

中性子深層透過における 核データの不確かさの誤差伝播

Error propagation of nuclear data uncertainty in neutron deep penetration

山野直樹

特定非営利活動法人放射線線量解析ネットワーク(RADONet) 東京工業大学 科学技術創成研究院

> **令和6年度第1回ラドネット研究会** 15th June 2024 @**原子力安全技術センター**





- ・背景(これまでの研究を含めて)
- ・不確かさ解析手法
- ・深層透過問題への適用
- ・まとめ

背景



- 1. 中性子深層透過の評価量に対する断面積の不確かさの誤差伝播を評価することは,廃止措置等のV&Vに重要である。
- 通常,誤差伝播はENDF-6形式の核データで与えられる共分散ファイルを用いて行われる。しかし、ENDF-6フォーマットは、核データに存在する可能性のあるすべての不確かさの相関を表現することができないことも認識されている。

 $D(y) = SD(g)S^T$ S:感度行列,D:共分散行列

- MF31: Covariance of the average number of neutrons per fission $ar{
 u}$
- MF32: Covariance of resonance parameters
- MF33: Covariance of cross sections (no correlation between different reactions)
- MF34: Covariance of angular distribution of secondary neutrons (MT=2, P₁ only)
- MF35: Covariance of energy distribution of secondary neutrons (MT=18 only)
- MF40: Covariance of radionuclide production (none)

(弾性散乱の角度分布と全断面積の相関を含む)異なった反応間の相関 データの処理は挑戦的課題である。 <u>これまでの研究</u>



Estimation of uncertainty in transmutation rates of LLFPs in a fast reactor transmutation system via an estimation of the cross-section covariances^{*}

In the study, a concept of using three small-size (MONJU 300MWe-class) fast reactor cores was proposed to load six LLFPs in radial and axial blankets and shielding assembly with YD_2 and/or YH_2 moderators.



Support Ratio (transmutation rate/production rate in a system, %/year)



Zr (61pins/assembly)

* N. Yamano, T. Inakura, C. Ishizuka, S. Chiba. J. Nucl. Sci. Technol. 58:5 (2021) 567-578. doi: 10.1080/00223131.2020.1845839.

<u>これまでの研究(つづき)</u>



Estimation of uncertainty in transmutation rates of LLFPs in a fast reactor transmutation system via an estimation of the cross-section covariances^{*}



Support Ratio (transmutation rate/production rate in a system, %/year)

* N. Yamano, T. Inakura, C. Ishizuka, S. Chiba. J. Nucl. Sci. Technol. 58:5 (2021) 567-578. doi: 10.1080/00223131.2020.1845839.





- トータルモンテカルロ法(TMC)¹は、T6²に基づいて、断面積の不確かさの影響を評価するための手法であり、多数のランダムな断面積データを作成する必要がある。
- 他方,共分散ファイルが評価されていれば,SANDY³を 適用して,それを基に任意の数のランダム断面積データ を作成することができる。
- 5. 本研究⁴では、²⁸Si断面積の不確かさに着目して、²³⁵U熱 核分裂中性子源を用いて厚さ3mのコンクリートを透過し た後の中性子線量の不確かさを、ランダムサンプリング 法を用いた3種類のトータルモンテカルロ法に基づいて 評価した。
- [1] A.J. Koning, D. Rochman. Ann. Nucl. Energy 35 (2008) 2024-2030.
- [2] A.J. Koning, D. Rochman, J.-Ch. Sublet, et al. Nucl. Data Sheets 155 (2019) 1-55.
- [3] L. Fiorito, et al. Ann. Nucl. Energy 101 (2017) 359-366.
- [4] N. Yamano, T. Inakura, C. Ishizuka, S. Chiba. J. Nucl. Sci. Technol., 59[5] (2022) 641-646.

<u>不確かさ解析手法</u>



- T6を用いてJENDL-4.0の²⁸Si断面積を再現した後に,各 種モデルパラメータをランダムに振って1000個のラン ダムファイルを生成した。
- 最初の方法では、これらのランダムファイルを直接使用して、さまざまな物理量間の相関関係をすべて考慮した処理を行った。
- 3. 2番目の方法では、ENDF-6形式の共分散ファイルを作成し、それを基にSANDYを使用して1000個のランダムファイルを作成した。
- 第3の方法では、T6によって生成されたランダムファイ ルが使用されるが、角度分布データは摂動を加えない ノミナルデータに固定された。
- 各手法について1000セットの群定数を作成し、1次元Sn 輸送コードANISNを用いて厚さ300cmのコンクリート を透過する中性子を計算し、中性子線量の期待値と標 準偏差を比較した。









T6**で作成した²⁸Si断面積の相対標準偏差と相関行列***



¥

Tokyo Tech



<u>コンクリート深層透過問題への適用</u>

ANISN計算体系は、下図に示す一次元球体系で、中心から100cm までを 空気層として、その後300 cm厚の輝緑岩(Diabase)コンクリートとした。 左側境界は反射条件、右側境界は真空条件とした。線源はU-235核分裂 中性子スペクトルを最初の100 cm 空気層中に一様に分布させた。

群定数はNJOY2016を用いて作成し,中性子199群(VITAMIN-B6群構 造)を採用した。ANISNの計算条件はP₅S₁₆である。

> Outer region (Air, I m thickness) Diabase concrete (3m thickness)



- Source region (Air)
 - Im radius
 - Uniform distribution
 of ²³⁵U thermal fission
 spectrum





TMCで得られたT6とSANDY及び弾性散乱断面積の 角度分布(MF4)非摂動による中性子線量分布

期待値の減衰はほぼ一致したが、その標準偏差は異なる結果となった





TMCで得られたT6とSANDY及び弾性散乱断面積の 角度分布(MF4)非摂動による中性子線量分布

結果(つづき)

期待値の減衰は, T6, SANDY, MF4非摂動の3者でほぼ一致したが, 標準偏差は異なっていた。



13



14

光学定理:
$$Imf(0) = \frac{k}{4\pi}\sigma_t \rightarrow \sigma_{el}(0) = |f(0)|^2 \ge \left(\frac{k}{4\pi}\sigma_t\right)^2$$

ここで *σ_{el}*(0), *σ_t* と *k* は, それぞれ0度方向の弾性散乱断面積, 全断 面積, 入射中性子の波数。全断面積と前方方向弾性散乱断面積に は正の相関があり, 弾性散乱断面積の角度分布(MF4)の摂動を無視 すると相関は減少する。



* G.C. Wick. A Theorem on Cross Sections. Phys. Rev. 75(9) (1949) 1459.



T6で生成された1000個のランダムファイルにおける ²⁸Siの全断面積と前方弾性散乱断面積の正の相関



N. Yamano, T. Inakura, C. Ishizuka, S. Chiba. J. Nucl. Sci. Technol. 59(5) (2022) 641-646. doi: 10.1080/00223131.2021.1997665

全断面積と前方散乱断面積の相関





 ・パラメータの摂動による全断面積の変化に起因する透過率の変化
 を打ち消すように前方弾性散乱断面積が変化するため、微分散乱
 断面積の摂動を全断面積の摂動と同時に考慮した方が透過率の分 散が低減する <u>まとめ</u>



今回開発した不確かさ解析手法は、T6法とTMC法を組み合わ せたものであり、現行のENDF-6形式では処理が困難な弾性散 乱の角度分布と全断面積の相関を考慮することができ、核 データの不確かさによる原子炉物理量への伝播を定量的に評 価できる。

コンクリート深層透過への適用例を示した。弾性散乱の角度 分布と全断面積の相関を考慮することにより,線量率の不確 かさは低減した。

将来的には、宇宙炉や核融合炉の遮蔽解析、加速器駆動シス テム (ADS) など、さまざまな分野への応用が期待される。



Positive correlation between the total cross section and the forward elastic scattering cross section in the 1000 random files generated by T6 for ⁶³Cu

- As with ²⁸Si, there is a positive correlation between the total and forward scattering cross sections for ⁶³Cu.
- Ignoring the perturbation of MF4, the correlation decreases.



N. Yamano, S. Chiba, T. Inakura, C. Ishizuka. J. Nucl. Sci. Technol. 61(1) (2024) 74-83. doi: 10.1080/00223131.2023.2272759.

ご清聴ありがとうございました

本日ご紹介した下記論文を入手希望の方は山野までご連絡ください。pdf版をお送りします。 N. Yamano, T. Inakura, C. Ishizuka, S. Chiba. J. Nucl. Sci. Technol. 59(5) (2022) 641-646. doi: 10.1080/00223131.2021.1997665.

N. Yamano, S. Chiba, T. Inakura, C. Ishizuka. J. Nucl. Sci. Technol. 61(1) (2024) 74-83. doi: 10.1080/00223131.2023.2272759.





