

§3. 挿入光源

3-1. TSLF 超高輝度 X 線アンジュレータ

山本 樹

高エネルギー物理学研究所・放射光実験施設
MR 超高輝度放射光計画推進室*

Super Brilliant X-ray Undulator for the Tristan Super Light Facility

Shigeru YAMAMOTO

KEK-PF Tristan Super Light Facility

A 5.4-m long 239-pole undulator comprising three rigid and precise standardized-unit undulators was completed and installed in the Tristan Main Ring, which was operated as a light source at a beam energy from 8 to 10 GeV. This undulator was successfully tested, characterized and used as a brilliant hard x-ray source for several synchrotron-radiation experiments during the last three and a half months of 1995.

1. はじめに

高エネルギー物理学研究所・放射光実験施設では1991年4月以来、高エネルギー物理実験用加速器としてのTristan主リング(MR)を1 nm·radian程度の超低エミッタンスに到達可能なリングに改造し、全く新しい超高輝度放射光光源(Tristan Super Light Facility, 以下 TSLF)とするためのR & Dを推進して来た¹⁻³⁾。TSLF計画では、我々はX線領域の超高輝度・可変単色光源の実現(第3世代光源)、さらには軟X線領域の自由電子レーザーの実現(第4世代光源)と、それらの利用を目指した。MRを放射光源化する場合、リングの運転エネルギーを高エネルギー実験用の30 GeVから10 GeVに下げることによってRf空洞の数を大幅に減らし、4本の200

m長直線部のうち3本に各種の特徴ある挿入光源を設置することが可能になる。

TSLFの概念図を図1に示した。我々はTSLF建設において、その前半期で3台の6 m長級のアンジュレータの製作を、後半期で3台の70 m長級の長尺アンジュレータの製作を計画し、さらにバイパス軌道を新たに増設することによる2台の自由電子レーザー(100 m長アンジュレータを想定)の製作までを視野に含めてきた。しかし、高エネルギー物理学研究所の次期計画としてMRトンネルを利用したBファクトリ建設が先行することとなり、MRの本格的放射光源化実現は当面不可能となった。

本稿では、TSLF計画において我々が企画した超高輝度挿入光源の概要を、1995年の後半MR

* 高エネルギー物理学研究所・放射光実験施設 MR 超高輝度放射光計画推進室 〒305 つくば市大穂 1-1
TEL 0298-64-5680 FAX 0298-64-7529 e-mail Shigeru@kekvax.kek.jp

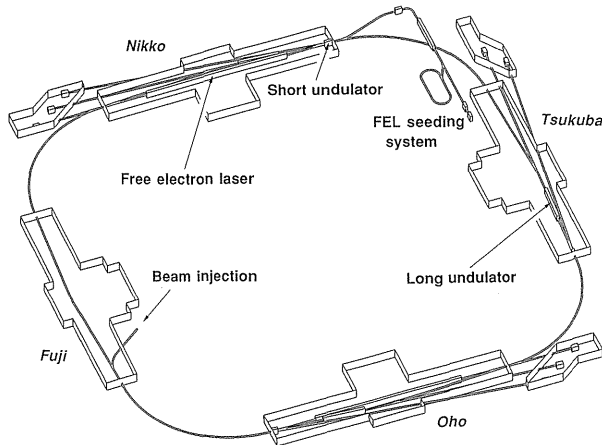


Figure 1. Schematic illustration of the TSLF.

にて行った、高輝度放射光実験のために建設した、挿入光源を例にとって述べることにする（本機は当然 TSLF 計画の R & D において長尺アンジュレータのプロトタイプとして製作したものである）。さらに、MR を用いたこの放射光実験におけるスペクトル測定についても触れることにする。

2. TSLF 超高輝度挿入光源

TSLF の 70 m 長尺アンジュレータおよび短尺 (5.4 m) アンジュレータから得られる放射のスペクトルを図 2 に示した：MR-L は長尺アンジュレータを、MR-S は短尺アンジュレータを各々示す。MR を加速エネルギー $E_B=10$ GeV、および蓄積電流 $I_B=100$ mA で運転した時（自然エミッタンス $\epsilon_0=1.5$ nm・radian、エミッタンス結合比 $\kappa=0.01$ ）には、短尺アンジュレータ ($K=0.97$) から 14.4 keV の単色 X 線を 4.3×10^{20} 光子/sec/mm²/mrad²/0.1% バンド幅 という高輝度で、長尺アンジュレータからはさらに一桁高い輝度で得ることが期待できる（後述の 1995 年秋の高輝度放射光実験用挿入光源からの放射スペクトルも MRT として示した：ただし、この場合の電流値は $I_B=10$ mA）。

TSLF 計画において企画した長いアンジュレータを、一体のものとして各々独立に製造するのは

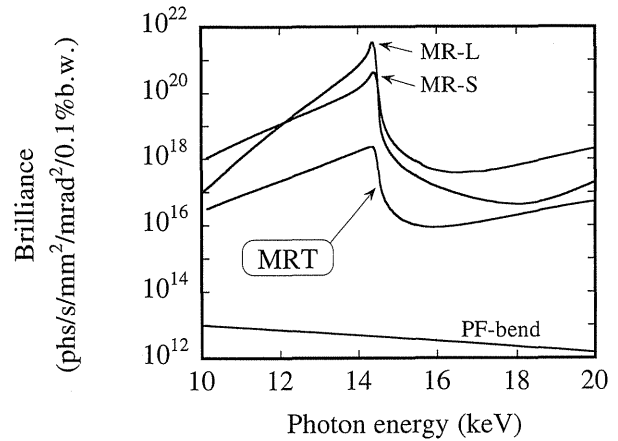


Figure 2. Spectra of radiation from the TSLF undulators: MR-L and -S, respectively, denote those obtained from a 70-m undulator ($N=1600$) and a 5.4-m one ($N=120$) planned in the original TSLF ($\lambda_u=4.5$ cm, 10 GeV and 100 mA operation with $\epsilon_0=1.5$ nm). MRT stands for that obtained from the XU#MR0 ($\lambda_u=4.5$ cm, 10 GeV and 10 mA operation with $\epsilon_0=5$ nm).

非常に困難である。さらに複数台の製作を考慮する場合、同様の長さで異なる性能のアンジュレータを、長さの総和として 400 m 以上 ($428 \text{ m}=6 \text{ m} \times 3+70 \text{ m} \times 3+100 \text{ m} \times 2$) 製作しなければならないので、それらを各々独立に建設するのは経費面から見ても、立ち上げ・運転のマンパワーの面から見ても非常に不経済である。

我々は上記問題点を解決するために、挿入光源本体をいくつかのコンポーネントに分割し規格化する方針を採用することにした。具体的には、(1) 5.4 m 長の共通ベース上に 1.8 m 長の規格化された 3 台のユニットアンジュレータを設置し、各ユニットが干渉することなくアンジュレータ磁石列の同軸性・平行性を達成できるようにすること、および(2)各ユニットアンジュレータに異なる周期長を持つ磁石列を装着する方式を確立することである。70 m から 100 m の長さを持つアンジュレータについては、この 5.4 m 長アンジュレータを連結することにより同一方式で建設可能となる。

このような方針に則った永久磁石型アンジュレータの製作技術を確立するため、1992 年度から

我々は、短尺アンジュレータ・プロトタイプ（以下 XU#MR0 と呼ぶ）の製作を行った³⁾。完成した XU#MR0 の構造を図 3 に示す。このアンジュレータの磁気回路には鉄心を使用しないピュア型（磁場の周期長 $\lambda_u = 4.5$ cm, 周期数 $N = 120$; 磁石素材の残留磁束密度 $B_r = 12.8$ kG, 保磁力 $iH_c = 17$ kOe）を採用し、磁場の電子ビームへの印加方式としては、通常のアンジュレータで使われる out-of-vacuum 方式（電子ビームが通過する真空槽の外側から磁場を印加する）を採用した。XU#MR0 の基本パラメータを表 1 に示した。

XU#MR0 の設計にあたり、我々は、以下の技術的目標を設定して、上記問題点の解決を図った。

A) ユニットアンジュレータ内の精度・剛性：

各ユニットアンジュレータが単体として十分な剛性・精度を持つことは、この方式の挿入光源製作において基本的に重要な問題である。アンジュレータにおいて特に重要な部分である磁石取り付けガーダーの剛性を最適化して磁石の引き付け力による歪みを許容値内に抑えるために、ガーダー

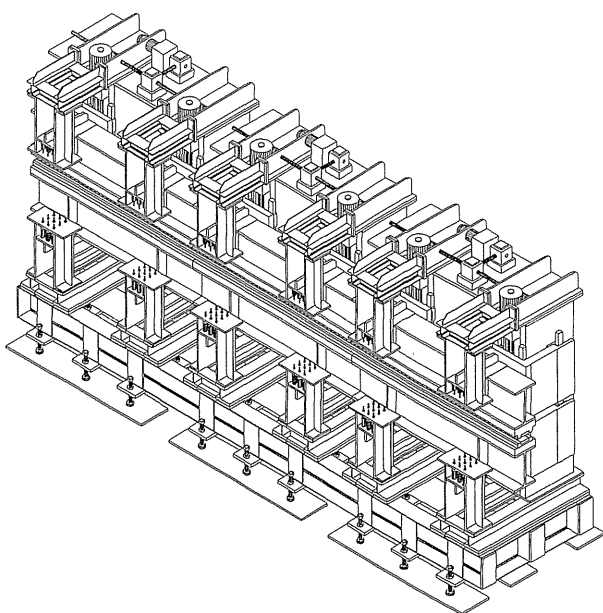


Figure 3. Structure of the XU#MR0.

Table 1. Basic parameters of the XU#MR0.

Magnetic structure	Pure configuration
Magnet material	NdFeB (NEOMAX41H)
Period length	$\lambda_u = 4.5$ cm
Number of periods	120 (40/unit undulator \times 3)
Magnet length	5.4 m (1.8 m/unit undulator \times 3)
Maximum B	B = 2.64 kG
Maximum K	K = 1.11
Minimum gap	3 cm

にかかる最大の引力を見極めなければならない。図 4 は、アンジュレータの磁場周期長 λ_u の関数として表した、磁石間ギャップが 3 cm の場合の磁場強度（太線）を示している。TSLF では、第 3 または第 4 世代光源としてアンジュレータのみを考慮の対象としている。もしもアンジュレータ放射として、5 よりも小さな K パラメータのみを許すとすれば、長い周期長が強い磁場を与えるにもかかわらず、最大磁場は、 $\lambda_u = 8.3$ cm の時の 6.5 kG に制限されることがわかる。長さ 1.8 m 磁石列長（磁石幅 9 cm）の場合、この時のガーダーにかかる最大引力は 1400 kgf. となり、高さ 35 cm のガーダーを使用すればその磁石引力による歪みは λ_u の値に拘わらず $1 \mu\text{m}$ 以下に抑制することができる。

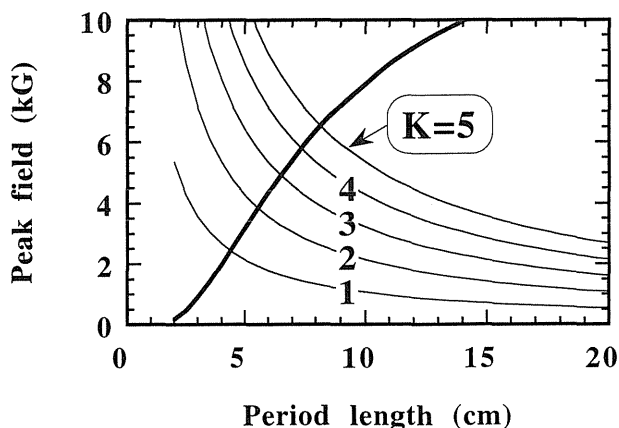


Figure 4. Maximum magnetic field given as a function of λ_u (a bold line). The relations of the magnetic field and λ_u with a constant K value are also shown (thin lines).

B) ユニットアンジュレータの規格化:

各ユニット相互の同一性・不干渉性が必要である。各ユニットアンジュレータは、機械的に磁石ギャップの送りまで同一となるように製作できる技術を確立した。

C) 周期長 λ_u の選択性:

磁石寸法を切りの良い値にして、かつ選択性を持たせるために、ユニットアンジュレータ (の磁石列) の長さを異なる λ_u に対してできる限り可約となるように選定することが必要になる。表 1 に示したユニットアンジュレータ長 (=1.8 m) はこの観点から決定された。XU#MR0 の場合、4 から 12 cm の周期長領域ではつぎの 12 通りの λ_u が選択可能となる: $\lambda_u=4.0, 4.5, 4.8, 5.0, 6.0, 7.2, 7.5, 8.0, 9.0, 9.6, 10.0$, および 12.0 cm。

D) 磁石の取り付け法:

同一のアンジュレータ機械部に異なる λ_u の磁石を取り付けるために、磁石取り付けガードに磁石列取り付け用スペーサー (λ_u に対応した取り付け穴を持つ) を装着した。

E) アライメント法:

短尺アンジュレータの共通ベース上に各ユニットを同軸性・不干渉性を保ちつつ、十分な精度で配置する方法を確立した (項目 B と関連)。

さらに、ユニット化とは別の問題であるが、挿入光源運転の自由度をできる限り大きくするために、次の目標を設定した。

F) 磁石列の片持ち支持法の採用:

加速器の真空を破らずに挿入光源本体の現場設置・取り外しを可能にするため、本体構造として装置軸方向から見て“C”の字型の片持ち支持方式を採用した。この方式では対向磁石面間の平行性を確保することが難しくなるが、これを解決するために、特殊な荷重-ストローク関係を持つバネシステム⁴⁾を C の字型本体の開いた側から磁石列に装着して、“矯正”を行った。このバネシステムは複数のバネを用い、より強いバネを狭いギャップで働かせることによって、図 5 に示した荷

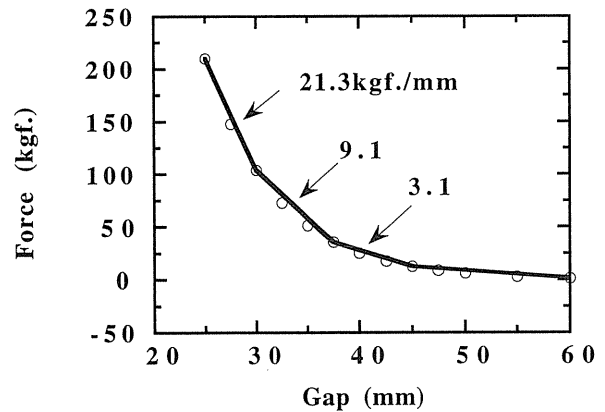


Figure 5. Load (circles) required for the parallelism of the opposing magnets can be supported by the spring system if it has an effective force-gap relation, indicated by the bold line with effective spring constants (given in the figure).

重-ギャップ関係を実現し、ギャップに対して指数関数的に増減する磁石吸引力を相殺できるものになっている。

G) In-vacuum 方式への対応可能性:

大型真空槽、および磁石列のビーム軸方向摺動機構の設置を考慮した本体設計とする。高エネルギー物理学研究所・Tristan AR に設置した U#NE3 真空封止型アンジュレータの成功において示されたように⁵⁻⁷⁾, in-vacuum 方式を採用できることによって得られる利点は、挿入光源を設置すべき加速器の運転上の自由度が、いわゆる通常型挿入光源設置の場合に比べて著しく増加することである。これは、磁石列を加速器の真空内に持ち込むことによって電子ビームに対する開口 (=ギャップ) を自由に設定できるからである。この方式は TSLF のような低エミッタンスリングで要求される高度かつ繊細な加速器調整に対してますます重要になる。

XU#MR0 の磁場最適化は、ホール素子による精密磁場測定に基づき、その結果求めた電子軌道を理想的サイン曲線にできる限り近づけるという方法で行った。磁場の補正は、調整初期の段階では平均より強度の高い磁場を持つ磁極の磁石を弱い磁極の磁石と交換することによって行い、より

微調整の段階では、ディスク状の磁石チップを用いて各極の磁場のばらつきを抑えた：ギャップ＝30 mm ($K=1.1$, 図6参照)。その目的で各々の磁石ホルダーには、チップを収納するための小孔を設けてある³⁾。

磁場最適化の条件として次のものを採用した。

$$\theta_{def} \leq \sigma'_r = \sqrt{\lambda/N\lambda_u},$$

$$\delta \leq \sigma_r = \sqrt{\lambda N\lambda_u}/4\pi.$$

上式は一電子からの放射(波長 λ)が理想的な空間コヒーレンス(放射の角度発散 σ'_r , および光源サイズ σ_r)を持つために、電子軌道が満たすべき、サイン型軌道包絡線の折れ曲がり角度 θ_{def} , および段差 δ に対する条件である。我々は、XU#MR0設計の前提として、その1次光が⁵⁷Feの核共鳴エネルギー14.4 keV ($\lambda=0.86$ Å, つまり $\sigma'_r=4$ μ rad および $\sigma_r=1.8$ μ m)をカバーできることとしたので、 θ_{def} および δ の許容値は、各々4 μ rad および1.8 μ mという非常に小さな値になる。結果を図6に示した(各極毎の磁場のばらつきで表現すると、 $\Delta B/B=0.19\%$)。最適化の結果は非常に良好であり、 θ_{def} は14.4 keV放射に対する許容値の1/20程度に抑えられている：別の言葉で言えば上のコヒーレンス条件が $\lambda=0.002$ Åまで満たされることを意味する。

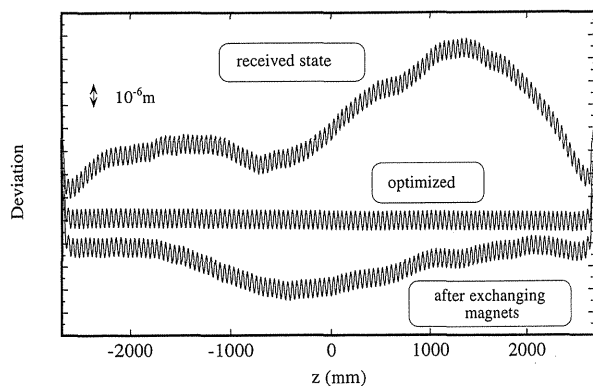


Figure 6. Electron orbit in the XU#MR0 when $K=1.1$. It was adjusted by exchanging magnets from its received state, and finally optimized by using magnet chips.

3. TSLF 高輝度実験のための XU#MR0 の改造

はじめに述べたように我々は、1995年秋に行った高輝度放射光実験のための実用光源として、XU#MR0を使用した。このためのMRラティスの改造は改造部分を最小限に抑えているためTSLF本来の計画に比べれば十分なものとはいえないが、 $E_B=10$ GeVの時に $\epsilon_0=5$ nm \cdot radian ($\kappa=0.02$)という低エミッタンス⁸⁾を目標通り達成することができれば、 3×10^{18} 光子/sec/mm²/mrad²/0.1%バンド幅という非常に高輝度の放射を生成することができる(図2参照)。図7には、この実験において使われたMRの二つの運転モード($E_B=8$ および10 GeV : $I_B=10$ mA)で期待できるXU#MR0からの放射輝度を示した(図中nは放射の次数)。

しかし、このラティスで挿入光源の設置場所として使用可能な部分はMRのアーチ部に属しており、本来MRの長直線部に設置する方針で設計した上述のXU#MR0のビーム軸高さはこの部分に適合しない。我々はこの問題を解決するために、XU#MR0の共通ベースを100 mm高のものに作り替える改造を行った(旧型は500 mm高)。この改造(XU#MR0のビーム高さを1100 mm

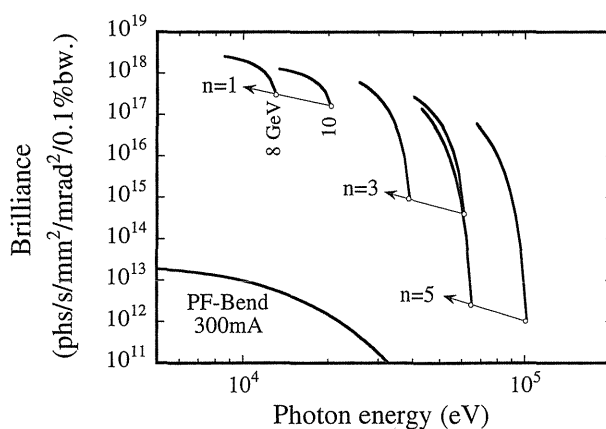


Figure 7. Brilliance of radiation from the XU#MR0 in the cases of 8- and 10-GeV operation of the MR with a beam current of 10 mA. Each curve shows the locus of the peak position of the n-th harmonic when K decreases from its maximum.

まで減少させることができるが、MR アーク部のビーム高さは900 mm なので、床面をさらに200 mm 掘り下げる必要がある。)は、第2節の磁場調整後、各ユニットアンジュレータの連結を解いて新しい共通ベース上に再設置する過程を含む。しかし、各ユニットの連結部にこの過程で生じるかもしれない磁場不整は、設置の機械精度を十分に高めることで無視できる程度のものに抑えられることが確認できた(図8参照)。このことは長尺アンジュレータ建設の際にも、全体長についての磁場測定・調整を行わずに、最小で2台連結したユニットについて磁場調整を行いつつ、調整のすんだものから順次加速器内に設置できることを示しており、実際上大変有効である。

4. XU#MR0 の MR への設置と放射の評価実験

MR ラティス改造、放射光ビームライン設置、および上記の掘り下げ工事を含めた XU#MR0 の設置は、1995年6月15日の高エネルギー実験終了日から9月18日までの3ヶ月間に行った。非常に過密なスケジュールではあったが、無事故で予定された全工程を達成することができた。MR に設置完了後の XU#MR0 とビームラインの状況を上流側から見おろした写真として図9に示した。

9月18日にMR運転を開始し、9月20日のビ

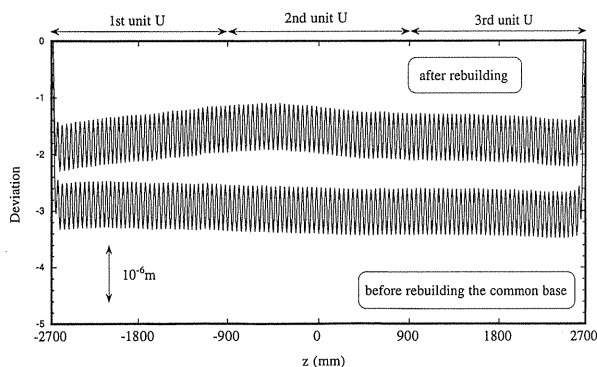


Figure 8. Magnetic field in the XU#MR0 before and after of the rearrangement of its unit undulators.

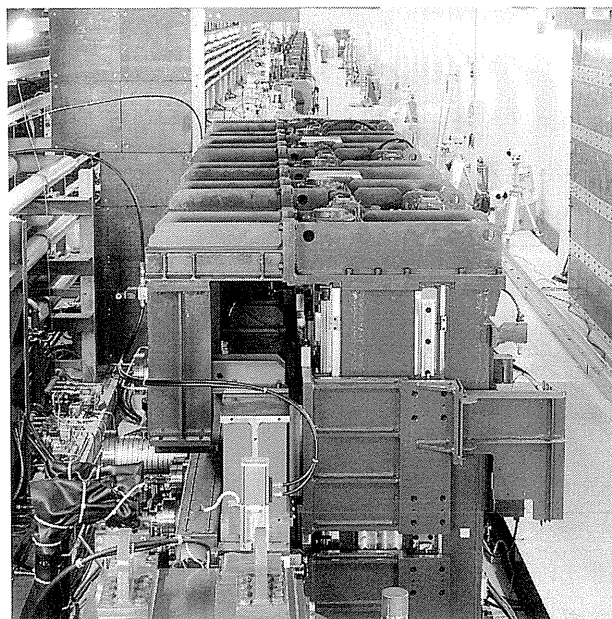


Figure 9. Photograph of the XU#MR0 after installation: view from upstream along the photon beam axis.

ーム蓄積後直ちにモノクロメータ第1結晶までの光軸出しに成功した。XU#MR0は、その後のモノクロメータの立ち上げ、および各利用実験のための光源として、12月27日の運転終了まで安定した光供給を行った⁹⁾：運転はおもに $E_B=8$ および10 GeV において行われた(図7参照)。

光源としての性能達成は、加速器グループとの共同のマシINSTAディを中心にしておこなった。放射の評価実験は、電子ビームの y 方向角度発散 σ'_y の測定とスペクトル測定の二通りについて行った。実験時間全体が不足していることから、比較的測定の容易な σ'_y の値を用いて加速器運転へのフィードバックを行った。スペクトル測定については実験期間の一番最後に割り当てざるを得なくなったことは非常に残念であった。

4.1 角度発散 σ'_y の測定

実験開始当初、放射輝度が期待値を一桁程度も下回るといふ指摘があったため¹⁰⁾、放射の診断として2結晶分光器による電子ビームの y 方向角度発散 σ'_y 測定¹¹⁾を行った。この時、 σ'_y が目標値の4~8倍(17~25 μrad 程度)の値を取るこ

とが大きな問題であったが、加速器側の精力的な運転パラメータの探索、およびその後判明した σ'_y の電流依存性の除去の結果、10 μrad 程度まで押さえ込むことが可能になった。

一方で、XU#MR0 のギャップの開閉（磁場強度の増減）によって σ'_y が変動することが判明した¹¹⁾。このことは、挿入光源設置点における磁場の x 成分がゼロでないために電子ビームが y 方向のキックを受けるためである：はじめは上記の 20 μrad 程度の σ'_y の殆どがこのことに起因するとの疑いもあったが、最終的には数 μrad 以下であることがわかった。原因としては挿入光源の不整な水平磁場または環境磁場水平成分の存在等が考えられるが、いずれにしても、このことは光の発散が小さく（数 μrad 以下）かつ電子ビームの (y 方向) 角度発散がそれとほぼ等しい（回折限界に達している）TSLF 光源のような第3世代光源が、目標の輝度を達成するために非常に重要な問題であり、解決策は第3および第4世代光源全体にとって意義のあるものとなる。この問題の解決のために我々は挿入光源中心軸に沿って x および y 両方向の一樣磁場を発生させる空芯コイルを設置し、 σ'_y を最適化できることを示した¹¹⁾。上記の長尺アンジュレータ設計法とあわせて第3世代以後の光源にとっての基本的技術となるであろう。

4.2 スペクトルの測定

光源性能として最も重要なスペクトル評価を約 13 keV の光子エネルギーにおいて行った。この時は、非常に小さな開口を持つ X-Y スリット (0.2 mm \times 0.2 mm) によって軸上の放射を制限しているので光束密度を測定している¹¹⁾。Tristan AR における U#NE3 真空封止型アンジュレータについても我々は同様のスペクトル絶対測定⁷⁾を行ったがその時との主な相違点は、今回の場合は測定を行った全エネルギー領域において校正された PIN・フォトダイオードを検出器と

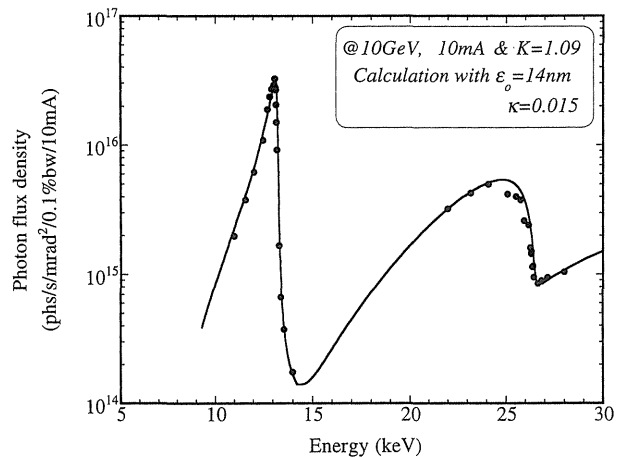


Figure 10. Photon flux density of the radiation from the XU#MR0 with $K=1.09$ (the first harmonic energy is 13.1 keV) when the MR is operated at 10 GeV and 10 mA. The solid circles indicate the observed results and the solid curve indicates the result of a calculation made with $\varepsilon_0=14$ nm and $\kappa=0.015$.

して使用しているのに対して、U#NE3 の場合は ^{57}Fe の核共鳴光子という特殊な光子（エネルギー = 14.4 keV）のみを励起する光学系を用いその光子の数を正確に測定する検出器を使用している点である。

図10は、この測定系を使用して求めた放射の光束密度（黒丸）を示している：アンジュレータの偏向パラメータ $K=1.09$ （一次光のエネルギー $\varepsilon_1=13.1$ keV）、および運転エネルギー $E_B=10$ GeV であり、ビーム電流値は $I_B=10$ mA に規格化してある。ここで用いた $K=1.09$ という値は、2 結晶分光器が測定時に許容したエネルギー帯域に放射スペクトルの各次の主要部分が収まるように選ばれた。またこの時、発光点から 100 m 先の検出器までの各種窓（不純物を含めて）、ヘリウムガス、および大気による吸収効果、各分光結晶の反射効率およびバンド幅の効果は全て補正してある。

実現された一次光の光束密度は、 3.3×10^{16} 光子/sec/mrad²/0.1%バンド幅であり、目標のビーム性能が達成された場合のその約二分の一である。しかし、我々は、短期間ではあったが、今回

の実験を遂行できたことによって、MR では難しくなった第4世代放射光源実現への道を模索し光源開発の基礎的な技術を蓄積するとともに、非常に輝度の高い光によって初めて可能になる科学についての端緒を開くことができたと考えている。

参考文献

- 1) The Tristan Super Light Facility: Conceptual design report 1992, KEK progress report 1992-1 (1993).
- 2) H. Kitamura, S. Yamamoto and S. Kamada: Rev. Sci. Instrum. **60**, 1407 (1989).
- 3) S. Yamamoto et al.: Rev. Sci. Instrum. **66**, 1996 (1995).
- 4) S. Yamamoto: PF Activity Report 1990, R-11 (1991).
- 5) S. Yamamoto: PF Activity Report 1989, R-16 (1990).
- 6) S. Yamamoto et al.: Rev. Sci. Instrum. **63**, 400 (1992).
- 7) S. Yamamoto et al.: J. Appl. Phys. **74**, 500 (1993).
- 8) S. Kamada et al.: Rev. Sci. Instrum. **66**, 1913 (1995), 鎌田 進, 「MR 放射光総合報告会」報告書, KEK Proceedings 96-8, p3, および放射光 10, No. 2 (本号).
- 9) S. Yamamoto et al.: J. Synch. Rad., 4, in press (1997).
- 10) 八木直人および若林克三, 私信
- 11) 杉山 弘: 「MR 放射光総合報告会」報告書, KEK Proceedings 96-8, p88, および放射光 10, No. 2 (本号).