1C\_PL02

### 2017年春の年会

加速器・ビーム科学部会セッション

## 南関東における加速器に関する最近の話題

Recent topics on particle accelerators in South Kanto

# (2) クライオ電子リニアック用 C バンド加速管の作製と評価

(2) The manufacture and evaluation of C-band accelerating structures for a cryogenic electron linac

佐治 晃弘<sup>1</sup>, \*井原 功介<sup>2</sup>, 五反田 修平<sup>2</sup>, 太田 温<sup>2</sup>, 中川 潤<sup>2</sup>, 遠藤 克己<sup>2</sup>,

山口 誠也<sup>3</sup>, 小林 幸則<sup>3</sup>, 新冨 孝和<sup>3</sup>, 道園 真一朗<sup>3</sup>, 舟橋 義聖<sup>3</sup>, 吉田 光宏<sup>3</sup>, 松本 修二<sup>3</sup>, 高富 俊和<sup>3</sup>, 上野 健治<sup>4</sup>, 佐藤 勇<sup>5</sup>

1総研大、2トヤマ、3高エネルギー加速器研究機構、4三菱商事テクノス、5日本大学

### 1. はじめに

現在、株式会社トヤマでは、高エネルギー加速器研究機構(KEK)と日本大学と共にX線発生装置とし ての利用を目指したエネルギー回収型クライオ電子リニアックの開発を進めている。このリニアックは、 入射部で生成した電子ビームを20Kまで冷却した1.3mの加速管で75MeVまで加速させた後、単結晶ター ゲットを通過させることでパラメトリックX線(PXR)を発生させる装置である。ターゲットを通過した 後の電子ビームは、加速管と同じ構造をした減速管に入射させてエネルギーを回収する。これにより、減 速管を通過した電子ビームは数 MeVまで減速されるため、ダンプする際に発生する放射線量の大幅な抑制 が期待できる。将来的には大掛かりな放射線シールドを必要としない、非常にコンパクトでどこにでも設 置可能なX線発生装置としての利用を考えている。

ここでは、本リニアックで使用する加速管の製作と評価について報告する。

#### 2. 加速管の仕様

エネルギー効率良いコンパクトなリニアックを実現す るためには、加速管の性能が非常に重要な要素となる。 エネルギー効率を上げるためには、加速管でのエネルギ ーロスを極力減らすことが求められる。その上で、コン パクト化を図るためには単位長さあたりの加速勾配を大 きくする必要がある。そこで今回はこれらの要求を満た すために、進行波型の C バンド加速管を低温(20K)で 運転することにした。これにより高い Q 値(=低エネル ギーロス)と加速勾配の両立が可能となる。加速管の主 な仕様は表1に示す。

衣 I 加速官切上脉	
加速方式	準定電界進行波型
運転周波数	5712±1 [MHz]
運転温度	20 [K]
加速モード	2π/3
セル数	74
全長	1300 [mm]
アイリス径 (2a)	16.000~13.225 [mm]
セル内径(2b)	42.643~40.760 [mm]
無負荷 Q 値	73500~74200
VSWR	≦1.2

表1 加速管の仕様

### 3. 加速管の製作

加速管の製作には、構成部品の精密な加工や電気的な特性を評価するための RF 測定、軸ズレのない正確 な接合が必要不可欠である。以下にこれらの詳細を記述する。

### 3-1. 加工

本加速管は一般的なディスクロード型加速管と同様にディスク、スペーサー、カプラーから構成されて いる(図1)。これらの部品は最初に一次加工によって、仕上寸法から約0.1mmの削り代を残した状態まで

## 2017年日本原子力学会

# 1C\_PL02

### 2017年春の年会

加工される。一次加工の際、切削する切込み量が大きいことなどの理由でワークに残留応力が発生し、歪 みや反りといった変形が起こる場合がある。ミクロンオーダーの精密な加工が要求される加速管において は、これらの変形が加工精度に影響を及ぼすため、一次加工後に残留応力を除去する目的でアニール処理 を施した。

アニール処理後は、超精密旋盤による加工によって鏡面仕上げとしている。精密な加工を実現するため に詳細な加工条件は勿論のこと、使用する治具やバイト、ワーク温度に至るまで徹底した管理のもと加工 している。



図1 加速管の構成部品(左からディスク、スペーサー、カプラー)

#### 3-2. RF 測定

加速管の電気的な特性を評価するために製作過程の随所で RF 測定を行った。測定は、用途に合わせて以下に述べる端板法とノーダルシフト法を使い分けて行った。

端板法は、レギュラーセルから数セルだけを取り出し、その両端にアンテナ付きの板を取り付けて測定 を行う。測定対象は主に共振周波数やQ値である。以下4-1で述べる3セル空洞のRF測定はこの方法を 採用している。

ノーダルシフト法は、金属プランジャーを加速管に挿入して測定を行う。この方法は、プランジャーの先端位置と反射波の位相を測定することでセル毎の位相進みを求めることができる非常に有用な測定方法であり、最も使用される測定方法の一つである。

### 3-3. 接合

加速管の接合には、ロウ付けや電子ビーム溶接(EBW)、電鋳、拡散接合などが一般に用いられている。 上記の接合方法には一長一短があり、加速管に要求されるスペック(剛性や真直性、電気特性等)を考慮 しながら最適な方法を選ぶ必要がある。

今回の加速管では、電気特性として低温時における加速管の高いQ値が最も重要となる。ロウ付けの場合、銅以外の異種金属であるロウ材がディスクとスペーサーの間に介在するとRFのエネルギーロスが増加し、Q値の低下を招く恐れがある。そこで今回は拡散接合とEBWを用いた接合を採用した。ただし、カプラー部に関しては、構造上の制約で一部ロウ付けを行っている。

具体的な接合方法は、レギュラーセルの部分を3分割してそれぞれを拡散接合で接合した後、カプラー 部を含めた各々のパーツを EBW で繋ぐことにした(図2)。尚、EBW を行う継目近傍では接合時の熱変形 が予想されたため、スペーサーの側面に共振周波数調整用のチューニングピンを取り付けている。

-1C\_PL02-



図2 加速管の全体図

### 4. 加速管の評価

## 4-1. 基礎試験 ~3 セル空洞~

加速管を新たに製作する際、3~6 セル程度の試作 空洞を製作して基礎試験を実施するのが一般的であ る。基礎試験の目的としては、電磁界シミュレーシ ョンの解析結果と実測値との比較や接合条件の最適 化、チューニング機構の確認等が挙げられる。

我々も3セル空洞を製作し、基礎試験を実施した (図3)。空洞本体は拡散接合で接合した後、クライ オチャンバー内に設置して低温状態での電気特性を 評価した。また、スペーサー外径に取り付けたピン を押し引きすることでチューニング効果の検証も行 った。



図3 3セル空洞

## 4-2. 大電力試験

製作した加速管の性能を評価するため、大電力試験を KEK で実施した。試験のセットアップを図4に示 す。加速管はクライオチャンバー内にセットし、20K に冷却した状態で RF を投入した。RF 源にはクライ ストロンを用いた。加速管からの暗電流を測定するために加速管の上下流にファラデーカップとベンディ ングマグネットを配置した。RF のパルス幅を変化させながらコンディショニングを行った結果、パルス幅 1.0µs、繰り返し 50Hz において加速勾配 30.9MV/m を達成した。暗電流に関しては検出限界 100fA 以下で あったため測定することができなかった。



KLY: クライストロン
DC: 方向性結合器
DL: ダミーロード
FC: ファラデーカップ
BM: ベンディングマグネット
IP: イオンポンプ
CCG: 冷陰極真空計

図4 大電力試験の模式図

## 5. まとめ

今回、クライオ電子リニアックのCバンド加速管の製作と評価を行った。製作に関しては、加工から RF 測定、接合といった一連の工程を経て1本の加速管に仕上げることができた。製作した加速管は大電力試 験によるコンディショニングの結果、加速勾配 30.9MV/m(パルス幅 1.0 µ s、繰り返し 50Hz)まで到達す ることができた。

今後は、より高い加速勾配を実現すべく、加速管の温度をより安定させる冷却機構の検討を行う予定である。

Akihiro Saji<sup>1</sup>, \*Kosuke Ihara<sup>2</sup>, Shuhei Gotanda<sup>2</sup>, Yutaka Ota<sup>2</sup>, Jun Nakagawa<sup>2</sup>, Katsumi Endo<sup>2</sup>, Seiya Yamaguchi<sup>3</sup>,

Yukinori Kobayashi<sup>3</sup>, Takakazu Shintomi<sup>3</sup>, Shinichiro Michizono<sup>3</sup>, Yoshisato Funahashi<sup>3</sup>, Mitsuhiro Yoshida<sup>3</sup>,

Shuji Matsumoto<sup>3</sup>, Toshikazu Takatomi<sup>3</sup>, Kenji Ueno<sup>4</sup>, Isamu Sato<sup>4</sup>

<sup>1</sup>The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, <sup>2</sup>Toyama Co., Ltd.,

<sup>3</sup>High Energy Accelerator Research Organization, KEK, <sup>4</sup>Mitsubishi Corporation Technos Co., Ltd., <sup>5</sup>Nihon University