

日大LEBRAにおける加速器 光源の開発とその現状

日本大学量子学研究所電子線利用研究施設
(LEBRA: Laboratory for Electron Beam Research & Application)

早川 恭史

Outlines

1. 施設沿革
 1. 日本大学放射光利用計画
 2. 学術フロンティア推進事業
2. 125MeV電子リニアックとビームラインの仕様
3. 3種類の光源開発と特徴的な応用
 1. 近赤外自由電子レーザー (FEL)
 2. パラメトリックX線放射 (PXR) によるX線源
 3. THz領域コヒーレント放射光源
4. 現状の問題点と今後の展望

日本大学と加速器研究

- 1957年 日本大学原子力研究所（現量子科学研究所）
設立（核融合研究をターゲット）
- 1975年 π 中間子によるがん治療計画（ π 計画）開始
- 1989年 35MeVダブル・サイデッド・マイクロトロン完成
- 1992年 自由電子レーザー（FEL）放射光利用計画開始
- 1997年 125MeV電子リニアック完成
- 1998年 100MeV電子ビーム加速成功
- 2001年 FELファースト・レージング達成@1.5 μ m
- 2003年 光源共同利用研究開始

日本大学放射光利用計画

東北大、KEK、電総研、動燃などの関連研究機関の
協力・助言 ⇒ 紫外～赤外領域のFELによる放射光利用
学内外の共同利用を構想

電子加速器: マイクロトロン ⇒ リニアック
KEKから陽電子発生用リニアックの移設で実現

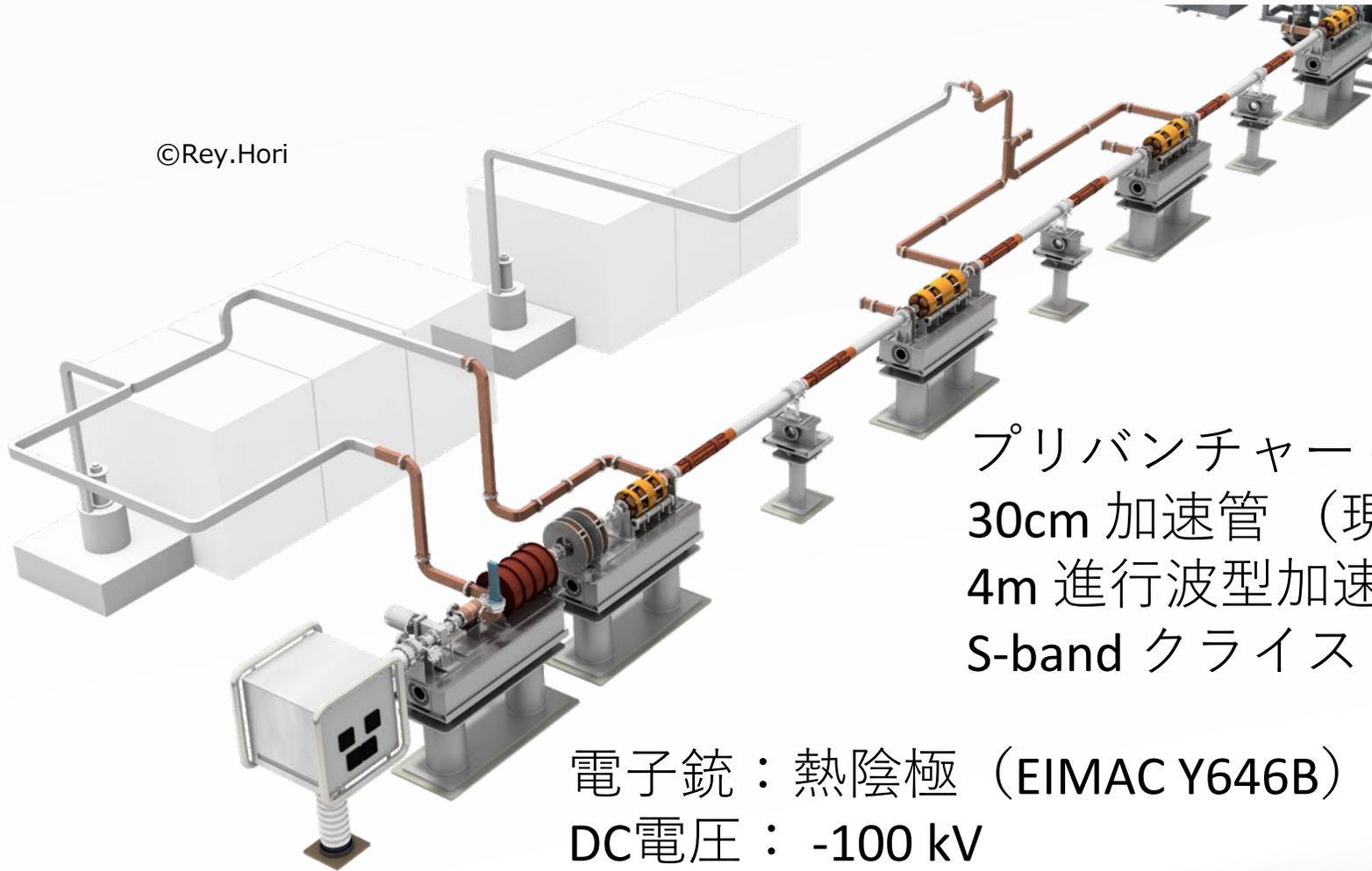
共同研究「大強度電子線形加速器の高度化と大出力短波
長自由電子レーザーの開発研究」をKEKと締結

(題目、参加者を変更しながら現在まで更新・実施中)

施設名「電子線利用研究施設 (**LEBRA: Laboratory for
Electron Beam Research and Application**)」

LEBRA電子リニアックの構成と当初の利用計画

©Rey.Hori



- 紫外～近赤外共振器型FEL
- アンジュレータ放射光
- 電子線照射
- 低速用電子源

プリバンチャー+バンチャー
30cm 加速管（現在は撤去）

4m 進行波型加速管 X 3

S-band クライストロン（PV3030） X 2

電子銃：熱陰極（EIMAC Y646B）

DC電圧： -100 kV

（計画）光陰極電子銃（LaB6）

放射光計画の開始と近赤外FELへの転換

1998年 電子ビーム加速成功

488nm アンジュレータ自発放射光観測

アンジュレータ磁場劣化 ⇒ FEL発振せず

2000年 近赤外仕様のアンジュレータ磁石列に交換
(周期長：24mm → 48mm)



学術フロンティア推進事業によるビームライン整備

2000年 文科省の私立大学学術研究高度化推進事業の1つである学術フロンティア推進事業に「可変波長高輝度単色光源の高度利用に関する研究」が採択（半額助成）

（2000 – 2004年度， 継続2005-2007年度： 合計 約17億円）

医学医療系・生物系のプロジェクト

⇒ 理工系を含む学際的プロジェクト

FEL輸送ビームラインの整備、ユーザー実験棟の建設

追加⇒ パラメトリックX線放射（PXR）を用いた
X線源用ビームライン建造

ユーザー実験棟の建設



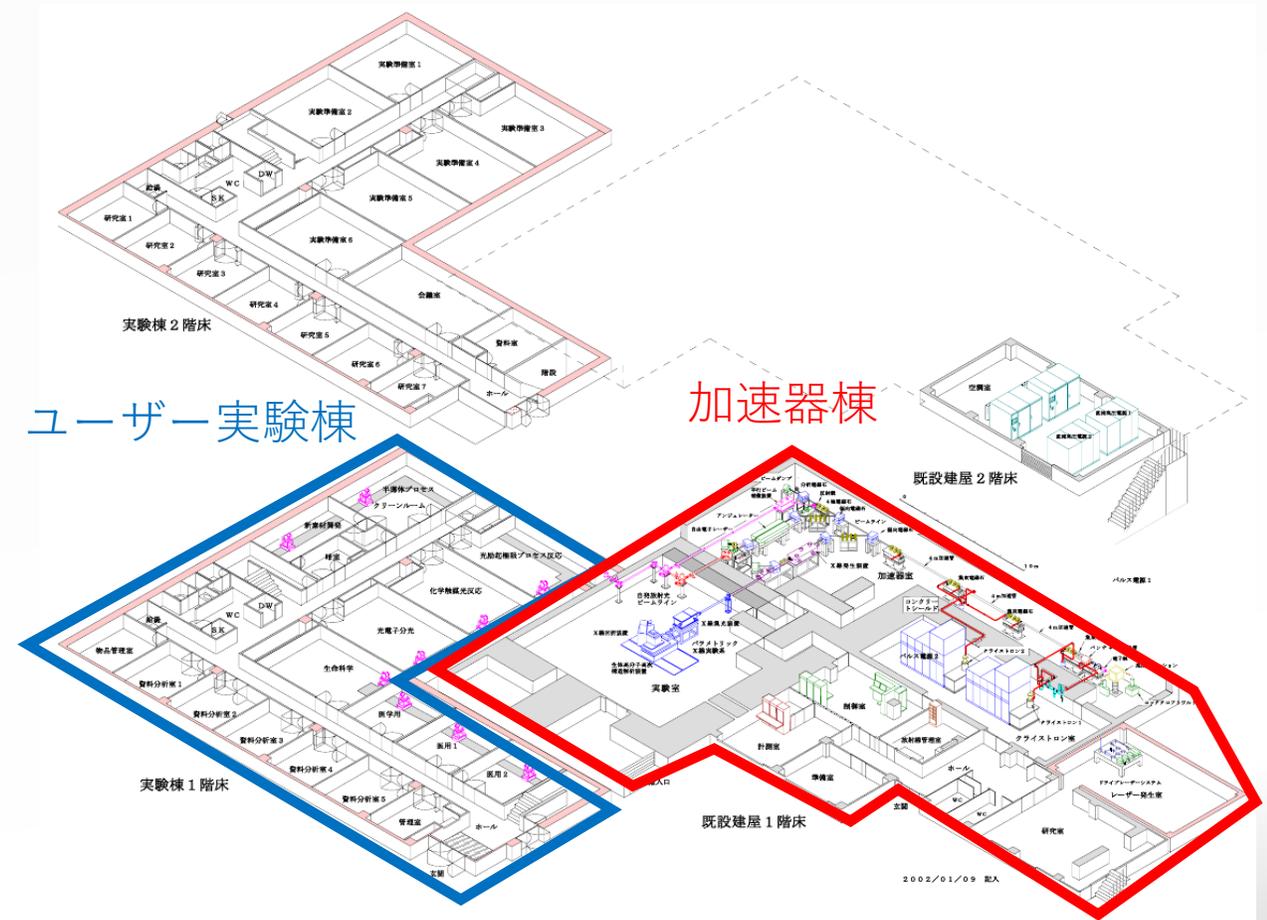
2001年3月竣工

1 F: FEL実験室 8室

各種実験準備室

2 F: スタッフ居室

会議室・実験準備室



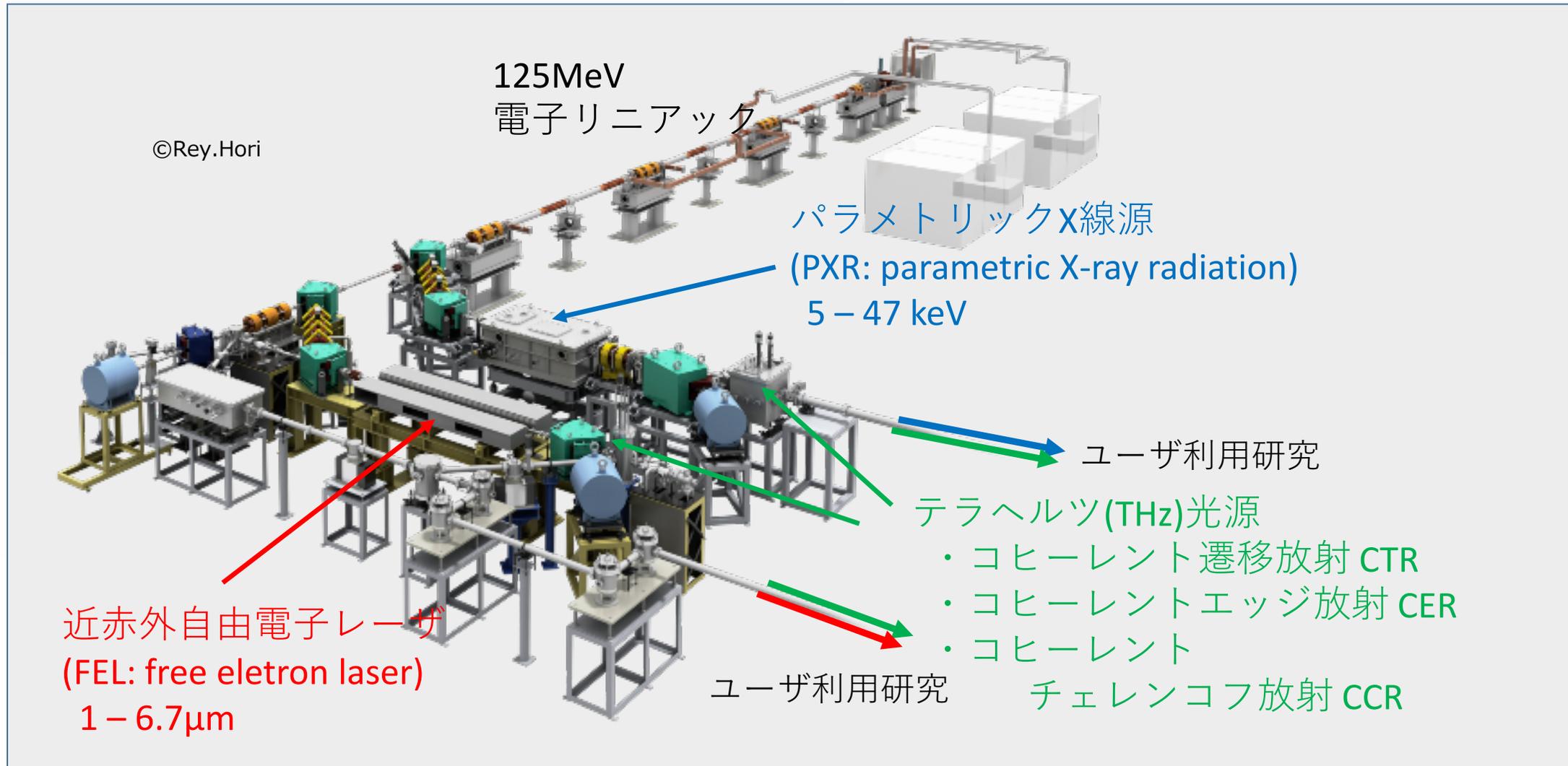
日大125MeV電子リニアック

最大電子エネルギー	100 MeV
加速周波数	2856 MHz
クライストロン出力	30 MW × 2
マクロパルス幅	$\leq 20 \mu\text{s}$
マクロパルス電流	$\leq 200 \text{ mA}$
繰り返し	$\leq 12.5 \text{ pps}$
最大ビーム電力	0.8 kW
規格化エミッタンス	$< 20 \pi \text{ mm mrad}$

太字： 放射線使用施設としての許可条件



2本ビームラインと3種類の光源



非破壊型BPM導入

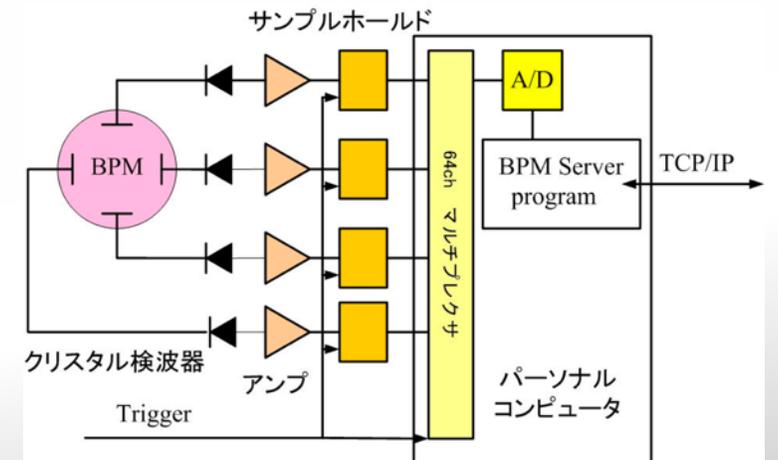
蛍光板モニターが放射線源となり
アンジュレータ磁石列損傷の恐れ

↓ 蛍光板を廃止

RFピックアップ型ビームポジションモニター
(BPM) を多数導入

ストレート・FEL・PXRライン：計 14台
電荷重心を $10\mu\text{m}$ の精度でモニター
(ビーム形状の観測不可)

45° 偏向部でマクロパルス内エネルギー変動
モニター可能 ⇒ アクロマー調整に活用



クライストロンの長パルス化

使用クライストロン：三菱電機PV3030系

KEKより譲渡されたPV3030A1で $20\mu\text{s}$ の長パルス運転を模索（仕様では $2.5\mu\text{s}$ ）

⇒ 真空窓の破損を多く経験

⇒ 真空窓近傍の排気系強化により $20\mu\text{s}$ 達成

FEL発振の見通しが立つ

以後

独自仕様PV3040N（50MW用窓、IP強化）

およびKEKからのPV3030A3などを使用



近赤外FELの仕様とファースト・レージング

マクロパルス $20\mu\text{s}$ 達成により、
FEL発振実験が本格化

基本波波長 $1.5\mu\text{m}$ 固定で試験
(光共振器：多層膜ミラー)

2001年5月 ファースト・レー
ジング達成 (増幅のみ観測、
飽和には達せず)

磁気回路	Halbach Planar
磁石材質	Nd-Fe-B
周期長	48mm
周期数	50
実効K値	0.6 – 1.4
共振器長	6718.04mm
FEL基本波 波長	0.8 – $6.7\mu\text{m}$

FEL飽和達成と光共振器ミラーの耐性

多層膜ミラーは耐性不足

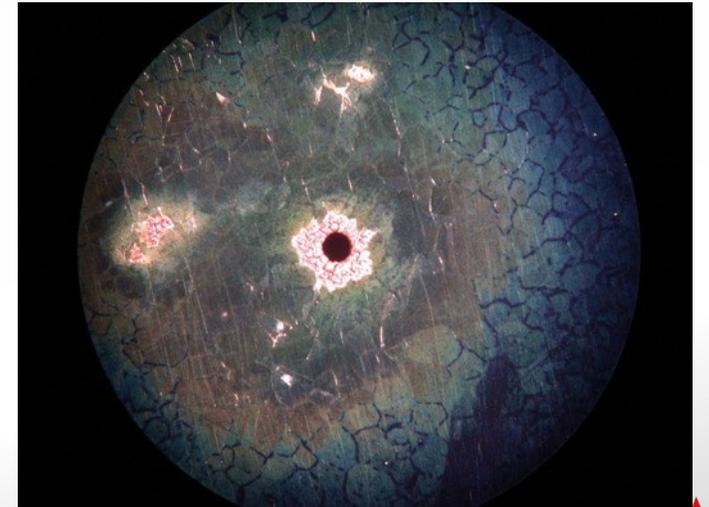
⇒ 金属コートミラーに転換（銅基板・銀コート）

2003年 FEL飽和達成（マクロパルス強度: 5 – 60mJ）

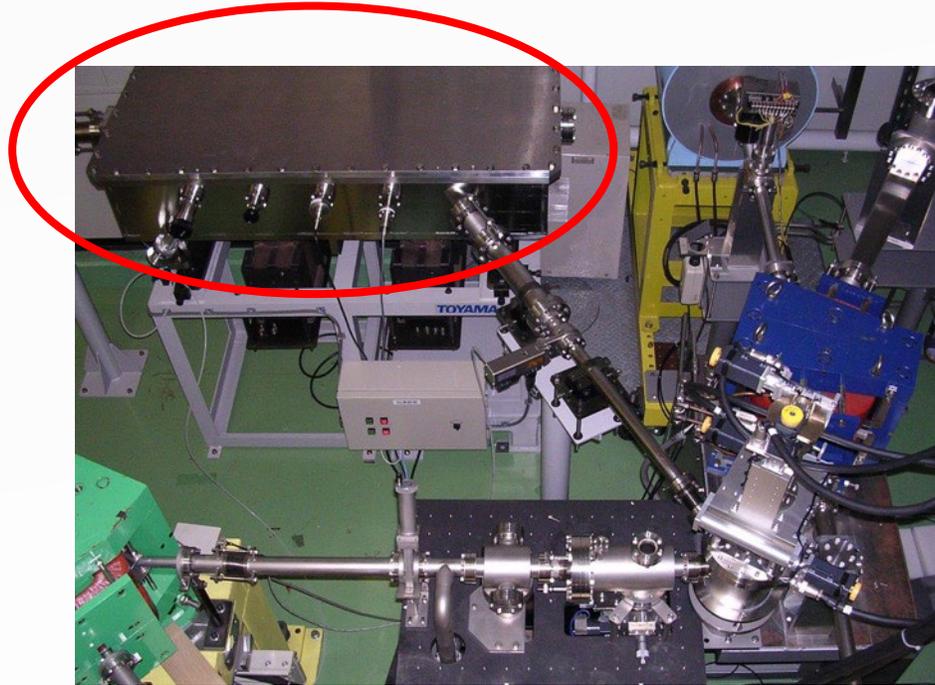
金属ミラーでも1年程度の寿命

短波長領域（ $< 1.5\mu\text{m}$ ）での基本波発振は
原則見合わせ → BBO 高調波変換で対応

交換頻度減少、現在は銅基板・金コート



FEL輸送ラインの整備と利用研究開始



上流共振器ミラー結合穴を焦点とする、楕円面ミラー+放物面ミラー光学系で平行化して輸送（波長毎のアライメント不要）

ユーザー実験棟まで真空ダクトを介して輸送（末端まで50m以上）

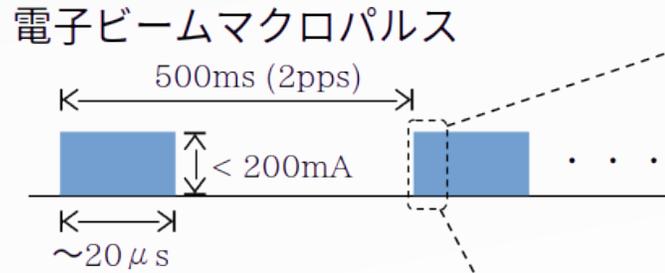


各FEL実験室で排他的に取り出して利用可能

2003年度後期より共同利用開始

バーストモードの運用

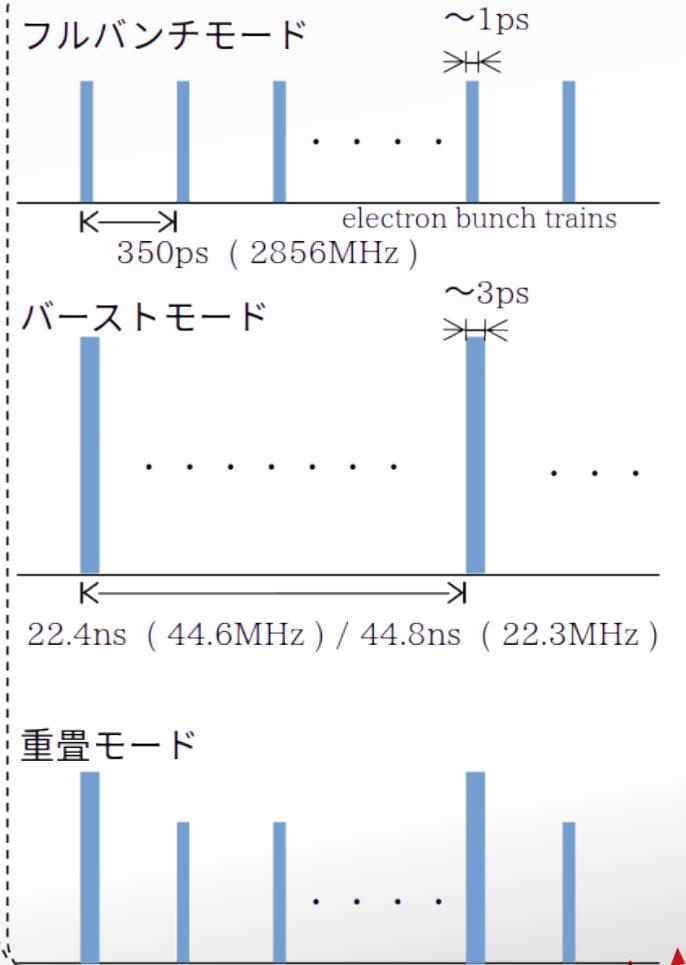
電子銃に高速グリッドパルサーを導入、電子バンチの間引き運転が可能



加速周波数2856MHzの64分周 (44.6MHz)、
128分周 (22.3MHz) で運転可能
(FEL光共振器を光パルスが往復する周波数
22.3MHzに合わせて間引き)

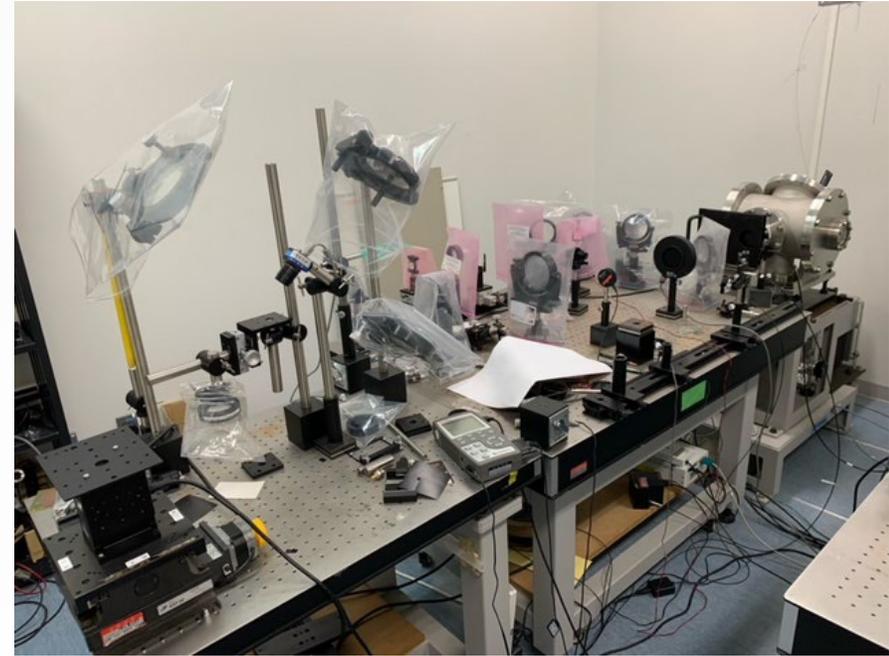
通常フルバンチモード、バーストモード、
両者を頂上したモードで運転可能

バーストモードではバンチ当たりの電荷量が
多く、FEL発振に有利



FELの代表的な応用

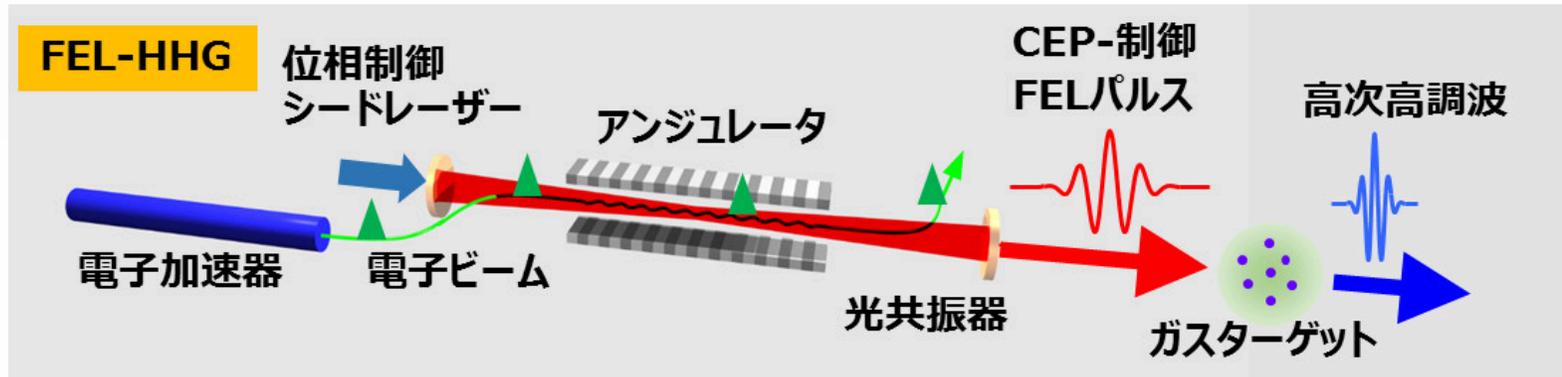
- 高輝度単パルス性を利用したレーザー加工（GHzバースト）
 - 人の歯の掘削
 - LIPSS 微細構造形成
 - ポリ乳酸ドット転写
- 波長選択制を利用した物質制御
 - カーボンナノチューブ・カイラリティ制御（BBO結晶による高調波を利用）
 - セルロース分解（中赤外）



Q-LEAP基礎基盤研究への参画

文科省・量子飛躍フラグシッププログラム（Q-LEAP）基礎基盤研究「自由電子レーザーで駆動する高繰り返しアト秒光源のための基礎基盤技術の研究」（羽島良一）に参画

赤外FELパルスを希ガス高次高調波（HHG）で変換
⇒ 軟X線領域の短パルス光源の実現



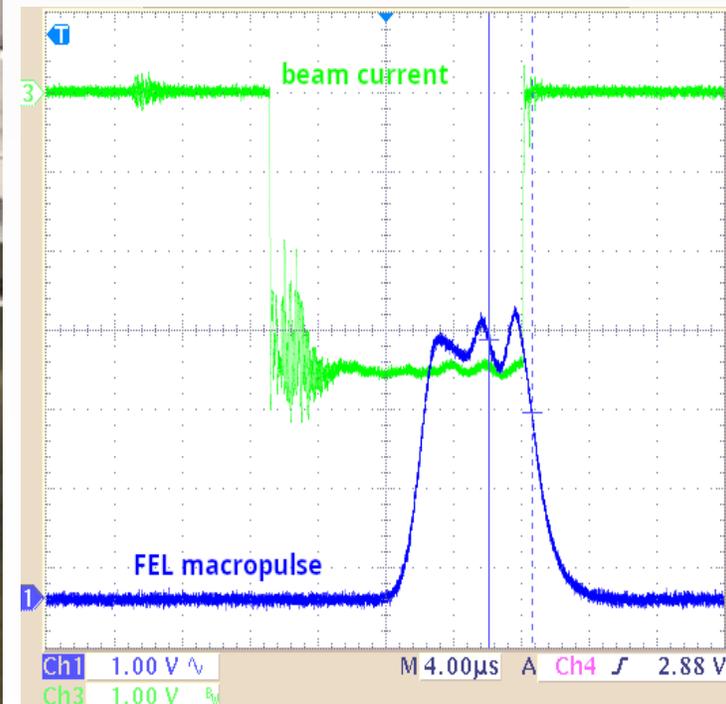
赤外用アンジュレータ磁石列の更新

赤外用アンジュレータの
磁石列も減磁が生じる

2度目の磁石列交換
(信越 → NEOMAX)

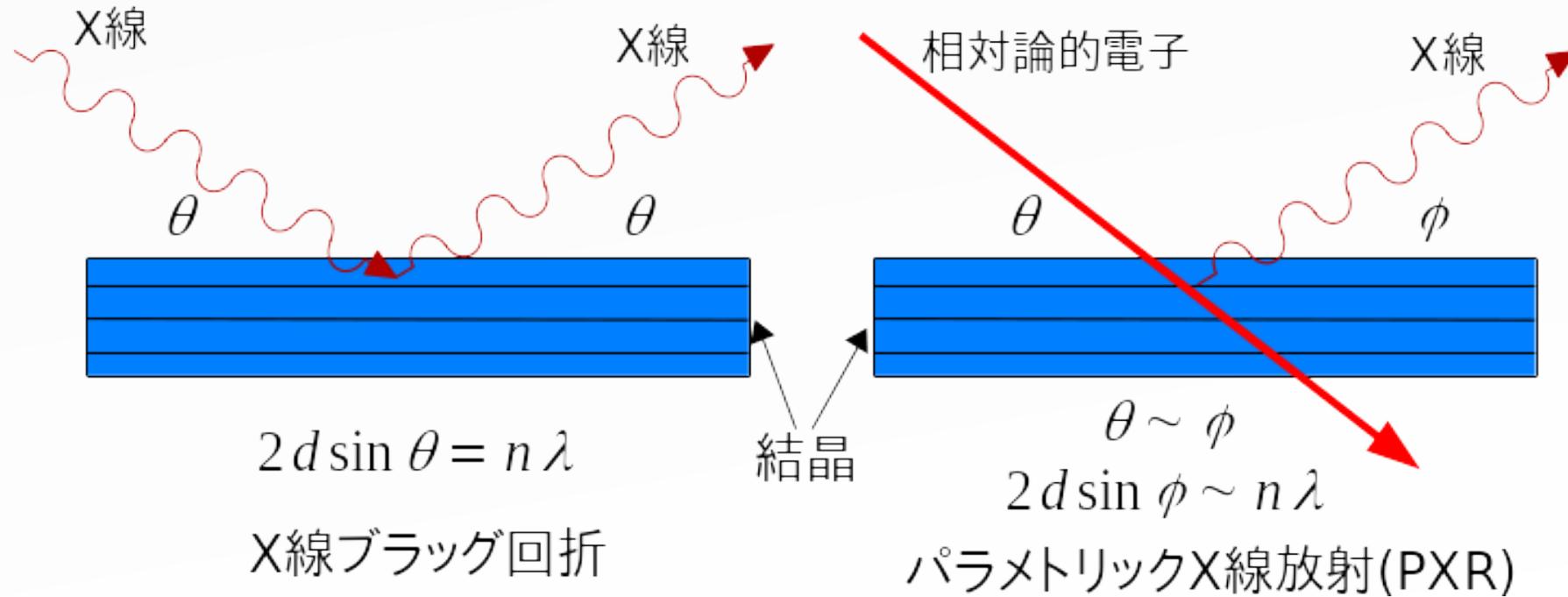
磁気回路端部の見直し
周期数 50 → 49

順調にFEL発振、利用研究
に供給



波長 $3.4\mu\text{m}$ でのFEL発振波形

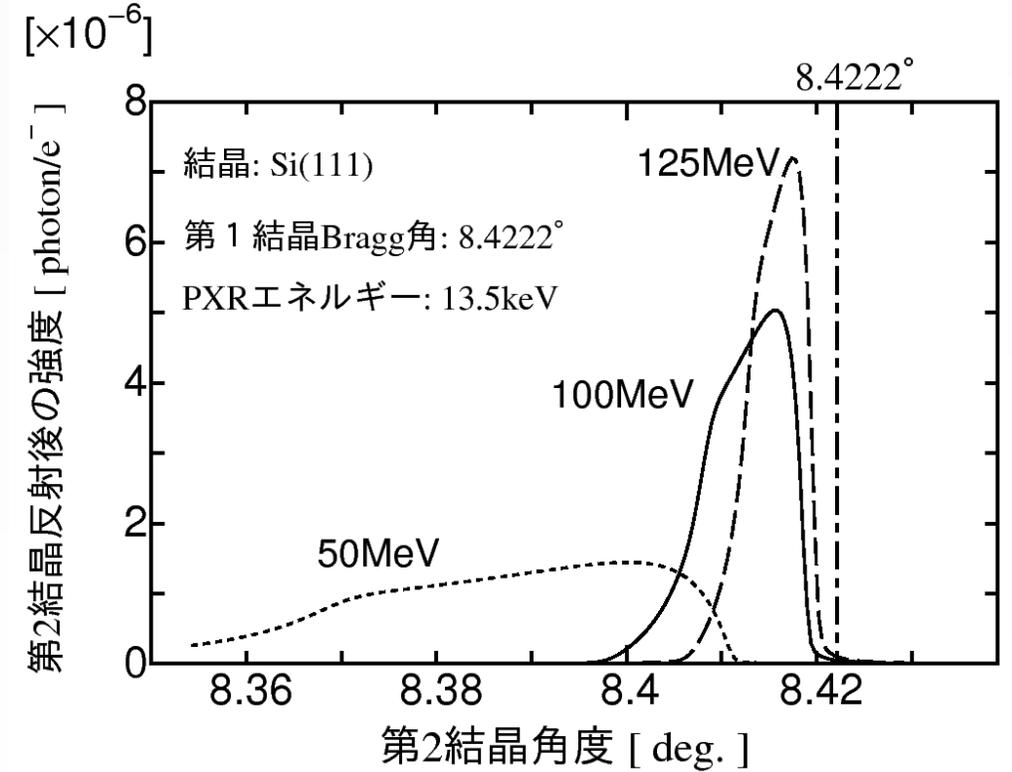
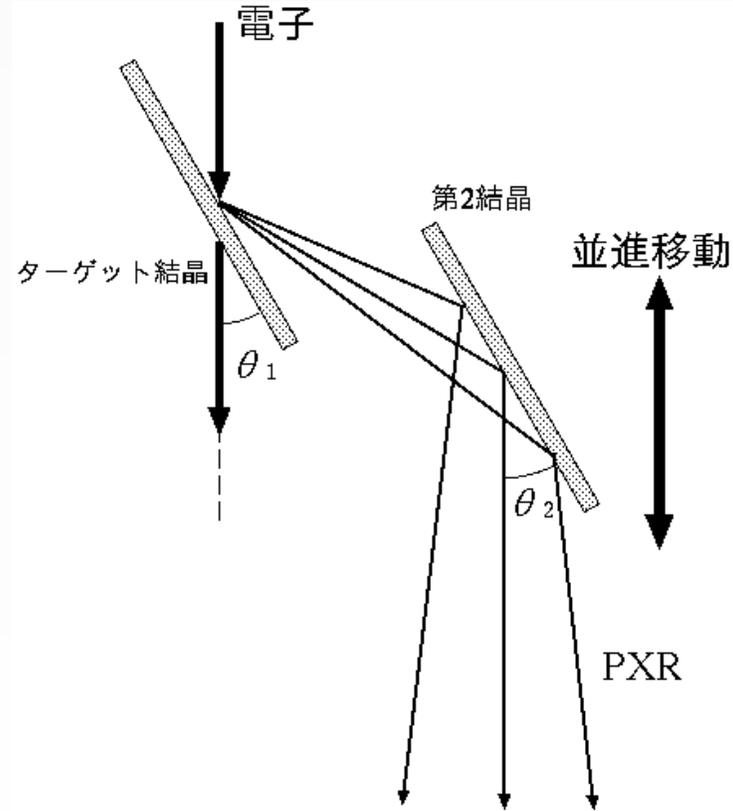
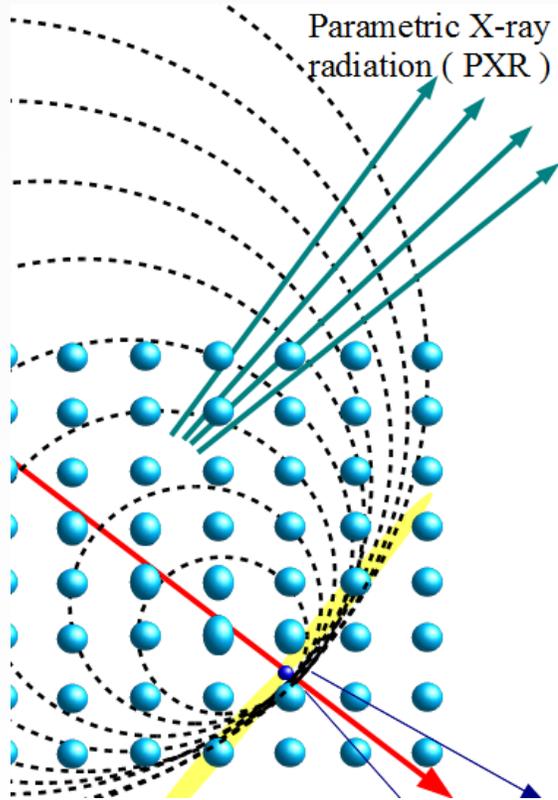
パラメトリックX線放射 (PXR)



外見上はX線Bragg回折に類似、入射光子を相対論的な電子に置き換えた形
(電子電場を担う仮想光子のBragg回折に相当)

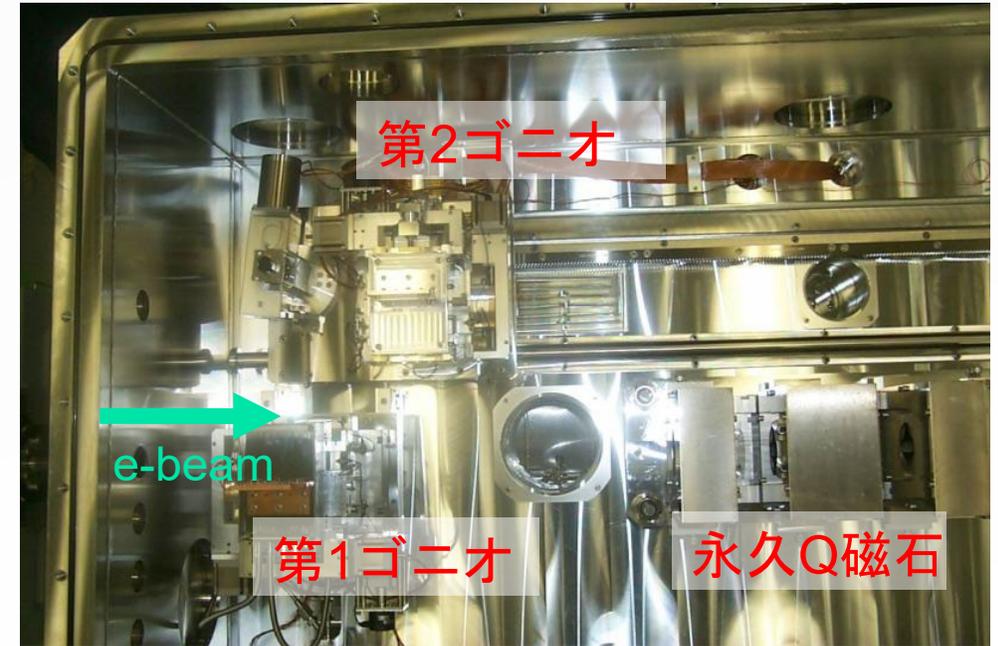
X線エネルギー(波長)は電子エネルギーではなく、結晶の面間隔とBragg角で
決まる (エネルギー可変単色X線源)

2結晶システムによる輸送



円錐広がりによる角度変化とPXRエネルギーの変化（空間チャープ）が、Bragg回折条件において補償しあう（僅かな角度デチューンが必要）
円錐ビーム全体を平面波的に回折可能

LEBRAビームライン



PXR線源：2結晶型システムを採用
遮蔽壁を通して実験室（常時立入可）へ輸送
専用ビームラインを持つ常設PXR線源は世界で唯一

LEBRA-PXR線源の特徴

- **単色性**

- 水平方向にエネルギー変化 $\sim 10\%$
 - 局所的な線幅 0.1%以下 (数eV)

- **連続エネルギー可変**

- ターゲット結晶の“Bragg角”のみで制御

- **広くて平坦な照射野**

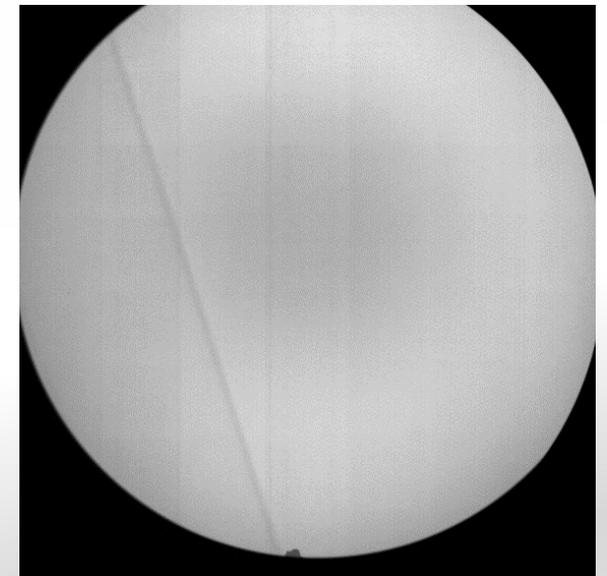
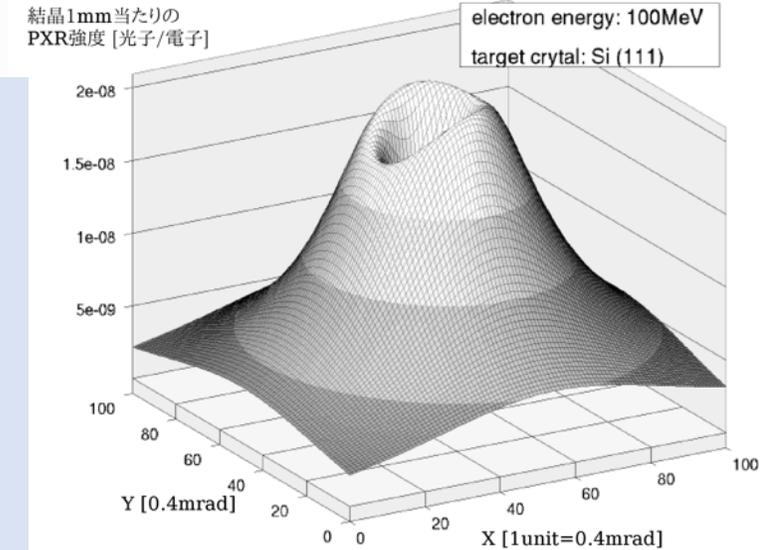
- $1/\gamma$ に依存して広がる円錐ビーム
 - 直径100mm@X線取出し窓

- **空間コヒーレンス**

- μrad オーダーの屈折・散乱を検出可能

- **安定性**

- 電子ビーム軌道を安定にすれば良い
 - X線量の少なさを長時間測定で補うことができる



LEBRA-PXR線源の仕様

電子エネルギー	100 MeV
PXR放射源	Si 単結晶
電子ビームサイズ	0.5 – 1mm (直径)
X線エネルギー	Si(111): 4 – 20 keV Si(220): 6.5 – 34 keV Si(400): 9.1 – 47.4 keV
照射野サイズ (取出し窓@実験室)	100 mm in dia.
X線光子数率	$\sim 10^7$ /s @17.5keV

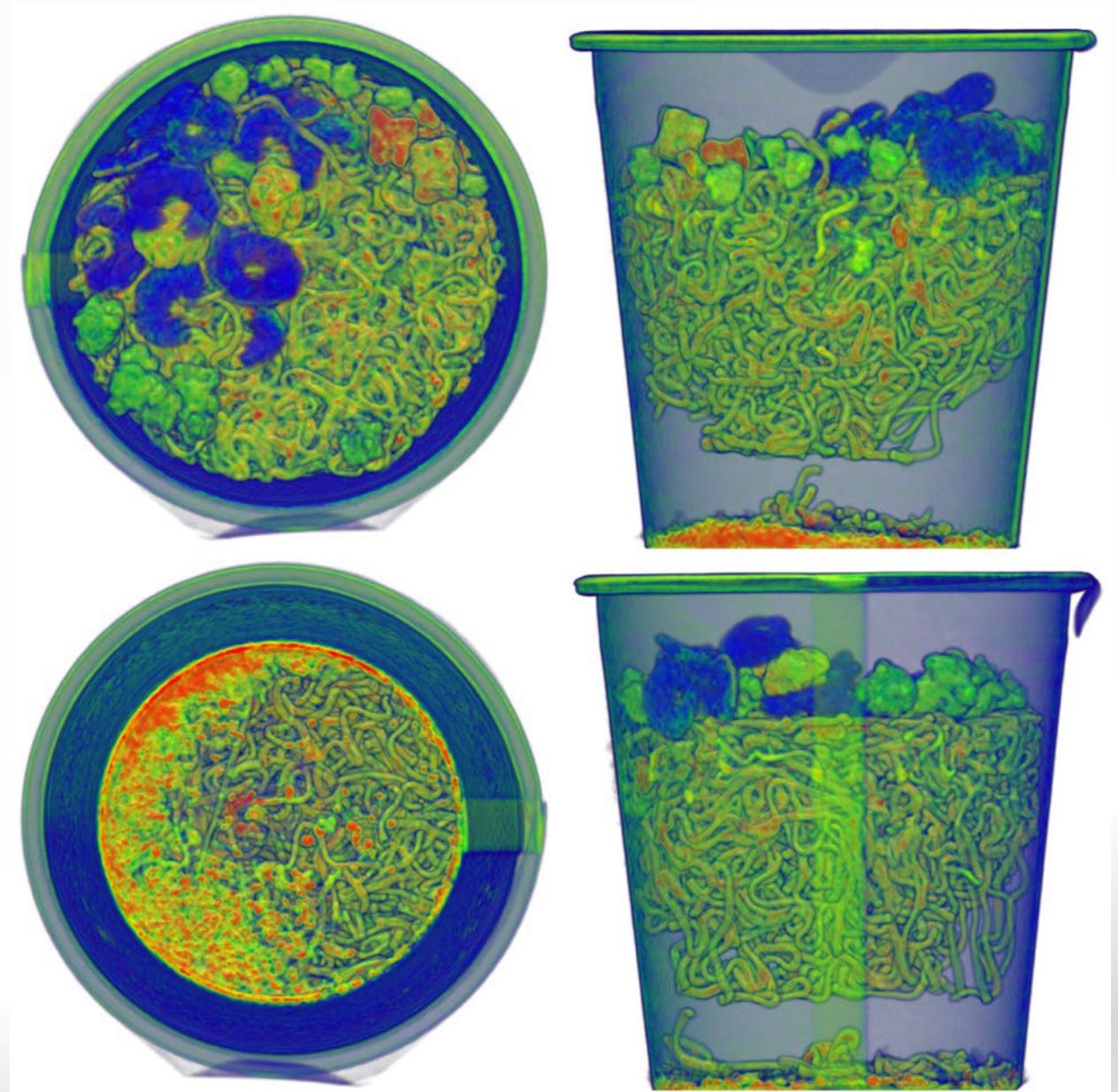
2004年に運用開始



PXR線源の応用（イメージング）

- エネルギー選択単色X線イメージング
X線の吸収に基づくコントラスト
CT(コンピュータ断層撮像)も可能
- X-ray absorption fine structure (XAFS)
分散型XAFS解析が可能(画像として測定)
- 回折強調イメージング
(DEI: Diffraction-enhanced imaging)
数 μ radの屈折/散乱で画像のコントラストを形成
位相コントラスト/(超)小角散乱像
- K端差分法(KES: K-edge subtraction)による元素イメージング
K殻吸収端を利用した元素マップ測定

X線CT撮像



PXRエネルギー（中心）：
22keV
試料：即席カップ麺
投影画像枚数：500枚
測定時間：3.5時間（net）

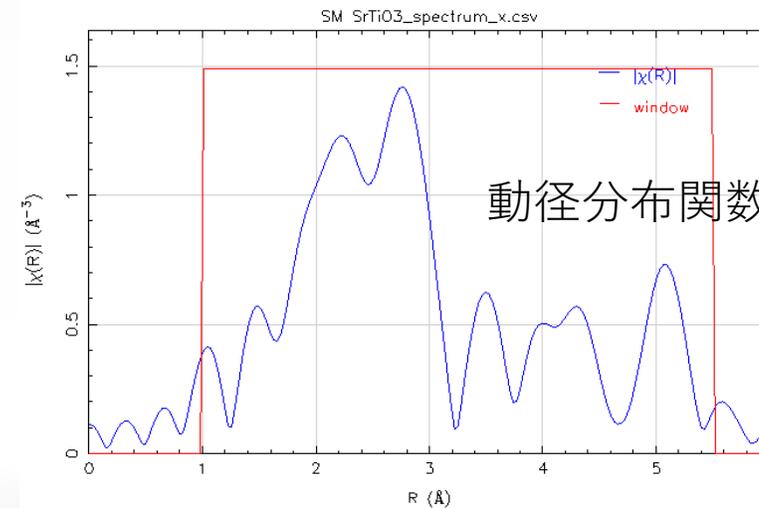
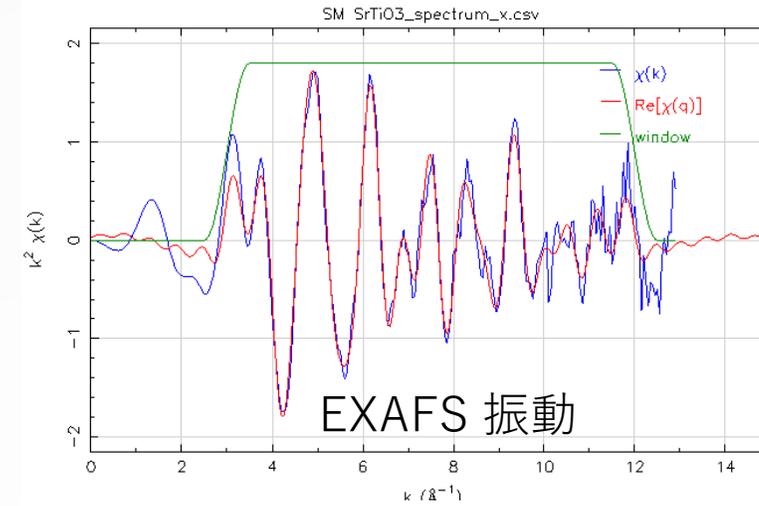
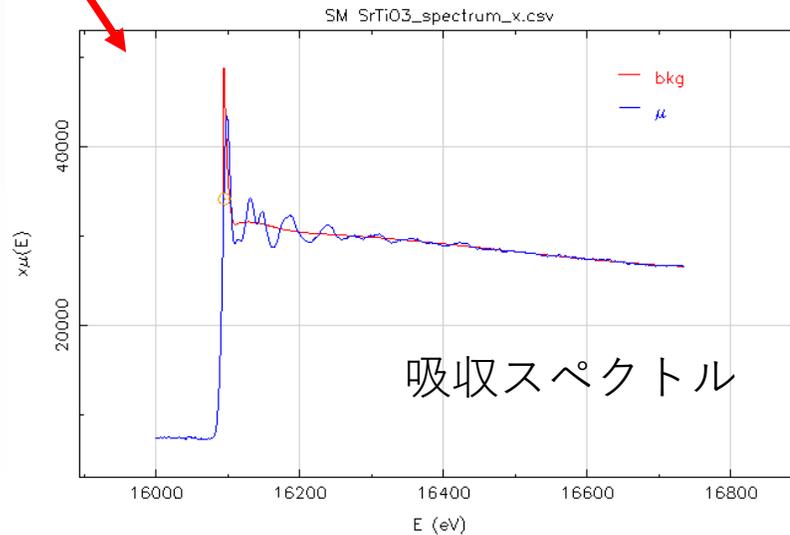
分散型XAFS分析の例



試料
SrTiO₃ (白色顔料)

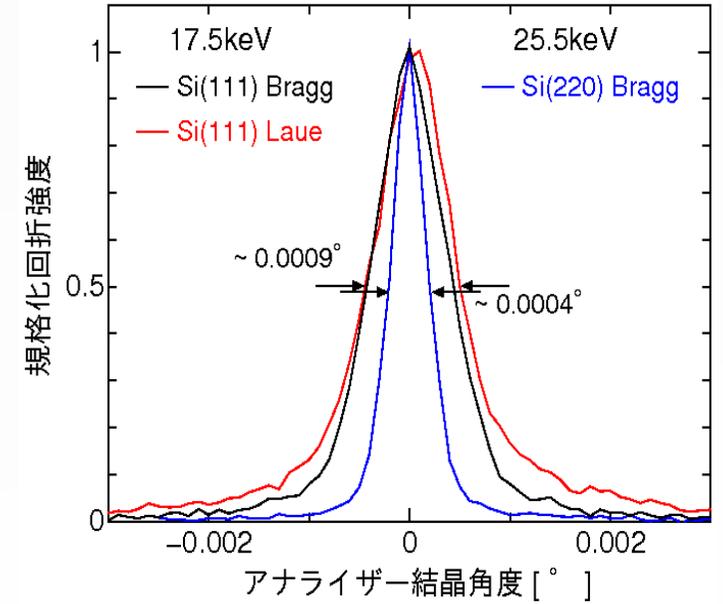
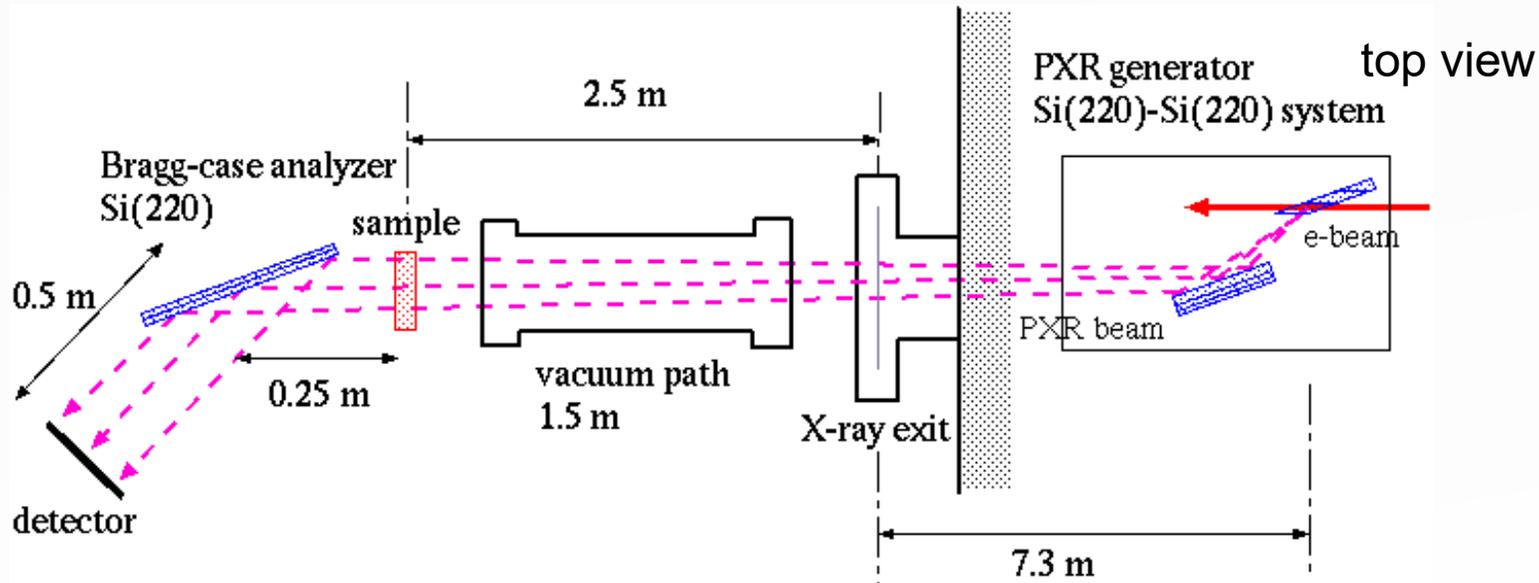
測定時間 30分

検出器: IP



プロファイル内のエネルギー変化 → 吸収像がそのままスペクトル

回折強調イメージング (DEI)

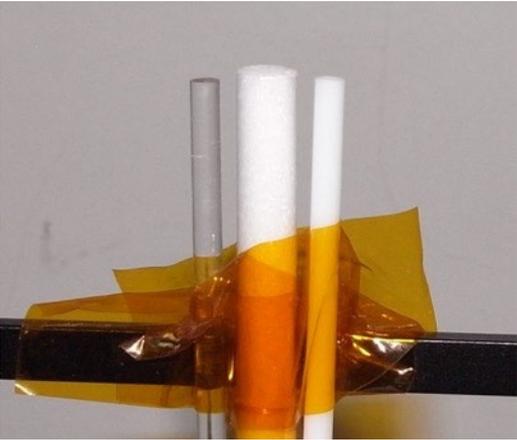


試料物質を透過したX線の
屈折・散乱をアナライザー結晶
による回折で検出する
イメージング手法

画素毎に回折曲線を測定することに相当する

DEIによる吸収像、屈折像、小角散乱像

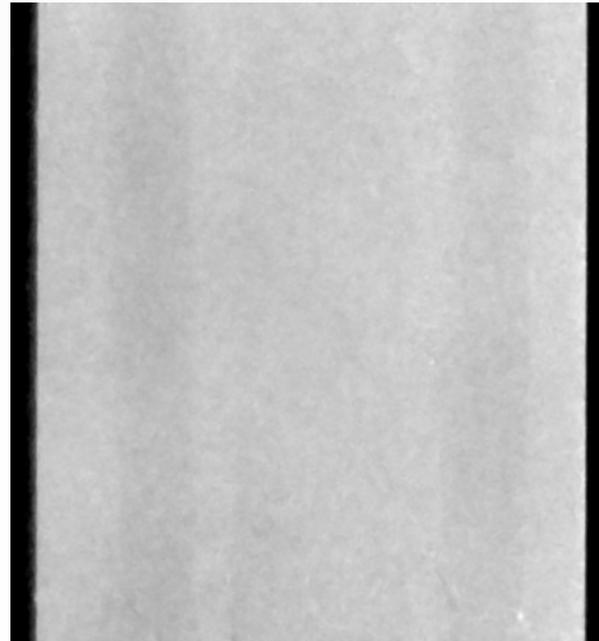
PXRエネルギー: 25.5 keV
吸収がわずかな試料に対して有効



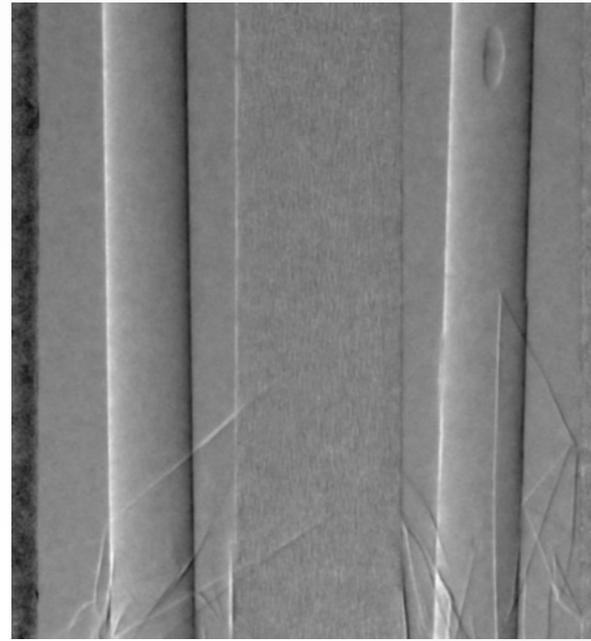
左から
アクリル棒
密度: 1.17 g/cm³

発泡スチロール
密度: 0.16 g/cm³

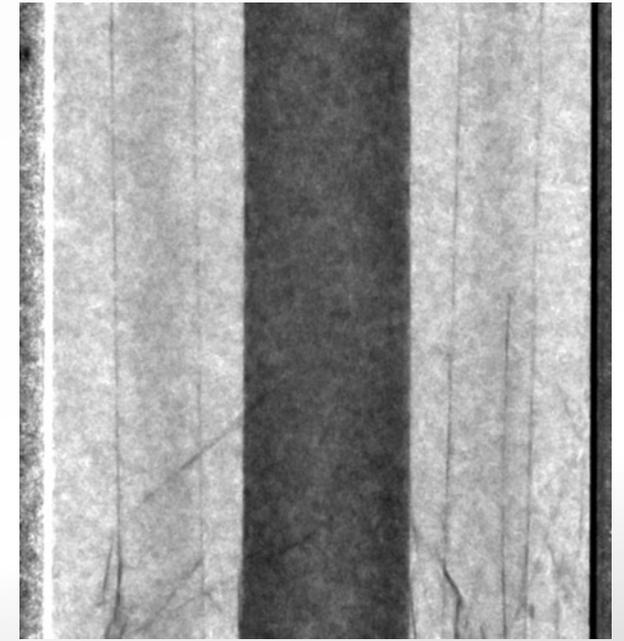
ポリスチレン
密度: 0.986 g/cm³



吸収コントラスト像



屈折コントラスト像
(位相勾配像、微分位相像)

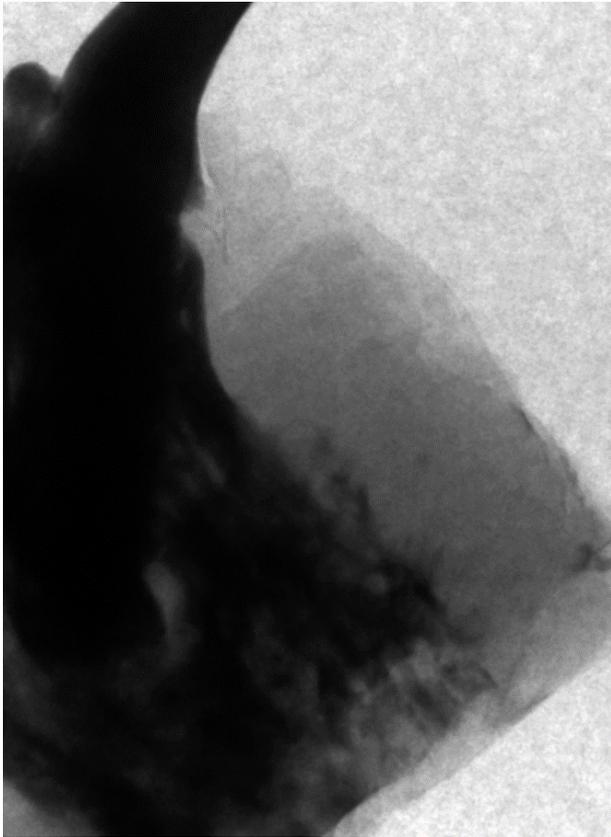


(超)小角散乱
コントラスト像

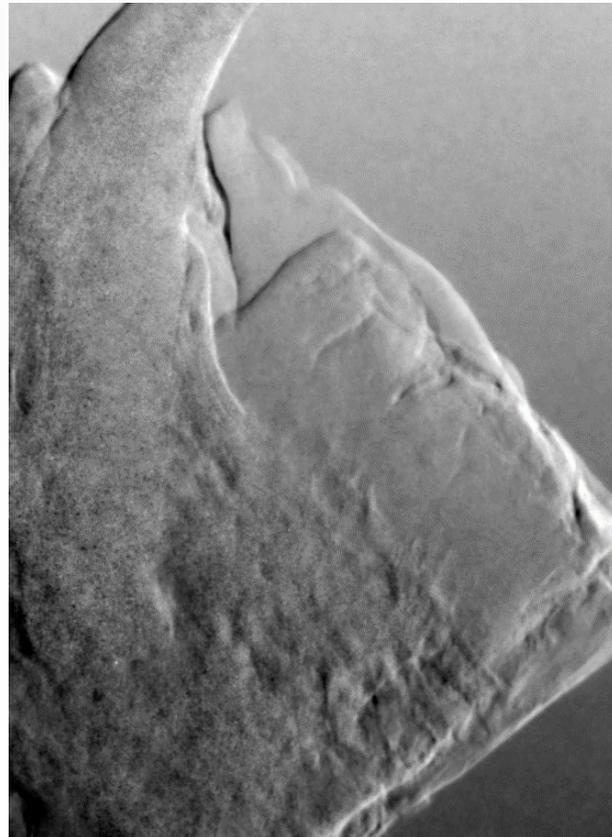
DEIで得られるX線像

試料: ニホンネコ顎骨 扁平上皮癌の切除標本 (松戸歯学部 金田研究室提供)

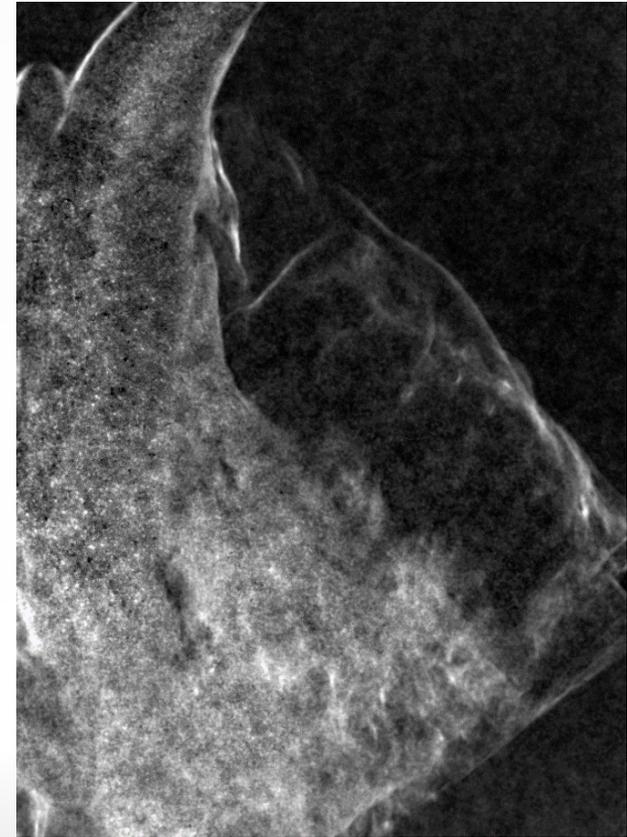
PXR energy: 20 keV (DEI像: 15分撮像 x 5枚 + バックグラウンド像)



吸収像

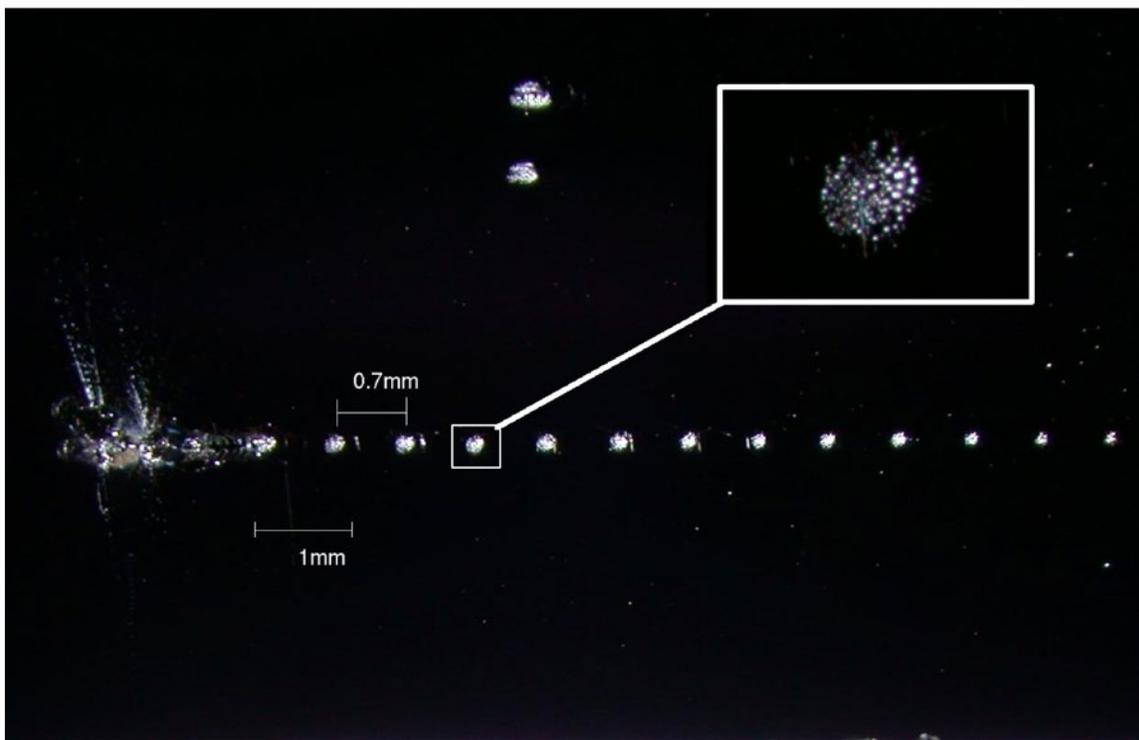


屈折像
(位相コントラスト)



(超)小角散乱(SAXS)像

ターゲット結晶の損傷



運用当初はターゲット結晶の損傷多発
マクロパルス幅 $20\mu\text{s} \rightarrow 5\mu\text{s}$ と制限
ターゲットの損傷リスク大幅に低減



2021年10月、約7年使用したSi(220)
結晶が損傷
入射部集束系の構成変更により、
結晶上のビームサイズがrms半径
0.2mm以下になった可能性



LEBRA高強度テラヘルツ波光源開発(産総研と共同研究)

PXRラインTHz光源：

Ti薄膜、アルミ蒸着ターゲット等からのTHz-CTR(遷移放射)、偏向電磁石からのTHz-CER(エッジ放射)

近赤外自由電子
レーザー(FEL)

4 m × 3 ACC Section
(40~125 MeV)

-100 kV DC gun

Klystron × 2

パラメトリック
X線放射(PXR)

THz光源仕様

THz光 (0.1~2.5THz(@FEL)、
0.1~4.0THz(@PXR))
FELライン：CER (FEL重畳可)
PXRライン：CTR、CER、CCR

PXR

THz

FELラインTHz光源：

アンジュレーター下流側の偏向電磁石で発生させたTHz-CER
FEL重畳輸送、バンチ長評価、ユーザー利用等が可能なビームライン構築

FEL, THz

©Rey.Hori

THz領域コヒーレント放射

コヒーレント遷移放射

(CTR: coherent transition radiation)

薄膜ターゲット通過時に発生

コヒーレントエッジ放射

(CER: coherent edge radiation)

偏向電磁石磁場の出入口で発生

コヒーレントチェレンコフ放射

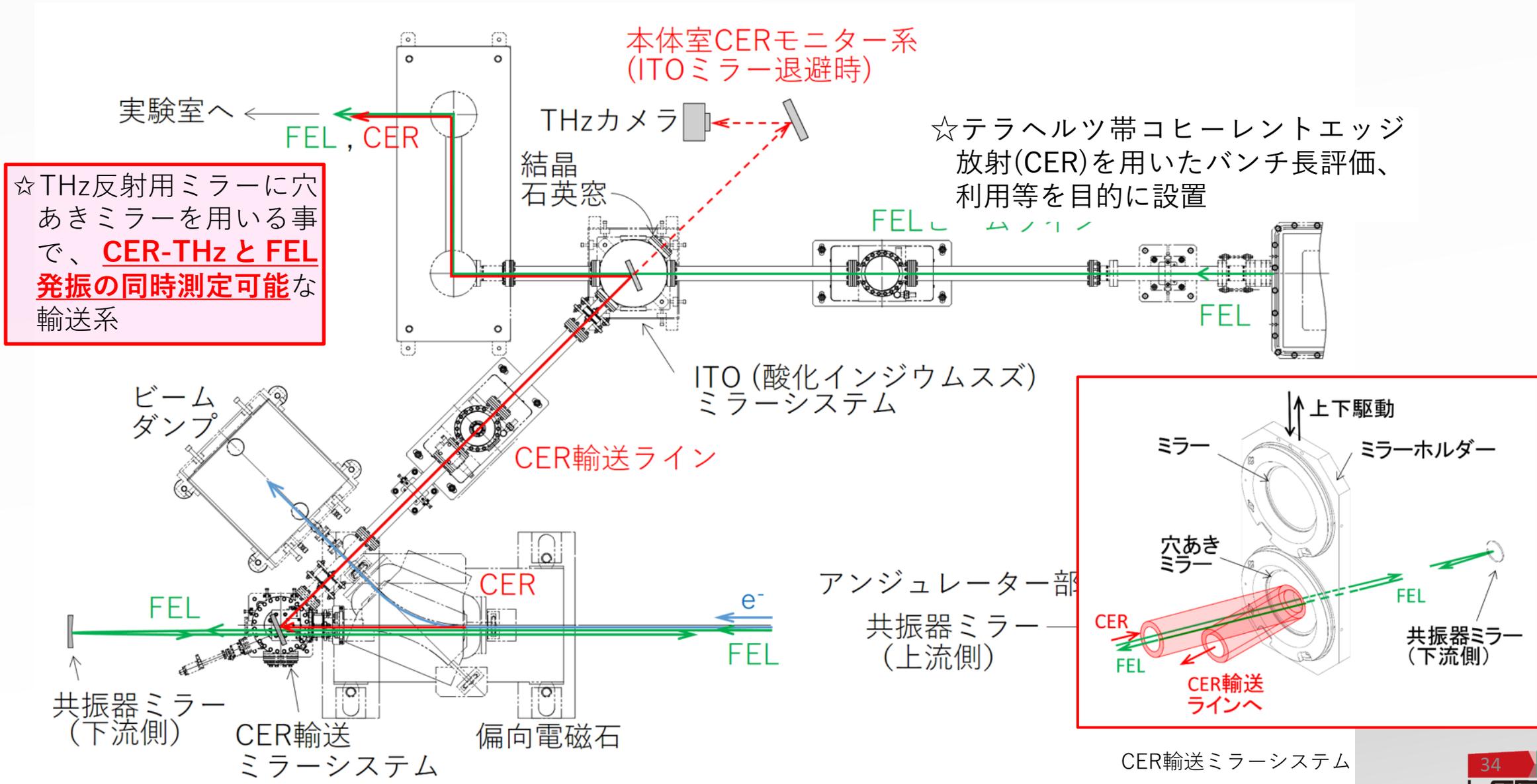
(CCR: coherent Čerenkov radiation)

誘電体近傍通過時に発生

電子バンチ長 ~ 1 ps

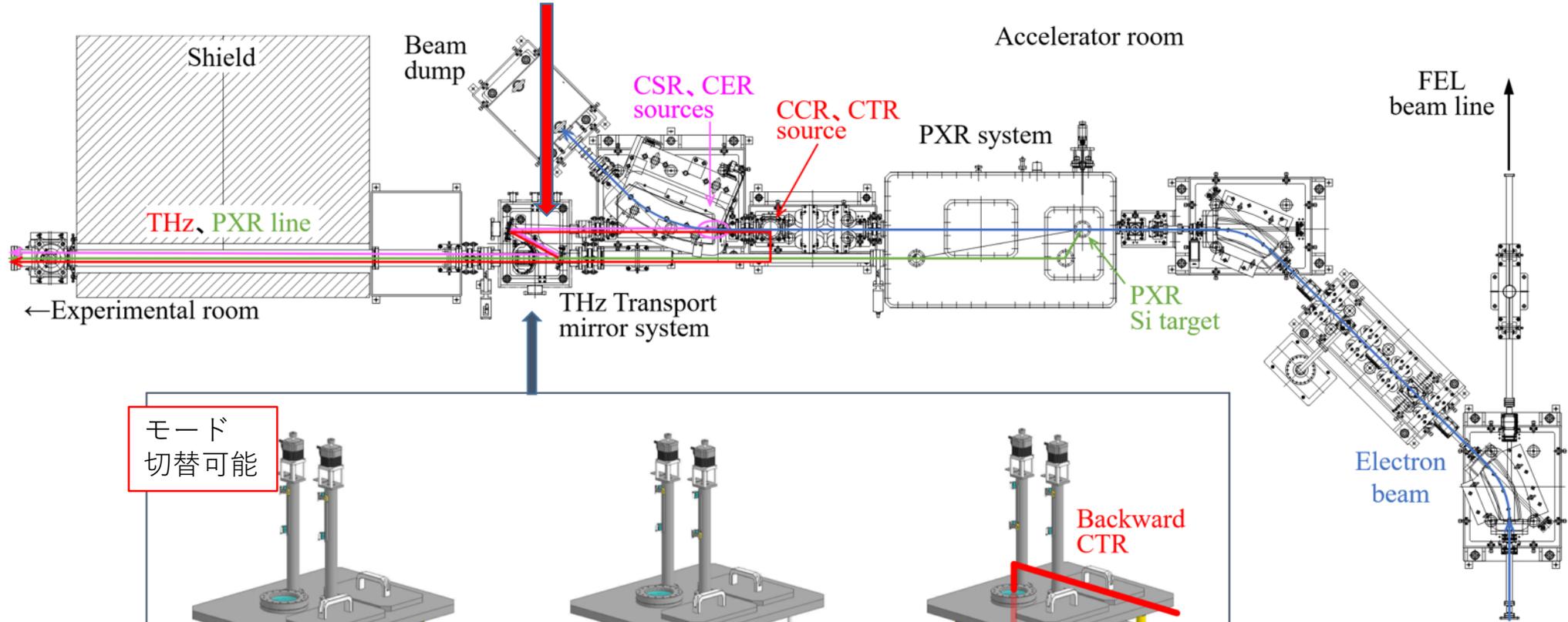
サブmmより長波長域で
コヒーレント放射となる
(周波数: 0.1 – 4 THz)

FEL-THz重畳ライン(産総研と共同研究)

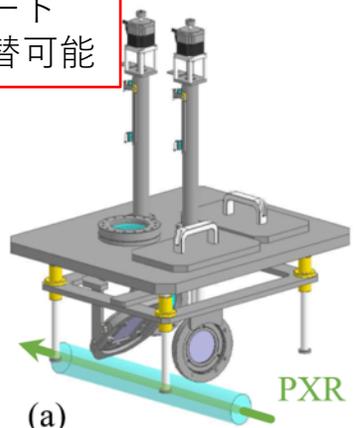


PXRラインTHz光輸送ライン(産総研と共同研究)

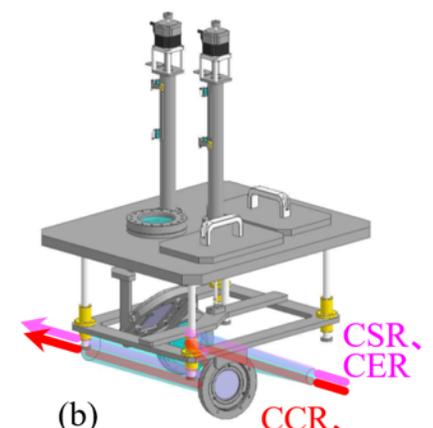
☆PXRライン既設で未使用であった多目的真空槽天板を改良し、ミラー、駆動機構をすべて上面に設置



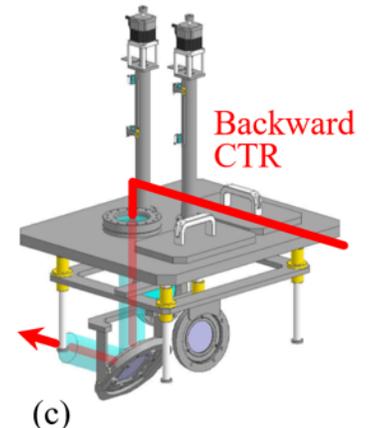
モード切替可能



PXR利用時
(ミラー退避)



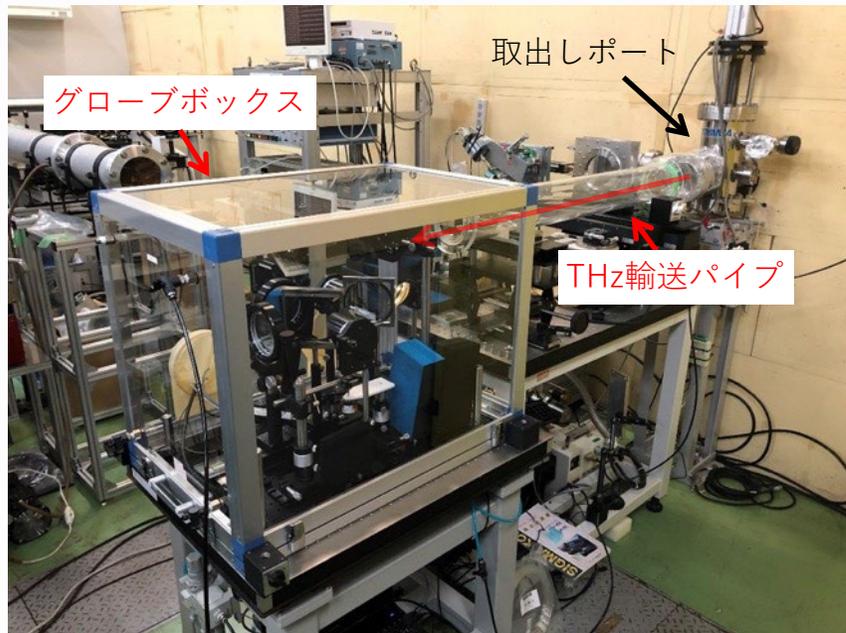
PXR + CER
輸送時(真空中)



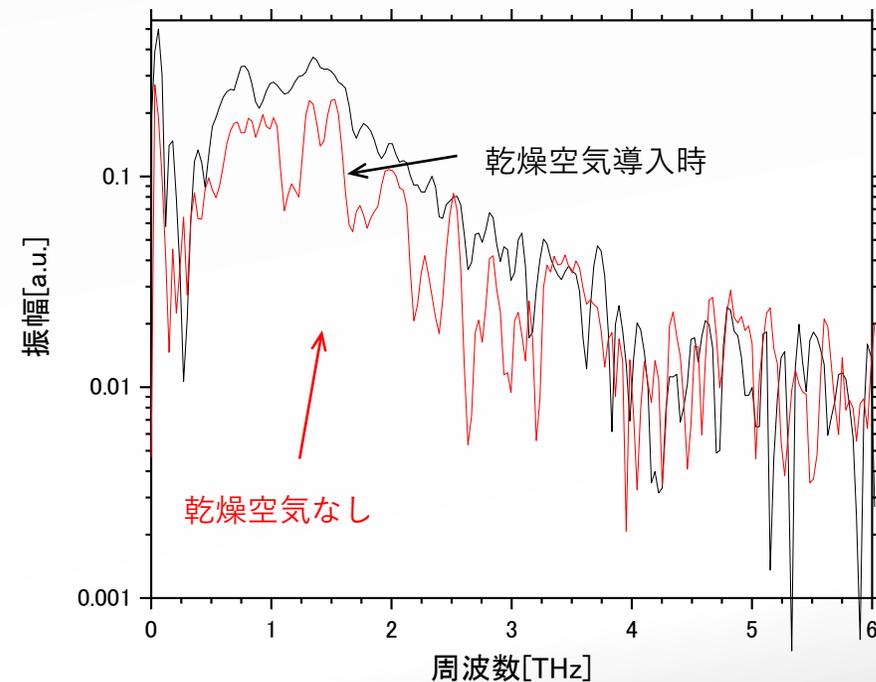
PXR + 後方CTR輸送時
(一部大気中輸送部あり)

PXRラインTHz測定系(産総研、大谷研@日大理工と共同研究)

- ・THz輸送ラインにはトロイダルミラーを利用
- ・利用実験や各測定時に利用できる周波数帯域は0.1~4THz弱



取出口からボックス間もパイプで接続、
干渉計等をグローブボックス内へ設置、
乾燥空気導入測定系を構築



テラヘルツ帯のCERスペクトル波形測定例

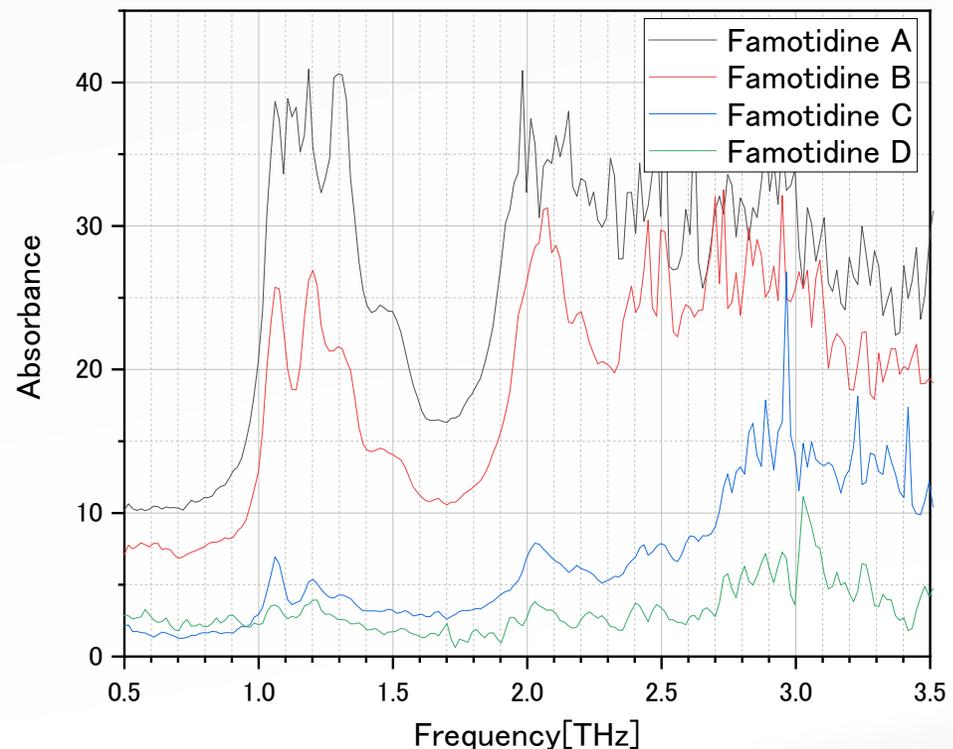
PXRラインTHz測定系(産総研、大谷研と共同研究)

国立がん研究センター中央病院の飯島氏との共同研究を開始し、ファモチジン、イブプロフェンなどを錠剤化したサンプルで測定テストを実施中



サンプル作成用打錠機とサンプル作成例

ファモチジン測定例
(Famotidine, 富士フィルム和光純薬)



各濃度におけるFamotidineサンプルの吸光度
サンプルの厚みを2 mmに補正、ポリプロピレン・
乾燥空気による影響を補正

(日大理工 木下耀氏 提供)

現状の問題点

- 人員不足の深刻化
 - 教員数の抑制が続き、新規採用が困難
 - 技術職員が配置されていない
 - PD募集中
- クライストロン電源の老朽化
 - 部品レベルで代替品への交換を進める / 制御系の故障に不安
 - 経常的な予算では更新困難 / 拠点形成事業のようなものが必要
 - サイラトロン使用 → できれば半導体に切り替えたい
- クライストロンの購入・入手
 - 単価が高く、受注生産では納期が掛かる
私学助成金の適用される形での購入が困難

今後の展望

- THz – X線領域にわたる 3 種類の光源の活用
 - 学外ユーザー（特に企業ユーザー）の獲得
 - 地域産業界との連携の推進（リエゾン不在が問題）
- 100MeV級 電子リニアックとしての特徴を生かしたい
- マッチする学際的拠点形成事業等の模索
- 大学附置施設加速器施設としての意義の模索

謝辞

電子線利用研究施設の設立、拡充は様々な資金援助を受けて成されたものです。

大学からの拠出金

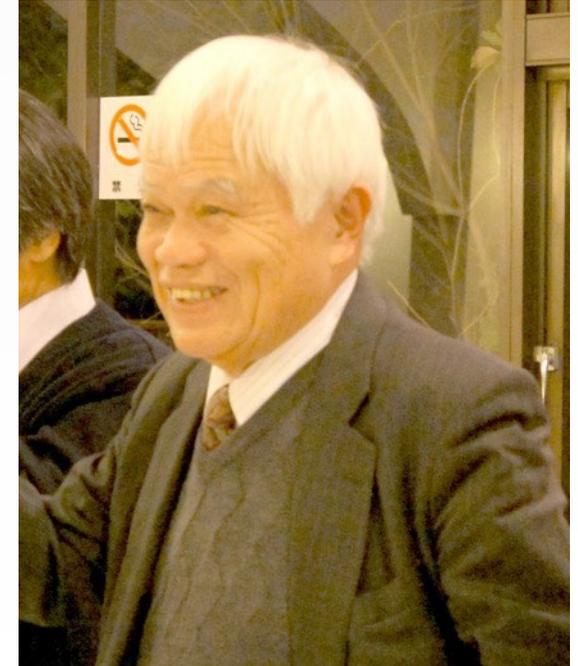
科技庁委託研究費

学術フロンティア推進事業

文科省Q-LEAP

科研費等外部資金

また、歴代の施設スタッフ、大学院生、PD・研究員、事務職員の皆様の貢献に感謝します。



佐藤 勇 先生
(1935 - 2019)

ご清聴ありがとうございます

関連する報告

TWSP08 日本大学電子線利用研究施設LEBRAの現状報告

WEP52 高繰り返し中赤外光周波数コム開発に向けた試験位相相関実験

THP26 日大LEBRA-FELのマクロパルス波形の共振器長デチューニング依存性

THP44 加速器運転中の定点線量評価に向けた電離箱と自作シンチレータの比較

THP45 プラズマとの相互作用実験のための真空保護インターロック装置開発

FRP25 自由電子レーザーで駆動する高繰り返しアト秒光源の研究: 2023

FRP43 疑似宇宙高速電波バースト現象生成に向けたプラズマとの衝突実験の準備状況