

エネルギー回収型冷却電子リニアックにおけるCバンド検波型 ビーム位置モニターの開発

DEVELOPMENT OF A BEAM POSITION MONITOR DETECTING C-BAND FREQUENCY IN THE ERL-BASED CRYOGENIC ELECTRON LINAC

井原功介^{A)}, 諏訪田剛^{B,C)}, 遠藤克己^{A)}, 竹中久貴^{A)}, 太田温^{A)}
Kosuke Ihara^{A)}, Tsuyoshi Suwada^{B,C)}, Katsumi Endo^{A)}, Hisataka Takenaka^{A)}, Yutaka Ota^{A)}
^{A)} Toyama Co., Ltd.

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{C)} Department of Accelerator Science, Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

Abstract

TOYAMA CO., Ltd., KEK and Nihon University have been developing ERL-based cryogenic electron linac as an X-ray generator. In this paper we will report the development status of the beam position monitor (BPM) and its test bench to be installed in the linac. The type of BPM is a stripline-type, detection frequency is set to C band. The shape of the electrode part was determined by an electromagnetic field simulation. The test bench to calibrate the BPM has adopted the inexpensive and simple antenna type.

1. はじめに

株式会社トヤマは、高エネルギー加速器研究機構と日本大学と共にX線発生装置としての利用を目的としたエネルギー回収型冷却電子リニアックの開発を進めている。このリニアックは加速管と減速管を20Kまで冷却することでエネルギー効率を高めつつ、X線発生後のビームを減速管で十分に減速させてからダンプすることで放射線の発生量を抑える。また、加速周波数をCバンド(5712MHz)にすることで装置全体のコンパクト化を図っている。将来的には得られたX線をイメージングやがん治療などに応用したいと考えている。

ここでは、このリニアックに設置するビーム位置モニター(BPM)とその校正用テストベンチの開発状況を電磁場解析の結果をもとに報告する。BPMの電極はストリップライン電極を使用し、検出周波数は加速周波数と同じ5712MHzに設定した。電磁場解析のシミュレーションにはANSYS社の解析ソフト

HFSSを使用した。尚、このモニター開発は高エネルギー加速器研究機構と(株)トヤマの共同研究下で進められている。

2. ストリップライン型BPM

2.1 基本設計

ストリップライン型BPMの解析モデルをFigure 1に示す。上下左右の4カ所に配置した電極はダクトの壁に覆われるよう電極内径とダクト内径が一致する構造にしている。これによりビームから見た構造上の段差を少なくし、ビームによって励起される余計な高調波の発生を防いでいる。BPMの内径は、その前後に設置されるビームダクトの内径とカットオフ周波数を考慮しながら決定し、小径型(φ20mm)と大径型(φ26mm)の2種類のBPMを設置する予定である。また、電極の開口角はビームの電流量がある程度小さくても位置検出ができるよう35°に設定した。その他の設計パラメータは以下に示すイン

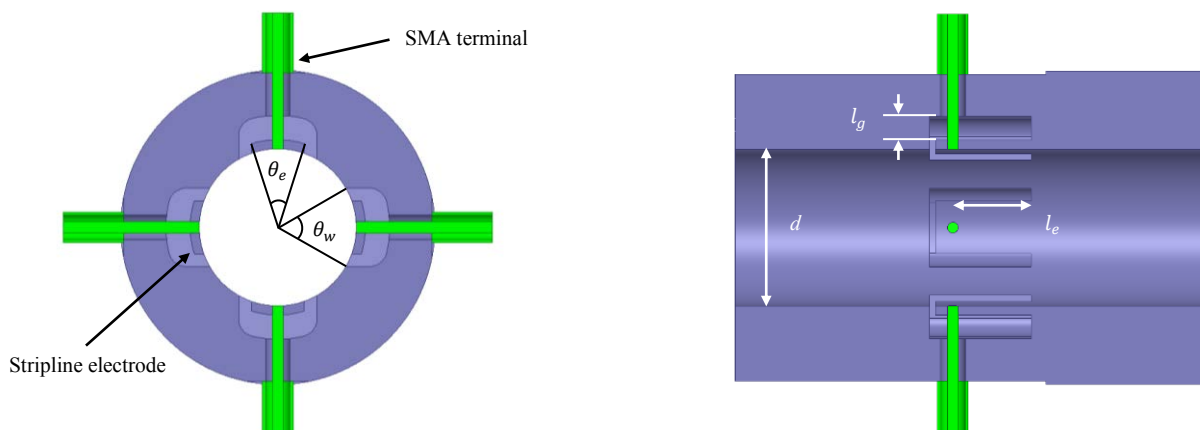


Figure 1: Analysis model of the stripline-type BPM, (a) the front and (b) side views.

ピーダンスマッチングと電極の周波数特性の結果から決定した。Table 1に設計パラメータの一覧を記す。

Table 1: Mechanical Design Parameters

Parameters	Symbol	Small diameter type	Large diameter type
Inner diameter	d	20 mm	26 mm
Aperture angle			
Wall	θ_w	62 deg	60 deg
Electrode	θ_e	35 deg	35 deg
Electrode lengths	l_e	10 mm	9 mm
Gap lengths	l_g	4.5 mm	4 mm

2.2 インピーダンスマッチング

電極でピックアップされた電気信号を効率よく伝達するためには、電極と伝送路のインピーダンスマッチングを行う必要がある。今回の伝送路は50Ωの同軸ケーブルとSMA端子(50Ω)を使用予定であるので電極のインピーダンスもそれに一致させた。その際、電極と壁のギャップ長 l_g や壁の開口角 θ_w を調整しながら最適な形状に追い込んでいった。インピーダンスの大きさはTime-domain reflectometer (TDR)をシミュレーションで行って確認した。TDRとは、インピーダンスを測定したい伝送路にパルス信号を印加し、反射して戻ってくるまでの時間と強度からインピーダンスを求める手法である。この際、電極長が短いと整合が取れていないSMA端子の中心胴体からのリングングした信号に電極部からの信号が埋もれてしまい、正確なインピーダンスを求めることができない。そこで、電極部における信号のフラット・トップを長くするため電極長を60mmに伸ばした状態でシミュレーションを行った。Figure 2に小径型BPMの結果を示す。SMA端子の同軸部(50Ω)から電極終端部(0Ω)までのインピーダンスの変化を時間軸で描いている。上記で述べたリングングが0.2 ns付近で起こっているのがわかる。その後に見られるフラット・トップの部分が電極部のインピーダンスを表しており50Ωに一致していることが確認できる。

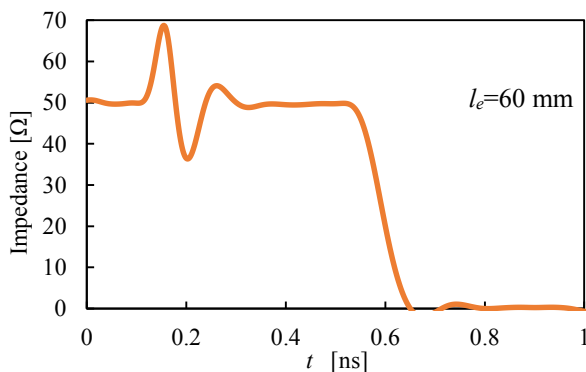


Figure 2: Result of TDR simulation for small diameter type.

2.3 電極の周波数特性

ストリップラインの電極長は、検出周波数で最大出力が得られるよう設計するのが一般的である。ここで電極からの出力信号が最大となる電極長 l_e は検出周波数の波長 λ を用いて

$$l_e = \frac{2n-1}{4} \lambda \quad (n=1,2,\dots) \quad (1)$$

と表わされる[1]。(1)より検出周波数が5712MHzの時、およそ13mmの電極長で最大感度となることがわかる($n=1$)。

上記の結果を確かめるため、ワイヤーを使った簡単なシミュレーションを行った。これはBPMの中心に張ったワイヤー($\phi 0.5\text{mm}$)に高周波を印加することでビームを擬似させ、周波数をスイープさせながらSMA端子からの出力を測定するというものである。このとき、検出周波数で出力が最大になるよう電極長の調整を行った。その結果、5712MHzにおいて最大出力になる電極長 l_e はおよそ10mmであることがわかった[Fig. 3]。これは(1)の計算結果と3mm程度ズレがある。この原因については現在のところ詳しくは分かっておらず、今後の課題となった。

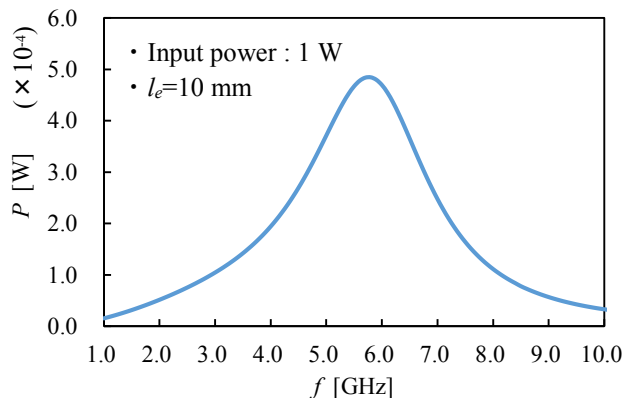


Figure 3: Frequency characteristics of an electrode of the stripline BPM.

4. テストベンチ

4.1 テストベンチの概要

製作したBPMは加工や組立の際、機械公差の範囲内で寸法的なズレが発生する恐れがある。これらのズレはビームの位置情報に影響を及ぼし、正確な位置測定妨げになりかねない。そこで、BPMを加速器に組み込む前に、あらかじめテストベンチに組み込み電氣的な校正試験をする必要がある。この際、BPMの性能評価も合わせ確認することが可能である。

一般的なテストベンチは、高周波を印加してビームを擬似するためのワイヤーやアンテナの他に、それらの位置を変位させるためのステージ、BPMをセットするための支持機構などが取り付けられてい

る。測定は高周波を印加してその位置を変化させながら電極を励振する手法が取られる。その結果得られた各端子からの出力とワイヤー（もしくはアンテナ）の位置の関係からBPMの校正は行われる。

擬似ビームにワイヤーを用いる場合、その終端部やダクト端面といった構造が変化する箇所からの反射波に注意する必要がある。もし反射波が発生すると、その信号も電極がピックアップしてしまうので正しい測定結果が得られない。したがって、ワイヤーを使用して正確な校正を行う場合は反射波の発生を抑えるための複雑な機構が必要になり、それによってテストベンチの製作費が高額になってしまう。そこで今回は、構造がシンプルでセットアップも簡単なアンテナを用いたテストベンチを製作することにした[Fig.4]。

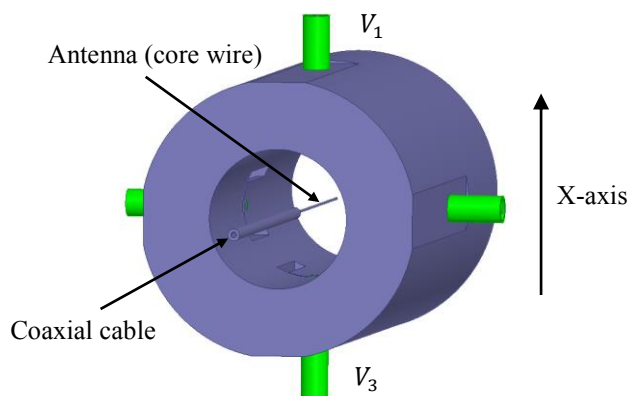


Figure 4: Test bench of the BPM with a coaxial cable-type antenna.

4.2 感度曲線と感度係数

感度曲線と感度係数について簡単に述べる。BPMを通過したビームの位置を調べるためには各端子から出力される電圧信号を位置情報に変換しなければならない。X軸上のビームの重心位置 x は、対向する電極の出力電圧 V_1 、 V_3 を用いて

$$x = S_b \frac{V_1 - V_3}{V_1 + V_3} = S_b \frac{\Delta}{\Sigma} \quad (2)$$

と表される[2]。ここで Σ と Δ は対向する電極に誘起される電圧の和と差をそれぞれ表している。 S_b は感度係数と呼ばれる量で位置分解能を決める因子となる。一般に検出回路が同じであれば感度係数が小さいほど位置分解能は良い。(2)のビーム位置 x と Σ/Δ の関係をプロットしたものを感度曲線と呼んでいる。今回はシミュレーション結果を3次の多項式でフィッティングし、感度曲線と感度係数を求めている。ビーム位置 x は0mmから5mmまで1mmステップで変化させている。感度係数 S_b は電極部の幾何学的構造からも求めることができる。今回のモデルにお

いては、電極の開口角 θ_e と内径 d を用いて

$$S_b = \frac{d\theta_e}{4 \sin \theta_e} \quad (3)$$

と表することができる。(3)によって求めた値はシミュレーション結果の妥当性を判断するために使用した。

4.3 アンテナ一体型テストベンチ

アンテナを使用して校正を行う場合、アンテナの長さによって感度曲線が変化するので注意が必要である。例えばアンテナの長さが電極に比べ短いと、ビームが作る電場（TEM波）を電極近傍でうまく再現することができず、そのまま校正をおこなっても全く意味がない。そこで、アンテナを使用する際は事前にシミュレーションによってビームを疑似できているか確認しておく必要がある。その確認方法としてシミュレーション上で直接電場を見るだけではあまり効果的ではないので、以下に示す方法を採用した。

- ① BPMにワイヤーを張り、ダクト端面で反射波が発生しないような理想的な吸収境界を設定して感度係数を求める。この感度係数を真の値とする。
- ② ①で求めた感度係数とアンテナを使用して求めた感度係数が一致するようにアンテナの長さを決定する。

Table 2に実際に上記方法で感度係数が一致した際の値を示す。小径型と大径型の両方でワイヤーを使用した場合の感度係数と一致していることがわかる。また、(3)の計算結果と2つのシミュレーション結果を比較すると、誤差が数パーセントに収まっていることからシミュレーション結果の妥当性も問題ないと考えられる。

Table 2: Comparison of the Sensitivity Coefficient

Simulation	Sensitivity coefficient : S_b [mm]	
	Small diameter type	Large diameter type
Wire	5.11	6.77
Antenna	5.13	6.76
Calculation of Eq.(3)	5.33	6.92

5. まとめ

Cバンド用ストリップライン型BPMとそのテストベンチの設計パラメータを、電磁場シミュレーション結果をもとに決定した。本BPMは、電極内径とダクト内径を一致させることで高次モードの波の発生を抑える形状を採用した。テストベンチはアンテナ

PASJ2015 WEP083

による励振機構を採用することでシンプルかつ安価な装置にすることが可能になった。今後、BPMとテストベンチをそれぞれ製作し、各シミュレーション結果と実測値の比較・検証を予定している。

参考文献

- [1] 平松成範, 「加速器のビームモニター」, KEK Internal 2004-4.
- [2] 諏訪田剛, “ビーム計測I”, OHO 2002 (2002).
- [3] T. Suwada, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 705 (2013) 7-12.