

2001年2月28日  
独立行政法人 理化学研究所

## 世界最強の高輝度放射光源誕生

### - SPring-8 の性能を飛躍的に高める新技術 -

理化学研究所（小林俊一理事長）は、世界最高輝度の放射光を発生する長尺型のアンジュレータを完成させ、このほど試運転に成功しました。長尺型アンジュレータは、理研播磨研究所 X 線超放射物理学研究室の北村英男主任研究員と、同研究所 X 線干涉光学研究室の石川哲也主任研究員が中心となり開発、兵庫県播磨科学公園都市に建設された大型放射光施設 SPring-8 の蓄積リングに設置されました。

長尺型アンジュレータの装置長は、世界最大の 27m（磁石長 25m）でこれまでの装置の約 5 倍あります。発生する X 線の輝度は、光子エネルギーが 40keV の場合、SPring-8 の既存のアンジュレータ（磁石長 4.5m）よりも約 3 倍高く、SPring-8 と同じ第三世代大型放射光施設で使用されている欧米の装置に比べても、一桁強度が高くなっています。また X 線波長（光子エネルギー）を可変できることも大きな特徴です。

本装置で得られる高度に干渉した X 線は、各種イメージング手法\*1 に絶大な威力を発揮します。さらに、この開発過程で得られた光源技術は、次世代の放射光源といわれるオングストローム領域\*2 の X 線自由電子レーザーの早期実現を促すものです。

## 1. 背景

SPring-8 は、挿入光源としてレーザーに近い性質を持つ高輝度 X 線\*3 を発生できるアンジュレータを多数設置できるように設計された第 3 世代\*4 の大型放射光施設です。アンジュレータは、加速器の偏向電磁石間の直線部分に N および S 磁極をハーモニカのように上下に配置し、その間をすり抜ける電子ビームを蛇行させることで、その運動方向を変え、高輝度の放射光を発生させます。既存のアンジュレータの装置長は、長くても 5m 程度しかありません。ところが、SPring-8 ではその設計段階（1990 年）から、第 3 世代の次に到来する第 4 世代放射光源を展望しており、20m を越える装置長を持つアンジュレータの設置が可能となっています。

次世代の第 4 世代放射光源とは、第 3 世代放射光源の特質に極短パルス特性\*5 を持たせたもので、短い時間に干渉性に優れた X 線が大強度で得られるような光源です。この光源は、レーザーの特質をすべて備えていることから、X 線自由電子レーザーと呼ばれており、これを実現するための大前提として高性能加速器と 20m を越える長尺型のアンジュレータが必要となります。今回の開発はこの考えに沿って開発、製作されたものです。

## 2. 開発経過

アンジュレータの長さを増やしていくと、電子の蛇行回数が増えるため理論上は、X 線の輝度特性が飛躍的に向上します。しかし、実際には期待したほどの性能が得られないことが多いのが事実です。理論値に達する性能を得るためには、工学上の

多くの問題点を解決しなければなりません。

本研究で製作したアンジュレータの装置長は 27m。電子ビームを蛇行させるための永久磁石部の長さは 25m となっており、磁場周期長を 32mm に設計したことにより蛇行の繰り返し数（周期数）は 780 回となります。これほどまでに長いアンジュレータは、今まで建設されたことがありません。従来の考え方では、5m 毎に装置を分割することが推奨されていました。しかし、分割によって磁石列にすき間ができるため、放射光性能が著しく低下することが問題になっています。これを避けるために本研究では、わが国独自の技術である真空封止アンジュレータ技術を投入しました（図 2）。この結果、25m にわたって切れ目のない磁石列を実現することができました。

もうひとつの重要な技術は、完全に近い周期磁場をつくることです。これにエラーが存在すると正確な蛇行運動が期待できなくなり、結果として放射光性能が劣化することになります。本装置では、世界最高水準の磁場評価技術を適用することにより、理論値に近い放射光性能を得ることができました。図 3 は、SPring-8 直線部に設置した 27m アンジュレータの写真です。

### 3. 性能評価

性能評価を行うために、本装置で発生した高輝度 X 線のスペクトルを測定しました。光子エネルギー 18.8keV（波長 0.66 オングストローム）が得られるよう磁石ギャップを 50mm にしたところ、図 4 の赤色曲線で示すスペクトルが得られました。しかし、黒色曲線で示した理論値と比較して、“光子エネルギー位置がずれている”、“光強度が不足している”、“スペクトル幅が広い”という結果が得られました。そこで 27m アンジュレータ全体に 0.1 ガウスの一様磁場を与えたところ、緑色曲線で示すように理論値にほぼ一致する結果が得られました。

このような現象がみられた主たる原因は、地磁気（0.5 ガウス程度）の方向性であることが判明しました。これは、本装置の磁場調整を行った方向と、最終的に設置した方向とに 90°の違いがあったためです。今まで、地磁気がアンジュレータのスペクトルに影響を与えたという例は報告されたことがありません。それだけに、このアンジュレータが高度に調整されていることを物語っております。

図 5 は、第 1 次光の光子エネルギーが 7.5keV（1.7 オングストローム）となるよう、磁石ギャップを 12mm にしたときに得られたスペクトルです。第 1 次光以外に、第 3 次光と第 5 次光の鋭いスペクトルピークが 22keV（0.56 オングストローム）、37.5keV（0.33 オングストローム）で得られています。

図 6 は、アンジュレータから発生する X 線の輝度を表しています。光子エネルギーが 10keV の場合、27m アンジュレータは  $9 \times 10^{20}$ （単位：光子数/sec/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup> in 0.1% b.w.）、SPring-8 の 4.5m アンジュレータでは  $2.3 \times 10^{20}$ 、欧州共同の ESRF の 5m アンジュレータでは  $1.7 \times 10^{20}$  となっております。さらに、40keV の場合、27m アンジュレータは  $2.2 \times 10^{20}$ 、4.5m アンジュレータ（SPring-8）は  $7 \times 10^{19}$ 、ESRF では  $1.7 \times 10^{19}$  となっております。

#### 4. 性能評価

SPring-8の光源性能は、標準長(4.5m)のアンジュレータだけでもすでに世界トップの位置にあります。供用開始以来3年以上の歳月を経ましたが、この間、高輝度X線を利用する科学分野は大きく前進しました。その一方、干渉性に優れたX線の利用が生命線となっているイメージング分野や、空間的にも時間的にも高密度のX線を必要とする非線形光学などの研究分野では、光強度の不足が指摘されています。しかし、本研究で開発した27mアンジュレータが発生する超高輝度領域のX線は、SPring-8標準型に比べても格段に優れており、これらの科学分野の要望に十分対応できるものとして大きな期待が寄せられております。

さらに、本開発の過程で得られた高精度の長尺アンジュレータ技術は、新世代光源を実現するための大前提であり、第4世代放射光源といわれるオングストローム領域のX線自由電子レーザーの早期実現を促すものともいえます。

(問い合わせ先)

独立行政法人理化学研究所

播磨研究所 X線超放射物理学研究室

主任研究員 北村 英男

Tel : 0791-58-2832 / Fax : 0791-58-2810

播磨研究所 研究推進部

西村 勇人

Tel : 0791-58-0900 / Fax : 0791-58-0800

(報道担当)

独立行政法人理化学研究所 広報室

嶋田 庸嗣

Tel : 048-467-9272 / Fax : 048-462-4715

#### <補足説明>

##### ※1 イメージング手法

超平行X線が必要な屈折イメージング、干渉性に優れた(位相のそろった)X線ビームが必要な位相コントラストイメージングとX線ホログラフィーイメージングなどの先端的結像手法。いずれも医学、生命科学および材料・電子デバイス分野で重要な手法となることが期待されている。

##### ※2 オングストローム領域

X線の波長領域の定義は科学分野によって異なる。構造解析を手法とする科学分野では、波長2オングストローム以下をX線と呼ぶのに対して、レーザー科学分野では100オングストローム、あるいは1000オングストローム以下をX線と呼ぶことがある。オングストローム領域のX線とは、1オングストローム付近あるいはそれ以下の波長をもつ正真正銘のX線に限定される。

### ※3 高輝度 X 線

レーザーのような空間的特性（小さなビーム径と優れた平行性）をもつ X 線。これに対し医学用 X 線発生装置は、完全無指向性 X 線光源。高輝度 X 線の特徴は微小面積に干渉性に優れた大強度の X 線ビームを得ることができる。

### ※4 第 3 世代放射光施設

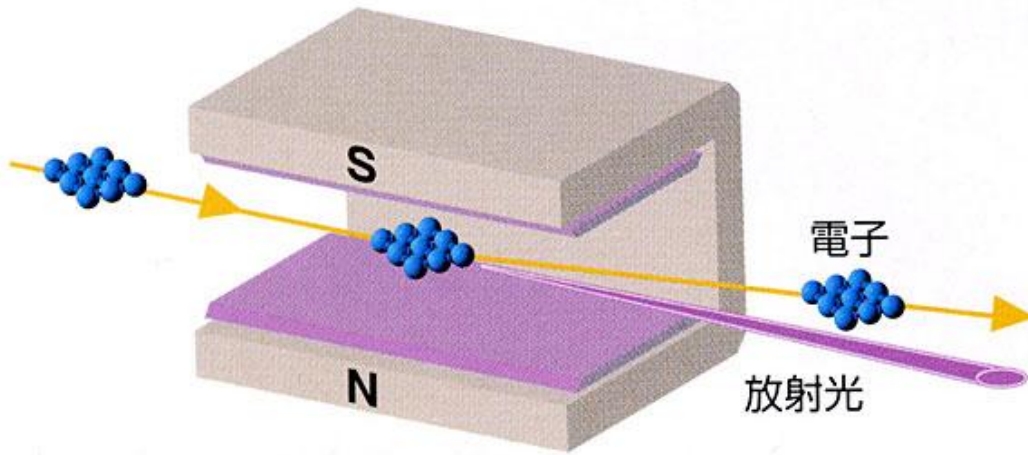
現存する放射光施設は以下の 3 つのカテゴリーに分類される。

1. 第 1 代放射光:素粒子実験用に建設した電子蓄積リングから副産物として得られる放射光を寄生的に利用、あるいは後に放射光専用に転用したもの
2. 第 2 代放射光:光利用のために建設した電子蓄積リングであるが今や古典的ともいえる偏向部放射光利用を主力とするもの
3. 第 3 世代放射光:挿入光源（特にアンジュレータ）に最適化した電子蓄積リングで干渉性に優れた高輝度放射光を発生するもの。

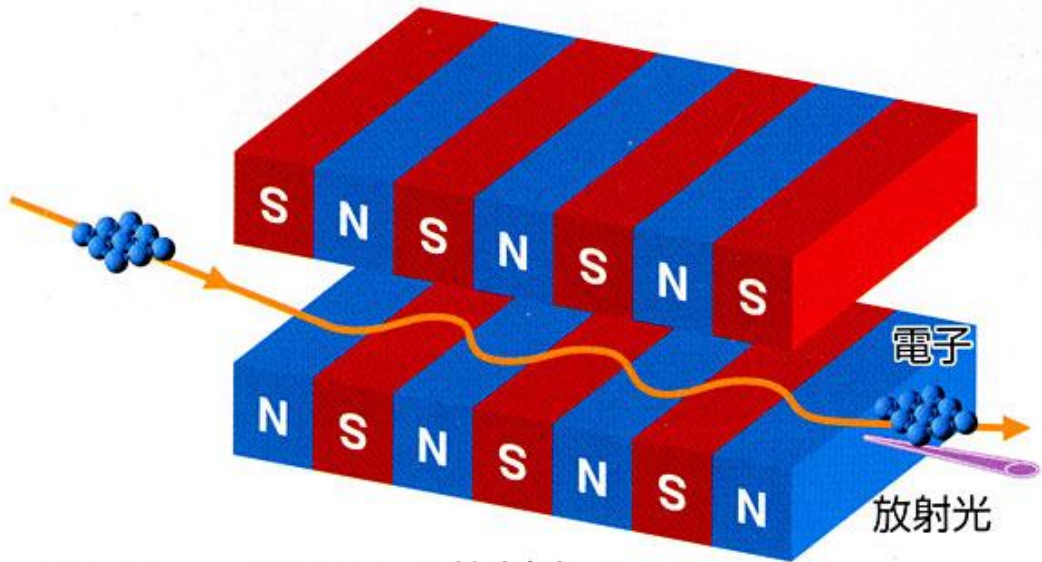
米国スタンフォード大学の SSRL は現存する数少ない 1. のカテゴリーに属する施設。2. に属する施設は世界各国で活躍しているが、代表的なものでは最初の放射光専用リングである東大物性研の SOR-RING (運用終了)、筑波のフォトンファクトリー、米国ブルックヘブン研究所の NSLS などがある。一方、3. のカテゴリーに属する施設は X 線領域に限定すると、欧州共同の ESRF、米国アルゴンヌ研究所の APS、そして SPring-8 がある。

### ※5 極短パルス特性

放射光は、決して直流的な光ではなく必ずパルス光の列として得られる。その典型的なパルス幅は加速器によって異なるが短くても 50 ピコ秒程度である（1 ピコ秒は 10<sup>-12</sup> 秒）。これを通常のパルス特性とすると極短パルス特性とは、極めて短いパルス幅（0.1 ピコ秒以下）をもつ光の特性のことをいう。複数の光子が同位置に同時到着するが可能性が期待されることから非線形光学分野にとって欠くことのできない光の性質。



▲偏向電磁石からの放射光

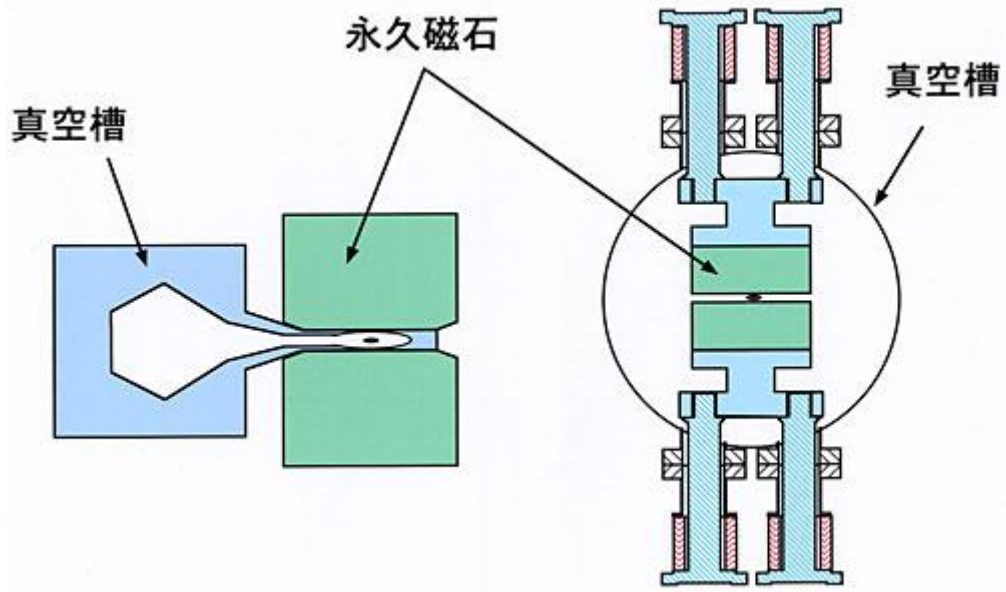


アンジュレータからの放射光▲

図1 アンジュレータの原理

上図:偏向電磁石からの放射光。高エネルギー電子ビームが一様な磁場で偏向を受けるときに接線方向に発生する放射。そのスペクトルは遠赤外領域から X 線領域まで広い波長領域において連続的な分布を示す。

下図:アンジュレータからの放射。周期的に極性が交代する磁石列によって電子ビームが蛇行運動するとき発生する放射。蛇行回数(周期数)を増やすことによってさらに高輝度の放射光を得ることができる。そのスペクトルは特定の狭い波長領域に分布が集中している(単色光)。通常、磁石材料としては希土類永久磁石が使用される。



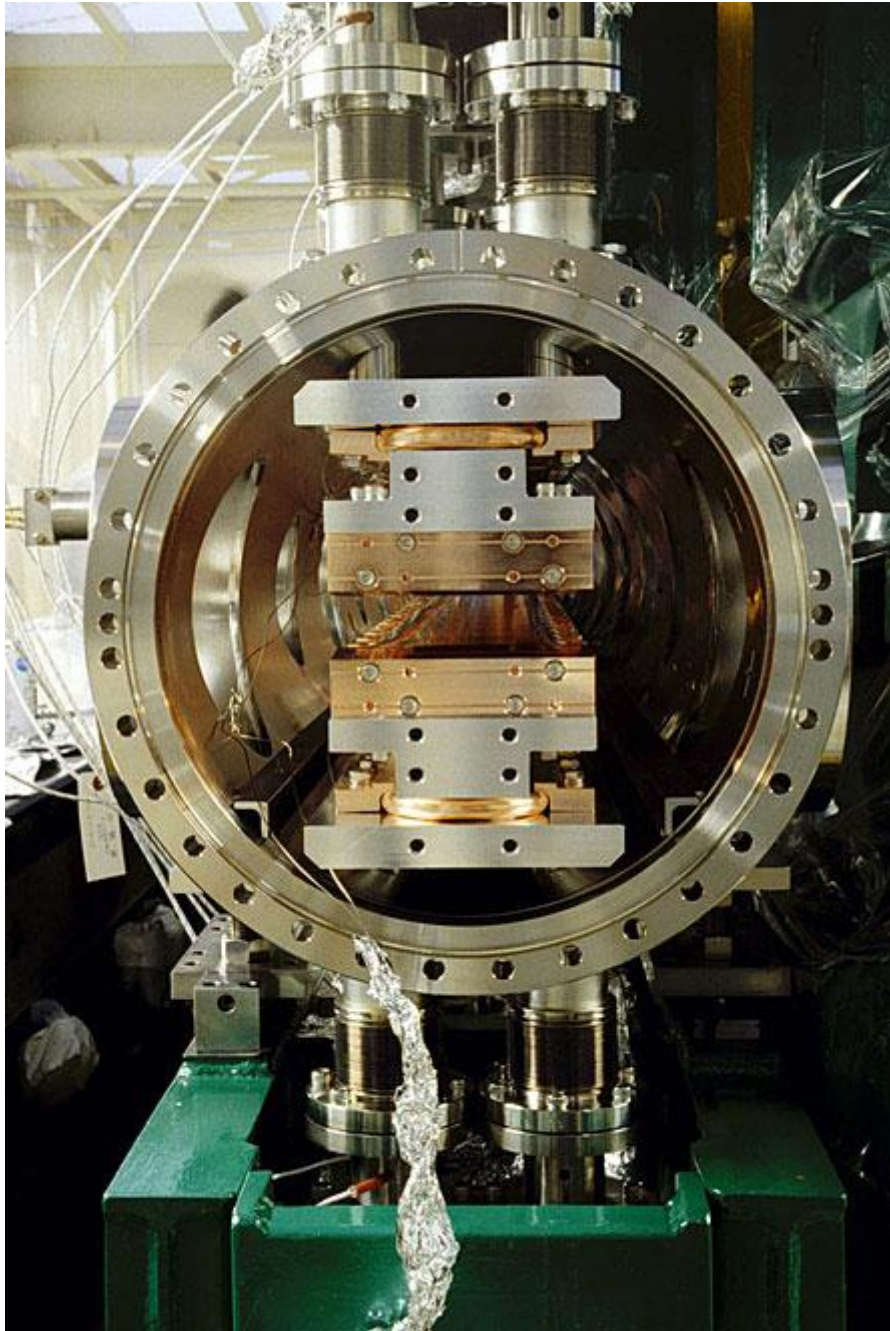


図2 真空封止アンジュレータの原理

左図:従来型アンジュレータの断面図。永久磁石列のギャップ内に真空槽が設置されている。電子ビームと永久磁石列の間に真空槽の金属板が存在するので狭いギャップが実現できない。

右図:真空封止アンジュレータの断面図。真空槽の中に永久磁石列が置かれている。電子ビームと永久磁石列の間に障害物が存在しないので狭いギャップを得ることができる。その結果として、周期長の短いアンジュレータの設計が可能となる。

下図:真空封止アンジュレータの例 (SPring-8)

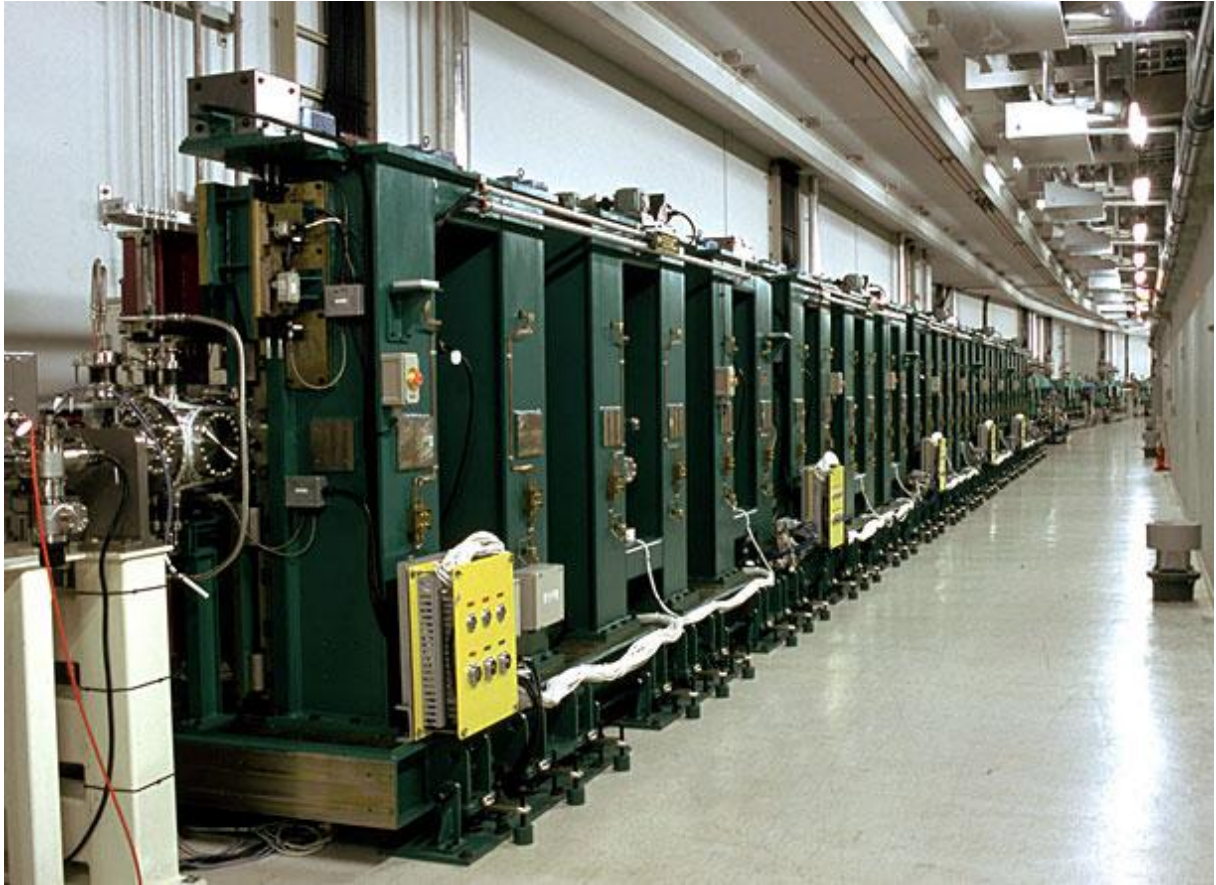


図3 SPring-8蓄積リングの直線部に設置した27mアンジュレータ全装置長は27m、永久磁石長は25m、周期長は32mm、周期数は780、最大磁場はギャップ12mmのとき5700ガウス。



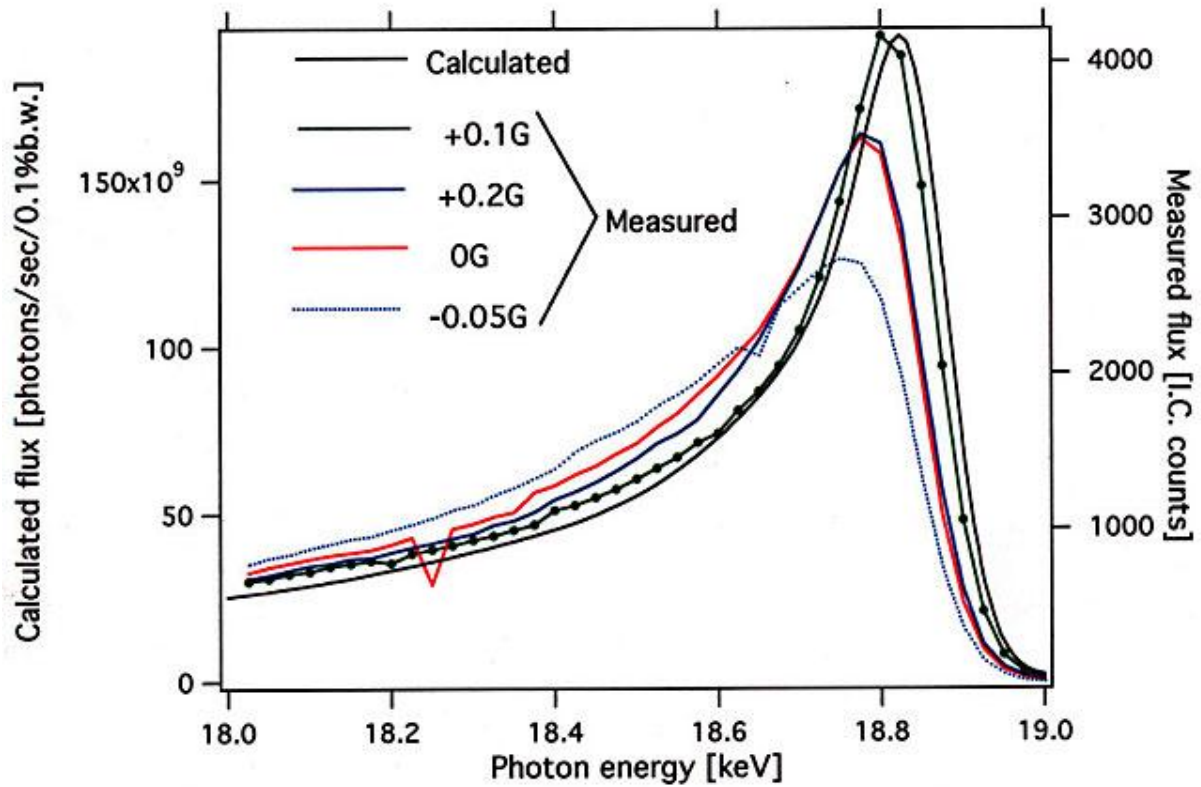


図4 X線スペクトルへの地磁気の影響

27m アンジュレータの磁石ギャップを 50mm に設定。光子エネルギー18.8keV（波長 0.66 オングストローム）において第1次光が得られる。当初は赤色曲線で示すスペクトルが得られた。しかし、黒色曲線で示した理論値と比較してみると光子エネルギー位置がずれている、光強度が不足している、そしてスペクトル幅が広い。そこで27m アンジュレータ全体に 0.1 ガウスの一様磁場を補正磁場として与えたところ緑色曲線で示すように理論値にほぼ一致する結果が得られた。さらに計 0.2 ガウスの一様磁場を与えたところ過補正となり補正前のスペクトルに戻ってしまった。

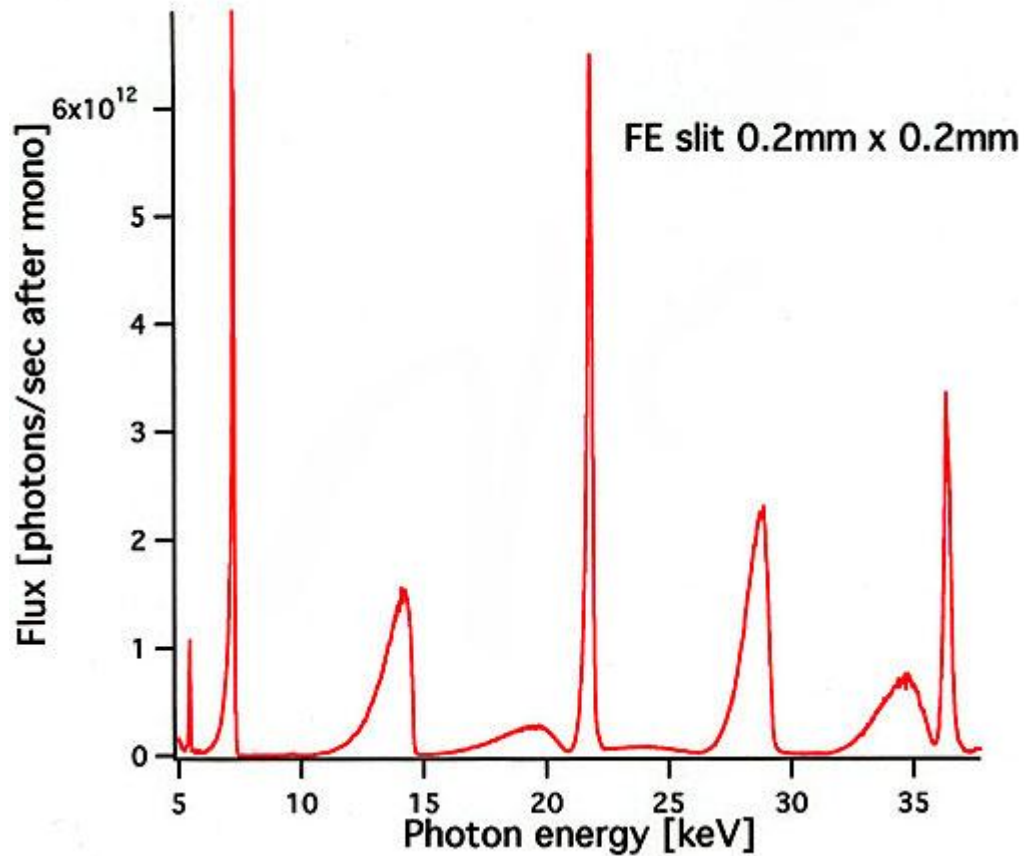


図5 27m アンジュレータから得られた X 線のスペクトル。

第1次光の光子エネルギーが7.5keV (1.7 オングストローム) となるよう磁石ギャップを12mmにしたときに得られたスペクトル。第1次光以外に第3次光と第5次光の鋭いスペクトルピークが22keV (0.56 オングストローム)、37.5keV (0.33 オングストローム) に得られている。

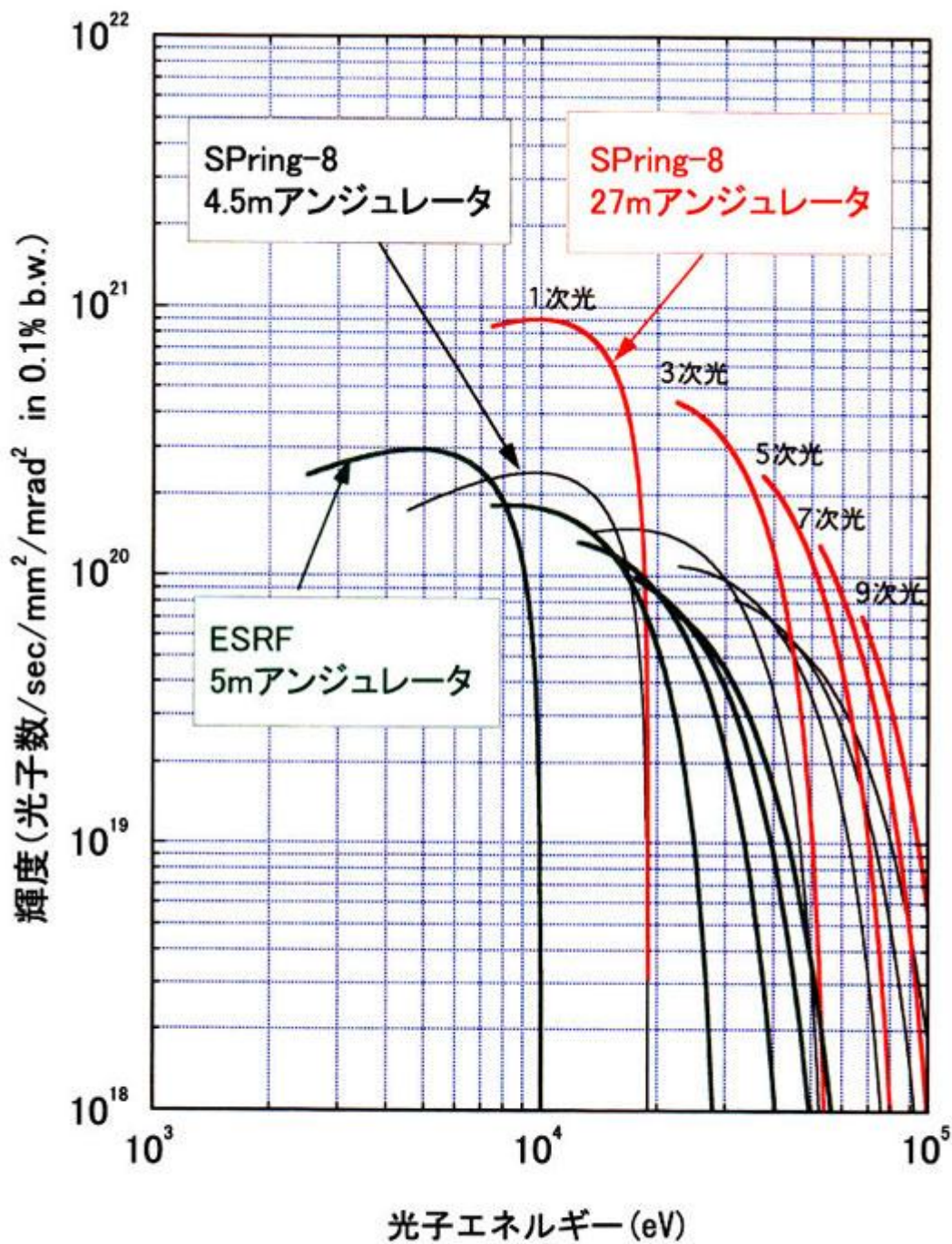


図6 他のアンジュレータとの比較