

CONSTRUCTION STATUS OF THE BEAM DIAGNOSTIC SYSTEM FOR XFEL/SPRING-8

Hirokazu Maesaka ^{#A),B)}, Shinobu Inoue ^{C)}, Hiroyasu Ego ^{A),B)}, Yasuyuki Tajiri ^{B)}, Shin'ichi Matsubara ^{A),B)}, Ken'ichi Yanagida ^{A),B)}, Ryo Yamamoto ^{B)}, and Yuji Otake ^{A),B)}

^{A)} RIKEN/SPRING-8, XFEL Joint Project

1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148

^{B)} JASRI/SPRING-8, XFEL Joint Project

1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198

^{C)} SPRING-8 Service Co. Ltd.

2-23-1, Kouto, Kamigori-cho, Ako-gun, Hyogo, 678-1205

Abstract

The beam diagnostic system for the x-ray free electron laser facility at SPRING-8 is under construction. The mass-production of rf cavity beam position monitors, screen monitors, differential current transformers and beam slits was completed. The beam monitors of the accelerator part of the XFEL were already installed and those of the undulator part are being installed. C-band rf deflector cavities for temporal bunch structure measurement were provided in March 2010 and the cavities are tested with a high-power rf field. The mass-production of beam monitor readout electronics was completed and its installation and cabling are now conducted. We newly developed a 16-bit 238MSPS A/D converter board, which was mass-produced for the electronics of the undulator part. The construction work will be finished in September 2010.

XFEL/SPRING-8 におけるビーム診断システムの建設状況

1. はじめに

SPRING-8 キャンパスにて建設中の X 線自由電子レーザー (XFEL) 施設は、平成 22 年度末のビーム調整開始を目指して据付・調整作業が進められている。本施設のビーム診断システムについても同じスケジュールで建設をおこなっている。

XFEL 施設の概略図とあわせてビーム診断システムの主な構成品の数量を図 1 に示す。XFEL 施設ではビーム位置測定に RF 空洞型ビーム位置モニタ (RF-BPM)^[1], ビームプロファイルの測定に OTR (Optical Transition Radiation) または YAG:Ce を使ったスクリーンモニタ (SCM)^[2,3], ビーム電荷量測定に差動型カレントトランスフォーマ (CT)^[4] を用いる。また、電子バンチの時間構造を測定するために横方向 RF 電場をつくる RF ディフレクタ^[5] を 3 番目のバン

チ圧縮器の下流に設置する。それに加えて、偏向電磁石からのコヒーレントシンクロトロン放射 (CSR) の検出器やストリークカメラもバンチ長測定に用いる。さらに、各バンチコンプレッサにはビームを整形するためのスリット (SLIT)^[6] を設ける。

図 2 にビーム診断システムの工程表を示す。機器の量産はすでに終わっており、今年 10 月の加速管コンディショニング開始までにすべての機器の設置を完了する予定である。ただし、量産開始以降に増設が必要となったものがいくつかあり、それらについては現在製作中で、平成 22 年度末のビーム運転開始までに設置完了する予定である。

ビームモニタの加工品については、平成 19 年半ばごろから加速器用 RF-BPM, SCM, CT, SLIT の量産を開始し、平成 20 年半ばごろから光源用の機器の量産を開始した。加速器用の機器は平成 21 年夏ご

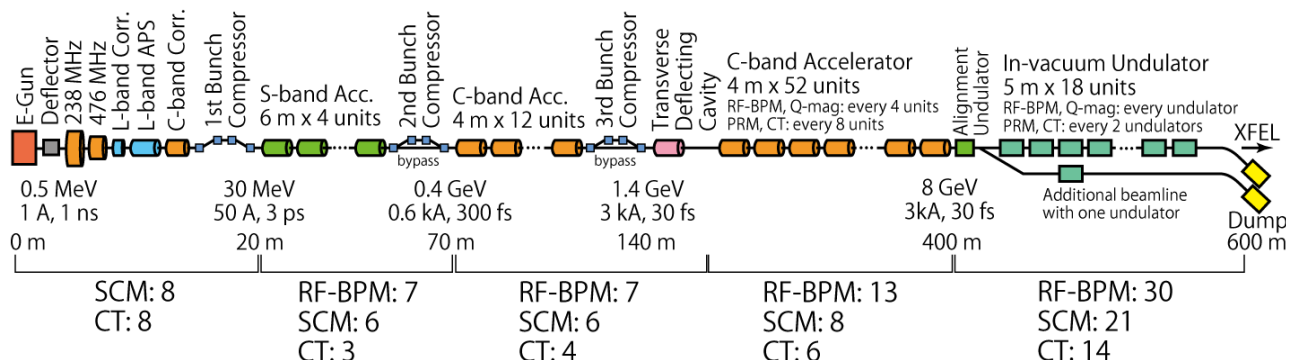


図 1 : XFEL 施設の概略図とビーム診断システムの主な構成品の数量

maesaka@spring8.or.jp

ろ、光源用の機器は今年 7 月までに納品された。加速器部分の据付作業は平成 21 年 7 月から開始し、今年 2 月に完了した。光源用の機器は今年 5 月から据付を始めており、9 月に完了する予定である。

読み出し回路については、加速器用のものが平成 19 年から、光源用のものが平成 20 年から製作を始め、すでに納品が終わっている。現在、加速器用・光源用ともに設置・配線をおこなっている。この作業も 9 月末までに完了する予定である。



図 2 : ビーム診断システムの工程表

2. 各機器の状況

前節に述べた各ビーム診断機器について個別の状況を以下に述べる。

2.1 RF-BPM

RF-BPM の概略図を図 3 に示す。RF-BPM は TM010 モードと TM110 モードの 2 つの空洞を持っており、TM010 空洞で電荷量と位相原点を求め、TM110 空洞でビーム位置を測定する。共振周波数はいずれの空洞も 4760MHz である。位置分解能は試験加速器での試験で $0.2\mu\text{m}$ と測定されている^[1]。

RF-BPM の量産は完了しており、空洞の共振周波数や Q 値の測定などの受け入れテストも終わっている。例として、TM110 空洞の共振周波数、無負荷 Q 値(Q_0)、負荷 Q 値(Q_L)を図 4 に示す。周波数、 Q_0 、 Q_L の設計値はそれぞれ 4760MHz、約 600、約 45 であるが、設計通りに製作できていることがわかる。また、直径 0.3mm のアンテナを挿入して電気中心と機械中心のずれを測定し、 $\pm 0.02\text{mm}$ 以内に入っていることも確認した。

RF-BPM の据え付けの際には、隣接する四極電磁石の磁場中心と RF-BPM の電気中心が合っていることを確認している。図 5 に示すように、四極電磁石を 2 台の RF-BPM で挟み、直径 $50\mu\text{m}$ の金メッキタンクステン線を張る。ワイヤの位置は 2 台の RF-BPM の電気中心を通るようにあわせる。電気中心を求めるには、TM010 空洞から 4760MHz の RF を印加し、TM110 から検出したときにパワーが最小になるところを探せばよい。四極電磁石の磁場中心を測定するときは、電磁石を励磁し、ワイヤに交流電流を流して RF-BPM でワイヤの揺れを測定する。揺れがなくなる位置が磁場中心である。四極電磁石と RF-BPM の位置のずれは一部を除いてほぼ $\pm 0.05\text{mm}$

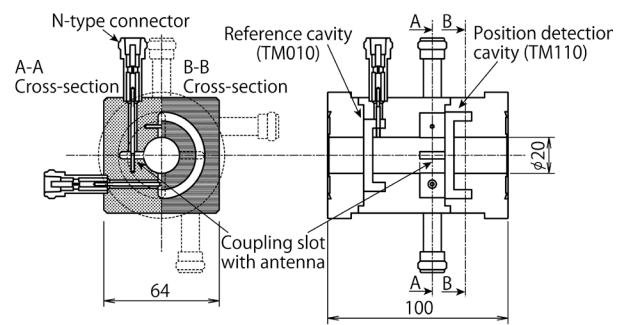


図 3 : RF-BPM の概略図

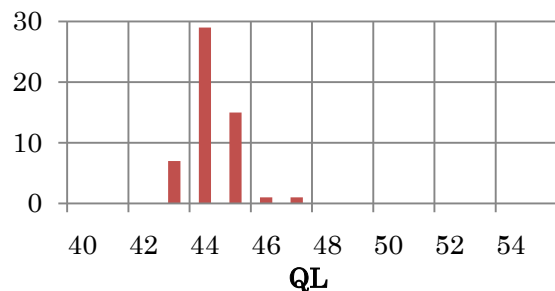
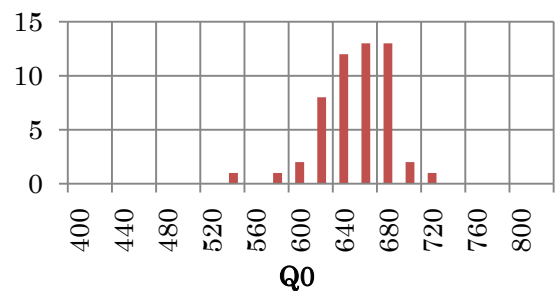
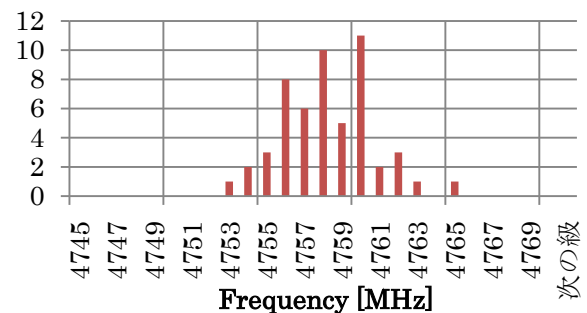


図 4 : RF-BPM の TM110 空洞の共振周波数(上)、無負荷 Q 値(中)、負荷 Q 値(下)のヒストグラム。

以内に入っている。この測定の精度は同じ測定を複数回おこなった時の再現性から 0.02mm 程度と見積もっている。このようにして据え付けられた RF-BPM と四極電磁石の写真を図 6 に示す。

光源用の RF-BPM については各アンジュレータ間に設置され、X 線を使った精密アライメントのためのアイリスを備えている。アライメント用の X 線は振り分け用偏向電磁石の上流にあるアライメント専用のアンジュレータ(図 1 参照)で発生させる。その X 線を RF-BPM に取り付けられている直径 0.1mm のアイリスに当て、下流の X 線検出器で撮像する。これにより、RF-BPM を一直線上に並べることができる。

図7にアイリス付き RF-BPM の写真を示す。アイリスは SUS の円筒に直径 0.1mm 深さ 1mm の孔のあいたタングステンを圧入した構造となっている。アイリスはニューマチックアクチュエータで出し入れされ、挿入する際には V ブロックに押さえつけることで位置を決める形となっている。

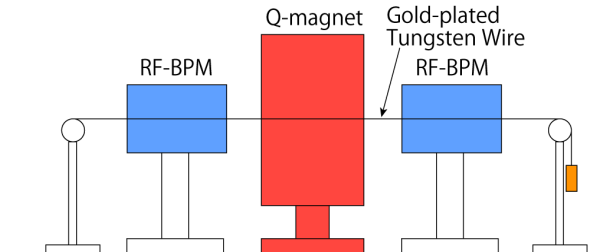


図 5 : 四極電磁石の磁場中心と RF-BPM の電気中心とのずれ測定のセットアップ

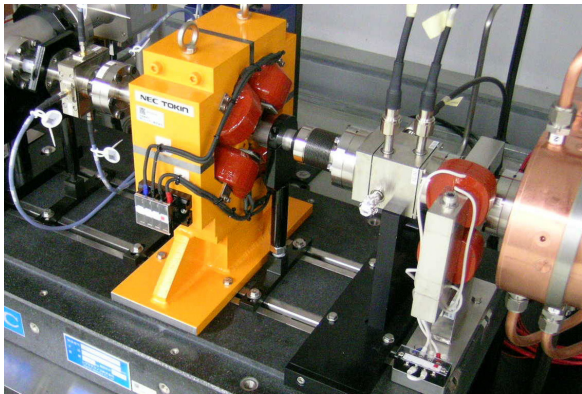


図 6 : 据付けられた RF-BPM と四極電磁石の写真

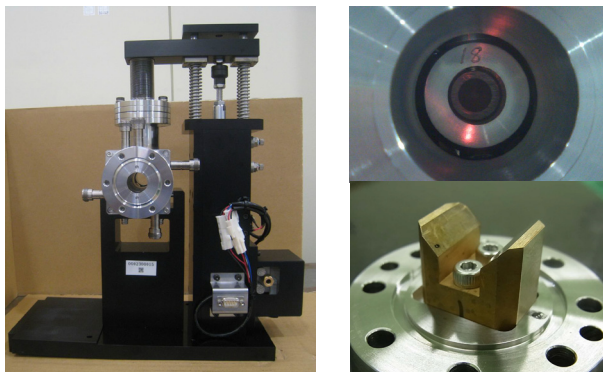


図 7 : アイリス付き RF-BPM の写真(左)。右上はアイリスの拡大で、右下はアイリスを受ける V ブロックである。

2.2 スクリーンモニタ

スクリーンモニタ(SCM)は、ビームが金属ターゲットにあたったときに出る OTR や YAG:Ce 蛍光体に当たったときの像を CCD カメラでとらえることによってビームプロファイルを測定する装置である。本装置は、ターゲットを出し入れする真空チャンバと、ビームプロファイルを撮像するための光学架台に分かれている。SCM の真空チャンバと光学架台をそれぞれ図 8, 9 に示す。

SCM のターゲットは真空チャンバ内のシャフトに取り付けられており、シャフトを上下に動かすこ

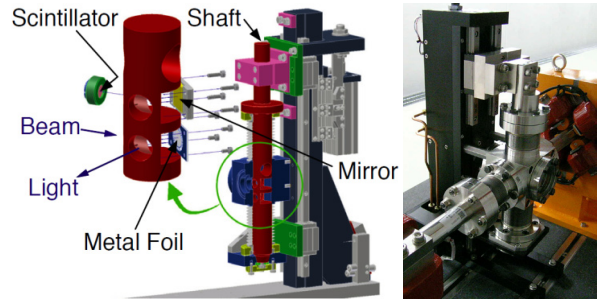


図 8 : SCM 真空チャンバの概略図と写真。

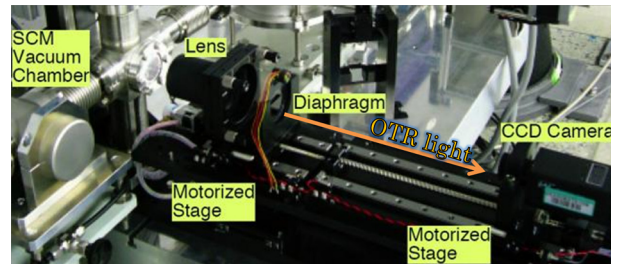


図 9 : SCM 光学架台の写真。

とでターゲットを出し入れする。シャフトはリニアガイドで精密にスライドできるようになっており、駆動はエアシリンダでおこなう。ターゲット位置は 0.1mm 以下の精度でビーム軸に合うように調整されている。

光学架台にはカスタム仕様のレンズ・電動の絞り・CCD カメラが設置されている。とくに、高分解能が必要なところでは、1-4 倍の可変ズーム光学系を備えている。4 倍光学系での分解能は $2\mu\text{m}$ である^[2]。この可変ズーム光学系では倍率を遠隔操作できるようにステップモーターでレンズとカメラを動かせるようにしている。なお、分解能が $10\mu\text{m}$ 程度で十分なところではモーターのない固定焦点光学系を使用する。CCD カメラからの画像データは CameraLink を通してカメラ用サーバに記録される^[3]。

SCM の据え付け状況としては、加速器用の真空チャンバ部分はすでに据え付けが完了しており、光源用のものは現在据え付け中である。光学架台については加速器用・光源用とも据え付け中である。

2.3 差動型 CT

XFEL では図 10 に示すような差動型の CT を使用する^[4]。この CT は 4 ポート備えており、2 つは正の信号、のこりの 2 つは負の信号が出るようにコイルを巻いている。正と負の信号の差を取ることで、コモンモードノイズを低減することができる。また、4 ポートの信号の平均をとることでビーム位置の依存性を抑えることができる。

差動型 CT はすでに納品済みで、設置前に信号の極性確認なども終えている。加速器用のものは設置済み、光源用のものは設置の途中である。9 月末までに設置が完了する予定である。

2.4 RF ディフレクタ

RF ディフレクタ(RFDEF)は、横方向の RF 電場でビームをキックすることでバンチの時間構造を 10fs

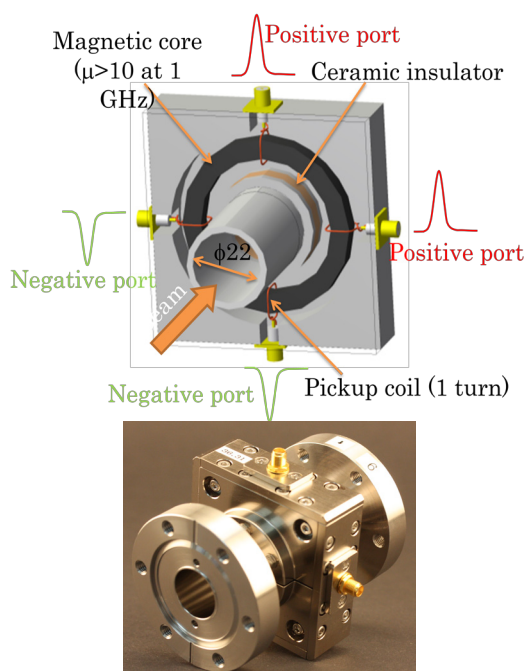


図 10：差動型 CT の概略図(上)と写真(下)。

の分解能で測定するための空洞である。図 11 に示すように、横方向 RF 電場のゼロクロス位相にビームをのせることで、バンチの時間構造を空間方向に引き伸ばす。それをスクリーンモニターでとらえることで時間構造を得ることができる。

XFEL で使用する RFDEF の概略図とセルの写真を図 12 に示す。周波数は C バンド加速器と同じ 5712MHz で、HEM11-5 π /6 モードを使用している。この加速管は位相速度と群速度の方向が逆向きの後進波管となっている。ビーム孔をレーストラック型の形状として電場の X 方向と Y 方向の縮退を解いている^[5]。XFEL では長さ 1.7m の空洞を 2 本使用し、50MW クライストロン 1 本から RF を供給する。これにより、最大 40MV の横方向電圧が得られ、エネルギー 1.4GeV、バンチ長 100fs のビームを 5m 下流で約 1mm に引き伸ばすことができる。

空洞の製作状況としては、今年春に 2 本とも完成している。そのうちの 1 本の移相誤差と軸上電磁界分布を図 13 に示す。位相誤差は ± 2.8 度であり、RFDEF として十分な性能が得られている。図示してはいないが、もう 1 本の移相誤差は ± 7.5 度と若干大きいものとなった。しかしながら、時間構造測定の問題にはならない。シャントインピーダンスは 2 本とも 10M Ω /m 以上と求められ、仕様値の 9M Ω /m を十分にクリアしている。

RFDEF は現在、試験設備に据え付けられ、高電界試験をおこなっている。問題なければ 9 月に実機に据え付けられる予定である。

2.5 CSR モニタ、ストリークカメラ

バンチ長を測定するための他の方法として、CSR 強度を測定する方法と、ストリークカメラを使用す

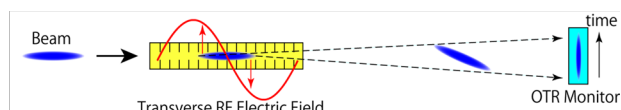


図 11：RFDEF によるバンチの時間構造測定システムの概略図。

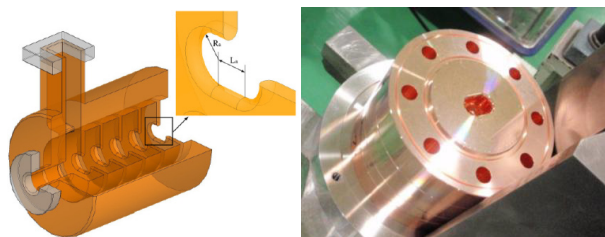


図 12：RFDEF 空洞の概略図(左)とセルの写真(右)。

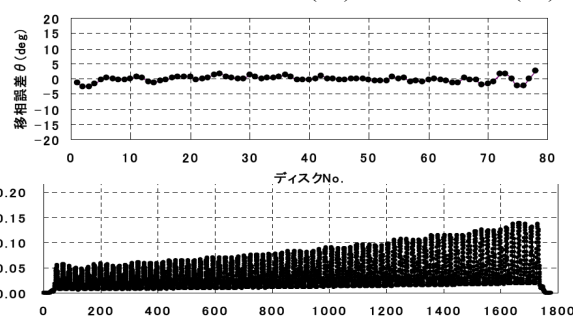


図 13：RFDEF 空洞の移相誤差(上)と軸上電磁界分布(下)。電磁界分布の横軸は mm である。

る方法とがある。CSR モニタは 3 つのバンチコンプレッサのそれぞれに設置する予定である。各バンチコンプレッサの 4 番目の偏向電磁石から出る CSR を石英ビューポートから取り出して焦電検出器で検出する。ストリークカメラについては、スクリーンモニターからの OTR を浜松ホトニクス社の FESCA200^[7]で測定する方法をとる。

実機の製作をする前に、SCSS 試験加速器を用いて CSR モニタとストリークカメラによるバンチ長測定試験をおこなった。バンチ長を変えるために、試験加速器のバンチコンプレッサの上流でビームにエネルギーチャープを与える S バンド加速器の加速位相をスキャンしながら CSR の強度測定とストリークカメラでのバンチ長測定をおこなった。その結果を図 14 に示す。図には FEL の強度をフォトダイオードで測定したものもプロットされている。クレスト位相では CSR 強度が弱くストリークカメラのバンチ長も長い。位相をバンチング方向（マイナス側）に振っていくと CSR 強度が上がり、ストリークカメラで測定したバンチ長が短くなる。-23 度あたりが FEL のレージング点であるが、さらにバンチング方向に位相を動かすと、CSR 強度はさらに上がり、ストリークカメラで測定したバンチ長もさらに短くなる、やがてオーババンチとなり CSR 強度が下がり、ストリークカメラのバンチ長も長くなる。これはビーム力学から予想される結果であり、CSR モニタ・ストリークカメラとも正常に動作していることが確認された。したがって、CSR モニタの結果を加速器にフィードバックすることも可能である。

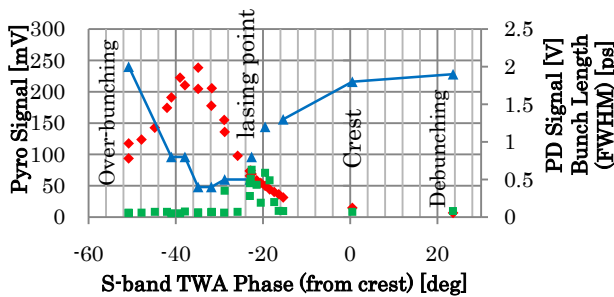


図 14：試験加速器での S バンド加速器の位相に対する CSR 強度(赤◆)・ストリークカメラ(青▲)・FEL 強度(緑■)の関係。横軸は 0 度が Crest である。

2.6 スリット

各バンチコンプレッサ部にはビームを整形するためのスリットが設置される。その外観の写真を図 15 に示す。角穴のあいたタングステンブロックが銅のロッドにロウ付けされた構造となっており、それを 2 本駆動してスリット幅を変えられるようになっている。詳細については文献[6]を参照されたい。スリットの製造はすでに完了しており、据え付けもほぼ完了している。

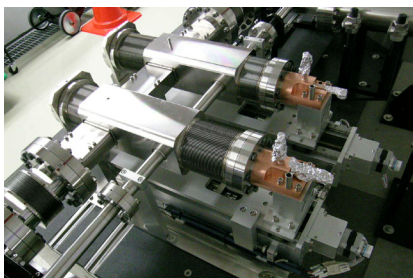


図 15：スリットの外観の写真。

2.7 読み出し回路

RF-BPM と CT の読み出し回路は、加速器の Low-level RF システム用に開発した水冷 19 インチラックに収め、低ノイズ集合電源から電源供給する方式^[8]をとっている。RF-BPM の回路は、空洞からの 4760MHz の信号を IQ 検出器で検波したあと、VME の高速 A/D 変換ボード(12 ビット・238MHz サンプルング)にて波形データとして取得する形となっている。CT については、加速器トンネル内のプリアンプを経て水冷ラック内の主アンプで処理したあと、VME 高速 A/D 変換ボードで取得する。回路の製作は加速器用・光源用とも終わっており、現在、設置・配線をおこなっている。図 16 に光源用回路の写真を示す。

最近の進展としては、A/D 変換ボードの分解能を 12 ビットから 16 ビットに上げたものを開発したことが挙げられる。加速器用の回路については 12 ビットのボードを量産したが、それと並行して 16 ビットのボードを開発してきた。光源用の回路については 16 ビットのボードが間に合ったため、すべて 16 ビットで製作した。実際のダイナミックレンジは約 13 ビットが達成され、12 ビットのボードに比べてダイナミックレンジが大きく向上している。

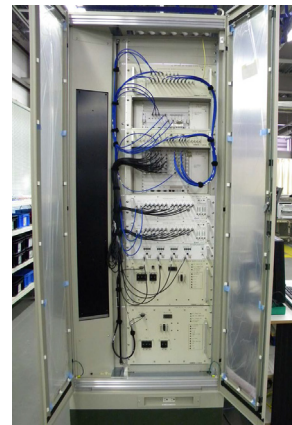


図 16：光源用の RF-BPM と CT の回路の写真。

3. まとめ

RF-BPM, SCM, CT, RFDEF, SLIT などからなる XFEL のビーム診断システムは、今年 10 月からの加速管コンディショニングに間に合うよう、製作・設置がおこなわれてきた。これまでに、モニター本体・読み出し回路とも量産品の製作が完了している。加速器部分については据付もほぼ完了している。9 月末までに光源部分のものも含め据付を完了させる予定である。一部、増設分の診断機器をいくつか製作中であるが、こちらは 2 月のビーム調整に間に合うような予定で進めている。このように、XFEL のビーム診断システムは予定通りに建設されている。

謝辞

ビーム診断機器本体の製作では明昌機工(株)、(株)トヤマにご尽力いただきました。RF ディフレクタの製作では三菱重工業(株)に大きく貢献していただきました。読み出し回路の製作・設置・配線は三菱電機特機システム(株)を中心に多くの企業にご協力いただきました。この場を借りて感謝申し上げます。また、XFEL グループの他の方々にもビーム診断機器の建設にご協力いただきましてありがとうございました。

参考文献

- [1] H. Maesaka *et al.*, "Development of the RF Cavity BPM of XFEL/SPring-8", Proceedings of DIPAC'09 (2009).
- [2] K. Yanagida *et al.*, "Development of Screen Monitor with a Spatial Resolution of Ten Micro-meters for XFEL/SPring-8", Proceedings of LINAC'08 (2008).
- [3] T. Matsumoto *et al.*, "X 線自由電子レーザー計画におけるビームプロファイルモニターシステム", in these proceedings.
- [4] A. Higashiya *et al.*, "Development of a Beam Current Transformer for the X-FEL Project in SPring-8", Proceedings of FEL'07 (2007).
- [5] H. Ego *et al.*, "Design of the Transverse C-band Deflecting Structure for Measurement of Bunch Length in X-FEL", Proceedings of EPAC'08 (2008).
- [6] S. Inoue *et al.*, "X 線自由電子レーザー計画における電子ビームスリット", in these proceedings.
- [7] <http://www.hamamatsu.com/>
- [8] T. Ohshima *et al.*, "XFEL/SPring-8 タイミング・低電力 RF システムの建設状況", in these proceedings.