

JAERI-Tech
2003-048



JP0350235



SPring-8原研軟X線ビームライン挿入光源
ID23の位相駆動が誘起する閉軌道変動調査
及び補正テーブルの作成

2003年5月

中谷 健・田中 均*・高雄 勝*・安居院 あかね
吉越 章隆・竹内 政雄*・青柳 秀樹*・大熊 春夫*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

Spring-8 原研軟 X 線ビームライン挿入光源
ID23 の位相駆動が誘起する閉軌道変動調査及び補正テーブルの作成

日本原子力研究所関西研究所放射光科学研究センター
中谷 健・田中 均*・高雄 勝*・安居院 あかね・吉越 章隆・竹内 政雄*
青柳 秀樹*・大熊 春夫*

(2003 年 2 月 17 日受理)

放射光リングに設置される挿入光源は、その磁気回路が持つ誤差磁場により、駆動時に蓄積ビーム軌道の変動を引き起こす。Spring-8 原研軟 X 線ビームライン用挿入光源 ID23 は、高速で位相駆動を行うので、その変動は頻繁に発生する。この影響を抑えることを目的として、Spring-8 マシンスタディ中に軌道変動抑制用補正励磁テーブルの作成を行っている。2001 年 3 月から 6 月にかけて ID23 位相駆動時に使用する高精度位相駆動補正励磁テーブルを新たに作成するため、蓄積リングの 4 ヶ所のアーク部に置かれている 4 台の電子ビーム位置モニターの内 2 台から得られたビーム軌道変動データと ID23 の位相の動きとを同じ時間軸上で測定し、補正テーブルを作成するためのデータを取得するマシンスタディを行った。

関西研究所： 〒679-5148 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1

* 高輝度光科学研究センター

Study of Closed Orbit Distortion from High Speed Phase Switching of
Variably-polarizing Undulator APPLE-2 in 2001 March-June

Takeshi NAKATANI, Hitoshi TANAKA*, Masaru TAKAO*, Akane AGUI,
Akitaka YOSHIGOE, Masao TAKEUCHI*, Hideki AOYAGI* and Haruo OHKUMA*

Synchrotron Radiation Research Center
Kansai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Mikazuki-cho, Sayou-gun, Hyogo-ken

(Received February 17, 2003)

The insertion device in synchrotron radiation storage ring causes the distortion of the closed orbit along with the drive, due to the error magnetic field which the magnetism circuit holds. The fluctuation is often happened because the insertion device ID23 with the JAERI soft X-ray beam line in SPring-8 drives the phase frequently at high speed. We study making of the correction table for orbit fluctuation control during the SPring-8 machine study to restrain this influence. From March, 2001 through June, we simultaneously acquire the movement of the ID23-phase and the orbit fluctuation data which are obtained from 2 of 4 electron beam position monitors that are set up in 4 places of arc department of the storage ring, to make the high accuracy phase drive correction table that uses it at the time of the ID23 phase drive.

Keywords: ID23, BL23SU, SPring-8, Closed Orbit Distortion, Correction Table, APPLE-2, Variable-polarizing Undulator, Soft X-ray

*Japan Synchrotron Radiation Research Institute

目次

1. はじめに	1
2. 補正の方法	4
3. データの取得	5
4. プログラムの競合の改善	9
5. 軌道変動と位相位置	13
5.1 駆動方向に依る軌道変動	13
5.2 駆動範囲に依る差	15
5.3 駆動速度に依る差	17
5.4 機器に依る差	19
6. 補正励磁テーブルの作成	21
7. 結語	27
謝辞	27
参考文献	28

Contents

1. Introduction.....	1
2. Standard Method of Making Correction Table of ID Drive.....	4
3. Experiments.....	5
4. Software Conflicition.....	9
5. Results.....	13
5. 1 Beam Fluctuation Dependent on Drive Direction.....	13
5. 2 Beam Fluctuation Dependent in Drive Range	15
5. 3 Beam Fluctuation Dependent on Drive Speed.....	17
5 .4 Beam Fluctuation Dependent on Instruments.....	19
6. Making of Correction Table	21
7. Summary.....	27
Acknowledgments.....	27
References.....	28

1. はじめに

大型放射光施設 SPring-8 の BL23SU は、軟 X 線分光や照射実験を目的に建設された原研専用軟 X 線ビームラインである。蓄積リングに設置された挿入光源は磁石列のギャップ距離と位相を変えることによってエネルギー及び偏光を変えることができる。

この挿入光源は、SPring-8 の蓄積リングのセル 23 の 4 m 直線部の上流側 2 m 部分に設置された可変偏光アンジュレーター (variably-polarizing undulator) APPLE-2 (advanced planar polarized light emitter type-2) である。Figure 1.1 に ID23 の磁石列の模式図を示す。各々の磁石列は、周期長 (λu) 12 cm 周期数 16 からなっている。Figure 1.1 にある上下各 2 列、計 4 列の磁石列はビーム軌道に対して対角にある磁石列とペアを組んで、ビーム軸上で斜め方向の螺旋磁場を作る。

一般に挿入光源は、上下の磁石列のギャップ距離を変える (ギャップ駆動) ことで、基本波のピークエネルギーが変わる。APPLE-2 型アンジュレーターの場合は、ギャップ駆動だけでなく、位相駆動を行うこともできる。位相駆動とは、対角の磁石の組を対角線上のもう一方の組に対してビーム軸と並行に $\lambda u/2$ ($-\lambda u/2$) 動かすことで、この駆動により任意の偏光を得ることができる。本報告では位相差を位相として記述する。位相を変えると同時に基本波のピークエネルギーも変化する。Figure 1.2 に ID23 の計算スペクトルを実線で示す。点線が基本波のピーク強度とギャップ距離の関係である。そのエネルギー範囲は、円偏光基本波のピークで概ね 0.3 keV ~ 3 keV である。同じギャップ距離でも偏光モードによって基本波のスペクトル形状が異なることが分かる。

放射光リング中の挿入光源を駆動すると、その磁気回路が持つ誤差磁場により、蓄積ビームの閉軌道に変動を引き起こす。ID23 のもっとも重要な特徴である連続左右円偏光の高速切換は、磁石列の位相駆動を高速で繰り返すことによって得られる。この方法はアンジュレーター内の電子ビームの軌道を変化させることにより位相変調を行うので、引き起こされる軌道変動も頻繁に発生することになる。一般に放射光施設では多くのビームラインが同時に稼動しているので、位

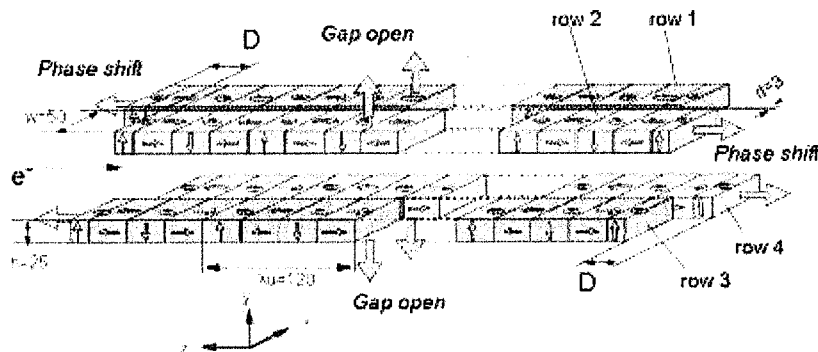


Figure 1.1: The magnetic structure and movement of the double-array undulator, APPLE-2. λu and D indicate the magnetic period length and the phase shift distance, respectively (Yokoya *et. al.*: Synchrotron Rad. 5, (1998) 10).

This is a blank page.

相変調が引き起こす電子ビーム軌道の変動が他のビームラインで行われている実験に支障を与えることは避けなければならない。実際、アンジュレータの設定の変更が入射時のみに限られている施設も多い。しかしながら SPring-8 ではアンジュレータの上流・下流に水平及び垂直方向の補正を行う電磁石 (Steering Magnet : STM) を設置し、リング全体の軌道変動を最小限に押さえる工夫がなされている。ID23 でも挿入光源の上流に 2 機 (st_h_2, st_v_2)、下流に 2 機 (st_h_3, st_v_3) の計 4 台の補正電磁石が設置されている。本スタディでは、これらの内、挿入光源直上流と直下流の STM を使用して補正励磁を行った。

SPring-8 の運転スケジュールは「サイクル」によって分割されている。ここに 2001 年第 3 サイクルから第 6 サイクルの間のマシンスタディ及びビームライン調整の内、マシンスタディとして、第 3 サイクル 3/21 6:00 ~ 12:00、第 4 サイクル 4/17 8:00 ~ 18:00、第 5 サイクル 5/21 23:00 ~ 5/22 5:00、第 6 サイクル 6/27 1:00 ~ 10:00、ビームライン調整として第 1 サイクル 1/18 2:00 ~ 8:00、第 3 サイクル 3/8 1:00 ~ 7:00、第 5 サイクル 5/11 8:00 ~ 9:00 に行われた高精度位相駆動補正励磁テーブルの作成について報告する。

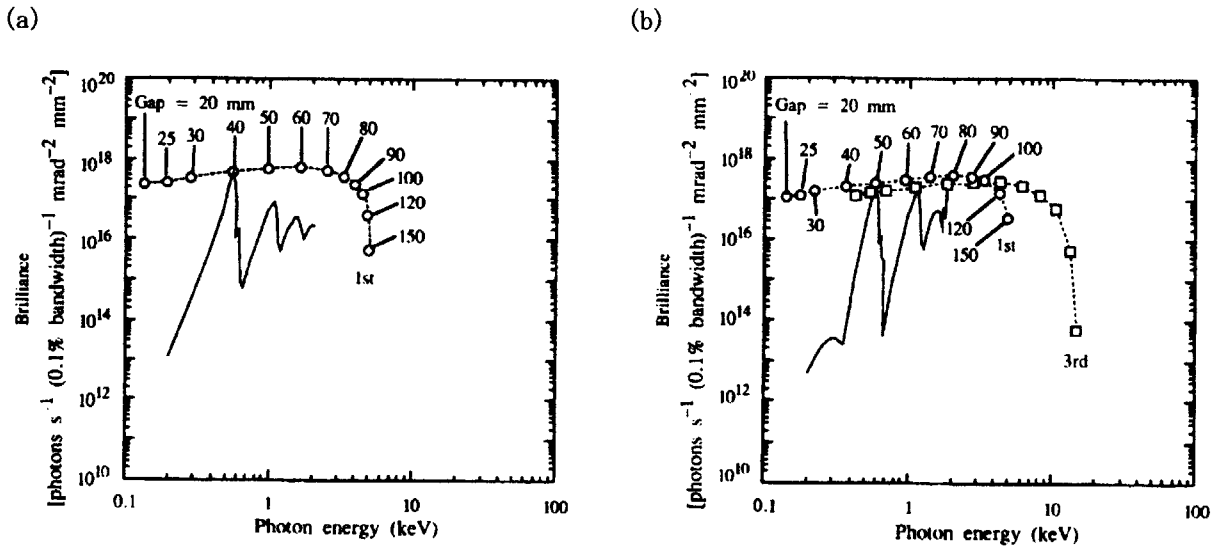


Figure 1.2: ID spectra of (a) circular mode and (b) liner mode (Yokoya *et. al.*: Synchrotron Rad. 5, (1998) 10).

2. 補正の方法

ID23 の位相駆動中の短い時間に発生する電子軌道のずれを押さえ込むには、数十ミリ秒間隔で ID23 前後に設置された補正電磁石の励磁量を変化させる必要がある。ギャップ距離及び位相位置と励磁量の対応表を、我々は補正励磁テーブルと呼んでいる。このテーブルは、位相の依存性だけでなくギャップにも依存性があるので二次元のテーブルとなる。補正励磁テーブルを求める手順を Figure 2.1 に示す。まず、リファレンスとなる蓄積電子ビーム軌道を測定し、次に ID を補正励磁量を求めたい位置に駆動して軌道を測定する。その測定値とリファレンスとの差を補正するように励磁量を決定し、また次の位置に移動して軌道を測定、というループを繰り返して補正励磁テーブルを作る。また、出来上がった補正励磁テーブルを使用して、軌道補正を行うアルゴリズムを Figure 2.2 に示す。ID が駆動開始したら、現在位置を計測、テーブルから励磁量を求め、補正電磁石にセットする、というループを ID が駆動している間、約 30 ミリ秒周期で行っている。

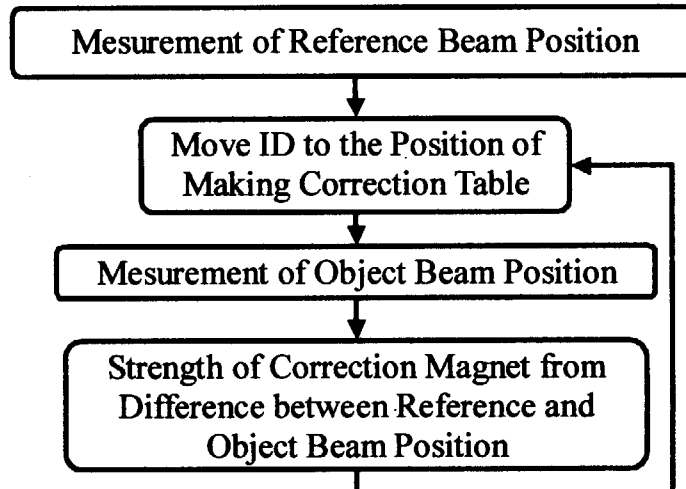


Figure 2.1: Standard method of making correction table of ID drive.

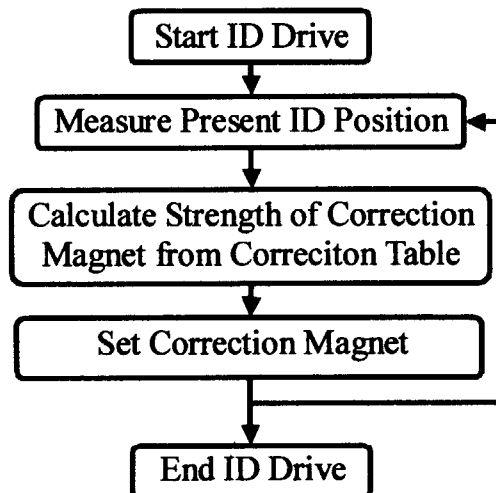


Figure 2.2: Algorism of correction.

3. データの取得

SPring-8の蓄積リングにはリング全周に渡るビーム軌道をモニターするために、多数の電子ビーム位置モニター (rf Beam Position Monitor) が設置されており、そのデータはSPring-8中央制御室に集められている。これらのrfBPMのうちセル4, 15, 27, 39に設置されたものは、高速な軌道変動を測定するために回路系の改良がなされている。ID23の動きが引き起こす軌道変動は、この4台のrfBPMの内2台(セル27と39)を用いて周期20 Hzで測定された。測定のご概念図をFigure 3.1に示す。

測定の蓄積ビームの条件は下記のものであった。

蓄積電流:100 mA

Filling Pattern:160 bunch train * (12-1)

Optics:HHLV+4LSS

暫定版の補正テーブルでID23を駆動したときにセル39のrfBPMで観測された水平方向の軌道変動の例をFigure 3.2に示す。本報告では軌道変動とは水平方向の物のみを指すこととする。縦軸が $1.4 \mu\text{m}$ の変動が1 mVの割合で電圧に変換された軌道変動で横軸は時間である。図には三種類の軌道変動が含まれている。750秒から800秒にかけてが位相駆動に伴う軌道変動、850秒から900秒にかけてがギャップ駆動に伴う軌道変動、900秒から1000秒にかけて位相駆動用サーボモーターからの磁場による軌道変動が観測されている。

上記のビーム条件でID23以外のIDを固定し、ID23をユーザー実験とほぼ同等の繰り返しパターンで位相駆動を行い、水平方向の軌道変動を測定した。測定に用いた繰り返しパターンをFigure 3.3に示す。位相駆動は、ユーザー運転時に使用しているパラメータ(速度30 mm/s、加減速レート30 μs :30 μs ごとに0.01 mm/s ずつ速度を増減する)を基準とした。駆動の開始(グラフの0秒の位置)から5秒間、ID23の水平方向補正励磁電磁石の一つに正規の補正励磁量+0.1 A (グラフの紫部分)の励磁を行い故意に軌道変動を起こさせ、それをrfBPMのデータとID23の駆動の時間軸を一致させるためのトリガーとした。

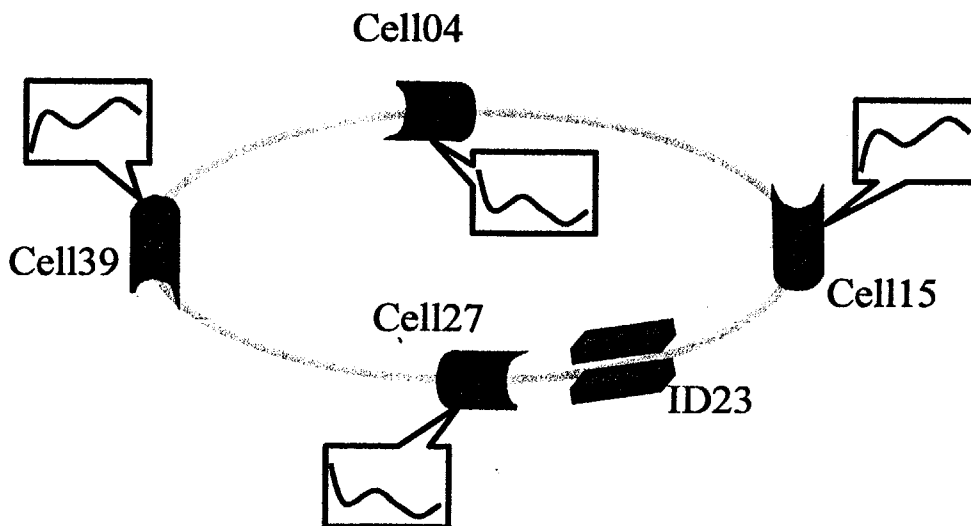


Figure 3.1: Schematic illustration of rfBPM measurement.

This is a blank page.

Beam Fluctuation by ID23 Phase @ Cell39

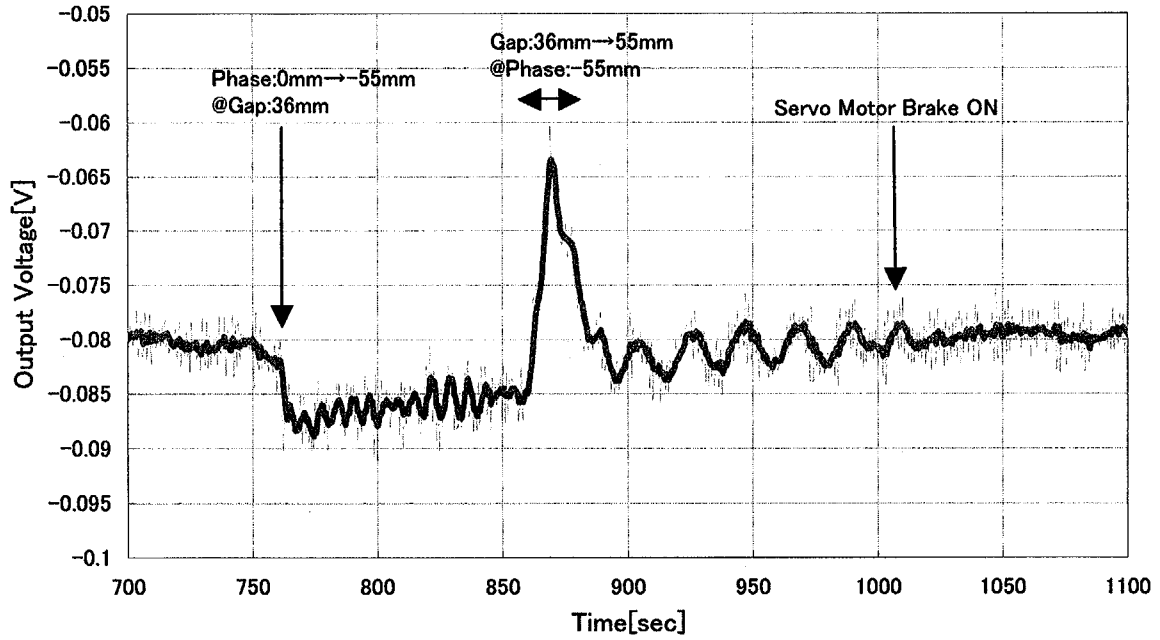


Figure 3.2: Beam fluctuation at Cell39 induced by ID23 drive.

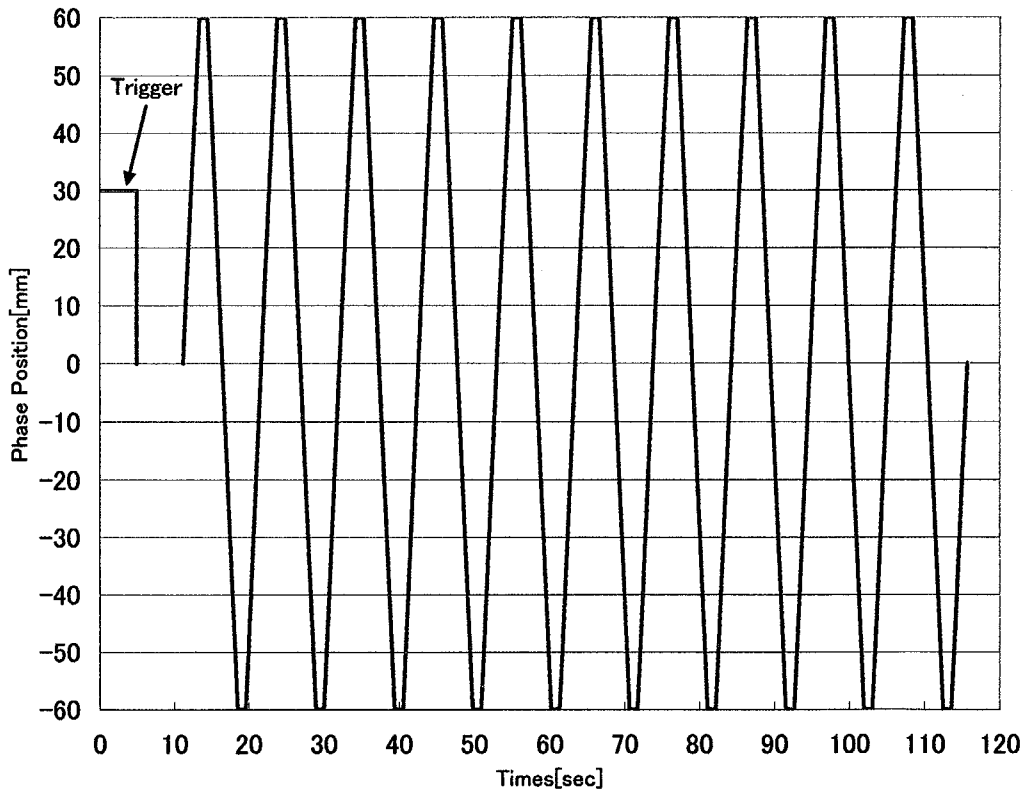


Figure 3.3: ID phase drive pattern.

This is a blank page.

4. プログラムの競合の改善

以下の条件でパターン駆動して得られた軌道変動と位相駆動とを同じ時間軸上に並べたグラフをFigure 4.1に示す。紺色のグラフが水平方向の電子軌道位置を示すrfBPM の出力電圧、すなわち水平方向の軌道変動、紫色のグラフがID23 の位相位置を示してゐる。

パターン駆動条件は

駆動ギャップ値 36 mm (最少ギャップ)

位相駆動範囲 -60 mm ~ 60 mm (-60 mm と 60 mm の位置で1 秒間静止)

位相駆動速度 30 mm/s

加減速レート 30 μ 秒 (30 μ 秒ごとに 0.01 mm/s ずつ速度を増減する)

とした。

このグラフからも解るように、

- (1) 110 秒付近の大きな軌道変動($\sim 70 \mu$ m)
- (2) 位相駆動に誘起される周期的な軌道変動($\sim 30 \mu$ m)

が観測されている。ここで(1)に着目する。

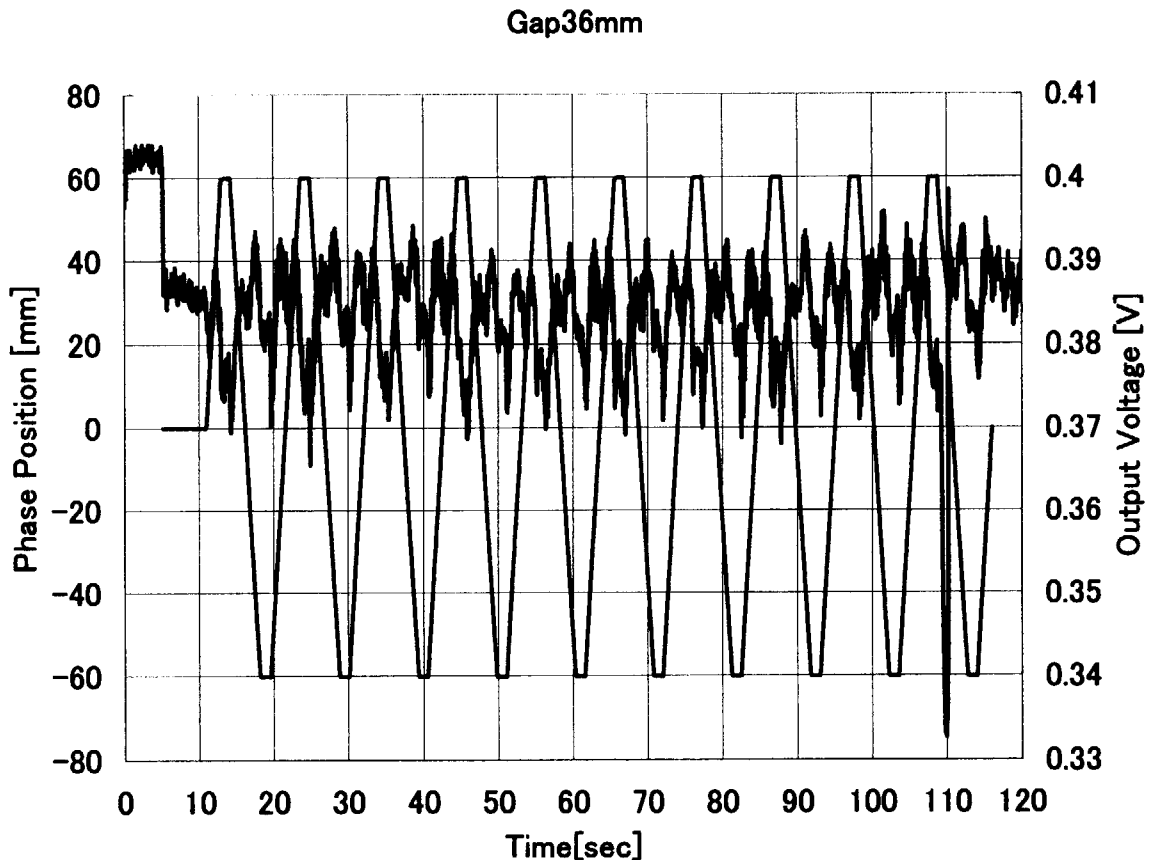


Figure 4.1: Beam fluctuation by ID23 drive.

This is a blank page.

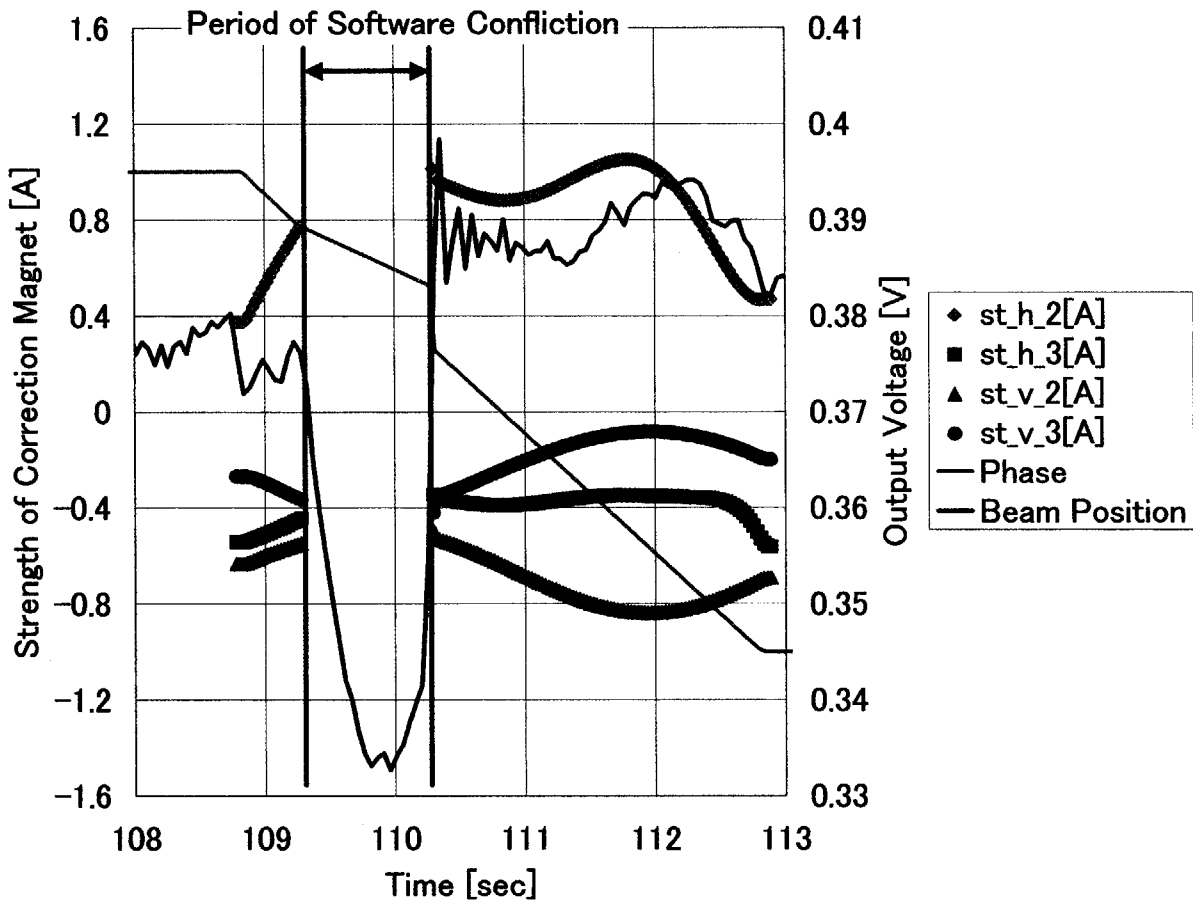


Figure 4.2: Large beam fluctuation by problem of software confliction.

110 秒付近を拡大して、この時の補正電磁石の励磁量と重ねたグラフを Figure 4.2 に示す。グラフから見て取れる通り、110 秒付近で位相位置(Phase)と補正励磁量(st_h_2, st_h_3, st_v_2, st_v_3)をプロットしたグラフが途切れている。この時のログを解析した結果、グラフが途切れている約 1 秒の間、位相が変化しているにもかかわらず補正量は一定値で駆動が行われていることが解った。この約 1 秒間は正しい補正励磁が行われていないので、大きな軌道変動が誘起されてしまったのである。

ID23 の補正励磁の制御はソフトウェアで行っている。このソフトウェアが動作している VME システムの上では、これとは別に挿入光源の状態を常時モニターしてデータベースに書き込むソフトウェアが同時に動作している。これらのプログラムを見直した結果、タイミングによってはデバイスの競合が発生することが解った。この競合をコントロールできるように双方のソフトウェアを改修した結果、このような大きな軌道変動は発生しなくなった。

This is a blank page.

5. 軌道変動と位相位置

5.1 駆動方向に依る軌道変動

プログラムの改善後、Figure 4.1と同様の測定を行った。測定で得られた同じ時間軸上に並んだ軌道変動と位相位置のデータから、横軸を位相、縦を軌道変動にして駆動方向ごとにプロットしたグラフをFigure 5.1に示す。赤色のグラフ（◇:正方向）は $-60\text{ mm} \rightarrow 60\text{ mm}$ まで位相を駆動した時の軌道変動、青色のグラフ（□:負方向）は $-60\text{ mm} \leftarrow 60\text{ mm}$ まで駆動した時のものである。駆動の方向によって軌道変動の様子が異なることがわかる。以降、正方向に駆動した時と負方向に駆動した時の軌道変動の差を、

- ・位相駆動範囲を変えた場合(5.2)
- ・駆動速度を変えた場合(5.3)
- ・軌道変動を引き起こす機器を変えた場合(5.4)

というように条件を変えながら測定した結果をFigure 5.2, 5.3, 5.4に示す。

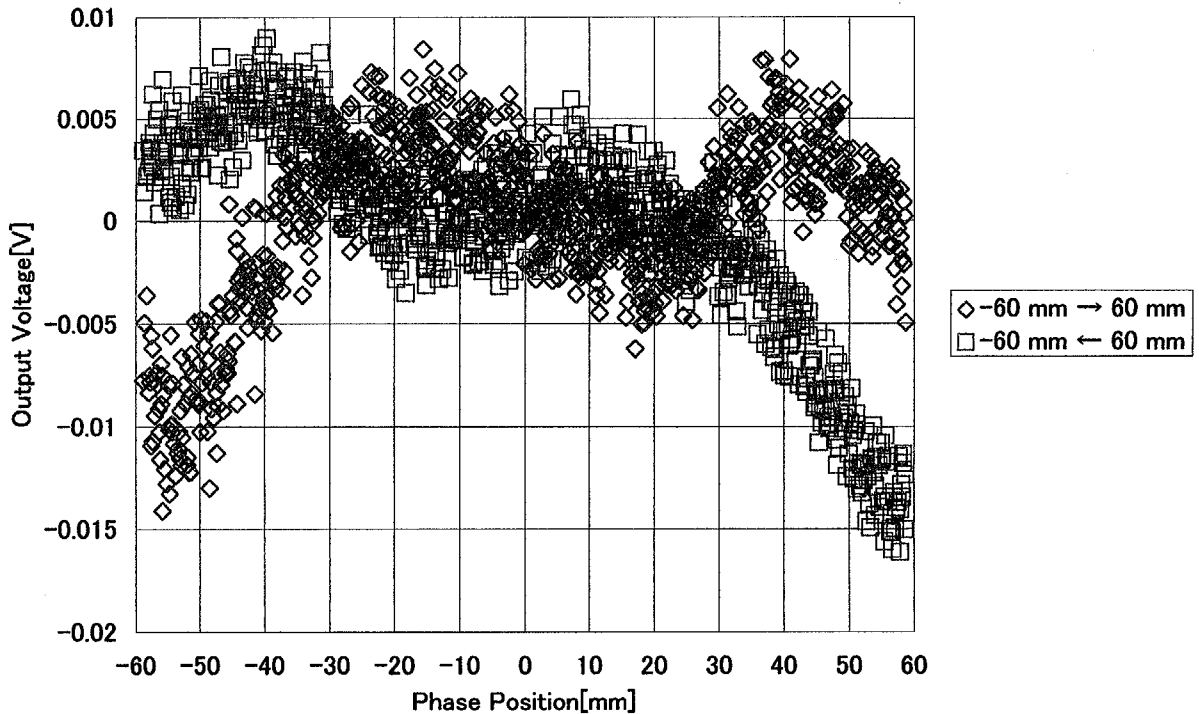


Figure 5.1: Beam fluctuation dependent on drive direction.

This is a blank page.

5.2 駆動範囲に依る差

位相駆動と軌道変動の様子を駆動範囲(± 60 , ± 50 , ± 40 mm)を変えて測定した。横軸を位相、縦軸を駆動方向に依る軌道変動の差にして駆動範囲ごとにプロットしたグラフをFigure 5.2に示す。 \diamond :-60 mm ~ 60 mm、 \square :-50 mm ~ 50 mm、 \triangle :-40 mm ~ 40 mm である。

見易くするために縦軸の原点をずらしてプロットしているが、駆動範囲を-60 mm ~ 60 mm、-50 mm ~ 50 mm、-40 mm ~ 40 mm と変化させても変動の一部を切り出す形になっているだけで、駆動方向に依る差の様子は変わらない。

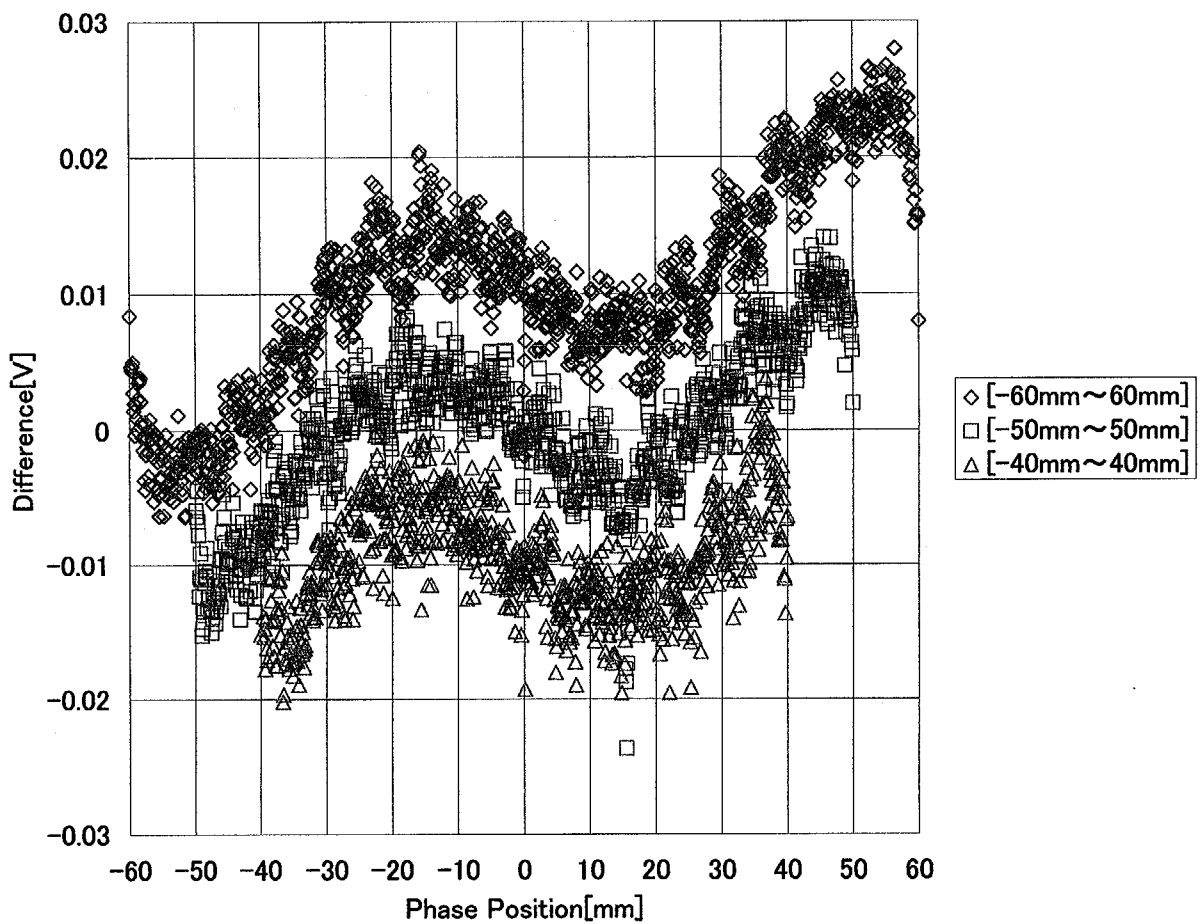


Figure 5.2: Difference in drive range.

This is a blank page.

5. 3 駆動速度に依る差

位相変動と軌道変動の様子をさらに位相駆動の速度を変えて測定した。横軸を位相、縦軸を駆動方向に依る軌道変動の差にして駆動速度ごとにプロットしたグラフをFigure 5.3に示す。

◇ 300 mm/s、□ 30 mm/s、△ 7.5 mm/sである。通常ユーザー運転時に使用するのは青の 30 mm/sであるが、変化を見るために通常の10倍の速度と通常の4分の1の速度で位相のパターン駆動を行った。結果は、駆動速度を増すにしたがって駆動方向に依る差が大きくなっていることが分かった。

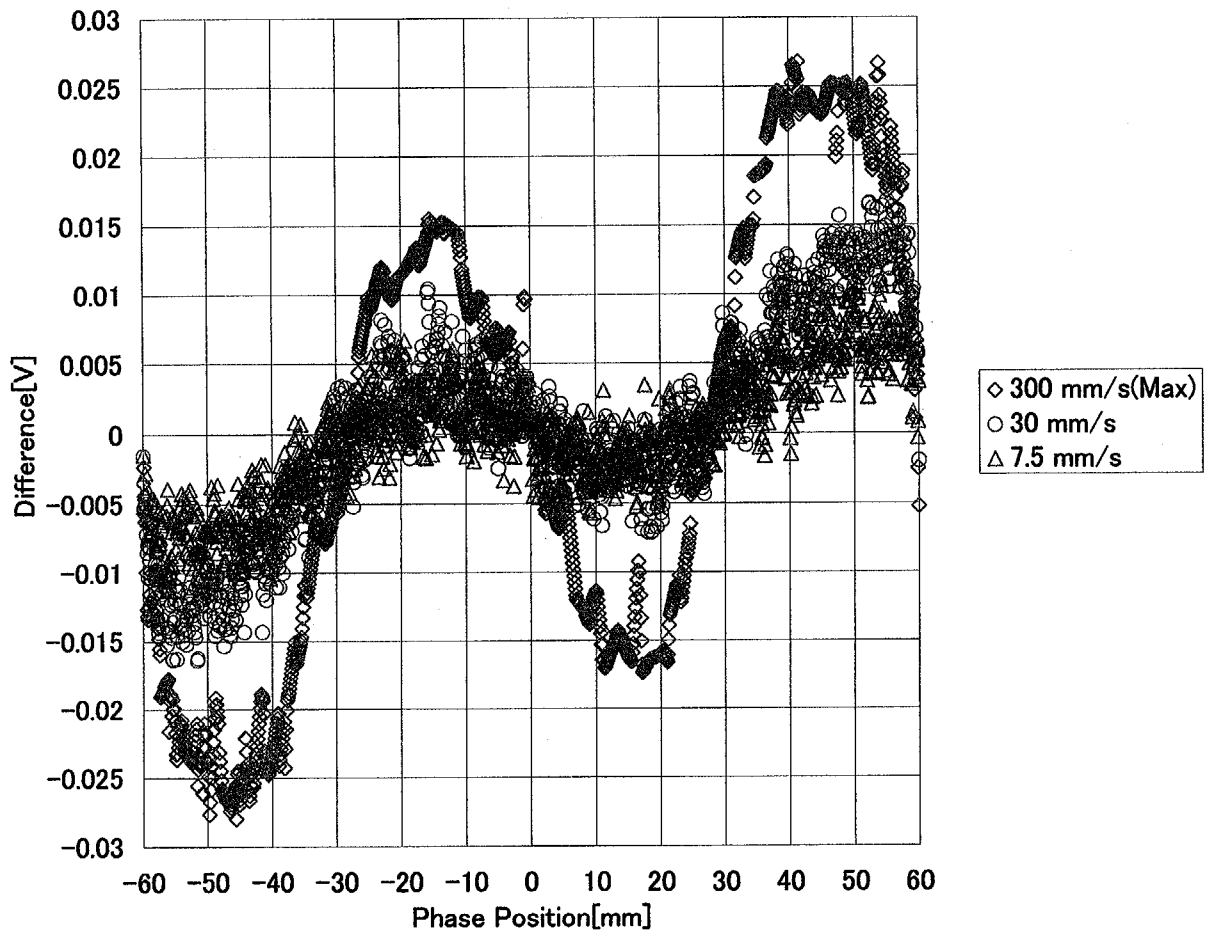


Figure 5.3: Difference in drive speed.

This is a blank page.

5.4 機器に依る差

2章の補正の方法でも述べたように、軌道変動の抑制はIDの状態の変化と同期して補正励磁電磁石の励磁量を変化させることによって行っている。つまり、一方の状態を固定して、もう一方を変化させると、大きな軌道変動が起こる。この条件で軌道変動を測定した。Figure 5.4は、横軸を位相、縦軸を正方向駆動時の軌道変動 (◇) と負方向駆動時の軌道変動 (□) と駆動方向に依る差 (△) にして、プロットしたグラフである。Figure 5.4(a)は”補正励磁一定で位相駆動”を行った時の変動差で、Figure 5.4(b)は”補正電磁石のパターン運転”を行った時の変動差である。

“補正励磁一定の位相駆動”とは、パターン駆動中の補正励磁を位相位置が0 mmの補正励磁量で固定した状態で位相駆動をする、すなわち、パターン駆動中補正電磁石の励磁量は変化しない、という意味である。“補正電磁石のパターン運転”とは、位相を0 mmの位置で固定して、補正電磁石のみを、あたかもFigure 3.3のように位相駆動を行ったかのように、励磁テーブルに従った値でパターン運転する、という意味である。それぞれに駆動方向に依る差が表れている。

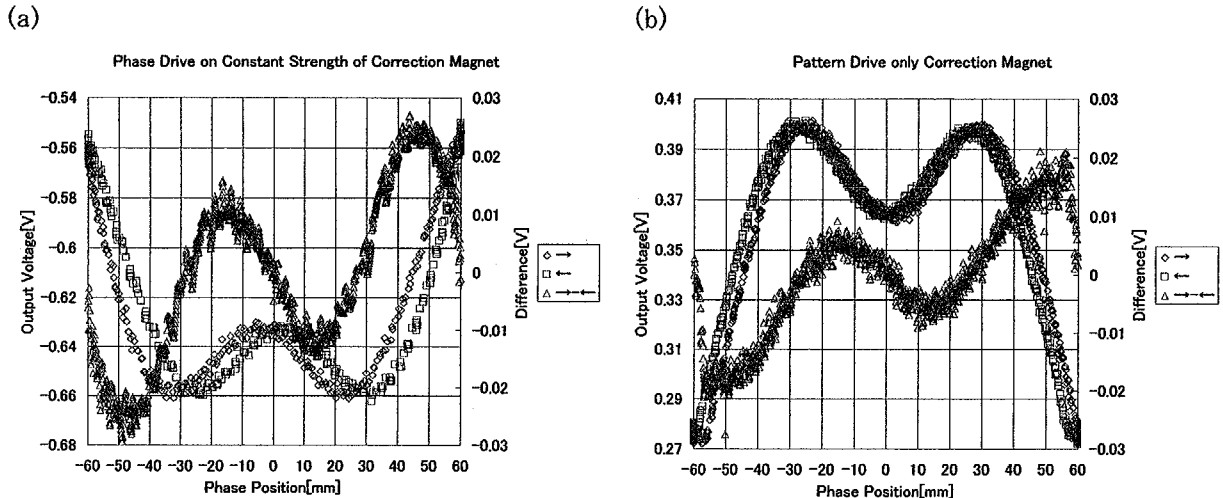


Figure 5.4: Difference in instruments. (a) Phase drive on constant strength of correction magnet. (b) Pattern drive only correction magnet.

This is a blank page.

6. 補正励磁テーブルの作成

5章の結果から、位相駆動に伴う軌道変動を2つの成分、すなわち、駆動方向に依らず位相位置にのみに依存する軌道変動（これを静的な軌道変動成分と呼ぶ）と駆動方向に依る軌道変動成分（動的な軌道変動成分と呼ぶ）に分けて軌道変動を考えることにした。その手順は、まず、静的な軌道変動を補正するテーブルを作り、次に動的な成分を補正する励磁テーブルを作る、というものである。

位相駆動に伴う静的な軌道変動とは、正方向に駆動した時の軌道変動と負方向に駆動した時の軌道変動の平均値 (Figure 6.1 の▲:水色) と考えられる。また、動的な軌道変動とは、正方向に駆動した時の軌道変動 (Figure 6.1 の◇:赤色) と負方向に駆動した時の軌道変動 (Figure 6.1 の□:青色) の平均値 (Figure 6.1 の▲:水色) からの差 (Figure 6.2 の◇:赤色と□:青色) と見なすことができる。

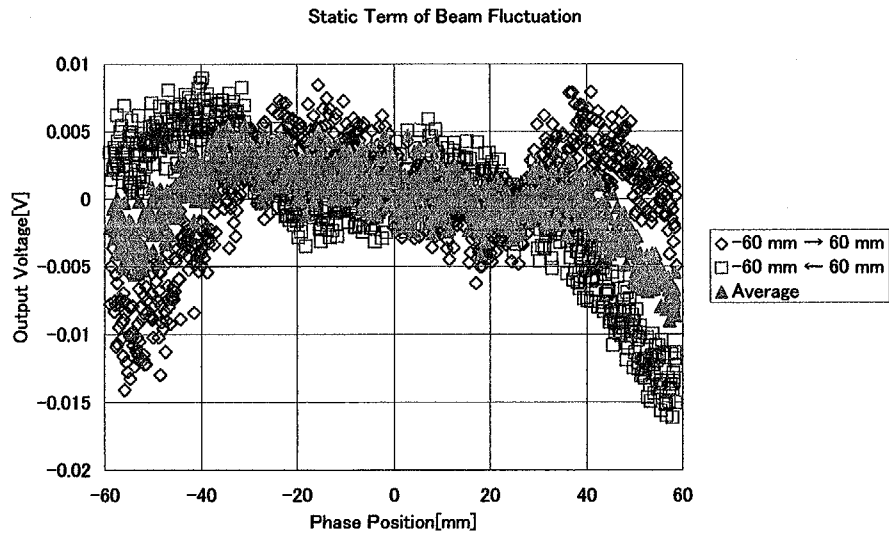


Figure 6.1: Static term of beam fluctuation.

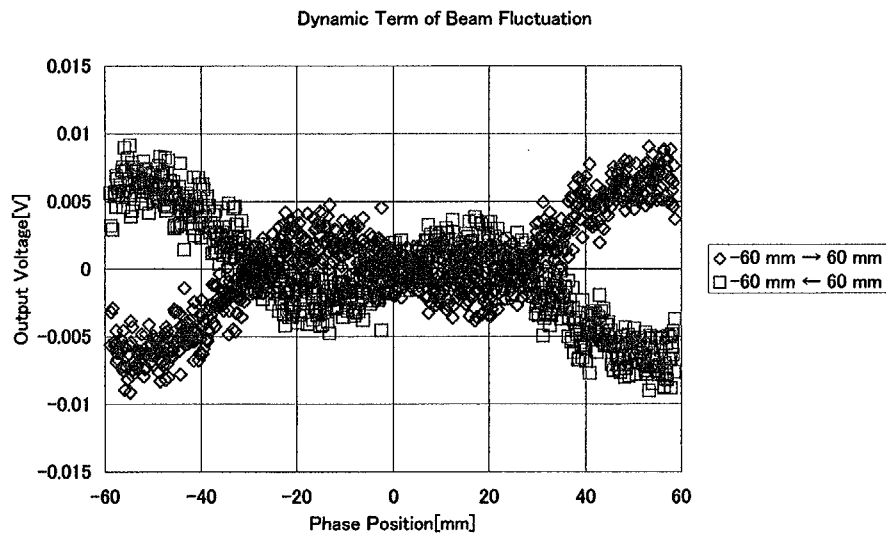


Figure 6.2: Dynamic term of beam fluctuation.

This is a blank page.

Figure 2.1の手順に基づき、位相位置が0 mmの位置をリファレンスとして各位相位置での軌道変動を測定し、補正励磁量を決定した。また、補正精度向上のため、以下の反復処理を行い、高精度な静的な軌道変動を補正する励磁テーブルを作成した。

①. 5章の結果から、十分遅い速度、且つ、補正励磁一定で、駆動を行えば静的な軌道変動のみが表れる。駆動速度を15 mm/sで補正励磁一定のパターン駆動を行うと、静的な軌道変動成分のみが表れることが解ったので、この条件で軌道変動を測定した。その結果は、Figure 6.3のとおりで、駆動方向に依る差 (Δ :緑色)は見受けられない。この軌道変動を補正するテーブルを作る。(テーブル ①)

②. テーブル ①を用いてユーザー運転と同等の速度(30 mm/s)でパターン駆動を行い、軌道変動を観測する。その結果をFigure 6.4に示す。縦軸はFigure 6.3の2倍に拡大している。軌道変動に駆動方向に依る差が表れる (\diamond :赤色と \square :青色)が、静的な変動 (\blacktriangle :水色)のみを補正するようにテーブル ①を修正し新たなテーブルを作る。(テーブル ②)

③. テーブル ②を用いてパターン駆動を行い軌道変動を観測する。その結果をFigure 6.5に示す。縦軸はFigure 6.4の2倍(Figure 6.3の4倍)に拡大している。静的な変動 (\blacktriangle :水色)が減少していることが解る。最終的に平均の軌道変動が平坦になるまで②と③の処理を繰り返す。

この補正により特定のギャップで位相駆動時30 μ m程度あった軌道変動が15 μ m程度まで押え込むことができた。

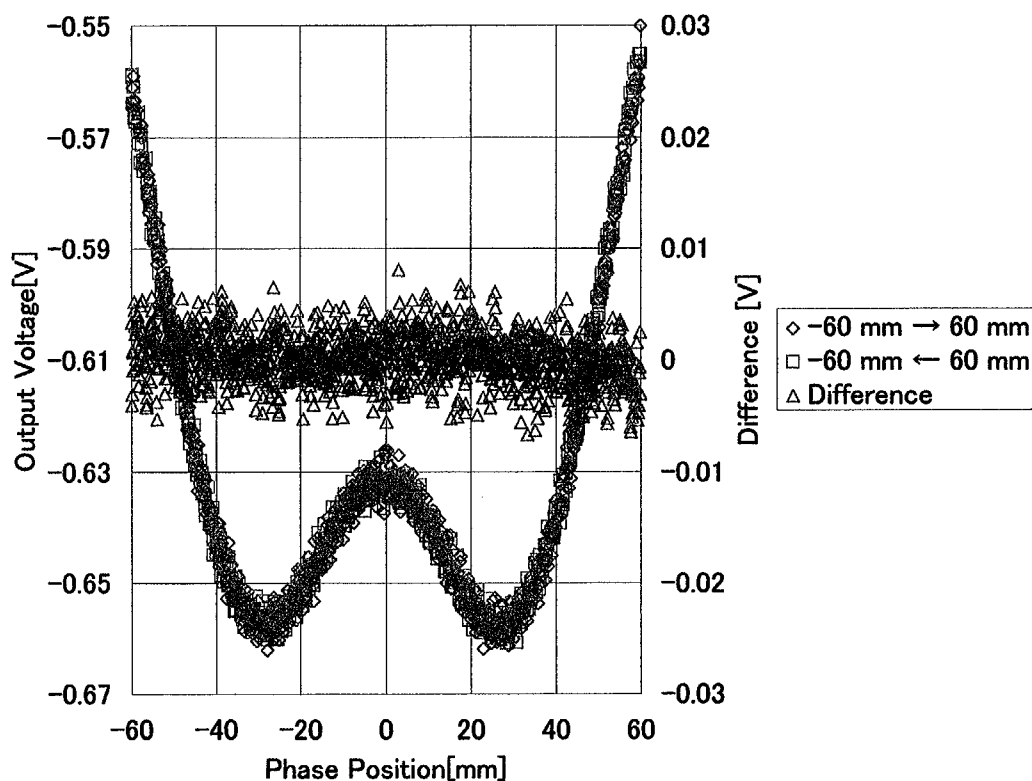


Figure 6.3: Making of correction table ①, Phase drive at slow speed (15 mm/s).

This is a blank page.

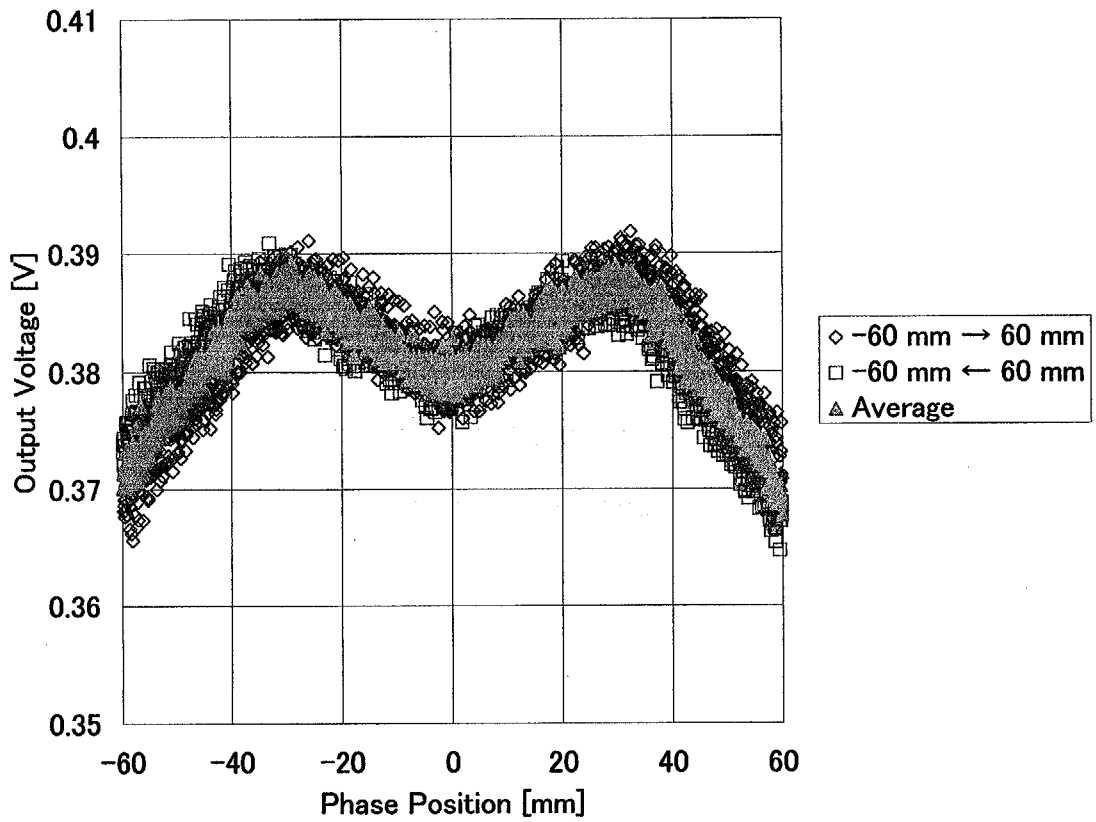


Figure 6.4: Beam fluctuation of normal speed drive (30 mm/s) with correction table ①.

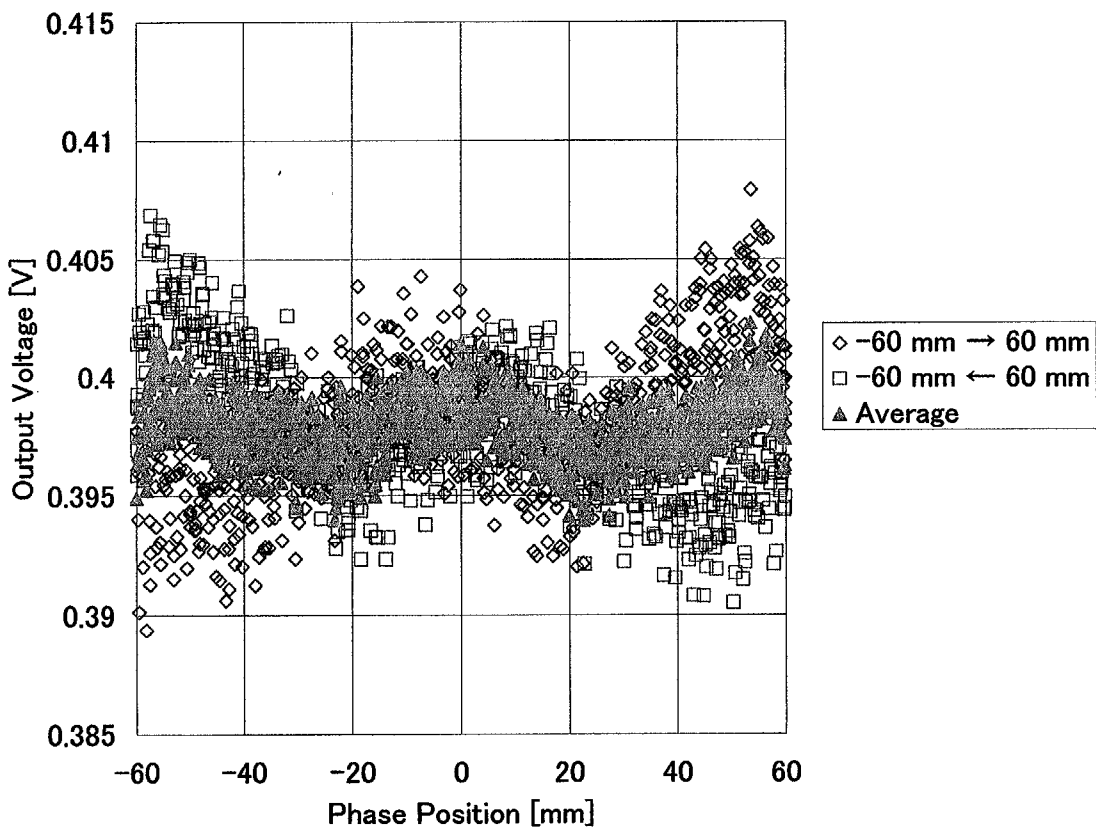


Figure 6.5: Beam fluctuation of normal speed drive (30 mm/s) with correction table ②.

This is a blank page.

7. 結語

2001年第3サイクルから第6サイクルに行われた、ID23の引き起こす軌道変動の調査と補正テーブルの作成を行った。

蓄積リングアーク部のピックアップrfBPMを使用して、ID23位相駆動時の軌道変動を駆動と同期させて観測した。

非同期に表れる大きな軌道変動($\sim 70 \mu\text{m}$)は、ソフトウェアの競合によって発生していることが判明したので、ソフトウェアを改修することによって対処した。

位相駆動と同期した軌道変動は、位相駆動の方向に依存した変動を示したので、これを踏まえた補正励磁テーブル作成方法を考案した。この方法により、特定のギャップで位相駆動時に $30 \mu\text{m}$ 程度あった軌道変動が $15 \mu\text{m}$ 程度まで押え込むことができた。これを繰り返せば、方向に依らない軌道変動はほぼ補正できることがわかった。

謝辞

SPring-8中の加速器部門、挿入光源グループ、制御グループ、フロントエンドチーム、光診断チーム、安全管理室など本当に多くのスタッフの方々にご助力いただきました。ここに改めて感謝致します。

また、ID23にご理解いただきご支援下さった下村理放射光科学研究センター長に感謝いたします。

参考文献

[ID23]

Design of a new type of planar undulator for generating variably polarized radiation, S. Sasaki, K. Kakuno, T. Takada, T. Shimada, K. Yanagida, and Y. Miyahara, Nucl. Instrum. Methods A331, 763 (1993).

A new undulator for generating variably polarized radiation, S. Sasaki, K. Miyata, and T. Takada Jpn. J. Appl. Phys. 31, L1794 (1992).

Generation of variously polarized radiation by a double array undulator, Y. Miyahara and S. Sasaki, Synchrotron Radiation News, vol. 7, No. 1, 18 (1994)

Analyses for a planar variably- polarizing undulator, S. Sasaki, Nucl. Instrum. Methods A347, 83 (1994).

First observation of undulator radiation from APPLE-1, S. Sasaki, T. Shimada, K. Yanagida, H. Kobayashi and Y. Miyahara, Nucl. Instrum. Methods A347, 87 (1994).

Design of variable polarizing undulator (APPLE-TYPEY) for SX beamline in the SPring-8, H. Kobayashi, T. Shimada, M. Takao, A. Yokoya, and Y. Miyahara, Proceeding of European Particle Accelerator Conference, Barcelona, June 2579 (1996).

Conceptual design of vertical undulator, K. Kakuno and S. Sasaki, JAERI-M Report 92-157 (1992) (in Japanese).

Magnetic Field Calculation of Variable Polarizing Undulator (APPLE-type) of SX Beamline in the SPring-8, H. Kobayashi, S. Sasaki, T. Shimada, M. Takao, A. Yokoya and Y. Miyahara, JAERI-Tech. 96-013 (1996) (in Japanese).

[BL23SU]

Construction of JAERI Soft X-ray Beamline for Actinide Materials, T. Nakatani, Y. Saitoh, Y. Teraoka, T. Okane, and A. Yokoya, J. Synchrotron Rad. 5, 536 (1998).

Soft X-ray Beamline Specialized for Radioactive Materials Equipped with Variably-polarizing Undulator, A. Yokoya, T. Sekiguchi, Y. Saitoh, T. Okane, T. Nakatani, T. Shimada, H. Kobayashi, M. Takao, Y. Teraoka, Y. Yahashi, S. Sasaki, Y. Miyahara, and T. A. Sasaki, J. Synchrotron Rad. 5, 10 (1998).

SPring-8 原研軟 X 線ビームライン BL23SU の H12 年運転・整備記録、安居院あかね、吉越章隆、中谷健、斎藤祐児、寺岡有殿、横谷明德、JAERI-Tech 2001-043.

SPring-8 原研軟 X 線ビームライン BL23SU の H13 年運転・整備記録、安居院あかね、吉越章隆、中谷健、藤井健太郎、横谷明德、JAERI-Tech 2002.

First Operation of Circular Dichroism Measurements with Periodic Photon-Helicity Switching by a Variably-polarizing Undulator at BL23SU at SPring-8, A. Agui, A. Yoshigoe, A. Yokoya, Y. Saitoh, Y. Hiramatsu, T. Shimada, T. Nakatani, T. Matsushita, Y. Miyahara, H. Tanaka, M. Takeuchi, T. Bizen, S. Sasaki, M. Takao, H. Aoyagi, T. P. Kudo, K. Satoh, S. Wu, H. Ohkuma, Rev. Sci. Inst. 72, 3191 (2001).

APPLE-2 型アンジュレータの高速位相変調を用いた高分解能円二色性実験：安居院あかね、吉越章隆、中谷健、松下智裕、斎藤祐児、水牧仁一郎、横谷明德、田中均、宮原義一、島田太平、竹内政雄、高雄勝、佐々木茂樹、青柳秀樹、工藤統吾、佐藤一道、呉樹奎、大熊春夫、放射光、vol. 14, 17 (2001).

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値は CODATA の1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- bar は, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)
= 4.184 J (熱化学)
= 4.1855 J (15 °C)
= 4.1868 J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS (仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

SPRINGER 8 原研軟X線ビームライン挿入光源ID23の位相駆動が誘起する閉軌道変動調査及び補正テーブルの作成

R100

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています。