

アンジュレータ

田中隆次

理研放射光センター

Outline

- アンジュレータ工学一般論(2節)
- 真空封止型アンジュレータ(3節)
- アンジュレータコミッショニング(4節)

Outline

- アンジュレータ工学一般論
- 真空封止型アンジュレータ
- アンジュレータコミッショニング

アンジュレータとは?

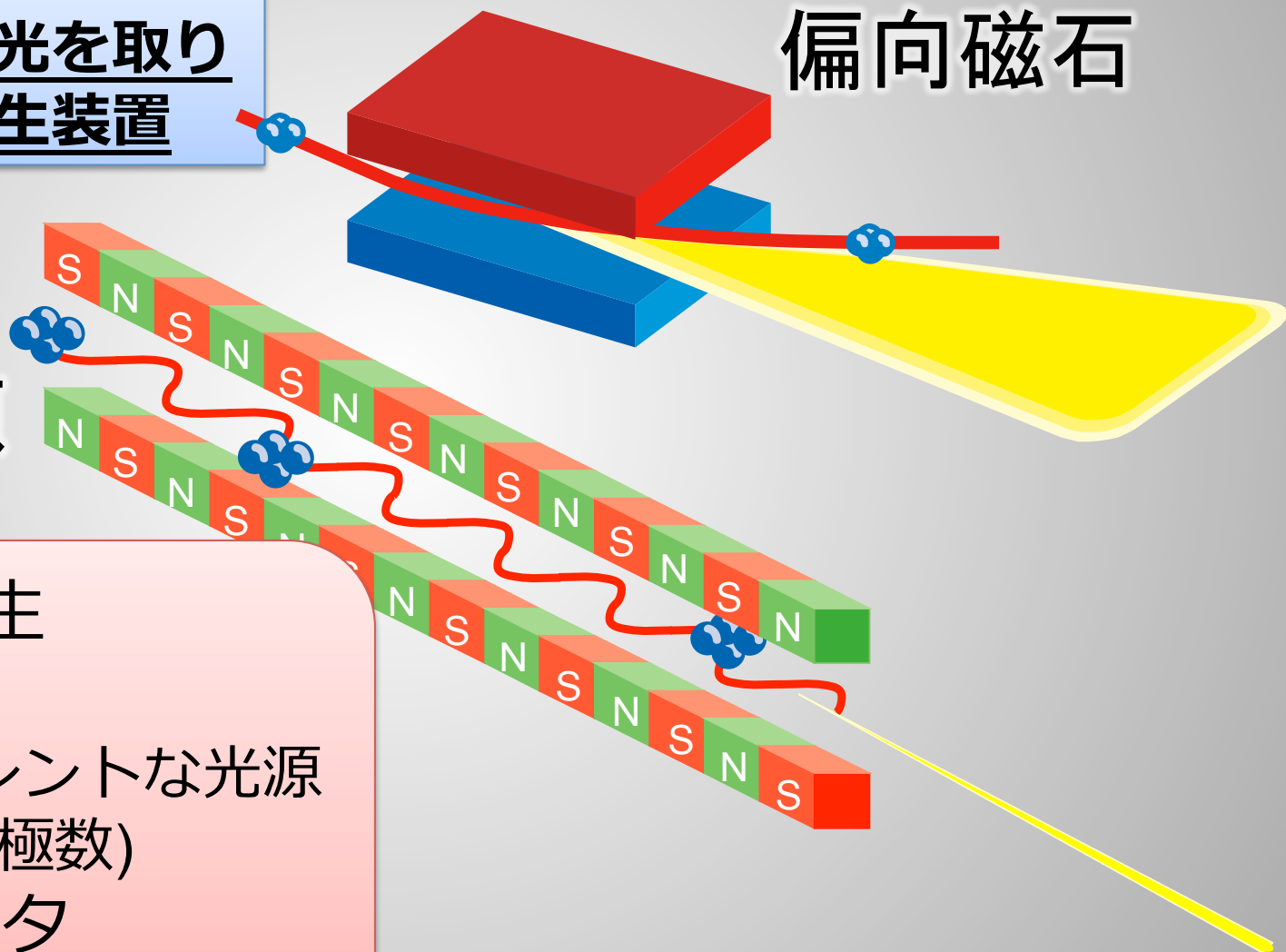
放射光源
電子を曲げて放射光を取り出すための磁場発生装置

偏向磁石

挿入光源

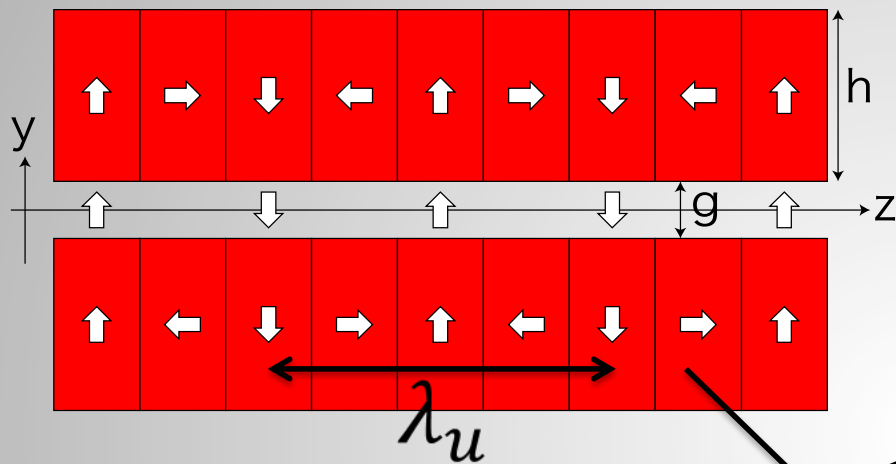
周期的磁場発生

- ウィングラ
 - ✓ インコヒーレントな光源
(=偏向磁石×極数)
- アンジュレータ
 - ✓ コヒーレントな光源

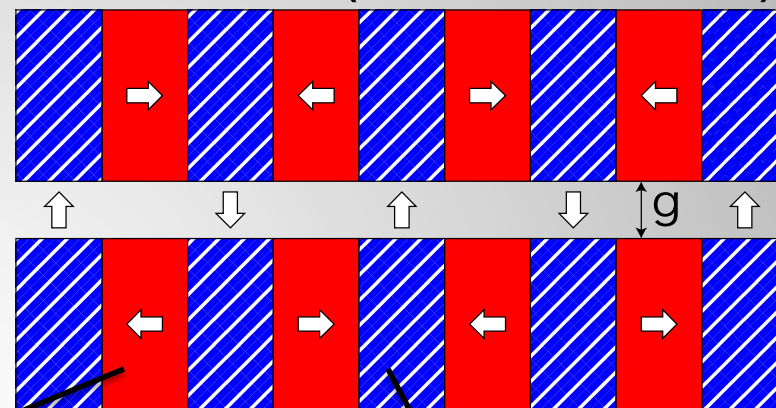


周期的磁場の発生(磁気回路)

永久磁石型(ナリバック)

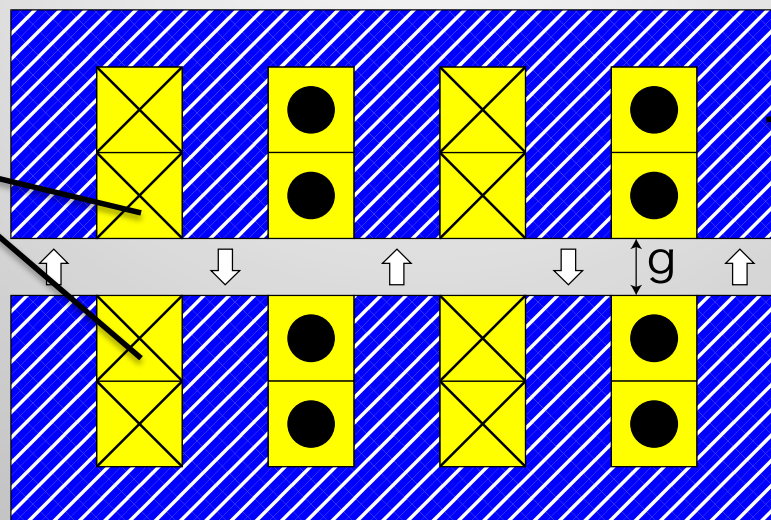


永久磁石型(ハイブリッド)



永久磁石

コイル



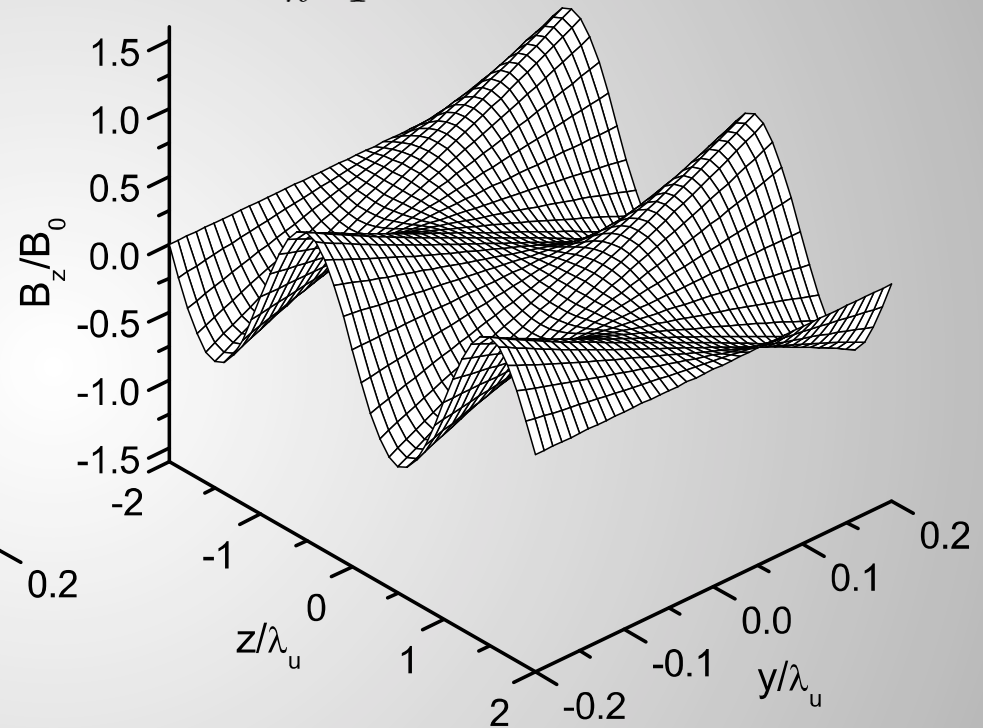
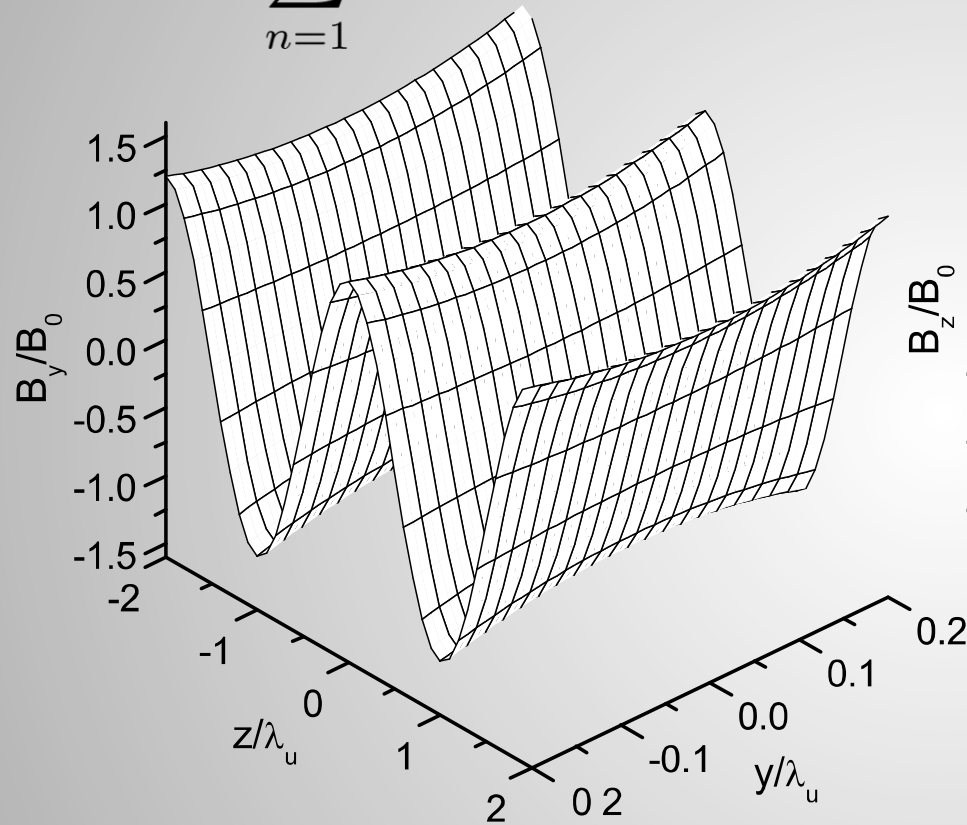
磁極材

電磁石型

ハルバック型磁気回路の磁場分布

$$B_y = \sum_{n=1} B_{n,0} \cos nk_u z \cosh nk_u y$$

$$B_z = \sum_{n=1} B_{n,0} \sin nk_u z \sinh nk_u y$$



- 垂直方向へオフセットがあるとき ($|y| > 0$)
- ✓ 垂直磁場振幅大 → K値エラー
 - ✓ Z方向への周期的磁場 → 収束作用

磁場振幅を決める要因

$$B_{n,0} = 2B_r F_n(4) G_n H_n$$

永久磁石の
残留磁束密度

3つの因子の積

$$F_n(M) = \frac{\sin n\pi/M}{n\pi/M}$$

$$G_n = e^{-\pi n g / \lambda_u}$$

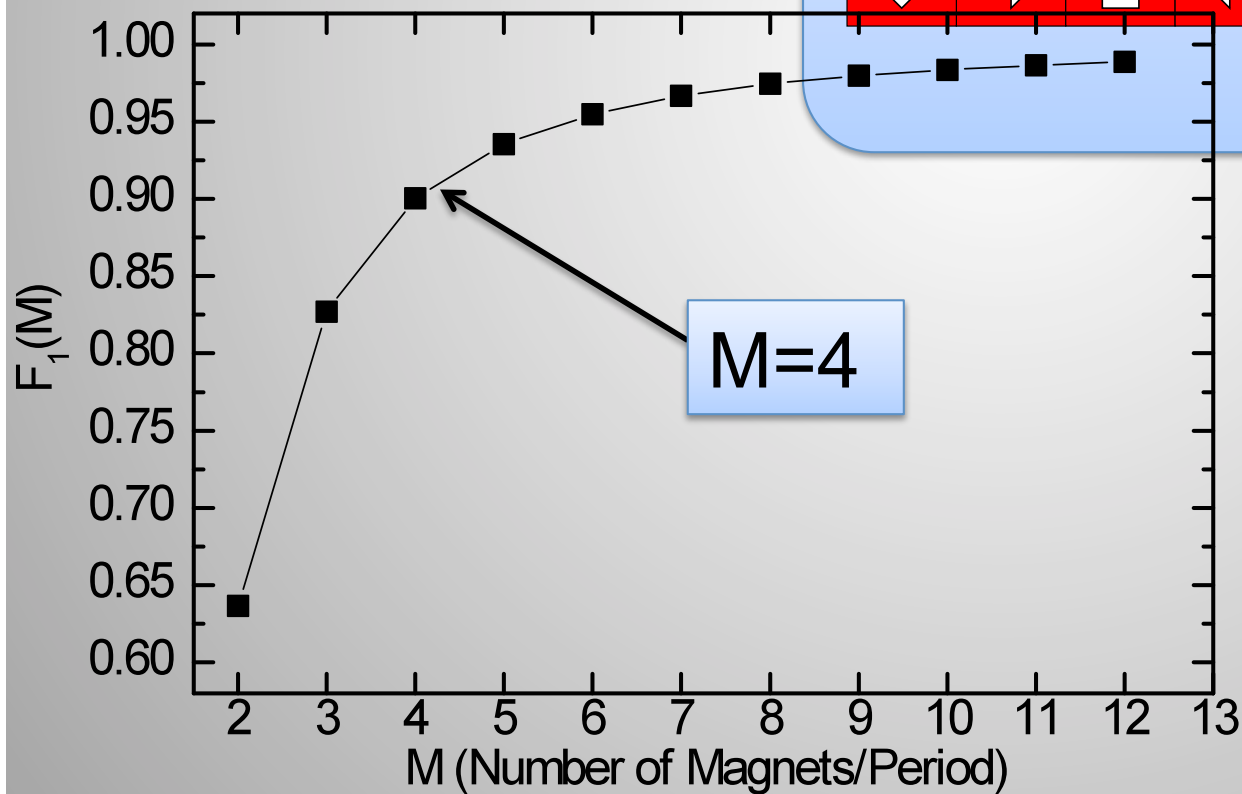
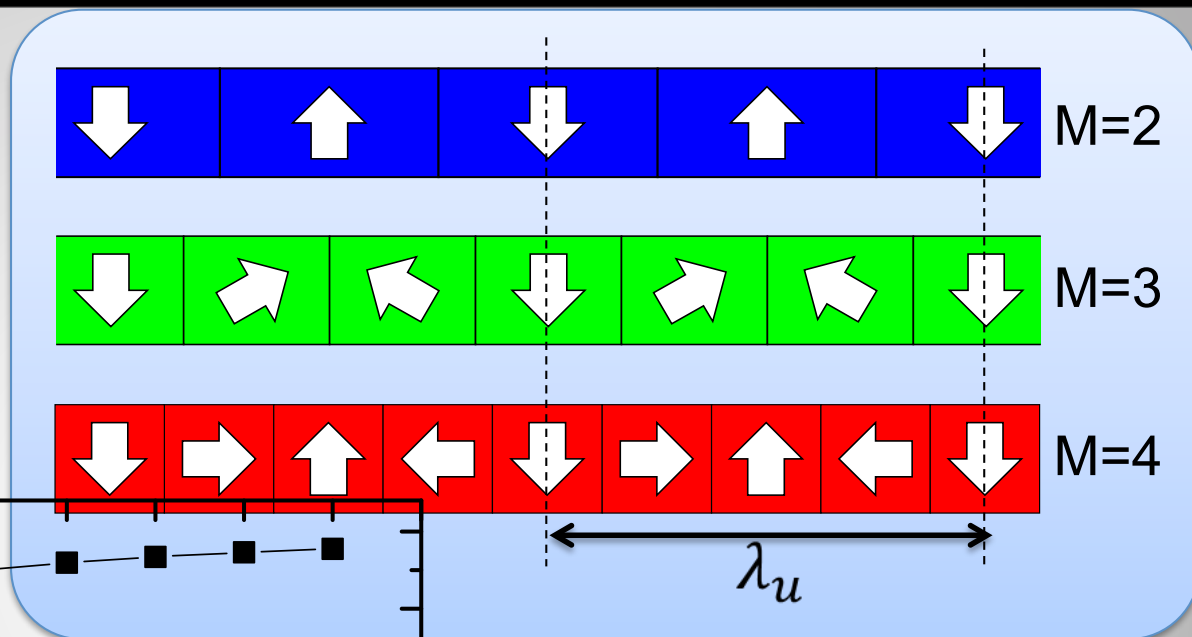
$$H_n = 1 - e^{-2\pi n h / \lambda_u}$$

周期あたりの磁石個数

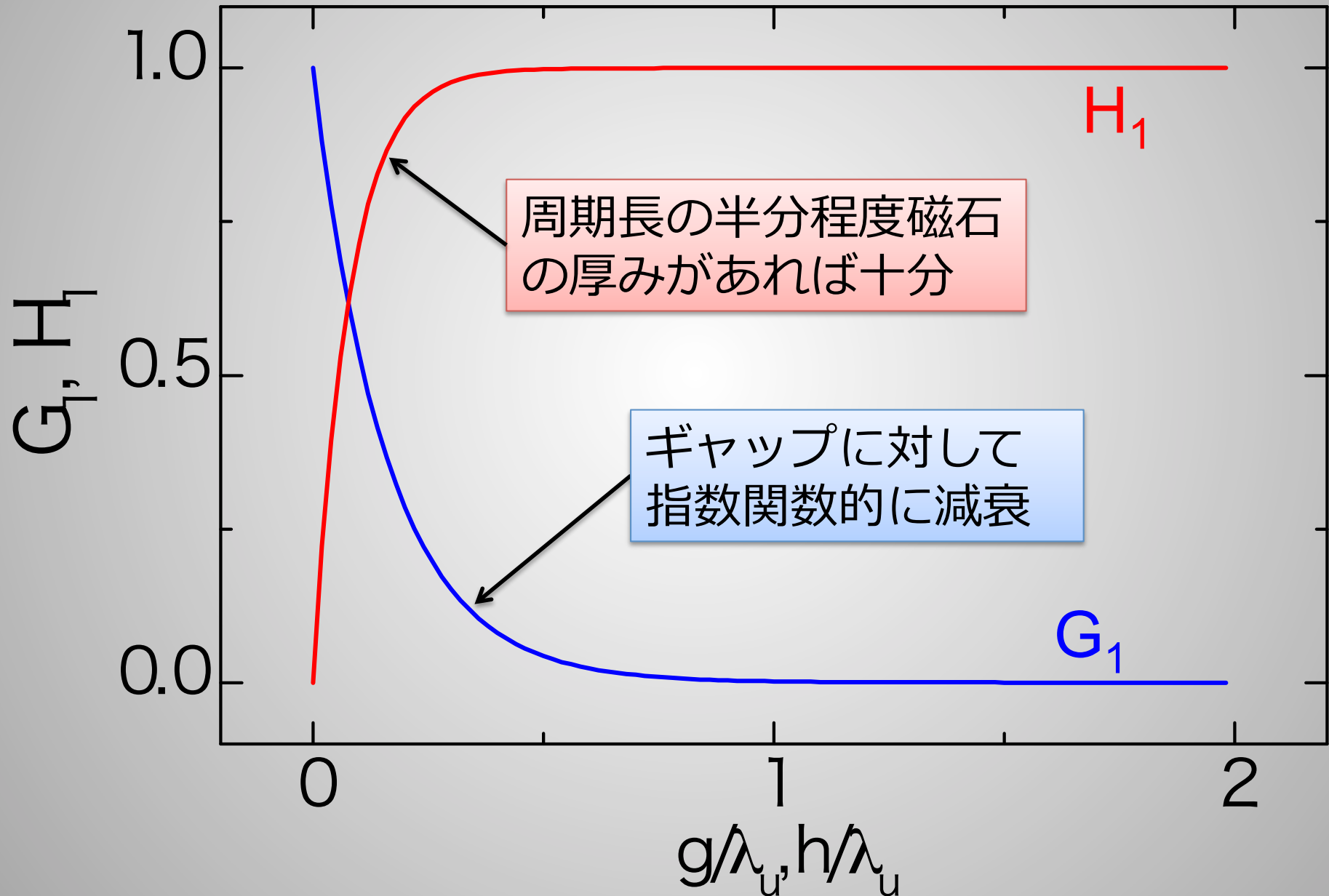
ギャップ開による減衰

磁石高さの影響

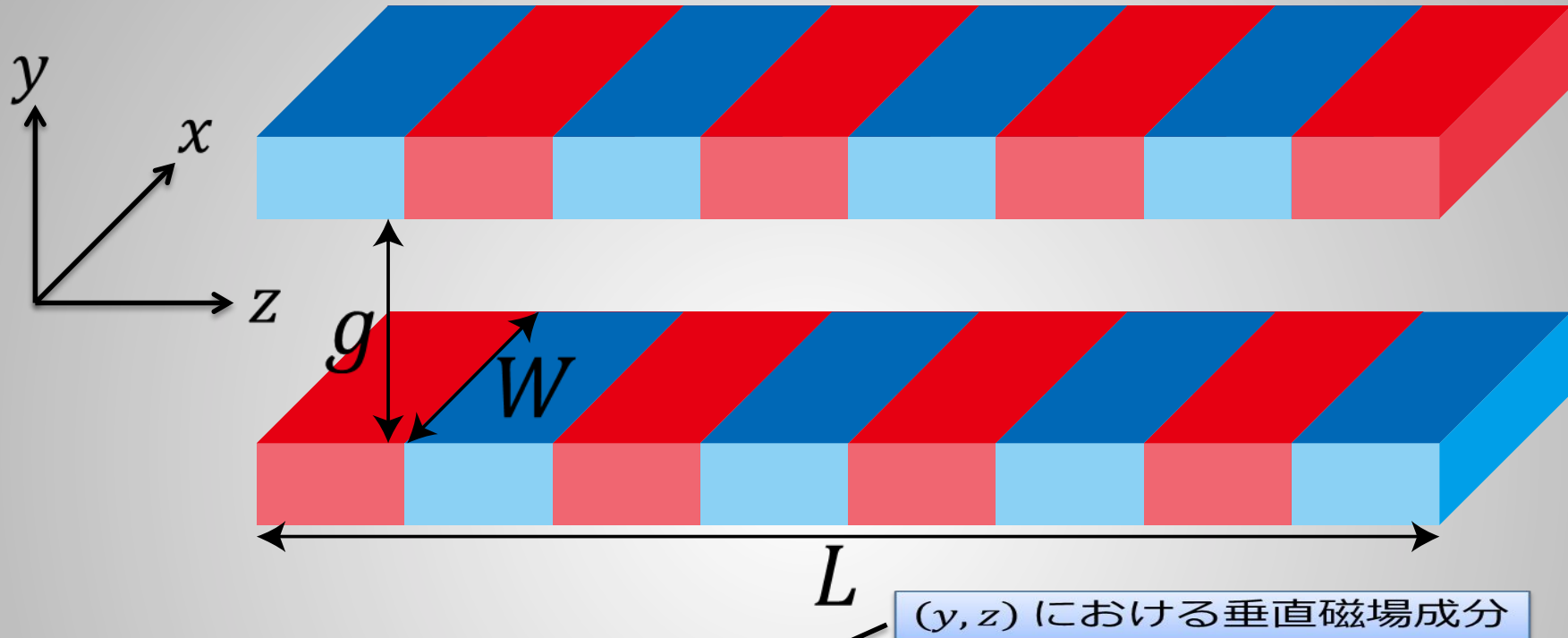
$F_n(M)$: 周期あたりの磁石個数



G_n & H_n : ギャップ及び磁石高さの影響



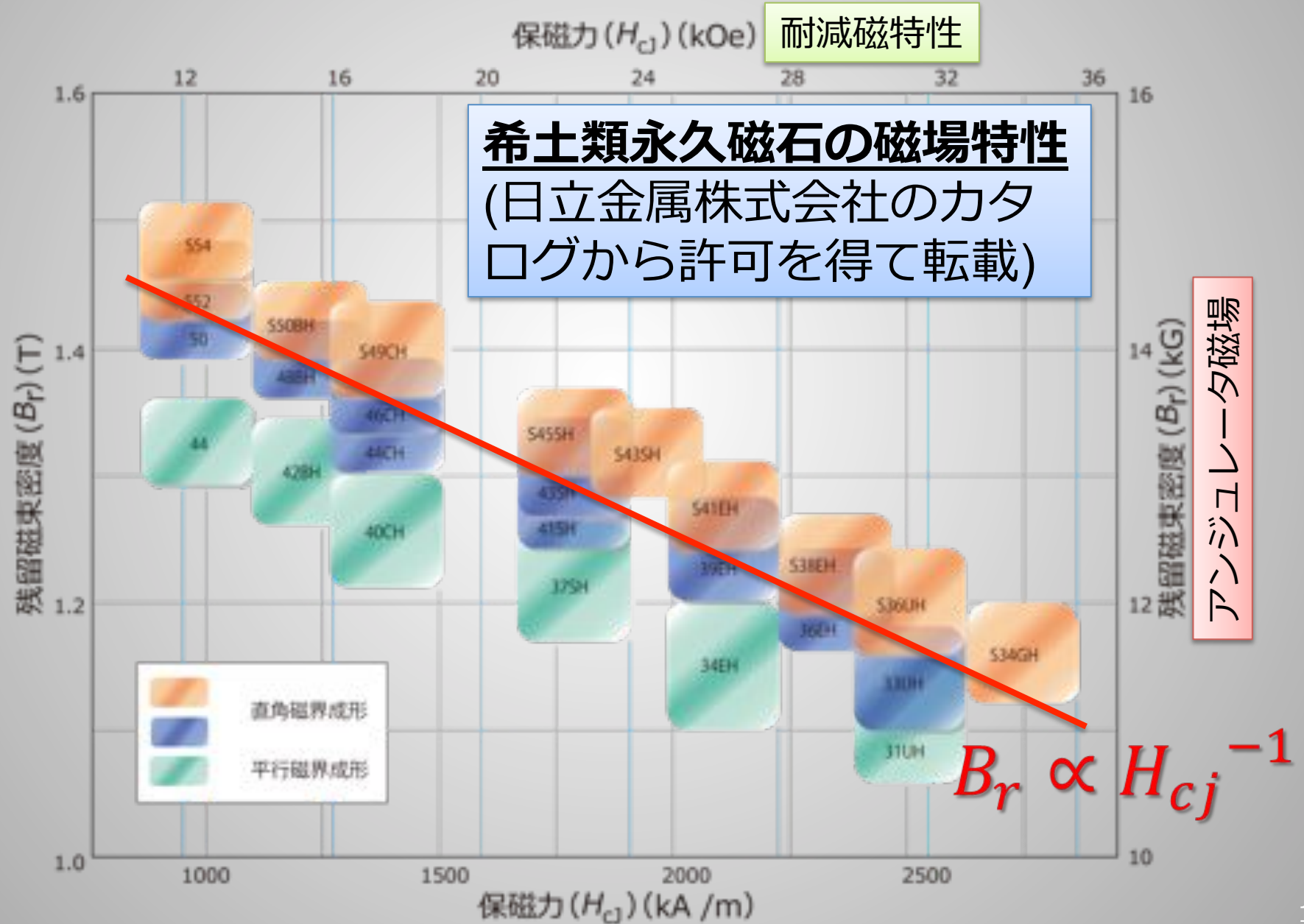
吸引力の評価



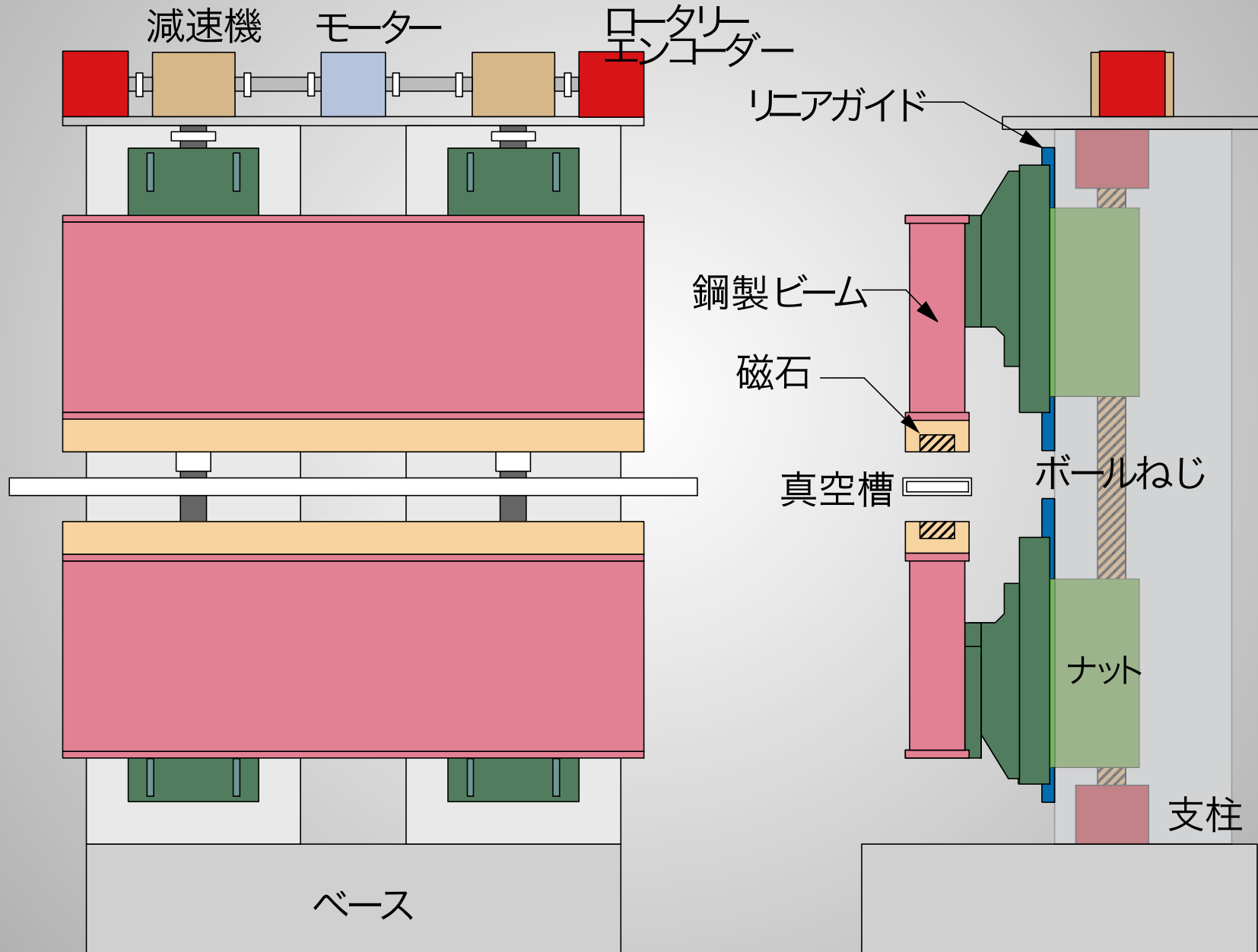
$$E = \int_V \frac{(B_{1,0} \cos k_u z \cosh k_u y)^2}{2\mu_0} dV \sim \frac{LW}{4\mu_0} g B_{1,0}^2$$

$$f(g) = \frac{dE}{dg} \sim \frac{LW}{4\mu_0} B_{1,0}^2$$

永久磁石の選定



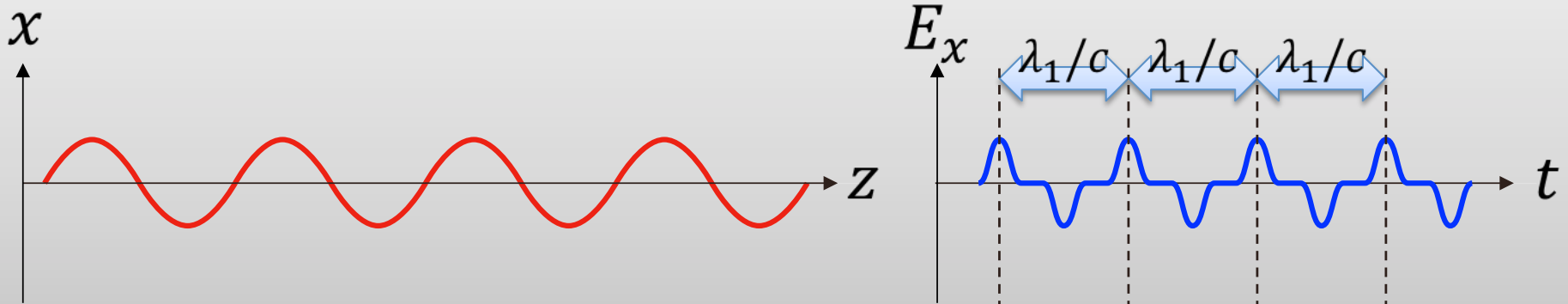
駆動架台の概要



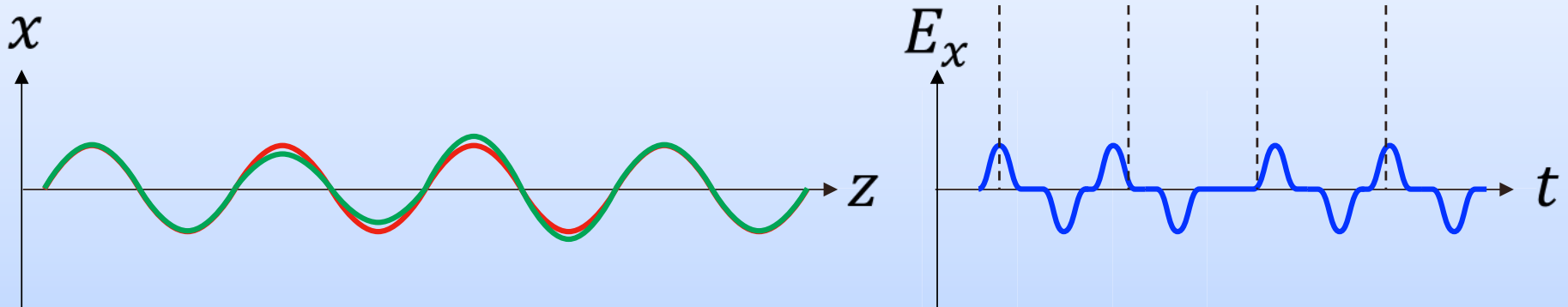
誤差磁場の影響：位相誤差

アンジュレータ電子軌道と光電場の関係

理想的軌道の場合



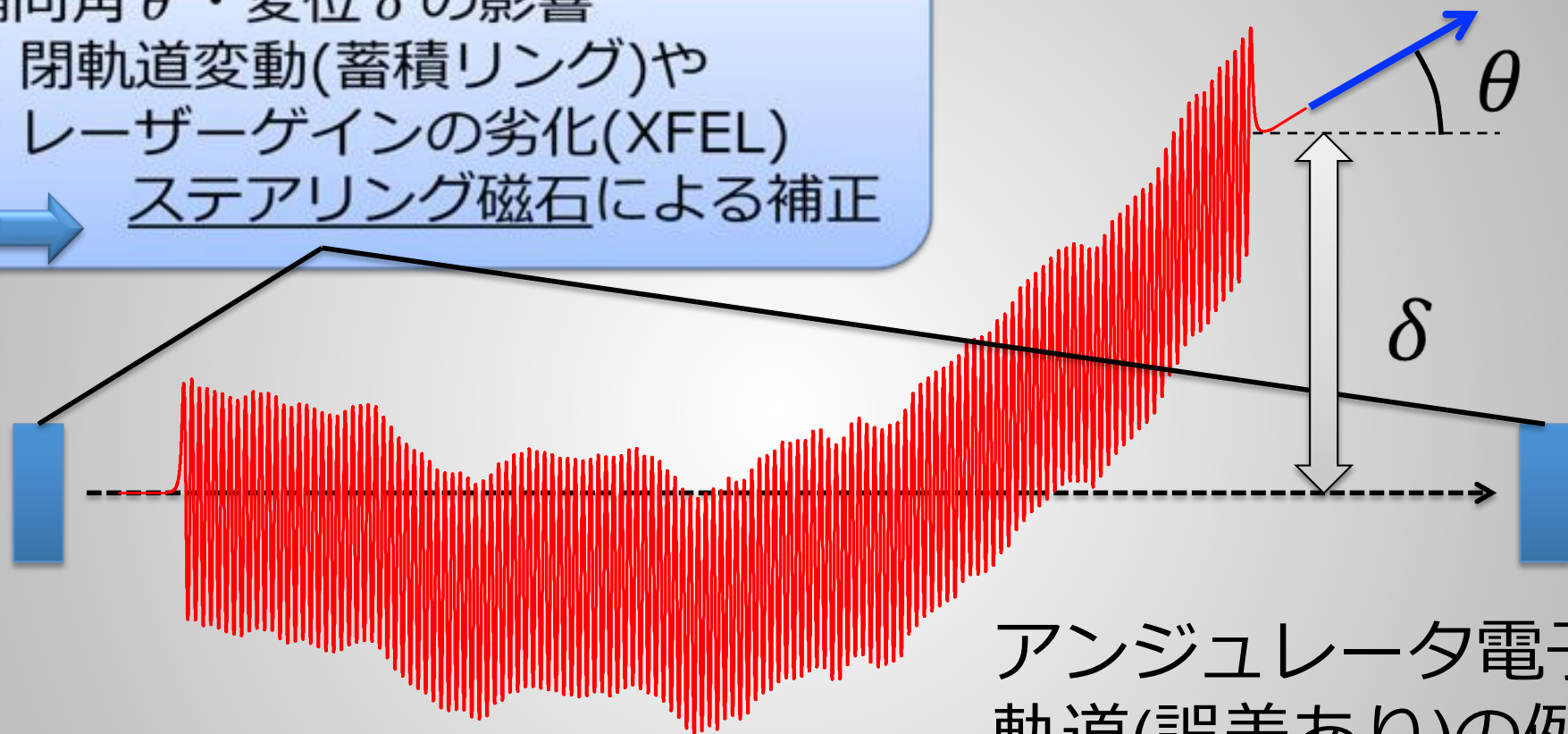
誤差を含む場合



誤差磁場の影響：磁場積分

偏向角 θ ・ 変位 δ の影響

- ✓ 閉軌道変動(蓄積リング)や
 - ✓ レーザーゲインの劣化(XFEL)
- ステアリング磁石による補正



アンジュレータ電子軌道(誤差あり)の例

$$\theta_{x,y} = \frac{e}{\gamma mc} I_{1y,1x} \quad : \text{一次積分}$$

$$\delta_{x,y} = \frac{e}{\gamma mc} I_{2y,2x} \quad : \text{二次積分}$$

アンジュレータ磁場測定：磁場分布

磁場センサに要求される仕様

- ✓ 狭い感応部（大きな磁場勾配）
- ✓ 測定速度（多点数の測定）

ホール素子

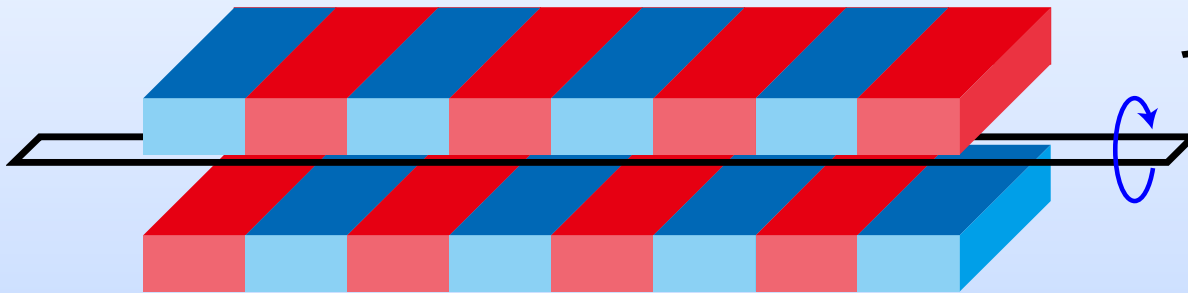
磁場センサ
支持アーム
長尺石定盤

磁石列

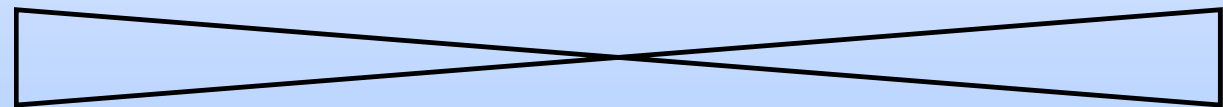
高剛性・高精度石定盤による
ホール素子駆動システム

- ホール素子の位置誤差小
- ×側面からのフリーアクセス要
- ×可搬性

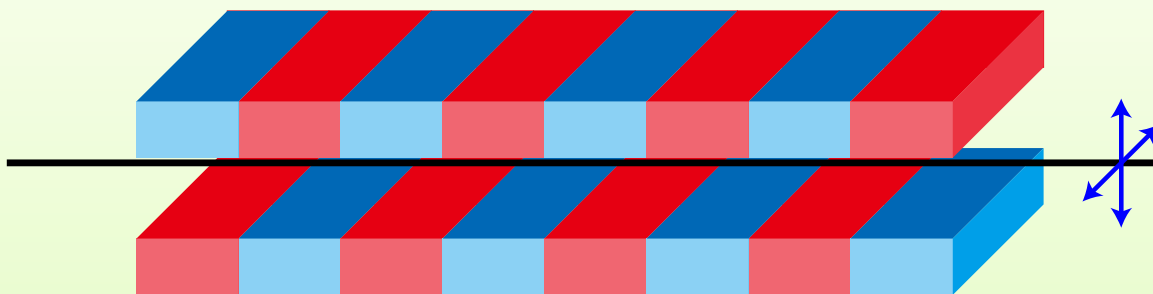
アンジュレータ磁場測定：磁場積分



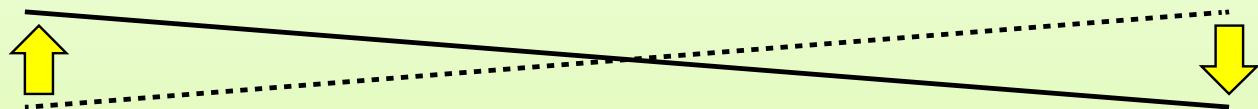
フリップコイル



二次積分測定用コイル

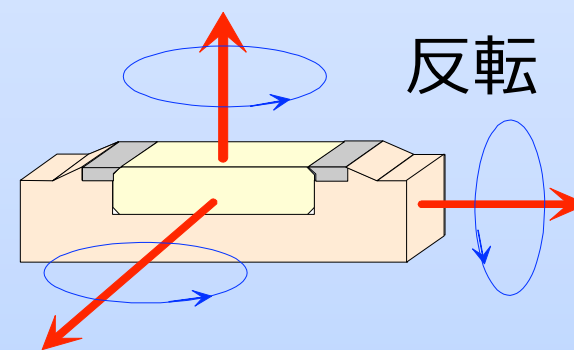
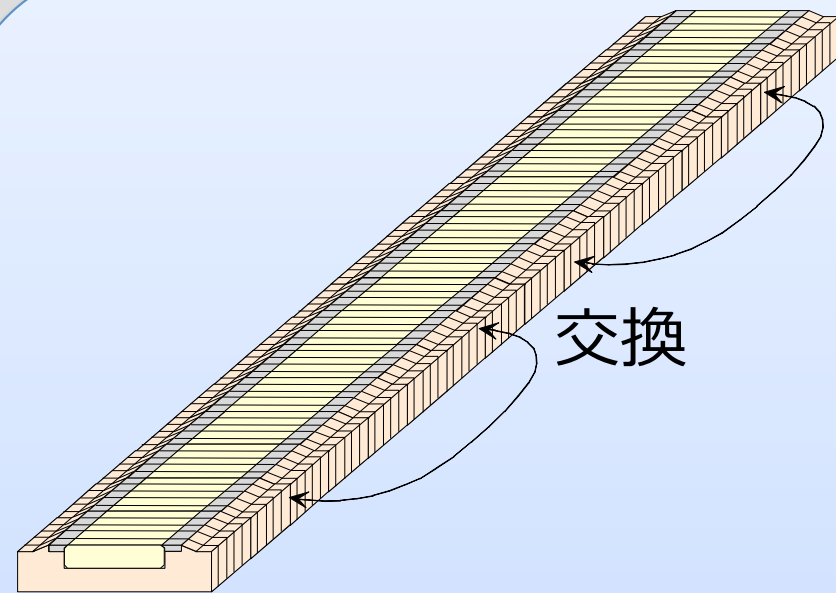
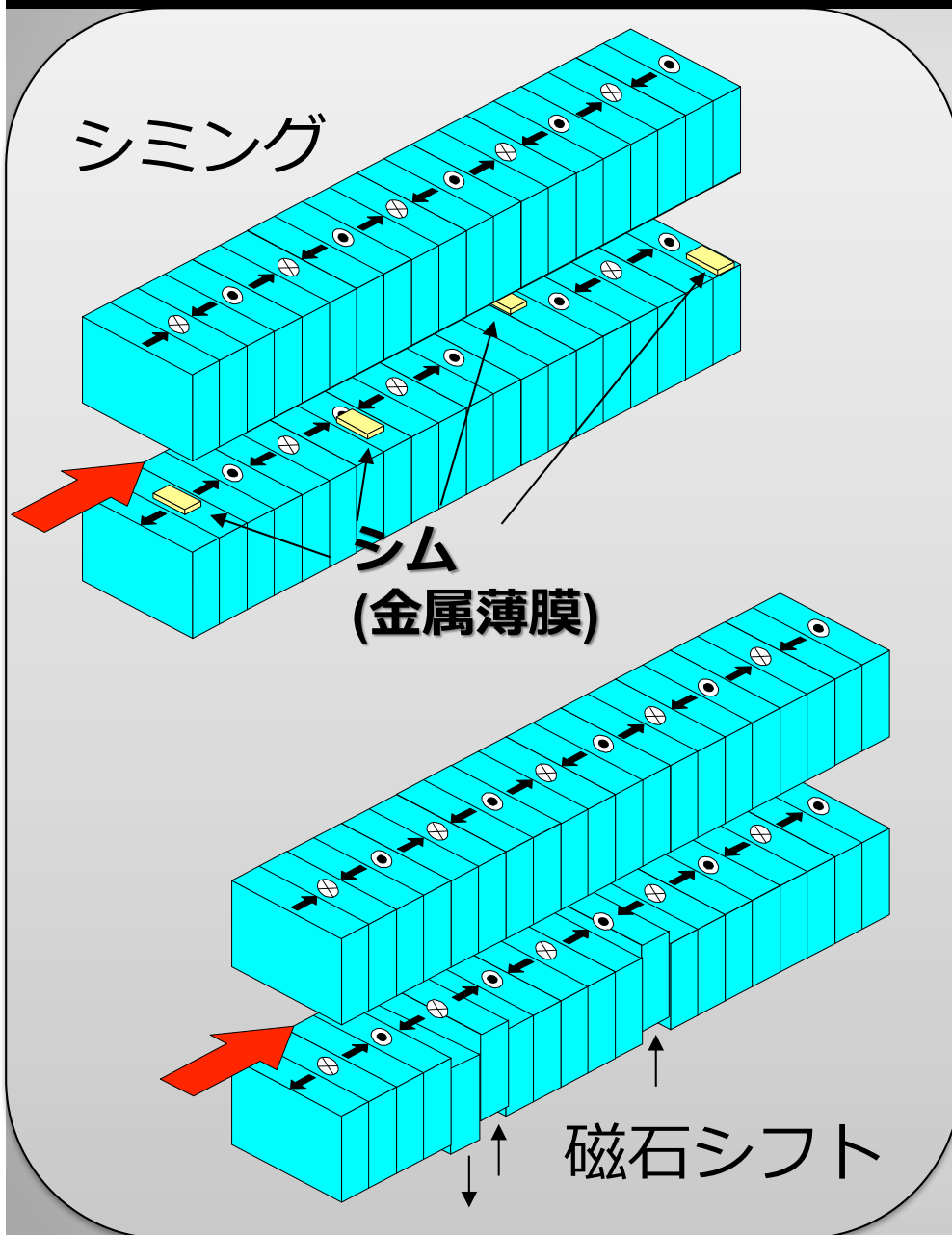


直動ワイヤー



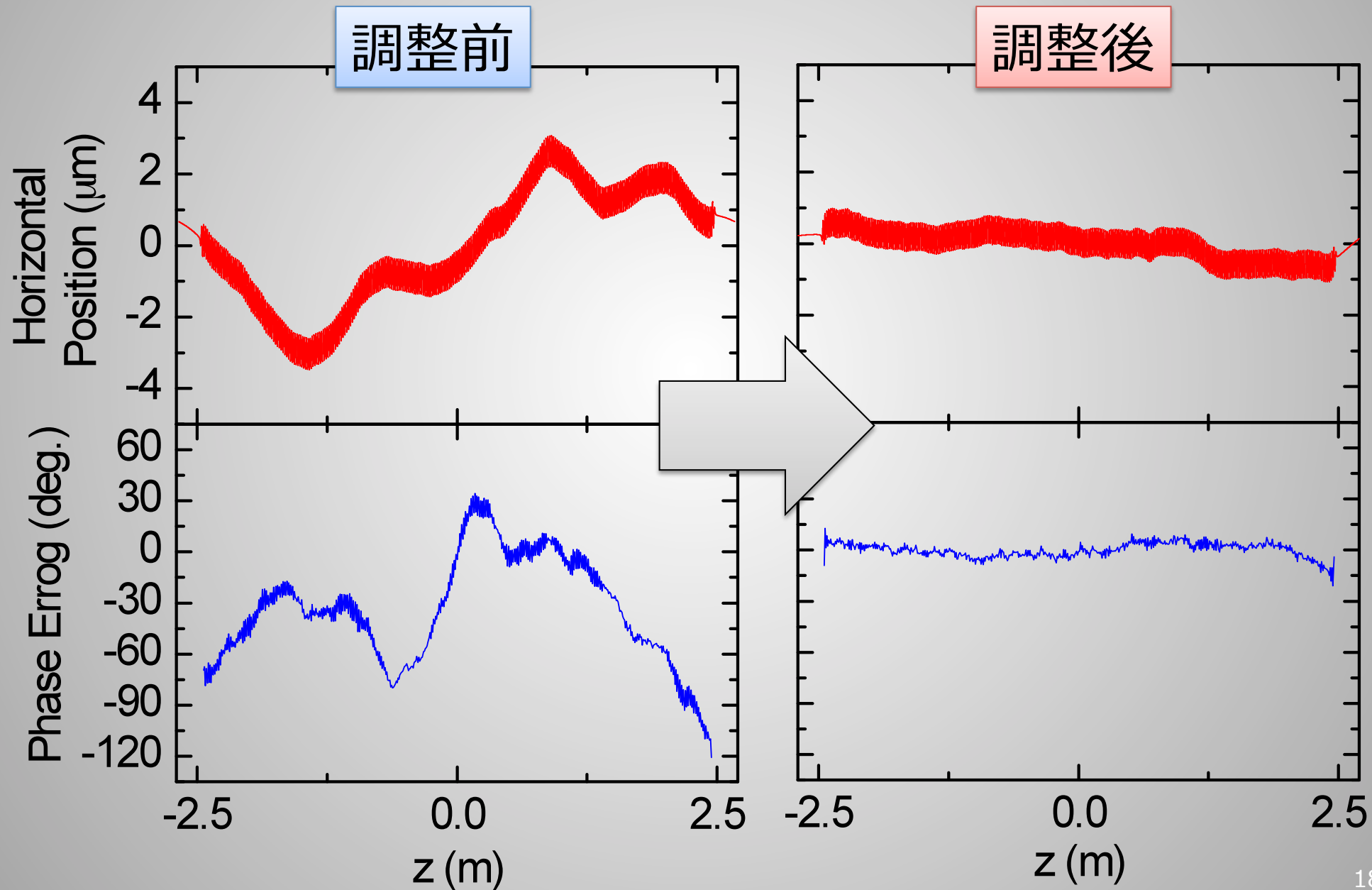
二次積分測定時の動き

磁場調整：その場ソーティング



“その場”ソート：
磁石ユニットの再配置

その場ソーティングの例



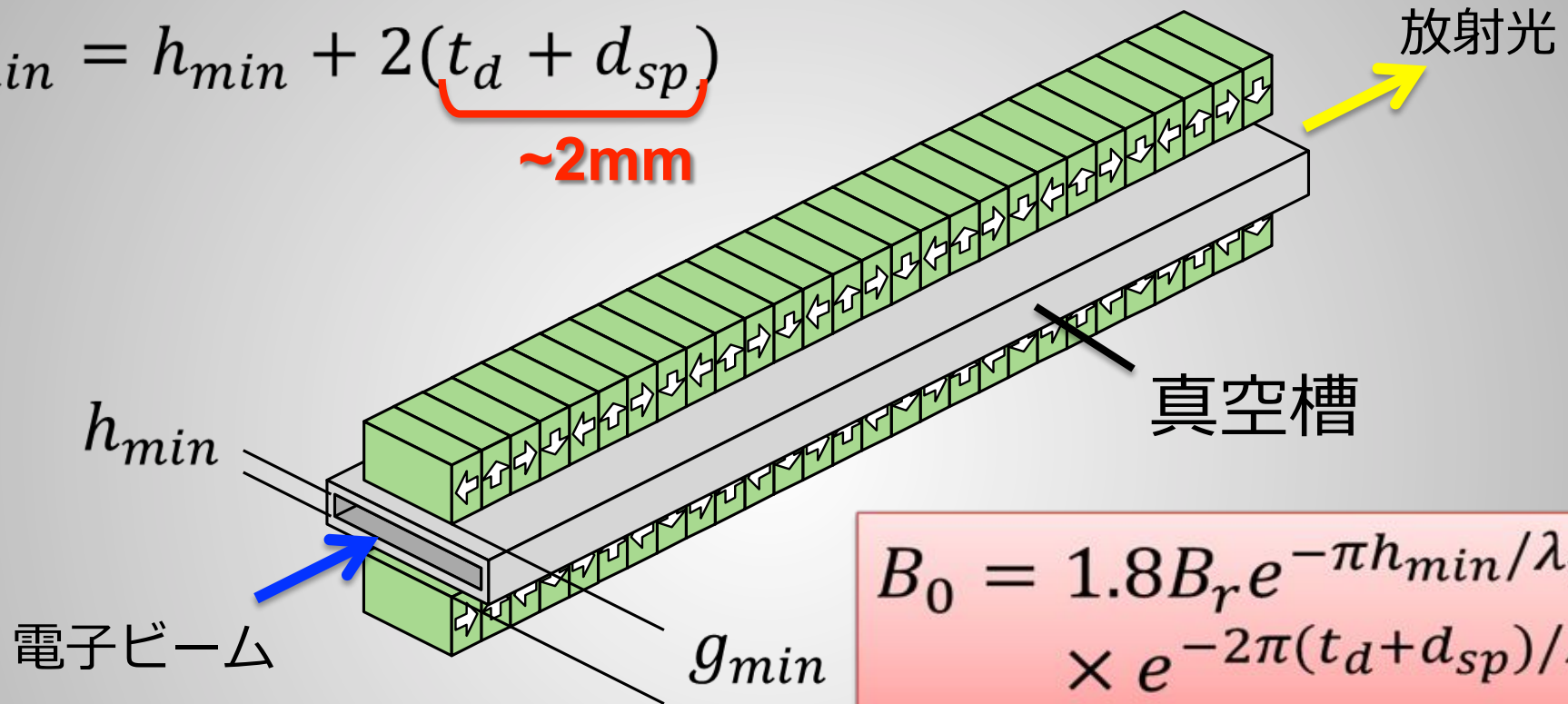
Outline

- アンジュレータ工学一般論
- **真空封止型アンジュレータ**
- アンジュレータコミッショニング

真空封止型アンジュレータとは？

$$g_{min} = h_{min} + 2(t_d + d_{sp})$$

~2mm

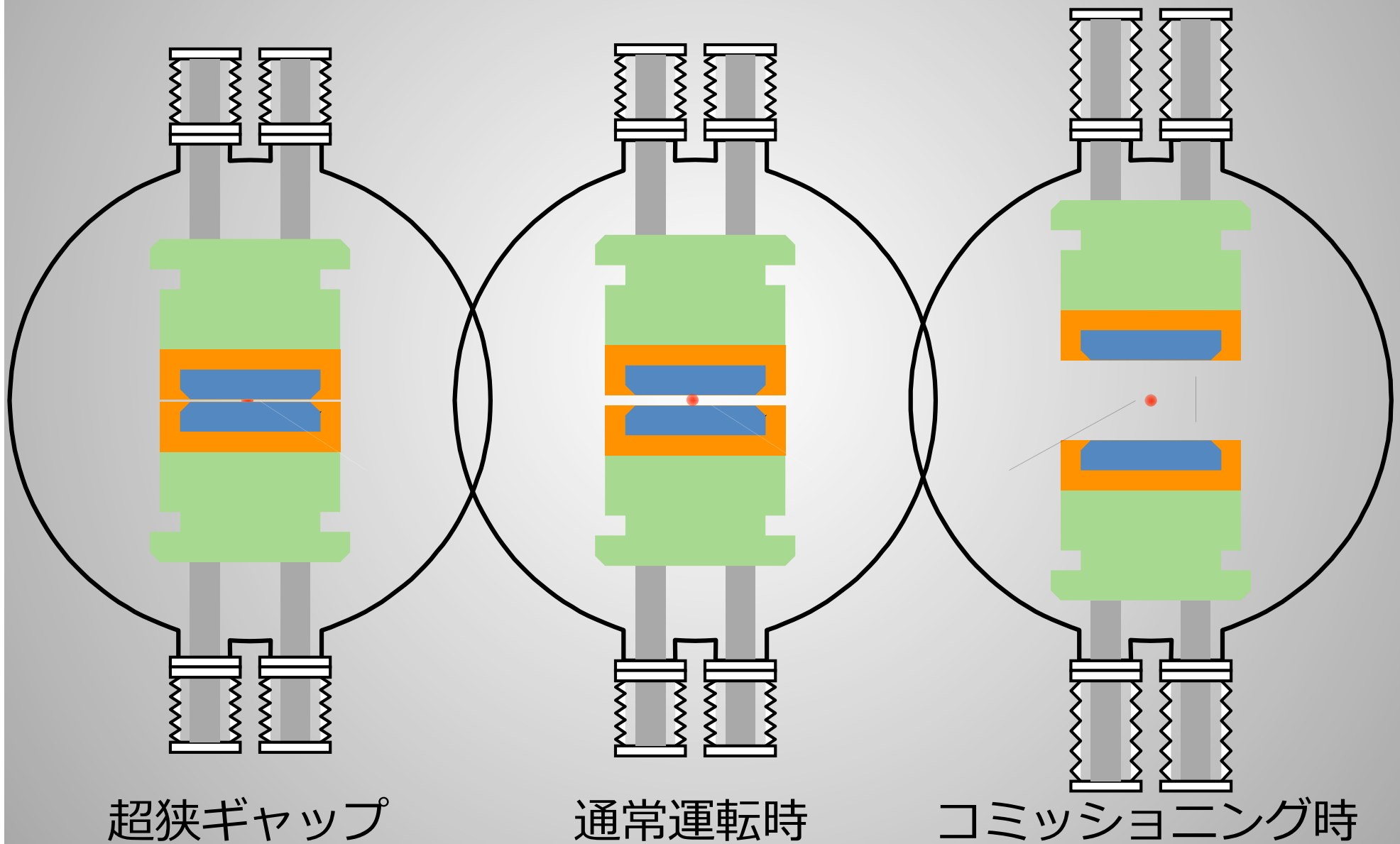


$$B_0 = 1.8B_r e^{-\pi h_{min}/\lambda_u} \times e^{-2\pi(t_d + d_{sp})/\lambda_u}$$

~0.5
($\lambda_u = 18 \text{ mm}$ のとき)

磁石列を真空槽内部へ！
➡ 真空封止型アンジュレータ
(In-Vacuum Undulator: IVU)

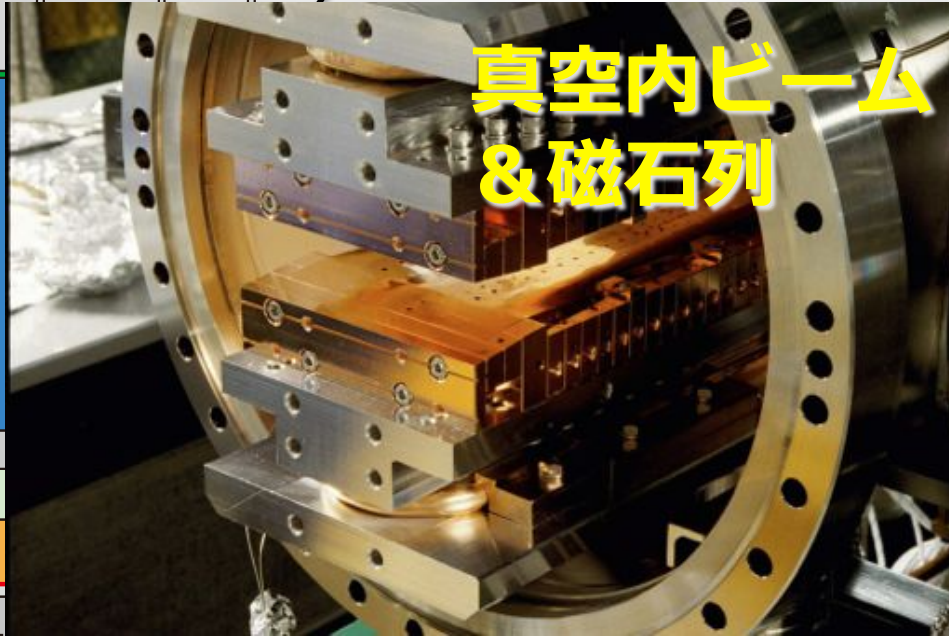
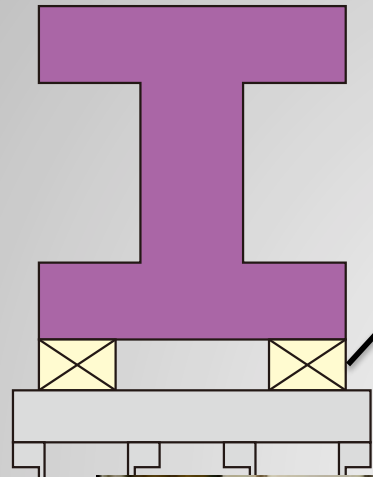
重要な利点：ギャップの物理的制約



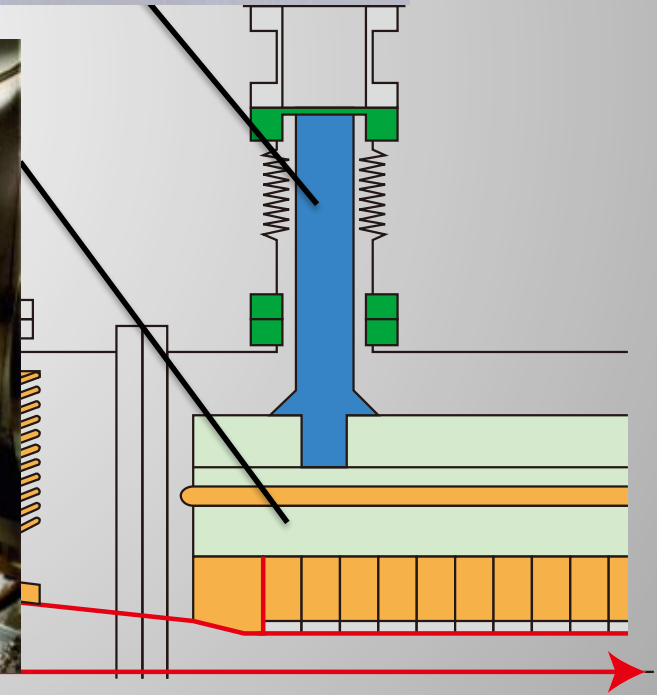
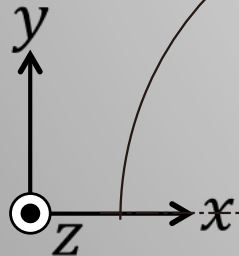
構



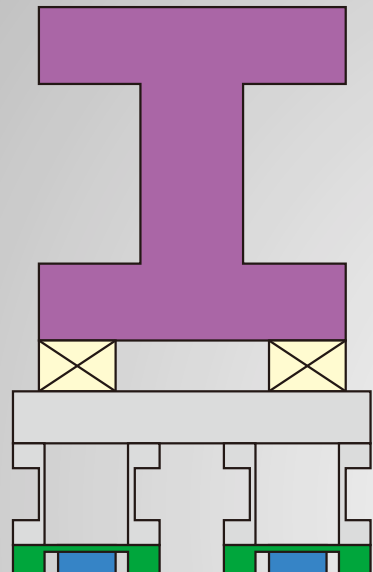
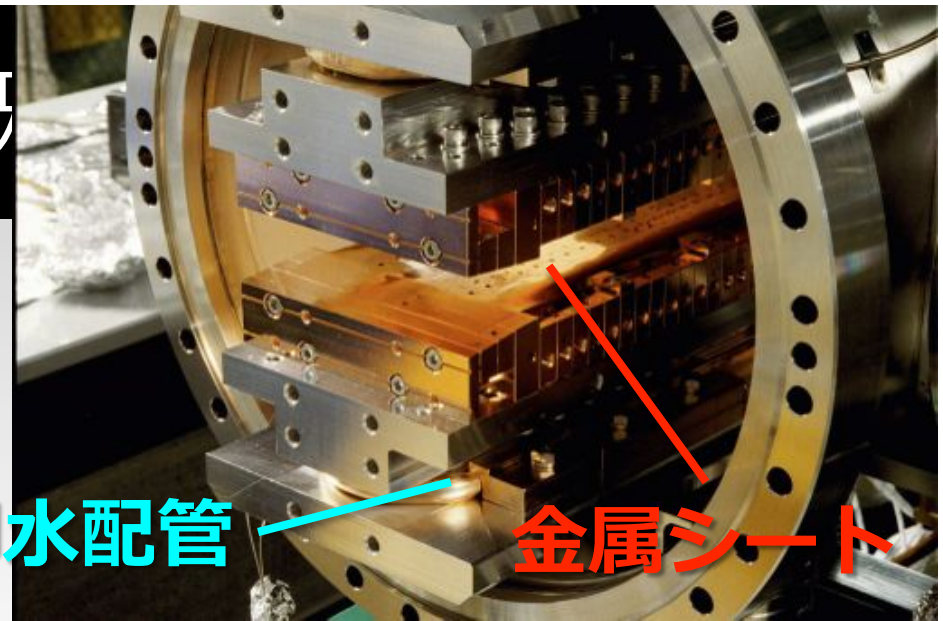
ベローズシャフト



真空内ビーム
& 磁石列

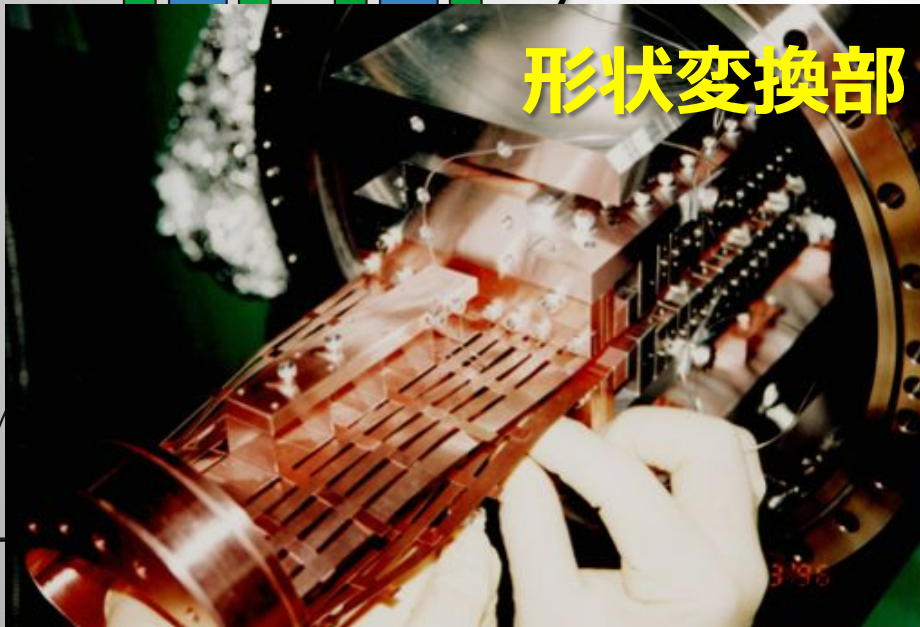


構造の概

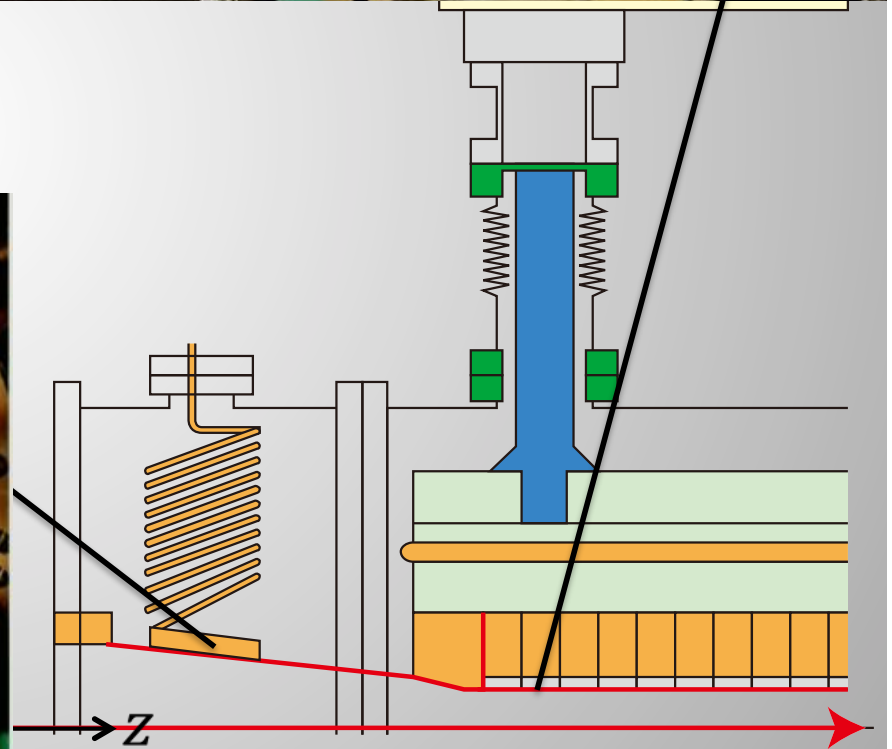


冷却水配管

金属シート



形状変換部



超高真空を可能にする技術

加速器に適合する超高真空に向けた
永久磁石の2つの課題

焼結体 - ポーニフ

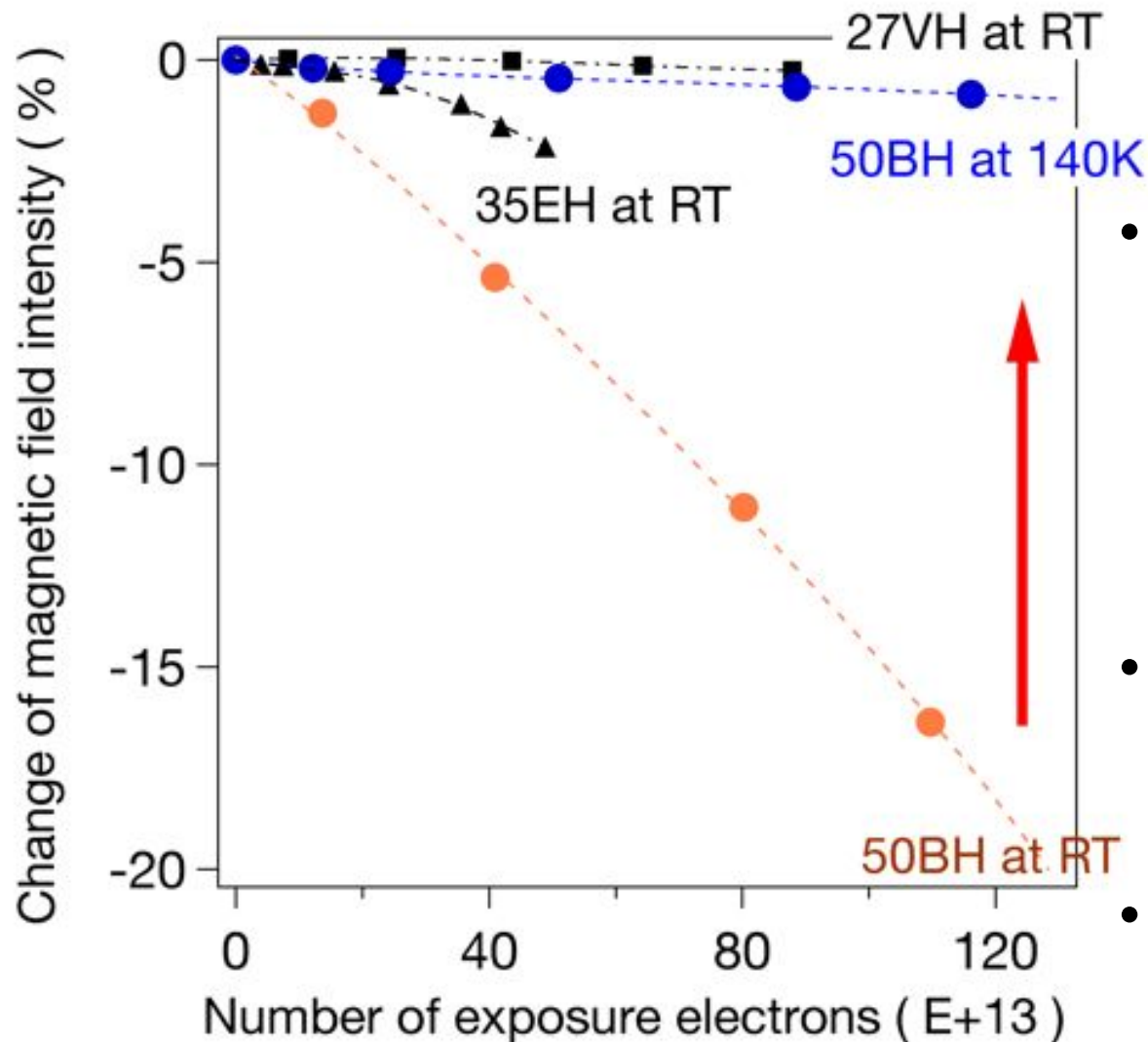
SPring-8用IVUでは、標準的に
10^{-8}Pa (10^{-10}Torr) に到達



TiNコーティング (5 μ m)

- の選定
熱処理による精密温調
ベーク@125 $^{\circ}$ C
- ✓ 熱的前処理(磁場調整前)
 - 140 $^{\circ}$ C/48時間
 - 本ベーク時の熱減磁対策
 - 耐放射線特性向上

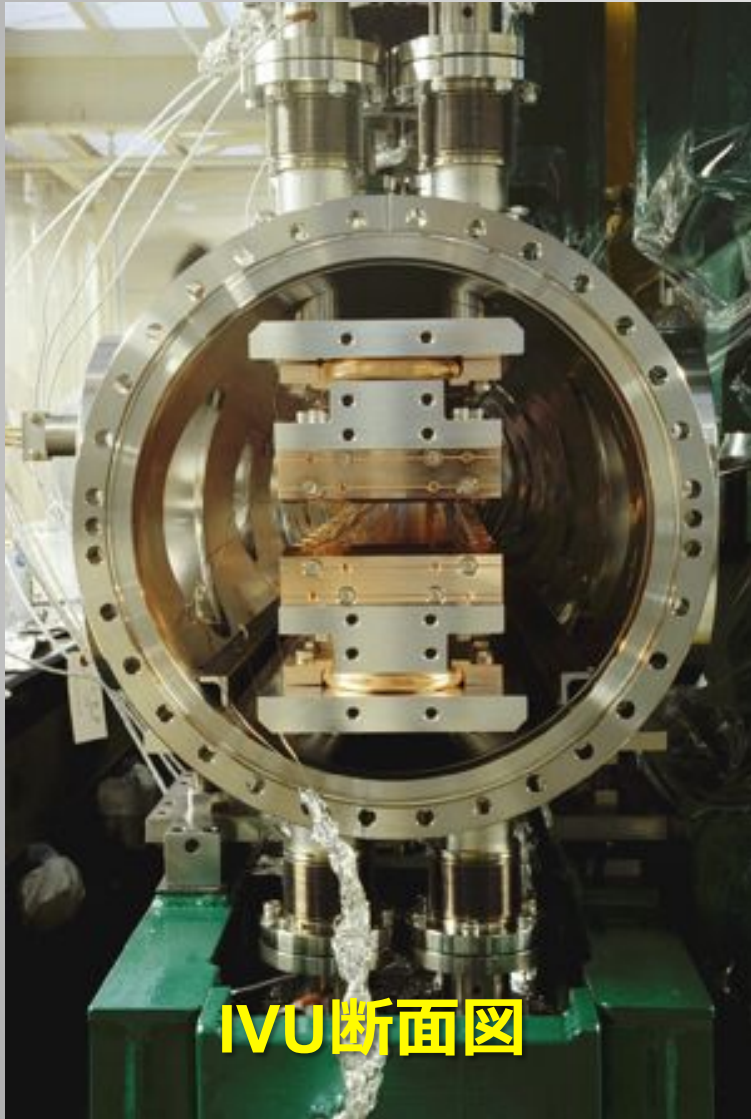
放射線減磁とその対策



- SPring-8で取られている対策
 - 高保磁力(>2000kA/m)磁石を採用
 - 熱的前処理
- これまでに、減磁によるスペクトル変化などの例なし
- 10年経過後のIVUでも磁場変化は観測されず

各種条件及び磁石材質における放射線減磁測定結果(提供：JASRI 備前輝彦氏)

その場磁場測定(1)



IVU断面図

- 真空封止アンジュレータ
 - 従来手法の適用不可
 - 磁石列単体での測定
 - ▶ 真空槽設置のため測定後の脱着が必要
- “その場”磁場測定
 - 真空槽設置下での磁場測定
 - ▶ 真空槽設置後の磁場性能
 - ▶ 長期運転後の磁場性能
 - クライオアンジュレータ

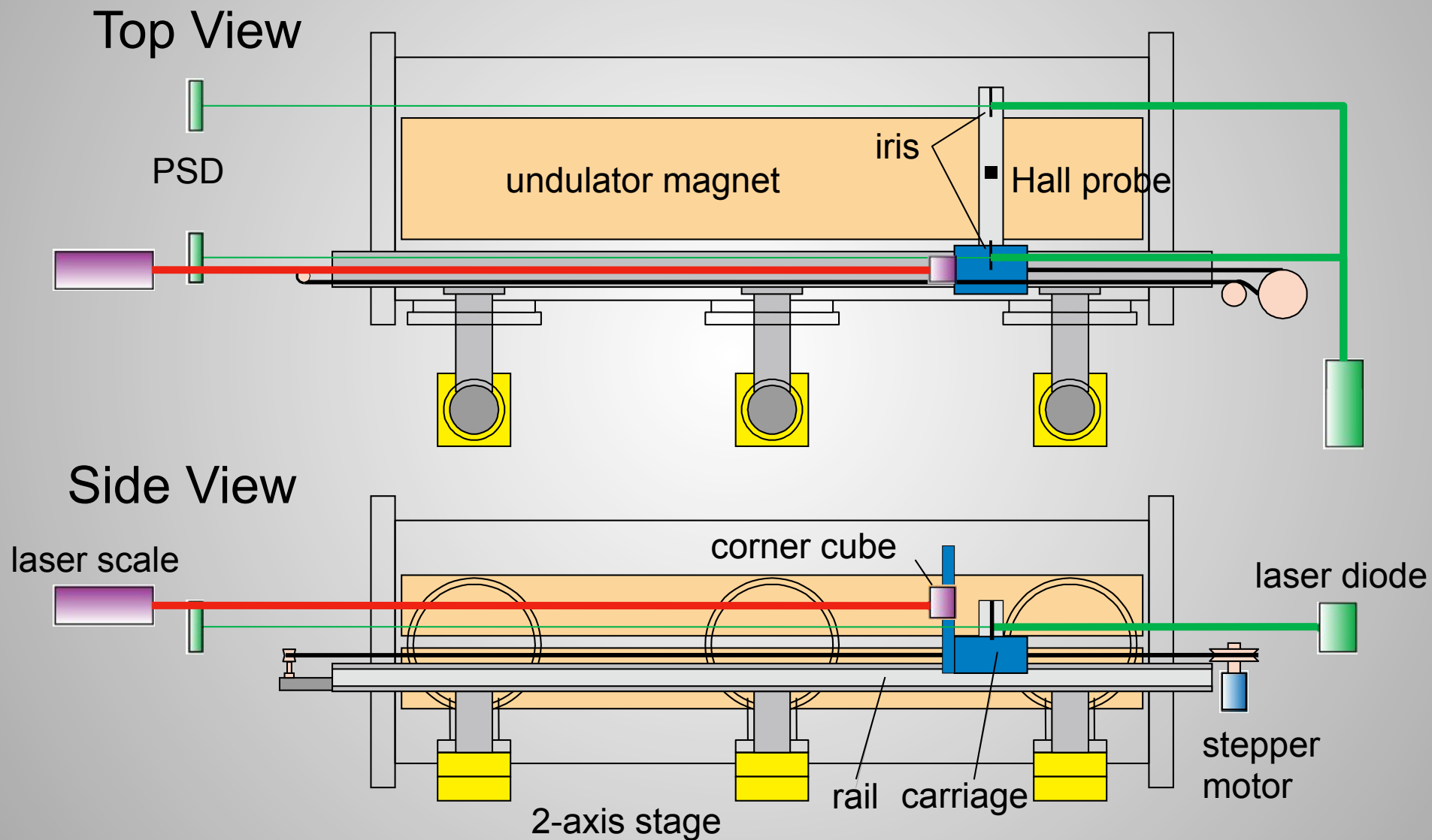
新しい概念による
磁場測定法の必要性

その場磁場測定(2)

- “その場”磁場測定を可能にする *SAFALI*
 - 簡素なホール素子駆動システム
 - 真空槽内に設置可能
 - 可視レーザーによるホール素子の横位置変動監視と動的フィードバック
 - レーザ測長計による縦位置測定

SAFALI
***Sef-Aligned Field Analyzer with
Laser Instrumentation***

その場磁場測定(3)



SAFALI適用例

- SPring-8 BL35XU
 - 10年間運転後交換し、磁場測定：減磁の兆候は確認されず
- クライオアンジュレータ
 - IVUの永久磁石を冷却し磁場特性を向上
 - SLS用(2009)、SPring-8用(2012)
- SACLA用IVU
 - 光源棟アンジュレータラインに設置後全セグメントについて測定
 - 必要に応じて磁場調整（ボールネジの微調）

Outline

- アンジュレータ工学一般論
- 真空封止型アンジュレータ
- **アンジュレータコミッションング**

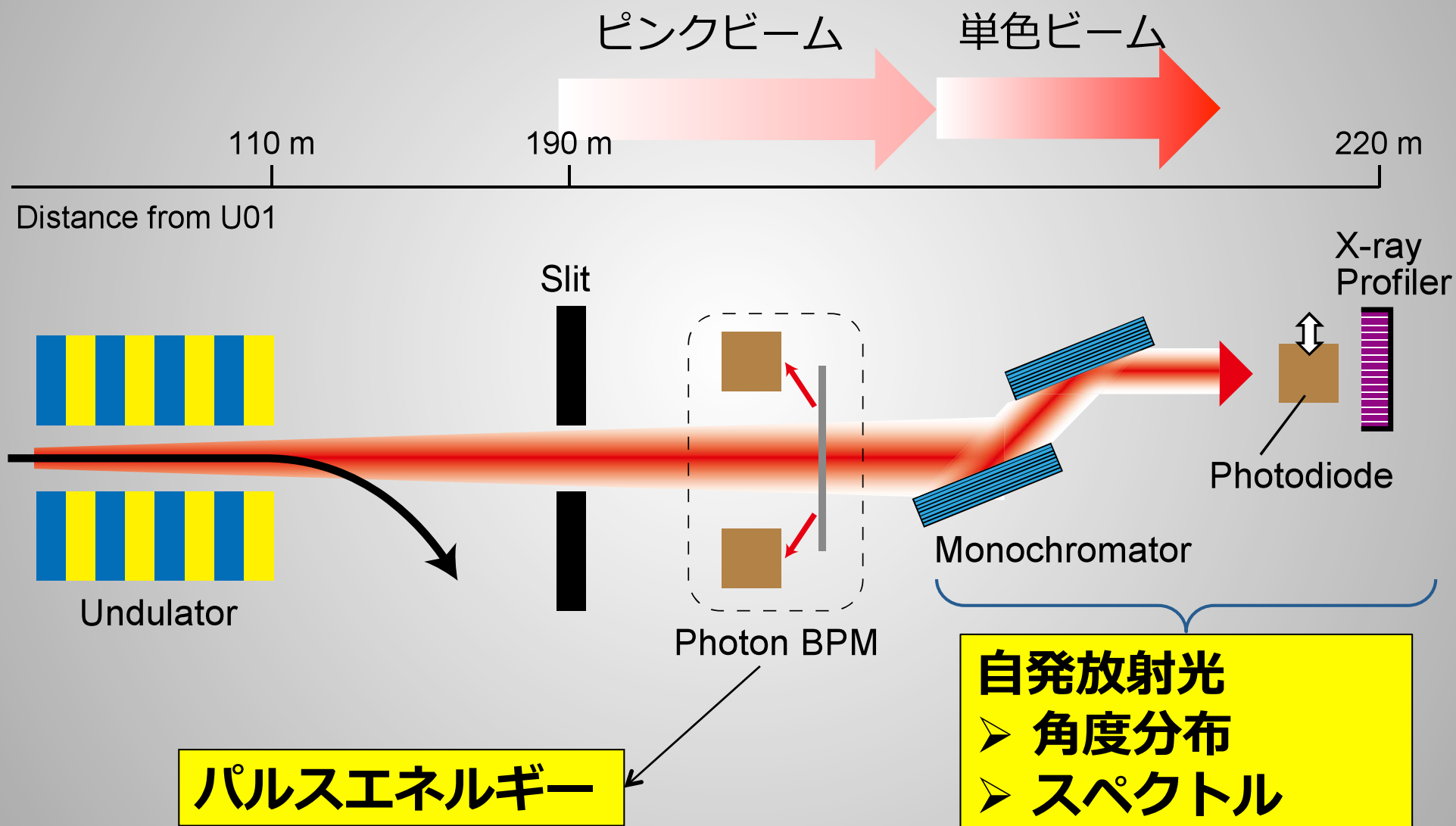
アンジュレータコミッショニング

- SACLAでレーザー飽和を達成するには5m \times 18台ものIVUセグメントが必要
- 全セグメントがコヒーレントに動作し、単一デバイスとして機能する必要あり

➤ アンジュレータコミッショニング

- 調整項目
 - ステアリング磁石 (軌道の直線性)
 - アンジュレータギャップと高さ (K値)
 - 位相シフト (位相整合)
 - テーパ (ウェイク場の補正)

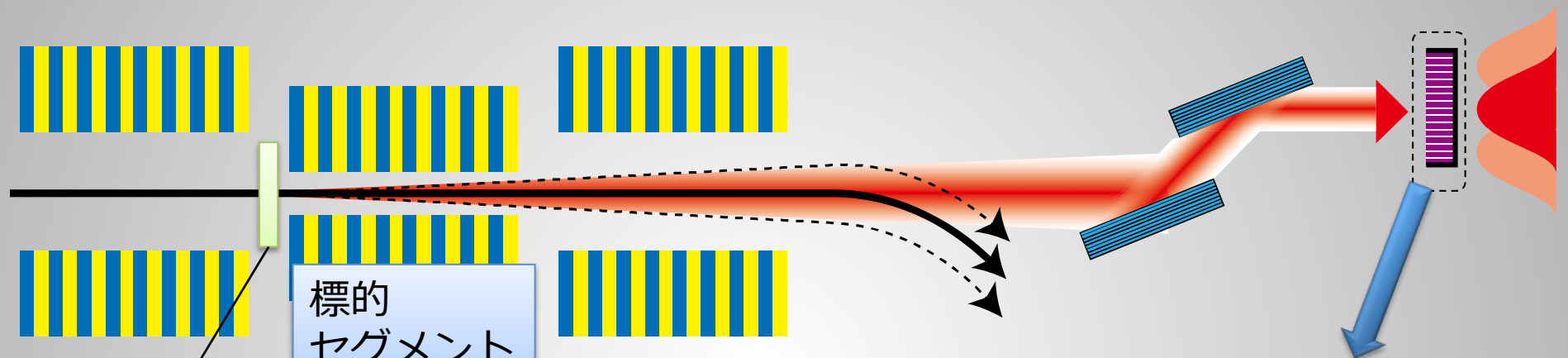
SACLA光診断系(初期コミッショニング時)



アライメント目標値と手法

ターゲット項目		目標値	調整手法
軌道	BPM	2.2 μm	-
	入射角度	0.5 μrad	角度分布
K値	ギャップ	1.9 μm	スペクトル
	高さ	60 μm	
	総計	5×10^{-4}	-
位相整合		30°	スペクトル

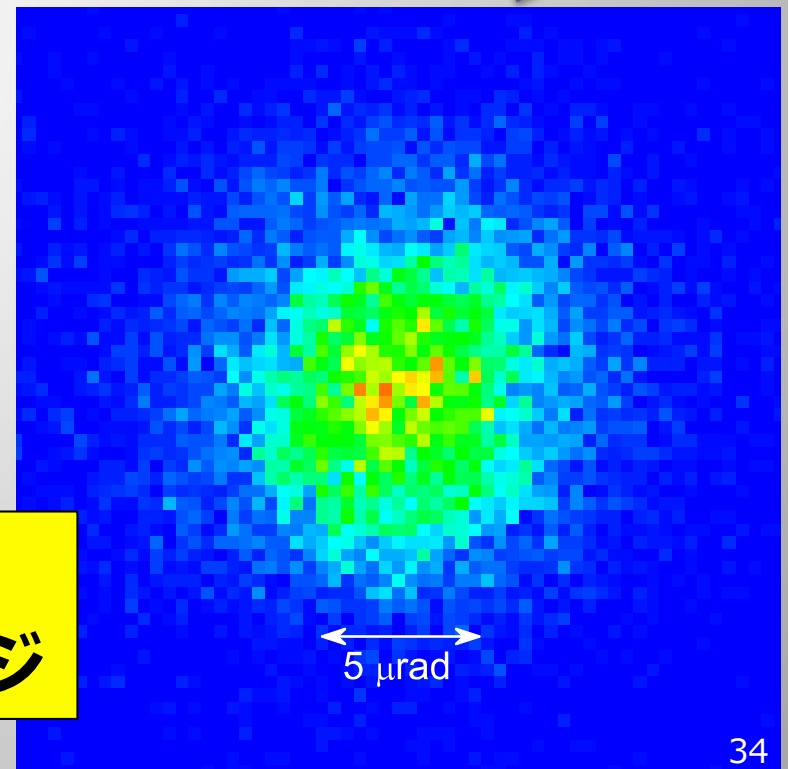
セグメント入射角の評価



ステアリング
磁石

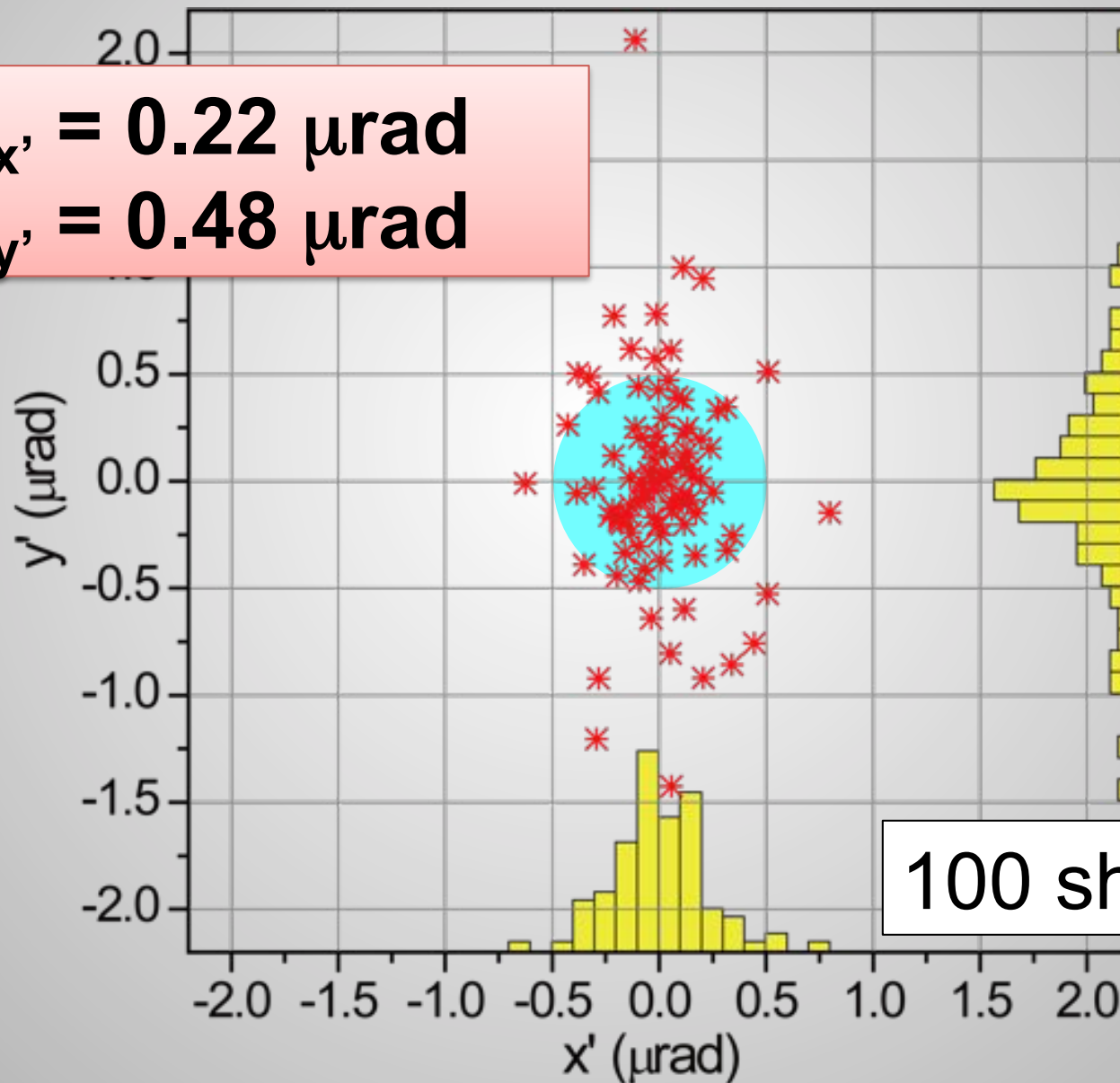
標的
セグメント

単色化自発放射光の
単一ショットイメージ



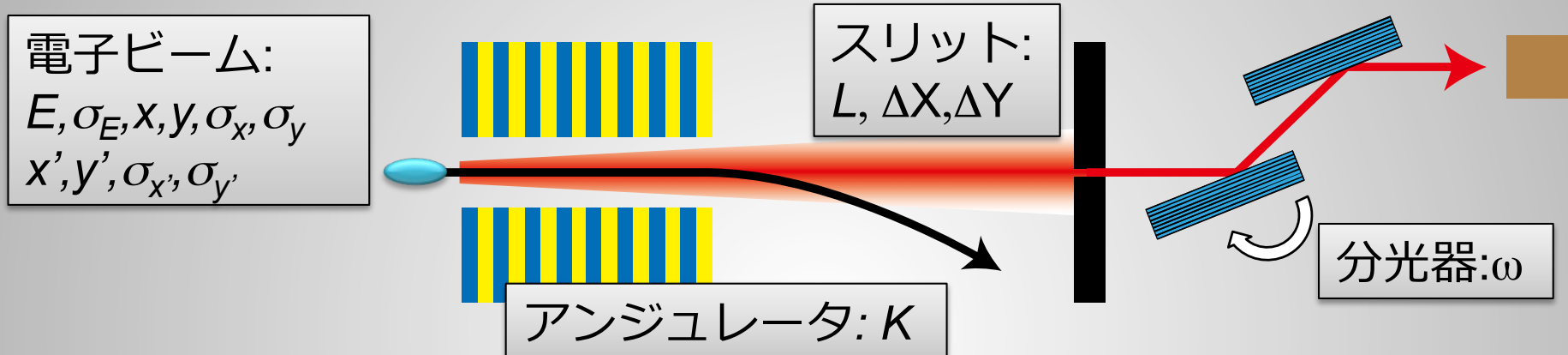
単色化SRビームの位置安定性

$$\sigma_{x'} = 0.22 \mu\text{rad}$$
$$\sigma_{y'} = 0.48 \mu\text{rad}$$



スペクトル測定によるK値の調整

URスペクトルは多数のパラメータに依存する



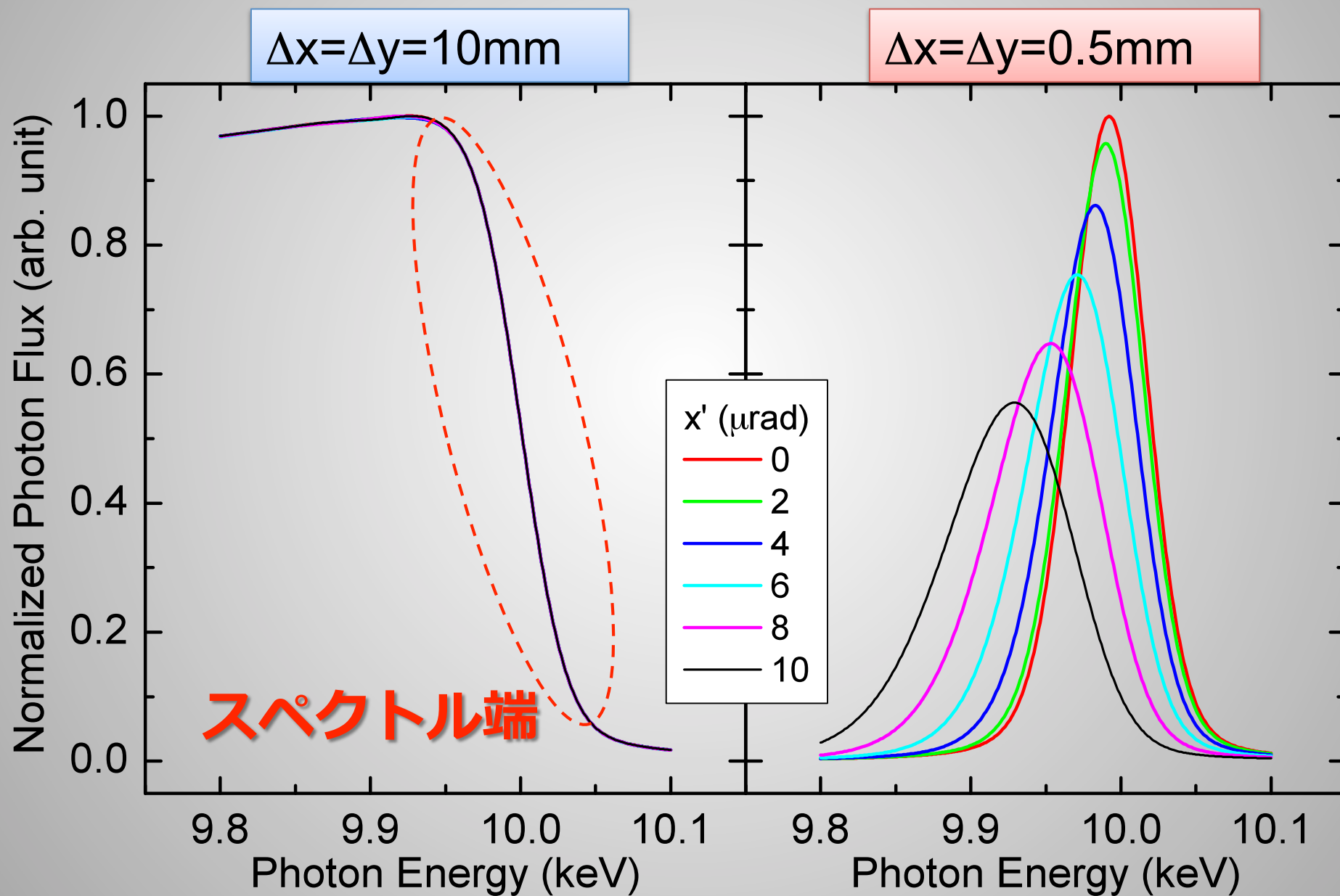
狭いスリット開口

広いスリット開口

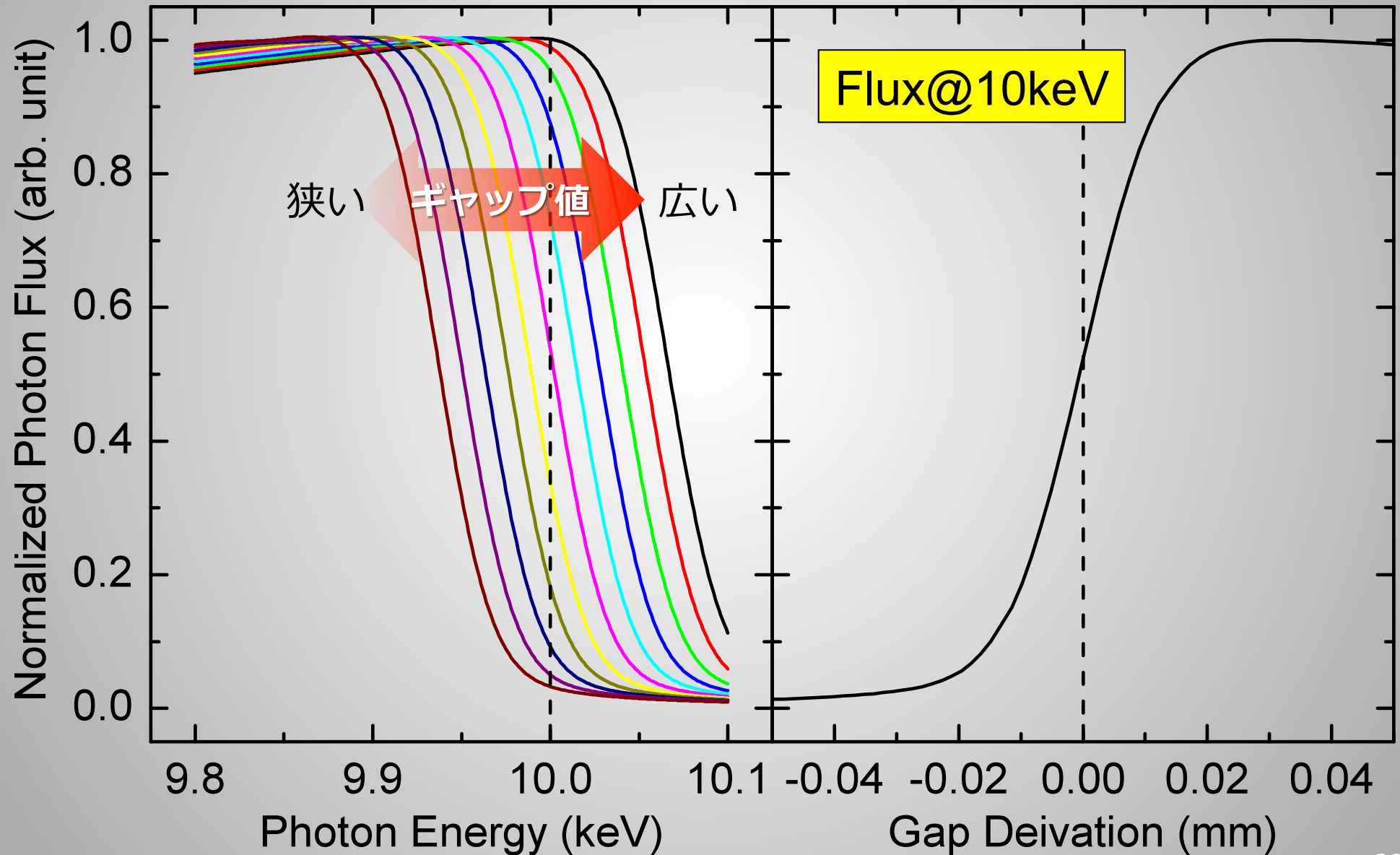
“部分フラックス”
ナローバンドだが、
条件依存が大きい
 $f(\omega, K, E, \sigma_E, L, \Delta X, \Delta Y,$
 $x, y, \sigma_{x,y}, x', y', \sigma_{x',y'})$

“全フラックス”
ワイドバンドだが
条件依存が小さい
 $F(\omega, K, E, \sigma_E)$

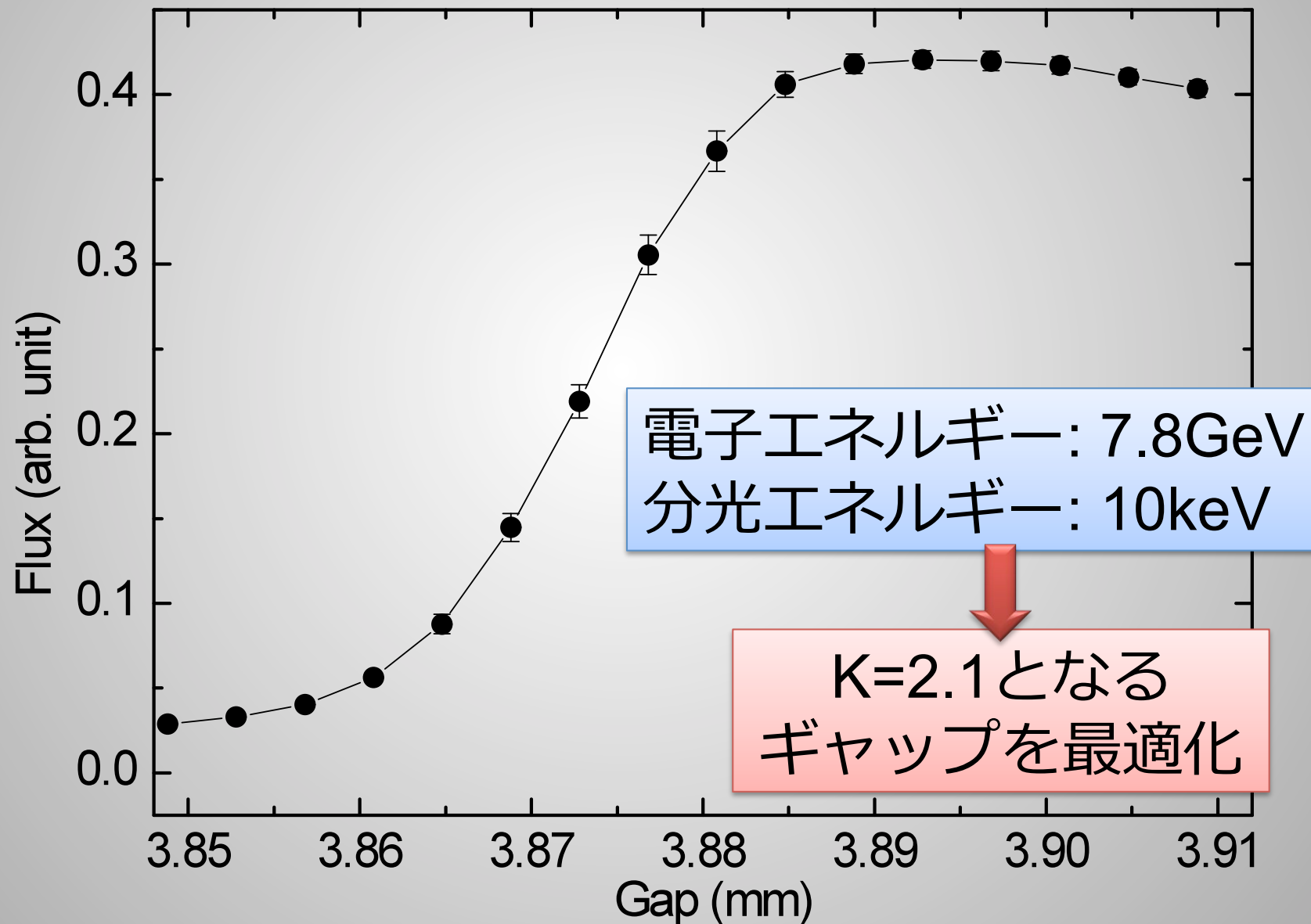
スペクトルの計算例



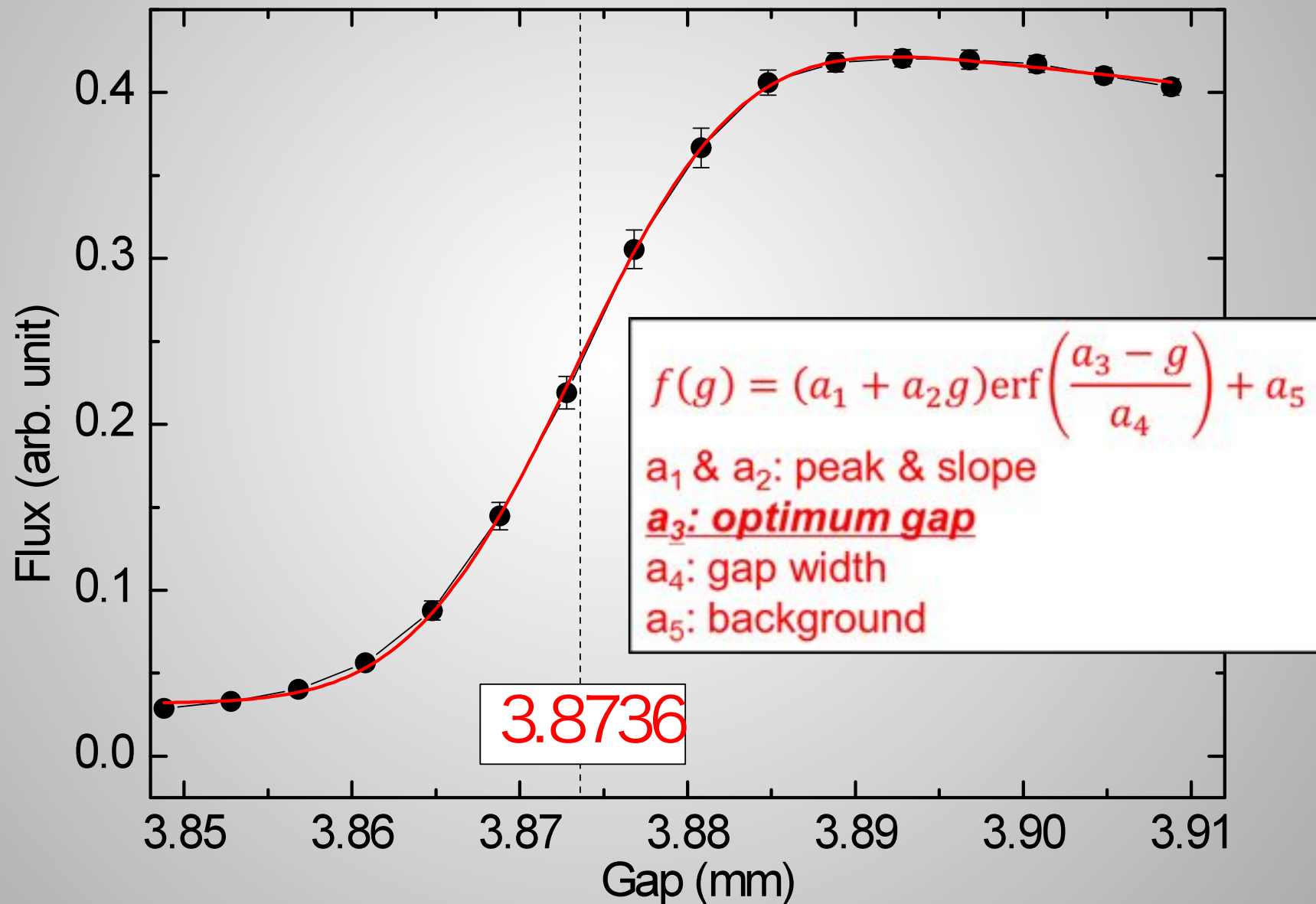
ギャップの精密調整



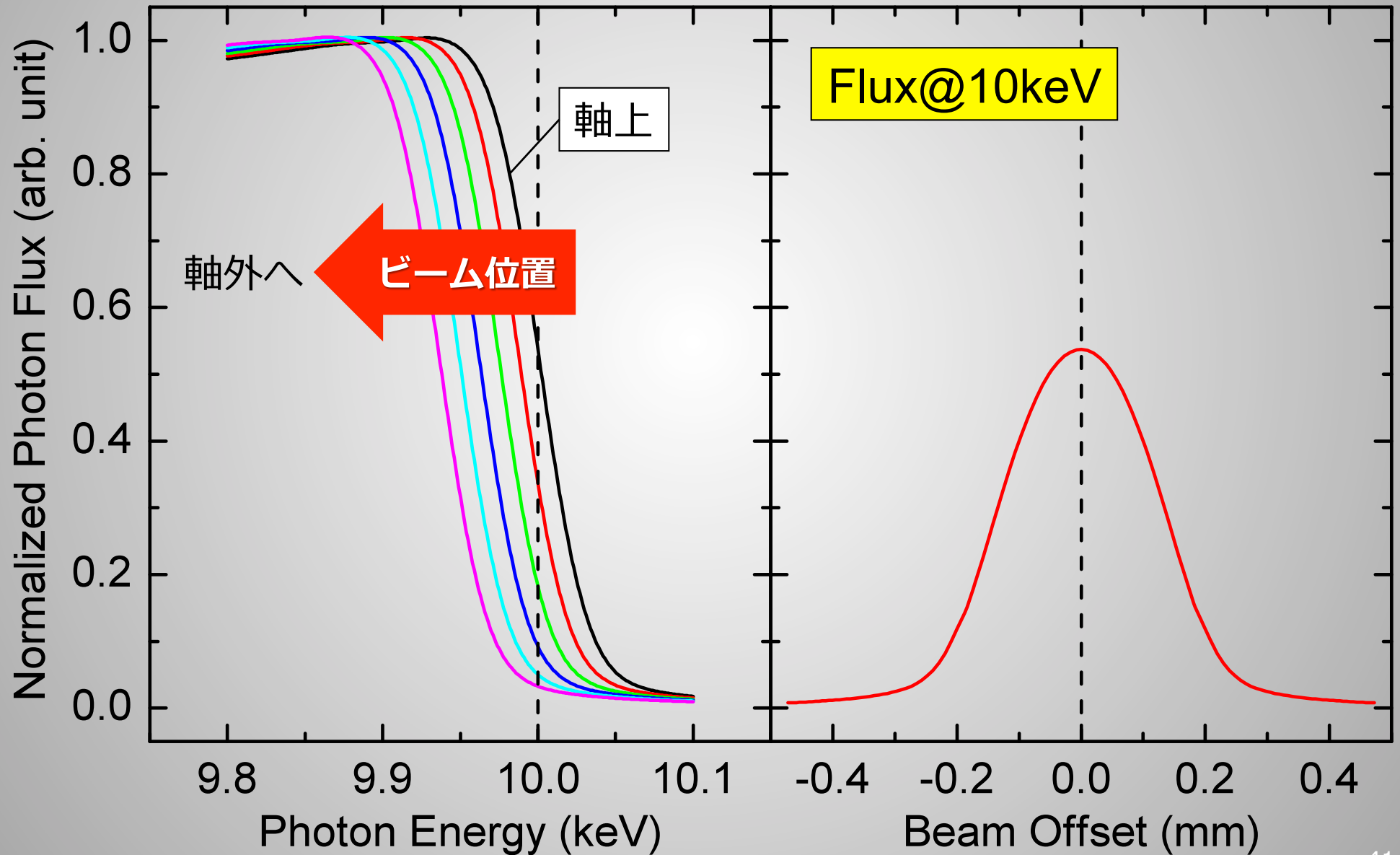
ギャップ調整例



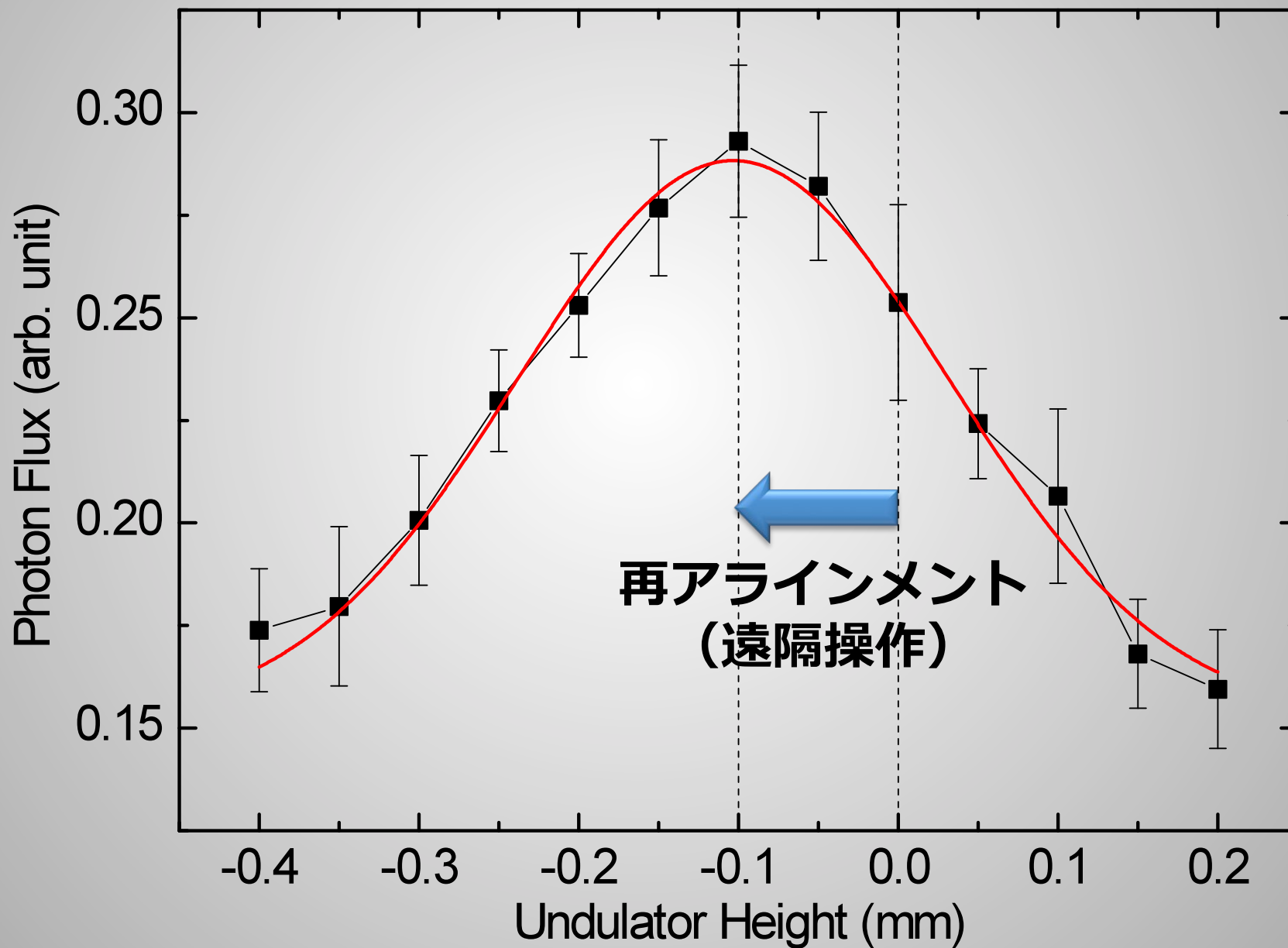
最適ギャップ特定のためのフィッティング



高さのアライメント



アライメント例



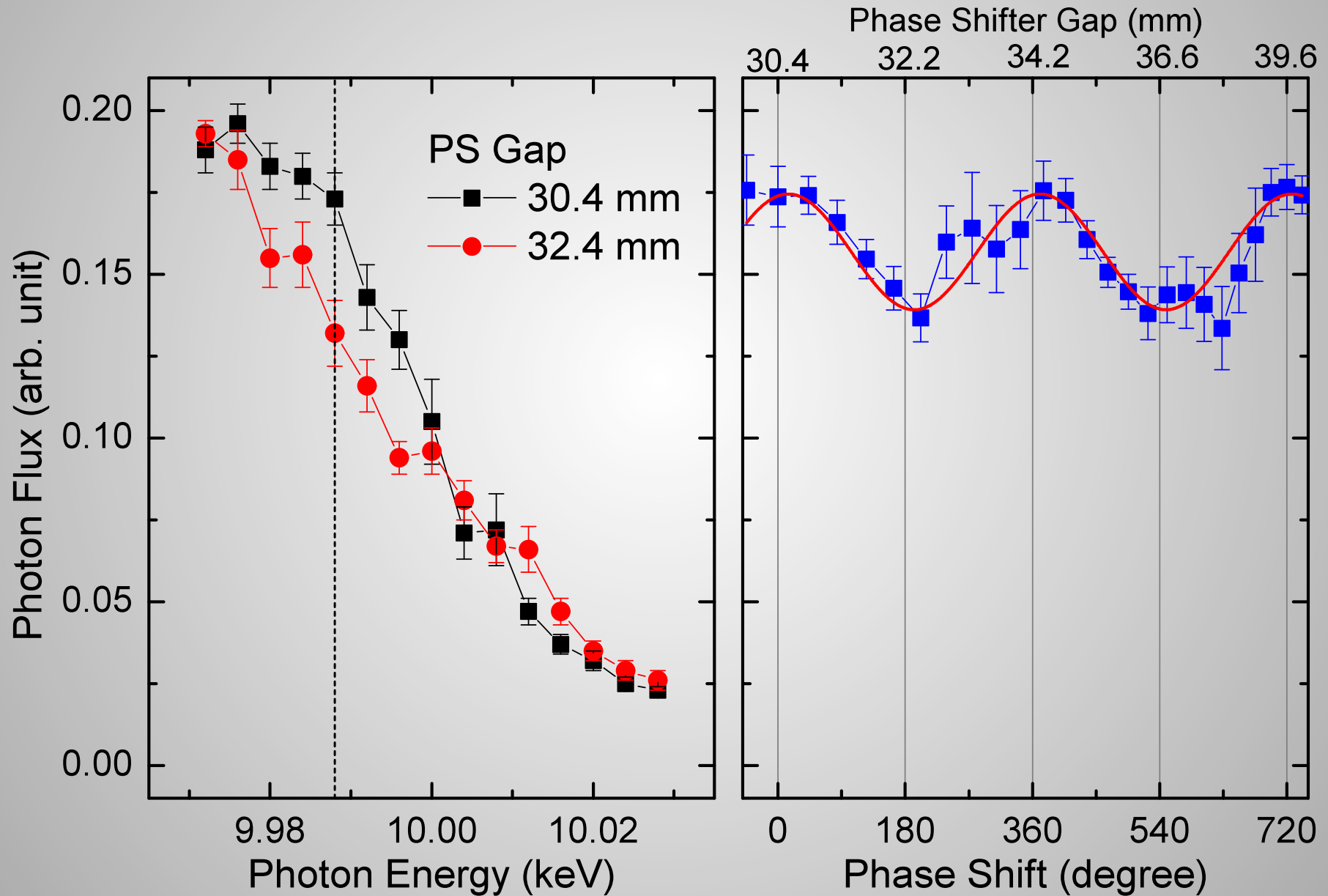
位相シフター

SACLAアンジュレータ
ドリフト部



位相シフター(1周期の
アンジュレータと同等)

位相整合例



アライメント目標値と手法

ターゲット項目		目標値	達成値
軌道	BPM	2.2 μm	-
	入射角度	0.5 μrad	0.22 μrad (x) 0.48 μrad (y)
K値	ギャップ	1.9 μm	0.6 μm
	高さ	60 μm	10 μm
	総計	5×10^{-4}	2×10^{-4}
位相整合		30°	15°