

高エネルギー粒子加速器施設の遮蔽設計法の現状と その精度評価

Status of Shielding Design Methods and Benchmarking for High Energy Accelerator Facilities

(独)日本原子力研究開発機構
J-PARCセンター 安全ディビジョン
中島 宏

近年、高エネルギー粒子加速器は基礎科学から医学利用など様々な分野で使用されている。これら加速器施設においては、各施設において遮蔽設計法を開発し、遮蔽設計法の精度検証を行い、設計に適用している。そこで、本稿では高エネルギー粒子加速器施設における遮蔽設計法の現状とこれら遮蔽設計法の精度検証について概括する。

1. 序

近年、高エネルギー粒子加速器は、物質・生命科学、原子核・素粒子物理学等の基礎科学や産業利用、粒子線治療などの医学利用など、様々な分野で使用されている。そのため、その用途に応じて、加速器のエネルギー、強度、加速粒子などは非常に広い範囲に及んでいる。日本では、GeVエネルギー・MW級の世界最高レベルのビーム強度を有する複合陽子加速器施設：大強度陽子加速器施設 (J-PARC: Japan Proton Accelerator Research Complex)¹、重粒子線医療施設 (HIMAC: Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba)²等が稼動している。また、世界的に見ても、欧州原子核研究所 (CERN: Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) の大型ハドロン加速器 (LHC: Large Hadron Collider)³のようなTeVエネルギー級の非常に高いエネルギーの加速器や、米国ORNL (Oak Ridge National Laboratory) では大強度陽子加速器を用いた核破砕中性子源 (SNS: Spallation Neutron Source)⁴が稼動を開始した。加速器開発計画に関しては、国内には数多くの粒子線治療施設の計画がある。海外では欧州で

高エネルギー重イオン加速器 (EURISOL: European Isotope Separation On-Line Radioactive Ion Beam Facility)⁵や大強度陽子加速器を用いた核破砕中性子源 (ESS: The European Spallation Neutron Source)⁶などの計画が進められており、米国ではMSU (Michigan State University) のFRIB (the Facility for Rare Isotope Beams)⁷の建設計画が認められた。

これら加速器施設運用及び建設においては、施設周辺環境や施設内作業員の放射線安全性を確保するために、精度の良い設計データと設計計算手法を用いて、施設設計、安全評価する必要がある。本稿では、これらの施設における遮蔽設計法の現状とこれら遮蔽設計法の精度検証について述べる。

2. 高エネルギー加速器施設設計法の現状

高エネルギー加速器施設設計においては、各施設において遮蔽設計手法を開発し、その手法の精度検証を行い、設計に適用している。LHCやEURISOLの設計には、CERNやINFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) を中心として開発した、モンテカル

ロ計算コードシステム(FLUKA: Integrated particle physics Monte Carlo simulation package)⁸が全体の設計、評価に用いられている。SNSの設計では、LANL (Los Alamos National Laboratory)で開発した高エネルギー粒子輸送モンテカルロ計算コードMCNPX⁹が用いられ、使用許可申請に用いられた。米国・FNAL (Fermi National Accelerator Laboratory)では、高エネルギー粒子輸送モンテカルロ計算コード:MARS¹⁰を開発し、施設設計、安全評価を行っている。このように海外では、高エネルギー粒子加速器施設の設計計算には、高エネルギー粒子輸送モンテカルロ計算コードの使用が一般的である。実際には、設計段階での検討においては、様々な簡易計算法が用いられていると思われるが、国際会議などではこれらコードによる設計が報告されている。

国内では、医療用加速器施設等の設計に簡易な設計手法が用いられ、使用許可申請に用いられている。しかし、近年、J-PARCの設計においては、これら国内外の現状を俯瞰して、世界の知見を集約し、従来の簡易計算法に加え、高エネルギー粒子輸送モンテカルロ計算コードPHITS¹¹ (旧名: NMTC/JAM¹²)、MCNPXやMARSを併用した、統合的な計算システムが用いられた^{13,14,15,16}。そこで、次にJ-PARCで用いた遮蔽設計法を概括する。

3. J-PARCにおける遮蔽設計法

J-PARCにおいて、簡易計算手法と詳細なモンテカルロ計算手法が併用された理由は、以下のJ-PARCの特徴による。

- 1) 高エネルギーの陽子線を取り扱う施設であること (最大50GeV)
 - 2) 大出力の放射線発生施設であること (最大1 MW)
 - 3) 大規模な加速器施設であること (総延長約3.6km)
- 施設概念検討時点での建屋配置に即した、

遮蔽厚の設定やスカイシャイン評価と天井厚設定、詳細設計時点での迷路、貫通孔漏洩線量評価においては、建屋設計、機器設計、配管設計とのやりとりの中で、迅速に他設計の変更に伴う影響検討、設置最適位置等のパラメータサーベイのための線量評価を行う必要がある。そのためには、J-PARCのような大規模施設では、詳細な計算は膨大な時間を要することから、簡易設計手法が不可欠である。また、加速器施設設計において、最も不確定性があるのは、線源条件となるビーム損失率の設定である。J-PARCでは、加速器機器の保守時近接性(Hands on Maintenance)の要請に基づき、ICFA (International Committee on Future Accelerators)における報告書¹⁷及び高エネルギー加速器研究機構(KEK: High Energy Accelerator Research Organization)等既存の加速器施設における経験¹⁸から、修理・保守・点検する際の作業員の被ばくを考慮して¹⁹設定している。そのため、バルク遮蔽計算ではMoyerモデル²⁰やTeschの式²¹等の簡易式、ダクトストリーミング計算ではTeschの式²²、DUCT-III^{23,24}等、スカイシャイン計算ではStapletonの式²⁵が全体的な設計に使われた。

一方で、これら簡易計算手法は、加速器施設におけるビーム損失を想定したものであるため、その仮定からターゲットやビームダンプの様な線源と遮蔽体が一体化した計算には適さない等、適用には様々な制約条件がある。また、加速器施設の入・出射部、ターゲットやビームダンプ、実験施設ターゲット部においては、形状が複雑であり、簡易計算法が適用できない。逆に、ターゲットにおいては施設性能を決定する最大ビーム量が設定され、加速器施設の入・出射部では設計の制約から、最大ビーム量が設定されるため、明確に線源条件が規定されることから、その設計精度は計算精度及び幾何条件の設定で決まる。これらの計算体系に対応するため、詳細

な放射線輸送計算手法として、PHITS、MCNPXやMARSというモンテカルロ法による計算手法が用いられた。このモンテカルロ法を用いた計算の流れを図1に示す。J-PARCでこれら多種のモンテカルロコードが用いられたのは、個々の特徴を設計計算の状況に応じて使い分けたためである。PHITSは、NMTC/JAMを基に開発された、多目的粒子重イオン輸送計算コードである。このコードは、DCHAIN-SP 2001コード²⁶と容易に組み合わせることができ、加速器機器、ターゲット、空気、水における残留放射能やそれによる空間線量の計算に用いられた。MCNPXはこれまで、20MeV以下の低エネルギーで汎用モンテカルロ計算コードとして使用されてきたMCNP²⁷を基にした計算コードであり、数多くの評価法や分散低減法を有している。MARSはビーム軌道計算コードSTRUCT²⁸と結合することにより、ビーム軌道計算の結果をそのまま線源として用いることができる。また、MARSは分散低減法の一つであるLeading Particle Biasingを用いて

いることから、粒子束計算速度が早い。これらの計算に用いている核データについては、MCNPを用いた20MeV以下の中性子輸送計算に関してJENDL-3.3²⁹を用いており、DCHAIN-SP 2001を用いた放射能計算に関してはFENDL Dosimetry File³⁰を用いている。また、中性子束からの線量換算係数については、旧原研・保健物理部での評価値³¹を用いて線量評価を行っている。次に、遮蔽設計上重要な項目毎に、それぞれの設計法について述べる。

3.1 深層透過

深層透過における放射線透過計算に関しては、簡易計算法として、1 GeV以下についてはTeschの式²¹を、1 GeV以上についてはKEKパラメータ³²によるMoyer Model²⁰を用いた。一方、ビーム入出射部、ターゲットやビームダンプの様なビーム損失が多く、複雑な体系には、モンテカルロ法による計算を行った。これらについて両立性を明らかにするため、典型的な体系において、計算結果の比較

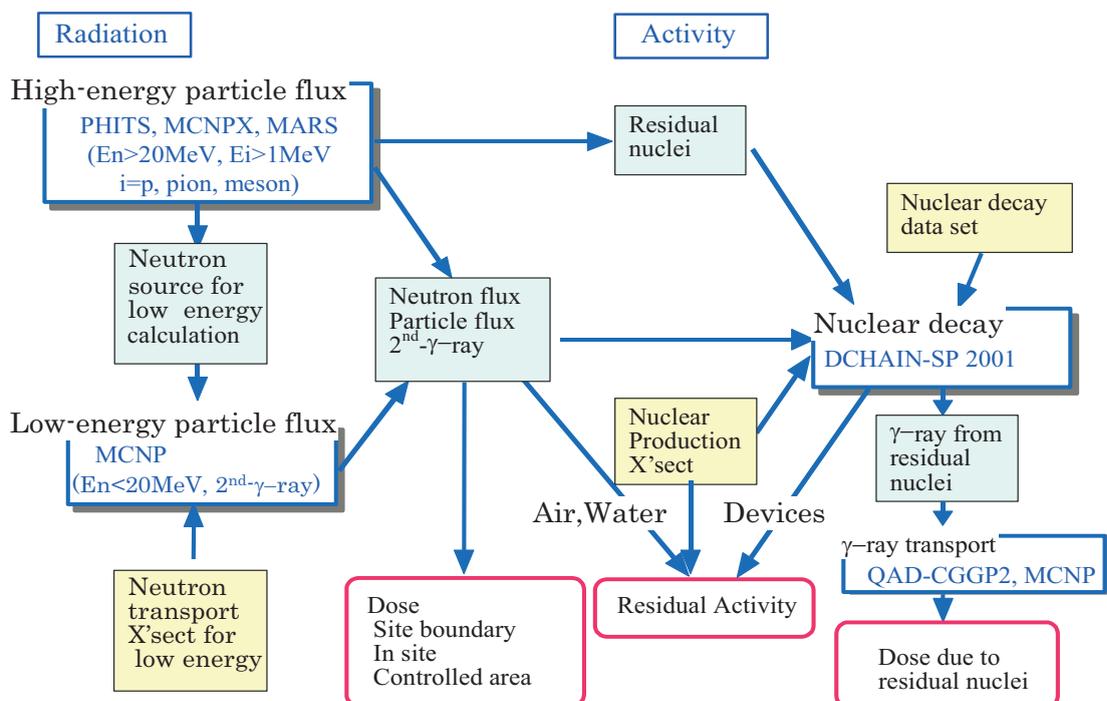


図1 J-PARCにおける遮蔽設計計算の流れ¹⁴

を行った。図2にその比較の一例として、コンクリート遮蔽体内における中性子減衰にかかるMoyer ModelとMARSの計算結果を示す。ここでは、簡易計算方法の適用条件に合わせるため、線源位置から1 m側方に設置したコンクリート遮蔽体内における中性子減衰を、エネルギー1.5 GeVの陽子が5 W出力でビームロスするという条件で比較している。深さ1 mまでMARSの結果がやや高い値を示し、それ以上の深さではMoyer Modelの結果がやや高い値を示しているが、全体的にはファクター2の誤差範囲内で一致している。

ところで、簡易計算法における中性子減衰の計算結果は、使用するパラメーターにより異なるが、世界的にはCERNで測定されたパラメーター³³が使用されている。このパラメーターの違いについて、BNL/AGS (Brookhaven National Laboratory/Alternative Gradient Synchrotron) における測定結果を基に、鉄3 m厚さまでCERNパラメーターは実験値を再現し、KEKパラメーターはより安全側に計算されることが報告されている³⁴。

これは、KEKパラメーターを測定した実験が遮蔽体のより厚いところで行われたことによるものであり、遮蔽体内で中性子が単純な指数関数で減衰しないことに起因する。

3.2 ストリーミング

ストリーミング計算に関しては、J-PARCでは、導波管、冷却水管等、無数のダクト及び搬入口等の迷路状通路が設置されることから、これら多数のダクトに対応するために、Teschの式²²等の簡易計算手法を使用することを基本とした。また、大口径の通路などの設計に対応するために、アルベド計算法を高エネルギー用に改良したDUCT-III^{23,24}を整備した。更に詳細な計算を要する複雑形状ダクトについては、モンテカルロ法による計算を行った。これら設計法による結果の比較の一例を図3示す。これは、日本原子力研究開発機構JAEA (Japan Atomic Energy Agency)・イオン照射研究施設 TIARA (Takasaki Ion Accelerators for Advanced Radiation Application) の第2軽イオン室に通じる2回

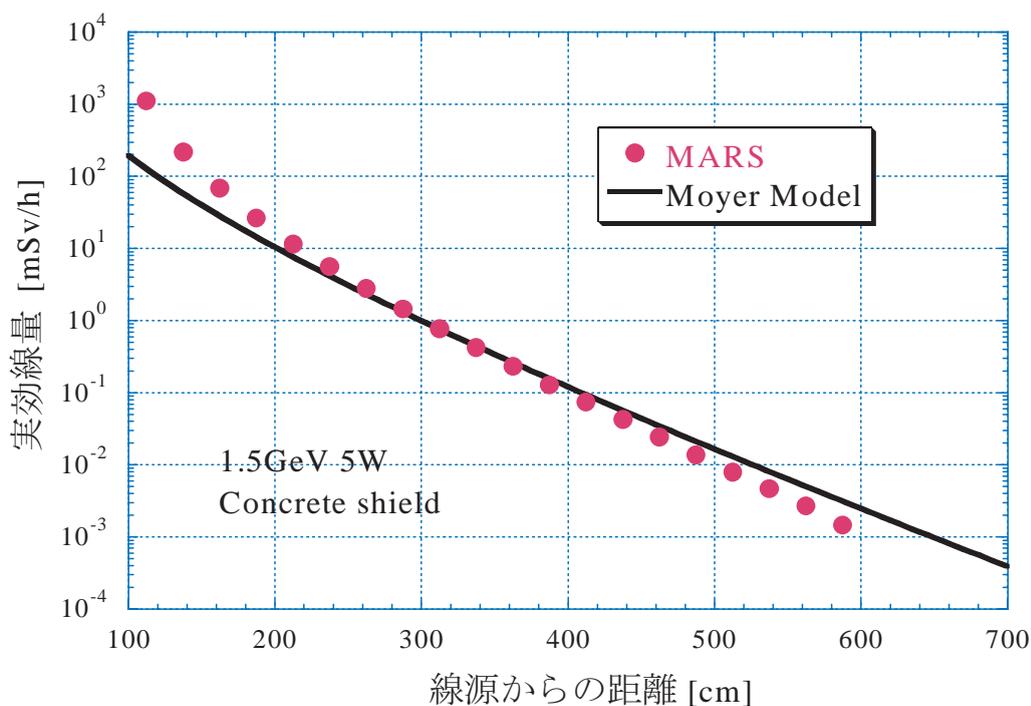


図2 バルク遮蔽にかかる簡易計算法とモンテカルロ法の比較

屈曲通路内において測定された中性子線量率の測定結果について、計算値と比較したものである³⁷。TIARAでは、68MeV陽子を厚いCuターゲットに入射し、発生した白色中性子を中性子線源として、ボナーボールを用いて中性子線量率を測定した。比較している計算値は、DUCT-III、MCNPX 及び NMTC/JAM (PHITS) によるものであるが、第3脚目でDUCT-IIIの結果がやや過大評価しているが、全体的には概ねファクター2で実験値を再現しており、計算法の相互に差がないことを示している。

3.3 スカイシャイン

スカイシャインについては、事業所境界における全施設からの寄与を評価しなければならず、各施設設計変更に対応するため、簡易計算手法：Stapletonの式²⁵による評

価を行った。J-PARCのように地下に設置される場合、設置深度は建設コストと評価値に直接反映するため、その最適化のために膨大な回数の設計変更が行われた。また、実験施設等の地上建物へ対応するため、ラインビームレスポンス法を高エネルギー用に拡張した簡易計算コードSHINE-III³⁸も整備した。ここでは、NMTC/JAM (PHITS)で計算したパラメーターを関数フィッティングし、コードに組み込んでいる。更に、モンテカルロ法による評価も並行して行った。図4はStapletonの式、SHINE-III及びNMTC/JAM (PHITS)によるスカイシャインによる線量計算結果の比較を示したものである。何れのエネルギーでも1000m以上で、Stapletonの式による結果はやや過小評価するものの、全体的には非常に良い一致を示している。J-PARCでは、施設と事業所境界の距離が近いことから、適

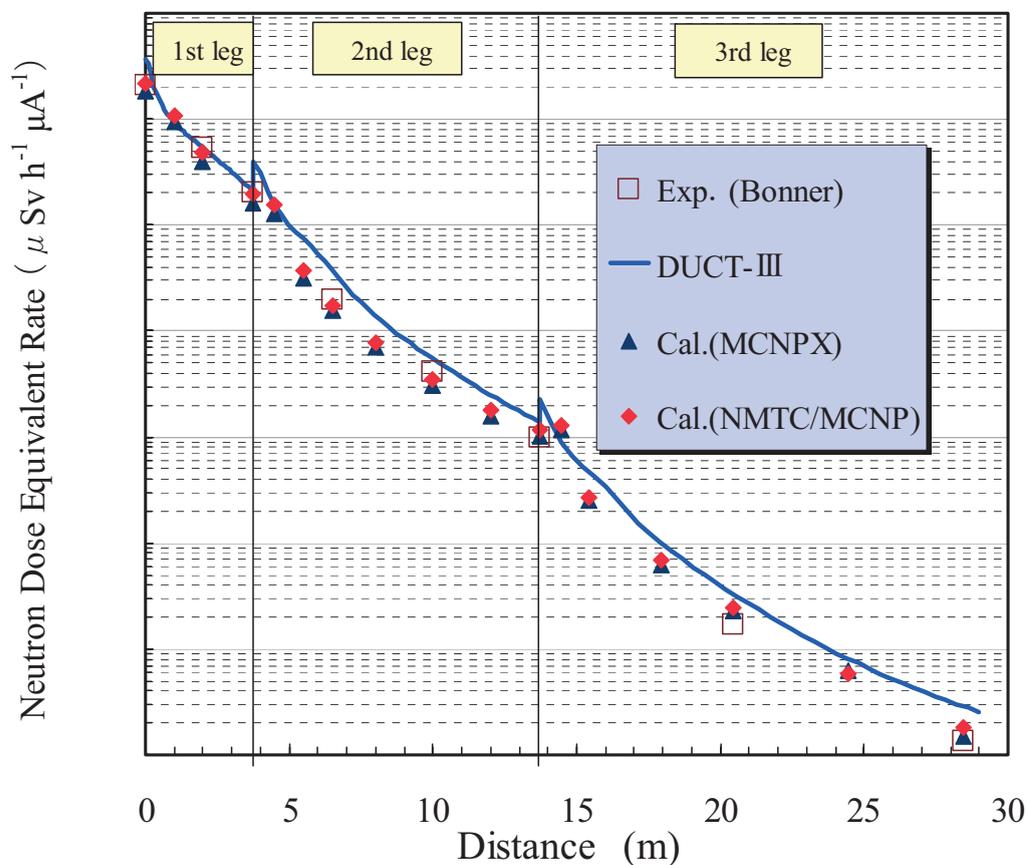


図3 迷路内ストリーミング中性子線量分布にかかる測定値と簡易計算法及び詳細計算法による計算値の比較¹⁴

用条件の範囲であれば、何れで計算しても同様の結果を与える。

実際の設計に際しては、作業の効率化を図るために、各施設の遮蔽体評価に対して Moyer Model 又は Tesch の式を、スカイシャイン線量評価に対しては Stapleton の式を用いて両者同時に計算するシステム：SSCAT (Simplified Shielding Calculation Table System)³⁹ を作成し、これにモンテカルロ計算結果を加えることにより、個別施設の遮蔽体厚さを計算すると共に、事業所境界における各施設からのスカイシャイン線量合算値を評価した。

3.4 放射化

大強度加速器施設では、施設内空気や加速器機器・ビームダンプ等の冷却水中における放射エネルギーを評価しなければならない。それは、その評価結果が、施設の気密構造や空気・冷却水の取り扱いシナリオ及び空調機器や冷却水循環機器の能力を決めるからである。これらの生成については、線源条件の設定が難しく、幾何条件が複雑であり、正確な放射線

束計算が困難であることと、様々な粒子が様々なエネルギーで放射化に寄与するため、十分な放射化断面積データを取得することが困難であり、評価が非常に難しい。そこで、J-PARC では、基本的に KEK 等における実測値に基づいて、スケーリングにより評価した。しかしながら、このスケーリングは必ずしも全ての場合に適用できない。また、先のモンテカルロ計算手法は、酸素や窒素のような軽核からの核破砕生成物を計算する精度が充分ではない。そこで、放射能評価上問題となる空気・冷却水からの生成核種は限られていることから、実験値及び計算値を組み合わせ、窒素及び酸素の放射能生成断面積を予め評価した⁴⁰。これにそれぞれの場で計算した中性子束及び陽子束を掛け、それぞれの核種の崩壊を計算して、空気・冷却水中の放射能生成量の時間依存評価を行った。この放射エネルギーから、空気、冷却水の総量及び換気、入れ替え回数を仮定し、空気中、冷却水中の放射能濃度を算定した。実際の設計では、この結果を法令に定められた排出濃度等と比較することを繰り返し、施設全体の構造、機器能

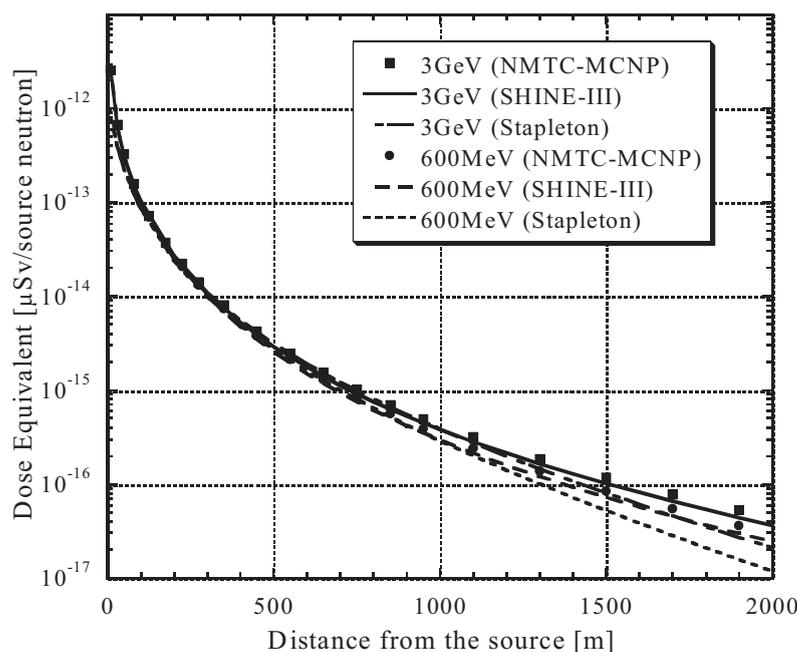


図4 スカイシャインに関する簡易計算法と詳細計算法による計算結果の比較¹⁴

力を決めている。

4. J-PARC遮蔽設計法の精度検証

これまで述べてきたように、J-PARCにおいては、様々な計算手法が用いられているため、これらの精度を検証し、整合性を取る必要がある。これら計算法のうち、簡易計算法については、実機施設における測定結果や経験に基づき、安全尤度を考慮して作成されていることから、その適用範囲を誤らなければ、特にどの手法を用いても問題となることは少ない。一方、モンテカルロ法については、汎用性がある一方で、コードの特性が異なることから、用いる核データを含め、総合的に比較、検証する必要がある。そこで、J-PARCでは、遮蔽設計上重要な課題：厚いターゲットからの中性子収量、ビームダンプ、深層透過、ストリーミングについて、主に実験データに基づくベンチマーク問題集を作成し、モンテカルロ法を中心に精度評価を行ったので、ここではその概要について述べる⁴¹。

厚いターゲットからの中性子収量は放射線源として全ての計算の基となる重要な項目である。この中性子収量に関しては、1) LANLで測定された256MeV陽子による炭素、アルミニウム、鉄及び劣化ウランターゲットからの中性子収量に関する実験^{42,43}、2) KEKで行われた0.5及び1.5GeV陽子による鉛及びタングステンターゲットからの中性子収量に関する実験⁴⁴について比較検討を行った。その一例として、KEKでの実験に関する比較結果を示す。KEKにおける実験では、12GeV陽子シンクロトロンに設置された π^2 ビームラインにおいて、0.5及び1.5GeV陽子を用いて、鉛とタングステンに関し、様々な角度における生成二次中性子スペクトルが測定されている。図5は1.5GeV陽子が入射した鉛から生成する中性子について、測定結果とNMTC/JAM (PHITS)、MCNPX及びMARSによる計算結果を比較したものである⁴⁵。In-

medium nucleon-nucleon cross section (NNCS) を用いたNMTC/JAM (PHITS) の計算結果は、前平衡過程の影響があるところで多少過小評価しているが、全体的に良く実験値を再現している。また、MCNPX及びMARSについても一部実験値との食い違いが見られるが、全体的には良く一致している。LANLの実験解析と併せて、総合的には概ねファクター2の精度で実験値を再現していることが示された。

ビームダンプ体系に関しては、KEKなどで様々な測定が行われているが、ここでは、最近の実験データとして、BNL/AGSで行われた1.6、12及び24GeV陽子による水銀ターゲットにおける反応率分布測定結果⁴⁶について検討した。実験では、直径20cm長さ130cmのステンレス容器に封入された水銀に、1.6、12及び24GeVの陽子を入射し、その周囲に配置した種々の放射化箔を用いて、水銀ターゲットで生成した二次中性子の空間・エネルギー分布を測定した。図6は、その一例として、 $^{209}\text{Bi}(n, 4n)^{206}\text{Bi}$ (閾エネルギー: 22.6MeV) の反応率分布について、その実験結果とモンテカルロ計算結果について比較した結果を、実験体系と共に示したものである³⁶。12、24GeVの体系後方において、MARSの結果が僅かに多少過大評価し、またMCNPXが僅かに過小評価している。また、1.6GeVでは全てのコードが僅かに過小評価しているが、全体的には概ねファクター2以内で実験値を再現した。

深層透過に関しては、1) 43及び68MeV陽子により発生した擬似単色中性子のコンクリート及び鉄深層透過^{47,48}、2) 2.83、24GeV陽子入射により水銀ターゲットで発生した中性子の鉄及びコンクリート深層透過^{36,49}について比較検討を行った。前者はJAEA・TIARAで行ったp-Li反応による準単色中性子源を用いて、中性子源前方に設置したコンクリート及び鉄遮蔽体後背面における透過中性子スペク

トルを測定した実験である。後者は、前節の水銀ターゲットの両側に鉄及びコンクリートの遮蔽体を設置し、その内部において様々な放射化箔を用いて、中性子の減衰を測定したものである。図7は、一例として、AGS/BNLの鉄遮蔽体内における $^{209}\text{Bi}(n,6n)^{204}\text{Bi}$ (閾エネルギー:38.0MeV)の反応率分布について、実験結果と計算結果について比較したものである³⁶。NNCSを用いたNMTC/JAM (PHITS)の計算結果は、全体的に非常に良く実験値を再現している。また、MCNPX及びNNCSを用いないNMTC/JAM (PHITS)についても、やや過小評価するものの、その減衰傾向は実験値と良く一致している。TIARAの実験解析と併せて、総合的には概ねファクター2で実験値を再現した。

ストリーミングに関しては、1) 7 GeV陽

子加速器施設における直及び1回屈曲トンネル中性子ストリーミング⁵⁰、2) 68MeV陽子加速器施設における迷路状通路中性子ストリーミング³⁷について比較検討を行った。前者は英国8 GeV陽子シンクロトロン施設で行われたストリーミング実験である。後者は、3.2節で示したものである。前者を含め、モンテカルロ法については全体的には概ねファクター2で実験値を再現しており、計算法の相互に差がないことが確認された。

J-PARCで纏めたベンチマークでは以上であるが、これらの他に、遮蔽設計上重要な項目としては、スカイシャイン、放射化にかかる計算精度評価がある。

スカイシャインについては、J-PARCで主たる部分を占める加速器トンネル部について、先に示したように計算法によって、大き

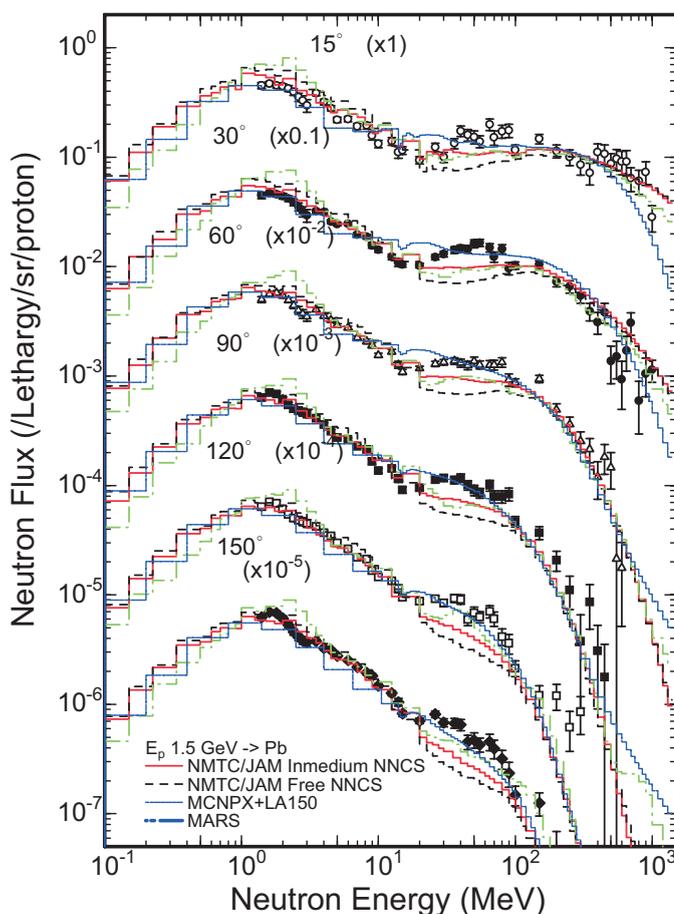


図5 KEK/PSにおいて行われた中性子取量測定に関する実験値と計算値の比較⁴⁵

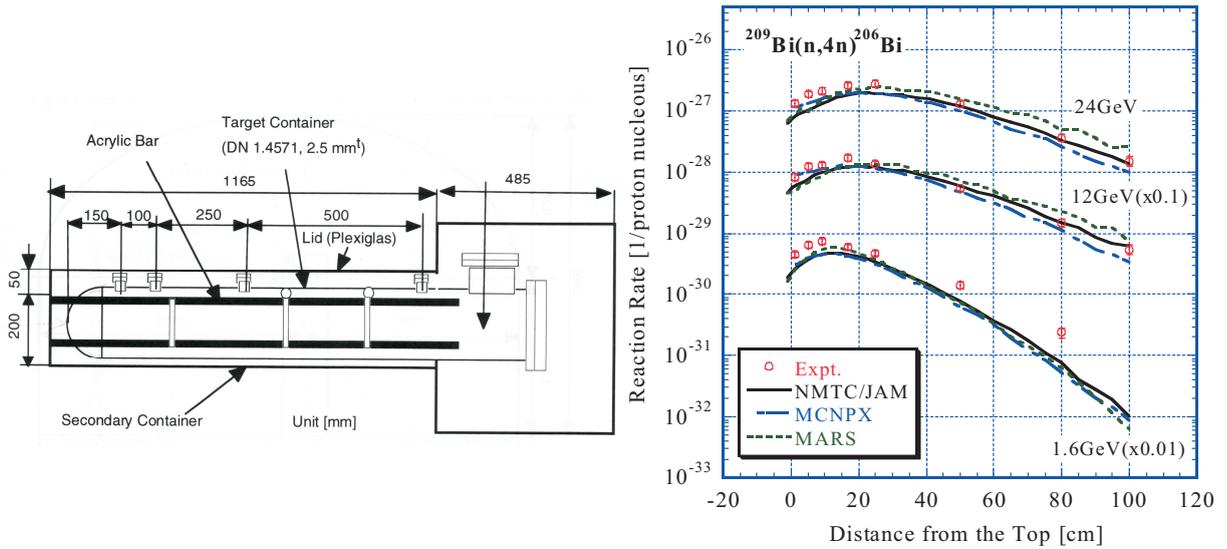


図6 BNL/AGSで行われた水銀ターゲット実験体系とそのターゲット周囲におけるBi (n, 4n) 反応率分布にかかる実験値及び計算値の比較³⁶

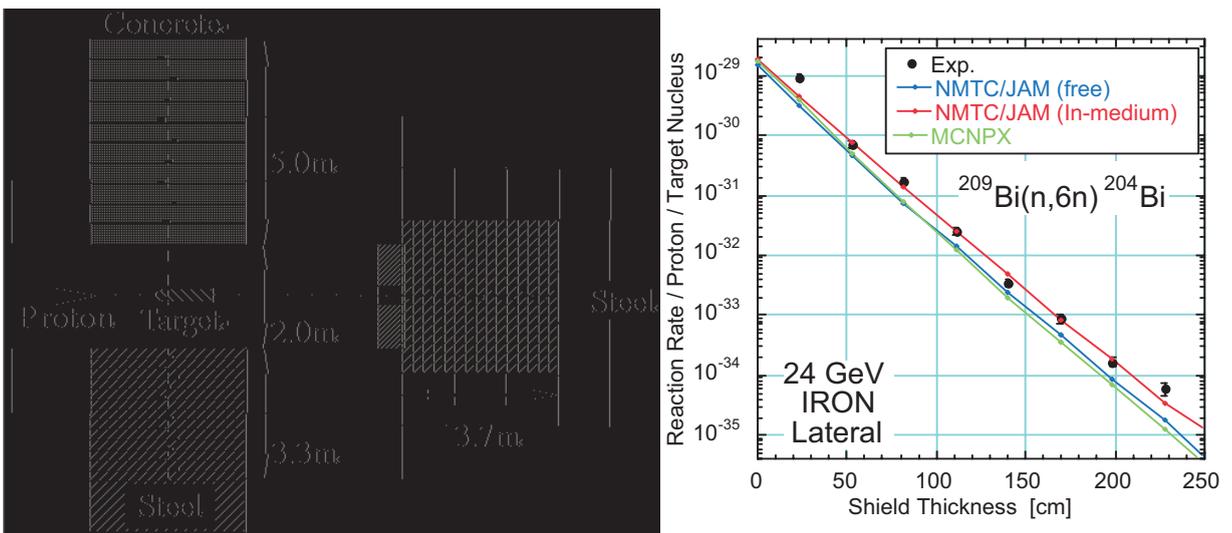


図7 BNL/AGSで行われた深層透過実験体系と鉄遮蔽体内のBi (n, 6n) 反応率分布にかかる実験値と計算値の比較³⁶

な差異が見られないことから、実験に基づいた検証を行っていない。しかし、近年カザフスタンにおける実験等が行われ、実験データが蓄積されていることから、今後、これらを基に遮蔽設計法の検証を行う必要がある。

放射化にかかる評価については、1) 放射線管理上は、排出の都度放射能濃度を測定し、管理を行うため、管理運用で対応しうること、2) 計算に必要とされるデータが少な

く、計算条件が複雑なため、設計計算で精度が期待されないことから、当初J-PARCでは実験に基づく検証を行わなかった。しかし、その後、BNL/AGSなどにおける測定結果が公表される等、実験データの蓄積が見られることやDCHAIN-SP2001の改良が進み、精度が向上していることから、これも遮蔽設計法の検証に加えていくことを検討する必要がある。

5. まとめ

高エネルギー加速器施設では、様々な加速器施設遮蔽設計法が開発され、その精度検証が行われてきた。J-PARC等では、それに基づいて、使用許可を受け、施設の運用が行われている。一方で、大半の小規模加速器施設では、簡易計算法による設計が行われているのが現状である。簡易計算法は誰もが使える一方で、使用には細心の注意が必要であり、また必ずしも合理的な設計ができるとは限らない。詳細計算法は使用に習熟する必要があるが、設計条件が明確であれば、合理的な設計が可能である。加速器施設の増加と共に、今後更に放射線の挙動に関する知見が集積され、これら遮蔽設計法の精度向上が期待される。外国では、既に、これら最新の知見に基づいた設計及び許認可が行われている。現在日本では、一部の申請でそれが行われているが、これら最新の知見を的確に遮蔽設計に反映させていくためには、これらが許認可に適用できる遮蔽設計法として認められなければならない。即ち、加速器施設全体に適用させるには、これら最新の知見を許認可に適用させるための制度が必要であり、そのための適用基準が示されている必要がある。今後、国、学会等でこのような制度構築が進められることが期待される。

参考文献

1. <http://j-parc.jp/index.html>
2. http://www.nirs.go.jp/research/division/charged_particle/himac/index.shtml
3. <http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/LHC-en.html>
4. <http://neutrons.ornl.gov/aboutsns/aboutsns.shtml>
5. <http://www.ganil.fr/eurisol/>
6. <http://ess-neutrons.eu/>
7. <http://www.orau.org/ria/frib-workshop09/default.htm>
8. <http://www.fluka.org/fluka.php>
9. <http://mcnpx.lanl.gov/>
10. <http://www-ap.fnal.gov/MARS/>
11. <http://phits.jaea.go.jp/index.html>
12. K. Niita, et al., "High Energy Particle Transport Code NMTC/JAM", Nucl. Instrum. Methods, B184, 406 (2001).
13. N. Sasamoto, et al., "Status on shielding design study for the high-intensity proton accelerator facility," J. Nucl. Sci. Technol., Suppl. 2, 1264 (2002).
14. H. Nakashima, et al., "Radiation Safety Design for the J-PARC Project," Radiat Prot Dosimetry, 115, 564-568 (2005).
15. H. Nakashima, et al., "Radiation shielding study for the J-PARC project," Proc. of 14th Biennial Topical Meeting of the ANS Radiation Protection and Shielding Division, 267-282 (2006).
16. H. Nakashima, et al., "Radiation Shielding Design for the J-PARC Project," to be published at Proc. of shielding aspects of accelerators, targets and irradiation facilities - SATIF 8, 22-24 May 2006 (2006).
17. "Beam Halo and Scraping," Proc. 7th ICFA Mini-Workshop on High Intensity High Brightness Hadron Beams, Interlaken Resort on Lake Como, Wisconsin, U.S.A. (1999).
18. I. Yamane, "Radiation Protection Measures for the Maintenance Service of JHF 3-GeV Ring," KEK Internal Report 98-7 (1998).
19. H. Nakashima, et al., "Estimation of activity and dose distributions around a proton linac induced by beam spill," J. Nucl. Sci. Technol. Suppl.1, 870-874

- (2000).
20. B. J. Moyer, "Method of Calculation of the Shielding Enclosure for the Berkeley Bevatron", Proc. 1st Int. Conf. Shielding around High Energy Accelerators, Presses Universitaires de France, Paris, 65 (1962).
 21. K. Tesch, "A Simple Estimation of the Lateral Shielding for Proton Accelerators in the Energy Range 50 to 1000 MeV", Radiation Protection Dosimetry, Vol.11 No.3, 165 (1985).
 22. K. Tesch, Particle Accel., 12, 169 (1982).
 23. R. Tayama, et al., "DUCT-III: A Simple Design Code for Duct-Streaming Radiations," KEK Internal 2001-8 (2001).
 24. F. Masukawa, et al., "Verification of the DUCT-III for Calculation of High Energy Neutron Streaming," JAERI-Tech 2003-018 (2003).
 25. G. B. Stapleton, K. O'Brien, and R. Thomas, Particle Accel., 44(1), 1 (1994).
 26. T. Kai et al., "DCHAIN-SP 2001: High Energy Particle Induced Radioactivity Calculation Code", JAERI-Data/Code 2001-016 (2001) [in Japanese].
 27. J. F. Briesmeister (Ed.), "MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4A", LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory (1993).
 28. I. Baishev, A. Drozhdin and N.V. Mokhov, "STRUCT Program User's Manual," SSCL-MAN-0034 (1994).
 29. K. Shibata, et al., "Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-3: JENDL-3.3," J. Nucl. Sci. Technol. 39, 1125 (2002).
 30. A. B. Pashchenko, IAEA Consultants' Meeting on Selection of Evaluations for the FENDL/A-2 Activation Cross Section Library, Summary Report, INDC(NDS)-341, IAEA (1996).
 31. Y. Sakamoto and Y. Yamaguchi, "Dose Conversion Coefficients in the Shielding Design Calculation for High Energy Proton Accelerator Facilities", JAERI-Tech 2001-042 (2001) [in Japanese].
 32. S. Ban, Nucl. Instrum. Methods, 174, 271 (1980).
 33. G. R. Stevenson, L. K. Lin and R. H. Thomas, Health Phys., 43, 13 (1982).
 34. L. K. Lin, G. R. Stevenson and R. H. Thomas, Health Phys., 46, 674 (1984).
 35. R. H. Thomas and S. V. Thomas, Health Phys., 46, 954 (1984).
 36. H. Nakashima, et al., "Research Activities on Neutronics under ASTE Collaboration at AGS/BNL," J. Nucl. Sci. Technol. Suppl.2, 1155-1160 (2002).
 37. Su. Tanaka, et al., "An Experimental Study on Radiation Streaming through a Labyrinth in a Proton Accelerator Facility of Intermediate Energy", Health Physics, 81, 406 (2001).
 38. T. Tsukiyama, et al., "SHINE-III: Simple Code for Skyshine Dose Calculation up to 3 GeV Neutrons," J. Nucl. Sci. Technol., Supplement 1, 640 (2000).
 39. T. Masumura, et al., "Simplified Shielding Calculation System for High-intensity Proton Accelerators," JAERI-Data/Code 2000-026 (2000) [in Japanese].
 40. S. Furihata and H. Nakashima,

- “Analysis of activation yields by INC/GEM,” JAERI-Conf 2001-006, 236 (2001).
41. N. Matsuda, et al., “Analyses of Benchmark Problems for the Shielding Design of High Intensity Proton Accelerator Facilities,” JAERI-Tech. 2008-030 (2008).
 42. M. M. Meier, et al., “Neutron Yields from Stopping- and Near-Stopping-Length Targets for 256-MeV Protons,” Nucl. Sci. Eng., 104, 339-363 (1990).
 43. M. M. Meier, et al., “Differential Neutron Production Cross Sections and Neutron Yields from Stopping-Length Targets for 256-MeV Protons,” LA-11518-MS (1989).
 44. S. Meigo, et al., “Measurements of Neutron Spectra Produced from a Thick Lead Target Bombarded with 0.5- and 1.5-GeV Protons,” Nucl. Instrum. Methods, A431, 521 (1999).
 45. S. Meigo, et al., “Measurements of Neutron Spectra Produced from a Thick Tungsten Target Bombarded with 0.5- and 1.5-GeV Protons,” J. Nucl. Sci. Technol., Suppl. 2, 1252 (2002).
 46. H. Takada, et al., “Measurements of Activation Reaction Rate Distributions on a Mercury Target Bombarded with High-Energy Protons at AGS,” JAERI-Data/code 2000-008 (2000).
 47. N. Nakao, et al., “Transmission through Shields of Quasi-Monoenergetic Neutrons Generated by 43- and 68-MeV Protons -I : Concrete Shielding Experiment and Calculation for Practical Application,” Nucl. Sci. Eng. 124, 228-242 (1996).
 48. H. Nakashima, et al., “Transmission through Shields of Quasi-Monoenergetic Neutrons Generated by 43- and 68-MeV Protons-II : Iron Shielding Experiment and Analysis for Investigating Calculation Methods and Cross Section Data,” Nucl. Sci. Eng. 124, 243-257 (1996).
 49. H. Nakashima, et al., “Current Status of the AGS Spallation Target Experiment,” Proc. of OECD/NEA Workshop on Shielding Aspects on Accelerator, Target and Irradiation Facilities, SLAC, Apr. 10-12 (2002)
 50. G.R.Stevenson, et al., “An Experimental Study of Attenuation of Radiation in Tunnels Penetrating the Shield of an Extracted Beam of the 7 GeV Proton Synchrotron NIMROD,” Health Phys., 24, 87 (1973).