

# R&DビームラインBL-11の検討状況

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所  
放射光実験施設 基盤技術部門 若林大佑

2023年1月5-6日

# 開発研究多機能ビームライン構想

---

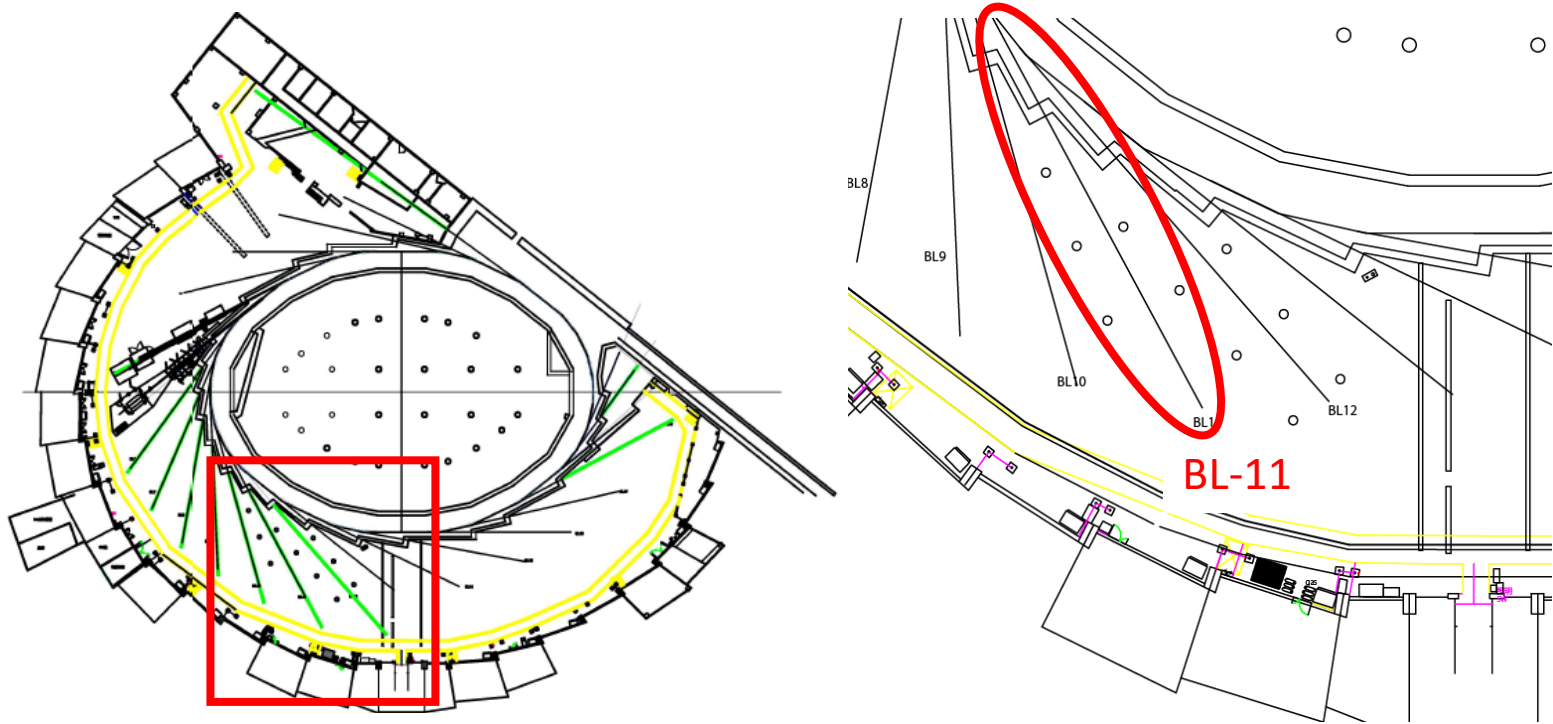
- ビームライン基盤技術に関するR&Dを既存のビームラインで行う場合、ユーザーへのビームの安定供給を妨げない範囲に限定される。
- PFの高度化や次期光源計画を見据えた基盤技術のR&Dには、専用ビームラインが必要となる。
- 専用ビームラインにおけるR&Dは、基盤技術の深化だけでなくビームラインに関わる人材の育成にも繋がる。

## 基盤技術部門光学系チームを中心に 2020年度より開発研究多機能ビームラインのデザインを開始

2021年度から月に1-2回のペースで検討会を開催、**研究系や光源系(加速器第6研究系)**だけでなく**UVSORやHiSOR**とも協力して検討を進めている

本日の報告：**R&Dビームラインの検討状況の報告**  
**2ビーム利用モードのビームスペック案の紹介**

# R&Dビームライン建設予定地



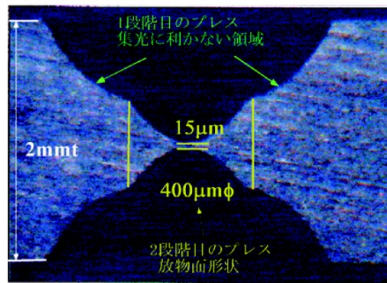
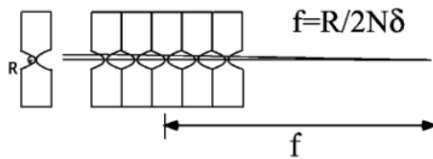
- 偏向電磁石を光源とし（現BL-11）、軟X線（SX）と硬X線（HX）の2つのブランチを有する（白色も含む）
- 基幹部、光学系、光学素子、実験手法、実験装置等、様々なR&Dを実施できるように、広いスペースや高い自由度の確保を重視する

**Hybrid Ringに繋がる開発研究が可能な軟X線と硬X線の2ビーム利用ビームライン**

# 放射光ビームの集光

X線は容易には曲がらない ⇒ 屈折・回折・反射の利用

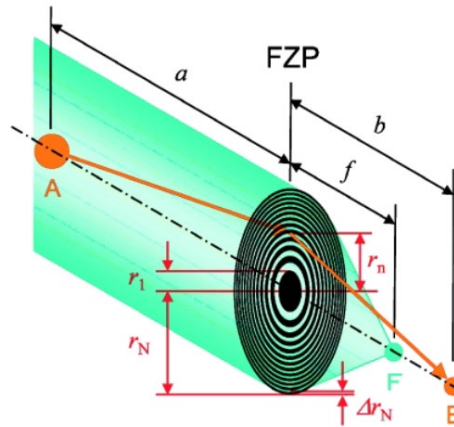
## 1. 屈折



- 色収差がある
- 焦点距離が長い  
⇒ 強集光が困難
- 吸収によるロスがある  
硬X線でのみ利用可

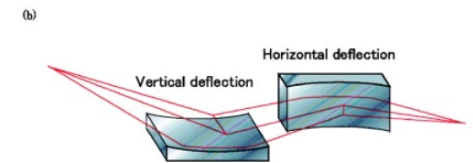
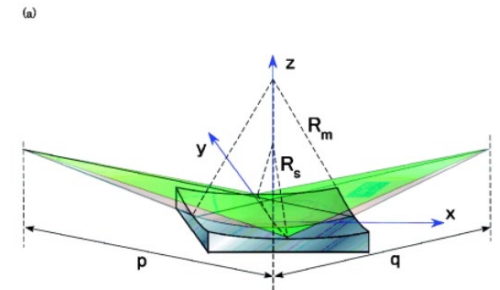
## 2. 回折

例 Fresnel Zone Plate (FZP)



- 色収差がある
- $\Delta r_n$  が回折限界を決定
- 複数次数の回折光  
⇒ ピンホールで選択
- 回折効率有限

## 3. 反射



- 色収差がない
- 透過率は材質や入射角に依存
- 光軸が変化する

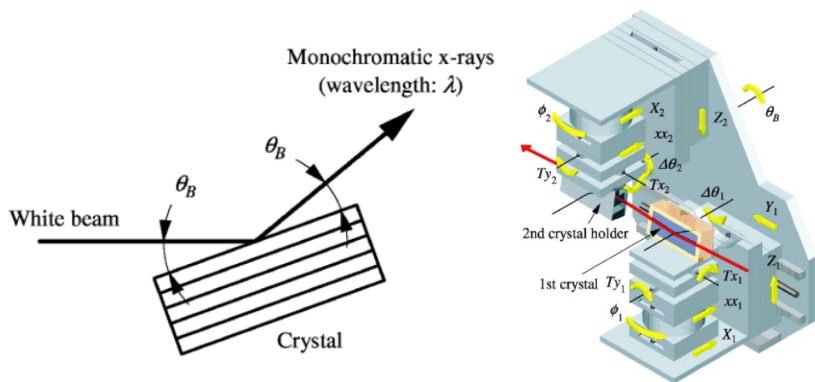
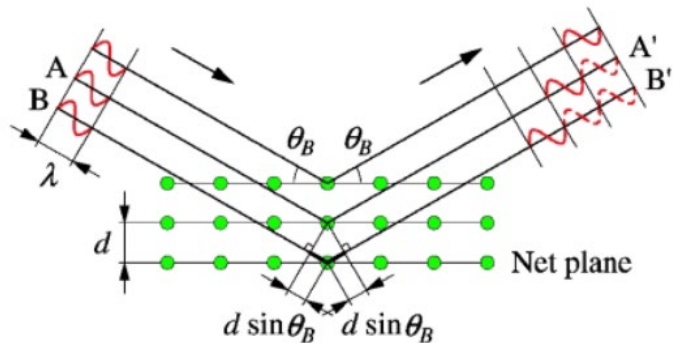
# 放射光ビームの単色化

放射光X線は様々なエネルギーを含む(白色)

⇒ 多くの実験では**エネルギーの切り出し(単色化)**が必要

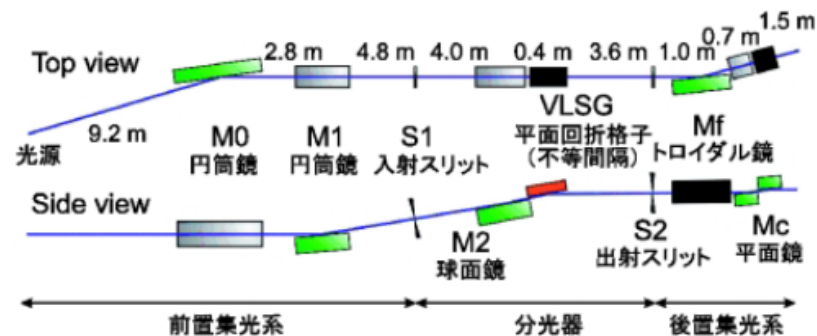
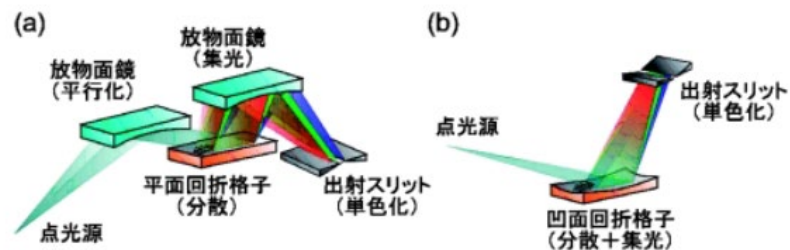
1. 結晶分光器 硬X線領域で利用

ブラッグ反射を利用して単色化



2. 回折格子分光器 軟X線領域で利用

虹にして(分光して)スリットで切り出し

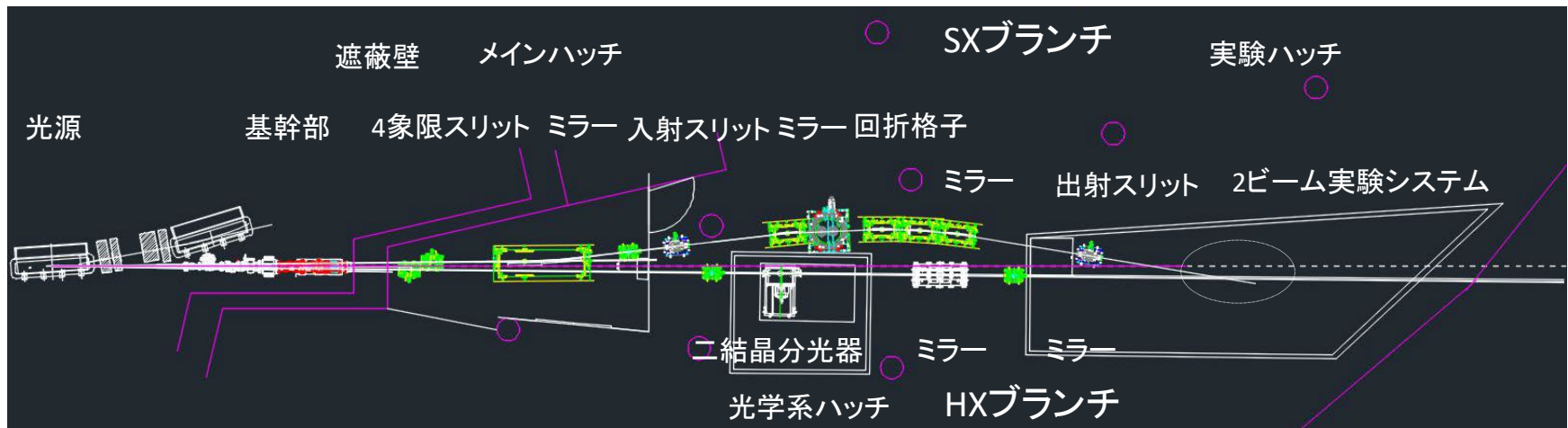


図は「放射光ビームライン光学技術入門」(2008)より

# R&Dビームラインデザインの再検討

- 2ビーム利用のための開発研究を先行  
実験ハッチの中ほどで軟X線と硬X線二つのブランチの焦点が一致(スペースの確保)  
光路調整用ミラーを追加、両ブランチ水平出射、2ビーム実験システム、...
- BL-11サイトを前提としてデザインを最適化  
デッキ天井および支柱との干渉の回避、BL全長に合わせた修正、...

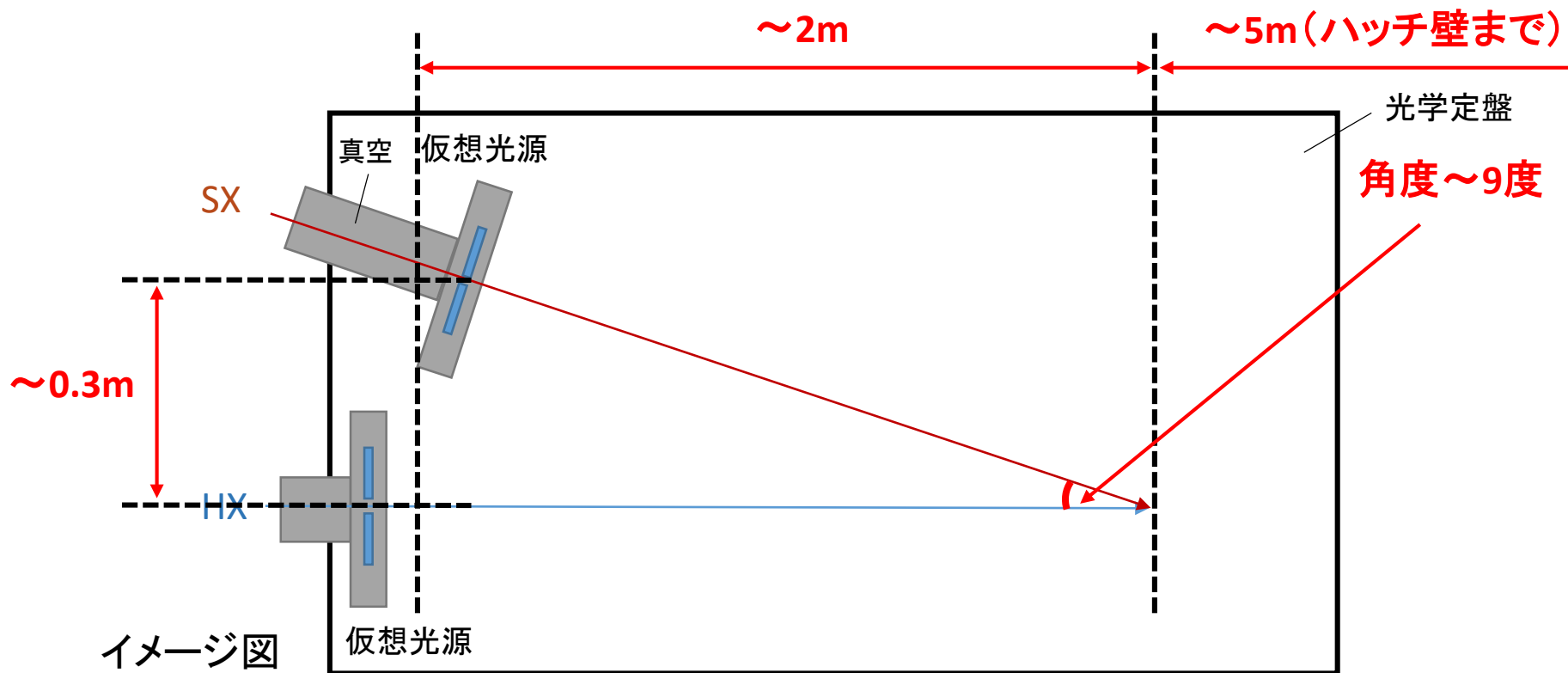
**軟X線・硬X線ともに拘束条件が多く、問題化しそうなビーム性能が存在  
汎用性 vs 性能のバランスが重要となるだろう**



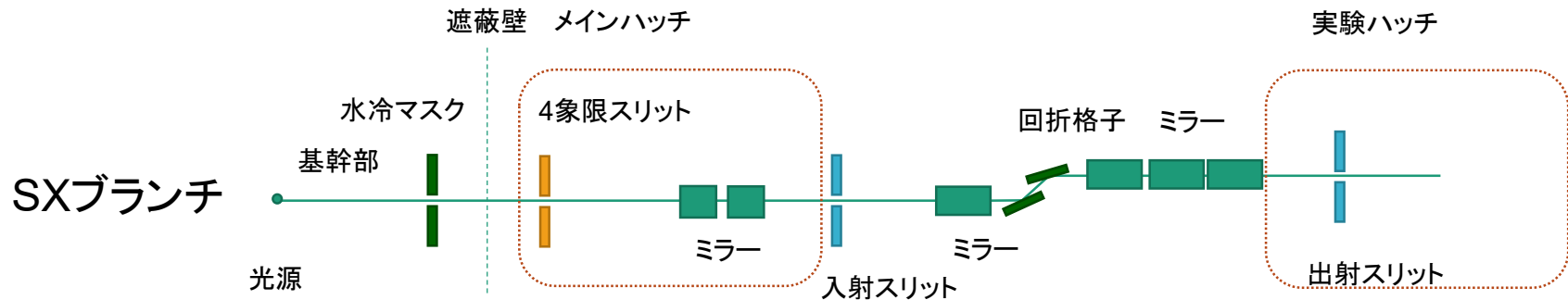
# 2ビーム利用の幾何学配置

- なるべく多くの実験配置に対応 → **スペースの確保、縦横集光点の一致**
- ビーム調整のしやすさを重視 → **水平出射(、高さ調整ミラー)**

仮想光源までを設計して、そこから下流は実験装置とみなす  
実験者は、最終集光系を含めて設計(斜入射系で2ビームの角度も変更可能)



# R&DビームラインSXブランチの設計



- 1.5keVまでの軟X線の利用が可能(ミラーの入射角は基本的に2度)
- HXブランチと最終集光点が一致(出射スリットより下流は実験ハッチ内)
- 光路調整用の平面ミラーを3枚含む
- メインハッチおよび最終集光点に十分なフリースペースを確保
- 仮想光源点(入射スリット・出射スリット)にパルスセクターや試料の挿入が可能



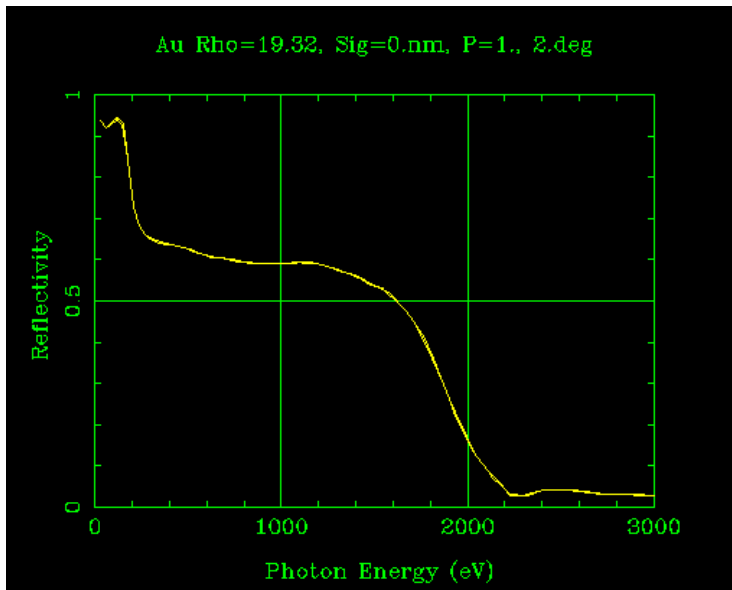
# SXブランチの集光系の検討

## 拘束条件

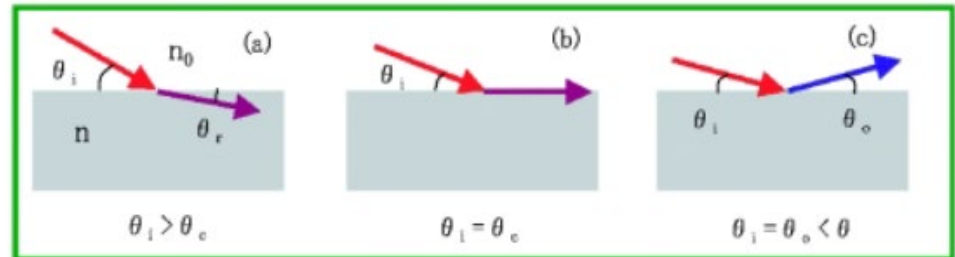
- ▶ HXブランチから一旦離してもう一度交差
- ▶ 1.5keV程度までを想定し、集光ミラーは入射角2度以下で構成
- ▶ 2ビーム利用と同時利用を切替可能なシステム \*今回は2ビーム利用に絞って紹介

光学素子の数が多いためフラックス(強度)の不足が懸念される

Auコート, 2度入射



入射角 $\theta <$  臨界角 $\theta_c$ : 全反射  
入射角 $\theta >$  臨界角 $\theta_c$ : 屈折  
 $\theta_c$ は、光のエネルギーと大体反比例  
⇒高エネルギーであるほど反射されない



# SXブランチの集光系の検討

## 分光器の設計案

① フラックス(強度)重視

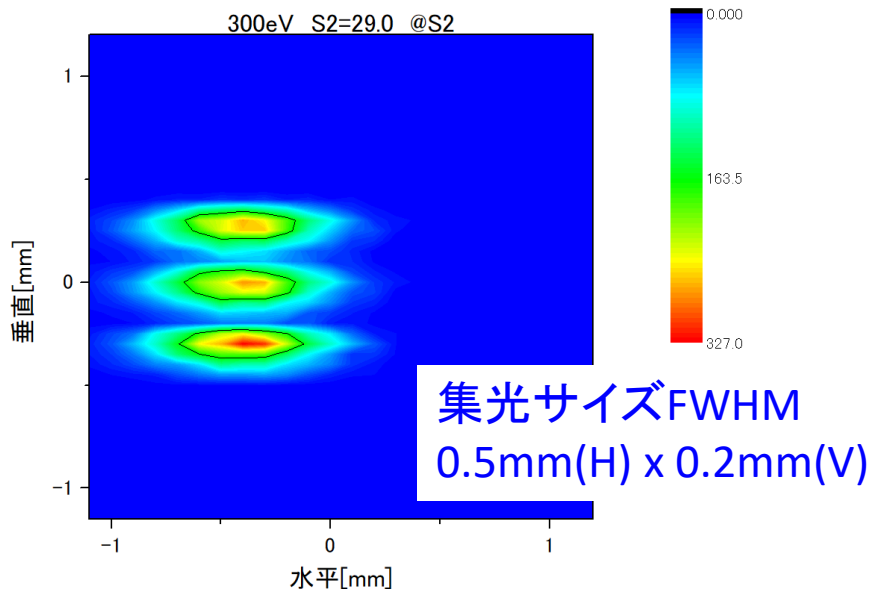
低分散、白色・単色光の焦点ほぼ一致

② エネルギー分解能重視

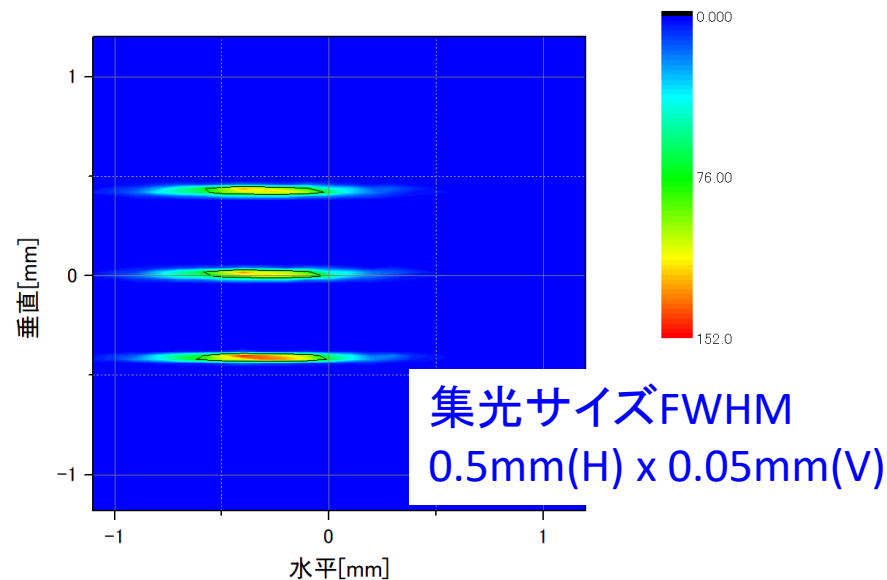
縦集光サイズ小

出射スリット位置での集光の様子 @300eV

① エネルギー分解能  $E/\Delta E$  1600  
フラックス  $5.9 \times 10^{10}$  ph/s



② エネルギー分解能  $E/\Delta E$  11000  
フラックス  $3.1 \times 10^9$  ph/s



# SXブランチの集光系の検討

## 分光器の設計案

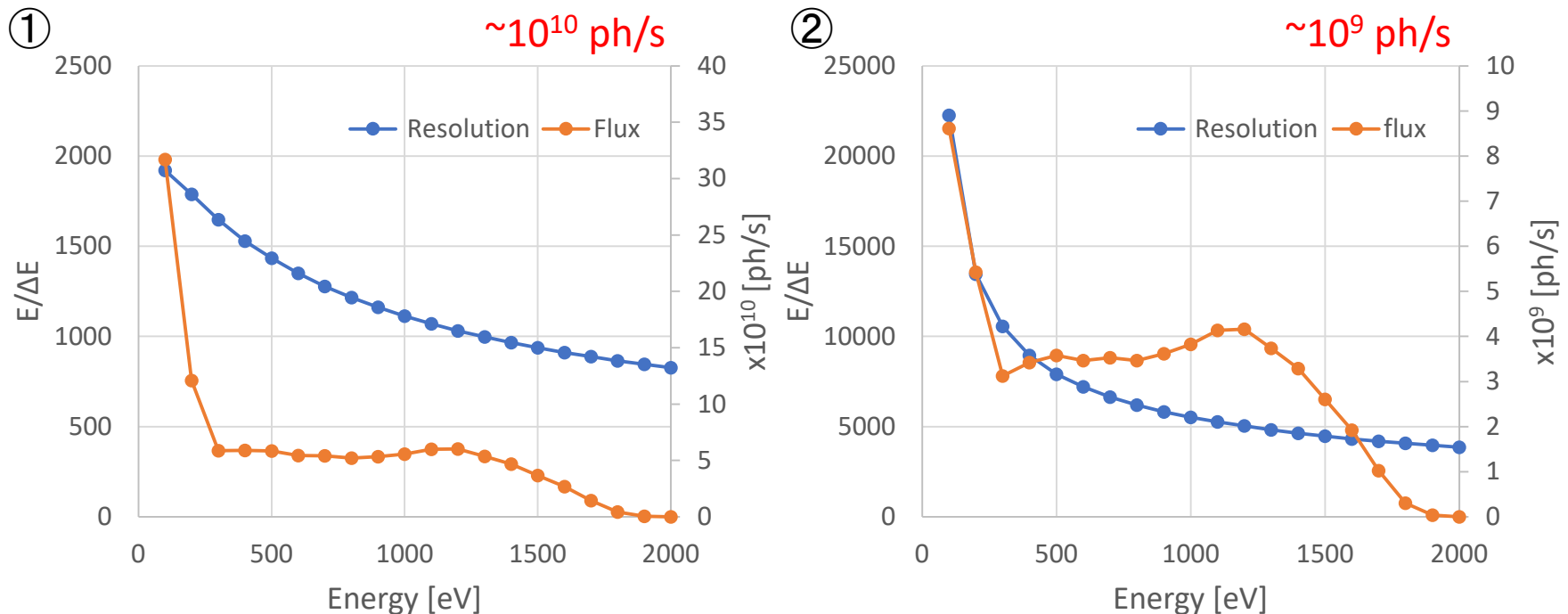
① フラックス(強度)重視

低分散、白色・単色光の焦点ほぼ一致

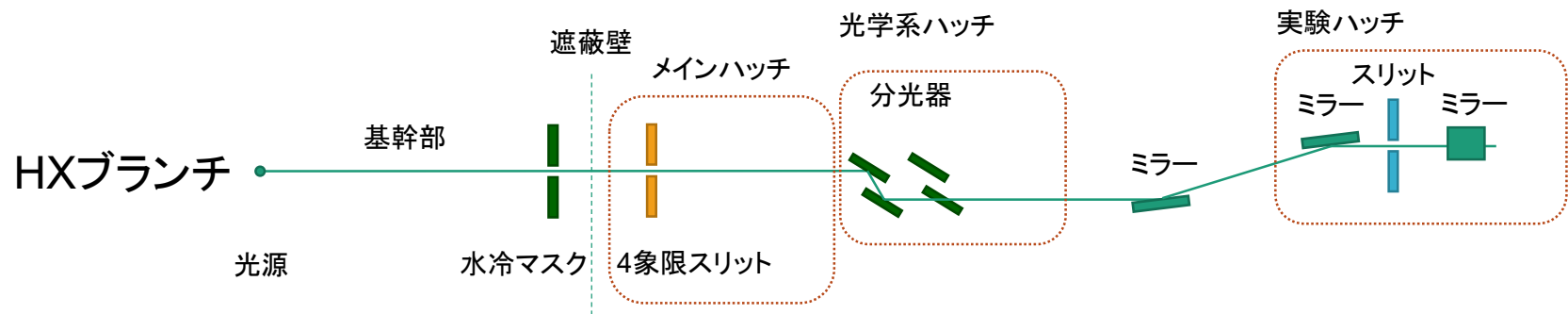
② エネルギー分解能重視

縦集光サイズ小

フラックスとエネルギー分解能(Grの回折効率 $\eta$ は10%と仮定)



# R&DビームラインHXブランチの設計



- 30keVまでの硬X線の利用が可能 → 特殊利用の場合に限定
- SXブランチと最終集光点が一致 2ビーム利用では15keV程度までを想定
- 水平出射とするため、光路調整用ミラー1枚を実験ハッチ内に設置
- 実験ハッチでは、非集光/集光の白色光/単色光の利用が可能
- 光学系ハッチおよび実験ハッチは、各種R&Dを行うために十分な広さを確保

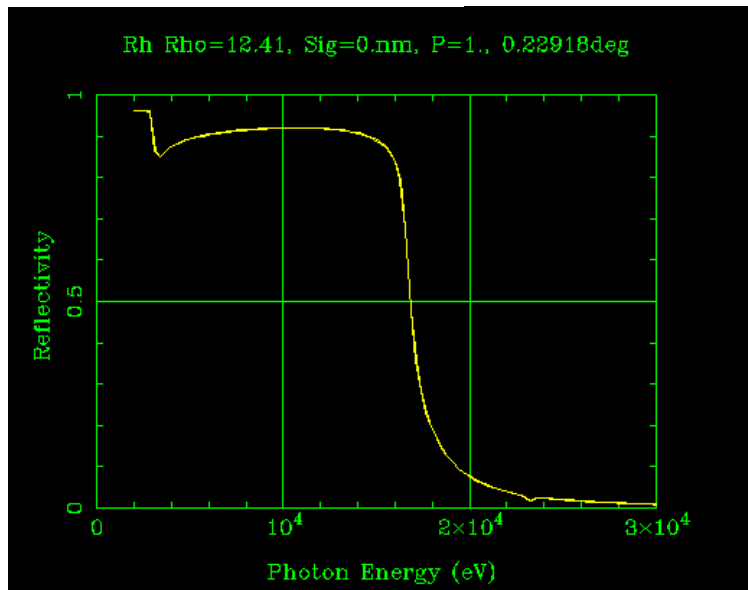
# HXブランチの集光系の検討

## 拘束条件

- 光学系ハッチを確保すると、第一ミラーが置けるのは22.5mより下流
- ~15keV程度を想定し、入射角4mradでハッチ内仮想光源点に集光
- 2ビーム利用時の調整を想定して平行水平出射

強集光が避けられないため、集光サイズ(収差)の問題が支配的

Rhコート, 4mrad入射



## 集光系の検討案

- ① 曲げ円筒 + 平面  
収差は大きいがシンプル
- ② 曲げ円筒 + 円筒  
収差補正系、フラックス回復

収差が残っていると下流のビーム拡がり  
が非対称となって最終集光に影響がある  
可能性がある

# HXブランチの集光系の検討

## ① 曲げ円筒＋平面

M1 @22.5m

4mrad入射

上はね 曲げ円筒(トロイダル)

M2 @27.5m

4mrad入射

下はね 平面

トロイダルミラー1枚で集光 6m先で集光(縮小比→270 $\mu$ m(H) x 30 $\mu$ m(V) 集光)

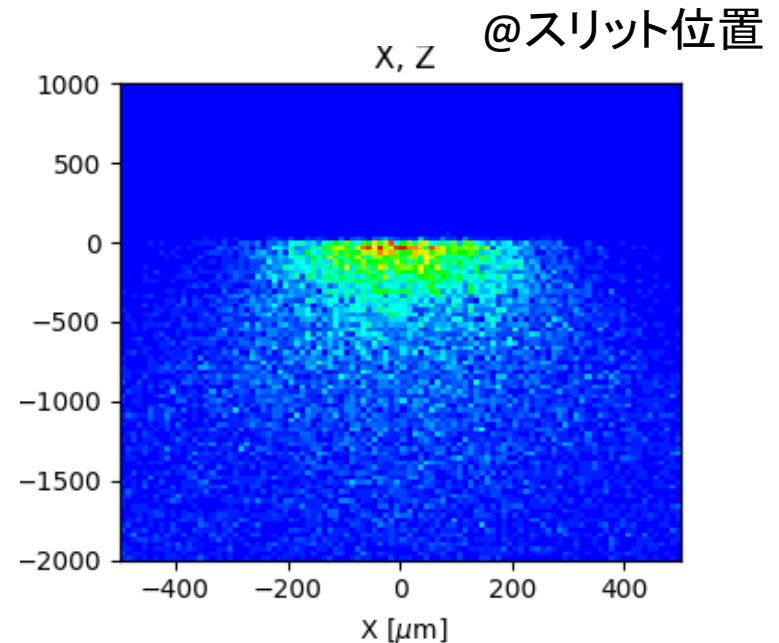
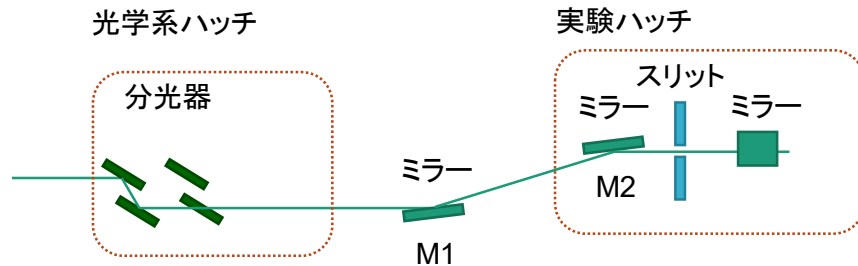
集光点を下流にしてより高エネルギーのX線に適用することも可能

**収差が強くて集光サイズが大きい、汎用性は高い**

集光サイズ: FWHM 380 $\mu$ m(H) x 300 $\mu$ m(V)

透過率(□500 $\mu$ m領域): 10%

フラックス換算@10keV:  $8.3 \times 10^{10}$  ph/s



# HXブランチの集光系の検討

## ② 曲げ円筒+円筒

M1 @22.5m

4mrad入射

上はね 曲げ円筒(トロイダル)

M2 @27.5m

4mrad入射

下はね 長手円筒

トロイダルミラーで4m下流に集光(縮小比→180 $\mu$ m(H) x 20 $\mu$ m(V) 集光)

集光点の1m下流に収差補正用円筒ミラーを設置、1m下流で集光

トロイダルの短手Rは①と同じ 下流ミラーを入れ替えば①と②はスイッチ可能

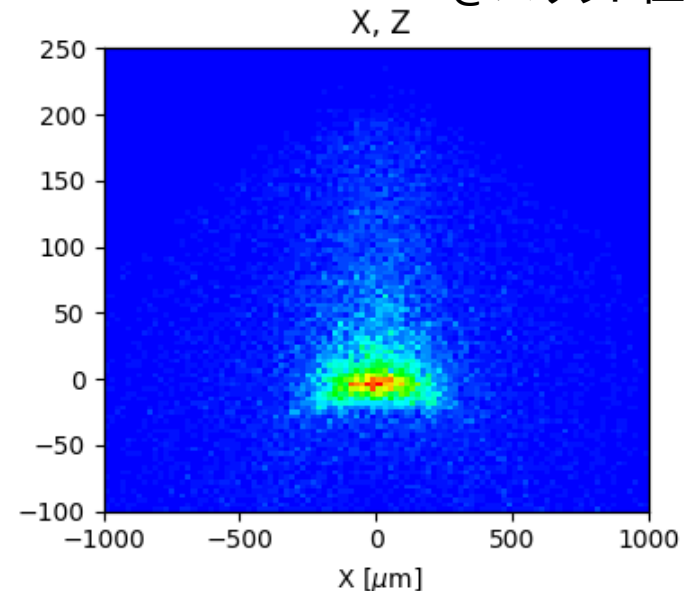
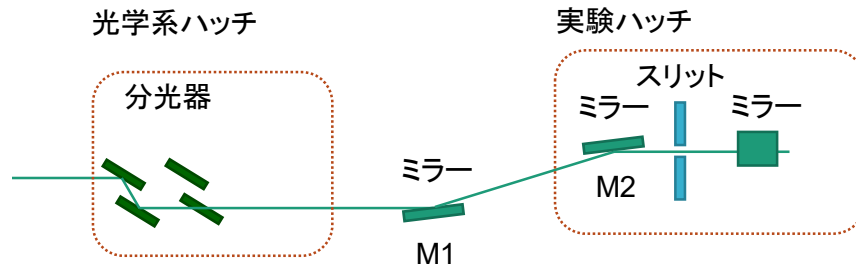
**集光サイズが小さく透過率も多い、集光プロファイルも良い**

集光サイズ: FWHM 360 $\mu$ m(H) x 25 $\mu$ m(V)

透過率(□500 $\mu$ m領域): 23%

フラックス換算@10keV:  $1.9 \times 10^{11}$  ph/s

@スリット位置



# まとめ

## ➤ 2ビーム利用モードでのスペックまとめ

	SXブランチ フラックス重視	SXブランチ 分解能重視	HXブランチ
サイズ@仮想光源	0.5mm(H)x0.2mm(V)	0.5mm(H)x0.05mm(V)	0.3mm(H)x0.03mm(V)
エネルギー領域*	50-1700 eV	50-1700 eV	4-13 keV
エネルギー分解能(E/ΔE)	> ~1000	> ~5000	~10 <sup>4</sup>
フラックス@仮想光源	~10 <sup>10</sup> ph/s	~10 <sup>9</sup> ph/s	~10 <sup>11</sup> ph/s
白色利用	○	×	△(要高さ調整)

- 仮想光源より下流は最終集光素子含めて自由に実験配置を展開することが可能
- 試料位置より下流に十分な広さのスペースを確保
- 現BL-11は今年度末で撤去、来年度から建設に着手予定

\*1800eV(SX), 17keV(HX)までは、フラックス1桁落ち

