

デブリ取り出し時の臨界事故解析

東京工業大学科学技術創成研究院

先導原子力研究所

小原 徹

背景

- 福島第一原子力発電所廃止措置における臨界安全
 - 燃料デブリ取り出し時の再臨界事故を防ぐ
 - 万一再臨界事故が発生した場合の現象の進展をあらかじめ評価し作業員の安全確保のための方策を確立する
 - 特に即発超臨界の事故が発生した場合
 - 現象が非常に早く進展するため臨界を検知した後に有効な対応を取ることは困難
 - 有効な安全対策を確立するためにあらかじめ発生エネルギー及び線量をできるだけ精度よく評価しておくことが重要

超臨界動特性解析手法

- 一点炉近似動特性解析
 - 一般の炉心の動特性解析には広く利用される手法であるが、燃料デブリの塊が大きい場合や複数の燃料デブリ領域が中性子的に弱く結合している場合などには適用できない。
- 空間及び時間依存の中性子輸送方程式による数値解析
 - 理論的には可能であるが、計算量が膨大となり現実的には適用困難。
- 空間依存動特性解析コード
 - 積分型動特性モデルに基づき東工大で開発された空間依存動特性解析コード

本研究の目的

- 格納容器下部に堆積した燃料デブリの実際に想定される体系へのMIKコードの適用可能性の確認

積分型動特性解析モデル

$$N_i(t) = \sum_{j=1}^n \int_{-\infty}^t \alpha_{ij}(t-t') N_j(t') dt' \quad (\text{Eq. 1})$$

$\left[\frac{\text{fissions@}^{\text{"i"}}}{\text{sec}} \right]$

 $\left[\frac{\text{fissions@}^{\text{"i"}}}{\text{sec} \cdot \text{source fission@}^{\text{"j"}}} \right]$

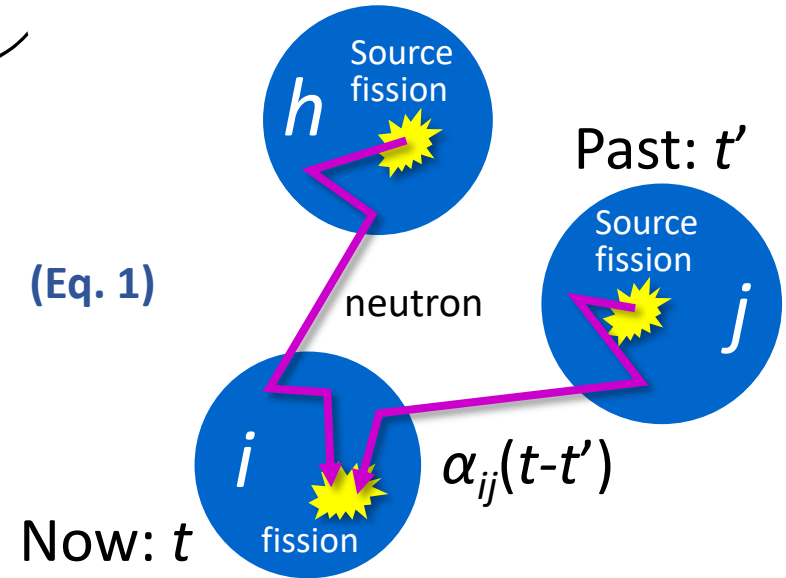


Figure 2: Multi-region system

定義

- $N_i(t)$: 時刻 t の領域 “ i ” での単位時間あたりの核分裂数
- $\alpha_{ij}(\tau)$: τ 秒前に領域 “ j ” で核分裂が起きたときそれによって領域 “ i ” で核分裂が起きる確率密度関数

物理的意味

- 領域 “ i ” の時刻 t での単位時間当たりの核分裂数は、過去のすべての領域での核分裂による寄与の和で表される。

モンテカルロ法による関数 $\alpha_{ij}(\tau)$ の算出

1. 関数 $C_{ij}(\tau)$ の導入

$$C_{ij}(\tau) \equiv \int_0^\tau \alpha_{ij}(\tau') d\tau' = \frac{\sum_{i, 0 \leq t \leq \tau} W_{\text{fission}}}{\sum_{j, t=0} \frac{W_s}{\nu}} \quad (\text{Eq. 2})$$

- 物理的な意味

- 時刻=0に領域“ j ”で一回核分裂が起きた結果、時刻 τ までに領域“ i ”で発生する核分裂の総数

- $C_{ij}(\tau)$ はモンテカルロ計算により評価することができる

2. ノンアナログのモンテカルロ法での核分裂ウエイト W_{fission}

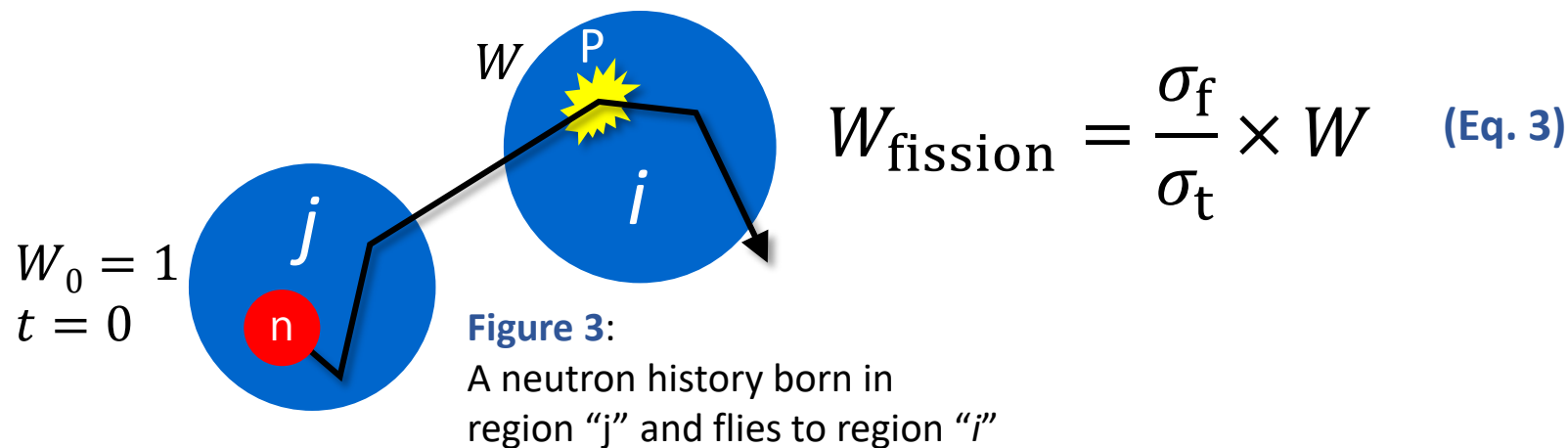


Figure 3:
A neutron history born in region “ j ” and flies to region “ i ”

動特性計算方法

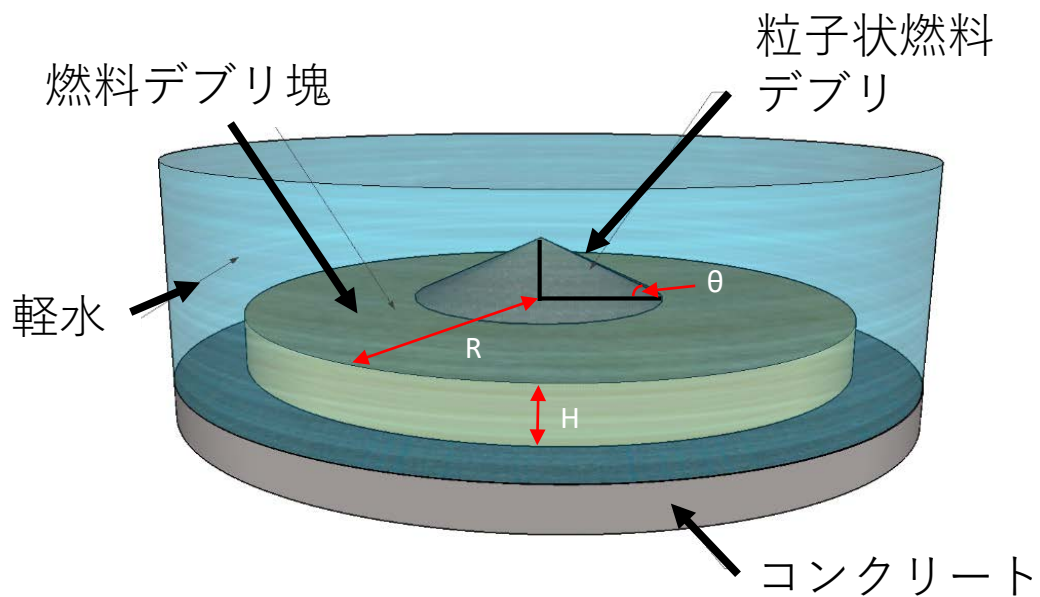
$$N_i(t) = \sum_{j=1}^n \int_{-\infty}^t \alpha_{ij}(t-t') N_j(t') dt'$$
$$\approx \sum_{j=1}^n \left\{ \underbrace{N_j(0) [C_{ij}^{t=0}(\tau')]_{k\Delta t}^{k_{\text{cut}}\Delta t}}_{\text{fission contribution before reactivity insertion}} + \sum_{k'=0}^{k-1} \underbrace{N_j(k'\Delta t) [C_{ij}^{t=k'\Delta t}(\tau')]_{(k-k'-1)\Delta t}^{(k-k')\Delta t}}_{\text{fission contribution after reactivity insertion}} \right\}$$

特徴

- フィードバック効果は時間依存関数 $C_{ij}(\tau)$ で考慮
- 関数 $C_{ij}(\tau)$ は連続エネルギーモンテカルロコードMVP2.0及びJENDL-4.0核データライブラリーを用いて算出
- 取り扱う体系に制約がない
- 現在の手法では遅発中性子の効果は取り入れていない
- きわめて低い出力で臨界になっている状態から即発超臨界になった場合の解析が可能

PCV下部の燃料デブリ塊に粒子状
燃料デブリが落下し堆積した場合
の臨界事故解析の例

解析体系



燃料デブリ組成

Material	Mass %
UO ₂	53
Zr	11
ZrO ₂	10
Fe	11
Others (Cr, Ni, Si, etc.)	15

ウラン濃縮度: 5%

円錐状に堆積した粒子状燃料デブリ

領域体積	4.7x10 ⁵ cm ³
粒子半径	0.1 cm
デブリ体積割合	0.6
領域高さ	53 cm
角度(θ)	30°
領域半径	≈ 92 cm

円柱状燃料デブリ

高さ (H)	5 cm
半径 (R)	150 cm

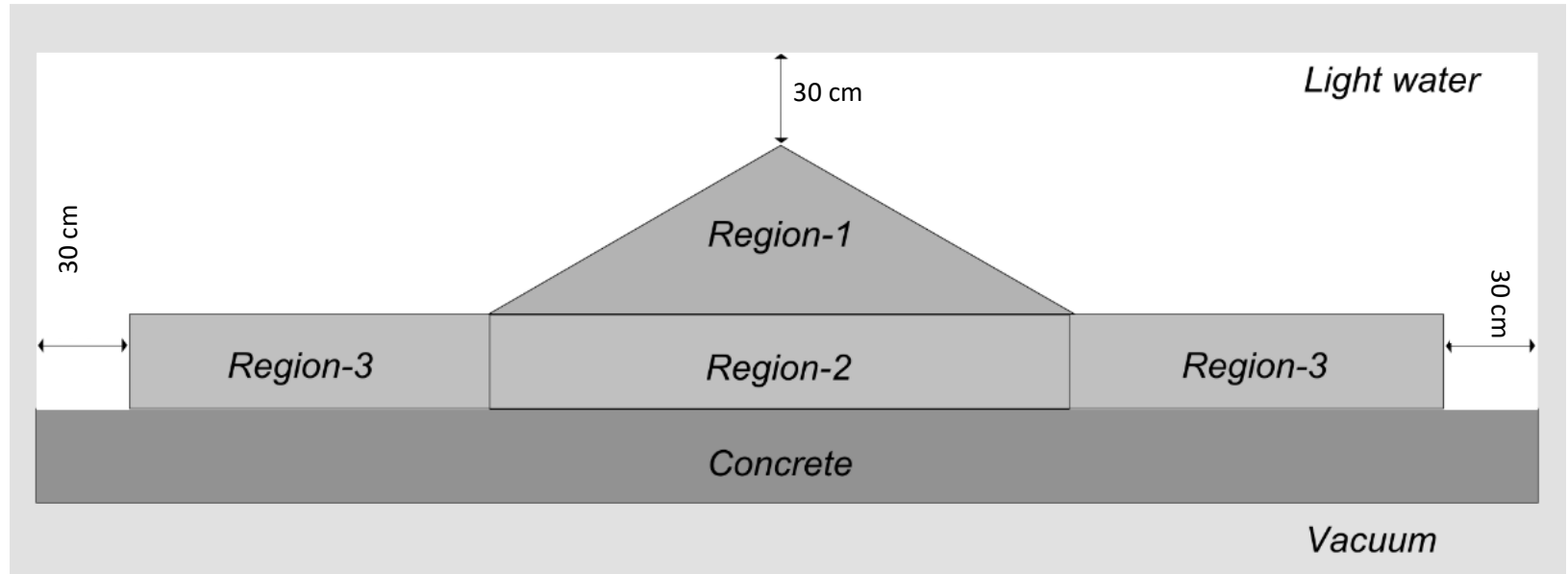
円柱状コンクリート

高さ	30 cm
半径	180 cm

軽水領域

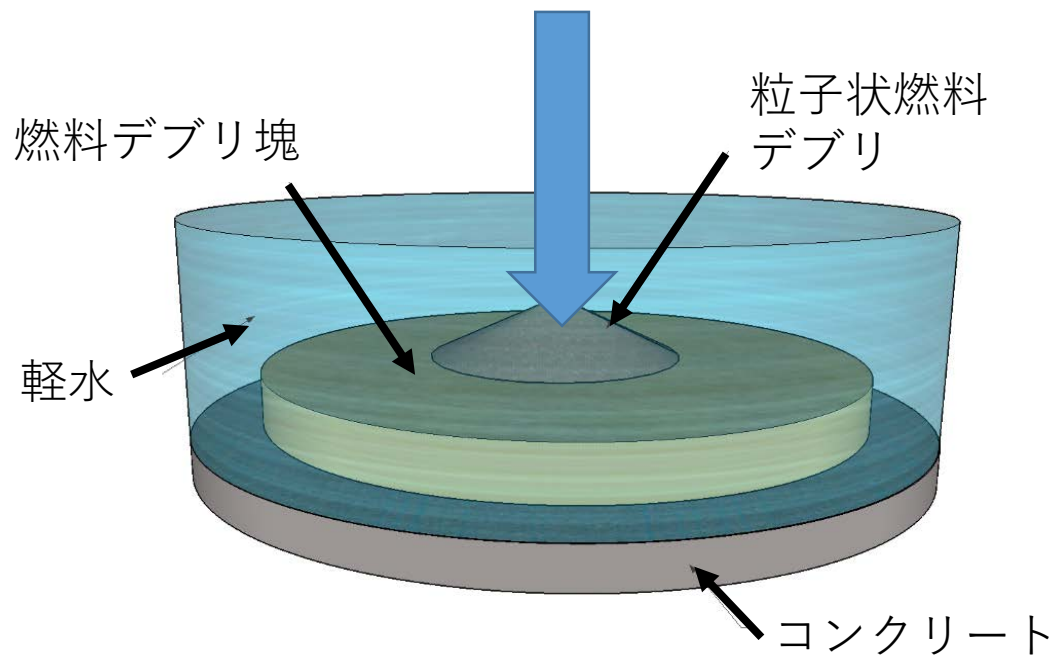
厚さ	30 cm
----	-------

MIKコード解析における領域



想定した事故

砕けた粒子状の燃料デブリが落下



即発中性子による実効増倍率

$$k_p = 1.0141 \quad (\sigma = 0.01\%)$$

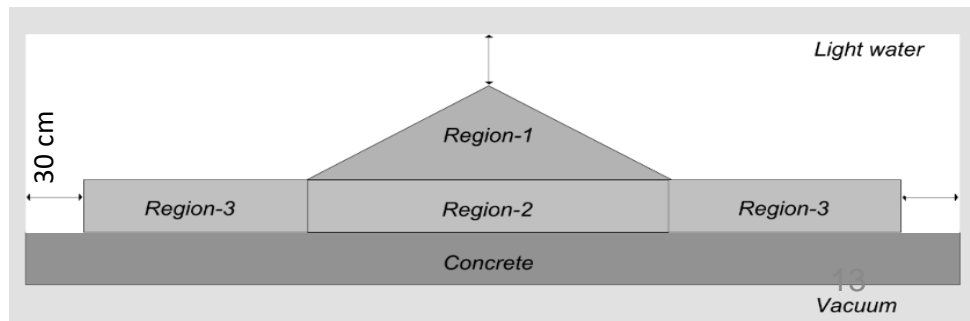
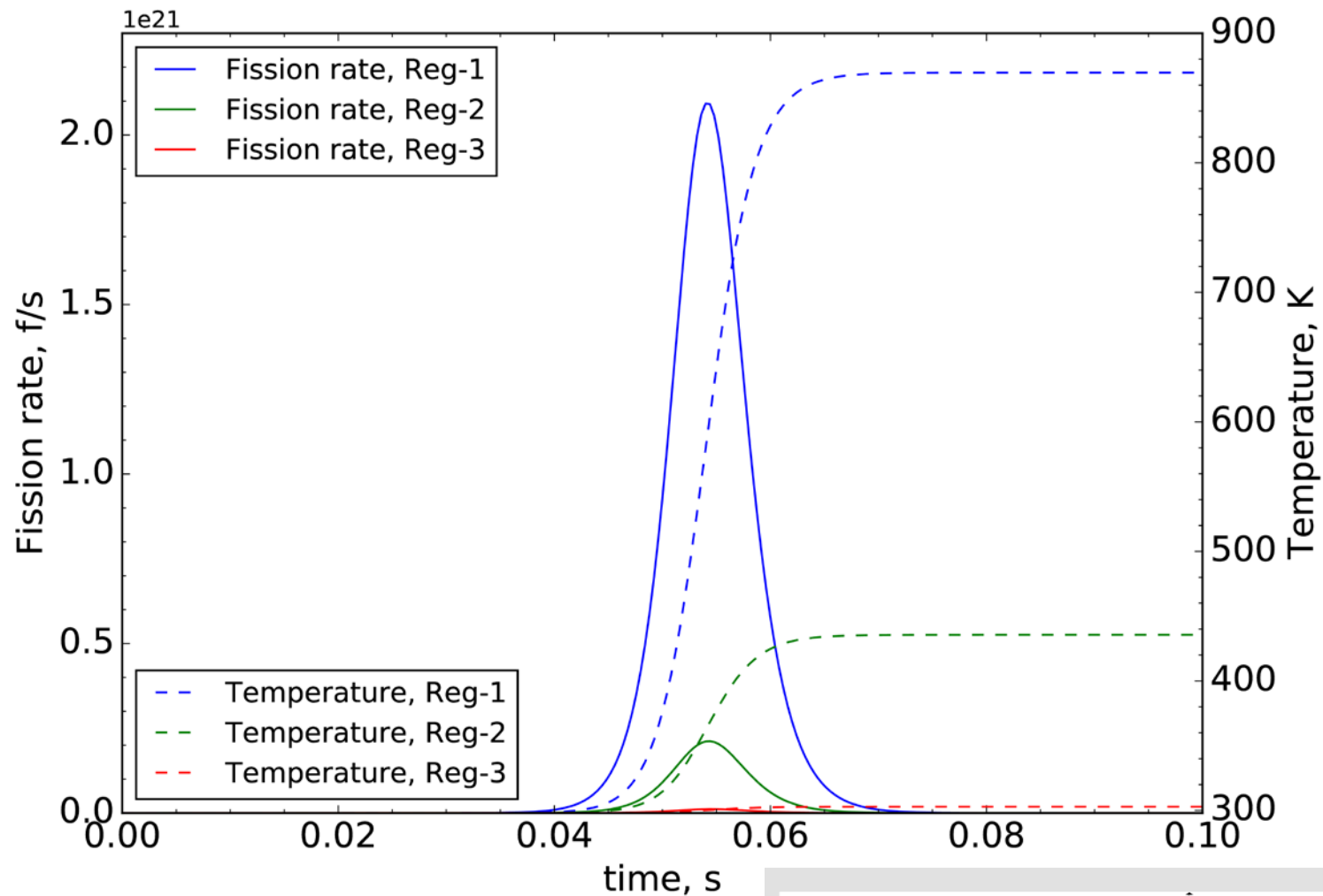
初期状態：
低出力臨界状態(1W)
初期温度: 25°C



時刻0でステップ
状の反応度投入
燃料デブリと水は
断熱（領域間の熱
の移動はない）

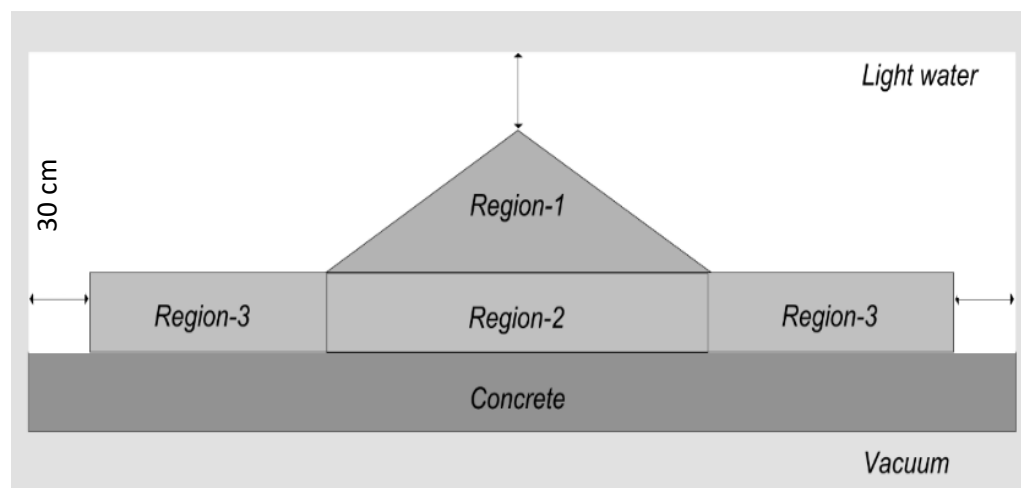
解析結果

解析結果 -各領域の出力と温度の変化-



解析結果 – ピーク出力、発生エネルギー、温度

	Reg-1	Reg-2	Reg-3
ピーク出力 [fissions/s]	2.1×10^{21}	2.1×10^{20}	1.2×10^{19}
発生エネルギー [MJ]	533	54	3
最終温度 [°C]	596	163	30



結論

- 軽水中にある燃料デブリ塊の上に粒子状燃料デブリが落下・堆積したことで発生する臨界事故の解析を空間依存動特性解析手法を用いて行った。
- 空間依存動特性解析コードMIKを用いることにより温度上昇によるフィードバック効果を取り入れてそれぞれの燃料デブリ領域の発生エネルギーと温度上昇を求めることができることが確認できた。
- この手法の活用により再臨界事故時の精度のよい線量評価を行うことが期待できる。

今後の計画

- PHITSを用いた線量計算
- エネルギーのみならず線量を考慮した事故解析
- 有効な対策方法の検討