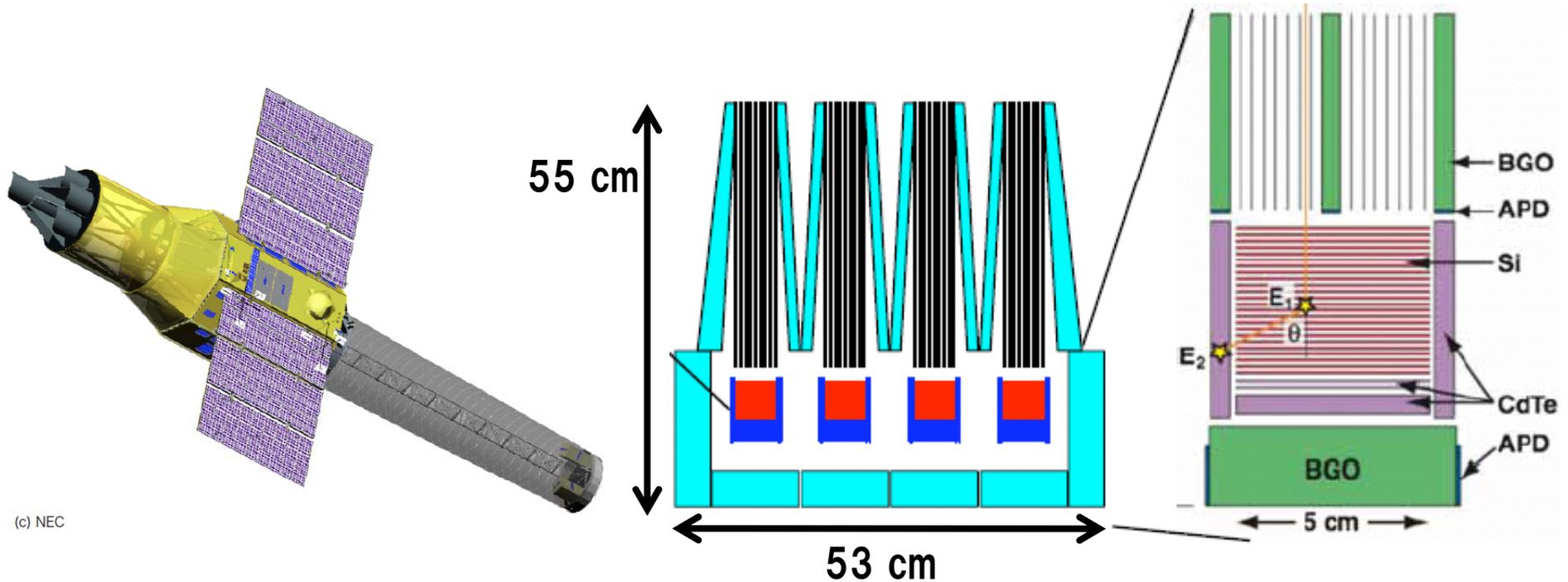


# モンテカルロシミュレーションを用いた 次期X線天文衛星ASTRO-H搭載 軟ガンマ線検出器SGDの 放射化バックグラウンド評価

○平木 一至、水野 恒史、深沢 泰司、梅木 勇大(広島大)、  
小高 裕和、渡辺 伸、国分 紀秀、高橋 忠幸(ISAS/JAXA)、  
中澤 知洋(東京大)、中平 聡志(青山学院大)、  
寺田 幸功(埼玉大)、田島 宏康(Stanford) 他HXI/SGDチーム

# ASTRO-H搭載軟 $\gamma$ 線検出器SGD



(c) NEC

- 2014年打ち上げ予定
- 4種類の検出器を搭載
- 軟X線から軟 $\gamma$ 線の  
広帯域でブラックホール  
などの高エネルギー現象  
を観測予定

## SGDの要求性能

⇒ 10-600 keVでの観測

50-300 keVでは過去最高感度  
(HXDの10倍)、HXI (硬X線  
イメージャ) の帯域とスムーズに  
つながる。

# SGDに採用された狭視野コンプトンカメラの原理

軟 $\gamma$ 線帯域では、天体信号は弱いのに、BGレベルは高い  
⇒ BGが検出器の感度を定める大きな要因

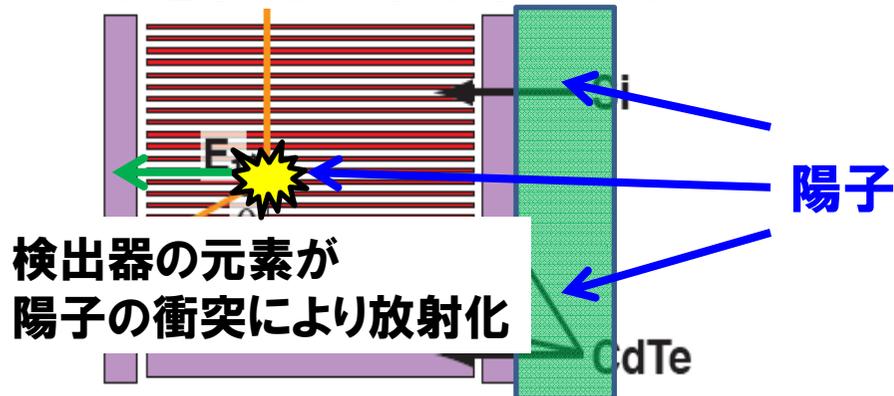
## BGOアクティブシールド + コンプトン再構成

・BGOアクティブシールド  
→信号読み出し可能なシールド  
HXDで高いバックグラウンド(BG)  
除去能力を実証済

・コンプトン再構成  
→コンプトン散乱を利用したイベントの選定  
散乱角  $\theta$  → 視野内 = 天体信号  
→ 視野外 = BGなので除去 ⇒ 感度 UP

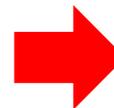
これら徹底したBG除去技術でも、BGを完全には除去できない

## ○荷電粒子と検出器の反応による放射化



SGD → Zの大きな物質を使用  
シールド、CdTe、Fine Collimator  
陽子がこれらに衝突し放射化  
放射性崩壊により $\gamma$ 線を放射  
⇒ 検出器自身がバックグラウンド源に

軌道上での放射化BGを正確に見積る



・検出器デザインの決定  
・感度の評価

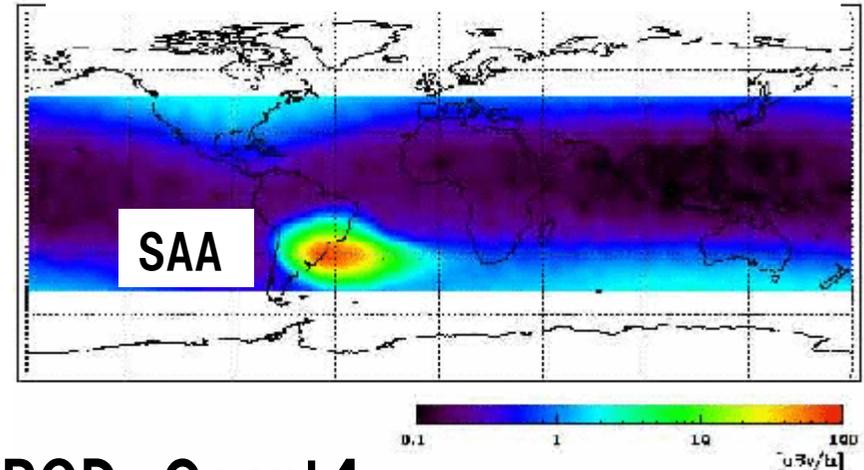
# 研究目的

## 軟γ線検出器SGDの放射化バックグラウンド評価

衛星軌道での環境を模擬するには、  
モンテカルロシミュレーションが最適

- ・南大西洋の上空にある地磁気の異常帯
- ・1日に9回 通過する
- ・約150 MeV 陽子が  
1000秒間に  $10^5$  個/cm<sup>2</sup>も降り注ぐ

衛星軌道での荷電粒子フラックス



使用するシミュレーションツール: MGGPOD、Geant4

- ・検証されたフレームワークが存在
- ・ただし組み込むプロセスは、ユーザー自身で検証する必要がある
  - CdTe検出器は、宇宙環境では新しい素材
  - 低エネルギー(keV領域)の精度を要求

本研究の目的

過去の実験データや文献と比較することで、  
シミュレーションプログラム(物理プロセス)の検証を行う

# 放射化バックグラウンドを見積もるには

放射化BGを次の3段階に分けてシミュレートすることで推定する

## Step 1. 放射性同位体の生成 (MGGPOD)

→軌道上の放射線環境を仮定し、  
検出器との相互作用で  
**生成する放射性同位体を  
シミュレートする。**

Step 1

陽子の照射によって  
生成される親核種の  
リストを作成

## Step 2. 生成された放射性同位体の 崩壊レートの計算 (MGGPOD)

→宇宙線粒子の照射・冷却時間に応じた  
**核種毎の崩壊レートを計算。**

Step 2

崩壊によってできる  
娘核種のリストを生成

## Step 3. 放射性同位体の崩壊後 (Geant4)

→Step2までの結果を利用して  
**検出器と粒子との相互作用を  
シミュレートし、  
放射化バックグラウンドを見積る。**

Step 3

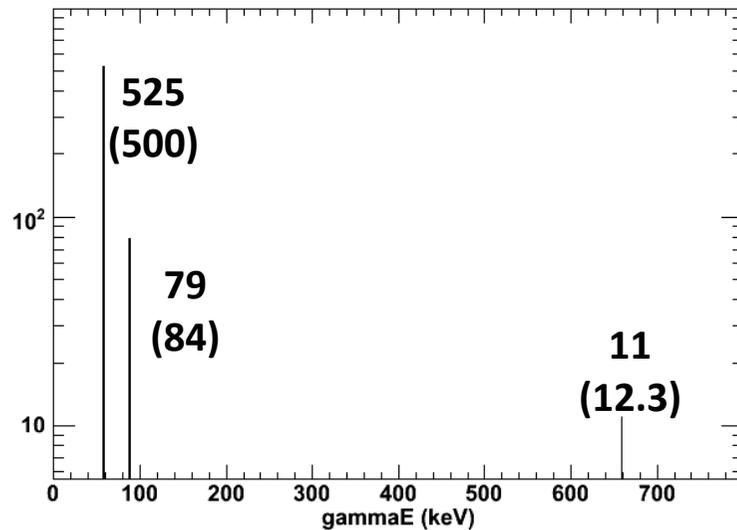
検出器と核種との相互作用を  
モンテカルロシミュレーション

本研究では、Step1, 2のMGGPODの核種の生成・崩壊  
及び、Step3のGeant4の物理プロセスの検証を行った。

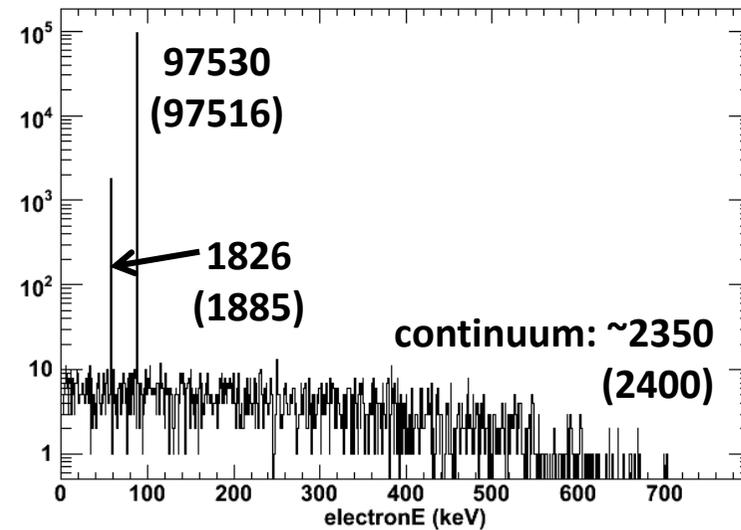
# Step3、Geant4の検証

例)  $\gamma$ 崩壊、 $\beta^-$ 崩壊及びIT (Isometric Transition) の検証 ( $^{127m}\text{Te}$ から $^{127}\text{I}$ への崩壊)

$\gamma$ 線のエネルギー分布



電子のエネルギー分布



上は親核種の崩壊によってできた個々の粒子の運動エネルギー、左が $\gamma$ 線、右が電子。図中の数字はラインの強度、括弧の数字は文献からの予測値。

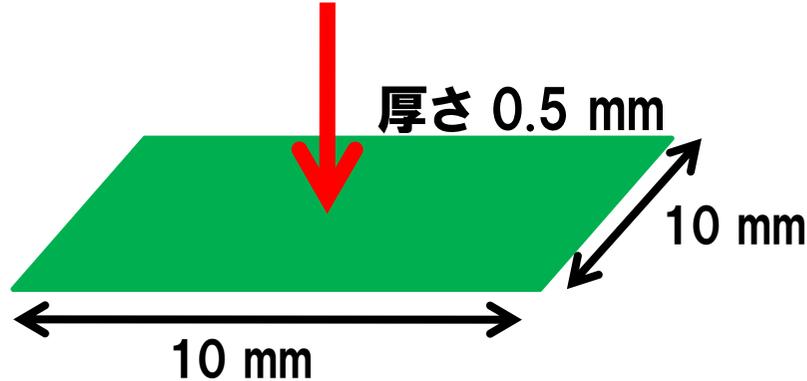
→**ラインのエネルギーと強度、連続成分は概ね正しい。**

例のように放射化BGで重要な以下の物理プロセスが正常に動作していることを確認した。

1. 電子捕獲 ( $\beta^+$ 崩壊)
2.  $\gamma$ 崩壊 (内部転換)
3.  $\beta^-$ 崩壊
4. IT (Isometric Transition)

# シミュレータの検証 ～CdTe放射化実験との比較～

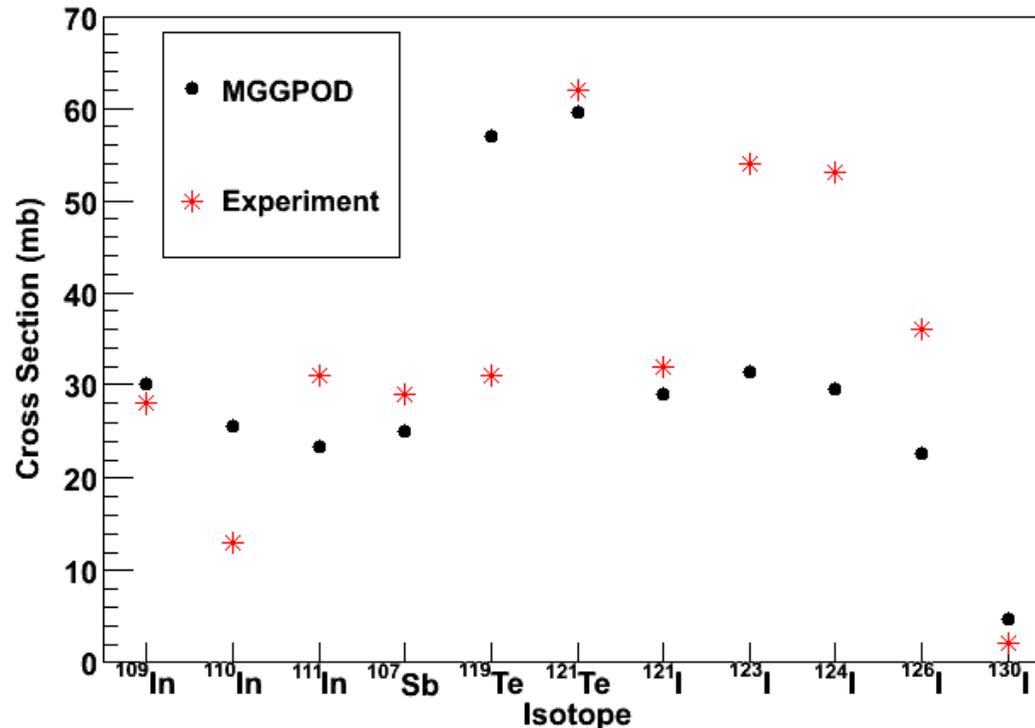
150 MeV単色陽子



Murakami et al. (2003) で同定されている核種についてその反応断面積を比較。

→シミュレーションは生成レートから反応断面積を算出

## 反応断面積



MGGPODでの核種の生成量について検証。

→factor 2で実験と

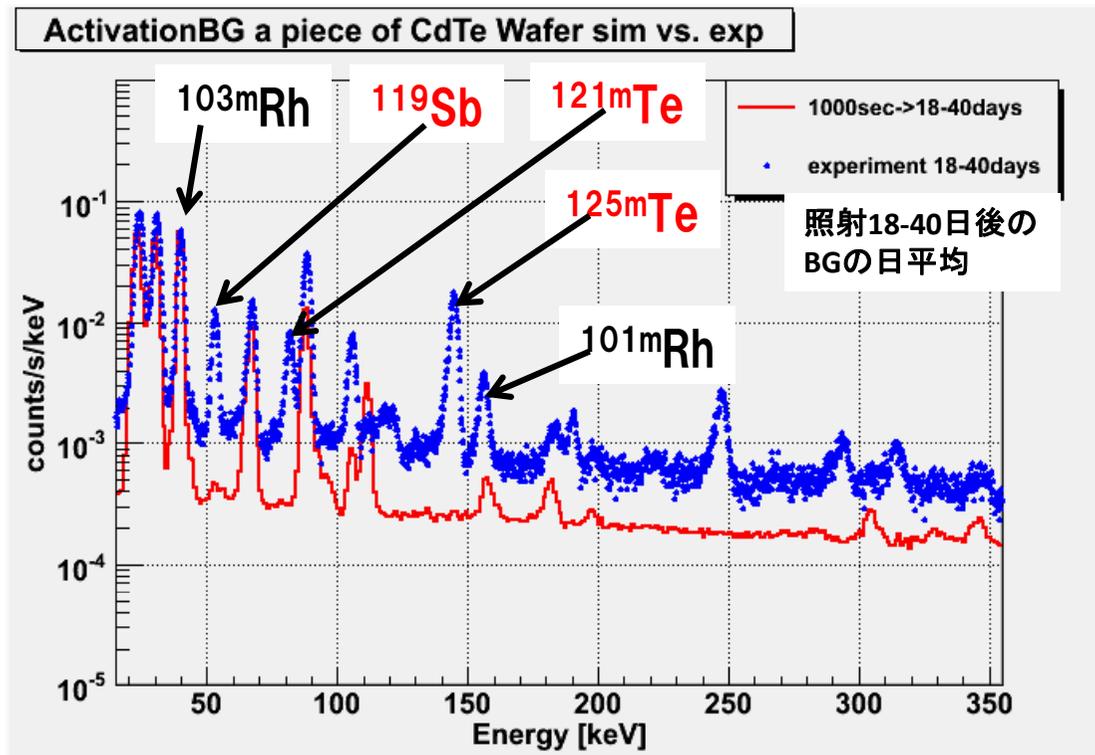
シミュレーションは一致

※実験ではビーム強度にfactor2の不定性がある。

**生成量の算出は概ね正しい**

※原子番号の大きいでは系統的にシミュレーション値の方が小さくなるので注意が必要

## Step2、崩壊の分岐比 & アイソマーの生成レートの検証



•  $^{101m}\text{Rh}$ や $^{103m}\text{Rh}$ などは概ね正しい。

但し、 $^{119}\text{Sb}$ や $^{121m}\text{Te}$ 、 $^{125m}\text{Te}$ の様に主にアイソマーで再現できないラインが多い。

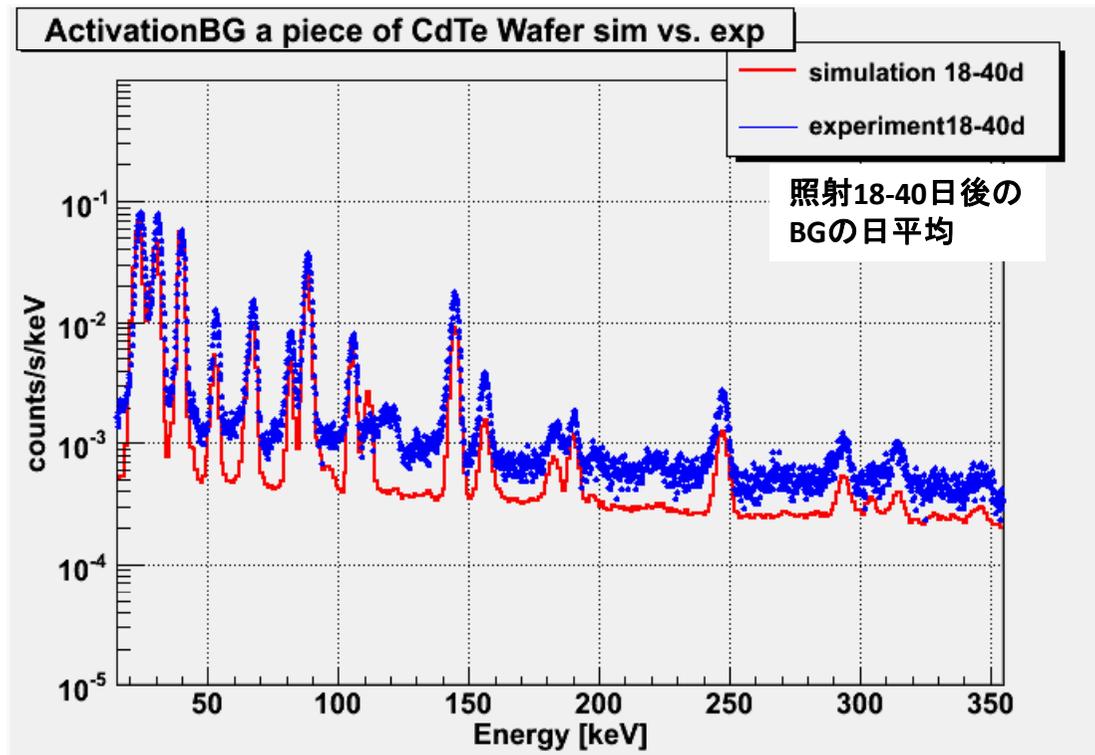
→ MGGPOD内の崩壊の分岐比を設定しているライブラリデータに不備があった。

A=100-130の範囲で、アイソマー自身、または親核種の寿命が1日以上の子核種の崩壊の分岐比を文献をもとに計算し、計7核種についてライブラリデータを修正。

→ MGGPODのStep1 (GGOD) でできた核種の生成レートでアイソマーの生成レートが全てゼロになっている。

A=100-130の範囲で、1日以上の子核種を持つ核種19核種について grand state:meta stateの生成レートが50 : 50であると仮定して生成レートファイルを書き換える。

## Step2、崩壊の分岐比 & アイソマーの生成レートの検証（プロセス修正後）



- ライン成分は実験をほぼ全て再現できている。  
ただし、一部のラインで強度が実験より低くなる。  
→ **アイソマーの生成量に起因すると考えられる。**
- 連続成分についても、当初のものより改善。  
但し、BGレベルはまだ若干低い。

## まとめ

放射化BGシミュレータを構成しているGeant4とMGGPODの2つのプログラムについて、プロセスの動作検証を行った。

- Step3、Geant4の検証

放射化BGの主要な物理プロセス（電子捕獲、 $\gamma$ 崩壊、 $\beta$ 崩壊、IT）が正常に動作することを確認できた。

- Step1、MGGPODの検証

MGGPOD中の同位体生成部分の動作は概ね正しいことが分かった。

- Step2、MGGPODの検証

修正によりアイソマーによるラインを再現できるようになった。

ただし、一部のラインで強度の足りないものがある。

## 今後

- アイソマーの生成量について検証を行う。
- **現行のSGDジオメトリを用いて本格的なBG評価を行う。**
- Trade off studyによりBG0シールドやFine Collimatorの**検出器デザインの最適化**を行う。