

# MEASUREMENT OF ISOCHRONISM OF RIBF CYCLOTRONS

Ryo Koyama<sup>1, A), B)</sup>, Masaki Fujimaki<sup>A)</sup>, Nobuhisa Fukunishi<sup>A)</sup>, Akira Goto<sup>A)</sup>, Masatake Hemmi<sup>A)</sup>, Masayuki Kase<sup>A)</sup>, Naruhiko Sakamoto<sup>A)</sup>, Tamaki Watanabe<sup>A)</sup>, Kazunari Yamada<sup>A)</sup>, and Osamu Kamigaito<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science

2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198

<sup>B)</sup> SHI Accelerator Service Ltd.

1-17-6 Osaki, Shinagawa, Tokyo, 141-0032

## Abstract

The 6-20 phase probes (PPs) are installed in the all cyclotrons of RIBF for non-destructive measurement of their isochronism. We have measured isochronism by observing the zero-cross points of bunch signals from PPs using an oscilloscope for nearly 20 years. We have developed new measuring system of isochronism using a lock-in amplifier for commissionings of 3 new cyclotrons started at 2006. In order to investigate the consistency of those two measuring methods of isochronism, we measured the isochronism using an oscilloscope and lock-in amplifier simultaneously. Additionally, we have performed Fourier analysis to bunch signals observed using an oscilloscope to investigate the difference of beam phases between frequency components.

## RIBFにおけるサイクロトロンの等時性測定

### 1. はじめに

理研RIビームファクトリー(RIBF)<sup>[1]</sup>は4基のリングサイクロトロン(RRC, fRC, IRC, SRC)とその入射器である線形加速器RILAC及びAVFサイクロトロンで構成される。全てのサイクロトロンにはその動径方向に6個～20個の静電誘導型の位相プローブ(Phase Probe: PP)が配置され、これらを用いて非破壊に検出したビームバンチ信号を元に等時性磁場調整を行っている。図1.1にRIBFの構成の概念図及びサイクロトロンそれぞれのPPの数を示す。

RIBFでは2つの等時性測定方法を採用しており、一つは1986年のRRC稼働以来20年以上実施して来た方法で、PPからの信号をオシロスコープで観測し、そのゼロクロス点を基準とする方法であり、AVFとRRCでは現在もこの方法でのみ等時性測定を行っている。もう一つは2006年のfRC, IRC, 及びSRCのコミッショニング開始に合わせて開発したロックインアンプ(LIA)を用いたシステムである<sup>[2]</sup>。現在でもfRC, IRC, SRCの等時性測定はLIAシステムのみで行っているが、20年以上の経験のあるオシロスコープによる方法との整合性は予てより疑問であった。また、LIAは基本的にビームバンチ信号の1周波数成分のみを測定するため、他の周波数成分のビーム位相との関係も疑問であった。これらの疑問を解決すべく、オシロスコープとLIAで同時に等時性を測定し、尚かつオシロスコープで取得したビームバンチ信号をフーリエ解析し基本波の10倍波までのビーム位相を調べた。本稿ではこれらを通してサイクロトロンの等時性の測定方法による違いを考察する。

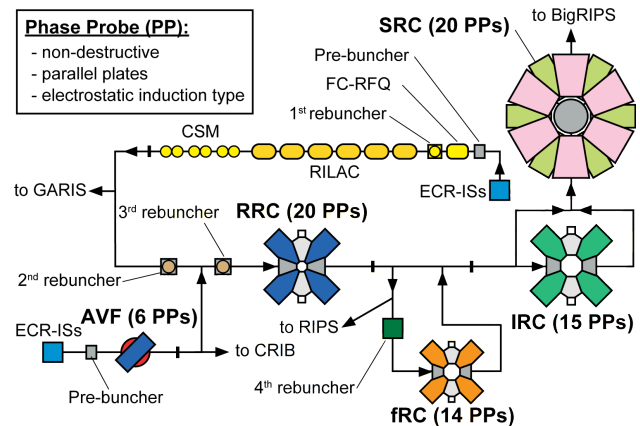


図1.1: RIBFの構成の概念図。

### 2. 2つの等時性測定方法

#### 2.1 位相プローブ

RIBFの全てのサイクロトロンの等時性は各サイクロトロンのバレー部に設置された位相プローブ(Phase Probe: PP)によって測定される。PPは平行平板電極でそのギャップをビームが通過する際に生じる誘導電荷をビームバンチ信号として検出する非破壊型プローブである。RIBFの各サイクロトロンのPPの数、寸法(径方向×周方向)、及びギャップを表2.1に示す。尚、各サイクロトロンの一内周のPPをPP#1と呼び、外周に向かいその番号が増えてPP#2, PP#3...と呼んでおり、本稿でもそれに倣うこととする。

<sup>1</sup> E-mail: rkoyama@riken.jp

表2.1 : RIBFサイクロトロン位相プローブ概要

サイクロトロン	設置数 [対]	寸法 [mm] (径方向×周方向)	ギャップ [mm]
AVF	6	80×80	25
RRC	20	100×100	26
fRC	14	100×100	26
IRC	15	#1~5: 70×80 #6~15: 70×100	26
SRC	20	73×123	30

## 2.2 ゼロクロス点観測

ゼロクロス点を観測する方法は1986年のRRC稼働以来20年以上行われてきた方法である。この方法はPPからの信号をオシロスコープで観測し、ビームオンとオフそれぞれの波形の交点をビームバンチの電荷中心と見なす。実際にはサイクロトロンの一側内側のPPのゼロクロス点を基準とし、他のPP信号のゼロクロス点がどの程度ずれているかを観測する。図2.1にPP信号をオシロスコープで観測した例を示す。

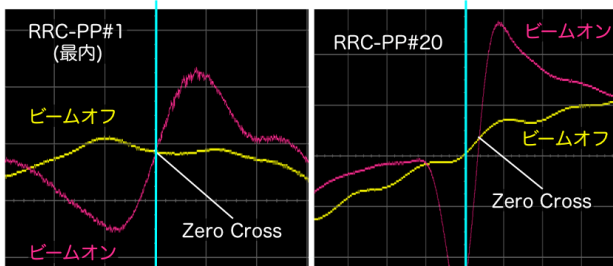


図2.1 : オシロスコープによる等時性測定例。

尚、現在でもAVFとRRCはこのゼロクロス点観測によってのみ、等時性測定を行っている。

## 2.3 ロックインアンプによる等時性測定

ロックインアンプ(LIA)は被測定信号と基準信号の2つを要し、被測定信号のうち、基準信号の周波数と等しい周波数成分のみを検波、及び増幅して出力する。今、 $V_I(t) = V_I \sin(\omega_R t + \theta_I)$ で表される被測定信号と、 $V_R(t) = V_R \sin(\omega_R t + \theta_R)$ で表される基準信号を考える。ここで $V$ 、 $\omega$ 、 $t$ 、及び $\theta$ はそれぞれ振幅、周波数、時間、及び位相である。これら2信号をミキサーによって掛け合わせると、以下の出力 $V_M$ を得る。

$$V_M = V_I V_R \sin(\omega_R t + \theta_I) \sin(\omega_R t + \theta_R) = 1/2 V_I V_R \cos(\theta_R - \theta_I) + 1/2 V_I V_R \sin(2\omega_R t + \theta_R + \theta_I). \quad (2-1)$$

このうち、高周波成分( $2\omega_R$ )となる第二項はローパスフィルター(LPF)によって除去出来るので、第一項、即ち基準信号と被測定信号の位相差の余弦波に比例したDC成分のみが得られる。これが位相検波の基本原則である。我々の採用したStanford Research System社製のLIA-SR844(帯域: 25 k~200 MHz、ダイナミックリザーブ: 80 dB)は、基準信号とは直交する第二の基準信号を内部で生成し、この信号と被測定信号とで上記同様の演算を行い、直交成分も得る。これら同相・直交成分を元に、Digital Signal Processor(DSP)によって被測定信号の振幅、及び基準信号との位相差が演算される(図2.2参照)。

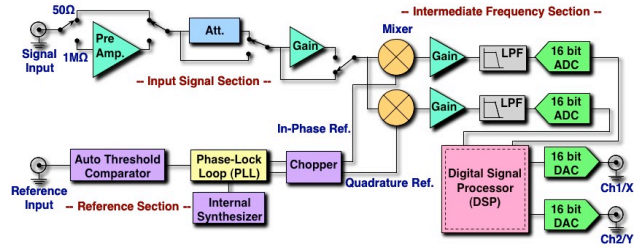


図2.2 : LIA-SR844のブロックダイアグラムの概略図。

この様に基準信号に対する相対位相を出力する機能を利用し、全てのPP信号の位相を測定し、それらの相対位相から等時性の情報を得る方法である。

PPはビームバンチ信号だけではなく、加速キャビティからの漏洩高周波も検出してしまいうため、LIAのロックイン機能は重要である。図2.3はSRCのPP#1からの信号をスペクトラムアナライザーで測定した例である。ビームオフ状態でも見えるピークが加速キャビティからの漏洩高周波であり、低次の1f, 2fなどはビーム信号が埋もれてしまっている。一方、矢印で示した辺り等のS/Nの良い成分を選んで測定すれば、バックグラウンドの影響を極力抑えた精度の良い測定が可能となる。

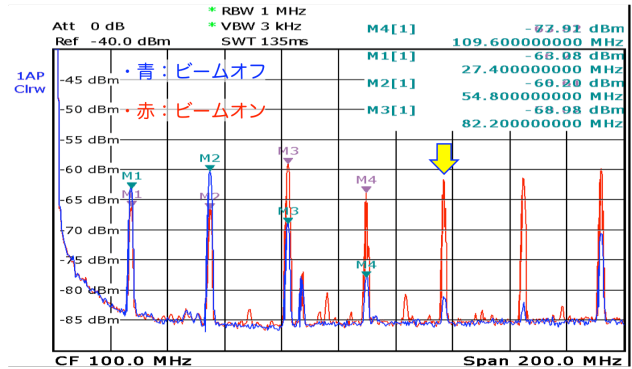


図2.3 : SRCのPP#1からの信号をスペクトラムアナライザーで測定した例。

尚、現在もfRC, IRC, SRCはこのLIAシステムによってのみ、等時性測定を行っている。

## 3. 等時性の比較測定方法とフーリエ解析

### 3.1 フーリエ解析の目的

前章で述べたように2006年より今日まで、fRC, IRC, SRCはLIAシステムによってのみ等時性測定を行っているが、予てより以下の2点が疑問であった。

- 1) オシロスコープによるゼロクロス点観測方法との整合性: 20年以上オシロスコープを用いて実際に波形を目視しながらの測定であり直感的である為、その結果に説得力があるのに対し、LIAでは数値的に測定される為、両者の整合性を調べることにより信頼性を得る必要があった。
- 2) LIA測定における、測定周波数以外の周波数成分のビーム位相: LIAは基本的に外部リファレンス

信号に使用する1つの周波数成分しか測定しない。従って、測定する周波数成分によって等時性に違いが出るのかどうかを調べる必要があった。

- 1) を調べる為にPP信号を2つに分け、オシロスコープとLIAで同時に等時性を測定した。また2)を調べる為に、バンチ信号をフーリエ解析して得られる10倍波までの周波数成分の位相を算出した。本来、PP信号を複数に分け、外部リファレンスを変えた複数台のLIAで等時性を測定すればLIAの測定周波数による等時性の違いを調べることが出来るが、PP信号レベルによる分割の問題、用意できるリファレンス周波数の限界、及びフーリエ解析という周知の数学的手法による明快さ等から今回はこの手法を採用した。

### 3.2 フーリエ解析の手順

フーリエ解析は以下の様な手順で行った。全て自前のLabVIEWプログラムによって半自動処理される。

- 1) オシロスコープよりビームバンチ信号データ取得：データ長は約1.2周期分でデータ点数は500点。このデータ点数はRIBFで日常使用しているオシロスコープ(Agilent DSO6000 series 500 MHz)の仕様因る。
  - 2) スプライン法によるデータ補間：加速周波数を基本波とする所望の周波数成分を得る為にオリジナルデータに補間を施した。尚、事前調査として自作の周期関数、即ち位相の解っている周期関数に対して最近傍、線形、スプライン、及びエルミート補間の4種で補間を施した後にフーリエ解析したところ、スプライン法の位相再現性が最も良かったのでこの補間方法を採用した。
  - 3) フーリエ変換：補間後のビームバンチデータにFast Fourier Transform (FFT)を施し、基本波から10倍波までの周波数成分の位相を算出した。
- この一連の処理を全てのPPに対して行い、基本波から10倍波までのFFT位相から等時性を得る。

### 3.3 測定システム

本測定に使用したシステムのブロックダイアグラムを図3.1に示す。

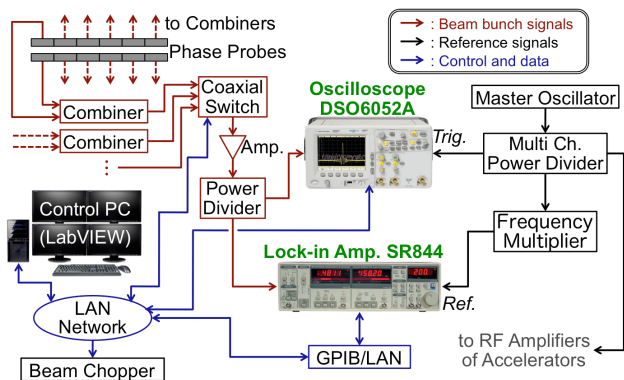


図3.1：測定システムのブロックダイアグラム

図3.1に示した通り測定システムは1) ビームバンチ信号、2) リファレンス信号、及び3) 等時性データ

取得で構成され、これらについて以下に説明する。

- 1) ビームバンチ信号：ビームバンチ信号は平行平板型のPPによって非破壊に検出される(2.1節参照)。動径方向に並んだPPそれぞれの平行平板の上下で検出した信号はコンバイナーによって結合された後、同軸スイッチへと入力され、これらから1つずつ選択してビームバンチ信号を観測する。RIBFの5台のサイクロトロンそれぞれに同軸スイッチが設置されている。尚、3.1節で述べた測定の為、スイッチ出力を-6dBパワーディバイダー(HUBER+SUHNER/4901.01)で分割し、オシロスコープとLIAそれぞれに入力した。
- 2) リファレンス信号：各PP信号の相対的なタイミングを元に等時性の情報を得るので、測定には基準となる信号(リファレンス信号)が必要となる。このリファレンス信号には加速器の加速高周波の元となるマスターオシレータ(Agilent E4426B)の出力をサムウェイ社製のマルチチャンネルパワーディバイダーで複数に分割したものを使用し、オシロスコープの外部トリガー信号及びLIAの外部リファレンス信号とした。LIAにおいては2.3節で述べた通り、S/Nの良い周波数成分の測定を行うため、逡倍器を用いて基本波の整数倍の外部リファレンス信号を得た。
- 3) 等時性データ取得：等時性データの取得はLabVIEWプログラムに因って半自動で行われる。これには測定PPを切り替える為のスイッチ制御、オシロスコープの設定及び波形データ取得、波形データのFFT解析、LIAの設定と位相データ取得、及びバックグラウンド差し引きの為のビームチョッパー制御が含まれる。

## 4. 測定結果

### 4.1 FFTの位相成分の比較

始めにSRCの等時性測定結果を図4.1に示す。尚、この測定時におけるSRCの加速ビーム条件は、加速粒子： $^{14}\text{N}^{5+}$ 、加速周波数：27.4 MHz、入射エネルギー・ビーム量：88.4 MeV/u・600 enA、取出しエネルギー・ビーム量：250 MeV/u・300 enAであった。また、S/Nの都合によりLIAではSRC加速RF基本波の3倍波(3f)成分を測定した。

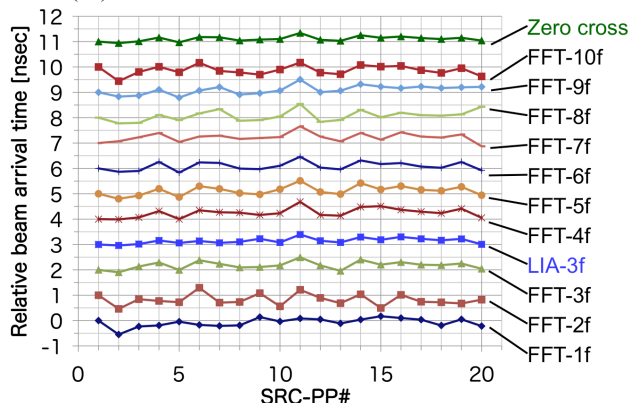


図4.1：SRCの等時性比較測定結果。



図4.1の横軸はSRCのPP番号、縦軸は相対的なビーム位相を時間(nsec)で表している。比較の為、1~10倍波のFFT位相に加え、ゼロクロス点、及びLIA測定位相をそれぞれ1 nsecずつオフセットしてプロットした。多少ばらつきはあるが、すべて $\pm 0.5$  nsec (基本波の位相角度で $\pm 5^\circ$ )程度の範囲に収まっており、10倍波までのどの周波数成分で測定してもこの程度の精度は達成されることが確かめられた。

RRCの測定結果は図4.2の様になった。この時の加速条件は、加速粒子： $^{40}\text{N}^{17+}$ 、加速周波数：28.1 MHz、入射エネルギー・ビーム量：5.2 MeV/u・1500 enA、取出しエネルギー・ビーム量：95 MeV/u・900 enAであった。また、LIAではRRC加速RF基本波の2倍波(2f)成分を測定した。

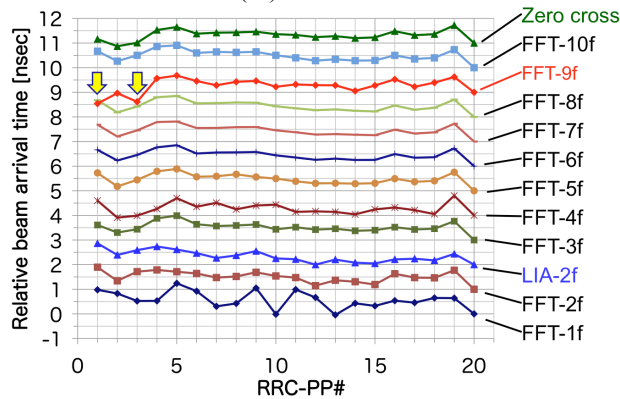


図4.2：RRCの等時性比較測定結果。

RRCにおいても $\pm 0.5$  nsec (加速RF基本波の位相角度で $\pm 5^\circ$ )程度の範囲に収まっており、10倍波までのどの周波数成分で測定してもこの程度の精度は達成されることが確かめられた。但しPP#1と#3のFFT-9f位相(图中矢印)が傾向から外れた。そこでPP-#3信号のスペクトルと波形を調べたところ、図4.3-aの様に9f成分の強度が突出し、同図-bの様に波形上でもはっきり9f成分が確認された。PP#1においても同様なスペクトル及び波形であった。尚、比較の為、他の周波数成分と一貫性が見られたPP#2のスペクトル及び波形も一緒に示した。

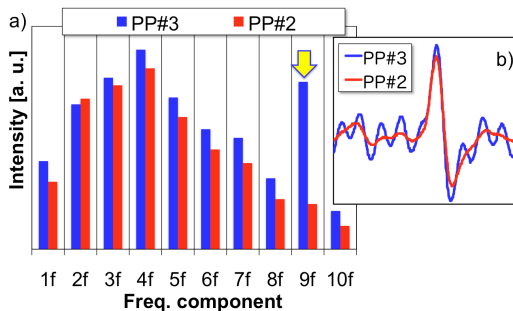


図4.3：RRC-PP#2と#3のバックグラウンド差し引き後のa)周波数スペクトル、b)オシロスコープ波形。

同図a, b共にバックグラウンドを差し引いたプロットであるので、ビーム起因で測定系に9fが発生し、ビーム位相算出に誤差を与えていると考えているが、発生原因は解おらず、今後解決すべき問題である。

#### 4.2 FFT・LIA・ゼロクロスの比較

FFT・LIA・ゼロクロスの3つの等時性測定方法の比較の為、図4.4にFFTとLIAの同じ周波数成分(SRCは3f, RRCは2f)及びゼロクロスを重ねてプロットしたものを示す。4.1節で示したデータと同じデータであるが、相対ビーム位相を加速RF基本波の位相角度に直してある(同図縦軸)。

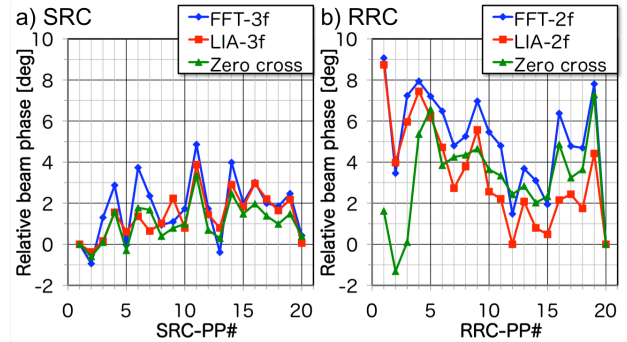


図4.4：a)SRC及びb)RRCの等時性のFFT・LIA・ゼロクロス3測定方法の比較。

SRCではおよそ $2^\circ$ 程度の差でFFT・LIA・ゼロクロスの3測定方法で等時性の一致が見られたが、RRCではPP#1と#3の9f高調波問題(4.1節参照)を除いてもSRCと比べてFFT及びLIAとゼロクロスとの一致の程度が悪かった。このRRCの等時性測定におけるFFT及びLIAとゼロクロスとの不一致の理由を調べる為、バンチ波形の様子をSRCとRRCで比較してみると、図4.5のようになった。

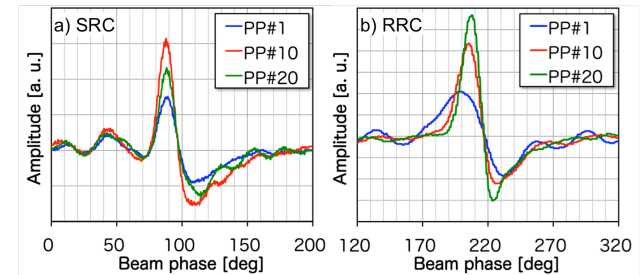


図4.5：最内(#1)・中間(#10)・最外(#20)のPP信号をオシロスコープで観測した波形(a) SRC, b) RRC)。

この様にSRCでは(周方向の)バンチ長が最外周までほぼ一定であるのに対し、RRCでは内側から外側に向かって徐々にバンチ長が短くなり、最外(#20)のバンチ長が最内(#1)の60%程になることが解った(4.4節も参照)。また、SRC・RRCのバンチ波形共にtailを引いた非対称波形となっている。オフラインテストによっても確かめたが、ガウシアン一階微分波形等の対称関数の場合、そのゼロクロス点が一致していれば波形幅を変えてもその位相は各周波数成分共に保存される。一方非対称波形の場合、ゼロクロス点を一致させていても波形幅を変えるとその位相は各周波数成分で差が現れる(フーリエ変換による各周波数成分がsinとcosとが混在した関数で記述される為)。従ってRRCにおいてはバンチ長縮小に伴う各周波数成分の位相の動向を補正する必要があると考えた。

### 4.3 RRCにおけるバンチ長縮小に伴う位相の補正

この補正を行うにはバンチピーク両サイド部分を除去し、客観的に観測バンチ波形を成形する必要があったので、以下の手順を採用した。

- 1) オシロスコープ観測バンチ波形(微分波形)を積分。
- 2) 積分波形を3-Gaussianで最小2乗fitting。
- 3) fittingした3-Gaussian波形を再び微分。
- 4) これをPP#1~#20全てに対して行う。
- 5) 得られた20個の微分波形のゼロクロス点を合わせた上で、3.2節で述べた手順でフーリエ解析を行い、10倍高調波までの各PPの位相を算出。

これらによって図4.6の様な結果が得られた。横軸がRRC-PP番号、縦軸がRRC加速RF基本波に直した相対位相である。この図はゼロクロス点が一致していてもバンチ長が変化(縮小)するに伴い現れる位相の動向を示しており、求める補正位相となる。

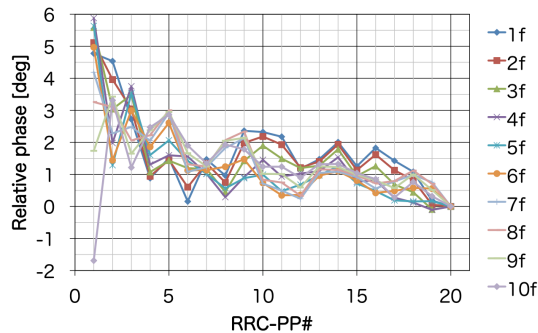


図4.6：ゼロクロス点一致の下、バンチ長縮小に伴う各周波数成分の位相の動向。

得られた補正位相を図4.4-bのFFT-2fから差し引いて補正を施すと図4.7が得られた。ゼロクロスとの不一致が改善され、PP#1と#3の9f高調波問題(4.1節参照)を除けば、ゼロクロスとの差は最大でも2°程度とSRCの結果(図4.4-a)と同程度となった。

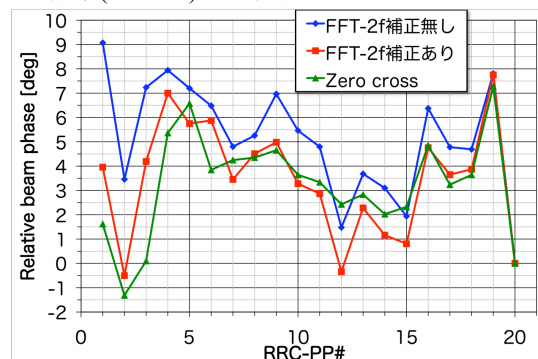


図4.7：バンチ長縮小効果補正前後のRRC等時性比較。

### 4.4 バンチ長が縮小されて観測される原因

本稿で述べた測定以外の加速条件においても、RRCでは内側から外側に向かってバンチ長が縮小される傾向にある。オシロスコープで観測する段階では縮小されて見えるが実際にバンチ長が縮小されているかどうかは現段階では明確でない。バンチ長が縮小されて観測される理由は現段階では以下の2つ

が兼ね合わさった結果と解釈しているが詳しい調査は行っておらず、今後の課題である。

- 1) PPの応答特性の差：SRCの $\beta$ ゲイン1.5に対してRRCは $\beta$ ゲイン4と相対的に大きい為、これによる周方向(縦方向)のバンチ長の拡大もRRCの方が大きくなる。一方で周方向のPPサイズはRRCの方がSRCよりも短い(表2.1参照)。即ち周方向バンチ長に対する周方向PPサイズの相対的關係がRRCの方がSRCよりも内周と外周で差が大きい為、PPの応答の差が現れている可能性がある。
- 2) 高周波磁場による位相圧縮効果：内周から外周に向かって電圧勾配を付けることで高周波磁場を形成し、位相圧縮効果を狙っている<sup>[3]</sup>。本稿の周波数帯域での電圧勾配はSRCで1.2に対してRRCは1.5と相対的に大きく、位相圧縮効果も比較的大きく効いた結果が現れた可能性がある。

## 5. まとめと今後の課題

- SRCとRRCの等時性をオシロスコープとLIAで同時に測定し、従来のゼロクロス点観測に因る方法とLIAの結果を比較した。結果、LIAとゼロクロスで測定した等時性が2°程度の差で一致が見られ、整合性の確認が出来た。但し、RRCについてはバンチ長縮小に伴う位相の動向を補正する必要があった。しかしながら完全な一致とまではいかず、解析方法を工夫するなど、更なる解析が必要である。
- バンチ波形をフーリエ解析することにより10倍波成分までの位相を算出した。得られた等時性はSRC、RRC共にすべて $\pm 0.5$  nsec (基本波の位相角度で $\pm 5^\circ$ )程度の範囲に収まっており、10倍波までのどの周波数成分で測定してもこの程度の精度は達成されることが確かめられた。
- RRCではビーム起因の高調波(本測定では9倍波)が測定系に乗る現象が確認され、ビーム位相算出に大きな誤差を与えることが解った。又ゼロクロス点の決定にも影響を与えていると予想される。他の加速条件ではどうなるかなど調査が必要である。
- バンチ長縮小に伴うLIAの応答も調べる必要がある。アナログのビームバンチ模擬信号を生成して、LIAの応答を調査する。
- 現在、全ての等時性測定は加速器本体室から数百m離れたコントロール室で行っている。この過程でバンチ信号は減衰等を経るが、その程度はバンチ信号を形成する周波数成分によって異なる。従ってコントロール室で観測する波形及びゼロクロス点は加速器本体室でのそれとは異なる可能性があり、調査が必要と考えている。尚、1つの周波数成分のみを測定するLIAではこの点が問題にならない為、ゼロクロス点との不一致が解決されれば信頼性のある等時性測定器となると考えている。

## 参考文献

- [1] Y. Yano, Nucl. Instr. & Meth. B261 (2007) 1009.
- [2] R. Koyama et al., Proc. of PASJ4-LAM32, Wako-shi Saitama, Japan (2007), WP38.
- [3] T. Fujisawa et al., Nucl. Instr. & Meth. A 292 (1990) 1.