

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

研究背景

- 福島第一原子力発電所デブリ除去
 - 再臨界事故の防止
 - 再臨界となった場合の影響評価と対策の検討
- デブリの状態
 - 詳細は不明
 - 複雑な組成・形状となっている可能性
 - さまざまな組成
 - さまざまな大きさ、形状、配置
 - 水との混合状態
 - デブリ取り出し作業によって大きさ、形状、配置が変わる可能性

研究背景（つづき）

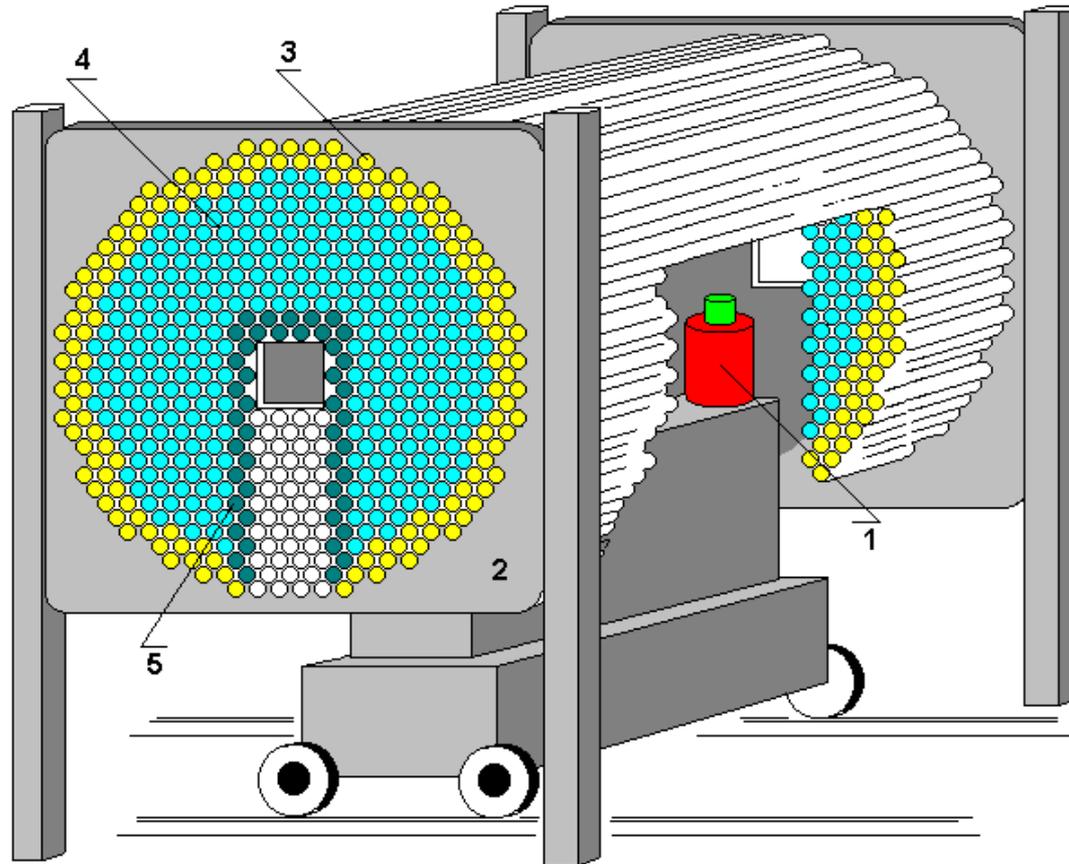
- 再臨界が考えられる状況の例
 - デブリ取り出し作業により小径の多数のデブリ粒子が発生または移動
 - 水との最適混合割合
 - 水減速材をはさんで他の大きなデブリと核的に弱く結合している状況となる可能性もある
- 再臨界時の動特性解析
 - 臨界となったデブリ・水混合体の周囲のデブリが影響を与える可能性あり
 - 一点炉近似、拡散近似では取り扱えない現象

研究の目的

- 東工大で開発された積分型動特性モデル解析コードを用い領域間の結合が弱い燃料デブリ体系での臨界事故解析に適用し放出エネルギーや線量等の影響量の評価を行う。

核励起レーザー研究

-核エネルギーを直接光エネルギーに変換する技術



1. 金属ウランパルス炉心
2. レーザーモジュール
3. 中性子反射体
4. 核励起レーザー発振セル
5. 内部中性子反射材

レーザー発振セルの内側を濃縮ウランでコーティング
発振セルの間にはポリエチレン減速材を装荷

核励起レーザー発振実験用原子炉（ロシアIPPE）

Barzilov A.P., Gulevich A.V., Kukharchuk O.F. et al. *Some Aspects of a Nuclear and Radiation Safety of a Coupled Pulse Reactor Systems* // Proc. Intern. Conf. ARS'97, 1997.の図に加筆

積分型動特性モデル

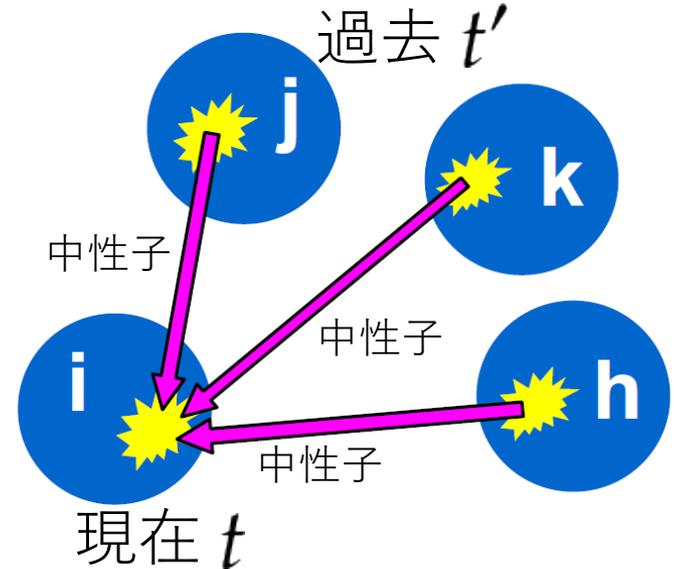
領域*i*の単位時間の核分裂数×分布関数

核分裂密度 $P(\mathbf{r}, t) = N_i(t)\psi_i(\mathbf{r})$ “多点化”する

$$\int_{V_i} \psi_i(\mathbf{r}) d\mathbf{r} = 1$$

$$\alpha_{ij}(t - t') \equiv \int_{V_i} d\mathbf{r} \int_{V_j} d\mathbf{r}' \psi_j(\mathbf{r}') \alpha(t - t', \mathbf{r}', \mathbf{r})$$

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



積分型動特性モデルの概念図

$N_i(t)$: 時刻*t*での領域*i*における単位時間あたりの核分裂数

$\alpha_{ij}(\tau)$: 領域*j*で最初の核分裂が起きた場合に、その核分裂から τ 秒後に領域*i*で発生する核分裂数[fissions/sec/fission]

モデル特徴

- 理論上、適用する問題に制限が無い。
- 即発中性子寿命のような積分パラメータが必要ない。
- 但し、 $\alpha_{ij}(\tau)$ を求めておく必要がある。

モンテカルロ法による $C_{ij}(\tau)$ 計算手法開発

□ $C_{ij}(\tau)$ のコリジョンエスティメイト

核分裂を起こす中性子ウエイト

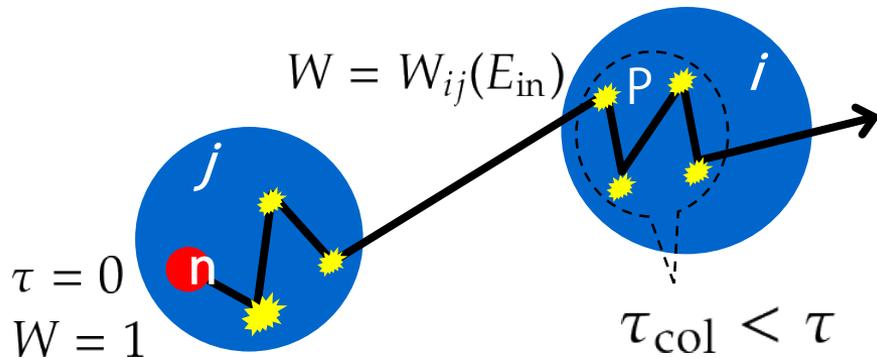
$$C_{ij}(\tau) \equiv \int_0^\tau \alpha_{ij}(\tau') d\tau' = \frac{\sum_{\tau} \boxed{W_{\text{fission}}}}{\sum \boxed{\frac{W_{sk'_j}(E_0)}{v_{pk'}(E_0)}}} \left[\frac{\text{fissions@i} \leftarrow \text{j} (0 \leq \tau' \leq \tau)}{\text{fission@j}} \right]$$



領域 j での核分裂1回あたり、その核分裂発生から時間 τ までに領域 i で累積何回の核分裂が起きている

か？

□領域間のノンアナログ中性子ランダムウォーク



領域jで生まれて、

領域iで核分裂を起こしうる中性子ヒストリ

点Pで核分裂を起こす中性子ウエイト

$$W_{\text{fission}} = \frac{\sigma_{kf}(E_{\text{in}})}{\sigma_{kt}(E_{\text{in}})} \times \boxed{W_{ij}(E_{\text{in}})}$$

ミクロ核分裂確率 中性子ウエイト

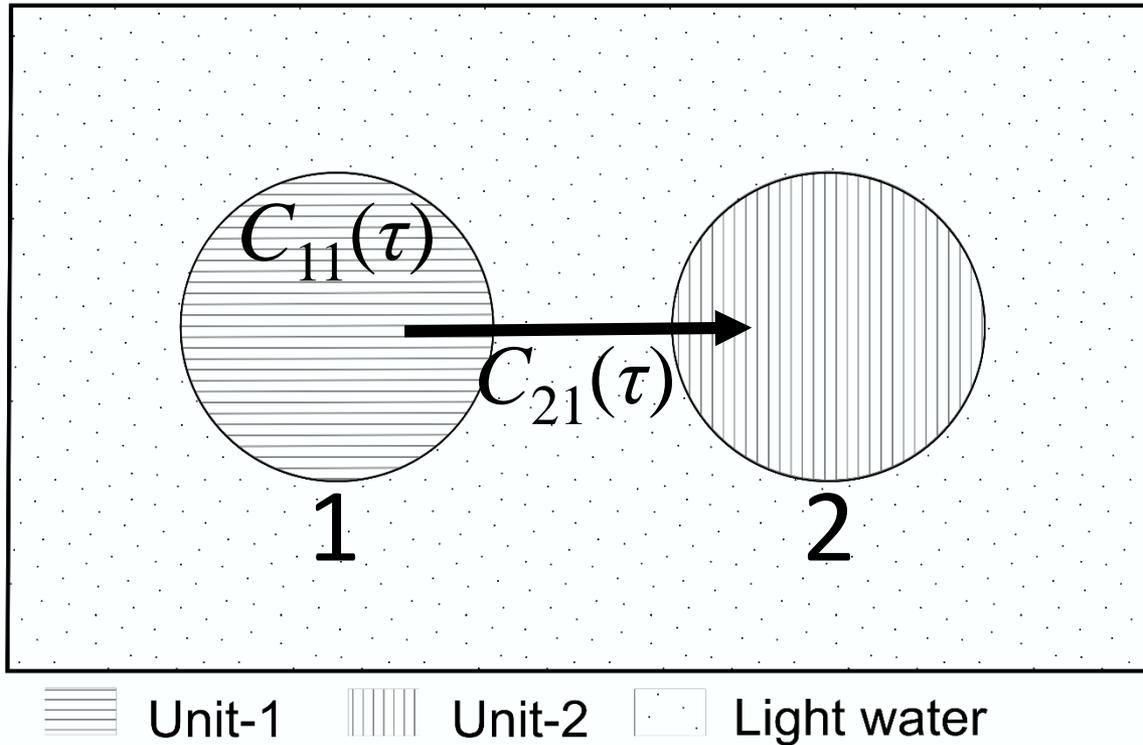
空間依存動特性解析コード概要

1. 積分型動特性モデルに基づき空間依存動特性解析を行う。
2. モデルの解法として前進計算法を採用し、独自にコーディングを行った。

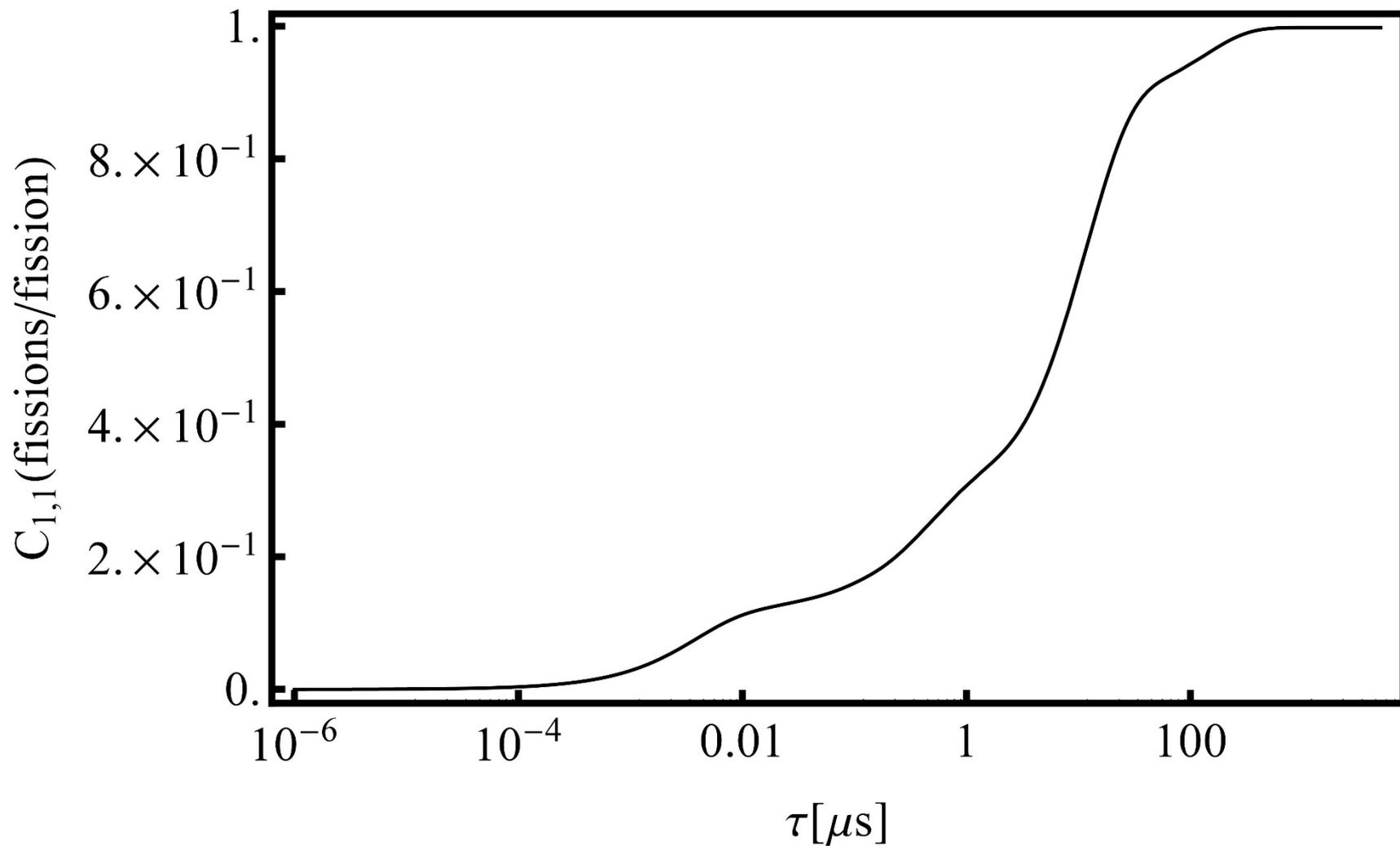
$$N_i(t) = \sum_{j=1}^n \int_{-\infty}^t \alpha_{ij}(t-t') N_j(t') dt'$$
$$\approx \sum_{j=1}^n \left\{ N_j \left[C_{ij}(\tau') \right]_{k\Delta t}^{k_{\text{cut}}\Delta t} + \sum_{k'=0}^{k-1} N_j(k'\Delta t) \left[C_{ij}(\tau') \right]_{(k-k'-1)\Delta t}^{(k-k')\Delta t} \right\}$$

3. 極低出力定常状態から即発超臨界パルスを生じる動特性問題への適用を想定。
4. 遅発中性子は考慮しない。
5. 反応度はステップ状に投入する。
6. 反応度フィードバック効果は $C_{ij}(\tau)$ を温度依存にすることで動特性計算結果に反映する。
7. 各領域の温度上昇をステップ毎に断熱近似で計算する。
8. $C_{ij}(\tau)$ はモンテカルロ法 (MVP2.0 + ν_p 固有値計算機能) によって計算する。

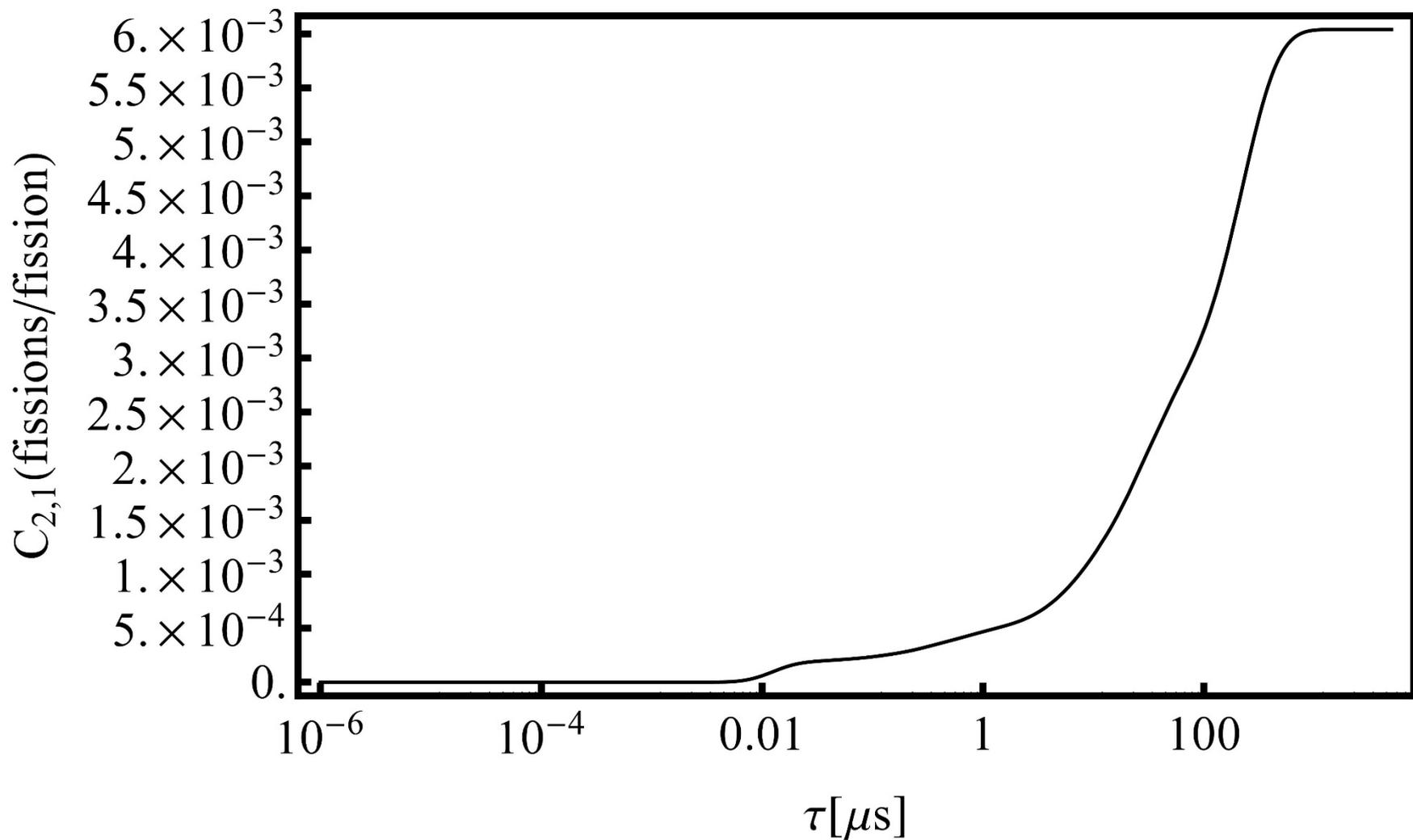
$C_{ij}(\tau)$ の例



- 軽水中にある UO_2 粒子と軽水の混合体からなる2つの球体
- ・ 球体直径：2.7 cm、 UO_2 粒子直径：1mm、U濃縮度：5%、
球体間の距離：10cm



軽水中にある UO_2 粒子と軽水の混合体からなる2つの球体の $C_{11}(\tau)$

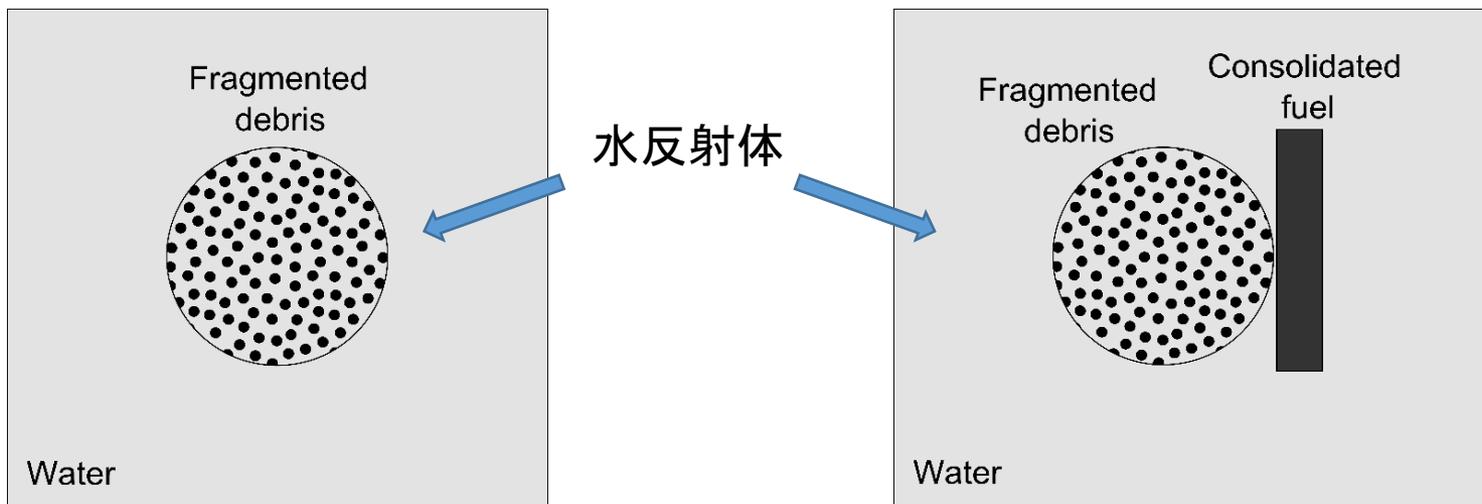


軽水中にある UO_2 粒子と軽水の混合体からなる2つの球体の $C_{21}(\tau)$

動特性解析例

燃料デブリ体系

形状及び組成



単一燃料デブリ粒子体系

- 軽水と半径1mmの燃料デブリ粒子の混合体が単一球の状態が存在
- デブリ組成: UO_2 76.0%; Zr 18.7%; Fe 2.7%; and Cr, Mo, Cd etc
- ウラン濃縮度: 5wt%
- 球内でのデブリ体積割合: 0.2

燃料デブリ粒子と燃料デブリ塊の体系

- 軽水と半径1mmの燃料デブリ粒子の混合体球の近くに固体燃料デブリが存在している体系
- 燃料デブリ組成は単一体系の時と同じ
- デブリ燃料球と燃料デブリ塊は接している

解析条件

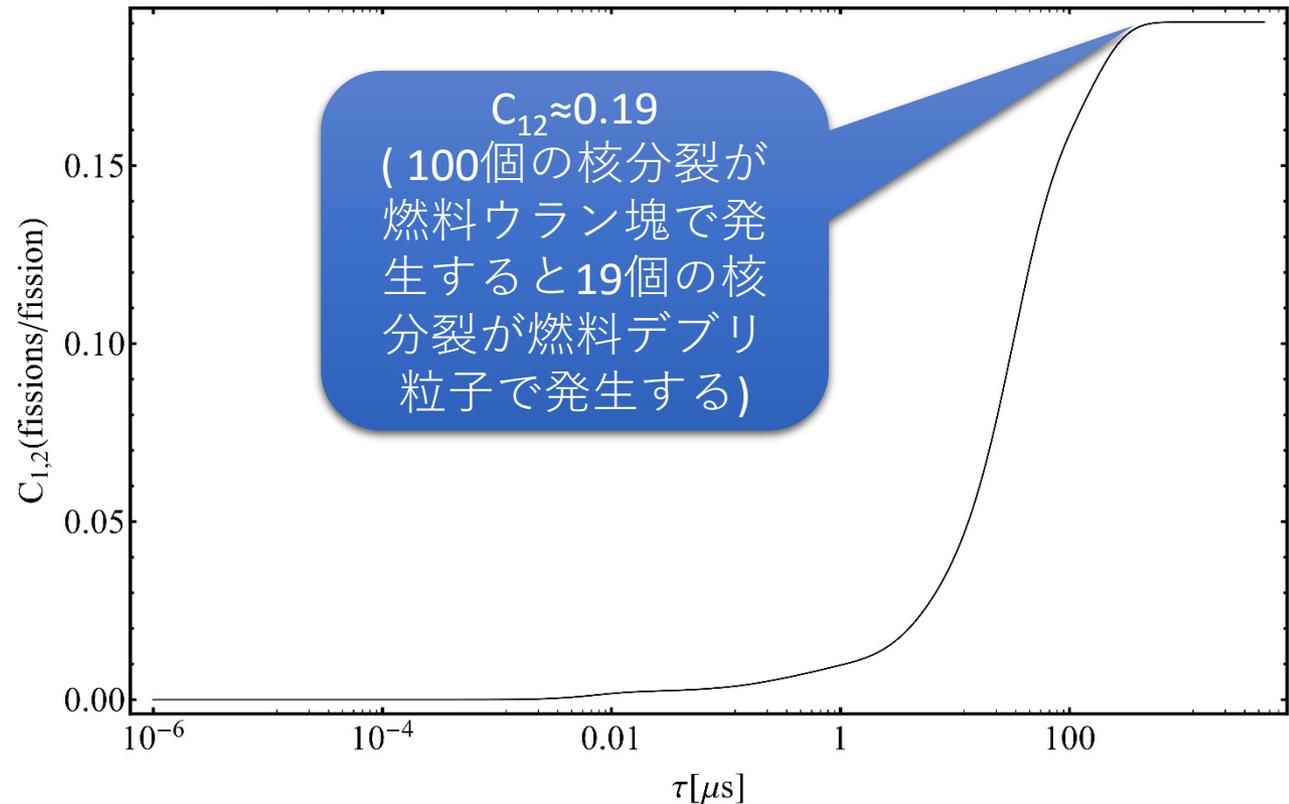
- 初期条件
 - 出力1Wの臨界状態
- 単一燃料デブリ粒子球体系
 - 臨界時の燃料デブリ球の半径 $R_{\text{CRITICAL}} \approx 31.0 \text{ cm}$
 - 燃料デブリ粒子球半径をステップ状に大きくして反応度投入 ($0.00194 \Delta k/k^*$)
- 燃料デブリ粒子球と燃料デブリ塊の体系
 - 臨界時の燃料デブリ粒子半径 $R \approx 30.3 \text{ cm}$
 - 燃料デブリ塊の大きさ $XYZ=8.75 \times 70 \times 70 \text{ cm}$
 - 燃料デブリ粒子球半径をステップ状に大きくして反応度投入 ($0.00195 \Delta k/k^*$)

*) $k=k_{\text{eff}}(1-\beta)$ 即発中性子実効増倍率

中性子輸送モンテカルロによる $C_{ij}(\tau)$ 計算

フィードバック効果を取り入れるための温度点を2点とし、2つの領域の温度を変えて4回のモンテカルロ計算を行い16個の $C_{ij}(\tau, \mathbf{T})$ 関数を求めた。

個々のモンテカルロ計算では80万ヒストリー×80バッチ（6400万ヒストリー）で解析



燃料デブリ粒子と燃料デブリ塊からなる体系の $C_{12}(\tau)$

解析結果

-反応度投入後の出力変化-

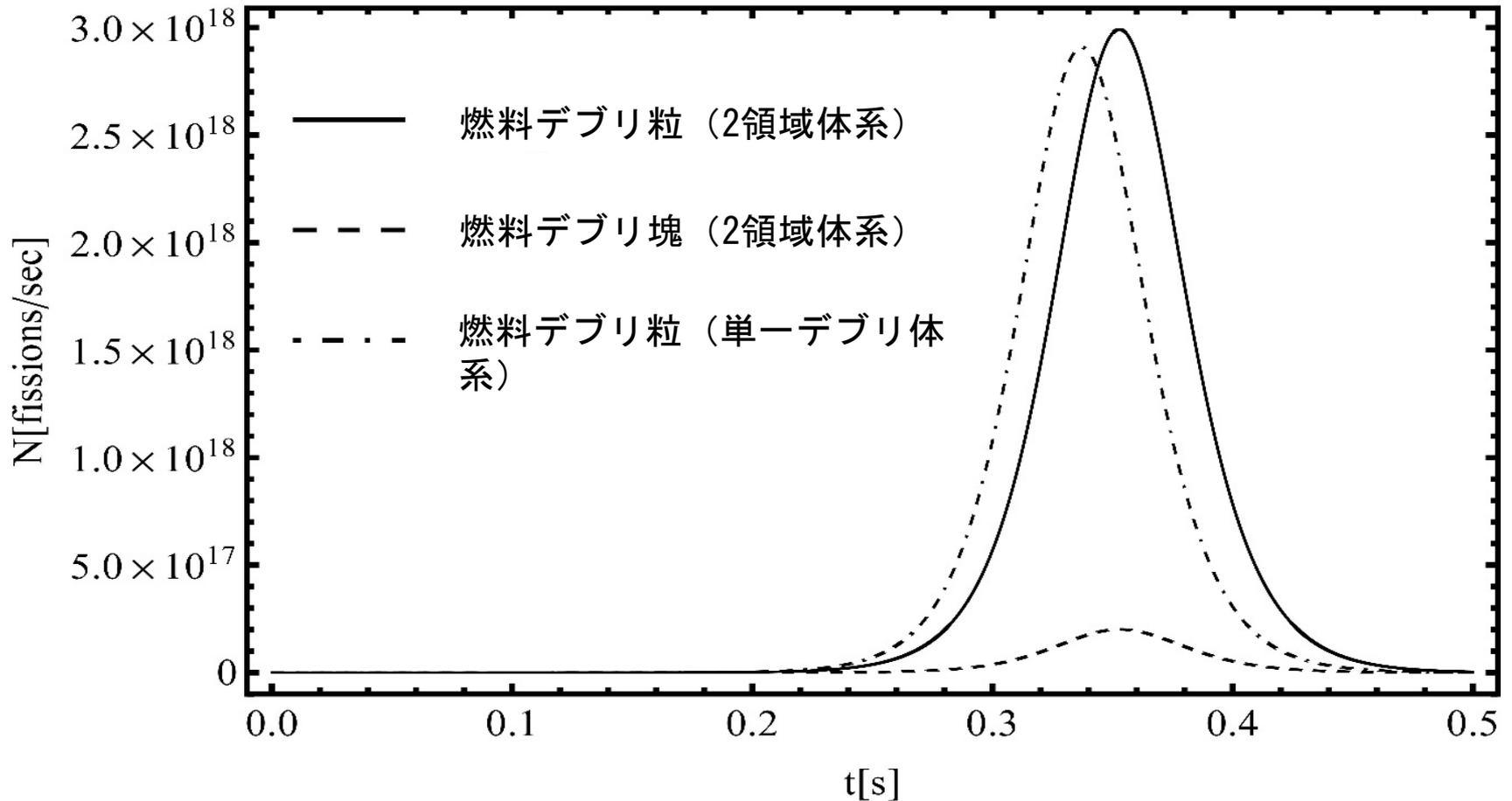


図 反応度投入後の出力変化

解析結果

-反応度投入後のピーク出力と発生エネルギー-

	単一燃料デブリ粒子球体系	燃料デブリ粒子球と燃料デブリ塊の体系	
		燃料デブリ粒子	燃料デブリ塊
投入反応度 [$\Delta k/k$]	0.00194	0.00195	
発生エネルギー（全核分裂数） [fissions]	$2.02 \cdot 10^{17}$	$2.17 \cdot 10^{17}$	$1.45 \cdot 10^{16}$
		$2.31 \cdot 10^{17}$	
ピーク出力 [fissions/s]	$2.91 \cdot 10^{18}$	$2.99 \cdot 10^{18}$	$2.01 \cdot 10^{17}$
		$3.19 \cdot 10^{18}$	

- 燃料デブリ塊が近傍に存在すると塊での核分裂の発生により、燃料デブリ粒子のみのときに比べ発生エネルギーが大きくなっている。（約14%）

まとめ

- 燃料デブリ取出し時の再臨界事故時の解析を行っている。
- 例として水中に粒子状燃料デブリのみ存在する体系と燃料デブリ塊が近傍に存在する体系での解析を行い発生エネルギーの違いについて検討した。
- 今後より実態に近い体系での解析および作業位置等での線量評価を予定。