

JAERI-Tech  
96-014



# 準周期アンジュレータの製作と磁場測定

1996年3月

小林秀樹<sup>\*1</sup>・大橋 健<sup>\*2</sup>・佐々木茂美・島田太平  
高雄 勝・橋本眞也<sup>\*3</sup>・宮原義一

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。

入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 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 Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1996

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 (株)原子力資料サービス

## 準周期アンジュレータの製作と磁場測定

日本原子力研究所関西研究所大型放射光開発利用研究部

小林 秀樹\*<sup>1</sup>・大橋 健\*<sup>2</sup>・佐々木茂美・島田 太平  
高雄 勝・橋本 眞也\*<sup>3</sup>・宮原 義一

(1996年2月27日受理)

放射光を発生する挿入光源装置として、整数次の高調波を発生しないアンジュレータを製作した。従来のアンジュレータとは異なり、本アンジュレータから得られる放射光の高調波は非整数次となり、光学系で高調波を取り去ることが容易になると期待される。準周期アンジュレータが発生する磁場は準周期的に分布していて、通過する電子に準周期的な加速度を与える。本試作機では、準周期的な磁場分布を発生させるための磁気回路部は、準周期的に配置された Nd-Fe-B 永久磁石とアルミニウム製スペーサによって構成した。磁極間隔は2種類ありそれぞれ25mm, 55.9 mmとし、磁極数は27, 磁石列の全長は1245mmとした。装置組立後、ホール素子を用いて磁場測定を行い、所定の磁場分布を得るため磁場調整を行った。得られた磁場分布から計算した放射光エネルギーは、設計値に一致し高調波は非整数次となった。

---

関西研究所（東海駐在）：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 - 4

\*1 外来研究員 信越化学工業株式会社

\*2 信越化学工業株式会社

\*3 高輝度光科学研究センター

Construction and Magnetic Field Measurement of Quasi-periodic Undulator

Hideki KOBAYASHI\*<sup>1</sup>, Ken OHASHI\*<sup>2</sup>, Shigemi SASAKI, Taihei SHIMADA  
Masaru TAKAO, Shinya HASHIMOTO\*<sup>3</sup>, and Yoshikazu MIYAHARA

Department of Synchrotron Radiation Facilities Project  
Kansai Research Establishment

Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 27, 1996)

A prototype quasi-periodic undulator(QPU) to generate irrational harmonic radiation was constructed in order to evaluate the performance of this type of device. This undulator generates irrational harmonics which can be eliminated easily by optics. Magnetic field of this undulator distributes quasi-periodically along the undulator axis to kick an electron quasi-periodically. Nd-Fe-B permanent magnets and aluminum spacers were used for producing a quasi-periodic magnetic field. There are two pole distances 25mm and 55.9mm in the undulator, and the number of poles are 27, the total length is 1245mm. After construction of this undulator, Magnetic field was measured with a Hall-probe, and corrected by using shim, so that the peak fields agree with the design value. The photon energies of spectrum peaks calculated from the measured field data agreed with the design values of irrational higher harmonics.

Keywords: Magnetic Field, Quasi-periodic, Undulator, Irrational Harmonic,  
Radiation, Permanent Magnet, Nd-Fe-B, Hall-probe

---

\*1 on leave from Shin-Etsu Chemical Co.,Ltd.

\*2 Shin-Etsu Chemical Co.,Ltd.

\*3 Japan Synchrotron Radiation Research Institute

## 目 次

1. 概 要 .....	1
2. 磁気回路部の設計 .....	1
3. 磁気回路部の製作 .....	2
4. 磁場測定および磁場調整 .....	2
5. ま と め .....	4
参考文献 .....	4

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Design of Magnetic Circuit .....	1
3. Construction of Magnetic Circuit .....	2
4. Magnetic Field Measurement and Correction .....	2
5. Conclusion .....	4
References .....	4

## 1. 概 要

周期的な磁場分布をもつ従来のアンジュレータでは、発生する放射光の高調波は基本波の整数倍である。放射光を用いる多くの実験では、単一エネルギーのみを使用するために光学系を用いてそれ以外の高調波を取り除くことになるが、整数次の高調波を完全に取り除くことは非常に難しい。

最近、電子進行方向に準周期的な磁場分布をもち、非整数次の高調波を発生する新型のアンジュレータが考案された<sup>1), 2)</sup>。このアンジュレータが発生する放射光には有理数次の高調波が含まれないので、任意の高調波を唯一のスペクトル・ピークとした光のみを容易に取り出すことができる。このアンジュレータは準周期アンジュレータ(quasi-periodic undulator)と呼ばれている。この種のアンジュレータのビーム試験を行うために、試作機を製作した。ここでは、その磁気回路部の製作と磁場測定および磁場調整について報告する。

## 2. 磁気回路部の設計

準周期アンジュレータの磁石配置は次の式で与えられる<sup>2)</sup>。

$$z_n = n + \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right) \left[ \frac{1}{\eta + 1} n + 1 \right]$$

$n$ は整数で、 $z_n$ は $n$ 番目の磁石位置を表す無次元数である。 $\eta$ は無理数であり、括弧[]は括弧内の数より小さい最大の整数をとる。今回は $\eta = \sqrt{5}$ とした。上式の $z_n$ で与えられる位置に磁石を置くと1つの磁石と隣の磁石との距離は $d$ または $d'$ となり、 $d'/d = \eta$ である。

Fig. 1に製作したアンジュレータの磁石配置を示す。図の矢印は磁化方向を示す。磁石の中心間距離は $d$ または $d'$ であり磁石の $z$ 軸方向の長さを $d$ とすれば、磁石は接するかもしれないが $d' - d$ のすきまができる。接している磁石ではお互い逆向きの磁化方向を持つため、軸上の磁場は部分的に打ち消し合って、単独の磁石による磁場よりも弱くなる。ピーク磁場の大きさをほぼ等しくするために単独磁石の $z$ 方向の長さを $d$ の3割減とした。端部の磁石は電子軌道補正のために $z$ 方向の長さを単独磁石の半分にした。 $+y$ 方向磁化の総和と $-y$ 方向磁化の総和は同じとなり、磁場の $z$ 方向の1回積分(電子のキック角に相当)はほぼゼロになる。実用上の磁石寸法を考慮して $d = 25.0\text{mm}$ 、 $d' = 55.9\text{mm}$ とした。

磁場計算の結果として、Fig. 2, 3にギャップ値 $\text{gap} = 36\text{mm}$ 、 $60\text{mm}$ のときの磁場、1回積分、2回積分の分布、および得られる放射光のスペクトルを示す。スペクトル図中には、最も低エネルギーの顕著なピークを1次光としたときの3次光、5次光等の整数倍高調波のエネルギー位置を破線で示した。破線に一致するピークは存在せず、2番目の顕著なピークはここで言う1次光の2.4倍のエネルギーとなっている。

## 1. 概 要

周期的な磁場分布をもつ従来のアンジュレータでは、発生する放射光の高調波は基本波の整数倍である。放射光を用いる多くの実験では、単一エネルギーのみを使用するために光学系を用いてそれ以外の高調波を取り除くことになるが、整数次の高調波を完全に取り除くことは非常に難しい。

最近、電子進行方向に準周期的な磁場分布をもち、非整数次の高調波を発生する新型のアンジュレータが考案された<sup>1), 2)</sup>。このアンジュレータが発生する放射光には有理数次の高調波が含まれないので、任意の高調波を唯一のスペクトル・ピークとした光のみを容易に取り出すことができる。このアンジュレータは準周期アンジュレータ(quasi-periodic undulator)と呼ばれている。この種のアンジュレータのビーム試験を行うために、試作機を製作した。ここでは、その磁気回路部の製作と磁場測定および磁場調整について報告する。

## 2. 磁気回路部の設計

準周期アンジュレータの磁石配置は次の式で与えられる<sup>2)</sup>。

$$z_n = n + \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right) \left[ \frac{1}{\eta + 1} n + 1 \right]$$

$n$ は整数で、 $z_n$ は $n$ 番目の磁石位置を表す無次元数である。 $\eta$ は無理数であり、括弧[]は括弧内の数より小さい最大の整数をとる。今回は $\eta = \sqrt{5}$ とした。上式の $z_n$ で与えられる位置に磁石を置くと1つの磁石と隣の磁石との距離は $d$ または $d'$ となり、 $d'/d = \eta$ である。

Fig. 1に製作したアンジュレータの磁石配置を示す。図の矢印は磁化方向を示す。磁石の中心間距離は $d$ または $d'$ であり磁石の $z$ 軸方向の長さを $d$ とすれば、磁石は接するかもしれないが $d'-d$ のすきまができる。接している磁石ではお互い逆向きの磁化方向を持つため、軸上の磁場は部分的に打ち消し合って、単独の磁石による磁場よりも弱くなる。ピーク磁場の大きさをほぼ等しくするために単独磁石の $z$ 方向の長さを $d$ の3割減とした。端部の磁石は電子軌道補正のために $z$ 方向の長さを単独磁石の半分にした。 $+y$ 方向磁化の総和と $-y$ 方向磁化の総和は同じとなり、磁場の $z$ 方向の1回積分(電子のキック角に相当)はほぼゼロになる。実用上の磁石寸法を考慮して $d=25.0\text{mm}$ 、 $d'=55.9\text{mm}$ とした。

磁場計算の結果として、Fig. 2, 3にギャップ値 $\text{gap}=36\text{mm}$ 、 $60\text{mm}$ のときの磁場、1回積分、2回積分の分布、および得られる放射光のスペクトルを示す。スペクトル図中には、最も低エネルギーの顕著なピークを1次光としたときの3次光、5次光等の整数倍高調波のエネルギー位置を破線で示した。破線に一致するピークは存在せず、2番目の顕著なピークはここで言う1次光の2.4倍のエネルギーとなっている。

### 3. 磁気回路部の製作

製作したアンジュレータ磁気回路部をFig. 4に示す。上下2列ある磁石列のうち、Fig. 4は下側の磁石列を示している。主な仕様値をTable 1に示す。

Table 1 試作アンジュレータの主なパラメータ

Distance between poles	$d=25.0\text{mm}$ $d'=55.9\text{mm}$
Number of poles	$N=27$
Total length	$L=1245\text{mm}$
Minimum gap	gap=36mm
Peak magnetic field (gap=36mm)	$B_{yp}=0.24\text{ T}$
Magnet length	$l_1=25.0\text{mm}$ $l_2=17.5\text{mm}$ $l_3=8.7\text{mm}(\text{edge})$
Magnet width	$w=80\text{mm}$
Magnet height	$h=35\text{mm}$
Remanent field	$Br=1.2\text{T}$

$z$ 軸は磁気回路中心（ギャップ中心）軸に一致し、ギャップ方向を $y$ 、水平方向を $x$ とする（Fig. 4参照）。端部磁石は $d \times 0.35=8.75\text{mm}$ の値を微調整して $8.7\text{mm}$ とし、磁場の2回積分値（電子の軌道に相当）を補正した。

使用した磁石はNd-Fe-B系永久磁石（信越化学、N36H）である。磁石幅 $w$ は $80\text{mm}$ で、 $x$ 方向の磁場の減衰は約1%（ $x=10\text{mm}$ 位置）である。磁石高さ $h$ を調整することによりピーク磁場強度が大きく変化し、gap=36mmにおいて1次光として約 $1.3\text{eV}$ （電子エネルギー200MeV時）が得られるように $h$ を $35\text{mm}$ とした。この磁石列は既存の架台に取付けるため、全長 $L$ を $1245\text{mm}$ 、磁極数 $N$ を27とした。

磁石と磁石のすきまにはスペーサとしてアルミニウムのブロックを挿入した。端部のストッパー、ベースプレートとともにアルミニウム製である。磁石には角に切りかきを付け、SUS304のクランプにより機械的にベースプレートに固定した。アルミニウムスペーサには $z$ 方向にM10の貫通孔を3ヶ所開け、ここに鉄材のねじを入れることにより、磁場調整を行うことができる構造とした。

### 4. 磁場測定および磁場調整

磁石列を架台に組みつけた後、3次元ステージに取付けられたホール素子を用いて磁場測定を行った。計算機制御によりホールプローブを走査し、ギャップ中心軸（ $z$ 軸）上の磁場分布を測定した。測定全長は $1800\text{mm}$ で、 $0.5\text{mm}$ ステップで3600点の測定に約1時間を要した。

まず、ギャップ駆動の再現性を調べるため、任意のgap値からgap=36mmに駆動した後に磁場測



### 3. 磁気回路部の製作

製作したアンジュレータ磁気回路部をFig. 4に示す。上下2列ある磁石列のうち、Fig. 4は下側の磁石列を示している。主な仕様値をTable 1に示す。

Table 1 試作アンジュレータの主なパラメータ

Distance between poles	$d=25.0\text{mm}$ $d'=55.9\text{mm}$
Number of poles	$N=27$
Total length	$L=1245\text{mm}$
Minimum gap	gap=36mm
Peak magnetic field (gap=36mm)	$B_{yp}=0.24\text{ T}$
Magnet length	$l_1=25.0\text{mm}$ $l_2=17.5\text{mm}$ $l_3=8.7\text{mm}(\text{edge})$
Magnet width	$w=80\text{mm}$
Magnet height	$h=35\text{mm}$
Remanent field	$Br=1.2\text{T}$

$z$ 軸は磁気回路中心（ギャップ中心）軸に一致し、ギャップ方向を $y$ 、水平方向を $x$ とする（Fig. 4参照）。端部磁石は $d \times 0.35=8.75\text{mm}$ の値を微調整して $8.7\text{mm}$ とし、磁場の2回積分値（電子の軌道に相当）を補正した。

使用した磁石はNd-Fe-B系永久磁石（信越化学、N36H）である。磁石幅 $w$ は $80\text{mm}$ で、 $x$ 方向の磁場の減衰は約1%（ $x=10\text{mm}$ 位置）である。磁石高さ $h$ を調整することによりピーク磁場強度が大きく変化し、gap=36mmにおいて1次光として約 $1.3\text{eV}$ （電子エネルギー200MeV時）が得られるように $h$ を $35\text{mm}$ とした。この磁石列は既存の架台に取付けるため、全長 $L$ を $1245\text{mm}$ 、磁極数 $N$ を27とした。

磁石と磁石のすきまにはスペーサとしてアルミニウムのブロックを挿入した。端部のストッパー、ベースプレートもともにアルミニウム製である。磁石には角に切りかきを付け、SUS304のクランプにより機械的にベースプレートに固定した。アルミニウムスペーサには $z$ 方向にM10の貫通孔を3ヶ所開け、ここに鉄材のねじを入れることにより、磁場調整を行うことができる構造とした。

### 4. 磁場測定および磁場調整

磁石列を架台に組みつけた後、3次元ステージに取付けられたホール素子を用いて磁場測定を行った。計算機制御によりホールプローブを走査し、ギャップ中心軸（ $z$ 軸）上の磁場分布を測定した。測定全長は $1800\text{mm}$ で、 $0.5\text{mm}$ ステップで3600点の測定に約1時間を要した。

まず、ギャップ駆動の再現性を調べるため、任意のgap値からgap=36mmに駆動した後に磁場測

定を行う動作を数回繰り返した。その結果 (Table 2参照)、磁場エラーは0.01%以下に収まることが分かった。

Table 2 ギャップ駆動の再現性

回数	端部ピーク磁場(Gauss)	中心付近ピーク磁場(Gauss)
1	2481.9	2441.7
2	2482.2	2441.7
3	2482.4	2441.6
4	2482.5	

磁場調整の目標としては、gap=36mm時に、

- 1) 各ピーク磁場の値を揃える
- 2) 1回積分の値を100G-cm以下にする
- 3) 2回積分値を小さくする

の3つを設定した。

Fig. 5に磁場調整部を示す。調整方法の第1は、スパーサに設けた3ヶ所のM10穴に鉄ねじを入れて、磁束を短絡してピーク磁場を減少させる。その程度は、ねじの長さ、位置、個数を変えて調整する。調整方法の第2は、磁石とベースプレート間に非磁性の薄板を入れて、磁石高さを高くしてピーク磁場を大きくする。その大きさは薄板の厚さを変えて調整する。

薄板を入れる前と後のピーク磁場の変化をFig. 6に示す。Fig. 6はgap=36mm時に0.05mmの薄板を片側磁石列の1つの磁石下に入れた結果であり、その磁石がつくるピーク磁場が数Gauss増加していることがわかる。また、Fig. 7はgap=36mm時に長さ15mmのねじを片側磁石列3本、上下磁石列合わせて6本をFig. 5のように1つの磁石に接して入れた場合に、その磁石がつくるピーク磁場の変化を示す。これによってピーク値で十数Gauss減少していることがわかる。

これらの磁場調整を行うと、同時に1回積分、2回積分の値も変化する。上述Fig. 7のねじによる調整の結果、1回積分、2回積分はFig. 8のように変化した。電子入り口付近 (Fig. 8左側) だけの調整で、電子出口で2回積分値がかなり変化していることがわかる。磁場調整は、ピーク磁場調整を終えた後、軌道調整をする順序で行った。

磁場調整前と最終調整後の1回積分、2回積分の値をTable 3に示す (gap=36mm)。

Table 3 磁場調整の結果

	調整前	調整後
1回積分(G-cm)	-178.0	-76.9
2回積分(G-cm <sup>2</sup> )	-19343.9	1743.2

調整後のピーク磁場の最大誤差は1.7%であった。一回積分はgap=36mm、50mm、60mmにおいて100G-cm以下となった。

磁場調整後のgap=36mm、60mm時の磁場、1回積分、2回積分の分布および磁場測定データから計算された放射光スペクトルをFig. 9、10に示す。スペクトルには整数次の高調波が現れていないことが分かる。磁場計算からの結果Fig. 2(b)に比べるとFig. 9(b)では、一次波、高調波ともに

エネルギーは一致しているが、磁場エラーのために高調波の強度が減少しており、ノイズレベルも若干上がっている。これを補正するには、スペクトルを考慮に入れた磁場調整が必要と思われる。

Fig.11に蓄積リングに設置された本アンジュレータの写真を示す。

## 5. ま と め

新型の挿入光源である準周期アンジュレータの試作機を製作した。設計時に磁場分布計算および放射光スペクトル計算を行い仕様値を決定した。磁気回路部は永久磁石、アルミニウムスペーサで構成され、既存の架台に取付けられた。製作後、2種類の磁場調整機構によってピーク磁場、磁場の1回積分、2回積分の補正を行い、磁場分布を測定した。得られた磁場データから計算された放射光スペクトルには整数次の高調波は現れないことが確認された。

本アンジュレータは電総研蓄積リングNJI-IVに設置し、放射光測定を実行する予定である。

## 参 考 文 献

- 1) S.Hashimoto and S.Sasaki : Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A361, 611(1995).
- 2) S.Sasaki, H.Kobayashi, M.Takao, Y.Miyahara and S.Hashimoto: Rev. Sci. Instrum., 66(2), 1953(1995).

エネルギーは一致しているが、磁場エラーのために高調波の強度が減少しており、ノイズレベルも若干上がっている。これを補正するには、スペクトルを考慮に入れた磁場調整が必要と思われる。

Fig.11に蓄積リングに設置された本アンジュレータの写真を示す。

## 5. ま と め

新型の挿入光源である準周期アンジュレータの試作機を製作した。設計時に磁場分布計算および放射光スペクトル計算を行い仕様値を決定した。磁気回路部は永久磁石、アルミニウムスペーサで構成され、既存の架台に取付けられた。製作後、2種類の磁場調整機構によってピーク磁場、磁場の1回積分、2回積分の補正を行い、磁場分布を測定した。得られた磁場データから計算された放射光スペクトルには整数次の高調波は現れないことが確認された。

本アンジュレータは電総研蓄積リングNIJ-IVに設置し、放射光測定を実行する予定である。

## 参 考 文 献

- 1) S.Hashimoto and S.Sasaki : Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A361, 611(1995).
- 2) S.Sasaki, H.Kobayashi, M.Takao, Y.Miyahara and S.Hashimoto: Rev. Sci. Instrum., 66(2), 1953(1995).

エネルギーは一致しているが、磁場エラーのために高調波の強度が減少しており、ノイズレベルも若干上がっている。これを補正するには、スペクトルを考慮に入れた磁場調整が必要と思われる。

Fig.11に蓄積リングに設置された本アンジュレータの写真を示す。

## 5. ま と め

新型の挿入光源である準周期アンジュレータの試作機を製作した。設計時に磁場分布計算および放射光スペクトル計算を行い仕様値を決定した。磁気回路部は永久磁石、アルミニウムスペーサで構成され、既存の架台に取付けられた。製作後、2種類の磁場調整機構によってピーク磁場、磁場の1回積分、2回積分の補正を行い、磁場分布を測定した。得られた磁場データから計算された放射光スペクトルには整数次の高調波は現れないことが確認された。

本アンジュレータは電総研蓄積リングNJI-IVに設置し、放射光測定を実行する予定である。

## 参 考 文 献

- 1) S.Hashimoto and S.Sasaki : Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., **A361**, 611(1995).
- 2) S.Sasaki, H.Kobayashi, M.Takao, Y.Miyahara and S.Hashimoto: Rev. Sci. Instrum., **66(2)**, 1953(1995).

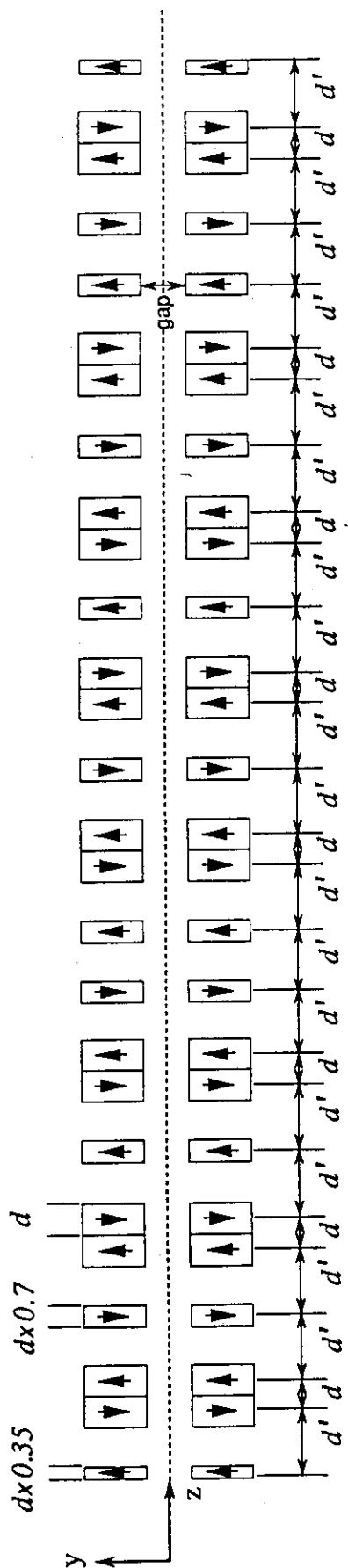


Fig.1 Position and size of magnets

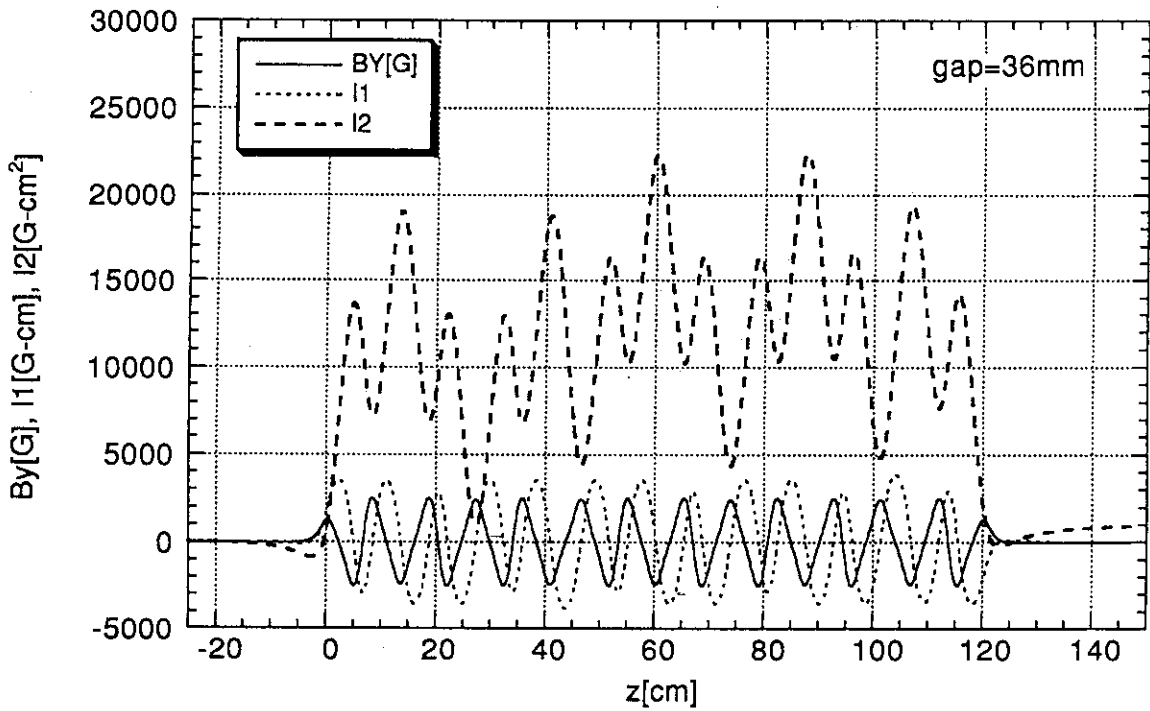


Fig.2(a)  $B_y$ , 1st-integral( $I_1$ ), 2nd-integral( $I_2$ ) distribution along  $z$ -axis are calculated. gap=36mm

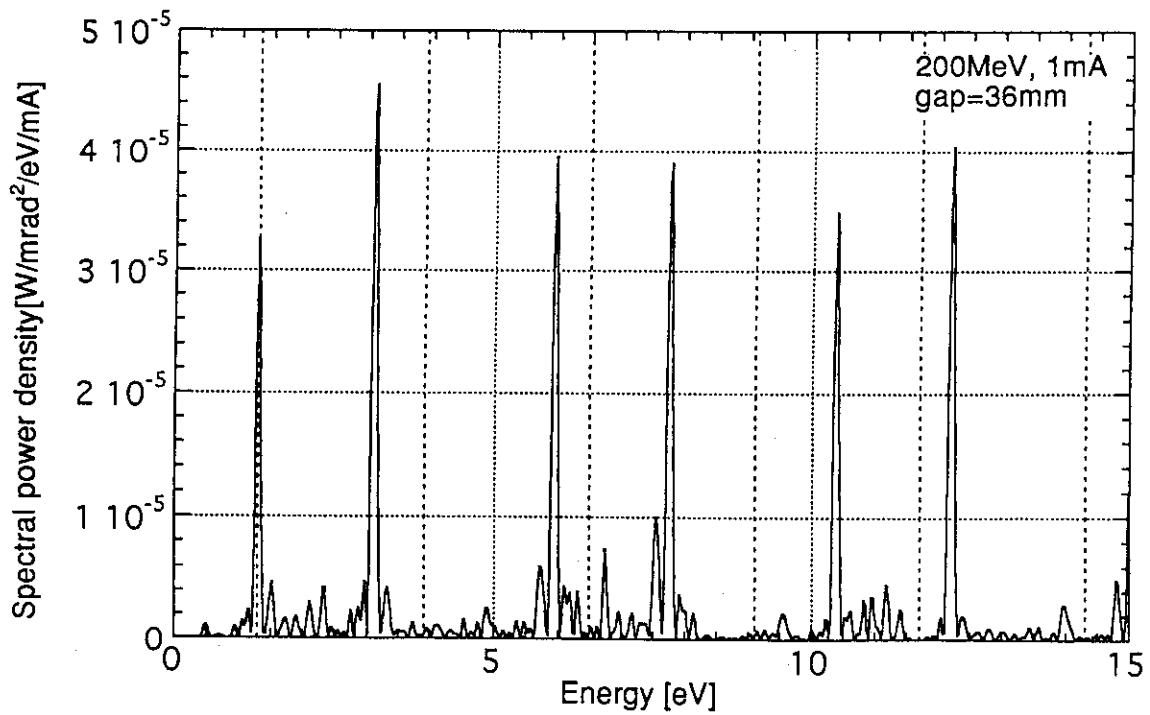


Fig.2(b) Radiation spectrum from quasiperiodic undulator. gap=36mm

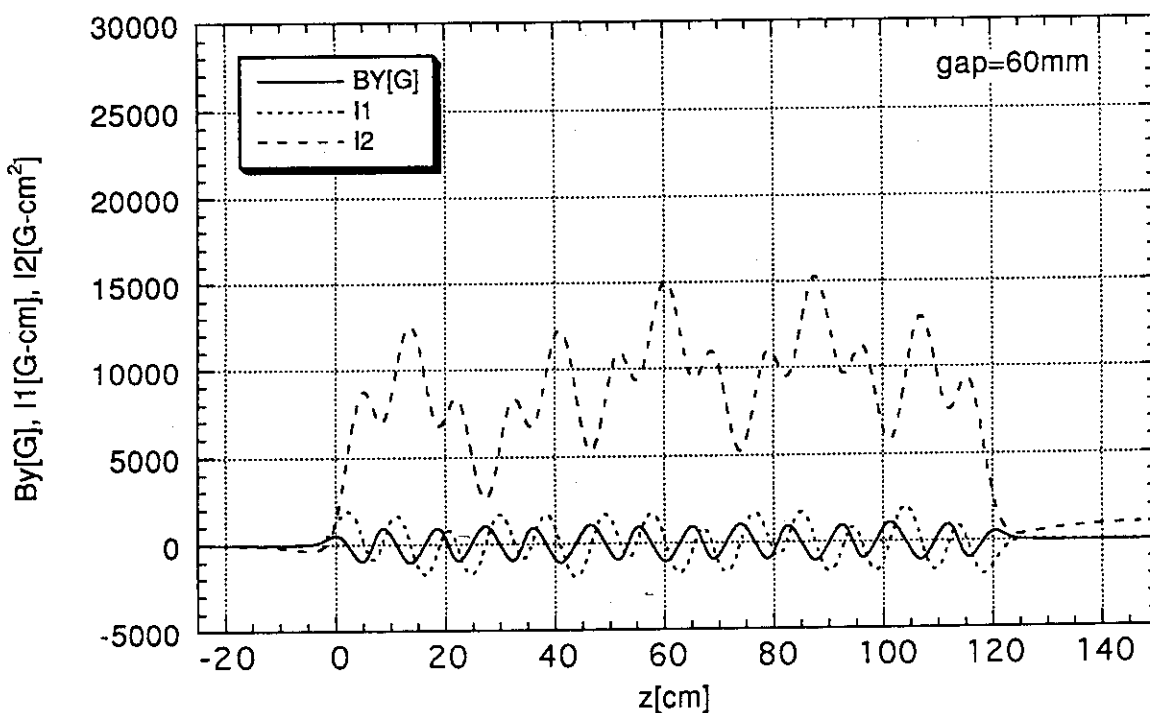


Fig.3(a) By, 1st-integral(I1), 2nd-integral(I2) distribution along z-axis are calculated. gap=60mm

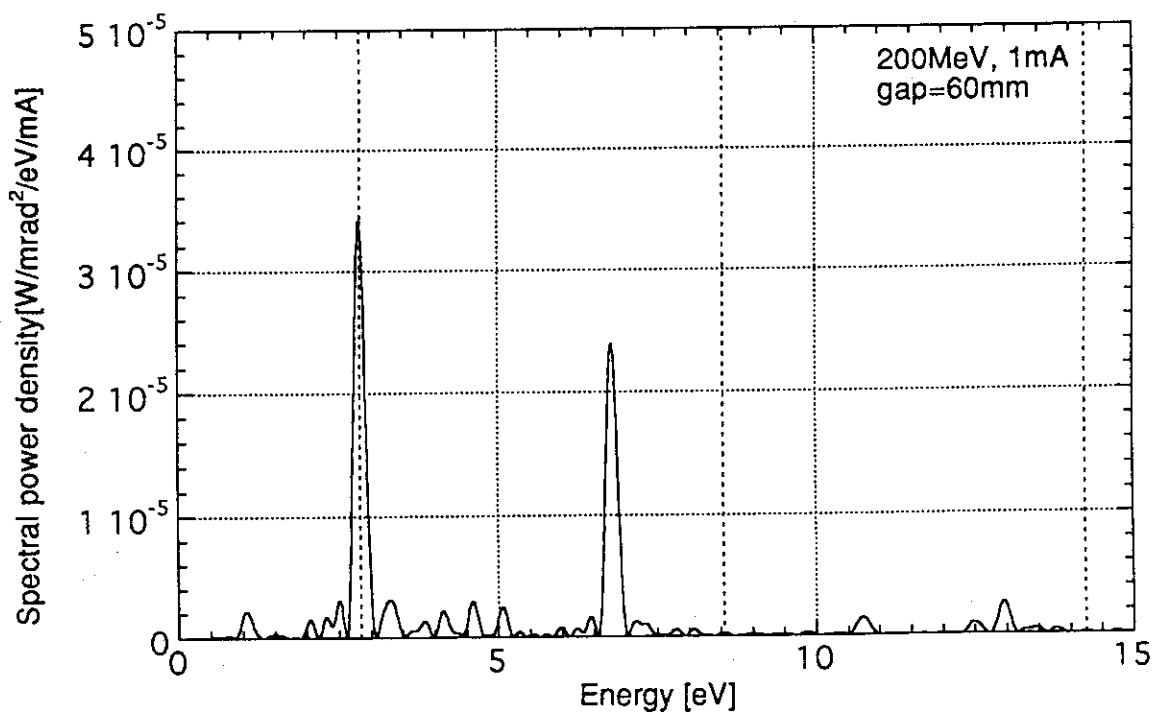


Fig.3(b) Radiation spectrum from quasiperiodic undulator. gap=60mm





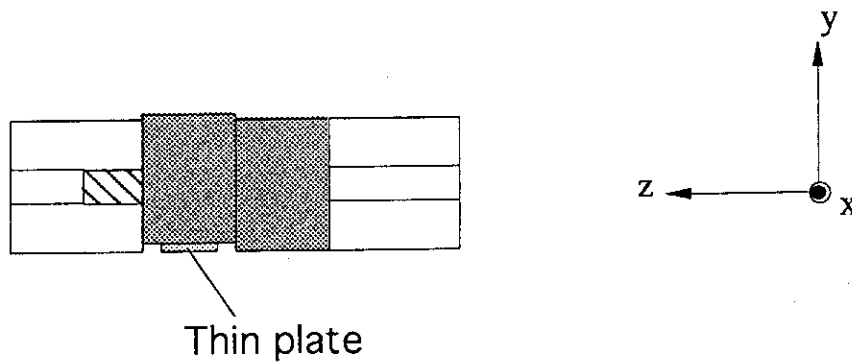
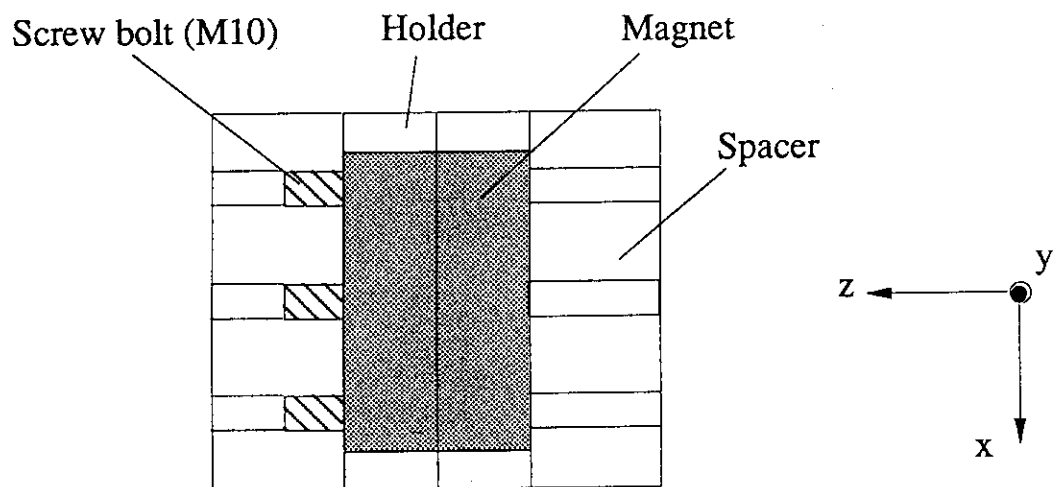


Fig.5 Magnetic field correction structure

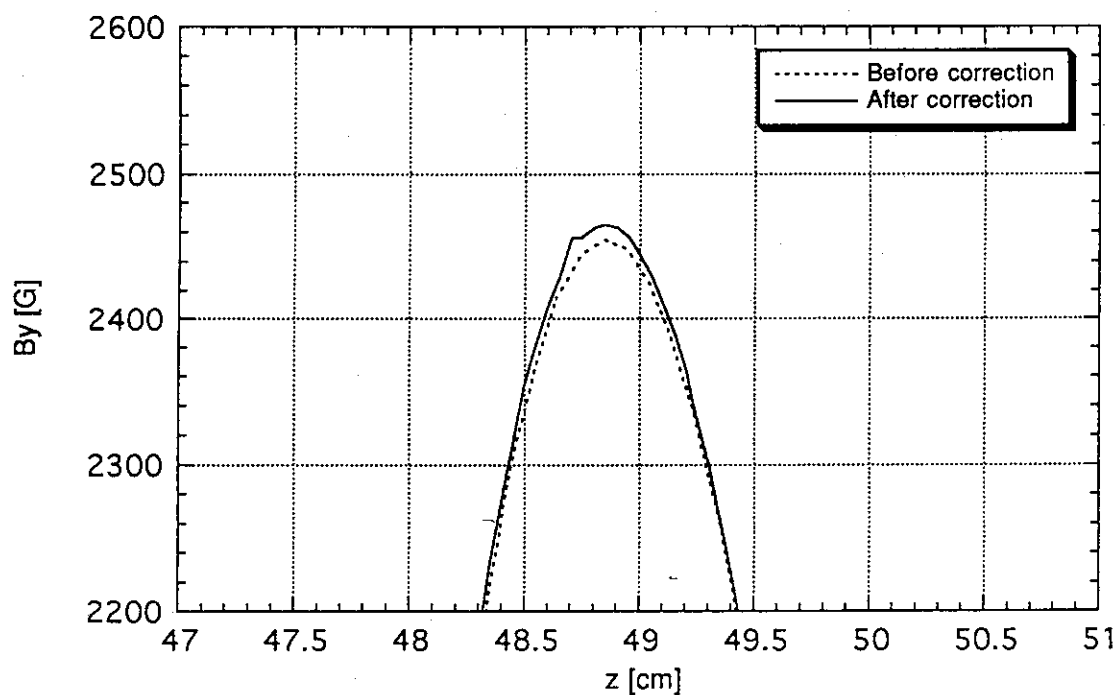


Fig.6 Magnetic field correction by thin plate.  
Thickness of plate is 0.05mm. gap=36mm

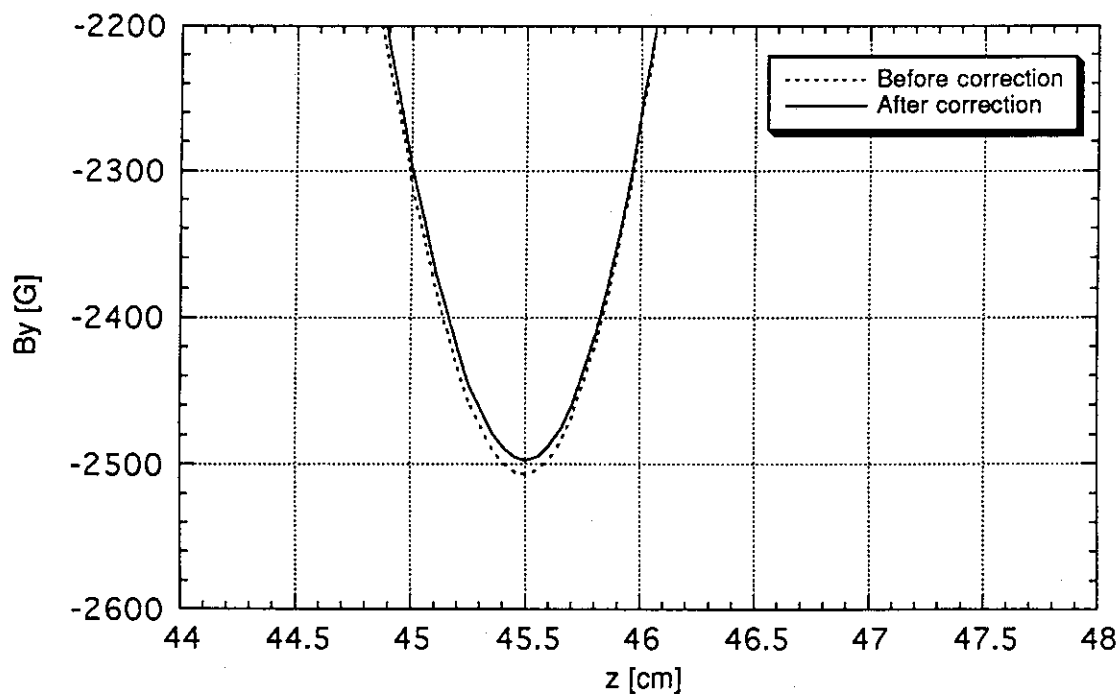


Fig.7 Magnetic field correction by flux shunt.  
gap=36mm

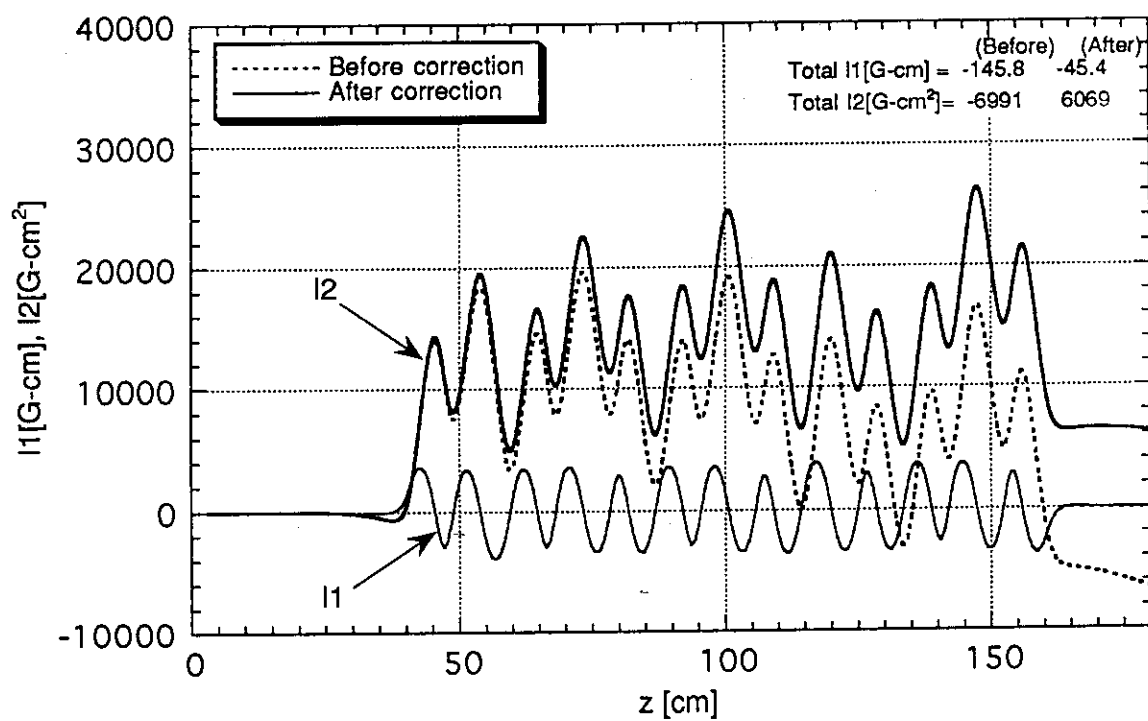


Fig.8 1st-integral(I1), 2nd-integral(I2) distribution changes by field correction. gap=36mm

S

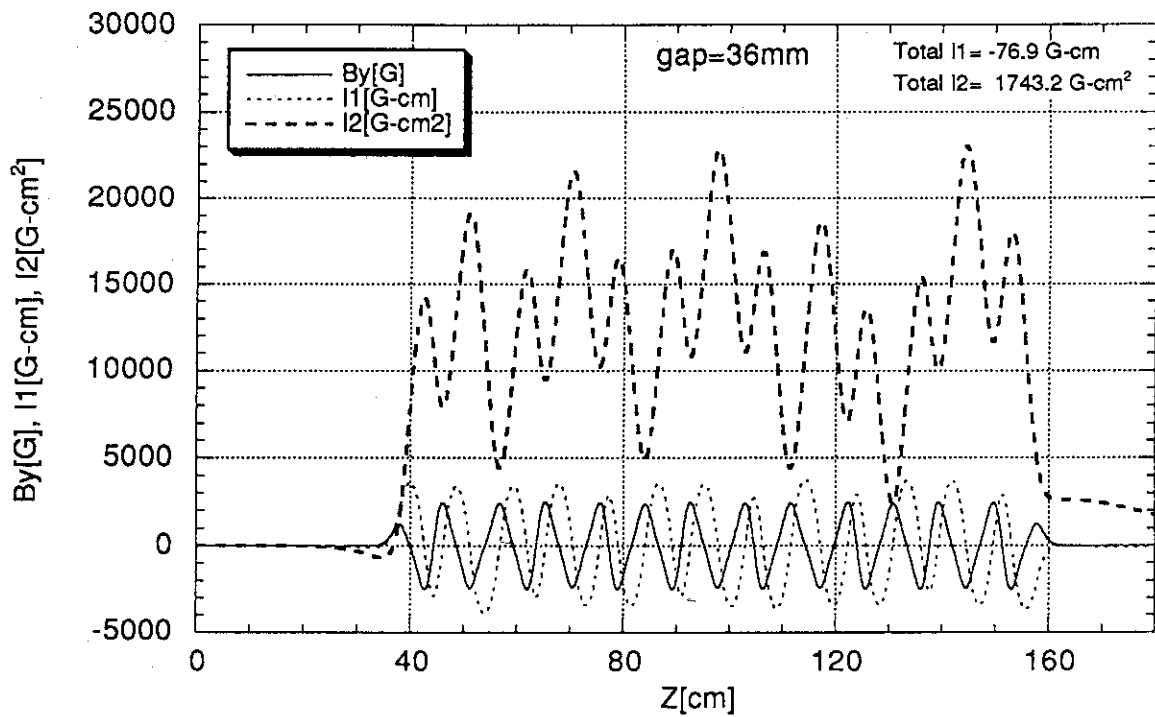


Fig.9(a)  $B_y$ , 1st-integral( $I_1$ ), 2nd-integral( $I_2$ ) distribution.  
gap=36mm

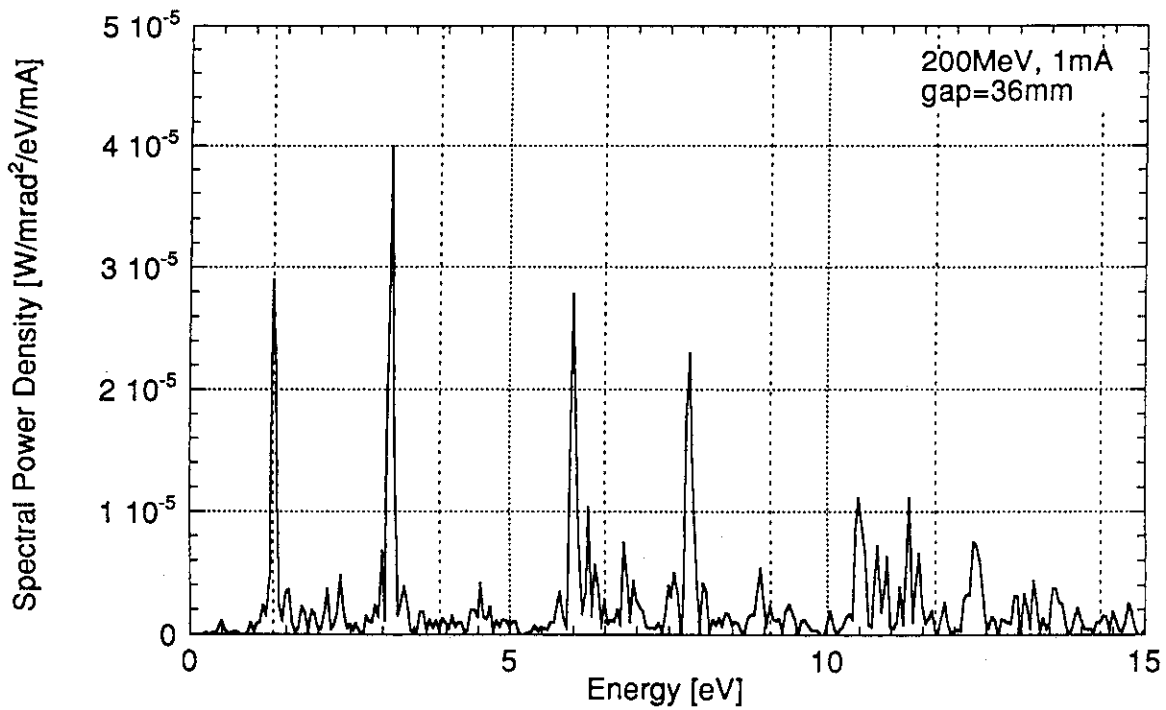


Fig.9(b) Radiation spectrum is calculated from measured field data.  
gap=36mm

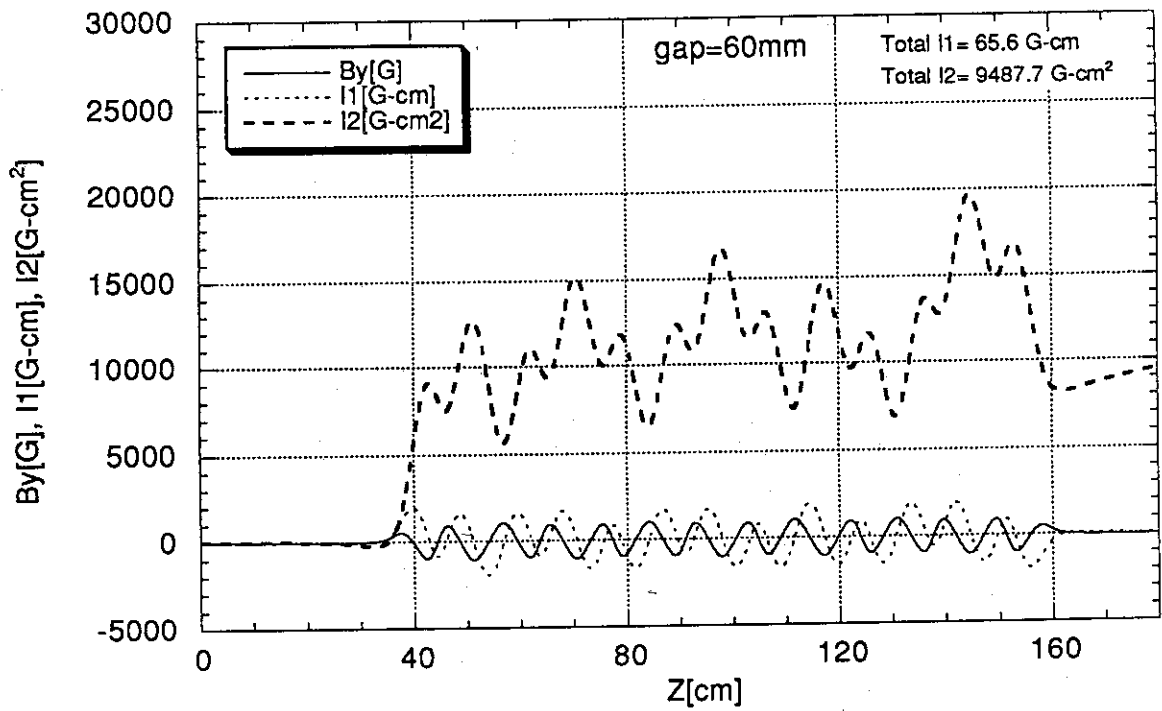


Fig.10(a) By, 1st-integral(I1), 2nd-integral(I2) distribution.  
gap=60mm

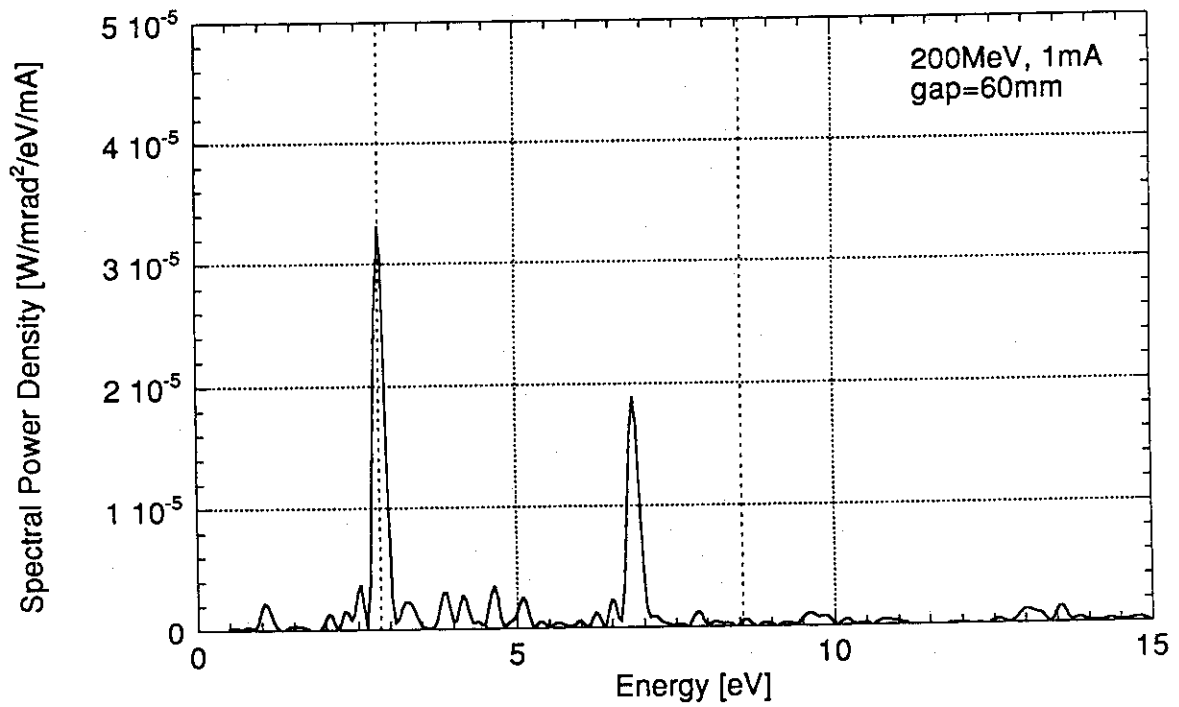


Fig.10(b) Radiation spectrum is calculated from measured field data.  
gap=60mm

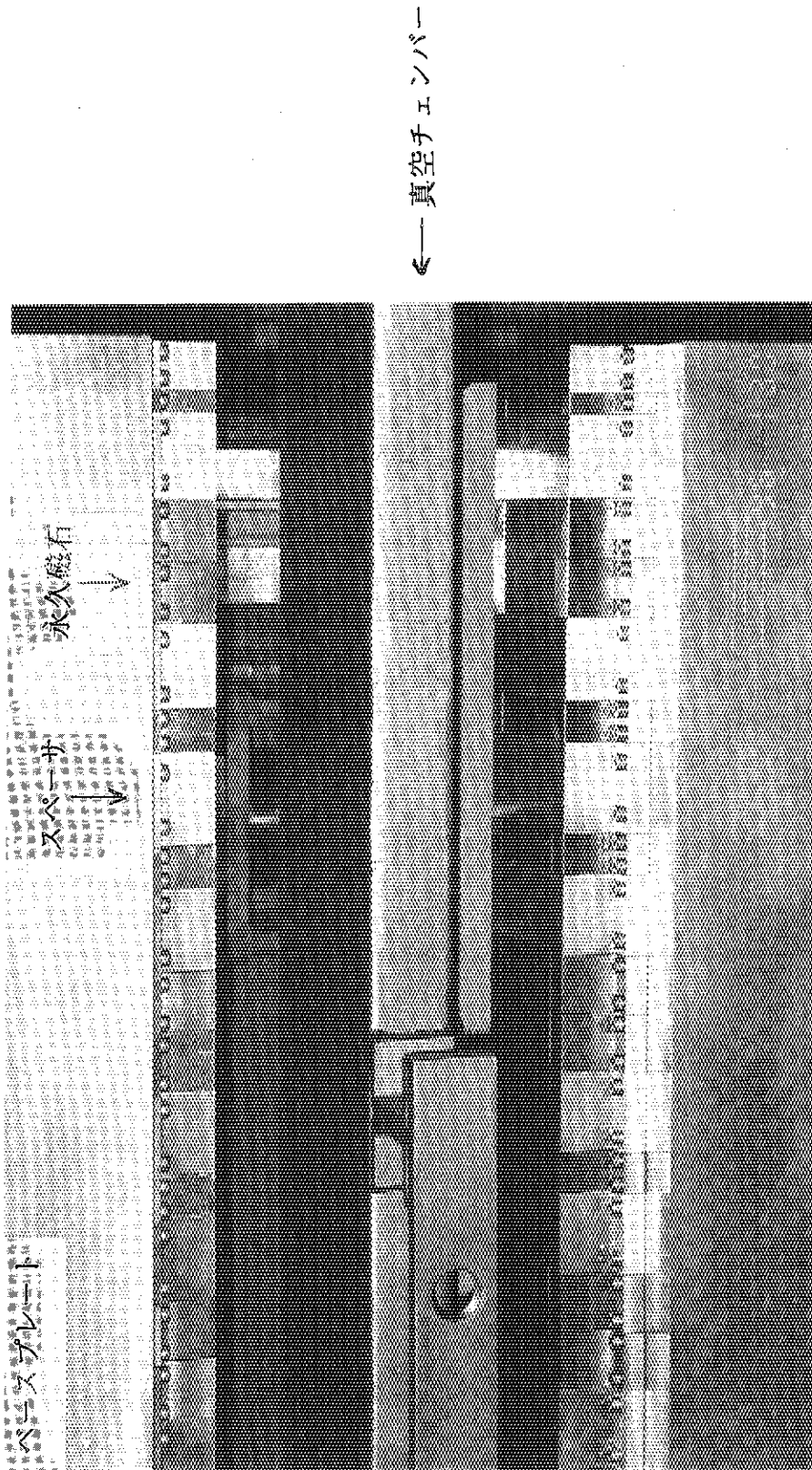


Fig.11 Quasi-periodic undulator installed in NIJI-IV storage ring.