核データニュース，No.133 (2022)

核データ部会、シグマ調査専門委員会合同セッション

「原子炉の廃止措置における放射化断面積データの現状と利用」

(2) 近年の評価済み核データライブラリを用いた原子炉廃止措置のための放射化計算手法の課題と提言

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（JAEA）
廃炉環境国際共同研究センター（CLADS）
燃料デブリ研究ディビジョン
放射線特性評価グループ
奥村 啓介
okumura.keisuke@jaea.go.jp

1. はじめに

筆者は、東海村において長らく原子炉解析用のデータ・コードの開発や JENDL ベンチマークなどの基礎・基盤研究を地道に続けていたが、福島第一原子力発電所（1F）の事故後、JAEA に福島研究開発部門 [1]が設立され（2014 年）、その中で国内外の英知を結集して 1F 廃炉研究を支援するための CLADS も設立（2015 年）されたことから、現在はその一員として 1F に近い富岡町において主に燃料デブリ取り出しに係る研究開発を進めている。そのためか、本発表セッションの企画段階では、1F に係る放射化計算などの紹介を依頼された。しかし、事故炉の廃止措置は通常炉のそれとは大きく異なるところが多く、前後の講演者の内容ともそぐわないため、通常炉の廃止措置をテーマとして標題のような内容の発表をさせていただくこととした。その後、核データニュースへの投稿を依頼されたが、著作権の観点から「全く同じ内容ではいけない。学会発表の予稿と同じ図表を使ってはいけない。」といった制限があるとのことで、本務が忙しい中、なかなか筆が進まなくなってしまった。

原子力学会での発表では、以下の内容を 15 分程度で紹介させていただいた。

① 原子炉廃止措置における放射化計算手法の概要
② 多群放射化断面積ライブラリの作成と応用
③ ORIGEN コードの進化
④ 近年の評価済み核データの放射化計算への適用課題
⑤ 放射化計算の課題解決に向けた提言

これらのうち、①～④については、原子力学会の予稿 [2]に要点を記述したので見てい

ただければ幸いである。一方、最後の⑤については、予稿には詳しい内容を記述しておらず、発表でも多くを説明する時間もなかったため、この場を借りて以下に「提言」の部分を中心に述べさせていただくこととする。

2. 放射化計算手法の課題と提言

(1) 微量不純物データの整備

原子炉廃止措置における放射能インベントリを扱う問題では、数 ppm～数百 ppm 程度しか材料中に含まれていない元素であっても、それらに含まれる核種の放射化が問題になることが多い。理想的には、原子力プラントにおいて、放射化廃棄物が問題にされる領域での全ての材料物質に対して、複数回の実測に基づく初期元素濃度の統計的分布が与えられるのが望ましい。そこまででなくても、せめて保守的評価のための最大元素濃度や実測での検出下限値などの標準的なデータは必要である。原子炉廃止措置に向けて、このようなデータベースを整備して標準化する活動は事業者を中心に進められているが、未だ実現には至っていない。

放射化計算では、初期組成に対して 100%の感度があることから、材料中微量不純物の初期元素濃度は最も大きな不確かさ（ファクターレベル）要因であり、一般的に核データの不確かさの比ではない。よって、先ずは、材料毎の微量不純物元素（希ガスを除く約 75 核種）の濃度データを充実させることが重要と言える。

(2) 新しい放射化計算コードとデータライブラリの開発

2021 年 12 月に公開された JENDL-5 [3]の中性子反応サブライブラリは 795 核種に対する断面積を収納し、崩壊データサブライブラリも 4071 核種に対するデータを収納している。これにより、従来のように JENDL で不足するデータを JEFF-3.0/A [4]などで補完する必要はなくなった。一方で、核種や核反応の大幅増や崩壊データ（壊変チェーンやこれと密接に関係する線源データ）の詳細化により、日本では現在も利用されている ORIGEN2 などの基本設計が古いコードは対応できなくなった [2]。米国のオークリッジ国立研究所（ORNL）では、これまで燃料の燃焼計算や放射化計算に長く使われてきた 3 群スペクトルインデックス入力方式の ORIGEN-S モジュールの開発継続を止め、最近の SCALE6.2 においては全く新しい ORIGEN モジュールに刷新している [5]。新しい ORIGEN モジュールでは、多群断面積対応を図るとともに、放射化（燃焼）方程式の解法も、従来の指数展開法をベースにした手法ではなく、近年の複雑な壊変チェーンにもロバストに対応が可能なチェビシェフ有理近似法（CRAM）[6]を採用している。また、放射化計算に関して特に重要なポイントは、対象とする体系や材料に応じて必要な核反応タイプを扱えることであり、6 種類の核反応（(n,γ), (n,2n), (n,3n), (n,f), (n,p), (n.α)）しか扱えない ORIGEN2 は、今後の多様化対応が求められる放射化計算には十分な適用性があるとは言い難い。よっ

て、中性子スペクトルが場所によって大きく変化し、様々な核反応の寄与が考えられる放射化計算では、SCALE システムのように多群で 20 以上の核反応を扱えるコードを利用することが望ましい。

JENDL-5 の核データを SCALE システムで利用できるようにすることも当面の対処方法として考えられるが、本来、核データと解析コードは相互に関係する部分が多々あり、全く独立したものとは言い難いことから、断面積、壊変チェーン、核分裂収率、半減期、中性子や光子の線源データ等は、これらを使用する放射化計算コードとセットで開発することが望ましい。また、通常 1 回の放射化計算自体は秒単位で計算することが可能であるが、大きな原子力プラント全体の中性子輸送計算で扱う全メッシュ領域に対して放射化計算が求められることもあるため、主に計算手法に依存する精度と計算時間とのバランスも実用上重要と言える。

(3) 放射化感度解析

材料や微量不純物元素の数は多く、(1)で述べた微量不純物データの整備には多くの時間と予算が必要となる。このため、やみくもに元素分析をするのは効率的ではなく、放射性廃棄物の処理・処分の専門家や現場で規制対応をする事業者が要望する放射性核種の生成起源となる核種を、(2)で述べた適切なデータ及びコードを使用して放射化計算の専門家が特定するとともに優先度を与えることが重要である。目的とする放射性核種の選定は、放射性廃棄物のクリアランスや処理・処分方法などに依存した告示濃度限度や分析の難易度等に依存するため、核データ、炉物理、放射線工学、バックエンド、分析などの分野間の連携が重要と言える。

支配的な元素を特定するための放射化感度解析は、そのための特別なコードを開発しても良いが、放射化計算に要する計算時間は数秒であることと、検討する元素の数はせいぜい 75 程度であることから、網羅的な直接計算による放射化感度解析 [7,8]でも十分に対応可能である。放射化計算のための核データの精度向上も、放射化感度解析により目的とする放射性核種の支配的な生成（核反応）経路とエネルギー領域を特定してから、他の不確かさによる影響因子も考慮して効率的に進めることを推奨する。

(4) 放射化計算用データ・コードの V&V 手法の確立

実際の放射化計算は、原子力プラントの中性子輸送計算と部位ごとの核種崩壊生成計算とで構成されるが、ここでは「放射化計算」＝「運転停止後の長期冷却期間を含む核種崩壊生成計算」とみなすこととする。また、最初の V（Verification）は、評価時の原子数（または原子数密度）を求める核種崩壊生成計算の基礎方程式 [9]を、核データ（核反応断面積、核異性体比、壊変系列、崩壊分岐比、核分裂収率など）と中性子束の時間変化が全て真であると仮定して解いた場合に、正しい解が得られるかどうかの確認とする。更

に、放射化計算の主な目的が遮蔽計算や線量評価であることから、得られた原子数から 2 次的に得られる、放射能、崩壊熱、光子線源、中性子源が正しく得られるかの確認も必要不可欠である。

現状では、このような意味での Verification が厳密には行われておらず、複数の放射化計算コードを使って大きな結果の差異が見られても、どの計算コードの結果を信頼してよいかはもとより、その原因が計算コードやデータの不具合、数値解法、断面積、崩壊データ等の何れなのか判断できない状況となっている。これは、放射化計算で扱う壊変チェーンが複雑化し、扱う核種や核反応の数も膨大になっている近年の核データを利用する場合により深刻化しつつある。核データが異なる放射化計算コードによる結果の相互比較では、この課題解決は見込まれないため、先ずは全く同じ核データと入力データを使用して、複数の異なる数値解法を利用して結果を比較できる放射化計算コード（単一開発者による同一コードである必要はない）を用意することが望まれる。

後者の V（Validation）では、主にユーザが設定する計算モデル（入力データ）と JENDL などの核データを使用して、実測される結果をどの程度再現できるかを確認することが求められる。原子炉燃料の燃焼計算では、使用済み燃料の照射後試験解析などで、主要核種についてある程度の Validation は行われているが[10]、放射化計算に関してはほとんど進んでいないように思われる。JPDR ベンチマーク[11]のような Validation 素材は多くはなく、中性子輸送計算での不確かさ影響も無視できないため、核データ評価に使われている放射化断面積測定などの実験データを巧く活用するか、加速器などを用いた放射化断面積の標準検証場などがあると良いと考えている。また、核データ評価に含まれる 800 近い核種に対する 20 以上の核反応断面積の検証は現実的ではないことから、JENDL-5 では未だ整備されていない放射化断面積の共分散データの利用価値は、主に当面実測が期待できない放射能インベントリの信頼性評価にあるだろうと予想している。

(1)～(4)で述べた課題解決は容易ではないが、早期の社会貢献を意図するのであれば、バックエンド分野の研究者や現場で規制対応の実務を行っている人たちの声「何を、どこまで、いつ迄に」を聞いて、必要な研究開発を効率的に進めることが重要と考えている。

3. おわりに

原子炉の廃止措置のための放射化計算に係る課題と提言を 4 つ挙げた。全体としての課題解決には、核データ、原子炉物理、放射線工学、分析、バックエンドの分野の専門家が研究者と事業者の枠を超えて協働することが望まれる。日本の基礎・基盤の研究者はこの連携があまり得意ではないように感じている。若い研究者がこの種の研究開発を志すのであれば、先ず自身の専門性を深めてから（Ｉ型）、他分野にも興味を持って手を広げ（Ｔ型）、専門性を増やす（π 型→蛸型）ことが良いように思う。この過程で、他分野も

含めた人材ネットワークを構築することができる。これとは別に、徹底して自身の専門性を深め、その分野での世界初や世界一だけを狙う生き方もあるであろう。部屋に籠って妄想をしていることが大好きな筆者としては、後者の生き方のほうが理想ではあるが、現状は他機関や他部署の多くの人たちと協力してプロジェクトを進める立場にあり、理想は適わぬまま研究人生を終わる予感がしている。

参考文献

[1] 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構　福島研究開発部門：https://fukushima.jaea.go.jp/

[2] 奥村啓介：「核データ部会、シグマ調査専門委員会セッション、原子炉の廃止措置における放射化断面積データの現状と利用　(2)近年の評価済み核データライブラリを用いた放射化計算における留意点，日本原子力学会 2022 年秋の大会、3NPL-02 (2022).

[3] 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構核データ研究グループ：「JENDL-5」，https://wwwndc.jaea.go.jp/jendl/j5/j5_J.html

[4] J-Ch. Sublet, A. J. Koning, R.A. Forrest, J. Kopecky : The JEFF-3.0/A Neutron Activation File - EAF-2003 into ENDF-6 format -, JEFDOC-982, OECD/NEA (2003).

[5] W. A. Wieselquist, R. A. Lefebvre, and M. A. Jessee, Eds.: SCALE Code System, ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.4, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN (2020). https://www.ornl.gov/scale

[6] Maria Pusa : Rational Approximations to the Matrix Exponential in Burnup Calculations, Nuclear Science and Engineering, 169, 155–167 (2011).

[7] 一般社団法人 日本原子力学会「遮蔽計算の応用技術」研究専門委員会：放射線遮蔽ハンドブック – 応用編 - ：3.7 放射化感度解析, 78-83, (2020).

[8] 山本健土，奥村啓介，小嶋健介，岡本力：炉内構造物の放射化核種の主要な生成経路，日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2013-038 (2014).

[9] 一般社団法人 日本原子力学会「遮蔽ハンドブック」研究専門委員会：放射線遮蔽ハンドブック – 基礎編 - ：8 放射化, 299-342, (2015).

[10] 奥村啓介，杉野和輝，小嶋健介，神智之，岡本力，片倉純一：JENDL-4.0 に基づく ORIGEN2 用断面積ライブラリセット; ORLIBJ40，日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2012-031 (2013).

[11] T. Sukegawa, N. Sasamoto and K. Fujiki: Accuracy Verification for Calculation of Inventory in JPDR Due to Neutron Activation, IAEA International Nuclear Data Committee, INDC(JPN)-164 (1993).