

JAERI-Research

97-058



放射光ビームラインハッチ床面からの
散乱光子による漏洩線量評価

1997年9月

浅野芳裕

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。
入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 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（〒319-11 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 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1997

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 榊原子力資料サービス

放射光ビームラインハッチ床面からの散乱光子による漏洩線量評価

日本原子力研究所関西研究所大型放射光開発利用研究部

浅野 芳裕

(1997年7月29日受理)

放射光ビームラインハッチコンクリート床からの散乱線(グランドシャイン)による漏洩線量を1回散乱評価コードG33—GP2により評価した。光子エネルギー範囲を30keVから2.5MeVとし、ハッチ内側床面に鉛板を敷設した場合、ハッチ外側床面に鉛板を敷設した場合およびハッチ壁を床に埋設した場合の3ケースについて解析した。また、モンテカルロコードITS3.0コードを用いた計算結果と比較することにより、G33—GP2コードによる計算結果の妥当性を検証した。大型放射光施設スプリング8の典型的なウィグラービームライン、アンジュレータビームライン、偏向電磁石ビームラインについて、グランドシャインによる漏洩線量を評価した。その結果、大型放射光施設のビームラインにおいては、グランドシャインによる漏洩線量は大きくなり、安全対策上重要な検討項目の1つであること、遮蔽処置を施す場合にはハッチ壁外側に鉛板を敷設することが良いことなどが確認できた。

Leakage Dose Distribution Due to Scattered Photon of
Synchrotron Radiation from Concrete Floor of
Beamline Hutch

Yoshihiro ASANO

Department of Synchrotron Radiation Facility Project
Kansai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Kamigori-cho, Ako-gun, Hyogo-ken

(Received July 29, 1997)

The leakage doses due to scattered photon from the concrete floor of the synchrotron radiation beamline hutch, so called ground shine, have been calculated by using a general purpose gamma-ray scattering code G33-GP2 for it ranging from 30 keV to 2.5 MeV. Calculations were performed for three geometries, the geometries with lead bands equipped along the foot of the inside and outside the hutch wall, and that with the bottom part of hutch wall buried in the concrete floor. Validity of the calculation was verified by comparing its calculation with those using a Monte Carlo code ITS3.0. The total leakage dose outside the hutch has been estimated for the case of the typical wiggler, undulator and bending-magnet beamlines of SPring-8, showing that the dose due to ground shine is found to be a serious issue for the 8 GeV class synchrotron radiation beamline and that the lead band set along the foot of the outside hutch is found to be the most beneficial for shielding the ground shine.

Keywords: Synchrotron Radiation, Beamline, Ground Shine, G33-GP2, ITS3.0, SPring-8, Shielded, Leakage Dose

目 次

1. 緒 言	1
2. 計 算	2
2.1 放射光ビームラインハッチの構成	2
2.2 計算モデル	2
3. 結果および検討	4
3.1 グランドシャイン線量の光子エネルギー依存性	4
3.2 グランドシャイン線量の線源位置依存性	5
3.3 ITS3.0とG33—GP2との比較	5
4. SPring—8ビームラインのグランドシャイン線量	7
4.1 偏向電磁石ビームラインにおけるグランドシャイン線量	7
4.2 ウィグラービームラインにおけるグランドシャイン線量	7
4.3 アンジュレータビームラインにおけるグランドシャイン線量	8
5. 結 論	9
謝 辞	9
参考文献	10
付録1 G33—GP2コードの入力データ	76
付録2 空気の吸収線量換算係数	78

Contents

1. Introduction	1
2. Calculation	2
2.1 Synchrotron Radiation Beamline Hutch.....	2
2.2 Model Calculation	2
3. Results and Discussion	4
3.1 Leakage Dose Dependence on Photon Energy	4
3.2 Leakage Dose Dependence on Source Position	5
3.3 Comparison G33-GP2 with ITS3.0 Calculation	5
4. Leakage Dose Due to Ground Shine for SPring-8 Beamline.....	7
4.1 Bending Magnet Beamline	7
4.2 Wiggler Beamline.....	7
4.3 Undulator Beamline	8
5. Conclusion	9
Acknowledgement	9
References	10
Appendix 1 Input Data of G33-GP2	76
Appendix 2 Conversion Factor of Air Absorbed Dose	78

1. 緒言

放射光は、それ自体強い指向性を持つ大強度の放射線であり、とりわけESRF⁽¹⁾やAPS⁽²⁾、SPRING-8⁽³⁾のような第3世代放射光施設では、従来の施設より蓄積電子エネルギーが格段に高く、かつて無かった程の大強度、高エネルギーの放射光ビームを得ることができる。そのため、ビームラインの安全設計には細心の注意を払わなければならない。

ビームラインの安全確保のためには、誤って放射光ビームを身体に受けることの無いようにインターロックシステムを構築することのほかに、ビームライン周辺の放射線レベルを上昇させることによる無用な被曝をしないように遮蔽設計することが必要である⁽⁴⁾。放射光ビームラインは、上記2つの目的を遂行するために、通常光学素子等を格納する光学ハッチおよび実験装置を格納する実験ハッチが設置される。これらのハッチは空間的な制約などから主に鉛壁が用いられ、コンクリート床等の散乱面に対して遮蔽壁が相対的に薄くなり、床からの散乱線がハッチの外に漏洩し易い構造となる。

第3世代放射光施設では蓄積電子エネルギーが高くなったこと、挿入装置光源を数多く導入したことなどにより、ビームライン安全設計上、今迄あまり問題としなかったビームラインハッチ床面からの散乱放射線（以下、グランドシャインと呼ぶ）を効率良く遮蔽することが、ハッチのケーブルダクト等からのストリーミング対策同様、重要な問題の1つとして注目されている⁽⁵⁾。

従来、放射線の1回散乱を取り扱う問題として、原子炉等ではスカイシャイン問題が数多く取り扱われてきた⁽⁶⁾。しかし、放射光ビームラインのグランドシャイン問題を系統的に取り扱った文献は、非常に少ない。そこで、一回散乱点減衰核法計算コードG33-GP2⁽⁷⁾を用いて、グランドシャイン計算のハッチ構造依存性を調べた。また、代表的な例について、モンテカルロ輸送計算コードITS3.0⁽⁸⁾を用いて同様の計算を行い、G33-GP2計算結果の妥当性について検証した。さらに、SPRING-8の代表的なビームラインについて、グランドシャインの評価を行った。

2 計算

2.1 放射光ビームラインハッチの構成

安全に係わる放射光ビームラインの機器概念図を図2-1に示す。図には主ビーム1系統のみの場合を示した。ここで、偏向電磁石や挿入装置より取り出された放射光ビームは、ビームスペクトルを整形するフィルター、ビームの拡がりを防ぐコリメータ、およびビームを遮断する放射光ビームラインシャッター等の機器間を通過後、蓄積リング遮蔽壁外側に導かれる。遮蔽壁外側に導出された放射光ビームは分光器（モノクロメータ）により分光された後、実験ハッチに導かれ実験装置に導入される。このとき、実験ハッチ手前に放射光ビームを遮断する下流シャッターと実験中に実験ハッチ後方の線量率が上昇するのを防ぐエンドストップが設置される。また、放射光ビームに混入してくる高エネルギーガンマ線（蓄積リング内残留ガスと蓄積電子との相互作用によって発生する制動放射線）等がビームライン後方に拡がるのを防ぐガンマストップが設置される。モノクロメータやガンマストップ、下流シャッターは光学ハッチの中に設置される。放射光ビームは光学ハッチ内に設置されている分光器（モノクロメータ）等に導入されるので、一般に直接ハッチ壁に当たることはなく、ハッチの遮蔽構造の決定には放射光ビームの散乱放射線のみを考慮する。

放射光ビームラインハッチは、蓄積リング建屋の実験ホールに、リングの接線方向にバルク遮蔽壁から取り出された放射光ビームを囲む形で構築される。Spring-8の場合、直径400mの円周の接線方向に61本のビームラインが敷設され、ビーム間の距離は遮蔽壁出口の位置で3m以下である。このように、ハッチを設置するための空間は通常非常に狭くなり、実験空間を広くするためにもできるだけハッチ壁を薄くする必要がある。そこでハッチ壁はX線、ガンマ線に対して十分な遮蔽能力を持った鉛材が主として用いられる。この場合、床材はコンクリートが普通であるから、図2-2に示すように、ハッチ鉛壁を床に垂直に置くだけの構造では、床で散乱された光子はハッチの外側に漏洩する確率が大きくなる。この散乱光子を遮蔽するため、(1)ハッチ内側の床面に鉛板を敷設する、(2)ハッチ外側の床面に鉛板を敷設する、(3)ハッチ鉛壁をコンクリート床面に埋め込む、あるいはこれらの組み合わせなどの工夫をする必要がある。これらのどの方法を採用するかは、ビームラインの構造、レイアウトに依存する。また、いずれの方法にしても、どの程度の厚さの鉛板を、どれくらいの幅で敷設したら適切に遮蔽できるか、あるいは、どの程度ハッチ壁を埋め込むことによって適切に遮蔽できるのか問題となる。そこでこれら3つのハッチ構造について、グランドシャインの評価計算を行った。

2.2 計算モデル

計算モデルの概念図を、(1)ハッチ内壁床面に鉛板を敷設した体系、(2)ハッチ外

壁床面に鉛板を敷設した体系 (3) ハッチ壁下部を床に埋設した体系 に対して各々図 2-3 (1)、(2)、(3) に示す。ここで、線源となる放射光の散乱点の位置は、通常の放射光ビームと散乱体である光学素子等の位置を考慮して、コンクリート床から、高さ 1 m、ハッチ壁から 2 m の距離を基準として、高さ 0.5 ~ 1.5 m、ハッチ壁からの距離を 0.5 ~ 2 m の位置の範囲について計算した。光学素子などの散乱体で散乱された角度依存散乱線 (*) を STAC8⁽⁹⁾ で計算し、その散乱線を等方放射線源に変換して放射線源とした。散乱体であるコンクリート床は厚さ 50 cm、線源を中心にして縦幅 5 m とした。横幅はハッチ内側を 2 m とし、ハッチ外側を 50 cm まで考慮した。また、空気層は 2 m とした。散乱光子のエネルギーは 30 keV から 2.5 GeV まで 20 点を計算した。計算に用いたエネルギー点を表 2-1 に示す。計算に用いたコンクリート組成を表 2-2⁽⁶⁾ に示す。評価対象は空気吸収線量とした。G33-GP2 コードの入力例および G33-GP2 コードの出力から空気吸収線量を算定する換算係数を各々付録 2-1、付録 2-2 に示す。G33-GP2 コード計算に用いた再生係数の物質には、直接線による線量に対して鉛、床散乱による線量計算にはコンクリートを用いた。

G33-GP2 コードによる計算の検証のため、ITS3.0 の ACCEPTP コードを用い、モンテカルロ計算を実施した。用いた計算モデルを図 2-4 に示す。ここではモンテカルロ計算の統計精度を上げるため、円筒モデルを用いた。

(*) モノクロメーターなどの光学素子には通常シリコンが用いられるが、ここでは銅 1 cmφ x 1 cm 厚を散乱体として仮定している。

3. 結果および検討

3.1 グランドシャイン線量の光子エネルギー依存性

ハッチにグランドシャイン対策を施さない場合の、ハッチ壁外床面での線量率エネルギー依存性の計算結果を図3-1(1)、(2)に示す。ここで、線源は1秒間あたりに1個の光子を等方放射するものとして、縦軸に1時間あたりの空気吸収線量を表し、横軸にハッチ壁からの距離を表した。表中に示されている数字は線源の光子エネルギーである。同様に図3-2(1)~(14)にハッチ内側に鉛板を敷設したときのハッチ外側床面での線量率(Model(1))を光子エネルギー毎に示す。ここでTは鉛板の厚さを示す。図3-3(1)~(14)に、ハッチ外側に鉛板を敷設したときのハッチ外側床面での線量率(Model(2))を光子エネルギー毎に示す。ここでTは鉛板の厚さを示す。図3-4(1)~(14)に、ハッチ壁を埋設したときのハッチ外側床面での線量率(Model(3))を光子エネルギー毎に示す。ここでDはハッチ壁埋設深さを示す。図で、ハッチ壁距離が10cm付近および40cmを越える付近に於て計算結果に揺らぎが示されている。これは、散乱線を計算するうえで飛跡効果(レイ.エフェクト)が現われているものである。

ハッチにグランドシャイン対策を施さないときと、ハッチ内側に鉛板を敷設(Model(1))したときとの比較では、遮蔽を施すことにより漏洩線量率が減少するだけでなく、次の特長を示した。①光子エネルギー70keVから100keVにかけて、漏洩線量率の減衰傾向はハッチ床面での距離に対して異なっている。また、70keV光子による漏洩線量率は100keVによる漏洩線量率よりも大きい。この原因として、線源から放射された光子が床に敷設された鉛のK吸収端の影響を強く受けるためと考えられる。②敷設鉛の厚さが10mmになると、光子エネルギーが高いときには、壁外床面での線量は壁からの距離に依存しなくなる。また、ハッチ壁から40cm程度離れた位置では、敷設鉛厚さに依存しなくなり、一定値を示した。これは、ハッチ壁外側近傍における漏洩線量は、散乱後の光子の床コンクリートによる減衰よりも敷設された鉛の遮蔽効果が大きい。一方、ハッチ壁からの距離が遠く、距離が40cm程度になると、鉛の遮蔽効果よりも散乱後の光子の床コンクリートによる減衰が支配的となるためと考えられる。

ハッチ外側に鉛板を敷設(Model(2))した場合には次の特長を示した。

①Model(1)においては、漏洩線量率の減衰逆転傾向の変化が70keVから100keVで発生したのに対して、100keVから130keVで減衰逆転傾向の変化が現われた。これは、線源からの光子が100-130keVのときに、コンクリート床で散乱されることによってエネルギーが減少するに伴い、ハッチ壁外側に敷設された鉛を透過する際の光子エネルギーが鉛のK吸収端のエネルギー(88keV)を下回ることになると考えられる。②壁外床面での線量の減衰が壁からの距離に依存して顕著である。

ハッチ壁を床に埋設(Model(3))したときには次の特長を示した。

①ハッチ壁近傍では線量を下げることができるが、ハッチ壁から数cm離れた位置で極大値となる線量が現われる。②低エネルギー光子に対しては効果はあるが、高エネルギー光子に対してはグランドシャイン線量の減少は少ない。

3.2 グランドシャイン線量の線源位置依存性

放射線源の位置によるグランドシャイン線量の依存性を調べるために、線源の位置を床から0.5～1.5mの高さの範囲、ハッチ壁から0.5～2mの距離の範囲で変化させてハッチ壁外側床面の漏洩線量率を計算した。この場合、Model (1) および Model (2) では敷設鉛の厚さを3mmとした。Model (3) ではハッチ壁埋設深さを5cmおよび10cmの2ケースとした。その結果を図3-5 (1)～(10)に示す。図より主な特長として以下のことが示された。

- ①鉛敷設および壁埋設をしない場合 (FLAT) には、図3-5 (1) 及び (2) に示されているように、線源の位置による依存性は顕著には現われない。また、その中でも1.0～0.15 MeVの光子エネルギー範囲では、線源を低い位置に設定したときの方が漏洩線量が高いことや、ハッチ壁に近い位置に線源を設置したときの方が漏洩線量が低く、B=1.5m付近で極大となり、2mでまた線量が下がる傾向が認められる。
- ②Model (1) の場合、図3-5 (3) 及び (4) に示されているように、床からの高さが0.5mの位置に線源を設置したとき、ほとんどハッチ壁からの距離に漏洩線量は依存しない。低エネルギー光子では床からの位置が高い程、漏洩線量は多くなる。一方、1MeV付近では逆に0.5mの高さの方が漏洩線量は多い。ハッチ壁からの距離に関しては、低エネルギー光子ではハッチ壁に近い程、漏洩線量が多くなり、一方、高エネルギー光子になるに伴い、その影響は顕著でなくなる傾向がみられる。
- ③Model (2) の場合、図3-5 (5) 及び (6) に示されるように、床からの高さが低い程、漏洩線量は多くなる。一方、高エネルギー光子に成る程、この傾向は小さくなる。ハッチ壁からの距離に関しては、距離が遠くなる程、漏洩線量は多くなり、この傾向は光子エネルギーが高く成る程小さくなる。
- ④Model (3) の場合、図3-5 (7) 及び (8) に示されるように、ハッチ壁を5cm埋設した場合には光子エネルギーが低いと、線源の位置が床から高い程、漏洩線量は多くなり、光子エネルギーが200keV～300KeVでこの傾向は逆転する。図3-5 (9) 及び (10) に示されているように、ハッチ壁を10cm埋設した場合には、光子エネルギーが150keVでこの傾向が逆転する。ハッチ壁からの距離の影響では、線源がハッチ壁から近い程、漏洩線量が多く、光子エネルギーが200～300keV以上ではその傾向は逆転し、距離の影響は顕著で無くなる。

3.3 ITS3.0 と G33-GP2との比較

図3-6 (1)～(4)に円筒平板モデル (Model (4)) でのG33-GP2計算結果およびITS3.0での計算結果を示す。図3-6 (1) にはG33-GP2で得られたハッチ壁外側床面でのグランドシャインによる漏洩線量率を示した。

図3-1 (1) の平板モデルと図3-6 (1) の円筒平板モデルでの比較では、その差はほとんど見受けられない。ただし、ハッチ壁外側近傍の漏洩線量は円筒平板モデルの方が低い。この理由は、床での光子散乱点から評価点までの到達距離がハッチ壁近傍において円筒平板モデルで

は遠くなり、線源と評価点の線上の外側からの回り込みによる漏洩線量が小さくなるためと考えられる。ハッチ壁を透過して来る直接線による漏洩線量を図3-6(2)に、グランドシャインによる漏洩線量と直接線による漏洩線量の和を図3-6(4)に示す。ただし直接線による漏洩線量はG33-GP2コードで得られる最大漏洩線量を示した。図3-6(2)に示されているように、直接線によるハッチ壁外側床面での漏洩線量はハッチからの距離にほとんど依存しなくて一定か、若干増加傾向が認められる。

G33-GP2とITS3.0計算結果との比較を図3-6(4)に示した。ITS3.0との比較では、図に示されているようにハッチ壁近傍では、良く合っている。高エネルギー光子では、G33-GP2の計算結果が高くなっている。この理由は、直接線による漏洩線量をG33-GP2では最大漏洩線量で示してあり、過大評価しているためである。また、光子エネルギーが0.25MeV以下では、ハッチ壁から遠方ではITS3.0の計算結果が高くなっている。この原因として、光子のエネルギーが低いとハッチ壁遠方では一回散乱および直接線による漏洩線量が少なくなり、相対的に、空気およびコンクリート床での多重散乱による線量が大きくなったためと考えられる。

4. S P r i n g - 8 ビームラインのグランドシャイン線量

現在、建設整備が進められている第3世代大型放射光施設 S P r i n g - 8 では、全部で38本の挿入装置光源ビームラインと23本の偏向電磁石ビームラインが設置中および設置可能である。これらは光源の種類によって、偏向電磁石、ウィグラー及びアンジュレータの3種に大別される。1997年現在、建設されている典型的なこれら3種の光源定数を表4-1に示す。また、そのときの放射光光源スペクトルを図4-1に示す。光源からビーム状に放射された光子はモノクロメータなどの光学素子によって散乱され、ハッチ内全域に放射される。図4-2に散乱された放射光のスペクトルを各光源毎に示す。この時の散乱角度はビーム進行方向に対して50度及び90度である。ただし、光子数は散乱点から2mの距離にハッチ壁が存在するものとして、ハッチ壁側面の位置での光子フラックスである。この散乱スペクトルを用いてG33-GP2およびITS3.0により、各ビームラインでのグランドシャイン線量を評価すると共に、漏洩線量を基準値以下(*)にするためには各Model(1)～(3)でどの程度の対策が必要かを計算した。その結果、3種の光源ビームライン全てにおいて、グランドシャイン対策を施さなければならないこと等が明かとなった。以下に各光源毎のビームラインに対するグランドシャイン計算結果を示す。

4.1 偏向電磁石ビームラインにおけるグランドシャイン線量

図4-3～図4-14に偏向電磁石ビームラインにおける、局所遮蔽等が無い場合での、通常必要となるハッチ遮蔽壁の厚さ、鉛1cm+鉄1cmを想定した各Modelでのグランドシャイン線量計算結果を示した。図には、線源と同じ高さHで、ハッチ壁外側での線量を●で示した。同様に、評価点での直接線による最大漏洩線量を破線で示した。ここで図4-9～図4-14にはハッチ内側に鉛を敷設する場合(Model(1))での鉛敷設幅を変化させたときのグランドシャイン線量を示した。また、各図には比較のために、線源と同じ高さでのハッチ壁外の漏洩線量と評価点での直接線による最大線量を示す。

図4-3、図4-4に示されている様に、鉛の敷設が無い場合においてITS3.0コードによる結果とG33-GP2による計算結果はハッチ壁近傍で良く合っていることが確認された。また、グランドシャイン対策のための必要鉛敷設厚さは設計基準目標値を $0.07 \mu\text{Sv/h/mA}$ とすると、局所遮蔽等が無い場合、Model(1)で $T=4\text{mm}$ (鉛)、幅は約 $L=30\text{cm}$ 必要である。Model(2)では同様に $T=3\text{mm}$ (鉛)、幅 $L=25\text{cm}$ 必要である。Model(3)に於ては $D=7\text{cm}$ のハッチ壁埋設が必要であることが示された。

4.2 ウィグラービームラインにおけるグランドシャイン線量

図4-15～図4-38にウィグラービームラインにおける各モデルでのグランドシャイン線量計算結果を示す。図には、偏向電磁石ビームラインの場合と同様に、線源と同じ高さHの、ハッチ壁外側での線量を●で示した。同様に、評価点での直接線による最大漏洩線量を破線で示した。ここで図4-21～図4-26にはハッチ内側に鉛を敷設する場合(Model(1))での鉛敷設幅を変化させたときのグランドシャイン線量を示した。図4-27～図4-38には、

ウィグラービームラインで局所遮蔽等が無い場合、通常必要となるハッチ遮蔽壁の厚さ、鉛3 cm+鉄1 cmを想定した各Modelでのグラウンドシャイン線量計算結果を示した。また、偏向電磁石ビームラインの場合と同様に、各図には比較のために線源と同じ高さでのハッチ壁外の漏洩線量と評価点での直接線による最大線量を示す。

図4-15、図4-16に示されている様に、鉛の敷設が無い場合においてITS3.0コードによる結果とG33-GP2による計算結果はハッチ壁近傍では、良く合っていることが確認された。また、グラウンドシャイン対策のための必要鉛敷設厚さは設計基準目標値を $0.07 \mu\text{Sv/h/mA}$ とすると、ハッチ壁鉛厚さ3 cmでは、Model (1) で $T=10\text{mm}$ (鉛) 以上、幅は約 $L=30\text{cm}$ 以上必要である。Model (2) では同様に $T=10\text{mm}$ (鉛)、幅 $L=40\text{cm}$ 以上必要である。Model (3) に於ては $D=10\text{cm}$ 以上のハッチ壁埋設が必要であることが示された。

4.3 アンジュレータビームラインにおけるグラウンドシャイン線量

図4-39～図4-62にアンジュレータビームラインにおける各モデルでのグラウンドシャイン線量計算結果を示す。図には、他の2つのビームラインと同様に、線源と同じ高さHの、ハッチ壁外側での線量を●で示した。同様に、評価点での直接線による最大漏洩線量を破線で示した。ここで図4-45～図4-50にはハッチ内側に鉛を敷設する場合 (Model (1)) での鉛敷設幅を変化させたときのグラウンドシャイン線量を示した。図4-51～図4-62には、アンジュレータビームラインで局所遮蔽等が無い場合、通常必要となるハッチ遮蔽壁の厚さ、鉛2 cm+鉄1 cmを想定した各Modelでのグラウンドシャイン線量計算結果を示した。また、偏向電磁石ビームラインの場合と同様に、各図には比較のために線源と同じ高さでのハッチ壁外の漏洩線量と評価点での直接線による最大線量を示す。

図に示された結果より、グラウンドシャイン対策のための必要鉛敷設厚さは設計基準目標値を $0.06 \mu\text{Sv/h/mA}$ とすると、ハッチ壁鉛厚さ2 cmでは、Model (1) で $T=10\text{mm}$ (鉛)、幅は約 $L=30\text{cm}$ 必要である。Model (2) では同様に $T=7\text{mm}$ (鉛)、幅 $L=40\text{cm}$ 必要である。Model (3) に於ては $D=10\text{cm}$ のハッチ壁埋設が必要であることが示された。

(*) SPring-8での設計目標値 管理区域内作業場所で 最大 $7 \mu\text{Sv/h}$

5. 結論

大型放射光施設のビームライン遮蔽安全評価を行う場合、重要な問題の1つと考えられるハッチ床からのグランドシャインによる漏洩線量を3つのモデルについてG33-GP2コードを用いて解析評価した。その結果、以下のことが明かとなった。

(1) ハッチ内側に鉛を敷設 (Model (1)) するときには、低エネルギー光子に対しては大きな遮蔽効果が期待出来るが、高エネルギー光子ではそれ程期待出来ない。特にハッチ壁から距離が離れるとほとんどグランドシャインによる漏洩線量は減少しない。

(2) ハッチ外側に鉛を敷設 (Model (2)) するときは、内側に敷設 (Model (1)) に対してその遮蔽効果は大きく、特に高エネルギー光子に対しても、コンクリート床散乱後の光子エネルギーが減少した後に鉛遮蔽されることになるので、その遮蔽効果は大きい。

(3) ハッチ壁埋設 (Model (3)) の場合には、ハッチ内側に敷設 (Model (1)) の場合と同様に、低エネルギー光子に対しては遮蔽効果は期待できるが、高エネルギー光子に対してはそれほど期待出来ない。また、ハッチ壁外で漏洩線量分布に極大値が現われる特長を有す。

(4) 光源の種類にかかわらず、大きな漏洩線量率になることが示されているように、Spring-8のような大型放射光施設では、グランドシャインによる漏洩線量対策は重要な遮蔽項目の1つである。

(5) グランドシャイン遮蔽を施す場合、遮蔽安全上からはハッチ外側に鉛バンドを敷設する場合の方が、ハッチ内側に鉛バンド敷設およびハッチ壁埋設よりも効果が大きい。

謝辞

本報告をまとめるにあたり、貴重な意見をいただいた笹本宣雄博士をはじめ大型放射光開発利用研究部員およびSpring-8関係者に深く感謝します。

5. 結論

大型放射光施設のビームライン遮蔽安全評価を行う場合、重要な問題の1つと考えられるハッチ床からのグランドシャインによる漏洩線量を3つのモデルについてG33-GP2コードを用いて解析評価した。その結果、以下のことが明かとなった。

(1) ハッチ内側に鉛を敷設 (Model (1)) するときには、低エネルギー光子に対しては大きな遮蔽効果が期待出来るが、高エネルギー光子ではそれ程期待出来ない。特にハッチ壁から距離が離れるとほとんどグランドシャインによる漏洩線量は減少しない。

(2) ハッチ外側に鉛を敷設 (Model (2)) するときは、内側に敷設 (Model (1)) に対してその遮蔽効果は大きく、特に高エネルギー光子に対しても、コンクリート床散乱後の光子エネルギーが減少した後に鉛遮蔽されることになるので、その遮蔽効果は大きい。

(3) ハッチ壁埋設 (Model (3)) の場合には、ハッチ内側に敷設 (Model (1)) の場合と同様に、低エネルギー光子に対しては遮蔽効果は期待できるが、高エネルギー光子に対してはそれほど期待出来ない。また、ハッチ壁外で漏洩線量分布に極大値が現われる特長を有す。

(4) 光源の種類にかかわらず、大きな漏洩線量率になることが示されているように、Spring-8のような大型放射光施設では、グランドシャインによる漏洩線量対策は重要な遮蔽項目の1つである。

(5) グランドシャイン遮蔽を施す場合、遮蔽安全上からはハッチ外側に鉛バンドを敷設する場合の方が、ハッチ内側に鉛バンド敷設およびハッチ壁埋設よりも効果が大きい。

謝辞

本報告をまとめるにあたり、貴重な意見をいただいた笹本宣雄博士をはじめ大型放射光開発利用研究部員およびSpring-8関係者に深く感謝します。

参考文献

- (1) European Synchrotron Radiation Facility; "The Red Book Draft B", Grenoble France (1987)
- (2) Argonne National Lab.; "7GeV Advanced Photon Source Conceptual Design Report", ANL87-15 Argonne USA (1987)
- (3) JAERI-RIKEN SPring-8 Project Team; "SPring-8 Project Part 1 Facility Design", Hyogo Japan (1991)
- (4) Y.Asano; " Safety Design of Synchrotron Radiation Beamline", SR Science and Technology Information Vol.6 No.3 (1996) (in Japanese)
- (5) Y.Asano and N.Sasamoto; "Shielding Design Calculation for SPring-8 Insertion Device Beamline", Proceedings of 1996 Int. Cong. on Radiation Protection Vol.4 p.4-582 Vienna Austria
- (6) " Hand Book of Gamma-ray Shielding ", Atomic Energy Society of Japan Tokyo Japan (1988) (in Japanese)
- (7) Y.Sakamoto and S.Tanaka;"QAD-CGGP2 and G33-GP2: Revised Version of QAD-CGGP and G33-GP" JAERI-M90-110 Japan Atomic Energy Research Institute (1990)
- (8) J.A.Halbleib et.al.," ITS Version 3.0: The Integrated Tiger Series of Coupled Electron/Photon Monte Carlo Transport Codes", SAND91-1634 (1992)
- (9) Y.Asano and N.Sasamoto;"Development of Shielding Design Code for Synchrotron Radiation Beamline" Radiat. Phys. Chem. Vol.44 No.1/2 p.133 (1994)

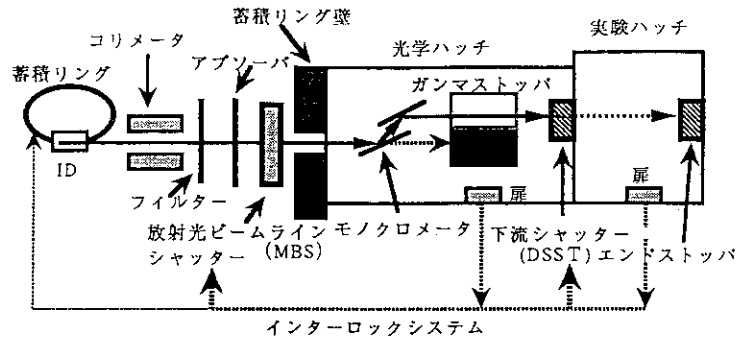


図 2-1 主ビーム 1 系統のみのしゃへい安全設計に係わる放射光ビームライン概念図

- ID; 挿入光源装置 (アンジュレータ、ウィグラー) 及び偏向電磁石
- 放射光ビームラインシャッター (MBS); 通常状態で MBS が閉まれば、蓄積リング壁外側で基準線量率以下となるしゃへい能力を持つ。
- アブソーバ; 余分な熱を除去する装置で、MBS その他の機器の熱負荷を軽減する。
- フィルター; 放射光スペクトルを整形するためのもので、主に使用しない低エネルギー成分を除去する。
- コリメータ; 放射光、ガスプレクス、ビームロス等による放射線の広がりを防ぐもので光学ハッチを軽減する機能を有する。
- モノクロメータ; 放射光を分光し、単色化する装置
- ガンマストップ; 主にガスプレクス、ビームロス等によって発生する高エネルギー光子がビームライン後方に広がるのを防ぐ。
- 下流シャッター (DSS T); 実験者がハッチ内に入室して調整等を実施可能にするために放射光を遮断し、ハッチ内での線量率が基準値以下となるしゃへい能力をもつ。
- エンドストップ; 実験中にハッチ後方の線量率が放射光のために上昇することを防ぐもので DSS T と同等のしゃへい能力を持つ。
- 光学ハッチ; 光学素子等からの散乱線による線量率の上昇を基準値以下にするために設置されるもので、放射光使用時の不用意な被ばくを防ぐ囲い。
- 実験ハッチ; 放射光及び散乱線から実験者の安全を確保するための囲いであり、実験中はハッチの周囲で基準線量率以下となるしゃへい能力をもつ。

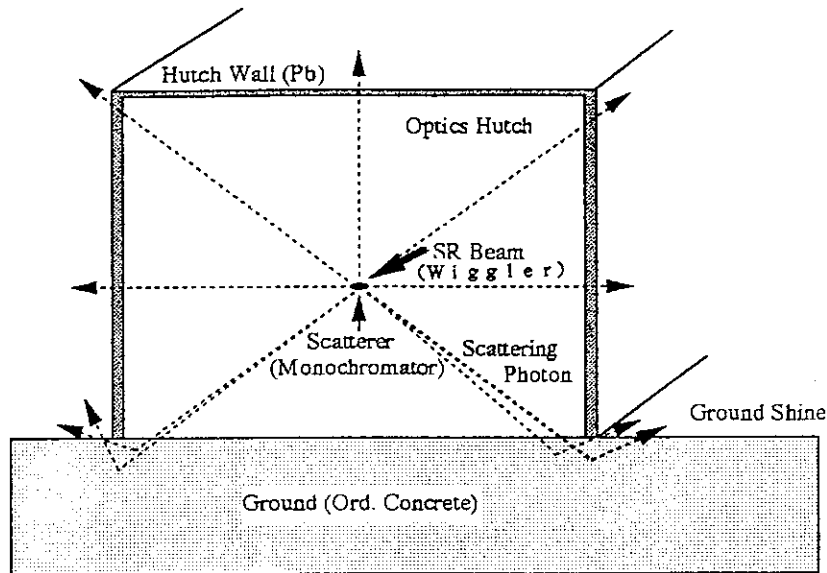


図 2-2 グランドシャインによる放射光ビームラインハッチ漏洩放射線の概念図

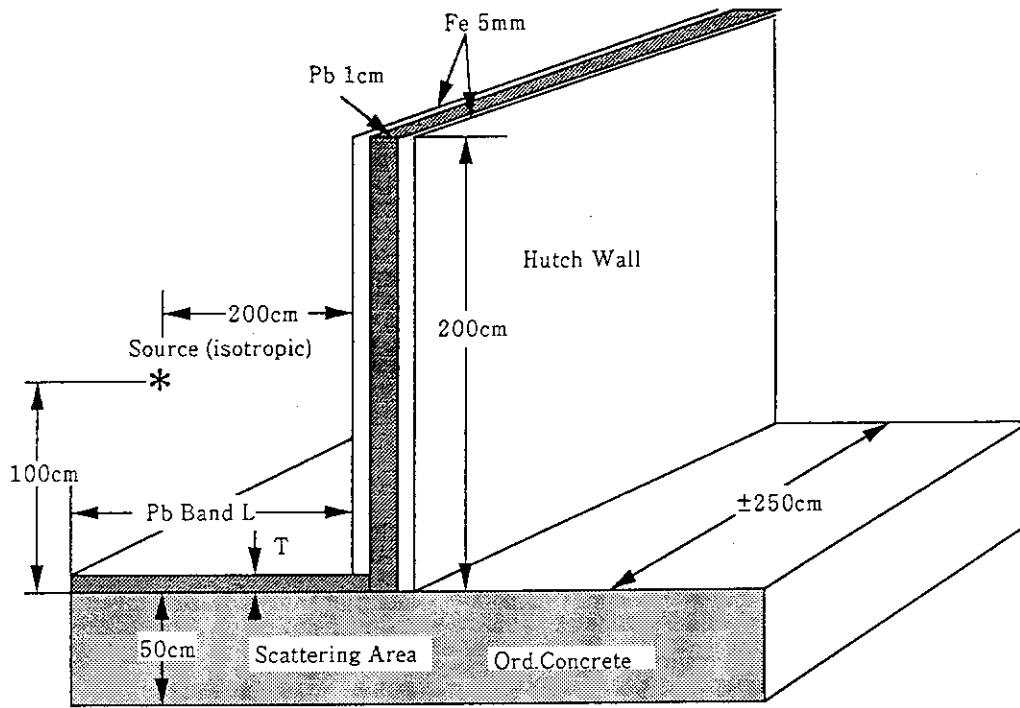


図 2—3 (1) G33—GP2によるグランドシャイン評価用計算モデル1
(厚さ T cm、幅 L cmの鉛遮蔽材をハッチ内側に敷設)

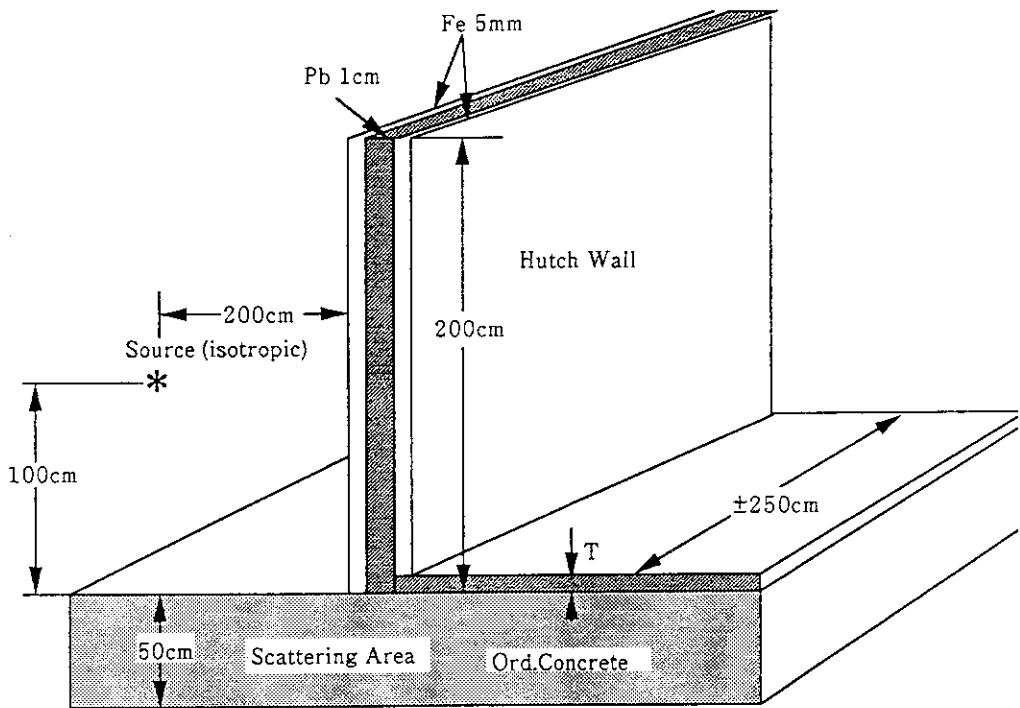


図 2—3 (2) G33—GP2によるグランドシャイン評価用計算モデル2
(厚さ T cmの鉛遮蔽材をハッチ外側に敷設)

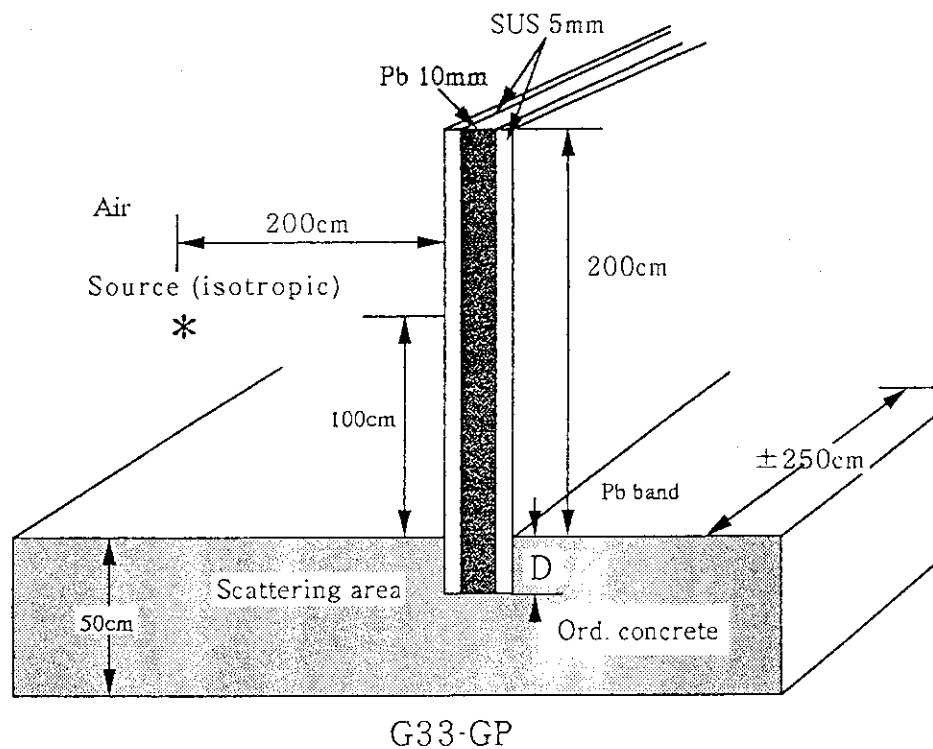


図2-3 (3) G33-GP2によるグランドシャイン評価用計算モデル3
(ハッチ壁を深さDcm埋設)

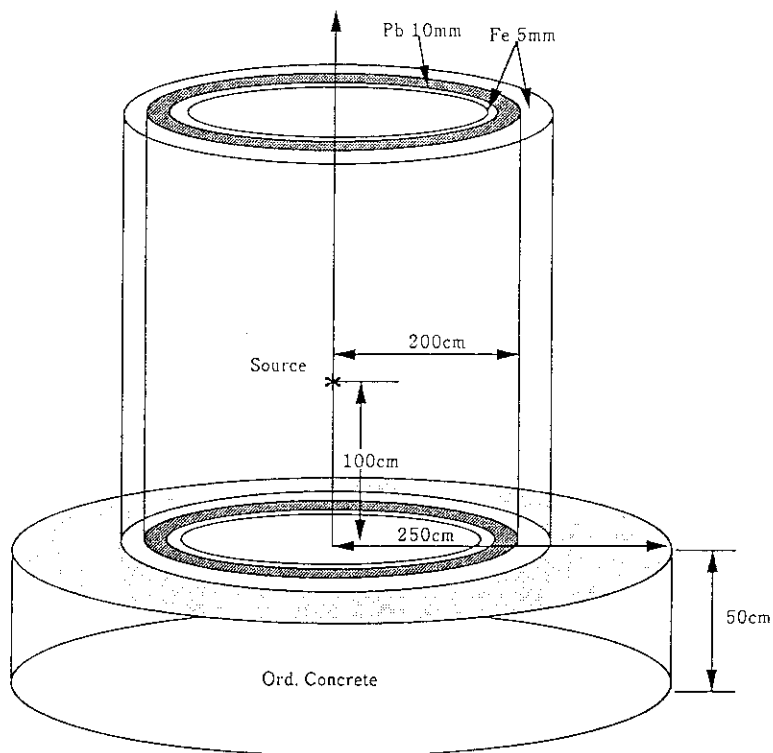


図2-4 G33-GP2とITS3.0によるグランドシャイン比較計算モデル
(円筒平板モデル、鉛敷設及び埋設無し)

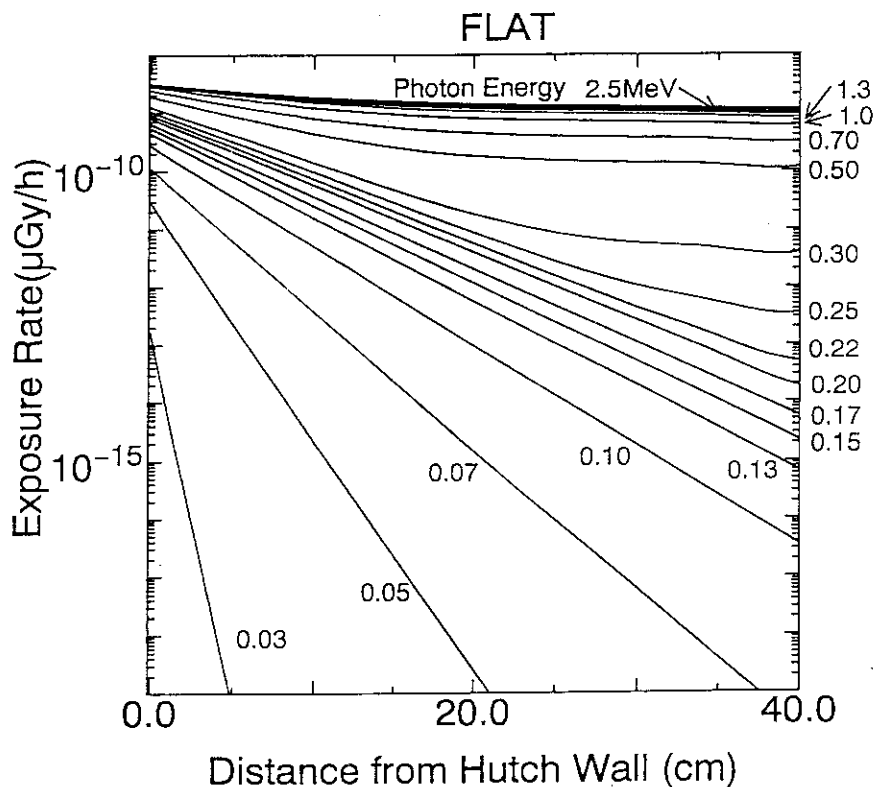


図3-1 (1) グランドシャインの低エネルギー領域における光子エネルギー依存性 (鉛敷設及び埋設無し)

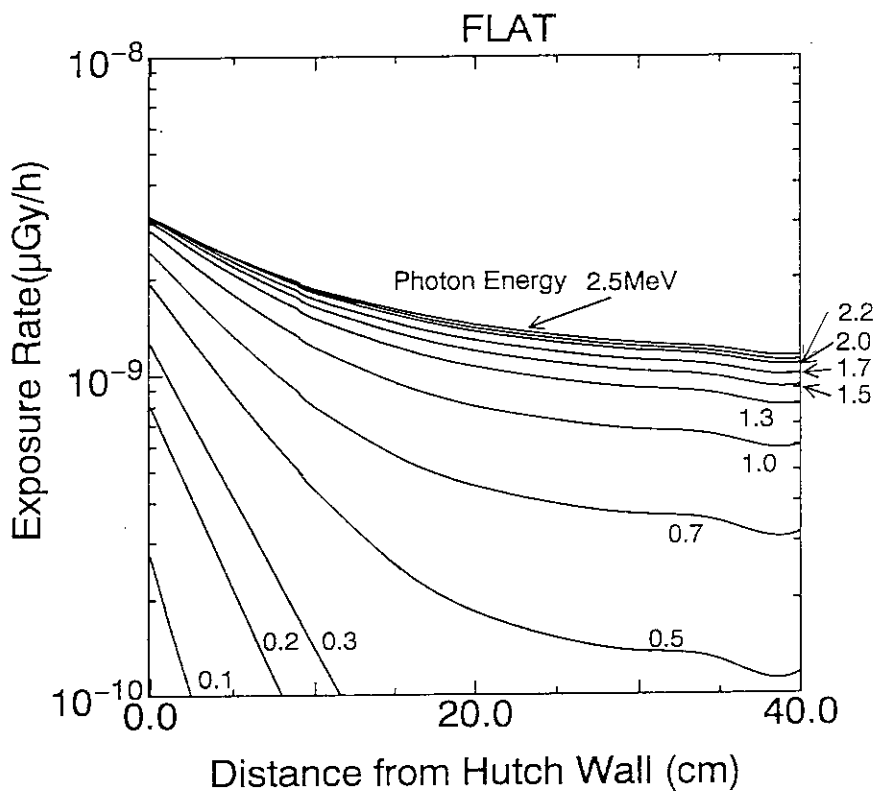


図3-1 (2) グランドシャインの高エネルギー領域における光子エネルギー依存性 (鉛敷設及び埋設無し)

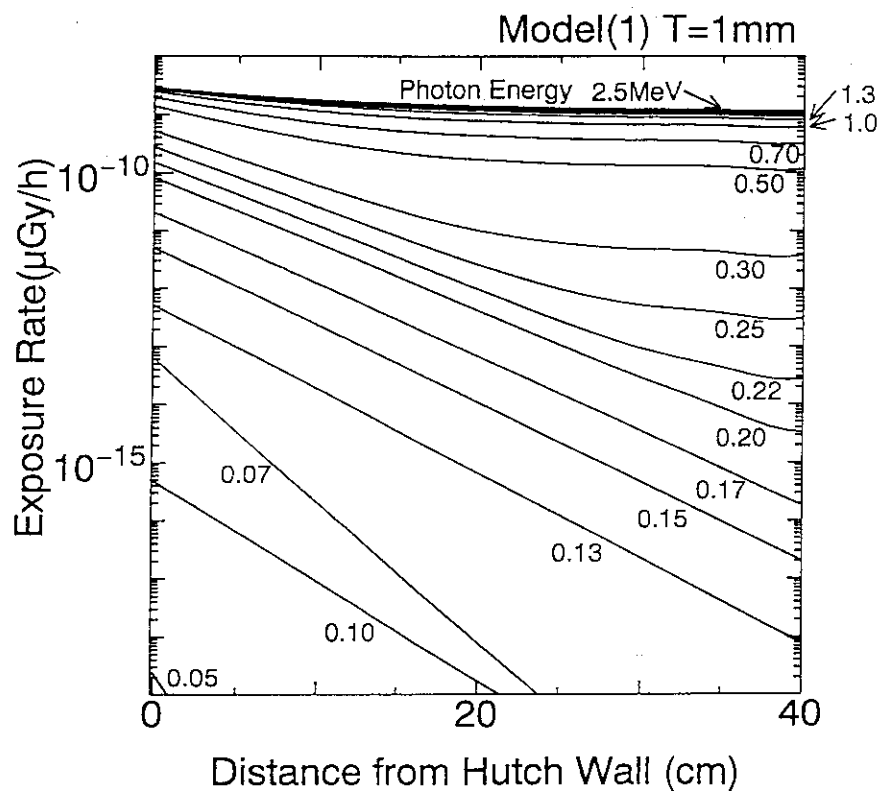


図3-2 (1) グランドシャインの低エネルギー領域における
光子エネルギー依存性 (内側敷設鉛厚さ T = 1 mm)

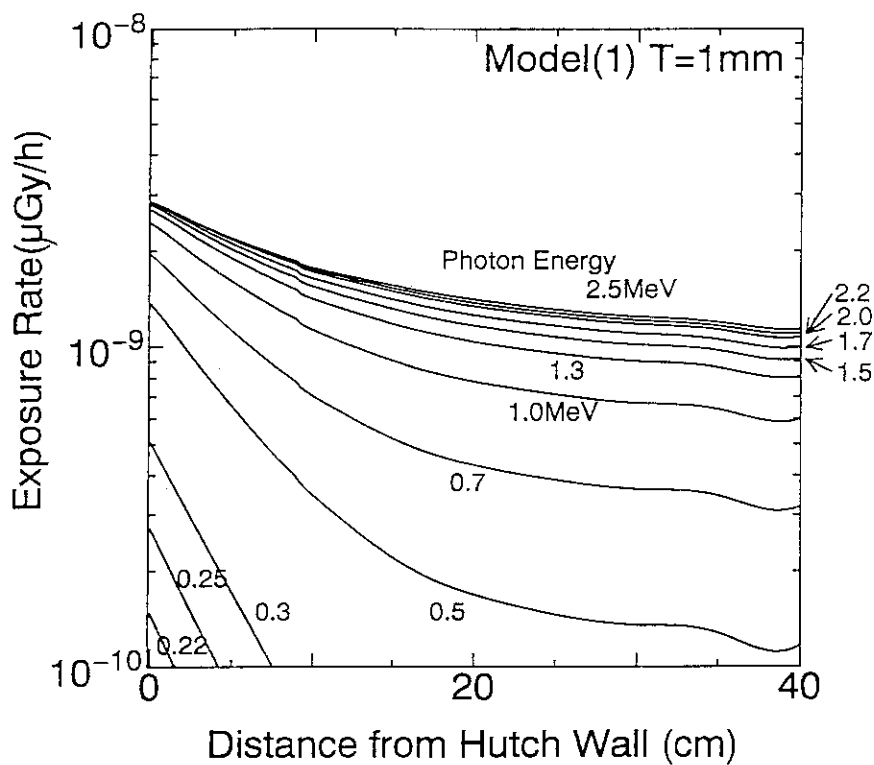


図3-2 (2) グランドシャインの高エネルギー領域における
光子エネルギー依存性 (内側敷設鉛厚さ T = 1 mm)

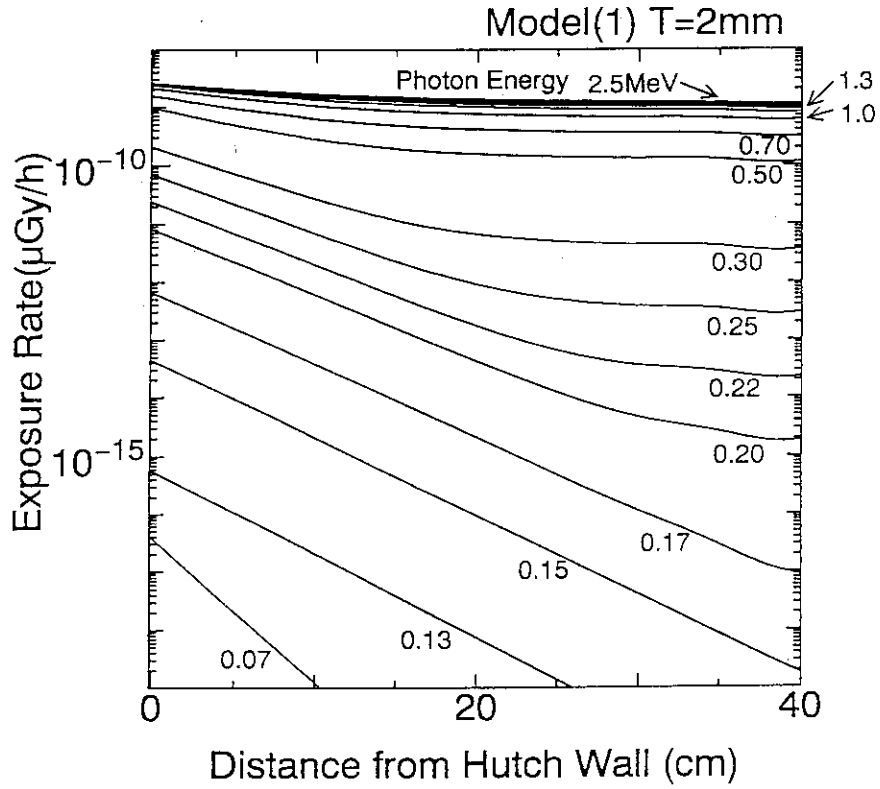


図3-2(3) グランドシャインの低エネルギー領域における光子エネルギー依存性 (内側敷設鉛厚さ T = 2 mm)

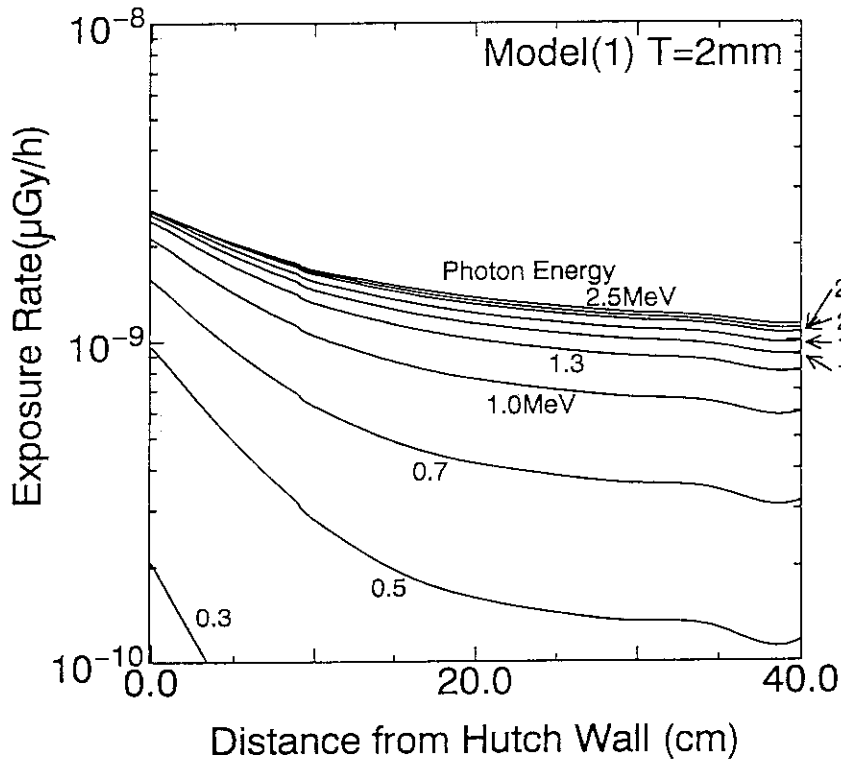


図3-2(4) グランドシャインの高エネルギー領域における光子エネルギー依存性 (内側敷設鉛厚さ T = 2 mm)

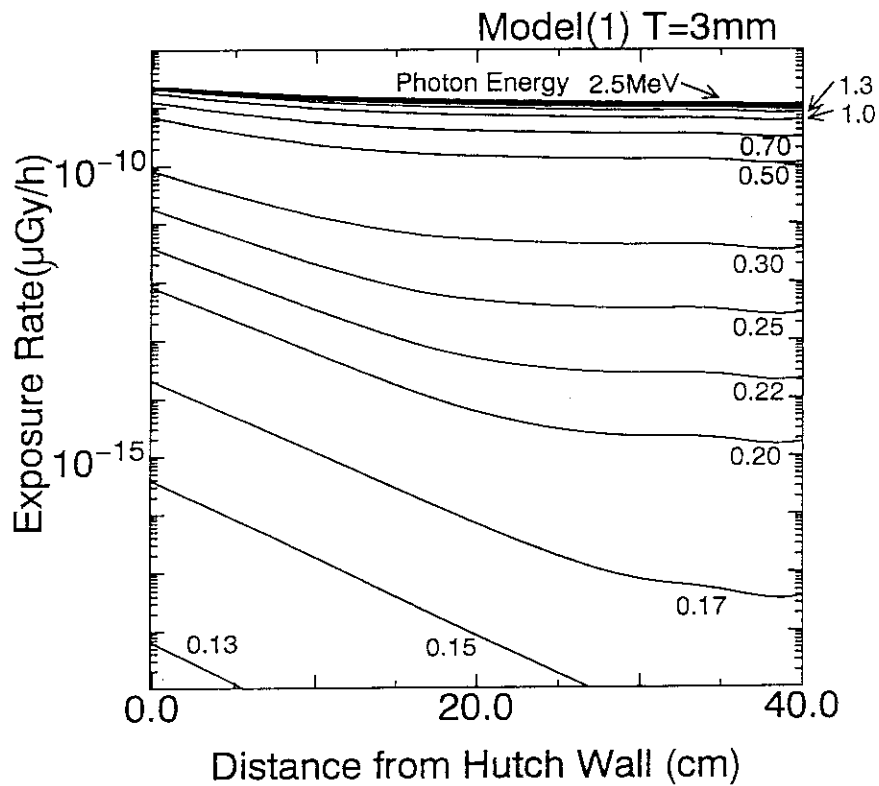


図3-2 (5) グランドシャインの低エネルギー領域における
光子エネルギー依存性 (内側敷設鉛厚さ T = 3 mm)

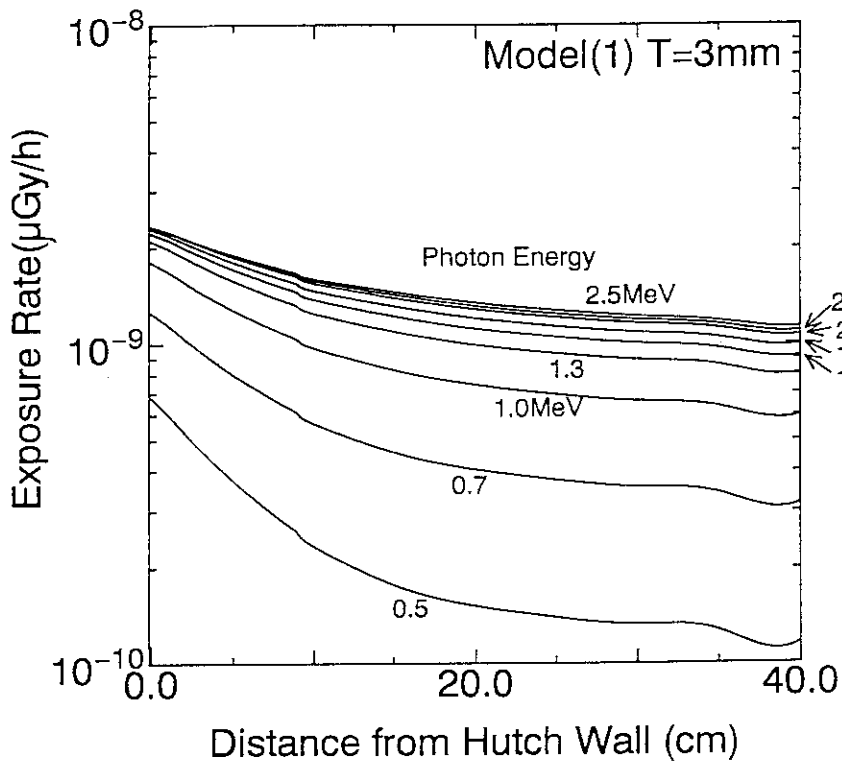


図3-2 (6) グランドシャインの高エネルギー領域における
光子エネルギー依存性 (内側敷設鉛厚さ T = 3 mm)

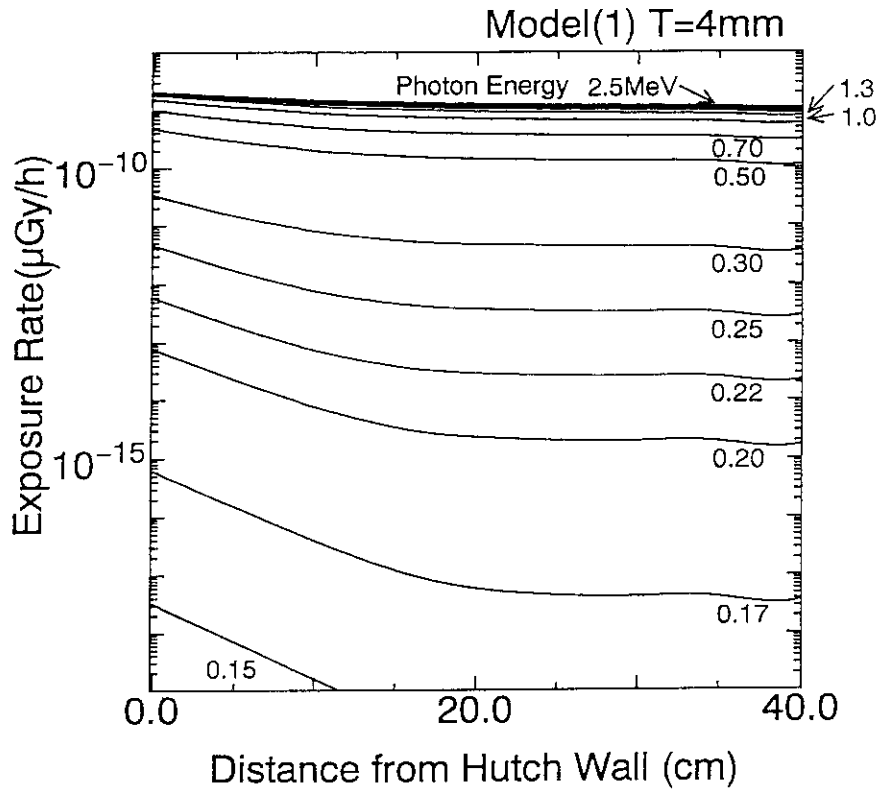


図3-2(7) グランドシャインの低エネルギー領域における
光子エネルギー依存性 (内側敷設鉛厚さ T = 4 mm)

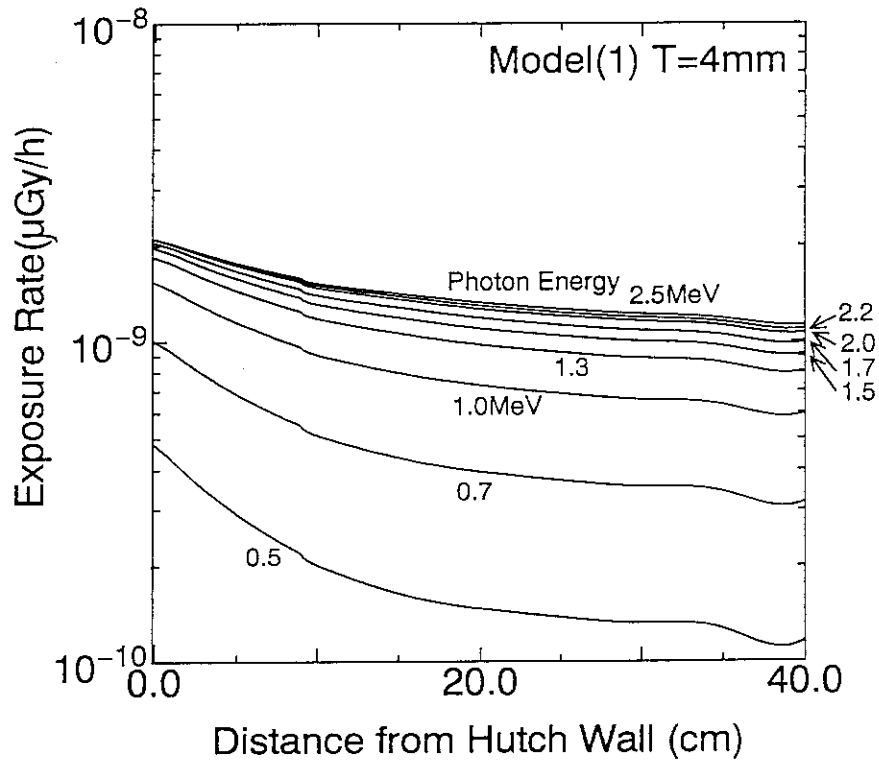


図3-2(8) グランドシャインの高エネルギー領域における
光子エネルギー依存性 (内側敷設鉛厚さ T = 4 mm)

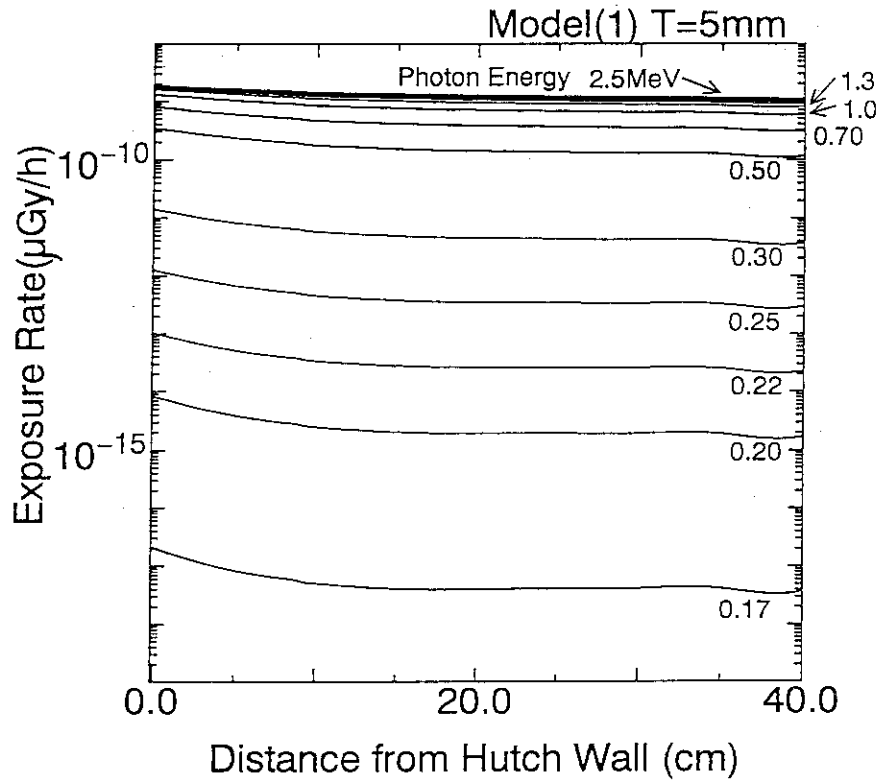


図3-2(9) グランドシャインの低エネルギー領域における
光子エネルギー依存性 (内側敷設鉛厚さ T = 5 mm)

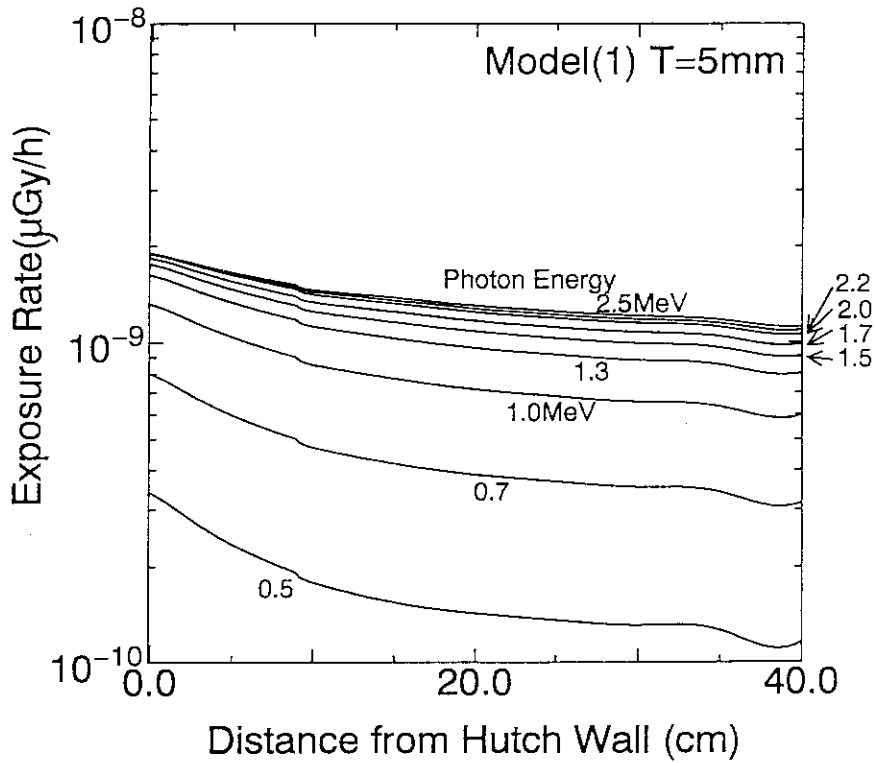


図3-2(10) グランドシャインの高エネルギー領域における
光子エネルギー依存性 (内側敷設鉛厚さ T = 5 mm)

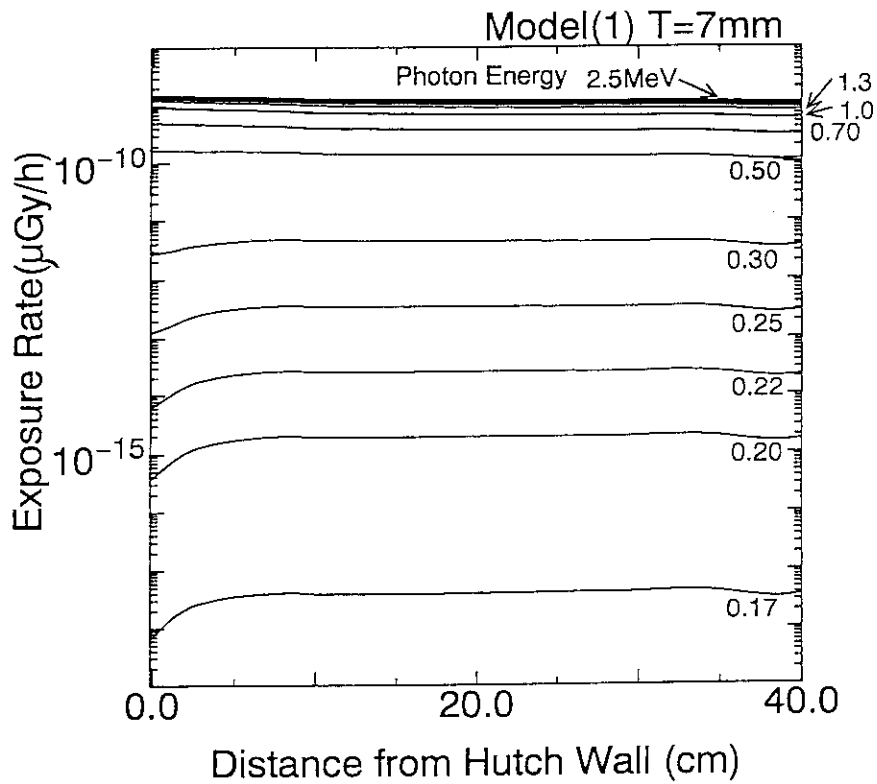


図3-2 (11) グランドシャインの低エネルギー領域における光子エネルギー依存性 (内側敷設鉛厚さ T = 7 mm)

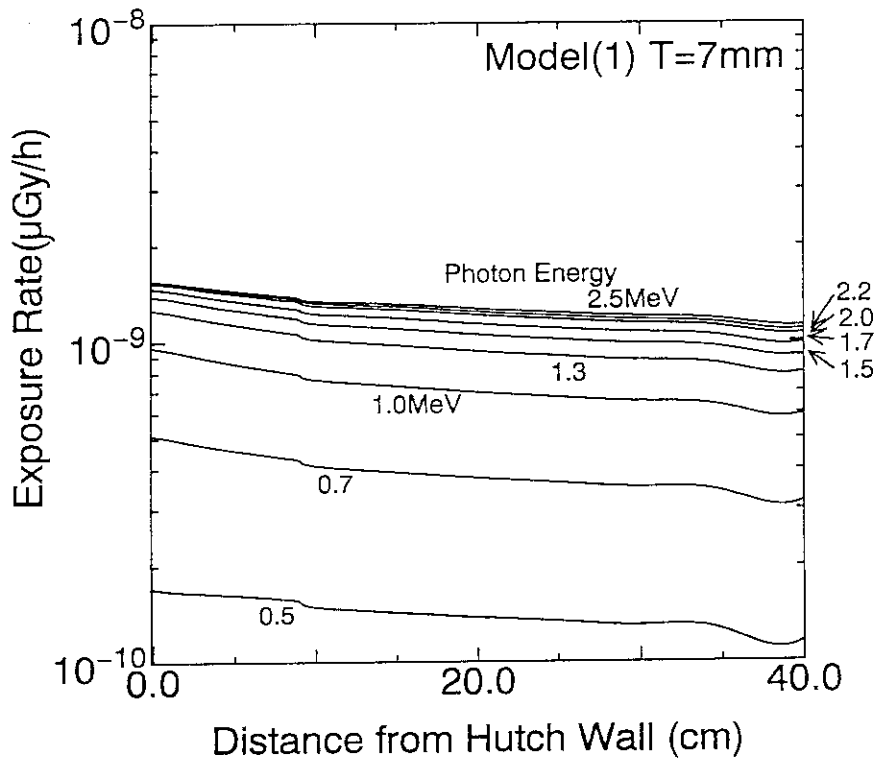


図3-2 (12) グランドシャインの高エネルギー領域における光子エネルギー依存性 (内側敷設鉛厚さ T = 7 mm)

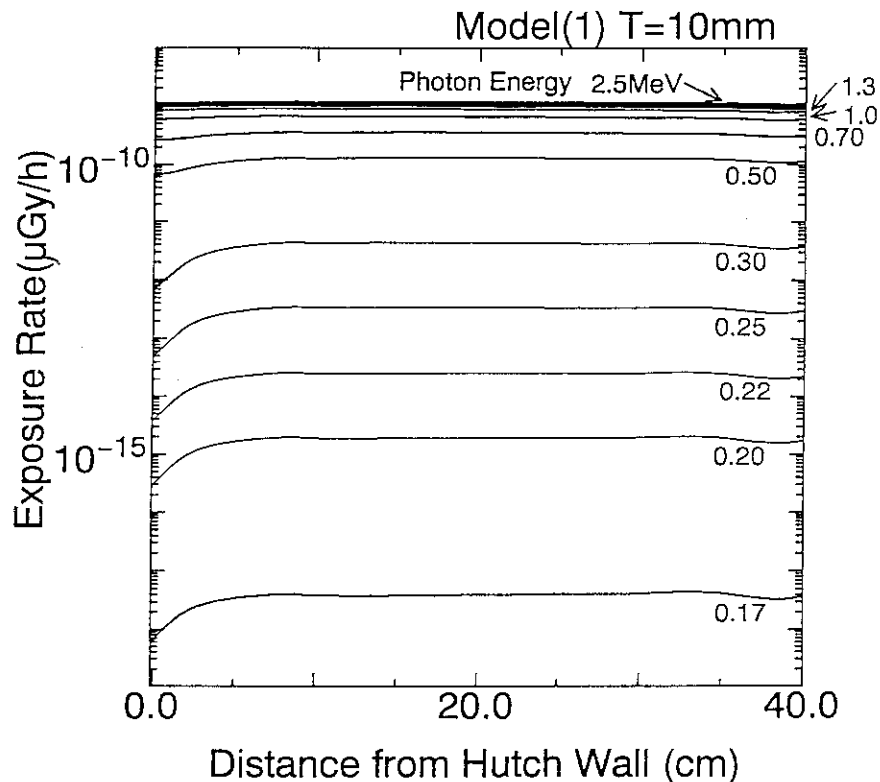


図3-2(13) グランドシャインの低エネルギー領域における光子エネルギー依存性 (内側敷設鉛厚さ T=10mm)

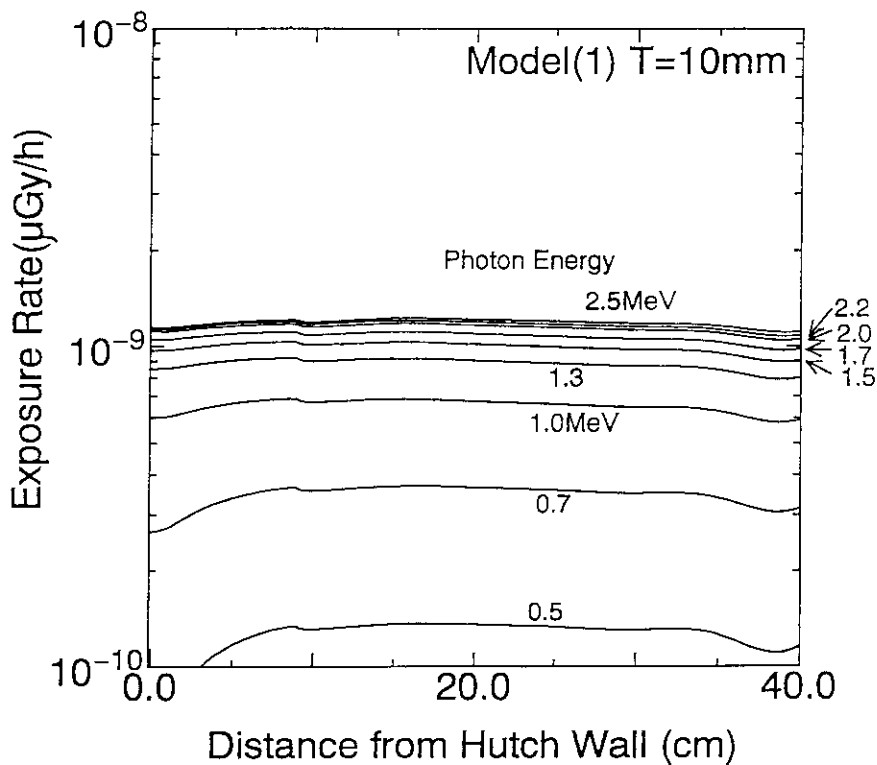


図3-2(14) グランドシャインの高エネルギー領域における光子エネルギー依存性 (内側敷設鉛厚さ T=10mm)

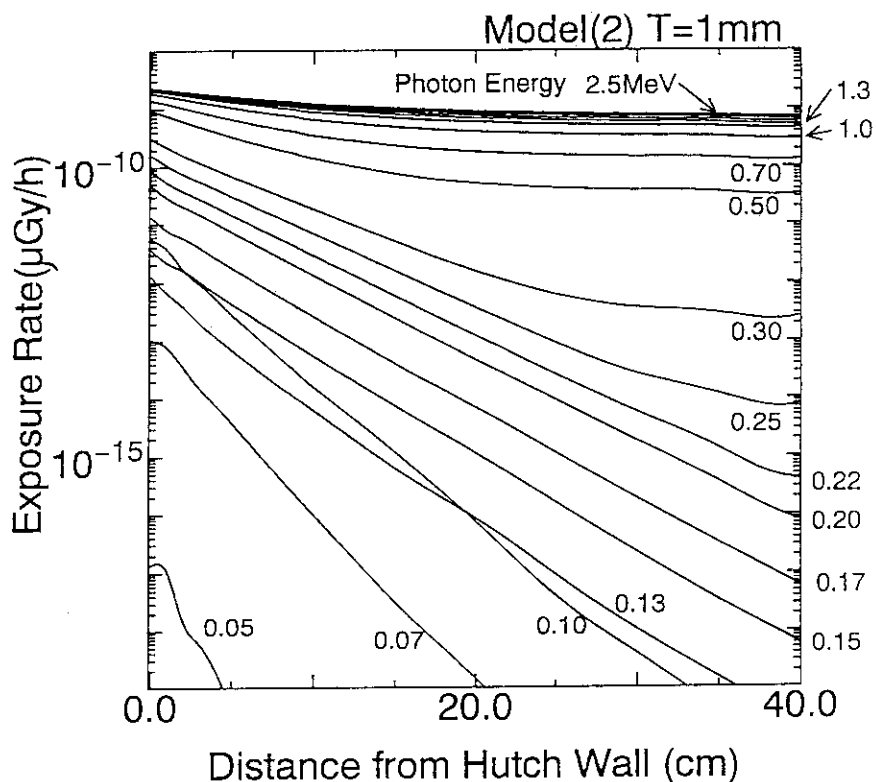


図3-3 (1) グランドシャインの低エネルギー領域における光子エネルギー依存性 (外側敷設鉛厚さ $T = 1 \text{ mm}$)

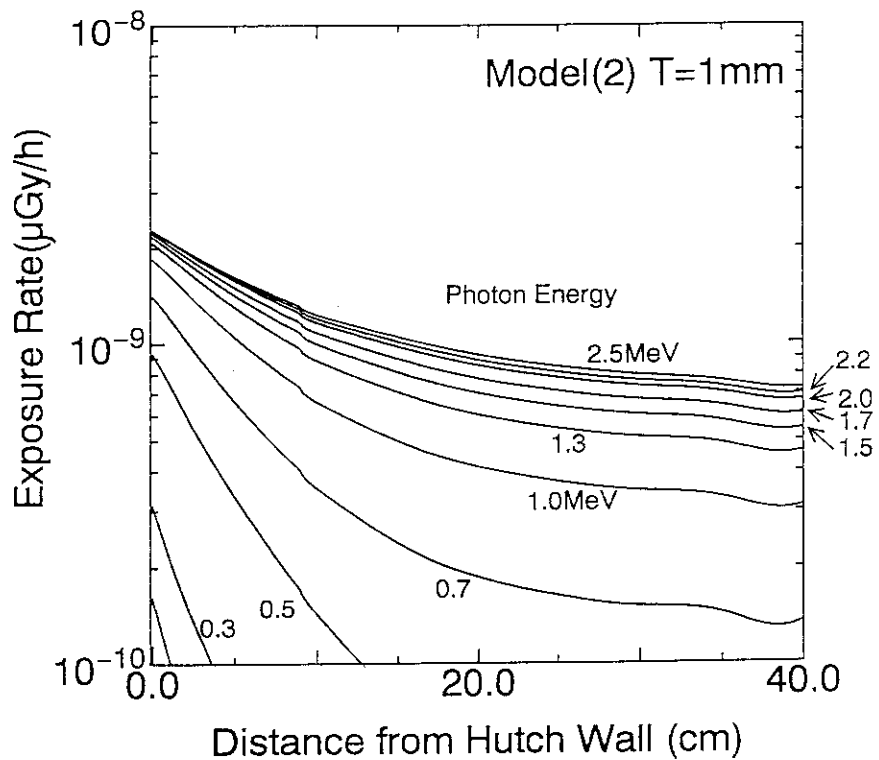


図3-3 (2) グランドシャインの高エネルギー領域における光子エネルギー依存性 (外側敷設鉛厚さ $T = 1 \text{ mm}$)

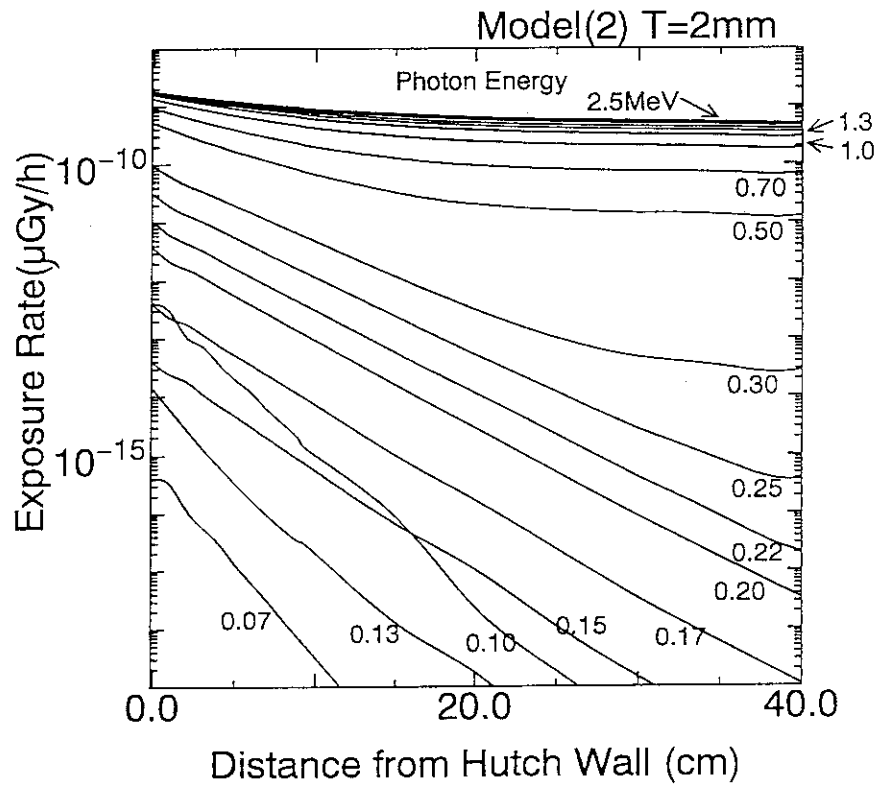


図3-3(3) グランドシャインの低エネルギー領域における
光子エネルギー依存性 (外側敷設鉛厚さ T = 2 mm)

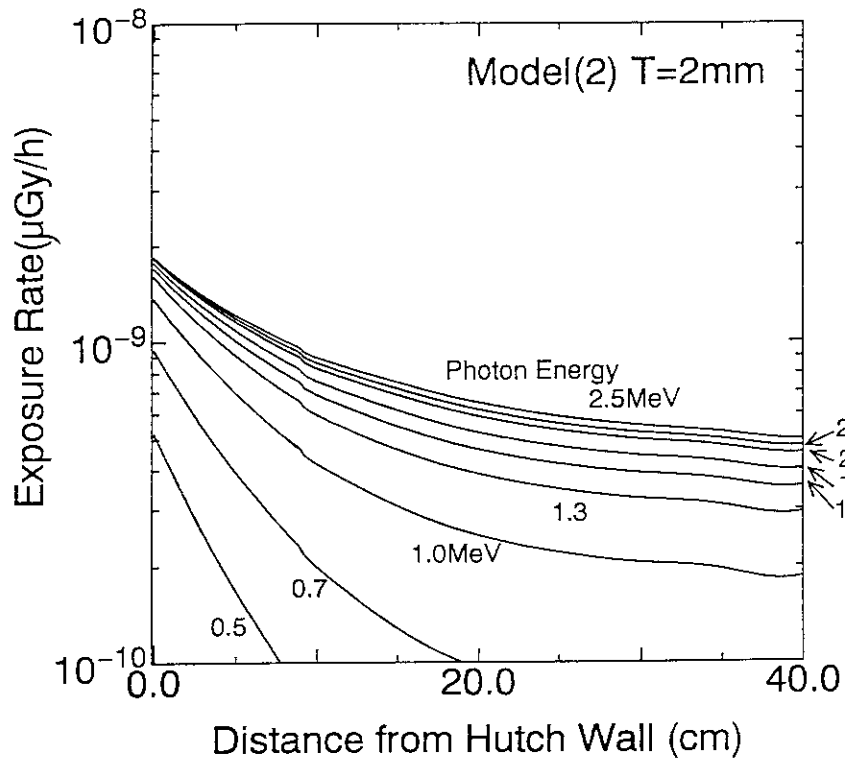


図3-3(4) グランドシャインの高エネルギー領域における
光子エネルギー依存性 (外側敷設鉛厚さ T = 2 mm)

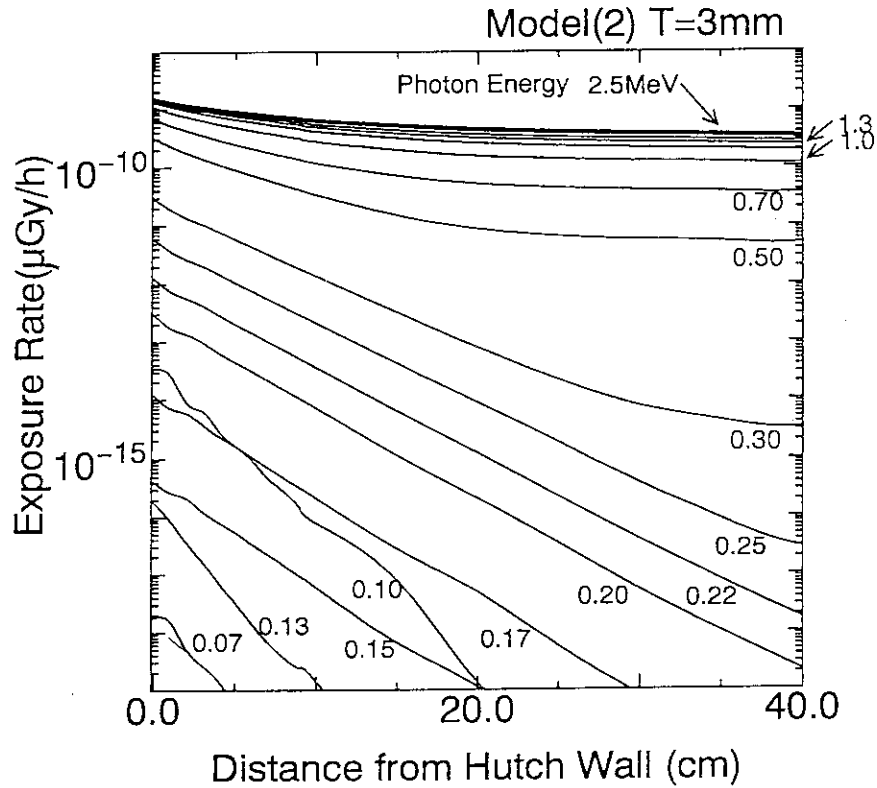


図3-3 (5) グランドシャインの低エネルギー領域における光子エネルギー依存性 (外側敷設鉛厚さ T = 3 mm)

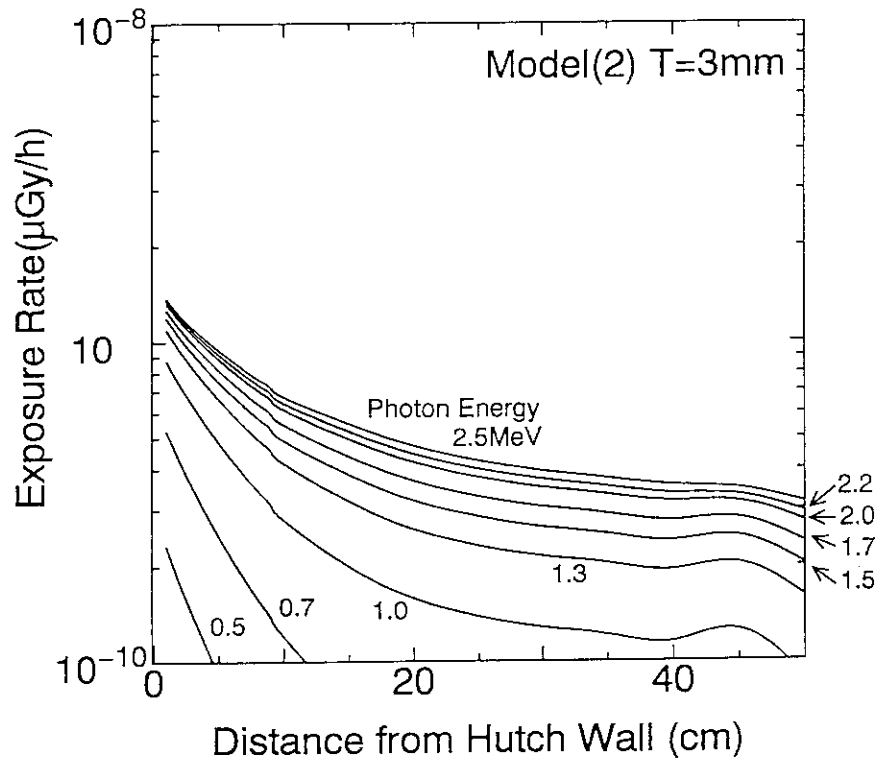


図3-3 (6) グランドシャインの高エネルギー領域における光子エネルギー依存性 (外側敷設鉛厚さ T = 3 mm)

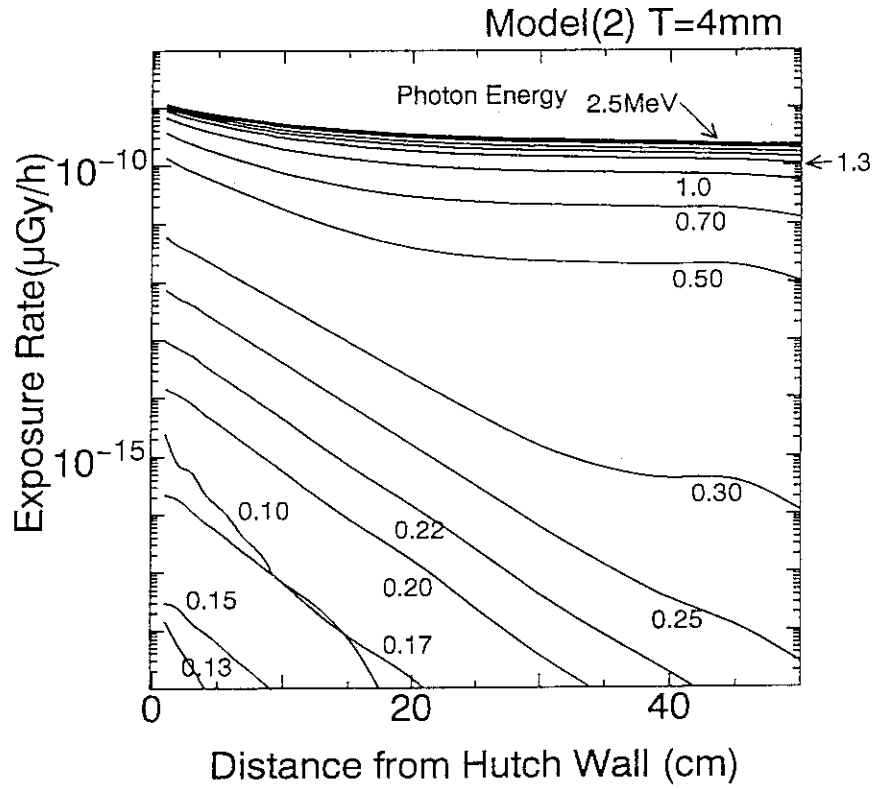


図3-3(7) グランドシャインの低エネルギー領域における
光子エネルギー依存性 (外側敷設鉛厚さ T = 4 mm)

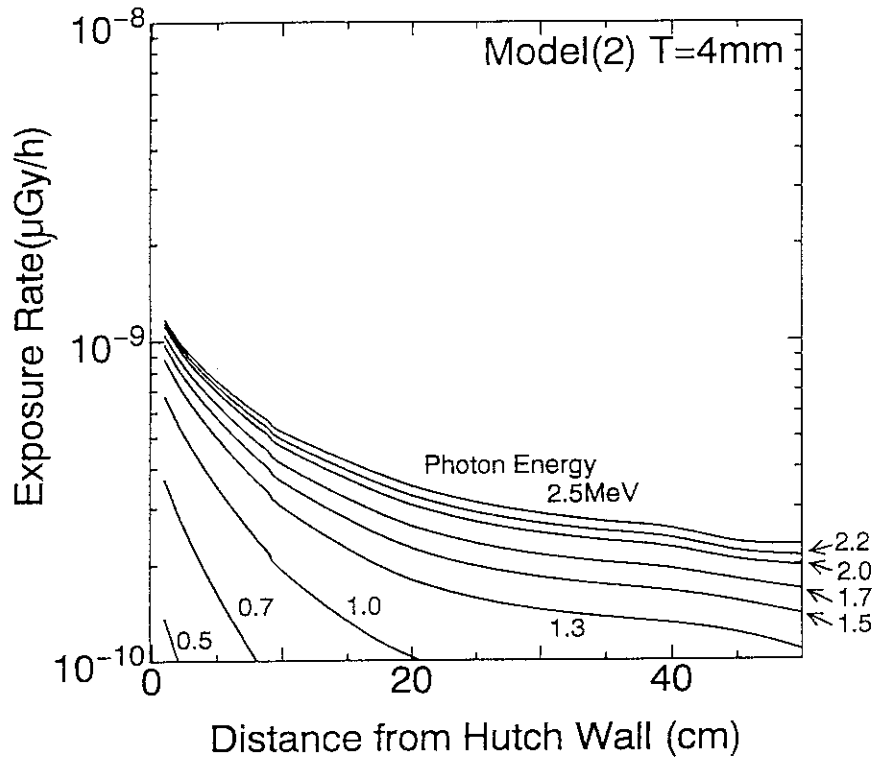


図3-3(8) グランドシャインの高エネルギー領域における
光子エネルギー依存性 (外側敷設鉛厚さ T = 4 mm)

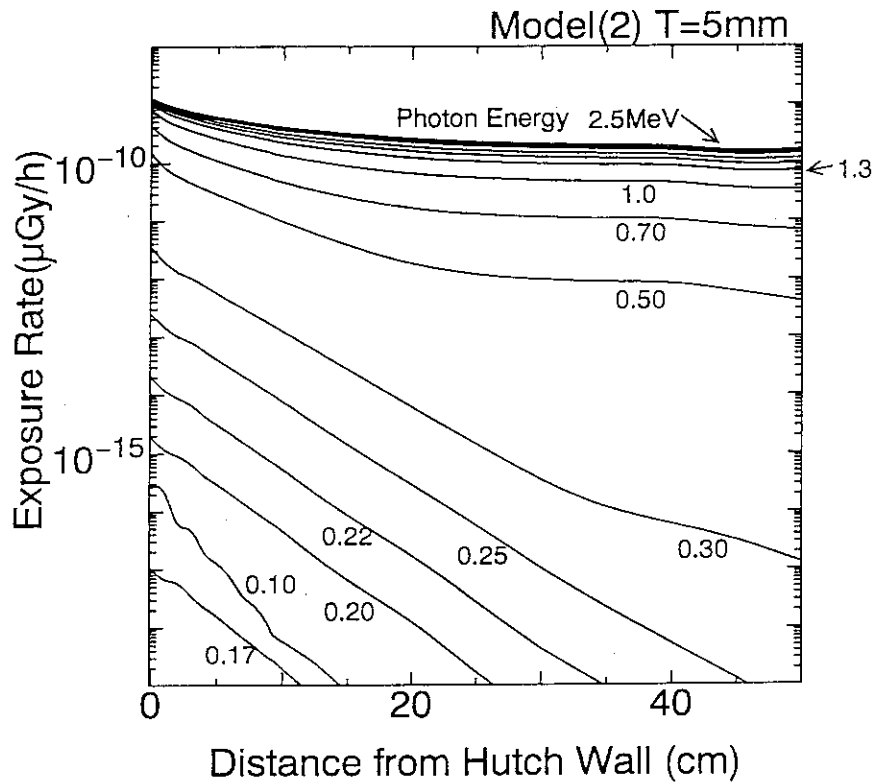


図3-3(9) グランドシャインの低エネルギー領域における光子エネルギー依存性 (外側敷設鉛厚さ $T = 5 \text{ mm}$)

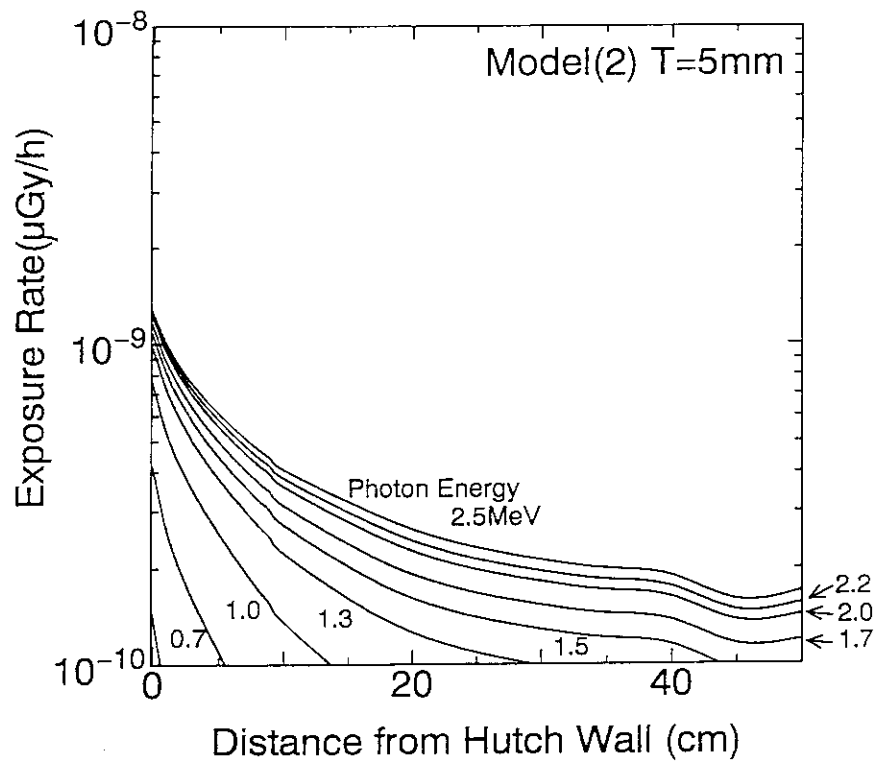


図3-3(10) グランドシャインの高エネルギー領域における光子エネルギー依存性 (外側敷設鉛厚さ $T = 5 \text{ mm}$)

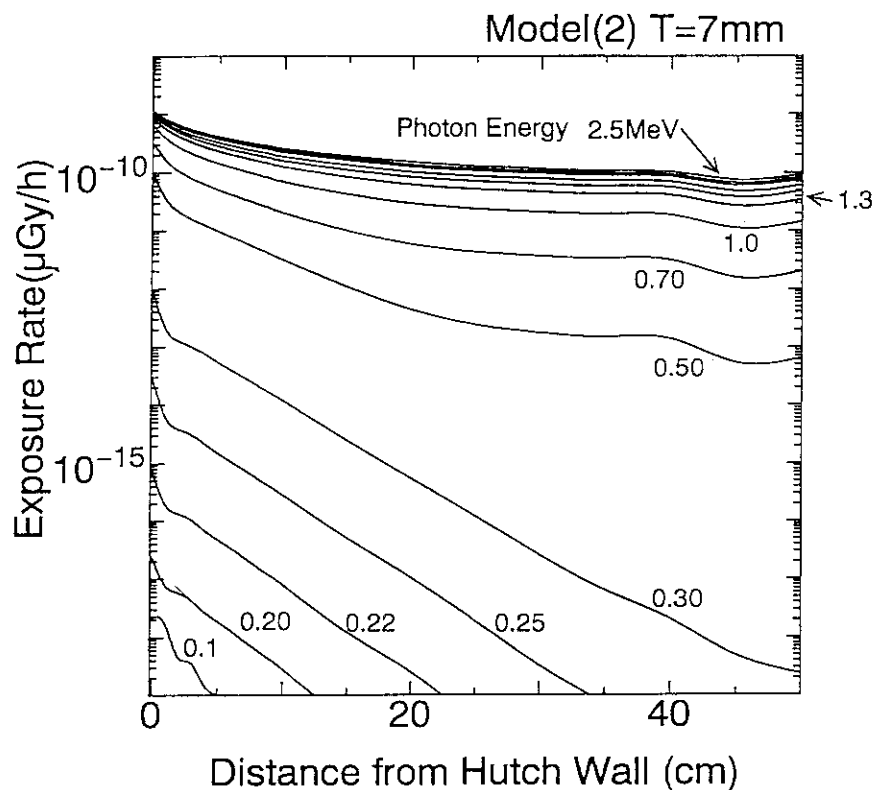


図3-3 (11) グランドシャインの低エネルギー領域における
光子エネルギー依存性 (外側敷設鉛厚さ T = 7 mm)

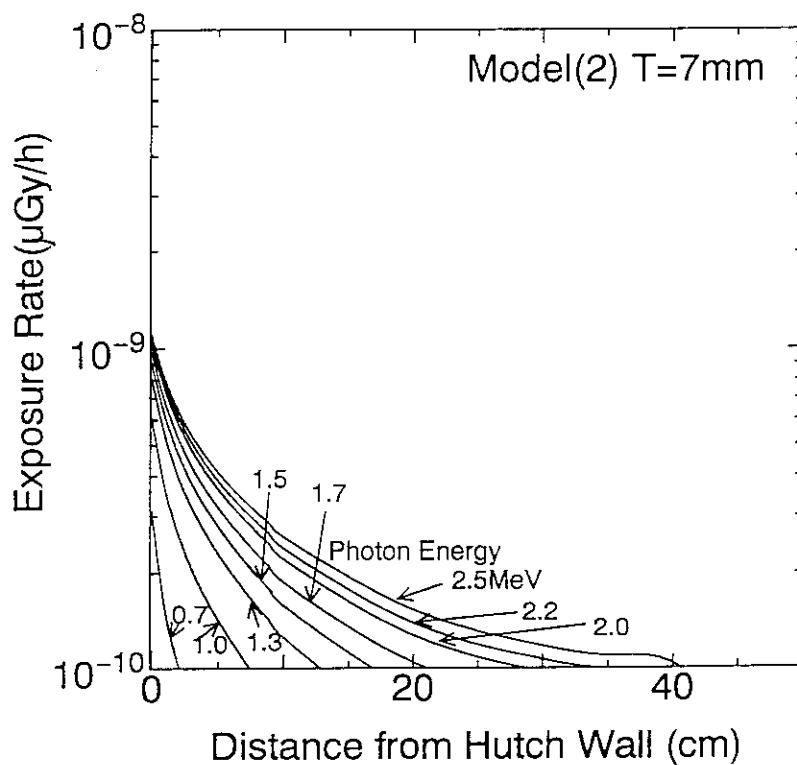


図3-3 (12) グランドシャインの高エネルギー領域における
光子エネルギー依存性 (外側敷設鉛厚さ T = 7 mm)

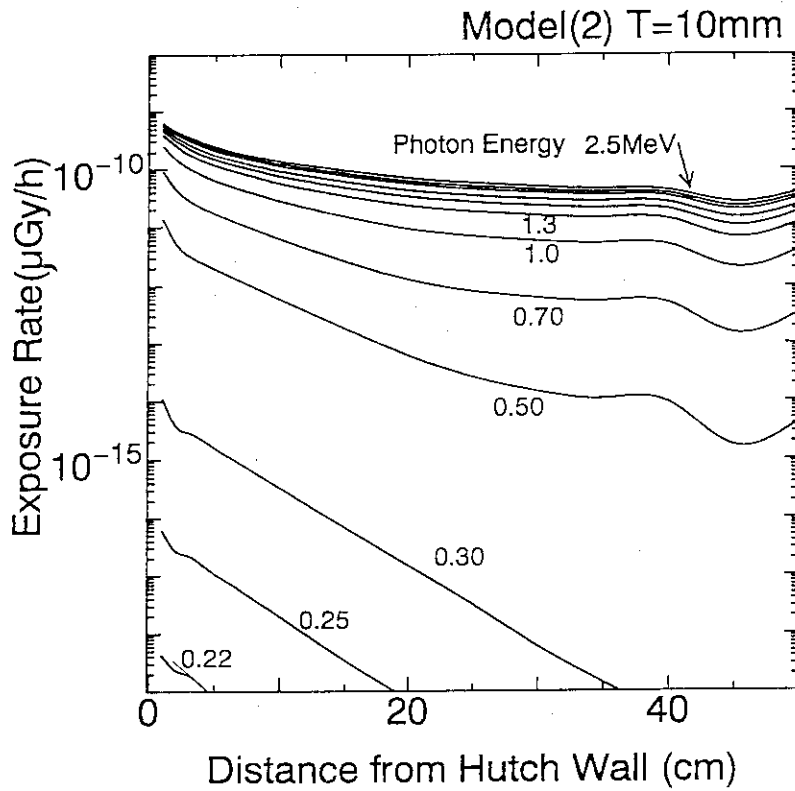


図3-3(13) グランドシャインの低エネルギー領域における
光子エネルギー依存性 (外側敷設鉛厚さ T = 10 mm)

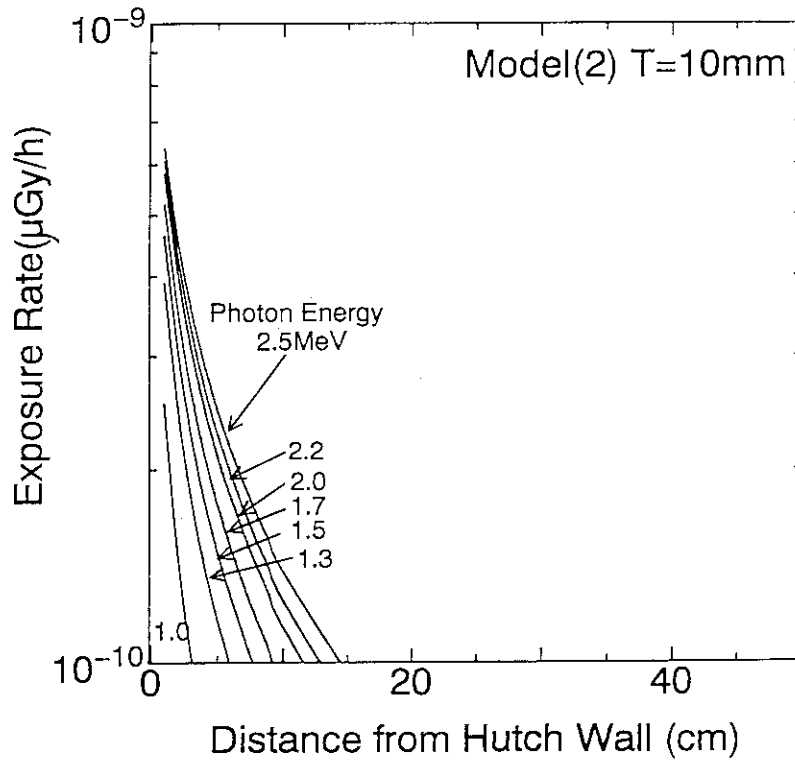


図3-3(14) グランドシャインの高エネルギー領域における
光子エネルギー依存性 (外側敷設鉛厚さ T = 10 mm)

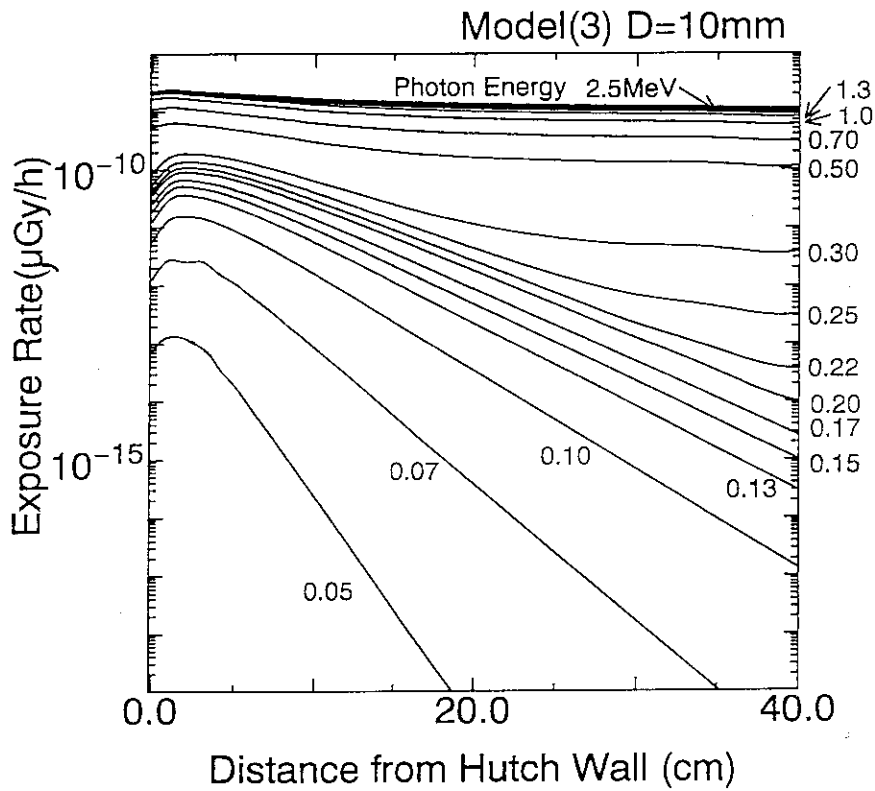


図3-4 (1) グランドシャインの低エネルギー領域における光子エネルギー依存性 (壁埋設深さD=10mm)

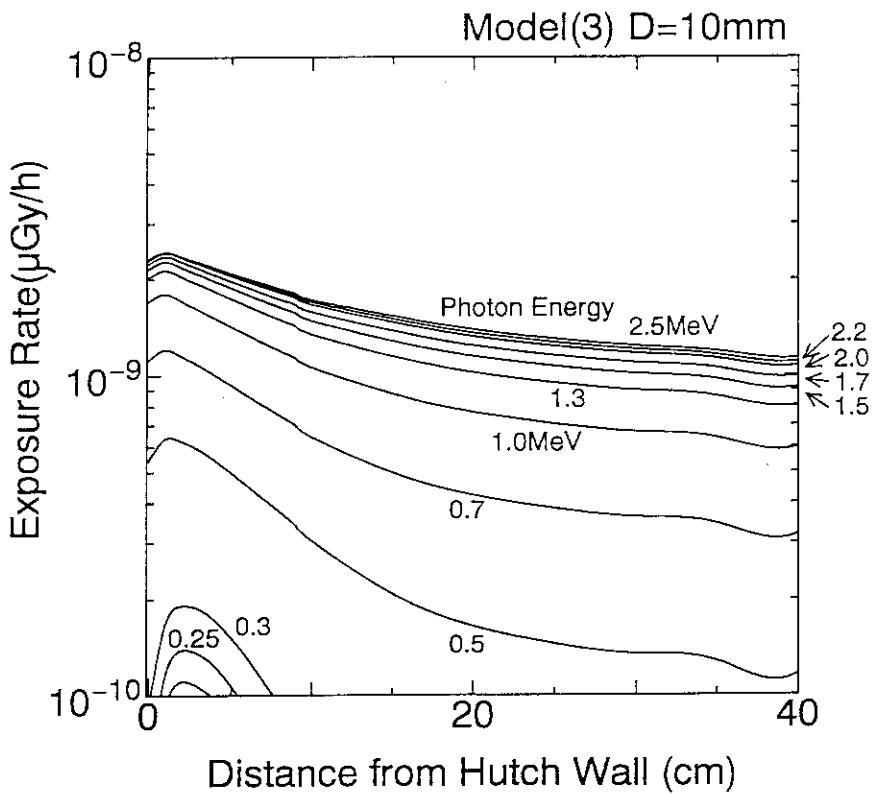


図3-4 (2) グランドシャインの高エネルギー領域における光子エネルギー依存性 (壁埋設深さD=10mm)

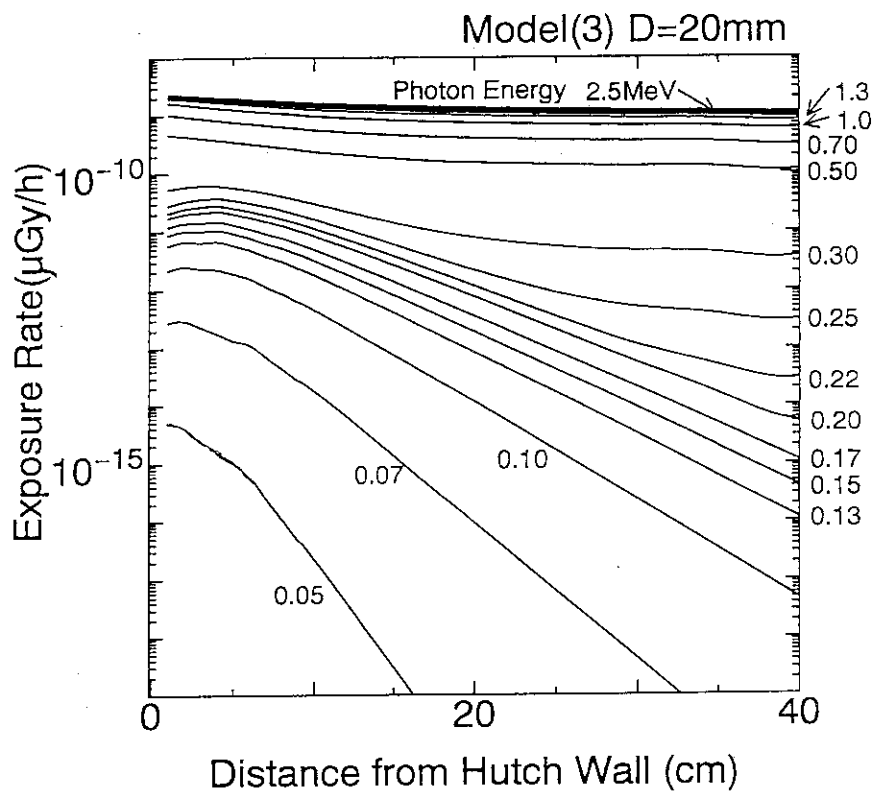


図3-4(3) グランドシャインの低エネルギー領域における
光子エネルギー依存性 (壁埋設深さD=20mm)

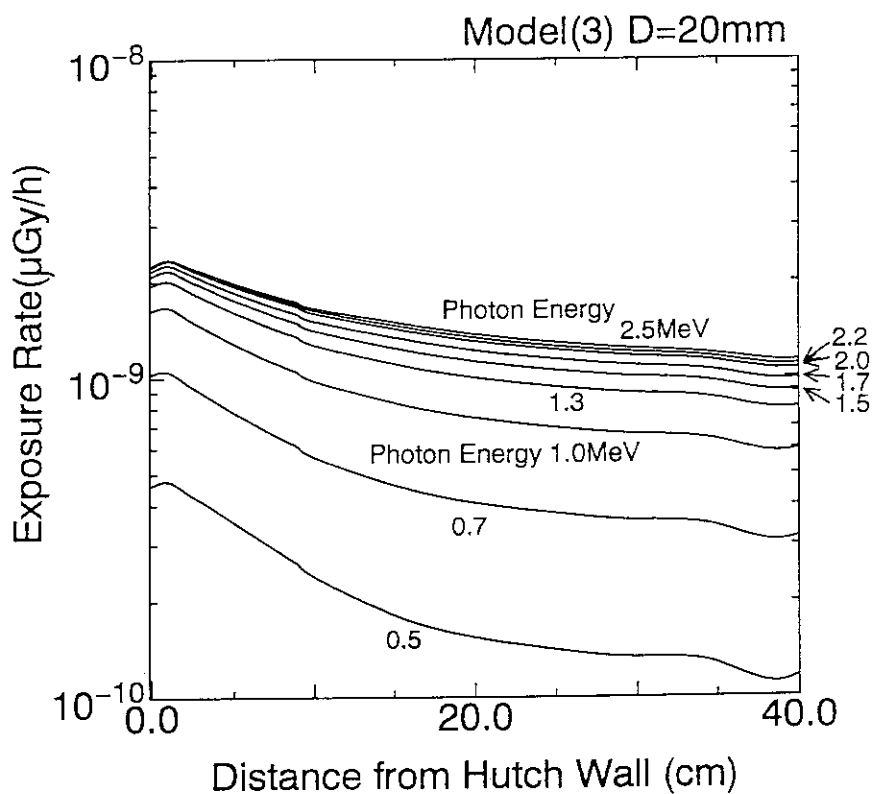


図3-4(4) グランドシャインの高エネルギー領域における
光子エネルギー依存性 (壁埋設深さD=20mm)

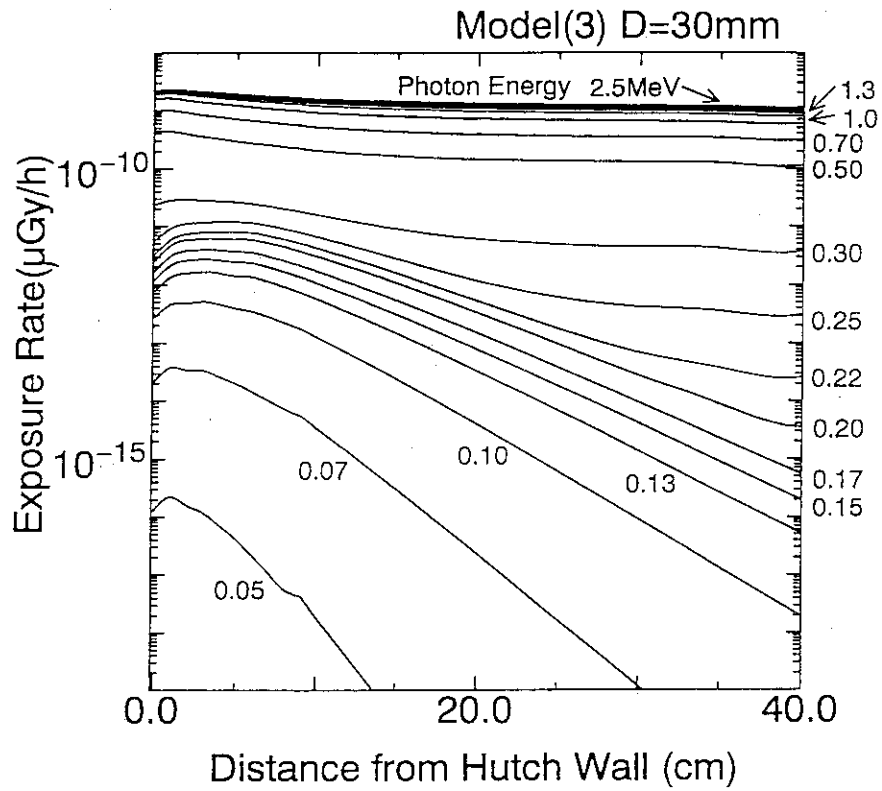


図3-4(5) グランドシャインの低エネルギー領域における
光子エネルギー依存性 (壁埋設深さ D = 30 mm)

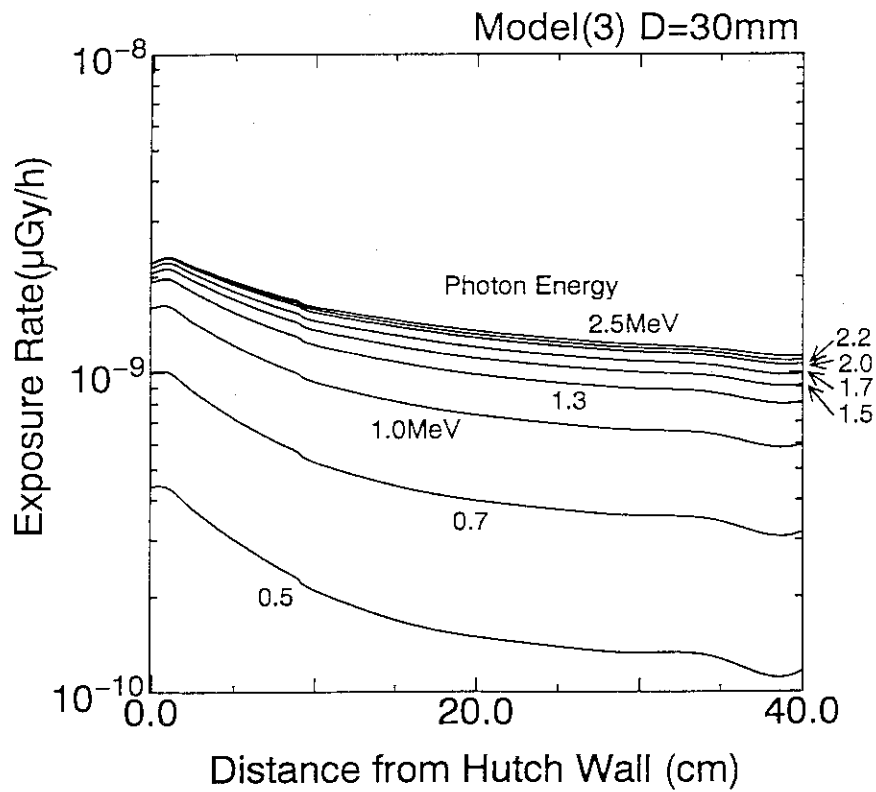


図3-4(6) グランドシャインの高エネルギー領域における
光子エネルギー依存性 (壁埋設深さ D = 30 mm)

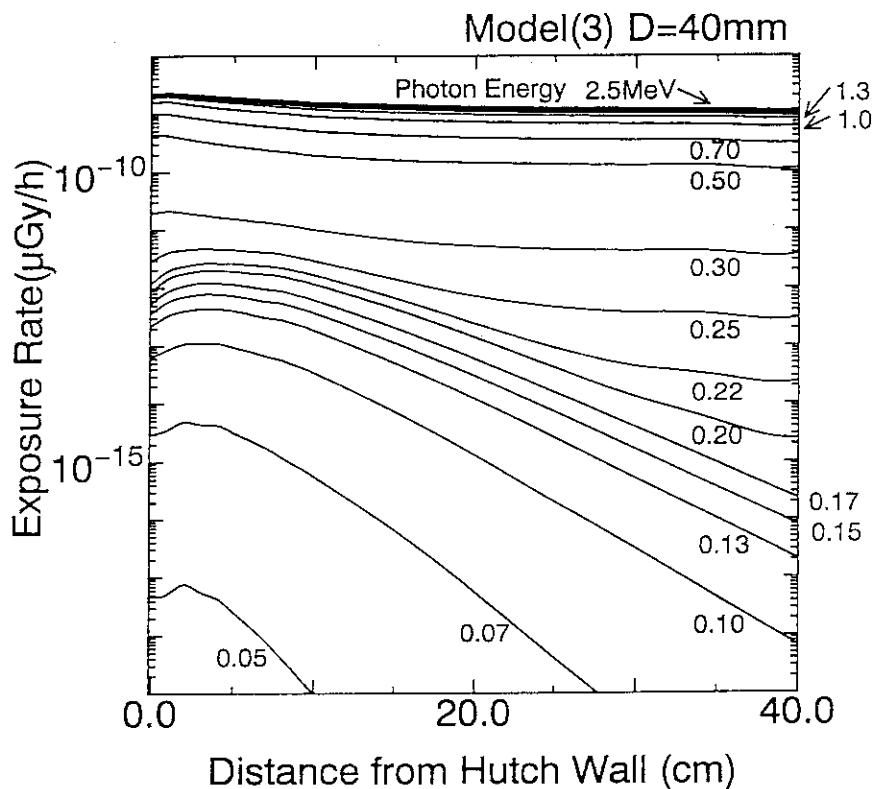


図3-4 (7) グランドシャインの低エネルギー領域における
光子エネルギー依存性 (壁埋設深さ D = 40 mm)

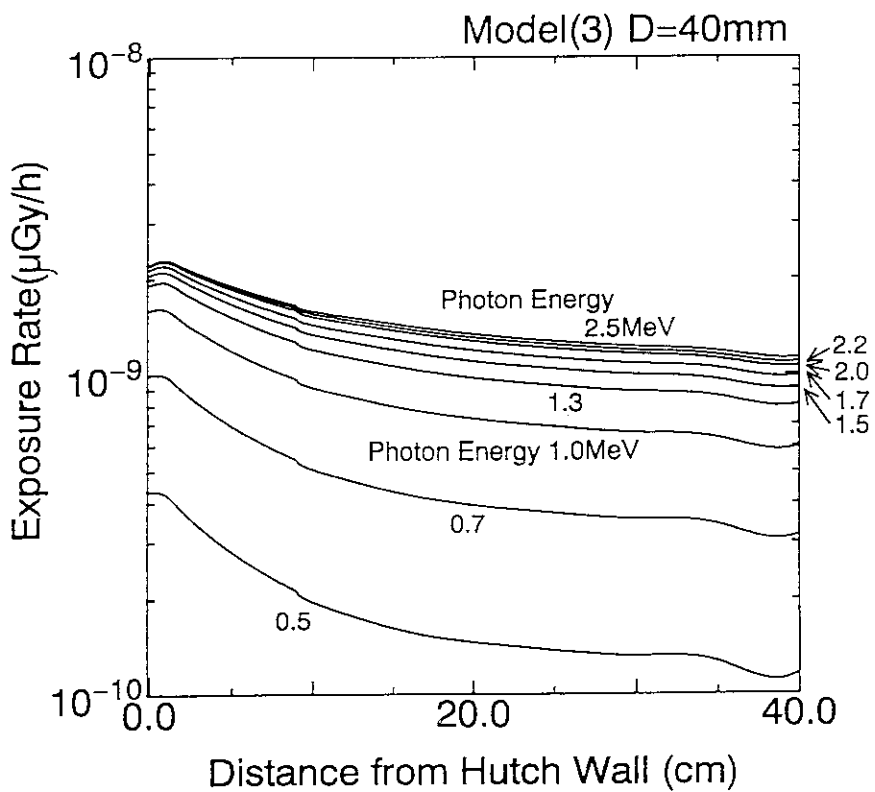


図3-4 (8) グランドシャインの高エネルギー領域における
光子エネルギー依存性 (壁埋設深さ D = 40 mm)

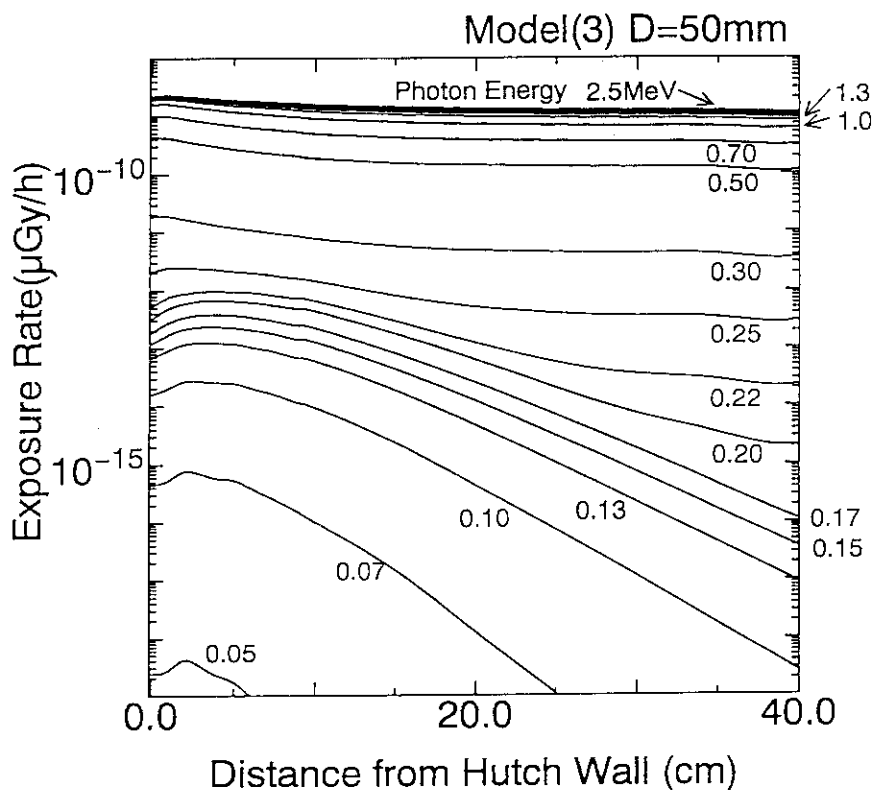


図3-4 (9) グランドシャインの低エネルギー領域における
光子エネルギー依存性 (壁埋設深さD = 50 mm)

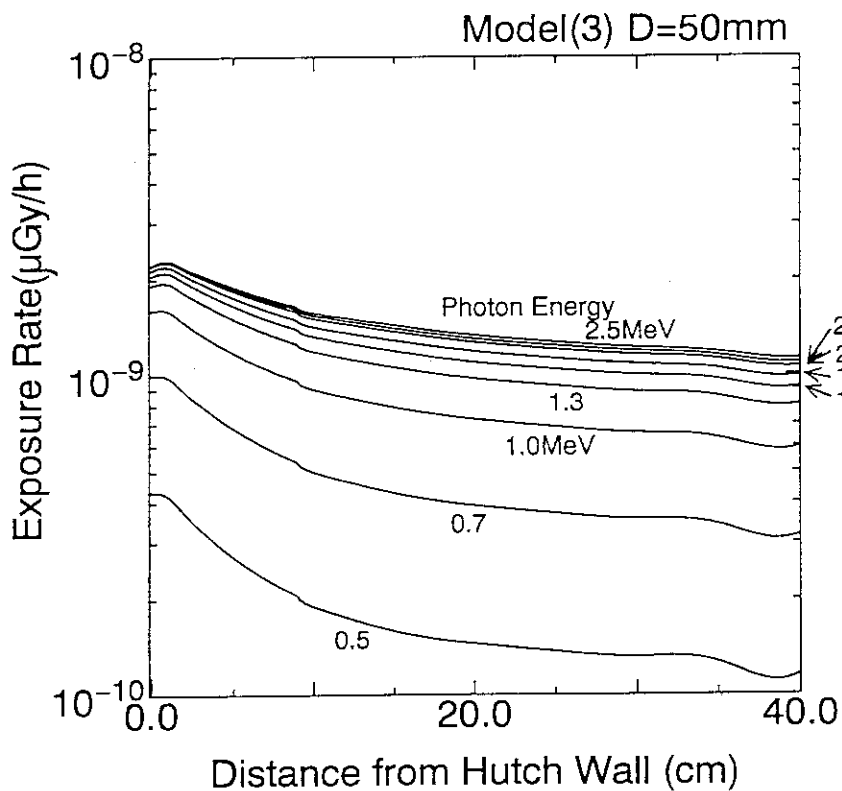


図3-4 (10) グランドシャインの高エネルギー領域における
光子エネルギー依存性 (壁埋設深さD = 50 mm)

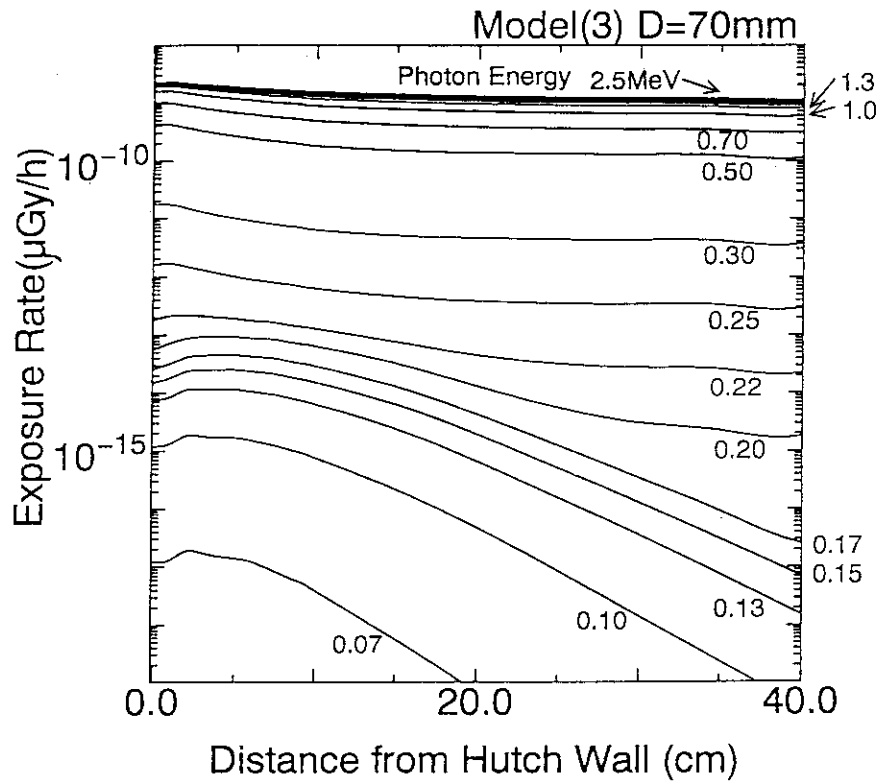


図3-4 (11) グランドシャインの低エネルギー領域における光子エネルギー依存性 (壁埋設深さ D = 70 mm)

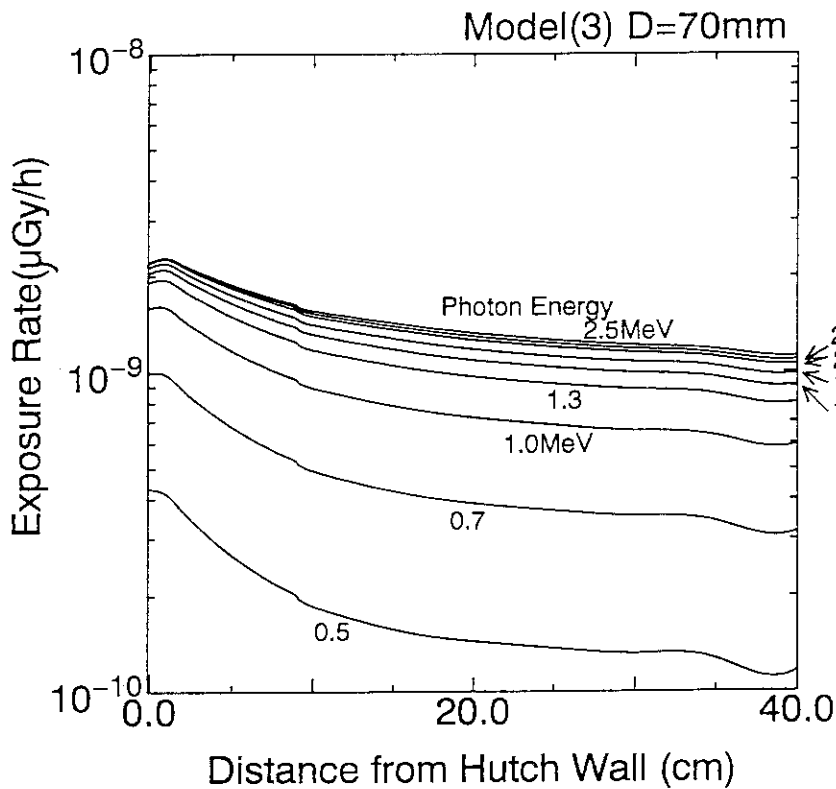


図3-4 (12) グランドシャインの高エネルギー領域における光子エネルギー依存性 (壁埋設深さ D = 70 mm)

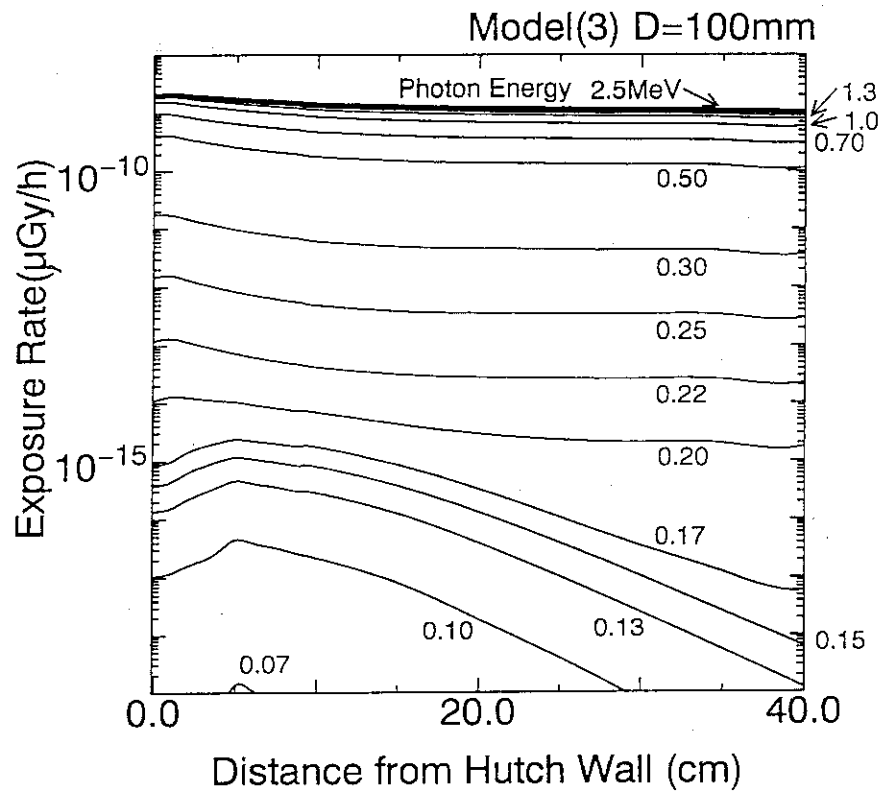


図3-4(13) グランドシャインの低エネルギー領域における
光子エネルギー依存性 (壁埋設深さD=100mm)

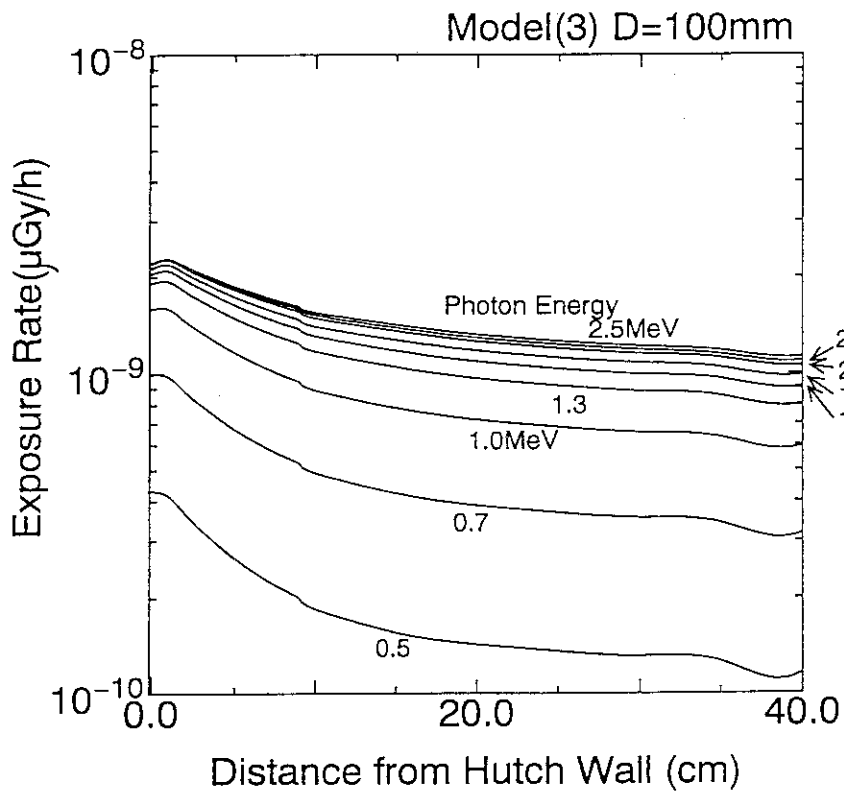


図3-4(14) グランドシャインの高エネルギー領域における
光子エネルギー依存性 (壁埋設深さD=100mm)

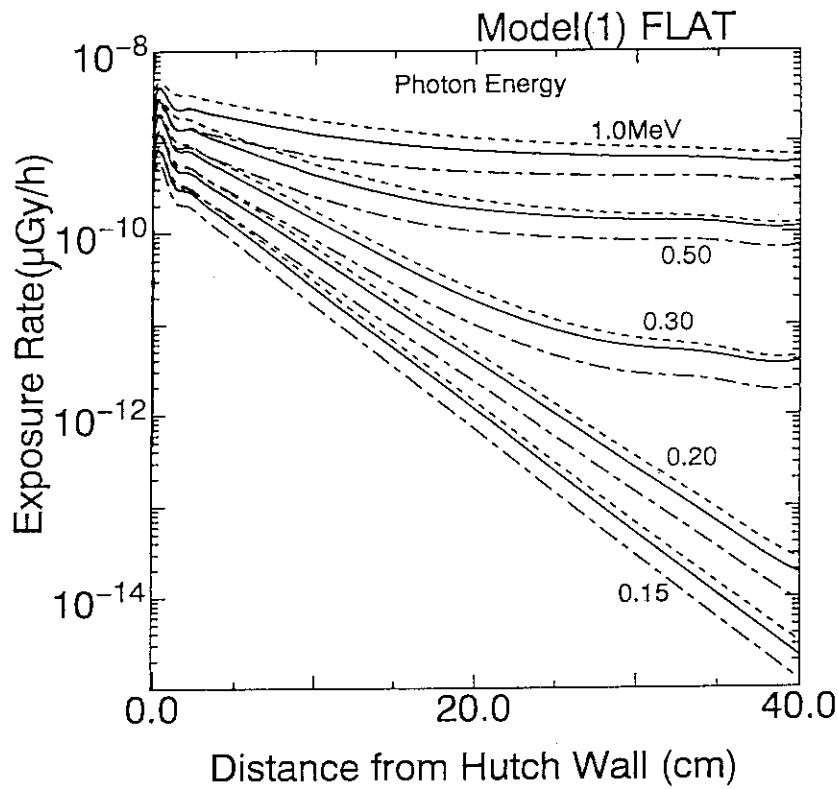


図3-5 (1) 線源位置によるグランドシャイン線量依存性 (Model(1)、鉛敷設無)

— ; H=1.0, B=2.0, ; H=0.5, B=2.0, - - - - ; H=1.5, B=2.0

(線源位置 H:床からの高さ (m)、B:ハッチ壁からの距離 (m))

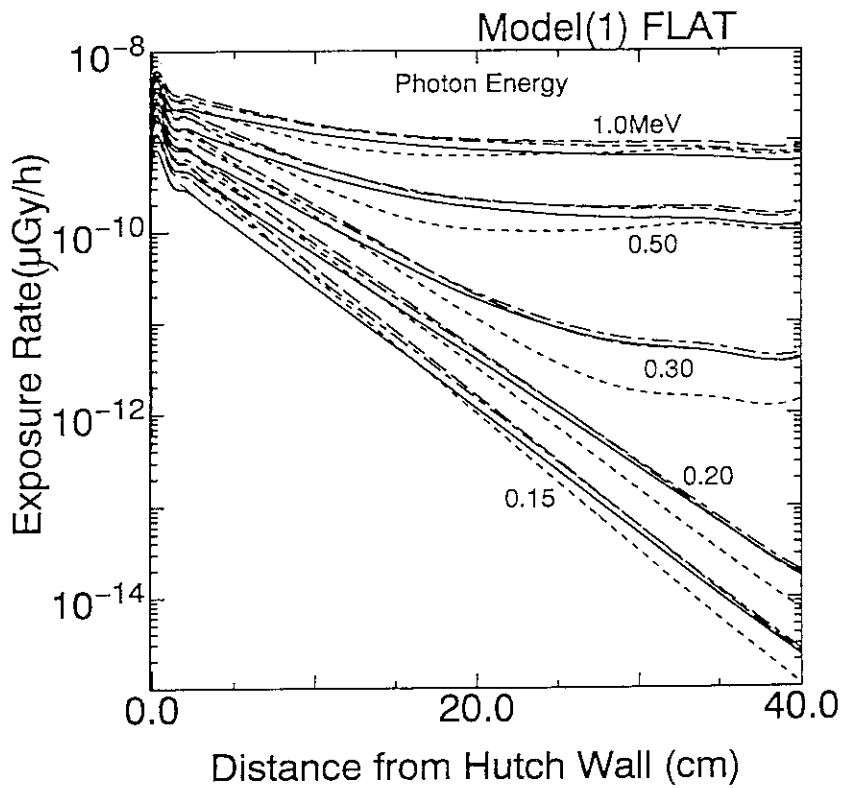


図3-5 (2) 線源位置によるグランドシャイン線量依存性 (Model(1)、鉛敷設無)

— ; H=1.0, B=2.0, ; H=1.0, B=0.5, - - - - ; H=1.0, B=1.0, - - - - ; H=1.0, B=1.5

(線源位置 H:床からの高さ (m)、B:ハッチ壁からの距離 (m))

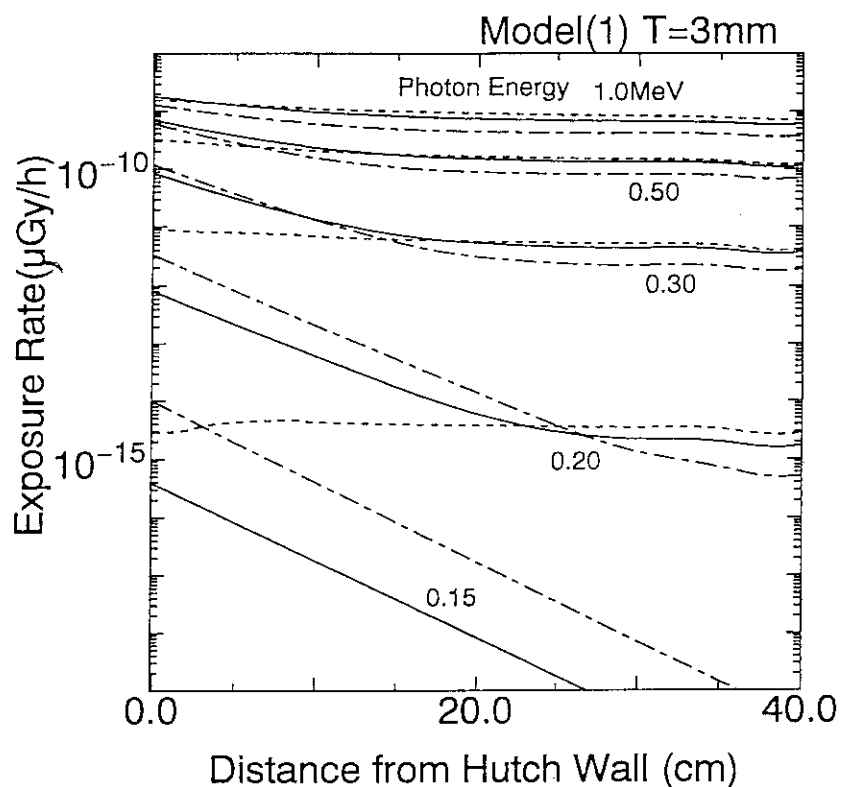


図3-5 (3) 線源位置によるグラウンドシャイン線量依存性 (Model(1)、鉛敷設 3mm)

— ; H=1.0, B=2.0, ; H=0.5, B=2.0, - - - - ; H=1.5, B=2.0

(線源位置 H: 床からの高さ (m)、B: ハッチ壁からの距離 (m))

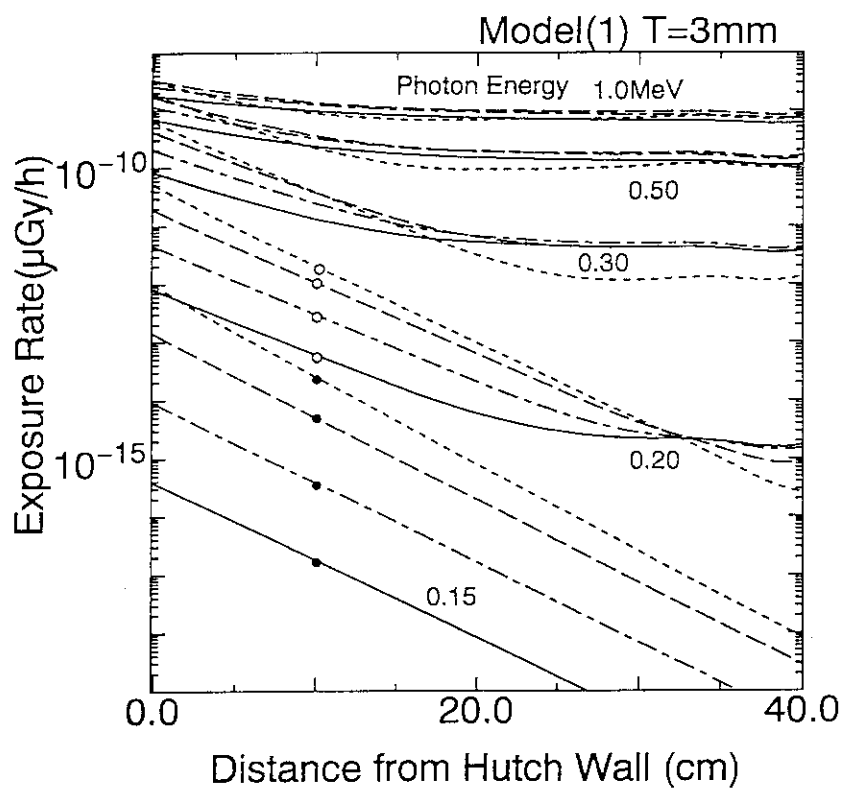


図3-5 (4) 線源位置によるグラウンドシャイン線量依存性 (Model(1)、鉛敷設 3mm)

— ; H=1.0, B=2.0, ; H=1.0, B=0.5, - - - - ; H=1.0, B=1.0, - - - - ; H=1.0, B=1.5

(線源位置 H: 床からの高さ (m)、B: ハッチ壁からの距離 (m))

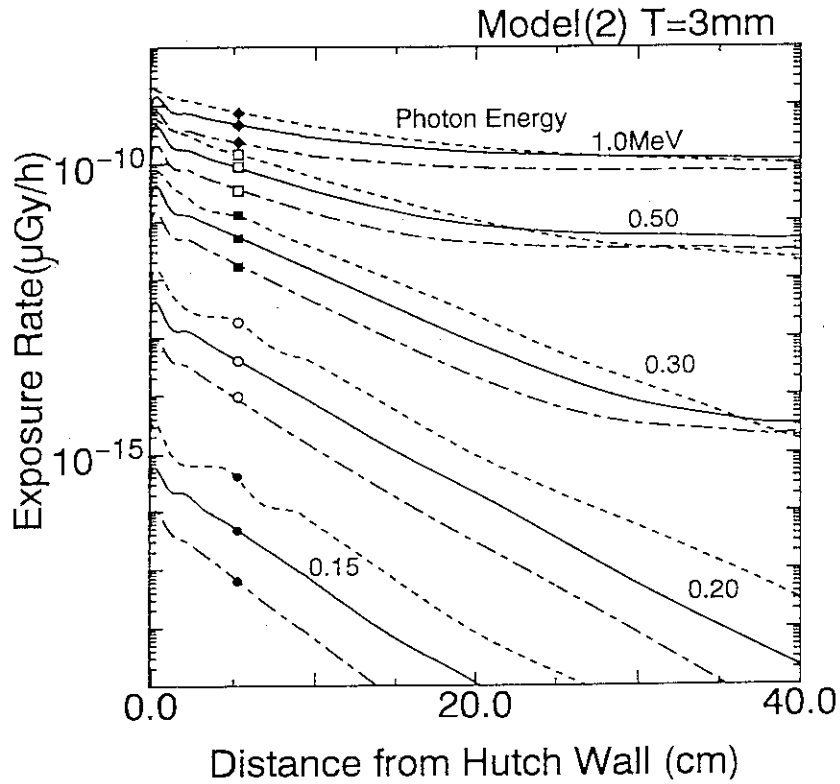


図3-5 (5) 線源位置によるグランドシャイン線量依存性 (Model(2)、鉛敷設3mm)

— : H=1.0, B=2.0, : H=0.5, B=2.0, - - - - : H=1.5, B=2.0

(線源位置 H:床からの高さ(m)、B:ハッチ壁からの距離(m))

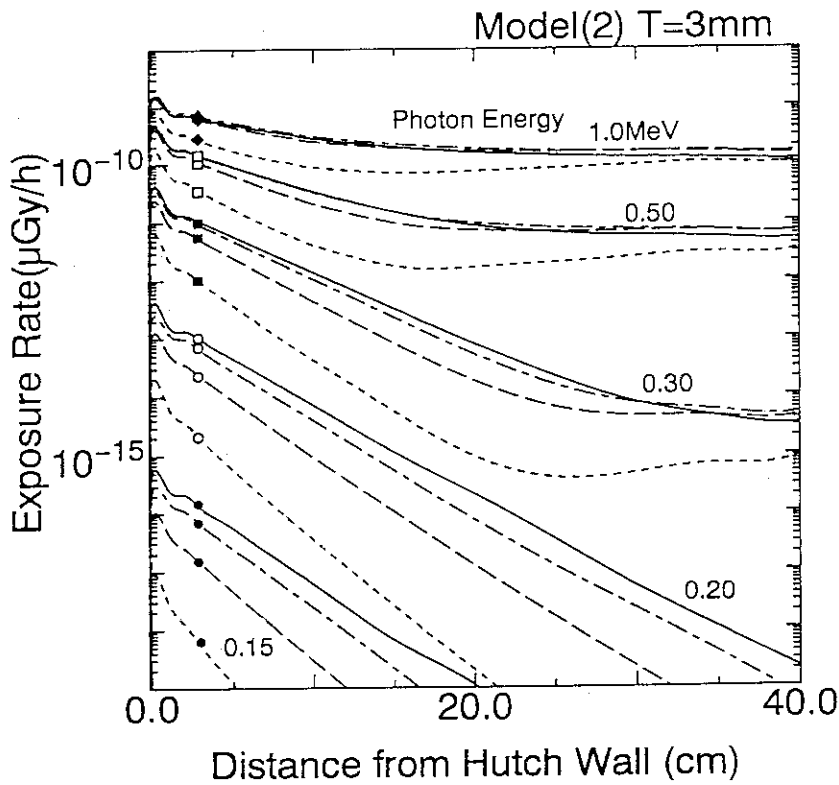


図3-5 (6) 線源位置によるグランドシャイン線量依存性 (Model(2)、鉛敷設3mm)

— : H=1.0, B=2.0, : H=1.0, B=0.5, - - - - : H=1.0, B=1.0, - - - - : H=1.0, B=1.5

(線源位置 H:床からの高さ(m)、B:ハッチ壁からの距離(m))

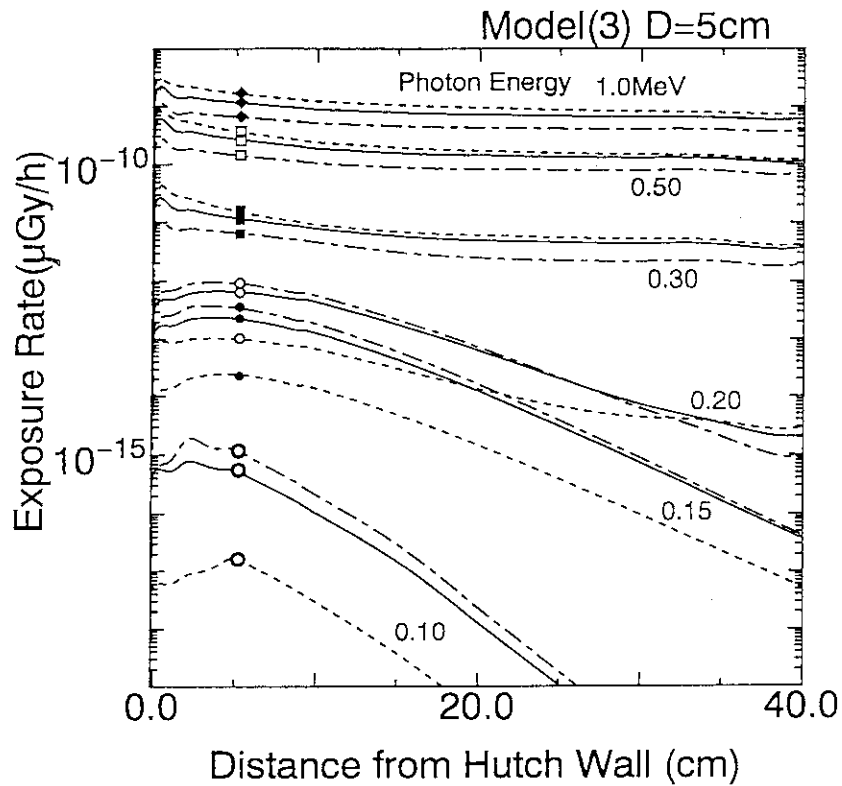


図3-5 (7) 線源位置によるグランドシャイン線量依存性 (Model(3)、壁埋設5cm)

——; H=1.0, B=2.0,; H=0.5, B=2.0, - - - -; H=1.5, B=2.0

(線源位置 H: 床からの高さ (m)、B: ハッチ壁からの距離 (m))

- - - - H=0.1, B=1.5

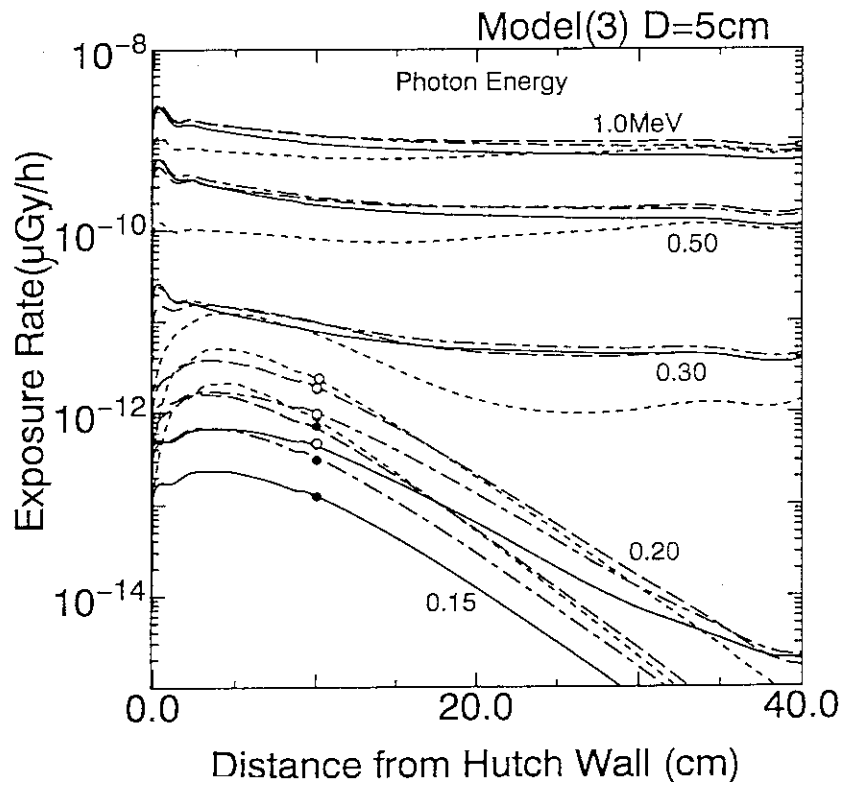


図3-5 (8) 線源位置によるグランドシャイン線量依存性 (Model(3)、壁埋設5cm)

——; H=1.0, B=2.0,; H=1.0, B=0.5, - - - -; H=1.0, B=1.0, - - - -; H=1.0, B=1.5

(線源位置 H: 床からの高さ (m)、B: ハッチ壁からの距離 (m))

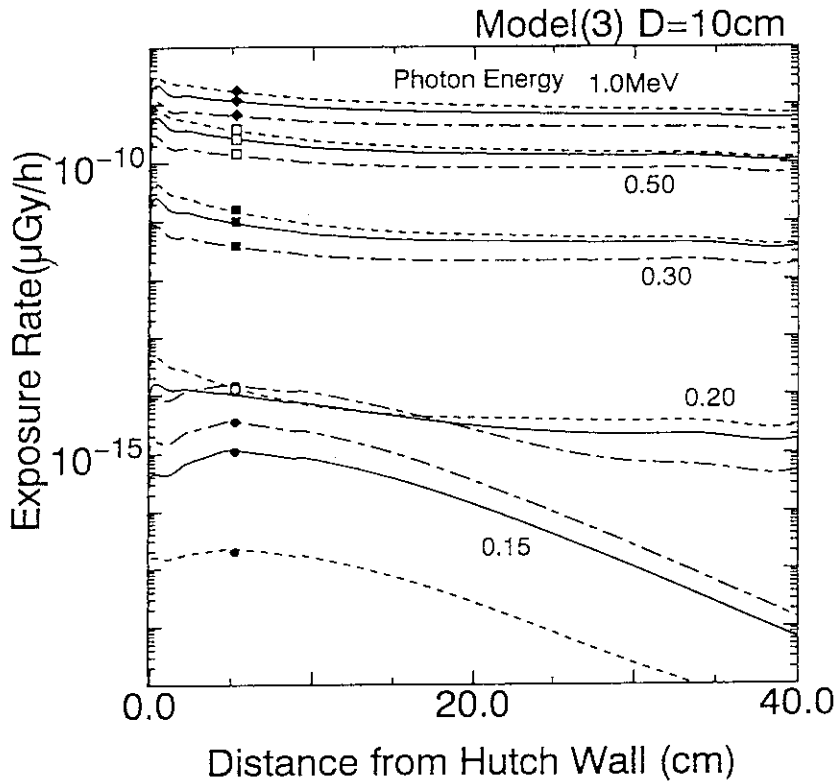


図3-5 (9) 線源位置によるグランドシャイン線量依存性 (Model(3)、壁埋設10cm)

— ; H=1.0, B=2.0, ; H=0.5, B=2.0, - - - - ; H=1.5, B=2.0
(線源位置 H: 床からの高さ (m)、B: ハッチ壁からの距離 (m))

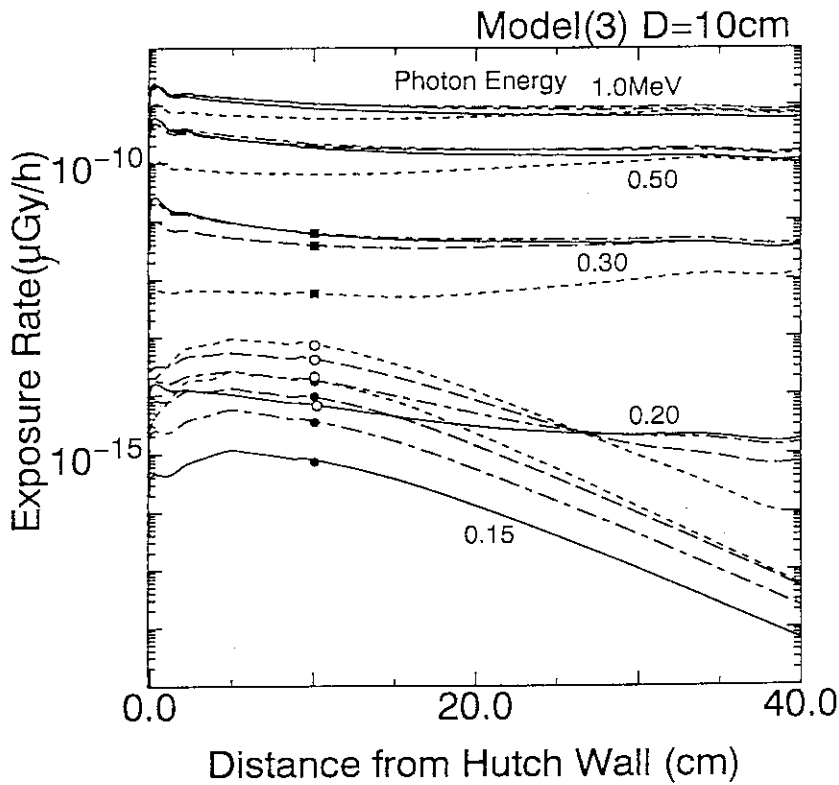


図3-5 (10) 線源位置によるグランドシャイン線量依存性 (Model(3)、壁埋設10cm)

— ; H=1.0, B=2.0, ; H=1.0, B=0.5, - - - - ; H=1.0, B=1.0, - - - - ; H=1.0, B=1.5
(線源位置 H: 床からの高さ (m)、B: ハッチ壁からの距離 (m))

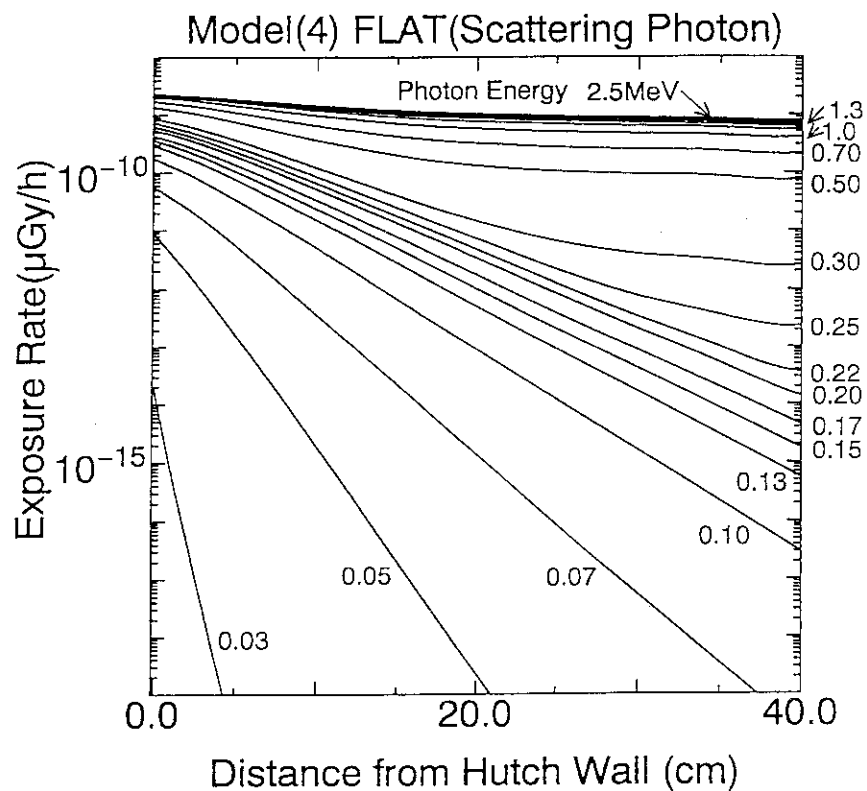


図3-6 (1) 円筒平板モデル(Model(4))によるG33-GP2計算結果
(G33-GP2によるグランドシャイン線量光子エネルギー依存性)

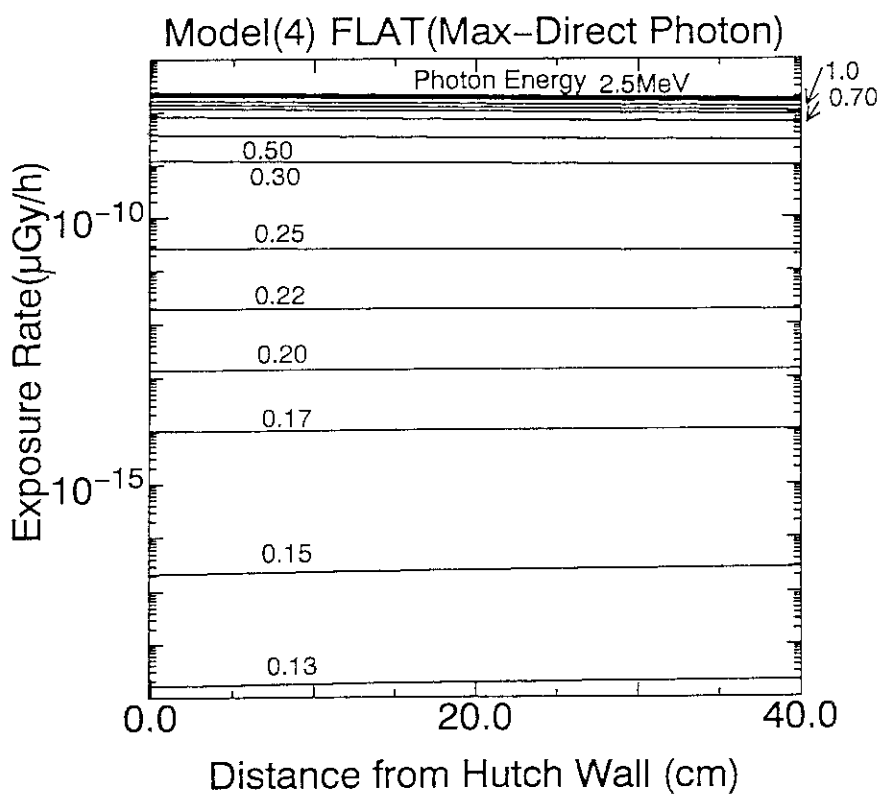


図3-6 (2) 円筒平板モデル(Model(4))によるG33-GP2計算結果
(G33-GP2による直接線線量光子エネルギー依存性)

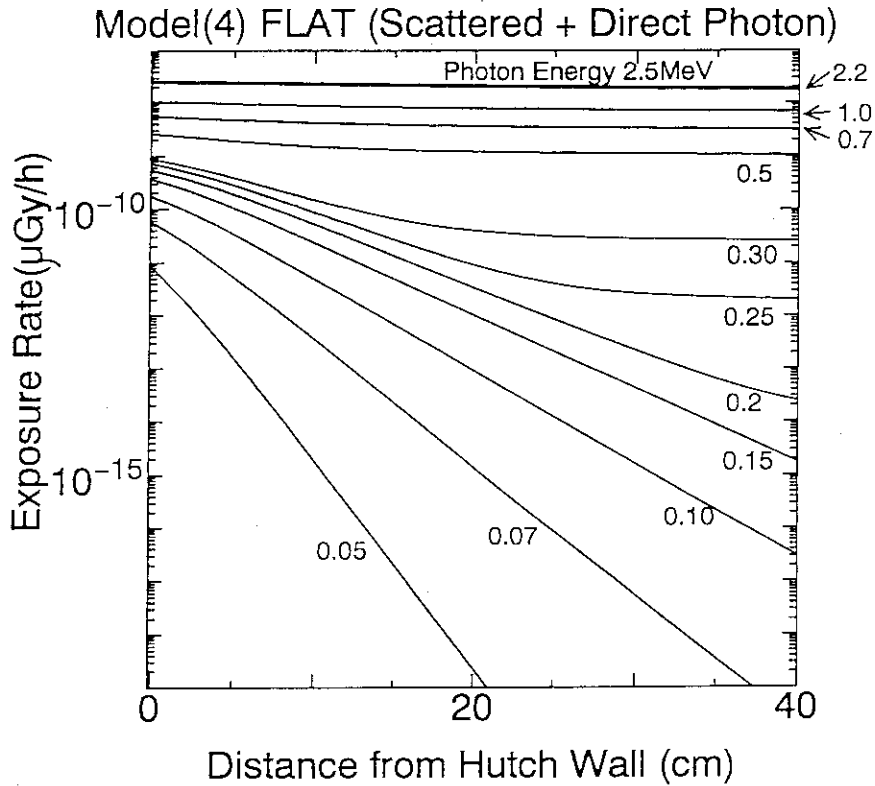


図3-6 (3) 円筒平板モデル(Model(4))によるG33-GP2計算結果
(G33-GP2による(直接線+グランドシャイン)線量光子エネルギー依存性)

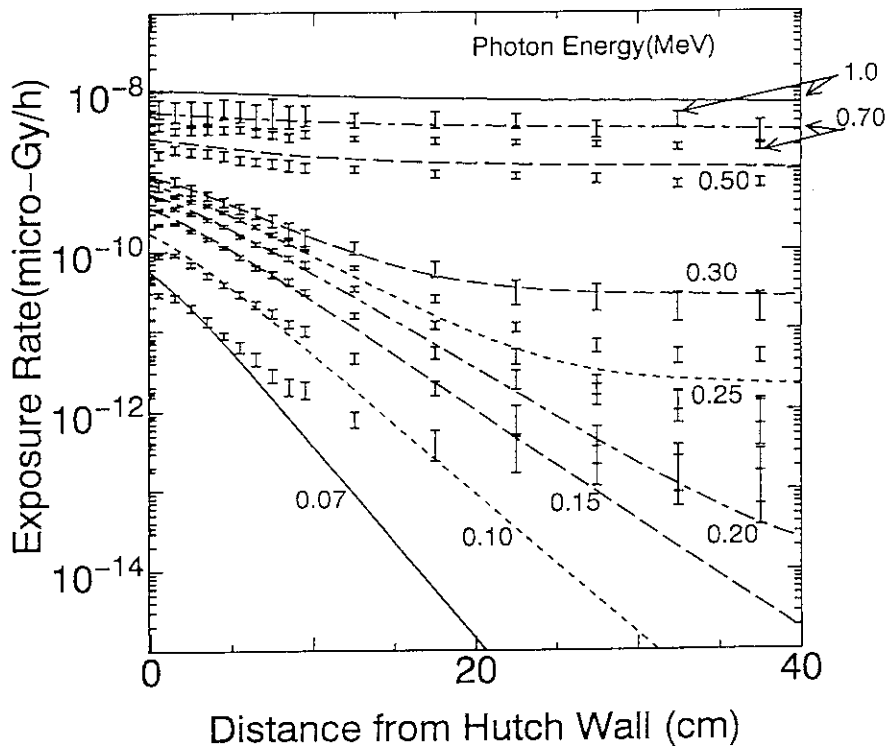


図3-6 (4) 円筒平板モデル(Model(4))によるG33-GP2と
ITS 3.0の比較
(図中の数字は光子エネルギーを示す。□: ITS 3.0計算結果)

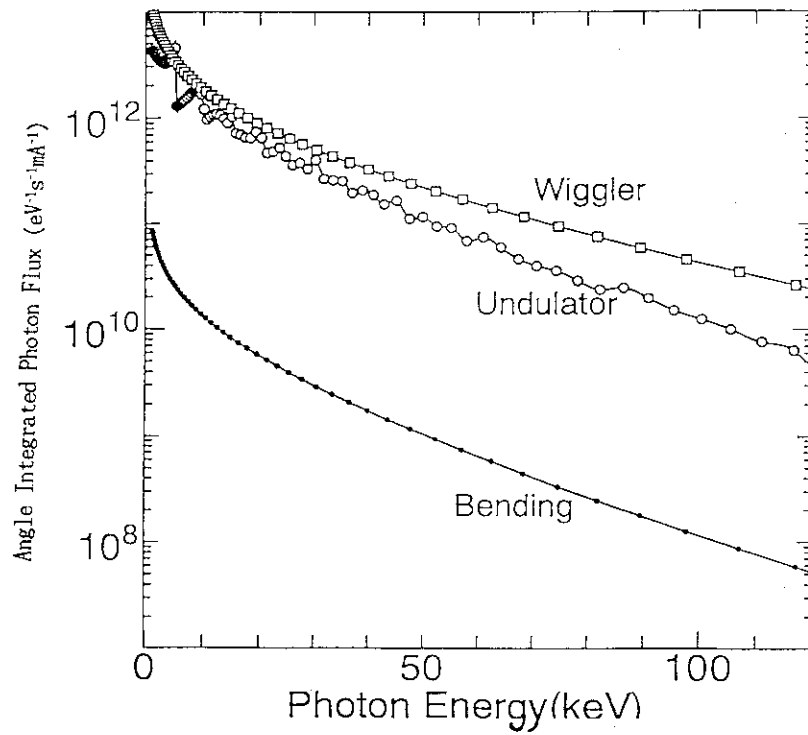


図4-1 Spring-8の典型的な放射光光源スペクトル
(開き角による積分値)

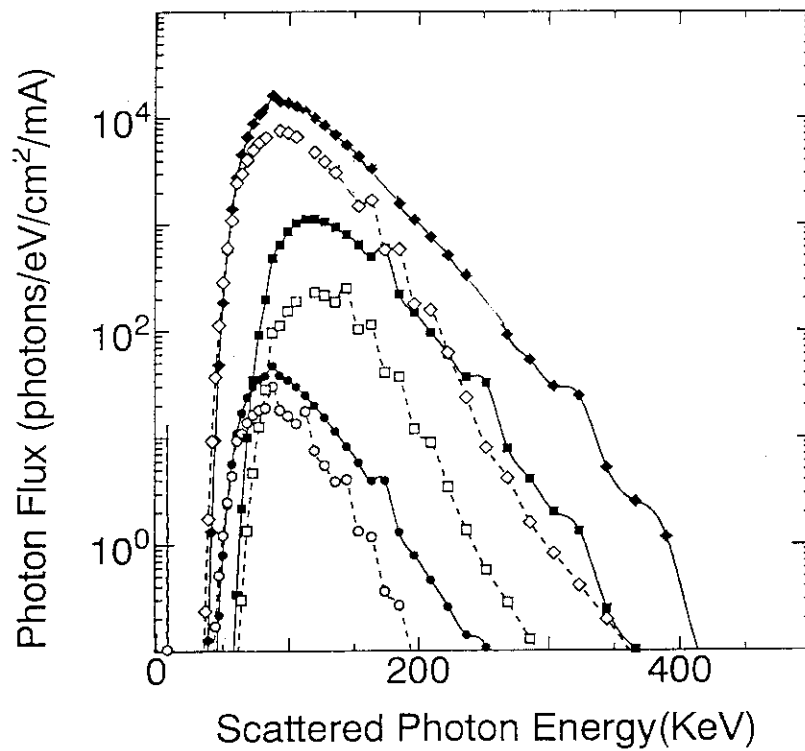


図4-2 散乱放射光スペクトル (散乱角50度及び90度)
散乱位置; ハッチ側壁から2m、散乱体; 銅1cm

- : 偏向電磁石 50度散乱、 ○: 偏向電磁石 90度散乱
- : アンジュレータ 50度散乱、 □: アンジュレータ 90度散乱
- ◆: ウィグラー 50度散乱、 ◇: ウィグラー 90度散乱

Source: Bending at 200 cm 90 deg. Without local shield

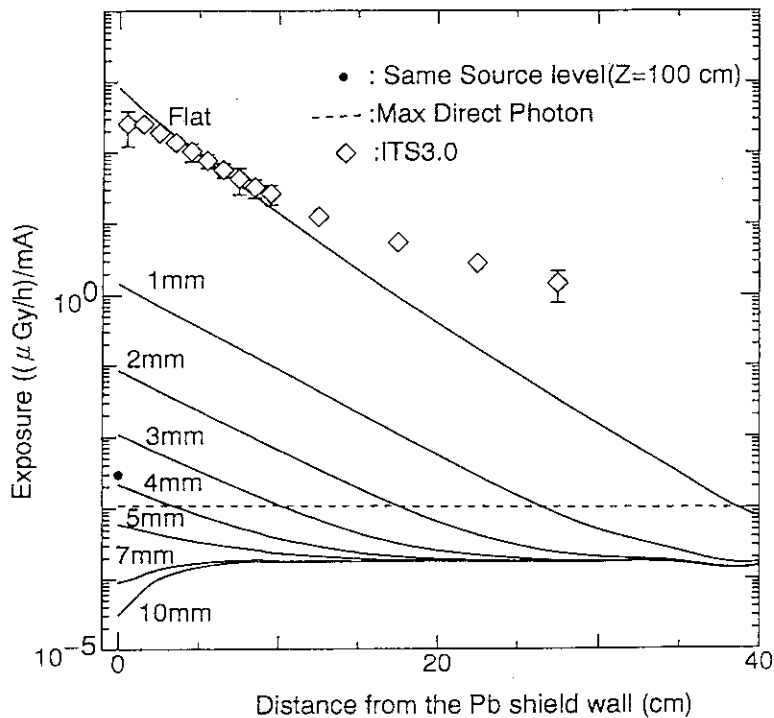


図4-3 Model (1)におけるSP ring-8偏向電磁石ビームラインのグランドシャイン線量計算結果 (散乱角度 90度、各数字は敷設鉛厚さTを示す。) (●; 線源と同じ高さでのハッチ壁外の漏洩線量率) (-----; 直接線による最大漏洩線量)

Source: Bending at 200 cm 50 deg. Without local shield

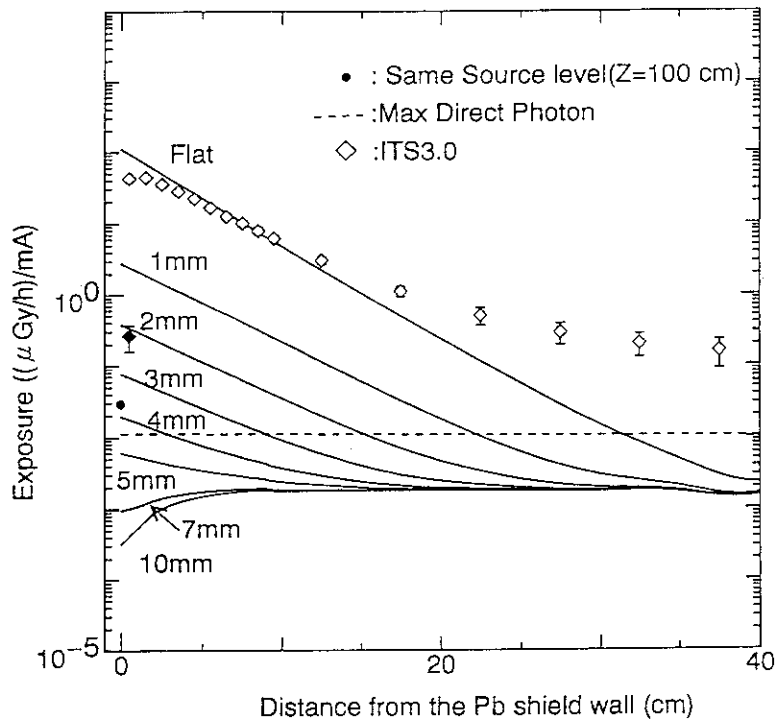


図4-4 Model (1)におけるSP ring-8偏向電磁石ビームラインのグランドシャイン線量計算結果 (散乱角度 50度、各数字は敷設鉛厚さTを示す。)

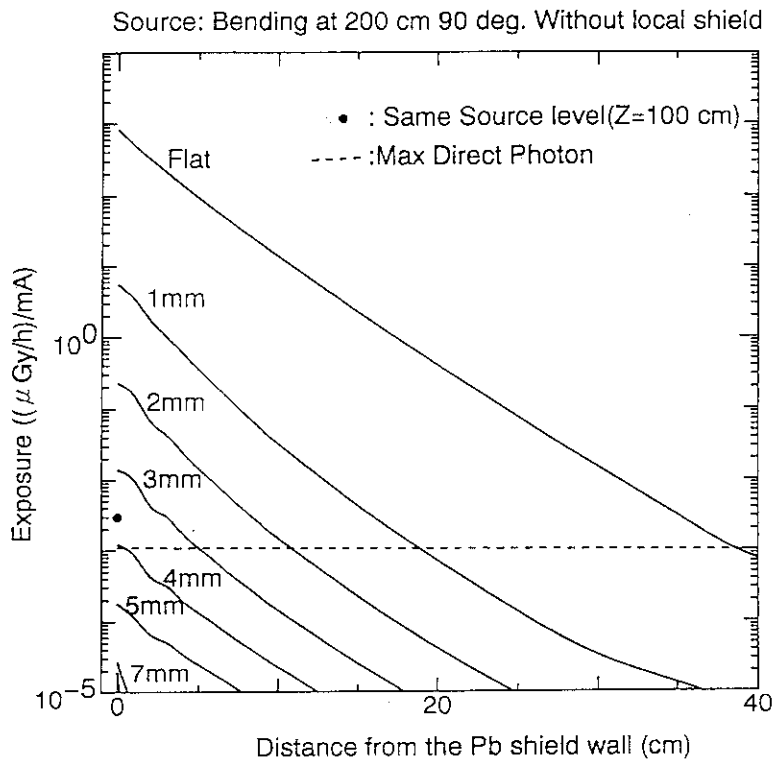


図4-5 Model (2)におけるSPRING-8偏向電磁石ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果 (散乱角度 90度、各数字は敷設鉛厚さTを示す。)

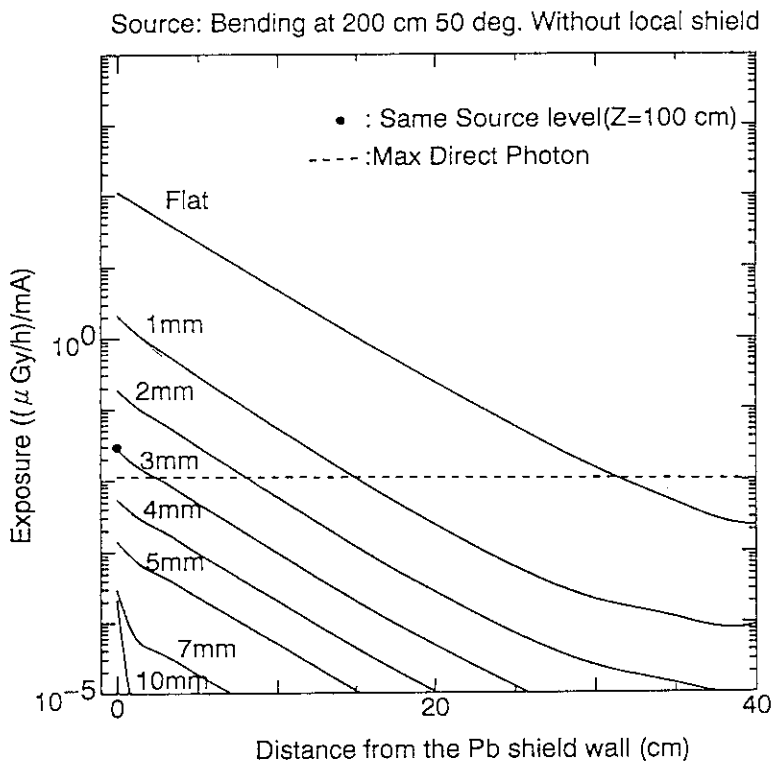


図4-6 Model (2)におけるSPRING-8偏向電磁石ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果 (散乱角度 50度、各数字は敷設鉛厚さTを示す。)

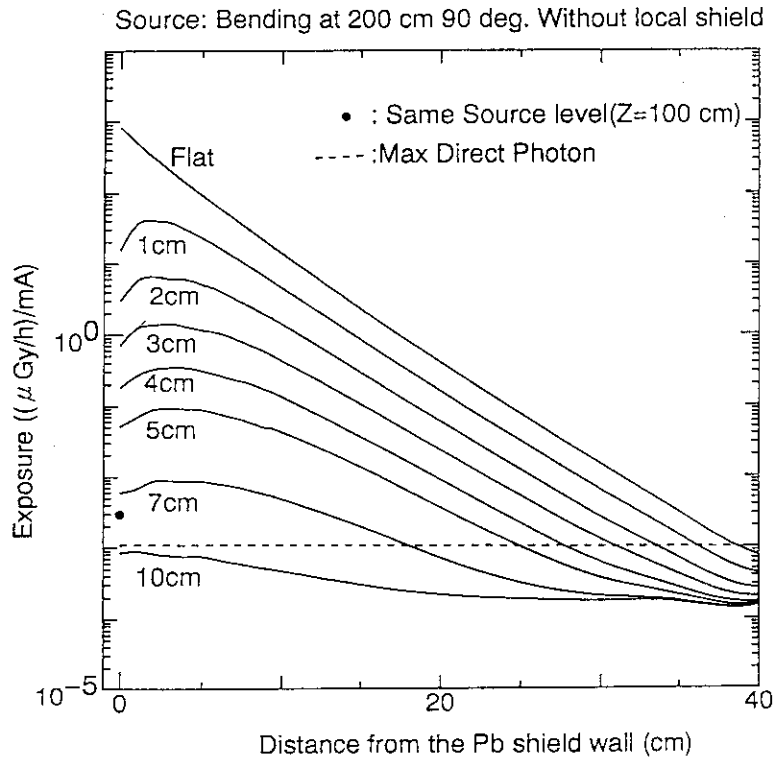


図4-7 Model (3)におけるSPring-8偏向電磁石ビームラインのグランドシャイン線量計算結果 (散乱角度 90度、各数字は埋設壁深さDを示す。)

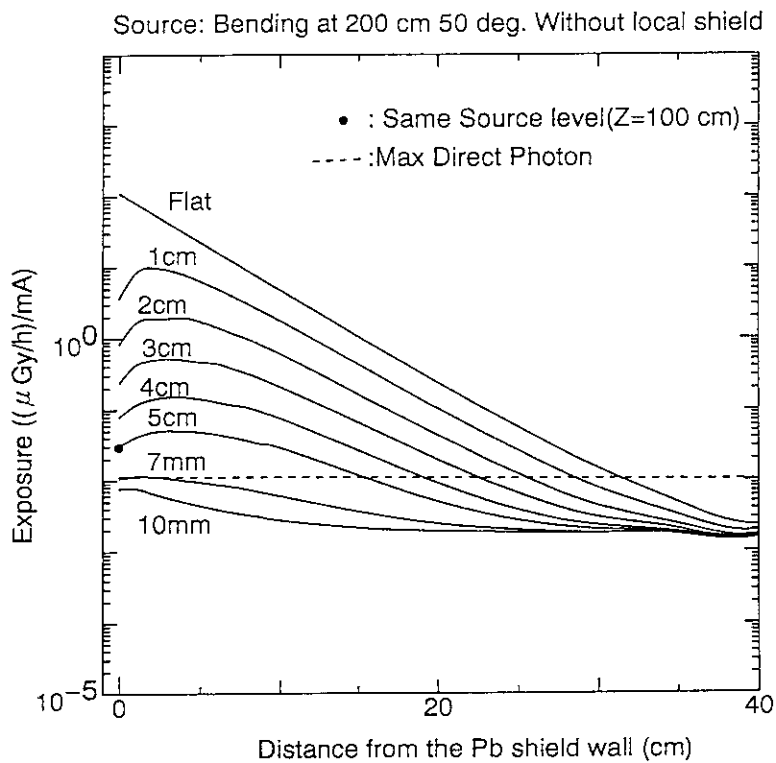


図4-8 Model (3)におけるSPring-8偏向電磁石ビームラインのグランドシャイン線量計算結果 (散乱角度 50度、各数字は埋設壁深さDを示す。)

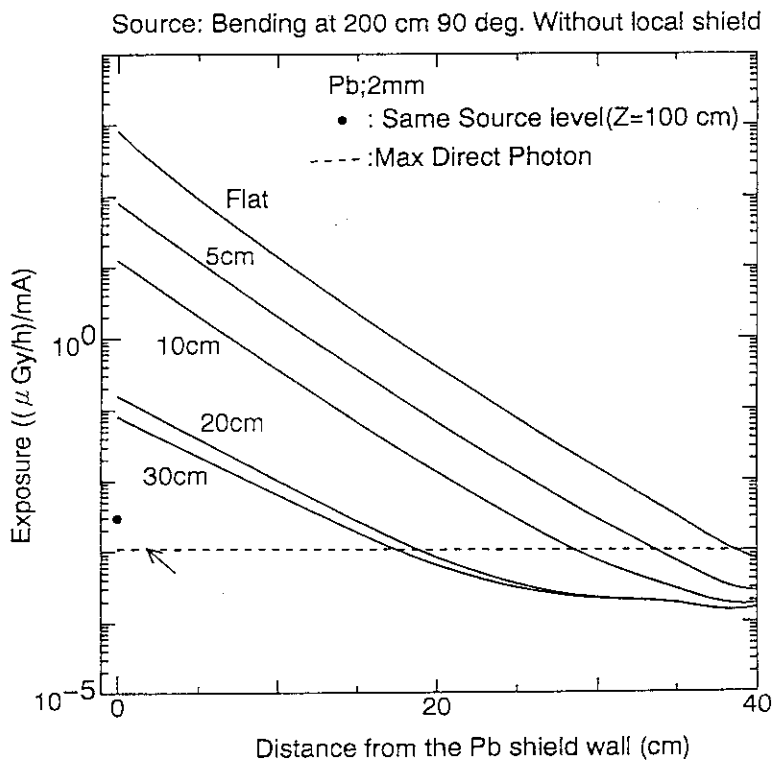


図4-9 Model(1)におけるSPRING-8偏向電磁石ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 90度、各数字は2mm鉛の敷設幅Lを示す。)

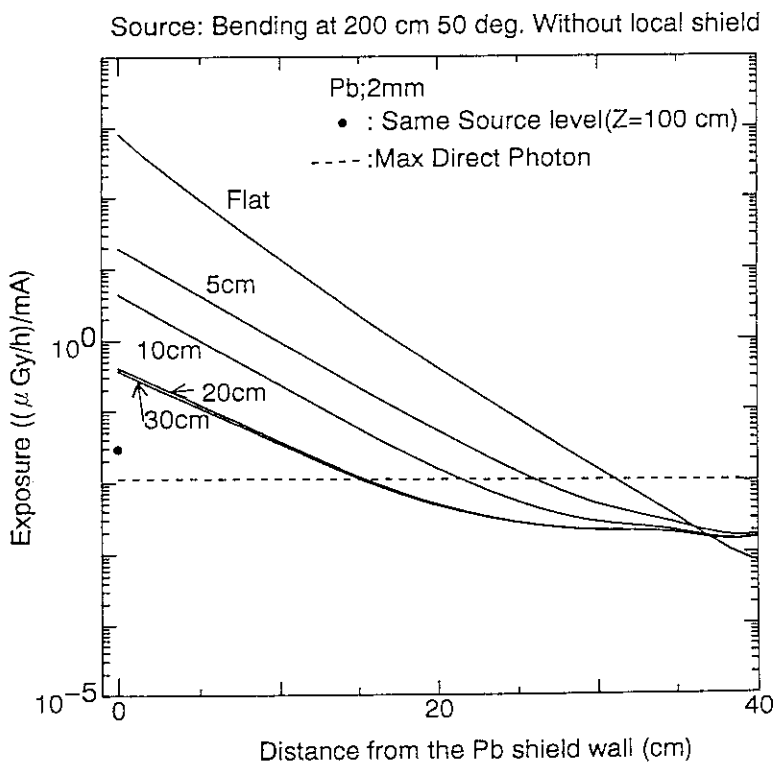


図4-10 Model(1)におけるSPRING-8偏向電磁石ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 50度、各数字は2mm鉛の敷設幅Lを示す。)

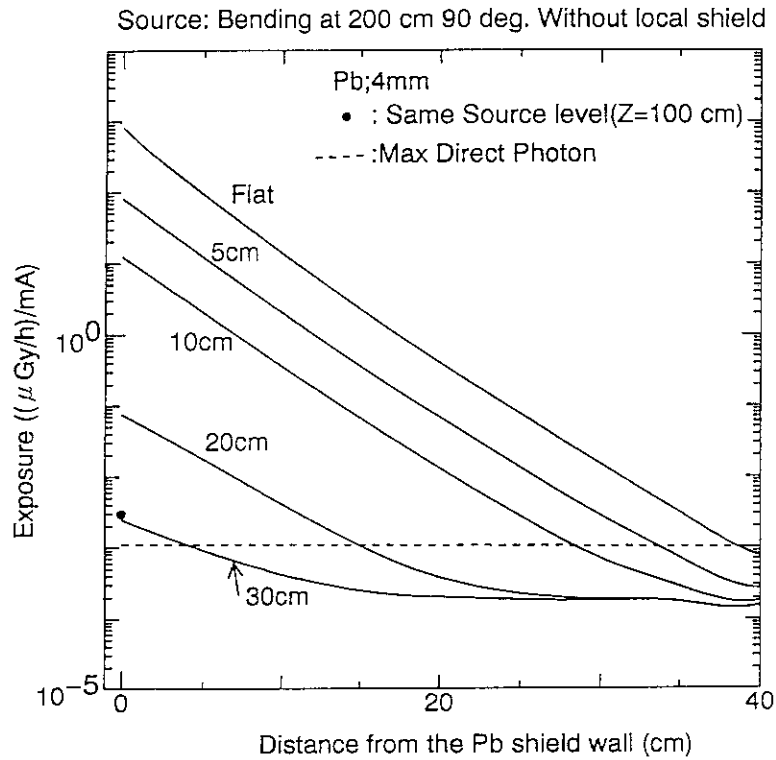


図4-11 Model (1)におけるSPRING-8偏向電磁石
 ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 90度、各数字は4mm鉛の敷設幅Lを示す。)

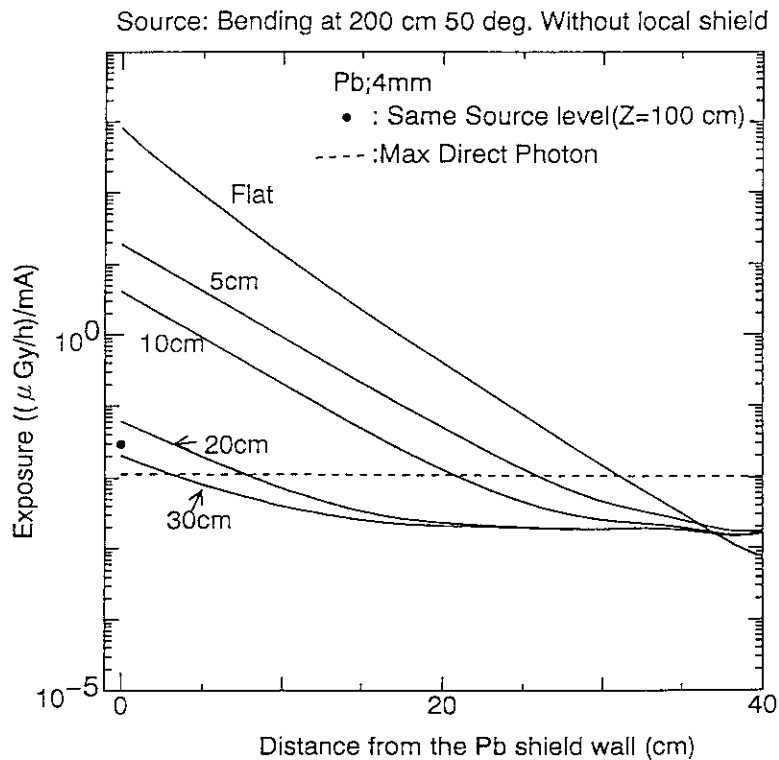


図4-12 Model (1)におけるSPRING-8偏向電磁石
 ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 50度、各数字は4mm鉛の敷設幅Lを示す。)

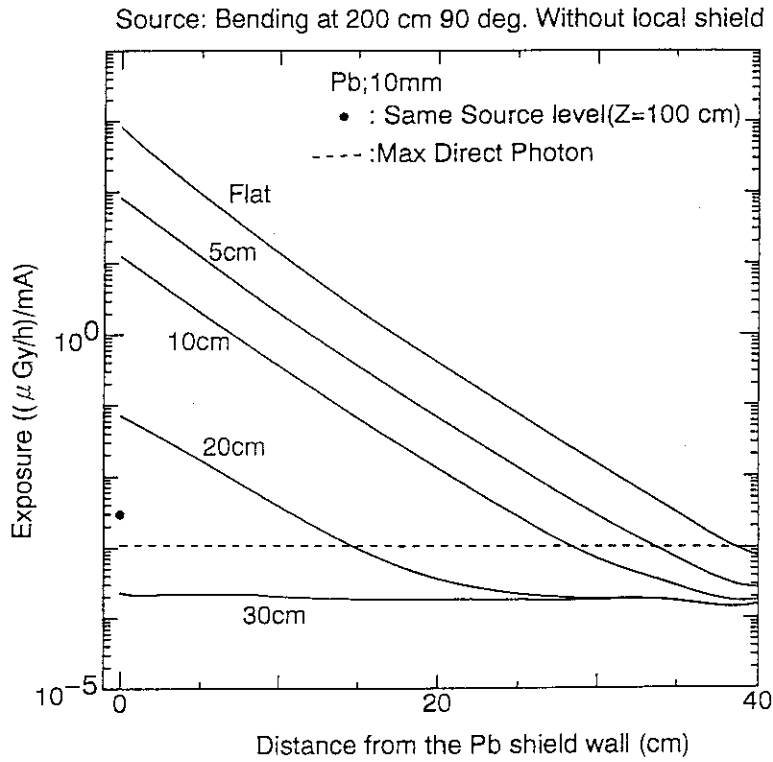


図4-13 Model (1)におけるSPRING-8偏向電磁石
 ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 90度、各数字は10mm鉛の敷設幅Lを示す。)

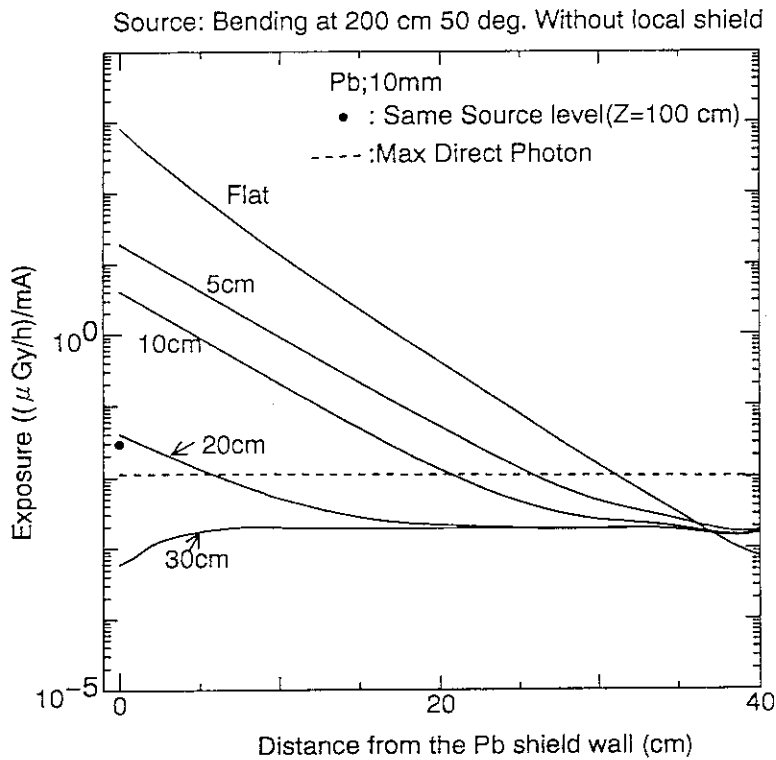


図4-14 Model (1)におけるSPRING-8偏向電磁石
 ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 50度、各数字は10mm鉛の敷設幅Lを示す。)

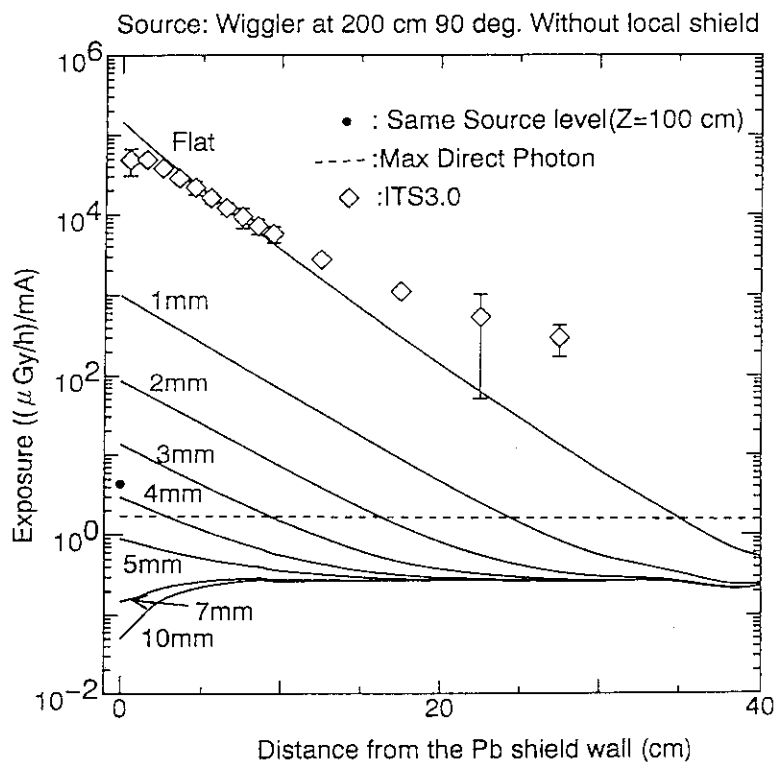


図4-15 Model (1)におけるSPRING-8ウィグラー
 ビームラインのグランドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 90度、各数字は敷設鉛厚さTを示す。)

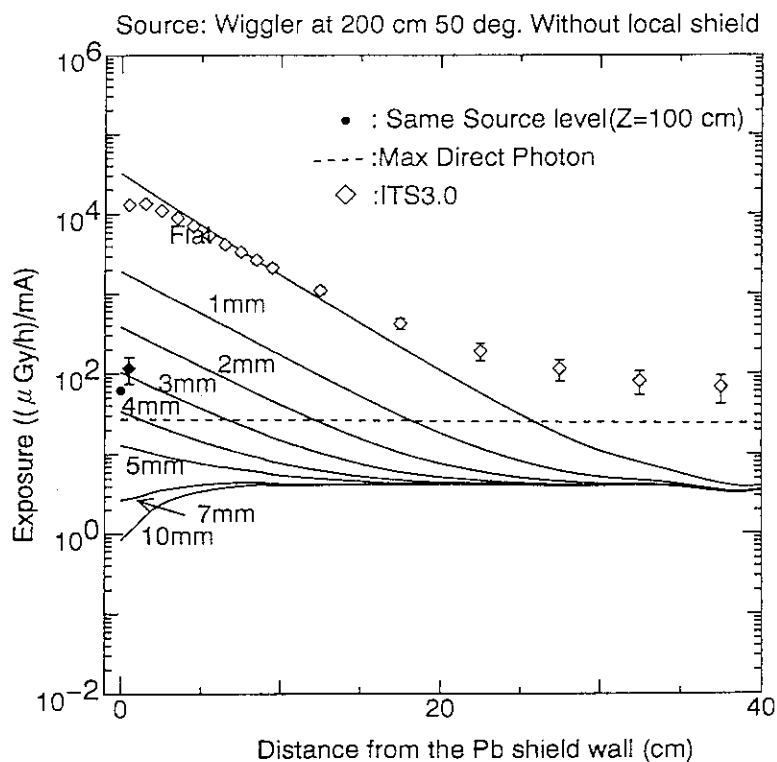


図4-16 Model (1)におけるSPRING-8ウィグラー
 ビームラインのグランドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 50度、各数字は敷設鉛厚さTを示す。)

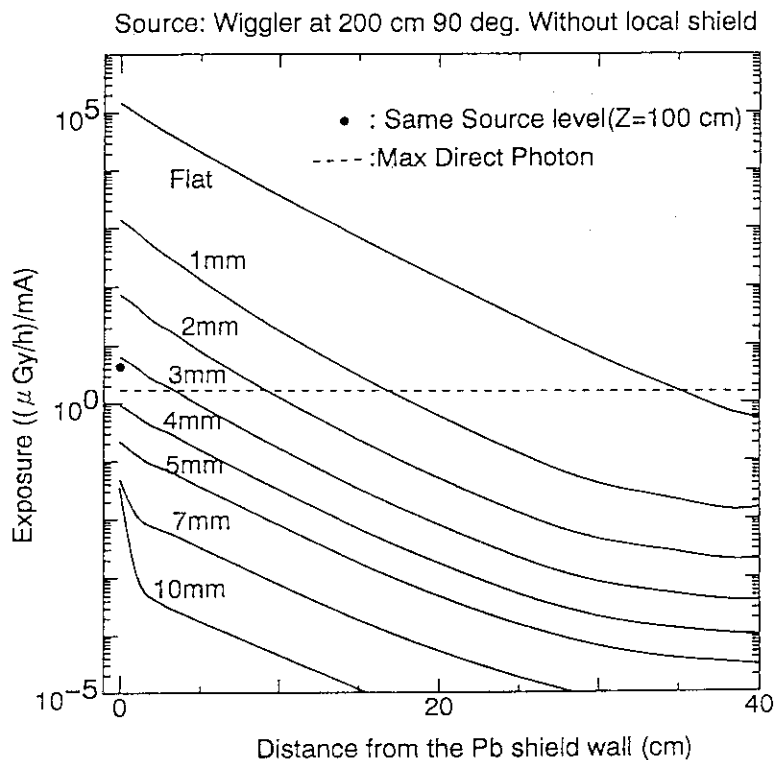


図4-17 Model (2)におけるSPRING-8ウィグラー
 ビームラインのグランドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 90度、各数字は敷設鉛厚さTを示す。)

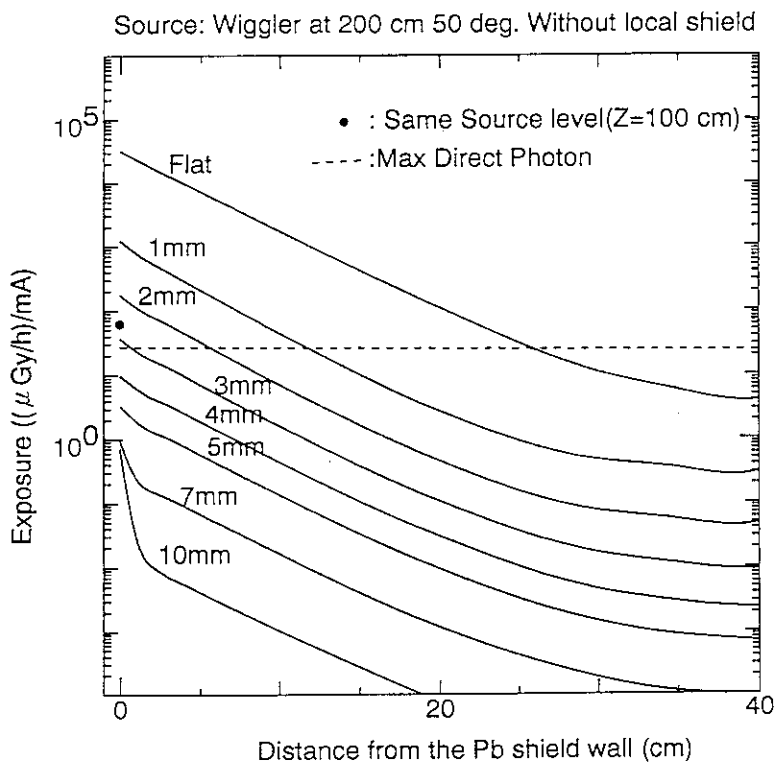


図4-18 Model (2)におけるSPRING-8ウィグラー
 ビームラインのグランドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 50度、各数字は敷設鉛厚さTを示す。)

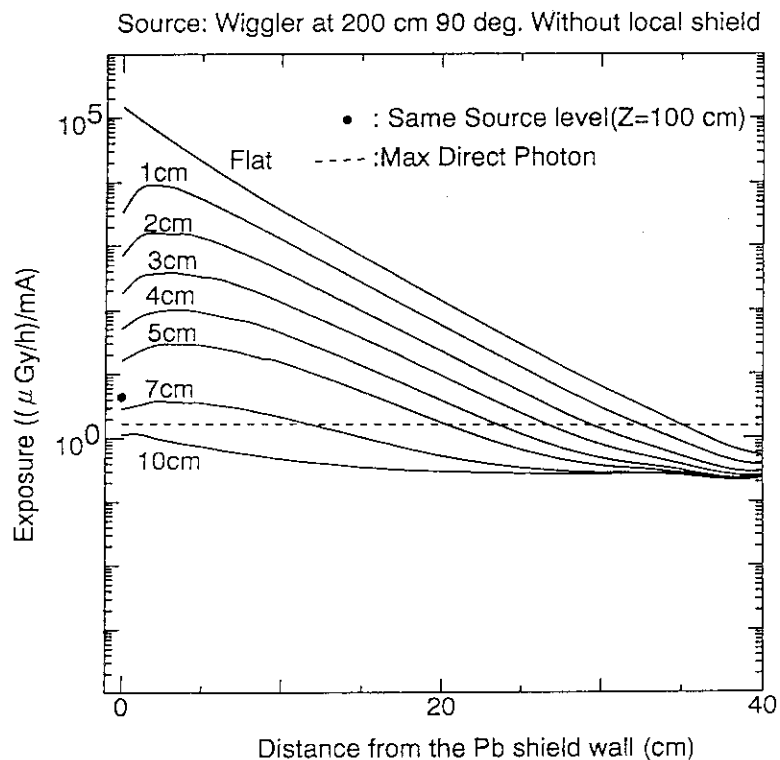


図4-19 Model (3)におけるSPring-8ウィグラー
 ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 90度、各数字は埋設壁深さDを示す。)

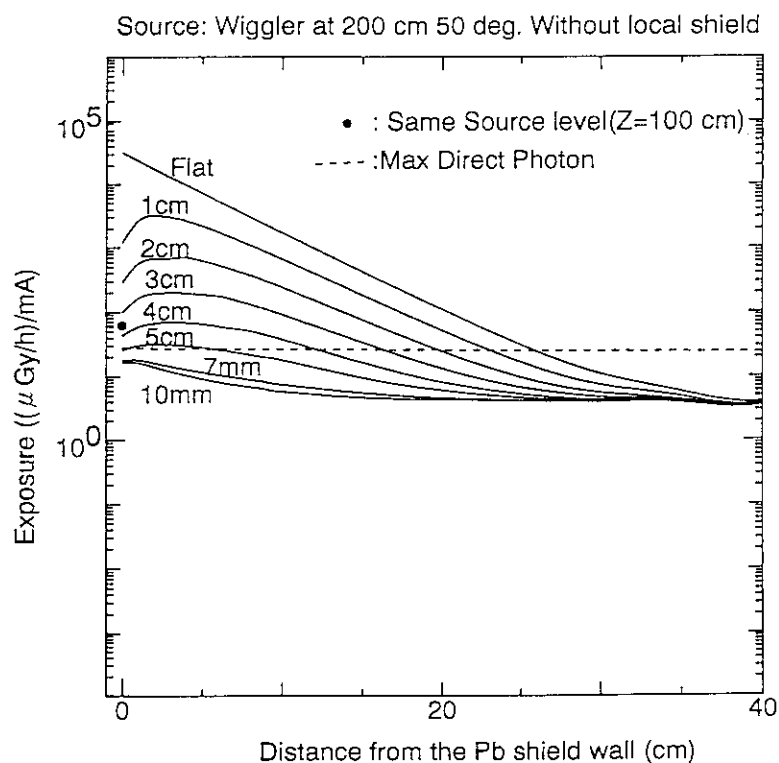


図4-20 Model (3)におけるSPring-8ウィグラー
 ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 50度、各数字は埋設壁深さDを示す。)

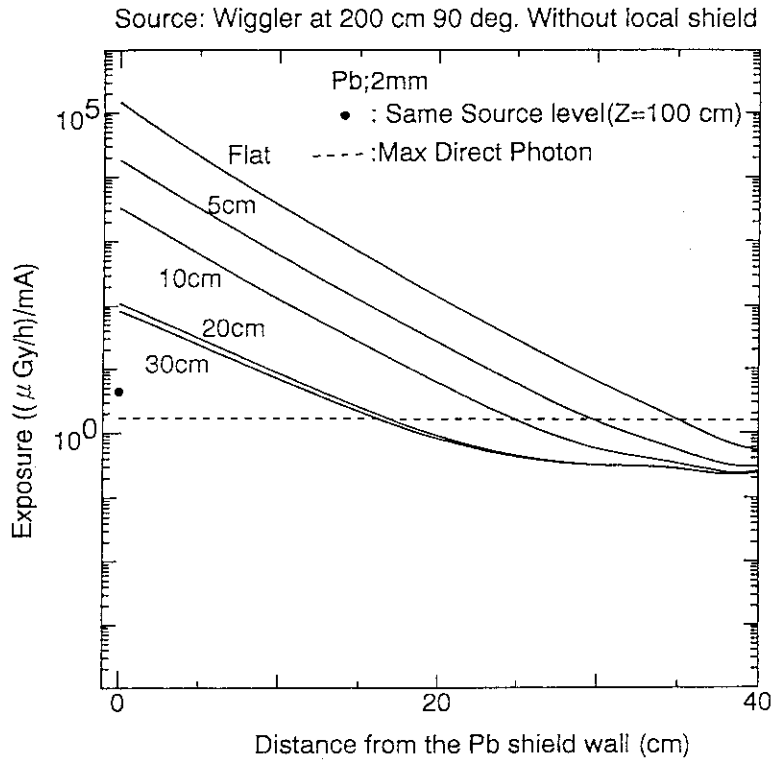


図4-21 Model (1)におけるSPRING-8ウィグラー
 ビームラインのグランドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 90度、各数字は2mm鉛の敷設幅Lを示す。)

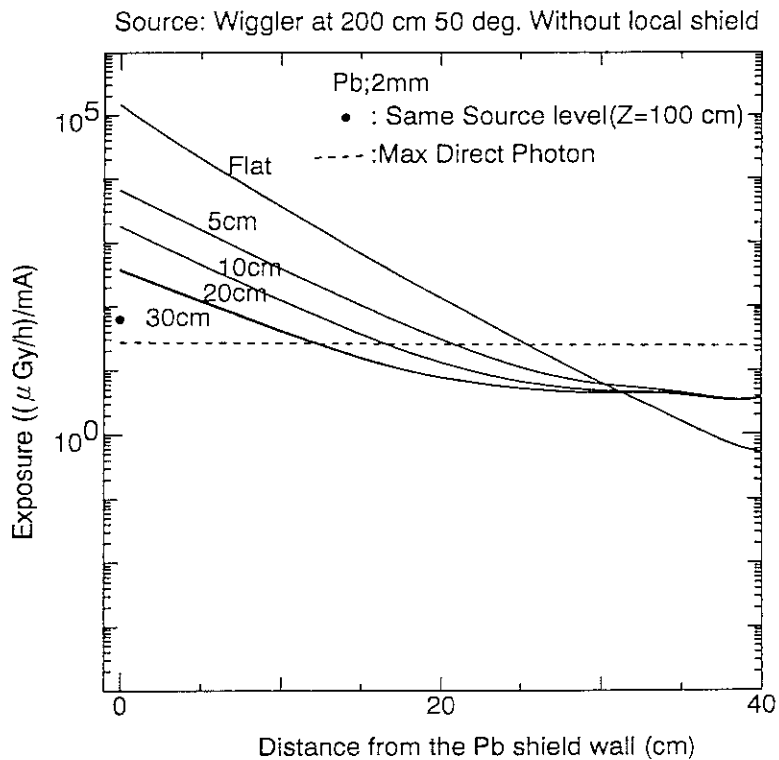


図4-22 Model (1)におけるSPRING-8ウィグラー
 ビームラインのグランドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 50度、各数字は2mm鉛の敷設幅Lを示す。)

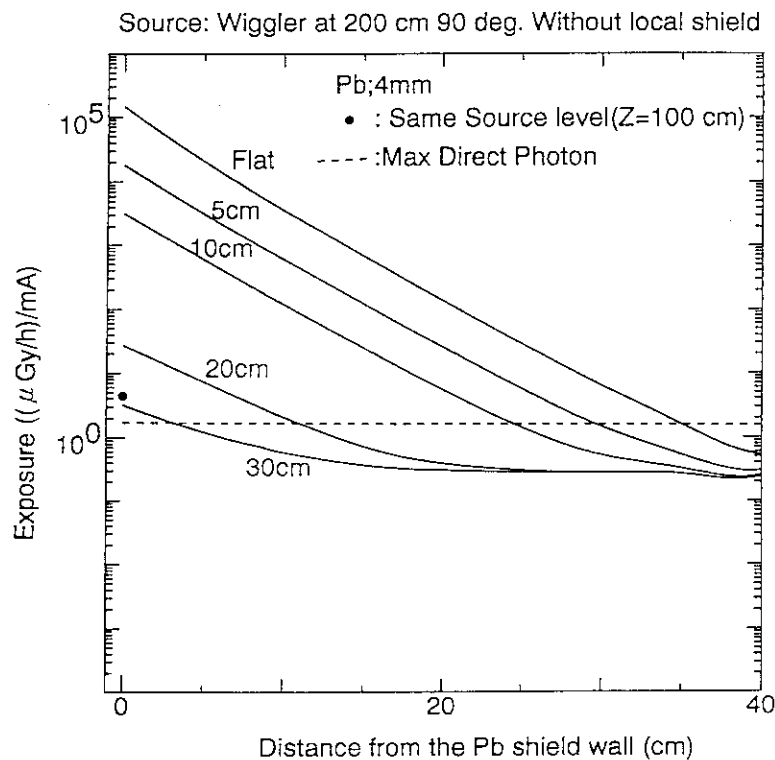


図4-23 Model (1)におけるSPRING-8ウィグラー
 ビームラインのグランドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 90度、各数字は4mm鉛の敷設幅Lを示す。)

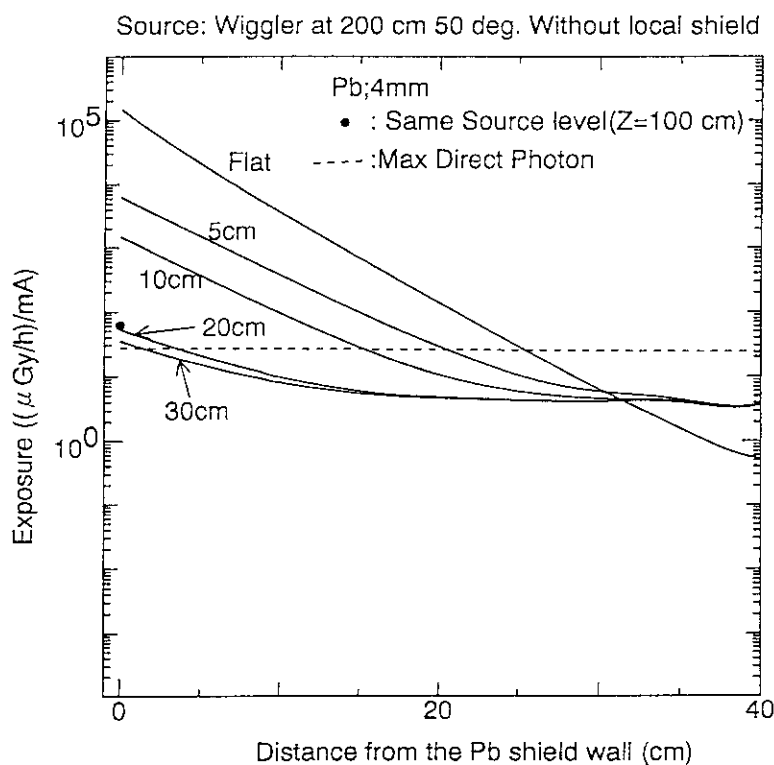


図4-24 Model (1)におけるSPRING-8ウィグラー
 ビームラインのグランドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 50度、各数字は4mm鉛の敷設幅Lを示す。)

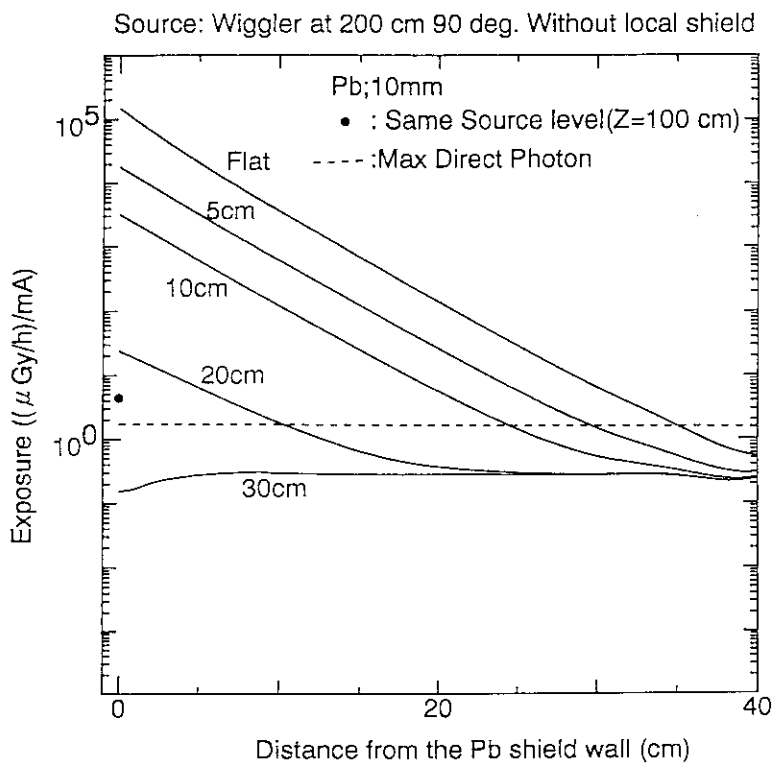


図4-25 Model (1)におけるSPRING-8ウィグラー
 ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 90度、各数字は10mm鉛の敷設幅Lを示す。)

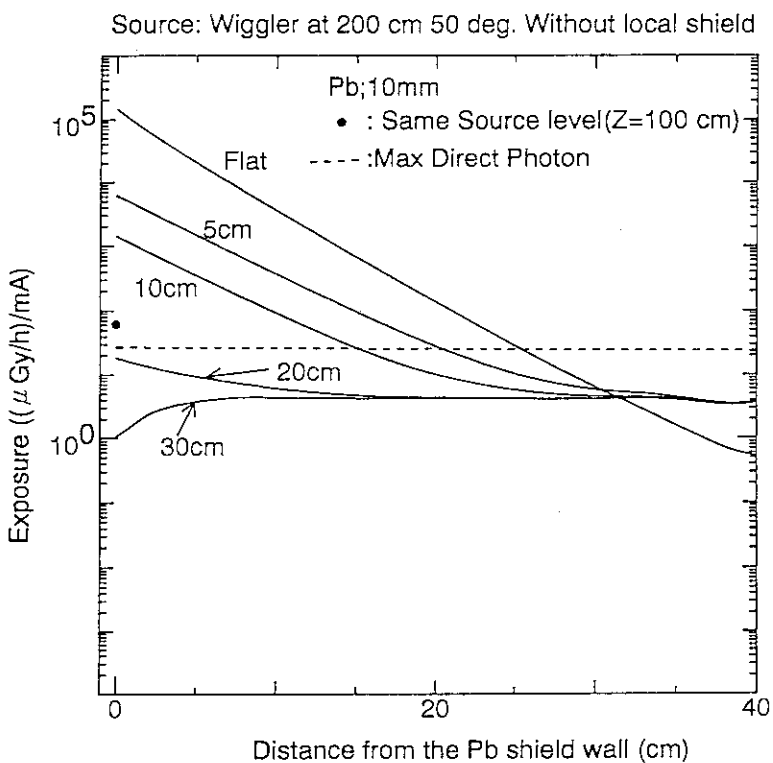


図4-26 Model (1)におけるSPRING-8ウィグラー
 ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 50度、各数字は10mm鉛の敷設幅Lを示す。)

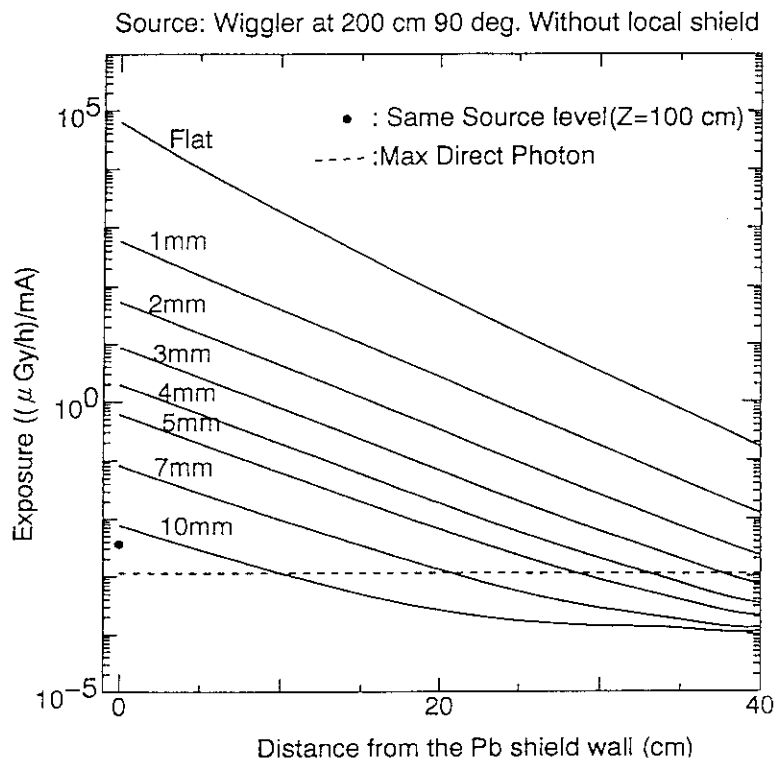


図4-27 Model (1)におけるSPring-8ウィグラー
 ビームラインのグランドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 90度、各数字は敷設鉛厚さTを示す。
 ただし壁鉛厚さを3 cmとした。)

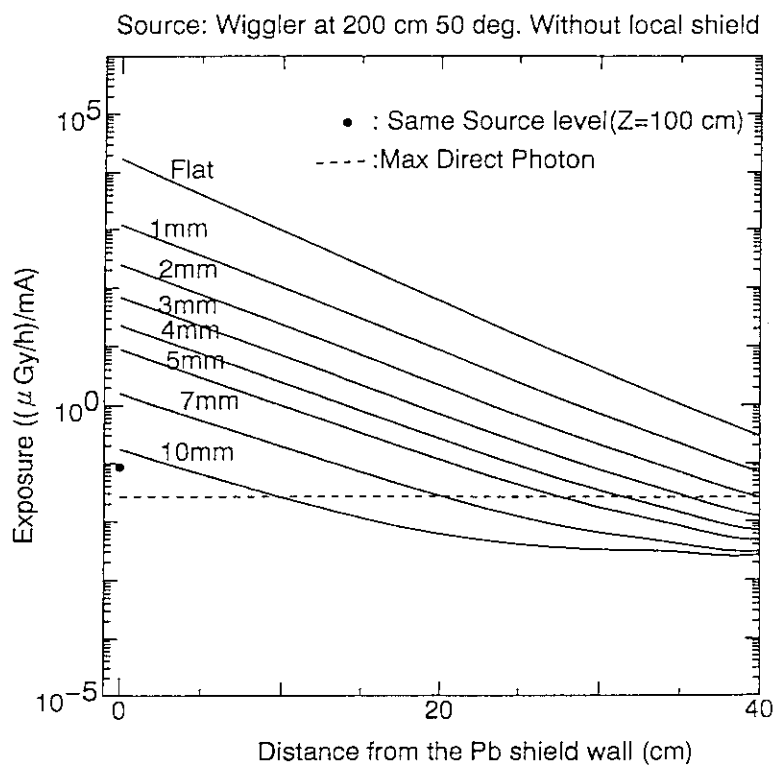


図4-28 Model (1)におけるSPring-8ウィグラー
 ビームラインのグランドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 50度、各数字は敷設鉛厚さTを示す。
 ただし壁鉛厚さを3 cmとした。)

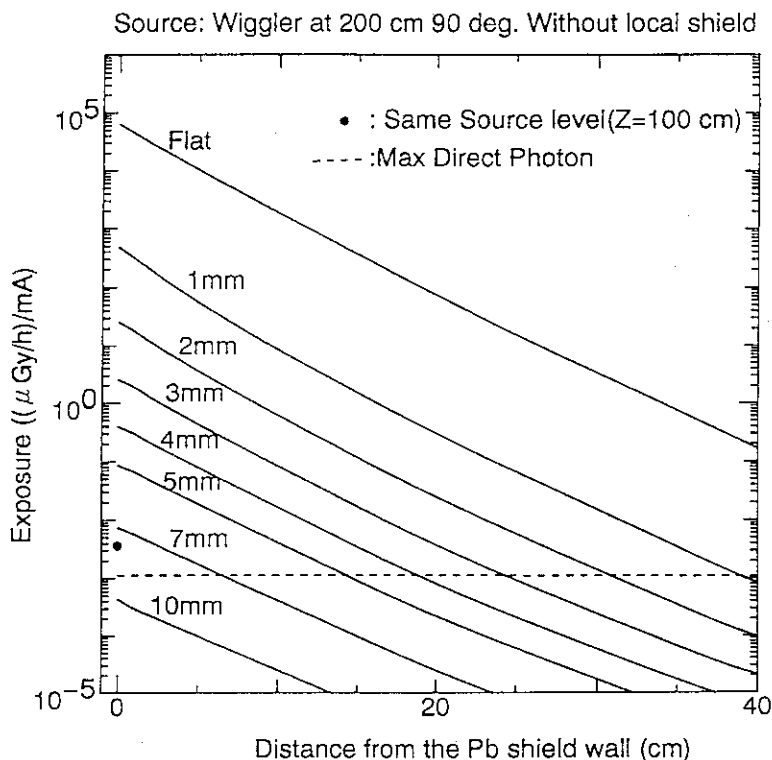


図4-29 Model (2) におけるSPRING-8ウィグラー
 ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 90度、各数字は敷設鉛厚さTを示す。
 ただし壁鉛厚さを3cmとした。)

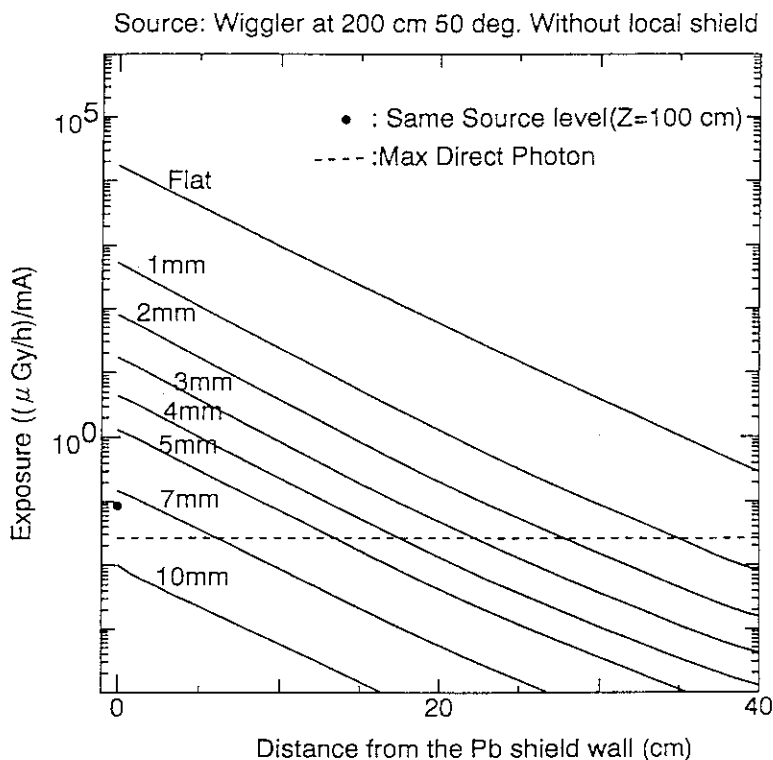


図4-30 Model (2) におけるSPRING-8ウィグラー
 ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 50度、各数字は敷設鉛厚さTを示す。
 ただし壁鉛厚さを3cmとした。)

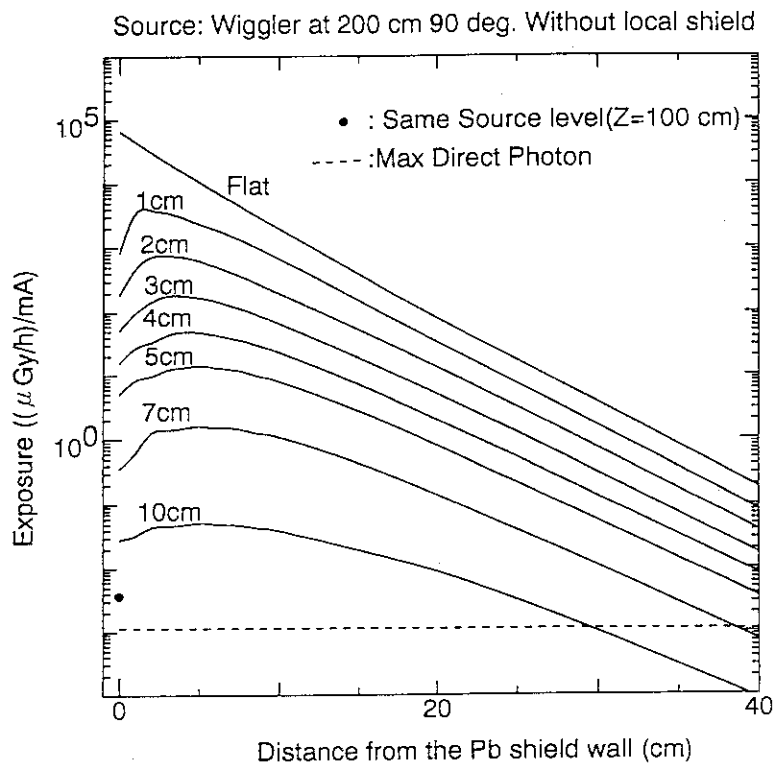


図4-31 Model (3) におけるSPring-8ウィグラー
 ビームラインのグランドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 90度、各数字は埋設壁深さDを示す。
 ただし壁鉛厚さを3cmとした。)

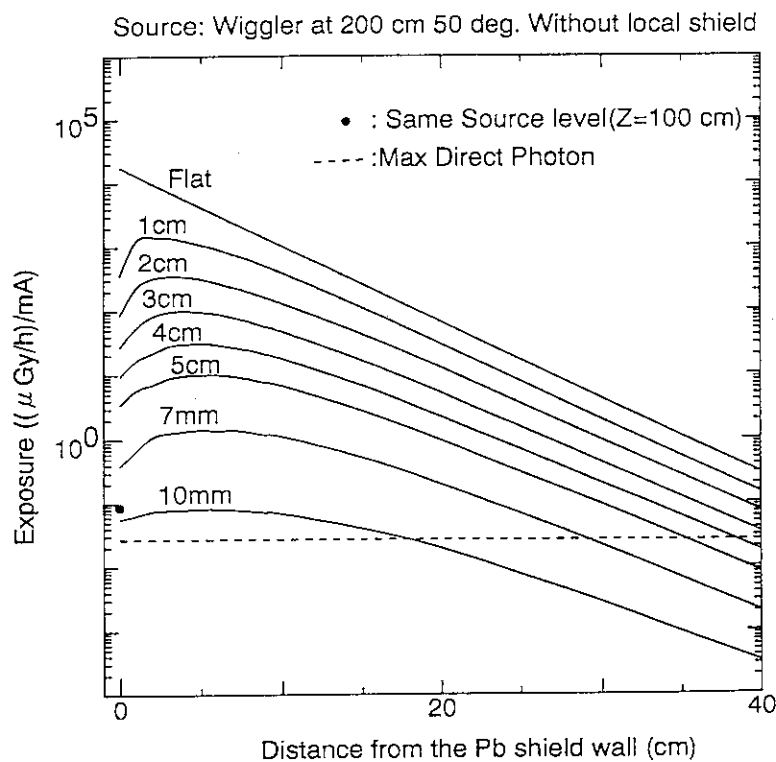


図4-32 Model (3) におけるSPring-8ウィグラー
 ビームラインのグランドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 50度、各数字は埋設壁深さDを示す。
 ただし壁鉛厚さを3cmとした。)

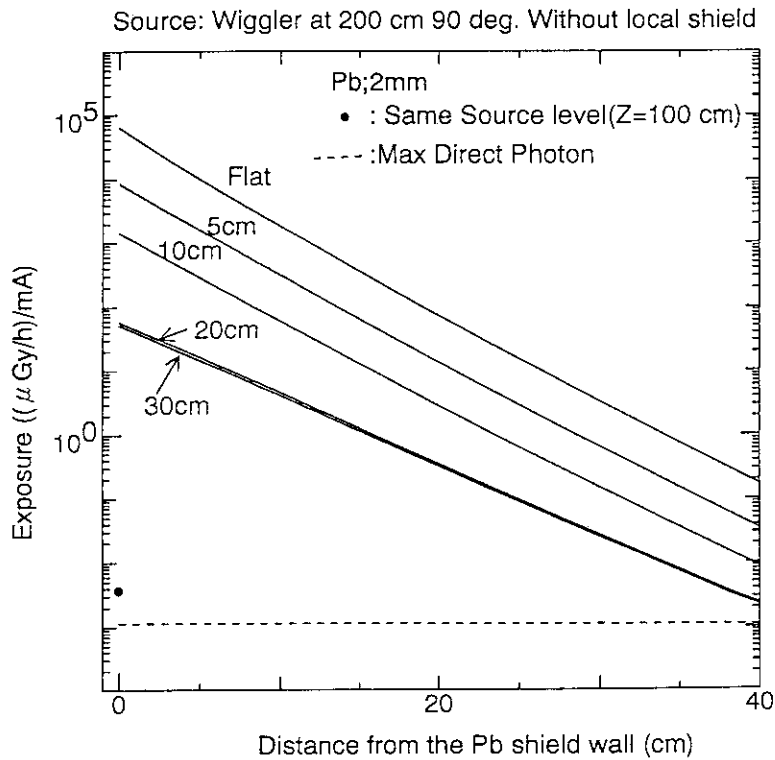


図4-33 Model (1)におけるSPring-8ウィグラー
 ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 90度、各数字は2mm鉛の敷設幅Lを示す。
 ただし壁鉛厚さを3cmとした。)

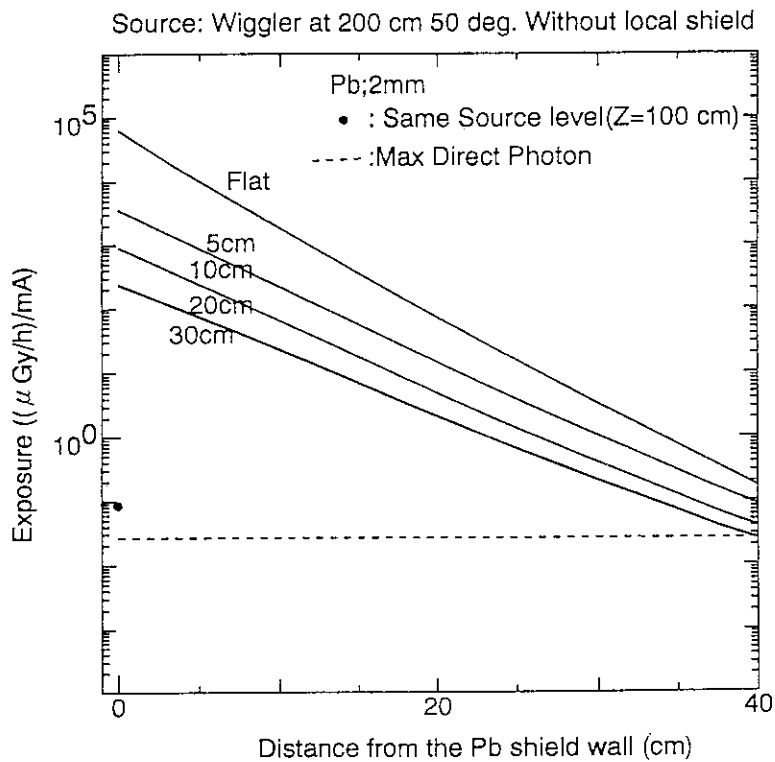


図4-34 Model (1)におけるSPring-8ウィグラー
 ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 50度、各数字は2mm鉛の敷設幅Lを示す。
 ただし壁鉛厚さを3cmとした。)

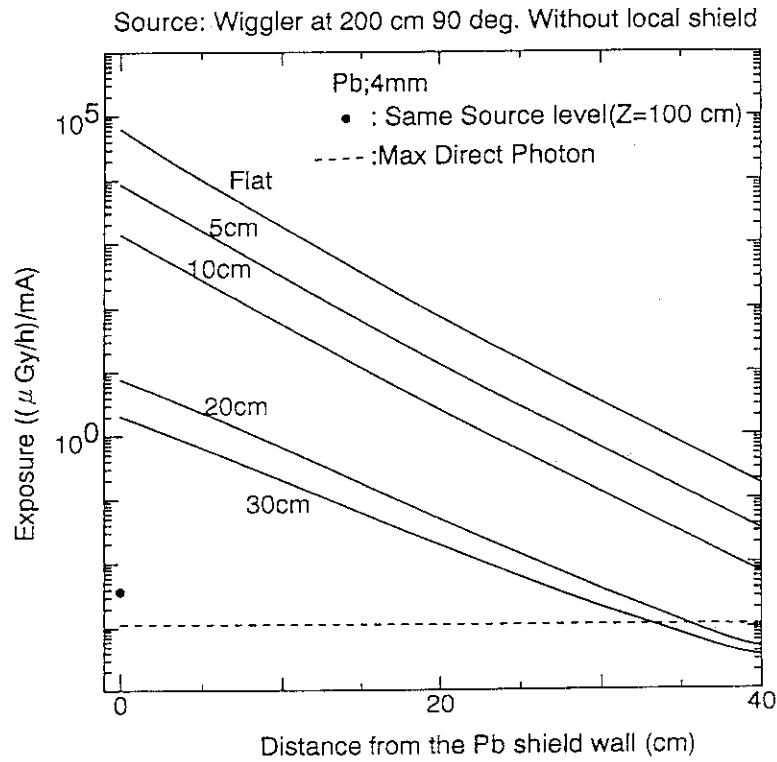


図4-35 Model (1)におけるSPRING-8ウィグラー
 ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 90度、各数字は4mm鉛の敷設幅Lを示す。
 ただし壁鉛厚さを3cmとした。)

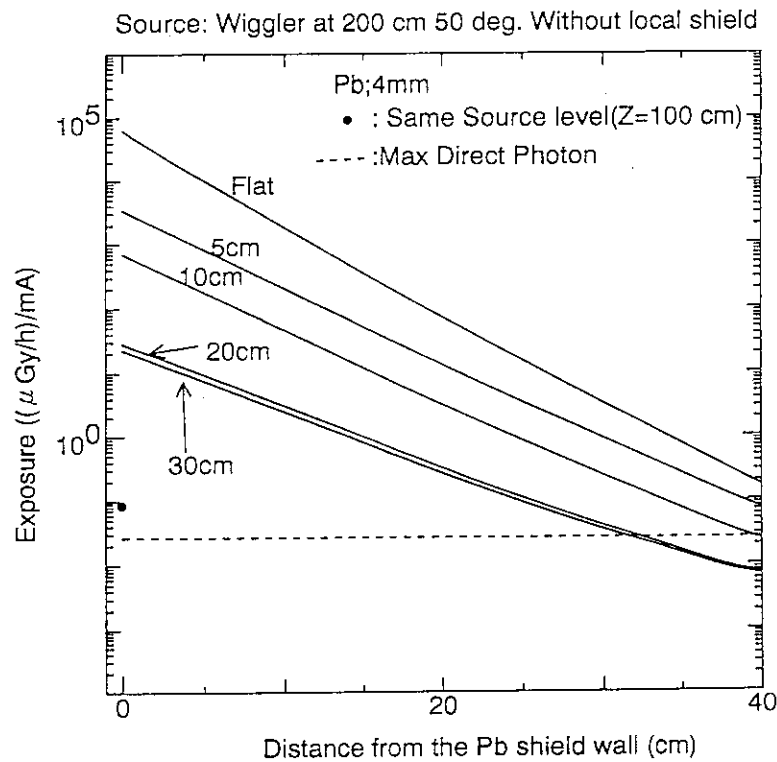


図4-36 Model (1)におけるSPRING-8ウィグラー
 ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 50度、各数字は4mm鉛の敷設幅Lを示す。
 ただし壁鉛厚さを3cmとした。)

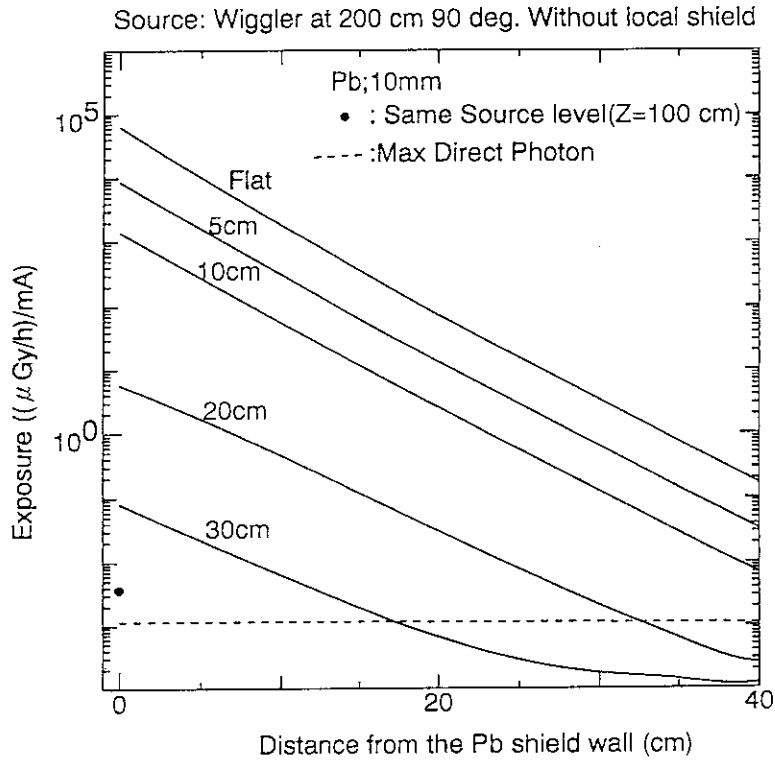


図4-37 Model (1)におけるSPring-8ウィグラー
 ビームラインのグランドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 90度、各数字は10mm鉛の敷設幅Lを示す。
 ただし壁鉛厚さを3cmとした。)

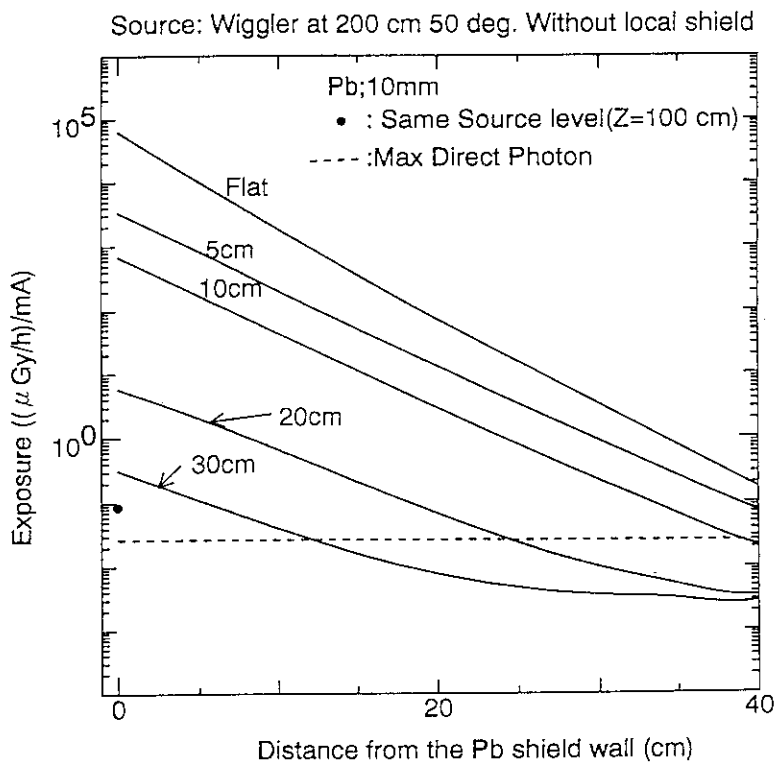


図4-38 Model (1)におけるSPring-8ウィグラー
 ビームラインのグランドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 50度、各数字は10mm鉛の敷設幅Lを示す。
 ただし壁鉛厚さを3cmとした。)

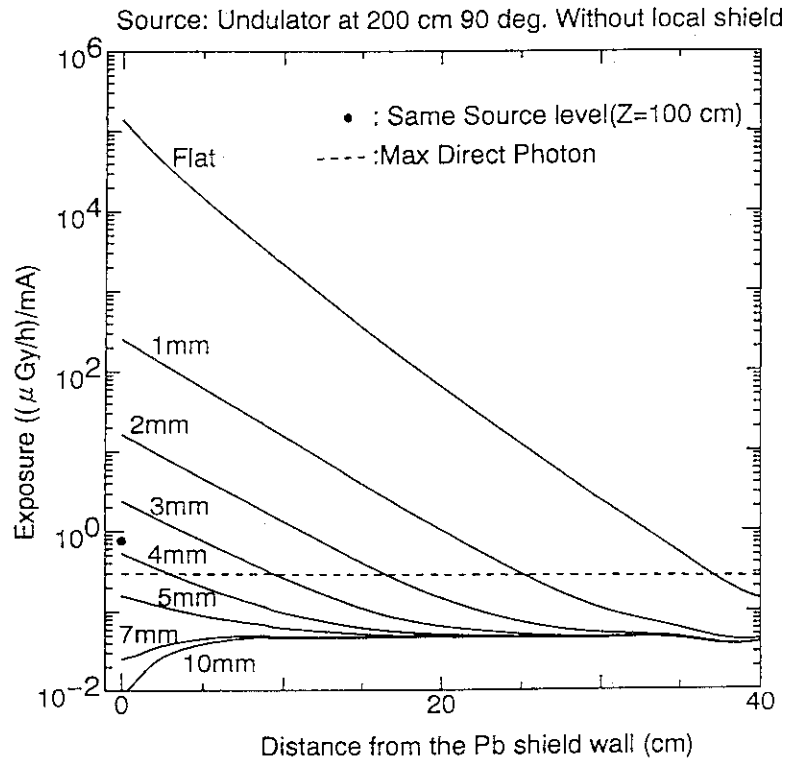


図4-39 Model(1)におけるSPRING-8アンジュレータ
 ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 90度、各数字は敷設鉛の厚さTを示す。)

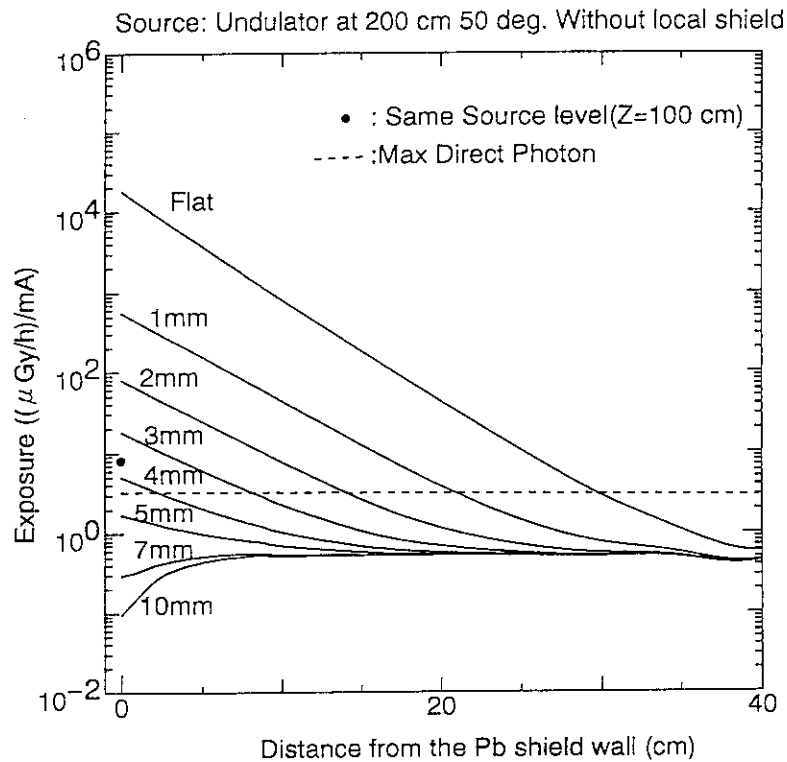


図4-40 Model(1)におけるSPRING-8アンジュレータ
 ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 50度、各数字は敷設鉛の厚さTを示す。)

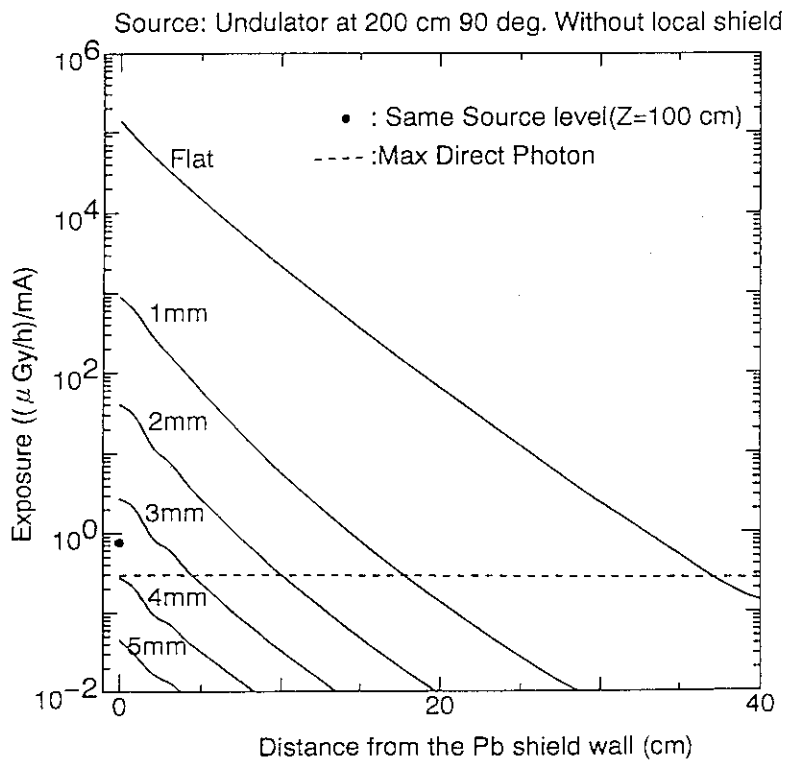


図4-41 Model(2)におけるSPRING-8アンジュレータ
 ビームラインのグランドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 90度、各数字は敷設鉛の厚さTを示す。)

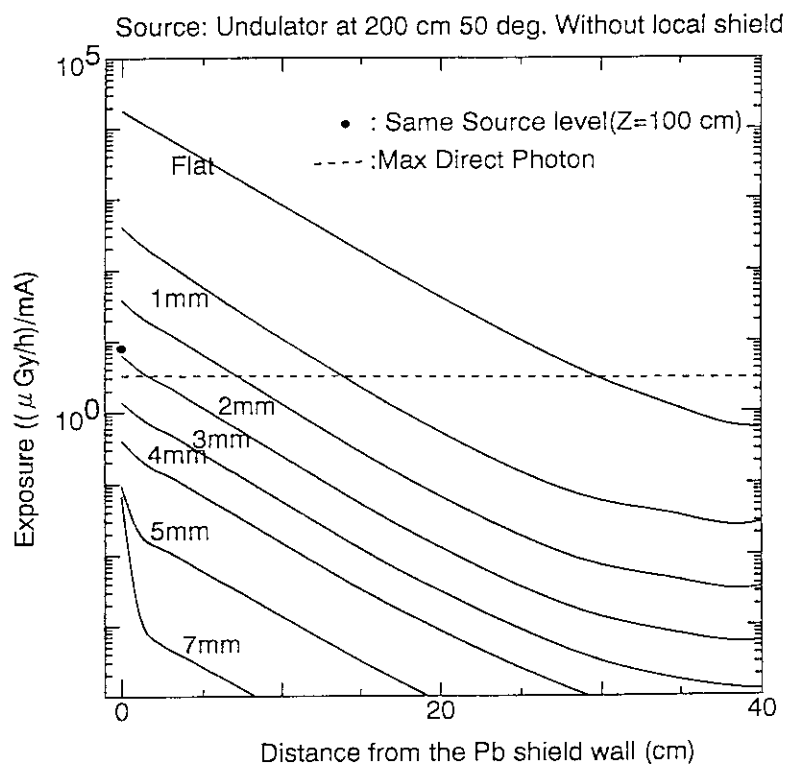


図4-42 Model(2)におけるSPRING-8アンジュレータ
 ビームラインのグランドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 50度、各数字は敷設鉛の厚さTを示す。)

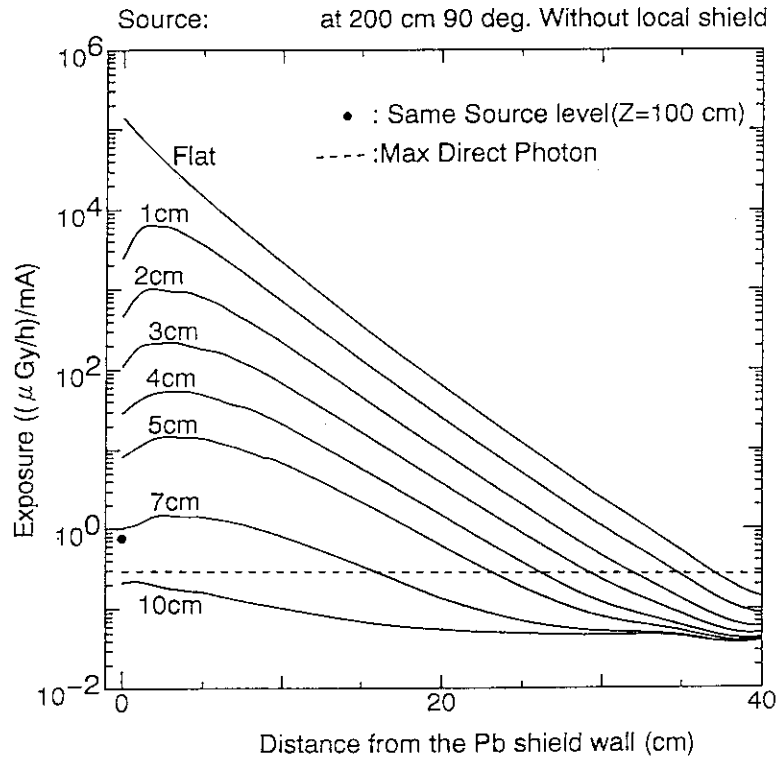


図4-43 Model (3)におけるSPRING-8アンジュレータ
 ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 90度、各数字は埋設壁深さDを示す。)

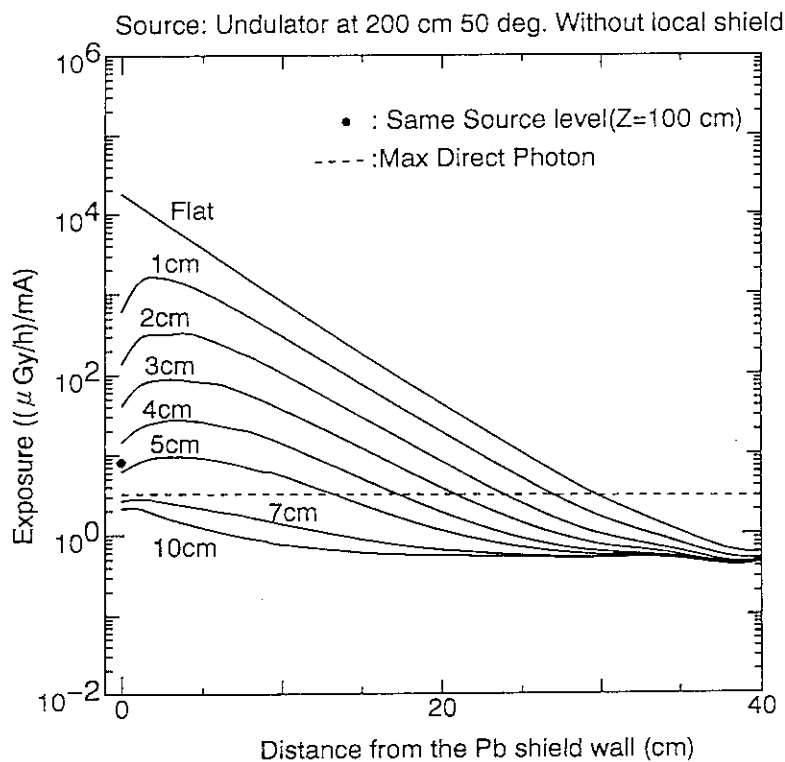


図4-44 Model (3)におけるSPRING-8アンジュレータ
 ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 50度、各数字は埋設壁深さDを示す。)

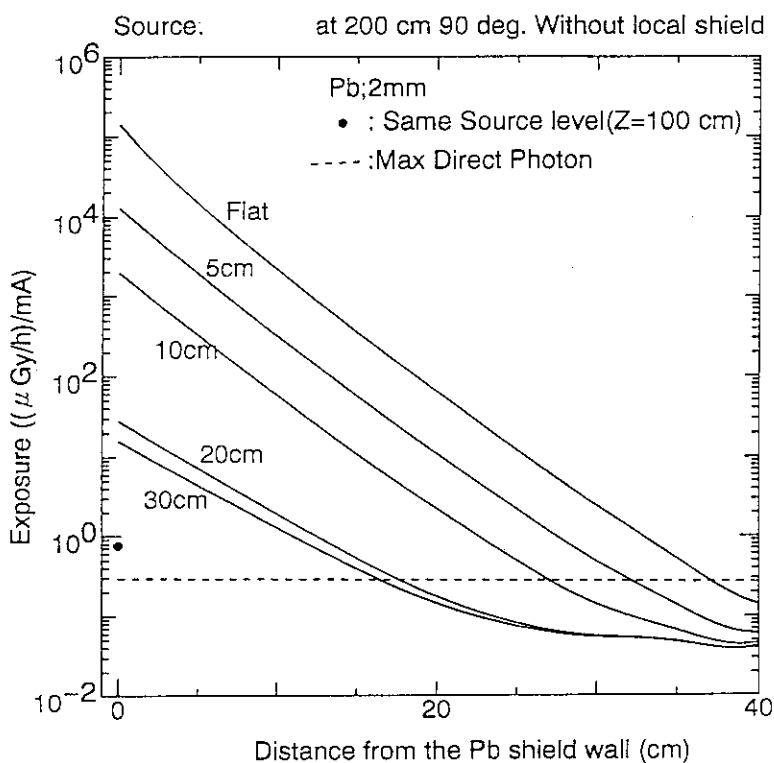


図4-45 Model(1)におけるSPRING-8アンジュレータ
 ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 90度、各数字は2mm鉛の敷設幅Lを示す。)

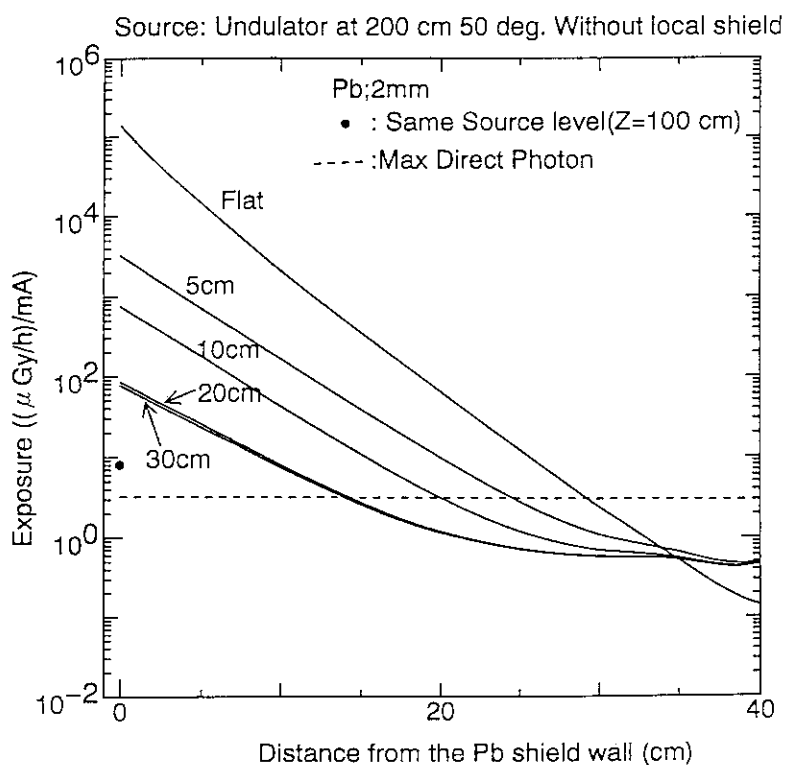


図4-46 Model(1)におけるSPRING-8アンジュレータ
 ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 50度、各数字は2mm鉛の敷設幅Lを示す。)

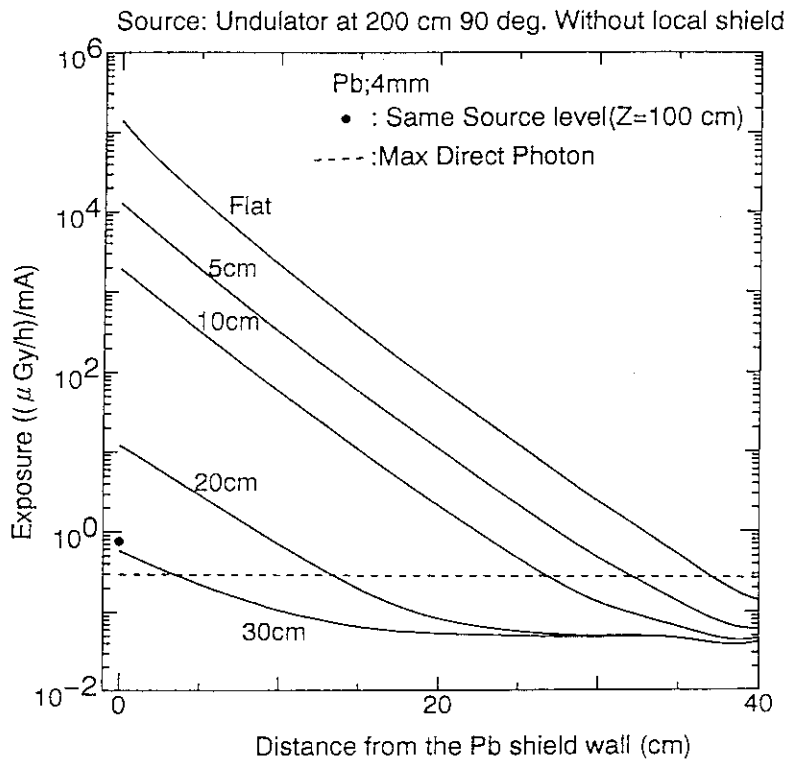


図4-47 Model (1)におけるSPRING-8アンジュレータ
 ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 90度、各数字は4mm鉛の敷設幅を示す。)

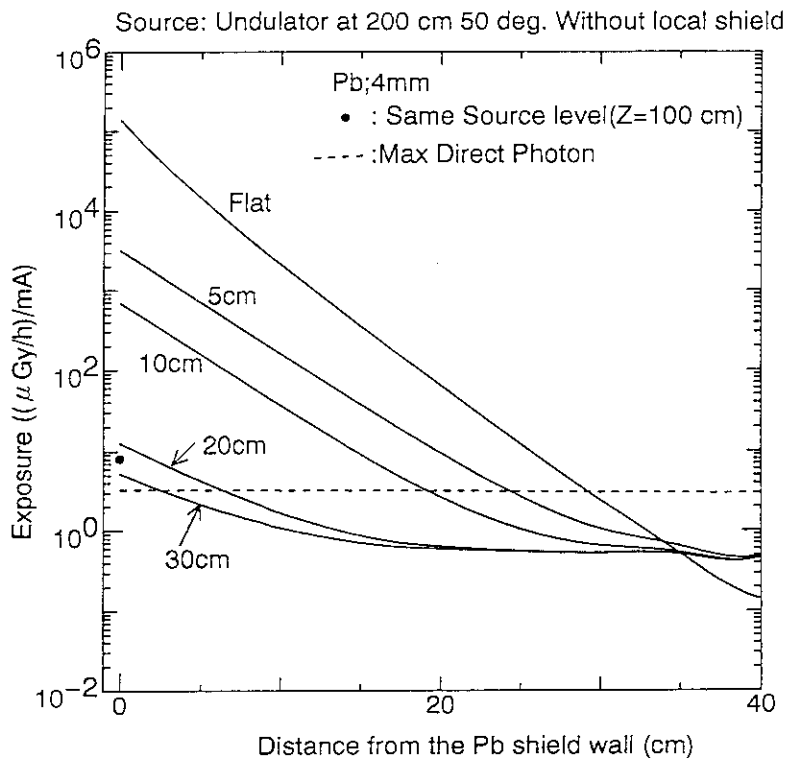


図4-48 Model (1)におけるSPRING-8アンジュレータ
 ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 50度、各数字は4mm鉛の敷設幅を示す。)

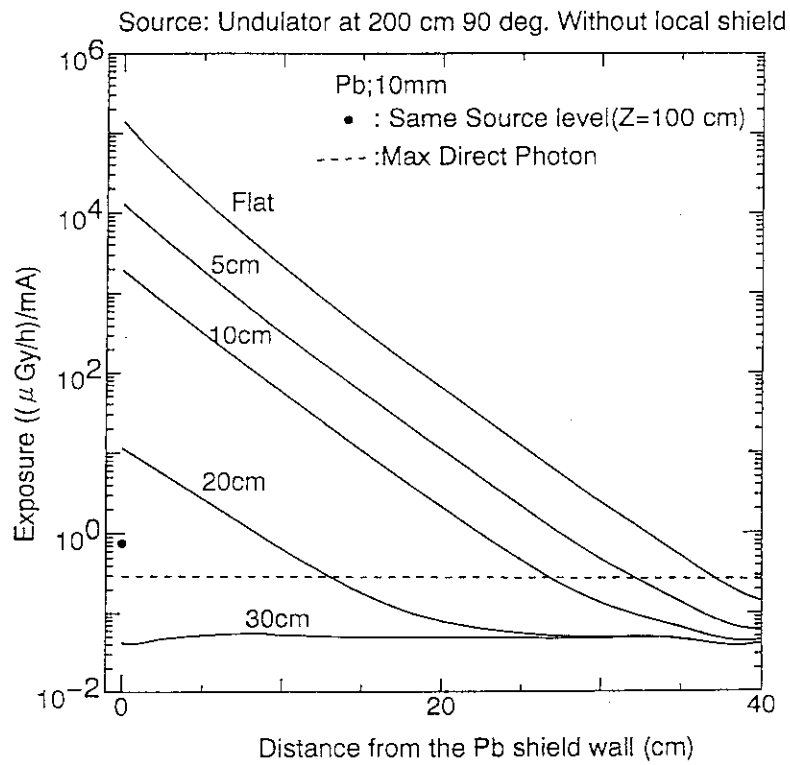


図4-49 Model (1)におけるSPRING-8アンジュレータ
 ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 90度、各数字は10mm鉛の敷設幅Lを示す。)

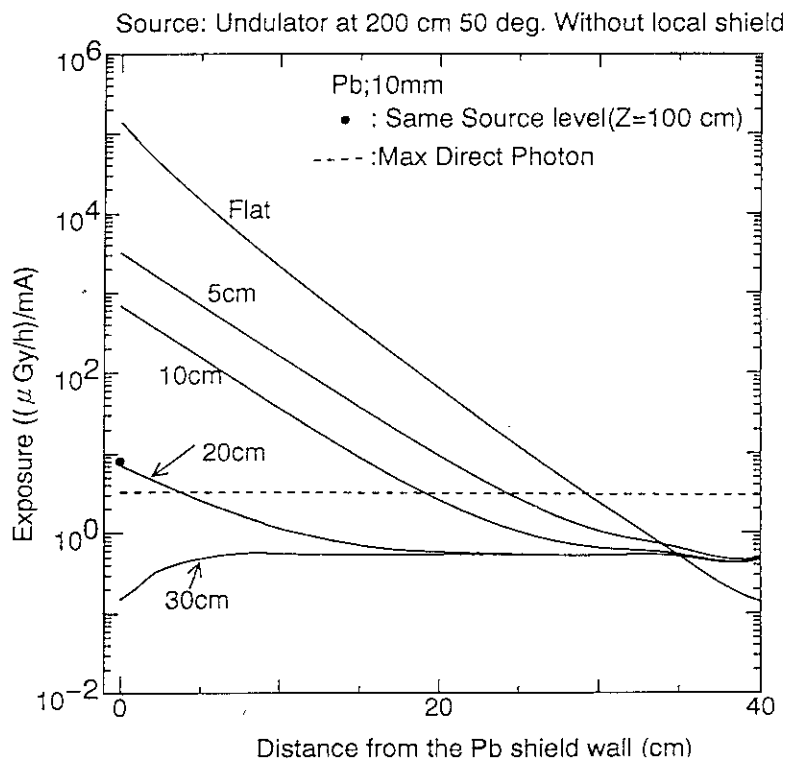


図4-50 Model (1)におけるSPRING-8アンジュレータ
 ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 50度、各数字は10mm鉛の敷設幅Lを示す。)

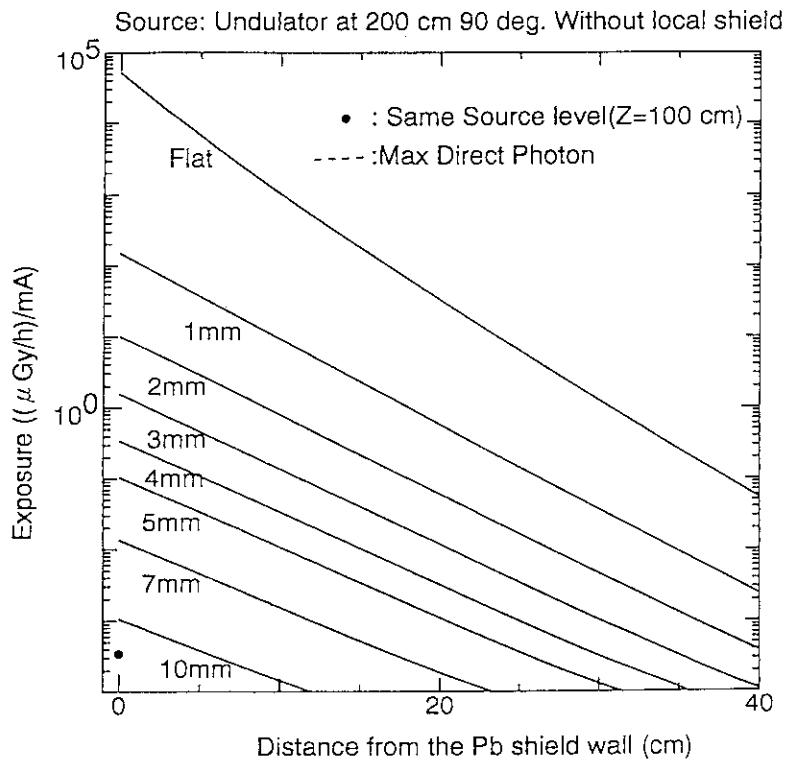


図4-51 Model (1)におけるSPRING-8アンジュレータ
 ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 90度、各数字は敷設鉛厚さTを示す。
 ただし壁鉛厚さを2cmとした。)

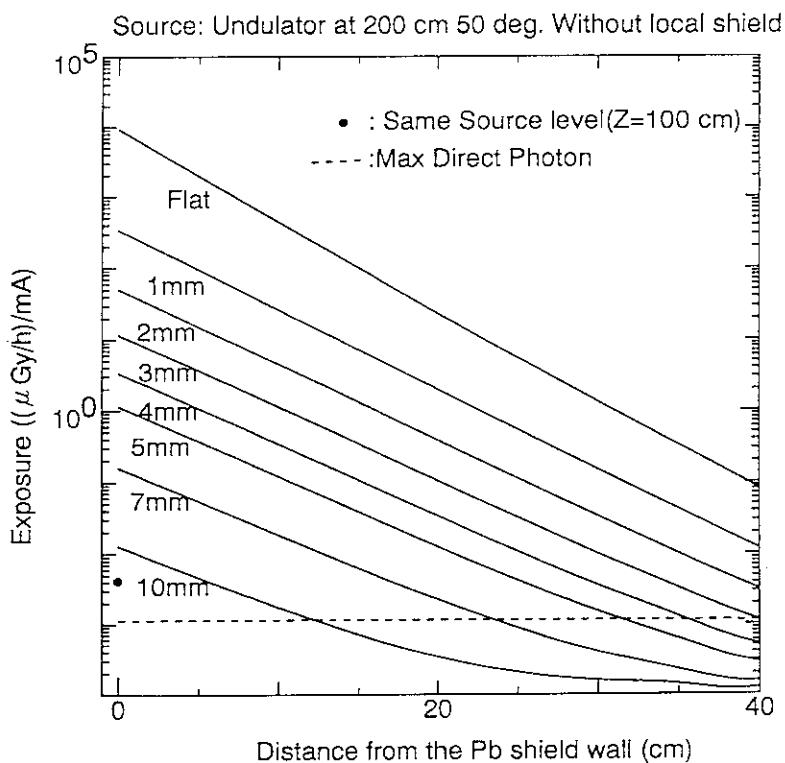


図4-52 Model (1)におけるSPRING-8アンジュレータ
 ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 50度、各数字は敷設鉛厚さTを示す。
 ただし壁鉛厚さを2cmとした。)

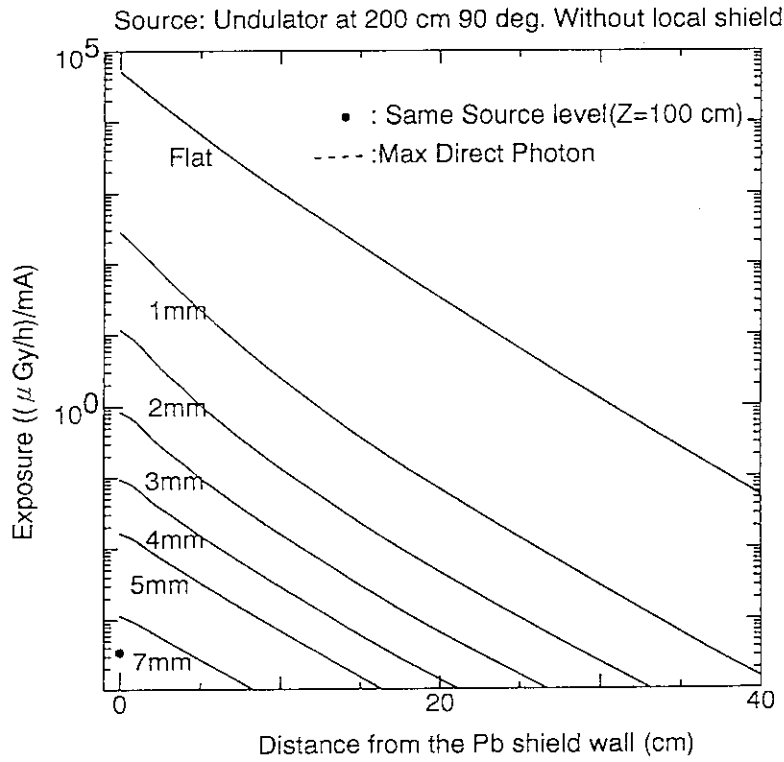


図4-53 Model (2)におけるSPRING-8アンジュレータ
 ビームラインのグランドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 90度、各数字は敷設鉛厚さTを示す。
 ただし壁鉛厚さを2 cmとした。)

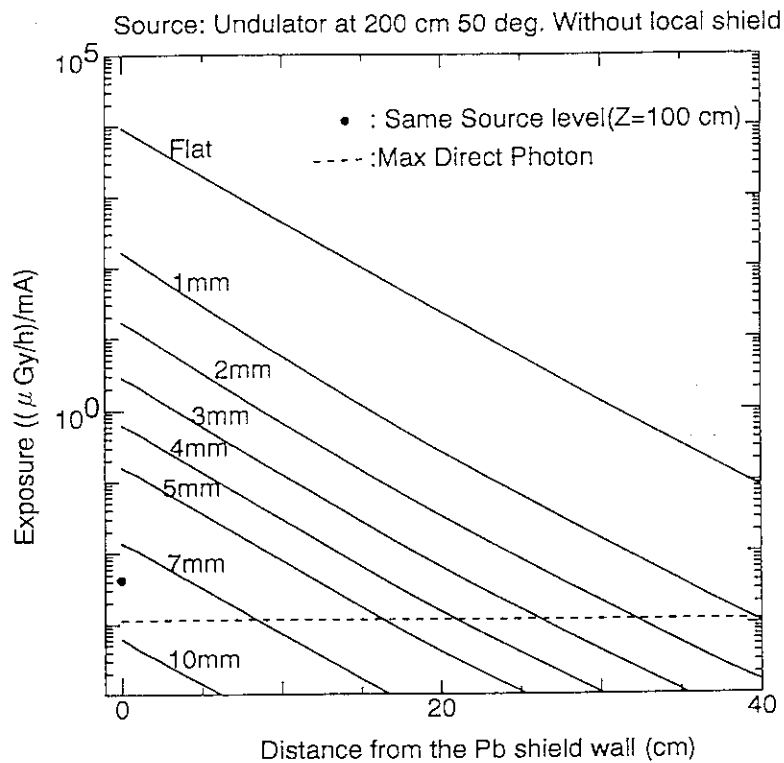


図4-54 Model (2)におけるSPRING-8アンジュレータ
 ビームラインのグランドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 50度、各数字は敷設鉛厚さTを示す。
 ただし壁鉛厚さを2 cmとした。)

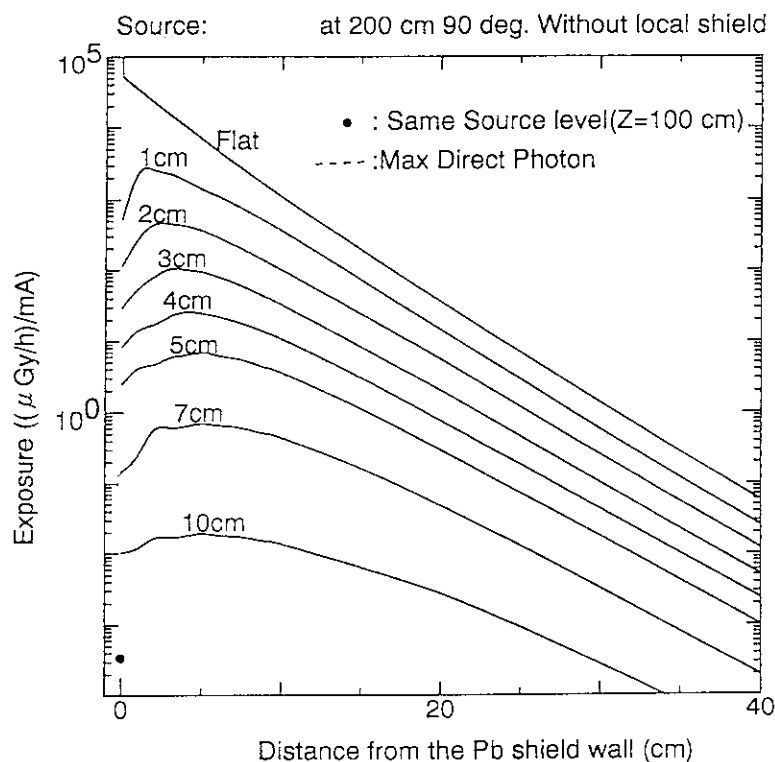


図4-55 Model (3)におけるSP ring-8アンジュレート
 ビームラインのグランドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 90度、各数字は埋設壁深さDを示す。
 ただし壁鉛厚さを2cmとした。)

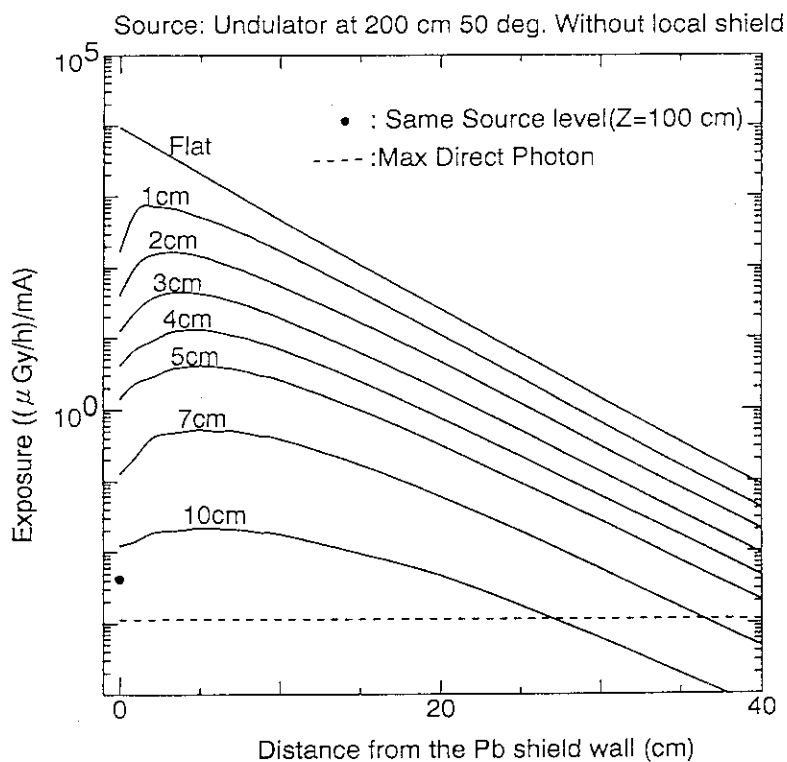


図4-56 Model (3)におけるSP ring-8アンジュレート
 ビームラインのグランドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 50度、各数字は埋設壁深さDを示す。
 ただし壁鉛厚さを2cmとした。)

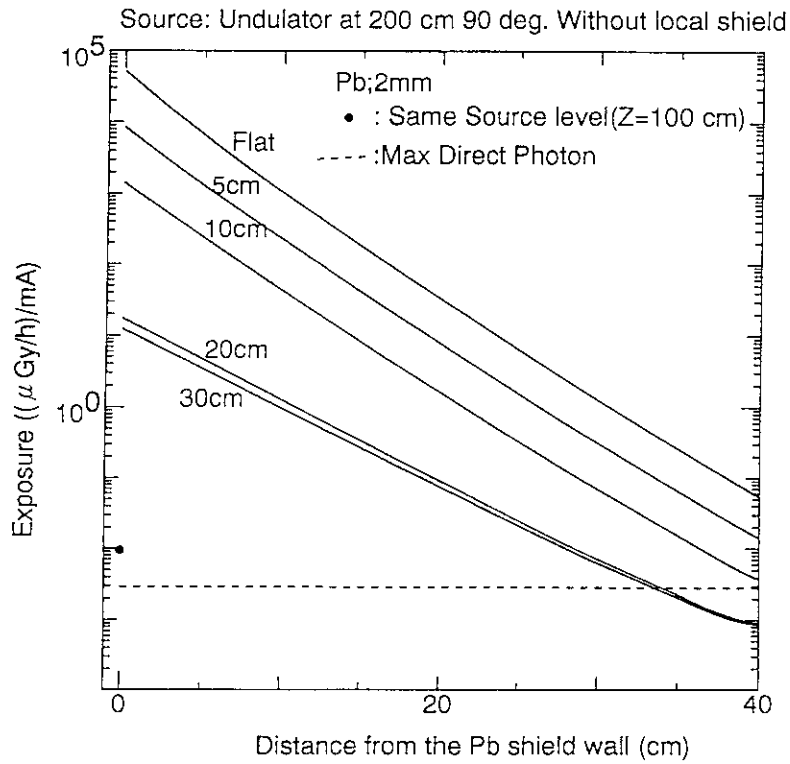


図4-57 Model(1)におけるSPRING-8アンジュレータ
 ビームラインのグランドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 90度、各数字は2mm鉛の敷設幅Lを示す。
 ただし壁鉛厚さを2cmとした。)

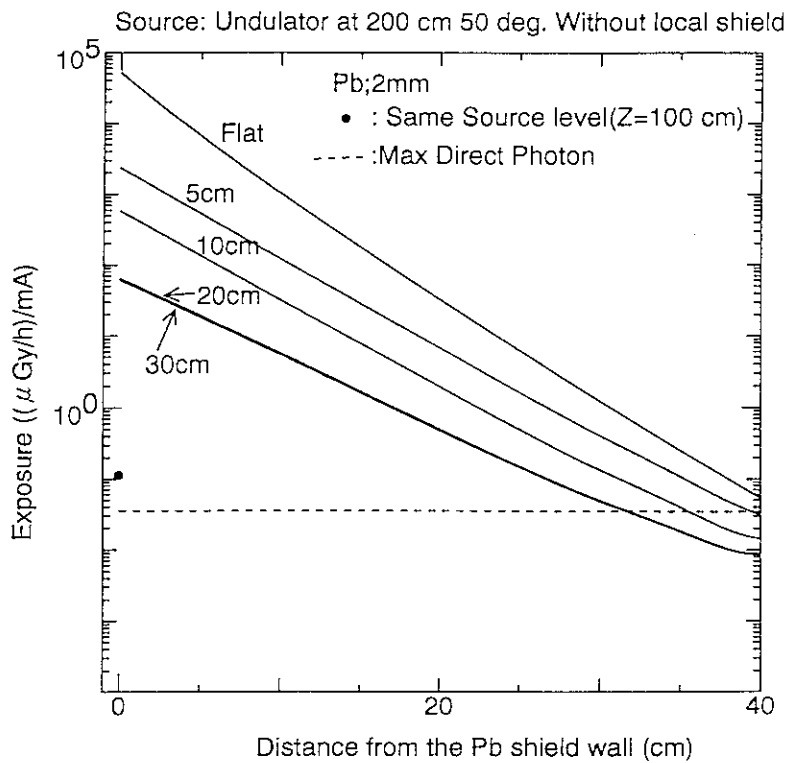


図4-58 Model(1)におけるSPRING-8アンジュレータ
 ビームラインのグランドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 50度、各数字は2mm鉛の敷設幅Lを示す。
 ただし壁鉛厚さを2cmとした。)

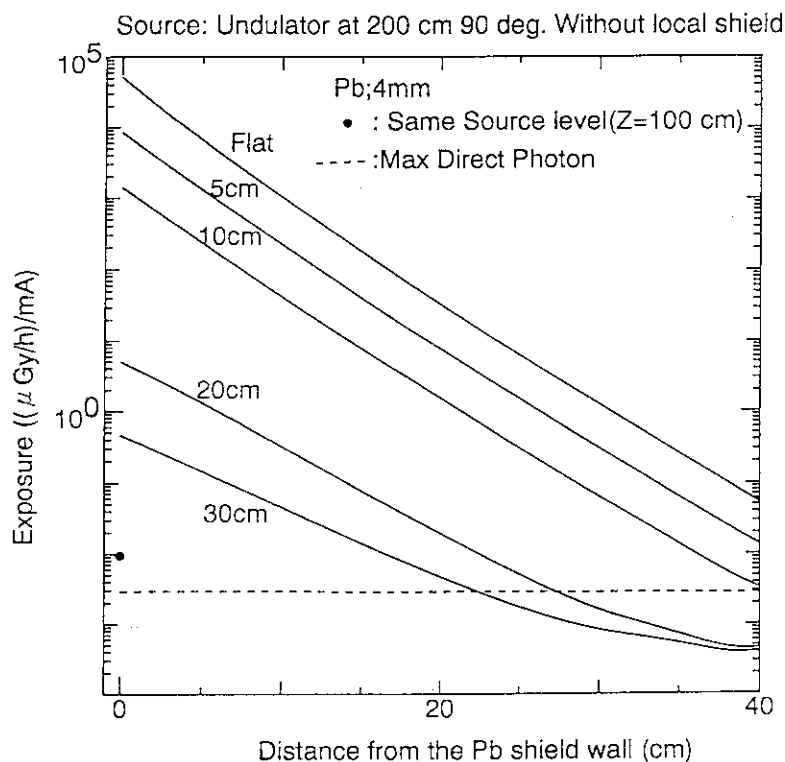


図4-59 Model(1)におけるSPRING-8アンジュレータ
 ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 90度、各数字は4mm鉛の敷設幅Lを示す。
 ただし壁鉛厚さを2cmとした。)

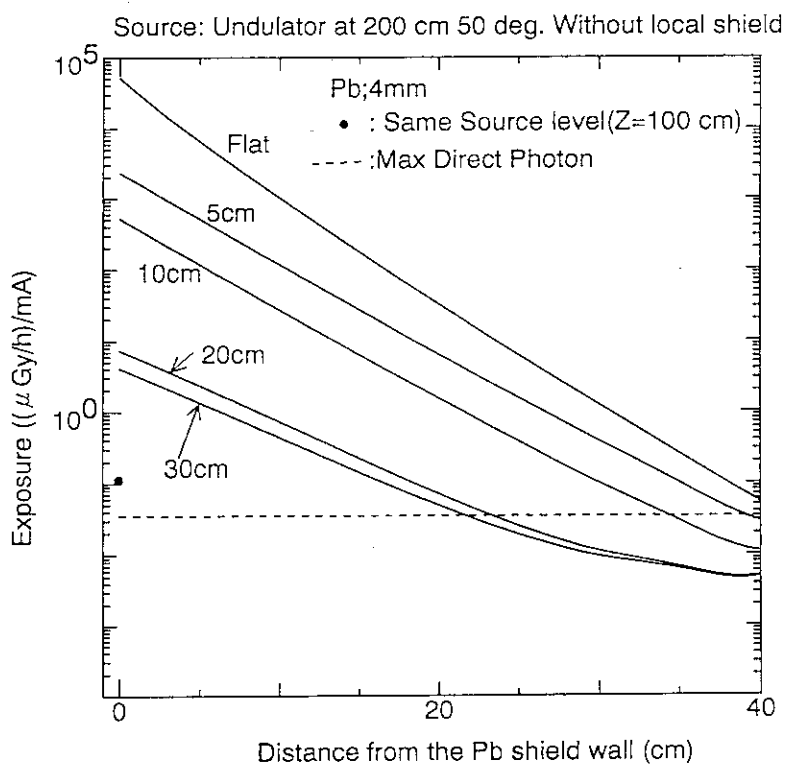


図4-60 Model(1)におけるSPRING-8アンジュレータ
 ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 50度、各数字は4mm鉛の敷設幅Lを示す。
 ただし壁鉛厚さを2cmとした。)

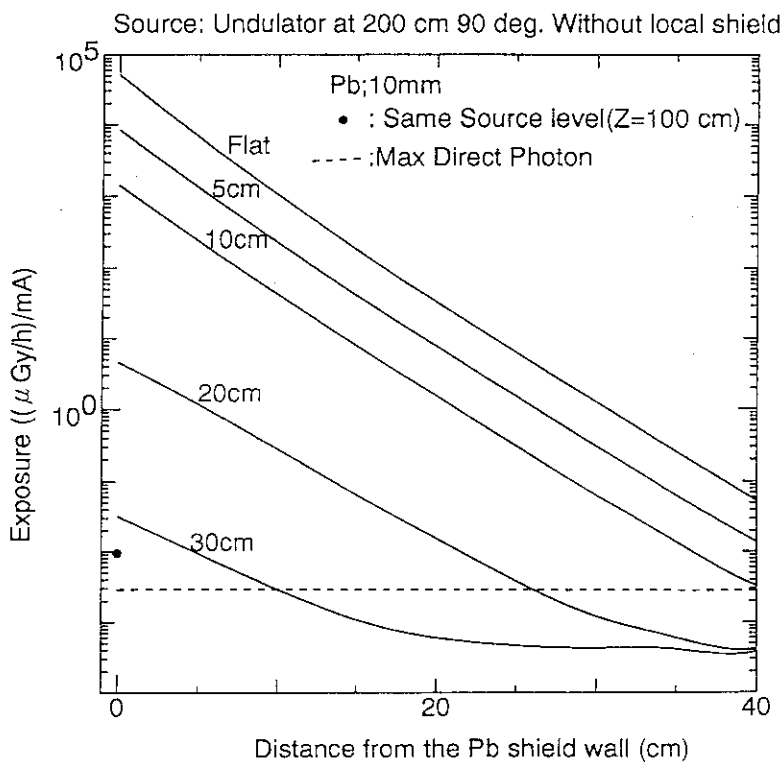


図4-61 Model(1)におけるSPRING-8アンジュレータ
 ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 90度、各数字は10mm鉛の敷設幅Lを示す。
 ただし壁鉛厚さを2cmとした。)

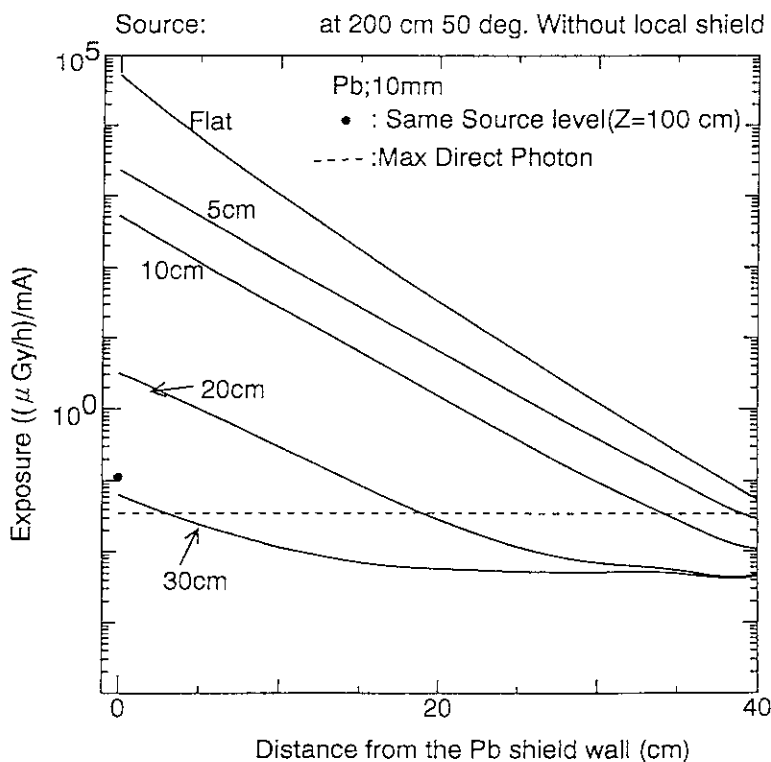


図4-62 Model(1)におけるSPRING-8アンジュレータ
 ビームラインのグラウンドシャイン線量計算結果
 (散乱角度 50度、各数字は10mm鉛の敷設幅Lを示す。
 ただし壁鉛厚さを2cmとした。)

表 2. 1 G33-GP2 で用いた線源エネルギー点

No.	エネルギー (MeV)	No.	エネルギー (MeV)
1	0.03	11	0.30
2	0.05	12	0.50
3	0.07	13	0.70
4	0.10	14	1.00
5	0.13	15	1.30
6	0.15	16	1.50
7	0.17	17	1.70
8	0.20	18	2.00
9	0.22	19	2.20
10	0.25	20	2.50

表 2-2 G33-GP2 計算で用いた物質の組成

原子番号	元素記号	組成 (g/cm ³)			
		空気	SUS	鉛	コンクリート
1	H				0.013104
6	C		0.0196		
7	N	8.5723E-4			
8	O	2.6277E-4			1.165086
11	Na				0.040014
12	Mg				0.006084
13	Al				0.106938
14	Si		0.01764		0.737334
15	P		0.002744		
16	S				0.003042
19	K				0.044928
20	Ca				0.193986
25	Mn		0.10388		
26	Fe		7.60088		0.029016
28	Ni		0.04312		
29	Cu		0.010976		
42	Mo		0.04116		
82	Pb			11.34	

表4-1 S P r i n g - 8 の典型的な光源定数

	Undulator ^(*)	Wiggler	Bending Magnet
Storage Ring Energy	8GeV	8GeV	8GeV
Total Power	0.11kW/mA	0.18kW/mA	1.5W/mrad.mA
Periods	3.2cm	12cm	39.3m ^(**)
Number of Periods	140	37	-
Critical Energy	-	42.7keV	29 keV
Peak Magnetic Field			
Strength	0.78T	1.0T	0.68T
Deflection Parameter	2.3	11.2	-
Opening Angle			1.5mrad

(*1) In-vacuum type Undulator

(*2) Bending radius

付録 ー1 G33-GP2コードの入力データ (モデル (3) 1cm埋め込み)

G33GP PB BOX										1 CM			
1	20	20	20	18	4	20	20	15	6	1	0		01
1	0	CONC	EXP	8.73	CONC								02
-250.	-200.	-150.	-100.	-50.0	0.0	40.0	80.0						03
120.	150.	170.	180.	190.	195.	198.	200.						04
210.	220.	230.	240.	250.									05
-250.	-200.	-150.	-100.	-50.	-40.	-30.	-20.						06
-10.	-5.	0.	5.	10.	20.	30.	40.						07
50.	100.	150.	200.	250.									08
-50.	-45.	-40.	-35.	-30.	-25.	-20.	-18.						09
-16.	-14.	-12.	-10.	-8.	-7.	-6.	-5.						10
-4.	-3.	-2.	-1.	0.									11
2	1	1	2	-5	6								12
3	2	-1	1	2	3	-5	7						13
3	3	-2	2	3	4	-5	8						14
3	2	-3	3	4	5	-5	9						15
2	1	-4	4	-5	10								16
3	4	1	7	5	1	-6	11						17
4	2	-1	6	2	8	5	2	-6	12				18
4	3	-2	7	3	9	5	3	-6	13				19
4	2	-3	8	4	10	5	4	-6	14				20
3	4	-4	9	5	5	-6	15						21
2	4	1	12	6	6								22
3	4	-1	11	2	13	6	7						23
3	4	-2	12	3	14	6	8						24
3	4	-3	13	4	15	6	9						25
2	4	-4	14	6	10								26
1	4											1.980+02	27
2	4											1.985+02	28
3	4											1.995+02	29
4	4											2.000+02	30
5	6											0.0	31
6	6											-1.0	32
0.0	0.0	8.5723-4	2.6277-4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		33
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		34
0.0	0.0												35
0.0	0.0196	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01764				36
0.002744	0.0	0.0	0.0	0.10388	7.60088	0.04312	0.010976						37
0.04116	0.0												38
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		39
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		40
0.0	11.34												41
0.013104	0.0	0.0	1.165086	0.040014	0.006084	0.106938	0.737334						42
0.0	0.003042	0.044928	0.193986	0.0	0.029016	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		43
0.0	0.0												44
0.0	0.0												45

1.0	6.0	7.0	8.0	11.0	12.0	13.0	14.0	46
15.0	16.0	19.0	20.0	25.0	26.0	28.0	29.0	47
42.0	82.0							48
1.00794	12.011	14.007	15.999	22.990	24.305	26.982	20.086	49
30.974	32.066	39.098	40.078	54.938	55.847	58.69	63.546	50
95.94	207.2							51
0.03	0.05	0.07	0.10	0.13	0.15	0.17	0.20	52
0.22	0.25	0.30	0.50	0.70	1.00	1.30	1.50	53
1.70	2.00	2.20	2.50					54
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	55
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	56
1.00	1.00	1.00	1.00					57
1.500-02	2.000-02	3.000-02	4.000-02	5.000-02	6.000-02	8.000-02	1.000-01	58
1.500-01	2.000-01	3.000-01	4.000-01	5.000-01	6.000-01	8.000-01	1.000+00	59
1.500+00	2.000+00	3.000+00	4.000+00					60
1.902-03	9.251-04	4.355-04	2.252-04	1.523-04	1.256-04	1.230-04	1.399-04	61
1.993-04	2.992-04	4.592-04	6.736-04	8.794-04	1.075-03	1.348-03	1.684-03	62
2.189-03	2.814-03	3.599-03	4.512-03					63
1.000E-6	1.000E-3	1.0						64
0.0	0.0	100.0						65
2.00E+2	0.0	100.0						66
2.00E+2	0.0	0.0						67
2.01E+2	0.0	0.0						68
2.02E+2	0.0	0.0						69
2.03E+2	0.0	0.0						70
2.04E+2	0.0	0.0						71
2.05E+2	0.0	0.0						72
2.06E+2	0.0	0.0						73
2.07E+2	0.0	0.0						74
2.08E+2	0.0	0.0						75
2.09E+2	0.0	0.0						76
2.10E+2	0.0	0.0						77
2.15E+2	0.0	0.0						78
2.20E+2	0.0	0.0						79
2.25E+2	0.0	0.0						80
2.30E+2	0.0	0.0						81
2.35E+2	0.0	0.0						82
2.40E+2	0.0	0.0						83
2.45E+2	0.0	0.0						84
2.50E+2	0.0	0.0						85
								86
								87
*END								

付録 — 2 空気の吸収線量換算係数

群 番号	上限エネルギー (MeV)	中点の換算係数 (mR/h/γ/s)	群 番号	上限エネルギー (MeV)	中点の換算係数 (mR/h/γ/s)
	(0.01)*				
1	0.015	1.902×10^{-3}	11	0.30	4.592×10^{-4}
2	0.02	9.251×10^{-4}	12	0.40	6.736×10^{-4}
3	0.03	4.355×10^{-4}	13	0.50	8.794×10^{-4}
4	0.04	2.252×10^{-4}	14	0.60	1.075×10^{-3}
5	0.05	1.523×10^{-4}	15	0.80	1.348×10^{-3}
6	0.06	1.256×10^{-4}	16	1.00	1.684×10^{-3}
7	0.08	1.230×10^{-4}	17	1.15	2.189×10^{-3}
8	0.10	1.399×10^{-4}	18	2.00	2.814×10^{-3}
9	0.15	1.993×10^{-4}	19	3.00	3.599×10^{-3}
10	0.20	2.992×10^{-4}	20	4.00	4.512×10^{-3}

注) 本数値は J. H. Hubbell, Photon Mass Attenuation and Energy-absorption Coefficients from 1keV to 20MeV, Int. J. Appl. Radiat. Isot. Vol 33. (1982) のデータより求めた。

*) (0.01) は 1 群の下限エネルギーである。