



# ビルドアップ係数計算のための 光子深層透過問題における光核反応の影響の解説

令和6年6月15日

第一回ラドネット研究会

海上技術安全研究所 大西世紀

**Nuclear Science and Engineering** >

Volume 198, 2024 - Issue 2: Special Issue Featuring Papers from the 14th International Conference on Radiation Shielding and 21st Topical Meeting of the Radiation Protection and Shielding Division (ICRS 14/RPSD 2022)

[Submit an article](#)[Journal homepage](#)

This Journal



Advanced search

91

Views

0

CrossRef  
citations to date

0

Altmetric

Research Report

# Effect of Photonuclear Reactions on the Photon Deep Penetration Problem for Buildup Factor Calculation

Seiki Ohnishi  , Fumiyoshi Nobuhara & Yoshihiro Hirao

Pages 517-526 | Received 04 Dec 2022, Accepted 20 Jan 2023, Published online: 17 Apr 2023

 Cite this article <https://doi.org/10.1080/00295639.2023.2172309> Check for updates Full Article Figures & data References Citations Metrics Reprints & Permissions[Read this article](#)

## Abstract

Photon deep penetration calculations were conducted to create a buildup factor database for a new point kernel code. The calculations included the effects of photonuclear reactions, which were not considered in previous buildup factor calculations, and the target energy was extended up to 30 MeV. For media with large photonuclear cross sections, the contribution of the neutron dose becomes significant. For example, in iron at 80 mean free paths, the total dose is  $10^{24}$  times larger than when the photonuclear reactions are not considered. On the other hand, it was found that if photonuclear reactions are ignored, the calculation results are not necessarily conservative in media with a significant neutron shielding capacity, such as water.

## Related research

# ICRS 14/RPSD-2022

14th International Conference on Radiation Shielding and  
21st Topical Meeting of the Radiation Protection and Shielding Division

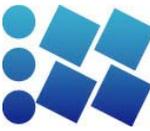


## Effect of Photonuclear Reaction on Deep Penetration Problem for Build-Up Coefficient Calculation

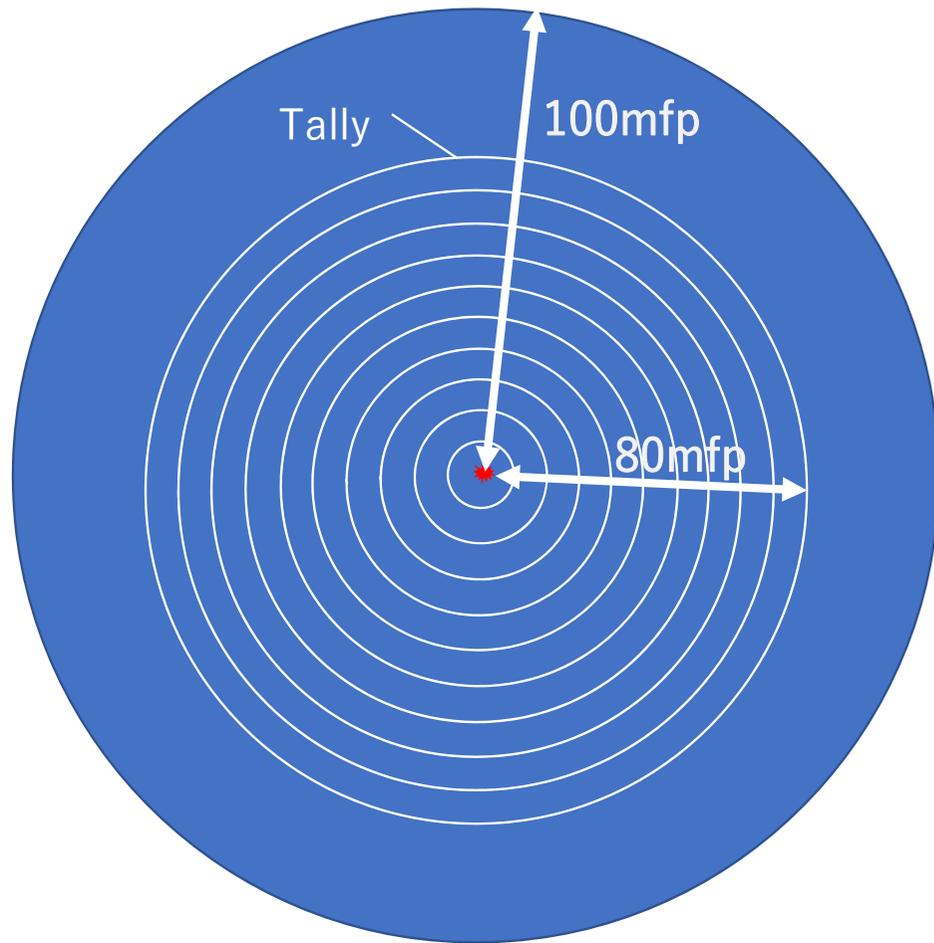
Ohnishi Seiki

National Maritime Research Institute, Japan

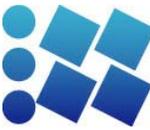




# POKERコードのためのビルドアップ係数計算

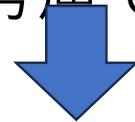


- MCNP6.2 + ENDF/B-VI + IAEA-PD
- 半径100mfp相当の球殻体系
- 中心に単一エネルギー光子点線源 (最大30MeV)を置き
- 80mfpまで1mfpごとに線量を計算
- 無限媒質体系とするために反射体領域を20mfp付加
- 光核反応を考慮
- レイリー散乱を考慮

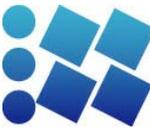


# 分散低減法の採用

- 80mfpまでの線量計算で、光子、中性子ともにFSD(相対標準偏差) < 4%が目的
- 試行粒子の分布(population)をコントロールする必要がある
- 計算ケースは大量(エネルギー一点数[数十]×材料[13種])にあるため手動での設定は不可能
- 将来的には核データの見直しなどによる変更は考えられるので自動的に設定できる必要がある
- ADVANTGコードは光核反応を考慮できない



自動反復スクリプトによるウェイトウインドウ設定を採用



# 主要な分散低減法が利用しにくい理由

## 指数減衰法

- 深部では減衰傾向が変わるので単一の指数減衰は用いることができない
- 光核反応があるとフラックスは指数減衰に当てはまらない

## 密度減少法

- 密度減少法ではWWGを使うが、WWGは複数タリーを対象にできない(今回は光子・中性子対象で球殻全層をtallyとする)
- どれくらいのstepで密度を増加させるか等のパラメータ設定は材料ごとに必要

## CADIS法

- ADVANTG(denovo)は光核反応が扱えない

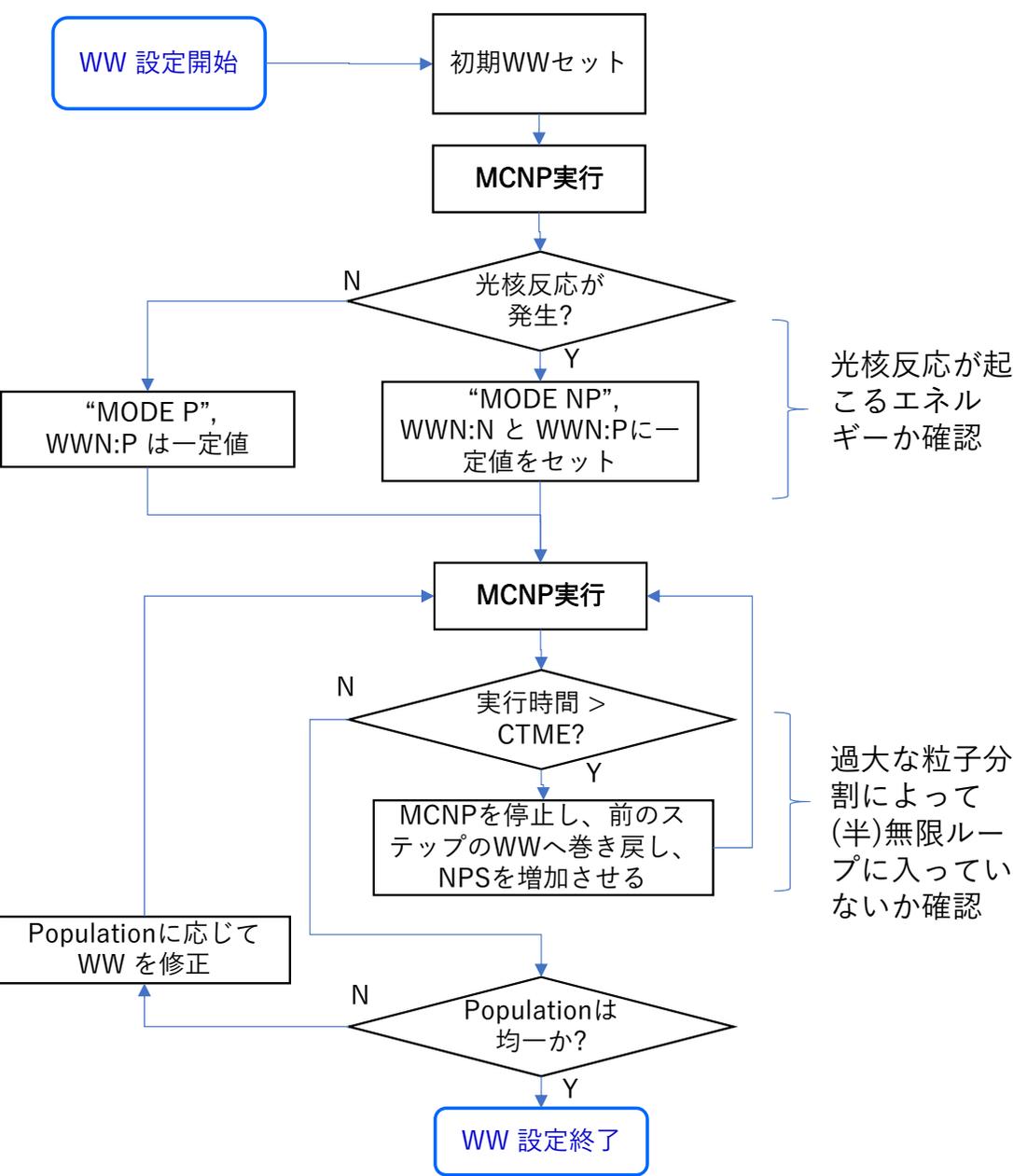


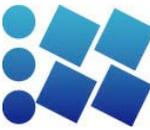
# 光核反応を考慮した反復によるWW設定

- セルベースのWWを使用
- セルのpopulationが均一になるようにWW下限値を設定

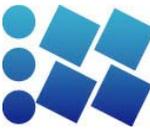
基本的な反復の流れは

1. MCNPを実行
2. セルのWW下限値にpopulationの比例した数を乗算する
3. 1に戻る

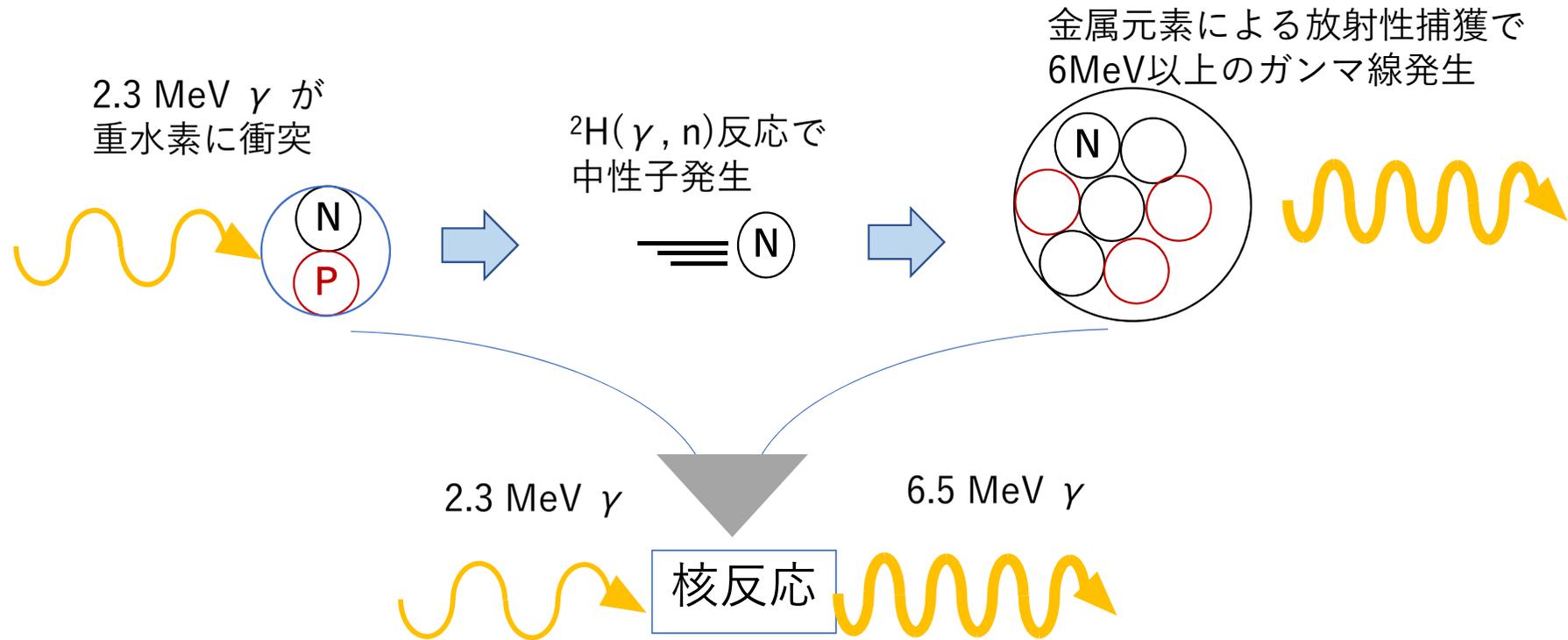




- MCNPのWW下限値は絶対値を与える必要がある。光子の場合は初期値を0.5にすればよいが、中性子は初期値をいくつに設定すべきか？  
→ 平均的な光中性子weightを用いる。MCNPのoutpファイルのsummaryにヒストリ平均光中性子weightがあるので、それを使う。
- 逐次修正するときの一回あたりの計算時間はどのように設定するか？  
→ MCNPのoutp summaryにphotonuclear中性子発生イベント数があるので、それが統計的に有意な数値(2000程度)を下回ったら計算時間不足として次の回の実行時間(CTME)を伸ばす
- 粒子分割が多すぎるとMCNPの計算が終わらない(Ctrl-Cでも制御が戻らない)ようになるがこの状態にどう対処するか？  
→ MCNPは別プロセスで実行し、CTMEで設定した時間を過ぎたら強制的にプロセスを殺す。WeightWindowの状態は何回か前の状態に戻してCTMEを伸ばす

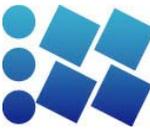


# 光子は上方散乱する？



光核反応を考慮すると稀に線源光子より高エネルギーの光子が発生する！

このような高エネルギー光子は透過力が大きいいため、発生時にFSDが大きくなる



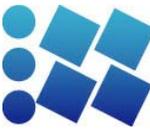
# 「稀にしか起こらない重大イベント」を 「よく起こる軽微なイベント」へ

中性子に起因する二次 $\gamma$ 線粒子の数を(平均値を保存するよう weightを減らして)増やせば良い

## PIKMTカード

- 拡張MT番号ごとに反応の発生粒子数を与える
- **！危険！** 指定されなかったMT番号の反応は起きなくなる
  - 光子生成反応はすべて指定する必要がある
  - 例えばNa-23の光子生成拡張MT番号は500個くらいある

PIKMTカードを使うのはコンクリートと土の場合のみにする



# 拡張MT番号

励起核が基底状態へ落ちるまでには複数の経路があるので、それらの経路を区別したID番号[\*]



- MT=3は普通はRedundant扱い
- 光子発生反応をどのMT番号で記述しているかはACEファイルによる  
大半はMT=50~90(非弾性)と102(捕獲)だが、16(n,2n)や22(n,α)の有る核種も  
→ ACEファイルから読み取るしか網羅する方法はない

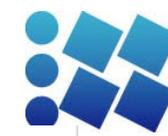
[\*] MCNP事始め - サルにもわかる? MCNP -  
<http://www.aesj.or.jp/~ndd/ndnews/pdf65/no65-08.pdf>

# 分散低減 結果例

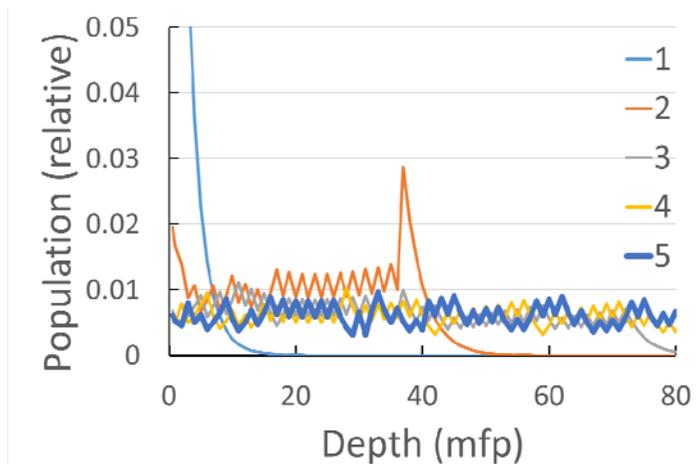
- 鉛
- 100 keV 光子線源

凡例は繰り返し番号

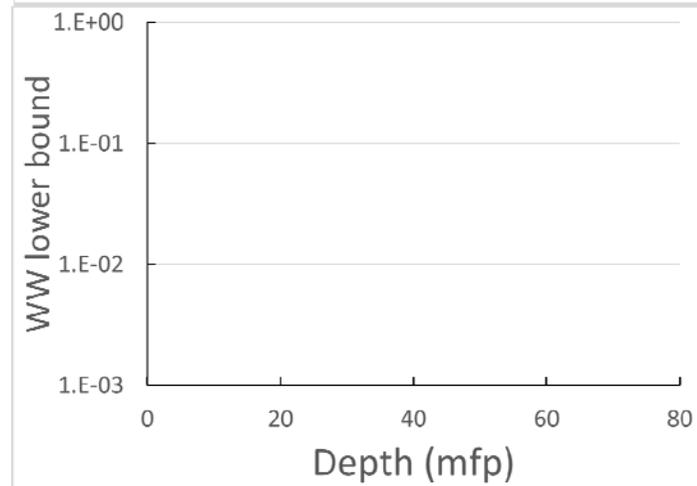
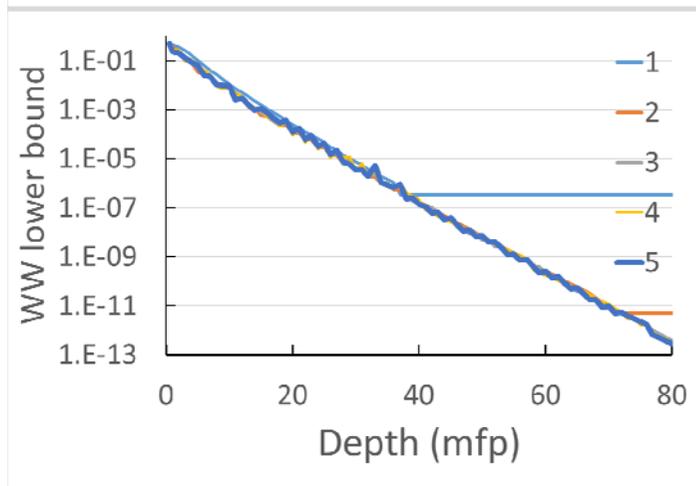
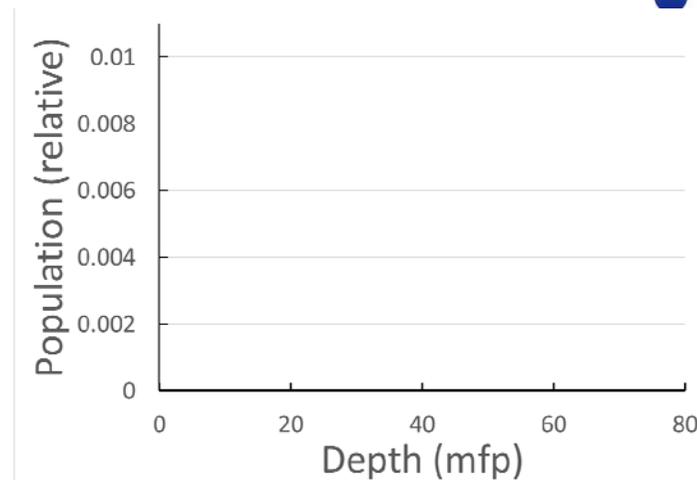
中性子の発生はなし

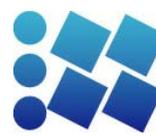


光子



中性子



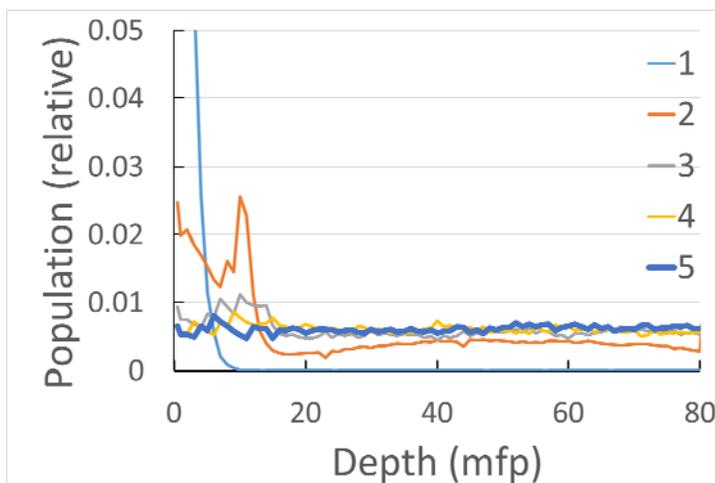


# 分散低減 結果例

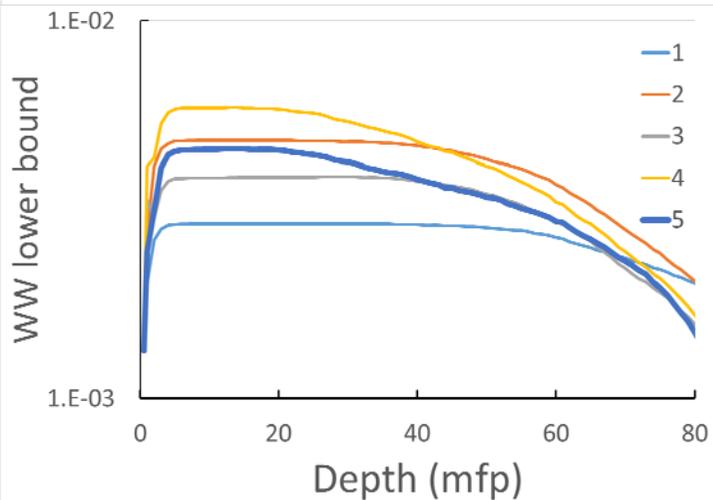
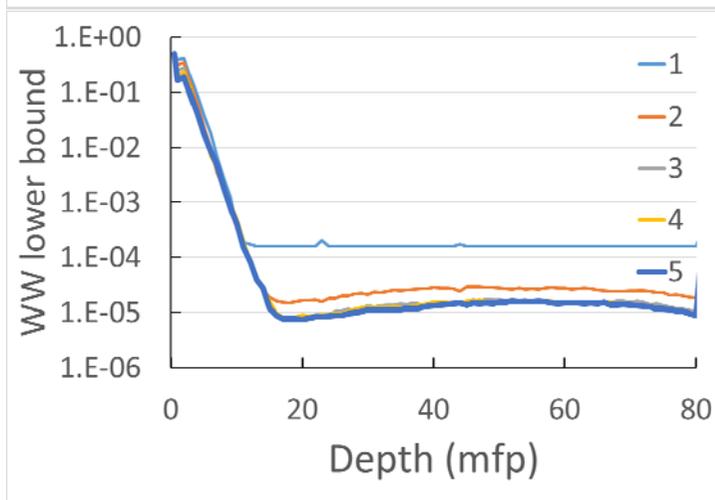
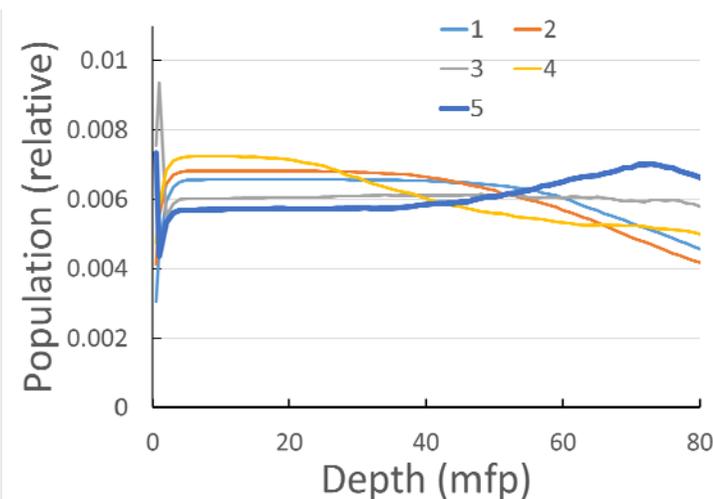
- 鉛体系
- 8 MeV 光子線源

光子・中性子のpopulation  
が適切にコントロールされ  
ている

光子



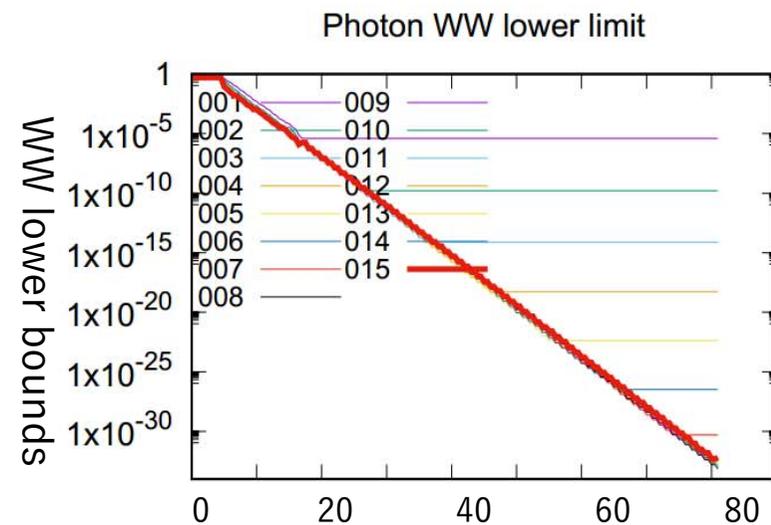
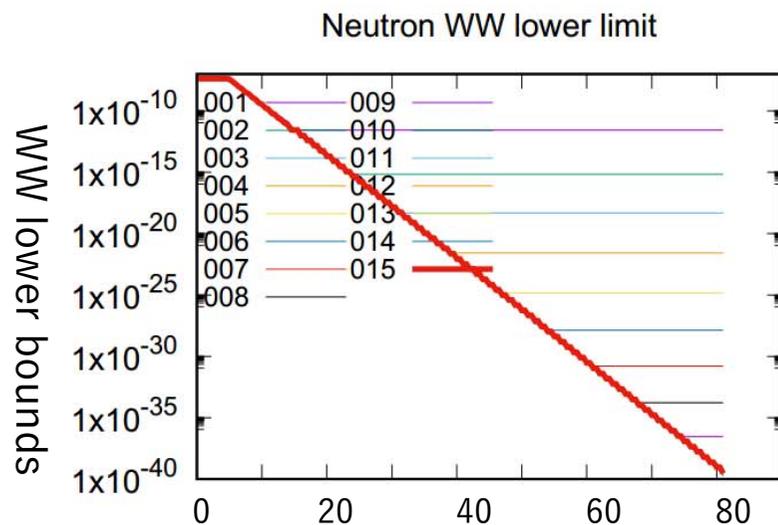
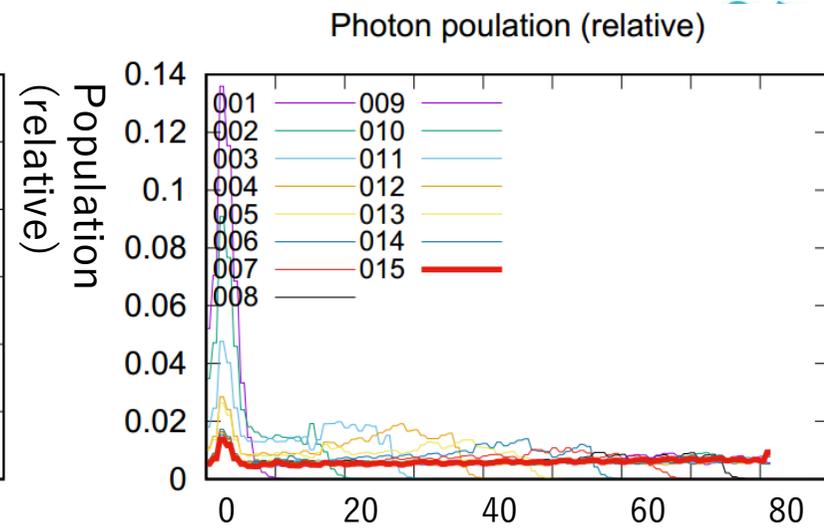
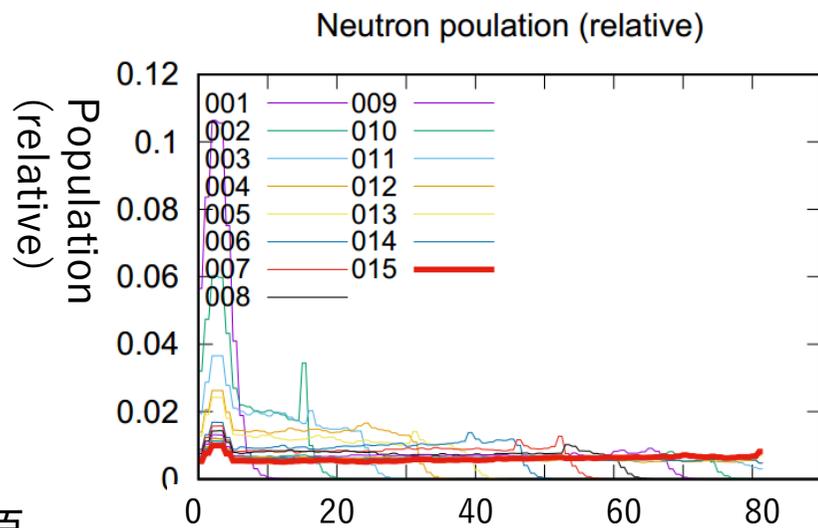
中性子



# 分散低減 結果例

- 炭素体系
- 13 MeV 光子線源

炭素は中性子減速性能が高いため、中性子も発生後直ちに指数的に減衰する。



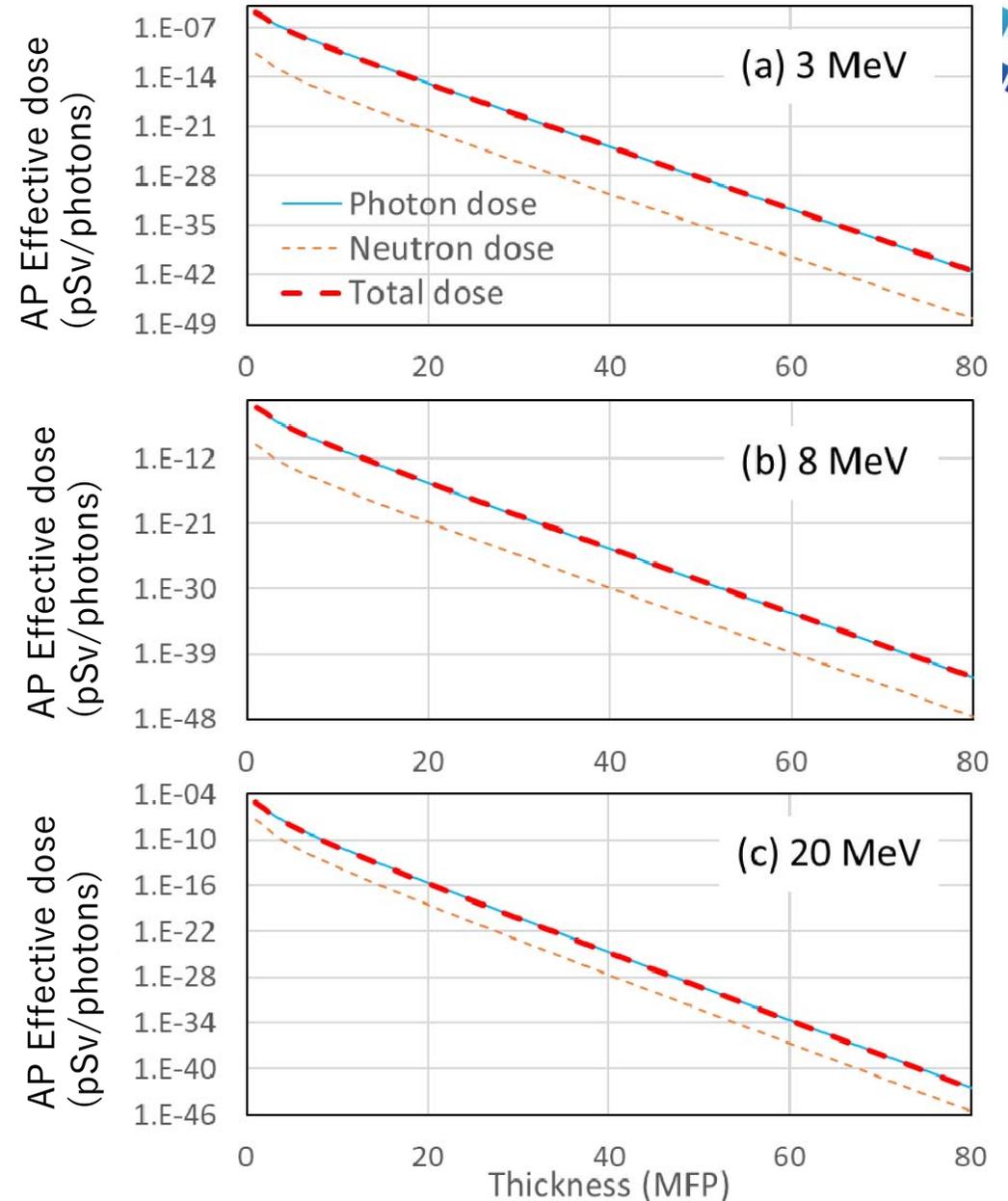
# 計算結果：水体系

## 線源光子エネルギー

- 3MeV,
- 8MeV, or
- 20MeV

## 線量減衰曲線の例

光中性子が発生しているが、中性子遮蔽が十分であるため、合計線量への寄与は少ない



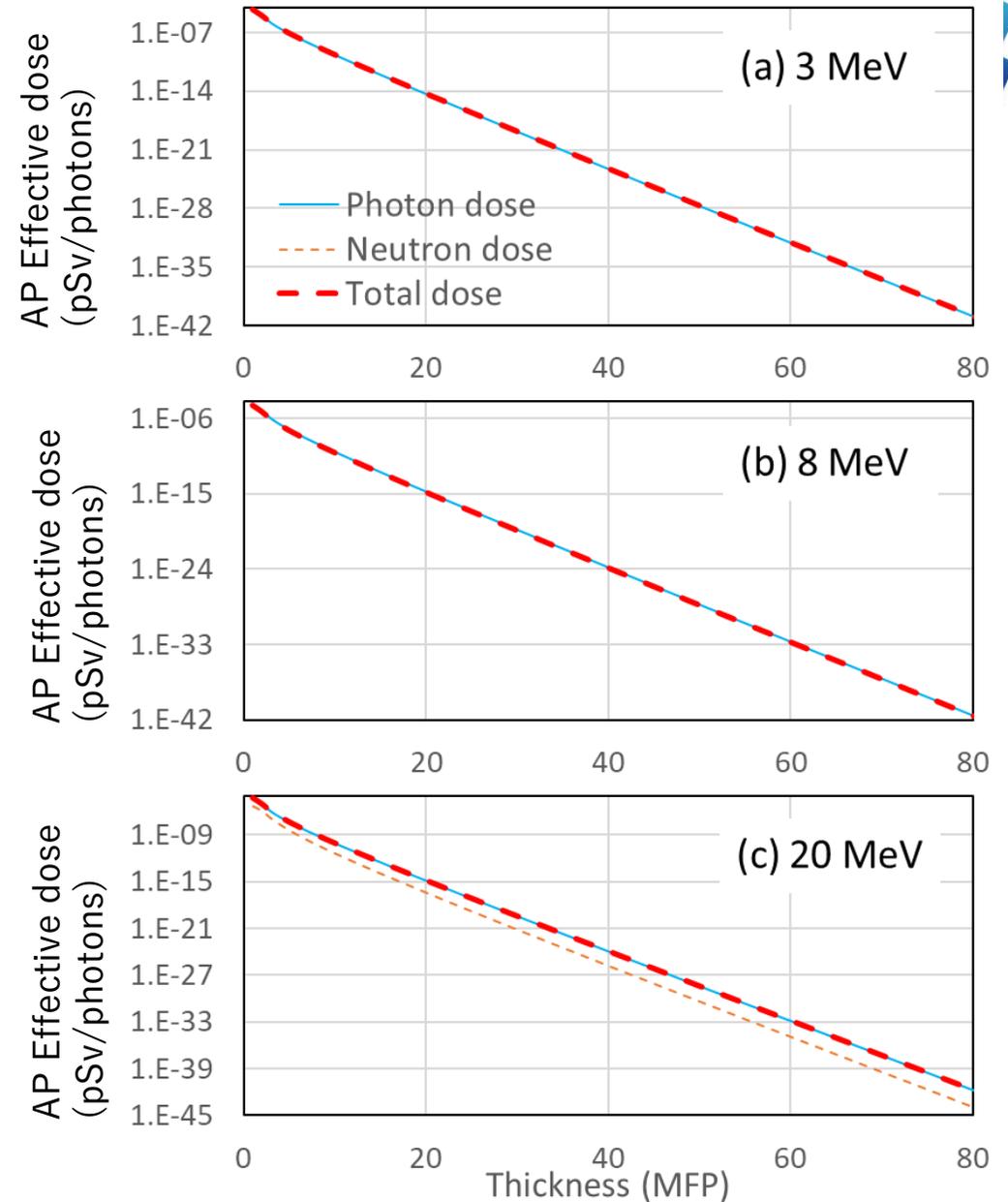
# 計算結果：炭素

## 線源光子エネルギー

- 3MeV,
- 8MeV, or
- 20MeV

## 線量減衰曲線の例

光中性子が発生しているが、中性子遮蔽が十分であるため、合計線量への寄与は少ない



# 計算結果：コンクリート

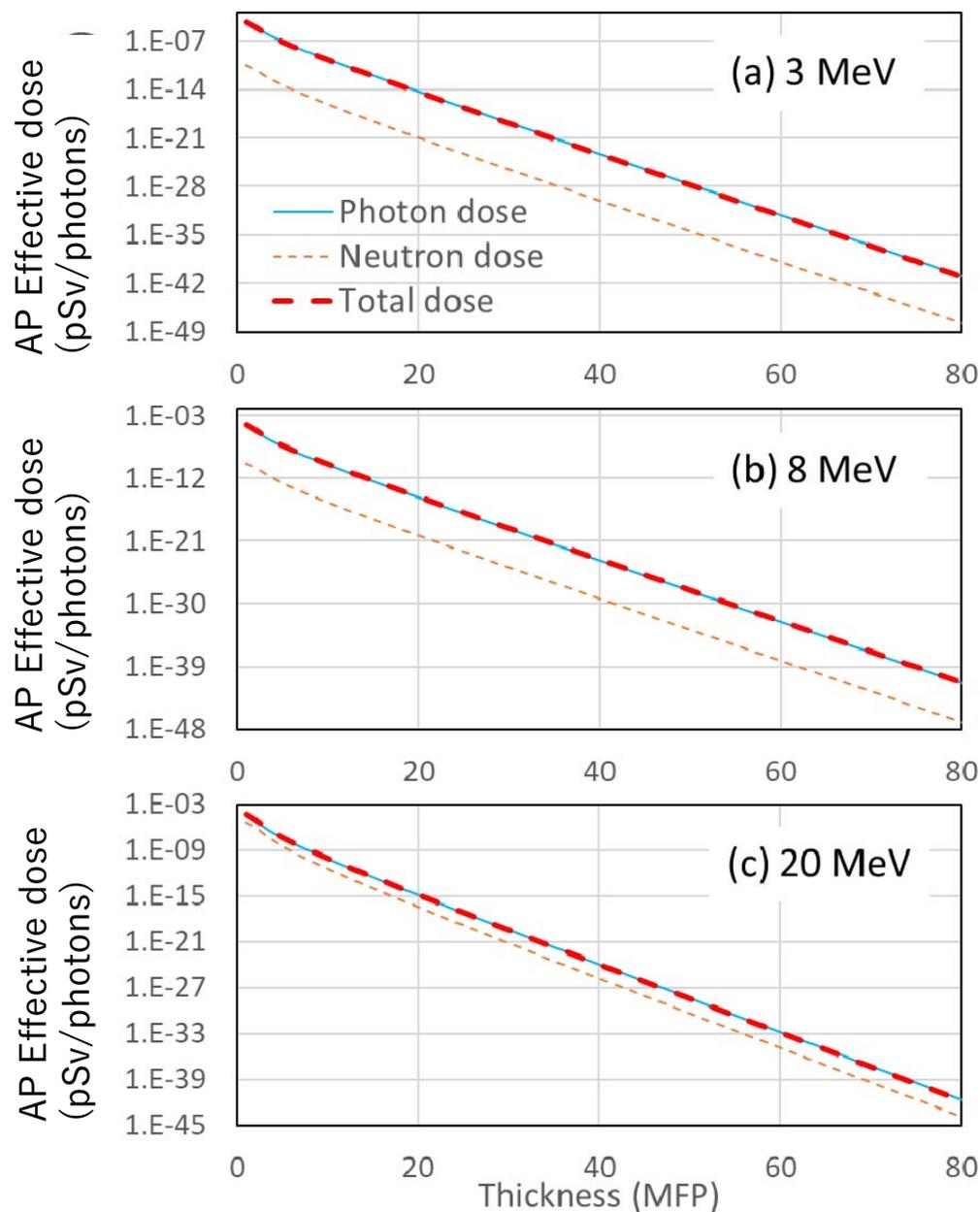
## 線源光子エネルギー

- 3MeV,
- 8MeV, or
- 20MeV

## 線量減衰曲線の例

光中性子が発生しているが、中性子遮蔽が十分であるため、合計線量への寄与は少ない

中性子遮蔽能力の高い材料では光核反応の寄与は小さい



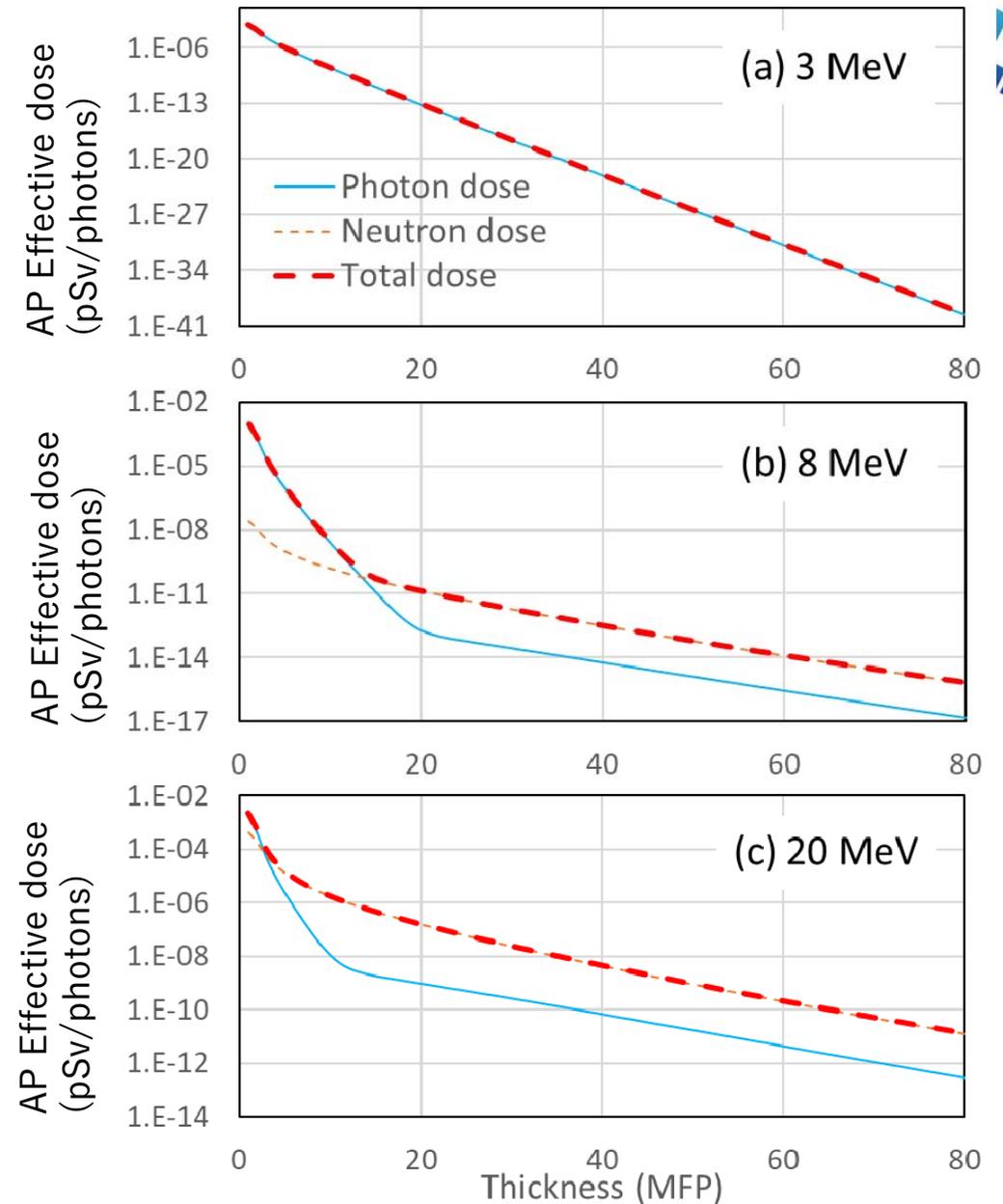
# 計算結果: 鉄

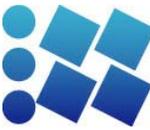
## 線源光子エネルギー

- 3MeV,
- 8MeV, or
- 20MeV

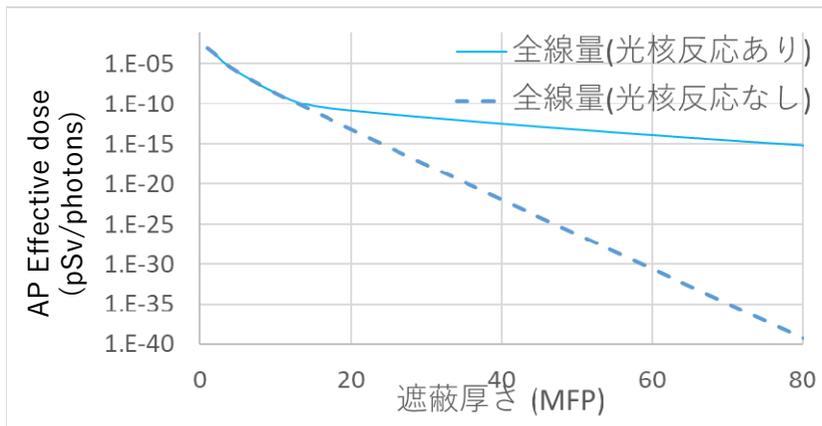
## 線量減衰曲線の例

光核反応による光中性子に起因する線量が非常に大きい

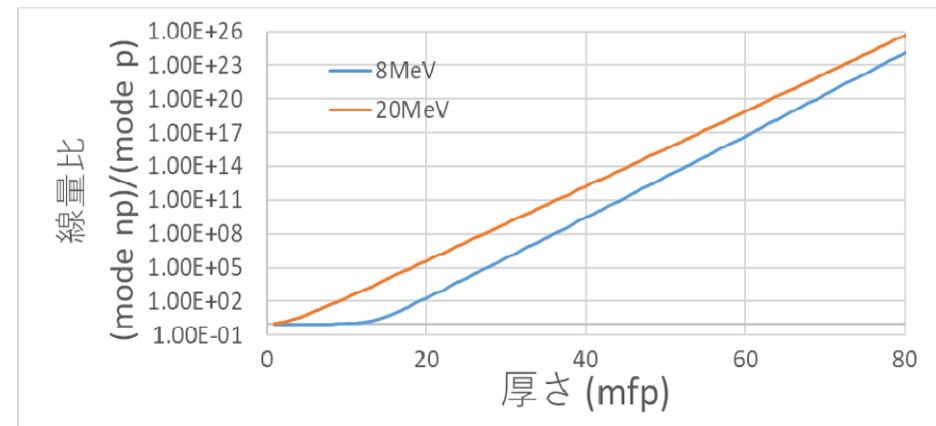




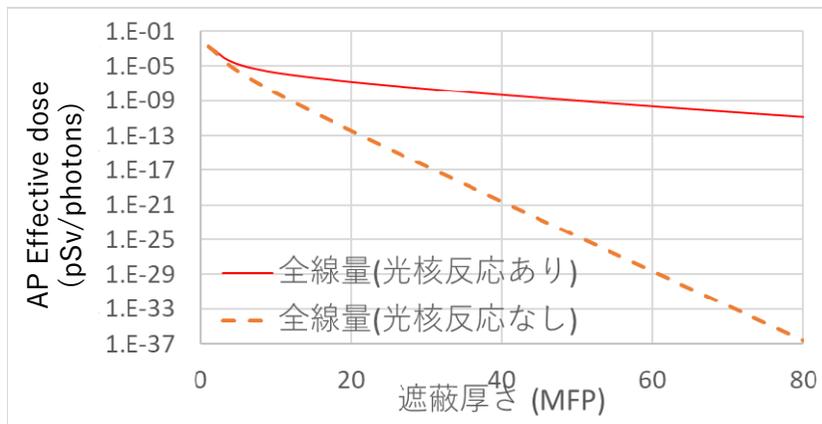
# 光核反応の影響(全線量比)



鉄体系 8MeV光子線源の線量分布



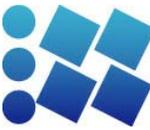
光核反応考慮時の線量と非考慮時の比  
(左記グラフの実線/点線の比)



鉄体系 20MeV光子線源の線量分布

- 20MeV光子線源-鉄体系光核反応を考慮すると、
- 20mfp深さでは約1,000,000倍に線量が増加する
  - 80mfpでは $10^{26} =$   
10,000,000,000,000,000,000,000,000,000(100秭)倍

# 検算



ケース: 20 MeV 光子線源及び鉄球の場合( 1 mfp ~ 4cm )

1. 光子線量の減衰率は?

→ ~ 0.36 (= e<sup>-1</sup>) per mfp

2. 中性子線量の減衰率は?

→ ~ 0.75 per 4cm (<sup>252</sup>Cf高速中性子) [\*]

1mfpごとに  
中性子/γ 線量比は  
0.75/0.36=2.08倍に  
なる

3. 中性子線量と光子線量はどの深さで同等になるか?

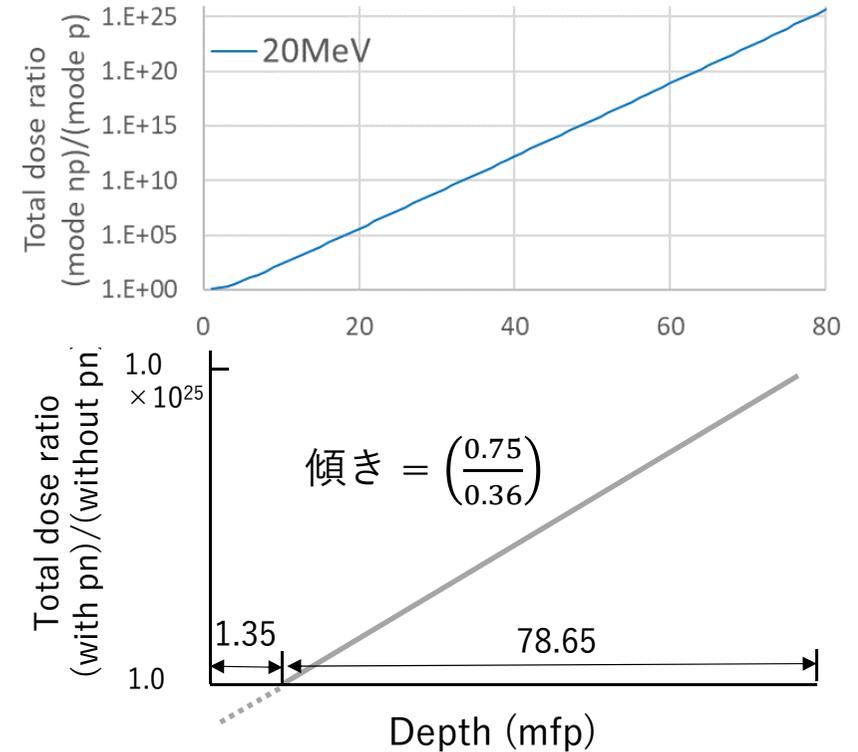
C: 線量換算係数, λ: 減衰長, σ: 中性子生成断面積, ρ: 密度

光子フラックス及び光子線量  $\phi_p = \frac{e^{-\lambda_p r}}{4\pi r^2} \quad D_p = \phi_p C_p$

半径rの内側で生成する中性子数  $N = \int_0^r 4\pi r'^2 \phi_p \sigma \rho dr' = \frac{\sigma \rho}{\lambda_p} (1 - e^{-\lambda_p r})$

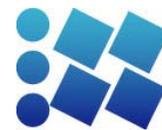
中性子フラックスと中性子線量  $\phi_n = \frac{\sigma \rho (1 - e^{-\lambda_p r}) e^{-\lambda_n r}}{4\pi \lambda_p r^2} \quad D_n = \phi_n C_n$   
(単純のため中性子の減衰は無視)

$D_p = D_n \rightarrow r = \frac{-1}{\lambda_p} \ln \left( \frac{C_n \sigma \rho}{C_p \lambda_p + C_n \sigma \rho} \right) = \underline{\sim 5.4 \text{ (cm)} = 1.35 \text{ (mfp)}}$



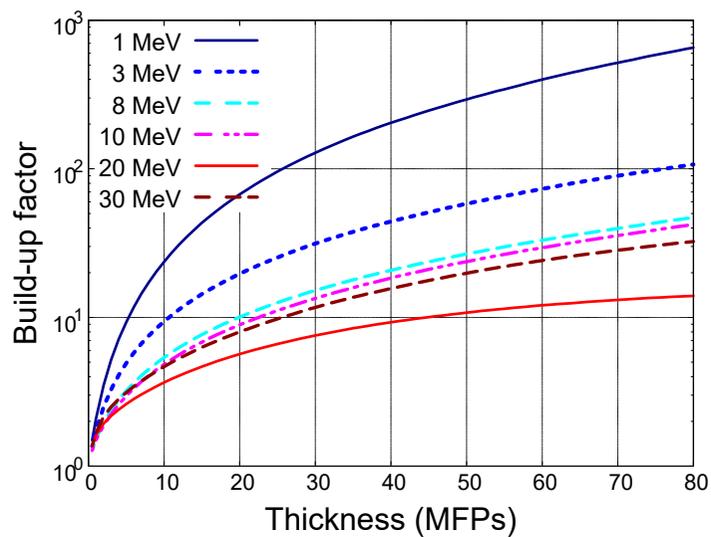
中性子/光子線量比@80mfp  
 $= \left( \frac{0.75}{0.36} \right)^{(80-1.35)} = \underline{\underline{1.2 \times 10^{25}}}$

[\*] T. Sakamoto et al., JAERI-DATA-CODE 2000-044, Japan Atomic Energy Research Institute (2000).

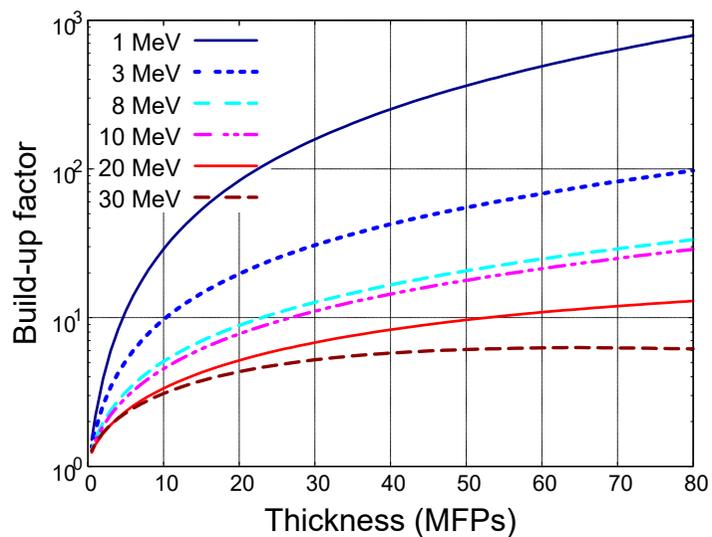


# ビルドアップ係数

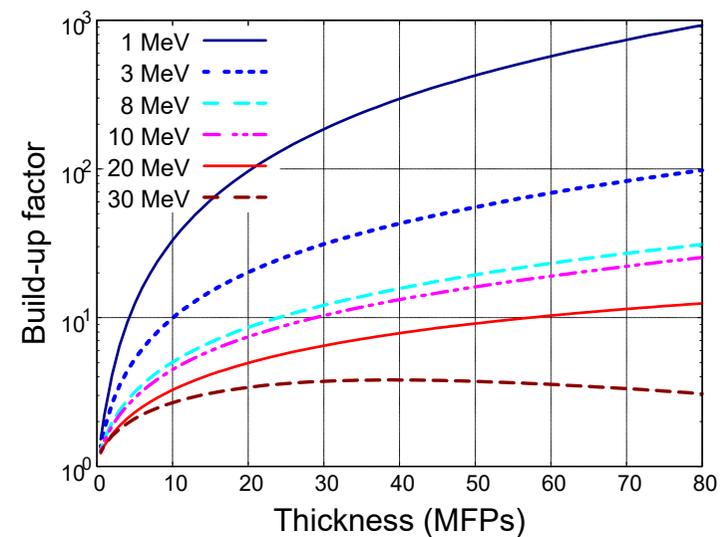
コンクリート



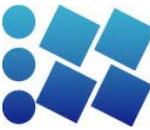
水



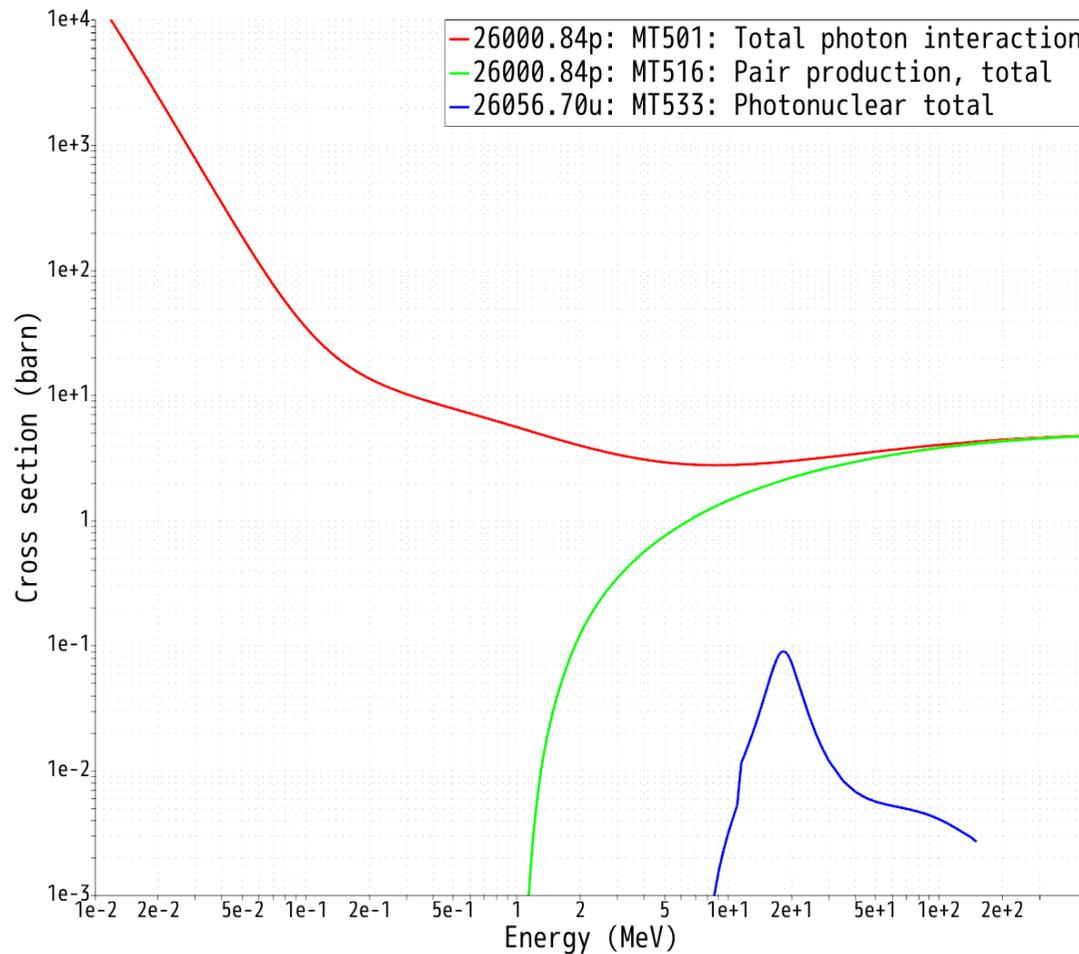
ポリエチレン



図は Ohnishi et al., Nucl. Sci. and Eng. doi: 10.1080/00295639.2023.2172309 による



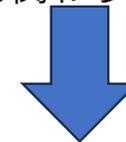
# 高エネルギーでMFPが縮む効果



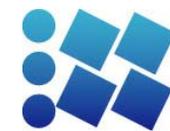
- いくつかの核種は10~20MeVから (photoatomic)全断面積が増加する



- 20MeV以上ではエネルギーに従ってMFPが縮む(一方で中性子の分布はほぼ変わらないにも関わらず)

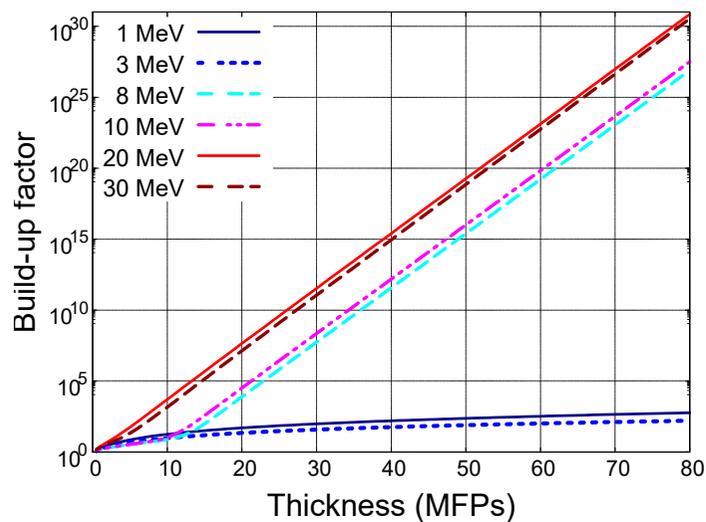


20MeV以上でビルドアップ係数が増大する

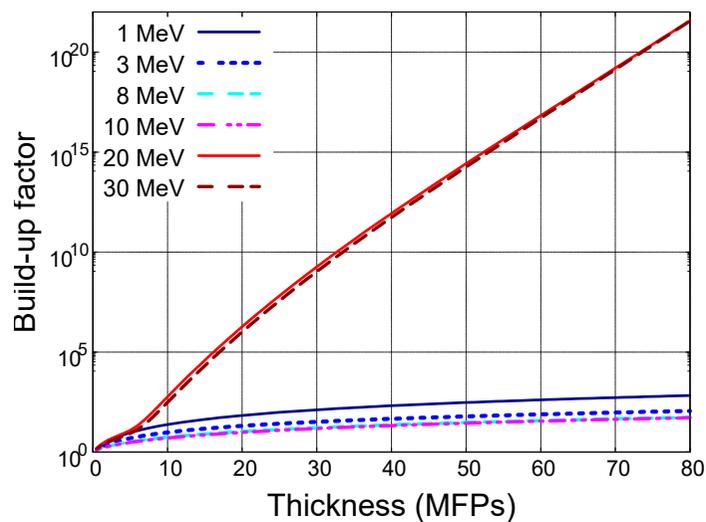


# ビルドアップ係数

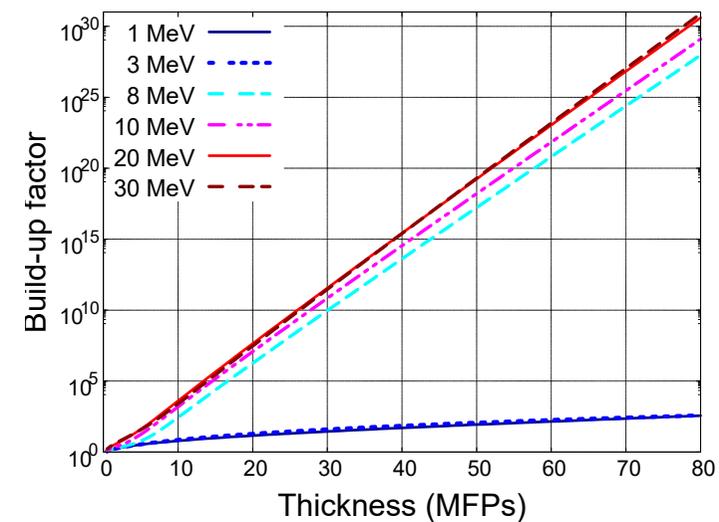
鉄



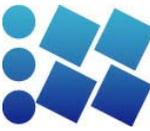
アルミニウム



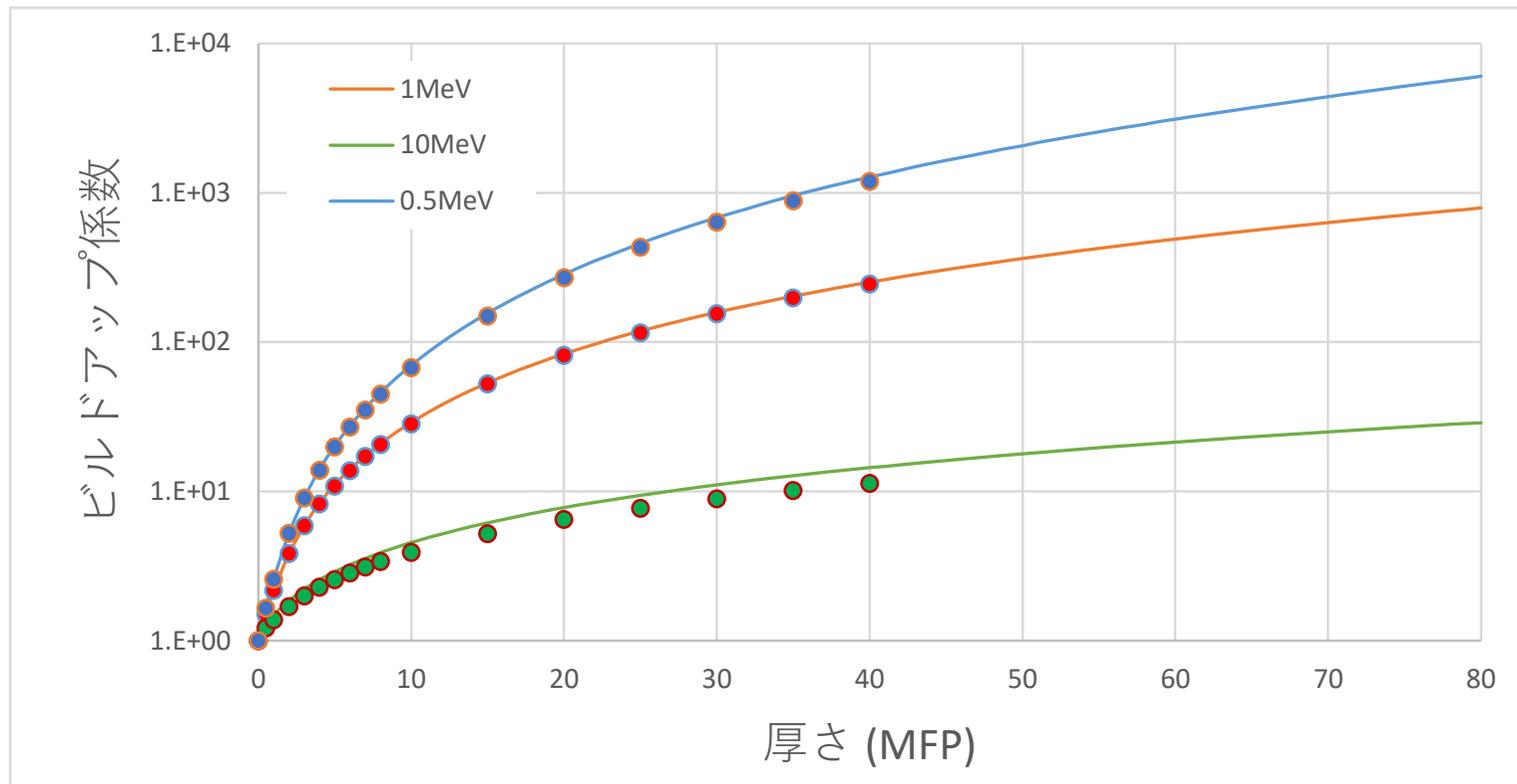
タングステン



図は Ohnishi et al., Nucl. Sci. and Eng. doi: 10.1080/00295639.2023.2172309 による

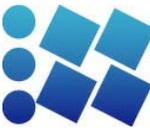


# 過去の文献値との比較：水

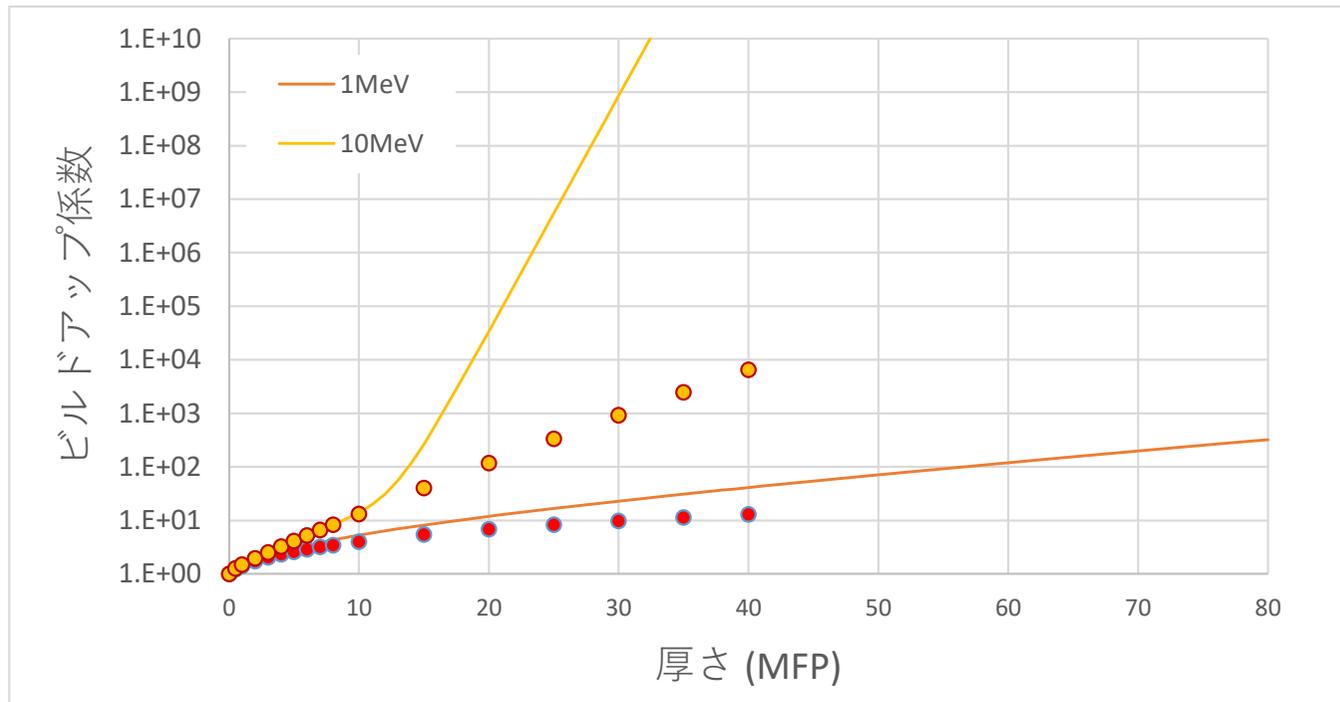


実線：今回の計算  
丸：文献値

データは財団法人原子力安全技術センター 放射線施設の遮蔽計算実務(放射線)データ集による

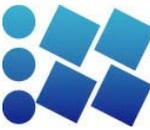


# 過去の文献値との比較：鉛



実線：今回の計算  
丸：文献値

データは財団法人原子力安全技術センター 放射線施設の遮蔽計算実務(放射線)データ集による



# レイリー散乱の考慮による効果

- 散乱が増える

レイリー散乱によるエネルギー・運動量の変化は0ではないので線量に影響が出る

- 無衝突線束が小さくなる

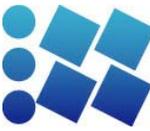
レイリー散乱を考慮すると、無衝突線束が小さくなるため、ビルドアップ係数は大きくなる。

- MFPが縮む

MFP算出時にレイリー散乱断面積を加えると考慮しない場合よりもMFP(cm)が短くなる

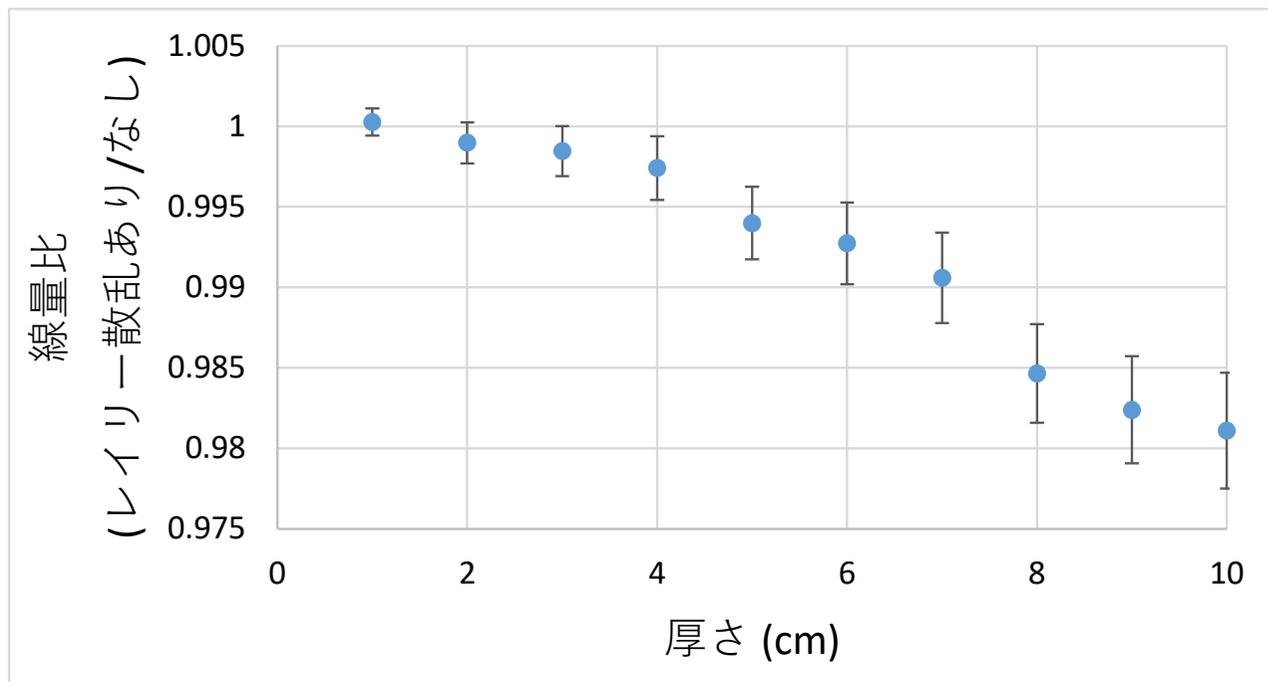
- 断面積ライブラリ間の差

コンプトン散乱断面積等はライブラリ間での差が小さいが、レイリー散乱断面積の差は比較的大きい場合がある(推測)のでライブラリ間の差が出やすい

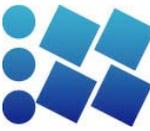


# レイリー散乱により衝突が増える効果

鉛球殻体系 + 0.5MeV光子線源

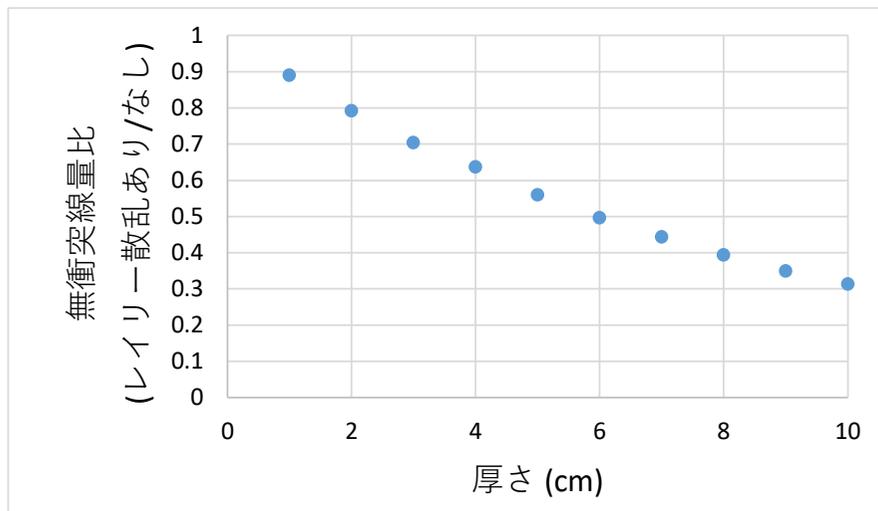


鉛体系で0.5MeV光子をおいた場合、10cm(~18MFP)で2%程度の差

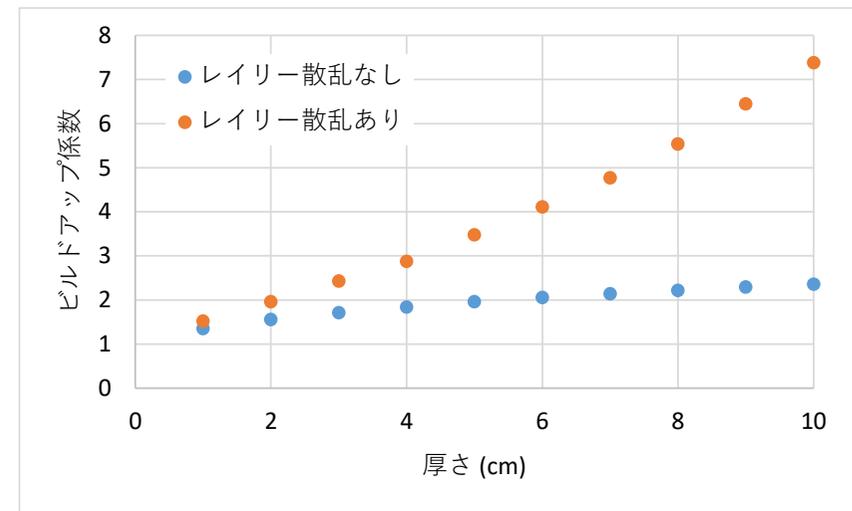


# レイリー散乱により無衝突線束が変わる (見かけの)効果

鉛球殻体系 + 0.5MeV光子線源

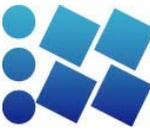


無衝突線量比



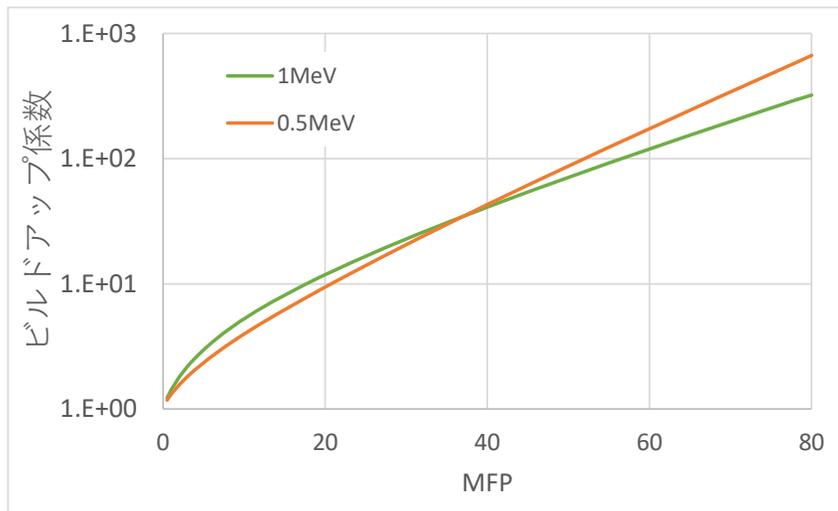
ビルドアップ係数

- 鉄10cm厚さの場合、レイリー散乱の有無で線量では2%程度の差だったが、
- 無衝突線束には3倍程度の差が有るため、ビルドアップ係数では3倍の差が生じる

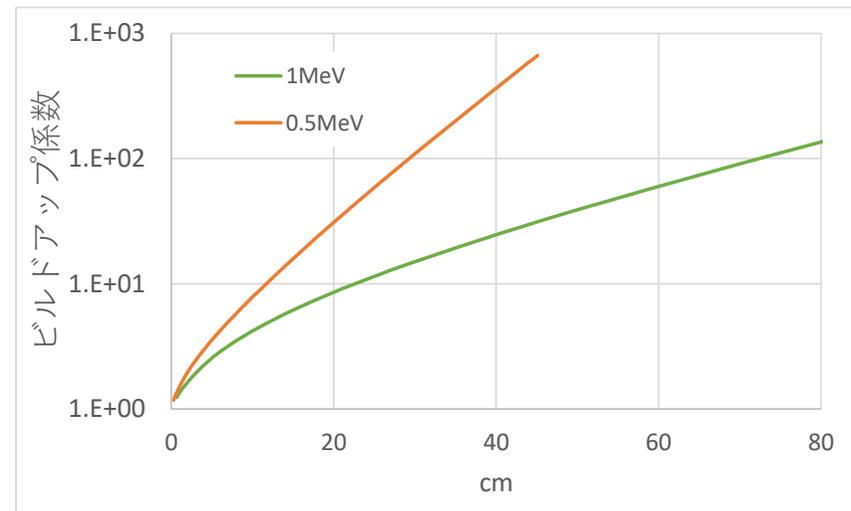


# レイリー散乱によりMFPが変わる(見かけの)効果

鉛体系でのビルドアップ計算結果(両者ともレイリー散乱あり)



MFP表示



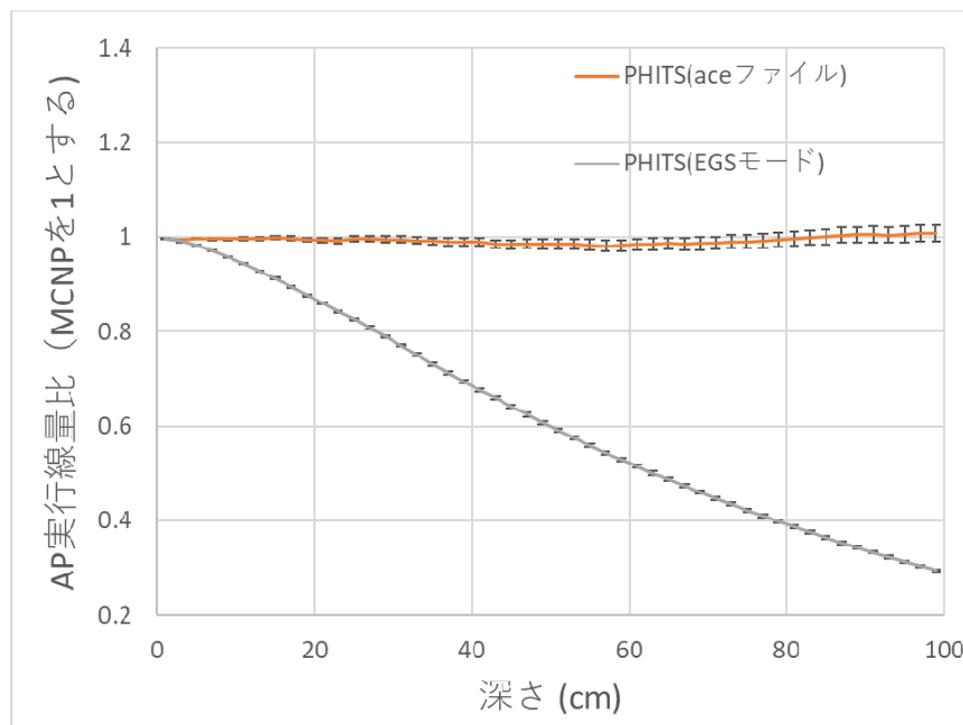
cm表示

低エネルギーではレイリー散乱によりMFPが縮む効果が大きく出るので、MFPで表示した場合、傾向が大きく変わって見える



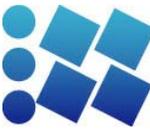
# 断面積間の差異(MCNP, PHITS, PHITS-EGS)

体系：球、 線源：662keV光子、 線量：AP実効線量 での計算結果

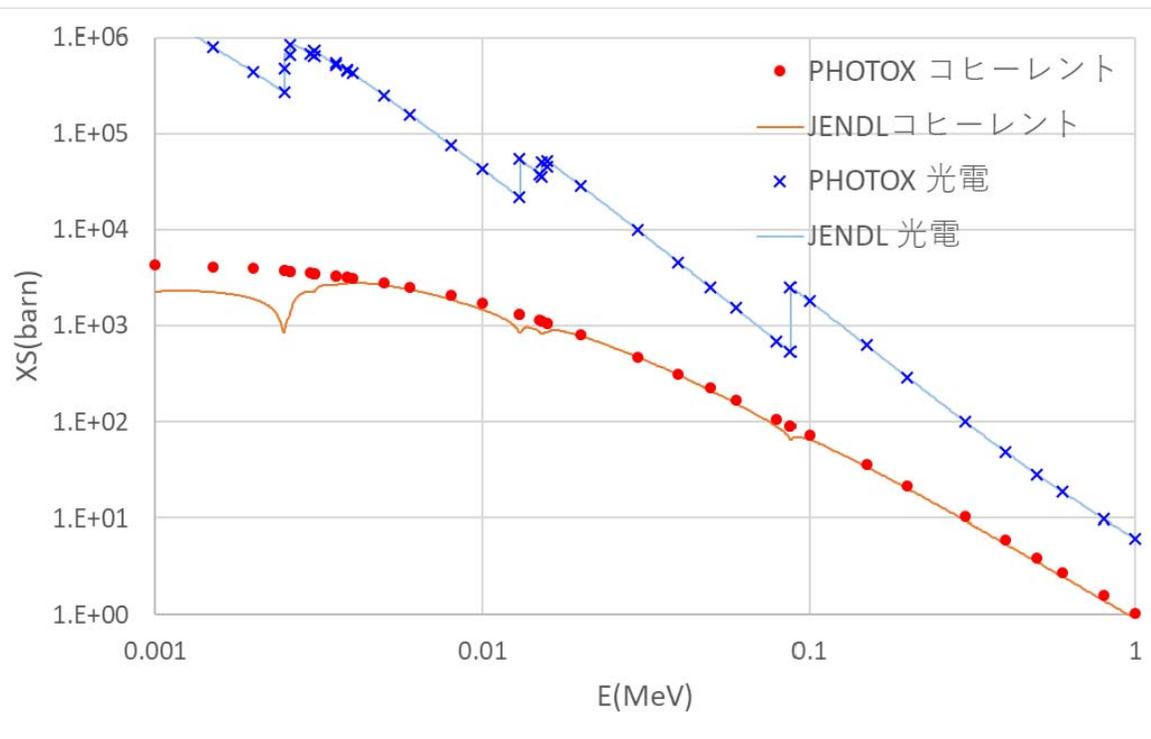


鉛

核種によっては深層透過計算時にEGSとMCNPで差が生じる



# 鉛の断面積比較(XCOM, AceLibJ40)

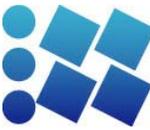


	E(MeV)	AceLibJ40 断面積(b)	XCOM 断面積(b)	XCOM/JENDL
コヒーレント	0.6	2.4918E+00	2.77E+00	1.1128
	0.8	1.4181E+00	1.59E+00	1.1212
光電効果	0.6	1.8616E+01	1.86E+01	0.9991
	0.8	9.8732E+00	9.88E+00	1.0005
コンプトン	0.6	2.15E+01	2.16E+01	1.0007
	0.8	1.90E+01	1.91E+01	1.0011
全断面積	0.6	4.26E+01	4.29E+01	1.0065
	0.8	3.03E+01	3.05E+01	1.0066

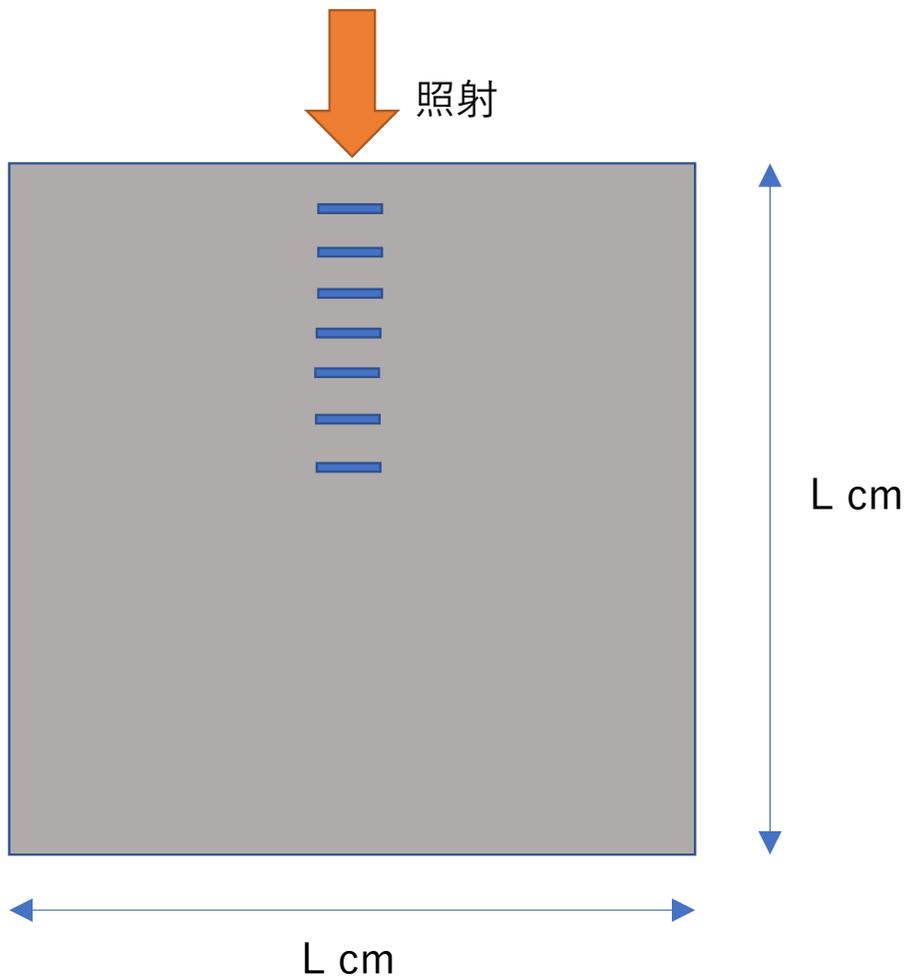
0.6~0.8MeVでは

- 光電・コンプトン断面積の差異は小
- コヒーレント散乱はPHOTOXの方が11%大きい。
- 全断面積ではXCOMが0.65%大きい

※photox≒xcom と考えられる。両者ともにNIST DBがデータソースであるため。



# 実験で確認できるか？



L=40cm

体積 =  $6.4E+4$  (ブロック64個)

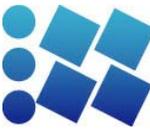
重量 = 726 kg

鉛ブロック1個

体積 =  $20\text{cm} \times 10\text{cm} \times 5\text{cm} = 1000\text{cm}^3$

重量 = 11.34kg

- 厚さ20cmでの差異は13%程度
- 検出器誤差(ガラス検出器では3%程度)
- 鉛純度
- ブロック間のギャップの効果
- 加工精度



## まとめ

- 分散低減を導入し80mfpの深層透過計算を行った
- MCNPの出力ファイルは分散低減に非常に有用
- 光核反応の影響は軽核主体の材料と重核主体の材料では異なる
- 中性子遮蔽能力の大きい材料では光核反応の影響は小さい
- 概ね過去のビルドアップ係数と近い値であるが、光核反応が支配的な条件では大きな差になる
- 今回レイリー散乱を考慮したため、MFPに微小な差があり、その結果無衝突線量およびビルドアップファクターにも(見かけの)大きな変化が出ている