508MHz 狭帯域ビーム位置検出器の開発

DEVELOPMENT OF A 508MHz NARROWBAND DETECTOR FOR BEAM POSITION MONITORS

石井 仁#, A), 森 健児 A), 福間 均 A), 手島昌己 A), 飛山真理 A), 有永三洋 A),
山田恭介 B), 平根達也 C), 埜下英児 C)
Hitoshi Ishii #, A), Kenji Mori A), Hitoshi Fukuma A), Masaki Tejima A),
Makoto Tobiyama A), Mitsuhiro Arinaga A),
Kyosuke Yamada B), Tatsuya Hirane C), Eiji Nonoshita C)
A) High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
B) DIGITEX LAB.CO. LTD
C) CANDOX Systems Inc.

Abstract

SuperKEKB, which is the upgrade of KEKB, is an asymmetric-energy double ring collider composed of a 4GeV positron ring and a 7GeV electron ring. Its design luminosity is 40 times higher than that of the KEKB. In the positron ring, detectors for beam position monitors in KEKB with detection frequency of 1GHz should be replaced because the cut-off frequency of newly fabricated vacuum chambers is below 1GHz. The development of a new detector with detection frequency of 500MHz started in 2007, then fabrication of 140 detectors has finished in 2013. This paper describes problems encountered in the course of the development of the detector and solutions to them. Topics cover a signal multiplexer with isolation larger than 80dB, apparent position shift at changing of signal attenuation by a variable attenuator, usefulness of applying a performance evaluation system prepared for an R&D detector to that in mass production process, and so on.

1. はじめに

SuperKEKB 加速器は 4GeV の陽電子リング（LER)と 7GeV の電子リング（HER）からなるエネルギー非対称の衝突型加速器である。この加速器は KEKB 加速器に比べ 40 倍の世界最高のルミノシティーを目指し、KEK で間もなく完成予定である[1]。ビーム位置モニタシステムは、加速器内のビーム軌道を安定に維持するための位置情報を提供する加速器制御の根幹を成す装置である。加速器トンネル内に設置される静電誘導型ビーム位置モニタ(BPM)は、両リング合わせて 910 台である。この内訳は LER に 444 台、HER に 466 台である。又、20 カ所の制御側室に設置されるビーム位置検出器（以後、検波器）の総数は、242 台となる。この内 133 台は、今回開発した検波器が充てられ、残りの 109 台は、KEKB の検波器が再利用される。BPM 及び、新旧検波器の使用状況を Table 1 に示す。

SuperKEKB の検波器は、KEKB の性能を基本的に引き継ぎ、更なる性能向上を目指して開発された。主要な性能仕様は、Table 2 の通りである。この検波器は KEKB と同じ VXI-C サイズ 1 幅のモジュールで製作され、1GHz から 500MHz への検波周波数の変更以外、回路構成も同一である。尚、検波周波数の変更は、LER でビーム不安定性を引き起こす原因となる電子雲対策の為、真空チェンバの形状が Figure 1 に示す様にアンテチェンバ化され、その結果、真空チェンバの導波管モードの遮断周波数が 1GHz 以下となる事に因る。

本論文では、性能実現に必要不可欠な回路要素、問題回避の解説及び、性能評価、加速器運転時に予想される課題等について報告する。

Table 1: The Number of Reused and New Detectors

	BPM	Detector		
		Reused	New	Total
LER	444	0	118	118
HER	466	109	15	124
Total	910	109	133	242

Table 2: Performance Specification

雑音指数	7dB Typ.
信号対雑音比 (SNR)	90dB 以上　(2k 点の FFT、8 回平均 @-60dBm の単一正弦波)
非直線性	0.05%以下 (1/8F.S.～F.S.の範囲)
可変減衰器切り替え前後位置変化	5μm 以下
測定時間	30ms 以下/ch.　(2k 点 FFT の時)

#hishii@post.kek.jp

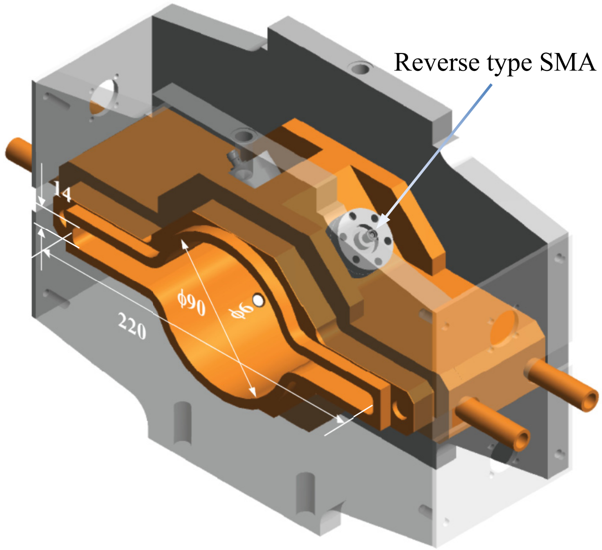

Figure 1: Ante-chamber for LER.

2. 信号処理

定格運転時のビーム波形は、バンチ長(σ_z=5mm)、バンチ電流（i_b=1.44mA/bunch）とすれば、矩形波に等価なパルス幅は約 42ps、波高値は数百 A（チェンバ径と電極サイズに依存）となる。この時、508MHz 成分で-10dBm 程度の信号強度が得られる[2]。

検波器の信号処理の流れは、Figure 2 に示す通りである。加速器トンネル内より伝送されたビーム信号は、4 入力セレクタで 1 つ選ばれ、可変減衰器、フィルタ、LNA(Low Noise Amplifier)、2nd 増幅器を通り DBM(Double Balanced Mixer)で周波数変換された IF 信号(f_{IF}=19kHz)を得る。所謂、ヘテロダイン検波である。その後、IF 信号は ADC(100kSPS)に因ってディジタル信号に変換され FFT を施す。得られたスペクトラムから IF 信号の振幅を求め、これをビーム信号の大きさとする。以後順次セレクタをスキャンし、各電極に対応した電圧を蓄積する。

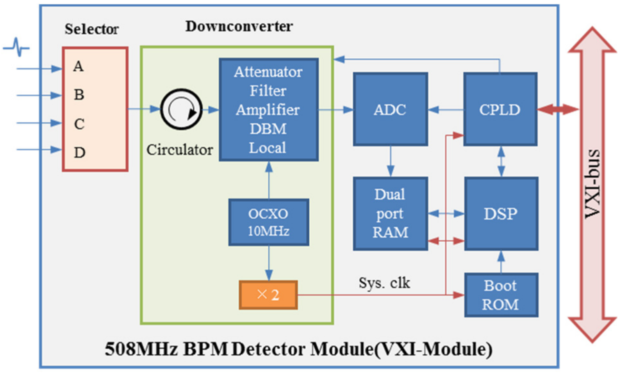

Figure 2: Block diagram of a detector.

ADC 以降の FFT 処理等は DSP(Digital Signal Processer)が担い、データの受け渡し、各部の制御及び VXI インターフェースは、CPLD(Complex Programmable Logic Device)で行われる。ネットワーク上のホスト計算機は、データ収集及び、位置演算、オフセット補正等の処理を行なう。

3. 回路要素と問題回避

3.1 50Ω終端付きセレクタ回路

セレクタ部に求められる性能は、Table 3 の通りである。

Table 3: Performance Specification of a Selector

入力反射係数	$\|\Gamma_i\|$<0.3 (i=1,2,3,4)
入力反射係数・トラッキング	$\|\Gamma_i - \Gamma_j\|$<0.1 (i,j=1,2,3,4)
ON,OFF アイソレーション	80dB 以上
チャネル間アンバランス	1dB 以下
チャネル間アイソレーション	80dB 以上
挿入損失	2dB 以下
切り替え時間	2μs 以下
非選択チャネルの状態	50Ω終端
低域通過フィルタ (fc)	800MHz 程度
最大入力レベル	+23dBm (total power)
耐入力	20V,100ps,FWHM 500Mpps に対して損傷なし

開発当初、SPDT(Single Pole Double Throw)用 PIN-diode IC 及び、FET-SW の組み合わせでセレクタを設計し評価した。その結果、基本性能は満たすものの、Figure 3 で示す様なスイッチの過渡応答特性等が問題と成った（スパイク状の部分）。過渡応答特性（スパイク、リンギング）は、仕様書で規定しにくい部分となる為、判断基準が難しい[3]。

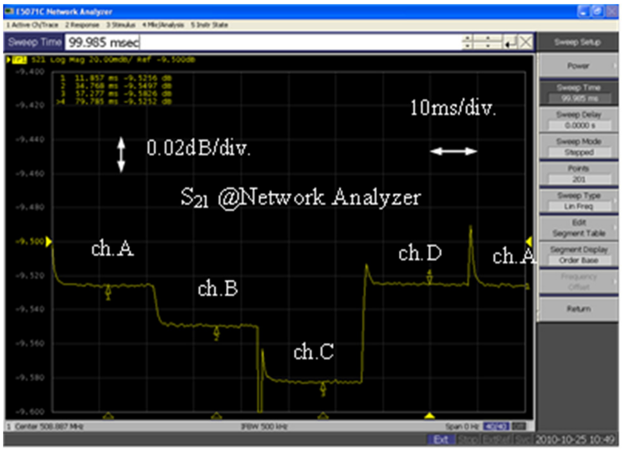

Figure 3: Response of the selector before improvement.

そこで、過渡応答の改善を目的に回路構成を見直し、Figure 4 に示す新たな回路を設計した。基本構成は、シリーズ・スイッチとシャント・スイッチの

組み合わせで成り立っている。これは、十分なアイソレーションを得る為の構成である。

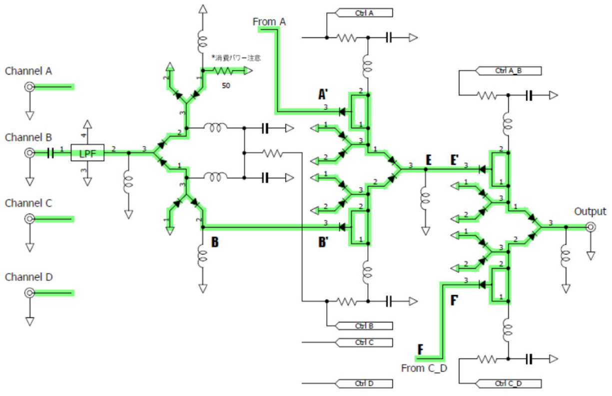

Figure 4: Circuit of a new selector.

各スイッチ素子には、PIN-Diode を用いた。各セクション間の結合は、Diode の極性を調整し DC 結合とした。従来のコンデンサに因る AC 結合では、電位差のあるセクション間のスイッチである為、過渡応答（スパイク）に対しては、不利と判断した。又、どのチャネルに対しても信号通過の Diode の数、型番が等しくなる様に構成され、対称性の良い設計と成っている。新セレクタの過渡応答特性の改善結果を Figure 5 に示す。尚、新旧セレクタの切り替え時間は、何れも 2μs 以下である。

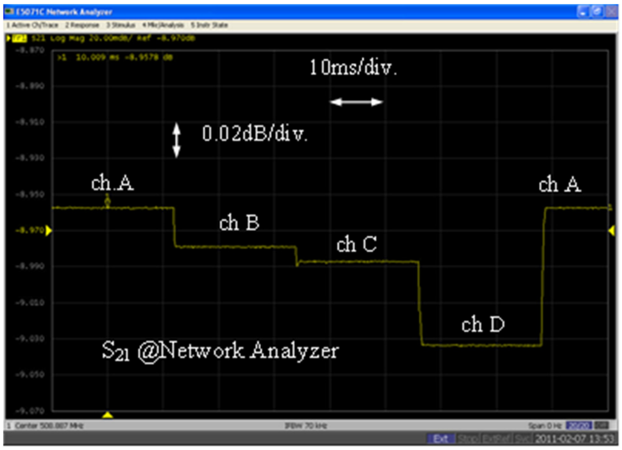

Figure 5: Response of a newly designed selector.

Table 4: Isolation Characteristic of a New Selector

Condition	Channel #	Isolation [dB]
All off	Channel A	105.42
	Channel B	102.08
	Channel C	103.46
	Channel D	101.66

アイソレーション特性については、Table 4 に示す様に、仕様の 80dB を上回る結果が得られた。

3.1 可変減衰器の設定変更と位置ズレ

BPM の各電極(A,B,C,D)に発生する電圧は、ビーム位置と電流の関数である。ビーム位置を測る為には、適切な測定範囲に収まる様に可変減衰器を設定し、セレクタを順次切り替え測定する必要がある。この時、検波器のセレクタのチャネル間の S_{11}（入力の反射係数）が全て同一なら求めた位置に誤差は含まれない。しかしながら、実際にはセレクタのチャネル間の S_{11} には性能諸元内の偏差が存在する。加えて、信号レベル調整用の可変減衰器も設定値に因って、S_{11} が変化する。これらが原因となって不整合損失に変化が生じ、各チャネル間で LNA までの S_{21}（順方向伝達係数）に差が発生し位置誤差（オフセット）となる。元々の原因は、セレクタのチャネル間の揃い精度にあるが、事実上無くす事は出来ない。可変減衰器の設定値に対する位置誤差低減には、セレクタと可変減衰器の間にアイソレータを配置する事が有効である事が分った。アイソレータの有無に因る変動幅の変化を Table 5 に示す。これは、温度試験から得られた結果である。温度は、20-35℃範囲を 5℃ステップで変化させ、各温度にて可変減衰器を 0-55dB の範囲を 5dB ステップで変化させた。その時得られたデータから、$k_x=k_y=33$mm として水平、垂直方向の位置 X,Y を求め、減衰量と位置変化の関係を得る。X 方向の最大、最小の差をΔX とし、Y 方向も同様にΔY として温度毎に表した。尚、X,Y は各電極に対する測定電圧を Va,Vb,Vc,Vd として次式で求められる。

$$X = k_x \frac{Va - Vb - Vc + Vd}{Va + Vb + Vc + Vd} \quad , \quad Y = k_y \frac{Va + Vb - Vc - Vd}{Va + Vb + Vc + Vd}$$

ここで、k_x,k_y はモニタチェンバの形状、電極配置で決定されるモニタチェンバ固有の定数である。

Table 5: Position Change upon Switching the Variable Attenuator

温度[℃]	位置変化 [μm p-p]	
	ΔX Isolator/No Isolator	ΔY Isolator/No Isolator
20	3.4 / 13	3.8 / 7
25	3.3 / 12	2.3 / 9
30	3.4 / 15	3.1 / 12
35	3.8 / 17	5.7 / 9

3.2 可変減衰器の過渡応答改善

可変減衰器に求められる性能の中で、挿入損失の大小は検波器の様な用途では、小さい方が望ましい。又、スイッチング時間や、切り換え時の過渡応答や定常状態に達するまでの時間も重要である。これらの事情は、セレクタと全く一緒である。

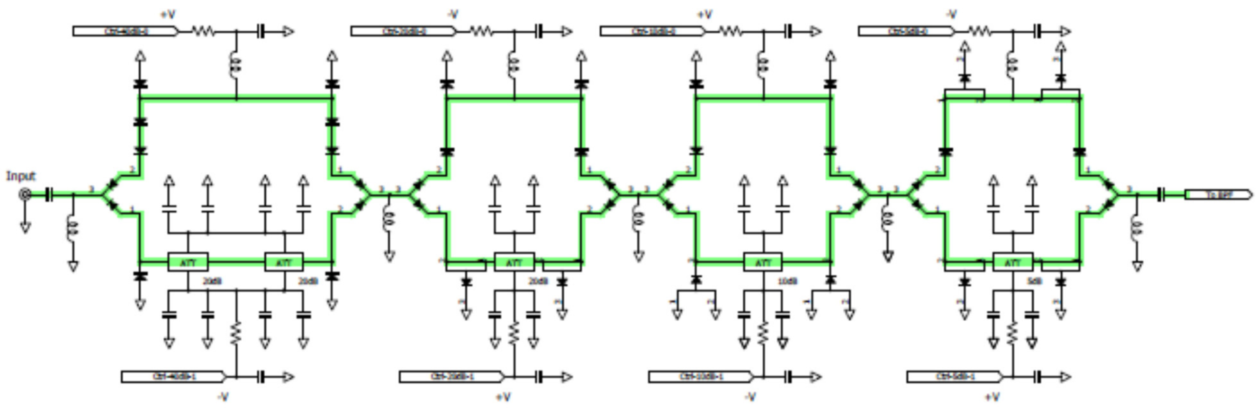

Figure 6: Circuit of a new step attenuator.

開発当初は可変減衰器のスイッチング素子として、セレクタで用いた IC タイプの PIN-Diode を用いて設計した。この可変減衰器の切り換え時の過渡応答が、セレクタと同様な応答を示し満足できる結果では無かった。最終的に、IC を用いた改造版とディスクリートの PIN-Diode を用いた新設計の可変減衰器とで比較テストを行い、Figure 6 に示す回路に至った。

新設計の可変減衰器に用いたスイッチング素子は、ディスクリートの PIN-Diode で構成し SPDT とシャント・スイッチの組み合わせでセレクタ部同様に段間は DC 結合と成っている。又、各セクションのスルー側（0dB）からのリーケージを減らす為、シリーズ・スイッチ用 PIN-Diode を減衰量 40dB では 4 個追加し、それ以外の減衰量には 2 個追加した。可変減衰器の過渡応答特性を Figure 7 に示す。

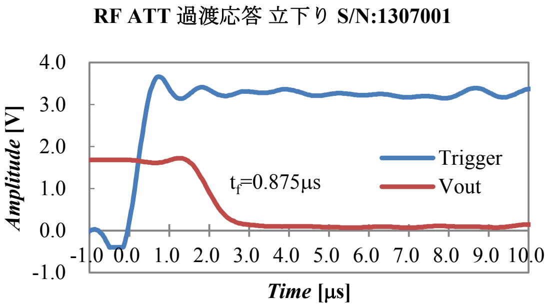

Figure 7: Transient characteristics of a new attenuator.

3.3 P1dB と非直線性

前述の通り、LER では、検波器の検出周波数の変更が行われた。これに伴い、周波数変換用 Mixer がパッシブ・タイプの DBM からアクティブ・タイプ（ギルバート・セル）の DBM に変更された。これは、 Local 入力(LO)ポートのドライブ・パワー(7dBm-13dBm 程度)が大きい事とイメージ・リジェクション・ミキサ構成に位相の異なる 2 種類の LO 信号(0°,90°)を必要とする事からの判断であった。

半導体（増幅器、Mixer 等々）を用いた回路網の入出力特性は、信号の大きい所では飽和特性を示す事は、良く知られた事実である。飽和特性を規定する指標の、P1dB（本来出力されるべき値より 1dB 下がった出力値又は、その時の入力値：1dB compression point）で表されている。

P1dB と非直線性には密接な関係があり、非直線性 0.05％を必要とする検波器の様な用途では、Mixer 入力で P1dB より 24dB 以上低いレベルで性能が達成可能となる。Figure 8 は、飽和特性を arctan で近似し P1dBi(添え字の i は、入力を意味する)=0dBm とした場合の予想される非直線性を表している。

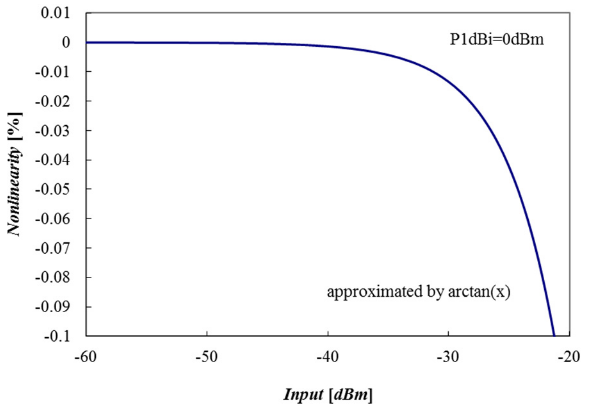

Figure 8: Expected nonlinearity of a mixer by arctan approximation.

通常 P1dB は、Active Mixer(0dBm)より Passive Mixer(LO=13dBm なら 10dBm 程度)の方が大きい。ただし，現在では、P1dB の大きい Active Mixer(13dBm)も入手可能と成っていて最終的にこの検波器に反映されている。

検波器の非直線性の検査項目では、最大入力の-60dBm を超える-50dBm まで測定範囲が拡大されている。これは、ビーム入射開始時や、Duty=10%程度の状態での測定を想定している為である。この時、BPM からの信号はバースト信号となるが、個々のバンチからの波高値に変化は無い。平均ビーム電流は、Duty に比例するので、検波出力をフルバンチ時と等しくするには 10dB 大きい信号が必要となる。

Figure 9 は、Mixer 変更前後の検波器の非直線性を表している。同図より、Mixer を変更前は、0dB の所で-50dBm の入力なので 0.05%の範囲を超えている事が分かる。又、Mixer を変更した方が良い事は、一目瞭然である。Mixer 変更は、基板改版を必要とするデメリットがあり、一方、Mixer を変更せずに僅かな改修で、非直線性の範囲を拡大する手立てもあった。調査の結果、LNA,2nd アンプ,Mixer と Mixer 内臓のベースバンド・アンプ(BB)を含めた総合 P1dB は-36.5dBm と分かり BB の入力が多少大きい事が非直線性の原因と推測された。シミュレーションの結果、2nd アンプの利得を 19dB から 9dB に下げて、BB の前に 6dB の減衰器を挿入する事で、非線形性を改善出来る事が分かっていた。最終的に、Mixer を P1dB のより大きいものに変更した方が、非線形性改善により有利と判断した。

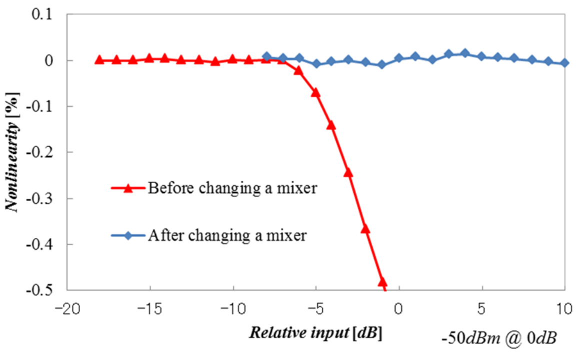

Figure 9: Comparison of nonlinearity before and after changing a mixer.

3.3　検査、評価システム

本来、検査、評価システムは納入後の試験や不具合時の故障診断用に KEKB 当時から引き継いだシステムであった。同システムでは、検波器の VXI モジュールとしての動作確認等々、検査項目は多岐にわたる。最も重要なのは、検波器より得られたデータから、測定系全体の SNR(Signal to Noise Ratio）を求める性能評価である。この時入力される疑似ビーム信号は、SG(Signal Generator) から与えられ f=508.887MHz、P=-60dBm の CW(Continues Wave) である。IF 信号出力で SNR を測定する場合、Spectrum Analyzer や FFT Analyzer を用いる事に成るが、信号強度の他に測定帯域内の全雑音を求める必要がありそう簡単では無い。その為、評価システムを用いる事は有用であると云える。

検波器には、アナログ処理部があり、ポテンショメータに因る調整個所が存在する。例えば、イメージ・リジェクション・ミキサの最良抑圧点を見つける為の Q(Quadrature)チャネル側の位相調整、IF 増幅器のオフセット調整、ゲイン調整等がある。これら調整個所の全ては、書き換え可能な電子ボリュームに置き換えられた。電子ボリュームの調整は、検査、評価システムに因る自動測定と計算機プログラムを介した調整が可能と成っている。

単年度 120 台生産の生産現場は、多忙を極めたと思われる。出荷前の各種検査では、多岐にわたる検査項目があり、とりわけ温度特性試験は長時間の測定が必要である。この様な状況下で、検査、評価システムを生産現場で用いた事が大いに役立った。

4.　運転に向けた課題

KEKB では、ビーム加速周波数(f_{rf} =508MHz)の影響を避ける為、$2f_{rf}$ を検出周波数としていた。当時から、508MHz の漏洩電波の存在は、高周波源に近接の加速器制御側室内と、トンネルからの信号ケーブルの末端でも観測されていた。一部の BPM 用に up converter を使用した 508MHz 検波が行われていたが、現状では、SuperKEKB での漏洩電波に因る位置誤差の程度は不明である。今後は、この漏洩電波に因る影響の推定や、電磁シールド等、無視出来ない位置誤差が生じた場合の対策を検討中である [4] 。

5.　まとめ

SuperKEKB 用検波器の検討を始めたのは、2007 年度の晩秋以降であった。具体的に開発を始めた 2008 年度から 2013 年度末納品まで、丸々6 年の月日を要した。試作機の評価が遅々として進まず停滞した時期や、より性能の高いパーツへの変更等々、紆余曲折はあったものの、無事完成する事が出来た。尚、製作台数は、2012 年度 20 台、2013 年度 120 台の合計 140 台である。

検波器の性能は、全ての検査項目をクリアし、仕様諸元を満たしている。ただし、本当の性能評価は、SuperKEKB の運転が始まった時、ビームでの確認となるので、その日を待ちたい。

参考文献

[1] 赤井和憲、小磯晴代、”SuperKEKB リング建設の現状”、本プロシーディングス。
[2] H.Ishii et al., “Development of a beam position detector for an orbit feedback system in SuperKEKB”, Proceedings of the 8th annual meeting of Particle Accelerator Society of Japan.
[3] T. Fujita et al., ”A PROBLEM IN RF SWITCHES OF MULTIPLEXING BPM SYSTEM”, Proceedings of DIPAC 2005, Lyon, France.
[4] 森 健児, “LCR 制御ラックの電磁波シールドについて”，ビームモニタ定例打ち合わせ, Nov. 27, 2013.