

▲▼ 会議のトピックス(II) ▼▲

日本原子力学会「2016年秋の大会」

核データ部会、炉物理部会、加速器・ビーム科学部会、
及び「シグマ」特別専門委員会、企画・合同セッション

「原子炉・加速器施設の廃止措置と放射化核データライブラリの現状」

2016年9月7日(水) 13:00~14:30 久留米シティプラザ

概要報告

日本原子力研究開発機構
核データ研究グループ
中村 詔司
nakamura.shoji@jaea.go.jp

1. はじめに

日本原子力学会 2016年秋の大会(久留米シティプラザ)において、9月7日(水) 13:00~14:30(L会場)に、核データ部会、炉物理部会、加速器・ビーム科学部会、及び「シグマ」特別専門委員会による企画・合同セッションが、「原子炉・加速器施設の廃止措置と放射化核データライブラリの現状」というテーマで開催された。会場の様子を写真1に示してある。40名以上の参加者があった。

本セッションでは、下記の3件の発表が企画された。國枝賢氏(JAEA)を座長として、各研究者が実験施設の廃止措置に向けた課題や進めている廃止措置の状況、廃止措置にともなう放射化量評価に資する核データライブラリについ



写真1 セッションの様子(L会場にて)

て発表し、各発表に対して質問や活発な議論が時間一杯、行われた。

- (1) 「ふげん」廃止措置のための残存放射エネルギーの評価と課題 (JAEA) 林 宏一
- (2) 九州大学タンデム加速器実験室の廃止 (九大) 寺西 高
- (3) 放射化核データライブラリの現状と課題 (JAEA) 岩本信之 (敬称略)

2. 「ふげん」廃止措置のための残存放射エネルギーの評価と課題 (JAEA : 林 宏一)

新型転換炉原型炉施設「ふげん」の概要として、立地条件、原子炉の型式、原子炉本体の構造について説明された。「ふげん」は、1979年3月20日に本格運転を開始してから2003年3月29日まで稼動し、約25年間の運転及び772体のMOX燃料の装荷実績を有しており、2008年2月12日に廃止措置計画の認可を受け、廃止措置に着手している。

○放射化汚染の残存放射エネルギー評価について

「ふげん」は、重水減速沸騰軽水冷却圧力管型の原子炉で、原子炉本体の構造や減速材に重水を用いていることを除き、基本的なプラント構造はBWRに良く似ている。炉心部が圧力管型であり、その材料にZr-2.5%Nb合金を用いていること、重水を取り扱う設備を有していることが、特有として挙げられた。炉心特性としては、燃料体の核分裂で発生した中性子が減速材の重水により熱中性子領域まで減速し、鉄水遮へい体及び生体遮へい体を過ぎる辺りでは更に減速する特徴を考慮し、炉心領域、遮へい体領域(鉄水遮へい体、生体遮へい体コンクリート)、生体遮へい体コンクリート外側領域に分けて計算された。それぞれの領域における中性子束の計算には、解析コードを使い分けて行っていた。

- ① 炉心領域について、炉心管理で使用してきた解析コードを使用。圧力管監視試験片の放射化量の測定値と計算値を比較し、評価の妥当性を検討した。
- ② 鉄水遮へい体について、放射化箔：Ni, Co, Au, Au/Cd, Co/Cdのセットを、約30箇所に設置し、半年間照射した後、ガンマ線スペクトル分析により放射化量(Bq/g)を求めた。

また、大型のAu箔を炉心軸方向に20箇所に配置し、放射化量を求めており、計算値と測定値が良く一致していることを示した。

- ③ 生体遮へい体コンクリートについて、ボーリングによりコアを取りだし、深さ方向の放射化量を測定し、深さ方向についても計算値と測定値が一致していることを示した。
- ④ 生体遮へい体コンクリート外側領域について、大型のAu箔とMCNPコードによる中性子束の評価とともに、ボナーボール型中性子検出器(中性子の減速材にポリエチレンを使用し、装着されている³He比例計数管により中性子を計測する)を用いて中性子スペクトルの評価を行って、コンクリートの放射化量を評価した。

○クリアランスにおける放射化汚染評価について

原子炉運転中のタービン建屋内の中性子束測定の結果、最も高い中性子線量が検出された主蒸気管室を評価の代表箇所とし、放射化箔による測定の結果、同室内の中性子束は平均的に分布していることを示した。また、ボナーボールによる中性子束スペクトルは、N-17のβ崩壊に伴うものであることを示した。

また、ANISNによる輸送計算を行い、中性子スペクトルを求め、それを用いてORIGEN計算を行なった。クリアランス規則に定められている33核種について、放射化量を算定し、そのうち評価対象核種を ^3H 、 ^{54}Mn 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 $^{152,154}\text{Eu}$ 、 ^{239}Pu 、 ^{241}Am の10核種と選定した。

最後に、今後は施設全体の残存放射能評価の確立を目指すとともに、安全かつ合理的な廃止措置を行っていく予定であることを述べて、発表を締めくくった。

本発表を受けて、以下のような質疑応答があった。

- ▶ Ni 箔は計算値と測定値が合っていない。→ Ni-58のしきい値反応で、どうしても計算値が過大評価になってしまう。
- ▶ コンクリートの水分量が効くので、実際の水分量が問題になってくる。
- ▶ 核データには、何を使用したのか？ → JSSTDLを使用した。つまり JENDL-3.2 を使っている。
- ▶ 大型の Au 箔など、自己遮蔽が大きく効くと思いますが？ → 検討して評価している。

3. 九州大学タンデム加速器実験室の廃止（九大：寺西 高）

九州大学箱崎キャンパスが伊都キャンパスへ移転するにあたり、原子核実験室の加速器を移設して使用するのが難しいために、廃棄することになった。磁石などの多くの機器は伊都へ移動させるが、タンデム加速器、及びヴァンデグラフ加速器は廃棄とのことで、その具体的な廃止措置について発表した。

まず、簡単に加速器建設の歴史を紹介した。

ヴァンデグラフ	1943年	計画スタート
	1970年	7.5MeV ビーム加速
	1980年代	使用なし
	2013年12月	廃止手続き

ペレトロン・タンデム加速器 1972年 建設～

これら放射線発生装置は、原則として“放射化物”となるため、大学として試行錯誤しながら廃止措置を進めていった。原子力規制庁からは、“計算で評価し、計算の確認のために測定を用いよ。測定のみで放射化物から除外するのは認めない”とのことであったが、大学側としては、運転履歴を基に、ビームがどこにどれだけ当たったのかを評価する

ことは非常に難しいことから、ビームによる直接放射化と二次放射化に分けて議論し、どのような核種が生成されるか検討した。鉄、ステンレスなどの直接放射化については、加速器の幾何学的構造から直接部位を検討し、また二次中性子による放射化については、計算で検討した。測定では、NaI サーベイメータにより放射化を確認した。フランジ 1 枚でも測定可能とのことである。

ビームラインの直接放射化部位は幾何学的条件のみで判断した。ビームに対して影の部分は、実測すると放射化していないことが分かった。RI 生成率は核データライブラリの TENDL-2014 を用いて評価した。陽子、重陽子ビームのエネルギーに対して、Yield を計算し、陽子では ^{56}Co 、重陽子では ^{57}Co が生成される。計算結果と ^{56}Co 、 ^{57}Co 、 ^{54}Mn などの放射能値から陽子や重陽子のビーム強度を見積もることができるとのことであった。また、二次中性子による放射化について、ビームストッパーの周囲 5cm では、放射化は問題ない、と判断した。放射化物撤去後の建物については、中性子によるコンクリートの放射化は問題なかった。また、スミヤでも問題なかったとのことである。廃棄物は減容化に成功し、200L ドラム缶 3 個と 50L ペール缶 2 個に収まったとのことである。

廃止措置の最終報告は、2016 年 9 月末に行われる予定である。最後に、今回の廃止措置で得た教訓を下記のように述べた。

- 加速器運用停止後、直ちに重要な箇所の測定をすべし。
 - ・重要な箇所を Ge 検出器で測定する。
 - ・ ^{56}Co 、 ^{57}Co 、 ^{54}Mn 等の残留放射能から、過去の運転実績と中性子発生量の推定ができる。
 - 数年の冷却期間があることが理想的である。
 - ・ ^{60}Co ($T_{1/2}=5.3$ 年) だけ問題にすればよくなる。
- 今回は、停止後約 90 日に最初の機器搬出をしたため、 ^{54}Mn 、 ^{58}Co などの短寿命核の評価が必要だった。

本発表を受けて、以下のような質疑応答がなされた。

- ▶ 周囲 5cm の判定レベルは？ → 文科省の基準値を示した。(クリアランス)レベルを下回っていれば、“放射化物”と言われない。
- ▶ TENDL を使うことに対して規制庁は？ → 特に指摘はなかった。計算で評価することが重要であった。

4. 放射化核データライブラリの現状と課題 (JAEA : 岩本信之)

放射化核データライブラリの現状と収納核種数、全反応数 (MF9,10 には無いが、MF3 に収納のある反応を含む) などについて説明があった。一部を記載すると、以下の通りである。

ライブラリ名	公開年	入射エネルギー上限	核種数	反応数
UKTRIHA	1980年	15MeV	305	1,477
JENDL/A-96	1996年	20MeV	233	1,522
EAF-2010	2010年	60MeV	816	49,575

このうち、国産の放射化断面積ファイルである JENDL/A-96 について紹介があった。このファイルは原子炉及び核融合炉材料の中性子による放射化量推定用であるが、問題点として、0K の平均化された共鳴断面積であること、300K の断面積データが無いことが挙げられ、原子炉の廃止措置への利用には適切ではない、との説明があった。また、インベントリ評価について、その評価手法の流れと放射化核データライブラリの位置づけが説明された。

廃止措置用の新たな放射化断面積ファイルである JENDL/AD-2017 について紹介があり、線量告示に記載された半減期が 30 日以上のある ^3H を始めとする 227 核種とこれに含まれない超長半減期 12 核種の計 239 の放射性核種を生成する反応を持つ核種が収納されている。例えば、 ^{36}Cl を生成する反応では、 $^{35}\text{Cl}(n,\gamma)^{36}\text{Cl}$ 、 $^{36}\text{Ar}(n,p)^{36}\text{Cl}$ 、 $^{39}\text{K}(n,\alpha)^{36}\text{Cl}$ となる。また、10MeV 以上に閾エネルギーを持つ反応については、ライブラリへの収納対象外である、との説明があった。このファイルには全体で、83 元素、304 核種のデータが収納され、2016 年度に公開予定とのことである。評価については、JENDL-4.0 から採用された核データについては JENDL-4.0 と整合した部分断面積が収納されている。また、新評価も行われ、測定データを再現するように断面積を調整したとのことである。例として、 $^{185}\text{Re}(n,\gamma)^{186\text{m,g}}\text{Re}$ 反応について、他のライブラリと比較した。さらに、 $^{185}\text{Re}(n,2n)^{184\text{g}}\text{Re}$ の評価結果について報告し、測定値への再現性の良好さを示した。

高エネルギー核データファイルである JENDL-4.0/HE について、説明があった。JENDL/A-96 や JENDL/AD-201X には陽子入射の核データが収納されていないため、これの代替としての利用が可能である旨の紹介があり、評価例として、 $^{\text{nat}}\text{Zr}(p,x)^{88}\text{Y}$ および $^{\text{nat}}\text{Zr}(p,x)^{83}\text{Rb}$ を挙げた。核データの利用においては、測定値との比較によりデータの信頼性を確認した方が良いとの考えを述べた。

重陽子放射化核データは、核融合炉施設や重陽子加速器施設で重要になってくる。九州大学及び JAEA が開発を進めている重陽子入射用コードシステム DEURACS を用いた計算結果を、 $^{51}\text{V}(d,x)^{48}\text{V}$ 反応断面積等について示し、測定データに対する再現性から本計算コードの有効性を示した。更に、次期放射化断面積ファイル JENDL/A-20xx について説明し、94 元素、384 核種を収納するなどの構想が紹介された。

最後に、ライブラリ開発における課題を、下記のように纏めた。

- 核データ評価は、断面積の測定値を基に評価している。
- ・測定値の多くは、熱領域や 14MeV に限定されている。

- ・他のエネルギー領域での妥当性が不明である。
- 放射化核データライブラリの信頼性向上のために
 - ・ベンチマークテストによる検証が不可欠である。
 - ・中性子スペクトルを考慮した断面積による放射エネルギーと測定値の比較が必要。
 - ・ライブラリ開発に有用で利用可能な積分データが不足している。

上記の課題を踏まえて、JAEA・原子力基礎工学研究センターの JENDL 委員会では、2015 年度より放射化断面積評価 WG を設置し、放射化断面積ファイル開発の議論を行ってきた、とのことであった。

本発表では、以下のような質疑応答があった。

- ▶ TENDL ファイルで 20MeV 以下の信頼性は？ → Fe などはよく評価されているが、マイナーな核種については、計算のみである場合があるので（取り扱いに）注意が必要である。
- ▶ 自己遮蔽補正に利用するには、ポイントワイズの全断面積が必要であるため、これを整備して欲しい旨、要望があった。
- ▶ 今後、核データの誤差評価について → 汎用核データライブラリのアクチノイド核種については共分散が格納されている。今後、軽核、構造材を中心に共分散データを加えていく予定である。

【筆者の感想】

過去には、核データと炉物理分野の合同セッションが開催されてきているが、今回は更に加速器・ビーム科学部会、「シグマ」特別専門委員会を加えた 4 分野による合同セッションであった。今回のセッションのように、他分野と組み合わせた企画、例えば再処理や分離回収などの化学分野と組み合わせると、想定外に面白い化学反応（研究コラボレーション）が起きるのではないかと思う。

以上