

新博士紹介

氏名	ひがし なお* 東 直* (高エネルギー加速器研究機構)
論文提出大学	東京大学大学院理学系研究科
学位種類	博士 (理学)
取得年月日	2016年9月16日
題目	Development of a Transmission Electron Microscope Adopting Two-Mode Superconducting RF Accelerating Cavity for Achieving Low Energy Dispersion

1. 博士論文の概要

この博士論文は世界初の超伝導高周波 (SRF) 技術の透過型電子顕微鏡 (TEM) への応用である“超伝導高周波-透過型電子顕微鏡 (SRF-TEM)”のための基礎技術開発とその全体設計について論じたものである[†]。

TEM は試料を sub-nm スケールでイメージングできる装置であり、材料学や生物学など広い分野で使用されている。現在一般に利用されている数 100 kV 程度の加速電圧を持つ TEM を使用する場合、試料は数 10 nm 程度に薄くスライスする必要がある。これは試料との非弾性散乱による電子ビームのエネルギー損失と、散乱による電子ビーム束の減少により、厚い試料では高位置分解能を保持できないからである。

数年前より高エネルギー加速器研究機構 (KEK) において、高エネルギー加速器のために開発されてきた様々な技術を TEM に応用する研究が行われている。この新型 TEM は数 10 MV/m の加速電場を持つ高周波共振空洞を採用する。さらに超伝導高周波空洞を採用することで従来型 TEM に匹敵する高いビーム電流が得られ、また常伝導空洞に比べ加速電場をより高精度に制御できる。この新しいタイプの TEM, “超伝導高周波-透過型電子顕微鏡 (SRF-TEM)” は、高い加速電圧によ

り従来よりも厚い試料の観察が可能となる。

SRF-TEM はその高い加速電場のおかげで、従来の静電加速を利用する装置よりもコンパクトに実現できる。しかしこれまで高エネルギー加速器に使用されてきた高周波加速方式は一般にビームのエネルギー幅を増大させ、色収差として TEM の位置分解能を劣化させるという欠点があった。本研究では 2 つの加速電場が共存する特別な加速空洞, “2 モード空洞”を開発した (図 1)。この 2 モード空洞により、共振周波数 1.3 GHz の TM_{010} モードに対し、その 2 倍高調波である共振周波数 2.6 GHz の TM_{020} モードを重ね合わせて電子ビームを加速する電場を平坦化することができる (図 2)。本研究の電子銃としては光陰極電子銃が既に製作されている。これにより数 ps 長

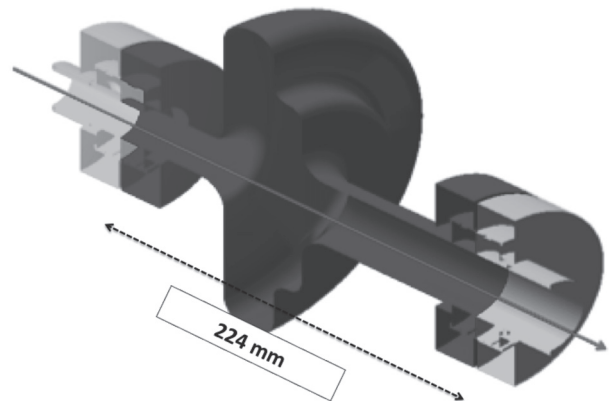


図 1 2モード空洞

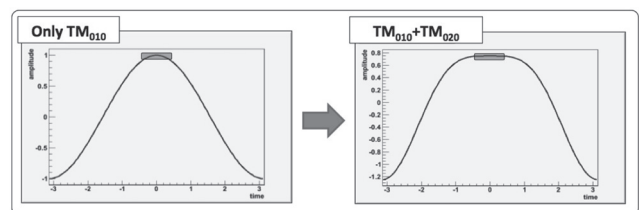


図 2 2つの共振モードの重ね合わせの概念図
左) TM_{010} モードのみの加速
右) $TM_{010}+TM_{020}$ モードの加速

* 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization (E-mail: nao.higashi@kek.jp)

[†] 著者博士論文は東京大学素粒子物理国際研究センターの「研究成果: 学位論文」のページに掲載
<https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/research/thesis.html>

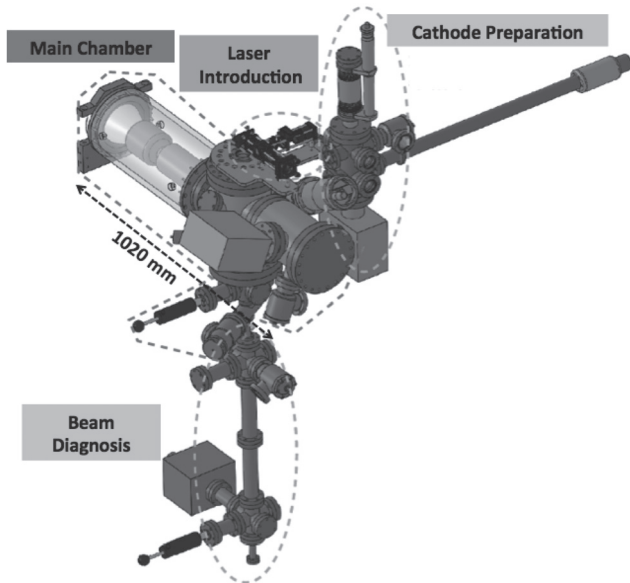


図3 SRF-TEM用に開発された光陰極電子銃

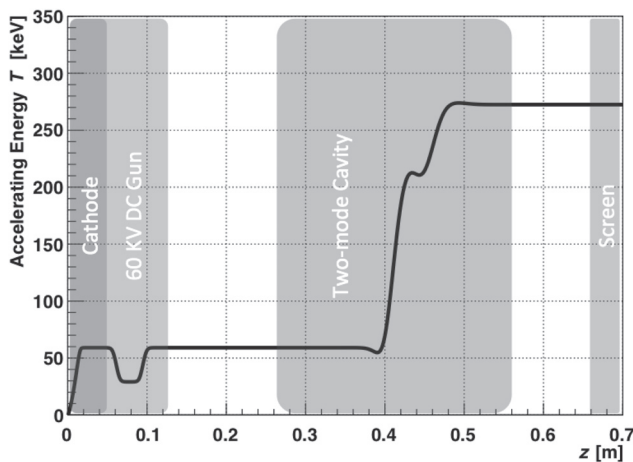


図4 300 kV 加速においてエネルギー幅増大を抑制するような2モード空洞を用いた加速の様子

の極短パルスが生成でき、2モード空洞が作る加速電場の周期に高精度に同期させることができる(図3)。

本論文ではSRF-TEM, 300 kVの原理実証機及び3 MV 実用機の全体設計と、それらに不可欠な基幹技術の確立について説明を行っている。全体システム設計としてはビーム・ダイナミクス・シミュレーションにより、2モード空洞により300 kV 及び3 MV においてビームのエネルギー幅を縮小できることを示した(図4)。

基幹技術については2モード空洞とその生成電

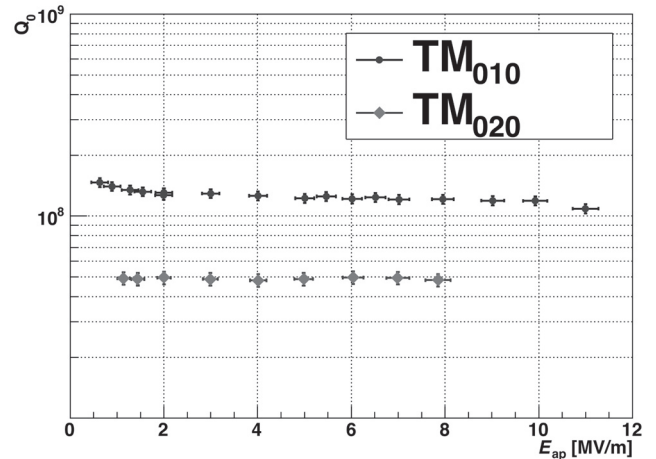


図5 2モード空洞の極低温高電界試験(縦測定)の結果

場を高精度制御するシステムを開発した。2モード空洞においてはKEKがこれまで培ってきた超伝導空洞製作レシピを2モード空洞用に最適化及び新手法の開発を行い、また既存施設を有効利用することにより、 TM_{010} モードと TM_{020} モードの2つの共振モードにおいておよそ10 MV/mの加速電場を達成することを確認した(図5)。高周波制御システムにおいては、cERLのために開発されたシステムを本研究用に最適化することにより、 TM_{010} モードでは振幅(0.0012 ± 0.0003)%、位相(0.04 ± 0.01) mdeg., TM_{020} モードでは振幅(0.0005 ± 0.0004)%、位相(0.03 ± 0.01) mdeg.の安定度をそれぞれ達成した。

これらをもって全く新しいタイプのTEM, SRF-TEMへの道を切り拓いた。

2. 現在の研究

著者は2016年10月よりKEK加速器研究施設第七研究系光源第1グループに所属している。第七研究系ではKEKの光源加速器PFとPF-ARの運転及びそれらに関わる開発研究を行っており、光源第1グループでは電子軌道・電磁石を担当している。著者は今年2月にコミショニングを無事終え4月からユーザー運転を開始したPF-ARの直接入射路や、KEKの将来放射光源KEK-LS、またPFやPF-ARの性能向上に関する研究を行っている。また、SRF-TEMの研究開発についても引き続き行っている。