

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K05124

研究課題名(和文) 加速ビームのセラミックブレイク(誘電体)通過に伴うインピーダンス及び輻射の研究

研究課題名(英文) Impedance and radiation during the passage of beams through a ceramic break

研究代表者

菖蒲田 義博 (Shobuda, Yoshihiro)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 J-PARCセンター・主任研究員

研究者番号：90370410

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：加速器のビームの大強度化は、物理実験で世界的な成果を得る上で必然的な流れである。これに伴い、本来ビームを安定に回す上で不可欠な構成要素であるはずの加速器のセラミック部が電磁波を発生するようになり、ビームを不安定にする懸念が出てきた。近年、研究代表者らは「セラミック部に、僅か10nmの金属薄膜をコーティングするだけで電磁波は遮蔽され、ビームを安定化できる。」と理論的に予言した。研究代表者らは、今回これを実験的にも実証し、加速器の基盤技術を確立させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今回の実証実験により、研究代表者らの理論が正しいことが実証された。これにより、電磁場の遮蔽を行いつつ、一方で、ビームの形状がわかる新型のモニターの開発が可能になった。さらに、加速器物理の理論的理解をより深めることができた。この意味で、本研究は実用的にも学術的にも加速器科学の発展に貢献したといえる。

研究成果の概要(英文)：High intensity beams are an inevitable tool to achieve world-class results in high-energy physics. As a result, the ceramic break, which is an essential component in the accelerators, has emitted electromagnetic waves, may destabilize the beams. Recently, the authors theoretically have predicted that the electromagnetic waves can be shielded and the beam can be stabilized by coating the ceramic break with a thin metal film of only 10 nm. In this research, the authors have experimentally demonstrated this prediction and established the basis of the accelerator technology.

研究分野：加速器科学

キーワード：電磁シールド モニタ

1. 研究開始当初の背景

加速器のビームの大強度化は、物理実験で世界的な成果を得る上で必然的な流れであり、世界においては、MW 級の加速器が計画中、建設中及び稼働中である。これに伴い、本来ビームを安定に回す上で不可欠な構成要素であるはずの加速器のセラミック部(図1)で、電磁波が発生するようになり、ビームを不安定にする懸念が出てきた。近年、研究代表者(葛蒲田義博)らは、「セラミックブレイクの内面に、僅か 10nm の窒化チタンをコーティングするだけで電磁波は遮蔽され、ビームを安定化できる。」と、理論的に予言した。

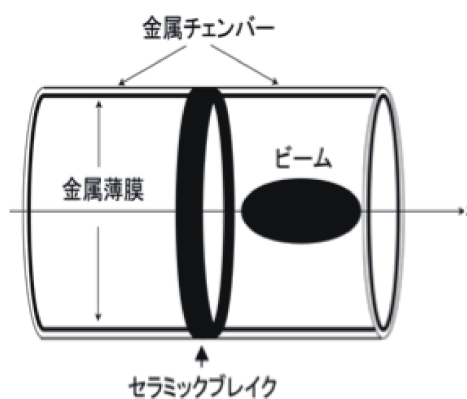


図1: セラミックブレイク

2. 研究の目的

本研究は、研究代表者の理論的予測を実験的に実証し、加速器の基盤技術を確立させることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究の方法は、以下(1)から(6)のとおり。

- (1) セラミックブレイクとビームとの相互作用(セラミックブレイクのインピーダンス)を模擬的に測定するため、テストスタンドを設計製作した。(図2)
この際、「両端の金属真空容器と完全に導通する窒化チタン付きのセラミックブレイク」と、比較のため「窒化チタン無しのセラミックブレイク」を製作した。

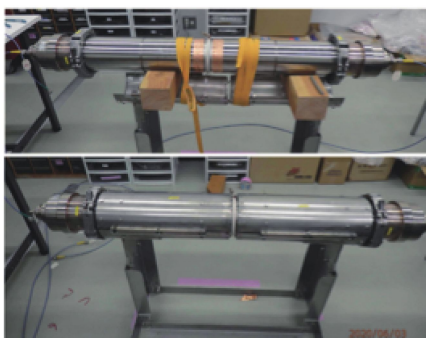


図2: テストスタンド

- (2) セラミックブレイクの外側の電磁場も測定できるように市販のアンテナを購入した。そして、JAXA の電波暗室(図 3)を使った理想的な状況下で、2 種類のセラミックブレイクを用いて、模擬ビームとセラミックブレイクの相互作用及びセラミックブレイクの外側の電磁場の測定を行った。

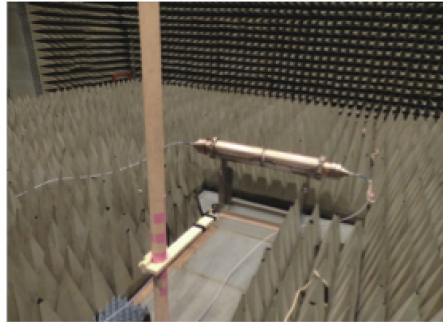


図 3: JAXA の電波暗室

- (3) 研究代表者が所属する日本原子力研究開発機構の原子力科学研究所においても電波暗室が無くとも再現実験ができるように実験室の整備を行い、再現実験を成功させた。
- (4) 実際の加速器内部で実際のビームを使った放射場の測定ができるように複数のアンテナを製作した。
- (5) 実際の加速器を使って、ビームとセラミックブレイクを使った測定を行った。その際、ビーム条件を観測しつつ放射場の測定を行い、計算結果と比較した。(図 4)

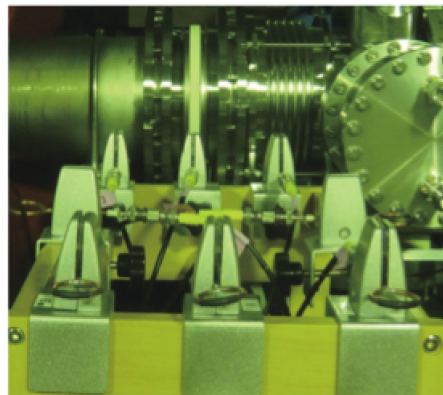


図 4: 実際の加速器での測定

- (6) 実際の加速器における使用に耐え得る実用的な真空仕様の窒化チタン付きセラミックブレイクの設計と製作を行った。

4. 研究成果

本研究では以下(1)から(7)に示す、研究成果を挙げることができた。

- (1) 両端の金属真空容器と完全に導通する 15nm の窒化チタンでコーティングしたセラミックブレイクの製作に成功した。一般に、金属真空容器とセラミックを銀口ウ付けするには、セラミックの両端を Ni メッキでメタライズする必要がある。今回のセラミックブレイクでは、さらに窒化チタンとセラミックブレイクの両端の金属真空容器は、電氣的接触が保証される必要がある。これについては、窒化チタン薄膜と Ni メッキをオーバーラップさせる技術を利用することで克服した。テスターで測定すると、セラミックブレイクの両端の電気抵抗は 1 程度と確認でき、設計値を再現できた。
- (2) 実際の加速器のビームを使わずに、セラミックブレイクとビームとの相互作用を測定できるテストスタンドを使った測定法を確立した。そして、測定結果と計算結果が一致することを示した。これにより、セラミックブレイク上の 15nm 厚の窒化チタンは、ビームに由来する電磁場を遮蔽できることを実験的に示した。

- (3) セラミックブレイク上の窒化チタンは、0Hz から 1GHz のビームの持つ周波数成分に依らずに直流抵抗を示すことを模擬ビームを使って実証した。(図 5)
 これは、従来の抵抗性インピーダンスの振る舞いとは全く異なるものである。
 さらに、この性質を利用することで広帯域のモニタができることを発見し、この原理実証を行った。この成果は雑誌 (Physical Review Accelerators and Beams) において発表した。(図 6) また、日本加速器学会での口頭発表にも選ばれた。
 (https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2021/abstracts/html/TU0A04.htm)

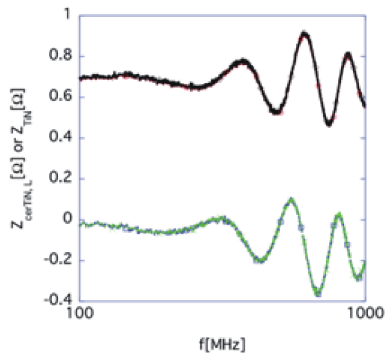


図 5: 窒化チタン付きセラミック
ブレイクブレイクのインピーダンス



図 6: 掲載論文

- (4) さらに、この性質を考察することで、従来の抵抗性インピーダンスの性質についても理解を深めることに成功した。そして、従来の教科書に記載されている記述には修正が必要であることを見出した。この成果は、雑誌 (Progress of Theoretical and Experimental Physics) において発表し、Editors' Choice にも選ばれた。(図 6)
- (5) ネットワークアナライザを使用することで、ループアンテナの誘起電圧とフラックス磁場の間の校正ができるようになった。これにより、自作のループアンテナでも誘起電圧とフラックス磁場の周波数応答の校正ができるようになった。
- (6) 模擬ビームでの評価が妥当であることを確認するために、実際の加速器と実際のビームで窒化チタン無しのセラミックブレイクの周りの電磁場について、自作のループアンテナで測定した。計算結果は測定結果を再現でき、実際の加速器でも両端の金属真空容器と完全に導通する窒化チタン付きのセラミックブレイクが使用できる見込みが立った。これらの成果が、国際加速器学会の実行委員の目に留まり、2022 年 3 月に発表の依頼を受けることになり、研究代表者は 2022 年 6 月に開催予定の国際加速器学会において、口頭発表を行う予定である。(<https://www.ipac22.org/scientific-program/>)
- (7) 以上の研究成果により、原理的には電磁場の遮蔽を行いつつ、ビームのモニタもできるセラミックブレイクが開発できたと言える。補助事業期間の最終年度には、実際の加速器で使用できる真空仕様の窒化チタン付きセラミックブレイクの設計と製作を成功させた。(図 7)

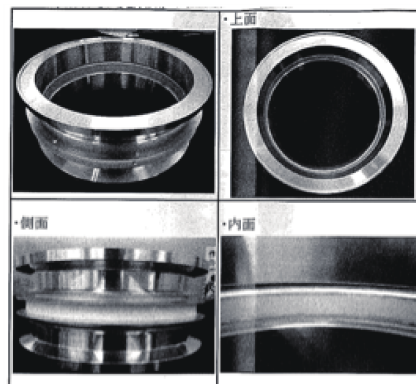


図 7: 窒化チタン付きセラミック
ブレイクの実用機

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Shobuda Yoshihiro, Toyama Takeshi	4. 巻 23
2. 論文標題 Titanium nitride-coated ceramic break for wall current monitors with an improved broadband frequency response	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Accelerators and Beams	6. 最初と最後の頁 92801
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevAccelBeams.23.092801	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yoshihiro Shobuda	4. 巻 ptac053
2. 論文標題 Two-dimensional resistive-wall impedance with finite thickness: its mathematical structures and their physical meanings	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1-44
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac053	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高浦田義博
2. 発表標題 TiN 付きのセラミックブレイクを利用した壁電流モニター
3. 学会等名 日本加速器学会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	外山 毅 (Toyama Takeshi) (30207641)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・教授 (82118)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------