

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月20日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21604012

研究課題名（和文） エネルギー回収リニアック(ERL)用ビーム診断装置の開発

研究課題名（英文） Development of Beam Diagnostic Apparatus for Energy Recovery Linac

研究代表者

芳賀 開一 (HAGA KAIICHI)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・講師

研究者番号：00180795

研究成果の概要（和文）：この研究の対象である「エネルギー回収リニアック(ERL)」加速器は、非常に高品質の放射光ビームを生み出す、次世代の放射光源用加速器である。また、放射光の生成に使用された電子ビームから使用後はそのエネルギーを回収し、新たな電子ビームの加速に使用するという画期的な加速器である。しかし、エネルギーを100%回収するためには、電子ビームの性質を詳細に診断する必要がある。当該研究は、ERL加速器内の電子ビームを診断するための装置を開発するものである。

研究成果の概要（英文）： Energy Recovery Linac is the excellent type of accelerator ,firstly for generating synchrotron radiation with very high quality and secondly for recovering the accelerated electron beams energy in order to reuse its energy for accelerating next electron beams. But it is necessary to know the beam parameters for recovering full energy. This research aims for developing the diagnostic apparatus of the electron beams.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：加速器物理、ビーム診断

科研費の分科・細目：量子ビーム

キーワード：加速器

1. 研究開始当初の背景

1970年代に開発され運転を開始した放射光源用加速器は、挿入光源を主な放射光発生機器とする大型円形リング型のいわゆる第3世代光源を経て、現在、回折限界に近い光を発生することが可能な、X線自由電子レーザーなど第4世代の光源用加速器が開発・建設され、利用が開始されている。

一方、我々はKEKにおいて、同じく第4世代の放射光源用加速器に属する、エネルギー回収リニアック(ERL)の開発・建設を開

始している。ERL加速器の特徴としては、そこから発生する放射光ビームが、空間的な回折限界に達するのみならず、時間的にも回折限界に達している点のほかに、一度電子ビームを加速するために利用したエネルギーを、超伝導加速空洞内で回収し、次の新しい電子ビームの加速に再利用することが可能な点にある。

ERL加速器の特徴である、このエネルギー回収を達成するためには、周回する電子ビームの相対位相を検知しておく必要が

あり、またそのためのビーム診断装置を開発する必要があった。

2. 研究の目的

(1) ERL においては、電子源で生成され前段加速器で加速された電子ビームが、主リニアックに入射され、周回部および直線部において放射光を発生した後、再び主リニアックに導かれる。但しこの周回ビームは主リニアック内において今回はビームを減速させる位相にあり、そのビームエネルギーが回収され、低エネルギーになった所で、ビームダンプへと導かれる。この時、完全なエネルギー回収が行われるためには、主リニアックに入射されて加速される電子ビームバンチと、周回部を一周して再び主リニアックに導かれ減速されるバンチとの双方の位相が、正確に π (180°) だけずれていなければならない。さらに、電子ビームが一周してくる間にビーム損失があると、エネルギー回収に支障をきたすのみならず、周囲の放射線レベルを上昇させることにもなる。従って、本研究では、周回ビームの位相の検出と、そのビーム電流量の変化を同時に検出するための装置の開発をその目的としている。

(2) 一般に周回中のビーム損失を検出するためには、周回前後の2カ所に精密な直流電流トランスフォーマー (DCCT) を設置し、両者で測定した電流値の差を求めることで、2つの DCCT の間の軌道区間でのビーム損失を直接求めることが出来る。しかし 10^{-5} 程度の僅かの差を検出するために、片側の測定値に相当する直流電流を両 DCCT の補助巻き線に流して、電流値とキャンセルさせれば、他方の DCCT からの出力はこの区間でのビーム損失に相当する。この方法は米国ブルックヘブン国立研究所で提案されている。この方法では、2カ所の DCCT をあらかじめ精密に校正しておく必要があるうえに、出力オフセットがゼロになるように調整したものを長時間維持できるシステムを構築することが必要となる。

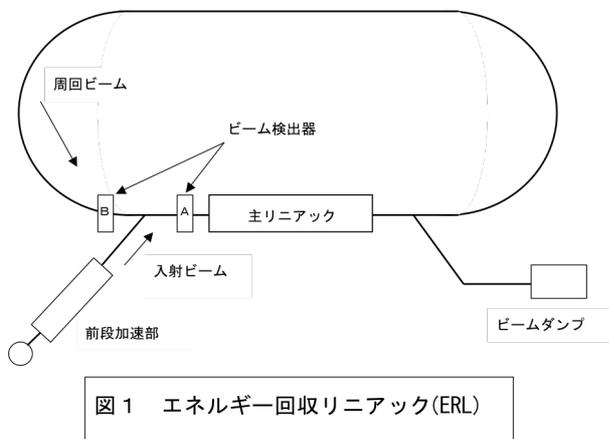


図1 エネルギー回収リニアック(ERL)

(3) 本研究においては、ERL 内を周回するビームの性質を利用して、周回ビームの位相とビーム損失を比較的単純な回路系で計測する。ERL 周回軌道内に2つのビーム検出器を設置する(図1)。ビーム検出器としては、ボタン型電極あるいは壁電流モニターを想定している。図2にあるように、主リニアックの直前に設置されたビーム検出器(A)で検出されるビーム信号は、前段加速器から入射されたビームの信号と、ERL 内を一周した周回ビームの信号の和となっている。前者は加速高周波の加速位相に乗っており、後者はそこから位相 π だけずれた減速位相に乗っていないなければならない。ビームの位相関係が正しく、しかもビーム損失が無い場合には、A点でのビーム検出信号の加速高周波の周波数成分は正確にゼロとなる。この周波数成分は、ダブルバランスドミキサーを使って同期検波することにより検出する(図3)。一方、ビーム損失が発生している場合には、この周波数成分がゼロとはならない。さらに、ビーム損失が発生していなくても、周回ビームの位相が π からずれて理想的でない場合には、同様に周波数成分がゼロとならない。つまり、ビーム検出器からの信号中の、加速高周波の周波数成分を同期検波することで、周回ビームの位相のずれおよびビーム損失を検出することが可能となる。周回ビームの位相の検出には、周回部内の入射ビームとの合流部上流に設けたビーム検出器(B)と加速高周波間の位相検出器を用いて検出する(図3)。位相が正しい条件に無い場合には、周回路の軌道長を厳密に調整してこの条件を満足させる必要があり、この装置が有効に働く。

(4) 本装置は ERL 内を周回するビームの特性をうまく利用して、比較的単純な回路系をシンプルに構成することで、ERL の運転に必要なビーム診断装置の一部を実現するものである。この装置が開発できれば、ERL 内でのビーム損失の検出、エネルギー回収のための加速器制御に利用することが可能になる。開発は、高エネルギー加速器研究機構の放射光科学研究施設

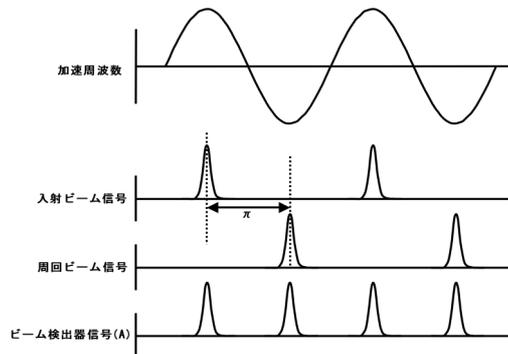


図2 ビーム検出器信号のタイミング関係

の PF 2.5GeV リングにおいて行う予定である。開発の第一段階では実証テストをおこなうための「250MHz モデル」を製作して、PF 2.5GeV リングでの実ビームを使ったテストを行う。第二段階は、実際の ERL で想定されている「1.3GHz モデル」の試験を、測定器を用いてベンチテストをおこなう。

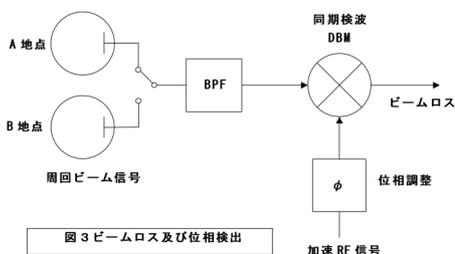


図3 ビームロス及び位相検出

3. 研究の方法

(1) 平成 21 年度

開発の第一段階として、この診断装置の実証テストをおこなうために、「250MHz モデル」を製作して、PF 2.5GeV リングにおける電子ビームを使った試験を実施する。PF 2.5GeV リングでは、加速用 RF 周波数が 500MHz であるので、蓄積リング内を周回する電子ビームは、この加速周波数に合わせて 2ns 間隔でバンチングしている。「250MHz モデル」においては、これらの PF リング内を周回しているバンチを、1 バンチおきに、ERL での入射ビームと周回ビームであるとみなして、開発回路のテストをおこなう。つまり、ERL としては、500MHz の半分の 250MHz で運転されていると見なしているため、「250MHz モデル」と呼ぶ(図4)。この実証テストのために開発する必要があるものは、主に以下の2点である。

①250MHz 同期検波回路

PF リングに設置されているボタン型電極(設置済み)からのビーム信号を、250MHz で運転されている ERL からの入射ビームと周回ビームと見なした上で、それらの信号中の、加速周波数成分(250MHz 成分)の検出を行う回路である。この回路の中心となるのは同期検波をおこなうための Double Balanced Mixer (DBM) であるが、ごく僅かなビームの損失を計測するためには、DBM の平衡性や入力ポート間のアイソレーションが重要となるので、このシステムでは性能の良い DBM を複数個の中から選別して使用することが必要となる。

②250MHz 発信器

この「250MHz モデル」では、PF リングを周回している電子ビームを、1 バンチおきに ERL の入射・周回ビームとみなしているため、検波回路の IF 信号としては、PF リングの

500MHz RF 周波数と同期している 250MHz の RF 信号が必要である。このための 250MHz 発信器を開発する。

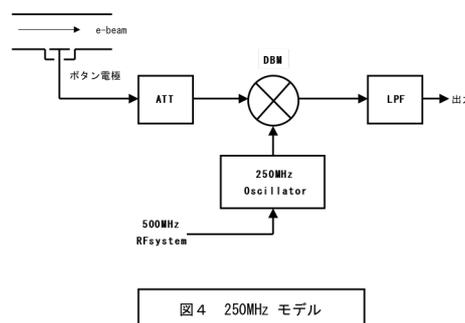


図4 250MHz モデル

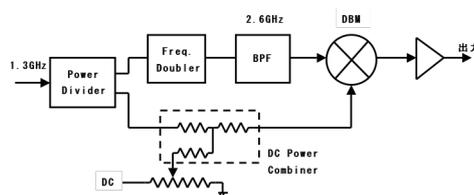


図5 1.3GHz モデル ビームシミュレータ

(2) 平成 22 年度

前年度に開発した「250MHz モデル」に、PF リングに設置されているボタン型電極からの信号を入力し、性能を確認するとともに、問題点の洗い出しをおこなう。

現在、放射光科学研究施設で計画されている ERL 加速器では、加速周波数として 1.3GHz が想定されているので、開発の第二段階として上記実証テストにもとづき、「1.3GHz モデル」を製作する。開発するものは以下の2点である。

①ERL ビームシミュレーター(図5)

ERL の実証器での性能をチェックするためには、1.3GHz で運転されている加速器のビーム信号で十分に性能を発揮することを確認しておく必要がある。そのために、1.3GHz ビームをシミュレートするための回路を開発する。1.3GHz 運転の ERL では、ビーム検出器には入射ビームと周回ビームそれぞれの信号が 1.3GHz の2倍の、2.6GHz 周期で入力される。従ってビームシミュレーターでは、市販の 1.3GHz の信号発生器出力を周波数2通倍回路でまず 2.6GHz 信号を得る。但しこのままでは検波しても加速周波数成分が発生しないので、DBM を使ってこの信号へ 1.3GHz の振幅変調をかけ、周回ビームにビーム損失が発生した状況を再現する。

②1.3GHz 同期検波回路

250MHz モデル同様ビーム信号中の、

1.3GHz 加速高周波成分を検出する回路である。ここでも DBM は性能の良いものを複数個の中から選別して使用する。

(3) 平成 23 年度

前年度に引き続き 250MHz ビームテストをおこなう。それと同時に、1.3GHz モデル用のテストベンチの構築を進め、ERL ビームシミュレーターを用いた 1.3GHz モデルのテストベンチでの性能試験をおこなって性能確認を進める。また、これまでの開発結果や成果報告を、当該年度に開催される国際会議で発表する。

4. 研究成果

(1) 250MHz モデルの製作

RF の加速周波数が 1.3GHz である ERL 加速器においてこの診断装置が動作するかどうかを確認する前段階として、それとは異なる周波数である 500MHz の加速周波数で運転されている放射光 PF リングにおいて、テストを行うべく、「250MHz モデル」の製作を開始した。

まず、放射光 PF リングの中を 500MHz で周回する電子ビームを、それぞれ 250MHz で周回する、加速ビームと減速ビームの 2 つのビームとみなして、その加速周波数成分を検出する。この 250MHz 同期検波回路においては、加速周波数と同期して、その半分の 250MHz の信号を生成する回路が必要となる。

500MHz 1/2 分周モジュールの仕様は、
RF 入力部：

信号レベル -6 ~ +10dBm (50 Ω 時)
周波数範囲 400 ~ 550 MHz

出力部：

チャンネル数 3 ch
出力レベル 2.2 Vp-p (50 Ω 時)

であり、コネクタは共に SMA コネクタを使用した。回路の主要部のブロック図をいかに示す。出力の 3ch は同期が取れるように遅延回路が挿入されている。

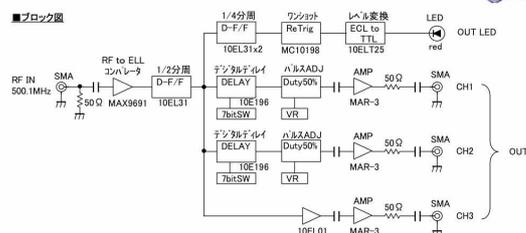


図 6 500MHz 1/2 分周器ブロック図

(2) 250MHz モデルのビーム試験

2011 年 1 月より、PF2.5GeV リングにおいて、実際のビームを使った試験を開始した。PF リングの全周に分散して配置されている

ビームモニター (BPM) 検出部のボタン型電極からのビーム信号をこの 250MHz 同期検波回路に入力し、その 250MHz 周波数成分を検波した。結果を以下に示す。

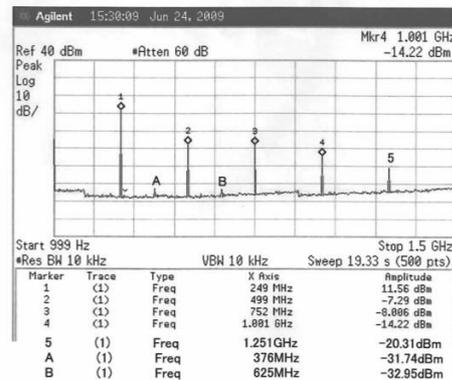
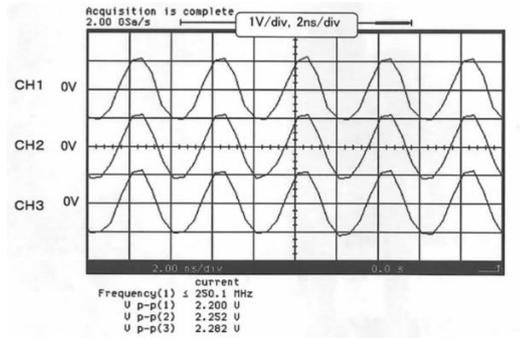


図 7 250MHz モデル試験結果

しかしこの後 2011 年 3 月に東日本大震災が発生し、KEK の加速器も甚大な被害を受け、その復旧にはおよそ半年を費やした。従って、電子ビームバンチ間の位相差を計測するテストに遅れを生じる事となった。

(3) 1.3GHz モデルの製作

「250MHz モデル」の実ビームでの試験と並行して、実際の ERL 加速器での実証に必要な、「1.3GHz モデル」の製作を開始した。ここではまず 1.3GHz で加速されている電子ビームからの信号を模擬するビームシミュレーターの設計を行い、部品の選定・収集にあたった。現在 2.6GHz の 2 通倍回路の選定と、同期検波で重要となる、ダブルバランスドミキサー (DBM) の選定を行っている。DBM は製品性能にばらつきが生じるので、ある個数の中から性能の良い物を選定する必要がある。

(4) 今後の展望

2013 年 3 月から、KEK において ERL 加速器の実証機となるコンパクト ERL 加速器の運転が開始される。1.3GHz モデルの整備を引き続き行うとともに、この加速器からのビームを使用して、機器の性能を確認して

ゆきたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計1件)

- ① K.Haga, “Beam Diagnostics of Compact Energy Recovery Linac Project in KEK”, ERL2011 ICFA Future Light Sources Workshop, Tsukuba, Dec 2011

6. 研究組織

(1) 研究代表者

芳賀 開一 (HAGA KAIICHI)

高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・講師

研究者番号：00180795

(2) 研究分担者

春日 俊男 (KASUGA TOSHIO)

高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・教授

研究者番号：70044758

飛山 真理 (TOBIYAMA MAKOTO)

高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・准教授

研究者番号：60207595

高井 良太 (TAKAI RYOTA)

高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助教

研究者番号：20533780