

## DESIGN OF THE 2-4MHZ PREBUNCH SYSTEM AT TRIAC

Kazuaki Niki<sup>1,A)</sup>, Shigeaki Arai<sup>B)</sup>, Hironobu Ishiyama<sup>A)</sup>, Masashi Okada<sup>A)</sup>,  
Hiroyuki Makii<sup>C)</sup>, Hiroari Miyatake<sup>A)</sup>, Yutaka Watanabe<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> KEK, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, <sup>B)</sup> RIKEN, Wako, Saitama 351-0198, <sup>C)</sup> JAEA, Tokai, Ibaraki, 319-1195

### Abstract

$^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$  experiment is planned at TRIAC. An intense pulsed  $\alpha$  beam with the width of less 10ns and the interval between 250ns and 500ns is required for this experiment. Because the SCRFQ, which is one of the TRIAC accelerators, has a radio frequency of 26MHz, the bunch interval becomes 38.5ns. In order to make the bunch interval of 250ns or more, the pre-bunch system, which consists of pre-buncher and the chopper with a variable frequency of 2-4MHz, is considered at the upstream of the SCRFQ. It is designed as the bunching beam profile becomes like a pseudo saw-tooth wave, which is obtained by applying the RF voltage with three harmonic frequencies for two gaps with non-Pi mode of the pre-buncher. The design of this system and the results for the beam simulation of the pre-buncher and SCRFQ are described in this report.

## TRIACでの2-4MHzプリバンチシステムの設計

### 1. はじめに

主系列星内の水素燃焼後のヘリウム燃焼殻で起こる $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ の反応率は、以降の重元素組成比を左右する重要な物理量である。原科研タンデム施設内に設置されているTRIAC(Tokai Radioactive Ion Accelerator Complex)の加速器を使ってこの反応断面積を測定する計画が現在進められている。<sup>[1]</sup> TRIACの加速器はq/Aが1/28以上のイオンを2keV/uから178keV/uまで加速する26MHzの分割同軸型高周波四重極線形加速器(SCRFFQ)とq/Aが1/10以上のイオンを140keV/uから1.4MeV/uまでエネルギー可変で加速できる51MHzの加速空洞4台からなるIH型線形加速器(IH)から成る。 $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ の実験では中性子のバックグラウンドと測定する $\gamma$ とを十分良く分離するために250ns~500nsの間隔で10ns程度にバンチした高強度 $\alpha$ パルスビームを作り、バックグラウンド比を1/1000以下の可能な限り小さくすることが要請されている。しかし通常TRIACの加速器はイオン源からの2keV/uのビームをまず26MHzのSCRFFQで加速するため、バンチ間隔は約38.5nsとなる。これを250ns以上のバンチ間隔にするためSCRFFQの前段に2~4MHzの周波数可変のプリバンチャーを設置したシステムを構築することにした。

### 2. プリバンチャー

プリバンチャーの配置図を図1に示す。プリバンチャーは設置場所の制限からSCRFFQの上流92.6cmの場所に置くことにした。効果的なバンチングを考えると、さらに上流に置きたいが偏向電磁石が直上流にある為此の位置となった。また後で述べるようにS/Nを良くするためビームチョッパーも設置する必要がある。<sup>[2]</sup> 250ns~500nsの間隔で10ns程度にバ

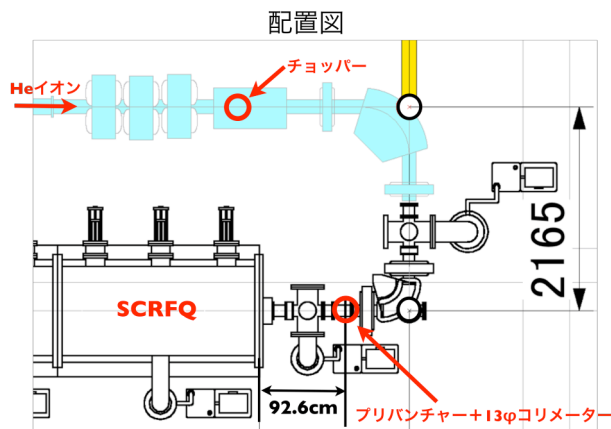


図 1: プリバンチャーの配置

ンチされたビームを作るということは、SCRFFQの周波数が26MHzでバンチ間隔が約38.5nsであるのでビームをSCRFFQに入射する前にこのSCRFFQの周期の7~13倍(整数倍)のバンチ分をSCRFFQの1周期分である38.5nsに集めることになる。具体的な周期を検討するため、図2に示すようなSCRFFQのバンチ13個分に相当する2MHz(周期500ns)とバンチ7個分に相当する約3.7MHz(周期269ns)の2つで検討することにした。500ns(又は269ns)に広がっているSide bunch分をCenter bunchに効率よく集めることがこのプリバンチャーの目的である。

このプリバンチシステムに要求される条件は、1) 2~4MHzの周波数可変であること、2) バンチング効率ができるだけ良いこと、3) Center bunchの粒子数に対してSide bunchの数が1/1000以下で可能な限り小さいこと(S/Nが良いこと)である。ま

<sup>1</sup> E-mail: kazuaki.niki@kek.jp

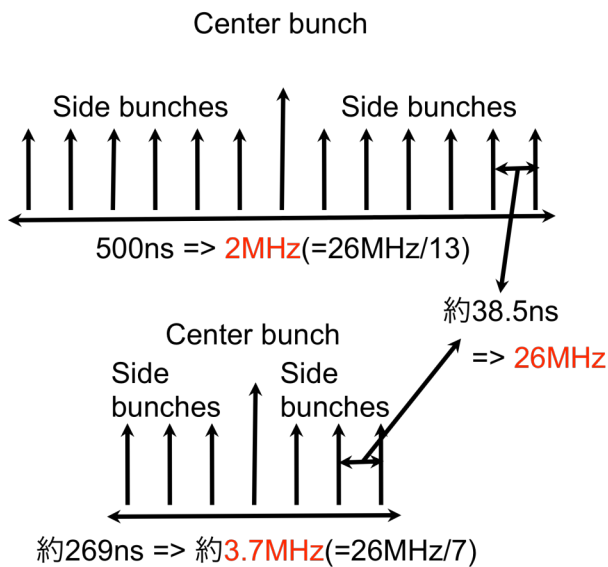


図 2 : バンチの集積

ずバンチング効率を良くするためプリバンチャーに印加する電圧は3つの周波数のRFを合成して得られる疑似鋸歯状波とした。また最初は1ギャップの電極に高周波をかけてバンチングすることを考えたが、周波数が低いため周囲の構造と  $\beta \lambda / 2 = 15.5\text{cm}$  (2MHzの場合) が同程度となり漏れ電場の影響で効率的なバンチングができないことが分かった。そのため漏れ電場の影響がなく、又電力的にも良い2ギャップ構造を基本とした。疑似鋸歯状波のモデルは以下のような式で示される。

$$\text{基本波} + 1/3 \times 2 \text{倍波} + 1/9 \times 3 \text{倍波} \quad (1)$$

ここで基本波は2MHzと3.7MHz等となる。3つのRFを合成したバンチングをするには2ギャップ構造のバンチャー3台に独立なRFを印加して運転する方法があるが、2ギャップのバンチャー1台で同等の性能を得る方法を考えた。通常の2ギャップで間隔が  $\beta \lambda / 2$  の場合は基本波では  $\pi$ モードとなるが2倍波は  $2\pi$ モードとなり印加電圧が2つのギャップで相殺されてしまい疑似鋸歯状波はできない。そこでギャップ間隔を  $\beta \lambda \theta / 2\pi$  ( $\theta$ は2ギャップの位相差) とし、第1ギャップにかける電圧を以下とする。

$$\sum_{i=1}^3 a_i \sin(i\omega t + \phi_i) \quad (2)$$

第2ギャップでビームが受ける電圧は符号が反対で位相が  $\theta$  だけ進んだものとなる。そこで式(2)の  $a_i$  と  $\phi_i$  を以下の式(3)のように撰べば2つのギャップで受ける電圧の和が式(1)となり、結果としてビームは2ギャップを通過した後に疑似鋸歯状波で得られるバンチングと同じ効果を得る。

$$\phi_i = -\frac{(\pi + i\theta)}{2}, a_i = \frac{1}{2 \cdot 3^{(i-1)} \sin(-i\theta/2)} \quad (3)$$

$(i=1, 2, 3)$

さらに  $\theta$  を140度、220度に撰ぶと3つの合成波の振幅の二乗の平均が最小となる。このときの電力は1ギャップの電極に疑似鋸歯状波を印加した場合の約  $1/3$  となる。

実際の設定では2MHzの場合に140度分のギャップの間隔  $\beta \lambda / 2 \times 140 / 180 = 12.05\text{cm}$ 、3.7MHzの場合に220度分のギャップの間隔  $\beta \lambda / 2 \times 220 / 180 = 10.20\text{cm}$  で考えている。これらの設計指針をもとに図3のようなプリバンチャーチェンバーを製作した。ステップモーターで真空容器のベローズフランジを動かし、片側のギャップが可動となっている。電極部のギャップの間隔は8cmから16cmまで可変となっている。実機のドリフトチューブは円筒に8本の串刺し棒を差し込んで製作された。串刺し棒の影響は電場分布に関してはSuper Fishで計算して問題ないと考えているが、RFコンタクトの具合は実機の試験結果によっては改善が必要となる。

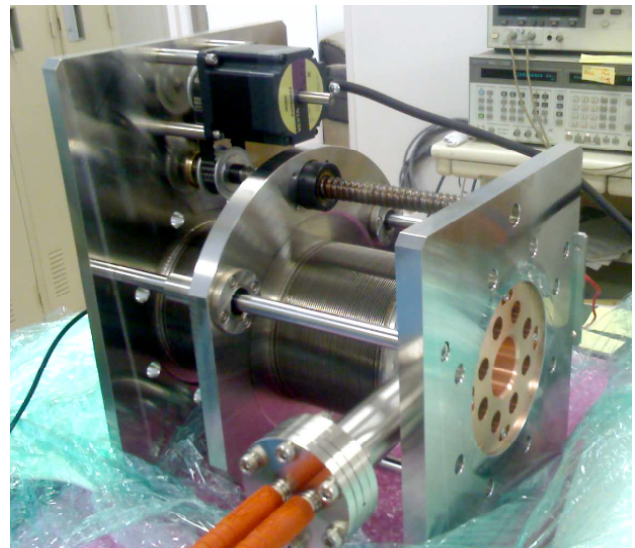


図 3 : プリバンチャーチェンバー

### 3. ビームシミュレーション

#### 3.1 プリバンチャー

2ギャップのプリバンチャーの効果をTRACEPでシミュレートしてみた。TRACEPはビーム輸送系用のコードで線形加速器の設計コードであるPARMILAの一部を利用し、追加を行ったものである。バンチャーキャビティ用の要素を入れることができるので、3つのハーモニック数をプリバンチャーのギャップ間隔だけ離れた場所に置いて疑似鋸歯状のバンチングが得られるかをみた。結果を図4に示す。縦軸は  $\alpha$  粒子のエネルギー広がり MeV/u で示して

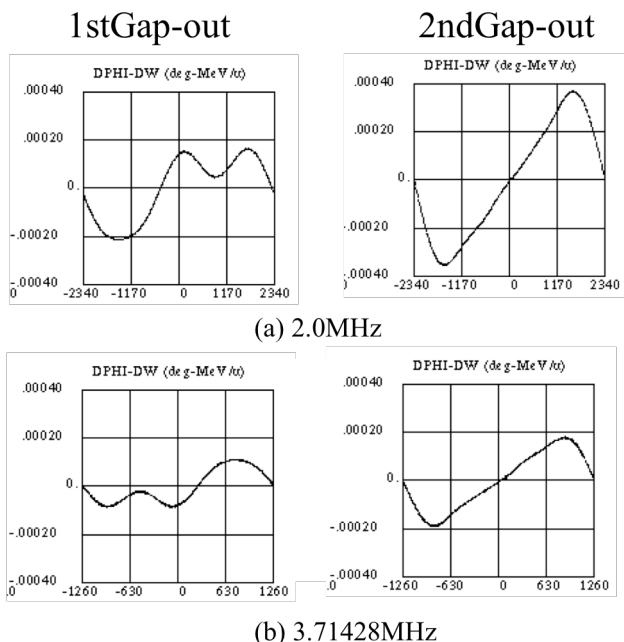


図 4 : バンチャーシミュレーション

いる。ΔT = 0 がエネルギー2keV/uに対応している。横軸は位相広がりを示す。SCRFAQの26MHzの位相で規格化されている。図4の(a)が2.0MHz、(b)が3.7MHzの場合である。いずれの場合も第2ギャップの出口で疑似鋸歯状の波形が得られている。2つのギャップ間のドリフトスペースの影響は小さい。

### 3.2 LEBT+SCRFAQ

図1のプリバンチャー上流の偏向電磁石からプリバンチャー、アインツェルレンズを経由してSCRFAQの入口までのLEBTをTRACEPで、その後のSCRFAQ出口までをPARMTEQでシミュレーションした。結果の例を図5に示す。1000個の粒子は2MHzのプリ

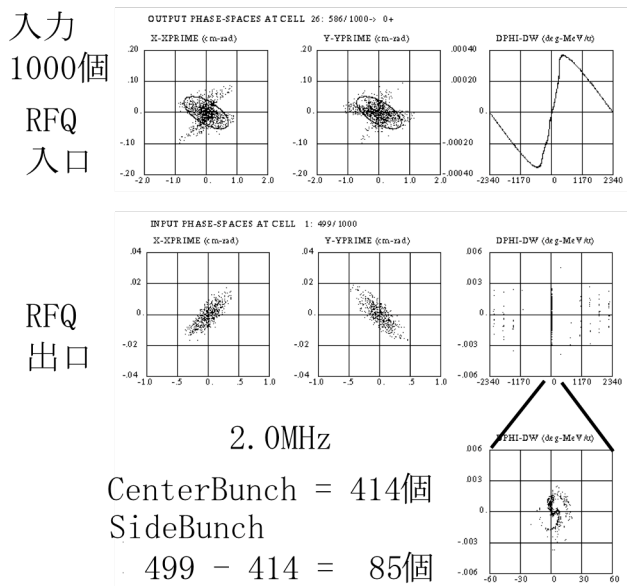


図 5 : バンチャーとSCRFAQのシミュレーション

バンチャーでバンチングされ、SCRFAQの出口ではCenter bunchに41%が集まる。プリバンチャーが無ければ7.7%となるはずなのでバンチングファクターとしては5.3倍となる。しかし8.5%がSide bunchに残るのでS/Nとしては約1/5でこのままでは実験に使えない。プリバンチャーに入射する前に±120度以上のビームをチョップすることでSide bunchに残る数を1/1000以下にすることができる。<sup>[2]</sup> また3.7MHzの場合はCenter bunchに63%集まるが、16%がSide bunchに残る。この場合も同様にチョッパーでS/Nを良くする必要がある。

## 4. インピーダンス変換器とRF電源

プリバンチャーの電極には最大で約1kVのRF電圧をかける必要がある。電源電力を少なくするため、RF電源とプリバンチャー本体の間にトランスと抵抗からなるインピーダンス変換回路を置くことにした。図6にその回路シミュレーションの例を示す。負荷静電容量は計算コードPOISSONで約17pFと評価した。結果電源電力は1kW未満と評価した。またRF増幅器の入力RF源として3波発生器と合成器の組み合わせではなくて任意波形発生器を使う方向で進めている。

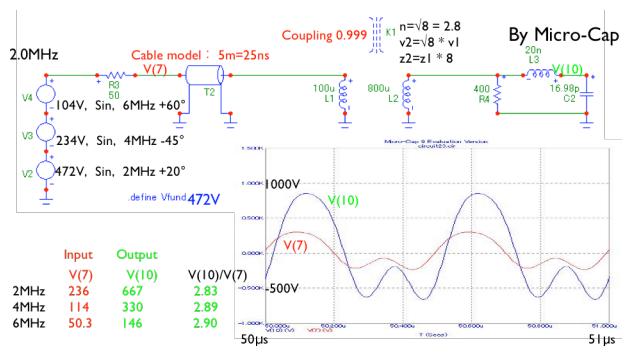


図 6 : RFフィード部の回路シミュレーション

## 5. まとめと今後

2ギャップ間の位相差をπからずらすことで2ギャップのプリバンチャー1台で疑似鋸歯状波相当のバンチングをすることができる。またチョッパーを組み合わせればS/Nを1/1000以下にすることが期待できる。

現在実機プリバンチャー、インピーダンス変換器、RF電源と任意波形発生器を組み合わせた試験を進めている。プリバンチャー実機の静電容量は36pF程度と計算で評価していた値の2倍ほどであった。今後回路系の周波数特性等を測定し、9月以降にビーム試験をする予定である。

## 参考文献

- [1] 牧井宏之. Private Communication. H. Makii et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 547, 411, 2005.
- [2] 岡田雅之. 本学会Proceedings