

2.6 先端的利用研究のための装置技術開発

2.6.1 概要

2.1 節から 2.5 節までに提案された研究は、高輝度光源が出来れば明日にも出来ると言うことではない。新しい高性能な光源の特性をフルに生かすためには光学系、検出系さらには建屋設計を含めて新しい考え方、新しい技術開発が必要である。別な表現をすれば、この様な乗り越えなければならないハードルが低い計画は「将来計画」ではなく「現在計画」とも言えよう。2.6.2 節から 2.6.4 節に記したことはこれから我々が乗り越えなければならないハードルとそれを乗り越える道筋を検討したまとめである。

光学系・光学素子の開発は最も重要な課題の一つである。ERL 光源ではアンジュレーターが用いられるが、この場合に光学素子、ビームライン要素が処理しなければならない熱負荷はアンジュレーターのデザインに依って現在の第三世代光源並かそれ以上になる。この様な高熱負荷条件下でも ERL 光源から得られる放射光の特性（短パルス、高コヒーレンス、ナノビーム）を損なうことなく、分光、集光して試料まで導き、検出する必要がある。このためには分光結晶、回折格子、ミラー等の光学素子に関してその表面仕上げ精度も従来以上に高い性能のものが要求される。また、種々の素材開発も必要となるであろう。

検出系に関しても同様で、短パルス特性を生かした実験を効率よく行うためには高速なデータ収集システムや高分解能位置敏感検出系の開発が必要となる。

単にこういった実験用機器だけでなく、既に第三世代光源でも問題となっているように振動や熱膨張対策も必要になる。鉄材の線膨張係数は 10^{-5} deg^{-1} のオーダーであり、1 m の鉄製架台の上にある光学素子は環境温度が 1 度変化すれば $10 \mu\text{m}$ 偏倚する。室温を 0.1 deg で制御することは技術的にもコスト的にも困難であり、可能な限りコストを抑制して高い性能を出すためには、要所所で新しい素材を採用することが必要となろう。実際、SSRL では SREAR III リングのビームポジションモニター架台にインバー合金を採用している。

ここで提案している計画は単に ERL に特化した研究のためだけでなく、従来の放射光利用の中心である各種物質の評価研究をも包含するものである。この場合、従来の放射光施設では化学反応の追跡、化学的、生物学的、放射線的な潜在的危険性を伴う試料等の研究には安全面から制約が課されていた。PF では非密封ラジオアイソトープを扱えるエリアを整備し、その面での研究が展開されているが、同様な施設を新しい施設建設時から取り入れることによってより学問的、実用的に興味ある系の研究を行うことが可能となると考えられる。また、PF における 20 年の共同利用の経験を生かして効率的に運用出来る施設設計も必要となる。

野村昌治 (KEK・PF)

2.6.2 光学素子・光学系

2.6.2.1 X線光学素子および光学系の検討課題

ERL では従来よりも輝度の高い放射光が得られるだけでなく、 100 fs ~ 数 ps 程度のパルス幅を持った、回折限界に近いコヒーレントな放射光が得られる。しかし、光源でせっかく良い光が得られても、ビームラインコンポーネントでそれを劣化させてしまっては台無しである。そこで本節では、ERL の光学素子・光学系の検討課題として、熱負荷の問題、コヒーレンスの保存、パルスの伝搬特性などについて概観する。

2.6.2.2 熱負荷の問題

第一に考慮すべき問題は熱負荷である。まずX線分光光学系について検討する。PF-ERL と SPring-8 の熱負荷の比較を表 2.4 に示す ($E = 8 \text{ keV}$)。これからわかるように PF-ERL の Total Power は SPring-8 と同程度であり、Power Density は SPring-8 よりも小さい。したがって、SPring-8 で熱負荷の問題が解決されれば、その技術を PF-ERL にも転用することができる。SPring-8 の 25m-Undulator ビームラインである BL-19LXU では、液体窒素冷却の回転傾斜型二結晶分光器が使用されているが、そこでの測定結果 [1] を見ると、計算値の 60~70% の flux が得られているようである (ただし、front end slit のサイズを $0.7 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$ とした場合)。

表 2.4: $E = 8 \text{ keV}$ における、PF-ERL と SPring-8 の比較

ここでは PF-ERL のエミッタンスを $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 10 \text{ pmrad}$ とした。30 m-undulator のパラメータは、 $\lambda_u = 1.6 \text{ cm}$ 、 $N = 1875$ 、 $\beta_x = \beta_y = 20 \text{ m}$ 、5 m-undulator のパラメータは、 $\lambda_u = 1.6 \text{ cm}$ 、 $N = 312$ 、 $\beta_x = \beta_y = 5 \text{ m}$ である。なお、PF-ERL のパラメータはまだ確定しておらず、ここに挙げた値は目標値である。

		PF-ERL undulator @ 5 GeV		SPring-8 undulator @ 8 GeV	
Beam current		100 mA	100 mA	100 mA	100 mA
Undulator length		30 m	5 m	25 m	5 m
Source size (μm)	horizontal	37.8	18.2	892	892
	vertical	37.8	18.2	22.8	10.6
Source div. (μrad)	horizontal	4.1	9.8	37.4	38.4
	vertical	4.1	9.8	4.3	10
Beam size @ 50 m (μm)	horizontal	244	510	2761	2813
	vertical	244	510	236	509
Brilliance(ph/s/0.1%/mm ² /mr ²)		6.0×10^{23}	7.6×10^{22}	2.2×10^{21}	5.0×10^{20}
Flux(ph/s/0.1%)		1.9×10^{16}	3.1×10^{15}	9.0×10^{15}	2.4×10^{15}
Coherent flux (ph/s/0.1%)		3.6×10^{15}	4.6×10^{14}	1.3×10^{13}	3.0×10^{12}
% beam coherence		19	15	0.14	0.13
Total Power		36.4 kW	6.1 kW	31.2 kw	15.7 kW
Power/Area @ 20 m		2680 W/mm ²	446 W/mm ²	4687 W/mm ²	1894 W/mm ²

PF-ERL では長さが 200 m の Undulator も検討されている。この場合、熱負荷が SPring-8 の BL-19LXU を上回ることになるため、新たに熱負荷対策を講じる必要がある。現在有力視されている方法の一つは、ダイヤモンド結晶の液体窒素冷却である。表 2.5 はシリコンとダイヤモンドの熱特性を比較したものである。室温のダイヤモンドは、液体窒素で冷却したシリコンとほぼ同程度の熱耐性 ($|\alpha/k|$ 、 α は熱膨張率、 k は熱伝導度) を有している。ダイヤモンドを 100 K まで冷却すると $|\alpha/k|$ はさらに二桁改善されるので、200m-Undulator でも使用可能だと予想される。

ダイヤモンド結晶を分光に用いる場合、結晶の完全性が重要である。図 2.39 は数年前に撮影された Type IIa の人工ダイヤモンド結晶のトポグラフである [2]。周辺部に積層欠陥が見えるが、中央部はほぼ完全であることがわかる。結晶育成技術の発達により、現在はさらに完全性の高い大型の (10 mm 角程度) 結晶が得られるようになっている [1]。しかし分光結晶として利用することを考えると、さらなる大型化が望まれる。

次に軟 X 線分光光学系の場合であるが、SPring-8 での経験と VUV・SX 高輝度光源計画における検討結果から判断して、回折格子とそれより上流の光学素子を水冷する方式で熱負荷の問題は

表 2.5: シリコンとダイヤモンドの熱特性の比較

α は熱膨張率、 k は熱伝導度である。 $|\alpha/k|$ は熱耐性の指標であり、この値が小さいほど熱負荷に強くなる。ダイヤモンドの場合、結晶の種類によって熱伝導度が異なる。最も熱伝導度が高いのは Type IIa である。

Parameter	Silicon		Diamond	
	300 K	100 K	300 K	100 K
$\alpha(\text{K}^{-1}) \times 10^{-6}$	2.6	-0.4	1	0.05
$k(\text{W cm}^{-1} \text{K}^{-1})$	1.5	8.8	9 - 20	30 - 100
$ \alpha/k (\text{W}) \times 10^{-6}$	1.7	0.045	0.11 - 0.05	0.002 - 0.0005

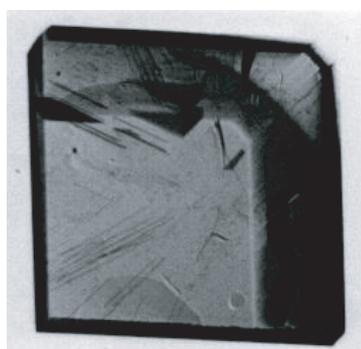


図 2.39: ダイヤモンド結晶のトポグラフ。

使用したダイヤモンドは Type IIa の (001) 結晶で、大きさは $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 0.722 \text{ mm}^t$ 。非対称 220 反射を用いて撮影。 $\lambda = 0.1 \text{ nm}$ 。モザイク度は約 2 秒。

対処できると考えられる [3]。

2.6.2.3 コヒーレンスの保存

空間的コヒーレンスを保存するには、X線窓、集光素子（ミラー、屈折レンズなど）、分光結晶、移相子などのビームラインコンポーネントによる波面の乱れを小さく抑える必要がある。軟X線に関しては波長が長くなるためX線より課題が少ない。そこで、以下ではX線の場合についてのみ検討する。

Be窓に関する計算によると、波長 0.1 nm のX線を使用する場合、表面粗さを $0.2 \mu\text{m}$ (rms) 以下にする必要がある [4]。この条件はBe窓の表面を研磨することで容易に達成することができる。

ミラーに関しては、まずスロープエラーを小さくする必要がある。PF-ERLの場合、光源から 50 m 下流でのビームサイズは、 30 m-undulator で $244 \mu\text{m}$ 、 5 m-undulator で $510 \mu\text{m}$ となる ($E = 8 \text{ keV}$ の場合、表 2.4 参照)。ミラーと試料の距離が 20 m だとすると、ミラーのスロープエラーが $3 \mu\text{rad}$ の場合、ビームサイズは試料の位置で $60 \mu\text{m}$ 広がることになる。現在のミラー作成技術ではスロープエラーを $2 \mu\text{rad}$ (rms) 以下にすることが可能であるが [5]、熱負荷によってかなりの歪みが生じるおそれがある。次に、表面粗さを小さくすることも必要である。たとえば、波長 0.041 nm のX線を 2 mrad の角度でミラーに照射する場合、表面粗さを 0.05 nm (rms) 以下にしなければならない [4]。これはつまり、一原子層レベルの表面制御が必要だということである。こ

のような厳しい条件を克服するために、大阪大学・超精密科学研究センターでは SPring-8 と共同でプラズマ CVM (*Chemical Vaporization Machining*) と EEM (*Elastic Emission Machining*) の研究がなされており [6]、ESRF では IBF (*Ion Beam Figuring*) の研究がなされている [7]。

分光結晶に関しても、歪みを小さく抑えることが必要になる。図 2.40(a) は Si 111 反射の反射率と位相シフトのグラフである ($\lambda = 0.15 \text{ nm}$)。回折 X 線の位相は選択反射領域内で 180 度変化する。したがって波面の乱れを $\lambda/10$ 以下に抑えるには (すなわち位相の乱れを 36 度以下に抑えるには) 入射 X 線の発散と結晶の歪みを選択反射の角度幅 ω の $1/5$ 以下にしなければならない。図 2.40(a) の計算では $\omega = 6.6''$ なので、入射 X 線の発散と結晶の歪みを $1.3''$ 以下に抑えなければならない。通常、分光器には (+, -) 配置の二結晶が用いられるが、この場合、位相シフトは結晶一枚の場合の 2 倍になる (図 2.40(b))。なお、波面を保存する分光結晶の配置として、たとえば (+, -, -, +) の四結晶配置を考えることもできる。

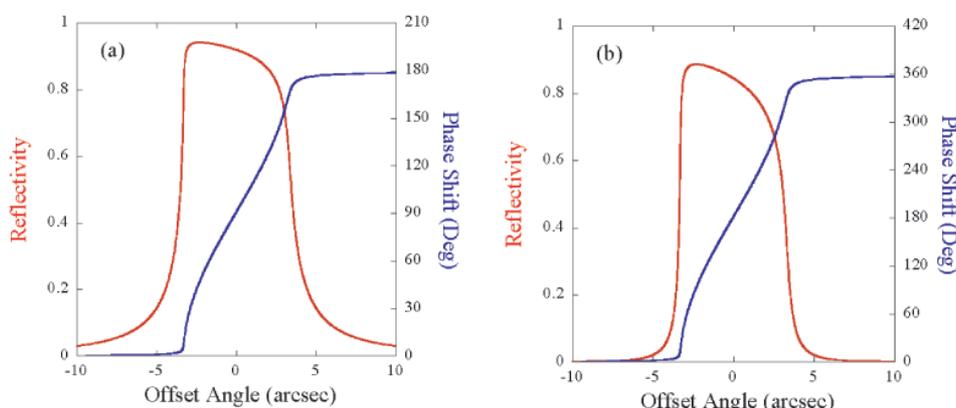


図 2.40: Si 111 反射の反射率と位相シフト。(a) 一回反射の場合、(b) (+, -) の二回反射の場合

2.6.2.4 X線分光光学系におけるパルス伝搬特性

現在 PF では 100 ps、SPring-8 では 30 ps のパルス光が得られているが、ERL ではさらに二桁～三桁短いパルス光が得られる。

そこでまず問題になるのが、結晶における X 線の反射率とパルス長の関係である。Wark らの計算によると [8]、X 線のパルス長が完全結晶の消衰距離 (またはモザイク結晶の吸収距離) よりも短くなると、積分反射強度は減少する。もしこれが事実なら、モザイク結晶を用いる光学系や、完全結晶の高次反射を用いる光学系に深刻な影響を及ぼすことになる。

次に問題になるのが、回折によるパルスの伸びである。結晶の表面で反射される X 線と結晶の内部で反射される X 線は光路長が異なるため、その分パルスが伸びることになる。Si 111 反射の場合 ($E = 8 \text{ keV}$)、パルスの伸びは 5 fs 程度なのでほとんど無視することができるが、高次反射になるとパルスの伸びは数十 fs になる [9]。

2.6.2.5 軟 X 線分光光学系におけるパルス伝搬特性

光源でどんなに短いパルスの X 線を発生しても、分光光学系によってそのパルス幅が広がるようなことがあっては意味がない。例えば、単純に考えて光学素子の中心に当たった光と端の方に当たった光とでその光路長に差があったら、その分だけ到達時間に差が生じ、結果的にパルス幅

を広げることになりかねない。そこでここでは、ミラーと回折格子それぞれに対して、そうした効果が本当に現れるのかを検討する。

まず、ミラーについて検討する。いわゆるフェルマーの原理として知られているように、A点で発生した光がミラー上のP点を通ってB点にいたるときの集光条件は、光路長 $AP+PB$ がPの座標によらず一定であることである。従って、集光点で見える限り光路長に差は無く、パルス幅は保存されることになる。これを実際に確認するため、図2.41のような可変偏角の不等刻線間隔平面回折格子分光器を例に、一本一本の光線の光路長をレイトレースによって計算した。ここではミラーの寄与だけを知りたいので、回折格子は平面鏡に置き換えて（入射角と出射角を等しくして）計算を行った。また、一般論としての計算であるため、光源は標準的な蓄積リングとアンジュレータを仮定している。図2.42に光源から試料位置までの光路長の分布を示す。50 eVでも800 eVでも光路長の分布は非常に小さい(10^{-7} m以下)ことがわかる。なお、二つのエネルギー間で光路長が違うのは偏角が違うからであり、本質的な意味はない。この結果からパルス長の広がりを見積もると、図に示した通り fs 以下のオーダーとなり、ほとんど影響は無いことがわかる。

次に回折格子について考えてみると、集光条件は $PA+PB+nm\lambda = \text{一定}$ となる。ここでnは中心から数えた溝の番号、mは回折次数、 λ は波長である。つまり、隣りあった溝に当たった光の光路長が、互いに $m\lambda$ だけ異なっているということになる。例えば波長として 30 \AA (約400 eV)を考えた場合、10000本離れた溝に当たった光の光路長は互いに $30 \mu\text{m}$ 異なっているはずである。これは時間にして100 fsに相当するので、パルス幅に影響を与える可能性がある。この簡単な考察から、もしエネルギー分解能を高めようとして回折格子の照射範囲を広げるとパルス幅が広がってしまうということが予想される。

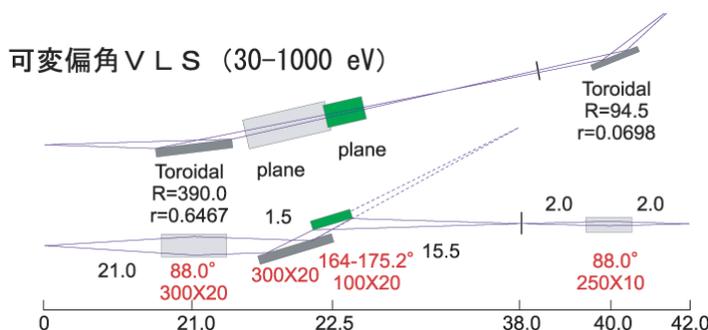


図 2.41: レイトレースに用いた光学系の模式図。回折格子の刻線密度は 600 l/mm。

ミラーの場合と同様にレイトレースで光路長を計算した結果を図2.43に示す。パルス幅の広がりには図に示したように800 fs (50 eV) および37 fs (800 eV) であり、特に50 eVの場合(波長が長い上に回折格子の照射範囲も広い)に無視できない影響が出ている。なお、回折格子の照射範囲は σ にして約16.5 mm (50 eV) および12.0 mm (800 eV) で、溝本数に直すとそれぞれ約9900本、7200本に相当する。今、不確定性原理から800 fs, 37 fsがどのくらいのエネルギー分解能に対応するかを見積もってみると、 $E/\Delta E = 9900$ (50 eV), 7600 (800 eV) となり、回折格子の溝本数とほぼ等しくなる。良く知られているように回折格子のエネルギー分解能は照射される溝本数の程度であるから、ここでも我々は不確定性原理から逃げる事が出来ないことがわかる。すなわち、短パルスを必要とする場合には回折格子の照射範囲を不用意に広く取ってはならないということである。

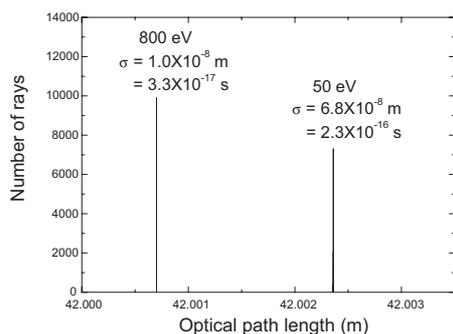


図 2.42: 回折格子をミラーに置き換えた場合の光源から試料位置までの光路長の分布。図 2.41 に示した光学系に対し、レイトレースによって計算した。

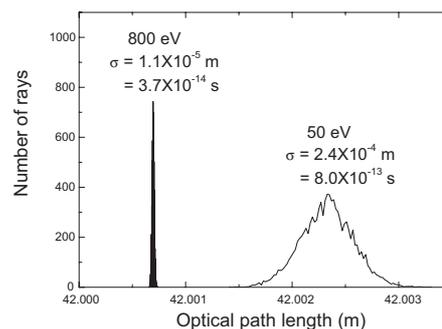


図 2.43: 1 次回折光に対して計算した光源から試料位置までの光路長の分布。

2.6.2.6 レーザーとのポンプ&プローブ実験における同期

PF-ERL を利用したサブピコ秒時間分解実験提案の大多数は、短パルスレーザーで試料を励起し放射光でプローブするポンプ&プローブ実験である(2.1 節参照)。この場合、両者を同期させることが不可欠である。レーザーによるポンプ&プローブ実験では同一のレーザー光を分岐してポンプ光とプローブ光を発生させているため数 fs の精度で同期させることが可能になっているが、この方式を放射光の場合に適用することはできない。

放射光とレーザーを同期するには、基準信号で ERL の電子銃と LINAC、短パルスレーザーを駆動する方式が考えられる(図 2.44) [10]。PF-ERL 放射光源の周波数は 1.3 GHz であるので、基準信号の 1/16 の 81.25 MHz でフェムト秒チタンサファイアモードロックレーザーを発振することにより両者を同期させる。室温の変動と光学素子の振動を低減することも重要である。SPring-8 における放射光・レーザー同期実験ではこのような手法によって数時間にわたりジッターを 2 ps 以内に抑えることに成功している [11]。2 ps 以下の分解能を実現するには放射光とレーザーを同一のストリークカメラでモニターし、時間ジッターをパルスごとに実測してポンプ・プローブ時間差を補正する方法が現実的である。ピコ秒時間分解ラジオリシス実験用に開発された時間ジッター補正システム [12] では最終的な時間分解能として 800 fs が達成されている [13]。将来、超高速 X 線ストリークカメラが開発されれば時間分解能は数百 fs まで改善できると期待される。

PF-ERL の周波数は約 1 GHz、レーザーの周波数はせいぜい 10 kHz であるため、ポンプ&プローブ実験では 99.999% の光を捨てることになる。たとえば PF-ERL の 30m-Undulator では $E = 8 \text{ keV}$ で 1.9×10^{16} という flux が得られるが(表 2.4)、実際に使用できる flux は 10^{11} 程度である(2.1.1.4 節参照)。

2.6.2.7 ナノビーム対応光学素子、集光光学系

ナノビームといっても集光光学系の基本に変化は無く、縮小率、収差、スロープエラーの 3 つによってビームサイズが決まる。ERL の場合には発光点が非常に小さいので、特に縮小率の部分は従来に比べてずっと楽になるのは当然である。すなわち、同じ縮小率でも従来よりもずっと小さい

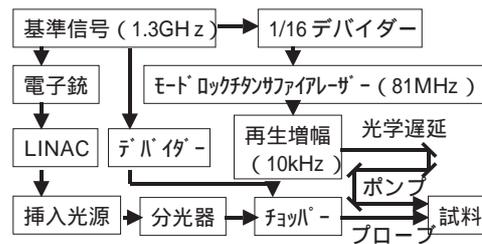


図 2.44: 放射光とレーザーの同期システムの一例。

スポットが得られることになるし、ある大きさのスポットを得るために必要な縮小率もずっと小さくて済むようになる。一方、これも当然のことであるが、スロープエラーには特に留意する必要があると考えられる。というのはスロープエラーの影響は光源がどんなに小さくても変わらないので、相対的にその重要性が増してくるからである。例えば現実的な配置として集光鏡から焦点まで 200 mm を想定すると、 $0.5 \mu\text{rad}$ (約 0.1 秒)のスロープエラーでも像の広がり は 200 nm となり、場合によっては縮小率で決まるスポットサイズよりも大きくなってしまふ。さらに、もう一つ重要なのは光学素子と試料の振動対策であろう。これもスロープエラーと同様、相対的に影響が重要になってくる。集光ミラーと試料との相対的な位置が変わらないようにすることが肝要である。

2.6.2.8 その他の検討事項

この他にも、集光素子・集光光学系の開発と改良、波動光学に基づく計算プログラムの作成など、検討すべき課題はたくさんある。PF だけでこれらの課題をすべて網羅することは到底不可能なので、他の放射光施設との協力が必要であろう。

雨宮健太(東大・理)、平野馨一、間瀬一彦、柳下明(KEK・PF)

参考文献

- [1] M. Yabashi, K. Tamasaku, H. Yamazaki, and T. Ishikawa : Proceedings of SPIE, 4500 (2001) 177.
- [2] K. Hirano : private communication.
- [3] 極紫外・軟 X 線放射光源計画検討会議世話人会・加速器仕様策定ワーキンググループ・ビームライン仕様策定ワーキンググループ・利用研究ワーキンググループ編、「極紫外・軟 X 線放射光源計画デザインレポート」(平成 14 年 9 月)。
- [4] Y. Wang, T. Xiao and H. Xu : J. Synchrotron Rad. 7 (2000) 209.
- [5] A. Freund : Summary of Group V, *ICFA Workshop on Future Light Sources*, Argonne National Lab., Argonne, IL, April 6-9 (1999).
- [6] A. Mori et al. : Proceedings of SPIE, 4501 (2001) 30.
- [7] O. Hignette et al. : Proceedings of SPIE, 4501 (2001) 43.
- [8] J. S. Wark and H. He : Laser and Particle Beams, 12(3) (1994) 507.

- [9] S. D. Shastri, P. Zambianchi and D. M. Mills : Proceedings of SPIE, 4143 (2001) 69.
- [10] A. Zholents et al.: http://erl.chess.cornell.edu/SRI2001_proceedings/ZholentsMadisonWS.pdf.
- [11] Y. Tanaka, T. Hara, H. Kitamura and T. Ishikawa, : Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A467-468, (2001) 1451.
- [12] T. Kozawa, Y. Mizutani, M. Miki, T. Yamamoto, S. Suemine, Y. Yoshida and S. Tagawa, : Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A 440 (2000) 251.
- [13] 吉田陽一、古澤孝弘、関修平、田川精一、平成 14 年度理研・日本分光学会装置部会合同シンポジウム「超短パルス電子線・X 線技術の現状と新展開」テキスト (2002) 4.

2.6.3 検出系

新しい光源が実現され新しい手法による研究が提案されるとき、計測方法にも飛躍的な進展があれば何 10 倍も効率的に結果が得られるかもしれない。予想していなかった新しい現象も捉えられる可能性がある。新光源計画の中で計測系の開発が重要であることは間違いない。ただし放射光利用実験では計測系への要求は多種多様ですべてを満たす万能検出器や計測システムは存在しない。X 線、光や電子を捕らえる検出器の開発以外にもデータ処理システムの開発など重要な要素がいくつもある。ここでは新光源によって新しい展開が期待される実験手法として「短パルス特性を利用した時分割 X 線測定」と「コヒーレント X 線によるイメージング」に注目して、そのための検出器や計測系の開発テーマについていくつか考えてみる。

2.6.3.1 サブナノ秒応答検出系

物質の構造変化等を放射光短パルス X 線を利用して最短分解時間で調べるためには放射光を発生する電子バンチの最短時間間隔より短い時間で計測すればよい。電子が 1.3 GHz の高周波電場で加速される場合、電子バンチの間隔は 0.77 ns となる。したがって各バンチごとのタイミングで時間変化を観察するならサブナノ秒で応答する検出器が必要ということになる。計測のもっとも基本を考えると、たとえば、ある位置で計測される放射線強度の時間変化を調べるような場合、サブナノ秒で検出器出力 1 パルスを計測することである (図 2.45 参照)。検出器として速い応答を示すものには X 線検出器として使われるシリコン PIN フォトダイオード (Si-PIN PD) やアバランシェフォトダイオード (Si-APD) がある。Si-PIN PD や Si-APD は素子の電気容量が小さければ幅 1 ns 以下の出力パルスも可能である。とくに APD の場合は高周波増幅器との組み合わせにより X 線 1 光子によるパルス出力が可能である。ある 1 個の電子バンチから同じタイミング (ERL を想定して電子バンチの幅は 1 ps 以下と考える) で X 線が入射するとき生じる時間ジッターは検出器の時間分解能による。Si-PIN PD や APD の時間分解能は空乏層中に生じた電荷キャリアの移動時間の差が短いほどよい。つまり素子の厚さが薄いほど良いタイミング性能が得られる。空乏層 100 μm あたり 1 ns というのが時間分解能の目安である。Si-PIN PD, APD を使った X 線検出器なら素子の厚み、大きさの設計によりサブナノ秒応答は可能である。問題はパルス処理回路側にある。たとえばパルスを計数する場合、現存する市販の電子回路系では 300 MHz が限界である。2 つのパルスを別々に処理するのに 3.3 ナノ秒必要ということなので、0.77 ns 以下のパルス処理を実現しようとするときにさらに 4 倍以上速い信号処理を行わなくてはならない。



図 2.45: 電子バンチのタイミング (0.77 ns 間隔) とサブナノ秒検出器の応答。出力波高が時間によって変化していく場合を示す。

2.6.3.2 高速データ収集システム

時分割測定として放射線強度分布 (1次元または2次元) の時間変化をできるかぎり短い時間間隔で記録する場合、1次元または2次元検出器の独立・多チャンネルシステムによる高速計測が要求される。そのとき各チャンネルの検出器が1で述べたような高速検出器でデータ収集も電子バンチ間隔以下の時間でできれば時間分割測定におけるもっともよい時間分解能 (最短分解時間) が得られる。高速のデジタルデータ取得の例としてデジタルオシロスコープの波形記録が挙げられる。最近のデジタルオシロスコープでは8ビットの変換精度で数Gサンプル/秒のデータサンプリングを実現しAD変換に要する時間およびメモリへの格納時間は数100 ps以下が可能になっている。開発の難易度および必要なコストはデータ分解能 (AD変換精度)、データ収集速度、必要なチャンネル数につれて上がるが、サブナノ秒またはナノ秒でデータ収集する多チャンネルシステムは分解能が8-10ビット程度ならば独立に処理することで実現可能だろう。ただしシステムの小型化はサブナノ秒パルスのための高周波回路系の集積度がどこまで可能かに依存する。

2.6.3.3 高分解能位置敏感検出系

サブミクロン位置分解能やより広い有感領域を有する2次元検出器の開発はイメージングへの応用に必要となっている。現在2次元検出器としてもっともよく使われているCCDの場合、空間分解能は $10\ \mu\text{m}$ から数 $10\ \mu\text{m}$ で有効領域は1辺につきその1000倍から数1000倍である。出力ダイナミックレンジは3桁から4桁である。空間分解能の優れた検出器としてはズームング管が開発され有効領域は数mm径ながら $1\ \mu\text{m}$ 以下の分解能を実現している。単分子構造解析への応用などが期待されるオーバーサンプリング法ではコヒーレントX線を使って微弱な回折強度の精密測定を行う。その場合、回折強度を正確に記録するため検出器には $1\ \mu\text{m}$ 以下の空間分解能、広い有感領域 (1辺数10mm?) とともに出力の比例性が広く確保される (4桁以上?) 必要があるだろう。これらすべての性能を満たすような2次元検出器はまだ存在しないので実験テーマに合わせて必要な性能の検討を行い開発目標を具体化すべきと考える。

2.6.3.4 検出器システムの開発体制

検出器本体の開発、信号処理回路系、とくに2次元検出器の場合は 10^6 を超えるチャンネルを個別に処理するような高集積度、高速データ処理が可能なシステムの開発が必要になるかもしれない。そのためには検出器を応用する研究テーマの専門家だけでなく電子回路やソフトウェアなど各分野での専門家グループによる開発を年限を限って組織的に行うようなプロジェクト研究を進めることが着実な成果を上げるうえで有効だろう。このようなプロジェクトを成功させるには、放射光利用を行う各分野、各施設において計測系開発に軸をおいて研究を進めるような研究者が検出器開発プロジェクトを次々と提案していくようなしくみの検討が必要だろう。KEKでは大規

模な検出器システムの開発を行っている高エネルギー物理分野の専門家の協力を得ることを考慮すべきである。

岸本俊二 (KEK・PF)

2.6.4 エンジニアリング・利用

ERLの特長をフルに発揮するためには、利用サイエンス、光学系、検出系の他に種々の基本的なインフラストラクチャーの性能を向上することが重要である。また、少人数で効率的な共同利用支援を行い、研究対象となる系の特性をフルに生かした研究を行うためには単に光源の性能だけでなく、総合的に研究を支えるシステムが必要となる。ここでは、ERLの特長を生かした新しい放射光源を建設するに当たり検討しなければならないいくつかの点に付いて記す。これらの内のいくつかは新第三世代光源でも技術的開発項目と捉えられており、単に業者に任せただけでは解決が困難ではないかと思われる。従って、放射光コミュニティとして専門家と相談しながら解決策を見出していく必要がある。

1. 振動・熱膨張対策

ERLを光源とする場合、数十 nm 程度のナノビーム光を作ることが出来る。また、回折格子分光器を用いるビームラインでは高いエネルギー分解能を得るためには極めて小さな開口幅の入射スリットを使うことが求められる。この様に微少な位置精度を必要とする場所については熱膨張に依る動き、床振動等による動きを極力抑制する必要がある。

熱膨張に関しては温度の安定化を図れば安定することは自明であるが、実験ホールの環境として ± 0.1 deg 以下を求めることはコスト面から見て妥当でない。 ± 1 deg 程度の空調環境の中でも熱源のない実験ハッチ内では ± 0.2 deg 程度で安定している。送風の仕方、熱源の隔離、断熱の仕方の工夫が必要である。また、鉄材の熱膨張係数は $1.4 \times 10^{-5} \text{deg}^{-1}$ と大きいので、ステンレス鋼、大理石、インバー合金等の材料を適切に選択する必要がある。

振動に関しては床振動に由来するもの、空調等の空気振動に由来するものが等が原因となる。現状の PF 光源棟では機械室が実験ホール、リングトンネルと同じ建屋内にあり、この振動がビームの安定性に影響を与えている [1]。従って、これら機械室は光源棟とは別の基礎とし、震動源にも除震、制震機能を完備する必要がある。これらの機械的床振動の他にも実験に用いるポンプ、チラー類のもたらす影響に関して研究が必要であるし、空気の流れの変化に由来する振動に付いても研究が必要である。例えば現在の PF 実験ホールの基礎は網目状にコンクリートの枠があり、それに床板が載っている構造であるが、新しい施設ではビームラインを建設し、実験を展開する場所を予め定め、その部分の基礎を強化することも必要であろう。

特に建屋の設計は加速器やビームラインと異なり、建設後 30 年近くの運命を決めることになるので慎重に取り組む必要がある。

2. 電氣的ノイズ対策

機械的な雑音と同時に電氣的な雑音の低減、隔離も重要である。高分解能電子分光実験では「放射光施設では一般的な実験室と比較して高いエネルギー分解能を得られない」ことが通説となっているが、この真の原因は解明されていない。また、これまでの放射光利用経験に照らしても、光子数の統計で決まるだけの S/N 比を実現出来ていない例も多いように見受けられる。

加速器は大電力を使う装置であり、ある意味ではノイズ源である。ERLの特性を十分に生かし

て高精度の実験を行うためには、こういった環境の中で如何にノイズを低減するかという解を見出しておく必要がある。

3. 建屋設計の思想

Photon Factory は設計当初に想定した以上の大規模な共同利用を 20 年に亘って行ってきた。日本の放射光施設の職員数は諸外国の施設と比較して数分の一以下であり（例えば ESRF は 600 人、APS は 405 人、SRS は 260 人に対して PF は 80 人）、このような条件下で、少人数で効率的に運転、共同利用支援を行える建屋設計が必要とされる。

一方で、放射光施設の建設費の中に占める建屋建設費の割合は諸外国の場合と比較して大きく、総建設費に大きな割合を占めている。

4. 利用実験にOrientした実験環境の構築

放射光は多様な研究に利用されているが、その中でも材料評価へ利用されている割合が大きい。これらの研究では単に常温常圧下のみならず、各種の特殊環境下での実験が求められることも少なくなく、今後こういった方向の研究が拡大する可能性は大きい。現状の PF では排ガス配管を設置することで、各種のガスを利用した実験に対応しているが、今後より複雑で危険性の高い実験を行うことも必要となろう。また、より実環境に近い、例えばエンジン運転中の排ガス触媒の挙動研究や化学反応の追跡、遺伝子操作や放射性同位元素を使用した試料を用いた実験等も求められよう。こういった実験を行うためには、排ガス処理等の環境維持装置、また、万が一の場合も被害が広がらない実験室を予め作っておく必要がある。この良い例が PF の RI エリアであり、これがなければ非密封ラジオアイソトープを使った実験は実現出来なかった。同様にクリーンルーム環境やウエットな実験をその場で行える化学実験室、生物実験室仕様の実験ステーションも求められる。

野村昌治 (KEK・PF)

参考文献

- [1] K. Huke, Jpn. J. Appl. Phys., 26 (1987) 285.