

JAERI-Research

2000-014



JP0050328



非結合型水素モデレータにおける
プレモデレータの拡張効果

2000年3月

原田正英・勅使河原誠・甲斐哲也
坂田英明・渡辺 昇・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刊している研究報告書です。
入手の問合せは、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、お申し越しください。なお、このほかに財團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）で複写による実費領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, 2000

編集兼発行 日本原子力研究所

非結合型水素モデレータにおけるプレモデレータの拡張効果

日本原子力研究所東海研究所中性子科学研究センター

原田 正英*・勅使河原 誠*・甲斐 哲也・坂田 英明・渡辺 昇***・池田 裕二郎

(2000年2月2日受理)

大強度核破碎中性子源開発においてメインモデレータの一つである非結合型超臨界水素モデレータの高性能化を目指して、鉛反射体における核的特性に関する検討を行った。計算には、NMTC/JAERI97 コード及び MCNP4A コードを用いた。計算の結果、平面型のプリモデレータをターゲットとモデレータの間に設置した場合は、中性子強度はプリモデレータ厚さ 1.5 cm で利得が最大になり、モデレータ内核発熱はプリモデレータ厚さ増加に従って単調に減少するとともに、パルスの時間半値幅はほとんど変わらないことが示された。これは、プリモデレータ導入が、熱中性子モデレータの高度化に有効であることを示す。また、プリモデレータをモデレータの周りに巻いて、中性子ビーム引き出し孔側に拡張すると、さらなるプリモデレータ効果が得られることが示された。また、鉛反射体の方がベリリウム反射体より、プリモデレータ効果が大きいことが示された。一方、MW 級核破碎中性子源では、ポイズン中の発熱が膨大であることから、その使用は不利であると言える。さらに、デカッピングエネルギーは、1 eV がモデレータ特性にとって最適であることが示された。そして、最適なモデレータサイズ及び中性子引出し面サイズは、それぞれ $12 \times 12 \times 5 \text{ cm}^3$ 、 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ であることが示された。以上の結果を基に、基準非結合型水素モデレータ概念を提案した。

Premoderator extension effect
for a decoupled hydrogen moderator

Masahide HARADA*, Makoto TESHIGAWARA*, Tetsuya KAI,
Hideaki SAKATA, Noboru WATANABE*** and Yujiro IKEDA

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

(Received February 2, 2000)

To improve neutronic performance of a decoupled super-critical hydrogen moderator, which is one of main moderators in a high intensity pulsed spallation neutron source presently under development, neutronic characterization of the moderator surrounded by lead reflectors was studied by using NMTC/JAERI97 and MCNP4A codes.

In a case of a flat premoderator installed between a target and the moderator, the gain of a neutron intensity reached to its maximum at 1.5 cm of the premoderator thickness. Then, the nuclear heat in the moderator decreased with increasing premoderator thickness and the pulse time FWHM was not changed much. These results indicate that the introduction of premoderator is very effective for improvement of a thermal moderator. The premoderator which surrounded the moderator and extended to the neutron beam hole was turned out to be effective. Also, it was shown that the premoderator in lead reflectors was effective on neutronic performance in comparison with those in beryllium reflectors.

Moreover, a poison was not favorable for the MW-class spallation neutron source because of a great deal of nuclear heat generation. And it was found that best decoupling energy was 1eV for moderator characterization. Then, the optimized moderator size and viewed surface size were shown to be 12 x 12 x 5 cm³ and 10 x 10 cm², respectively.

Based on these results, we proposed a standard decoupled hydrogen moderator concept.

Keywords: Moderator Neutronics, Decoupled Hydrogen Moderator, High Intensity Pulsed Spallation Neutron Source, Lead Reflector, Premoderator, Neutron Intensity, Nuclear Heating, Time FWHM

* Post Doctoral Fellow

** Scientific Consultant

目次

1. はじめに	1
2. 計算モデル及び検討の概要	2
2.1. プリモデレータ厚さ依存性	3
2.2. プリモデレータ形状依存性	3
2.3. プリモデレータ効果の反射体依存性	4
2.4. ポイズンの有無によるモデレータ性能への影響	4
2.5. モデレータ性能のデカップリングエネルギー依存性	4
2.6. モデレータサイズと引き出し面サイズ依存性	5
3. 計算結果と議論	5
3.1. プリモデレータ厚さ依存性	5
3.2. モデレータ性能のプリモデレータの形状効果	6
3.3. プリモデレータ効果の反射体材質依存性	7
3.4. ポイズン有無によるモデレータ性能への影響	7
3.5. デカップリングエネルギー依存性	8
3.6. モデレータサイズとビーム引出し面サイズの依存性	9
4. まとめ	10
謝辞	11
参考文献	12

Contents

1. Introduction	1
2. Calculation Model and Method	2
2.1. Premoderator Thickness Dependence of Moderator Performance	3
2.2. Premoderator Geometry Dependence of Moderator Performance	3
2.3. Reflector Material Dependence of Premoderator Effect	4
2.4. Poison Dependence of Neutronic Performance	4
2.5. Decoupling Energy Dependence of Neutronic Performance	4
2.6. Moderator Size and Viewed Surface Size Dependence of Neutronic Performance	5
3. Results and Discussion	5
3.1. Premoderator Thickness Dependence of Moderator Performance	5
3.2. Premoderator Geometry Dependence of Moderator Performance	6
3.3. Reflector Material Dependence of Premoderator Effect	7
3.4. Poison Dependence of Neutronic Performance	7
3.5. Decoupling Energy Dependence of Neutronic Performance	8
3.6. Moderator Size and Viewed Surface Size Dependence of Neutronic Performance	9
4. Conclusion	10
Acknowledgment	11
Reference	12

1. はじめに

大強度陽子加速器計画では、21世紀における科学の飛躍的発展をもたらす中性子散乱研究の大強度核破碎パルス中性子源の建設が計画されている。その中性子源の最大出力は5MWを目指している。5MW核破碎パルス中性子源の開発では、核破碎中性子ターゲットに水銀ターゲットを用い、ターゲット上下に冷中性子、熱中性子、熱外中性子用の三台のモデレータを配置する構成を基本として検討が進められている¹⁾。このターゲット及びモデレータに反射体を組み合わせたの基本構成概念(TMRA, Target Moderator Reflector Assembly)を図1に示す。また、主要なモデレータの特性を表1に示す。この中で、パルス幅の短い熱中性子用として、超臨界水素をモデレータ材とする非結合型モデレータ²⁾が検討されている。固体メタンや液体メタンは、パルス特性が優れているので、熱中性子用モデレータ材として多く用いられているが、MWを超える強い中性子場では、メタンの放射線損傷が問題となる。固体メタンモデレータではバーブ³⁾が、液体メタンではワックス状の化合物⁴⁾がそれぞれ発生することが指摘されており、5MWを目指す本計画の施設設計で、固体・液体メタンを採用することは技術的に困難である。その代替案として、混合モデレータ^{2),3)}(液体水素に含水素粒子(例えば、固体メタンや氷、ポリエチレンなど)を混入して流動させたモデレータ)が提唱され、すでに実験⁴⁾も行われている。しかしながら、混合モデレータの実用には、解決すべき技術的な課題が多い。以上の理由により、モデレータ材料は、現状として水素が最有力との結論に達している。

一方、水素を用いるモデレータ(超臨界水素や液体水素)は、水素密度が小さく、減速能が低いため、中性子強度が低くなることが欠点である。また、共通の問題として、MW級の核破碎中性子源では、モデレータ内の核発熱が大きいことが指摘されている。

このような水素モデレータの欠点を補う試みとして、結合型モデレータの検討では、含水素密度の高い物質で予め中性子を減速するプリモデレータを導入して、モデレータ内での核発熱を軽減し、かつ中性子特性を向上できることが報告されている^{5),6),7),8)}。さらに、プリモデレータの形状の最適化により、中性子特性が一層向上したという報告がある⁹⁾。そこで、プリモデレータの導入に着目して、非結合型モデレータにその概念を適用して検討することとした。

プリモデレータの導入に当たっては、プリモデレータの厚さや形状を最適化して、高性能なモデレータ概念を構築することを目指す。このとき、中性子の減速能の違いから、反射体材質を変えることにより、プリモデレータの効果も大きく変わることが予想される。

一方、モデレータの基本設計を確立するために、さらに必要となる次の点の検討も急がれる。ポイズニングエネルギー以下の中性子パルスの時間特性を向上するポイズンの導入は、MW級での中性子場では、膨大な発熱が生じることが予想されるので、中性子工学の観点からその必要性を検討する必要がある。デカップリングエネルギーは、非結合型モデレータの

¹⁾ 非結合型とは、パルスのピークの時間幅を短くするために、CdやGdなど、低エネルギー中性子を吸収する物質(デカップラー)でモデレータと反射体を区切った種類。デカップリングエネルギー以下の中性子強度は減少する。

²⁾ burp: 固体メタンモデレータの放射線損傷により発生する現象。突如、モデレータ内の温度が急激に上昇し、クライオスタットの真空間隙の真空間隙が急激に悪くなる。最悪の場合、クライオスタットを破壊する。

³⁾ 液体メタンモデレータにおいて、放射線損傷によるメタン分解生成物の重合により生成される沸点の高い重合体。モデレータ内で生成・蓄積され、終には、石炭のような沈着物になり、液体メタンが循環しなくなる。

特性を決める非常に重要な要素であり、中性子強度とパルスの時間特性に大きな影響をもたらすので、その決定には十分な検討が必要である。また、中性子特性に影響を及ぼすモデルータサイズや引き出し面のサイズについても、検討が必要である。

本研究では、5MW 核破碎中性子源の非結合型超臨界水素モデレータの高性能化を目指して、次に示すモデレータの中性子工学に関する研究を行った。

- 1) モデレータ性能のプリモデレータ厚さ依存性
- 2) モデレータ性能のプリモデレータ形状依存性
- 3) プリモデレータ効果の反射体材質依存性
- 4) ポイズンの有無によるモデレータ性能への影響
- 5) モデレータ性能のデカップリングエネルギー依存性
- 6) モデレータ性能のモデレータサイズと引き出し面サイズ依存性

2. 計算モデル及び検討の概要

計算に用いた基礎となるモデルを図 2 に示す。計算モデルは、5 MW 核破碎中性子源開発の基本モデル¹⁾に基づいている。陽子ビーム (Proton Beam) は水平入射とし、ターゲット (Target) は、水銀 (Hg) で半円筒形状 ($17.35 \times 8.16 \times 60.0 \text{ cm}^3$) で、真空層を含むステンレス製の二重容器で覆われている。熱中性子モデレータ (Moderator, $10 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$) は、(超臨界水素の核データが無いために、代用として) 温度 20 K の液体水素 (Liquid-H₂) のモデレータ材を、真空層を含むアルミ製の二重容器で覆い、ターゲット下部に設置した。中性子ビームは、モデレータから左右 (陽子ビーム軸と垂直方向) 両面取り出しとなっている。モデレータの中央には、ポイズン (Poison) として厚さ 50 μm のガドリニウム (Gd) を設置した。なお、本研究では、非結合型モデレータのみに着目するために、ターゲット上部とターゲット下部にそれぞれ設置される予定の冷中性子用モデレータ及び熱外中性子用モデレータ¹⁾ (図 1 参照) は、考慮していない。反射体 (Reflector) には、結合型モデレータでの検討において、パルスの時間特性が良好であった鉛を用いた。反射体は、図 4 に示すように擬似八角形の筒状で、平均半径 80 cm、高さ 160 cm とした。デカップラーは厚さ 3 mm で、デカップリングエネルギー (Decoupling Energy) が 1 eV になるように密度を調節した炭化ホウ素 (B₄C) を用い、ビーム引出し面 (Viewed Surface) 以外でモデレータとターゲット及び反射体とが仕切られるように設置した。入射する陽子エネルギーを 1.5 GeV とし、陽子ビームの投影形状は均一矩形分布で、面積は $13.35 \times 5.16 \text{ cm}^2$ とした。このときのビーム電流密度は、5 MW 出力で $48 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ となる。中性子検出器 (Tally) は、モデレータのビーム取り出し面の表面から 2 m 離した位置に設置した。計算コードは、高エネルギーハドロン輸送計算コード NMTC/JAERI97¹⁰⁾ 及び低エネルギー粒子輸送計算コード MCNP4A¹¹⁾ を用いた。

中性子強度、中性子パルス特性及びモデレータ内核発熱をモデレータの核的特性を表す指標とした。中性子強度 (Neutron Intensity) は、本研究では、熱中性子モデレータが守備範囲とする 1 meV~1 eV のエネルギー領域のうち、減速領域である 20、50、100 meV のエネルギーの中性子強度に着目した。また、中性子パルス特性の指標には、中性子パルスのピーク強度とピークの中性子パルスピーカーの伝達を中心とした時間の広がり半値幅 FWHM (Full

Width of Half Maximum) (Time FWHM of Pulse Peak) を用いた。なお、時間特性の計算の際には、計算時間の節約と統計精度を向上させるために時間焦点法¹²⁾を用いた。時間焦点法でのエネルギー幅は、対象エネルギーの+10%とした。加えて、モデレータ内核発熱は、モデレータ体積内の水素に付与される全核発熱 (Nuclear Heat in Moderator) について評価した。モデレータの性能の総合的評価では、理解しやすい FOM (Figure of Merit)¹³⁾を指標とした。本研究では、中性子パルスのピーク強度 ϕ_{peak} 、パルスの時間半値幅 $FWHM$ の比

$$FOM = \phi_{peak} / FWHM$$

で定義される FOM を使用した。この式では、FOM は、中性子パルスのピーク強度が高く、パルスの時間半値幅が小さい方がより高い値を示し、高性能なモデレータであることを表す。特に短いパルス時間幅が要求される中性子散乱実験へのモデレータ性能を評価するために、 ϕ_{peak} を $FWHM$ の二乗で割った次のように定義される FOM を用いた。

$$FOM = \phi_{peak} / (FWHM)^2$$

この FOM は、パルスの時間的広がり具合を重視する評価値である。便宜上、本研究では、前者を FOM_1 、後者を FOM_2 と呼ぶ。

次に、各計算項目に対応する計算モデルを個別に示す。

2.1. プリモデレータ厚さ依存性

図 2 にプリモデレータ厚さ依存性計算で用いた計算モデルの三次元図を示す。また、図 3 及び図 4 に、それぞれ、計算モデルの陽子ビーム軸垂直方向、陽子ビーム軸平行方向の断面図を示す。これらの図を見ればわかるように、計算では、デカップラーとターゲットの間に、平面型の厚さ 0.2 cm のアルミニウム製容器でできた軽水 (H_2O) プレモデレータ (Premoderator) を導入した。このプリモデレータは、ビーム引き出し面方向にモデレータより 5 cm 張り出した形状である。モデレータに流入する中性子はターゲットからの成分が大きい。従って、この位置がプリモデレータの効果を見るには最適であると考えられる。このとき、プリモデレータの厚さを、0.0、0.5、1.0、1.5、2.0、3.0 cm と変えて計算を行った。プリモデレータの厚さを変えたときでも、ターゲットとモデレータとの隙間が空かないように、モデレータは常にプリモデレータと接触するように詰めて設置した。なお、厚さ 0.0 cm のときは、プリモデレータのアルミ容器も設置せず、ターゲット容器とモデレータ容器が接している状態（すなわち、プリモデレータが無い状態）である。計算条件を表 2 に示す。

2.2. プリモデレータ形状依存性

モデレータに流入する中性子は、ターゲット側からの成分が大きいが、中性子源の広がりを考慮すると、反射生成が存在し、それがターゲット側以外の面から流入してくることは無視できない。そのため、プリモデレータをターゲット側のみならず、モデレータの他の面（中性子ビーム引出し面以外）に対しても巻くことは、十分有効な方法であると考えられる。これは、結合型モデレータにおけるプレモデレータ効果の検討でも有効であると報告されてい

る¹⁴⁾。そこで、プリモデレータ形状の効果を見るために、この報告を参考にして、中性子ビーム引出し面以外をプリモデレータで囲い、中性子ビーム取り出し口上部に拡張（0、5、10 cm）した形状のプリモデレータ（厚さ 1.0、1.5 cm）を設定して計算を行った。プリモデレータの厚さは、どの面に関しても一様である。図 5 及び図 6 に、陽子ビーム軸垂直方向、陽子ビーム軸平行方向の計算モデルの断面図をそれぞれ示す。また、このときの計算条件を表 3 に示す。なお、表 2 の共通条件は省略してある。

2.3. プリモデレータ効果の反射体依存性

鉛は、中性子吸収断面積が小さく反射体として有効な材質であるが、質量数が大きいために中性子の減速能が悪い。一方、ベリリウム（Be）は、中性子吸収断面積が小さく反射体として有効な材質であるが、質量数が小さいので中性子の減速能が高い。そのために、鉛反射体下では、高中性子減速能をもつ軽水のプリモデレータの導入は大きな効果があるが、ベリリウム反射体下ではそれほど大きな効果が無いと予想される。そこで、反射体材質として鉛とベリリウムについて、同一条件で、プリモデレータ有無及びプリモデレータ厚さ 0.0、1.0 cm の場合で計算を行い、プリモデレータ効果の比較を行った。このときの計算条件を表 4 に示す。表 2 で示した共通の条件は省略してある。

2.4. ポイズンの有無によるモデレータ性能への影響

ポイズンは、低エネルギー中性子を吸収断面積が高い物質で、一般にガドリニウムが良く用いられる。モデレータ内にポイズンを設置した場合、モデレータ内でのポイソニングエネルギー以下の中性子の蓄積時間が短くなり、ポイソニングエネルギー以下の中性子パルスの時間特性が向上する。反面、中性子強度が低下することやポイズンでの発熱が大きいなどの問題がある。特に、MW 級核破碎中性子源では、ポイズンでの発熱が膨大になり、液体状態や超臨界状態の水素を用いるモデレータにとって大きな問題を発生すると予想される。そのため、ポイズンが無くてもパルス特性が十分に中性子散乱実験の要求に耐えるならば、その使用を避けることが望ましい。ポイズンの有無による中性子特性への影響を見るための計算は、表 2 の条件でプリモデレータ厚さを 1.0 cm に固定し、ポイズン有りの場合とポイズン無しの場合で計算した。

2.5. モデレータ性能のデカップリングエネルギー依存性

非結合型モデレータの中性子特性は、デカップリングエネルギー¹⁾に大きく左右される。デカップリングエネルギーが大きくなると、中性子強度が減少する一方で、パルスの時間特性が良化する。そのため、中性子特性のデカップリングエネルギーの依存性を見た上で、デカップリングエネルギーを決定する必要がある。

デカップリングエネルギーを変えるには、デカップラー材質を変える方法（低エネルギー中性子の吸収断面積が大きな物質の吸収断面積の立ち上がりエネルギーの違いを利用する）と、デカップラー材質の厚さを変える方法（エネルギーが低くなるにつれて、中性子吸収断

¹⁾ デカップリングエネルギーの定義は、中性子束がデカップラーを透過した時に、強度が $1/e$ になるエネルギーである。

面積が大きくなる物質の厚さを変える) があり、この二つの方法で検討を行った。

デカップラー材質を変えたときのデカップリングエネルギー依存性については、デカップラーに B_4C (厚さ 3 mm, 密度調整によりデカップリングエネルギー 1 eV に設定) の変わりに、厚さ 0.5 mm のサマリウム (Sm)、ガドリニウム (Gd)、カドミウム (Cd) を用いて計算を行った。この時のデカップリングエネルギーは、それぞれ 0.2、0.3、0.4 eV である。表 5 には、このときの計算条件のうち表 1 との相違点のみを示してある。

また、デカップラー厚さを変えたときのデカップリングエネルギー依存性の計算は、デカップラーとして (密度調整をしていない) B_4C を用い、デカップリングエネルギーが 0.2、1、10、100 eV となるように、デカップラーの厚さを変えて行った。このときの B_4C の厚さは、順に 0.3、0.7、2.0、6.0 mm である。プリモデレータは、厚さ 1.5 cm で、モデレータ及び中性子ビームの引き出し部を巻き、中性子ビームの引き出し部に 5 cm 拡張した形状を使用した。なお、Gd ポイズンは使用していない。表 6 に、計算条件のうち表 1 との相違点を示す。

2.6. モデレータサイズと引き出し面サイズ依存性

モデレータサイズとビーム引出し面サイズは、中性子特性に影響を及ぼすだけでなく、モデレータ容器の構造強度などの構造工学的な面での開発にも関連してくるが、まずは、中性子工学の観点から最適なサイズを決定する必要がある。

そこで、中性子特性のモデレータ厚さ依存性を調べるために、モデレータの厚さを 5、8 cm と変えて計算を行った (モデレータの縦、横は、 $10 \times 10 \text{ cm}^2$)。また、モデレータ厚さは、ポイズンとの関わり合いが強いので、ポイズン有無の場合についても同時に計算を行った。このときの計算条件を、表 7 に示す (表 2 と同一条件は省いてある)。

次に、モデレータの側面サイズと中性子ビーム引出し面サイズとを変えて、中性子特性への影響を調べた。モデレータサイズは、 $10 \times 10 \times 5$ 、 $12 \times 12 \times 5$ 、 $14 \times 14 \times 5$ 、 $16 \times 16 \times 5 \text{ cm}^3$ を、また面サイズは、 10×10 、 12×12 、 $14 \times 14 \text{ cm}^2$ を設定した。このときのプリモデレータは、厚さ 1.5 cm で、モデレータ及び中性子ビームの引き出し部を巻き、中性子ビームの引き出し部に 5 cm 拡張した形状を使用した。なお、ポイズンは使用しなかった。表 8 に表 2 と同一条件を省いた計算条件を示す。

3. 計算結果と議論

3.1. プリモデレータ厚さ依存性

図 7 に各エネルギーの中性子強度及びモデレータ内核発熱のプレモデレータ厚さ依存性の計算結果を示す。各計算値は、プリモデレータ厚さ 0 cm (プリモデレータ無し) の時の計算値で規格化した。プリモデレータの厚さが増すに従って、20、50、100 meV のどのエネルギーでも中性子強度が増加している。図より、厚さ 1.5 cm で最大 (プリモデレータ無しの場合に比べ、20 % 増) となることがわかる。また、プリモデレータ厚さの増加に伴い、モデレータ内核発熱は単調に減少し、中性子強度比が最大となる厚さ 1.5 cm では、プリモデレータ無しの場合に比べて 30 % 少なくなっている。これは、プリモデレータの導入が、モデレータ内核発熱の低減に有効であることを示している。

中性子強度が増加する理由は、プレモデレータ内部で中性子が減速されて (中性子のエネ

ルギースペクトルが低エネルギー側に遷移する)、液体水素モデレータに適したエネルギーを持つ中性子が多くモデレータに入射するようになる(ソフトニング効果)からである。このソフトニング効果により、プリモデレータ内で先に中性子がエネルギーを損失して、モデレータに中性子が付与するエネルギーが減少し、発熱が抑えられる。プリモデレータを1.5 cmより厚くしても、中性子強度のさらなる増加はない。すなわち、プリモデレータのソフトニング効果が効きすぎて、主要な成分が、デカップリングエネルギー以下になり、デカップラーにより吸収されてしまうためである。

プリモデレータのソフトニング効果を見るために、プリモデレータが有る場合と無い場合を比較して、一つの計算モデルでのモデレータ内中性子束エネルギースペクトルの変化を調べた。その結果を図8に示す。プリモデレータが無い場合に比べ、プリモデレータがある場合、数十 keV～数 MeV の中性子束が減少して1 keV以下の中性子束が増大しており、中性子のエネルギー分布が低エネルギー側に遷移していることがわかる。このようなソフトニング効果がプリモデレータの大きな役割である。

一方、中性子パルスの時間分解能(FWHM)に関しては、図9に示すように、プリモデレータ厚さによらずほぼ一定である(プリモデレータが無い場合に比べ最大でも5%増)ことがわかった。結合型モデレータでは、プリモデレータの導入によりパルスの分解能が劣化する(ピークの時間幅が広がる)¹⁴⁾ことがわかっているが、非結合型モデレータでは、パルス特性を悪化させる主因となっている軽水プレモデレータで熱平衡に達した中性子(約20 meV)は、デカップラーにより遮断するためにモデレータまで到達せず、中性子パルスの時間特性に大きく影響しないと考えられる。

図10にFOM₁のプリモデレータ無しの場合を1と規格化して計算した結果を示す。モデレータ性能は、プリモデレータの導入により総合的に向上する。この結果は、中性子強度のプリモデレータ厚さ依存性の結果と同様に、プリモデレータ厚さが1.5 cmでほぼ最高となることがわかった。

3.2. モデレータ性能のプリモデレータの形状効果

図11に、各エネルギーでの中性子強度のプリモデレータ形状依存性の計算結果を示す。どのエネルギーでも、プリモデレータでモデレータを巻いた形状が中性子強度の増加を促す(プリモデレータ無しの場合に比べ、30%増加)ことがわかる。この理由は、巻いた形状のプリモデレータが、モデレータの側面や底面から流入する中性子に対してもソフトニング効果を発揮しているためである。この形状でさらにプリモデレータを中性子ビーム孔側に拡張していくと、拡張長さが5 cmで最も強度が高くなり、さらに厚さを増すと中性子強度が減少している。プリモデレータ厚さ1.5 cm、拡張長さ5 cmのときに最大となり、プリモデレータ無しの場合に比べて45%の強度増が得られている。拡張することにより利得が大きくなる理由は、中性子ビーム孔のターゲット側からモデレータに流入してくる中性子に対して、プリモデレータのソフトニング効果が効いているからであると考えられる。一方、拡張長さ5 cmのプリモデレータの横幅はターゲットの横幅と同じになる(すなわち、モデレータから見てターゲットを覆い隠すような形状になる)ために、拡張長さを5 cm以上とってもさらなる強度の増加にはつながらないと考えられる。

また、図12に示す各エネルギーの中性子パルスの時間FWHMのプリモデレータ形状依

存性の計算結果からは、モデレータ及び中性子ビーム孔を巻いたプリモデレータは、厚さ・拡張長さにかかわらず、プリモデレータ無しの場合に比べ、時間 FWHM を最大 10 %増やすということがわかった。

モデレータの中性子特性は、図 13 に示す FOM_1 のプリモデレータ形状依存性の計算結果から、中性子強度のプリモデレータ形状依存性の結果と同様に、厚さ 1.5 cm 拡張長さ 5 cm のときに最高性能を示すことがわかった。パルスの時間特性は悪化するものの、パルスのピーク強度が大きく増加している。

一方、モデレータ内核発熱のプリモデレータ形状依存性の計算結果からもモデレータの周囲にプリモデレータを巻くと、モデレータ内核発熱が軽減されることがわかった（図 14）。さらに、厚さ、拡張長さを増大させると、核発熱の軽減効果が高いという結果が得られた。この理由は、プリモデレータが厚くなればなるほど、ソフトニング効果が効いてくるためと考えられる。これは、モデレータ内核発熱のモデレータ厚さ依存性の計算結果と同じ傾向である。

3.3. プリモデレータ効果の反射体材質依存性

図 15 は、各エネルギーでの中性子強度におけるプリモデレータ効果の反射体依存性の計算結果である。比較のために、3.2 節で得られた鉛反射体下での最適化プリモデレータを用いた場合の計算値も示す。ベリリウム反射体下での中性子強度は、プリモデレータ無しでも、鉛反射体下のプリモデレータ無しの場合に比べ、35 %強度が高い。プリモデレータの厚さを 1.0 cm にしたときのプリモデレータ無しの場合の強度増は、鉛反射体下では 20 %であるのに対し、ベリリウム反射体下では 5 %程度しかなく、ベリリウム反射体下では、プリモデレータの効果は非常に少ないことがわかる。一方、鉛反射体下では、3.2 節で示されたように、プリモデレータの導入により、プリモデレータ内の場合に比べ、最大 45 %の中性子強度増（巻いたプリモデレータ形状で、厚さ 1.5 cm、拡張長さ 5 cm のとき）となる。

図 16 に示す中性子パルスの時間 FWHM の計算結果から、ベリリウム反射体下では、プリモデレータ導入に関係無く、鉛反射体下よりも 5 %程度 FWHM が増加することがわかった。

図 17 に FOM_1 の観点から反射体材質の違いによるプリモデレータ効果のモデレータ特性への影響の結果を示す。ベリリウム反射体下では、プリモデレータの厚さにかかわらず、大きな FOM を示しているが、鉛反射体下では、プリモデレータの導入により FOM が大きくなり、最大性能を持つプリモデレータでは、ベリリウム反射体下での FOM より良い結果が得られることがわかった。

このように、プリモデレータ効果は、鉛反射体ではベリリウム反射体と比べて非常に大きいことがわかった。

3.4. ポイズン有無によるモデレータ性能への影響

図 18 に示すように、ポイズンの有無による中性子エネルギースペクトルの計算を行った結果、ポイズンが無い方が有る場合に比べてポイソニングエネルギー（Gd では、約 0.3eV）以下で強度が大きいことがわかる。また、図 19 に、ポイズンの有無による各エネルギーで中性子強度の計算結果から、エネルギーが低いほどポイズン無しの方が中性子強度の利得が

大きくなっている。しかしながら、図 20 のパルスの時間 FWHM の計算結果から、中性子強度の増加が大きかったエネルギーほど、時間 FWHM が大きくなっていることが示されている。この結果を FOM の観点から見てみると、図 21 に示すように FOM_1 及び FOM_2 は両方ともポイズン有りの方が高い結果を示している。このように、ポイズンを入れることで、中性子強度が減少する反面、パルスの時間特性が向上して、FOM が大きくなることがわかる。

一方、表 9 に、ポイズン有り、モデレータサイズ $12 \times 12 \times 5 \text{ cm}^3$ 、陽子エネルギー 3 GeV 、プリモデレータ無しの場合のポイズン及びモデレータ内での核発熱の計算結果を示す。5 MW 当たりのポイズンとモデレータでの全発热量はほぼ等しく、各 5 kW/MW 程度に達する。現行の設計では、モデレータ循環系での除熱能力を最大で 3 kW と設定しており、これが適用されると工学的には厳しい。ただし、プリモデレータを導入すれば、モデレータでの発熱は 40 % 程度軽減できる。また、単位体積当たりの発熱量で比較すると、モデレータに比べ、ポイズンでの発熱が 400 倍も大きいことがわかる。これは、ポイズンの厚さが $50 \mu\text{m}$ しかないことを考えると、モデレータ内に局所的な高熱が生じていることになり、モデレータ材質である液体水素の循環による除熱は、極めて困難と考えられる。

これらの結果から、5 MW 核破碎中性子源では、ポイズンはパルスの時間特性を向上させる一方で、モデレータ内に局所的な高熱を生じるので、工学的な成立性を短期間で実現するのは非常に困難である。

3.5. デカップリングエネルギー依存性

図 22 に示すデカップラー材質を変えることによる各エネルギーでの中性子強度のデカップリングエネルギー依存性の計算結果から、 B_4C 以外のデカップラーは、デカップリングエネルギーが低いため、中性子強度が増加している。また、図 23 の各エネルギー中性子パルスの時間 FWHM のデカップリングエネルギー依存性の計算結果からは、中性子強度の傾向とは逆に、 B_4C 以外のデカップラーでは、パルスの時間 FWHM が増加していることがわかる。FOM の観点からみたデカップリングエネルギーの依存性の計算結果を、図 24 及び図 25 に示す。図 24 の FOM_1 は、デカップリングエネルギーによらず、ほぼ同じ値を示しているが、図 25 の FOM_2 は、デカップリングエネルギーが低いほど、低い値を示している。このため、時間特性が良いパルスを必要とする中性子散乱実験には、 1eV 以下のデカップリングエネルギーでの使用は難しいと言える。

次に、デカップラー材質を変えることによる各エネルギーでの中性子強度のデカップリングエネルギー依存性の計算結果を図 26 に示す。この結果から、デカップリングエネルギーが上昇すると、指数関数的に中性子強度が減少することが示されている。また、図 27 の各エネルギーでの中性子パルスの時間 FWHM のデカップリングエネルギー依存性の計算結果からは、デカップリングエネルギーの上昇に従い、パルスの時間 FWHM も少しずつ減少することがわかった。また、 FOM_1 及び FOM_2 の計算結果（図 28、図 29）から、 50 meV 及び 100 meV の中性子では、デカップリングエネルギーが 1eV のときが、FOM がもっとも大きいことがわかった。一方、 20meV の中性子では、デカップリングエネルギーが低いほど、 FOM_1 が良いこともわかった。FOM がこのような傾向を示す理由は、デカップリングエネルギーの上昇に従い、パルスの時間 FWHM も良くなるが、中性子のパルスピーク強度の減少が非常に大きいためである。これらの結果から、デカップラーには B_4C を用い、デカップリングエ

エネルギーは 1eV 程度が良いと推察される。

これまでの議論では、モデレータのピーク成分のみ着目し、テール成分にはほとんど着目していない。しかしながら、図 30 に示す中性子エネルギー 50meV のときのデカップリングエネルギーが 1 eV、100 eV のパルス時間構造の計算結果からわかるように、ピーク強度は、デカップリングエネルギーが小さくなると増加し、パルスのテール成分は、ピーク成分の増加量以上に増加していることである。一方、パルスのテール成分は、ある種の中性子散乱実験ではバックグラウンド成分となるので、モデレータの性能を評価する一因子となる。しかしながら、図 30 の計算結果は、分散低減法を用いず約 1 週間計算した（計算マシン：CPU—Celeron450MHz、OS—Linux）にもかかわらず、十分な統計を得ることが出来ず、現状ではこのテール成分に着目して、モデレータの性能について議論を行うことは得策ではない。

3.6. モデレータサイズとビーム引出し面サイズの依存性

図 31 に、各エネルギーの中性子強度のポイズンの有無を含めたモデレータ厚さ依存性の計算結果を示す。この結果から、どのエネルギーでも、厚さが大きく、また、ポイズンの無い方が中性子強度が大きいことがわかる。次に、各エネルギーの中性子パルスの時間 FWHM のポイズンの有無を含めたモデレータ厚さ依存性の計算結果を図 32 に示す。この結果は、図 31 の結果と同じく、どのエネルギーでも、厚さが大きくポイズンの無い方が FWHM が大きくなる傾向を示している。このときのモデレータ内の全発熱と単位体積当たりの発熱を計算した結果を図 33 に示す。この図から、モデレータの厚さを厚くすると、全発熱量だけでなく、単位体積当たりの発熱が増加していることがわかる（なお、ポイズン有無では、発熱量はほとんど変わらなかったので、図 33 には載せていない）。これらを FOM の観点から見た結果を図 34 に示す。この図から、 FOM_1 はどの場合でもほぼ等しいが、 FOM_2 は厚さを大きくすると、ポイズンの有無に関わらず、低い値を示している。このことは、パルス特性が重視される場合には望ましくないので、厚さはできるだけ大きくしない方が良いと言える。

図 35 には、中性子強度のモデレータ側面サイズ及びビーム引出し面サイズ依存性の計算結果を示している。この図から、ビーム引出し面サイズが同じで、モデレータ側面サイズが大きい方が中性子強度が高くなっていくが、モデレータサイズを変えずにビーム引出し面を大きくした場合、ビーム引出し面からの全中性子強度は増加するが、中性子輝度（ビーム引出し面の単位面積当たりの中性子強度）は減少することがわかる。このとき、モデレータサイズ $14 \times 14 \times 10 \text{ cm}^3$ 、ビーム引出し面サイズ $10 \times 10 \text{ cm}^2$ の場合に中性子の輝度が最大値になっている。図 35 の結果を、中性子ビーム引出し面面積で積分した結果が図 36 である。この図から、中性子引出し面が大きくなればなるほど、また、モデレータサイズが大きいほど、引き出し面から引き出される全中性子量は大きくなることがわかった。

中性子強度が中性子引出し面サイズに依存性を持つ理由を探るために、中性子引出し面サイズのモデレータから放出される中性子強度のターゲットから垂直方向における位置分布を調べた（モデレータサイズ $14 \times 14 \times 5 \text{ cm}^3$ 、中性子引出し面サイズ $10 \times 10 \text{ cm}^2$ ）。その結果を図 37 に示す。図に見られるように、10 meV 以下の熱中性子領域の中性子は、モデレータ中心付近にピークを有する分布になっている。この理由は、デカップラーを通ってモデレータ内で中性子が熱化するために、十分に減速されなければならず、また、中性子源である

ターゲットに近い位置よりもモデレータ中心部に近いほどで熱中性子に発展するために、このような分布になると考えられる。一方、熱中性子領域から高いエネルギー領域になるにしたがって、このエネルギーの中性子が減速過程にあるために、モデレータ内で熱中性子が多い部分より、エネルギーの高い中性子が存在するターゲットに近いほど、エネルギーの高い減速領域の中性子が多く存在するので、中性子強度分布のピークがターゲット側に近づいていくと考えられる。このことから、減速領域の中性子は、モデレータのターゲットに近い領域から、多く放出されているために、ターゲットに近いところで中性子引出し面サイズを絞った方が、中性子輝度の観点からは利点がある。

次に、パルスの時間 FWHM のモデレータの側面サイズと中性子引出し面サイズの依存性の計算結果を図 38 に示す。この結果から、モデレータ側面サイズが大きくなるに従い、パルスの時間 FWHM は、緩やかに増加していくことが示された。

FOM の計算結果は、図 39 に示している。この図から、モデレータサイズ $12 \times 12 \times 5 \text{ cm}^3$ か $14 \times 14 \times 5 \text{ cm}^3$ で、ビーム引出し面サイズ $10 \times 10 \text{ cm}^2$ が最も高い値を持つことがわかる。

モデレータ内の全核発熱及び単位体積当たりの核発熱のモデレータ側面サイズ及び中性子引出し面サイズ依存性の計算結果を、図 40 に示す。この図から、中性子引出し面サイズに関係無く、モデレータの側面サイズ（モデレータの体積）が大きくなればなるほど、全核発熱は上昇し、単位体積当たりの核発熱は減少することがわかった。

以上の結果から、FOM の観点からは、モデレータサイズが、 $12 \times 12 \times 5 \text{ cm}^3$ もしくは、 $14 \times 14 \times 5 \text{ cm}^3$ で、中性子ビーム引出し面サイズが、 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ の時が、最も高い性能を示すが、モデレータ内核発熱を考慮するとモデレータサイズ $12 \times 12 \times 5 \text{ cm}^3$ 、中性子引出し面サイズ $10 \times 10 \text{ cm}^2$ の時が最も良いと言える。

4. まとめ

鉛反射体において、非結合型液体水素モデレータにプレモデレータを導入することで、パルス特性がほとんど悪化することなく、核発熱が軽減し、中性子強度が増加することがわかった。モデレータ内核発熱の観点からは、プリモデレータの厚さや拡張長さを大きくした方が、より核発熱を軽減できることがわかった。中性子強度が最大となるプリモデレータ厚さは 1.5 cm で、その形状は中性子ビーム孔に 5 cm 拡張し、モデレータ及び中性子ビーム孔を巻いた時である。このとき、プリモデレータ無しに比べ、中性子強度は 45% 強度が増加し、FWHM は 10% 劣化するものの、モデレータ核発熱に関しては 40% も軽減される。このことは、プリモデレータ導入が中性子特性や工学的な面から極めて有効であることを示す。

また、鉛反射体とベリリウム反射体でのプリモデレータ効果の違いについて研究した結果、鉛反射体の方が、ベリリウム反射体下に比べ、大きなプリモデレータ効果が得られることがわかった。

ポイズンの有無による中性子特性への影響を調べた結果、ポイズン有りの場合はポイズン無しの場合より中性子特性は向上するが、ポイズンでの発熱が膨大であり、工学的な観点からはポイズンの使用は不利である。

デカップリングエネルギーは中性子の強度とパルス特性の両方に影響を及ぼすため、最適な値を決定するには、中性子ビームを使用するユーザーの要求を十分考慮する必要がある。

現在のところ、FOM の観点からは 1eV 程度が良いと言える。しかしながら、実験のバックグラウンドとなるテール成分が、デカップリングエネルギーに大きく影響しており、さらに詳細な検討が必要である。

モデレータの厚さによる中性子特性の変化を調べた結果、FOM の観点からは 5 cm が良いと言う結果が得られた。また、モデレータの側面サイズとビーム引出し面サイズの中性子特性に与える影響やモデレータ内核発熱については、モデレータサイズ $12 \times 12 \times 5 \text{ cm}^3$ 、ビーム引出し面 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ が最適であることがわかった。

以上の検討結果から鉛反射体下での最高性能の非結合型モデレータは、厚さは 1.5 cm で、中性子ビーム孔に 5 cm 拡張し、モデレータ及び中性子ビーム孔を巻いた形状のプリモデレータがあり、ポイズンが無く、デカップラーは炭化ホウ素で、デカップリングエネルギーは 1 eV、モデレータサイズ $12 \times 12 \times 5 \text{ cm}^3$ 、ビーム引出し面 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ であると言える。

今回のプリモデレータ効果に関する検討では、プリモデレータはモデレータを巻いた形状で一様厚さを用いたが、側面や底面の厚さを変えるなど、さらに最適化する必要がある。一方で、プリモデレータ材質に重水を用いるとさらに効果が得られるとの報告¹⁵⁾があり、プリモデレータの材質に関する検討が必要である。さらに、反射体サイズがモデレータの中性子特性に影響を及ぼすとの報告¹⁶⁾もあり、プリモデレータ効果に及ぼす反射体サイズ依存性の検討も必要である。

また、本研究では、中性子パルスの時間構造の評価にピーク部分に着目したが、デカップリングエネルギー依存性の検討で述べたように、実際の中性子ビーム利用でバックグラウンド成分として重視されるテール成分も関係してくるので、テール成分にも着目した検討を行うことが必要である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、日野竜太郎室長をはじめとする中性子科学研究所センターのターゲット開発室の方々には、熱・構造・材料工学的な見地から大変貴重なご助言、ご指摘を頂いた。

高エネルギー加速器研究機構の古坂道弘教授及び川合将義教授、北海道大学大学院工学研究科の鬼柳善明教授には、ターゲットニュートロニクスの見地からご助言、ご意見を頂いた。

また、本研究を進めるに当たって、核破碎中性子利用研究室の方々から様々なご助力を頂いた。

ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Teshigwara M., et al.: "Neutronic studies on the JAERI 5MW Spallation Neutron Source", JAERI-Research 99-020 (1999).
- 2) Williamson K.D. and Lucas A.T.: Proc. 5th Meeting of Int. Collaboration on Advanced Neutron Sources (Los Alamos National Laboratory, USA, October 3-7, 1988), p.559 (1988).
- 3) Lucas A.T., Bauer G.S. and Sulfredge C.D.: Proc. 13th Meeting of Int. Collaboration on Advanced Neutron Sources (Paul Scherer Institute, Switzerland, 11-14 Oct., 1995), p.644 (1995).
- 4) Ogawa Y., Konno M., Iwasa H., Kamiyama T., Kiyanagi Y., Furusawa M. and Watanabe N. : Proc. 14th Meeting of Int. Collaboration on Advanced Neutron Sources (Starved Rock Lodge, Utica, Illinois, June 14-19, 1998), p.569 (1998).
- 5) Kiyanagi Y., Watanabe N. and Iwasa H.: Nucl. Instr. Meth. **A312**, 56 (1992).
- 6) Kiyanagi Y., Watanabe N. and Iwasa H.: Nucl. Instr. Meth. **A343**, 558 (1994).
- 7) Kiyanagi Y., Sato S., Iwasa H., Hiraga F. and Watanabe N., Physica B **213 & 214**, 857 (1995).
- 8) Watanabe N., Kiyanagi Y. and Firisala M.: Proc. 13th Meeting of Int. Collaboration on Advanced Neutron Sources (Paul Scherer Institute, Switzerland, 11-14 Oct., 1995), p.659 (1995).
- 9) Watanabe N., Teshigawara M., Takada H., Nakashima H., Oyama Y., Kai T., Nagao T. and Kosako K.: Proc. 14th Meeting of Int. Collaboration on Advanced Neutron Sources (Starved Rock Lodge, Utica, Illinois, June 14-19, 1998), p.743 (1998).
- 10) Takada H., Yoshizawa N., Kosako K. and Ishibashi K.: "An Upgrade Version of the Nucleon Meson Transport Code : NMTC/JAERI97", JAERI-Data/Code 98-005 (1998).
- 11) Briesmeister J. F. (Ed.) : "MCNP, A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4A", LA-12625 (1993).
- 12) 勅使河原 誠 : JAERI-Review 99-013, p.15 (1999).
- 13) Watanabe N. and Kiyanagi Y.: Physica B **180 & 181**, 893 (1992).
- 14) Kai T. et al: in preparation.
- 15) Kiyanagi K. et al.: Private Communication.
- 16) Sakata H. et al.: in preparation.

表 1 主要なモデレータの概要

Moderator	Cold moderator	Thermal moderator	Epithermal moderator
Purpose	Cold neutron High resolution & high intensity	Thermal neutron High resolution	Epithermal neutron High resolution
Neutron Energy	0.1-5 meV	5-300 meV	>0.3eV
Moderator Material	Super-Critical H ₂	Super-Critical H ₂	H ₂ O
Moderator Temp.(K)	20	20	Room temp.
Coupling	Coupled	Decoupled	Decoupled

表 2 プリモデレータ厚さ依存性計算での計算条件

Proton Beam				
	Energy (GeV)	Profile	Size	Beam power (MW)
	1.5	Uniform distribution	13.35 x 5.16 cm ²	5
Target				
	Material	Shape	Size (W x H x L cm ³)	
	Hg	Rectangular	17.35 x 8.16 x 60.0	
Reflector				
	Material	Size (W x H x L cm ³)		
	Pb	80 x 160 x 120		
Moderator				
	Material	Size (W x H x L cm ³)	Poison	Viewed Surface Size (W x H cm ²)
	Liquid H ₂	10 x 10 x 5	Gd, 50 μm	10 x 10
Decoupler				
	Material	Decoupling Energy (eV)		
	B ₄ C	1	(controlled density)	
Premoderator				
	Material	Thickness (cm)	Geometry & Position	
	H ₂ O	0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0	Main flat between target and moderator outside of decoupler	
Geometry & Position		Extension (cm)		
	Side flat	5		
between target and neutron beam hole outside of decoupler				

表 3 プリモデレータ形状依存性計算での計算条件
(表 2 と共通の条件は省略)

Premoderator	Material	Thickness (cm)	Geometry & Position Main
	H ₂ O	1.0, 1.5	surrounding moderator outside of decoupler
Geometry & Position Sub		Extension (cm)	
surrounding neutron beam hole outside of decoupler		0, 5, 10	

表 4 プリモデレータ効果の反射体材質依存性計算での計算条件
(表 2 と共通の条件は省略)

Reflector	Material	Size (W x H x L cm ³)	
	Be, Pb	80 x 160 x 120	
Premoderator	Material	Thickness (cm)	Geometry & Position Main
	H ₂ O	0.0, 1.0	flat
			between target and moderator outside of decoupler
Geometry & Position Sub		Extension (cm)	
flat		5	
			between target and neutron beam hole outside of decoupler

表 5 デカップラー材質を変えることによるデカップリングエネルギー依存性計算
での計算条件
(表 2 と共通の条件は省略)

Decoupler	Material	Decoupling Energy (eV)	Decoupler Thickness (mm)
	Sm, Gd, Cd	0.2, 0.3, 0.4	0.5

表 6 デカップラー厚さを変えることによるデカップリングエネルギー依存性計算
での計算条件
(表 2 と共に条件は省略)

Decoupler	Material	Decoupling Energy (eV)	Decoupler Thickness (mm)
	B ₄ C	0.2, 1, 10, 100	0.3, 0.7, 2.0, 6.0
<hr/>			
Premoderator	Material	Thickness (cm)	Geometry & Position Main surrounding moderator outside of decoupler
	H ₂ O	1.5	
Geometry & Position Side	Extension (cm)		
surrounding neutron beam hole outside of decoupler	5		

表 7 モデレータ厚さ依存性計算での計算条件
(表 2 と共に条件は省略)

Moderator	Material	Size (cm ³)	Poison	Viewed Surface (W x H cm ²)
Liquid H ₂		10 x 10 x 5	Gd, 50 μm	10 x 10
		10 x 10 x 8	No Gd, 50 μm No	

表 8 モデレータサイズ及び中性子ビーム引出し面サイズ依存性計算での計算条件
 (表 2 と共通の条件は省略)

Moderator	Material	Size (cm ³)	Poison	Viewed Surface (W x H cm ²)	
Liquid H ₂		10 x 10 x 5	No	10 x 10	
		12 x 12 x 5		10 x 10	
		14 x 14 x 5		10 x 10	
		16 x 16 x 5		12 x 12	
				12 x 12	
				14 x 14	
Premoderator	Material	Thickness (cm)	Geometry & Position Main		
H ₂ O		1.5	surrounding moderator outside of decoupler		
Geometry & Position Sub	Extension (cm)				
surrounding neutron beam hole outside of decoupler	5				

表 9 モデレータ及びポイズンでの核発熱

モデレータサイズ 12×12×5 cm³、3 GeV、プリモデレータ無しでの計算結果

	Nuclear Heat (kW/5MW)	Volume (cm ³)	Nuclear Heat/Volume (kW/cm ³ /5MW)
Poison	4.27	0.72	5.92
Moderator	5.47	719	0.015

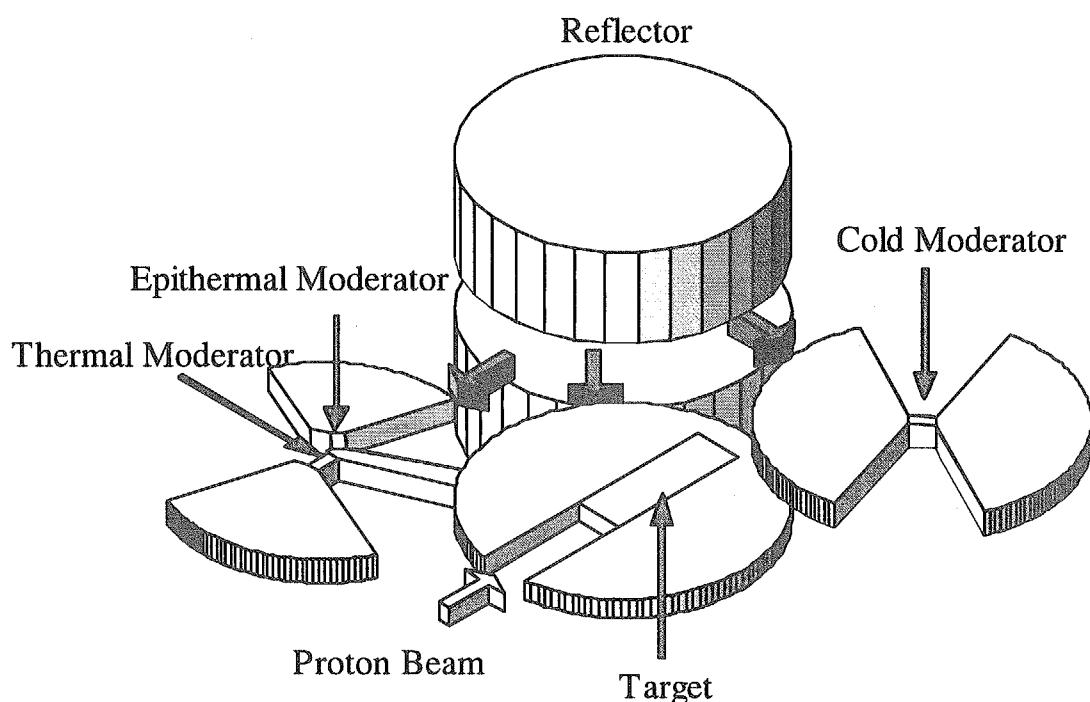


図 1 ターゲット・モデレータ・反射体の基本構成概念図

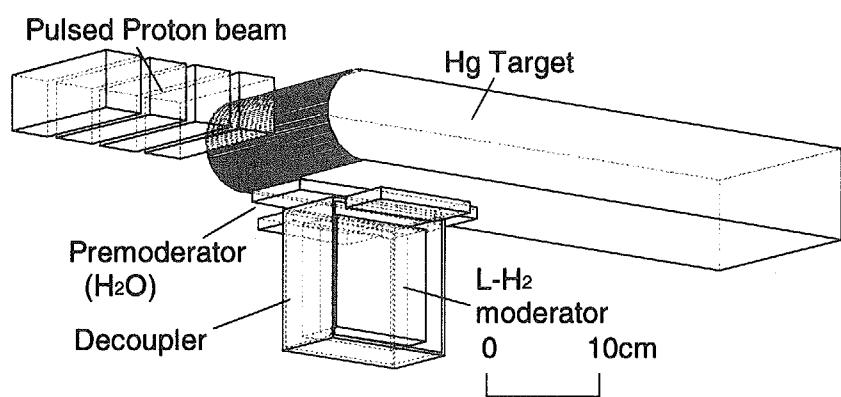


図 2 プリモデレータの厚さ依存性での計算モデルの三次元図

H_2O プリモデレータをターゲットとデカッplerの間に設置し、陽子ビーム孔と中性子ビーム孔を除いて、反射体で満たされている。

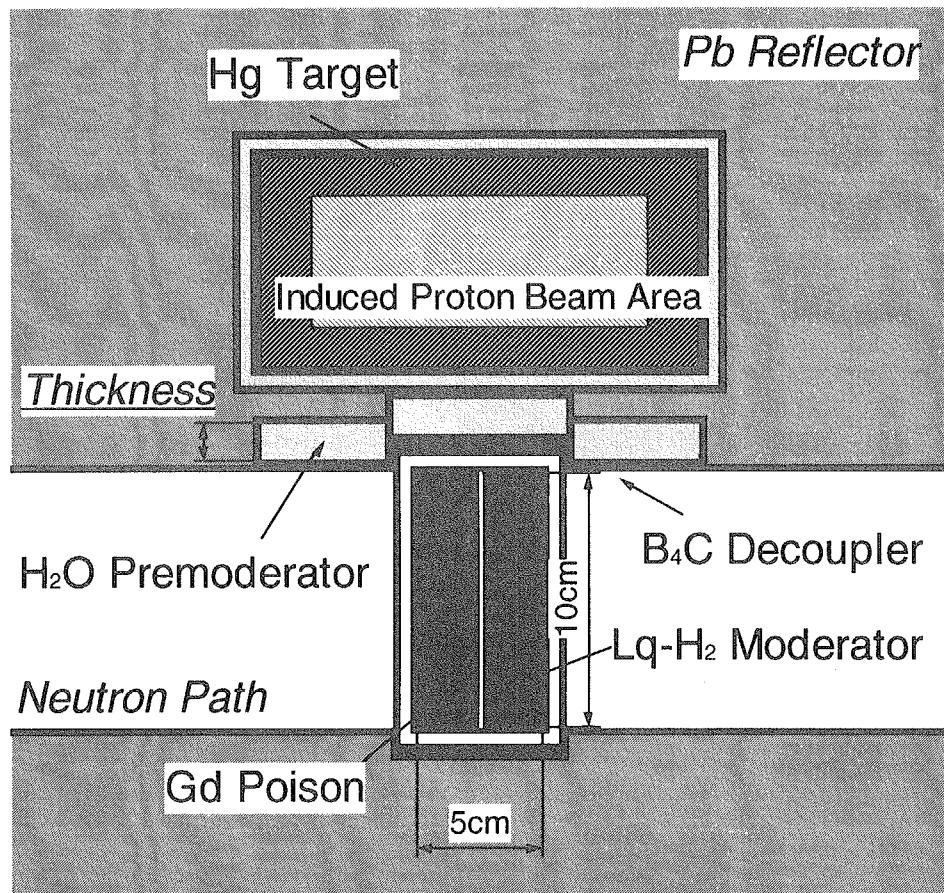


図 3 プリモデレータ厚さ依存性計算モデルの陽子ビーム垂直方向の断面図
 ターゲットとデカップラーの間に、厚さを変えたプリモデレータを設置した。
 このプリモデレータは、ビーム引き出し面方向にモデレータより 5 cm 張り出している。なお、モデレータの中心には、Gd ポイズンが入っている。

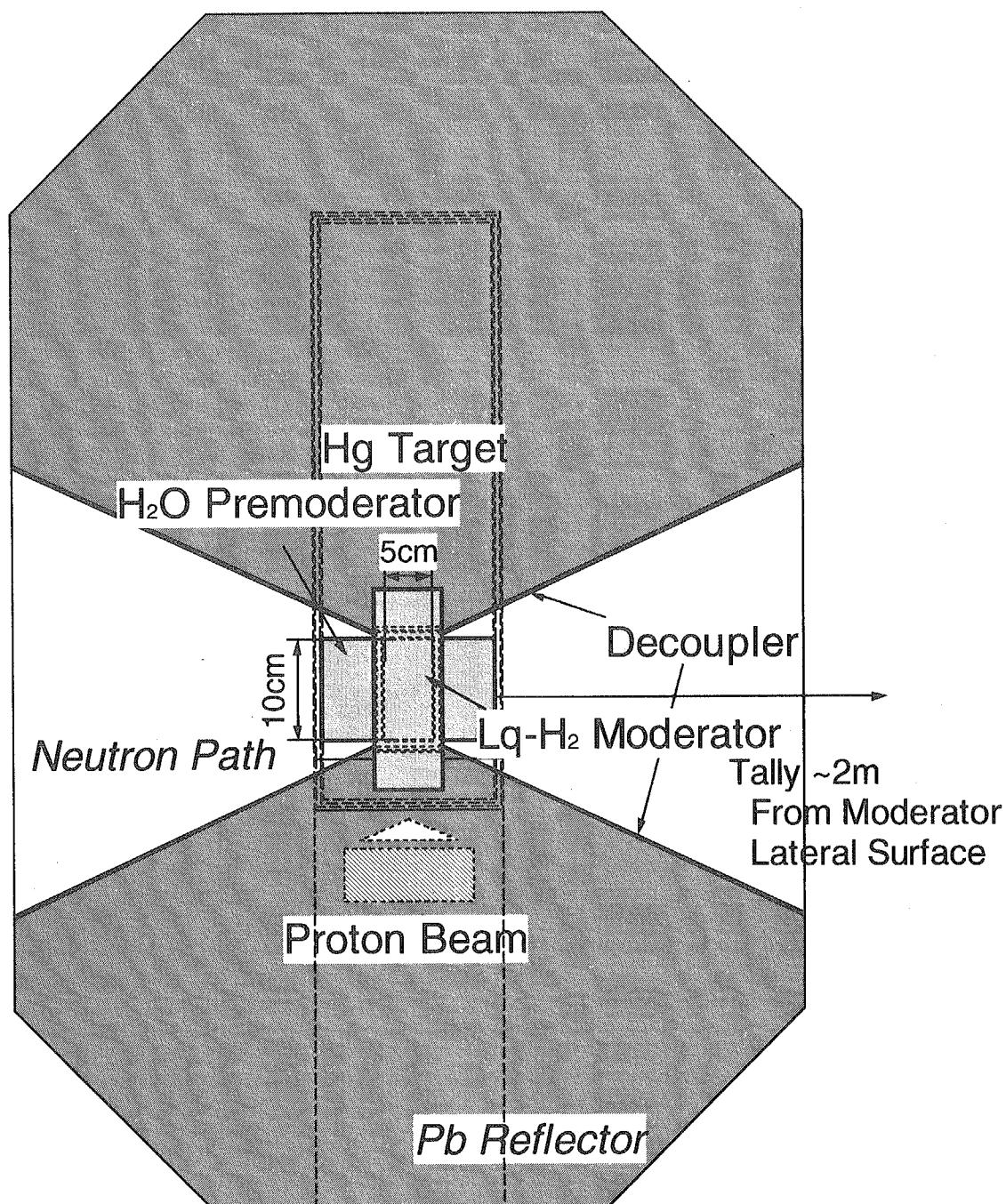


図 4 プリモデレータ厚さ依存性計算モデルの陽子ビーム平行方向の断面図
点線は、モデレータ及びターゲットの位置を示している。

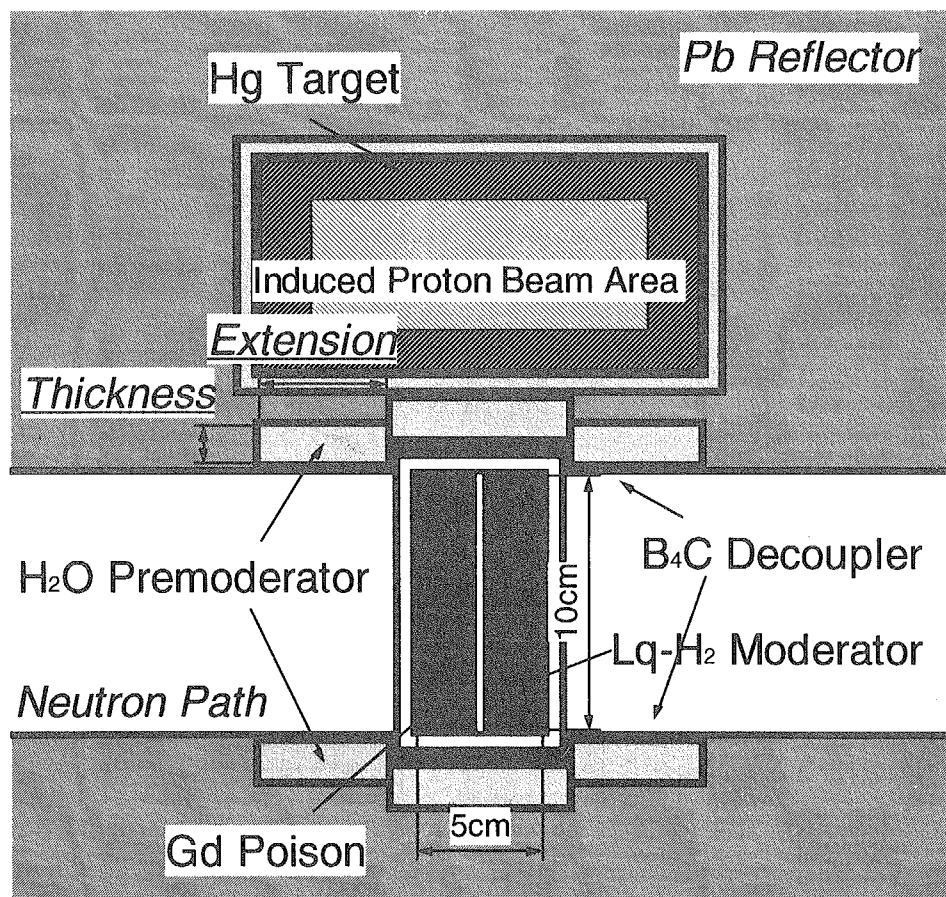


図 5 プリモデレータ形状依存性計算モデルの陽子ビーム垂直方向断面図
プリモデレータは、モデレータ及び中性子ビーム孔の周囲を取り巻く。モデレータ中心には、Gd ポイズンがある。

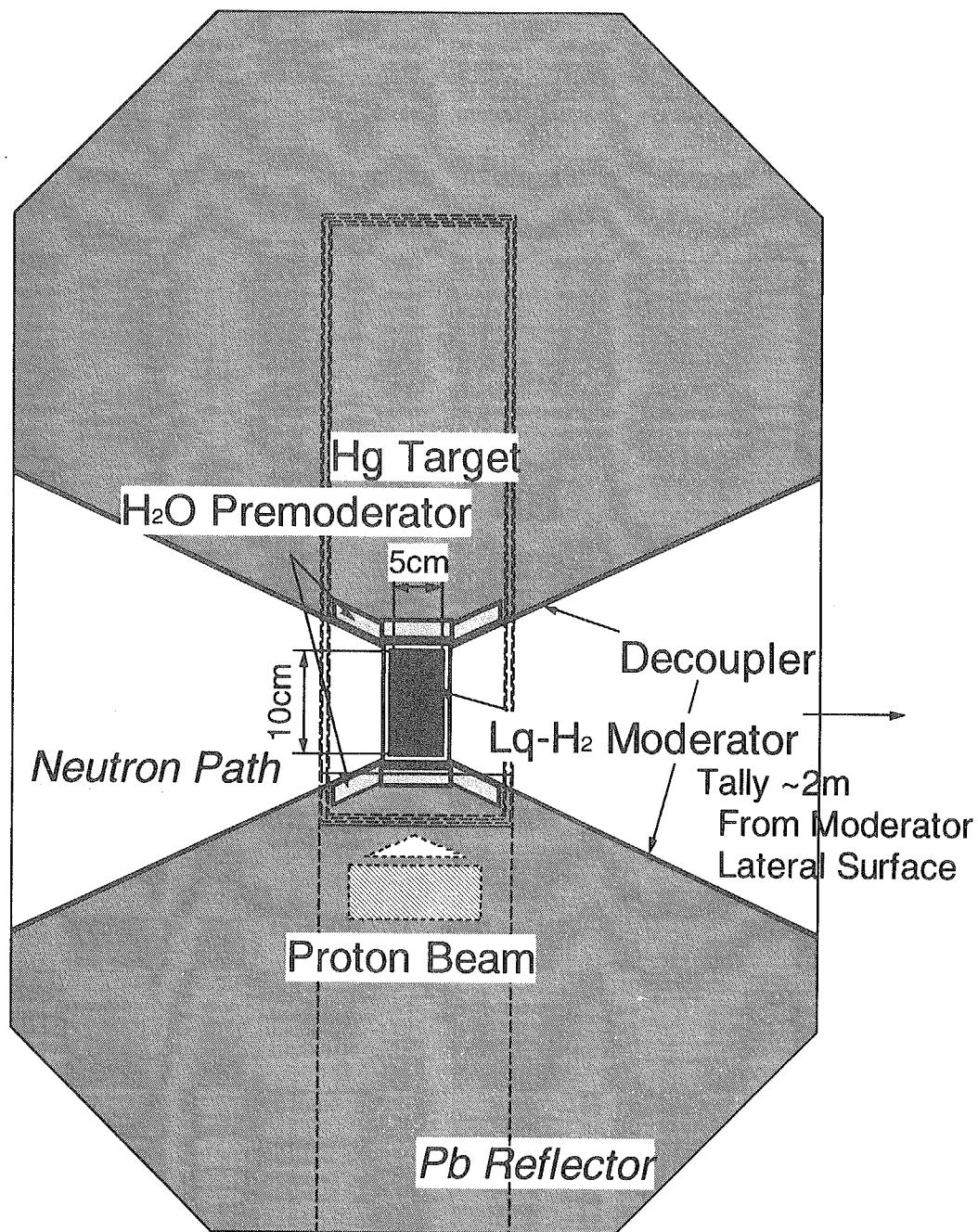


図 6 プリモデレータ形状依存性計算モデルの陽子ビーム平行方向の断面図
点線は、ターゲットの位置を示す。

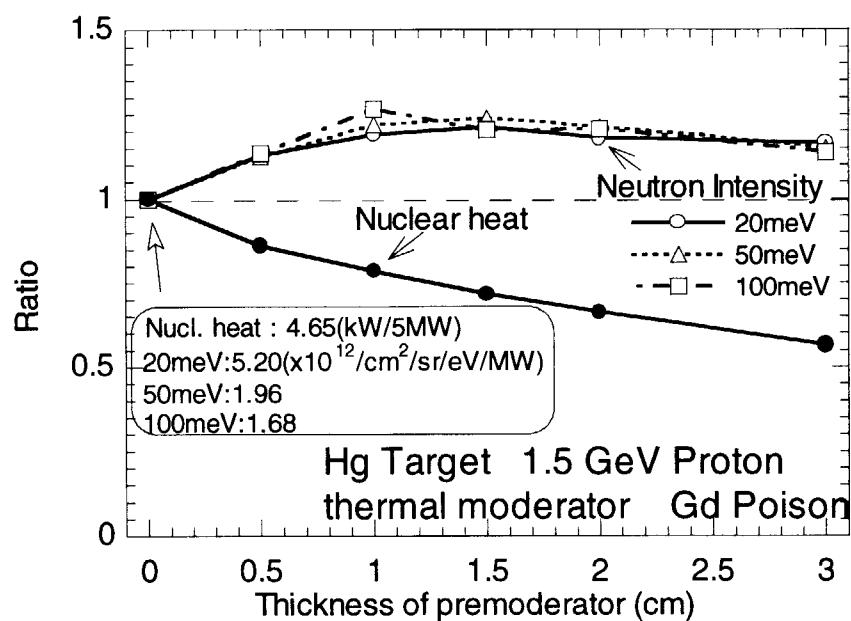


図 7 各エネルギーの中性子強度及びモーデレータ内核発熱のプリモーデレータ厚さ依存性
各計算値は、図中に示しているプリモーデレータ厚さ 0.0 cm の計算値にそれぞれ規格化している。

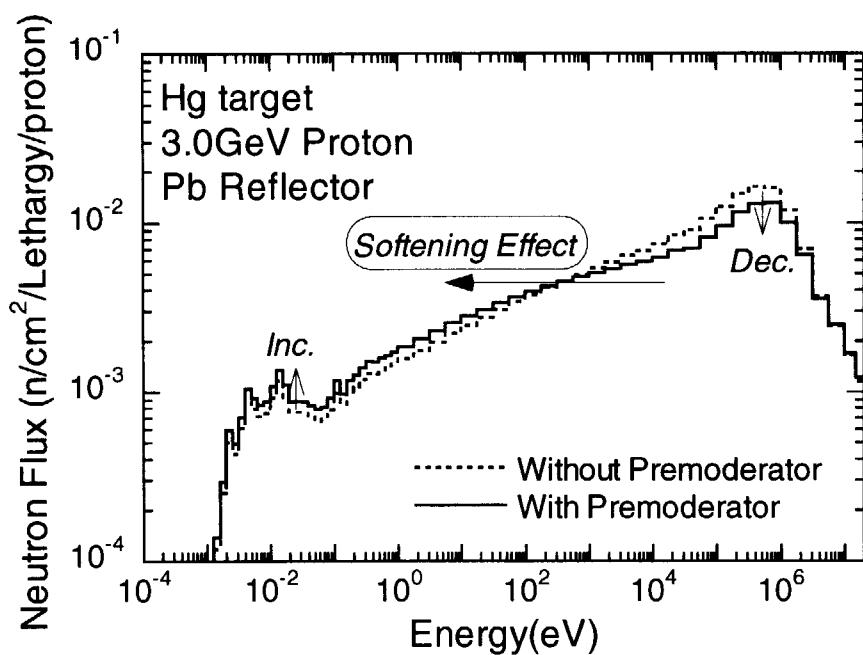


図 8 プリモーデレータの有・無によるプリモーデレータ内中性子束エネルギースペクトルの変化

プリモーデレータのソフトニング効果により、数十 keV～数 MeV の中性子束が減少し、1keV 以下の中性子束が増大していることがわかる

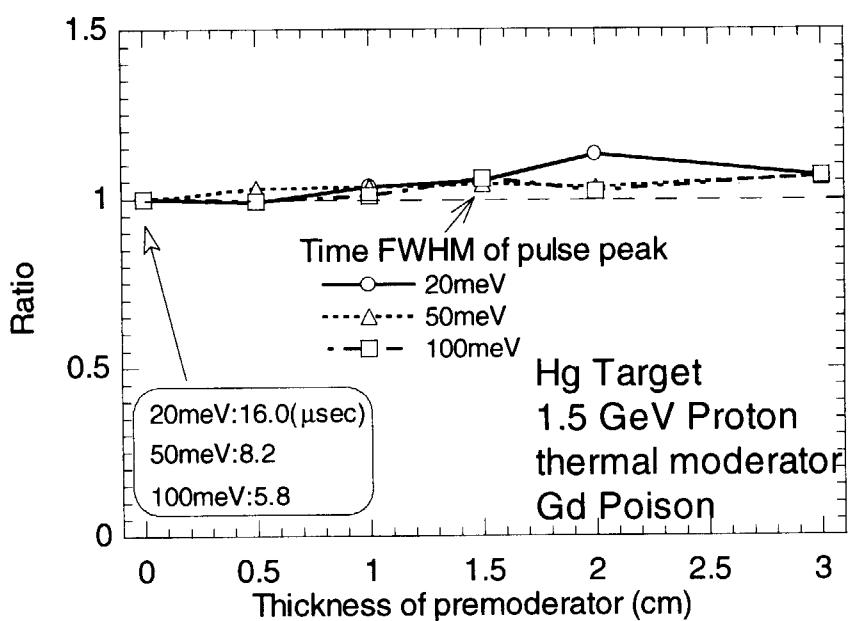
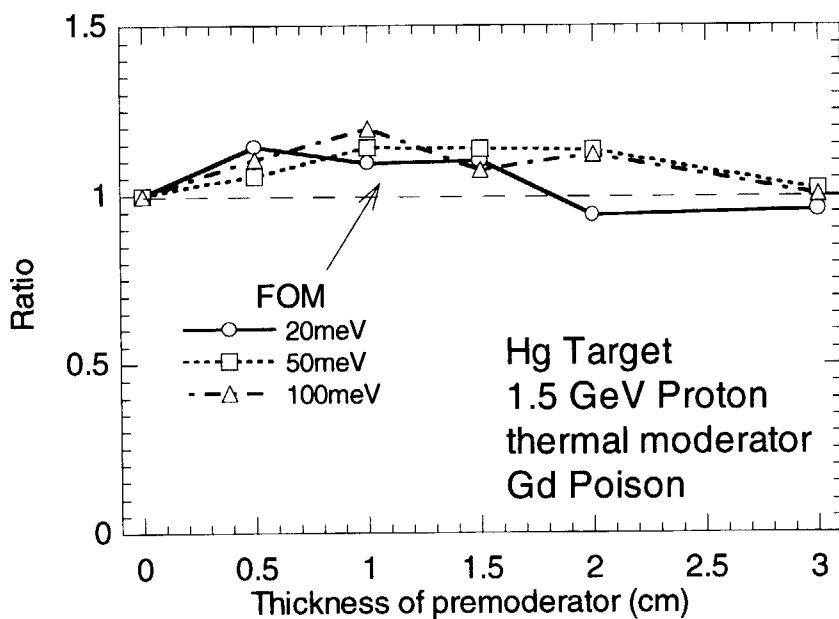


図 9 中性子パルスの時間 FWHM のプリモデレータ厚さ依存性

各計算値は、図中に示しているプリモデレータ厚さ 0.0 cm の計算値にそれぞれ規格化している。

図 10 モデレータ性能を評価する FOM_1 のプリモデレータ厚さ依存性

各計算値は、プリモデレータ厚さ 0 cm の時の値にそれぞれ規格化している。

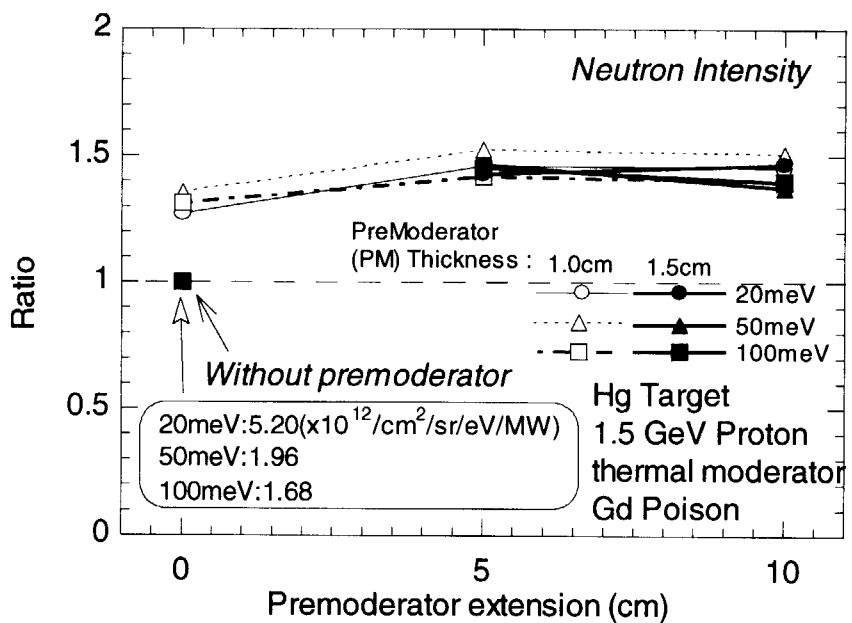


図 11 中性子強度のプリモデレータ形状の依存性

各計算値は、図中に示しているプリモデレータ無しの場合の計算値にそれぞれ規格化している。

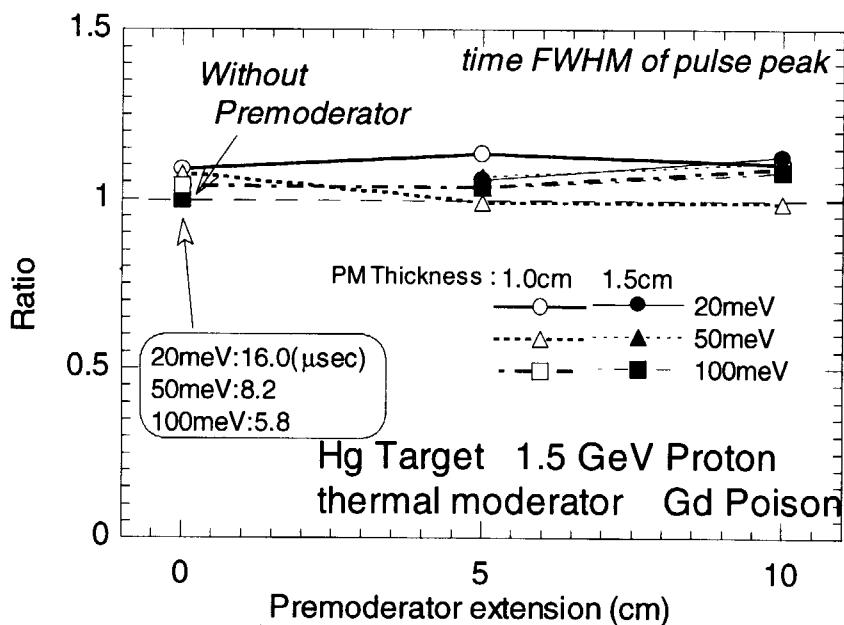


図 12 中性子パルスの時間 FWHM のプリモデレータ形状依存性

各計算値は、図中に示しているプリモデレータ無しの場合の計算値にそれぞれ規格化している。

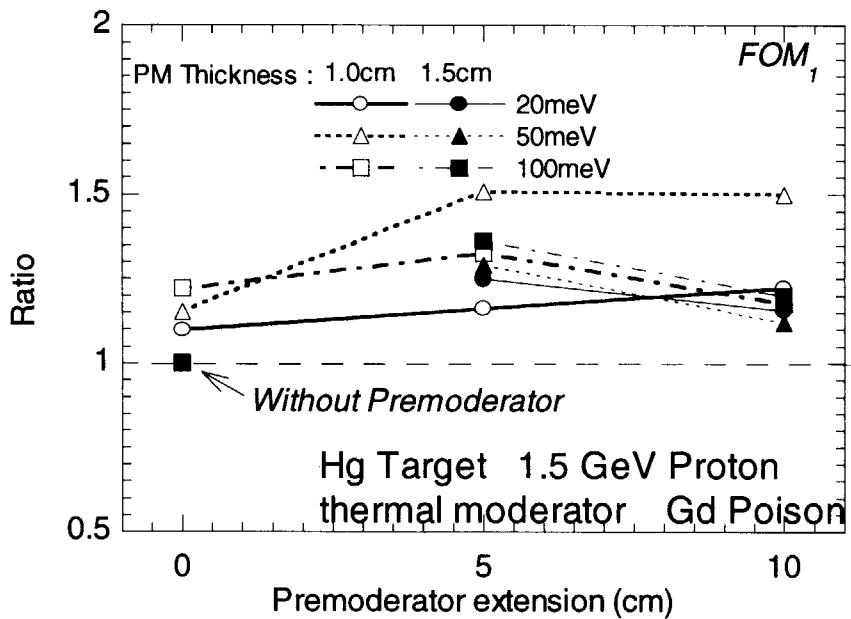


図 13 モデレータの性能を示す FOM_1 のプリモデレータ形状依存性
各計算値は、プリモデレータが無い時の計算値に規格化している

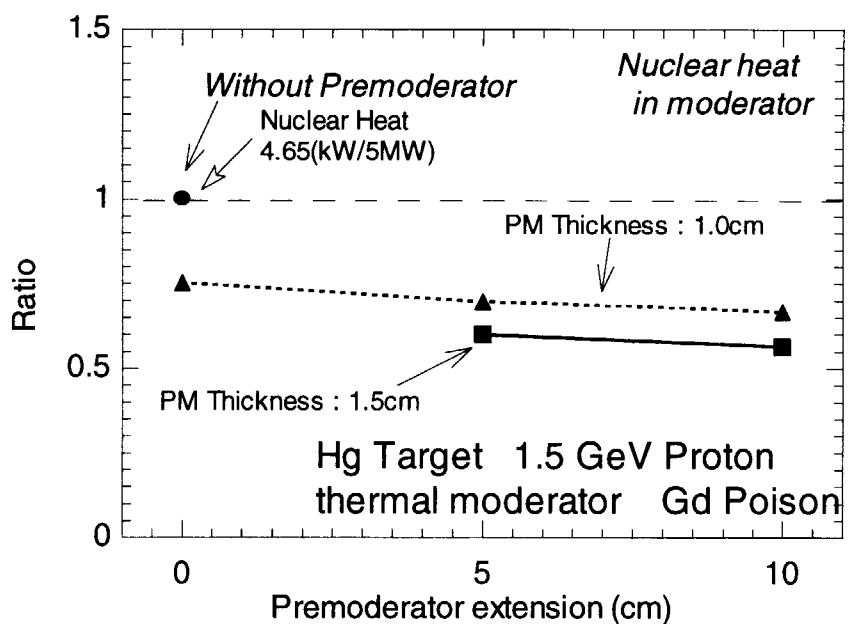


図 14 モデレータ内核発熱のプリモデレータ形状依存性
各計算値は、図中に示しているプリモデレータ無しの場合の計算値にそれぞれ規格化している。

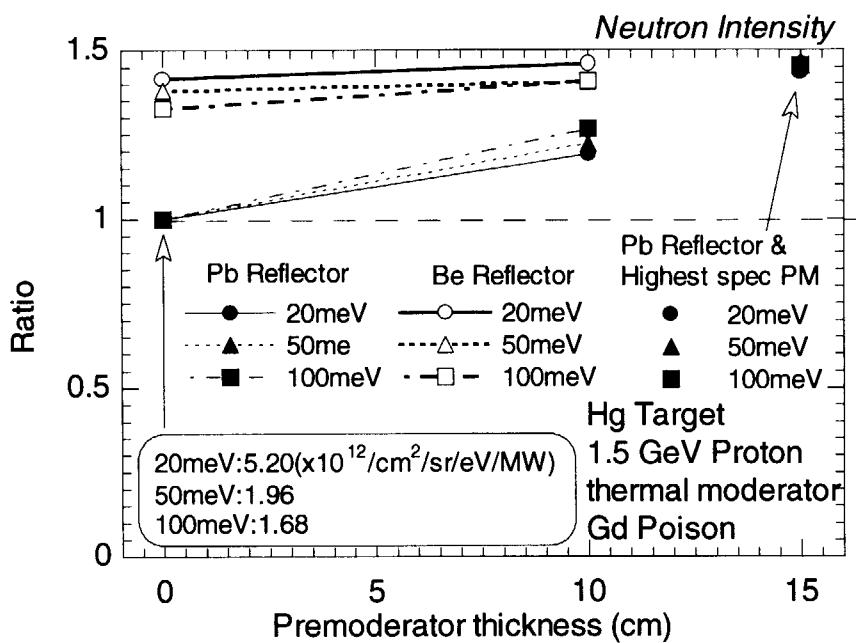


図 15 各エネルギーの中性子強度におけるプリモデレータ効果の反射体依存性

各計算結果は、図中に示している鉛反射体下でのプリモデレータが無い時の計算値に規格化している。また、厚さ 1.5 cm のデータは、鉛反射体下での本研究で得られた最高性能のプリモデレータを用いた計算値である。

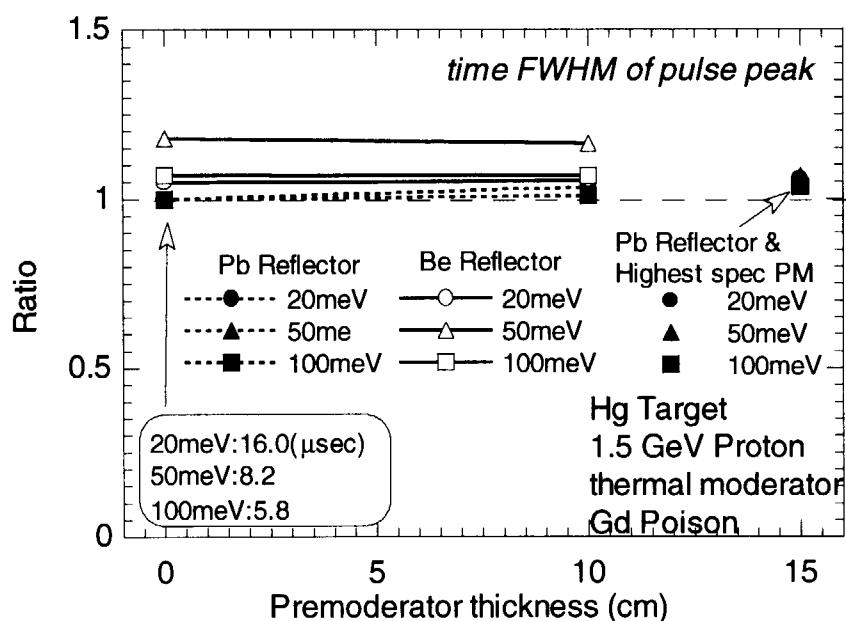
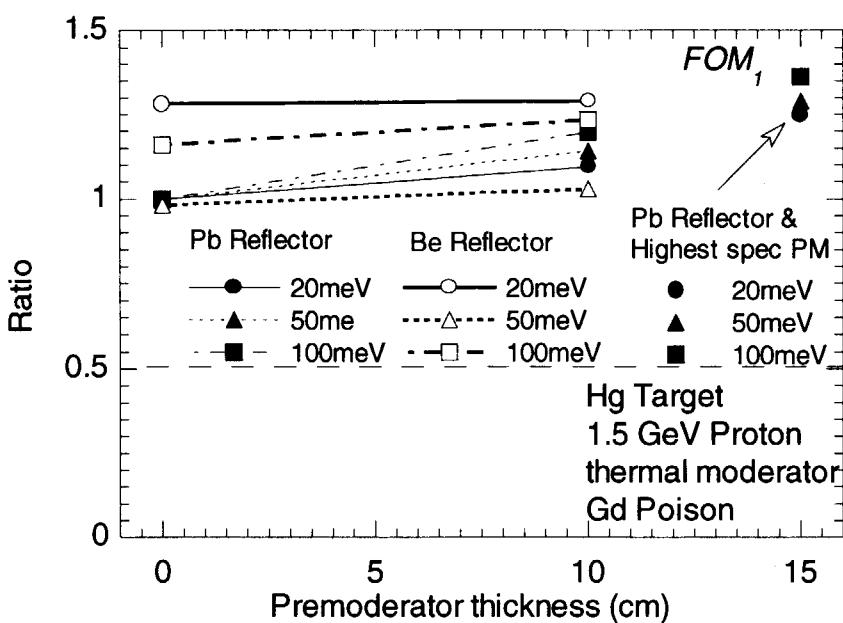


図 16 パルス時間 FWHM におけるプリモデレータ効果の反射体依存性

各計算値は、図中に示している鉛反射体下でのプリモデレータが無い時の計算値に規格化している。また、厚さ 1.5 cm のデータは、鉛反射体下での本研究で得られた最高性能のプリモデレータを用いた計算値である。

図 17 FOM₁におけるプリモデレータ効果の反射体依存性

各計算値は、図中に示している鉛反射体下でのプリモデレータが無い時の計算値に規格化している。また、厚さ 1.5 cm のデータは、鉛反射体下での本研究で得られた最高性能のプリモデレータを用いた計算値である。

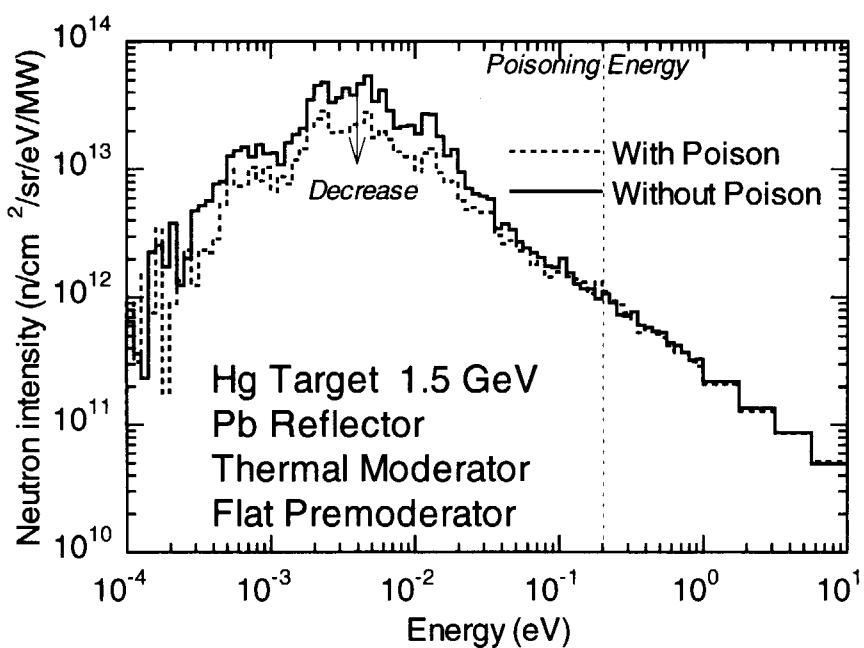


図 18 ポイズン有無による中性子エネルギースペクトルの変化

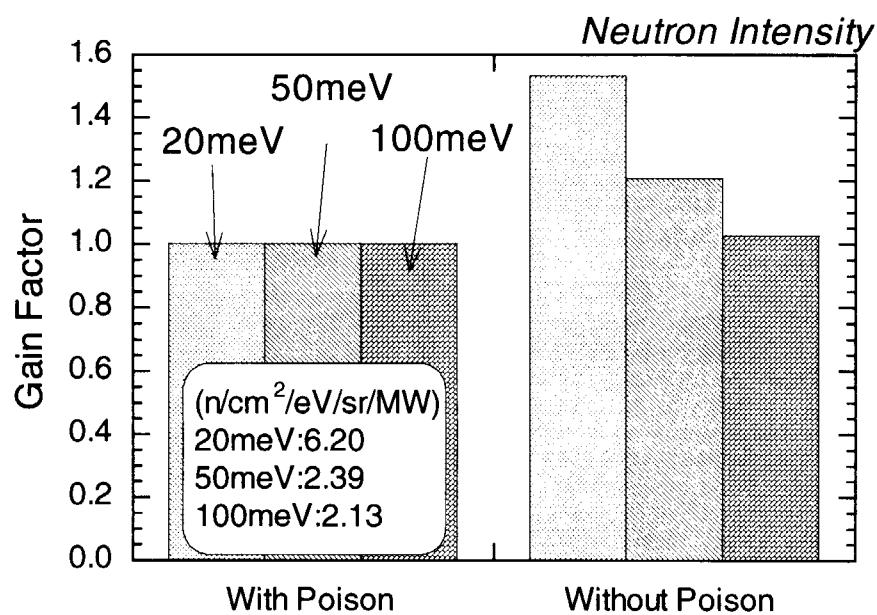


図 19 ポイズン有無による各エネルギーでの中性子強度の変化
 各計算値は、図中に示すポイズン有りの計算値に規格化している

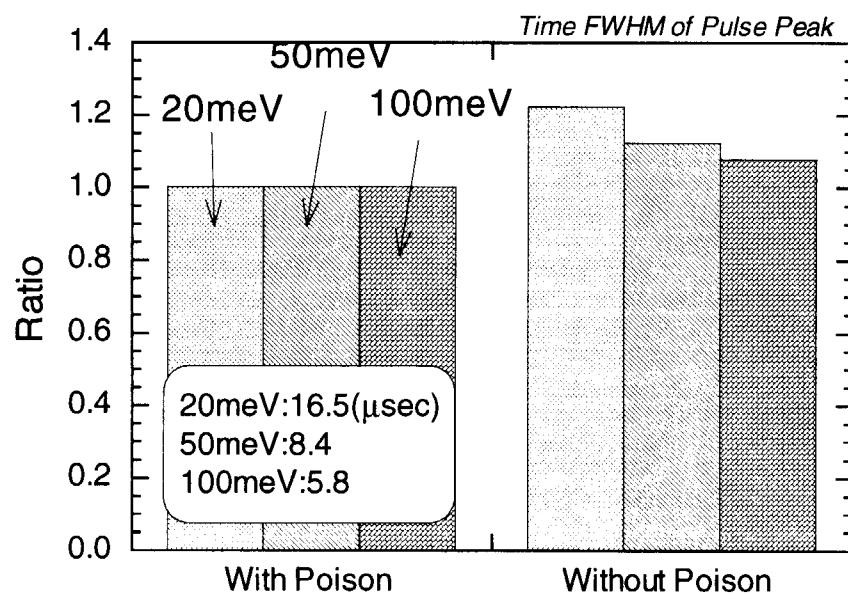


図 20 ポイズン有無による各エネルギーの中性子パルスの時間 FWHM の変化
 各計算値は、ポイズン有りの計算値に規格化している

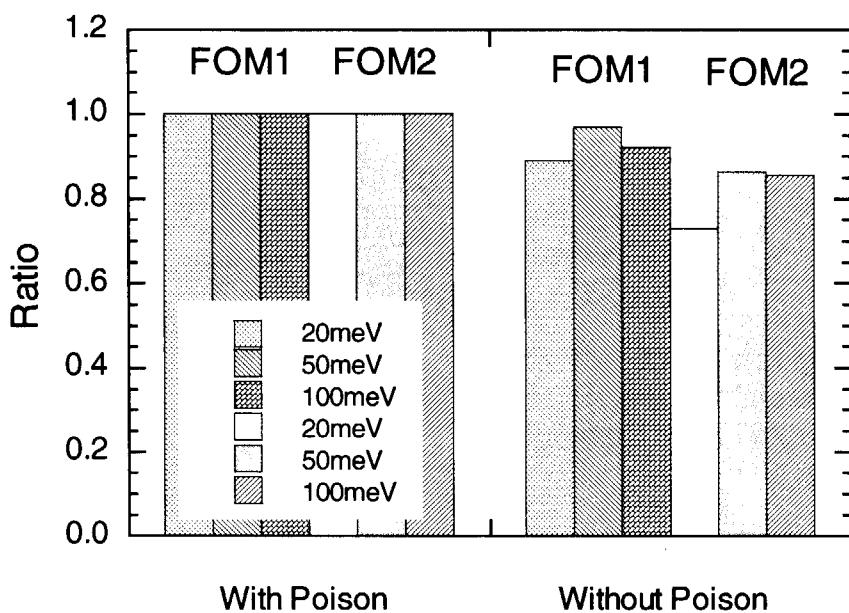


図 21 ポイズンの有無による FOM_1 及び FOM_2 の変化
各計算値は、ポイズン有りの計算値に規格化している

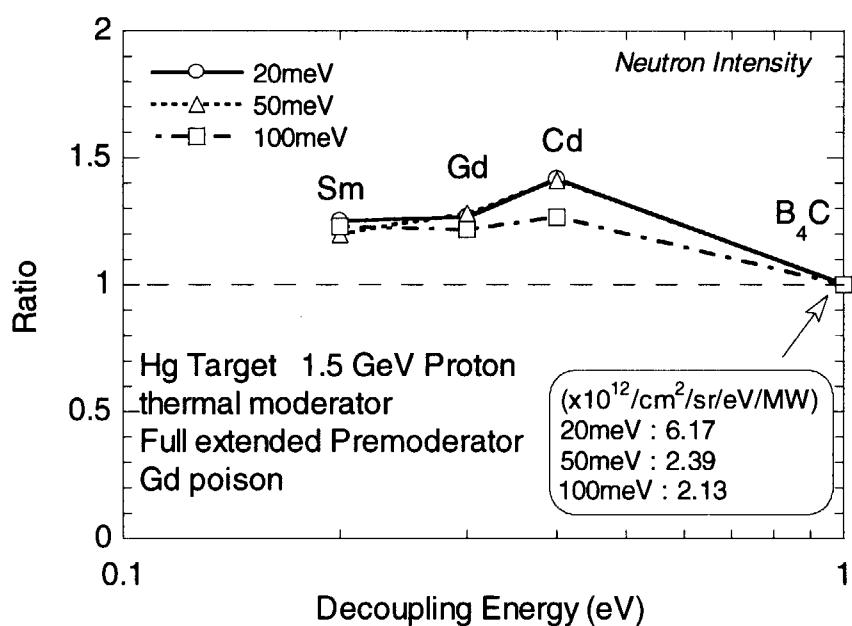


図 22 デカップラー材質の違いによる各エネルギーでの中性子強度のデカップリング
エネルギー依存性
各計算値は、図中に示しているデカップリングエネルギー 1 eV の計算値に規格
化している

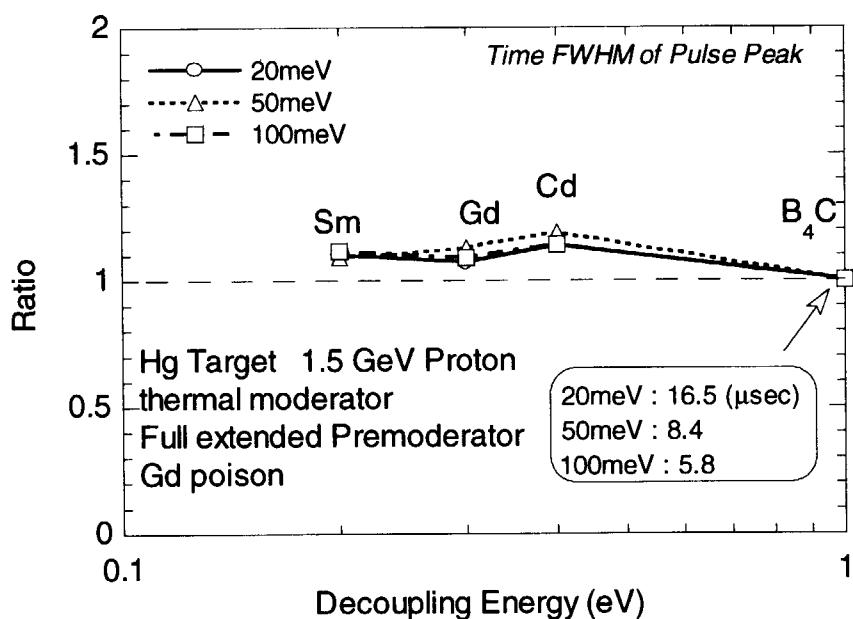


図 23 デカップラー材質の違いによる各エネルギーでのパルスの時間 FWHM のデカップリングエネルギー依存性

各計算値は、図中に示しているデカップリングエネルギー 1 eV の計算値に規格化している。

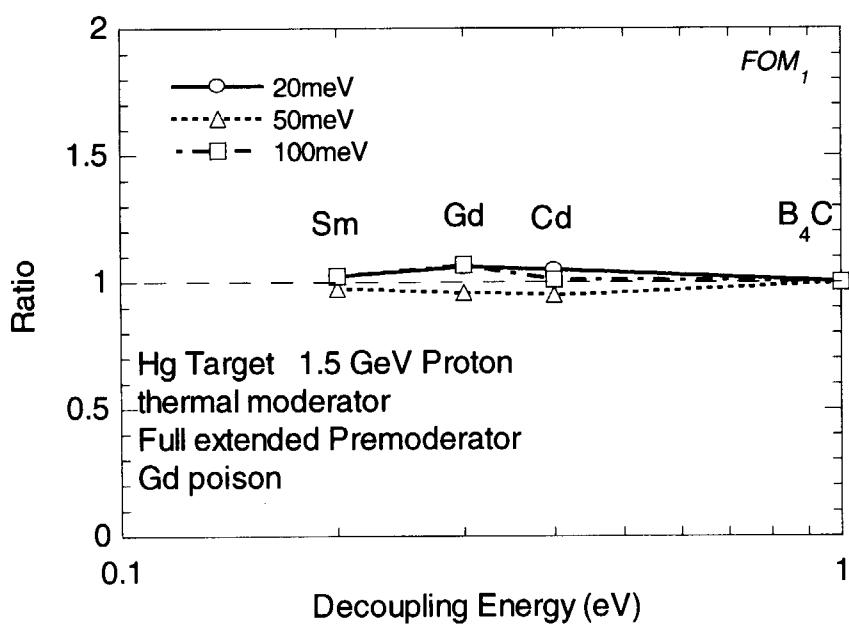


図 24 デカップラー材質の違いによる FOM₁ のデカップリングエネルギー依存性

各計算値は、デカップリングエネルギー 1 eV の計算値に規格化している

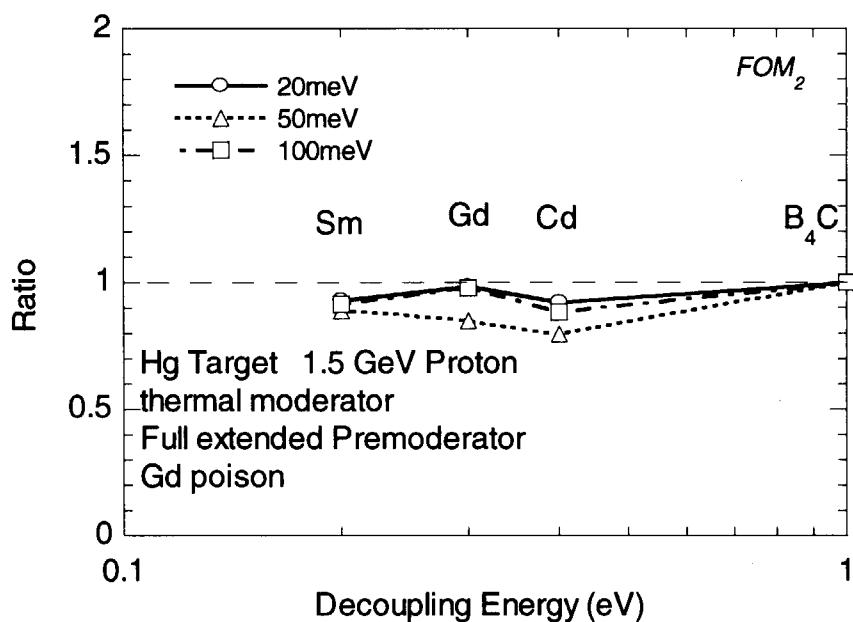


図 25 デカップラー材質の違いによる FOM_2 のデカップリングエネルギー依存性
各計算値は、デカップリングエネルギー1 eV の計算値に規格化している。

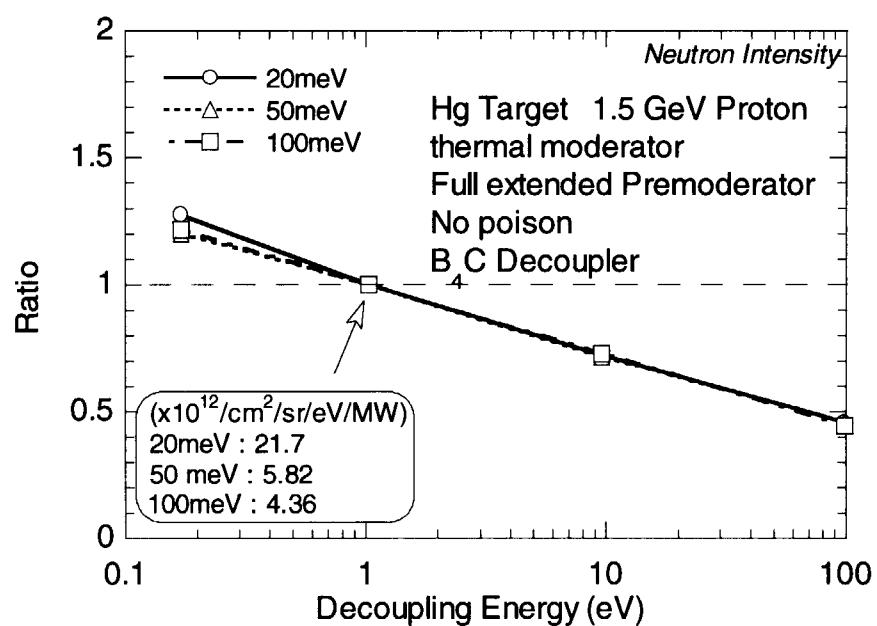


図 26 デカップラーの厚さの違いによる各エネルギーでの中性子強度の
デカップリングエネルギー依存性
各計算値は、図中に示すデカップリングエネルギー1 eV の計算値に規格化して
いる。

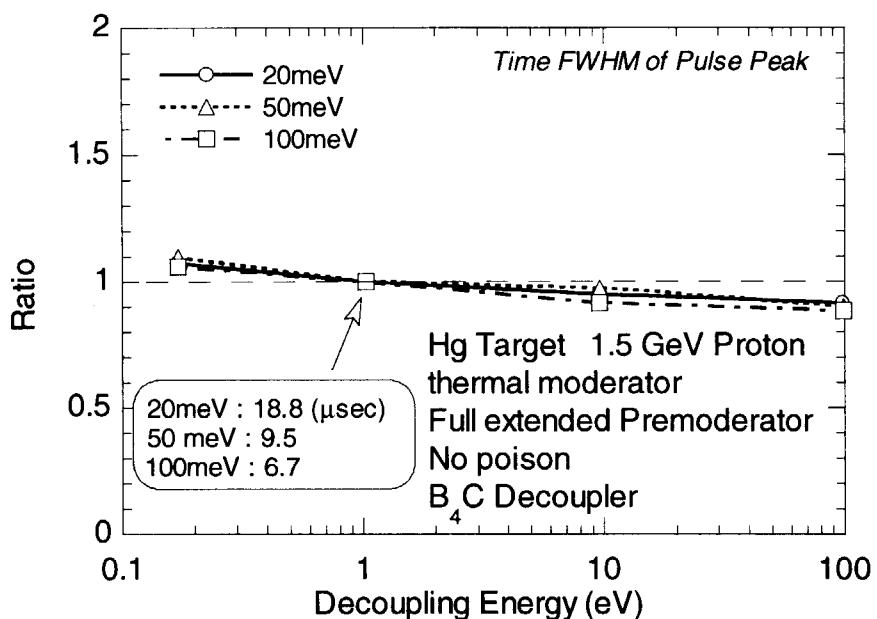


図 27 デカップラーの厚さの違いによる各エネルギーでの中性子パルスの時間 FWHM のデカップリングエネルギー依存性
各計算値は、図中に示すデカップリングエネルギー 1 eV の計算値に規格化している。

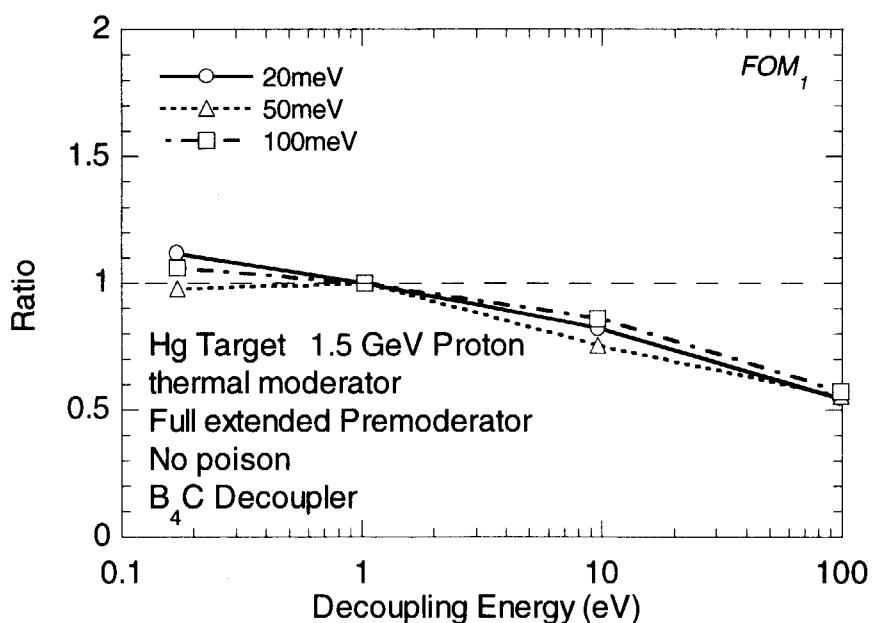


図 28 デカップラーの厚さの違いによる FOM_1 のデカップリングエネルギー依存性
デカップリングエネルギー 1 eV の計算値に規格化している。

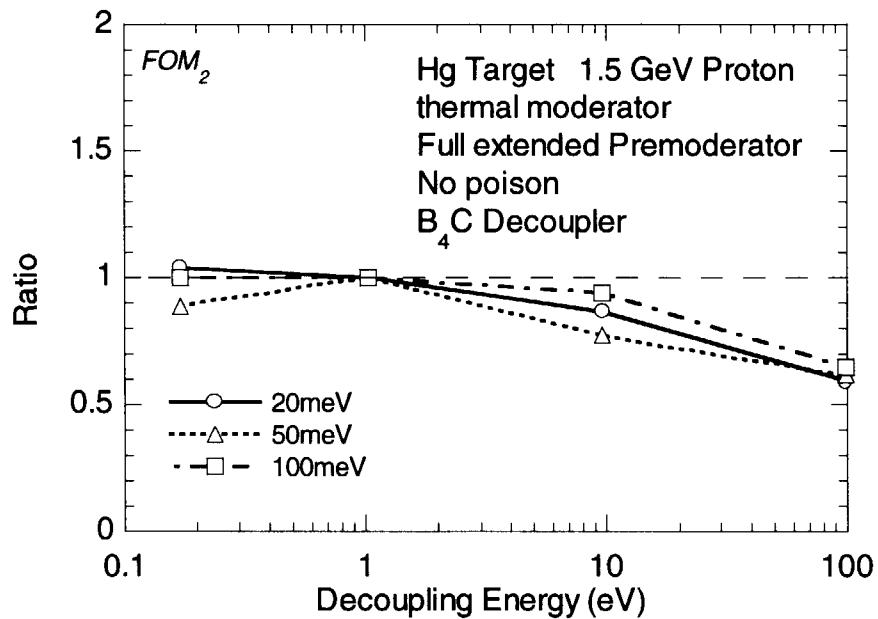


図 29 デカップplerの厚さの違いによる FOM_2 でデカップリングエネルギー依存性
デカップリングエネルギー 1eV の計算値に規格化している。

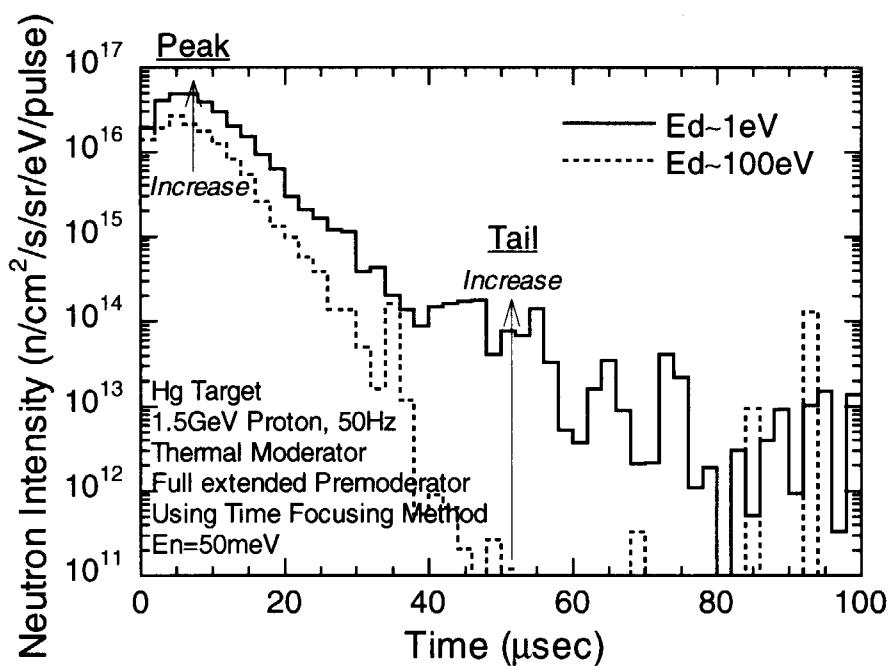


図 30 デカップリングエネルギー 1eV 及び 100eV での中性子パルスの時間構造の違い
中性子エネルギーは、 50 meV である

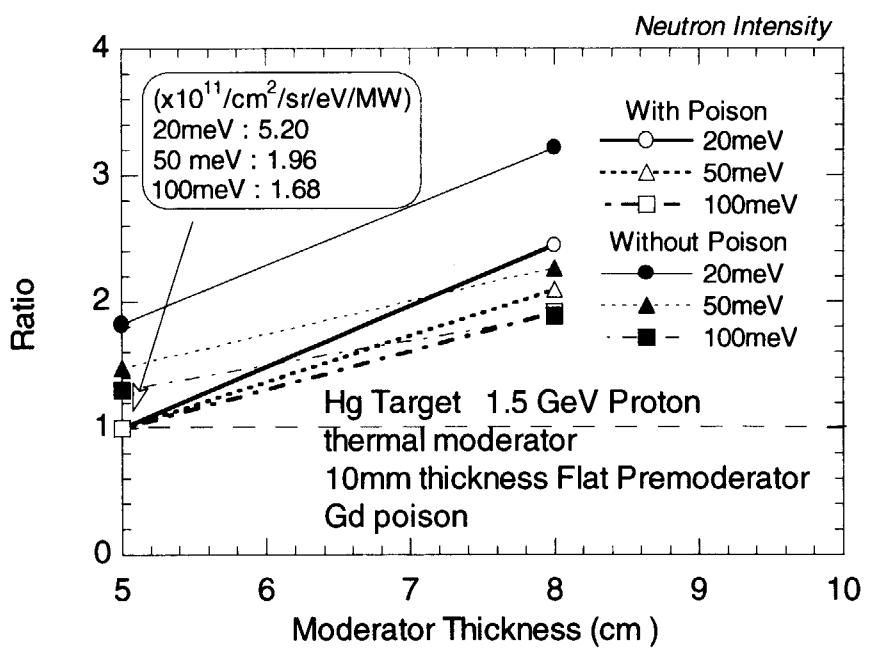


図 31 各エネルギーの中性子強度のモデレータ厚さ依存性

各計算値は、図中に示すモデレータ厚さ 5 cm、ポイズン有りの計算値に規格化している。

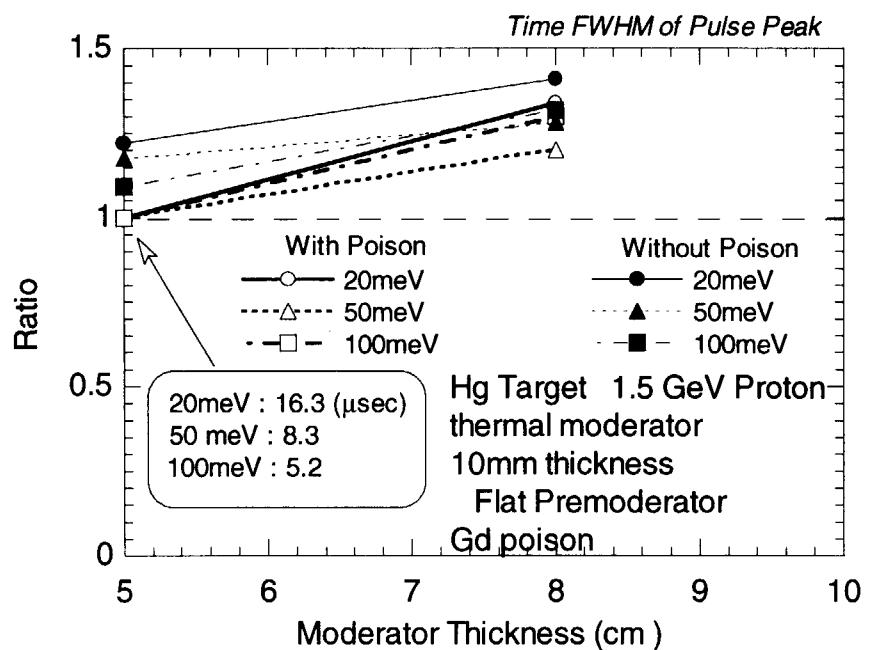


図 32 各エネルギーでのパルス時間 FWHM のモデレータ厚さ依存性

各計算値は、図中に示すモデレータ厚さ 5 cm の計算値に規格化している。

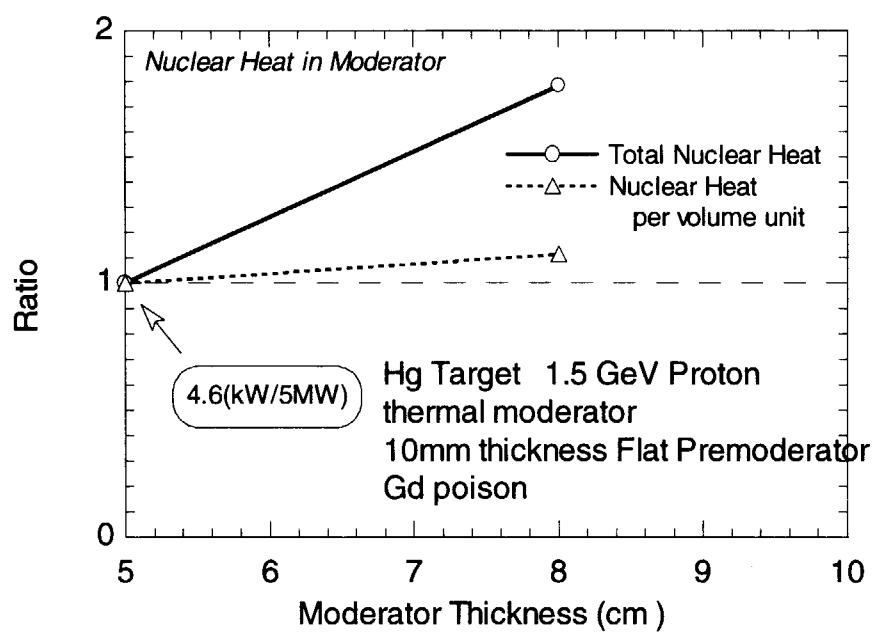


図 33 モデレータ内の全発熱及び単位体積当たりの核発熱のモデレータ厚さ依存性
各計算値は、図中に示すモデレータ厚さ 5 cm の計算値に規格化している。

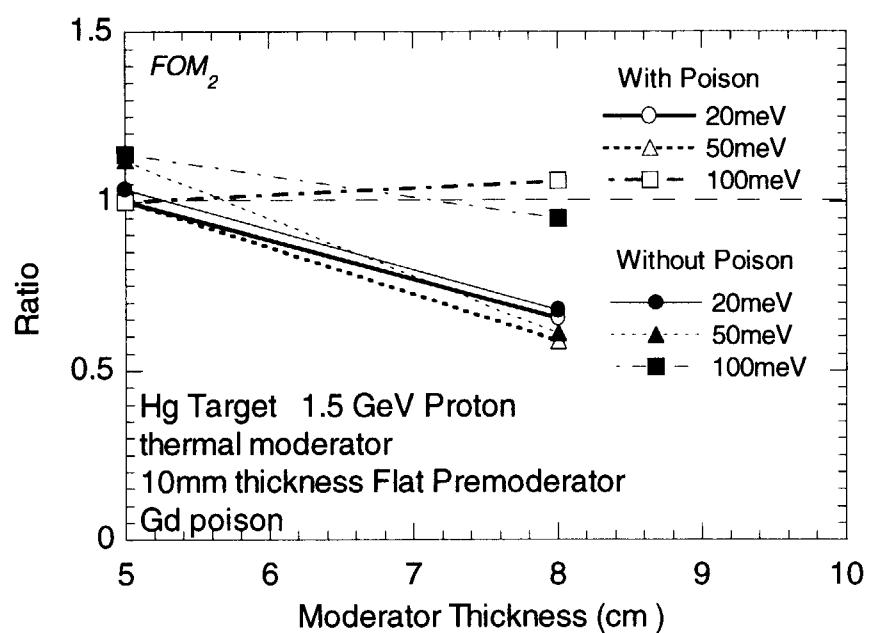
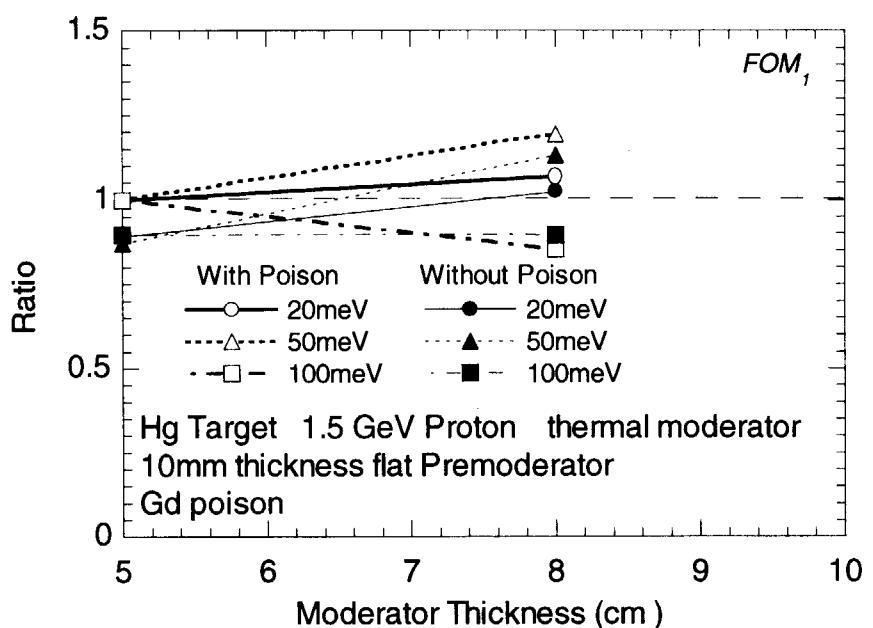


図 34 FOM_1 (上図) 及び FOM_2 (下図) のモデレータ厚さ依存性
モデレータ厚さ 5 cm、ポイズン有りの計算値に規格化している。

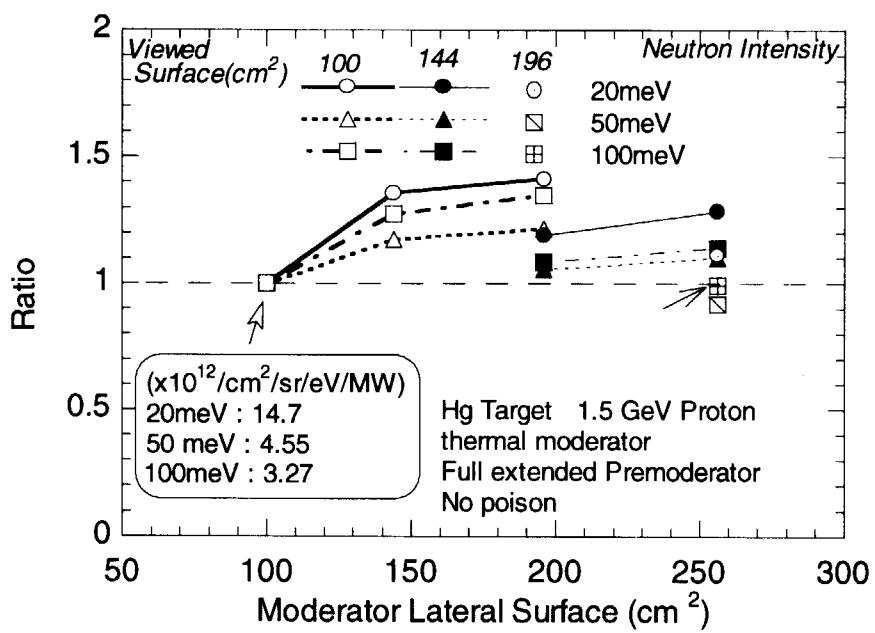


図 35 各エネルギーでの中性子強度のモダレータサイズ及び中性子引出し面サイズ依存性

それぞれ、図中に示すモダレータサイズ $10 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$ 、中性子引き出し面サイズ $10 \times 10 \text{ cm}^2$ の計算値に規格化している。

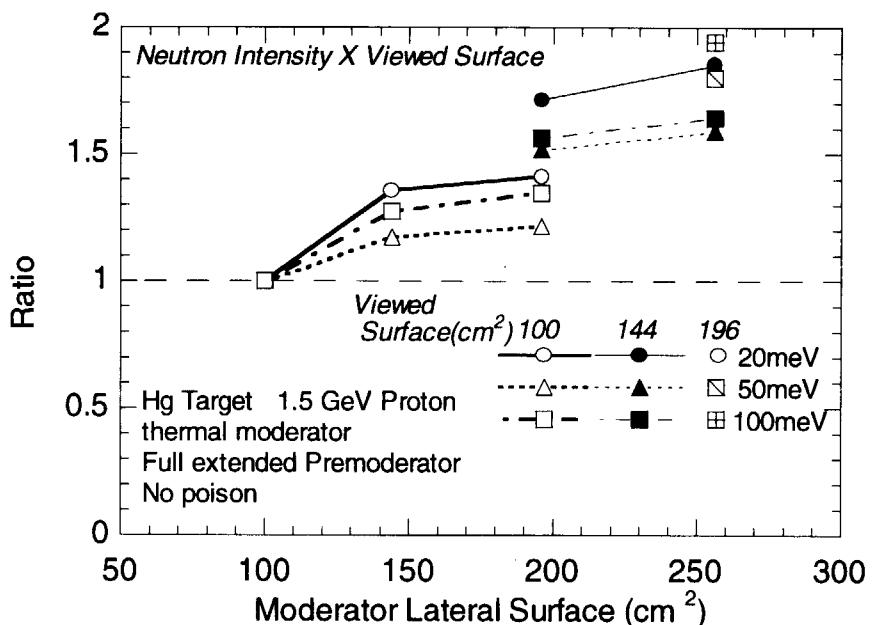


図 36 中性子引き出し面積全体で積分した中性子強度のモダレータサイズ及び中性子引出し面サイズ依存性

それぞれ、図中に示すモダレータサイズ $10 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$ 、中性子引き出し面サイズ $10 \times 10 \text{ cm}^2$ の計算値に規格化している。

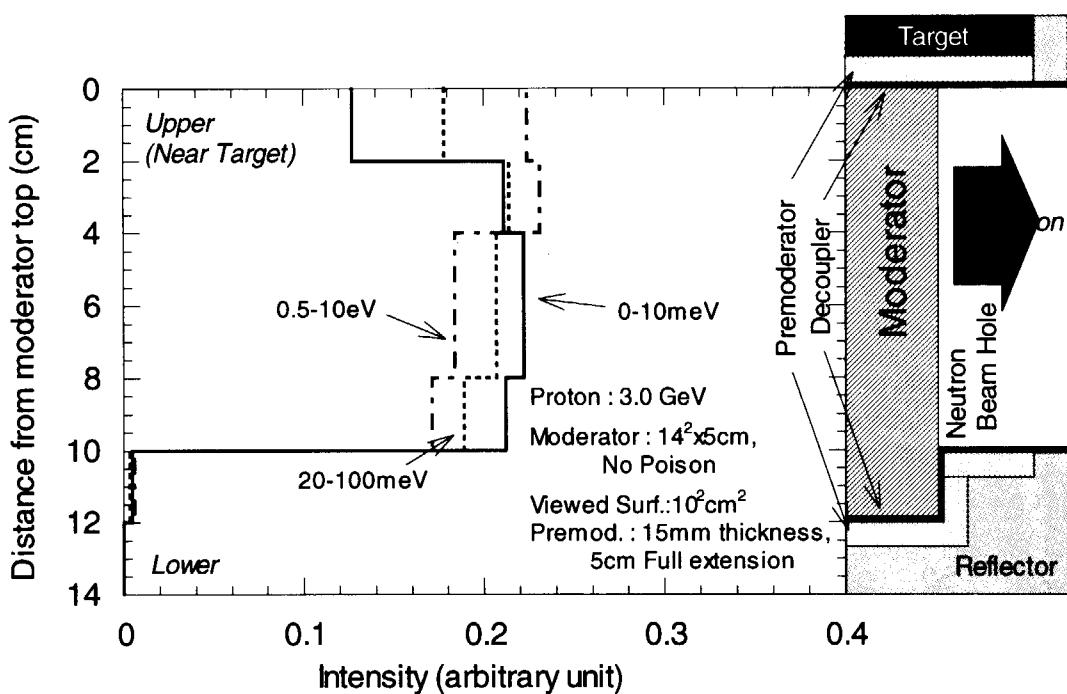


図 37 エネルギー領域別に見た中性子強度の中性子引出し位置依存性
それぞれ、積分強度で規格化している。

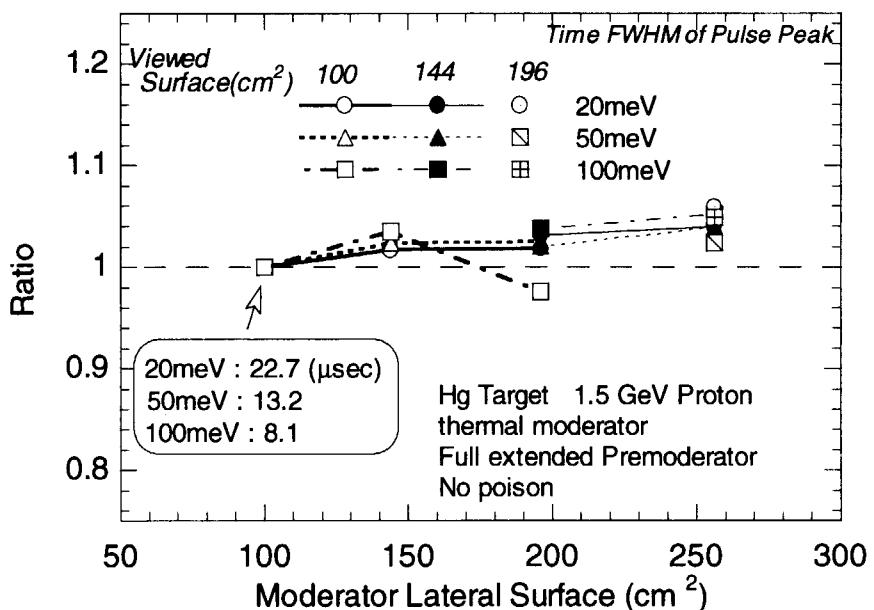


図 38 各エネルギーでのパルスの時間 FWHM のモーデレータサイズ及び中性子引出し面サイズ依存性
それぞれ、図中に示しているモーデレータサイズ $10 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$ 、中性子引き出し面サイズ $10 \times 10 \text{ cm}^2$ の計算値に規格化している。

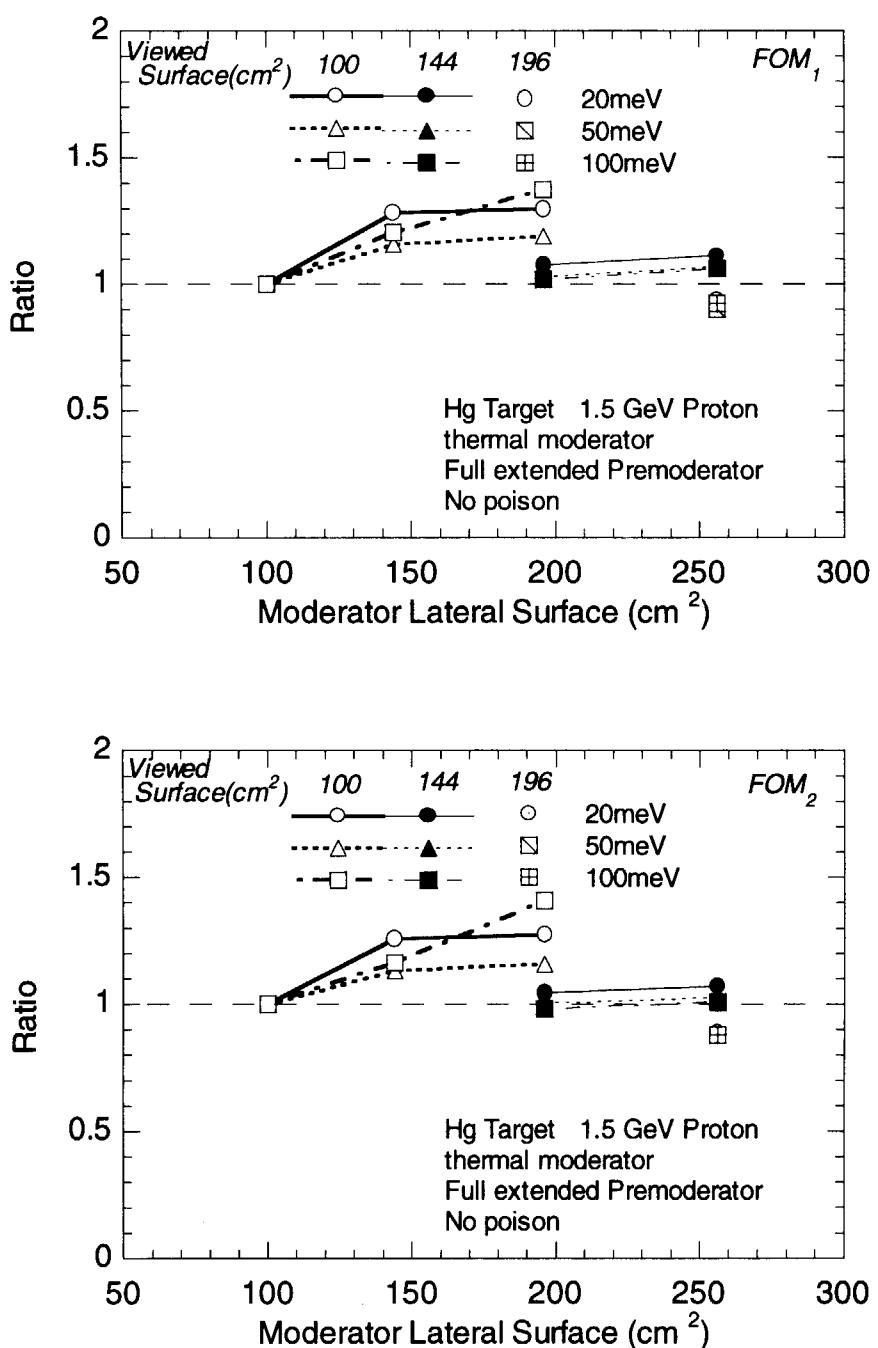


図 39 FOM₁（上図）及び FOM₂（下図）のモデレータサイズ及び中性子引出し面
サイズ依存性
それぞれ、モデレータサイズ $10 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$ 、中性子引き出し面サイズ $10 \times 10 \text{ cm}^2$ の計算値に規格化している。

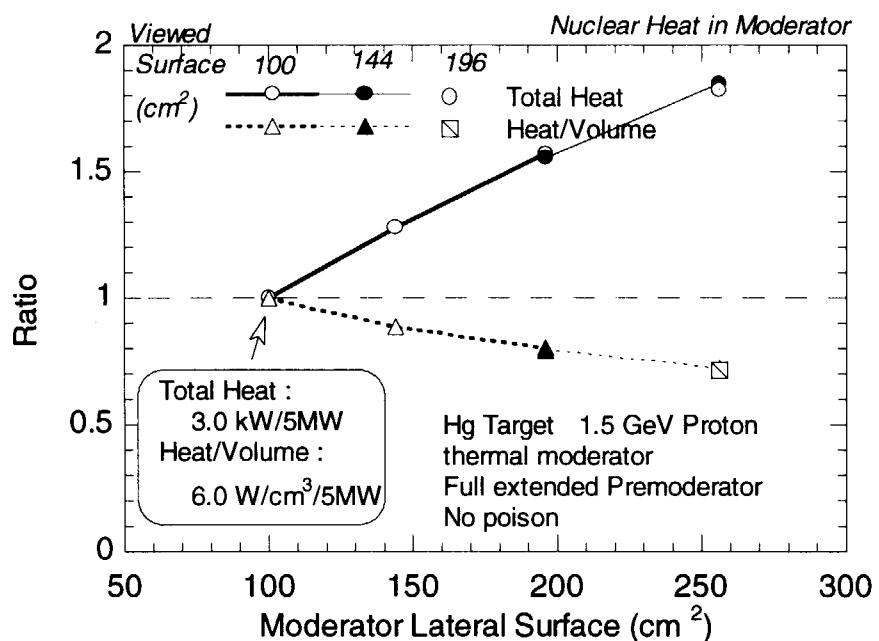


図 40 モデレータ内全発熱及び単位体積当たり発熱のモーデレータサイズ及び中性子引出し面サイズ依存性
 それぞれ、図中に示しているモーデレータサイズ $10 \times 10 \times 5 \text{cm}^3$ 、中性子引出し面サイズ $10 \times 10 \text{cm}^2$ の計算値に規格化している。

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
物質量	モル	mol
光强度	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
功率、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	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	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	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	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
線量等量	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

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-25} \text{ kg}$$

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	d
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、1eVおよび1u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のカテゴリーに分類されている。
- ECC関係理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換 算 表

力	N(=10 ³ dyn)	kgf	lbf	MPa(-10bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
1	0.101972	0.224809	1	1	10.1972	9.86923	7.50062×10 ³	145.038
9.80665	1	2.20462	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233	
4.44822	0.453592	1	0.101325	1	1.03323	760	14.6959	
粘度 1Pa·s(N·s/m ²)=10 P(ボアズ)(g/(cm·s))			1.33322×10 ⁻⁴	1.35951×10 ⁻³	1.31579×10 ⁻³	1	1.93368×10 ⁻²	
動粘度 1m ² /s=10 ¹¹ St(ストークス)(cm ² /s)			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 cal= 4.18605J(計量法)
		1	0.101972	2.77778×10 ⁻⁷	0.238889					
9.80665	1	2.72407×10 ⁻⁶	2.34270	9.29487×10 ⁻³	7.23301	6.12082×10 ¹⁹				= 4.184J(熱化学)
3.6×10 ⁶	3.67098×10 ⁵	1	8.59999×10 ⁵	3412.13	2.65522×10 ⁶	2.24694×10 ²⁵				= 4.1855J(15°C)
4.18605	0.426858	1.16279×10 ⁻⁶	1	3.96759×10 ⁻⁴	3.08747	2.61272×10 ¹⁹				= 4.1868J(国際蒸気表)
1055.06	107.586	2.93072×10 ⁻³	252.042	1	778.172	6.58515×10 ²¹				仕事率 1PS(仏馬力)
1.35582	0.138255	3.76616×10 ⁻⁷	0.323890	1.28506×10 ⁻³	1	8.46233×10 ¹⁸				= 75 kgf·m/s
1.60218×10 ¹⁹	1.63377×10 ²⁰	4.45050×10 ⁻⁶	3.82743×10 ⁻⁹	1.51857×10 ⁻²	1.18171×10 ¹⁹	1				= 735.499W

放射能	Bq	Ci		吸収線量	Gy		rad	照射線量	C/kg		R	Sv	rem
		1	2.70270×10 ⁻⁸		1	100			1	3876			
	3.7×10^{10}	1	0.01	1	2.58×10^{-1}	1							

(86年12月26日現在)

