

ERLを支えるビームモニター

1. はじめに

ERLは大電流かつ高品質の高エネルギー電子ビームを現実的な消費電力で実現し得る魅力的な加速器である。既にFELと組み合わせて赤外や紫外領域の高出力光源として実用化されている他 [1]、素粒子・原子核分野でもイオンビームの電子冷却等への利用が計画されている [2]。一方、KEKでは2005年頃より先端性と汎用性を兼ね備えた次世代の大型放射光源候補として検討を開始し、2013年12月にはERLの基本要素を一通り備えた試験加速器“コンパクトERL (cERL)”が完成、その調整運転を開始した [3]。このような加速器の調整運転を効率的に遂行し、加速器が持つ性能を十分に引き出すためには、ビームの位置や大きさ、形状、長さ、品質、強度、ロスポイント等のパラメータを精密に計測し得るビーム診断機器（ビームモニター）の存在が欠かせない。本稿では、加速器を支える基盤技術の一つである種々のビームモニターについて解説する。ただし、網羅的な説明は過去のOHOテキストを中心に多くの名著があり [4]、ERLに必要な電氣的・光学的ビームモニターについても2008年の本セミナーで取り上げられているため [5, 6]、ここでは上記cERLで実際に使用しているビームモニターに話を限定し、その動作原理や設計思想、今後の課題等について具体的な使用例を交えながら紹介したい。

2. cERLのビームモニター概要

cERLは将来の大型放射光源や高繰り返しFELを見据えた試験加速器であるためその構成は流動的であるが、現時点での主要なビームモニターの全体配置を図1に示す。表1は図中に示されていないものも含めた全モニターの種類と台数をまとめたリストである。各モニターの概要を以下で述べる。

Table 1: cERLの全モニターリスト

種類	目的	台数
BPM (Stripline/Button)	Position, Charge	45
SCM (Ce:YAG/OTR)	Position, Profile	32
BLM (Fiber/CsI)	Loss	10
CT	Charge	4
DCCT	Current	1
Movable FC	Charge	3

● BPM (Beam Position Monitor)

BPMとはその名のとおりビームの位置を測定するモニターで、最も基本的なモニターの一つである。金属製の真空ダクト内に置かれた荷電粒子は、ダクトの内面に逆符号の鏡像電荷を誘起する。荷電粒子が加速されてダクト内を運動すると鏡像電荷もその運動に追従するため、ダクトには電流が流れることになる。このビームと並行してダクト上を流れる電流を“壁電流”という。単純な円筒対称の真空ダクトを想定すると、ビームがダクトの中心を通った場合

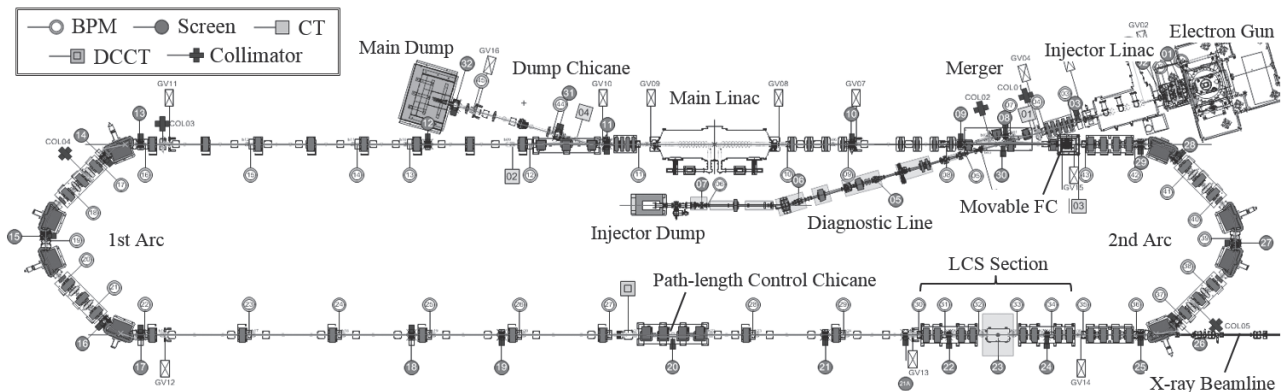


Fig. 1: cERLにおけるモニター配置

は壁電流の密度分布は等方的となるが、中心からずれた場所を通った場合はその分布に偏りが生じる。ダクト内の方角方向に複数の電極を対向させて配置し、この壁電流の偏りを検出してビームの重心位置（ダクト中心からの変位）を割り出すのが BPM の基本原理である。図 2 にその概念図を示す。

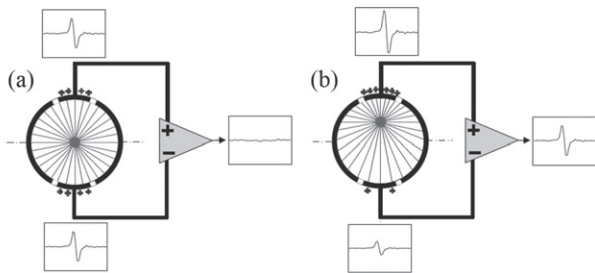


Fig. 2: BPM の基本原理の概念図 [7] (a) ビームがダクト中心を通った場合 (b) ダクト中心からずれた位置を通った場合

各電極からはビームの位置に依存して異なる大きさの信号が出力されるが、ダクト中心からの変位が電極間の距離に対して十分小さい場合、それらの総和は通過したビームの強度（電荷）に比例した一定値となる。したがって、各 BPM の和信号を加速器の上流から順に並べれば、ビームをロスしている区間をおおよそ判定できる。また、電極をうまく設計すれば出力信号にビームの進行方向の構造（バンチ構造）を反映させたり、信号の分布を多重極展開したときの高次成分を利用してビームサイズ等を測定することもできる [8, 9]。

BPM の最大の強みは、ビームの軌道を非破壊で測定できることにある。ERL の CW モード（ビームを間引かないで連続的に加速する運転モード）では、ビームパワーがメガワットのオーダーとなり得るため、後述するスクリーンモニターのような破壊型のモニターは使用できない。BPM はこのようなハイパワー領域で特に有用なツールとなる。

cERL のような線形加速器でビームの質を劣化させることなく輸送するためには、集束力やエネルギーの変化、シングルキック等に対するビームの応答を随時計測し、それを設計に近づけていく努力が必要である。そのためには、全ての四重極電磁石とセットで BPM を配置するのが理想であるが、実際

にはコストや設置スペースを削減するため、事前のシミュレーションにより軌道補正に要求される精度を満たすのに最低限必要な台数に絞られる。cERL の場合は基本的に 2 台の四重極電磁石に対して 1 台の割合となっており、合計 45 台の BPM が設置されている。

● SCM (Screen Monitor)

SCM とは、ビームが当たると発光するスクリーン（シンチレータや金属箔等）をビーム軌道上に挿入し、その発光分布をダクトの外に設置した CCD カメラで撮影することでビームの断面方向プロファイルを光学的に測定するモニターである。典型的な破壊型モニターであるため、使用する際はビームロスによる空間線量の増加やスクリーン自体の熱損傷に注意しなければならないが、ビームの位置だけでなくそのサイズや密度分布まで同時に測定できるという大きな利点を持つ。スクリーンとして発光効率の高いシンチレータを使用すれば非常に低強度のビームでも観測できるため、ビームをワンパスで加速する線形加速器や蓄積リングに繋がるビーム輸送ラインでは欠かせない機器である。また、上流の電磁石や空洞等と組み合わせればビームのエネルギーや進行方向の長さといった様々なパラメータを測定することが可能であり、cERL の調整運転においても最も重要なモニターとなっている。

SCM も BPM と同様、軌道補正やビームパラメータの測定に対する要求に応じた場所に設置されるが、特にビームを見失いやすい偏向電磁石の下流や、ビームの位置だけでなくプロファイルまで重要となる加速空洞の前後といった場所への設置が有効である。cERL では全部で 32 台の SCM を使用している。

● BLM (Beam Loss Monitor)

高エネルギーのビームを構成している粒子が真空ダクト等に衝突して失われると、そのダクトが放射化したり発熱したりするだけでなく、2 次的に発生する大量の放射線によるダメージで周辺のハードウェアが故障する恐れがある。最上流の電子銃等で生成したビームをできるだけ失うことなく下流へ輸送するためには、ビームが加速器のどこで、どれくらい失われているかをリアルタイムで把握し、それ

を最小化するよう慎重に調整する必要がある。このようなビームのロスポイントや損失量を計測するモニターが BLM である。BLM にはビームロスで発生した 2 次粒子（中性子、ガンマ線、電子・陽電子、陽子等）を光や電子正孔対に変換して検出するタイプのものが多く、あらかじめビームロスが想定されている場所（ビームダンプやコリメータ等）の周辺やビームダクトに沿って配置される。特に ERL のようなハイパワーのビームを備えた加速器では、わずかなビームロスでもハードウェアの破損や真空事故に直結するため、BLM で一定レベル以上のビームロスを検知したら即座に加速器が停止するよう、高速のインターロックシステムに組み込まれて使用されることが多い。

cERL の加速器室内には動作速度や使用目的に応じて数種類の BLM が設置されているが（図 37 参照）、それらのうち $1 \mu\text{s}$ 以内という高速で動作するものの数は 10 台となっている。

● CT (Current Transformer)

CT とは、交流電流センサーとして広く使われている電流トランスと同じ原理でビームの強度を測るモニターである。すなわち、図 3 に示したようにフェライト等の強磁性体で作られたトロイダルコアにビームを通し、コア内に発生した磁束をコアに巻いたピックアップコイルで検出する。コイルの両端に誘起される電圧はコアを通ったビームが運ぶ電流に比例するため、非破壊でビームの強度や時間構造を測定することができる。上述した BPM の和信号よりビームの通過位置に依存しない出力信号を得られるため、加速器の上流に設置した CT と下流に設置した CT で信号の差を取れば、より正確にビームの損失量（輸送効率）を評価することが可能である。

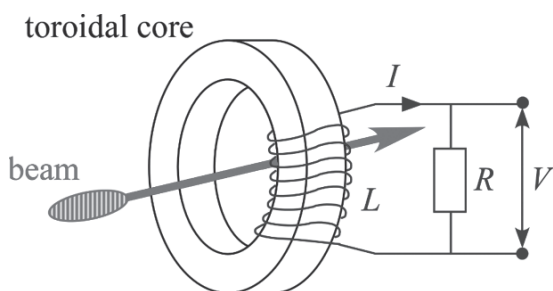


Fig. 3: CT の模式図

トロイダルコアは真空ダクトの外に設置されるため、CT 部のダクトはビームが伴う電磁場の高周波成分を通し易いセラミックで作られ（セラミックブレイク）、コア全体はその高周波を外部へ漏洩させないよう金属の静電シールドで覆われる。このシールドは、壁電流の流れを妨げないための迂回路としての役割も担っている。セラミックの内面にはビームによるチャージアップを防ぐための導電性コーティングが施され、外面には必要以上の高周波成分をカットするための容量構造（薄い絶縁フィルムを金属箔で挟んで形成したコンデンサ等）が設けられる。ハイパワーのビームでは壁電流や取り出した高周波成分に起因する発熱が大きくなり得るため、コアを断熱材で保護したり温度モニターを設置する等の配慮が必要となる。

cERL には、入射ライン、周回部の上流と下流、ダンプラインの各所に計 4 台の CT が設置されているが、現在のビーム強度ではノイズに対する出力信号の比率（SN 比）が小さく精度の高い情報が得られないため、まだビーム調整に使用していない。図 4 にその写真を示す。コアには Bergoz 社製の Fast CT を使用している。

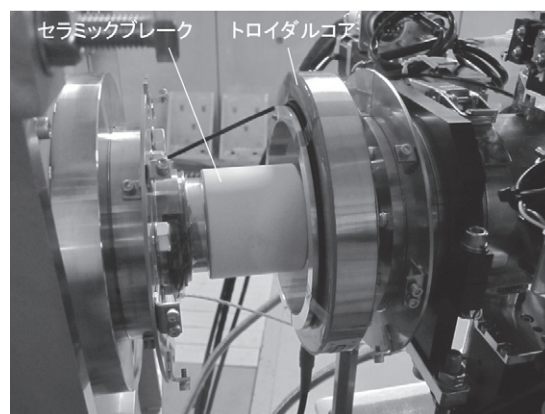


Fig. 4: cERL で使用している CT（外側の静電シールドと容量構造を取り外してセラミックブレイクを露出させた状態）

● DCCT (DC Current Transformer)

上述した CT はビームにより誘起される磁束密度の変化をコイルのインダクタンスを介して検出するものであるから、磁束密度に変化のない連続的なビームに対しては機能しない。そこで、複数のコア

とコイルを巧みに組み合わせることで、ビーム電流の直流成分を測定できるようにしたものが DCCT である。

図 5 に典型的な DCCT の模式図を示す。DCCT は 2 つのトロイダルコアと 3 種のコイルから構成されている。1 番目のコイルは互いに逆向きに巻かれており、各コアを交流的に励磁するのに用いられる。この励磁電流の周波数は通常数 kHz 程度であり、振幅はコア内の磁束密度が十分飽和する大きさに設定される。同じ向きに巻かれた 2 番目のコイルは、1 番目のコイルで励磁されたコア内の磁束密度の変化を検出するのに使用される。簡単のため 2 つのコアは全く同じ磁気特性を持つと仮定すると、ビームがない場合には 2 つの磁束密度の変化が互いにキャンセルするので 2 番目のコイルで得られる検出信号はゼロである (図 6(a) 参照)。しかしながら、2 つのコアを連続的なビームが通過すると、交流的な励磁電流にビームからの直流電流が加わるため、図 6(b) のように 2 つの磁束密度の変化がキャンセルしなくなり、励磁電流の倍の周波数を主成分とした検出信号が得られる。3 番目のコイルはこの検出信号をゼロに戻すように働くフィードバック回路と繋がっており、ここに流れるフィードバック電流を測定すれば 2 つのコアを通過した直流電流を知ることができる。

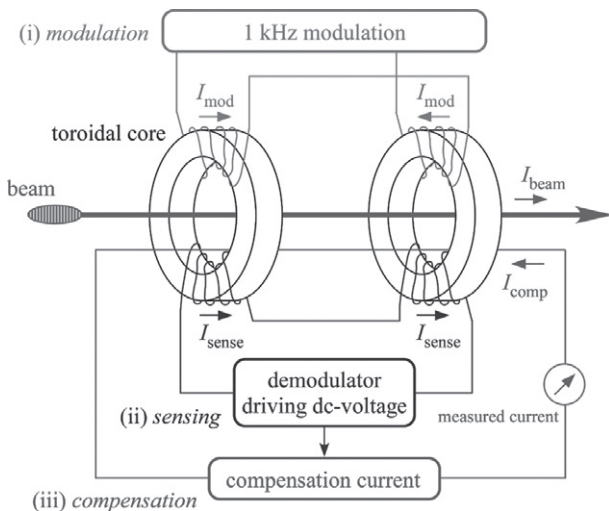


Fig. 5: DCCT の模式図 [10]

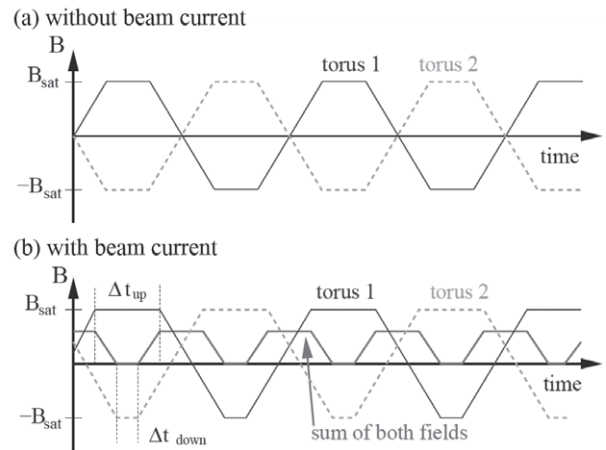


Fig. 6: 2 つのコア内に発生する磁束密度とその和 (簡単のため三角波で近似) [10] (a) ビームがない場合 (b) ビームがある場合

2 つのコアの磁気特性が一致しない場合、フィードバック電流にリップルが生じて測定精度が悪化する。実際の DCCT にはこの影響を軽減して高精度化するための仕組みが加えられており、さらに直流電流の速い変化にも追従できるよう広帯域化する工夫もなされている。DCCT も CT と同様に注意深く設計されたセラミックブレイクの近くに設置されるが、CT よりも外部磁場の影響を受けやすいため、静電シールドに加えて磁気シールドも兼ねた筐体内に設置される。

cERL にも DCCT を 1 台設置しているが、CT と同じく平均ビーム電流が小さい現状ではまだ使用していない。図 7 にその写真を示す。コアには Bergoz 社製の New Parametric CT を使用している。

● FC (Faraday Cup)

FC とは、絶縁された電極でビームを直接受け止め、生じた電流からビームの強度を測るモニターである。ビームが入射した際に電極表面から放出される 2 次電子を外部へ逃がさないようカップ状の電極を使用することからこのような名前と呼ばれている。電極で得られたビーム電流は適当なフィードスルーを介して真空ダクトの外に取り出され、精密抵抗や低ノイズの電流/電圧変換アンプによって検出される。原理は非常に単純であるがモニターとしての感

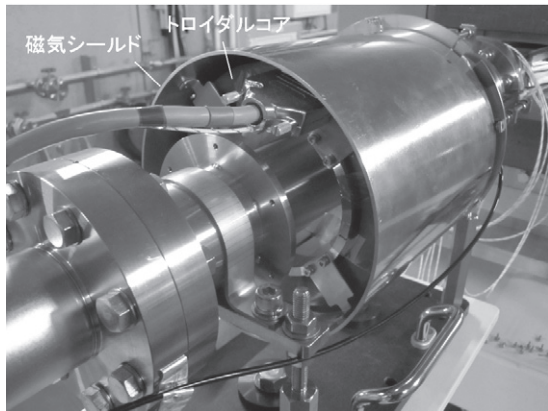


Fig. 7: cERL で使用している DCCT (外側の静電シールドを取り外しミューメタルで作られた円筒状の磁気シールドが見えている状態)

度は高く、上述した DCCT の検出限界 ($\sim 1 \mu\text{A}$) よりも数桁低いビーム電流まで測定することができる。

測定精度を高めるためには、ビームが電極を貫通したり漏れ出たりすることがないように、ビームの種類やエネルギーに応じたサイズ・厚みの電極を使用しなければならない。また、電極内に放出された 2 次電子を余すことなく回収することも重要であり、そのためにはカップを深くする、カップの入口に別の電極を設けてポテンシャル障壁を作る、永久磁石を用いてビーム軸と垂直な方向に一樣な磁場を作るといった方法がある (図 8 参照)。当然ながら電極はビームのエネルギーロスにより発熱するため、熱伝導度の高い銅等の材質で作られることが多い。ハイパワーのビームでは水冷も必要となるが、冷却水は温度に依存する有限の電気伝導度を持っているため、完全に絶縁された非冷却の FC と比べると測定精度が落ちる傾向がある。また、ハイパワーのビームに使用する場合、ビームパワーが電極の 1ヶ所に集中しないよう、カップの内面をコーン上に加工したり、上流の電磁石を使ってビームの照射面積を拡げるといった工夫も必要になる。このように、FC は可動式のビームストッパーとも言えるため、ハイパワーのビームに使用するには冷却や放射線遮蔽の面でビームダンプと同様の設計が求められる。逆に言えば、ビームダンプのダクトを丸ごと絶縁して入射した電流を取り出せるようにすれば、そのままハイパワー仕様の FC として利用することが可能である。

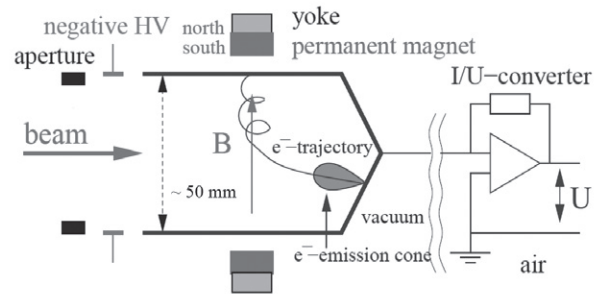


Fig. 8: 典型的な FC における 2 次電子の捕集方法 [10]

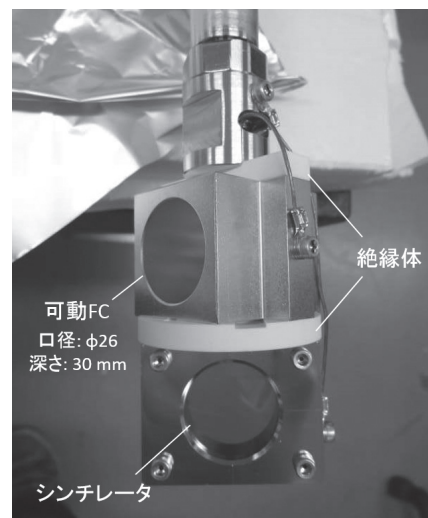


Fig. 9: cERL で使用している可動式の FC (下に付いているのが SCM 用シンチレータ)

cERL には、電子銃の直後と入射ビーム診断ライン、第 2 アーク直後の計 3ヶ所に可動式の FC を設けている。前者 2つは主加速空洞で加速する前の低エネルギービームが対象となるため SCM と同じ駆動機構でビーム軌道上に挿入されるのに対し、後者は加速後に周回してきた高エネルギービームが対象のため専用の駆動機構と放射線シールドを備えている。これらの他、診断ラインの末端にある入射ビームダンプと主空洞下流のメインダンプもそれぞれダクトを絶縁することで FC としての機能を持たせてあり、計 5ヶ所でビーム強度を測定可能となっている。図 9 に電子銃直後で使用している可動 FC の写真を示す。銅製のカップ状電極で、ダクトとはセラミックのスペーサーにより絶縁されている。SCM

Table 2: cERL 用 BPM の内訳

設置場所	ダクト	電極	台数	出力振幅 [mV _{pp} /pC]	ロスファクター [mV/pC]
合流部・直線部	φ50	Stripline (Short)	27	103.5	59.1
入射部・診断部	φ63	Stripline (Long)	4	88.6	48.3
ダンプリーン	φ85	Stripline (Long)	2	60.2	21.3
アーク部	8 角形	Stripline (Short)	10	172.7	82.0
LCS 衝突点	φ50	Button	2	75.1	26.1

用のシンチレータと同じ駆動機構を利用して出し入れされる。

以上の基本的なビームモニターに加え、入射ビーム診断ラインには“スリットスキャナー”と“偏向空洞”が設置されている。これらはそれぞれビームの質（エミッタンス）と進行方向の長さ（パンチ長）を測定するためのモニター関連機器である [11]。

以下では、これらの中から特に開発要素の高い BPM と SCM, BLM を取り上げ、その動作原理やシステム構成、具体的な使用例等を述べる。また、今後の課題についても最後にまとめて紹介する。

3. ビーム位置モニター (BPM)

加速器を構成している真空ダクトは、そこを通るビームのサイズや軌道を考慮してなるべくビームロスが少なくなるような大きさ・形状で作られている。前章で述べたとおり、BPM はダクトの内側に電極を配置して壁電流の分布をピックアップするものであるから、ダクトが異なれば BPM のデザインも変わってくる。cERL に設置されている全 45 台の BPM も、ダクトの形状や電極のタイプによって表 2 に掲げた 5 種類に大別できる。本章では、これらの中から最も製作台数の多い直線部用 BPM に注目し、その詳細を解説する。

3.1. BPM ダクトの設計

3.1.1. ストリップライン電極の特性と最適化

図 10 に直線部用 BPM ダクトの模式図と電極部の写真を示す。ダクトは円筒形状で、内径は 50 mm である。ビームによって誘起される壁電流は、内壁の上下左右に配置した 4 枚の板状電極で外部へ取り出す。

このような形状の電極は“ストリップライン電極”と呼ばれる。

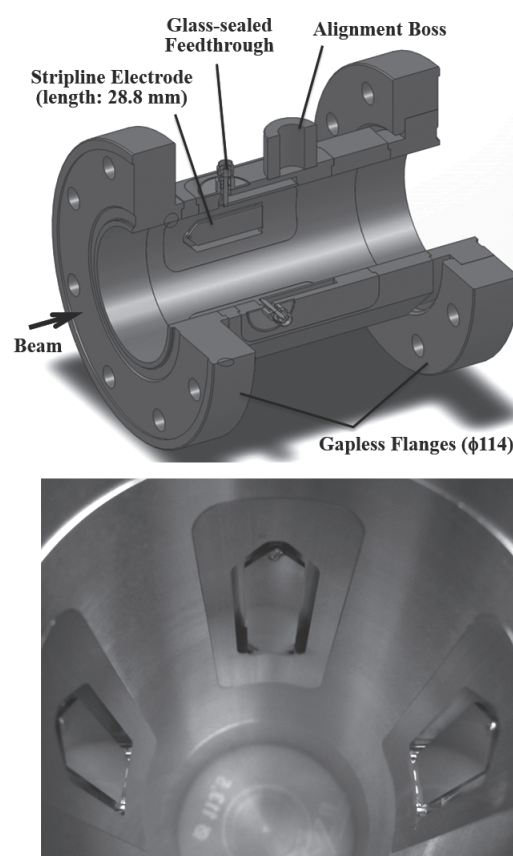


Fig. 10: 直線部用 BPM ダクトの模式図と電極部の写真

ここで、図 11 のようなモデルを考え、ストリップライン電極からどのような信号が出力されるかを考えてみる。円筒ダクトの半径を r 、ダクト中心から電極表面までの距離を a 、ダクト中心から電極を見込む角度を α 、電極の長さを l とする。電極の両端はそれぞれフィードスルーに接続されており、同軸ケーブル等を介して 50Ω で終端されているものとする

($R_1 = R_2 = 50 \Omega$)。このようなストリップライン電極がダクトの内壁と形成する伝送線路の特性インピーダンス Z_{strip} は、プリント基板におけるマイクロストリップラインと同様に r と a と α によって決まり、通常は両端のポートで信号の反射が起こらないよう、 50Ω になるよう調整される ($R_1 = R_2 = Z_{\text{strip}} = 50 \Omega$)。例として電極の長さよりも十分短いビームが光速で通過する場合を考えると、各ポートから出力される信号は次のように説明できる (図 12 参照)。

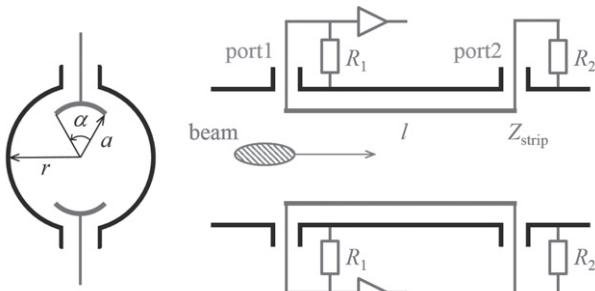


Fig. 11: ストリップライン電極のモデル

- $t = 0$: ビームが電極の上流端に到達。このとき電極上に誘起された壁電流は、 $Z_{\text{strip}} = R_1 = 50 \Omega$ であるのでちょうど同じ大きさの 2 つに分割され、片方はポート 1 へ、もう片方は電極を伝わって下流へと向かう。
- $0 < t < l/c$: 上流端で 2 分された壁電流の片方とビームが光速 c で並走する。
- $t = l/c$: ビームが電極の下流端に到達。ビームが電極を離れる際、下流端には上流端で誘起された壁電流と大きさは同じだが符号が異なる壁電流が生じる。この電流もやはり $Z_{\text{strip}} = R_2 = 50 \Omega$ のため 2 つに分割され、ポート 2 に向かったものはビームとともに電極を伝わってきた逆符号の電流と重なって相殺される。一方、もう片方の電流は上流へ向かって電極上を伝搬する。
- $t = 2l/c$: 下流端で誘起された壁電流が上流端に到達し、ポート 1 から出力される。

すなわち、上流側のポート 1 からは $2l/c$ の時間間隔で両極性のパルス信号が観測されるのに対し、下流側

のポート 2 からは何も信号が出てこない (実際には電極の機械的・電氣的不完全性によりポート 1 の $1/10 \sim 1/30$ 程度の振幅を持った信号が出力される)。各ポートの出力はビームの進行方向が逆転するとそっくり入れ替わるので、どちらのポートから信号が出力されるかによりビームの進行方向を見分けることができる。このストリップライン電極型 BPM の方向性は他の形式の BPM にはない特徴であり、同じダクトを 2 つのビームが逆方向に通過する衝突型加速器では特に大きなメリットとなる。

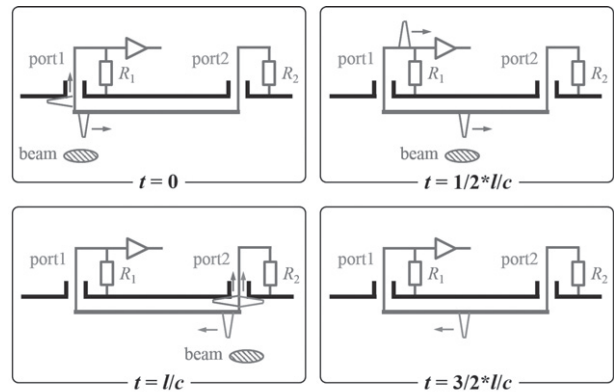


Fig. 12: ストリップライン電極上を伝搬する信号の様子

図 12 の過程を定量的に考えると、ポート 1 から出力される電圧信号 $V_1(t)$ は次のように表すことができる。

$$V_1(t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\alpha}{2\pi} \cdot R_1 \left[I_{\text{beam}}(t) - I_{\text{beam}}\left(t - \frac{2l}{c}\right) \right] \quad (3-1)$$

$I_{\text{beam}}(t)$ はビーム電流である。ビームの時間構造がガウス分布で表される場合、すなわち $I_{\text{beam}}(t) = I_0 \cdot \exp(-t^2/2\sigma^2)$ のとき、式 3-1 は

$$V_1(t) = \frac{Z_{\text{strip}}}{2} \cdot \frac{\alpha}{2\pi} \left[e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} - e^{-\frac{(t-2l/c)^2}{2\sigma^2}} \right] \cdot I_0 \quad (3-2)$$

と書き直すことができ、これを異なるバンチ長 σ に対して図示すると図 13 のようになる。また、式 3-2 をフーリエ変換して周波数領域で表現すると

$$\begin{aligned} V_1(\omega) &= Z_{\text{strip}} \cdot \frac{\alpha}{4\pi} \cdot e^{-\frac{\omega^2 \sigma^2}{2}} \cdot \sin\left(\frac{\omega l}{c}\right) \cdot e^{i\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\omega l}{c}\right)} \cdot I_0 \\ &\equiv Z_t(\omega) \cdot I_0 \end{aligned} \quad (3-3)$$

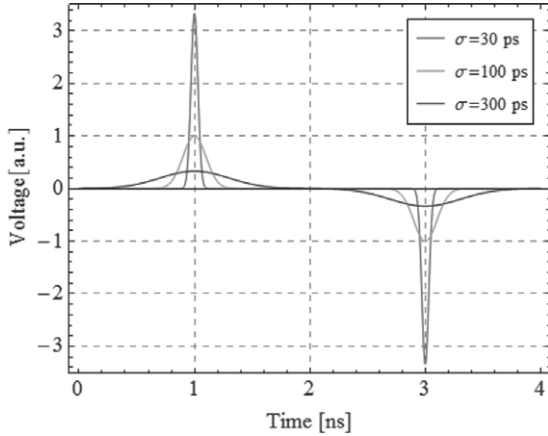


Fig. 13: ストリップライン電極の上流ポートから出力される電圧信号 ($l = 300$ mm)

となる。 $Z_t(\omega)$ はビーム電流に対する BPM の応答を特徴付ける関数で、オームの法則を適用するとインピーダンスに対応することから“転送インピーダンス”と呼ばれる。図 14 は $|Z_t(\omega)|$ を周波数の関数として図示したものである。この図からも分かるように、ストリップライン電極は

$$f_{\max} = \frac{c}{4l}(2n-1) \quad \text{for } n = 1, 2, \dots \quad (3-4)$$

の周波数に対して感度が最大となる。電極の長さに対してパンチ長が長くなってくると、上流端で生じた信号と下流端で生じた逆符号の信号の重なりが増加するため、周波数が高くなるにつれて感度が低下する。また、フィードスルーに接続される同軸ケーブルは表皮効果の影響でローパスフィルターの特性を持っているため、高周波数領域での感度はさらに低下することになる。したがって、最も感度が高いのは $n = 1$ の場合であり、このときの電極長は式 3-4 より

$$l_{\text{opt}} = \frac{c}{4f} = \frac{\lambda}{4} \quad (3-5)$$

と表される。逆に、 $l = n\lambda/2$ の場合は感度がゼロとなり、どちらのポートからも信号が出力されなくなる。これは、ビームが $2l/n$ の間隔で繰り返し通過する場合に対応し、先に通過したビームの信号が後続のビームの信号によってちょうど打ち消される状況になるためである。

以上の考察により、ストリップライン電極の長さは検出したい周波数、すなわちビームの繰り返し周波数によって最適化されることが分かった。cERL の繰り返し

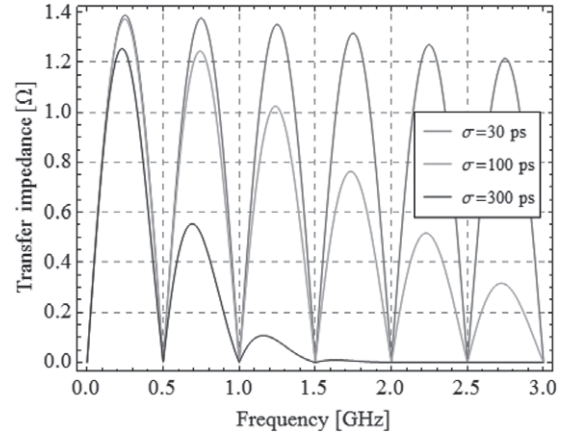


Fig. 14: ストリップライン電極の周波数特性 ($l = 300$ mm, $\alpha = 20^\circ$)

返し周波数は 1.3 GHz であるが、一部のセクションでは加速前後のビームが交互に通過するため、繰り返しは最大 2.6 GHz となる。よって、電極の長さは式 3-5 より 28.8 mm に選んだ。この長さであれば 1.3 GHz の信号にも対応できるが、検出感度は 2.6 GHz に比べて 3 割程度低下するため (-1.5 dB)、今後の拡張を考えても 1.3 GHz の周波数でしかビームが通過しない入射部やダンプラインについては、1.3 GHz で最大感度となる長さ (57.6 mm) に設定した。ストリップライン電極を使用する利点の一つは、電極の幅、すなわちビームからの見込み角 α を大きくすれば、それに比例して大きな信号を得られることである (式 3-1 参照)。したがって、非常に低強度のビームで開始される加速器の調整運転初期から BPM を使用するためには、 α を大きく設定することが望ましい。しかしながら、電極の特性インピーダンス Z_{strip} は単位長さ当たりの静電容量 C に反比例するため、 $Z_{\text{strip}} = 50 \Omega$ を実現しようとする大きな電極程ダクトとの間の距離を大きくする必要があり、ダクト自体のサイズが大きくなってしまふ。また、同軸構造のフィードスルーと電極の接続部におけるインピーダンス不整合や隣り合う電極同士の電氣的な結合が大きくなり、出力信号の形状や BPM としての性能に悪影響が生じる。cERL ではこの点も考慮し、どのセクションの BPM についても $\alpha = 20^\circ$ となるよう電極の幅を決定した。内径 50 mm の直線部用 BPM の場合は 8.8 mm となる。電極の厚みは機械的強度を考慮して 1 mm とした。

各電極はダクトの内壁に設けた舟形の溝に $r = a$ と

なるよう配置した（図 10 参照）。このように電極をダクトの内壁と面一で配置した方が、ダクト内に突き出す形で配置するよりもビームに対する物理的口径を大きく確保できる他、後述する“ウェイク場”も比較的小さく抑えることができる。電極とダクト間の距離（動径方向・方位角方向）は、上述したように電極の特性インピーダンス Z_{strip} が 50Ω になるよう決めた。この場合の特性インピーダンスは、高周波信号を伝搬させたときにダクトと電極間に生じる電位差と電極を流れる電流の比（あるいは電場と磁場の比）で定義される。平行平板や同軸といった単純な構造であれば理論的に精度良く計算できるが、このような複雑な構造の場合は 3 次元の電磁場解析コードを利用して評価することが多い。ここでは市販のソフトウェアである“HFSS[12]”を使用した。

図 12 で考察したとおり、ストリップライン電極は方向性を持っており、ビームの下流側ポートからは（理想的には）信号が出力されない。これは下流側ポートを短絡しても上流側の信号には影響がないことを意味する。したがって、cERL の BPM でも電極の下流側は直接ダクトに溶接して短絡させている。一方、上流側の電極端はダクトに溶接された同軸構造のフィードスルーに接続されており、電極上に誘起された壁電流はこれを介して外部へ取り出される。このフィードスルーは、最大 2.6 GHz（384 ps 周期）で通過するビームからの信号を個々に切り分けて観測するために開発されたもので、中心導体の固定と真空封止を担う絶縁体に通常のアリミナセラミックス（ $\epsilon_r \approx 10$ ）ではなくより誘電率の低いガラス（BHA, $\epsilon_r = 5$ ）を使用している [13]。一般にガラス素材はセラミックスよりも機械的強度の面で劣るが、今回使用したガラスは母材のコバルトとほぼ同じ熱膨張係数を持っており、適切な溶接代と開先を設けることで組立時やベーキング時に破損した例はない。図 15 は市販の 3 次元ビームシミュレータ“GdfidL[14]”で計算した直線部用 BPM の出力波形とそのスペクトルである。テストビームのパンチ長は 1 mm（3.3 ps）、パンチ電荷は 1 pC とした。出力波形にはフィードスルー周辺のインピーダンス不整合点で生じた多重反射の影響が見られるが、ケーブルや検波回路での損失を考慮しても十分検出できるだけの振幅が得られており、時間的にも 384 ps（2.6 GHz）の周期で連なるビーム信号を充分区別し得る応答速度

が得られている。

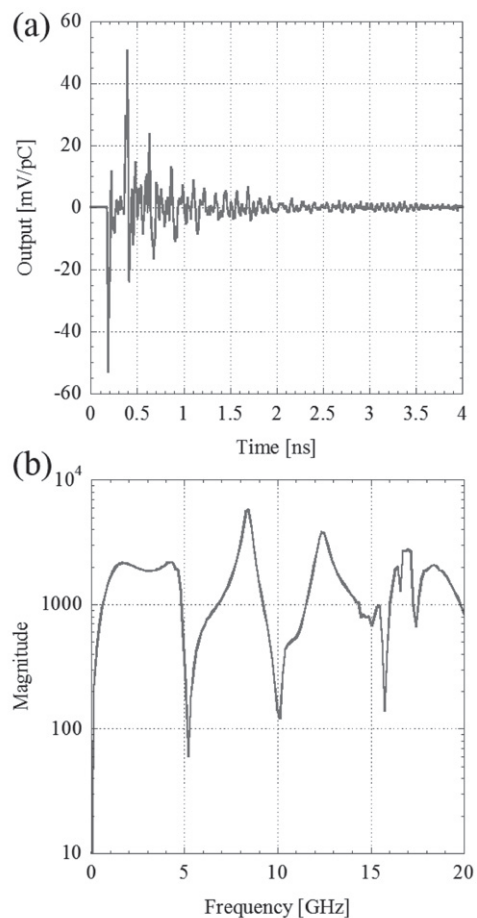


Fig. 15: GdfidL で計算した直線部用 BPM の時間応答と周波数特性

3.1.2. TDR による電極の健全性チェック

実際に製作したストリップライン電極の健全性は、TDR（Time Domain Reflectometry：時間領域反射率測定）によりチェックできる。電極の取り付け誤差等で信号経路の途中に特性インピーダンスが 50Ω と異なる点があると、そこを通過する信号の一部が反射される。TDR とは、信号経路に立ち上がりの速いステップ信号を入力し、その反射されてきた信号と入力信号の合成波形を観測することで経路に沿った特性インピーダンスの変化を計測する手法である。例えば、経路の先が 50Ω で終端されているとすると入力した全エネルギーがそこで吸収されるため反射は起きず、合成波形の振幅に変化はない（図 16(a)）。一方、短絡されている場合はそこでの電圧を打ち消すように

符号が反転した信号が反射されるため、合成波形の振幅はゼロになる（図 16(b)）。逆に開放されている場合はエネルギーが一切吸収されずに同じ位相で全反射されるため、合成波形の振幅が倍増する（図 16(c)）。このことから、特性インピーダンスが 50Ω より低い場合はその分振幅が減り、高い場合は増えることは容易に想像がつくであろう。また、その変化が現れるまでの時間は信号の往復時間に対応することから、合成波形の時間構造を解析することで経路上のどこで不整合が起きているかを判定できる。図 17 が実際のストリップライン電極で TDR を実施した結果である。電極が長い方が分かり易いので、電極長 57.6 mm の入射部用 BPM の場合を例示した。測定には Tektronix 社製の TDR 測定器（サンプリングオシロスコープ：DSA8200, TDR モジュール：80E04）を使用した。図の縦軸は電圧からインピーダンスに換算されており、中央のラインが 50Ω になるよう設定されている。最初に見える大きな不整合はフィードスルーのガラス封止部分で、高周波信号にとっては低インピーダンスの容量性負荷に見えることから波形の窪みとして現れている。その後は電極長の倍にあたる時間（ 384 ps ）の間は 50Ω で推移し、短絡された下流端の所でゼロとなっていることから、電極自体に大きな歪みやインピーダンスの不整合はないことが分かる。

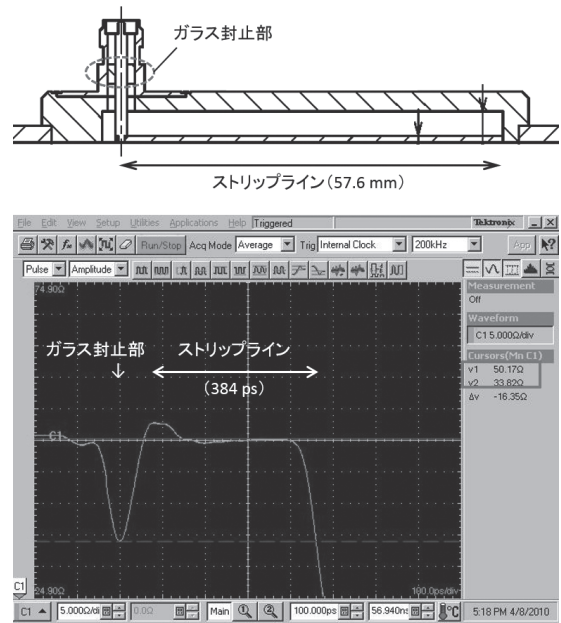


Fig. 17: 直線部用 BPM での TDR 測定結果

3.1.3. ウェイク場の評価

ウェイク場とは凸凹のあるダクト等をビームが通過する際に壁電流の流れが乱されることで生じる電磁場であり、船が通過した後に水面にできる航跡（ウェイク）にちなんでこう呼ばれている。ウェイク場が後続のビームに与える影響は“ウェイクポテンシャル”というパラメータで表され、簡単のため方位角方向に一律な密度分布を持ったリング状の光速ビームを仮定すると、ビームから距離 s だけ後方を進む粒子が受ける電圧 $V(s)$ は、ウェイクポテンシャルを $W_L(s)$ とすると次のように書ける [15]。

$$\begin{aligned}
 V(s) &= \int_{-\infty}^{\infty} E_z \left(z, t = \frac{z+s}{c} \right) dz \\
 &= -qW_L(s)
 \end{aligned}
 \tag{3-6}$$

q はビームの総電荷、 $E_z(z, t)$ はビームによって生じた進行方向のウェイク場である。ウェイクポテンシャルは通過するダクトの構造によって一意に決まる s の関数であり、これをフーリエ変換して周波数領域で表したものは“ビーム結合インピーダンス”と呼ばれる。また、ウェイク場はビームが伴う電磁場に起因するものであるから、ビームがインピーダンスを持つ構造体を通過するとその分のエネルギーを損失する。このような構造体を 1 回通過したときのエネルギー損失 ΔE

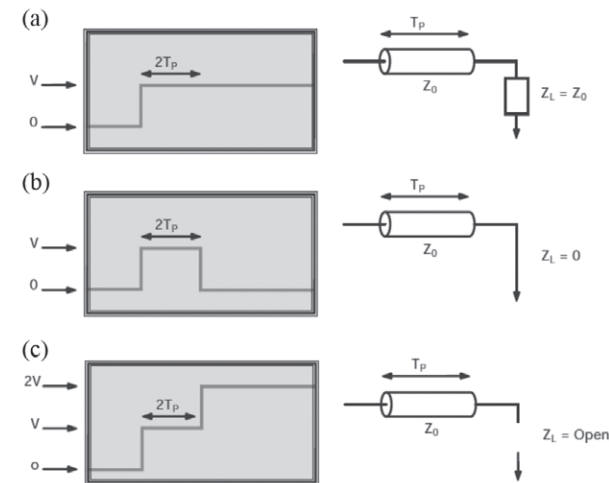


Fig. 16: TDR の測定例 (a) 50Ω で終端されている場合 (b) 短絡されている場合 (c) 開放されている場合

は

$$\Delta E = -q^2 k_L \quad (3-7)$$

と書ける。 k_L はロスファクターと呼ばれ、ビームの進行方向の密度関数とウェイクポテンシャル（周波数領域で言えばビーム結合インピーダンス）の畳み込み積分に比例する定数である。ビームの平均電流が I_{ave} の場合、この構造体で単位時間あたりに失われるエネルギー、すなわちパワーロス P_{loss} は

$$P_{loss} = q \cdot I_{ave} \cdot k_L \quad (3-8)$$

となる。ダクトとビームの相互作用で生じるこのウェイク場は、BPM や他のモニターにとって厄介なノイズ源となるだけでなく、ダクト表面の抵抗によって熱に変換され局所的な発熱を引き起こしたり、空洞状の構造体の中に長く留まって後続のビームの運動を共鳴的に不安定化させたりする可能性があるため、各ダクトを設計する段階でできるだけ小さく抑えるよう配慮しなければならない。短バンチかつ大電流のビームを備える ERL では、特に慎重に評価しておく必要がある。

cERL では、GdfidL を用いて事前にウェイク場の評価を行った。バンチ長 1 mm (3.3 ps)、バンチ電荷 1 pC の光速ビームを模擬した場合のウェイクポテンシャルとビーム結合インピーダンスを図 18 に示す。今回のように電極を溝にはめ込んだ構造では、電極とダクトの間に空洞状の狭い空間ができ、ここにウェイク場の一部のモードがトラップされて予期せぬ発熱が生じる恐れがあるが、計算されたインピーダンスを見る限り際立ったピークはなく、そのような共鳴構造にはなっていないことが分かる。また、溝の上流側の角を斜めにカットして舟形にしてあるのも、フィードスルーと電極の繋ぎ目における壁電流の流れをよりスムーズにしてウェイク場の発生を抑えるための工夫である。この場合のロスファクターは 59.1 mV/pC となり、平均電流 10 mA のビームを想定した場合のパワーロスは 4.6 mW と見積もられる。同様にして求めた各 BPM ダクトのロスファクターを表 2 にまとめて掲載した。

BPM ダクトのビーム進行方向の長さは 125 mm であり、両端には前後のダクトとボルトで締結した際にダクト内面に隙間や段差が生じないように設計された特殊フランジが溶接されている [16]。各パーツの溶接も

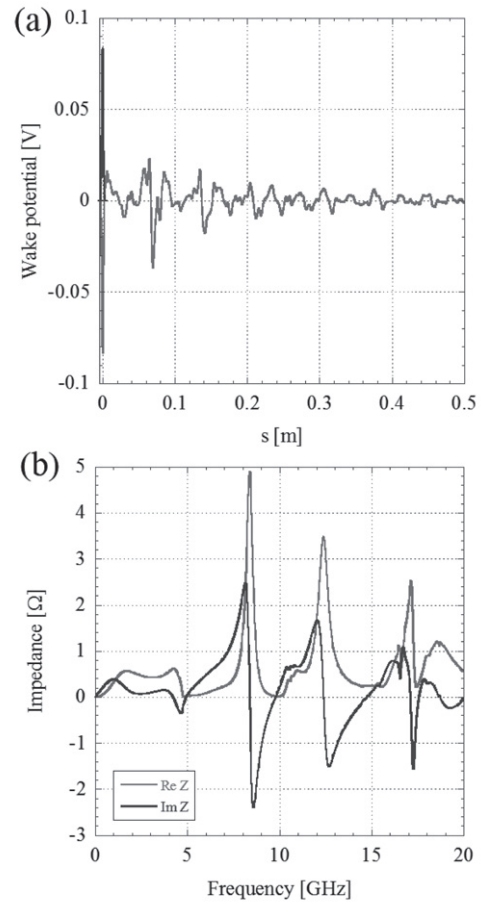


Fig. 18: 直線部用 BPM で生じるウェイクポテンシャルとビーム結合インピーダンス

全て大気側から行うことでダクトの内面を平滑に保っている。BPM はモニターの中でも最も設置台数が多いため、このような細かい工夫でも全体のパワーロス低減に効果が見込める。また、BPM ダクトの設置誤差はビーム位置のオフセットや測定精度の悪化に繋がるため、基準軌道に対してできるだけ正確に設置できるよう、ダクトの天面には水準器やレーザートラッカーのターゲット座を乗せるためのアライメント用ボスを設け、位置調整機構を備えた BPM 専用の架台を介して精密に設置される。

3.2. 信号処理システム

3.2.1. 検波回路

前節では、ERL の BPM に求められる“高感度”と“高速応答”を念頭に設計したストリップライン型 BPM の詳細を述べた。検出ヘッドとしてどのような

タイプの BPM を用いたとしても、出力される生波形には多くのノイズが含まれているため、その中から必要な信号だけを抜き出し（検波）、最終的にはビームの位置情報に焼き直す必要がある。検波には様々な方式があるが、その選定の際に基準となるのは“BPM の位置分解能と時間分解能は両立しない”ということである。すなわち、広帯域の検波方式で信号を処理すれば個々のバンチの振舞いまで検出できるが、信号に含まれるノイズの割合も増えるためビーム位置の分解能は悪くなる。一方、狭帯域で処理すれば長時間にわたる平均操作も有効となり位置分解能は飛躍的に向上するが、その分個々のバンチ情報は失われる。よって、検波方式はビームの位置検出に求められる位置分解能と時間分解能を十分考慮して選ばなければならない。また、基本的には BPM と同じ台数の検波回路が必要となるため、製造にかかるコストも重要なファクターとなる。最近では高速の ADC により信号を早い段階でデジタル化し、FPGA 内で並列処理することでハードウェアを変更することなく多目的に利用可能な検波回路も市販されている [17]。

cERL の場合は、バンチ当たり数 fC という非常に少ない電荷で加速器の調整を開始し、最大 7.7 pC まで増強する。したがって、できるだけダイナミックレンジの広い検波方式が望ましい。当面ビームサイズは数 100 μm 程度であるためそれほど高い位置分解能は必要なく、むしろ最初の微少電荷の段階から位置測定可能であることが求められる。時間分解能についても当面は個別のバンチごとに位置を測定できる必要はなく、1 μs 幅のパルスビーム全体の位置を検出できれば十分である。また、今後の量産を考えるとなるべく安価に製作できることも重要である。

これらの条件を踏まえ、cERL では“ログレシオ方式”を採用することにした。図 19 に製作したログアンプ回路のブロック図を示す。ログアンプは入力電圧の対数に比例した電圧を出力するアンプの一種で、カスケード接続された多段の高周波アンプから構成されており、非常に広いダイナミックレンジを有する。また、通信・放送業界でよく使用されていることから IC の開発も進んでおり、高性能なものを安価に入手可能というメリットもある。一方、温度に対する安定性と入力電圧に対する線形性が比較的低いため、ビーム位置の測定精度は他の方式よりも若干劣る。

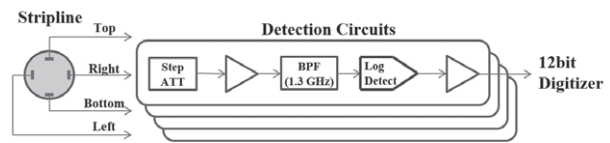


Fig. 19: ログアンプ回路のブロック図

検波対象であるビームの位置情報を含む信号は、周波数領域で見るとビームの繰り返し周波数である 1.3 GHz の整数倍にパワーが集中する。ゆえに、ログアンプの前に 1.3 GHz を中心周波数としたバンドパスフィルター（BPF）を配置し、帯域幅を 20 MHz 程度に制限している。そのためバンチごとの位置検出は難しいが、パルスごとの平均位置であれば十分検出可能である。ノイズ低減の目的からは、1.3 GHz の整数倍で、かつ BPM ダクトのカットオフ周波数（3.5 GHz）よりも低い 2.6 GHz 成分を検波した方が望ましいが、断面が 8 角形のダクトを採用しているアーク部用 BPM ではカットオフ周波数がちょうど 2.6 GHz 付近となるため、回路の仕様を統一するためにも検波周波数は 1.3 GHz とした。回路の入力段には遠隔で操作できる可変アッテネータを設けており、これを切り替えることで回路の動作領域を入力レベルに応じてシフトすることができる。図 20 はいくつかのアッテネータ設定における回路の入出力特性である。アッテネータが 0 dB 設定の場合を例にとると、-90 dBm から -30 dBm の入力レベルに対して Log-Linear に応答しているのが分かる。また、加速器調整時のパルスビームと同じ 1 μs 幅のパルス信号を入力した場合、およそ 200 ns の立ち上がり時間でフラットトップに達する出力波形が得られる。

3.2.2. デジタイザ

検波回路の出力信号をサンプリングしてデジタル化するデジタイザには、横河電機社製の高速データアキュイジションユニットと絶縁入力モジュール（SL1000）を採用した。他にも電圧レンジ固定の ADC ボードや市販のオシロスコープを並べて使用することも検討したが、サンプリング速度やビット数、チャンネル数、価格、占有面積等の点でそれぞれメリットとデメリットがある。最終的にはアナログ帯域が十分広いことと

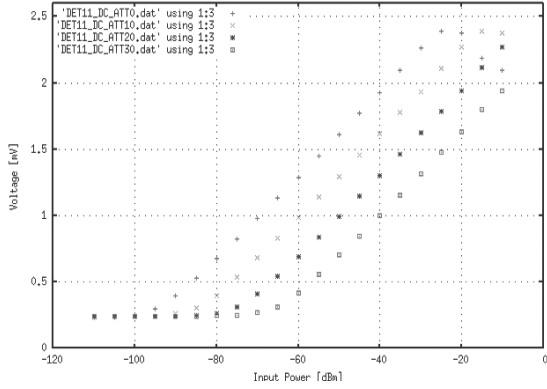


Fig. 20: ログアンプ回路の入出力特性

12 bit の分解能があること、また、同じモジュールを FC やビームダンプの電流モニター等にもそのまま利用できるといった利点からこの機種を採用した。cERL の制御フレームワークである “EPICS[18]” にも対応しており、非常に汎用性が高い。

3.3. マッピングとビーム位置計算

上記のシステムで微量電荷のパルスビームを観測したときのストリップライン電極の出力信号と、そこからビームによって誘起された 1.3 GHz 成分を検波しデジタル化した後の検出信号を図 21 に示す。ビームの重心位置 x, y は、図 21(b) に示した 4 つの信号のフラットトップ部分のみを抜き出して平均化し、得られた電圧 V_t, V_l, V_r, V_b から次式で計算できる。

$$\begin{aligned} x &= k_x (\log V_r - \log V_l) \\ &= k_x \log \frac{V_r}{V_l} \\ &\equiv k_x \cdot U \end{aligned} \quad (3-9)$$

$$\begin{aligned} y &= k_y (\log V_t - \log V_b) \\ &= k_y \log \frac{V_t}{V_b} \\ &\equiv k_y \cdot V \end{aligned} \quad (3-10)$$

U, V はビーム電流、すなわち 4 電極の和信号 ($V_t + V_l + V_r + V_b$) には依存しない。 k_x, k_y は測定された電圧の差と実際のビーム位置を結ぶ比例係数で、“感度係数” と呼ばれる。感度係数はビームの変位に依存する関数で、ダクトの中心付近 ($\sqrt{x^2 + y^2} \ll r$) ではほぼ定数で近似できるが、変位が大きい場所では非線形に変化する。相対論的な速度で運動するビームの電場はローレンツ収縮によりほぼ動径方向の面内に集

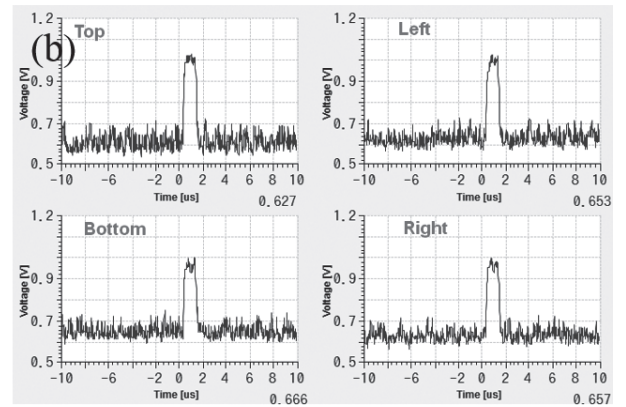
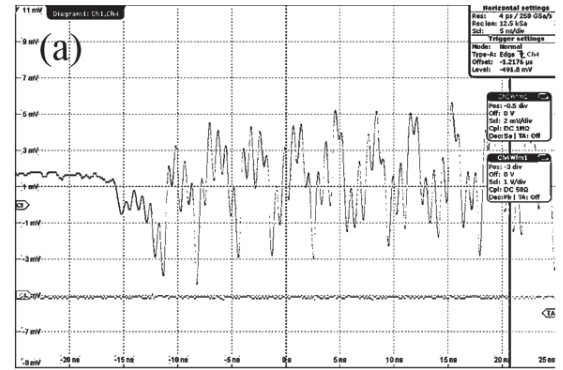


Fig. 21: 直線部用 BPM からの出力波形 (a) 検波前 (b) 検波後

中しているの、ビームが任意の場所を通過したときに電極上に誘起される電荷は、ダクトの断面形状と電極配置を境界条件にして 2 次元のポアソン方程式を解けば求めることができる。その数値計算には境界要素法が用いられることが多いが [19]、ここではダクト設計の過程で利用した 3 次元ビームシミュレータ “CST PARTICLE STUDIO[20]” を用いた。ビームの通過位置をダクト中心から 1 mm ずつ水平方向へずらしていったときに、各電極の出力から計算した U をプロットすると図 22(a) のようになる。このグラフの傾きから $k_x (= k_y)$ を求めると 14.0 (単位は mm) となる。同じ手順を鉛直方向に対しても行い、式 3-10 に基づいて計算したビーム位置と実際のビーム位置を 2 次元的にプロットしたのが図 22(b) である。BPM の校正データとなるこのような図を求めることを “マッピング” と呼ぶ。図 22(b) を見ると、 $\sqrt{x^2 + y^2}$ が大きくなるにつれて実際のビーム位置と計算結果に差が生じているのが分かる。これは $k_x = k_y = \text{const.}$ と仮定し

たため、実際のビーム位置計算ではマッピングの結果に U と V の多項式をフィットすることで得られる感度曲線が用いられる。また、実際には同じ BPM でも電極の加工や組み立て時の誤差によって感度曲線が 1 台ずつ微妙に異なるため、テストベンチにおいて 2 次元的に位置を走査できる細いワイヤーを BPM に通し、それにビームを模擬するパルス電圧を印加して実測によりマッピングすることが多い。

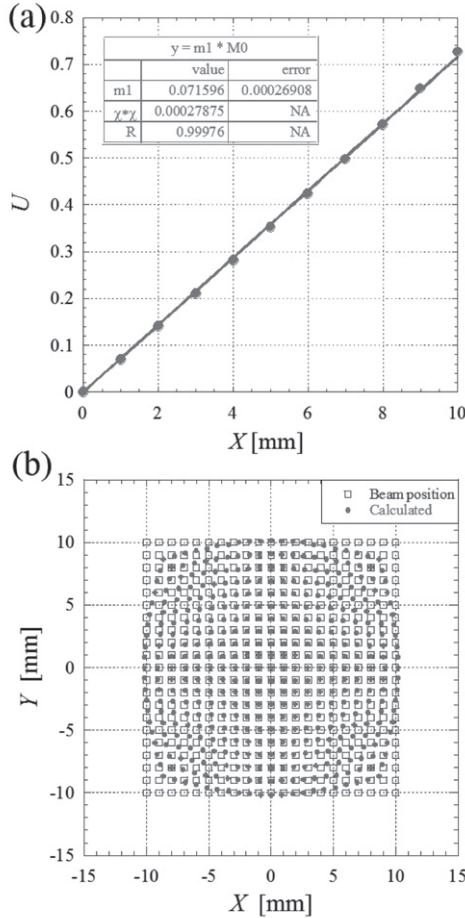


Fig. 22: 直線部用 BPM のマッピング結果 (a) 水平軸上 (b) 横方向面内

ちなみに、BPM の電極は上下左右に配置されるとは限らない。特に電子や陽電子ビームの蓄積リングでは、水平方向の電極に放射光が直撃するのを避けるため方位角方向に 45° 回転させた位置に配置される。また、断面がレーストラック型のダクトや挿入光源用にかなり扁平なダクトが使用されることも多く、その場合には上面と下面の対称な位置に並べて配置する。cERL においても、2つのアーク部では水平方向の物理的口

径を大きく保つため断面が 8 角形のダクトを使用しており、電極はその斜面に 1 つずつ配置されている。このようにダクトの縦横比が 1 でない場合の BPM では、ビームが発する電気力線の届き方が電極によって変わってくるため $k_x \neq k_y$ となり、必要とされる感度に応じて電極の位置や数を調整しなければならない。ビーム位置の計算式は

$$\begin{aligned} x &= k_x \{ \log V_{tr} + \log V_{br} - (\log V_{tl} + \log V_{bl}) \} \\ &= k_x \log \frac{V_{tr} \cdot V_{br}}{V_{tl} \cdot V_{bl}} \\ &\equiv k_x \cdot U \end{aligned} \quad (3-11)$$

$$\begin{aligned} y &= k_y \{ \log V_{tr} + \log V_{tl} - (\log V_{br} + \log V_{bl}) \} \\ &= k_y \log \frac{V_{tr} \cdot V_{tl}}{V_{br} \cdot V_{bl}} \\ &\equiv k_y \cdot V \end{aligned} \quad (3-12)$$

となる。参考のため、アーク部用 BPM のマッピング結果を図 23 に示す。電極を上下左右に配置する場合と比較すると、この場合の方が感度係数の線形範囲は狭まる傾向がある。それでもなお他の線形アンプの出力からビーム位置を求める方式 (Δ/Σ 方式) に比べれば広めであり、この直線性の良さはログレシオ方式が持つメリットの一つである。

3.4. ビームを使った校正

3.4.1. 位置分解能

図 24 に上流の補正電磁石の励磁電流を階段状に変化させたときのビーム位置測定結果を示す。青が BPM による測定値で、赤は隣接する SCM で測定した値を BPM の位置での値にスケールしたものである。両者はよく一致しており、BPM とその信号処理システムが正しく機能していることを端的に表している。ビーム位置を固定したときの測定値のばらつきから簡易的に BPM の位置分解能を評価すると、およそ $150 \mu\text{m}$ と見積もられる。ただし、これは電子銃で生成されるビームの位置ジッターも含んだ値である。また、バンチ当たり 10 fC 程度という微少電荷で $1 \mu\text{s}$ の時間幅のパルスビームに対する値であり、バンチ当たりの電荷を増やす、あるいはパルスを伸ばして検出信号を平均する時間を増やせば $10 \mu\text{m}$ オーダーの前半までは改善できると考えている。

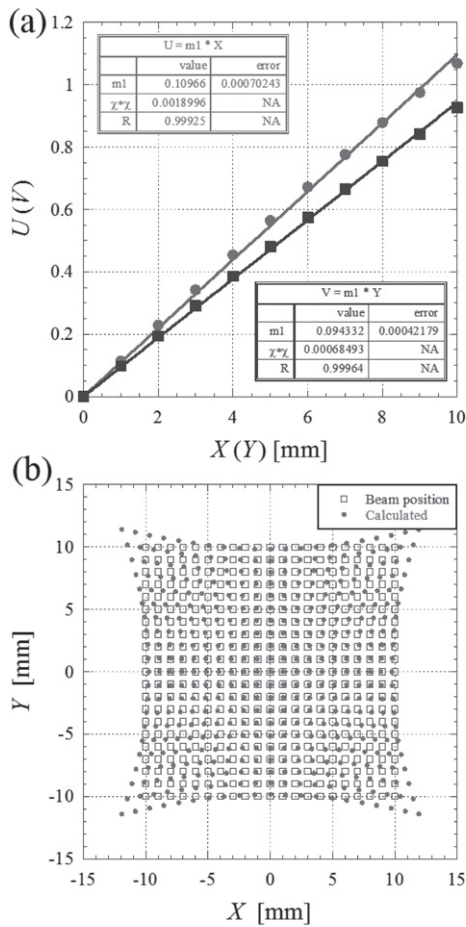


Fig. 23: アーク部用 BPM のマッピング結果 (a) 水平・鉛直軸上 (b) 横方向面内

3.4.2. オフセット

加速器の軌道調整では、ビームが四重極電磁石の磁場中心を通るよう調整される。したがって、BPM はそのようにして決められた基準軌道からの変位を測定すべきであるが、実際には四重極電磁石の機械的中心を基準に設置される上、BPM 自体の機械的中心と電気的中心が一致しているとも限らないため、ビーム位置の測定値には必ずオフセットが含まれることになる。このオフセットの値は、隣接する四重極電磁石の強さに対するビームの応答から求めることができる。すなわち、ビームが四極磁場の中心を通っている場合はその電磁石の強さを変えてもビームサイズが変わるだけでビームの重心位置に変化はないが、中心を通っていない場合はサイズとともに重心位置も変化する。よって、隣接する四重極電磁石の強さを変えてもビー

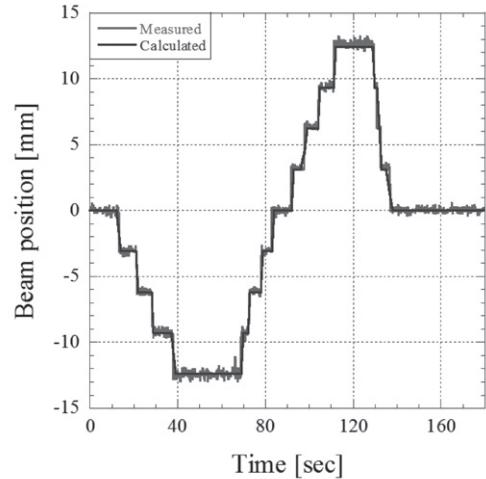


Fig. 24: BPM で測定したビーム位置と SCM で測定したビーム位置の比較

ム位置が変化しないときに BPM が示している値がオフセット（四重極電磁石の磁場中心と BPM の電気的中心のずれ）であると分かる。オフセットの大きさは BPM ごとに異なるため、個々に調べて上述したビーム位置の計算式に補正項として加える必要がある。このような補正方法を“Beam Based Alignment”という。

3.5. cERL 調整運転での使用例

3.5.1. BPM の制御パネル

図 25(a) は cERL の調整運転で使用している BPM の個別表示パネルである。上段に検波後の 4 電極信号、下段にそのフラットトップ部分の平均値から計算したビーム位置のトレンドグラフが表示される。上部のプルダウンメニューで表示する BPM を切り替えられるようになっており、詳細な軌道調整の際に利用される。図 25(b) は全 BPM の出力を上流から順に並べて表示したもので、上段が水平方向の軌道、中段が鉛直方向の軌道、下段がビーム電荷（4 電極の和信号）に対応する。各 BPM が示す軌道をそのまま表示するだけでなく、任意の基準軌道から差分を表示する機能も備えており、長時間の軌道ドリフトやビームエネルギーを変化させたときの軌道のずれ（エネルギー分散）の確認等に役立っている。

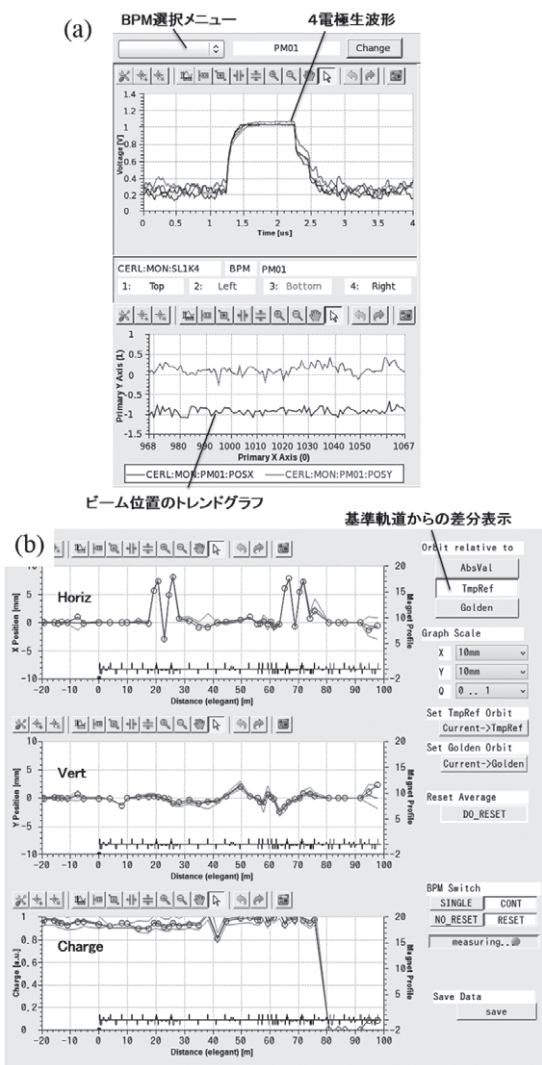


Fig. 25: BPM 制御パネルの一例 (a) 個別表示パネル (b) 周回軌道表示パネル

3.5.2. 2 カラービームの同時測定

ストリップライン電極の項でも少し触れたように、cERL の合流部からダンプシケインまでの区間には、互いにエネルギーが異なる周回前のビームと周回後のビームが共存する (2 カラービーム)。そのため、周回後のビームを観測しようとして SCM を挿入すると、周回前のビームがそこで失われてしまい、当然周回後のビームも存在しなくなる。すなわち、この区間では周回後のビームを観測するのに SCM のような破壊型のモニターは使用できないのである。周回後のビーム軌道は、ERL の最重要過程であるエネルギー回収やメインダンプへ導くその後の軌道調整に不可欠であることから、各研究施設ではその観測法に頭を悩ませてき

た。例えば、アメリカの Jefferson Laboratory (JLab) で稼働中の ERL では、中心に穴の開いたスクリーンを使用し、周回前のビームはその穴を通過させ、周回後のビームは少し軌道をずらすことで穴の周辺に当てて観測するという手法を採用していた。cERL においても、当初はこの穴開きスクリーンや 2 つの BPM 信号を時間的に切り分けることができる高速ゲートスイッチの採用を検討していたが、最終的には周回前のビームと周回後のビームでは同じ BPM を通過するタイミングに一定の差があることに注目し、BPM を利用してこれらの位置を個別に計測する方法を考案した。

図 26(a) にこの方法の模式図を示す。調整運転で使用するバーストモードの場合、周回後のビーム信号は周回前のビーム信号に対して周回時間分だけ遅延して重なる。したがって、この重なった信号の先頭には周回前のビーム、後尾には周回後のビームからの信号のみが現れる。これらのパートに挟まれた部分の信号は、理想的には検出されない。なぜなら、周回後のビームはエネルギー回収のため位相が 180° ずらされているため、周回前のビーム信号と重なることで生じる 2.6 GHz の信号は、検波回路内の BPF (中心周波数: 1.3 GHz) によってカットされるためである。

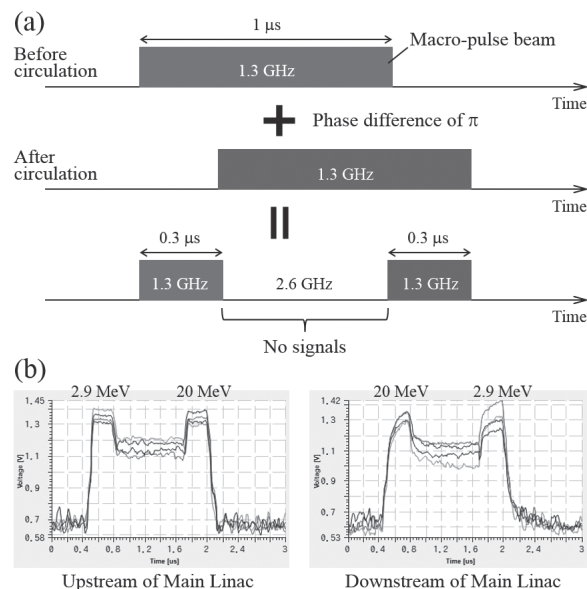


Fig. 26: BPM を利用した 2 カラービームの測定例 (a) 測定の原理 (b) 測定結果

Table 3: cERL 用 SCM の内訳

設置場所	ダクト	駆動方式	スクリーン	サイズ	台数
合流部・直線部	φ50	Pneumatic	YAG & OTR	φ28	16
入射部・診断部	φ63	Pneumatic	YAG	φ26	5
ダンプライン	φ100	Pneumatic	YAG & OTR	φ50	2
アーク部	8 角形	Pneumatic	YAG & OTR	20 × 40	6
入射シケイン	扁平	Pneumatic	YAG / OTR	26 × 76	1
周長補正シケイン	扁平	Stepping motor	YAG / OTR	26 × 66	1
LCS 衝突点	φ41.5	Pneumatic	Desmarquest	10 × 10	1

図 26(b) に 2 カラービームの測定例を示す。4 電極からの信号がそれぞれ階段状になっており、周回前のビームと周回後のビームをはっきり区別して観測できている。各パートの幅はビームの周回時間で決まり、cERL の場合はおよそ 300 ns である。グラフの立ち上がり時間の違いは、使用した検波回路の特性の差に起因している。これらのパート間の信号がゼロでないのは、2つのビームのエネルギーが大きく異なるために、それらの信号の位相差が主空洞からの距離に比例して 180° からずれるためである。逆に言えば、この部分の信号はビームの位相モニターとして利用できる。このシンプルで確実な方法は、周回後のビームの軌道調整に大いに役立った。なお、この方法はビームの途中に無視できる時間幅のシャープな切れ込みさえ設ければ、CW ビームに対しても適用できる。

4. スクリーンモニター (SCM)

図 1 に示したとおり、cERL にはビーム軌道に沿って全 32 台の SCM が設置されている。BPM と同様に、SCM の内部構造もダクト形状やスクリーンの種類によって異なっており、表 3 に挙げた 7 種類に分類できる。本章では、これらの中から最も製作台数の多い直線部用 SCM を取り上げ、その構造やスクリーン観測用の光学系、調整運転における使用例等について述べる。

4.1. SCM ダクトの設計

4.1.1. 2 種類のスクリーン

図 27 に直線部用 SCM ダクトの模式図とスクリーンホルダーの写真を示す。スクリーンを固定するスク

リーンホルダーは 2 段式となっており、ビームの強度やエネルギーに応じて 2 種類のスクリーンを使い分けられる構造になっている。

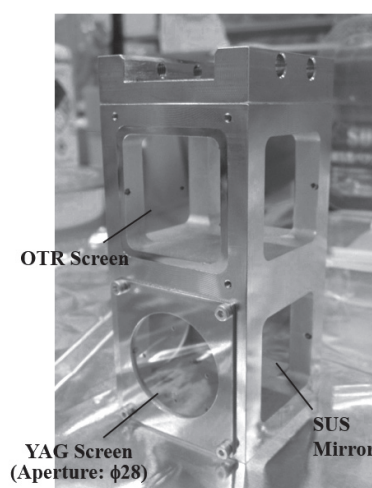
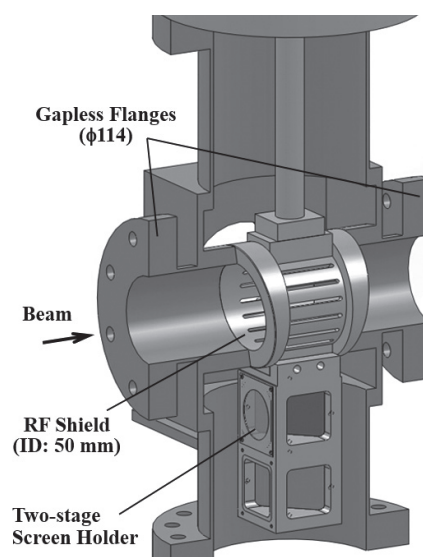


Fig. 27: 直線部用 SCM ダクトの模式図とスクリーンホルダーの写真

一つ目のスクリーンは、厚さ $100 \mu\text{m}$ の Ce:YAG シンチレータである。Ce:YAG は、固体レーザーの発振媒質として広く用いられている YAG (Yttrium Aluminum Garnet, 組成式: $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) に Ce をドーブした黄色透明なセラミックス素材で、電子ビーム等の放射線が当たると可視域の蛍光を等方的に発する。蛍光の減衰時間は 70 ns 程度と短く残光が少ないため、ビームの速い変化や高繰り返しビームの観測に適している。また、スクリーン自体がほぼ透明な上に比較的薄く加工できることから、高エネルギービーム用のシンチレータとしてよく使用されるアルミナ蛍光板等と比べるとスクリーン内部での蛍光の散乱や吸収が少なく、滲みのないクリアなビーム像を得ることができる。スクリーンの素材として重要な熱特性や耐放射線性にも優れており、その代表的な物理特性を表 4 にまとめた。入射ビームの強度と発光量の線形性も良いが、結晶内で励起される電子の数には限りがあるため、蛍光の減衰時間内に入射する電荷密度が高くなりすぎると発光量が飽和し、線形性が失われる。この飽和が始まる電荷密度の閾値は結晶の組成やビームエネルギーに依存するので一概には言えないが、オーダーとしては $0.1 \text{ pC}/\mu\text{m}^2$ が目安となる。

Table 4: Ce:YAG の物理特性

密度	4.57	g/cm^3
放射長	3.6	cm
屈折率	1.82	
曲げ強度	360	MPa
比熱	602	$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$
熱伝導率	11.7	$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$
融点	1970	$^\circ\text{C}$
最大発光波長	525	nm
発光減衰時間	70	ns
光収率	18000	ph/MeV

ビームの電荷が絶縁体であるスクリーン表面に堆積し (チャージアップ)、その急激な放電によってスクリーン自体が破損するのを防ぐため、ビームが入射する面には厚さ 30 \AA (3 nm) のアルミコーティングを施している。ビーム軸に対して垂直な方向から観測する場合、スクリーンに対するビームの入射角を 0° にする配置と 45° にする配置が考えられるが、同じ大きさのスクリーンでも有効径を大きく取れること、有限

の被写界深度に起因するピントのずれがないこと、透明な結晶内の発光域を斜めから透視することによる分解能の低下がないこと、導電性コーティングによる蛍光強度の減衰がないこと等の理由から、このホルダーでは 0° 入射の配置を採用している。発せられた蛍光は、スクリーンの背後に 45° の角度で取り付けられた厚さ 1 mm のステンレスミラーを介してダクト側面のビューポートへと導かれる。できるだけ多くの蛍光を取り出せるよう、ビューポートの両面には可視域の減反射コーティングを施している。

二つ目のスクリーンは、OTR (Optical Transition Radiation: 可視域遷移放射) 発生用の金属フォイルである。OTR とは荷電粒子が誘電率の異なる物質へ入射する際にその境界面から発せられる輻射で、図 28 に示したようにターゲットの前方と後方それぞれに放出される。OTR は特殊相対論から予言される古典的な輻射であり、その発光量は入射ビームの強度に対して (ターゲットが破損しない限り) 正確な線形性を示す。ただし、シンチレータ光に比べて指向性等に大きな特徴を持つので、以下で少し詳しく解説しておく。

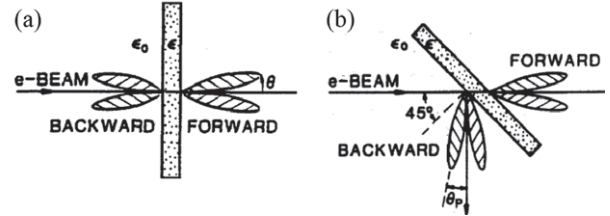


Fig. 28: 前方 OTR と後方 OTR [21] (a) 垂直に入射した場合 (b) 45° の角度で入射した場合

まず、電荷 e を持った粒子が誘電率 ϵ の媒質から垂直に真空へ入射する場合を考える (図 28(a) 参照)。このような場合に真空中へ放出される “前方 OTR” の強度 dW_f は、立体角 $d\Omega$ 、角振動数 $d\omega$ 当たり

$$\frac{d^2 W_f}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2 \beta^2}{16\pi^3 \epsilon_0 c} \frac{\cos^2 \theta \sin^2 \theta}{(1 - \beta^2 \cos^2 \theta)^2} \times \left| \frac{(\epsilon - 1)(1 - \beta^2 - \beta \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta})}{(\epsilon \cos \theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta})(1 - \beta \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta})} \right|^2 \quad (4-1)$$

となることが知られている [21, 22]。 β は粒子の速度と光速 c の比で、 ϵ_0 は真空の誘電率、 θ は粒子の進行

方向を基準にした OTR の放出角度である。粒子の運動が相対論的であるとし ($\beta \approx 1$)、媒質として金属を想定すると ($|\epsilon| \gg 1$)、式 4-1 の第 3 項は 1 に収束し、次式のように簡略化できる。

$$\begin{aligned} \frac{d^2 W_f}{d\omega d\Omega} &= \frac{e^2}{16\pi^3 \epsilon_0 c} \frac{\sin^2 \theta}{(1 - \beta \cos \theta)^2} \\ &\simeq \frac{e^2}{4\pi^3 \epsilon_0 c} \frac{\theta^2}{(\theta^2 + \gamma^{-2})^2} \end{aligned} \quad (4-2)$$

ここで、 $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$ はローレンツファクターである。一方、真空から媒質へ垂直に入射する場合に真空中に放出される“後方 OTR”の強度 dW_b は、式 4-1 の β を $-\beta$ に変えることで得られる。前方 OTR の場合と同様に $\beta \approx 1$ 、 $|\epsilon| \gg 1$ という近似を適用すると、

$$\frac{d^2 W_b}{d\omega d\Omega} \simeq \frac{e^2}{4\pi^3 \epsilon_0 c} \frac{\theta^2}{(\theta^2 + \gamma^{-2})^2} \left| \frac{\sqrt{\epsilon} - 1}{\sqrt{\epsilon} + 1} \right|^2 \quad (4-3)$$

となる。第 3 項は光が真空から媒質に垂直入射するときの反射率と同じ形になっている（フレネル反射）。このことから、後方 OTR は粒子が伴う電場のうち媒質中を伝搬できなかった成分が境界面で反射されたものと考えることができる。また、ここまでの表式に粒子の質量が含まれていないことから分かるように、OTR はビームが伴う電磁場だけが関与して起こる現象であるから、放出される光のエネルギーは荷電粒子の種類（電子や陽子等）に依存しない。同様に角振動数 ω にも依存しておらず、OTR のエネルギースペクトルはビームの電磁場が境界面で反射される上限である“プラズマ角振動数 ω_p ”までの広い範囲をカバーしている。一般的な金属の場合、 ω_p は深紫外域のエネルギーに対応する（ ~ 10 eV）。

式 4-2 と 4-3 に共通する角度依存性を表す項のみをいくつかの γ に対して図示すると図 29 のようになる。放射強度のピーク値は粒子のエネルギーに依存して変化するが、ピークになる放射角度は

$$\theta \simeq \pm \frac{1}{\gamma} \quad (4-4)$$

で共通する。したがって、 γ が大きい高エネルギーのビーム程狭い角度範囲に放出されるため、その大部分をカメラの画角に納めることができ、観測には有利になる。ただし、光の指向性が高いとその分シビアな光軸調整を要求されることから、ターゲットからカメラまでの距離が遠い場合には注意を要する。逆に、 γ が

小さい低エネルギーのビームや陽子ビーム等の場合は放射角度が広くなり、その一部しか利用できなくなるため、場合によっては開口の大きな特殊光学系や MCP (Micro Channel Plate) を備えたハイゲインカメラ等が必要になる [23]。

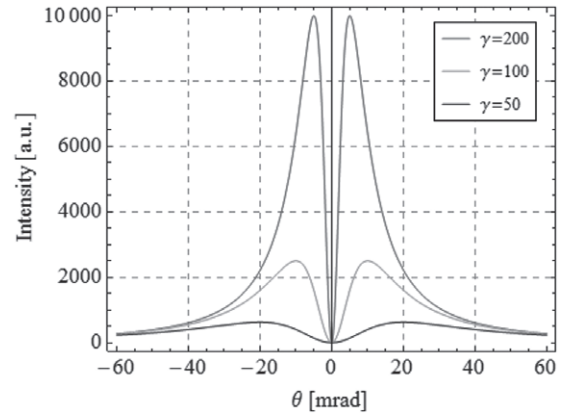


Fig. 29: OTR 放射強度の角度分布

次に、図 28(b) に示したような 45° 入射の場合を考えてみる。式 4-3 に対する考察から、この場合の後方 OTR は光が境界面で反射される方向、すなわち粒子の運動方向に垂直な方向へ放出されることは容易に想像がつく。これは、粒子によって媒質内に誘起された鏡像電荷が境界面上で対消滅するのに伴う放射とも考えられ、鏡像電荷の運動方向と放射との間の角度を θ' とすると、このときの放射強度は

$$\frac{d^2 W}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2}{16\pi^3 \epsilon_0 c} \left| \frac{-\sin \theta}{1 - \beta \cos \theta} + \frac{\sin \theta'}{1 - \beta \cos \theta'} \right|^2 \quad (4-5)$$

で与えられる。 $\beta \approx 1$ のとき、すなわち $\theta \approx \pi/2$ 、 $\theta' \ll 1$ のときは第 1 項が第 2 項に対して無視できる大きさになるため、 θ を θ' に変更した式 4-2 の形に帰着する。一方、真空側へ抜ける際の前 OTR の場合は第 2 項が無視できるようになり、 0° 入射のときと同じく粒子の軌道周りの狭い角度範囲に集中して放出される。

放射強度のエネルギー依存性を調べるため、式 4-2 を $0 \leq \theta \leq \theta_{\max}$ の範囲で積分すると、 θ_{\max} の値に応じて次のようになる。

$$\theta_{\max} \ll \frac{1}{\gamma} : \frac{dW}{d\omega} = \frac{e^2}{8\pi^2 \epsilon_0 c} (\gamma \theta_{\max})^4 \quad (4-6)$$

$$\theta_{\max} \gg \frac{1}{\gamma} : \frac{dW}{d\omega} = \frac{e^2}{4\pi^2 \epsilon_0 c} [2 \ln(\gamma \theta_{\max}) - 1] \quad (4-7)$$

図 29 にも現れているとおり、OTR の放射強度は放射軸近傍の非常に狭い角度範囲では γ^4 に比例して急激に増加するが、トータルの強度としてはエネルギーの対数に比例して比較的ゆっくりと増加することが分かる。 ω_1 から ω_2 の範囲に放出される光子数 N_{photon} は、式 4-7 を光子のエネルギー $\hbar\omega$ で割り、 ω について積分すると得られる。

$$N_{\text{photon}} = \frac{\alpha}{\pi} [2 \ln \gamma - 1] \cdot \ln \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right) \quad (4-8)$$

α は微細構造定数であり、 θ_{max} は簡単のため 1 ($\gg 1/\gamma$) とした。ただし、これは 1 個の荷電粒子から放出される光子数であるから、これにビームが含む粒子数 N_{beam} を掛けることでビーム全体から放出される光子数を見積もることができる。典型的な値を代入すると、およそ 100 個のビーム粒子が 1 個の光子を可視域に放出する割合となり、上述したシンチレータに比べると光の収率は 5 桁程度低いことが分かる。

また、実際のビームを構成する粒子は有限の角度拡がりを持っているので、放出される OTR の放射強度はその分布関数と式 4-2 の畳み込み積分で与えられる。すなわち、標準偏差 σ' のガウス分布を仮定すると、放射強度は

$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} \propto \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(-\frac{\theta_0^2}{2\sigma'^2} \right) \cdot \frac{(\theta - \theta_0)^2}{[(\theta - \theta_0)^2 + \gamma^{-2}]^2} d\theta_0 \quad (4-9)$$

となる。この角度拡がりの影響は、OTR 角度分布の中心部におけるコントラスト（最大値と最小値の差）に現れる。角度分布はカメラレンズの焦点を無限遠に合わせることで実験的に観測できるため、得られた分布に式 4-9 を当てはめればビームのエネルギー γ だけでなく角度拡がり σ' も推定できる。角度拡がりはその地点におけるビームサイズと掛け合わせることで後述する“エミッタンス”となるため、このような OTR の放射特性を利用したエミッタンス測定もなされている [24]。なお、ビームサイズはレンズの焦点をターゲット表面に合わせたときに観測されるビームプロファイルから測定できる。

以上で述べたように、OTR は指向性や放射強度、エネルギースペクトル等の点でシンチレータ光とは大きく異なる特性を持つ。cERL ではこの特性の違いを活かし、YAG スクリーンと相補的に使い分けることでダイナミックレンジの広い SCM を実現している。

OTR は誘電率の異なる境界面からの輻射であるから、その放射強度や角度分布はターゲットの厚みには寄らない。よって、OTR 発生用のターゲットはできるだけ薄く加工し、かつ原子番号の小さい物質で製作した方がビームとの相互作用が減って比較的高パワーのビームにも使用可能となる。しかしながら、ターゲットを薄くすればするほど機械的な強度は低下するため、ターゲット表面を平坦に保つのが難しくなり、得られるビームプロファイルの質が悪化する傾向がある。また、ビームのエネルギーロスで発生する熱によるダメージを軽減するためには、比熱や熱伝導率、融点が高い物質の方が望ましい。このような観点から各施設で様々な材質が選ばれ、使用されているが、cERL では薄く加工できる金属のうちで最も入手しやすく、比較的熱特性にも優れたアルミニウムを採用した。ただし、アルミだけでは面精度を保つことが困難なので、両面とも鏡面加工した厚さ 70 μm のシリコンウェハの表面にアルミを蒸着したものを使用している。蒸着膜の厚さは 40 nm である。シリコンウェハは半導体デバイスの基板材料として利用されていることから加工・量産の技術が発達しており、薄くて高品質なものを安価に入手できる。OTR スクリーンの場合もやはり 0° 入射の配置にするのが理想であるが、通常反射ミラーを用いるとターゲット裏面からの前方 OTR とミラー表面からの後方 OTR が重複して取り出されることになる。これを避けるためには OTR の角度分布を考慮した穴開きミラーを使用する等の工夫が必要となるため、OTR スクリーンについては 45° 入射を採用し、後方 OTR を直接取り出す配置とした。

これらのスクリーンの開口は、設置場所のダクト形状によって異なる。直線部用 SCM の場合は、内径 50 mm の円形ダクトに対して $\phi 28$ mm となっている（他のセクションについては表 3 を参照）。各スクリーンの周辺部 4ヶ所には直径 1 mm の穴が開けてあり、スクリーン表面へのピント調整やカメラ倍率の校正に利用している。

4.1.2. RF シールド

BPM ダクトの設計でも考慮したように、100 fs 以下のパンチ長を目標としている cERL では、ダクト内面のギャップや段差を少なくしてビーム通過時に発生するウェイク場をできるだけ小さく抑えることが重

要である。ところが、SCM ダクトはビーム軌道に直接スクリーンを挿入できる構造でなければならず、設置台数も多いため、そのままでは非常に大きなウェイク場の発生源となり得る。そこで、cERL の SCM ダクトでは、スクリーンを使用しないときは両端のビームダクトと滑らかに繋がる円筒型のウェイクシールド (RF シールド) がビームライン上に入る構造にした (図 27 参照)。ウェイク場は壁電流が発する制動放射と考えることもできるため、このようなシールドを設けることによって壁電流がダクトに沿ってスムーズに流れるようにすれば、その発生を大幅に減らすことができる。シールドとダクトの接触は、コンタクトフィンガーのような弾性を持つ部品ではなく、精密なはめ合いによる物理的接触のみで実現している。シールドの内径はビームダクトと同じ 50 mm で、動径方向の厚みは最薄部で 3 mm である。側面には真空排気用に幅 3 mm、長さ 33 mm のスリットが合計 18 本、等間隔に配置されている。このシールドの効果を確かめるため、GdfidL で同じ構造のシールドを付けた空洞状ダクトを再現し、スリットの数とロスファクターの関係を調べた。パンチ長 1 mm (3.3 ps) のビームに対する結果を図 30 に示す。ロスファクターはスリットの数にほぼ比例して増加し、18 本ではおよそ 10 mV/pC となっている。シールドを設けない場合の値は 1.5 V/pC であるから、このシールドにはロスファクターを 1/100 以下まで抑える効果があることが分かる。図 31 はアーク部の RF シールドをビームの進行方向から見た写真である。ダクトの形状に合わせてシールドも 8 角形をしており、ダクトとの境目は肉眼ではほぼ確認できない。

上記 2 種類のスクリーンと RF シールドは、圧縮空気の圧力を利用した 3 ポジション式のアクチュエータにより駆動される。各ポジションの位置決め精度は 0.1 mm 以下である。SCM ダクトの両側面には、ビューポートを取り付けるための ICF フランジが直接溶接されている。ビーム進行方向の両端に位置するフランジには、BPM ダクトと同様ギャップレスの特殊フランジを採用しており、フランジ面間の距離は 180 mm となっている。

以上のような直線部用 SCM の他、入射部には RF シールドや OTR スクリーンの代わりに電子銃のフォトカソード表面をカメラで観察するためのミラーや可

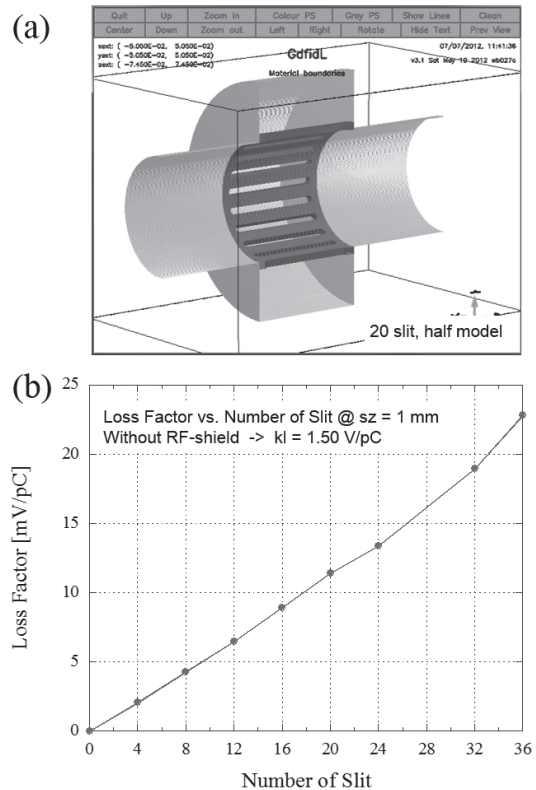


Fig. 30: GdfidL で計算した RF シールドの効果 (a) 計算に使用したモデル (b) 排気用スリットの数とロスファクターの関係

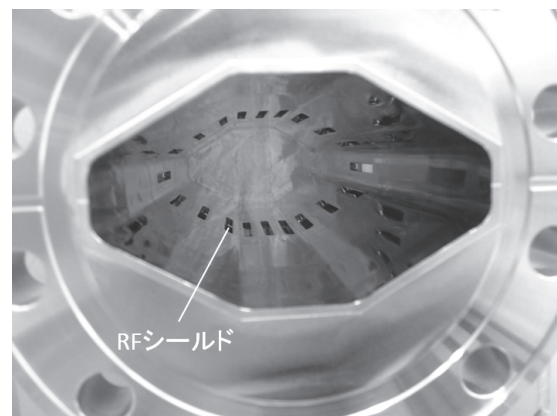


Fig. 31: アーク部用 SCM ダクトの RF シールドの写真 (シールドの下にスクリーンホルダーが格納されている)

動 FC (図 9 参照) を備えた SCM が設置されている。また、周長補正シケインの中央に設置される SCM は、バンプの高さによって大きく変わるビーム軌道に対応するため、ステッピングモーターによる無段式駆動となっている。

4.2. スクリーン観測用光学系

ビーム軌道にスクリーンを挿入するだけでは単なる遮蔽板に過ぎないので、スクリーンが発した光を結像してビームの像を得るための光学系が必要となる。図 32 に直線部用 SCM で採用したスクリーン観測用光学系の模式図と写真を示す。前節で述べたとおり、各スクリーンが発した光はビーム軸に対して 90° の方向に進み、可視域の減反射コーティングが施されたビューポートを通してダクト外部に取り出される。光はその後 1 枚のアルミ平面ミラーを介して鉛直方向に反射され、ダクトを背にした CCD カメラへと送られる。ミラーで一度中継しているのは、光軸の調整を容易にするのと、カメラをビームレベルより低い位置に設置することで放射線による CCD 素子のダメージを軽減するためである。カメラには、ギガビットイーサネットを通じて画像データの高速かつ長距離伝送が可能な GigE カメラ (Allied Vision Technologies, Prosilica GC650) を採用した。1 秒間に最速 90 フレームの画像を転送できる小型のデジタルモノクロカメラで、CCD の画素数は 659 × 493 (VGA 相当)、画素サイズは 7.4 μm (正方面素)、ダイナミックレンジは 12 bit (4096 階調) である。一般の監視用カメラ等でよく行われる“ガンマ補正”は行っておらず、CCD から出力される電圧の振幅は入力した光の強度に比例する。また、外部トリガーに任意のディレイを加えたタイミングで撮像可能で、信号増幅のゲイン (0~22 dB) や露光時間 (10 μs~120 s) もネットワーク経由で容易に設定できる。結像には絞りを備えた低ディストーションの CCTV レンズ (ミュートロン, HS5028J3) を使用している。レンズの焦点距離 f は、幾何光学におけるレンズの公式から

$$f = \frac{L \cdot h}{H} \quad (4-10)$$

で求められる。ここで、 L はレンズ前面から被写体までの距離 (作動距離)、 h は CCD 素子のサイズ、 H は撮影したい視野のサイズである。例えば、作動距離 400 mm の位置にレンズを設置し、スクリーンの開口 φ28 mm 全体を 1/3 インチの CCD (H:4.8 mm×V:3.6 mm) で撮影するためには、およそ 50 mm の焦点距離のレンズが必要となる。コリメータの近くやダンプラインといった定常的なビームロスが予測される場所では、放射線によるノイズやダメージを軽減するため、敢えて

作動距離を長くにとってカメラをビームラインから遠ざけている。レンズの前面には、CCD 画素が飽和しないよう、必要に応じて吸収型の減光フィルター (ND フィルター) が取り付けられる。特にビームパラメータの測定等で光の強度が大きく変化し得る場所では、フィルターの濃度を遠隔で切り替えるためのフィルターチェンジャーが装備されている。

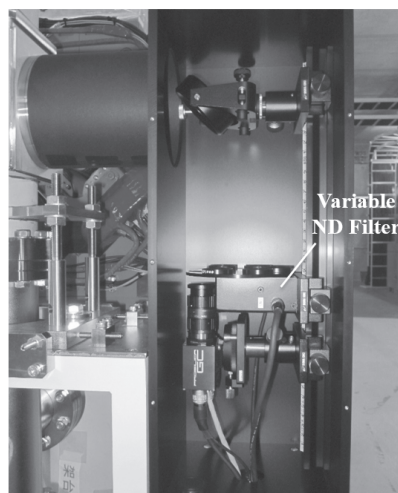
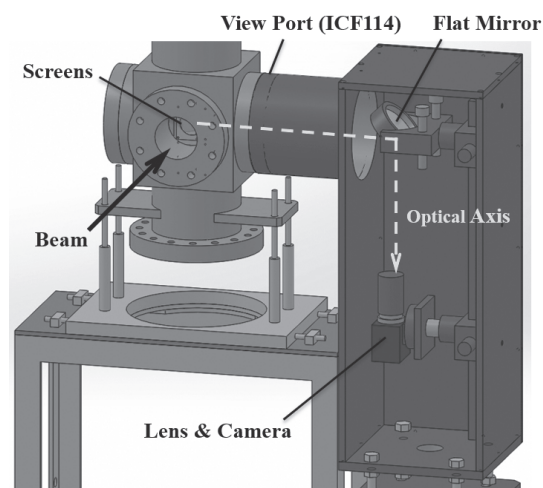


Fig. 32: スクリーン観測用光学系の模式図と写真

これらの光学系は、外部からの迷光を防ぐため黒アルマイト処理されたアルミ製の暗箱内に設置される。図 27 に示したスクリーンホルダーは上下を反転できる構造になっており、その向きによって光を取り出す方向、すなわち光学系を設置する方向を変えることができる。基本的にはアクセスのし易さを考慮して加速器の外側に設置しているが、暗箱が隣接する他のビューポートや放射線シールドと物理的に干渉する場合には例外的に内側に設置している。どちらの場合でも、カ

メラで取得した画像と実際のスクリーンの上下左右の関係は同じになる。

4.2.1. 空間分解能の評価

レンズを使った結像光学系の空間分解能は、主に次の5つの原因によって制限される [25]。

- (1) レンズによる収差：光の空間的な拡がりや入射角度によって生じるサイデル収差（球面収差やコマ収差等）と、レンズの屈折率が光の波長によって異なる（分散）ために生じる色収差に分けられる。収差の大きさは物面における光学系の開口数 NA_o に比例する。
- (2) 絞りによる回折：光がレンズや絞りといった有限の大きさの開口を通過すると必ず回折を生じ、それらが干渉し合って縞状の回折パターンを形成する。たとえ収差のない光学系を用いたとしてもこの回折パターンの大きさより小さく集光することはできないので、観測できる像の大きさに限界が生じる（回折限界）。回折パターンの大きさは光の波長に比例し、 NA_o に反比例する。
- (3) CCD 画素による量子化：CCD カメラは連続的な像を画素の単位で量子化して記録するため、1画素の大きさより小さい変化は区別できない。それによる分解能への影響は、画素の大きさに比例し、 NA_o （光学系の倍率）に反比例する。
- (4) 発光点の奥行き：発光点がレンズに対して奥行きを持つ場合、全ての光が一点に集光せず像にボケが生じる（ピンボケ）。その大きさは発光点の奥行きと NA_o の積に比例する。
- (5) 結晶内での電子散乱・制動放射：YAG スクリーンの場合、入射した電子が結晶内で多重散乱や制動放射を起こすことで発光点が拡がり、像に滲みが生じる。その大きさはビームのエネルギーや強度に大きく依存する。また、上述したように、ビームの強度が高くなってくるとその中心部において蛍光の強度が飽和する可能性がある。このような状態ではビームサイズを実際より大きく見積もってしまう傾向があるので、入射する電荷密度には注意を要する。

開口数 NA_o は、レンズの最外周部を通過して焦点に向かう光線と光軸がなす角を θ 、レンズの直径を D とすると

$$NA_o = \sin \theta \simeq \frac{D}{2L} \quad (4-11)$$

で与えられる。ただし、レンズと被写体間の媒質は真空、あるいは空気と仮定した。開口数はレンズの絞りで調節でき、値が大きい程多くの光を集められるので明るい光学系となるが、その分被写界深度は浅くなるのでピントの調節がシビアになる。

光学系の空間分解能の制限する上記5つの寄与は、光線追跡による数値計算や理論的な計算式からそれぞれ評価できるが、ここでは簡易的に次のような方法で評価した。まず、(1) から (3) については、白色ネオセラムの基板上に方眼パターン（2 mm ピッチ、線幅：0.5/0.1 mm）が印刷された校正プレートを実際のセットアップで撮影し、得られた画像のエッジ幅から評価した。図 33(a) に撮影した校正プレートの画像を示す。現状ではどの SCM においてもスクリーンの開口全体が見渡せる倍率（0.13 倍程度）で撮影している。CCD の 1 pixel がスクリーン上でのおよそ 57 μm に相当する。図 33(b) は (a) の図中に示した破線上の強度分布とその位置微分であり、各エッジ部分の幅から物面における分解能 δ_o を見積もると、およそ 37 μm となる。次に、(4) の寄与 δ_t は、幾何学的な解析から次式で評価した。

$$\delta_t = \frac{tNA_o}{2n} \quad (4-12)$$

ここで、 t は発光点の奥行きであり、YAG スクリーンの場合は結晶厚の半値、OTR スクリーンの場合はビームサイズとなる。 n は発光体の屈折率で、YAG スクリーンの場合は 1.82（表 4 参照）、OTR スクリーンの場合は 1（真空）である。実際のセットアップにおける開口数 NA_o は 0.036 程度であるから、式 4-12 より各スクリーンにおける δ_t を計算できる。YAG スクリーンのみで生じる (5) の寄与 δ_e については、ビームのエネルギーや強度に依存して変化するため、ここでは大きめに見積もって結晶の厚み程度と仮定した。このように評価した3つの独立な寄与からトータルの空間分解能 δ_{total} を

$$\delta_{\text{total}} = \sqrt{\delta_o^2 + \delta_t^2 + \delta_e^2} \quad (4-13)$$

として計算すると、YAG スクリーンの場合が $62 \mu\text{m}$ 、OTR スクリーンの場合が $37 \mu\text{m}$ となった。これらは分解能の原理的な限界である上記の画素分解能 ($57 \mu\text{m}$) と同等以下であり、カメラの CCD 素子を有効に利用できていることが分かる。上記 (5) の寄与による像の滲みがないため、一見 OTR スクリーンの方が YAG スクリーンよりも分解能が高いように見えるが、実際の OTR は図 29 に示したような鋭い指向性とラジアル偏光という特殊な偏光状態を持っているため、今回の評価で使用した等方的かつランダムに偏光した光とは回折パターンが異なり、分解能は上記の値の 3 倍程度に悪化する可能性がある。

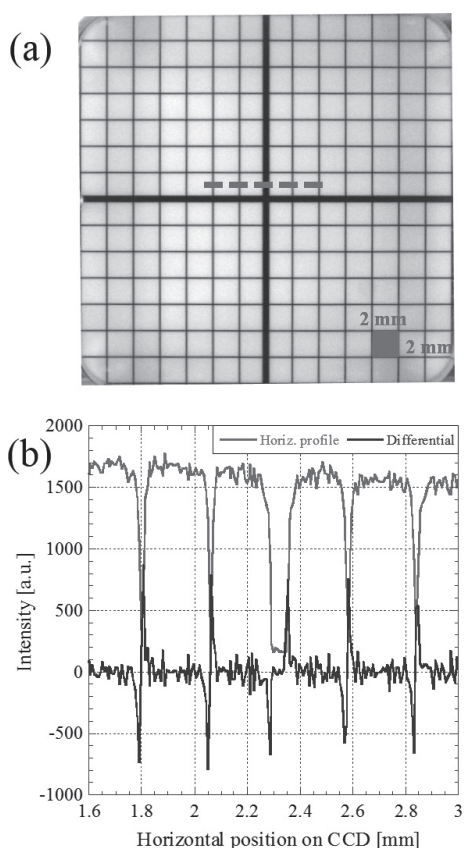


Fig. 33: 校正プレートによる空間分解能の評価 (a) 実際のセットアップで撮影した方眼パターン (b) 破線上の強度分布とその位置微分

4.3. cERL 調整運転での使用例

調整運転の初期段階では、非常に低強度のビームでも精度良く観測できる SCM が軌道調整の主力となる。また、調整が進んでビーム強度が上がってきた場合で

も、ビームの質やサイズを小さく保ったまま輸送したりそれらを定量的に評価したりするためには、ビームの重心位置だけでなくプロファイルまで測定できる SCM が不可欠である。上述したように、cERL の SCM は 2 種類のスクリーンを備えているが、これまでの調整運転では基本的に YAG スクリーンしか使用していない。その理由は OTR の特徴的な角度分布と光収率の低さにある。例えば、cERL の入射部ではビームエネルギーが最大でも 5.5 MeV 程度であるため、OTR の角度拡がりには式 4-4 より $\pm 85 \text{ mrad}$ となり、開口角 $\sim 36 \text{ mrad}$ の上記光学系ではまず観測できない。ビームエネルギーが 20 MeV となる周回部では角度拡がり $\pm 25 \text{ mrad}$ まで狭まるため、光学系の開口以内に放射強度のピークが取り、実際に OTR スクリーンでもビームプロファイルを観測できることを確認しているが、YAG スクリーンに比べると放射強度が大幅に低いことから SN 比の点で劣る。したがって、上述した発光量の飽和が始まるまでは、主に YAG スクリーンを使用することになる。現状の最大電荷密度で YAG スクリーンの線形性が保たれていることは実験的に確認済みである。

4.3.1. SCM の制御パネル

図 34 に SCM (YAG スクリーン) で取得したビームプロファイルの表示パネルを示す。パネル中央に表示されているのが上述した GigE カメラにて撮影されたスクリーンの 2 次元画像で、上部のプルダウンメニューから表示するカメラを選択することができる。画像は 5 Hz のビームトリガーに同期して更新されるが、制御ネットワークの帯域を圧迫しないよう、測定に使用している SCM のカメラのみデータを送信する仕組みとなっている。その下と左に位置するグラフには、画像データをそれぞれ水平方向と鉛直方向に積分して得られたビームプロファイルが表示される。積分する範囲は任意に指定できるので、視野全体の射影プロファイルからある断面における強度分布まで取得することができる。右手にはこれらのプロファイルを解析して得られた統計情報やビーム調整に役立つピーク位置のトレンドグラフを配置している。各プロファイルにはガウス関数が最小二乗法によりフィッティングされ、RMS ビームサイズの変化をリアルタイムで測定できる。また、取得した画像からあらかじめメモリに

保存しておいた任意の画像を差し引いて表示するバックグラウンド補正機能も備えている。

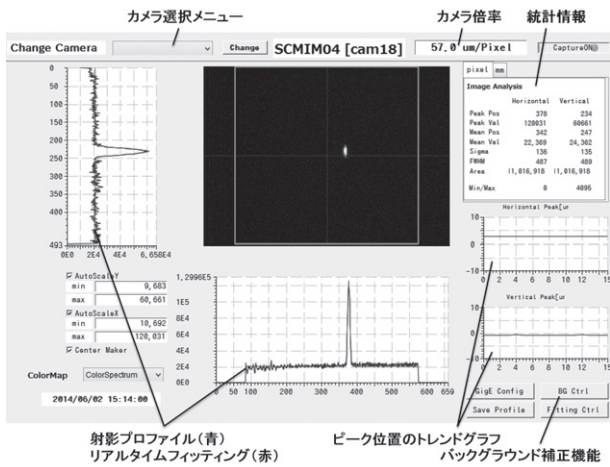


Fig. 34: SCM で取得したビームプロフィールの表示パネル

4.3.2. Q スキャン法によるエミッタンス測定

SCM を用いたビームパラメータの測定例として、Q スキャン法によるエミッタンス測定を紹介する。エミッタンスとはビームの質を表す物理量で、一般的にはビームの構成粒子が6次元空間上で占める体積として定義される。構成粒子間のクーロン散乱が無視できる場合にはビームの集束・発散や加減速等には依らない保存量となることが知られており、エミッタンスが小さい程ビームサイズが小さく、かつ構成粒子の運動方向が揃った質の良いビームとすることができる。エミッタンスを測定する手法はいくつかあるが、ここではビームの集束力の変化に対するビームサイズの応答を利用して測定する手法を取り上げる。ビームの集束力は四重極電磁石 (Quadrupole Magnet) の強さをスキャンすることで変えられるので、この方法は“Q スキャン法”と呼ばれることが多い。

図 35 に Q スキャン法の概念図を示す。図の左手からビームが入射したとすると、ビームは四重極電磁石中で磁場中心からの距離に比例した集束力あるいは発散力を受け、磁石から距離 L だけ下流に位置するスクリーン上でのビームサイズを変化させる。まず四重極電磁石中における単粒子の運動を考えると、運動方程

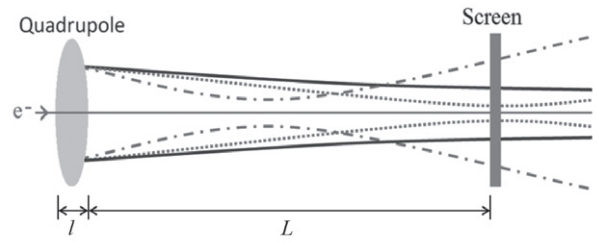


Fig. 35: Q スキャン法の概念図

式は

$$\frac{d^2x}{ds^2} = -\frac{qB_g}{mv}x \equiv -\omega^2x \quad (4-14)$$

となる。 m , q , v はそれぞれ粒子の質量, 電荷, 速度であり、 B_g は磁石の磁場勾配である。独立変数には中心軌道に沿って測った距離 s を採用した。磁石の入口 ($s = 0$) での変位と軌道の傾きをそれぞれ x_0 , $x'_0 \equiv \frac{dx_0}{ds}$ とすると、式 4-14 の解は行列表示で

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \cos \omega s & \frac{1}{\omega} \sin \omega s \\ -\omega \sin \omega s & \cos \omega s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x'_0 \end{pmatrix} \\ &\equiv M_F \begin{pmatrix} x_0 \\ x'_0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4-15)$$

と表すことができる。ここで、 $s \rightarrow 0$ の極限をとると (ただし $\omega^2 s$ は一定とする)、

$$\begin{aligned} M_F &= \begin{pmatrix} \cos \omega s & \frac{1}{\omega} \sin \omega s \\ -\omega \sin \omega s & \cos \omega s \end{pmatrix} \\ &\rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -k & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4-16)$$

となる。 $k \equiv \omega^2 s$ であり、光学レンズでいうところの焦点距離の逆数に相当する。ここでの s は四重極電磁石の厚さに対応していることを考えると、この操作は磁石の作用を空間のある一点に集中させていることになる。これを“薄レンズ近似”と呼ぶ。また、ある要素がイオン運動に及ぼす影響を全て含んだ式 4-16 のような行列のことを“転送行列”という。上記の M_F は、2行1列成分の符号がマイナスであることから分かるように、水平方向自由度に対して集束作用をもつ四重極電磁石の転送行列である。極性が逆の磁石の場

合も同様にして

$$M_D = \begin{pmatrix} \cosh \omega s & \frac{1}{\omega} \sinh \omega s \\ \omega \sinh \omega s & \cosh \omega s \end{pmatrix} \\ \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ k & 1 \end{pmatrix} \quad (4-17)$$

と計算できる。次に、磁石を出てからスクリーンに至るまでの長さ L のドリフトスペースについて考えると、その転送行列は

$$M_O = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4-18)$$

と書ける。したがって、図 35 に示した経路全体に対する転送行列は、得られた各要素に対する転送行列を順番に掛け合わせるにより、次式で与えられる。

$$M_{FO} = M_O M_F \\ = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -k & 1 \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} 1 - kL & L \\ -k & 1 \end{pmatrix} \quad (4-19)$$

一方、任意の要素 1 から 2 への転送行列を

$$M_{12} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \quad (4-20)$$

とすると、要素 2 におけるビームサイズ σ_2 は次のように表すことができる。

$$\sigma_2 = \sqrt{\varepsilon(m_{11}^2 \beta_1 - 2m_{11}m_{12}\alpha_1 + m_{12}^2 \gamma_1)} \quad (4-21)$$

ここで、 ε はビームのエミッタンス、 α_1 、 β_1 、 γ_1 は要素 1 における“Twiss パラメータ”である。Twiss パラメータは加速器の構成で一意に決まる s の関数であり、互いに

$$\alpha(s) = -\frac{\beta'(s)}{2} \quad (4-22)$$

$$\gamma(s) = \frac{1 + \alpha(s)^2}{\beta(s)} \quad (4-23)$$

という関係で結ばれている。これを図 35 のセットアップに適用し、転送行列 4-19 の各成分を式 4-21 に代入すれば、スクリーン上でのビームサイズが

$$\sigma_2 = \sqrt{\varepsilon[(1 - kL)^2 \beta_1 - 2L(1 - kL)\alpha_1 + L^2 \gamma_1]} \\ = \sqrt{L^2 \sigma_1^2 \left[k - \left(\frac{1}{L} - \frac{\alpha_1}{\beta_1} \right) \right]^2 + \frac{\varepsilon^2 L^2}{\sigma_1^2}} \\ \equiv \sqrt{a(k - b)^2 + c} \quad (4-24)$$

と求まる。途中で関係式 4-23 と $\sigma_1^2 = \varepsilon \beta_1$ を使用した。よって、四重極電磁石の集束力 k に対するビームサイズの応答を測定し、係数 a 、 b 、 c をフリーパラメータにして式 4-24 をフィッティングすれば、エミッタンスは次式で求められる。

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{ac}}{L^2} \quad (4-25)$$

ただし、この表式で得られるエミッタンスはビームの加減速によって値が変化する得るので、通常はビームエネルギーで規格化した規格化エミッタンス

$$\varepsilon_n = \gamma \beta \frac{\sqrt{ac}}{L^2} \quad (4-26)$$

が用いられる。ここでの β と γ は上記の Twiss パラメータではなく、それぞれ $\beta = v/c$ 、 $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$ (ローレンツ因子) である。なお、このようにして得られた係数 a 、 b 、 c からは、エミッタンスだけでなく四重極電磁石の位置での Twiss パラメータも次式で評価できる。

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{a}{c}} \quad (4-27)$$

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{a}{c}} \left(\frac{1}{L} - b \right) \quad (4-28)$$

エミッタンスを小さく維持したままビームを輸送するためには、実際に計測した Twiss パラメータを設計値に合わせる努力が必要であり (オプティクスマッチング)、Q スキャン法はこの目的にも利用される [26]。

以上の議論では暗に水平方向を仮定してきたが、鉛直方向の場合は四重極電磁石の極性が逆になると考えられるので、転送行列 4-17 を使って展開しなければならない。しかしながら、ここでのように薄レンズ近似を適用した場合は単に k の符号を反転させればよく、測定データにフィッティングする応答関数は式 4-24 と同じでよいことが分かる。ただし、Twiss パラメータの α_1 の値は係数 b の符号によって変わるので、式 4-28 は水平方向と鉛直方向で使い分けなければならない。ちなみに、薄レンズ近似を適用しない場合は、応答関数として式 4-21 を変形した

$$\sigma_2 = \sqrt{\sigma_1^2 \left(m_{11} - \frac{\alpha_1}{\beta_1} m_{12} \right)^2 + \frac{\varepsilon^2}{\sigma_1^2} m_{12}^2} \\ \equiv \sqrt{A(m_{11} + Bm_{12})^2 + Cm_{12}^2} \quad (4-29)$$

を用いると見通しがよい。式中の転送行列成分は、水平方向の場合

$$m_{11} = \cos \sqrt{kl} - L \sqrt{\frac{k}{l}} \sin \sqrt{kl} \quad (4-30)$$

$$m_{12} = \sqrt{\frac{l}{k}} \sin \sqrt{kl} + L \cos \sqrt{kl} \quad (4-31)$$

となり、鉛直方向の場合

$$m_{11} = \cosh \sqrt{kl} + L \sqrt{\frac{k}{l}} \sinh \sqrt{kl} \quad (4-32)$$

$$m_{12} = \sqrt{\frac{l}{k}} \sinh \sqrt{kl} + L \cosh \sqrt{kl} \quad (4-33)$$

となる。 l は四重極電磁石の厚みである。規格化エミッタンスと Twiss パラメータは、フィッティングで得られた係数 A, B, C から

$$\varepsilon_n = \gamma\beta\sqrt{AC} \quad (4-34)$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{A}{C}} \quad (4-35)$$

$$\alpha_1 = -B\sqrt{\frac{A}{C}} \quad (4-36)$$

で求められる。 k が大きい領域でのビームサイズ応答を利用する場合は、こちらの表式を使用すべきである。

図 36 は低バンチ電荷 (~ 20 fC/bunch) での調整運転時に取得した Q スキャン法の結果である。SCM には第 1 アーク直後の直線部に設置した 1 台 (図 1 中の #18) を使用した。スキャンする四重極電磁石、すなわちドリフトスペースの長さは、最もビームを集束した状態でのビームサイズが上述した YAG スクリーンの空間分解能を下回らないよう決めた ($L \sim 6.0$ m)。また、その状態で CCD 画素が飽和しないよう、カメラのゲインと ND フィルターの濃度を慎重に調整した。横軸がスキャンした四重極電磁石の集束力 k [m^{-1}] で、縦軸が SCM で測定した水平方向及び鉛直方向の RMS ビームサイズ σ_x, σ_y [mm] である。各 k の値に対するビームサイズは連続して 20 回測定され、そのときの平均値と標準偏差がプロットしてある。これらのデータに重み付き最小二乗法を用いて応答関数 4-24 をフィットし、得られた係数から規格化エミッタンス ε_n を見積もると、水平方向が 0.140 ± 0.002 mm · mrad、鉛直方向が 0.136 ± 0.001 mm · mrad となった。ここで付した規格化エミッタンスの誤差 $\Delta\varepsilon_n$ は、フィッティ

ングにおける各係数の測定誤差 $\Delta a, \Delta c$ から次の伝搬則に基づいて評価した値である。

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_n &= \sqrt{\left(\frac{\partial\varepsilon_n}{\partial a}\right)^2 (\Delta a)^2 + \left(\frac{\partial\varepsilon_n}{\partial c}\right)^2 (\Delta c)^2} \\ &= \frac{\gamma\beta}{2L^2} \sqrt{\left(\frac{c}{a}\right) (\Delta a)^2 + \left(\frac{a}{c}\right) (\Delta c)^2} \quad (4-37) \end{aligned}$$

これらのエミッタンスはビームの構成粒子間に働くクーロン相互作用 (空間電荷) が無視できる場合の設計値とほぼ同じであり、低バンチ電荷ではビーム生成時に決まる初期エミッタンスを増加させることなく輸送できていることが分かった。バンチ電荷が高くなってくると空間電荷がビーム全体の挙動に影響を及ぼすようになり (空間電荷効果)、このように初期エミッタンスを維持したまま輸送することが難しくなる。実際の調整運転でも高バンチ電荷 (7.7 pC/bunch) ではまだエミッタンスの増加を抑えきれていないが、上述したオプティクスマッチングを入念に行うことにより順調な改善傾向が確認されている。

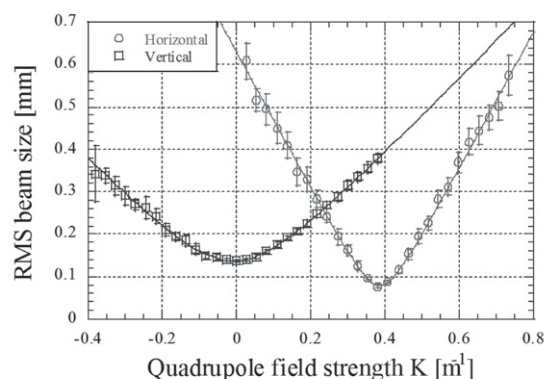


Fig. 36: Q スキャン法によるエミッタンス測定の一例

5. ビームロスモニター (BLM)

図 37 に cERL の加速器室内に設置している BLM の配置図を示す。まず、ビームに最も近い位置に配置されているのが光ファイバーを用いた BLM である。その特徴はビームのロスポイントをリアルタイムで診断できることであり、ビームが通過する真空ダクトに沿って配置される。調整運転が始まった当初は 4 本の光ファイバーで cERL の一周をカバーするように配置していたが、現在はビームロス調整の具合を判断する際

に指標となるアーク部での損失量を測定するため、2ヶ所のアーク部に沿って配置している。局所的なビームロスを高感度で検知する目的で配置しているのがヨウ化セシウム (CsI) の純結晶を用いた BLM である。意図的にビームを削るコリメータの近傍や、エネルギー回収の具合によっては多くのビームロスが予想されるダンプリング入口といった計 8ヶ所に配置してあり、その出力は加速器を緊急停止するためのインターロックシステムに接続されている。同じく局所的なビームロス検知用にタリウム (Tl) をドープした CsI 結晶を用いた BLM も使用している。純結晶を用いた上記の BLM に比べると応答速度は遅いが結晶の発光効率が高いため検出感度に優れている。これらは各アーク部の頂点やビームを細く絞る必要のあるレーザーコンプトン散乱 (LCS) 実験の衝突点付近といったビーム調整の要所に配置され (計 8ヶ所)、必要に応じて他所への移設も可能となっている。

以上は応答速度が $1 \mu\text{s}$ 前後の高速 BLM であるが、cERL ではこれらに加えてビームロスで発生したエックス線やガンマ線の線量率を測定するためのエリアモニター (日立アロカメディカル, MAR-782) を設置している。応答速度は適用する移動平均の時間幅に依存するが概ね 1 s のオーダーであり、この目的には十分である。シリコン半導体を利用した放射線検出器で、50 keV から 6 MeV までのエックス線・ガンマ線に感度

がある。図 37 に示したとおり加速器室内の 12ヶ所に設置し、比較的広いエリア単位でのビームロス検出に利用している。12台のうち 2台は主空洞内のフィールドエミッションで生じる暗電流の計測に使用しており、残りの 10台は個別に閾値を設定してインターロックシステムに組み込んで使用している。また、図中には示していないが、DC の高電圧 (500 kV) を扱う cERL の電子銃では、放電による放射線の上昇をいち早く検知して安全に停止させるため、チェンバー直下により低いエネルギーのエックス線 ($> 7 \text{ keV}$) から検出できる電離箱式のサーベイメータ (Fluke Biomedical, 451B) を設置して利用している。

本章ではこれらの中から光ファイバーと CsI シンチレータを利用した高速 BLM を取り上げ、その動作原理やシステム構成、使用例等について紹介する。

5.1. 光ファイバーを用いた高速 BLM

ビームを構成していた高エネルギー電子の一部がビームロスによって真空ダクトに衝突すると、そこを起点に電磁シャワーが生じて多くの 2 次的高エネルギー電子がダクト外へ放出される。これらの 2 次電子が真空ダクトに沿って設置されていた光ファイバーを通過すると、ガラスコアの内部で“チェレンコフ光”が発生する。チェレンコフ光とは、荷電粒子が屈折率 n の媒質中を通過する際に、その速度 v が媒質中にお

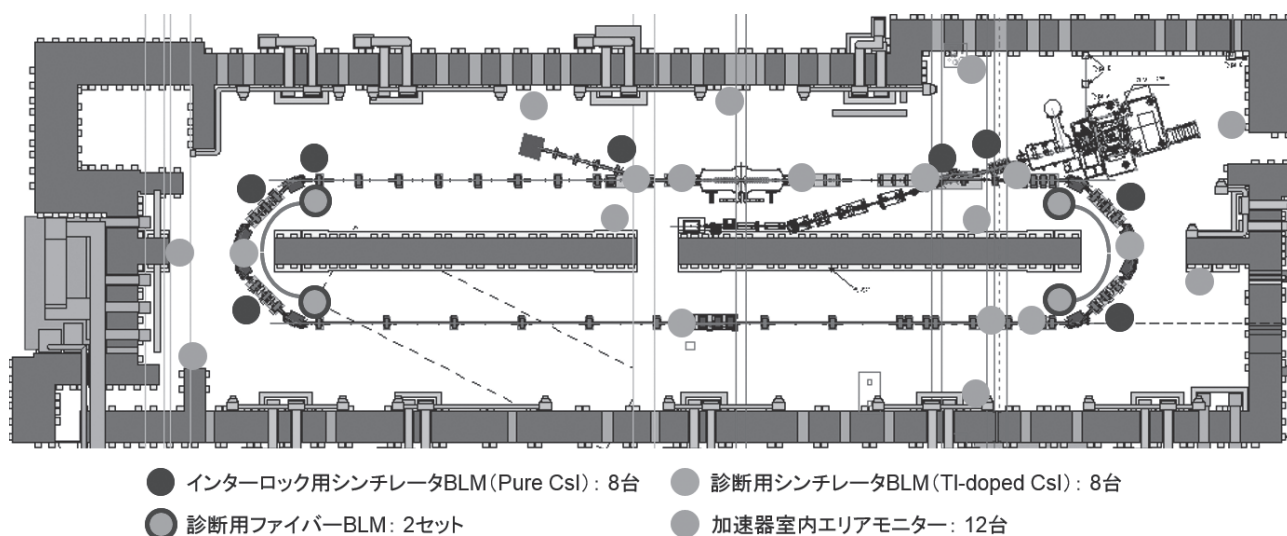


Fig. 37: cERL 加速器室内の BLM 配置

ける光速を超えた場合、すなわち

$$v > \frac{c}{n} \quad \therefore \beta = \frac{v}{c} > \frac{1}{n} \quad (5-1)$$

の場合に放出される光で、荷電粒子に置き去りにされた電磁場の波面が揃うことで生じる衝撃波と考えることができる (図 38 参照)。その放出角度は、光の波面と粒子の進行方向がなす角度を θ とすると

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta} \quad (5-2)$$

と表され、粒子の飛跡に沿って円錐状に放出されることが分かる。例えば、媒質として $n = 1.6$ の一般的なガラスを想定すると、チェレンコフ光は粒子の速度が $0.625c$ を超えた場合に放出され、その角度はおよそ 51° となる。

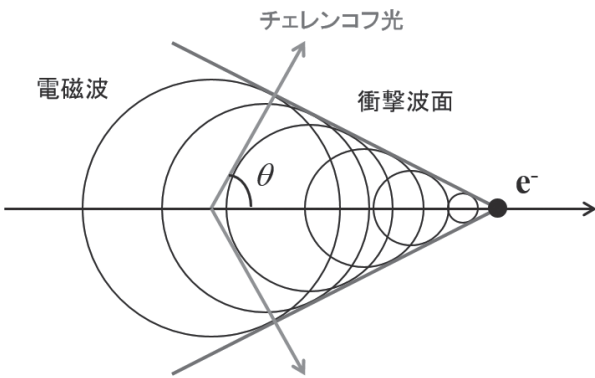


Fig. 38: チェレンコフ光発生イメージ

このようにして発生したチェレンコフ光は、ファイバー中を上流方向と下流方向の二手に分かれて伝搬していく。これらの光パルスファイバー両端に取り付けた光電子増倍管 (PMT, フォトマル) で電気信号に変換して検出すれば、その振幅からおおよその損失量を、時間差からビーム進行方向のロスポイントを診断できる [27]。図 39(a) にロスポイント測定時の模式図を示す。ファイバー長を L 、ファイバーの上流端からロスポイントまでの距離を x とすると、2つの信号の時間差 t_d は

$$t_d = \frac{L - 2x}{v_f} \quad (5-3)$$

となる。ただし、 v_f はファイバー中での光速で、一般的なガラスコアの場合

$$v_f \simeq \frac{2}{3}c \quad (5-4)$$

である (単位長さを進むのにかかる時間: 5.0 ns/m)。したがって、得られる信号の時間構造を解析すれば、おおよそのロスポイントを判定できる。

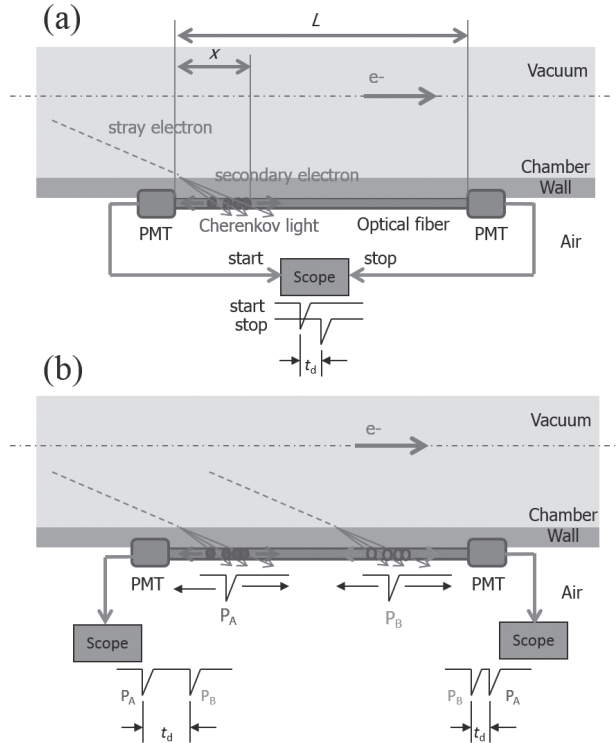


Fig. 39: 光ファイバーを用いたロスポイント判定の原理 (a) 両端の信号を使う場合 (b) 片端の信号を使う場合

次に、ロスポイントが複数あった場合にファイバーの上流端と下流端でそれぞれどのような信号が得られるかを考えてみる (図 39(b) 参照)。簡単のため、最初のロスポイント A から 1 m 下流に次のロスポイント B があったとすると、ビームは A でロスを生じた後、ファイバー内に発生した下流側へ進む光パルスとともにダクト内を進行する。ただし、このときのビームの速度はほぼ光速 ($v \simeq c$, 3.3 ns/m) であるのに対し、光パルスの速度は式 5-4 のようであるから、ビームの方が先に B へ到着して次のロスを生じる。このときファイバーの上流端で得られる信号の時間差は、AB 間をビームが進むのにかかる時間 (3.3 ns) に光パルスの伝搬時間 (5.0 ns) が加わるので、およそ 8.3 ns となる。一方、下流端では A で生じた信号と B で生じた信号の順番が入れ替わり、その時間差は $5.0 \text{ ns} - 3.3 \text{ ns} = 1.7 \text{ ns}$

となる。すなわち、ファイバーの上流端で観測すると信号の時間差は実際の距離よりも拡大され、下流端では逆に圧縮される。時間差が大きい程ロスポイントを判定する際の位置分解能は高くなるので、上流端か下流端のどちらかで観測する場合には前者の方が有利であることが分かる。ただし、ファイバーと2次電子の交差角の関係から、得られる信号強度は下流端の方が数倍高くなる。

cERLのビームラインに沿って光ファイバーを敷設し、上流から順にスクリーンを挿入してビームのロスポイントを変化させたときの出力信号をオシロスコープで観測した。このときの結果を図40にまとめて示す。ファイバーには、得られるチェレンコフ光の強度や光の減衰時間、耐放射線性等を考慮し、高純度の石英ガラスを材質にした大口径ファイバー（コア径：600 μm ）を使用した。フォトマル（浜松ホトニクス、H10721-110）はファイバーの上流端に取り付け、下流端には光の反射を抑えるための光吸収体を設置した。より下流のスクリーンを挿入する程出力信号の遅延時間が増加しているのが分かる。各信号は数 ns で急峻に立ち上がっており、そのエッジ間の時間差を上記の校正係数（8.3 ns/m）を使って距離に換算すると、図面上でのスクリーン間距離と ± 30 cm 程度の誤差で一致することを確認した。実際のセットアップでは、真空ダクトの形状が場所によって異なっていたり、ダクト間のフランジ部分でファイバーが多少遠回りしたりするので、測定結果にはこの程度の誤差が生じる。また、実際に測定しているのはあくまでダクトから放出された2次電子の場所であり、それは必ずしもビームロスの発生点と一致するとは限らないことに注意して解析しなければならない。

5.2. CsI シンチレータを用いた高速 BLM

シンチレータに放射線が入射すると物質中の電子が励起され、再び基底状態へ戻る際にその差分にあたるエネルギーが光として放出される。このシンチレーション光をフォトマル等の光電変換素子で電気信号に変換・増幅すれば、入射した放射線の量やエネルギーを高感度で測定することができる。cERLではこのようなシンチレーション検出器を BLM として各所に配置し、一定レベル以上の放射線（ビームロス）を検知したら即座に加速器を停止させるインターロックシ

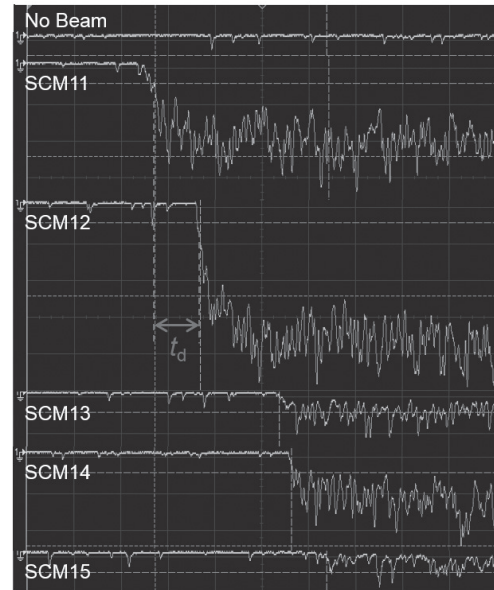


Fig. 40: cERLで行ったファイバー BLMの動作試験

テムに組み込んで使用している。その動作速度は加速器を構成する機器の破損や放射化を最小限に止めるためできるだけ速い方が望ましいが、cERLでは1 μs 以内を目標に開発された [28]。

図41にそのシステム構成を示す。ビームロス検出部のシンチレータには、CsIの純結晶を用いた。一般には少量のタリウムをドーピングして発光効率を高めたCsI(Tl)が使用されることが多いが、本システムでは高速動作が重要となるため、より蛍光の減衰時間が短い純結晶を採用した。純結晶の方が潮解性や吸湿性が弱く、大気中で扱い易いというメリットもある。表5にPure CsI及びCsI(Tl)の物理特性をまとめた。シンチレータのサイズは10 mm \times 10 mm \times 25 mmであり、不等辺の面をフォトマルの光電面（カソード）に向けて設置する。フォトマルにはサイドオン型のラージカソードタイプを採用した（浜松ホトニクス、R11558）。今後シンチレータを交換する可能性も考慮し、シンチレータとフォトマルの接触面には光学グリースや接着剤等は塗布していない。これらはアルミ製の遮光ケースに納められ、図37に示した加速器室内の各所に設置される。放射線の入射窓には、ベリリウム等の金属ではなく、厚手のMDF（中密度繊維板）を使用している。ビームロス検出部の写真を図42(a)に示す。

ビームロスに起因して発生したシンチレーション光

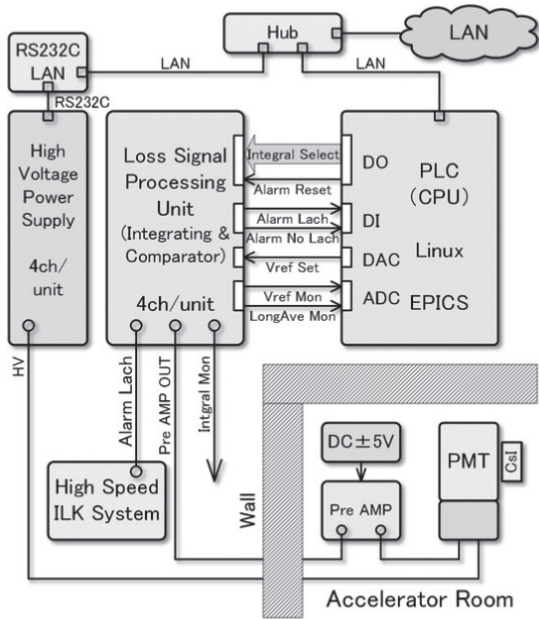


Fig. 41: インターロック用シンチレータ BLM のシステム構成

Table 5: Pure CsI 及び CsI(Tl) の物理特性

	CsI(Pure)	CsI(Tl)	
密度	4.51	4.51	g/cm ³
放射長	1.86	1.86	cm
屈折率	1.95	1.79	
融点	621	621	°C
最大発光波長	315	550	nm
発光減衰時間	16	1000	ns
光収率	2000	54000	ph/MeV

は、フォトマルの光電面を介して電子に変換され、雪崩的に2次電子放出を起こす多段のダイノード電極で 10^7 倍程度に電流増幅される。この検出信号は加速器室外に設置された信号処理回路へ送られるが、フォトマルから回路までは約50mも離れているので、SN比改善のため検出部近くのプリアンプでさらに増幅された後送られる。信号処理回路は、フォトマルからの生信号を積分して平均化するための積分回路、その積分出力が任意の基準電圧を超えた場合に警報を発報するための比較回路、その発報状態を保持するためのラッチ回路から構成されており、積分回路の時定数や比較回路の基準電圧は外部のPLCを介して遠隔で変更可能となっている。信号処理回路を中心としたシステム構成機器の写真を図42(b)に示す。

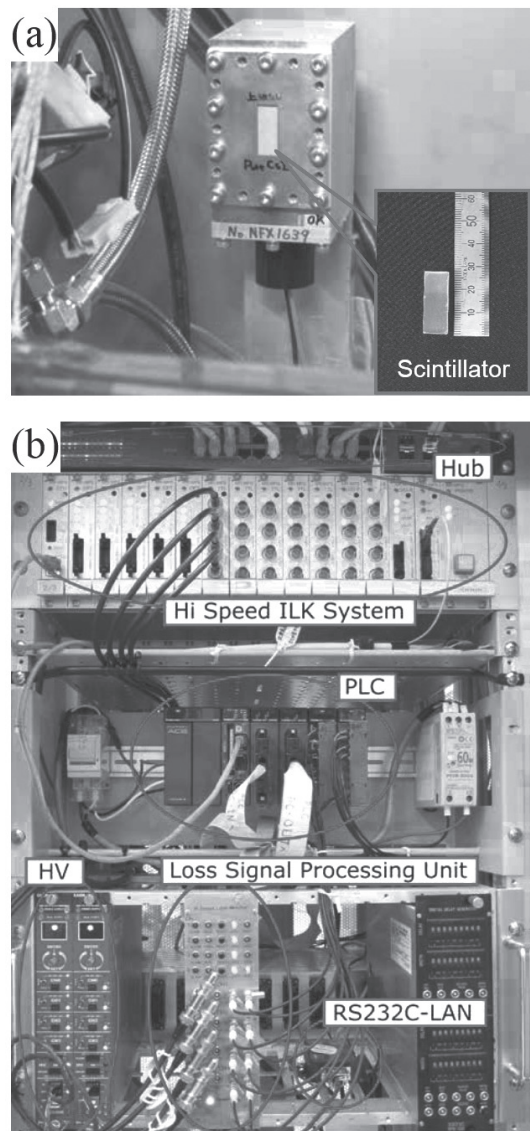


Fig. 42: シンチレータ BLM の写真 (a) ビームロス検出部 (b) 信号処理回路周辺

図43は検出部近傍のスクリーンを挿入して行ったシンチレータ BLM の動作試験の結果である。ビームロスに同期して得られたプリアンプの出力 (CH1, 黄) が積分回路によりある時定数の下で積分され (CH2, 緑)、その値が発報レベル (CH3, 青) に達すると警報出力 (CH4, 赤) のレベルが High から Low へ切り替わっているのが分かる (Normally High)。既存のインターロックシステムとの関係にも問題なく、BLM の発報を受けて即座に加速器が停止することも確認できた。また、この例の時定数設定では、ビームロス発生から警報発報まで約 $0.8 \mu\text{s}$ で動作しており、目標の動作速度をクリアしている。

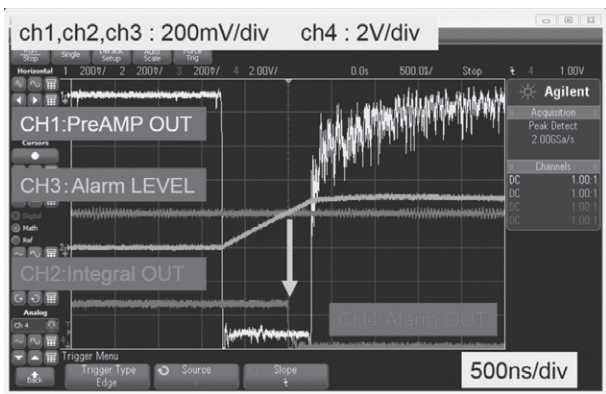


Fig. 43: cERL で行ったシンチレータ BLM の動作試験

5.3. cERL 調整運転での使用例

cERL を CW モードで運転する際には、ビームロスによる放射線の発生をできるだけ小さく抑えることが重要であり、本章で述べた各種 BLM の出力を注視しながら慎重にビーム電流が増やされる。ビームロスの調整には、図 44(a) に示したビームコリメータを使用する。これは水冷した銅製のロッドを上下左右の 4 方向から独立に挿入できる構造になっており、ビームロスの原因となるビームハローやビームテイルの除去に利用する。cERL には同様のコリメータが図 1 に示した 5ヶ所に設置されているが、ビームのエネルギーが高くなるとビームロスで発生する放射線が急激に増加するだけでなく機器の放射化も招くため、周回部のビームロス低減にはこれらの中でも低エネルギーセクションに設置された 2 台 (図 1 中の COL01 と COL02) が特に有効である。このようなコリメータを使ったビームロス調整の様子を図 44(b) に示す。グラフの横軸は時間で、縦軸にはメインダンプで測定したビーム電流 (青) とダクト中心からコリメータロッド先端までの距離 (赤)、及び上述したファイバー BLM の出力信号の振幅 (緑) が表示されている。コリメータをダクト中心に向かって挿入していくと、次第にアーク部でのビームロスが減少し、さらに挿入を続けるとビームのコアまで削ってビーム電流自体が減少しているのが分かる。したがって、この場合の最適なコリメータ挿入量は図中に矢印で示した範囲、すなわちビームロスが最小になるがビーム電流には影響を与えない (ビーム

コアを削らない) 範囲となる。BLM とコリメータを駆使したこのような一連のビームロス調整によって、cERL の平均ビーム電流は順調に増強されてきている。

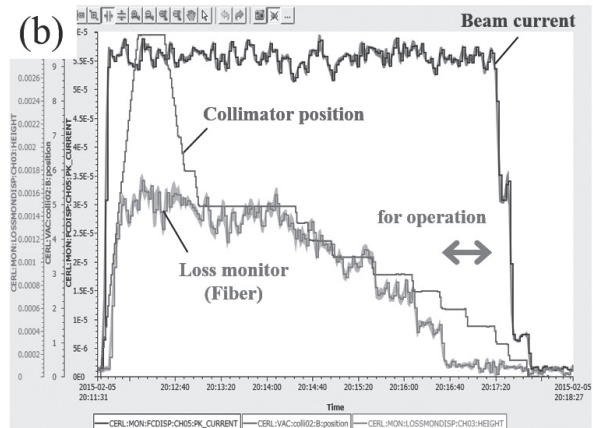
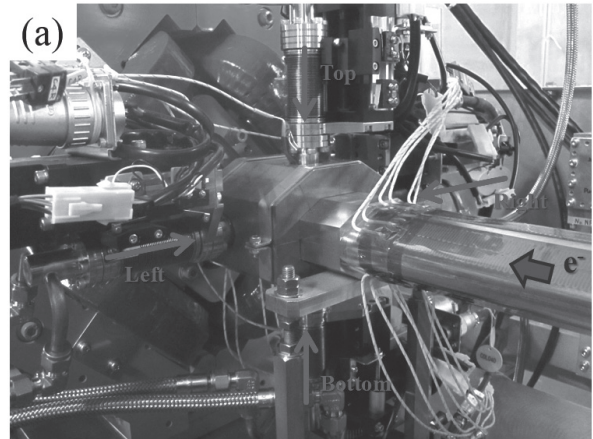


Fig. 44: ビームコリメータによるビームロス調整 (a) アーク部用コリメータの外観 (b) ビームロス調整の様子

6. 今後の課題

cERL は 2013 年 12 月に周回部を含む加速器全体での調整運転を開始して以来、CW 運転におけるビーム電流の増強や低エミッタンスを維持したまま高バンチ電荷のビームを輸送するためのマシンスタディ等が精力的に行われ、着実にその性能を上げている [29]。また、これらの努力と並行してビームのユーザー利用に向けた準備も進められており、2015 年 3 月には LCS による準単色エックス線の生成に成功した [30, 31]。今後はビームとレーザーの双方からこのエックス線強度

の増強に努めるとともに、もう一つのビーム利用計画である大強度テラヘルツ光源に向けた準備を進めることになる。概要だけとなるが、参考までに今後ビームモニター関係で予定している改良や必要になる主な開発項目を以下に列挙する。

- BPM 検波回路の増設：予算の都合上、現状では BPM の信号処理に使用している検波回路の数が不足している。全 45 台の BPM に対して、回路は 27 台しか存在しない。他の加速器で使用していた市販の回路を 10 台分は確保できたが、残りの不足分は同軸スイッチ (Teledyne, SP6T) による切り替え方式を採用することで賄っている。このスイッチを利用すれば、1 台の回路で 6 台分の BPM 信号を処理可能となるが、並列に処理できないため全周のビーム軌道を測定するのに 10 秒程度かかってしまっている。今後は順次回路を増設し、本体の形である「BPM: 回路=1:1」を目指す。
- BPM 検波方式の変更：現状では微弱なビームを用いて行われる調整運転の初期段階から BPM を利用できるよう、BPM の検波方式にはダイナミックレンジの広いログレシオ方式を採用しているが、今後加速器の調整が進んで一定のビーム強度が得られるようになった場合は、狭帯域の同期検波等のより測定精度の高い検波方式へ変更する。また、アーク部の入口と出口等、今後ビームの到着時間が重要になる場所については先行して検波方式を見直し、高精度のビーム位相モニター (バンチアライバルモニター) として利用できるようにする。
- SCM 光学系の高分解能化：SCM についても、今後ビームのエミッタンスが低下してくると現在使用している光学系では空間分解能が不足するため、収差を抑えた大口径のレンズを使って撮影倍率を上げ、高分解能化する。ただし、倍率を上げるだけでは視野が狭くなりビームを見失う可能性があるため、通常のビーム調整にも利用できるような倍率は可変にする必要がある。
- コヒーレント OTR 対策：今後バンチが短くなったときに SCM の問題となる可能性があるのが“コ

ヒーレント OTR (COTR)”である。COTR とは、可視光の波長と同程度のバンチ長あるいは密度変調を持ったビームが物質を通過する際に発せられるコヒーレントな遷移放射のことで、現在の SCM 構造では本来のビーム像に重なる形で発せられるためビームプロファイルの測定が困難になる。対策はいくつか考えられるが、現在 YAG スクリーンで使用している金属ミラーの中心部に COTR を逃がすための穴を開け、空間的に分離するのが最も容易で低コストな方法である [32]。

- インターロック用高速 BLM の増設：BLM については、今後の電流増強に備えて CsI シンチレータによる高速 BLM の数を現在の倍に増やす。また、ビームロス検出部の長寿命化や、必要な性能・機能を見極めてシステムのコストダウンを図ることも重要である。
- 周回部におけるバンチ長モニターの開発：大強度テラヘルツ光源への利用のために cERL でテラヘルツ領域のコヒーレント放射を発生させるためには、ビームのバンチ長を現在の数 ps から 100 fs 以下まで圧縮する必要がある (バンチ圧縮)。これにはエネルギーが高い粒子と低い粒子では第 1 アークを通過するのにかかる時間が異なることを利用するが (磁気圧縮)、その調整や効果の確認には周回部におけるバンチ長モニターが必須である。現在開発を進めているのは、SCM の OTR スクリーンから放出されるテラヘルツ領域のコヒーレント遷移放射 (CTR) をマイケルソン干渉計に導き、得られる干渉縞の形状からバンチ長を推定するというものである [33]。ただし、この方法はバンチ形状や測定に使用する光の周波数特性等を仮定する必要があるため、クロスチェックとしてより直接的な測定方法 (周回部にもビーム診断専用のビームラインを設けて偏向空洞を設置する、SCM からの OTR を高速ストリークカメラで観測する、ビームに同期したパルスレーザーと電気光学結晶を用いた EO サンプリング技術を利用する等) の導入も検討している。
- 放射光モニターの導入：現在のビームエネルギー (20 MeV) では難しいが、今後高エネルギー化が進めば可視域の放射光モニターも利用できるよ

うになる。放射光干渉計や高速ゲートカメラ、ストリークカメラ、コロナグラフといった従来の蓄積リング型放射光源で培われた多くの技術を導入することにより、ビームを非破壊で診断できる幅が一気に広がる。これらの放射光モニターを設置するには専用の放射光転送ラインと暗室が必要になる。

7. おわりに

cERL に設置されているビームモニターの中でも最も基本的で重要な役割を担う BPM, SCM, BLM について、その詳細を使用例とともに紹介した。これらは cERL の順調なビーム調整に大きく貢献しているが、今後の課題でも触れたように現在の性能では不十分な点も多い。今後の改良や開発を通じて得られる知識・経験を、将来の大規模 ERL で実現される大強度・低エミッタンスビームの診断に活かしていきたい。

テキストの内容については、時間の都合上やむを得ず解説を省いた項目もあり、普段加速器や高周波測定に馴染みのない読者には分かりにくい箇所が多いのではないと思う。特に、今後の調整運転で重要になるバンチ長モニターや放射光モニターについて詳しく触れられなかったのが非常に悔やまれる。また、同じ理由で原稿をビーム診断のエキスパートの方々にチェックしていただく時間が取れなかったため、多くの嘘や間違いが含まれている可能性がある。これはどんなテキストにも当てはまることではあるが、読者には是非眉に唾をつけて読んでいただき、筆者の後学のため間違いを指摘していただきたい。難しいことを難しく語るのとは簡単である。今回の執筆を通じて、難しいことを平易に、かつ誤解なく伝えることの難しさを改めて痛感した。

参考文献

- [1] D. Douglas *et al.*, Proc. of IPAC2012, New Orleans, pp. 2111-2115 (2012).
- [2] D. M. Gassner *et al.*, Proc. of IBIC2014, Monterey, pp. 49-54 (2014).
- [3] 島田美帆他, 第 11 回日本加速器学会年会議事録, 青森, pp. 1-5 (2014).
- [4] <http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt4.html>
- [5] 飛山真理, OHO'08 テキスト, 第 8 章 (2008).
- [6] 三橋利行, OHO'08 テキスト, 第 9 章 (2008).
- [7] F. Sannibale, Fundamental Accelerator Theory, Lecture No. 13, Michigan State Univ. (2007).
- [8] T. Suwada *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **6**, 032801 (2003).
- [9] K. Yanagida *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **15**, 012801 (2012).
- [10] P. Forck, Joint University Accelerator School 2011, Lecture Notes on Beam Instrumentation and Diagnostics (2011).
- [11] S. Sakanaka *et al.*, Proc. of ERL2013, Novosibirsk, pp. 16-21 (2013).
- [12] <http://www.ansys.jp/products/electromagnetics/hfss/>
- [13] M. Tobiyama *et al.*, Proc. of BIW08, Tahoe City, pp. 205-209 (2008).
- [14] <http://www.gdfidl.de>
- [15] 陳栄浩, OHO'11 テキスト, 第 2 章 (2011).
- [16] Y. Tanimoto *et al.*, Proc. of IPAC2013, Shanghai, pp. 3315-3317 (2013).
- [17] <http://www.i-tech.si/accelerators-instrumentation/libera-brilliance-plus/>
- [18] <http://www.aps.anl.gov/epics/>
- [19] T. Shintake *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **254** pp. 146-150 (1987).
- [20] <https://www.cst.com/Products/CSTPS>
- [21] B. Gitter, Technical report, UCLA Department of Physics (1992).
- [22] L. Wartski *et al.*, J. Appl. Phys. **46**, pp. 3644-3653 (1975).
- [23] Y. Hashimoto *et al.*, Proc. of IBIC2013, Oxford, pp. 338-341 (2013).

- [24] M. A. Tordeux *et al.*, Proc. of EPAC2000, Vienna, pp. 1818-1820 (2000).
- [25] 柳田謙一他, 第 6 回日本加速器学会年会議事録, 東海, pp. 448-451 (2009).
- [26] 宮島司他, 第 12 回日本加速器学会年会議事録, 敦賀, THP017 (2015).
- [27] T. Obina *et al.*, Proc. of IBIC2013, Oxford, pp. 638-643 (2013).
- [28] 下ヶ橋秀典他, 第 12 回日本加速器学会年会議事録, 敦賀, THP083 (2015).
- [29] S. Sakanaka *et al.*, Proc. of ERL2015, Stony Brook, MOPCTH07 (2015).
- [30] R. Nagai *et al.*, Proc. of IPAC2015, Richmond, TUPJE002 (2015).
- [31] A. Kosuge *et al.*, Proc. of IPAC2015, Richmond, TUPWA066 (2015).
- [32] S. Matsubara *et al.*, Proc. of IBIC2012, Tsukuba, pp. 34-37 (2012).
- [33] 本田洋介他, 第 12 回日本加速器学会年会議事録, 敦賀, THP088 (2015).