

J-PARC 3 GeV シンクロトロン入射ダンプの中性子によるサンプル放射化評価(2) EVALUATION OF THE SAMPLE ACTIVATION AT THE INJECTION DUMP OF J-PARC 3 GEV RAPID CYCLING SYNCHROTRON (2)

山本風海^{#, A)}, 中野秀仁^{A)}, 松本哲郎^{B)}

Kazami Yamamoto^{#, A)}, Hideto Nakano^{A)}, Tetsuro Matsumoto^{B)}

^{A)} Accelerator Division, J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

^{B)} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

Abstract

To accumulate a high-intensity beam in the Rapid Cycling Synchrotron (RCS), the H⁻ beams from the linac converted into protons and injected into the RCS. In this process, a certain amount of the beam is not converted, and it leads to the injection dump. Since the secondary particles are constantly produced inside the dump due to this waste beam, we have studied if those secondary particles can be used as an irradiation test. In this report, we compare the results of calculations using PHITS/DCHAIN codes and measurements using a germanium-semiconductor detector after activating a bismuth-209 sample.

1. はじめに

J-PARC 3 GeV シンクロトロン(3 GeV Rapid Cycling Synchrotron, RCS)は物質生命科学実験施設(materials and life science experimental facility, MLF)および主リング(Main Ring, MR)に最大 1 MW 相当のビームを供給する目的で建設された[1]。RCS において 1 MW のビーム出力を達成するためには、リニアックからの入射ビームを RCS の RF バケツ内に多重入射しビーム粒子を溜める必要があり、RCS では荷電変換入射手法を用いてビームを蓄積している[2]。この荷電変換入射のため、J-PARC リニアックでは陽子に電子が 2 個付随した負水素イオン(H⁻)を加速しており、H⁻ビームは RCS の入射点に設置した 1 ミクロン程度の薄膜[3]を通過することで陽子に変換される。この際、変換しきれなかった粒子は入射点下流に設置されたダンプに導かれ廃棄される。図 1 に入射部の機器配置と入射、周回ビーム及び荷電変換されなかった H⁰、H⁻の軌道を示す。

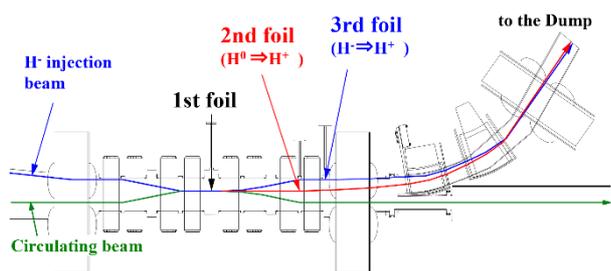


Figure 1: Beam orbits in the injection line.

荷電変換反応は確率的事象であることから、入射ダンプには運転中ある程度のビーム(600 W 程度)が定期的に廃棄され続ける。現在は、この入射ダンプへの廃棄ビームはただ廃棄しているだけである。しかし、このビームによって中性子、ガンマ線等が生成され続けているため、これら二次粒子を照射試験等に用いることができれば、

RCS の定常運転に寄生する形で試験を行うことができ効率的である。その可能性を探るために、入射ダンプで発生している二次粒子に関して、PHITS[4]およびDCHAIN[5]を用いたシミュレーション評価、および Bi サンプルを用いた放射化測定を実施している[6]。今回は、昨年度の報告の続きとして 1 年経過後の放射化サンプルの測定結果の報告、および照射試験サンプル移動装置の設計について報告する。

2. シミュレーション

2.1 モデル

昨年度実施したシミュレーション[6]について、ダンプ周辺のコンクリート壁の形状に間違い(開口形状が四角ではなく同心円)があったことから、モデルを修正し再計算を行った。図 2 に PHITS を用いて作成したモデル(ビームが紙面に向かって入射する向きから見たサンプル位置周辺での断面図)を示す。コンクリートの開口形状

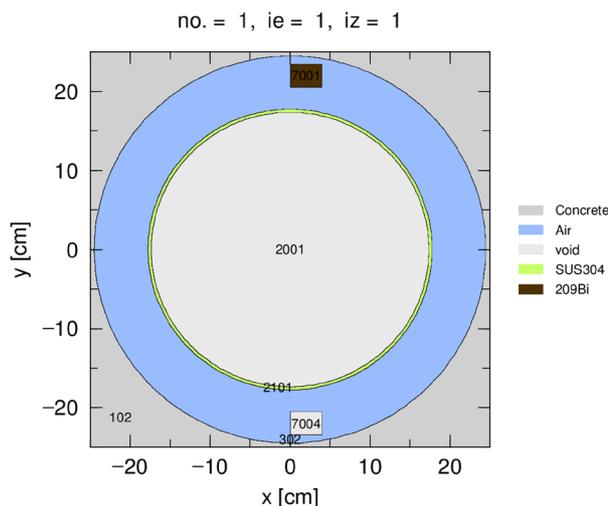


Figure 2: Calculation model of the injection dump.

[#] kazami@post.j-parc.jp

の変更に伴って、サンプル形状、位置も見直した。それ以外のパラメータ(入射ビーム量等)は同一の条件とした。

2.2 計算結果

図 3 に、モデル中のサンプルを模したボイド領域に入射した二次粒子のスペクトルを示す。モデルの形状を小さくしたため Flux の絶対値は変動しているが、スペクトルの特徴に大きな違いはなかった。さらに、PHITS の結果を DCHAIN コードに接続することで、²⁰⁹Bi サンプルの 1 年後の放射性核種を求めた。表 1 にビーム停止一年後のサンプル中の放射性核種のうち、ガンマ線線量が多い上位 5 種を示す。全放出ガンマ線のうち線量換算で 77% が ^{207m}Pb によるもので、次いで ²⁰⁷Bi の寄与が 13.5%、^{110m}Ag が 8.7% で、¹²⁴Sb 以下の核種は 1% 以下である。最も寄与の大きい ^{207m}Pb の寿命が 0.8 秒と極端に短い。これは親核である ²⁰⁷Bi の軌道電子捕獲もしくは β^+ 壊変によって生成されるためである。²⁰⁷Bi の寿命は 31.6 年と測定間隔と比較してかなり長い。今後さらに数年が経過するとガンマ線源はほぼ ^{207m}Pb とその親核 ²⁰⁷Bi だけになると思われる。

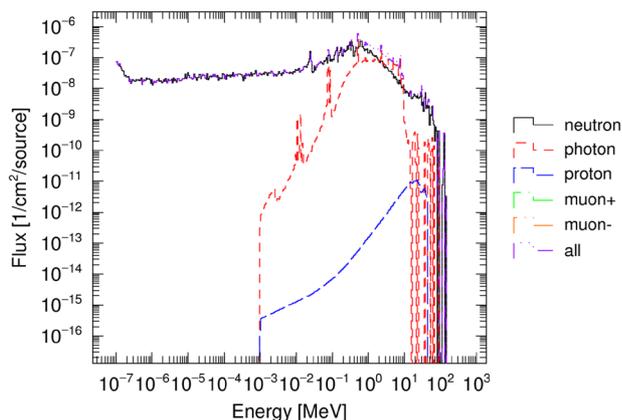


Figure 3: Energy spectra of the secondary particles.

Table 1: Residual Nuclides After 1-year Cooling

Nuclides	Photon Dose [uSv*m ² /h]	Radioactivity [Bq/cc]	Harf Life
^{207m} Pb	1.0441E-03	8.7639E+00	0.806 s
²⁰⁷ Bi	1.8289E-04	1.0433E+01	31.6 y
^{110m} Ag	1.1822E-04	5.4473E-01	249.8 d
¹²⁴ Sb	5.6609E-06	4.1150E-02	60.2 d
⁶⁵ Zn	2.0084E-06	4.7445E-02	244.3 d

3. サンプル放射化測定

3.1 実験条件

サンプルの照射条件、測定条件などに関しては昨年度に詳細を報告[6]しているためここでは省略する。今回、1 年後の放射性核種の測定を行う前に、標準線源を用いた検出効率測定を新たに実施した。図 4 に ²²Na の 0.511 MeV、1.276 MeV および ⁶⁰Co の 1.17 MeV、1.33 MeV のガンマ線ピークを用いた検出効率測定結果

を示す。一般的に、Ge 検出器の検出効率は両対数グラフを用いると 500 keV 程度を超えたエネルギーでは直線で近似できることから、これら 4 点を用いて直線フィットした以下の式として検出効率を求めた。

$$\ln(\epsilon) = -1.52 - 1.37 \times \ln(E)$$

ここで ϵ は検出効率、 E は測定するガンマ線エネルギーである。

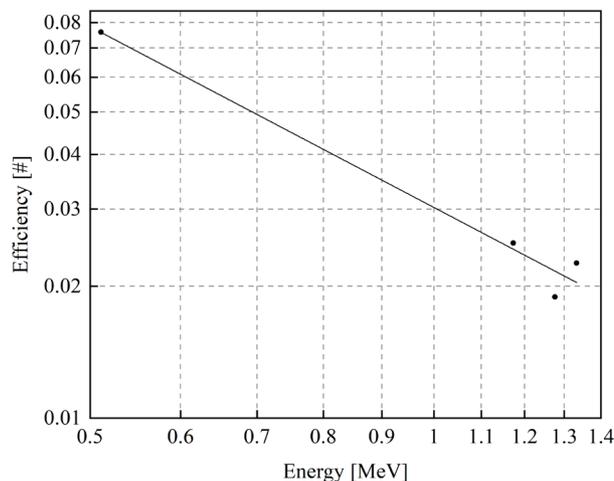


Figure 4: Detection efficiency calibration result.

3.2 測定結果

図 5 に、一年冷却後に Ge 検出器で測定した照射サンプルのスペクトルを示す。また、0~1 MeV、1~2 MeV の範囲の拡大を図 6 に示す。

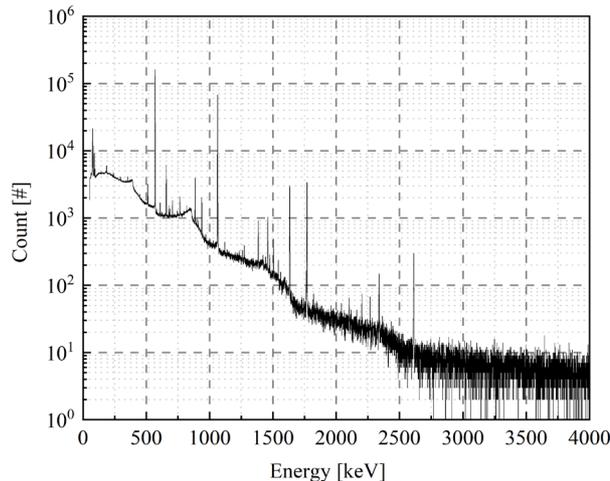


Figure 5: Gamma-ray spectrum of irradiated sample.

4. 考察

まず、測定されたスペクトルの中で、0~2000 keV までの範囲にある主要なピークについて Phits および DCHAIN の計算結果を基に核種を同定した。その結果を図 6 内に示している。Phits の結果では ^{207m}Pb、²⁰⁷Bi、

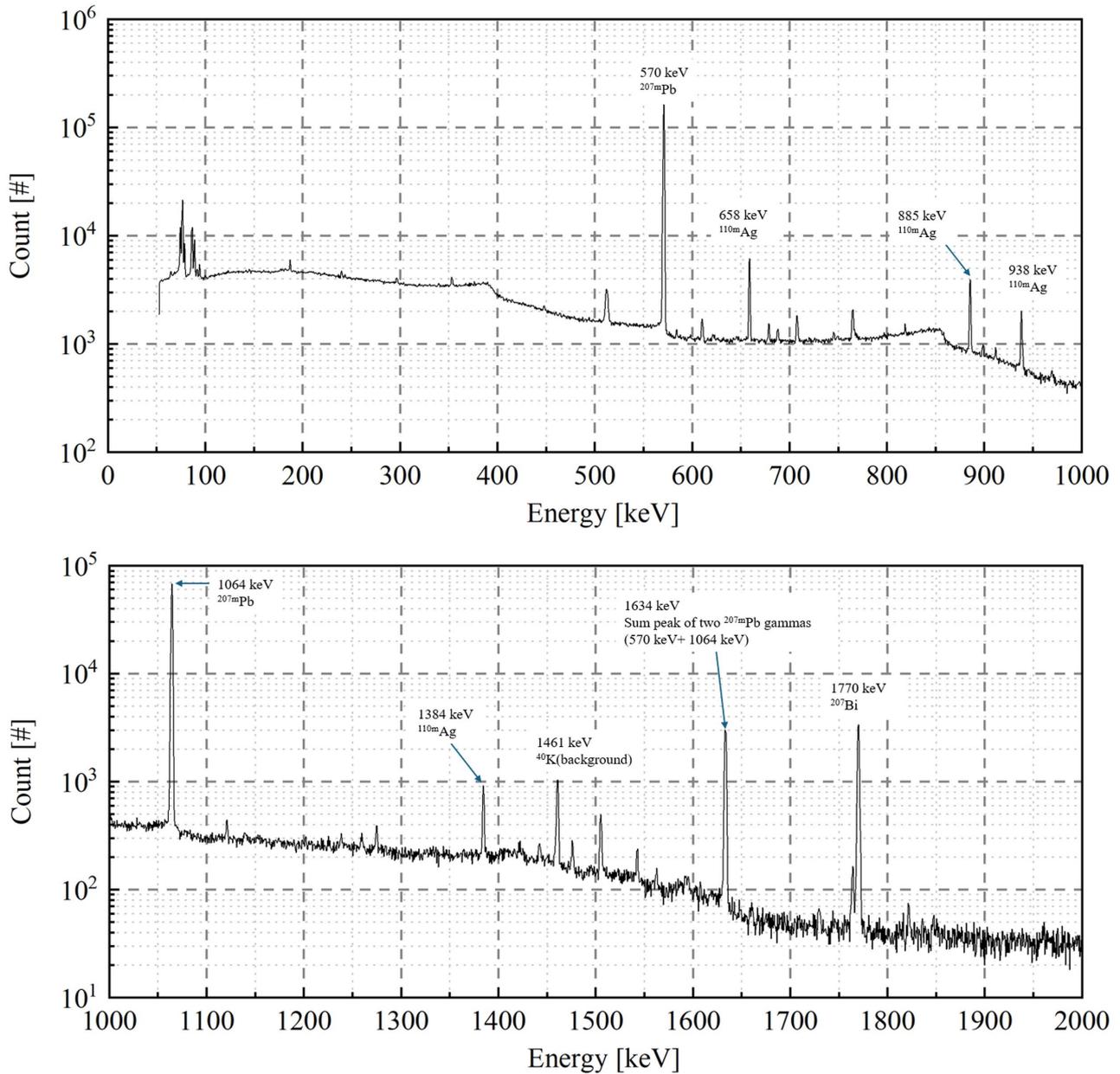


Figure 6: Gamma-ray spectrum of irradiated sample and identified nuclides.

^{110m}Ag が主要なガンマ線源であるが、実際の測定結果でもそれら核種由来のガンマ線ピークが存在することを確認した。1461 keV のピークについては、サンプルを何も置かないバックグラウンド測定データにも同じカウントレートで存在していることから、周辺環境に存在する ^{40}K 由来であると考えられる。また、1634 keV は ^{207m}Pb から放出される2つのガンマ線エネルギー (570 keV, 1064 keV) の和と一致することから、それらの和信号であると考えられる。

同定した ^{207m}Pb 、 ^{207}Bi 、 ^{110m}Ag の各ピークについて、その面積から崩壊数を求めた。手順としては、まず生データからバックグラウンドを差し引いたピーク面積をカウント数の和で算出した。次に、ピーク面積をそのピークに相当する分岐比で割り、測定時の検出器のライブタイムで割ることで、単位時間あたりの崩壊によるガンマ線検出

回数数を求めた。最後に、この値を検出効率で割ることで、単位時間当たりの崩壊数を評価した。この手順で得られた各ピークの放射能を、DCHAIN の計算結果と併せて表 2 に示す。全体的に、測定結果は計算値よりも低めに出ているが、エネルギーが高くなるにつれてその差が小さくなっているように見える。実際には、同じ核種の解析結果は等しくなるのが正しいはずなので、測定結果は高エネルギー側を過大評価しているか、もしくは低エネルギー側を過少評価していると思われる。今回、検出効率の測定は手持ちの ^{22}Na と ^{60}Co のみを用いて実施したが、そもそも低エネルギー側のデータ点が511 keVの一点のみしか存在せず、また1 MeV以上の3点のデータはエネルギー間隔が小さいにもかかわらずデータのバラつきが大きいなど、検出効率の精度に疑問が残っていることがその一因と考えられる。一方で、ほぼ 180 度方向への散

Table 2: Comparison of the Radioactivity Between the Measurement and Simulation Results

Nuclides	Peak energy [keV]	Measured Radioactivity [Bq]	Calculated Radioactivity [Bq]	Ratio (Measured/Calculated)
^{207m}Pb	570	8.54	19.6	0.44
^{207m}Pb	1064	11.5	19.6	0.59
^{207}Bi	1770	18.8	23.3	0.81
^{110m}Ag	658	0.514	0.884	0.58
^{110m}Ag	885	0.657	0.884	0.74
^{110m}Ag	937	0.688	0.884	0.78
^{110m}Ag	1384	0.973	0.884	1.10

乱二次中性子による放射化の評価であり、精度は出づら
いにもかかわらず、ファクター2もしくはそれ以下で一致
していることから、本手法を用いることで放射化の評価を
ある程度の精度でできることが確認できた。

5. サンプル交換機構

入射ダンプは奥行き 1.6 m であるが、ダクトとダンプ壁
の隙間は 5 cm しかなく、手を奥まで入れることができず
内部に放射化サンプルを置くことはできないことから、レ
ールに沿ってサンプルを送る/引き出すことのできるサン
プル交換機構の設計を進めている。図 7 にその概念図
を示す。Phits の計算によると、1 MW 連続運転を年間
4500 時間継続すると、ダンプの内部 1.5 m の位置で中
性子およびガンマ線による吸収線量の合計はおおよそ
1 MGy のオーダーに到達すると見込まれる。今回の測

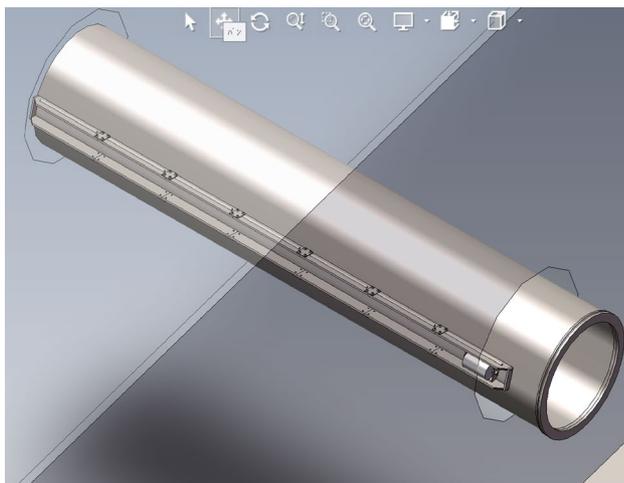


Figure 7: Schematic of sample exchanger.

定結果からも、Phits による評価はファクター2以下程度
で正しいと考えられることから、サンプル交換機構も年間
その程度の線量を吸収することになるので、複雑な構造
とせず一周つなげたチェーンを回すことでサンプルを移
送する方式を考えている。年度内に製作を進め、可能な
限り早く設置するべく検討を進めている。

6. まとめ

RCS の入射ダンプを照射場として利用する可能性を
探るため、PHITS および DCHAIN コードを用いたシミュ
レーションと Ge 半導体検出器を用いたガンマ線測定に
より、入射ダンプ入口に置くことで放射化した ^{209}Bi 内に
生成された放射性核種の種類および数量を評価した。1
年間冷却後の Ge 検出器による測定スペクトルを解析し
たところ、PHITS および DCHAIN シミュレーションで最も
生成量が多かった数核種について、相当するガンマ線
エネルギーで大きなピークを示しており、さらにその面積
から崩壊数の絶対値を評価したところ、実測値がシミュ
レーション値の半分からほぼ同数という結果を得た。今後
は、設計しているサンプル交換機構を用いて照射位置を
ダンプ内部に変更することによって、シミュレーションと測
定の精度向上を目指す。これにより、シミュレーションモ
デルの統計が向上することが期待できる。

参考文献

- [1] K. Yamamoto *et al.*, “Design and actual performance of J-
PARC 3 GeV rapid cycling synchrotron for high-intensity
operation”, *J. Nucl. Sci. Technol.* 59, 9, 2022, pp. 1174-1205.
doi:10.1080/00223131.2022.2038301
- [2] H. Harada, “H. Painting-injection study using a virtual
accelerator in a high-intensity proton accelerator”, KEK
Report No. 2009-7, 2009.

- [3] M. Yoshimoto *et al.*, “Progress status in fabrication of HBC stripper foil for 3-GeV RCS at J-PARC in Tokai site”, Proc. INTDS2018, EPJ Web of Conferences. 229, 01001, 2020.
- [4] T. Sato *et al.*, “Recent improvements of the Particle and Heavy Ion Transport code System - PHITS version 3.33”, J. Nucl. Sci. Technol. 61, 127-135, 2024.
- [5] H. N. Ratliff *et al.*, “Modernization of the DCHAIN-PHITS activation code with new features and updated data libraries”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., B, 484, pp. 29-41, 2020. doi:10.1016/j.nimb.2020.10.005
- [6] K. Yamamoto *et al.*, “J-PARC 3 GeV シンクロトロン入射ダンプの中性子によるサンプル放射化評価”, Proceedings of the 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 31 -August 3, Yamagata, Japan, 2024, pp. 741-745.