

CURRENT STATUS OF CAVITY BPM FOR ATF2 FINAL FOCUS

Tomoya Nakamura^{1,A)}, Yosuke Honda^{B)}, Yoichi Inoue^{C)}, Tosiaki Tauchi^{B)}, Tomoyuki Sanuki^{D)}, Sachio Komamiya^{A)}

^{A)} The University of Tokyo

7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{C)} Tohoku Gakuin University

1-3-1 Tsuchitoi, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-0065

^{D)} Tohoku University

2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-0812

Abstract

IP-BPM is an ultra high resolution cavity BPM (Beam Position Monitor) to be used at ATF2, a test facility for ILC final focus system. Control of beam position in 2 nm precision is required for ATF2. We have fabricated 2 blocks (4 cavities) and checked their basic characteristics. Beam test at ATF extraction line proved an 8.72 nm position resolution.

ATF2 最終収束系のための空洞型ビーム位置モニターの開発状況

1. はじめに

ATF2^[1]はILCのための試験加速器であるATFの延長である。ATFは今日、ILCスペックのビームエミッタンスを達成可能な唯一の加速器であり、ATF2ではILC最終収束系のための実証研究が行われる。すでにATF2建設工事が始まっており、2008年10月には運転をスタートする予定である。

ATF2には主に2つの目標がある。1つ目はIP (Interaction Point) において35nmのビームサイズを実現すること、2つ目はIPにおいて2nmの精度でビーム位置を制御することである。

これまでにATFでは空洞型BPM (KEK Old Model) で約17nmの位置分解能を達成していた^[2]が、これらの目標を達成するためには、2nmというさらなる超高位置分解能をもつビーム位置モニター (IP-BPM) の開発が必要不可欠である。我々はIP-BPMのホットモデルを2基、製作し、ATFの取り出しラインにおいてその性能をテストした。

2. IP-BPMの特長

IP-BPM は空洞型BPMであり、ビーム位置検出にはダイポールモード信号を利用する。ダイポールモード信号はスロットを通じて磁氣的に導波管とカップルし、その後同軸アンテナから読み出される^[3]。

IP-BPM には大きく3つの特長がある。まず、X方向の位置とY方向の位置を完全に独立に測定するため、直方体空洞を採用した。Xの共振周波数は5.712GHz、Yの共振周波数は6.426GHzに設計されており、アイソレーションは-50dB以下である。

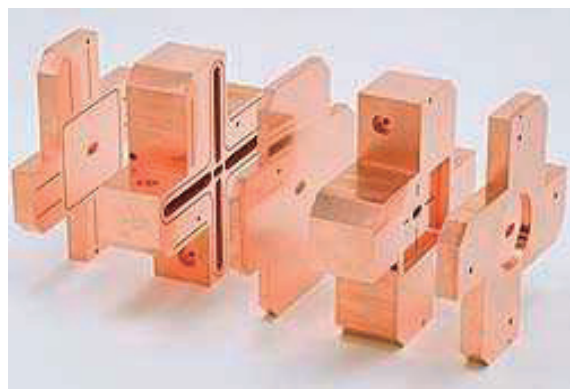


図1: IP-BPMブロック

2つ目に、角度感度を落とす設計になっている。これはIPでは強い収束のために角度ジッターが大きくなるため、空洞長Lを6mmと短くすることで達成した。

3つ目に、高カップリングによる高位置感度である。特に、空洞長を短くしたことで位置感度もまた落ちることになるが、その分ビームパイプのアパーチャーを小さくすることで空洞のインピーダンスを上げている。カップリング定数 β は、X、Yそれぞれ1.4、2.0となるよう設計されている。

3. 検出回路

IP-BPMにはダイポールモードを使用し空洞でのビーム位置を知るためのセンサー空洞と、同じ共振周波数であるがモノポールモードを使用しビーム

¹ E-mail: tomoya@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

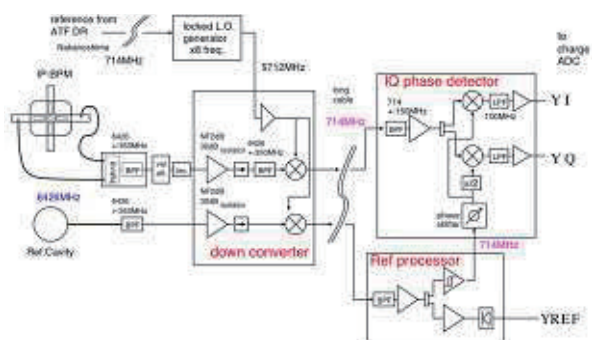


図 2 : 検出スキーム

チャージをモニターするためのリファレンス空洞がある。リファレンス空洞はセンサー空洞の位相検波にも使用される。

センサー空洞の2つのポートから取り出された信号はまずコンバイナーで差を足し合わされる。ダイポールモードはそれぞれのポートから逆位相で出てくるので2倍になる。次に可変アテネータ (0~70dB) を通る。この可変アテネータは位置感度を落とすためのもので、位置分解能測定のCalibrationに使用される。その後ダウンコンバーターで714MHzまで落とされ、最後に位相検出器で検波される。

このとき位相検出にはリファレンス信号が使用される。リファレンス信号はセンサー信号と同じローカルオスシレーターでダウンコンバートされるので、相対的な位相関係を保ったまま検出することができる。

このとき、位相の90度異なるI成分とQ成分を取り出すことができる。ビームの角度や、バンチの傾きといった信号は位置信号とは90度位相がずれているので、I-Qを精密に分けてやることで位置信号のみをI信号として、角度信号などをQ信号として取り出すことができる。

また、ダイポールモード以外のモードの混入を防ぐため、バンドパスフィルタを用いて欲しい周波数のみを選択的に取り出している。

4. 基本特性テスト

現在までにIP-BPMは2ブロック (4 空洞) が完成している。IP-BPMの基本特性は、以下の測定で確かめられた。

まず、ネットワークアナライザで空洞の共振周波数とQ値、X-Yアイソレーションを測定し、設計値と一致することを確認した。このとき、リファレンス空洞の周波数をセンサー空洞の周波数と合うようにチューニングを施した。

次に、空洞の形状を評価するためにR/Q測定を行い、実際にダイポールモードがビーム位置に感度があること (位置の2乗に比例すること) を確かめた。測定にはビーズ摂動法を利用した。

続いて、ATF取り出しラインを使用し、ビームを用いて位置感度、角度感度測定を試みた。位置感度測定ではステアリングマグネットを用いてビーム位

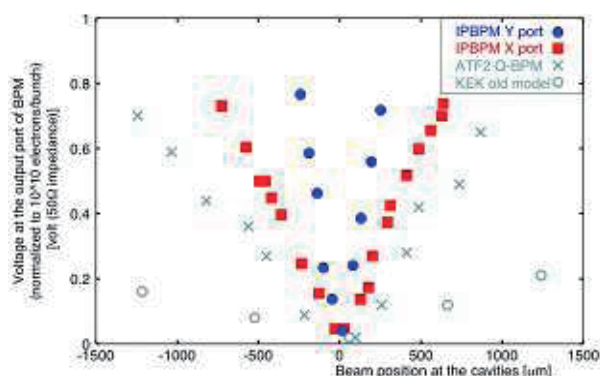


図 3 : 位置感度測定結果

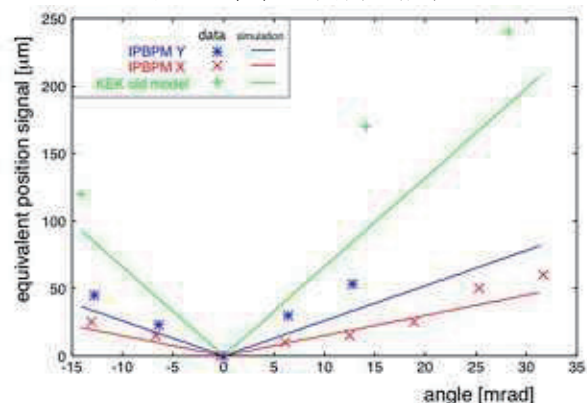


図 4 : 角度感度測定結果

置を動かし、それに対する応答を見た。その際ダイオードによる振幅検出を行ったので、ビーム位置に対してV字型に応答している。角度感度測定ではシムを挟むことで空洞をビームに対して傾けた。このときビームが空洞中心を通ったとしても、感度はゼロにならない。このオフセットを等価の位置信号と比較し、評価した。

位置感度はKEK Old Modelの5~8倍、角度感度は1/2~1/4であることが確かめられた。また、熱ノイズと位置感度の比較から、Y方向でオフセットが2nmの信号まで検出可能であることが示された。

5. I-Qチューニング

角度信号の混入は位置分解能を大きく悪化させる。従って位置信号と角度信号の分離は高位置分解能達成のために非常に重要である。

従来はビームを振って、オシロスコープで波形を観察しながら位相シフターを最適化するだけであったが、今回はビーム位置を振ったその応答から3つの空洞内のビーム位置が揃うようにシムを挟むなどして調整し、最終的に数 μ m程度の精度で3つの空洞の位置を合わせたうえでチューニングを行った。その際に、まずは2つの空洞の位置をそろえた後、ステアリングマグネットを2つ使うことでビーム位置を精確に平行に動かし、3つの空洞位置を厳密に揃えることができた。空洞の位置 (厳密には空洞内のビーム位置) を揃えることができれば、Q成分は小さくなり、I-Qチューニングを精密に行うことがで

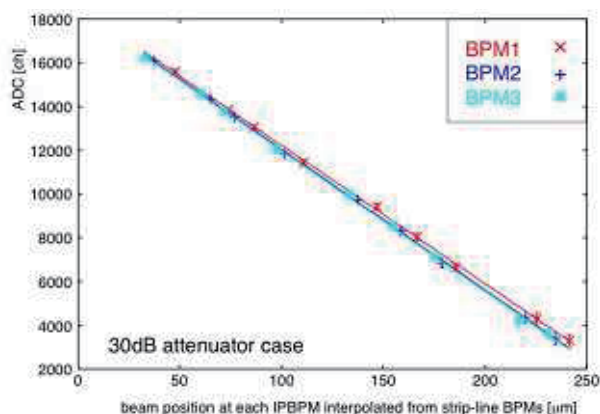


図 5 : Calibration Run

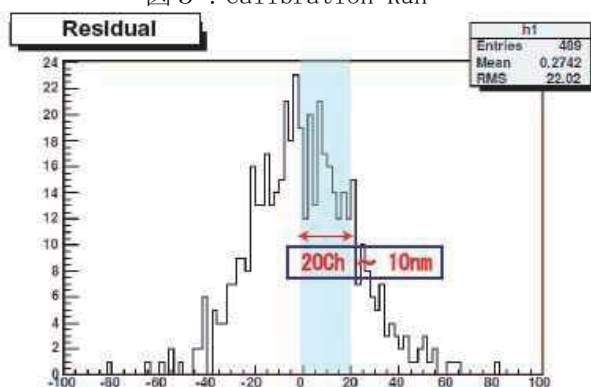


図 6 : Resolution Run

きる。

6. 位置分解能測定

位置分解能測定には3つの空洞を使用した。我々の言う位置分解能は、「(真ん中の空洞のビーム位置を、両端の空洞の情報から予測する精度) × (Geometry Factor)」である。これもビームテストはATF取り出しラインで行った。

測定では、マグネットを使用してビーム位置を振って行うCalibration Runと、ビーム位置を固定し、統計をためるResolution Runを行った。Calibration Runでセンサー空洞からのI (位置) 信号と実際の変位の対応をつけた。このとき、検出回路のダイナミックレンジを増やすために可変アテネータを40dB、30dB、20dBとし、それらの結果から0dBにおける位置信号→変位のCalibration Slopeを求めた。続くResolution Runは0dBで1時間程度行い、真ん中の空洞の位置 (I) 信号を両端の空洞の情報から予測する精度を、線形重回帰分析により求めた。このときの精度 (RMS) と、Calibration Runで求めたスロープにより、位置分解能を求めることができる。

測定においては、あらかじめリファレンス信号をICTでキャリブレーションしておくことにより、ビームチャージによる適切なデータカット ($0.640 < \text{ICT}(10^{10}e^-/\text{bunch}) < 0.755$) をかけることができた。

その結果、可変アテネータによるアテネーション

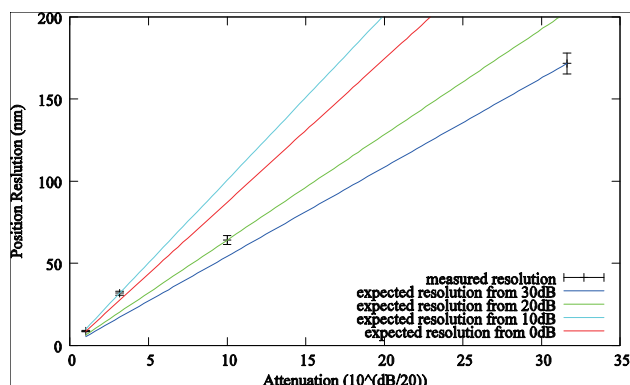


図 7 : 位置分解能

がない (0dB) 状態での位置分解能は、世界最高となる $8.72 \pm 0.28 \pm 0.35 \text{ nm}$ が実証された。ビームチャージは $0.68 \times 10^{10}e^-/\text{bunch}$ 、ダイナミックレンジは $4.96 \mu\text{m}$ であった。これは、ATF2運転時 ($10^{10}e^-/\text{bunch}$) で 5.94nm の分解能に対応する。

7. 熱ノイズ測定

位置分解能測定に先立ち、熱ノイズ測定を行った。

熱ノイズ測定は、同じセンサー空洞からの信号を2つに分けて同じ検出回路に通し、その相関を見ることでエレキの熱雑音で決まる検出限界を求めた。その際、位置分解能測定と同様に可変アテネータを変えてCalibration Runを行い、Resolution Runで分けた2つの信号の相関のRMSを求めた。その結果、熱ノイズはATF2運転時 ($10^{10}e^-/\text{bunch}$) で 3.46nm 分に対応することがわかった。残りおよそ 6.89nm 分のノイズの起源を調べ、それを除くことが課題となる。

8. まとめ

ILC最終収束系の実証開発研究のための試験加速器ATF2で利用する空洞型ビーム位置モニタ (IP-BPM) の開発を行った。ATF取り出しラインでのビームテストの結果、世界最高となる 8.72nm の超高位置分解能が実証され、ATF2の目指す 2nm でのビームの精密制御に向けて大きく前進した。

参考文献

- [1] ATF2 Collaboration., “ATF2 Proposal “, High Energy Accelerator Research Organization, 2005
- [2] Y.Inoue, et al., “Development of Nanometer Resolution Cavity BPM “, Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, Aug. 2-4, 2006
- [3] 本田洋介, “ナノビーム診断 “, 高エネルギー加速器セミナー「超伝導リニアコライダー」, p.14-1 ~ p.14-42, 2006年8月