

JAERI-Tech
99-023



JP9950124



NMTC/JAERIを用いたはじめ出し損傷断面積及びDPA計算

1999年3月

伊賀公紀*・高田 弘・池田裕二郎

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公開している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1999

編集兼発行 日本原子力研究所

NMTC/JAERIを用いたはじき出し損傷断面積及びDPA計算

日本原子力研究所東海研究所中性子科学研究センター

伊賀 公紀*・高田 弘・池田裕二郎

(1999年2月1日受理)

核子・中間子輸送コードNMTC/JAERIにLindhard-Robinsonモデルに基づくはじき出し損傷断面積計算機能を追加した。はじき出し損傷断面積を正確に評価するため、核子-原子核断面積の950MeV以上への拡張、弾性散乱角度分布の修正も同時に行った。機能拡張したNMTC/JAERIコードを用いて、Cr、Fe、Ni及びSUS316のはじき出し損傷断面積を計算した。弾性散乱によるはじき出し損傷断面積について、計算値は20MeVでJENDL PKAファイルの値と滑らかに接続することが確認できた。

1.5GeV、5MWの陽子を入射する核破砕ターゲットの核設計研究の一環として、これらの値を用いて水銀ターゲットのビーム入射窓及びターゲット容器におけるDPA(Displacement per atom)を評価した。計算は以下の3通りのビーム条件で行った；(a)一様分布で電流密度 $48\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。(b)放物分布で平均電流密度 $48\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、(c)放物分布で平均電流密度 $24\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。結果として、ビーム入射窓の最大DPAはそれぞれ (a)68DPA/yr、(b)114DPA/yr、(c)70DPA/yr、ターゲット容器の最大DPAはそれぞれ (a)41DPA/yr、(b)52DPA/yr、(c)37DPA/yrと評価された。本研究で得られたDPA値は、他の機関の核破砕中性子源設計における結果と概ね同じ値であることがわかった。

Displacement Cross Section and DPA Calculations Using NMTC/JAERI

Kiminori IGA *, Hiroshi TAKADA and Yujiro IKEDA

Center for Neutron Science
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 1, 1999)

A new function calculating displacement cross sections using the Lindhard-Robinson model is implemented in the nucleon-meson transport code NMTC/JAERI. The nucleon-nucleus cross sections in the energy region above 950 MeV and the angular distribution data of elastic scattering are also modified to evaluate the displacement cross sections as accurate as possible. The displacement cross sections of Cr, Fe, Ni, and type 316 stainless steel are calculated with the updated version of NMTC/JAERI. It is confirmed that the calculated displacement cross sections caused by the elastic scattering connect smoothly with the value of the JENDL PKA File at 20 MeV.

With these calculation values, the displacement per atoms (DPA) in the beam window and target vessel of a mercury target are estimated in a framework of the neutronics design study of the spallation target bombarded with 1.5GeV protons with a power of 5 MW. The following three beam conditions are selected in this calculation; (a) uniform distribution with average current density of $48 \mu\text{ A/cm}^2$, (b) parabolic distribution with average current density of $48 \mu\text{ A/cm}^2$, and (c) that with average current density of $24 \mu\text{ A/cm}^2$. The DPAs are estimated as (a) 68, (b) 114, and (c) 70 DPA/yr at the beam windows, and (a) 41, (b) 52, and (c) 37 DPA/yr at the target vessel for the three cases, respectively. It is found that the DPAs obtained in this study are almost the same as the results of other design studies for spallation neutron source facilities.

Keywords : Displacement Cross Section, DPA, NMTC/JAERI, Lindhard-robinson Model,
Nucleon-nucleus Cross Section, Angular Distribution for Elastic Scattering,
Spallation Neutron Source, Mercury Target, Beam Window,
Type 316 Stainless Steel

* Kyushu University

目 次

1. はじめに	1
2. NMTC/JAERIの改良	2
2.1 はじき出し損傷断面積	2
2.1.1 Lindhard-Robinsonモデル	2
2.1.2 NMTC/JAERIでの計算方法	3
2.2 断面積データの改訂	3
2.2.1 核子-原子核断面積	3
2.2.2 弾性散乱角度分布	3
3. はじき出し損傷断面積計算	5
3.1 計算条件	5
3.2 計算方法	5
3.3 結果及び考察	5
4. 核破碎水銀ターゲットのDPA評価	7
4.1 計算体系	7
4.2 入射ビーム条件	7
4.3 DPA評価点	7
4.4 結果及び考察	8
4.5 ビーム窓とターゲット容器の使用限度	9
5. まとめ	10
謝 辞	10
参考文献	11

Contents

1. Introduction	1
2. Improvement of NMTC/JAERI Code	2
2.1 Displacement Cross Section	2
2.1.1 Lindhard-Robinson Model	2
2.1.2 Calculation Method in NMTC/JAERI Code	3
2.2 Revision of the Cross Section Data	3
2.2.1 Nucleon-nucleus Cross Section	3
2.2.2 Angular Distribution for Elastic Scattering	3
3. Displacement Cross Section Calculation	5
3.1 Calculation Condition	5
3.2 Calculation Method	5
3.3 Results and Discussion	5
4. DPA Evaluation of the Mercury Spallation Target	7
4.1 Calculation Model	7
4.2 Incident Beam Condition	7
4.3 DPA Calculation Position	7
4.4 Results and Discussion	8
4.5 Lifetime of the Beam Window and the Target Vessel	9
5. Summary	10
Acknowledgments	10
References	11

1. はじめに

日本原子力研究所(原研)では、高エネルギー大強度陽子ビームを用いて得られる強力な中性子及びその他の粒子を利用して広範囲な基礎研究と消滅処理等を行う中性子科学研究計画を提案している。この研究施設の一つとして、大強度核破砕中性子源施設が計画されている。この施設では数 GeV、5 MW 程度の陽子を水銀等の重いターゲットに入射し、核破砕反応により発生した中性子を利用することが考えられている。諸外国ではこのような MW 級の核破砕中性子源として、米国では 1 MW (1 GeV、1 mA 陽子)による核破砕中性子源 (SNS)⁽¹⁾が、欧州では 5 MW (1.334 GeV、3.75 mA 陽子)による核破砕中性子源 (ESS)⁽²⁾が計画されている。

大強度核破砕中性子源施設の核破砕ターゲットは、入射陽子及び生成中性子束が強いために構造材が激しい放射線損傷を受ける。放射線損傷による材料の劣化を示す指標として、標的原子当りのはじき出し数 (DPA: Displacement per Atom) と H、He ガスの生成量が用いられる。そのうち DPA は材料の機械的性質の変化を見る目安として用いられ、DPA 量は材料の使用期間を決定する重要な制限値となる。高エネルギー大強度陽子ビームの照射を受ける核破砕ターゲットのビーム入射窓とターゲット容器はターゲットに生成される放射性核種や冷却水を閉じこめる第一壁として役割を果たす一方、ここでは放射線損傷量が高くなることが予想される。ターゲットの安全性を確保するためにはこれらの部位の放射線損傷量を精度良く評価することが重要である。

DPA の値は実験で直接求めることが難しく、特に 20 MeV 以上の高エネルギー領域については実験データが無い。したがって、計算コードを使用して DPA を求めるのが一般的である。DPA は、入射粒子が標的核をはじき出す確率であるのはじき出し損傷断面積 (Displacement cross section) と、陽子及び中性子束より求められる。SNS や ESS の核破砕中性子源のビーム入射窓のはじき出し損傷断面積の導出には LAHET⁽³⁾ コードシステムが使用されている⁽⁴⁾。しかし、LAHET コードにより得られるのはじき出し損傷断面積は数 10 MeV で過小評価であること、ENDF-B 等の核データライブラリと接続しない等の問題点が指摘されている⁽⁴⁾。そのため、DPA 量を精度よく評価するためにはより信頼できるコードを使用する必要がある。

原研では核破砕中性子源の核設計に NMTC/JAERI⁽⁵⁾ を標準として使用している。しかしながら DPA 評価機能はまだ整備されていない。そこで本研究では、NMTC/JAERI にはじき出し損傷断面積計算機能を追加し、これを用いて中性子科学研究計画で提案されている核破砕水銀ターゲット^(6,7)のビーム入射窓、及びターゲット容器の DPA を評価した。

2. NMTC/JAERI の改良

2. 1. はじき出し損傷断面積

2. 1. 1. Lindhard-Robinson モデル

はじき出し損傷断面積は入射粒子当りのはじき出し原子数で定義される。入射粒子は標的核種と衝突し1次はじき出し原子 (PKA: Primary Knock-on Atom) を生成する。この PKA が他の原子をはじき出すのに十分なエネルギーを持っている場合、PKA は他の原子をカスケード状にはじき出す。そこで、PKA によりはじき出された原子の総数を求める必要がある。

1個の PKA によりはじき出される原子の総数は PKA のエネルギー (T) に依存した関数となる。この関数は、はじき出し損傷関数 ($\nu(T)$) と呼ばれ、Norgett, Robinson と Torrens⁽⁸⁾ により以下のように与えられている。

$$\nu(T) = \left(\frac{\beta}{2T_d} \right) \xi(T) \quad (1)$$

ここで、 T_d は PKA によりはじき出される原子のはじき出ししきいエネルギーである。 $\xi(T)$ は PKA のもつエネルギーのうち、弾性衝突で失われるエネルギーである。Lindhard-Robinson モデル^(8,9) では $\xi(T)$ は以下のように表される。

$$\xi(T) = \frac{T}{1 + \kappa g(\varepsilon_T)} \quad (2)$$

$$g(\varepsilon) = 3.4008\varepsilon^{1/6} + 0.40244\varepsilon^{3/4} + \varepsilon \quad (3)$$

$$\kappa = \frac{(0.0793)Z_1^{2/3}Z_2(A_1 + A_2)^{3/2}}{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{3/4}A_1^{3/2}A_2} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{0.8853A_2}{(27.2)Z_1Z_2(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})(A_1 + A_2)} T \quad (5)$$

ここで、 Z_1 、 A_1 は PKA の原子番号と質量数、 Z_2 、 A_2 は PKA によりはじき出される原子の原子番号と質量数である。また κ は Norgett ら⁽⁸⁾ により 0.8 が提案されている。

エネルギー E の粒子が入射したときのはじき出し原子数 ($n_d(E)$) は、PKA の反跳エネルギーが T となる断面積 ($\sigma_d(T, E)$) とはじきだし損傷関数の積で表される。

$$n_d(E) = \int \nu(T)\sigma_d(T, E)dT \quad (6)$$

はじき出し損傷断面積はターゲット核種当りのはじき出し原子数で定義されるため、

$$\sigma_{DX}(E) = \frac{n_d(E)}{NxS} \quad (7)$$

で与えられる。ここで、 N 、 x 、 s 、はそれぞれ、ターゲット構成核種の数密度、ターゲットの厚さ、ビームの断面積を表す。

DPA は、 $\sigma_{DX}(E)$ とその場所での陽子又は中性子エネルギースペクトル $\phi(E)$ 、及び照射時間 t より次のように表される。

$$DPA = t \int \sigma_{DX}(E)\phi(E)dE \quad (8)$$

2. 1. 2. NMTC/JAERI での計算手法

NMTC/JAERI では PKA の反跳エネルギーが各反応終了後の残留核の運動エネルギーとして求められる。PKA の反跳エネルギーの決定時に $\sigma_d(T, E)$ が考慮されているため、(1) 式で求められるはじき出し損傷関数 $\nu(T)$ は、はじき出し原子数 $n_d(E)$ と等しくなる。 $n_d(E)$ の和はターゲット内ではじき出された原子の総数であり、はじき出し損傷断面積は

$$\sigma_{DX}(E) = \frac{1}{N_x S n_0} \sum n_d(E) \quad (9)$$

で与えられる。ここで、 n_0 は入射粒子数である。

2. 2. 断面積データの改訂

2. 2. 1. 核子-原子核 断面積

核子-原子核断面積は $\sigma_d(T, E)$ を決定する値であり、はじき出し損傷断面積の計算において重要な量である。NMTC/JAERI では 950 MeV 以下の陽子、中性子入射による全断面積、弾性・非弾性散乱断面積は Pearlstein の系統式⁽¹⁰⁾を用いて求められる。Pearlstein の系統式で得られる断面積については既にその妥当性が評価されているので、950 MeV 以下の中性子-原子核、陽子-原子核 断面積データについては従来通りの値を用いることとした。

一方、950 MeV 以上では、全断面積に幾何形状断面積を用いていたが、Pearlstein の系統式で得られる値と接続性が悪い等の不具合がある。幾つかの核種については 950 MeV 以上の中性子の全断面積が測定されている。主な構造材であるステンレスの構成元素 (Cr, Fe, Ni) に原子番号の近い核種では、Cu の測定値がある⁽¹¹⁾。そこで Cr, Fe, Ni の全断面積には、Cu の測定値に係数を掛け 950 MeV で Pearlstein の系統式による値に接続したものを使用した。中性子の非弾性散乱断面積は NASA の系統式⁽¹²⁾により得られた値を使用した。この結果得られた中性子-原子核断面積を図 1 に示す。百数十 MeV 以上では Cu の測定値より求めた全断面積と Pearlstein の系統式より得た値とがよく一致しており、950 MeV 以上でも実験値より求めた全断面積を用いて良いと判断できる。

陽子の全断面積については比較できる実験値が無いため、従来と同様に幾何形状断面積を用いた。陽子の非弾性散乱断面積については Welisch らの系統式⁽¹³⁾により得た値とした。この結果得られた陽子-原子核断面積を図 2 に示す。

2. 2. 2. 弾性散乱角度分布

PKA に付与されるエネルギーは散乱角度に依存して定まるため、はじき出し損傷断面積は弾性散乱角度分布により変化する。はじき出し損傷断面積計算において、後方散乱は PKA に付与されるエネルギーが大きくなるため無視することができない。特に数十 MeV の粒子の散乱では、後方散乱の割合が比較的多いためこの影響が大きい。

これまでの NMTC/JAERI では、Bessel 関数で近似した弾性散乱角度分布を用いていた。この近似では重心系で 30 度程度までの前方散乱しか記述されない。図 3 に 20 MeV 中性子を ^{56}Fe

に入射した場合の弾性散乱角度分布を示す。図より NMTC/JAERI でサンプリングされる弾性散乱角度は前方性が非常に強く後方散乱が起らない分布となることがわかる。これは光学ポテンシャルによる計算、JENDL 3.2 の評価値に矛盾した結果である。

したがって、光学ポテンシャルを用いて計算した弾性散乱角度分布をライブラリ化して組み込み、NMTC/JAERI で後方散乱を正しくサンプリングできるようにした。本研究では光学ポテンシャルとして、100 MeV までの中性子入射は Walter-Guss⁽¹⁴⁾ のポテンシャル、100MeV 以上の中性子入射は Shen⁽¹⁵⁾ のポテンシャルを使用した。陽子入射反応については Cooper ら⁽¹⁶⁾ のポテンシャルを用いた。これらの光学ポテンシャルは使用したエネルギー領域で実験値をよく再現している⁽¹⁴⁻¹⁶⁾。中性子を⁵⁶Feに入射した場合の弾性散乱角度分布を図4に、陽子を⁵⁶Feに入射した場合の弾性散乱角度分布を図5に示す。ただし、本研究では高エネルギーの中性子及び陽子入射については、散乱確率が1%以下となる後方の角度分布の計算は行っていない。

弾性散乱による角度分布のサンプリングを変更した NMTC/JAERI コードを用いた、弾性散乱によるはじき出し損傷断面積の計算結果を図6に示す。弾性散乱角度分布を修正したことにより、20 MeV において JENDL PKA ファイル⁽²³⁾ の値との接続性がよいはじき出し断面積が得られた。

3. はじき出し損傷断面積計算

本研究では核破碎水銀ターゲットのステンレス製ビーム窓及びターゲット容器の放射線損傷評価を行うため、主要構成元素である、Cr、Fe、Ni 及び検討されている材料 (SUS 316) についてははじき出し損傷断面積の計算を行った。

3.1. 計算条件

計算は数密度、 1.0×10^{22} atoms/cm³、厚さ 10 mm の擬似無限平板に単一エネルギーのペンシルビームを垂直に入射する体系で行った。Fe の場合の計算入力ファイルの例を図 7 に示す。はじき出ししきいエネルギー T_d は、Cr、Fe、Ni とともに 40 eV を使用した。

NMTC/JAERI では核内カスケードモデルに自由空間での核子-核子 (NN) 断面積を用いた Bertini モデル⁽¹⁷⁾ と媒質効果を考慮した NN 断面積を用いた ISOBAR モデル^(18,19) が選択できる。今回の計算では JENDL PKA ファイルとのつながりがより良い ISOBAR モデルを使用した。ただし、現在のコードでは ISOBAR モデルを用いた計算は 950 MeV 以下でしか行えないため、950 MeV 以上では Bertini モデルを用いた。

3.2. 計算方法

Cr、Fe、Ni については NMTC/JAERI を用い、入射エネルギー毎にはじき出し損傷断面積を求めた。

SUS 316 のような混合物の場合、単一組成の物質とは異なり、はじき出し原子数ははじき出される核種に依存する。本計算では、SUS 316 を構成するそれぞれの原子がはじき出される確率は数密度に比例すると仮定し、SUS 316 のはじき出し損傷断面積 ($\sigma_{DX}(E)$) は次式で求めた。

$$\sigma_{DX}(E) = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{DXi}(E)N_i}{N_{tot}} \quad (10)$$

ここで、 $\sigma_{DXi}(E)$ は元素 i のはじき出し損傷断面積、 N_i は元素 i の数密度、 N_{tot} はターゲット (SUS 316) の数密度である。今回の検討では SUS 316 の構成元素のうち Cr、Fe、Ni のみを考慮した。計算に用いた数密度を表 1 に示す。

20 MeV 以下の中性子によるはじき出し損傷断面積は JENDL PKA ファイルとして整備されている。そこで、中性子については NMTC/JAERI で計算を行う下限を 20 MeV とした。陽子については評価値が無いため NMTC/JAERI を用いて 1 MeV まで計算を行った。それ以下の低エネルギーの陽子による散乱は主に Rutherford 散乱であり、PKA の反跳エネルギーが小さくなるため今回の計算では考慮しなかった。

3.3. 結果及び考察

Cr、Fe、Ni 及び SUS 316 のはじき出し損傷断面積の計算結果を図 8 から図 15 に示す。比較のため中性子入射については LAHET 2.82 を用いた Pitcher らの計算結果⁽²⁰⁾ も併せて示す。

40 MeV 付近のピークは核子-原子核断面積がこの付近でピークを持つために現れる。800 MeV 付近からはじき出し損傷断面積が減少するのは、核反応による放出粒子数の増加により放出粒子が持ち出すエネルギーが多くなり、PKA の反跳エネルギーが少なくなるためである。LAHET 2.82 による計算値に見られる 60 MeV 付近のピーク、800 MeV 付近のピークも同様の理由であると思われる。NMTC/JAERI による結果に見られる 950 MeV での不連続部は核反応計算に用いる核内カスケードモデルが ISOBAR モデルから Bertini モデルに変わったためである。

20 MeV での全はじき出し損傷断面積の値は JENDL PKA ファイルの値よりも 30% 程度小さい。これは NMTC/JAERI では α 粒子の生成量が実際よりも低く計算されるため、PKA に与えるエネルギー量を過小評価することが原因と思われる。しかし、20 MeV におけるはじき出し損傷断面積の JENDL PKA ファイルの値との接続性に関しては、NMTC/JAERI による結果の方が LAHET 2.82 による結果よりも良好であり、より実際に近い値であると判断できる。

4. 核破碎水銀ターゲットの DPA 評価

4.1. 計算体系

計算は水銀ターゲット、鉛反射体で構成する核破碎ターゲット体系について行った。これは現在、中性子散乱中性子源の基準モデルとして検討が進められている体系⁽⁶⁾である。

ターゲット容器は SUS 316 製の三重又は、四重容器が考えられている。ターゲット容器はもっとも内側の容器の損傷が激しく、その外側の容器は内側に比べて損傷量が小さいと思われる。そこで、計算の簡略化のためターゲット容器を二重容器とし、その間に冷却材の D₂O を流す体系とした。水銀ターゲットの側面図を図 16 に示す。ターゲット容器の厚さは内側の容器が 3 mm、外側の容器が 2 mm で D₂O の厚さは 5 mm である。またターゲットの断面は、ビームが当たらない水銀の領域を上下に 15 mm、左右に 20 mm 各々設定した。

4.2. 入射ビーム条件

入射陽子ビームのエネルギーは 1.5 GeV、投入電力を 5 MW とし、形状は一様分布または放物分布とした。このときのビーム断面の扁平率は、 y 軸方向/ x 軸方向が 0.17 とした⁽⁷⁾。一様分布ビームの電流密度は $48 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ⁽⁷⁾、放物分布ビームの平均電流密度は 24 及び $48 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ とした。表 2 に計算に用いたビームの寸法を示す。

従来の NMTC/JAERI では放物分布の線源を設定することができないため、本計算では x, y 点での電流密度 ($J(x, y)$) を次式からサンプリングして求めるように修正した。

$$J(x, y) = J(0, 0)[1 - (x/a)^2 - (y/b)^2] \quad (11)$$

ここで、 $J(0, 0)$ は中心の電流密度、 a, b はそれぞれ x 軸方向、 y 軸方向のビーム半径である。この場合、平均電流密度 $\langle J \rangle$ は

$$\langle J \rangle = \frac{J(0, 0)}{2} \quad (12)$$

で与えられる。

4.3. DPA 評価点

材料の寿命評価は最も損傷が激しい部位で行われる。核破碎ターゲットにおいて、ビーム入射窓は最も損傷が激しい部分である。ターゲット容器で最も損傷が激しいと思われるのはモデレータが付く面である。なぜなら、モデレータからの冷・熱中性子強度を最大にするためにビームとモデレータの距離を離すことができないため⁽⁷⁾、ターゲット容器がより強力な中性子束にさらされるためである。そこで、DPA の評価はビーム入射窓とターゲット容器の上下面について行うこととし、これらの位置の中性子及び陽子エネルギースペクトルの計算を NMTC/JAERI - MCNP4A⁽²¹⁾ コードシステムを用いて行った。

ビーム入射窓での中性子及び陽子エネルギースペクトルの計算を行う領域は、一様分布ビームについてはビームの当る領域を 1 領域とし、放物分布ビームについては中心から同心円状に

10 領域に分けた。これは、ビーム入射窓での中性子束及び陽子束は入射ビームの電流密度に依存すると考えられるためである。計算を行った領域の模式図を図 17 から図 19 にそれぞれ示す。NMTC/JAERI - MCNP4A コードシステムにより計算した内側容器のビーム窓での中性、陽子エネルギースペクトルの結果を図 20、21 に示す。

ターゲット上下部の中性子及び陽子エネルギースペクトルは、ビーム軸に沿って 10 mm 毎に求めた。ターゲット前面から深さ 90~100 mm での中性子、陽子エネルギースペクトルの計算結果を図 22、23 に示す。

DPA の値は装置の連続使用期間を決定する重要な値の一つであるため、運転条件を 1 年間連続と仮定して DPA 量を評価した。

4. 4. 結果及び考察

ビーム窓での年間 DPA 計算結果を表 3 から表 5 に示す。また、これらの比較を図 24 に示す。図の横軸は、ターゲットの幅で規格化している。内側容器のビーム窓での DPA は、一様分布ビームの場合 68 DPA/yr、放物分布ビームの場合最大で 114 DPA/yr (平均電流密度 $48 \mu\text{A}/\text{cm}^2$)、70 DPA/yr (平均電流密度 $24 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) である。外側容器のビーム窓では、一様分布ビームの場合 50 DPA/yr、放物分布ビームの場合最大で 83 DPA/yr (平均電流密度 $48 \mu\text{A}/\text{cm}^2$)、51 DPA/yr (平均電流密度 $24 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) である。

ターゲット容器上下部の DPA 計算結果を表 6 から表 8 に示す。また、これらの比較を図 25 に示す。z はターゲット先端からの深さである。最も DPA の大きい場所はターゲット先端から 90 ~ 100 mm の位置である。内側容器の最大 DPA は、一様分布ビーム入射の場合 41 DPA/yr、放物分布ビーム入射の場合 52 DPA/yr (平均電流密度 $48 \mu\text{A}/\text{cm}^2$)、37 DPA/yr (平均電流密度 $24 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) である。外側容器の最大 DPA は、一様分布ビーム入射の場合 32 DPA/yr、放物分布ビーム入射の場合 41 DPA/yr (平均電流密度 $48 \mu\text{A}/\text{cm}^2$)、29 DPA/yr (平均電流密度 $24 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) である。

この結果、ターゲット容器の DPA はビーム入射窓での中性子に起因する DPA 量とほぼ同じ値であり、ビーム入射窓の 50 ~ 60% であることが示された。外側容器の DPA は内側容器の 75% であった。これは外側容器の中性子束が若干低いためであり、内側容器や冷却材部の厚さにより値が変化する。陽子と中性子の DPA への影響では、20 MeV 以下の中性子の割合がビーム窓で 50 ~ 60%、ターゲット容器で 80 ~ 90% となることがわかった。

他の評価値との比較のために、今回得られた結果と SNS⁽⁴⁾、ESS⁽²²⁾ の設計における評価値との比較を表 9 に示す。DPA は電流密度にほぼ比例するため、DPA を電流密度で規格化した値を表 9 に同時に示す。電流密度で規格化した DPA は NMTC/JAERI による計算値、SNS、ESS の評価値ともほぼ一致している。この結果より、今回行った計算結果は SNS、ESS の評価値と矛盾の無い値であり、本研究で NMTC/JAERI に追加した損傷計算機能により DPA の評価が行えることが確認できた。

4. 5. ビーム窓とターゲット容器の使用限度

これまでの材料照射実験から、SUS 316 は約 20 DPA の損傷量に達すると延性がなくなり、熱衝撃などの荷重負荷に継続して耐えられない恐れが生じる。したがって、SUS 316 の使用限度として 20 DPA を用いると、本計算から得られた結果から判断して、ビーム窓の使用期限は一様分布ビーム入射の場合、積算時間が 2600 時間 (約 3 か月)、平均電流密度 $48 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ の放物分布ビーム入射の場合 1500 時間 (約 2 か月)、平均電流密度 $24 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ の放物分布ビーム入射の場合 2500 時間 (約 3 か月) である。またターゲット容器は一様分布ビーム入射の場合 4300 時間 (約 6 か月)、平均電流密度 $48 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ の放物分布ビーム入射の場合 3400 時間 (約 5 か月)、平均電流密度 $24 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ の放物分布ビーム入射の場合 4700 時間 (約 6 か月) で交換する必要がある。

5. まとめ

核破碎中性子源のはじき出し損傷断面積を計算するために高エネルギー粒子・中間子輸送コード NMTC/JAERI について以下の改良を行った。

- 1) Lindhard-Robinson モデルに基づくはじき出し損傷断面積計算機能を追加した。
- 2) 950 MeV 以上の全断面積、弾性・非弾性散乱断面積を実験値、NASA の系統式、Welisch の系統式を用いて修正した。
- 3) 弾性散乱角度分布を光学ポテンシャルを用いて計算した値に変更した。

現在、中性子科学研究計画において検討を進めている、水銀ターゲット、鉛反射体体系に 1.5 GeV、5 MW の陽子を入射した場合のビーム入射窓及びターゲット容器の DPA を計算した。結果として次の知見を得た。

- 1) 平均電流密度 $48 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ の一様分布ビーム入射の場合、ビーム入射窓の損傷は 68 DPA/yr である。
- 2) 放物分布ビーム入射の場合、ビーム入射窓の損傷は最大で 114 DPA/yr (平均電流密度 $48 \mu\text{A}/\text{cm}^2$)、70 DPA/yr (平均電流密度 $24 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) である。
- 3) ターゲット容器の DPA はビーム入射窓の 50 ~ 60% である。
- 4) 全損傷量に占める 20 MeV 以下の中性子の割合がビーム入射窓で 50 ~ 60%、ターゲット容器で 80 ~ 90% である。
- 5) NMTC/JAERI による計算で、ESS、SNS の DPA 評価値とほぼ同じ値を得た。

以上のことから、はじき出し損傷断面積計算機能を追加した NMTC/JAERI の DPA 評価への適用性を確認すると共に、今後の核破碎ターゲット設計において、寿命評価のために役立つデータを供給できる見通しを得た。

今後、過小評価されているはじき出し損傷断面積の非弾性散乱成分について、計算過程等の検討を行い、ターゲット核設計の最適化に使用していく予定である。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、はじき出し損傷断面積の計算手法について高温材料強度研究室の菊地賢司氏に有益な助言を頂きました。また、JENDL PKA ファイルの使用について、極限ハドロン科学研究グループの千葉敏氏、核データセンターの深堀智生氏に貴重な助言、ご指導を頂きました。さらに、核破碎ターゲット体系の計算では核破碎中性子工学研究室の勅使河原誠氏、永尾忠司氏に援助して頂きました。感謝の意を表します。

参考文献

- (1) "The NSNS Collaboration, National Spallation Neutron Source Conceptual Design Report", NSNS/CDR-2/V1 and V2 (1997).
- (2) Bauer G. (Ed.): "The ESS Target Station Concept", ESS-96-60-T (1996).
- (3) Prael R. E. and Lichtenstein H.: "Users Guide to LCS: The LAHET Code System", LA-UR-89-3014 (1989).
- (4) Wechsler M. S., Barnett M. H., Dudziak D. J., Mansur L. K., Charlton L. A., Barnes J. M. and Johnson J. O.: "Calculations of Radiation Effects on 316 Stainless Steel Container Materials for the NSNS", Proceedings of the Symposium on Materials for Spallation Neutron Source, Feb. 10-12, 1997, Orlando, Florida, 23 (1997).
- (5) 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 (1998).
- (6) Teshigawara M., Watanabe N., Takada H., Nakashima H., Nagao T., Oyama Y. and Kosako K.: "Neutronic Studies of Bare Targets for JAERI 5 MW Pulsed Spallation Neutron Source", JAERI Research (To be published).
- (7) Teshigawara M., Watanabe N., Takada H., Kai T., Nakashima H., Nagao T., Oyama Y., Ikeda Y. and Kosako K.: "Neutronics Study on the JAERI 5 MW Spallation Neutron Source - Neutronic Performance and Nuclear Heating of the Reference Target-moderator-reflector System and the Target Shape/Size Effects -", JAERI Research (To be published).
- (8) Norgett M. J., Robinson M. T. and Torrens I. T.: Nucl. Eng. Des., 33, 50 (1974).
- (9) Lindhard J., Nielsen V. and Scharff M.: Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk., 36, No. 10 (1963).
- (10) Pearlstein S.: Astrophys. J., 346, 1049 (1989).
- (11) Schopper H. (Ed.): "LANDOLT-BÖRNSTEIN, Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, New Series, Group I: Nuclear and Particle Physics, Vol. 7, Elastic and Charge Exchange Scattering of Elementary Particles", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 19 (1973).
- (12) Tripathi R. K.: "Universal Parametrization of Absorption Cross Sections", NASA Technical Paper, 3621 (1997).
- (13) Wellisch H. P. and Axen D.: Phys. Rev., C54, 1329 (1996): Private Communication.

- (14) Walter R. L. and Guss P. P.: Radiat. Effects, 95, 73 (1986).
- (15) Shen Q. B., Feng D. C. and Zhuo Y. Z.: Phys. Rev., C43, 2773 (1991).
- (16) Cooper E. D., Hama S., Clark B. C. and Mercer R. L.: Phys. Rev., C47, 297 (1993).
- (17) Bertini H. W.: "Monte Carlo Calculations on Intranuclear Cascade", ORNL-3833 (1963).
- (18) Chen K., Fraenkel Z., Friedlander G., Grover J. R., Miller M. and Shimamoto Y.: Phys. Rev., 166, 949 (1968).
- (19) Harp G. D., Chen K., Friedlander G., Fraenkel Z. and Miller M.: Phys. Rev., C8, 581 (1973).
- (20) Pitcher E. J., Ferguson P. D., Russell G. J., Prael R. E., Madland D. G., Court J. D. and Daemen L. L.: "The Effect of the New Nucleon-Nucleus Elastic Scattering Data in LAHET Version 2.8 on Neutron Displacement Cross Section Calculations": Private communication.
- (21) Briesmeister J. F. (Ed): "MCNP A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4A", LA-12625 (1993).
- (22) Filges D., Neef R. D., Schaal H., Tietze A., Weber U., Breuer W. and Wimmer J.: "Damage Studies for Structure- and Beam Window Materials for the ESS Mercury Target", ESS-96-47-T (1996).
- (23) Kawai M., Fukahori T., Aruga T., Chiba S., Ikeda Y., Kitao K., Maki K., Murata T., Shibata K., Sugi T., Takahashi A., Yamano N., Yamanouchi Y. and Watanabe Y.: "PKA, KERMA and DPA Files of JENDL", Proceedings of International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, May 19-24, Trieste, Vol. 59, 1110 (1997).

表 1 計算に用いた SUS 316 の元素比率

元素	数密度 [10^{22} atoms/cm ³]
Cr	0.184
Fe	0.686
Ni	0.130

表 2 入射ビーム形状

	形状 [mm]	電流密度 [μ A/cm ²]		
		平均	中心	
均一分布	長方形 200 × 34	48	-	
放物分布	楕円形 232 × 38	48	96	
放物分布	楕円形 320 × 56	24	48	

表 3 48μ A/cm² の均一分布ビームを入射した場合のビーム窓の DPA 計算結果

領域		Neutron		Proton	Total
		(≤ 20 MeV) [DPA/yr]	(> 20 MeV) [DPA/yr]	[DPA/yr]	[DPA/yr]
内側容器	1	39.5	6.9	21.2	67.5
	2	27.5	3.7	0.3	31.4
外側容器	1	25.9	3.8	20.2	49.9
	2	20.4	2.6	0.2	22.9

表 4 平均 $48 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ の放物分布ビームを入射した場合のビーム窓の DPA 計算結果

領域		Neutron		Proton	Total
		(≤ 20 MeV) [DPA/yr]	(> 20 MeV) [DPA/yr]	[DPA/yr]	[DPA/yr]
内側容器	1	60.5	11.7	41.4	113.6
	2	60.4	11.6	40.9	112.7
	3	58.6	11.2	38.8	108.5
	4	55.4	10.8	36.1	102.3
	5	52.4	9.9	32.7	95.0
	6	47.9	8.9	28.1	84.9
	7	43.5	7.9	23.3	74.7
	8	38.1	6.5	17.5	62.0
	9	32.9	5.2	11.0	49.1
	10	27.8	3.9	4.0	35.7
	11	24.6	3.1	0.4	28.1
	12	21.8	2.7	0.2	24.6
	平均	41.4	7.3	20.4	69.1
外側容器	1	37.5	5.8	39.5	82.8
	2	37.3	6.0	39.0	82.3
	3	37.1	6.0	37.2	80.3
	4	35.4	5.7	34.7	75.8
	5	33.3	5.4	31.4	70.1
	6	30.7	4.7	27.1	62.5
	7	28.4	4.2	22.5	55.1
	8	25.8	3.8	16.8	46.4
	9	23.0	3.2	10.7	36.9
	10	20.2	2.6	3.7	26.5
	11	18.4	2.2	0.1	20.6
	12	16.8	1.9	0.1	18.8
	平均	27.5	4.1	19.6	51.2

表 5 平均 $24 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ の放物分布ビームを入射した場合のビーム窓の DPA 計算結果

領域		Neutron		Proton	Total
		(≤ 20 MeV) [DPA/yr]	(> 20 MeV) [DPA/yr]	[DPA/yr]	[DPA/yr]
内側容器	1	42.2	7.4	20.4	70.0
	2	41.6	7.2	20.1	68.8
	3	40.6	6.8	19.2	66.5
	4	38.6	6.4	17.8	62.7
	5	36.2	6.0	16.0	58.2
	6	33.2	5.3	13.7	52.2
	7	29.7	4.7	11.4	45.8
	8	26.0	3.9	8.5	38.3
	9	22.1	3.1	5.3	30.6
	10	18.5	2.4	1.9	22.8
	11	17.4	2.0	0.2	19.6
	12	15.5	1.7	0.1	17.3
	平均	28.4	4.4	10.0	42.7
外側容器	1	27.8	4.0	19.4	51.1
	2	27.7	3.9	19.2	50.7
	3	26.9	4.0	18.3	49.2
	4	25.6	3.6	17.0	46.2
	5	24.2	3.4	15.4	42.9
	6	22.4	3.0	13.2	38.6
	7	20.4	2.8	11.0	34.1
	8	18.4	2.4	8.2	29.0
	9	16.3	2.0	5.1	23.4
	10	14.3	1.6	1.8	17.7
	11	13.7	1.4	0.1	15.2
	12	12.6	1.3	0.1	14.0
	平均	19.8	2.6	9.6	32.0

表 6 $48 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ の均一分布ビームを入射した場合のターゲット容器の DPA 計算結果

	z [mm]	Neutron		Proton	Total
		(≤ 20 MeV) [DPA/yr]	(> 20 MeV) [DPA/yr]	[DPA/yr]	[DPA/yr]
内側容器	42 - 50	31.4	4.6	0.3	36.3
	50 - 60	33.0	5.0	0.4	38.4
	60 - 70	33.7	5.3	0.4	39.5
	70 - 80	34.2	5.6	0.5	40.2
	80 - 90	34.2	5.8	0.5	40.5
	90 - 100	34.0	5.9	0.6	40.4
	100 - 110	33.6	5.9	0.6	40.0
	110 - 120	32.9	5.8	0.6	39.3
	120 - 130	32.2	5.8	0.6	38.6
	130 - 140	31.3	5.6	0.6	37.6
	140 - 150	30.5	5.5	0.7	36.7
	150 - 160	29.4	5.4	0.7	35.4
	160 - 170	28.6	5.2	0.6	34.4
	170 - 180	27.5	5.0	0.6	33.1
	180 - 190	26.5	4.8	0.6	31.9
190 - 200	25.5	4.6	0.6	30.8	
外側容器	42 - 50	24.5	3.6	0.2	28.3
	50 - 60	25.7	3.9	0.3	29.9
	60 - 70	26.5	4.3	0.3	31.1
	70 - 80	26.8	4.5	0.4	31.6
	80 - 90	26.9	4.6	0.4	31.9
	90 - 100	26.9	4.8	0.4	32.1
	100 - 110	26.7	4.8	0.5	32.0
	110 - 120	26.4	4.8	0.4	31.6
	120 - 130	25.9	4.8	0.5	31.2
	130 - 140	25.4	4.8	0.5	30.7
	140 - 150	24.7	4.7	0.5	29.9
	150 - 160	24.2	4.6	0.5	29.3
	160 - 170	23.4	4.4	0.5	28.4
	170 - 180	22.7	4.3	0.5	27.6
	180 - 190	22.1	4.2	0.5	26.8
190 - 200	21.3	4.1	0.5	25.9	

表 7 平均 $48 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ の放物分布ビームを入射した場合のターゲット容器の DPA 計算結果

z [mm]	Neutron		Proton	Total
	(≤ 20 MeV) [DPA/yr]	(> 20 MeV) [DPA/yr]	[DPA/yr]	[DPA/yr]
内側容器 44 - 50	41.0	5.2	0.3	46.6
50 - 60	41.7	6.4	0.4	48.4
60 - 70	42.9	6.8	0.5	50.2
70 - 80	43.9	7.6	0.7	52.2
80 - 90	43.7	7.3	0.7	51.8
90 - 100	43.7	7.7	0.7	52.1
100 - 110	43.2	7.5	0.8	51.5
110 - 120	42.0	7.5	0.8	50.2
120 - 130	40.8	7.2	0.9	48.9
130 - 140	39.4	7.5	0.8	47.7
140 - 150	38.2	6.9	0.9	46.0
150 - 160	36.3	6.8	0.8	43.9
160 - 170	35.5	7.1	0.8	43.4
170 - 180	34.2	6.5	0.8	41.5
180 - 190	32.7	6.2	0.8	39.7
190 - 200	31.5	6.3	0.8	38.5
外側容器 44 - 50	30.8	3.8	0.3	34.9
50 - 60	31.5	5.1	0.3	36.9
60 - 70	32.9	5.4	0.3	38.7
70 - 80	33.6	5.6	0.4	39.6
80 - 90	33.5	6.1	0.4	40.0
90 - 100	33.6	5.9	0.5	40.0
100 - 110	34.1	6.5	0.6	41.1
110 - 120	33.7	6.1	0.5	40.4
120 - 130	32.7	6.3	0.7	39.6
130 - 140	31.8	5.9	0.7	38.4
140 - 150	30.4	5.8	0.6	36.8
150 - 160	29.3	5.9	0.6	35.9
160 - 170	27.7	5.7	0.6	34.1
170 - 180	26.8	5.8	0.6	33.2
180 - 190	26.5	5.3	0.5	32.3
190 - 200	24.8	5.3	0.6	30.7

表 8 平均 $24 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ の放物分布ビームを入射した場合のターゲット容器の DPA 計算結果

z [mm]	Neutron		Proton	Total
	(≤ 20 MeV) [DPA/yr]	(> 20 MeV) [DPA/yr]	[DPA/yr]	[DPA/yr]
内側容器 53 - 60	29.4	4.0	0.2	33.6
60 - 70	30.4	4.1	0.3	34.8
70 - 80	31.1	4.7	0.3	36.0
80 - 90	31.4	4.8	0.4	36.5
90 - 100	31.6	4.7	0.3	36.7
100 - 110	31.5	5.0	0.3	36.7
110 - 120	30.9	5.2	0.4	36.5
120 - 130	30.6	4.9	0.4	35.9
130 - 140	29.8	4.6	0.4	34.8
140 - 150	29.0	4.7	0.4	34.1
150 - 160	28.2	4.6	0.4	33.3
160 - 170	27.0	4.4	0.4	31.9
170 - 180	26.6	4.4	0.4	31.4
180 - 190	25.2	4.2	0.4	29.9
190 - 200	24.7	3.8	0.4	29.0
外側容器 53 - 60	22.5	3.0	0.1	25.6
60 - 70	23.5	3.4	0.2	27.1
70 - 80	24.2	3.6	0.2	28.0
80 - 90	24.6	4.0	0.2	28.8
90 - 100	25.0	3.9	0.3	29.2
100 - 110	24.5	4.0	0.3	28.8
110 - 120	24.7	4.1	0.3	29.1
120 - 130	24.5	4.0	0.3	28.9
130 - 140	24.3	4.0	0.4	28.7
140 - 150	23.4	3.9	0.3	27.6
150 - 160	22.4	3.7	0.4	26.5
160 - 170	22.1	4.0	0.3	26.5
170 - 180	21.5	3.8	0.3	25.5
180 - 190	20.5	3.6	0.3	24.4
190 - 200	20.1	3.7	0.4	24.2

表 9 ビーム中心位置での DPA の比較

	JAERI		SNS	ESS
入射エネルギー [GeV]	1.5		1.0	1.334
平均ビーム出力 [MW]	5		1	5
ビーム形状	長方形	楕円形	楕円形	楕円形
[mm]	200×34	232×38	320×56	200×70
ビーム断面積 [mm ²]	6800	6000	14000	11000
電流密度分布	一様分布	放物分布	放物分布	放物分布
電流密度 [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	48	96	48	18
DPA/yr	67.5	113.6	70.0	22.8
電流密度当りの DPA [DPA/yr/ $\mu\text{A cm}^2$]	1.4	1.2	1.5	1.3

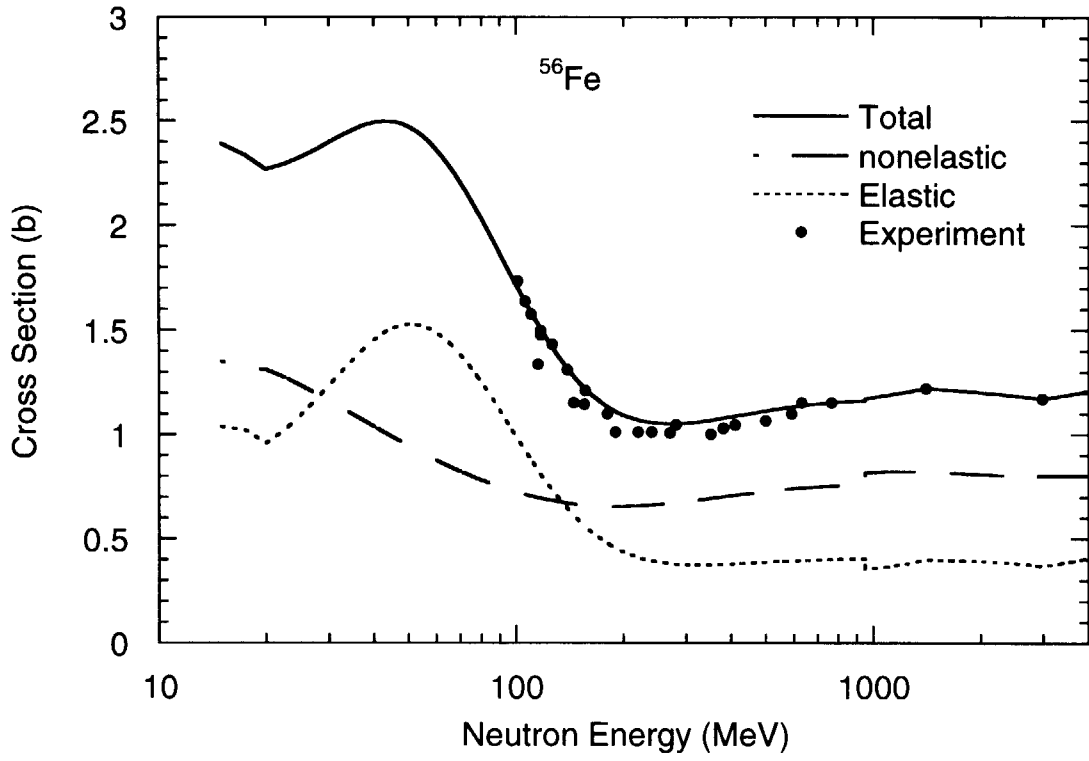


図 1 ^{56}Fe に中性子を入射した場合の核子-原子核断面積

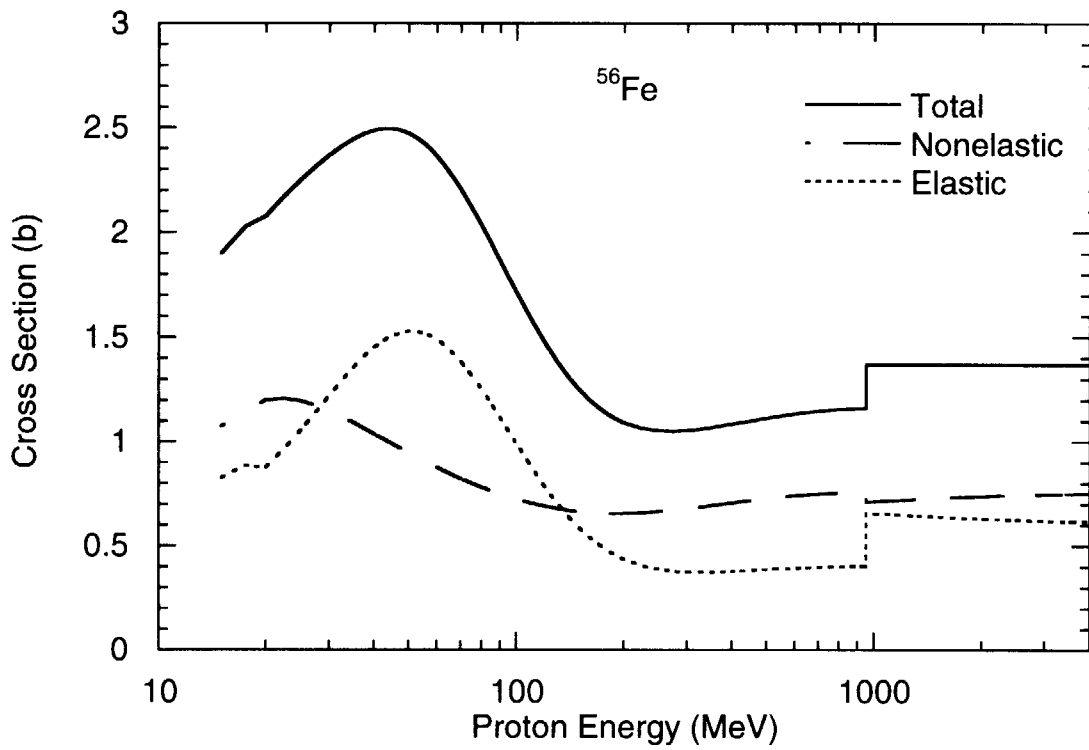


図 2 ^{56}Fe に陽子を入射した場合の核子-原子核断面積

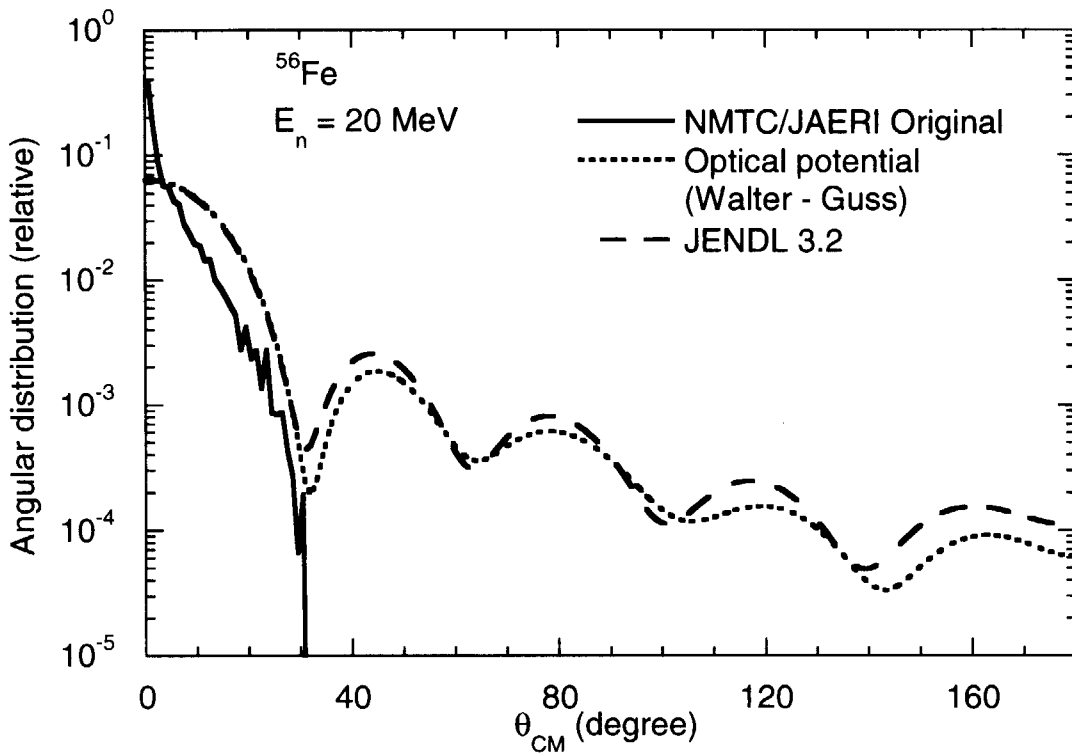


図3 ^{56}Fe に 20 MeV 中性子を入射した場合の弾性散乱角度分布

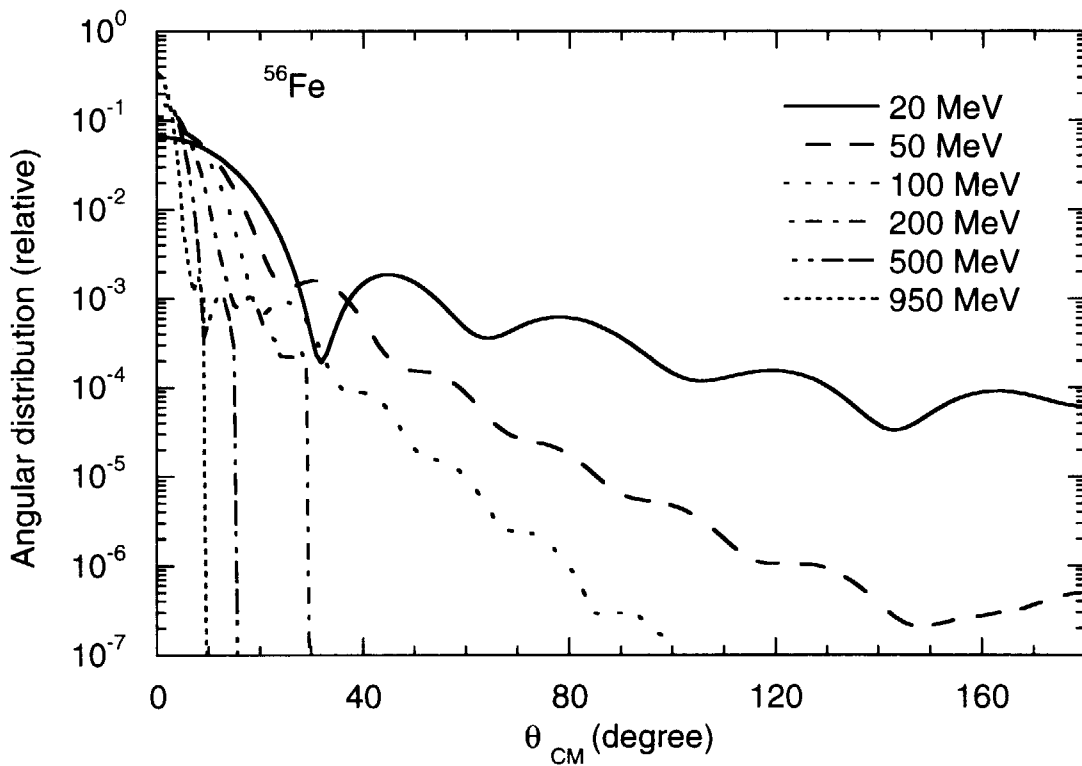


図4 光学ポテンシャルにより計算した ^{56}Fe に中性子を入射した場合の弾性散乱角度分布

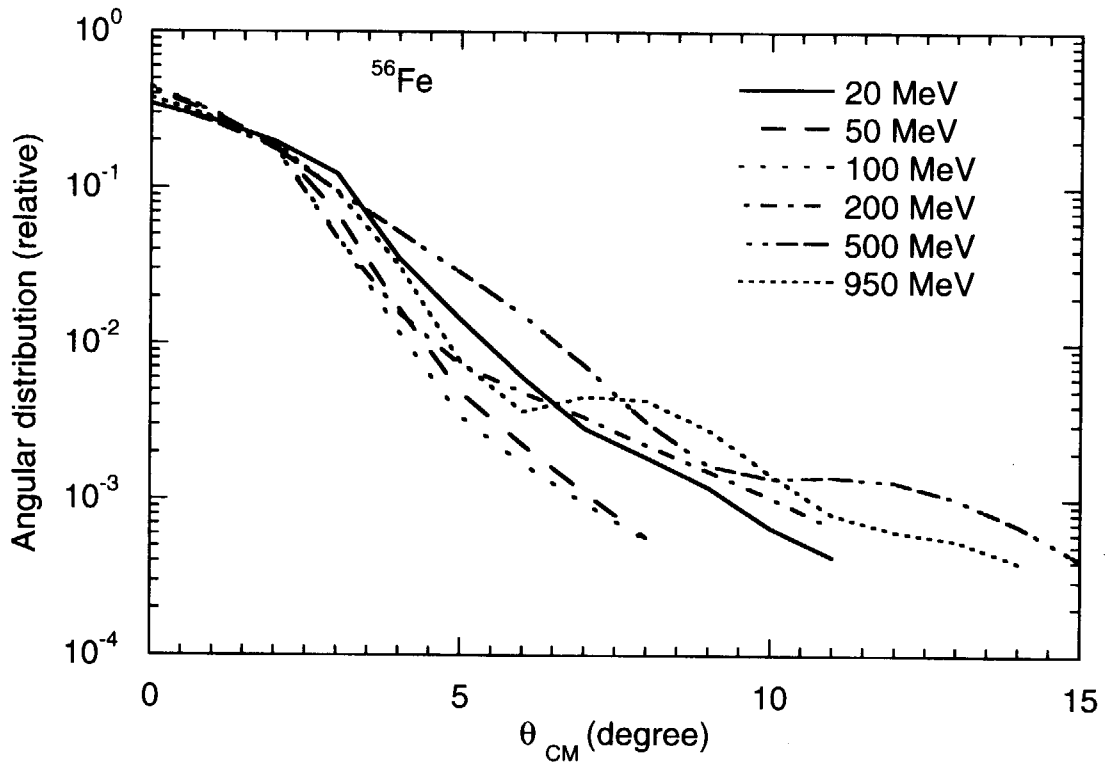


図 5 光学ポテンシャルにより計算した ^{56}Fe に陽子を入射した場合の弾性散乱角度分布

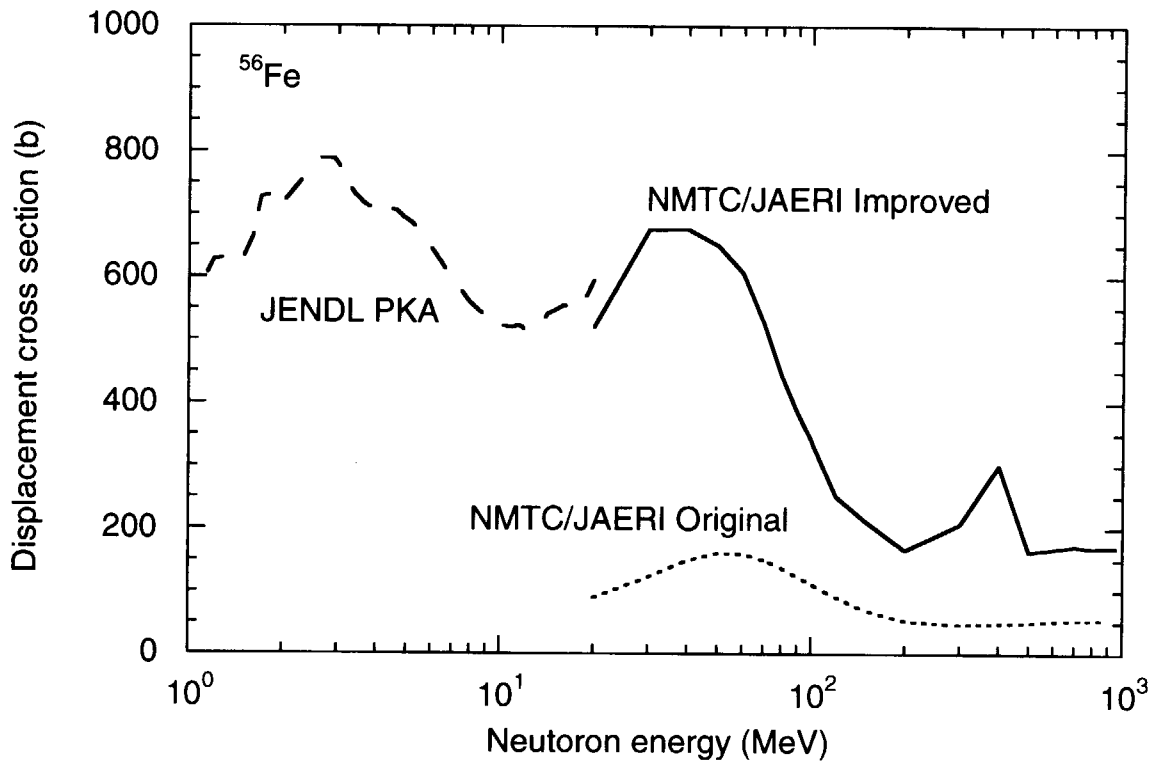


図 6 ^{56}Fe に中性子を入射した場合の弾性散乱によるはじき出し損傷断面積

DPA calculation input

Fe 10.0 mm

0. 0

5000.	1.	15.	1	300000	10	0
1	23	21	11	0	22	
0.	0.	1	0	0	0	
2	2	2	3			
0.	4					
26.	54.	0.0580E-2				
26.	56.	0.9172E-2				
26.	57.	0.0220E-2				
26.	58.	0.0028E-2				

Fe 10.0 mm

0 0 1 0

rcc 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 100.0

rcc 2 0.0 0.0 -1.0 0.0 0.0 10.2 100.10

end

tg1 +1

tll -1 2+

out -2

end

1 2 3

3*0

1 1000 0

0

no-importance

source 1

0.0 -0.1 -0.1 100. 1. 0. 1.

tally* 0 0 0 0 0 1

energy 70

energy 0.0 1.11 1.35 1.65 2.02 2.46

energy 3.01 3.68 4.49 5.49 6.70 8.19

energy 10.00 12.20 13.50 14.90 17.50 20.00

energy 22.50 25.00 27.50 30.00 35.00 40.00

energy 45.00 50.00 55.00 60.00 65.00 70.00

energy 80.00 90.00 100.00 110.00 120.00 140.00

energy 160.00 180.00 200.00 225.00 250.00 275.00

energy 300.00 325.00 350.00 375.00 400.00 450.00

energy 500.00 550.00 600.00 650.00 700.00 750.00

energy 800.00 900.00 1000.00 1100.00 1200.00 1300.00

energy 1400.00 1500.00 1600.00 1800.00 2000.00 2250.00

energy 2500.00 2740.00 3000.00 3250.00 3500.00

volume 7853.9816 1570.7963 1.

h-region 1

h-region 1

sp-unit 0

pt-surf 3

図 7 はじきだし損傷断面積計算に用いた NMTC/JAERI の入力ファイル例

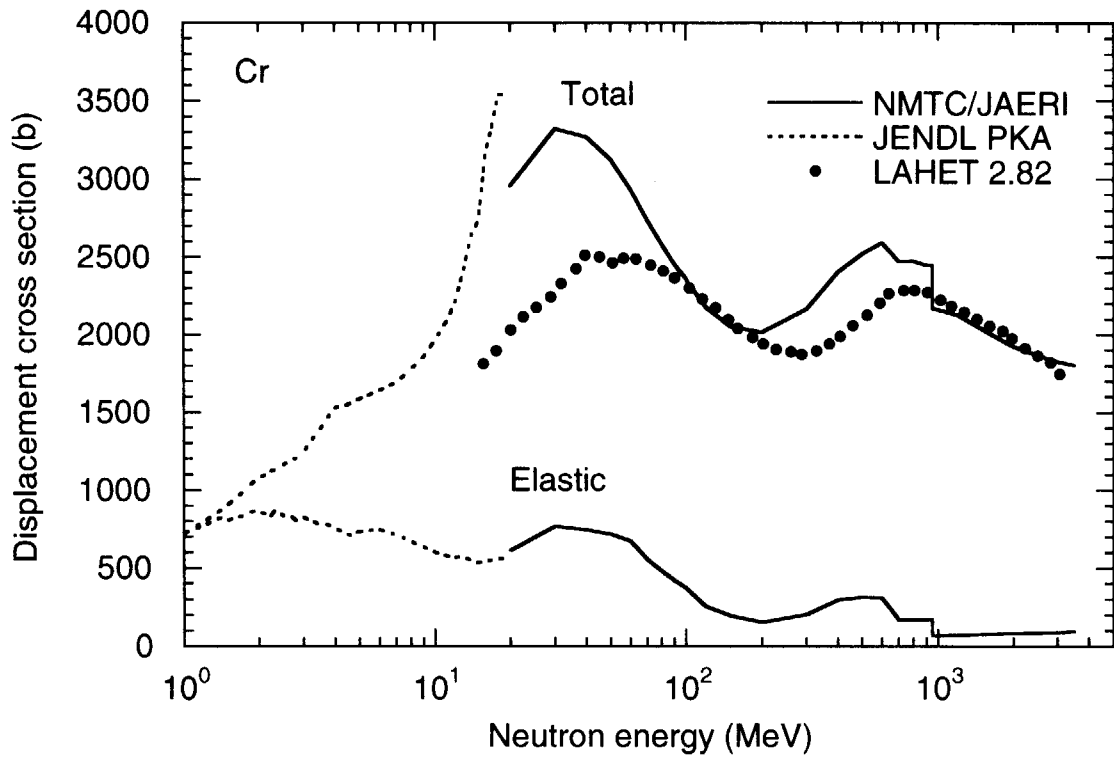


図 8 Cr に中性子を入射した場合のはじき出し損傷断面積

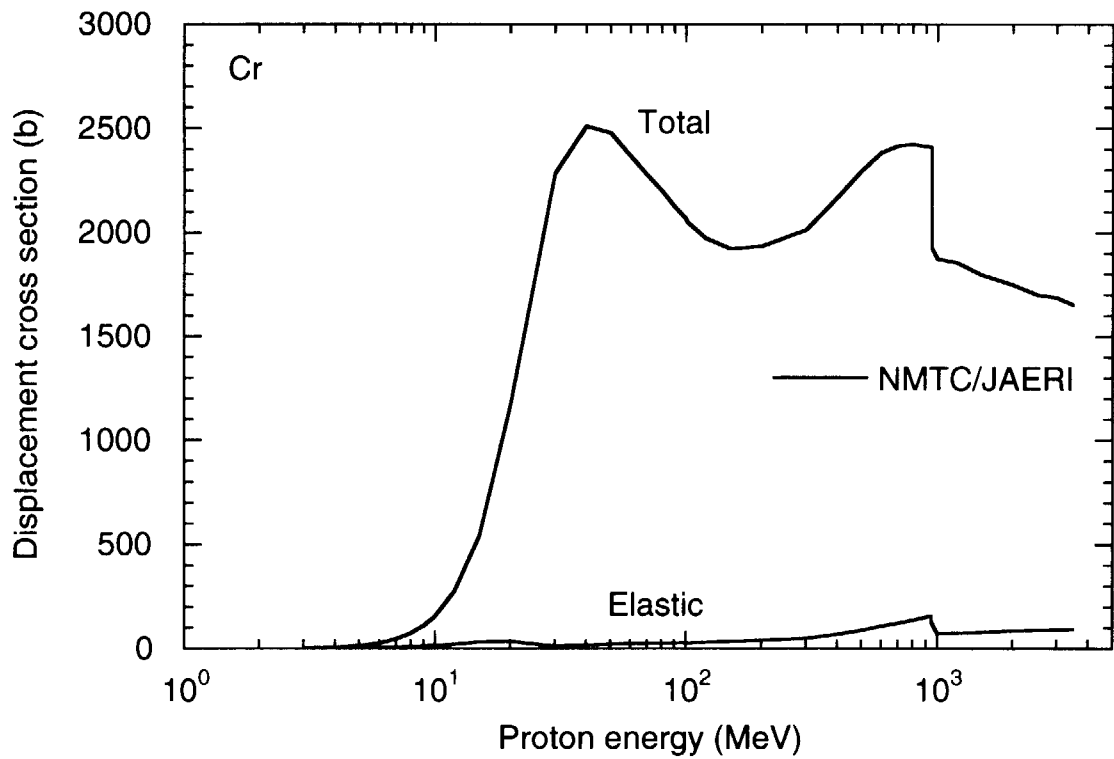


図 9 Cr に陽子を入射した場合のはじき出し損傷断面積

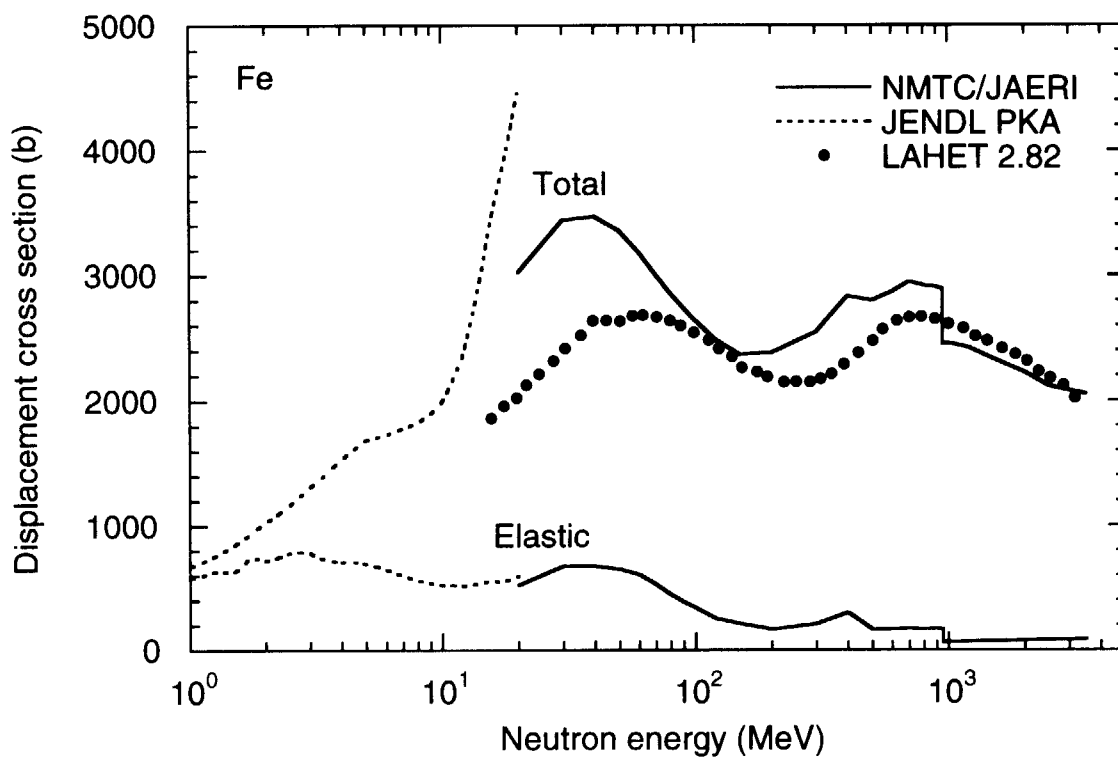


図 10 Fe に中性子を入射した場合のはじき出し損傷断面積

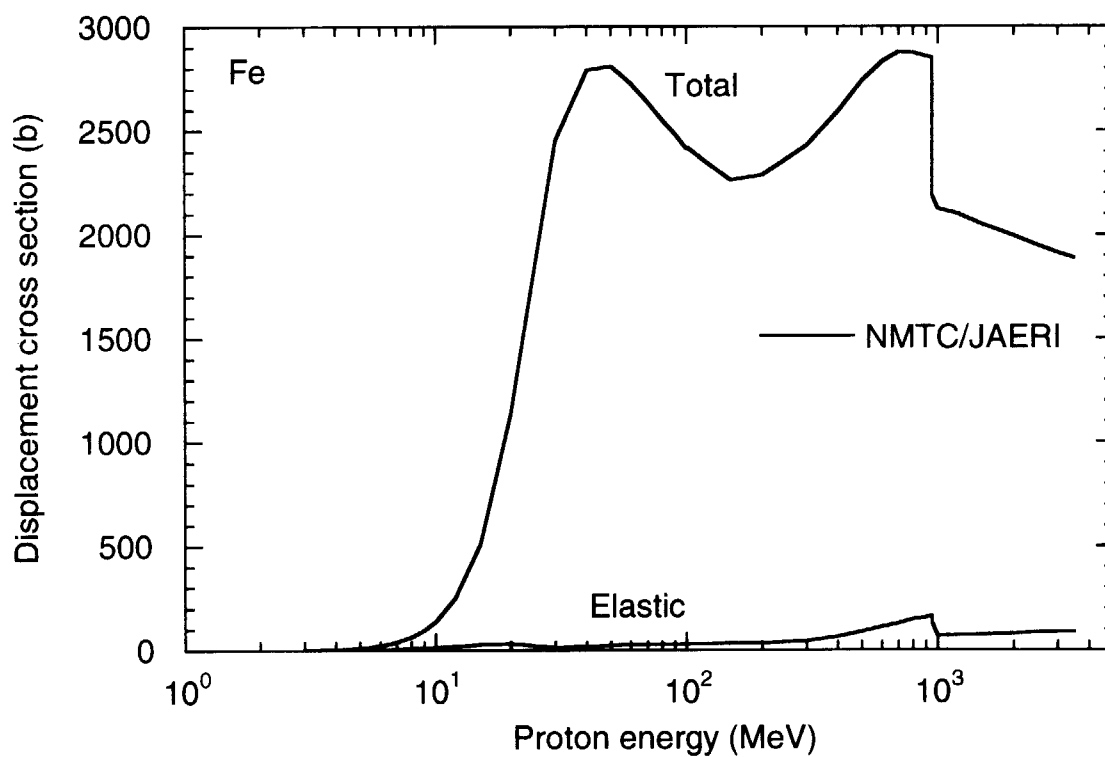


図 11 Fe に陽子を入射した場合のはじき出し損傷断面積

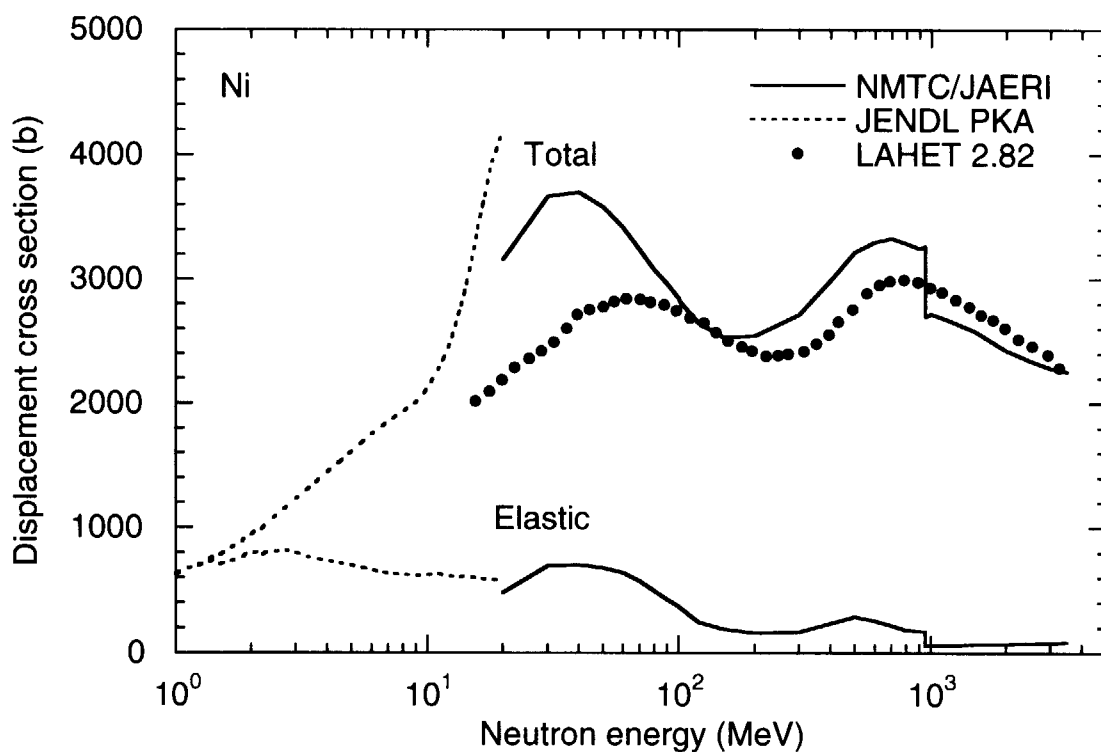


図 12 Niに中性子を入射した場合のはじき出し損傷断面積

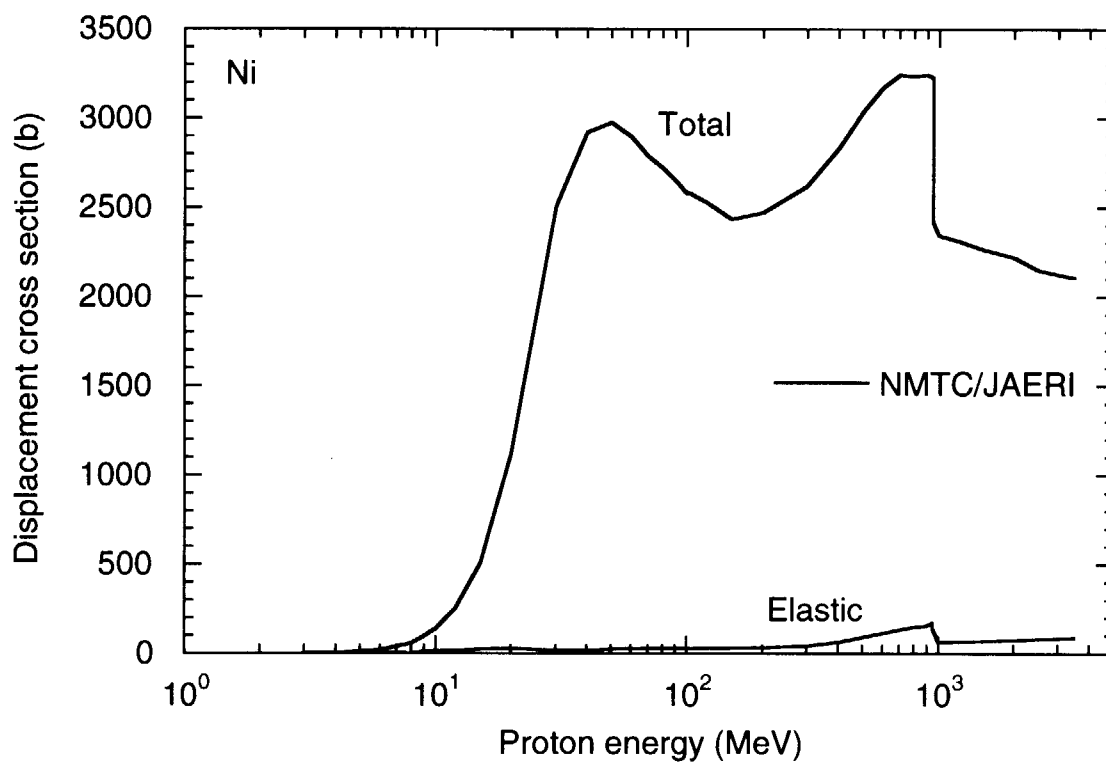


図 13 Niに陽子を入射した場合のはじき出し損傷断面積

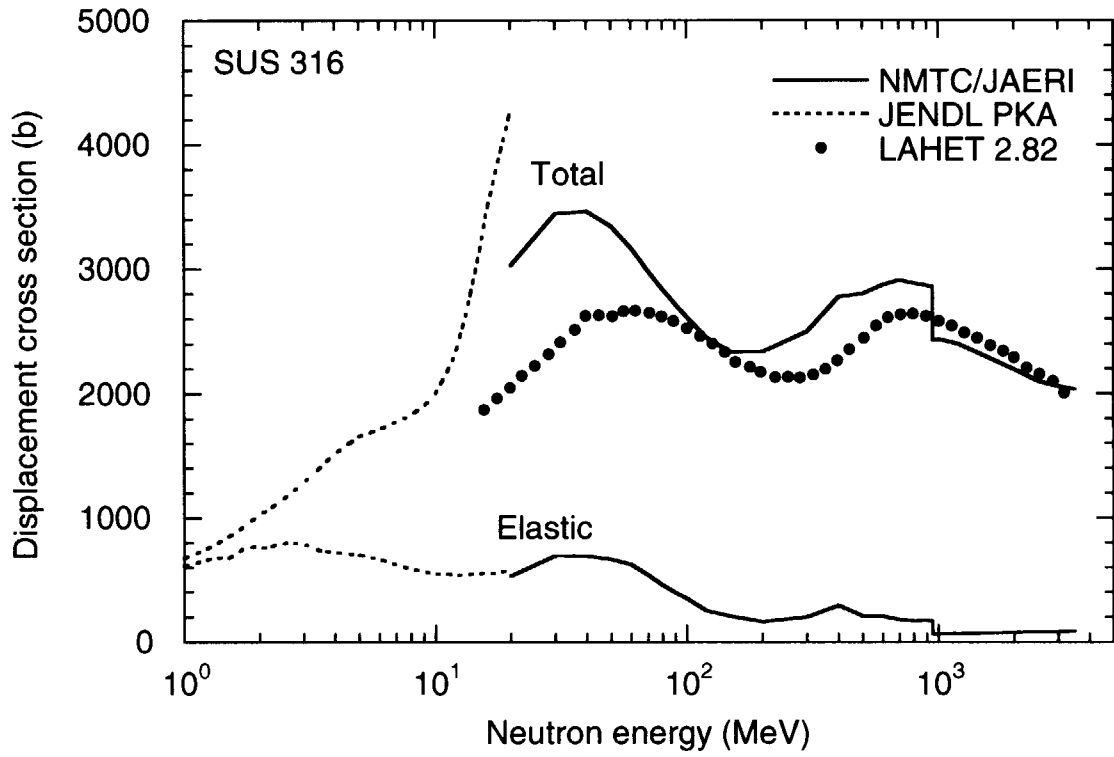


図 14 SUS 316 に中性子を入射した場合のはじき出し損傷断面積

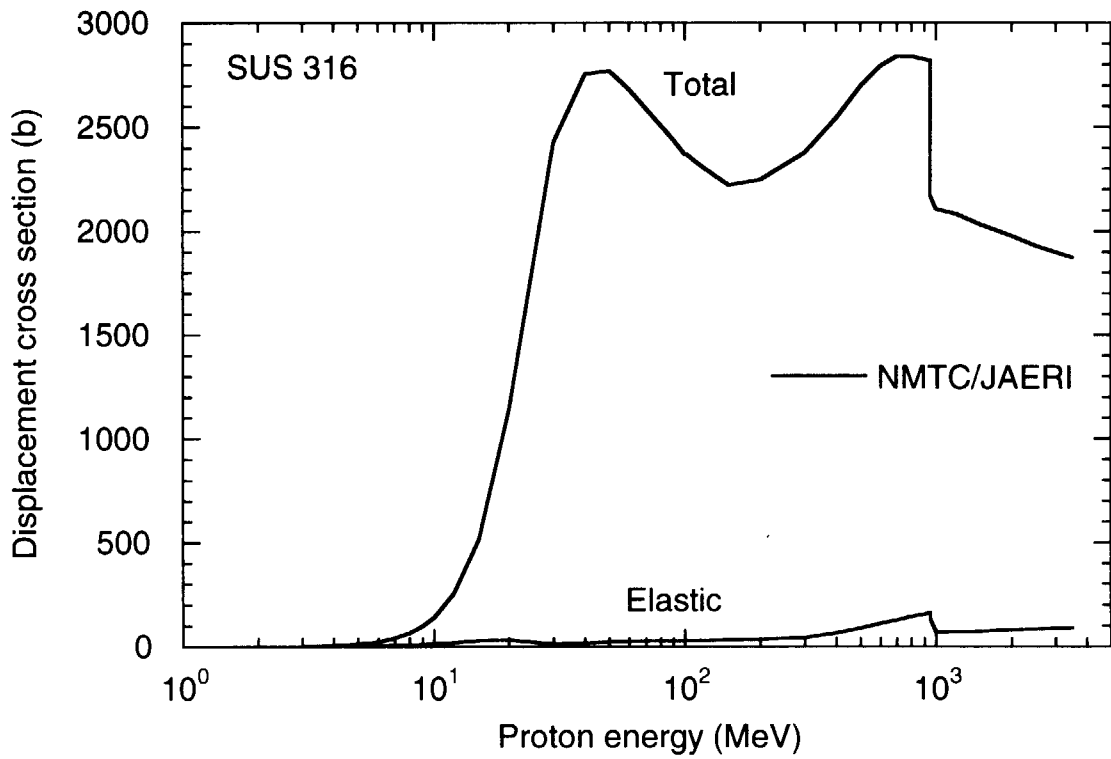


図 15 SUS 316 に陽子を入射した場合のはじき出し損傷断面積

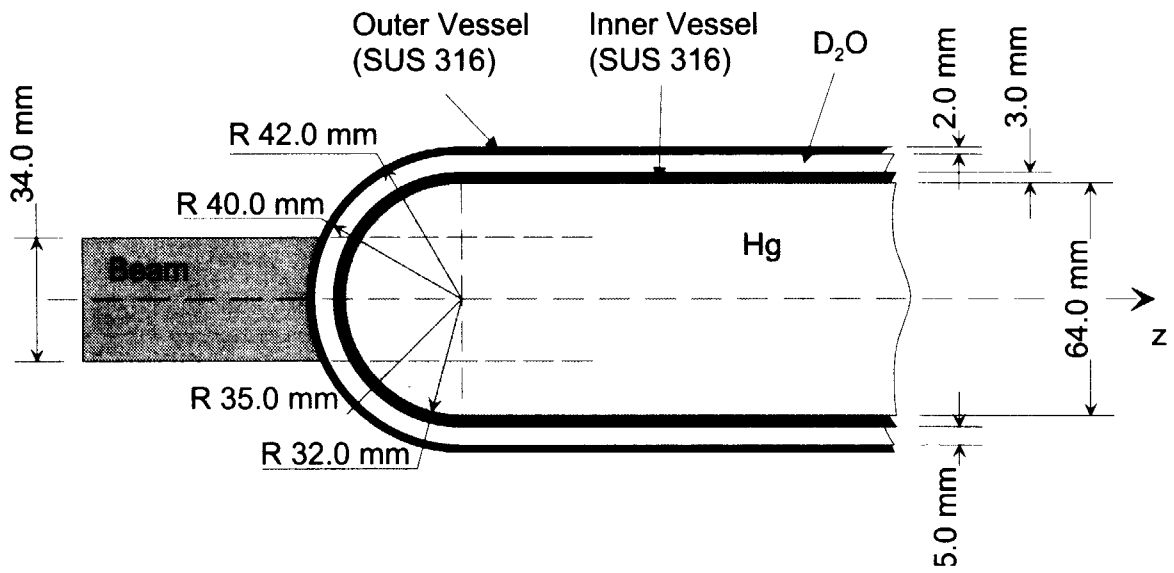


図 16 ターゲットの側面図 (一様分布ビームの場合)

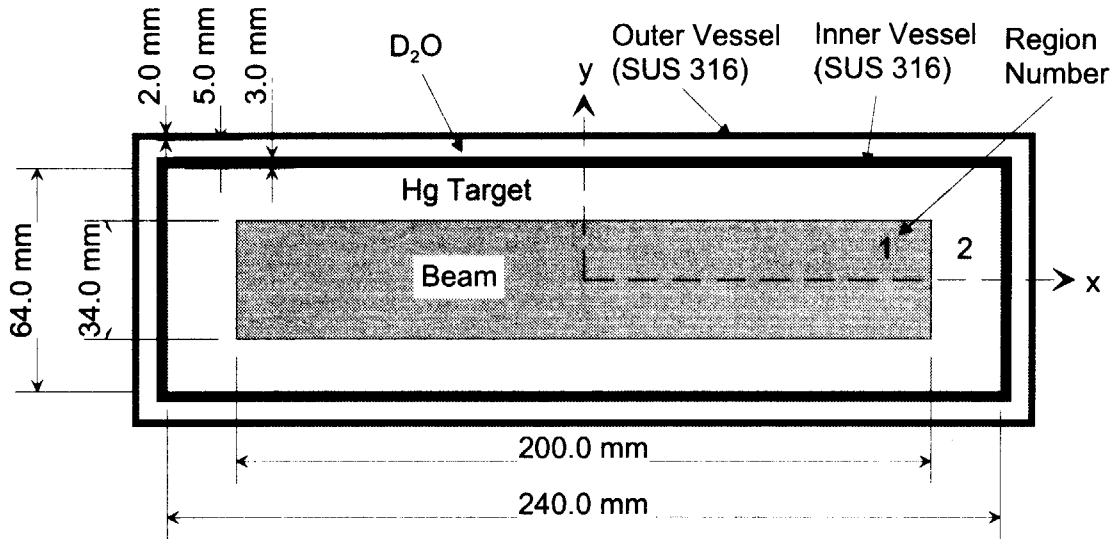


図 17 一様分布ビームを入射した場合の DPA 計算領域

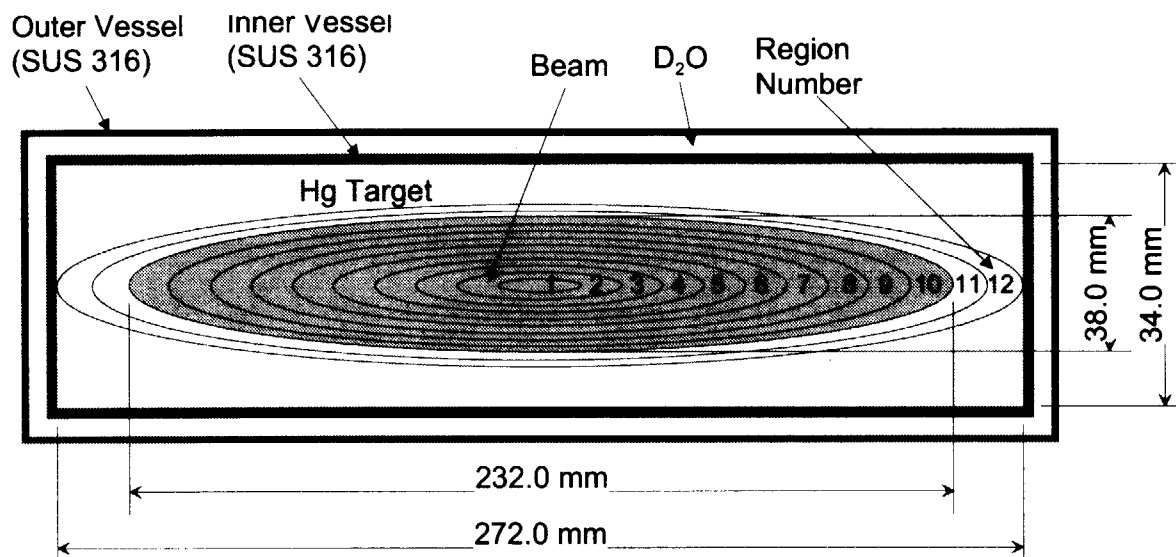


図 18 平均 $48 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ の放物分布ビームを入射した場合の DPA 計算領域

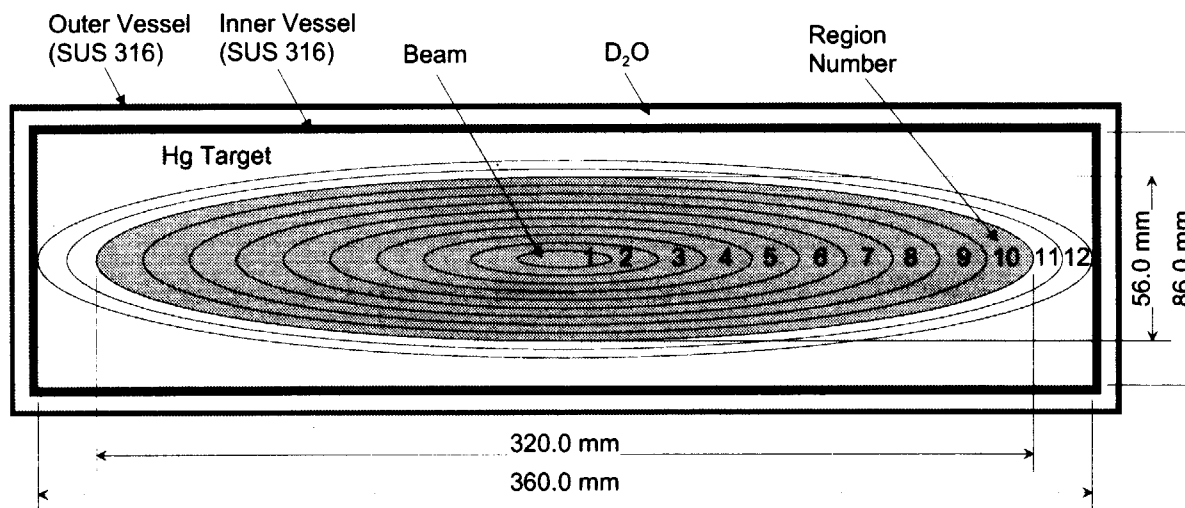


図 19 平均 $24 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ の放物分布ビームを入射した場合の DPA 計算領域

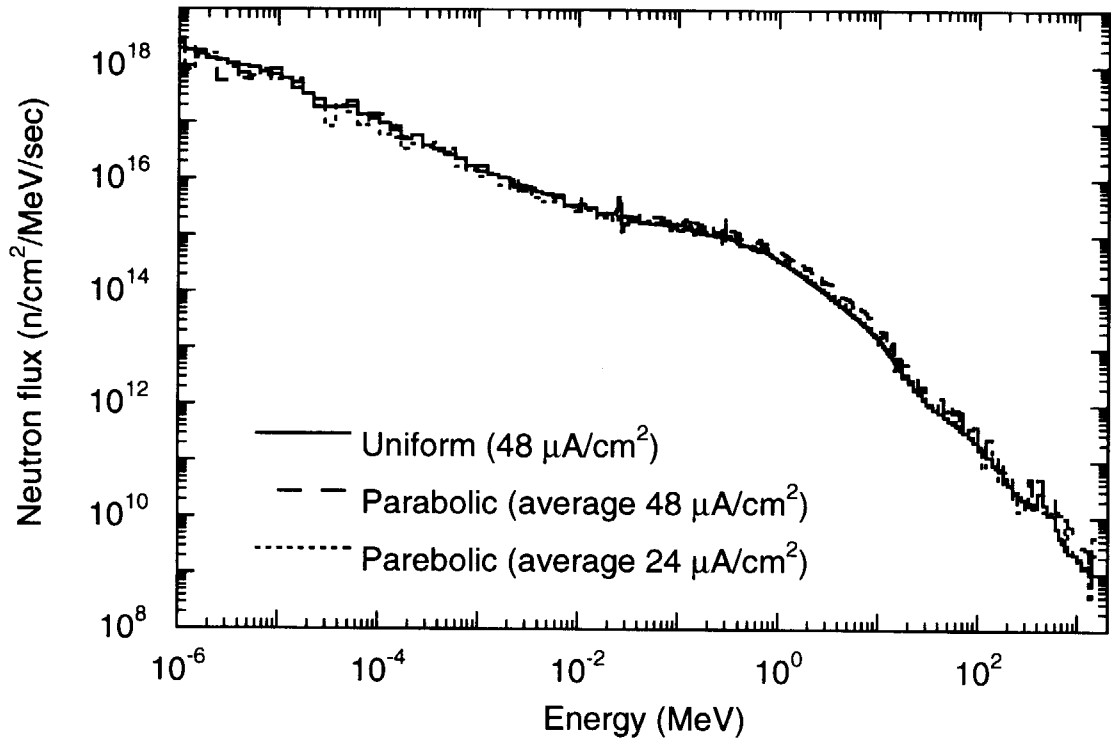


図 20 内側容器のビーム窓での中性子エネルギースペクトル

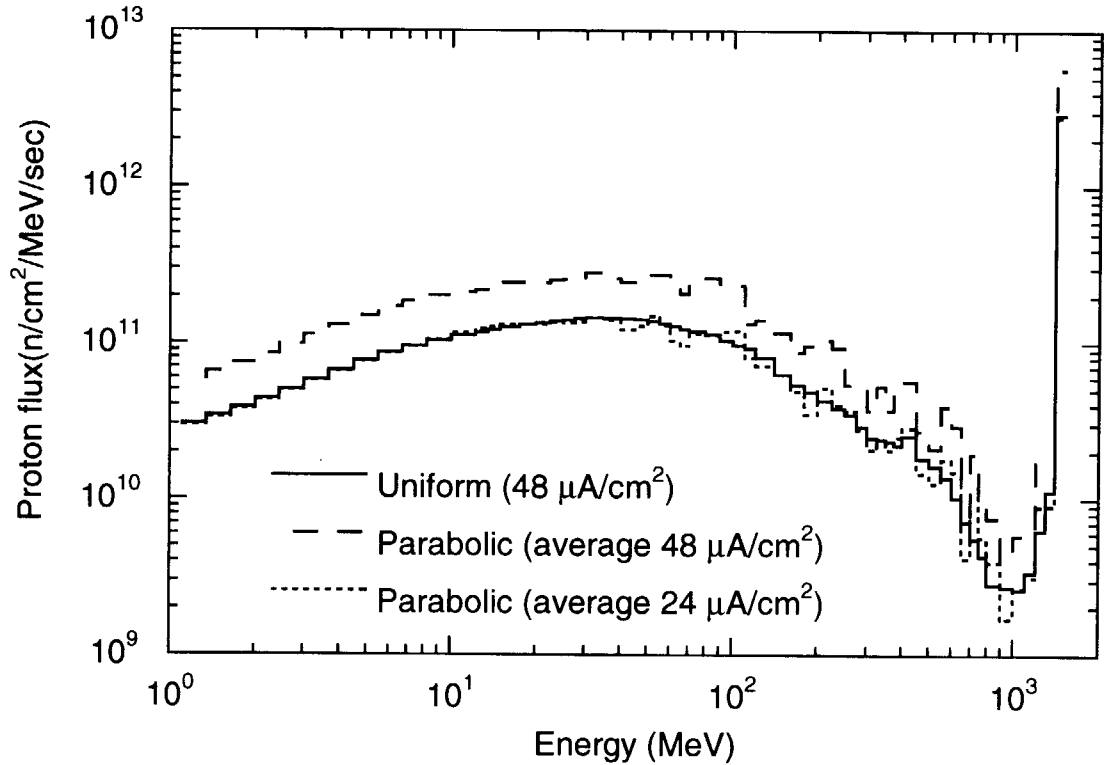


図 21 内側容器のビーム窓での陽子エネルギースペクトル

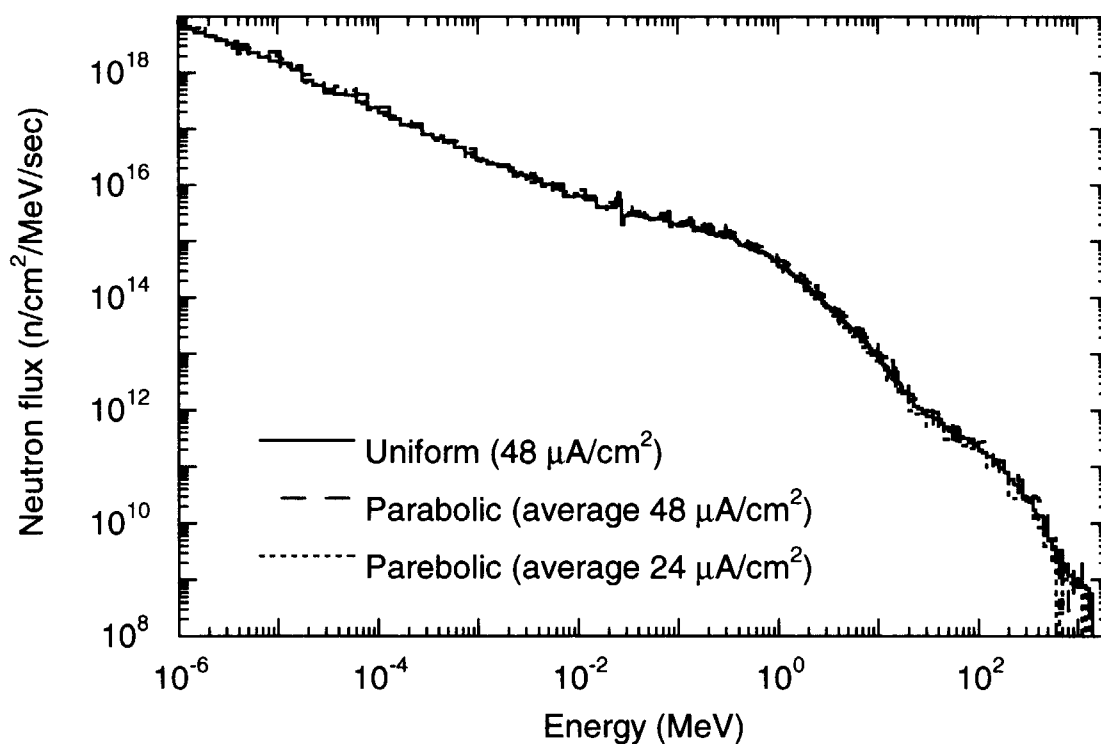


図 22 内側容器のターゲット前面から深さ 90 ~ 100 mm の位置での中性子エネルギースペクトル

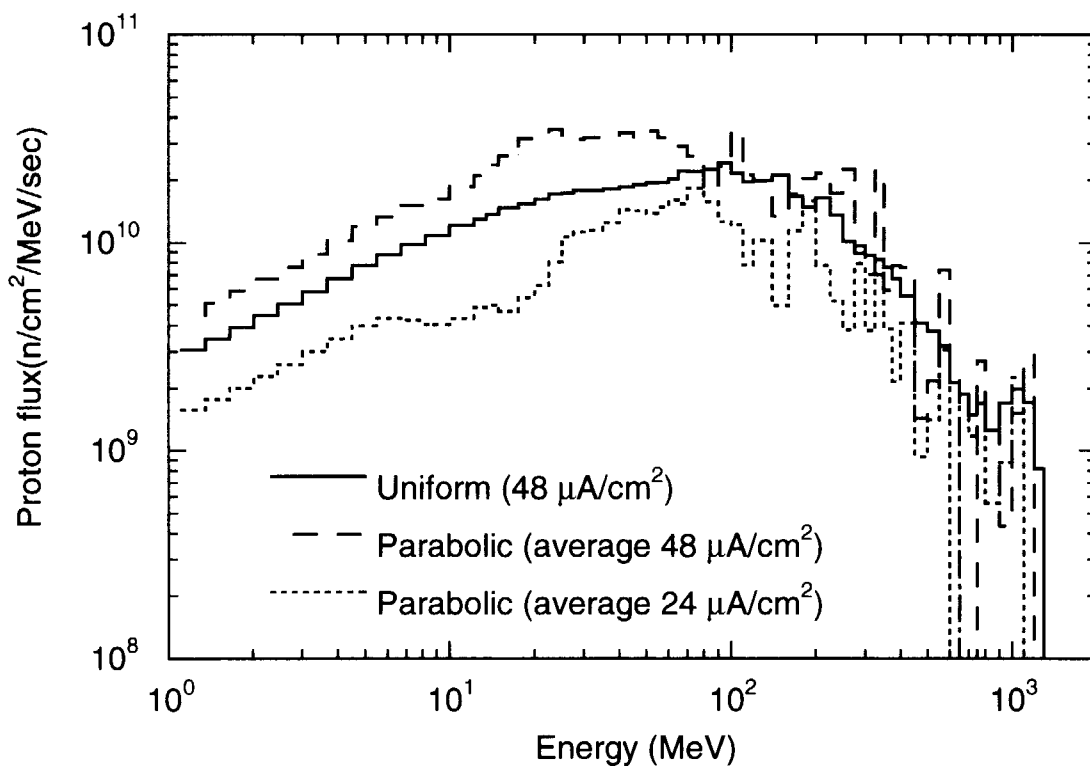


図 23 内側容器のターゲット前面から深さ 90 ~ 100 mm の位置での陽子エネルギースペクトル

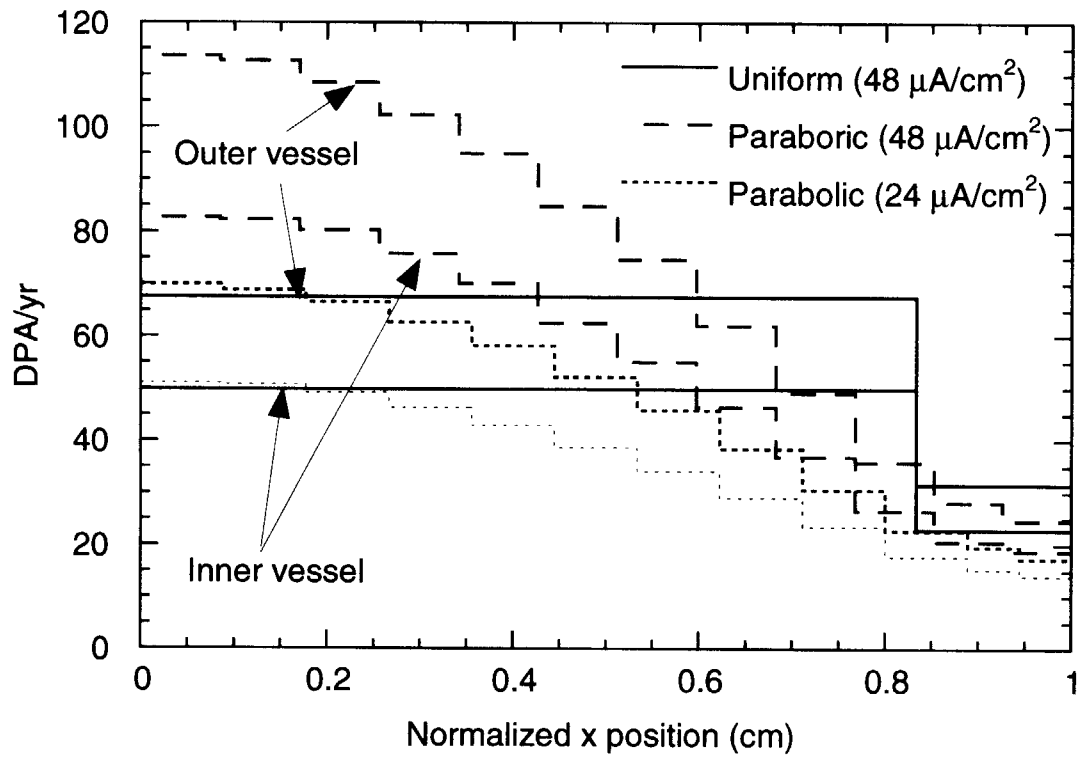


図 24 ビーム入射窓の DPA 計算結果

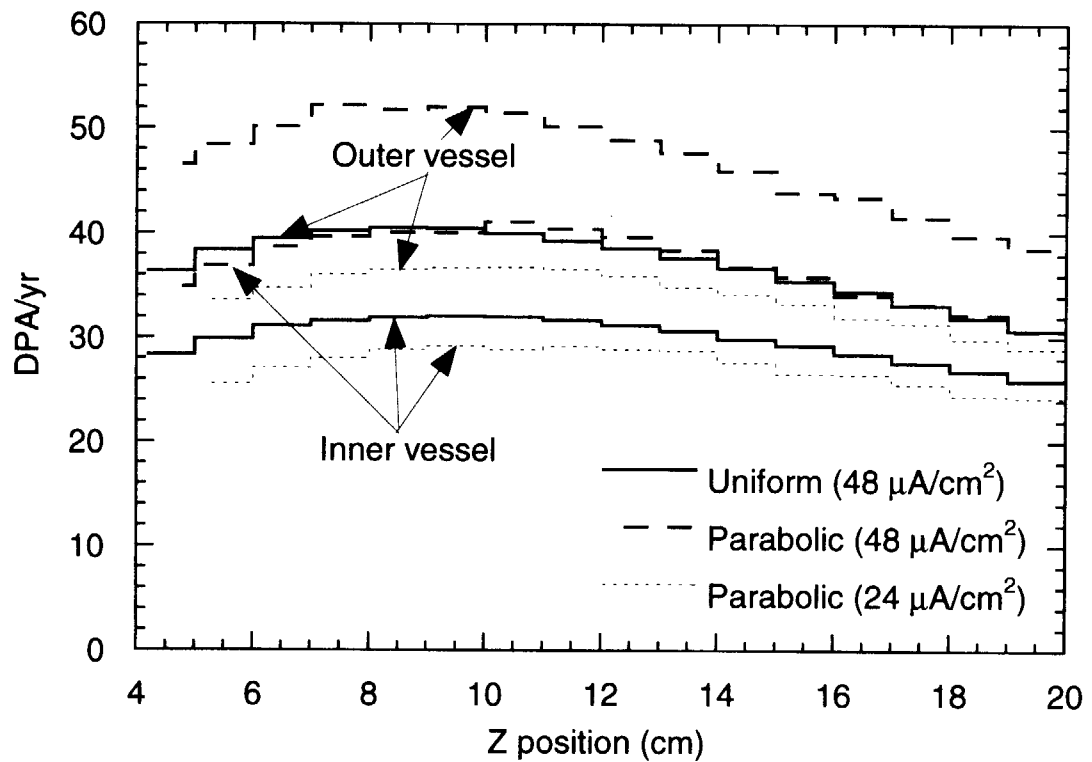


図 25 ターゲット容器上下部の DPA 計算結果

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バ	bar
ガ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラ	rad
レ	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値は CODATA の1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリに入れていない。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁶ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)
= 4.184 J (熱化学)
= 4.1855 J (15 °C)
= 4.1868 J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS (仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

N M T C / J A E R I を用いたはじき出し損傷断面積及び D P A 計算