



(除染しない場合の総被ばく線量に対する比率)

# 原子炉冷却系の放射能レベル

測定箇所	配管仕様 サイズ (インチ・材料)	内面積／ 重量 (cm <sup>2</sup> /t)	表面 線量率 (mSv/h)	表面汚染 密度 (Bq/cm <sup>2</sup> )	10年後の			
					汚染密度 (Bq/cm <sup>2</sup> )	汚染濃度 (Bq/t)	廃棄物 区分	
原子炉冷却系 Aグループ	吐出管	16B.SS	5.52E+04	0.005	8.00E+01	2.1E+01	1.2E+06	レベルⅢ
	マニホール*	28B.SS	3.29E+04	0.02	1.50E+03	4.0E+02	1.3E+07	レベルⅢ
	下降管	14B.SS	6.27E+04	0.003	1.10E+02	3.0E+01	1.9E+06	レベルⅢ
	入口管	2B.SS	2.05E+05	0.03	1.95E+03	5.2E+02	1.1E+08	レベルⅢ
	上昇管	3B.SS	1.51E+05	0.22	1.67E+04	4.5E+03	6.8E+08	レベルⅢ
原子炉冷却系 Bグループ	吐出管	16B.SS	5.52E+04	0.03	5.20E+02	1.4E+02	7.7E+06	レベルⅢ
	マニホール*	28B.SS	3.29E+04	0.01	4.60E+02	1.2E+02	4.1E+06	レベルⅢ
	下降管	14B.SS	6.23E+04	0.07	8.60E+03	2.3E+03	1.4E+08	レベルⅢ
	入口管	2B.SS	2.05E+05	0.1	6.50E+03	1.7E+03	3.6E+08	レベルⅢ
	上昇管	3B.SS	1.51E+05	0.39	2.96E+04	8.0E+03	1.2E+09	レベルⅡ

※10年後の汚染密度及び汚染濃度の算出方法

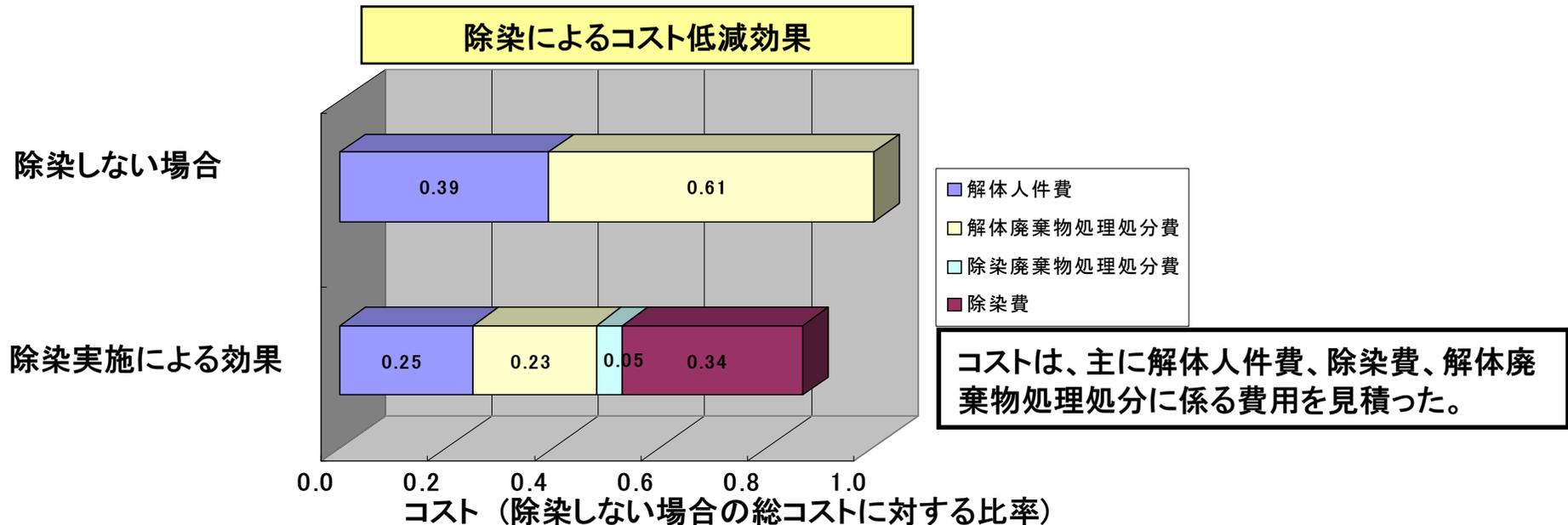
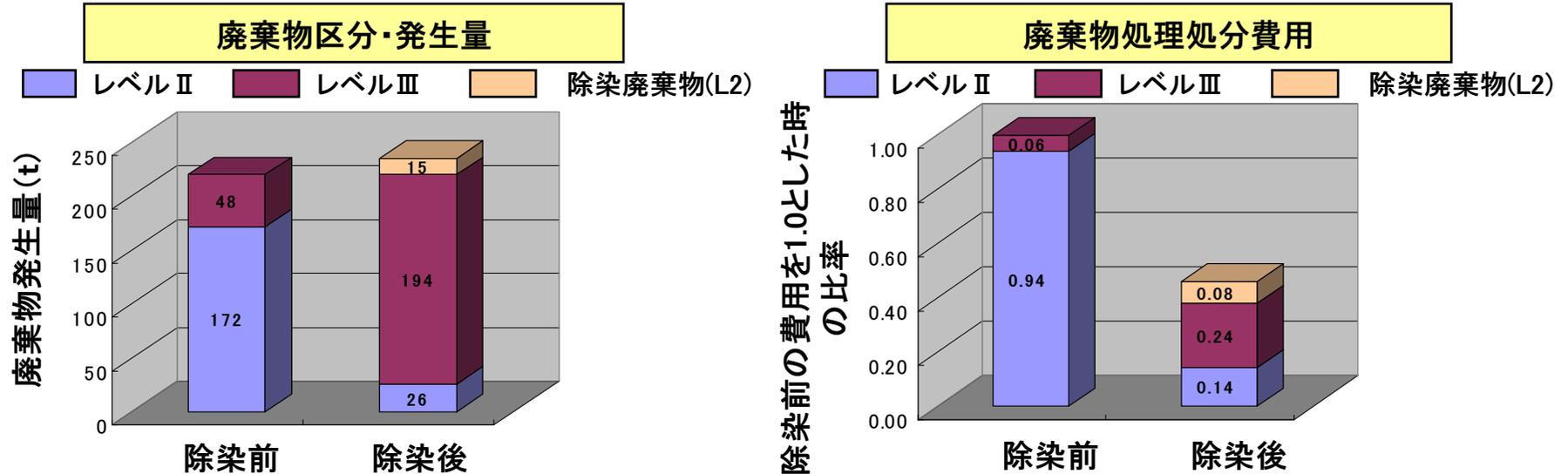
- ・10年後の汚染密度: 表面汚染密度 × (1/2) <sup>(10年/5.27年)</sup>
- ・10年後の汚染濃度: 10年度の汚染密度 × (内表面／重量)

レベルⅠ 廃棄物: 低レベル廃棄物のうち、放射能レベルが比較的高いもの(余裕深度処分)

レベルⅡ 廃棄物: 低レベル廃棄物のうち、放射能レベルが比較的低いもの(コンクリート処分)

レベルⅢ 廃棄物: 低レベル廃棄物のうち、放射能レベルが極めて低いもの(トレンチ処分)

# 除染によるコスト低減効果



# まとめ

【系統除染から10年後に原子炉再循環系の解体作業を想定した評価結果】

- 運転終了後に原子炉冷却系の化学除染を実施したことにより、作業者の被ばく線量を除染しない場合の20%程度まで低減することが期待できる。
- 除染により、原子炉冷却系の解体で発生する廃棄物の放射能レベルを低減できたことにより、処分費用を相対評価として6割程度の低減。また、除染費用等を含めたコストでは除染をしない場合に比べて2割程度の低減と考えられる。
- 廃止措置の除染については、除染費の増大を抑制しながら、除染効果向上を図ることが重要である。

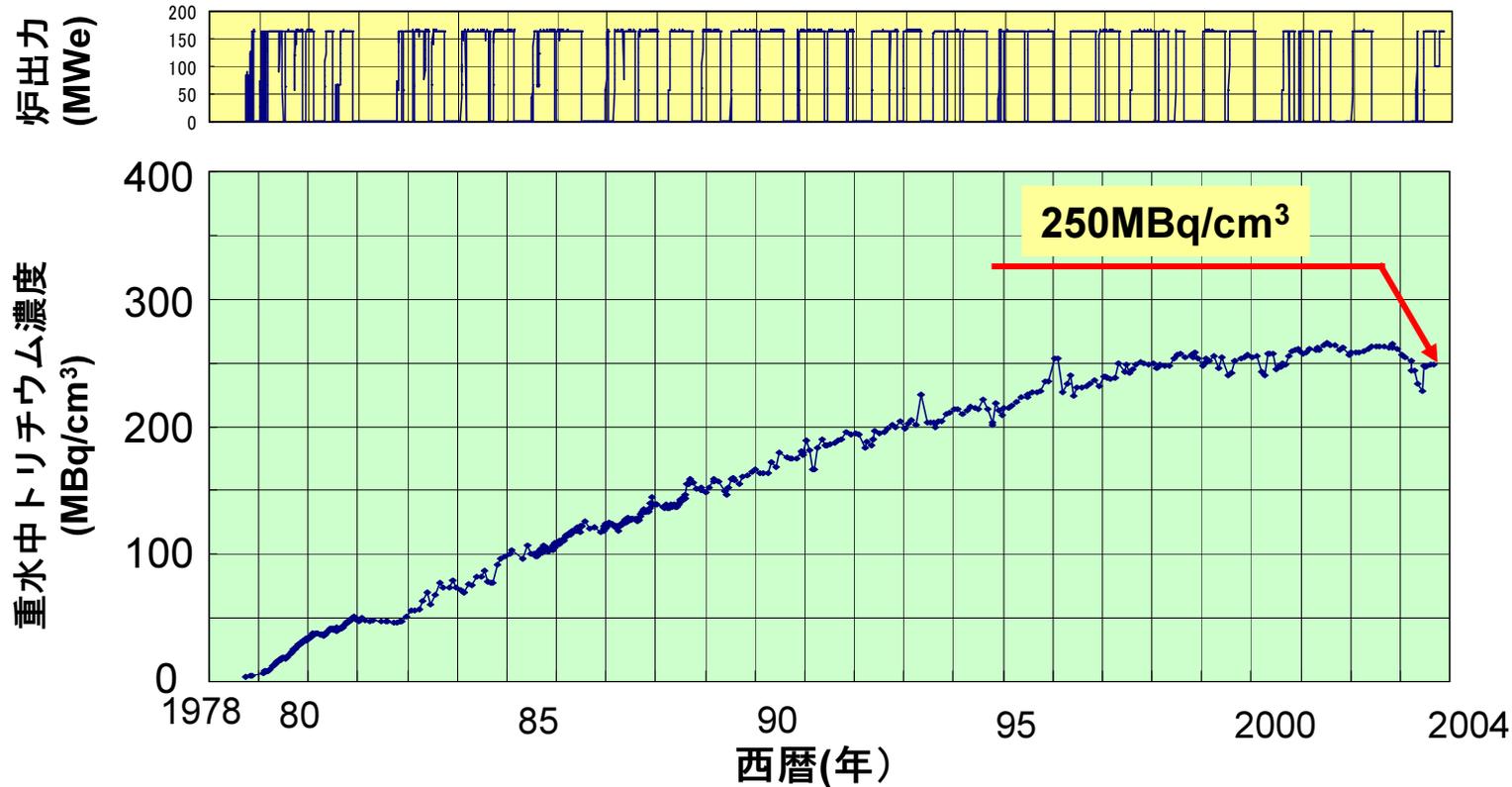
# 重水・ヘリウム系のトリチウム除去手法

## 【発表内容】

1. トリチウム生成と除去目的
2. 重水ヘリウム系のトリチウム汚染と除去技術
3. 重水ヘリウム系のトリチウム除去作業状況



# 重水中のトリチウム濃度推移



## ● トリチウムの生成

- ◆ 重水分子の重水素の放射化  
 ${}^2\text{H}(n, \gamma){}^3\text{H}$

## ● トリチウムの性質

- ◆ 低エネルギーの $\beta$ -線放出核種(最大エネルギー-18.6keV)
- ◆ 物理学的半減期 : 約12年
- ◆ 重水炉では水・水蒸気(HTO, DTO, T<sub>2</sub>O)の形態で存在
- ◆ トリチウムは水蒸気となって空気中に拡散し易い(作業環境汚染、環境放出)
- ◆ 呼吸や皮膚吸収による内部被ばくに注意を要す。(被ばく防護管理)

# トリチウム取扱作業の状況



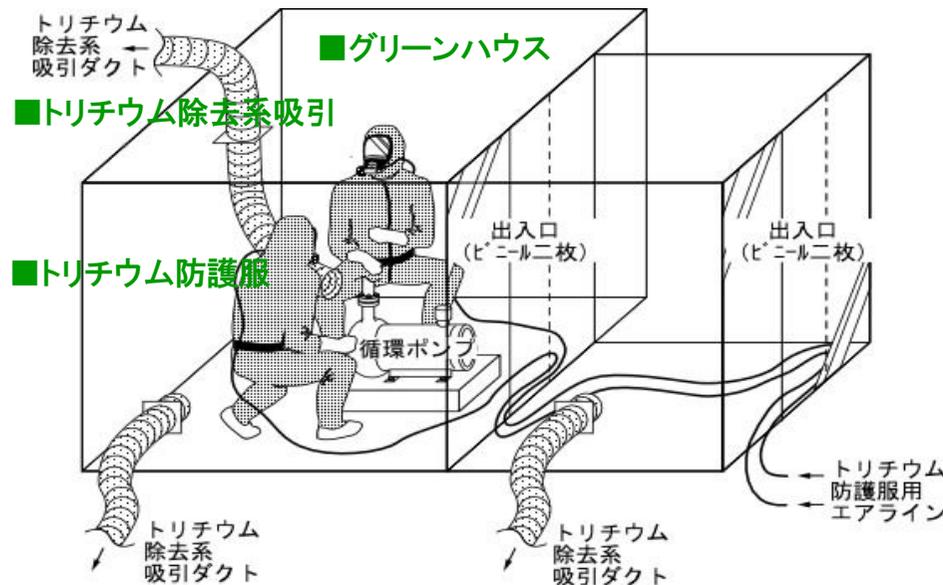
重水循環ポンプの分解点検作業

装備	着用基準*1 (空气中H-3濃度) Bq/cm <sup>3</sup> -air	重水換算量*2 (cm <sup>3</sup> )
エアライン マスク	0.08~0.8	0.01~0.1
トリチウム 防護服	0.8~	0.1~

\*1:トリチウム防護服の着用基準である0.8Bq/cm<sup>3</sup>-airは、空气中濃度限度の値  
 \*2:作業エリア30m<sup>3</sup>(4m×3m×2.5m)、重水中トリチウム濃度250MBq/cm<sup>3</sup>として算出



グリーンハウス



作業時のトリチウム対策



トリチウム防護服

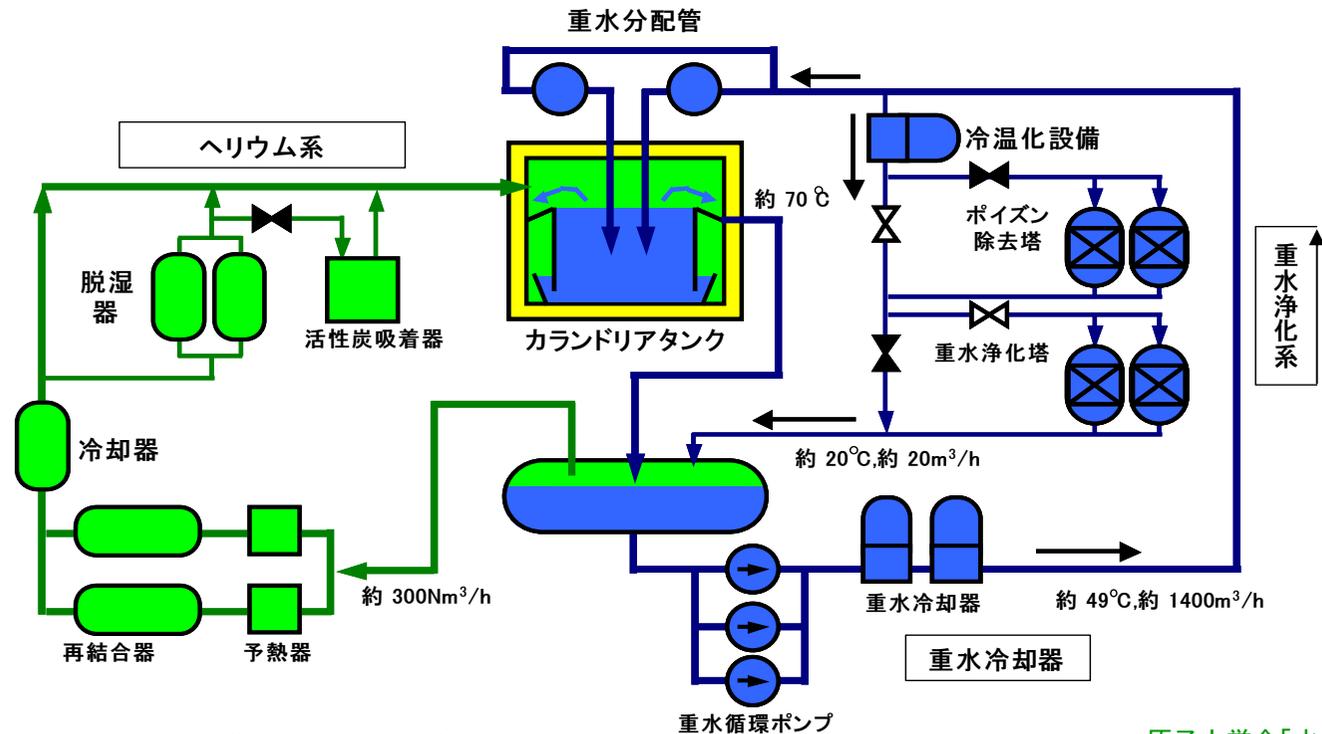
# 重水・ヘリウム系トリチウム除去の目的・目標

## ■ 解体工事の合理化

重水系機器・配管の解体作業において作業環境中トリチウム濃度の上昇を抑える。  
 (トリチウム防護対策が不要なトリチウム濃度  $8 \times 10^{-2} \text{Bq/cm}^3\text{-air}$  以下を目標)

## ■ 廃棄物処理処分の合理化

重水系からの廃棄物発生を抑える。(クリアランスレベル  $100 \text{Bq/g}$  以下を目標)





# トリチウム汚染とトリチウム除去基礎試験結果

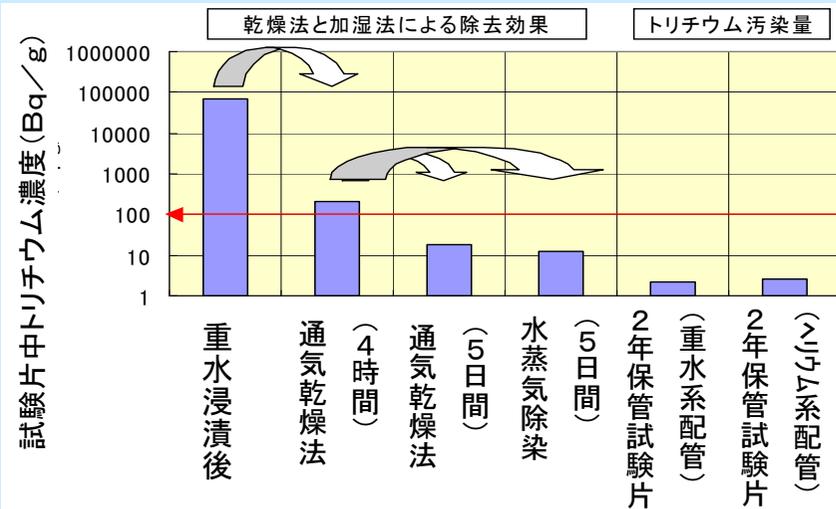
- ・ 乾燥法によりトリチウム濃度を3桁以上低減できる可能性あり
- ・ 完全なトリチウム除去には時間がかかるが初期除染の効果が大きい
- ・ 乾燥法でも十分な除去効果が得られる



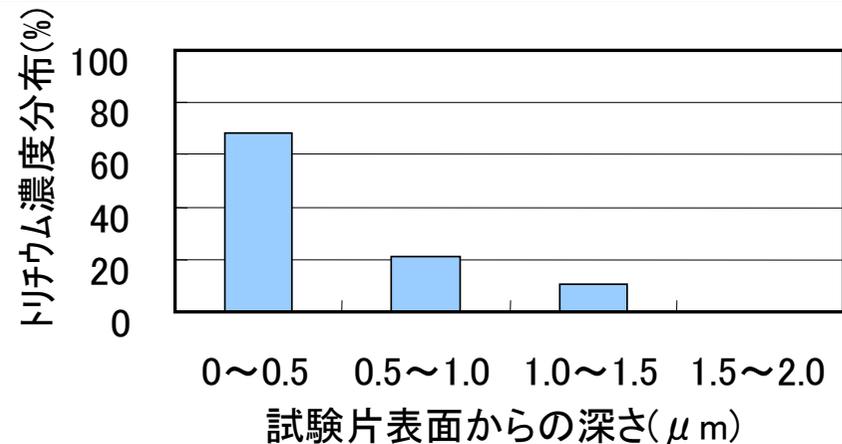
試験片（重水浄化系保管廃材）を表面から0.5 $\mu$ mずつ溶解し、深さ方向のトリチウム濃度分布を調査



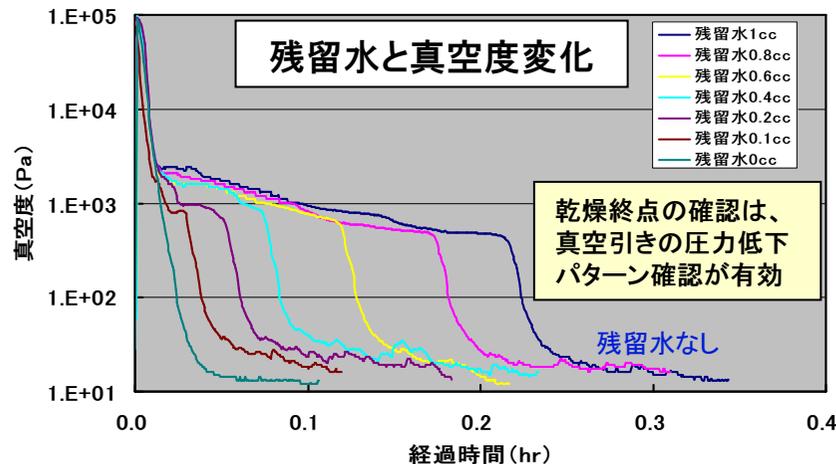
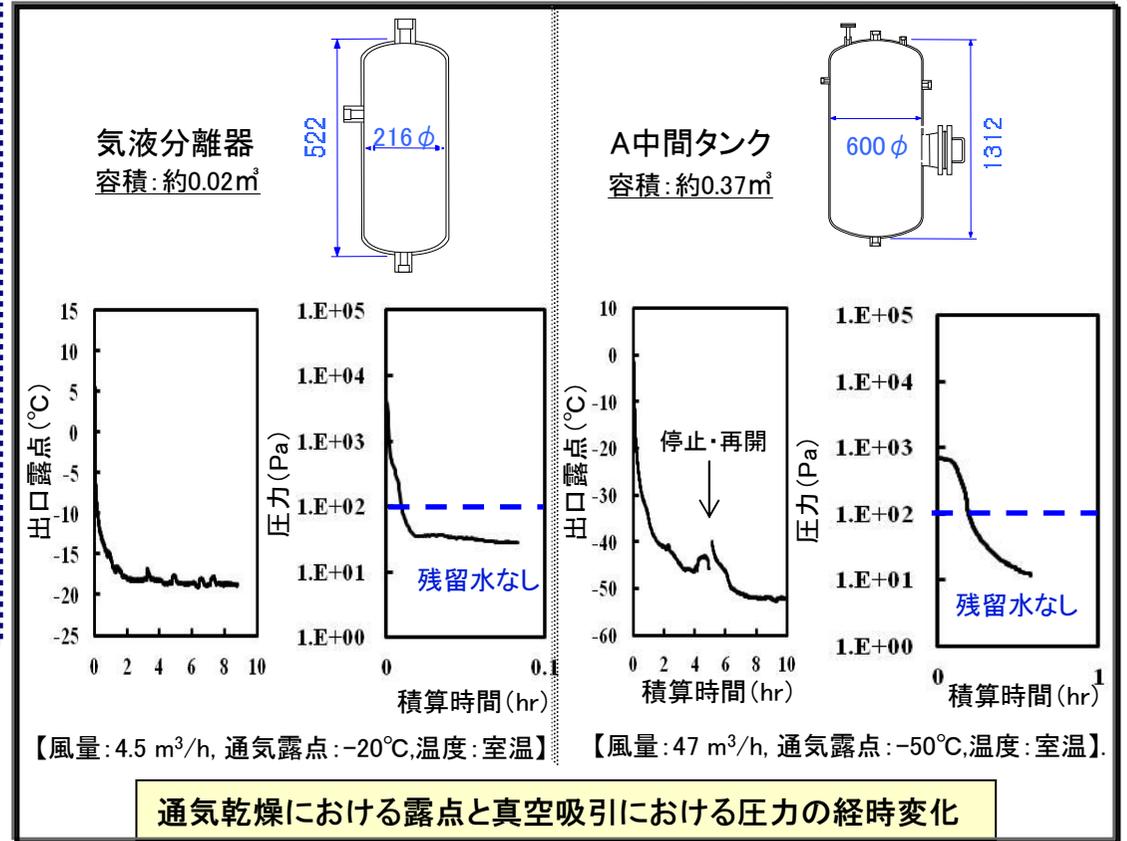
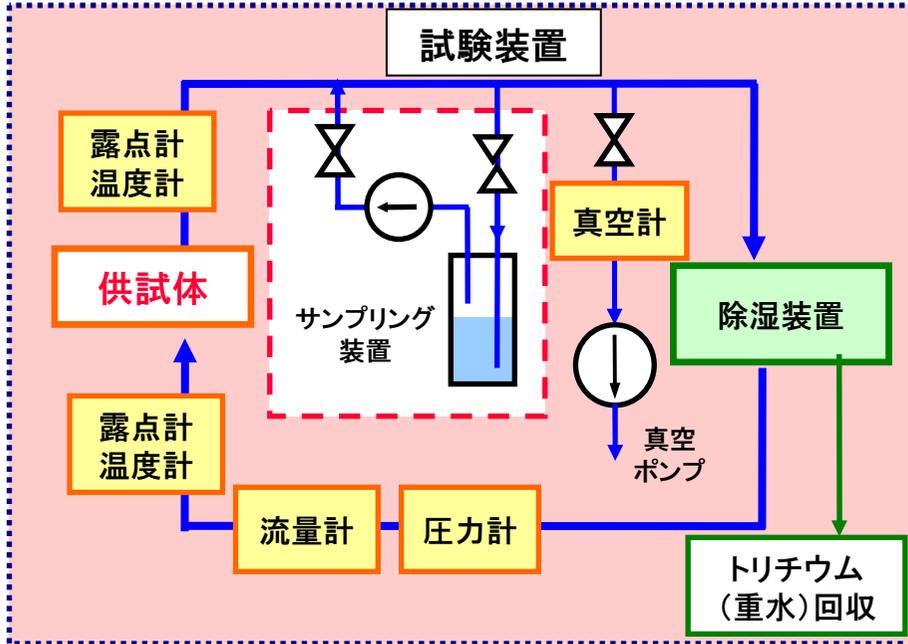
母材中のトリチウム濃度が低いため、付着水と酸化皮膜中のトリチウムを乾燥法で除去することが可能



クリアランス



# 重水精製装置機器を用いた重水乾燥試験



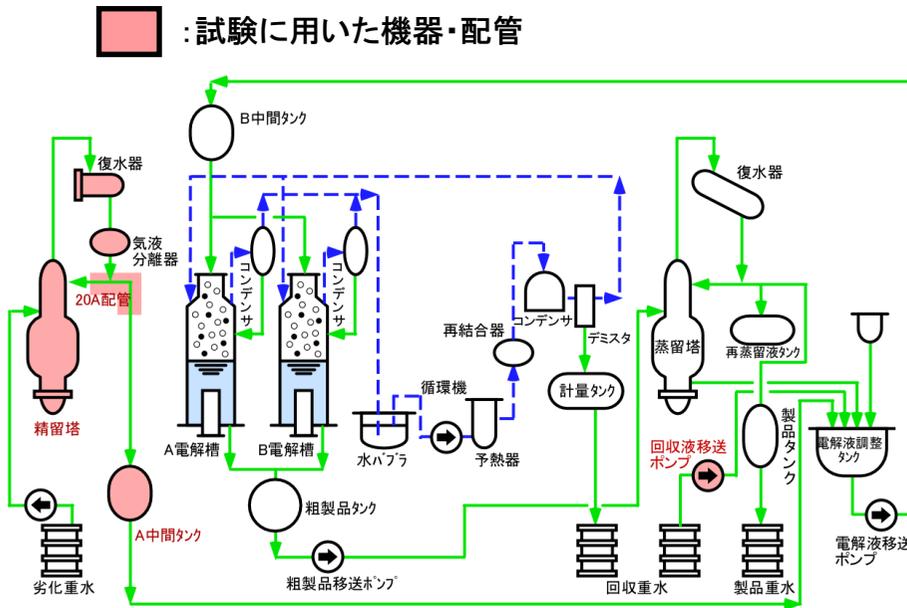
**残留重水除去確認方法の有効性を確認**

- ・通気空気の露点監視
- ・真空引きによる減圧挙動監視



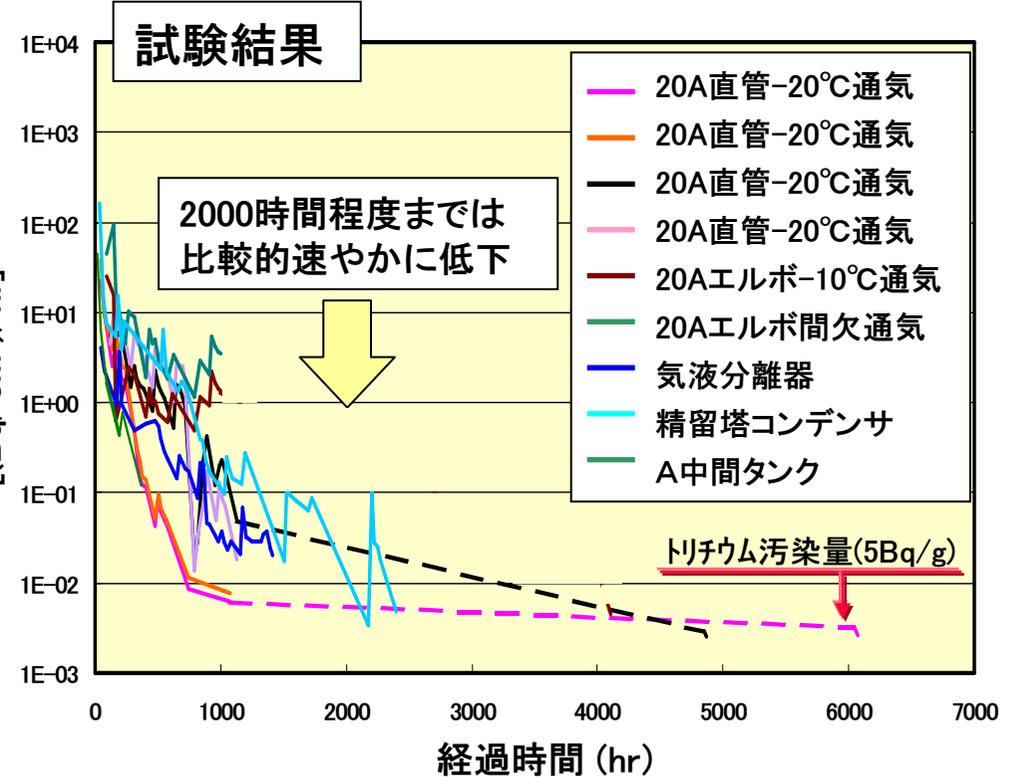
# 重水乾燥後の酸化皮膜からのトリチウム放出挙動

## 【重水精製装置機器を用いたトリチウム除去試験】



重水精製装置 I 系統図

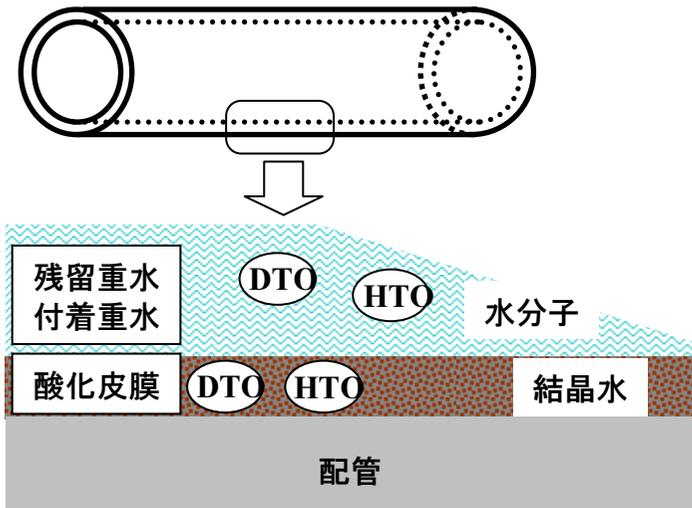
単位面積当たりのトリチウム放出率  
[(Bq/cm<sup>2</sup>)/hr]



- 単位面積あたりのトリチウム放出率は試験体の内容積や形状に係わらず一定。
- 残留重水の乾燥が完了した後の試験体単位面積当たりのトリチウム放出率は、2000時間までの間に徐々に低下し、それ以降は低下が緩やかになる。
- 残留重水乾燥後のトリチウム放出については、乾燥空気の通気量や露点によって、その速度を加速させることは困難、間欠通気により対象物内の空気を定期的に置換することで十分である。

# 「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： $2.5 \times 10^8$  Bq/cm<sup>3</sup>(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
- 酸化皮膜中重水

## ○酸化皮膜中トリチウム

- ・付着重水除去後に空气中に拡散

## ○トリチウム放出率(常温環境下)

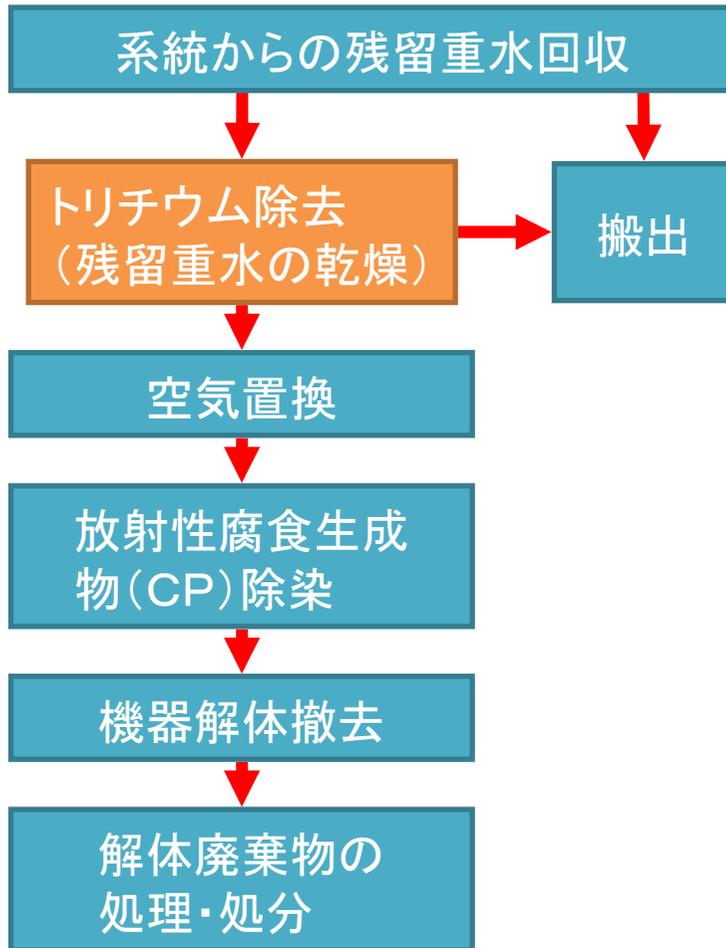
- ・付着重水除去直後： $\sim 10^2$  Bq/cm<sup>2</sup>/hr
- ・2000時間～3000時間経過後： $\sim 10^{-2}$  Bq/cm<sup>2</sup>/hr

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

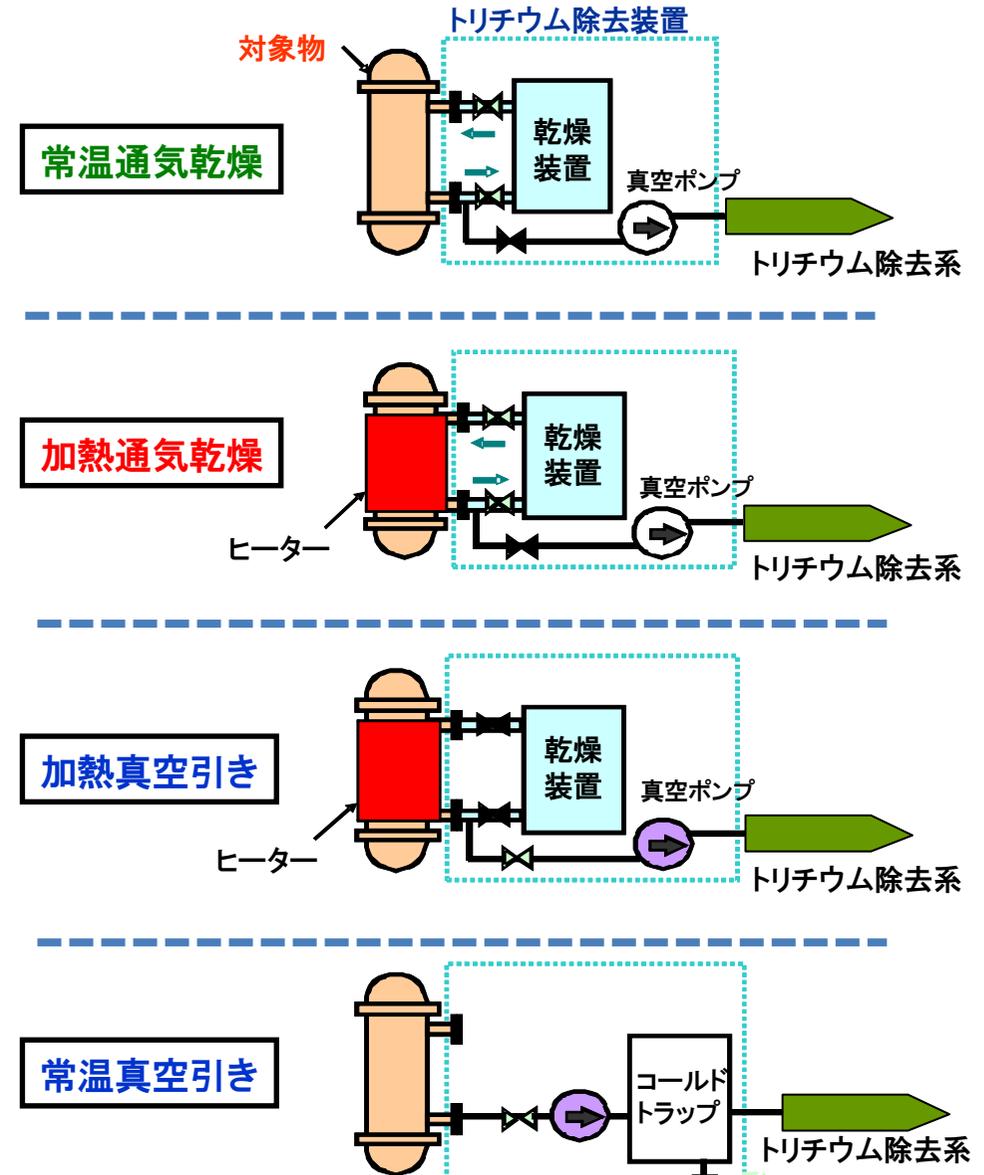
- ①残留重水のドレンアウト(重水回収)
- ②ドレンアウト後の通気乾燥や真空乾燥による残留重水・付着重水除去  
(重水の乾燥回収・トリチウム除去)
- ③付着重水除去後の酸化皮膜中トリチウムの除去(空気置換)

# 残留重水回収、トリチウム除去の作業手順

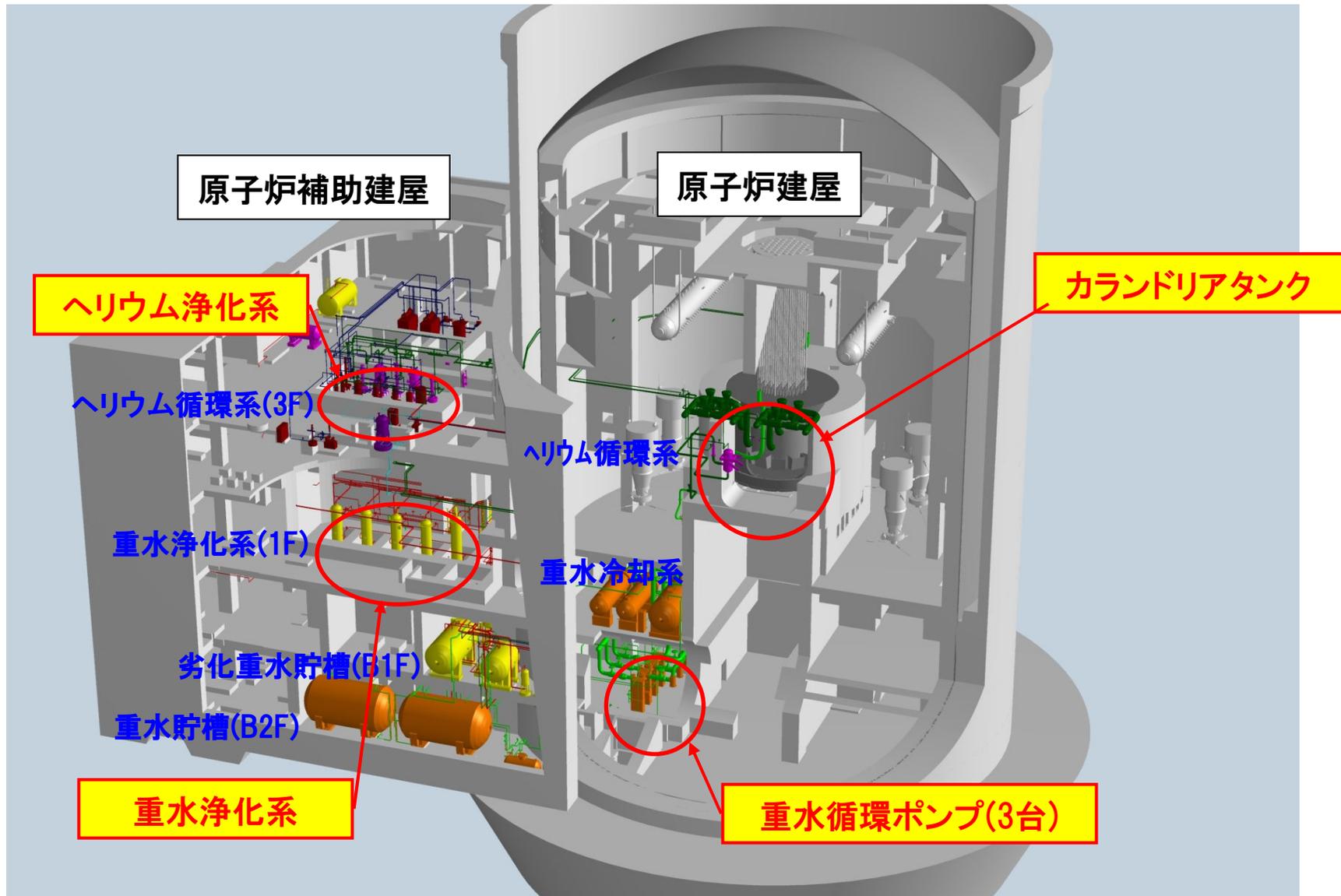
## 【重水ヘリウム系設備解体の手順】



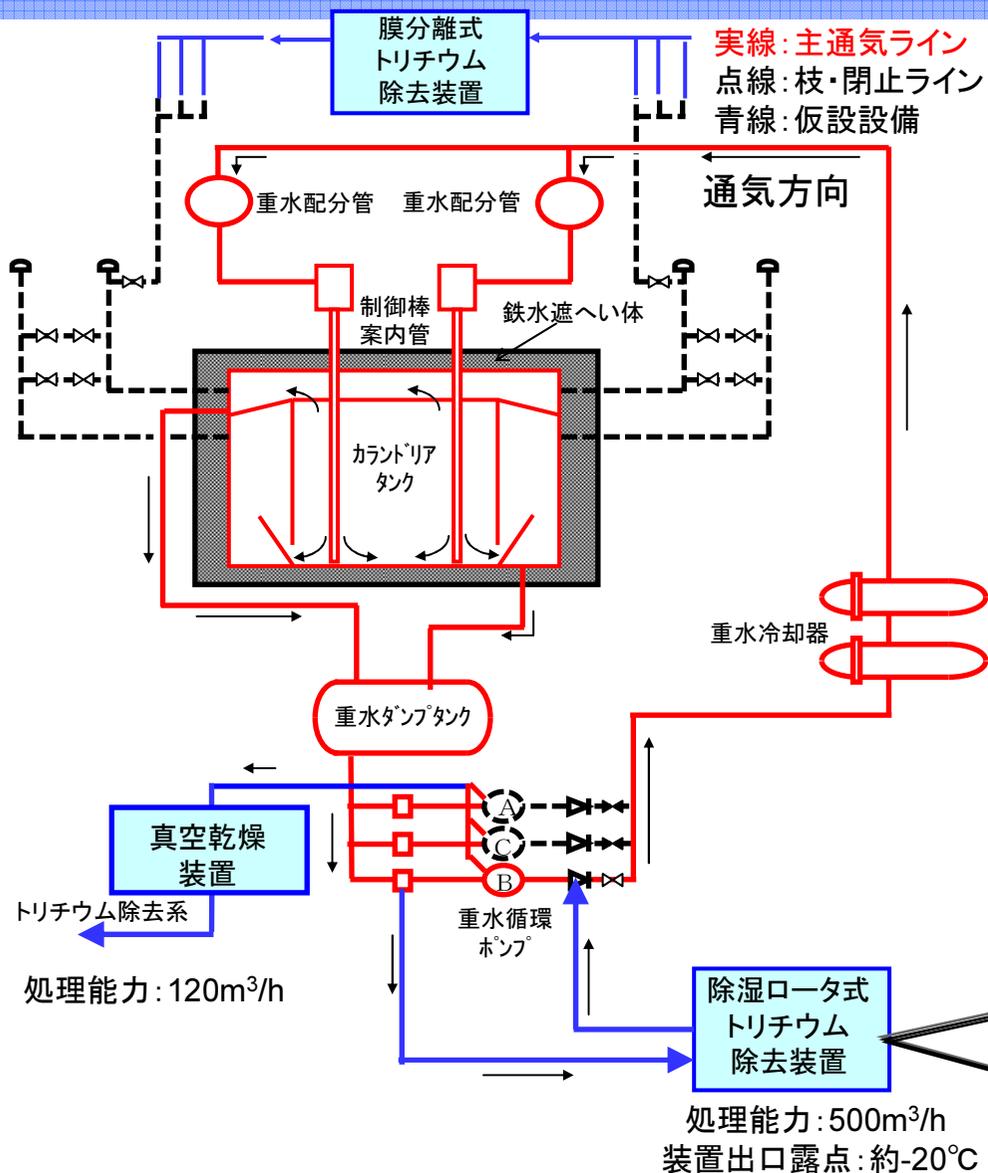
## トリチウム除去方法



# トリチウム除去工事の対象設備・機器



# 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状況



## ■ 除湿ロータ式トリチウム除去装置によるトリチウム除去(常温通気乾燥)

平成23年度	回収量: 約100 L
平成24年度	回収量: 約5 L
平成25年度	回収量: 約5 L



## ■ 真空乾燥装置によるトリチウム除去(常温真空乾燥)実施中



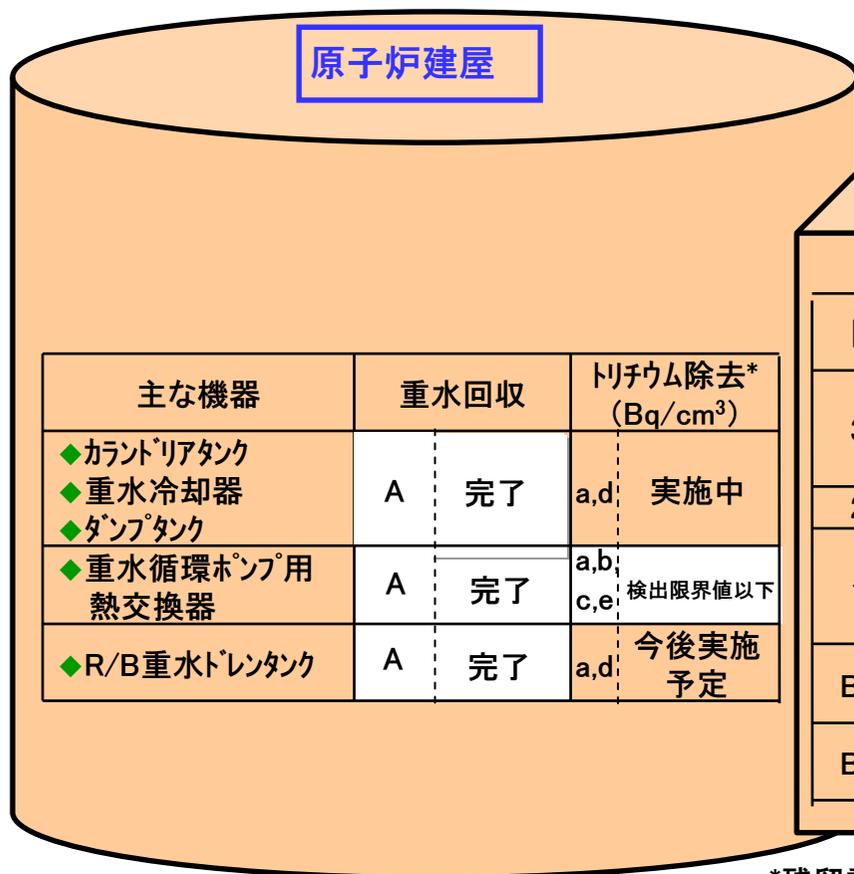
【除湿ロータ式トリチウム除去装置】



# 重水回収・トリチウム除去作業状況

## ・開放を伴う重水回収と通気・真空乾燥（平成27年3月末における実績）

重水回収・トリチウム除去方法  
 A: 開放を伴う重水回収  
 a: 常温通気乾燥  
 b: 加熱通気乾燥  
 c: 加熱真空乾燥  
 d: 常温真空乾燥  
 e: 常温で空気置換



: 作業完了

\*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



ご清聴有難うございました。