

# J-PARC 遅い取り出しビームロス低減のためのシリコン湾曲結晶の開発 DEVELOPMENT OF BENT SILICON CRYSTAL FOR BEAM LOSS REDUCTION IN J-PARC SLOW EXTRACTION

武藤亮太郎<sup>\*,A)</sup>, 浅見高史<sup>A)</sup>, 木村琢郎<sup>A)</sup>, 松村秋彦<sup>B)</sup>, 村杉茂<sup>A)</sup>,  
沼井一憲<sup>A)</sup>, 岡村勝也<sup>A)</sup>, 白壁義久<sup>A)</sup>, 富澤正人<sup>A)</sup>, 柳岡栄一<sup>A)</sup>

Ryotaro Muto<sup>\*,A)</sup>, Takashi Asami<sup>A)</sup>, Takuro Kimura<sup>A)</sup>, Akihiko Matsumura<sup>B)</sup>, Shigeru Murasugi<sup>A)</sup>,  
Kazunori Numai<sup>A)</sup>, Katsuya Okamura<sup>A)</sup>, Yoshihisa Shirakabe<sup>A)</sup>, Masahito Tomizawa<sup>A)</sup>, Eiichi Yanaoka<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Ibaraki, Japan

<sup>B)</sup> NAT Corporation

## Abstract

At the J-PARC Main Ring, slow extraction of 30 GeV and 8 GeV proton beams using third-order resonance is being performed for the Hadron Experimental Facility. User operation at 30 GeV and 92 kW was achieved in May 2025, but further reduction of beam loss during slow extraction is essential for even higher intensities. Beam loss primarily occurs in the electrostatic septum, located at the most upstream end of the slow extraction straight section. As a method to reduce this beam loss, we are considering using a bent silicon crystal. This device uses the channeling effect or volume reflection effect of the bent silicon crystal on positive charged particles to deflect protons that would otherwise collide with the septum electrode of the electrostatic septum, thereby reducing beam loss. The amount of crystal deformation when a silicon crystal is bent using anticlastic deformation at positions that does not interfere with the beam was estimated using the finite element method. The effects of changes in the bending angle due to vertical position and the transverse displacement of the crystal on the loss reduction effect were evaluated. The results showed that sufficient beam loss reduction could be expected for both 30 GeV and 8 GeV beams.

## 1. はじめに

茨城県東海村に位置する J-PARC のメインリング [1] は、3 GeV から 8 GeV および 30 GeV に加速した陽子ビームを様々な素粒子原子核実験に供給している。メインリングのビーム取り出しには 2 つのモードがあり、ひとつはニュートリノ実験施設に向けた速い取り出し、もうひとつはハドロン実験施設に向けた遅い取り出しである。この遅い取り出しにおける大きな課題の一つが、ビームロスの低減である。2025 年 4 月から 5 月のビーム運転では、1 サイクルあたりの粒子数  $8 \times 10^{13}$  protons、繰り返し時間 4.24 s、ビームパワーにして 92 kW のユーザー利用運転を達成した。このときの取り出し効率、つまりロスなく取り出されたビームの割合は、約 99.6% であった。これは世界最高レベルの高い取り出し効率であるが、さらなるビーム増強のためにはビームロスをさらに低減することが望ましい。ビームロスは主に、遅い取り出し直線部の最上流に位置する静電セプタム (ESS) でおこるため、このビームロスを低減するための一手法として湾曲シリコン結晶の開発を行っている。これは、湾曲させたシリコン結晶の荷電粒子に対する channeling 効果または Volume Reflection 効果を用いて静電セプタムのセプタム電極に衝突してしまう陽子を偏向させ、ビームロスの低減を図る機器である [2]。この機器の導入のために、シリコン結晶をビームと干渉しない部分で湾曲させたときのビームが照射される部分でのシリコン結晶の変位量を ANSYS [3] を用いた有限要素法計算で見積もり、予想されるビームロス低減量を評価した。以下、まずシリコン結晶に要求されるサイズと湾曲角について説明し、

それを実現する湾曲方法について述べる。そして、湾曲によって生じるシリコン結晶の横方向への変位がビームロス低減効果に与える影響を 30 GeV および 8 GeV ビームについて検討する。

## 2. シリコン結晶によるビームロス低減効果

静電セプタムの上流においたシリコン結晶によるビームロス低減効果は FLUKA [4] によって見積もられた [5]。結果を以下にまとめる。

- シリコンの結晶構造はダイヤモンド構造である。シリコン結晶の (110) 面を用いて Channeling または Volume Reflection の効果を利用してビームを偏向する。
- ビーム軸方向の長さは、0.5 mm から 2 mm の範囲で検討した結果、短いほうがよいことがわかった。ビーム軸方向に長いと、Channeling 効果を利用する場合はビームが結晶の下流端に到達する前に結晶面の外で出てしまう確率 (dechanneling rate) が増える。また multiple Coulomb scattering による角度広がりが大きくなってしまい、これは Channeling と Volume Reflection どちらを使う場合でもビームロス低減効果を低減させる。
- Channeling を使用するときのビーム偏向角は 50  $\mu$ rad から 300  $\mu$ rad の範囲で検討したところ、大きいほうがよいという結果となった。偏向角が大きいと、dechanneling rate は増えてしまうが、そもそもの偏向角が大きいため、dechanneling された陽子のもつ偏向角の平均値も大きくなり、偏向角が小さく静電セプタムのリボンに衝突してしまう陽子の数は小さくなる。偏向角が大きくなりすぎると下流のビーム輸送ラインのアクセプタンス内に

\* ryotaro.muto@kek.jp

おさまらなくなることが懸念されるが、300  $\mu\text{rad}$  の偏向角であればハドロン実験施設に設置された二次粒子生成標的まで問題なく輸送できることがわかった。Volume Reflection を使用する場合は、ビームの偏向角はシリコン結晶の湾曲角には依らないが、湾曲角は角度アクセプタンスを決める。ビームの角度広がりには 1-RMS で 20  $\mu\text{rad}$  程度であり、これを十分に含む大きさであればよい。

ビーム軸方向の長さに関しては、短いほうが良いことがわかったが、製作のしやすさを考えて 1 mm とし、Channeling を使用するときのビーム偏向角としては 300  $\mu\text{rad}$  を採用した。また横方向の厚さは FLUKA でのビームロスの検討で仮定した 0.2 mm を採用し、これを実現するようなシリコン結晶の湾曲のさせ方を検討した。

### 3. シリコン結晶の湾曲のさせ方

シリコン結晶を湾曲させるために、シリコン結晶に力を加える必要があるが、ビームが当たる領域周辺にシリコン結晶を曲げるための治具を配置することはできない。治具にビームが衝突してビームロスを引き起こしてしまうからである。そこで、細い短冊状のシリコン結晶の、ビームの当たらない上下部にのみ力を加えて中央部の変形を引き起こす anticlastic deformation [6] という変形を利用してシリコンを湾曲させる。Figure 1 に概念図を示した。anticlastic deformation とは、図中の

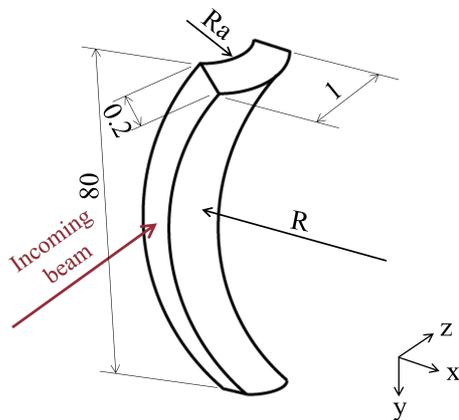


Figure 1: Schematic drawing of the anticlastic deformation of a silicon crystal.

$R$  に有限の値を与えることで、結晶の中心部を含む広い領域に  $R_a$  方向の湾曲を引き起こすものである。結晶の上下端部で結晶を角度を付けて保持して  $R$  を与えることで、beam が当たる領域にふれることなく有限の  $R_a$  を発生させることができる。偏向角 300  $\mu\text{rad}$ 、ビーム軸方向の長さ 1 mm の湾曲の曲率半径  $R_a$  は 3.33 m である。この  $R_a$  を得るために必要な  $R$  を得るために、ANSYS [3] による有限要素法を用いた計算で  $R_a/R$  を見積もった。結晶は等方的ではないため、どの結晶面にどの角度からビームを入射するか、つまり Fig. 1 の  $x, y, z$  軸の結晶軸に対する角度によって応力とひずみを

関係づける stiffness matrix が変化し、結果が変わってくる。Figure 2 にシリコン結晶の構造と、それに対する座標軸の取り方を示した。x 軸が (110) 面と直行し、yz 平

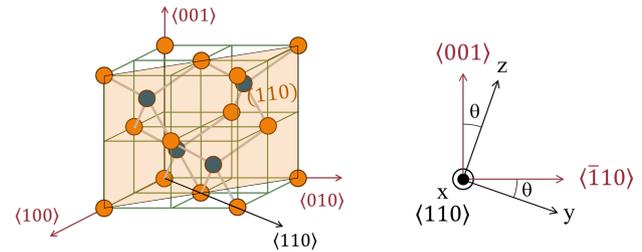


Figure 2: A conceptual diagram showing the structure of a silicon crystal and the relationship between the crystal axes and the x, y, and z axes. The z axis is the incident direction of the beam, the x axis is the transverse direction to the beam, and the y axis is the vertical direction.

面が (110) 面と平行になるようにとり、ビーム入射軸である z 軸と (001) 軸との角度を  $\theta$  とおく。 $\theta = 0$  のときの stiffness matrix  $C$  は下記のようなになる。単位は [GPa] である。

$$C = \begin{pmatrix} 194.45 & & & & & & \\ 35.25 & 194.45 & & & & & \\ 63.9 & 63.9 & 165.8 & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 79.6 & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 79.6 & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 50.95 & \end{pmatrix}$$

この matrix を x 軸 (= (110) 軸) を回転軸として回転させ、任意の  $\theta$  に対する stiffness matrix を得る。 $\theta = 0, 30, 45, 60, 90 \text{ deg}$  のときの  $R_a/R$  を Fig. 3 に示した。 $R_a/R$  が最小になる、つまりある  $R_a$  を得るため

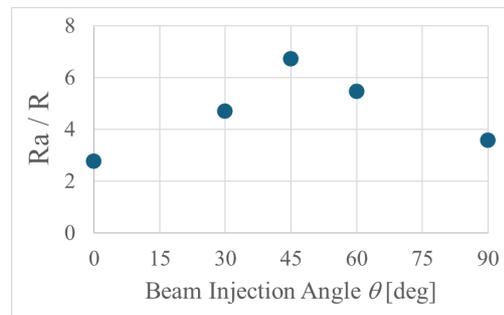


Figure 3: Dependence of  $R_a/R$  on  $\theta$ .

の  $R$  を最も大きく取れるのは、 $\theta = 0$  つまり beam 入射軸である z 軸を結晶の (001) 軸とした場合である。このときの  $R_a/R$  は -2.77 となり、湾曲角 300  $\mu\text{rad}$  に対応する  $R_a = 3.33 \text{ m}$  を得るために必要な  $R$  の最大値は 1.2 m となる。

### 4. ビームの鉛直方向の広がりに対する湾曲シリコン結晶の効果

30 GeV, 92 kW のビーム運転時の鉛直方向のビームエミッタンスは下流のビーム輸送路で測定され、RMS で

約  $2\pi$  mm mrad である。湾曲シリコン結晶を導入しようとしている地点での、遅い取り出し時の  $\beta_y$  は約 23 m であるため、 $2\pi$  mm mrad のエミッタンスは 7 mm に対応する。湾曲シリコン結晶の median plane から離れた位置のビームに対する結晶の効果を考えるうえで考慮に入れなければならないのは、

- $R_a$  の鉛直方向位置に対する依存性
- $R$  が有限であることで、シリコン結晶の横方向の位置が理想的な位置からずれる効果

の 2 点である。このうち  $R_a$  については、median plane から 25 mm の位置でも ANSYS による計算では全く変化が見られなかったため、問題にはならない。有限の  $R$  が引き起こすシリコン結晶の横方向の位置の変化  $\delta x$  については、鉛直方向の位置を  $y$  として、

$$\delta x = R(1 - \cos(\arctan(y/R))) \sim y^2/R$$

とかける。 $R = 1.2$  m に対して  $y = 7$  mm の位置で  $\delta x \sim 40 \mu\text{m}$  となる。この変位が beam reduction 効果に与える影響を 300  $\mu\text{rad}$ , 200  $\mu\text{rad}$  の channeling の場合と、Volume Reflection を用いる場合、またそれぞれの場合について、湾曲結晶に加えてその下流の“diffuser 1 (diff1)”と呼ばれる散乱体 [5] を挿入した場合について、FLUKA を用いて見積もった。結果を Fig. 4 に示す。こ

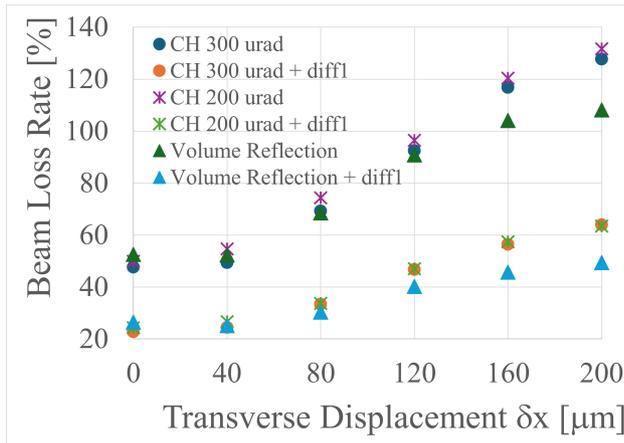


Figure 4: Beam loss rate with various  $\delta x$  estimated using FLUKA. In legends CH stands for channeling and diff1 stands for diffuser 1. Beam loss without the bent silicon crystal and the diffuser is set to 100%.

の図によれば、beam の鉛直方向の 1-RMS が引き起こす  $\delta x = 40 \mu\text{m}$  に対してはビームロスにはほぼ変化しないが、それ以上の変位に対しては結晶の位置が理想位置からずれる効果でビームロス低減効果は減殺していき、大きな  $\delta x$  では逆にビームロスが増加してしまう。beam の鉛直方向の profile を gaussian であると仮定し、Fig. 4 の結果を掛け合わせてビームロス低減効果を見積もったものを Table 1 に示す。表中の Beam Loss は散乱体や湾曲シリコン結晶を用いない場合を 1 としており、また矢印の左側は  $\delta x$  の効果を考慮に入れないもの、右側は考慮に入れたものを表す。Volume Reflection を使用する場合は、結晶の湾曲角はビームの偏向角には効かず

角度アクセプタンスのみに効くので、湾曲角を 100  $\mu\text{rad}$  とした。 $\delta x$  の効果を考慮に入れない場合は 300  $\mu\text{rad}$  の channeling が最も大きなビームロス低減効果を持つが、 $\delta x$  の効果を考慮に入れると湾曲角が小さく、 $R$  が大きい Volume Reflection または 200  $\mu\text{rad}$  の channeling のほうがビームロス低減効果が大きくなる。

Table 1: Document Layout

Configuration	Beam Loss
No mitigation	1.0
Channeling (300 $\mu\text{rad}$ )	0.48 $\rightarrow$ 0.58
Channeling (200 $\mu\text{rad}$ )	0.50 $\rightarrow$ 0.54
Volume Reflection (100 $\mu\text{rad}$ )	0.53 $\rightarrow$ 0.54
Channeling (300 $\mu\text{rad}$ ) + diff1	0.23 $\rightarrow$ 0.28
Channeling (200 $\mu\text{rad}$ ) + diff1	0.24 $\rightarrow$ 0.26
Volume Reflection (100 $\mu\text{rad}$ ) + diff1	0.26 $\rightarrow$ 0.26

## 5. 8 GeV ビームに対する湾曲シリコン結晶の効果

ハドロン実験施設では 30 GeV だけでなく、8 GeV 陽子ビームを利用する COMET 実験 [7] も計画されている。ビームのエネルギーごとに異なるサイズの結晶を用いることは難しいため、ここまで検討してきた 30 GeV 陽子のロス低減のための結晶を 8 GeV ビームの取り出しで用いた場合のロス低減効果を FLUKA を用いて見積もった。まず、Coulomb 散乱による散乱角は

$$\Theta_{\text{rms}} \sim \frac{19.2 \text{ MeV}}{\beta c p} \sqrt{\frac{x}{X_0}}$$

と表される。ここで  $x$  は散乱する物質のビーム軸方向の長さ、 $X_0$  は物質の radiation length である。散乱角は運動量に反比例するためビーム軸方向に 1 mm の長さのシリコン結晶から 8 GeV 陽子がうける Coulomb 散乱の散乱角は 30 GeV 陽子と比べて約 4 倍に増加し、RMS で約 230  $\mu\text{rad}$  となる。これは 30 GeV 陽子に対して channeling を用いる場合に効果的であったビームの偏向角 200  $\mu\text{rad}$  と同程度であり、ビームロスの低減に Coulomb 散乱も大きな役割を果たす。次に、8 GeV 陽子の場合、30 GeV ビームと比べて取り出しビームの鉛直方向のエミッタンスは約 4 倍になり、ビームの幅は約 2 倍に広がるため、鉛直方向の位置の二乗に比例する  $\delta x$  の影響が大きくなる。このため  $R$  をより小さくできる Volume Reflection を用いることとし、その場合の 8 GeV ビームに対するビームロス低減効果を見積もった。結果 Fig. 5 に示す。結晶の湾曲角を 100  $\mu\text{rad}$ ,  $R = 3.6$  m とし、 $\delta x$  の影響も考慮に入れてビームロス低減効果を算出したところ、ビームロスの量は約 46% となり、8 GeV ビームに対して 30 GeV 陽子用の湾曲シリコン結晶をそのまま用いても十分なビームロス低減効果を得られることがわかった。

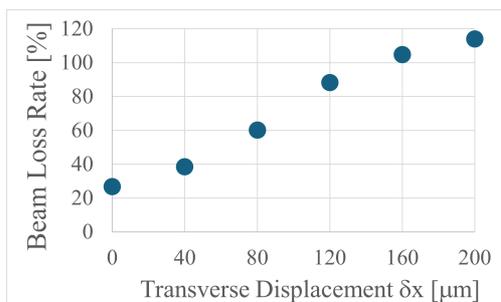


Figure 5: Dependence of beam loss rate on  $\delta x$  for 8 GeV protons, estimated using FLUKA, using the volume reflection effect of a bent silicon crystal. The bending angle of the silicon crystal is  $100 \mu\text{rad}$ .

## 6. まとめと今後

ビーム軸方向の長さ  $1 \text{ mm}$ 、薄さ  $0.2 \text{ mm}$  のシリコン結晶を Anticlastic deformation により変形させたときの  $R_a$  と  $R$  の比を ANSYS を用いて計算し、(110) 面に  $\langle 001 \rangle$  軸方向からビームを入射した場合の、所望の偏向角および  $R_a$  をもたせるために必要な鉛直方向の湾曲の曲率半径  $R$  を求めた。

有限の  $R$  の、結晶のビームロス低減効果に与える影響を FLUKA を用いて見積もった。湾曲角を  $300 \mu\text{rad}$  とすると横方向の変位  $\delta x$  の影響が大きくなるため、 $30 \text{ GeV}$  ビームに対しては偏向角  $200 \mu\text{rad}$  で Channeling するか、湾曲角  $100 \mu\text{rad}$  で Volume Reflection 効果を用いるのがよい。 $8 \text{ GeV}$  ビームに対してはビームが鉛直方向に大きいため湾曲角はより小さいほうがよく、湾

曲角  $100 \mu\text{rad}$  で Volume Reflection 効果を利用したときのビームロス低減効果は約  $46\%$  と見積もられた。

今後、結晶を実際に湾曲させて偏向角の実測にすすむ。また結晶の切断面の処理方法などを確立させ、来年度のビーム試験を目指して試験用の結晶の製作を行う。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP22H04941, JP24K15604 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] Joint Project Team of JAERI and KEK, “The Joint Project for High-Intensity Proton Accelerators”, KEK Report 99-4, 1999 and JAERI-Tech 99-056, 1999.
- [2] F. M. Velotti *et al.*, “Septum shadowing by means of a bent crystal to reduce slow extraction beam loss”, *Phys. Rev. Accel. Beams.*, 22, 093502, 2019. doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.22.093502
- [3] <https://www.ansys.com/>
- [4] C. Ahdida *et al.*, “New Capabilities of the FLUKA Multi-Purpose Code”, *Front. Phys.*, 9, 2022. doi:10.3389/fphy.2021.788253
- [5] R. Muto *et al.*, “Simulation studies on bent silicon crystals for loss reduction in slow extraction operation at J-PARC Main Ring”, Proceedings of the 16th International Particle Accelerator Conference, Taipei, Taiwan, May 2025, TUPB023.
- [6] V. Guidi, L. Lanzoni, A. Mazzolari, “Study of anticlastic deformation in a silicon crystal for channeling experiments”, *J. Appl. Phys.*, 107, 113534, 2010. doi.org/10.1063/1.3372722
- [7] <https://comet.kek.jp/>