

理研 RIBF におけるビームロスによる放射線検出器の開発 DEVELOPMENT OF NEW BEAM LOSS MONITOR FOR RIKEN RIBF

志熊良樹^{#, A, B}, 三宅泰斗^A, 奥野広樹^A, 高橋一匡^B, 佐々木徹^B, 菊池崇志^B

Yoshiki Shikuma^{#, A, B}, Yasuto Miyake^A, Hiroki Okuno^A, Kazumasa Takahashi^B, Toru Sasaki^B, Takashi Kikuchi^B

^ARIKEN Nishina Center for Accelerator-based Science

^BNagaoka University of Technology

Abstract

At RIKEN Nishina Center, the plan to upgrade the current facility and increase heavy ion beam intensity is promoted. However, there is a concern that the beam loss may cause serious thermal damage to the Electrostatic Deflection Channel (EDC). Currently, a thermocouple that detects a temperature gradient is used as a Beam Loss Monitor (BLM) that observes the beam loss of EDC. However, the response time of the thermocouple cannot keep up with the melting time by beam loss. There is a problem that the EDC melts before the Beam Interlock System (BIS) functions and causes accelerator operation failure. Therefore, it is necessary to develop a detector that can detect the beam loss immediately by using radiation detection and electric signals. We adopted an ionization chamber as a new BLM, devised an original design method, and designed based on engineering analysis. We developed a multi-stage electrode type ionization chamber and estimated its performance.

1. はじめに

理研 RI ビームファクトリー (RIBF) では、現在の加速器施設をアップグレードして、重イオンビーム強度を増強する「RIBF 高度化計画」が推進されている。本高度化計画により RIBF を更に高度化し、世界最高性能の重イオンビームにより新しい元素変換科学の開拓が期待されている[1]。

その一方で、ビーム強度を増強するに伴い、ビームによる機器への損傷が深刻になることが懸念される。サイクロトロン加速器でビームを加速するにあたり、問題になるのはビームロスが特定の機器に集中することである。その中でもビームによる損傷が最も懸念される装置が Electrostatic Deflection Channel (EDC) である[2]。現在、Figure 1 に示すように RIBF の各サイクロトロン加速器の EDC がビームにより損傷しており、損傷が深刻な場合は EDC に高電

圧が印加出来ず、ビームの取り出しが出来なくなる。

そのため、EDC におけるビームロスをモニターして EDC がビームによって融解する深刻な損傷を受ける前にビームインターロックを機能させてビームチョッパーでビームを止めることが重要な課題となる。既存のビームロスモニター (BLM) システムの構成を Figure 2 に示す。

既存の EDC のビームロスモニター (BLM) は、検出器として温度勾配を検出する熱電対を採用している。しかし、熱電対の応答時間ではビームインターロックシステムが機能するまでにビームロスにより EDC が融解する。そのため、放射線検出及び電気信号を駆使してビームロスを即時観測可能な BLM の開発を提案した。

我々は新規 BLM の検出器としてイオンチェンバーを採用し、工学的な知見に基づく独自の設計方法を考案して設計・開発を行った。

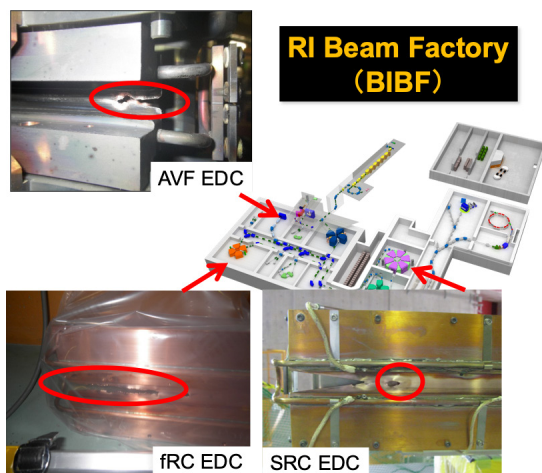


Figure 1: Beam damage of EDC.

既存のビームロスモニターシステム構成

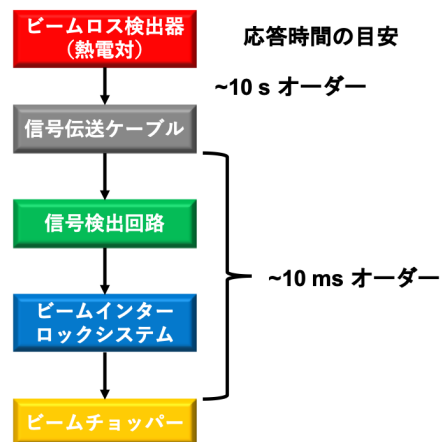


Figure 2: Schematic of Beam Loss Monitor system.

[#]yoshiki.shikuma@riken.jp

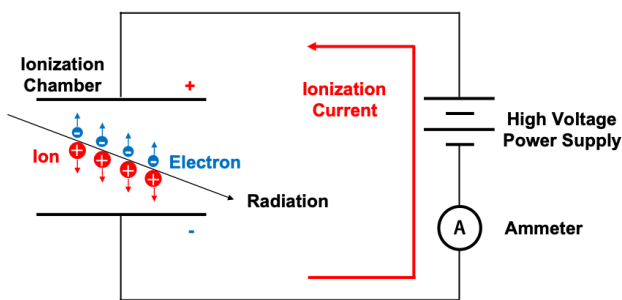


Figure 3: Principle of ionization chamber.

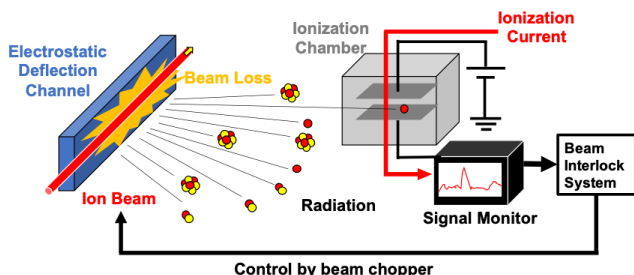


Figure 4: Concept of beam loss detection at EDC.

2. イオンチェンバーの設計

イオンチェンバーの基本的原理を Figure 3 に示した。イオンチェンバーは放射線検出器の一つであり、電圧を印加した 2 枚の平行に向かい合った電極間に放射線が入射すると電極間の気体を電離させ、イオン・電子対を多数生成する。そして、イオン・電子が電場によるドリフト運動により電極に到達すると測定回路に電離電流が流れ、放射線が検出される。

EDC におけるビームロスで発生する放射線をイオンチェンバーで検出することによって、EDC へのビームロスパワーを観測する。Figure 4 に EDC における放射線によるビームロス検出の概念図を示した。

BLM の検出器として用いるイオンチェンバーの設計方法を以下のように考案した。

1. EDC の熱伝導解析からビームロスによって EDC が融解する入熱量及び融解時間を解析。
2. 融解時間からイオンチェンバーの最遅応答時間を決定。
3. 放射線解析からビームロスによって発生する放射線によるイオンチェンバー内の気体の最低吸収線量率を見積もり、ビームロスを十分に検出可能なイオンチェンバーのセンサ体積を決定。
4. イオンチェンバーの応答時間などからその他の設計パラメータの設計値を決定。

以下では、設計の具体的な方法をまとめた。

2.1 ビームロスによる EDC の熱伝導解析

ビームロスによって材質が銅である EDC が融解する入熱量及び融解時間を見積もるために 2 次元熱伝導解析コードにより、温度分布を求めた。EDC を

Figure 5 に示すような 2 次元モデルで定義して式(1)に示す 2 次元熱伝導方程式に基づいて熱伝導計算を行った。

$$\frac{\partial T(x, y)}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{C} S(x, y) \quad (1)$$

ここで、 x, y は位置[m]、 t は時刻[s]、 $T(x, y)$ は座標 (x, y) における EDC の温度[K]、 a は熱拡散率[m²/s]、 C は単位面積あたりの熱容量[J/(K·m²)]、 $S(x, y)$ は座標 (x, y) におけるビームロスによる入熱面密度[W/m²]である。また、本解析で使用した重イオンビームのパラメータを Table 1 に示す。重イオンビームパワーがビームロスに変換される割合をビームロス率と定義して、ビームロス率を変化させて解析を実施した。

Figure 6 にビームロス率に対する融解時間特性を示す。解析結果からビームロス率が 12 % (ビームロスによる入熱量が 985 W) のときに EDC の飽和温度が銅の融点に達する結果となった。このことからおよそ 1 kW 以上のビームロスで EDC が融解することが予測される。また、ビームロス率が 100 % (ビームロスによる入熱量が 8.21 kW) のときの融解時間はおおよそ 20 ms であることから BLM は 20 ms よりも十分速い応答時間を持つ必要があることが分かった。そして、既にイオンチェンバーを BLM として導入している加速器施設のイオンチェンバーの応答時間 [3] を目安に、ビームロス検出器に要求される応答時間を十分に満足することを考慮した。本設計では BLM の検出器としてのイオンチェンバーに要求される応答時間を 100 ns と決定した。

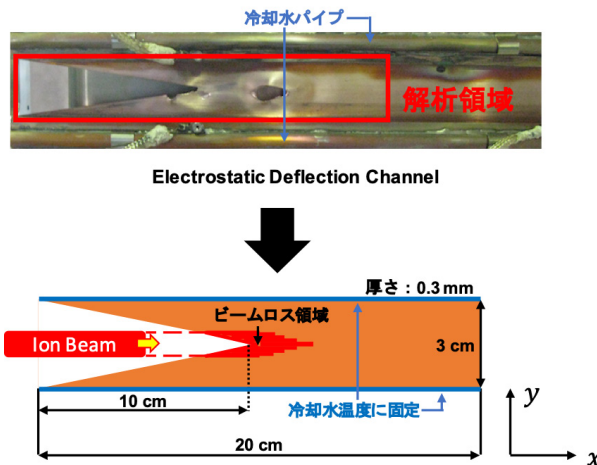


Figure 5: 2D analysis model of EDC.

Table 1: Heavy Ion Beam Parameters

Parameter	Value
Nuclide	²³⁸ U
Energy	345 MeV/u
Intensity	100 pnA
Power	8.21 kW
Diameter	3 mm

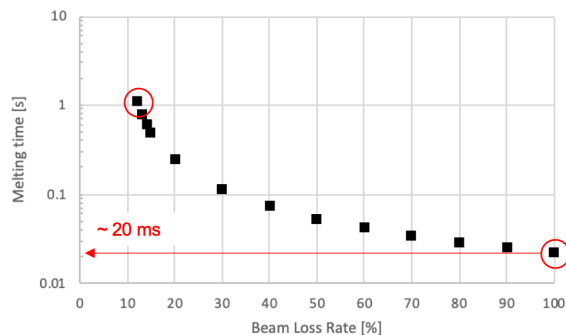


Figure 6: Relation between time to reach melting point of Cu and beam loss rate.

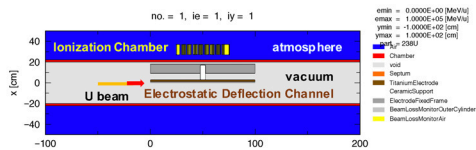
2.2 ビームロスによる EDC 周辺の放射線解析

熱伝導解析よりビームロス率が12%のときに EDC が融解すると見積もられたことから検出可能なビームロス率の分解能を1%とした。次にビームロス率1%の場合の放射線量をイオンチェンバーで検出するため、必要なセンサ体積を検討する。イオンチェンバーのインストール予定位置におけるビームロスによる最低吸収線量率を見積もるため、EDC 周辺のジオメトリを粒子・重イオン輸送計算コード (PHITS) [4]上で模擬した。実際の EDC を模擬した EDC 周辺のジオメトリの平面図を Figure 7 に示す。EDC でウランビームを取り出す際のビームロス率に相当するように EDC に入射するウランの粒子数を指定することで吸収線量率を計算した。Figure 8 にビームロス率1%のときの吸収線量率の2次元分布、Figure 9 にイオンチェンバーのインストール予定位置での吸収線量率の1次元分布を示す。

解析結果からビームロス率1%におけるイオンチェンバーのインストール予定位置における最低吸収線量率は 2×10^{-1} Gy/h 程度である。故に、ビームロス率1%を検出するためには、放射線解析から得られた吸収線量率よりも低い 10^{-1} Gy/h 程度の吸収線量率を検出可能なセンサ体積が必要であることが分かった。



実際のEDC周辺のジオメトリ



模擬したEDC周辺のジオメトリの平面図

Figure 7: Geometry around EDC.

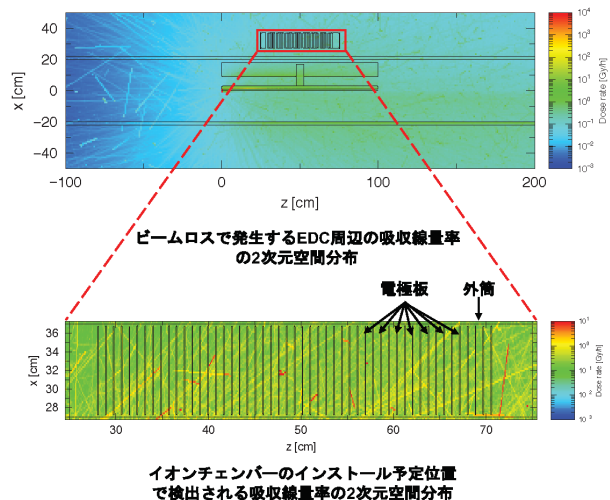


Figure 8: 2 dimensional distribution of absorbed dose rate due to beam loss.

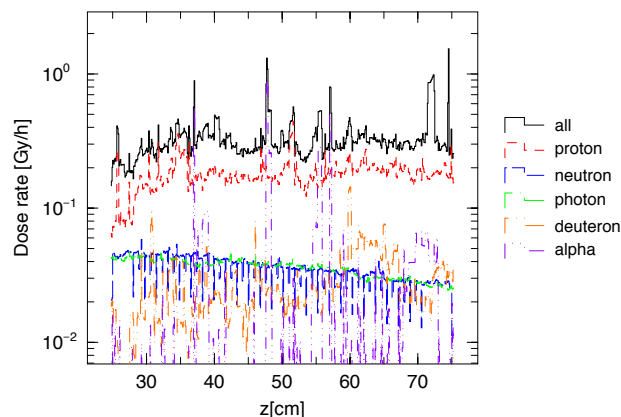


Figure 9: 1 dimensional distribution of absorbed dose rate at the installation location of the ionization chamber.

2.3 イオンチェンバーのパラメータ設計

熱伝導解析及び放射線解析により BLM としてのイオンチェンバーに要求される応答時間及びセンサ体積を得た。これらのパラメータからイオンチェンバーの各設計パラメータを検討した。熱伝導解析より決定したイオンチェンバーの応答時間とイオンチェンバーの電場強度からイオンチェンバーの印加電圧及び電極間距離を決定する。イオンチェンバー領域で使用するときの電場強度は典型的に 10^6 V/m 程度未満にする必要があることが知られている[5]。本設計では電場強度を安全率2倍確保した 5×10^5 V/m と決定した。次にイオンチェンバーにおける荷電粒子のドリフト時間について考える。荷電粒子のドリフト時間 t [s] は式(2)で与えられる[6]。

$$t = \frac{pd^2}{\mu V} \quad (2)$$

ここで、 μ は荷電粒子の移動度 [$\text{m}^2 \cdot \text{Pa} / (\text{V} \cdot \text{s})$]、 V は印加電圧 [V]、 p はイオンチェンバーの内部圧力 [Pa]、

d は電極間距離[m]である。また、印加電圧 V と電極間距離 d から電極間の電場強度 E [V/m]は式(3)で定義される。

$$E = \frac{V}{d} \quad (3)$$

式(2)に式(3)を代入して電極間距離 d について解くと式(4)になる。

$$d = \frac{\mu Et}{p} \quad (4)$$

より速い応答時間を得るために検出する荷電粒子をイオンよりも移動度が良い電子とした。一般的に電子の移動度 μ は $10000 \sim 15000 \text{ m}^2 \cdot \text{Pa} / (\text{V} \cdot \text{s})$ である[7]。本設計では、 $15000 \text{ m}^2 \cdot \text{Pa} / (\text{V} \cdot \text{s})$ の値を使用した。

また、加速器運転時の線量が非常に高いことから空気中での測定でも十分だと考え、イオンチェンバーを大気圧下の環境で使用することにした[8]。すなわち、イオンチェンバーの内部圧力 p は大気圧 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ である。熱伝導解析によりイオンチェンバーの応答時間を 100 ns とした決定したため、イオンチェンバーで電子を検出する時間は電子のドリフト時間 t になることからドリフト時間を 100 ns としたとき、印加電場に対する電極間距離を式(4)より得ることができる。Figure 10 に印加電場に対する電極間距離を示す。

印加電場に対する電極間距離特性から電場強度を $5 \times 10^5 \text{ V/m}$ としたときの電極間距離が 7.5 mm と決定する。そのため、印加電圧は -3.75 kV となる。次にイオンチェンバーのセンサ体積について検討した。イオンチェンバーのインストール予定位置でのノイズ電流値はおよそ 10 nA 程度であることを考慮して、電離電流信号のS/N比を 120 dB 以上と仮定して最低センサ体積を見積もった。

最低センサ体積を検討するためにイオンチェンバーの感度を導出する。ビームロスによる放射線がセンサ体積 Δ [cm^3]を通過するとき、センサ体積内の質量密度 ρ_m [g/cm^3]の気体を E_{loss} [eV]分だけ損失した放射線のエネルギーによって電離して生成されるイオン・電子対の数 N は式(5)となる。

$$N = \frac{E_{\text{loss}}}{w} \quad (5)$$

ここで、 w はセンサ体積内の気体の W 値[eV]である。このとき、気体の吸収線量 D [Gy]は式(6)で表される。

$$D = \frac{eE_{\text{loss}}}{(\rho_m \times 10^{-3}) \times \Delta} \quad (6)$$

また、イオン・電子が電極に収集されると、総電荷量 Q [C]は式(7)となる。

$$Q = PeN \quad (7)$$

ここで、 P は電離して生成されたイオン・電子が電離電流に寄与する確率、 e は電気素量[C]である。以上からイオンチェンバーの感度 S [C/Gy]を式(8)で定義する。

$$S = \frac{Q}{D} = P \frac{\rho_m \Delta}{w} \times 10^{-3} \quad (8)$$

さらに、単位を[A/(Gy/h)]に換算すると式(9)が得られる。

$$S = 3.6 \times P \frac{\rho_m \Delta}{w} \quad (9)$$

すなわち、気体の吸収線量率が D_{rate} [Gy/h]のとき、イオンチェンバーの電離電流 i [A]は式(10)により計算できる。

$$i = 3.6 \times P \frac{\rho_m \Delta}{w} D_{\text{rate}} \quad (10)$$

ここで、本設計では電子を検出するため、電離して生成された電子が電離電流に寄与する確率 P を求める必要がある。理想的な平行平板イオンチェンバーモデルの収集電荷量を考えると P は 0.5 であることが導出できる[9]。気体は空気であることから質量密度 ρ_m は $1.25 \times 10^{-3} \text{ g}/\text{cm}^3$ 、 W 値は 34 eV である。

ビームロス率 1% を十分に検出可能なセンサ体積を担保するために 10^{-1} Gy/h の吸収線量率をノイズ電流 10 nA に対して S/N 比 120 dB 以上で検出することを満たすためのセンサ体積を(9)式を用いて計算するとおよそ 1500 cm^3 以上となる。本設計では 2 倍のマージンを取ってセンサ体積を 3000 cm^3 と決定した。(8)式を用いてセンサ体積 3000 cm^3 のときのイオンチェンバーの感度を計算すると $0.2 \text{ A}/(\text{Gy}/\text{h})$ 程度となる。

計算より得られた設計値を Table 2 に示す。これらの設計値を基にイオンチェンバーの開発を行った。

Table 2: Ionization Chamber Design Parameters

Applied voltage	-3.75 kV
Electrode gap	7.5 mm
Gas pressure	$1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$
Response time	100 ns
Sensor volume	3000 cm^3
Sensor sensitivity	$0.2 \text{ A}/(\text{Gy}/\text{h})$

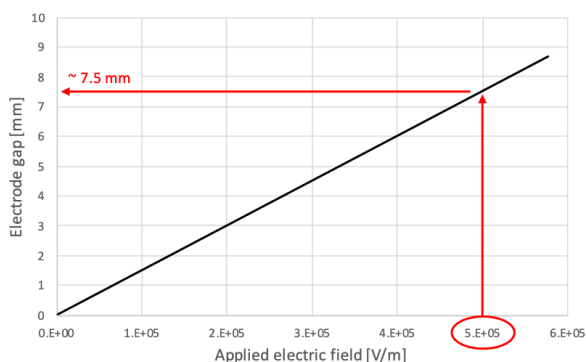


Figure 10: Characteristics of electrode gap with respect to applied electric field.

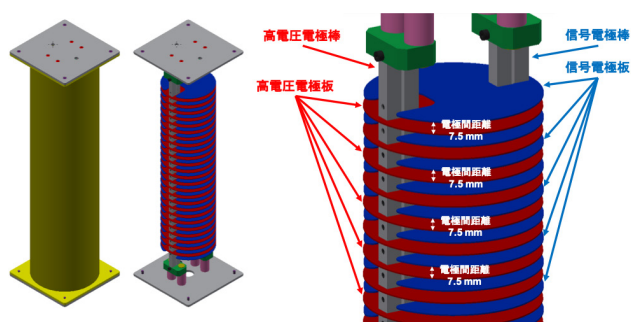


Figure 11: Multi-stage electrode type ionization chamber.

3. イオンチェンバーの開発と性能の計算

Table 2 に示す設計値に基づいて開発したイオンチェンバーを Figure 11 に示した。

イオンチェンバーの構造を検討する上で、イオンチェンバーの応答時間を 100 ns 程度に担保すると同時にセンサ体積を 3000 cm³ 程度まで稼ぐことを可能にするために低い印加電圧でも ns オーダーの応答時間を担保することが出来るかつセンサ体積を大きくして感度を良くすることを狙いとして多段電極型を採用した。高電圧電極板及び信号電極板を交互にスタックしており、同じ極性の電極板同士は共通の電極棒で固定しており、電極板に対して異なる極性の電極棒は静電場解析を実施して、絶縁破壊しない程度まで距離を取るように電極棒周りの電極板形状を決定した。

そして、開発したイオンチェンバーの各ビームロス率のときに検出される電離電流のおよその平均値を見積もった。まず PHITS コードでビームロス率に対するイオンチェンバーのインストール予定位置での平均吸収線量率の解析を行い、その結果及び(10)式を用いてビームロス率に対する平均電離電流を計算した。Figure 12 にビームロス率に対する平均電離電流特性を示す。

見積もりの結果からビームロス率 1 % のとき平均電離電流は 40 mA 程度検出されることが分かる。また、熱伝導解析よりビームロス率 12 % 以上で EDC が融解する解析結果から平均電離電流が 0.4 A 程度以上検出される前に 20 ms よりも十分速い応答でビームインターロックを機能させる必要がある見積もりとなった。

4. まとめ

我々は新規 BLM としてイオンチェンバーを採用し工学的知見に基づく独自の設計方法を考案して熱伝導解析より BLM として要求される応答時間の水準を得た。また、放射線解析によりイオンチェンバーで検出される吸収線量率及び電離電流の見積もりを行い、多段電極型のイオンチェンバーを開発した。今後は開発した多段電極型イオンチェンバーを実際にサイクロトロン加速器の EDC 周辺にインストールして実証試験を実施する予定である。

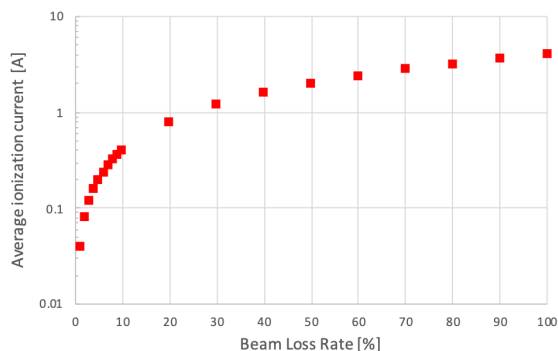


Figure 12: Characteristics of average ionization current with respect to beam loss rate.

参考文献

- [1] <https://www.nishina.riken.jp/research/upgrade.html>
- [2] N. Sakamoto *et al.*, "OPERATING EXPERIENCE WITH ACCELERATION OF HIGH INTENSITY HEAVY-ION BEAMS IN RIBF", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Toyonaka, Japan, Aug. 1-3, 2012, pp. 7.
- [3] B. Dehning *et al.*, "THE LHC BEAM LOSS MEASUREMENT SYSTEM", Proceedings of PAC07, Albuquerque, New Mexico, USA, pp. 4192.
- [4] Tatsuhiko Sato, Yosuke Iwamoto, Shintaro Hashimoto, Tatsuhiko Ogawa, Takuya Furuta, Shin-ichiro Abe, Takeshi Kai, Pi-En Tsai, Norihiro Matsuda, Hiroshi Iwase, Nobuhiro Shigyo, Lembit Sihver and Koji Niita
Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02, J. Nucl. Sci. Technol. 55, 684-690 (2018).
- [5] http://accwww2.kek.jp/oho/OHO%20text%20archives%202005-2011/OHO10%20web%20final/OHO10_yamamoto_20100825-2.pdf
- [6] R. L. Witkover, D. Gassner, "Design and Testing of the New Ion Chamber Loss Monitor for SNS", PAC'03, p. 2450.
- [7] M. Stockner, "Beam Loss Calibration Studies for High Energy Proton Accelerators", Vienna Tech. U., Dissertation, pp. 20(2007).
- [8] M. Nakamura *et al.*, "BEAM LOSS MONITORING IN RIKEN RIBF USING IONIZATION CHAMBERS", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Japan, Aug. 4-6, 2010, pp. 756.
- [9] 久保一, "NuMI ニュートリノビームラインを用いた T2K 実験ミューオンモニターの長期試験 (FNAL T968 実験)", Master's thesis, 京都大学大学院 理学研究科, 2008, pp. 137.