

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 8 月 22 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2020

課題番号：16H02134

研究課題名(和文)低温フォトリックアシスト常伝導空洞による高電界・高Qを兼ね備えた新領域電子加速管

研究課題名(英文)Cryogenic photonic assisted cavity for the accelerating structure with high quality factor and high electric field

研究代表者

吉田 光宏 (Yoshida, Mitsuhiro)

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・准教授

研究者番号：60391710

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究期間に行った主な研究成果としては、放電の要因となるマルチパルスを抑制するコーティング開発のため、様々な物質の2次電子放出係数及びQ値の測定を行い、誘電体アシスト空洞に最適なDLCコーティングを開発した。これを最小単位の誘電体アシスト空洞である2セルの試験システムを開発し、誘電体アシスト空洞の高電界試験を行い115MV/m程度の高電界を得られた。さらに高電界試験チェンバーに冷凍機を設置し、液体窒素温度程度まで冷却して測定を行った。また加速器システムの設計として真空排気及びディスク間の接触の問題を大幅に改善するチョーク構造の開発を行い冷却効率や真空のコンダクタンスを改善できる構造が決定した

研究成果の学術的意義や社会的意義

誘電体アシスト空洞は、誘電体フォトリック構造により電磁波を内側に閉じ込める事ができ、マイクロ波の蓄積効率を非常に高くできる新しい加速構造である。これを用いる事で非常に高エネルギー効率の加速器が実現する。このような加速器は学術利用の大型加速器だけでなく、産業利用や医療応用で幅広く利用する事ができる。また材料として使用しているセラミックは磁器と同じであり、大型の物でも任意の形状の物を安価に焼結する事が可能である。

研究成果の概要(英文)：The DLC coating is found to suppress the secondary electron emission coefficient and to become best material for the dielectric assist accelerating structure. We adopt this coating to the minimum structure with 2-cell dielectric cell and applied the high power RF. Finally the high gradient of 15 MV/m was obtained in this configuration. Further new structure with choke structure and nose was designed for the better vacuum and breakdown at contact part between cell.

研究分野：加速器

キーワード：加速器 フォトリック 誘電体

## 1. 研究開始当初の背景

次世代の電子線形加速器は、円形加速器の限界を超える超高エネルギー物理実験のため高い電界強度が実現可能なシステムが求められている。一般的に、電子線形加速器に用いられる加速空洞は、常伝導空洞と超伝導空洞の二つに大別されるが、どちらのシステムを採用するのかは常に議論が分かれる。例えば、2つのリニアコライダ計画を比べると、ILC計画では超伝導空洞が採用され、CLIC計画では常伝導空洞が採用されている。またSASE型の放射光施設でも超伝導加速器が採用されてきているが、大型化やコストの問題がある。このように常伝導空洞と超伝導空洞の間で議論が分かれる理由は、それぞれの加速器パラメーターが対極的で、それぞれ原理的限界やコストの問題を抱えており、一長一短なためである。

超伝導空洞ではQ値が高く、少ない高周波電力で高い加速電圧が得られ、またビームを長時間加速できるのが利点だが、ビーム負荷のある加速器ではビーム負荷以上の超伝導本来の $Q = 10^{10}$ という極端に高いQ値は無意味である。例えばILCの場合、ビームの消費エネルギーと空洞蓄積エネルギーの比のビーム負荷は $Q=10^6$ であり、加速空洞のQ値も $10^6$ 程度で良いため、超伝導空洞に固執する必要は無い。一方常伝導空洞のQ値は電気伝導率の平方根に比例するため、無酸素銅の電気伝導度が液体窒素温度で常温の10倍になったとしてもQ値は約3倍にしかならず、常伝導空洞を冷却しても高いQ値は得られない。

これを打破するような常伝導と超伝導の利点を併せもった中間的な誘電体フォトニックアシスト型加速空洞を我々は提案し、研究開発及び基本特許の取得を行ってきた。その後このフォトニックアシスト型加速空洞で低電力では $10^5$ 以上のQ値が得られたが、高電力試験では誘電体のマルチパクタ放電により数MV/m程度が限界で実用化に至っていなかった。

## 2. 研究の目的

本研究は、現在の加速器技術で到達困難なエネルギーフロンティアの小型・高エネルギー線形加速器の実現を目指し、超伝導加速空洞と代替可能な非常に高いQ値( $>10^6$ )と常伝導加速空洞を超える超高電界( $>100$  MV/m)加速を可能にする室温または液体窒素温度で動作可能な誘電体フォトニック構造を用いた加速空洞(図1)の原理実証を目的とする。従来、加速空洞は常伝導体ないし超伝導体のみからなるが、それぞれ原理上、多くの問題を抱えており、これらの問題解決には抜本的な解決策が必要である。本研究では、誘電体の低誘電損失特性と高い耐電圧特性に着目し、加速管構造として誘電体と真空部が周期的に並ぶ2次元フォトニック構造で高周波電力の大部分を内部に閉じ込め、最外殻部に位置する常伝導壁での電界強度を下げ、高周波損失を低減させる誘電体アシスト型加速管の実用化を目的としている。

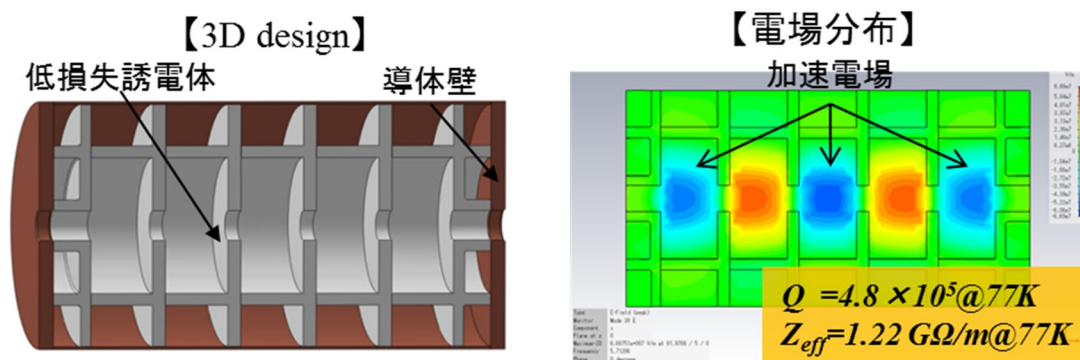


図1：フォトニックアシスト型加速空洞の概念図と電磁波計算

## 3. 研究の方法

本研究では、高電界試験装置を改良し、様々なコーティングのマルチパクタの抑制を目的とした高電界試験を行い、誘電体フォトニックアシスト空洞の高電界運転の研究開発を行う。またさらに電子顕微鏡を用いて2次電子放出係数を測定すると共に、低温での特性や、空洞構造の再設計、及び新たな誘電体材料の開発を行う。これらのコーティング・材質、構造の改良、試験装置の開発を総合的に行う事で、実用的な電界での安定な運転を可能にする

## 4. 研究成果

本研究期間に行った主な研究成果としては

・コーティングの開発：

放電の要因となるマルチパクタを抑制するコーティング開発のため、様々な物質の2次電子放出係数及びQ値の測定を行い、誘電体アシスト空洞に最適なDLCコーティングを開発した

・高電界試験：

最小単位の誘電体アシスト空洞である2セルの試験システム(図2)を開発し、2次電子放出係数の小さいDLCコーティングを用いて誘電体アシスト空洞の高電界試験を行い15MV/m程度の高電界を得られた(10.1103/PhysRevAccelBeams.24.022001 査読有)

・冷却試験：

高電界試験チャンバーに冷凍機を設置し、液体窒素温度程度まで冷却して測定を行った

・加速器システムの設計

真空排気及びディスク間の接触の問題を大幅に改善するチョーク構造の開発(特許化)を行い新しい冷却効率や真空のコンダクタンスを遥かに改善できる構造が決定した。

さらに産業用も含めた加速器システム用の加速管のデザインを行った

・材料開発：

シャントインピーダンスを高くする事のできる高誘電率材料の測定を行った。

さらに従来使用していたセラミックは焼結時に添加する焼結補助剤などの不純物やセラミック内部の気孔、微小な欠陥などの表面または内部の場所で放電が起こるものが支配的である。そこでこれらの耐電圧特性を向上させるための単結晶材料の開発を行い、測定を行った

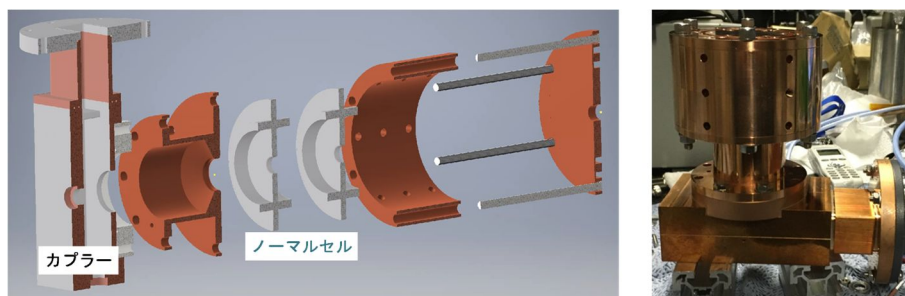


図2：最小単位の2セル誘電体アシスト空洞の概略図と高電界試験用の実機

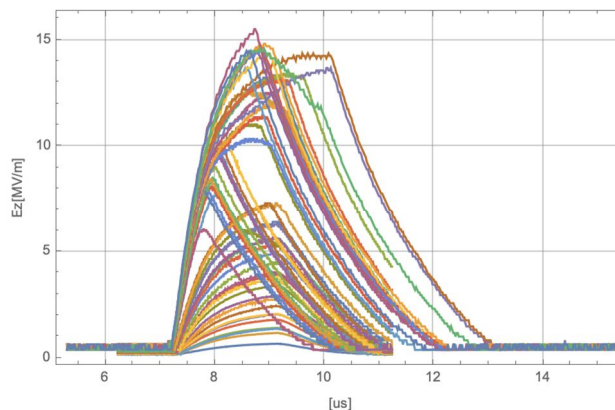
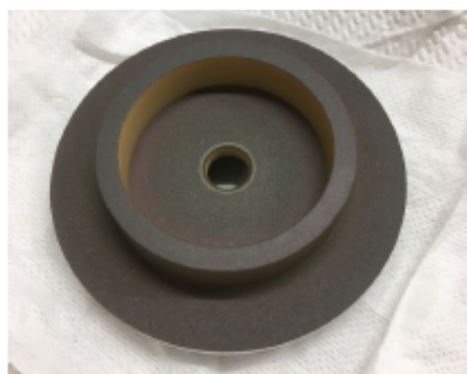


図3：DLCコーティングしたセラミックセルと高電界試験の空洞蓄積電圧測定

図3はセラミックセルにDLCコーティングを表面に施したものであり、このDLCコーティングは2次電子放出係数の測定で非常に低い事が分かっており、またこのように表面が黒くなっているがQ値の低下も1%以下である事が測定から分かり、誘電体加速器に理想的なコーティングである事が分かった。これを用いて高電界試験を行った所15MV/m程度の加速電圧が得られた。

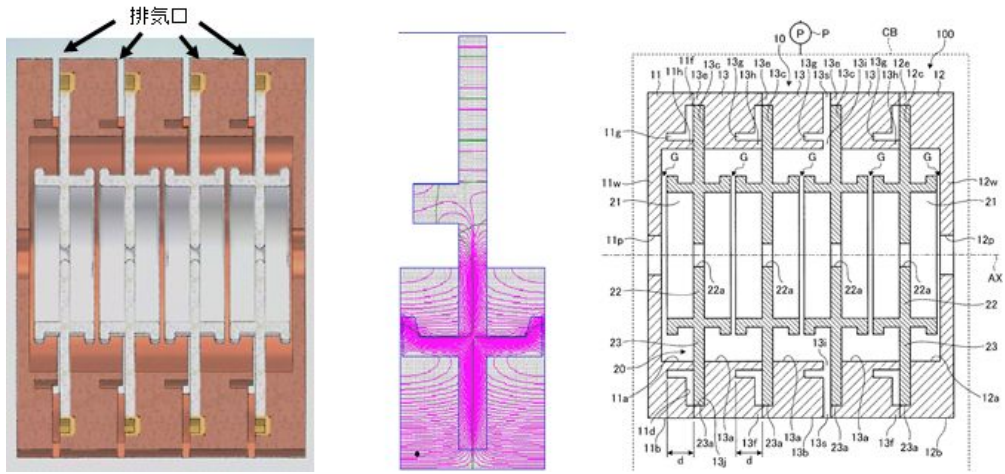


図4：誘電体アシスト空洞の新構造(左)、電界分布(中)、特許化された構造(右)

図4は量産性を考慮して新規に設計した誘電体アシスト空洞の構造である。この構造により、セル同士が接触する事が無くなり、接触面の接合の問題や、真空排気の問題が解決された。またこの構造によるウェーク場を外にダンプする事も可能になった。この構造は図4(右)の構造として特許を取得した。

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 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Satoh, Daisuke, Tatsunori Shibuya, Hiroshi Ogawa, Masahito Tanaka, Ryunosuke Kuroda, Shingo Mori, Mitsuhiro Yoshida, Hiroyuki Toyokawa	4. 巻 459(15)
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 該当する

1. 著者名 Mori Shingo, Yoshida Mitsuhiro, Satoh 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 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 該当する

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 森 紳悟、吉田 光宏
2. 発表標題 誘電体アシスト型加速空洞における航跡場の減衰について
3. 学会等名 第16回日本加速器学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森 紳悟、吉田 光宏
2. 発表標題 The Design Optimization of the Dielectric Assist Accelerating Structure for Better Heat and Gas Transfer
3. 学会等名 10th International Particle Accelerator Conference 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shingo Mori, Mitsuhiro Yoshida, Daisuke Satoh
2. 発表標題 MEASUREMENT OF THE SECONDARY ELECTRON-EMISSION COEFFICIENT FROM LOW-LOSS DIELECTRIC MATERIALS
3. 学会等名 Particle Accelerator Society of Japan
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shingo Mori, Mitsuhiro Yoshida
2. 発表標題 THE RF GUN ADOPTING THE DIELECTRIC ASSIST ACCELERATING STRUCTURE
3. 学会等名 LINAC2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 加速空洞	発明者 森紳悟、吉田光宏、 重岡伸之	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特開2020-187986	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------	---------