



令和5年度廃炉人材育成研修 R6.2.7～R6.2.9

# 燃料デブリ取り出し時の臨界管理技術

講師  
国際廃炉研究開発機構  
八木 誠

主催：日本原子力研究開発機構



# 内 容

1. はじめに
  - (1)背景
  - (2)臨界の基礎知識
2. 燃料デブリ分布の推定と臨界リスク評価例
  - (1)燃料デブリ分布・性状の推定
  - (2)臨界リスク評価例
3. 燃料デブリ取り出し時の臨界シナリオ
  - (1)燃料デブリ取り出し工法と臨界シナリオ
  - (2)燃料デブリ加工方法と臨界シナリオ
  - (3)臨界シナリオと臨界リスクまとめ
4. 燃料デブリ取り出し時の臨界管理技術
  - (1)安全要求と機能要求
  - (2)臨界防止技術
  - (3)臨界近接監視技術
  - (4)臨界検知技術
  - (5)段階的な燃料デブリ取り出し規模拡大への対応
5. 燃料デブリ取り出し時の臨界挙動評価例
6. まとめ



# 1.はじめに

## (1)背景

現状の燃料デブリは、プラントの監視データから未臨界であることが確認されている。

一方で、燃料デブリの状態は詳細に分かっていないことや、今後の燃料デブリ取り出し作業に伴って想定される種々の状態変化（形状、水量）に対しても、確実に臨界を防止し、安全かつ円滑に作業ができるよう安全対策を実施する必要がある。

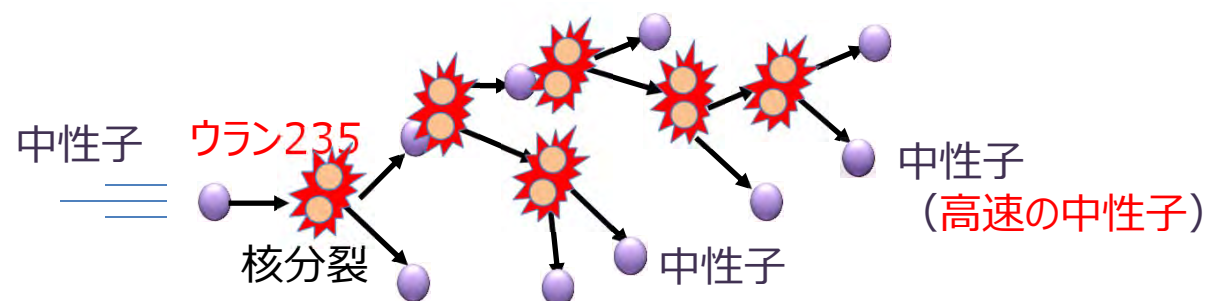
このため、燃料デブリ取り出し工法（冠水工法、気中工法）や燃料デブリの加工方法によってどのような臨界リスクが生じるかを検討し、必要な臨界管理技術の開発を行っている。

以下では、はじめに臨界の基礎知識を説明し、次に臨界シナリオと典型的な部位での臨界評価結果を説明し、さらに開発中の臨界防止技術、臨界近接監視技術、臨界検知技術等について解説する。

# 1.はじめに

## (2)臨界の基礎知識

- 臨界とは？ 核分裂反応が連鎖的に一定の割合で継続している状態



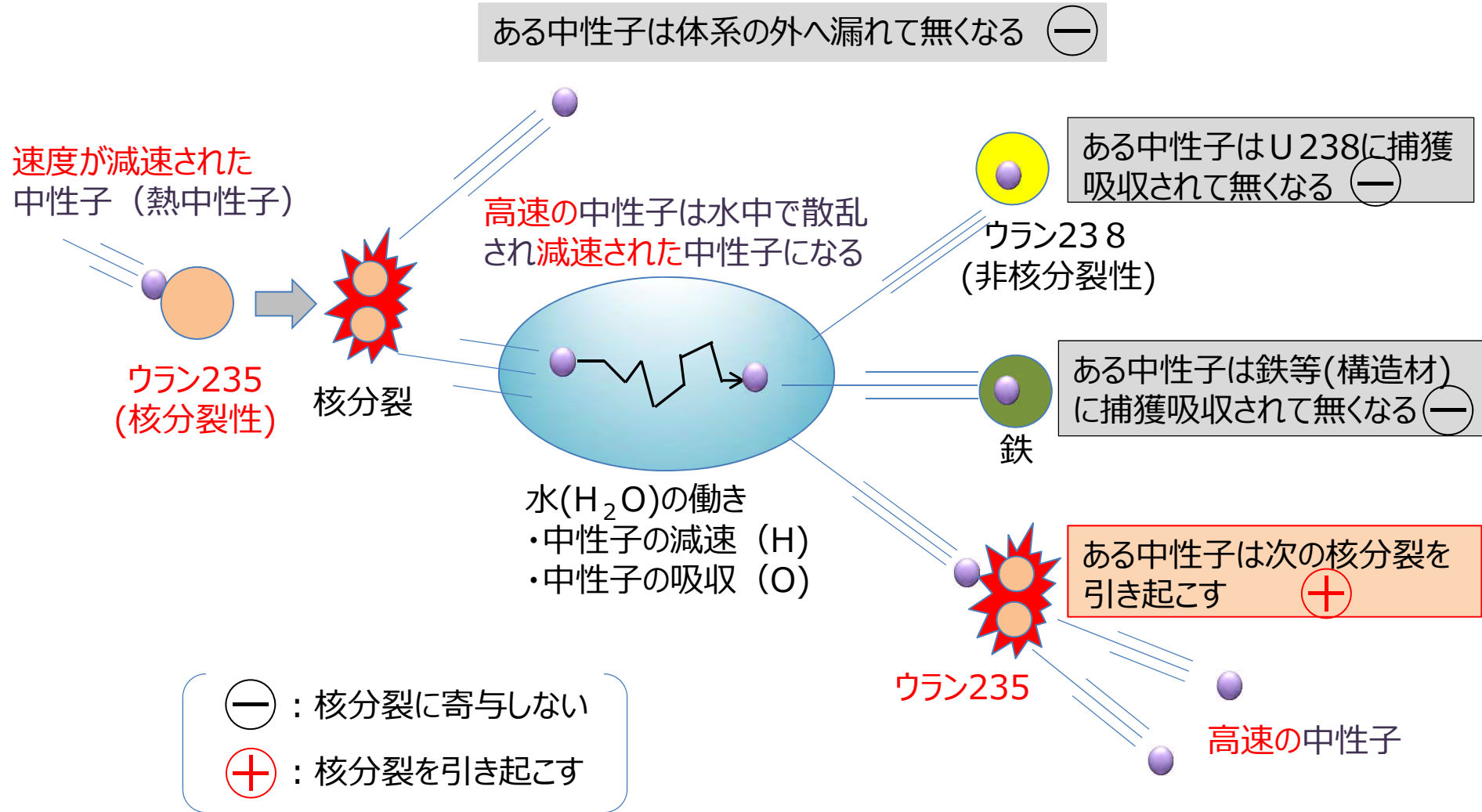
連鎖反応の持続性を定量化する指標：中性子増倍率  $K$

- $K > 1$  : 超臨界 … 中性子数は時間とともに増大する
- $K = 1$  : 臨界 … 中性子数は時間的に変化しない
- $K < 1$  : 未臨界 … 中性子数は時間とともに減少する

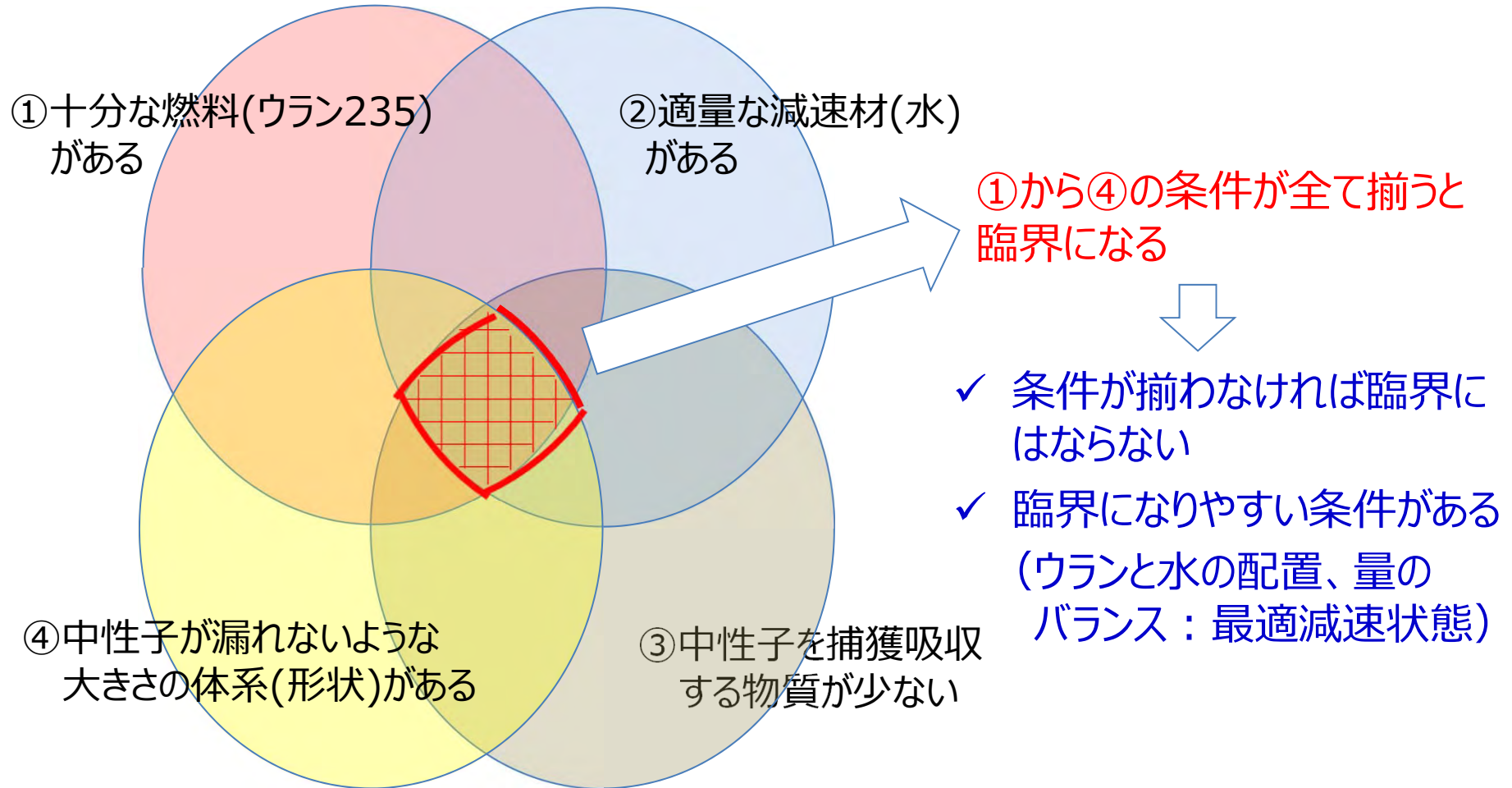


**$K < 1$  となるよう管理していくことが必要 (未臨界の維持)**

# ●核分裂を起こすためには？

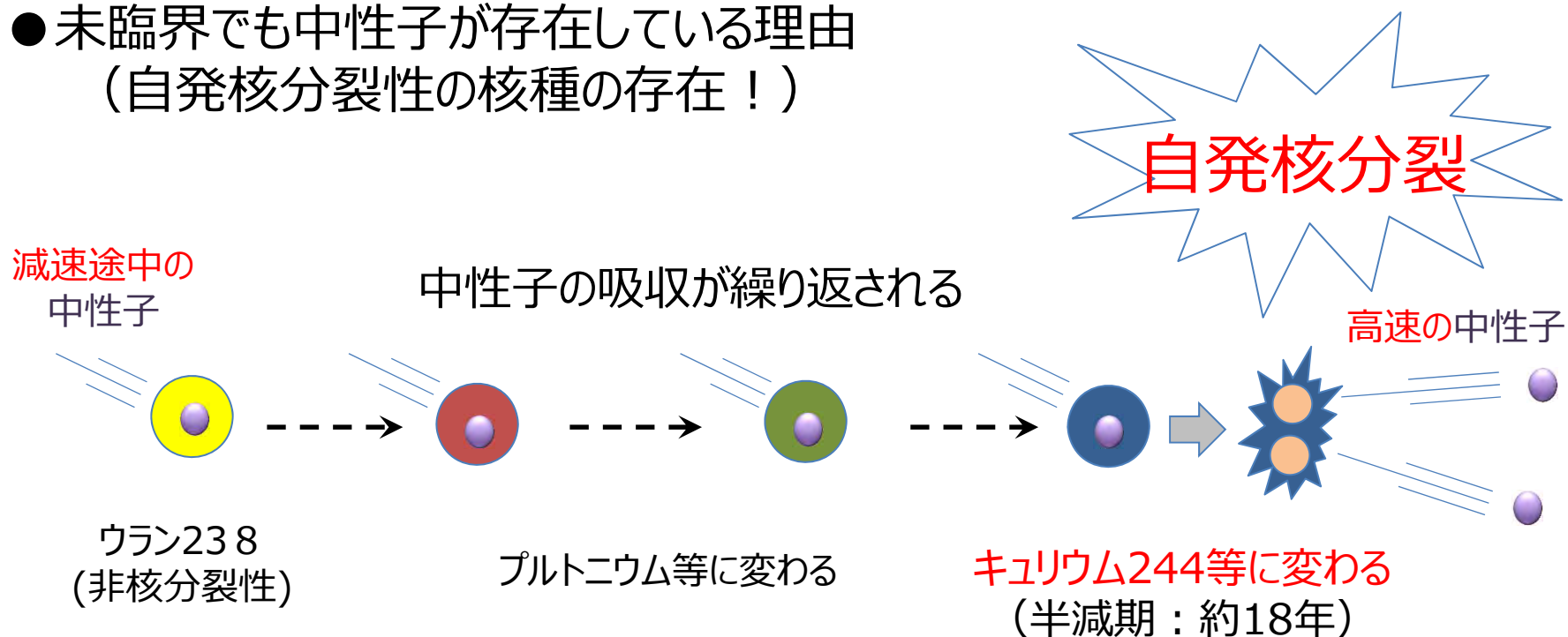


## ● 臨界が起こるための基本条件





- 未臨界でも中性子が存在している理由  
(自発核分裂性の核種の存在！)



燃料デブリの中には、運転中に生成したキュリウム244等が存在するため、この核種の**自発核分裂により、臨界になっても、一定量**の中性子発生がある。

# 内 容

1. はじめに
  - (1)背景
  - (2)臨界の基礎知識
2. 燃料デブリ分布の推定と臨界リスク評価例
  - (1)燃料デブリ分布・性状の推定
  - (2)臨界リスク評価例
3. 燃料デブリ取り出し時の臨界シナリオ
  - (1)燃料デブリ取り出し工法と臨界シナリオ
  - (2)燃料デブリ加工方法と臨界シナリオ
  - (3)臨界シナリオと臨界リスクまとめ
4. 燃料デブリ取り出し時の臨界管理技術
  - (1)安全要求と機能要求
  - (2)臨界防止技術
  - (3)臨界近接監視技術
  - (4)臨界検知技術
  - (5)段階的な燃料デブリ取り出し規模拡大への対応
5. 燃料デブリ取り出し時の臨界挙動評価例
6. まとめ

## 2.燃料デブリ分布の推定と臨界リスク評価例

### (1)燃料デブリ分布・性状の推定

燃料デブリの取り出し方法や取り出し時の臨界リスクを検討するためには、

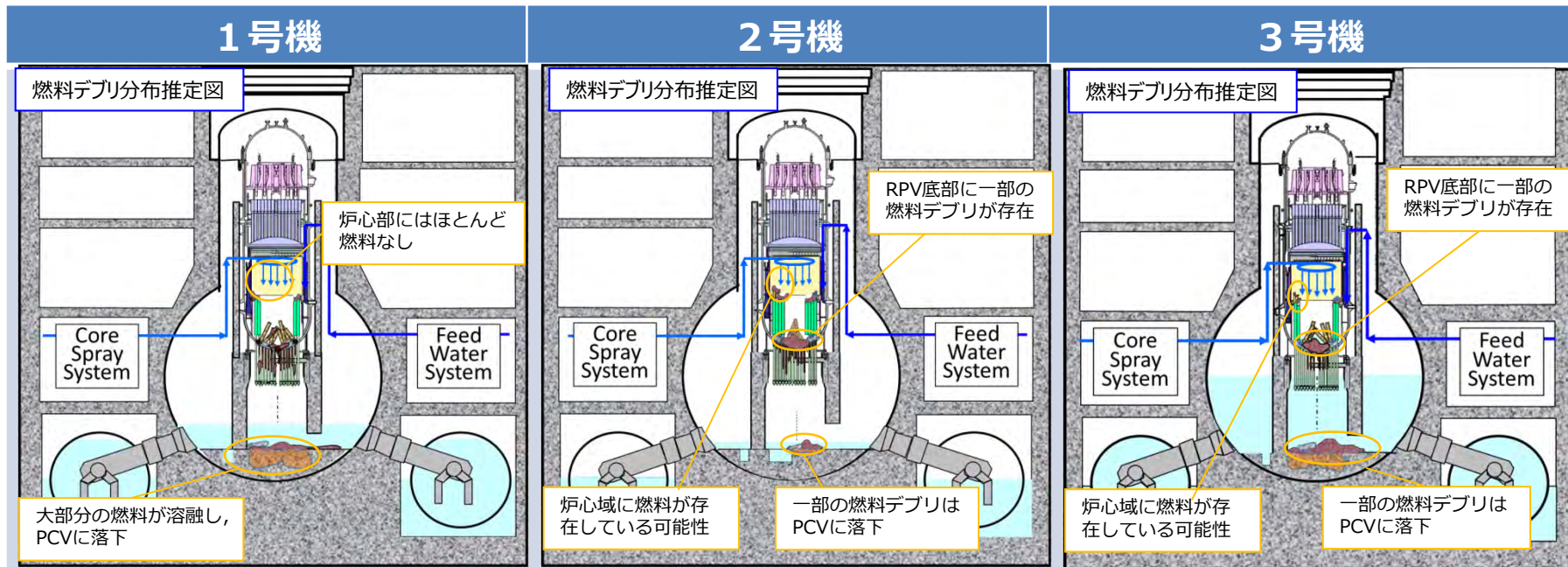
- 燃料デブリがどこに（場所）
- どのような状態で（性状や形状）
- どれくらい（量）

存在しているかを知ることが重要である。

これまで、IRIDによる廃炉・汚染水対策事業や東京電力HD(株)、JAEA等によって、原子炉圧力容器内や格納容器内の燃料デブリ分布・性状について、下記のような調査・研究が行われてきた。

- ①プラントデータや解析コードに基づく総合的な炉内状況把握
- ②宇宙線ミュオンを利用した原子炉の透視
- ③カメラや放射線測定器による格納容器内部の調査
- ④燃料デブリの性状把握研究

# (1)燃料デブリ分布・性状の推定



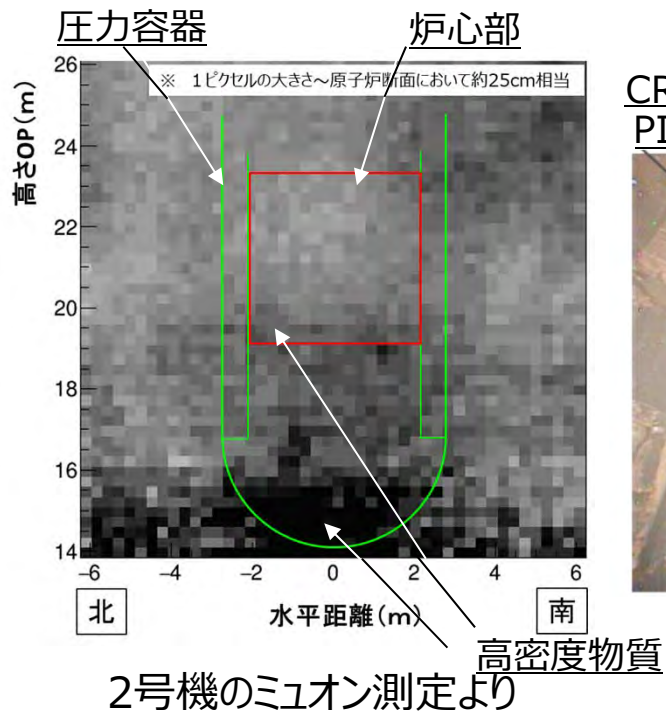
- 溶融した燃料がほぼ全量が原子炉格納容器 (PCV)に落下し、元々の炉心部にはほとんど燃料が存在しない

- 溶融した燃料のうち、一部は原子炉压力容器 (RPV)の下部プレナムおよび格納容器へ落下し、一部は元々の炉心部に残存
- 3号機は2号機よりも多くの燃料デブリが格納容器に落下していると推定

※ 「廃炉・汚染水対策事業費補助金（総合的な炉内状況把握の高度化）」(IRID, IAE)  
 第2回福島第一廃炉国際フォーラム講演資料より抜粋 (<http://ndf-forum.com/program/day2.html> , 2017年7月3日)

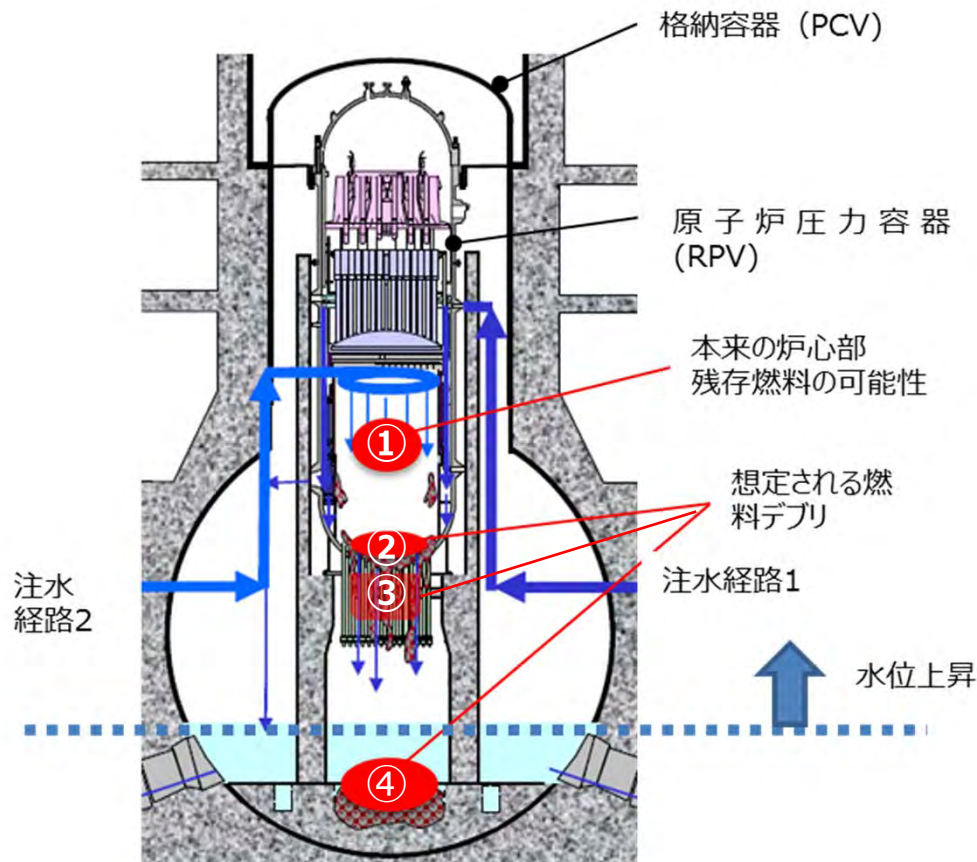
# (1)燃料デブリ分布・性状の推定

No.	分布位置	性状	特徴
1	炉心部	切り株燃料、粉状、小石状	<ul style="list-style-type: none"> <li>•切り株燃料：炉心外周部に溶け残った燃料</li> <li>•粉状、小石状：溶融した燃料が急冷され、小片化</li> <li>•塊状：ゆっくり冷却され塊となったもの</li> <li>•クラスト：溶融した金属と酸化物燃料が混合固化したもの</li> </ul>
2	圧力容器底部	粉状、小石状、塊状、クラスト（岩盤状）	
3	CRD/計装管	管内部の隙間や外面に付着	
4	格納容器底部	粉状、小石状、塊状	



## (2) 臨界リスク評価例

- 燃料デブリの存在の可能性が示されている代表的な部位に対して、想定される燃料デブリ状態を考慮した臨界評価を実施し、臨界リスクの定量感をつかむ



### ① 炉心部

- ・外周リング状の残存燃料
- ・集合状態(n行×n列)の残存燃料

### ② RPV下部

- ・球状デブリの堆積

### ③ CRDハウジング

- ・配管付着デブリ

### ④ PCV低部

- ・球状デブリの堆積
- ・コンクリートと相互反応したデブリ (MCCIデブリ)
- ・微粒子状デブリの巻き上がり

## (2) 臨界リスク評価例(①炉心部：外周リング状の残存燃料)

### 【前提条件】

■炉心中央部の燃料が溶け落ち、外周部にリング状に切り株状（元の形を維持）燃料が残存しているところに水位の上昇を想定

・燃料組成は、

①運転当時2011年の組成

②2021年時点の組成

・制御棒は考慮しない

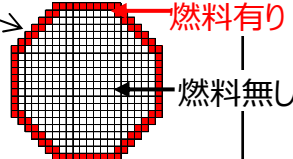
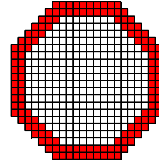
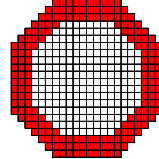
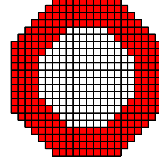
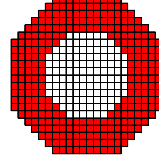
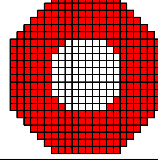
### 【評価結果】

● 時間経過に伴う組成の変化（崩壊）により、臨界のなり易さが変わる。

(2021/1/1時点では)

● 燃料集合体4層以下では未臨界

● 5層以上では、高さ約60cm以下では未臨界、それ以上では臨界となる範囲がある。

残存する燃料 集合体列の層数	未臨界である水位高さ範囲	
	2011/3/11時点	2021/1/1時点
炉心→ 1層 	無条件に未臨界	
2層 	無条件に未臨界	
3層 	無条件に未臨界	
4層 	約75cm以下 で未臨界	無条件に 未臨界
5層 	約45cm以下 で未臨界	約60cm以下で 未臨界
6層 	約45cm以下 で未臨界	約60cm以下で 未臨界

## (2) 臨界リスク評価例(①炉心部：集合状態(n行×n列)の残存燃料)

### 【前提条件】

- 炉心の燃料が溶け落ち、一部に元の形を維持した燃料が固まって残存しているところに水位の上昇を想定
  - ・ 燃料組成は現実の炉心の組成
  - ・ 制御棒は喪失しているとする

### 【評価結果】

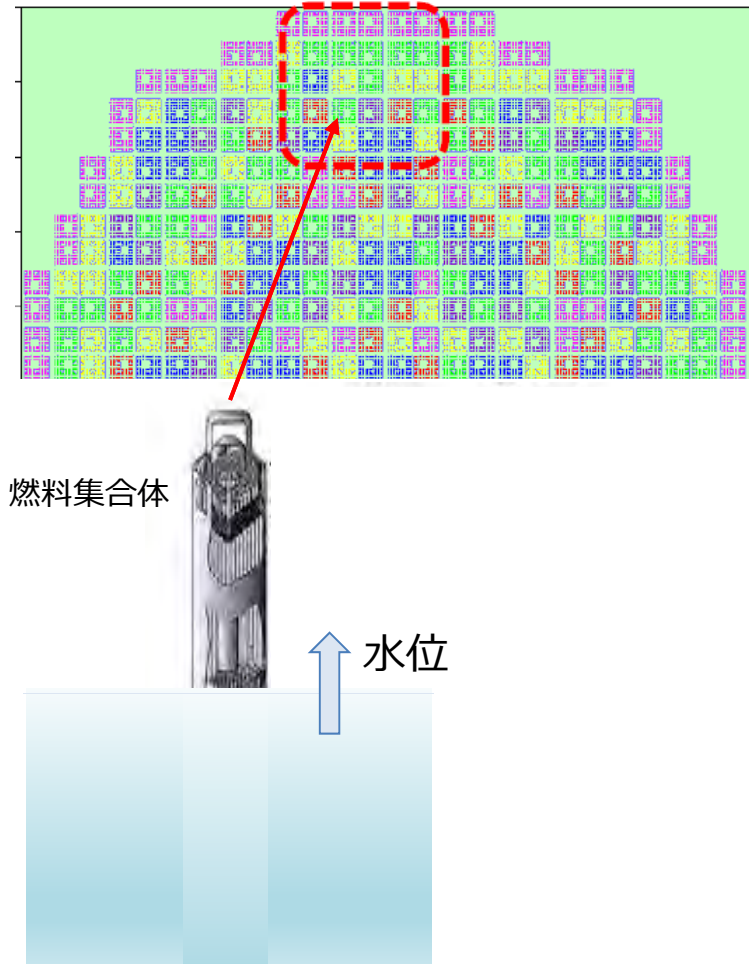
- ・ 燃料集合体が4行×4列(16集合体)までの固まりの範囲では未臨界
- ・ 燃料集合体が5行×5列(25集合体)以上に固まっていると、水位が2m程度あると臨界となる範囲がある。

### 【まとめ】

ミュオン測定により、1号機では、炉心部に大きな燃料デブリの塊はないと推定されているため、残存燃料の臨界リスクは小さいと推定される。一方、2号機及び3号機では、炉心域の下部の一部に高密度物質の存在の可能性も指摘されていることから、明確になるまでは、留意が必要。

### <解析体系列>

- ・ 炉心内の5行×5列
- ・ その周りは燃料がなく水が占有





## (2) 臨界リスク評価例(②RPV下部)

### 【前提条件】

■RPV底部にて、燃料デブリや溶融した構造材が、水と最適な減速状態で混ざり合う状態を想定

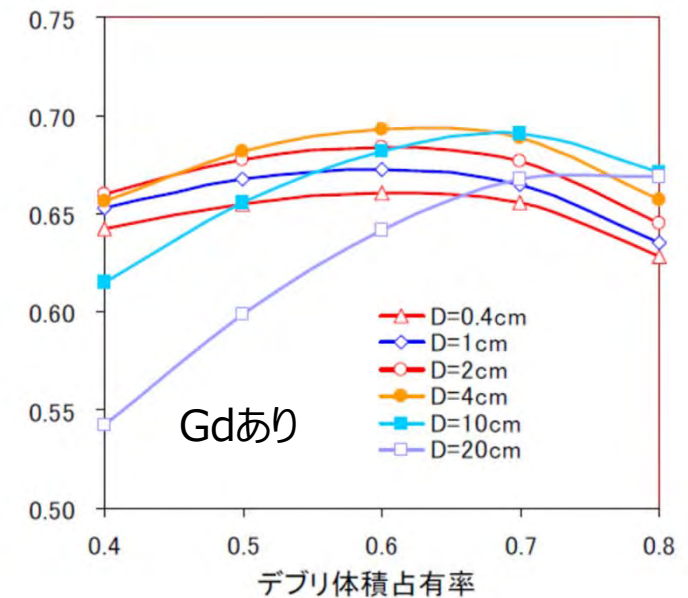
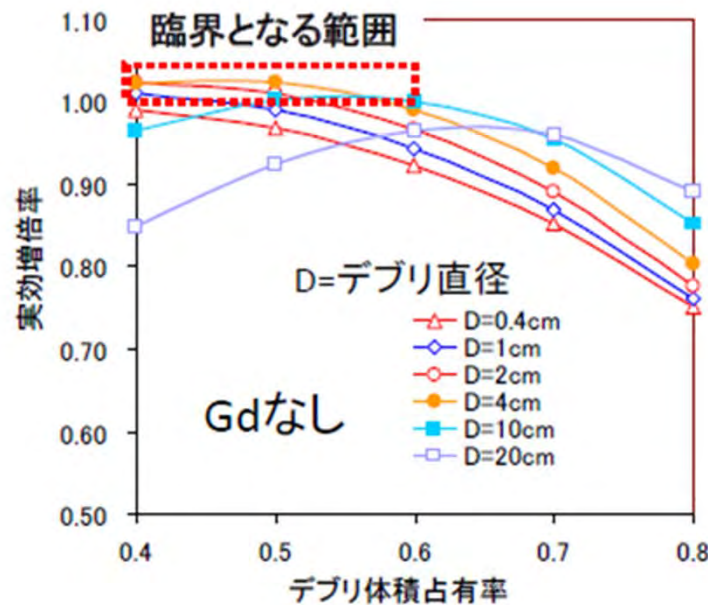
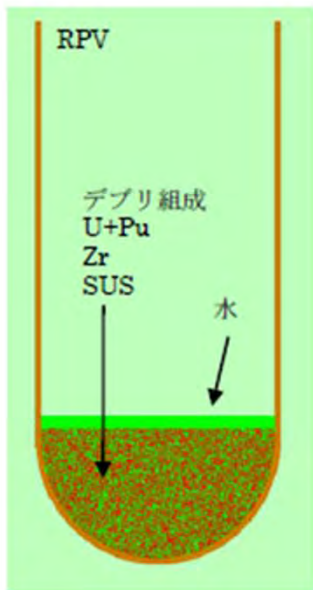
- ・球状の燃料デブリ
- ・組成は炉心平均燃焼度相当
- ・FPは含めない
- ・SUSが重量比で25%含入
- ・燃料に含入の残留Gdの有／無考慮

### 【評価結果】

- ・燃料デブリと水の体積比が1:1程度でデブリ粒径が4cm程度の場合の領域に臨界となる範囲がある
- ・現実的な条件である、燃料に含入の残留Gdを考慮すれば臨界にはならない

### 【まとめ】

- ・現実的な燃料デブリの性状・組成では臨界リスクは小さいが、厳しい組成条件の組み合わせで臨界となる範囲があるので留意が必要。



## (2) 臨界リスク評価例(③CRDハウジング部)

### 【前提条件】

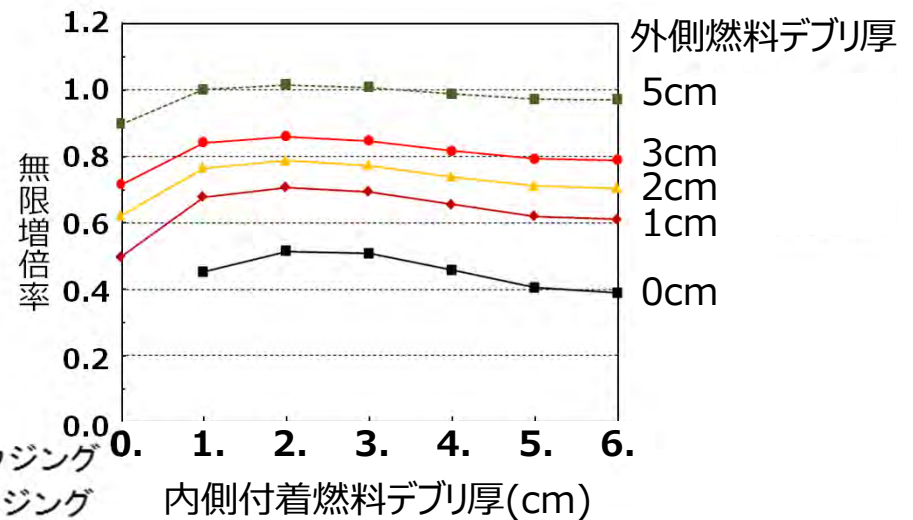
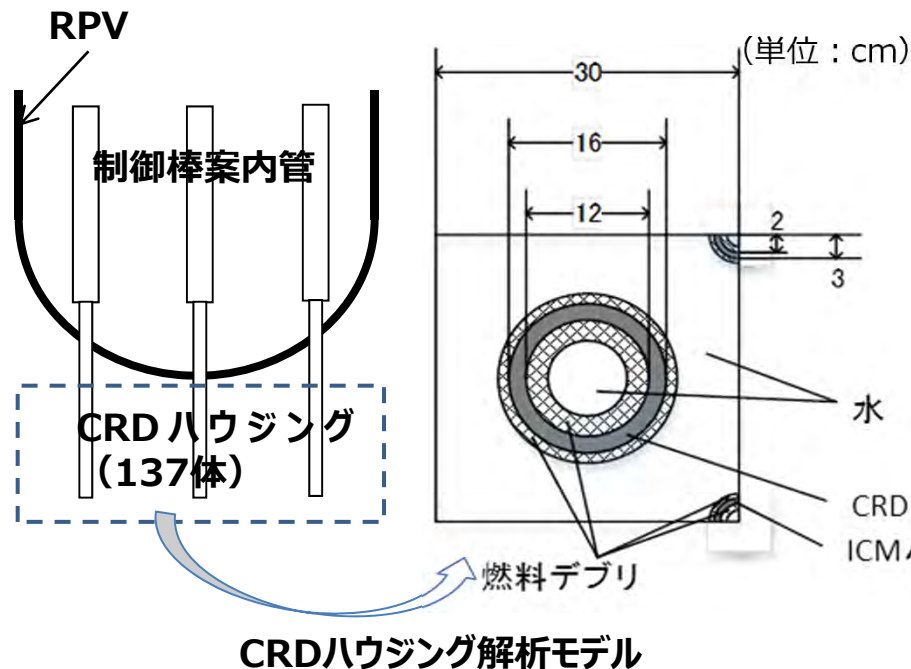
- RPV下部に突き出している制御棒駆動機構 (CRD) ハウジングに付着した燃料デブリの水没を想定
  - ・組成は燃料集合体最小燃焼度相当
  - ・SUS/中性子吸収体は含まない

### 【評価結果】

- ・CRDハウジング内側にだけデブリが充満しても、臨界にはならない。
- ・CRDハウジング外側一面に3,4cm厚の付着では臨界にならない。5cm厚程度で臨界になる領域がある。

### 【まとめ】

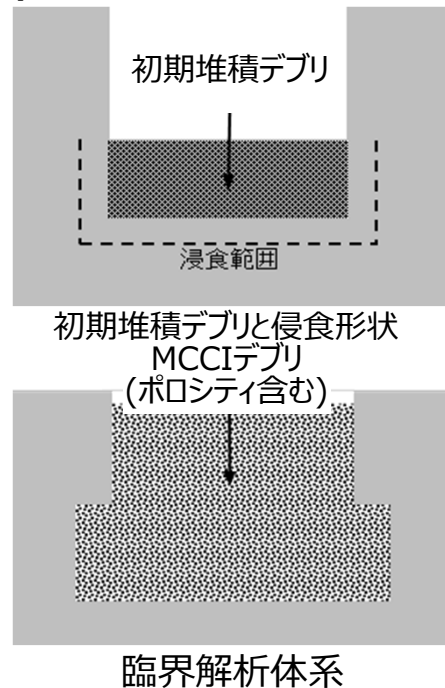
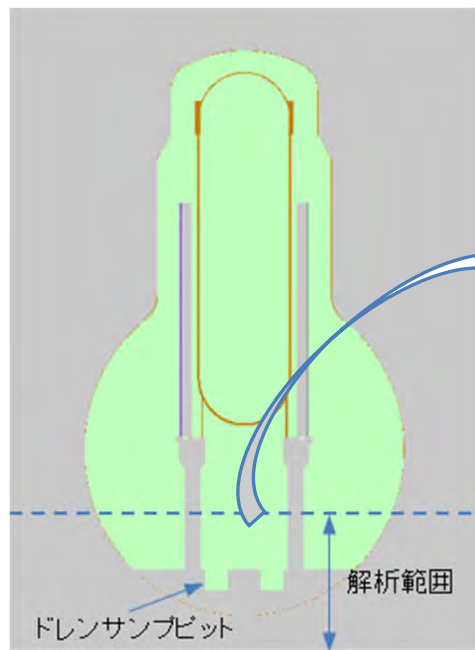
- ・かなりの厚さの燃料デブリがCRDハウジング外側一面に付着しない限りは臨界にはならない。



## (2) 臨界リスク評価例(④PCV低部：MCCI燃料デブリ部)

### 【前提条件】

- PCV下部の臨界評価は、基本は②RPV底部の評価と同様
- 特異な状況として、コンクリートと相互作用(MCCI)した、ポロシティ(空孔)を多く含んだ燃料デブリが水と混合した場合を想定
  - ・ 組成は過酷事故解析コードの解析例
  - ・ 中性子吸収体 $B_4C$ /Gdは有/無考慮
  - ・ SUSは有(重量比で42%)/無考慮

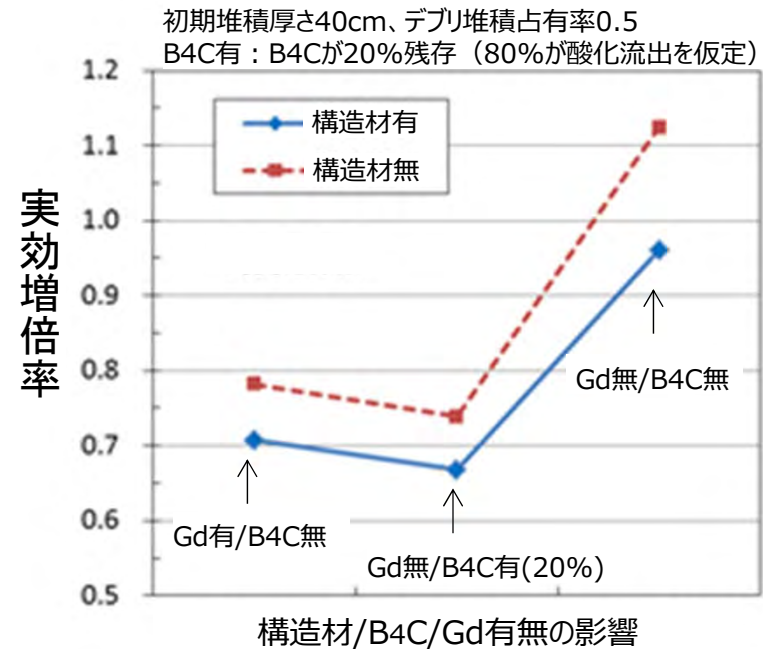


### 【評価結果】

- ・ SUSまたは $B_4C$ またはGdの何れかが含まれれば未臨界。それらが全て含まれない場合のみ臨界になる領域がある。

### 【まとめ】

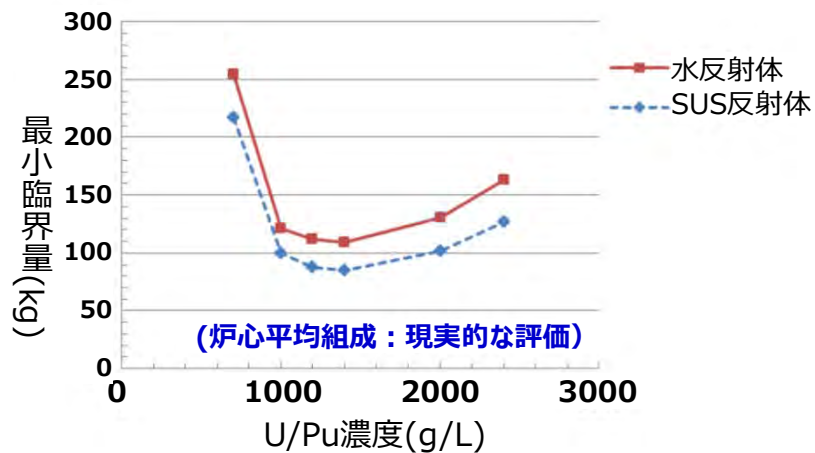
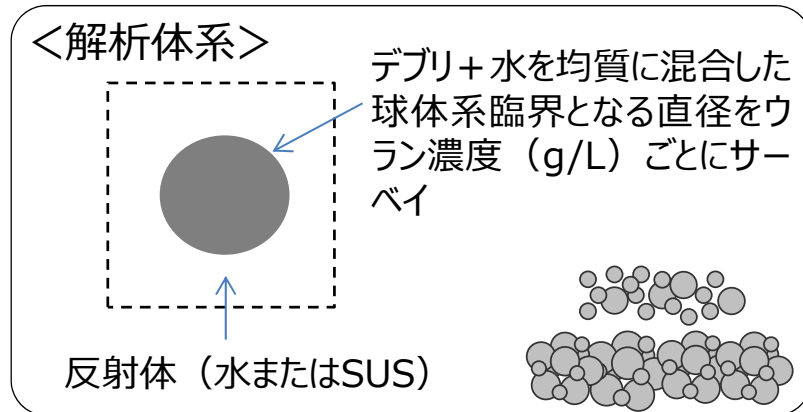
- ・ 1/2/3号機共にPCV下部は冠水しているが、臨界になっていない事実から、MCCIデブリを想定しても、中性子吸収体が相当含まれていることを示唆。



## (2) 臨界リスク評価例(④PCV低部：微粒子状デブリの巻き上がり)

### 【前提条件】

- 堆積している微粒子状燃料デブリが水流や取り出し作業による巻き上がりを想定
  - ・ 組成は最小燃焼度/炉心平均組成
  - ・ 構造材、吸収体含まずウラン酸化物のみ

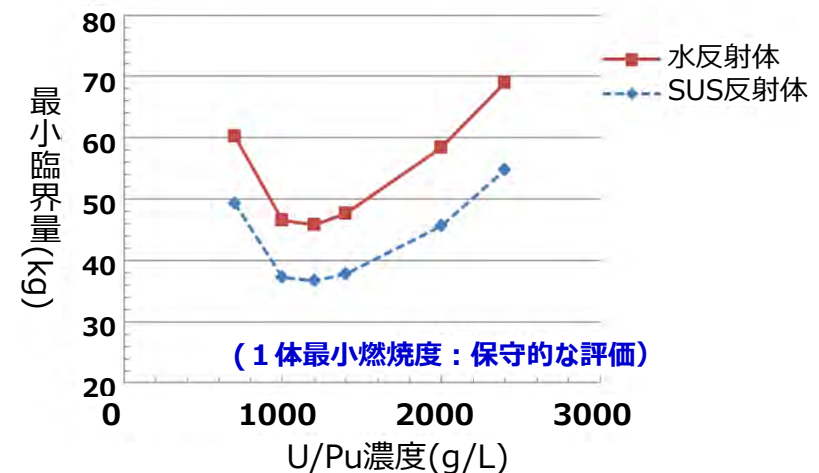


### 【評価結果】

- ・ 最適減速状態でも臨界には46Kg(保守的な組成)～109kg(現実的な組成)程度の巻き上がりが必要 (最小臨界質量)

### 【まとめ】

- ・ 保守的な評価でも、臨界になるには、50Kg程度の巻き上がりが必要であり、巻き上がりによる臨界の可能性は非常に想定しにくい



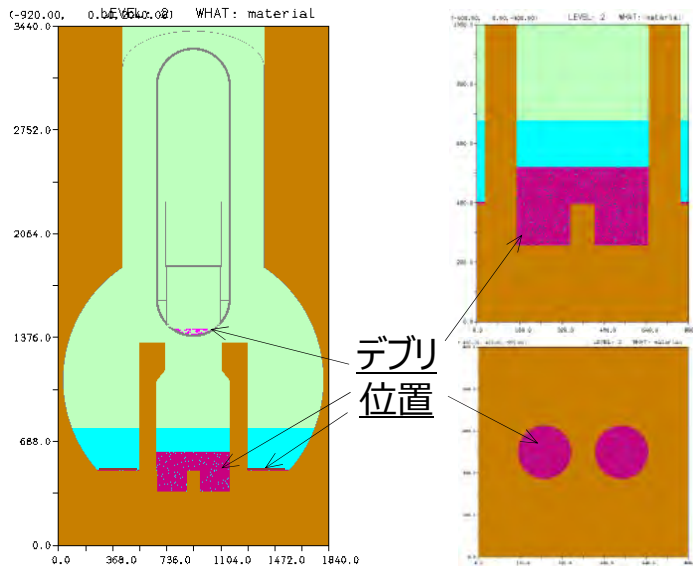
## (2) 臨界リスク評価例(⑤統計的手法を取り入れた臨界評価例)

### 【目的】

- 評価条件を保守的な極端な条件のみ用いるのではなく、確率変数として扱い、現実的な臨界性（中性子増倍率）の推定を行う。

### 【確率変数として扱うパラメータ】

- デブリ粒径
- デブリ組成
- デブリ空隙率
- 構造材の混合割合
- デブリ体積占有率
- Gd帯同割合



(a) 解析体系（1F1模擬,左:全体,右:°デスタル断面とサブ°ピット平面、デブリ位置は炉内状況把握等の結果を反映）

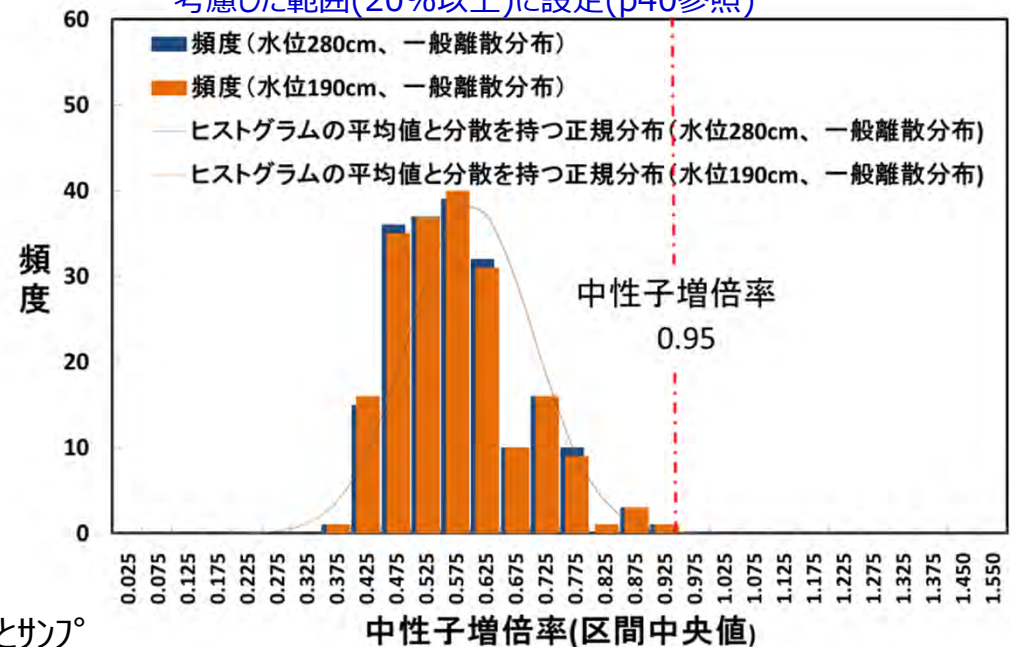
### 【評価結果※】

- 200ケースの種々の組み合わせに対する増倍率の評価結果(下図)より、0.95を超えるケースは十分小さい(0.1%以下)。

### 【まとめ】

- 正の印加反応度が投入されても、直ちに臨界超過となる確率は非常に小さいと推定。

※ 構造材量は、1号機の希ガス観測データから推定した増倍率を考慮した範囲(20%以上)に設定(p40参照)



(b) 中性子増倍率分布（1F1号機）

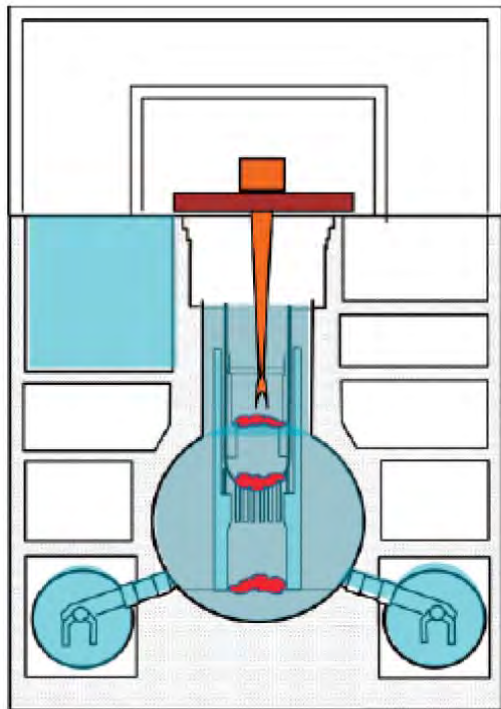
# 内 容

1. はじめに
  - (1)背景
  - (2)臨界の基礎知識
2. 燃料デブリ分布の推定と臨界リスク評価例
  - (1)燃料デブリ分布・性状の推定
  - (2)臨界リスク評価例
3. 燃料デブリ取り出し時の臨界シナリオ
  - (1)燃料デブリ取り出し工法と臨界シナリオ
  - (2)燃料デブリ加工方法と臨界シナリオ
  - (3)臨界シナリオと臨界リスクまとめ
4. 燃料デブリ取り出し時の臨界管理技術
  - (1)安全要求と機能要求
  - (2)臨界防止技術
  - (3)臨界近接監視技術
  - (4)臨界検知技術
  - (5)段階的な燃料デブリ取り出し規模拡大への対応
5. 燃料デブリ取り出し時の臨界挙動評価例
6. まとめ

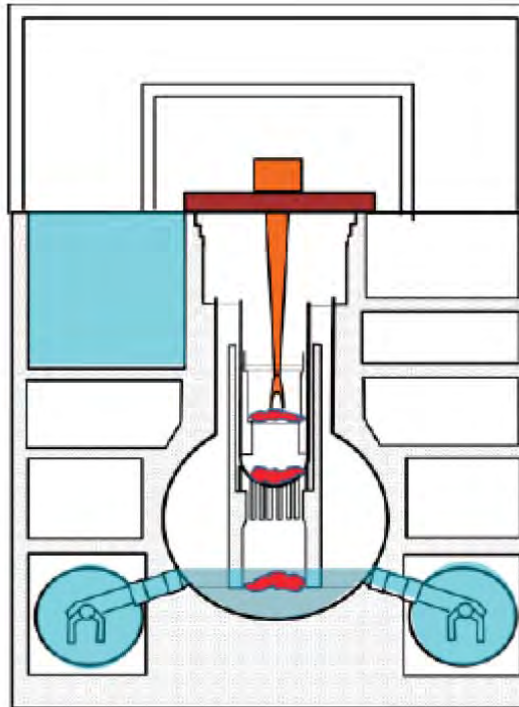
# 3. 燃料デブリ取り出し時の臨界シナリオ

## (1) 燃料デブリ取り出し工法と臨界シナリオ

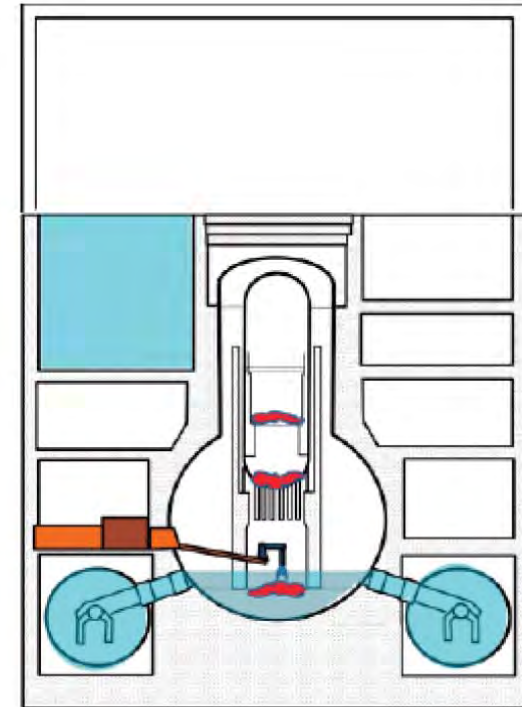
① 冠水-上アクセス工法



② 気中-上アクセス工法



③ 気中-横アクセス工法



### <臨界シナリオ>

- 臨界の発生リスクは水と燃料デブリの混合状態によって異なる
- このため、冠水工法や気中工法などの工法毎に、水と燃料デブリの状態の関係を正しく把握し、臨界発生リスクを考慮する必要がある

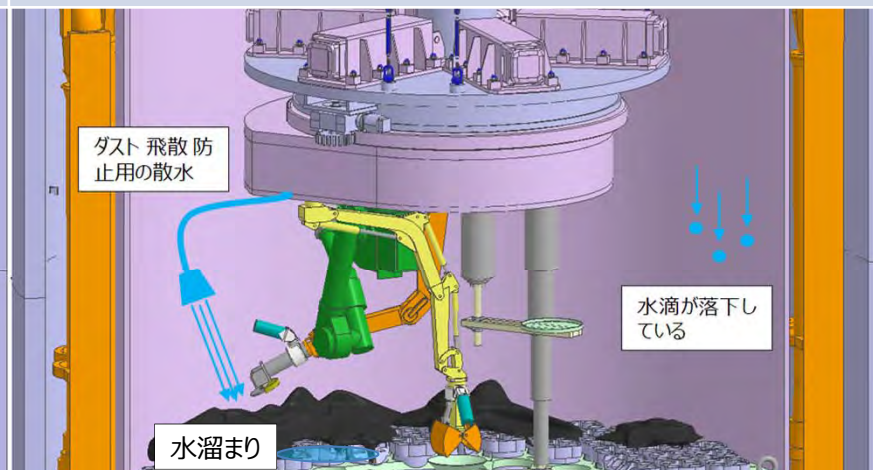
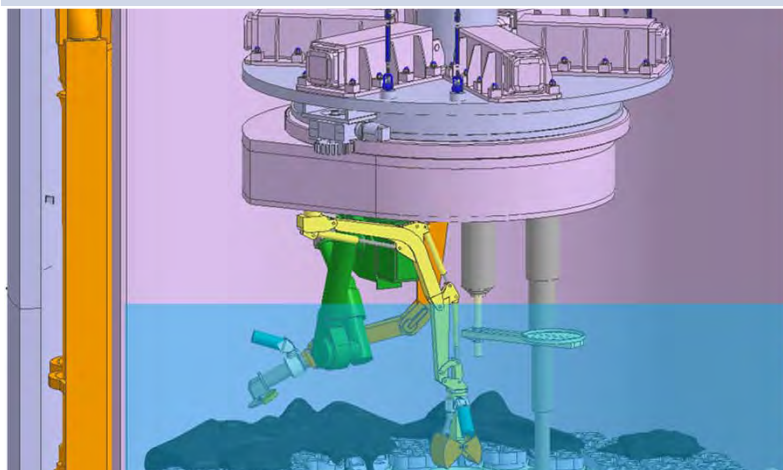
# (1)燃料デブリ取り出し工法と臨界シナリオ

## 水中加工(冠水工法)

- ・水位の上昇中に燃料デブリや切り株燃料が冠水する。
- ・燃料デブリの上に水位が形成されている。
- ・加工開始から回収まで水中で行われる。

## 気中加工(気中工法)

- ・燃料デブリの上に水位は形成されていない。
- ・燃料デブリの下方に水溜まりの可能性あり。
- ・冷却水はかけ流し。
- ・水滴が落下している。
- ・ダスト飛散防止のために散水しながら加工。



### <臨界シナリオ>

#### ●冠水工法

- ・露出している燃料デブリや切り株燃料の冠水により、正の反応度が印加される事象。
- ・水中のデブリ加工により、水とデブリの混合状態が変化し、正の反応度が印加される事象。

#### ●気中工法

- ・臨界リスクは小さくなるが、冷却や細粉飛散防止のために水が掛け流しされる場合や水溜まりでは、水中加工と同様注意が必要



## (2)燃料デブリ加工方法と臨界シナリオ

<臨界シナリオ例>

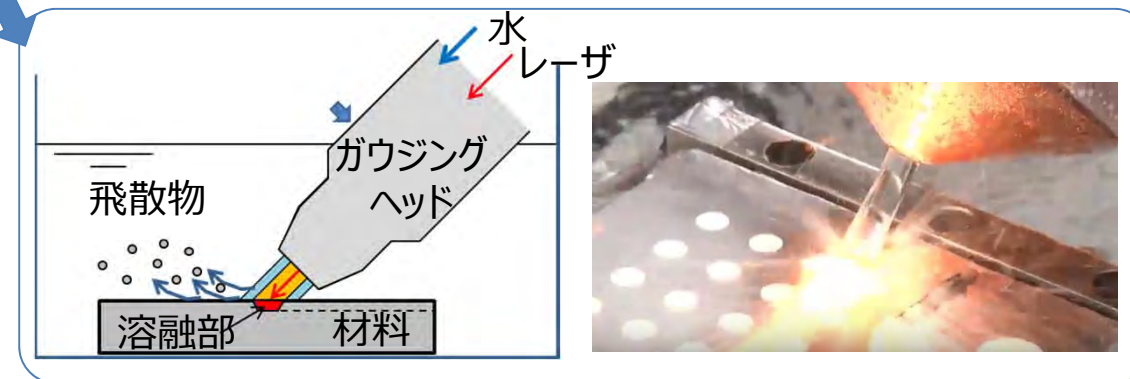
タイプ	加工方法
切削・研削	コアボーリング
	ディスクソー
	ワイヤソー
	ハンドソー
	超音波コアドリル
	油圧カッター
溶融	チゼル
	アブレイシブウォータージェットAWJ
	レーザガウジング
	プラズママーク
	プラズマジェット
	ガス
	接触式アーク
	アークソー
陽極式WJ	
レーザ掘削	



- コア抜きした後にできた穴にデブリ細粉が堆積し、水と混合する事象



- デブリが微細化し水と混合する事象



## (2)燃料デブリ加工方法と臨界シナリオ

デブリ加工方法	想定される 臨界シナリオ	事象のイメージ	臨界リスク	
			気中加工	水中加工
カッタ、ワイヤーソー、アブレイシブ・ウォーター・ジェット(AWJ)	デブリに亀裂が多数生じて、水が浸入する		水溜まりがある場合は注意	<b>注意</b> (亀裂の数・範囲に留意)
チゼル	砕かれて小片化したデブリが水中に集積する		水溜まりがある場合は注意	<b>有り</b>
コアボーリング	穴あけ箇所へ水が浸入する		水溜まりがある場合は注意	<b>注意</b> (穴の個数・隣接状態等に留意)
レーザー	水中で切削された粒状のデブリが巻き上がる		無し	<b>注意</b>

### (3) 臨界シナリオと臨界リスクまとめ

- 以上、推定される燃料デブリの分布・性状、取り出し工法・加工方法を考慮し、号機毎の臨界発生リスクを定性的にまとめた。

部位	臨界シナリオ	1号機	2号機	3号機
炉心部	・残存燃料の水没	<b>極小</b> (残存燃料ほとんどなし)	<b>中</b> (炉心領域、外周部に燃料残存可能性あり)	<b>小</b> (外周部に燃料残存可能性あり)
RPV下部	・デブリの水没 ・取出時状態変化	水没時： <b>小</b> 取出時： <b>極小</b> (残存量少)	水没時： <b>中</b> 取出時： <b>小</b> (残存量多く、かつ露出)	水没時： <b>中</b> 取出時： <b>小</b> (残存量多く、かつ露出)
CRDハウジング	・付着デブリ水没	<b>小～極小</b> (付着形状・量からリスク小)	<b>小～極小</b> (付着形状・量からリスク小)	<b>小～極小</b> (付着形状・量からリスク小)
PCV低部	・露出デブリ水没 ・取出時状態変化 (含、巻き上がり)	水没時： <b>小</b> 取出時： <b>小</b> (存在量多い、露出量少)	水没時： <b>小</b> 取出時： <b>小</b> (存在量やや小、露出量やや大)	水没時： <b>小</b> 取出時： <b>小</b> (存在量多い、露出量少)

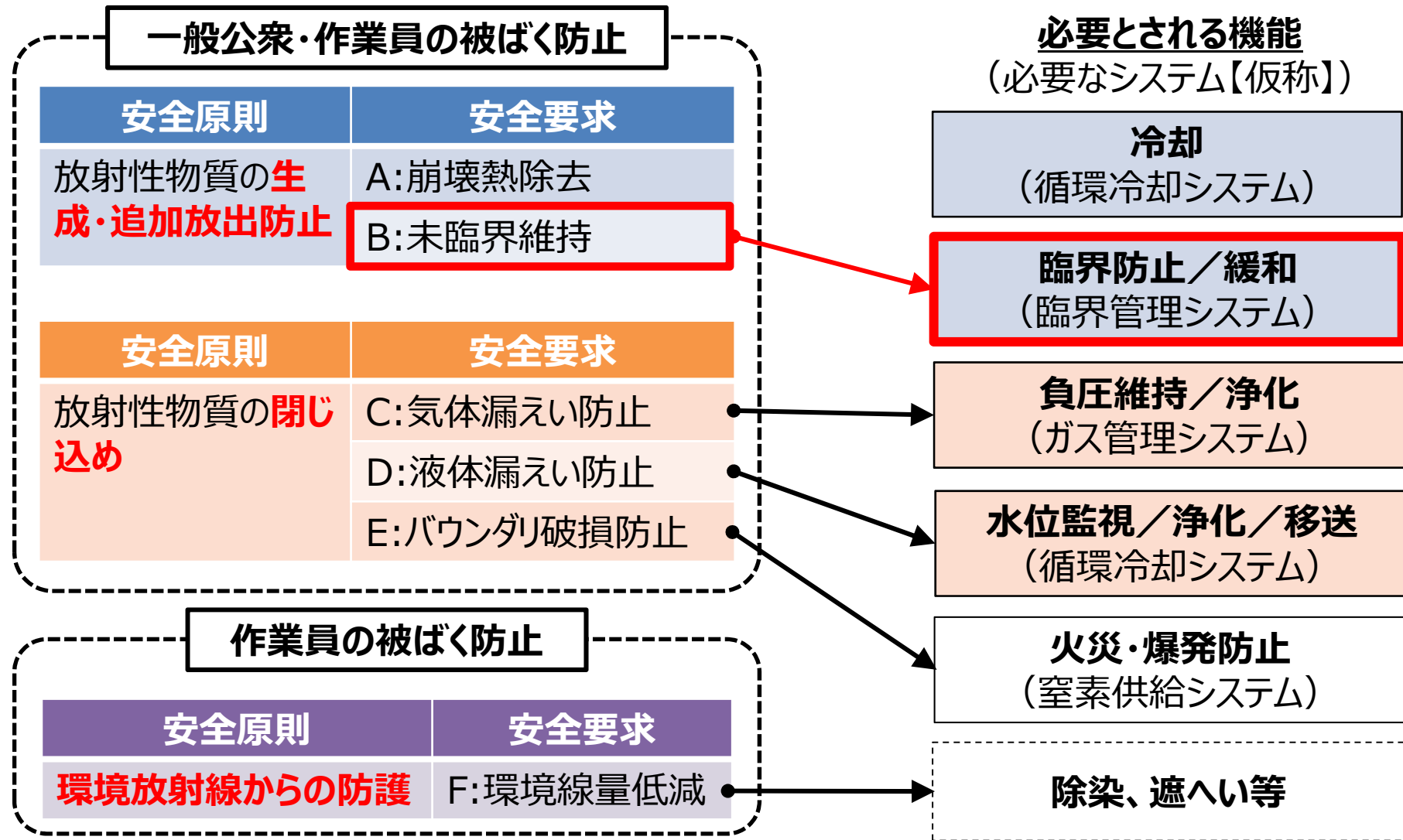
- 全体的に燃料デブリの水没や取り出し時の状態変化による臨界の発生リスクは小さいと評価。
- 燃料デブリ残量が多く、かつ、露出のある部位において相対的に大きい。但し、そのような部位でも、現実的な燃料デブリ組成を考えれば臨界リスクは小さいと評価。
- 現状、燃料デブリ組成や性状等の情報が少ないため、万が一に備えて、臨界防止・監視・緩和に係る臨界管理技術を準備することが重要。

# 内 容

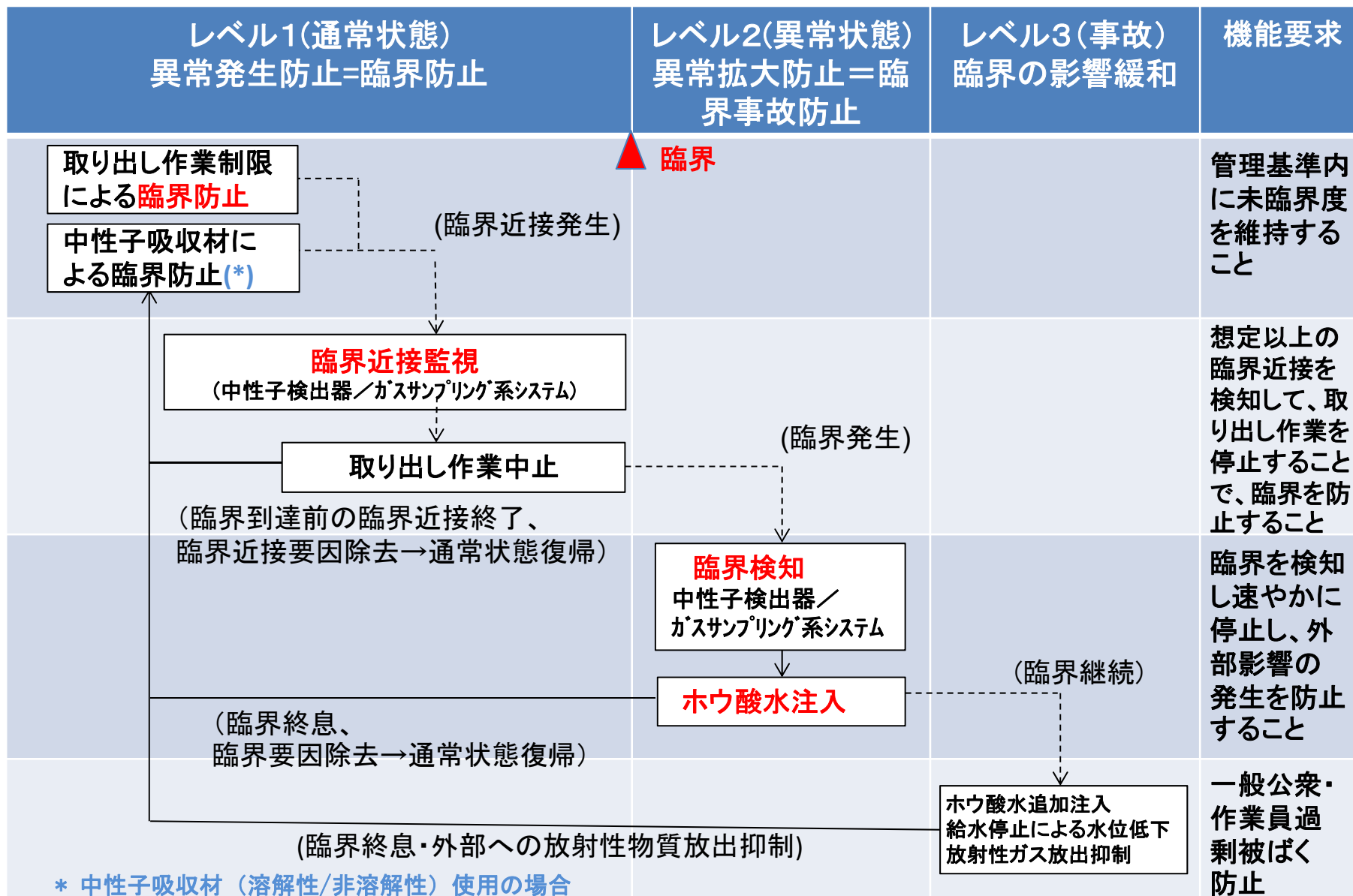
1. はじめに
  - (1)背景
  - (2)臨界の基礎知識
2. 燃料デブリ分布の推定と臨界リスク評価例
  - (1)燃料デブリ分布・性状の推定
  - (2)臨界リスク評価例
3. 燃料デブリ取り出し時の臨界シナリオ
  - (1)燃料デブリ取り出し工法と臨界シナリオ
  - (2)燃料デブリ加工方法と臨界シナリオ
  - (3)臨界シナリオと臨界リスクまとめ
4. 燃料デブリ取り出し時の臨界管理技術
  - (1)安全要求と機能要求
  - (2)臨界防止技術
  - (3)臨界近接監視技術
  - (4)臨界検知技術
  - (5)段階的な燃料デブリ取り出し規模拡大への対応
5. 燃料デブリ取り出し時の臨界挙動評価例
6. まとめ

# 4. 燃料デブリ取り出し時の臨界管理技術

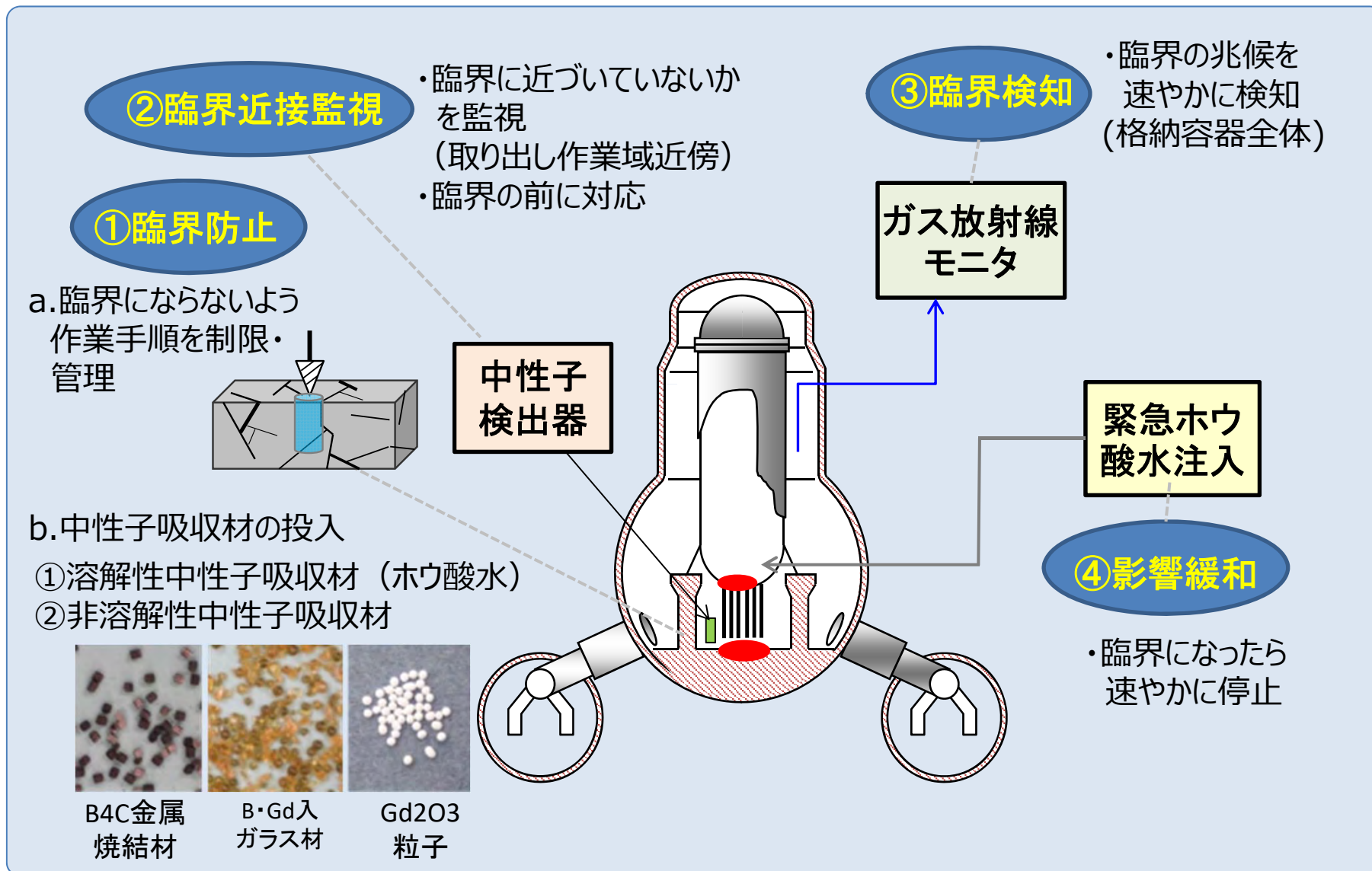
## (1) 安全要求と機能要求 (デブリ取り出し全体)



# (1)安全要求と機能要求 (多層に渡る臨界管理技術適用案)



# (1)安全要求と機能要求 (臨界管理システムの全体像)



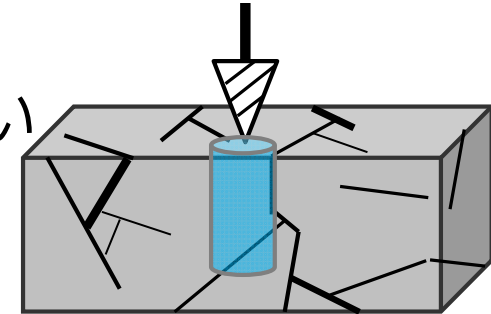
(注) 燃料デブリの分布や性状・組成等の情報に基づき臨界リスク、影響等を考慮の上、必要な技術が選択される。

# 4. 燃料デブリ取り出し時の臨界管理技術

## (2) 臨界防止技術 (a. 作業手順の制限・管理)

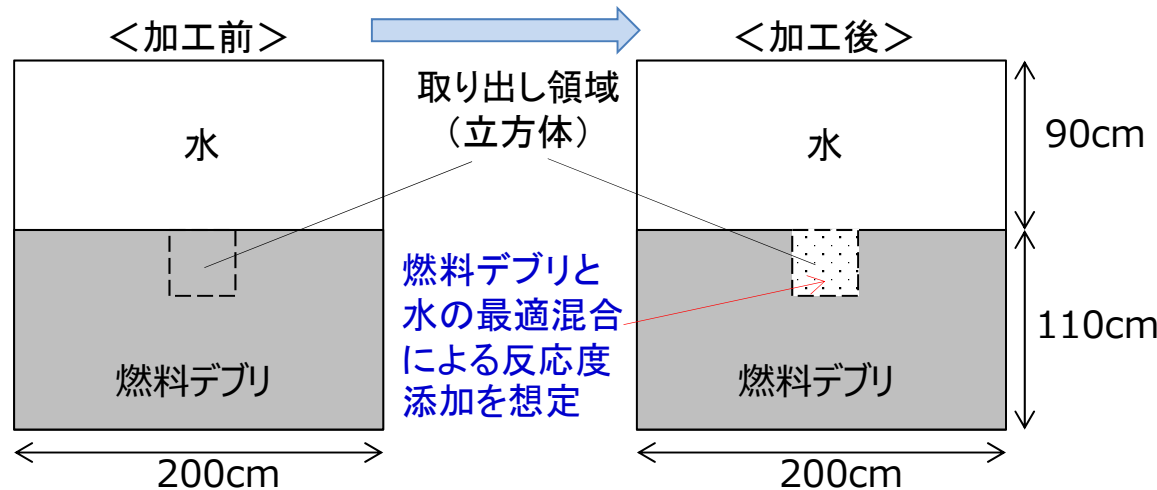
### 【方法】

取り出し1回あたりに過剰な反応度が添加されないように取り出し量（加工量）に制限を加える。

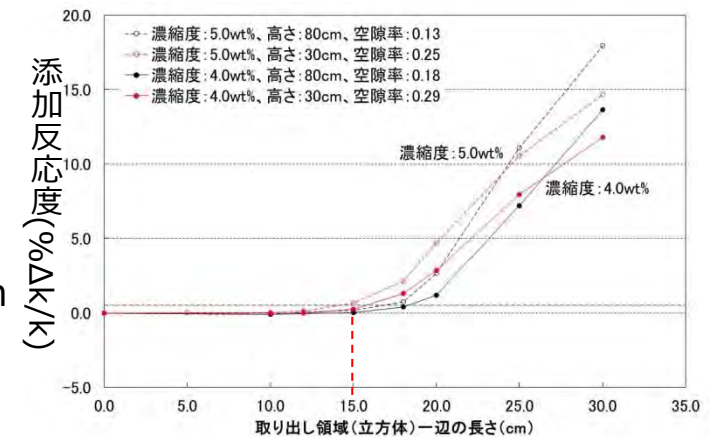


### 例) ボーリング加工の場合

- 添加反応度  $0.1\% \Delta k/k$  以下：一辺12cm立方体の大きさ以下に制限
- 添加反応度  $0.5\% \Delta k/k$  以下（即発臨界にならない範囲）  
：一辺16cm立方体の大きさ以下に制限



評価体系



1回の取り出し量と添加反応度の関係



## (2) 臨界防止技術 (b.① 溶解性中性子吸収材)

### 【方法】

中性子吸収材であるホウ素 (B) を含む水溶液 (五ホウ酸ナトリウム) を格納容器内に注入することにより、燃料デブリ中に吸収材を行き渡らせデブリ加工に伴う臨界リスクを低減する。

(保守的評価FP、SUS不含)

### ■ 必要ホウ素濃度

残留ウラン濃縮度の大きさにより、必要なホウ素濃度は変わる。

元々の燃料に含まれていた最高濃縮度を仮定すれば、必要ホウ素濃度は非常に高くなるが、現実的な最高濃縮度や残留Gdを考慮すれば6,000ppm程度、平均的な濃縮度では4,000ppm程度となる。また、FPや構造材の存在を仮定すれば、それ以上に低くなる。

(参考) 構造材、収納缶等への腐食影響  
4,000ppm～12,000ppmでは腐食影響がないことを確認済。

デブリ中のウラン濃縮度 (wt%)	組成根拠	必要ホウ素濃度(ppm)	
		残留Gd無	残留Gd有
5.0	燃料棒最高濃縮度 4.9wt%	21,500	
4.0	燃料集合体平均濃縮度(未燃焼)	11,800	
3.5	炉停止時の1年目燃料最低燃焼組成 (1F2/3)	10,100	5,150 (Gd濃度 0.011wt%)
3.1	炉停止時の1年目燃料最低燃焼組成 (1F1)	8,500	6,400 (Gd濃度 0.004wt%)
2.8	炉停止時の4燃料集合体平均最低燃焼組成	6,900	
1.9	炉停止時の炉心平均組成	3,900	

ほう酸水中の球状燃料デブリの体系で評価

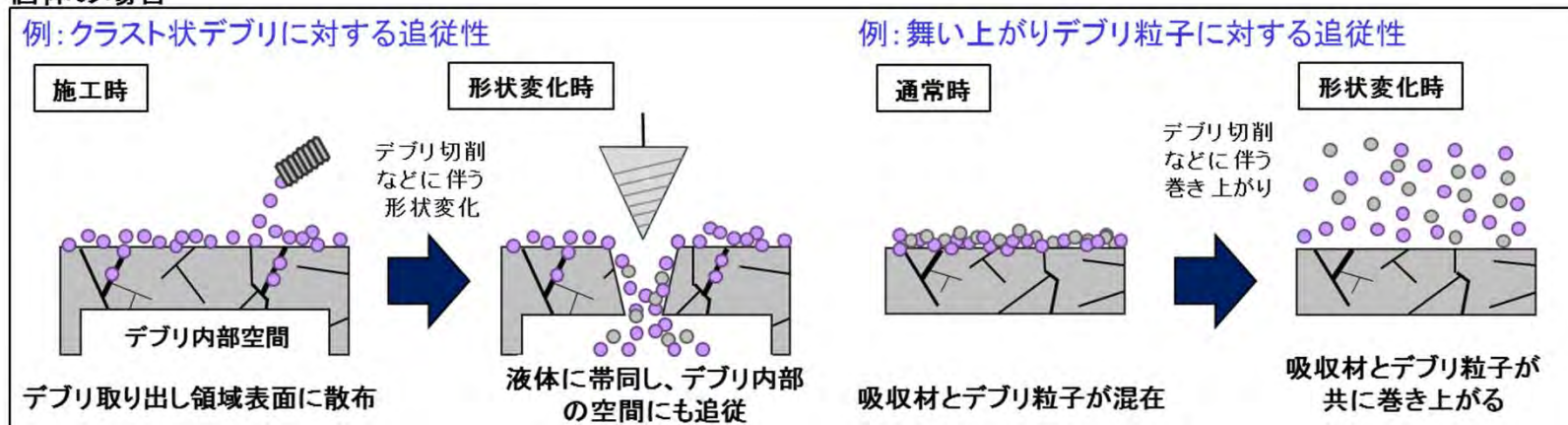
## (2) 臨界防止技術 (b.② 非溶解性中性子吸収材)

### 【方法】

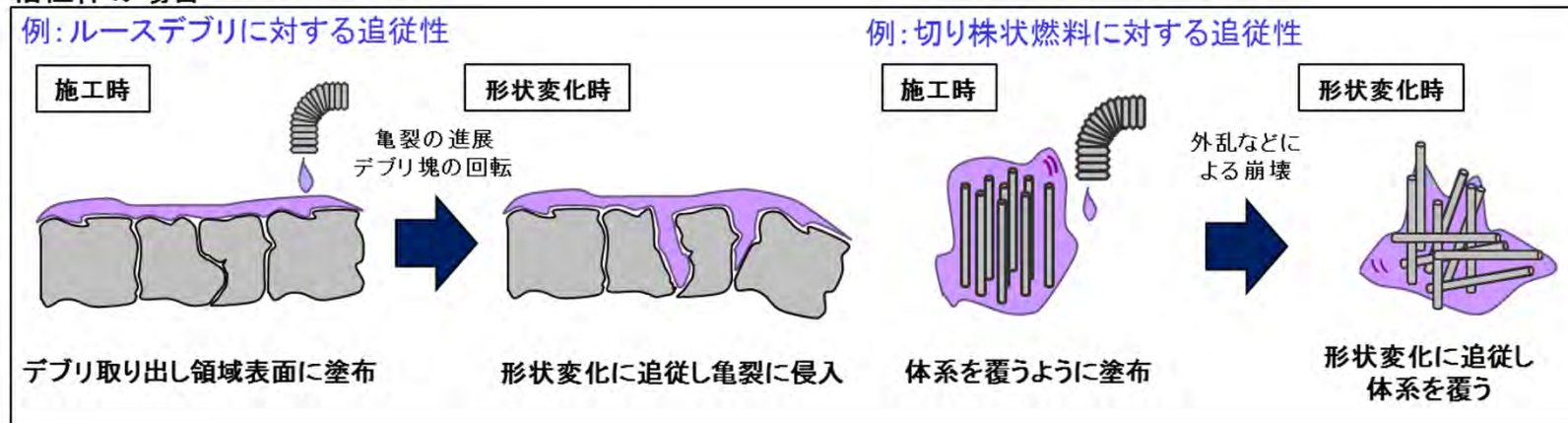
水に溶けない非溶解性の中性子吸収材を、デブリ加工領域の近傍に局所的に直接散布して燃料デブリと混合させ、臨界リスクを低減する。

### ■ 適用のイメージ

個体の場合



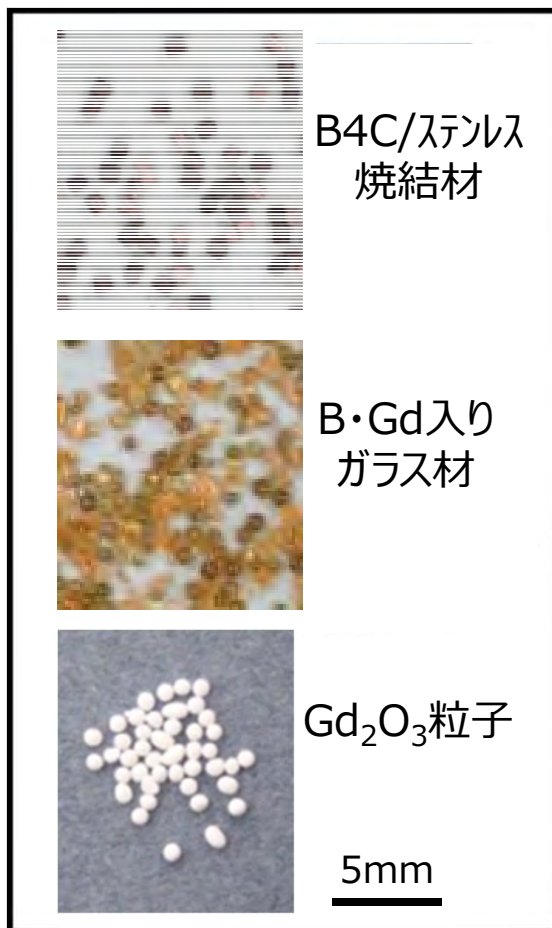
粘性体の場合



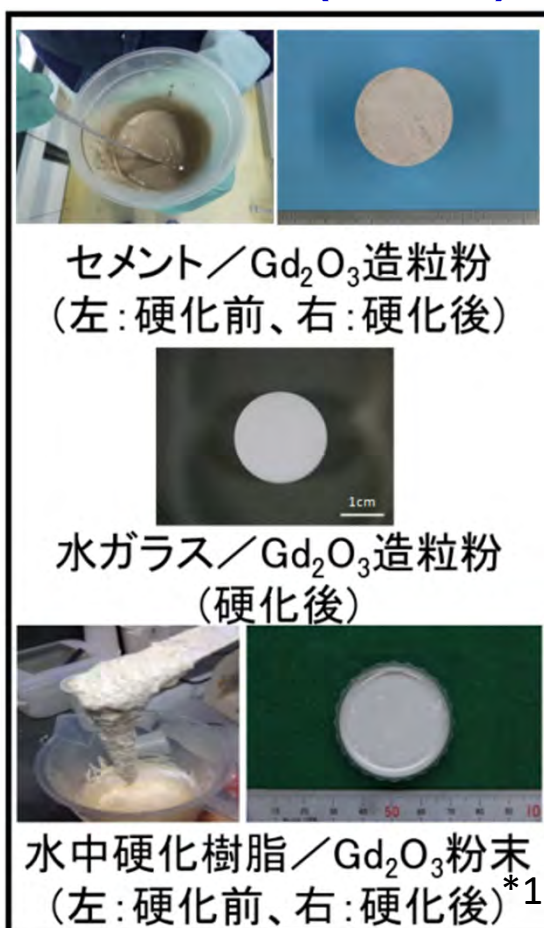
## (2) 臨界防止技術 (b.② 非溶解性中性子吸収材)

### ■ 候補材

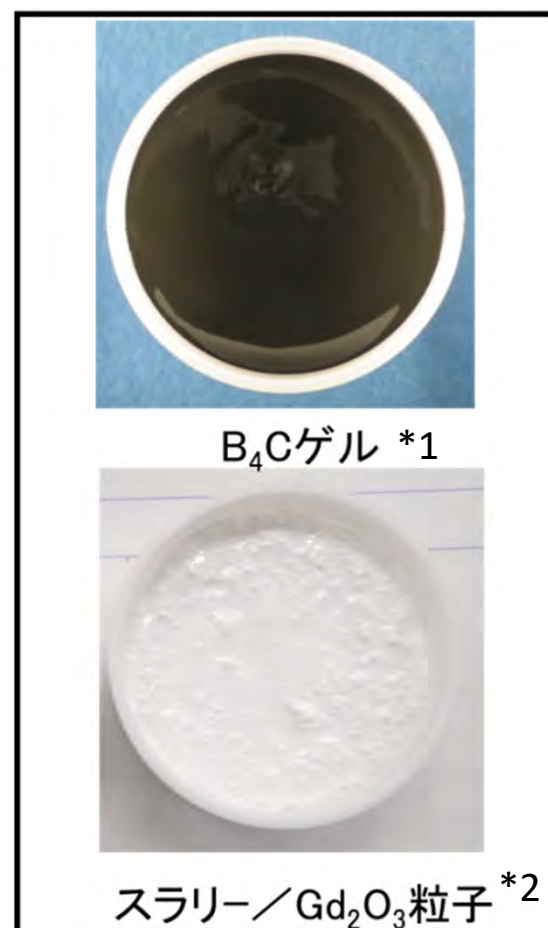
#### 固体



#### 液体→固体(固化体)



#### 粘性体



\*1照射により溶出した浸漬液が酸性となるため開発中止

\*2照射により固化して粘性体としての機能喪失したため開発中止

## (2) 臨界防止技術 (b.② 非溶解性中性子吸収材)

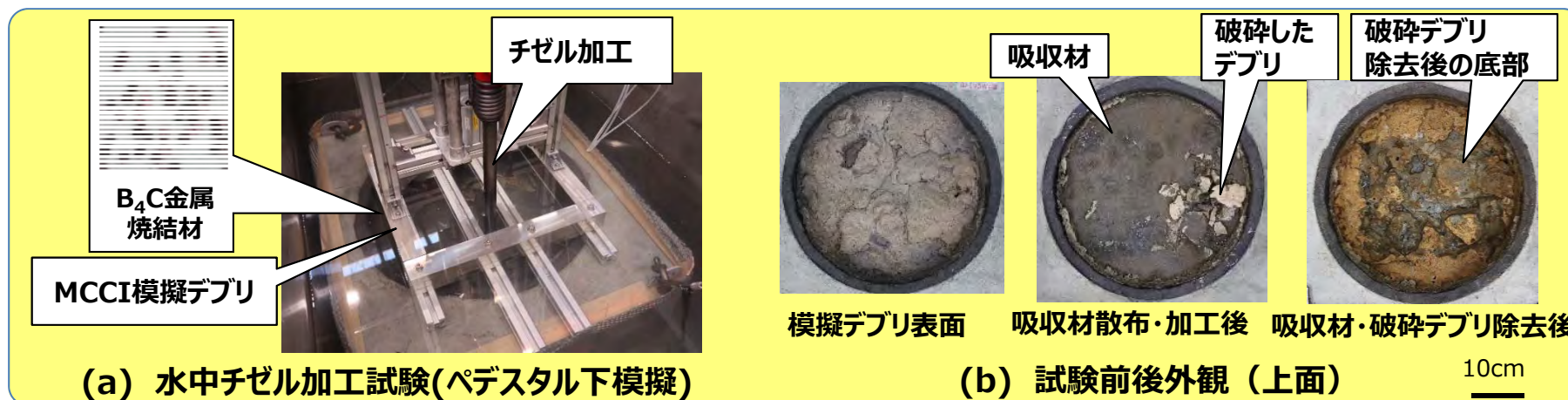
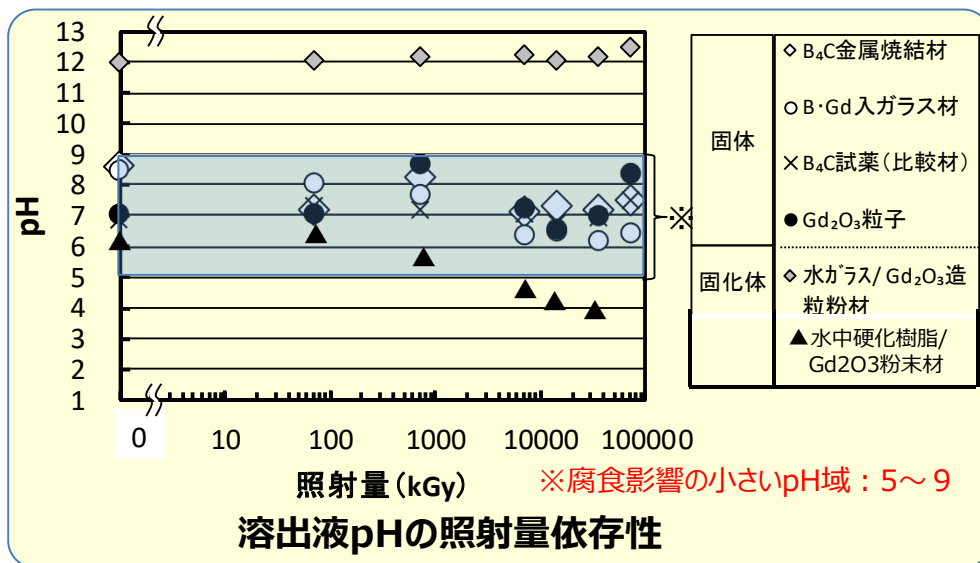
### ■ 候補材の選定

基礎物性

付着性・混合性

水質/構造材料/収納缶への影響

施工性 ...

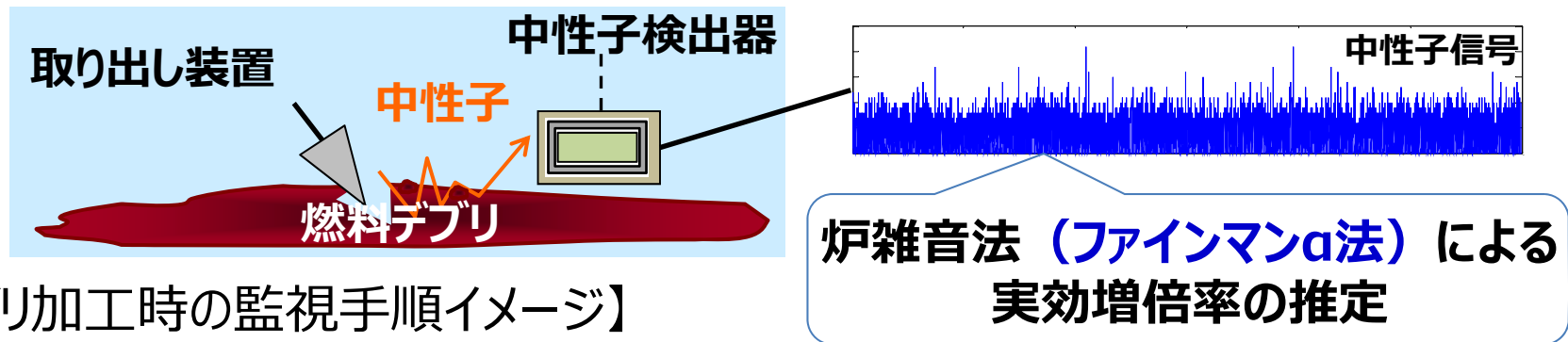


# 4. 燃料デブリ取り出し時の臨界管理技術

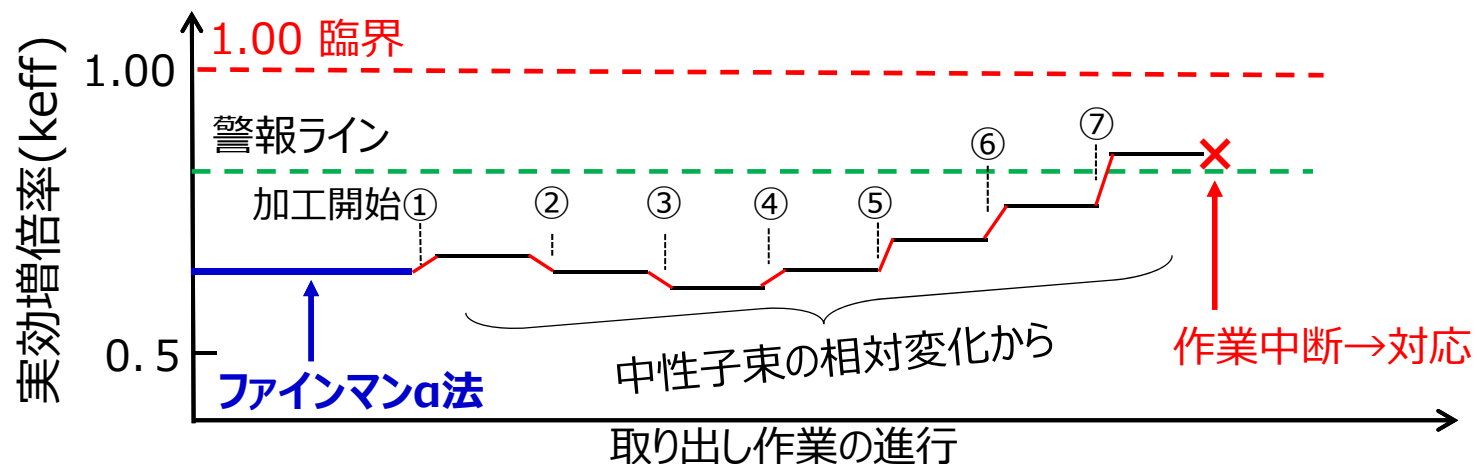
## (3) 臨界近接監視技術

【方法】

燃料デブリ取り出し位置近傍に中性子検出器を設置し、中性子信号の分析から未臨界度（実効増倍率）を推定して、臨界に近接する兆候があれば、作業の中断を促し、臨界を未然に防止する。

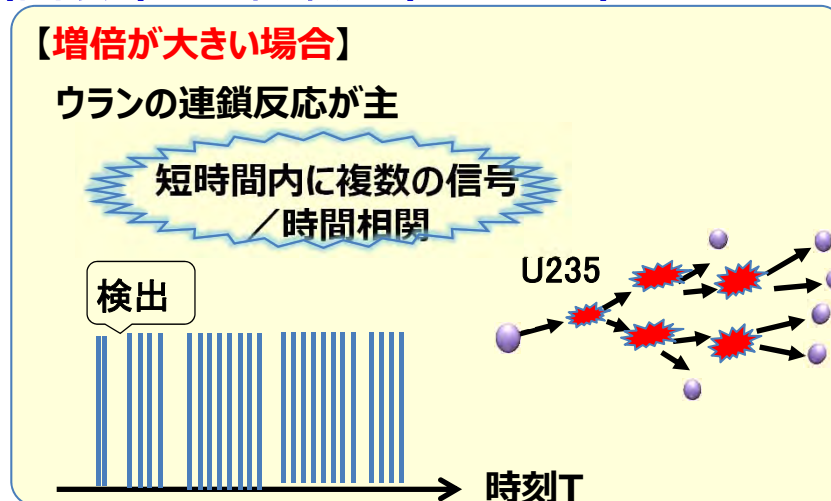
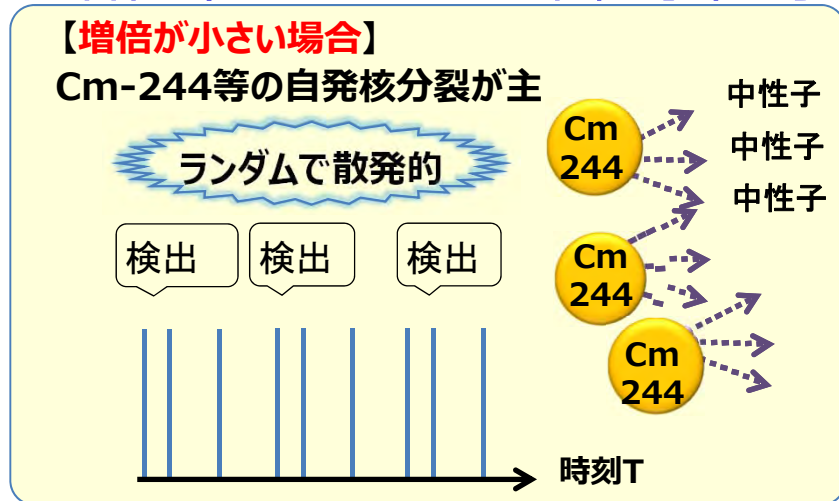


【デブリ加工時の監視手順イメージ】

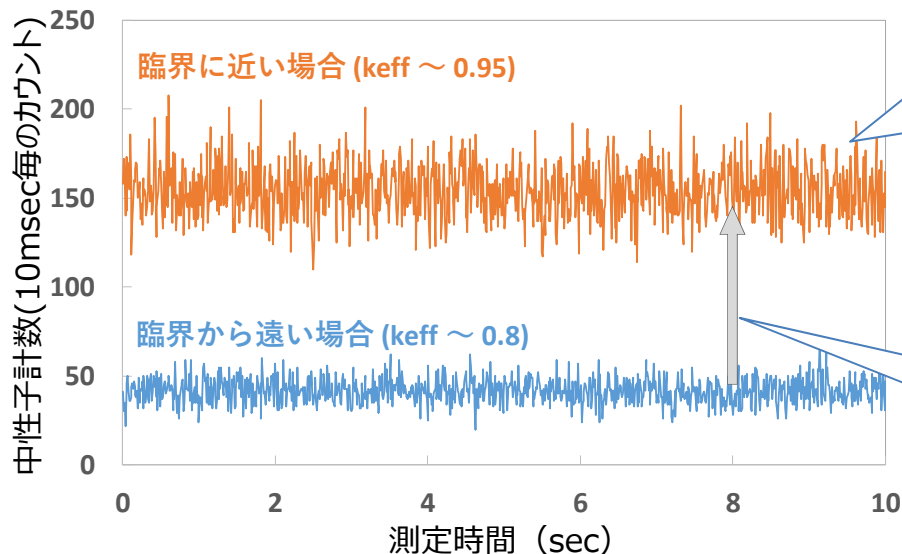


# (3) 臨界近接監視技術 (ファインマンα法の原理)

## ■ 増倍率の違いによる中性子信号 (計数) の特徴 (イメージ)



## ■ 中性子計数の時刻列分析から未臨界度 (実効増倍率) を評価



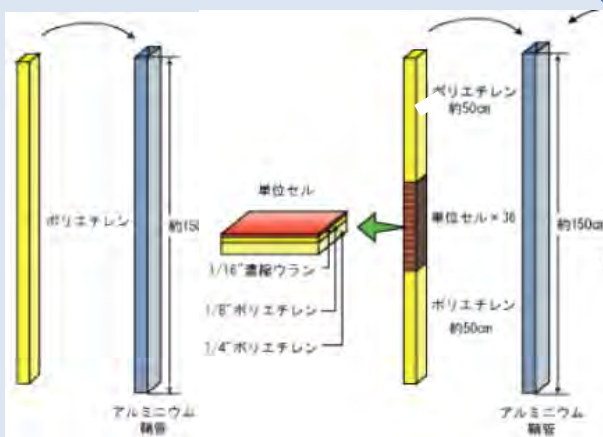
### <ファインマンα法>

計数のゆらぎ方の違いを分析し増倍率を導出  
 (種々の時間間隔での計数を算出し、  
 その平均と分散の関係から導く)

### <中性子源増倍法>

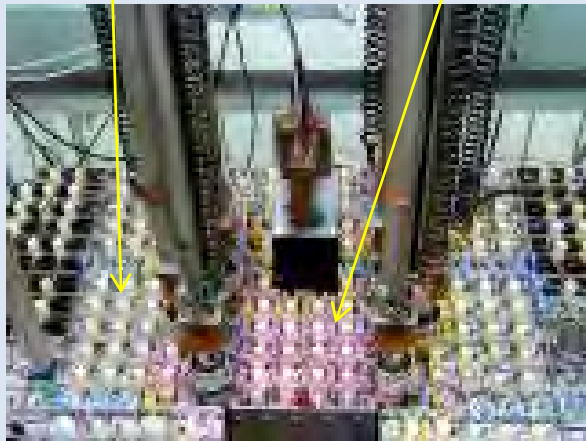
計数の相対的な大きさの関係から増倍率を導出。

# (3) 臨界近接監視技術(京都大学KUCA\*でのフィンマンα法の実証試験)



ポリエチレン  
反射体

燃料体



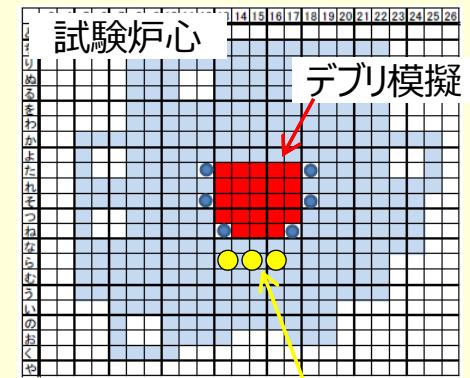
KUCA炉心

■ 京都大学KUCAホームページより引用

## 【主な試験パラメータ】

### 種々のデブリ状態を模擬

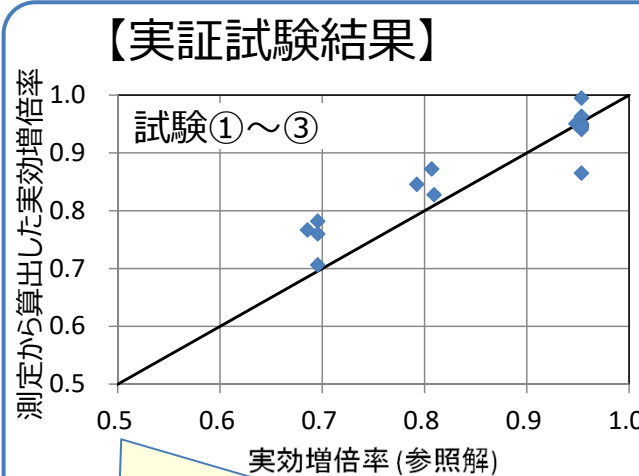
- ① 実効増倍率 : 0.7~0.95
- ② 水対ウラン比 : 50~300
- ③ 燃料-検出器距離: 最大60cm
- ④ デブリ広がり模擬 (固有値間隔)  
:  $1 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^{-2}$



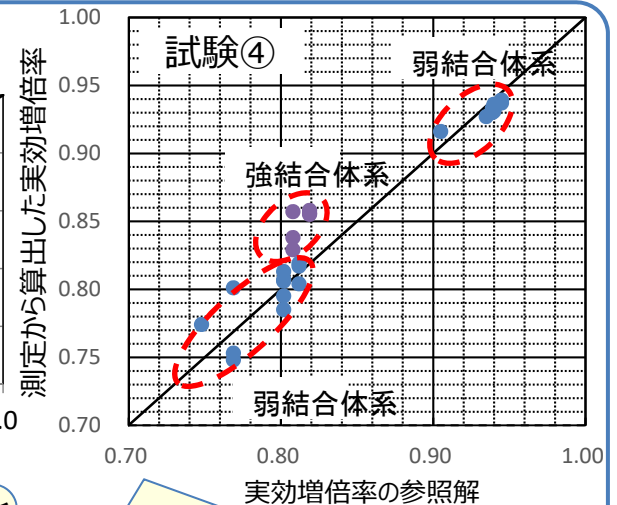
B-10  
中性子検出器



## 【実証試験結果】



- ✓ 種々の状態に対し未臨界度の推定が可能
- ✓ 未臨界度が大きいケース、検出器が離れているケースで誤差が大きい



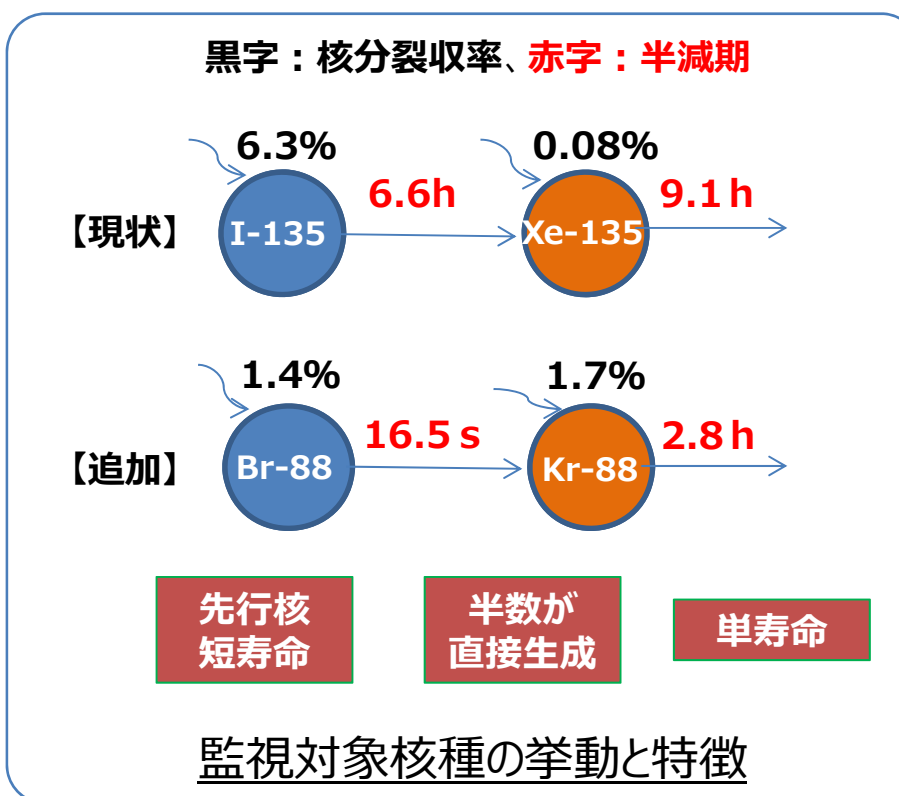
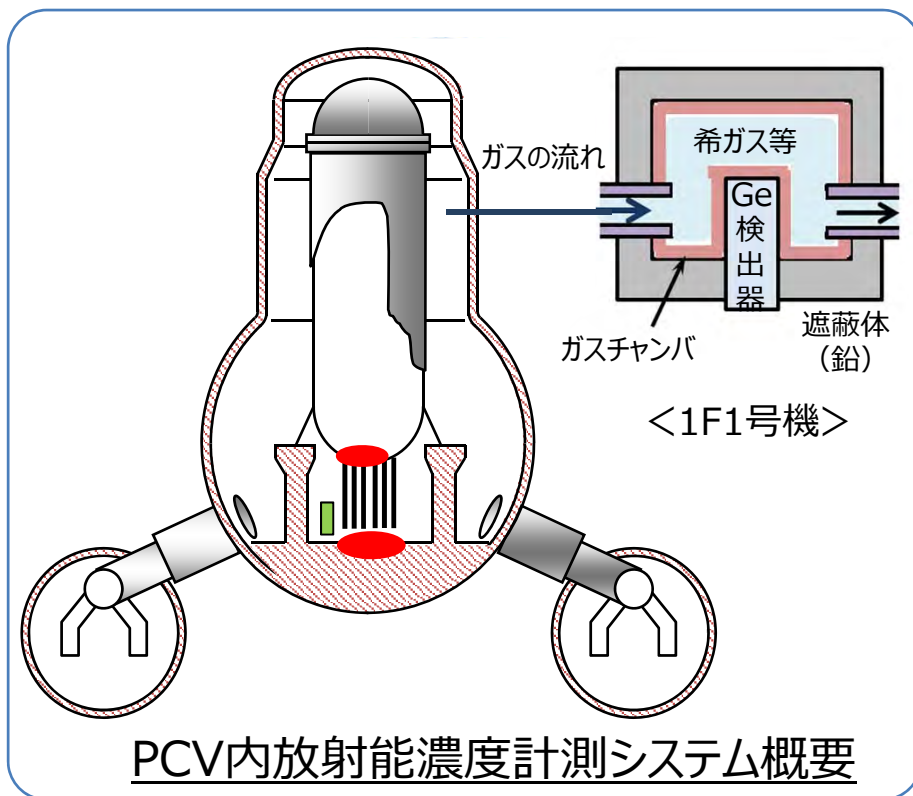
- ✓ 広がりのあるデブリに対して、取り出し作業領域の未臨界度評価が可能

# 4. 燃料デブリ取り出し時の臨界管理技術

## (4) 臨界検知技術 (ガスサンプリング系の高度化)

【方法】

現状、未臨界状態の確認は、PCV内のXe-135の濃度測定により行っている。これに対し、再臨界時に、Xeに比べ早い応答のKr-87、Kr-88を測定できるようにし、万一の臨界をより早期に検知し、影響緩和策の早期稼働を促す。

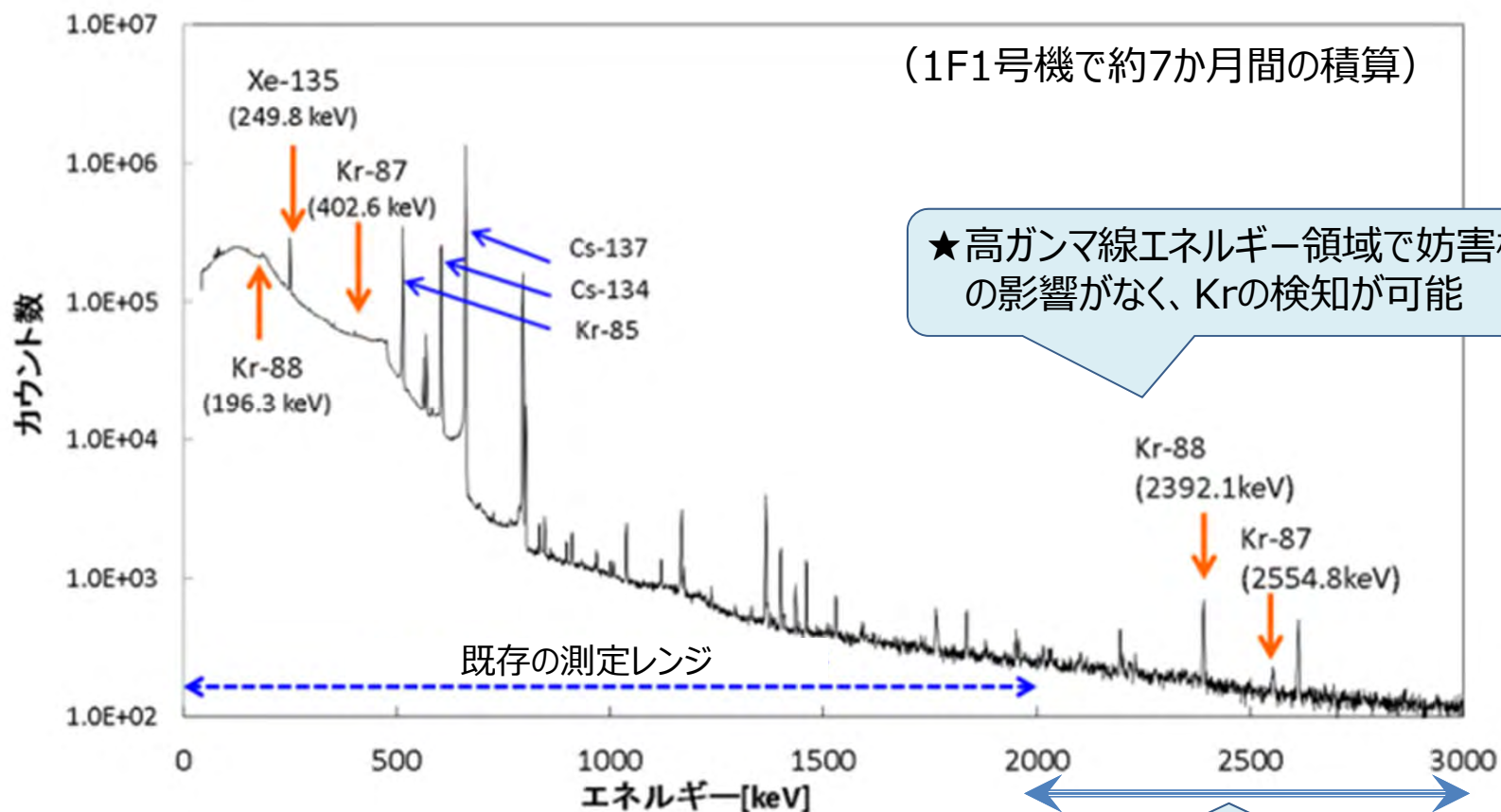




## (4) 臨界検知技術 (ガスサンプリング系の高度化)

### ■ Kr測定の可能性確認

現在は、希ガスの発生は非常に小さいが、Ge検出器を設置している1号機にて、長期間に渡ってγ線データを測定し、Kr測定の可能性を検証した。

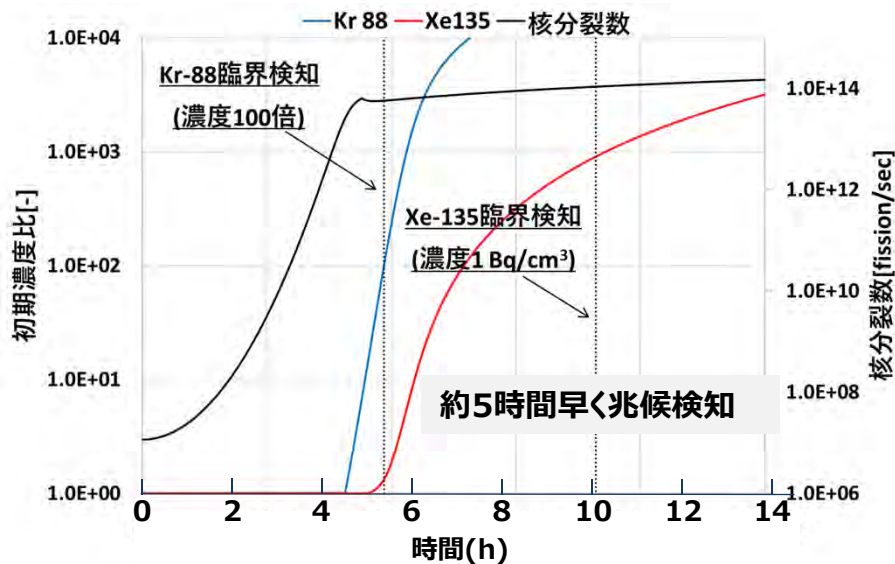


PCV内の放射性核種のガンマ線エネルギースペクトル

# (4) 臨界検知技術 (ガスサンプリング系の高度化)

## ■ Krの臨界事象検知への適用性

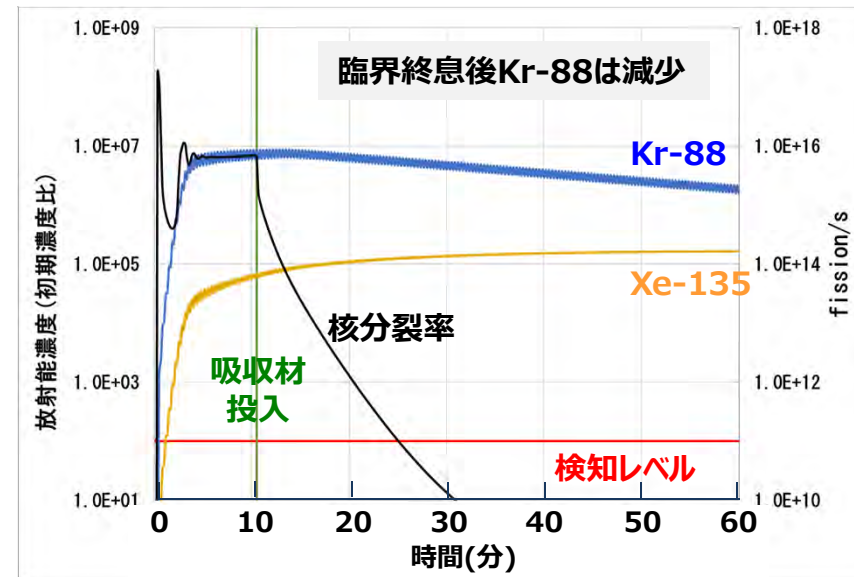
- 中性子検出器での検知が難しい細粉蓄積 (微小臨界) に対する検知性(図(a))
- Kr-88の減衰特性を利用した臨界終息判定への適用性(図(b))



(a) 細粉蓄積時の検知性

<前提条件>

- ・添加反応度:  $5.0E-03$ ドル/h  
(想定: 加工量: 30kg/day)
- ・排気流量:  $21.8m^3/h$



(b) 臨界終息時のKr-88放射能濃度変化

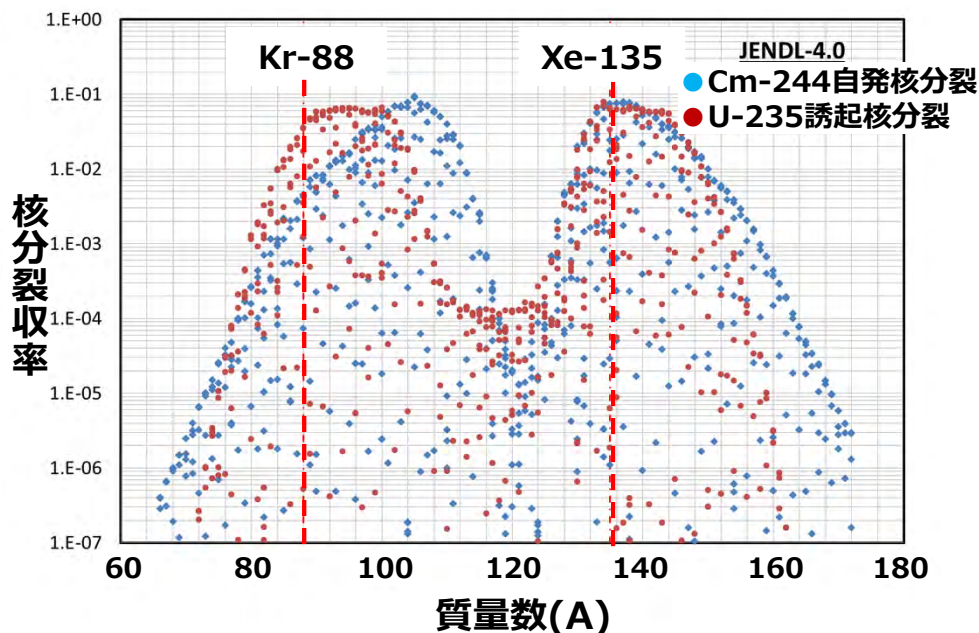
<前提条件>

- ・添加反応度:  $0.71\% \Delta k/k$   
(想定: 約5トンのデブリの臨界)
- ・排気流量:  $3,000m^3/h$

# (4) 臨界検知技術 (ガスサンプリング系の高度化)

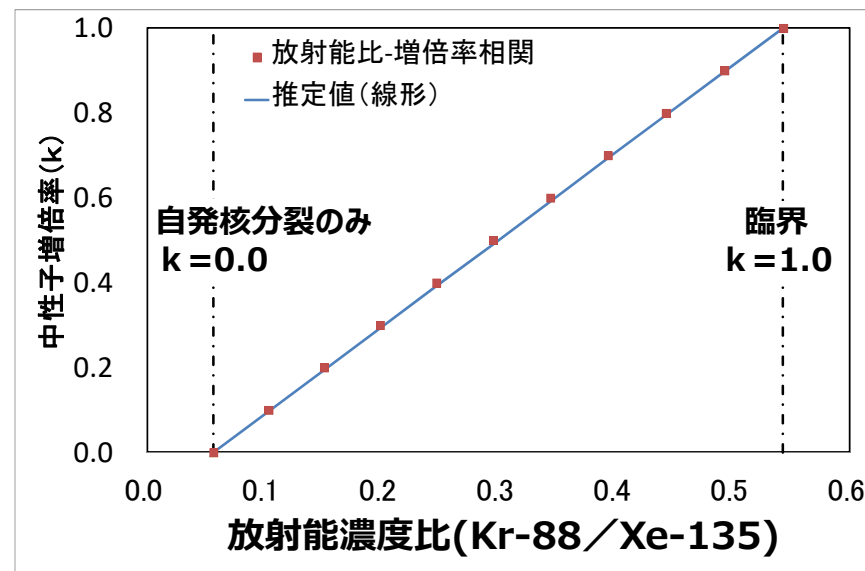
## ■ Kr、Xeの放射能濃度比による未臨界度推定技術

- 自発核分裂(Cm-244等)と誘起核分裂(U-235等)による核分裂生成物(FP)の収率差を利用した未臨界度推定法 (図(a))
- 測定されるKr-88とXe-135の放射能濃度比より、FPガス発生から検知までの時間補正を行って未臨界度 (増倍率) を推定(図(b))



(a) 自発核分裂と誘起核分裂の収率の相違

A ~ 90では相違大、A ~ 135では相違小



(b) Kr-88/Xe-135放射能濃度比と増倍率の関係

1F1号機の増倍率推定結果  
k = 0.5~0.7

## (5) 段階的な燃料デブリ取り出し規模拡大への対応

燃料デブリの取り出しは、少量の採取から段階的に取り出し規模を拡大する計画であり、取り出し量や取り出し工法に応じて適切な臨界管理方法を適用する。

取り出し作業		内部調査	燃料デブリ取り出し			
			段階的に規模を拡大する取り出し			本格取り出し
取り出し量		微量(数g)	少量(数kg)	少量(数kg～数10kg)	本格(～数100kg/日)	
取り出し方法		把持・吸引等	把持・吸引等	コアボーリング等	コアボーリング等	
①臨界防止 ②臨界近接監視	作業制限	デブリに変化を与えない方法	デブリに変化を与えない方法	・1回あたりの加工量制限 ・取り出し位置間隔の制限	・1回あたりの加工量制限	・1回あたりの加工量制限(拡大)
	臨界近接監視	—	—	中性子束監視	中性子束監視	中性子束監視
	非溶解性中性子吸収材	—	—	—	—	未臨界度測定
	溶解性中性子吸収材	—	—	—	—	非溶解性中性子吸収材
③臨界検知 ④影響緩和	臨界検知	PCVガス放射線モニタ	PCVガス放射線モニタ	PCVガス放射線モニタ 中性子束モニタ	PCVガス放射線モニタ 中性子束モニタ	PCVガス放射線モニタ 中性子束モニタ
	臨界終息	五ホウ酸ナトリウム水注入	五ホウ酸ナトリウム水注入	五ホウ酸ナトリウム水注入	五ホウ酸ナトリウム水注入	五ホウ酸ナトリウム水注入

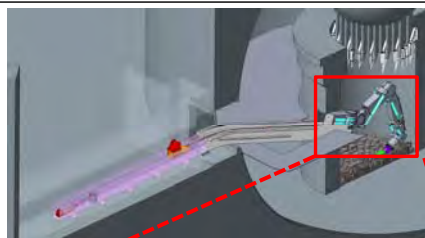
選択

## (5) 段階的な燃料デブリ取り出し規模拡大への対応

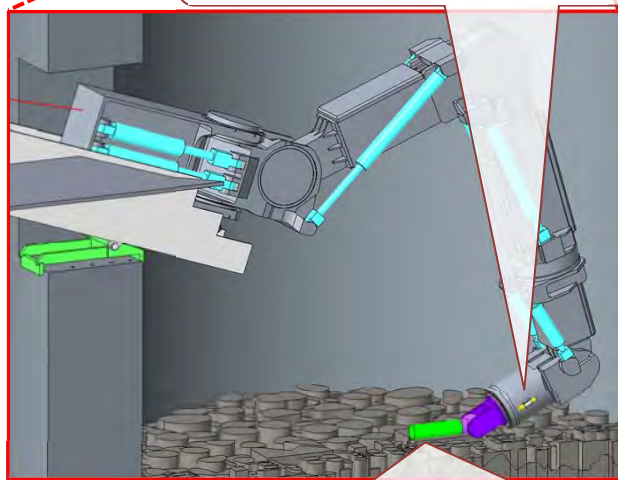
中性子検出器による臨界近接監視例を示す。3手順を考えている。

- ① 取り出し作業前の状態把握（未臨界状態の確認）
- ② デブリ加工前後の監視（未臨界状態の変化の確認）
- ③ デブリ加工中の連続監視（加工中の異常な変化の確認）

<横取り出し工法>

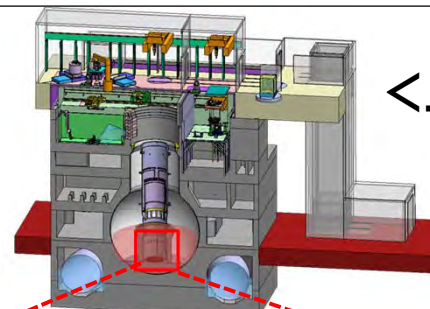


②、③：加工ツールに並置した  
デブリ加工前後の臨界近接監視、  
加工中の連続監視用検出器

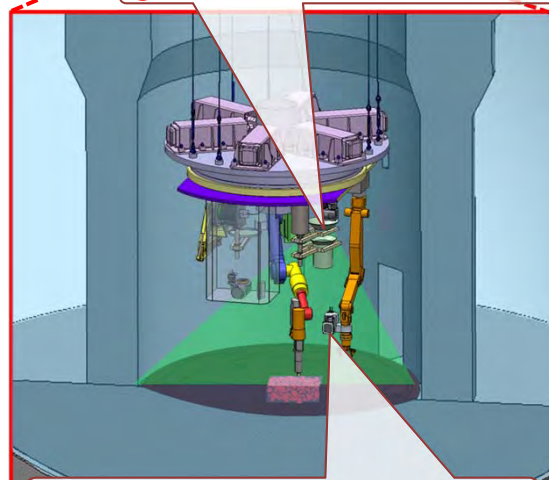


①：アームに搭載した未臨界度測定用検出器

<上取り出し工法>



③：中性子連続監視用検出器



②：加工ツールに並置したデブリ加工  
前後の臨界近接監視用検出器

# 内 容

1. はじめに
  - (1)背景
  - (2)臨界の基礎知識
2. 燃料デブリ分布の推定と臨界リスク評価例
  - (1)燃料デブリ分布・性状の推定
  - (2)臨界リスク評価例
3. 燃料デブリ取り出し時の臨界シナリオ
  - (1)燃料デブリ取り出し工法と臨界シナリオ
  - (2)燃料デブリ加工方法と臨界シナリオ
  - (3)臨界シナリオと臨界リスクまとめ
4. 燃料デブリ取り出し時の臨界管理技術
  - (1)安全要求と機能要求
  - (2)臨界防止技術
  - (3)臨界近接監視技術
  - (4)臨界検知技術
  - (5)段階的な燃料デブリ取り出し規模拡大への対応
5. 燃料デブリ取り出し時の臨界挙動評価例
6. まとめ

# 5. 燃料デブリ取り出し時の臨界挙動評価例

## 【想定した臨界シナリオ】

A. 圧力容器下部に堆積する1.3トン（保守的）のデブリの臨界事象

- ① 亀裂が入る（0.1%ΔK 瞬時投入）
- ② 砕いたデブリの崩落（1.0 %ΔK 瞬時投入）
- ③ 穴あけ加工（0.0005%ΔK / 1分で100分間）

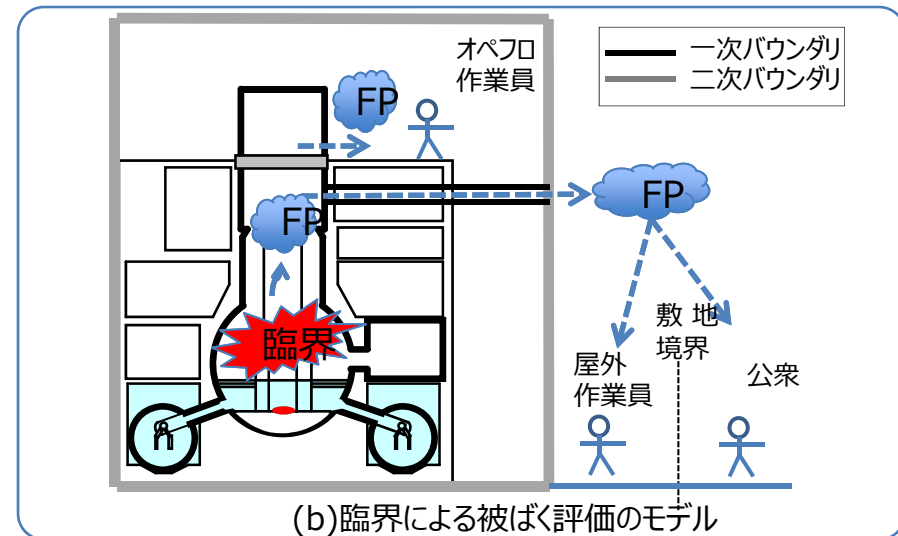
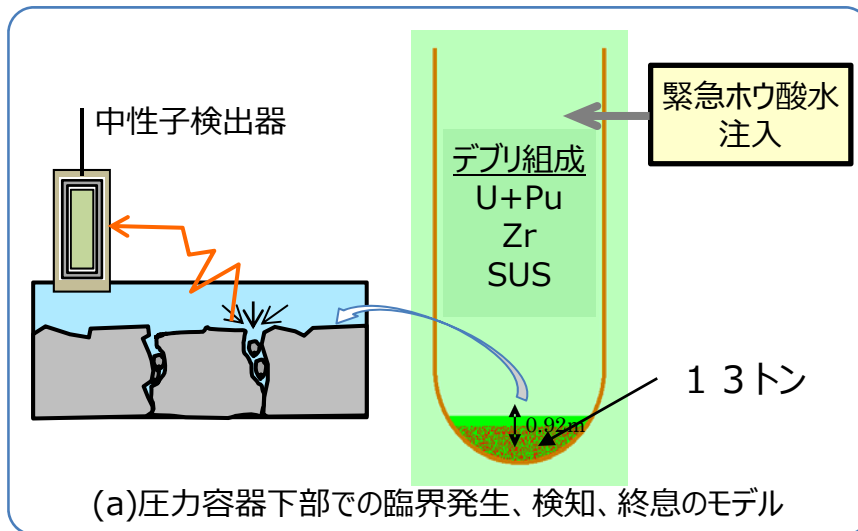
B. ④ CRDハウジング1体に付着する約500kgのデブリの落下・細粒化

## 【臨界解析条件】

- 臨界検知：中性子が初期値の1,000倍で臨界検知
- ホウ酸水注入遅れ：10分

## 【被ばく評価条件】

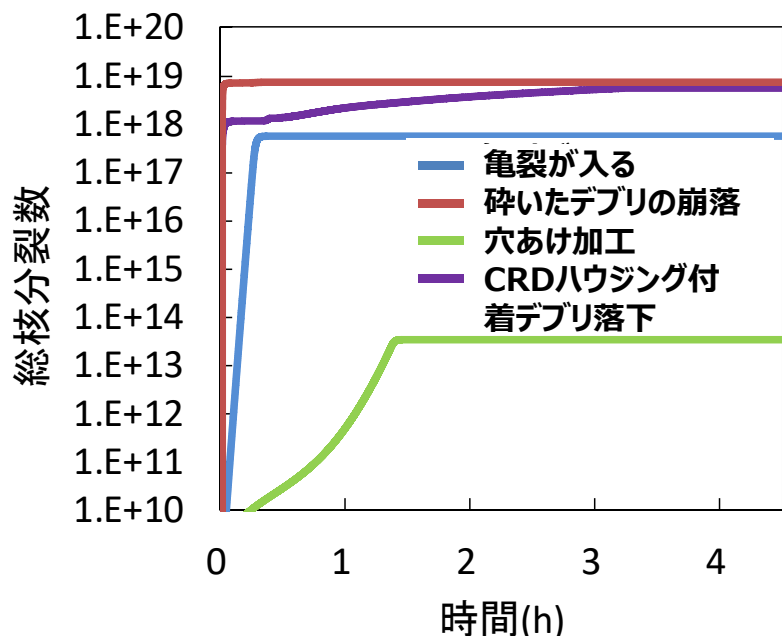
- PCVで生じた希ガスがそのまま建屋外へ排出
- PCVガス管理システムの排気量：3,000m<sup>3</sup>/h
- セルからオペフロへの漏洩率：1%



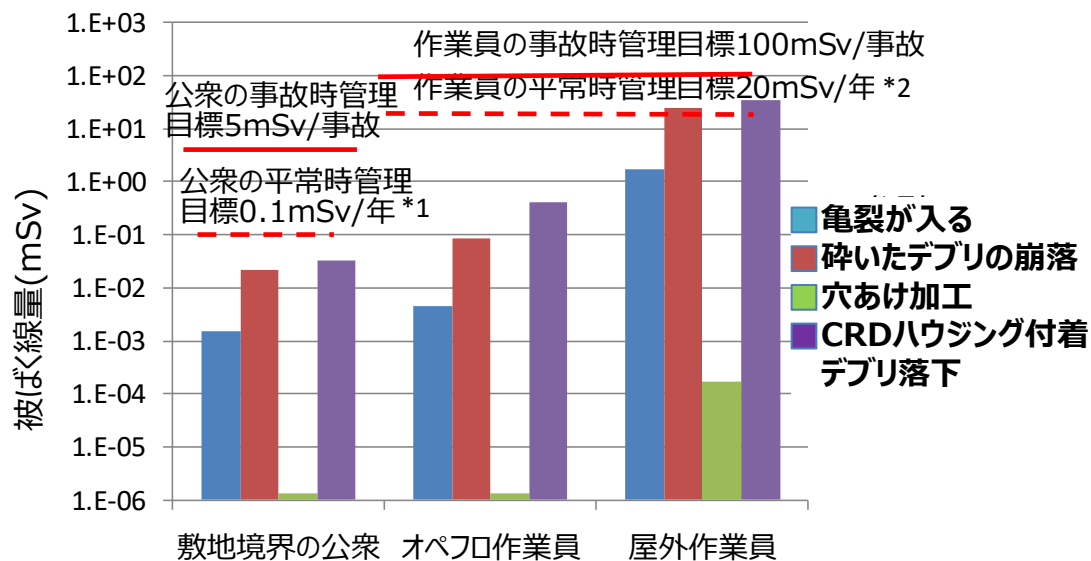
# 5. 燃料デブリ取り出し時の臨界挙動評価例

## 【評価結果】

保守的な臨界シナリオ事象に対しても、開発している臨界検知と収束手段（ホウ酸水注入）を用いれば、被ばく影響が管理目標を満足するよう対応が可能な見通しが得られた。



総核分裂数の時間推移



被ばく線量

\*1: 1mSv/年の10%  
\*2: 5年で100mSv



# 内 容

1. はじめに
  - (1)背景
  - (2)臨界の基礎知識
2. 燃料デブリ分布の推定と臨界リスク評価例
  - (1)燃料デブリ分布・性状の推定
  - (2)臨界リスク評価例
3. 燃料デブリ取り出し時の臨界シナリオ
  - (1)燃料デブリ取り出し工法と臨界シナリオ
  - (2)燃料デブリ加工方法と臨界シナリオ
  - (3)臨界シナリオと臨界リスクまとめ
4. 燃料デブリ取り出し時の臨界管理技術
  - (1)安全要求と機能要求
  - (2)臨界防止技術
  - (3)臨界近接監視技術
  - (4)臨界検知技術
  - (5)段階的な燃料デブリ取り出し規模拡大への対応
5. 燃料デブリ取り出し時の臨界挙動評価例
6. まとめ

## 6. まとめ

- 臨界になるためには、一定量の核分裂性物質が水と最適な割合で混合し、かつ、中性子吸収物質がほとんど含まれていない等の条件が揃う必要がある。臨界評価によれば、そのような条件が揃うケースは非常に限定的であり、稀と考えられる。
- 一方、燃料デブリの分布や性状・組成の情報は、現状十分得られていないこと、また、燃料デブリ取り出しに伴って生じる種々の状態変化の可能性を考えると、条件が揃って、臨界または臨界近接する可能性を完全には排除できない。
- このため、着実に臨界を防止し、また、万が一臨界が発生しても影響を緩和できるように、臨界管理技術を準備することが重要である。
- なお、現在、東京電力HD(株)は、格納容器内の放射能濃度(Xe-135)の監視により未臨界状態であることを確認している。また、異常が確認された場合には、ホウ酸水注入の準備を整えている。
- 本日説明した臨界管理技術は、臨界安全を確保しつつ、効率よく燃料デブリ取り出しを行うことを目的としている。今後、新たに得られるPCV内、RPV内の情報や燃料デブリ取り出し工法を踏まえて、見直しされ高度化される必要がある。

以上