

挿入光源事始め

佐々木泰三

要旨

多重周期で極性の交代する磁石列を電子加速器の直線部に挿入して、多重発生する放射光を干渉によって輝度を増大し、指向性を高め、偏光特性を制御する装置、Unjulator（挿入光源の一つの形）は、偏向電磁石で発生する連続スペクトルの放射光に比べて多くの点で優れた特徴を持ち、早くからその特性は理論的に研究されていた。それが実用化して瞬間に普及したきっかけは1978年、Klaus HalbachとHerman Winickが永久磁石でこの装置の実用化に道を開いたことである。ちょうどその頃建設の始まったフォトン・ファクトリー（PF）にWinickがやってきてそのアイデアを伝え、実用化を勧めたのが日本での開発のきっかけになった。PFでは超伝導縦型ウィグラーを挿入する予定の長い直線部BL-16の対極に同じく長直線部BL-2があって、実用的なUnjulatorを挿入する余地があったのが幸いした。

当時PFは未だ建設途中であったので、PFの測定器研究系と光源研究系の有志がすでに運転を開始して共同利用に公開していた物性研のSOR施設に試作機PMU-1を持ち込み、Feasibility Studyと理論の検証を試みたのが1981年であった。この試験は大成功で、Undulatorの優れた特性は余すところなく実証され、技術的なノウハウも十分得られたので、直ちに実用機PMU-2の製作に着手し、PFが完成して公開を始めた1983年には完成して性能評価と共に一般公開も実施された。本稿はPFの完成30周年の祝に同じ題で行った記念講演の概要である。

1. はじめに

2012年3月15～16日、放射光実験施設、フォトン・ファクトリー（以下PF）は完成後30周年を祝い、記念のシンポジウムを開催した。この「解説」はその記念講演の一部として行った話の主な部分をまとめたものである。講演の要旨は別に「PFニュース」に掲載されるので、本稿ではなるべく重複を避け、PFニュースでは紙数の関係で割愛した図や写真を含む講演の主要部分を再現することにする。

PFは活動を開始して30年になるが、我が国の放射光研究の歴史は更に古く50年前にさかのぼり、昭和37年4月、阪大の豊中キャンパスで開催された日本物理学会の素粒子実験分科会に大阪市大の小塩・笹沼両氏が当時試運転に成功したばかりの東大原子核研究所の750 MeV電子シンクロトロン（以下ESR）の放出する軟X線のスペクトル強度の計算結果を報告したことから始まった。この結果をもとに日本全国の関心を持つユーザー・グループINS・SORが結成され、ビームラインを設置して実験を開始したのがその翌年であった。この活動を立ち上げた主要メンバーの多くがあの世に行ってしまったので、50周年を祝う行事を開催する目途も立たないのは残念だが、PFの30年と共にこの歴史にも心を馳せて頂くよう、一言注意を喚起しておきたい。

PFは周知のように、他の目的のために作られた加速器

に間借り、寄生して実験を行った第一世代の放射光研究の不便さ・不自由さから脱却して、自前の「光源加速器」をユーザー主導で建設・運営する「第二世代」の放射光研究施設である。電子シンクロトロンは電子を加速して最大エネルギーになったところで加速を止め、軌道を収縮させて真空槽内の金属標的にぶつけてガンマー線を発生する。これを繰り返し行うので、電子は何時も軌道を回っているわけではないし、入射して軌道に捕捉される電子の量も一定していない。従って光源としては安定性が良くないのが普通である。第二世代の「光源加速器」が出現する頃、高エネルギー実験に用いられる電子加速器は進化して「蓄積リング」が主流になった。これは電子を決まったエネルギーで繰り返し入射して軌道に「蓄積」するもので、安定性はシンクロトロンに比べて遥かに良い。しかし高エネルギー実験では普通電子と陽電子を別の軌道に蓄積しておいて、軌道上の一点で衝突させて対消滅によってガンマー線を発生するので、入射、蓄積と消滅が周期的に繰り返される。従ってこの場合も軌道上に何時も電子が居るわけではない。「光源加速器」として世界で初めて最初から光源として設計・建設された核研の「SOR-RING」は蓄積リングであるが、もちろん「衝突」の必要がないので、一旦蓄積された電子ビームは徐々に減衰はするが、長時間同じ軌道を周回し続け、安定性は極めて高い。既成の加速器に「寄生」していた光源の制約から脱却しただけでなく、光源としての最適化を求めて独自の進化を遂げることができた、とい

う点で加速器技術に画期的な進歩をもたらすきっかけとなった。

「光源加速器」の概念の確立とともに、更に光源の性能を画期的に飛躍させる原動力となったのが周期的な磁石列を加速器の直線部に挿入して、放射光を多重回発生して干渉させる「挿入光源」、Undulator（アンジュレーター）である。挿入光源を蓄積リングの直線部に挿入して、これを主力装置として光源の最適化、高輝度化を目指したものが第三世代の放射光施設で、我が国では SPring-8 がこれに当たる。光源技術は更にもう一段飛躍を遂げて、挿入光源の光を増幅・発振させる X 線レーザー「SACLA」が実現した。本稿は我が国でこうした「第三世代、第四世代放射光」のルーツである「挿入光源」が初めて導入、開発された経緯を伝えるのが目的である。

2. Undulator の歴史

Undulator には色々なヴァリエーションがあるが、基本形は Fig. 1 に示すようなもので、周期的に磁場の向きが交代する磁石列の中に高エネルギーの電子を走らせる。電子は磁石列の中を蛇行して繰り返し発光するが、Fig. 2 に示すように前方で見る光の波長 λ は次のような式で与えられる。

$$\lambda_n = \lambda_u / 2n\gamma^2 (1 + \gamma^2\theta^2 + K^2/2) \quad (1)$$

但し λ_u は Fig. 1 で示した磁場の周期、 γ は電子のエネルギー（静止エネルギー単位）、 θ は電子の運動の軸と観測方向の角度、 n は高調波の次数である。ここで K というのは磁場の強さを表すパラメータで、磁束密度 B を Tesla, Undulator の周期磁場の周期 λ_u を m で表わすと

$$K = 93.4B \lambda_u \quad (2)$$

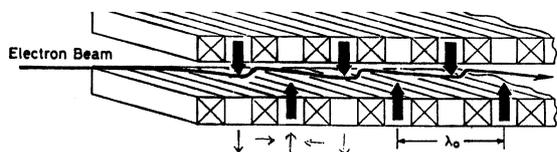


Fig. 1 Basic arrangement of permanent magnet array in an undulator.

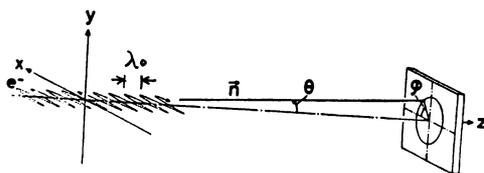


Fig. 2 Axial symmetry of undulator spectra.

となる。

電子の蛇行軌道は基本的には正弦波だが、進行方向の速度が変調を受けるため非線形成分を持ち、高調波を発生する。波長が軸対称なので、前方で見る可視光のパターンは Fig. 9 で示すように円形の虹になる。

周期的な磁場の中に電子を走らせて干渉性の発光をさせるというアイデアを最初に考えたのは Moscow 大学の V. L. Ginzburg¹⁾ で、1947年に公表している。最初に実験を試みたのは Oxford 大学の H. Motts²⁾ で、彼は1953年、Stanford 大学に行って小型の線形加速器を使ってミリ波・サブミリ波の実験を試み、原理を実証した。初期の挿入光源の目的は当時まだ適当な発光デバイスのなかった短波長の電波の発生であったが、その後半導体のデバイスが次々と登場して、このような大げさな発光方法は実用化しなかった。しかし Motts はもし GeV クラスの加速器が利用できるようなになれば、この装置が紫外・X線の光源として利用できると指摘することを忘れていない。

時代が替わって中型・大型の蓄積リングが光源として期待されるようになった1970年代には、リングの直線部にこういう周期磁場のデバイスを挿入して X 線を発生出来ないか、と色々な試みが現れた。Frascati や Trieste では電磁石を挿入する試みがあったが、何しろ電磁石はどうしても図体が大きすぎて、短い直線部では十分な周期数を確保することが難しい。一方1976年には Berkeley の Madey がダブル・ヘリックスの超伝導体コイルに線形加速器からの電子ビームを通し、両側に共振器をつけて赤外の自由電子レーザーを発振させた。この仕掛けを高エネルギーの蓄積リングに挿入して光源に出来ないか、という試みが米仏共同チームでこの後暫く追及されたが、超伝導磁石を電子軌道に接近して挿入するのは大変危険で、しばしば事故を起こして結局断念したという経緯がある。

挿入光源の実用化に決定的な転機をもたらしたのは1978年の Klaus Halbach と Herman Winick の永久磁石型 Undulator の発明で、これによって「挿入光源」は一気に実用化の機運を迎えた³⁾。Winick は大変謙虚な人で、この発明の功績を磁気回路の形を思いついた Halbach 一人の功績としているが、このアイデアの成立の過程には Winick の問題意識や経験が深く関わっているため、私はこの発明は両者の仕事と思っている。このアイデアが生まれるいきさつを私は本人の口から詳しく聞いて、このことを確信した。

Winick はそのアイデアを PF の建設中、1978年と翌年の2回にわたって日本に来て講演した。挿入光源の理論に関しては既にアメリカとソ連で多くの理論的論文が公表され、これが光源として従来用いられてきた円形加速器の放射光に比べて多くの優れた特徴を持つことが明らかになり、次世代の光源として期待されていたが、それを実現するデバイスとしては有力な方法が見つかっていなかった。Halbach・Winick の永久磁石 Undulator は極めて単純な

磁気回路で実用化の道を開いた画期的な発明で、これによって挿入光源の実用化の機運が一気に拓けたものと云う事が出来る。

3. 日本の Undulator 試作機：PMU-1^{4,5)}

PF の建設が計画された時点ではこの永久磁石 Undulator の構想は未だなかったから、これを軌道の中に組み込む計画ももちろん存在しなかった。PF では超伝導磁石を使う縦型 Wiggler で硬い X 線を発生する計画が当初からあって、軌道上に 2 か所の長直線部を持つ楕円型の軌道が提案されていた。長直線部を 2 か所に設けたのは対称性の考慮からで、そのうちの一つが Wiggler の挿入場所と予定されていたが、もう一つが空いていたのが PF に Undulator を挿入する上で大変好都合であった。この時期日本以外に X 線光源としての第二世代放射光施設として建設が進んでいた Brookhaven の NSLS はすでに軌道設計が終わっていて、Undulator を挿入する場所はなかった。幸運にも少し遅れてスタートした PF は Halbach 型の Undulator の発明がタイムリーに出現したおかげで、第二世代の光源としては唯一最初から挿入光源を軌道の中に取り入れるチャンスが生じたのである。

Undulator が光源として従来の偏向電磁石で発生する連続スペクトルの放射光に比べてその高い輝度、高い指向性、直線偏光性、など格段に優れた特徴を持っていることはすでに 1970 年代の初めから多くの加速器専門家が指摘しており、理論的な計算結果もアメリカやソ連で数多く公表されていた。1976 年、Quebeck で開催された北米物理学学会の連合大会では放射光光源の特別シンポジウムが企画され、私はその会議に、その年から共同利用運転が始まった物性研の SOR-RING (核研からその前年に移管) について報告をするために参加していた。そこでも次の光源としての Undulator は有望なデバイスとして取り上げられていたし、K. Green が会議の中で特別講義をやったが、それは結局理論どまりで、具体的なデバイスの討論に踏み込むことはなかった。しかし次の世代の放射光光源としての挿入光源の圧倒的な優位は理論的に疑う余地がなく、どうやってそれを実現するかという技術が緊急の課題だ、というのが大方の認識であった。

私も挿入光源が次の放射光研究の主力装置になるという認識を共有していたので、帰国してすぐに SOR-RING の建設を担当した諸君を集めて核研で勉強会を始めた。Winick もその頃同様の問題意識から永久磁石のエキスパートであった Halbach に会って、永久磁石で周期的に電子軌道を曲げるデバイスが設計できないか、と持ちかけたのがこの発端だった。Winick はこのアイデアを 1978 年には試作機を作ってテストをする段階まで進んでおり、建設が始まったばかりの PF に来て、熱心にその御利益を吹聴して帰ったが、PF が建設途上の加速器であったことが我

々に幸いした。

私は 1980 年に測定器研究系の主幹として PF に着任したが、東大に未だ論文を完成していない大学院学生を数名かかえて併任として在籍していたので、この中から修士課程の玉虫秀一君を試作の担当者として中心に据え、光源系の助手として高工研に居た北村英男氏に指導を依頼して試作に着手した。手始めにこの年 6 月に Stanford に Winick さんを訪ね、技術のノウハウを聞いてきた。最後に「Winick さんは磁石をどこから買っているのか？ よかったらアメリカのメーカーを紹介してもらえないか？」と言ったら、「何を寝惚けたことをいうか。私は磁石をすべて日本から買っているのだ。磁石は日本製が一番良いんだぞ」と笑われて大恥をかいた。そこで帰国後電総研に磁性材料部長の対馬さんを訪ね、日本の主な磁石メーカーについてアドバイスを聴いた。当時の最強の磁石材料はサマリウム・コバルトで、Fig. 1 のような磁気回路を組むには磁化の強さと共に抗磁力が重要である。後に住友特殊金属でネオジム・鉄・ボロンの合金 NEOMAX が発明され、多くの点でサマリウム・コバルトを凌駕する高性能をもつことから、それ以後は挿入光源用の磁石はこのタイプが主力となった。

試作機 PMU-1 は 1981 年に製作され、物性研 SOR-RING の共同利用実験として課題申請をした上で同年 12 月に試運転を行った^{4,5)}。実験参加者は次の通り。

高工研 PF：佐々木泰三、山川達也、佐藤 繁、

北村英男、前沢秀樹

東大教養(大学院学生)：鈴木芳生、玉虫秀一、金森英人

東大物性研：宮原義一、磯山悟朗、西村 博、

三国 晃、浅岡清治

大阪市大：三谷七郎

試作機の磁石列の構造は Fig. 3 に示すようなもので、19 極のサマリウム・コバルト SmCo_5 と鉄を交互に組み合わせて矢印が示すような磁場の向きを作る。両端に一对の補正用磁石を配置し、これを水平軸の周りに回転して軌道の補正を行い、磁石列が軌道に挿入された状態と外れた状態とで軌道の変化がゼロになるように調整する。

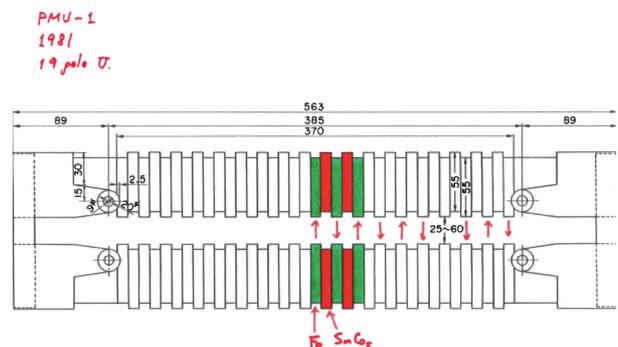


Fig. 3 (Color online) Magnet array of PMU-1.

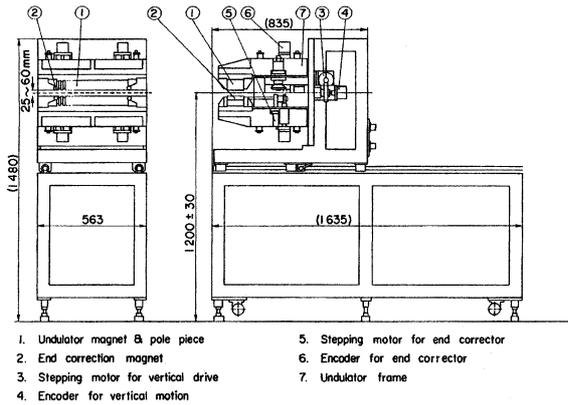


Fig. 4 Front and side views of PMU-1.

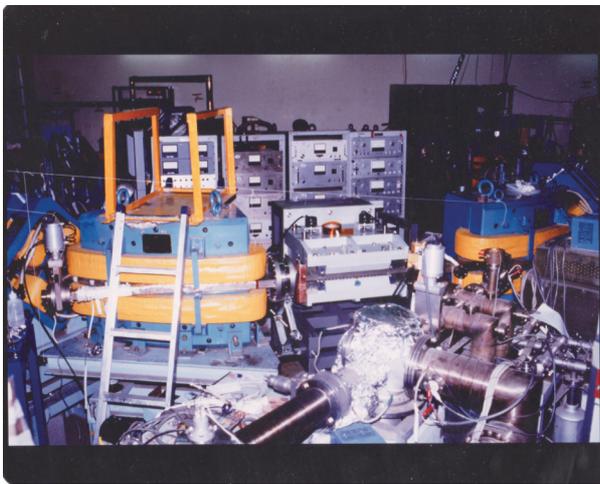


Fig. 5 PMU-1 as inserted in the SOR-RING.

Fig. 4 は組立図で、左が正面、右は横から見た図である。架台の上にはレールが設けてあり、磁石列全体をリングの内側から直線部の軌道に挿入したり引き抜いたりできる。軌道に挿入した状態は Fig. 5 の写真のようなものである。

この試運転で行った実験は次のようなものであった。

1. Undulator の動作試験。軌道の調整
2. スペクトルの絶対強度測定。
3. 理論の検証：スペクトルの電子エネルギーによる変化、磁場強度と角度への依存性。
4. 可視光による観察、偏光特性の検証—カメラ撮影

1の試験では SOR-RING を200~380 MeV の範囲で運転しながら、磁石列挿入の軌道への影響を観察した。光源のプロファイルをモニター上で観察しながら Fig. 3 の磁石列の左右に配置した“end-corrector”磁石を用いて軌道位置を修正する。その一例が Fig. 6 に示すようなもので、容易に挿入前の軌道に戻すことができた。

2ではネオンの光電子スペクトル計測による絶対強度測定法で PMU-1 の Undulator 光のスペクトルを測定し

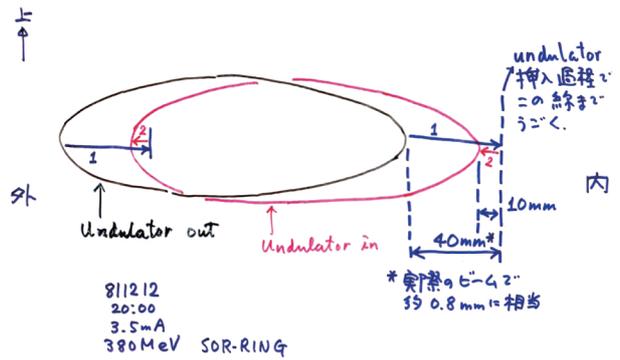


Fig. 6 (Color online) An example of orbit adjustment for “in” and “out” position.

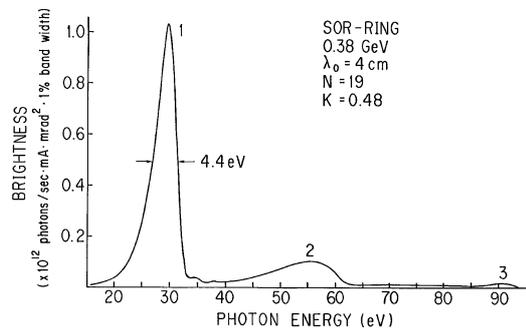


Fig. 7 Brightness spectrum of PMU-1 in the absolute scale.

た。後に述べる PMU-2 ではヘリウムを用いたが、PMU-1 の発光領域ではヘリウムの 2 電子励起領域が含まれ、光電子とフォトン数は比例しない場合がある。極紫外・軟 X 線の領域で希ガスの光電子を計測して光の絶対強度を測定する方法は名古屋大学プラズマ研究所の客員部門で開発された技術で、すでにプラズマの発光の絶対強度測定にも有効に利用されている。一般に希ガスのような単原子気体では既知の光電離断面積を用いて光電子計測によって光源の絶対強度を見積もることができる⁶⁾。

Fig. 7 はリングの電子エネルギー 0.38 GeV, $K = 0.48$ のスペクトルを絶対強度単位で表わしたもので、理論値とよく一致する。このスペクトルでは極紫外領域の 30 eV に 1 次光のピークがあり、2 次光、3 次光のピークも見える。式(1)で与えられる Undulator 光の波長は本来はこのピークに相当するものであるが、光源のエミッタンス（電子のパンチの広がりや角度発散の積）が十分に小さくないと低エネルギー側にずれ、半値幅も大きくなる（この点については後に触れる）。この測定結果では(1)に相当するフォトン・エネルギーは 30 eV 付近のプロファイルのピークではなく、33 eV 付近のテールにある。

3 の理論検証実験では式(1)の成立を確かめるため、主に 1 次光を用いてピーク波長 λ_1 が加速器の電子エネルギー γ 、磁場の強さ K 、観測角度 θ によってどう変わるかを測定し、予期した結果を確認した。この結果は文献 3, 4

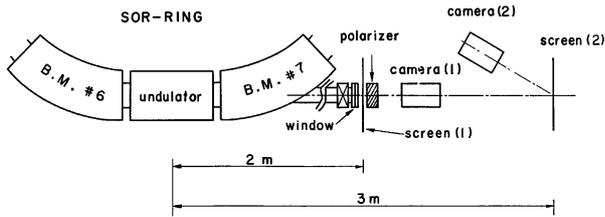


Fig. 8 Camera arrangements for observing radiation patterns.

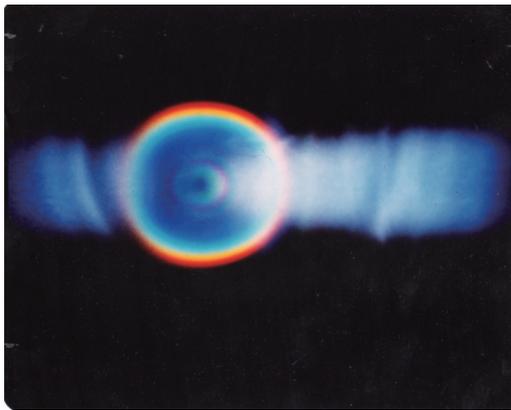


Fig. 9 A rainbow of PMU-1 for 200 MeV.

に詳細に報告されている。この試験で実用上興味があるのは磁場によるスペクトルの変化で、磁場によるエネルギーのチューニングで狭帯域のため利用波長領域が限定されるという Undulator の制約をある程度緩和することができる。これについては PMU-2 の例で詳しく述べることにする。

4 の可視光観察は非常に興味深く、意外な発見がたくさんあった。可視光観察はカメラと偏光子を用いたが、Undulator の入る直線部の後の偏向磁石に光の取り出し口を設け、石英窓、偏光子を通してカメラで直接光源像を見る(位置 1)、さらに鏡で反射した像を見るカメラ(位置 2)で観察した (Fig. 8)。

Fig. 9 は(2)の配置で撮影した200 MeV の虹で、この時偏光子は通していない。水平に白く長く伸びた光が見えるのは偏向磁石からの放射光の白色光である。中央部には内側が青、外側が赤の真円の虹が見えるが、面白いことにこの虹の内側にぼんやりした小さな虹が見える。しかも良く見るとその小さな虹の外側にもうひとつ薄い虹がある。Fig. 4 あるいは Fig. 5 で分かるように、この試作機では磁石列はリングの内側から挿入出来るようになっていて、軌道に直交するレールを用いて装置全体を内側に引き抜いて外せるようになっていて、軌道の内側に玉虫君が入って磁石列を引き抜きながらこの虹を観察するという試みを何度もやってみた。磁石を引き抜くと Fig. 9 の外側の虹は完全に消えるが、内側の小さい虹はそのまま残っている。従ってこの内側の虹は偏向電磁石の端から染み出している磁場

が単調にゼロになるのではなく、何度か振動しながらゼロになることを示している。挿入した永久磁石の磁場反転の周期は 4 cm で、電磁石の磁場が末端に作る振動磁場の周期はこれよりも長いことが分かる。挿入磁石を引き抜く途中では丸い虹が複雑に変形してグニャグニャと乱れて消える。挿入する時も、操作の途中でやはり歪んだ虹が複雑に変形して最後に綺麗な円い虹が復元する。まさかこんなことが起こるとは予期しなかったので、この動画を取ることができなかったのは残念だった。これで明らかになったことは、電子が偏向電磁石の磁場を通り抜けて直線部に入る時と、直線部から次の偏向電磁石の中に入る前とで電子の軌道はこの染み出し磁場の振動によって Undulator の発光を自発的にやっているということだ。もしかしてこれは我々の新発見ではないか、と念のため Physics Abstract で調べてみたら、すでに数年前に Novosibirsk の研究者がこのことに気がついて論文を書いていることを知った。但しこの論文では虹の観測などは報告していない。

文献 4 には本稿で Fig. 9 に用いた 200 MeV の写真の他に、380 MeV で撮影した虹の写真が掲載されている。その写真では真ん中の虹は 3 次光まで観察でき、形もやや歪んでいる。この写真は実験が終わって資料を整理したのち、文部省に参考資料として提出した。文部省としては建設中の「放射光実験施設」の広報資料として利用できると考えたのであろう。玄関に飾るから虹の絵を全紙大の印画紙に引き伸ばして提出してほしいという。ご要望に応じて大きな虹の絵を作って提出したところ、その絵はしばらく文部省の正面玄関の掲示板に飾ってあった。多分文部省内外の訪問者の注意を引いたのだろう。当初は 2, 3 日と聞いていた展示の予定は大幅に伸びて、一ヶ月くらいは飾ってあった。このような虹のパタンが見えるのは SOR-RING のような数百 MeV の小さなマシンに限られ、あまりエネルギーが高くなると可視光は視野の外に追い出されてしまい、観察は困難である。しかし挿入光源のイメージとしては虹の絵は大変直観的で分かりやすいので、この写真は PF だけでなく、後に建設された SPring-8 の建設期にも放射光のイメージ・パタンとして宣伝パンフレットに掲載されて活躍した。

さて虹の観察でもう一つ重要な実験は偏光特性の観察であった。Fig. 8 にはカメラの前に偏光子を挿入する位置が示してあるが、これを用いて縦偏光だけを通して水平成分を消した写真が Fig. 10 である。水平面では直線偏光は完全にこの方向に偏っているのですべて消えているが、この虹の中心を通る垂直面も完全に消えている。Undulator の偏光特性を示すパタン Fig. 11⁷⁾を参照すれば、水平面と垂直面で偏光は水平面に偏る直線偏光で、その中間はやはり直線偏光ではあるが、その向きが傾いている。水平面に白い帯として現れる偏向磁石からの放射光も水平偏光なので消えている。これらの実験の詳細は文献 4 に報告されている。

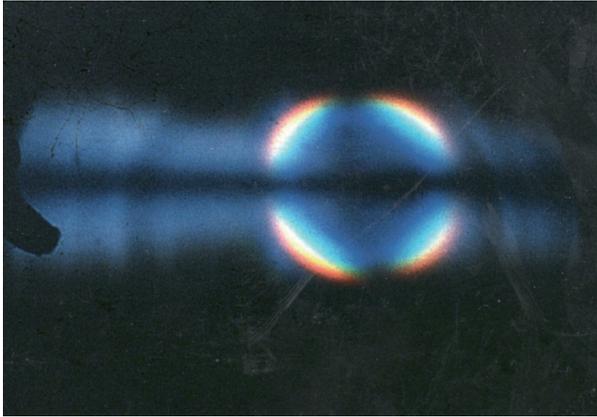


Fig. 10 A rainbow pattern with horizontally polarized components eliminated.

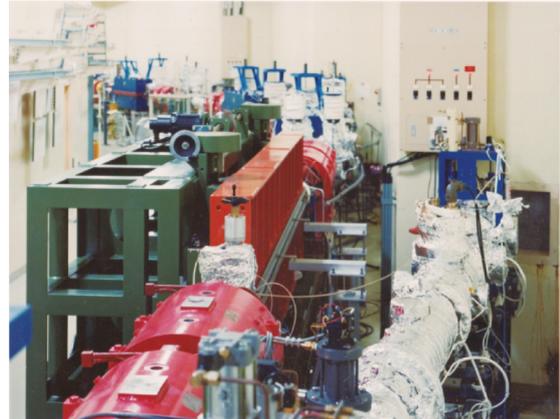


Fig. 12 PMU-2 as inserted in the orbit of Photon Factory ring (BL-2).

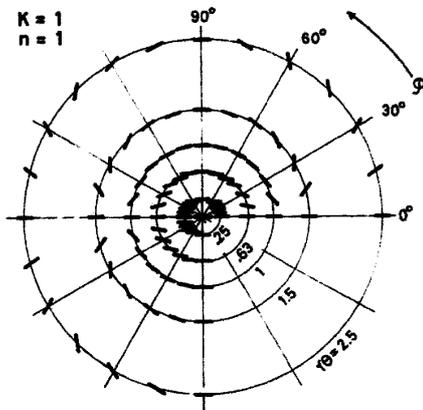


Fig. 11 θ and ϕ dependence of the polarization of undulator radiation Refer to Fig. 2.

4. 最初の実用機PMU-2⁸⁾

試験機の成果を踏まえて PF では直ちに BL-2 に挿入すべき実用機の製作に着手した。PF の当初計画には Undulator の挿入は含まれていなかったため、年次計画として継続中であった PF の当初予算とは独立に別途柱を立てて予算請求をし、昭和57、58年の2年度計画として5千万円を要求し、認められた。

この実用機は周期数60、磁場の周期 $\lambda_u = 4$ cm、最小磁場間隙で $K = 1.64$ 、1次光のピークは400 eVで、磁場間隙の調整によって1次光ピークは0.4~1.0 keVの範囲で調整できる。この装置は1983年に完成し、1984年に利用運転を開始した⁷⁾。これを BL-2 に挿入した状態が Fig. 12 である。

このビームラインは最初から一般公開されたが、それと並行して建設チーム(設計・建設・調整: 北村英男; 光学測定: 前沢秀樹・鈴木芳生)による詳細な性能評価が行われた。性能評価としては試作機と同じく

1. スペクトルの測定と絶対強度の決定。

2. 磁場強度変化によるチューニング試験。
3. 偏光度測定。

を試み、すべてヘリウムの光電子測定による方法を用いた。PMU-1の項で述べたように希ガスの光電離断面積はよく知られており、光の絶対強度測定に適している。光電子の計測には Cylindrical Mirror Analyzer (CMA) を Magic Angle Mode で使い、ピンホールを通して光束の中心部を切りだした Undulator 光は88度入射の白金の鏡で反射して CMA の入射位置でヘリウムと相互作用する。光電子の計数率は He の光電離断面積と光源の電流、ピンホールの直径とピンホールから発光点までの距離で決まる幾何学的条件、白金の反射率、気体の密度、CMA の効率等、多くのパラメータが関与するが、これらの要素が適正に決まれば光源のスペクトル強度は計数率から厳密に評価できる。この光源の絶対強度評価法の詳細については文献6を参照されたい。

Fig. 13 はこうして光電子分光器で測定された PMU-2 の測定データの原図である。磁場間隙はほぼ最小値の32.5 mm で、1次光から4次光までが記録されている。これを輝度の絶対値、光源の電流 mA 当たり、立体角 mrad^2 に毎秒放出されるフォトン数を1%のエネルギー・バンド幅で見積もった量を測定値(点)と計算値(実線)で比較したものを Fig. 14 に示す。計算に用いた光源のエミッタンスと電子のエネルギー幅を図の中に示してあるが、測定値と計算値の一致は極めて良い。この図では偏向電磁石で発生する通常の放射光はピークの裾に見える小さなバックグラウンドでしかなく、Undulator の光がこの白色光に比べて桁違いに明るいことは明らかである。しかしながら、この試験が行われた時点での PF の光源のエミッタンスは今日の第三世代の光源に比べてかなり大きく、これが Undulator の本来の性能の発揮を大幅に妨げていることが検討の結果明らかになった。Fig. 15 は北村英男氏の計算した PMU-2 の1次光のスペクトル輝度で、これが光源のエミッタンスによってどう変化するかを示している。光源のエ

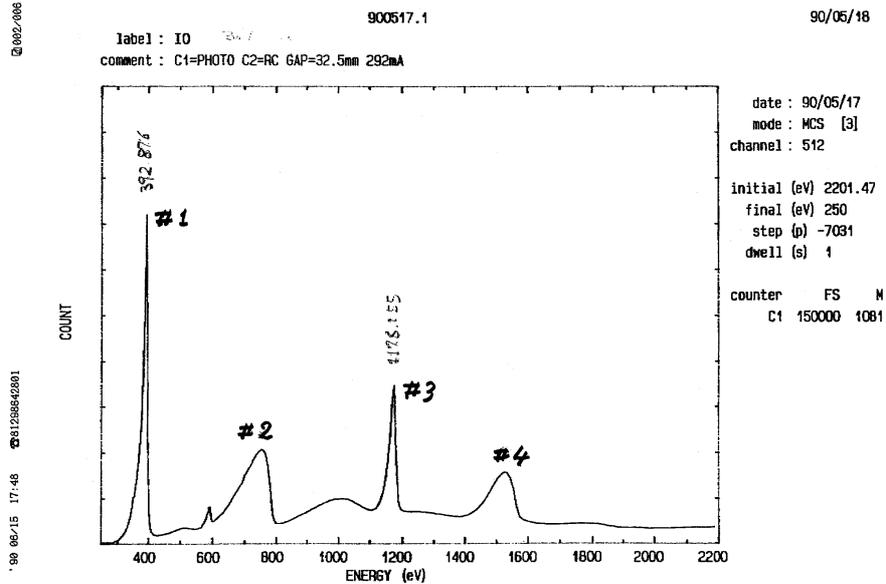


Fig. 13 A typical recording of spectral pattern from PMU-2.

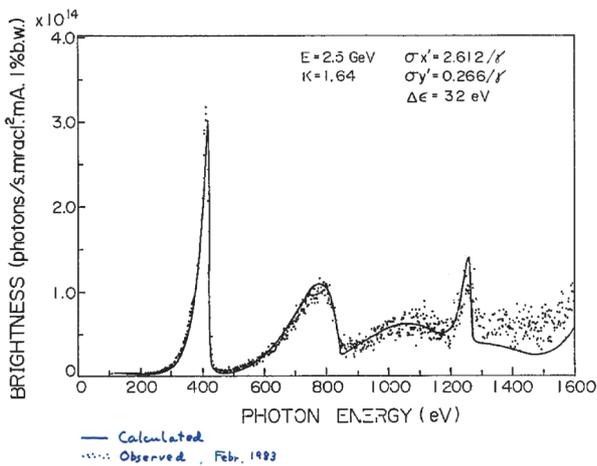


Fig. 14 (Color online) Spectral brightness of the 1st, 2nd, and 3rd order components of undulator radiation from PMU-2 in the absolute scale.

ミッタンスを今日の第三世代の光源では標準的な値である $5 \text{ nm}\cdot\text{rad}$ と仮定すると Undulator 光のピーク強度は曲線 1 のようになるが、当時の値 $500 \text{ nm}\cdot\text{rad}$ で計算すると曲線 4 のようになり、ピーク強度は 1 桁下がり、ピークのフォトン・エネルギーは低エネルギー側にシフトし、半値幅も増大する。これは試験機の PMU-1 でも観測された傾向で、Undulator 光の本来の優れた性質を実現するためには光源のエミッタンスを下げるのが必須であることが分かる。Undulator 光を主として利用しようという第三世代の高輝度光源はこのような認識に基づいて最初から数 $\text{nm}\cdot\text{rad}$ 程度の低エミッタンスの電子ビームを目指すことになった。

PF はその後数次の改良によってエミッタンスを改善し

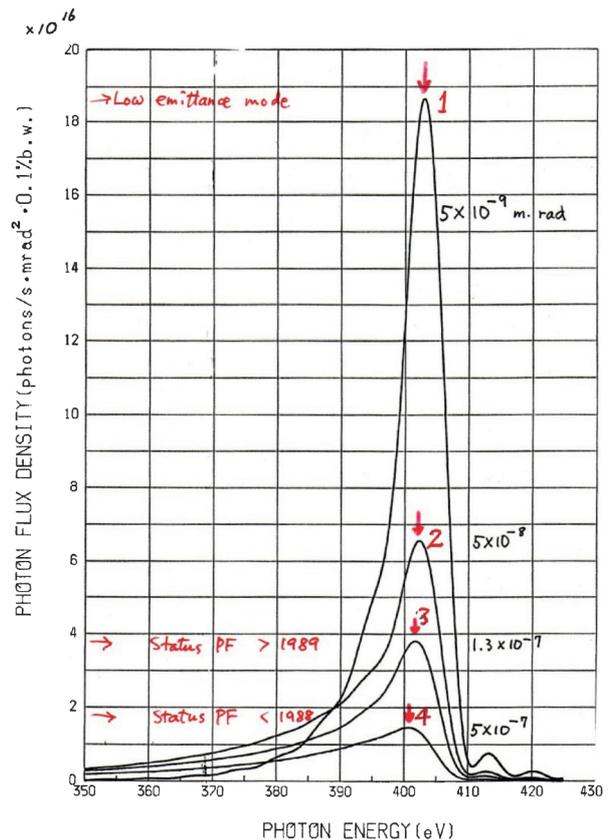


Fig. 15 (Color online) Emittance dependence of the 1st order components of undulator radiation from PMU-2 (Courtesy H. Kitamura).

たが、1989年の実績では1/4程度に下がり、スペクトルはこの図の曲線 3 まで改善した。

2 番目の実験は磁場の変化による Undulator 光のチュー

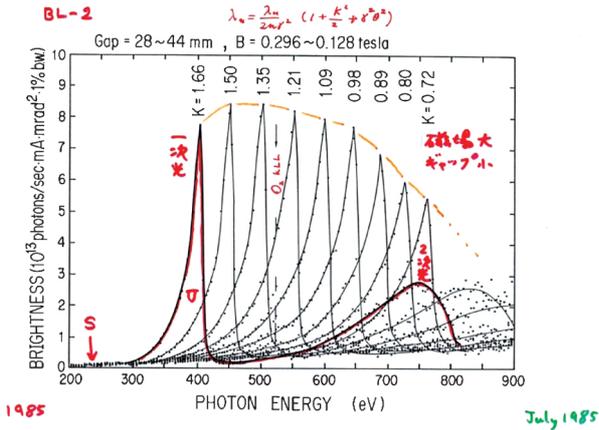


Fig. 16 (Color online) Tuning of undulator radiation from PMU-2 with variable magnetic field strengths.

ニングである。Undulator 光は偏向電磁石の発生する連続スペクトルとは異なって準単色光であるから、目指す波長域に大強度の光が得られるのは好都合であるが、多少広い範囲のスペクトルを使いたいという時には不便である。しかし磁場の強度を変えることによって発光する波長域をある程度は変えられるので、磁場によるチューニングがどの程度出来るかは調べておく必要がある。Fig. 16 は K 値を 1.66 (B=0.296 Tesla) から 0.72 (B=0.128 Tesla) まで変化させて得られた 1 次光のスペクトルの変化である。ピークは 0.4 keV から 0.76 keV まで変化しているが、この先約 1 keV くらいまでは十分実用になる輝度を得られ、チューニングの範囲は 2.5 倍くらいと見てよい。この図も Fig. 14 と同じく測定値と計算値を点と実線で示してある。この測定領域には気体不純物からのオージェ電子の信号が紛れ込んでいる。図の中央付近に出てくる酸素のオージェ電子による O-KLL 線がその一例である。余分な信号ではあるが、これは磁場のパラメータには影響されず、常に同じ位置に出てくるので、エネルギーの較正用として役に立つ。磁場によるチューニングは Undulator 光を狭い範囲ではあるが可変エネルギーの光源として利用する可能性を与えるので、実用上便利ではあるが、動作条件を変えることによって電子の軌道に影響を与えることもあり、利用者側で勝手にチューニングをするわけにはゆかない。

試験機 PMU-1 ではパラロイド板を用いて定性的に偏光特性を観察したが、PMU-2 では偏光度をヘリウムの光電子放出の角度依存性の測定を用いて定量的に測定することを試みた。

一般に入射光の偏りの方向と光電子の波数ベクトルのなす角を θ とすると、光電子放出強度の角度依存性 $I(\theta)$ は次のような式で表わされる。

$$I(\theta) = \sigma/4\pi \{1 + \beta(3 \cos^2 \theta - 1)/2\} \quad (3)$$

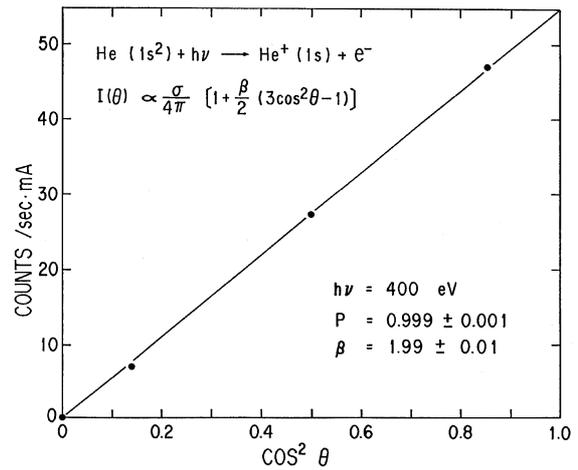


Fig. 17 A measurement of angular dependence of photoelectrons of He emitted by undulator radiation from the 1st order component of PMU-2. It is concluded that the 1st order radiation is fully polarized along the horizontal direction..

σ は電離の全断面積、 β は遷移の種類によって決まる定数で、ヘリウムの場合のように、s 状態から p 状態への遷移では 2.0 である。従ってヘリウムの光電離では I は $\cos^2 \theta$ に比例し、光の偏りの方向では 0、直交する方向で 1 となる。Fig. 17 はこの方法で測定した He 光電子の角度分布の測定例で、 $I(\theta)$ はみごとに $\cos^2 \theta$ に比例しており、400 eV での 1 次光のピークはほぼ完全に軌道面に偏っている。

以上の試験を通じて Undulator の光学的特性はほぼ確かめられたが、その本来の特性をフルに実現するためには母体の電子加速器のビームが十分に良く絞られていて低いエミッタンスで運転される必要があることが明らかになった。しかしそうした制約にも拘らず、PF に挿入された Undulator は従来我々が経験したいかなる放射光光源よりも圧倒的に明るいことは明らかである。その手ごたえを実感しよう和我々は面白い実験を試みた。

その一例が Fig. 18 に示す Ne の KLL オージェのスペクトルである。Ne の K 殻の電離エネルギーは 870 eV で、この図は二つのフォトン・エネルギー 1.35 keV と 900 eV で K 殻電子を電離し、それに伴って放出される KLL オージェスペクトルを比較測定したものである。この時の Undulator の K 値はそれぞれ 1.0 と 0.4 である。この実験の目的は K 殻の閾値よりずっと高いところにあるフォトン・エネルギー (1.35 keV) と比較的近いエネルギー (0.9 keV) で起こるオージェ電子のスペクトルの形を比べてオージェ電子と光電子の相互作用の違いを見ようというものである。

Ne KLL オージェというのは X 線が Ne の K 殻から光電子を放出したのち、L 殻の電子が 1 個 K 殻に遷移して空孔を埋め、L 殻のもう 1 個の電子が K と L の準位差に等しいエネルギーを与えられて原子から飛び出す効果である。従って放出されたオージェ電子のエネルギーは関係す

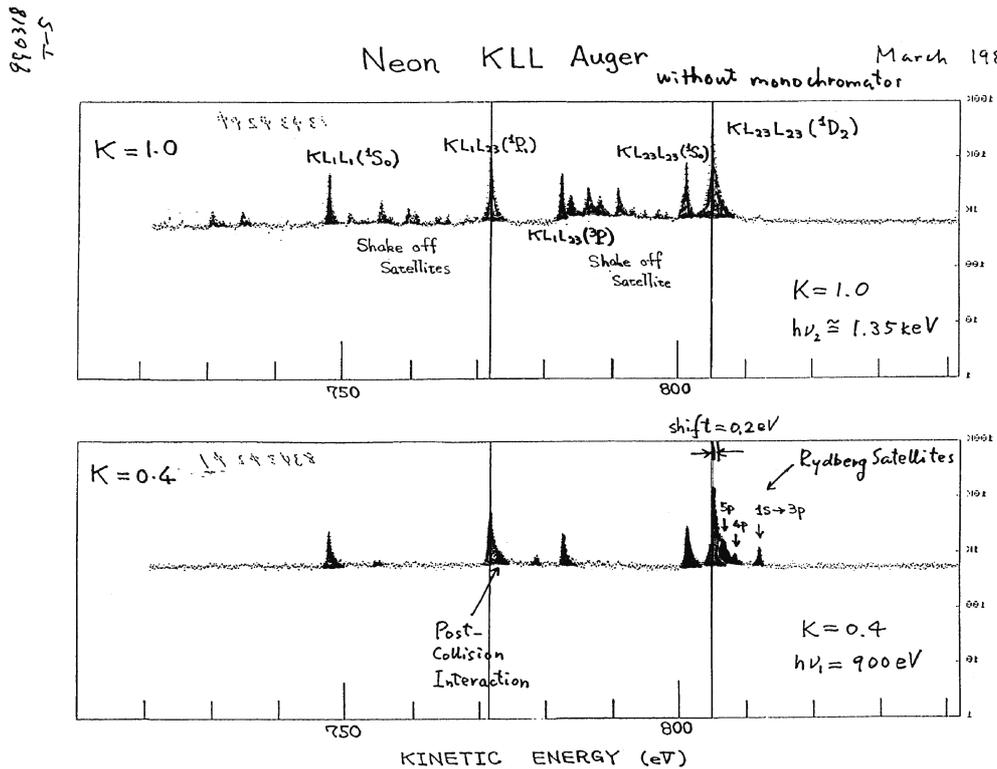


Fig. 18 Ne KLL Auger spectra observed at 1.35 keV (upper part) and 0.90 keV (lower part), respectively, with PMU-2 (Courtesy Y. Suzuki).

る電子準位の定常状態のエネルギーの差で決まっており、光電子放出を引き起こした X 線のエネルギーには依存しない。ところが入射した X 線のエネルギーが K 殻の電離閾値に近い場合、光電子のエネルギーが低く、速度が小さいので、K 殻電離に続いてオージェ電子が飛び出す時点で光電子がまだ内殻領域に留まってウロウロしていることになる。この二つの電子の間には当然斥力が働き、オージェ電子は加速されて本来のエネルギーより大きなエネルギーを貰って出てゆく。そのためオージェ電子のエネルギー分布は元来は対称性をもったガウス分布に近い形をしているのに、励起 X 線のエネルギーが電離閾値に近くなればなるほど非対称になり、高エネルギー側に裾を引いた非対称のエネルギー分布を示すようになる。この効果は原子内殻の電子相関効果の一例で、Post Collision Interaction と呼ばれ、多くの理論的研究があるが、最初は上智大学の鈴木洋氏、大谷俊介氏らが電子線を用いて発見したものである。その後上智大と東大の共同チームがこの効果を光励起で観察しようと、物性研の軌道放射物性研究施設で実験を試みたが、光源の強度が十分でなく、理論的な解析に耐える十分な S/N 比を持ったプロファイルを観測するまでには大変な苦勞をした。

Fig. 18 は当時 PF で仕事をしていた大学院学生の鈴木芳生氏（現 SPring-8）がいわば「鼻歌交じり」で気楽に測定した Ne K 殻オージェ電子の測定データの原因図で、きわめて短い時間内に強いオージェ・ピークでは 10 万カウン

トを計測している。下の図は上よりも電離閾値（870 eV）に近い 900 eV で測定したものである。また閾値にそれほど近いわけではないが、オージェ・プロファイルのピークが 0.2 eV ほど高エネルギー側にずれ、プロファイルの非対称性も顕著に出ている。田無の SOR-RING で昔徹夜に次ぐ徹夜で苦勞した者にとっては夢のような実験であった。

5. 終わりに

本稿は PF30 周年の記念講演の一部として、既に歴史となってしまった昔の話を若い研究者の皆さんのご参考までにお伝えしておこうというつもりでまとめたもので、その後の挿入光源の目覚ましい発展や、それがもたらした多くの素晴らしい研究成果については触れていない。

挿入光源、特に Undulator は従来の加速器の偏向電磁石で発生する放射光に比べて圧倒的に優れた高輝度、指向性、偏光特性に加えて、さらにさまざまな設計自由度によって、放射光の利用範囲を著しく拡大することになり、放射光技術は全く新しい発展段階に入った。この新しいポテンシャルを全面的に実現することを目指して、エミッタンスの低い第 3 世代の放射光 X 線光源の時代が始まり、それは 1990 年代後半、SPring-8、APS、ESRF と世界の三極を形成する高輝度 X 線光源施設として実現した。

こうした目覚ましい放射光技術の革新をもたらしたのは

もっぱら1978年の Halbach-Winick の永久磁石型 Undulator の発明で、Low-cost で電源が要らないという便利さに加えて、そのデザインの柔軟性、発展性によって自由な偏光特性の制御技術が展開し、一方磁石の性能の目覚ましい向上や、真空中に磁石列を封入する技術の開発によって光源加速器の小型化への道が開けた。現在は高輝度 X 線光源は大型機が主流であるが、将来中型、小型の高輝度 X 線光源が出現すれば放射光研究は集中型の大型施設に束縛されず、ユーザーの地元で利用できる個別施設へと移行が始まる可能性もある。Undulator が潜在的に持つ大きなポテンシャルに期待して試作と実用化を進めてきた我々の予感は見事に的中しただけでなく、当初の予想を超える驚異的な新技術を生み出した。今年3月から公開運転が始まった X 線自由電子レーザー SACLA はその一例である。

参考文献

- 1) V. L. Ginzburg: Izv. Akad. Nauk SSSR Ser. Fiz. **11**, 165 (1947).
- 2) P. Luchini and H. Motz: Undulators and Free Electron Lasers, Clarendon Press, Oxford, 1980.
- 3) H. Winick, G. Brown, K. Halbach and J. Harris: Physics Today **34**, 50 (1981).
- 4) H. Kitamura, et al.: Appl. Phys. **21**, 1728-1731 (1982).
- 5) H. Maezawa, et al.: Nucl. Instrum. & Methods **208**, 151-155 (1983).
- 6) T. Sasaki, T. Oda and H. Sugawara: Nuclear Fusion Research **32**, Suppl. 1 (1974) 61-71; Appl. Optics **16**, 3115-3121 (1977).
- 7) H. Kitamura: Jpn. J. Appl. Phys. **19**, L185 (1980).
- 8) H. Kitamura, Y. Suzuki, H. Maezawa and T. Sasaki: Appl. Optics **25**, 3260-3268 (1986).

著者紹介



佐々木泰三

東京大学名誉教授，高エネルギー加速器研究機構名誉教授，兵庫県参与

E-mail: tzsasaki@mwa.biglobe.ne.jp

専門：真空紫外・軟 X 線分光学，原子分子物理学

【略歴】

1956 大阪大学理学部物理学科大学院修了，東大教養学部物理教室助手，同基礎科学科助教授，教授を経て1980 高エネルギー物理学研究所教授，放射光実験施設測定器研究系主幹，1984 同施設長，1985 大阪大学基礎工学部教授。1988 理化学研究所研究顧問*，1989 日本原子力研究所特別研究員*。*1997 辞任。1988～現在 兵庫県参与。2004～2012 JASRI 評議員。

Early Trials of Undulator Development in Japan

Taizo SASAKI

Abstract Undulators, composed of periodic arrays of permanent magnet, which generate intensified synchrotron radiation with high brightness, strong collimation, high degrees of polarization, when inserted into the straight sections of storage rings, were regarded as greatly improved synchrotron radiation sources since their early theoretical studies. However, it was made practically feasible only after invention of permanent magnet devices by Klaus Halbach and Herman Winick in 1978. Photon Factory, which was then under construction took up advices by Herman Winick, and started construction of a model, PMU-1 with 19 poles in 1980 to be tested at the SOR-RING which had been operated by ISSP since 1976. Feasibility studies and verification of theoretical properties of undulator radiation have been successfully performed in 1981.

The next step was to construct the practical machine PMU-2 to be inserted into BL-2, a long straight section of the Photon Factory. It was composed of 60 periods of magnetic array, with 4cm period, and the first order peak to be tuned from 0.4 to 1.0 keV. PMU-2 was completed in 1983 and made available for public use.

The present article reproduces a talk given at the ceremonial symposium for celebrating 30th Anniversary of the Photon Factory held in March, 2012.