

# 原子力発電プラントの 廃止措置と水化学

石樽顕吉

- 1 廃止措置とは
- 2 内外の動向
- 3 わが国の取組
  - ・ 法整備
  - ・ 資金確保
  - ・ 技術開発
  - ・ 廃棄物管理
4. 水化学との関わり

# 廃止措置とは

## ○廃止措置 (Decommissioning)

役割が終了した原子力施設を**規制上の管理から解除する**ために取られる**行政上**及び**技術的措置**。

### ■発電炉の場合

- ・当該領域から①使用済燃料、放射性廃棄物(運転中の廃棄物も含む)の撤去
- ②放射能汚染の除去
- ・廃止措置開始以前からの準備が必要な長期に亘る活動
- ・経済的因子も重要(多額の費用確保)

## ○用語について

### ・廃止措置と廃炉

通常炉の**廃止措置**と**1F**事故後の修復作業とは異なる活動

# 発電炉廃止措置の選択肢

## ○ 米国(NRC)

- 1) SAFSTOR(安全貯蔵)
- 2) DECON(即時解体)
- 3) ENTOM(永久埋設)

・SAFSTORの後、解体を行うケース多い。

## ○ IAEA

即時解体からサイト内埋設までの中間的方式を含む幅広い方式。例えば **遅延解体(一定期間の安全貯蔵後に解体)**

## ○ 日本

**標準工程(商業炉)** 昭和60年策定、現実との乖離も。

・細かな定義は余り意味が無い。プラントの事情により柔軟に適用。

# 海外における発電炉廃止措置の動向 1

## ○ 世界

- 廃止措置中                      ~150基 (終了、準備中も含む)
- 廃止措置終了                      **11**基      (**3**万**kW** 以上)

## (1) 米国

- 恒久停止
  - 1964 – 1987年      10基
  - 1989 – 1998      12基
  - 2013 – 2014      5基

- 閉鎖発表
  - 2015 – 2016年      10基

- 廃止措置終了 **10**基、

- 新しいビジネスモデル: 廃止措置専門会社がライセンス、資金を引き継いで廃止措置

# 海外における発電炉廃止措置の動向－2

## (2) ドイツ

### ● 恒久停止

1977—1988年	5基
1989—1990	6基(VVER)
1994—2005	3基
2011年	8基 (脱原子力法)

### ● 閉鎖予定

—2022年 8基 (原子力発電から撤退)

### ● 廃止措置終了

1基

## (3) その他

- ・ イギリス 廃止措置中 26基
- ・ フランス 廃止措置中 10基

大部分はガス炉、安全貯蔵中

# わが国における発電炉廃止措置の状況

- 廃止措置中 10基  
東海発電所、ふげん、浜岡1, 2号、敦賀1号、美浜1, 2号、玄海1号、島根1号  
伊方1号

- 廃止措置準備中 2基  
大飯 1, 2号  
・JPDR (1.3万kW) および1F 1-6号は除く

- 廃止措置の工程

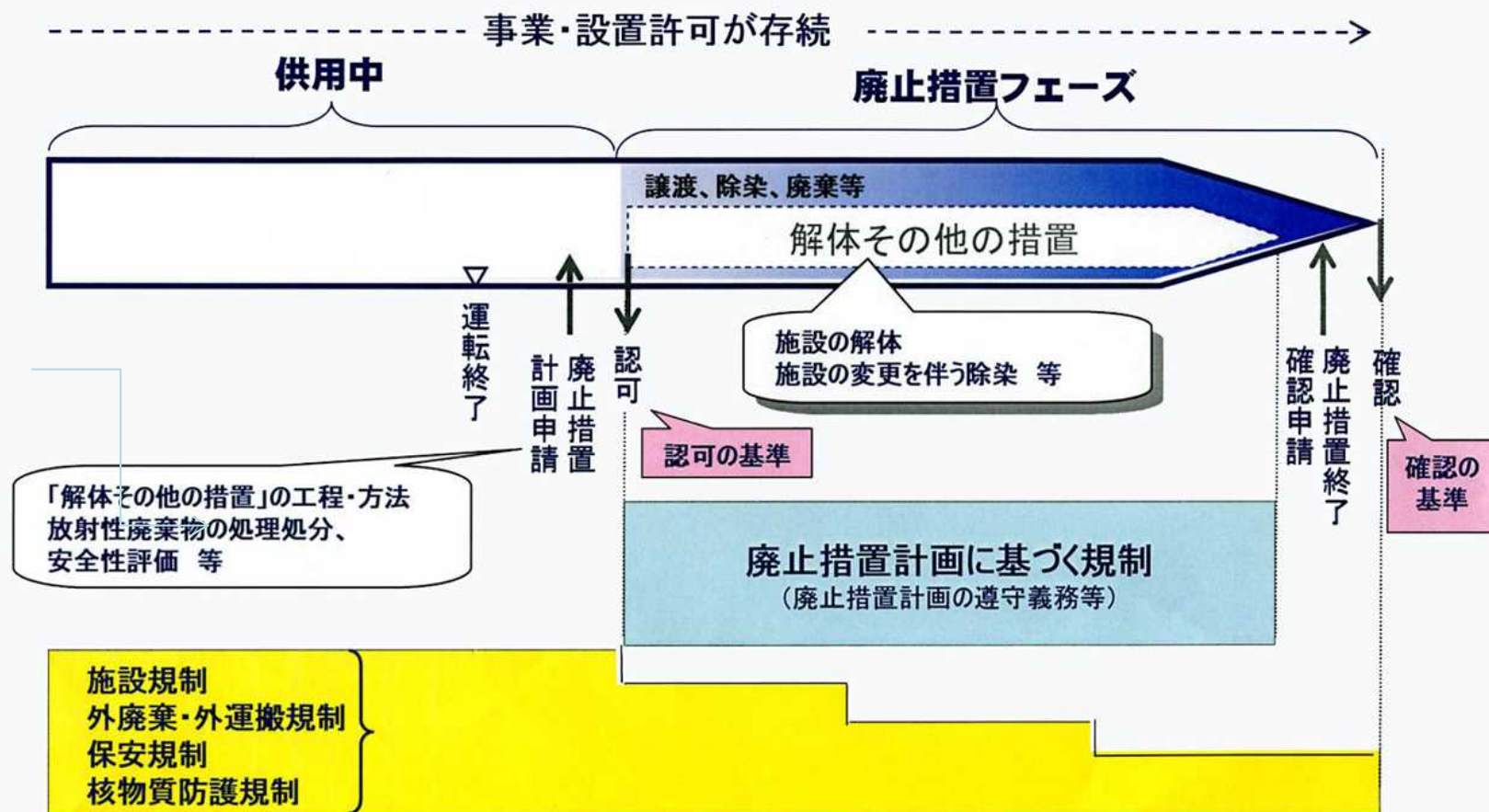
## ふげん(ATR 16.5万kW) の場合

恒久停止 2003年

廃止措置計画 2008年認可、2011年、2018年変更

- |                      |             |
|----------------------|-------------|
| ① 重水系・ヘリウム系等の汚染の除去期間 | 2008—2018年  |
| ② 原子炉周辺設備解体撤去期間      | 2018 - 2023 |
| ③ 原子炉本体解体撤去期間        | 2023 - 2032 |
| ④ 建屋解体期間 (管理区域解除後)   | 2032 - 2034 |
- SF搬出終了目途: 2027年

# 炉規制法( H17年改正)による廃止措置の規制



## 【ポイント】

1. 原子炉の場合は、一部廃止の場合も「廃止措置規制」を適用。
2. 廃止措置フェーズの施設規制や保安規制については、廃止措置の進捗に応じた合理的な規制レベルとするため、政省令において具体的に規定。

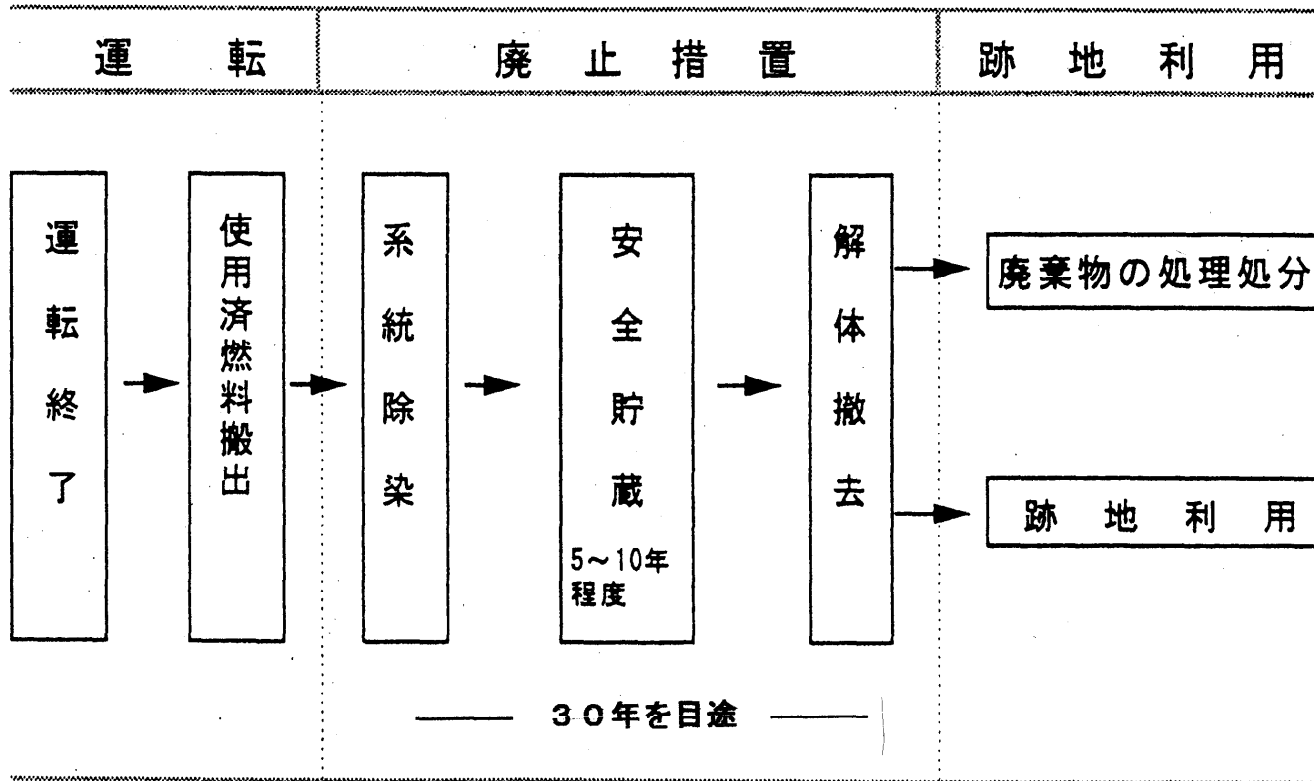
「原子力施設の廃止措置規制のありかたについて」 原子力安全・保安部会 廃止措置安全小委員会

廃止措置計画の認可:廃止措置開始

使用済燃料(SF)の搬出は廃止措置開始の前提要件ではないが、搬出先の確保は必須

運転開始時に廃止措置実施方針の公表(H29改正)

商業用原子力発電施設の廃止措置の標準工程



総合エネルギー調査会原子力部会報告書(平成9年)の図に一部手を加えたもの

特徴

- ・SF搬出後 廃止措置段階
- ・安全貯蔵 5-10年
- ・跡地利用を重視
- ・終了期限 30年程度

- ・廃止措置費用見積りの基礎
- ・日本の状況に適した工程
- ・プラントの状況に応じ、柔軟に適用すべきもの



## 廃止措置の費用

---

小型炉 (50万kW級)	360	～	490	億円程度
中型炉 (80万kW級)	440	～	620	億円程度
大型炉 (110万kW級)	570	～	850	億円程度

---

(縄田康光、立法と調査、2015、No 369 をもとに作成)

### ○標準工程に基づく見積り

- ・炉型による違いは余り大きくない
- ・除染、解体、廃棄物の放射能測定、解体廃棄物の処理、処分及び運搬費用 含む。**SF・運転中廃棄物に係る費用含まれず**

### ○引当金(内部積み立て) 免税措置

会計規則の改正、引当方法の見直し(H27)<sup>8</sup>

# 廃止措置に必要な技術

## ■ 要素技術

1. インベントリ評価
2. 除染(解体前、解体後)
3. 解体
4. 遠隔操作
5. 廃棄物管理
6. 放射線安全(計測)

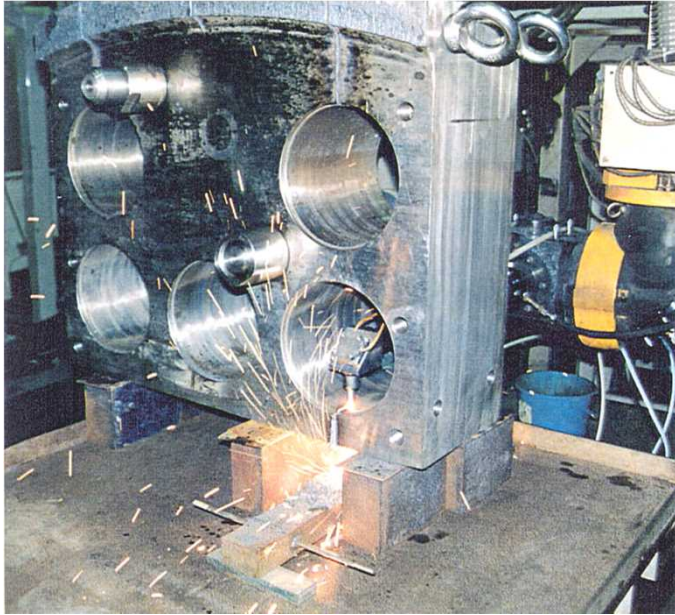
○要素技術の選択と組み合わせによる最適化などのプロジェクト・マネジメント  
重要

## ■ 我が国における技術開発

JPDR 廃止措置	1986—1997年
NUPEC 確証試験	1982—2004
ふげん廃止措置	2008—

実プラントの経験多くないが、既存技術で対応可能

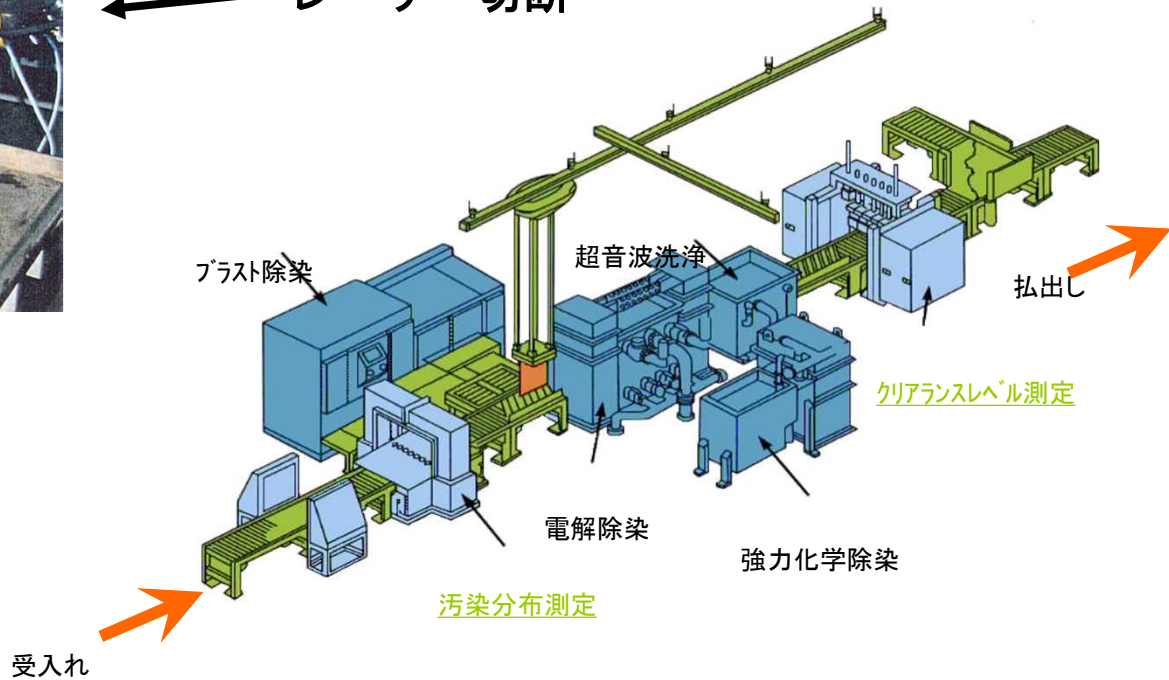
# NUPECにおける試験例



← レーザー切断



鋼板及び黒鉛の把持



除染と放射能測定との組合せにより、放射性金属を遠隔で処理するシステムを確立。

## 廃棄物処理システム

確証試験の成果： 廃止措置技術ハンドブック(H19)  
(技術カタログ)

# 廃止措置に伴う廃棄物の発生量(推定)

単位 万トン

放射能レベル区分	BWR (110万kW級)	PWR (110万kW級)	GCR (17万kW級)
低レベル放射性廃棄物 (L1, L2, L3)	1.3	0.6	2.2
放射性物質として扱う 必要のない廃棄物 〔金属 / コンクリート〕	2.8 〔2.1 / 0.7〕	1.2 〔0.3 / 0.8〕	4.2 〔0.6 / 3.6〕
放射性物質でない 廃棄物	49.5	47.7	12.9

「原子力施設におけるクリアランス制度の整備について」(原子力安全・保安部会 廃棄物安全小委員会) をもとに作成

# 廃止措置に関連する廃棄物

1. 比較的短期間に集中して**大量の解体廃棄物**が発生
2. 大部分は放射性として扱う必要がない(**クリアランス対象**)**廃棄物**と放射性でない廃棄物、大部分が**コンクリートと金属**
3. 解体の**初期の段階**で比較的**多量の金属廃棄物**、**最終段階**で**大量のコンクリート廃棄物**が発生
4. レベル区分(L1, L2, L3)に応じた**処分の道筋と見通し**が必要
5. **クリアランス対象物**の**再利用、再使用**極めて重要
6. **多くの場合**運転中の**放射性廃棄物の撤去、搬送先の確保**が必要

# 廃止措置により発生する放射性廃棄物

## ● 発生量

110 万kW 級 1基 単位 m<sup>3</sup> (廃棄体に換算)

クラス	BWR	PWR
L1	100	260
L2	1,640*	2,390*
L3	7,050*	3,030*

\* 解体後除染を実施 総合エネルギー調査会原子力部会中間報告(H11年)より

## ● 処分方策

### 第2種廃棄物埋設

L1: 余裕深度処分(中深度処分)  
(地下利用に対し十分な深度に人工バリア)

六ヶ所村で調査と試験終了(H18年)  
技術基準に関する検討実施中

L2: ピット処分  
(浅地中に人工バリア設置)

運転中廃棄物の処分 六ヶ所村で実施中

L3: トレンチ処分  
(浅地中に人工バリア設置無し)

試験的処分実施(JAEA)  
サイト周辺での処分検討

クリアランス物

再利用、再使用、産業廃棄物

## 第2種廃棄物埋設の濃度上限値と区分値

濃度上限値：埋設事業の許可申請にあたって廃棄物の濃度範囲を処分の方法別に示す。許可申請では処分環境での核種挙動を考慮した安全評価必要

### ・トレンチ処分

核種	濃度上限値 (Bq/ton)
Co-60	1E10
Sr-90	1E7
Cs-137	1E8

### ・ピット処分

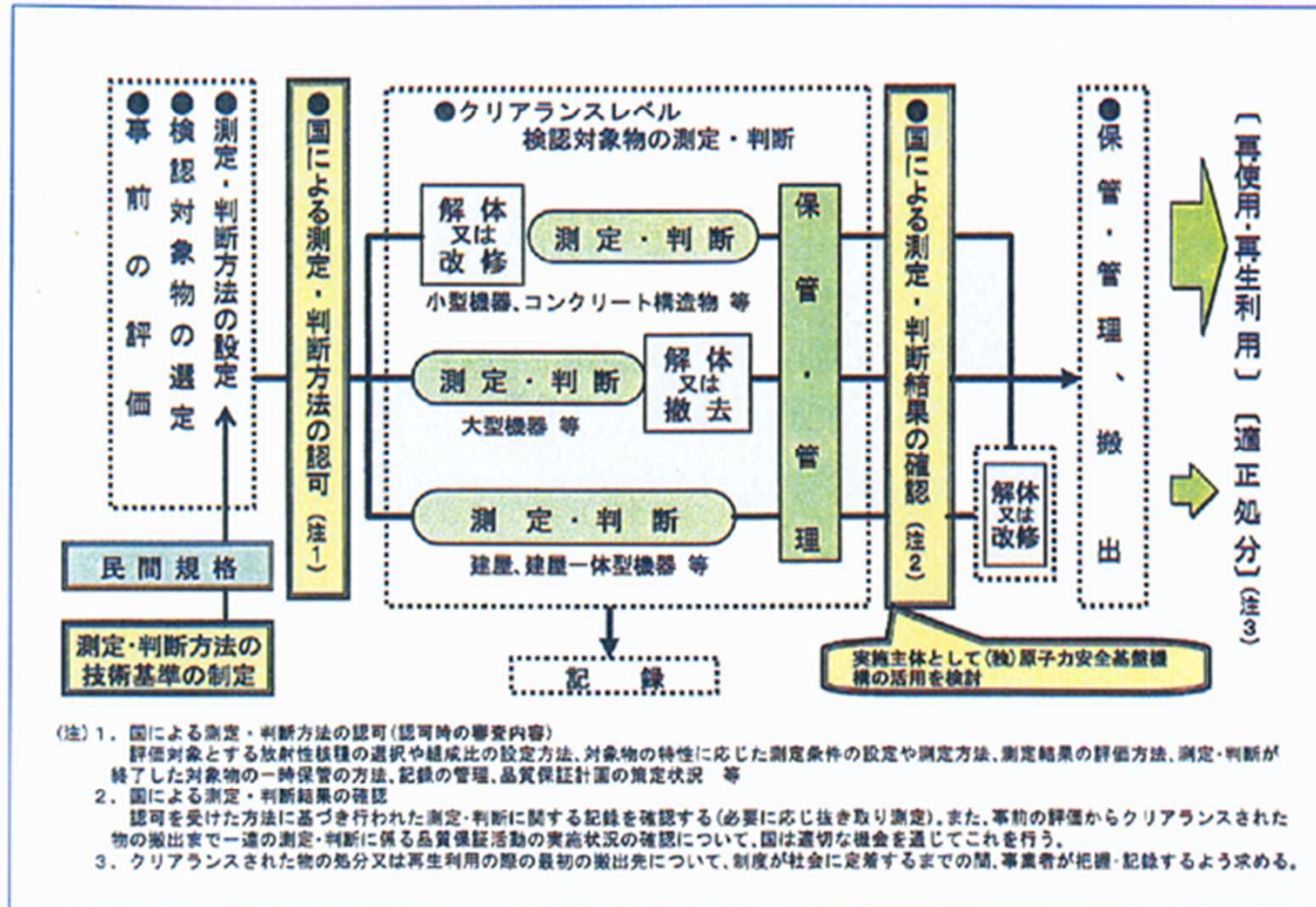
C-14	1E11	Tc-99	1E9
Co-60	1E15	Cs-137	1E14
Ni-63	1E13	$\alpha$	1E10

### 濃度区分値

#### ・余裕深度処分(中深度処分)

C-14	1E16	I-129	1E12
Cl-36	1E13	$\alpha$	1E11
Tc-99	1E14		

# クリアランス検認の流れ



「原子力施設におけるクリアランス制度の整備について」原子力安全・保安部会 廃棄物安全小委員会(H16)  
 H17 炉規制法部分改正、クリアランス省令(技術規準)施行



# 核種のクリアランス・レベルの例

クリアランス省令第2条別表に記載の33核種より抽出、  
作成

核種 (Bq/g)	半減期(年)	壊変(放出)	クリアランス・レベル
C-14	5700	$\beta^-$	1
Cl-36	3.0E5	$\beta^-$ (98%)	1
Ni-63	100	$\beta^-$	100
Nb-94	2.0E4	$\beta^-$ ( $\gamma$ )	0.1
Tc-99	2.1E5	$\beta^-$	1
I-129	1.6E7	$\beta^-$ ( $\gamma$ )	0.01
Co-60	5.3	$\beta^-$ ( $\gamma$ )	0.1
Sr-90	29	$\beta^-$	1
Cs-137	30	$\beta^-$ ( $\gamma$ )	0.1

# 処理・処分において扱いの面倒な核種

- 長半減期、難測定、被ばく寄与大、存在量大、化学形状複雑などの特性を有する核種

## ・C-14

- 生成： 中性子による放射化
  - N-14 (n,p) 多くの場合寄与大
  - O-17(n,  $\alpha$ ), C-13(n,  $\gamma$ ) 場合による
- 発生源
  - ① 有機物：主としてイオン交換樹脂(樹脂の劣化)
  - ② 燃料被覆管：ジルカロイ中の不純物 (N : 30–40ppm)
  - ③ 炉内構造材：S.S 中の不純物 (N: max. 0.1%)
- 特記
  - 有機及び無機形態のC-14 存在、化学形状未詳
  - 国際協力プロジェクト CAST(C-14 Source Term)プログラム  
原環センタ参加

## 処理・処分において扱いの面倒な核種 2

- **Tc-99**
- 生成:放射化とfissionの可能性
  - Mo-98(n, $\gamma$ )  $\Rightarrow$  Mo-99( $\beta^-$ )  $\Rightarrow$  Tc-99m( $\gamma$ )  $\Rightarrow$  **Tc-99**
  - U(n,f)  $\Rightarrow$  Mo-99, Tc-99m
- 発生源: 構造材、燃料被覆管の含有成分(腐食と放出)
  - 炉内構造材中のMo
    - S.S 304  $\sim$ 0.15%、S.S 316L  $\sim$ 2.5%
  - ジルカロイ中のMo ( $\sim$ 0.005%)
  - fission: 破損燃料リーク、ランプ U
- 特記
  - Mo-99 (66h)と Tc-99m(6.0h) 放射平衡
  - **Mo-99 ,Tc-99m** 炉水でも測定可能、長期保管中に消滅し**Tc-99** (難測定)

## 処理・処分において扱いの面倒な核種 3

- 他の核種の例

- **Ni - 63**

発生 Ni-62(n,γ) S.Sの構成成分

特記 Niの挙動 水化学で、ある程度把握。 Ni-59共存。

- **Nb - 94**

発生 Nb-93(n,γ) ジルカロイの不純物 (Nb ~0.01%)

ZIRLO (Nb ~1%)

fission の可能性

特記 Nb-95[Nb-94 (n,γ)] 沪水で測定可能

- **I - 129**

発生 fission

特記 I-133, I-131 沪水で測定可能(初期の水化学で経験)

# 使用済イオン交換樹脂(SIER)

- SIER; 一次系における浄化装置  
系中の放射性核種を捕獲  
核種の 保有量、保管中又は処理・処分時の放出量の把握重要
- C-14 の場合 (CAST プログラム)
  - スウェーデンのプラントの例
    - 湿潤SIERに蓄積されたC-14:IER のアニオン交換当量数  
と処理水量に相関(インベントリ評価)
    - SIERのエアバブルで保有量低下、相関関係変化
    - C-14は大部分無機型(炭酸塩)
      - 有機成分 BWR復水脱塩器 1~5%
      - PWR炉浄化系 ~30%
    - 樹脂の放射線分解の影響 詳細不詳

## 分析手法

### ● 難測定核種の計測

#### ▪ C-14の例

- 液体シンチレーションカウンタ(LSC)によるβカウンティング  
多く使用
    - 試料作製煩雑、長半減期核種の感度高くない
  - 加速器質量分析法(AMS)
    - 固体試料を加速器(多くはタンデム型)のイオン源に装填し、イオンビームとして引き出された特定質量のイオンを検出
    - 安定同位体に対する同位体比の測定
    - C-14のほかCl-36, I-129 などの分析に有効
- C-14/C-12: ~1E-16**

# 廃止措置と水化学の関わり

## 1. 除染

○解体前 系統化学除染（標準工程）  
運転期間中に経験あるプラントも

○解体後

解体物のクリアランス、廃棄物処理・処分対応

・除染による残存核種の相対濃度、汚染分布 の変化の影響

## 2. 放射性核種の性状・挙動の把握

○難測定核種に対して

- ・当該核種の発生源の同定
- ・燃料被覆管・炉内構造材の腐食と核種放出（放出量と形態）
- ・移行挙動（付着と離脱）
- ・イオン交換樹脂による蓄積と放出

# 水化学の貢献の可能性

1. 除染による作業被ばくと廃棄物量の低減
2. 廃棄物処理・処分の合理化・効率化
  - インベントリ評価の信頼性向上 (ex. 核種の sca.fac.の精度向上)
  - 核種の化学性状と振る舞の把握による処理・処分の最適化  
関連核種が汚水でのみ観測可能な場合あり
  - 安全評価の信頼性向上  
処分環境における核種挙動の把握
  - NR, クリアランス等の検認の合理化、容易化  
記録の保存
3. 放射性廃棄物の発生量低減(物量と放射エネルギー)
  - 発生源と挙動把握に基づく対策

## ○ バックエンドへの貢献



## おわりに

- 我が国は通常炉の廃止措置に向けてこれまで法整備、資金確保、技術開発、廃棄物対策などで準備。残された課題もあり。
- 1F 事故後、廃止措置を選択するプラントが急増。突然の決定により、準備が十分でないケースも。事前の準備重要。
- 既存の技術で十分安全に実施可能。ただし要素技術の選択と組み合わせの最適化などのプロジェクト・マネジメントは重要。
- 使用済み燃料の搬出と運転中廃棄物も含め大量に発生する解体廃棄物の管理(処理・処分対策)が最大の課題。
- インベントリ評価や廃棄物処理・処分に関連して、従来の水化学管理で着目していないC-14やTc-99などの特別な核種の性状と振る舞を追跡、把握すること重要。
- 水化学の目標の一つを「バックエンドへの貢献」と視野を広げること重要。