

# 23本の中性子ビームポートにおける 光子スペクトル (Private : Ver.20.12.04)

平成 16 年 03 月 24 日  
日本原子力研究所  
大強度陽子加速器施設開発センター  
中性子施設開発グループ  
原田 正英

## 1 履歴

Ver.1 平成 16 年 2 月提供 23 本の中性子ビームポートにおける光子スペクトルデータ

## 2 概要

平成 15 年 8 月時点の線源集合体の図面をもとに計算モデルを構築し、23 本の中性子ビームライン毎に光子スペクトル計算を行った。本計算で用いた計算モデルは、すでに報告している中性子パルス計算を行ったモデルと同一である。

光子スペクトルとしては、即発光子によるエネルギー及び時間スペクトル、残留放射性核種からの崩壊により放出される光子のエネルギースペクトルを計算した。

提供データ一覧を表 1 に示す。

## 3 計算条件

### 計算モデル

最新の線源集合体の図面（平成 15 年 8 月時点）をもとに、計算モデルを構築した。（この計算モデルは、中性子パルス計算を行ったモデルと同一である。）パルス計算のために、取り出される 23 本の中性子ビームポートに合わせて、24 台の光子用点検出器（No.16 には 2 台設置）を、各ビーム孔の中心位置にモデルータ表面から 10m 下流に設置した。ポート番号は、周知の番号付と同一である。

また、中性子ビームラインは、中性子ビームラインの構成が不明であったので、ビームライン中間に、中性子ビーム窓、コリメータ、ガイド管などの構造物を考慮しておらず、No.16 の水平型反射率計を除くビームラインはすべて、遮蔽体中に  $100 \times 100 \text{mm}^2$  中性子ビーム孔が、点検出器まで空いているモデルとなっている。ダクト断面寸法がこれよりも小さい場合、正確な値はその条件で計算を行う必要がある。No.16 の水平型反射率計については、結

合型モデレータのターゲット側に近い上半分(  $50 \times 100\text{mm}^2$  )を2本の異なるビームラインから見たときの計算値である。

線源集合体の半径4000mmより外側は、各中性子ビームラインダクト部分を除き、粒子の輸送を行わない( Importance 0 )空間として設定した。

計算モデルを図1～図6に示す。また、詳細な計算条件を表2及び表3にまとめている。

## 即発光子と崩壊光子

本計算では、即発光子と崩壊光子を計算した。即発光子は、核反応により瞬時に発生するもので、陽子ビームパルスと時間相関がある光子である。崩壊光子は、核反応により生成された放射性核種の崩壊により発生し、陽子ビームパルスと時間相関がない光子である。

光子パルス計算における時間は、モデレータ表面から10m位置の検出器までの飛行時間(33.4nsec)を含んでいる。光子の飛行速度がエネルギーによらず一定であるため、中性子パルス計算におけるTime Focusing法を使用していない。

崩壊光子に関しては、陽子ビームパルスと時間相関がほとんど無視できるため、光子パルスデータに含んでいない。崩壊光子の強度は運転履歴(運転時間、陽子ビーム出力)に依存するため、正確な値を導出するには、より実際的な運転履歴で評価を行う必要がある。本計算では、表3に示すように、崩壊光子の強度が最も高くなると思われる条件で計算を行っている。

なお、本計算では、崩壊光子が発生する領域として、水冷遮蔽体・ミドルセクションとその内側部を考慮している(表3参照)。しかしながら、中性子ビームライン上のこれより下流に設置されるシャッター、コリメータ、分光器、実験装置、遮蔽体などからの崩壊光子は含まれていない。これらからの崩壊光子の影響が無視できない場合は、これらの装置類を設置した条件で計算する必要がある。

## 単位

時間平均された光子エネルギースペクトルデータの単位は、陽子ビーム出力1MWの仮定の下、 $[n/(cm^2 \cdot s \cdot sr \cdot lethargy)]$  で与えられている。これは、モデレータの表面積 $1\text{cm}^2$ あたり、毎秒、分光器に向かった単位立体角あたり、単位レサジー幅あたりに放出される光子数に相当する。レサジー幅とは、あるエネルギービンのエネルギー上限と下限をそれぞれ $E_{high}$ 、 $E_{low}$  とするとき、 $\ln(E_{high}) - \ln(E_{low})$  で定義される値で、各エネルギービンの積分値を求める場合にはレサジー幅を乗じる必要がある。分光器側から見込むモデレータの面積を乗じ、光子束を得たい位置における $1\text{cm}^2$  がどれだけの立体角に相当するかを考慮する必要がある。

また、エネルギー積分された光子の時間スペクトルデータの単位は $[n/(cm^2 \cdot s \cdot sr \cdot pulse)]$ 、エネルギー別の時間スペクトルの場合は $[n/(cm^2 \cdot s \cdot sr \cdot lethargy \cdot pulse)]$  で与えられている。これは、1MW & 25Hzの陽子ビーム出力時に、1陽子パルスが入射した時の光子の時間スペクトルを示す。このとき、モデレータの表面積 $1\text{cm}^2$ あたり、分光器に向かった単位時間あたり、単位立体角あたり、(エネルギー別であればさらに単位レサジー幅あたり)

に放出される光子数に相当する。

## 4 計算結果

主要ポートにおける即発光子の時間平均されたエネルギースペクトルを図7に示す。見ているモデレータの種類によって、光子のエネルギースペクトルが異なっている。基本的にどのモデレータも、スペクトル形状、強度に大きな差はない。2MeV 付近のピークは水素-1 の中性子捕獲による光子、100MeV 付近のピークは  $\pi^0$  粒子の崩壊による光子である。200MeV 以上の光子には、 $\eta$  粒子の崩壊による光子も含まれる。 $\pi^0$ 、 $\eta$  の寿命は非常に短いため、これらの崩壊による光子は即発光子に分類している。なお、MCNP で取扱可能な光子(正確には電子)の上限エネルギーが 1GeV で、便宜上、1GeV 以上の光子を 1GeV 以下に畳み込んで計算している。実際は、1GeV 以上の成分も存在するが、無視できるほど非常に小さい。

エネルギー積分された即発光子の時間スペクトルを図8に示す。見ているモデレータの種類によって、光子の時間スペクトルが異なっている。

ポート 05 及びポート 08 におけるエネルギー範囲をいくつかに分けた即発光子の時間スペクトルを図9及び図10に示す。エネルギーによって、若干、時間スペクトル形状に差があることがわかる。

ポート 05 及びポート 08 における光子の時間平均されたエネルギースペクトルを図11に示す。残留放射性核種から放出される崩壊光子は、即発光子より 0.1MeV で約 5 桁、1MeV で約 7 桁小さく、10MeV 以上成分はほとんど無いことがわかる。

ポート 05 及びポート 08 におけるエネルギー積分された時間スペクトルを図12に示す。残留放射性核種から崩壊放出される光子は時間相関が無く、即発光子より  $1\mu\text{sec}$  で約 9 桁、 $1000\mu\text{sec}$  で約 7 桁小さいことがわかる。

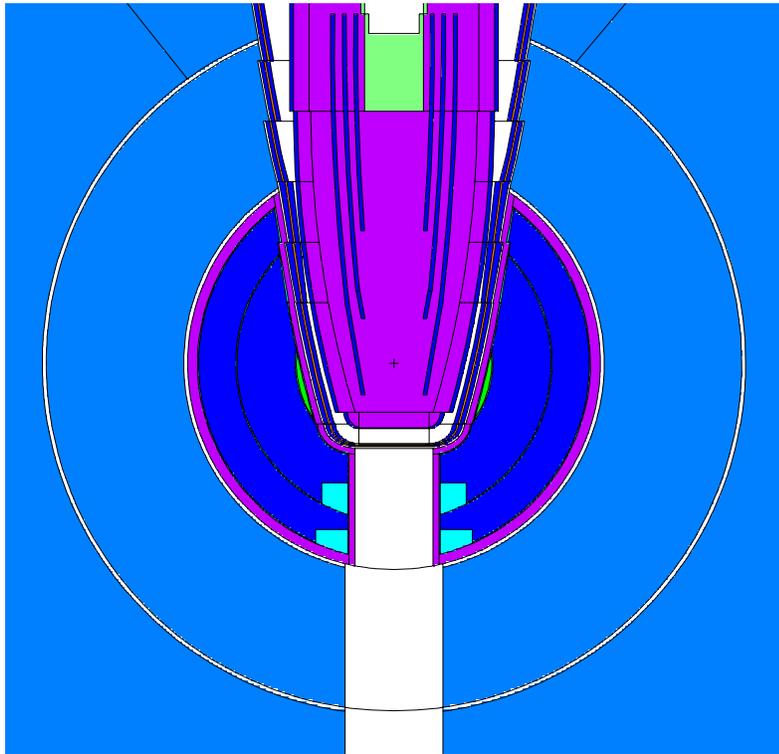


図 1: 計算モデル (ターゲット & 反射体、水平断面図)

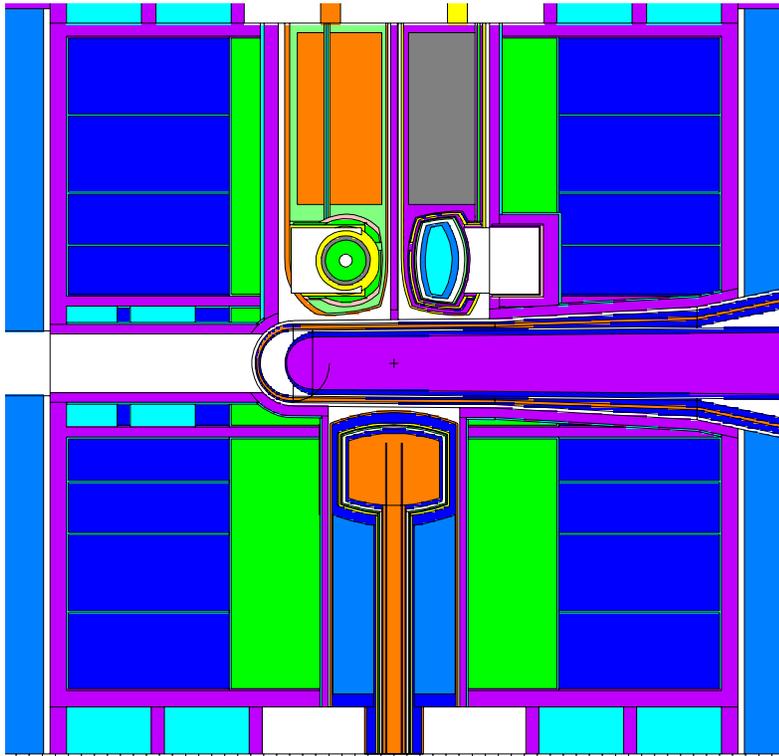


図 2: 計算モデル (ターゲット & 反射体、垂直断面図)

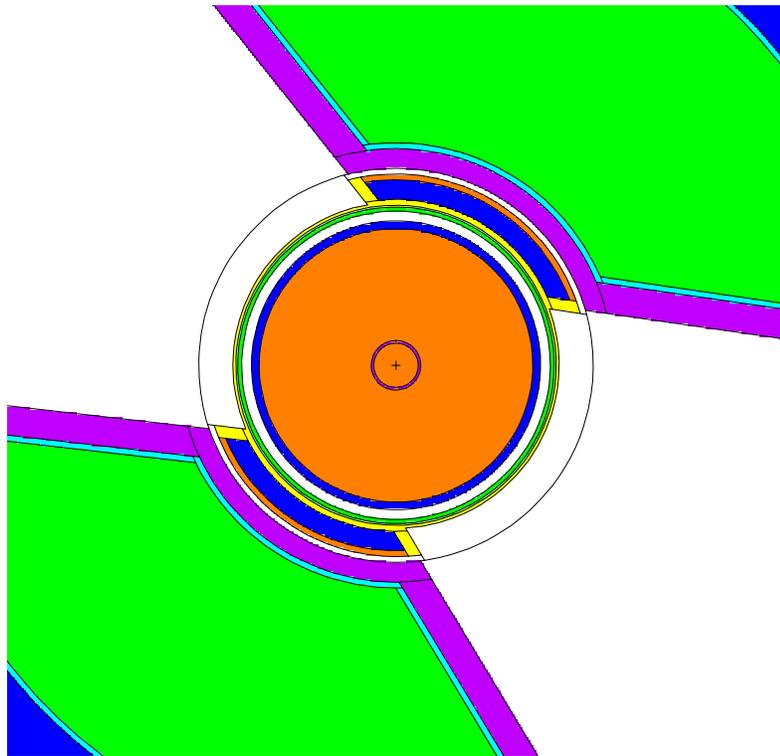


図 3: 計算モデル ( 結合型モデレータ部、水平断面図 )

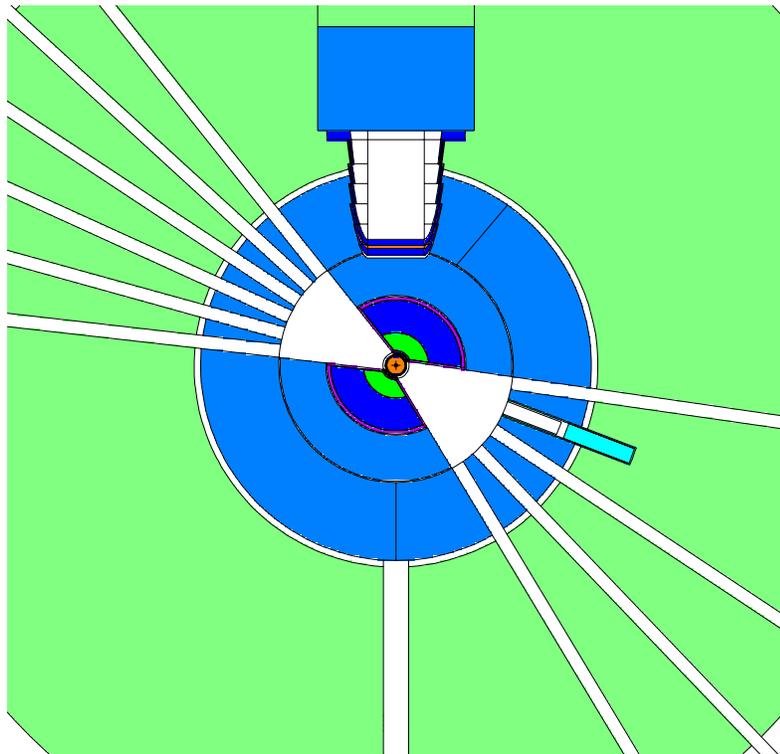


図 4: 計算モデル ( 結合型モデレータ部、拡大水平断面図 )

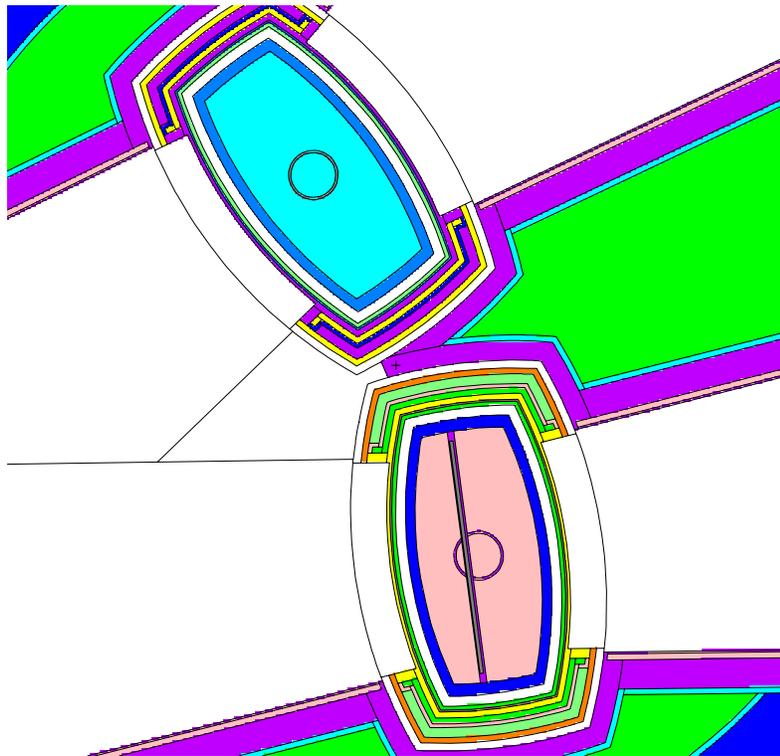


図 5: 計算モデル (非結合型モデレータ部、水平断面図)

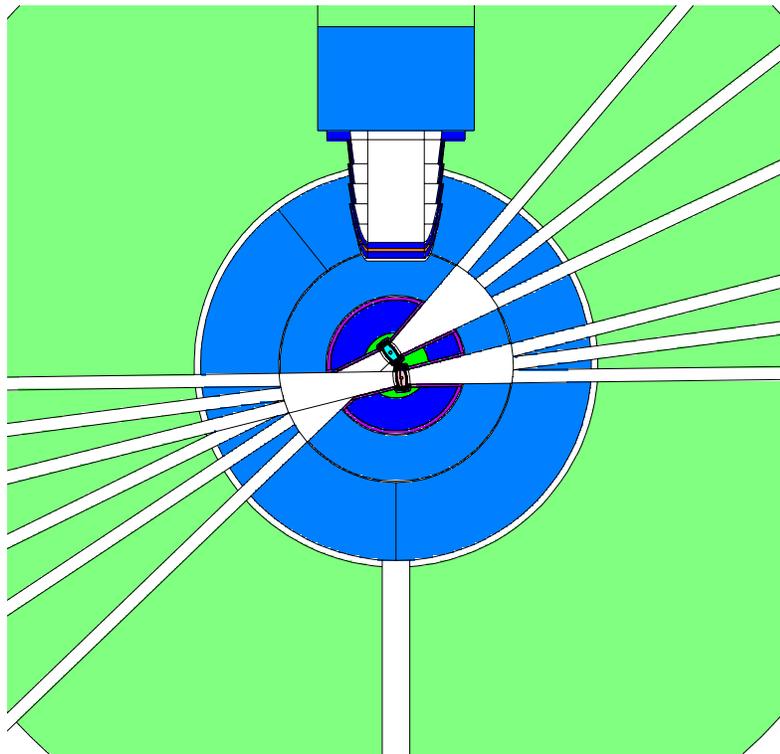


図 6: 計算モデル (非結合型モデレータ部、拡大水平断面図)

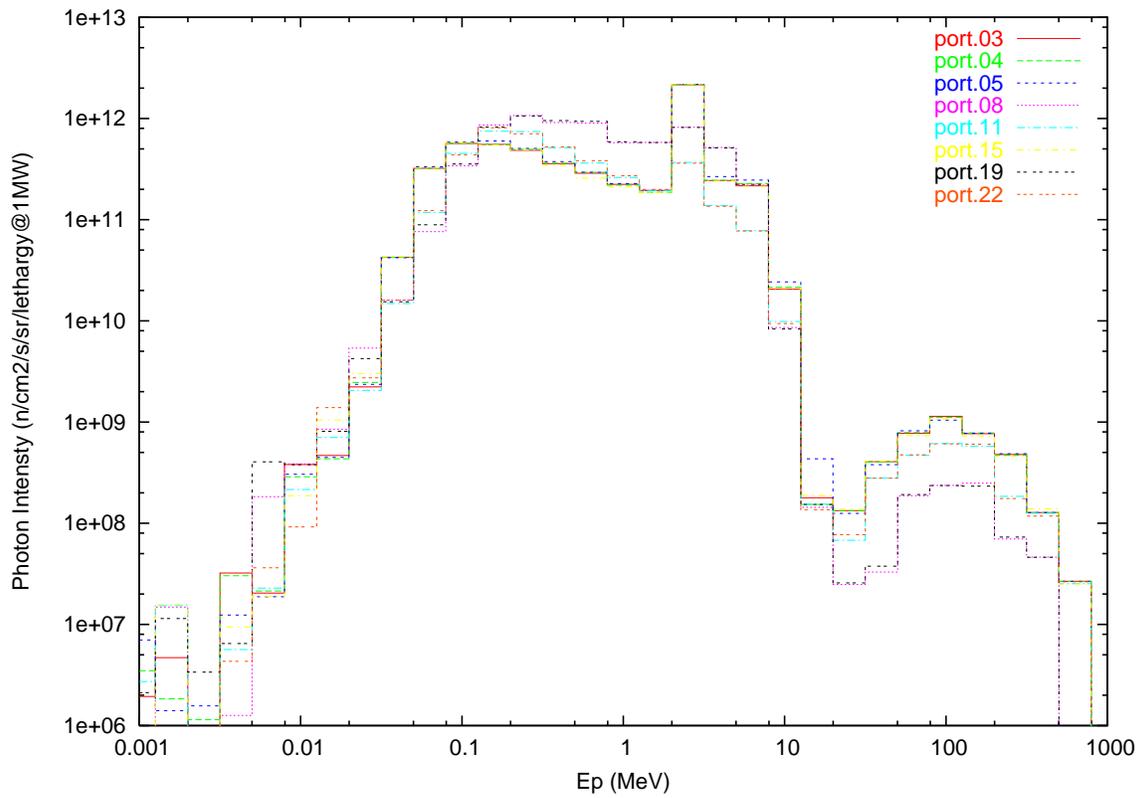


図 7: 主要な中性子ポートにおける時間平均された即発光子の時間スペクトル

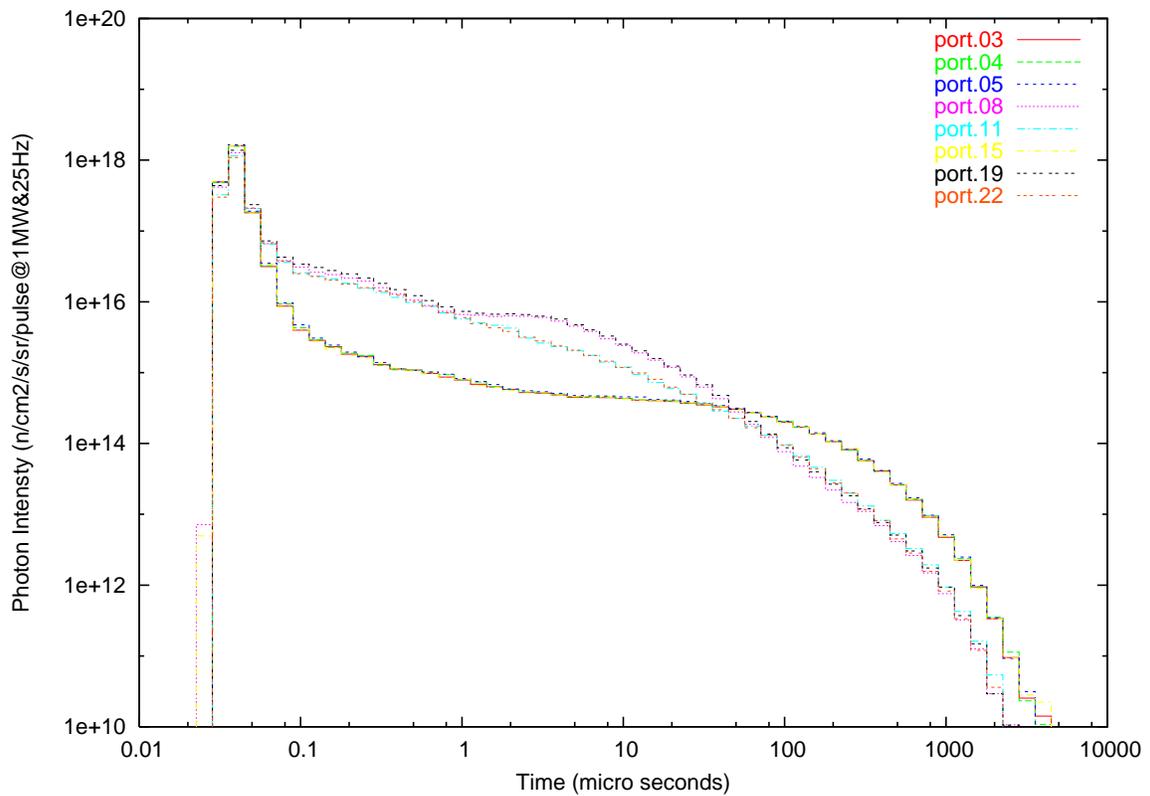


図 8: 主要な中性子ポートにおけるエネルギー積分された即発光子の時間スペクトル

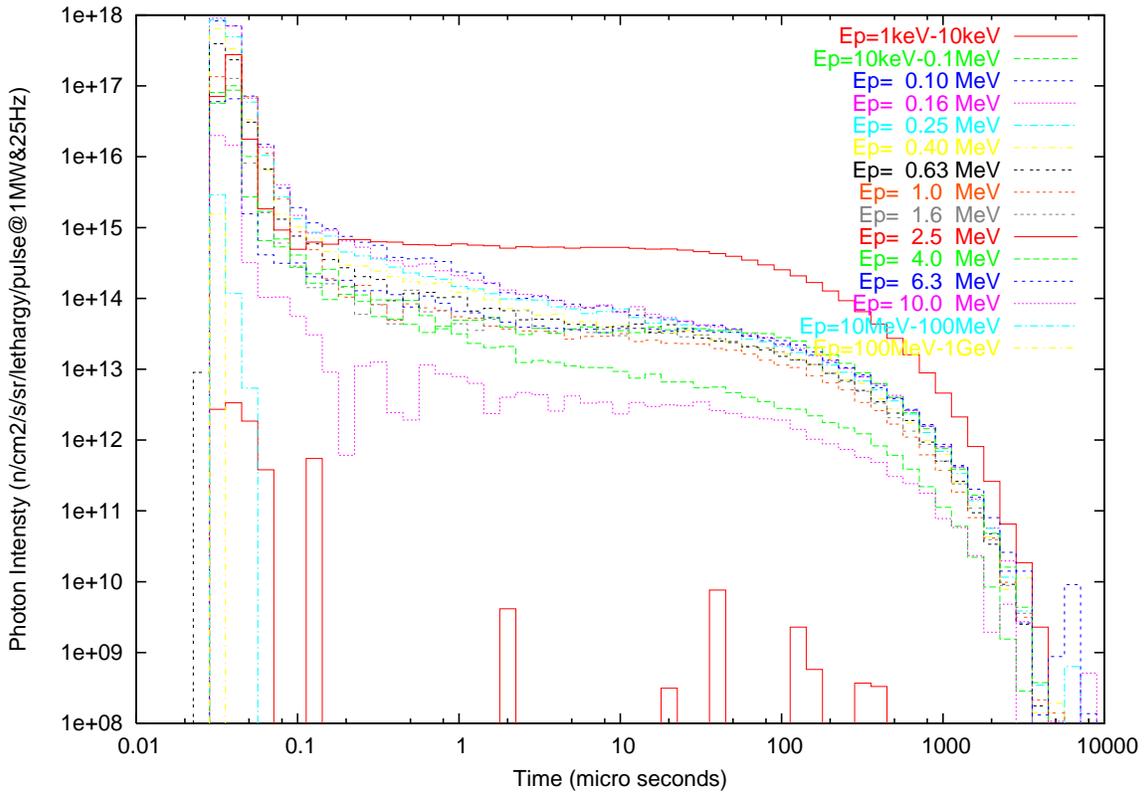
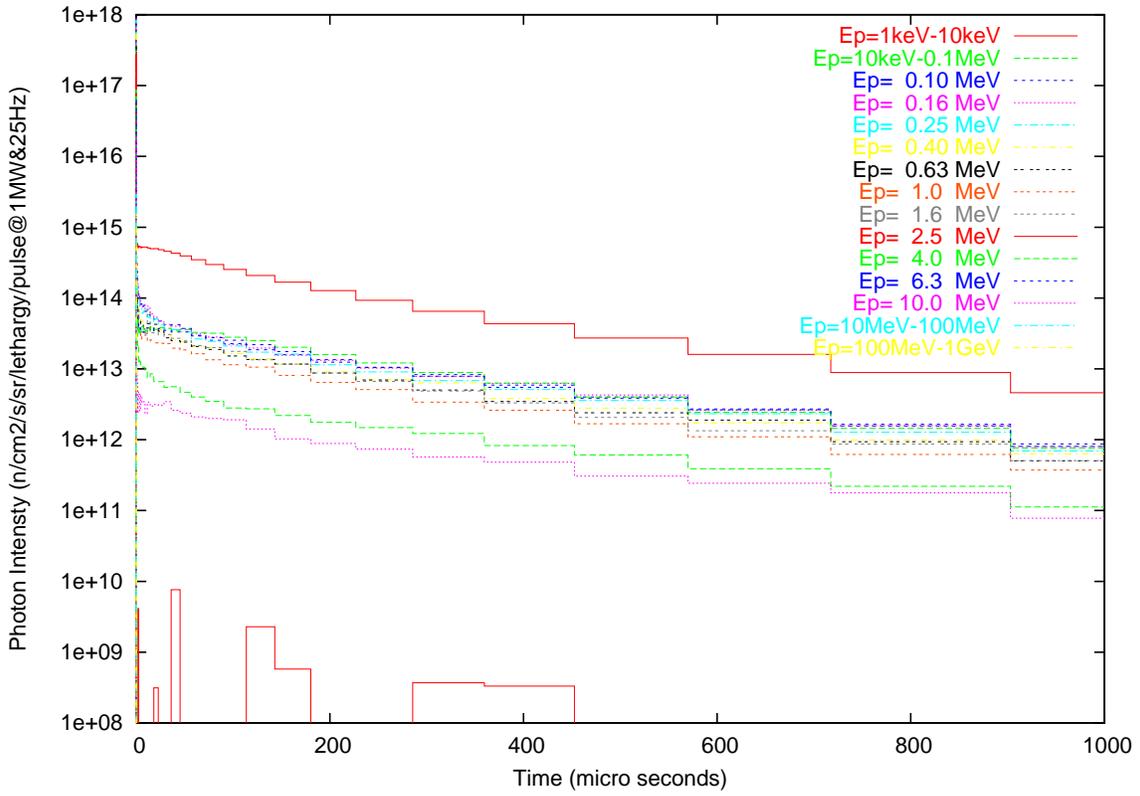


図 9: ポート 05 におけるエネルギー別の即発光子の時間スペクトル

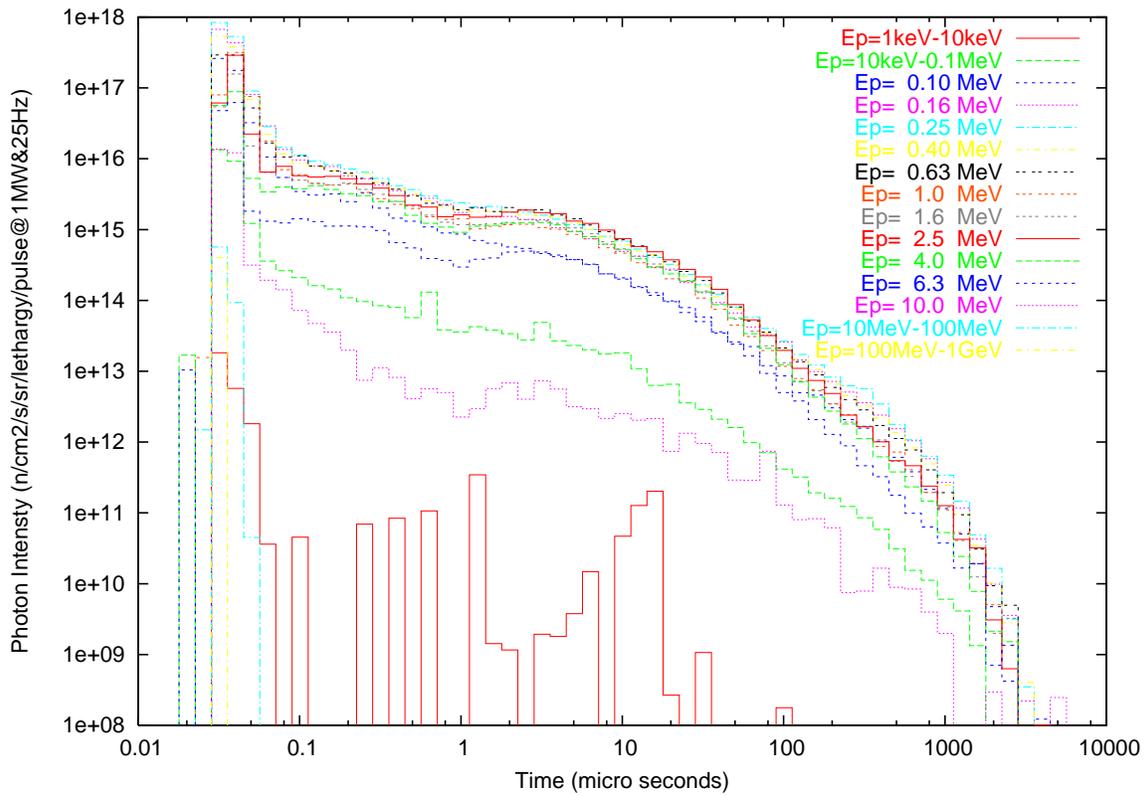
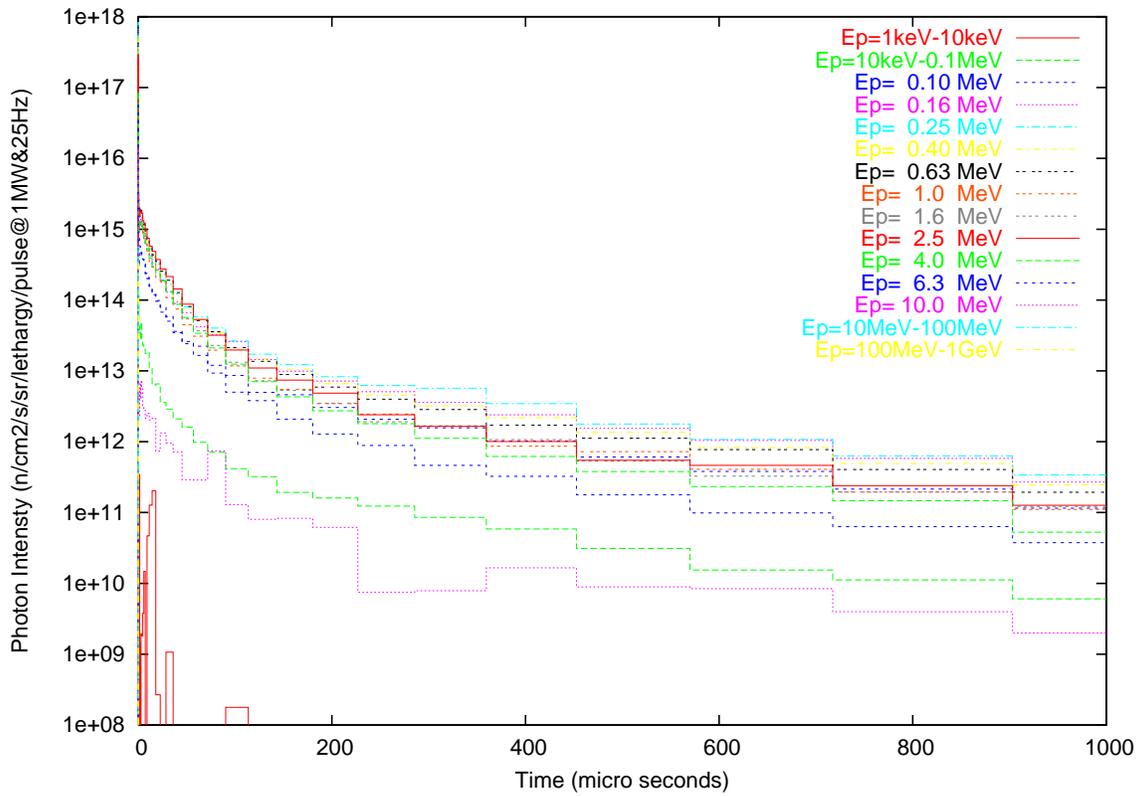


図 10: ポート 08 におけるエネルギー別の即発光子の時間スペクトル

表 1: 提供データ一覧

● 本資料

– 説明

– 表

– 各種グラフ

- \* 各中性子ポートにおける即発光子の時間平均されたエネルギースペクトル
- \* 各中性子ポートにおける即発光子のエネルギー積分された時間スペクトル
- \* 各中性子ポートにおける即発光子のエネルギー別の時間スペクトル
- \* 各中性子ポートにおける崩壊光子(残留放射性核種からの放出光子)による時間平均されたエネルギースペクトル
- \* 各中性子ポートにおける崩壊光子(残留放射性核種からの放出光子)による時間平均強度

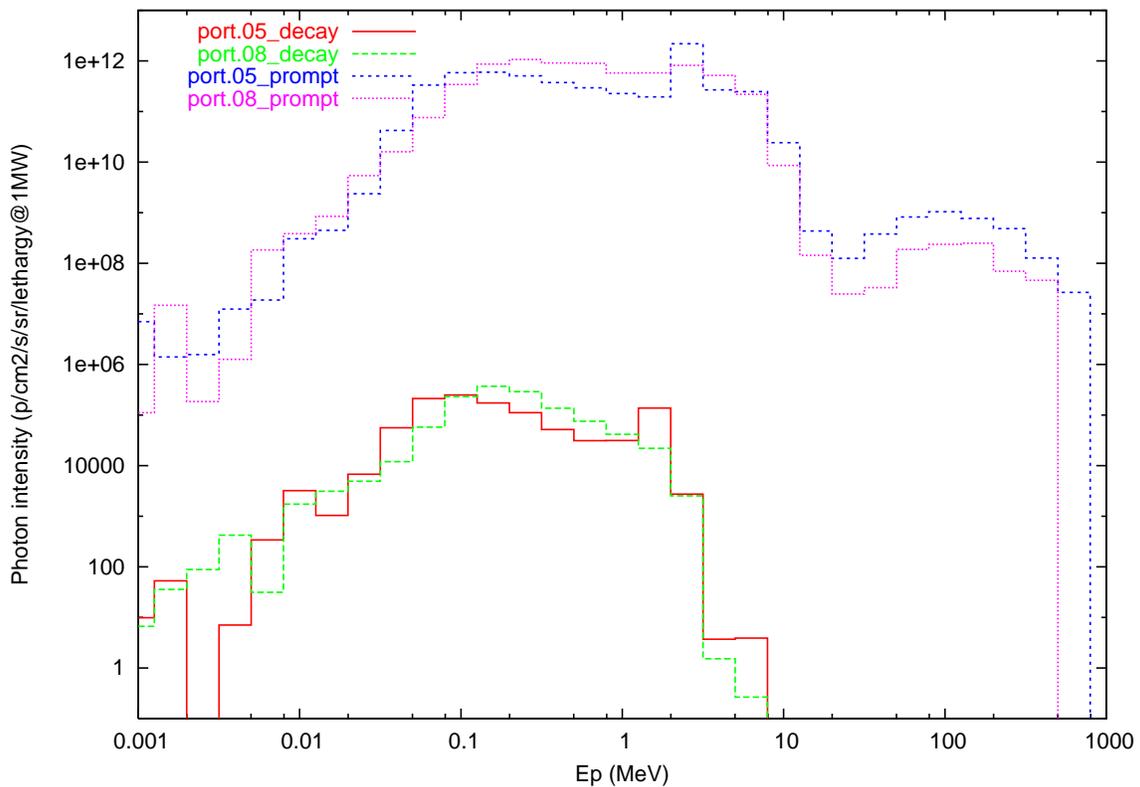


図 11: ポート 05 及びポート 08 における時間平均された即発及び崩壊光子のエネルギースペクトル

表 2: 計算条件 (特筆すべき項目のみ)

項目 1	項目 2	現条件
計算コード	陽子、中性子輸送 ( $E_n > 20$ MeV)	PHITS Ver.1.67
	光子輸送、中性子輸送 ( $E_n < 20$ MeV)	MCNP-4C3
	残留放射性核種計算	DCHAIN-SP-2001
モデルバージョン	Private	Ver.20.12.04
陽子ビーム	ビーム出力 ビームプロファイル 周波数 位置の揺らぎ	陽子ビーム窓直前の強度で 1 MW 位相空間で $81\pi$ mm mrad & 均一 + ガウス分布 ターゲット直前で、 $18 \times 7 \text{ cm}^2$ 25Hz 水平方向 $1\sigma = 0.68 \text{ cm}$ 垂直方向 $1\sigma = 0.06 \text{ cm}$
陽子ビーム窓	材質と厚さ 冷却水と厚さ	A5083 アルミニウム合金 2.5 mmt $\times$ 2 軽水 3.0 mmt
モデレータ	材質 容器材質 冷却水材質	液体水素 (パラ 100%)、20K A6061 アルミニウム合金 軽水
反射体	内側 (Be) 外側 (Fe) 容器材質 冷却水材質	$\phi 50 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$ $\phi 100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$ A6061 アルミニウム合金 重水
水冷遮蔽体	材質	体積比 90% SUS304L と体積比 10% 軽水の均質混合材と仮定
ミドルセクション	材質	体積比 90% SUS304L と体積比 10% 軽水の均質混合材と仮定
中性子ビーム孔		$10^w \times 10^h \text{ cm}^2$
光子タリー	No.16 のみ	$10^w \times 5^h \text{ cm}^2$
	種類	点検出器
	位置	各中性子ビームポートのビーム孔中央
	距離	モデレータ表面から 10.0 m 下流
	台数	No.16 を除く 22 本の中性子ビームポート各 1 台 No.16 中性子ビームポート 2 台

表 3: 残留放射性核種計算条件

陽子ビーム出力	陽子ビーム窓直前の強度で 1 MW
運転時間	5000 時間
冷却時間	なし (運転停止直後)
対象物質	Be&Fe 反射体、アルミニウム容器、AIC、Cd (水銀ターゲット、ターゲット容器一式は除く)

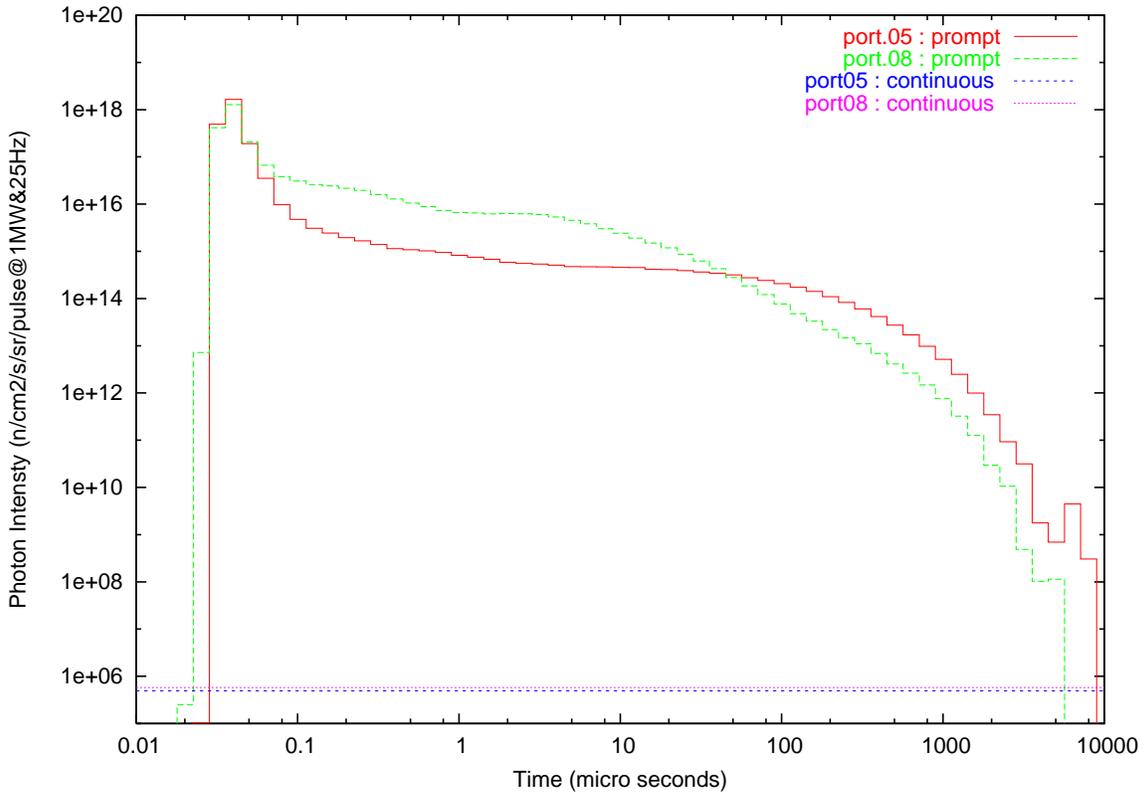


図 12: ポート 05 及びポート 08 におけるエネルギー積分された即発及び崩壊光子の時間スペクトル