

DEVELOPMENT OF BEAM PHASE MEASURING SYSTEM USING LOCK-IN AMPLIFIER FOR RIBF

Ryo Koyama^{1, A), B)}, Tamaki Watanabe^{A)}, Masaki Fujimaki^{A)}, Nobuhisa Fukunishi^{A)},
Yasuteru Kotaka^{A), B)}, Masayuki Kase^{A)}, Yasushige Yano^{A)}

A) RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198

B) Sumitomo Heavy Industries Accelerator Service Ltd., 1-17-6 Osaki, Shinagawa, Tokyo, 141-0032

Abstract

In the RIBF, we have to tune an isochronous field of up to four cyclotrons (RRC, fRC, IRC and SRC). In order to improve the operating efficiency, automated tuning system of an isochronous field instead of the conventional manual tuning using an oscilloscope had been required. In response to this request, we have developed a new beam phase measuring system using lock-in amplifier (LIA) as a first step. Nowadays, the LIA system is used for the phase tuning of the rebuncher and the monitoring of beam phase and intensity as well as the tuning of an isochronous field.

In this proceedings, the configuration, usage, and the acquired data of LIA system are reported.

RIBFにおけるロックインアンプを用いた ビーム位相測定システムの開発

1. はじめに

RIビームファクトリー(RIBF)計画は、水素からウランに至る全元素を345 MeV/uのエネルギーに加速し、これをRIビーム生成分離装置Big-RIPSに打ち込み、世界最大強度のRIビームを発生させ、安定線から遠く離れた不安定核の構造や宇宙における元素合成の謎を解明すること等を目的として1997年にスタートした。2006年から開始されたビームコミッションは順調に進行し、2007年3月23日に345 MeV/uのウランビーム加速に成功^[1]、同年5月から6月にかけてBig-RIPSに供給され、新RIである¹²⁵Pdの発見という成果が得られた。

RIBFにおいて345 MeV/uのウランビームを得るには、RILACを入射器としてRRC, fRC, IRC, 及びSRCの4台のサイクロトロンを使用する。サイクロトロンの等時性磁場調整は、これまでオシロスコープを用いた生信号目視による手動調整で行ってきたが、RIBFにおいてはサイクロトロンが一挙に3台も増えることから作業効率改善等を目的とし、調整・維持を自動化したシステムが望まれた。そこで我々はこの要望に応える第一ステップとして、位相検波機能を持つロックインアンプを用いたビーム位相測定システムを開発した。

2. 従来の等時性磁場調整方法

従来の等時性磁場調整ではフェーズプローブ(PP)からのビームバンチ信号を共通の外部トリガーを用いてオシロスコープで観測し(図1)、全PPにおけるゼロクロス点(ビームオフ/オン波形の交点)が一致する

ように、メイン及びトリムコイル電流値を調整する。

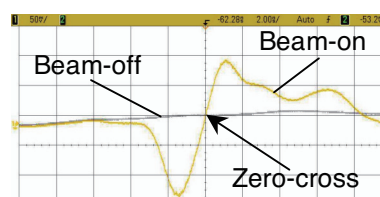


図1 : オシロスコープによるバンチ信号の観測。

即ち、全PPにおけるバンチのゼロクロス点一致すれば、バンチがPPを通過するタイミングが一致したと見なし等時性磁場成立とする方法である。RIBFのサイクロトロンは1器につきPPが15-20個ある為、この方法では手間がかかる上、調整精度の客観性にも欠ける。また、各PPにおけるバンチ通過タイミング(等時性)のデータを簡単に保存するシステムもない。更にビーム強度が小さければ信号そのものが観測出来ず、この方法は適用出来ない。このような理由から本稿の開発に至った。

3. ロックインアンプによる測定の原理

3.1 ロックインアンプ

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 , ω , t , 及び θ はそれぞれ振幅、周波数、

¹ E-mail: rkoyama@riken.jp

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2参照)。

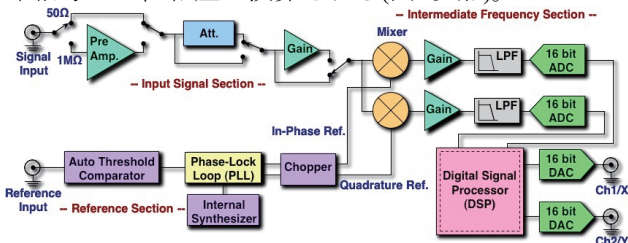


図2: LIA-SR844のブロックダイアグラムの概略図。

3.2 LIAの基準周波数の選定

図3にRRCのPP信号をスペクトラムアナライザーで観測した例を示す。共振器から漏れ出た加速高周波とその高調波がPPで検出される為にビームオフ時にいくつかのピークが図3-a)のように観測される。S/N比の良い周波数(図3中、 $2f$ など)を選定すれば、加速高調波の影響を極力抑えた測定が出来る。但し、S/N比の良い周波数は測定環境(加速周波数)によって異なる。表1に345 MeV/uのウランビーム加速(加速基本周波数: 18.25 MHz)における、現在のLIA基準周波数についてまとめる。

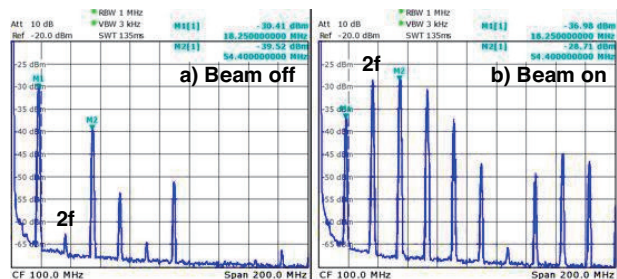


図3: RRCのPPからの信号をスペクトラムアナライザーで観測した例(a)ビームオフ、(b)ビームオン。

表1: 各加速器のLIA基準周波数

加速器	加速周波数[MHz]	LIA基準周波数[MHz]
RILAC	18.25	54.75 (3f)
RRC	18.25	36.50 (2f)
fRC	54.75	91.25 (5f)
IRC	36.50	73.00 (4f)
SRC	36.50	73.00 (4f)

S/N比の良い周波数成分を選んだとしても加速高調波レベルはゼロではない。また、ビーム強度が小さくなれば当然S/N比が悪くなる。従って、実際の測定ではビームオンの測定結果からビームオフの測定結果をベクトル的に差し引きすることでビーム成分のみを算出している。

4. 測定システムの構成

本システムのベースはLabVIEWで構築したプログラムで、LIA-SR844を始め各機器をリモートコントロールし測定を行う。図4に測定システムの構成を、表2に構成装置の内容を示す。

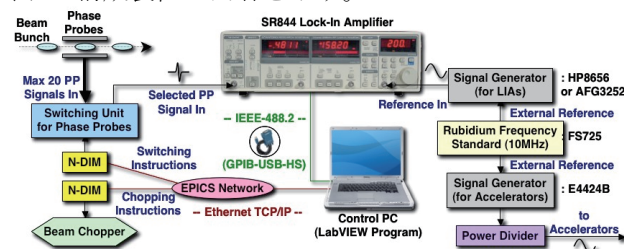


図4: LIA-SR844システムの構成。

表2: LIA-SR844システムの構成装置概要

LIA-SR844:	DSP2位相デジタルロックインアンプ。
Control PC:	LabVIEWプログラムを稼働し各機器を制御。
GPIB-USB-HS:	PCのUSBポート利用のIEEE488.2コントローラ。
N-DIM ^[2] :	PP切替スイッチ、チョッパー制御に用いる。
Phase probe:	サイクロトロン半径方向に最大20ペア並ぶ。
Beam chopper:	ノイズレベル測定時にビームをオフする。
Freq. standard:	ルビジウム10MHz発振器を使用。
Sig. generator:	ルビジウム10MHz発振器に同期して、LIA用の基準信号や加速高周波を発生させる。

5. LIA-SR844システムの利用

5.1 等時性磁場調整

等時性磁場調整には、LabVIEWプログラムを用いる。ユーザーは基準周波数や信号強度に合わせたレンジを選択して実行するだけで、各PPにおけるノイズレベル(主に加速高調波)を差し引いたLIA基準信号との位相差、及び信号強度を画面に全PPについてプロットし、測定結果をファイルに出力する。

RIBFのサイクロトロンは等時性磁場調整用のトリムコイルを10~20本有する。各コイル電流値をわずかに変化させた際に各PPでどれだけビームタイミングがずれるかは軌道計算によって一次摂動の範囲で評価出来る。この計算結果を元にLIAの測定結果のばらつきが小さくなる様に χ^2 フィットを行い、各コイルの電流補正量を評価出来る。図5はfRCの等時性磁場($^{238}\text{U}^{73+}$, 10.75 MeV/u)をこの方法で段階的に作った様子であり、5回の測定で標準偏差0.13 nsecという良好な等時性磁場が得られた事が示されている。

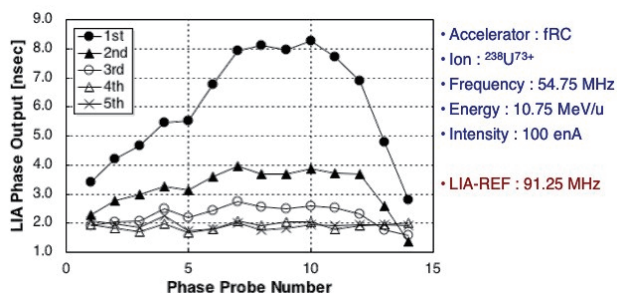


図5: LIA測定と軌道計算に基づいた χ^2 フィットによって等時性磁場が段階的に作られる様子。

5.2 ビーム位相/強度の監視

RIBFのような多段式の加速システムでは、各加速器の相対的なビーム位相のマッチングが重要であり、ビームを強度/エネルギーの両面で安定して供給するにはそれらを常時監視する必要がある。そこで各要所に設置されたPP(図6参照)からの信号をLIAに取り込み、図7に示すLabVIEWプログラムによってビームの強度/位相を常時監視している。尚、現在、RILACからのビーム位相の安定度が課題の一つとなっている為^[1]、RILAC-RRC間で重点的に監視を行っている。また、数日以上長期でビーム位相を監視していると一方向に観測位相がシフトしていく現象が確認されている。これはビーム位相が実際に動いているのではなく、LIAの基準信号発生器自体の安定度が疑わしい。早期に解決すべき問題である。

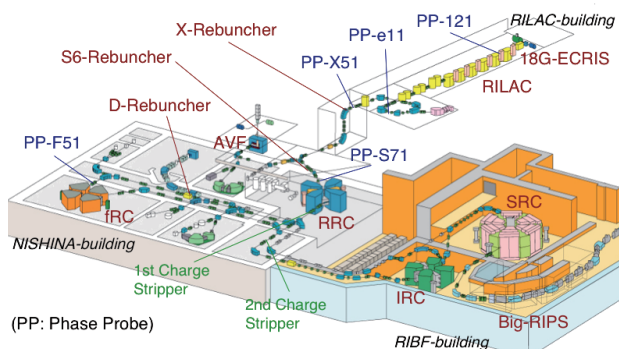


図6: RIBF鳥瞰図。現在、ビーム強度/位相監視に用いているPPを示す。

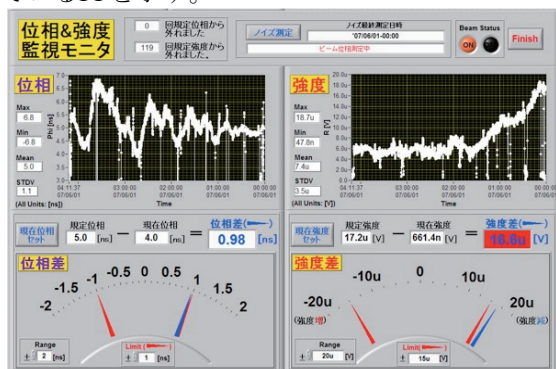


図7: ビーム強度/位相監視用のLabVIEWフロントパネル。任意設定値から任意設定量外れると警告アラームが発報する。

5.3 リバンチャーの位相調整

リバンチャーはビームバンチの縦方向の収束を行うことで主に後段のサイクロトロン中でのターンセパレーションを良好にし、取出し効率を上げる効果を狙って設置されている。但しこの時、後段のサイクロトロンとのエネルギーマッチングを維持する為に、リバンチャーでは加減速されないことが基本である。この条件を満たすようにPP-F51(図6参照)からのバンチ信号をLIAで監視しながら、D-リバンチャー(図6参照)のRF位相を調整した例を図8に示す。RF位相調整後(図8-(3))はリバンチャー励振前(図8-(1))のビーム位相と同位相(通過タイミング等しい)、かつ観測強度が増している(バンチングで電荷密度増大)ことから、エネルギーを変えずにビームバンチを縦方向に収束できたことが確認出来る。

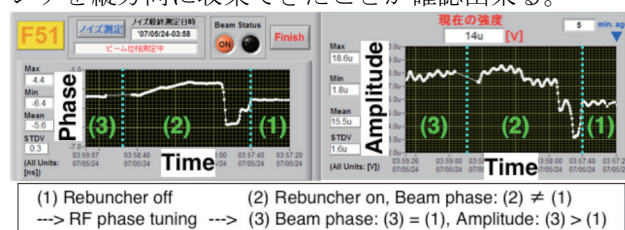


図8: D-リバンチャーのRF位相調整の様子。

6. 今後の予定

本システムは現段階では発展途上であり、以下の項目を早期にこなし、より確かなシステムにしたい。

- 1) 測定環境の整備: グランドループ、基準信号発生器の安定度、信号ケーブル特性について議論、テストを行い素性を明らかにし改善する。また、これらを元に測定誤差も見積もる。
- 2) TOFとの比較: 現在行っているビーム位相監視は相対的な挙動の監視に留まっているので、TOFデータ^[3]との比較から基礎データを得たい。
- 3) 等時性磁場調整の一元化: 現在、独立しているLIA等時性測定、コイル電流補正量の計算、及び補正電流値セットを一元化し、自動で等時性磁場を作るシステムを構築する。
- 4) 測定点の拡張: RILACビームの監視に加えて全サイクロトロンの入出口でも監視が行えるようにソフト/ハードを整備する。これによりRIBF全加速器の状態を把握し、より長期に安定したビーム供給を目指す。

7. 参考文献

- [1] N. Fukunishi et al., "Commissioning of RI Beam Factory Accelerator Complex", in this proceedings.
- [2] M. Fujimaki et al., RIKEN Accel. Prog. Rep. 38, 258 (2004).
- [3] T. Watanabe et al., "Measurements of beam energy and longitudinal beam profile using plastic scintillation monitors for RIBF", in this proceedings.