

行	入力パラメータと書式
1	タイトル(文字列)
2	減衰情報(元素) z=原子番号(3桁整数右揃), ele=原子記号(2文字), name=元素名(20文字まで) z= 1, ele=" H ", name=" hydrogen "
3	エネルギー群数 入力パラメータ: EGrp=エネルギー群数(整数) 入力例: EGrp =28
4	ヘッダ(文字列) Energy(MeV)          mu/rho(cm <sup>2</sup> /g)
5	エネルギー(MeV)及び減衰係数(cm <sup>2</sup> /g) 1. 00000E-02(実数有効桁数6桁) [SPS×Y]      3. 854E-1(実数有効桁数4桁)

・減衰係数を算出するための  $\gamma$  線相互作用データとして XCOM ライブラリを用いる。

XCOM データにおいて、K-X 線のエネルギー表現には有効桁数 6 桁を必要とする。よって、減衰係数データファイルとしては XCOM の元データが表現できるエネルギーの有効桁数とする。XCOM のデータの内、何個かは K-X 線のエネルギーが同じデータがある。生データのままでと、K-X 線の上と下で同じ結果になる。K-X 線が同じ場合は差異が出るよう強制的に K-X 線上のデータを 0.1eV 増加させる扱いとする。

原子番号 87 番以降は K-X 線のエネルギーが 100keV を超える。Rb(Z=87) の K-X 線は、" 1. 01137E-01" であり、101.137 keV である。K-X 線上側のエネルギーを K-X 線増加分を 0.1keV とした場合、1011371eV となる。これは現状の有効桁数 6 桁では、K-X 線の上下のエネルギーが同一となる。

本件の扱いを検討した結果、XCOM の表示桁は有効桁数 6 桁であることから、100keV を超過する K-X 線の場合、K-X 線の増分は 1keV にする。ファイル名も同様とする。

エネルギー、減衰係数の右に K-X 線等のコメントを追記する。

### 3. ビルドアップ係数データ

ビルドアップ係数 (BF) の表タイプの書式を規定する。<sup>1</sup>

今回のガンマ線の計算では、30MeV までの (1 次) ガンマ線による線量を、次の 2 パターンで計算する。

1) 光核反応有りでガンマ線の直接線と全線量 (ガンマ) で BF 値を算出する。

<sup>1</sup> 現状で GP 法フィッティング形式への対応は考慮しない。

2) 光核反応有りでガンマ線の直接線と全線量(中性子)で中性子BF値を算出する。  
 2次ガンマ線の線量について、鉄の場合、試算で80mfpにおいて2次ガンマ>1次ガンマになり、線量への影響は明らかである。ただし、モンテカルロ(MC)法コードの計算では1次ガンマ線と分離できないために合算して扱う。中性子BFとは、光中性子の線量寄与を点減衰核法のBFと同様の考え方で整理するために本研究で定義した用語である(本文参照)。データ自体はMC法コードで計算する結果を格納する。  
 エネルギーの有効桁数はK-X線等の不連続箇所が記述できる桁数とし、またBF値は有効桁数3桁程度で十分だが、計算結果4桁と合わせる目的で4桁とする。

```

ビルドアップ係数ファイル(bf_icrp_116_eap.dat)
Build Up File      !タイトル(1)
ICRP Pub. 116 E(AP) !タイトル(2)  ←ソフトで読込、表示タイトル
2020 PHITS 3.20 calculation value; !タイトル(3)  ←非表示タイトル
lib-type=" buildup-file"  !ビルドアップ係数ファイルの指定
name=" concrete"  !材質(1) 物質順は後で追加しても処理できるよう順不同
density=7.8 g/cm3, !物質の説明密度や組成の出典など
EGrp=28  !エネルギー群数。数字は可変。ソフト上、[2.減衰係数]と異なっても良い?
1.00000E-02  !Energy(1) (MeV)
MFPGrp=80  !mfp計算数。数字は可変。現状基本1-80mfpの整数
Thick  Thick      BU-F      RE      BU-F      RE
(mfp)   (cm)      (gamma)   (gamma) (neutron) (neutron)
  1    7.564E-04  1.586E+00 0.0061  0.000E+00 0.0000
. . .
<BLANK>
1.50000E-02  !Energy(2) (MeV)
MFPGrp=80
Thick  Thick      BU-F      RE      BU-F      RE
(mfp)   (cm)      (gamma)   (gamma) (neutron) (neutron)
. . .
<BLANK>
name=" iron"  !材質(2)
. . .
  
```

行	入力パラメータと書式
1	タイトル(文字列)

2	表示タイトル ICRP Pub. 116 E(AP) !タイトル(2) <ソフトで読込、表示タイトル(文字列)	
3	2020 PHITS 3.20 calculation value; 非表示タイトル	
4	ビルドアップ係数ファイルの指定 lib-type= "buildup-file" (20文字迄) ビルドアップ係数表形式ファイル lib-type=" buildup GP -file" (20文字迄) ビルドアップ係数 GP 形式ファイル (旧来)	
物質数	5	ビルドアップ係数物質名 入力パラメータ: name="ビルドアップ係数物質名" (20文字迄) 例: name="concrete" !材質(1) 物質順は後で追加しても処理できるよう順不同
	6	物質の説明(文字)
エネルギー	7	エネルギー群数 入力パラメータ: EGrp=エネルギー群数(整数) 入力例: EGrp =28 ※群数は [2.減衰係数]と異なることもソフト上許容する。
	8	エネルギー(MeV) 入力パラメータ: エネルギー(実数) 入力例: 1.00000E-02 ! Energy(1) (MeV)
	9	mfp 計算数 入力パラメータ: MFPGrp=mfp 計算数(整数) 入力例: MFPGrp=80 ※数字は可変。現状基本 1-80mfp の整数
	10- 11	ヘッダ(文字列) 入力例 Thick Thick BU-F RE BU-F RE (mfp) (cm) (gamma) (gamma) (neutron) (neutron)
	12	厚み(mfp単位)、厚み(cm単位)、BF-g、BF-g 相対誤差、BF-n、BF-n 相対誤差 ※MFPGrp 個入力
	92	<BLANK>

#### 4. 線量換算係数データ

換算係数データは、基本的に ICRP Pub. 116 等の文献値データをそのまま使用する。

換算係数データファイル(conv_icrp_116_eap.dat)		
E(AP) Conversion Factor ref.: ICRP Pub.116<タイトル		
Photons: Effective dose per fluence, in units of pSv cm <sup>2</sup> , for monoenergetic particles incident in AP geometry		
EGrp=34 !エネルギー群数 34 個が列挙される。ICRP データのまま		
Energy (MeV)	E_AP	
0.01	0.0685	
...		ICRP データ
30.0	37.9	(エネルギー、換算係数)
<BLANK>		

換算係数データファイル(conv__icrp74_air_kerma.dat)		
Ka Conversion Factor ref.: ICRU Report 57(47) & ICRP Pub.74 <タイトル		
Photons: Air Kerma per fluence, in units of pGy cm <sup>2</sup> , for monoenergetic particles		
EGrp=34 !エネルギー群数 34 個が列挙される。IURU データのまま		
Energy (MeV)	Ka_74	
0.01	7.43	ICRU データ
...		(エネルギー、換算係数)
10.0	24.0	
<BLANK>		

#### 5. 係数データファイル構成管理

上の3つのファイル設定を記述するファイルである。アプリの config 等から編集保存できるようにする。

[1-g file]( conv\_1-g.dat)は、空気カーマから照射線量を算出する際に必要な係数ファイルの指定を行う。同セクションの Calculation\_Dose\_Num=10 は、[Calculation Dose]の10番目のデータを使用するという指定である。なお、[1-g]係数の整備の優先度は低いため、設計書としての記述に留める。

ライブラリ設定ファイル(lib_setting.dat)
library setting file <タイトル



```

[Attenuation]
  atten_xcom.dat
  <BLANK>
[Calculation Dose]
1. ICRP Pub. 116 E(AP) 実効線量(Default)
  bf_icrp_116_eap.dat
  conv_icrp_116_eap.dat
2. ICRP Pub. 116 E(PA) 実効線量
  bf_icrp_116_epa.dat
  conv_icrp_116_epa.dat
  . . .
6. 空気カーマ(ICRP74)
  bf_icrp74_air_kerma.dat
  conv_icrp74_air_kerma.dat
<BLANK>
[1-g file]
  conv_1-g.dat
  Calculation_Dose_Num=10
<BLANK>
[Photon Data] 核種放出率データ (photons/decay)

```

## 6. 核種線源ライブラリ

次年度の検討事項。線源スペクトルデータのフォーマットは、コード開発側が DECDC2/ICRP Pub. 107 ライブラリから RI 線源データ（光子放出率データ）をロードする機能を実装しているため、そのフォーマットに準ずる。複数の RI 核種を指定して計算可能にする。

コード開発側では、上の DEDDC2 だけでなく、ORIGEN2 等を用いて外部で作成された線源ファイルをロードする機能も開発する。よって、任意の群数をもつデータ構造配列にも対応できるように線源データのフォーマットを検討する。

群構造の場合、代表エネルギーが群バンドのどこになるか、また線スペクトルをどのようにデータとして格納して処理するか、コード開発側と協議する。

## 7. 物質組成ライブラリ

コード標準（組込材料）の物質組成データファイル（テキスト）。同一の書式でユーザー用（カスタム材料）物質組成データファイルも利用可能とする。

標準物質組成ライブラリ (lib_material.dat)	
material library [ standard material ]/ [ user material ]<タイトル	
matNum=10	
Iron	
7.8 1	! 密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) (規格化)
26 7.8	! 元素 NUCLID×1000 [SPS] rho(g/cm <sup>3</sup> ) 又は重量割合 (wt%)
<BLANK>	
lead	
11.0 1	
82 11.0	
<BLANK>	
Polyethylene	
0.92 2	
1 1.3223E-01	
6 7.8777E-01	
<BLANK>	
...	

行	入力パラメータと書式	
1	タイトル(文字列) material library [ standard material ]<タイトル	
2	物質数 入力パラメータ : matNum=登録物質数(整数) 入力例 : matNum=10	
物質数	3	物質名 入力パラメータ : 文字列( 例 : iron 物質順は後で追加しても処理できるよう順不同
	4	密度 (g/cm <sup>3</sup> ) 元素数(整数)
	5	NUCLID(整数) 密度 (g/cm <sup>3</sup> ) or 重量割合 (wt%) (実数) 26 7.8 ※元素数回読み込む。1行には1元素分のみ入力可。
	6	<BLANK>

## 8. (1-g)補正係数ファイル

1-g 補正係数ファイル(conv_1-g. dat)	
1-g file<タイトル	
1-g Factor <タイトル	
EGrp=34 !エネルギー群数 34 個が列挙される。データそのままの値	
Energy (MeV)	1-f
0.01	1.0
...	
10.0	0.99
<BLANK>	

出典：平山論文データ  
(エネルギー、1-g)

## 9.エネルギー範囲まとめ

コード内蔵ライブラリにおける適用可能なエネルギー範囲は下記とする。10keV 以下の光子については、ICRP Pub.74 及び Pub.116 で示されておらず、作成範囲から除外する。

データ	従来 (QAD-CGGP2R)	本事業開発コード	備考
減衰係数	0.01~30MeV	0.01~30MeV	XCOM より
換算係数	0.01~10MeV	空気カーマ：0.01~10MeV 上記以外：0.01~30MeV	文献より
ビルドアップ係数	0.015~15MeV	空気カーマ：0.01~10MeV それ以外：0.01~30MeV	計算値

## 10. 計算する出力線量について

計算する出力線量は下記のとおり。

- ・実効線量(AP, PA, LLAT, RLAT, ROT, ISO) ICRP Pub. 116
- ・水晶体吸収線量(AP) ICRP Pub. 116
- ・皮膚(男性)吸収線量(AP) ICRP Pub. 116
- ・皮膚(女性)吸収線量(AP) ICRP Pub. 116
- ・空気カーマ ICRP Pub. 74

## 11. 有効桁数について

データ	従来 (QAD-CGGP2R)	本事業開発コード	備考
線源強度	入力桁数は、フリーフォーマットで細かい桁数でも入力できるようにする。 但し、実際の精度はエンジニアリングジャッジで 2 桁から 1 桁(悪ければ)程度と考えられる。		
減衰係数	4 桁	4 桁	XCOM より
換算係数	3 桁	3 桁	文献より
ビルドアップ係数	GP フィットティング フィッティング誤差 5%~10%程度。 物質にも依存	計算上の精度は恐らく 2 桁程度であり、多く見て 3 桁程度であるが、新設コードの計算結果を 4 桁とすることから合わせる。安全裕度をとるかは今後議論。	MC 法計算値
計算結果	4 桁	4 桁	

## 12. XCOM K-X 線エネルギーの扱いについて

例えば鉄の場合、X 線エネルギーは 7112.0eV だが、データとしては

- ・ 下側 :  $7112.0 * 0.99995 = 7111.6444\text{eV}$ 、
- ・ 上側 :  $7112.0 * 1.00005 = 7112.3556\text{eV}$

としてバンド処理する。ただし、XCOM で出力させる際は、便宜上下側の光子エネルギーを 7112.0 から 0.1 を引いた値で 7111.9eV、上側が 7112.0eV とし、単純に X 線エネルギーから 0.1eV 引いた値を下のエネルギーとして出力させるようにする。

## 付録Ⅷ

ガンマ線ビルドアップ係数 (BF-g) の作成例

(鉄、及び鉛)

鉄、及び鉛のガンマ線ビルドアップ係数 (BF-g) をモンテカルロ法シミュレーション (PHITS-EGS) によって計算した。下表に示す代表的なガンマ線源エネルギーについて、横軸を遮蔽厚 (透過距離、mfp 単位)、縦軸をビルドアップ係数で表したグラフを示す。

なお、グラフの一部は、異なる遮蔽厚の領域に対して、タイトルに (1/2) , (2/2) と示して 2 枚に分けた。分けた遮蔽厚の境界は 40 未満と 40 以上である。これは、ビルドアップ係数を示す縦軸の範囲が広く、1 枚のグラフで表しにくいことによる。

遮蔽材	ガンマ線源エネルギー または遮蔽厚 (mfp)	単位	線量種類、備考	表示ページ番号
鉄	10 (下限)	keV	実効線量 E(AP) (AP 照射)	3
	15			4
	20			4
	50			5
	100			5
	150			6
	200			6
	500			7
	1	MeV		7
	4			8
	8			8~9
	10			9~10
	30 (上限)			10~11
鉛	10 (下限)	keV	11	
	13.0351		12	
	13.0352		12	
	15.1999		13	
	15.2000		13	
	30		14	
	88.0044		14	
	88.0045		15	
	100		16	
	500		17	
	1.022		MeV	17
	1.25			18

	1.5			18
	2.044			19
	4			19
	7			20
	10			21
	30 (上限)			22
鉄	100keV, 1MeV, 10MeV, 30MeV	—	実効線量 E(AP) $\gamma$ 線源エネルギー毎のビル ドアップ係数を比較	23
鉛	88.0044keV, 88.0045keV, 100keV, 1MeV, 20MeV, 30MeV	—		24
鉄	1MeV	—	実効線量 (6 種各照射体 系)、目の水晶体等価線 量、皮膚等価線量 (男性、 及び女性) 空気カーマ率 上記の線量種類毎の 1MeV $\gamma$ 線のビルドアップ 係数を比較	25
鉛				25
鉄	1, 10, 20, 40, 60, 80	mfp	実効線量 E(AP) mfp 毎の横軸エネルギー対 ビルドアップ係数を比較	26
鉛				27

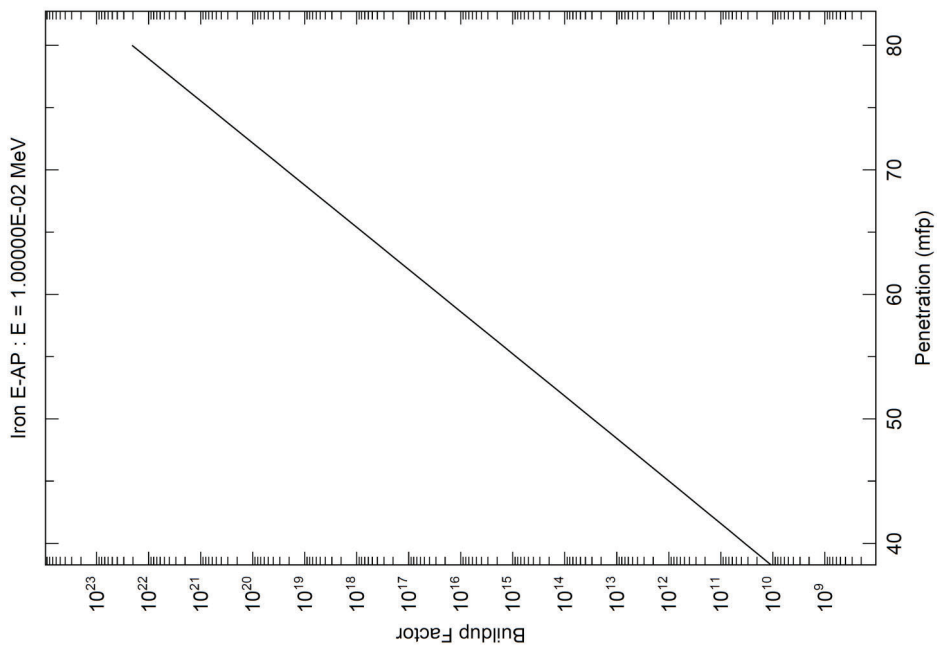


図 鉄に対する 10keV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数 (2/2)

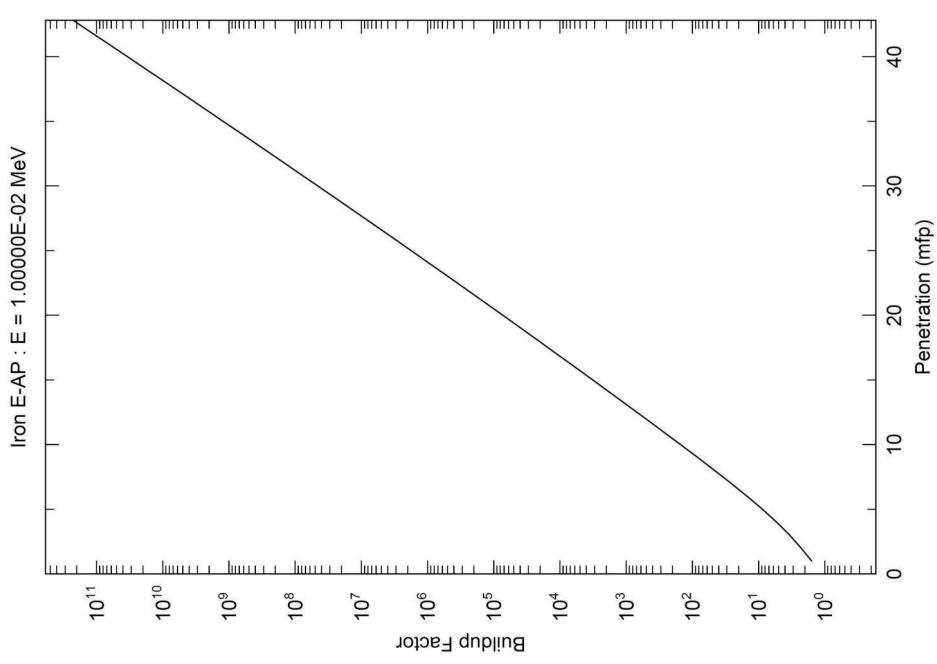


図 鉄に対する 10keV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数 (BF-g) (1/2)



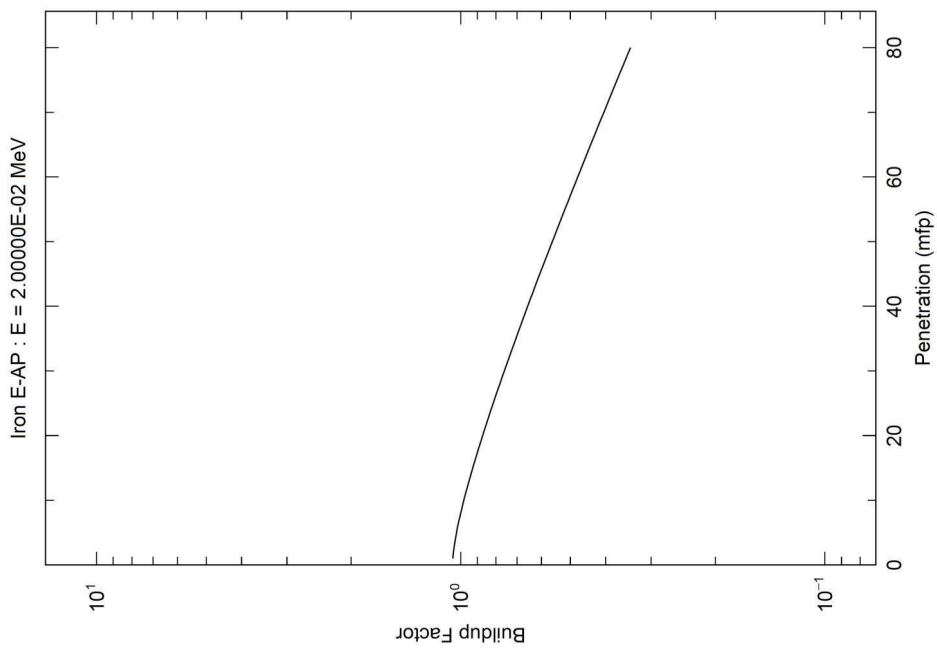


図 鉄に対する 20keV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

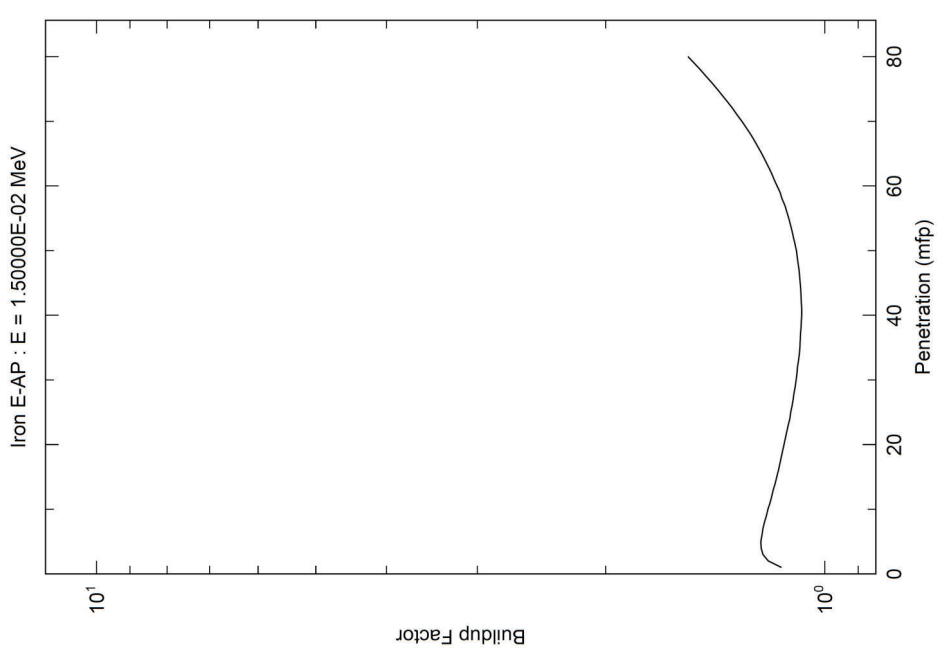


図 鉄に対する 15keV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数

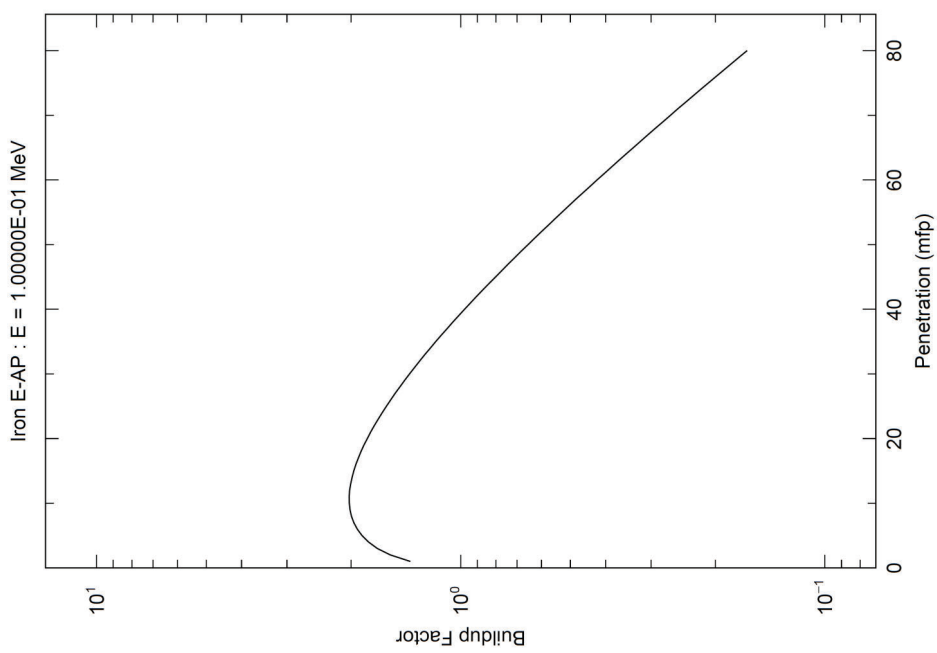


図 鉄に対する 0.1MeV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

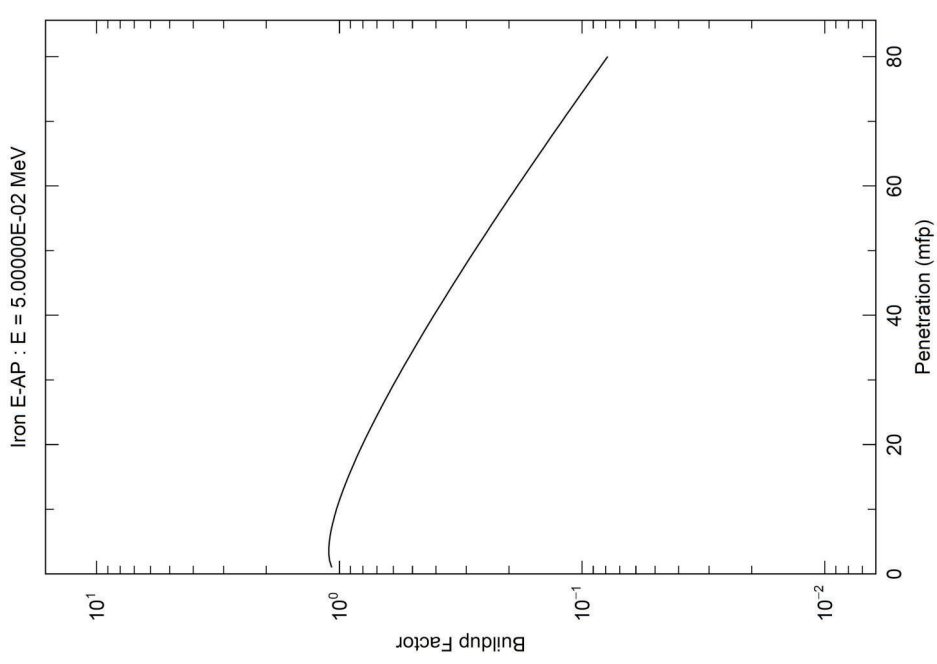


図 鉄に対する 50keV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

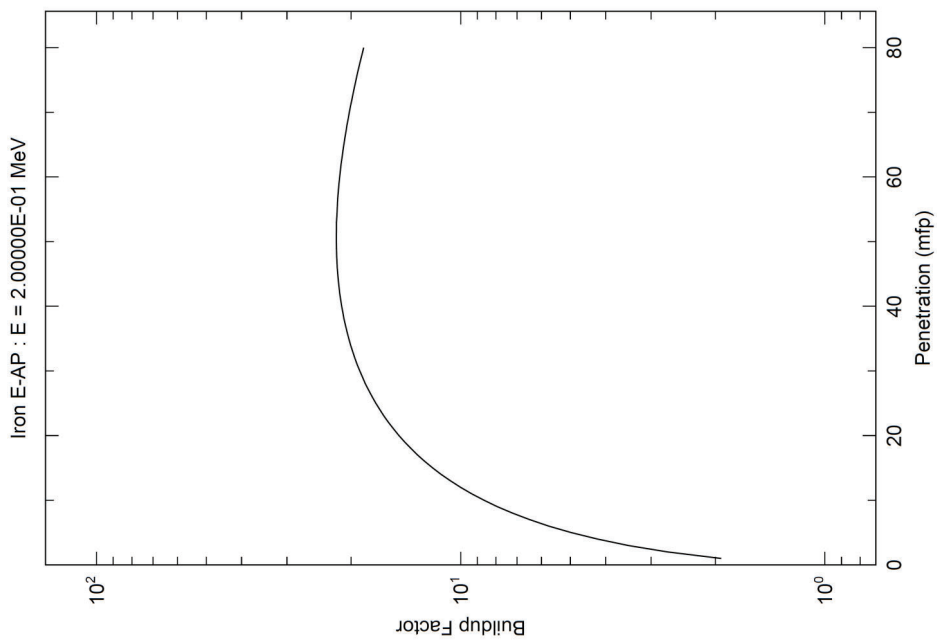


図 鉄に対する 0.2MeV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

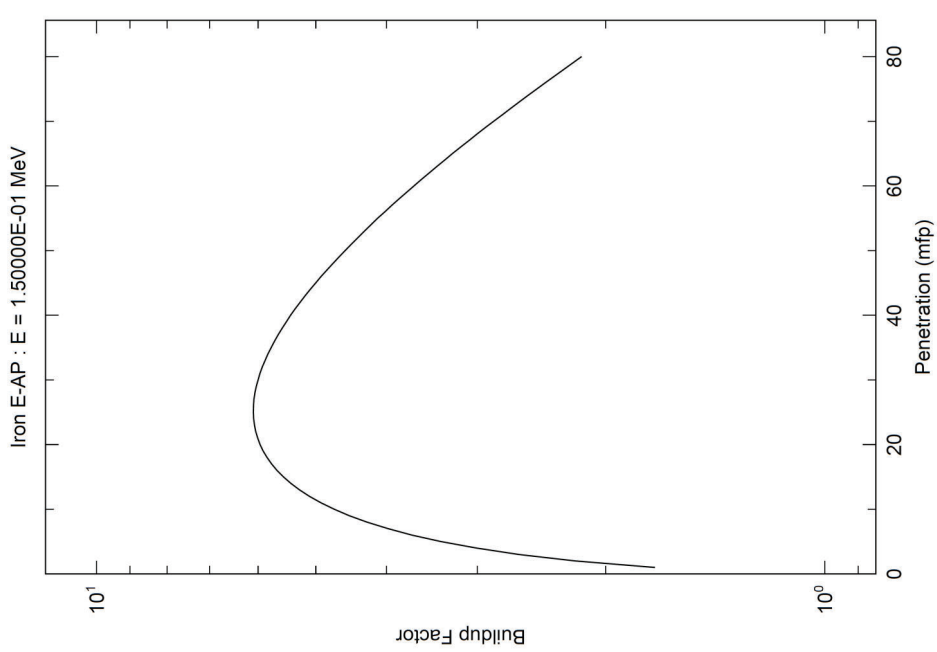


図 鉄に対する 0.15MeV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

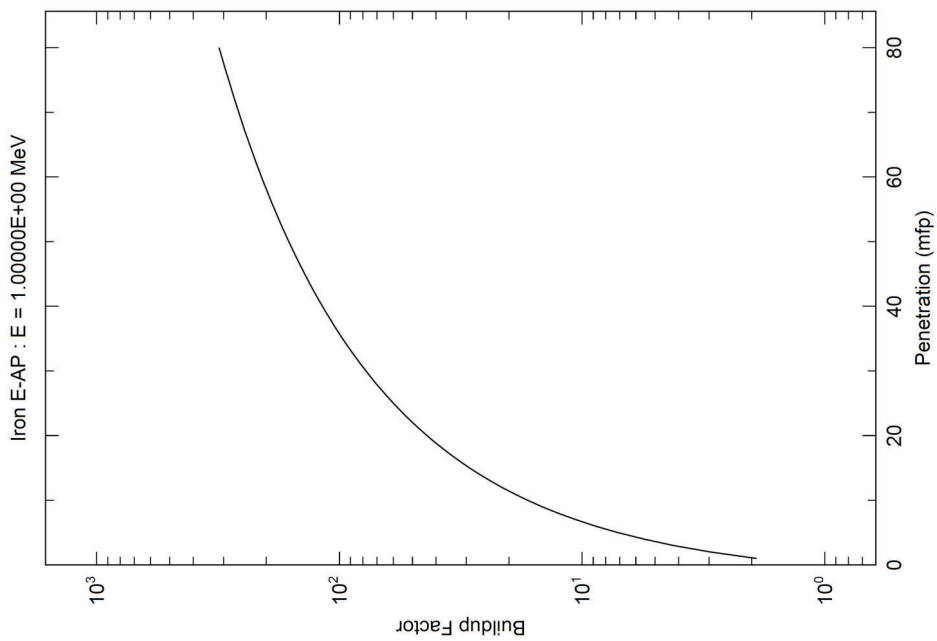


図 鉄に対する 1MeV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

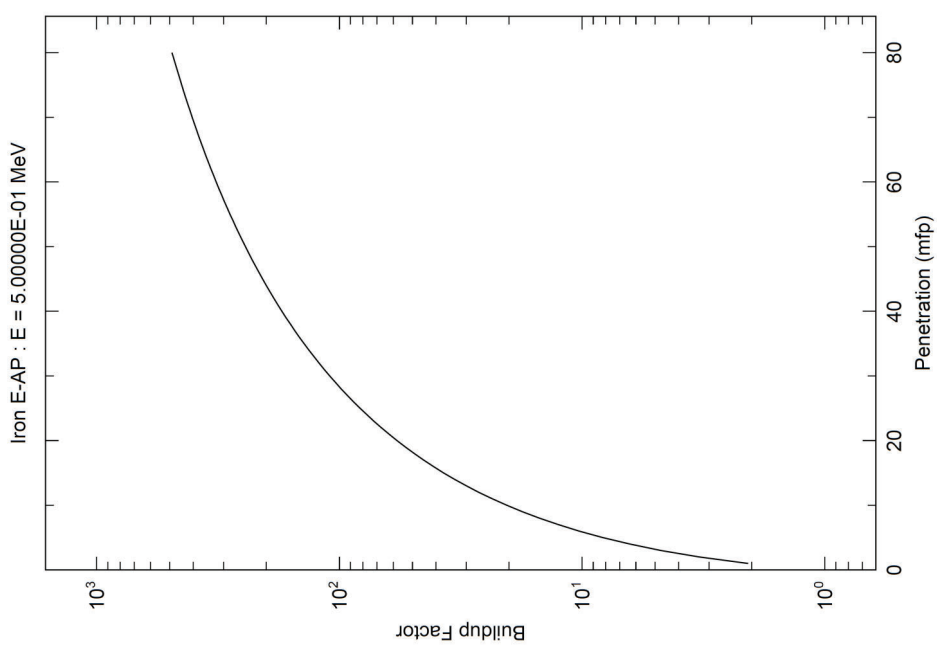


図 鉄に対する 0.5MeV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

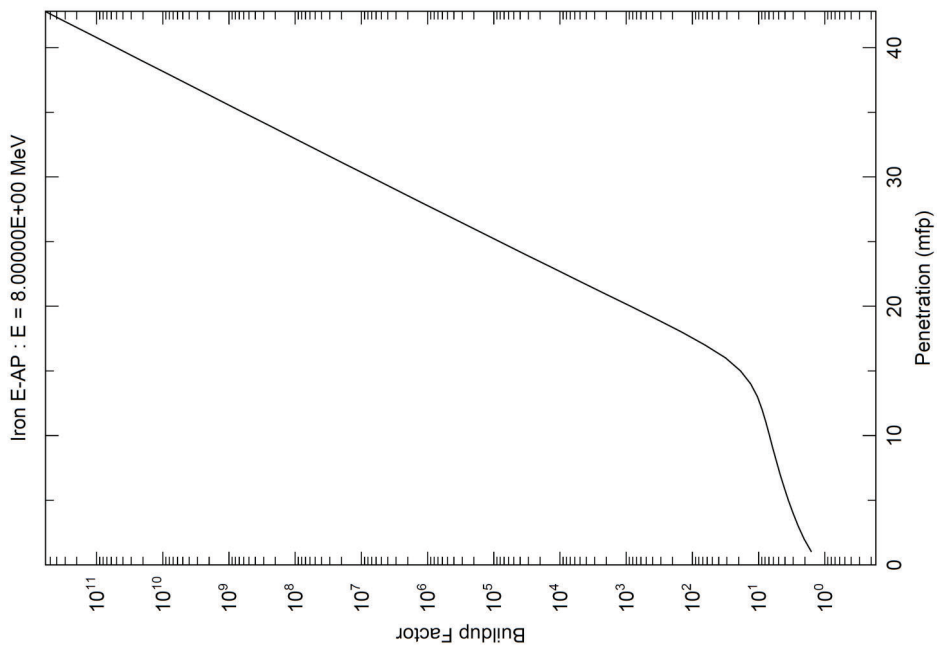


図 鉄に対する 8MeV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (1/2)

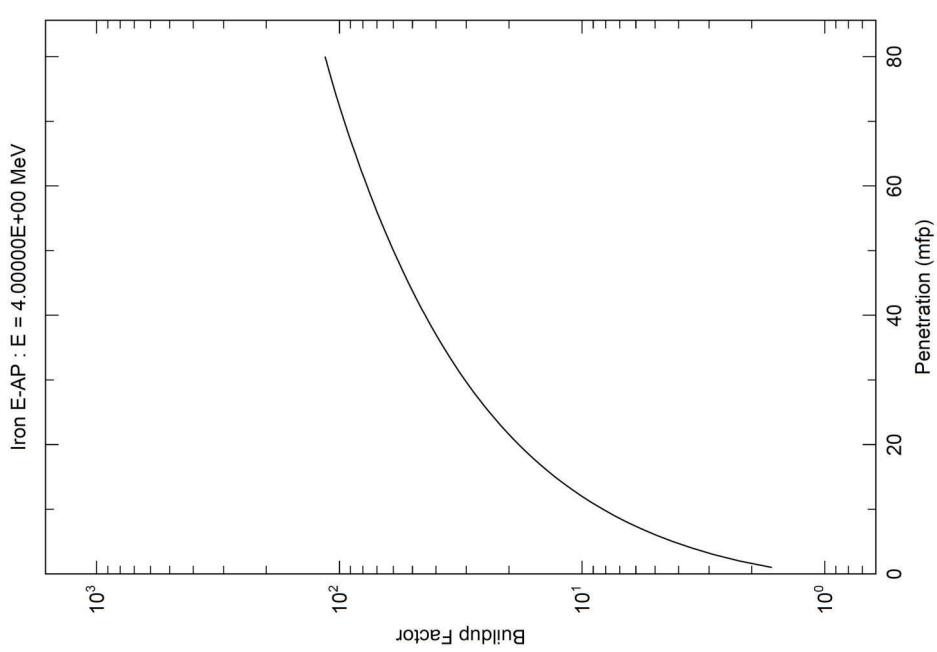


図 鉄に対する 4MeV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

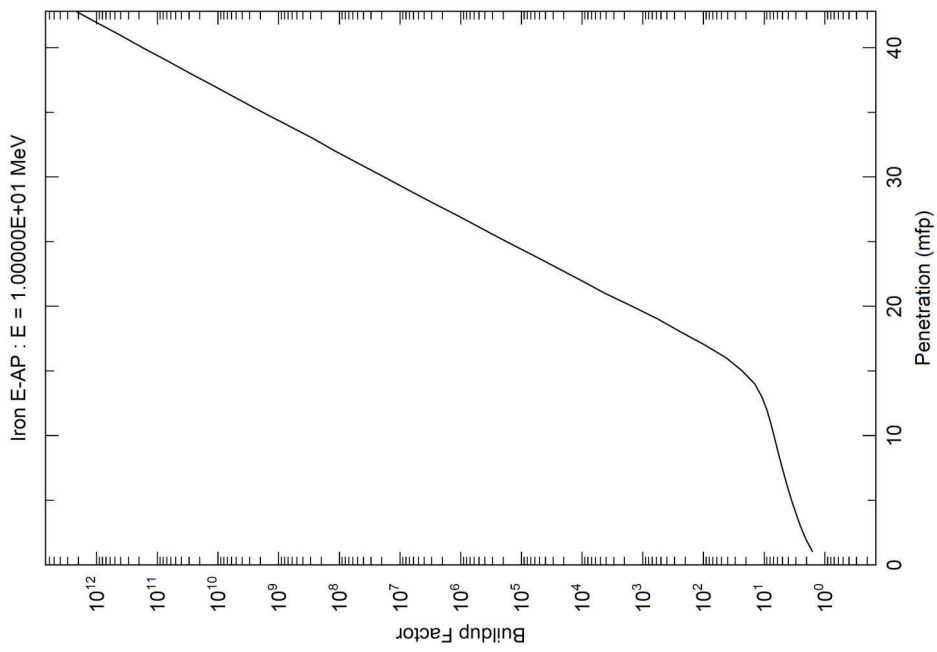


図 鉄に対する 10MeV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (1/2)

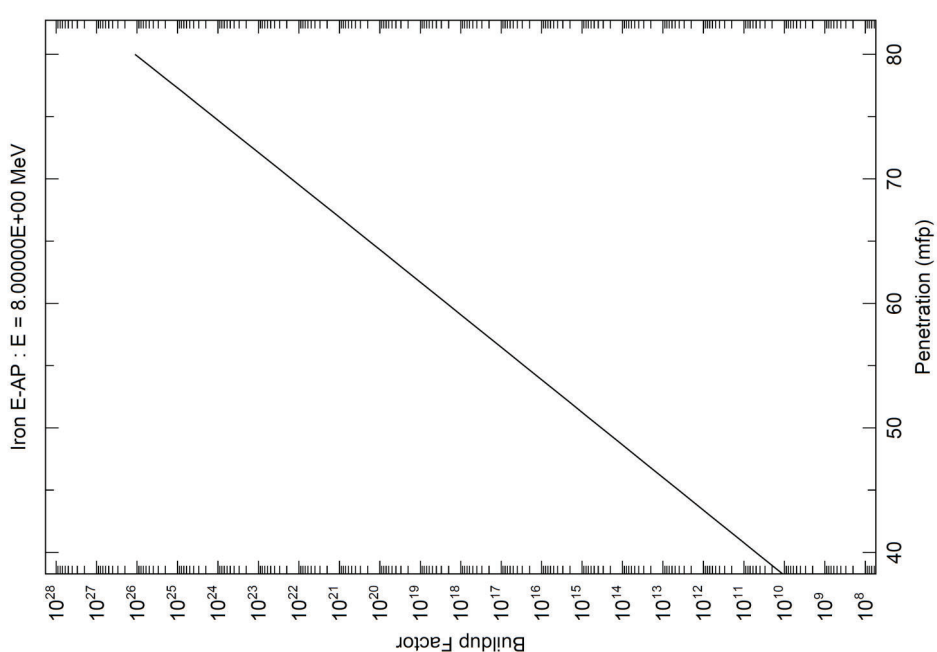


図 鉄に対する 8MeV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (2/2)

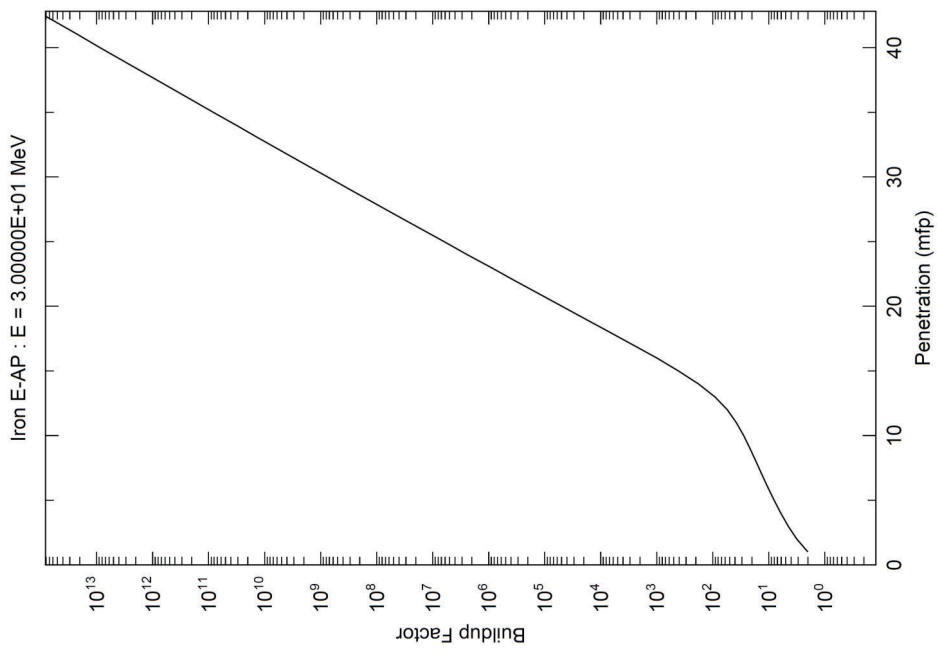


図 鉄に対する 30MeV- $\gamma$  線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (1/2)

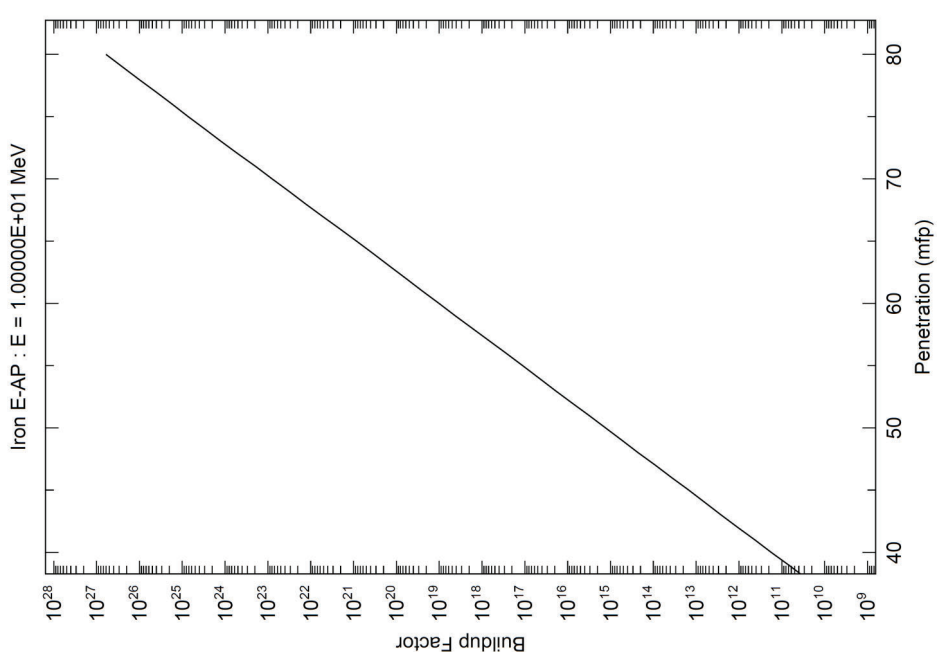


図 鉄に対する 10MeV- $\gamma$  線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (2/2)

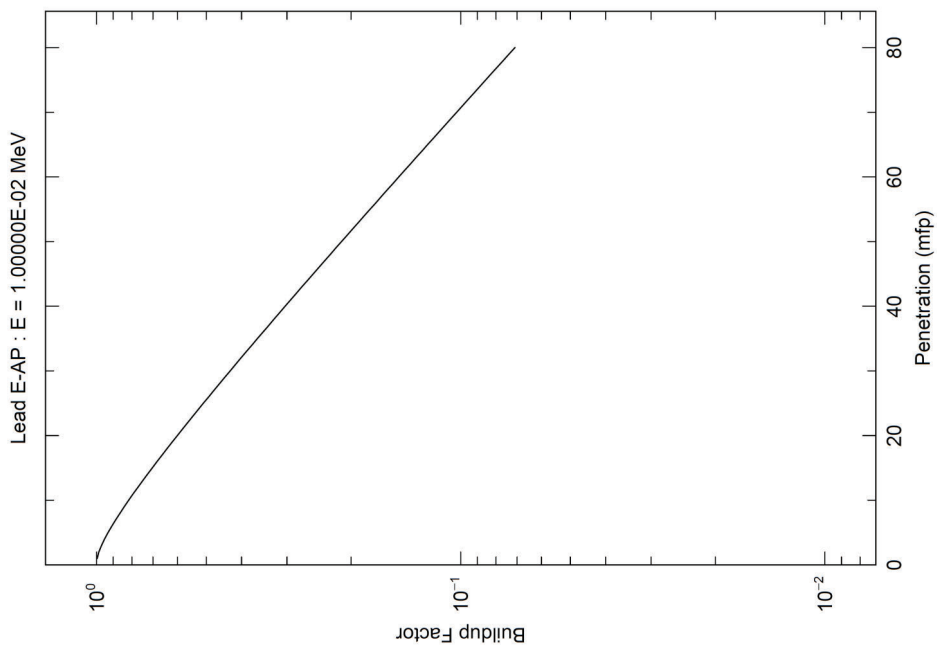


図 鉛に対する 10keV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

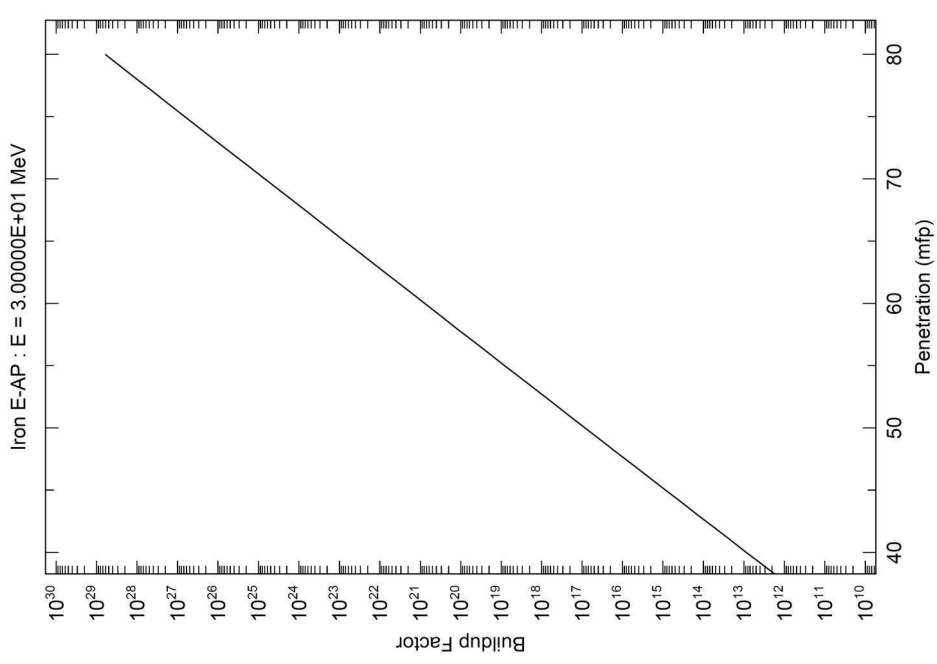


図 鉄に対する 30MeV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (2/2)



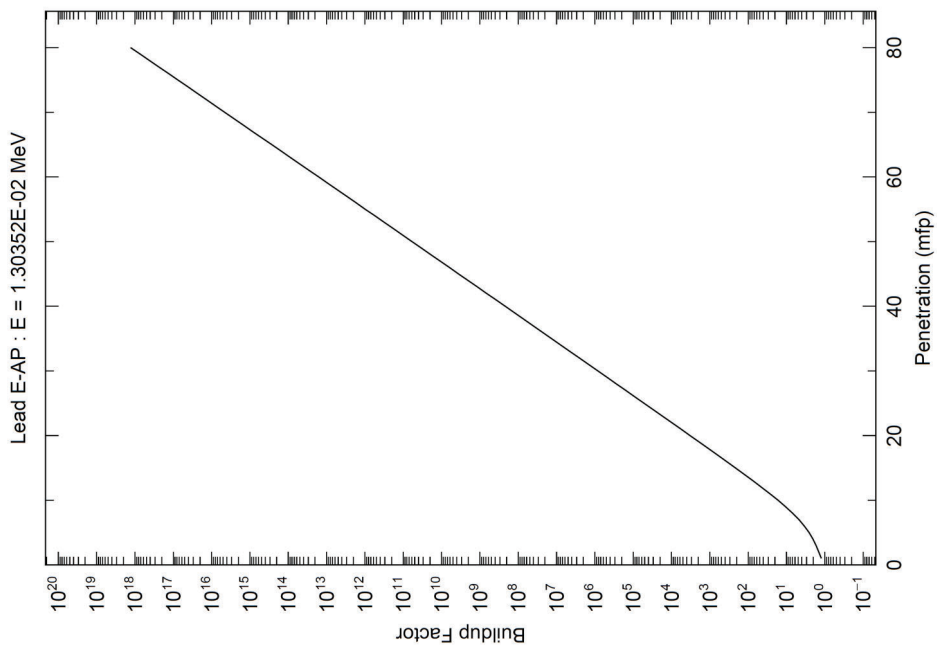


図 鉛に対する 13.0352keV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

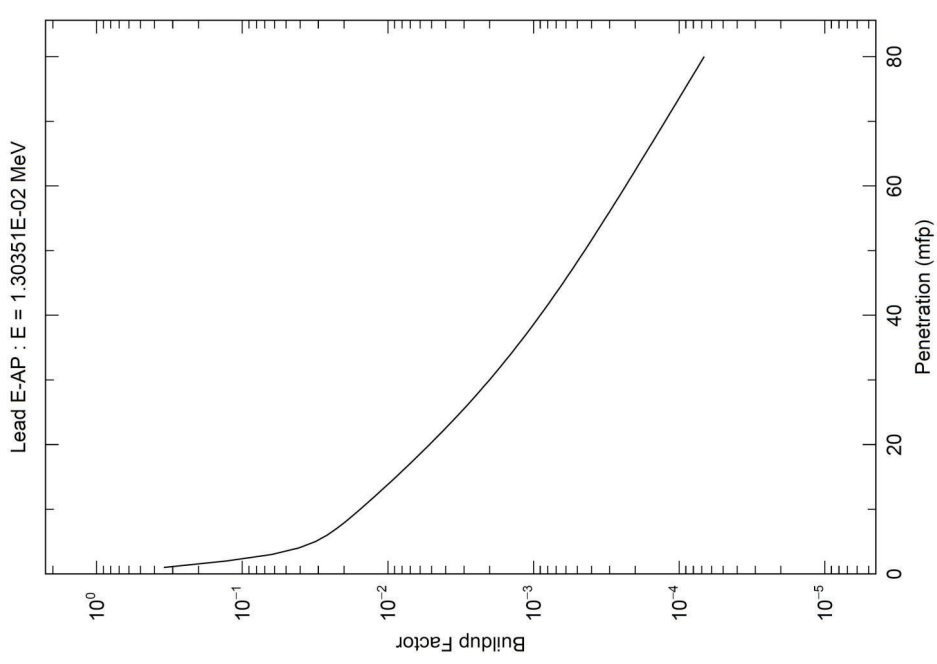


図 鉛に対する 13.0351keV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

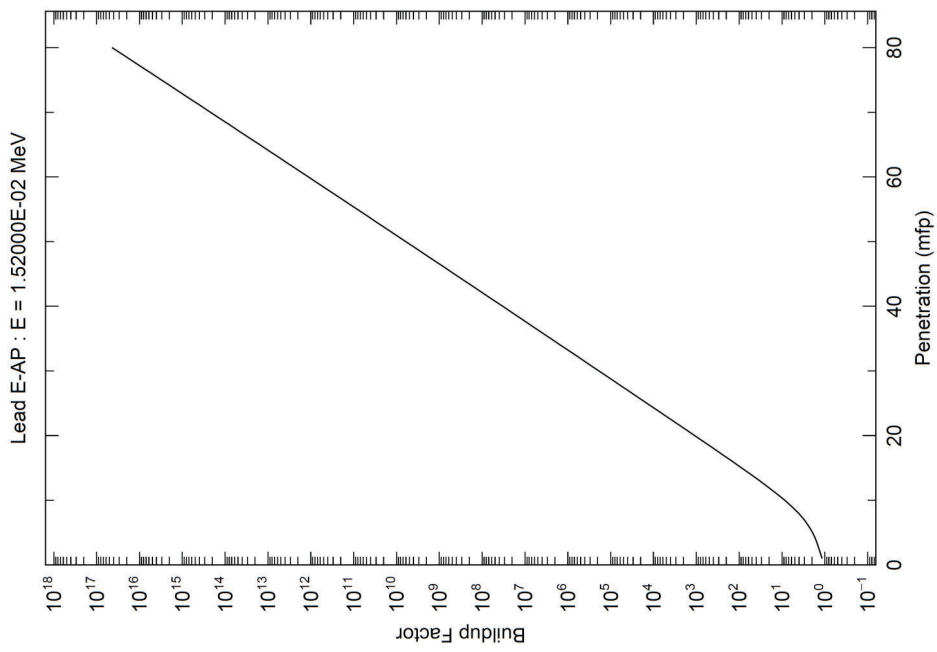


図 鉛に対する 15.2000keV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

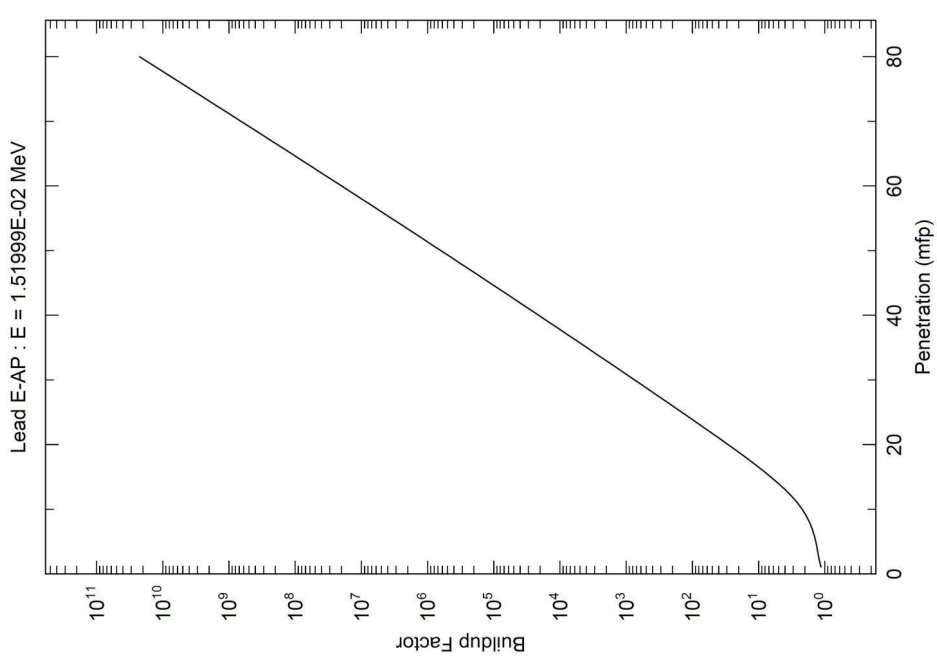


図 鉛に対する 15.1999keV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

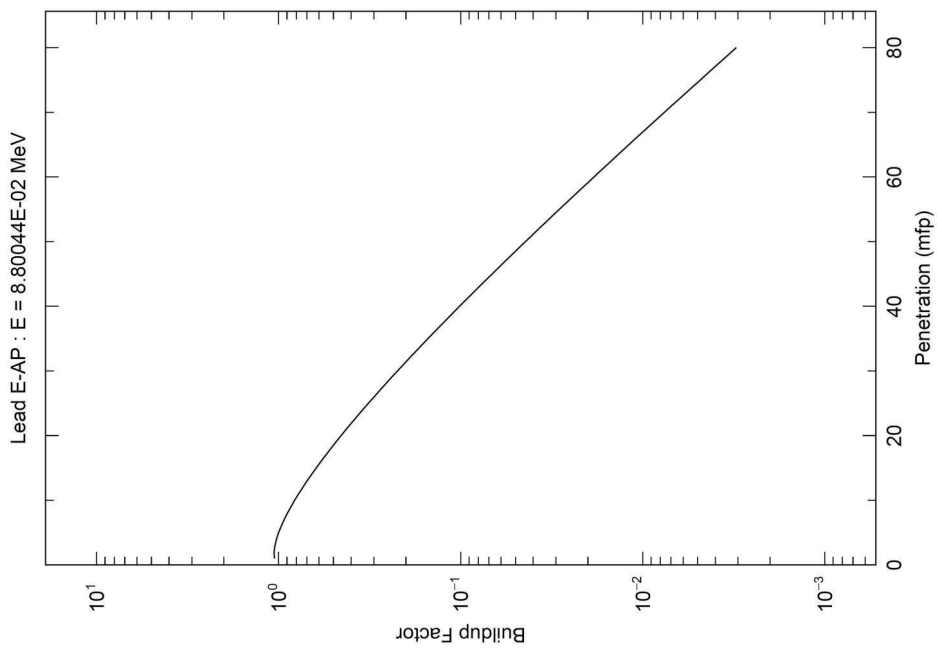


図 鉛に対する 88.0044keV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

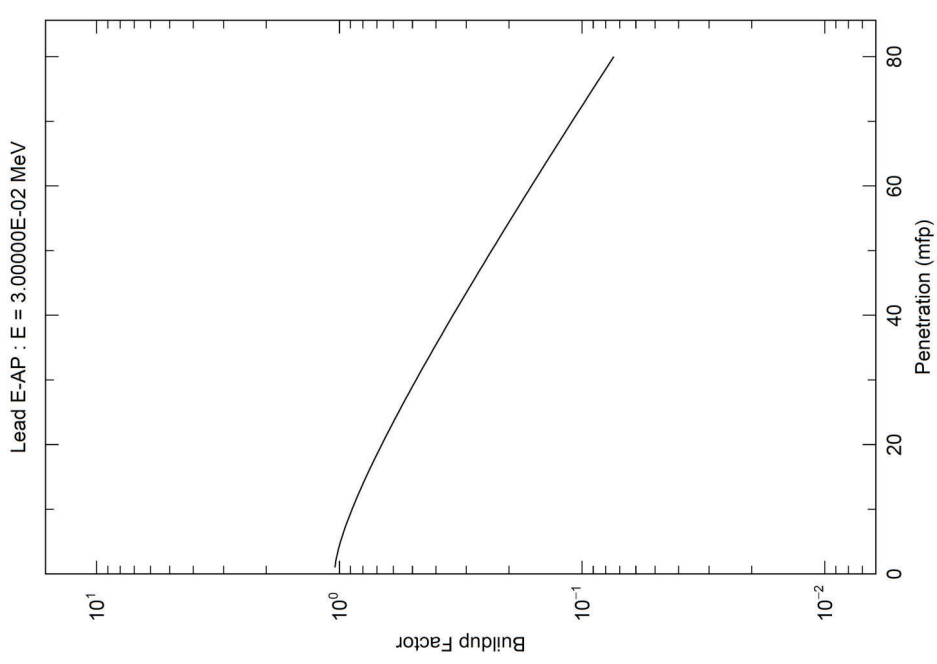


図 鉛に対する 30keV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

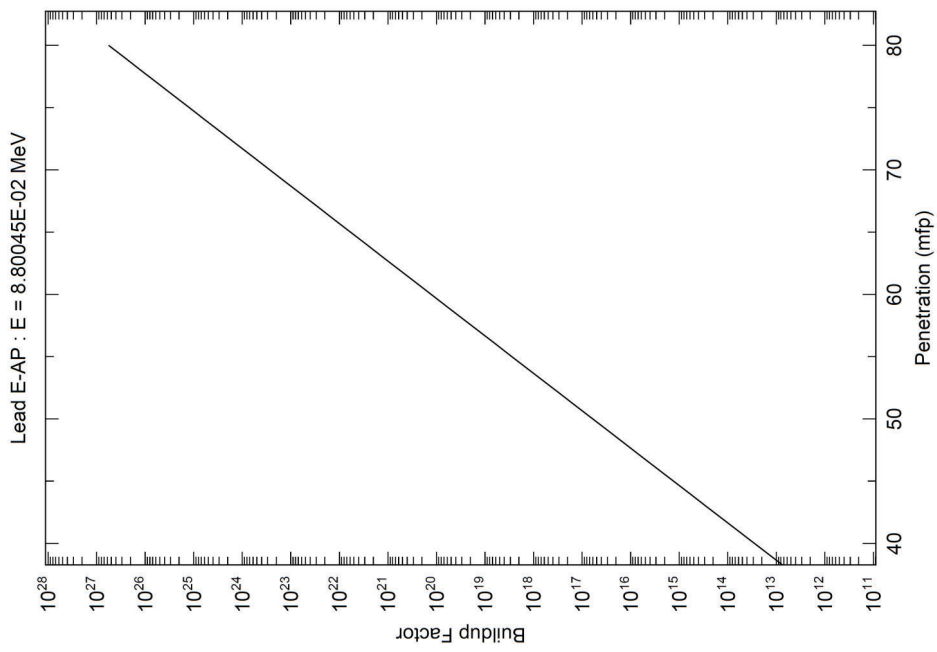


図 鉛に対する 88.0045keV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (2/2)

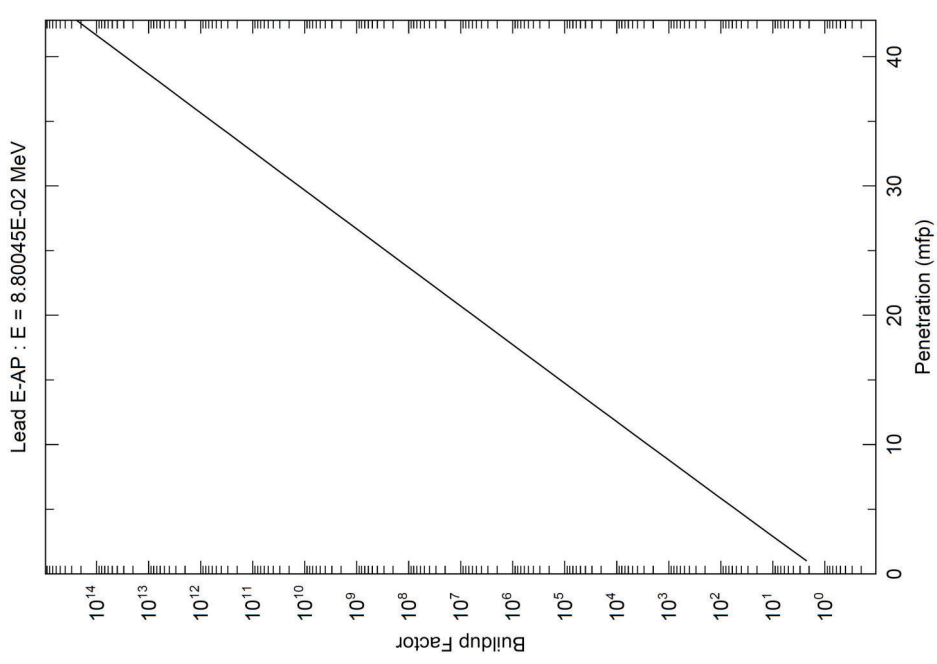


図 鉛に対する 88.0045keV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (1/2)

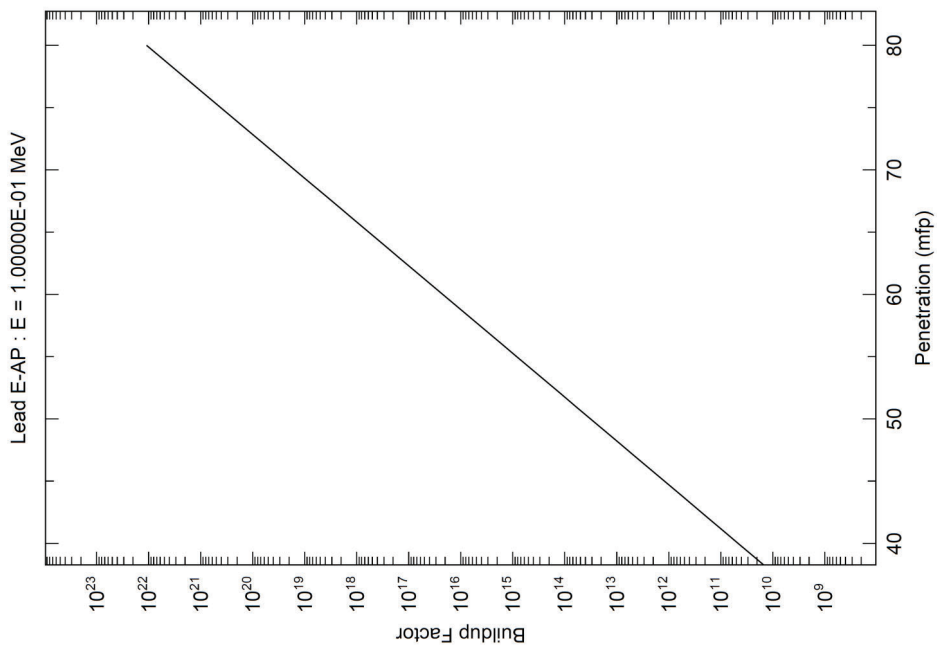


図 鉛に対する 0.1MeV- $\gamma$  線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (2/2)

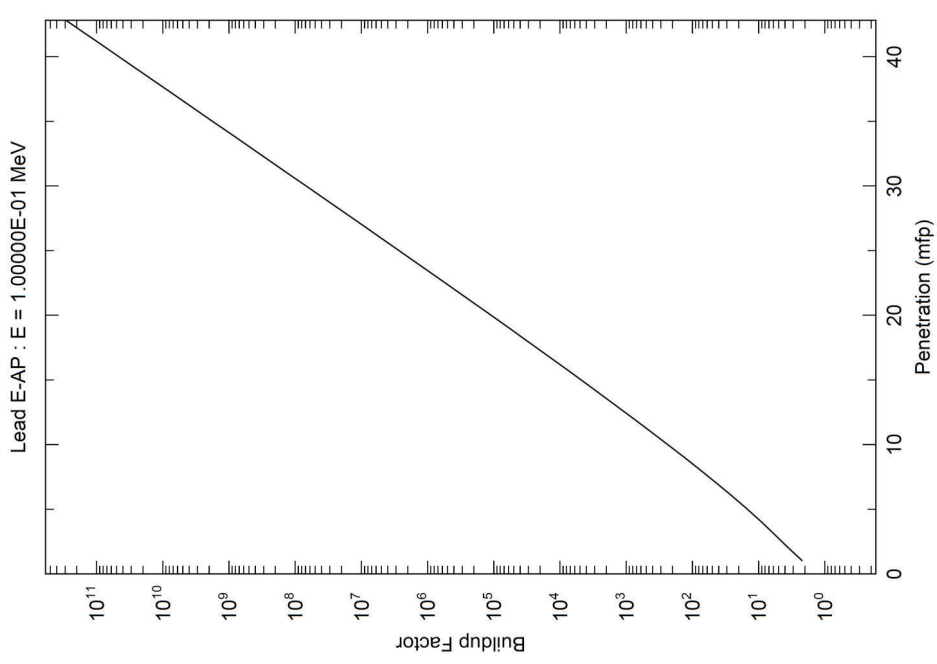


図 鉛に対する 0.1MeV- $\gamma$  線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (1/2)

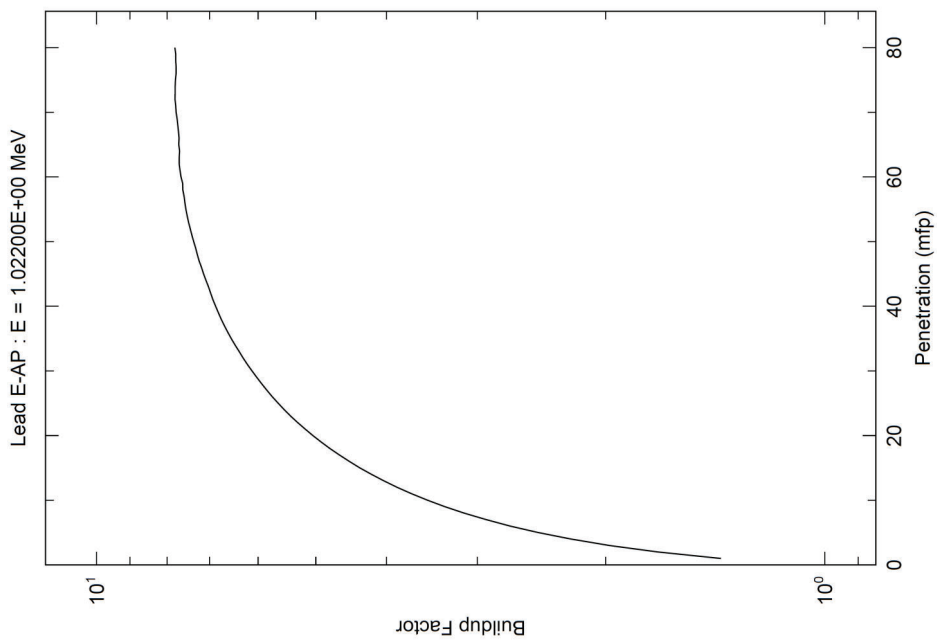


図 鉛に対する 1.022MeV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

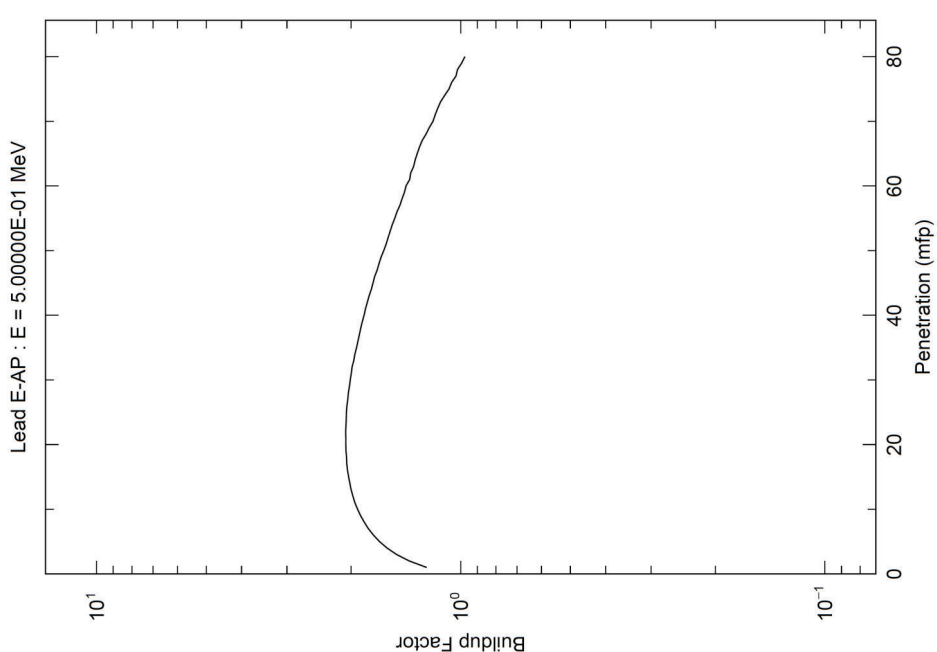


図 鉛に対する 0.5MeV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

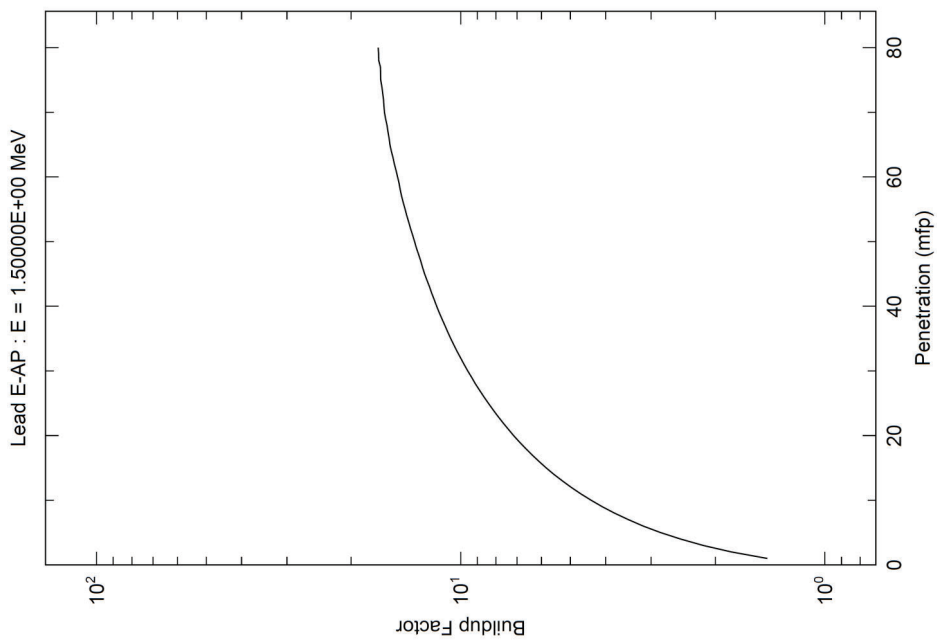


図 鉛に対する 1.5MeV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

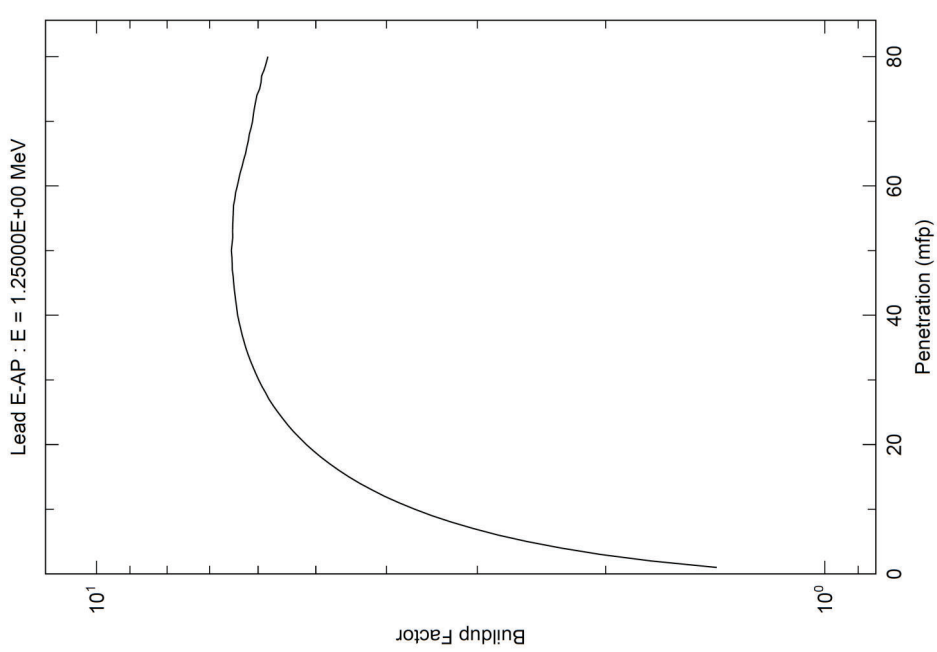


図 鉛に対する 1.25MeV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

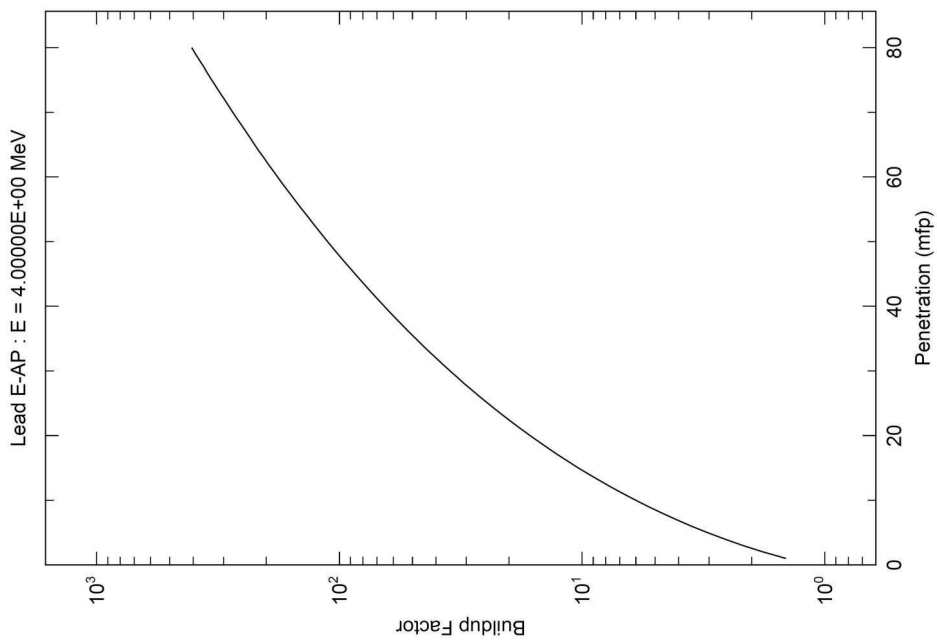


図 鉛に対する 4MeV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

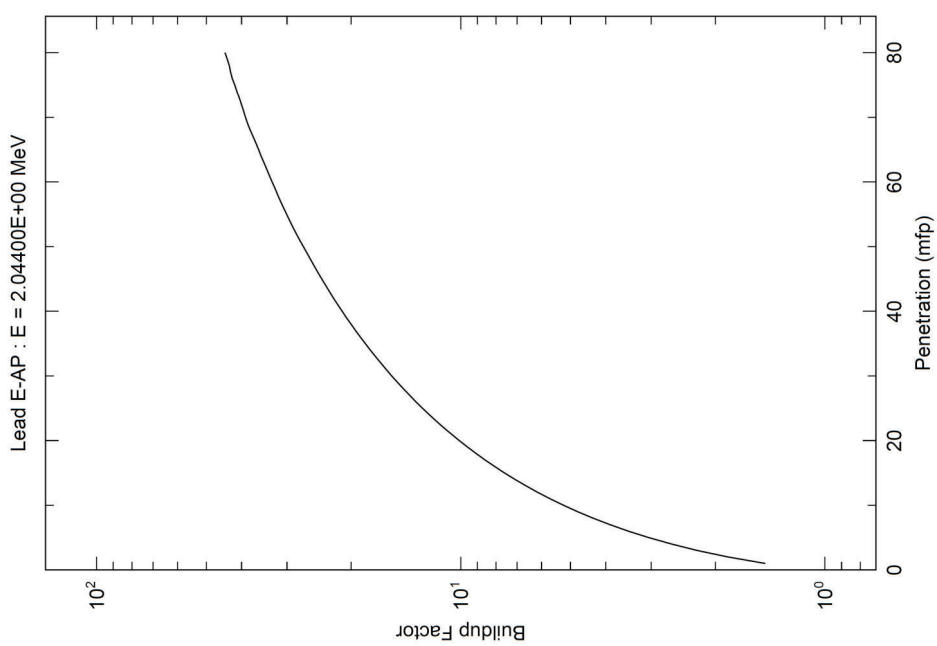


図 鉛に対する 2.044MeV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)



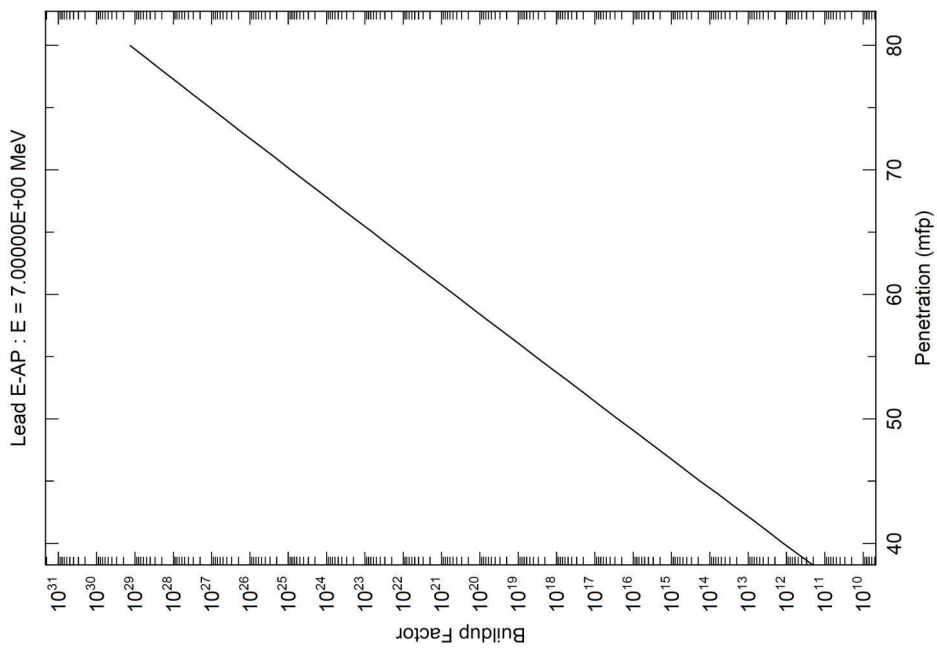


図 鉛に対する 7MeV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (2/2)

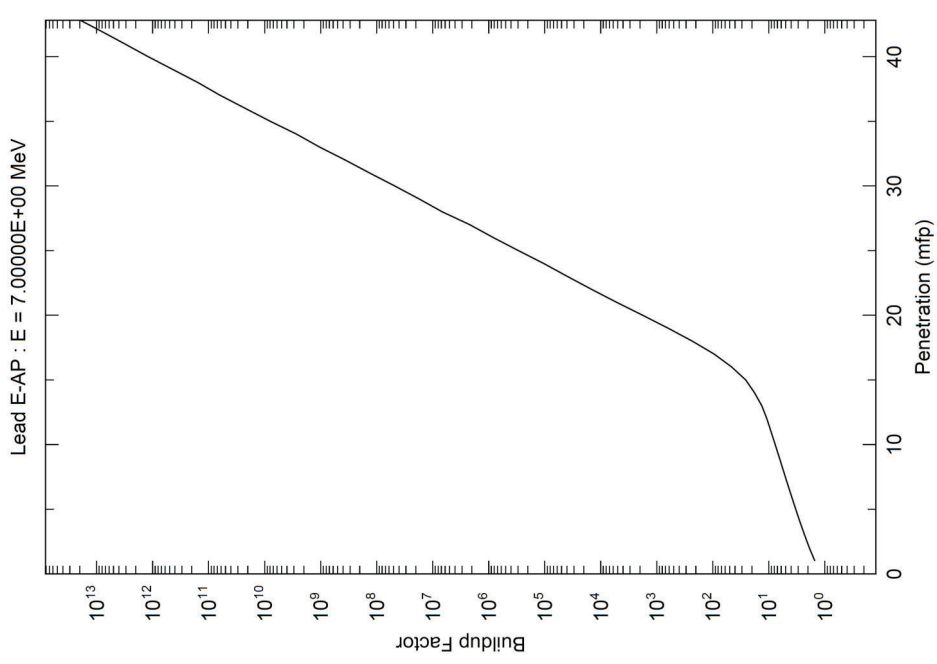


図 鉛に対する 7MeV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (1/2)

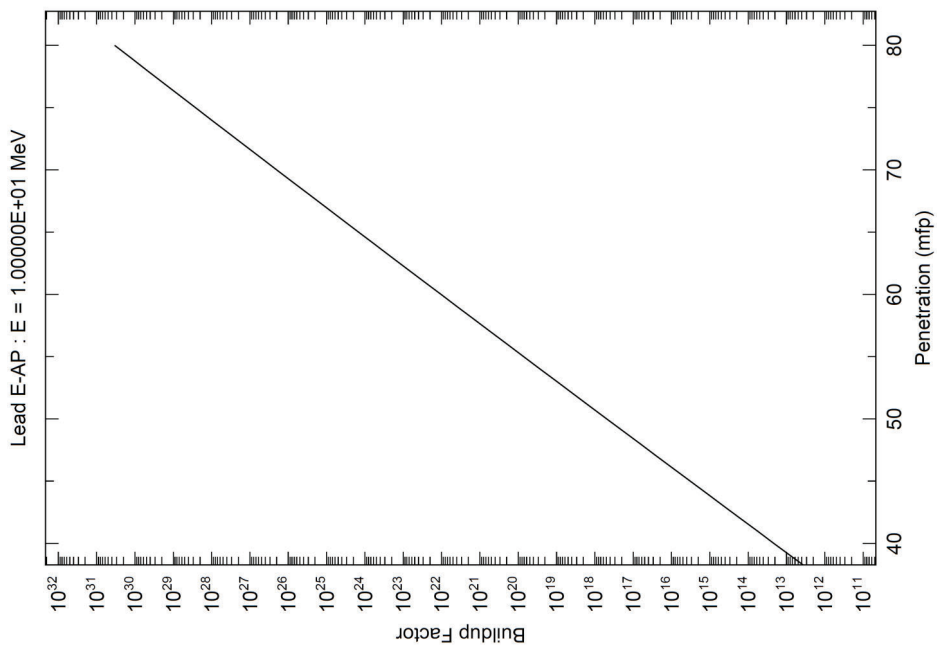


図 鉛に対する 10MeV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (2/2)

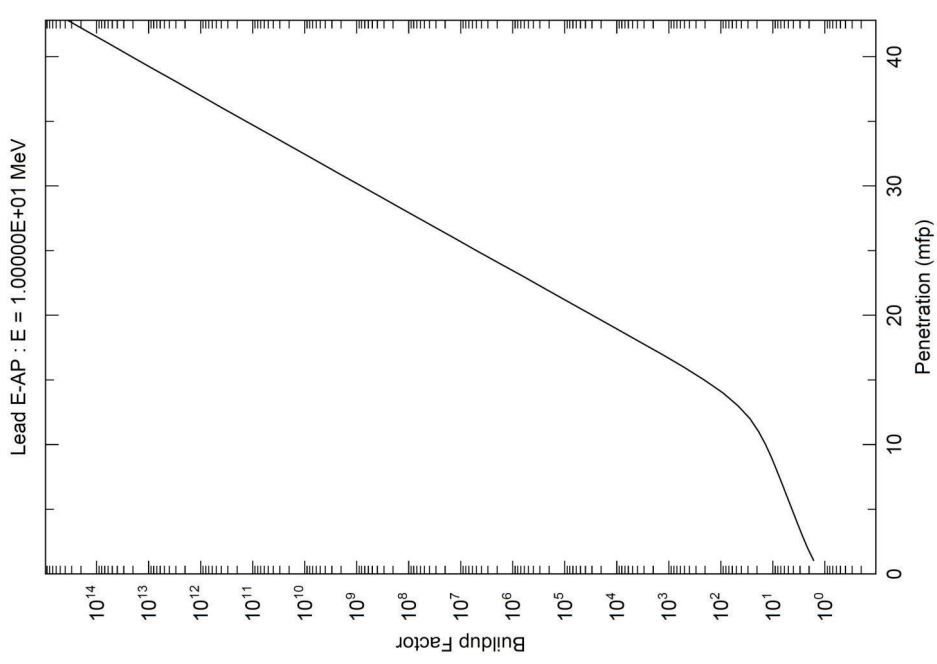


図 鉛に対する 10MeV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (1/2)

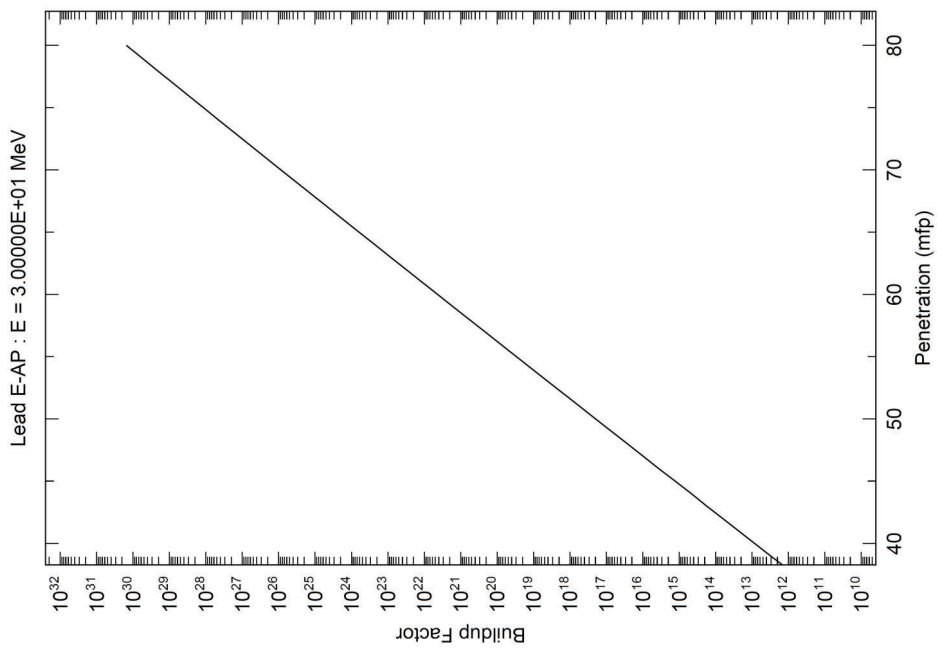


図 鉛に対する 30MeV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (2/2)

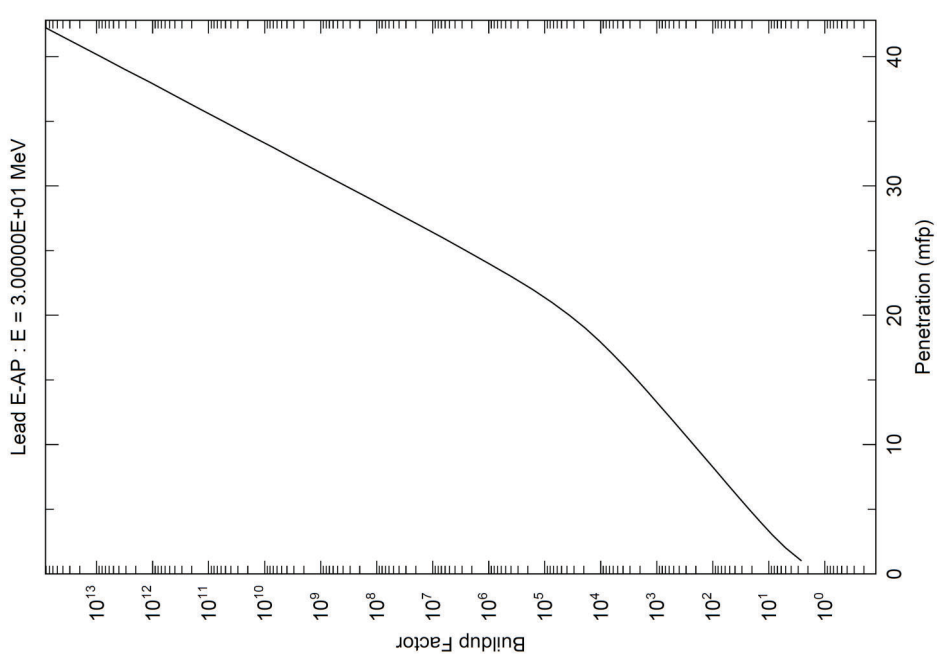


図 鉛に対する 30MeV- $\gamma$ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (1/2)

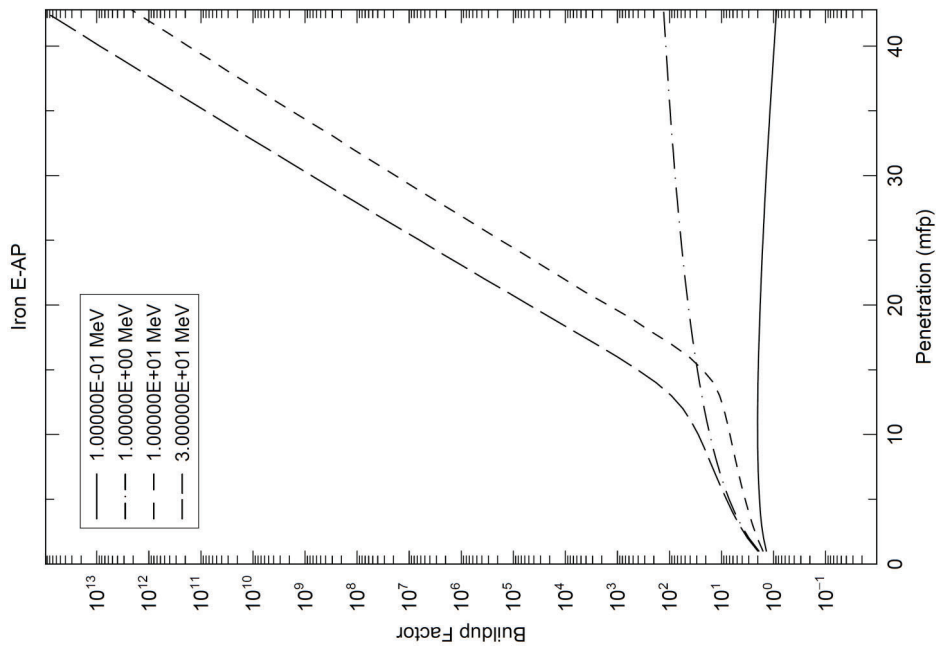


図 鉄に対するγ線エネルギー毎の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (1/2)

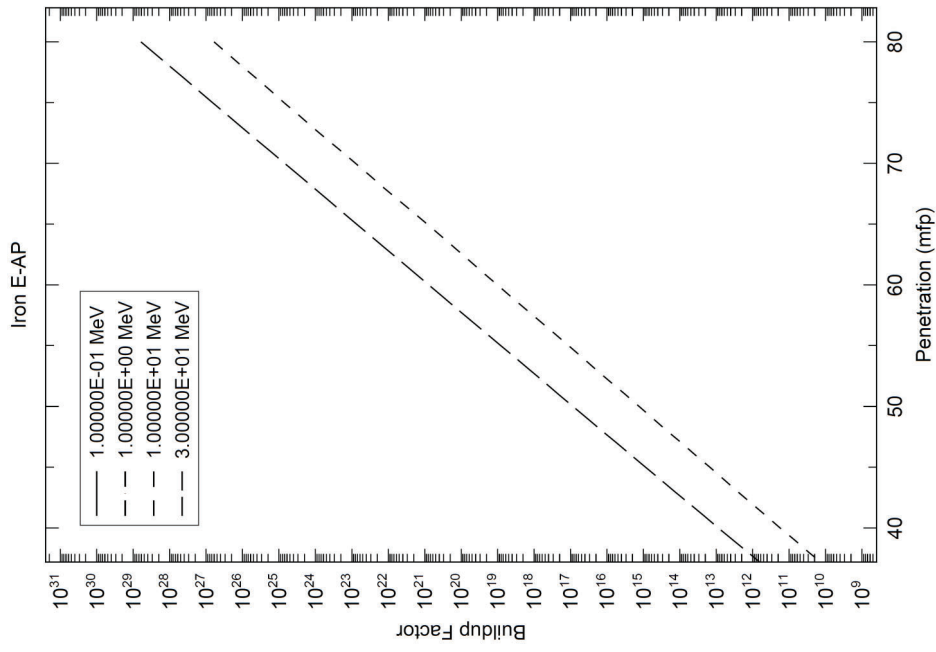


図 鉄に対するγ線エネルギー毎の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (2/2)

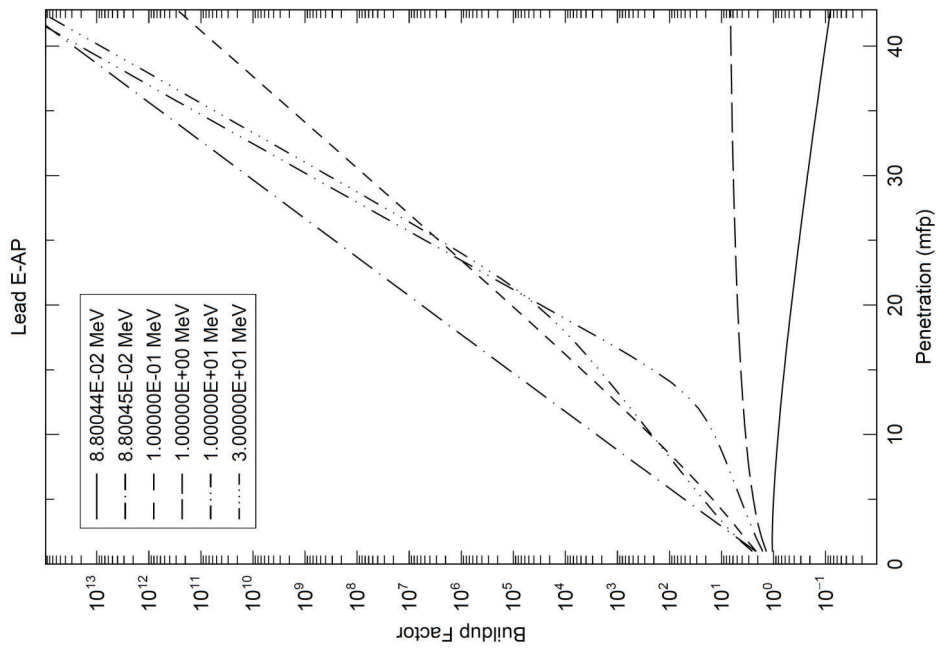


図 鉛に対するγ線エネルギー毎の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (1/2)

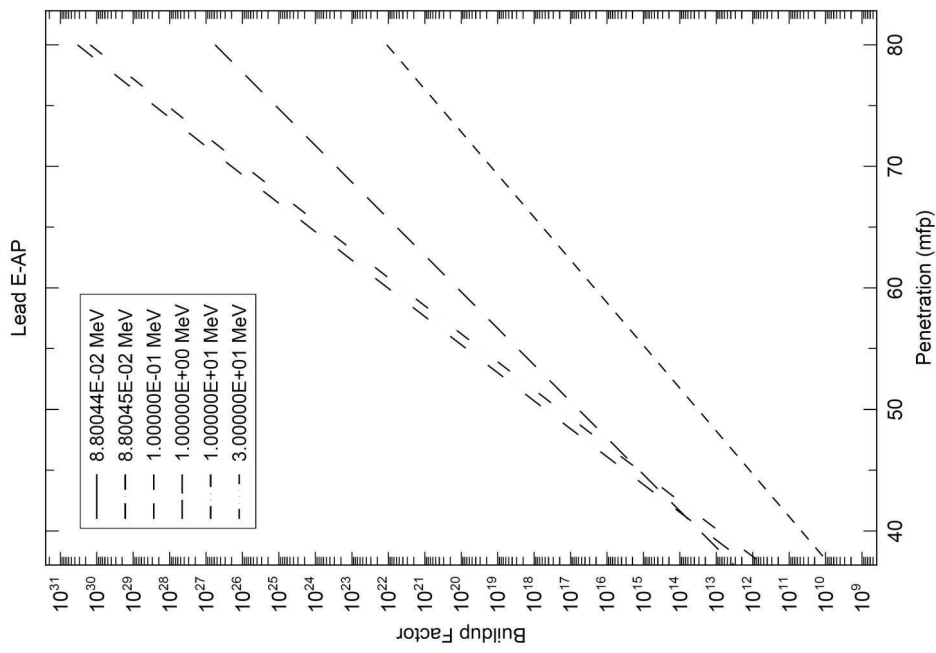


図 鉛に対するγ線エネルギー毎の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (2/2)

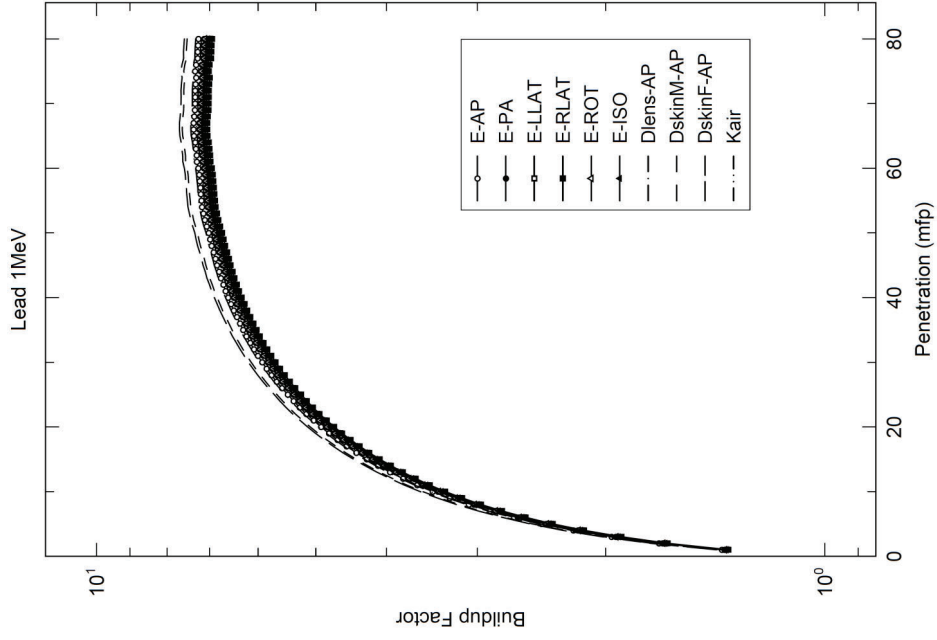


図 鉛に対する 1MeV γ線の各線量種類のビルドアップ係数(BF-g)

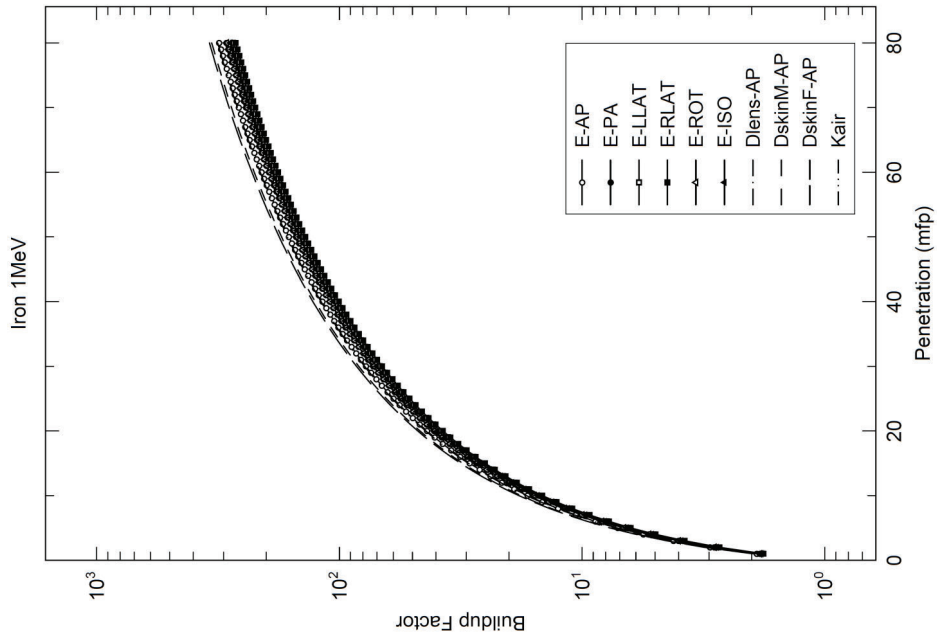


図 鉄に対する 1MeV γ線の各線量種類のビルドアップ係数(BF-g)

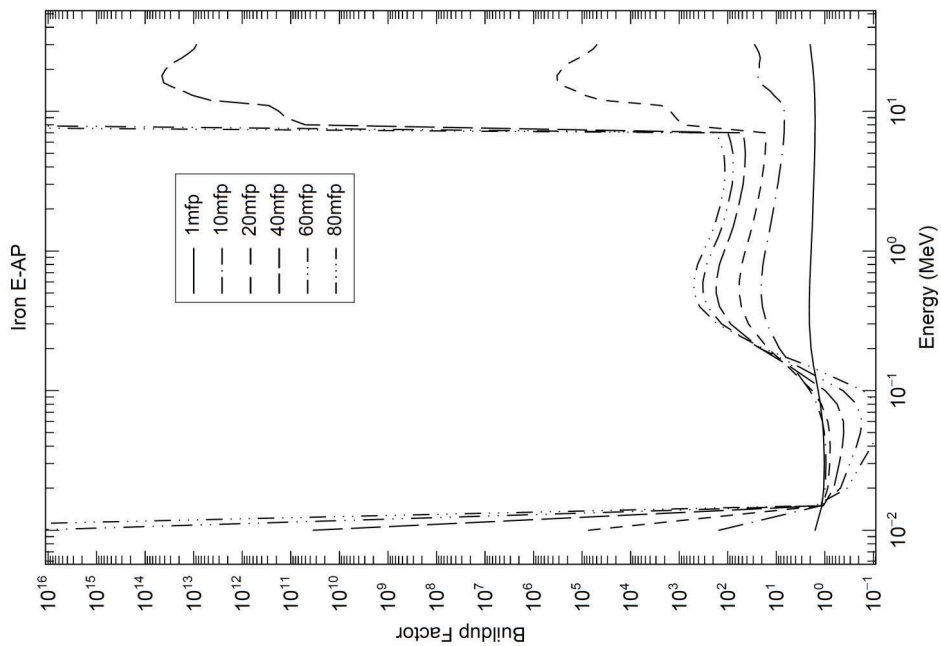


図 鉄に対する mfp 毎のビルドアップ係数(BF-g) (1/2)

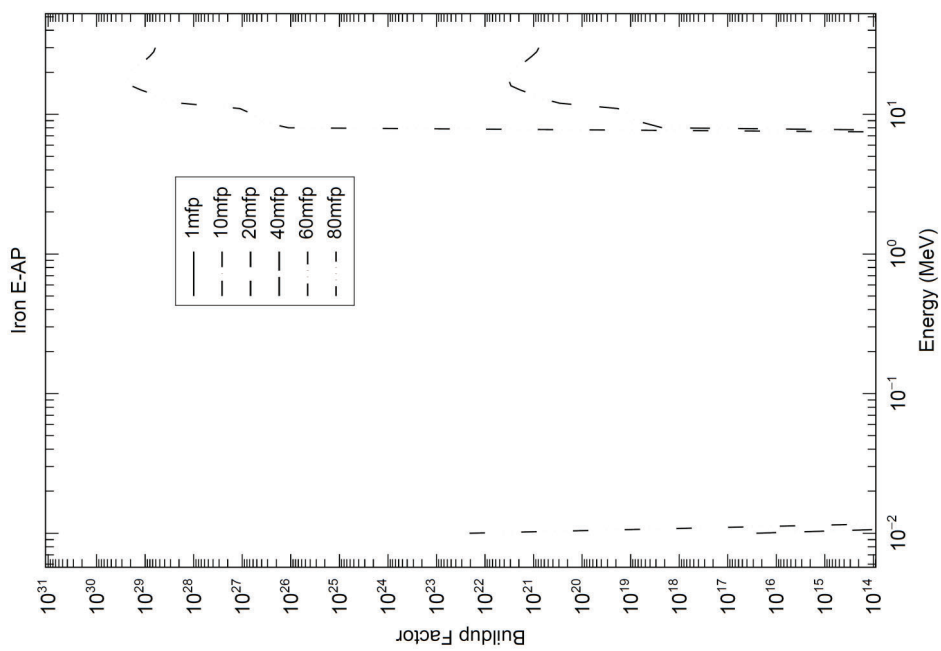


図 鉄に対する mfp 毎のビルドアップ係数(BF-g) (2/2)

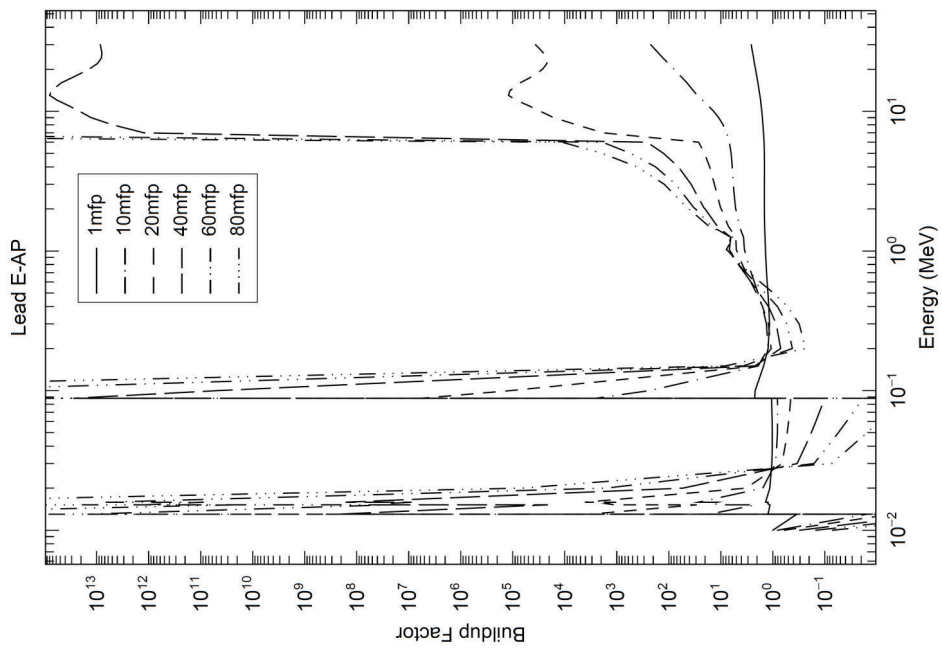


図 鉛に対する mfp 毎のビルドアップ係数(BF-g)



## 付録IX

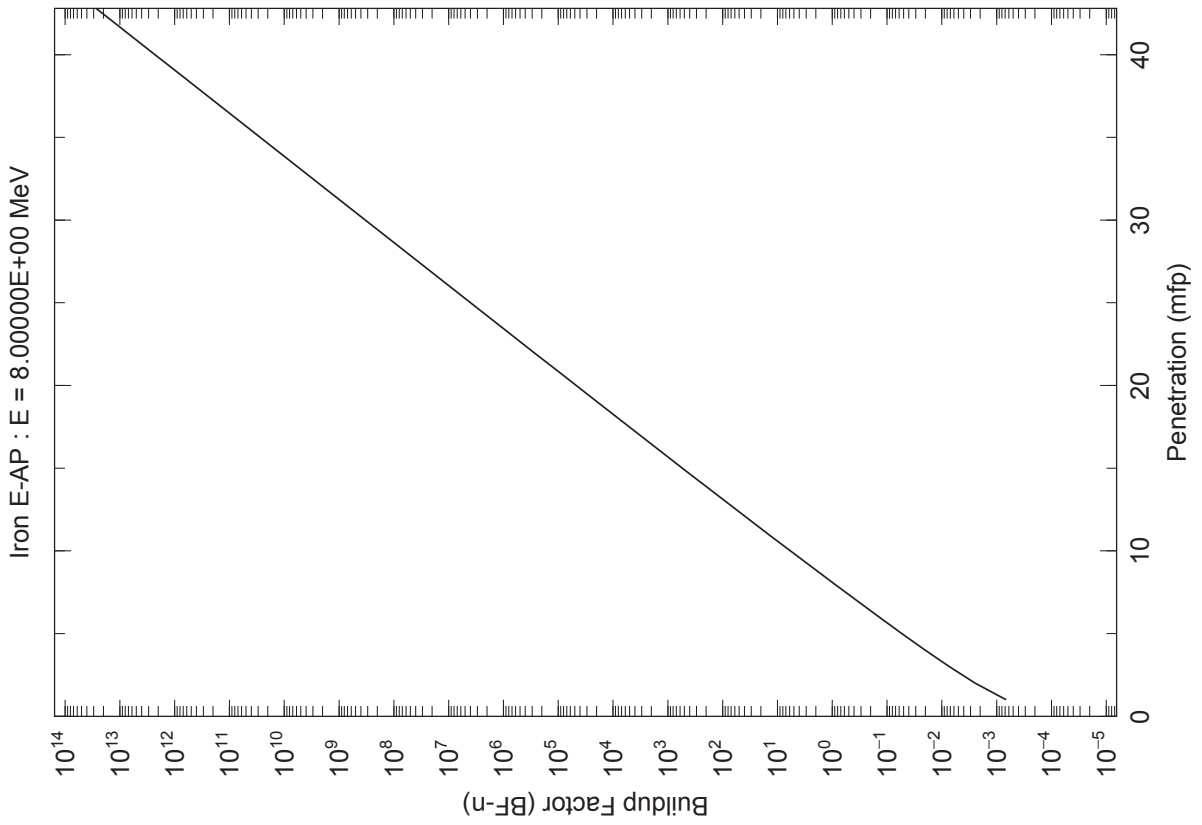
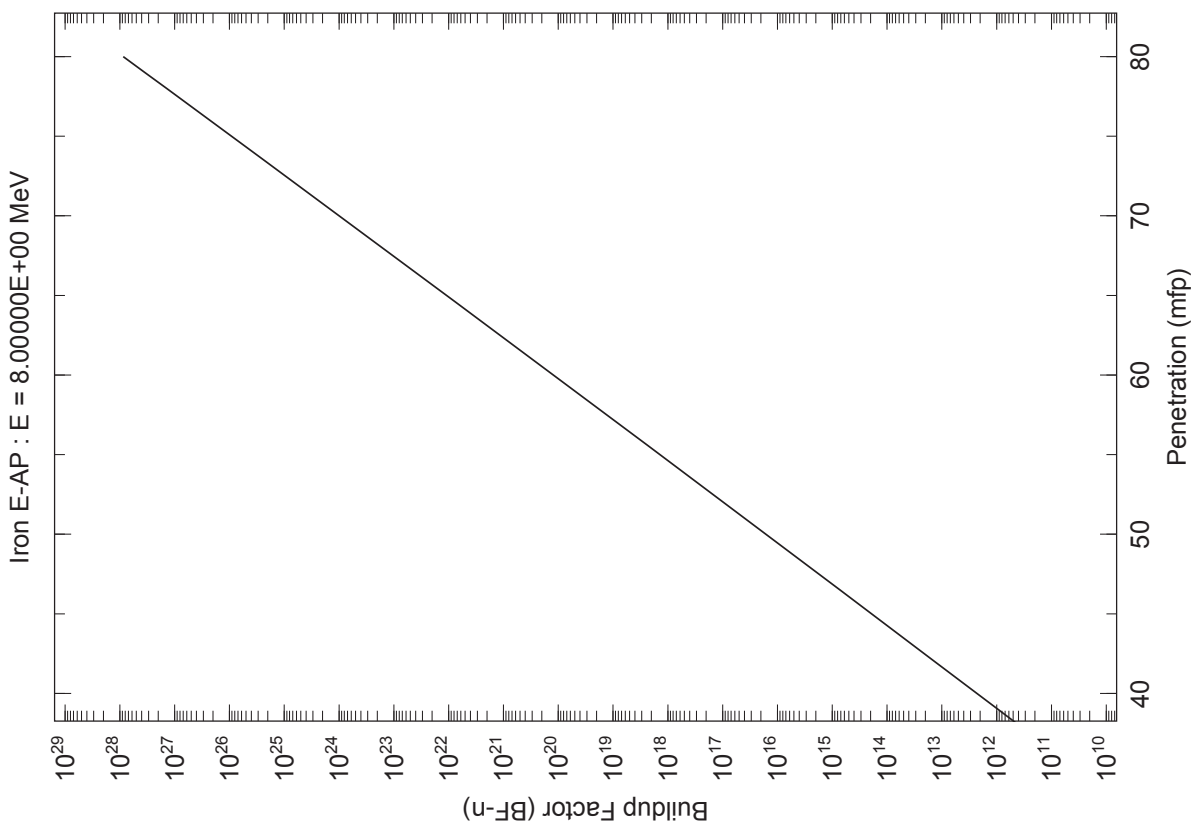
光中性子ビルドアップ係数 (BF-n) の作成例

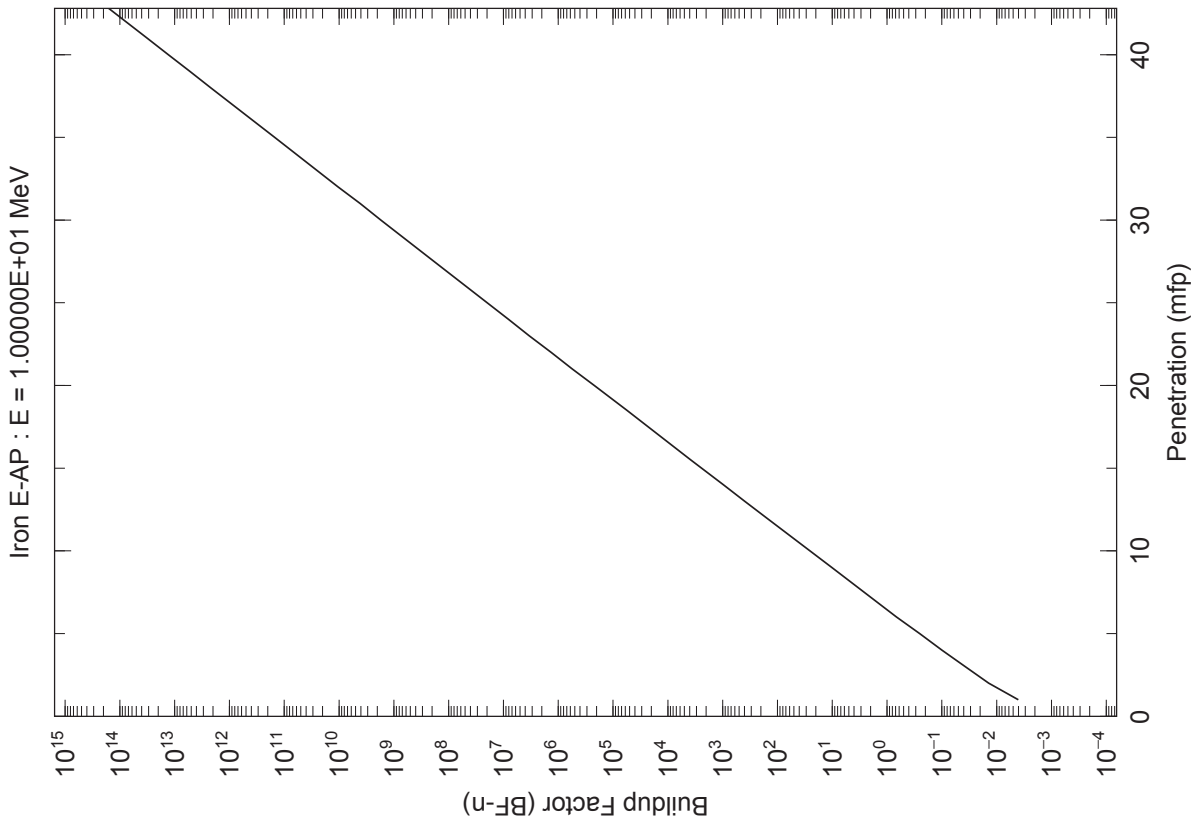
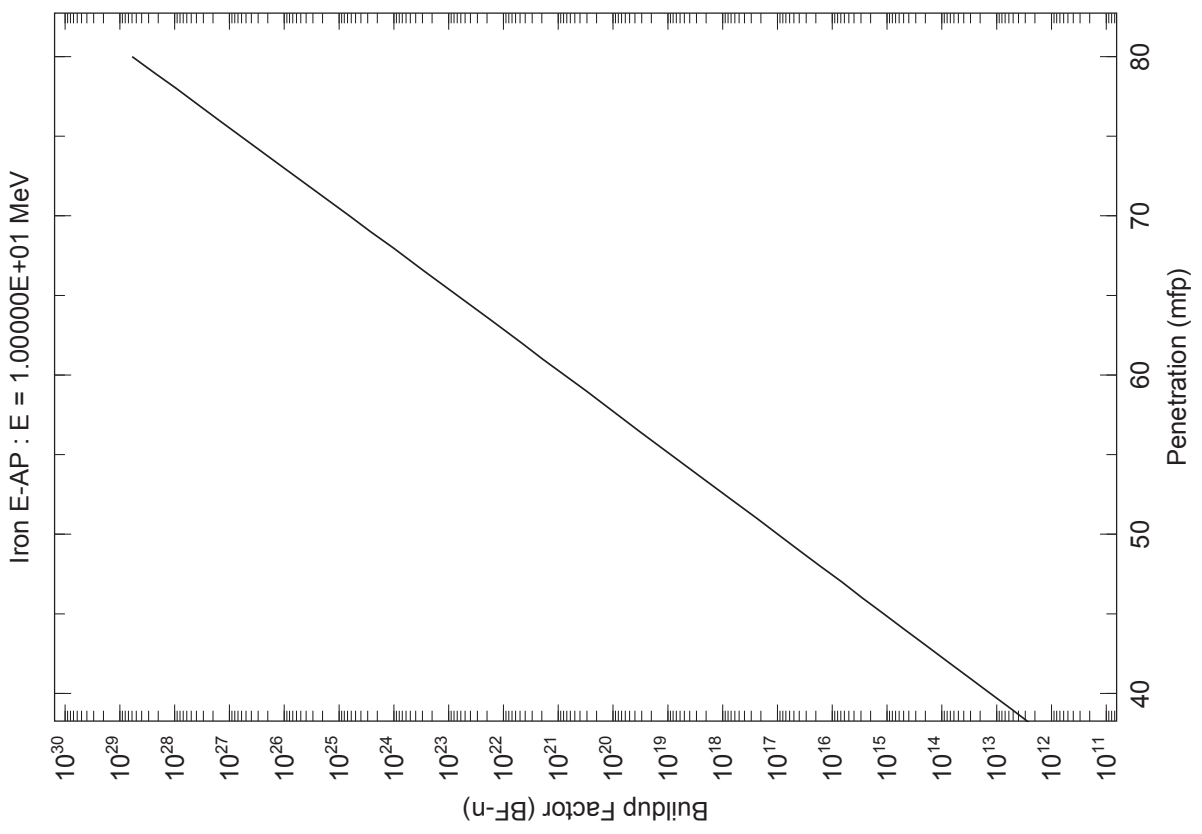
(鉄、及び鉛)

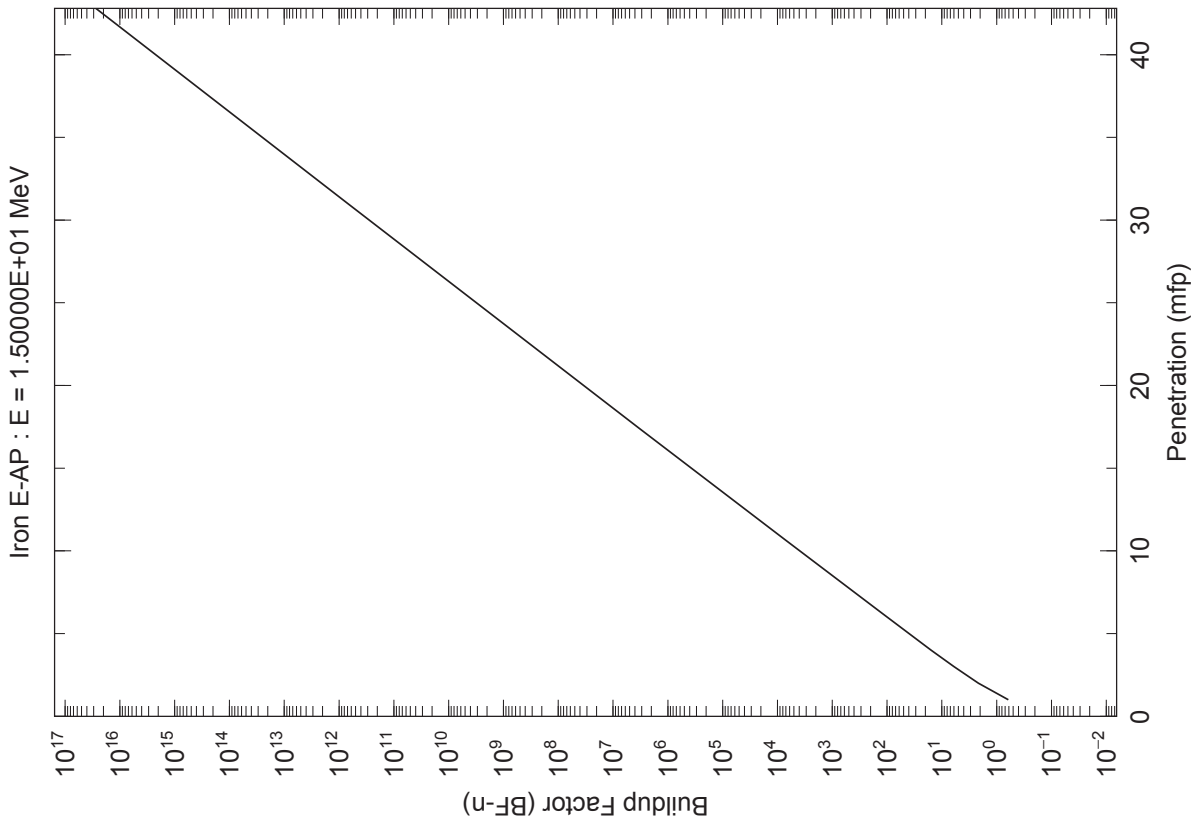
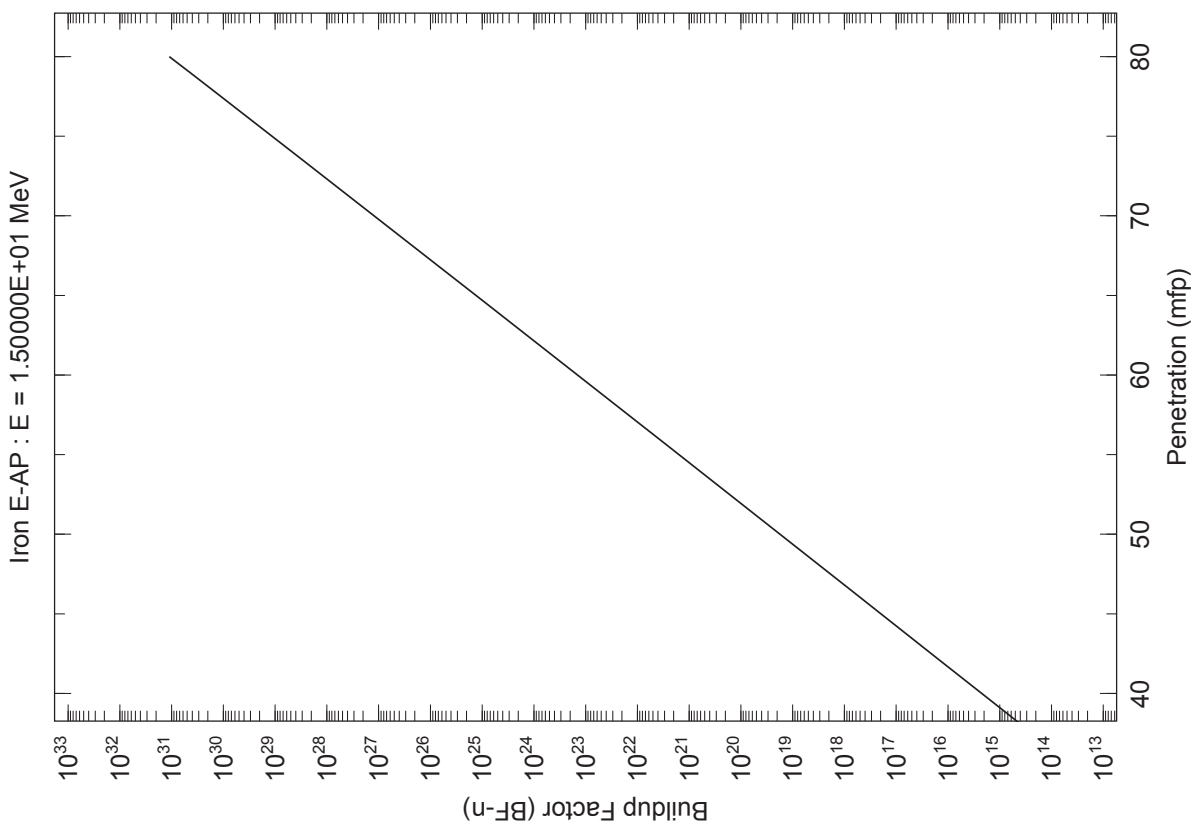
鉄、及び鉛の光中性子ビルドアップ係数 (BF-n) をモンテカルロ法シミュレーション (PHITS-EGS) によって計算した。下表に示す代表的なガンマ線源エネルギーについて、横軸を遮蔽厚 (透過距離、mfp 単位)、縦軸をビルドアップ係数で表したグラフを示す。

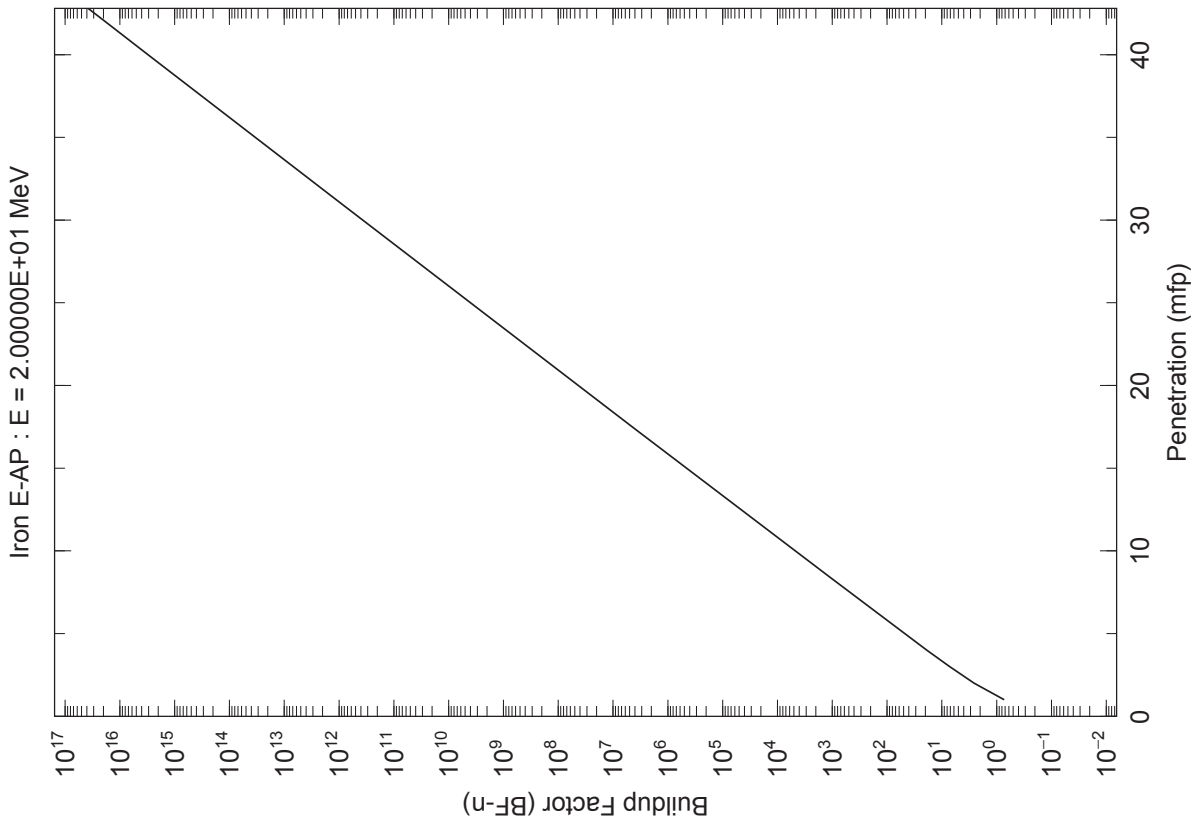
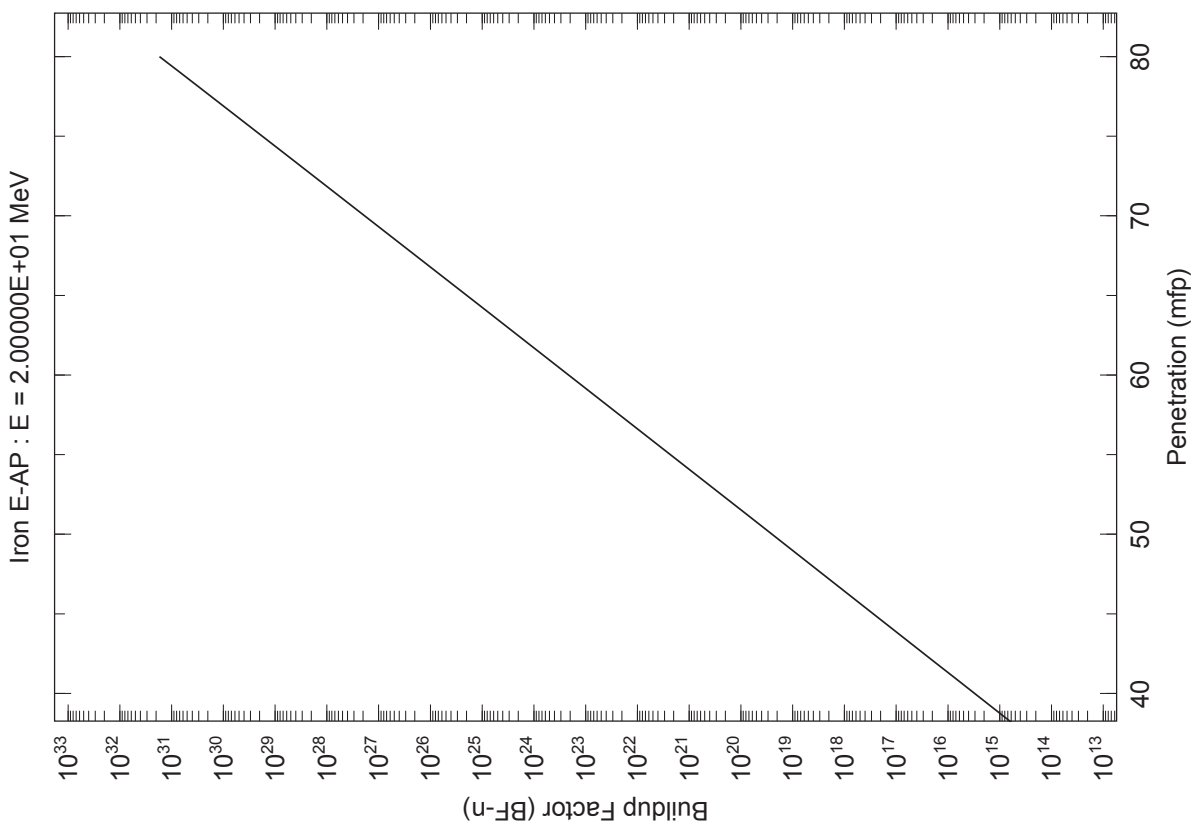
なお、ビルドアップ係数のグラフは、異なる遮蔽厚の領域に対して、2 枚に分けて示した。分けた遮蔽厚の境界は 40 未満と 40 以上である。これは、ビルドアップ係数を示す縦軸の範囲が広く、1 枚のグラフで表しにくいことによる。

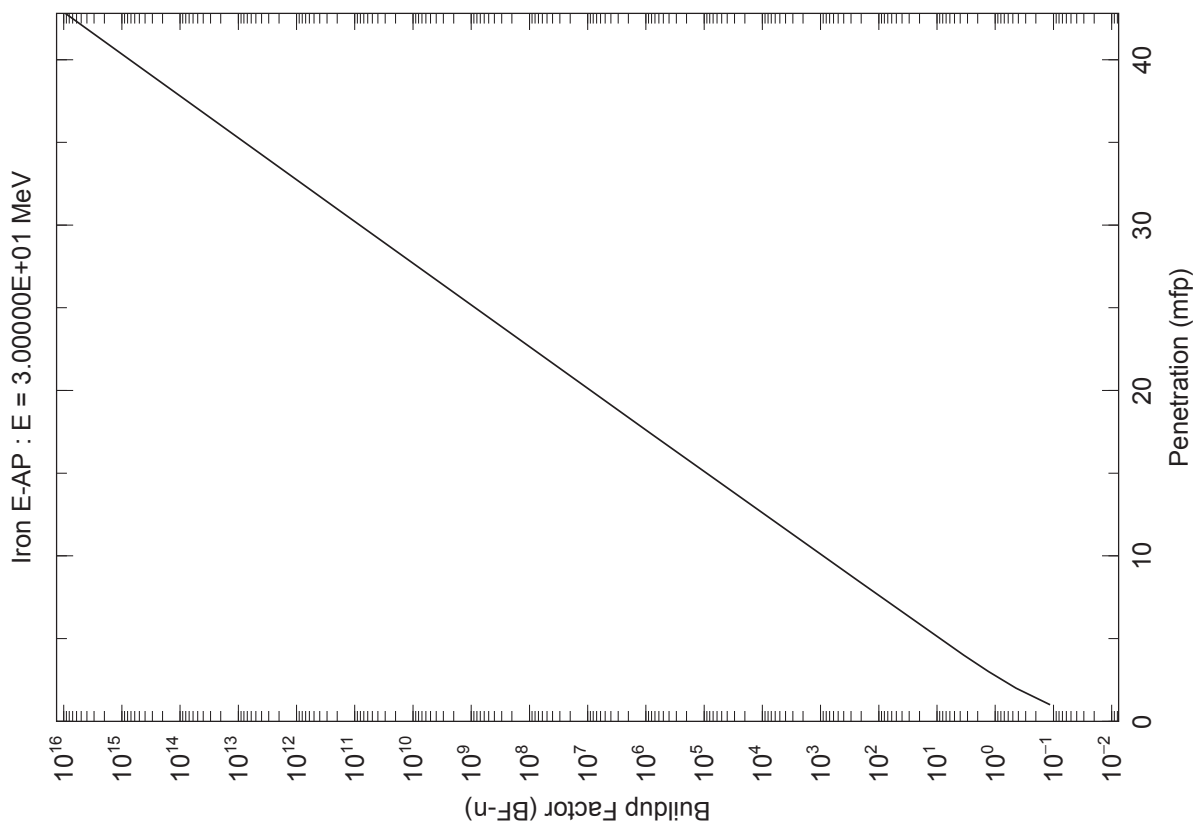
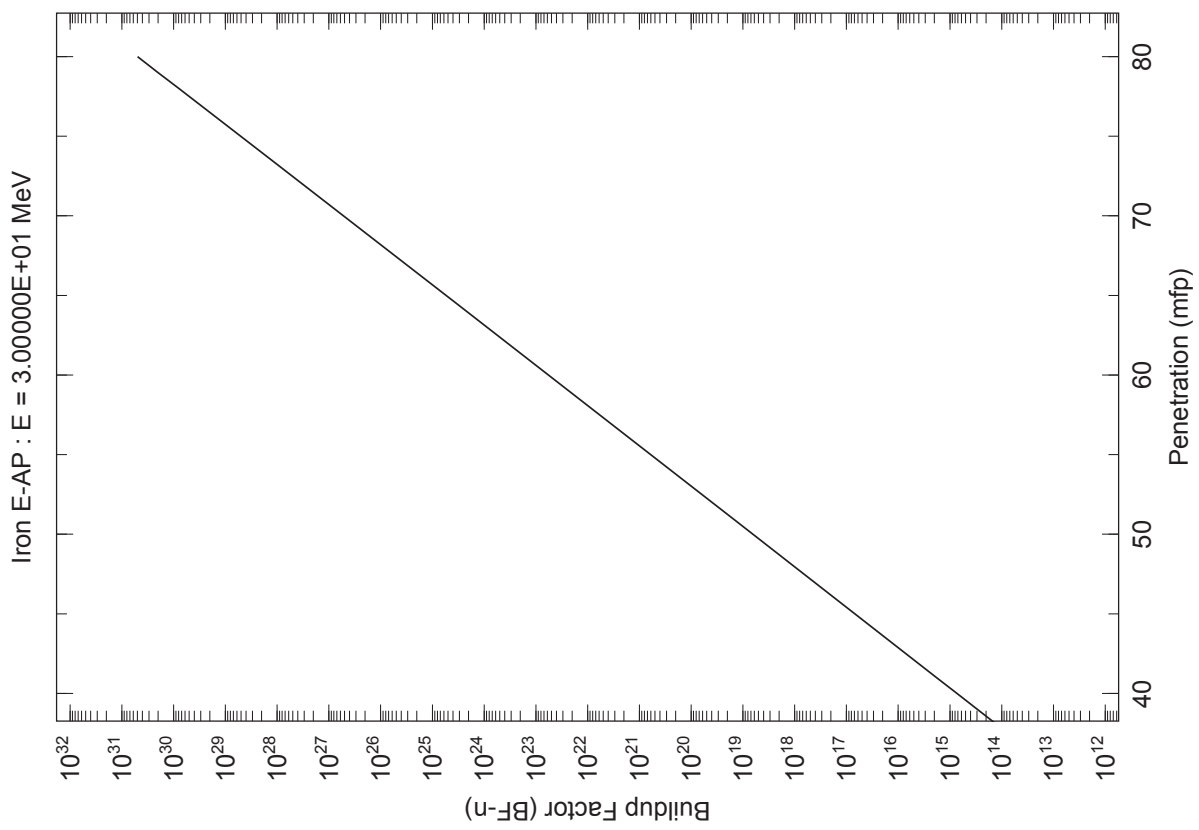
遮蔽材	ガンマ線源エネルギー(MeV)	線量種類	表示ページ番号
鉄	8	実効線量 E(AP) (AP 照射)	2
	10		3
	15		4
	20		5
	30 (上限)		6
鉛	8		7
	10		8
	15		9
	20		10
	30 (上限)		11

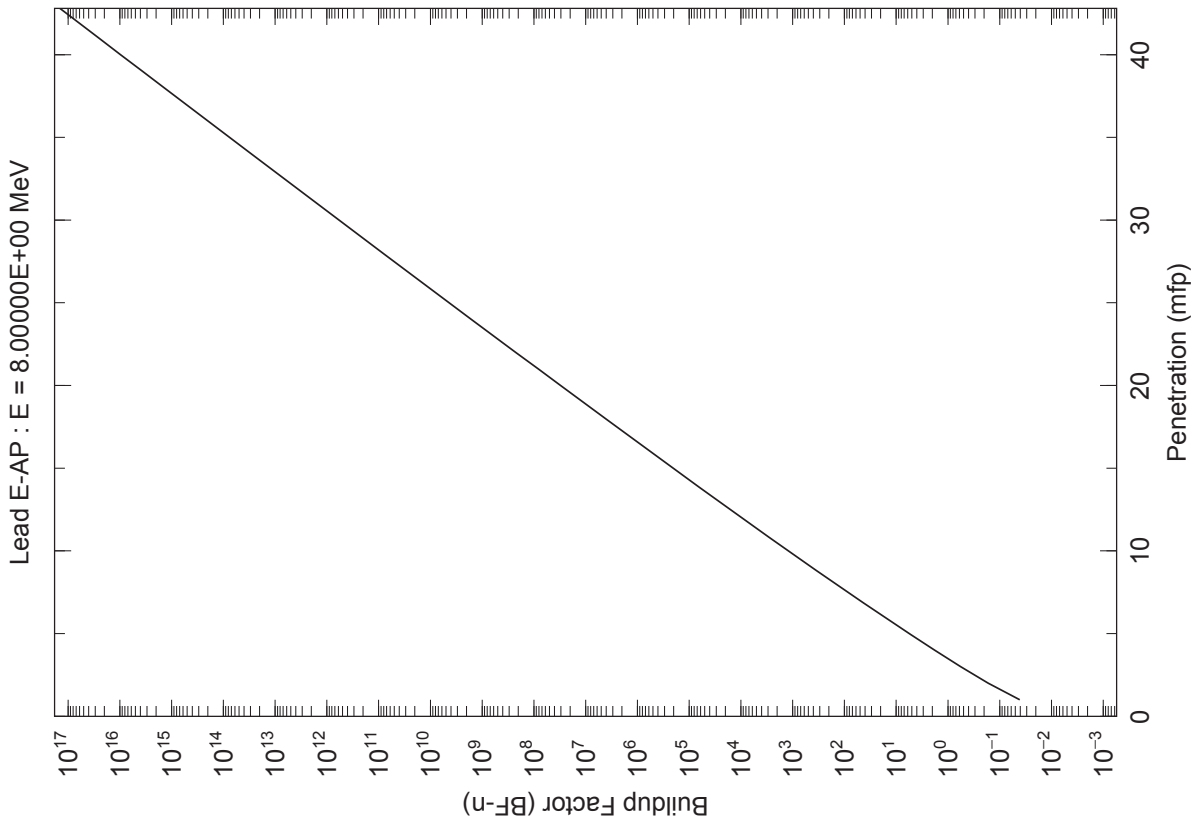
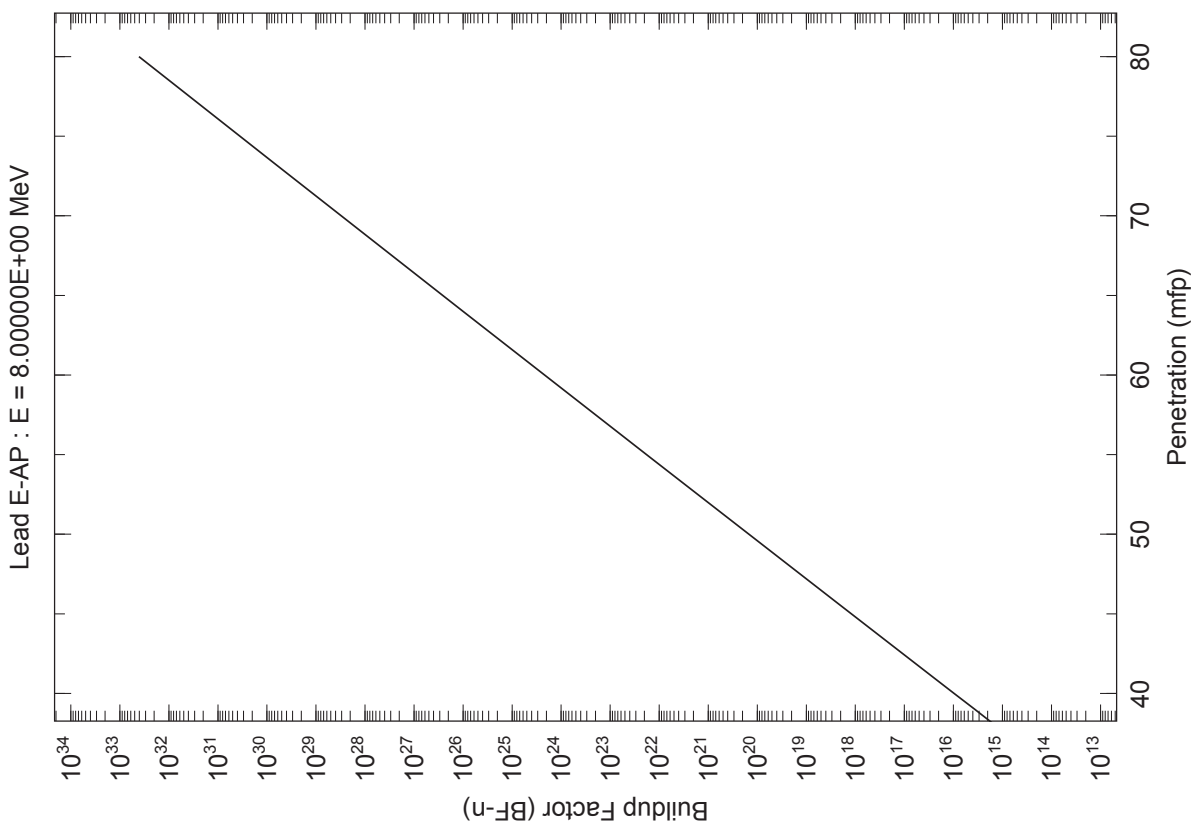




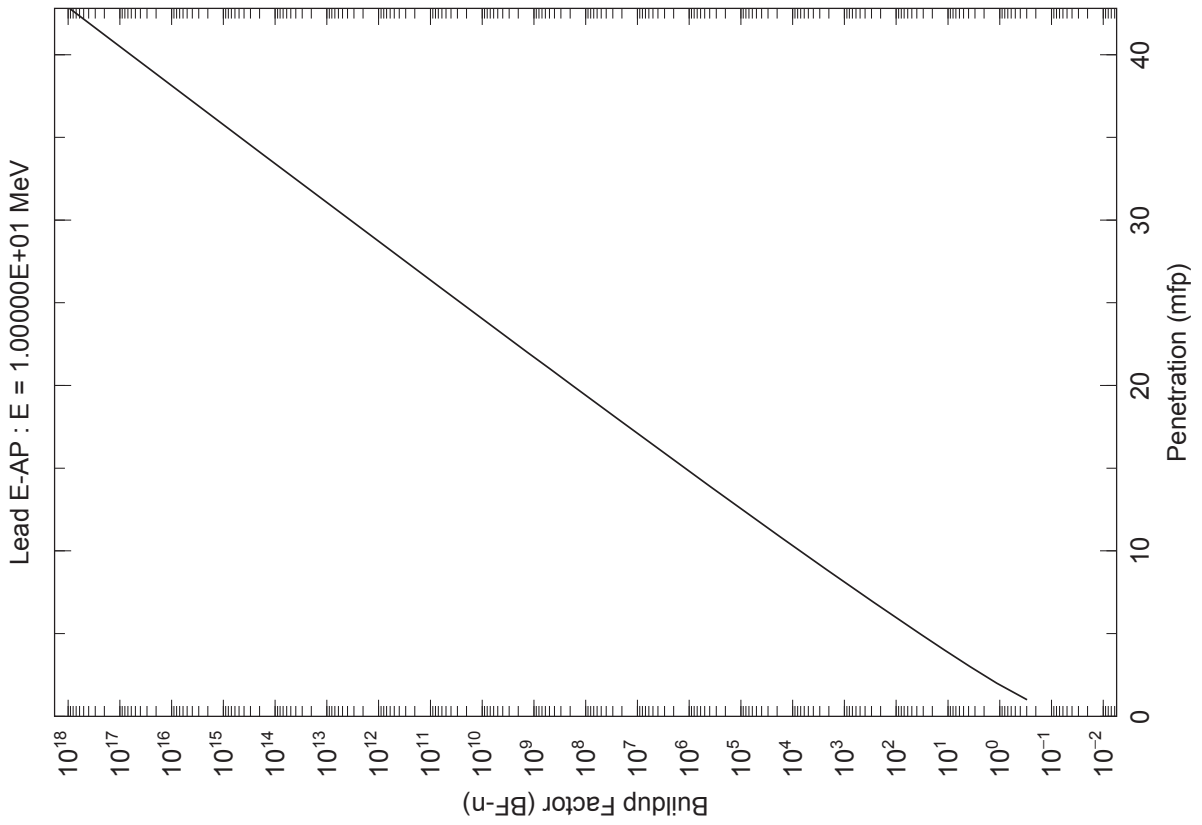
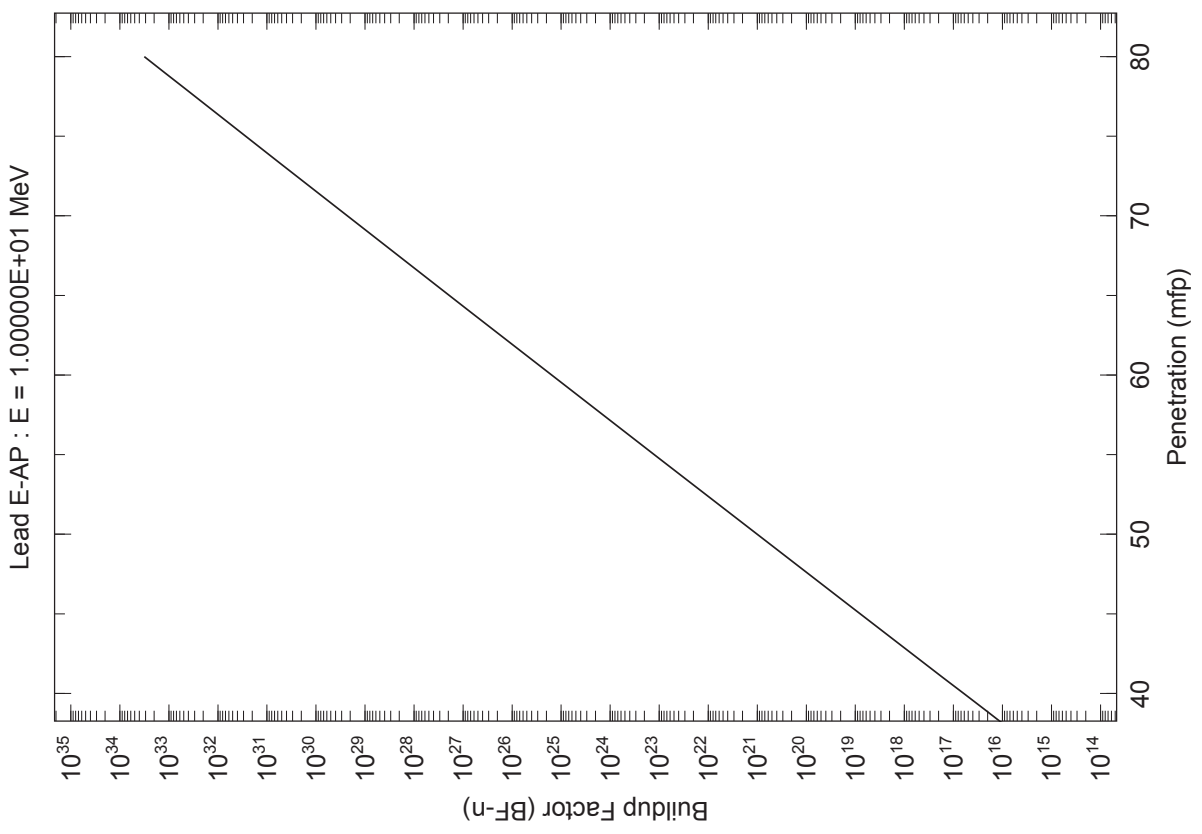


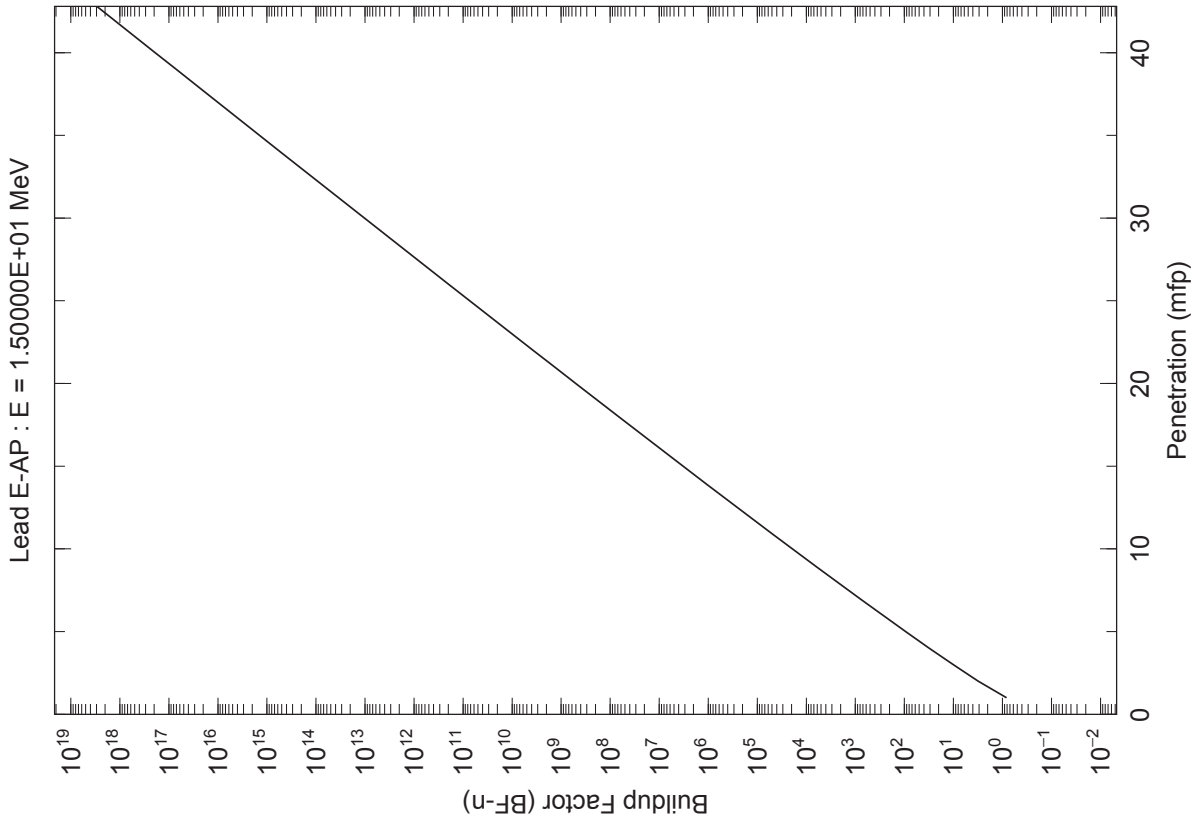
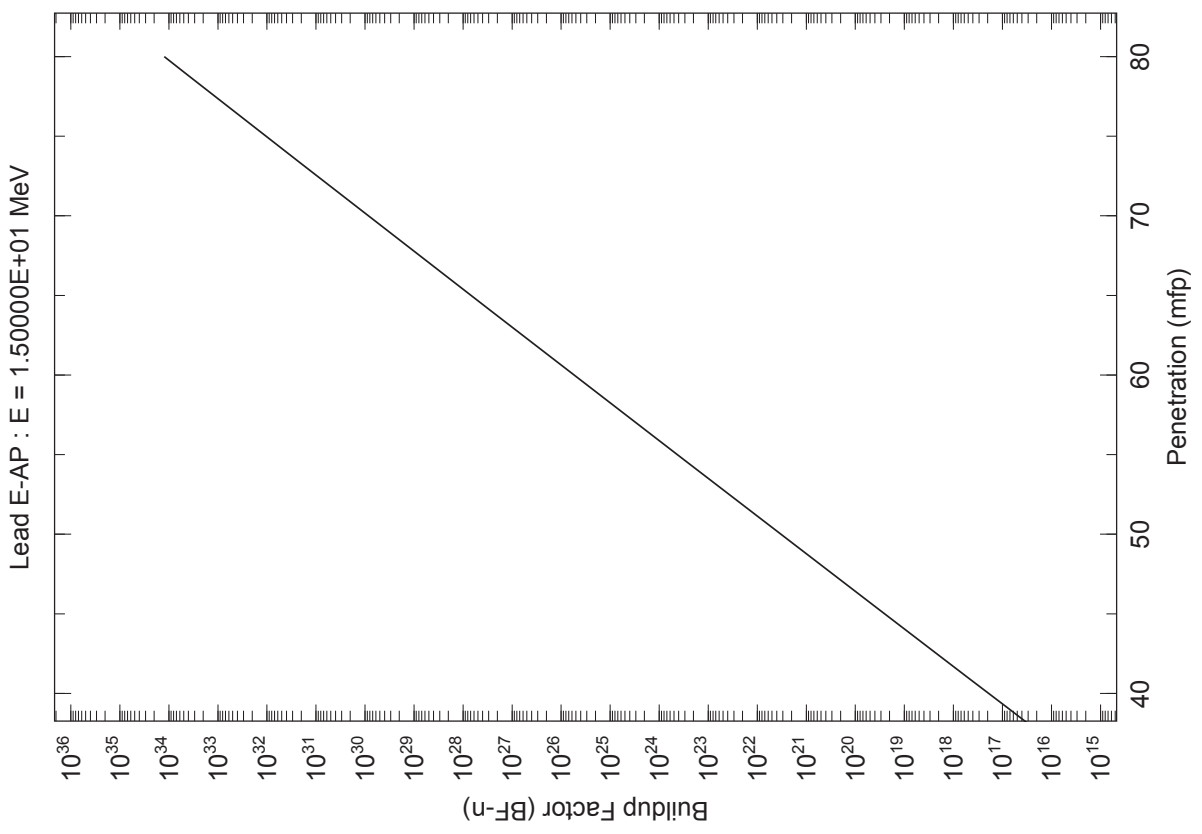


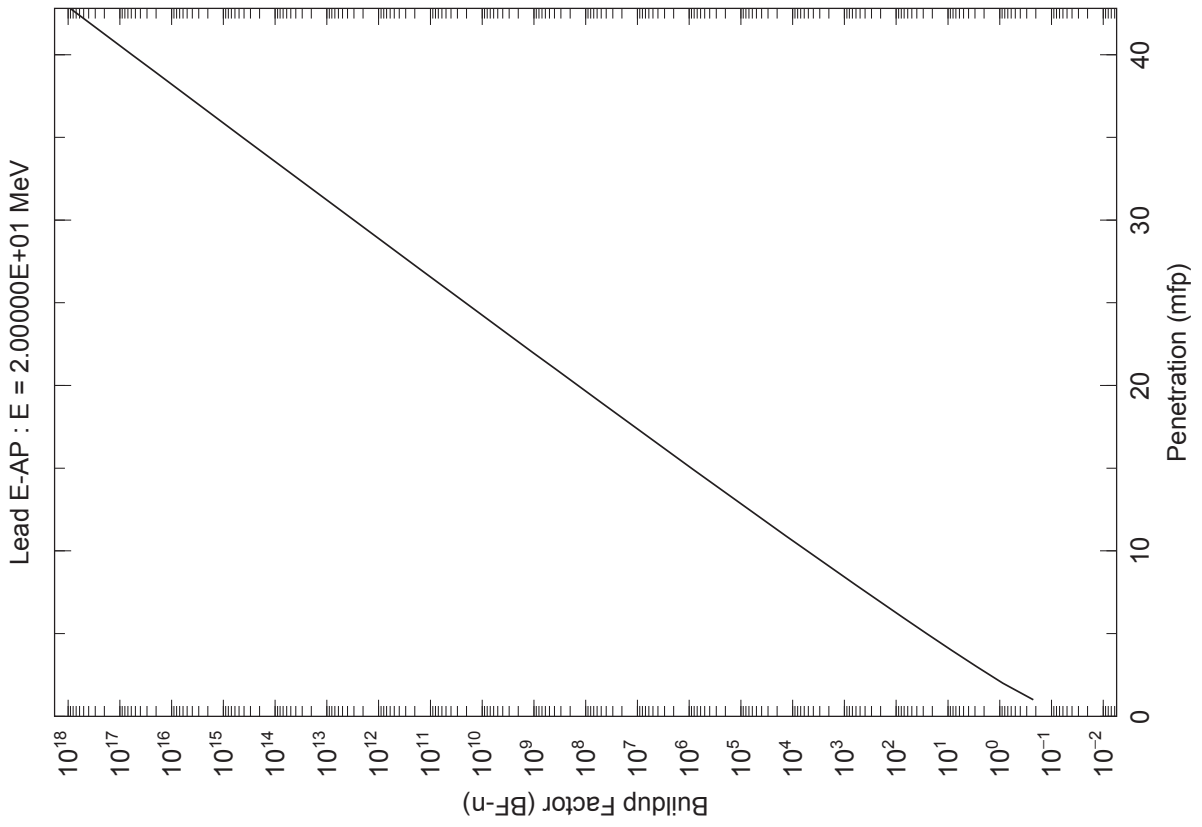
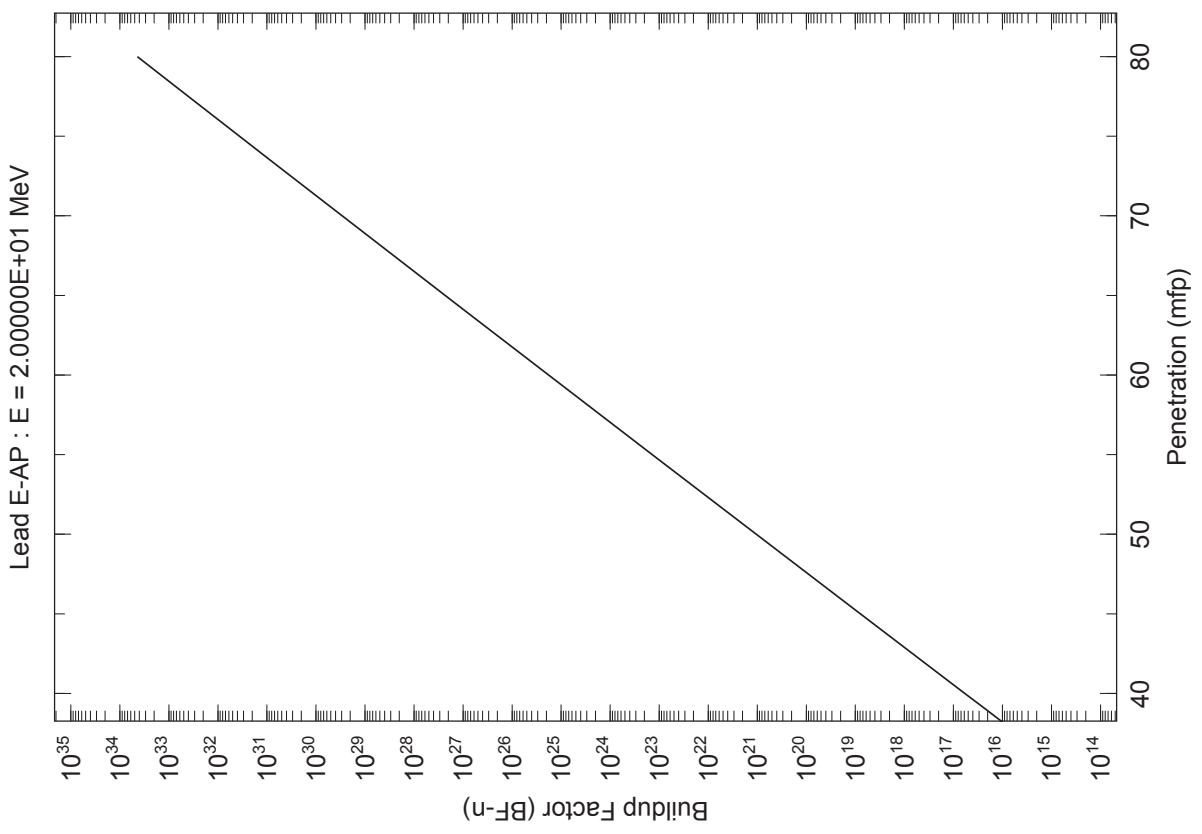




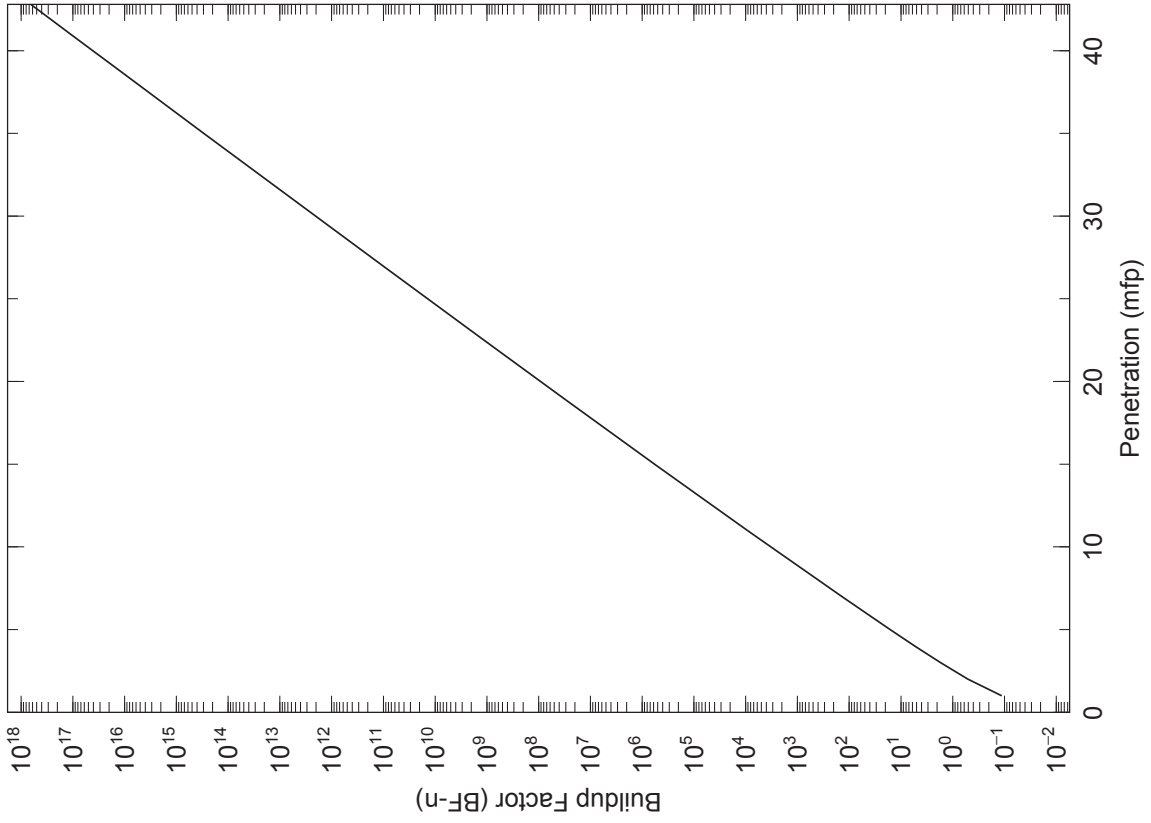




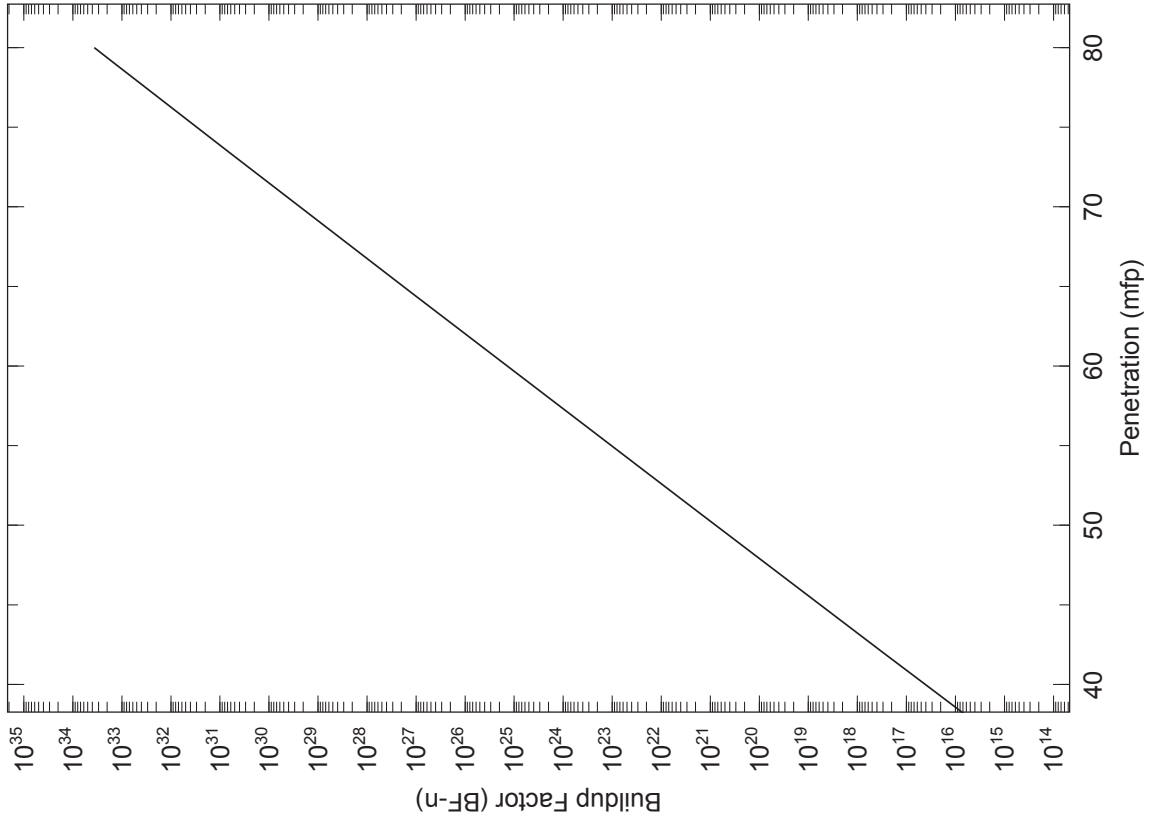




Lead E-AP : E = 3.00000E+01 MeV



Lead E-AP : E = 3.00000E+01 MeV



## 付録 X

ガンマ線遮蔽線量計算コードの基本設計内容

## ガンマ線遮蔽線量計算コードの基本設計内容

### 1. 線源エネルギーに依存する線源強度の算出

#### 入力

核種           放射能 (Bq)

Nuclide        A

ただし、 $A(\text{Bq})=A(\text{disintegration/s})$

RI 核種線源 (光子発生率) ライブラリは、線源核種 Nuclide の放出するガンマ線束数と放出エネルギーおよび光子発生率を収録する。線源強度(photons/s) Sint(j)との関係を以下に示す。

Nuclide	線源エネルギー	光子発生率	線源強度
Nray(j)	keV	<b>photon/disintegration</b>	photons/s
1	E(1)	Yield(1)	Sint(1)
2	E(2)	Yield(2)	Sint(2)
.			
Nray	E(Nray)	Yield(Nray)	Sint(Nray)

ここで Nray は、Nuclide の放出するガンマ線束数を指す。  
このとき線源エネルギー E(j)に依存する線源強度(photons/s) Sint(j)は、次式で与えられる。

$$\mathbf{Sint(j)=A \times Yield(j)}$$

### 2. 係数データの補間

線源エネルギー E(j)に相当する 3 種類の係数の値を内挿処理で求める。内挿法は 4 点 (三次) ラグランジュ補間公式を用いる。エネルギー内挿処理について全て log-log 内挿とする。唯一、MeanFreePath の内挿処理(ビルアップ係数のみ) は、linear(MFP)-log 内挿とする。

Nelm 物質の密度を定義するために利用する元素数

MatB 入力で与えるビルドアップ代表物質を示す変数

Sort 整備されている線量換算係数の線量種類数

線源エネルギーE(j) に対する内挿値を、以下に示す係数について求める。

jlib ライブラリテーブルを定義するエネルギー点数

			内挿スケール
線量換算係数	DF(jlib, sort) → DFint(j, sort)		log-log
質量減衰係数	$\mu_m(jlib, Nelm) \rightarrow \mu_{mint}(j, Nelm)$		log-log
ビルドアップ係数	B(jlib, thick, MatB, sort) → Bint(j, thick, sort)		log(Energy)-log
			linear(MFP)-log

### 3. 体積線源領域のメッシュ分割

線源領域は幾何形状として/RCC（直方体）/RPP（円筒）/SPH（球体）/で与える。3軸の分割数/Lso/Mso/Nso/として分割座標/divS/divM/divN/( $\theta$  と  $\phi$  はラジアン単位)を入力する。

座標系	分割数	分割座標の入力
x r $\rho$	Lso	divS(l), l=1, Lso+1
z z $\theta$	Mso	divM(m), m=1, Mso+1
y $\phi$ $\phi$	Nso	divN(n), n=1, Nso+1

3軸に沿った微小体積線源の相対的な強度を示すパラメータ/FL/FM/FN/を求める。

・デカルト座標

$$\begin{aligned} x : FL(l) &= \text{divS}(l+1) - \text{divS}(l) \\ z : FM(m) &= \text{divM}(m+1) - \text{divM}(m) \\ y : FN(n) &= \text{divN}(n+1) - \text{divN}(n) \end{aligned}$$

・円筒座標

$$\begin{aligned} r : FL(l) &= (\text{divS}(l+1)**2 - \text{divS}(l)**2)/2 \\ z : FM(m) &= \text{divM}(m+1) - \text{divM}(m) \\ \phi : FN(n) &= \text{divN}(n+1) - \text{divN}(n) \end{aligned}$$

・球座標

$$\begin{aligned} \rho : FL(l) &= (\text{divS}(l+1)**3 - \text{divS}(l)**3)/3 \\ \theta : FM(l) &= \text{divM}(m+1) - \text{divM}(m) \\ \phi : FN(n) &= \cos(\text{divN}(n)) - \cos(\text{divN}(n+1)) \end{aligned}$$

ここで、微小体積線源  $V_{unit}(l, m, n)$  と線源領域の体積  $V_{src}$  は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} V_{unit}(l, m, n) &= FL(l)FM(m)FN(n) \\ V_{src} &= \sum_{l=1}^{Lso} FL(l) \cdot \sum_{m=1}^{Mso} FM(m) \cdot \sum_{n=1}^{Nso} FN(n) \end{aligned}$$

微小体積代表点 P(l, m, n)における体積で重み付けする線源強度補正係数は次式で定義される。

$$Wgt_{src}(l, m, n) = \frac{V_{unit}(l, m, n)}{V_{src}}$$

#### 4. 遮蔽材組成入力

Nelm 物質の密度を定義するために利用する元素数

Nmat 計算体系の組立に利用する物質数

RhoPrt(n,m) 物質 m=1,Nmat を構成する元素 n=1,Nelm の部分密度 (g/cm<sup>3</sup>)

#### 5. 遮蔽材による減衰計算とガンマ線エネルギーフラックスの計算

$\mu_m$  : 質量減衰係数(cm<sup>2</sup>/g)

$\mu_l$  : 線吸収係数(cm<sup>-1</sup>)

$\rho$  : 密度(g/cm<sup>3</sup>)

t : 透過長さ(cm)

とおくと、減衰率は次式で表せる。

$$Atten = e^{-\mu_l t} = e^{-\mu_m \rho t}$$

以下の処理を、線源領域分割数 (Lso \* Mso \* Nso) 回繰り返す。

Kmax 微小体積を代表する線原点—計算点間の透過線上に介在する領域の数

Leg(k) 透過線上にある領域の透過距離 k=1,kmax (cm)

とにおいて幾何形状分析処理で Leg(k)が求められたら、次式を求める。

$$Smat(n) = \sum_{k=1}^{kmax} \sum_{m=1}^{Nmat} Leg(k) RhoPrt(n, m)$$

この式は  $Atten = e^{-\mu_l t} = e^{-\mu_m \rho t}$  の  $\rho t$  の項を物質構成元素にのみ依存する変数  $Smat$  として与える。

次に線源エネルギーE(j)の線束について透過線上の物質による吸収を考慮せずに空間の広がりによる減衰だけを考慮したガンマ線フラックス  $Flux0(j)$ を次式で定義する。

$$Flux0(j) = Wgt_{src}(l, m, n) \frac{Sint(j)}{4\pi R^2}$$

ただし、

R 線原点—計算点間の距離(cm)、 $R = \sum_{k=1}^{kmax} Leg(k)$ でもある。

透過線上の物質による吸収を考慮したガンマ線フラックス  $Flux1(j)$ を次式で定義する。

$$Flux1(j) = Flux0(j) e^{-\sum_{n=1}^{Nelm} Smat(n) \mu_m \rho t(j, n)}$$

代表物質 MatB によるビルドアップ効果を考慮したガンマ線フラックス  $FluxR(j, sort)$  をビルドアップと線量換算係数データの整備された線量種類数(Isort)分について次式で求める。



$$\mathbf{Flux}_R(j, \text{sort}) = \mathbf{Flux1}(j) \mathbf{BintDT}(j, \text{sort})$$

$\mathbf{BintDT}(j, \text{sort})$  は、 $\text{TransMFP} = \sum_{n=1}^{N_{elm}} \mathbf{Smat}(n) \mu_m \mathbf{int}(j, n)$  として、 $\mathbf{Bint}(j, \text{thick}, \text{sort})$  を  $\text{MeanFreePath}$  単位に着目して内挿により求める透過距離  $\text{TransMFP}$  に当たるビルドアップ係数となる。

最後に、それぞれのフラックスの積算処理を行う。

## 6. 様々な線量種類に対応した線量率の計算

上で定義した3種類のガンマ線フラックスに、整備した線量種類数( $\text{Isort}$ )分の線量換算係数を乗じることで3種類の線量率を次式で与える。

$$\mathbf{DOSE0}(j, \text{sort}) = \mathbf{FLUX0}(j) \mathbf{DFint}(j, \text{sort})$$

$$\mathbf{DOSE1}(j, \text{sort}) = \mathbf{FLUX1}(j) \mathbf{DFint}(j, \text{sort})$$

$$\mathbf{Dose}_R(j, \text{sort}) = \mathbf{Flux}_R(j, \text{sort}) \mathbf{DFint}(j, \text{sort})$$

ここで、

$\mathbf{DOSE0}(j, \text{sort})$  空間の広がりによる距離減衰のみ考慮した線量

$\mathbf{DOSE1}(j, \text{sort})$  吸収を考慮し散乱効果を見込まない直接線量

$\mathbf{DOSE}_R(j, \text{sort})$  吸収と散乱効果を取り込んだ線量

となる。主に参照されるビルドアップを考慮した線量は  $\mathbf{DOSE}_R(j, \text{sort})$  である。

$\mathbf{DOSE0}(j, \text{sort})$  は、RI 核種の減衰率の算出において参照する。

最後に、それぞれエネルギー  $j$  にわたって積分することで、合計線量を得る。

$$\mathbf{TDOSE0}(\text{sort}) = \sum_{j=1}^{N_{ray}} \mathbf{DOSE0}(j, \text{sort})$$

$$\mathbf{TDOSE1}(\text{sort}) = \sum_{j=1}^{N_{ray}} \mathbf{DOSE1}(j, \text{sort})$$

$$\mathbf{TDOSE}_R(\text{sort}) = \sum_{j=1}^{N_{ray}} \mathbf{DOSE}_R(j, \text{sort})$$

$\mathbf{TDOSE}_R(\text{sort})$  がビルドアップを考慮した線量の計算結果である。

以 上

付録XI

成果発表資料

(日本原子力学会 2021 年春の年会)

## γ線簡易遮蔽線量計算法の適切な見直しに関する研究

平尾好弘(海技研)、延原文祥(東京ニュークリア・サービス)、大西世紀(海技研)

1

### 目的と背景

放射線施設の許認可や基本設計で用いられるガンマ線の簡易遮蔽計算コードのフレームワークを、最新の法令・勧告・知見をもとに見直して、各所の需要に  
応えていける国産コードを新設する。

- ・ 最新の計算環境を活用して、古いQADに対する積年の不満を解消
- ・ 計算プロセスの透明性重視（与えられた情報で人力でも結果を確認可）
- ・ 計算に使用するデータの根拠と再現性を重視（誰でも確認・拡張可）

・平成24～26年：放射線工学部会 国産安全解析コード開発戦略検討ワーキンググループ

放射線工学に係る解析コードの開発課題や開発体制について検討

→ 安全解析コード開発に携わる人材育成のため、解析コードやデータの国内における持続的な改良や発展に資する体制の構築とそれを維持する仕組みが不可欠である。遮蔽解析に使用される簡易解析コードについて、米国で半世紀近く前に開発されたものがベースであり、それらの多くに開発元のサポートは既がない。

・平成27年～：放射線工学部会 簡易遮蔽解析コードレビューワーキンググループ

簡易遮蔽解析コードの見直しに係る課題を実コードに基づいて具体的に検討

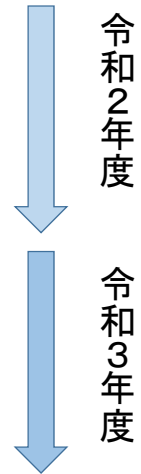
→ ガンマ線の点減衰核積分法コードの新設に向けた仕様検討  
→ 新設資金獲得活動 → 規制庁安全研究公募採択(令和2～3年、2年間)

2

## フレームワーク見直しの手順とコード新設計画

- 計算コードの実態調査に基づく見直し範囲検討
  - ✓ 最新の規制利用コードの仕様調査と受容性評価
  - ✓ 見直し範囲の明確化に係る専門家ヒアリング
  - ✓ 新設コードの構成・仕様の決定
- データと計算法の見直しとコード開発
  - ✓ ICRP新勧告を反映した簡易計算用データの作成
  - ✓ 最新の知見に基づく簡易計算法の適用性拡張
  - ✓ 上を組み入れた新設コードの設計・開発
- 新設コードのV&Vと技術ガイド作成
  - ✓ 新勧告反映、及び適用性拡張の妥当性検証
  - ✓ 新勧告対応の計算技術ガイド作成

受託研究  
スケジュール



3

## 最新の規制利用コードの仕様調査

コード名称 ソフトウェア名称	開発国	最終更新・ 文献発表年	配布状況	妥当性確認状況
MicroShield	アメリカ	2020年	商用 (Grove Software)	開発元によるV&V資料 V&Vパッケージ提供
RANKERN	イギリス	2016年	商用 (The ANSWERS Software)	開発元によるV&V資料
NARMER-1 (MERCURE-6の 後継コード)	フランス	2017年	限定公開 (フランス原子力庁CEA)	開発元によるV&V資料

- アメリカのMicroShieldを仕様調査の対象に選定
  - ✓ V&Vを実施してレポートするV&Vパッケージソフトを併売
    - ✓ V&Vの検証項目と方法を調査することが可能
  - ✓ 2020年8月に最新のMicroShield Pro Ver.12がリリースされたばかり
    - ✓ 勧告・知見の対応状況を知るのに好適

4

### 調査したコード仕様の受容性評価

- コードマニュアルを参照して技術仕様を整理
  - ✓ 入力の作成、出力の表示、及びサポートツールの機能
- V&Vパッケージを参照して仕様毎のV&V手法を整理
- 技術仕様とV&V手法毎に、新設コードへの受容性評価
  - ：新設目的と専門家意見に照らして新設コードで採択する。
  - △：部分的に採択する。部分的な修正を要する。
  - ×：採択不要、優先度低。場合によっては代替仕様を提案



新設コードの構成・仕様案を決定

5

### 外部専門家による研究レビュー体制

- 受託元の研究班会合（一月半に一度）
  - プログラムオフィサー、同補佐、調査官
  - 受託事業目的に沿って研究活動の妥当性を監査
  - 受託元が抱える実際的な関心と課題をインプット  
Ex) 30MeVまでの高エネルギーガンマ線に対応
- 研究レビュー委員会（12月と3月に開催）
  - 12名の外部専門家委員（医療2、加速器2、核融合1、発電3、重複4）
  - 各位の幅広い専門領域から情報・意見をインプット  
Ex) 眼の水晶体の外部被ばく線量評価法の明確化（1月、委員講演）  
→（実用量）3mm深さ線量の計算を検討に追加

6

## 新設コードの構成・仕様案 → これに沿ってデータとコードを開発中

大項目	中項目	概要	GUIのサポートツール
動作・開発環境	プラットフォーム、言語等	WindowsPC、オンプロミス設計、OpenMP対応、C系言語(C++)	—
計算入力作成	遮蔽体系入力	体系要素(線源・遮蔽体・線量評価点)の形状と座標を定義し、各要素に線源情報と材料情報を割り当てる。 <b>体系要素の空間投影図を対話的に表示しながら入力</b>	CGIによる形状設定 体系の投影図表示
	材料情報入力	体積線源・遮蔽体に割り当てる材料情報(組成、密度、減弱係数、ビルドアップ係数(制動放射含む))を定義する。 任意の組成から成る <b>カスタム材料を定義して、材料情報を自動生成</b>	組込材料データ作成 カスタム材料データ作成
各入力データは、個別にファイルで管理し、再利用	線源情報入力	線源情報(RI核種、エネルギー毎放出率)を直接入力 または <b>RI核種ライブラリから選択参照して読み込む</b> 。 体積線源のメッシュ分割手法の選択 ( <b>ガウス積分の採用</b> )	線源データ作成 RI核種インポート
	ビルドアップ係数レファレンス材料選択	散乱ビルドアップ計算する遮蔽体を、線源と線量評価点の間に引いた透過線上に存在する遮蔽体の中から選択する。 <b>透過線上に存在する体系要素の情報を表示して、体系要素の位置関係や、使用される材料情報が想定どおりか確認する。</b>	透過線の通過領域情報
	遮蔽計算法の適用性拡張	<ul style="list-style-type: none"> <li>高エネルギーガンマ線に対応、光中性子の寄与考慮</li> <li>特定の二重層遮蔽に対応</li> <li>スラブ遮蔽の斜め透過に対応</li> </ul>	関係するデータの作成
計算出力表示	計算出力のサマリー	非衝突線フルエンス、各線量種類の出力、 計算に用いたデータや自動作成した情報の表示・ <b>グラフ化</b>	グラフ作成ライブラリ連携等

太字は、従来のQAD系の遮蔽計算コードで対応していない新設仕様

7

## 簡易計算用データの見直し対応

新勧告に係る検討項目	小項目
遮蔽材料の遮蔽計算用データ整備 (ICRP Pub.116の線量換算係数に対応)	遮蔽材料の選定 各材料の組成・密度の見直し // 減弱係数の整備 // ビルドアップ係数を出力線量種類毎に整備
出力する線量種類の選定 線束から各線量への換算係数データ整備	<ul style="list-style-type: none"> <li>実効線量 (ICRP116, 照射体系6種全て)</li> <li>皮膚等価線量(ICRP116, AP照射、男女別)</li> <li>眼の水晶体等価線量(ICRP116, AP照射) → 外部被ばく評価に関して、実用量の考慮検討</li> <li>空気カーマ率 (ICRP74, &lt;10MeV)</li> </ul>
最新RI核種ライブラリのRI線源データ利用	ICRP Pub.107 (DECDC2)からRI核種のイールドを直接参照
高エネルギーガンマ線への対応	高エネルギーガンマ線(<30MeV)に対応(PET施設等想定) 光核反応による光中性子の線量寄与を考慮

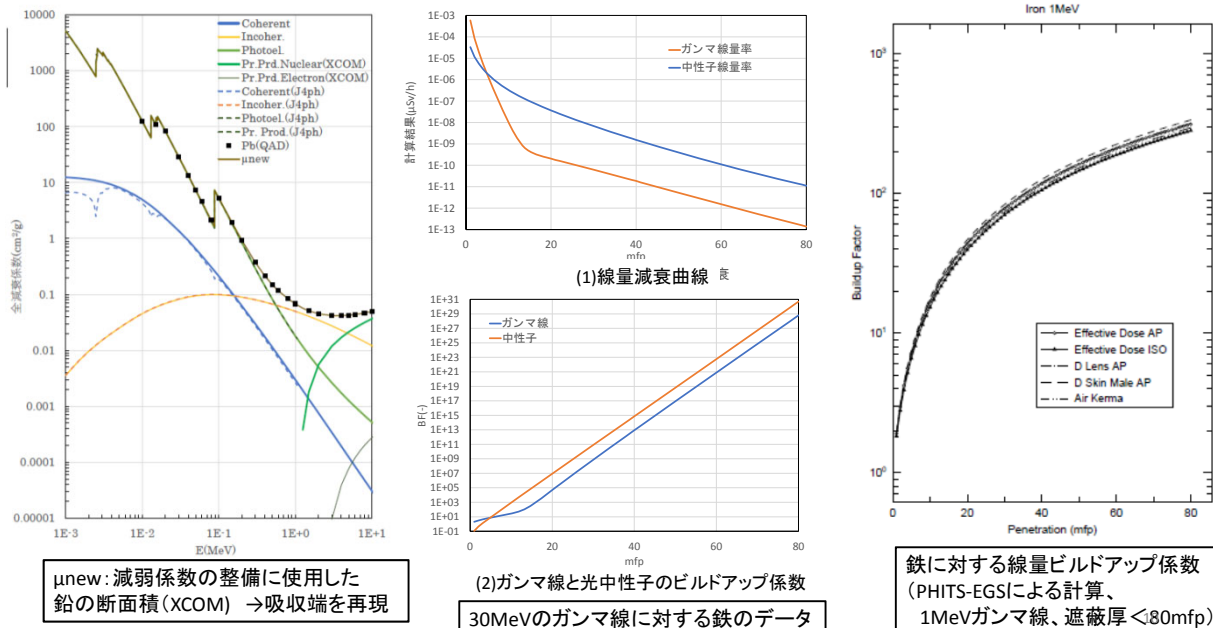
8

## 簡易計算用データの見直し対応(進捗状況)

新勧告に係る検討の小項目	進 捗
遮蔽材料の選定 (組込材料リスト)  各材料の組成・密度の見直し // 減弱係数の整備 // ビルドアップ係数を線量種類毎に整備  // 光中性子の線量寄与を整備	実用性の高さから単元素6核種、混合物7種に決定 ・ 空気、水、コンクリ、鉛ガラス、アクリル樹脂、PE、土壌、SUS それらの組成・密度を決定し、根拠資料を作成 減弱係数のデータ整備 モンテカルロ法 (PHITS-EGS) による計算手順の検討 鉄と鉛について係数の整備 (10keV~30MeV、0.5~80MFP)  中性子の線量寄与をガンマ線と分けてデータ整備。捕獲ガンマ線の寄与は一次ガンマ線の寄与と合算して扱う。 下記の勧告・標準を参照し、ガンマ線の換算係数データ整備 (ICRP 116) 実効線量、眼の水晶体及び皮膚の等価線量 (≤ 30MeV) (ICRP 74) 空気カーマ (≤ 10MeV) (IEC62387, JIS4345) 眼の水晶体評価に係る実用量Hp(3)
線束から各線量への換算係数データ整備	

9

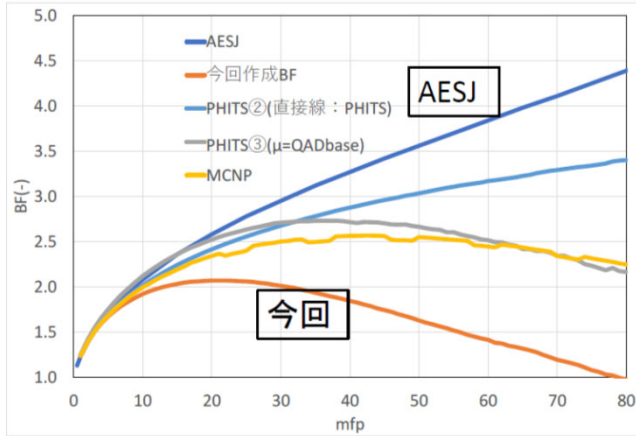
### 遮蔽計算用データの整備の例 (遮蔽材:鉄、または鉛)



今回、コヒーレント散乱を考慮した輸送計算でデータ整備

QAD-IEのBFとの比較 材質:鉛、0.5MeV-γ

QAD-IEベースと今回の本質的比較  
①密度変更、②計算コード変更  
密度 鉄 7.86->7.8、鉛11.34->11



今回、輸送計算でコヒーレント散乱を考慮したため、断面積が若干大きくなり、BFが低下傾向となった。



エネルギー低い領域  
原子番号大きい物質で  
影響あり

BF<1になったのは、減衰係数に、コヒーレント散乱を含めなかったことが原因、それでも厚さでBFの値は少し落ちてくる。

遮蔽線量評価の適用性拡張

最新の線量計算法に係る検討項目	概要
新勧告に対応したガンマ線遮蔽計算コードの開発	(2)で整備した新勧告対応データを用いた遮蔽計算コードを開発する。次年度、実際に計算を行って妥当な結果が得られるか評価する。
下記について、遮蔽計算法の適用性拡張を試み、計算コードに取り込んで妥当性を確認する。	
高エネルギーガンマ線の光核反応による光中性子の線量計算	光中性子をガンマ線と分けて遮蔽計算用データを整備しておき、個別に線量寄与を計算して合算する。
特定の二重層遮蔽対応	次年度予定。コンクリートと鉄板等、特定の頻出材料を重ねた二重層遮蔽体の透過線量を計算する。
スラブ遮蔽に対する斜め透過線量計算	次年度予定。スラブ遮蔽体に対して、従来の垂直入射だけでなく、斜め方向に透過する場合の線量を計算する。



### 簡易遮蔽計算コードの開発項目

	項目	詳細項目	進捗	備考
アナリスト ベース (GUI)	計算入力ファイル読込	幾何形状	完了	直方体、球、円筒、組み合わせ立体
		線源	完了	点、直方体、球、円筒
		線量評価点	完了	任意点、2次元メッシュ、3次元メッシュ
	データライブラリ読込	減弱係数ファイル	完了	
		ビルドアップ係数ファイル	完了	
		換算係数ファイル	完了	眼の水晶体の被ばく評価に実用量の考慮が追加
		RI核種ライブラリ	今年度	
	エネルギー補間	材料組成ライブラリ	完了	
		減弱係数、ビルドアップ係数、換算係数	今年度	任意のエネルギー群構造に対してデータを内挿
	線量計算	線源分割	今年度	
直達線の減弱計算		今年度		
ビルドアップ係数の散乱寄与		今年度		
線量計算		今年度		
結果出力	計算入力エコー	今年度		
	使用ライブラリデータ表示	今年度		
	計算結果表示	今年度	グラフ化、可視化は次年度	
グラフィック (GUI)	計算入力編集	幾何形状	完了	直方体、球、円筒、組み合わせ立体
	計算結果可視化	線源、及び線量評価点	次年度	
		2次元、3次元	次年度	
	サポートツール		次年度	体系の簡易投影図表示のみ完了

### 開発中コードのスクリーンショット

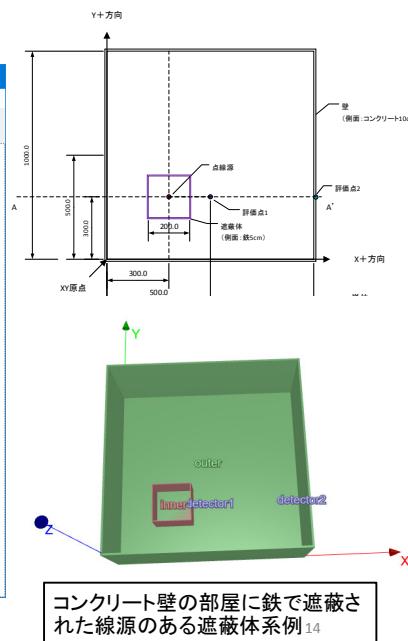
The screenshot shows a code editor with a GUI input support window. The code defines a zone with materials like WATER, CONCRETE, and AIR, and includes source and detector definitions. A 3D model of a room with various zones and a detector is displayed.

**GUI入力サポート**

**計算出力とエラー表示**

**対話的な入力設定**

**遮蔽体系要素(線源・遮蔽体・線量評価点)の3次元投影図による確認**



## ま と め

- 研究の目的・背景、フレームワーク見直しの手順とコード新設計画
- 米国の規制利用コードの仕様調査を行い、外部専門家を交えて仕様毎に国内事業への受容性評価を実施し、新設コードの構成・仕様を決定した。
- ICRP2007年勧告に対応した簡易計算用データの作成方針
  - 現状、鉄及び鉛から整備、残りの材料については次年度
- 簡易計算法の適用性拡張の方針 →次年度に継続
- 新設コードの開発方針 →次年度に継続
  - 現状、仕様案に対してテキストベースの入出力による動作を確認
- 簡易遮蔽計算コードレビューWGのメンバーに、データ整備と妥当性評価をご協力頂いています。簡易計算に関心のある計算協力者を募集中です。

15