



## 2.2.2 加速器遮蔽実験

原研・中島宏、田中進、坂本幸夫、中根佳弘、高田弘、明午伸一郎、益村朋美、田中俊一、  
東北大・中村尚司、馬場護、黒沢忠広、中尾誠、京大・秦和夫、KEK・平山英夫、中尾徳晶、  
理研・上養義朋、国立歴史民俗博物館・今村 峯雄、放医研・高田真志

中間エネルギー領域の加速器施設遮蔽設計法の確立を目的として、原研高崎研 TIARA の AVF サイクロトロンを用いて、一連の加速器施設遮蔽実験を行った。本報告ではその中から、中性子深層透過実験及び放射線迷路ストリーミング実験について述べる。

### Shielding Experiments for Accelerator Facilities

H. Nakashima, Su. Tanaka, Y. Sakamoto, Y. Nakane, H. Takada, S. Meigo, T. Masumura, Sh. Tanaka (JAERI), T. Nakamura, M. Baba, T. Kurosawa, M. Nakao (Tohoku Univ.), K. Shin (Kyoto Univ.), H. Hirayama, N. Nakao (KEK), Y. Uwamino (RIKEN), M. Imamura (NMJH) and M. Takada (NIRS)

A series of shielding experiments was carried out by using AVF cyclotron accelerator of TIARA at JAERI in order to validate shielding design methods for accelerator facilities in intermediate energy region. In this paper neutron transmission experiment through thick shields and radiation streaming experiment through a labyrinth are reported.

Key words : Shielding Experiment, Accelerator Facilities, Intermediate Energy, Neutron Transmission, Radiation Streaming

#### 1. 序

近年、加速器は工業、医療など広い分野にわたり、その利用が進められている。また、その利用を発展させるために、高エネルギー・大電流加速器施設の建設が計画されている。これらの施設設計のためには、放射線安全性と経済性の観点から、遮蔽設計計算手法の検証とこれに関する基礎データの取得が重要である。しかし、数十 MeV 以上のエネルギーを持つ粒子を発生させ、且つ遮蔽実験に適した加速器施設があまり無いことから、このエネルギー領域における遮蔽実験データはほとんど測定されていない。そのため、このエネルギー領域において、その設計手法の精度はほとんど検証されていない。

そこで、これらを検証するベンチマーク実験データの取得を目的として、原研高崎研 TIARA の AVF サイクロトロンを用いて、一連の遮蔽実験及び核データなど遮蔽設計基礎データの測定を行っている。施設遮蔽設計においては、1)深層透過、2)放射線ストリーミング、3)機器等の放射化、4)スカイシャイン等がその検討項目となるが、TIARA ではこれらのうち、1)から 3)までについて実験が行われている。本報告では、その中から、中性子深層透過実験及び放射線迷路ストリーミ

ング実験と、それらの実験結果を用いて行った遮蔽設計法の精度評価について述べる。

## 2. 加速器施設遮蔽設計法の現状

本研究で行った実験結果について報告する前に、簡単に 20 から 100 MeV エネルギー領域における遮蔽設計法の現状について触れてる。このエネルギー領域における加速器施設の詳細設計法は、二種類に大別される。

一つは、従来原子炉や核融合炉の設計に使用されてきた、ボルツマン輸送方程式に基づく計算コードによるもので、核データによる群定数を用いて計算する手法である。この手法では、遮蔽設計上問題になるのは主に中性子及び二次 $\gamma$ 線であるという仮定に基づいているため、中性子核反応により生じる二次荷電粒子の影響を無視している。現在、中性子に関して 400 MeV までのエネルギー領域において、群定数セット HILO86[1]が使用可能である。HILO86 は、光学モデル及び HETC[2]による計算値を基にして、数少ない微分及び積分実験値を再現するように調整して作成されたものであるため、その精度は、従来の評価済み核データファイルに基づいて作成されてきたものと比べると大幅に劣る。また、このエネルギー領域では、弾性散乱角度分布は急激な前方性を示すため、HILO86 で用いている 5 次のルジャンドル関数で展開しようとした場合、実際には起こり得ない負の散乱確率を与えることがある。

今一つの手法は、素粒子物理用検出器の設計や宇宙船における被曝評価などに用いられている、核内カスケード・前平衡過程・蒸発モデルによる高エネルギー粒子輸送計算コードを用いる手法である。この手法の場合、核反応による二次荷電粒子等も全て追跡することができる。この計算コードは、中性子エネルギー 20MeV でボルツマン輸送方程式に基づく計算コードと接続して、そのエネルギー以下の中性子及び二次 $\gamma$ 線の挙動の計算を行う。しかし、これらのモデルの使用下限は、約 100 MeV と言われており、20 から 100 MeV までのエネルギー領域における計算精度は明確にされていなかった。

近年、これらの問題に対して、LANL では、150 MeV までの中性子と陽子の評価済み核データファイル[3]が作成され、その一部が公開されている。更に、この核データファイルを基に、MCNP[4]の使用範囲を 150 MeV まで拡張した MCNPX[5]を作成し、高エネルギー粒子輸送計算コード LAHET[6]に接続する動きも見られる。しかし、未だ、MCNPX は公開されておらず、使用が制限されている。更に、評価されている核種数も限定されている。

これらの詳細計算手法では膨大な計算時間を必要とするため、加速器施設においても簡易計算法が用いられる。特に、加速器施設においては、原子炉等と同様に無数のダクト、通路等が存在するため、これらにおける放射線ストリーミングを評価する必要がある。この評価にモンテカルロ計算手法を用いた場合、大きな体系における比較的小口径のダクトから漏洩する放射線による線量のピーキングが計算されない場合がある。そのため、この評価に対しては、簡易計算手法を用いるのが一般的である。実際、TIARA の AVF サイクロトロンにおける通路等の遮蔽設計には、簡易計算法の一つである Tesch の式[7]が用いられた。この他に、中村・上巻の式[8, 9]や秦の式[10, 11]などが提案されている。しかし、従来の加速器施設は、これらの精度評価実験を行うことを意図して設計されていないため、精度評価に理想的なストリーミング実験によってその精度が検証

されていない。

### 3. TIARA の準単色中性子場

遮蔽ベンチマーク実験に求められる条件として、1)線源条件が明確であること、2)実験配置が明確であり、計算における境界条件が明確であること、3)できるだけ多くの物理量（反応率、エネルギースペクトル等）が絶対値で測定されており、これらの測定に用いる検出器の検出効率、応答関数等が精度良く与えられていること等がある。

これらの条件のうち、線源条件を明確にするために、図1に示すように、TIARA のサイクロトロン加速器本体室内の LC コースに単色中性子発生装置を設置し、準単色中性子場を確立した。本装置では、45 から 90MeV の陽子を 2 MeV エネルギーロスに対応する厚さの  ${}^7\text{Li}$  濃縮ターゲットに当て、 ${}^7\text{Li}(p,n)$  反応により準単色中性子を発生させる。その内 0 度方向に発生する中性子を、コンクリート遮蔽壁に設置した長さ約 2.2 m 直径約 11 cm のコリメーターを通して、第3軽イオン室に引き出す。一方、反応せずにターゲットを通過した陽子は、電磁石で曲げられ、本体室内のビームダンプに捨てられる。このことにより、第3軽イオン室では、入射陽子により、ターゲット以外で生じる中性子の寄与を非常に少なくすることができ、測定における S/ N 比を上げるとともに、計算における境界条件を明確にしている。また、第3軽イオン室のコリメーター出口側の遮蔽壁には、遮蔽実験用に 1.2m X 1.2m 深さ 1.2m のくり抜きがある。この中に実験供試体を設置することにより、第3軽イオン室内に導かれた中性子による室内散乱中性子の影響を減らすことができる。このことによっても、計算における境界条件を明確にしている。

この中性子場における中性子強度の絶対値を測定するために、反跳陽子型カウンターテレスコープ (Proton Recoil Counter Telescope :PRT) を用いて、第3軽イオン室のコリメーター出口において各陽子エネルギーにおける中性子収量の測定を行った。(表1) [12, 13]この測定における系統誤差は、3.3%(45MeV )から 6.2%(90MeV)で、その主因は PRT に用いたラジエーター中に含まれる水素の微分散乱断面積の誤差によるものである。遮蔽実験中は、ファラデーカップ及び PRT で校正した  ${}^{238}\text{U}$  及び  ${}^{232}\text{Th}$  核分裂計数管を用いて、陽子電流及び中性子源において発生中性子数をモニターする。これらにより、測定値が絶対値で与えられることとなる。

また、サイクロトロン本体室と第3軽イオン室の間のコリメーターを抜けてくる、源中性子エネルギースペクトルを、PRT 及び液体シンチレーション検出器による飛行時間法を用いて測定し、線源条件として与えている。図2にこの中性子場におけるエネルギースペクトルを示す。飛行時間法による測定から、ピークエネルギー分解能は約 3MeV であり、約 5 MeV 以上の中性子エネルギースペクトルが得られている。5MeV 以上のエネルギースペクトルにおける単色ピーク成分の割合は、43MeV 陽子入射で約 43%、68MeV 陽子入射で約 30 %であり、エネルギーが上昇するとともにその割合が小さくなる。

この中性子場の最大の特徴は、ビーム状で単色ピーク成分を持つ準単色中性子を得ることができることである。このことにより、ビーム軸状に置いた物質における単色中性子の散乱挙動を測定することができる。このような場は世界的にも他にあまり例がなく、遮蔽実験、検出器開発、核データの測定等に適した中性子場となっている。

#### 4. 中性子透過実験[14, 15, 16, 17, 18, 19, 20]

この単色中性子源発生装置において発生する、約 40 及び 65MeV の準単色中性子を用いて、厚い遮蔽体における中性子透過実験を行った。本実験に用いた遮蔽体は、厚さ 10cm から 1.3m の鉄、厚さ 25cm から 200cm コンクリート及び厚さ 30cm から 183cm のポリエチレンである。測定に用いた検出器は、

- 1) MeV 領域の中性子エネルギースペクトルについて BC501A 液体シンチレーション検出器、
- 2) MeV 以下の領域の中性子スペクトルについてボナーボール検出器、
- 3) MeV 領域の中性子反応率分布について核分裂計数管及び固体飛跡検出器
- 4) 中性子線量当量について中性子レムカウンター

である。特に、液体シンチレーション検出器については、この中性子場や、東北大 CYRIC 及び理研における中性子場において、その応答関数を測定し、本実験に供している。[21]測定点は、それぞれの厚さにおいてビーム軸状と 20 cm 及び 40 cm off-center の点であり、先にも述べたように、遮蔽体における単色中性子の散乱に関するデータをj得ている。

図 3 に各遮蔽体背後における MeV 領域の中性子エネルギースペクトルの変化の様子を、図 4 にビーム軸状と off-center における中性子エネルギースペクトルの変化を示す。この図から遮蔽体における中性子の減衰の様子が、物質によって大きく異なることが分かる。鉄とコンクリートを比較すると、深くなるにつれて、コンクリートの場合、低エネルギー成分の割合が増加してくる。また、ポリエチレンの場合は、軽核のみで構成されているために、低エネルギー成分に構造がほとんど見られず、またピーク成分に比較して、低エネルギー成分の割合が最も低い。ビーム軸状と off-center での比較では、エネルギーが高くなるにつれて、中性子散乱の前方性がより顕著になるために、遮蔽体内での散乱角度がより大きくなる 40 cm off-center でピーク成分の割合が最も小さくなっている。

これらの実験データを基に、2章で述べた詳細計算手法の中から代表的なものについて、その計算精度の検証を行った。一つは、低エネルギーモンテカルロコード MORSE-CG[22]及び HILO86 群定数セットの組み合わせによるもの、今一つは、Sn 法を用いた DOT3.5[23]及び HILO86 群定数セットの組み合わせによるもの、そして、高エネルギー粒子モンテカルロ計算コードシステム HERMES[2]である。図 5 に実験値とこれらの計算値との比較した結果を示す。ビーム軸状では、MORSE-CG による計算値が実験値を最も良く再現している。DOT3.5 による計算値は、ピーク部分においてファクター 2 程度過小評価し、それ以外の部分では過大評価している。HERMES の結果は、弾性散乱を考慮しない場合、約 1 桁過大評価し、弾性散乱を考慮した場合でも、ファクター 2 程度過大評価した。この図に示した HERMES の計算結果は、更に我々が Pearlstein's systemics[24]を用いて、全断面積及び弾性散乱断面積の取り扱いについて改良したものであるが、ピーク部分については、実験値を再現したものの、低エネルギー成分の部分でやや過大評価している。Off-center における比較でも、MORSE-CG による計算値は、ファクター 2 程度実験値と異なっているものの、他の計算値に比べて比較的良く実験値を再現している。一方、DOT3.5 による計算結果は、計算結果が発散した。また、改良した HERMES もピークを形成せず、大幅に過小評

価している。以上の結果を纏めると、MORSE-CG は、全体的にかなり精度良く実験値を再現し、このエネルギー領域の遮蔽設計には適用可能である。DOT3.5 に関して、本解析では離散角度分点として  $S_{16}$  を用いたが、この分点数の依存性を調べるために  $S_8$  を用いた計算結果が更に過小評価したことから、少数の離散角度分点では、エネルギーが高くなることにより生じる鋭い前方微小角散乱を表現し得ないことが分かった。また、HERMES については、弾性散乱を考慮した計算が必要であることと、この弾性散乱の角度分布の取り扱いについて改良が必要であることを示した。ここで、更に MORSE-CG の計算精度を向上させるには、このエネルギー領域における精度の良い核データが重要であり、核融合炉遮蔽設計においても指摘されているように、ルジャンドル展開を用いない、二重微分断面積を用いた計算手法が有効である。

ところで、本ベンチマーク実験は、OECD/NEA における「加速器遮蔽専門家会議」において数十 MeV エネルギー領域におけるベンチマーク問題として取り上げられた。[25]このベンチマーク計算には、先に検証した詳細計算手法以外の様々な計算コードが参加し、その精度検証が行われている。参加したコードは、MCNP4A、LCS[6]、MARS13[26]及び FLUKA[27, 28]である。このうち、MCNP は先の分類の低エネルギーモンテカルロコードであり、それ以外は、高エネルギー粒子輸送計算コードである。図 6 にその結果の一部を示す。MARS や FLUKA の結果は 20~30%の精度で実験値を再現し、これらが非常に優れたコードであることを示した。

#### 5. 迷路ストリーミング実験[29, 30]

TIARA の第 2 軽イオン室とそれに続く長さ約 30m の 2 回屈曲通路は、図 7 に示すように、通路が第 2 軽イオン室と同一平面にあり、通路断面が単純矩形である。更に、線源がほぼイオン室の中央に設置されている。即ち、この体系は、加速器遮蔽施設における迷路ストリーミング計算精度を検証する実験を行うために、最適な幾何形状を持つように作られたものである。

実験に用いた中性子源は、室内に設置した Cu ターゲットを用いた 68MeVp-Cu 反応による白色中性子である。図 7 に示すように、陽子はターゲット室上方からターゲットに入射する。この実験における線源条件を明確にするために、このターゲットにおいて発生する中性子の角度微分エネルギースペクトルを放射化箔法を用いて測定した。[31]

本実験に用いた検出器は、ターゲット室内においては、

- 1) 速中性子束について  $^{238}\text{U}$  及び  $^{232}\text{Th}$  核分裂計数管
- 2) 熱中性子束分布について金箔による放射化法と TLD

迷路内においては、

- 1) 中性子線量当量分布についてレムカウンター
- 2) MeV 領域の中性子エネルギースペクトルについて BC501A 液体シンチレーション検出器、
- 3) MeV 以下の領域の中性子スペクトルについてボナーポール検出器
- 4) 中性子反応率分布について固体飛跡検出器及び  $^{238}\text{U}$  及び  $^{232}\text{Th}$  核分裂計数管
- 5) 熱中性子束分布について TLD
- 6)  $\gamma$  線線量分布について TLD 及び電離箱
- 7)  $\gamma$  線スペクトルについて BC501A 液体シンチレーション検出器

である。

まず、中性子線源の角度微分エネルギースペクトルについて、核内カスケード・前平衡・蒸発モデルを用いた NMTC/JAERI97[32] 及び MCNP-4B を用いて、解析を行った。この解析に用いている幾何形状では、銅ターゲットの形状を忠実に再現している。図 8 に陽子ビーム入射方向に対して 90 度方向のエネルギースペクトルの実験値と計算値の比較を示す。ファクター 2 程度 30MeV 以上で実験値を過大評価し、5MeV 以下で過小評価しているものの、大凡実験値を再現していることが分かる。そこで、室内及び迷路における解析では、この計算値を線源スペクトルとして、計算を行った。

室内及び迷路における実験の解析では、HILO86 群定数セットを用い、MORSE-CG 及び MCNP-4B により計算を行った。また、比較のために、最近 LANL で評価された、150MeV までの核データファイルから作成された群定数セットでも併せて計算を行った。しかし、この両者の群定数セットによる計算結果の違いは、ほとんど無いため、以下の実験値との比較では、HILO86 によるもののみを示す。

ターゲット室内における速中性子反応率分布の実験値と計算値との比較の結果を図 9 に示す。線源近傍では、比較的良い一致を示しているが、線源から離れ、室内散乱中性子による寄与が増すにつれて、計算値は実験値を過小評価する傾向にあり、壁近傍ではファクター 2 に達する。図 10 に迷路入り口部における中性子エネルギースペクトルの比較を示す。数百 keV 及び熱中性子領域を除いて、計算値は実験値を過小評価しており、特に MeV 領域の散乱線評価に問題があることを示している。図 11 は、室内における熱中性子束に関する実験値と計算値の比較を示しているが、計算値は大凡ファクター 2 から 3 過大評価となっており、スペクトル測定の結果と同様の傾向を示している。迷路内においても、室内同様にファクター 2 から 3 程度過小評価し、熱中性子に至る減速過程にも問題があることを示した。迷路部における中性子線量当量の比較においては、図 12 に示すように計算値はほぼ実験値を再現しているが、1 脚目でファクター 2 程度実験値を過小評価しており、室内散乱による MeV 領域中性子の過小評価の影響を受け継いでいる。しかし、2 脚目以降実験値と一致していることから、keV 領域の中性子と併せて、積分的には一致していることが分かる。

簡易計算手法の精度評価に関する結果を図 13 に示す。この図では、迷路入口部における線量を 1 に規格化して比較してある。TIARA の設計に用いた Tesch の式による計算結果は、1 脚目で最大ファクター 3 程度過小評価するものの、他の部分で非常に良く一致することを示し、その適用性が明らかとなった。この 1 脚目での違いは、Tesch の式[6]を評価する際に考慮された線源条件に対して、今回の実験では線源からの中性子が迷路入口に斜めに入射しているためと考えられる。また、中村・上叢の式[7, 8]についても比較したところ、2, 3 脚で減衰傾向が一致し、全体としてファクター 3 程度以内で一致することを示した。

## 6. まとめ

本研究では、加速器遮蔽設計手法の精度検証を行うために、TIARA の施設設計段階から遮蔽実験を行うに最適である工夫を行い、その特色を生かして、遮蔽ベンチマーク実験を行った。そし

て、本実験により得られたデータを基に、設計手法の精度検証を行い、いくつかの手法においてはその適用性を明らかにし、適用性に問題のある手法については、その精度向上の方向を示唆した。更に、本実験結果の意義は世界的にも認められ、既に各種計算手法の改良や核データ評価の積分テストに貢献している。このことは、今後建設が予定されている高エネルギー加速器施設の遮蔽設計のみならず、宇宙環境下における施設設計や被曝線量評価、高エネルギー物理学における検出器設計及び医療施設における粒子線照射効果や被曝線量評価等に大きな影響を与えている。

今後の研究課題は、粒子線の応答関数に関する実験的研究である。実際の施設設計において直接的評価の対象となる線量当量であるが、これは粒子線束と線量当量換算係数の積によって与えられるものであり、どちらも評価に足る精度を有している必要がある。本研究では、前者について精力的に研究を行ってきたが、後者に対する実験的研究は未だ行われていない。また、世界的に見てもこのエネルギー領域におけるデータはほとんど存在しない。本研究の目的である、施設遮蔽設計の精度向上のためには、線量当量換算係数に関する研究も行われて、初めて本研究は完結したと見るべきである。

#### 参考文献

1. Alsmiller Jr. R. G., Barnes J. M. and Drischler J. D., "Neutron-Photon Multi-group Cross Sections for Neutron Energies up to 400 MeV (Revision 1)," ORNL/TM-9801, Oak Ridge National Laboratory (1986).
2. Cloth P., et al., "HERMES A Monte Carlo Program System for Beam Materials Interaction Studies", Jül-2203 (1988).
3. Chadwick M. B., et al., "Cross-Section Evaluation to 150 MeV for Accelerator-Driven Systems and Implementation in MCNPX," Nucl. Sci. Eng., 131, 293 (1999).
4. Briesmeister J. F., ed., "MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 4B," LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory (1997).
5. Hughes H. G., et al., "Status of the MCNP<sup>TM</sup>/LCS<sup>TM</sup> Merger Project," Proc. Radiation Protection and Shielding Division Topl. Conf., Nashville, Tennessee, April 19-23 1998, p. I-188, American Nuclear Society (1998).
6. Prael R. E. and Lichtenstein H., "USER GUIDE TO LCS: THE LAHET CODE SYSTEM," LA-UR-89-3014, Los Alamos National Laboratory (1989).
7. Tesch K., Particle Accel., 12, 169 (1982).
8. Uwamino Y., Nakamura T. and Ohkubo T., Med. Phys., 13, 374 (1986).
9. 中村尚司、上叢義朋、Radioisotopes, 35(2), 51 (1986).
10. Shin K., J. Nucl. Sci. Technol., 25, 8 (1988).
11. Shin K., Selvi S. and Hyodo T., J. Nucl. Sci. Technol., 23, 949 (1986).
12. Baba M., Iwasaki T., Kiyosumi T., Yoshioka Y., Matsuyama S., Hirakawa N., Nakamura T., Tanaka Su., Tanaka Sh., Nakashima H., Meigo S. and Tanaka R., "Characterization and Application of 20-90

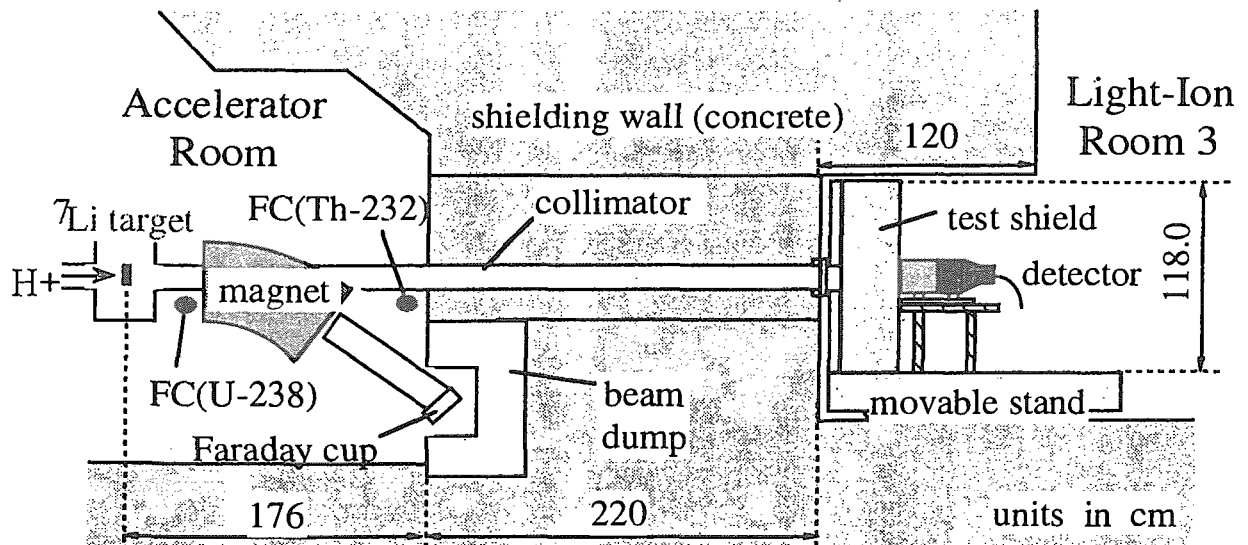
- MeV  ${}^7\text{Li}(p,n)$  Neutron Source at TIARA,” Proceedings of International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Gatlinburg Tennessee, U.S.A., Vol.1, 90 (1994).
13. Baba M., et. al., “Characterization of a 40-90 MeV  ${}^7\text{Li}(p,n)$  Neutron Source at TIARA Using a Proton Recoil Telescope and a TOF Method,” to be published in Nucl. Instrum. Meth.
  14. Sakamoto Y., Nakashima H., Nakane Y., Tanaka Sh., Tanaka Su., Nakamura T., Baba M., Nakao N. and Shin K., “Shielding Experiments with Quasi-Monoenergetic Neutrons between 15 and 90 – MeV at AVF Cyclotron Facility TIARA,” Proc. of ICRS8, p.809, Arlington, U.S.A. (1994).
  15. Nakao N., Nakashima H., Nakamura T., Tanaka Sh., Tanaka Su., Shin K., Baba M., Sakamoto Y. and Nakane Y., “Transmission Through Shields of Quasi-Monoenergetic Neutrons Generated by 43- and 68-MeV Protons : Part I - Concrete Shielding Experiment and Calculation for Practical Application,” Nucl. Sci. Eng., 124, 228 (1996).
  16. Nakao N., Nakashima H., Sakamoto Y., Nakane Y., Tanaka Sh., Tanaka Su., Nakamura T., Shin K., and Baba M., “Experimental Data on Concrete Shield Transmission of Quasi-Monoenergetic Neutrons Generated by 43- and 68-MeV Protons via  ${}^7\text{Li}(p,n)$  Reaction”, JAERI-Data/Code 97-020 (1997).
  17. Nakashima H., Nakao N., Tanaka Sh., Nakamura T., Shin K., Tanaka Su., Takada H., Meigo S., Sakamoto Y., Nakane Y. and Baba M., “Transmission Through Shields of Quasi-Monoenergetic Neutrons Generated by 43- and 68-MeV Protons: Part II - Iron Shielding Experiment and Analysis for Investigating Calculation Methods and Cross Section Data,” Nucl. Sci. Eng., 124, 243 (1996).
  18. Nakashima H., Nakao N., Tanaka Sh., Nakamura T., Shin K., Tanaka Su., Meigo S., Nakane Y., Takada H., Sakamoto Y. and Baba M., “Experiments on Iron Shield Transmission of Quasi-monoenergetic Neutrons Generated by 43- and 68-MeV Protons via  ${}^7\text{Li}(p,n)$  Reaction”, JAERI-Data/Code 96-005 (1996).
  19. Nakao N., Nakao M., Nakashima H., Tanaka Su., Sakamoto Y., Nakane Y., Tanaka Sh., and Nakamura T., “Measurements and Calculations of Neutron Energy Spectra Behind Polyethylene Shields Bombarded by 40- and 65-MeV Quasi-Monoenergetic Neutron Sources,” J. Nucl. Sci. Technol., Vol.34, No.4, p348 (1997).
  20. Nakao N., Nakashima H., Nakao M., Sakamoto Y., Nakane Y., Tanaka Su., Tanaka Sh. and Nakamura T., “Experimental Data on Polyethylene Shield Transmission of Quasi-monoenergetic Neutrons Generated by 43- and 68-MeV Protons via  ${}^7\text{Li}(p,n)$  Reaction”, JAERI-Data/Code 98-013 (1998).
  21. Nakao N., Nakamura T., Baba B., Uwamino Y., Nakanishi N., Nakashima H. and Tanaka Sh., “Measurements of Response Function of Organic Liquid Scintillator for Neutron Energy Range up to 135 MeV,” Nucl. Instrum. Methods., A362, 454 (1995).
  22. Straker G. R., Steven P. N., Irving D. C. and Cain V. R., “MORSE Code - A Multigroup Neutron and Gamma Ray Monte Carlo Transport Code,” ORNL-4585, Oak Ridge National Laboratory (1970).
  23. Rhodes W. A. and Mynatt F. R., “DOT-III: A Two-Dimensional Discrete Ordinates Radiation Transport



- Code," ORNL/TM-4280, Oak Ridge National Laboratory (1979).
24. PEARLSTEIN S., "Medium Energy Nuclear Data Libraries; A Case Study, Neutron and Proton Induced Reactions in  $^{56}\text{Fe}$ ," J. Astrophys., 346, 1049 (1989).
  25. Nakane Y., Sakamoto Y. Hayashi K. and Nakamura T., "International Comparison of Neutron Transmission Benchmark Analyses for Iron and Concrete Shields in Low, Intermediate and High Energy Proton Accelerator Facilities," Proc. on Shielding Aspects of Accelerators, Target and Irradiation Facilities, 151 (1997).
  26. Mokhov N. V., "The MARS Code System User's Guide Version 13(95)", FERMILAB-FN-628 (1995).
  27. Fasso A., Ferrari A., Ranft J. and Sala P. R., "FLUKA: present status and future developments," Proc. IV Int. Conf. on Calorimetry in High Energy Physics, La Biodola (Isola d'Elba), Sept. 20-25 1993. Ed. A. Menzione and A. Scribano, World Scientific, p. 493.
  28. Fasso A., Ferrari A., Ranft J. and Sala P. R., "FLUKA: Performances and Applications in the Intermediate Energy Range," Specialists' Meeting on Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities. Arlington, Texas, April 28-29 (1994).
  29. 田中進、中島宏、中根佳弘、坂本幸夫、明午伸一郎、田中俊一、高田真志、黒沢忠広、中村尚司、中尾徳晶、今村峯雄、上養義朋、秦和夫、平山英夫、「迷路漏洩線の測定－第2軽イオン室内迷路漏洩線の測定－」、原子核研究, Vol.41, No.3, p.101 (1996).
  30. Tanaka Su., Nakane Y., Sakamoto Y., Nakashima H., Meigo S., Tanaka Sh., Kurosawa T., Nakamura T., Nakao N., Hirayama H. and Shin K., " Measurements of Neutron and Photon Leaked Through Three-Leg Labyrinth from 68-MeV Proton Target Room," Proc. on ANS Topical Meeting (1998).
  31. 坂本幸夫、中島宏、中根佳弘、明午伸一郎、高田弘、田中進、田中俊一、高田真志、黒沢忠広、中村尚司、中尾徳晶、今村峯雄、上養義朋、「迷路漏洩実験の線源中性子スペクトル」、原子核研究, Vol.41, No.3, p.95 (1996).
  32. Takada H., Yoshizawa N., Kosako K. and Ishibashi K., "An Upgraded Version of the Nucleon Meson Transport Code: NMTC/JAERI97," JAERI-Data/Code 98-005, Japan Atomic Energy Research Institute (1998).

表1 単色中性子場における中性子フルエンス[12]

Proton Energy (MeV)	<sup>7</sup> Li target thickness (mm)	Neutron energy at Peak (MeV)	Neutron fluence 10 <sup>9</sup> n (Sr μC) <sup>-1</sup>
43	3.60	40.5	3.46(±3.3%)
48	3.80	45.4	2.70(±3.2%)
53	4.30	50.9	3.82(±4.6%)
58	4.70	55.3	4.45(±3.5%)
63	5.00	60.6	4.17(±3.3%)
68	5.20	65.2	4.82(±3.9%)
78	6.00	75.0	5.34(±4.5%)
87	6.75	84.6	6.35(±6.2%)



TIARA準単色中性子場断面図  
サイクロトロンLCコース

図1 準単色中性子場断面図

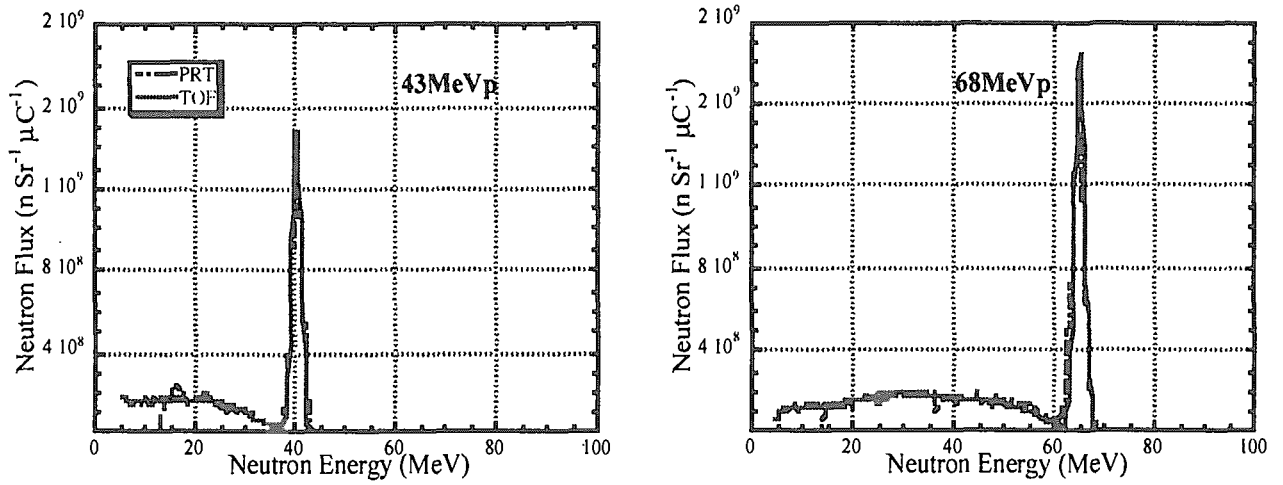


図2 源中性子エネルギースペクトル

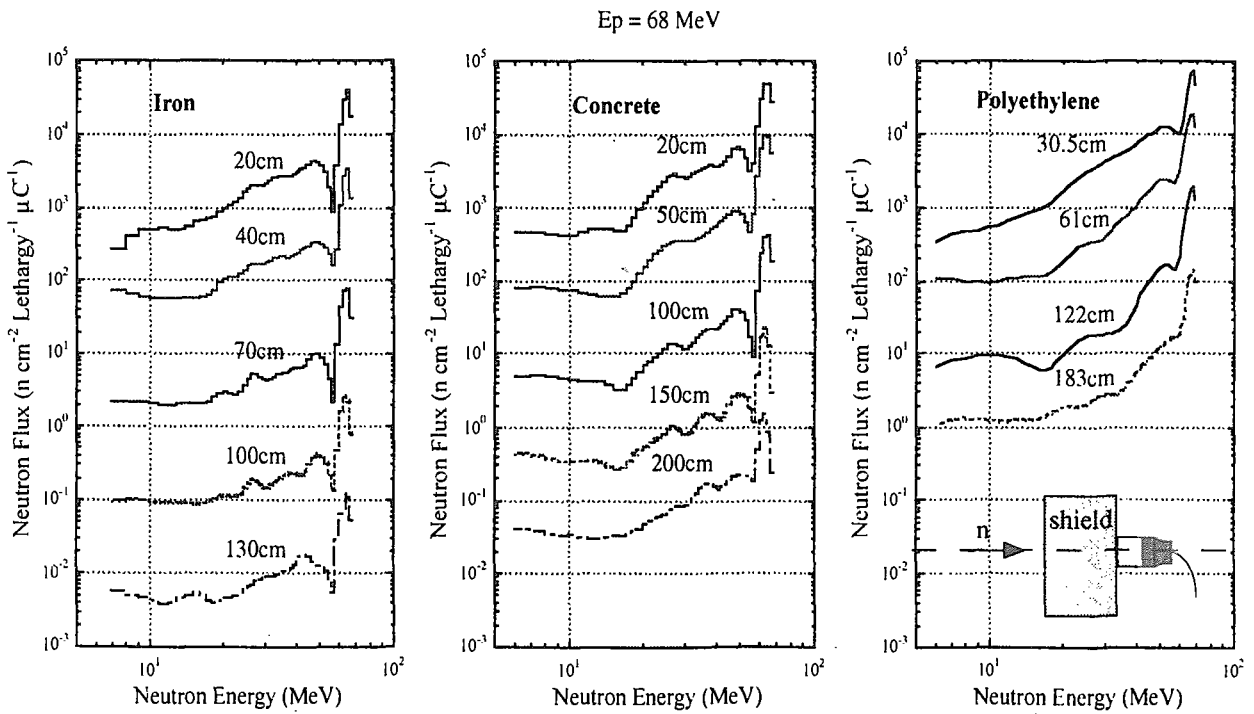


図3 各遮蔽体背後における中性子スペクトルの変化

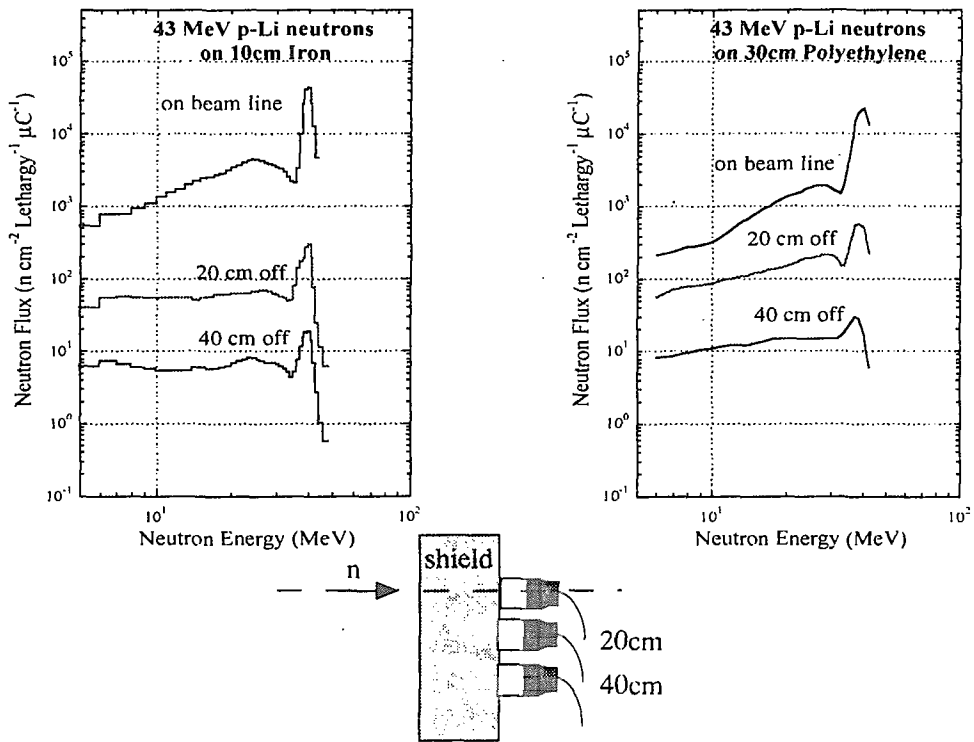


図4 ビーム軸状と off-center における中性子エネルギースペクトル

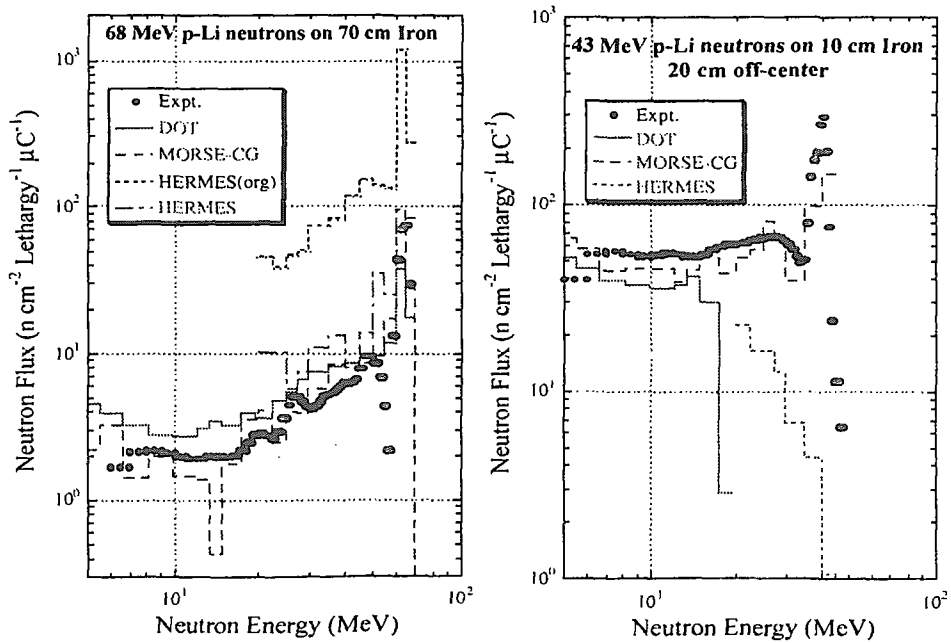


図5 中性子エネルギースペクトル測定値と計算値の比較

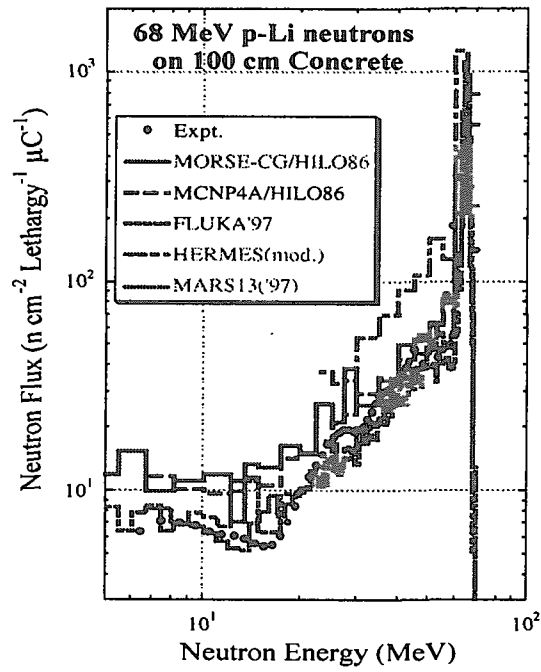


図6 国際ベンチマーク解析における中性子エネルギースペクトルの比較

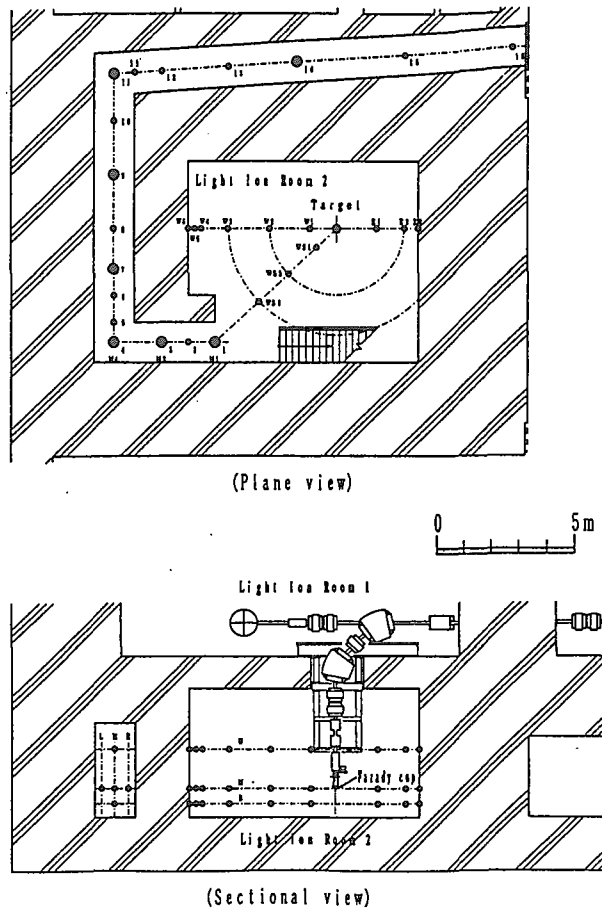


図7 迷路ストリーミング実験体系

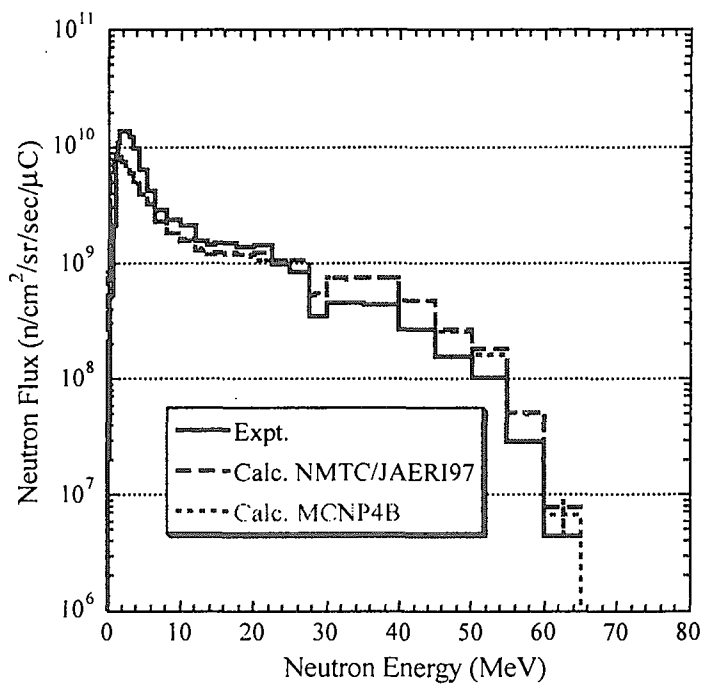


図8 90度方向源中性子スペクトルの比較

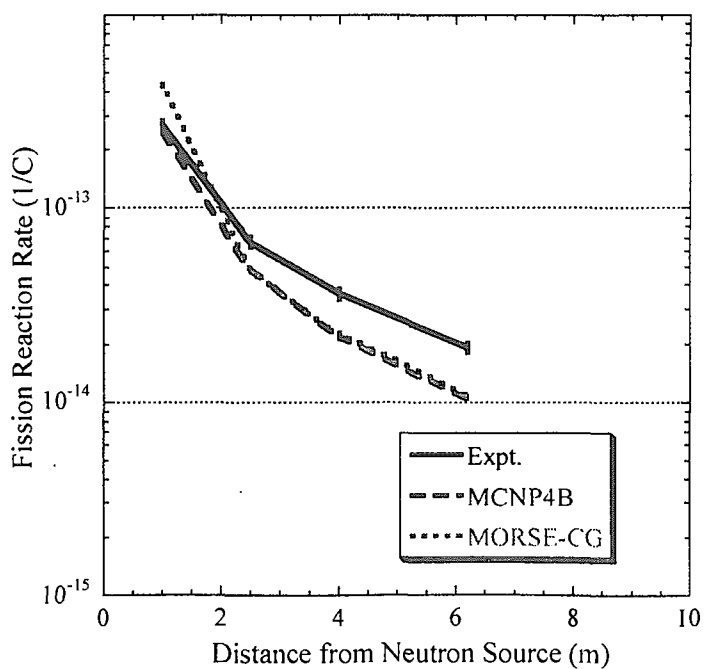


図9 ターゲット室内における速中性子反応率分布実験値と計算値の比較

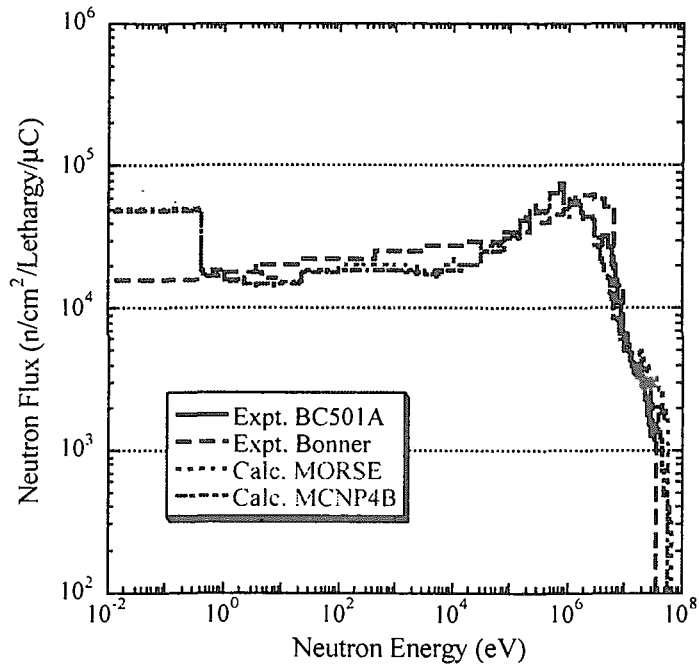


図 10 迷路入り口部における中性子エネルギースペクトル

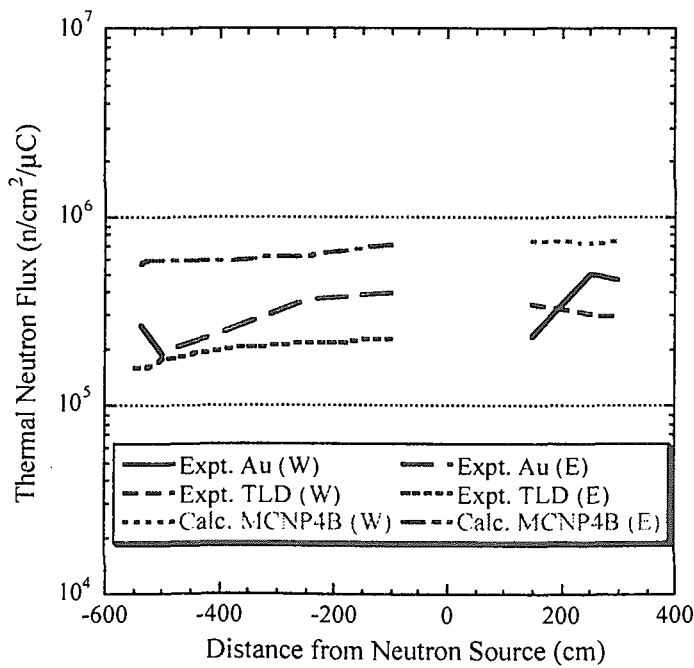


図 11 室内における熱中性子束に関する実験値と計算値の比較

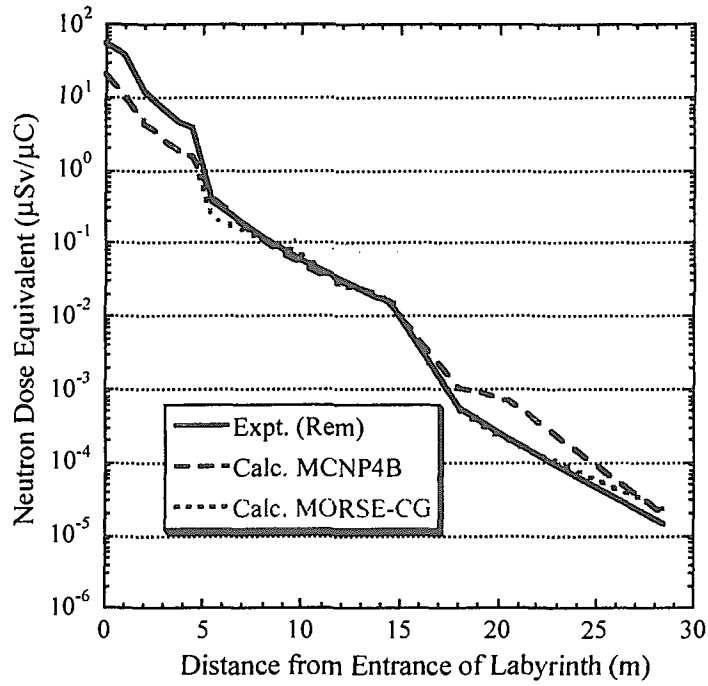


図 1 2 迷路内における中性子線量当量分布実験値と計算値の比較

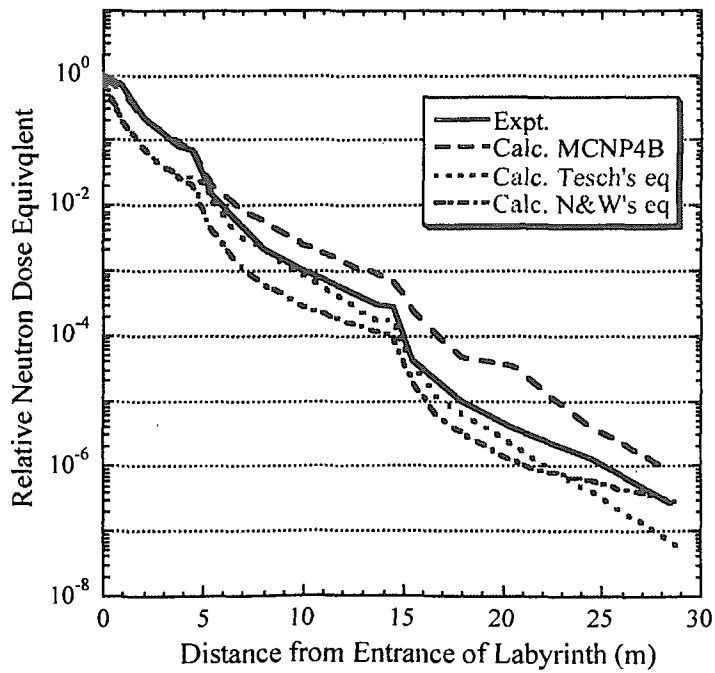


図 1 3 迷路内における相対中性子線量当量分布実験値と計算値の比較