



次世代放射光施設（NanoTerasu）における QSTビームラインの放射線遮蔽計算

<http://www.qst.go.jp/>

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

次世代放射光施設（NanoTerasu）における QSTビームラインの放射線遮蔽計算

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

量子ビーム科学部門

次世代放射光施設整備開発センター

松田洋樹、萩原雅之、竹内章博、糸賀俊朗、小西啓之

目 次

目 次	2
図目次	3
表目次	5
1. 概要	6
2. 計算方法	6
2.1. 放射線源	6
2.2. PHITS	6
2.3. PHITSパラメータ	6
2.4. 放射線源の生成	7
2.5. 遮蔽計算	9
2.6. 管理区域境界の基準値	9
3. 各ビームラインの計算結果	9
3.1. BL02U	10
ガス制動放射線源	10
放射光線源	16
3.2. BL06U	21
3.3. BL13U	27
4. まとめ	34
5. 参考文献	34

目 次

図 2.1	光子空間分布。左) 発生直後 右) ラチェット面まで輸送後	8
図 2.2	各ビームラインの放射光スペクトル	8
図 3.1	BL02U ジオメトリ 光学ハッチ 平面図	11
図 3.2	BL02U 3Dジオメトリ 下流より見る	11
図 3.3	BL02U 実効線量分布 光学ハッチ 平面図全寄与	12
図 3.4	BL02U 実効線量分布 光学ハッチ 平面図中性子の寄与	12
図 3.5	BL02U 実効線量分布 光学ハッチ 平面図光子の寄与	13
図 3.6	BL02U 実効線量分布 光学ハッチ 断面図全寄与	13
図 3.7	BL02U 実効線量分布 光学ハッチ 断面図中性子の寄与	14
図 3.8	BL02U 実効線量分布 光学ハッチ 断面図光子の寄与	14
図 3.9	BL02U 実効線量分布 半月板付近 平面図全寄与	15
図 3.10	BL02U 実効線量分布 光学ハッチ側壁 断面図全寄与	15
図 3.11	BL02U 実効線量分布 光学ハッチ後壁 断面図全寄与	16
図 3.12	BL02U 実効線量分布 光学ハッチ 平面図放射光	17
図 3.13	BL02U 実効線量分布 光学ハッチ 断面図放射光	17
図 3.14	BL02U 実効線量分布 光学ハッチM0ミラー付近 断面図放射光	18
図 3.15	BL02U 実効線量分布 光学ハッチ後壁床付近 断面図放射光	18
図 3.16	BL02U 実効線量分布 光学ハッチダクト① 断面図放射光	19
図 3.17	BL02U 実効線量分布 光学ハッチダクト② 断面図放射光	19
図 3.18	BL02U 実効線量分布 光学ハッチダクト③ 断面図放射光	20
図 3.19	BL02U 実効線量分布 光学ハッチダクト④ 断面図放射光	20
図 3.20	BL02U 実効線量分布 光学ハッチダクト⑤ 断面図放射光	21
図 3.21	BL06U ジオメトリ 光学ハッチ 平面図	22
図 3.22	BL06U 実効線量分布 光学ハッチ 平面図全寄与	22
図 3.23	BL06U 実効線量分布 光学ハッチ 平面図中性子の寄与	23
図 3.24	BL06U 実効線量分布 光学ハッチ 平面図光子の寄与	23
図 3.25	BL06U 実効線量分布 光学ハッチ 断面図全寄与	24
図 3.26	BL06U 実効線量分布 光学ハッチ 断面図中性子の寄与	24
図 3.27	BL06U 実効線量分布 光学ハッチ 断面図光子の寄与	25
図 3.28	BL06U 実効線量分布 側壁 断面図全寄与	25
図 3.29	BL06U 実効線量分布 後壁 断面図全寄与	26

図 3.30	BL06U	実効線量分布	半月板付近	平面図全寄与	27
図 3.31	BL13U	ジオメトリ	光学ハッチ	平面図	28
図 3.32	BL13U	実効線量分布	光学ハッチ	平面図全寄与	29
図 3.33	BL13U	実効線量分布	光学ハッチ	平面図中性子の寄与	29
図 3.34	BL13U	実効線量分布	光学ハッチ	平面図光子の寄与	30
図 3.35	BL13U	実効線量分布	光学ハッチ	断面図全寄与	30
図 3.36	BL13U	実効線量分布	光学ハッチ	断面図中性子の寄与	31
図 3.37	BL13U	実効線量分布	光学ハッチ	断面図光子の寄与	31
図 3.38	BL13U	実効線量分布	半月板付近	平面図全寄与	32
図 3.39	BL13U	実効線量分布	光学ハッチ側壁	断面図全寄与	33
図 3.40	BL13U	実効線量分布	光学ハッチ後壁	断面図全寄与	33

表 目 次

表 2.1	線源の特徴	6
表 2.2	デフォルト値から変更したPHITSパラメータ	7
表 3.1	BL02U 散乱体・遮蔽体	10
表 3.2	BL02U 散乱体・遮蔽体	21
表 3.3	BL13U 散乱体・遮蔽体	28

1. 概要

モンテカルロ粒子輸送計算コード PHITS を用いて、NanoTerasu の各ビームラインの光学ハッチにおける遮蔽計算を行った。本レポートではその結果を報告する。

2. 計算方法

2.1 放射線源

この遮蔽計算で考慮したの放射線源はガス制動放射線及び放射光の2種類である。ガス制動放射線は蓄積リングを周回する電子とリング中の残留ガスが相互作用して発生する光子である。放射光は挿入光源によって生成される光子である。それぞれの特徴を表 2.1 にまとめる。ガス制動放射線は、フラックスは低いがエネルギーが極めて高い。放射光は、フラックスは極めて高いがエネルギーは低い。なおフラックスは蓄積リング定常運転時 (400 mA) の条件で評価した。その他の加速器パラメータ等については文献 [1] を参照されたい。

表 2.1 線源の特徴

名称	フラックス 1/秒	最大エネルギー MeV
ガス制動放射線	10^6 オーダー	3000
放射光	10^{16} オーダー	0.2

2.2 PHITS

モンテカルロ粒子輸送計算コード PHITS [2] はあらゆる物質中での様々な放射線挙動を核反応モデルや核データなどを用いて模擬するモンテカルロ計算コードである。放射線遮蔽設計だけでなく医学物理計算、放射線防護研究や宇宙線・地球科学分野研究など幅広く利用されている。日本原子力研究開発機構が中心となり開発が進められている。

本計算で使用したバージョンは 3.24 であるが、公式配布版は細かなバグが存在するため修正パッチを当てた。パッチによる物理モデルの変更はない。

2.3 PHITS パラメータ

パラメータ値は基本的にデフォルト値を採用した。しかし光子や電子・陽電子などの影響を評価するために値を適宜変更した。デフォルト値から変更したパラメータを表 2.2 に示す。

核データライブラリは PHITS デフォルト値を使用した。PHITS において光核反応の巨大共鳴反応は JENDL-PD/2004 [3] が使用されている。

表 2.2 デフォルト値から変更した PHITS パラメータ

パラメータ名	数値	詳細
negs	1	EGS5 を用いて輸送する
e-mode	2	Event generator モードを使用する
emin(2)	1e-10	冷中性子まで考慮するため
emin(12)	5e-2	EGS5 の輸送下限は 10 keV だが計算時間が急激に増加するためこの値を採用した
emin(13)	5e-2	同上
emin(14)	1e-2	線量換算係数の下限が 10keV のため
dmax(12)	3001	制動放射線エネルギー上限が 3 GeV のため
dmax(13)	3001	同上
dmax(14)	3001	同上
ipnint	1	光核反応を考慮する
nspread	2	電子ビーム輸送時のみ変更
nedisp	1	電子ビーム輸送時のみ変更

2.4 放射線源の生成

光学ハッチ遮蔽計算に必要な電子によるガス制動放射線を模擬するために制動放射線が発生する領域中で電子を輸送し、発生した光子だけを領域端に於いてダンプした。ガス制動放射線発生領域は挿入光源が設置される直線部である。これは Undulator が設置される長直線部、Multi Pole Wiggler (MPW) が挿入される短直線部の二種類が存在する。それぞれ長さは 9.66 m、3.86 m である。挿入光源中心位置から光学ハッチラチェット面までは Undulator 型で 18.4 m、MPW 型で 17.4 m である。3 本の QST ビームラインでは Undulator 型挿入光源だけが使用されるが、コアリジョンビームラインでは MPW 型も使用される。

ビームパイプ径は 3 GeV 電子のガス制動放射線の臨界角とラチェット面までの距離から半径 35 mm² と決定した。簡単のため MPW も半径 35 mm とする。

真空パイプ中の真空ガス圧力及びガス組成比は文献 [1] を元に設定した。しかし実際の圧力条件下で計算を行ってもほぼ全く光子が発生しないため、圧力を 10^7 倍にして計算を行った。また実効線量に換算する際 10^7 倍し、条件を元に戻した。この操作によるガス制動放射線スペクトルの変化はない [4]。

より安全に評価するために、蓄積リング電流値は通常運転時よりも高い 500 mA とした。

光学ハッチ遮蔽計算の計算時間短縮のため、ダンプした光子をラチェット面まで輸送する。光子のダンプ位置及びラチェット面位置における光子の空間分布を図 2.1 に示す。光子はほぼ

1 $0.511 \times 10^{-3} E \text{ rad}$ (ただし E は GeV 単位の電子ビームエネルギー) と定義される。

2 制動放射線発生領域端からラチェット面までの距離は $9660/2+18400=23230 \text{ mm}$ であるから、臨界角で広がる場合 $23230 \times \tan(0.511 \times 3) \cong 35 \text{ mm}$ となる。

前方に放出されるため、ダンプ面からラチェット面まで輸送したとしても分布が広がることはあまり無い。半径5.94 mm内に1 σ の光子が含まれ、半径18.3 mm内に2 σ の光子が含まれる。

統計誤差を小さくするために光子数が 10^6 個以上となるようにガス制動放射線を計算した。

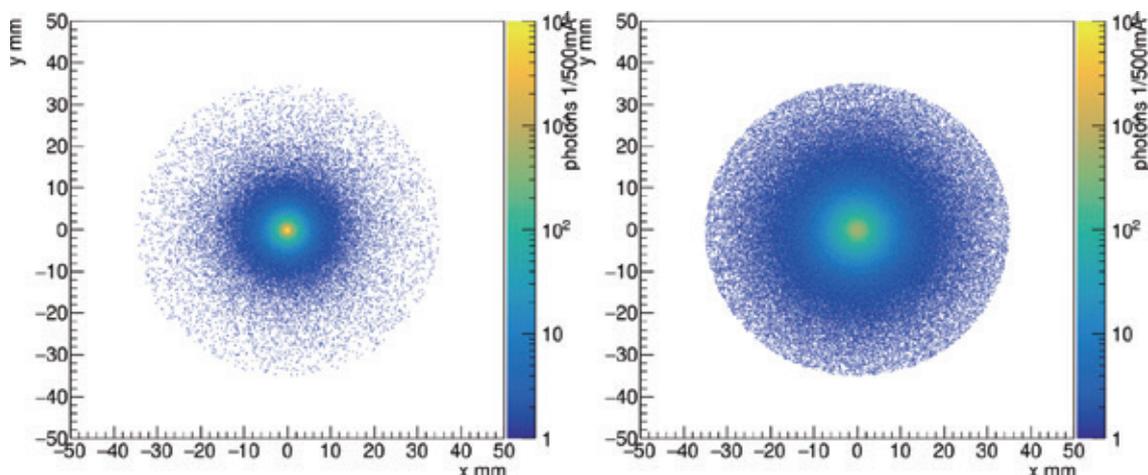


図 2.1 光子空間分布。左) 発生直後 右) ラチェット面まで輸送後

放射光は SPECTRA [5] を用いて計算された。これは様々な種類の挿入光源から発生する放射光を計算するプログラムである。各ビームラインの放射光スペクトルを図 2.2 に示す。いずれにビームラインにおいても約 0.2 MeV 程度で光子数は 1 個 / 秒以下となる。

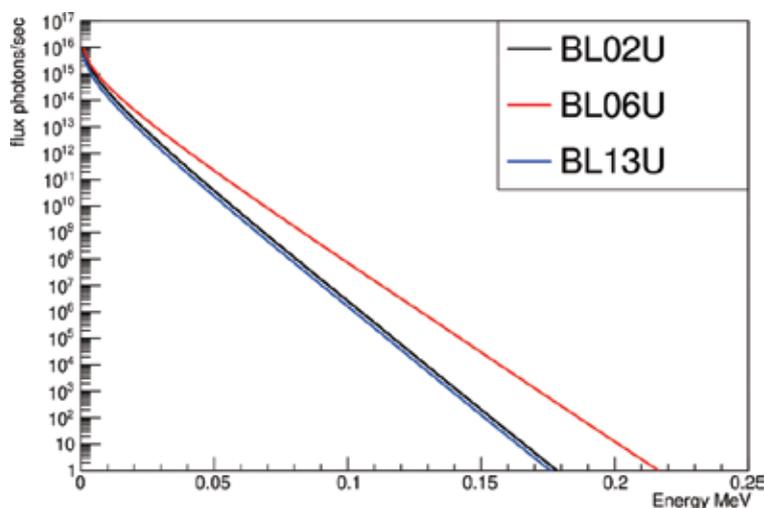


図 2.2 各ビームラインの放射光スペクトル

0.2 MeV 光子に対する鉛の減弱係数はおおよそ $1 \text{ cm}^2/\text{g}$ であるから、1 cm 厚の鉛を通過後光子は $\exp(-1 \times 1 \times 11.34) = 1.2 \times 10^{-5}$ 程度まで減衰される。0.2 MeV 光子の線量換算係数は約 $1 \text{ pSv} \cdot \text{cm}^2$ であり、仮に $10 \text{ photons/s/cm}^2$ が 1 cm 厚鉛に照射された場合、鉛透過後の実効線量は $0.03 \text{ } \mu\text{Sv/h}$ と計算される。これは基準値 $1.25 \text{ } \mu\text{Sv/h}$ を十分に下回る値である。光学ハッチの遮蔽壁は 1 cm 厚の鉛及び 1 cm 厚の鉄で構成されているから、遮蔽壁からの漏洩は考えなくともよいことが分かる。

2.5 遮蔽計算

ガス制動放射線を光学ハッチに輸送し、光学ハッチ外側側面及び後面での実効線量分布をタリーし、実効線量値が基準値を下回るようにミラー等光学装置の配置を決定した。ビームラインに下流に設けられた実験ハッチにガス制動放射線が輸送されることを考慮し、エンドストッパーを設けて遮蔽した。実際のガス制動放射線はフロントエンド部を通過する際コリメートされる。しかし安全側に評価するため、挿入光源位置から光学ハッチ入口まで幾何学的に輸送したものを入射源として用いた。

一方、放射光による遮蔽計算では最初の光学素子（M0 ミラー）に入射させた。PHITS では光学素子表面の反射を考慮できないため、すべての放射光が反射されず散乱されたものとして計算を行った。ガス制動放射線とは異なり、ハッチ壁・床面との隙間や光学ハッチケーブルダクトからのストリーミングの影響が大きいため、タリー領域設定時はそれら周辺を設定した。実際の光学素子は鉄製の真空チェンバー内に設置される。しかし安全側に評価するため、計算では真空チェンバーを設けていない。

放射光は 10 mm 厚みの鉛で完全に遮蔽され外部へ漏洩することは無い。一方で隙間などからのストリーミングにより簡単に外部へ漏洩する。ストリーミングはすべての光学ハッチで起こり得ることであるから、光学ハッチを代表して 02U だけの遮蔽計算を実施した。

フルエンス ($1/\text{cm}^2/\text{sec}$) から実効線量 ($\mu\text{Sv}/\text{h}$) への変換は PHITS 組み込みの実効線量換算係数 [6] を用いた。

2.6 管理区域境界の基準値

電離放射線障害防止規則（電離則）では 3 か月につき 1.3 mSv を超える恐れのある区域を管理区域として定める。NanoTerasu における 3 か月の運転時間を 520 時間とした場合、これは $2.5 \mu\text{Sv}/\text{h}$ と変換される。計算モデル等の不確実性を考慮し安全係数を 2 とすると、遮蔽計算における線量基準値は $1.25 \mu\text{Sv}/\text{h}$ となる。非管理区域においてこの値未満になるように遮蔽設計を行った。

3. 各ビームラインの計算結果

ここでは NanoTerasu ユーザー運転開始時に運用される 3 本の QST ビームラインの遮蔽計算結果を示す。2 次元 CAD 図面に基づいて精密に 3 次元 PHITS ジオメトリを作成した。

光学ハッチには、散乱体として寄与するミラーや遮蔽体となるガンマストッパー及び半月板を設置した。ミラー用チェンバーは真空パイプと同じ組成・圧力で満たし、安全側に評価するためにチェンバー自体の壁は設定していない。ガンマストッパー及び半月板にはビームパイプを設置した。後壁パネルにあるビームパイプを通すための貫通孔も図面通りに設置した。ケーブルダクト等は BL02U にのみ設置した。またハッチドアは設けていない。ここで側壁とは実験ホール側の遮蔽壁のことを指し、後壁とはハッチ下流側の遮蔽壁を指す。

特に明示しない限り、実効線量分布は 5 色カラープロットで表示され、スケールは 0 ~ 2.5 $\mu\text{Sv/h}$ である。場合によっては分かりやすくするために 2 色カラープロットで表示した。

3.1 BL02U

前述の通り BL02U に対してのみ放射光遮蔽計算を実施する。

ガス制動放射線源

ケーブルダクトやストリーミング防止構造（スカート構造と呼ぶ）の影響を評価するため、このビームラインにのみこれら構造体を組み込んだ。実験ホール側に於いて実効線量分布の統計誤差は最大 20% である。統計誤差を考慮しても実験ホール側への放射線漏洩はない。

表 3.1 BL02U 散乱体・遮蔽体

名称	寸法 mm	材質	密度 g/cm^3
ミラー0	L230 H50 W50	ケイ素	2.33
ガンマストッパー	本体: L300 H400 W400 貫通パイプ: 外径22、 内径21	鉛 鉄	11.34 7.8
ミラー1	L400 H50 W30	ケイ素	2.33
半月板	本体: L100 H400 W400 貫通パイプ: 外径25.4	鉛 鉄	11.34 7.8
ハッチ貫通孔	$\phi 100$	空気	1.21×10^{-3}

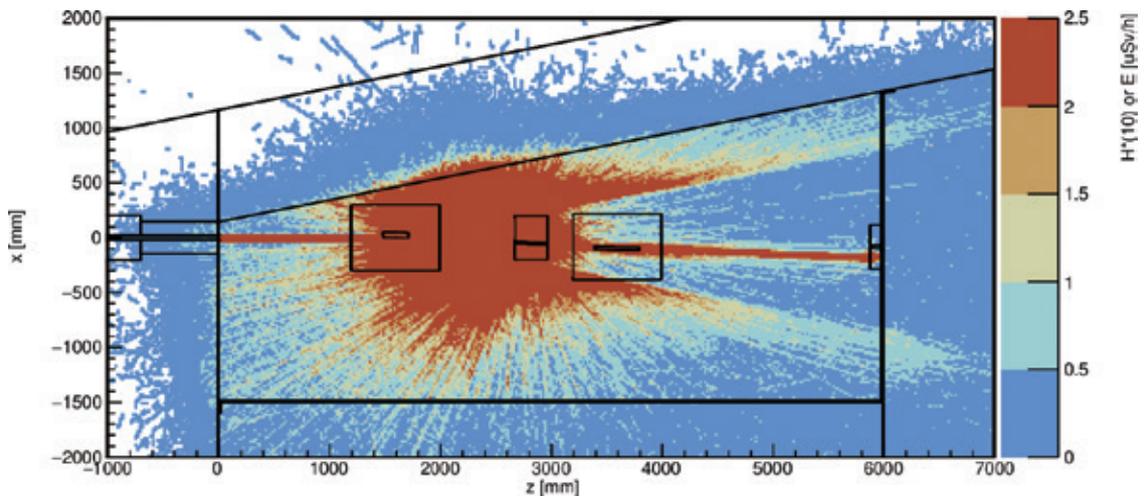


図 3.3 BL02U 実効線量分布 光学ハッチ 平面図 全寄与

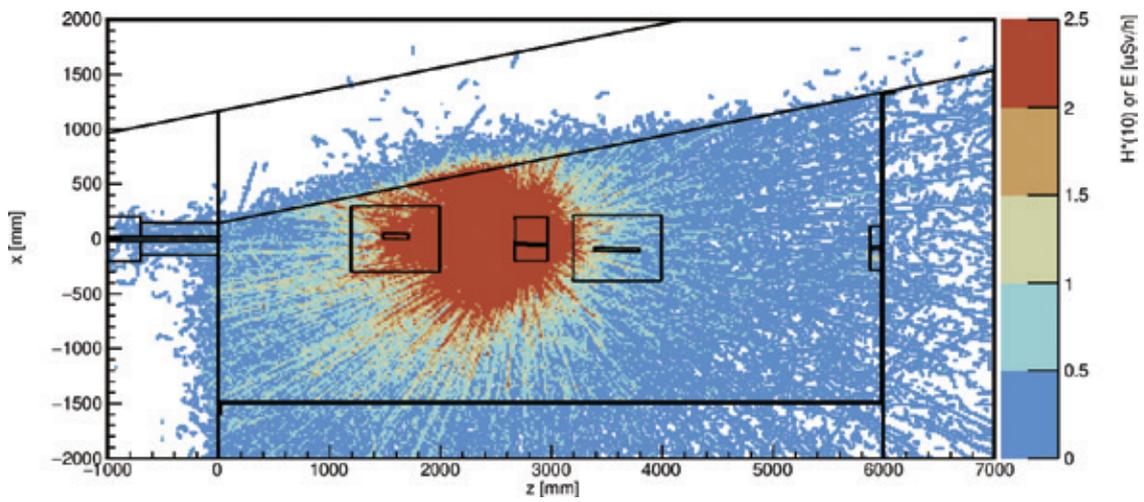


図 3.4 BL02U 実効線量分布 光学ハッチ 平面図 中性子の寄与

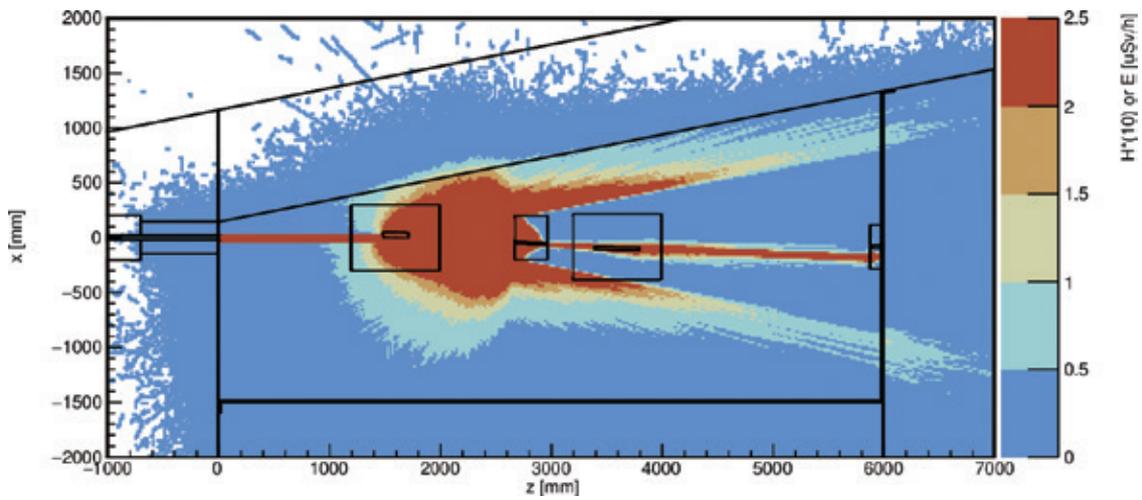


図 3.5 BL02U 実効線量分布 光学ハッチ 平面図 光子の寄与

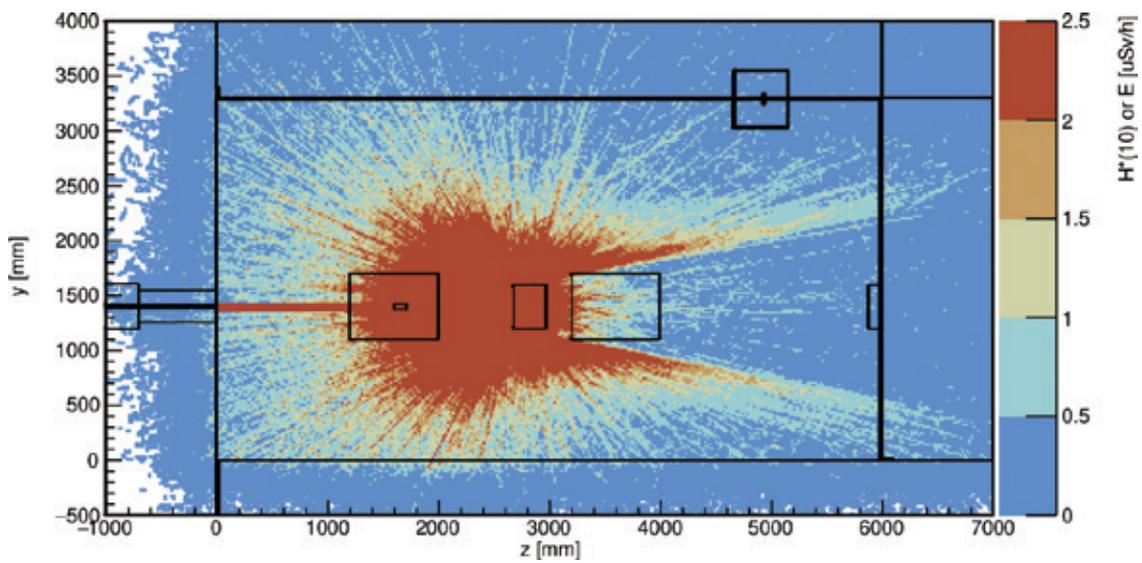


図 3.6 BL02U 実効線量分布 光学ハッチ 断面図 全寄与

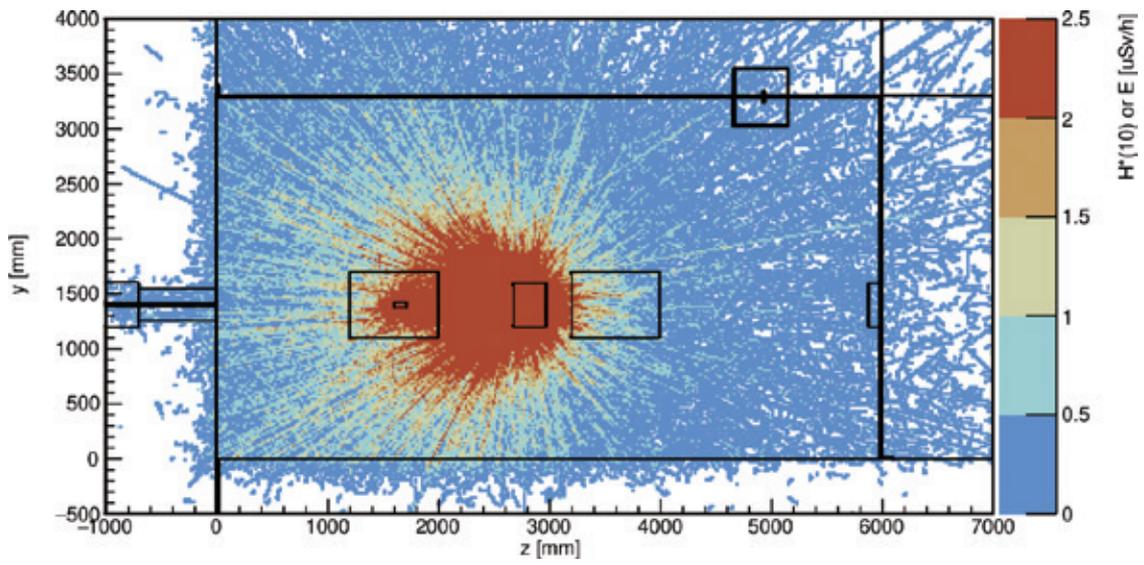


図 3.7 BL02U 実効線量分布 光学ハッチ 断面図 中性子の寄与

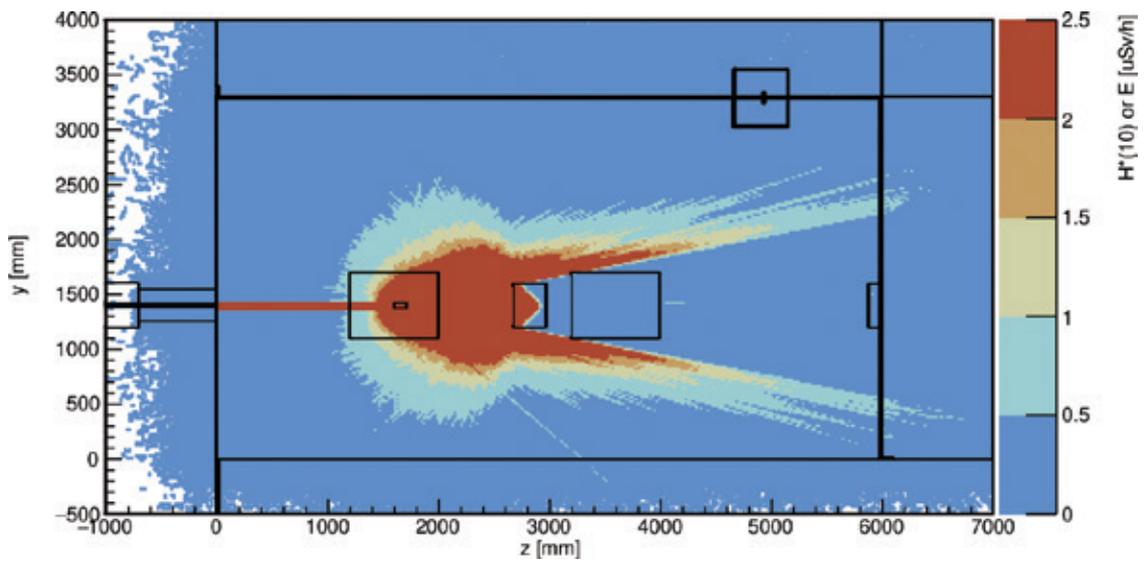


図 3.8 BL02U 実効線量分布 光学ハッチ 断面図 光子の寄与

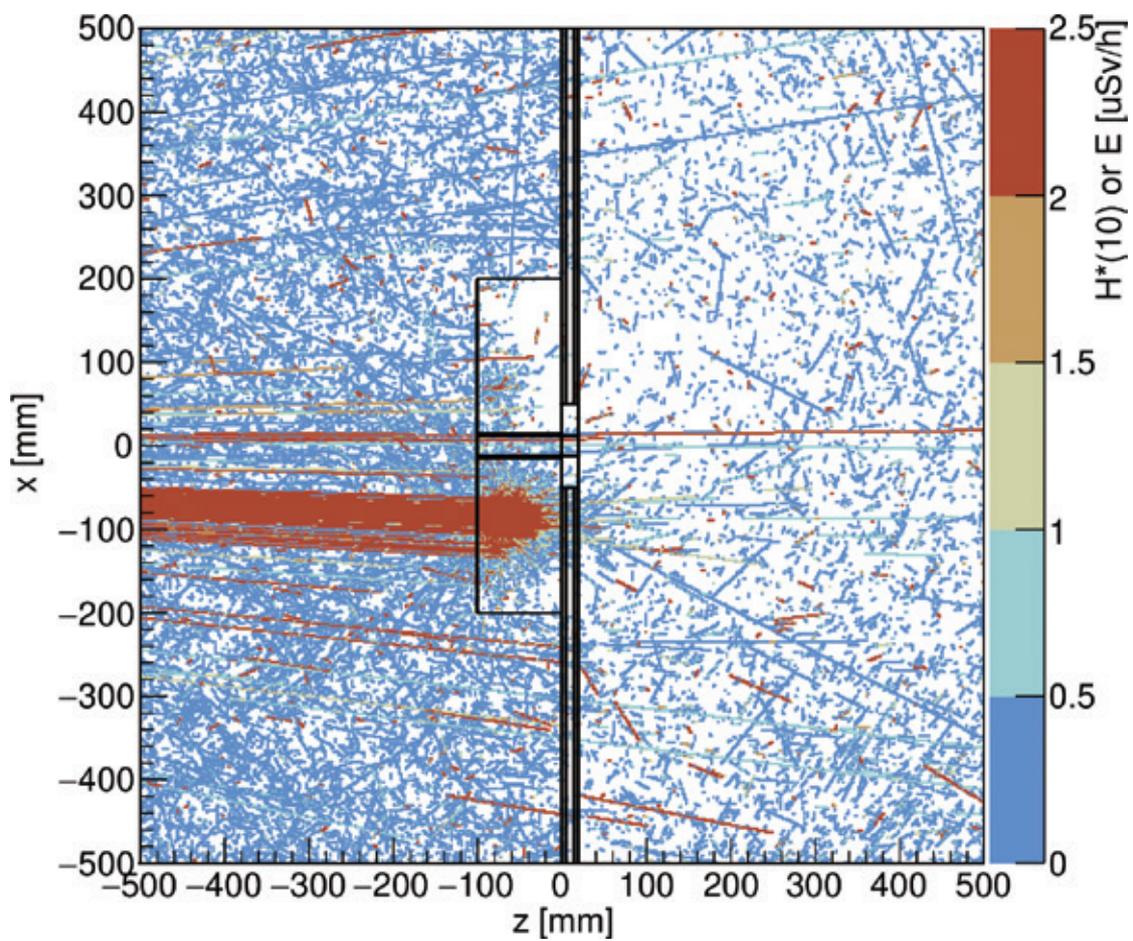


図 3.9 BL02U 実効線量分布 半月板付近 平面図 全寄与

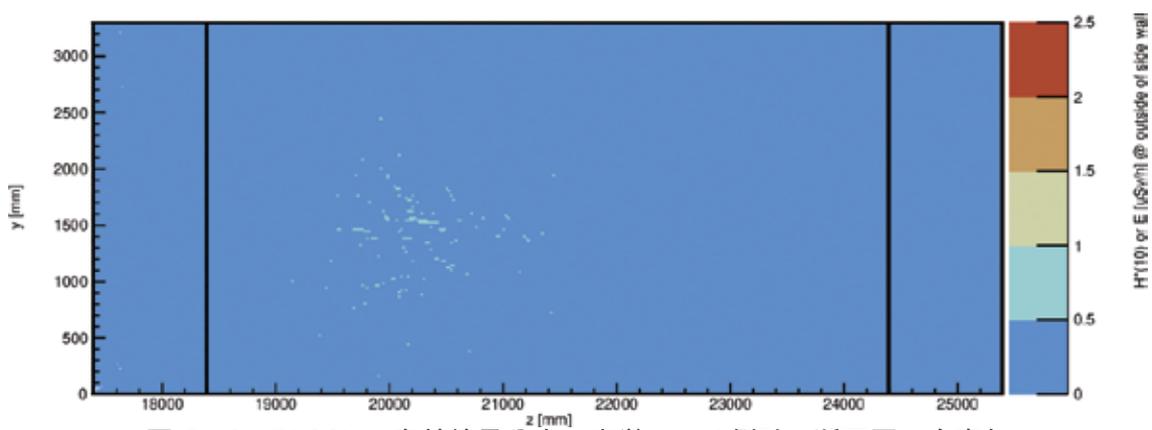


図 3.10 BL02U 実効線量分布 光学ハッチ側壁 断面図 全寄与

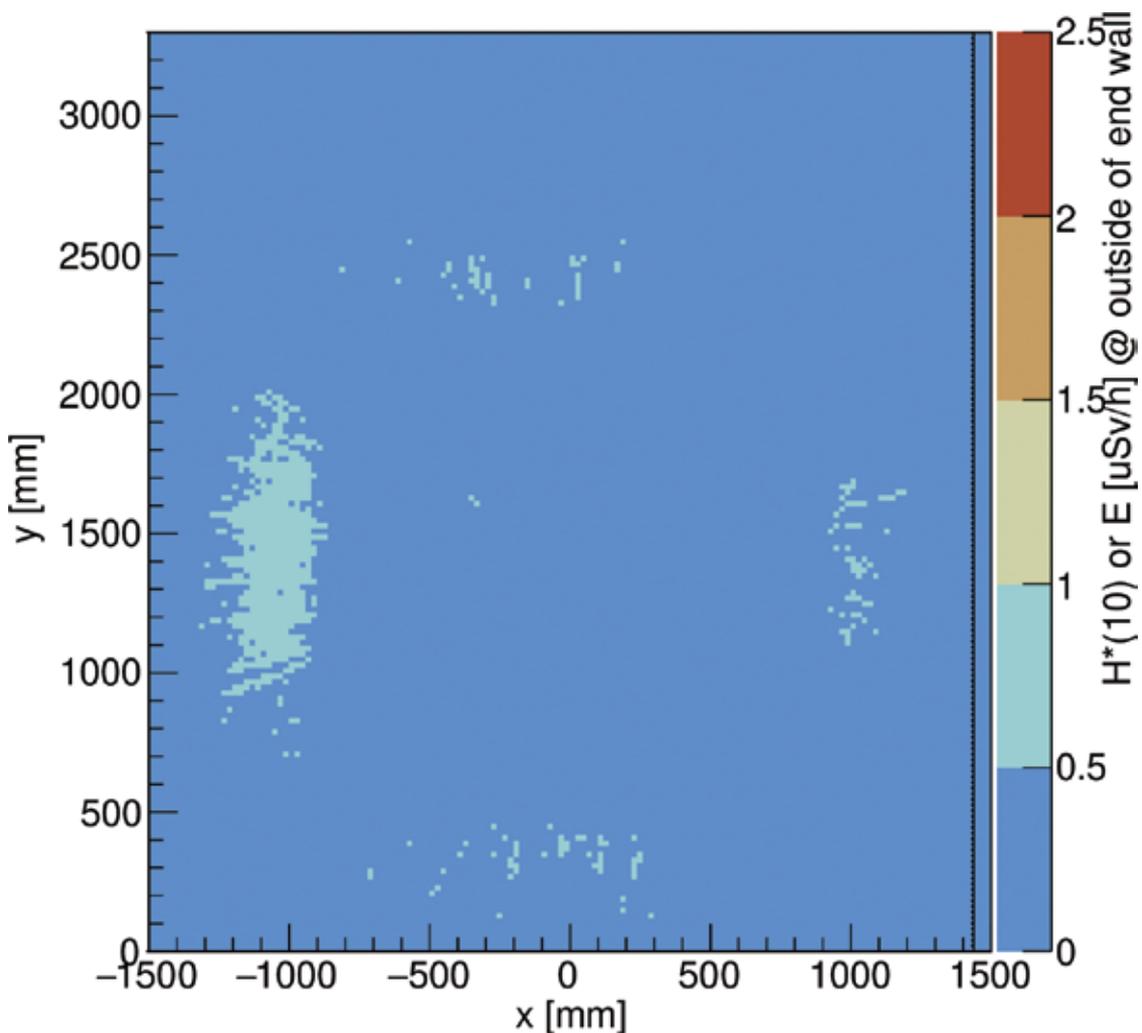


図 3.11 BL02U 実効線量分布 光学ハッチ後壁 断面図 全寄与

放射光線源

放射光を入射した際の実効線量分布を示す。スカート構造はストリーミングだけでなく、コンクリート床を通じて染み出す放射光を遮蔽するのも効果を発揮することが分かった。図 3.12 に於いて実験ホール側に放射線が漏洩しているように見えるが、真空パイプ用貫通孔が後壁に空いているからである。

図 3.15 においてスカート構造を設けたことでハッチ壁とコンクリート床面との隙間からのストリーミングや、コンクリート床面を透過してくる放射線が完全に遮蔽されていることが分かる。

図 3.16 から図 3.20 までダクト断面に於ける実効線量分布を示すが、2 回目の屈曲で十分に線量が低くなっていることが分かる。実際にはケーブルなどが設置されるため更に線量が小さくなると考えられる。

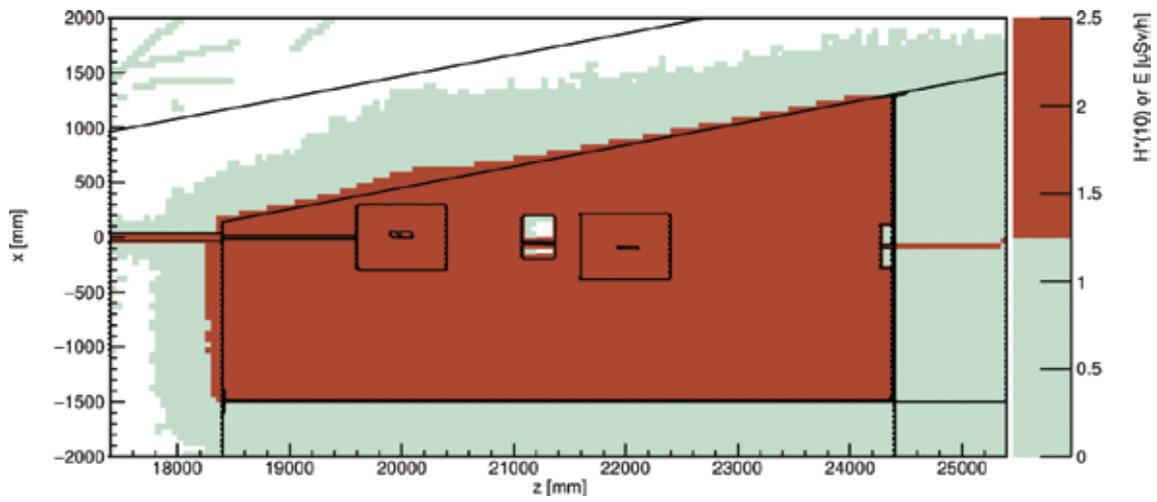


図 3.12 BL02U 実効線量分布 光学ハッチ 平面図 放射光

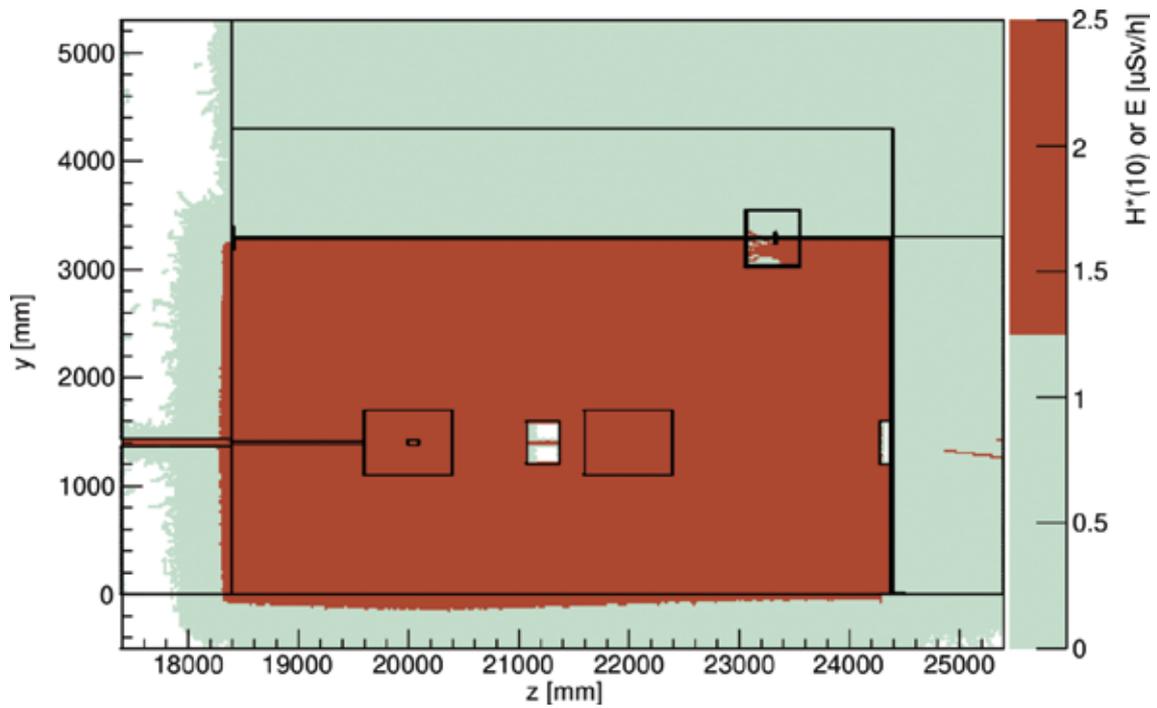


図 3.13 BL02U 実効線量分布 光学ハッチ 断面図 放射光

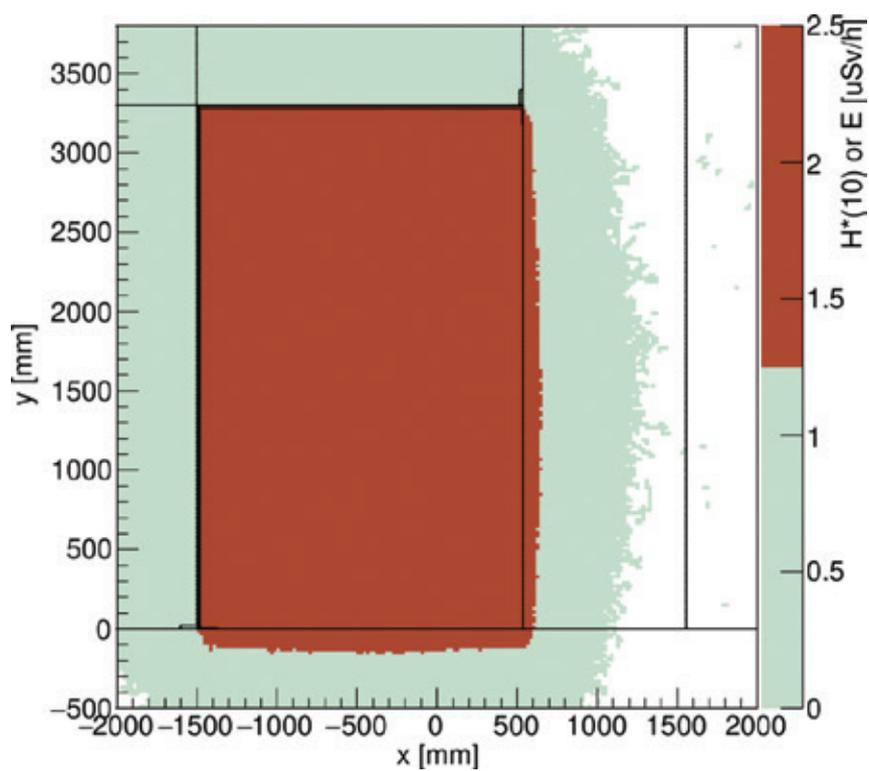


図 3.14 BL02U 実効線量分布 光学ハッチ M0 ミラー付近 断面図 放射光

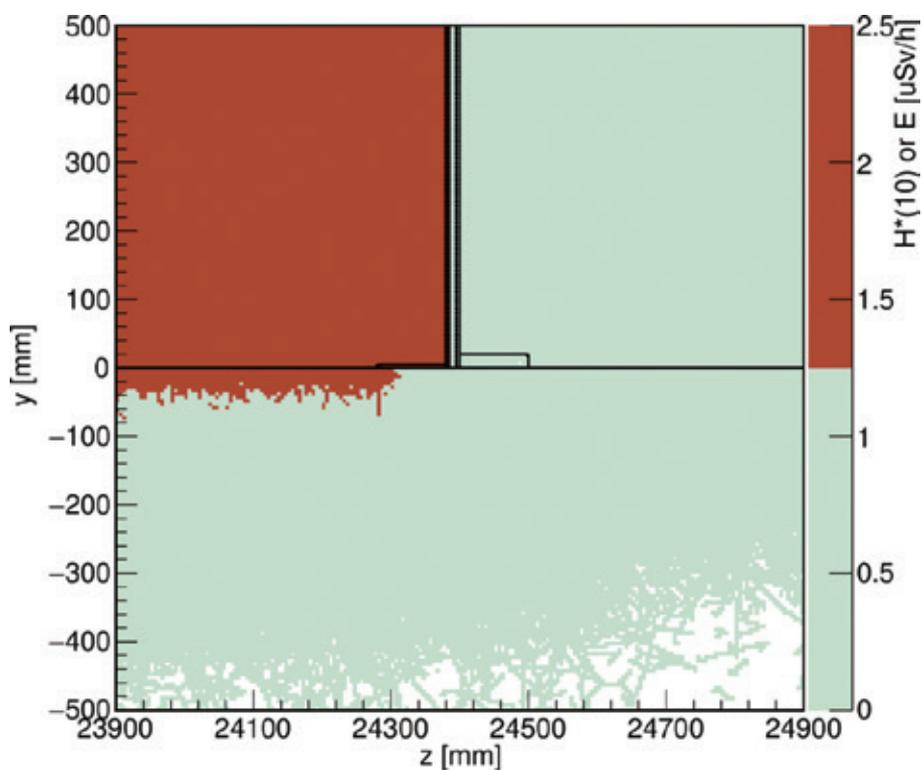


図 3.15 BL02U 実効線量分布 光学ハッチ後壁床付近 断面図 放射光

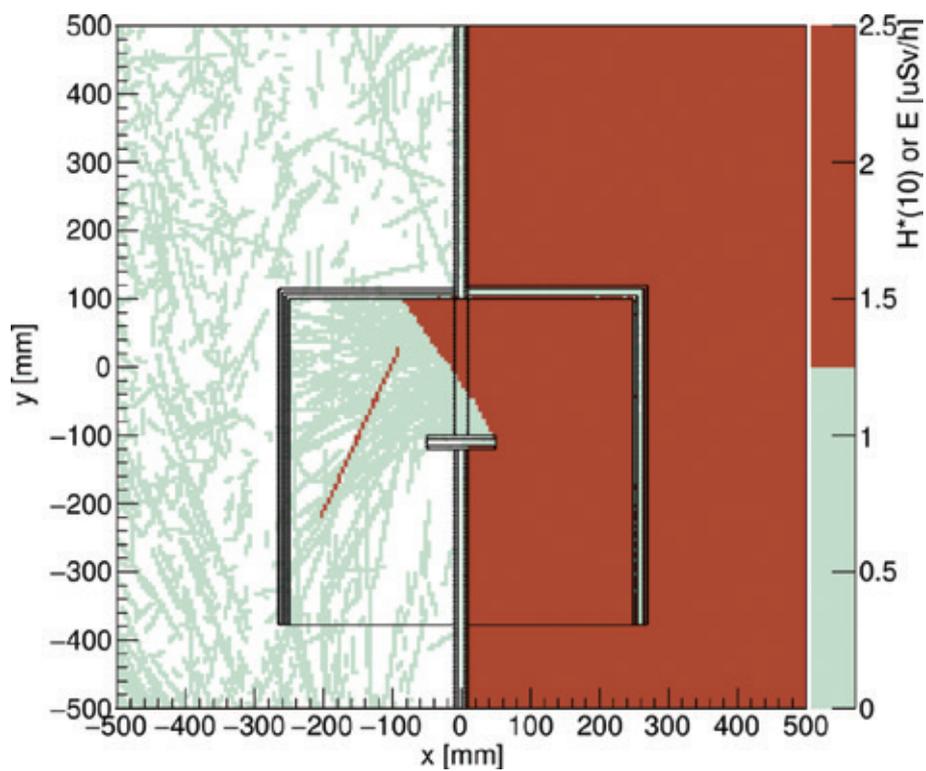


図 3.16 BL02U 実効線量分布 光学ハッチダクト① 断面図 放射光

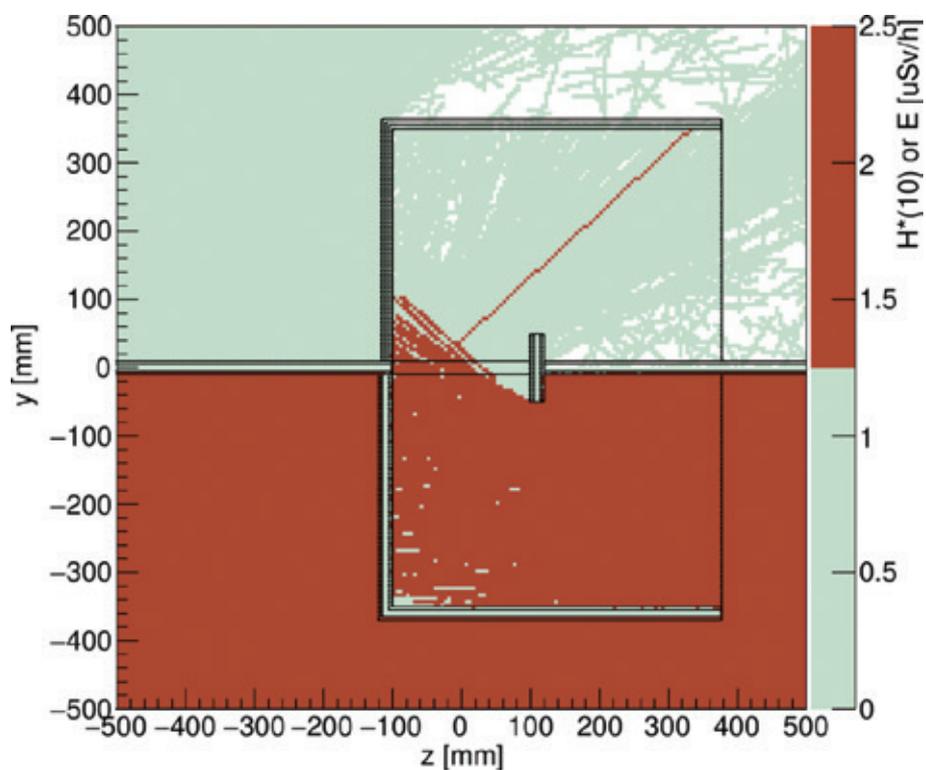


図 3.17 BL02U 実効線量分布 光学ハッチダクト② 断面図 放射光

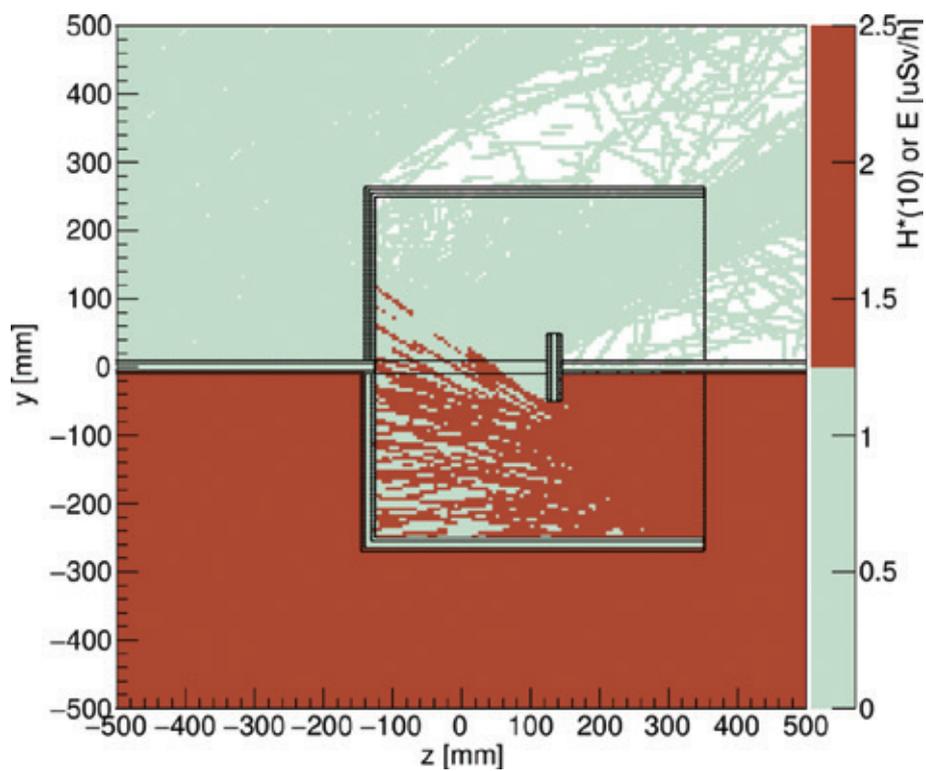


図 3.18 BL02U 実効線量分布 光学ハッチダクト③ 断面図 放射光

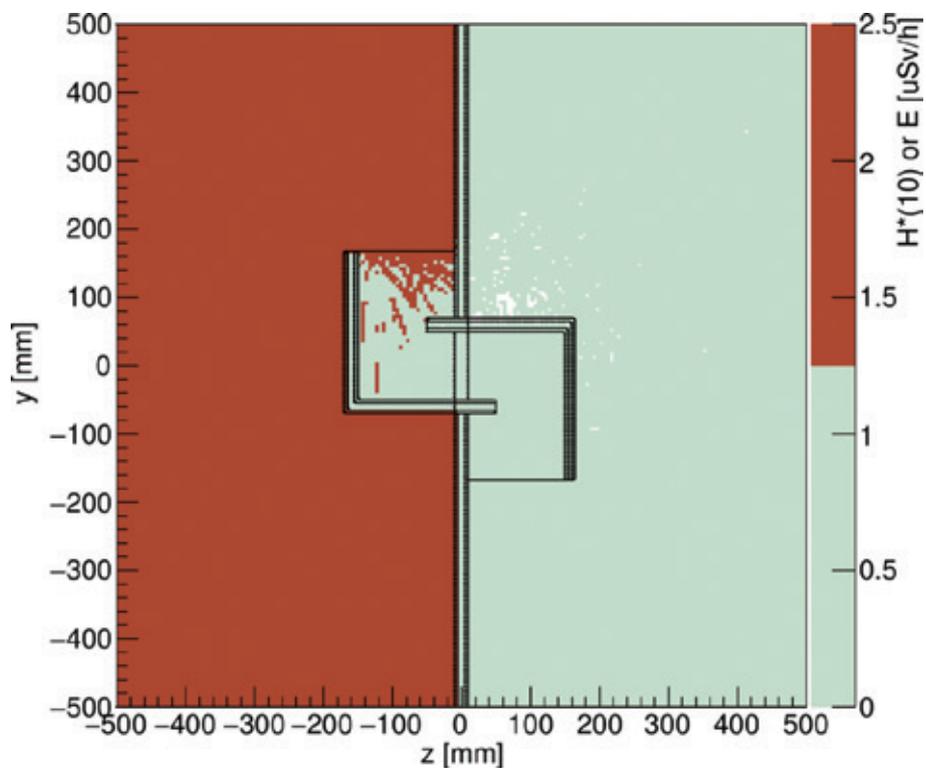


図 3.19 BL02U 実効線量分布 光学ハッチダクト④ 断面図 放射光

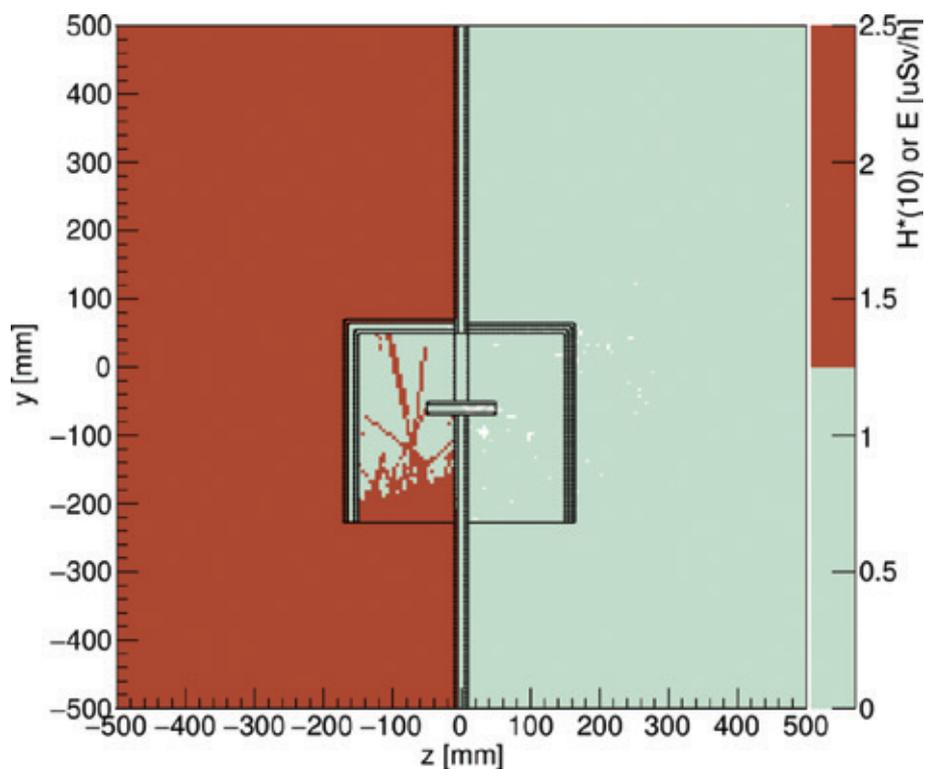


図 3.20 BL02U 実効線量分布 光学ハッチダクト⑤ 断面図 放射光

3.2 BL06U

02Uと同様にジオメトリを作成しガス制動放射線を入射して実効線量分布を評価した。

表 3.2 BL02U 散乱体・遮蔽体

名称	寸法 mm	材質	密度 g/cm ³
ミラー0	L230 H50 W50	ケイ素	2.33
ガンマストッパー	本体: L300 H400 W400 貫通パイプ: 外径22、 内径21	鉛 鉄	11.34 7.8
ミラー1	L400 H50 W30	ケイ素	2.33
半月板	本体: L100 H400 W400 貫通パイプ: 外径25.4	鉛 鉄	11.34 7.8
ハッチ貫通孔	φ100	空気	1.21×10^{-3}

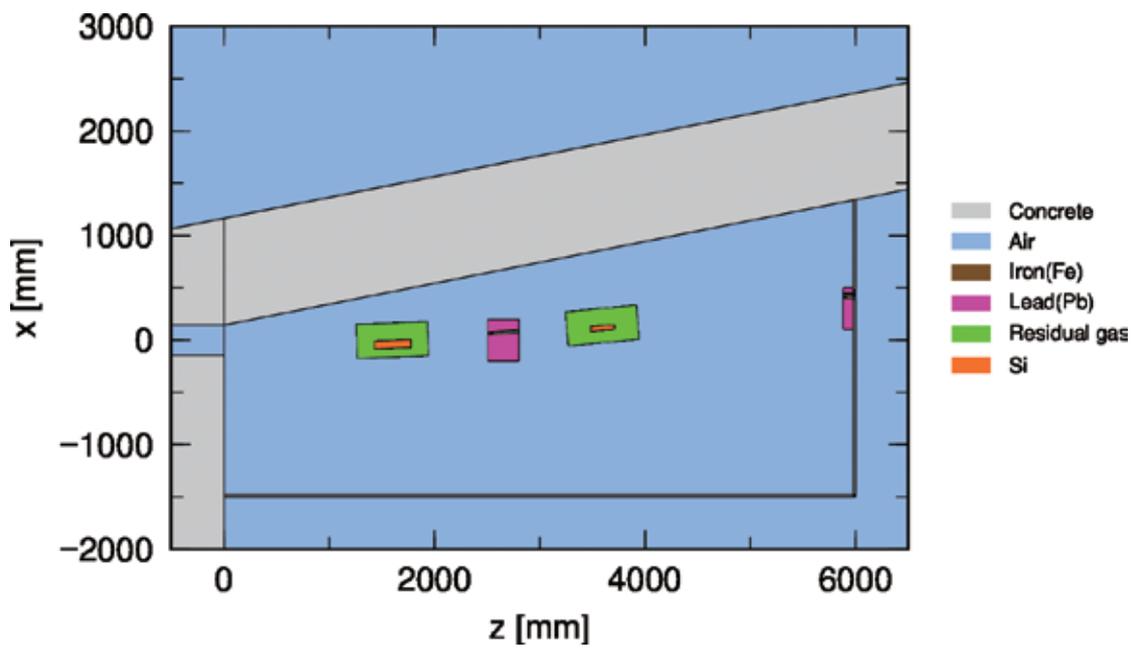


図 3.21 BL06U ジオメトリ 光学ハッチ 平面図

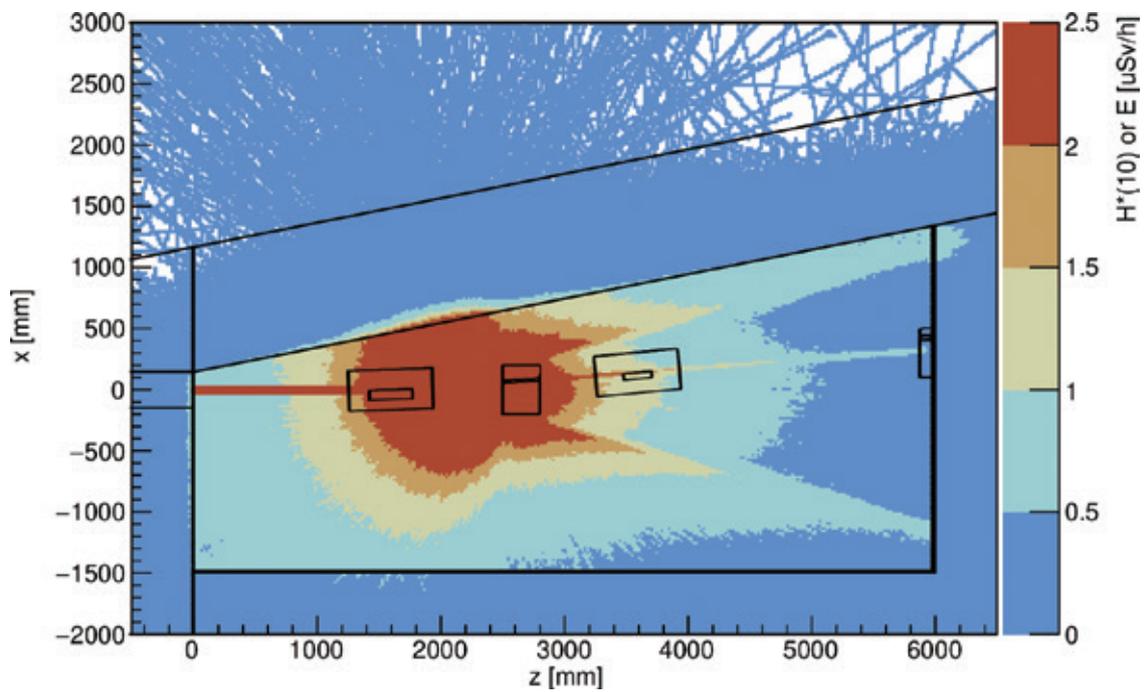


図 3.22 BL06U 実効線量分布 光学ハッチ 平面図 全寄与

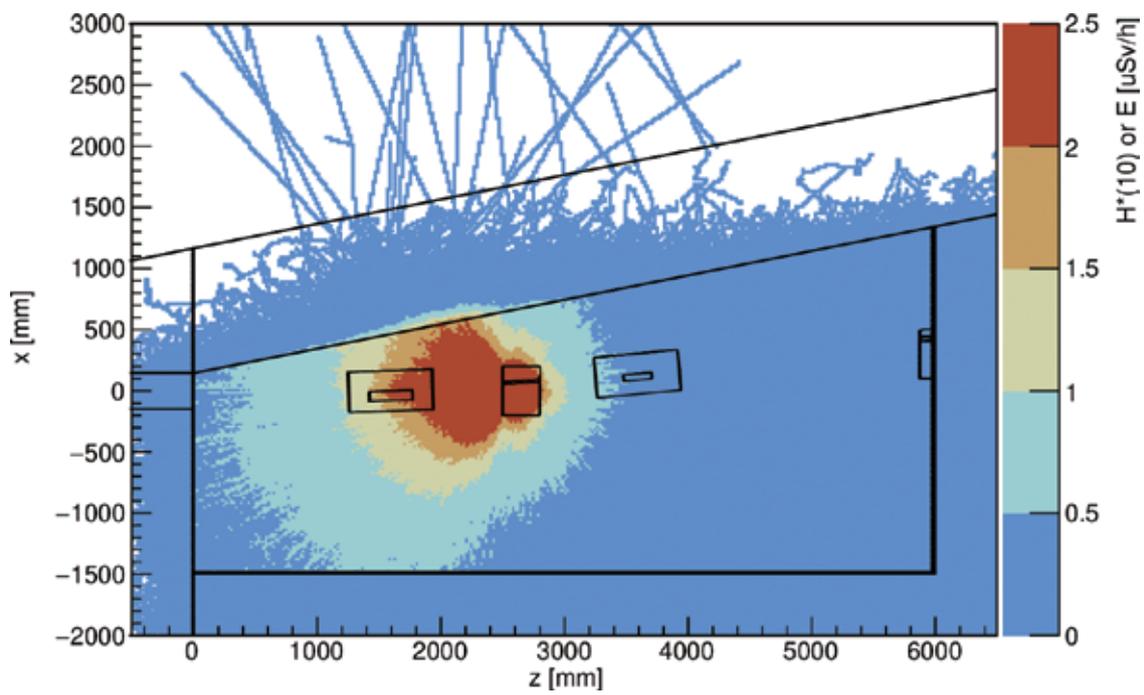


図 3.23 BL06U 実効線量分布 光学ハッチ 平面図 中性子の寄与

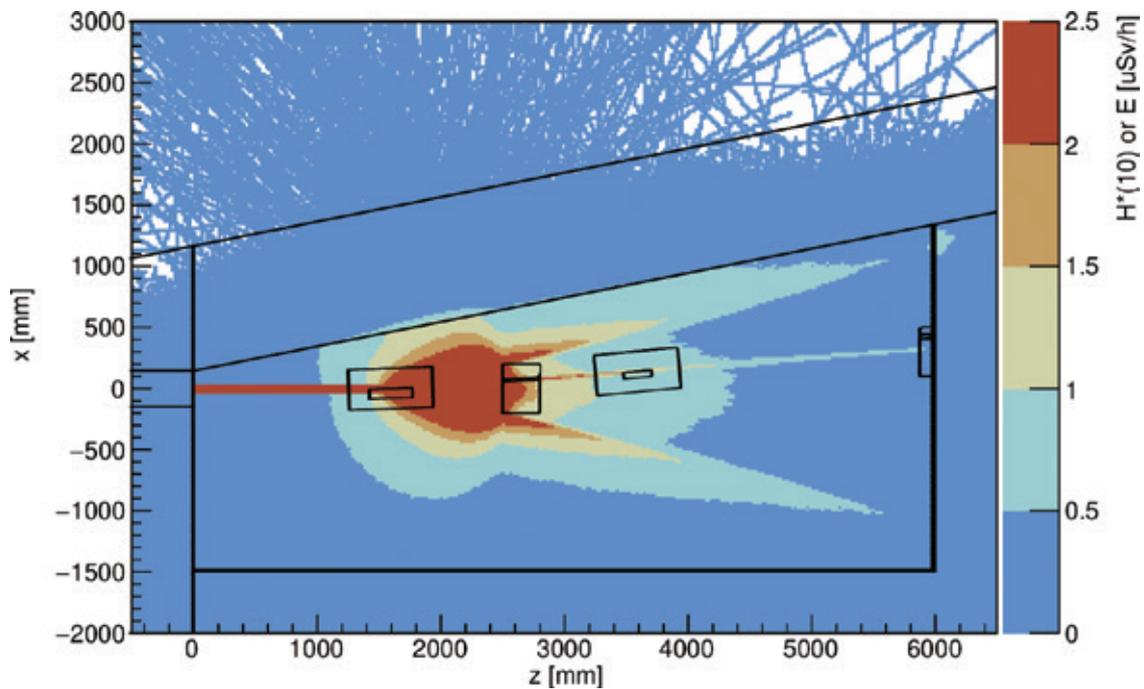


図 3.24 BL06U 実効線量分布 光学ハッチ 平面図 光子の寄与

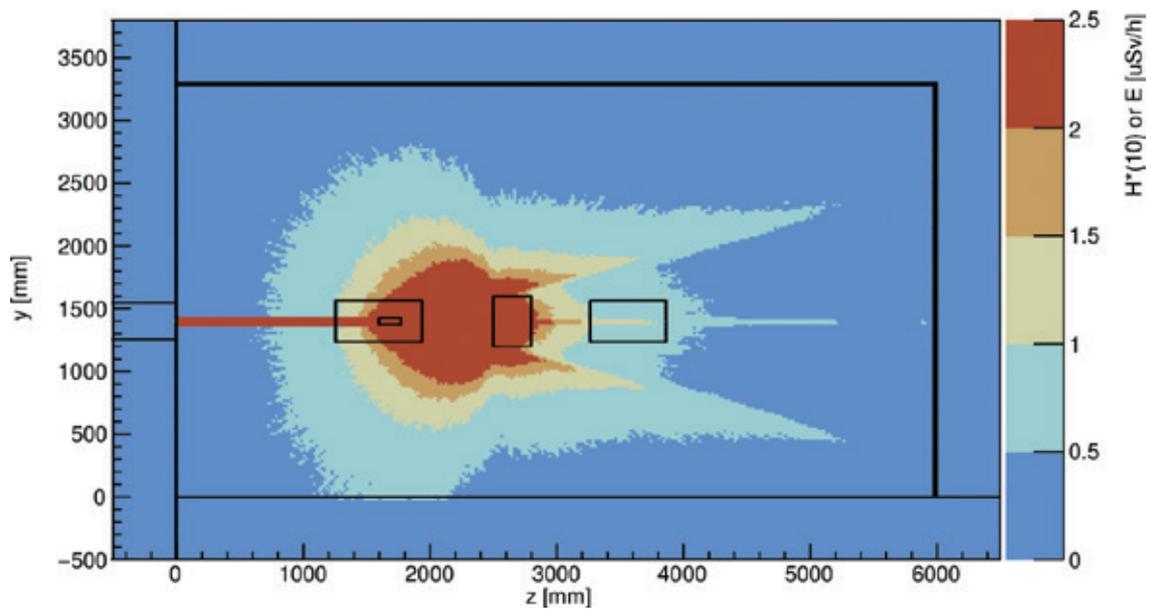


図 3.25 BL06U 実効線量分布 光学ハッチ 断面図 全寄与

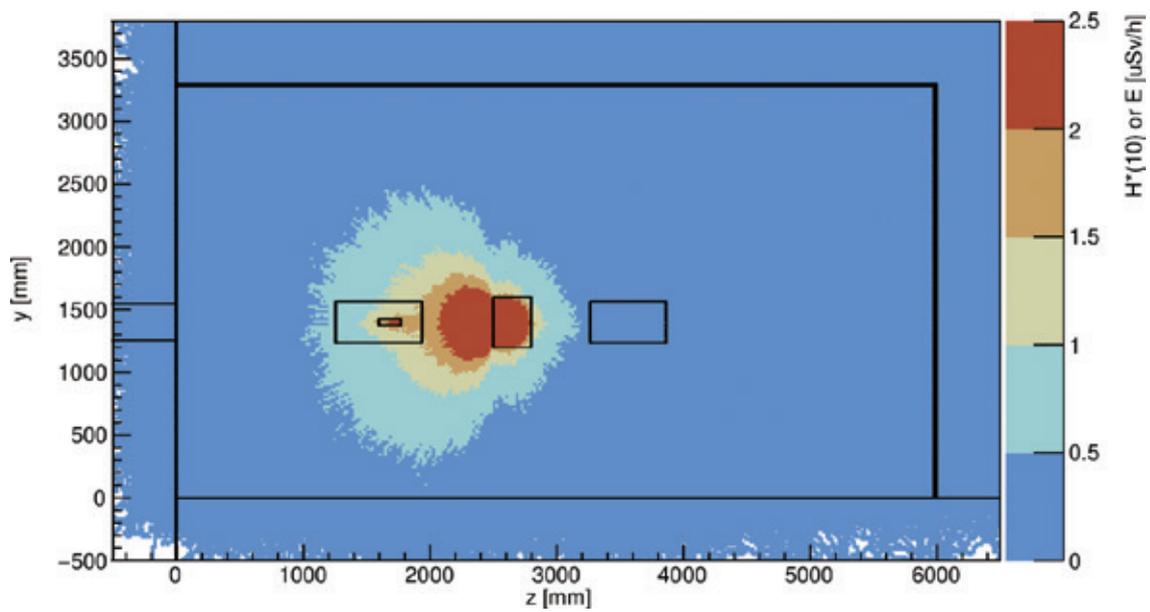


図 3.26 BL06U 実効線量分布 光学ハッチ 断面図 中性子の寄与

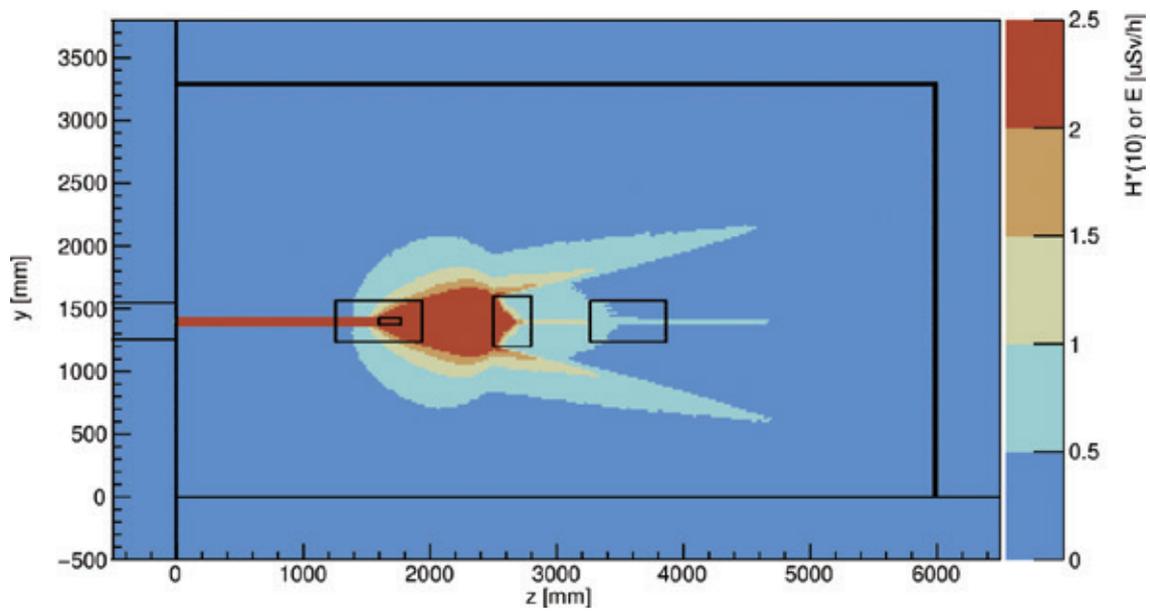


図 3.27 BL06U 実効線量分布 光学ハッチ 断面図 光子の寄与

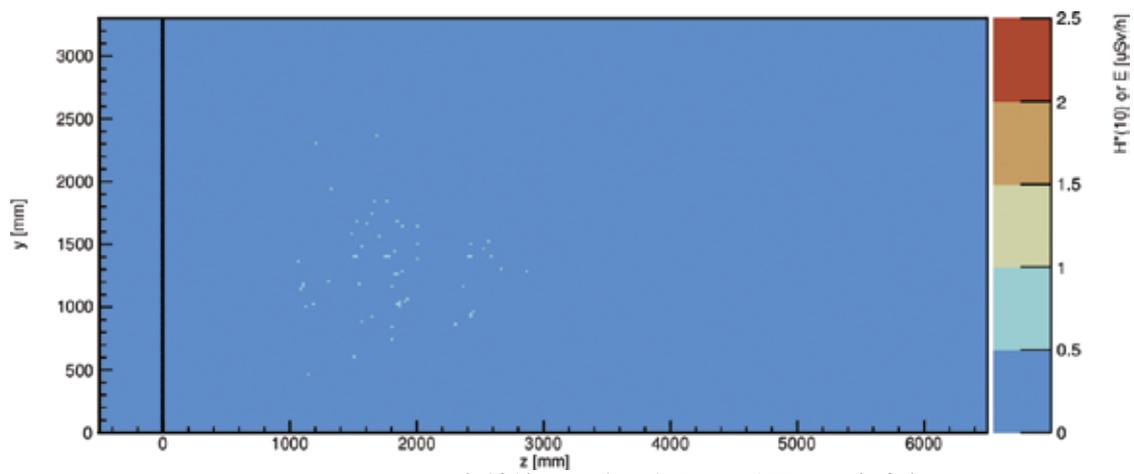


図 3.28 BL06U 実効線量分布 側壁 断面図 全寄与

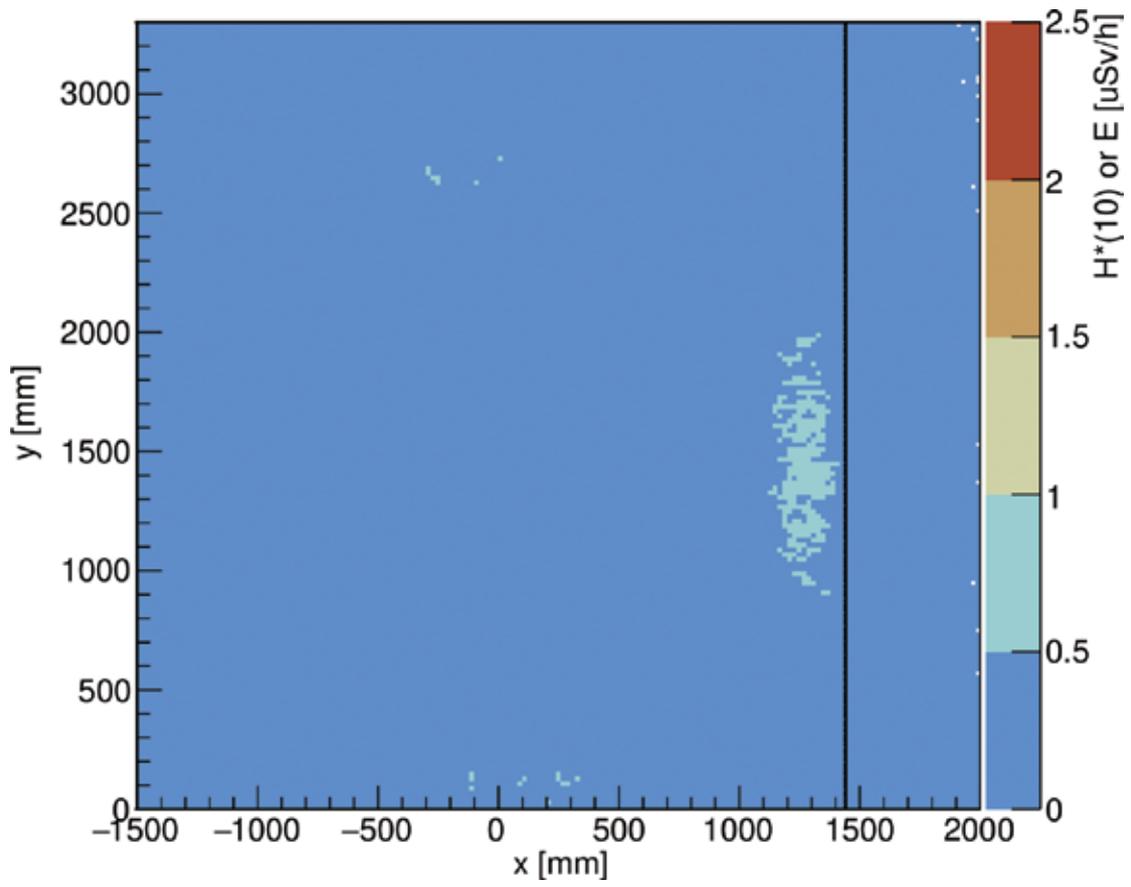


图 3.29 BLO6U 実効線量分布 後壁 断面図 全寄与

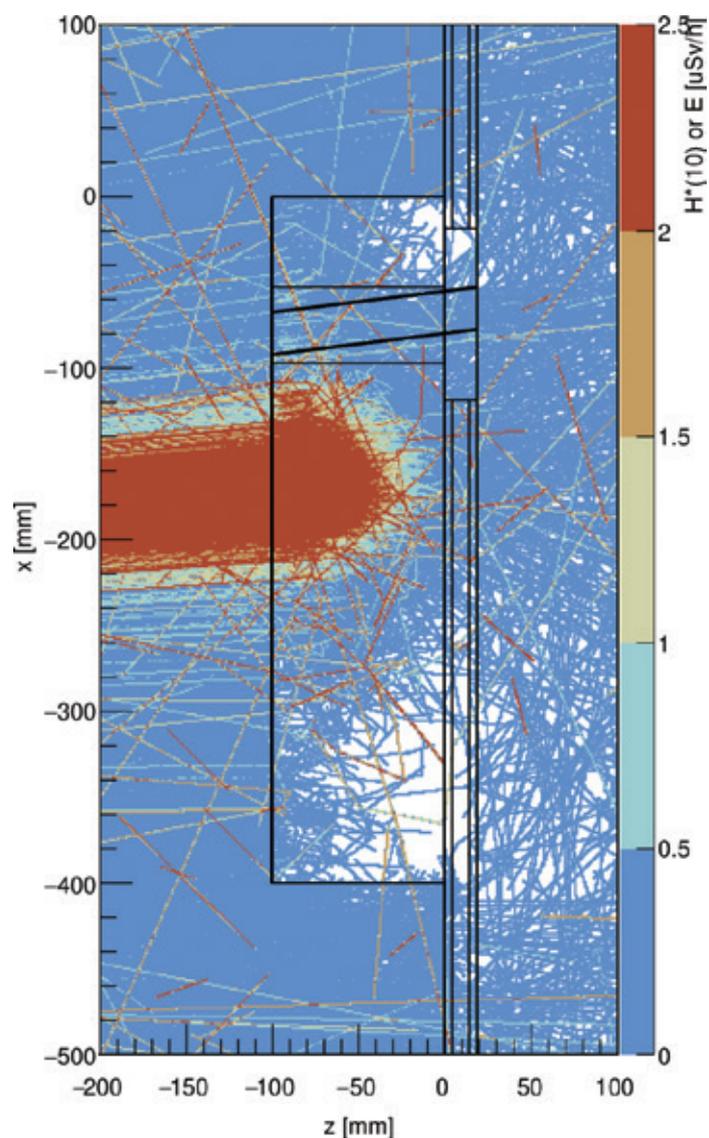


図 3.30 BL06U 実効線量分布 半月板付近 平面図 全寄与

3.3 BL13U

実際の製作・設置を考慮し、半月板を分割しガンマストッパーをもう1台追加してガス制動放射線を遮蔽する。図 3.38 の $x = -170$ mm 付近からガス制動放射線が入射しているが、これは挿入光源位置から直接到達するガス制動放射線である。実際にはフロントエンド部を通過する際コリメートされるため、半月板まで到達することはない。

表 3.3 BL13U 散乱体・遮蔽体

名称	寸法 mm	材質	密度 g/cm ³
ミラー0	L230 H50 W50	ケイ素	2.33
ガンマストッパー 1	本体: L300 H400 W400 貫通パイプ: 外径22、 内径21	鉛 鉄	11.34 7.8
ミラー 1	L230 H50 W30	ケイ素	2.33
ガンマストッパー 2	本体: L50 H300 W200	鉛	11.34
半月板 1	本体: L100 H300 W300 貫通パイプ: 外径25.4	鉛 鉄	11.34 7.8
半月板 2	本体: L10 H300 W300 貫通パイプ: 外径30	鉛 鉄	11.34 7.8
ハッチ貫通孔	φ100	空気	1.21×10^{-3}

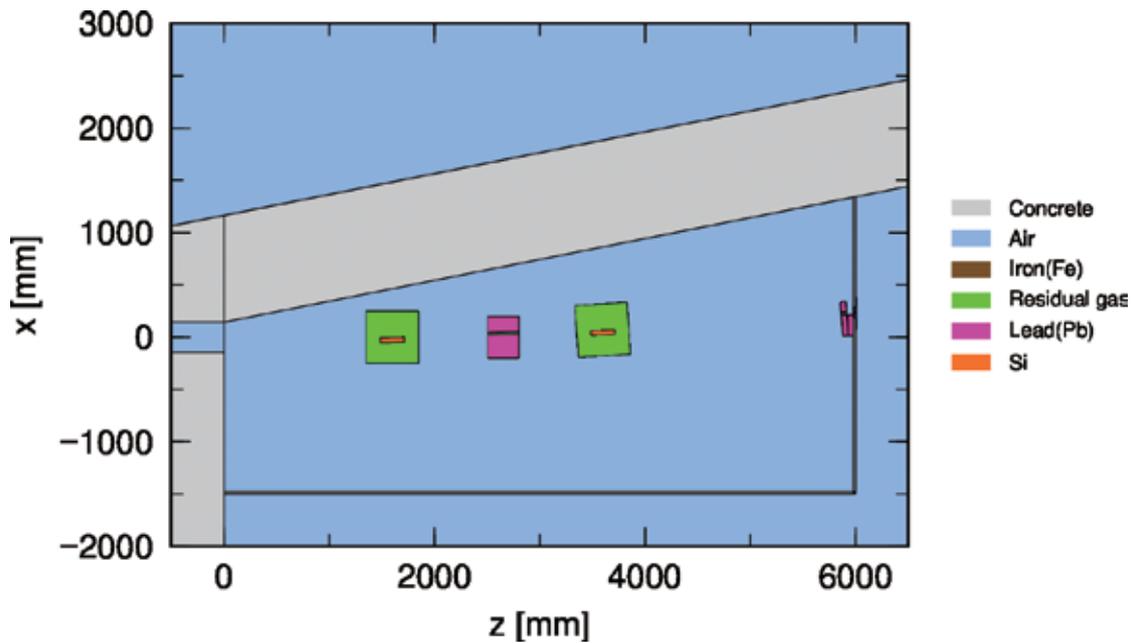


図 3.31 BL13U ジオメトリ 光学ハッチ 平面図

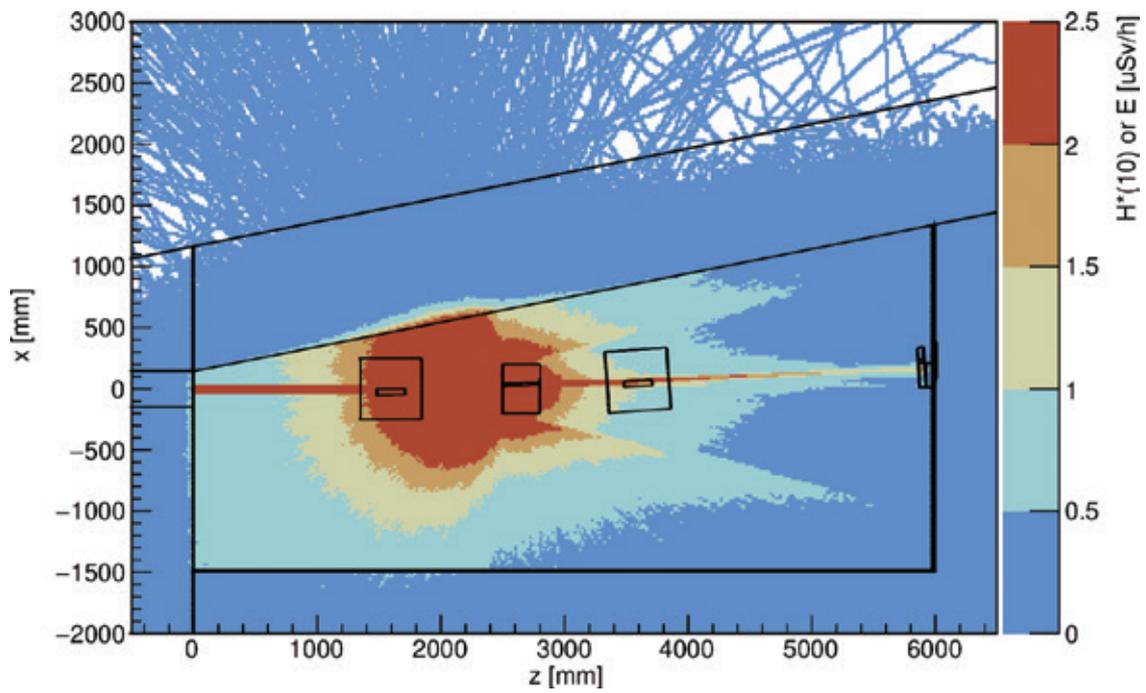


図 3.32 BL13U 実効線量分布 光学ハッチ 平面図 全寄与

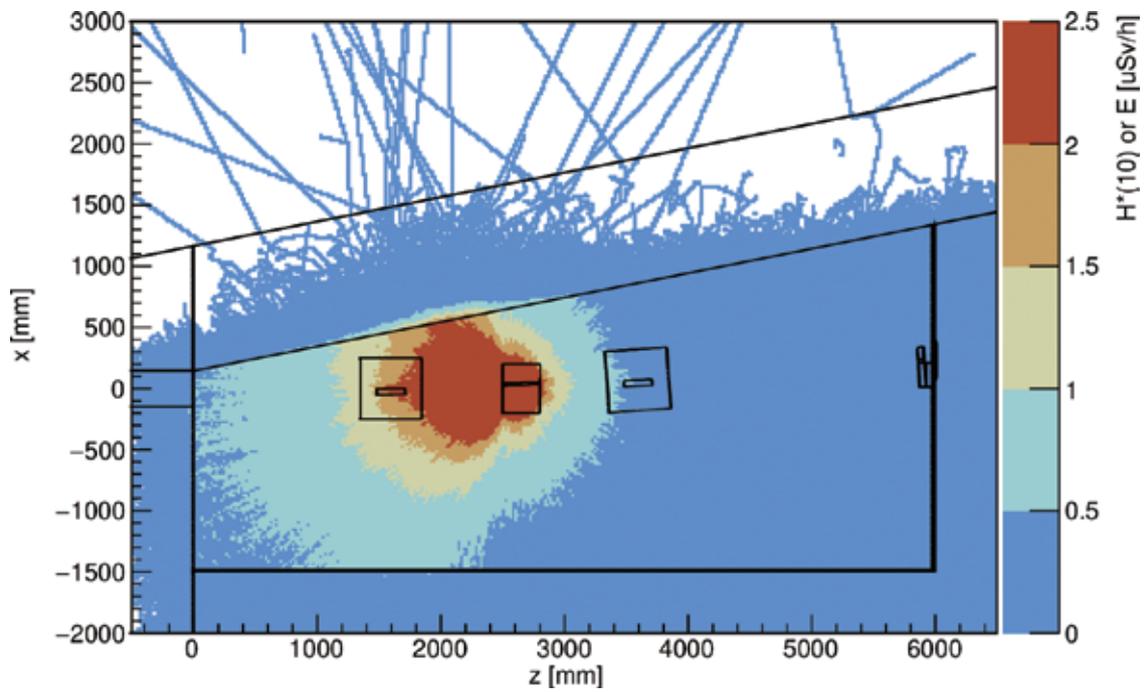


図 3.33 BL13U 実効線量分布 光学ハッチ 平面図 中性子の寄与

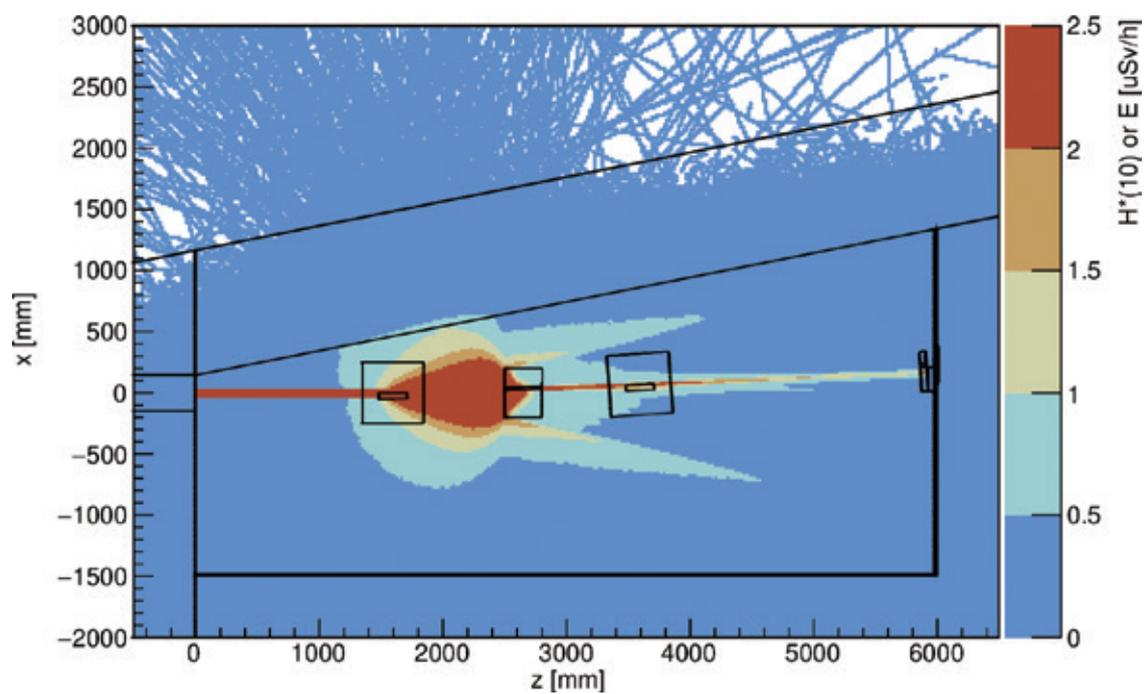


図 3.34 BL13U 実効線量分布 光学ハッチ 平面図 光子の寄与

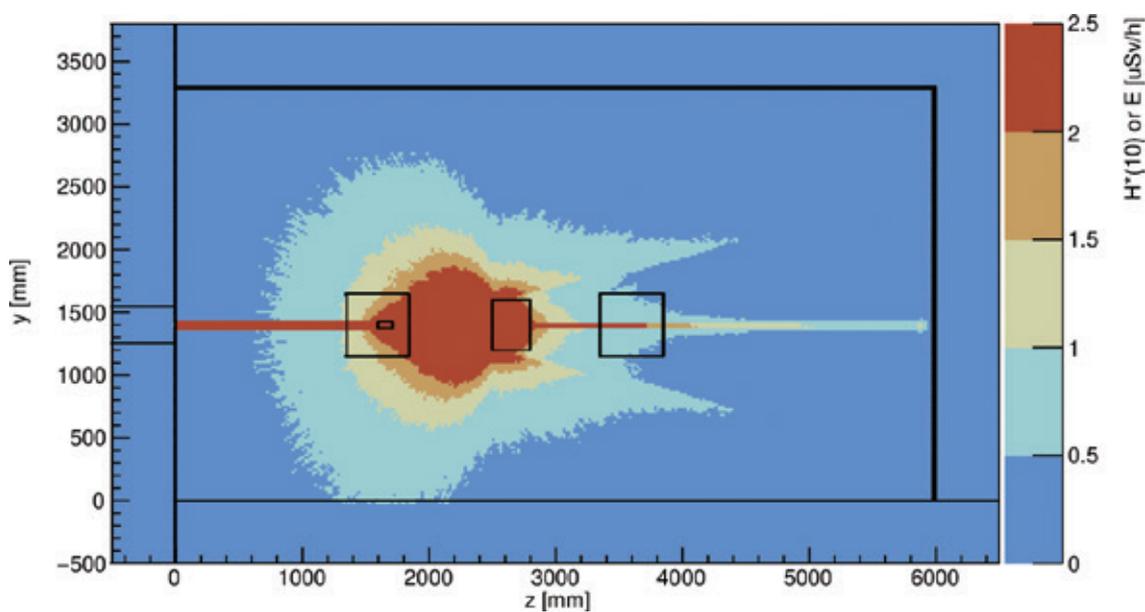


図 3.35 BL13U 実効線量分布 光学ハッチ 断面図 全寄与

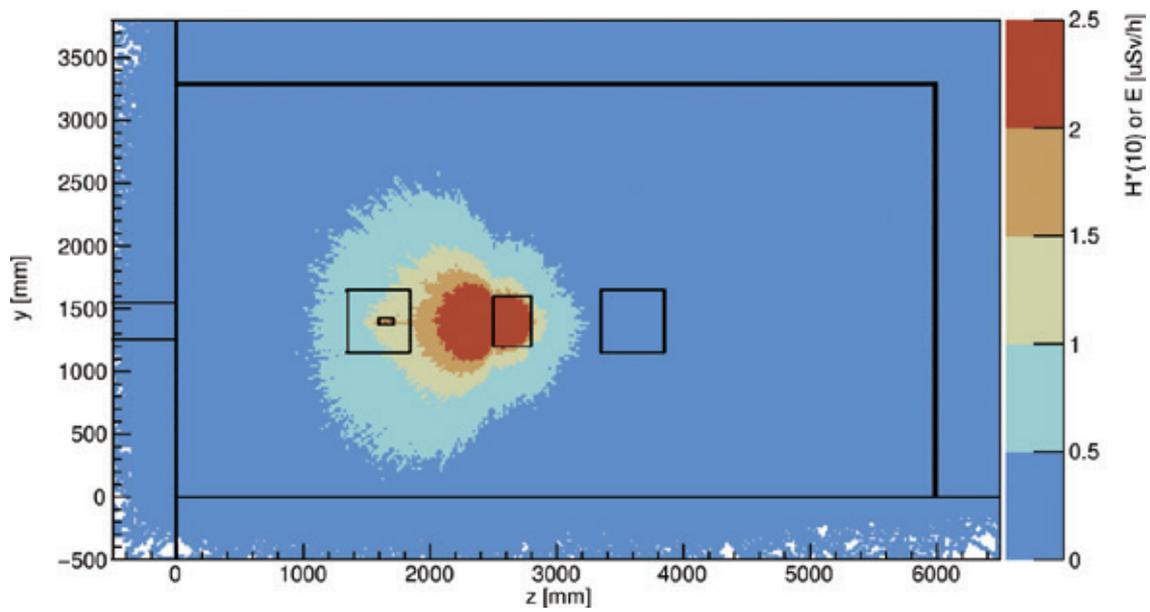


図 3.36 BL13U 実効線量分布 光学ハッチ 断面図 中性子の寄与

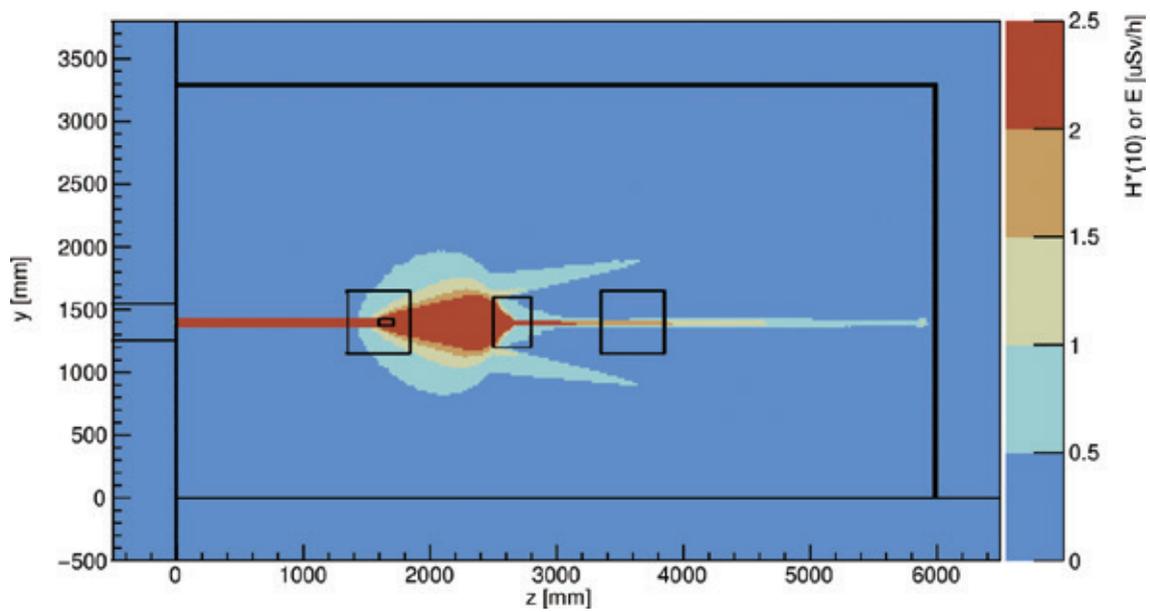


図 3.37 BL13U 実効線量分布 光学ハッチ 断面図 光子の寄与

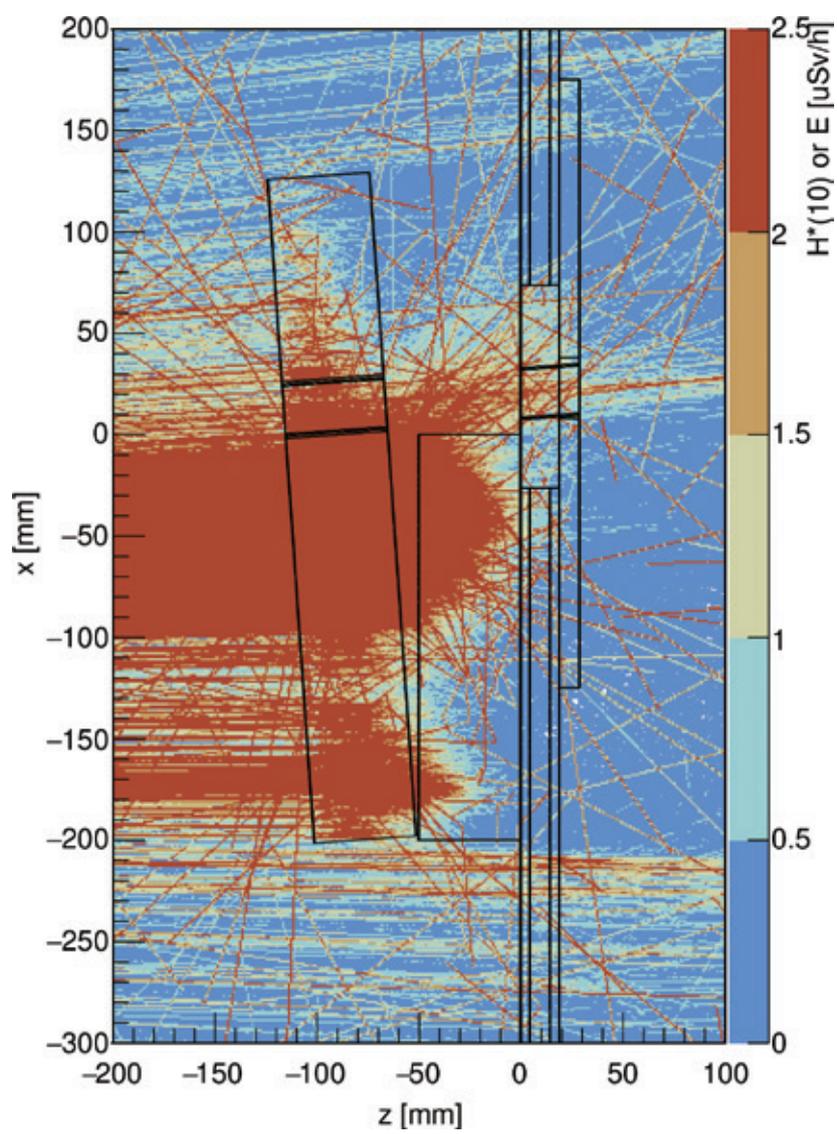


图 3.38 BL13U 实効線量分布 半月板付近 平面図 全寄与

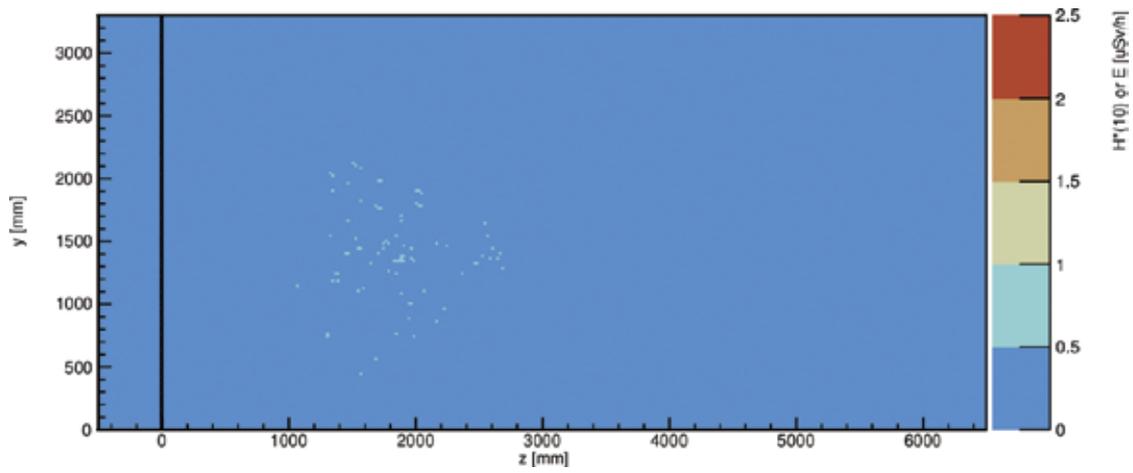


図 3.39 BL13U 実効線量分布 光学ハッチ側壁 断面図 全寄与

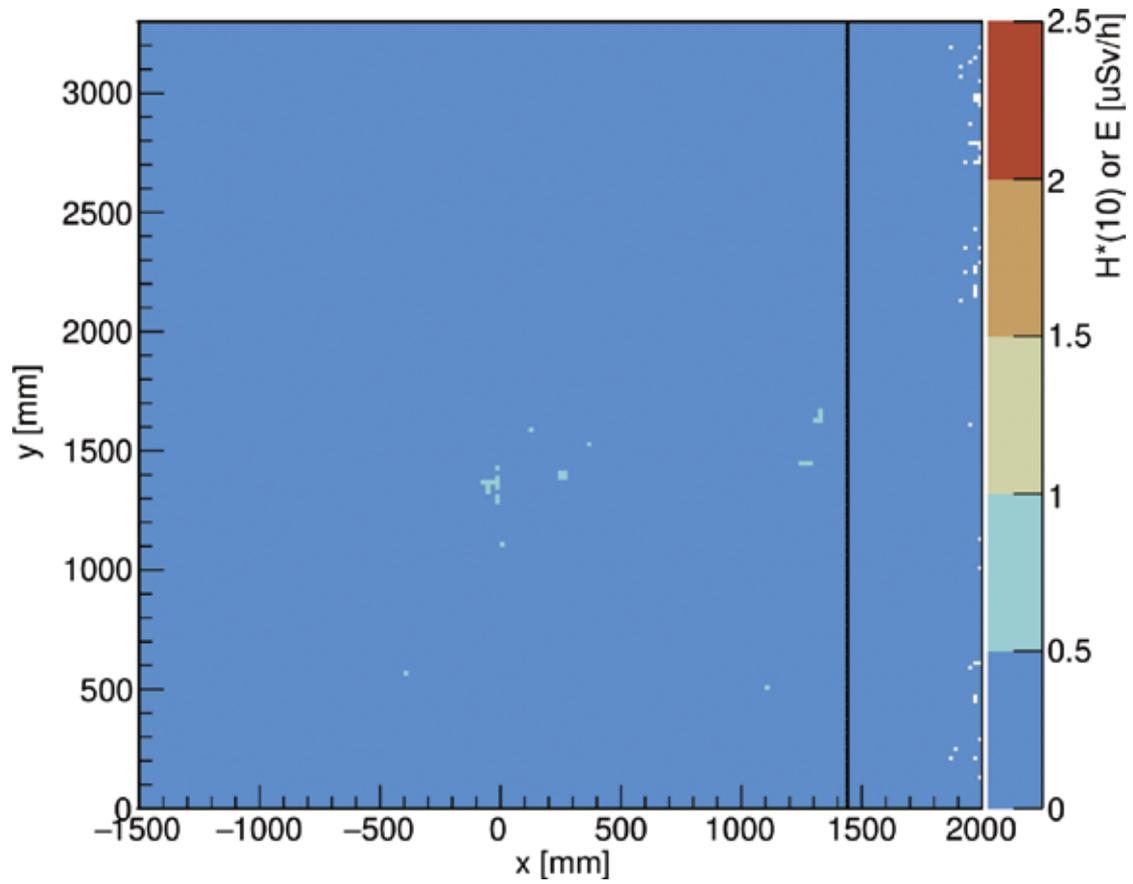


図 3.40 BL13U 実効線量分布 光学ハッチ後壁 断面図 全寄与

4. まとめ

施設稼働当初に運用が開始される QST の 3 ビームライン (BL02U、BL06U、および BL13U) について、ガス制動放射線及び放射光を線源とする遮蔽計算を行った。光学ハッチ外、すなわち実験ホールに於ける実効線量が管理区域境界基準値 (1.3mSv/3 か月) 未満となるように光学素子や遮蔽体の位置・構造を提案し、実際の設計・製作に反映させた。

5. 参考文献

- [1] 量子科学技術研究開発機構 次世代放射光整備開発センター, “加速器デザインレポート,” 2020. [Online]. Available: <https://www.qst.go.jp/uploaded/attachment/18606.pdf>
- [2] T. Sato et al., “Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02,” J Nucl Sci Technol, vol. 3131, no. January, pp. 1–7, Jan. 2018, doi: 10.1080/00223131.2017.1419890.
- [3] N. Kishida et al., “JENDL Photonuclear Data File,” AIP Conf Proc, vol. 769, no. 1, pp. 199–202, May 2005, doi: 10.1063/1.1944989.
- [4] Y. Asano, “SPRING-8 におけるガス制動放射線の評価,” 1999. doi: 10.11484/jaeri-research-99-022.
- [5] T. Tanaka, “Major upgrade of the synchrotron radiation calculation code,” J Synchrotron Radiat, vol. 28, pp. 1267–1272, 2021, doi: 10.1107/S1600577521004100.
- [6] 坂本幸夫 et al., “高エネルギー光子・電子・中性子・陽子に対する線量換算係数,” 2003. doi: 10.11484/jaeri-1345.

次世代放射光施設（NanoTerasu）における
QSTビームラインの遮蔽計算

発行年月 2023年3月
編集発行 国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構
量子ビーム科学部門
次世代放射光施設整備開発センター
高輝度放射光研究開発部
基盤技術グループ
印刷 中央印刷株式会社

©2023 国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

Printed in Japan
QST-R-28