

LIPAc Phase-B+コミッショニングでのビーム位置位相モニタの現状とビーム試験

BEAM TEST AND STATUS OF BEAM POSITION AND PHASE MONITOR IN THE LIPAc PHASE-B+ COMMISSIONING

廣澤航輝^{#,A)}, 権セロム^{A)}, ポダデラ イバン^{B)}, カリン ヤン^{C)}, モラレス ベガ フアン カルロス^{D)}
 Kouki Hirose^{#,A)}, Saerom Kwon^{A)}, Ivan Podadera^{B)}, Yann Carin^{C)}, Juan Carlos Morales Vega^{D)}

^{A)} National Institutes for Quantum Science and Technology (QST), Japan

^{B)} Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), Spain

^{C)} Fusion for Energy (F4E), Germany

^{D)} Universidad de Granada (UGR), Spain

Abstract

Linear IFMIF Prototype Accelerator (LIPAc) is a hadron LINAC developed and operated under the EU-JA collaboration, for validating technologies to accelerate a 9 MeV deuteron beam at CW, and high beam current (125 mA). LIPAc is presently in the commissioning phase namely B+, where the beam line is fully constructed by replacing the superconducting LINAC section between medium and high energy beam transport lines with an intermediate transport line for 5 MeV deuteron beam from RFQ. To compare different measurement method non-interceptive and also interceptive diagnostics, it is important to operate them at low duty cycle. Also, changes in beam properties can be traced by comparing the BPM data. Phase-B+ operation is useful to validate the beam transport codes, by using BPM measurement. This report presents the progress of the BPM with the results of the low duty cycle stage of Phase-B+ in 2021, and about the studies related to RF noise floor of the BPM signals.

1. イントロダクション

Linear IFMIF Prototype Accelerator (LIPAc)は、核融合炉材料試験を目的とした国際核融合材料照射施設 (IFMIF) の加速器部分の低エネルギー領域の検証を行うための試験加速器である。IFMIF 加速器は 40 MeV の重陽子を 125 mA-CW を 2 レーン配備し運用する設計だが、LIPAc ではその内イオン源から 9 MeV までの加速を含む部分についてスタディを行っている。入射器 (イオン源+低エネルギービーム輸送路: LEBT) を 100 keV で出力し、100 keV から 5 MeV までの加速は RFQ 空洞が、5 MeV から 9 MeV への加速は超伝導高周波加速ライナック (Super-conducting RF, SRF) が担う。IFMIF 加速器は 5 - 40 MeV の加速に複数台の SRF が使用されている[1]。

現在、コミッショニングフェーズは Phase-B+ と呼ばれ、デザイン大強度用ビームダンプまでの全てのビームラインを組み終えた。SRF ライナックをビーム輸送ライン (MEBT Extension Line, MEL) に置き換えた構成で試験を行っている。Phase-B+ の第一段階としては 2021 年 7 月に最初のビーム試験、12 月に 2 回目のビーム試験を実施した。Figure 1 に Phase-B+ LIPAc の構成とビーム位置

位相モニタ (Beam Position and Phase Monitor: BPM) の位置を示す。この段階では定格電流 (125mA) の 15% 程度、ビームエネルギー 2.5 MeV の陽子または 5 MeV の重陽子を用い低エネルギー高強度による、空間電荷力が非常に強い領域のビームダイナミクスや、ビーム診断システムの検証、SRF ライナックを除いた機器の稼働試験を行う。

LIPAc の目標を達成するには、125mA-CW ビームを、SRF ライナックを含めたビームラインでほぼ無損失でビームダンプまで導く必要がある。そのため、Phase-B+ においては、TraceWin[2]等のビームシミュレーションコードを駆使し、SRF ライナック入射アクセプタンスが実現可能である事と、5 MeV 領域での電磁石の調整による無損失ビーム輸送の可能性を示さなければならない。これを実現するためには、ビーム診断系の精度と信頼性の向上が不可欠である。特に、目標に近づきビーム強度が著しく上がると、非接触方式の測定系のみが頼みの綱である。

LIPAc には様々な診断機器が実装されている[3]が、本発表で報告する BPM は、ほぼ全てのコミッショニング条件で使用可能な唯一のモニタである。

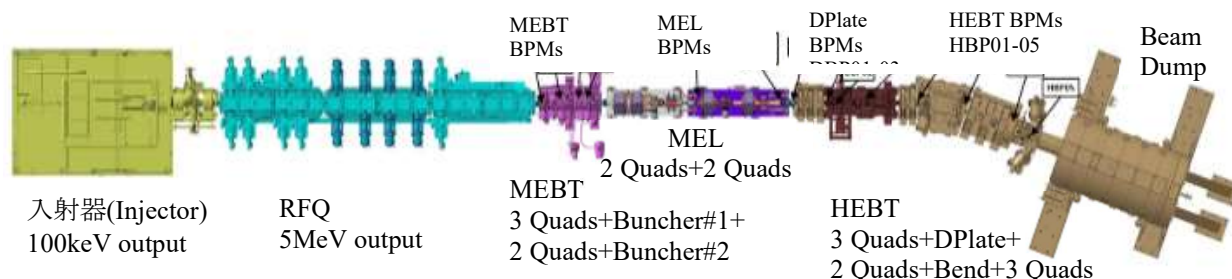


Figure 1: Configuration of LIPAc Phase-B+ commissioning and installed BPM positions.

[#]hirosawa.koki@qst.go.jp

マルチワイヤモニタは、ビームに直接接触してビームサイズを測定できるが、高デューティーで使用することはいかなる。スリットとファラデーカップでスキャン測定することも、同様の理由で困難である。残留ガス方式のモニタは逆に高強度でなければ十分な精度が確保できない。各モニタそれぞれに長所がある一方で、使用領域に制限があるが、BPM はバンチングが十分であれば、低強度-低デューティーから、125 mA-CW まで同条件で測定が可能である。また、ビーム重心情報の精度が非常に高い。visibility 劣化原因の Bunch lengthening も、ビームシミュレーションとの比較により、測定試験として有意義である。

2. LIPAc BPM の構成

現在運用している BPM は全て CIEMAT により開発された[4]。デザインレポート[5]によると、ビーム物理からの要求で Table 1 を満たすように設計、製作されている。BPM の検出部は Capacitive タイプと one end shorted stripline の二種類があり、Capacitive type は超伝導クライオモジュール、stripline type はその他すべての BPM に配備されている。MEBT/D-plate の BPM は以前に実施した Phase-B 試験にて実証がなされた[6]。

Phase-B+では、新たにインストールされた MEL/HEBT の BPM について Phase-B と同様の試験を行い、どの程度実機の環境で実現可能なのか、あるいは更なる向上が見込めるのかという試験を行うことが焦点となる。

Table 1: Target Parameter of LIPAc BPMs[7]

Parameter	Value
Beam Parameter	
Beam Energy	5 MeV-9 MeV
Beam Current	125 mA
RF pulse width	100 μ s - CW
Duty cycle	0.1% - 100%
BPM requirement	
Position resolution	10 μ m
Position Accuracy	100 μ m
Phase resolution	0.3 deg.
Phase precision	2 deg.
Electronics requirement	
Max input power	22 dBm
Required dynamic range	50 dB

LIPAc の BPM は Time of Flight 法でエネルギー測定する目的もあるため、ビーム位相測定が非常に重要である。このバンチング構造を介した BPM 間の相対位相を正確に測定するため、White Rabbit システム(WR)を用いて LLRF と同期するデザインを採用[8,9]している。Figure 2 に LLRF-BPM 間の同期構造を示す。10MHz の Master oscillator (MO) から信号を受け取った WR は、LLRF と BPM に optical cable を介して同列に支配下に置く。各モジュール間の同期条件は各子システム内部の WR 同期回路内で監視されており、同期が外れた場合は再同期のプロセスを実行する。従来キャリブレーション用信号は、10MHz の MO から直接取得する仕様になっていたが、現在は WR との上下関係を徹底するため、

WR から 10MHz 信号を取得するよう変更した。

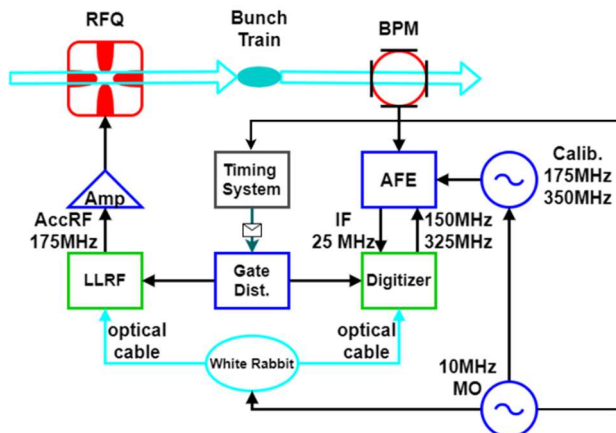


Figure 2: Schematic of synchronization among LLRF, beam, and BPMs.

BPM の信号処理部は、Analog Front End (AFE) と Digitizer に分かれています。AFE は Digitizer から提供される 150MHz/325MHz の信号を用いて、基本モードと 2 倍モードの信号を一律 25MHz にダウンコンバートする。そうして生成された IF 信号にバンドパスフィルタを掛け、16bit-125MS/s の ADC で IQ サンプリングを行う。最終的に、IQ コンバータが得るデータは、I/Q 各 25MS/s である。FPGA 評価ボードは、Virtex6 を用いており、IQ raw data の平均処理、Amp/Phase への変換、位置・電流値、平均化位相導出までを FPGA で実行する。現在実装している位置・電流値導出式は、以下の Eq. (1)、Eq. (2)、Eq. (3) であり、係数とオフセットはビーム試験中に CIEMAT のテストベンチで得た値を再確認し、Beam based alignment (位置)、Current transformer と Re-buncher 空洞(電流)等を用いて決定する。

$$x = k_x \frac{U_{\text{right}} - U_{\text{left}}}{U_{\text{top}} + U_{\text{bottom}} + U_{\text{right}} + U_{\text{left}}} + x_0 \quad (1)$$

$$y = k_y \frac{U_{\text{top}} - U_{\text{bottom}}}{U_{\text{top}} + U_{\text{bottom}} + U_{\text{right}} + U_{\text{left}}} + y_0 \quad (2)$$

$$I_b = k_s (U_{\text{top}} + U_{\text{bottom}} + U_{\text{right}} + U_{\text{left}}) + I_0 \quad (3)$$

各モニタ値は 40kS/s で常時出力されるが、それとは別に、最大 100MS/s で、サンプルデータの出力を行う Raw data logger (RDL) の機能が実装されている。RDL は DDR にサンプルデータを吐き出し、そこからファイルに書き込んでいく仕様であるため、蓄積データ長は決まっており、チャンネル・変数の分だけ解像度も低下する。最高解像度のデータは 4 チャンネル分、25MS/s のデータであり、40ns より大きな変位は補足できる可能性がある。

FPGA ボードとの通信は、EPICS IOC のネイティブな実装で行われており、中間に異なる制御ソフトウェアを挟まない。Phase-B+の最初のビーム試験では、EPICS IOC が PV gateway を介さず直接 LIPAc グローバルネットワークと通信していたために、全システム稼働時に負荷が跳

ね上がり、システムがダウンするという問題があった。EPICS IOC が落ちたために、BPM 機能全体が使えなくなってしまった。制御系が単体で閉じていない場合のデメリットが表れた状況であったが、問題点を逐次洗い出して対応した結果、現在は高負荷試験でも安定して稼働している。

3. Phase-B+ビーム試験での測定

前段階 Phase-B のビーム試験における BPM 測定にて、いくつかのパラメータが評価されている。このとき MEBT 直後に置いた D-plate の BPM で 3BPM 法により導出された BPM 位置解像度は $\sim 45\mu\text{m}$ であった[10]。RFQ ベーン電圧をスキャンして行ったエネルギー測定では、統計的に 5keV より細かいエネルギー解像度が得られている^[11]。バンチャー電圧のスキャンによってバンチ長が大きく圧縮された結果が確認された[6, 10]。これらの結果を参考に、同様の試験と性能向上に向けたスタディを進めていく予定である。

Phase-B+では、BD までのビームライン上に Fig. 1 に示す位置に BPM を置き、ビームダイナミクスの試験を行う。最初の段階は、Phase-B にて確認できた BPM の性能が十分に再現できているということの確認である。ただし、D-plate の位置が大きく異なるので、位置解像度の導出結果に差が出る可能性はある。

2021 年に行われた Phase-B+試験初期段階 (Stage-1 と呼称) における BPM の目標は、Phase-B からのいくつかのアップデートを含め、次にあげる項目を想定した。

- 全 BPM の稼働と Averaging/Gating 機能の確認
- 20mA, 低 Duty における Visibility の確認
- バンチャー空洞の bunch length 圧搾効果の確認
- ビーム電流の測定を CW で可能か考察

これら目標は、Phase-B+の Stage-1 及びそれに続く試験で High Current/High Duty に進む前に達成すべきとして掲げたものである。またこれまで MEBT と D-plate に於いては検証されている性能に、バンチ長が伸びてなお維持、あるいは肉薄できるかという数値的な評価も目標とした。本報告では、最初のビーム試験でどの程度達成できたかを、データと共に報告する。ビーム試験パラメータは Table 2 にまとめた。

Table 2: List of Values for Beam Experiment in the Phase-B+ Stage-1

Parameters	Values
Particle Species	D+ (H+ for test)
Peak Current	20 mA (10 mA)
Beam Energy	5 MeV (2.5 MeV)
Pulse Length	60 μs - 100 μs or 1.5ms
Pulse repetition	1 Hz
Re-buncher cavity	#01, 200 kV max

3.1 BPM システムの稼働状況

BPM の健全性及びビーム移動への応答性の確認は、ステアリング磁石を使用して、最初に試行した。Vertical

と Horizontal の位置を測定し、意図した方向へ確かに移動していることを確認し、BPM の配線状況と位置導出機能の確認を行った。

振幅と位相の測定を行うにあたって、Stage-1 では BPM に発生したハードウェアの問題で、位相が測定できなかった。後に、Clock 信号生成用のボードが破損し、正しく WR と同期した信号が送られていなかったことが判明した。この破損状況においては、ダウンコンバートを行っている信号が振動していただけで、IQ Demodulation 用のクロック等に異常はなかったため、Amplitude にはある程度の安定性があった。一方、位相に関しては IF 信号の位相が WR クロックからズレていたために、それに伴った振動が表れてしまった。WR 同期回路は正常に働いていたために、WR 自己診断系では異常を検知しなかったと考えられる。全チャンネル揃って 85° 程度振動していたが、今までのビーム試験結果[6, 10, 11]、および製造後の受け入れ試験では 2ps 以下のジッタに抑えられていたため高々 0.126° 程度のずれであるはずで、明らかに異常であった。後に、クロックに RF ジェネレータを用いた試験で位相の安定を確認し、BPM 本体機能に異常はないこと、かつ Average Gate 機能の正常な実装を確認した。Figure 3 に、一時的な解として RF ジェネレータ信号によるダウンコンバートを用いた測定結果を示す。上図は BPM の RDL データ、下図は Average Gate 機能を使用した測定である。後に議論するノイズの影響はあるが、ビームのパルス長だけ検出強度が上がり、位相がより安定していることが分かる。比較的安定している後半部の Averaging 結果は、 0.3° 以下の位相不確かさに抑えられている。次の試験では、完全な BPM を用いて更にスタディを続ける。

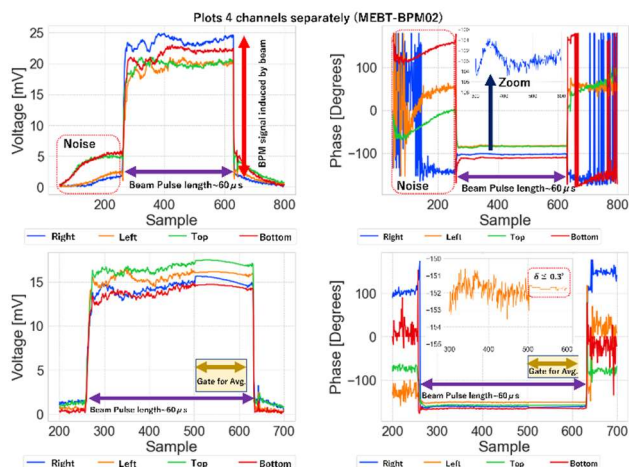


Figure 3: MEBT-BPM01 raw data using RF generator signal as the clock board signal of 175MHz, without (upper) and with (lower) averaging for 18 μs from 40 μs after beam chopper.

3.2 ビーム重心測定結果

ビーム測定結果には、バンチ構造が十分生存している領域では、位置の導出が可能な程度には測定出来た一方で、その他の領域では S/N 比によって測定精度が抑えられてしまった係数等は、ワイヤーテストによる値^[12]を初期値として採用した。パルス内の平均位置を追いか

けると、インジェクターの ECR オンオフで、ビームの Transverse 挙動が大きく変化することが分かった。Figure 4 に運転の configuration を全く変えずに入射器を立ち上げなおした前後のデータ (MEL-BPM01 を用いて取得) を示す。前後を比較するとパルス内で奇妙な振動が発生していることが見えた。後に、パルス内の振動はマルチワイヤモニタの結果とクロスチェックを実施し、整合性を確認している。横方向のビーム重心は、比較的安定している領域であっても、ズレていることが見えた。これら測定は、RF パラメータや電磁石パラメータを一切変えずに測定したものであるため、イオン源の状態変動に起因するものだと考えられる。今後、Injector のパラメータに関しては、更なるスタディを行う。

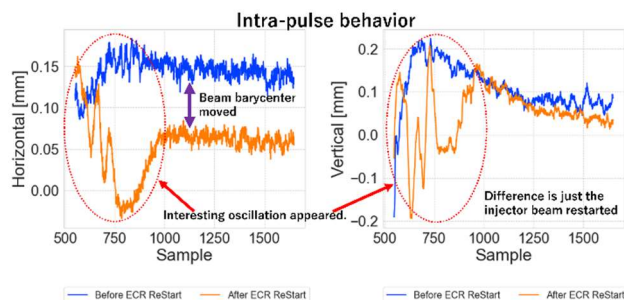


Figure 4: BPM-measured transverse position for beam pulses before (blue) and after (orange) a short injector stop without any configuration change.

Re-Buncher 空洞#1 を 200kV で駆動した場合のピーク電流の増大をテストした。試験時間の都合で、Phase-B の時のような電圧スキャンは出来なかったが Fig. 5 に、MEL-BPM02 の各電極チャンネルの検出振幅を Re-Buncher 空洞オンオフでの 175MHz ピーク電流の増加を比較した。Re-Buncher 空洞を離調した状態 (=オフ) では、ノイズと同等のレベルであったものが、200kV の結果では明確に強度が上がりノイズフロアから十分大きな信号が取得できていると分かる。縦方向のビームパルス直後に、半分程度の強度のノイズが乗っており、これは Gating 等で取り除ける可能性がある。また、バンチング位相探索のために、LLRF の位相を 268° -272° スキャンしたが有意な差は得られなかった。次は更にスキャン範囲を広げて位相の最適化を行う。

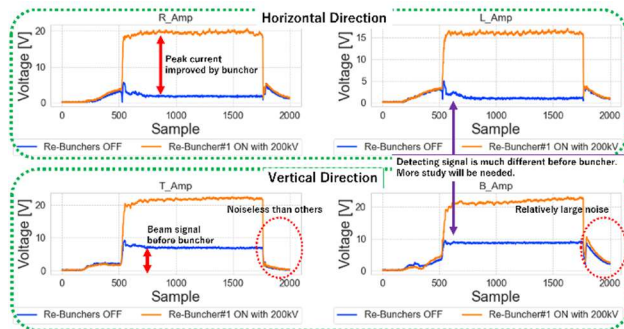


Figure 5: Comparison of the MEL-BPM02 detecting signals between before and after Re-Buncher cavity resonated at 200 kV of the bunching phase.

3.3 修理後の位相測定テストとその精度向上の考察

システムを修理し Clock 信号が安定した後に、次の試験に備えて Time of Flight 法の位相測定テストを行った。現在、Phase-B からのアップデートとして EPICS の値を用いてモニタする機能が実装されている。テストベンチと解析の結果、この方法では安定なビームに対してのみしか精度が見込めないことが判明した。同時に、位相誤差の導出と統計処理の順序を見直すことで改善がみられた。

Time of Flight 法は、BPM にて測定した $\Delta\phi$ を、次の Eq. (4) - Eq. (6) に適用し導出する。誤差は、Eq. (7) から見積もることが出来る。ただし今回は、BPM 間の長さ L に対する誤差は考えていない。

$$t_{\text{tof}} = \frac{1}{f_{\text{rf}}} \left\{ N - \frac{\Delta\phi}{2\pi} \right\} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{L}{t_{\text{tof}} \cdot c} \quad (5)$$

$$E_k = m_0 c^2 \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right\} \quad (6)$$

$$\frac{dE_k}{E_k} = \gamma(\gamma + 1) \sqrt{\left(\frac{dL}{L}\right)^2 + \left(\frac{\delta(\Delta\phi)}{N + \frac{\Delta\phi}{2\pi}}\right)^2} \quad (7)$$

真の値に近づけるために、この計算で用いる $\Delta\phi$ をどう得るかを現システム上で考えてみる。RF ジェネレータから、BPM 模擬信号を出力し Raw data を用いてデータをとる。そのデータに対して位相差導出の前後で平均をとって比較し、Raw data による解析の優位性を評価する。Figure 6 は先に平均をとったものと電極間の位相差をサンプルごとに導出した後に平均したものの誤差分布である。横軸 0 の点が平均である。事前に各電極で位相の平均をとったものは、最頻値と平均の間にズレが確認できる。一方、先に位相差を導出したものは、平均と最頻値が一致し、サンプル数を稼ぐことでフィッティングのアンバランスも小さくより正確にピーク検出ができる。

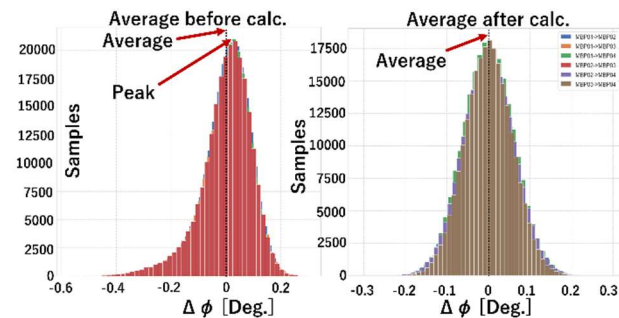


Figure 6: Distributions for errors from average of measured phases applied before (left) and after (right) calculating relative phase.

上記処理順序の違いを便宜上、pre-averaging と post-averaging と呼ぶ。CSS OPI に表示している位相値は EPICS PV 値であり 40kS/s の値は、FIR フィルタ後の値である。すなわち、短時間ながらも平均処理を事前に行

い、pre-averaging と同等のプロセスを踏む。Raw data を用いて、 $\Delta\phi$ を先に計算することで、システムの長周期の揺らぎを消すことができ、エネルギー測定精度の向上が期待できる。Table 3 に、従来手法による BPM システム由来の測定誤差と、改良手法の測定誤差を比較する。

Table 3: Comparison Between Different Averaging Phases Before and After Relative Phase Calculation

Combination	Pre-avg. [MeV]	Post-avg. [MeV]
MBP01 - MBP02	$< 1.511 \times 10^{-2}$	$< 2.518 \times 10^{-3}$
MBP01 - MBP03	$< 7.531 \times 10^{-3}$	$< 1.255 \times 10^{-3}$
MBP01 - MBP04	$< 6.253 \times 10^{-3}$	$< 1.042 \times 10^{-3}$
MBP02 - MBP03	$< 1.501 \times 10^{-2}$	$< 2.502 \times 10^{-3}$
MBP02 - MBP04	$< 1.067 \times 10^{-2}$	$< 1.778 \times 10^{-3}$
MBP03 - MBP04	$< 3.686 \times 10^{-2}$	$< 6.143 \times 10^{-3}$

3.4 RF ノイズの問題

BPM の Raw data に潜む謎のフロア上昇の起因が RF ノイズであることは、ファラデーカップによるビームストップ時に、ファラデーカップを取り除いた前後の BPM データと RFQ 空洞電圧を測ったデータ比較することで見えた。よく見る RF の反射らしきピークや、時定数が類似していることから、RF 源からのノイズが最有力候補となっている。

Figure 7 は、HEBT-BPM04/05(ファラデーカップ以降、ビームダンプ直前)の Raw data、RFQ 空洞電圧を示す。

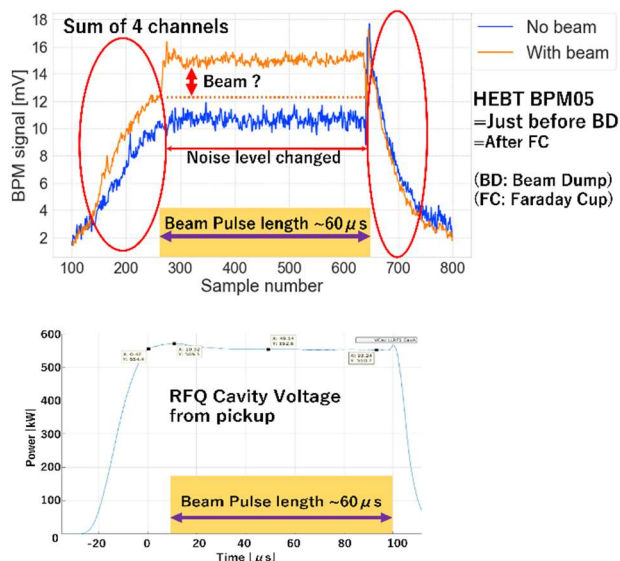


Figure 7: HEBT-BPM05 (first half 4 lines in the legend)/05(later half 4 lines in the legend) with FC beam stopper (top), without FC (middle), and typical RFQ cavity voltage in beam operation (bottom).

この時、ビームダンプの放射線モニタは有意に反応しなかった。ビームダンプに測定可能なビームが達していなかったにも拘らず、ビームのゲートオン付近で 175MHz の信号が明確に見えている。この時のビーム電流は 20mA、パルス長は 100μs、LLRF の立ち上がり時間は 35μs であった。ファラデーカップの無いときは、明らかにノイズのような信号が混じっているため、このノイズがビー

ムであると考えられる。常に確認できる信号は、RF のタイミングに酷似しており、基本モードが 175MHz であることから、これが原因である可能性が疑われる。この RF の侵入経路については調査中である。

4. まとめと今後の予定

Phase-B+ Stage-1 では、問題の発生で目標が未達成になったものの、BPM の一部アップデート機能、Gating サンプリング/Averaging 機能、Intra-pulse 挙動の測定、バンチャーによる visibility の向上は検証できた。しかし、正確な位置の導出等、MEBT における Phase-B 試験結果を再現するためには、RF ノイズへの対策が必須であることが判明した。修理の後再度テストベンチで測定を行い、十分な解像度が得られていることを確認した。

次の Phase-B+ビーム試運転では、ビーム重心の正確な測定を完全な BPM システムでリベンジすること、Time of Flight 法による RFQ 空洞出口でのビームエネルギー測定と、Re-buncher 空洞の位相チューニングを計画している。Re-buncher 空洞はビームライン上に 2 台あり、まだまだスタディの面白みを秘めている。

次段階 Phase-C における BPM 関連タスクは Phase-C の象徴的な、Cryomodule に関連したタスクを追求したい。例えば、Cryomodule 入口での入射条件を監視、9MeV SRF re-bunched beam の位置を測定、Cryomodule BPM の稼働試験、超伝導ライナックでのエネルギー利得を測定、等があげられる。なので、それを実行するに十分なスタディを続ける Phase-B+の BPM 試験で進めていきたい。

参考文献

- [1] Keitaro Kondo *et al.*, “Validation of the Linear IFMIF Prototype Accelerator (LIPAc) in Rokkasho”, Fusion Engineering and Design, Volume 153, 2020.
- [2] <https://www.dacm-logiciels.fr/tracewin>
- [3] Jacques Marroncle *et al.*, “IFMIF-LIPAc Diagnostics and its Challenges”, Proc. of the IBIC2012, pp. 557-565, 2012.
- [4] Ivan Podadera *et al.*, “Beam Positions Monitors developments for LIPAC”, 2012
- [5] AF9.1.1_Diagnostic_Design_Report_23CQT3_v1_0. (Internal).
- [6] David Jimenez and Ivan Podadera, “Overview of the LIPAc Beam Instrumentation for the Initial Accelerator Commissioning”, talk slide of the IBIC2019, 2019.
- [7] A. Guirao *et al.*, “Update on the Development of the New Electronic Instrumentation for the LIPAc/IFMIF Beam Position Monitors”, Proc. of the IPAC15, pp. 1025-1028, 2015.
- [8] BPMs_Digitizers_Digitizers (Internal).
- [9] BPMs_Digitizers_UserManual (Internal).
- [10] Ivan Podadera *et al.*, “BEAM COMMISSIONING OF BEAM POSITION AND PHASE MONITORS FOR LIPAc”, Proc. of the IBIC2019, pp. 534-538, 2019.
- [11] L. Bellan *et al.*, “ACCELERATION OF THE HIGH CURRENT DEUTERON BEAM THROUGH THE IFMIF-EVEDA RFQ: CONFIRMATION OF THE DESIGN BEAM DYNAMICS PERFORMANCES”, Proc. of the HB2021, pp.197-202, 2021.
- [12] Ivan Podadera *et al.*, “COMMISSIONING OF BEAM POSITION AND PHASE MONITORS FOR LIPAc”, Proc of the IBIC, 2016.