

# 原子力規制庁長官官房技術基盤グループにおける PHITSコード改良

## PHITS code improvements by Regulatory Standard and Research Department Secretariat of Nuclear Regulation Authority

原子力規制委員会 原子力規制庁長官官房技術基盤グループ  
後神 進史

原子力規制庁長官官房技術基盤グループでは、原子力事業者が施設若しくは機器の設置許可、事業許可、設計承認等の申請を行う際に実施する安全解析について、その妥当性を評価するため、様々な技術の導入と改善に向けた安全研究を継続的に実施している。核燃料輸送物の遮蔽解析分野においては、PHITSを当該分野に適用させるためのコード改良を行い、規制に用いるツールとしての整備を平成25年度より進めてきた。本稿ではこの安全研究について、その経緯及び進捗状況を紹介する。

### 1. はじめに

金属キャスクなどの輸送容器に核燃料物質を収納した核燃料輸送物の設計承認申請の遮蔽性能に対する安全解析では米国製の離散座標 $S_8$ 輸送計算コードDOT3.5 [1] が主として使用される例が多く、また、原子力規制庁長官官房技術基盤グループ（以下「技術基盤Gr.」という。）が発足する以前に審査の技術支援を行っていた旧（独）原子力安全基盤機構（以下「旧JNES」という。）がクロスチェック解析を行う際にも米国製である連続エネルギーモンテカルロ輸送計算コードMCNP [2] が使用されていた。核燃料輸送物に限らず原子力分野全体を見渡しても、遮蔽解析技術は我が国の原子力黎明期に機器と共に米国より入手した解析コードや断面積ライブラリをそのまま、あるいはインターフェースの改良や内蔵データの更新といった独自の改良を施したコードが多用されているのが現状である。しかし、平成21年には米国がMCNP等に輸出規制（10CFR810）を適用し、大幅な使用制限こそ回避されたもののコードの内容は非公開となり、精度や信頼性に対する検証も

行えなくなった。今後、MCNPのみならず、米国製解析コード全体に使用制限が拡大する可能性を無視することはできず、また米国製コードの独自改良に対する著作権問題が表面化する可能性等も勘案し、他国の事情により我が国の原子力安全評価や規制活動が制限を受ける事態を避けるための確実な対処の必要性は以前より議論がなされて来た [3]。これらの問題に関しては、日本原子力学会の放射線工学部会においても検討がなされ、その結論の一部として、国産の安全解析コード開発、改良及び保守の体制を整備し、継続的に保持していくことが重要であるとの提言がまとめられている [4]。

### 2. 安全研究の経緯

旧JNESにおいては前述のとおり、クロスチェック解析コードとしてMCNPを整備していたが、上記の使用制限問題に加え、申請者のMCNPによる安全解析に対するクロスチェック解析（旧JNESでは、独自に整備した解析コードを使用するとの原則があった。）で使用されるコードを整備する必要性も生じ、

国産の連続エネルギーモンテカルロ輸送計算コード PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System; 粒子・重イオン輸送統合コードシステム) [5] を当該分野の遮蔽解析コードとして導入するための安全研究をスタートさせ、その後、平成26年3月には旧JNESは原子力規制庁に統合され、当該研究は技術基盤Gr.の安全研究として引き継がれることとなった。

### 3. 安全研究の進捗状況

PHITSは、旧日本原子力研究所で開発されたNMTC/JAM [6] をベースとして機能拡張が施された、放射線、重イオンビーム等の三次元空間内の挙動を解析できる国産の汎用モンテカルロコードである。PHITSは、公開初期段階では大強度陽子加速器施設J-PARCにおける核破砕中性子源 [7] 等の設計に対する要望を多く取り込み、近年では宇宙開発や粒子線治療における被ばく評価等といった高エネルギー放射線・粒子線を扱う分野からのニーズに応える形で改良が進んで来た経緯がある。一方で、原子力施設・機器の遮蔽解析を実施する際に対象となる比較的低エネルギーの中性子やガンマ線を計算するための基本的な機能もほぼ有してはいたが、安全研究の具体的な作業を開始した段階での最新版であったPHITS2.53においては、要望が比較的少数であった原子力分野の実務に適用するための機能がMCNPと比べて充実しているとは言い難かった。したがって、安全研

究の第一段階として、PHITSを核燃料輸送物遮蔽解析コードとして導入して実務に適用する場合に効果的な機能の検討・抽出を行い、その結果に基づいて機能開発を進めている。

#### 3.1. 効果的な機能の抽出

平成25年度は、核燃料輸送物の遮蔽構造の特徴を反映した模擬体系を構築し、PHITS2.53及びMCNP5を用いて模擬容器の表面及び表面から1m離れた点(法令により線量基準が定められている点)における線量当量率を導出する解析をそれぞれのコードが有する機能により行い、その作業手順や作業効率を比較することで、PHITSに加えると効果的な機能を検討した[8]。両コードによる解析では、計算体系の他に、断面積ライブラリ、線源設定、線量率換算係数、計算機環境等のコードの機能に依存しない解析条件は極力同一の設定とした。それ以外の解析条件として、使用TallyはPHITS2.53では[T-Track] (Track Length Estimator)、MCNP5ではF5 Tally (Point Estimator) をそれぞれ使用し、分散低減法に関してはPHITS2.53では簡易解析結果を基に[Importance]パラメータを設定し、MCNP5ではWeight Window Generatorを用いて作成したWeight Window下限値パラメータを使用した。これらの条件を基に解析を行った評価結果及びそれに伴う統計誤差が容器表面で1%、表面から1mで3%を下回るまでに要する計算時間の比較を表1に示す。

表1 PHITS2.53及びMCNP5による核燃料輸送物模擬体系遮蔽解析の結果比較

評価位置	Tally体積 [cm <sup>3</sup> ]* <sup>1</sup>	PHITS2.53/MCNP5		
		線量当量率比	計算時間比* <sup>3</sup>	
容器表面	上部軸方向	16.0×3.0	0.972	4.1
	トランニオン* <sup>2</sup> 近辺	6.0×2.0	1.00	11.9
	下部軸方向	16.0×3.0	1.01	0.6
	下部径方向	11.9×3.0	1.00	0.6
	側部	11.9×3.0	1.06	3.1
表面から 1 m	上部軸方向	100.0×1.0	1.03	240
	上部径方向	29.1×1.0	1.10	614
	下部軸方向	100.0×1.0	1.04	58
	下部径方向	29.1×1.0	1.08	243
	側部	29.1×1.0	1.08	243

\* 1 PHITS2.53の [T-Track] の体積：面積 [cm<sup>2</sup>] ×厚さ [cm]

\* 2 輸送容器を吊り上げる、又は架台へ固定する際に使用される突起状の部材であり、周辺とは遮蔽構造が異なる。

\* 3 全評価位置で基準統計誤差を満足するまで計算を行い、その時点での各評価位置での統計誤差を基に、基準を満足するまでの計算時間を推定している。

当解析の結果より、線量当量率の評価結果に大きな違いが見られないことが確認できたが、表面から1mにおける評価を行う際に要する計算時間には顕著な差が現れた。これは大きな面積や体積を有する線源から空間的に離れた小領域における線束を評価することを得意とするPoint Estimatorの有無による差が大きい。また、表1には含まれない情報として、深層透過計算を行う際には必須ともいえる適切な分散低減パラメータを準備するための作業効率に着目してみても、Weight Window Generatorを有するMCNP5は同機能を搭載していなかったPHITS2.53と比べて遮蔽解析実用面での利便性は高い。このように、解析時間や解析作業の効率等、様々な角度からの比較・検討を行った結果、核燃料輸送物の遮蔽解析を実務として行う上で

PHITSにとって効果的な機能を抽出した。その抜粋を表2に示す。

上述の比較解析を行った次年度以降では、表2の内容に基づいてコード改良を進め、開発した機能を用いて、実際の核燃料輸送物に対する検証解析も行っている。

### 3.2 機能開発作業

機能開発作業の初年度（平成26年度）には、当時の最新版であったPHITS2.73（平成26年9月公開）をベースとして表2におけるNo. 2、3及び8の機能開発を行った[9]。これらの機能については、平成27年12月に公開されたPHITS2.82以降に反映され、搭載されている。また、同年度に核燃料輸送物を対象とした検証解析を実施した。

表2 PHITS2.53を核燃料輸送物遮蔽解析に適用する上で効果的な機能

No.	必要・効果的な機能	期待される効果
1	Cellの体積の自動計算機能の搭載	Tallyでの計算にCellの体積情報が必要な際に準備作業の効率が上がる。
2	Tallyの領域定義における円筒座標系( $r\theta$ -mesh)の使用	円筒形が多い輸送容器体系に対して、径方向の線量角度分布を評価する際に、設定が容易となる。
3	Next Event Estimator (Point Estimator 及び Ring Estimator)の搭載	計算時間が短縮できる。(特に容器表面から1m点での線量評価)
4	[T-Cross]セクションと [Multiplier]セクションの連動	[Multiplier]セクションに線量換算係数を設定することで、容器表面での線量を評価する際に精度が向上する。
5	分散低減パラメータの自動生成機能(MCNP5におけるWeight Window Generator相当機能)の搭載	複雑体系に対してWeight Window法を適用する際には、当機能がなければ実質的にパラメータの準備は非常に困難。
6	各Cellの輸送粒子到達数の出力(MCNP5におけるPopulation (table 126)相当)	分散低減パラメータ設定や計算結果の妥当性確認の指標となる。
7	統計の信頼性を確認できる指標の出力(MCNP5における10 Statistical Check相当)	計算過程や計算結果の妥当性確認の指標となる。
8	核分裂性核種を含む領域における核分裂二次中性子の制御機能(MCNP5におけるNONUカード相当)の搭載	核分裂性物質を放射線源とする核燃料輸送物等の計算を行う際に、中性子実効増倍率を別途準備することで計算時間が短縮できる。

表3 技術基盤Gr.のコード改良作業で開発し、PHITS正式版に反映された機能

No. *	反映された機能	内容
1	[T-Track]セクションを使ったモンテカルロ積分機能の活用	遮蔽解析において多数のCellの体積情報が必要となるのは主にNo. 5の[T-WWG]セクションであり、そこで要求される精度を満たすモンテカルロ積分機能を活用。
2	mesh = r-zの拡張	既存のr-zメッシュに角度設定( $\theta$ )を追加。
3	[T-Point]セクションの搭載	断面積ライブラリのデータを基に輸送計算を行う場合の中性子及び光子のみに適用を限定し、Point Estimator及びRing Estimatorを搭載。
4	[T-Cross]セクションの改良	セクション内にmultiplierサブセクションを追加。
5	[T-WWG]セクションの搭載	計算体系内の輸送粒子密度が均質となるようにWeight Window下限値パラメータを自動生成する機能を搭載。更に改良を予定。
6	[T-Track]セクションにおけるrshowオプションの活用	[T-Track]にmultiplierサブセクションとrshowオプションを設定し活用することでCellごとの輸送粒子到達数分布を出力可能。2次元表記も可。
7	今後の課題	検討中。
8	[Parameters]セクションにオプションを追加	nonuオプションを追加。輸送計算中に核分裂反応が誘起された時、 nonu=1 核分裂として扱う。 nonu=0 中性子捕獲として扱う。

\* No. の番号は表2の番号に対応している。

詳細は後述の3.3章に記す。翌平成27年度には、当時の最新版であるPHITS2.82をベースとして表2におけるNo.4及び5の機能開発を行った[10]。これらの機能については、平成28年9月に公開されたPHITS2.87以降に反映され、搭載されている。平成28年度作業は現在実施中であり、前述のとおりPHITS2.87より搭載された[T-WWG]セクション(表2におけるNo.5の機能)を発展させ、実務上の使い勝手を改善するための機能開発[10]を進めている。

以上の安全研究により機能開発を行い、PHITS正式版に搭載された機能を表3に示す。また、技術基盤Gr.の安全研究により開発した機能の具体的内容については、後日に別途詳報することとしたい。

### 3.3 核燃料輸送物に対する検証解析

平成26年度の安全研究の一環として、核燃料輸送物に対する中性子線量当量率の検証解析を行った。解析対象の輸送物としてOECD/NEA (Organization for Economic Co-operation and Development / European Nuclear Energy Agency) においてベンチマーク問題に取り上げられているTN-12型核燃料輸送物を選択し、当年度の安全研究により開発した新機能を搭載したPHITS2.73(以下「PHITS2.73改」という。)、MCNP5及び参考文献[11, 12]記載の解析・実測データの比較を行った。

図1にTN-12型核燃料輸送物解析モデルの断面図及び解析モデルを基にした3D外観図(PHITSの[T-3Dshow]出力図)を示す。モ

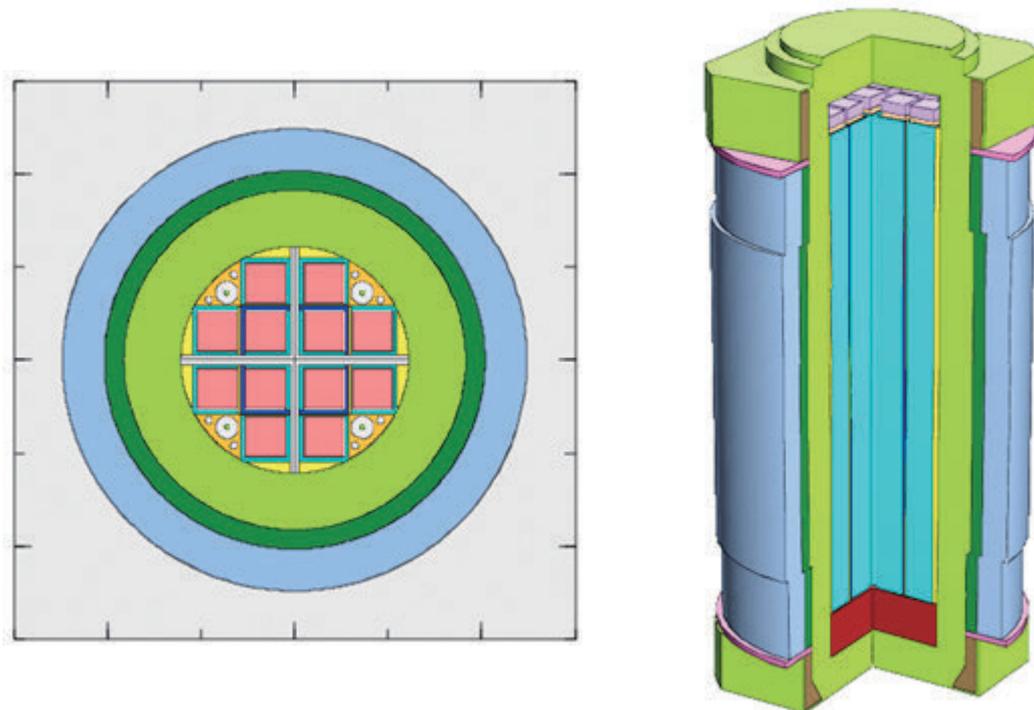
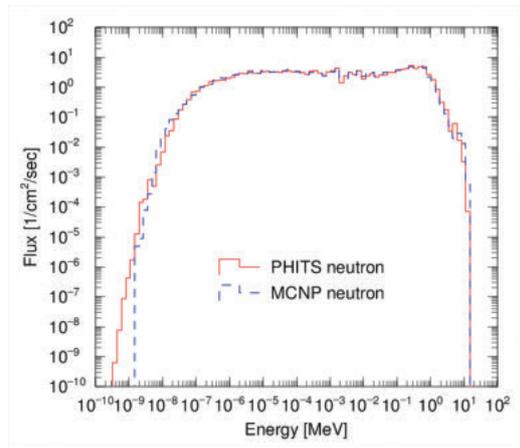


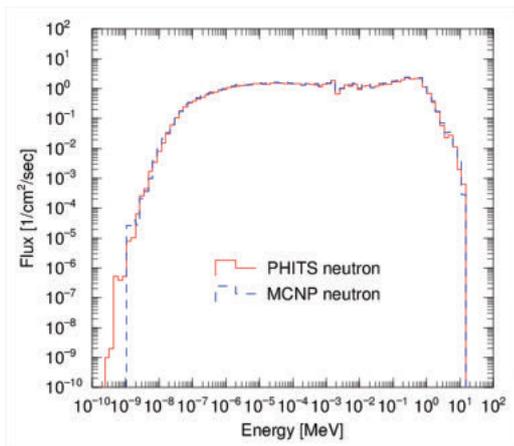
図1 TN-12型核燃料輸送物解析モデル  
左：断面図 右：解析モデルを基にした3D外観図

デル化における詳細な寸法、物質設定及び線源設定の解析条件は参考文献 [12] に準じているため、そちらを参照されたい。その他のPHITS解析条件として、断面積ライブラリはJENDL-4.0 [13]、解析における核分裂反応の取扱いはnonu=0 (表3のNo.8参照)、使用Tallyは [T-Track] 及び新規搭載の [T-Point] (表3のNo.3参照) である。また、対比するための測定値に関する条件は、厚さ12cmのパラフィンを減速材とした<sup>3</sup>Heカウンタを検出部としたレムカウンタを<sup>252</sup>Cf標準線源にて校正した検出器を使用し、線量率換算は検出器の応答関数専用計算された係数により線量当量率を評価している。上記の条件によるPHITS2.73改 ([T-Point]) 及びMCNP

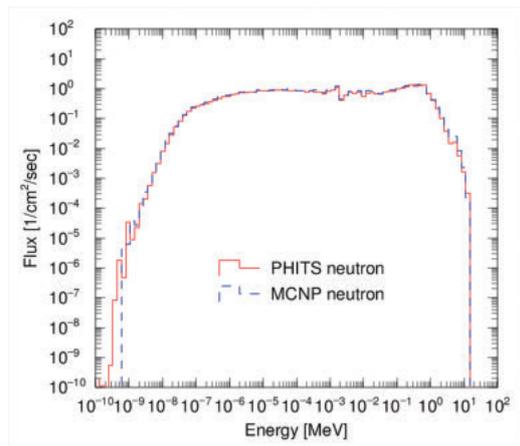
5 (F5 Tally) の評価結果として容器外部での中性子スペクトルを示した図2より、両コードによる解析結果に良い一致が得られること



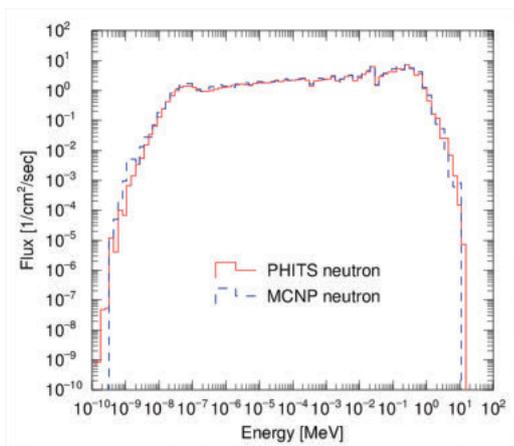
側部中央表面から15.5cm



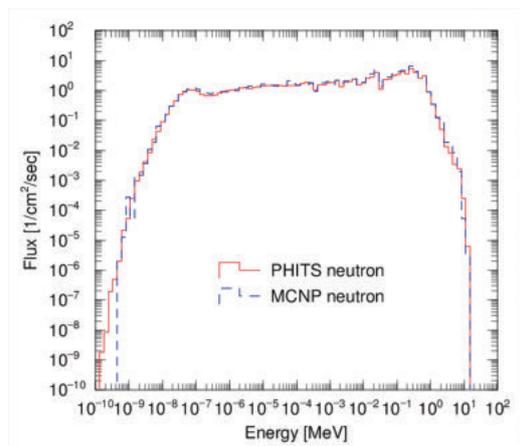
側部中央表面から100.0cm



側部中央表面から181.5cm



蓋部径方向表面から15.5cm



底部径方向表面から15.5cm

図2 容器外部での中性子スペクトル評価結果

が確認できた。また、上記のPoint Estimatorによる評価結果に加えて、PHITS2.73改のT-Trackによる評価結果、参考文献 [11] におけるMCNP5による評価結果及び測定値との線量当量率比較を表4に示す。今回解析を行ったPHITS2.73改及びMCNP5の評価結果は良い一致を示し、PHITS2.73改の[T-Track]及び[T-Point]による解析のhistory(線源粒子数)及びFSD(Fractional Standard Deviation: 相対標準偏差)から、[T-Point]の導入により計算効率が飛躍的に向上したことも確認できる。文献計算値(MCNP5)との比較では、側部中央に対する評価結果は良く一致しているものの、蓋/底部径方向に対しては有意な差が見られる。この原因として考えられるのが、参考文献の解析条件として一部不明確であった蓋/底部近辺の解析モデルの再現性の違いが挙げられる。最下段の文献測定値との対比に関しては、測定条件に対する再現性を考慮すれば、比較的良い

一致を示したものと考えられる。ここで解析条件と測定条件との誤差要因として、

- ・ORIGEN-ARP燃焼計算による線源強度、中性子線源スペクトル形状等の線源設定による誤差
  - ・計算モデルの均質化や簡略化による誤差
  - ・トラニオン及び緩衝体(事故時の落下衝撃等から輸送物を保護するために装着される部材。TN-12型ではバルサ材を使用。)を無視したことによる、蓋/底部径方向に対する線束への影響による誤差
  - ・輸送架台、床、壁等による散乱線の影響による誤差
  - ・文献測定に用いた測定器の校正及び線量率換算係数に係る誤差
- が考えられる。

以上の結果より、[T-Point]等を加える改良を施したPHITS2.73改の段階においても、核燃料輸送物遮蔽解析の実務に適用可能な性能を有していることが確認できた。

表4 容器外部での中性子線量当量率評価結果

評価ツール	history	側部中央						蓋部径方向		底部径方向	
		表面より 15.5cm		表面より 100.0cm		表面より 181.5cm		表面より 15.5cm		表面より 15.5cm	
		Dose [ $\mu$ Sv/h]	FSD [%]								
PHITS [T-Track]*	3.81E+09	77.59	0.72	36.68	1.05	21.16	1.39	73.24	0.73	53.51	0.84
PHITS [T-Point]	2.54E+07	76.19	0.40	35.79	0.16	21.16	0.13	71.00	0.33	52.89	0.39
MCNP F5 Tally	1.00E+07	76.12	1.72	36.29	0.72	21.63	0.58	73.47	1.55	55.65	1.87
文献計算値 F4 Tally	—	76.98	3.33	33.30	2.11	22.13	1.92	110.00	6.94	25.90	0.36
文献計算値 F5 Tally	—	73.98	0.95	34.40	0.22	20.61	0.11	110.80	1.34	27.23	0.33
文献測定値 レムカウンタ	—	52.9	—	28.6	—	19.0	—	59.3	—	35.0	—

\* [T-Track] は直径14cmの球形状

#### 4. まとめ

技術基盤Gr.ではPHITSを核燃料輸送物遮蔽解析へ適用させるための機能開発を進め、平成28年11月現在での最新版であるPHITS2.88には分散低減パラメータの自動生成機能 [T-WWG] 等も実装され、原子力規制の実務に適用する上でも有効な機能を数多く備えたツールとしても発展した。また、核燃料輸送物に対する検証解析を行い、世界的にも広く活用され実績も豊富なMCNPによる解析結果とも良い一致を示し、解析と測定との相違点を考慮すれば測定値に対しても比較的良く一致したものと考えられる。

技術基盤Gr.におけるコード改良作業では、様々な規制ニーズに対応すべく、また、より高精度・高効率な評価を行うための機能の検討、開発等を今後も進めていき、常に最新知見を適切に規制活動へ反映していく。

#### 参考文献

- [1] F. R. Mynatt, et al., “The DOT III Two-Dimensional Discrete Ordinates Transport Codes”, ORNL-TM-4280 (1973)
- [2] A General Monte Carlo N-Particle (MCNP) Transport Code, <http://www.lanl.gov/>
- [3] 田中俊一, 他, 「我が国での米国製原子力ソフトウェアの利用と課題—米国の管理政策に変化の兆し—」, 原子力eye, 56, No.11 (2010)
- [4] 「国産安全解析コード開発戦略検討報告書」, 日本原子力学会・放射線工学部会・国産安全解析コード開発戦略検討ワーキンググループ, (2014)
- [5] T. Sato, et al., “Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52”, J. Nucl. Sci. Tech., 50:9, 913-923 (2013)
- [6] K. Niita, et al., JAERI-Data/Code 2001-007 (2001)
- [7] T. Kai, et al., “Induced-Radioactivity in J-PARC spallation neutron source”, J. Nucl. Sci. Tech. Suppl 4, 172-175 (2004)
- [8] 後神進史, 「PHITSの核燃料輸送物遮蔽解析への適用性検討」, 第10回PHITS研究会 (2014)
- [9] 後神進史, 「PHITSの核燃料輸送物に対する遮蔽検証解析」, 第11回PHITS研究会 (2015)
- [10] 後神進史, 「Weight Windowパラメータ自動生成機能の開発と、その改良案」, 第12回PHITS研究会 (2016)
- [11] 浅見光史, 他, 「放射性物質輸送容器のモンテカルロ法による遮蔽安全評価手法ガイドライン原案の策定」, 海上技術安全研究所報告第13巻第1号 (2013)
- [12] “NEA CRP Intercomparison of Codes for the Shielding Assessment of Transport packaged-Solution of the TN12 Benchmark Problem by Mrs H. Locke”, AEA-R1063, (1991)
- [13] K. Shibata, et al., “JENDL-4.0 : A New Library for Nuclear Science and Engineering”, J. Nucl. Sci. Tech., 48:1, 1-30 (2011)