

## 1. はじめに

原子力発電プラント構造物の放射化計算に関して、日本でも研究開発が進められているものの、この分野に携わる研究者・技術者はそれほど多くはなく、原子炉炉心計算分野と比較すると、技術的成熟度には改善の余地があるものと考えられる。原子力プラントの放射化計算は、大きく、着目空間内での中性子・ガンマ線の輸送計算と、構造物の放射化計算（放射性核種の生成量計算）とに分かれる。令和4年度に科研費・基盤研究(C)として採択された研究「原子力発電プラント構造物の放射化計算のための革新的超高速計算フレームワーク」では、前者に焦点を当て、我が国で標準的となり得る、決定論的手法に基づく計算手法を開発することを目的とする。具体的には、評価済み核データファイルを起点として、FRENDY コードで媒質依存の多群定数を計算し、CBZ コードシステムで中性子・ガンマ線の輸送計算を行う、という流れを想定している。

このような研究開発を行うにあたって、計算対象となるベンチマーク問題を作成するとともに、その参照解を取得しておく必要がある。ベンチマーク問題の体系としては研究の進捗に応じて適切なものを設定する必要があることから、モデル化が容易なものから、実際の放射化計算に用いるような詳細なものまで準備するものとする。また、核データは JENDL-4.0 を用いるものとし、参照解は連続エネルギーモンテカルロコード MVP-3 により取得する。

## 2. ベンチマーク問題の概要

中性子源としては、(1)燃料領域に空間的に一様な外部源でエネルギーは 2MeV の単色としたもの<sup>1</sup>、(2)燃料領域に空間的に一様な外部源で U-235 の熱中性子核分裂により生じる中性子のエネルギースペクトルを与えたもの、(3)核分裂中性子源（固有値計算）、の3通りを考えることとする。なお、(1)、(2)の場合には、核分裂反応による中性子の増倍は考慮しない。

体系としては、(1)1次元球体系、(2)1次元平板体系、(3)2次元円筒体系、の3通りを当面は考えることとする。計算対象としては、体系の全中性子源（外部もしくは核分裂）で規格化された中性子束とし、（特定の範囲について）エネルギー積分した中性子束の空間分布及び特定の位置での中性子束エネルギースペクトルについて参照解と計算解との比較を行う。

## 3. 計算体系

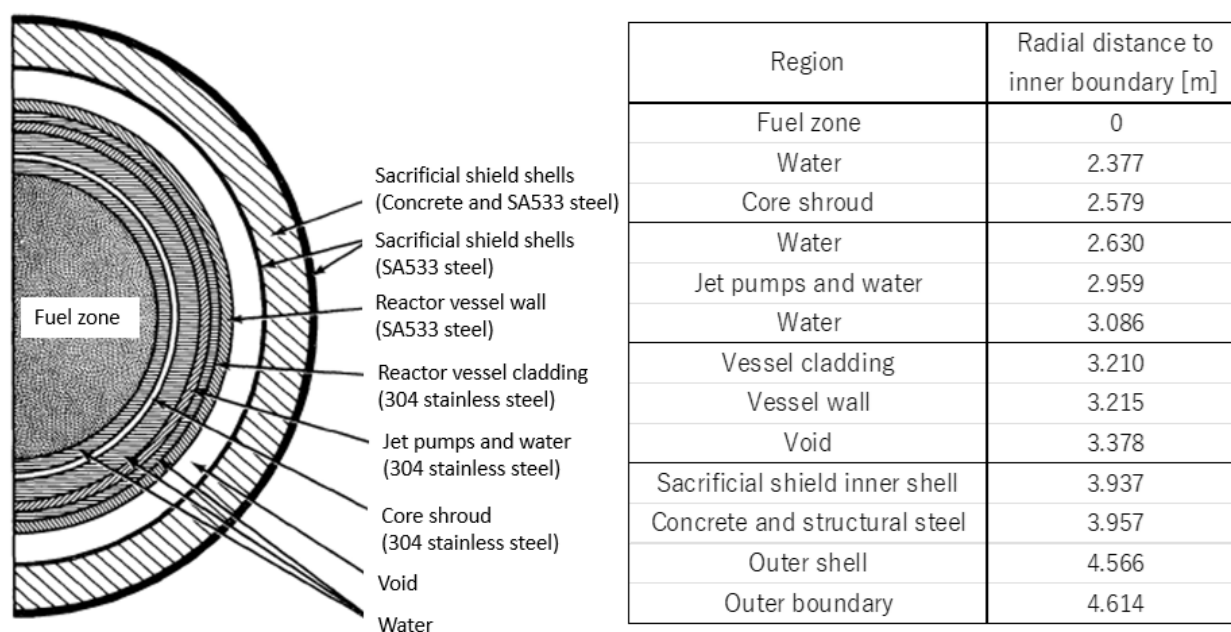
計算体系は、文献[1]の Appendix E に記載されているものに準拠する。BWR を想定した体系である。

1次元球体系モデルの幾何情報は、文献[1]の p.E-8 に記載されている、本来、炉心の軸方向中心平面での径方向円筒モデルとして提案されているものに基づく。体系を構成する媒質は Fuel (F)、SA533 (SA)、SS304 (SS)、コンクリート (CC)、Void (V)、Water (W) の6種類であり、中心から以下のような配列となっている。「Sacrificial shield」は「原子炉遮蔽」に対応しており厚さが 60cm 程度である。なお、その外側に存在する「第一次遮蔽（生体遮蔽）」はモデルに含まれていない。

---

<sup>1</sup> エネルギーに対して多群近似を用いる場合にはこのような源を適切に扱うことは出来ないため、連続エネルギーの計算と多群の計算との比較にこの条件を用いることは推奨しない。

F + W + SS + W + SS + W + SS + SA + V + SA + CC + SA



Fuel の数密度情報は、以下に示す文献[1]の p.E-7 記載の Table E.1-4 に示されているうちの「70% Coolant Void, Control Rods Out」を用いるものとする。文献[1]の p.E-6 に記載があるように、このデータを用いたときに Fuel 領域を取り囲む水領域で熱中性子の最大値が見られるためである。

Isotope	Material Densities in Homogenized Fuel Zone (atoms/cm <sup>3</sup> ) <sup>(a)</sup>			
	0% Coolant Void, Control Rods in	0% Coolant Void, Control Rods out	70% Coolant Void, Control Rods in	70% Coolant Void, Control Rods out
<sup>235</sup> U	6.449 x 10 <sup>19</sup>	6.449 x 10 <sup>19</sup>	6.449 x 10 <sup>19</sup>	6.449 x 10 <sup>19</sup>
<sup>236</sup> U	1.363 x 10 <sup>19</sup>	1.363 x 10 <sup>19</sup>	1.363 x 10 <sup>19</sup>	1.363 x 10 <sup>19</sup>
<sup>238</sup> U	5.205 x 10 <sup>21</sup>	5.205 x 10 <sup>21</sup>	5.205 x 10 <sup>21</sup>	5.205 x 10 <sup>21</sup>
<sup>239</sup> Pu	2.113 x 10 <sup>19</sup>	2.113 x 10 <sup>19</sup>	2.113 x 10 <sup>19</sup>	2.113 x 10 <sup>19</sup>
<sup>240</sup> Pu	7.246 x 10 <sup>18</sup>	7.246 x 10 <sup>18</sup>	7.246 x 10 <sup>18</sup>	7.246 x 10 <sup>18</sup>
<sup>241</sup> Pu	2.674 x 10 <sup>18</sup>	2.674 x 10 <sup>18</sup>	2.674 x 10 <sup>18</sup>	2.674 x 10 <sup>18</sup>
<sup>242</sup> Pu	5.808 x 10 <sup>17</sup>	5.808 x 10 <sup>17</sup>	5.808 x 10 <sup>17</sup>	5.808 x 10 <sup>17</sup>
<sup>135</sup> Xe	6.325 x 10 <sup>14</sup>	6.325 x 10 <sup>14</sup>	6.325 x 10 <sup>14</sup>	6.325 x 10 <sup>14</sup>
Zr	7.488 x 10 <sup>22</sup>	6.654 x 10 <sup>21</sup>	7.488 x 10 <sup>22</sup>	6.654 x 10 <sup>21</sup>
<sup>10</sup> B	1.674 x 10 <sup>20</sup>	0.0	1.674 x 10 <sup>20</sup>	0.0
O	2.530 x 10 <sup>22</sup>	2.557 x 10 <sup>22</sup>	1.517 x 10 <sup>22</sup>	1.525 x 10 <sup>22</sup>
H	2.894 x 10 <sup>22</sup>	2.948 x 10 <sup>22</sup>	8.683 x 10 <sup>21</sup>	8.844 x 10 <sup>21</sup>

また、Fuel 以外の媒質の数密度（単位は/cm/barn）は以下を使用するものとする。SS304、SA533、Concrete については、それぞれ密度を 7.93、7.87、2.2 g/cm<sup>3</sup> として、文献[1]の Table E.1-4 に示されている元素毎の重量比から計算した。水については、7MPa、500K での密度 0.779g/cm<sup>3</sup> から計算した。また、Void については空気を仮定した。

	SS304	SA533	Concrete	Water	Void
Fe-Nat.	5.806E-02	8.427E-02	8.066E-04		
Cr-Nat.	1.745E-02				
C		7.892E-04			
Ni-Nat.	8.136E-03	4.037E-04	4.514E-06		
Ca-Nat.			2.380E-03		
Si-Nat.			1.302E-02		
K-Nat.			5.760E-04		
Al-27			1.964E-03		
Na-23			8.644E-04		
O-16			3.618E-02	2.596E-02	1.039E-05
H-1			6.624E-03	5.192E-02	
N-14					3.860E-05

媒質の温度は、燃料媒質については、U、Pu、Xeを1,200K、Zrを600K、それ以外の核種を500Kとする。また、非燃料媒質については、「Concrete」を300Kとし、それ以外を500Kとする。

熱中性子散乱については、水とコンクリートのいずれにおいてもH-1については水分子中の $S(\alpha,\beta)$ を用いるものとする。その他の核種については自由気体モデルで考慮する。なお、熱中性子散乱を考慮するエネルギーの上限（MVPコードの入力変数ETHMAXに相当）は4.5eVとした。

#### 参考文献

[1] H.D.Oak et al., “Technology, Safety and Costs of Decommissioning a Reference Boling Water Reactor Power Station,” NUREG/CR—0672-Vol.2