



ERLサイエンスワークショップ
2009年7月11日 KEK国際交流センター交流ラウンジ



極限を実現する装置・光学系の検討

セッションのまとめと今後の開発課題

KEK-PF 平野馨一

1. はじめに: セッションの復習
2. X線光学に関する今後の課題
 - 2.1. ERLとX-FELOの光源性能
 - 2.2. 全体像
 - 2.3. 各論: 例) X線共振器の場合
3. まとめにかえて



1. はじめに



16:05-18:45	極限を実現する装置・光学系の検討:座長 松下 正 (KEK) :ディスカッション (KEK)
16:05-16:40	「X線光学素子用ダイヤモンド結晶の現状と展望」 玉作 賢治 (播磨理研)
16:40-17:15	「SOI技術による次世代高速2次元X線検出器の開発」 新井 康夫 (KEK)
17:15-17:50	「X-FELOの原理と光源特性」 羽島 良一 (JAEA)
17:50-18:25	「X線光学系/光学素子開発の現状と展望」 竹内 晃久 (JASRI)
18:25-18:45	ディスカッション

極限を実現する装置

- 1) 先端的X線光源 : 共振器型自由電子X線レーザー(X-FELO)
- 2) 先端的X線検出器 : SOI次世代高速2次元検出器

極限を実現するX線光学素子・光学系

- 1) **ダイヤモンド結晶** (X線分光素子、高熱負荷、コヒーレンス保存)
- 2) **X線ナノ集光素子**



X-FELOの原理と光源特性

羽島 良一 先生(JAEA)



- (1) 共振器型XFELの実現には高品質・高繰り返し電子ビームと高反射率ミラーの両方が必要
- (2) 電子銃、超伝導加速器技術、X線光学技術の進歩によりXFEL-Oが視野に入ってきた。
- (3) FELのシミュレーション
時間依存シミュレーション、Bragg反射における位相シフトの考慮、
高次のsupermodeも自動的に考慮 等の独自のシミュレーションを行った
<結果>
K-J. Kimらの計算結果とほぼ一致
5GeV、40pC、2ps、0.1mm-mrad の条件のとき **gain = 28%**
- (4) 共振器を波長精度で合わせる必要はない！
XFEL-Oではゲイン媒質(電子バンチ)が毎回リフレッシュされる
電子バンチと光パルスのオーバーラップが確保できればよい
- (5) バンチタイミングの精度 < 20fs (6um)
共振器ミラーの傾きの精度 < 8nrad



X線光学素子用ダイヤモンド結晶

玉作 賢治 先生 (播磨理研)



- (1) 用途: XBPM、窓材、分光結晶 (HPHT合成Type IIa)、移相子、ビームモニター共振器、非線形光学結晶
- (2) 特長: 軽元素、高デバイ温度、吸収係数小、熱伝導度大、膨張係数小
→ 高熱負荷分光結晶
- (3) 結晶性
かなり良くなっている(分光学、回折はOK)が、高コヒーレンスのビームを扱うにはまだ不十分(イメージングは×)。
- (4) 表面処理
研磨とPCVMを併用することにより、比較的良い表面が得られるが、更なる改善が望まれる。
- (5) 薄片化
今後のR&Dが必要



X線ナノ集光素子・ナノイメージング

竹内 晃久 先生 (JASRI)



- (1) X線顕微鏡の現状: 各手法の空間分解能、位相感度の現状
- (2) X線ナノ集光素子
 - i) 既存の集光素子(ミラー、FZP etc.) $\sim 10\text{nm}$ あたりが理論限界
 - ii) nm分解能実現可能な集光素子
 - 複合屈折レンズ(CRL): $\sim 2\text{nm}$
 - 多層膜ラウエレンズ: $\sim 1\text{nm}$ (現状1次元で20nm以下を達成)
- (3) X線CTの空間分解能(レンズ使用の場合)

焦点深度がCTの視野を決定
焦点深度は分解能の二乗に比例するので、分解能の向上に伴い視野は急激に狭くなる……

→ 目標とする分解能: (sub) 30nm
→ (平野コメント) レンズなしイメージングで更なる高分解能化は可能か？
- (4) ERLコヒーレントナノイメージング実験における課題点
 - ・振動: 光学系、光源、地盤、建物(現在数十nmで定常的に測定している)
 - ・温度安定性: 現在0.01度の温度管理、数十nm/数hの安定性
 - ・放射線損傷、冷却: 光学素子の放射線耐性、今のところ解決、ERLでは？
 - ・ナノオーダーの計測法
 - ・スペックル: スペックルの制御は次世代光源において重要な課題
 - ・No optics is the best optics?



SOI次世代高速2次元検出器

新井 康夫 先生 (KEK)



(1) 従来のPADより優れている点

- ・SOI技術を利用して放射線センサーと読み出しエレクトロニクスを一体化

(2) 特徴

- ・高レート、高速読み出し、高分解能化・低価格化が可能、耐放射線
- ・ピクセルごとに高機能なデータ処理回路を搭載でき、従来不可能であったような計測を可能にする

(3) 開発した素子のスペック

例) 128x128 pixel 20umx20um pixel

(4) 評価実験: イメージング実験、放射光による評価実験

(5) その他のR&D

Buried P-Well (BPW)、Vertical 3D Integration、SOI APD Pixel構造の研究



Open Questions

次世代放射光で必要な検出器のスペックは？

1. X線0次元高速検出器

- ・時間分解能、ダイナミックレンジ etc.

2. X線1次元検出器

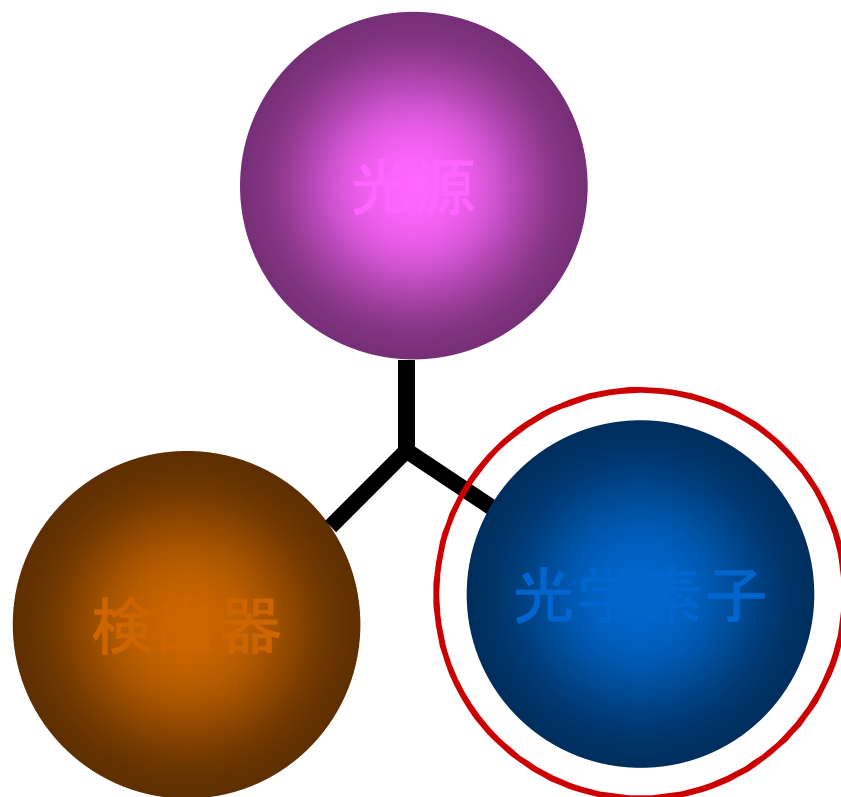
- ・時間分解能、ダイナミックレンジ etc.

3. X線2次元検出器

- ・空間分解能(ピクセルサイズ)
- ・視野の大きさ(ピクセル数Xピクセルサイズ)
- ・データ読み取り速度(時間分解能)
- ・ダイナミックレンジ
- ・感度



極限を実現するための 光源・光学素子/光学系・検出器



- 1) 新しい高性能な光源、光学素子/光学系、検出器は新たなサイエンスの可能性を切り拓く。
- 2) 次世代放射光源の有効利用には光源、光学素子/光学系、検出器の開発研究が必要。どれか一つが欠けても不十分。
- 3) 用途に応じて光源、光学素子/光学系、検出器の最適化が必要。展開するサイエンスの洗い出しの必要性
(本ワークショップ)

Open Question : 開発目標の設定



2. X線光学に関する今後の課題

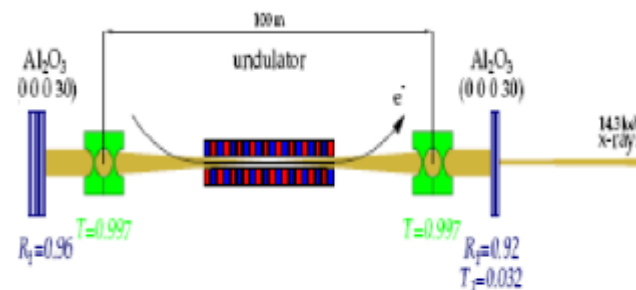
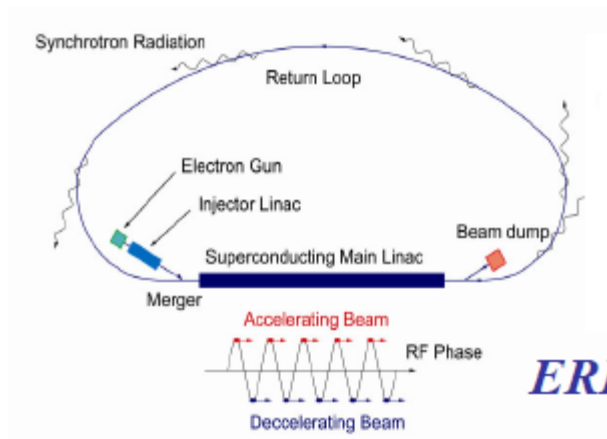
2.1. ERLとX-FELOの光源性能

2.2. 全体像

2.3. 各論：例) X線共振器の場合



2. 1. ERLとX-FELOの光源性能



	平均輝度	ピーク輝度	周波数 (Hz)	バンチ長 (ps)	コヒーレント比	$\Delta E/E$
3 rd SR	$\sim 10^{20-21}$	$\sim 10^{22}$	$\sim 500M$	10~100	$\sim 0.1\%$	$\sim 10^{-4}$ (分光器)
ERL ($\sim 5GeV$)	$\sim 10^{23}$	$\sim 10^{26}$	$\sim 1.3G$	0.1~1	$\sim 20\%$	$\sim 10^{-4}$ (分光器)
XFEL-O	$\sim 10^{26}$	$\sim 10^{33}$	$\sim 1M$	1	100%	$\sim 4 \times 10^{-7}$



ERLの特徴と光学素子への要求



(1) 微小円形光源

* ナノビーム利用研究への期待 → 1nm集光の必要性

(2) 高平均輝度: 3rd SRの約100倍

* 光学素子における光子密度も約100倍 → 熱負荷の問題

(3) 高空間コヒーレンス: コヒーレント比は3rd SRの約100倍

* コヒーレンスを保存する光学素子の必要性

* 高精度波面測定 & 波面制御

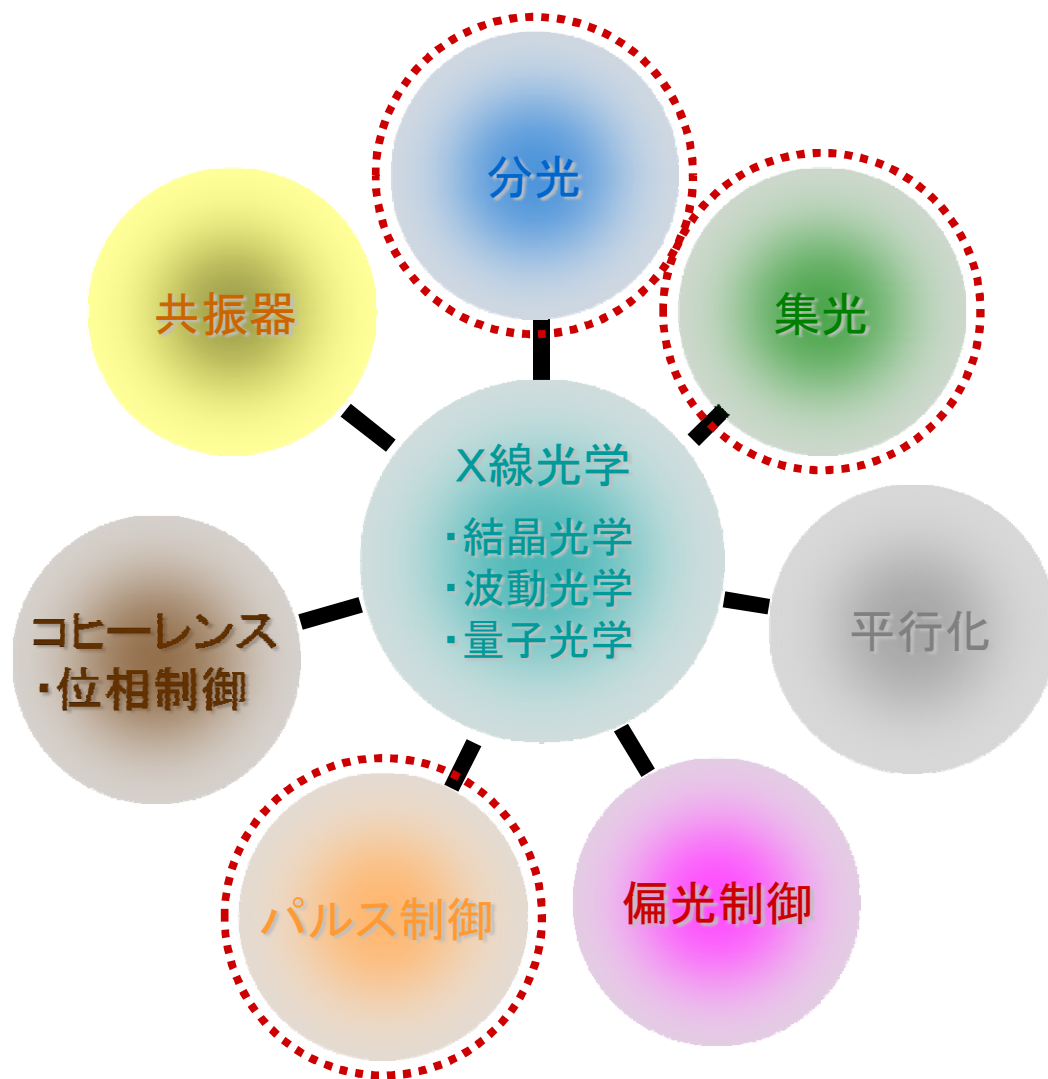
(4) 短パルス: 3rd SRの約1/100

* 放射光とレーザー光の同期の問題

「なにがなんでも同期をとろう！」(SPring-8 田中先生)



2. 2. X線光学に関する今後の課題 ～ 全体像 ～

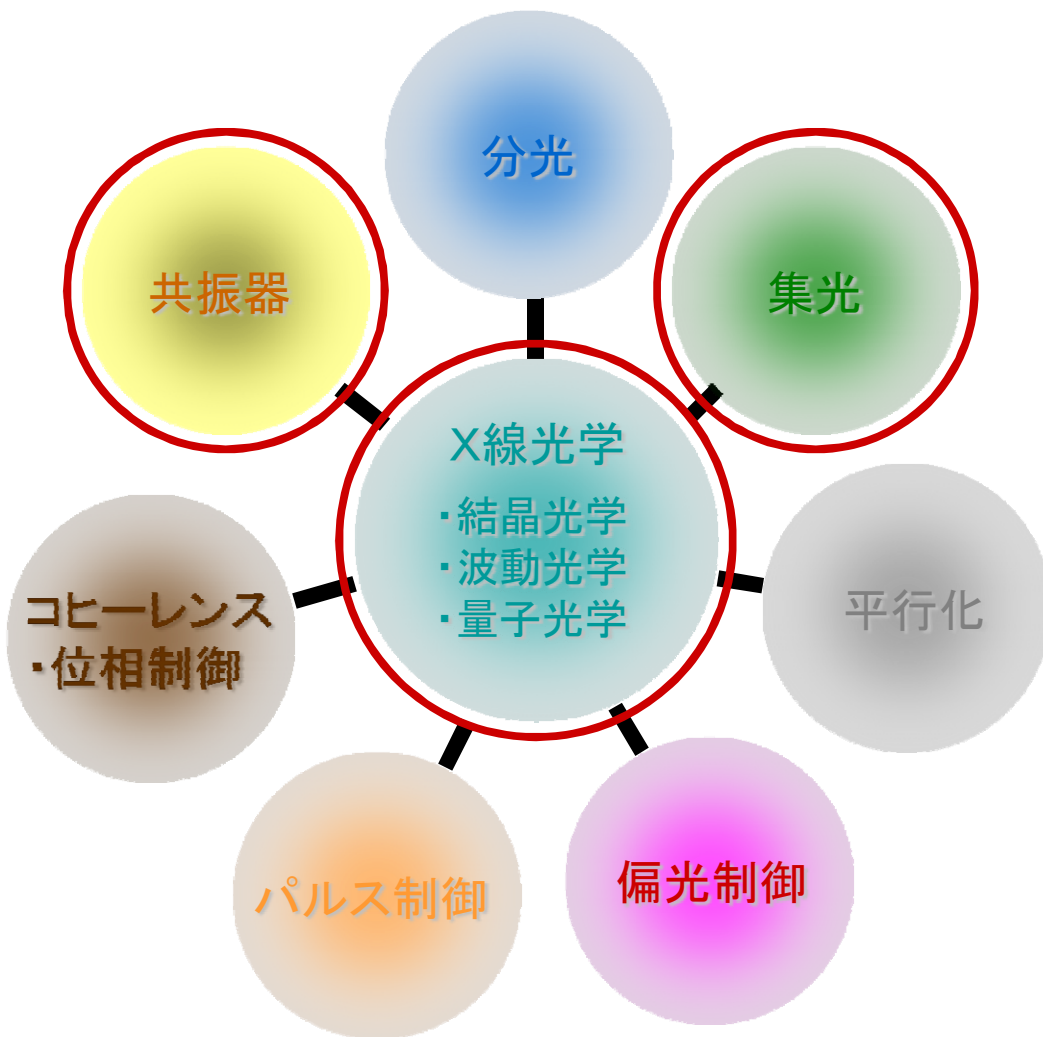


**X線光学開発研究課題
は多岐に渡る**

- 1) 他の放射光施設・大学・
研究機関との協力が必須
- 2) PFが重点的に取り組むべき
テーマの設定



X線光学に関して PFが重点的に取り組むべきテーマ(案)



基盤研究

- ・結晶光学: 二波から多波へ
- ・波動光学 etc.

光学素子・技術開発

- ・ナノ集光素子設計
- ・共振器開発 etc.

超精密評価・制御技術

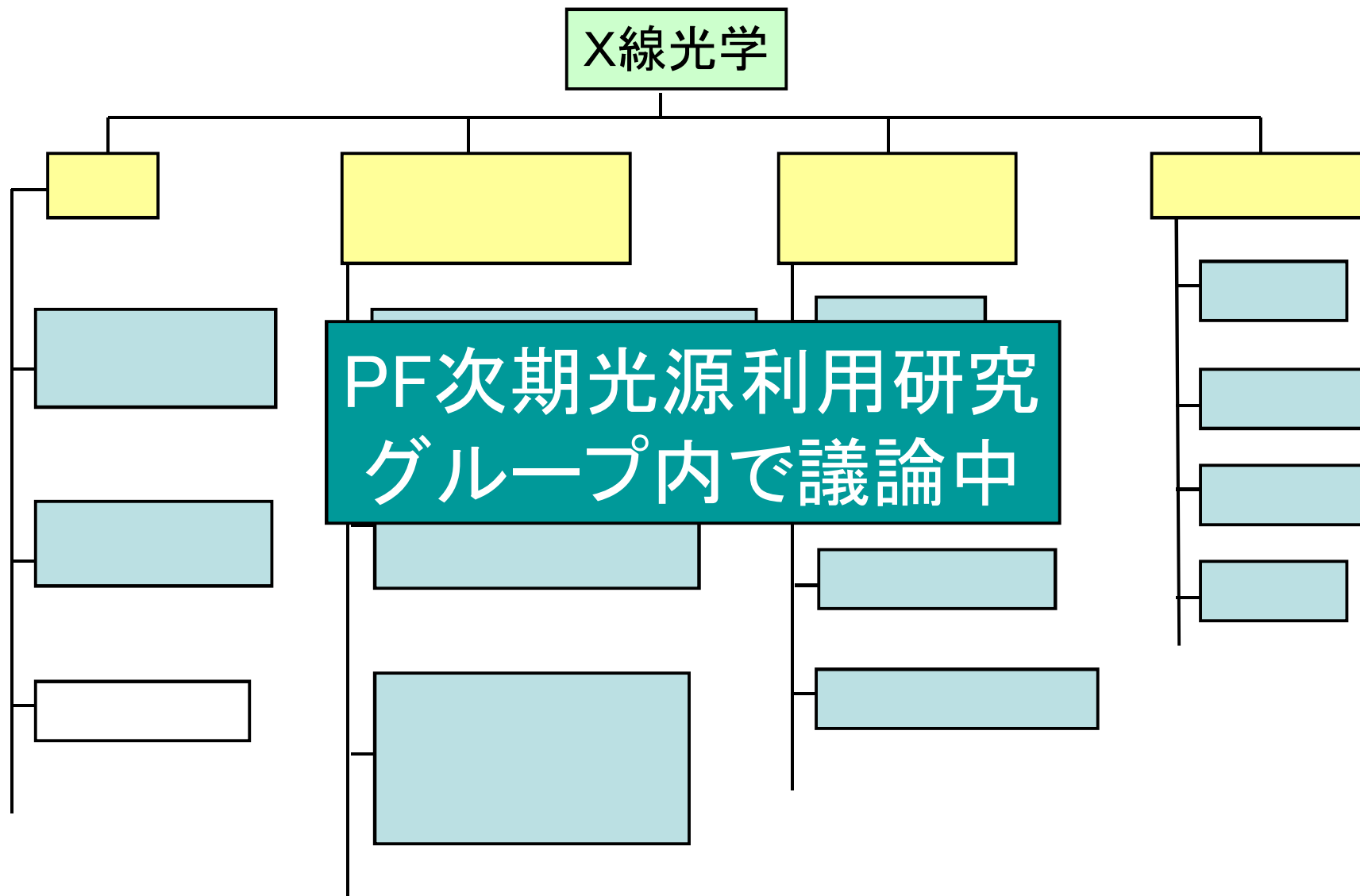
- ・結晶性
- ・位置&角度
- ・温度 etc.

応用研究

- ・イメージング etc.

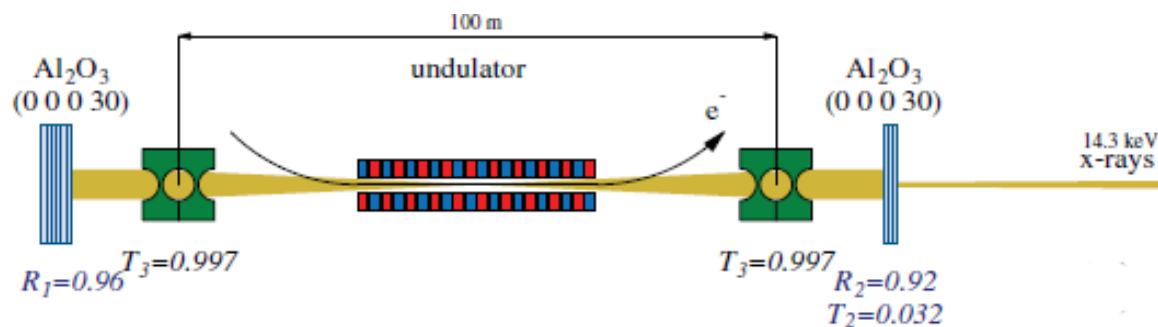


X線光学開発・研究体制(案)





2. 3. X線光学に関する今後の課題: 各論 例) X線共振器の場合



1. X線共振器に求められる条件

- (1) 結晶の完全性
- (2) 高い反射率 $R > 95\%$ 例) 低温に冷却したサファイヤ結晶やダイヤモンド結晶
- (3) 角度の安定性 $\Delta\theta < 8\text{ nrad} \sim 1/500\text{ sec}$

2. この他に検討すべき問題

- (1) 多波回折の影響
- (2) 熱負荷の問題
 - $\text{frep} \sim 1\text{ MHz}$ のとき $\text{Power} \sim 64\text{ W}@70\mu\text{m rms}\phi$ 第三世代光源なみ
 - $\text{frep} \sim 100\text{ MHz}$? 熱計算の必要性



～nrad精度の結晶性評価の可能性



超平面波X線トポグラフィー @ PF BL-15C

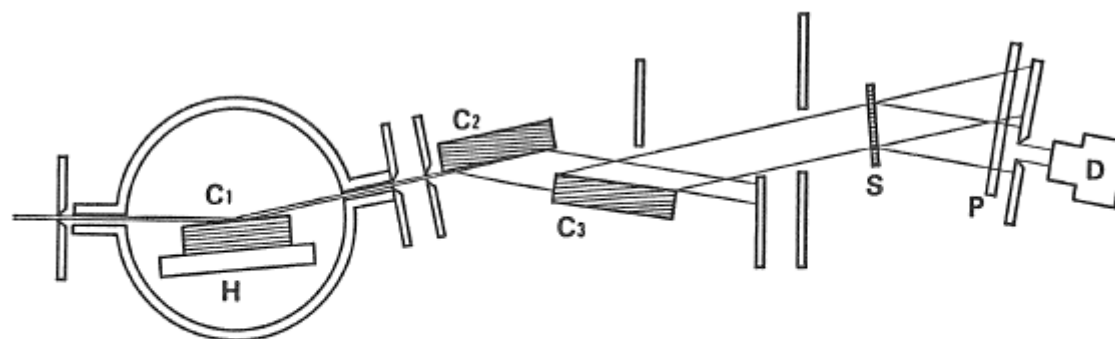


図1 実験配置(正面図)。C₁: プリモノクロメーター結晶、(111)シリコン、111 対称反射。C₂及びC₃: コリメータ結晶、220非対称反射。S: 試料結晶、ラウエケース 220 対称反射。H: 水冷結晶台。P: 真写乾板。 D: 角度位置モニター用シンチレーションディテクタ。

すでに～50nradの精度で結晶性を評価する技術は確立済み
(ただしシリコン結晶の場合について)

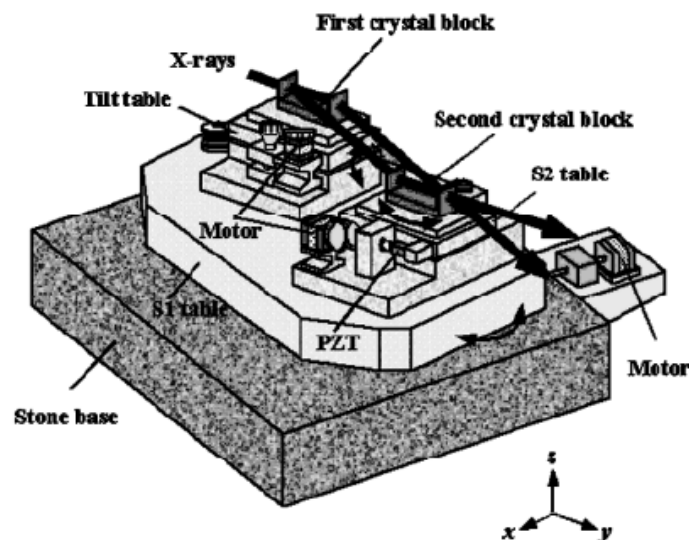
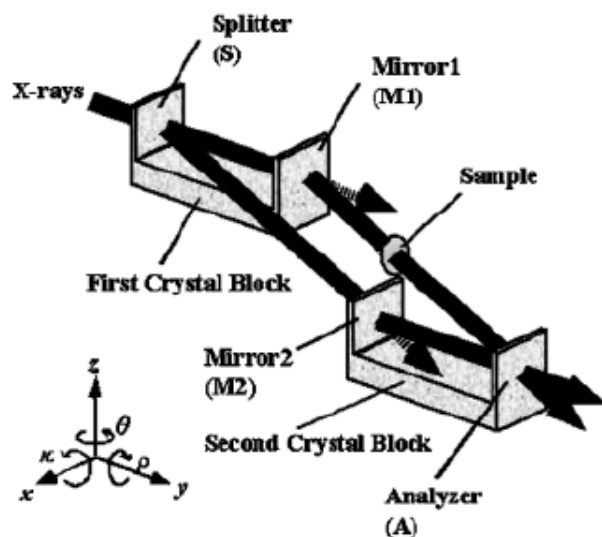
- ➔
- 1) 測定精度の向上(もう一押し?)
 - 2) ダイヤモンドやサファイヤ等への拡張



～nrad精度の角度調整の可能性



分離型X線干渉計(日立・米山ら) @ PF BL-14C1



二つの結晶ブロック間の角度制御を数nrad～sub-nradの精度ですでに日常的に行っている(ただし同一定盤上、水平面内のみ)



- 1) 同一定盤上にはない遠く離れた二つの結晶の調整
(アクティブフィードバックの導入?)
- 2) 水平面内と垂直面内の二次元制御



3. まとめにかえて



Open Questionsの例

* X-FELOの課題

電子銃、加速器、X線共振器

* X線検出器の課題

次世代放射光で必要な検出器のスペックは？

各検出器に関する個々の問題について etc.

* X線光学の課題

次世代放射光で必要な光学素子の性能

他の放射光施設・大学・研究機関との協力体制について

PFが重点的に取り組むべき戦略的課題は？

各光学素子に関する個々の問題について etc.