

現実的な臨界リスクの評価手法の検討

IRID（日立GEニュークリア・エナジー） 森本 裕一

2018年 1月 10日

東京工業大学 廃止措置技術・人材育成フォーラム

IRID：国際廃炉研究開発機構

- 背景と目的
- IRID「燃料デブリ臨界管理技術の開発」の概要
- ガス放射線モニタの観測値を用いた
未臨界度評価
- 統計的な臨界評価の手法
- 未臨界度の評価結果に基づく現状推定の例
- まとめ

背景と目的

◆ 背景

■ 保守的評価: 保守的な設定に基づく臨界評価

✓ 長所: 許認可の説明性は高い

✓ 短所: 過度の保守性により設備負担が大きくなる懸念あり

◆ 目的

現実的な臨界リスクを評価するための手法を開発

■ 未臨界度評価: 観測値を基として現在の状態を把握

■ 統計的評価: 物理パラメタの確からしさを反映した評価

✓ 長所: 過度の保守性を回避し知見に基づくリスク評価が可能、
設備負担の軽減検討に資する

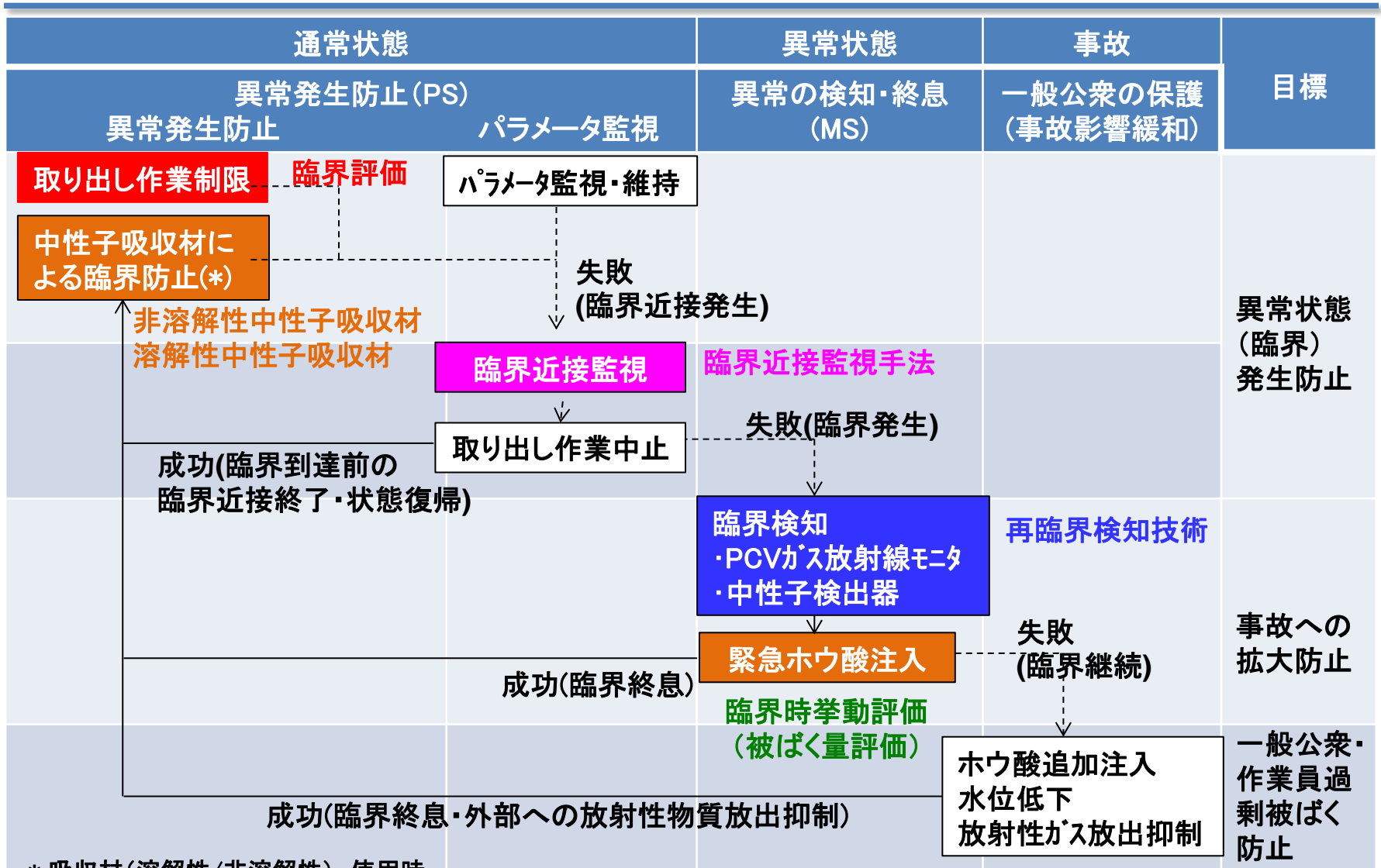
✓ 短所: パラメタの確からしさに対する精度が要求される

⇒ step by stepに知見を反映し評価結果を改善

「燃料デブリ臨界管理技術の開発」概要

臨界評価 技術	リスク要因を 把握する	臨界シナリオ・ リスク評価	臨界管理を適用 する場所・対象を 選定する	技術開発の 前提条件
	作業条件を 提示する	臨界評価	臨界防止の為に 必要な作業条件	取り出し方法 作業制約
	被ばく量を 評価する	臨界時 挙動評価	万一の臨界時の 一般公衆・作業員 の被ばく量	臨界終息手段 の有効性確認
臨界管理 技術	作業中の状態を 監視する	臨界近接 検知技術	臨界への接近が ないことを確認し ながら取り出す	臨界近接検知 システム
	臨界を 検知する	再臨界 検知技術	早期に検知し未臨 界維持のための 対応を促す	PCVガス放射 線モニタ
	未臨界を 維持する	中性子吸収材 (非溶解性、 溶解性)	吸収材の投入に より未臨界を維持 する	取り出し装置・ 液体システム

深層防護を踏まえた臨界管理方法



* 吸収材(溶解性/非溶解性) 使用時

ガス放射線モニタを用いた未臨界度評価

• 背景

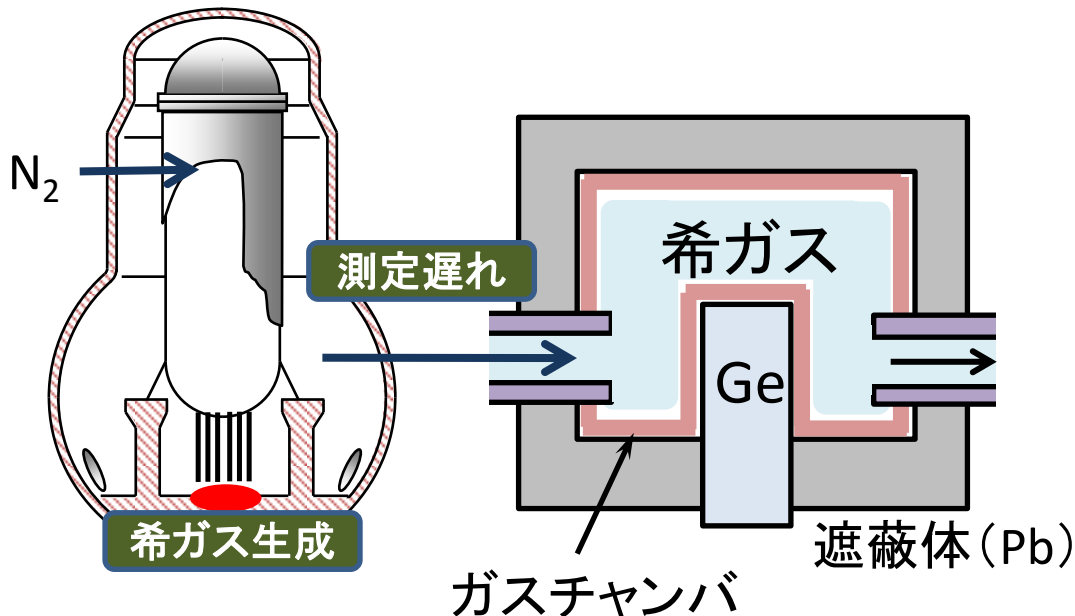
- ✓ 現在、福島第一原子力発電所は炉内の情報が得にくい状況にあり、PCVガス放射線モニタで測定されるガンマ線強度から算出可能な様々な核種の放射能濃度は炉内状態を知る貴重な情報
- ✓ H27年末に、Kr-87, Kr-88の放射能濃度を確認するため6ヶ月間のデータ収集を実施
- ✓ H28年末からエネルギー範囲を3MeVに広げデータ収集

• 目的

収集したPCVガス管理システムの核種放射能濃度を用いて放射能濃度の測定遅れ時間と未臨界の中性子増倍率（以下、中性子源増倍係数と呼ぶ）を推定

1号機のPCVガス放射線モニタ

- 1号機のPCVガス放射線モニタでは、環境への放出量を監視するため核種の放射能濃度をGe検出器で連続測定
 - 現状では、Xe-135(主にピーク250keV)を測定し、再臨界検知に利用
 - 将来は、Xe-135同様、Kr-87、Kr-88を短時間で測定できるよう改良予定



核種	エネルギー (keV)	相対強度
Xe-135	250	-
Kr-87	403	49.6
	2555	9.2
Kr-88	196	26.0
	2392	34.6

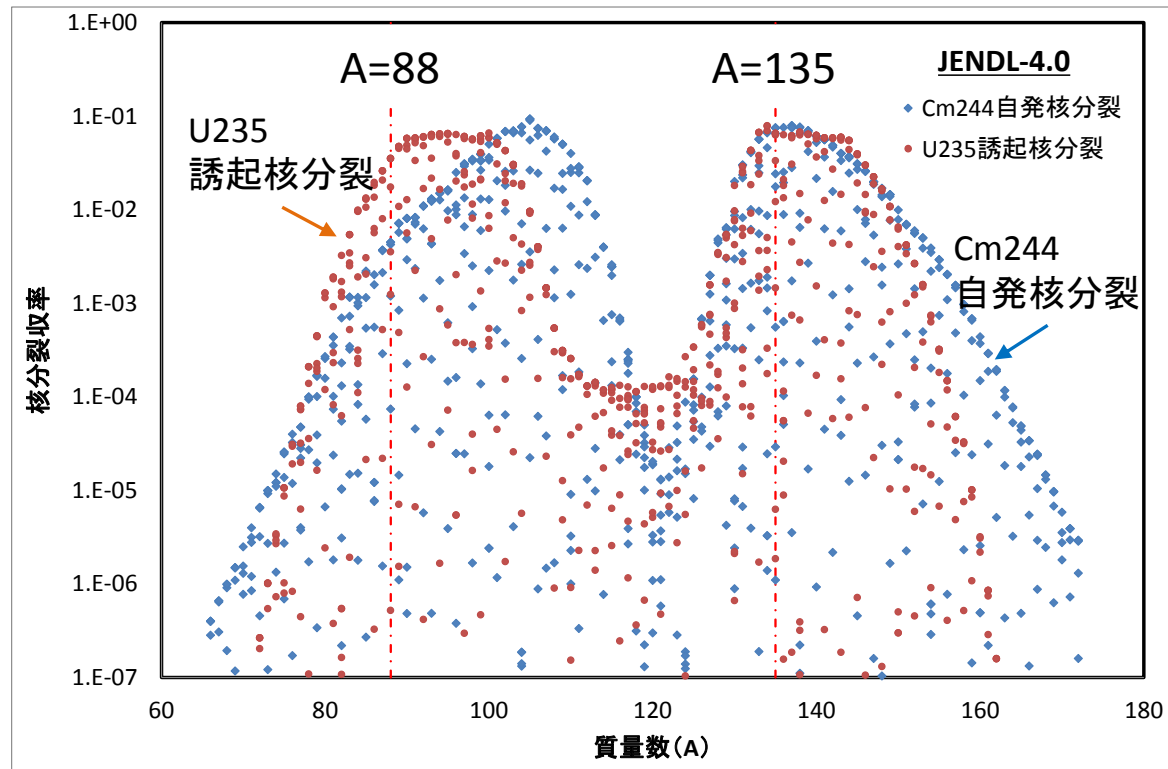
1号機PCVガス管理システム

測定対象ガンマ線

中性子源増倍係数の推定方法(1):原理

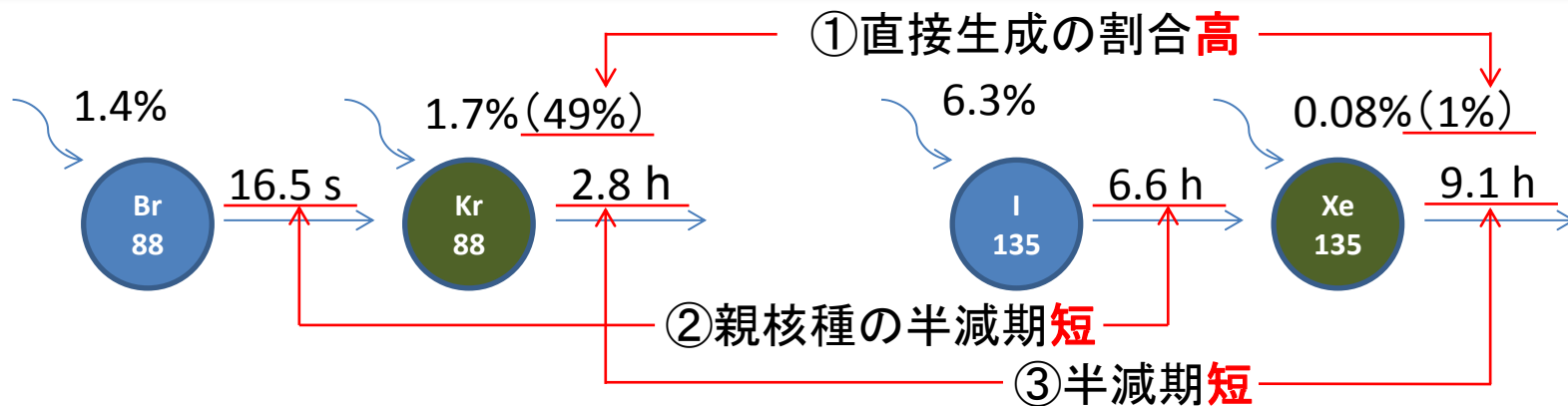
7

- 質量数88近傍の核種は自発核分裂と誘起核分裂の収率差大
 - 質量数135近傍の核種は自発核分裂と誘起核分裂の収率差小
- 上記核種の放射能比から中性子源増倍係数を推定できる^[1]



[1]中村正則他「核分裂生成ガスを測定して未臨界を監視する方法(Ⅱ)」2014年春の年会 O28(2014)

Kr-88測定による検知時間の短縮



- ① Kr-88は約50%が直接核分裂で生成されるが、Xe-135は直接生成されるのは約1%で残りは崩壊で生成される
- ② Kr-88の親核種の半減期は約17 sであるのに対し、Xe-135の親核種の半減期は6.6 hと長い
- ③ Kr-88の半減期は2.8 hに対し、Xe-135は9.1hと長い



体系の変化に対してKr-88は、Xe-135に比べ早く応答する
 →Kr-88により、短時間で臨界近接検知、臨界検知が可能

中性子源増倍係数の推定方法(2):基礎式

- Kr-88とXe-135の核分裂収率特性を用いた定常状態の中性子源増倍係数(k)の推定式

$$S = S_0 + k \cdot S_0 + k^2 \cdot S_0 + \Lambda = S_0 + \underbrace{\frac{k}{1-k}}_{\text{自発(sp) 誘起核分裂(in)}} \cdot S_0$$

$$R(k) \equiv \left[\frac{\lambda_{Kr} \cdot Kr}{\lambda_{Xe} \cdot Xe} \right]_{in-reactor} = \frac{\theta_{sp} \cdot \frac{\gamma_{sp,Kr}}{\nu_{sp}} + \theta_{in} \cdot \frac{\gamma_{in,Kr}}{\nu_{in}} \cdot \frac{k}{1-k}}{\theta_{sp} \cdot \frac{\gamma_{sp,Xe}}{\nu_{sp}} + \theta_{in} \cdot \frac{\gamma_{in,Xe}}{\nu_{in}} \cdot \frac{k}{1-k}}$$

ここで、 θ :ガス放出率、 γ :核分裂収率、 ν :発生中性子数

- ここでは、ガス放出率や組成に不確定さがあるため、最確値ではなく、中性子増倍係数の包絡値を推定

希ガス放出率(θ)の影響

- 低温状態では希ガスは主にデブリの極表面から放出
 - 誘起核分裂はデブリ表面での核分裂率大になる傾向(図1)
- 誘起核分裂と自発核分裂の希ガス放出率が等しい場合が保守的(図2) → **直線近似を採用**

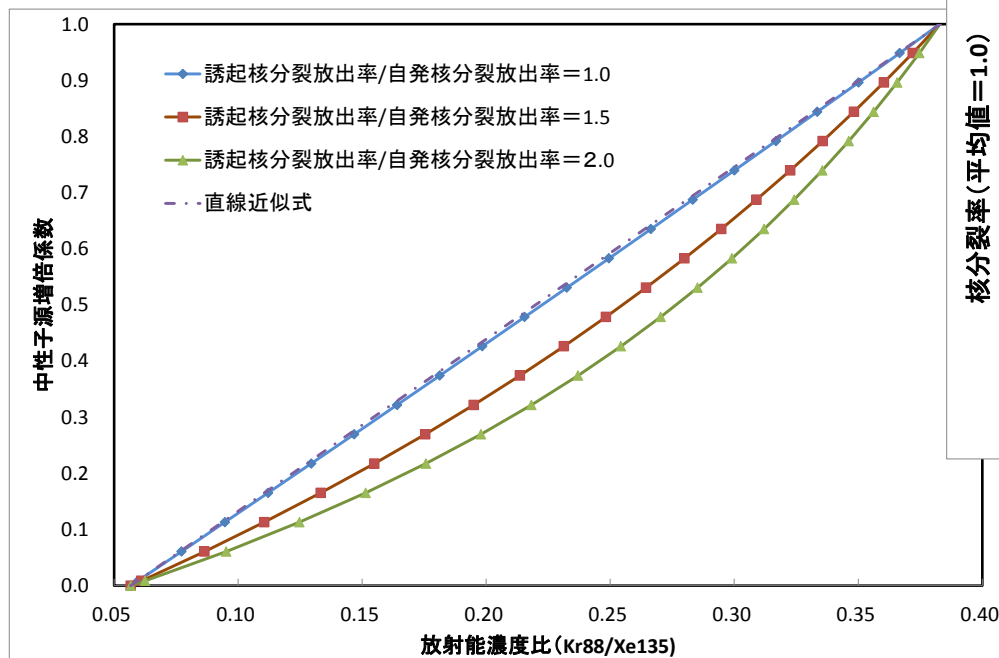


図2 希ガス放出率の違いによる中性子源増倍率推定値

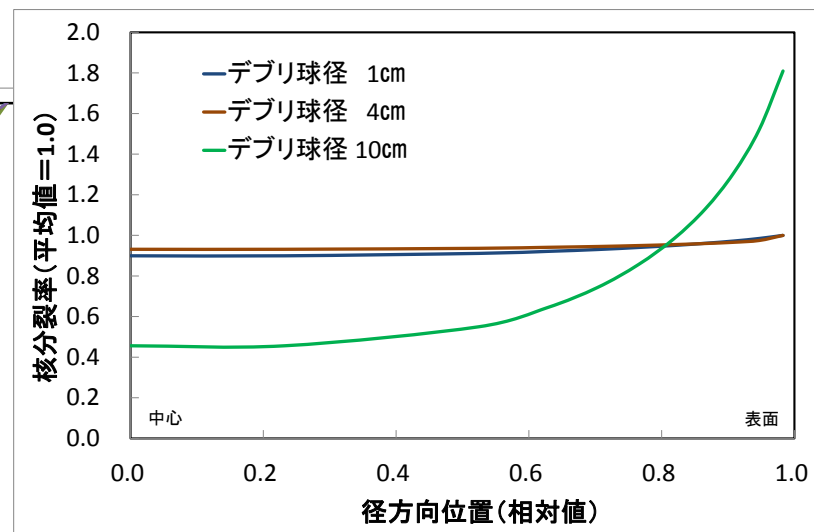
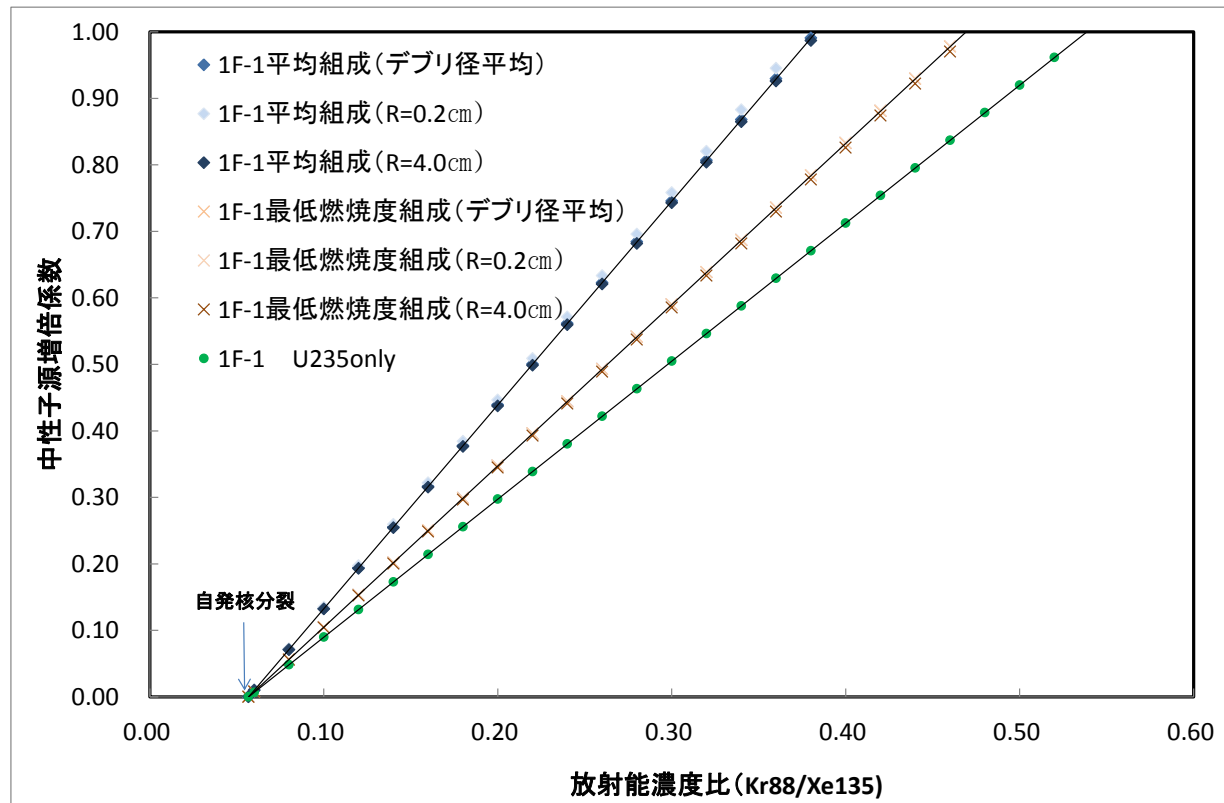


図1 デブリ球内の誘起核分裂率分布
(デブリ径が大きいと表面での核分裂率大、
一方、自発核分裂は径に依らず一様)

組成による中性子源増倍係数推定式の相違

- 組成の相違による誘起核分裂収率比の違い
 - K=0: Cm-244の自発核分裂収率比
 - K=1: 誘起核分裂収率比 → 組成の違いで差が出る



測定遅れ時間の推定方法と補正

- Kr-87とKr-88の放射能濃度比から測定遅れ時間を推定
 - 二つの核種の半減期の違いを利用

$$R_{measured} = \left(\frac{\lambda_{Kr87} \cdot N_{Kr87}}{\lambda_{Kr88} \cdot N_{Kr88}} \right)_{measured} = R_{in-reactor} \cdot \exp[-(\lambda_{Kr87} - \lambda_{Kr88}) \cdot T], \quad R_{in-reactor} = \frac{\gamma_{Kr87}}{\gamma_{Kr88}}$$

ここで、 γ ：核分裂収率、 λ ：崩壊定数

- 測定遅れ時間(T)は次式で推定できる

$$T = \frac{\ln\left(\frac{R_{measured}}{R_{in-reactor}}\right)}{\lambda_{Kr88} - \lambda_{Kr87}}$$

- この遅れ時間を補正することで、中性子源増倍係数と検出器位置での希ガス放射能濃度比の関係が得られる

1号機の希ガス放射能濃度評価

- 放射能濃度予備評価結果
 - 1号機のPCVガス放射線モニタの6ヶ月累積データからKr-87、Kr-88、Xe-135放射能濃度を評価
 - ✓ Kr-87: $6.0 \times 10^{-5} \sim 7.6 \times 10^{-5}$ Bq/cm³
 - ✓ Kr-88: $1.7 \times 10^{-4} \sim 2.1 \times 10^{-4}$ Bq/cm³
 - ✓ Xe-135: $9.7 \times 10^{-4} \sim 1.2 \times 10^{-3}$ Bq/cm³

表 1 1F-1 PCVガス管理システムの6ヶ月平均放射能濃度測定値

系統	核種	エネルギー (keV)	放射能濃度 (Bq/cm ³)			検出限界 (Bq/cm ³)
A系	Xe-135	249.79	9.70E-04	±	3.37E-06	9.35E-06
	Kr-87	402.64	5.99E-05	±	6.95E-06	2.08E-05
	Kr-88	196.34	1.74E-04	±	9.38E-06	2.80E-05
B系	Xe-135	249.79	1.24E-03	±	3.44E-06	9.52E-06
	Kr-87	402.64	7.63E-05	±	7.06E-06	2.11E-05
	Kr-88	196.34	2.09E-04	±	9.26E-06	2.77E-05

測定遅れ時間の推定結果

- Kr-87とKr-88の半減期の違いを利用して推定した測定遅れ時間は、核分裂収率の違い等で2.4～3.0hとなった(下表参照)

表 測定遅れ時間の推定結果

系統	核分裂収率	遅れ時間推定値(h)
A系	Cm244自発核分裂	3.0
	平均組成	2.6
	最低燃焼度組成	2.6
B系	Cm244自発核分裂	2.8
	平均組成	2.4
	最低燃焼度組成	2.4

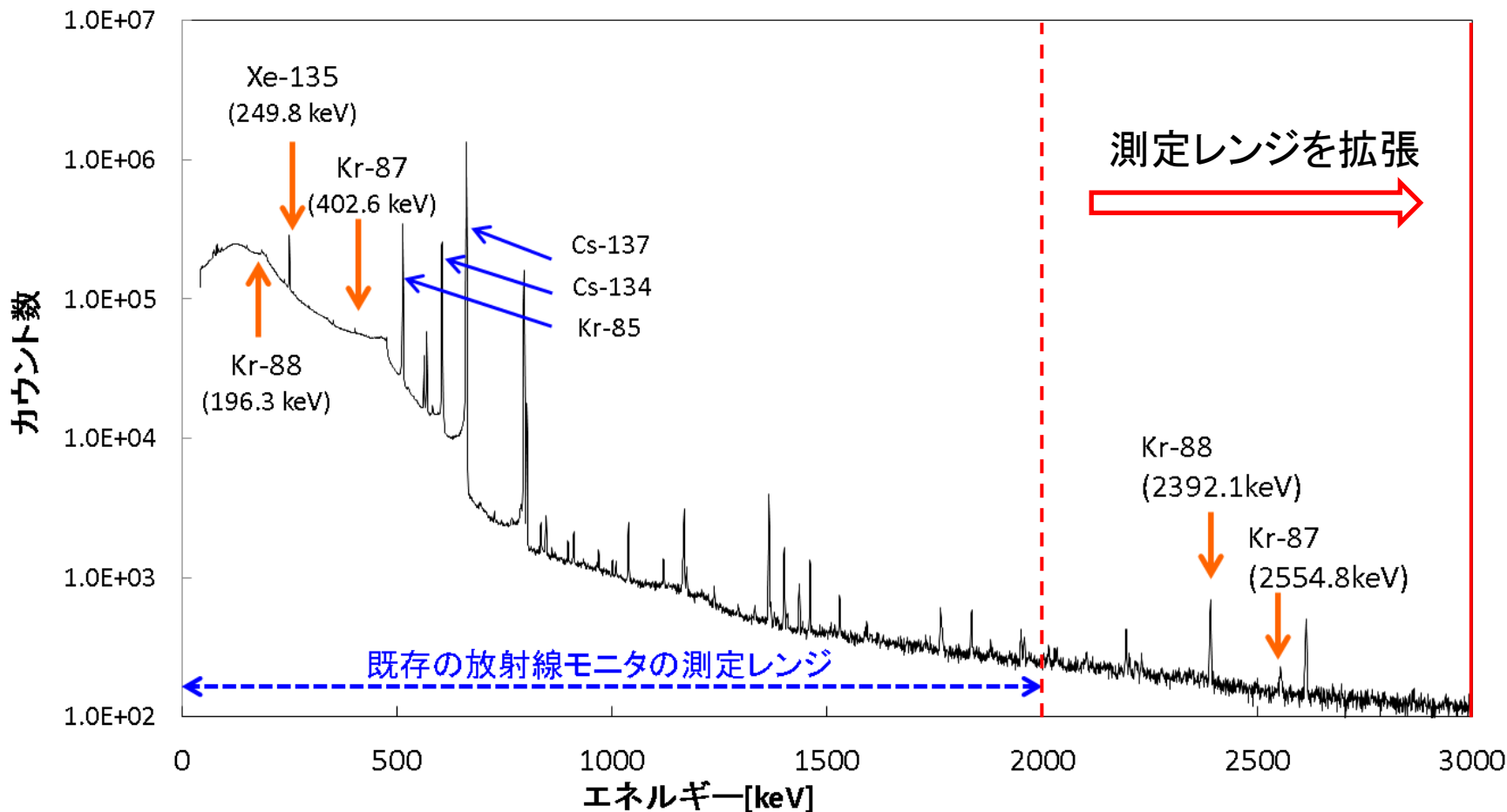
中性子源増倍係数の推定結果

- Kr-88とXe-135の放射能濃度比で推定した、測定遅れ時間を考慮した中性子源増倍係数は、条件設定の違いで0.4～0.7となった(下表参照)

表 中性子源増倍係数の推定結果

系統	増倍係数推定式	中性子源増倍係数(k)		遅れ時間推定値(h)
		遅れ時間補正無	遅れ時間補正有	
A系	平均組成	0.38	0.68	2.6(平均組成)
			0.74	3.0(自発核分裂)
	最低燃焼度組成	0.30	0.53	2.6(最低燃焼度組成)
B系	平均組成	0.34	0.60	2.4(平均組成)
			0.66	2.8(自発核分裂)
	最低燃焼度組成	0.27	0.47	2.4(最低燃焼度組成)

測定結果：1F 1号機の実測スペクトル(積算)



- 1号機のPCVガス管理システムの7ヶ月間累積値(2016~2017)
- 校正曲線を高エネルギー側(2 MeV ~3MeV)に外挿

測定結果：放射能濃度の評価

- 測定結果より放射能濃度を評価（下表）
- 濃度評価対象エネルギーを選定
 - Kr-87濃度評価対象 403keV（低エネルギー側ピーク）
 - Kr-88濃度評価対象 2392keV（高エネルギー側ピーク）
- 高エネルギー側ピークの測定によりKr-88測定誤差を低減

高エネルギー領域の校正曲線を高エネルギー側に外挿
⇒改良型検出器では高エネルギー側での校正が必要

核種	エネルギー (keV)	放射能濃度 (Bq/cm ³)		
Xe-135	250	1.111E-03	±	0.003E-03
	403	6.00E-05	±	0.49E-05
Kr-87	2555	8.36E-05	±	1.17E-05
	196	1.92E-04	±	<u>0.08E-04</u>
Kr-88	2392	1.63E-04	±	<u>0.04E-04</u>

測定対象

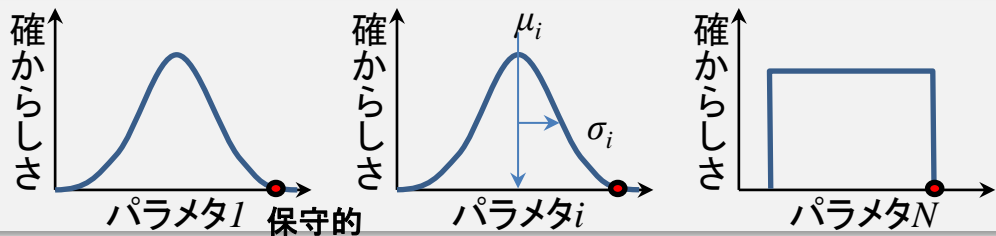
統計誤差
半減

まとめ

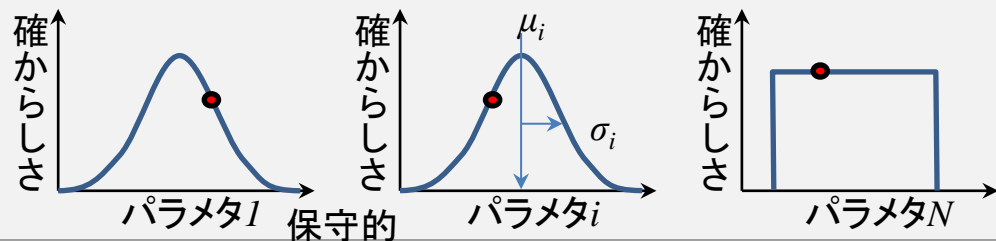
- PCVガス管理システムの希ガス放射能濃度を用いた
中性子源増倍係数、測定遅れ時間推定方法を提案
 - 測定遅れ時間: Kr-87とKr-88の半減期の相違を利用
 - 中性子源増倍係数: Kr-88とXe-135の核分裂収率特性を利用
 - 最確値ではなく包絡値を推定
- 1号機のPCVガス管理システムの6ヶ月間累積値を用いて
Kr-87, Kr-88, Xe-135の放射能濃度を評価し、測定遅
れ時間、中性子源増倍係数を推定
 - 測定遅れ時間: 2.4~3.0h
 - 中性子源増倍係数: 0.4~0.7 (十分に未臨界)
- Kr-87, Kr-88の高エネルギーガンマ線ピークを測定し、
Kr-87(403keV)、Kr-88(2392keV)が測定対象ピークと
して適切であると判断

統計的臨界評価の概要

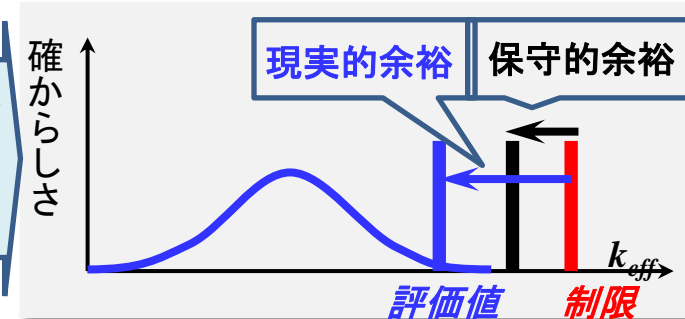
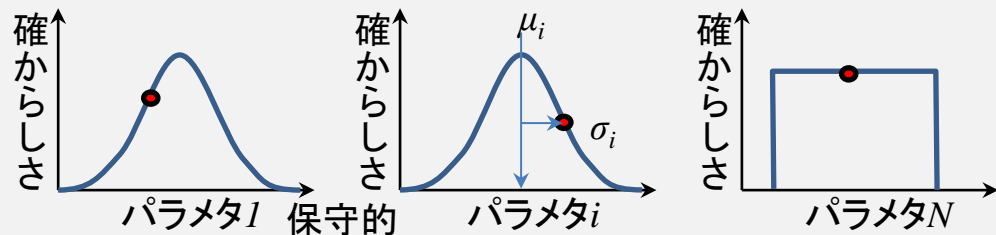
保守的な臨界評価: パラメタ値として保守的な値を設定



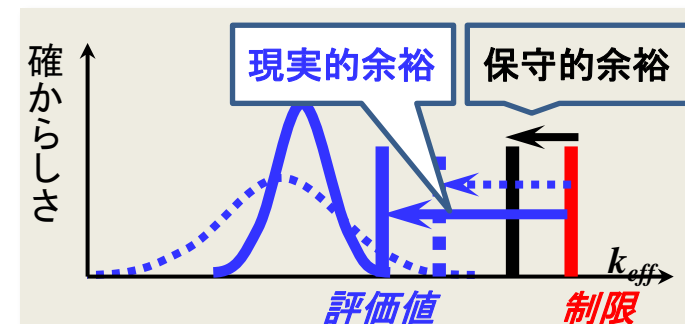
統計的な臨界評価: パラメタ値を不確かさに応じて設定



分布関数に応じてパラメタ設定し
複数回の臨界評価を実施



新規知見による見直し



1号機のデブリを対象として評価方法を例示

- 炉内の集合体/燃料棒分布の取扱い
 - 燃料体/燃料棒を最大6グループに分類し、インベントリ保存
 - Gd入り燃料1グループ、他は燃焼度別に5グループ
 - 各グループの平均組成
 - 確率論的幾何形状 (STGM)
- その他の変数の確からしさ
 - 分布関数を設定し選択
 - デブリ粒径
 - 空隙率
 - デブリ体積占有率
 - 構造材等の混入割合
 - Gd等の吸収材混入割合

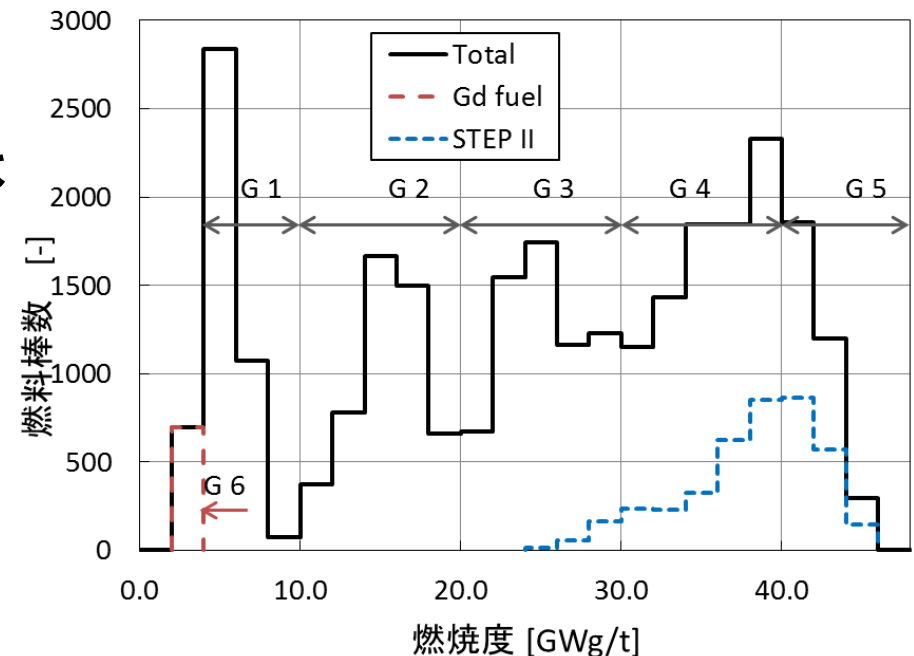


図 1F-1の燃料体燃焼度分布

統計的臨界評価（2）解析手法

- 解析コード：MVP2.0 + JENDL4.0
- 解析体系：圧力容器と格納容器からなる3次元体系とし、圧力容器下部プレナム、ペデスタル、ドライウェルにデブリが落下しているものとした

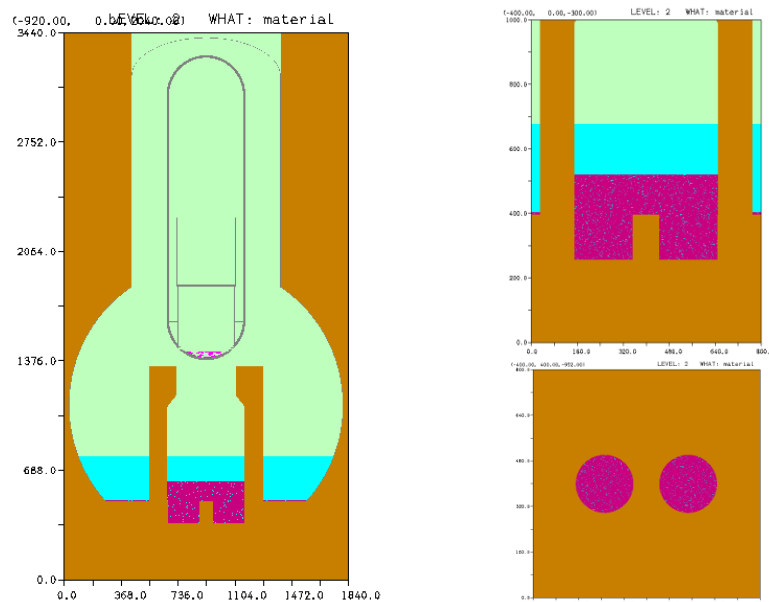


図 1号機PCVを対象とした解析体系例
(左：全体，右：ペデスタル断面とサンプルピット平面)

統計的臨界評価 (3) デブリ性状

パラメタ設定に利用する情報: デブリ性状リスト[1]を参考に設定
臨界計算時に過度に保守的とならない粒径設定[2]
(パラメタ分布の精度向上の課題あり)

デブリ位置	形態	粒径 (cm)	閉気孔率 (vol%)	デブリ 体積占有率
ペDESTAL	粉状、小石状	0.1~10.0	10~30	0.5~0.7
	コリウム	0.1~1.0	0~10	0.7~0.9
	クラスト	(10.0~100.0)*	10~30	0.7~1.0
ドライウエル	粉状、小石状	0.1~10.0	0~10	0.5~0.7
	コリウム	0.1~1.0 (10.0~100.0)*	10~30	0.7~0.9
下部 プレナム	クラスト・岩盤状	0.1~1.0	0~10	0.7~1.0
	溶解プール・塊状	(10.0~100.0)*		
	粉状・小石状	0.1~10.0	10~30	0.5~0.7

*: 括弧内が実態に近いが計算上は上の値使用

[1] [http://www.aesj.net/document/\(B-3\)鷺谷.pdf](http://www.aesj.net/document/(B-3)鷺谷.pdf)、[2] 日本原子力学会2016年秋の大会3L11

統計的臨界評価結果の例

1号機MAAP解析結果に基づきデブリ形態と存在量を仮定し統計評価を実施

表 評価条件

場所	形態	燃料重量	吸収材	構造材重量	デブリ性状
下部プレナム	クラスト	MAAP解析により設定	考慮せず	統計的評価	統計的評価
ペDESTアル	コリウム				
ドライウェル	コリウム				

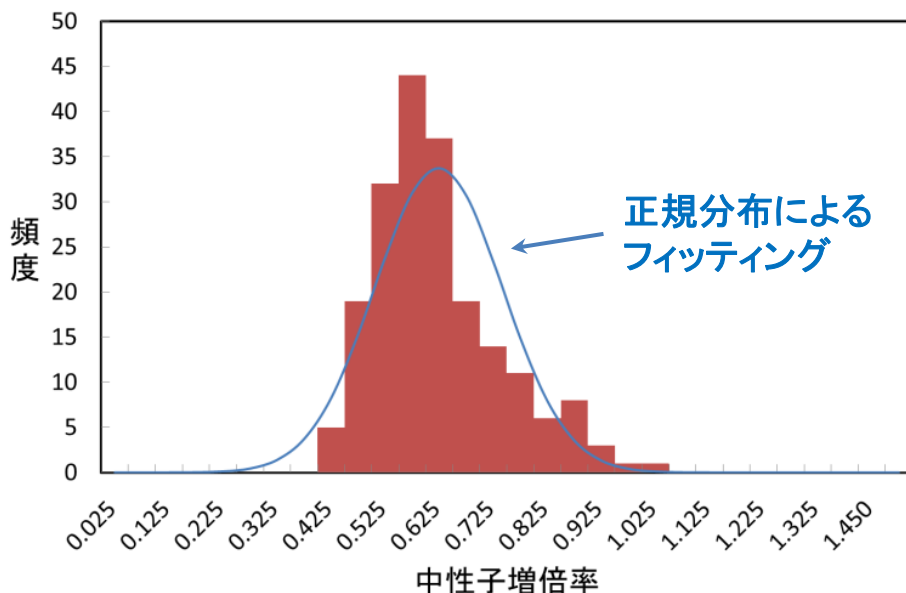


図 中性子増倍率の頻度分布

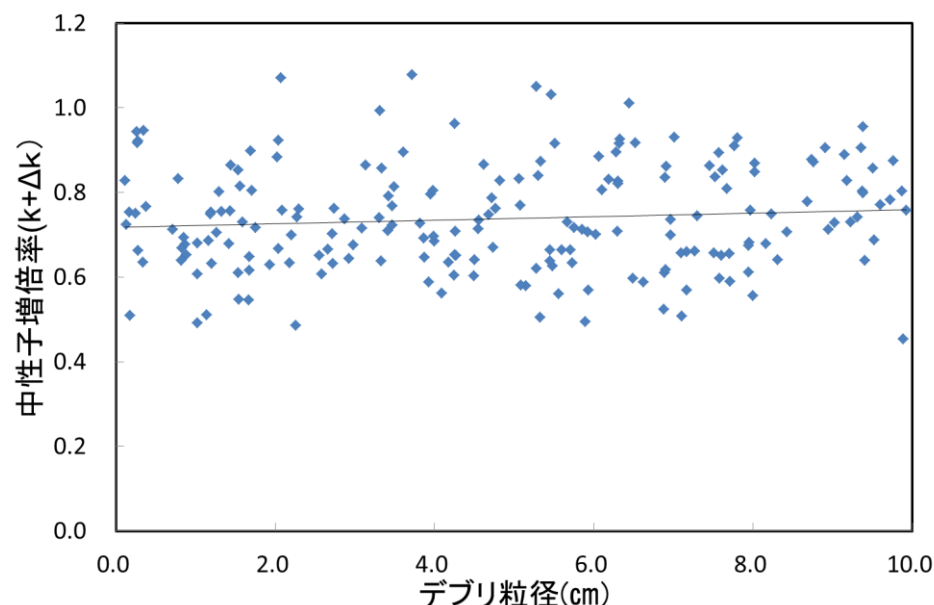


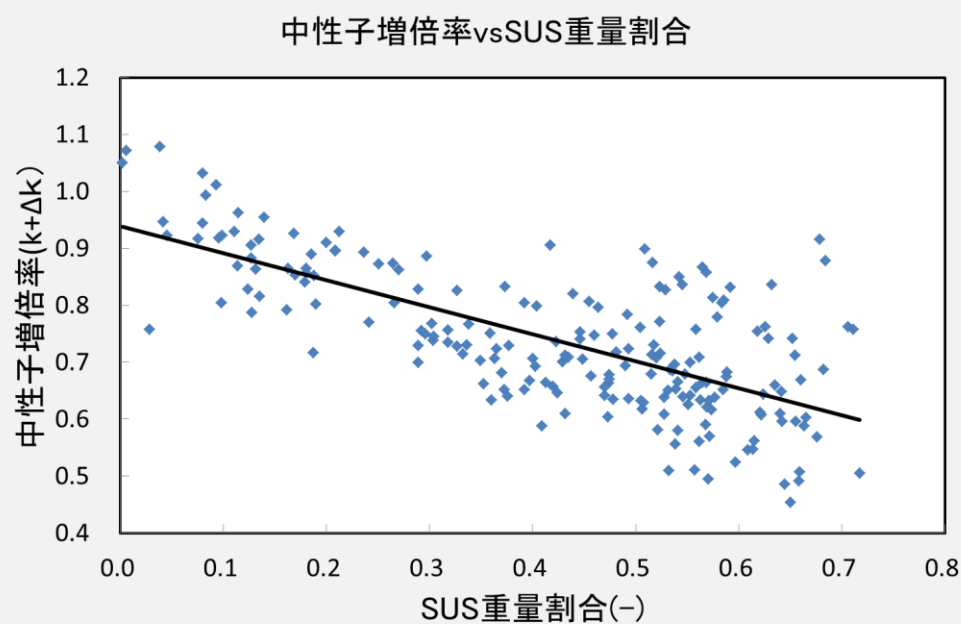
図 中性子増倍率とデブリ粒径の相関

ペDESTALデブリの物理量の相関

- 相関係数の絶対値が0.5以上のものを下表に示す
- SUS混入割合(あるいは燃料重量割合)と中性子増倍率との相関が大きい
⇒ 中性子源増倍係数の推定値を用いてSUS混入割合を推定

表 ペDESTALデブリの物理量の相関

	デブリ密度	ポロシティ 体積比	デブリ体積 占有率	水対燃料 体積比	Gd帯同 割合	燃料 重量割合	ZrO2 重量割合	SUS 重量割合	コンクリート 重量割合	ペDESTAL上部 デブリ高さ	中性子 増倍率
デブリ密度									負		
ポロシティ 体積比											
デブリ体積 占有率											
水対燃料 体積比										正	
Gd帯同 割合											
燃料重量 割合								負		負	正
ZrO2重量 割合								負			
SUS重量 割合									負	正	負
コンクリート重量 割合											
ペDESTAL上部 デブリ高さ											負



注)なお、結果は本研究で設定したパラメタ分布に依存し、今後見直しの可能性があります

ベイズ推定を用いた現状推定

ベイズの定理

$$P(A | X) = \frac{P(X | A) \cdot P(A)}{\sum_A P(X | A) \cdot P(A)}$$

$P(A)$: 事象Aの推定分布(事前確率)

$P(A | X)$: 事象Xを観測した際に
事象Aが発生する確率(事後確率)

$P(X | A)$: 事象Aを仮定した際に
事象Xが発生する確率

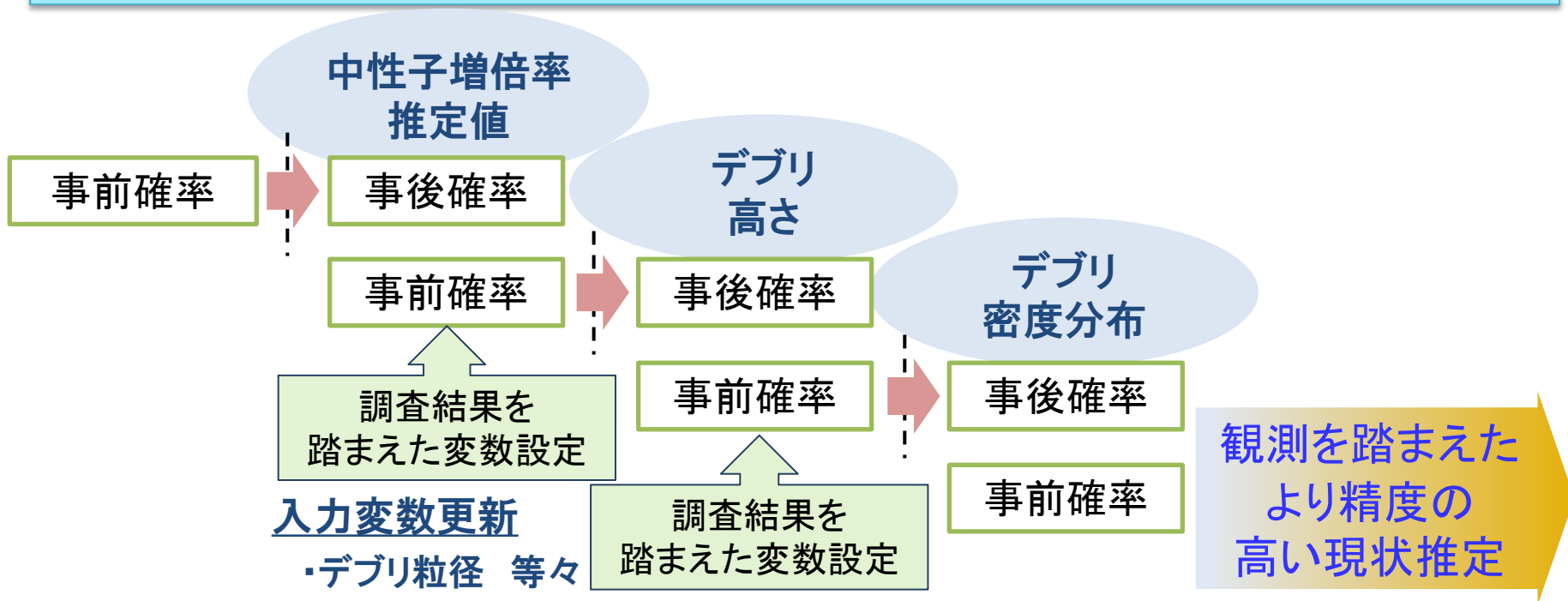
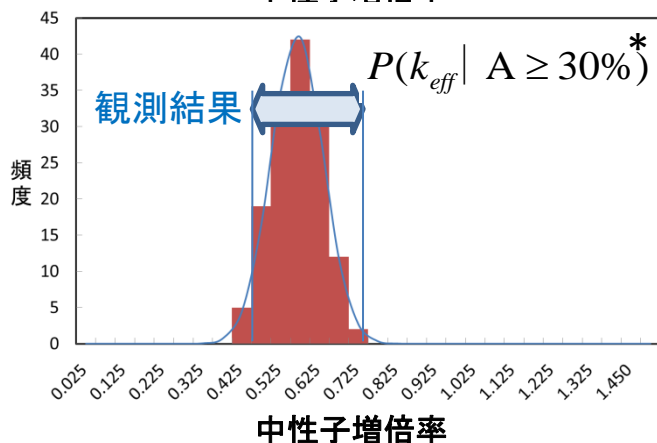
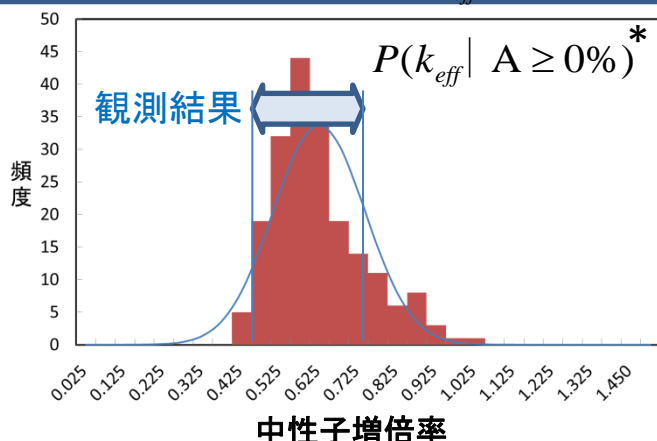


図 観測結果を用いた評価結果の改善手順

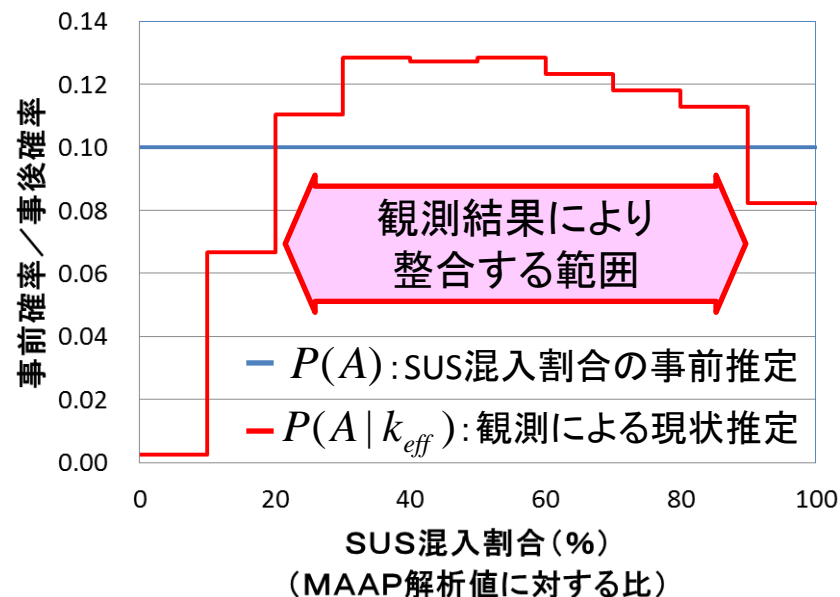
中性子増倍率推定値を用いた推定の例

利用する観測結果: ガス管理システムによる中性子源増倍係数の推定値 (0.47~0.74)
推定する炉内状況: SUSの混入割合 (MAAP解析値を100%に設定)

① SUS混入割合Aを一様な事前分布とし
増倍率分布を評価: $P(k_{eff} | A)$



② 観測結果を用いた事後確率計算



- ・SUSの混入割合は、MAAP解析値の20%以上であると推定される
- ↓
- ・推定結果を反映した設備検討を実施;
必要ホウ素濃度評価

必要ホウ素濃度の試算結果

利用する推定結果: 中性子源増倍係数の推定値を用いて算出したSUS混入割合(事後確率)
 検討する設備負担: 必要ホウ素濃度(中性子増倍率 >0.95 となる頻度が0.1%以下)

表 SUS混入割合推定前後の統計的臨界評価結果

SUS混入割合	$0.47 < k < 0.74$ の頻度	$k > 0.95$ の頻度
推定前(一様分布)	74%	0.3%
推定後	86%	$< 0.01\%$

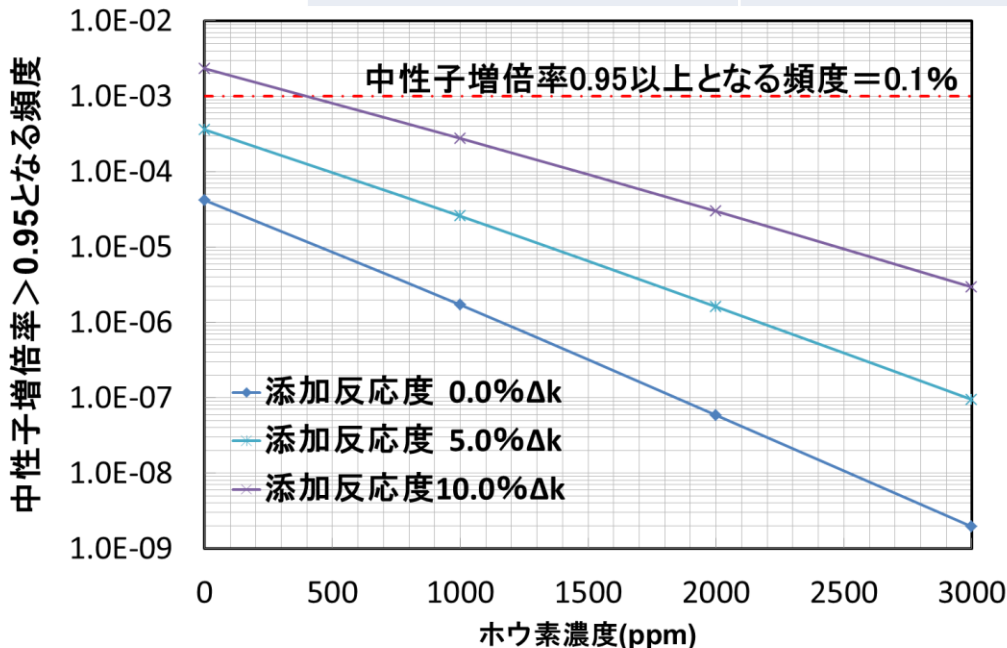


図 必要ホウ素濃度の評価結果

- ・現状推定後の評価値は、中性子源増倍率推定値と一致度改善
- ・添加反応度7% Δk まではホウ素濃度0ppmでも中性子増倍率 >0.95 となる頻度は0.1%以下
- ・取出し時などにおいて10% Δk 反応度が添加される場合でも約400ppmのホウ酸濃度により中性子増倍率 >0.95 となる頻度は0.1%以下

注)なお、結果は本研究で設定したパラメタ分布に依存し、今後見直しの可能性があります

まとめ

- 現実的な臨界リスクの評価手法として統計的手法を検討中
 - ✓ 炉内状況の知見を反映したパラメタ設定
 - ✓ パラメタの確からしさを設定した統計解析
 - ✓ 観測結果を反映したパラメタ分布(現状推定値)の改善
 - 現実的な状態推定と、それに対する設備検討
- 1号機PCVガス管理システムの中性子源増倍係数の推定結果をもとにSUS混入割合を推定
 - ✓ MAAP解析値の20%以上混入と推定
- SUS混入割合の推定結果を用い必要ホウ素濃度を試算
 - ✓ 添加反応度7% Δk まではホウ素添加不要
 - ✓ 10% Δk 反応度が添加される場合でも約400ppmのホウ酸濃度により中性子増倍率 > 0.95 となる頻度は0.1%以下

謝辞

本件は、資源エネルギー庁『平成26年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金（燃料デブリ臨界管理技術の開発）」』の成果の一部を取りまとめたものである。

ご清聴ありがとうございました