

# 超伝導トカマク装置建屋におけるダンプ計算を用いたダクトストリーミング評価に関する研究

田中聖一朗<sup>\*1</sup>・奥野功一<sup>\*1</sup>・助川篤彦<sup>\*2</sup>

日欧協力で実施している超伝導トカマク装置の組立に伴う既存建屋の新規貫通孔部における遮蔽構造の設計を行うために、3次元放射線輸送計算コードPHITSを用いた線量分布評価手法の検討を進めている。装置建屋の貫通孔部は、炉心プラズマから離れた位置にあることに加えて、ストリーミング防止のために複数回屈曲していることからモンテカルロ法では計算効率の点で課題があった。本研究では、PHITSのダンプ機能を用いて建屋貫通孔部におけるストリーミング評価を行うことにより、計算時間を含めた合理的な計算手法の改善を試みた。結果として、ダンプ計算による有効性は確認されたものの、さらなる計算効率の改善が必要であるという課題が抽出された。

キーワード：ダクトストリーミング、超伝導トカマク装置、PHITS、モンテカルロ法、ダンプ計算

## 1. はじめに

癌が国民病といわれて久しいなか、近年、「切らずに治す」癌治療法として加速器を用いた粒子線治療が普及しつつある。このような粒子線医療施設における放射線遮蔽設計では、遮蔽壁に設けられた空調や設備機器等のための貫通孔からの漏洩線量を適切に評価し、設計を行うことが必要である。本稿では、粒子線医療施設への適用を念頭に放射線発生施設の一つである核融合施設を対象として建屋貫通孔部におけるストリーミング評価を行い、精度良くかつ効率的な評価が可能な計算手法の検討を行った。

核融合反応をエネルギー生産に利用する場合、燃料を高温高压のプラズマ状態にして連続的に核融合反応を発生させる必要がある。プラズマ状態を閉じ込めて保持する方法には、「磁場閉じ込め方式」と「レーザー方式」があり、それぞれ技術的実現性の実証に向けて研究が進められている。我が国では、磁場閉じ込め方式の一つであるトカマク型の大型実験装置を使用して、1991年から日本原子力研究開発機構（現量子科学技術研究開発機構）が重水素実験を実施してきた<sup>1)</sup>。現在は、日欧協力により後継機である超伝導トカマク装置の組立が進められており、今後国際熱核融合実験炉（ITER）計画の目標達成のための支援研究や核融合原型炉開発に向けたITERでは実施が困難な高圧力実験等を通じた貢献が期待されている。

超伝導トカマク装置にはプラズマを閉じ込める磁場生成に適した超伝導コイルが採用される。そのため、装置が設置される建屋には超伝導コイル用の冷却系や電力供給用フィーダー線等の配管のための貫通孔部が新たに設けられる。

図-1に示すように、遮蔽体中に配管、ダクト、ハッチ等の遮蔽性能の低い部分が細長く貫通するとき、貫通部分に沿って放射線が漏洩する「放射線ストリーミング」が問題となる。貫通孔出口付近はストリーミングによって局所的に放射線線量が大きくなる。施設の遮蔽設計においては、ストリーミング線量を正確に評価し、配管等の配置や構造上の工夫を行うことにより線量が設計基準を満たすようにすることが求められる。

近年、加速器施設ではモンテカルロ法に基づく3次元放射線輸送計算コード（MCNP<sup>2)</sup> やPHITS<sup>3)</sup>）を用いて、放射線によるダクトストリーミングやスカイシャインも含めた詳細かつ合理的な建屋遮蔽設計が行われている。3次元計算を行う主な理由は、建屋遮蔽設計の最適化（建屋建設費のコストダウン）と建屋貫通部を含めた建屋内の詳細な線量分布を評価することにより、放射線安全対策の策定を行うためである。しかし、核融合実験装置のような大規模で複雑な体系の場合、貫通孔部が中性子発生源から遠く離れていて、かつ局所的な場所に位置するため、貫通孔の入口まで到達する中性子数を十分確保す

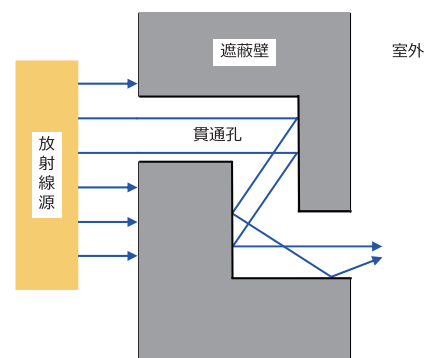


図-1 放射線ストリーミングのイメージ

\*1 建築研究第二部 \*2 量子科学技術研究開発機構

るのが難しく多大な計算時間が必要となるといった課題があった。

現在、超伝導トカマク装置建屋の新規貫通孔部における最適遮蔽構造の設計を行うために、3次元放射線輸送計算コードPHITSを用いた線量分布評価手法の検討を進めている。本研究では、PHITSのダンプ計算機能を用いて建屋貫通孔部におけるストリーミング評価を行うことにより、計算時間を含めた合理的な計算手法の改善を試みた。

## 2. 核融合施設における3次元モンテカルロ計算

物質中の中性子輸送に関するボルツマン方程式を、モンテカルロ法を用いて計算することにより、3次元の複雑な幾何形状を有する計算体系においても中性子挙動を模擬することが可能であり、特定の領域や任意の3次元メッシュ空間における中性子束を求めることができる。モンテカルロ法による計算では、評価する位置にタリーと呼ばれる仮想検出器を設置し、中性子束の評価を行っている。モンテカルロ法による計算誤差は、確率的な不確かさであるため、統計誤差の小さい計算結果を得るためには、タリーに多くの中性子が到達することが重要である。

現在、組立中の超伝導トカマク装置は、ドーナツ形状の中性子源領域であるプラズマを取り囲む形で真空容器、超伝導コイル等多くの機器類で構成されている(図-2)。真空容器は、二重構造でその間に中性子遮蔽用水が充填されるため、炉心プラズマからの中性子束の減衰は大きくなる。さらに、組立中の超伝導トカマク装置の施設では、建屋貫通孔部は線源から離れた位置にあるために貫通孔部中に入射する中性子数を十分確保するのが困難となる。その結果、統計が不十分となり信頼性のある正しい評価を行うことができない。

また、図-3に示すように超伝導トカマク装置が設置される装置建屋(本体室:幅40m×40m,高さ40m)の貫通孔部の多くは、ストリーミング防止のために複数回屈曲した形状となっている。このような場合、建屋貫通孔部の出口(図-3中の設備室(2)の出口)の正確な線量評価を1回の3次元モンテカルロ計算で行うのは難しいため、計算効率の改善方法の一つとして接続計算を用いることがある。従来の接続計算方法では、任意の接続場所における中性子束を評価し、その中性子束を線源として再計算する方法であったが、この方法では接続前後における粒子間の相関を考慮した計算を行えなかった<sup>4)</sup>。これらの欠点を補うため、本研究ではPHITSのダンプ機能を用いて超伝導コイル用ヘリウム冷媒配管(図-4)が通る建屋貫通孔部におけるストリーミング計算を行うとともに、ダンプ位置等の計算に係るパラメータに関する最適化検討を実施した。

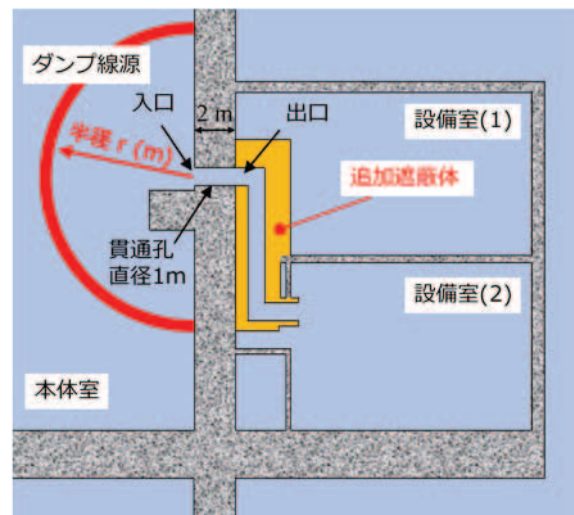


図-3 建屋貫通孔部断面の模式図

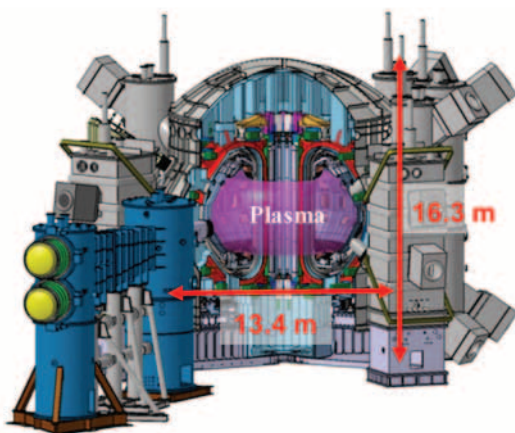


図-2 超伝導トカマク装置

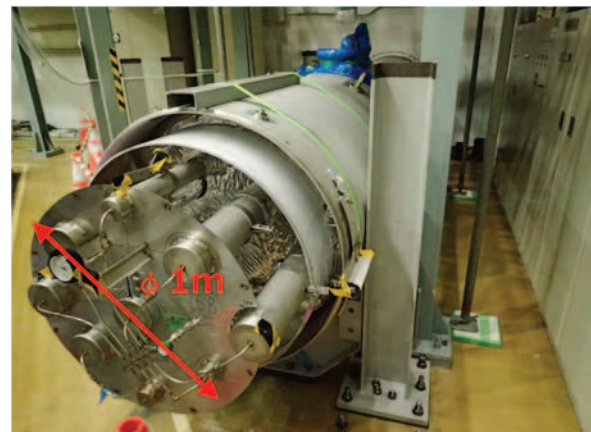


図-4 超伝導コイル用ヘリウム冷媒配管

### 3. 計算手法

#### 3.1 PHITSにおけるダンプ計算機能

PHITSは、任意形状の3次元体系内における放射線挙動を核反応モデルや核データ等を用いることにより模擬することが可能な汎用モンテカルロ計算コードである。PHITSには分散低減法やウェイトウィンドウ法など計算効率を改善するための機能が多く備わっており、その中にダンプ計算機能がある。この機能は指定した領域に入射した放射線の情報を蓄え(ダンプ)、それを線源とした2段階計算を行うというものである。すなわち、プラズマ体積線源からの粒子情報を建屋貫通孔入口部にてダンプし(1段階計算)、ダンプした粒子を線源として貫通孔入口から下流の輸送計算(2段階計算)を実施する。このとき、指定したダンプ領域を粒子が複数回通過することによるダブルカウントに注意する。これにより、一度線源として十分な量の粒子情報をダンプしてしまえば、貫通孔入口から下流における遮蔽体系の変更を行っても、1段階計算を省略することができ、放射線遮蔽設計を行ううえで計算時間の大幅な短縮が期待できる。

従来の接続計算法<sup>4)</sup>では、粒子の種類、空間位置情報(x, y, z)、速度成分(u, v, w)、エネルギー、ウェイトの情報は引き継がれるものの、接続前後の粒子は互いに相関が無く独立であると仮定されており、1段階目のイベント情報を考慮した統計処理が行われないことか

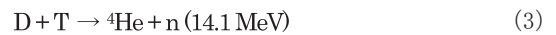
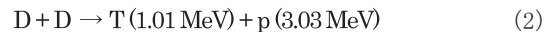
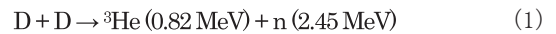
ら、統計的不確かさを過小評価してしまう可能性があった<sup>5)</sup>。PHITSのダンプ計算機能では、接続前後の粒子間の相関を考慮した計算が可能である。

#### 3.2 計算体系

PHITSでは、計算モデルをGeneralized Geometry(GG)を使って記述する。GGは面定義を数式(Surface)で表現し、面の組合せで空間を分割(Cell)し、複雑な3次元幾何形状を表現することができる。図-5に、GGにより作成した超伝導トカマク装置及び装置建屋のジオメトリデータを逆変換した3次元鳥瞰図を示す。また、図-6に超伝導トカマク装置が設置される本体室平面図を示す。冷媒配管用の建屋貫通孔は装置から20m程度離れた位置にある。貫通孔は、直径1m、長さ2mの円筒形状である。

#### 3.3 トーラス体積線源

超伝導トカマク装置で利用される重水素核融合反応(DD反応)は式(1)、(2)で表される。DD反応では、この2つの反応がほぼ同確率で起こる。また式(2)で生成されたトリチウム(T)は重水素(D)と式(3)の二次反応を起こす。その結果、重水素運転により2.45 MeVと14.1 MeVの中性子が発生することとなる。



DD反応による中性子発生率分布は、プラズマの密度分布、温度分布及び加熱による高速粒子分布で決まる。超伝導トカマク装置ではトーラス線源を発生するようにPHITSの線源ルーチンを書き換え、容易に中性子線源の分布形状を変更できるようにした<sup>6)</sup>。図-7には、代表的な超伝導トカマク装置の中性子発生分布を示す。また、図-8にPHITS計算用の入力中性子スペクトルを示す。2.45 MeV中性子が支配的であり、14.1 MeV中性子の比率は2.45 MeV中性子の3%以下であると仮定している。

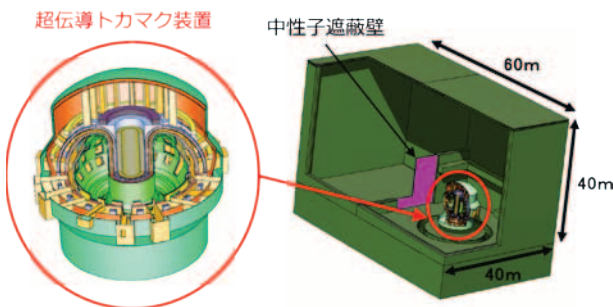


図-5 超伝導トカマク装置及び装置建屋の鳥瞰図

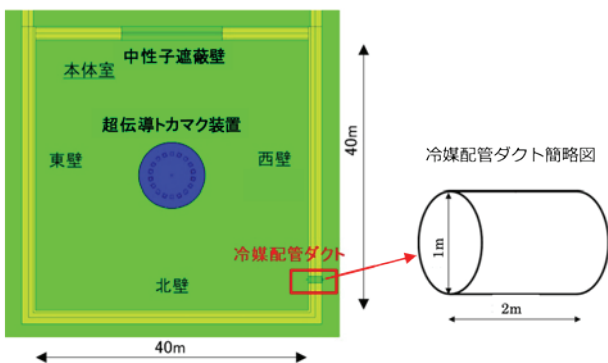


図-6 装置建屋本体室平面図及び建屋貫通孔の簡略図

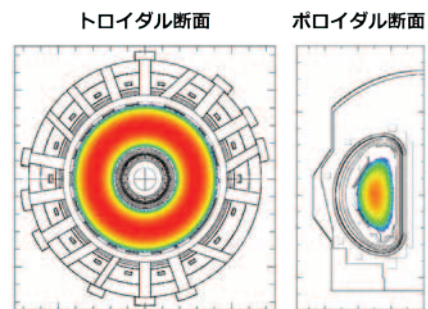


図-7 超伝導トカマク装置のプラズマ体積線源の例



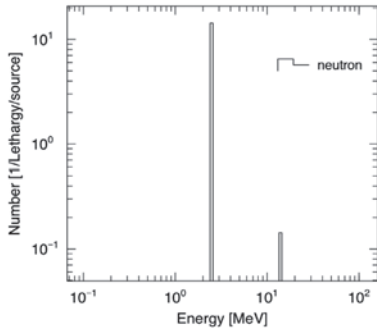


図-8 入力中性子スペクトル

### 3.4 計算条件

超伝導トカマク装置から約 20m 離れた位置にある建屋貫通部（直径 1m, ダクト長 2m）に到達した中性子の情報を貫通部入口（本体室側）にて蓄え（1 段目計算）、それをダンプ線源として貫通部の最初の出口の線量評価を行った（2 段目計算）。ダンプする領域は貫通部入口を中心とした半球形とし、球半径が、2m, 5m, 10m 及びダンプ計算なしの場合における貫通部出口の線量や誤差、計算時間の比較を行った（図-3）。これにより、ダンプ領域の設定位置や大きさのパラメータが計算結果や計算時間に与える影響について評価した。計算には PHITS

(Ver. 3.02), 核データには JENDL-4.0<sup>7)</sup> を使用し、各ケースにおけるヒストリー数は 10 億とした。

## 4. 計算結果

### 4.1 中性子束分布及びエネルギースペクトル

ダンプ計算なし（1 段目計算）及びダンプ球半径：2m, 5m, 10m（2 段目計算）の場合における中性子束分布の結果を図-9 に示す。1 段目の計算により、トーラス線源から発生した中性子が各ダンプ球表面において蓄えられ、2 段目計算ではダンプ球表面を線源にして 1 段目の計算情報を有した中性子が輸送されている。各ダンプ球半径において、建屋貫通部周辺の中性子束分布はよく類似した結果が得られた。

次に、図-10 に建屋貫通部入口及び出口における中性子のエネルギースペクトルを示す。炉心プラズマにおける DD 反応によって生成した 2.45 MeV, 14.1 MeV 中性子は、真空容器や超伝導コイル等の機器類あるいは建屋壁等の障害物と散乱を繰り返すことで減速し、なだらかな連続スペクトルとなる。特に、建屋貫通部は線源から遠く離れた下流の位置にあるため、散乱される回数が増

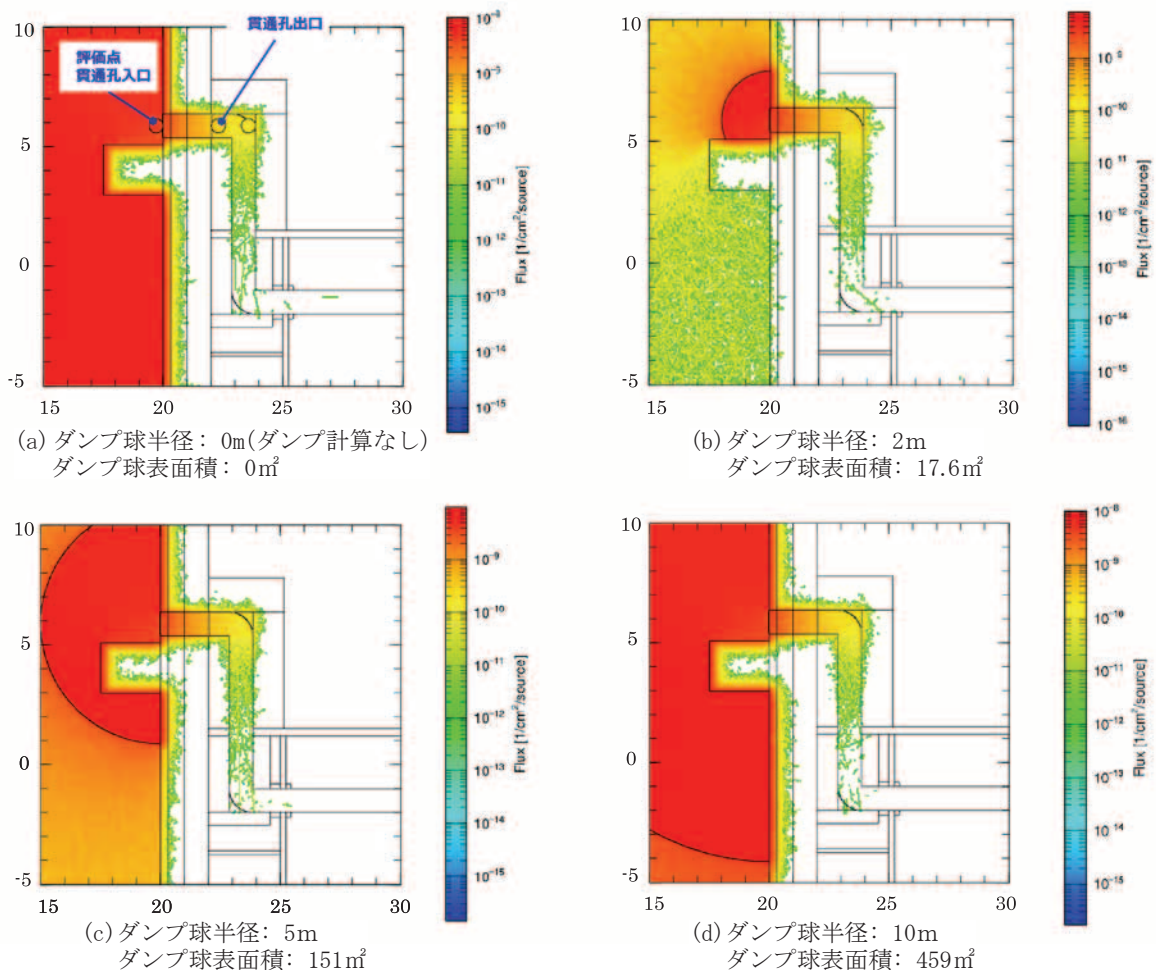
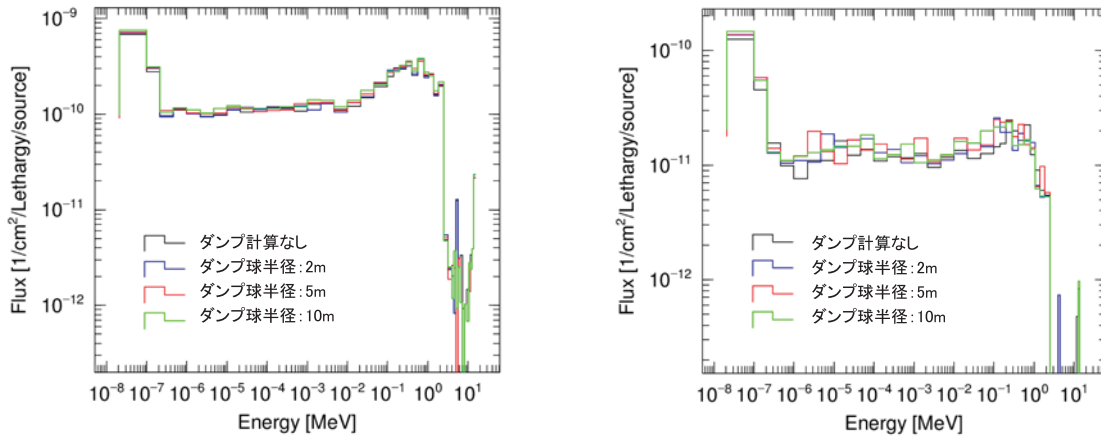


図-9 各ダンプ球半径における中性子束分布



(a) 建屋貫通部入口 (b) 建屋貫通部出口

図-10 建屋貫通部入口及び出口における中性子スペクトル

表-1 中性子線量及び統計誤差, 計算時間結果

		ダンブ球半径							
		0m (ダンブ計算なし)		2m		5m		10m	
		中性子線量 [ $\mu$ Sv/h]	Err.	中性子線量 [ $\mu$ Sv/h]	Err.	中性子線量 [ $\mu$ Sv/h]	Err.	中性子線量 [ $\mu$ Sv/h]	Err.
貫通部入口		9.59E-10	0.0178	3.92E-10	0.0049	4.38E-10	0.0038	4.97E-10	0.0033
貫通部出口		3.93E-11	0.0748	3.11E-11	0.0181	3.32E-11	0.0186	3.53E-11	0.0177
History		1.E+10		1.E+10		1.E+10		1.E+10	
1段目	Time [s]	2.29E+06		2.23E+06		2.34E+06		2.18E+06	
2段目	Time [s]	—		5.92E+05		8.48E+05		1.56E+06	
合計	Time [s]	2.29E+06		2.82E+06		3.19E+06		3.73E+06	

えてエネルギーの低い熱中性子成分が多くなっている。建屋貫通部出口では、更にこの傾向が顕著になる。また、この結果からダンブ球線源の半径によらず、中性子スペクトルの形状はほぼ変わらないことが確認できた。

#### 4.2 統計誤差及び計算時間

表-1に、貫通部入口・出口における中性子線量及び統計誤差, 計算時間の結果を示す。ダンブ計算を行った場合、貫通部入口及び出口における統計誤差がダンブ計算なしの場合よりも改善され、2%未滿となった。ダンブ計算の適用によって、貫通孔に入射する粒子の割合を大きくすることができ、分散(誤差)の低減につながったと考えられる。また、ダンブ球半径(球表面積)が大きいほど、統計誤差は小さくなる傾向にあることがわかった(図-11)。

計算時間に関しては、ダンブ球半径(球表面積)が大きいほど、2段目の計算に係る時間は長くなる傾向にある(図-12)。ダンブ球半径:10mにおける計算時間は、2mの場合と比較して約1.3倍長くなった。ダンブ線源から建屋貫通部までの距離が長くなると、その分だけ2段目の輸送計算に時間がかかるためであると考えられる。したがって、ダンブ球半径の大きさが1段目の計

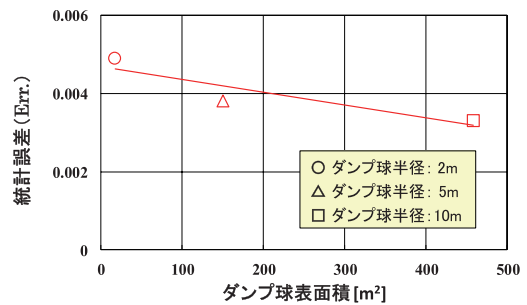


図-11 統計誤差(貫通部入口)の比較

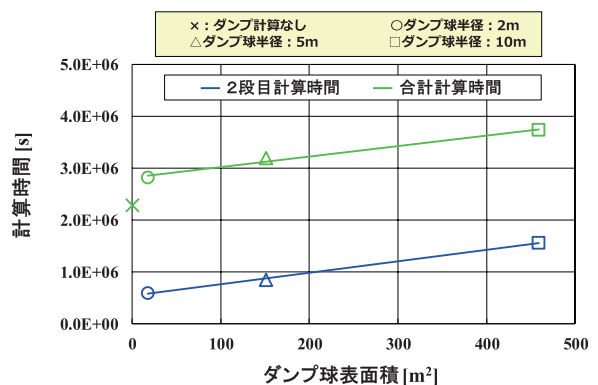


図-12 計算時間の比較

算時間に与える影響が少ないことを考慮すると、計算時間の短縮のためには、ダンプ球半径は小さいことが望ましいと考えられる。ダンプ計算の実施により、合計計算時間はダンプしない場合より伸びるものの、一度ダンプしてしまえば、その後のダンプ位置から下流における遮蔽体系の最適化検討を、1 段目計算を省略して行ことが可能となり、この点は放射線遮蔽設計を行ううえで、非常に有利であるといえる。

一方、中性子線量の計算結果に目を向けると、ダンプ計算を行った場合では、ダンプ計算なしと比較して中性子線量値を小さく評価しており、ダンプ球半径が小さくなるほど線量値は小さくなる。ダンプ球半径が小さい場合、貫通部入口からではなく遮蔽体の中を透過し、貫通孔部の途中から入射してきた成分（リップ効果）を十分に追跡することができず、その結果ストリーミング線量を過小評価してしまったことが原因の一つとして考えられる。今後、遮蔽体からの漏洩経路や漏洩量について、詳細な分析が必要である。

## 5. まとめ

放射線治療施設における遮蔽壁貫通孔部の遮蔽設計に係る計算時間を含めた合理的なストリーミング線量評価手法の検討を目的として、超伝導トカマク装置建屋に新規に設けられた、超伝導コイル用冷媒配管のための貫通孔部を対象としたストリーミング評価を実施した。

装置建屋の新規貫通孔部は、炉心プラズマから離れた位置にあることに加えて、ストリーミング防止のために複数回屈曲していることから、計算効率の改善のために PHITS のダンプ機能を用いた新たな計算技法を実施するとともに、ダンプ位置等の計算に係るパラメータに関する最適化検討を行った。

結果として、PHITS によるダンプ計算は、放射線治療施設に加えて核融合施設のような大規模でかつ装置が複雑な体系におけるストリーミング評価において、分散の低減及び計算時間短縮の点で非常に有効な手段であるこ

とが確認された。ダンプする領域については、貫通孔部周辺の幾何条件等を考慮する必要があるが、中性子を貫通部に効率よく入射させるために、ダンプ領域は小さい（入口部に接近させる）ことが望ましいと考えられる。

一方で、ダンプ計算を実施した場合、中性子線量はダンプ計算なしと比較して小さい結果となった。今後、遮蔽体からの漏洩経路や漏洩量等、詳細な分析が必要である。また、貫通孔出口部におけるより正確な線量分布の評価を行うためには、貫通孔部屈曲内に効率的により多くの粒子を入射させる等のさらなる分散低減手法を用いた工夫が必要である。

## 参考文献

- 1) 「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—, pp.20-25, 2015
- 2) MCNP6 Development Team: MCNP6 User's Manual Version 1.0, Los Alamos National Laboratory, LA-CP-13-00634, Rev.0 (2013).
- 3) T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, *et al.*, : Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02, J. Nucl. Sci. Technol. 55, pp.684-690, 2018
- 4) Ion E. Stamatelatos, T. Vasilopoulou, *et al.*, ICRS-13 & RPSD-2016 EPJ Web of Conferences 153, 07028, 2017
- 5) 波戸芳仁, 岩瀬広, 平山英夫: モンテカルロつなぎ計算における不確かさ評価, 日本原子力学会「2015年春の年会」予稿集, p.624, 2015
- 6) 助川篤彦, 瓜谷章, 西村清彦, 西谷健夫: 国内施設の中性子工学, J. Plasma Fusion Res. Vol.92, No.4, pp.282-285, 2016
- 7) K. Shibata, O. Iwamoto, T. Nakagawa, *et al.*, : "JENDL-4.0 : A New Library for Nuclear Science and Engineering," J. Nucl. Sci. Technol. 48(1), pp.1-30, 2011

---

### Duct Streaming Studies for Superconducting TOKAMAK Device Building by Monte Carlo Simulation using Dump Technique

Seiichiro TANAKA, Koichi OKUNO and Atsuhiko SUKEGAWA

In order to design shielding structures for the new ducts of the Superconducting TOKAMAK device building, we are developing an evaluation method for dose distribution using the 3D radiation transport calculation code: PHITS. In this study, we attempted to improve the rational calculation method by evaluating neutron duct streaming using the PHITS dump technique. The result confirmed that the dump technique was a very effective method in terms of dispersion reduction and reduction of computation time for large-scale and complicated systems such as a nuclear fusion facility.