

平成 30 年 6 月 9 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400302

研究課題名(和文)大強度陽子ビーム分岐偏向用湾曲シリコン結晶の開発

研究課題名(英文)Development of a bent silicon crystal for high-intensity proton-beam separation

研究代表者

澤田 真也 (Sawada, Shinya)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号：70311123

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、湾曲シリコン結晶のチャネリング現象を用いることによる陽子ビームの効率良い偏向方法の開発において、ビームロスが少ない湾曲結晶の製作方法を確立することが目的であった。すなわち、(1)ビームにさらされない位置にあるホルダで弾性的に結晶を湾曲させる方法、あるいは、(2)結晶の湾曲状態を保ちながら自立させる方法の少なくとも一方を完成させることが目的であった。ロシア・高エネルギー物理学研究所の研究者と協力し、(1)の結晶ホルダーをビームに曝されない位置におきながら弾性的に湾曲したシリコン結晶を製作することに成功した。続いて、この方法による湾曲結晶を国内においても自作することに成功した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research program was to develop a method to fabricate a bent silicon crystal used for bending a intense proton beam with good efficiency. Namely, the goal was to develop at least one of the methods, (1) one using a crystal holder which locates well outside of the beam and (2) one with a self-supporting crystal. We develop the method (1) with a collaboration with researchers at IHEP, Russia. Also we succeeded in fabricating a bent silicon crystal with the same method in Japan.

研究分野：実験核物理

キーワード：湾曲結晶 ビームハンドリング 国際情報交換

1. 研究開始当初の背景

陽子ビームを分岐・偏向させるデバイスとして、これまでいわゆる「Lambertson 電磁石」が用いられてきた。これは、ビームの一部のみが磁場のある領域を通過し偏向される仕組みである。この方法では、ビームの一部が必ず磁極にあたることになり、そこでのビームロスに起因する放射線や熱の発生、放射性物質の生成などが、特に J-PARC のような大強度陽子ビーム施設において問題となりうる。

一方、湾曲させたシリコン結晶におけるチャネリング現象を用いることにより、陽子ビームを偏向させることができる。



図1：先行研究で用いた湾曲シリコン結晶。矢印のように陽子ビームが入射する。入射ビームの多くがアルミ製ホルダにあたる。

本研究の代表者らは、平成 16～18 年度科研費基盤 (B) の援助を得て、KEK12GeV 陽子シンクロトロン (KEK-PS) において湾曲結晶による陽子ビームの分岐・偏向の原理を実証した。ビーム実験で実際に $10^{12}/s$ の 12GeV 陽子ビームから $10^7/s$ のビームを分岐偏向させることに成功し、実証に成功した (JPSJ vol.76, 064007-1 (2007) や「加速器」誌 vol.3, pp.354 (2007) などで発表)。そこでは、図1に示す湾曲シリコン結晶を用いた。この方法では、アルミ製のホルダによりシリコン結晶が弾性的に湾曲させられているが、陽子ビームの多くがホルダにあたり、ビームロスが生じるという難点がある。実際、図1の場合には、入射陽子ビームの中心が幅 3mm、厚さ 4mm のアルミ部分を通ることになる。陽子ビームが見るホルダの厚さはおよそ 0.01 nuclear interaction length であり、入射陽子ビームの 10% 程度がホルダに入射することから、 10^{-3} 程度のビームロスを生じることになる。

茨城県東海村の大強度陽子加速器 (J-PARC) における陽子ビーム強度の目標は前身の KEK-PS の約 100 倍である $10^{14}/s$ 程度なので、たとえ 10^{-3} 程度のビームロスであっても、大きな問題となりうる。ホルダにビームがあたらない構造の湾曲結晶の開発が大きな課題である。

2. 研究の目的

本研究は、ビームロスの少ない湾曲結晶の製作方法を確立することを目的とする。即ち、

- ビームに曝されない位置にあるホルダで弾性的に結晶を湾曲させる方法。
- 結晶の湾曲状態を保ちながら自立させる方法。

のすくなくとも一方を完成させることが目的である。

3. 研究の方法

- (1) ビームに曝されない位置にあるホルダで弾性的に結晶を湾曲させる方法

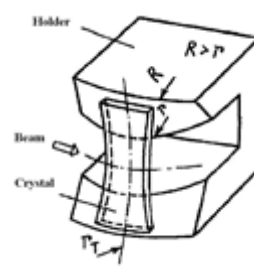


図2：ビームに曝されない位置にあるホルダの例。

例えば、図2にあるような方法である。結晶の上下を湾曲したホルダで押さえることにより、陽子ビームが直接ホルダを叩くことがない。ビームサイズが大きくなるとホルダの上下の空隙を大きくする必要はあるが、一方でその場合にはビームが通過する部分の湾曲度が小さくなり、ビームの偏向角は小さくなる。J-PARC ハドロン実験施設では、セプタム電磁石と組み合わせることにより、湾曲結晶で 2° 程度の偏向角を得ることを目標とする。湾曲結晶の製作にあたっては、シリコン結晶の弾性限界を超えない範囲でできるだけ大きな湾曲度を得ることが求められる。シリコン結晶の抑え方や薄板そのものの製作方法に工夫が求められる。本研究においては、KEK-PS での実証実験で共同研究を行い、ロシア IHEP の U-70 加速器において結晶によるビーム偏向実験の経験が豊富な Yury Chesnokov 博士 ("Crystal Channeling and Its Application at High-Energy Accelerators", Springer, 1997 の共著者) を研究協力者として、共同でこの型の結晶の開発を行った。まず同博士の下で J-PARC ハドロン実験施設の要求に沿った湾曲結晶の開発を進め、それが成功したのちに、国内メーカにおいて試作を行った。

- (2) 結晶の湾曲状態を保ちながら自立させる方法

湾曲した形状のまま自立したシリコン結晶である。塑性変形した結晶ともいえる。ただし、結晶構造が保持され、荷電粒子のチャネリングが実現されることが条件である。こ

のタイプの湾曲結晶は、シリコン結晶を湾曲させて熱処理等を行うことによって形状を保持させるものである。国内メーカーによる試作品について結晶構造が保持されチャネリングに使用できるかどうか、形状の精密測定によって明らかにした。

4. 研究成果

(1) ビームに曝されない位置にあるホルダで弾性的に結晶を湾曲させる方法

研究協力者である Yury Chesnokov 博士の協力により、図3の湾曲シリコン結晶が製作された。この結晶のサイズは、0.3mm(厚さ)×40mm(ビームと直交する方向、図3の左右方向で、ホルダの内側のサイズ)×26mm(ビームが通過する方向、図3の上下方向)であり、ビームが湾曲結晶を通過することに伴って偏向を受ける角度は22mradである。本結晶についてレーザー測定器による精密形状測定を行ったところ、結晶中心付近でのビームに沿った湾曲角が22mradであり、結晶全体を通して湾曲がなめらかで外形的に結晶構造が破壊されていないことが確認出来た。なお、ビームに沿った結晶のアライメントは(111)である。

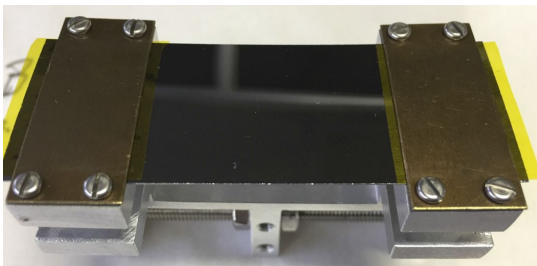


図3：Yury Chesnokov 博士の協力により製作されたシリコン湾曲結晶。

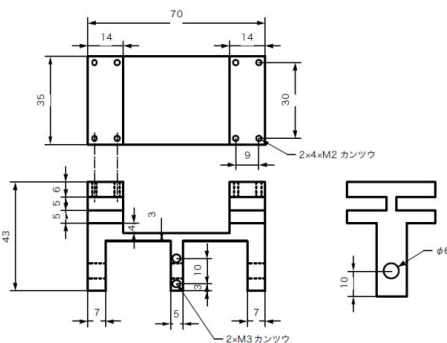


図4：国内で製作した結晶の治具(ホルダー)。

この成果をもとに、国内メーカーでの自作を試みた。シリコン結晶のサイズは、ホルダに挟まれる部分を含めて、Yury Chesnokov 博士による結晶と同様、0.3mm×71mm×26mmとした。結晶のアライメントも同様に(111)面の間をビームが通過して偏向される向きで

ある。この結晶を図4で示す治具(ホルダー)に固定して調整することにより、弾性的な湾曲を得た。図5が製作した湾曲結晶である。

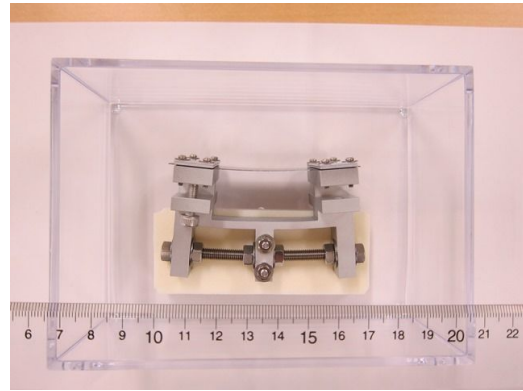


図5：国内で製作した湾曲結晶。

この結晶の湾曲角は17mradを目指したが、製作の過程で試行を繰り返したものの湾曲角を大きくしようとすると押さえの部分で割れが生じてしまった。最終的に製作に成功したものは目標の約半分の湾曲角を持つものであった。この湾曲はシリコン結晶の anticlastic 変形を利用しているが、結晶の厚みを厚くすると anticlastic 湾曲角を大きくすることができる。そのため、今後は、0.5mm ないし 1mm 程度の厚さの結晶を用いて目標の 17mrad あるいはそれ以上の湾曲角を得られるか試すべきである。その際には、より強い力で結晶をホルダに押さえつける必要があるため、ホルダの押さえ面の強度に注意することが必要である。

(2) 結晶の湾曲状態を保ちながら自立させる方法

国内メーカーにて、結晶を塑性変形により湾曲させ、湾曲状態を保ちながら自立しているシリコン湾曲結晶の製作を試みた。しかしながら、1mm 厚の結晶についてその結晶性を調べたところ結晶が壊れている可能性が高いことがわかった。また、メーカーの知的財産保護の観点から細かい製作方法が明らかにはなっておらず、今後さらに検討を続ける必要がある。

以上より、「ビームロスが少ない湾曲結晶の製作方法を確立する」との本研究の目的について、ビームに曝されない位置にあるホルダで弾性的に結晶を湾曲させる方法を確立することができた。今後は、湾曲角(ビームの偏向角)をさらに大きくすること、結晶の厚さやホルダの大きさなどに関する製作可能範囲を広げ、さらにはビームへの実際の応用につなげていくことが課題である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔その他〕

講演：

Hadron Physics at J-PARC

S. Sawada

Seminar at NRC Kurchatov Institute - IHEP

March 15, 2018

6．研究組織

(1)研究代表者

澤田 真也 (SAWADA, Shinya)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子

核研究所・教授

研究者番号：70311123

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

武藤 亮太郎 (MUTO, Ryotaro)

高エネルギー加速器研究機構・加速器研究

施設・准教授

研究者番号：50392147

(4)研究協力者

CHESNOKOV, Yury

ロシア・高エネルギー物理学研究所 (IHEP)