

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K20609

研究課題名（和文）高効率・高電界電子加速を目指した誘電体アシスト型加速管の開発

研究課題名（英文）Research toward high-power efficiency and high-gradient dielectric assist accelerating structure.

研究代表者

佐藤 大輔 (Sato, Daisuke)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究員

研究者番号：40780086

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、既存の金属加速管における電力効率や最大加速電界などの加速管性能の限界を超える電子加速技術として、誘電体アシスト型加速管という新たな高周波加速管を開発し、その性能向上に取り組んだ。本研究では、特にMgOセラミックスの表面をダイヤモンドライクカーボン（DLC）コーティングすることで、余剰の誘電損失を発生することなく、2次電子放出係数を大幅に低減化することに成功した。その結果、DLCコーティングを施した誘電体セルからなる誘電体アシスト型加速管において、高い電力効率を維持したまま10 MV/m以上の加速電界の励振に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本加速管の性能は、常伝導加速管の4倍以上の加速効率を有しており、既存の常伝導加速管を本加速管に置き換えるだけで、必要電力を1/4に低減化することができる。また、誘電体の材料費が安価であることから、加速管の製造コストも常伝導加速管の1/3程度で済んでしまう。さらには、高周波電源の小型化が可能となり、加速器システム全体の小型化、省電力化、低価格化が期待され、従来は困難であった加速器の可搬型などが比較的簡単に実現できる可能性がある。その結果、高エネルギー電子ビームの利用範囲が大きく拡大することが期待され、学術面・産業面ともに大きな波及効果が期待される。

研究成果の概要（英文）：In the project, we have developed a dielectric assist accelerating (DAA) structure to overcome the limitations of existing metal accelerating structures in terms of power efficiency and maximum accelerating gradient. By coating the surface of MgO ceramics with diamond-like carbon (DLC), the secondary electron emission coefficient was significantly reduced without excess dielectric loss. As a result, an accelerating gradient of more than 10 MV/m was successfully excited in a DAA structure using MgO cells with DLC coating while maintaining a high Q-value.

研究分野：加速器科学

キーワード：電子加速 高周波加速管 誘電体

1. 研究開始当初の背景

電子加速器は、20～21世紀にかけて基礎科学の発展を支えてきた基盤技術の一つである。とりわけ素粒子物理学分野では、近年、日本において電子・陽電子衝突型加速器を用いた「B中間子におけるCP対称性の破れの検証」が行われるなど、標準理論の検証に大きく貢献した。光科学分野では、電子加速器駆動の放射光源が重要な計測ツールとなり、現在では、第四世代放射光源と呼ばれる電子線形加速器ベースのX線自由電子レーザー(XFEL)が世界各国で建設されている。XFELは、フェムト秒の極短パルス幅で発振し、高い時空間分解能と空間コヒーレンスを有した高輝度なX線を発生することが可能であり、材料科学や生物科学において、微量サンプルの精密な結晶構造解析や超高速構造変化の観測など、様々な先端計測を可能とした。

基礎科学研究の電子加速器は、高周波加速管とよばれる金属管内で数GHz帯の電磁波と電子の電磁相互作用によってエネルギーの授受を行い、電子を高エネルギーに加速しているのだが、現状では加速管性能(電力効率、最大加速電界など)が加速器施設の規模を決めるボトルネックとなっている。電子線形加速器の加速管は、一般に常伝導加速管と超伝導加速管の二つに大別されるが、電力効率と最大加速電界という主要性能に着目すると、どちらの技術も一長一短である。常伝導加速管は、高周波数帯(>10GHz以上)を用いることで、80MV/m以上の高い安定加速電界が得られているが、超伝導加速管と比較して電力効率の面で大きく劣っている。一方、超伝導加速管は、電力効率が高いことが大きな利点だが、クエンチに起因する加速電界の理論限界が存在し、現状、30MV/m程度の加速電界で制限されている。電力効率や最大加速電界などの加速管性能は、加速管に使用する金属材料の高周波特性でほぼ決まってしまうため、近年、劇的な性能向上には至っていない。金属加速管以外にも、金属管内部に誘電体構造物を装荷した誘電体装荷型加速管も開発されているが、金属加速管の基本原則を踏襲しているため、金属加速管の電力効率や最大加速電界を上回る高周波加速管は誕生していない。こういった加速管性能が頭打ちの状態は長年続いており、今後の高エネルギー電子加速器を用いた科学技術の停滞が懸念される。仮に、高電力効率かつ高電界加速が可能な電子加速技術が実現すれば、電子線形加速器を用いた素粒子物理次期実験計画においても第五世代放射光源計画においても、加速器施設を可能な限りコンパクトかつ省電力で営業運転することが可能となり、加速器科学にとどまらず、物理学、材料科学、生物科学などにも副次的に大きな波及効果をもたらすことが期待される。

2. 研究の目的

本研究は、既存の金属加速管における加速管性能(電力効率、最大加速電界)の制限を超える電子加速技術として、誘電体の高い電磁場蓄積能力と放電耐圧特性に着目する。誘電体の優れた高周波特性を最大限に活用する方法として、金属管内部に誘電体同軸構造と誘電体円盤を周期的に装荷した誘電体アシスト型加速管(図1参照)という新たな誘電体装荷型加速管を提案し、誘電体材料の選定、幾何形状の最適化、表面コーティング技術などの適用により、加速管性能の向上に取り組み、最終的には、既存の常伝導加速管の10倍以上高い加速効率を実現しつつ、高加速電界を励振可能であるということを実証することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究課題に対しては、以下の3項目に分けて実施した。まず、はじめに、数多く存在する誘電体材料の誘電特性を用いて数値シミュレーションを実施し、(1)誘電体アシスト型加速管の電力効率が最大となる誘電体材料の探索に取り組んだ。次に高加速電界を励振するための目安となる(2)誘電体材料の2次電子放出係数の測定に取り組んだ。そして、(1)(2)の結果を総合的に評価して、電力効率と加速電界が共に高くなる誘電体材料で誘電体アシスト型加速管の製作し、その加速管性能を評価した。

(1) 誘電体アシスト型加速管に最適な誘電体材料の探索

誘電体アシスト型加速管は、金属管内部に装荷する誘電体構造の複素誘電率と幾何形状によって加速管の電力効率が決まる。そこで、加速管に使用する誘電体の比誘電率(ϵ_r)と誘電正接($\tan \delta$)を2変数とし、各($\epsilon_r, \tan \delta$)の組み合わせで誘電体アシスト型加速管のシャントインピーダンス(Z_{sh})が最大となる幾何形状を有限要素法に基づく電磁場シミュレーションで算出した。ここで得られた($\epsilon_r, \tan \delta, Z_{sh}$)の関係と、現在報告されている誘電体材料の複素誘電率を参照し、加速管のシャントインピーダンスが最大となる誘電体材料を見積った。

(2) 誘電体材料の二次電子放出係数 (SEY) の測定

誘電体の2次電子放出係数()は、誘電体加速管において励振可能な電界強度に影響する重要なパラメータであり、その値が1より小さいことが望ましい。 < 1であれば、2次電子が雪崩的に増幅するマルチパクタ放電が発生しづらいため、高加速電界が励振できる可能性が高まる。誘電体の2次電子放出係数は、入射電子のエネルギーに相関があり、一般的には、5 keV 以下のエネルギーで はピークを持つ。そこで、5 keV 以下のエネルギー範囲で入射電子のエネルギーを変化させて、いくつかの誘電体材料における のエネルギー依存性を計測し、 の小さい誘電体材料等の探索を行った。

(3) 誘電体アシスト型加速管の開発と性能評価

(1) の計算結果と(2) の測定結果をもとに、高い電力効率と加速電界が励振できる誘電体アシスト型加速管に適した誘電体材料を決定した。次に、誘電体アシスト型加速管の高電界試験までを想定して、(I)誘電体セルの製作誤差に起因する共振周波数シフトの見積りやその補正方法、(II)電力入力結合器の高周波設計なども含めた加速管の全体設計を実施した。これらの設計をもとに、誘電体セル構造や金属管の機械加工を実施し、最終的には各パーツを組み上げて加速管として仕上げた。開発した加速管は、まず、ベクトルネットワークアナライザを用いて共振周波数、Q 値等を計測した後に、高電界試験を実施して、その性能を評価した。

4. 研究成果

まず、(1) 誘電体アシスト型加速管に最適な誘電体材料の探索として(ϵ_r , $\tan \delta$, Z_{sh}) の関係を電磁場シミュレーションで計算したところ、比誘電率が高いほど、誘電正接が小さいほど加速管のシャントインピーダンスは高くなるということを見出した(図2参照)。ここで得られた、(ϵ_r , $\tan \delta$, Z_{sh}) の関係と、現在報告されている様々なセラミックスや単結晶誘電体材料の複素誘電率を用いて検討したところ、比誘電率が約 24 の Ba(Mg, Ta)O₃ セラミックスを用いることで、既存の常伝導加速管の約 10 倍程度の高いシャントインピーダンスが得られる可能性があることが明らかとなった。ただし、比誘電率が高くなるにつれて、加速管内での高周波損失のうち誘電体での誘電損の比率が高くなるため、誘電体セルの冷却が課題となるということも分かってきた。

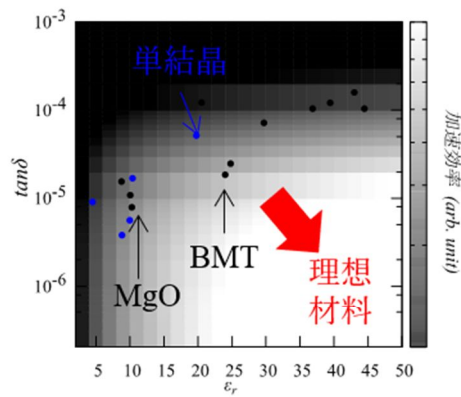
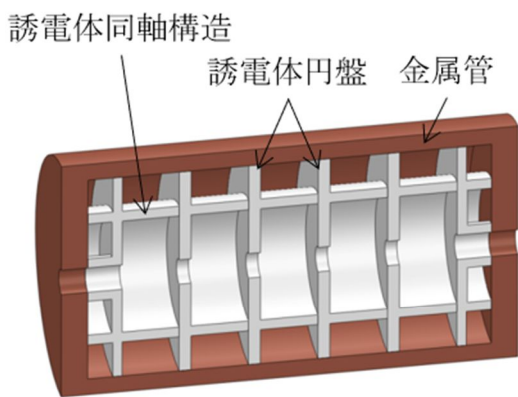


図1 : 誘電体アシスト型加速管 図2 : 加速効率の (ϵ_r , $\tan \delta$) 依存性

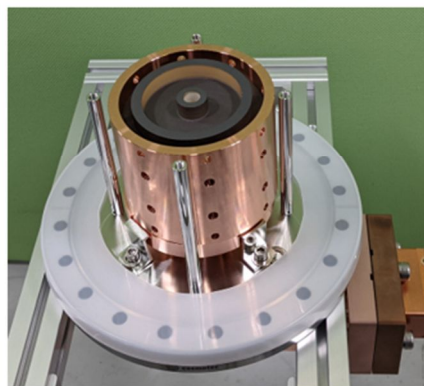
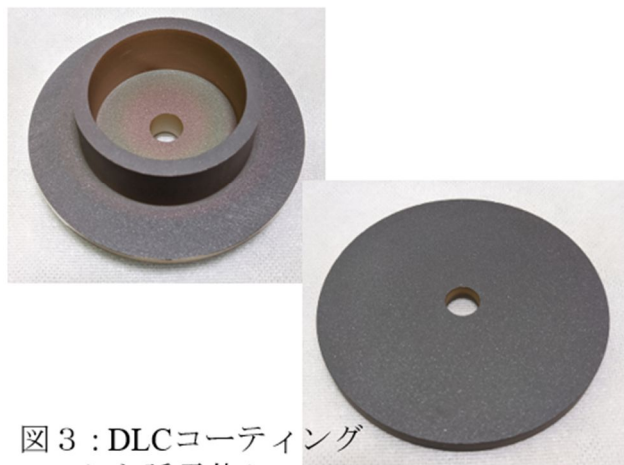


図3 : DLCコーティングした誘電体セル

図4 : 開発した加速管

次に(2)誘電体材料の2次電子放出係数の測定を実施した。ここでは、(1)の計算により、商用で手に入るセラミックス材料のうち、誘電体アシスト型加速管に適用した場合、高い電力効率が見込まれる材料をいくつか評価した。その中でも、高効率という面で最も優れているMgOに関しては、は最大で3以上と非常に高い値が計測された。その他にも、チタンやストロンチウムを含む複合酸化物セラミックスを評価したところ、 ~ 2 程度とMgOに比べるとは小さいが、まだまだ高い値を示した。2次電子放出係数の低減化に向けて、表面コーティングによる低SEY化に取り組んだ。その結果、ダイヤモンドライクカーボン(DLC)コーティングを施したMgO表面においては、800eV以上のエネルギーの電子において、 $SEY < 1$ と非常に小さく、DAA管に適した特性を有していることが明らかとなった。

(1)(2)の研究結果を総合的に評価して、高い電力効率と加速電界が見込まれる材料として、MgOセラミックスにDLCコーティングを施した誘電体セルが、現状では最適であると結論付けた。本研究において、開発した誘電体セルを図3に示す。また、誘電体アシスト型加速管として組み上げた一例を図4に示す。誘電体アシスト型加速管は、最も高い電力効率のもので、既存の常伝導加速管の4倍以上のシャントインピーダンスが得られ、DLCコーティングによる余剰の誘電損失は発生せず、高い電力効率を維持した。最終的には、高電界試験を実施し、DLC無コーティングに比べ約10倍高い加速電界の励振に成功した。

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 Sato Daisuke, Shibuya Tatsunori, Ogawa Hiroshi, Tanaka Masahito, Kuroda Ryunosuke, Mori Shingo, Yoshida Mitsuhiro, Toyokawa Hiroyuki	4. 巻 459
2. 論文標題 Power efficiency enhancement of dielectric assist accelerating structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms	6. 最初と最後の頁 148 ~ 152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2019.09.006	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 Mori Shingo, Yoshida Mitsuhiro, Sato Daisuke	4. 巻 24
2. 論文標題 Multipactor suppression in dielectric-assist accelerating structures via diamondlike carbon coatings	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Accelerators and Beams	6. 最初と最後の頁 022001-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevAccelBeams.24.022001	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3件（うち招待講演 2件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Daisuke Sato*, Tatsunori Shibuya, Hiroshi Ogawa, Masahito Tanaka, Ryunosuke Kuroda, Shingo Mori, Mitsuhiro Yoshida, Hiroyuki Toyokawa
2. 発表標題 Design and Development of Dielectric Assist Accelerating Structure
3. 学会等名 13th European Conference on Accelerators in Applied Research and Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤大輔
2. 発表標題 誘電体アシスト型高周波加速空洞の研究開発
3. 学会等名 第16回 日本加速器学会年会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daisuke Satoh*, Shingo Mori, Mitsuhiro Yoshida, Ryunosuke Kuroda, Hiroyuki Toyokawa
2. 発表標題 Toward high power efficiency and high gradient dielectric assist accelerating structures
3. 学会等名 11th International Particle Accelerator conference (IPAC20) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------