

# 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

2022年11月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

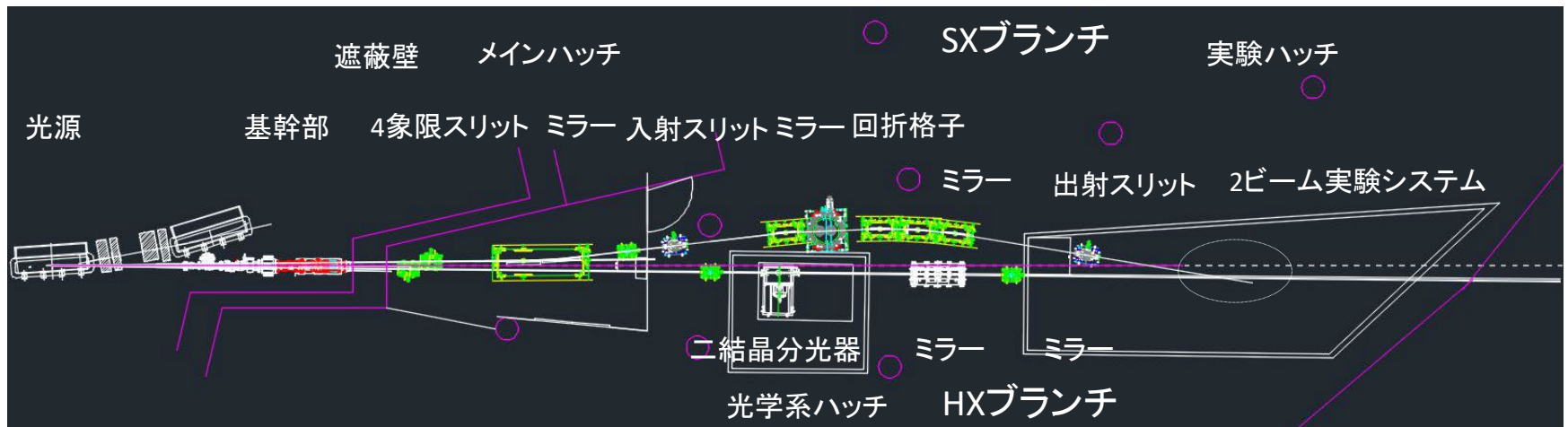
- 2ビーム利用のための開発研究を先行

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、...

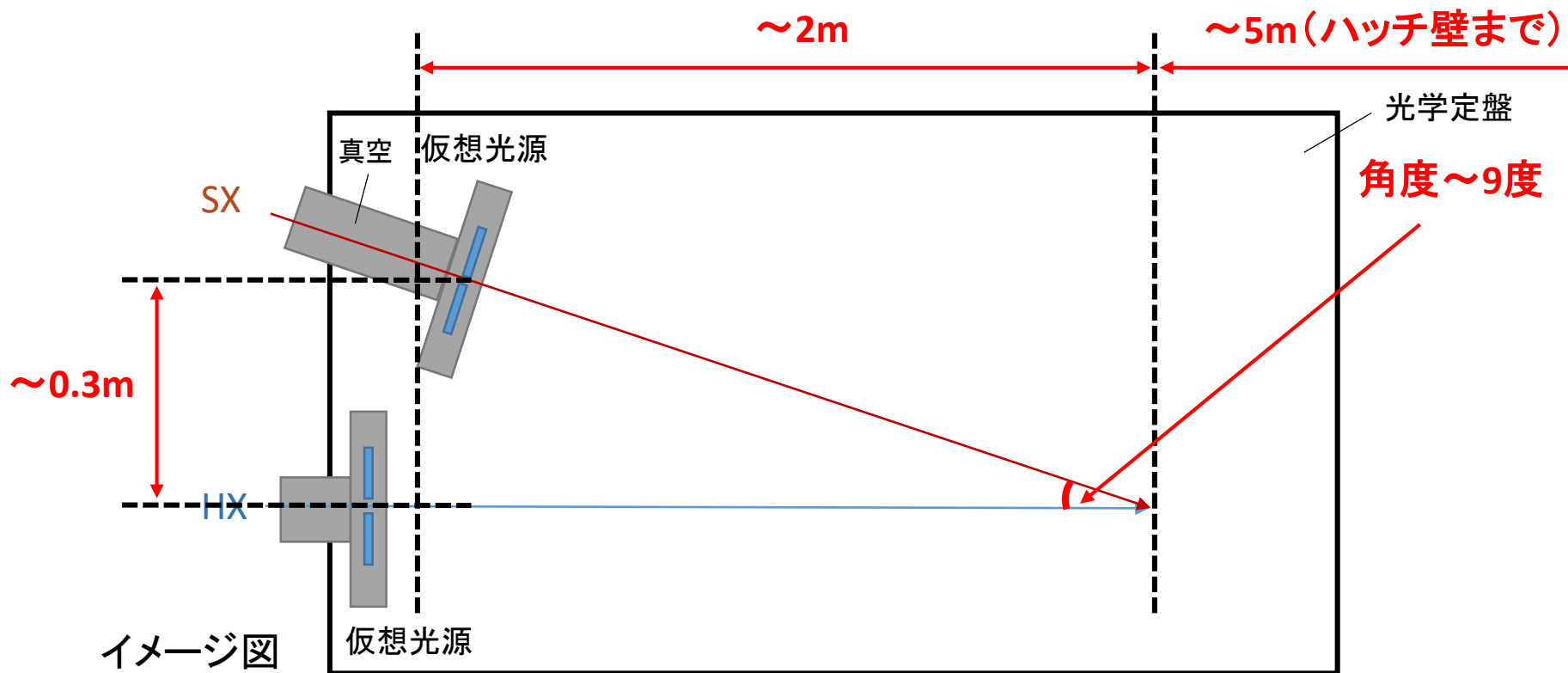
**SX・HXともに拘束条件が多く、問題化しそうなスペックが存在  
汎用性 vs スペックのバランスが重要となるだろう  
あくまでも現状の案を紹介、研究会他での提案に合わせて更新予定**



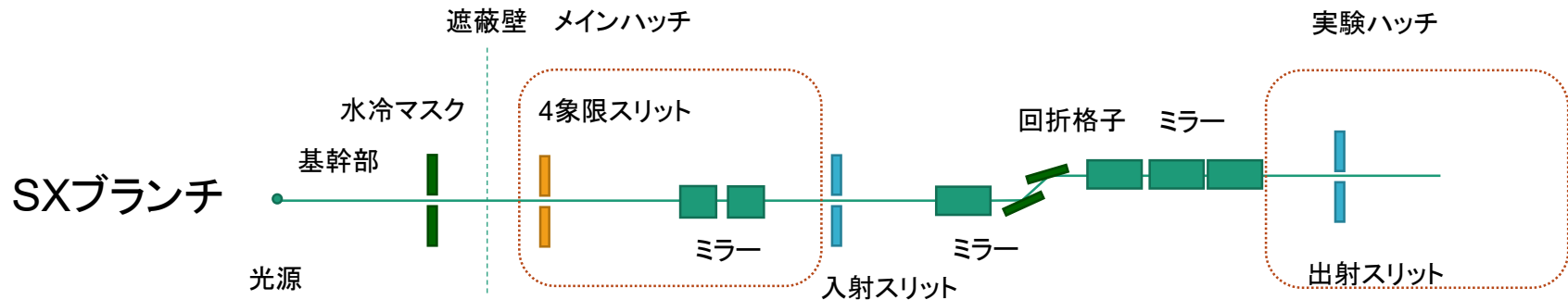
# 2ビーム利用の幾何学配置

- 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



# 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

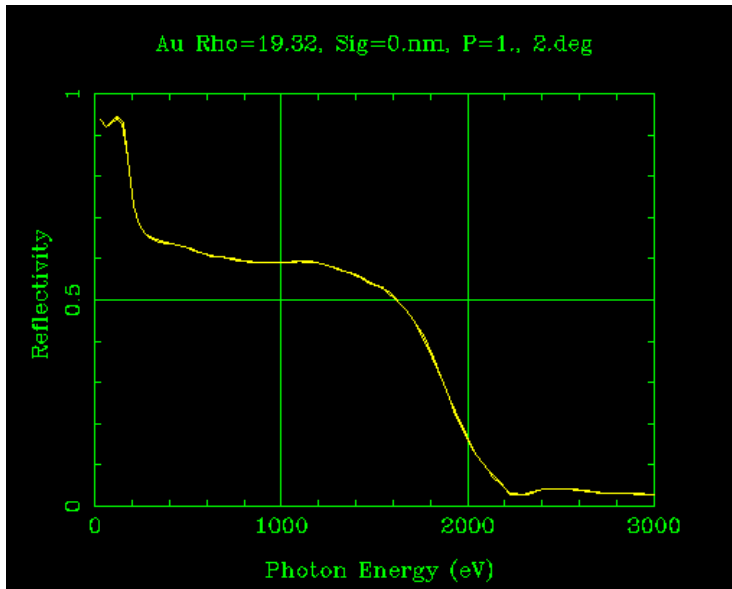
# SXブランチの集光系の検討

## 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ビーム利用と平行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の不足が懸念される

## Auコート, 2度入射



回折格子も含めると最低8枚の光学素子  
→ 全て2度だったとして1keVで1.7%の反射率

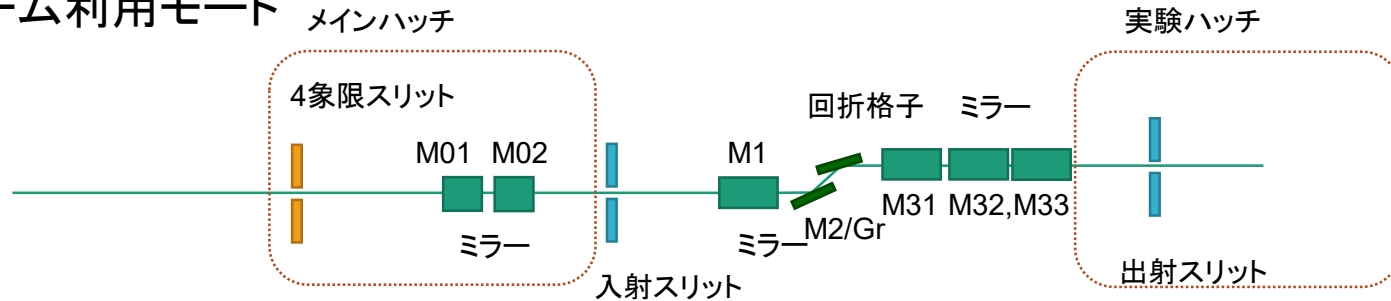
出射スリットの下流に最終集光素子  
→ FZPの場合は回折効率で1桁落ち  
FZP位置でビームサイズが大きいと大きくロス

ビーム拡がりを抑えるには出射スリットを下流に置く必要がある

→ 実験スペースの広さとトレードオフ

# SXブランチの集光系の検討

2ビーム利用モード



## ミラー内訳

M01	@12.5m	1度入射	横はね	平面
M02	@13.5m	2度入射	横はね	回転楕円
入射スリット	@16.5m	縦横集光		
M1	@19.5m	2度入射	横はね(振り戻し)	回転楕円
M2/Gr	@20.7m	可変偏角ミラー/不等間隔回折格子		
M31	@22m	2度入射	横はね(振り戻し)	長手凸円筒or双曲面
(パラレルモードではM31を切替えてBL-12側へ振っていく)				
M32,M33	@23,24m	2度入射	横はね(振り戻し)	平面
出射スリット	@29m	縦横集光		

出射スリット下流の最終集光を行いやすくするため、  
回転楕円による集光で出射スリット位置に縦横同時集光とする

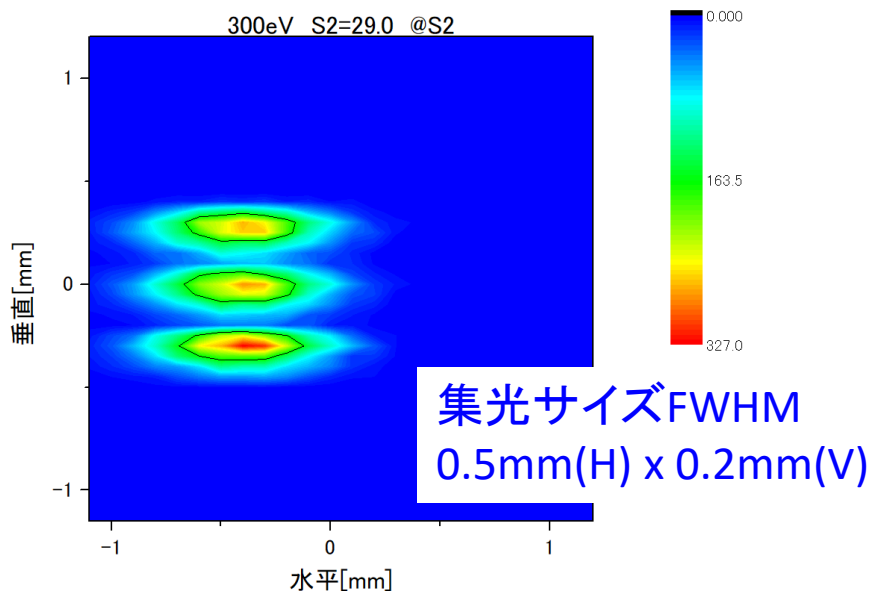
# SXブランチの集光系の検討

## 分光器の設計案

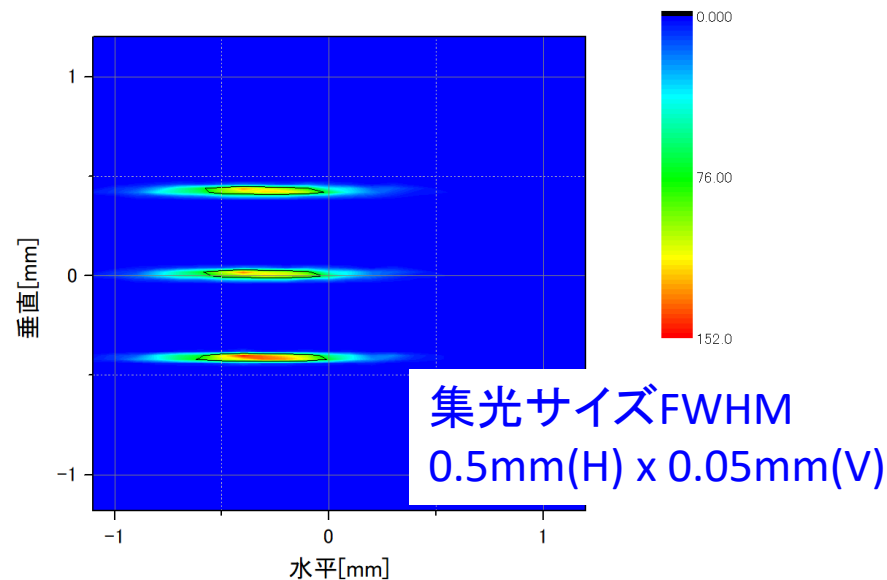
- ① フラックス重視      低分散、白色・単色光の焦点ほぼ一致
- ② エネルギー分解能重視      縦集光サイズ小

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



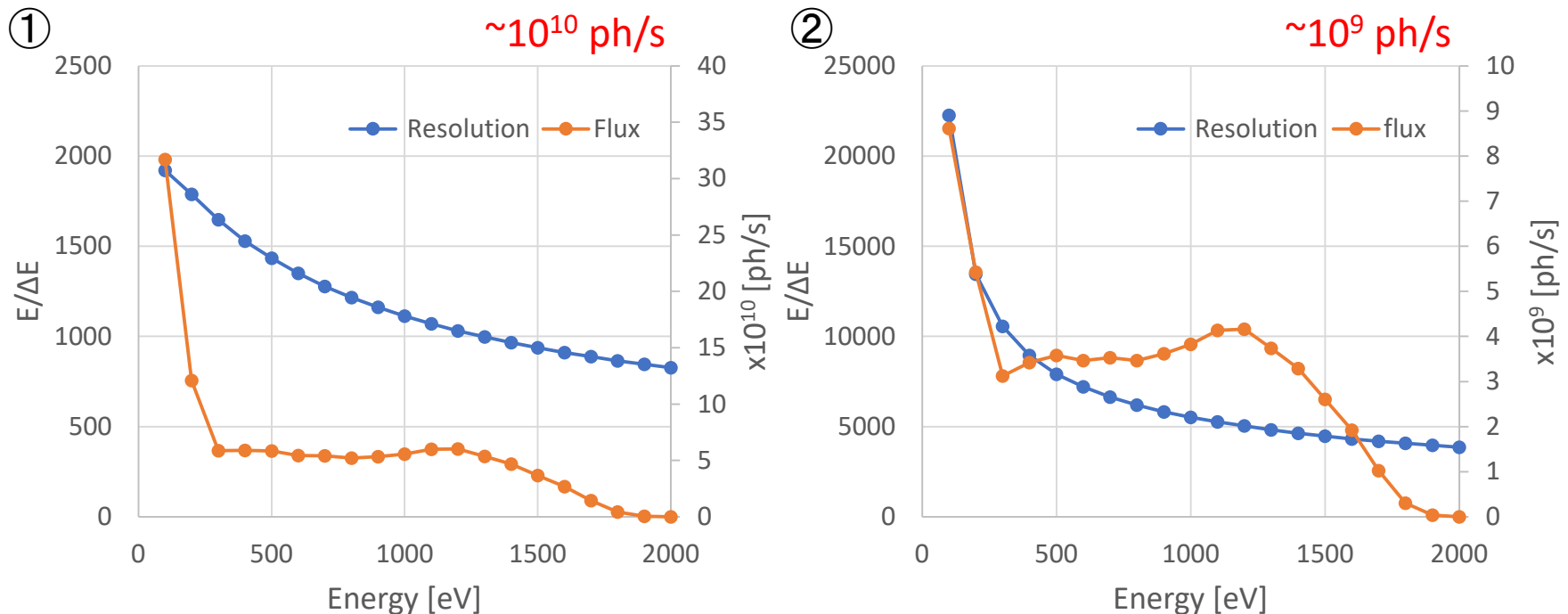


# SXブランチの集光系の検討

## 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)



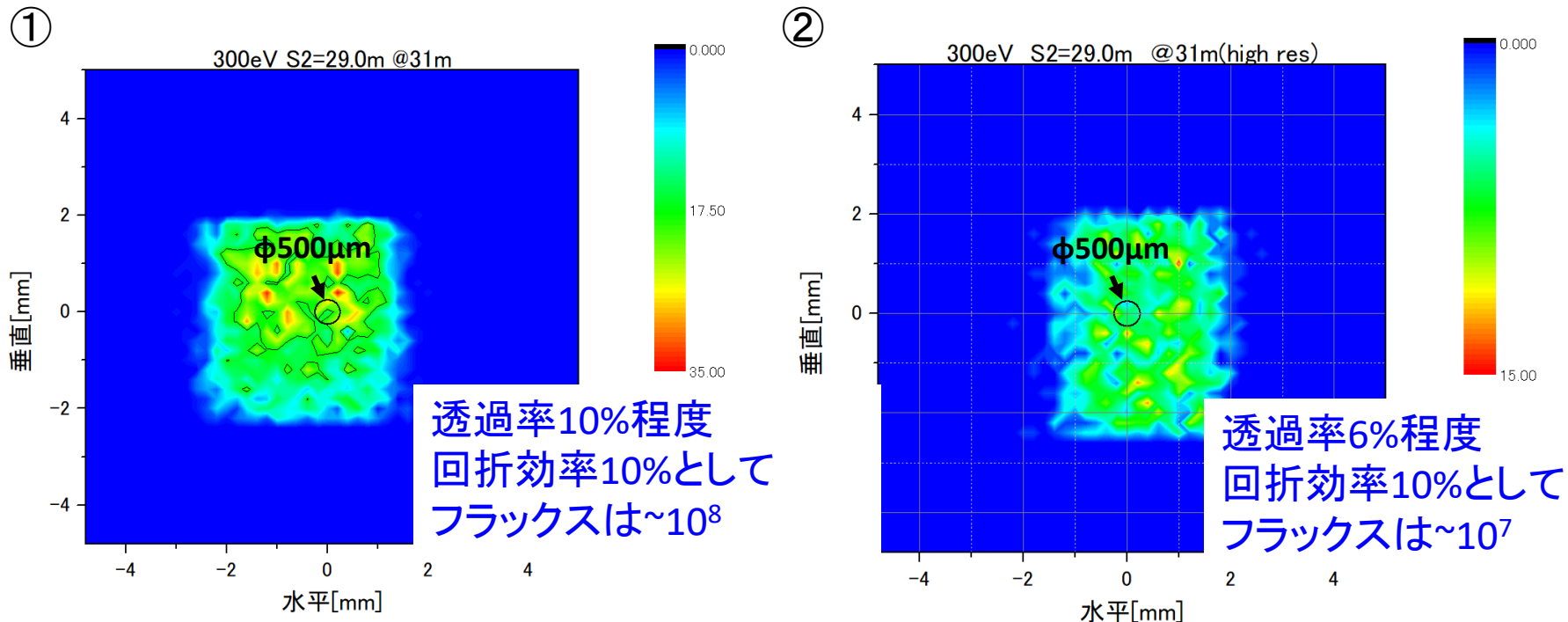
# SXブランチの集光系の検討

## 分光器の設計案

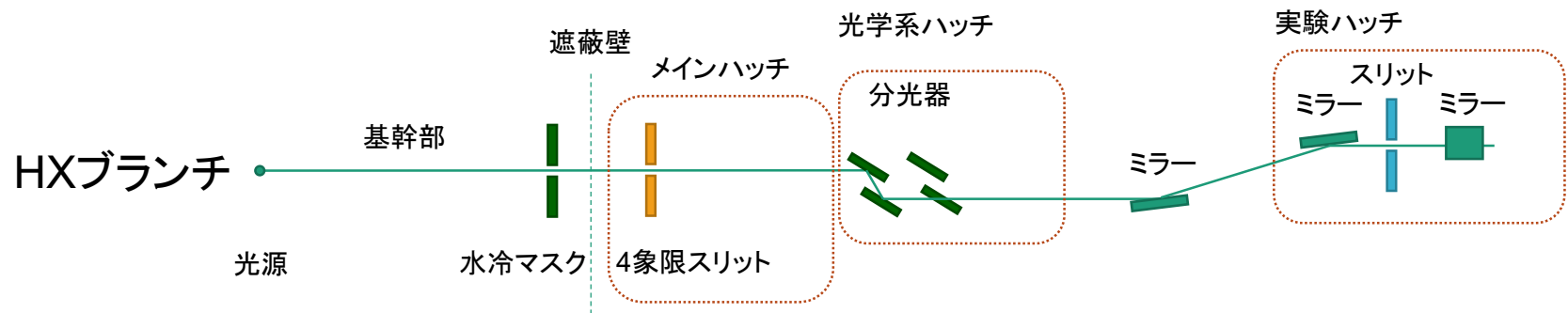
① フラックス重視                      低分散、白色・単色光の焦点ほぼ一致

② エネルギー分解能重視              縦集光サイズ小

仮にFZP集光する場合（縮小率2000:1を想定 集光サイズは①で $0.25\mu\text{m(H)} \times 0.1\mu\text{m(V)}$ )  
出射スリット下流2mでのビーム拡がり



# 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

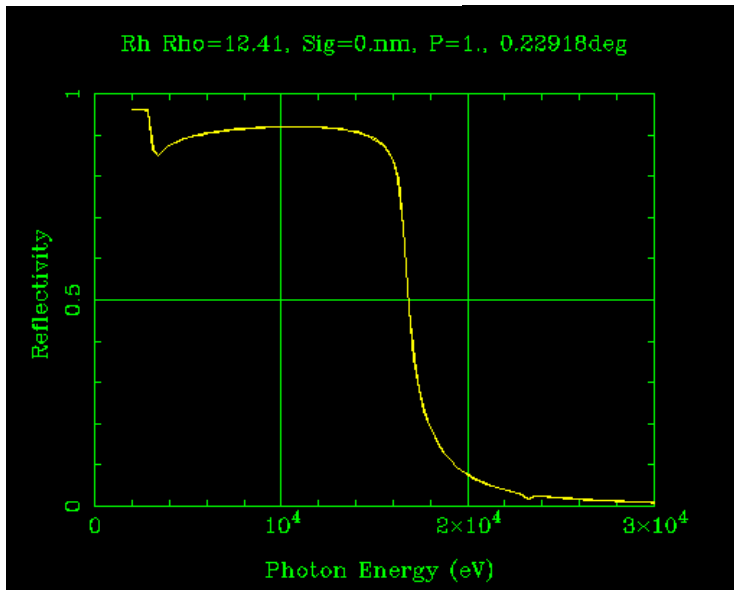
# HXブランチの集光系の検討

## 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)

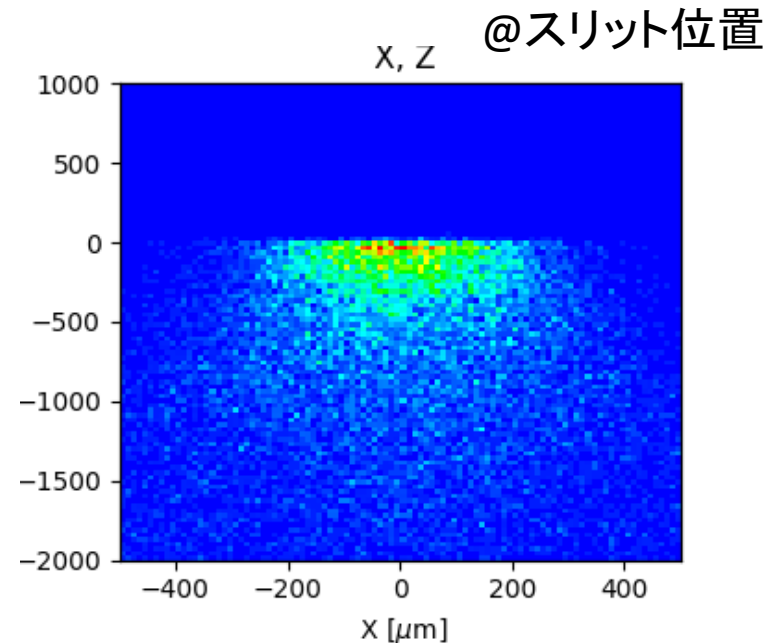
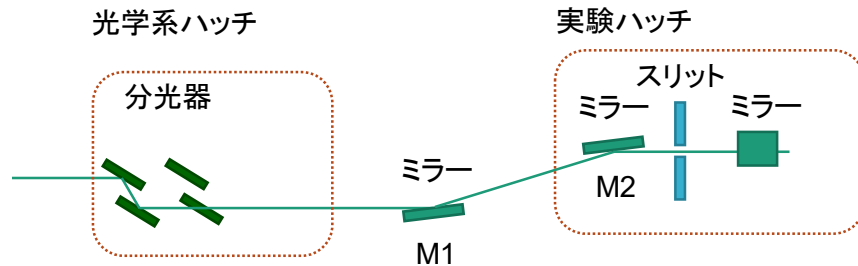
集光点を下流にしてより高エネルギーのX線に適用することも可能

**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れば①と②はスイッチ可能

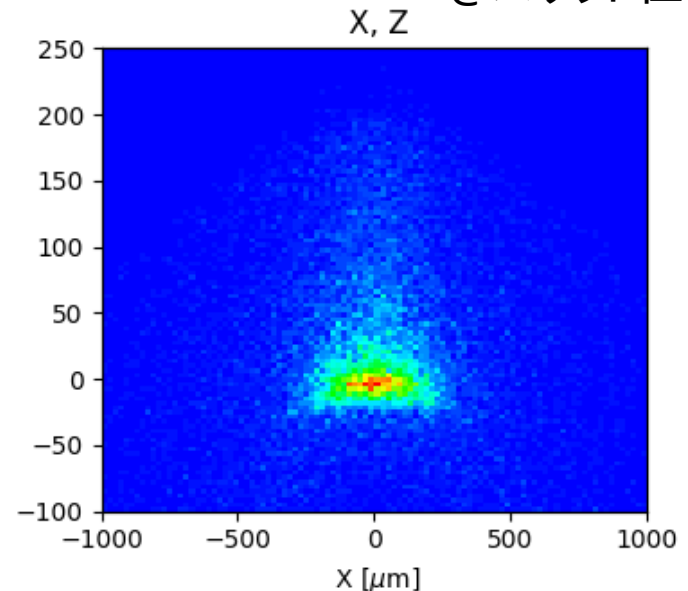
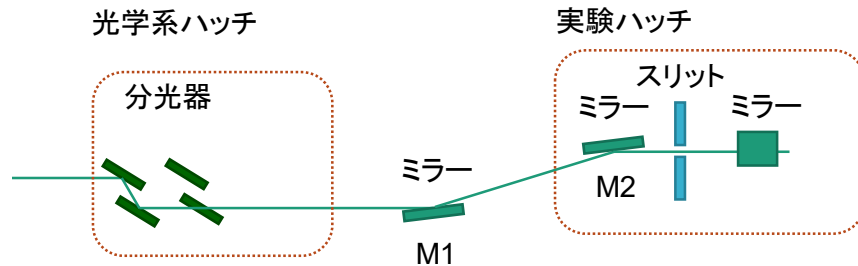
**集光サイズが小さく透過率も多い、集光プロファイルも良い**

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

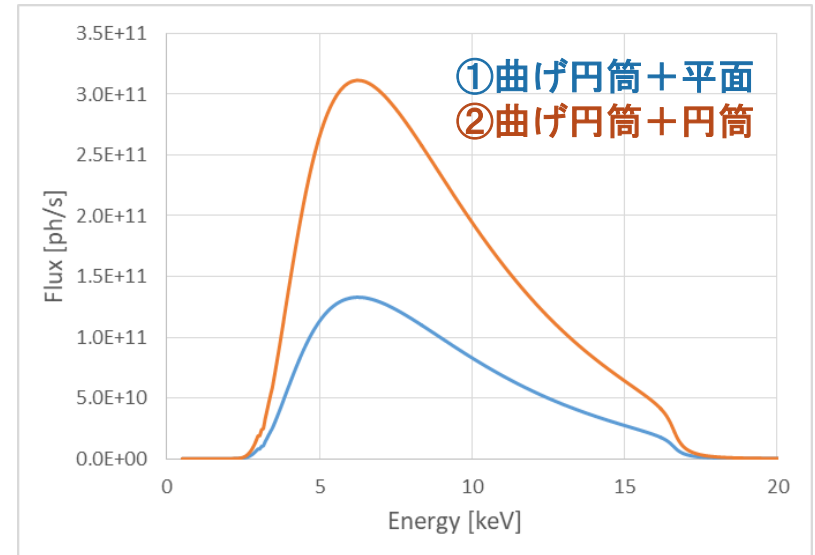


# HXブランチの集光系の検討

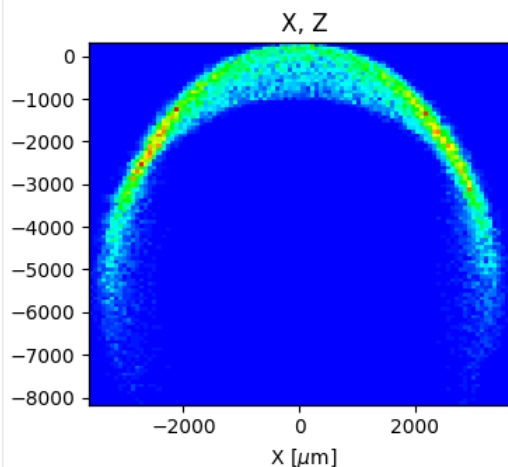
- フラックス見積もり  
エネルギー分解能  $E/\Delta E$   $10^4$  と仮定  
出射スリット位置での  $\square 500\mu\text{m}$  領域透過率から計算

4-13keV領域で  
概ね  $10^{11}$  ph/s オーダー

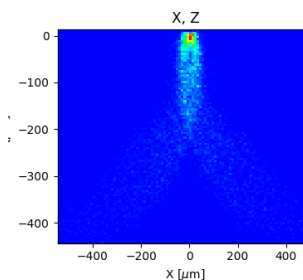
- 下流1.6mでのビーム拡がり



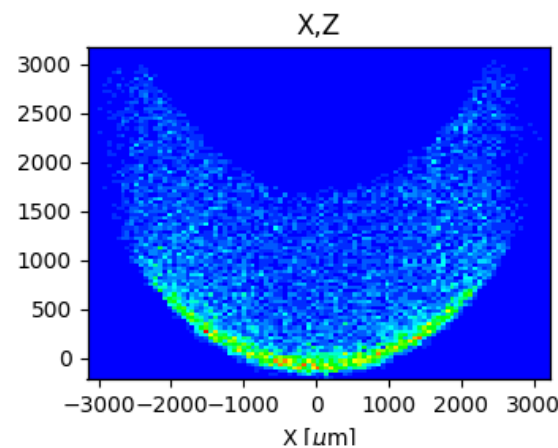
## ① 曲げ円筒 + 平面



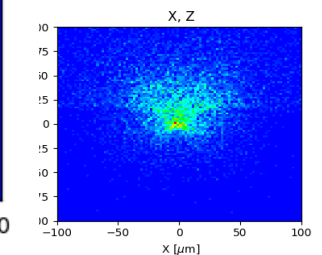
無理に楕円集光  
 $60\mu\text{m(H)} \times 40\mu\text{m(V)}$   
フラックスは同じ



## ② 曲げ円筒 + 円筒



無理に楕円集光  
 $60\mu\text{m(H)} \times 55\mu\text{m(V)}$   
フラックスは2/3



# 白色利用の可能性

## ➤ SXブランチにおける白色利用（①フラックス重視の場合）

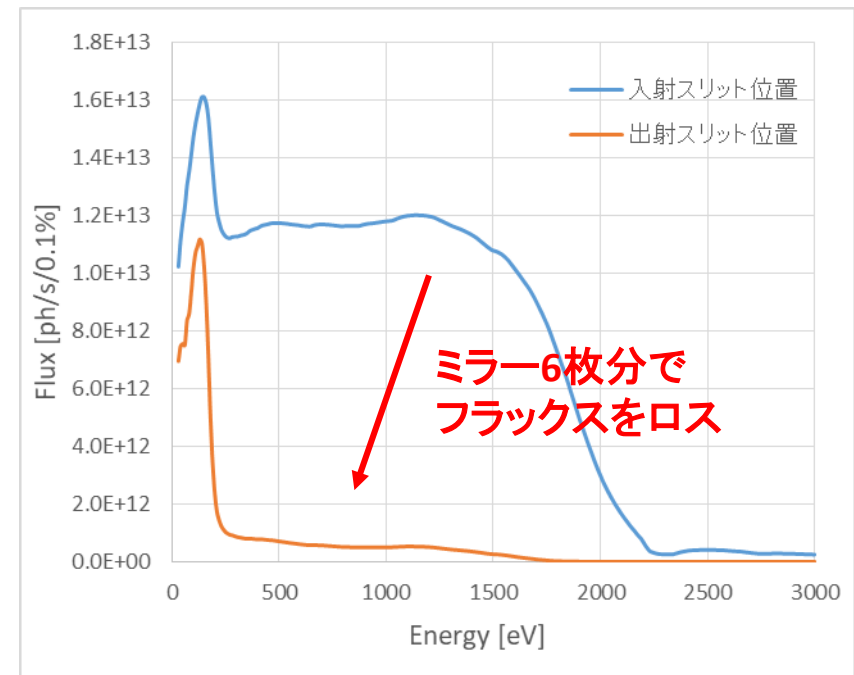
出射スリット位置で、白色もほぼ縦横集光  $0.5\text{mm(H)} \times 0.2\text{mm(V)}$ 程度  
取込1mrad, M2/Grの角度がいずれも2度の場合を想定  
Total fluxは $1.7 \times 10^{16}$  ph/s（30eV以下の領域は計算に含んでいない）  
（ただしサンプルは真空下）

SiN窓を通るとして、  
窒素の吸収端より上の  
500eV以上の領域で積分すると  
Fluxは $6.0 \times 10^{14}$  ph/s

M2/Grの角度次第でスペクトルを  
調整することが可能

ちなみに  
入射スリット位置では  
Total fluxは $5.1 \times 10^{16}$  ph/s

白色光のフラックススペクトル





# 白色利用の可能性

## ➤ HXブランチにおける白色利用

### (1) 非集光白色光の場合

取込を2mrad, Be窓1mm, 30m地点で考える

全て取り込むとTotal fluxは $1.7 \times 10^{16}$  ph/s

実際には、1mm角程度で当てるとすると、Fluxは $3.9 \times 10^{13}$  ph/s

ただし...高さは1200mmのため、  
SX側を17mm下げて当てる  
必要がある

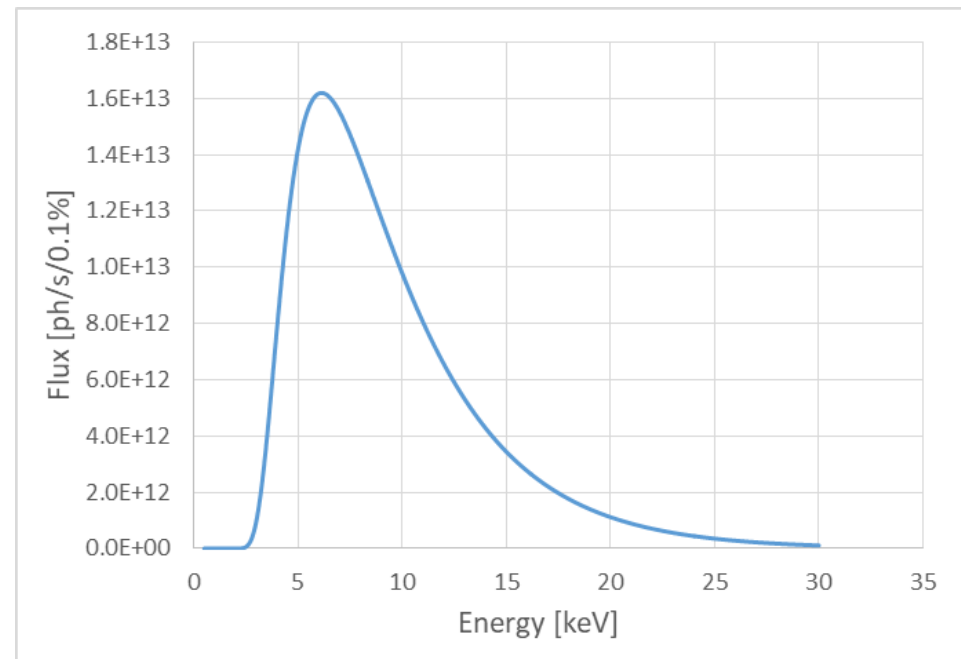
全て取り込んだ場合のフラックススペクトル

### (2) 集光白色光の場合

臨界エネルギーの問題はある  
が1mm角領域のfluxは増加

ただし...

**ミラー冷却機構、光の高さ制御**  
については要検討



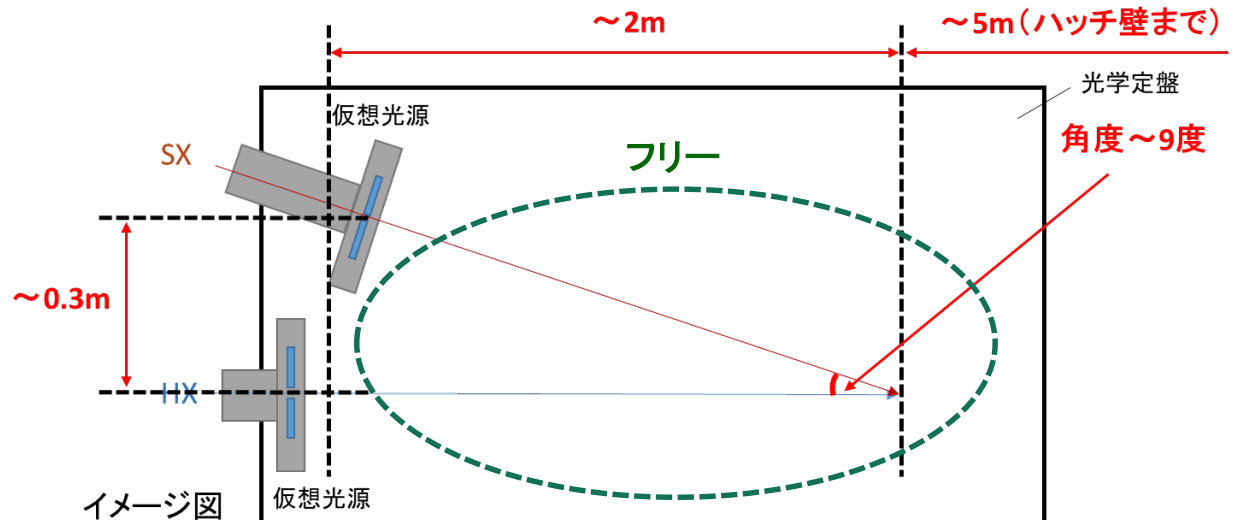
# まとめ

## ➤ 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)

\*1800eV(SX), 17keV(HX)までは、フラックス1桁落ち

- 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



イメージ図