

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	誘電体アシスト型高周波加速空洞の原理実証研究
Title(English)	A Proof-of-Principle Study of Dielectric Assist Accelerating Structure
著者(和文)	佐藤大輔
Author(English)	Daisuke Satoh
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10170号, 授与年月日:2016年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:林崎 規託,小栗 慶之,矢野 豊彦,赤塚 洋,筒井 広明
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10170号, Conferred date:2016/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻:	原子核工学	専攻	申請学位 (専攻分野):	博士	(工学)
Department of			Academic Degree Requested	Doctor of	
学生氏名:	佐藤 大輔		指導教員 (主):	林崎 規託	
Student's Name			Academic Advisor(main)		
			指導教員 (副):	塚原 剛彦	
			Academic Advisor(sub)		

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本論文研究は、室温下で 10 万を超える高い無負荷 Q 値とシャントインピーダンスを有する「誘電体アシスト型高周波加速 (Dielectric Assist Accelerating Structure, DAA) 空洞」という低損失誘電体材料を用いた新奇加速管の原理提唱とその原理実証に関するものである。

電子線形加速器は、長年、高エネルギー加速器や産業用加速器に至るまで、多岐にわたって応用されており、学術面・産業面で共にその発展に貢献してきた基盤技術の一つである。現在、稼働している電子線形加速器の多くは、室温で動作する常伝導加速管が採用されており、長年にわたる運用実績から広く社会に普及している。近年、X-band (11.424 GHz) 帯を利用した常伝導加速管で、平均軸上電界が 100MV/m という高電界が達成されており、実用化が望まれている。しかし、超伝導加速空洞と比較すると加速管の無負荷 Q やシャントインピーダンスは極めて低く、システム全体の電力効率が低いという欠点をもつ。

仮に、既存の常伝導加速管と比較して、数倍～10 倍程度の高いシャントインピーダンスを有し、室温で動作する加速空洞が存在すれば、高エネルギー物理学実験用加速器や、電子線・X 線等の人工放射線を利用した電子ビーム加工機や滅菌装置、がん治療器、非破壊検査装置など産業用加速器においてもシステム全体の低電力化・小型化に向けて、大きなブレークスルーとなりうる。しかし、常伝導加速管の開発現状としては、そのような高電力効率の加速管は存在しておらず、ここに技術革新の余地がある。

室温下で高いシャントインピーダンスを有する高電力効率の高周波加速空洞を実現するために、筆者は誘電体材料を利用した加速管に着目した。誘電体材料を利用した高周波加速管の中でも特に、誘電体装荷型高周波加速管 (Dielectric Loaded Accelerating Structure, DLA) と呼ばれる、誘電体円筒構造の外周を金属でコーティングしただけの非常にシンプルな構造を持つ加速管が盛んに研究されている。この DLA 構造は、そのシンプルさ故に X-band 以上の高周波帯の加速管でも製造が容易で、加速管自体も非常にコンパクトとなり、低コストで製作できるという大きなメリットをもつ。しかし、DLA 構造では原理的に、粒子加速に利用できる電磁場モードがエバネッセントモードに限られる。そのため、高周波電力の大部分は誘電体内部に蓄積されるため、ビーム加速に有効利用できず、シャントインピーダンスを上げることが困難である。筆者は、このデメリットを逆手に取り、誘電体装荷型加速管内を伝搬する電磁波の位相速度 v_p が $v_p > c$ となるモードの位相速度を別の方法で減速させて加速管として利用する、「誘電体アシスト型高周波加速空洞」という今までにない新しい誘電体加速管の着想に至った。

誘電体アシスト型高周波加速空洞は、金属筐体内部に特殊な誘電体セル構造を周期的に装荷した空洞構造をもつ。さらに加速モードとして、この新しい空洞構造の高次モードを利用すること

で、既存の常伝導加速空洞と比較して金属筐体内壁での導体壁損を数分の一程度に低減化することができる。また、空洞内部に装荷する誘電体構造を低損失材料で構成することによって誘電体構造内部での誘電損失も大幅に低減化することができる。その結果、空洞内部での全電力損失が既存の常伝導加速空洞のものと比較して大幅に低減化でき、室温下で極端に高い無負荷 Q 値とシャントインピーダンスを併せ持つ高周波加速空洞が実現できるということを発見した。当該コンセプトをもとに、2 次元有限要素法並びに 3 次元有限積分法を用いた電磁場シミュレーションで検証した結果、実在する低誘電損失セラミックスの誘電特性を用いることで、既存の常伝導加速空洞の無負荷 Q 値より 1 桁高く、シャントインピーダンスも数倍高い値を持つ誘電体アシスト型高周波加速（DAA）空洞の設計に成功した。

上記のような DAA 空洞に関する高周波設計をもとに、実際に DAA 空洞の原理実証機を製作し、ベクトルネットワークアナライザーを用いて低電力試験を実施した。その結果、電磁場シミュレーションによって得られた計算値とほぼ同じ、既存の常伝導加速空洞の約 10 倍に相当する高い無負荷 Q 値が得られるということを実験的に証明した。また、ビードプル摂動法を用いて、DAA 空洞内に励振される軸上電場分布とシャントインピーダンスを測定し、その結果、電磁場シミュレーションで求められた値とほぼ同じ測定結果が得られた。最終的には、クライストロンを用いた高電界試験を実施し、加速空洞内部に MV/m オーダーの加速電界を励振させることにも成功した。

論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻： 原子核工学 専攻
Department of
学生氏名： 佐藤 大輔
Student's Name

申請学位(専攻分野)： 博士 (工学)
Academic Degree Requested Doctor of
指導教員(主)： 林崎 規託
Academic Advisor(main)
指導教員(副)： 塚原 剛彦
Academic Advisor(sub)

要旨(英文 300 語程度)
Thesis Summary (approx.300 English Words)

A room-temperature RF linac structure with much higher quality factor and higher shunt impedance than those of conventional normal-conducting RF linac structures is strongly required for future high energy electron-positron colliders, compact medical accelerators and so on. In this paper, a novel dielectric based accelerating structure is proposed in order to improve both the quality factor and the shunt impedance of RF linac structures.

This structure is a standing-wave dielectric based accelerating structure and consists of special dielectric cell structures periodically arranged in a metallic enclosure. In an analytical calculation, we found that the wall loss of the accelerating mode in this special cell structure is extremely reduced since the surface current on the conducting cylinder can be made much lower than that of a conventional normal-conducting cavity. In addition, the computer simulations indicated that a prototype model will have an unloaded Quality factor of more than 10 times higher than, and the shunt impedance of much higher than those of the conventional disk-loaded copper structures. These values suggest that a high accelerating gradient can be provided with much less RF power, and it may be possible to operate the cavity at low cost. Moreover, this cavity can be fabricated economically since it has a simple structure and all of its cell structures are composed of a dielectric material.

A prototype model was actually developed, and tested at low power using a vector network analyzer. The results of the low power test gave good agreement with the value that had been obtained by the simulations, and therefore the usefulness as a high power-efficiency accelerating structure was demonstrated.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。
Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。
Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).