

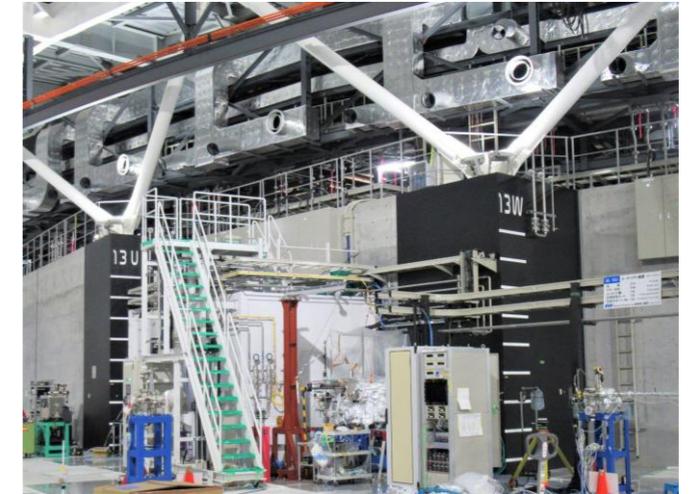
NanoTerasuにおける PHITSを用いた 遮蔽設計及びその検証

松田洋樹*(1)、竹内章博(1)、萩原雅之(1)、早川勢也(1)、系賀俊朗(2)
(1) QST、(2) JASRI

目次

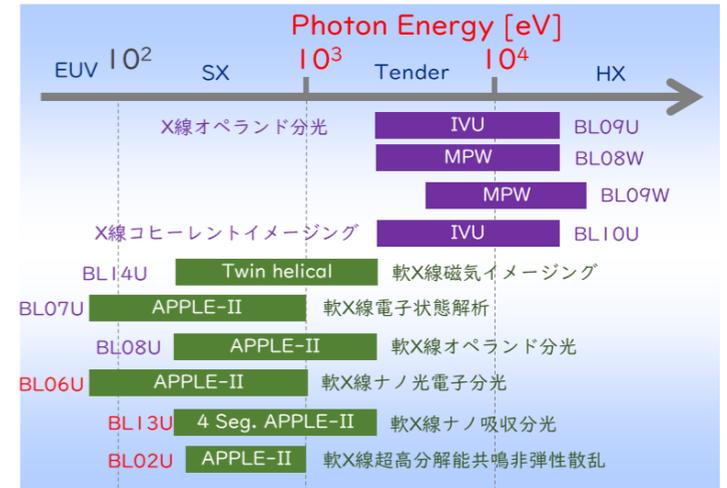
1. NanoTerasuの紹介
2. 検証
 - A) 散乱体周辺（遮蔽なし）の線量
 - B) 散乱体周辺（遮蔽あり）の線量
 - C) 電子ビームダンプ周辺空気の放射化
3. まとめ

2024年4月から、東北大学青葉山新キャンパス（宮城県仙台市）において軟X線向け3GeV高輝度放射光施設NanoTerasu（ナノテラス）の運転が行われている



パラメータ

加速器エネルギー	3 GeV
蓄積電流	400 mA (設計)
セル数	16
リング周長	349 m
エミッタンス	1.14 nmrاد
最大ビームライン数	28
年間最大運転時間	6,000 時間 (目標)



2025年現在

✓ 10ビームライン稼働中

3本：共用

7本：コアリジョン

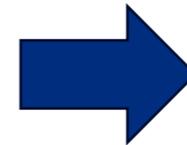
- 放射光利用の普及・拡大のさらなる推進
 - 産業分野でのさらなる利活用
 - 学際領域を含む新規ユーザーの開拓



「**放射線業務従事者*登録**」が産業利用・新規利用の障害
※放射線管理区域内において放射線発生装置の取扱いに従事する者

国内放射光施設の実験ホール（管理区域）でこれまでユーザーの被ばくなし

- ① 管理（健康診断、被ばく線量）のコスト
- ② 登録に要する手間や時間的コスト
- ③ 学生の実習や実験参加などの機会の喪失



NanoTerasuにおける放射線管理方針
 ユーザーが放射線従事者でなくても可能な
 限り放射光実験に参加できること

実験ホールの非管理区域化

参考：世界の放射光施設の現状

	実験ホール	実験参加に 放射線業務従事者登録
海外	非管理区域が大多数	不要が大多数
国内	管理区域 ※NanoTerasuは除く	必要 ※取扱等業務従事者でも参加可能

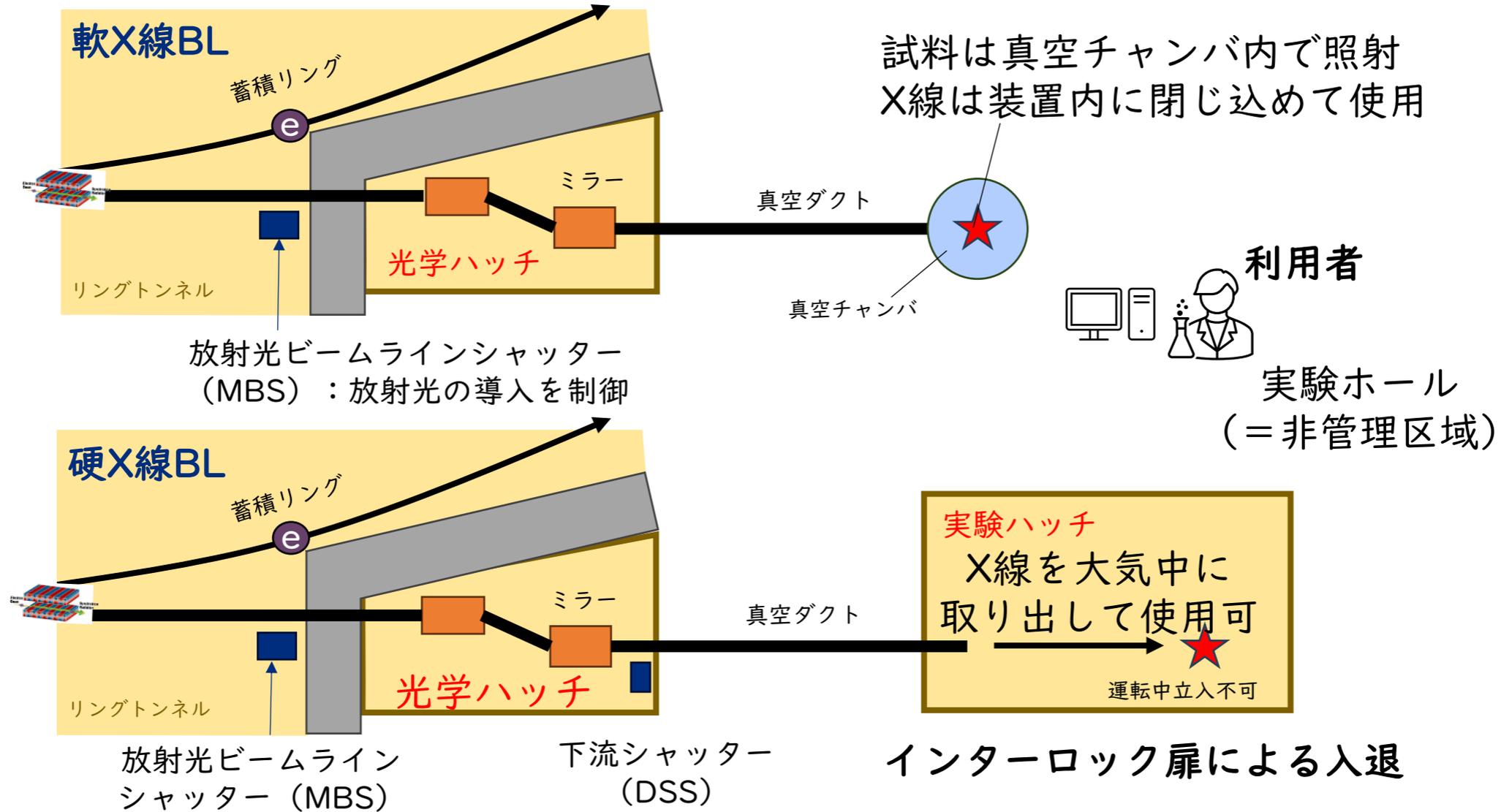
経験式の結果と比較し矛盾がないことを確認しつつ
 遮蔽設計を進めた

- ✓ 経験式が適用できない場所・条件
- ✓ 経験式では見逃す隙間からの漏洩確認



PHITS無くしては
 設計できなかった

放射光ビームライン（軟X線BL：6、硬X線BL：4）



2. 検証

比較するPHITSバージョン

- ✓ 3.31 (2023年4月リリース)
- ✓ 3.35 (2025年4月リリース)

相違点 (本検証に関わりのある箇所)

- ◆ JENDL-4 v.s. JENDL-5
- ◆ EGSのI物質中の元素数制限撤廃
- ◆ 電磁場中での電子挙動に関する不具合解消
- ◆ その他細かいバグ等

物理モデル (奨励設定)						
中性子	陽子・π粒子 (その他の核子)	重イオン	μ粒子	電子・陽電子	光子	
1 TeV	1 TeV/u	1 TeV	1 TeV	1 TeV	1 TeV	
核内カスケード模型 JAM 3.0 GeV + 蒸発模型 GEM	JAMQMD + GEM	仮想光子 核反応 JAM/ JQMD	核反応 JAM/ JQMD + GEM	EGS5 or **ETS	EPDL97 or EGS5	光核反応 JAM/ JQMD + GEM
核内カスケード模型 INCL4.6 + 蒸発模型 GEM 200 MeV	量子分子 動力学模型 JQMD + GEM 200 MeV	α	ATIMA + オリジナル 200 MeV	負ミューオン 原子生成+ 捕獲反応 1 meV	**ETS 1 meV	JAM/ JQMD + GEM + JENDL + NRF
20 MeV	*JENDL-4.0/HE 1 MeV	α	ATIMA or KURBUC / ITSART 1 keV	1 keV	1 keV	JENDL + NRF
核データ ライブラリ JENDL-4.0 0.01 meV	電離損失 or **KURBUC / ITSART 1 keV	ATIMA or ITSART のみ *遮蔽計算や中性子源設計のみ **飛跡構造解析のみ	ATIMA or KURBUC / ITSART 1 keV	1 keV	1 keV	JENDL + NRF

PHITS3.27に組み込まれた物理モデルとその適用エネルギー範囲

Version 3.27から大きな変更はなし

PHITSに組み込まれた物理モデル (奨励設定)						
中性子	陽子	原子核	μ粒子	電子	光子	
1 TeV	1 TeV/n	1 TeV	1 TeV	1 TeV	1 TeV	
JAM + GEM 3.0 GeV	JAMQMD + GEM	JAM/ JQMD + GEM	JAM/ JQMD + GEM 200 MeV	EGS5, ETS or ETSART	EPDL97 or EGS5	JAM/ JQMD + GEM + JENDL + NRF
INCL4.6 + GEM 200 MeV	JQMD + GEM	JQMD + GEM 200 MeV	ATIMA + Original Model 10 MeV/n	EGS5, ETS or ETSART	EPDL97 or EGS5	JAM/ JQMD + GEM + JENDL + NRF
20 MeV	JENDL-5	ATIMA or Original Model 1 MeV	ATIMA or Original Model 1 MeV	1 keV	1 keV	JENDL + NRF
JENDL-4 or JENDL-5 0.01 meV	ATIMA or KURBUC / ITSART 1 keV	ATIMA or KURBUC / ITSART 1 keV	ATIMA or KURBUC / ITSART 1 keV	1 keV	1 keV	JENDL + NRF

赤: 原子核反応モデルもしくはライブラリ 青: 原子反応モデルもしくはライブラリ
灰色でハイライトしたモデルやライブラリは、初期設定では利用されない

3.34から大きな変更点なし

最近の改良点①

PHITS3.34からの主な変更点

- ✓ JENDL-5放射化断面積をDCHAIN及びndata形式で整備
- ✓ [t-wwg]に粒子誘導機能と低エネルギー・アンバイアス法を導入
- ✓ [cell]セクションに#allコマンドを導入
- ✓ PHIG-3Dにxyzメッシュタリ一読込機能とPolygon Boolean法による描画機能を導入
- ✓ 化学コードをイオン飛跡構造解析にも適用可能なように改良
- ✓ AmBe線源などα線を用いた中性子源を再現するサンプルを追加
- ✓ RT-PHITSを用いた核医学線量評価機能の拡張

各項目の詳細は本資料に記載

最近の改良点②

PHITS3.34からの主な変更点

- ✓ 新しいインテルコンパイラ(ifx)に対応するようにソースコードを修正
- ✓ ほぼ全てのタリ一に対してsum overの値と統計誤差を正しく出力できるように改良
- ✓ Dump線源の粒子情報をヘッダーファイルから自動で読み込む機能を開発
- ✓ ラザフォード散乱の角度分布にバイアスを掛ける機能を導入
- ✓ [t-deposit]及び[t-dpa]にmotherパラメータを導入
- ✓ 宇宙線線源モードで平面(s-type = 1及び2)から線源を発生させるモードを追加
- ✓ EGSを用いた場合の1物質中の元素数制限(従来は20)を撤廃
- ✓ [multiplier]セクションにおいて4点(三次)ラグランジュ補間公式による内挿方法を追加
- ✓ HDF5形式の四面体メッシュ体系を読み込む機能を追加
- ✓ 核反応モデルINC-ELFを最新版に更新
- ✓ [t-4dtrack]のデータフォーマット拡張
- ✓ いくつかのDCHAIN放射化断面積ライブラリを更新((n,n')反応を含むようにした)
- ✓ ユーザー定義粒子 & 反応サンプルの拡充 (phits/utility/UserDefinedModel参照)

各項目の詳細はマニュアル等を参照

最近の改良点①

PHITS3.31からの主な変更点 (担当者)

- ✓ 拡張された統計指標出力機能の開発 (橋本)
- ✓ 飛跡構造解析結果から化学反応を模擬するコード(PHITS-Chem)の開発 (松谷)
- ✓ 任意物質に対する電子飛跡構造解析モードETSARTの導入 (平田)
- ✓ [weight window]と[t-wwg]の改良 (佐藤、仁井田)
- ✓ 厚いターゲット及び荷電粒子ライブラリを用いた[forced collisions]の導入 (佐藤)⁽¹⁾
- ✓ 荷電粒子に対するAdjointモードの導入 (佐藤)
- ✓ JENDL-5自動ダウンロード・セットアッププログラムの整備 (執行、佐藤)⁽²⁾
- ✓ PHITS入力ファイル作成専用エディタ(PHITS-Pad)β版の組込 (橋本)⁽³⁾
- ✓ PHIG-3Dへの4次元(x,y,z,t)飛跡可視化機能の追加 (坂本)⁽⁴⁾

1. (一財)RISTの協力により実施
2. アドバンスソフト株式会社の協力により実施
3. 原子力機構・計算科学センターの協力により実施
4. 海上技術安全研究所の大西世紀博士の協力により実施

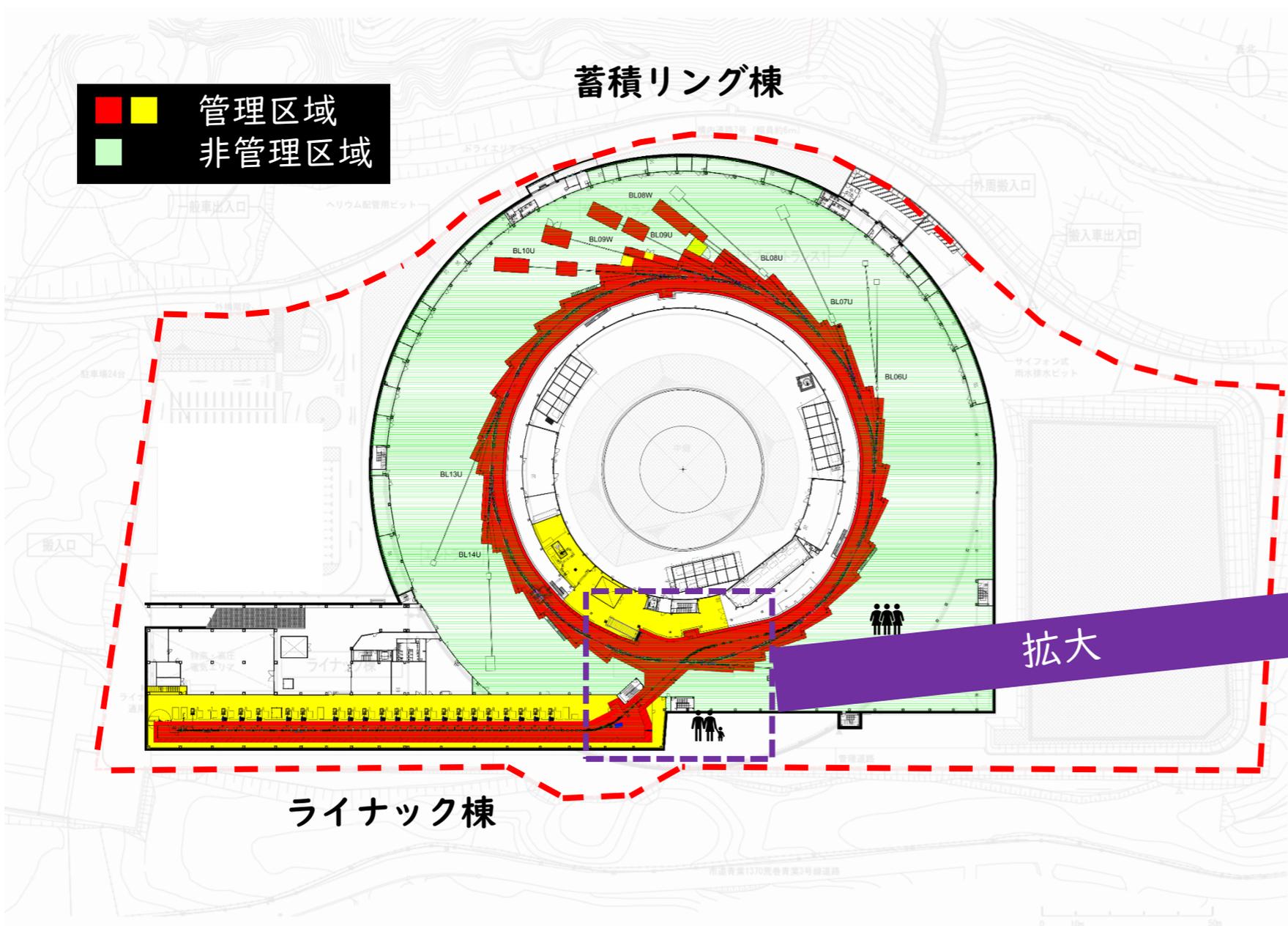
最近の改良点②

PHITS3.31からの主な変更点 (担当者)

- ✓ 一部核種に対するJENDL-5の組込(JENDL-4.0/HEからの入替) (佐藤)⁽¹⁾
- ✓ 各タリ一やicntl = 1モードでmultiplierの値を出力する機能の導入 (佐藤)⁽²⁾
- ✓ Windows用インストーラの更新 (佐藤)⁽³⁾
- ✓ タリ一結果の最大値を指定値に規格化するモードの導入 (小川)⁽⁴⁾
- ✓ [t-deposit2]で検出器分解能を考慮する機能の追加 (佐藤)
- ✓ meta-stableに対する中性子核データライブラリ読み込み機能の追加 (橋本)
- ✓ 任意イオン・物質に対する飛跡構造解析モードITSARTのアルゴリズムを改良 (小川)
- ✓ [t-deposit]に[multiplier]で定義したLET任意関数で重みづけする機能を追加 (佐藤、平田)
- ✓ [User Defined Interaction]と[User Defined Particle]を導入 (坂本)
- ✓ [t-interact]の飛跡構造解析モードにおける反応カテゴリを整理 (小川、甲斐、平田、佐藤)

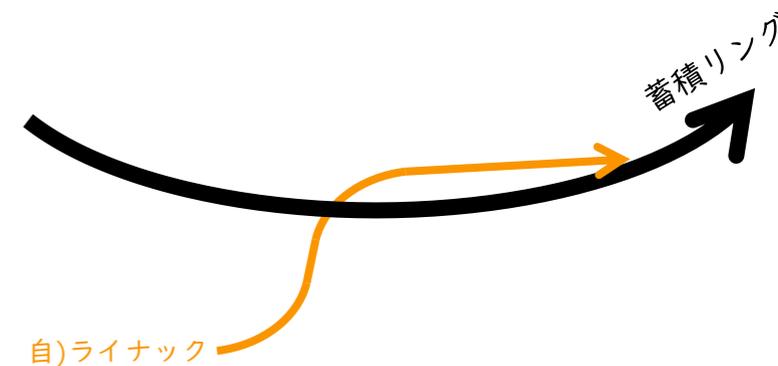
1. 原子力機構・今野力博士、多田健一博士、中山祥介博士、岩本信之博士の協力により実施
2. (一財)RISTの協力により実施
3. アドバンスソフト株式会社の協力により実施
4. 原子力機構・計算科学センターの協力により実施

2.A) 散乱体周辺（遮蔽なし）の線量 - 実験



加速器スタディ時間を利用し、散乱体への電子ビーム照射時の周辺線量の測定を行った

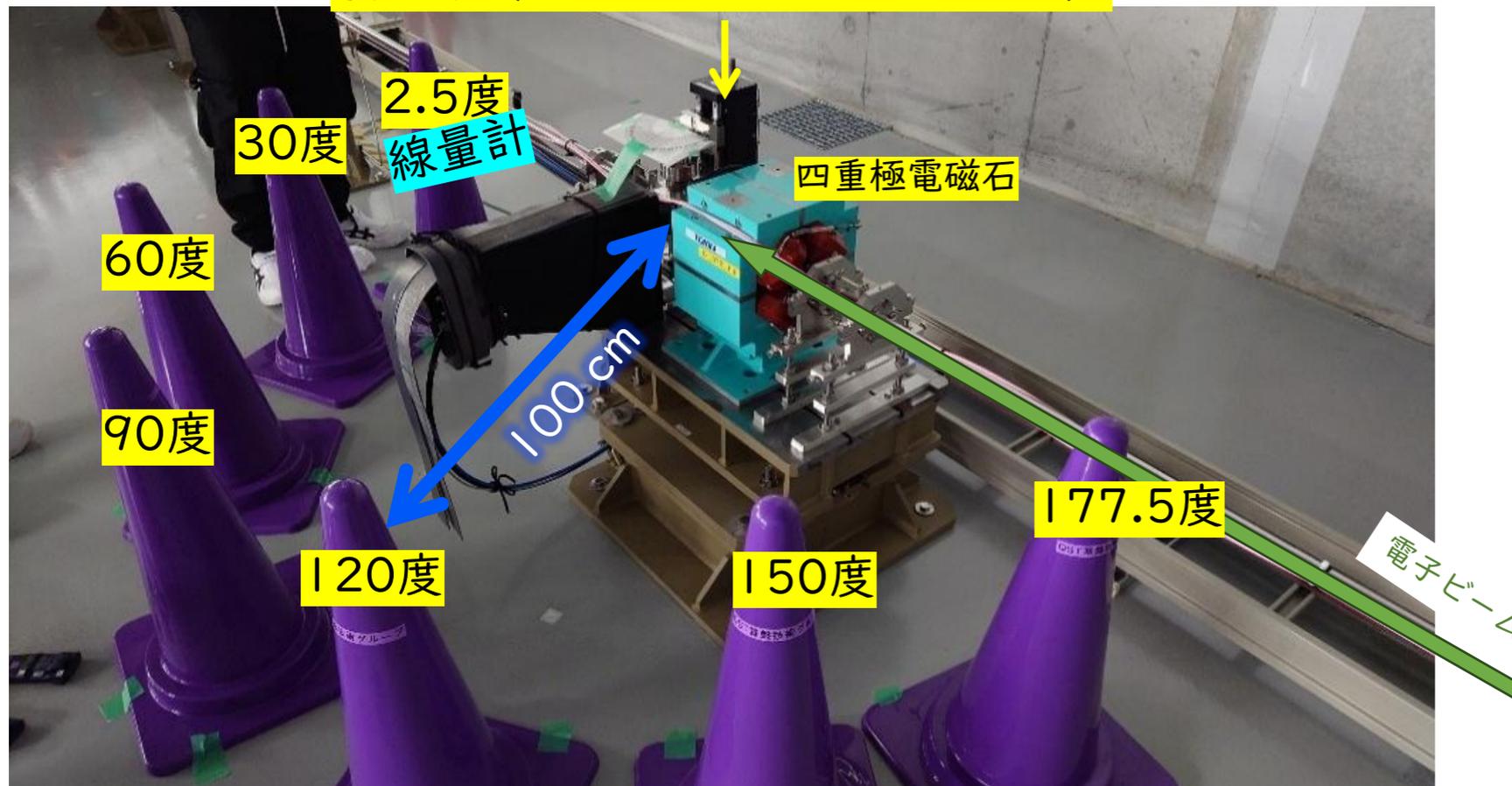
- A) 散乱体周辺の線量（遮蔽なし）
- B) 散乱体周辺の線量（コンクリリ遮蔽あり）



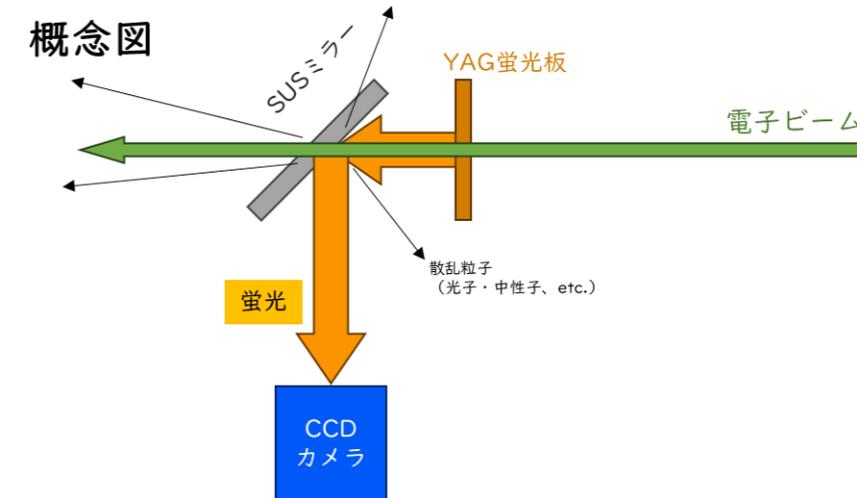
Beam Transport (BT) 部
→ライナックで加速した3 GeV電子を蓄積リングまで輸送する部

2.A) 散乱体周辺（遮蔽なし）の線量 - 実験

散乱体（スクリーンモニタ、SCM）



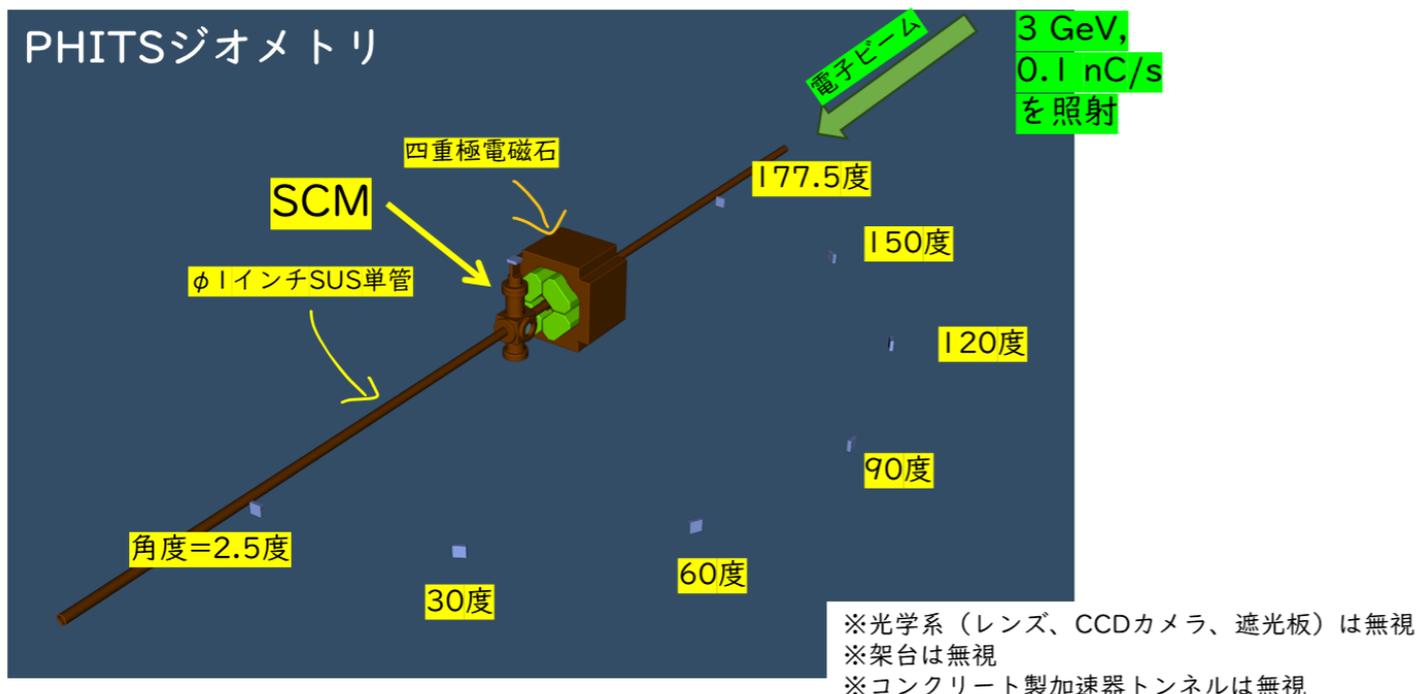
SCMとは？



電子ビームが蛍光板を通過した際に生じる蛍光を取り出し、CCDカメラで撮影・解析し、位置・大きさ・エネルギー等ビームプロファイルを計測する装置

蛍光を取り出すSUSミラーが主たる散乱体

- ✓ SCM周りに積算線量計  を100 cm離して設置
 - ✓ 垂直方向に1個設置（SCM直上と呼ぶ）
- ✓ 角度: 2.5, 30, 60, 90, 120, 150, 177.5度
- ✓ 0.15 nC/秒, 約1.6時間連続照射



PHITS計算条件

- PHITS 3.31
または3.35
- JENDL-4
またはJENDL-5
- negs=1
- PHITS推奨モデル使用
 - ◆ PHITS内蔵の光核反応モデル (JAM/JQMD+GEM+JENDL+NRf)
 - ◆ INCL4.6+GEM
 - ◆ JAM+GEM
 - ◆ EGS5
- 電子を輸送
- E=3 GeV
- 0.1 nC/s
- ペンシルビーム
- 2DCADに基いたジオメトリ

フラックスから線量への変換方法は？

- ① Multiplierを定義する
 - ◆ 中性子
 - ISO8529-3
 - ◆ 光子
 - 内蔵値 (ID=-114)
JAERI-1345
- ② エネルギービン幅を
積算線量計のエネルギー範囲に設定する
 - ◆ 熱中性子
 - 0.025 eV - 0.5 eV
 - ◆ 高速中性子
 - 24 keV - 15 MeV
 - ◆ X・γ線
 - 10 keV - 10 MeV

C（計算値）とE（実験値）の比 C/E を計算

PHITS3.3 I

設置角度	X・γ	C/E	
		熱中性子	高速中性子
2.5	0.42	0	1.05
30	0.10	M	0.88
60	0.08	M	0.78
90	0.09	M	0.48
120	0.11	M	0.38
150	0.09	M	0.20
177.5	0.01	M	0.05
SCM直上	0.03	M	0.15

PHITS3.35

設置角度	X・γ	C/E	
		熱中性子	高速中性子
2.5	0.42	0	1.07
30	0.10	M	0.91
60	0.08	M	0.83
90	0.09	M	0.51
120	0.11	M	0.38
150	0.09	M	0.22
177.5	0.01	M	0.06
SCM直上	0.03	M	0.15

M:最小検出限界値未満
(X・γ=0.1 mSv、熱・高速中性子=0.1 mSv)

- ✓ バージョンによる違いは見られない
- ✓ 前方方向の高速中性子線量の一致はよい
 - ✓ 一方、後方方向は過小評価



散乱体と測定点の間にコンクリート遮蔽壁（100 cm厚）を設ける。照射中の実測線量とPHITS計算値を比較する。

使用した線量計

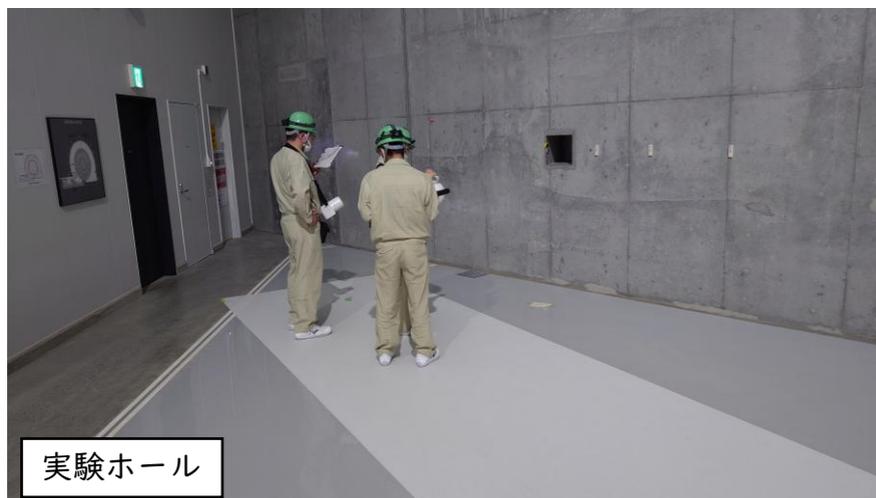
- ◆ NaIサーベイメータ (NHC6)
- ◆ レムカウンタ (NSN2)

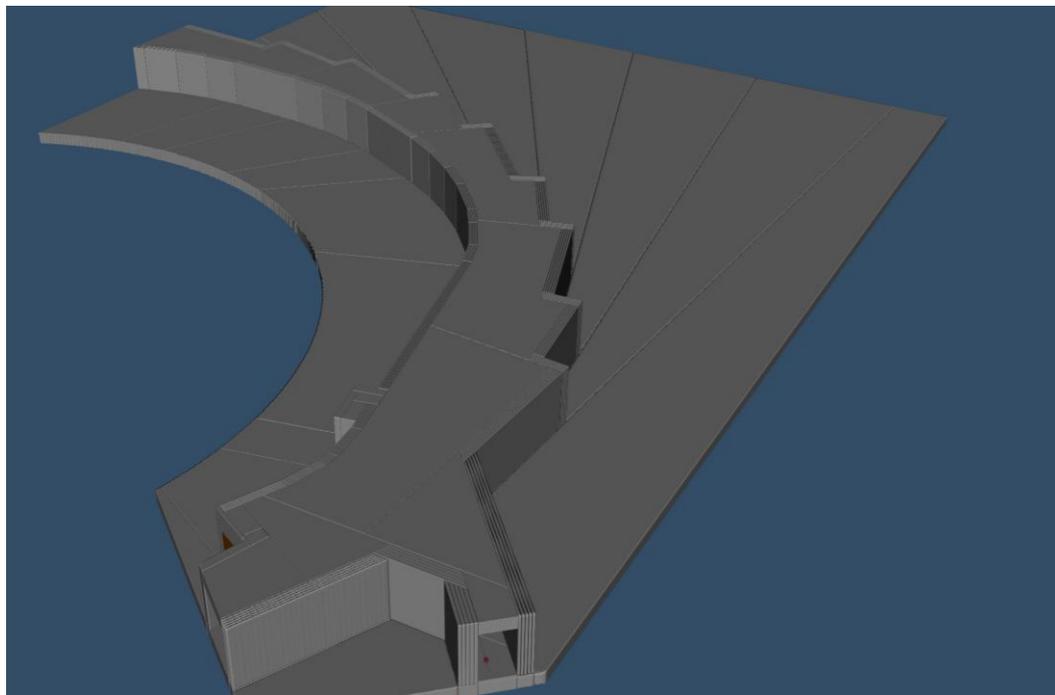
実験条件

- 0.11 nC/秒, 繰り返し1Hz

PHITS計算条件

- 散乱体周辺（遮蔽なし）と同じ

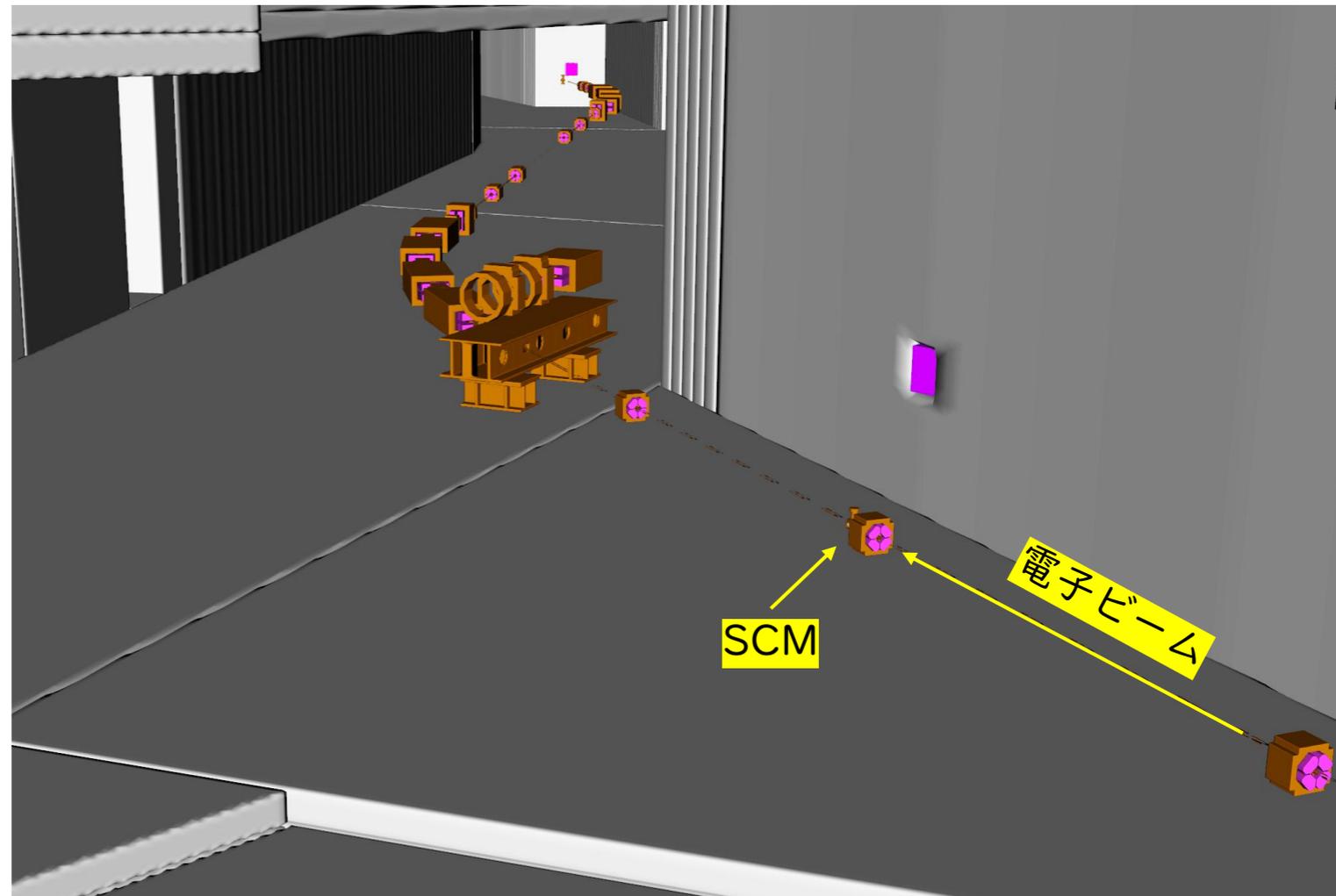




蓄積リング棟
リングトンネル・実験ホール

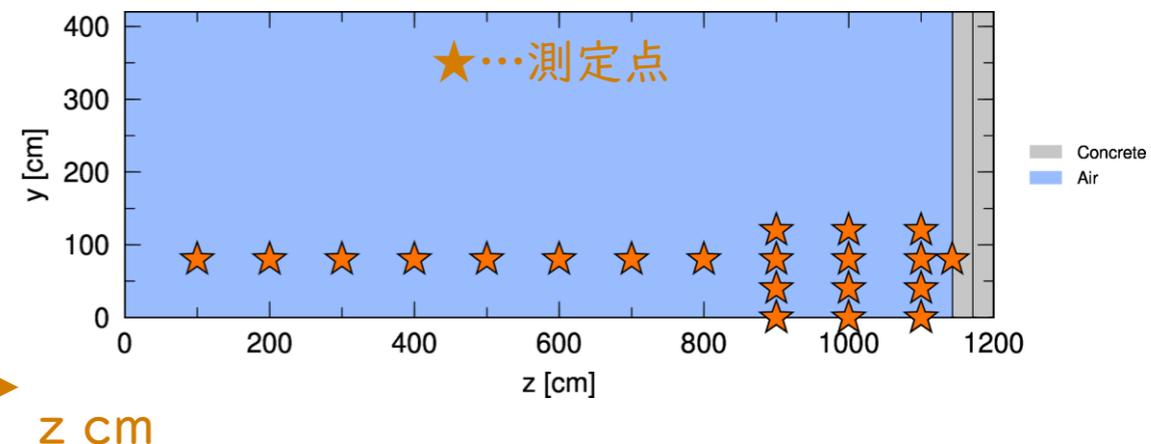
phig3d 2024.04.04以降で
描画領域の自動推定に失敗するようになりました…
→universe構造を用いた構造故、複雑すぎるのかもしれませんが

phig3d 2023.04.06では動作します。



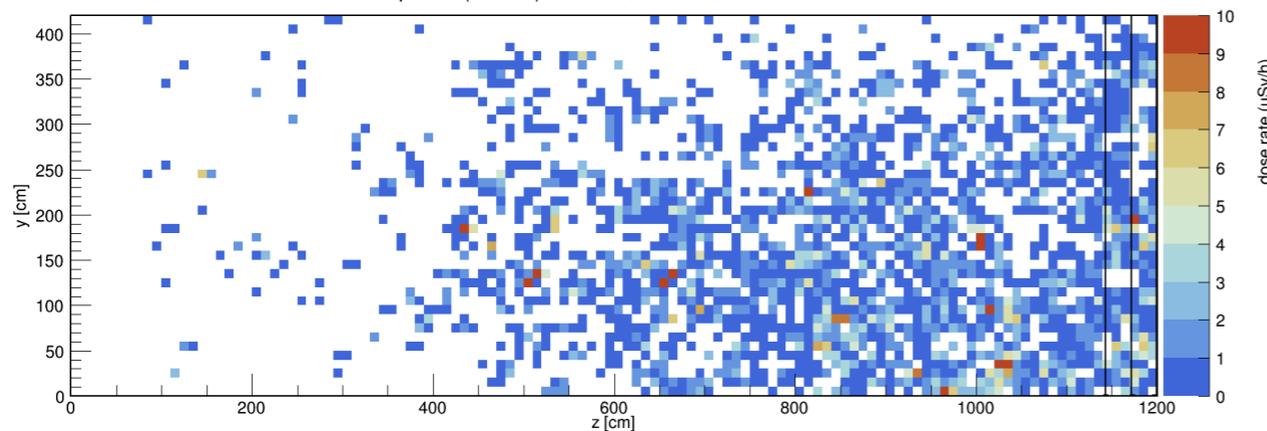
蓄積リング棟
リングトンネル内部

2.B) 散乱体周辺（遮蔽あり）の線量 - 結果（実験ホール）



PHITS3.3 I

SR exp. wall (BL01U) - no. = 2, ie = 1, ix = 1, mset = 1 - neutron

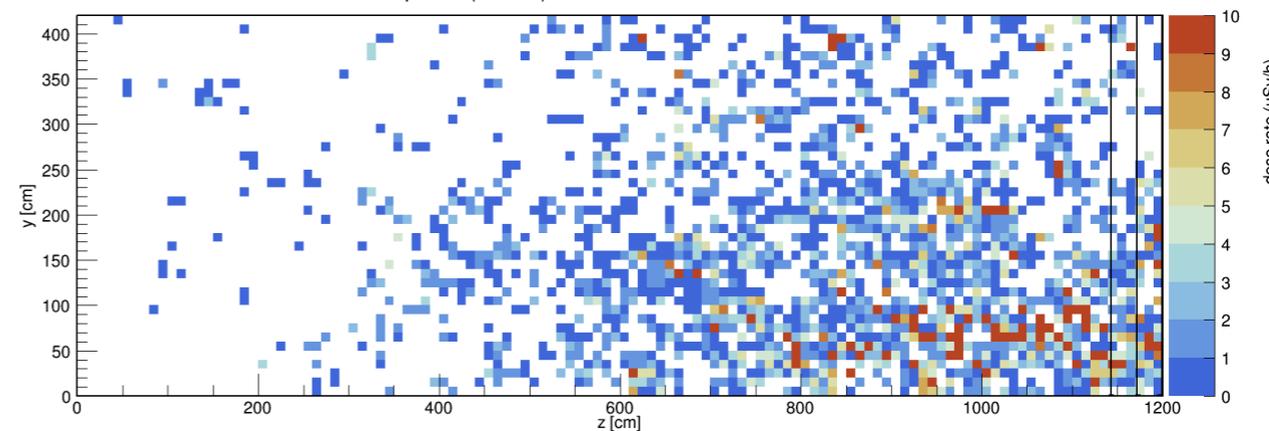


平均のC/E = 2.4

中性子線量分布

PHITS3.35

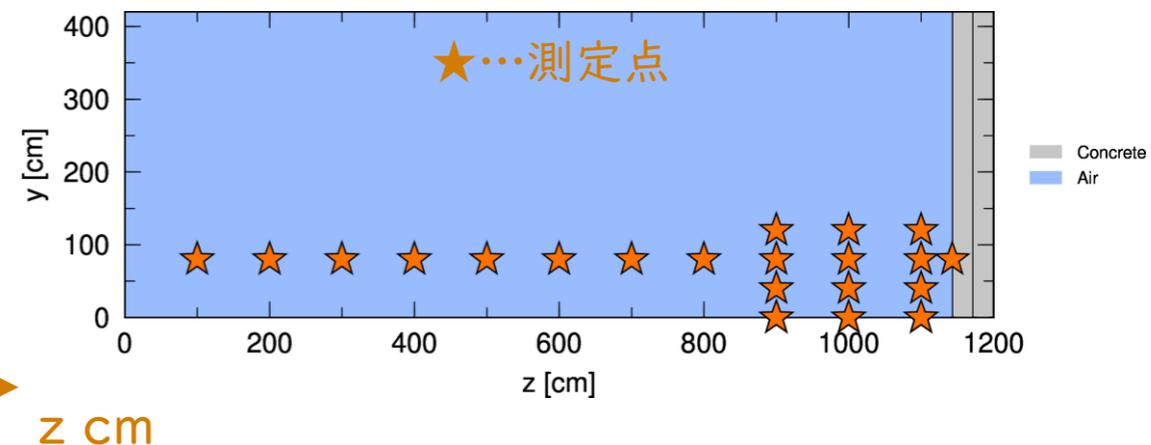
SR exp. wall (BL01U) - no. = 2, ie = 1, ix = 1, mset = 1 - neutron



平均のC/E = 6.8

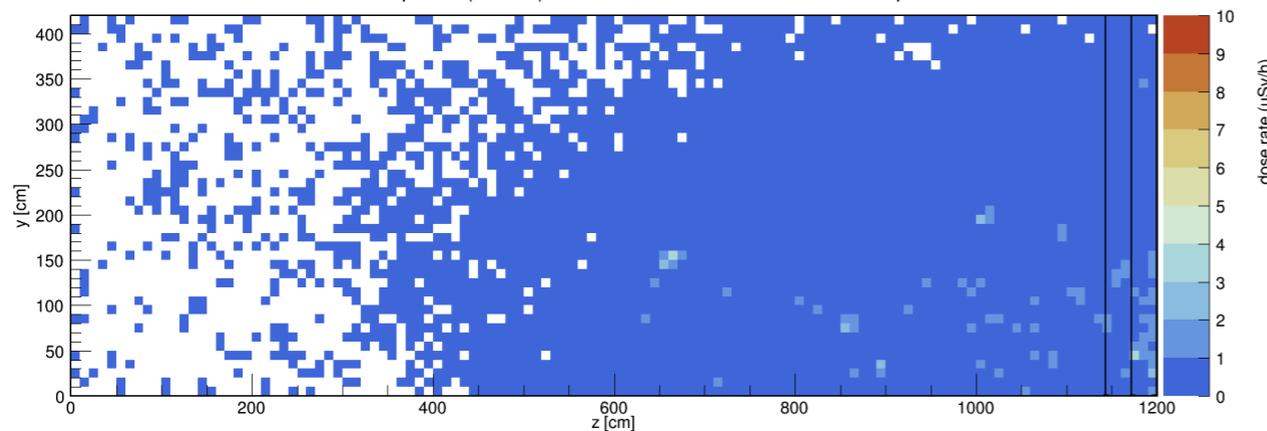
- ✓ 統計が十分ではなく誤差が大きい
- ✓ PHITS3.35では計算値がより大きい

2.B) 散乱体周辺（遮蔽あり）の線量 - 結果（実験ホール）



PHITS3.3 I

SR exp. wall (BL01U) - no. = 3, ie = 1, ix = 1, mset = 1 - photon

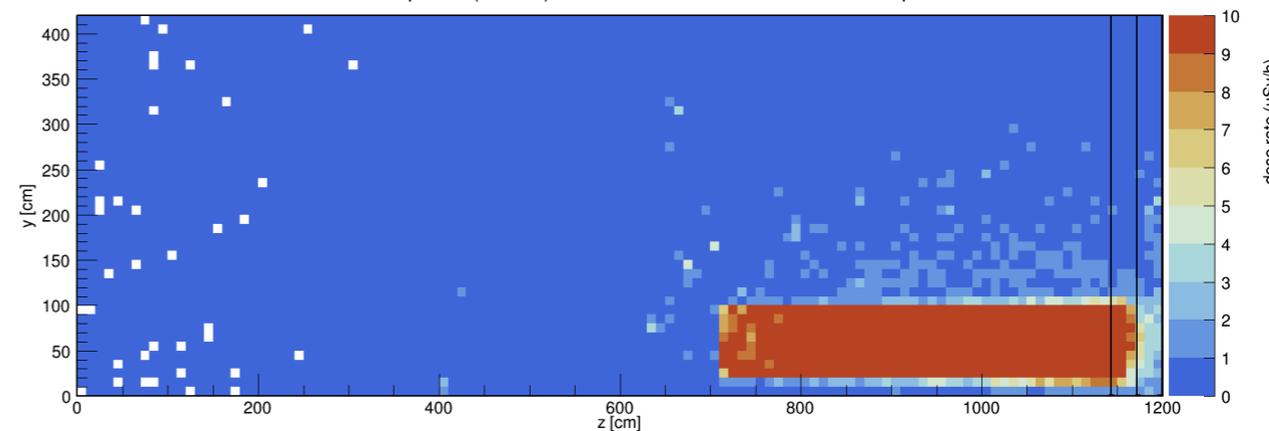


平均のC/E = 4.6

光子線量分布

PHITS3.35

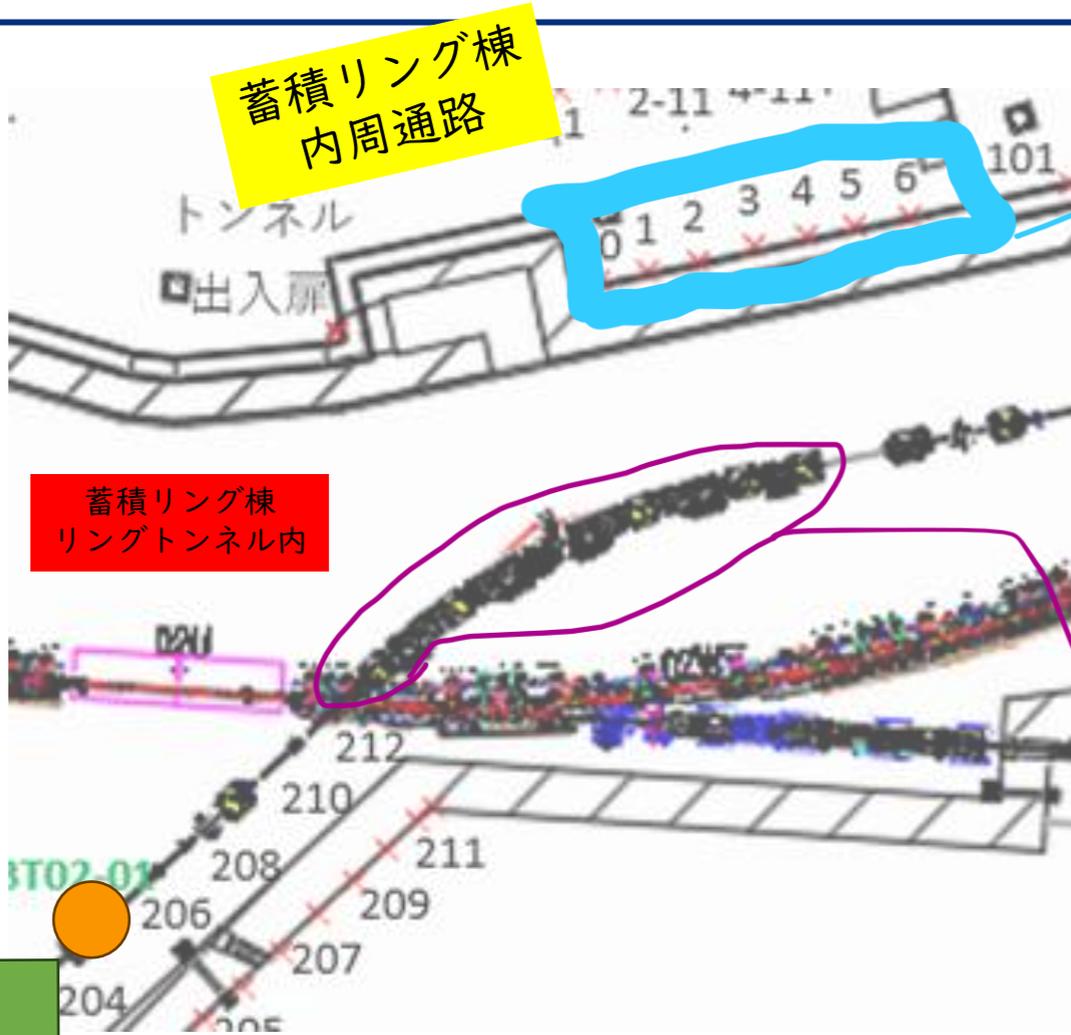
SR exp. wall (BL01U) - no. = 3, ie = 1, ix = 1, mset = 1 - photon



平均のC/E = 116

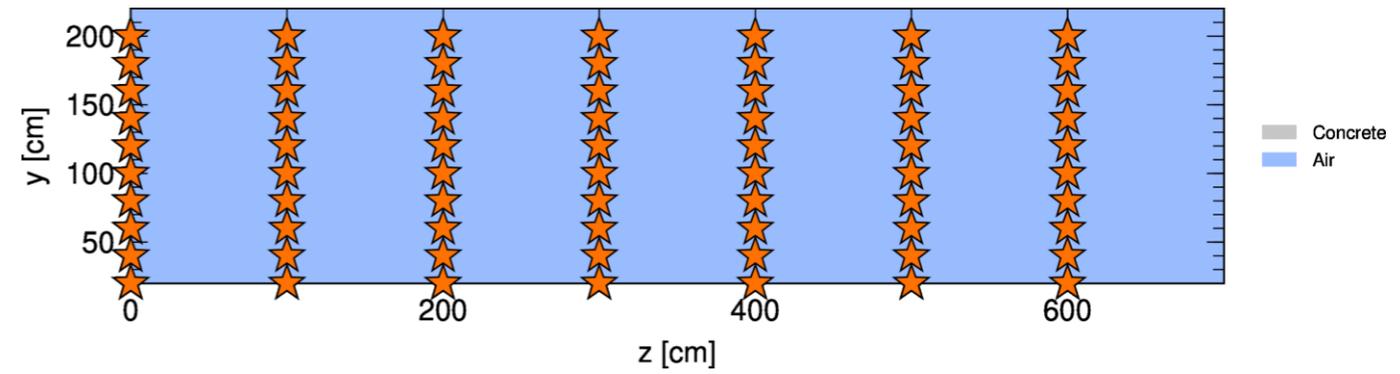
- ✓ 統計が十分ではなく誤差が大きい
- ✓ PHITS3.35では不可解な結果が得られた

2.B) 散乱体周辺（遮蔽あり）の線量 - 結果（内周通路）



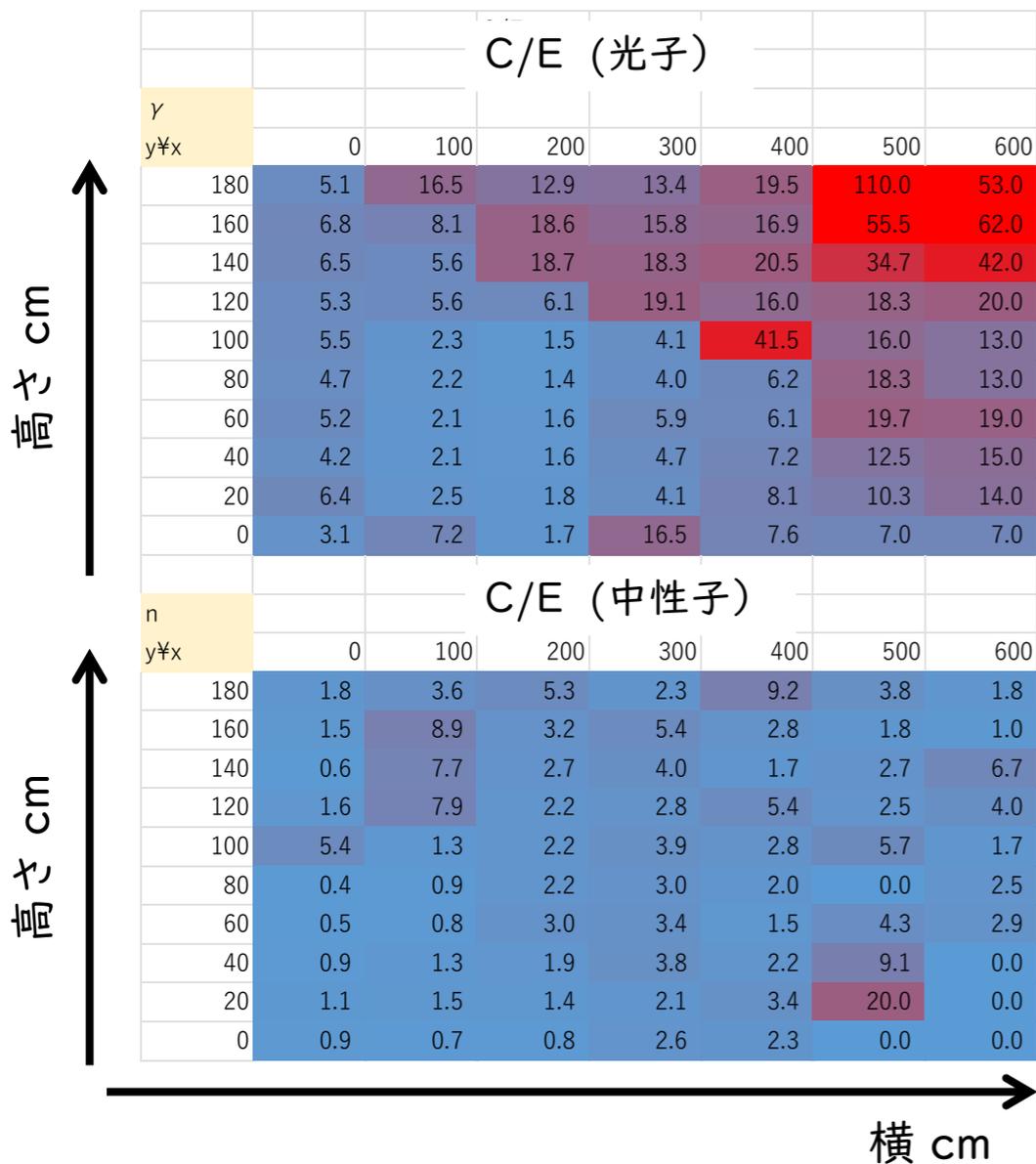
散乱体前方方向の遮蔽壁

★…測定点

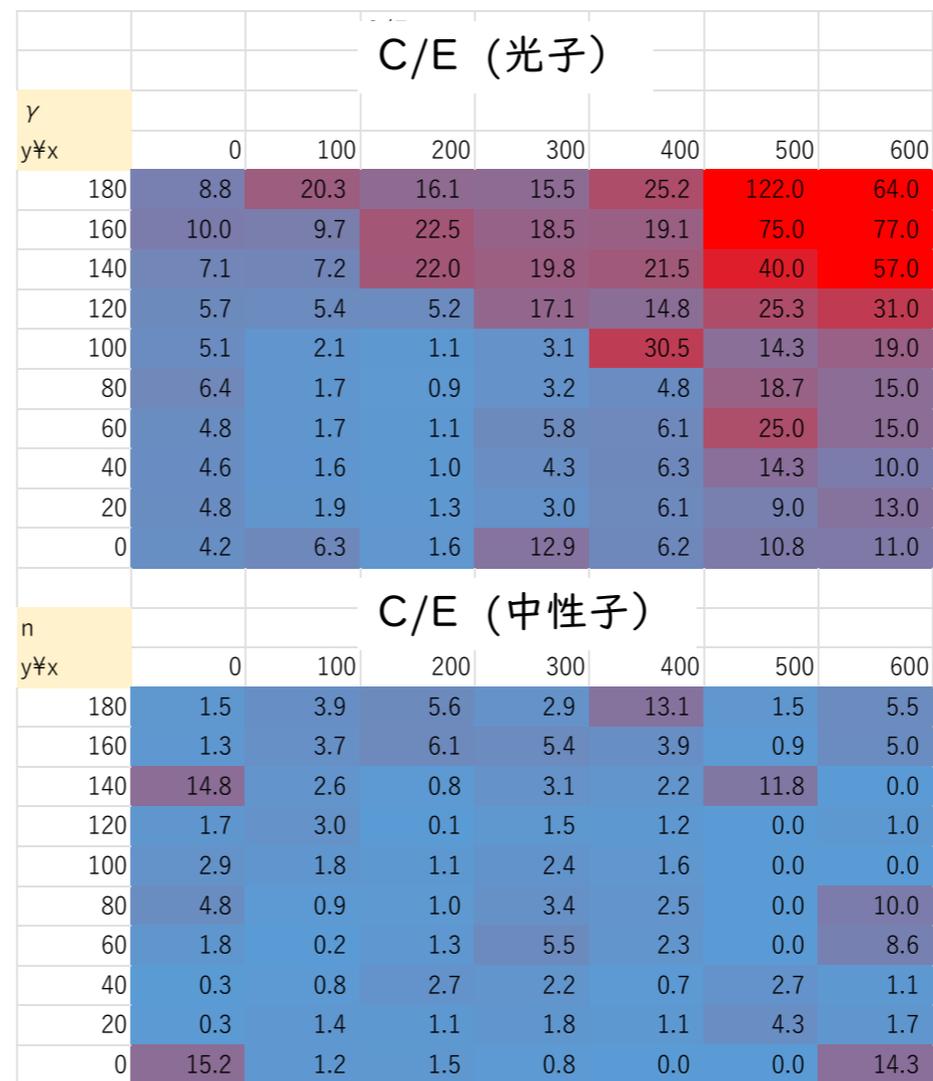


偏向電磁石
→電子ビームが曲がるように磁場を設定した

2.B) 散乱体周辺（遮蔽あり）の線量 - 結果（内周通路）



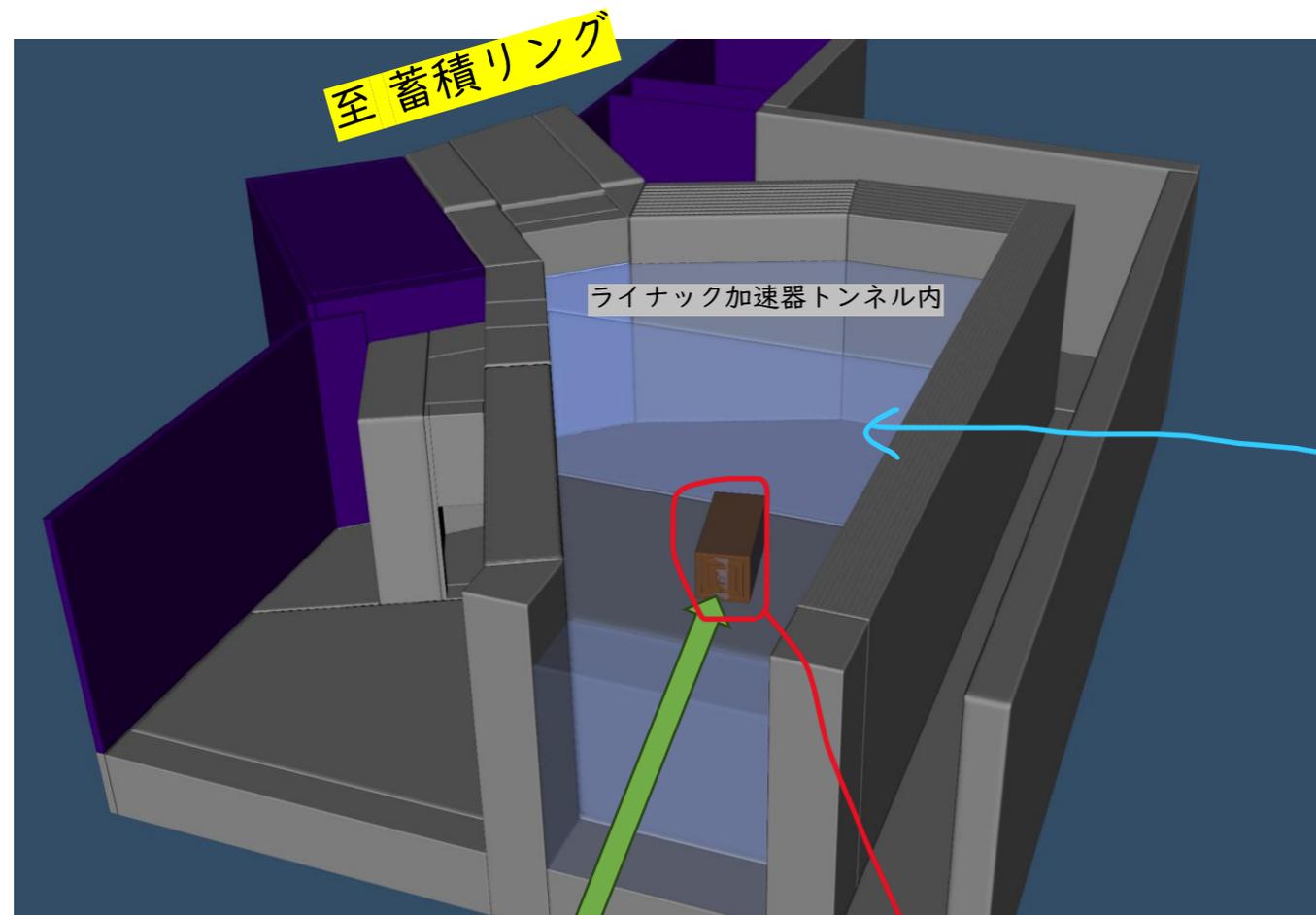
PHITS3.31



PHITS3.35

- ✓ 前方方向では光子・中性子ともに比較的良好なC/Eが得られた
- ✓ PHITS3.35ではよりC/Eが1に近づいた

ライナックビーム調整時、電子ビームの損失に伴い中性子が発生する。
この中性子によりライナック遮蔽トンネル内の空気が放射化する。



電子ビーム

ビームダンプ=
炭素 (中心部)
+鉄 (周辺部)

照射条件

- 電子ビーム：1.8 W, 3 GeV, 1Hz繰り返し
 - Ar-41放射能濃度が飽和する程度 (48時間) 照射
- ※実際の運転においてダンプへの照射時間は、数秒～数分を数回繰り返す程度



空気 (水色) の放射化を評価し、
(N=78.03%, O=21.03%, Ar=0.94%)

経験式による計算結果と比較する

※IAEA Technical Reports Series No.188

N-13, O-15の放射能濃度計算式

$$C_{air} = \frac{A_S \times P \times X_m}{V} \quad (7-1)$$

式(7-1)の各パラメータは以下の通りである。

- C_{air} : 空气中誘導放射能濃度(Bq·cm⁻³)
- A_S : 単位通過距離に生成される単位出力あたりの飽和放射能 (Bq·m⁻¹·kW⁻¹)
- P : 電子ビーム損失出力 (kW)
- X_m : 空气中を制動放射線が通過する距離 (m)
- V : 室容積(cm³)

Ar-41の放射能濃度計算式

$$C_{Ar} = \phi \times \sigma \times M \quad (7-5)$$

式(7-5)の各パラメータは以下の通りである。

- C_{Ar} : ⁴¹Arの飽和放射能濃度 (Bq·cm⁻³)
- ϕ : 熱中性子の発生量 (neutrons·cm⁻²·s⁻¹)
- σ : ⁴⁰Arの熱中性子捕獲断面積 (cm²)
- M : 空气中の⁴⁰Ar原子数密度 (cm⁻³)

仮定

- 入射ビーム1.8 Wが100%損失する
- ライナックトンネル体積=2.2e9 cm³



- 各パラメータを入れて計算



核種	空气中濃度限度 (Bq/cm ³)	飽和放射能濃度 (Bq/cm ³)
N-13	0.2	1.3 × 10 ⁻³
O-15	0.2	1.4 × 10 ⁻⁴
Ar-41	0.1	1.4 × 10 ⁻⁵

得られた飽和放射能濃度

放射能濃度 Bq/cm³

核種	IAEA TRS No.188	v3.31	v3.35
N-13	1.3e-3	3.6e-6	-
O-15	1.4e-4	-	-
Ar-41	1.4e-5	2.3e-4	2.0e-4

- Ar-41放射能濃度はPHITSバージョンによる変化はない
 - 核データ間で差は見られない
- 生成核種が異なる
 - v3.31 : H-3, Be-7, Be-11, C-10, C-11, C-14, N-13, Ar-41
 - v3.35 : N-13, Ar-37, Ar-41
- 1293 keVのガンマ線をゲルマニウム検出器で測定し定量

- ✓ NanoTerasuの遮蔽設計は、経験式とPHITS計算を比較し合いながら行っている
- ✓ PHITS3.31とPHITS3.35で行った計算結果を比較した
- ✓ NanoTerasuで行った線量測定結果とも比較した

A) 散乱体周辺（遮蔽なし）の線量

- ◆ バージョンによる違いは見られない
- ◆ 前方方向の中性子線量の一致はよい
- ◆ 後方方向は過小評価
- ◆ 光子はあらゆる角度において過小評価

B) 散乱体周辺（遮蔽あり）の線量

- ◆ PHITS3.35で若干の改善が見られた
- ◆ PHITS3.31と著しく異なる箇所が見つかった
 - ◆ 原因不明・調査中
- ◆ phig3dの描画領域の自動推定に失敗するバージョンが存在する

C) 電子ビームダンプ周辺空気の放射化

- ◆ バージョンによる違いはあまり見られない
 - ◆ JENDL-4とJENDL-5の違いが主たる要因
- ◆ PHITS3.31で生成されたN-13等はPHITS3.35では生成されない

今後

- B)の調査：簡単な体系で計算を行う
- 他計算結果との比較：放射光BLの遮蔽計算 等
- 鉛（遮蔽体）や鉄（加速器構造体）の放射化計算・実測との比較
 - 空気では違いが見られないが、鉛や鉄では違いが見られる可能性がある

1. NanoTerasu蓄積リング入射部付近における追加遮蔽の検討3, 2025年原子力学会春の年会
2. NanoTerasu蓄積リング入射部付近における追加遮蔽の検討2, 2024年原子力学会秋の大会
3. NanoTerasu蓄積リング入射部付近における追加遮蔽の検討, 2024年原子力学会春の年会
4. NanoTerasuにおける電子ビームダンプからの中性子測定, 2023年原子力学会秋の大会
5. Shielding design for 3 GeV next generation synchrotron radiation facility, 2021年核データ研究会