

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

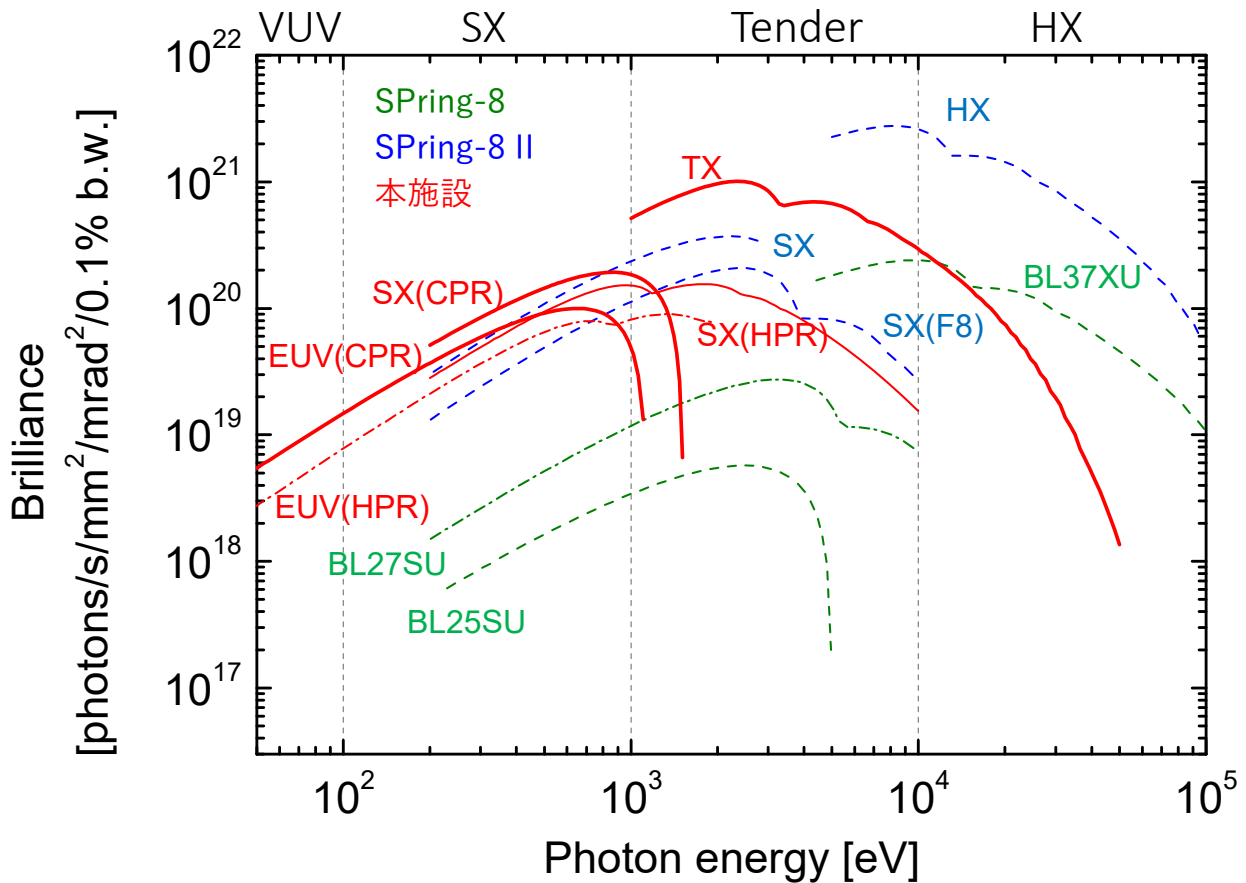
標準挿入光源の案

用途	種類	周期長 (mm)	周期数
可変偏光 軟X線～EUV	APPLE-II (水平直線偏光・垂直直線偏光・ 左右円偏光)	56	75
		75	56
直線偏光 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、

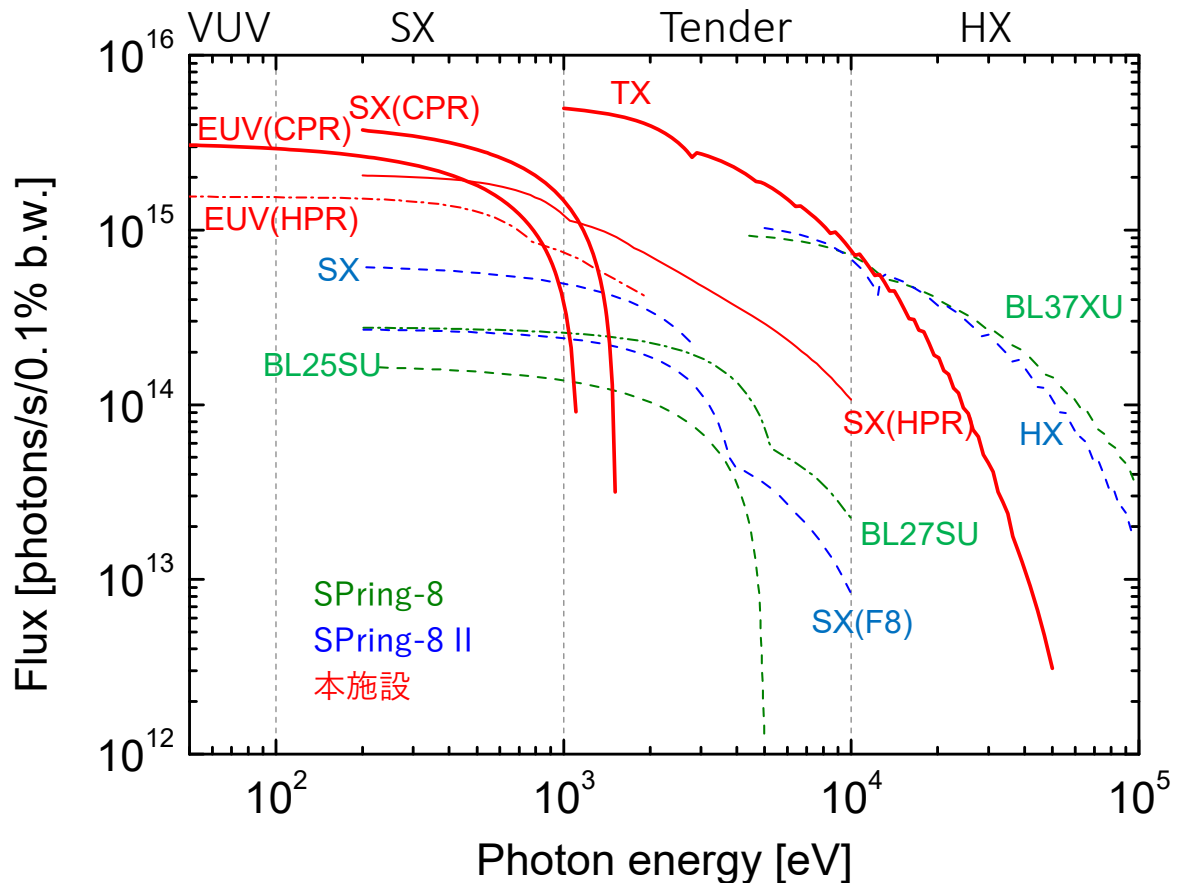
- 高速偏光切替のための分割アンジュレータ
- 軟X線／テンダーX線の同時使用
のオプションについても検討した。

光源の基本特性I (輝度)



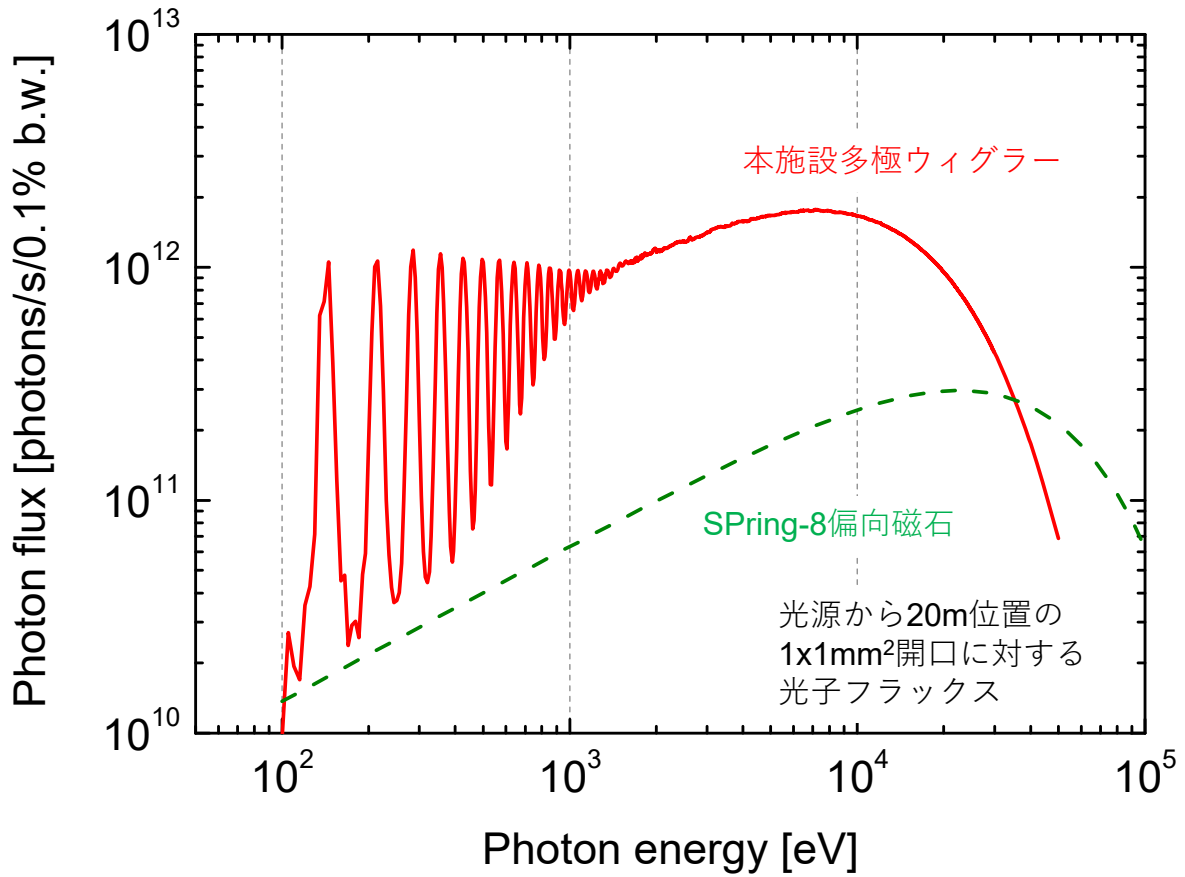
- 高エネルギー側 (5keV以上)はSPring-8 IIが優位 (～10²¹)
 - 10 keV以上はSPring-8の方が優位性有り
- Tender(1～5keV)域は特にゲインが大きい (～10²¹)
 - SPring-8 IIが稼働した場合でも優位性有り
- 軟X線(0.1～1keV) (～10¹⁹⁻²⁰)
 - SPring-8の20～100倍 (比較対象による)
 - SPring-8 IIと比較すると同程度
- 真空紫外(0.1keV以下) (～10¹⁸⁻¹⁹)
 - SPring-8, SPring-8 IIでは対象外

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

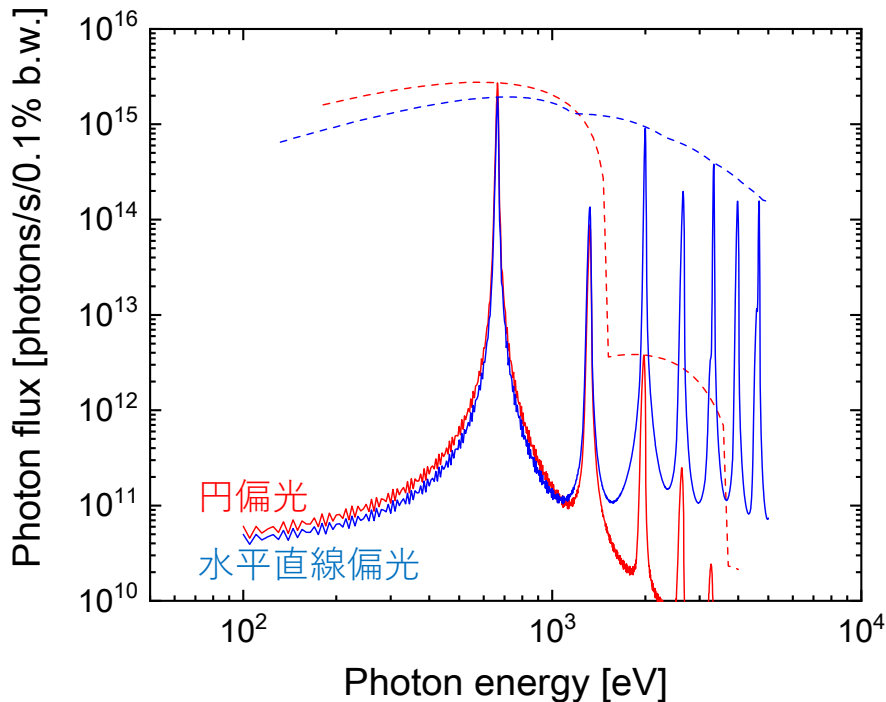
光源の基本特性III (広スペクトル光源)



- 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

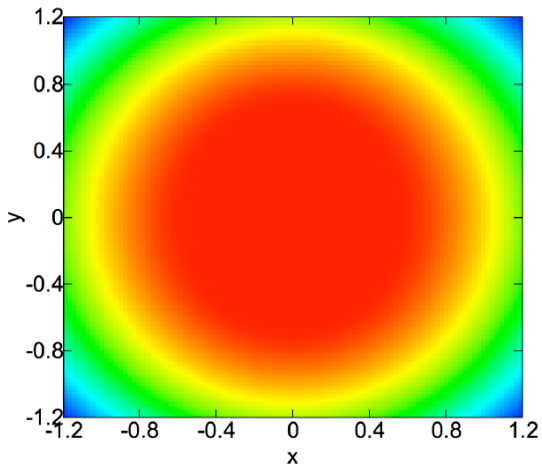
		最大 K値	最大磁場 (T)	光子エネルギー範囲 (keV)
APPLE-SX $\lambda_u = 56\text{mm}$	円偏光	2.75	0.526	0.178 - 1.20
	水平直線偏光	4.67	0.893	0.128 - 2 ^{*)}
	垂直直線偏光	3.39	0.648	0.226 - 2 ^{*)}
APPLE-EUV $\lambda_u = 75\text{mm}$	円偏光	4.67	0.666	0.050 - 1.01
	水平直線偏光	6.60	0.942	0.050 - 2 ^{*)}
	垂直直線偏光	6.21	0.887	0.056 - 2 ^{*)}

*) 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

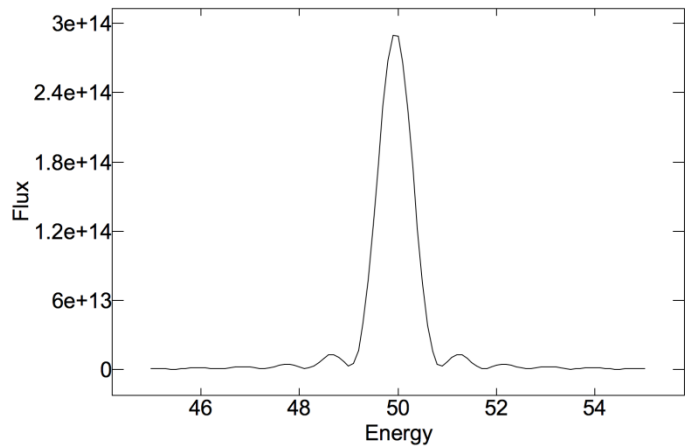
直線偏光モードでの熱負荷

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 mm²

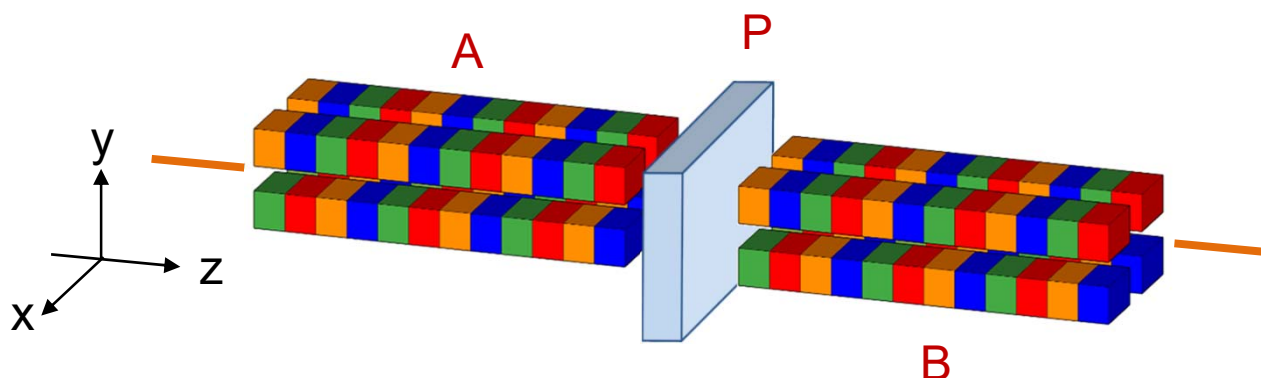


K=6.6のとき
ビームサイズ 1.2x1.2 mm²
を通過する光子フラックスのスペクトル

Undulator	Flux (ph/s/0.1%BW)	Power@M0 (W)
APPLE-EUV (Linear)	<u>2.9e+14@50eV</u> (slit: 1.2mmx 1.2mm)	67 (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 α を変えることにより、任意の偏光を発生させる。
 - $\alpha=0$ → 45°傾いた直線偏光
 - $\alpha=\pi/2$ → 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

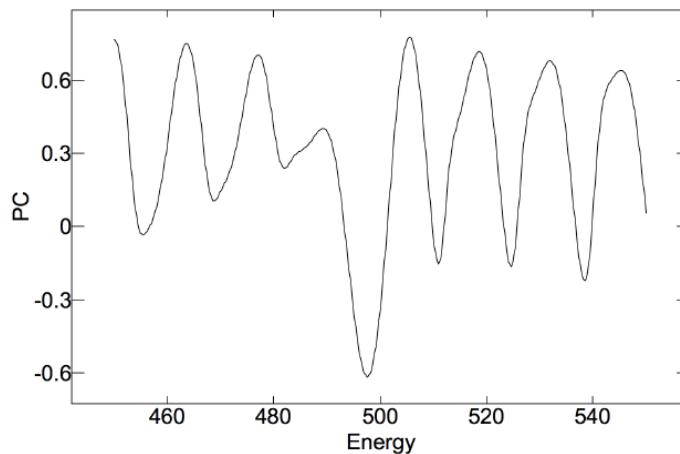
- 位相器は電子ビームを迂回させるものであるが、その量はごくわずか（アンジュレータの半周期分程度）であるため、蓄積リング軌道に与える影響は無視できる。よって、偏光の高速切替（~100Hz）が可能。
- 直線偏光の高次光を使って、高エネルギーの円偏光が得られる。

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。

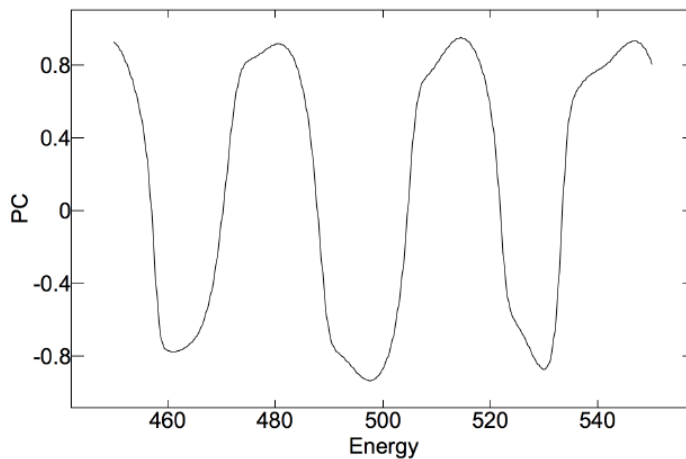
2-segement アンジュレータ

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

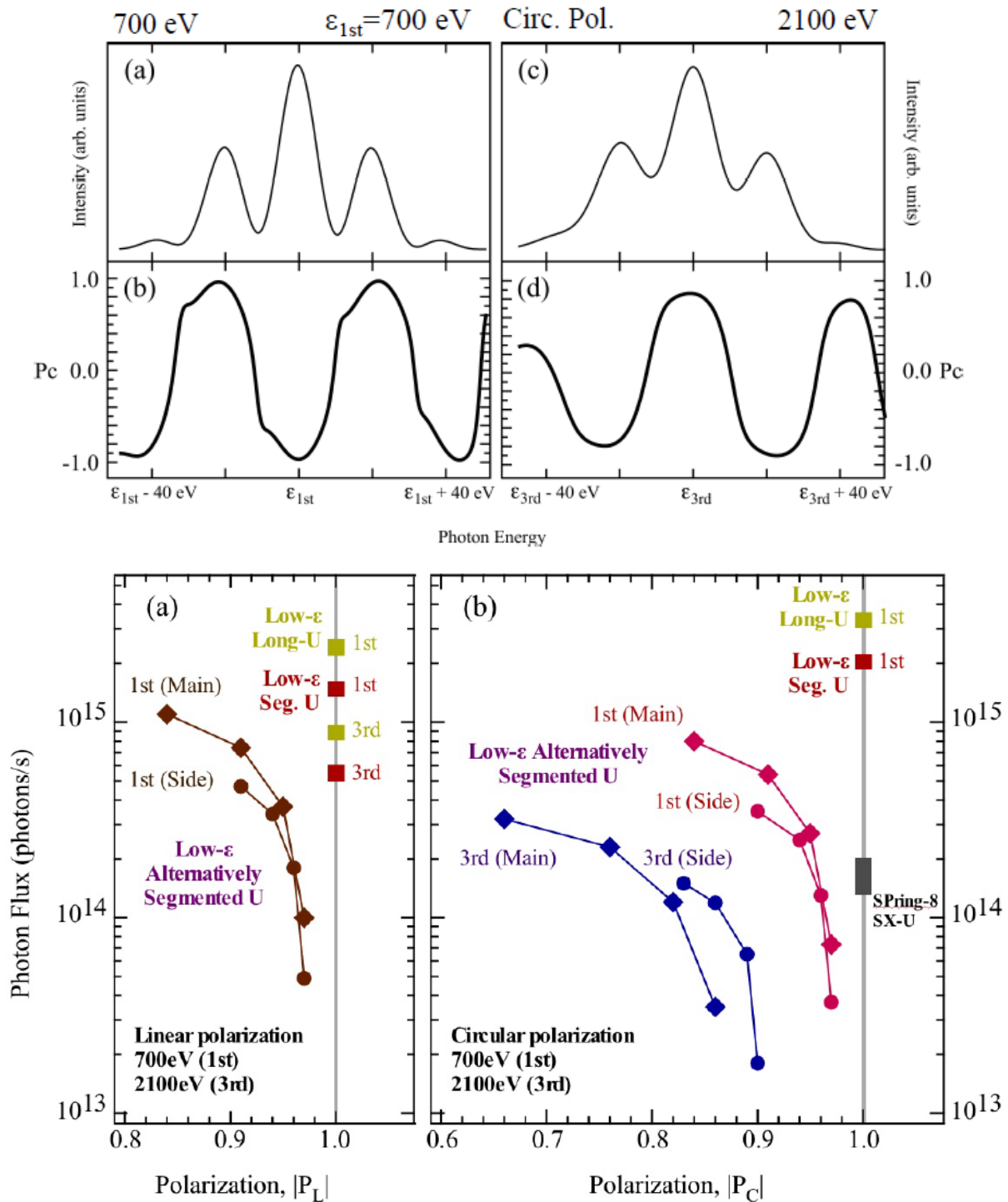
4台のAPPLE-II（周期長56mm×周期数15）から構成されるクロスアンジュレータの円偏光度のエネルギー依存性



- 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

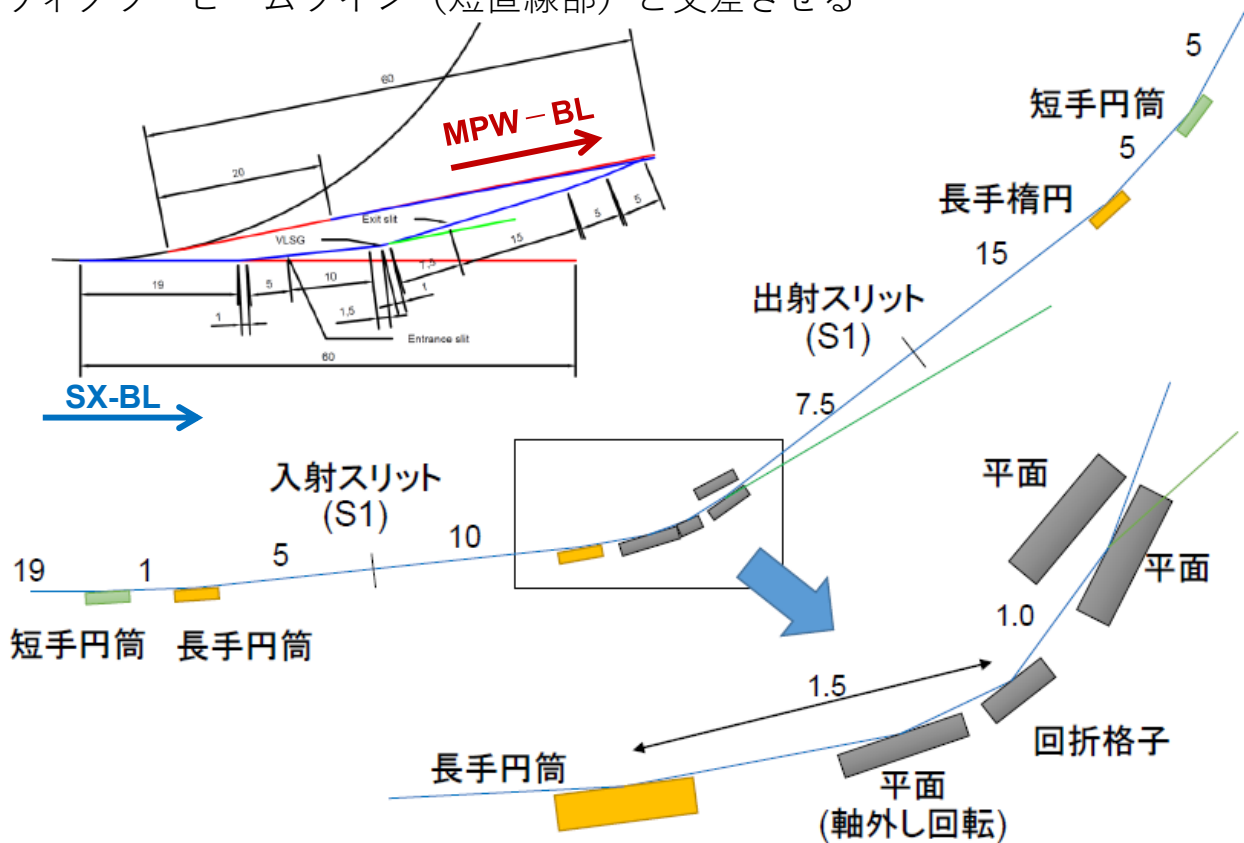
オプション1

同一ビームラインに、標準の半分の長さの軟X線用・テンダー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
- テンダー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

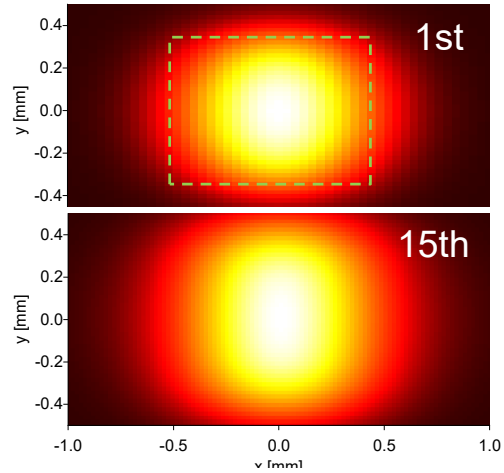
いずれのオプションも技術的には成立するが、軟X線利用を主とし、テンダーX線利用を付加機能として考えるのが適当。

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 3σ に相当する範囲 (0.985 x 0.725 mm²)

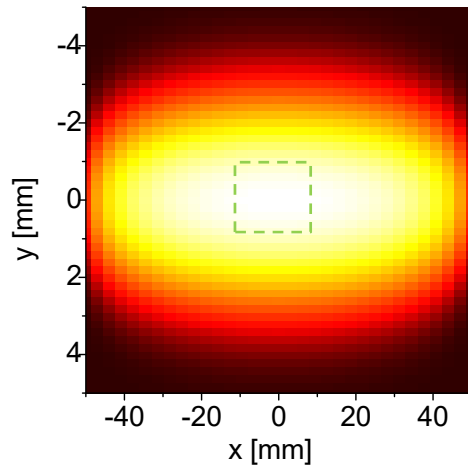


光源より20m地点でのビームプロファイル (最大K値2.36のとき)

多極ウィグラー

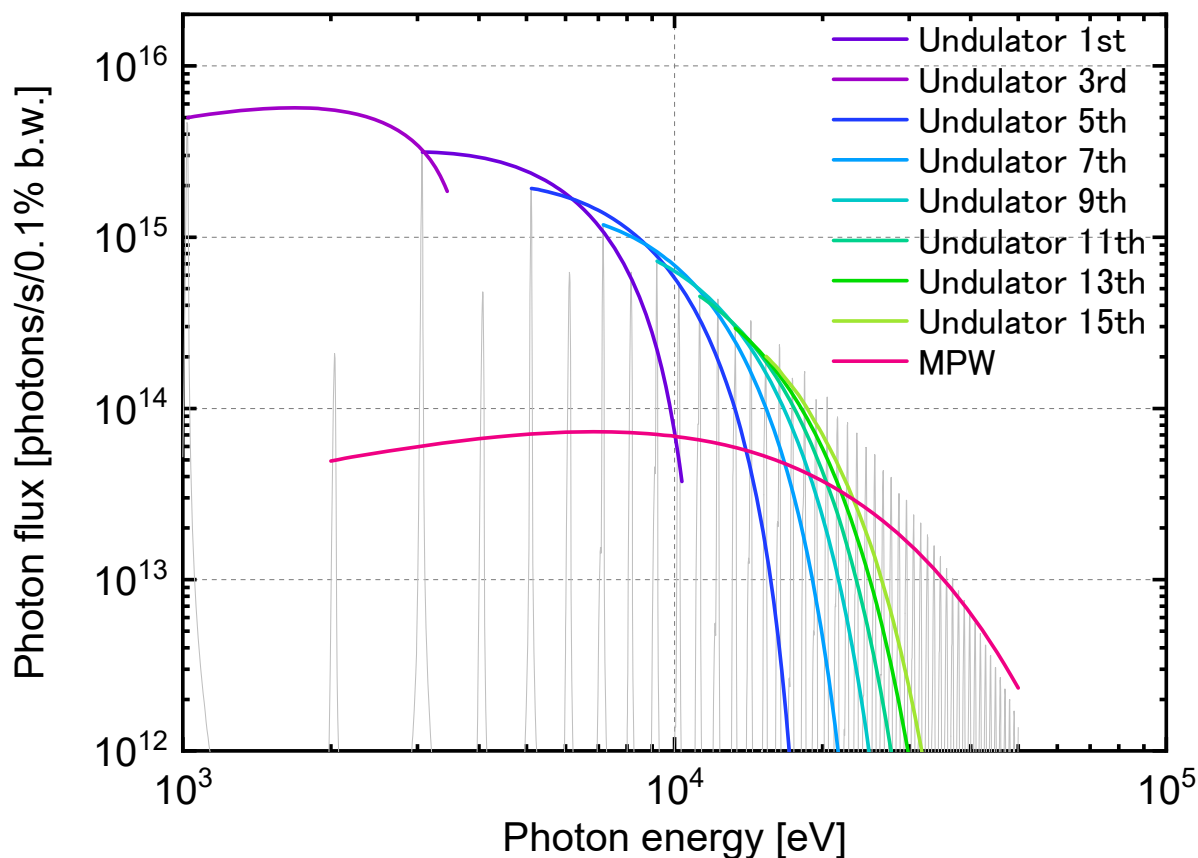
周期長 (mm)	120
周期数	5
ギャップ (mm)	15
K値	16.2
最大磁場(T)	1.15

- 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 mm²)。



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