

「ISSPワークショップ  
真空紫外アンジュレータビームライ  
ンの高度化と物性科学」

BL19分光光学系の更新

2009/12/18(金)

東京大学物性研究所SR施設

藤澤 正美

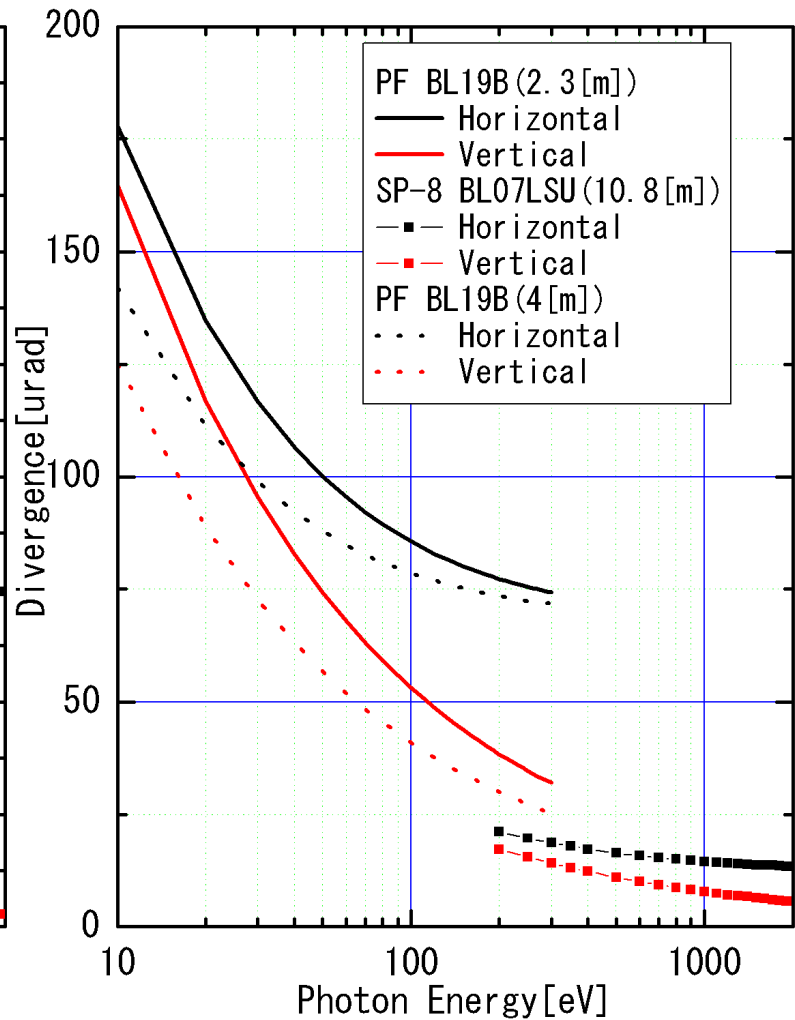
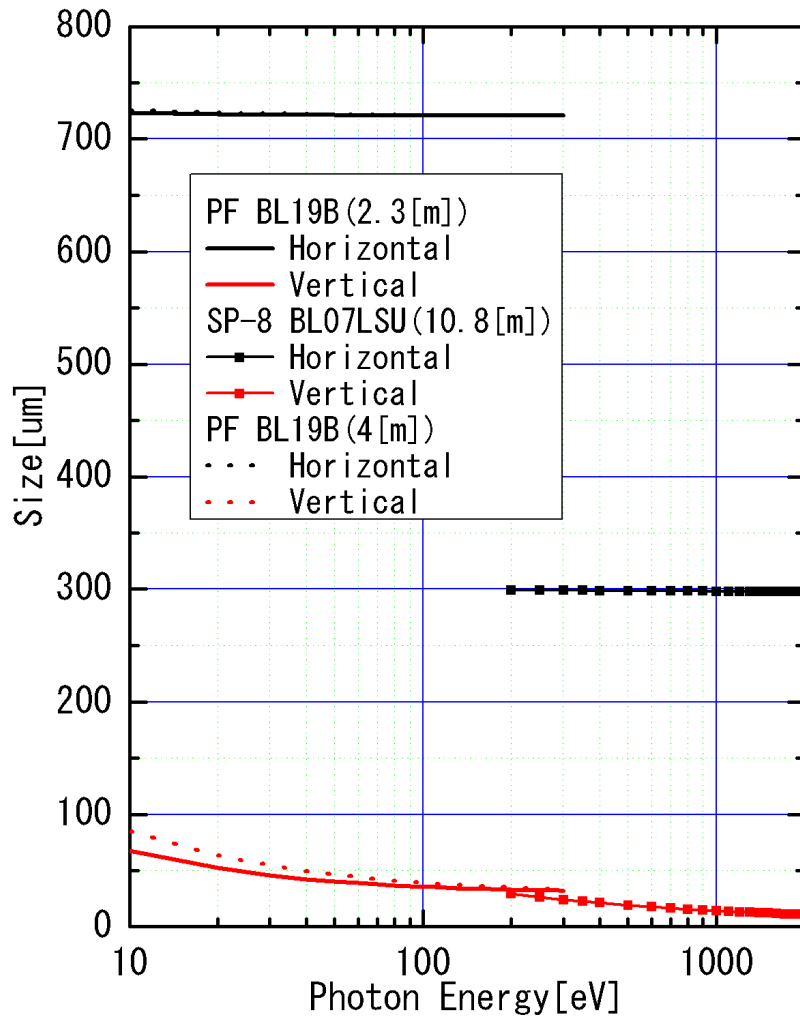
# 分光器の仕様

- 光子エネルギー範囲 10~300[eV]
  - 分解能~10,000
  - 明るく
  - 安く
- 
- 水平/垂直直線偏光、円偏光に対応する。  
= 反射率の偏光依存性の差を小さくする。

# PF-BL19光源、設置エリアの特徴

- 低い光子エネルギー & 短いID (約2[m])  
→ 光源の発散が大きい。  
(メリット、デメリットがある。)
- ビームラインが短い  
(光源点 ~  $M_0$  (1<sup>st</sup> mirror)  $\approx 14\text{m}$ 、  
光源点 ~ 測定点距離  $\approx 22 \sim 23\text{m}$ )  
→ 入射スリットなしの分光器

# 光源の比較



# 光子エネルギーと分光器の型

直入射領域 ( $\leq 30$  [eV]) と斜入射領域 ( $\geq 30$  [eV]) の混在

○斜入射分光器で直入射領域を出そうとすると、

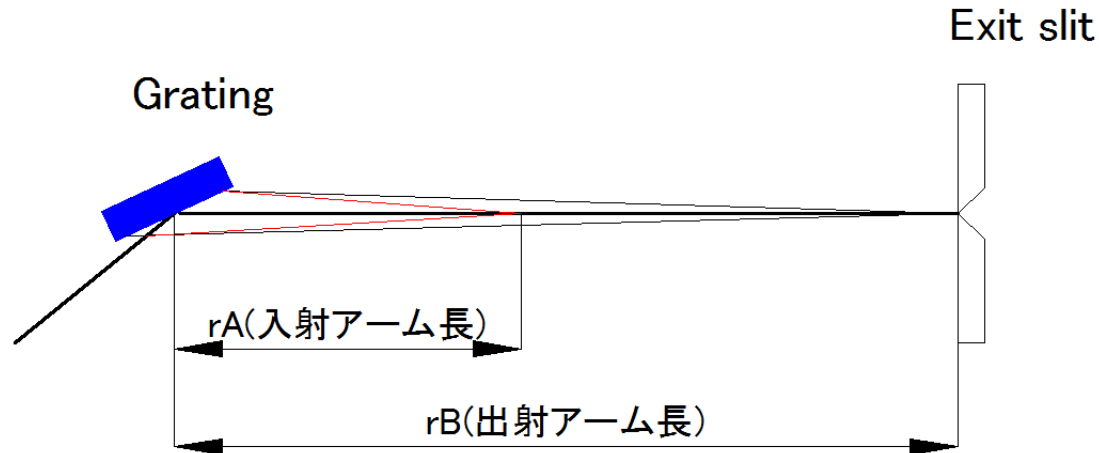
- (1) 高次光の大きさ
  - (2) 反射率の偏光依存性
- などの、問題点がある。

○直入射、斜入射のハイブリッド分光器は機構が複雑になる。機構の複雑さに見合う性能は得にくい。

# 光子エネルギーと分光器の型 続き

- というわけで、まずはいつもの通り、「不等刻線間隔平面回折格子斜入射分光器」(VLS-PGM)を採用。さらに、  
(\* )入射スリット無し、(\* )偏角は連続可変型、とする。
- 直入射領域の欠点を解消する努力をする。

# VLS-PGMの原理 (簡単に)



- 回折格子が見る光源は虚像 (M-G型)。
- 刻線密度に位置依存性を持たすことで、波長スキャンによる焦点移動距離を小さくできる。  
(固定偏角型)
- さらに、偏角を選ぶことで、これらをゼロにできる。  
(偏角可変型)
- 要求される分解能、効率によって、刻線密度等を決める。

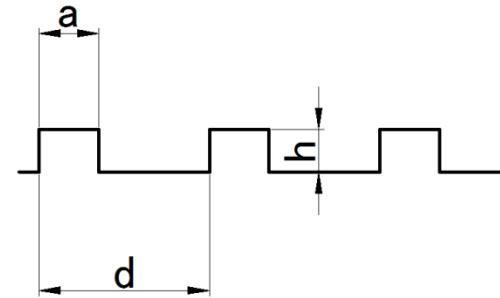
# 直入射領域の欠点克服法

## (1) 高次光の大きさ

→ 回折格子の  $a/d$ 、 $h$  の選択

→ 反射率の角度依存性

→ 準周期回折格子の採用



## (2) 反射率の偏光依存性

→ 偏光依存性が小さい物質

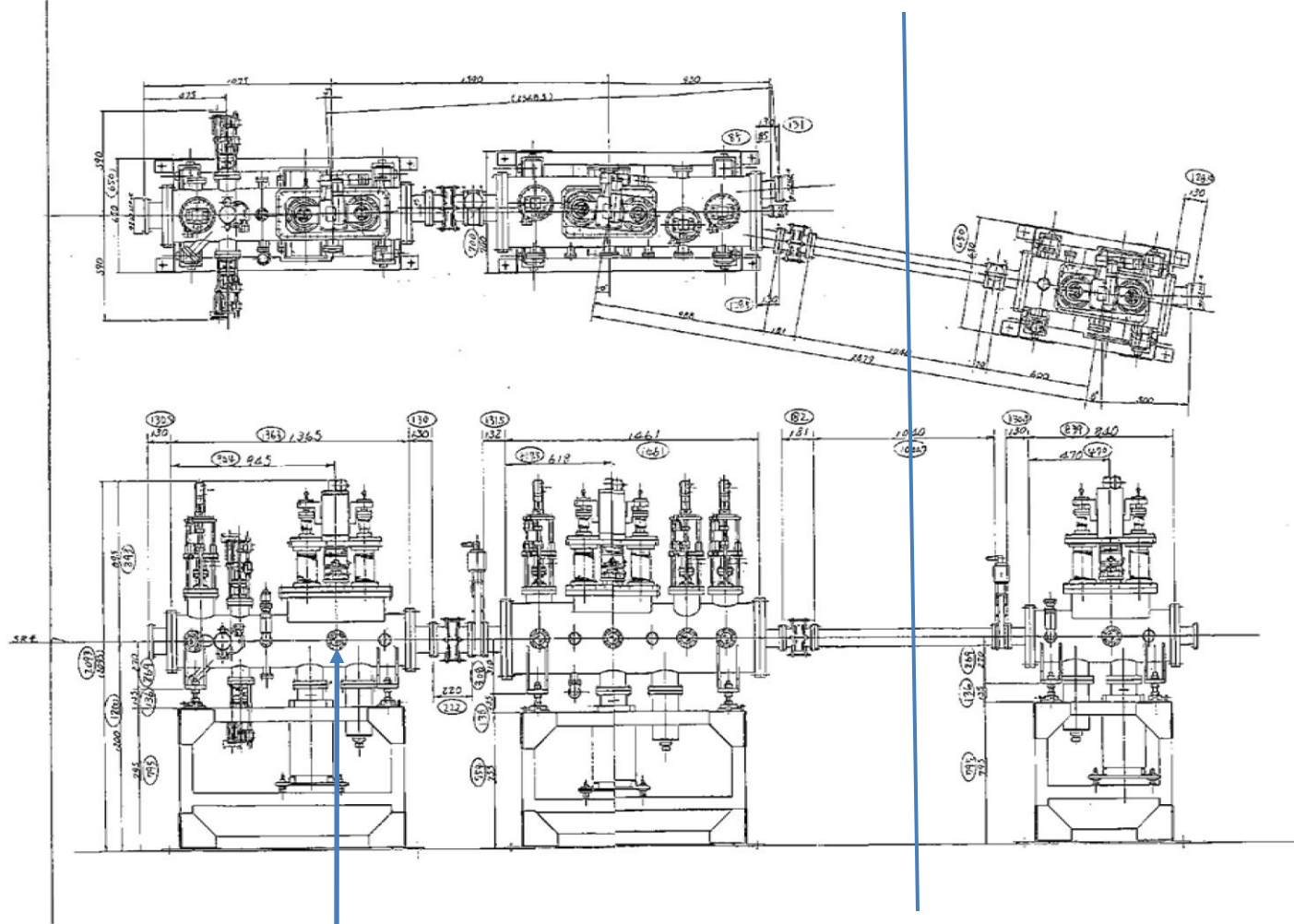
(Si、Alなど)



# 現BL19分岐ミラーシステム

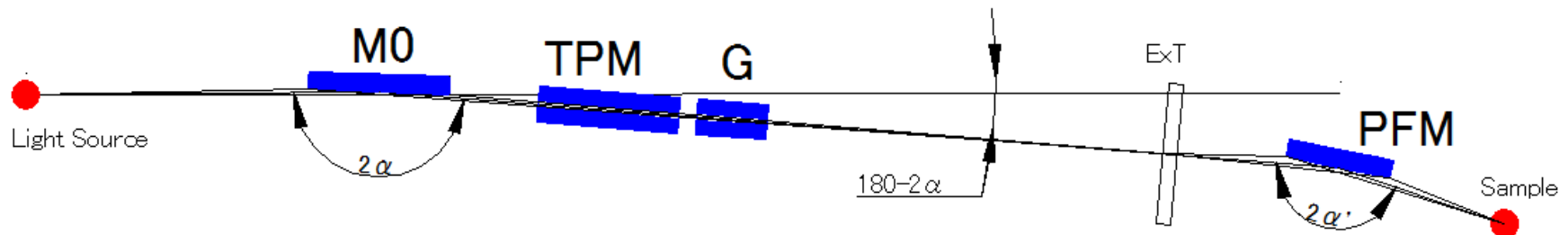
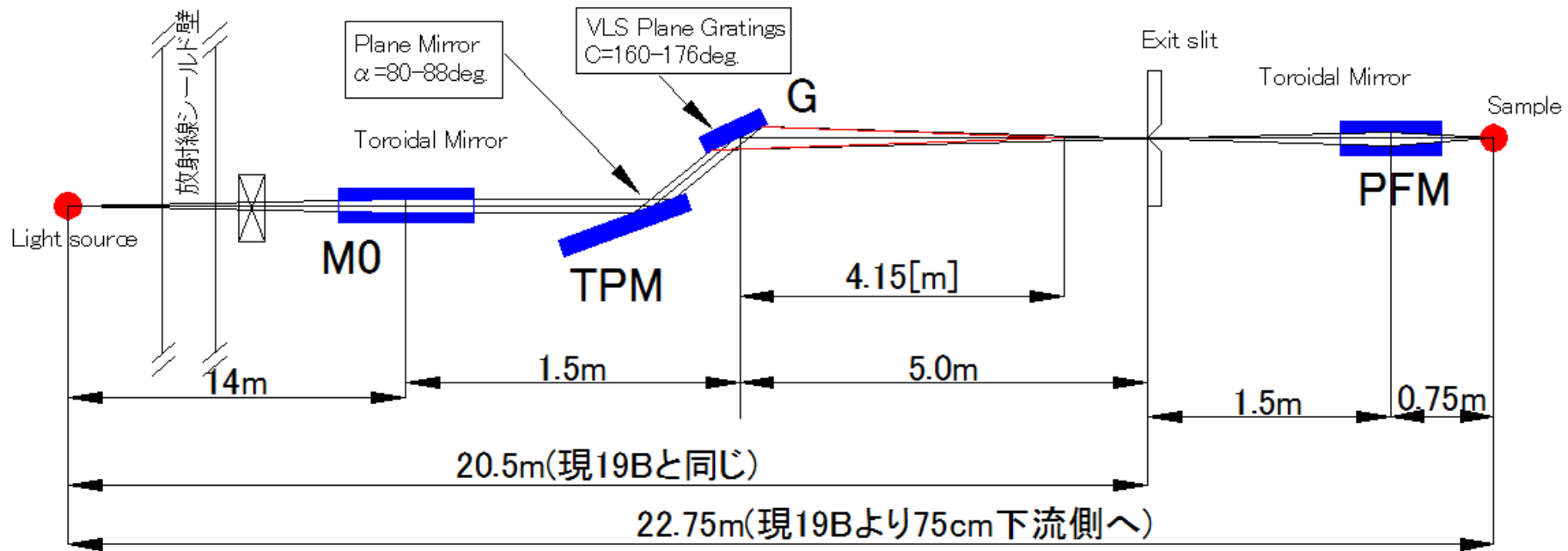
放射線シールド壁位置

放射線シールド壁の位置

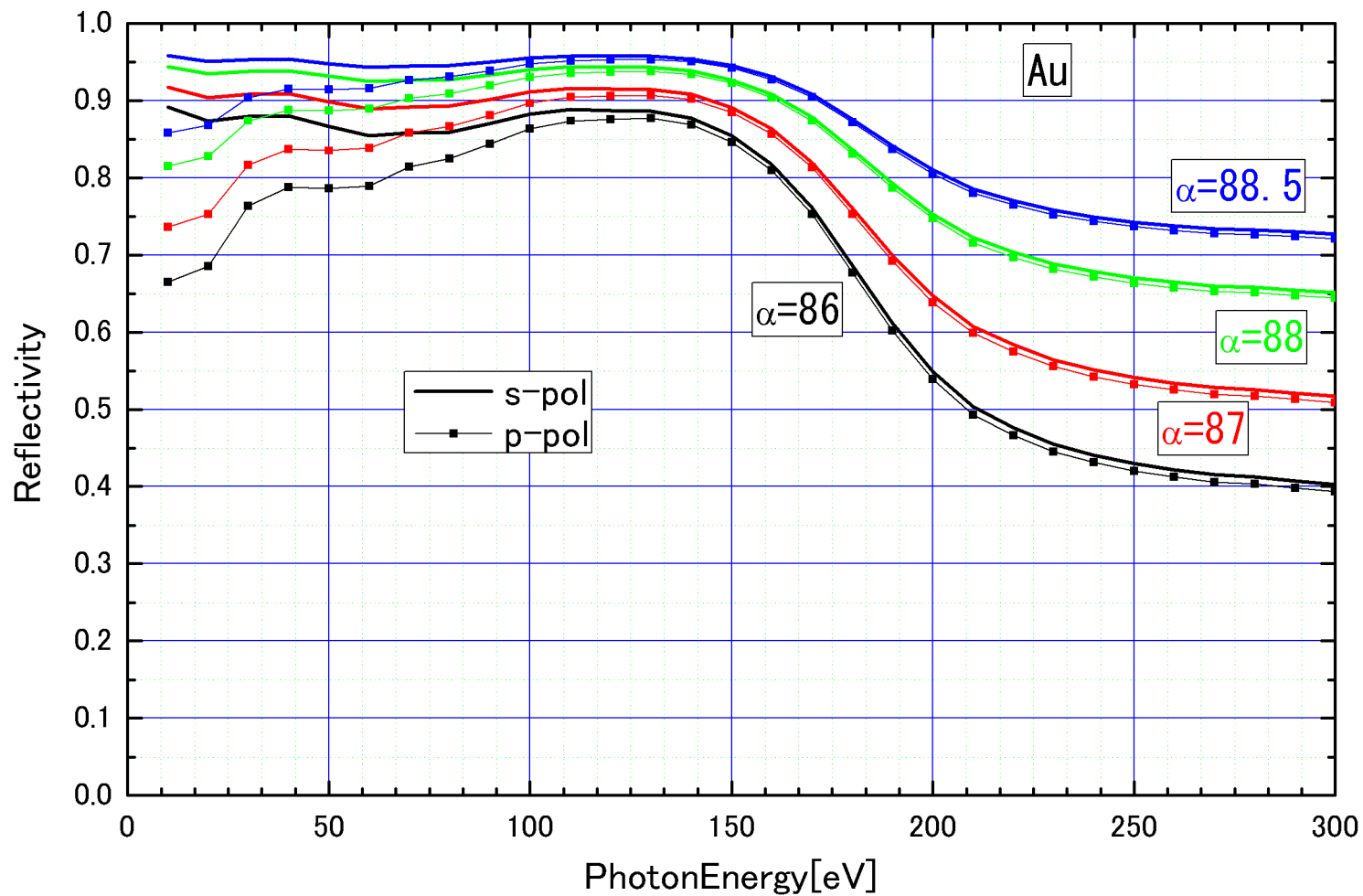


光源より約14[m]

# 分光器 (VLS-PGM) 全体の模式図



# M0の仕様 (鏡の反射率)



# M0の仕様 (光源の発散)

○電子 :  $\sigma_h=721$  [um]、 $\sigma_v=30$  [um]、 $\sigma_h'=68$  [um]、 $\sigma_v'=11$  [um]

○ID19 D面 :  $\lambda u=164$  [mm]、 $N=14$ 、 $L=2.296$  [m]

	Size[um]		Div.[urad]		Div.(4Σ )[urad]		M0距離= 14 [m]での光の大きさ		M0長さ[mm]			
	Σh	Σv	Σh'	Σv'	4Σh'	4Σv'	Sh[mm]	Sv[mm]	入射角			
hw	Σh	Σv	Σh'	Σv'	4Σh'	4Σv'	Sh[mm]	Sv[mm]	86	87	88	88.5
10	724	67.1	178	165	712	660	9.97	9.24	143	190	286	381
20	722	52	135	117	540	468	7.56	6.55	108	144	217	289
30	722	45.9	117	95.5	468	382	6.55	5.35	94	125	188	250
40	722	42.4	107	82.9	428	332	5.99	4.64	86	114	172	229
50	722	40.3	100	74.3	400	297	5.60	4.16	80	107	160	214
100	721	35.5	85.6	53.1	342	212	4.79	2.97	69	92	137	183
150	721	33.8	80.2	43.8	321	175	4.49	2.45	64	86	129	172
200	721	32.9	77.3	38.4	309	154	4.33	2.15	62	83	124	165
300	721	31.9	74.3	32	297	128	4.16	1.79	60	80	119	159

# M0の仕様(大きさ)

光像の大きさは、最大で $10 \times 10$  [mm]程度。

これを受ける鏡の大きさは、

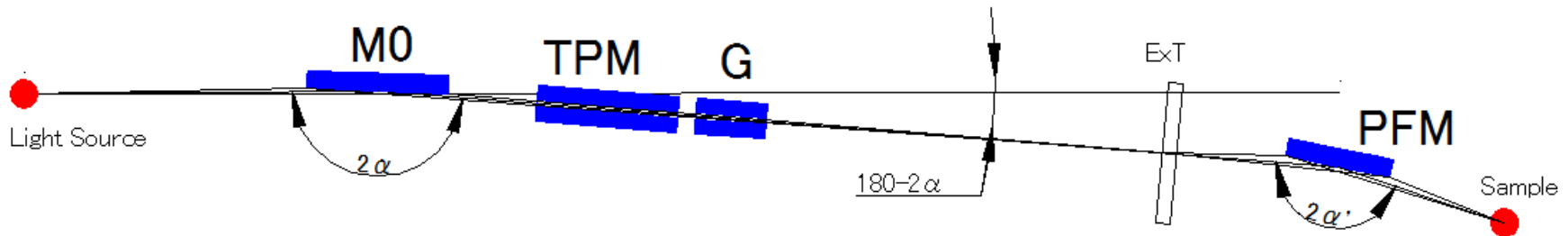
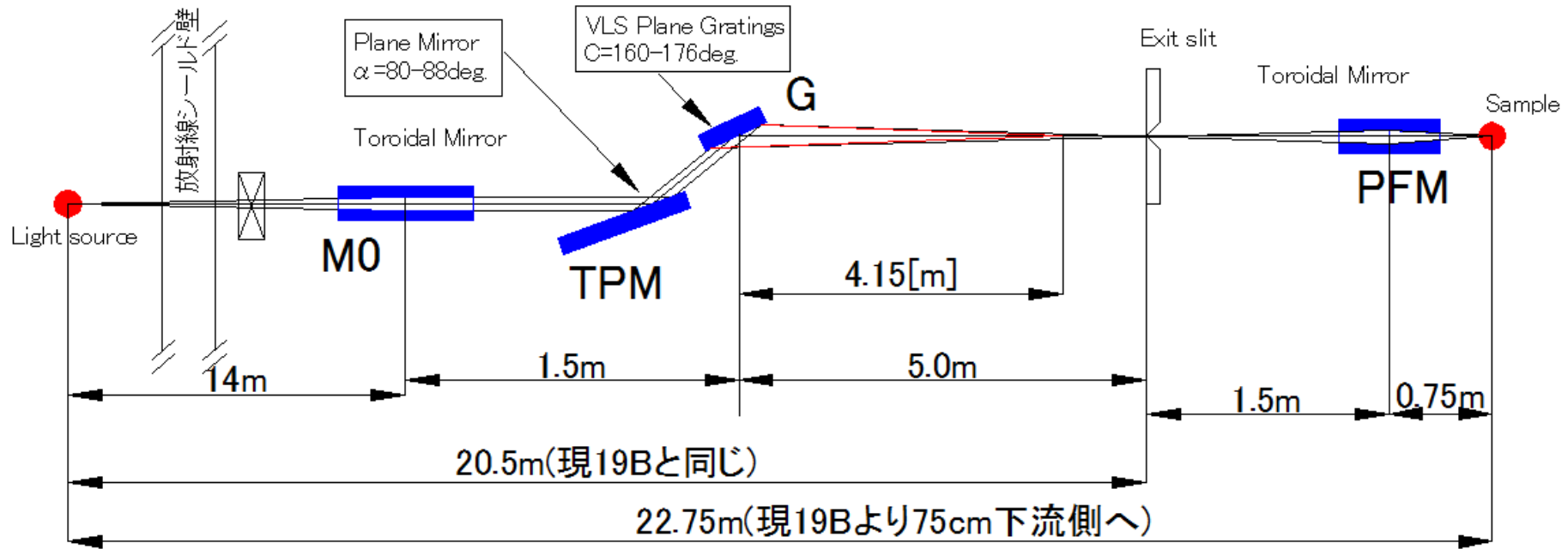
○入射角88.5度で、有効長さ380 [mm] × 有効巾10 [mm]  
(∴外形長さ400 [mm] × 外形巾40 [mm]程度)

○入射角88度で、有効長さ290 [mm] × 有効巾10 [mm]  
(∴外形長さ310 [mm] × 外形巾40 [mm]程度)

○入射角87度で、有効長さ200 [mm] × 有効巾10 [mm]  
(∴外形長さ230 [mm] × 外形巾40 [mm]程度)

とりあえず、入射角88度で検討。

# 分光器 (VLS-PGM) 全体の模式図



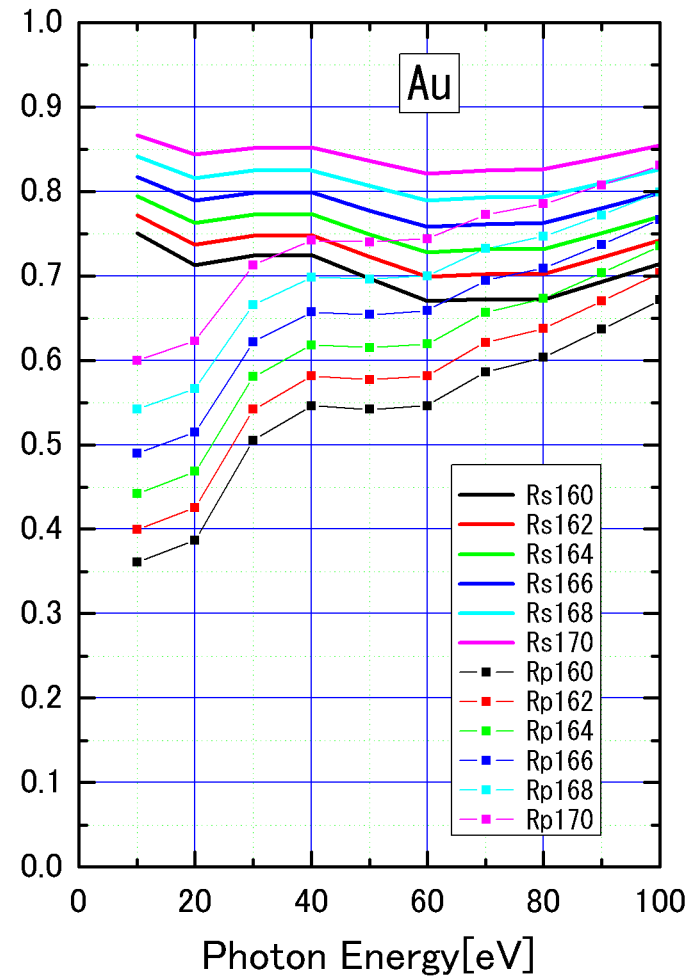
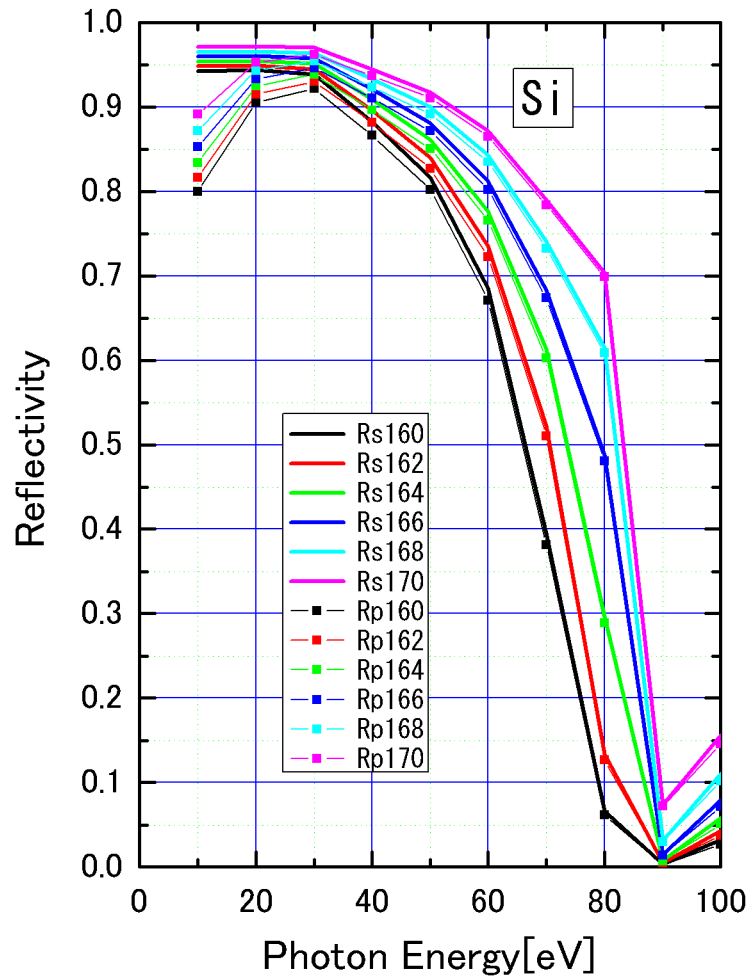
# 連続偏角可変機構の偏角範囲

○現実的には、TPM長さ300 [mm]、回折格子の長さ $\approx$ 100 [mm]として、

約160～約176度

(詳細は省略)

# 低エネルギー領域での反射率 (Si、Au)



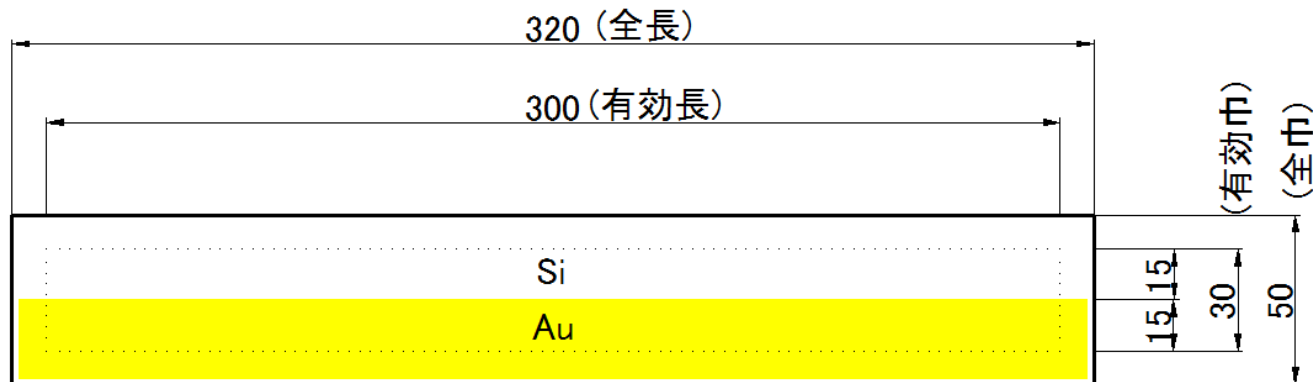


# 鏡の反射物質とエネルギー領域

s、p偏光反射率の差が小さい、  
反射率が高い、という要請から、

- (1) 10–70[eV]では、Si
- (2) 70–300[eV]では、Au

例えばTPMの反射面

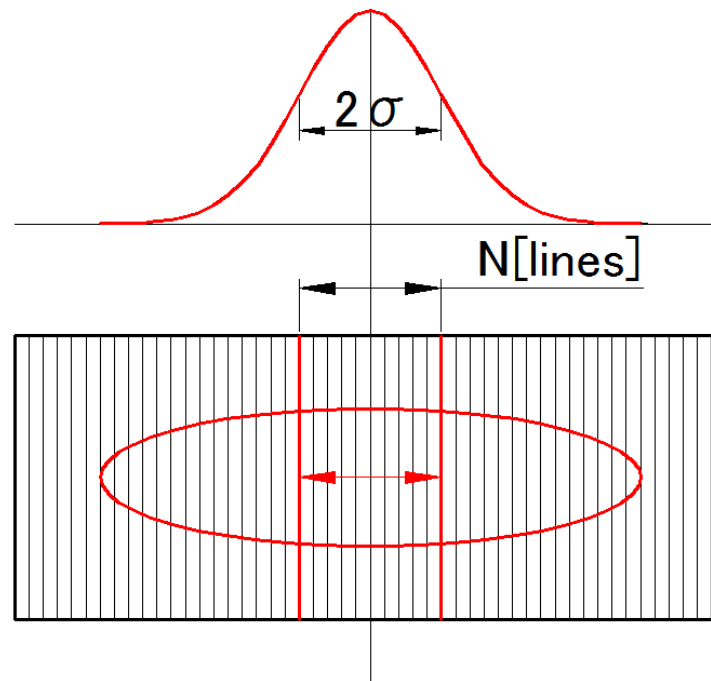


回折格子では、刻線の溝構造(深さ)を変える必要があるの  
で、このやり方は有効でない。

# 回折限界による分解能

$$\text{最大分解能} = \left( \frac{E}{\Delta E} \right)_{\max} \approx N \quad \text{照射領域の総刻線数}$$

刻線密度が小さい時、入射角が小さい時、  
無視できない場合がある。



# VLS平面回折格子の刻線密度係数 (今回の決め方)

○刻線密度を  $D = D_0 + D_1 Y + D_2 Y^2 + D_3 Y^3$  と表した時、

$D_0, D_1, D_2, D_3$  をここでは、刻線密度係数と呼ぶ。

○最小偏角160度程度で10[eV]に対応

→中心刻線密度 ( $D_0$ ) = 200 ~ 300 [1/mm]

前スライドで述べた状況になる。

○そこで、次のようにして刻線密度係数の決める。

「回折限界で決まる分解能が、  
長さ4[m]のIDに対しても(現ID長さは2.3[m])、  
全領域で~10,000以上となる。」

# VLS回折格子の刻線パラメーター の決定

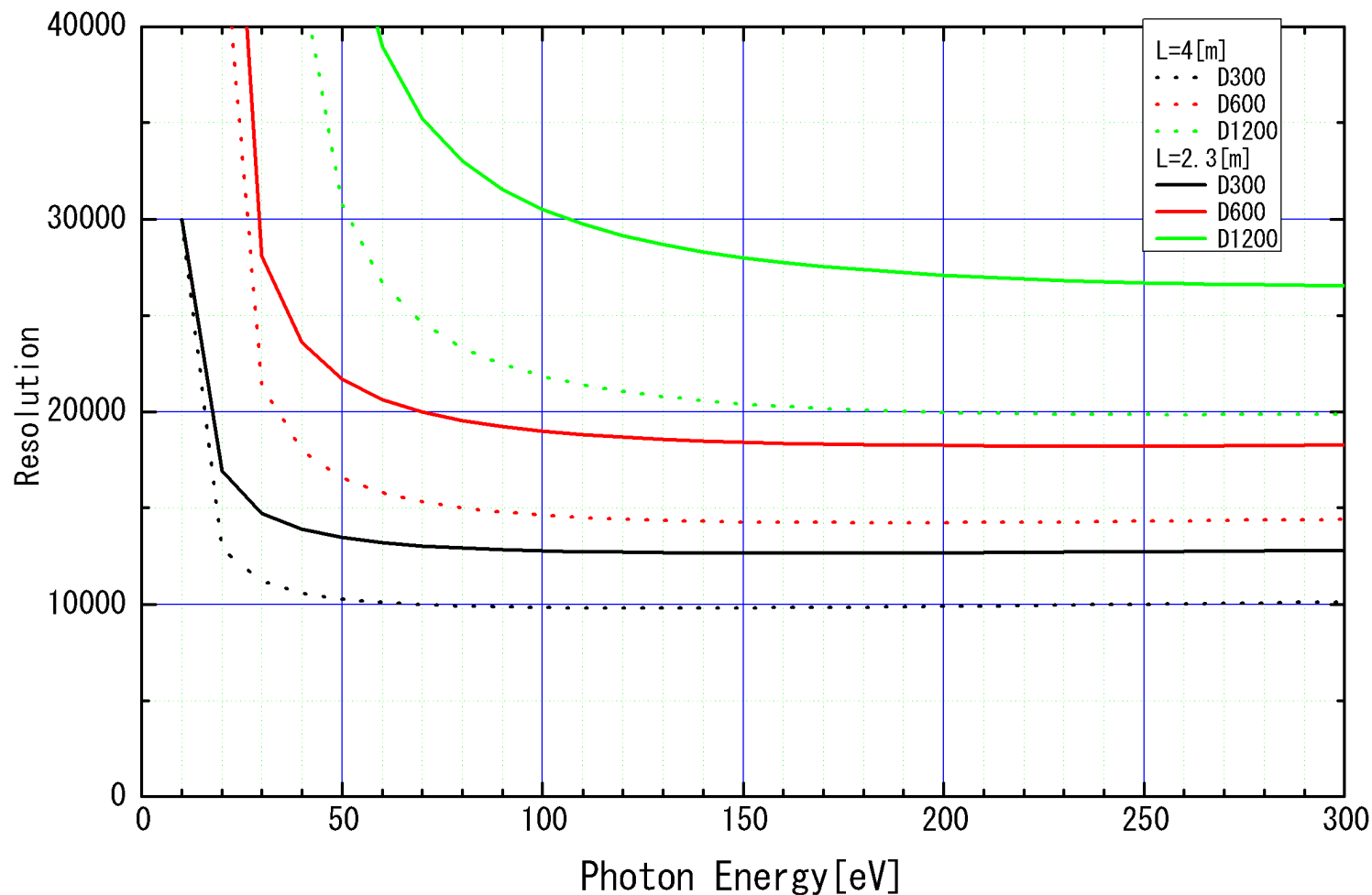
記号 (中心刻 線密度 [1/mm])	偏角[deg] 光子エネルギー[eV]	入射/出射 アーム長 [mm]	刻線密度係数
G1 (300)	偏角163度@10[eV] 偏角176度@280[eV]	-4, 150/5, 000	$D_0=300$
			$D_1=0.1176$
			$D_2=3.4E-05$
			$D_3=9E-09$

入射角は87.5—89.12度

# VLS回折格子の刻線密度係数

記号 (中心刻 線密度 [1/mm])	偏角[deg] 光子エネルギー[eV]	入射/出射 アーム長 [mm]	刻線密度係数
G1 (300)	163度@10[eV] 176度@280[eV]	-4, 150/5, 000	D0=300
			D1=0. 1176
			D2=3. 4E-05
			D3=9E-09
G2 (600)	163度@20[eV] 176度@560[eV]		D0=600
			D1=0. 2351
			D2=6. 8E-05
			D3=2E-08
G2 (1200)	163度@40[eV] 176度@1120[eV]		D0=1200
			D1=0. 4700
			D2=1. 35E-04
			D3=3E-08

# 回折限界による分解能 (IDの長さL=4[m]と現在のIDの長さL=2.3[m]の場合)



(注) 回折格子の長さ100[mm]とした。

# レイトレース (モンテ・カルロ法) による スリット巾で決まる (最大) 分解能の評価

- 光源サイズ
- 刻線密度の高次係数 ( $D_2$ 、 $D_3$ )
- 光学素子の形状誤差 (スロープエラー)
- 集光鏡の収差

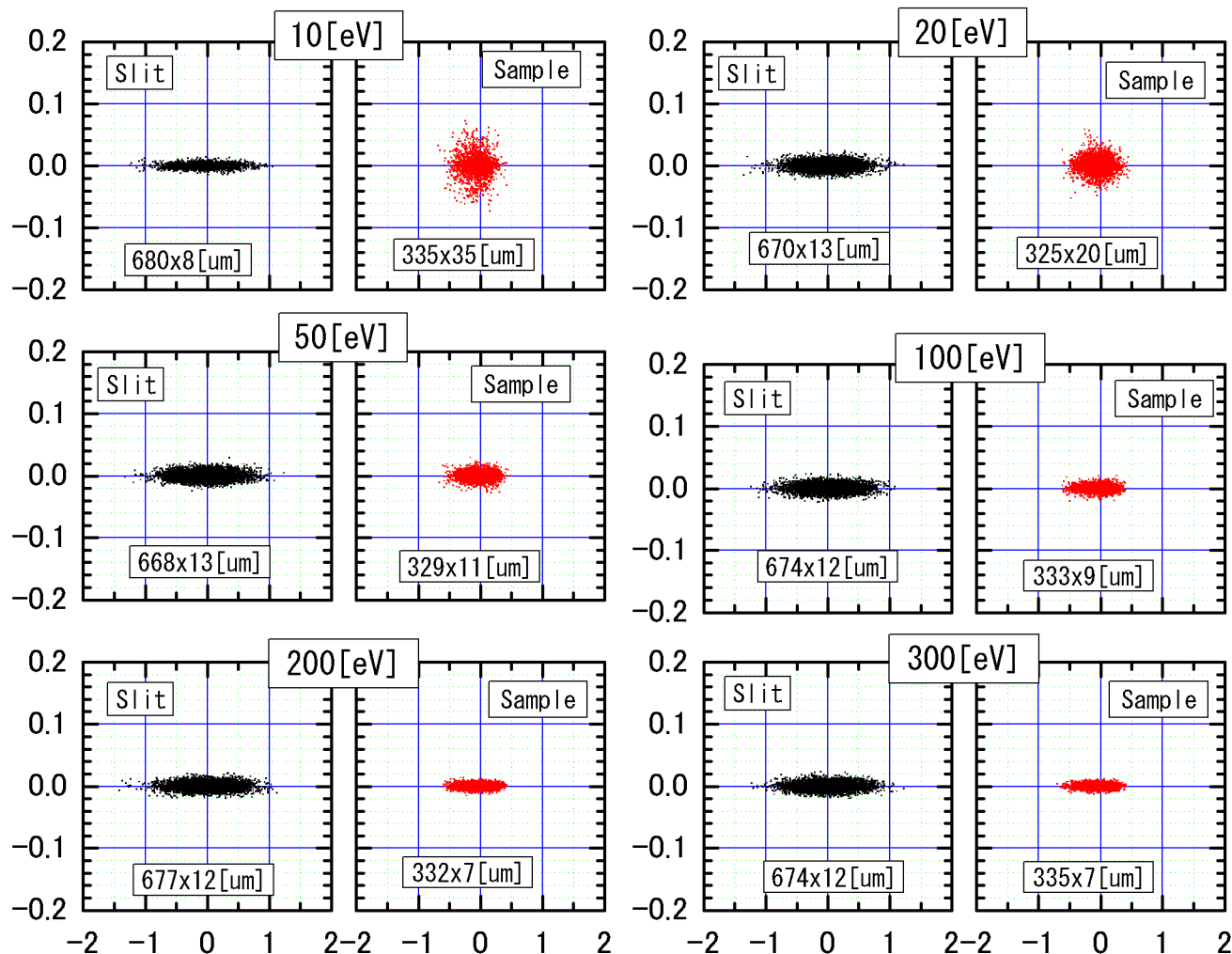
などの出射スリット上での光像サイズに対する寄与を含めて評価。

# 光学素子リスト

記号	表面形状	偏角 [度]	有効サイ ズ[mm]	反 射 物 質		Slope Error [urad]	アーム長 入射/出射 [m]	曲率半径
M0	トロイダル	176	290 × 10	Au	Tan.	2	14/6.5	254 [m]
					Sag.	10	14/5.65	281 [mm]
TPM	平面	163- 176	300 × 15	Au & Si	Tan.	<u>0.5</u>	∞	∞
					Sag.	10	∞	∞
G1	平面 (300 [1/mm])	163- 176	100 × 15	Si	Tan.	<u>0.5</u>	-4.15/5	∞
G2	平面 (600 [1/mm])			Au				
G3	平面 (1200 [1/mm])			Au	Sag.	10		∞
PFM	トロイダル	176	100 × 10	Au	Tan.	2	1.5/0.75	28.65 [m]
					Sag.	10	1.5/0.75	34.9 [mm]



# レイトレース結果 ( $D_0=300$ 、ID長=2.3 [m] の例)

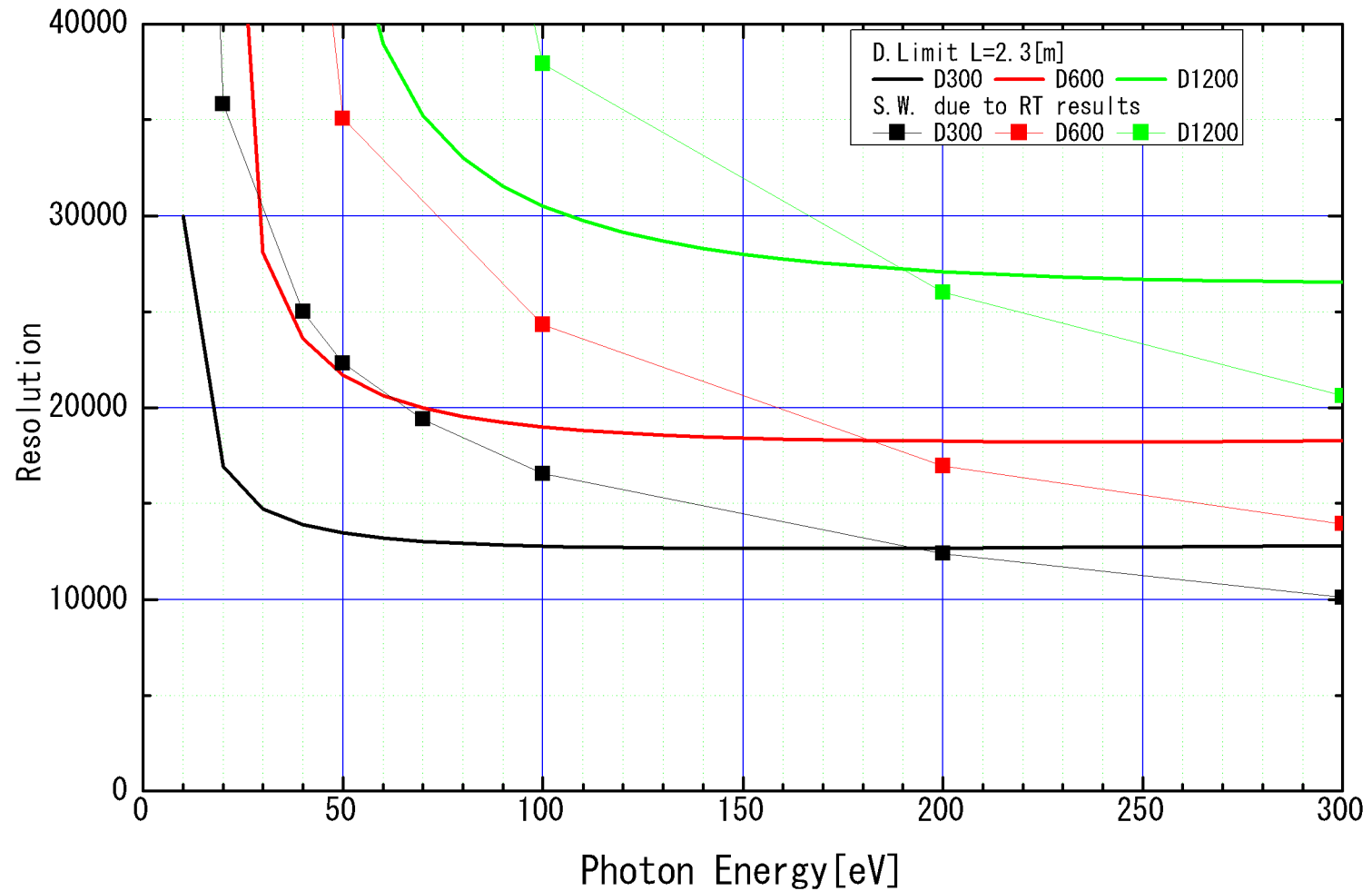


Slit上  
(h) 670~680  
(v) 12~13 [ $\mu\text{m}$ ]

sample上 :  
(h) 330~340  
(v) 7~35 [ $\mu\text{m}$ ]

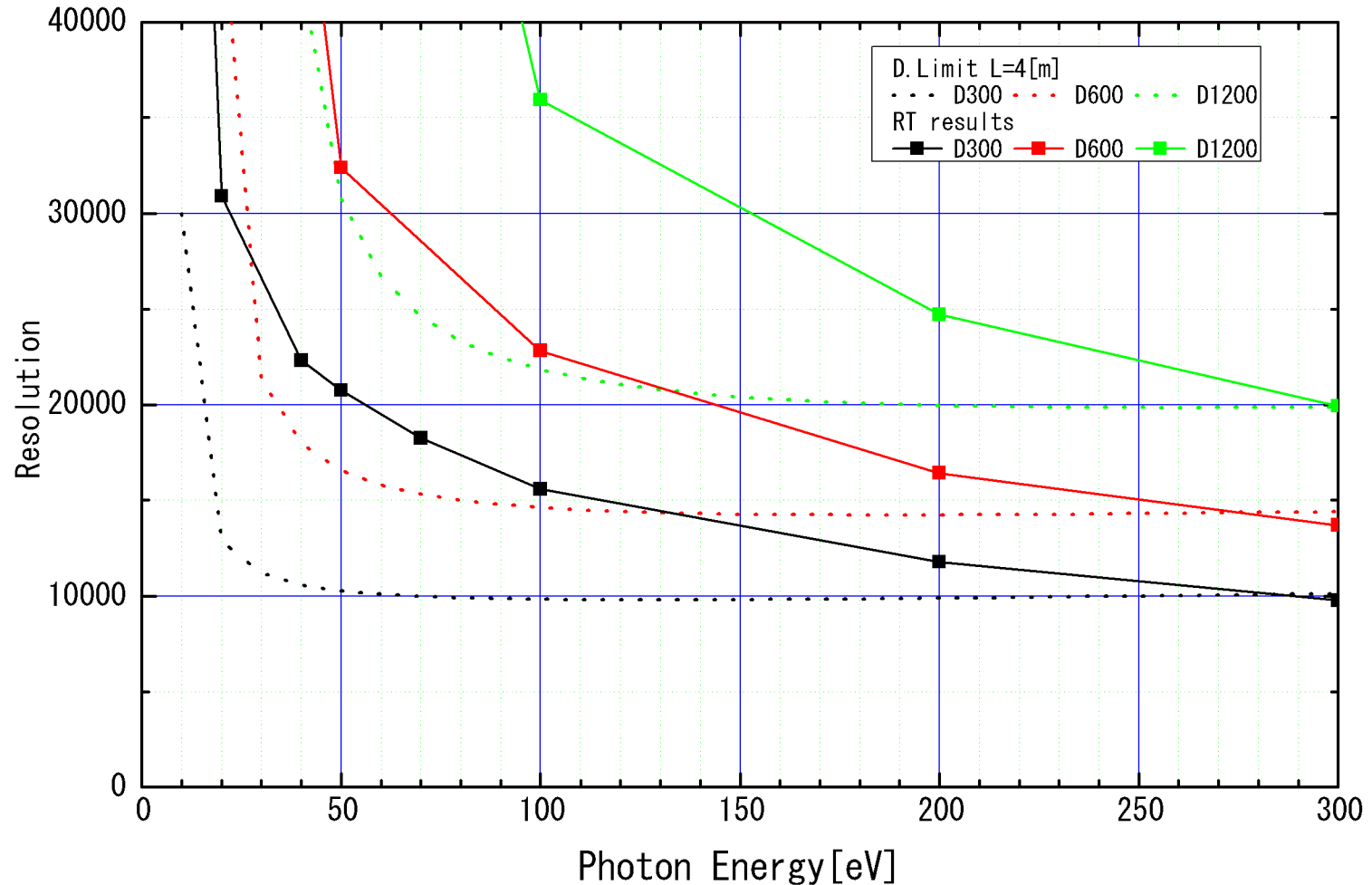
# レイトレース結果 (最大分解能)

## $L=2.3$ [m]

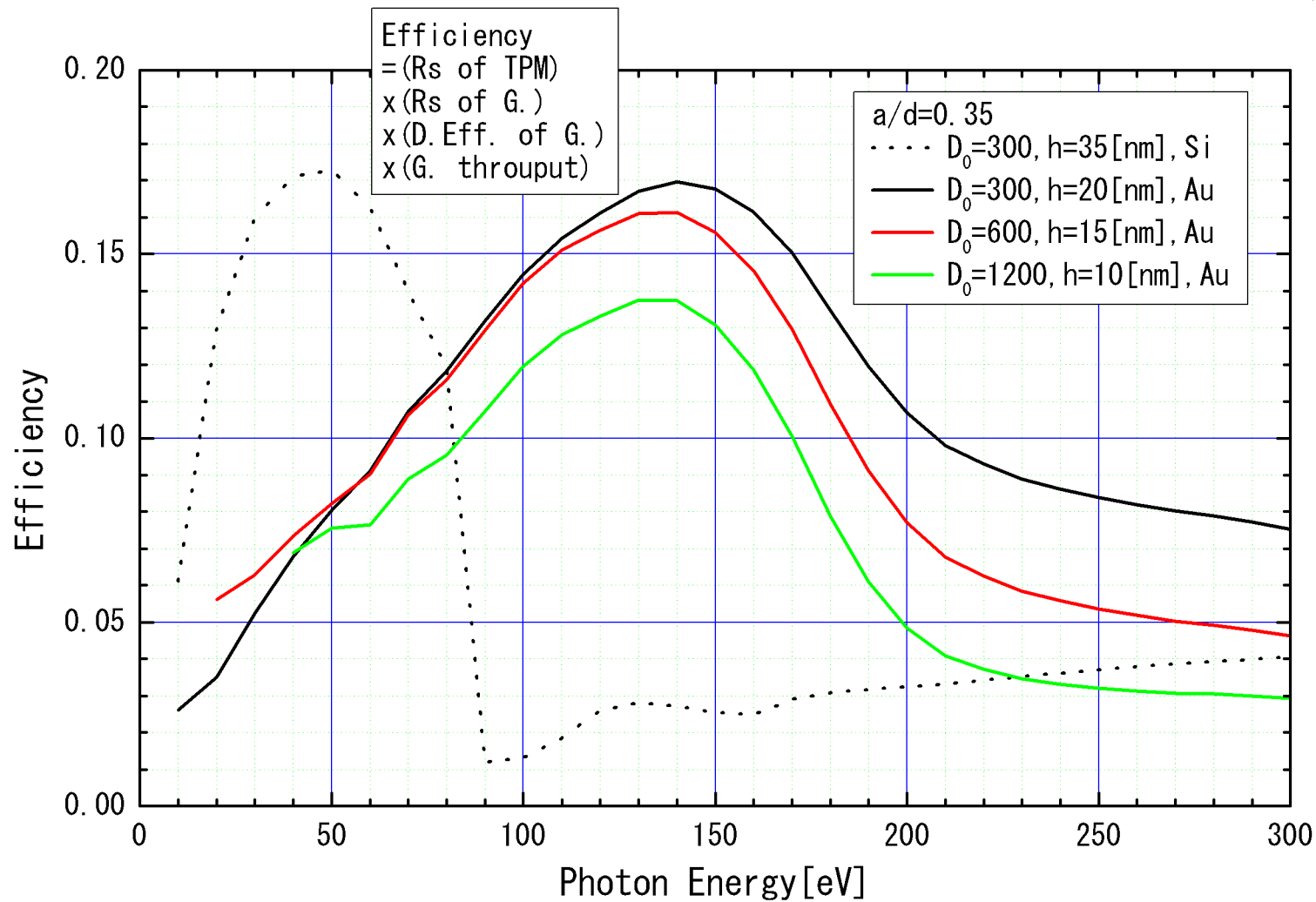
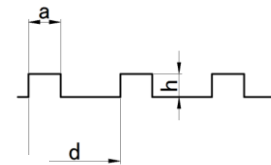


# レイトレース結果 (最大分解能)

## L=4 [m]

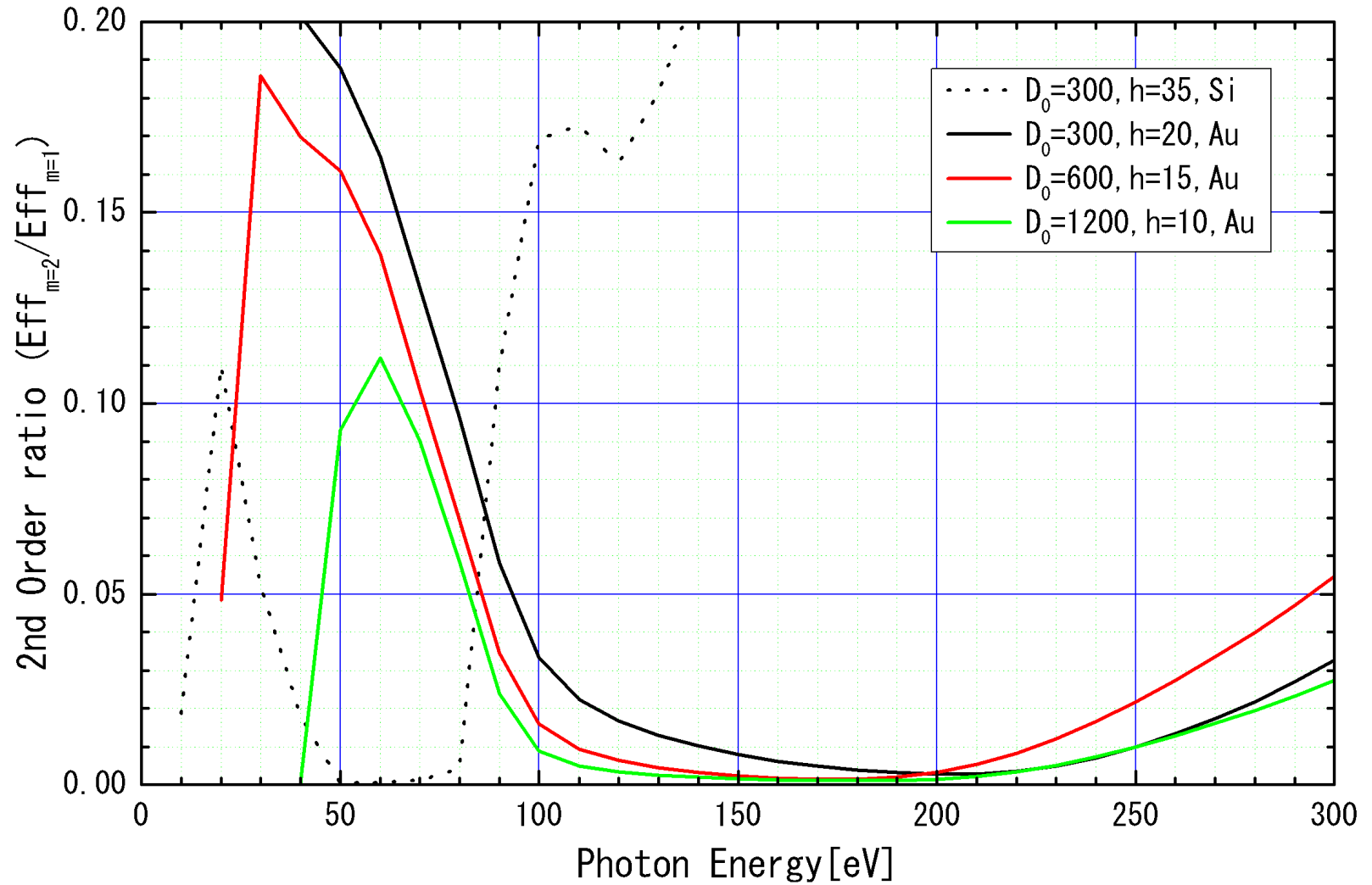


# 明るさ (効率)



- 回折効率の計算はスカラー法なので、高エネルギー側は小さく評価される。
- 反射率はs-偏光の値を用いた。

# 2次光の比



# まとめ

- 分光器型とレイアウトを提案
  - \* 入射スリットなし連続偏角可変型VLS-PGM型
  - \* 現19Bより下流側750[mm]がサンプル位置となるレイアウト
- 分光系の分解能、効率の計算評価  
中心刻線密度=300[1/mm]の回折格子だけで、  
全領域（10-300[eV]）で分解能10,000以上となる光学配置を提案。  
（[注]今回の光学配置は一つの案にすぎない。）
- が、明るさや、高次光成分の少なさを確保するためには、  
刻線深さや反射物質が異なる回折格子を2種類以上用意したい。
- 高次光成分除去をさらに行うために、  
準周期IDや準周期回折格子を使うことも考えられる。

# 補足：準周期回折格子について

Ref. N. I. M A Vol. 468 P313 (2001)

M. Fujisawa et al.

“Quasi-periodic grating for a monochromator at the Photon Factory BL19B”

- PF BL19リボルバーアンデュレーター-C面 ( $\geq 50$  [eV])
- 中心刻線数800本の回折格子
  - 「通常周期回折格子」と「準周期回折格子」の2次光強度の比較
- 日立製作所製
- Au4f内殻順位光電子スペクトル強度

補足：準周期回折格子について：問題点

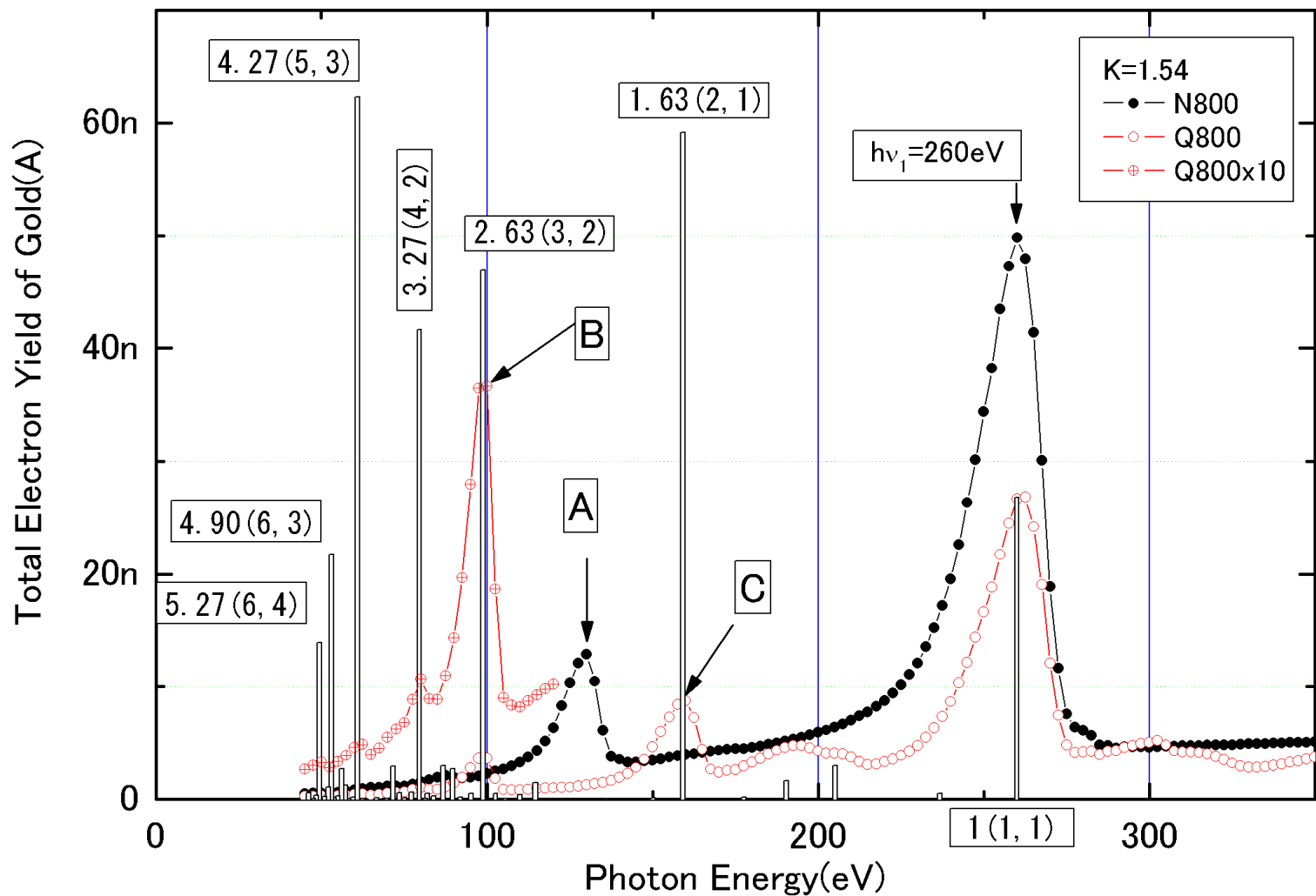
○ 機械式ルーリングで製作

軟X線用回折格子のルーリングはホログラフィックがほとんどである現在、

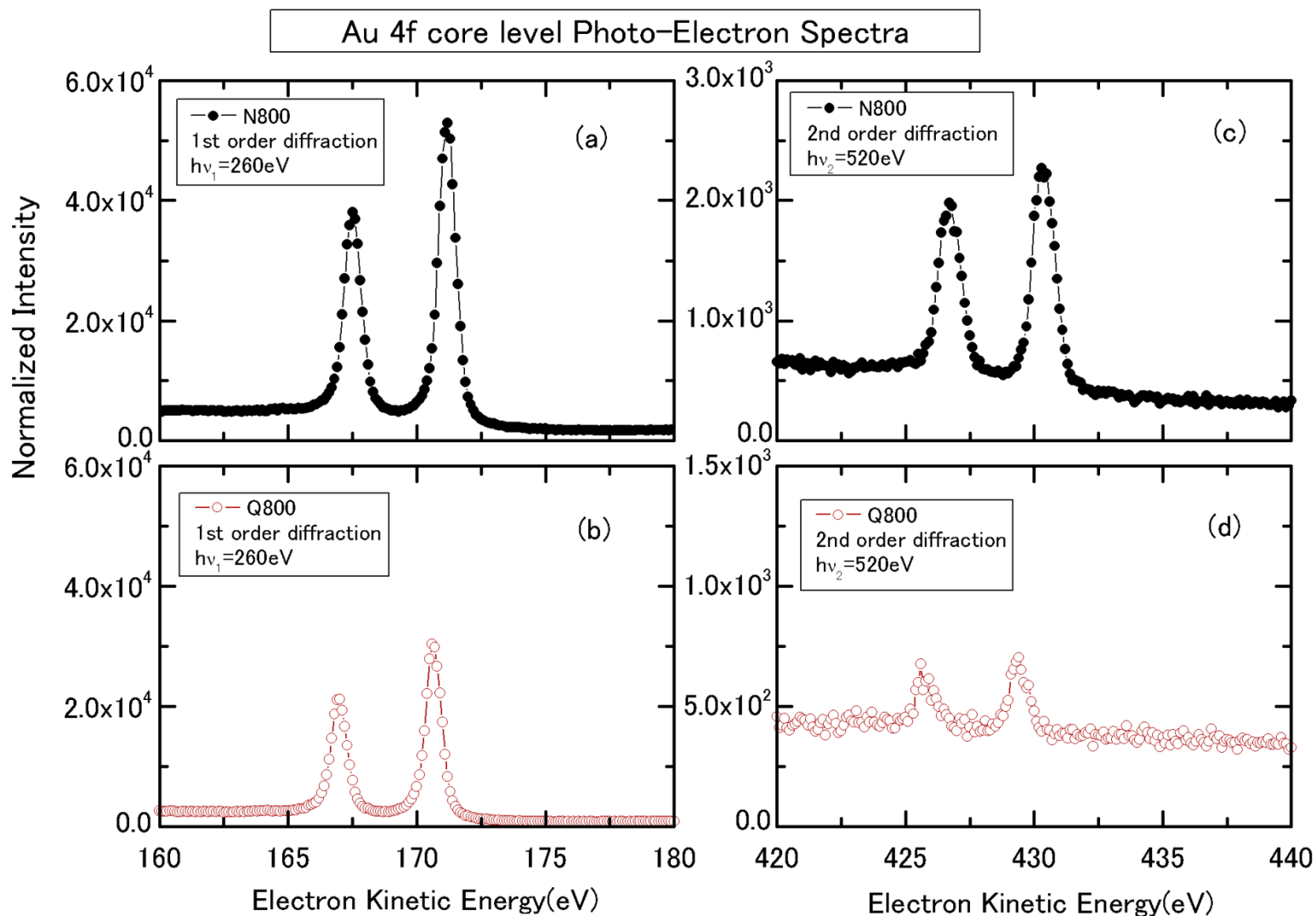
- (\*) メーカーが対応できるか？
- (\*) 価格は？



# 補足：準周期回折格子について：分光スペクトル



# 補足：準周期回折格子について：Au4f内殻準位PES例



# 補足：準周期回折格子について：強度比まとめ

