

XFEL/SPring-8  
Beamline Technical Design Report  
Ver. 1.0

June 17, 2008

理化学研究所・高輝度光科学研究センター  
X線自由電子レーザー計画合同推進本部  
利用グループ

SPring-8 Joint Project for XFEL

Experimental Facility Group

## はじめに

国の第三期科学技術基本計画の中で、「国家基幹技術」と位置づけられて推進されている「X線自由電子レーザー」施設整備は、平成20年度に5年計画の3年目を迎えた。この種の施設整備計画の常として、上流側から下流側に向けて計画が進行していくが、3年目を迎え、ついに加速器の下流に位置する、光源・ビームライン・実験装置や、それらに関連するユーティリティの整備を開始することになった。

X線自由電子レーザー計画合同推進本部では、利用グループを中心として、それらの概念設計を進めてきたところであるが、このたびその結果をとりまとめ、デザインレポートとして公開し、広く関連研究者のフィードバックを得ることにより、さらに一層優れた施設とすることを意図した。

その方針のもとに、今般デザインレポートの公開に至ったが、さらに細部を詰める作業は依然残っている。一方で、年度後半には、発注作業を進める必要もあるので、可能な限り速やかに関係各位のご意見をお聞きし、今後の計画に活かしていく所存である。

皆様の、X線自由電子レーザー施設整備計画に対する、これまでのご支援に感謝するとともに、今後の益々のご支援と、計画へのご意見をいただけることを期待している。

平成20年6月吉日  
X線自由電子レーザー計画合同推進本部  
利用グループ グループディレクター  
石川 哲也

## 執筆者

### 理研・JASRI X線自由電子レーザー計画合同推進本部

大橋治彦, 木村洋昭, 後藤俊治, 田中義人, 玉作賢治, 富樫格, 富澤宏光, 東谷篤志,  
矢橋牧名 (利用グループ ビームライン建設チーム)

永園充 (利用グループ SCSS 試験加速器利用チーム)

工藤統吾, 西野吉則, 初井宇記 (利用グループ データ処理系開発チーム)

高橋直 (加速器建設グループ 光源チーム)

田中隆次, 田中均, 渡川和晃, 原徹 (加速器建設グループ オプティックスチーム)

大端通, 古川行人, 松下智裕 (制御系建設グループ)

浅野芳裕, 糸賀俊朗 (安全設計グループ)

(順不同)

## 編集

矢橋牧名 (利用グループ ビームライン建設チーム チームリーダー)

石川哲也 (利用グループ グループディレクター)

## 発行

理研・JASRI X線自由電子レーザー計画合同推進本部 利用グループ

〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

e-mail: [xfeluser@spring8.or.jp](mailto:xfeluser@spring8.or.jp)

## 発行日

初版: 2008年6月17日

(無断転載を禁ず)

## 目次

1. 概要	1
2. 光源性能	2
3. 実験研究棟	14
4. ビームラインの設計指針	20
5. ビームラインの構成	26
5-1. 概要	
5-2. フロントエンド	
5-3. 光学系・輸送系	
5-4. 実験ステーション	
6. 個別コンポーネント仕様	33
6-1. 概要	
6-2. ハッチ	
6-3. フロントエンド機器	
6-4. ビームライン光学系機器	
6-5. ビームライン輸送系機器	
6-6. ビームライン真空システム	
6-7. モニタ機器	
7. データ収集システム (DAQ)	54
7-1. データ収集システム (DAQ)	
7-2. X線2次元検出器	
8. 制御・インターロックシステム	66
9. 共通実験装置	67
9-1. 共通実験架台	
9-2. 集光光学系	
9-3. 同期レーザー	
9-4. タイミング	
参考文献	68
APPENDIX	69
A1. XFELに対する照射耐性	
A2. 透過率の見積もり	
A3. 散乱能の見積もり	
改版履歴	

## 1. 概要

X 線自由電子レーザー (XFEL) は高輝度、高コヒーレンス、短パルスという特性をもつ新しい光源であり、日米欧で開発が行われている [1-1,1-2,1-3]。日本では、SPring-8 キャンパスにおいて、2006 年度から 2010 年度の 5 年計画で、X 線自由電子レーザー計画合同推進本部により XFEL 施設の建設が進められている。XFEL は、加速器、アンジュレータ、ビームラインから構成されるが、本レポートは、その中で利用実験と最も関わりの深い、ビームラインのデザインを示す。

放射光ビームラインは、放射光源の進歩と共に発展を遂げてきた。1970~80 年代の第 2 世代放射光 (放射光専用の蓄積リング光源) においては、安定かつ迅速に波長を走査するための分光器が開発され、また、超高真空の蓄積リングにビームラインを接続するための真空システムが整備された。1990 年代から始まる第 3 世代放射光 (低エミッタンス蓄積リングに設置されたアンジュレータを光源とする) では、光源からの高い熱負荷に耐えうる光学系の開発が最も重要な課題であった。今回の XFEL ビームラインに課せられたテーマは、「コヒーレンス」と「パルス」である。すなわち、コヒーレントな波面を乱さないようなスペックルフリー光学系の実現と、孤立した高輝度 X 線パルスを有効に利用できるような光学系・検出系の構築が求められる。このために、合同推進本部利用グループを中心として、様々な角度から検討が重ねられてきた。本書はその議論の上に立脚してまとめられている。

SPring-8 の XFEL 施設は、線形加速器により加速された電子ビームをスイッチング電磁石によって振り分けることで、5 本のビームラインが設置可能なように設計されている。2010 年度までの建設計画では、硬 X 線領域の FEL ビームライン (BL3) と広帯域ビームライン (BL1) の 2 本が設置される。このうち、本書初版では、BL3 を主な対象とし、BL1 については、改版時に詳細を追加する予定である。

全体の構成は以下の通りである。第 2 章に、ビームラインのデザイン及び利用実験の計画に不可欠な光源の性能をまとめる。第 3 章に、ビームラインが設置される実験研究棟の概要を示す。第 4 章にビームラインの基本的な設計指針を示し、それに基づいて作成されたビームライン構成を第 5 章に、各コンポーネントの仕様を第 6 章にそれぞれ示す。また、XFEL ではショット毎の実験データの取得が必須であるが、このために必要なデータ収集システム及び 2 次元検出器の仕様を第 7 章に示す。第 8 章に制御・インターロックシステムについて、第 9 章には共通実験装置の概要を示す。Appendix には、いくつかの独立したテーマについての考察を示す。

本書初版の作成は、設計作業と並行して行われており、当面の間、頻繁に追加・更新される予定である。このために、Appendix に改変記録の項目を設けたので参照されたい。

## 2. 光源性能

### 2-1. 概要

FEL の光特性は、電子ビームとアンジュレータのパラメータによって決定される [2-1,2-2]. 特に重要な項目は、前者では加速エネルギー、ピークカレント、ビーム密度であり、後者では磁石の周期長、周期数、最大磁場である. 本章では、これらのパラメータを示した上で、光特性 (FEL 及び自発放射) をまとめる.

本計画の加速器システムでは、高密度・低エミッタンス電子ビームを生成するため、熱電子銃と多段バンチ圧縮システムが用いられる. このシステムは、6 次元位相空間中の電子ビームのパラメータのデザインに大きな自由度を与えるが、ここでは典型的なパラメータセットに対して光特性を計算した. また、真空封止・短周期・ギャップ可変という特徴をもつ本アンジュレータシステムは、磁石間のギャップの調整により磁場を制御することで、電子ビームエネルギー  $E_b$  を固定した条件でも、波長の走査が可能である. ここでは、 $E_b = 8$  GeV の条件でいくつかの典型的な  $K$  値に対して光特性を計算した結果を示す. さらに、マルチバンチ運転 (40 パルス/トレイン, 4 ns 間隔) を可能とするために、C バンド主加速器としてチョークモード加速管を採用しているが、本章ではシングルバンチ運転の場合を示した.

### 2-2. 電子ビームパラメータ

電子ビームパラメータのサマリーを Table 2-2-1 に示す. また、ピークカレントと規格化エミッタンス、エネルギー Spredd、エネルギーの時間依存性をそれぞれ Fig.2-2-1, Fig.2-2-2, Fig.2-2-3 に示す. シミュレーションは、1 次元 PIC コード、PARMELA, ELEGANT を組み合わせて行われた.

Table 2-2-1 電子ビームパラメータ

Beam energy (GeV)	8
Peak current (kA)	4.4
Slice emittance	0.77
Slice energy spread	7.1e-5
Total charge (nC)	0.29
Bunch width (fs, FWHM)	55
Beam size at ID exit (um, rms)	35
Repetition rate (Hz)	60 (max) to 1 (min)

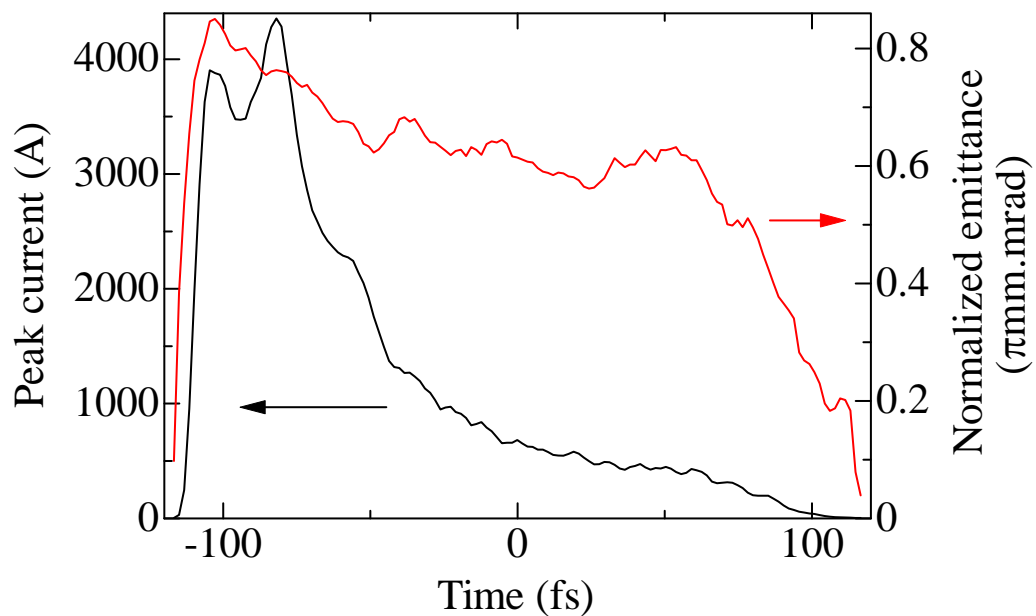


Fig.2-2-1 電子ビームのピークカレントと規格化エミッタンスの時間依存性.

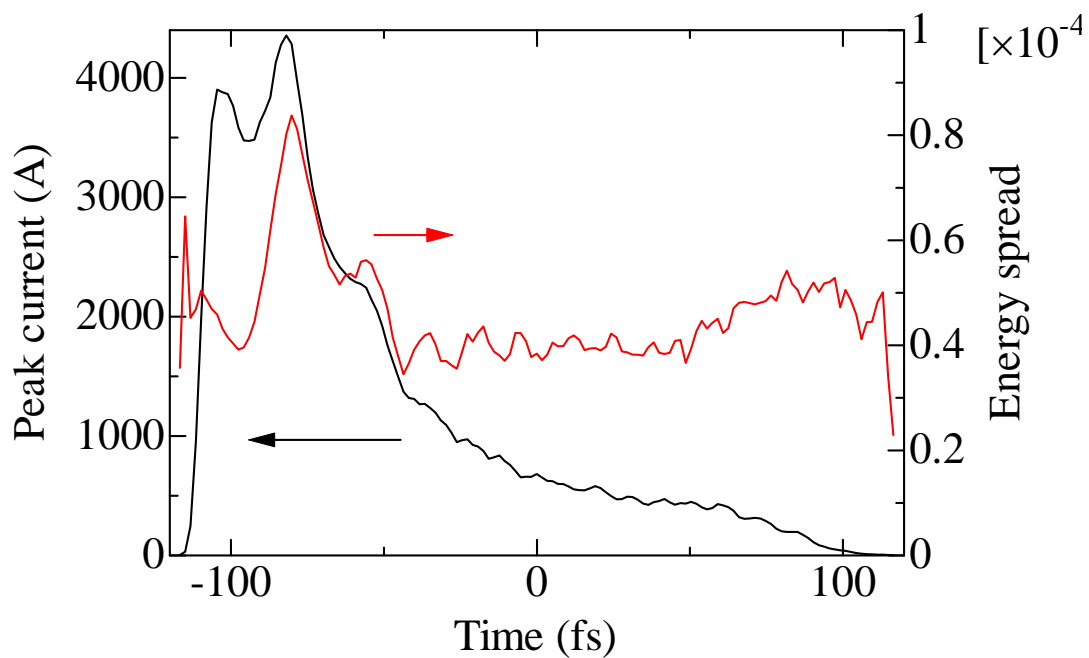


Fig.2-2-2 電子ビームのピークカレントとエネルギーブレッドの時間依存性.

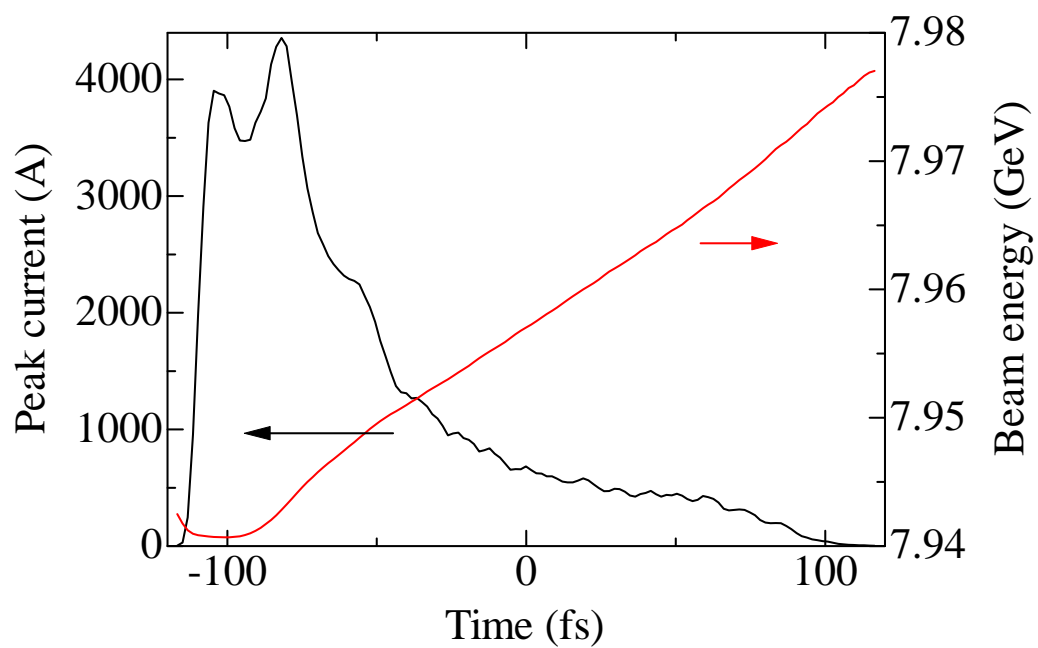


Fig.2-2-3 電子ビームのピークカレントとビームエネルギーの時間依存性.



## 2-3. アンジュレータパラメータ

BL3 用アンジュレータパラメータの設計値を [Table 2-3-1](#) に示す.

[Table 2-3-1](#) BL3 用アンジュレータパラメータ

Periodic length, $\lambda_U$ (mm)	18
Segment length (m)	5
Number of segment	18
Total periodic number	5000
Maximum deflection parameter, $K^{*1}$	2.3
Average betatron function, $\beta_x / \beta_y$ (m)	25 / 25

$$*1: K = \frac{eB_0\lambda_U}{2\pi m_e c}, B_0: \text{Peak magnetic field}$$

## 2-4. FEL 放射パラメータ

SIMPLEX [2-3] を用いて FEL 放射パラメータのシミュレーションを行った。Table 2-4-1 に、 $K=2.2$  のとき求められた各種パラメータをまとめる。続いて、 $K=2.2, 1.9, 1.5, 1.1$  と変化させたときの光子エネルギーと出力の関係を Fig.2-4-1 に、アンジュレータに沿った長さを横軸にとったゲインカーブを Fig.2-4-2 に示す。Fig.2-4-1 では、 $K$  値が大きくなるにつれ、放射波長が長波長側にシフトする（光子エネルギーが減少する）とともに (Eq. 2-4-3), FEL パラメータ  $\rho$  の増加により放射出力が増加することがわかる (Eq. 2-4-1)。同時に、Eq. 2-4-2 にしたがってゲイン長が減少するため、より速やかに飽和に達する (Fig.2-4-2)。さらに、時間スペクトル、エネルギースペクトルの典型例をそれぞれ Fig. 2-4-3, Fig. 2-4-4 に示し、時間・エネルギーの相関プロットを Fig. 2-4-5 に示す。

Table 2-4-1 FEL radiation parameters (fundamental radiation)

Electron beam energy (GeV)	8
Repetition rate (Hz)	60 (max) to 1 (min)
UND K value	2.2
FEL parameter <sup>※2</sup>	4.4e-4
Saturation length (m) <sup>※3</sup>	45
Wavelength (nm) <sup>※4</sup>	0.13
Photon energy (keV)	9.9
Bandwidth	9.2e-4
Source size (um, rms)	33
Angular divergence (urad, rms)	0.73
Peak power (GW)	29
Pulse energy (mJ)	0.78
Photons per pulse (phs/pls)	5.0e11
Pulse width (fs, FWHM)	30
Power ratio of higher-order harmonic (2nd:1st)	1.3e-4
Power ratio of higher-order harmonic (3rd:1st)	2.8e-3

$$\text{※2: } \rho = \left[ \frac{\gamma \lambda^2 r_e n_e}{8\pi} F_1(K) \right]^{\frac{1}{3}} = \left[ \frac{\gamma^2 \lambda^2 r_e I_p}{16\pi^2 c e \beta \epsilon_n} F_1(K) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Eq. 2-4-1})$$

$$F_1(K) = \frac{K^2}{(1+K^2/2)^2} \left[ J_0\left(\frac{K^2/4}{1+K^2/2}\right) - J_1\left(\frac{K^2/4}{1+K^2/2}\right) \right]^2$$

$$\gamma = E_B / m_e c^2 : \text{Lorentz factor}$$

$$\lambda : \text{Radiation wavelength}$$

$n_e$ : Density of e-beam

$I_p$ : Peak current of e-beam

$\varepsilon_n$ : Normalized emittance of e-beam

$\beta$ : Average betatron function

$$\text{※3: } L_g = \frac{\lambda_U}{4\pi\sqrt{3}\rho} \quad (\text{Eq. 2-4-2})$$

$$\text{※4: } \lambda = \frac{\lambda_U}{2n\gamma^2} \left( 1 + \frac{K^2}{2} \right) \quad (\text{Eq. 2-4-3})$$

$n$ : Order of harmonic

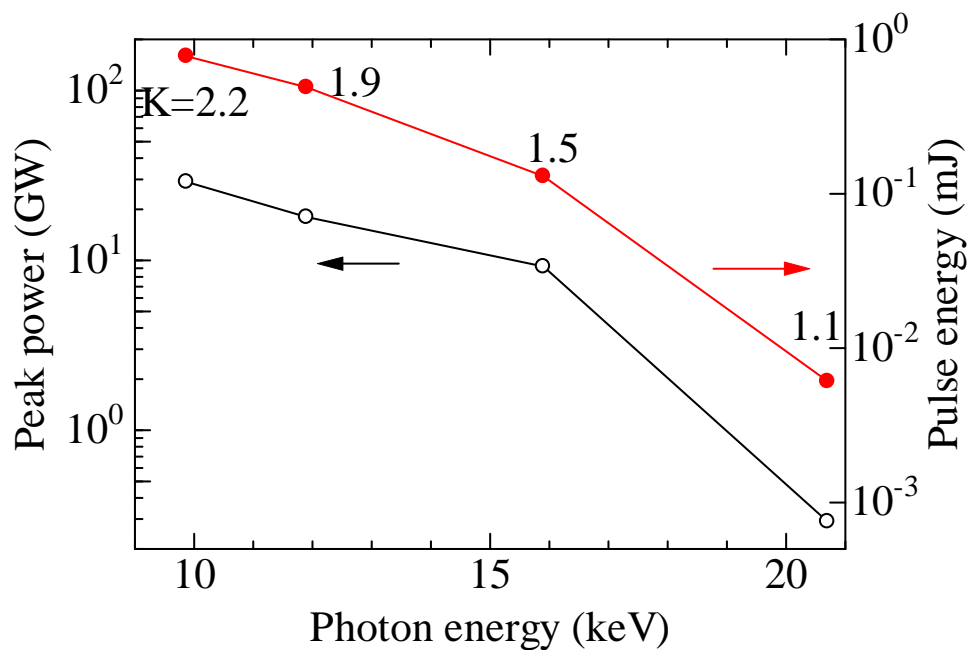


Fig. 2-4-1  $K$  値を変えたときの光子エネルギーとピークパワー及びパルスエネルギーの関係.

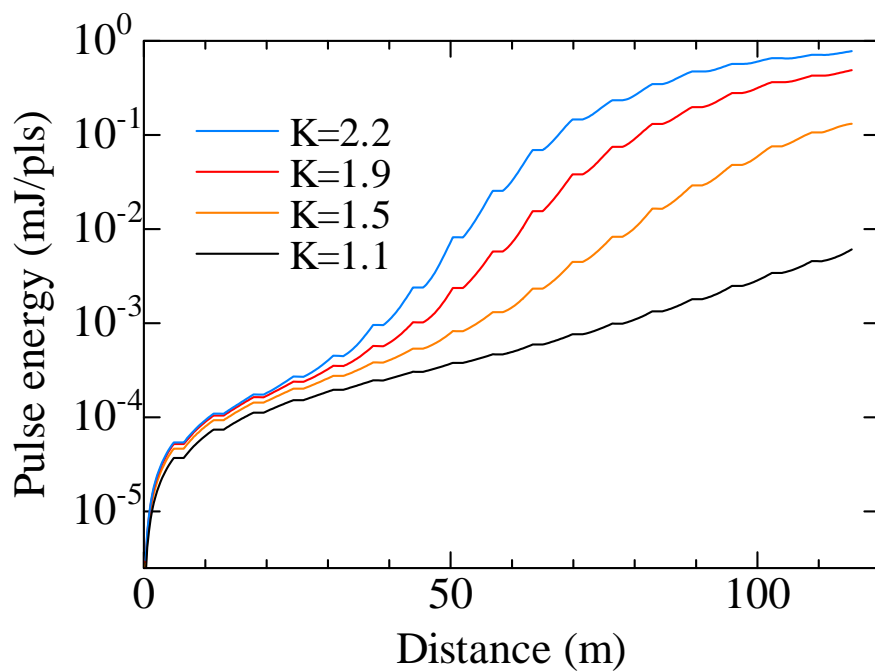


Fig.2-4-2 アンジュレータに沿った距離とパルスエネルギーの関係 ( $K=2.2, 1.9, 1.5, 1.1$ )

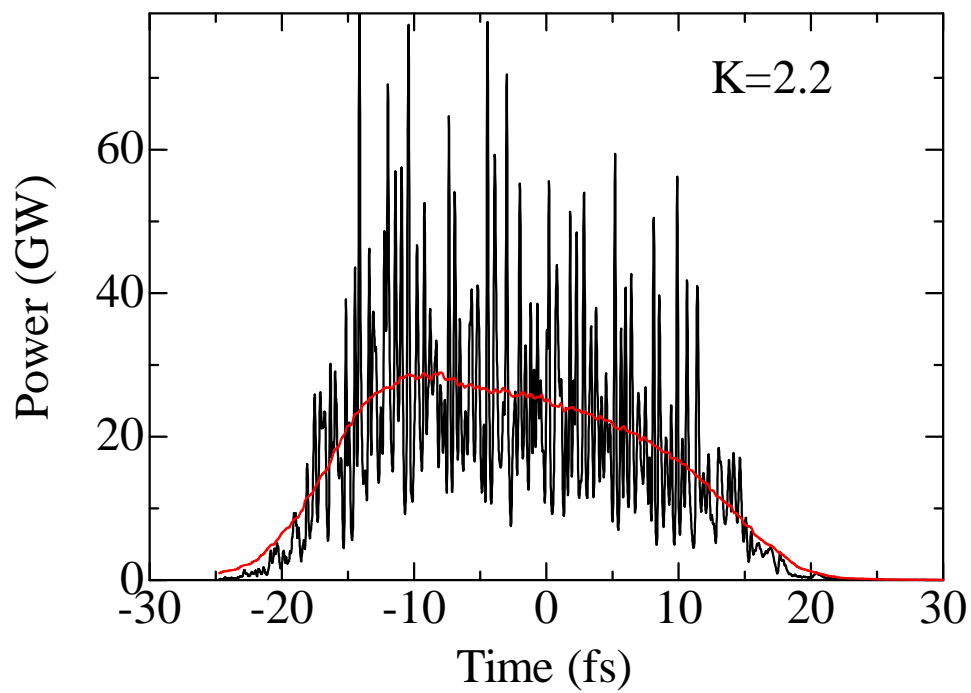
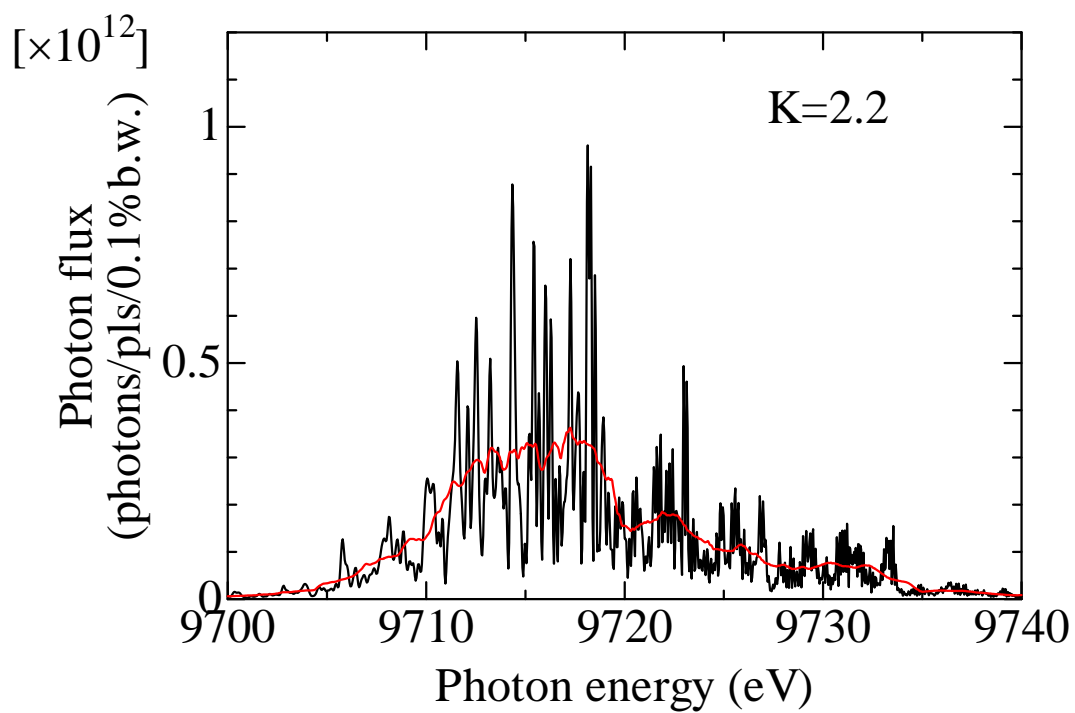
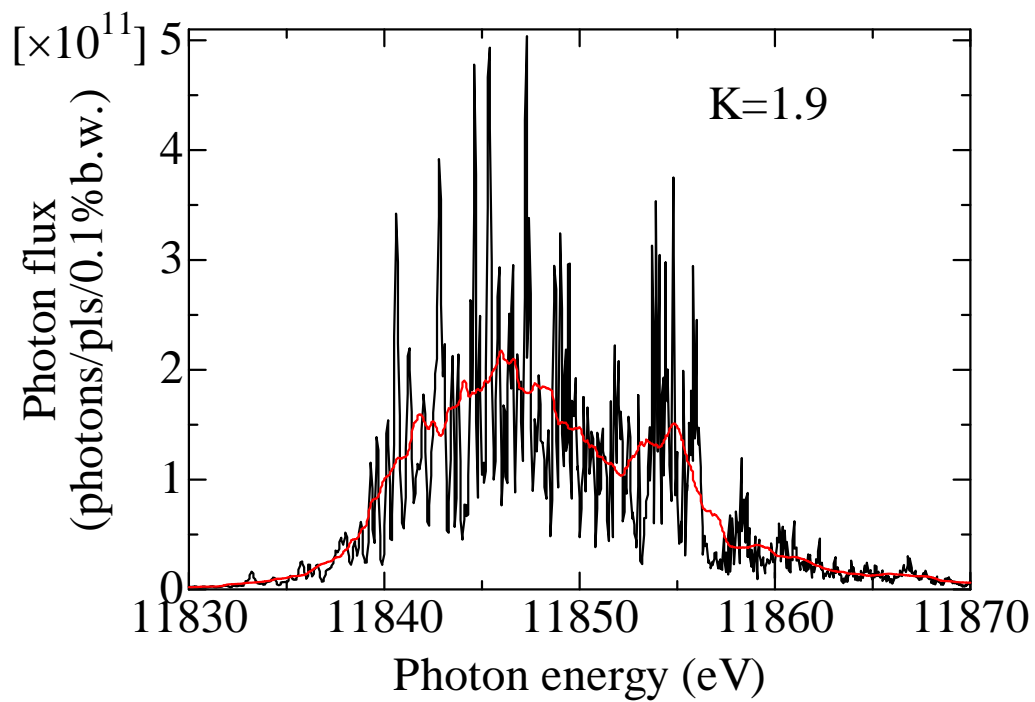


Fig. 2-4-3 時間スペクトル ( $K=2.2$ ).

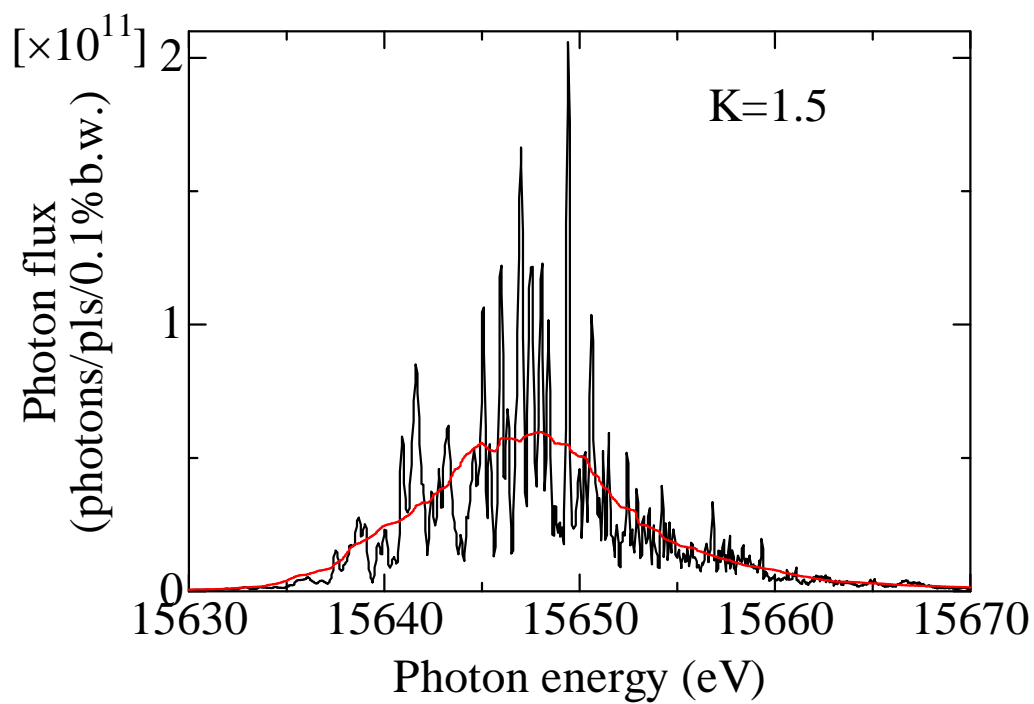
(a)



(b)



(c)



(d)

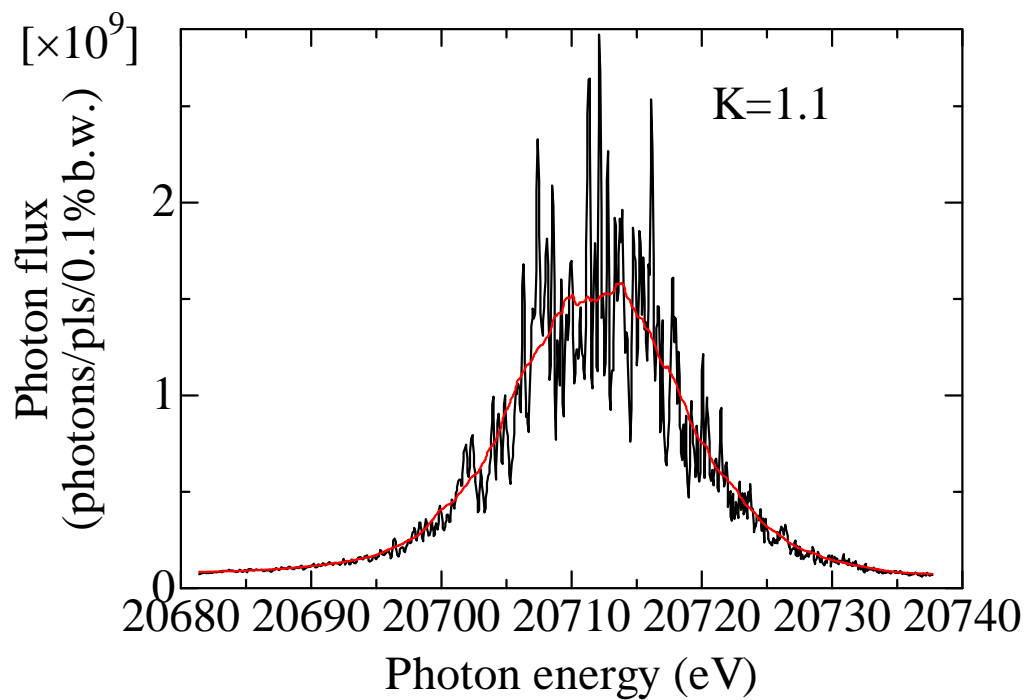


Fig. 2-4-4 エネルギースペクトル. (a)  $K=2.2$ ; (b) 1.9; (c), 1.5; (d) 1.1.

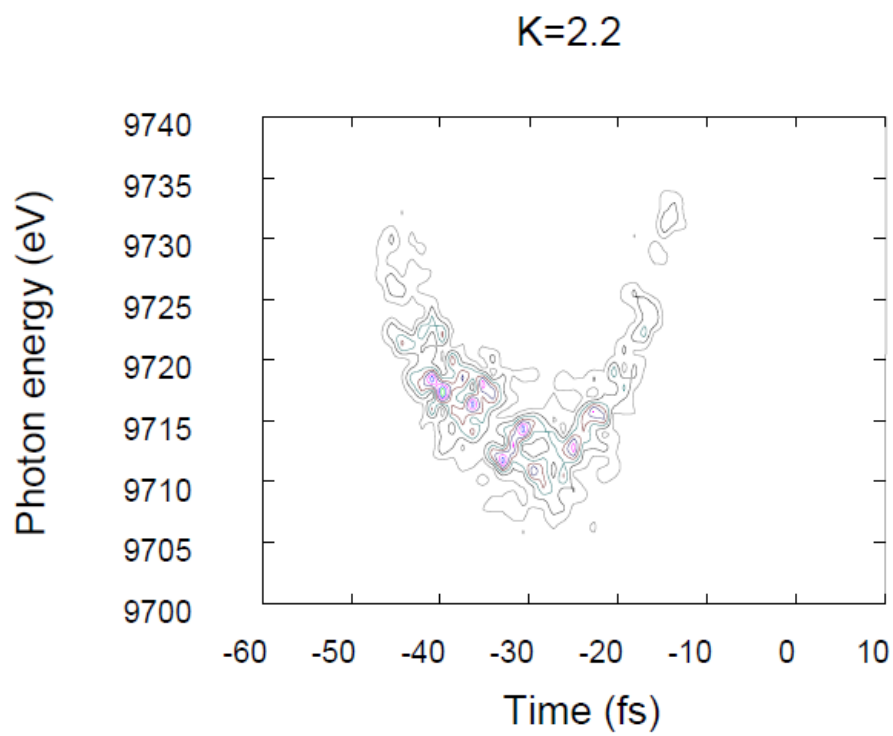


Fig.2-4-5 時間・エネルギーの相関 ( $K=2,2$ ).



## 2-5. 自発放射

自発放射のパラメータを [Table 2-5-1](#) にまとめる.

[Table 2-5-1](#) 自発放射のパラメータ

Beam energy (GeV)	8
Max. total charge (nC)	1.5
Max. repetition rate (Hz)	60
UND K value	2.2
Average power (W)	0.57
Power divergence H/V (urad, rms)	71/43
Power density at $L=64$ m (distance from UND exit) (mW/mm <sup>2</sup> )	1.5 <sup>※1</sup>
Partial power after $\phi$ 10 mm aperture at $L=64$ m (mW)	117

※1 アンジュレータ中心を仮想光源点として計算.

### 3. 実験研究棟

#### 3-1. 概要

XFEL 実験研究棟に関しては、2008 年 1 月末で基本構想がまとまった段階である。2008 年 3 月から基本設計・詳細設計を詰め、2009 年 3 月から建設開始、2010 年 5 月に竣工の予定である。ここでは、1 月末にまとめた基本構想にもとづいて述べる。

設計条件として、次の点を考慮した。

- (1) 実験ホール床においては、将来にわたって沈下の生じない構造とし、振動に配慮すること。
- (2) 実験ホールにおいては、振動・外気温の変動による影響のない構造とすること。
- (3) 研究室は基本設備を備え、将来にわたり異なる分野の研究・実験に対応できる柔軟で多目的な使用を可能にするよう配慮すること。

実験研究棟の配置計画図、平面計画図、立面・断面計画図を添付する。(Fig. 3-1-1, Fig. 3-1-2, Fig. 3-1-3)

XFEL 実験研究棟は XFEL 光源棟の下流部に建設される。このエリアの地盤は、中硬岩の切土部である。実験ホールのビーム軸方向の長さは、蓄積リング周回道路や長尺ビームライン BL31IS 用ホール外実験施設エリアサイズ等を考慮して決定された。しかし将来のビームラインの延長、或いは蓄積リングのビームを同時に使用する実験等も行うことが可能なように、XFEL ビームラインの延長線上の周回道路下部はトンネル状になっている。

#### 3-2. 実験ホール仕様（放射線管理区域内）

実験ホールでは、アンジュレータホールで発生した XFEL 光を使用して実験を行う。その為に、各種実験装置・光学ハッチ・実験ハッチ・各種制御機器等を設置する。

##### (1) サイズ

実験ホールは長さ（ビーム軸方向）56 m、幅 31 m、高さ（クレーンの揚程）7 m である。尚、XFEL ビームラインの間隔は 3 m、BL3 の最下流アンジュレータ（No. 18）下流部から実験ホール収納壁までは 73 m 程度である。

##### (2) 実験ホール床

実験ホール床部は、厚さ 1～2 m のコンクリートを打設して実験ホールの床とする。設計床加重は 2 t/m<sup>2</sup> である。床高さは XFEL ビームに対して -1.4 m で、その平坦度は ±10 mm 程度である。床表面部はエポキシ樹脂系塗装が施される。また、付室部の基礎との間は構造をわけることで、側室や機械室からの振動が伝わることがないようにする。床ピットは特に設けない。共通石定盤のアライメントを行うために、ハッチ内・準備スペースの床研削の必要性について検討する必要がある。(TBD)

##### (3) 天井クレーン

実験ホールには、横行・走行を持つ天井クレーン（最大つり上げ加重 2.8 t、揚程 7 m）が設置される。

#### (4) 搬入用扉

実験ホール南側の搬入室の扉は高さ 4 m×幅 4 m, 北側出入り口扉は高さ 2 m×幅 2 m である。

#### (5) 空調

実験ホールは設定温度±2 °Cに管理する。また外気の影響を避けるために、天井部・壁部には断熱材を用い、空調振動を抑えた空調設備を設置する。

#### (6) ユーティリティ

ビームラインごとに、実験用分電盤、冷却水、圧縮空気、空調ダクト分岐口が設けられる。また、将来スクラバーを設置するための局所排気用設備を設ける。容量等の詳細については検討中である。

### 3-3. 測定準備室仕様（放射線管理区域内）

測定準備室では、実験ホールにて行う実験の測定準備を行う。

各ビームラインには、サイズ幅 7 m×奥行き 10 m×高さ 3 m の測定準備室が実験ホールに隣接して（一階に）用意される。入口扉サイズは高さ 2 m×幅 2 m, 設計床加重は 1 t/m<sup>2</sup> である。又、天井梁はクレーンを設置できるように対応されている。

各部屋には、実験用分電盤、冷却水、圧縮空気が用意される。上水、実験排水設備は用意されない。

### 3-4. 試料準備室仕様（放射線管理区域外）

試料準備室では、実験ホールにて行う実験の試料準備を行う。

各ビームラインには、サイズ幅 7 m×奥行き 10 m×高さ 3 m の試料準備室が 2 階に用意される。入口扉サイズは高さ 2 m×幅 2 m 設計床加重は 0.5 t/m<sup>2</sup> である。

各部屋には、実験用分電盤、上水、実験排水設備が用意される。

### 3-5. 搬入室仕様（放射線管理区域外）

搬入室は、実験ホールに実験機器を搬出入するのに使用され、実験ホールの温度に大きな影響を与えないように風除室として使われる。サイズは幅 14 m×奥行き 7 m×高さ 5 m で設計床加重は 2 t/m<sup>2</sup> である。搬入扉サイズは高さ 4 m×幅 4 m で、天井クレーンは用意されない。

### 3-6. その他

将来、除外装置等の室外機を設置するスペースとして、実験研究棟南側付室の屋上部を用意している。

### 3-7. ノイズ対策

EMC 対策, AC ラインのコモンノイズ対策, 建家のアース（計測アース, メッシュアース,

上流建家とのセパレーション 等) それぞれについて数値目標を示す必要がある. (TBD)

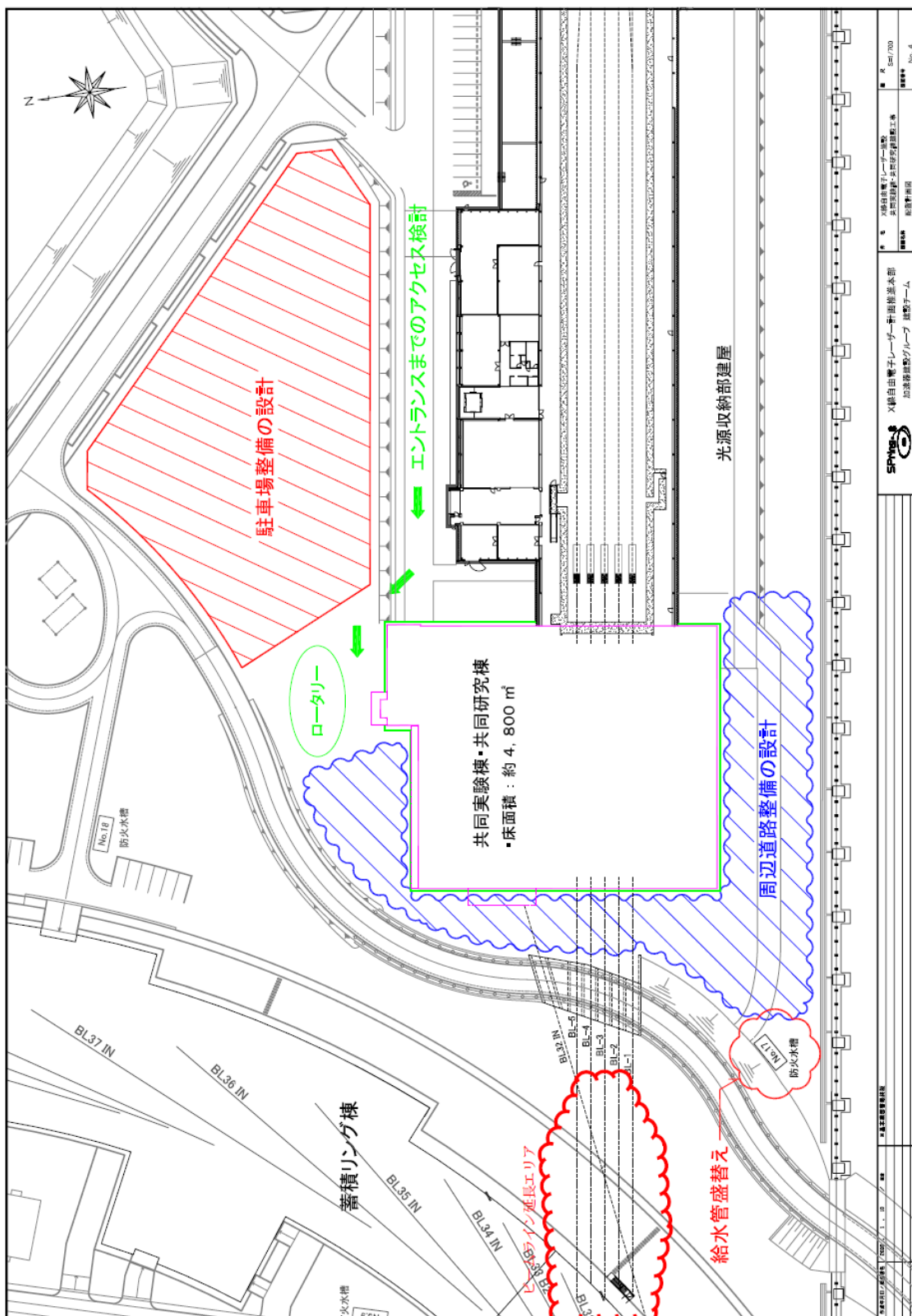


Fig. 3-1-1 XFEL 実験研究棟 配置計画図.

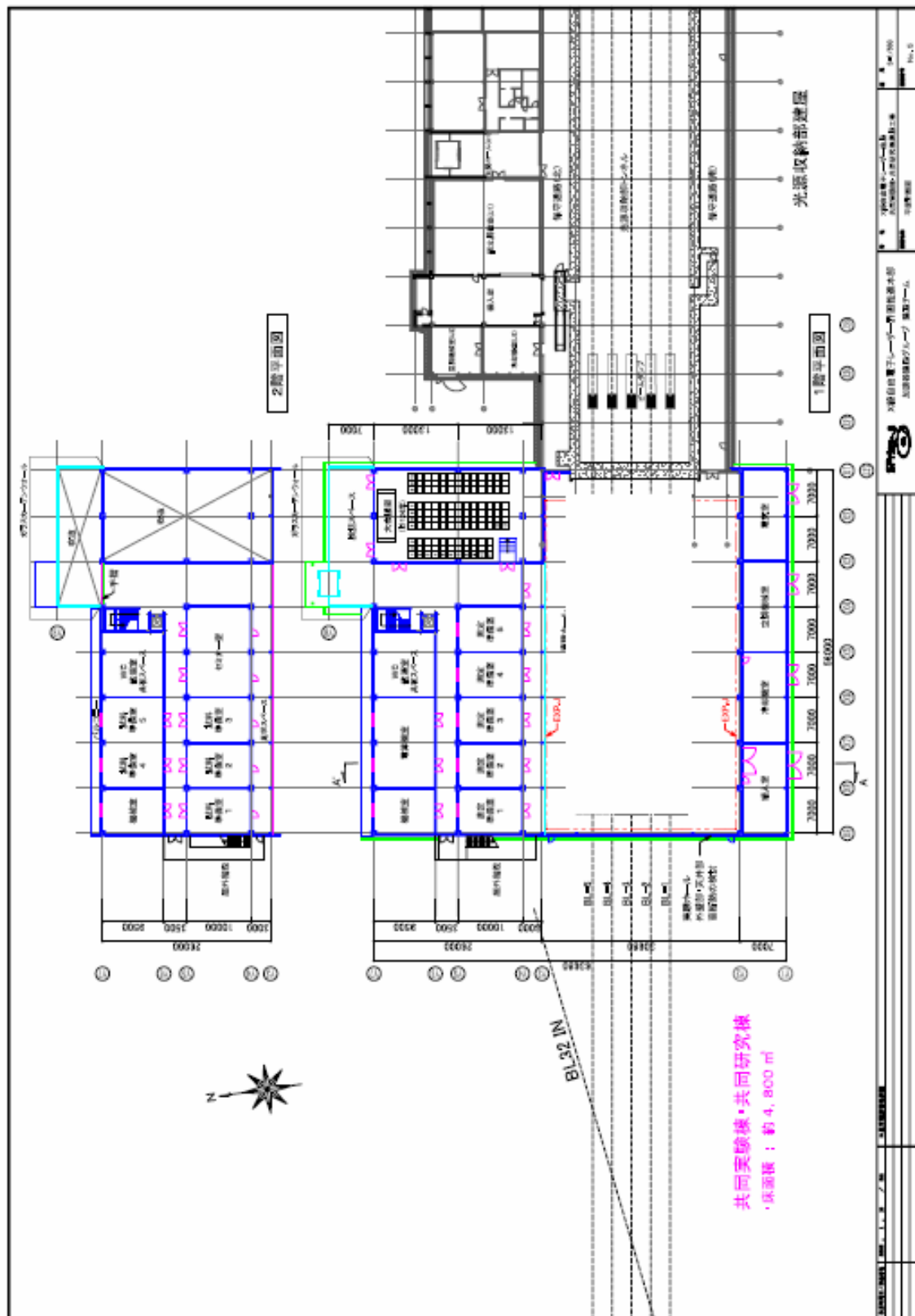


Fig. 3-1-2 XFEL 実験研究棟 平面計画図



## 4. ビームラインの設計指針

### 4-1. 概要

XFEL 放射は、コヒーレンス特性・超高輝度・パルス性といったビーム特性において、従来の放射光とは大きく異なっている。また、XFEL 施設は、ライナックベースの大型放射光源としては初めての事例である。ビームライン設計にあたっては、従来の考え方の踏襲に留まらず、新しい視点を導入する必要がある。

本章では、XFEL ビームライン設計にあたり特に議論になったポイントを列挙し、項目ごとに方針を示す。

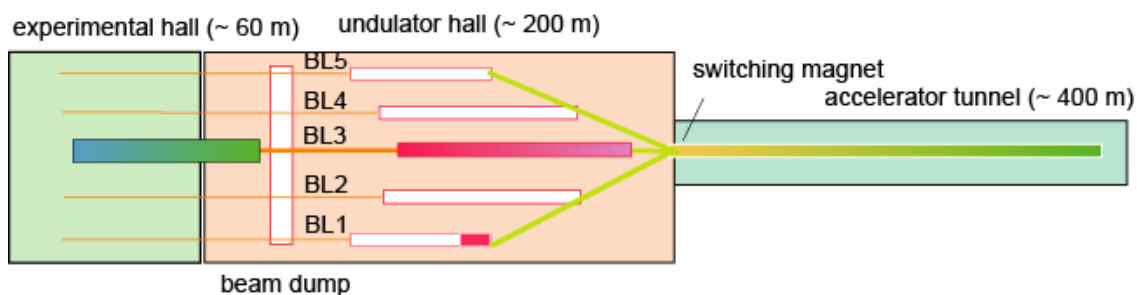


Fig. 4-1-1 ビームラインの全体構成

### 4-2. 配置計画

#### (1) ビームライン構成

光源収納部は、最終的に5本のビームラインが設置できるよう設計がなされた。振り分けビームラインの配置から、挿入可能なアンジュレータ長はそれぞれ約 80 m (BL1, BL5), 約 120 m (BL2, BL4), 約 150 m (BL3) となっている。短波長の FEL 放射には長尺のアンジュレータを必要とすることから、BL2, BL3, BL4 は硬 X 線, BL1, BL5 は軟 X 線・VUV 領域を主なターゲットとする。2010 年度に完成予定の第 1 期の建設計画では、BL3 を XFEL ビームライン, BL1 を広帯域ビームラインとして設置を行う。(Fig. 4-1-1)

#### (2) 隣接ビームライン

振り分け部の電子ビーム光学の要請により、隣接ビームラインの間隔は 3 m となっており、スペースに制約がある。このため、放射線遮蔽の目的で必要とされるシールドハッチは、個々のビームライン毎に設けるのではなく、複数のビームラインを束ねた構成にする。但し、全 5 本のビームラインを 1 つのハッチ内に収納すると、新規建設やメンテナンスの際に他のビームラインが利用できなくなるため、適宜分割を行う。



### 4-3. 放射線遮蔽

#### (1) 基本方針

8 GeV ビームダンプ電磁石付近の電子ビームロスによって高線量の $\gamma$ 線の発生が想定される。この $\gamma$ 線が、収納部貫通口を通して実験棟に飛び込むと、第一散乱体で光核反応を起こして中性子に転換する。実験棟内への放射線（ミュオン、電子線も含む）の線量を低減させるため、ダブルコリメータを収納部内に設置する。また、実験棟内の中性子遮蔽のために、第一散乱体を収納する光学ハッチをコンクリート（厚さ 50 cm 程度）でつくる。鉛ハッチの場合は、中性子線用の局所遮蔽として鉄またはポリエチレン 30 cm 程度が必要となり、自由度・作業性を著しく損ねるため、採用しない。

さらに、実験上の観点からは、XFEL と同軸に走る $\gamma$ 線の除去が要請される。このために、光学ハッチ内のオブティクスにより、 $\gamma$ 線と XFEL の光軸を光学ハッチ内で分離して、 $\gamma$ 線を光学ハッチ内で阻止し、実験ハッチには XFEL のみを輸送する。

#### (2) メインビームシャッタ (MBS)

ライナックベースの光源は、MBS を閉じた際に電子ビームを止めるという条件を加えることにより、シャッタを小型にできる可能性がある。しかし、インターロックの複雑化の回避と、加速器運転の常時モニタという観点から、本ビームラインでは MBS 閉の際も電子ビームの運転を継続する。ただし、ビームシャッタにおいて XFEL による照射損傷がみられた場合は別途対応する。

### 4-4. 光学系

#### (1) エネルギー（波長）範囲

ライナックベースの光源は、電子ビームのエネルギーを比較的容易に変えることができる。例えば、BL3 用アンジュレータ（周期長 18 mm）において、電子ビームを  $E_b=8$  GeV で運転したときの最低エネルギーは約 10 keV であるが、 $E_b=4$  GeV とすると 2.5 keV の軟 X 線を発生することが可能である。したがって、BL3 は 硬 X 線 (>4 keV) 対応を基本とするが、軟 X 線 (< 4 keV) も利用可能とする。このために、必要に応じて、真空隔壁としての Be 窓は光軸から退避して差動排気に切り替えられるようなシステムにする。また、 $\gamma$ 線除去のための光学系として、全反射ミラー(< 15 keV) と結晶分光器 (4~30 keV, with Si 111)を用意する。全反射ミラーを単独で用いることで、軟 X 線 FEL も実験ハッチに輸送することが可能である。(Fig. 4-4-1)

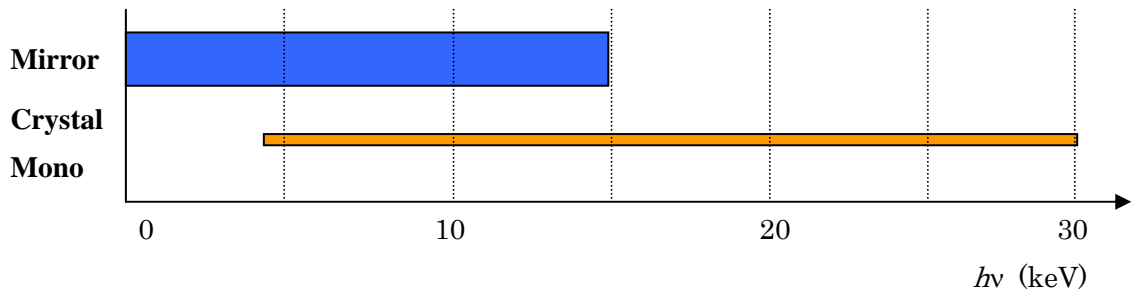


Fig. 4-4-1 光学系がカバーする光子エネルギー領域

## (2) バンド幅

XFEL のバンド幅は 0.1% のオーダーと見積もられている。光量を落とさず実験ハッチに導くために、全反射ミラーを用いる。全反射ミラーは、臨界エネルギーより低エネルギー（長波長）側の X 線を全反射するローパスフィルターとして作用する。一方、結晶分光器は、分解能 0.01% (Si 111) のバンドパスフィルターとして機能し、約 1 桁強度が落ちるが、波長を精度良く定めたい実験に用いる。

## (3) 高調波の低減

FEL は、基本波に対し高調波（2 次光, 3 次光）がそれぞれ 0.1%, 1 % 程度混入する。この成分をさらに 数桁以上低減させるために、ダブルミラーを用いる。カットオフエネルギーを変えるために、低エネルギー用と高エネルギー用の 2 セットを用意する。第 1 ミラーを共通に使い、第 2 ミラーを二つ (2a, 2b) 用意する（第一散乱体の数を減らすため）。また、二結晶分光器の場合の基本波に対する低減比は、2 次光, 3 次光についてそれぞれ ~1%, ~10% 以下である。

## (4) 定位置出射

実験、安全設計、アライメント等の複数の観点から、出射 XFEL の光軸は、使用する光学系に依存せずに常に一定であることが望ましい（定位置出射）。このために、ミラー、結晶分光器はそれぞれ ダブルミラー、二結晶分光器とし、光学素子をペアで使用することで出射光を入射光と平行に輸送する。また、光学素子の位置調整機構により、入射光と出射光のオフセットを一定に保つ。また、ダブルミラーと二結晶分光器は排他的に用いる。

## (5) オフセット

入射線に対する出射線のオフセット値は、小さすぎると  $\gamma$  線の阻止が困難となり、大きすぎるとダブルミラー（入射角: 数 mrad）を収納するために長大な光学ハッチを必要とする。BL3 では、オフセット値を 20 mm とする（参考: SPring-8 の標準 X 線ビームラインのオフセット値は 30 mm.）。この場合、ミラーの入射角を 2 mrad とすると、ミラーの間隔は 5 m となる。また、ビームの偏向方向は垂直方向とする。XFEL は水平偏光であ

るため、二結晶分光器を高角で使用したときの回折効率の低下を防ぐのが目的である。XFEL はスポット形状が円形に近いので、斜入射で用いるミラーの偏向方向は垂直・水平いずれも選択可能であるが、定位置出射の要請から分光器の偏向方向に揃えた。

#### (6) 安定性

XFEL のビーム発散は 1 urad 程度であり、光学素子に高い安定性が求められる。このために、ダブルミラー・二結晶分光器の駆動機構に対し、高剛性、軸数の低減、可動範囲の縮小、高精度の温度管理といった方針で設計を行う。また、真空ポンプが振動源となることを避けるため、スクロールポンプ・ターボ分子ポンプではなく、イオンポンプを用いる。

#### (7) アッテネータ

実験及びアライメント等の目的で、XFEL の強度を減衰させる必要がある。固体・ガスのアッテネータを組み合わせることにより、100 % ~ 0.1 % 程度の透過率の制御を行う。固体アッテネータについては、できるだけスペックルを生じないような素材（ベリリウム、シリコン等）を用いる。さらに強度を減衰させる必要がある場合は、いくつかのアンジュレータのギャップをディチューンさせることで行う。

### 4-5. 光学素子

#### (1) スペックルの抑制

XFEL は高い空間コヒーレンスを有する。コヒーレント照明下のスペックルを抑制するため、光学素子には高い品質（表面の形状精度、密度の均一性 等）が求められる。ミラー・Be 窓に対しては、R&D の結果、スペックルフリーの品質が既に達成されている。分光結晶としては、シリコン単結晶が使用できる。ダイヤモンド単結晶をスペックルフリーとして用いるためには、さらに R&D が必要である。

#### (2) 高パルスエネルギー

XFEL パルスにより、被照射面に対し、高いエネルギーが短時間にデポジットされる。マルチングやアブレーションへの対策のために、被照射面の材質としては、軽元素が望ましい。ビームシャッタにおいても、軽元素アブソーバとメタルシャッタを組み合わせる。

#### (3) 使用環境

光学素子へのパーティクル等のコンタミネーションは、照射損傷の原因となるため、オイルフリーの超高真空中で使用する。

#### (4) 平均熱負荷

60 Hz シングルバンチ運転時の平均熱負荷は、自発放射、FEL の寄与がそれぞれ 0.6 W 以下、60 mW 以下 [10<sup>12</sup> photons/pls (@10 keV) → 1 mJ/pls → 60 mW] と見積もられている。さらに、前者は、フロントエンド第 1 コリメータ (φ10 mm @ 64 m from ID2 exit) によって 0.12 W 以下まで低減される。これらの値を考慮して、光学素子は間接水冷方式とする。その他のコンポーネント (ビームシャッタ、スリット等) は、フロントエンド第一コリメータより上流のものに対しては水冷を行うが、下流に対しては必要性について検討を行う。(参考: SPring-8 BL19LXU の単色 X 線の平均熱負荷は約 0.1 W 程度)。マルチバンチ運転時は、この 40 倍のパワーが見込まれるため、別途検討が必要である。

### 4-6. モニタ

#### (1) パルス毎の計測

SASE-FEL はノイズ成分から立ち上がるため、パルス毎に光特性が変化する。ユーザー実験・加速器運转向けのモニタとしては、実験中も常時監視するために、透過型かつ 60 Hz のショット毎に計測できることが望ましい。一方で、ビームライン調整・コミッショニングには、破壊型モニタで、繰り返しも 1 Hz 程度でも構わない。

#### (2) コミッショニングへの対応

コミッショニング時には、γ線光軸を直接見込むようなテンポラリーなモニタ + オプティクスが必要である。このために、ガンマストップより上流部分に余裕をもった設計として、モニタ類を挿入できるようにする。

### 4-7. 実験ハッチ

#### (1) 標準架台

いくつかの実験の準備を並行して行えるよう、直列に複数のハッチを設置する必要がある。この場合、下流のハッチで実験しているときは、上流の実験機器を光軸から退避させる必要があり、上流ハッチに準備のために立ち入ることもできない。ビームタイムのロスを生じる恐れがある。このために、実験用架台をユニット化・標準化して、光軸から容易に退避し、また高い再現性 (100 μm 程度) をもって復帰可能なようにする。また、この移動架台を用いてハッチの外まで機器がスムーズに搬出できるようにする。但し、ハッチ扉の下部には放射線のストリーミングを防止する遮蔽構造を設ける必要があり、安全設計上の検討が必要である。

#### (2) ハッチ内の配置

上記の移動架台によって、実験装置は光軸直交方向への退避だけでなく、光軸方向

にも移動できるものとする。装置の上流に設置された集光光学系に対してアライメントを行うときに必要である。

## 5. ビームラインの構成

### 5-1. 概要

本章では、前章で述べられた基本概念をもとに作成されたビームラインの基本構成を示す。ビームラインは、光源収納部内に設置されるフロントエンド、実験ホール光学ハッチ内に設置される光学系・輸送系、その下流に設置される実験ステーションに大別される。以下、全体配置に続き、フロントエンド、光学系・輸送系についてコンポーネントの配置を示す。個々のコンポーネントの仕様については、第6章を参照のこと。

### 5-2. 全体配置

Fig. 5-2-1 に実験ホール内のビームライン配置を示す。実験ホールの上流側に、コンクリート製の光学ハッチが設けられ、下流側に金属パネル製の実験ハッチが置かれる。隣接ビームラインの間隔 (3 m) の制約から、光学ハッチ、実験ハッチともに、複数のビームラインを収納するように設置される。

光学ハッチは、OH1 (BL1-2)、OH2 (BL3-5) の2つにグループ化される。これにより、一方のグループに属するビームラインを使用しながら、他方の整備・メンテナンスを可能とする。また、ビームラインを光学ハッチの光軸方向の長さ (内法 17 m) は、BL3 の光学系・輸送系を基準に設定されている。

実験ハッチは、4つのハッチがタンデムに設置される。当初は4つのハッチともBL3向けに利用されるが、将来BL2と4が増設されたときは、これらのハッチを適宜振り分けることで、複数ビームラインで並行して実験を行うことが可能となる。一例をFig. 5-2-2に示す。この例では、放射線シールド付ビームパイプを各ハッチ内に設けることで、EH1と2はBL4専用、EH3と4はBL3専用として運用される。また、BL2はSPring-8蓄積リング棟実験ホールに輸送され、利用される。リング棟へのビーム輸送は、他のビームラインにおいても可能である。

また、BL1と5は軟X線若しくはより長波長のFELを対象とするため、光学ハッチでγ線を除去することにより、実験ハッチを設ける必要はない。これらのビームラインは、BL2、4との干渉を避けるために、光学ハッチ内の光学系により、光軸を水平方向に偏向させる。Fig. 5-2-1では偏向角を $2.4^\circ$ とした。

BL3の床面からの光軸高さは、実験ホール最上流部で1400 mmであるが、光学ハッチ内のビームライン光学系 (ダブルミラーまたは二結晶分光器) により+20 mmのオフセットが付加されるため、実験ハッチでは1420 mmとなる。

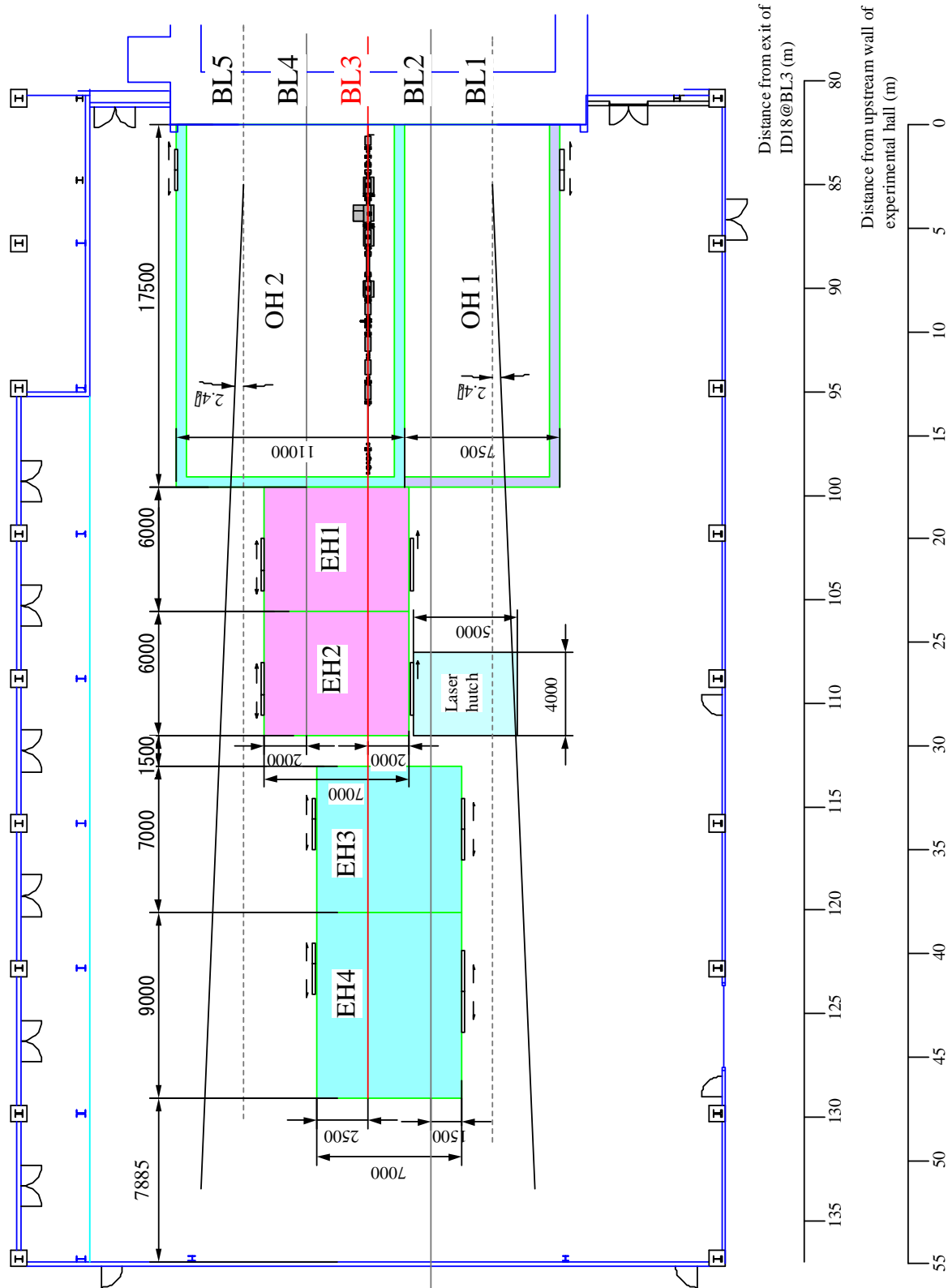


Fig. 5-2-1 実験ホールビームライン配置

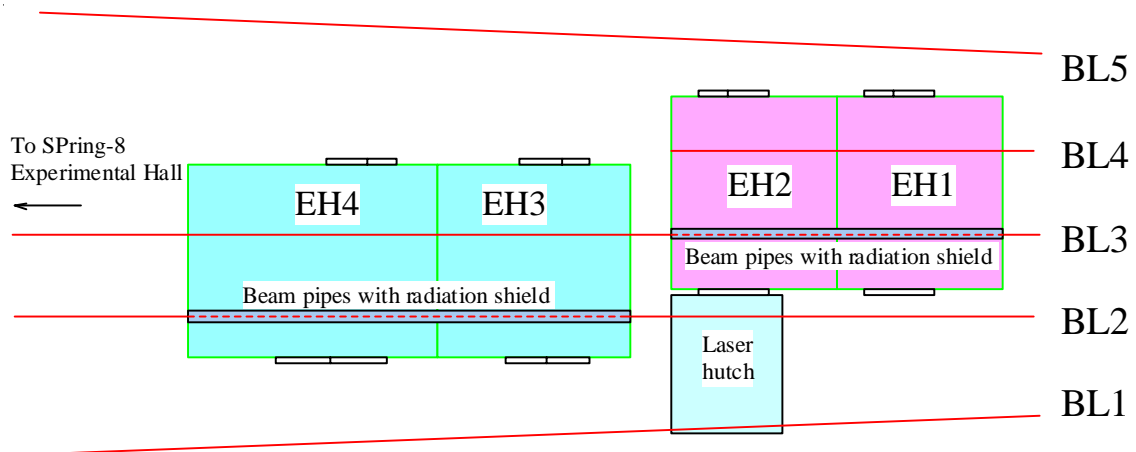


Fig. 5-2-2 ビームライン運用案

### 5-3. フロントエンド (FE)

#### 5-3-1. 機能

- (1) 加速器の超高真空セクションとの取合い
- (2) 不要な軸外放射の除去
- (3) 加速器運転用ビームモニタ
- (4) 放射線安全機器の設置

#### 5-3-2. 配置

機器の配置を Fig. 5-3-1 に示す.

#### 5-3-3. 取合点

- (1) 上流側: ビームダンプ永久磁石下流の GV 下流フランジ. GV は含まない.  
(光源収納部最下流壁から 15,000 mm 上流側)
- (2) 下流側: ベリリウム窓付き GV の下流フランジ. GV を含む  
(実験ホール最上流壁から 500 mm 下流側)



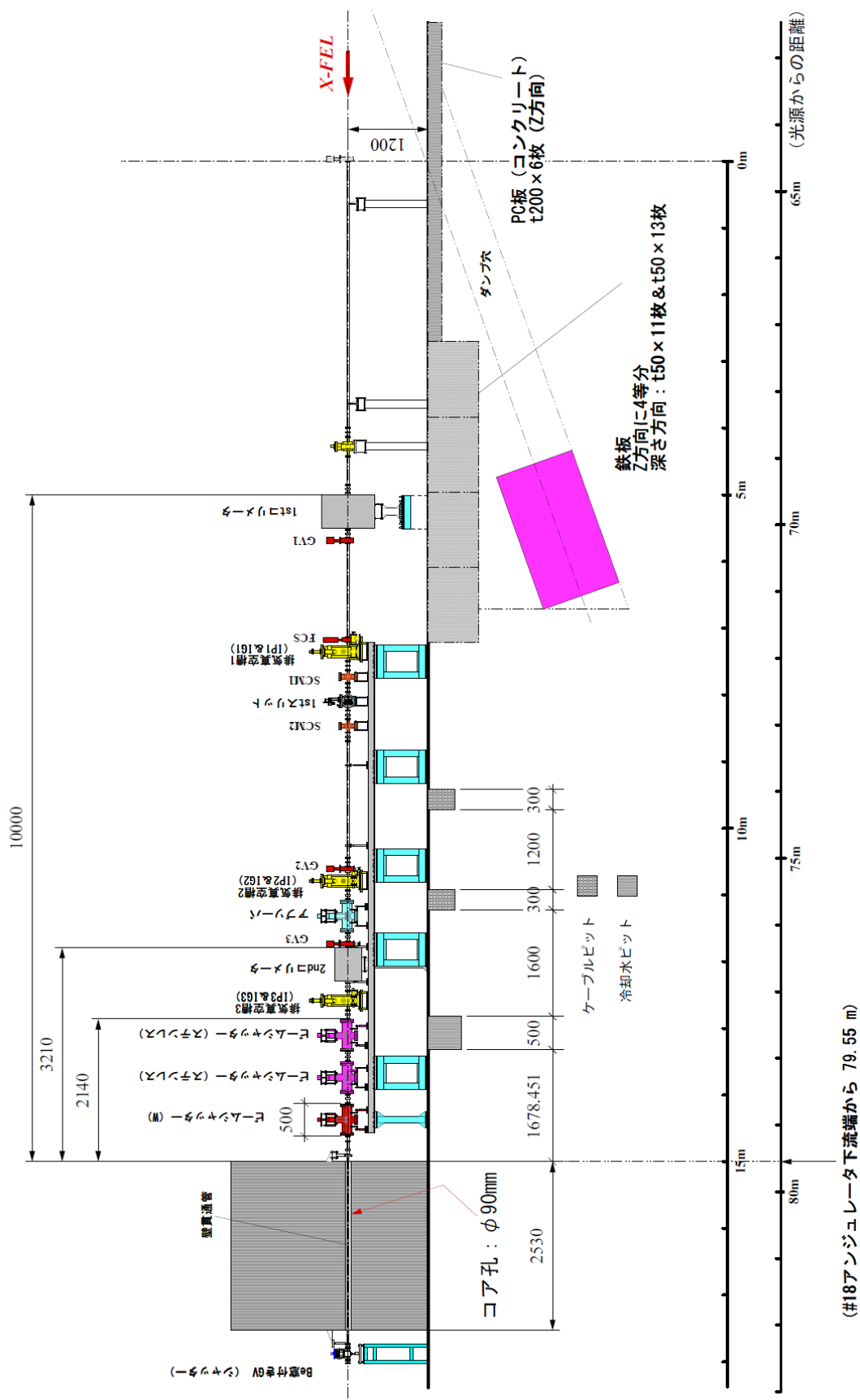


Fig. 5-3-1 フロントエンド配置図

## 5-4. ビームライン光学系・輸送系

### 5-4-1. 機能

- (1) XFEL の光特性の加工. 特に, 同軸上に混入するガンマ線の除去
- (2) XFEL の光特性の診断
- (3) 放射線安全の担保
- (4) フロントエンド・実験ステーションとの真空接続

### 5-4-2. 配置

機器の配置を Fig. 5-4-1 に示す. 床面からの光軸高さは, 入射ビームが 1400 mm, 出射ビームが 1420 mm である.

### 5-4-3. 取合点

- (1) 上流側: ベリリウム窓付き GV の下流フランジ. ただし, GV は含まない.  
(実験ホール最上流壁から 500 mm 下流側)
- (2) 下流側: 実験ハッチ 1 のベリリウム窓付き GV. ただし, GV は含む.

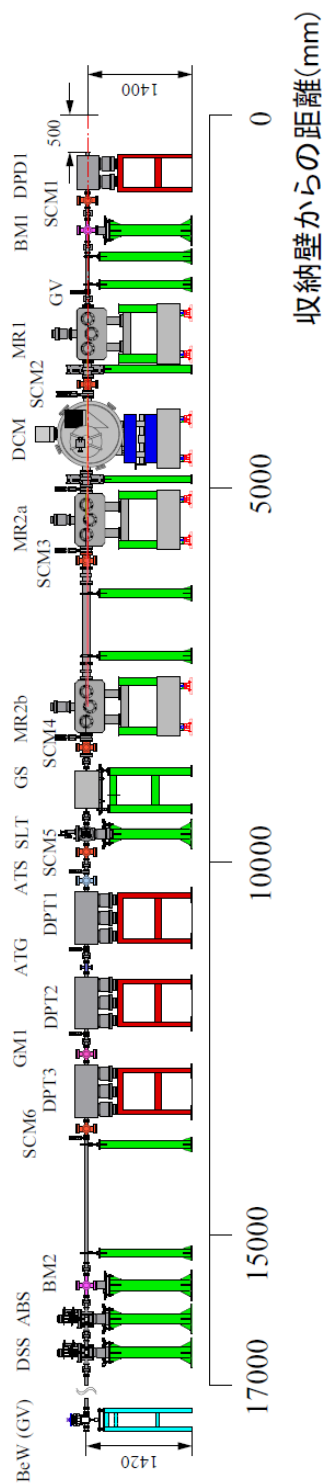


Fig. 5-4-1 ビームライン光学系配置図.

DPD: 2 段差動排気システム; SCM: スクリーンモニタ; BM: ビームモニタ; MR: ミラー;  
 DCM: 二結晶分光器; GS: ガンマ線ストッパ; SLT: 4 象限スリット; ATS: 固体アッテネ  
 ータ; DPT: 3 段差動排気システム; ATG: ガスアッテネータ; GM: ガスモニター; ABS:  
 アブソーバ; DSS: 下流シャッター; GV: ゲートバルブ; BeW(GV): BeW 付ゲートバルブ.

## 5-4-4. 光学系パラメータ

Table 5-4-1 光学系パラメータ

	ミラー a 低エネルギー用	ミラー b 高エネルギー用	二結晶分光 器
反射面・回折面	B4C, C ( $\rho=2.2 \text{ g/cm}^3$ ) or other light elements	B4C, C ( $\rho=2.2 \text{ g/cm}^3$ ) or other light elements	Si 111
入射角	4 mrad	2 mrad	$3.7^\circ \sim 30^\circ$
エネルギー範囲	$< 7.5 \text{ keV}$	$< 15 \text{ keV}$	4 ~ 30 keV
光軸方向の長さ	400 mm	400 mm	100 mm
アクセプタンス	1.6 mm	0.8 mm	$> 6.4 \text{ mm}$

## 5-5. 実験ハッチ内標準コンポーネント (TBD)

## 6. 個別コンポーネント仕様

### 6-1. 概要

本章では、ビームラインコンポーネントの個別仕様を示す。本仕様は、シングルバンチ運転を前提として設計されたため、マルチバンチ運転に対しては別途考慮が必要である。

### 6-2. ハッチ

#### 6-2-1. 光学ハッチ

- ・ BL1,2 を光学ハッチ 1 (OH 1), BL3-5 を光学ハッチ 2 (OH 2) とする (Fig. 5-2-1)。
- ・ ハッチの側面・天井・後面は、普通コンクリート 50 cm 厚 (または重コン 35 cm 厚) 以上とする。
- ・ ハッチの内法高さは、3.5 m とする。
- ・ 入退室用及び機器搬入用の扉を側面に設ける。搬入口の開口サイズは幅 2 m × 高さ 2.2 m 以上とする。
- ・ 天井にチェーンブロック (荷重 500 kg 程度) を取り付けられるような構造とする。
- ・ 最上流部の天井にケーブル貫通口を設け、吸気口・排気口・動力線・制御線等の配線・配管を導入する。空気の循環のために、排気の吸入口をハッチ下流に設け、ダクトで上流まで送る。
- ・ 扉・貫通口等の形状は、安全グループと協議して決定する (TBD)。

#### 6-2-2. 実験ハッチ

- ・ 実験ハッチを 4 つ設け、上流から EH1-4 とする (Fig. 5-2-1)。
- ・ 実験ハッチ本体及び開口のサイズを Table 6-2-1 に示す。
- ・ 搬入口 (特に床面) に関しては、放射線安全基準を満足した上で、スムーズな機器搬入の妨げにならないような機構とする (Fig. 6-2-1)。

Table 6-2-1 実験ハッチのパラメータ

ハッチ	サイズ L×W×H (m)	搬入口サイズ W×H (m)
EH1	6×7×4	2.5×3
EH2	6×7×4	2.5×3
EH3	7×7×4	3×3
EH4	9×7×5	4×3

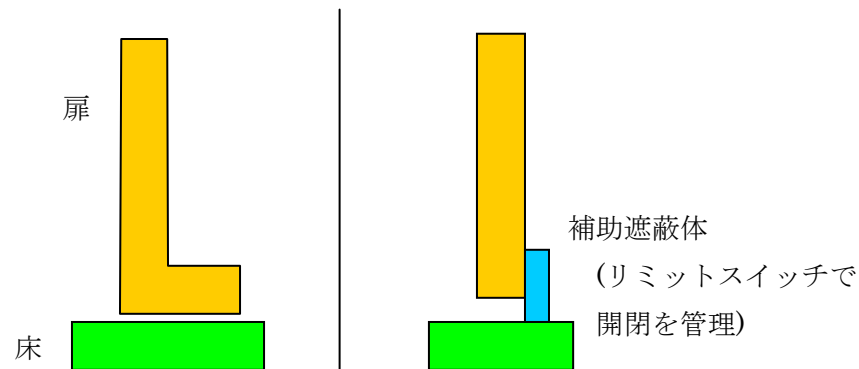


Fig. 6-2-1 搬入扉の立面断面図の例

- ・ ハッチの壁面と天井は鉄・鉛・鉄のサンドイッチパネルまたは鉄パネルとする。厚さについては安全グループと協議の上決定する。
- ・ 入退室用の自動扉を設ける。
- ・ 各ハッチに電力・冷却水・圧空を供給する。詳細は別途検討する (TBD)。
- ・ ハッチにケーブルダクトを設け、ハッチ内外を結ぶ配線、配管を行う。詳細は別途検討する (TBD)。
- ・ 実験ハッチの最下流には可動式 X 線ストッパを設ける。ハッチ前面・後面パネルに、真空ダクトを通す。

### 6-3. フロントエンド機器

#### 6-3-1. メインビームシャッタ (MBS)

アブソーバとビームシャッタから構成され、必要に応じて MBS を光軸上に下ろすことにより、実験ホールへの FEL 光の導入を熱的および放射線的に遮断する機能を有する。

##### (1) ビームシャッタ

- ・ SPring-8/FE 仕様と同じ構造のもの (ICF70 取り合い、面間 500 mm) を 3 連使用する。
- ・ シャッタの材質と厚みは、タングステン 400 mm が 1 連、ステンレス 400 mm が 2 連とする。タングステンの含有量、実寸法は別途検討する (TBD)。
- ・ 超高真空に対応できるように、事前に材料だけで高温脱ガス処理を行うこと。
- ・ 圧空駆動機構を有し、開閉の駆動時間が調整できる構造とする。
- ・ シャッタの開状態と閉状態を検出するための 2 連高耐久型リミットスイッチを、各シャッタに 2 組ずつ取り付ける。2 組、3 連のリミットスイッチのステータスを平行に PLC に導き、PLC 上で AND をとった上で開閉のステータス信号を出力する。
- ・ ベローズの耐用回数は、100,000 回以上とする。

##### (2) アブソーバ

- ・ 受光部の材質はグラファイトとし、厚さは別途検討する (TBD)。

- ・ 超高真空に対応できるように、事前に材料だけで高温脱ガス処理を行うこと。
- ・ 圧空駆動機構を有し、開閉の駆動時間が調整できる構造とする。
- ・ アブソーバの開状態と閉状態を検出するための 2 連高耐久型リミットスイッチを 2 組ずつ取り付ける。2 組のリミットスイッチのステータスを平行に PLC に導き、PLC 上で AND をとった上で開閉のステータス信号を出力する。
- ・ グラファイトを間接冷却するための水冷機構が必要である。
- ・ アブソーバの照射による表面損傷を検知する機構を検討する。またアブソーバ上流側に 500 mm 程度のニップルを設け、真空ベントにより目視観察が容易に行えるようにする。
- ・ ベローズの耐用回数は、100,000 回以上とする。

### 6-3-2. 1st コリメータ

- ・ 電子ビーム損失等による光学ハッチの線量増加を防止する機能を有する。
- ・ コリメータは大きさ L800 mm × W800 mm × t500 mm の鉄系材料とし、床面から支持をとること。コリメータの重量は約 2,540 kg である。
- ・ コリメータの内側には  $\phi 13$  mm の孔があいており、その中を外径 12 mm (内径 10 mm) の真空パイプが通る構造とする。コリメータの支持は、ダンプを跨ぐ架台 (H ビーム等) からとること。
- ・ 遮蔽壁上流端からコリメータ上流端面までの距離は 10000 mm とする。
- ・ 上流フランジに水冷機能を有すること。

### 6-3-3. 2nd コリメータ

- ・ 貫通口とビームダクトとの間隙を覆い、光学ハッチの線量増加を防止する機能を有する。
- ・ コリメータは大きさ L400 mm × W400 mm × t500 mm の鉄系材料とし、床面から支持をとること。コリメータの重量は約 640 kg である。
- ・ コリメータの内側には  $\phi 13$  mm の孔があいており、その中を外径 12 mm (内径 10 mm) の真空パイプが通る構造とする。真空パイプは共通ビームから支持をとること。
- ・ 遮蔽壁上流端からコリメータ上流端面までの距離は 3,210 mm とする。

### 6-3-4. フロントエンド真空システム

光源部の超高真空を維持するためのもので、ゲートバルブ、緊急遮断シャッターシステム、排気ポンプ、Be 窓付きゲートバルブから構成される。真空配管径は基本的に ICF70 である。また、軟 X 線モード使用時において下流側の光学系部品を守るためにベーク対応も考慮する。

#### (1) ゲートバルブ

- ・ オールメタル製ゲートバルブを使用する。

**(2) 緊急遮断シャッターシステム**

- ・ 下流側からの真空事故の影響を最小限にするため、フロントエンド上流に緊急遮断シャッター (FCS) を設ける。
- ・ 連動バルブは GV1 とする。
- ・ トリガー用センサーは FCS 下流の排気真空槽と、収納部内最下流の排気真空槽に取り付ける。

**(3) 排気真空槽**

- ・ 基本的に SPring-8/BL17SU 仕様と同じ構造のもの (ICF70 取り合い、面間 290 mm) を使用する。アネルバ製ノーブルポンプ (110 L/min 仕様)。
- ・ 排気真空槽には、電離真空計, TMP, 粗排気接続用バルブが組み込まれている。

**(4) Be 窓付きゲートバルブ (シャッター)**

- ・ 輸送部との共通化を図る。
- ・ 軟 X 線モード使用時には光軸から退避する。
- ・ 材質はブラッシュウエルマン社製 PVD 製法によるベリリウム薄膜とする。
- ・ ベリリウム箔を間接冷却するための水冷機構が必要かどうか検討を要する。
- ・ 圧空駆動機構を有し、開閉の駆動時間が調整できる構造とする。

**6-3-5. フロントエンド共通ビーム支持架台システム**

共通 H ビーム 2 本を、2 基の支持架台の上に設置し、ビーム軸に対して基準水平面、垂直面を作り出す。予め軸調整を行った真空装置は、この共通ビームに取り付けるだけでビーム軸に対する精度が自動的に満足される。

**(1) 共通ビーム**

- ・ 鉄系材料を用い、基準面についてはオイル塗布を、基準面以外については塗装を行うこと。
- ・ 真直度について規定する。
- ・ 共通ビームはビーム軸に対して  $\pm 0.2 \text{ mm}$  以内の精度で設置する。

**(2) 支持架台**

- ・ 鉄系材料を用い、本器上部には共通ビームを水平方向に微調整できる機能を有すること。
- ・ ビーム軸の床面からの高さの設計値は 1200 mm であるが、本器の製作においては床面の高低差を考慮する必要がある。
- ・ ケーブルピット、冷却水ピット、コリメータ専用架台等との干渉を考慮した配置が必要である。

**6-3-6. 収納壁貫通口**

FEL 光を光学ハッチに導くために、遮蔽壁に孔を明け壁貫通管を設置する。

- ・ 貫通口は建家完成後、コア抜きによってあける。



- ・ コア孔の口径は $\phi 70$  mm で遮蔽計算がなされているが、ICF70 フランジ付き壁貫通管 (全長 $\sim 2800$  mm) が取り付け可能な最小口径は 80 mm 以上と予想されるため再確認が必要である ( $\phi 75$  mm までは遮蔽機器の仕様が現状のままで良いことは確認済み) .
- ・ 遮蔽壁の中の壁貫通管まわりの遮蔽 (埋め戻し) は不要である.

### 6-3-7. 水冷 4 象限スリット

(目的)

軸外の自発放射を除去する.

(仕様)

- ・ フロントエンドの最上流部に設置される.
- ・ 独立した 4 軸のブレードから構成される.
- ・ 本スリットは XFEL のビーム成形には用いられないが、スキャン時にブレードが XFEL を遮る可能性がある. このため、メタルブレードの上流側に軽元素のアブソーバを取り付ける.
- ・ メタルブレードは材質 Cu, サイズ 50 mm $\times$ 30 mm, 厚さは 3 mm 程度とする.
- ・ 軽元素アブソーバは材質グラファイト, 厚さ 10 mm 以上とする.
- ・ 軽元素アブソーバとメタルブレードのオーバーラップは  $0 < d < 100$   $\mu\text{m}$  とする (Fig.6-3-1, Fig.6-3-2 参照).
- ・ 各ブレードの可動範囲は、光軸を基準に $\pm 10$  mm とする. 分解能は 10  $\mu\text{m}$  以下とする.
- ・ メタルブレードに対して水冷を行う. アブソーバはメタルブレードと熱接触をとることで間接冷却を行う.
- ・ 真空引きの際にブレードの引き込みがないような構造とする.
- ・ 光軸方向のフランジは ICF70 とし、フランジ面間隔を 280 mm とする.

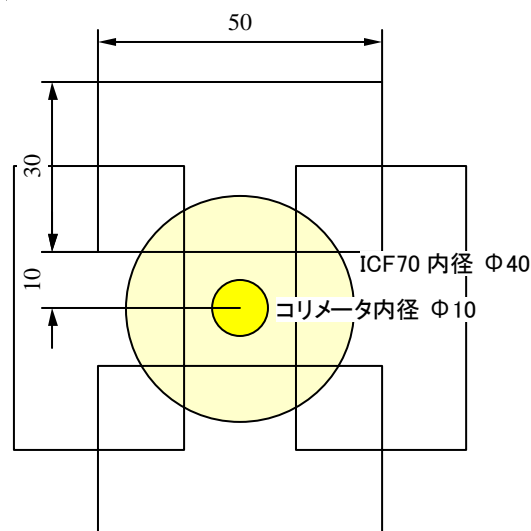


Fig. 6-3-1 ビーム軸方向からみたスリットの配置.

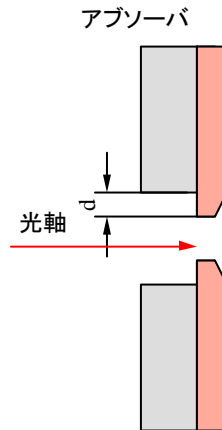


Fig. 6-3-2 側面からみたスリットブレードの配置

## 6-4. ビームライン光学系機器

### 6-4-1. ミラー

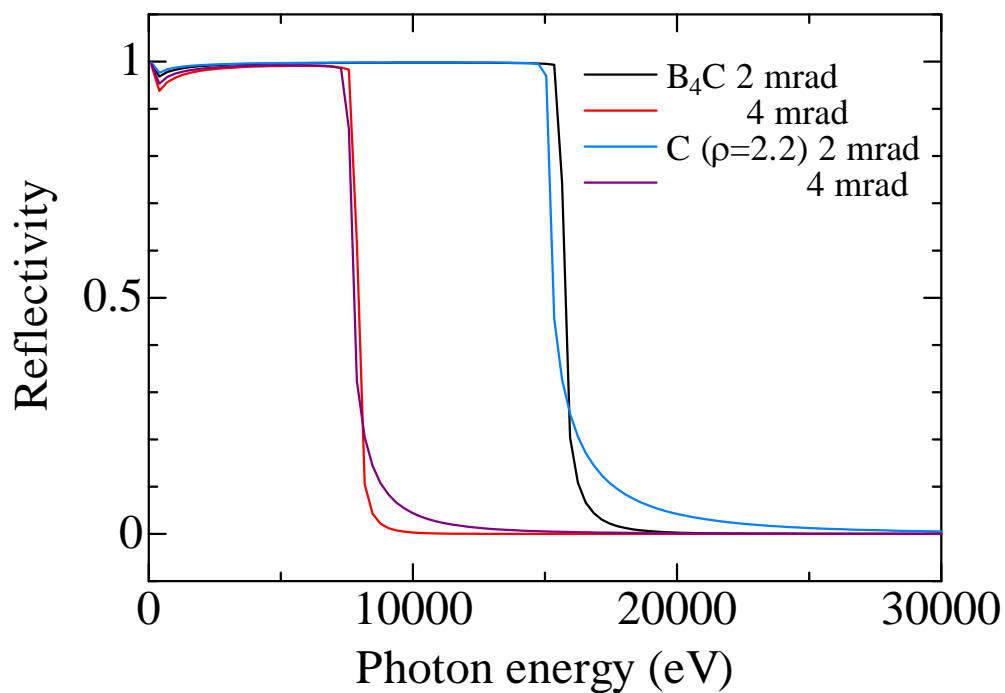
(目的)

FEL をガンマ線光軸から分離する.

(仕様)

- ・ 平面ミラーを用いる.
- ・ 有効ミラー長を 400 mm 以上とする.
- ・ ミラーの形状誤差は要検討 (TBD).
- ・ ミラーのコーティング材質は  $B_4C$  またはカーボンとする.
- ・ 光軸を平行に振り戻すため, ミラーは 2 枚 1 組で用いる.
- ・ カットオフエネルギーを変えるために, 入射角を 2 通り選択可能とする. このために, 第 1 ミラーを共通に用い, 第 2 ミラーを 2 つ (2a, 2b) 設置する.
- ・ ミラーの入射角は 2 mrad / 4 mrad とする.  $B_4C$  またはカーボン ( $\rho=2.2 \text{ g/cm}^3$ ) に対する反射率を図に示す (Fig.6-4-1) .
- ・ ダブルミラーとして使用したときの元の光軸からのオフセットを 20 mm とする. ミラー間隔は 5 m (2 mrad) または 2.5 m (4 mrad) となる.
- ・ ビーム軸の偏向方向は垂直方向である.
- ・ ミラーの駆動軸 (定義は図参照) は, Rx 軸, y 軸 は必須とし, オプションで Rz 軸, x 軸 を設ける. 各軸の目的・駆動範囲・分解能を表に示す (Fig.6-4-2, Table 6-4-1) .
- ・ Rx 軸の安定性は 0.1  $\mu\text{rad}$  以上とする.
- ・ ミラーチャンバーの光軸方向のフランジは ICF152 とする. フランジ面間隔は 750 mm とする.
- ・ ミラーの使用環境は超高真空とする. ベーキングも行う.

(a)



(b)

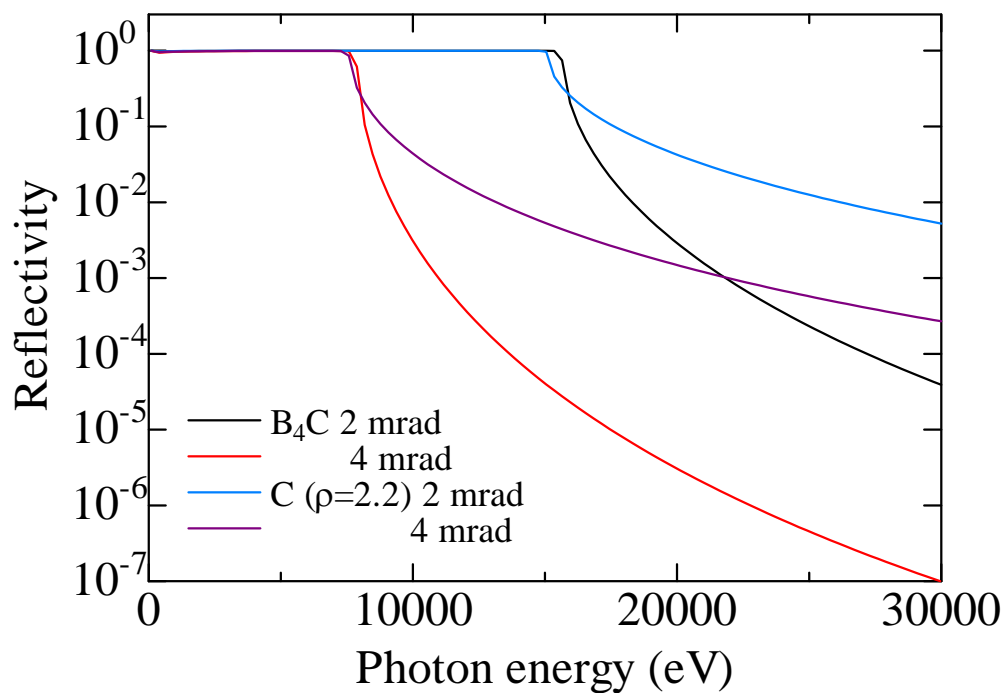


Fig. 6-4-1 ミラーの反射率. (a) リニアスケール; (b) ログスケール.

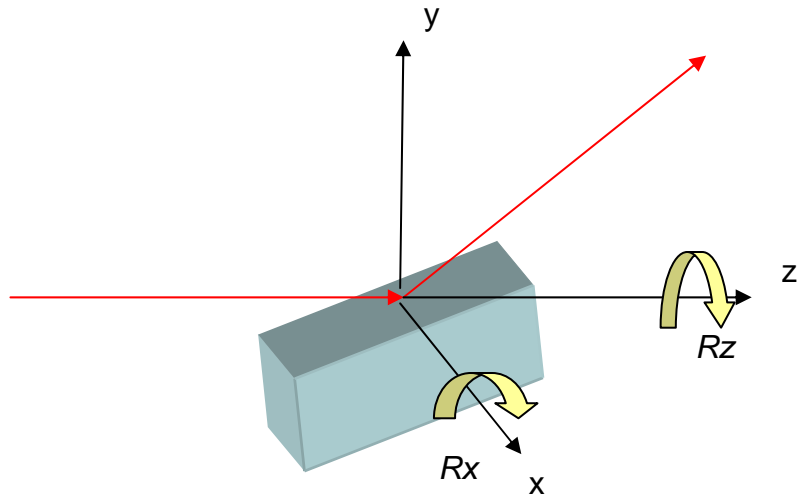


Fig. 6-4-2 ミラーの軸の定義

Table 6-4-1 ミラー駆動軸の詳細

Axis	Purpose	Range	Resolution
Rx1, Rx2	入射角の調整	$\pm 8 \text{ mrad}$ ( $\pm 0.5^\circ$ )	$< 1 \text{ urad}$
y1, y2	光軸への挿入・退避	$-10 \text{ mm}$ (退避側) $\sim 5 \text{ mm}$ (挿入側)	$< 10 \text{ um}$
x1, x2	ビーム照射領域の変更・コーティングの切替	$\pm 5 \text{ mm}$ (コーティング領域の幅に依存)	$< 100 \text{ um}$
Rz2	あおり角の調整 (第2ミラーのみ)	$\pm 5 \text{ mrad}$ ( $\pm 0.3^\circ$ )	$< 100 \text{ urad}$

## 6-4-2. 二結晶分光器

### (目的)

FEL の分光を行うとともに、ガンマ線光軸から分離する。

### (仕様)

- ・ シリコン結晶を用いて分光を行う。
- ・ ブラッグ角の範囲を  $3.7^\circ \sim 30^\circ$  とする。 ( $4 < h\nu < 30 \text{ keV @ Si 111}$ )
- ・ 上記範囲で定位置出射を満たすようにする。オフセットを  $h$ 、結晶へのビームのヒットポイント間隔を  $\Delta Z = Z1 - Z2$  (垂直方向) 及び  $\Delta X = X1 - X2$  (水平方向) とすると、次式のよ  
うに表される。

$$\Delta Z = \frac{h}{2 \cos \theta} \quad (\text{Eq. 6-4-1})$$

$$\Delta X = \frac{h}{2 \sin \theta} \quad (\text{Eq. 6-4-2})$$

- ・ オフセットを  $h=20 \text{ mm}$  とする。このとき、 $10 \leq \Delta Z \leq 11.55 \text{ mm}$  ( $0^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$ )、 $20 \leq \Delta X \leq 155 \text{ mm}$  ( $30^\circ \geq \theta \geq 3.7^\circ$ ) となる (Fig. 6-4-3)。  $h$  の許容偏差は、 $0.1 \text{ mm}$  とする。
- ・ 高い安定性と超高真空対応を実現するため、真空中の駆動軸の数を減らし、ストロークも小さく留めたい。このために、以下のような駆動機構を採用する (Fig. 6-4-4)。
- ・ 全体を  $\theta$  テーブルの上に乗せ、 $\theta$  軸の回転中心を二結晶間の対称点におく。
- ・  $\theta$  テーブルの上に二結晶の姿勢の微調整機構をおく。詳細は以下の通り。
- ・ 定位置出射実現のために、垂直方向の位置調整機構を設ける ( $Z1, Z2$ )。必要なストロークは、 $(11.55-10)/2 = 0.8 \text{ mm}$  以上。  $Z1, Z2$  の許容ヨーイング:  $\sim 1 \text{ urad}$  ( $\Delta\theta$  方向、あおり角方向はもう少し甘い)。特に、 $Z2$  のヨーイングは波長基準を損なうため、できるだけエラーを減らす必要がある。
- ・ 光軸方向 ( $\Delta Y$ ) に関しては、大型の結晶を用いることで駆動軸を省略する。必要な結晶の長さは、 $(155-20)/2 = 68 \text{ mm}$ 。低角側のビームサイズ ( $1 \text{ mm} / \sin 3.7^\circ = 16 \text{ mm}$ ) と端部の余裕をみると、トータルで  $100 \text{ mm}$  程度が良い (※結晶の長さが比較的小さくて済む理由は、オフセット値が  $20 \text{ mm}$  と小さいことと、回転中心を二結晶間の対称点にもってきたこと)。
- ・ 結晶の大きさを  $100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  とすると、重量は約  $580 \text{ g}$  となる。ホルダーを入れても  $3 \text{ kg}$  程度と見積もられる。
- ・ 光軸方向のフランジは ICF152 とし、フランジ面間隔を  $1,000 \text{ mm}$  とする。床面からフランジ中心までの距離は、上流側  $1,400 \text{ mm}$ 、下流側  $1,420 \text{ mm}$  とする。
- ・ 本駆動機構は、シリコン等の大型の結晶を用いることを前提としている。照射ダメージ等の問題からダイヤモンド結晶を使う必要が生じた場合は、別途検討する。

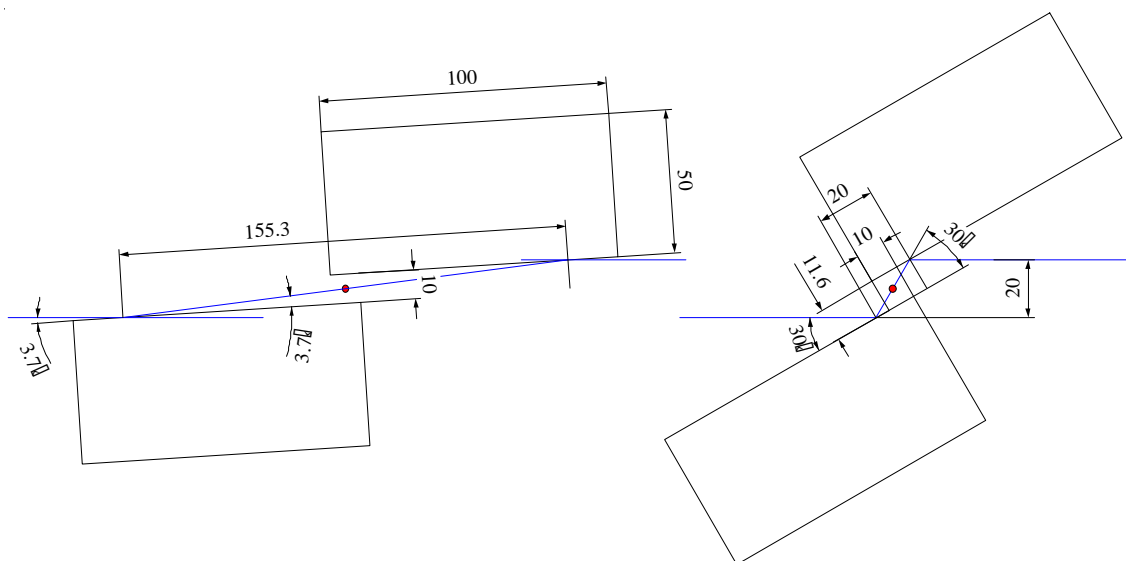


Fig. 6-4-3 二結晶分光器の低角側・高角側の配置図

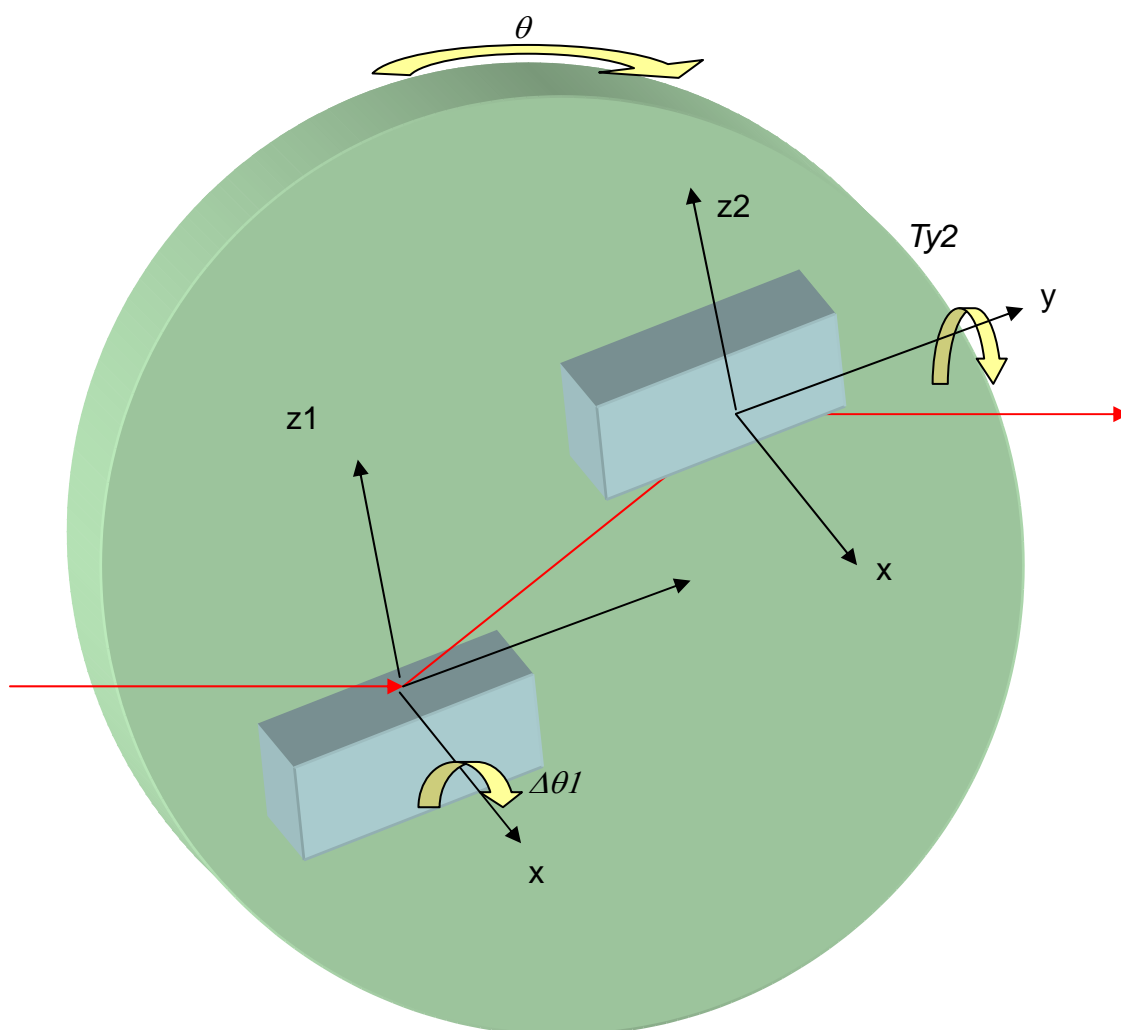


Fig. 6-4-4 二結晶分光器の軸の定義

Table 6-4-2 二結晶分光器駆動軸の詳細

Axis	Purpose	Range	Resolution
Z	架台全体の上下	$\pm 10$ mm	< 10 $\mu$ m
X	架台全体の並進（光軸直交方向）	$\pm 10$ mm	< 10 $\mu$ m
$\theta$	ブラッグ角調整	$-1^\circ \sim 30^\circ$	1 urad w encoder
Z1, Z2	結晶の垂直方向の間隔の調整	$\pm 1$ mm	< 10 $\mu$ m
$\Delta \theta 1$	平行度の調整	$\pm 1^\circ$	< 0.1 urad
$\Delta \theta 2$	平行度の調整（オプション）	$\pm 1^\circ$	< 0.1 urad
Ty2	あおり角の調整	$\pm 1^\circ$	< 1 urad

### 6-4-3. アッテネータ

(目的)

FEL を吸収あるいは散乱させることにより、強度を制御する。

(仕様)

- ・ 強度の可変範囲は、入射強度に対して  $1 \sim 1E-6$  とする。
- ・ 一部のアンジュレータのギャップをディチューンすることで 3 桁程度のアッテネーションが可能であるが、強度変動が大きくなることに対して注意が必要である。
- ・ ガスアッテネータと、固体アッテネータの 2 系統とし、併用可能とする。
- ・ ガスアッテネータでは、ガス種類、圧力を変化させ、強度を可変する。
- ・ 固体アッテネータでは、固体種類、厚さを変化させ、強度を可変する。
- ・ 共通仕様
  - ・ 輸送真空系に接続可能とする。
- ・ ガスアッテネータの仕様
  - ・ 上下流の差動排気セクションを含んだ全長は 1800 mm 以下とする。
  - ・ 最大圧力を 0.1 気圧程度とする。
- ・ 固体アッテネータの仕様。
  - ・ アッテネータとして、スペックルフリーのシリコン・ベリリウム等を用いる。
  - ・ アッテネータは直線導入器により光軸上に挿入できるようにする。光軸上の厚さを可変とする。

### 6-4-4. 水冷チラー

(目的)

光学素子を水冷却により一定温度に保つための水循環装置である。

(仕様)

- ・ 設定温度  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  の温度制御が可能であること。

- ・ 脈動をできるだけ減らすこと。
- ・ 熱負荷は 10 W 以下である。
- ・ 設置場所については別途協議する。

## 6-5. ビームライン輸送系機器

### 6-5-1. 下流シャッタ (DSS)

下流ビームシャッタと下流アブソーバから構成される。必要に応じて DSS を光軸上にする事により、実験ハッチへの FEL 光の導入を放射線的に遮断する機能を有する。フロントエンドのビームシャッタ開のまま実験ハッチへのユーザーの出入りを可能にし、光学素子への熱負荷を定常にするとともに、光学ハッチ内でビームモニタを常時行う。

#### (1) 下流ビームシャッタ

SPring-8 標準アンジュレータビームラインの下流シャッタ BL-TC-DSST-070 (フランジ面間 400 mm) の構造に準ずる。遮蔽体の寸法は安全グループと協議して決定する (TBD)。

#### (2) 下流アブソーバ

下流ビームシャッタの構造に準ずる。ただし、アブソーバとして、グラファイト 60 mm を用いる。

### 6-5-2. ガンマストッパ

#### (目的)

ミラー・二結晶分光器の下流に設置され、ガンマ線を阻止する。

#### (仕様)

- ・ 鉛ブロックに角形の開口部を設け、真空フランジ付角パイプを埋め込む。
- ・ 開口部は、ガンマ線光軸からオフセットした位置に設ける。遮蔽体の開口寸法を図に示す (真空パイプの開口寸法はパイプの肉厚分小さくなる)
- ・ 遮蔽体の厚さは 50 cm とする。光軸直交方向の寸法は安全グループと協議して決定する (TBD)。
- ・ 上流側フランジ部分に、XFEL ダイレクトビーム照射保護のためのアブソーバを設ける必要がある。



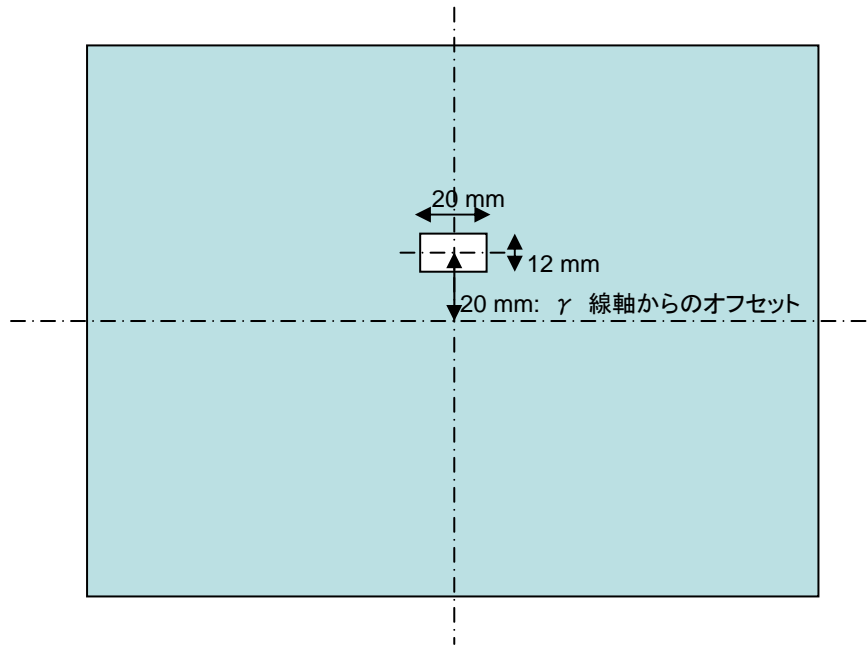


Fig. 6-5-1 遮蔽体の開口寸法

### 6-5-3. 補助遮蔽体

(目的)

第一散乱体（ミラー1 及び DCM）からハッチ後面に向けてに放出されるガンマ線を遮蔽する。

(仕様)

- ・ 厚さは 10 cm とする（但し、安全設計の結果変更の可能性あり）。光軸直交方向の寸法は安全グループと協議して決定する。
- ・ 中央部に開口を設け、ベローズを通せるような構造とする。

### 6-5-4. 4 象限スリット

(目的)

軸外の自発放射を除去する。

(仕様)

- ・ 独立した 4 軸のブレードから構成される。
- ・ 本スリットは XFEL のビーム成形には用いられないが、スキャン時にブレードが XFEL を遮る可能性がある。このため、メタルブレードの上流側に軽元素のアブソーバを取り付ける（6-3-7 項参照）。
- ・ メタルブレードは材質 Ta, 大きさ 50 mm × 30 mm, 厚さ 2 mm 以上とする。
- ・ 軽元素アブソーバは材質グラファイト, 厚さ 10 mm 以上とする。
- ・ 軽元素アブソーバとメタルブレードのオーバーラップは  $0 < d < 100 \text{ um}$  とする (Fig. 6-3-2)。

- ・各ブレードの可動範囲は、光軸を基準に±10 mm とする。送り分解能は 10 μm 以下とする。
- ・水冷は行わない。
- ・真空引きの際にブレードの引き込みがないような構造とする。
- ・光軸方向のフランジは ICF70 とし、フランジ面間隔を 280 mm とする。

## 6-6. ビームライン真空システム

### (目的)

- ・ FEL の吸収・散乱を低減し、輸送する。
- ・ 光学素子表面での汚染を低減する。

### (仕様)

- ・ 光学素子にかかわる光学真空系と、輸送にかかわる輸送真空系に分類する。

### 6-6-1. 光学真空系

- ・ 到達真空度は 5E-8Pa 以下とする。
- ・ 光学素子、機構を含まないとき、250 °Cでのベーキング処理を可能とする。
- ・ 光学素子、機構を含むとき、100 °Cでのベーキング処理を可能とする。
- ・ 真空シールはメタルシールとする。
- ・ 真空排気環境をオイルフリーとする。
- ・ 真空内部材は、超高真空対応部品とする。

### 6-6-2. 輸送真空系

- ・ 到達真空度は 1E-6Pa 未満とする。
- ・ 光学真空系と隣接している場合、光学真空系に接続した場合、その規定値を超えるものであってはならない。

### 6-6-3. 共通仕様

#### (1) 配置

- ・ 独立した排気ユニットセクションを設けることなく、真空容器に直結した主排気系と粗排気系を設ける。
- ・ ターボ分子ポンプと真空容器の間には、ポンプのフランジ口径に適合するコンダクタンスのバルブをポンプおよび真空容器に対してそれぞれ直結させる。粗排気完了後、バルブで仕切り、停止する。
- ・ 真空ゲージおよびポンプのコントローラ等は、ハッチ外に設置する。

※ハッチ内のスペース、放射線損傷問題及びハッチ内の温度・振動等の環境安定性の阻害要因になるものを排除する。ただし、可搬型粗引きポンプなど、立ち上げ時の一時使用す

るものはこの限りでない。

## (2) ポンプ・ゲージ

- ・主排気ポンプは、振動しない溜め込み型ポンプ（スパッタイオンポンプなど）を原則とする。
- ・真空容器の大きさ及び用途により指定するが、ミラーおよびモノクロでは、概ね以下の容量を想定する
- ・光学真空系の主排気ポンプは ICF203 にて 400 L/sec 以上の SIP と ICF203 以上の口径の TGP の組み合わせとする。
- ・光学真空系の粗排気系は ICF114 あるいは 152 のアングルバルブあるいはゲートバルブにて直結されるターボ分子ポンプ（100 L/sec あるいは 300 L/sec）とする。
- ・粗排気系はオイルフリー補助ポンプとターボ分子ポンプとする。
- ・真空計はイオンゲージとする。

## (3) バルブ

- ・ボディシールをメタルシールとし  $5E-11 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$  以下のリーク量とする。
- ・シートシールをバイトンあるいはメタルとし  $1E-10 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$  以下のリーク量とする。
- ・開閉動作 5 万回以上の寿命を有すること。なお保守可能な構造であること。
- ・圧空駆動方式とし、DC24V 印加時に開動作すること。
- ・開閉動作をバルブ単体にて手動操作可能とすること。
- ・リミットスイッチを有すること。
- ・バルブの開閉状態が機械的に目視確認可能であること。
- ・面間は ICF70, ICF152 フランジ付きでそれぞれ 35 mm 及び 70 mm とする。

## (4) その他

- ・シースヒータあるいはリボンヒータによるベーキング処理を可能とする。

## 6-7. モニタ機器

### 6-7-1. スクリーンモニタ

(目的)

光学系・アパーチャーのアライメントに用いる。また、ビームプロファイルや強度に対して半定量的な計測を行う破壊型のビームモニタである。

(仕様)

- ・薄膜フォトルミネッセンスを利用したスクリーンモニタ, Be 薄膜による散乱 X 線やドレイン電流を計測することによるビーム強度モニタ, PIN フォトダイオードによるダイレクトビーム強度モニタ, の方式をモード切替えにより選択して用いる (Fig. 6-7-1)。低フラックス用の蛍光板, 高フラックス用の蛍光板, ベリリウムフォイル, フォトダイオード等の光学素子を, 直線導入器を通して光軸上に挿入する。これらをフラックスに応じてチャンバー内部で切り替え駆動する。更に完全退避も可能とする

(Fig. 6-7-1) . 駆動機構による素子の位置繰り返し精度を 10 ミクロン以下にする.

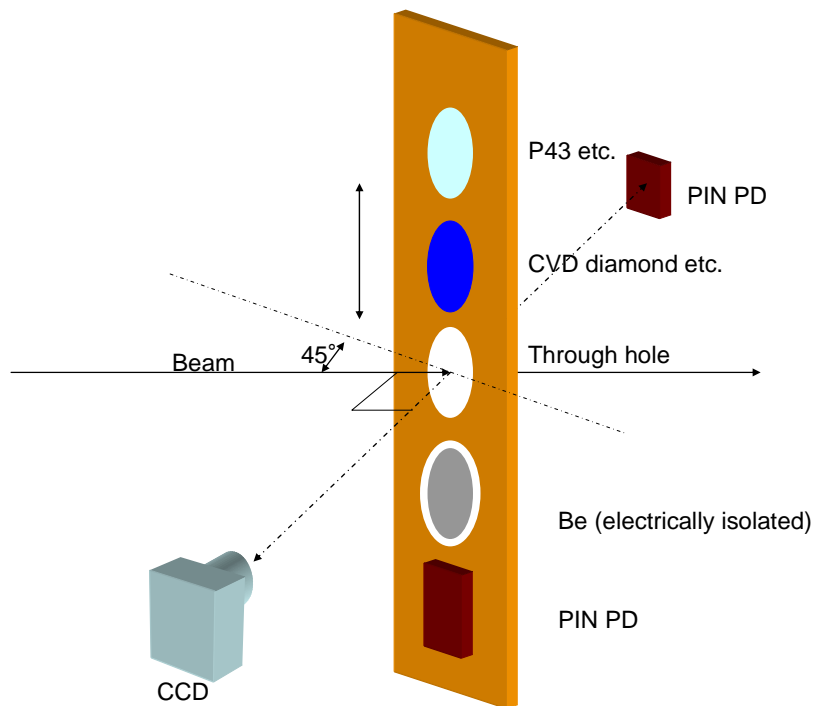


Fig. 6-7-1 光検出の原理

- ・ 光軸方向のフランジ規格は ICF70, ICF152 の 2 種類とする. フランジ面間隔は 200 mm とする. ICF152 は二結晶分光器およびダブルミラーの上下流で光軸オフセット量が増えるセクションに用いるものであり 3 台設置する. ICF70 はこれ以外のセクションに用いるものであり 2 台設置する.
- ・ 蛍光板の候補物質は, 低フラックス用として (1) アルミナ蛍光板, (2) P43, 高フラックス用として (3) CVD ダイヤモンドなどがある. 高フラックス用の蛍光板は高いピークドーズに対する耐久性を必要とする. CVD ダイヤモンド薄膜 (膜厚 30  $\mu\text{m}$ ) は SPring-8 標準型アンジュレータの最小 GAP において分光器上流のビーム照射に対して破損が無く, かつ高い平均フラックスにおける線形性が確認されている (Fig. 6-7-3)[6-1]. 蛍光板受光部は  $\phi 10\text{mm}$  以上とする. 蛍光観測用サファイアビューポートからレンズ系を有する可視光観測用カメラにより発光画像を得る. ビームは蛍光板に斜め 45 度入射, カメラは薄膜に垂直に見ることで, カメラの焦点深度の影響を低減させることができる (Fig. 6-7-1, Fig. 6-7-2). ただし, チャンバーの製作が複雑になるため, 検討が必要である.
- ・ 蛍光画像情報をもとにピーク位置, 強度, プロファイルを算出すること. 可視光観測カメラを含む画像計測システムの仕様は Table 6-7-1 の通りとする.

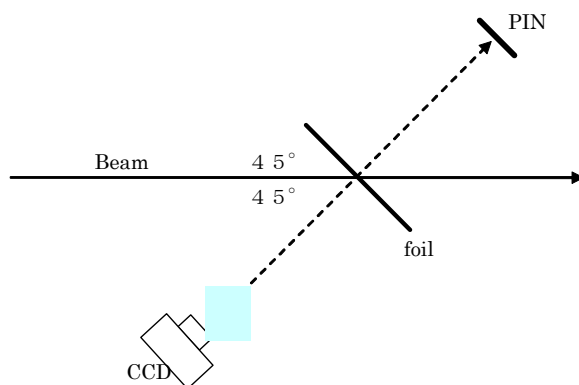


Fig. 6-7-2 蛍光板と CCD カメラ, 散乱板と PIN フォトダイオードの配置 (Top view)

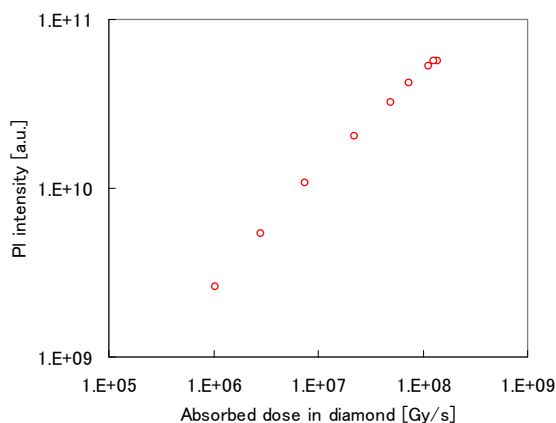


Fig. 6-7-3 B ドープ型ダイヤモンド薄膜のフォトルミネッセンス強度の吸収線量依存性. SPring-8 BL13XU の標準型アンジュレータ準単色光による測定.

Table 6-7-1 可視光観測カメラを含む画像計測システムの仕様

画素数	640 × 480 以上
フレームレート	60 f/s 以上. 露光時間はフレームレートと独立に調整可能
外部トリガー同期	60 Hz 以上の外部トリガーにて駆動可能
制御方式	カメラリンクによる
レンズマウント	C マウント
他	フレームグラバードとドライバー, データ収集用計算機, 信号用ケーブルを有する.

- ベリリウムフォイル挿入時には, ドレイン電流及び散乱 X 線強度計測によりビーム強度を得る. ベリリウムフォイルは光軸に対し斜め 45° に挿入する (Fig. 6-7-1, Fig. 6-7-2). ドレイン電流を計測できるように, ベリリウムフォイルはチャンバーに対して電氣的に絶縁され, バイアスがかかることが可能な構造とする (Fig. 6-7-1). ベリリウムフォイルからの散乱 X 線強度は, 大気中に置かれたフォトダイオード等の X 線検出

器により計測する (Fig. 6-7-1, Fig. 6-7-2). フォトダイオードは低エネルギーX線に対する透過率が低いサファイアビューポートを通じて散乱X線を計測する. 従って, 硬X線ビームのみが計測の対象となる. X線検出器は蛍光板用カメラと対向した位置に設置する (Fig. 6-7-1, Fig. 6-7-2). フォトダイオード出力電流およびベリリウムフォイルドレイン電流は低雑音プリアンプにより電圧変換後ケーブルドライブし, 光学ハッチ外の高速度ADCによりパルス波形を得る.

- ・ フォトダイオードへのダイレクトビーム入射モードは, 低フラックスの X 線強度測定に用いる. 出力電流信号は低雑音プリアンプにより電圧変換およびケーブルドライブし, 光学ハッチ外の高速度ADCによりパルス波形を得る.

## 6-7-2. ビーム計測用モニタ

(目的)

ビーム強度, 重心位置を非破壊に計測する. ビーム強度は, 実験データの規格化に用いるため, リニアリティ, 長期にわたる安定性が必要である. ビーム位置計測精度は 1  $\mu\text{m}$  以下とする. またビーム強度は, 最大フラックスまで線形性を保って計測できる必要がある.

(仕様)

(a)ガス型と(b)固体散乱型を用意する.

(a)ガス型

- ・ 差動排気により内部気体圧力を定常とする.
- ・ 計測対象は, 散乱 X 線と電離電流という 2つの可能性がある. 両者について (用いる希ガスと気圧も含めて) 比較検討を要する.
- ・ 散乱 X 線計測の場合, 高フラックスビーム入射における非線形応答の問題は少ないが, 十分な散乱強度が得られるか検討が必要である.
- ・ 電離電流計測の場合, 高フラックスビーム入射における非線形応答を回避するための検討が必要である. 特に高密度のパルス X 線が入る場合に極短時間の間に発生する高密度の電荷を再結合により失うことなく確実に電極に収集しなくてはならない. このためにガス圧は常圧以下で用いる. 一方, 常圧以下では電離電荷総量は減少するため, 電極付近で信号電荷増倍機構を要する. この増倍機構を含むシステムとしてのリニアリティに対する検討が必要となる.
- ・ ドリフト電荷を画素情報として得ることのできる検出素子を用いて読み出し, その合計によりビーム強度, 重心計算によりビーム位置情報を得る.
- ・ ビーム位置信号として垂直, 水平方向の 2つを得るために, チャンバー内において電場の方向が互いに垂直な 2つの検出部をタンデムに配置する.
- ・ ガスチャンバーの光軸方向のフランジ規格は ICF70 とし, フランジ面間隔は 200 mm とする.

## (b)固体散乱型

- ・ スペックルフリーの PVD・Be フォイルからの後方散乱 X 線を 4 つの X 線検出器（半導体フォトセンサー等）により検出し、信号強度の比により Be 薄膜上のビーム重心を算出する。また信号強度の合計によりビーム強度を算出する (Fig.6-7-4)。
- ・ 4 つの素子は、光軸に直交する面内で、鉛直線に対し $\pm 45^\circ$  (UL,UR) ,  $\pm 135^\circ$  (DL,DR) の位置におかれる (偏光依存性を同等にするため) (Fig.6-7-4)。
- ・ 用いる Be 窓とビームエネルギーにより散乱 X 線強度の空間プロファイルが変化するので、理論的な検討により絶対強度を得る方式を開発する。同時に計測される蛍光 X 線の影響をふまえた検討を要する。
- ・ 4 つの PIN フォトダイオードを同じロッドから得ることで PIN フォトダイオードの光感受性をできるだけそろえる。光のエネルギー変更によりビームが見かけ上位置ずれないように、フォトダイオード感度の波長依存性もできるだけそろえておく必要がある。同様の理由によりフォトダイオードの経年劣化について検討を要する。
- ・ 位置モニタキャリブレーション用に検出器は相互関係を保ったまま水平垂直に平行移動できることとする。移動範囲は $\pm 3$  mm, 分解能は 1  $\mu\text{m}$  とする。実ビーム位置とモニタから得るビーム信号の関係にはビームエネルギー依存性がある。フォトダイオードの経年的な劣化を考慮し、定期的なキャリブレーションを行う必要がある。水平・垂直の駆動機構については検討が必要である。
- ・ 位置モニタとしての再現性を考慮し、Be 窓のマクロな平坦さは(カーリング) $\mu\text{m}$  オーダーとする。
- ・ 強度モニタのダイナミックレンジとして  $1\text{E}7$  を目標とする。
- ・ センサーからの出力電流信号は低雑音プリアンプにて電圧値としケーブルドライブし、光学ハッチ外の高速度 ADC にて波形計測を行う。
- ・ 光軸方向のフランジ規格は ICF70 とする。フランジ面間隔は 300 mm とする。

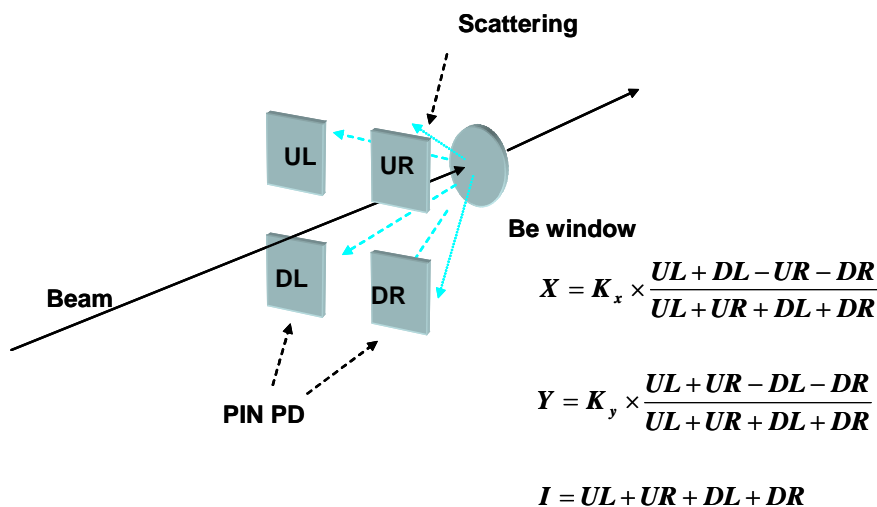


Fig.6-7-4 Be 窓からの散乱 X 線を利用するビーム位置モニタ

- ・ ADC により取得した波形のパルスごとの積分により、バンチ毎のビーム位置を Fig.6-7-4 の演算により得る。バンチ番号を算出データに付与する。これらの計算を高速で行う処理系を構築する必要がある。得られた信号の処理時間は、17 ms(60 Hz)より十分に短く(1 ms 程度)する必要がある。

### 6-7-3. タイミングモニタ

タイミングモニタは、XFEL と外部同期レーザーとを用いてポンプ-プローブ測定を行うために利用する。XFEL も外部同期レーザーも、加速器の基準信号に対して ~100 fs のジッターを持つため、フェムト秒領域でのポンプ-プローブ測定のためには、別途正確な照射タイミングの決定(ポストプロセス)が必要である。外部同期レーザーパルスのタイミング測定には、(a)XFEL パルスそのものとの比較と、(b)XFEL のもととなる電子ビームとの比較の独立な2種類の方法を採用する。利用実験に応じて、これらのタイミングモニタのどちらかを利用する。

#### (a) 過渡反射率方式

この方式では、XFEL パルスと外部同期レーザーパルスとのタイミングを決定する。このためにビームラインに過渡反射率測定用のポストプロセスチェンバーを設置する。このチェンバー内に、GaAs などの適当な試料をおき、ポンプ-プローブ測定を行う。

(利点)

- ・ レーザーパルス同士の真のタイミングを決定できる。

(難点)

- ・ XFEL と外部同期レーザーを実験用と過渡反射率測定用に分ける必要がある。

#### (b) 電気光学(EO)効果方式

この方式では、XFEL のもととなる電子ビームと外部同期レーザーパルスとのタイミングを決定する。このために加速器に EO チェンバーを設置する。タイミングの決定方法は、スペクトルエンコード方式、時間エンコード方式、空間エンコード方式が考えられるが、ある程度の時間分解能と低いレーザーパワーで測定可能な空間エンコード方式とする。

(詳細)

- ・ EO 結晶には、ZnTe または GaP を使用する。
- ・ 外部同期レーザーのオシレーター出力を EO チェンバーに導入する。
- ・ オシレーターから EO チェンバーまで数十m離れているので、レーザーパルスは空気中又はファイバー中を伝送させる。
- ・ 空気中を伝播させる場合、空気のゆらぎを少なくするため、ミラーや伝送路は、ダクトなどで覆う。
- ・ シングルモード光ファイバーの場合、大きなチャープをかけてピークパワーを低くし、



ファイバー中の非線形効果を抑制する。その後、パルス圧縮を行う。このため光学系は極めて複雑になると予想される。

- フォトニックファイバーの場合、裸線でない敷設可能なファイバーを用意する必要がある。光学系は非常に簡単。
- ファイバーは温度調節された経路を通す。必要に応じて、ファイバー長の安定化を行う。
- ジッターの大きな再生増幅器を用いる場合、別途オシレーター出力と再生増幅器出力のタイミングを測定する必要がある。OPCPA方式で増幅する場合は、このプロセスは不要。

(利点)

- 加速器中で測定するため、利用実験の種類を選ばない。

(難点)

- 電子ビームのタイミングは、X線自由電子レーザーパルスのタイミングとはずれる可能性がある。
- レーザーパルスを加速器まで伝送するため、複雑なアライメントを要する。

## 7. データ収集システム (DAQ)

### 7-1. データ収集システム (DAQ)

#### 7-1-1. 概要

XFEL では、光パルス個々の強度、位置、タイミング信号とのジッターなどが変動する。したがって、これらの光パルスの情報をユーザーが利用し、上記変動を考慮して実験結果を解析することが必要になると考えられる。

しかし、放射光、レーザーなどのユーザーコミュニティでは、このような実験スキームの経験がない。そのため、整備に当たっては施設側からユーザーコミュニティへの情報の周知に努力する必要がある。

#### 7-1-2. 基本整備方針

0 次元、(1 次元)、2 次元検出器のうち、モニタ等で利用する検出器に必要なデータ収集ボード等は、利用実験においてもユーザーが利用できるようにシステム設計を行う。それ以外のユーザー利用実験は、下で述べるタグジェネレーターでユーザーにタグを取得していただく。また、それに必要な技術サポートを行う。

#### 7-1-3. タグ

タグ番号は、運転期間の所定の時間、たとえばユーザー利用実験開始時などに、0 にリセットし、それ以降発生したパルス数とする。これは加速器制御のタグ付け方法と同一にするためである。ユーザーに供給するタグは 32 bit とし、それ以上のパルス数に到達した場合は 0 に戻る。従ってタグ番号だけではパルスは一意に決定できない。実験日時、時刻とタグ番号を指定することでパルスを一意に決定できる。ユーザーはタグ番号と分程度の精度の時刻を記録する実験システムを構築することが奨励される。

(参考) 60 Hz 24 時間で 22.3 bit

#### 7-1-4. タグジェネレーター

##### (1) 仕様

- ・ 理研側が準備するタグジェネレーターは、容易にタグ番号が取得できることを目的とする。ユーザー側の装置に数え落としがなければ、ユーザーが実験の最初のパルスのタグ番号を取得できればよい。
- ・ ユーザーは、市販のデータ取得 DIO ボード、またはイーサネットを介したソケット通信を準備することによりタグ番号を取得できる。
- ・ データ取得 DIO ボードを利用する場合には、測定 1 ランの開始タグ番号、終了タグ番号、およびリアルタイムでタグ番号を取得できる。
- ・ ソケット通信を利用する場合には、測定 1 ランの開始タグ番号と終了タグ番号を取得できる。リアルタイムのタグ番号は取得できない。
- ・ 上記の目的のためこのタグジェネレーターは、パルスと同期した Master Trigger (TTL)

を遮断する機能を持つ (Fig. 7-1-1). ユーザーが実験を測定 1 ランを開始する際には、タグジェネレーターに開始コマンドを送信する。タグジェネレーターは、要求を受け付けた 5 パルス後に、ユーザー装置に TTL 信号を供給する。また終了時には、ユーザーがタグジェネレーターに終了コマンドを送信すると TTL が直ちに遮断され、1 ランが終了する。ただし、終了コマンドが Master Trigger の直前の場合は 1 パルス後に終了する場合がある。

- ユーザーは、ソケット通信または Lemo ケーブルの TTL 信号によって、開始コマンドおよび終了コマンドを送信する。
- ユーザーの実験装置に供給される TTL 信号は 2 系統あり、それぞれ Master Trigger に対して遅延時間を設定することができる。
- 上記遅延時間は、パルスの 0~16 msec 後、または前のパルスの 0~1000 msec 後のいずれかを設定することができる。遅延時間の設定は、10  $\mu$ sec 分解能で精度は遅延時間の 0.1%程度の精度とする。
- 遅延時間なしの場合は、100 nsec 程度 master trigger に対して遅延する。
- 遅延時間の設定は、ビームラインに設置する PC の GUI ウィンドウから、もしくはソケット通信によって設定できる。
- nsec オーダーの時間精度が必要なユーザーは、ビームラインに設置する TDU (Timing Delay Unit) から供給される TTL, NIM, Pecl 信号などを用いる。タグを付ける場合は、タグジェネレーターから供給される TTL 信号を veto 信号として利用し、タグをつける。
- デジタル出力で最初のパルスのタグ番号を 32 bit パラレル出力する。また、別の 32 bit パラレル出力で、それぞれのパルス番号を Master Trigger に対して 8 msec 後まで出力する (Fig. 7-1-2)。後者の出力はユーザーが TTL を停止要求した後にも出力されるので、停止要求後にこのタグ番号を取得すると、測定した最後のパルス番号を取得することができる (Fig. 7-1-3)。このことを利用すると、タグ付けが 1 測定ラン中に間違いなく行われたか、確認できる。Fig. 7-1-4 にこのタグジェネレーターの利用方法の例を示す。タグ番号は、加速器のリセット時、あるいは 32 bit に到達した場合に 0 に戻る。このためタグ番号だけではパルスを一意に指定できない。そこで測定時の日時、時刻をユーザー側で記録しておく必要がある。ユーザー側は分程度の精度を確保するように推奨する。また、理研側で ntp ユーザーが利用できる ntp サーバーを用意するのでこれを用いて時刻合わせをすることが望ましい。
- ユーザー側へ供給する TTL パルスの遅延時間は、ビームラインに設置する PC の GUI ウィンドウから、もしくはソケット通信によって設定する。

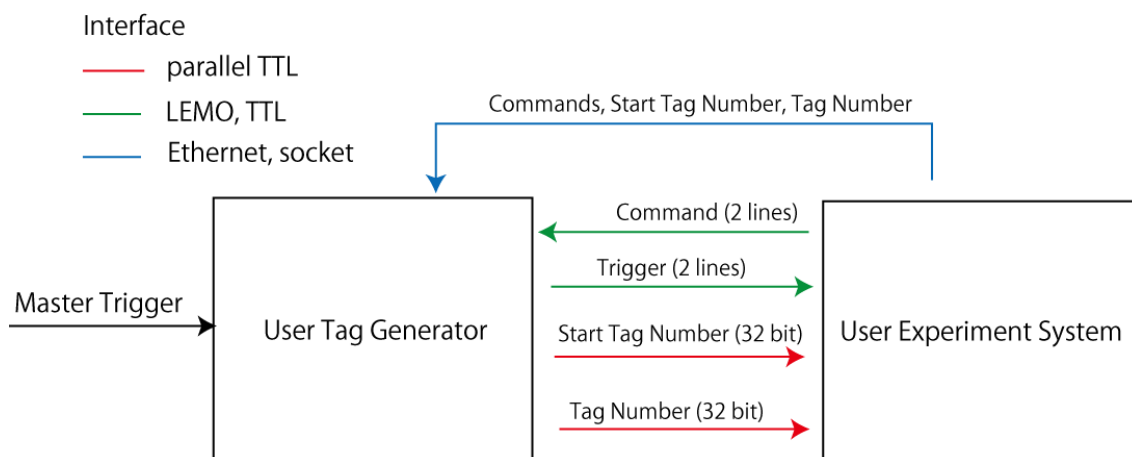


Fig. 7-1-1 タグジェネレーターの構成

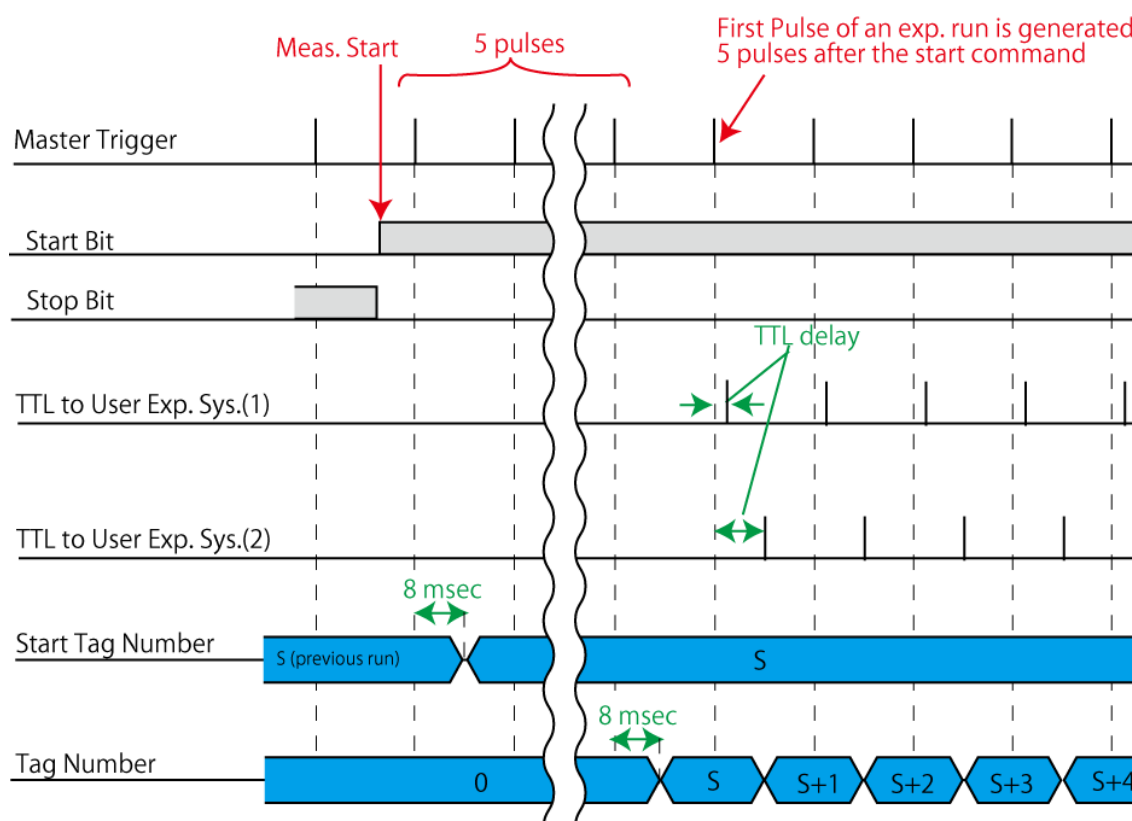


Fig. 7-1-2 タグ発生開始時のタイミングチャート. タグ開始番号出力は、最初のタグ番号 (S) を出力し続ける.

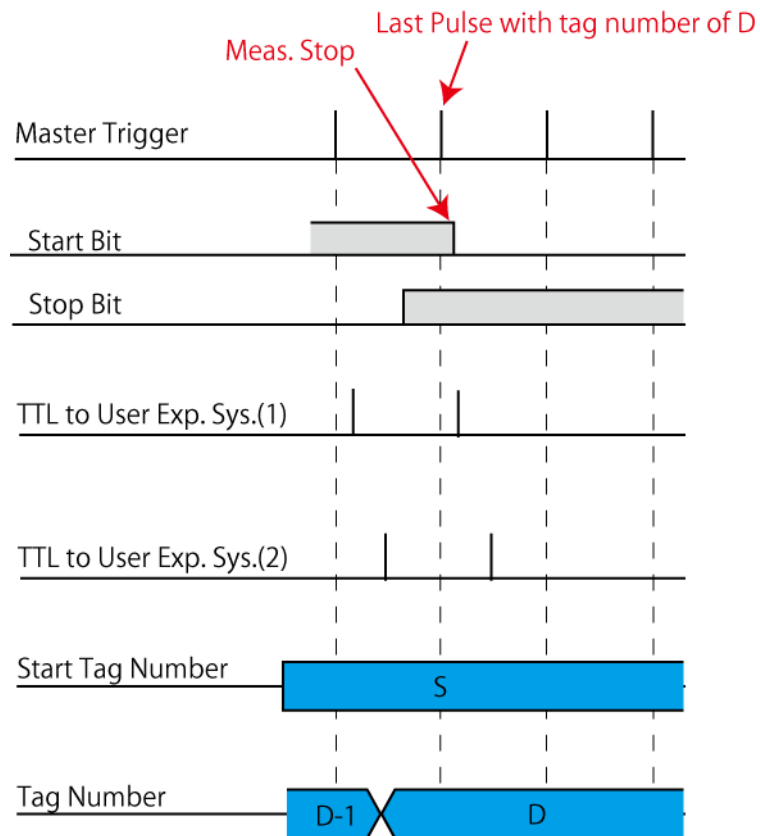


Fig. 7-1-3 タグ発生停止時のタイミングチャート. タグ番号出力は測定ラン終了後は, 最後のタグ番号 (D) を出力し続ける.

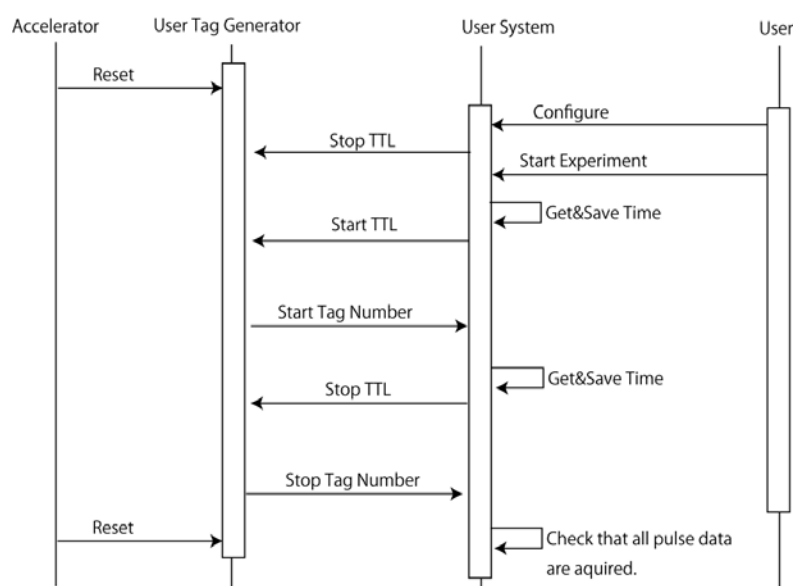


Fig. 7-1-4 タグジェネレーターの利用方法

## (2) ユーザー側がタグジェネレーターを利用するための要件

- ・ 測定ランの開始タグ番号, 終了タグ番号のみが必要な場合は, 開始コマンドと終了コマンドを送信, 開始タグ番号, 終了タグ番号を取得できればよい.
- ・ 開始コマンド, 終了コマンドは以下のいずれかの方法が利用できる.
  - イーサネットを介してソケット通信で, コマンドを送信する.
  - 2 bit デジタル出力可能なデータ収集 DO ボードまたは相当品により, コマンドを送信する.
  - 施設側で用意する PC の GUI ウィンドウから, マニュアルでコマンドを送信する.
- ・ 開始タグ番号, 終了タグ番号の取得は, 以下のいずれかの方法が利用できる.
  - イーサネットを介してソケット通信で, タグ番号を取得する.
  - 64 bit デジタル入力可能なデータ収集 DI ボードまたは相当品により, タグ番号を取得する.
  - 施設側で用意する PC の GUI ウィンドウから, タグ番号を読み取る.
- ・ リアルタイムでタグ番号を取得したい場合は, タグ番号が出力されている 32 bit 信号をデータ収集 DI ボードまたは相当品により取得する.
- ・ タグジェネレーターのインターフェースは下記の通りとする.
  - ソケット通信用イーサネット端子
  - ケーブルは開始および終了コマンド TTL レベル入力端子: LEMO 端子
  - タグ開始番号, タグ番号 TTL レベルパラレル出力: それぞれ 32 bit 端子は今後決定する.

## 7-1-5. システム構成

2次元検出器の出力は, 一般にデータ転送量が多い. 例えば 1 M pixel で 1 pixel 当たり 2 バイトのデータ量の場合では 1 Gbps, 9 Mpixel の検出器では 10 Gbps となる. このため, すべてのデータを取得するためのログ出力と, リアルタイムでユーザーが実験結果を判断するためのモニタ出力の 2 種類のデータ出力を行う (Fig. 7-1-5).

## (1) モニタ用データ転送

- ・ 必要に応じて間引いてデータ転送をおこなう.
- ・ 上記の間引き率はユーザーによって設定可能にする.
- ・ モニタ用データは, 同一パルスのもを出力する. たとえば, 60 Hz 運転時に, 間引き率を 10 と設定すると, タグ番号のひと桁目が 0 であるパルスのデータが 6 Hz でデータ転送される.
- ・ モニタ出力は複数の PC で利用できる.
- ・ モニタ出力は送達確認せず, リアルタイム性を重視する.
- ・ 同一パルスのデータがモニタできるようにする.

## (2) モニタ用 GUI

- ・ 0次元, 1次元検出器データの時系列, 2次元検出器の画像を表示ができる.
- ・ モニタ用データをファイルに保存することができる.
- ・ データ処理ライブラリを用いてデータ処理ができる.
- ・ 上記ライブラリには標準ライブラリとユーザーライブラリがあり, 標準ライブラリでは, 時系列データの標準偏差, ピーク位置, 重心位置, 総信号数などを計算するライブラリがあり, このライブラリの計算結果を表示できる.
- ・ ライブラリの仕様は今後検討を行う.

## (3) ログ出力

- ・ タグ番号とともに保存される.
- ・ 実験日時, 測定ラン番号, 実験責任者名, コメントなどのメタデータとともに保存される.
- ・ 上記仕様は今後検討を行う.

## (4) ログ GUI

- ・ ログをダウンロード, メタデータ表示, 簡易表示できる GUI
- ・ データ処理ライブラリを用いて, データまたはデータの一部のデータ処理ができる.

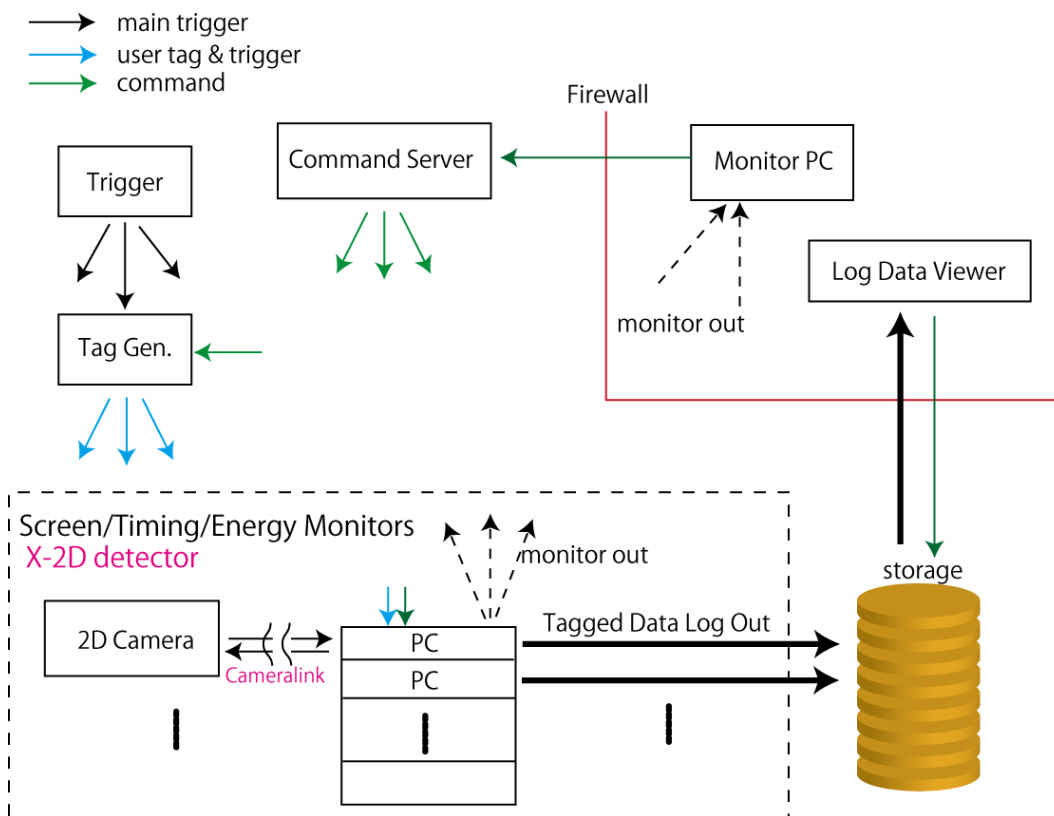


Fig. 7-1-5 DAQ システム構成

### 7-1-6. 検出器と DAQ ボード

下記の検出器, DAQ ボードは, 上記 DAQ システムに統合する.

#### (1) 0 次元検出器

- ・ 0 次元検出器用に, 低速 24 bit ADC, 高速 12 bit ADC, DIO ボードを用意する.
- ・ ビーム位置モニタ用 PIN photodiode
- ・ 位置モニタ用には, PIN photodiode 感度がそろったものを用意する.

#### (2) 1 次元検出器

- ・ 2 次元検出器で代用できるため, 必要かどうか慎重に検討する.
- ・ 高速エネルギーモニタ用 1 次元検出器
- ・ 低速高精度エネルギーモニタ用 1 次元検出器
- ・ EO モニタ用 1 次元検出器

#### (3) 2 次元検出器

- ・ 可視用 CCD カメラ
- ・ スクリーンモニタ用カメラ
- ・ X 線 2 次元検出器 (次節参照)
- ・ ユーザー持ち込みカメラについては理研側と協議し, 必要であれば DAQ システムへの統合を行う. 2 次元検出器の場合, インターフェースは Cameralink (base configuration まで)を推奨する.

### 7-1-7. 可視光用カメラ

60 fps (frame per second) 以上, 外部トリガー同期可能なもの.インターフェースはカメラリンクインターフェース. 可能な限り, 共通のカメラで, ユーザー実験を含めた幅広いニーズに対応できるようにする. 仕様はビームラインモニター用と共通にする.

### 7-1-8. データ保存

- ・ データはディスクストレージに保存する.
- ・ X 線 2 次元検出器 (次節参照) のように複数の 2 次元検出器モジュールで構成される検出器の場合は, 複数の PC サーバーによってデータ転送, 保存を行うことによりデータ転送速度, 保存速度がサーバー数, ストレージ数にスケールする構成とし将来の拡張を容易にする.
- ・ ユーザー実験後, ユーザーはデータを持ち帰るものとする.
- ・ 保存期間は 3 か月程度を目標とする.
- ・ 計測 run ごとに run number をつけ, データを整理する.
- ・ データはインターネットを介してユーザーがアクセス可能とする.



## 7-2. X線2次元検出器

### 7-2-1. はじめに

X線コヒーレント回折など実機(XFEL)の利用実験の多くに、X線2次元検出器の利用が提案されている。XFELは、既存のどの光源とも異なる極めて先進的な光源である。このため必然的にX線2次元検出器も、従来の放射光とは異なる高度な性能を持つシステムが要求される。

### 7-2-2. 要求仕様の概要

XFEL利用実験の特徴を検出器の立場から概観すると、下記の2点が重要である。

(要件1) パルスごとにデータを取得しなければならない。

(要件2) パルスあたりのパワーが約6桁強くなった。これに伴い、検出器に到達するピクセルあたりの光子数も、パルスあたり1光子程度であったものが最大 $10^6$ 光子まで増大する可能性がある。

要件1は、実機の繰り返し周波数最大60 Hzに同期して60 fps (frame per second) の撮像速度で動作することを要求する。さらに前のフレームの信号が次のフレームに残像として観測されてしまうことを避けるため、残像を実効的に無視できるセンサーが要求される。

要件2に関しては、高い光子数のX線が検出器に到達した場合に、センサーの直線性を損なうプロセスが起きる可能性がある。このような場合の検出器の応答について報告された例はなく、試験研究を行う必要がある。

なお、これまで放射光施設では蛍光体とCCD検出器を組み合わせた2次元検出器が広く用いられてきた。しかし、放射線損傷が起きやすいこと、残像が大きいことの2点から蛍光体は問題が多いと考えられている。シリコンを利用した半導体検出器では、フォトダイオード中でX線が吸収され、電子・ホールペアを多数生成する。電子・ホールはフォトダイオード中で分離し、一般に検出素子内でいずれかを電圧に変換する。電圧信号はAnalogue-to-digital converter (ADC)によってデジタル情報に変換される。

要件1を満たすためには、上記検出過程を速くする必要があるが、そのまま高速化してもノイズの増大を招くだけであり得策ではない。そこで、上記検出過程を並列で読み出すことにより、全体の速度を向上させるのが一般的である。

要件2に関しては、検出器の専門家の間でも解決策が見出されていない。シリコンの半導体検出器の場合、検出可能な最大信号強度は $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ の画素に10 keVのX線2500光子程度が上限でないかとの報告がある。 $10^6$ のX線光子が1画素 $100 \times 50 \times 50 \mu\text{m}^3$ に平均的に吸収されたと仮定すると、キャリア濃度は $10^{16} \text{ e/cm}^3$ に達する。これは通常のフォトダイオードのドーピング濃度に匹敵する。このことから、空乏層中の電場がX線によって生成したキャリアによって遮蔽されてしまい、通常の動作が期待できない。未発表の予備的な検討では、 $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ の画素に10 keVのX線2500光子程度が吸収された場合に上記の効果が表れ始め、2次元検出器の応答が変化し、実効的な空間分解能 (point spread function) が悪化する可能性が指摘されている。

### 7-2-3. 整備方針

予想されるニーズは多様である。既存の検出器でこれらの要求を満たすものはない。また市販の検出素子も存在しない。そこで、新たに検出素子、駆動・読出回路を開発する必要がある。開発に当たっては、**60 fps の撮像速度**を必須仕様、**検出可能な最大信号強度 (Full Well Capacity)**を優先度の高い仕様項目としシステムの選択を行う。また、下記で述べるモジュールを複数利用して大面積検出器を実現するが、この際に**モジュール間の不感領域**が、コヒーレント X 線回折顕微鏡などの利用研究では極めて重要なパラメータであることが示唆されている。不感領域がどの程度まで許されるかについて検討結果が得られ次第、仕様に反映させていく。

XFEL 発振時に確実に動作することを目標とするシステム (**安定システム**) と、新しい技術開発に取り組むシステム (**先進システム**) とに明確に区別し整備を行う。以下では安定システムとして開発するマルチポート CCD 検出器の仕様を示す。この安定システムにおいても開発的要素が多くある。実際の検出素子を用いた試験研究を行い、最終的な仕様を決定する前に実現可能性を検証する。

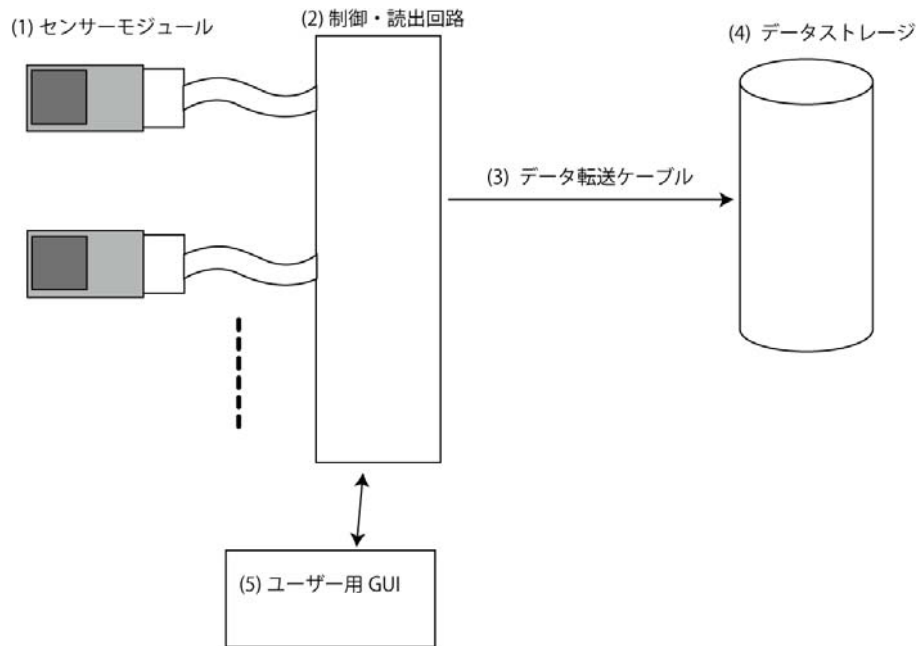
### 7-2-4. 安定システム：マルチポート CCD 検出器

#### (1)概要

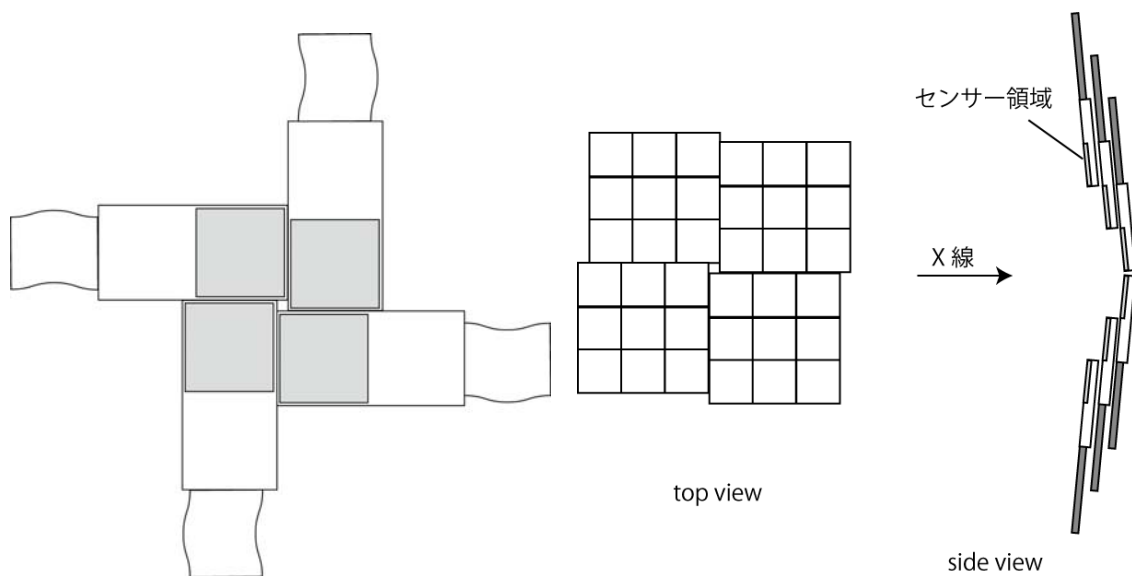
検出システムは、センサーモジュール、制御回路、データ転送ケーブル、データストレージからなる (**Fig. 7-2-1**)。制御回路で取得したデータは、データ転送ケーブルを経由してデータストレージに転送される。データ転送ケーブル、およびデータストレージについては技術的進展が著しいため、今後の動向を鑑みながら別途仕様を決定するものとする。全体の画素数は当面  $1k \times 1k$  とし、 $3k \times 3k$  まで拡張可能なシステムとする。

#### (2)センサーモジュール

検出素子開発には、相当程度の投資および開発期間が必要である。そこで、同一の検出素子で可能な限り多様な実験を可能にすることが望ましい。例えば、センサー中心に穴を設ける必要のある実験と、穴の必要のない実験が考えられる。本提案では、センサーモジュールの配列を変えることによって両者を実現できるシステムとする (**Fig. 7-2-2**)。また、将来的に画素数を増加する場合にも対応できることが望ましい。この場合も、同一のセンサーモジュールを用い、モジュール数を増やすことでより大きな画素数のシステムを構築できるようにする。センサーモジュールの画素数は  $512 \times 512$  とする。



**Fig. 7-2-1** 検出システムの概要. CCD 検出素子とフロントエンド回路からなるセンサーモジュール(1)で X 線を検出し, 制御・読出回路(2)によってデータが取得される. データはデータ転送ケーブル(3)を経由して転送され, データストレージ(4)に保存される.



**Fig. 7-2-2** センサーモジュール・アレイの構成. 左は  $1\text{k} \times 1\text{k}$ , 右は  $3\text{k} \times 3\text{k}$  pixel のシステム. センサーモジュールを並べ (タイリング), より大きなピクセル数を実現する. 中心にセンターホールが必要でない場合は, センサーモジュールを動かして敷きつめて使用する. この構成を本仕様とする.

## 7-2-5. 仕様詳細

## (1)残像

前のフレームの信号が次のフレームに残像として観測されてしまうことを避けるため、残像を実効的に無視できる半導体センサーで残像比 0.01%以下のセンサーを選択する。

## (2)素子フォーマット

フル・フレーム・トランスファー・アーキテクチャー

## (3)可視光遮光方法

可視光遮断用アルミニウムコートで厚さ 100 nm

## (4)センサー領域サイズ

製造歩留まりのよい比較的小型の素子サイズとし、放射線損傷等によりモジュールの交換コストを下げるため、 $25 \times 25 \sim 50 \times 50 \text{ mm}^2$ とする。

## (5)不感領域

2 ピクセル以下が望ましいが、技術的に困難であるので、許容領域についてシミュレーション結果が得られ次第決定する。

## (6)システムのピクセル数

$1\text{k} \times 1\text{k} \sim 3\text{k} \times 3\text{k}$ . モジュール当たり  $512 \times 512$ .

## (7)ピクセルサイズ

$50 \times 50 \sim 150 \times 150 \text{ um}^2$

## (8) 量子効率および空乏層厚

エピタキシャルシリコン(厚み 50 um, 空乏層厚 35 um) :

78% @ 6 keV, 20% @ 12 keV

または

高抵抗シリコン(厚み 130 um, 空乏層厚 100 um) :

93% @ 6 keV, 35% @ 12 keV

または

高抵抗シリコン(厚み 230 um, 空乏層厚 200 um) :

97% @ 6 keV, 58% @ 12 keV

## (9) 動作温度およびリーク電流

読出ノイズよりもリーク電流由来のノイズを十分に小さくするため、 $-10 \sim 0 \text{ }^\circ\text{C}$ でのリ

ーク電流由来ノイズが 15 fps 動作時に 50 e-/pixel/frame 以下とする。これはリーク電流が 37.5 ke-/pixel/s 以下であることを要求する。

(10)検出可能な最大信号強度

1000 ph./pixel @12 keV, 2000 ph./pixel @ 6 keV

(11)ピクセル当たりのブルーミングピーク信号強度, Full Well Capacity

8 M e-/pixel

(12)システムノイズ

ショットノイズの 1/5 以下

<0.2 X 線光子@ 6 keV <0.1 X 線光子@ 12 keV

これは単一ゲインのシステムでは 330 e-/pixel 以下に相当する。

(13)センサーノイズ

システムノイズの 2/3 以下

(14)ADC ダイナミックレンジ

14 bit 実効 13.5 bit

(15)撮像速度

60 frame per second

(16)ビニング

利用しない

(17)放射線耐性

3年以上

本仕様案では、データ転送ケーブル、およびデータストレージについては議論しない。

(18)アンチブルーミング

なし

(19)DAQ へのインターフェース

カメラリンク base configuration

8. 制御・インターロックシステム (TBD)

## 9. 共通実験機器

### 9-1. 共通実験架台

- ・ 実験ハッチ内において、実験装置のアライメントを速やかに再現性良く行うための共通実験架台を検討する。
- ・ 安定性を考慮して、実験架台の材質はグラナイトとする。
- ・ 再現性の目標精度を 100  $\mu\text{m}$  とする。
- ・ 定盤面のサイズは 1 m  $\times$  1 m (小型定盤) または 2 m  $\times$  1 m (大型定盤) 程度、高さは 30 cm 程度とする。

### 9-2. 集光光学系 (TBD)

### 9-3. 同期レーザー (TBD)

### 9-4. タイミング (TBD)

**参考文献**

- [1-1] T. Tanaka, & T. Shintake, (Eds) SCSS X-FEL Conceptual Design Report, (RIKEN Harima Institute, Hyogo, Japan, 2005).
- [1-2] J. Arthur et al., "Linac Coherent Light Source (LCLS) Conceptual Design Report", SLAC-R593 (Stanford, 2002).
- [1-3] M. Altarelli et al. (Eds) XFEL: The European X-Ray Free-Electron Laser, Technical Design Report. Preprint DESY 2006-097, (DESY Hamburg, 2006).
- [2-1] R. Bonifacio, C. Pellegrini, & L.M. Narducci, "Collective Instabilities and high-gain regime in a free-electron laser", *Opt. Commun.* **50**, 373-377 (1984).
- [2-2] E.L. Saldin, E.A. Schneidmiller, & M.V. Yurkov, "*The Physics of Free Electron Lasers*" (Springer, Berlin, 1999).
- [2-3] Takashi Tanaka, "FEL simulation code for undulator performance estimation", *Proc. 2004 FEL conf.*, 435-438 (2004), <http://radiant.harima.riken.go.jp/simplex>.
- [6-1] Togo Kudo, Sunao Takahashi, Nobuteru Nariyama, Takeshi Tachibana and Hideo Kitamura, "Synchrotron radiation x-ray beam profile monitor using chemical vapor deposition diamond film", *Rev. Sci. Instrum.* **77**, 123105 (2006).



## APPENDIX

### A1. XFEL に対するドースの見積もり

#### A1-1. 概要

XFEL では、単パルスの照射エネルギーが非常に高いため、光学素子の照射時の耐性について検討が必要である。最初に建設予定の X 線ビームラインを考えた場合、光学素子は、用途に応じて次表のように分類される。

Table A1-1-1 光学素子

光学素子の分類	候補となる材料	光源からの距離 $L$ (m)
(A) ビーム阻止 (シャッター, コリメータ等)	軽元素, 重元素	75 ~ 150
(B) 真空隔壁・X 線透過窓材	ベリリウム, ダイヤモンド	75 ~ 150
(C) 分光結晶	シリコン, ダイヤモンド完全結晶	100 ~ 150
(D) 全反射ミラー	軽元素, 重元素	100 ~ 150

耐性を評価するために、入射光の物質内での吸収エネルギーを、物質を構成する原子あたりのエネルギー (単位: eV/atom) に変換し、メルティングのスレシヨルド値と比較した。吸収エネルギーの評価は、(A)-(C)は通常の吸収係数、(D) は全反射条件下での表面近傍での消衰を考慮した吸収係数 (入射角依存性有り) を用いて行われる。したがって、通常の吸収体と、全反射下の吸収の 2 通りに分けて評価を行えばよい。

#### A1-2. 光源パラメータ (※ 本節に関して、本文中の最新パラメータとは異なる部分があるので注意すること)

SIMPLEX により SASE のパルス当たりの光子数  $N_p$ , ビームサイズ  $\sigma$ , 発散角  $\sigma'$  を計算した。光子数は SIMPLEX のパネルの表示値, ビームサイズ・発散角はシミュレーションから求めた。これらのパラメータの光子エネルギー  $E_p$  の依存性を調べるために、 $E_p < 10$  keV に対しては、アンジュレータの  $K$  値を固定して電子ビームのエネルギーを  $E_B=8$  GeV から 2 GeV の間で変化させて計算した (#1-#7)。また、 $E_p > 10$  keV に対しては  $E_B=8$  GeV で  $K$  値を変化させた (#7-#9)。その他のビームパラメータは次の通りである。

規格化エミッタンス	: $1 \pi$ mm.mrad
エネルギー幅	: $1E-4$
ピーク電流	: 3 kA
電荷量	: 0.2 nC (全幅 67 fs の矩形パルス)
アンジュレータ周期長	: 1.8 cm

アンジュレータ長 : 5 m (1 セグメント当たり)

平均  $\beta_x, \beta_y$  : 26 m

この結果, 下表のように  $N_p, \sigma, \sigma'$  が求められた. また, 最後のコラムに光のエミッタンスと波長の比

$$R = \sigma \sigma' / (\lambda / 4\pi) \quad (\text{Eq. A1-2-1})$$

を示す. ガウス型の回折限界光に対しては  $R = 1$  となるが, 今の場合には平均値として  $R = 1.5$  が得られた.  $N_p, \sigma, \sigma', R$  の光子エネルギー依存性を Fig. A1-2-1 から A1-2-3 に示す.

Table A1-2-1  $N_p, \sigma, \sigma'$  の計算結果

#	$E_b$ (GeV)	$K$	ID segment number	$E_p$ (eV)	$\lambda$ (nm)	$N_p$ (photons/pls)	RMS $\sigma$ ( $\mu\text{m}$ )	RMS $\sigma'$ ( $\mu\text{rad}$ )	$R =$ $\sigma \sigma' / (\lambda / 4\pi)$
1	2	2.18	5	625	1.98	4.90E+12	44.5	5.54	1.56
2	3	2.18	6	1410	0.882	2.40E+12	30.8	1.89	0.83
3	4	2.18	8	2500	0.495	1.40E+12	43.7	1.44	1.60
4	5	2.18	10	3910	0.317	8.80E+11	42.7	0.957	1.62
5	6	2.18	12	5630	0.22	5.70E+11	36.8	0.721	1.51
6	7	2.18	15	7660	0.162	3.80E+11	37.1	0.512	1.48
7	8	2.18	18	10000	0.124	2.60E+11	35.9	0.412	1.51
8	8	2	18	11255	0.110	1.91E+11	27.5	0.443	1.40
9	8	1.754	18	13300	0.093	1.15E+11	21.1	0.399	1.13

以下の計算では, 光子数  $N_p$  として上記の値 (及び補間値),  $\sigma$  として #1-#7 の平均値  $\sigma_{\text{ave}} = 38.8 \mu\text{m}$  を用いた (#8,9 は飽和に達していない). また, 発散角は, Eq. A1-2-1 において  $R = 1.5, \sigma = \sigma_{\text{ave}}$  として得られる  $\sigma'$  を用いた.

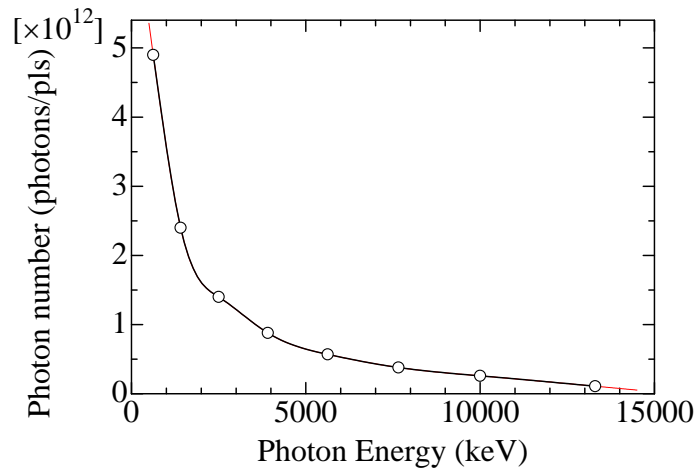


Fig. A1-2-1: パルス当たりの光子数 vs. 光子エネルギー

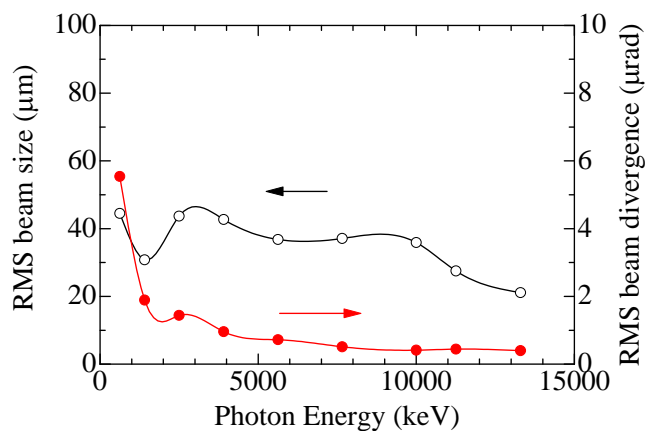


Fig. A1-2-2 ビームサイズ, 発散角の光子エネルギー依存性.  
実線はスプライン補間を表す.

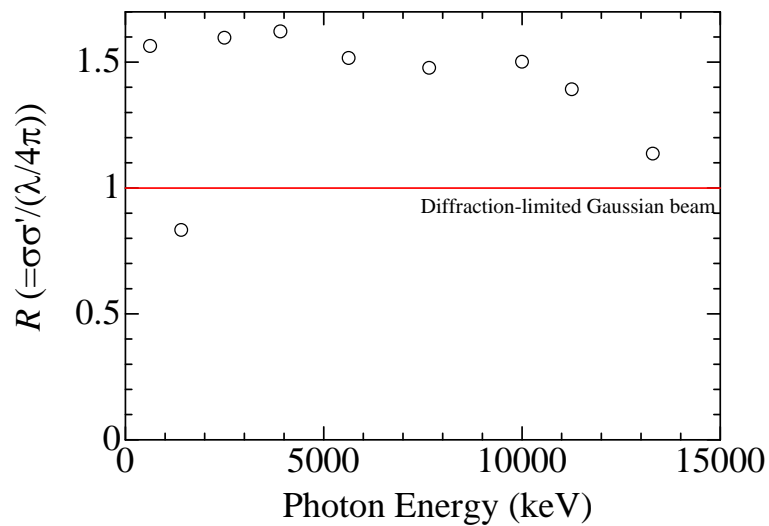


Fig. A1-2-3 パラメータ  $R$  の光子エネルギー依存性

### A1-3. 通常の吸収ドース

通常条件下のの吸収ドース  $D$  を、次式のように見積もった。

$$D = \frac{\mu N_p e E_p A}{2\pi\sigma_L^2 \rho N_A} \quad (\text{Eq. A1-3-1})$$

ただし、

$\mu$ : 吸収係数,  $\sigma_L$ : サンプル位置 (光源からの距離  $L$ ) における rms ビームサイズ,

$A$ : 平均原子量,  $\rho$ : 平均密度,  $N_A$ : アボガドロ数.

Be, B<sub>4</sub>C, Graphite, Diamond, SiC, Si, Cu について、光源からの距離を 100 m に固定して、光子エネルギーを 0.5 から 15 keV まで変化させてドースを計算した結果を Fig. A1-3-1 に示す。また、光子エネルギーを 1 keV, 5 keV に固定して、距離を変えながらドースを計算した結果を Figs. A1-3-2, A1-3-3 に示す。以下に、これらの結果をまとめる。

(1) Cu は、光源からの距離が遠い場合 ( $L \sim 100$  m) にも、吸収端近傍や低エネルギー領域においてメルティングスレシヨルドを超える可能性がある (Fig. A1-3-1)。したがって、特に安全を担保する機器については、ビーム阻止のための初段の材料として用いるのは不適當である。

(2) Be, B<sub>4</sub>C, Graphite, Diamond 等の軽元素は、光子エネルギーが高い場合 ( $E_p = 5$  keV) は、光源出口直後でも用いることができる (Fig. A1-3-2)。光子エネルギーが低い場合 ( $E_p = 1$  keV) は、光源出口直後ではスレシヨルドを超えるが、距離を  $L \geq 75$  m とするとスレシヨルドまで 1 桁以上のマージンがある (Fig. A1-3-3)。したがって、ビーム阻止及び窓材の候補となる。

(3) 分光結晶として、 $L = 100$  m のときの Si と Diamond のドースを考える。Fig. A1-3-1 より、Si は、高エネルギー領域 ( $E_p > 6$  keV) では、スレシヨルドまで 1 桁以上のマージンがあるが、低エネルギー条件 ( $1.98 \leq E_p < 6$  keV, 最小値は 111 反射の許容範囲から決定) ではマージンは 1 桁以内である。しかしながら、ドースの最大値 ( $E_p \sim 2$  keV 付近) においても、スレシヨルド値は超えていない。これに対し、Diamond は 111 反射が許容される全てのエネルギー領域 ( $E_p \geq 3.02$  keV) に対して用いることができる。

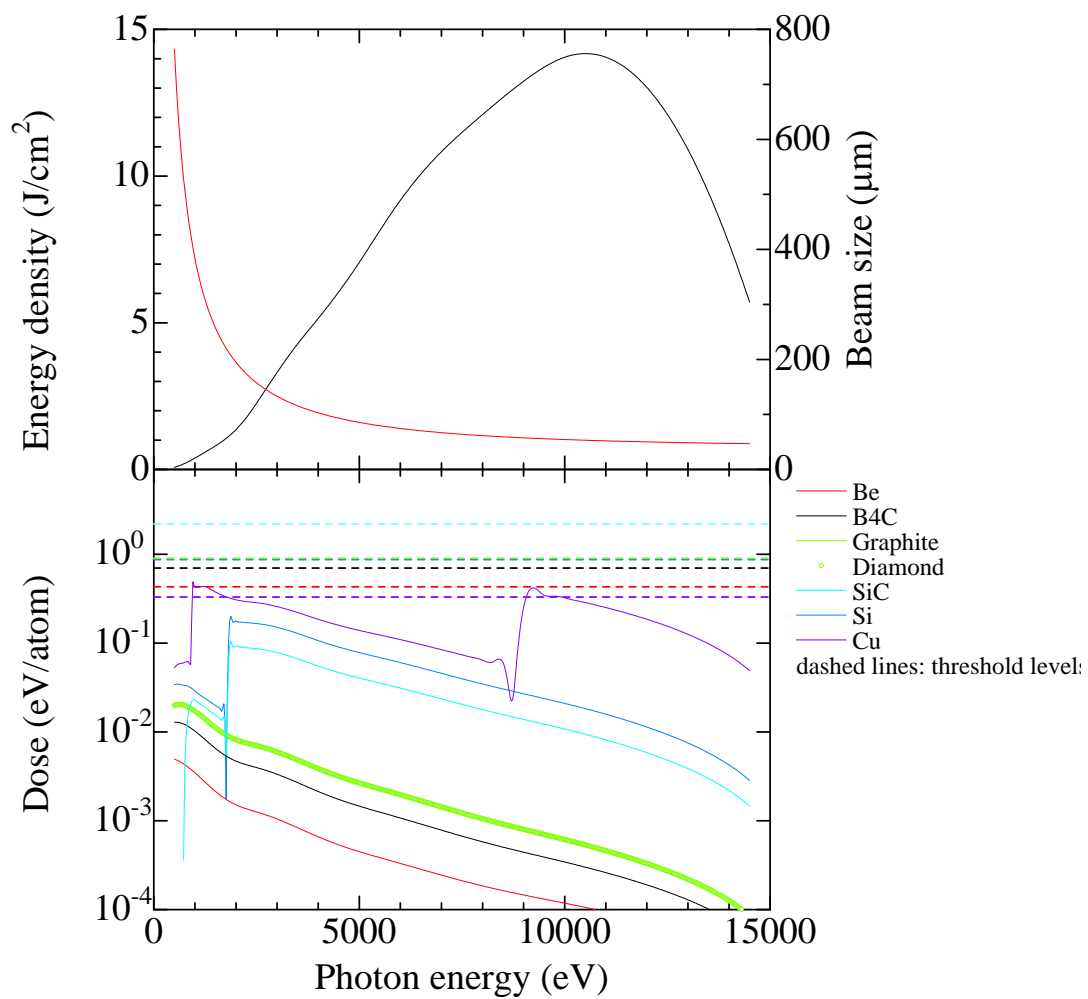


Fig. A1-3-1 (上) SASE のエネルギー密度及びビームサイズの光子エネルギー依存性. (下) ドースの光子エネルギー依存性. いずれも, 光源からの距離は  $L = 100$  m とした.

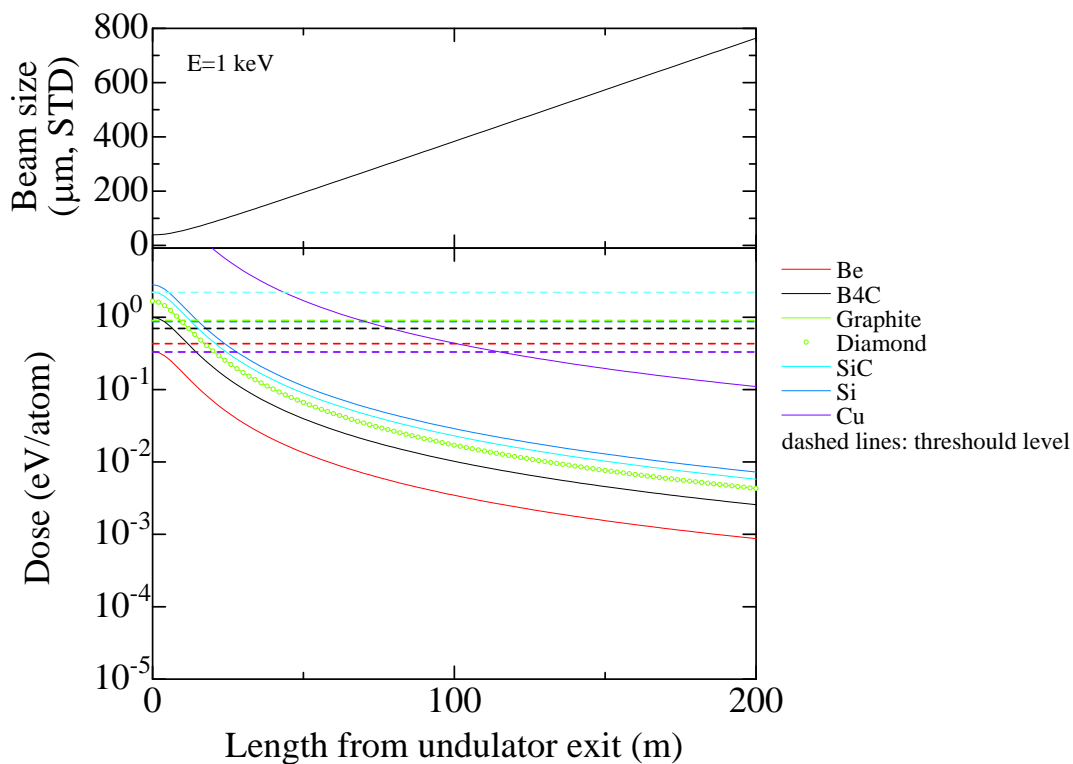


Fig. A1-3-2  $E_p = 1$  keV のときのドース及びビームサイズの距離依存性.

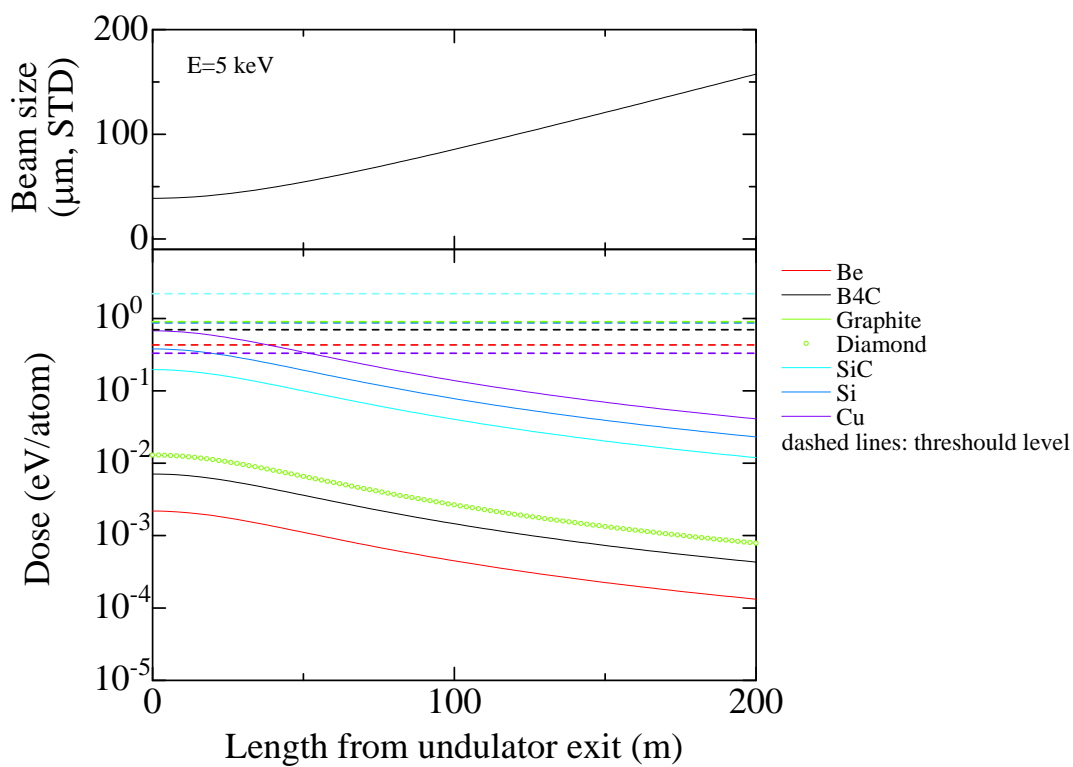


Fig. A1-3-3  $E_p = 5$  keV のときのドース及びビームサイズの距離依存性.

#### A1-4. 全反射条件

全反射条件下のドースは Eq. A1-4-1 のように表される.

$$D = \frac{\mu_r(\theta) N_p e E_p A (1-R) \sin \theta}{2\pi \sigma_L^2 \rho N_A}, \quad (\text{Eq. A1-4-1})$$

ただし,  $R$  は反射率を表し, 吸収係数  $\mu_r(\theta)$  は, 複素屈折率を  $n=1+\delta+i\beta$  として

$$\mu_r(\theta) = \frac{2\sqrt{2}\pi}{\lambda} \sqrt{\sqrt{(2\delta - \theta^2)^2 + 4\beta^2} + 2\delta - \theta^2}, \quad (\text{Eq. A1-4-2})$$

と表される. 入射角  $\theta$  が臨界角  $\sqrt{2\delta}$  より十分大きい極限では, Eq. A1-4-1 は通常の条件下のドース Eq. A1-3-1 の表式と一致する.

いくつかの光子エネルギー ( $E_p = 10, 5, 1$  keV) について, 入射角の関数としてドースと反射率を計算した結果を Figs. A1-4-1, A1-4-2, A1-4-3 にそれぞれ示す ( $L = 100$  m). また, 入射角を固定して, 光子エネルギーの関数としてドースと反射率を計算した結果を Figs. A1-4-4, A1-4-5 に示す. また, ミラーの長さを  $L_M = 50$  cm に固定し, 各光子エネルギーにおいて, ミラーのアクセプタンス  $\theta L_M$  が入射ビームサイズ  $\sigma_L$  の 5 倍となるように入射角  $\theta$  を変化させた結果を Fig. A1-4-6 に示す.

ミラー表面の材質としては, 金, シリコン, SiC, グラファイト ( $\rho = 2.2$  g/cm<sup>3</sup>) に対して計算した. 表面のラフネスは考慮していない. 以下に結果をまとめる.

- (1) 金の場合, 臨界角付近でスレシヨルドを超える (Figs. A1-4-1, A1-4-2).
- (2) シリコンの場合, 臨界角付近でスレシヨルドに近づくが, 超えることはない (Figs. A1-4-1, A1-4-2). また, 入射角  $\theta = 0.1^\circ$  に固定した場合, 全てのエネルギー領域においてスレシヨルドまで 2 桁のマージンがある (Fig. A1-4-4).  $\theta = 0.2^\circ$  のときも 1 桁のマージンがある (Fig. A1-4-5).
- (3) SiC の場合, 吸収ドースはシリコンと同等であるが, スレシヨルドが高いため許容度が高くなる.
- (4) グラファイトの場合, 反射率が高く, 原子当たりの吸収が小さいため, 臨界角付近でも 2 桁以上のマージンがある (Figs. A1-4-1, A1-4-2).
- (5) Fig. A1-4-6 より, ミラー長を  $L_M = 50$  cm とした場合,  $\theta L_M = 6\sigma_L$  の条件下で  $\theta$  は臨界角に比べて十分小さく, 全ての材質においてドースはスレシヨルドに対して 1 桁以上のマージンがあることがわかる. したがって, ミラー長  $L_M = 50$  cm が確保されれば, 低エネルギー側でビームサイズが増大した場合にも十分に対応可能である.

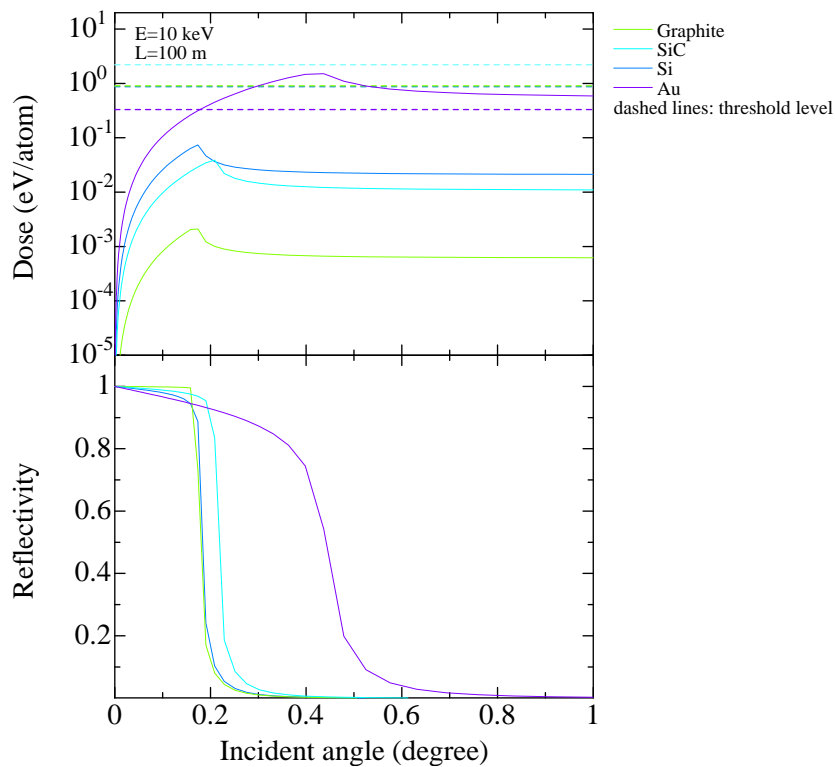


Fig. A1-4-1  $E_p = 10$  keV における ドース及び反射率の入射角依存性.

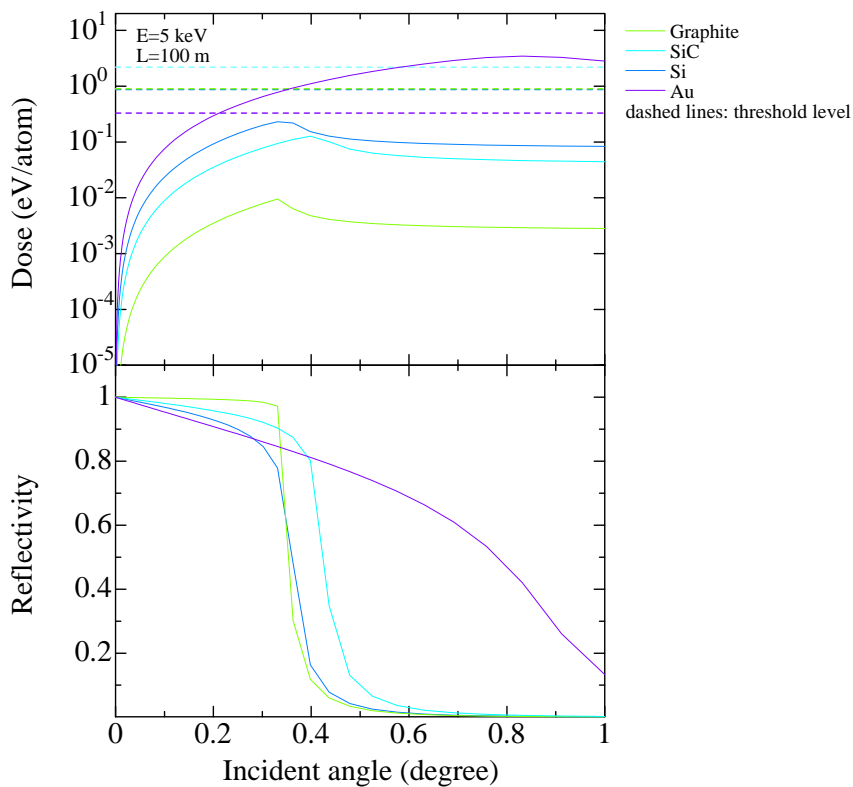


Fig. A1-4-2  $E_p = 5$  keV における ドース及び反射率の入射角依存性.



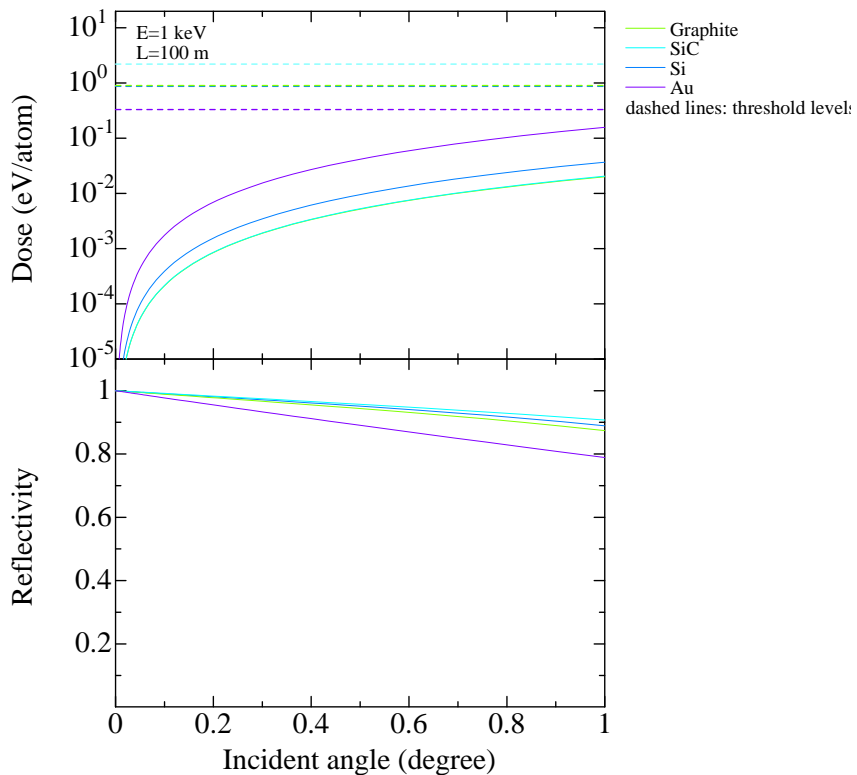


Fig. A1-4-3  $E_p = 1$  keV におけるドース及び反射率の入射角依存性.

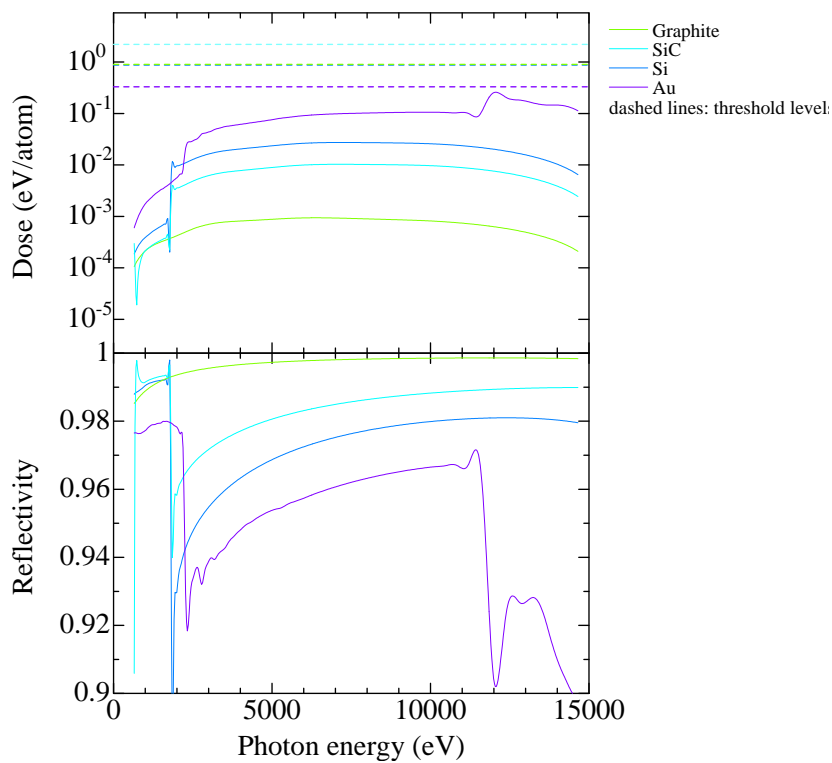


Fig. A1-4-4  $\theta = 0.1^\circ$  のときのドース及び反射率の光子エネルギー依存性.

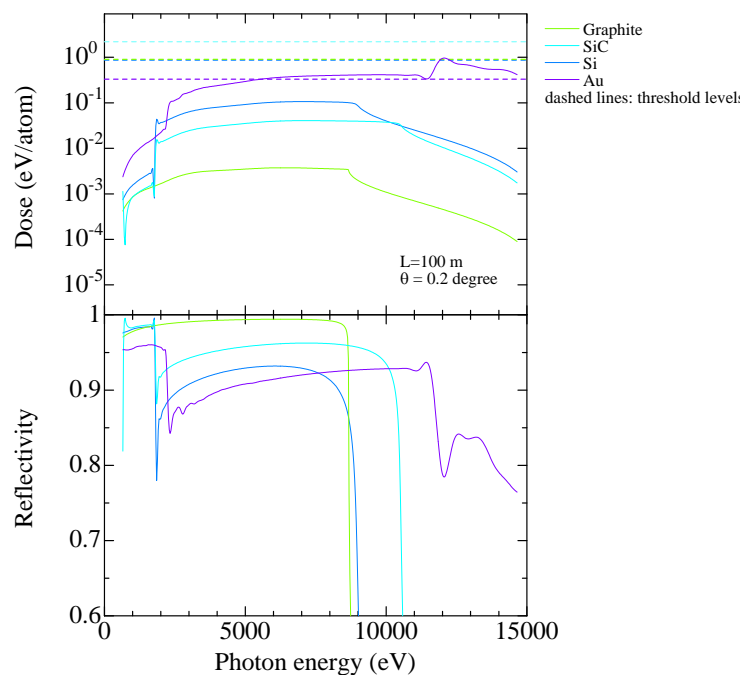


Fig. A1-4-5  $\theta = 0.2^\circ$ のときのドース及び反射率の光子エネルギー依存性.

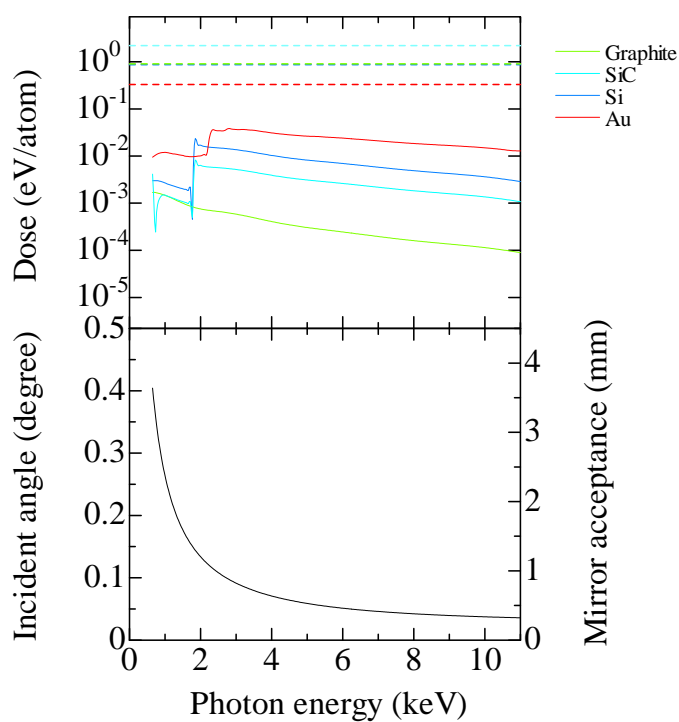


Fig. A1-4-6 ミラー長  $L_M = 50\text{ cm}$  のとき、ミラーのアクセプタンスとビームサイズの比を一定値 (6 倍) にとったときのドース (上図), 入射角 (下図左軸), 及びミラーのアクセプタンス (下図右軸). 光源からの距離は  $L = 100\text{ m}$ .

## A1-5. まとめ

- (1) ビーム阻止のための光学素子は、2段の構成にする必要がある。すなわち、ビームに直接照射される初段の材料は、 $B_4C$  等の軽元素を用いることで溶融・蒸発を防ぐ。ビームパワーを十分減衰させた後、次段に金属材料を用いて、硬 X 線・ $\gamma$  線を阻止する。
- (2) 真空隔壁・X 線透過窓材としては、ベリリウム・ダイヤモンドが全エネルギー領域で使用可能である。
- (3) 分光結晶としては、シリコンが硬 X 線領域 (6 keV 以上) で使用可能である。低エネルギー (3 ~ 6 keV) の領域では、照射耐性からみるとダイヤモンドが優れている。
- (4) 全反射ミラーの表面材料としては、臨界角付近で用いる場合は、 $SiC$ ,  $C$  が望ましい。 $Si$  は  $\theta \leq 0.2^\circ$  では問題なく用いることができる。また、低エネルギー領域でビームサイズが増大した場合は、取りこぼしがないようにミラーの入射角を大きくする必要があるが、ミラー長を 50 cm とすると、全ての材料において照射耐性は十分である。

次表にまとめを示す。(Table A1-5-1)

Table A1-5-1 光学素子の照射耐性

光学素子の分類	材料	照射耐性
(1) ビーム阻止 (シャッター, コリメータ等)	$B_4C$ , $SiC$ , $Be$ , $Diamond$	◎
	$Cu$	×
(2) 真空隔壁・X 線透過窓材	$Be$ , $Diamond$	◎
(3) 分光結晶	$Si$	○
	$Diamond$	◎
(4) 全反射ミラー	$Au$	△
	$Si$	○
	$SiC$	◎
	$C$	◎

## Reference:

R. Tatchyn, "LCLS optics: Technological issues and scientific opportunities," SLAC-PUB 6064, 1993.

R. M. Bionta, "Controlling dose to low Z solids at LCLS," LCLS note LCLS-TN-00-3, 2000.

M. Yabashi et al, "Optics development for Japanese XFEL project", Proc. SPIE **6586**, p. 658605.

## A2. 透過率の見積もり

### A2-1. はじめに

本章では、アッテネータの仕様を検討するために、いくつかの固体、気体について透過率を求めた。

X線の透過率は、単原子から構成される固体または気体 (@ T = 293 K) に対して、それぞれ次式のように与えられる。

$$T = \exp\left(-3.394 \times 10^{13} \frac{\lambda(\text{m}) \rho(\text{g/cm}^3) f'' z(\text{cm})}{M(\text{g/mol})}\right) \quad (\text{Eq. A2-1-1})$$

$$T = \exp(-1.395 \times 10^4 \times \lambda(\text{m}) P(\text{Pa}) f'' z(\text{cm})) \quad (\text{Eq. A2-1-2})$$

ただし  $f''$ : 原子散乱因子の虚部,  $z$ : アッテネータの厚さ,  $\rho$ : 密度,  $M$ : モル質量,  $P$ : 圧力である。

### A2-2. 固体アッテネータ

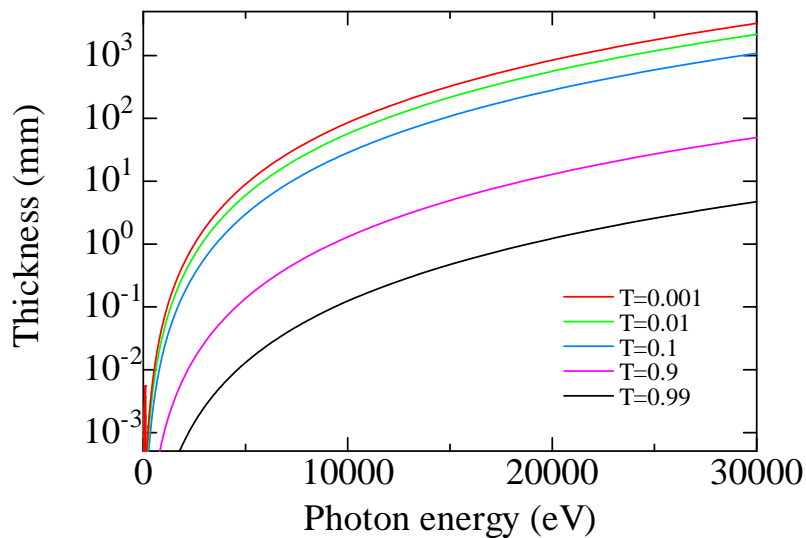
いくつかの固体に対し、次の項目の見積もりを行った。

- ① 透過率  $T$  をパラメータとしたときのアッテネータの厚さ  $z$  の光子エネルギー依存性
- ②  $z$  をパラメータとしたときの  $T$  の光子エネルギー依存性

(1) ベリリウム

 $\rho=1.85 \text{ g/cm}^3$ ,  $M=9.012 \text{ (g/mol)}$ 

①



②

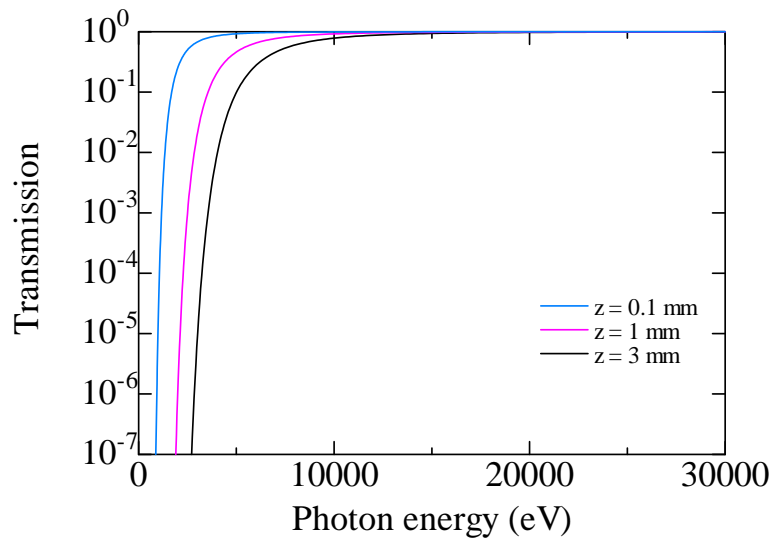


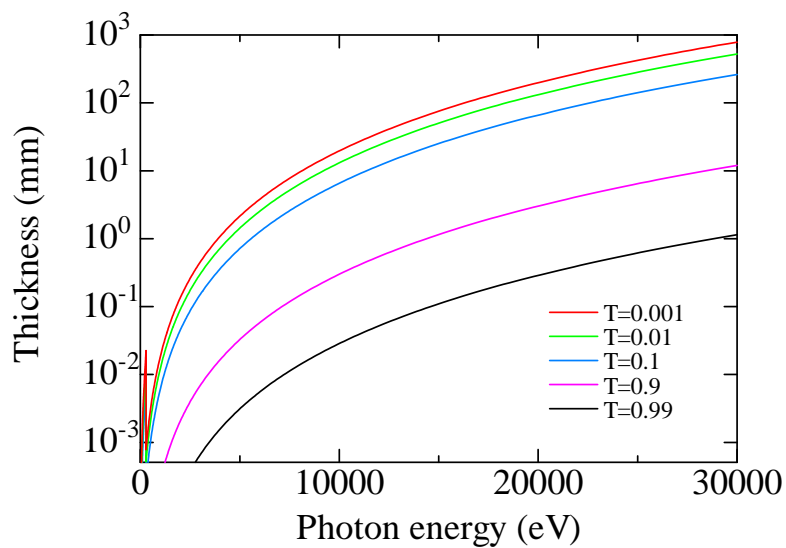
Fig. A2-2-1 ベリリウムの X 線吸収特性.

- ・ 3 keV 以下の減光に用いることができる.

## (2) 等方性黒鉛

 $\rho=1.7 \text{ g/cm}^3$ ,  $M=12.0 \text{ (g/mol)}$ 

①



②

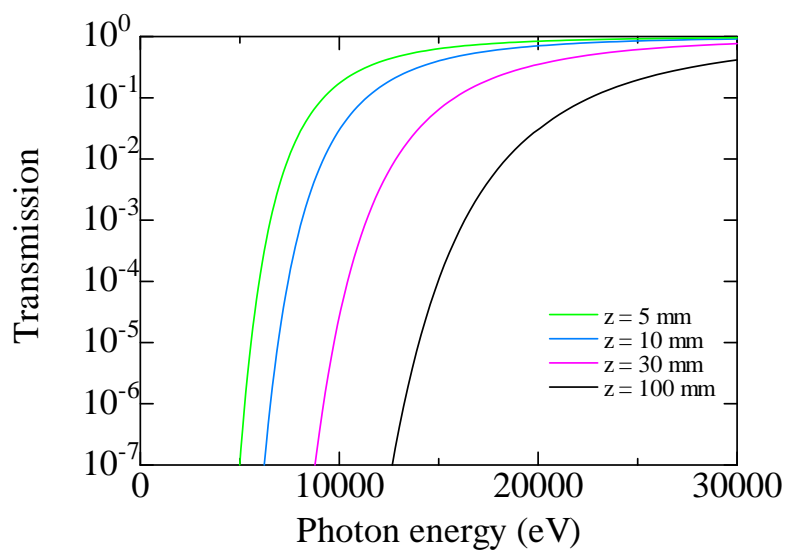


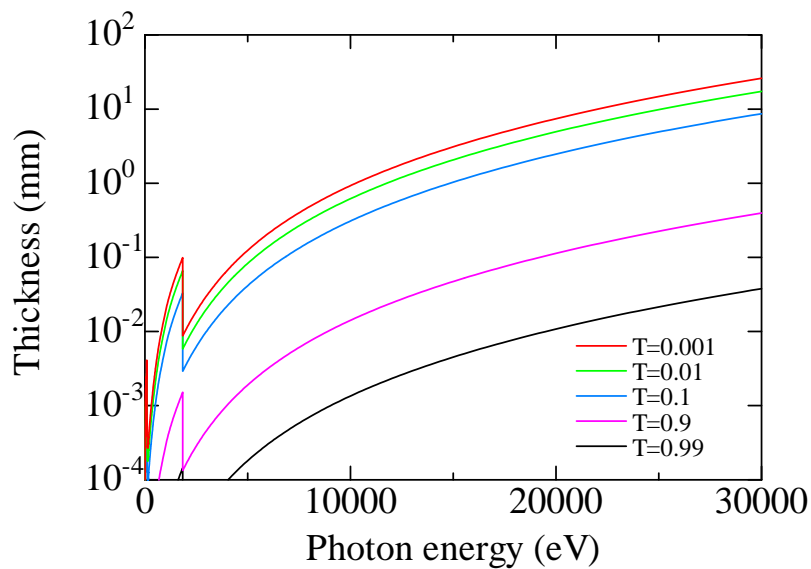
Fig. A2-2-2 等方性黒鉛の X 線吸収特性.

- ・ アブソーバとして用いる場合, 15 keV で 2 桁落とすには, 厚さ 60 mm 以上必要.

## (3) シリコン

 $\rho=2.33 \text{ g/cm}^3$ ,  $M=28.1 \text{ (g/mol)}$ 

①



②

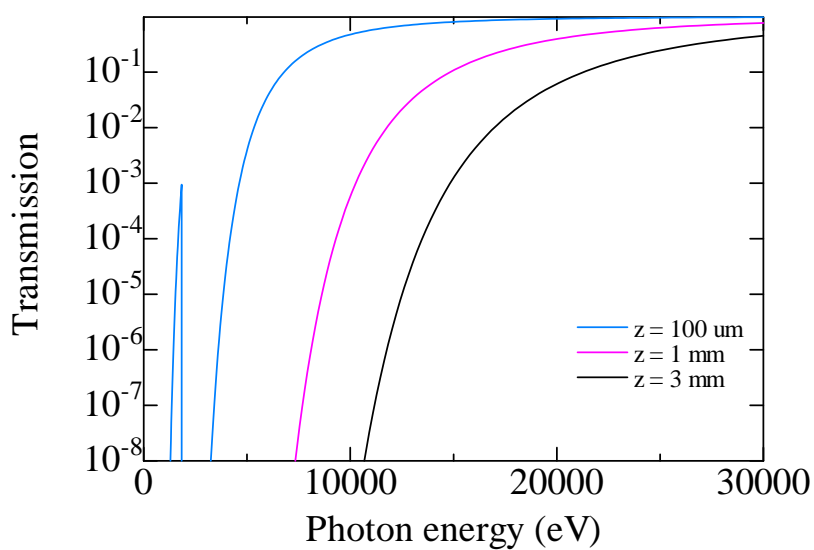


Fig. A2-2-3 シリコンの X 線吸収特性.

- ・ 最小厚さ 100  $\mu\text{m}$ , 最大厚さ 3 mm とすると, 10 keV では 50 % から 0.1% の範囲で透過率の制御が可能. 7 keV では透過率は最大で 10 % となり, さらに透過率を上げたい場合は別のアッテネータが必要. 5 keV 以下では細かい調整は困難.

## A2-3. ガスアッテネータ

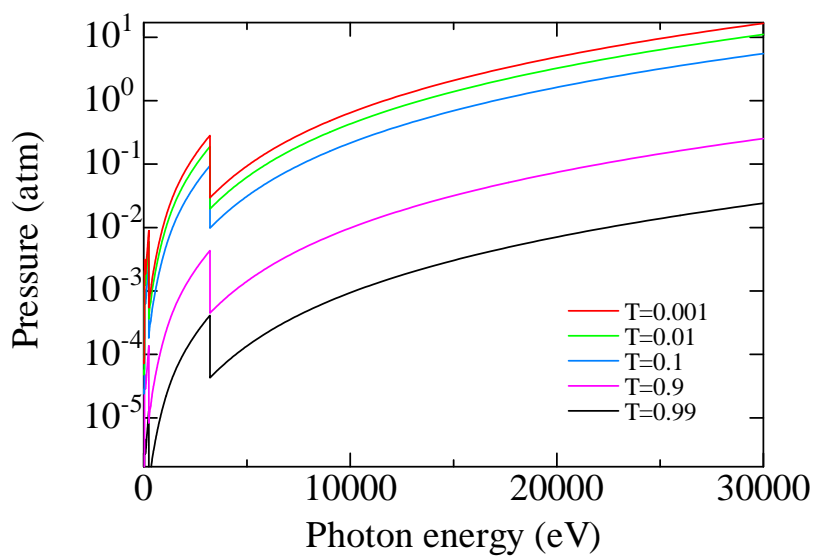
いくつかのガス種に対して、次の項目を見積もった。ガスセル長は  $z=1$  m に固定した。

① 透過率  $T$  をパラメータとしたときの、ガス圧力  $P$  の光子エネルギー依存性

② ガス圧力をパラメータとしたときの、 $T$  の光子エネルギー依存性

(1) Ar,  $z=1$  m

①



②

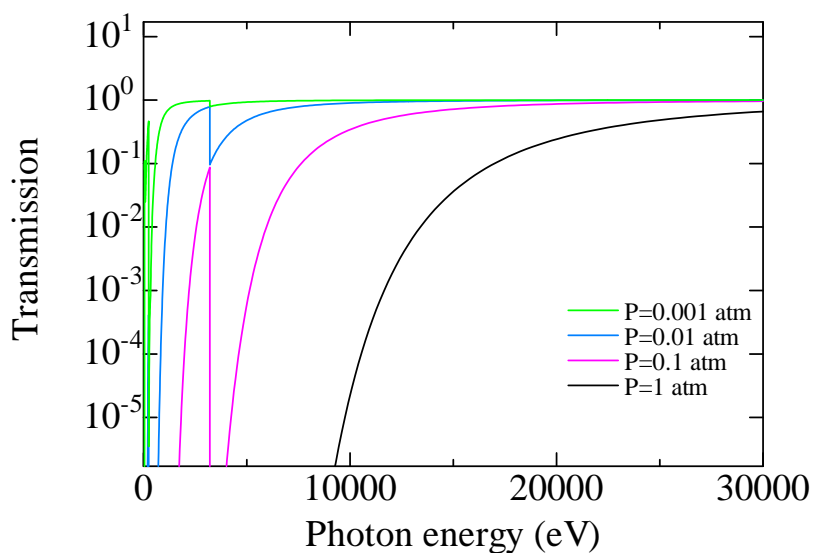


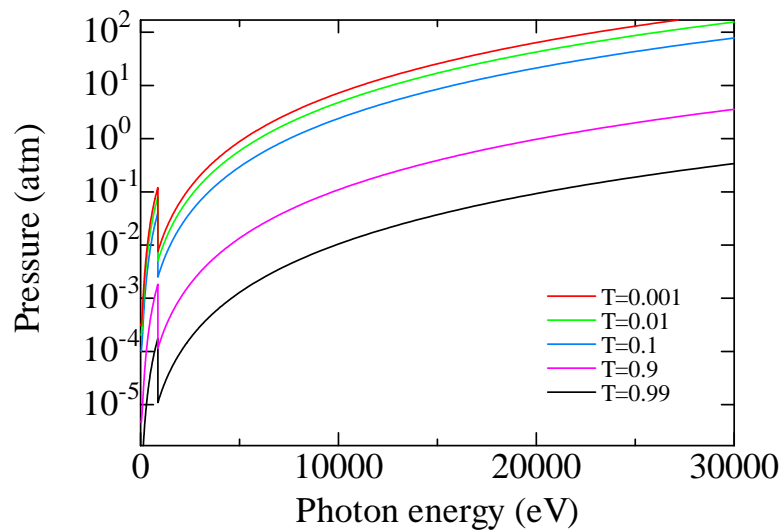
Fig. A2-3-1 Ar の X 線吸収特性.

- ・ 最大圧力 0.1 気圧とすると、7 keV で透過率 10%~100% で制御可能. 3~5 keV では単体でも使用可能.



(2)Ne, z=1 m

①



②

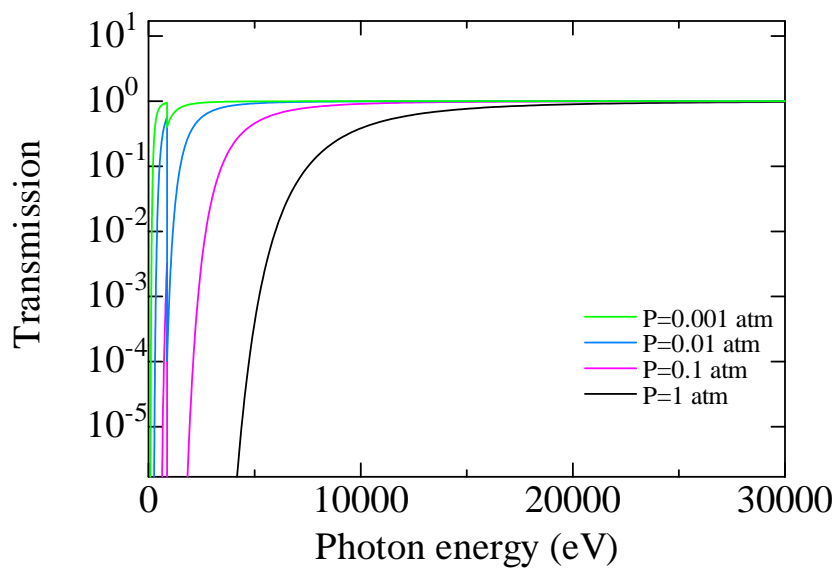
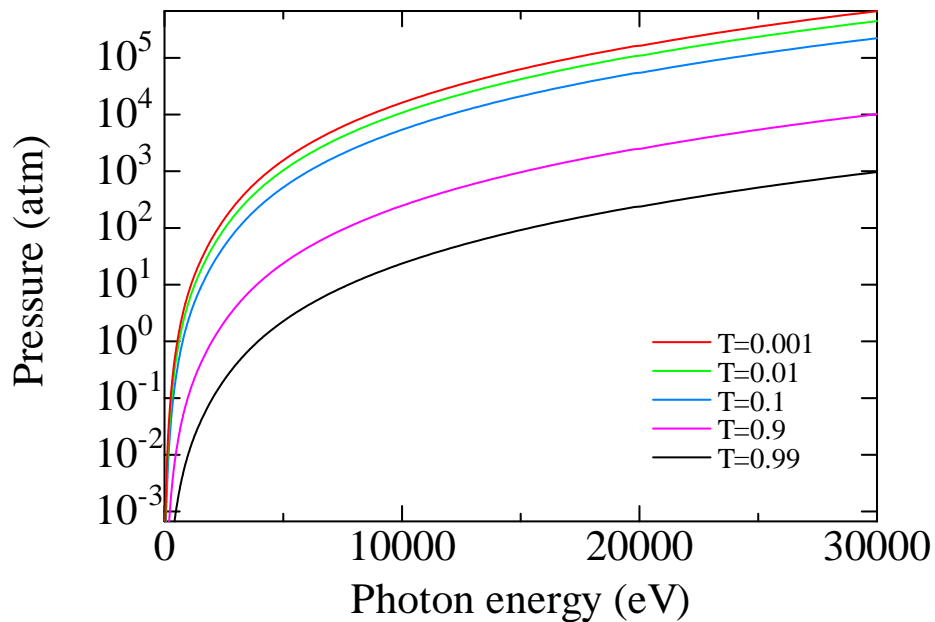


Fig. A2-3-2 Ne の X 線吸収特性.

- ・ 最大圧力 0.1 気圧とすると, 3 keV で透過率 3~100% で制御可能.

(3)He, z=1 m

①



②

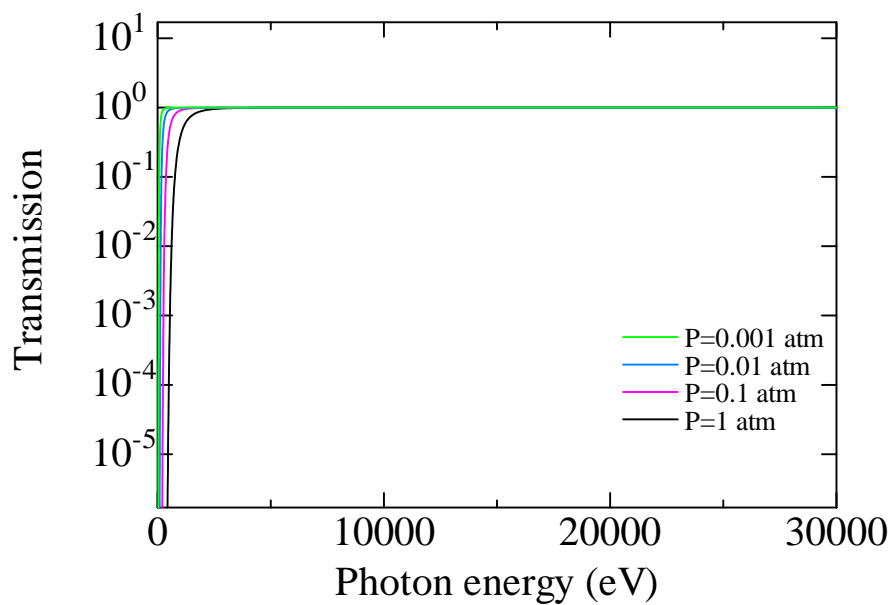


Fig. A2-3-3 He の X 線吸収特性.

- ・ 圧力 0.1 気圧以下では, 1 keV 以上の光子の吸収は無視できる.

## A2-4. まとめ

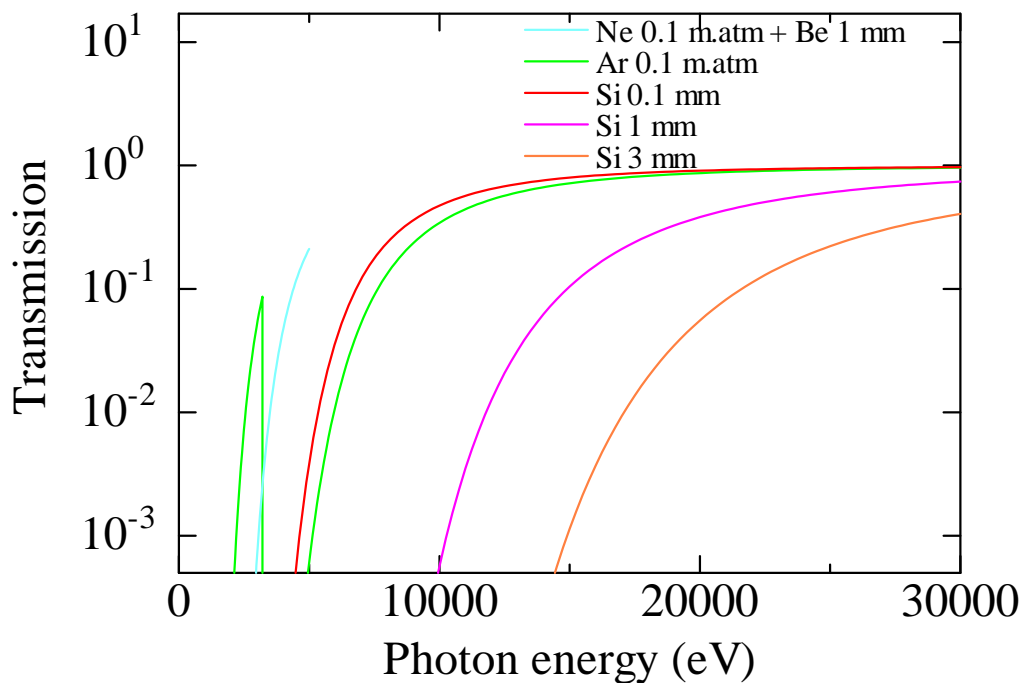


Fig. A2-4-1 各アッテネータの X 線吸収特性.

0.1% ~ 100%の透過率の制御は、次のように行うことができる。

- (1)  $h\nu < 3$  keV: Ne ( $zP < 0.1$  m.atm) と Be ( $z < 1$  mm) の組み合わせ
- (2)  $3 < h\nu < 5$  keV: Ar ( $zP < 0.1$  m.atm)
- (3)  $5 < h\nu < 10$  keV: Ar ( $zP < 0.1$  m.atm) と Si ( $100 \mu\text{m} < z < 1$  mm) の組み合わせ
- (4)  $10 < h\nu < 15$  keV: Ar ( $zP < 0.1$  m.atm) と Si ( $100 \mu\text{m} < z < 3$  mm) の組み合わせ

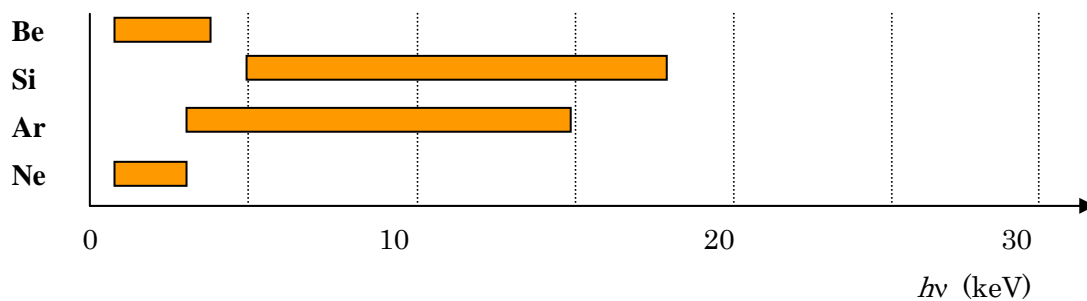


Fig. A2-4-2 各アッテネータのカバーするエネルギー領域

## A3. 散乱能の見積もり

X線の散乱強度は、単原子から構成される固体または気体 (@ T=293 K) に対して、それぞれ次式のように与えられる。

(固体の場合)

$$\begin{aligned}\frac{I_s(\text{phts/pls})}{I_0(\text{phts/pls})} &= \frac{\rho(\text{g/cm}^3)N_A(1/\text{mol})}{M(\text{g/mol})} z(\text{cm})r_e^2(\text{cm}^2) [F(x)^2 + S(x)] P_g \Delta\Omega \\ &= 6.02 \times 10^{23} \times 7.94 \times 10^{-26} \times \frac{\rho(\text{g/cm}^3)}{M(\text{g/mol})} z(\text{cm}) [F(x)^2 + S(x)] P_g \Delta\Omega \\ &= 0.0478 \times \frac{\rho(\text{g/cm}^3)}{M(\text{g/mol})} z(\text{cm}) [F(x)^2 + S(x)] P_g \Delta\Omega\end{aligned}$$

(気体の場合)

$$\begin{aligned}\frac{I_s(\text{phts/pls})}{I_0(\text{phts/pls})} &= \frac{\rho(\text{g/cm}^3)N_A(1/\text{mol})}{M(\text{g/mol})} z(\text{cm})r_e^2(\text{cm}^2) [F(x)^2 + S(x)] P_g \Delta\Omega \\ &= 4.11 \times 10^{-10} \times 6.02 \times 10^{23} \times 7.94 \times 10^{-26} P(\text{Pa}) z(\text{cm}) [F(x)^2 + S(x)] P_g \Delta\Omega \\ &= 1.96 \times 10^{-11} P(\text{Pa}) z(\text{cm}) [F(x)^2 + S(x)] P_g \Delta\Omega\end{aligned}$$

ex1) Be:  $\rho=1.85 \text{ g/cm}^3$ ,  $M=9.012 \text{ (g/mol)}$ ,  $z=100 \text{ um}$ ,  $F(x)^2+S(x) \sim 4$ ,  $P_g \sim 1$ ,

$\Delta\Omega = 10 \times 10 \text{ mm}^2 / (30 \times 30 \text{ mm}^2) = 0.1 \text{ sr}$  ( $\square 10 \text{ mm}^2$  の検出器を散乱領域から 30 mm 離して設置)

$$\frac{I_s(\text{ph/pls})}{I_0(\text{ph/pls})} \cong 0.0478 \times \frac{1.85}{9.01} \times 0.01 \times 4 \times 0.1 = 4 \times 10^{-5}$$

ex2) Ar:  $P=0.1 \text{ atm}$ ,  $z=10 \text{ cm}$ ,  $F(x)^2+S(x) \sim 10$ ,  $P_g \sim 1$ ,

$\Delta\Omega = 30 \times 30 \text{ mm}^2 / (50 \times 50 \text{ mm}^2) = 0.3 \text{ sr}$  ( $\square 30 \text{ mm}^2$  の検出器を散乱領域から 50 mm 離して設置)

$$\frac{I_s(\text{ph/pls})}{I_0(\text{ph/pls})} \cong 1.96 \times 10^{-11} \times 1.02 \times 10^4 \times 10 \times 10 \times 0.3 = 6 \times 10^{-6}$$

ex3) He:  $P=0.1 \text{ atm}$ ,  $z=10 \text{ cm}$ ,  $F(x)^2+S(x) \sim 2$ ,  $P_g \sim 1$ ,

$\Delta\Omega = 30 \times 30 \text{ mm}^2 / (50 \times 50 \text{ mm}^2) = 0.3 \text{ sr}$  ( $\square 30 \text{ mm}^2$  の検出器を散乱領域から 50 mm 離して設置)

$$\frac{I_s (\text{ph/pls})}{I_0 (\text{ph/pls})} \cong 1.96 \times 10^{-11} \times 1.02 \times 10^4 \times 2 \times 10 \times 0.3 = 1.2 \times 10^{-6}$$

参考文献:

後藤俊治, 博士論文「リチウムドリフト型シリコン半導体検出器の応答関数に関する研究」  
2000年.

## 改版履歷

初版: 2008 年 6 月 17 日