

# ワーキンググループ検討結果 —挿入光源について—

---

ビームライン検討委員会ワーキンググループ  
高橋正光 (QST)  
後藤俊治 (JASRI)  
雨宮健太 (KEK)  
為則雄祐 (JASRI)  
松田巖 (東大物性研)

## 実用的な挿入光源に求められる検討要素

### 1. 光の特性

- 光子エネルギー範囲
- 偏光度
- 輝度・光子フラックス・コヒーレントフラックス

### 2. 光学系に対する熱負荷

### 3. 独立チューニング

- 個々のビームラインにおける光子エネルギー（ギャップ）・偏光の操作を蓄積リングや他のビームラインに影響を及ぼさずにおこなうことができる。

### 4. 汎用性

- 立ち上げ・運用の合理化
- ビームライン更新の円滑化

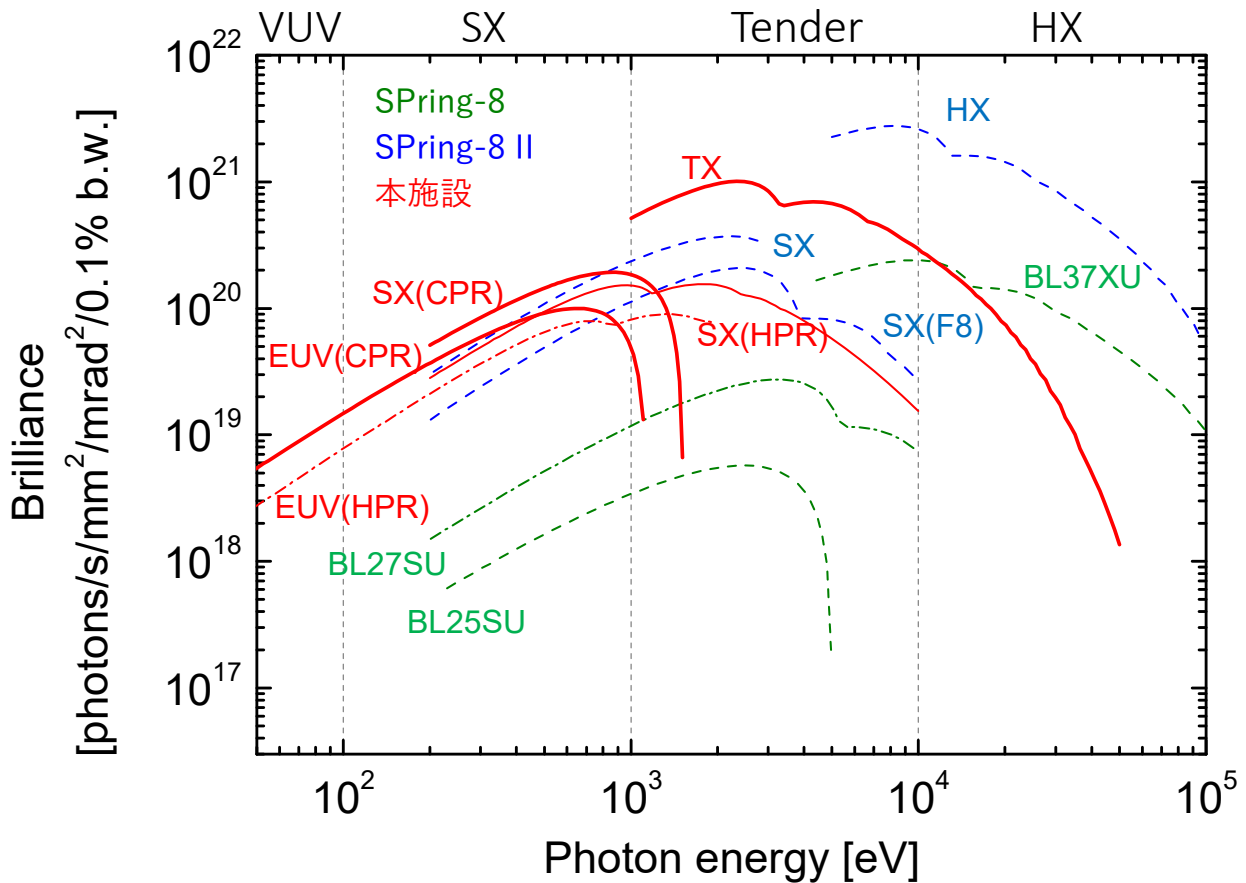
## 標準挿入光源の案

| 用途                        | 種類                                    | 周期長<br>(mm) | 周期数 |
|---------------------------|---------------------------------------|-------------|-----|
| 可変偏光<br>軟X線～EUV           | APPLE-II<br>(水平直線偏光・垂直直線偏光・<br>左右円偏光) | 56          | 75  |
|                           |                                       | 75          | 56  |
| 直線偏光<br>テンダーX線 (1-20 keV) | 真空封止平面アンジュレータ                         | 22          | 190 |
| 白色 (2-30 keV)             | 多極ウィグラー                               | 120         | 5   |

上記を標準に、

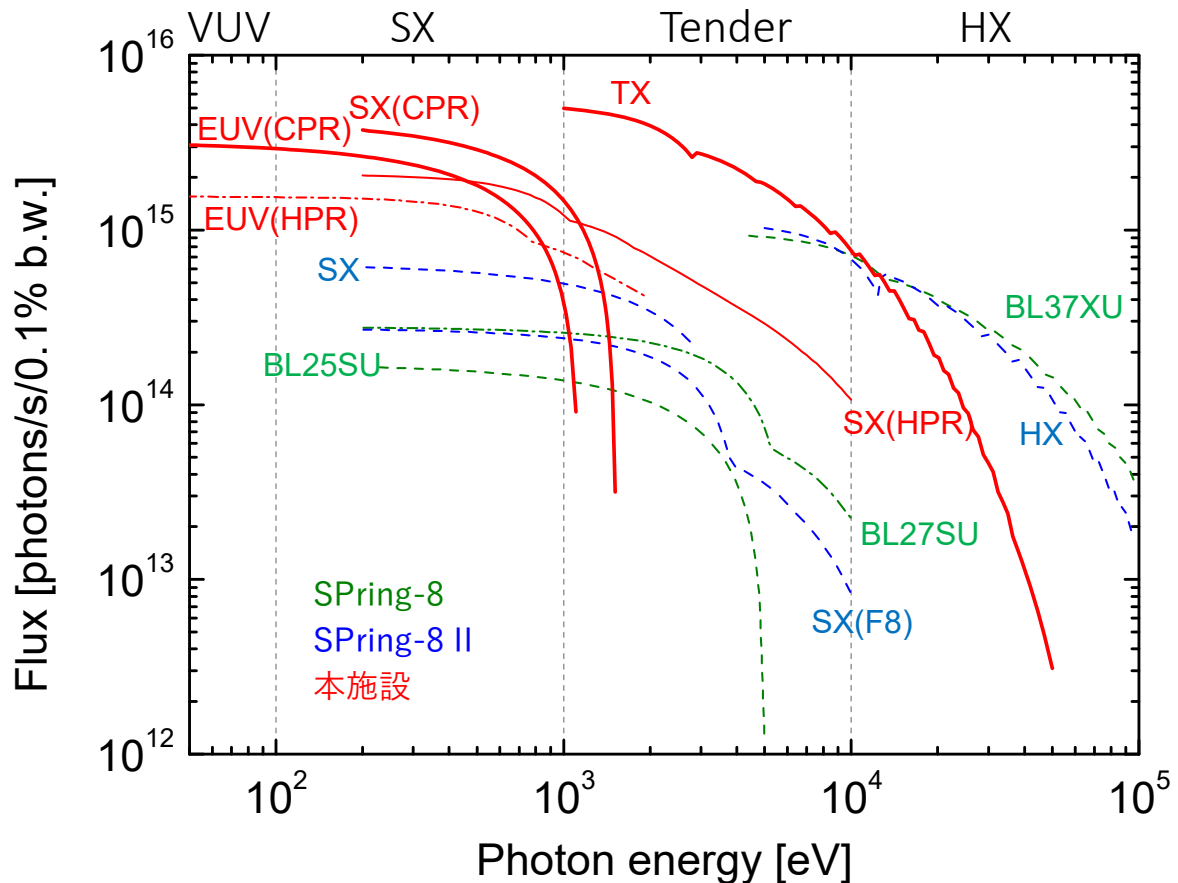
- 高速偏光切替のための分割アンジュレータ
- 軟X線／テンダーX線の同時使用  
のオプションについても検討した。

# 光源の基本特性I (輝度)



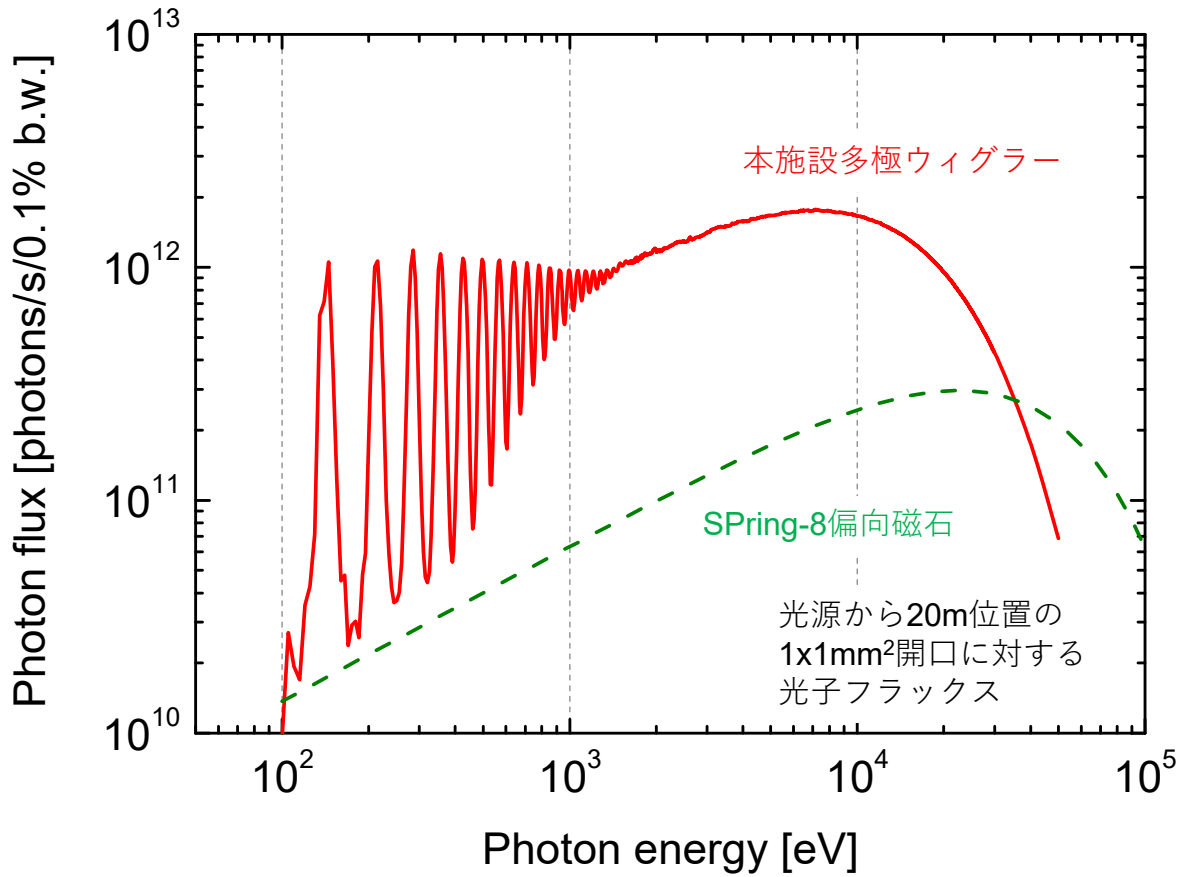
- 高エネルギー側 (5keV以上)はSPring-8 IIが優位 (～10<sup>21</sup>)
  - 10 keV以上はSPring-8の方が優位性有り
- Tender(1～5keV)域は特にゲインが大きい (～10<sup>21</sup>)
  - SPring-8 IIが稼働した場合でも優位性有り
- 軟X線(0.1～1keV) (～10<sup>19-20</sup>)
  - SPring-8の20～100倍 (比較対象による)
  - SPring-8 IIと比較すると同程度
- 真空紫外(0.1keV以下) (～10<sup>18-19</sup>)
  - SPring-8, SPring-8 IIでは対象外

# 光源の基本特性II (フラックス)



- 高エネルギー側は10keV程度まで ( $\sim 10^{15}$ )
  - 10keV以上はSPring-8, SPring-8 IIの方が優位性有り
- Tender(1~5keV)域はフラックスでもゲインが大きい ( $\sim 10^{15-16}$ )
  - SPring-8 IIが稼働した場合でも優位性有り
- 軟X線(0.1~1keV) ( $\sim 10^{15-16}$ )
  - フラックスで比較するとSPring-8 IIよりも優位
  - 10倍強~100倍弱程度のフラックスの増加を期待
- 真空紫外(0.1keV以下) ( $\sim 10^{15-16}$ )
  - SPring-8, SPring-8 IIでは対象外

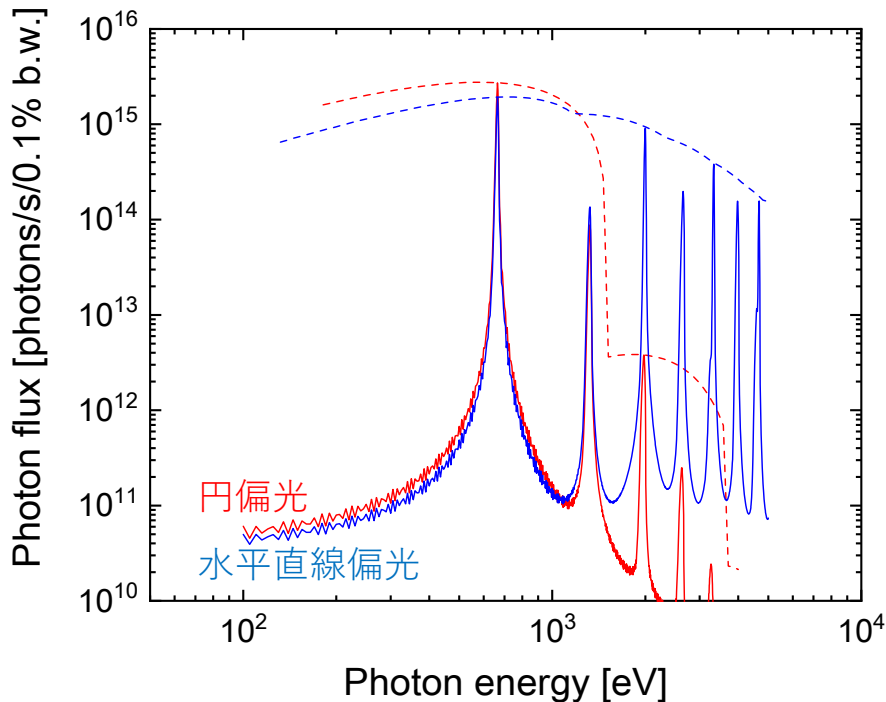
# 光源の基本特性III (広スペクトル光源)



- 光子エネルギー~2keV以上ではほぼ平滑な白色スペクトル
- 光子エネルギー~30keV以下の領域で、同一開口に対する光子フラックスはSPring-8の偏光磁石光源の約10倍

# 可変偏光光源の光子エネルギー範囲 3

## APPLE-SXのスペクトル



- 円偏光モードでは高次光は使用できない
- 円偏光・垂直直線偏光では水平直線偏光に比べエネルギー下端が上がる

## 各偏光モードにおける光子エネルギー範囲

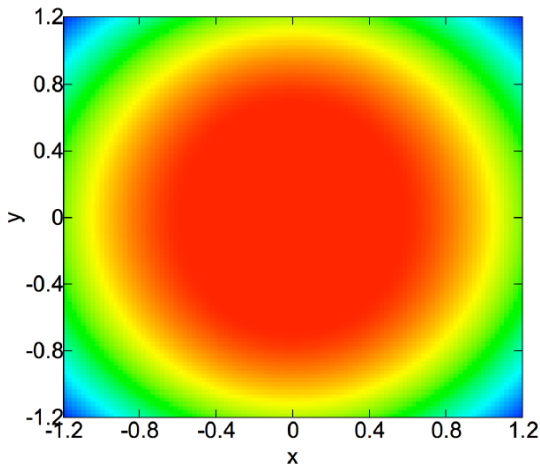
|  |        | 最大<br>K値 | 最大磁場<br>(T) | 光子エネルギー範囲<br>(keV)      |
|--|--------|----------|-------------|-------------------------|
| APPLE-SX<br>$\lambda_u = 56\text{mm}$  | 円偏光    | 2.75     | 0.526       | 0.178 - 1.20            |
|  | 水平直線偏光 | 4.67     | 0.893       | 0.128 - 2 <sup>*)</sup> |
|  | 垂直直線偏光 | 3.39     | 0.648       | 0.226 - 2 <sup>*)</sup> |
| APPLE-EUV<br>$\lambda_u = 75\text{mm}$ | 円偏光    | 4.67     | 0.666       | 0.050 - 1.01            |
|  | 水平直線偏光 | 6.60     | 0.942       | 0.050 - 2 <sup>*)</sup> |
|  | 垂直直線偏光 | 6.21     | 0.887       | 0.056 - 2 <sup>*)</sup> |

<sup>\*)</sup> 直線偏光モードでのエネルギー上端は高次光をどこまで利用するか依存

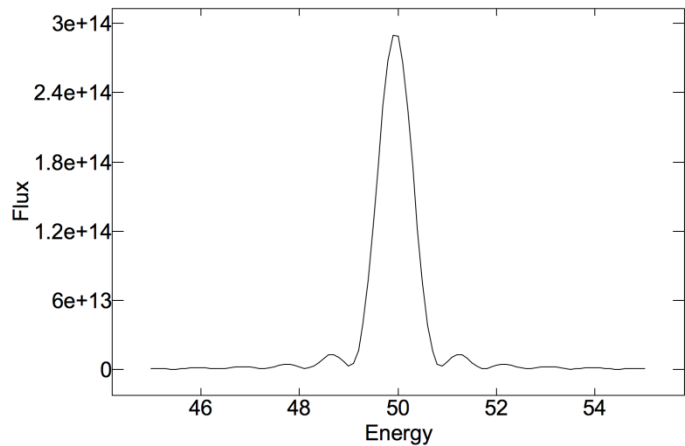
# 直線偏光モードでの熱負荷

光軸上の熱負荷が最も大きいEUV用APPLE（周期長75mm）の最小ギャップ時（K=6.6）の熱負荷を検討

## APPLE-EUV水平直線偏光モード



光源から20m地点での  
ビームプロファイル（50eV時）  
ビームサイズ 1.2x1.2 mm<sup>2</sup>

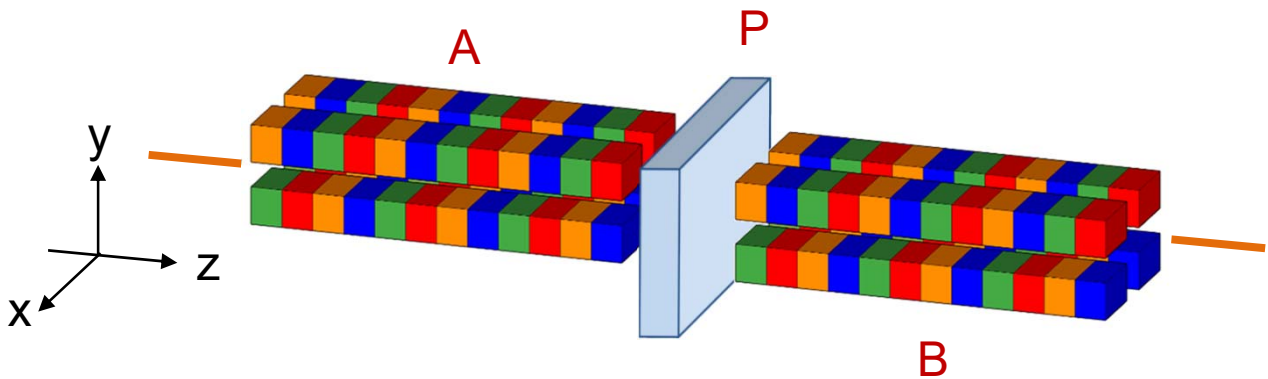


K=6.6のとき  
ビームサイズ 1.2x1.2 mm<sup>2</sup>  
を通過する光子フラックスのスペクトル

| Undulator          | Flux (ph/s/0.1%BW)                          | Power@M0 (W)               |
|--------------------|---|----------------------------|
| APPLE-EUV (Linear) | <u>2.9e+14@50eV</u><br>(slit: 1.2mmx 1.2mm) | 67<br>(slit: 1.2mmx 1.2mm) |

- 光軸上の熱負荷は67Wで、水冷ミラー（M0）で除去できるレベル

## 分割アンジュレータ



- 各構成要素はAPPLE-IIとする。
- アンジュレータAで発生する水平直線偏光 $E_x$ とアンジュレータBで発生する垂直直線偏光 $E_y$ を重ね合わせる。位相器Pで $E_x$ ,  $E_y$ 間の位相 $\alpha$ を変えることにより、任意の偏光を発生させる。
  - $\alpha=0 \rightarrow 45^\circ$ 傾いた直線偏光
  - $\alpha=\pi/2 \rightarrow$ 円偏光
- アンジュレータを4台、8台、・・・と増やすことも可能。

## APPLE分割アンジュレータの利点

- 位相器は電子ビームを迂回させるものであるが、その量はごくわずか（アンジュレータの半周期分程度）であるため、蓄積リング軌道に与える影響は無視できる。よって、偏光の高速切替（ $\sim 100\text{Hz}$ ）が可能。
- 直線偏光の高次光を使って、高エネルギーの円偏光が得られる。

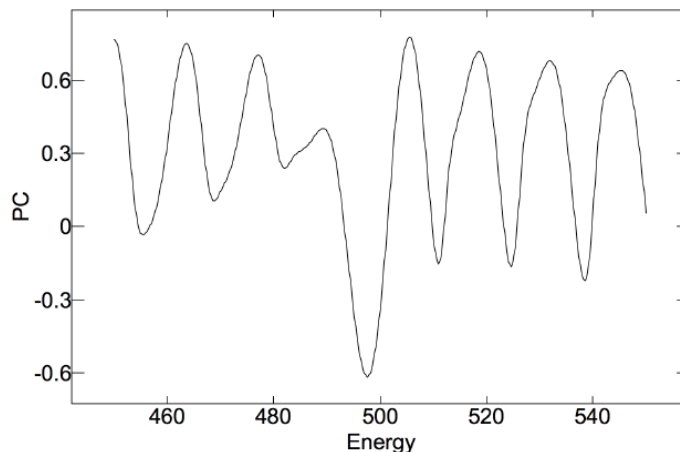
## APPLE分割アンジュレータの欠点

- 強度は単一のAPPLE-IIに比べ16-64%程度に減少。
- 調整パラメータが多いため、立ち上げ調整に時間や労力は必要。



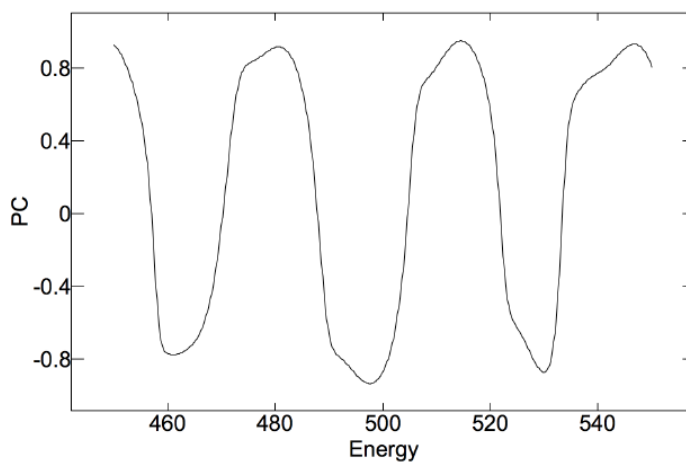
## 2-segement アンジュレータ

2台のAPPLE-II（周期長56mm×周期数35）から構成される分割アンジュレータの円偏光度のエネルギー依存性



## 4-segement アンジュレータ

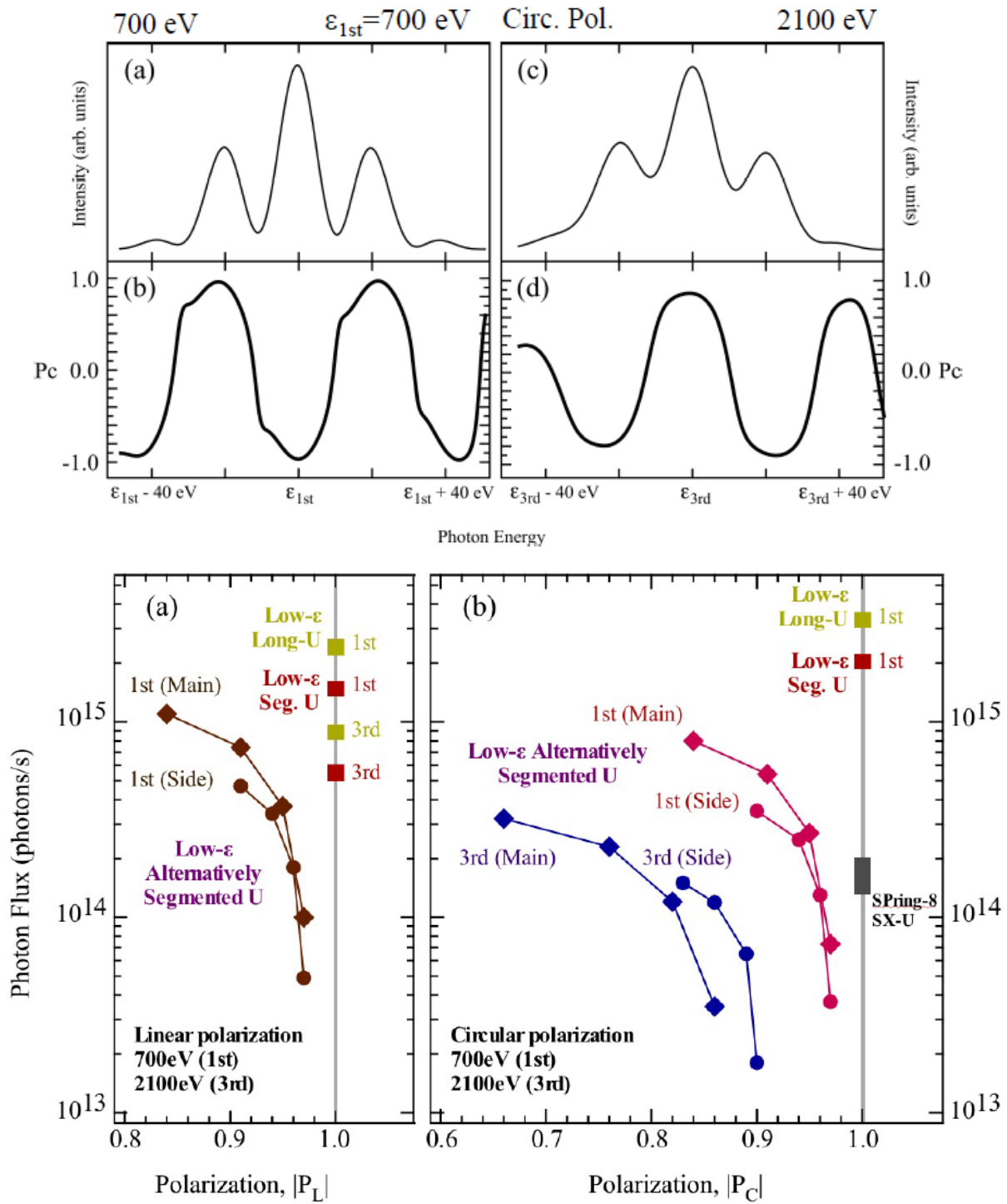
4台のAPPLE-II（周期長56mm×周期数15）から構成されるクロスアンジュレータの円偏光度のエネルギー依存性



- クロスアンジュレータの偏光度はエネルギーにより大きく変化する。そのため、吸収スペクトル測定（円偏光度を保持してエネルギーをスキャン）の場合、アンジュレータと位相器の両方を操作する必要がある。
- 2-segementでは偏光のエネルギー依存性が大きく、円偏光度も小さい。4-segementが実用的。

# 分割アンジュレータの偏光特性

## 1次光と3次光の円偏光度



APPLE分割アンジュレータは、実用的なオプションになりうる

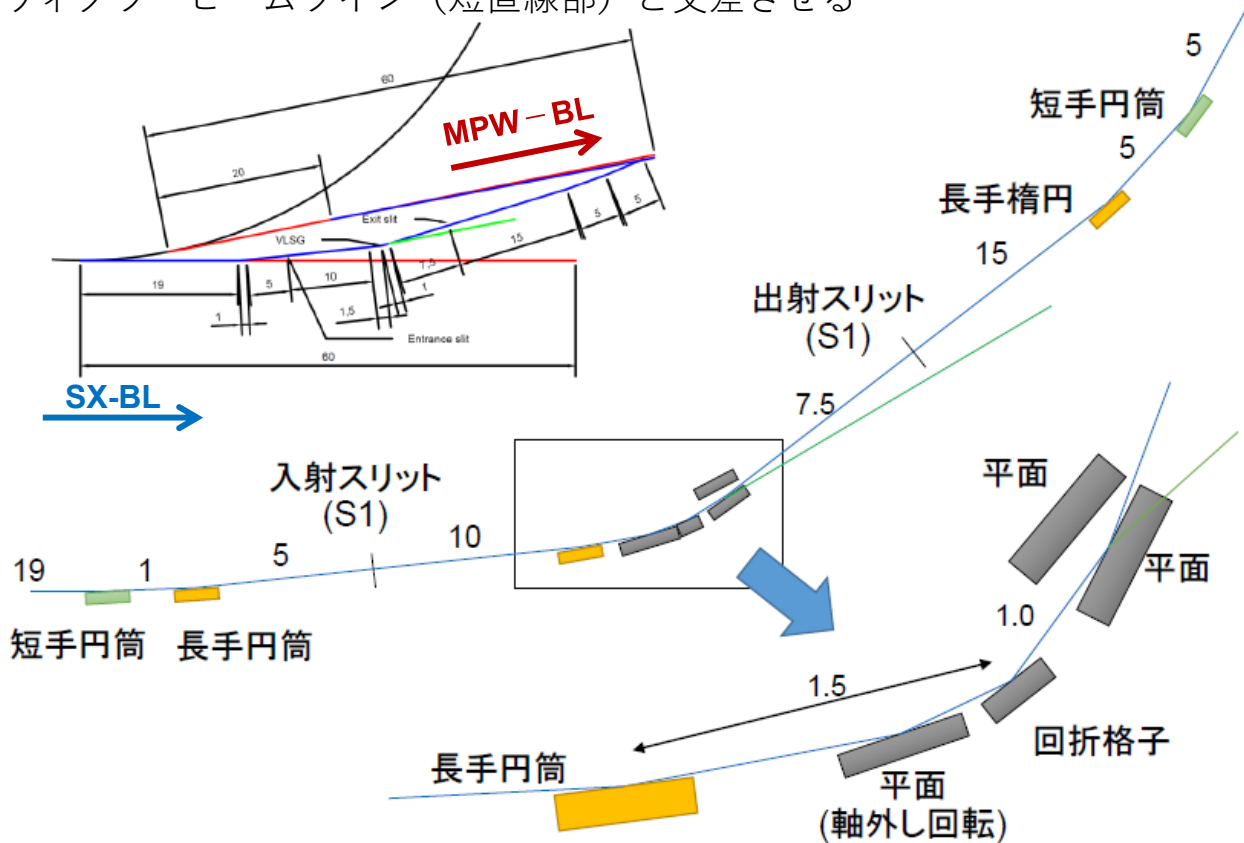
## オプション1

同一ビームラインに、標準の半分の長さの軟X線用・テンドーX線用2台のアンジュレータを設置。

- 軟X線は、標準アンジュレータの1/4の光子フラックス
- テンドーX線は標準アンジュレータの1/3の光子フラックス

## オプション2

軟X線ビームライン（長直線部）の光学系を水平振りにして、隣り合う多極ウィグラービームライン（短直線部）と交差させる



50%程度のロスで10,000-20,000の分解能が可能

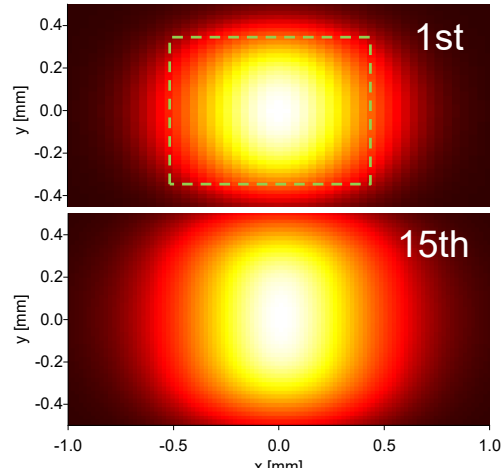
いずれのオプションも技術的には成立するが、軟X線利用を主とし、テンドーX線利用を付加機能として考えるのが適当。

# アンジュレータと多極ウィグラーの違い

## アンジュレータ

|             |      |
|-------------|------|
| 周期長 (mm)    | 22   |
| 周期数         | 190  |
| 最小ギャップ (mm) | 5    |
| 最大K値        | 2.36 |
| 最大磁場(T)     | 1.15 |

- アンジュレータではほぼすべてのビームを使う。
- 右図の枠は $3\sigma$ に相当する範囲 (0.985 x 0.725 mm<sup>2</sup>)

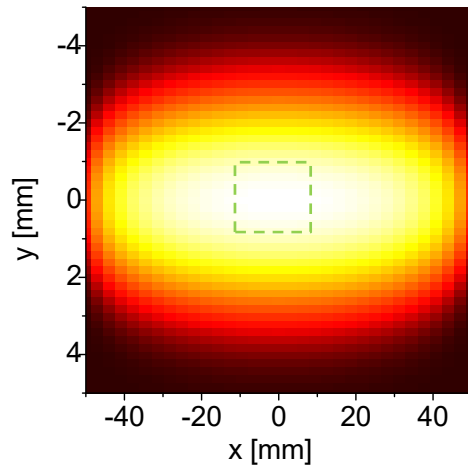


光源より20m地点でのビームプロファイル (最大K値2.36のとき)

## 多極ウィグラー

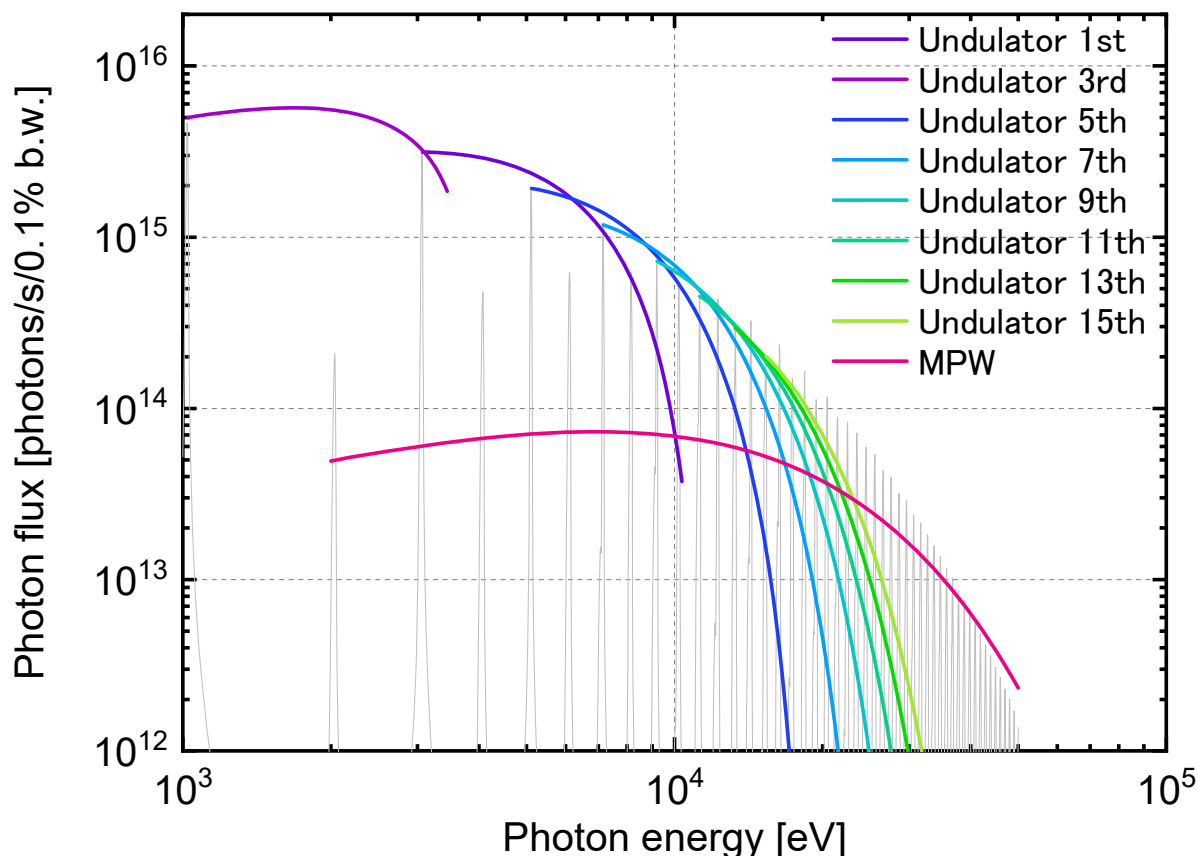
|           |      |
|-----------|------|
| 周期長 (mm)  | 120  |
| 周期数       | 5    |
| ギャップ (mm) | 15   |
| K値        | 16.2 |
| 最大磁場(T)   | 1.15 |

- 多極ウィグラーのビームは広がっているため、光学系で集めることで利用される光子フラックスが増える。
- 右図の枠は250Wの熱負荷 (SPring-8のアンジュレータと同等) に相当 (20 x 2 mm<sup>2</sup>)。



光源より20m地点でのビームプロファイル (E=7keV)

## 光子フラックスのスペクトル



### 多極ウィグラーが適合する場合

- ~15keV以上のX線を使用するとき
- 連続的で高速なエネルギー स्क्यानを必要とするとき（アンジュレータでは、1次光と3次光が切り替わる~3keVなどでギャップを大きく移動させる必要が生じる）

### アンジュレータが適合する場合

- ~10keV以下のX線を用いる場合で、広範囲なエネルギー स्क्यानは起こらないとき
- ナノビームを必要とするとき
- 高い空間コヒーレンスが必要なとき