

KEK Internal 2004-1

June 2004

A/R

BULK-I :
Radiation Shielding Tool for Proton Accelerator Facilities
(Japanese Part)

R. Tayama, K. Hayashi and H. Hirayama

Legal Notice: Neither High Energy Accelerator Research Organization, nor Hitachi, Ltd., nor any person acting on behalf of any of them, makes any warranty or representation, expressed or implied, with respect to the accuracy, completeness, or usefulness of the information contained herein, or that the use of any information, apparatus, method, or process disclosed herein may not infringe privately owned rights or assumes any liabilities with respect to the use of, or for damage resulting from the use of, any information, apparatus, method or process disclosed herein.

High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 2004

KEK Reports are available from :

Science Information and Library Service Division
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba-shi
Ibaraki-ken, 305-0801
Japan

Phone: +81-29-864-5137

Fax: +81-29-864-4604

E-mail: irdpub@mail.kek.jp

Internet: <http://www.kek.jp>

BULK-I : Radiation Shielding Tool for Proton Accelerator Facilities

Ryuichi TAYAMA and Katsumi HAYASHI

Hitachi, Ltd. Power & Industrial Systems

Hideo HIRAYAMA

*High Energy Accelerator Research Organization,
Applied Research Laboratory, Radiation Science Center*

Abstract

BULK-I は、50 ~ 500MeV の中間エネルギー陽子線加速器の遮へい設計ツールとして開発された。本ツールでは、浅いコンクリートにおいても計算が可能な新たな計算式を導入していること、及び MCNPX コードによるコンクリート又は鉄とコンクリートの二層構造遮へい体用の遮へい計算パラメータが整備されていることが主な特徴である。また、陽子線治療装置などのように、異なる陽子エネルギー、ビーム方向を考慮して遮へい計算を行うことができる。

本報告では、BULK-I の概要、インストールと使用方法について説明する。

Contents

Japanese Part	1
1 . はじめに	2
2 . プログラムの概要	2
2 . 1 特徴	2
2 . 2 計算式	2
2 . 3 遮へい計算パラメータ	3
2 . 4 コンクリート透過距離の取扱い	4
2 . 5 鉄遮へい体の取扱い	4
3 . プログラムのインストール及び実行方法	6
3 . 1 インストール方法	6
3 . 2 プログラムの実行方法	6
4 . プログラムの使用方法	7
Appendix A 遮へい計算パラメータの計算条件	10
Appendix B インプットデータの説明	12
References	14
Tables	15
Figures	17

Japanese Part

1. はじめに

陽子エネルギー50～500MeV の中間エネルギー加速器施設は、がん治療等の医療分野、農作物の品種改良等の生物分野など、幅広い分野で注目され、今後各国において、建設が加速するものと考えられる。

陽子線加速器施設においては、加速した陽子がターゲットや加速器構造材に衝突する際、(p, xn)反応によって2次中性子が発生し、遮へい設計の主要放射線源となる。この中性子線源は、角度及びエネルギー分布を持ち、遮へい壁の厚さを決定する大きな要因となる。

陽子線加速器施設における遮へい計算手法は、Moyerモデル¹⁾に代表されるように、中性子スペクトル平衡後の遮へい体中における線量率の減衰を想定した指数関数式が、一般的に用いられている。また、この式のパラメータである線源項及び減弱距離は、多くの研究者らによって実験的、解析的に求められている^{2)～7)}。ただし、中性子スペクトルが変化しているような、遮へい体が薄い領域(ビルドアップ領域)では使用できない。また、鉄とコンクリートの二層構造を採用する場合についても、上記式では線量率を精度良く計算することが難しい。

本報告では、上記背景を踏まえ、ビルドアップ領域をも含めた陽子線加速器施設における簡易的な遮へい計算式を提案すると共に、50～500MeV の中間エネルギー陽子線加速器施設を対象とした、コンクリート又は鉄との二層構造の採用を踏まえた遮へい計算パラメータを、MCNPX コードにより解析的に求め、簡易計算プログラムとして集約した。

以下、第2章では、プログラムの概要について述べ、第3章ではプログラムのインストール方法について、第4章では、プログラムの使用方法について説明する。なお、プログラムで使用している遮へい計算パラメータの計算条件については Appendix A に記した。また、インプットデータの説明を Appendix B に示した。

2. プログラムの概要

2.1 特徴

本プログラムは、中間エネルギー陽子線加速器施設を対象とし、コンクリート又は鉄との二層構造の遮へい体を透過した後の中性子及び線実効線量を簡易的に計算するものである。

本プログラムで取扱う幾何形状を図2-1に示す。ターゲット(放射線源)は、直方体系のコンクリート壁に囲まれた部屋内の原点にあるものとし、遮へい計算上安全側となるよう、代表的な構成材であるフルストップサイズの鉄を想定する。陽子線エネルギー及びビーム方向は、陽子線治療施設の回転ガントリーを踏まえ、それぞれ複数与えられる。このビーム条件と計算点の位置関係から求められる、ビームラインに対する放出角度 θ 及びコンクリートへの入射角 i (X、YまたはZ軸に対する角度)を考慮して、計算点での実効線量が計算される。線源からコンクリート壁までの距離及びコンクリート壁の厚さは、6面それぞれに与えられる。また、鉄遮へい体については、固定式及びビーム方向依存型の2種類が取扱え、前者は計算点毎に厚さを与え、後者はビーム方向を基準とした立体角と厚さで与えられる。計算点は、コンクリート壁中やコンクリート壁の外側の、任意の位置に複数設けられる。ただし、空気による減衰は無視される。

本プログラムの適用範囲は、

- 1) 陽子エネルギー：50～500MeV
- 2) ビーム方向に対する角度(放出角度)：0～180°(12分割)
- 3) コンクリート実効厚：100～735g/cm²(ビルドアップ領域を含む)
- 4) 追加鉄実効厚：0、25、50及び70cm(密度7.83g/cm³相当厚)

である。迷路、貫通孔からのストリーミング問題、あるいはスカイシャイン計算は、適用範囲外であり、DUCT-III⁸⁾やSHINE-IIIコード⁹⁾等を使用されたい。

2.2 計算式

遮へい体中において放射線のスペクトルが安定する平衡領域での実効線量は、次式で与えられる。

$$H(r,t) = \frac{H_0 e^{-\frac{t}{\cos \theta_i \lambda}}}{r^2} \quad (2-1)$$

ここで、 $H(r,t)$ ：単位陽子当りの実効線量(pSv)

H_0 ：単位陽子当りの線源項(pSv・cm²)

λ ：減弱距離(g・cm⁻²)

r ：線源から評価点までの距離(cm)

t ：遮へい厚さ(g・cm⁻²)

i ：コンクリート壁への入射角(°)

であり、 H_0 及び β は陽子エネルギー、放出角度、ターゲット材及び遮へい材の関数として与えられる。しかし、放射線の放出角度が大きくなるほど、放射線スペクトルが平衡に達するまでの遮へい体厚が大きくなり、この傾向は陽子エネルギーが低いほど顕著である。また、放射線の発生量も放出角度が増すにつれ低くなる傾向にあるため、ビーム方向に対し、後方の遮へい体厚は、前方に比べ薄くなる。このような条件下において、(2-1)式を使用すると、実効線量を過小評価する恐れがある。したがって、放射線のスペクトルが変化するビルドアップ領域についてもある程度適用可能な遮へい計算式が必要である。

ここでは、ビルドアップ領域での放射線の減速と吸収過程をマクロ的に捉えた次式を提案する。

$$H(r,t) = \frac{H_0}{r^2} e^{-\frac{t}{\cos\theta_i \lambda}} \left\{ \alpha - \left[1 - e^{-\frac{\beta}{\cos\theta_i} t} \right] \times (\alpha - 1) \right\} \quad (2-2)$$

ここで、 α : $H(r,0) r^2$ と H_0 の比

β : ビルドアップ領域用のフィッティングパラメータ

であり、陽子エネルギー、放出角度、及び遮へい材の関数として与えられる。

この式は、遮へい体が薄くスペクトルが平衡に達していない場合でも使用が可能であり、(2-1)式に比べ、陽子エネルギー、ビーム方向に対する放出角度等の適用範囲を拡大することができる。

2.3 遮へい計算パラメータ

(2-2)式中の遮へい計算パラメータ、 H_0 、 α 、及び β は、モンテカルロコードMCNPX2.1.5¹⁰⁾を用いた、Appendix Aに示す計算条件での、コンクリート中の中性子及び線実効線量の計算結果を基に評価した。コンクリート中の中性子スペクトルが変化するビルドアップ領域において、エネルギー別の中性子の減衰傾向が異なるので、中性子については、上限エネルギー境界を500MeV、5MeV、及び0.414eVとした3群に分けた。陽子エネルギーが高く、かつ放出角度が小さい場合、線実効線量は中性子に比べ1~2桁小さく無視できる。しかし、陽子エネルギーが低く、かつ放出角度が増すにつれ、線実効線量は中性子に対し無視できなくなるので、線についても評価の対象とした。ビーム方向に対する放出角度は、0°~60°及び60°~180°までを、それぞれ10°及び20°間隔で分割し、各角度範囲での遮へい計算パラメータを評価・整理した。パラメータの評価では、(2-2)式による計算値の過小評価を極力避けることに心がけた(一部過大評価を増大させることとなる)。

中性子及び線の線源項 H_0 と陽子エネルギーの相関を鉄厚0、25、50及び70cmそれぞれ図2-2~図2-5に、減弱距離と陽子エネルギーの相関をそれぞれ図2-6~図2-9に示す。ここで、 H_0 は陽子エネルギーとの相関近似式を精度良く近似するため、対数値で表している。

中性子及び線のフィッティングパラメータ α と H_0 の積つまり $H(r,0) r^2$ と陽子エネルギー

との相関を、それぞれの鉄厚について図 2 - 10 ~ 図 2 - 13 に、フィッティングパラメータと陽子エネルギーの相関を図 2 - 14 ~ 図 2 - 17 に示す。ここで、 H_0 は H_0 と同様の理由で、一部対数値で表している。

鉄厚、放出角度別のこれら遮へい計算パラメータは、陽子エネルギー50 ~ 500MeVの範囲において陽子エネルギーとの相関性が見られ、陽子エネルギーを引数とした6次の多項式で近似して使用している。このパラメータ近似による中性子及び線実効線量の合計値の誤差は、-18 ~ 30%の範囲内であり、これはコンクリート厚でみると数%程度である。なお、コンクリート厚 100g/cm²以下については、(2 - 2)式では表現できない箇所があるため、比較対象外としている(本プログラムでは、100g/cm²をコンクリート厚の下限とする)。コンクリート厚 100g/cm²以下での(2 - 2)式による計算値は過大評価となる恐れがあるので、注意されたい。

2.4 コンクリート透過距離の取扱い

(2 - 2)式中でのコンクリート透過距離は、遮へい厚さ t とコンクリート壁への入射角 i を考慮した実効透過厚さを使用している。しかし、 i が大きくなると、線源から計算点に達する放射線による実効線量よりも、計算点に近い遮へい体内壁で散乱され計算点に到達する成分のほうが大きくなるため、 i による(2 - 2)式の適用範囲が制限される。 i の適用上限について、陽子エネルギー300、150及び50MeVを代表例とし、鉄、コンクリートそれぞれ、MCNPX2.1.5コードを用いて解析的に調査した。この結果、 i の適用上限は45°程度であることが確認された。本プログラムでは、コンクリート透過距離 t_e を以下として取扱う。

$$0^\circ \leq i \leq 45^\circ$$

$$t_e = \frac{t}{\cos \theta_i} \quad (2 - 3)$$

$$45^\circ < i$$

$$t_e = \frac{t}{\cos 45^\circ} \quad (2 - 4)$$

2.5 鉄遮へいの取扱い

鉄遮へいは、固定式及びビーム方向依存型の2種類が取扱える。前者は計算点毎に実効透過厚さを与え、後者はビーム方向を基準とした立体角と鉄遮へい厚で与えられる。線源と計算点の間に、ビーム方向依存型の鉄遮へいがある場合、前節のコンクリートと同様、以下の式により実効透過厚さを求める。

$$0^\circ < \theta_e < 45^\circ$$

$$t_e = \frac{t}{\cos \theta_e} \quad (2-5)$$

$$45^\circ < \theta_e$$

$$t_e = \frac{t}{\cos 45^\circ} \quad (2-6)$$

鉄遮へいの実効透過厚の合計値は、第2.3節で述べた鉄厚別の遮へい計算パラメータの選択に使用する。具体的には、以下の条件で選択する。

鉄実効透過厚 < 25cm : 鉄厚 0cm の遮へい計算パラメータ

25cm < 鉄実効透過厚 < 50cm : 鉄厚 25cm の遮へい計算パラメータ

50cm < 鉄実効透過厚 < 70cm : 鉄厚 50cm の遮へい計算パラメータ

70cm < 鉄実効透過厚 : 鉄厚 70cm の遮へい計算パラメータ

3 . プログラムのインストール及び実行方法

3 . 1 インストール方法

(1) ファイルの展開

本プログラムはMicrosoft Excel[®]のVisual Basic Editorで作成されている。サンプルインプット、アウトプット及びプログラムは、自己解凍型の圧縮ファイルであり、ファイルをダブルクリックすることで、解凍、展開できる。

ファイル展開後のディレクトリ構成を図3 - 1 に示す。

*: Copyright (C) Microsoft Corporation.

(2) プログラムの構成

ディレクトリ T00L に格納されているプログラム T00L.XLS のファイル構成を表3 - 1 に示す。

3 . 2 プログラムの実行方法

プログラム T00L.XLS を起動し、input シートを選択すると、図3 - 2 に示すデータ入力画面が表示される。計算に必要なデータを入力後、Ctrl+Shift+R キーを押すと、プログラムが起動する。計算が終了すると、表3 - 2 に示す計算結果を示す output シートが表示される。第2章に示した適用範囲を超えた場合等、comment シートにエラーメッセージを記載する（計算は最後まで実行する）ので、計算終了後、正常に終了していることを確認する必要がある。

図3 - 1 に示すように、サンプルインプット及びアウトプットが用意されているので、プログラム使用前に、これらを用いて、プログラムが正常に動作していることを確認する必要がある。

4. プログラムの使用方法

(1) 入力データ

以下の例題に基づき、プログラムの入力データの作成方法について説明する。

1) 例題 1

例題 1 の計算体系とデータ入力例を図 4 - 1 に示す。この例題は、200MeV陽子が + Y 軸上に入射する時の、+ Y 軸側のコンクリート中の実効線量を計算する例である。陽子の強度は $6.25 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ 、週当りの運転時間は 10 時間としている。線源から + Y 軸側コンクリート壁までの距離、及び壁厚は、それぞれ 2m 及び 2.5m、コンクリートの密度は 2.1 g/cm^3 である。計算点はコンクリート厚 1m ~ 2.5m までの 7 点とし、コンクリート厚と実効線量 ($\mu \text{ Sv/w}$) の相関が得られる。

2) 例題 2

例題 2 は、図 4 - 2 に示すように、上記例題 1 の計算体系において、陽子ビームに対する立体角 $0 \sim 30^\circ$ の範囲に厚さ 50cm の鉄遮へい体 (ビーム方向依存) を追加した例である。ここで与える鉄厚は、実効透過距離でないことに注意されたい (線源点と計算点との位置関係から、プログラム内で実効透過距離を計算する)。また、週当りの運転時間を 1 時間とすることで、コンクリート厚と実効線量率 ($\mu \text{ Sv/h}$) との相関が得られる。

3) 例題 3

例題 3 の計算体系を図 4 - 3 に示す。この例題は、陽子が + Y 軸上に入射する時の、X、Y 及び Z 軸上のコンクリート壁外面での実効線量率 ($\mu \text{ Sv/h}$) を計算する例である。ここでは、図中に示すように、100 ~ 250MeV の 4 つの陽子エネルギーとその使用頻度を与えている。なお、ビーム使用頻度は合計が 1 となるように入力する。合計値が 1 でない場合、プログラム内で 1 に規格化し、“comment” シートに警告を出力する。

4) 例題 4

図 4 - 4 に示す例題 4 は、250MeV 陽子が 3 つの方向から入射する場合の、X、Y 及び Z 軸上のコンクリート壁外面での実効線量率 ($\mu \text{ Sv/h}$) を計算する例である。陽子ビームの方向は、線源点を原点とした方向ベクトルで与える。なお、ビーム方向の使用頻度は合計が 1 となるように入力する。合計値が 1 でない場合、プログラム内で 1 に規格化し、“comment” シートに警告を出力する。

5) 例題 5

例題 5 は、図 4 - 5 に示すように、上記例題 4 の計算体系において、+ X、- Y 及び Z 方向の計算点に対し、それぞれ厚さ 25cm、25cm 及び 50cm の鉄遮へい体 (固定式) を追

加した例である。図中に示すように、固定式の追加鉄遮へい体は、計算点毎に与える。また、固定式の追加鉄遮へい体の厚さは、ビーム方向依存型鉄遮へい体とは異なり、実効透過厚で与える。

(2) 出力結果

本プログラムでは、以下のシートが出力結果として用意されている。

1) “output” シート

“output” シートの出力例を表3 - 2に示す。本シートには、計算点毎に、

distance : 線源から計算点までの距離(cm)

concrete thickness : コンクリート実効透過厚(cm)

iron thickness : 固定式の鉄実効透過厚(cm)

photon dose : 線実効線量 ($\mu\text{Sv/w}$)

neutron dose : 中性子実効線量 ($\mu\text{Sv/w}$)

total dose : 実効線量合計値 ($\mu\text{Sv/w}$)

ここで、 β には、ビーム方向依存鉄厚は含まれていない。ビーム方向依存鉄厚が計算に考慮される計算点には、備考欄に“beam direction dependent iron shield”を記載し、鉄厚は次の“comment”シートに出力する。これは、複数取扱えるビーム方向について、それぞれ鉄遮へい体の有無が異なる場合があるためである。

2) “comment” シート

“comment” シートの出力例を表4 - 1に示す。本シートには、以下が出力される。

陽子エネルギーの使用頻度の合計が1にならない場合の警告

ビーム方向の使用頻度の合計が1にならない場合の警告

ビーム方向ベクトルが基準ベクトルでない場合の警告

陽子エネルギーが50MeVよりも小さい場合のエラー

陽子エネルギーが500MeVよりも大きい場合のエラー

ビーム方向依存鉄遮へい体を考慮した計算点、ビーム方向番号(入力順)、放出角度、及び鉄厚

壁への入射角度が45°を超えた計算点

コンクリート厚が適用範囲外の計算点とそのコンクリート厚

β は、プログラム内で1に規格化し、“input”シートのデータを書き換える。 β 、 θ 及び ϕ は、本プログラムの適用範囲外であり、間違った結果が出力される。 β に示す計算点は、壁への入射角度を45°とみなして計算する。

インプットデータが本プログラムの適用範囲外であっても計算は実行されるので、計算

終了後 “ comment ” シートを確認する必要がある。

出力データ例については、プログラムファイルに格納されているので、参照されたい。

Appendix A 遮へい計算パラメータの計算条件

1. 概要

50～500MeVの陽子線が厚いターゲットに衝突する際発生する2次粒子数（中性子及び線）及び遮へい体として鉄とコンクリートの二層構造を採用した場合の遮へい体中での実効線量の減衰分布を、3次元モンテカルロコードMCNPX2.1.5¹⁰⁾を用いて一括計算し、2次粒子の放出角度別遮へい計算パラメータ算出に使用する。ここでは、遮へい計算パラメータの計算条件について記す。

2. 計算条件

(1) 計算体系

計算体系を図A-1に示す。体系は、殻型でモデル化した遮へい体の中心に、1次陽子が完全に止まる厚さの円筒型鉄ターゲットを配置した。50～500MeVの陽子はペンシルビームを仮定し、ターゲットの円筒軸に入射させた。遮へい体は、0cm、25cm、50cm又は70cm厚の鉄の外側にコンクリートを配置し、2次粒子の放出角度別の実効線量計算及び分散低減対策上、ビームラインを軸とした円錐状に12分割し、また厚さ方向についても24分割した。なお、コンクリート厚さは4mとし、実効線量の計算範囲は、3.5mとした(残りは反射領域)。計算に使用したタリーは、表面交差評価子(surface crossing estimator)である。

(2) 計算コード及び断面積

計算コードは、3次元モンテカルロコードMCNPX2.1.5¹⁰⁾を使用した。また、MCNPXで使用する断面積は、150MeV以下の陽子及び中性子について、LANLから公開された前平衡統計モデルに基づくLA150データライブラリー¹¹⁾を、150MeVを超えるものについては、MCNPXに装備されている核内カスケード-蒸発モデルBertini¹²⁾を用いた。線については、MCPLIB02¹³⁾を用いた。

(3) 物性値

計算に使用したターゲット及び遮へい体の物性データを表A-1に示す。コンクリートの密度及び組成はANL-5800 Type02-a¹⁴⁾から引用した。鉄については、ターゲットと遮へい体に分け、それぞれ理論密度及びSS400ベースの密度(測定値)を用いた。なお、SS400に含まれる炭素、ケイ素等の不純物が、鉄の共鳴領域での断面積の谷をカバーできることが考えられる。しかし、1MeV以下の中性子に限れば、遮へい性能は不純物を考慮した鉄よりもコンクリートのほうが高いため、鉄とコンクリートの2層構造とすることが理想的である。鉄を透過した1MeV以下の中性子を十分遮へいできる厚さのコンクリートを設けることを前提に鉄遮へい体の厚さを決定することが遮へい上効率的であり、軽量化、コスト低減にも寄与する。ここでは、鉄遮へい体を設ける場合、コンクリートとの2層構造を推奨し、SS400中の不純物は無視することとした。

(4) 実効線量換算係数

中性子、線フルエンスから実効線量への換算係数を表A-2に示す。線及びエネルギー200MeV以下の中性子換算係数は、ICRP Pub. 74の前方(AP)照射ジオメトリーでのデータを、200MeVを超える中性子エネルギー領域については、岩井らの評価したAP照射ジオメトリーでのデータ¹⁵⁾を用いた。

(5) その他

中性子ヒストリ - 数は、 $10^6 \sim 10^7$ 個とした。また、エネルギー群を、中性子、線それぞれ4群及び1群に分けたWeight Windowを使用し、分散低減を図った。

Appendix B インプットデータの説明

図3 - 2 で与えるインプットデータについて、以下説明する。

1. 陽子エネルギーと使用頻度

(1) 陽子エネルギー数：次の(2)で与える陽子エネルギー数を入力する。

(2) 陽子エネルギーとその使用頻度：

1) 陽子エネルギー (MeV): 50 ~ 500MeV の任意の値を入力する。適用範囲外の場合、表4 - 1 に示すエラーが出力される。

2) 使用頻度：陽子エネルギー毎の使用頻度を合計が1となるよう入力する。合計が1でない場合、表4 - 1 に示す警告が出力され、プログラム内で1に規格化し、“input”シートのデータを書き換える。

2. 陽子ビーム

(1) 陽子数：単位時間当りの陽子数(s^{-1})の合計値を入力する。

(2) 運転時間：週当りの運転時間(h/w)を入力する。

(3) 陽子ビーム方向数：以下の(5)で与える陽子ビーム方向数を入力する。

(4) ビーム方向依存追加鉄

1) 鉄厚：ビーム方向依存鉄遮へい体の厚さ(cm)を入力する。ここで、鉄厚は、密度 $7.83g/cm^3$ 相当厚である。

2) 角度範囲：遮へい体が設けられる範囲を、ビーム方向に対する立体角($^{\circ}$)として入力する。

(5) 方向ベクトルとその使用頻度：

1) 方向ベクトル：陽子ビームの入射方向を基準ベクトルで入力する(計算体系は図2 - 1参照)。

2) 使用頻度：方向ベクトル毎の使用頻度を合計値が1となるよう入力する。合計が1でない場合、表4 - 1 に示す警告が出力され、プログラム内で1に規格化し、“input”シートのデータを書き換える。

3. 計算体系

(1) ターゲットから壁までの距離と壁厚

1) ターゲットから壁までの距離：線源を原点とし、線源からコンクリート壁内面までの距離(cm)を、計算したい方位について入力する。

2) 壁厚：計算したい方位について、コンクリート壁厚(cm)を入力する。

(2) コンクリート密度：コンクリート壁の密度(g/cm^3)を入力する。

4 . 計算点

(1) 計算点数：次の (2) で与える計算点数を入力する。

(2) 計算点座標

1) 計算点名：計算点名を任意に入力する。

2) 計算点座標：計算点座標 (X,Y,Z) をcm単位で入力する。計算点は、コンクリート壁中及びコンクリート壁の外側が対象となる。また、プログラム内で計算されるコンクリート透過厚とコンクリート密度の積が、本プログラムの適用範囲 100 ~ 735g/cm²外である場合、表 4 - 1 に示す警告が出力される。

3) 鉄厚：固定式の鉄遮へい体の実効透過厚(cm)を入力する。ここで、鉄厚は、密度 7.83g/cm³相当厚である。

4) 通過壁：計算で考慮する壁を、符号付軸 (X、 Y、 Z) で入力する。

インプットデータが本プログラムの適用範囲外であっても計算は実行されるので、計算終了後“ comment ”シートを確認する必要がある。

References

- 1) Moyer B. J., Evaluation of Shielding Required for the Improved Bevatron, Rep. UCRL-9796, Lawrence Berkeley Lab., Berkeley, CA (1961).
- 2) Hagan, N. K., Colborn, L. L., Armstrong Allen T. W., Nucl. Sci. Eng., 98,272 (1988).
- 3) Siebers J. V., DeLuca Jr. P. M., Pearson D. W., Coutrakon G., Nucl. Sci. Eng., 115, 13 (1993).
- 4) Aweschalom M., FNAL-TM-1354 (1987).
- 5) Knowles H. B., Orthel J. L., Hill B. W., Proc. 1993 Particle Accelerator Conference, Washington, DC, May 17-20, 1993, IEEE 1762 (1993).
- 6) Braid T. H., Rapids R. F., Siemssen R. H., Tippie J. W., O'Brien K., IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-18, 821 (1971).
- 7) Tesch K., Radiat. Protec. Dosim., 11, 165 (1985).
- 8) Tsukiyama T., Tayama R., Handa H., Hayashi K., Yamada K., Abe T., Kurosawa N., Sasamoto N., Nakashima H., Sakamoto Y., J. Nucl. Sci. Technol., Proceedings of the Ninth International Conference of Radiation Shielding, Supplement 1, 640 (2000).
- 9) Tayama R., Nakano H., Handa H., Hayashi K., Hirayama H., Shin K., Masukawa F., Nakashima H., Sasamoto N., KEK Internal 2001-8, Nov. 2001.
- 10) MCNPX version 2.1.5, CCC-705, RSICC Computer Code Collection, Oak Ridge National Laboratory (1999).
- 11) Chadwick M. B., et al., Cross-Section Evaluation to 150 MeV for Accelerator-Driven Systems and Implementation in MCNPX, Nucl. Sci. Eng., 131, 293 (1999).
- 12) Bertini H. W., Phys. Rev. 188,1711 (1969)
- 13) MCNPXS, DLC-189, RSICC Data Library (1997)
- 14) Reactor Physics Constants, ANL-5800, Argonne National Laboratory pp. 660 (1963).
- 15) Iwai S., et al., Overview of Fluence to Dose Equivalent Conversion Coefficients for High-Energy Radiations-Calculation Methods and Results of Effective Dose Equivalent and Effective Dose per Unit Particle Fluence, Proc. of SATIF3 (1997).

Tables

Table 3-1 Sheets in the TOOL.xls

input: input data sheet

output: output sheet

comment: comment sheet in the calculation, e.g. warnings

attenuation: attenuation cure of dose in the concrete at some energy and emission angle

photon: parameters for photon dose calculation

first: parameters for high energy neutron dose calculation

middle: parameters for middle energy neutron dose calculation

thermal: parameters for thermal neutron dose calculation

Table 3-2 Sample output sheet

calculation point	distance (cm)	concrete thickness (cm)	iron thickness (cm)	photon dose (micro-Sv/w)	neutron dose (micro-Sv/w)	total dose (micro-Sv/w)	remarks
Point 1	300	100	0	4.2E+03	2.0E+05	2.0E+05	
Point 2	325	125	0	2.2E+03	1.0E+05	1.0E+05	
Point 3	350	150	0	1.1E+03	5.5E+04	5.6E+04	
Point 4	375	175	0	6.0E+02	2.9E+04	3.0E+04	
Point 5	400	200	0	3.2E+02	1.6E+04	1.6E+04	
Point 6	425	225	0	1.8E+02	8.7E+03	8.8E+03	
Point 7	450	250	0	9.6E+01	4.8E+03	4.9E+03	

Table 4-1 Sample comment sheet

warning: proton energy frequency is normalized
 warning: beam direction frequency is normalized
 warning: beam vector is normalized
 error: proton energy is lower than lower limit(50MeV)!
 error: proton energy exceed upper limit(500MeV)!

calculation points considering direction dependent iron shield
 calculation point direction No. emission angle iron thickness
 Point 5 1 11.99466981 25.55800864

calculation points where their incident angle exceeds 45 deg
 calculation point
 Point 6

calculation points where their concrete thickness exceeds application range 100-735 g/cm²
 calculation point thickness(g/cm²)
 Point 3 21
 Point 4 1680
 Point 6 742.461628

Table A-1 Atomic Number densities of materials used in MCNPX calculations

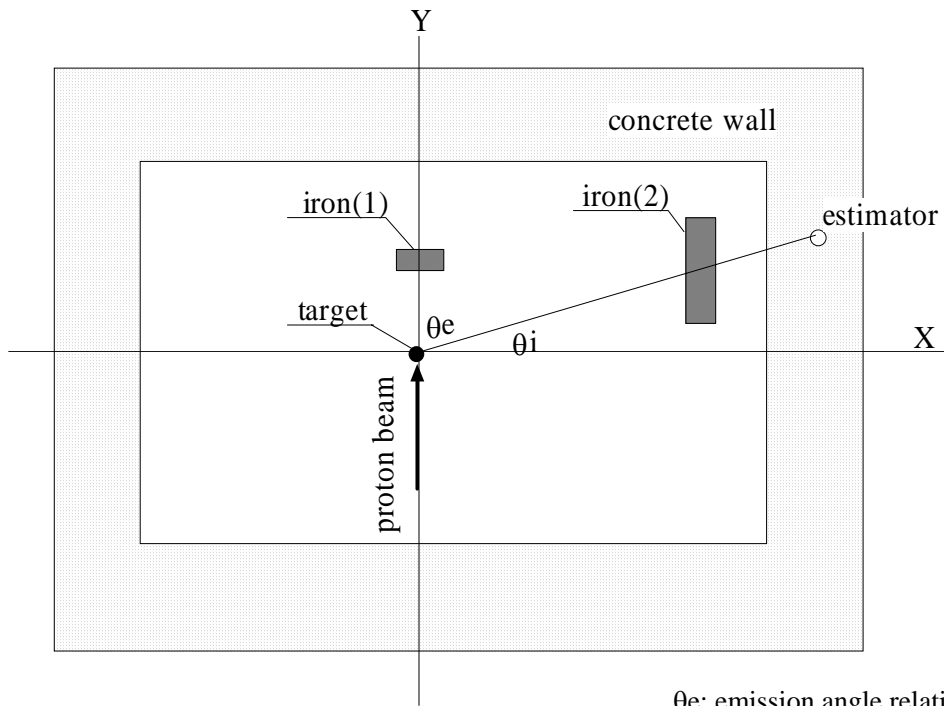
Materials	Air		Concrete		Iron (target)		Iron (shield)	
Density (g/cm ³)	1.239E-03		2.100E+00		7.860E+00		7.830E+00	
Element	Atomic number ($\times 10^{24}$ cm ⁻³)	Volume fraction (%)	Atomic number ($\times 10^{24}$ cm ⁻³)	Volume fraction (%)	Atomic number ($\times 10^{24}$ cm ⁻³)	Volume fraction (%)	Atomic number ($\times 10^{24}$ cm ⁻³)	Volume fraction (%)
H	7.402E-09	1.450E-02	1.299E-02	1.727E+01				
C	7.799E-09	1.528E-02	1.082E-04	1.439E-01				
N	4.020E-05	7.874E+01						
O	1.084E-05	2.123E+01	4.305E-02	5.724E+01				
Mg			1.161E-04	1.544E-01				
Al			1.632E-03	2.170E+00				
Si			1.558E-02	2.072E+01				
Ca			1.409E-03	1.873E+00				
Fe			3.235E-04	4.301E-01	8.472E-02	1.000E+02	8.440E-02	1.000E+02

Table A-2 Fluence to effective dose conversion factors for neutron and photon

Energy (MeV)	Conversion factor (pSv cm ²)	Energy (MeV)	Conversion factor (pSv cm ²)	Energy (MeV)	Conversion factor (pSv cm ²)
1.00E-09	5.24	9.00E-01	267	1.00E+01	2.38E+01
1.00E-08	6.55	1.00E+00	282	8.00E+00	1.99E+01
2.50E-08	7.6	1.20E+00	310	6.00E+00	1.60E+01
1.00E-07	9.95	2	383	4.00E+00	1.20E+01
2.00E-07	11.2	3	432	2.00E+00	7.49E+00
5.00E-07	12.8	4	458	1.00E+00	4.48E+00
1.00E-06	13.8	5	474	8.00E-01	3.73E+00
2.00E-06	14.5	6	483	6.00E-01	2.91E+00
5.00E-06	15	7	490	5.00E-01	2.47E+00
1.00E-05	15.1	8	494	4.00E-01	2.00E+00
2.00E-05	15.1	9	497	3.00E-01	1.51E+00
5.00E-05	14.8	10	499	2.00E-01	1.00E+00
1.00E-04	14.6	12	499	1.50E-01	7.52E-01
2.00E-04	14.4	14	496	1.00E-01	5.17E-01
5.00E-04	14.2	15	494	8.00E-02	4.40E-01
1.00E-03	14.2	16	491	6.00E-02	3.78E-01
2.00E-03	14.4	18	486	5.00E-02	3.57E-01
5.00E-03	15.7	20	480	4.00E-02	3.38E-01
1.00E-02	18.3	30	458	3.00E-02	3.00E-01
2.00E-02	23.8	50	437	2.00E-02	2.05E-01
3.00E-02	29	75	429	1.50E-02	1.25E-01
5.00E-02	38.5	100	429	1.00E-02	4.85E-02
7.00E-02	47.2	130	432		
1.00E-01	59.8	150	438		
1.50E-01	80.2	180	445		
2.00E-01	99	200	470.51		
3.00E-01	133	400	520.54		
5.00E-01	188	700	881.03		
7.00E-01	231	1000	1004.7		

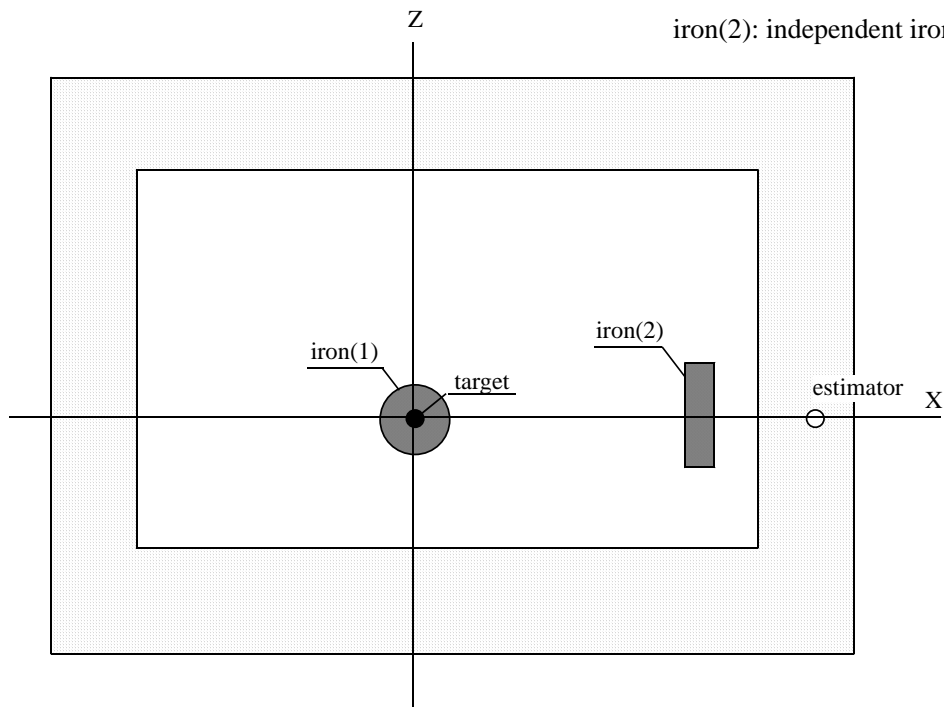
ICRP Pub74+Yoshizawa et al.

Figures



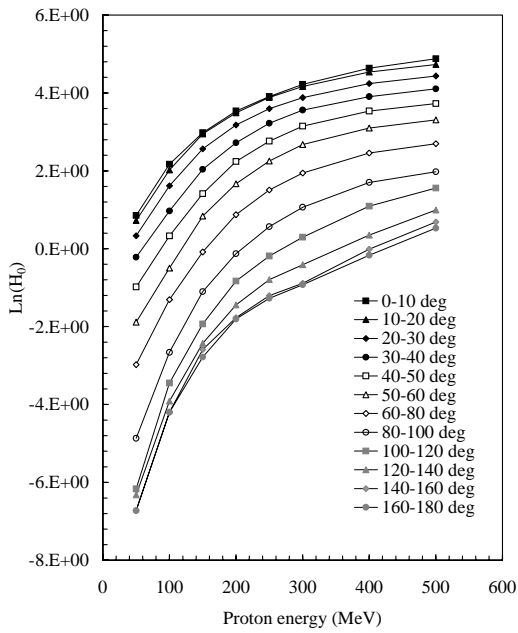
horizontal cross-section

θ_e : emission angle relative to beam direction
 θ_i : incident angle into concrete wall
 iron(1): beam direction dependent iron shield
 iron(2): independent iron shield

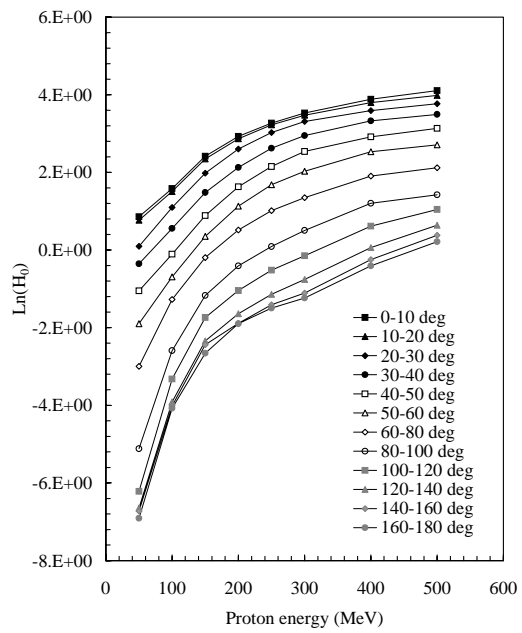


vertical cross-section

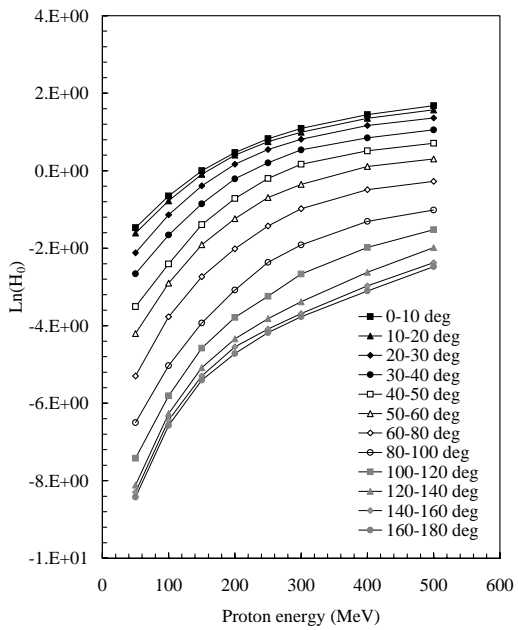
Figure 2-1 Geometry used in effective dose calculations



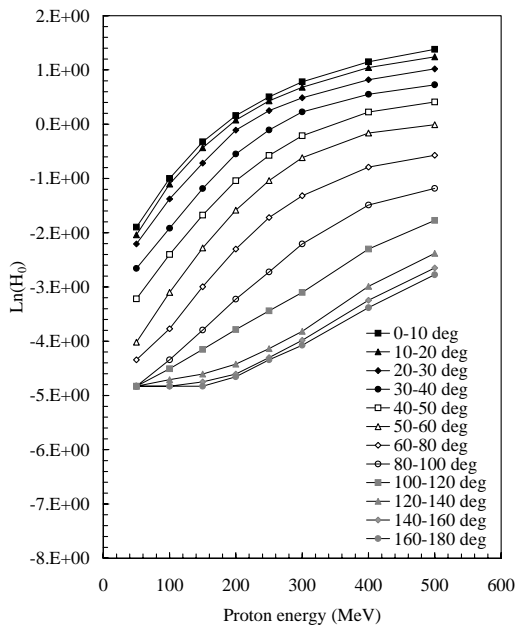
(a) $500\text{MeV} > E_n > 5\text{MeV}$



(b) $5\text{MeV} > E_n > 0.414\text{eV}$

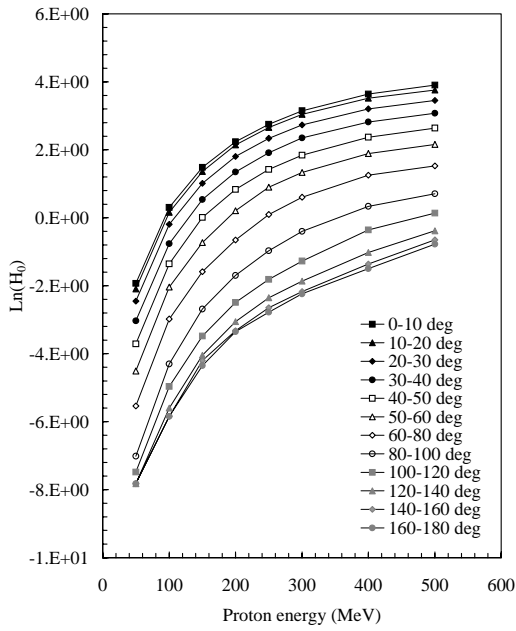


(c) $0.414\text{eV} > E_n$

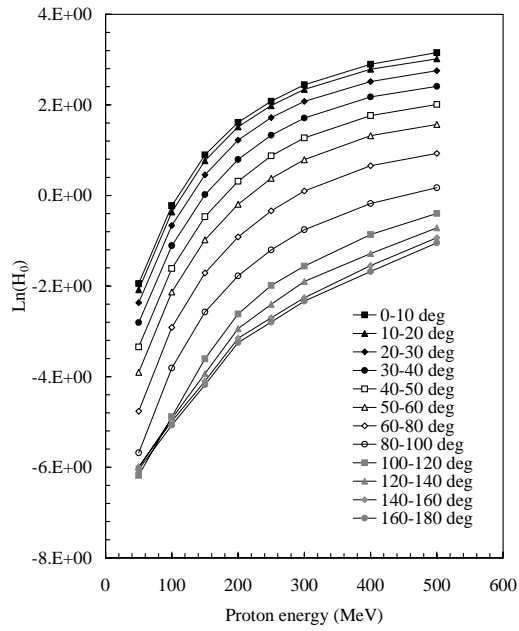


(d) photon

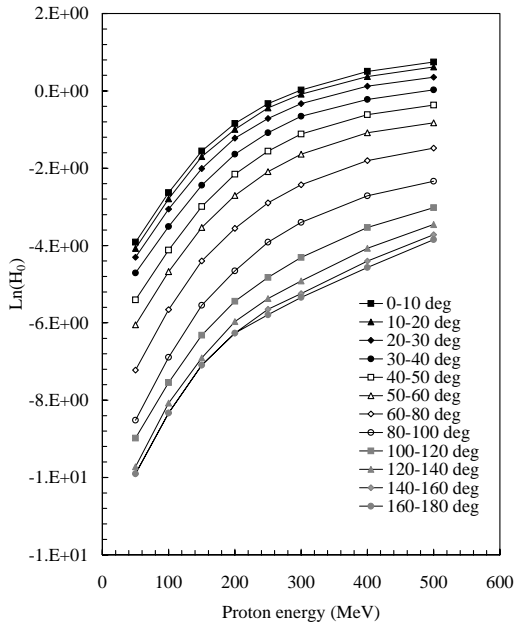
Figure 2-2 Proton energy vs. source term of concrete for each emission angle range relative to proton beam direction where thickness of additional iron shield is 0 cm.



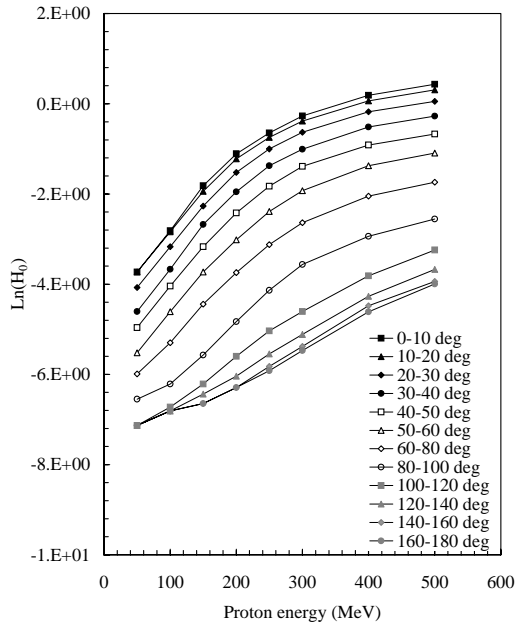
(a) $500\text{MeV} > E_n > 5\text{MeV}$



(b) $5\text{MeV} > E_n > 0.414\text{eV}$

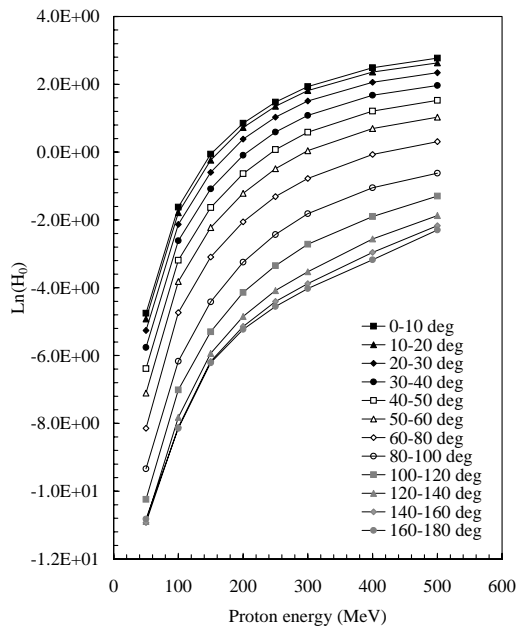


(c) $0.414\text{eV} > E_n$

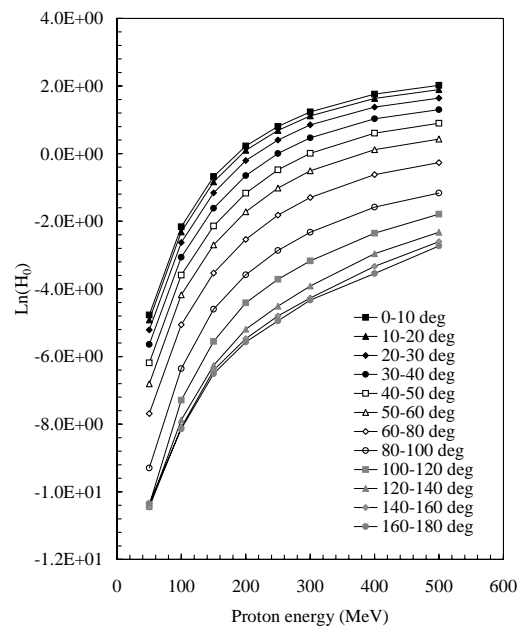


(d) photon

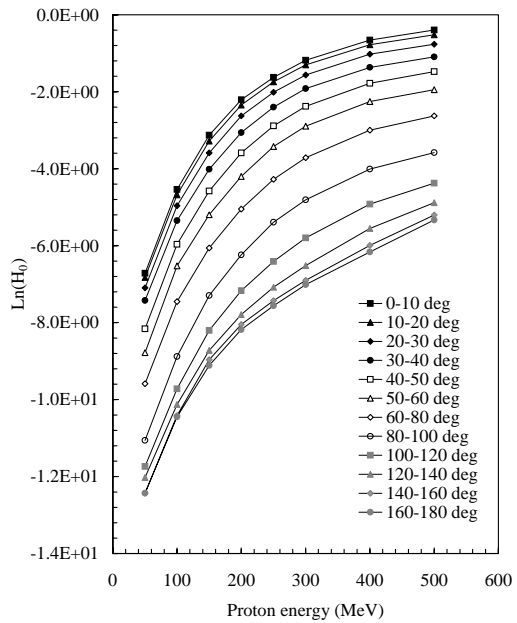
Figure 2-3 Proton energy vs. source term of concrete for each emission angle range relative to proton beam direction where thickness of additional iron shield is 25 cm.



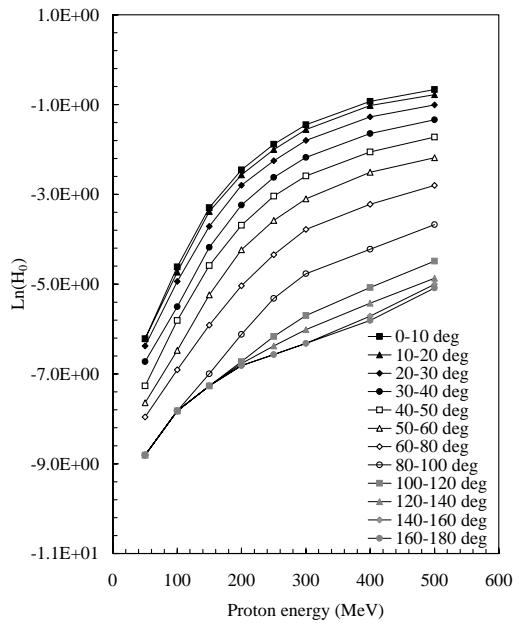
(a) $500\text{MeV} > E_n > 5\text{MeV}$



(b) $5\text{MeV} > E_n > 0.414\text{eV}$

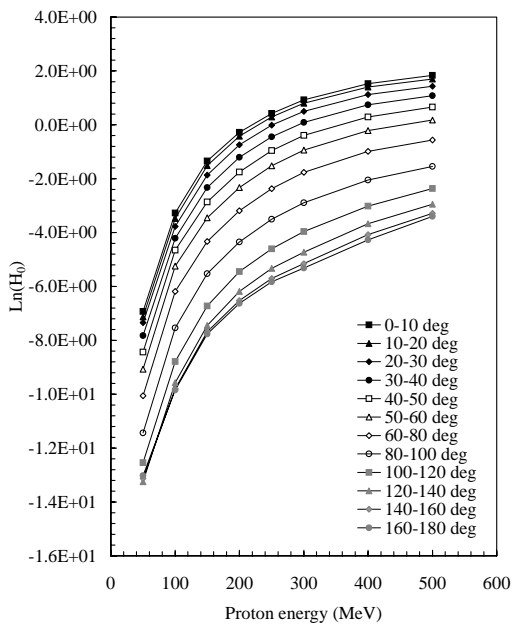


(c) $0.414\text{eV} > E_n$

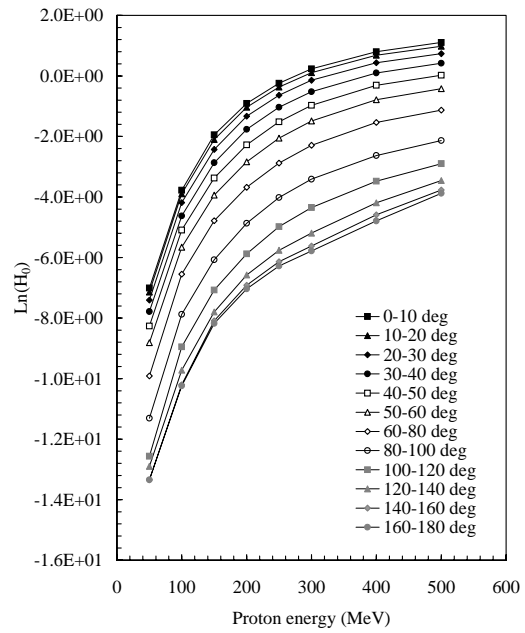


(d) photon

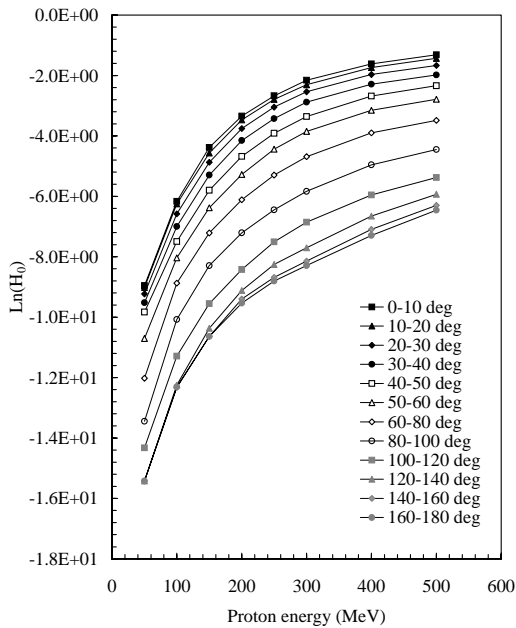
Figure 2-4 Proton energy vs. source term of concrete for each emission angle range relative to proton beam direction where thickness of additional iron shield is 50 cm.



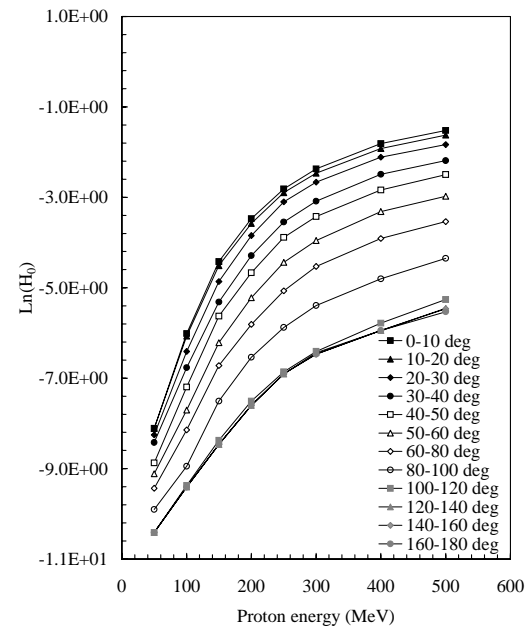
(a) $500\text{MeV} > E_n > 5\text{MeV}$



(b) $5\text{MeV} > E_n > 0.414\text{eV}$

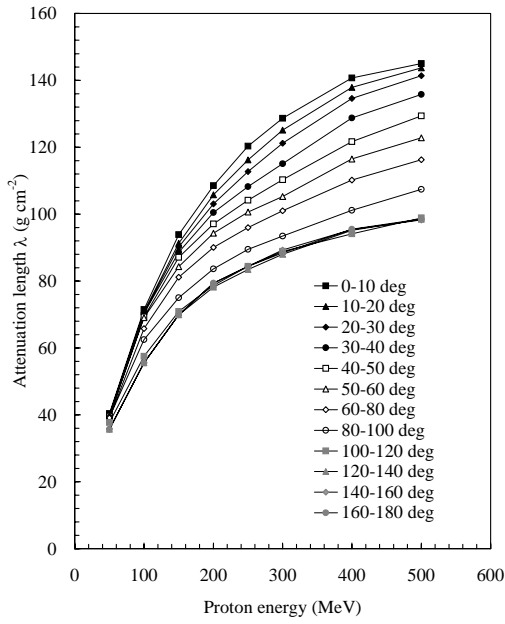


(c) $0.414\text{eV} > E_n$

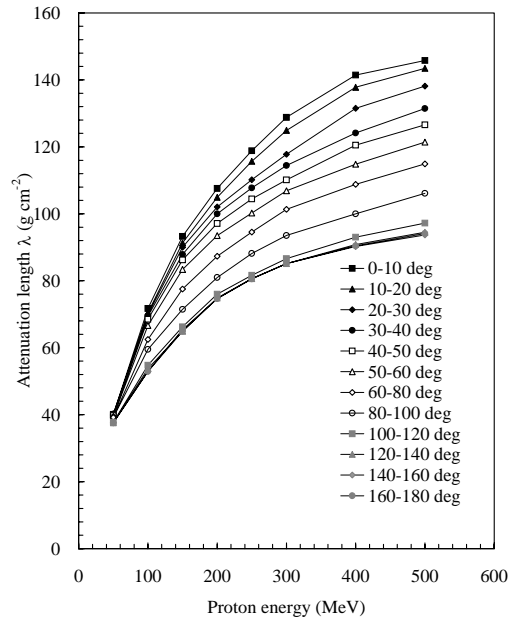


(d) photon

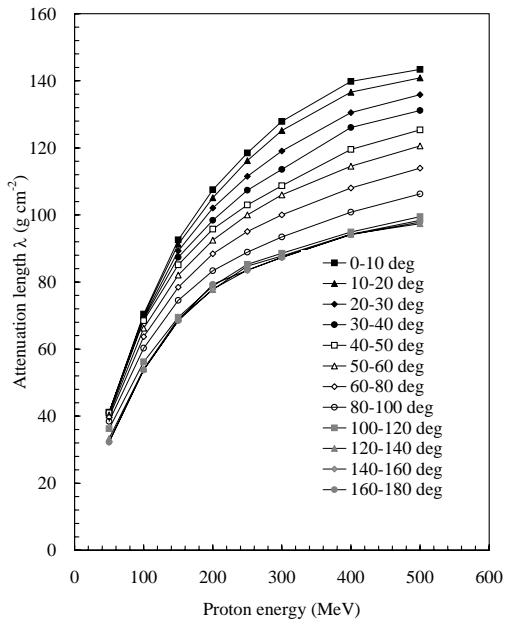
Figure 2-5 Proton energy vs. source term of concrete for each emission angle range relative to proton beam direction where thickness of additional iron shield is 70 cm.



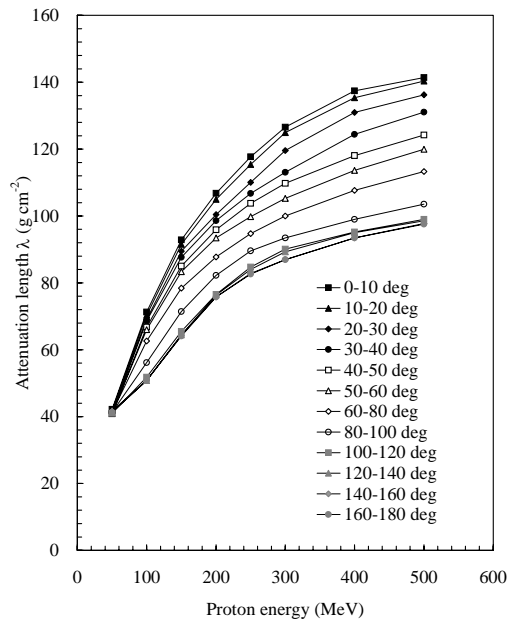
(a) $500\text{MeV} > E_n > 5\text{MeV}$



(b) $5\text{MeV} > E_n > 0.414\text{eV}$

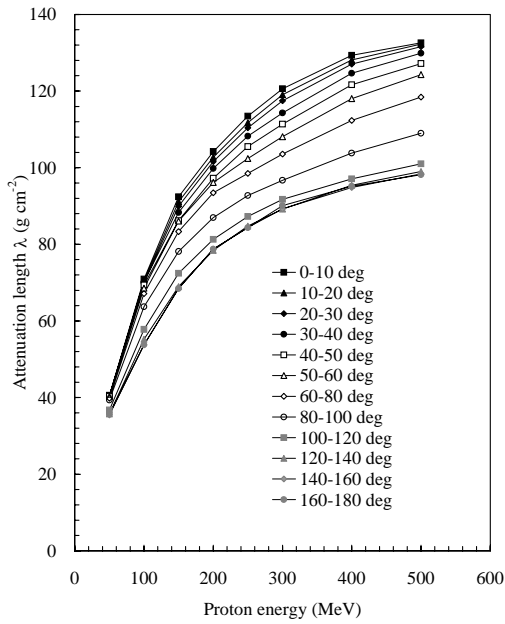


(c) $0.414\text{eV} > E_n$

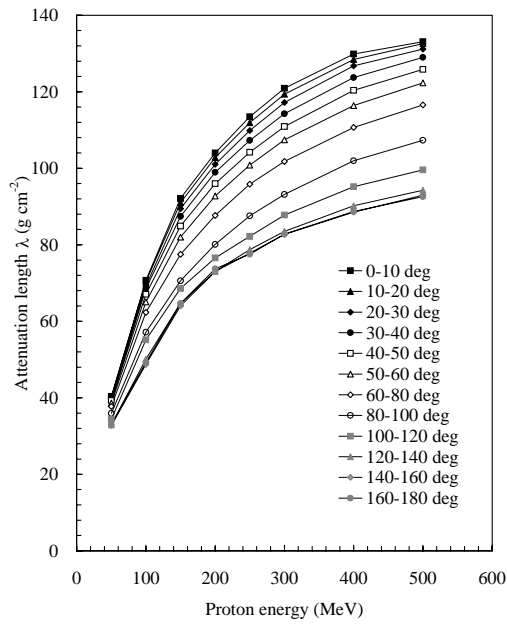


(d) photon

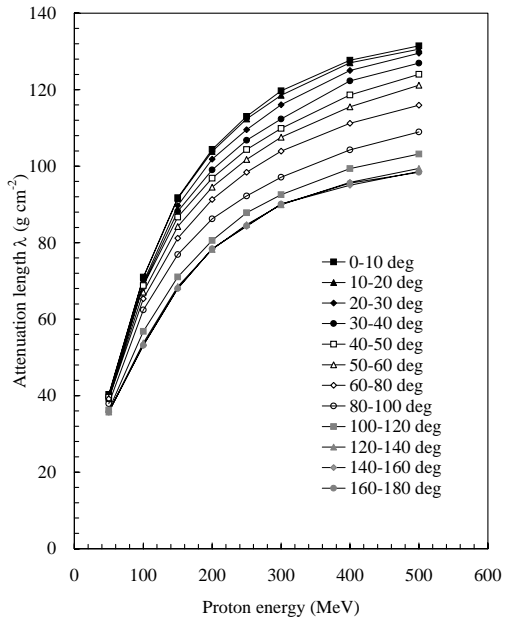
Figure 2-6 Proton energy vs. attenuation length of concrete for each emission angle range relative to proton beam direction where thickness of additional iron shield is 0 cm.



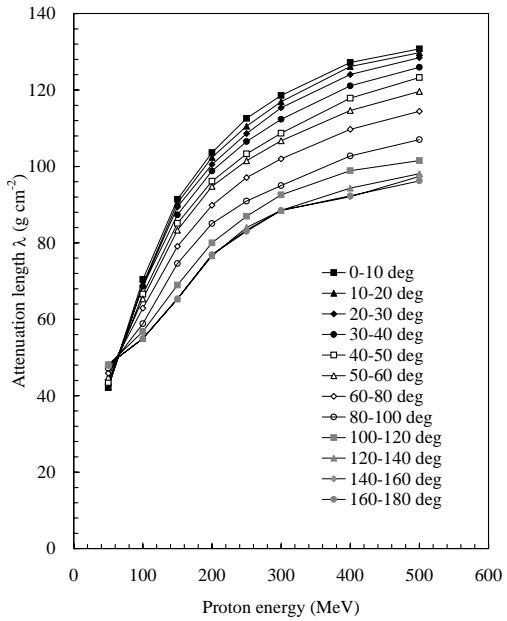
(a) 500MeV > En > 5MeV



(b) 5MeV > En > 0.414eV

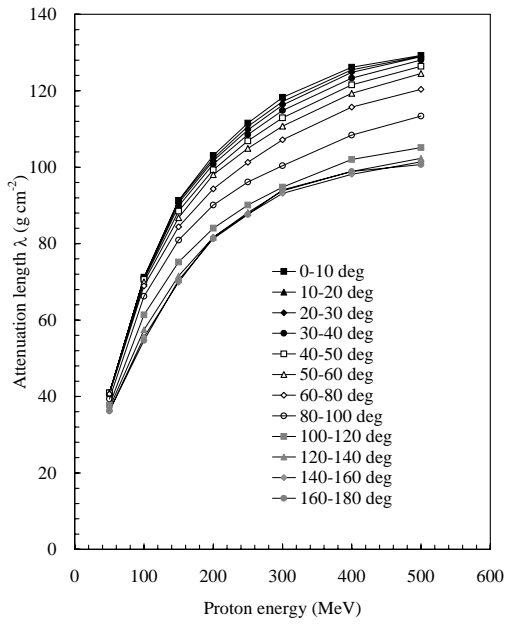


(c) 0.414eV > En

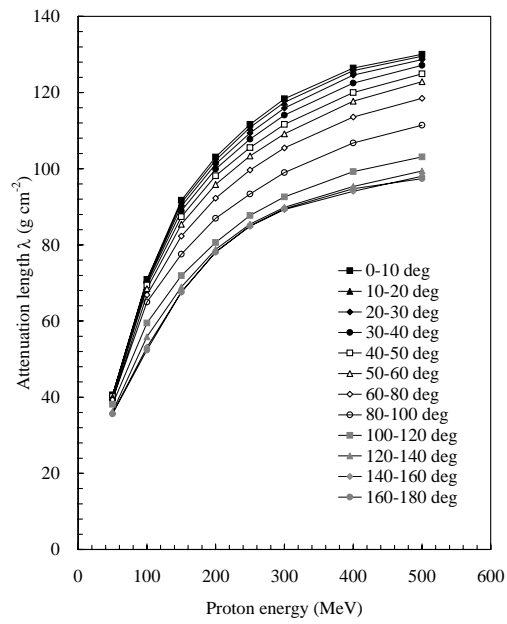


(d) photon

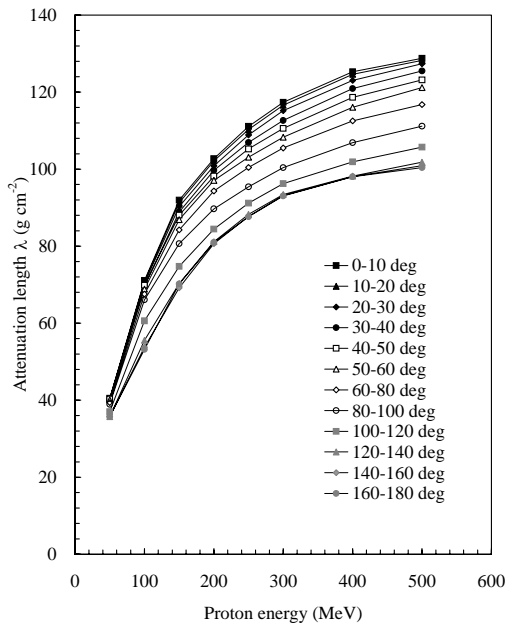
Figure 2-7 Proton energy vs. attenuation length of concrete for each emission angle range relative to proton beam direction where thickness of additional iron shield is 25 cm.



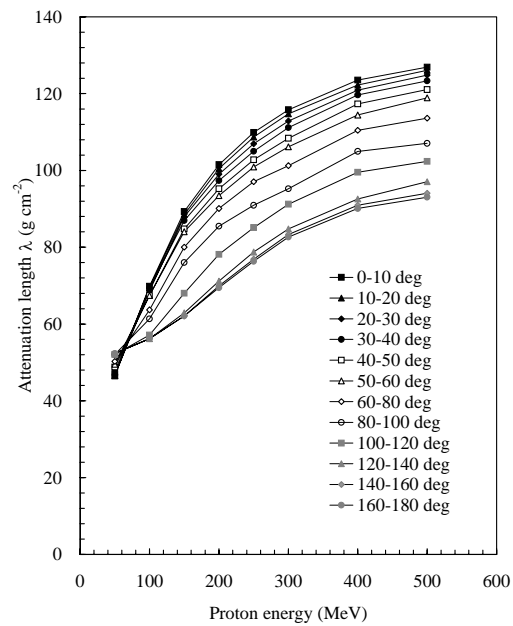
(a) $500\text{MeV} > E_n > 5\text{MeV}$



(b) $5\text{MeV} > E_n > 0.414\text{eV}$

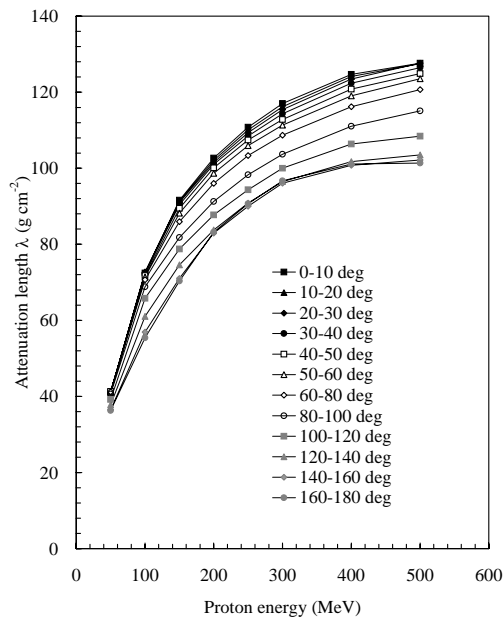


(c) $0.414\text{eV} > E_n$

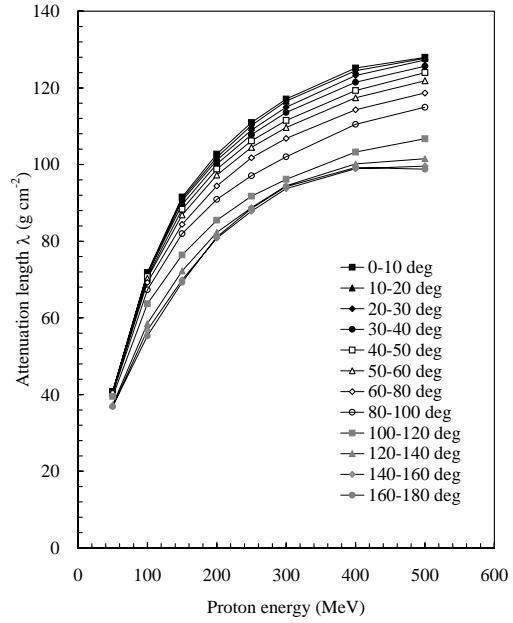


(d) photon

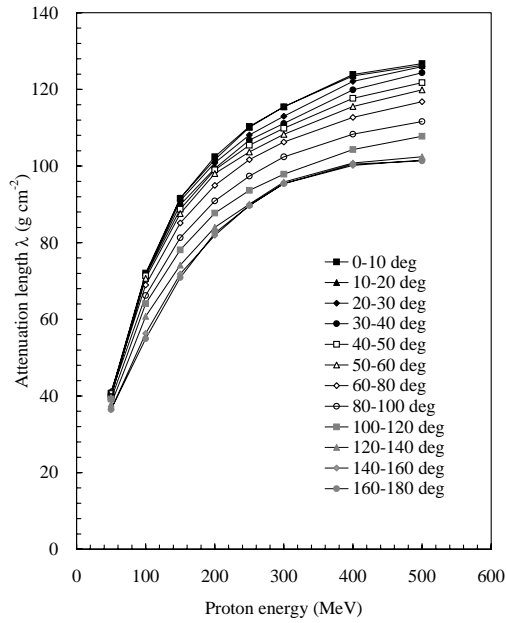
Figure 2-8 Proton energy vs. attenuation length of concrete for each emission angle range relative to proton beam direction where thickness of additional iron shield is 50 cm.



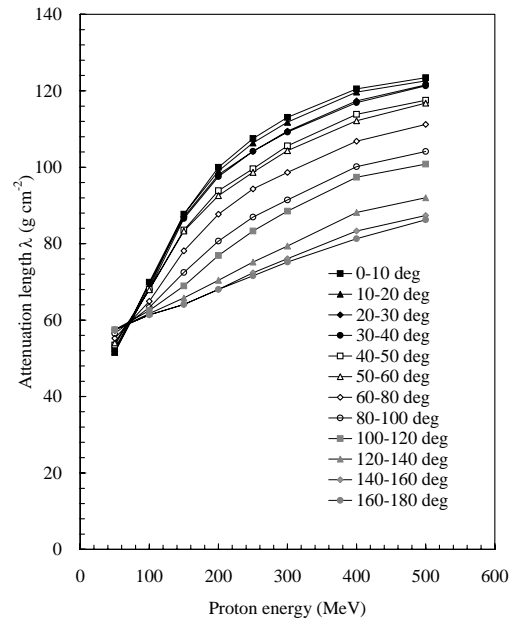
(a) $500\text{MeV} > E_n > 5\text{MeV}$



(b) $5\text{MeV} > E_n > 0.414\text{eV}$

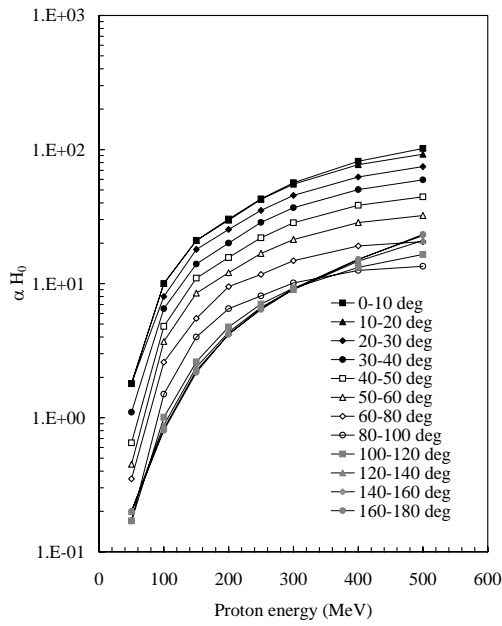


(c) $0.414\text{eV} > E_n$

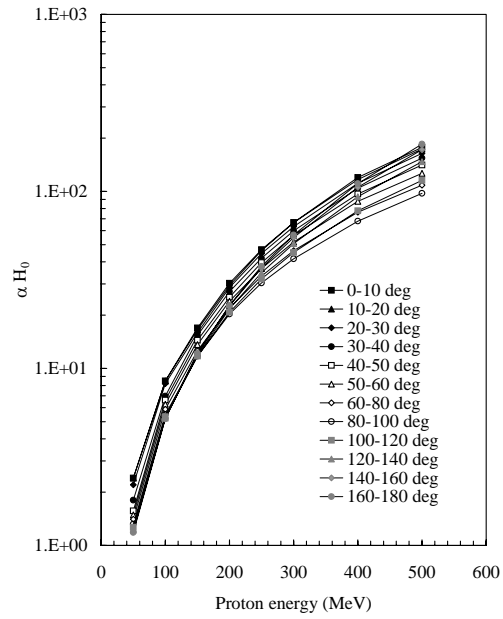


(d) photon

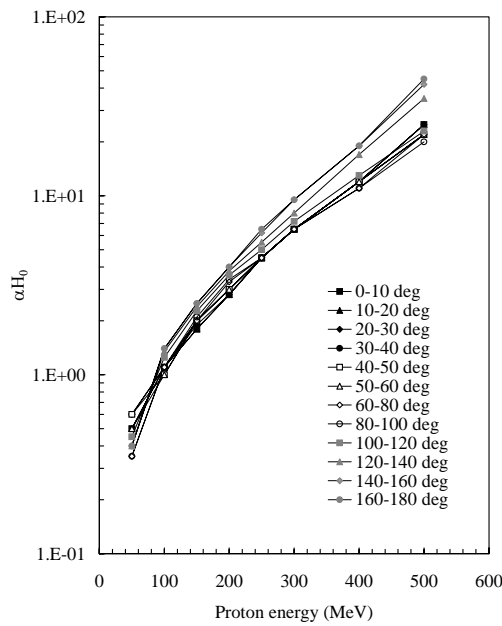
Figure 2-9 Proton energy vs. attenuation length of concrete for each emission angle range relative to proton beam direction where thickness of additional iron shield is 70 cm.



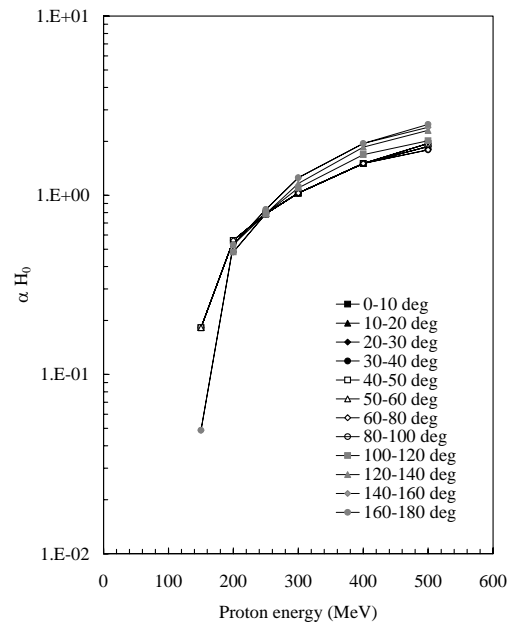
(a) $500\text{MeV} > E_n > 5\text{MeV}$



(b) $5\text{MeV} > E_n > 0.414\text{eV}$

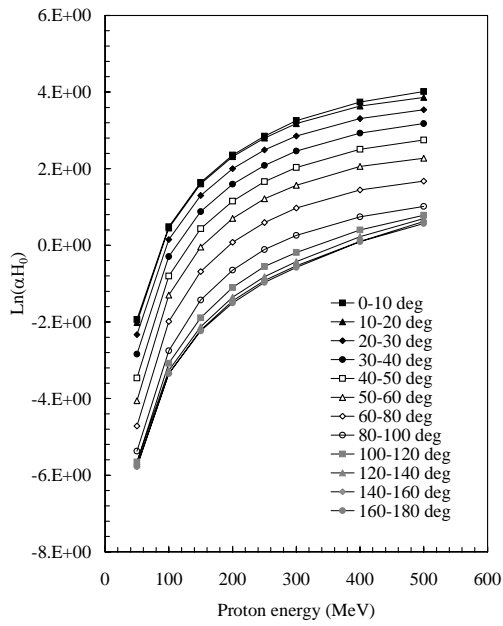


(c) $0.414\text{eV} > E_n$

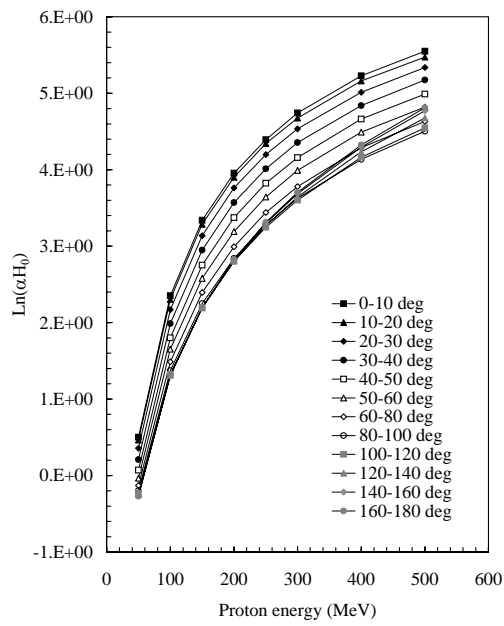


(d) photon

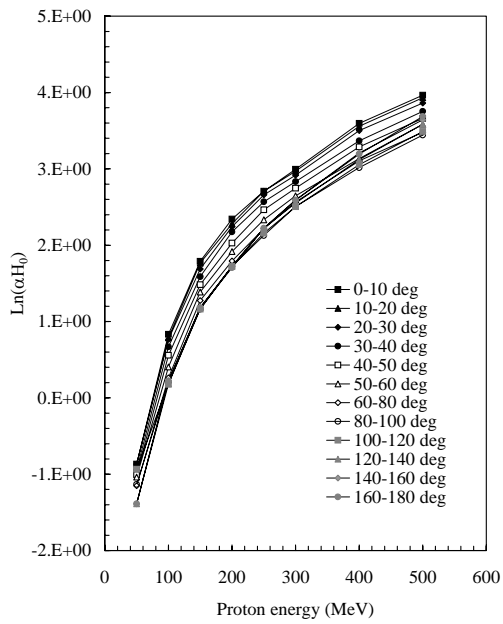
Figure 2-10 Proton energy vs. fitting parameter αH_0 of concrete for each emission angle range relative to proton beam direction where thickness of additional iron shield is 0 cm.



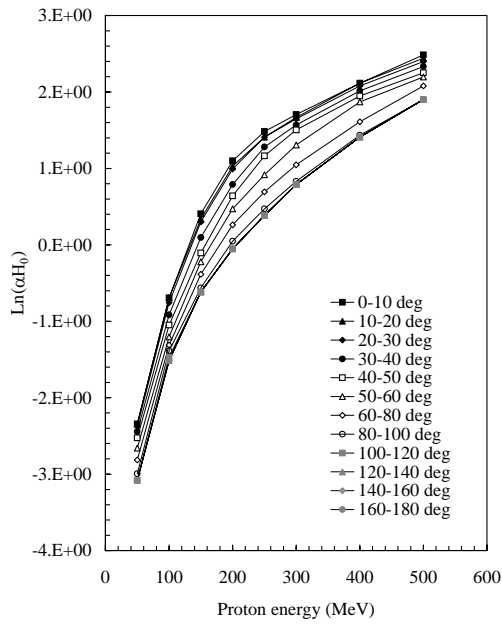
(a) $500\text{MeV} > E_n > 5\text{MeV}$



(b) $5\text{MeV} > E_n > 0.414\text{eV}$

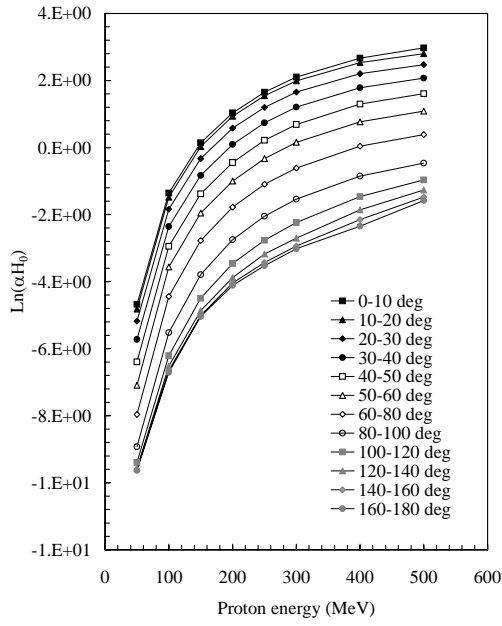


(c) $0.414\text{eV} > E_n$

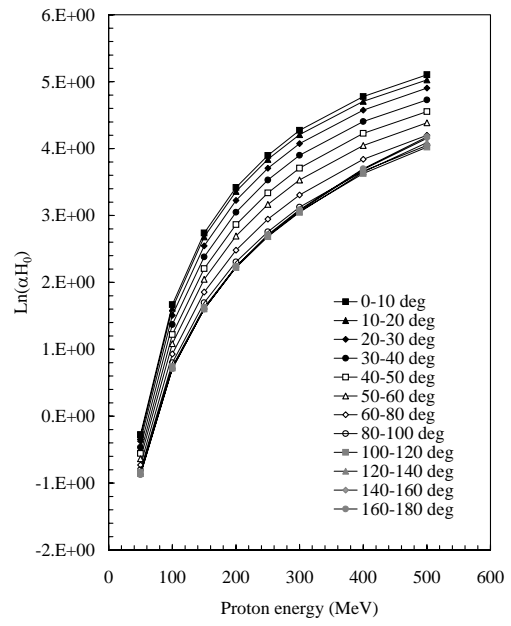


(d) photon

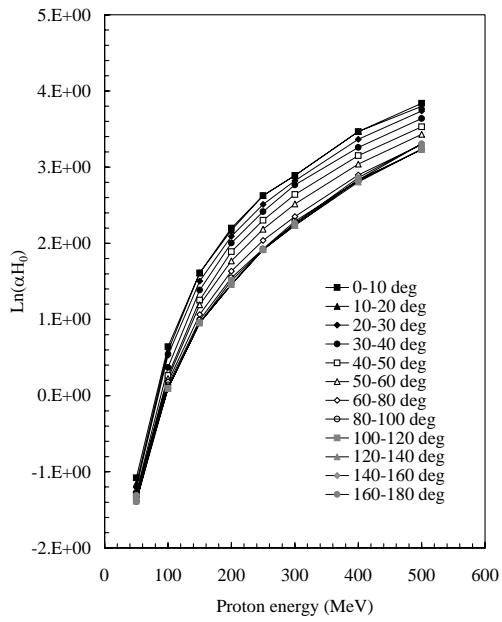
Figure 2-11 Proton energy vs. fitting parameter αH_0 of concrete for each emission angle range relative to proton beam direction where thickness of additional iron shield is 25 cm.



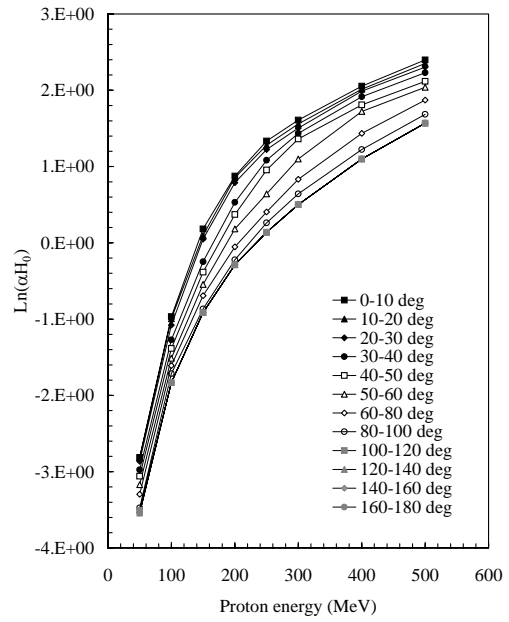
(a) $500\text{MeV} > E_n > 5\text{MeV}$



(b) $5\text{MeV} > E_n > 0.414\text{eV}$

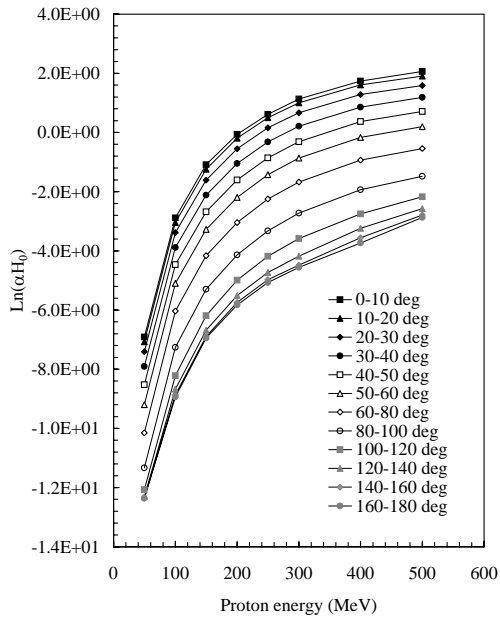


(c) $0.414\text{eV} > E_n$

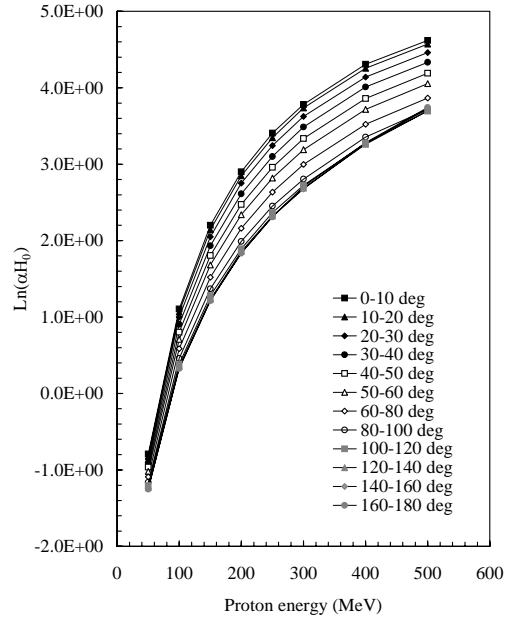


(d) photon

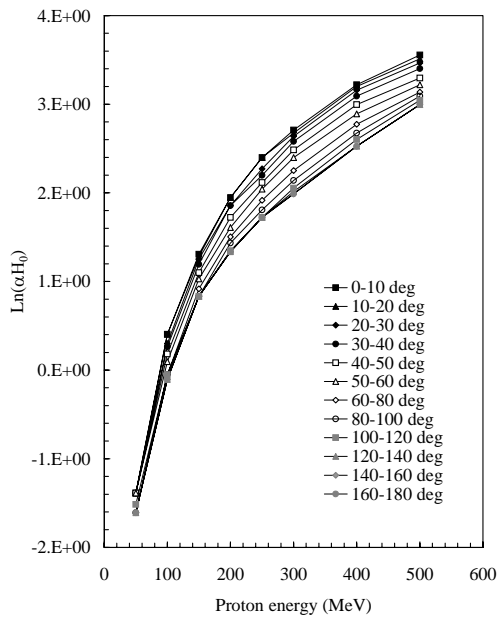
Figure 2-12 Proton energy vs. fitting parameter αH_0 of concrete for each emission angle range relative to proton beam direction where thickness of additional iron shield is 50 cm.



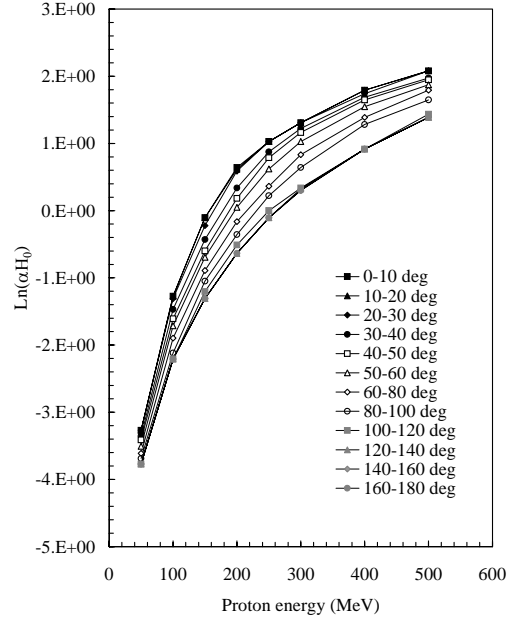
(a) $500 \text{ MeV} > E_n > 5 \text{ MeV}$



(b) $5 \text{ MeV} > E_n > 0.414 \text{ eV}$

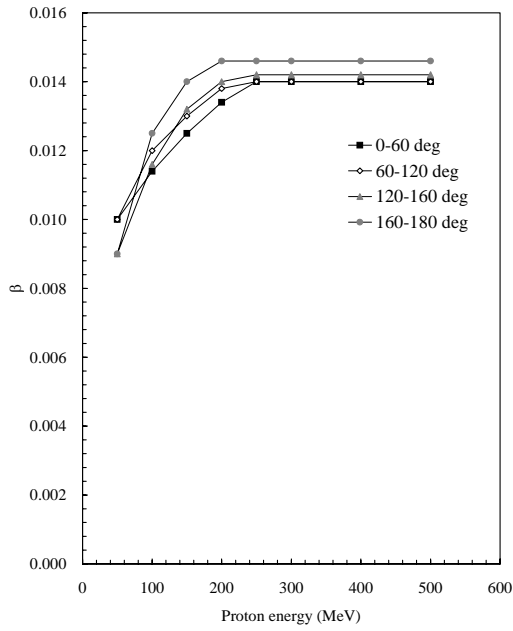


(c) $0.414 \text{ eV} > E_n$

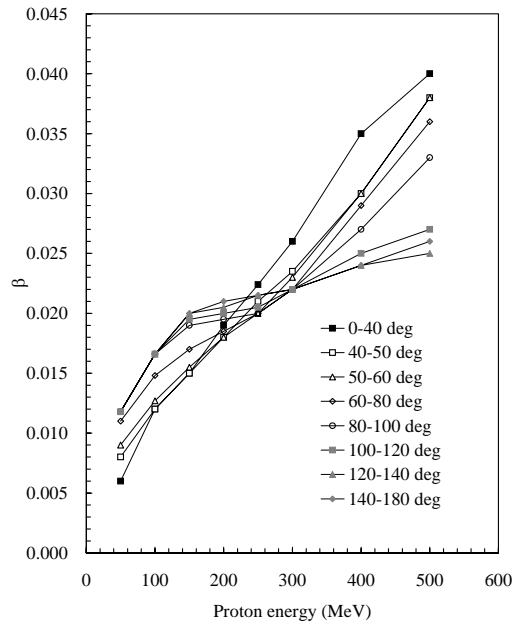


(d) photon

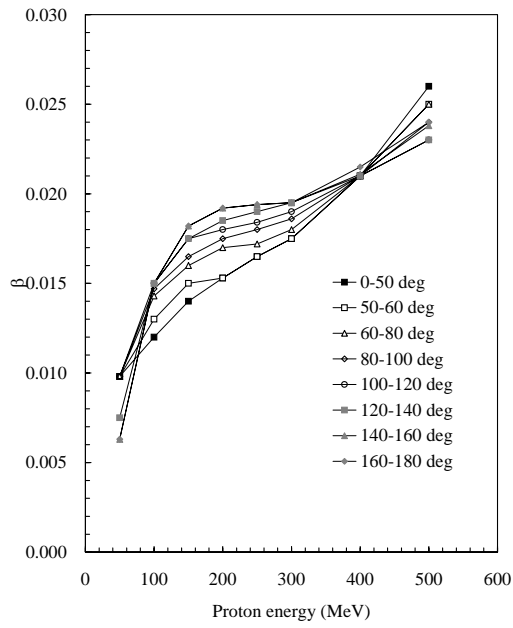
Figure 2-13 Proton energy vs. fitting parameter αH_0 of concrete for each emission angle range relative to proton beam direction where thickness of additional iron shield is 70 cm.



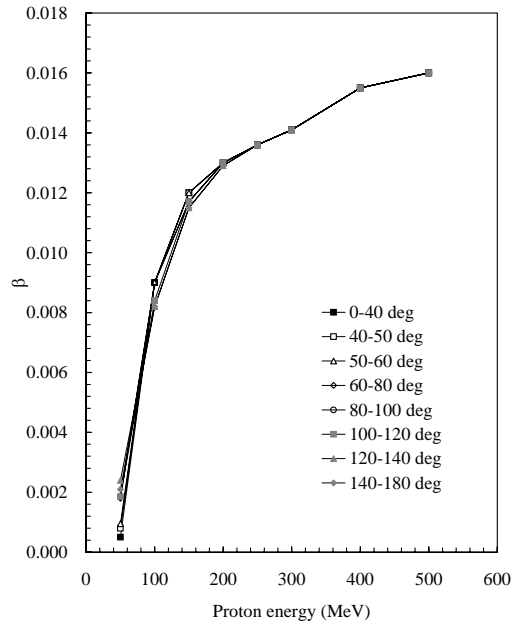
(a) $500\text{MeV} > E_n > 5\text{MeV}$



(b) $5\text{MeV} > E_n > 0.414\text{eV}$

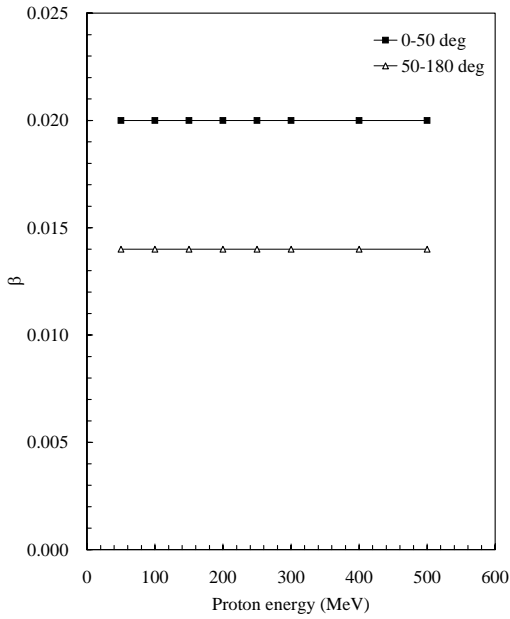


(c) $0.414\text{eV} > E_n$

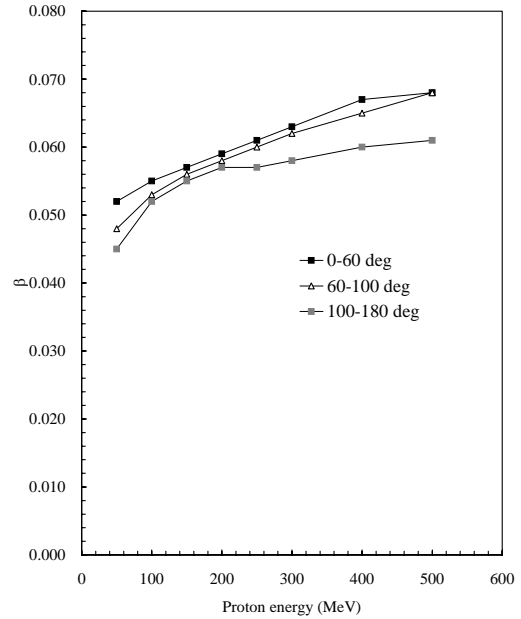


(d) photon

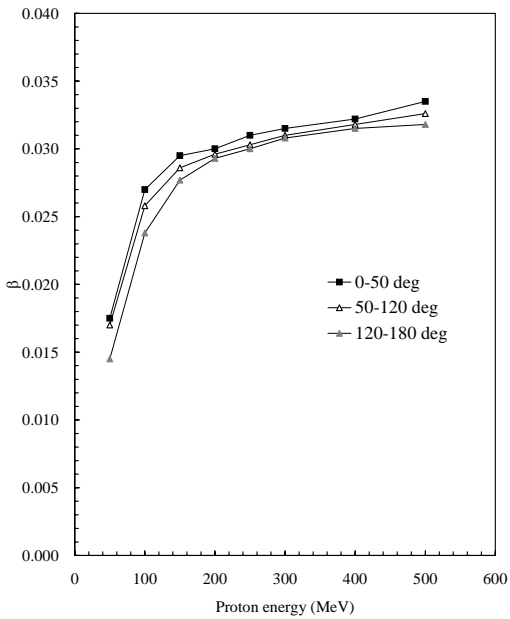
Figure 2-14 Proton energy vs. fitting parameter β of concrete for each emission angle range relative to proton beam direction where thickness of additional iron shield is 0 cm.



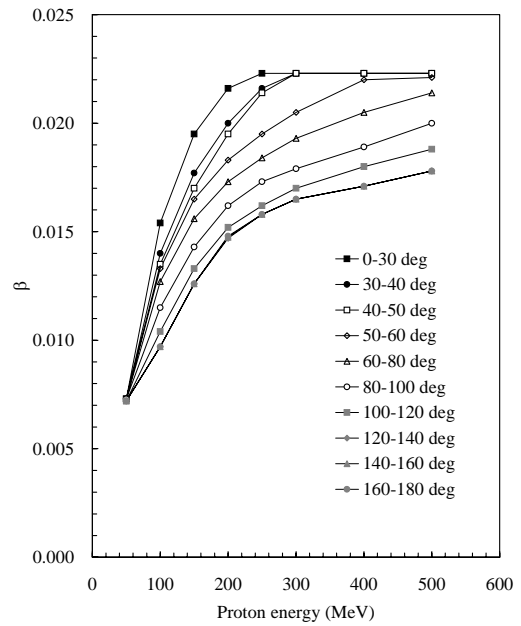
(a) $500\text{MeV} > E_n > 5\text{MeV}$



(b) $5\text{MeV} > E_n > 0.414\text{eV}$

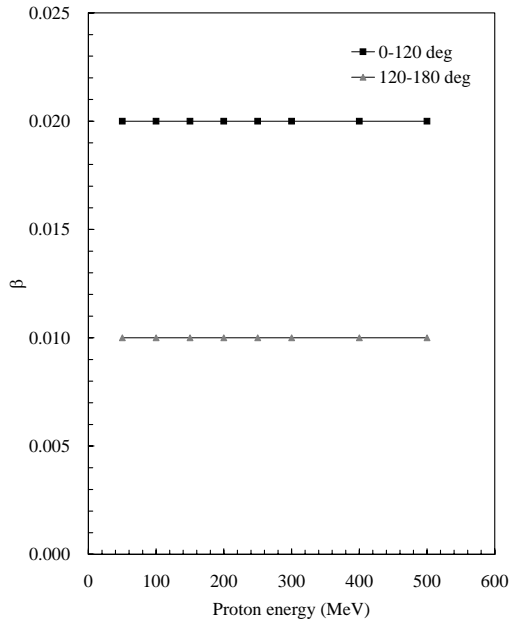


(c) $0.414\text{eV} > E_n$

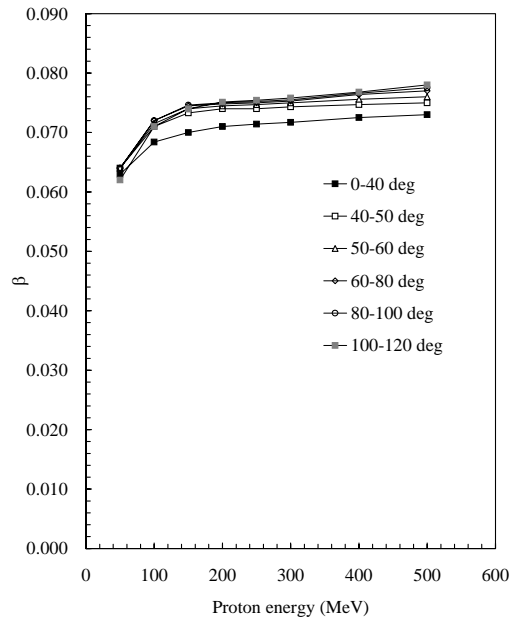


(d) photon

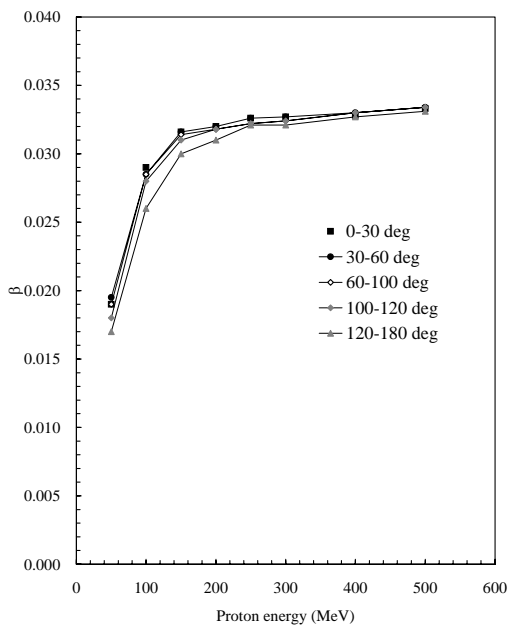
Figure 2-15 Proton energy vs. fitting parameter β of concrete for each emission angle range relative to proton beam direction where thickness of additional iron shield is 25 cm.



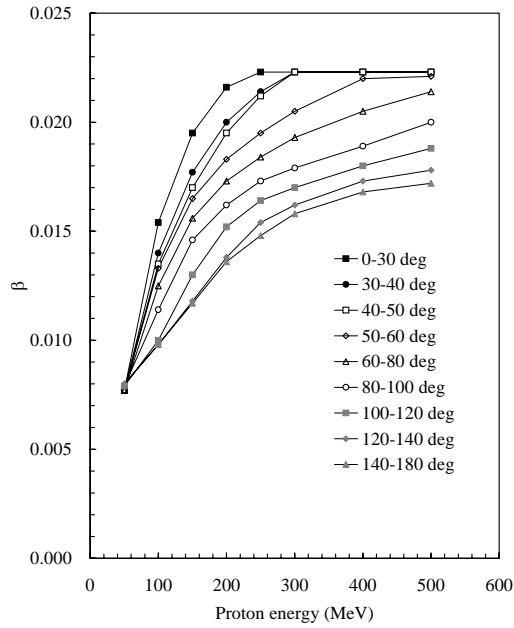
(a) $500\text{MeV} > E_n > 5\text{MeV}$



(b) $5\text{MeV} > E_n > 0.414\text{eV}$

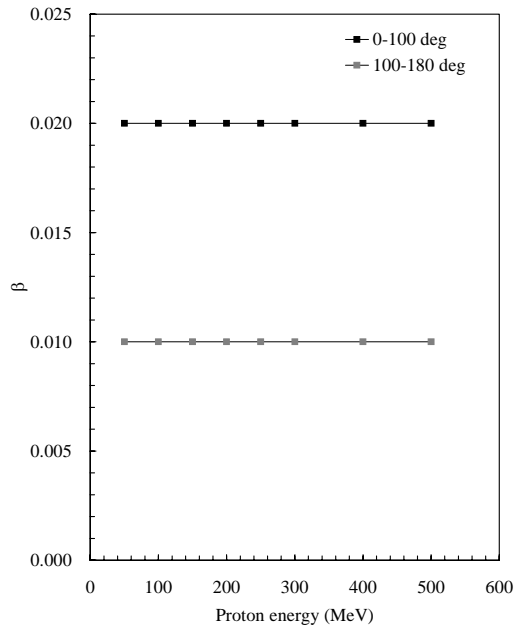


(c) $0.414\text{eV} > E_n$

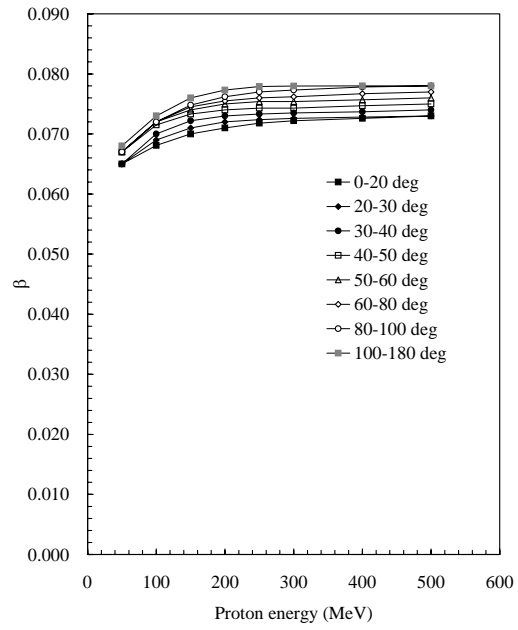


(d) photon

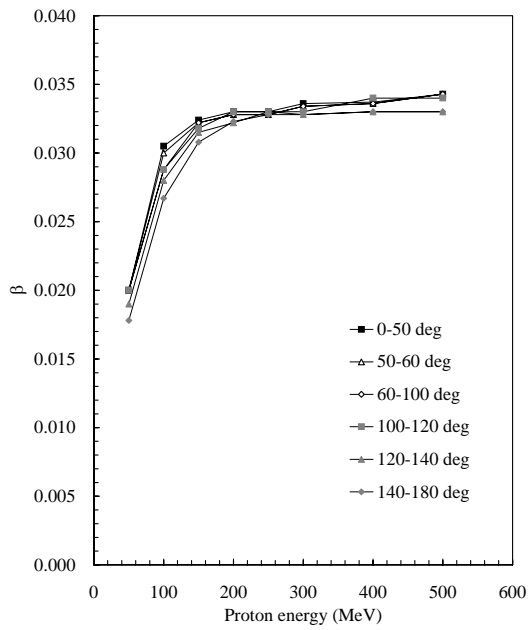
Figure 2-16 Proton energy vs. fitting parameter β of concrete for each emission angle range relative to proton beam direction where thickness of additional iron shield is 50 cm.



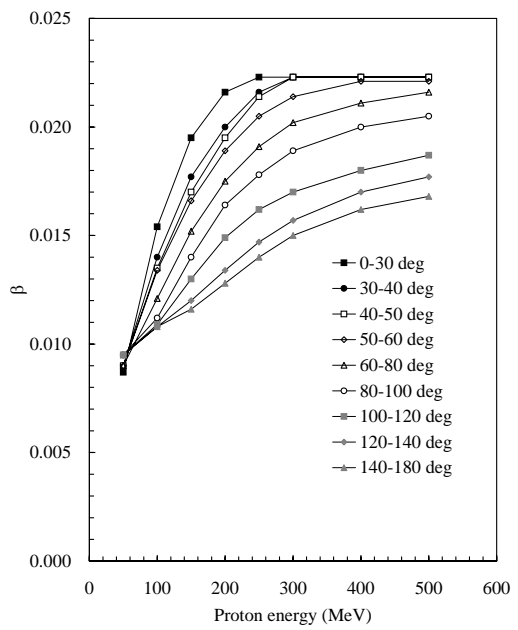
(a) $500\text{MeV} > E_n > 5\text{MeV}$



(b) $5\text{MeV} > E_n > 0.414\text{eV}$



(c) $0.414\text{eV} > E_n$



(d) photon

Figure 2-17 Proton energy vs. fitting parameter β of concrete for each emission angle range relative to proton beam direction where thickness of additional iron shield is 70 cm.

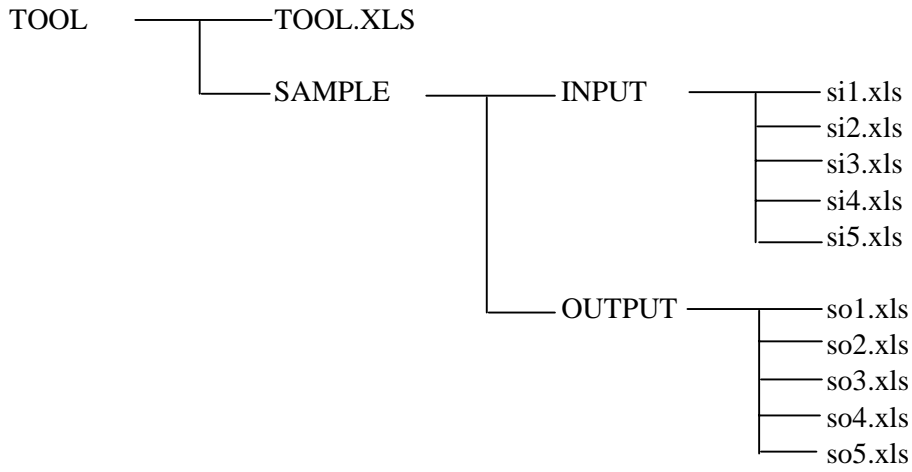


Figure 3-1 Directory structure of the package

1. Proton energy and frequency

(1) Number of proton energy

(2) Proton energies and their frequency

energy (MeV)	frequency
250	0.1
200	0.3
180	0.2
160	0.2
120	0.1
50	0.1

2. Proton beam

(1) Number of protons per sec

(2) Operation time

(3) Number of beam direction

(4) Beam direction dependent iron shield

thickness(cm)	solid angle range (deg)
20	0 15 deg

(5) Vectors of proton beam and their frequency

unit vector (u, v, w)	frequency
0 0 -1	0.5
-0.707109781 0.7071068 0	0.25
0.707106781 -0.707107 0	0.25

3. Geometry

(1) Distance from target to concrete wall and wall thickness

direction	distance (cm)	thickness (cm)
+X direction	200	250
-X direction	200	250
+Y direction	200	200
-Y direction	200	200
+Z direction	200	200
-Z direction	125	250

(2) concrete density

4. Coordinates of calculation points

(1) Number of points

(2) Coordinates

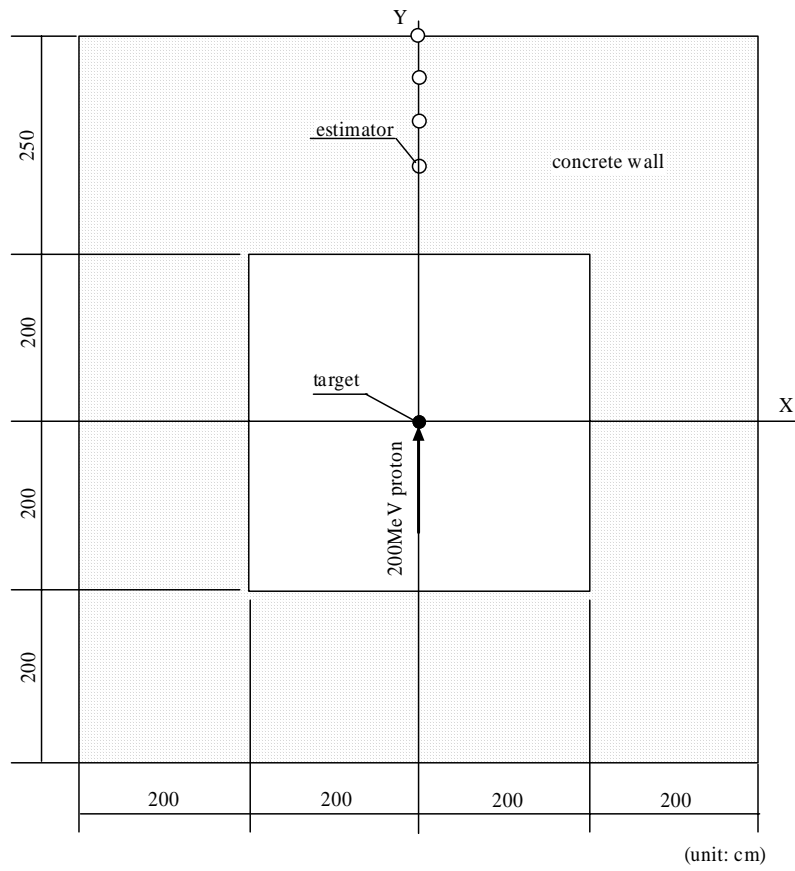
Name	X	Y	Z	iron thickness (cm)	crossing wall
Point 1	450	0	0	0	+X
Point 2	-450	0	0	0	-X
Point 3	0	400	0	25	+Y
Point 4	0	-400	0	25	-Y
Point 5	0	0	400	0	+Z
Point 6	10	0	-375	50	-Z
Point 7	400	0	0	25	+X
Point 8	400	100	0	25	+X
Point 9	400	150	0	0	+X
Point 10	400	200	0	0	+X

Remarks: iron thickness data are used for selecting effective dose calculation parameters.

5. Run

Please enter Ctrl+Shift+R and run a macro.
Calculated results are printed in "output" sheet.
Comments and warnings are printed in "comment" sheet.

Figure 3-2 Input sheet of the program



1. Proton energy and frequency

(1) Number of proton energy

(2) Proton energies and their frequency

energy (MeV)	frequency
200	1

2. Proton beam

(1) Number of protons per sec

(2) Operation time

(3) Number of beam direction

(4) Beam direction dependent iron shield

thickness(cm)	solid angle range (deg)	deg
0		

(5) Vectors of proton beam and their frequency

unit vector (u, v, w)	frequency
0 1 0	1

3. Geometry

(1) Distance from target to concrete wall and wall thickness

direction	distance (cm)	thickness (cm)
+X direction	200	200
-X direction	200	200
+Y direction	200	250
-Y direction	200	200
+Z direction	200	200
-Z direction	125	200

(2) concrete density

4. Coordinates of calculation points

(1) Number of points

(2) Coordinates

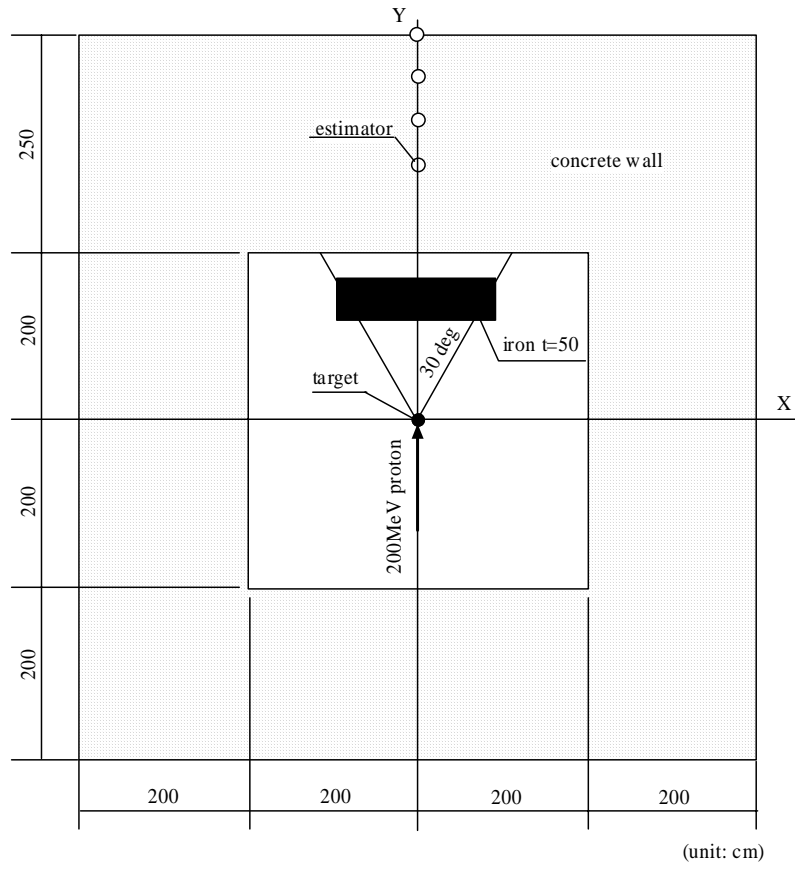
Name	X	Y	Z	iron thickness (cm)	crossing wall
Point 1	0	300	0	0	+Y
Point 2	0	325	0	0	+Y
Point 3	0	350	0	0	+Y
Point 4	0	375	0	0	+Y
Point 5	0	400	0	0	+Y
Point 6	0	425	0	0	+Y
Point 7	0	450	0	0	+Y

Remarks: iron thickness data are used for selecting effective dose calculation parameters.

5. Run

Please enter Ctrl+Shift+R and run a macro.
 Calculated results are printed in "output" sheet.
 Comments and warnings are printed in "comment" sheet.

Figure 4-1 Geometry and input sheet of sample No.1



1. Proton energy and frequency

(1) Number of proton energy:

(2) Proton energies and their frequency

energy (MeV)	frequency
200	1

2. Proton beam

(1) Number of protons per sec:

(2) Operation time:

(3) Number of beam direction:

(4) Beam direction dependent iron shield

thickness(cm)	solid angle range (deg)
50	0 - 30 deg

(5) Vectors of proton beam and their frequency

unit vector (u, v, w)	frequency
0 1 0	1

3. Geometry

(1) Distance from target to concrete wall and wall thickness

direction	distance (cm)	thickness (cm)
+X direction	200	200
-X direction	200	200
+Y direction	200	250
-Y direction	200	200
+Z direction	200	200
-Z direction	125	200

(2) concrete density:

4. Coordinates of calculation points

(1) Number of points:

(2) Coordinates

Name	X	Y	Z	iron thickness (cm)	crossing wall
Point 1	0	300	0	0	+Y
Point 2	0	325	0	0	+Y
Point 3	0	350	0	0	+Y
Point 4	0	375	0	0	+Y
Point 5	0	400	0	0	+Y
Point 6	0	425	0	0	+Y
Point 7	0	450	0	0	+Y

Remarks: iron thickness data are used for selecting effective dose calculation parameters.

5. Run

Please enter Ctrl+Shift+R and run a macro.
 Calculated results are printed in "output" sheet.
 Comments and warnings are printed in "comment" sheet.

Figure 4-2 Geometry and input sheet of sample No.2

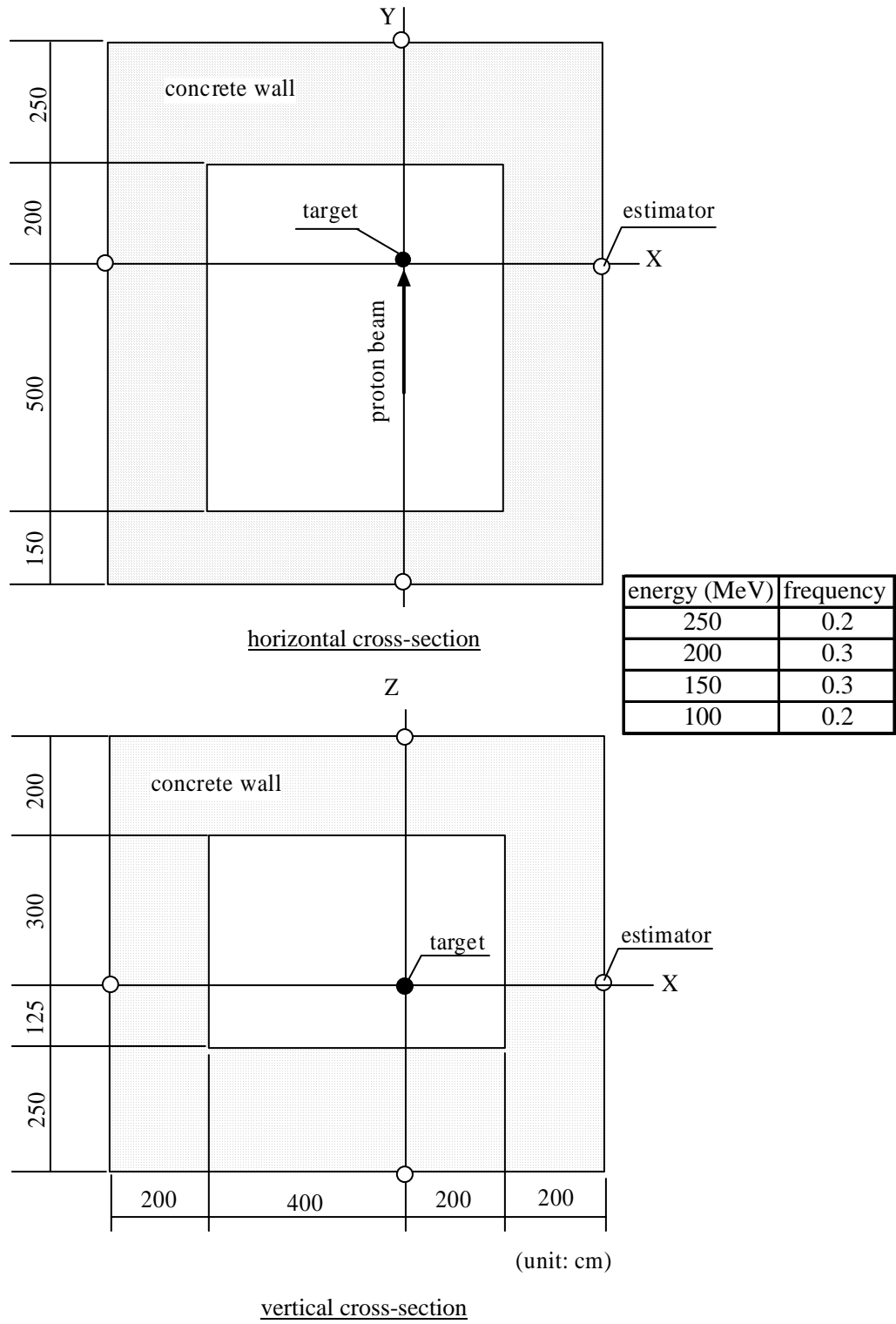


Figure 4-3 Geometry and input sheet of sample No.3

1. Proton energy and frequency

(1) Number of proton energy

(2) Proton energies and their frequency

energy (MeV)	frequency
250	0.2
200	0.3
150	0.3
100	0.2

2. Proton beam

(1) Number of protons per sec

(2) Operation time

(3) Number of beam direction

(4) Beam direction dependent iron shield

thickness(cm)	solid angle range (deg)
0	0 deg

(5) Vectors of proton beam and their frequency

unit vector (u, v, w)	frequency		
0	1	0	1

3. Geometry

(1) Distance from target to concrete wall and wall thickness

	distance (cm)	thickness (cm)
+X direction	200	200
-X direction	400	200
+Y direction	200	250
-Y direction	500	150
+Z direction	300	200
-Z direction	125	250

(2) concrete density

4. Coordinates of calculation points

(1) Number of points

(2) Coordinates

Name	X	Y	Z	iron thickness (cm)	crossing wall
Point 1	0	450	0	0	+Y
Point 2	0	-650	0	0	-Y
Point 3	400	0	0	0	+X
Point 4	-600	0	0	0	-X
Point 5	0	0	500	0	+Z
Point 6	0	0	-375	0	-Z

Diagram: A 3D coordinate system with origin (0,0,0) and axes +X, +Y, and +Z. A central white box is labeled "target (0,0,0)". A "proton beam" arrow points from the left towards the target. The target is surrounded by a grey rectangular "concrete wall".

Remarks: iron thickness data are used for selecting effective dose calculation parameters.

5. Run

Please enter CalcShaR and run a macro.
 Calculated results are printed in 'output' sheet.
 Comments and warnings are printed in 'comment' sheet.

Figure 4-3 Geometry and input sheet of sample No.3 (continued)

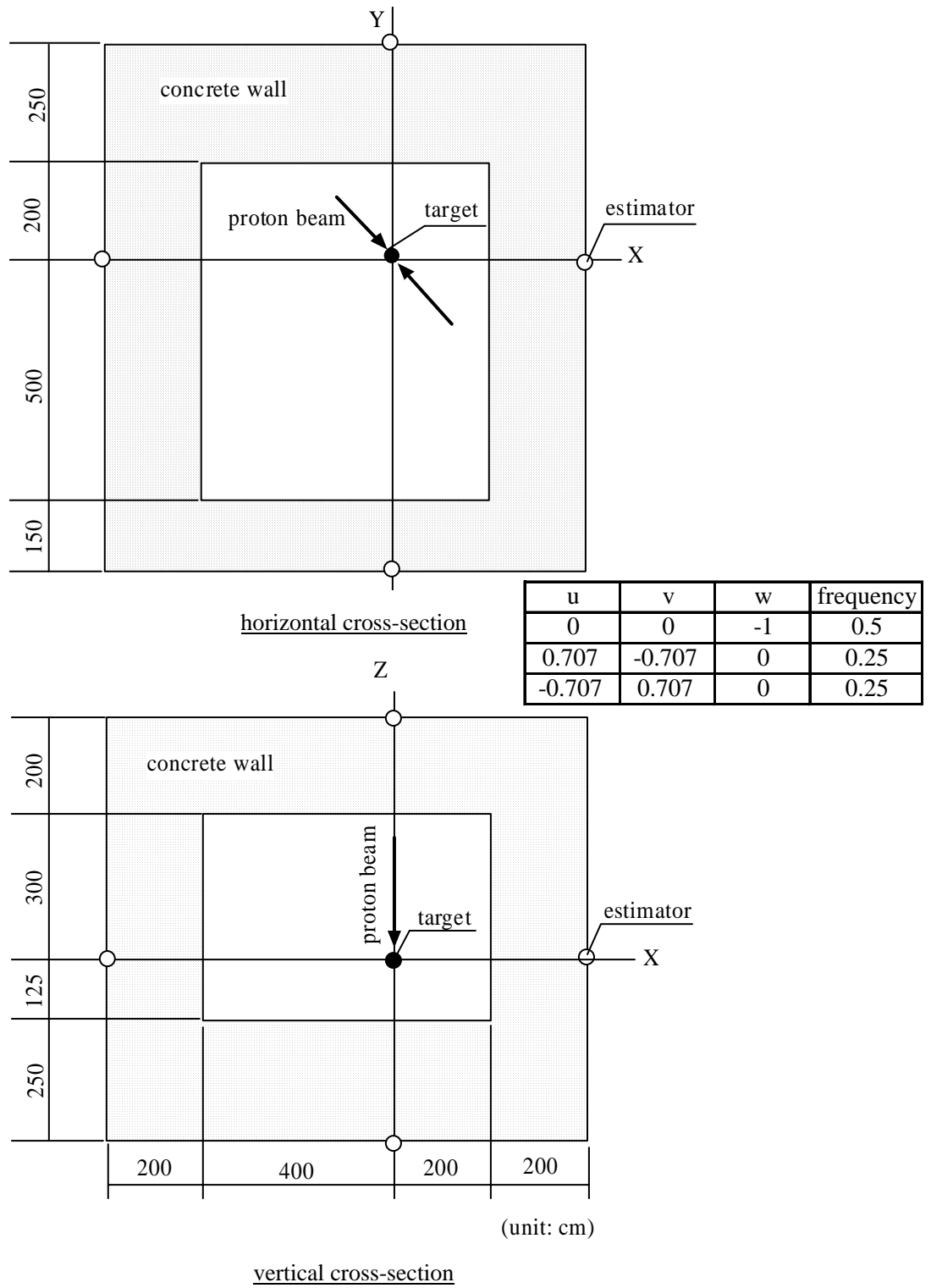
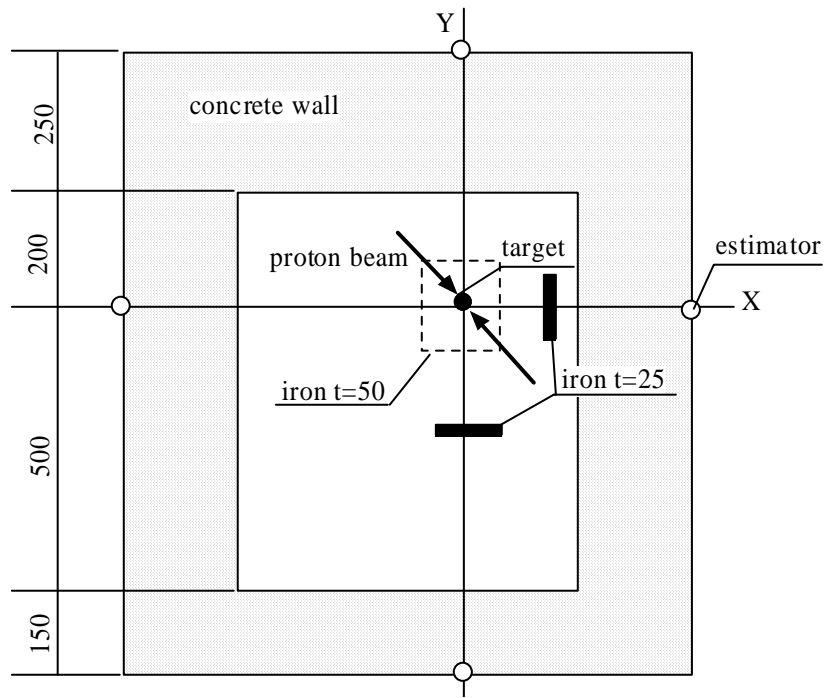
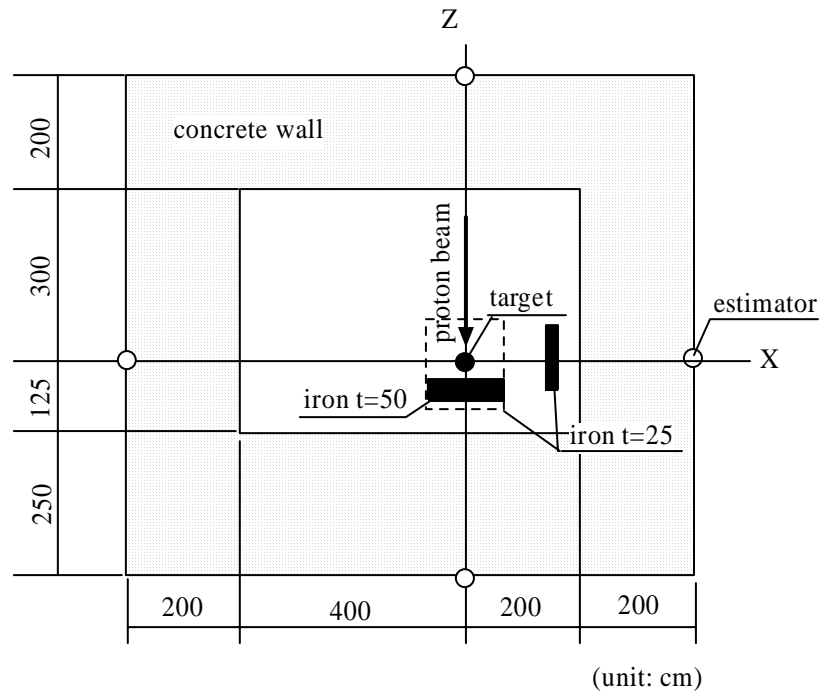


Figure 4-4 Geometry and input sheet of sample No.4



horizontal cross-section



vertical cross-section

Figure 4-5 Geometry and input sheet of sample No.5

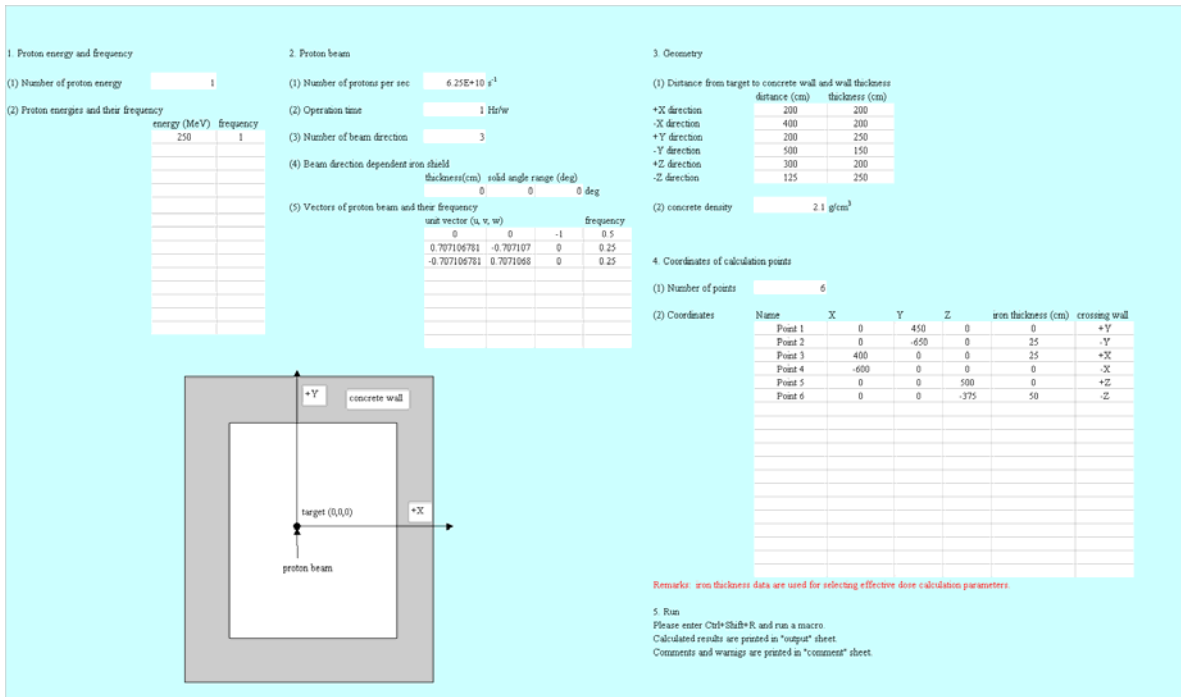
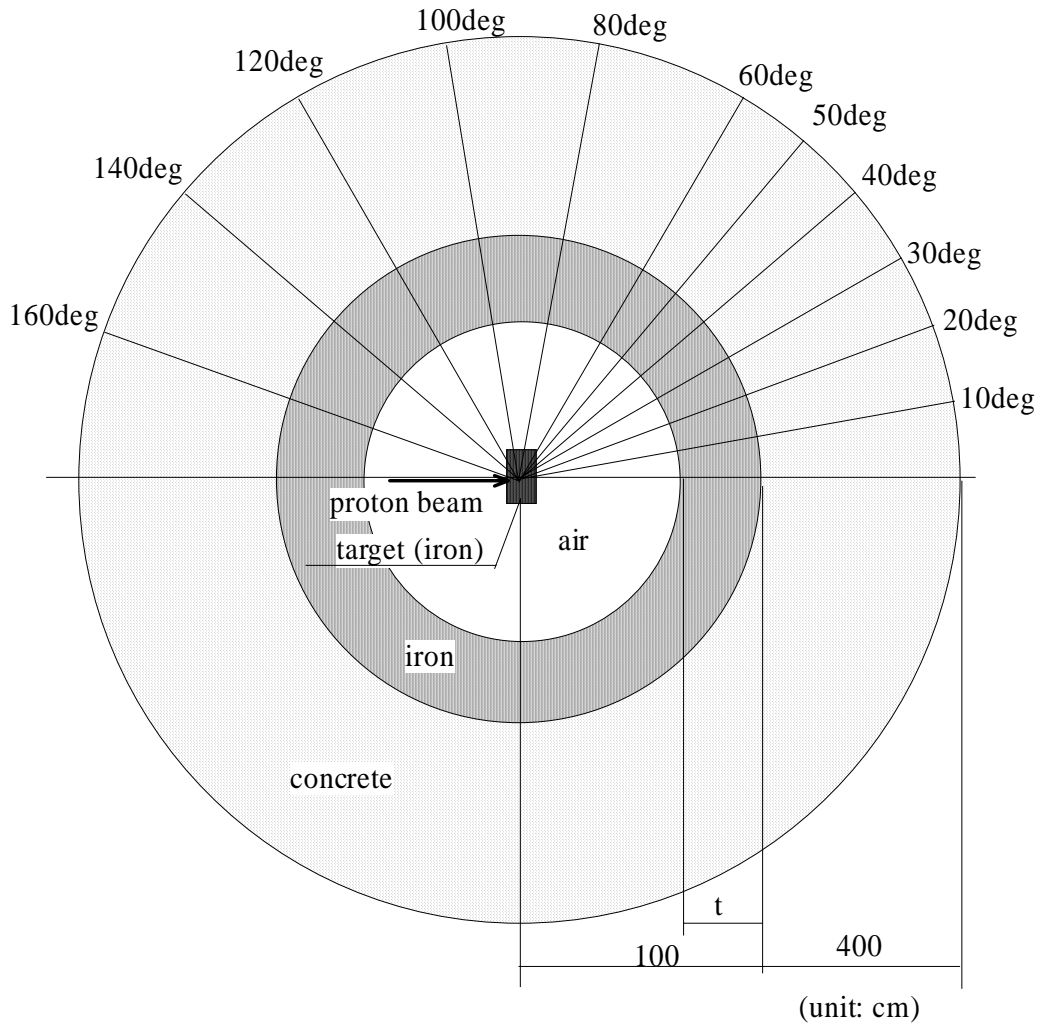


Figure 4-5 Geometry and input sheet of sample No.5 (continued)



Proton energy (MeV)	Target thickness (cm)
50	4.32E-01
100	1.44E+00
150	2.90E+00
200	4.78E+00
250	7.00E+00
300	9.70E+00
400	1.60E+01
500	2.36E+01

iron thickness t (cm)
0.0
25.0
50.0
70.0

Figure A-1 MCNPX model for calculating effective dose distribution in concrete