



Japan Atomic Energy Agency

燃料デブリの乱雑な組成・物質分布を 考慮した臨界計算手法の開発

日本原子力研究開発機構
安全研究・防災支援部門
安全研究センター
燃焼サイクル安全研究ディビジョン
臨界安全研究グループ

渡邊 友章

平成30年度 安全研究センター報告会
平成30年11月8日
富士ソフト アキバプラザ

本発表の一部は原子力規制庁からの受託事業の成果である

- 東京電力福島第一原子力発電所(1F)事故により**燃料デブリ**が生成

2号機格納容器内ペDESTAL底部



出典: 東京電力ホールディングス (http://photo.tepco.co.jp/ext_lib/180426_01/180426_08.jpg)

- 多量の燃料が存在 → 適切な**臨界管理**が必要

従来施設における臨界管理

→決定論的な臨界管理

- 燃料状態(状態変化含む)が既知
- 臨界評価条件を最も厳しくなるように設定し、設計基準の範囲で確実に臨界を防止
- TMI-2の場合：ホウ素濃度による決定論的な臨界管理が可能

TMI-2: スリーマイル島原子力発電所2号炉

1F燃料デブリで想定される臨界管理

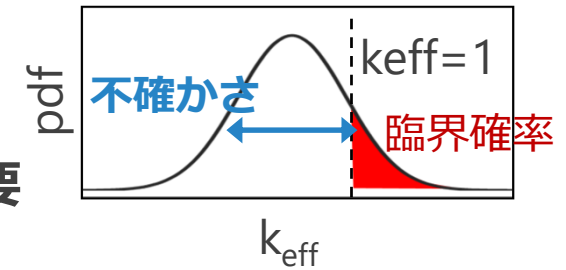
→臨界リスクに基づく管理

- 燃料状態が未知・不確か
- ホウ素濃度管理が困難かつ、放射線遮蔽の必要性等により水中でのデブリ取扱いを要する可能性があることから、決定論的な臨界管理に課題
- 臨界リスクに基づく管理(許容可能なリスクの範囲で作業工程を計画・運用)を検討

- 臨界リスク = 臨界発生確率 × 影響の大きさ



実効増倍率 k_{eff} の確率密度分布 (不確かさ) の評価が重要



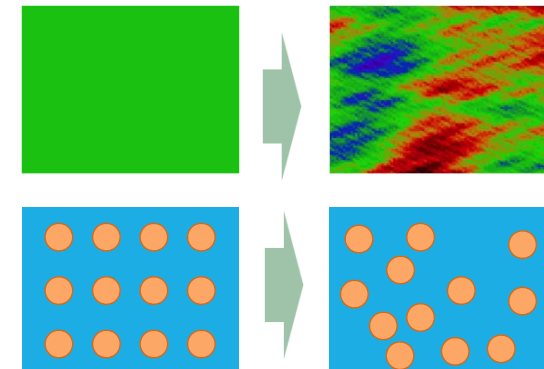
- 不確かさ評価に向けた検討

- デブリ性状 (組成や粒径) をパラメータとした網羅的な解析
- 課題：空間的に均一な組成・物質分布を仮定

→ 実際は乱雑(不均一)に分布

均一

不均一



- 乱雑さに起因する k_{eff} 不確かさの考慮が必要
- 従来の臨界計算手法では乱雑な分布の取扱いが困難

研究目的：

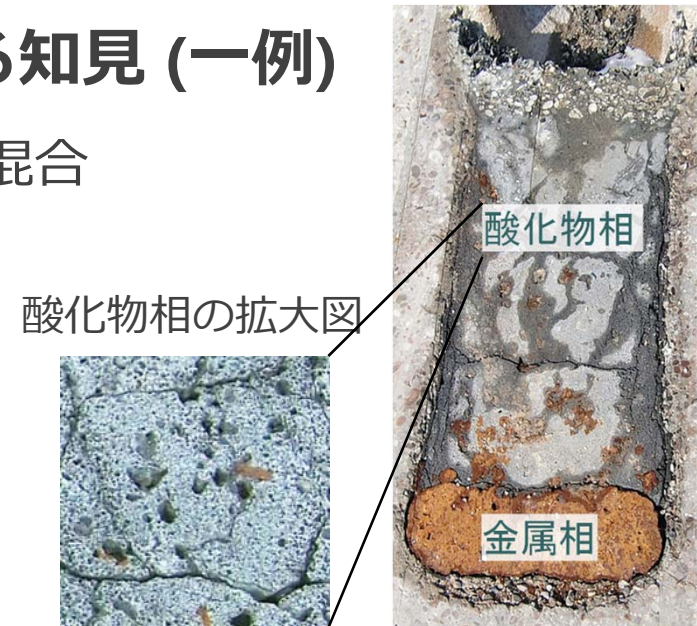
燃料デブリの乱雑な組成・物質分布を考慮した臨界計算手法の開発

● 燃料デブリの組成・物質分布に関する知見 (一例)

- 酸化物相：燃料とコンクリートが不均一に混合
- 金属相：酸化物相の中に部分的に析出
- 大小様々な空孔が存在



組成が連続的に変動する媒質の中に、別の物質相が細かく存在することを示唆



ドイツKITの模擬MCCI実験

KIT: カールスルーエ工科大学

MCCI: 溶融炉心コンクリート相互作用

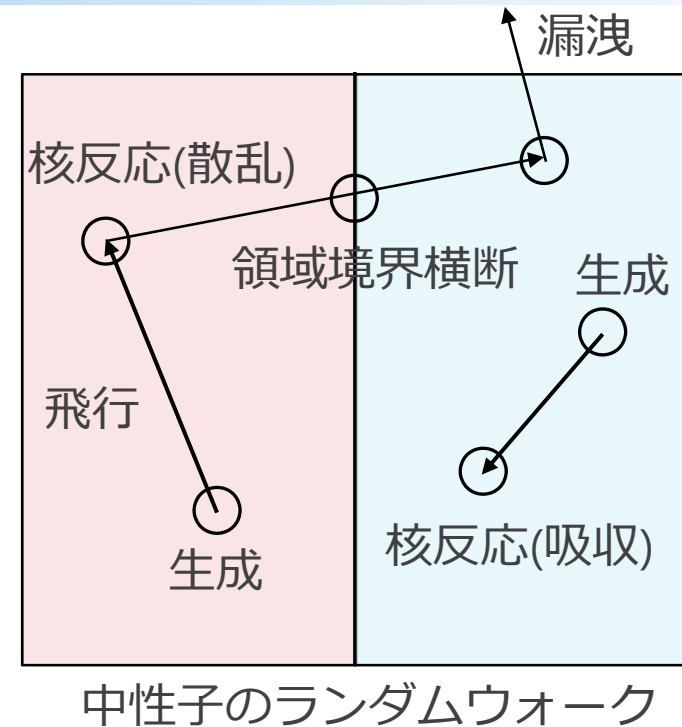
● 本研究の開発方針

- 連続的な組成分布を模擬するための**連続空間変動モデル**
- 不連続的な物質相を模擬するための**ボクセル体系**

→ これらを中性子輸送モンテカルロコードへ導入

- 計算機内で多量の仮想中性子を生成
- 乱数により確率的に挙動を決定
 - 飛行方向・距離、核反応の種類...
- 挙動を記録して核特性を計算
 - “世代”毎に核特性を計算

$$\text{実効増倍率} = \frac{\text{次世代の発生中性子数}}{\text{現世代の発生中性子数}}$$



- 複数世代にわたって統計処理 → 平均 + 標準偏差(統計誤差) を算出

モデル導入に向けた技術的課題:

- 連続空間変動モデル → 飛行距離の計算が困難
- ボクセル体系 → 領域境界横断増加による効率悪化

本研究:

特殊な中性子追跡手法
(**デルタ追跡法¹⁾**)を採用

本発表では割愛

1) E. R. Woodcock, et al., ANL-7050, 1965.

● 確率的乱雑化ワイエルシュトラス関数¹⁾ (RWF) を導入

$$V(\mathbf{r}/S) = \sum_{j=1}^{\infty} A_j \lambda^{-\alpha j} \sin(\lambda^j \cdot (\mathbf{r}/S) \cdot \boldsymbol{\Omega}_j + P_j)$$

RWF: Randomized Weierstrass Function

固定値

$$\lambda > 1$$

$$0 < \alpha < 1$$

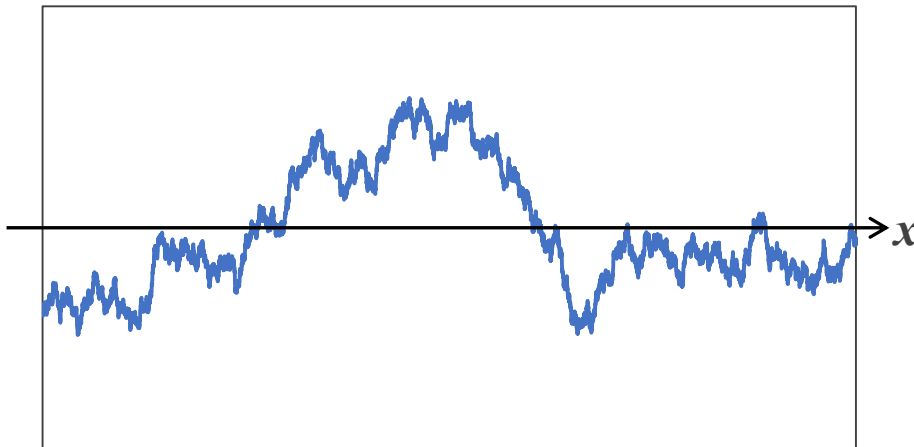
S : スケーリング因子

サンプリングパラメータ

A : 振幅

$\boldsymbol{\Omega}$: 単位方向ベクトル

P : 位相



特徴

- 期待値が0
- 標準偏差が空間的に一様
- 上限・下限値を設定可能
- ランダムな分布を多数生成可能

1) Ueki T., Nucl. Sci. Eng., 2014.

RWF

$$V(\mathbf{r}/S) = \sum_{j=1}^{\infty} A_j \lambda^{-\alpha j} \sin(\lambda^j \cdot (\mathbf{r}/S) \cdot \boldsymbol{\Omega}_j + P_j)$$

$$\lambda > 1$$

$$0 < \alpha < 1$$

S : スケーリング因子

● $1/f^{1+2\alpha}$ の周波数分布をもつ

$$P(f) \propto 1/f^{1+2\alpha} \quad f: \text{周波数}, P(f): \text{パワースペクトル密度}$$

極端に無秩序な系は周波数分布が $1/f \sim 1/f^2$ の範囲の状態に推移する傾向¹⁾

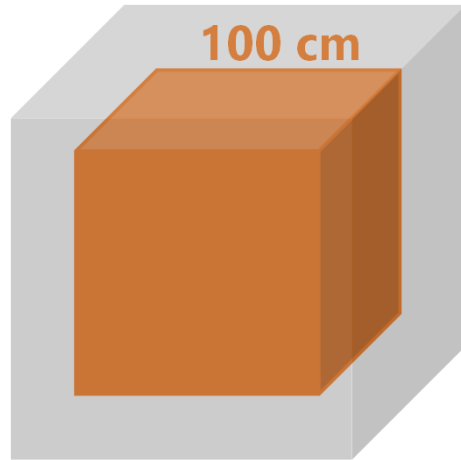
- (例) ● 半導体の熱雑音のスペクトル¹⁾ $\sim 1/f \quad \rightarrow \alpha \approx 0$
- 乱流のスペクトル²⁾ $\sim 1/f^{1.67} \quad \rightarrow \alpha \approx 0.33$
- ブラウン運動 $\sim 1/f^2 \quad \rightarrow \alpha \approx 0.5$

➡ RWFにより自然界の乱雑な系が落ち着く状態を模擬

1) Frieden B.R., *Physical Review E*, 1994.

2) Kolmogorov, A., *Doklady Akademiia Nauk SSSR*, 1941.

エネルギー1群モンテカルロ計算による試解析を実施



140 cm

目的:

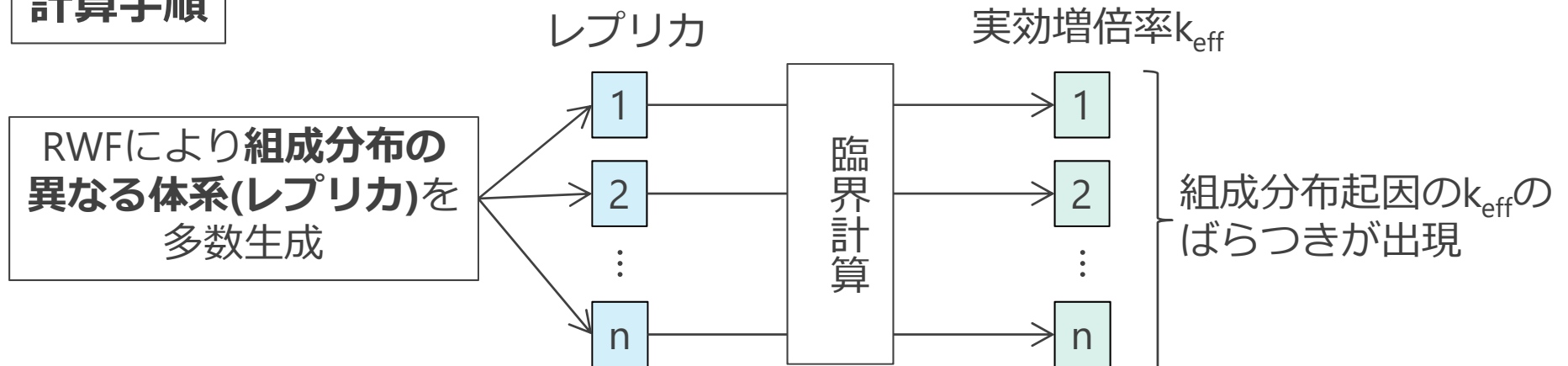
- 組成分布起因の k_{eff} 不確かさの存在を確認
- RWFパラメータの不確かさへの影響を確認

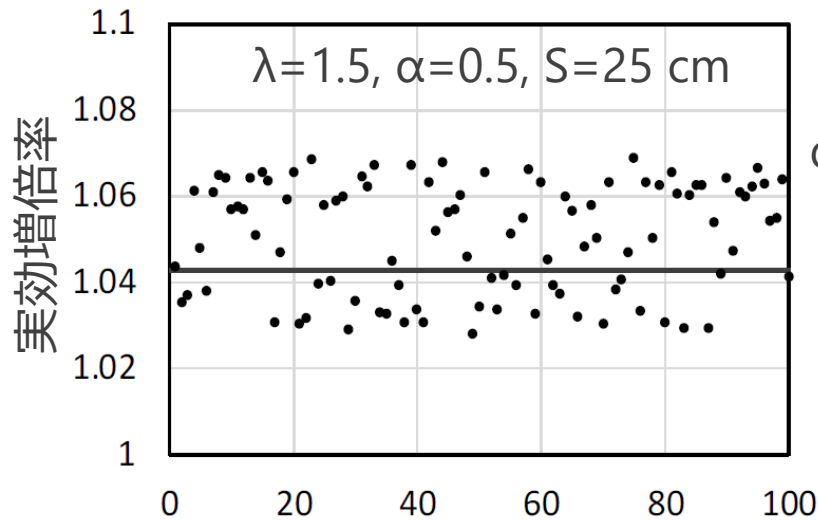
内側立方体 : UO_2 燃料(12GWd/t) + コンクリート

➔ RWFによる連続空間変動を導入
(燃料割合平均 1/8, 変動範囲: 0 ~ 2/8)

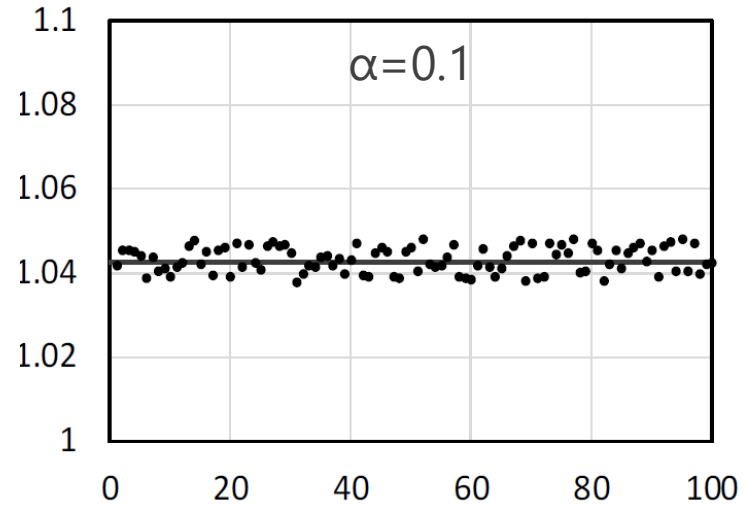
外側立方体 : コンクリート

計算手順



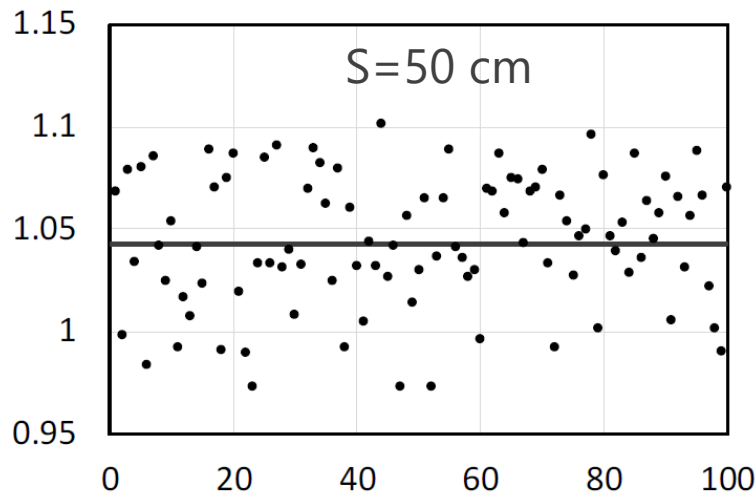


αを変更



レプリカ番号

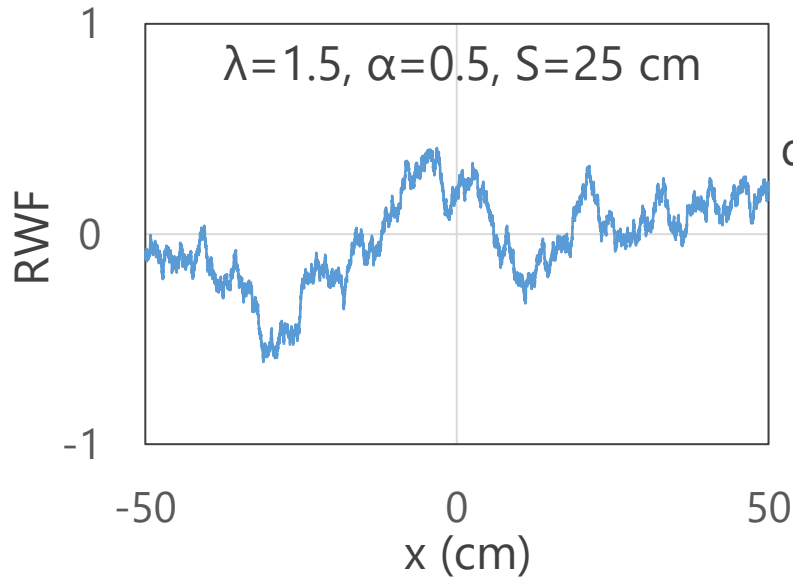
Sを変更



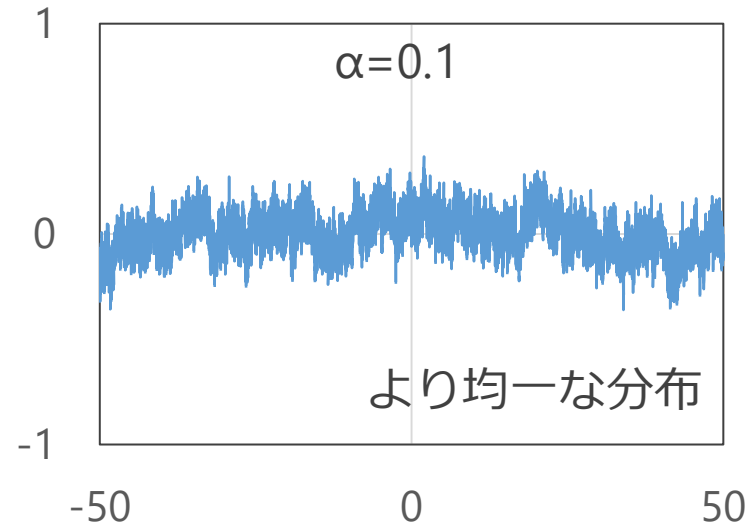
| (α, S) | (0.5, 25) | (0.1, 25) | (0.5, 50) | 一様分布 |
|-----------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| 平均 | 1.051 | 1.043 | 1.045 | 1.043 |
| 標準偏差 | 0.013 | 0.003 | 0.032 | 0.00009 |

統計誤差 + **組成分布起因の不確かさ** 統計誤差

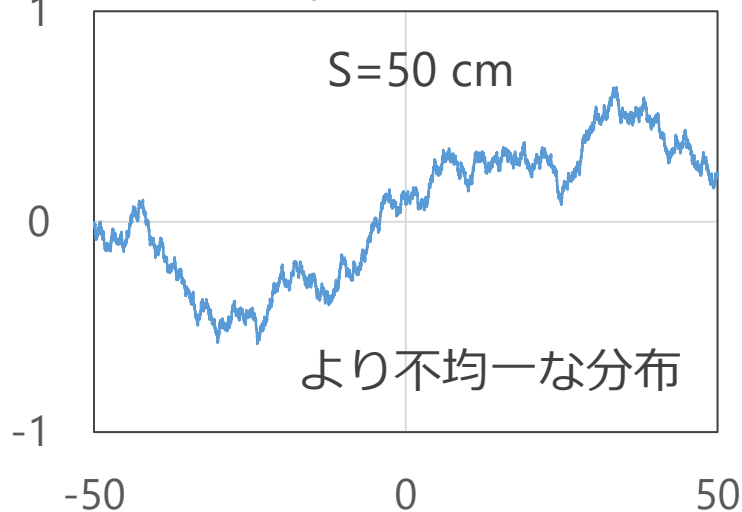
- 組成分布起因の有意な不確かさを確認
- α, S が大きくなるほど不確かさは大きい



αを変更



Sを変更



| (α, S) | (0.5, 25) | (0.1, 25) | (0.5, 50) | 一様分布 |
|---------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| 平均 | 1.051 | 1.043 | 1.045 | 1.043 |
| 標準偏差 | 0.013 | 0.003 | 0.032 | 0.00009 |

統計誤差 + **組成分布起因の不確かさ** 統計誤差

- 組成分布起因の有意な不確かさを確認
- α, S が大きくなるほど不確かさは大きい

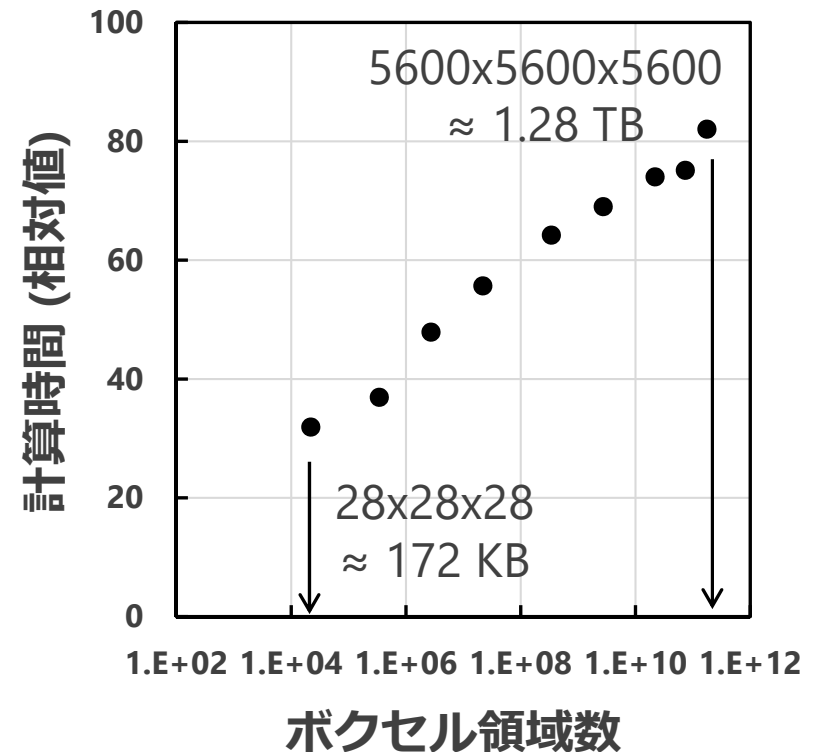
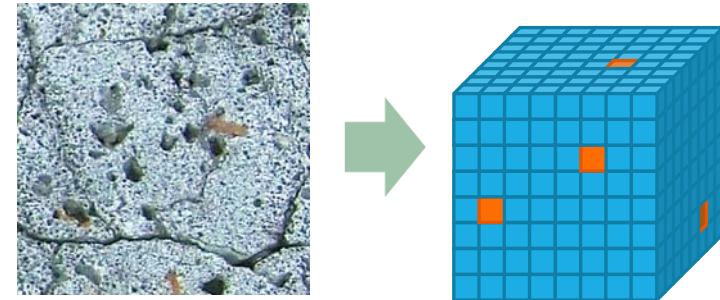
- 体系を小さな立方体領域に分割し、ランダムに物質領域を割当てて異なる物質分布を生成
- 特徴: 優れた計算効率
 - デルタ追跡法により領域増加の影響減
 - 規則的な配列のため領域探索が容易

1群均質モンテカルロ計算により
ボクセル数と計算時間の関係を検証



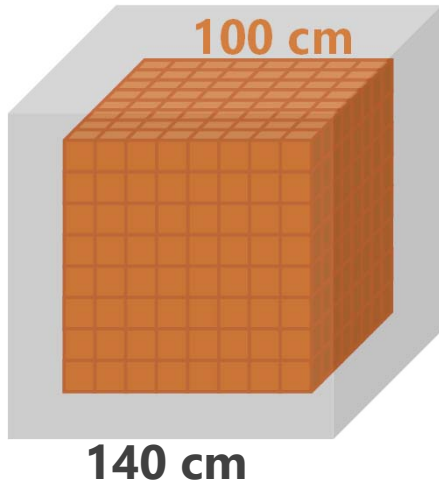
ボクセル数の増加に対して計算時間の増加が小さい (対数比例)

不連続的な物質分布をボクセルで表現



連続空間変動モデルにボクセル体系を組み合わせた試解析を実施

目的: ボクセルサイズの k_{eff} への影響を確認



内側立方体 :

UO₂燃料(12GWd/t) + コンクリート + ステンレス鋼

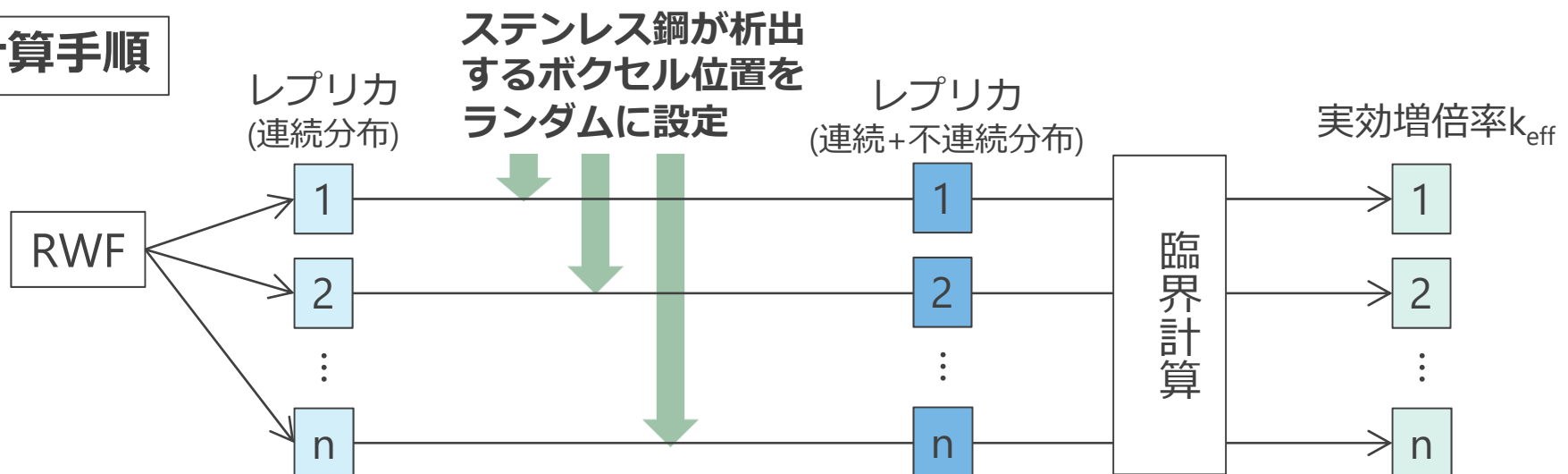
- UO₂燃料+コンクリート : RWFにより連続的に分布
- ステンレス鋼 : ボクセルにより不連続的に分布

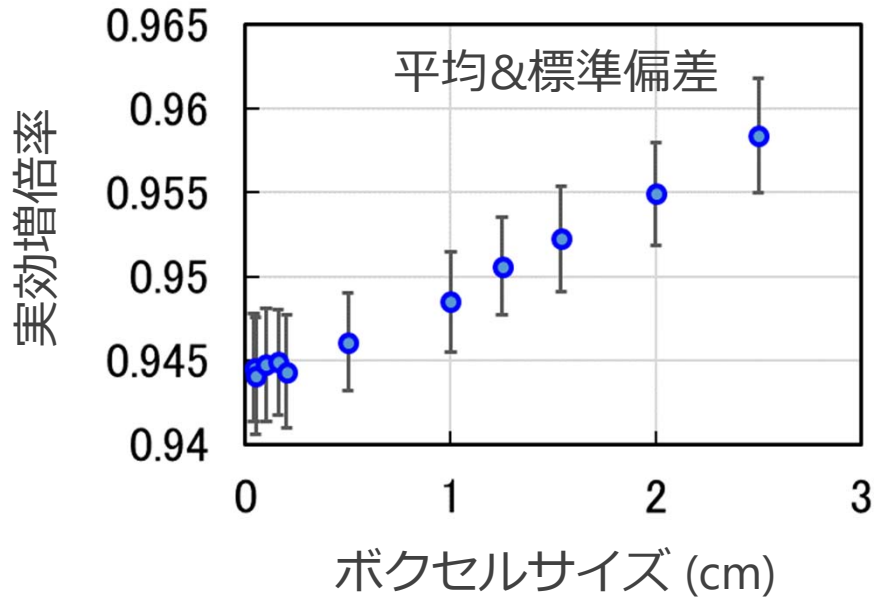
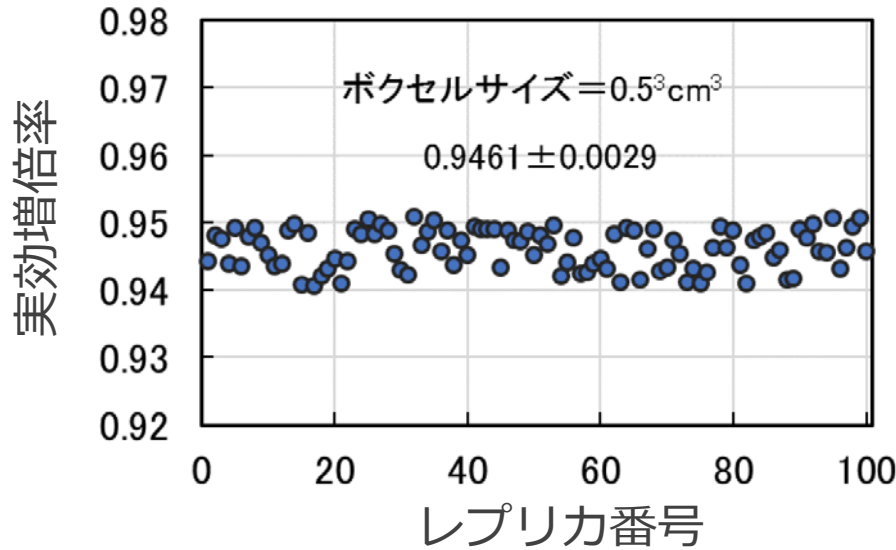
平均体積比 ステンレス鋼 : UO₂ : コンクリート

0.25 1 7

外側立方体 : コンクリート

計算手順





RWFパラメータ

$$\alpha = 0.5, \quad \lambda = 1.5, \quad S = 25 \text{ cm}$$

臨界計算

エネルギー2群 (高速群 + 熱群)

- 実効増倍率 (平均) :
ボクセルサイズが大きいほど増加



自己遮蔽効果によるステンレス鋼の
中性子吸収効果の減少

- 不確かさ (標準偏差) :
ボクセルサイズの影響小

- 燃料デブリ組成・物質分布の乱雑さを考慮した臨界計算手法を開発
 - 連続空間変動モデル (確率的乱雑化ワイエルシュトラス関数) の導入
 - ボクセル体系の導入
 - 多数のレプリカ生成による実効増倍率とその不確かさの計算手法を開発

- 試解析により乱雑な組成・物質分布に起因する実効増倍率の有意な不確かさを見出せることを確認

- 今後の課題：
 - 連続エネルギーモンテカルロ法への導入

- **連続エネルギー法に基づくモンテカルロコード(Solomon)の開発**
 - 本研究の開発手法を導入予定
 - 現在、汎用モンテカルロコードとして必要な機能の実装を進めている^{1,2)}
- **別の連続空間変動モデルの検討**
 - 正規分布ノイズに基づく連続空間変動モデルの開発³⁾
- **臨界リスク評価に向けた取り組み**
 - 確率的乱雑化ワイエルシュトラス関数に基づく乱雑体系における周波数分布(α)と実効増倍率分布の関係性の調査⁴⁾

1) 長家 康展、羽倉 洋行、原子力学会2018年春の年会、2F10

2) 長家 康展、羽倉 洋行、原子力学会2018年秋の大会、2M18

3) 植木 太郎、原子力学会2018年春の年会、1F08

4) 荒木 祥平、山根 祐一、植木 太郎、外池 幸太郎、原子力学会2018年秋の大会、1M09