#### 令和6年度

## 日本大学量子科学研究所電子線利用研究施設 ユーザーズミーティング

日本大学量子科学研究所

電子線利用研究施設

令和6年度 電子線利用研究施設ユーザーズミーティング

2025年2月28日(金) 10:30~15:00 理工学部船橋校舎14号館2階1423教室

#### プログラム

10:30 - 11:20

施設報報告

施設と光源の整備・利用状況 早川 恭史 (量科研) 施設のトラブル・整備予定 境 武志 (量科研)

11:25 - 11:55

日本大学 LEBRA における高強度 THz 光源とビームライン利用の現状 2024 年度 清 紀弘 (産総研)

- 12:00-12:40 施設運営委員会
- 12:00-13:30 昼食/ポスター閲覧・議論 (※ポスター発表リストは次ページ参照)
- 13:30 13:50

NEDO プロジェクトによる PXR を用いた燃料電池セルの非破壊検査の試み 胡桃 聡 (理工学部)

13:50 - 14:10

フタホシコオロギ複眼は中赤外線照射(LEBRA-FEL:3 μm~6 μm) に反応する 宍倉 文夫 (量科研)

14:10-14:30

放射光・PXR を用いた歯科標本の位相コントラストイメージング 高橋由美子(量科研)、河野哲朗(松歯)

14:30 - 15:00

共同利用ユーザーディスカッション

加速器施設見学(ミーティング開始前 or 閉会後)

ポスター発表内容

・Structural Analysis of Biopolymers by using Infrared Free Electron 高エネ研 川崎 平康 Lasers ・放射光 X 線位相コントラストイメージングの歯科標本への応用 量科研 高橋 由美子 ・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シ 日大院理工・物理 伊東 幸輝 ステムの開発 ・自由電子レーザーの光周波数コム化に向けた試験共振器開発 日大院理工・物理 久保田 月野 ・高エネルギー放射線照射環境構築のための実照射時間の正確な 日大院理工·物理 大和 紗也香 評価 ・高エネルギー放射線照射環境構築に向けた加速器運転中の線量 日大院理工・物理 倉田 瑞希 評価 ・電子ビームのプラズマ相互作用実験に向けた真空インターロッ 日大理工・物理 高岸 太陽 クシステムの改良 ・中赤外自由電子レーザー位相同期システム性能向上に向けた試 日大理工・物理 曽我 怜大 験共振器の構築 ・加速器内の電場による粒子の加速について 日大理工・物理 土屋 颯太 ・短時間光パルスによる金属応力測定 日大理工・物理 根岸 慧 ・自由電子レーザーによる中赤外光周波数コム生成に向けた試験 日大理工・物理 原田 一輝 調和共振器の作成 ・PHITS による γ 線の遮蔽シミュレーション 日大理工・物理 日南 健 ・高速電波バーストの模擬実験のためのインターロック装置 日大理工・物理 山口 晴矢 ・テラヘルツ波分光分析を用いた賦形剤測定 日大院理工・電子 藤野 一風 ・高精度光学湿度計測実現に向けたテラヘルツ帯水蒸気吸収スペ 日大理工・電子 住山 智基 クトル測定

# 施設からのお知らせ

## 施設報告

## 施設と光源の整備・利用状況

	共同利用課題申請と利用
2024年度 電子線利用研究施設 ユーザーズミーティング	<ul> <li>FEL、PXR、THz光の利用に関する申請</li> <li>+ 採択された研究課題は2年間有効</li> <li>+ 有効期間中は随時、利用時間の予約可</li> <li>+ 課題申請の受付は半年毎に行い、運営委員会で審査</li> </ul>
	◆ 研究課題申請に向けた予備的な実験は随時受け付け
2025年2月28日 船橋校舎14号館1423教室	◆ 解析装置等の利用に関しては、LEBRA事務室に利用 登録のみで課題申請手続きは不要(課金なし)
	◆ THz光の定常的利用が可能なビームラインを整備
使用料金	量子科学研究所 兼任所員募集
◆ 使用料金は1時間単位で 1万円/時間	
<ul> <li>◆使用者の区分による負担割合</li> <li>+ 量子科学研究所所員(含兼任所員) 20%</li> <li>+ 上記以外の日本大学教職員 50%</li> <li>+ 学外研究機関研究者 100%</li> <li>+ 企業 150%</li> </ul>	◆ 各年度末には量子科学研究所の兼任所員募 集のお知らせが、各学部学部長宛(理工学 部は教室主任宛)に送付されています
<ul> <li>◆予備実験に関しては原則無料</li> <li>◆事情により、減免する場合あり</li> </ul>	日本大学のLEBRAユーザーの方々にはなる べく応募していただくようお願いします。
◆ 解析装置の使用に関しては、当面無課金 (X線回折装置、Raman、AFM、Excimer Laser、etc.)	

## 利用にかかわる手続き

- ◆当施設に利用のため立ち入る際には、入り口で記帳をお 願いします(施設利用者数把握のため)
- ◆課題採択の上、光源利用される場合は、スケジュールを 施設担当者とご相談の上、「実験時間予約申請用紙」を 事前にご提出ください
- ◆ PXR、THzを利用する実験では放射線管理区域内での作業となりますので、事前に放射線業務従事者の登録をお願いします(手続き等はHPまたは事務室へ) 外部機関で従事者になる方は、業者委託の個人線量計の購入(有料)が原則必要となります。
- ◆様式はLEBRAのWebからダウンロードできます http://www.lebra.nihon-u.ac.jp

#### 成果報告等についてのお願い

- ◆ 当施設の光源、解析装置などを利用した研究で論文を 書かれた場合は、論文の本文や謝辞に施設名を明記し てください。外部資金の申請においても、光源や装置 の利用を前提とする課題は、申請書に施設や装置名が 判るような書き方をお願いします。
- ◆該当する論文出版、外部資金採択情報は事務室まで adm.lebra.office@nihon-u.ac.jp
- ◆兼任所員の方は量科研研究報告への寄稿(4/1締切り) も忘れずにお願いします(私学助成金特別補助の申請 に係るものです)。
- ◆ 解析装置群の長時間の利用や性能向上を希望される方は、消耗品やアップグレード費用を計上した外部資金への申請を積極的に行ってください。





## 課題採択の状況

#### 運営委員会により採択された課題は2年間有効

- 2022年度後期 3件 (FEL 2, THz 1)
- 2023年度前期 6件 (FEL 4, PXR 4, THz 1)\*
- 2023年度後期 1件 (FEL 1)
- 2024年度前期 3件 (FEL 1, PXR 1, THz 1)
- 2024年度後期 2件 (FEL 1, THz 1)

\*重複あり

12

14

(学外ユーザの参入が少しずつ増加)

#### 2024年度加速器利用時間統計

- ○ビーム利用実験:87件(光源試験実験を含む)
- FEL: 63 件@ 249 h
- PXR: 13 件@ 68 h
- THz: 11 件@ 70 h
- ○その他:597 h (利用実験以外の通電時間)
  - (加速器立上げ、調整、RF関連保守、点検等すべて含む)

(2025年2月21日までの集計)

通常に近い利用実験を実施することができた
 ※パルス幅11µs程度での運転に制限される状態は続く
 FEL発振強度は回復中(アンジュレーター修復による)
 (マクロパルス強度@3µm フルバンチ:~30mJ,バースト:~20mJ
 ※現状パルス幅が狭いため、強度は上記の半分以下)

### リニアック年間稼働時間の推移

年度	LV ON(hr)	#1 HV(hr)	#2 HV(hr)	Beam On(hr)	稼働日数	
2014	1854	1630	1622	895	182	
2015	1515	1332	1325	618	167	
2016	1169	930	926	388	151	
2017	1103	896	853	515	138	1
2018	1263	1090	984	358	143	
2019	1576	1360	1358	237	175	
2020	716	585	592	325	102	
2021	689	579	587	364	100	
2022	1126	1000	1010	570	143	
2023	1168	1028	1028	607	143	
<u>2024</u>	<u>985</u>	<u>867</u>	<u>875</u>	<u>388</u>	<u>137</u>	

(2025年2月21日までの集計)

※年度内の利用実験受付中

#### 主要解析装置等利用件数推移



※使用年数が20年以上経過したものもあり、保守・修理点検のコストが上昇 ※X線回折装置は延べ件数21件、ラマン・AFM・フーリエ分光の管理はユーザーに委託 ※X線解析装置利用の際は、予約も兼ねて装置カレンダーへ必ず記入を

#### 2024年度延べ利用件数:386件

## LEBRA電子線形加速器と各光源

	電子線形加速器		
ジ加速器	加速周波数	2856 MHz	
	加速エネルギー	$40 \sim 100 \; {\rm MeV}$	
	RFパルス幅	< 20 µs	
	繰り返し	$2\sim 12.5~\text{Hz}$	
	光源		
	近赤外自由電子レーザー (FEL) 発振可能波長(1次) 1000 ~ 6500 nm 非線形光学結晶による高調波 400 ~ 1200 nm		
	パラメトリックXネ X線エネルギー	線放射 (PXR) 9.1 ~ 47.4 keV(@Si(400))	
	THz光 (0.1~4 THz) FELライン: コヒーレントエッジ放射(CER)		
	PXRフィン: コヒーレント遷移	成射(CTR)	
	コヒーレントエッ	ジ放射(CER)	
	コヒーレントチェ	レンコフ放射(CCR)	

#### 電子ビーム加速モード



#### LEBRA電子線形加速器と各光源



## 電子ビーム加速モードとFEL強度

#### ・フルバンチモード

バンチ間隔:350 ps ピーク電流:~200 mA弱

#### 2011年より

・バーストモード

64分周 128分周 バンチ間隔:22.4 ns 44.8 ns ピーク電流:~2 A弱



・バンチあたりの光強度は高い

・立上がりが早く、FELパルス幅が広いので比較的安定に発振

・マクロパルスあたりのバンチ数が少ないのでFEL強度は低い

外部資金によるアンジュレータ修復

- ・減磁アンジュレータ磁石列を NEOMAX製に交換済
   (2020年2月)
- ・磁石周期数は50→49と減少したが、発振強度は回復
   ・アンジュレータ磁石列自体の購入をプロジェクト研究 費で賄ったため、FEL利用において、プロジェクト関 連実験を優先し成果を出す必要あり
- → FELユーザーの皆様にはご迷惑をお掛けする可能性が ありますが、ご理解とご協力お願いします。



- (研究期間最長10年の長期プロジェクト)
- ☆課題名『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』(代表:羽島良一)



#### FELミクロパルス強度@64分周

▶ Burst mode 44.6 MHz (FEL共振器は22.3 MHz)



FEL発振強度



## FELミクロパルス幅測定@3µm



Si(400)面による高エネルギー化

NEDOプロジェクト(JPNP20003)「可逆動作型プロトン伝導セラミック燃料電池の新規な健全性評価・解析技術の開発」(理工学部 吉川将洋教授)により高エネルギー単色X線も用いた測定を実施中



現在の結晶システムはSi(400)であり、47keVまでのX線が発生可能 (※強度はSi(220)に比べて低下)

#### PXRビームライン

PXR線源(ターゲット結晶) Si(400) (楔角3°)を使用中 (2022年 3月~現在)

- 線量 Si(111) > Si(220) > Si(400)
- 楔形エッジ効果により空間コヒーレンス改善 高次の結晶面の場合
- 位相シフト・散乱角への感度が良い
- XAFS測定におけるエネルギー分解能が高い

#### Si(400)で得られたPXRプロファイルとエネルギー較正



実際に撮像された40keV-PXRビー ムのプロファイル 結晶: Si(400) 電子エネルギー: 100MeV 平均ビーム電流: 1.3µA 検出器: イメージングプレート(IP) (REGIUS SIGMA2, Konika Minolta) 照射時間: 600s X線エネルギーの較正は、これまでと同様、PXRプロファイル内のエネル ギー分散(空間チャープ)と特定元素のK殻吸収端を用いて行う





24

 左) 33.3keV設定で得られたPXRプロファイル
 IPにヨウ素が含まれるため、そのK殻吸収端 33.17keVにおいて
 X線吸収が不連続的に変化
 右) 20.0keV設定でのMo薄膜の像
 暗部の縞はMo-K殻吸収端のEXAFS振動、明部にはSi結晶起因のトポグラ フが見える

#### 40keVでの撮像例



**40keV-PXRビームによる透過X線撮像の例** 検出器: IP (1pixel: 87µm) 測定時間: 1200s 左) 電卓 右) レーザーポインター

## 主なPXR応用

応用のほとんどはX線イメージングに基づくもの

CT(コンピュータ断層像) KES(K-edge subtraction)-CT K殻吸収端を利用した3次元元素分布計測が可能

回折型位相コントラストイメージング (DEI: diffraction-enhanced imaging) (超)小角散乱(SAXS)イメージング SR以外で可能な施設・装置は稀有

分散型XAFS測定(DXAFS) 検出器の整備により、以前より測定しやすくなった

### 主要なイメージ検出器(FPD)

フラットパネル検出器(FPD) (間接型) CT測定やDXAFS測定に使用

Shad-o-Box 1280HS (Rad-icon) ピクセル: 100µm x 100µm; 有効面積: 12.8cm x 12.8cm

Shad-o-Box 3KHS (Rad-icon) ピクセル: 50µm x 50µm; 有効面積: 11.4cm x 6.4cm

C9728DK-10 (浜木ト) ピクセル: 50µm x 50µm; 有効面積: 5.28cm x 5.28cm

C9250DP (浜木ト) ピクセル: 200µm x 200µm; 有効面積: 12.48cm x 12.48cm

#### 主要なイメージ検出器(その他)

イメージインテンシファイア(I.I.)付冷却CCD (主にDEI, SAXSイメージングで使用) シンチレータ(P-43) + C7068 + ORCA-ER(浜ホト) ピクセル: 25µm x 25µm; 有効面積: 3.3cm x 2.5cm

直接型CCD (低エネルギー(<10keV)用) 冷却CCD C4480 (浜ホト) ピクセル: 24µm x 24µm; 有効面積: 1.23cm x 1.23cm

イメージングプレート(IP) 読取り機 REGIUS Σ II (コニカミノルタ) (<mark>新規購入)</mark> ピクセル: 175μm x 175μm, 87.5μm x 87.5μm

CR-IR 392 (富士フィルム) (低エネルギーには不向き) ピクセル: 50µm x 50µm?

#### PXRを用いたCT撮像の例



PXR放射源: Si(220)PXRエネルギー(中心): 22keV試料: 即席カップ麺FPD: Shad-o-Box 1280HS試料-FPD: 300mm各投影像: 5s露光5回平均(25秒)投影像枚数: 500枚(角度ステップ 0.36°)測定時間: 3.5時間 (net)

## KES-CTによる元素イメージング



サンプル: SrTiO<sub>3</sub> (STO)で着色 したエポキシ樹脂

Sr 濃度 上から 5%, 1%, 0.5%, 0.1%, 0%



PXR線源 & DEI アナライザー: Si(220) PXR energy: 16.105 keV FPD: Shad-o-Box 1280HS (ピクセルサイズ: 100µm)

## KES-CTによる3次元元素マッピング



(左) 低エネルギー (右) 高エネルギー (~ 16.0 keV) (~ 16.2 keV)

(右) 高エネルギー3次元 Sr 元素分布 (吸収端をまた<br/>いだ2色CT像の差分)(~ 16.2 keV)いだ2色CT像の差分)断層像の明度値は、Sr元素の濃度に比例

#### 回折強調イメージング(DEI)





完全結晶の回折を用いて、試料 によるX線の屈折・散乱を測定可 能なイメージング技術

角度分解能は数µrad

## 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



## FEL-THz 重畳 ライン (産総研と共同研究)

k (1-1)

63.1 Bing for Tr

- 11 2 - Beg for G 10 3 Bit for h



立入り可能な実験室へ輸送、ユー ザー利用へ Klystron × 2 THz光源仕様 THz光 (0.1~2.5THz(@FEL)、 X線放射(PXR) 近赤外白由電子 0.1~ 4.0THz(@PXR)) FELライン: CER (FEL重畳可) PXRライン: CTR, CER, CCR 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, THz FEL重畳輸送、バンチ長評 価、ユーザー利用等が可能 ©Rey.Hori なビームライン構築 38

#### PXRラインTHz光輸送ライン(産総研と共同研究)



PXRラインTHz測定系(産総研、大谷研と共同研究)

## 施設報告

## 施設のトラブル・設備予定 その他連絡事項



#### 加速器装置関連の大きな故障と保守(3)

#### ■PXRライン上流部にステアリングコイル設置(2024/09下旬)

・ビーム軌道調整時の自由度を上げるためステアリング追加、 試験継続中(THz発生向け)



加速器装置関連の大きな故障と保守(5)

#### ■安定化電源のデモ機を借りてテストを実施中(2025/02/17~)

- ・モジュレーター電源ラインでデモ試験中
  - →使用していた山菱電気製AVRは既に製造中止 (※同タイプも作れないとのこと)
  - →電研精機研究所、菊水電子製のAVRで検討中 →電研精機製AVRは3月まで、菊水製は4月以降でテスト予定



#### 加速器装置関連の大きな故障と保守(4)

#### ■加速器モジュレーター電源の安定化電源が故障(2024/12中旬) →加速器系電源がすべてダウンする故障が発生(冷却水は維持) →安定化電源(AVR)の出力部の抵抗が破損



→電圧変動ログから、2024年3月8日16時頃 からAVR電源は調子が悪くなりはじめてい た事が判明



施設その他故障、保守等(1)

#### I X線回折装置関連故障中

- ・2024年度後半からRINT-2500(事務室横の部屋設置)が
   PCと本体間の通信系で問題が続く
- → 次年度入った時点でリガクへ修理依頼対応を予定
- (ただし、保守対象装置から外れているため直るか不明)
- ・R-AXIS(一番奥の部屋設置)も高圧が入らない状態

→ 管球で放電が発生しているらしく、管球部分の放電箇

所のクリーニングを実施予定







施設設備関連事項(3)	施設設備関連事項(3)
■ 各実験室における化学物質の利用に関して(続き)	■ 各部屋の扉、電気、水道関連
※化学物質を用いた下準備は、各自の学部・学科、研究室	→長時間離席する際は、消灯を →エアコンで「冷房」または「除湿」運転時で、特に
にある対応設備で行ってください	外気湿度が高い時期は各部屋の外気取込みスイッ
<u>必要な時に必要な量の購入を!</u>	<u>ナをUFFして下さい</u> →新しく設置したエアコンの外気取込み経路の都
大量保有・保管はリスクが増すだけ!	合上(元から?)、エアコンからの水漏れが発
※健康被害が起きないように各自が十分注意して実験に取組	至しやすくなっています →管財には相談中ですがまだ未対応
んでください	■ 各実験室の除湿対応
※施設内は他の方も利用するため、自分以外の人に対しても 十分注意を	→気になる部屋が有りましたらご連絡を →各部屋の除湿対策は引き続き対応
63	а арда у русского у с лув с учулов 64
施設設備関連事項(4)	施設その他連絡事項
施設設備関連事項(4) <ul> <li>LEBRA加速器CG、パンフレット更新</li> </ul>	施設その他連絡事項 ■LEBRAにおいて、各ビーム、X線回折装置など使わ
施設設備関連事項(4) ■ LEBRA加速器CG、パンフレット更新 → Rey.Hori氏作成のCG、施設パンフレット、施設ロゴはユーザーの皆さん も自由に利用できます	<ul> <li>施設その他連絡事項</li> <li>■LEBRAにおいて、各ビーム、X線回折装置など使われたかたは、</li> </ul>
施設設備関連事項(4)  LEBRA加速器CG、パンフレット更新 → Rey.Hori氏作成のCG、施設パンフレット、施設ロゴはユーザーの皆さん も自由に利用できます 細かい部分まで再現あり(A0サイズも対応)ご希望の方はスタッフまで	<ul> <li>施設その他連絡事項</li> <li>LEBRAにおいて、各ビーム、X線回折装置など使われたかたは、</li> <li>・成果報告を行った論文</li> <li>・学会発表</li> </ul>
施設設備関連事項(4) ■ LEBRA加速器CG、パンフレット更新 A Rey.Hori氏作成のCG、施設パンフレット、施設ロゴはユーザーの皆さんも自由に利用できます。 細かい部分まで再現あり(A0サイズも対応)ご希望の方はスタッフまで	<ul> <li>施設その他連絡事項</li> <li>LEBRAにおいて、各ビーム、X線回折装置など使われたかたは、</li> <li>・成果報告を行った論文</li> <li>・学会発表</li> <li>・研究会発表</li> </ul>
施設設備関連事項(4) ■ LEBRA加速器CG、パンフレット更新 → Rey.Hori氏作成のCG、施設パンフレット、施設ロゴはユーザーの皆さん も自由に利用できます。 細かい部分まで再現あり(A0サイズも対応)ご希望の方はスタッフまで ■ Comparison (A0サイズも対応)に希望の方はスタッフまで	<ul> <li>施設その他連絡事項</li> <li>LEBRAにおいて、各ビーム、X線回折装置など使われたかたは、</li> <li>・成果報告を行った論文</li> <li>・学会発表</li> <li>・研究会発表</li> <li>・各種受賞等の情報</li> </ul>
<section-header><ul> <li>         たのでのでので、施設の中期でので、施設の中期では、</li> <li>         ・ のので、施設のシアレット、施設の中期には、</li> <li>         ・ のので、施設のシアレット、施設の中期には、</li> <li>         ・ のので、</li> <li>         ・</li> <li></li></ul></section-header>	施設その他連絡事項 ■LEBRAにおいて、各ビーム、X線回折装置など使わ れたかたは、 ・成果報告を行った論文 ・学会発表 ・研究会発表 ・各種受賞等の情報 など、必ずLEBRAスタッフまでご連絡をお願いい
<section-header>施設設備関連事項(4) - CEDRADD 定義 CG、 パンフレット したのののののでのです。 - Rey.Hori 氏作成の CG、 施設 パンフレット、 施設 ロゴは ユーザーの 皆さん - 自由に利用できます。 - mov 部分まで再現あり (A O サイズも対応) ご希望の方は スタッフまで - Fey.Hori</section-header>	<ul> <li>施設その他連絡事項</li> <li>LEBRAにおいて、各ビーム、X線回折装置など使われたかたは、</li> <li>・成果報告を行った論文</li> <li>・学会発表</li> <li>・研究会発表</li> <li>・各種受賞等の情報</li> <li>など、必ずLEBRAスタッフまでご連絡をお願いいたします。</li> </ul>

その他、施設内設備、装置に関してお気づきの点、動作不良、相談等ありましたら、LEBRAスタッフまでご連絡ください

## 研究報告 (口頭発表)









NMJ 計量標準総合センター

2.1 THz帯CERビームラインの開発と利用研究 AIST





国立研究開発法人產業技術総合研究所

国立研究開発法人 産業技術総合研究所




#### **ころろう AIST** 4. まとめ

#### NMJ 計量標準総合センター

AIST

#### これまでの成果と今後の方針

- 1. PXR直線部におけるTHz光開発と利用研究
  - 既存のPXRビームラインを利用してコヒーレントエッジ放射を大実験室まで輸送し、乾燥空気雰囲気にてTHz帯のイメージングや分光測定を実施。
  - 光渦CTRが伝播と共に螺旋運動していることを観測。パルス重畳CTRの観 測に向けて共振器の開発を実施中。
- 2. FEL直線部におけるTHz光開発と利用研究
  - 中空トロイダル鏡を使用してFEL発振中のコヒーレントエッジ放射を観測し、 FEL発振が電子バンチ概形に影響することを発見した。
  - 高速応答のダイオード検波器を使用してコヒーレントエッジ放射ミクロパルスのマクロパルス内時間発展を観測した。
- 3. 今後(~来年度)の方針
  - THzビームラインの高度化を進めつつ、高強度THz光を利用した応用研究を 更に推進する。
  - 光渦CTRの更なる観測と、FELミクロパルス時間発展と同期したコヒーレント エッジ放射ミクロパルス時間発展の観測を実施したい。

国立研究開発法人 產業技術総合研究所



謝辞







#### (2023~2024年度) 13 LEBRA 40keVにおけるボタンセルの撮像試験(X線エネルギー依存)

- Sample-IP距離2m
- 試料の水平方向位置を変えながら(5点)撮影
- PXRビームは水平方向にエネルギー分散を持つため、X線のエネルギーをわずかに変化させながら測定することに相当 → 水平方向において約48 eV/mmのエネルギー分散があり、移動範囲75mmはX線エネルギー範囲3.6keVに相当する。

成果報告

まとめ・今後について

x=0mm

低エネルギー



Z	Element	K(1s) keV
56	Ba	37.4
57	La	38.9
58	Ce	40.4
70	Yb	61.3

La, CeのK殻吸収端マッピングに役立つ これらのサンプルは La, Ceが含まれる空気極層, 電解質層が切削され ているため、ここでは明確な変化は認められず



15

#### (2023~2024年度)<sup>14</sup> LEBRA PXR線源を用いたCe-K殻吸収端近傍でのイメージング

- PXRエネルギー: 40.4 keV@ビーム中心
- X線画像検出器:既存フラットパネル検出器(ピクセルサイズ 100 µm × 100 µm)
- 差分像をスムージング処理し、3次元プロットを試みた結果、Ceの空間分布取得に期待が持てる結果が得られた







まとめ・今後について

- NEDOプロ:燃料電池ボタンセルのX線イメージングをキーワードとして2021年度からスタートし, 2023年1月ステージゲート審査をクリア,2023~2024年度で終了
- LEBRAにおいて, Si (400) を導入し, 40keV程度のX線発生に成功
- これによって切削した燃料電池ボタンセルの試料Ceの元素分布に関するイメージングに成功
- KEKにおいて,高分解能のX線カメラおよび回折強調イメージングによって, 目視ではわからない内部欠陥に関する情報を画像化した および小角散乱に寄与する粒子・空隙情報を明らかにした。
- 今後 3月半ばに成果報告 2025年度以降の関連したNEDOプロへ申請するかどうかを統括する吉川先生, LEBRAスタッフの皆様と相 談しながら決定していく



16



• 本プロジェクトを進めるにあたり、LEBRAの皆様、事務の皆様には大変お世話 になっております。今後とも何卒よろしくお願いします。



17

#### ② P X Rを用いたボタンセル非破壊検査による内部欠陥の検出技術の開発工程表



College of Science and Technology, Nihon University



18

電子線利用研究施設・ ユーザーズミーティング 2025(令和7)年2月28日 日本大学理工学部 船橋校舎14号館1423室

#### フタホシコオロギ複眼は 中赤外線照射(LEBRA-FEL:3 µm~6 µm)に反応する

宍倉文夫<sup>1</sup>、早川建<sup>1</sup>、小松崎良将<sup>2</sup>、早川恭史<sup>1</sup>、境武志<sup>1</sup>、

野上杏子1、高橋由美子1、田中俊成1、全炳俊3、紀井俊輝3、大垣英明3

<sup>1</sup>日本大学量子科学研究所(LEBRA) <sup>2</sup>日本大学理工学部物理学教室 <sup>3</sup>京都大学エネルギー理工学研究所(IAE)

#### はじめに/発表内容

- 過去の研究成果とその年度における研究の展望について: ハイライトで補足 1-1 2022年度/ユーザーズミーテイングの発表内容と今後の展望
   2023年度/ユーザーズミーテイングの発表内容と今後の展望
   2024年度/ユーザーズミーテイングの発表内容と今後の展望
   2-1 はじめに/研究の目的
   2-2 材料と光源
   2-3 方法

   2-3-1 コオロギ複眼への照射系と網膜電図(ERGs)の測定系
   2-3-2 コオロギの行動を解析するための行動生物学的方法

   2-4 結果

   2-4-1 中赤外線(LEBRA-FEL:3 µm~6 µm)に反応した。
   2-4-3 中赤外線に反応する生物学的意義(2025年度の課題へ)
   2-5 今後の展望

#### 2022年度/ユーザーズミーテイングの 発表内容と今後の展望



-Spectraの測定は、卒論生(福本優樹:小松崎研、2019)との共同作業-

2023年度ユーザーズミーテイングの 発表内容と今後の展望

#### <ハイライト>

- 1 LEDs (**紫外~可視領域**: 21種類)の パワーを20 µWに設定して、網膜電図 を収集した。
- 2 1の条件で、**Spectral Sensitivity** (分光感度)を測定した(下図参照)。



#### はじめに/研究の目的

(1) 普遍性の研究:

節足動物・甲殻類のアメリカザリガニの複眼が、中赤外線(3 µm~28 µm)に反応 する現象を、節足動物・昆虫類のフタホシコオロギの複眼でも中赤外線に反応するか どうか追試する。反応すれば、同じ節足動物の仲間であるが普遍性を実証(一例)で きることになる。

(2) 生物学的意義の研究: ザリガニの複眼並びにコオロギの複眼が中赤外線に反応 することになると、これらの動物はなぜ中赤外線に反応するのか(生物学的意義) を解明したい。



- 宍倉他の論文から引用-

フタホシコオロギの複眼からののERGs ー宍倉他の未発表データー

#### 材料と光源



#### コオロギ複眼のERGsの比較: a-wave, b-wave, and Implicit time





FUTUENES

;)の収集

受ける。

る。

・Spectral Sensitivityの波長極大は > 6 µmと予測した。

#### 今後の展望

- (1) フタホシコオロギの複眼はLEBRA 3 μm~6 μmの範囲のFEL刺激に 反応したので、2026年/令和8年度はKU-FELと共同研究を実施し たい(中赤外線領域の長波長側、6 μm~28 μmを使用したい)。
- (2) 2025年/令和7年度は、LEBRA-FELの中赤外線領域(~ 6 µm)の光を使用して、この反応の生物学的意義を解明したい。方法は、コオロギにTread-millの上を歩行させて光刺激の効果を行動生物学的に探る。
   注: Tread-millを歩行するコオロギについては、2023年(令和5年)度のユーザーズミーテイングで報告しました。時間があればもう一度! (51秒)

 以上です。 	
	10



#### 2024年度 日本大学電子線利用研究施設 ユーザーズミーティング

放射光・PXRを用いた歯科標本の位相 コントラストイメージング

#### 2025/2/28

#### 高橋由美子, 早川恭史(日本大学量子科学研究所) 河野哲朗, 寒河江登志朗, 岡田裕之(日本大学松戸歯学部) 富樫侑也(日本大学大学院 松戸歯学研究科)

#### LEBRA





光源の特徴 LEBRA				
X線管	放射光	PXR		
■ 蛍光/制動放射	■ 制動放射	■ 分極放射		
<ul> <li>低輝度</li> <li>発散光</li> <li>連続/準単色</li> <li>(特定波長のみ)</li> <li>無偏光</li> <li>連続光</li> <li>ラボ装置</li> <li>(広汎に普及)</li> </ul>	<ul> <li>高輝度(強度が強い)</li> <li>指向性が高い</li> <li>連続スペクトル 任意の波長で単色化</li> <li>偏光性</li> <li>パルス光</li> <li>大型加速器施設 (国内8か所)</li> </ul>	<ul> <li>時間平均強度は弱い</li> <li>指向性が高い</li> <li>準単色 連続エネルギー可変</li> <li>偏光性</li> <li>パルス光</li> <li>小規模加速器施設 (実用化はLEBRAのみ)</li> </ul>		

2024/2/2





















16

E=20 keV, 露光時間 1sec /step, 測定範囲 5.6×10<sup>-6</sup> deg/step×1400 steps



## 研究報告 (ポスター発表)

# 日本大学量子科学研究所LEBRA ユーザーズミーティング 2025年2月28日

Structural Analysis of Biopolymers by using Infrared Free Electron Lasers

Takayasu Kawasaki<sup>1</sup>, Atsushi Nagase<sup>2</sup>, Ken Hayakawa<sup>2</sup>, Fumitsuna Teshima<sup>3</sup>, Kiyohisa Tanaka<sup>3</sup>, Heishun Zen<sup>4</sup>, Fumio Shishikura<sup>2</sup>, Norihiro Sei<sup>5</sup>, Takeshi Sakai<sup>2</sup>, and Yasushi Hayakawa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Accelerator Laboratory, KEK; <sup>2</sup>LEBRA, Institute of Quantum Science, Nihon University; <sup>3</sup>UVSOR; <sup>4</sup>IAE, Kyoto University;

<sup>5</sup>Research Institute for Measurement and Analytical Instrumentation, AIST

E-mail: takayasu.kawasaki@kek.jp

固体状の難分解性生体高分子の構造を分析する手法として赤外自由電子レーザーと放射光赤外顕微鏡を適用した。エビやカニの骨格成分キチンに対 して波長9.8 μm (vC-O)で照射するとN-アセチルグルコサミンが生成された。木質のパルプ化の際に生じるスルホン化リグニンに対して波長2.9 μm (vO-H)で照射するとコニフェリルアルデヒド由来のピークが検出された。これらの低分子化合物はそれぞれリグニン及びキチンを構成するモノマーであることが 知られている。従って赤外自由電子レーザーによる波長選択的照射によって難分解性生体高分子の構成成分を明らかにできることが示された。



謝辞: TIA collaborative research program "Kakehashi" (TK23-007 and TK22-050) and the grant from The Yanmar Environmental Sustainability Support Association

### X線位相コントラストイメージングの歯科標本への応用 Application of X-ray phase-contrast imaging to dental specimens

高橋由美子<sup>1</sup>, 早川恭史<sup>1</sup>, 河野哲朗<sup>2</sup>, 寒河江登志朗<sup>2</sup>, 岡田裕之<sup>2</sup>, 富樫侑也<sup>3</sup> <sup>1</sup>日大量科研, <sup>2</sup>日大松戸歯, <sup>3</sup>日大院松戸歯

#### はじめに

位相コントラストイメージング(phase-contrast imaging; PCI) は生体軟組織の観察に効果的であることから近年、医学・生物分野において画期的な 成果を上げている。しかし、医療分野の中でも硬組織が多い歯科分野ではPCIの利用実績が極めて少ない。そこで歯科医療へのPCIの応用可能 性を検討する一環として今回は唾石を取り上げた。唾石は唾液腺組織中に生じる結石で、壊死組織や細菌塊を核とし、周囲にリン酸カルシウム、 炭酸カルシウムなどが同心円状に沈着して層状構造を形成すると報告されているが、従来のラジオグラフィーや顕微鏡観察では形態学的情報を 得ることが難しい組織である。そこでPCIの一手法であるで回折強調法(Diffraction Enhanced Imaging; DEI)によって唾石構造の観察を試みた。

#### 実験

- 実験方法
- ◆ 回折強調法(Diffraction enhanced imaging; DEI)





- 光学系
- ビームライン: KEK-PF BL-14B, BL-14C
- X線エネルギー: 20, 35 keV
- コリメータ—: 非対称 Si (220) (b= 0.076, 0.085)
- アナライザー: 対称 Si (220), θ<sub>B</sub>=9.3, 10.6 deg
   ビームサイズ: 10 (H) × 10 (V) mm<sup>2</sup>

@ sample position

検出器: X線CCDカメラ (Photonic Science, XFD)

有効ピクセルサイズ: 6.45 μm (H) × 6.45 μm (V), ピクセル数1384 (H) × 1032 (V)



BL-14B 光学系



結果





■ CT 測定条件:E=20 keV, 露光時間 0.7 sec, 試料回転 0-180 deg, 0.12 deg/step, 画像再構成 FBP

 $\begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|} \hline FEG(X = 20 \ keV & FEC(X = 20$ 

#### まとめ

PCIは唾石のような硬組織でも従来の吸収像では得られない内部構造の情報を得られる可能性があることが分かった。今後の歯科分野での応用展開が期待できる。









- 参考文献
- [1] D. R. Lorimer, et al. "A Bright Millisecond Radio Burst of Extragalactic Origin", Science 318, 5851, 777-780
- [2] E. Petroff, J. W. T. Hessels, D. R. Lorimer "Fast radio bursts", The Astronomy and Astrophysics Review 27, 4
- (2019) [3]
- [4] [5]
- (2019).
  B. Zhang "Unexpected emission pattern adds to the enigma of fast radio bursts", Nature 582, 344-346 (2020).
  高速電波パースト|天文学辞典 (astro-dic.jp)
  Y. Sumitomo, R. Hajima, Y. Hayakawa and T. Sakai "Simulation of Short-Pulse Generation from a Dynamically Detuned IR-FEL Oscillator and Pulse Stacking at an External Cavity", J. Phys. Conf. Ser. 1350 012040 (2019)
  Y. Sumitomo, T. Asai, S. Kisaka, H. Koguchi, K. Kusaka, R. Yanagi, Y. Onishi, Y. Hayakawa, D. Kobayashi, S. Kurawai, J. Colenz, T. Sakai "Generation from the Net Towned Work for the International Context C [6]
- L'Administry, L'Asan, S. Kushad, H. Koguchi, K. Kushad, K. Talingi, L. Oushin, J. Haylakawa, D. Kubayashi, S. Kumagai, T. Saki, "A Ground Experimental Approach Toward Understanding Mysterious Astrophysical Fast Radio Bursts", LINAC2022, THPOJ022. [7] periment", Proc. 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2021), TUP001 experim (2021)
- T. Sato, et al., Recent improvements of the Particle and Heavy Ion Transport code. System PHITS version3.33, J. Nucl. Sci. Technol.
   「ビバッシェンの法則とは?」「式」や『最小値を持つ理由』などを説明します!", Electrical Information, https://detail-infomation.com/paschens-law/、(参照2024-7).







共振器の安定条件とガウスビームから、凹面鏡からの距離が 3700 mm で収束点を持つようにビームサイズ の理論値を求めた。

凹面鏡からの距離が 0mm → 2100mm まで 100mm 間隔で測定した。 1.6

- 自由電子レーザーの運転モー





#### 水の吸収帯である 3μm 付近をスキャンしながら照射し 分光器と目視で反応を確認した。 運転 : バーストモード (64分周) - ザー波長: 2.9~3.1 μm : 10~12 mJ マクロパルスあたりのレ 分光器 実際に実験に使用した小型分光器 純水蒸気 光として信号を確認することはできなかった。 25 hPa 程度 今回の実験環境 大気圧 1013 hPa 25 hPa 🛛 🖛 . 光としての検出は、反応量の少なさから測定できな かったと考えられる。 希薄環境下でも信号を検出するためには、質量分析 などで生成されるガスを直接測定する必要がある。 実際の自由電子レーザー照射実験環境 令和6年度修士論文発表会 2025/2/18

本研究は、非線形的な反応を起こしうる高強度で極短時間な光パルスを用いて、水素関連分子の反応の選択 的な制御を可能とする技術を確立し、水素関連分子の非線形反応を確認することを目的とし、以下を行った。

まとめ

- 1. 2. 現状の自由電子レーザーの位相相関の測定
- 1. 現代の自由電子レーザービックの
   2. 試験共振器の構築
   3. 自由電子レーザー照射実験

実験を行った結果、現状の共振器では光パルスの干渉を確認することはできなかった。また、試験共振器に おける入射系の精度を測定した結果、入射系の精度が高く、構築した光共振器が十分な性能を有していること が確認された。自由電ナレーザーの照射実験では、分光器や目視での測定では測定機器での有意な信号を確認 することはできなかった。

#### 今後の課題

結論

特定周波数成分の高強度化のための光周波数コムの生成と位相同期システムを導入を行う。

2025/2/1

#### 高エネルギー放射線照射環境構築のための 実照射時間の正確な評価

Precise Active Time Assessment for Construction of A High Energy Irradiation Environment

日本大学大学院理工学研究科物理学専攻前期博士課程 大和紗也香 (指導教員 住友洋介)

#### 放射線耐性素材の開発

・高エネルギー放射線による使用機器の劣化・故障
 例:アンジュレーターの放射線減磁
 →日大のLEBRAや大型放射光施設 SPring-8、X線自由電子レーザー(X-ray Free Electron Laser : XFEL)施設 SACLAなどで問題となっている。



#### 宇宙開発への関心の高まり

- 2024年1月、変形型月面ロボットによる小型月着陸実証機SLIM(スリム)の撮影に成功したと発表された。
- この撮影成功にはタカラト ミーやソニーグループといっ た一般企業も関わっている。



小型月着陸実証機SLIM(スリム)

※考:(c) 牢宙航空研究開発機構

#### 本研究の目的



#### 電子線利用研究施設(LEBRA)での 環境構築に向けた線量評価

- •場所:日本大学理工学部船橋 キャンパス内
- →都心からアクセスしやすい
- ・最大100MeVの電子エネル ギーを生み出せる電子線形加 速器を使った実験ができる
   →プレテストを行うことができ、
   段階的な線量評価が可能



日本大学電子線利用研究施設 (Laboratory for Electron Beam Research and Application : LEBRA)

#### 電子線利用研究施設(LEBRA)での 環境構築に向けた線量評価

- 場所:日本大学理工学部船橋
   キャンパス内
- →都心からアクセスしやすい
- ・最大100MeVの電子エネル ギーを生み出せる電子線形加 速器を使った実験ができる
   →プレテストを行うことができ、
   段階的な線量評価が可能



LEBRAにおける電子線形加速器の ビームラインの概要図

参考: Y. Sumitomo et al., "A Ground Experimental Approach Toward Understanding Mysterious Astrophysical Fast Radio Bursts", LINAC2022, THPOJ02





#### ガラス線量計による測定

	11/12011		0/12/102010	
運転モード	パースト	バースト	パースト	1.00
電子エネルギー[MeV]	78.1	96.9	68.1	\$7¥
メインコイルの電流値 [A]	55.4	68.8	48.4	
FELラインの電流値 [mA]	30.6	13日 28.6 14日 29.4 15日29.4	記録なし	
マクロパルス幅[µs]	12	11	11	
線量值 (側面) [mGy/h]	4.806	記録なし	3.941	
線量值 (上面) [mGy/h]	7.197	5.732	10.819	
線量値 (ストレートラ イン) [mGv/h]	27.55	33.29	記録なし	

加速器の運転条件とガラス線量計による線量評価



参考: S. Yamato et al., "Development of Dose Assessment around Accolerator for high-mergy imaliation experiments", Proceedings of the 21st Annual Moeting of Particle Accolerator Society of Japan, July 30 - August 2, 2024, Yamayan, pp.602-604.

#### ニュースバル放射光施設でのガラス 線量計の校正



ニュースバル放射光施設の概要図



ガラス線量計の設置場所及び実験時の条件

参考:兵庫県立大学 高度座寨科学技術研究所 ニ: スパル放射光施設「ニュースパルとは」, http://www.lati.u.hwpm.ar.in/NS/newsuham.ht

#### ニュースバル放射光施設でのガラス線量 計の校正

ガラス線量計によるγ線の照射時間と線量値。

γ線の照射時間[分]	線量値[µGy]
7	79
15	134
30	274

この結果をもとにガラス線量計の新たな校正を行う。 →放射線計算コード「PHITS」による照射環境を模した正確なシ ミュレーションを行い、表の線量値と比較する

#### ガラス線量計による遮蔽の効果の確認



アンジュレーター近くの45度偏向電磁石と遮蔽物。



ガラス線量計の設置場所の概要図。 ※加速器の運転条件

☆///迷袖ジ/厚松米叶 電子エネルギー 68.1MeV クライストロン高周波パルス幅 11µs



遮蔽物に設置したガラス線量計の測定結果。

#### まとめ

LEBRAの線形加速器を使い、µ秒程度の分解能での正確な実照射時間の把握を行った。 →Nalシンチレーション検出器による測定・プログラムによる測 定結果の解析で実現した。

【今後について】

- 高線量下でのガラス線量計の校正
- アンジュレーター周辺以外の照射線量評価

#### 高エネルギー放射線照射環境構築に向けた加速器運転中の線量評価

倉田瑞希,住友洋介,大和紗也香,土屋颯太,日南健(日大理工)境武志,早川健,早川恭史(日大LEBRA)

#### 背景

ベンチャー企業が参入するなど活発に行われている宇宙開発において、 宇宙環境下での**高エネルギー放射線**による材料や機器への影響評価が重要

通いやすい場所で放射線耐性の試験を行いたいという企業側からの要望

日本大学の加速器を利用して試験を行うメリット

100MeVまで加速可能な電子線形加速器 高エネルギー・高線量での試験が可能

都心からアクセスのしやすい船橋キャンパス

通常運転時の放射線を使うため、加速器の他の利用と共存

目標:プレテストなど「容易に使用」できる照射設備

高エネルギーでの線量評価を行う上で重要となること ・光電効果やコンプトン散乱、電子対生成

・核反応による**中性子生成** 

高価な線量計・・・すべての測定◎、利用の敷居↑

安価な線量計・・・すべての測定×、利用の敷居↓

気軽に試験が行える照射環境を構築のためには、安価な線 量計を使用し測定する。 すべての反応を考慮できないためシミュレーションと比較 することで、エネルギー分布や中性子の線量評価を行う。

#### ベンチャーを始めとした多くの企業の使用に対する敷居を下げ、 今後活発になっていく宇宙開発に大いに役立つような照射環境構築を目指す



この際に、パンチ圧縮を行うため大きなエネルギー差を設けることから、 45度偏向電磁石で真空ダクト内を通過できずに放射線が生成される。他 にも加速エネルギーの非平衡状態により加速しきれていない 気の損 失もある。この放射線を利用して機器や材料の試験を行う予定である。



#### シミュレーションによる加速器運転中線量評価

測定時の運転条件を入れて PHITS <sup>[1]</sup>でシミュレーションを 行い、ガラス線量計の吸収線量を求め、測定結果と比較す る。

ガラス線量計で測定した時の運転状況<sup>[2][3][4]</sup>を参考にシ ミュレーション条件を決め、チャンバーの入口から電子 ビームを発生させ磁場をかけて曲げたあとダクトを通るよ うに設定した。



 運転状況
 パースト

 モード
 パースト

 ビームエネルギー
 78.1 MeV

 ストレートライン電流値
 49.4 mA

 ガウス
 アクロバルス幅

 マクロバルス幅
 12 μs

 シミュレーション条件
 電子

 単年
 0.5 cm

 ガウス分布の中心値
 78.1 MeV/n

 ガウス分布の中心値
 10.1 MeV/n

 ガウス分布のカットオフ型大値
 65.3 MeV/n

 ガウス分布のカットオフ型大値
 90.9 MeV/n

 ガウス分布のカットオフ型大値
 90.9 MeV/n

 超子数
 7.41 × 10<sup>21</sup>

 磁場
 5.5 KG

電子の飛跡と y 線の飛跡は、以下のようになった。 y 線の飛跡は出ているがガラス線量計の吸収線 量は求められなかった。試行回数を3500万回として計算を行ったが、ガラス線量計が全体に比べて 小さいこと、壁面等に反射してエネルギーが下がった散乱ガンマ線を考慮するためにはもっと試行 回数を増やす必要があるのかもしれない。宇遠環境においても付近の物質で散乱して生じる低エネ ルギーガンマ線や、更には中性子の影響も考慮する必要があるためこの計算は重要となる。 他の原因も考えて設定を見直し、もう一度計算を行っていきたい。



#### 🛑 ガラス線量計の校正について

測定で使用した線量計は低エネルギーガンマ線源のCs-137で校正されているため高エネル ギー環境での測定が正しく出来 (ω) るか重要となる。そこで、ニュースバル加速器施設で の照射実験を行い高エネルギー環境での反応を見ることにした。レーザーコンプトン散乱 による34MeV準単色ガンマ線の生成しており光子数もわかっているので高エネルギーγ線 に対する応答を見るのに適している。



今回実験を行った場所は校正施設ではないためPHITSでシミュレーションを行い測定結果と比較する。

#### - 今後の展望

- 照射実験のシミュレーションに関して、空気に対する線量に換算する。
- 原子力機構にある照射設備でガンマ線をガラス線量計に照射する。
- 詳細な機器構成や精度を上げてPHITSでシミュレーションを行い、測定結果と 比較する。

 2)シミュレーションとの比較
 実験条件を設定し、ガラス線量計の吸収線量を求めた。結果は、1秒間で
 1.5×10<sup>-11</sup>Gy、7分間で6.5×10<sup>-9</sup>Gy程度 になり、測定結果と比べると値がかな り小さくなった。

次に、ガラス線量計の開定値は空気 カーマに変換した値になっているため、 空気の吸収線量も求めた。ジオメト リーが切れている図になってしまった が、高さは300cmとなっている。 結果は、1秒間で2.7×10<sup>14</sup>Gyとなった。

今後、実験値の比較に対して空気に対 する線量に換算する。 また、電子の飛跡も確認する。



光子

参考文献

 T. Sato, et al., Recent improvements of the Particle and Heavy Ion Transport code System - PHITS version 3.33, J. Nucl. Sci. Technol.
 S. Yamato, et al., "ASSESSMENT OF A HAND-MADE SCINTILLATOR RADIATION MONITOR BY AN ION CHAMBER TOWARD A POINT DOSE EVALUATION IN ACCELERATOR OPERATIONS", Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 29 Extension 1.0222. Enviro. In SIGNATION CONTRACT, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 29

 September 1, 2023, Fundashi, PASJ2023 THP44.
 M. Kurata, et al., "SINULATION DASE EVALUATION FOR A HIGH-ENERGY RADIATION IRRADIATION ENVIRONMENT", Proceedings of the 21th Annual Matting of Devicin A Colouration Control of the 30-A Nature 7 2024 Annuarity. DASE 2021 THEOREM 2021

 Ah. Ruhang, Cali, "Joint Carl Ox Oxfort: Victor Victor 4 (1001) hereast 0 1 robust 1000 metrics 0 in the 21th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan 1493 0 - August 3, 2024, "Annualtan, PASJ2024 THP019.
 S. Yamato, et al., "DEVELOPMENT OF DOSE ASSESSMENT AROUND ACCELERATOR FOR HIGH-ENROY IRRADIATION EXPERIMENTS", Proceedings of the 21th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan July 30 - August 3, 2024, "Annualtan, PASJ2024 THP020.

# 電子ビームのプラズマ相互作用実験に向けた真空インターロックシステムの改良

### 物理学科4年1077 高岸太陽 指導教員:住友洋介

共同研究者:伊東幸輝 根岸慧 山口晴矢

宇宙高速電波バースト現象の発生メカニズムの理解に向けて、加速器が生 成する高エネルギー電子ビームとプラズマの相互作用により疑似的な高速 電波バースト現象の再現を試みる実験を行っている。実験装置保護の観点 から真空維持は重要であり、万が一のための真空インターロックシステム の開発を行っている。

<u>背景</u>

## <u>目的</u>

インターロックシステムの改良

チタン膜の損傷を適切に検出し、これをトリガーとする新しいインターロッ クシステムの開発

|漏れ出したラジカルがパッシェンの法則によって生じる放電(火花放電)をト リガーするインターロックシステムへの改良

## インターロックシステムの改良













火花放電が起こった状態



放電が起こってない



電流増幅装置(AMP)導入前後の放電状態

イオンポンプを用いたインターロックシステムでは正しく動作しない 状況があるため、チタン膜の損傷を適切に検出し、これをトリガーと する新しいインターロックシステムの開発を試みた。高圧電源を用い て、漏れ出したラジカルでの「パッシェンの法則」による火花放電を トリガーとしたものである。電流増幅装置を用いてパルス幅を伸ばし、 フォトカプラ付リレーによりリレーを動作させやすくすることにより、 インターロックシステムを正しく動作させることに成功した。

まとめ -

### 参考文献

[1] 伊東幸輝,他,"プラズマとの相互作用実験のための真空保護インター ロックシステムの高精度化", PASJ2024, THPO78, 2024年7月31日(水)~ 8月3日(土)山形. [2] オムロン製品情報 <u>https://faq.fa.omron.co.jp/tech/s/article/faq02824</u>

[3] Electrical Information 【パッシェンの法則とは?】

https://detail-infomation.com/paschens-law/



# 中赤外自由電子レーザー位相同期システム性能向上に向けた試験共振器の構築

物理学科1079 曽我 怜大

担当教員:住友洋介 共同実験者:久保田月野、原田一輝



## 研究方針

①光コム:

レーザーの特性としてパルスにすると特定(2~6µm)の周波数成分の強度が分散してしまうため、くし状にピークを作る仕込みを用いて特定の周波数成分の強度を



### 高める。

### ②位相同期システム:

電子それぞれが共振器内で蛇行運動をし光を出すときに電子間で光の位相差が 生まれ波長同士が作用し非線形的な波長になりこの位相差をそろえることで1 つの大きな波長を生み出すため共振器内にスプリッターを通すことで光で電子 にマイクロバンチ化の作用と光の情報をそろえる調整を行う。



## 実験方針

試験共振器を用いて位相同期システムのテストを行う。

- 1:入射系を用いて凹面鏡に対して垂直に光を当て光の 経路を往復させることで光を往復できるかを確認す る。
- ②:光を何往復もさせるために凹面鏡に垂直に光を当て るのが条件で、そのために入射系を用意して共振器 の中のビームサイズを測定することで理論値とあっ ているかを確認する。

### ③:光が収束されていることを確認したうえでビームパ ワーが凹面鏡を2枚設置することによって強度が上 昇していることを確認する。









## まとめ

水素生成の超効率化をより実践的なものとするために現状ではまだ不十分といえる。 そのために当初の目的である高繰り返しな光周波数コムと位相同期システムの開発を行う。 現状2枚までの共振に成功させているため試験共振器上で3枚目の凹面鏡をいれ、ビームパワーの強度を高める調整を行ってい る。

参考文献:

1)久保田月野,他, PASJ2024 THP060.

2)Y. Sumitomo, et.al., JACoW LINAC2024, TUPB095.
## 加速器内の電場による粒子の加速について

日本大学理工学部物理学科 量子ビーム科学研究室 1087 土屋颯太 指導教員 住友洋介 共同研究者、大和紗也加、倉田瑞希、日南建

#### 背景

日本大学の電子線形加速器では電場を用いて加速して偏向電磁石で45度ずつ曲げることを2回行っている。しかし、偏向電磁石で45度曲げるときにエネルギーの異なる粒子が曲がり切れずに偏向電磁石に 粒子がぶつかることで放射線が発生する。この放射線がどのくらい出ているのかを知るには加速する際にどのようにしてエネルギーが異なる粒子ができるか知ることが必要である。本研究は加速器内の加速 の仕組みについて知ることが目的である。

#### 加速の原理

日本大学の電子線形加速器ではディスク装荷加速構造が使われている。これは図1のように円筒 導波管の中に穴の開いたディスクを一定 周期 d で装荷すると位相速度を光速にほとんど等 しくす ることができて、電子を加速することができる。



ディスクの半径をbとする。円筒導波管中の電場はヘルムホルツ方程式を使って解くと

 $E_z = E_0 J_0 \left( \frac{x_{01}r}{b} \right) \cos(\omega t)$  ① ただし、 $x_{01} (= 2.405)$ はベッセル関数の1番目の根となる。加速管中の等価回路は図2のようにな る。周期構造を持つn番目のセルに対してキルヒホッフの法則を適用すると以下の式が成り立つ。 ここで*I*<sup>n</sup>はn番目に流れる電流とする。

ω	( 2	1		$I_{n+1} = 0$
$-\frac{1}{j\omega C_{c}}$	$\sqrt{j\omega C_C}$	<sup>–</sup> <i>jωC</i>	$+ J \omega L$	$\int_{a}^{a} -\frac{1}{j\omega C_{C}} = 0$



図2 加速管の等価回路[1]

ここでセルは周期構造体中にあるので任意の点の波動関数は、任意の別のセルにおける同様な点の 波動関数と伝播因子を除き全く同じ値をとるので

$$I_{n-1} = e^{-j\theta}I$$

$$I_{n+1} = e^{j\theta}I$$

$$\theta = \beta d$$
(4)

先ほどの二つの式を①式に代入して全体をInで割り $\omega$  について解くと

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 + 2\frac{c}{c_c}(1 - \cos\theta)}$$
 (5)

ただし、 $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ とする。



この図の上側にある黄色と黒色の円筒が加速管である。この3つの加速管を通ることで粒子が加速さ れるので、ASTRAでこの3つの加速器をシミュレーションすることでエネルギーの変移がどのようにな るのか調べた。

今回のシミュレーションでは粒子を3つの加速器で加速させて3つ目の加速器の位相を8度ずつ変化さ せた。その際の波長を図4、エネルギー差を図5で示した。



となり、ωが定められる。加速管中の電磁場は周期性を持つので、フーリエ球数展開ができて中心軸上 の電場の軸方向成分 $E_z(r,z)$ は次の様になる。

 $E_z(r,z) = \sigma_{n \to -\infty}^{n \to \infty} a_n J_0(k_{rm} r) e^{j(\omega t - \beta_n z)}$  ⑦ ただし、 $\beta_n = \beta_0 + \frac{2\pi n}{d} k_{rm} = k^2 - \beta_n^2, \beta_0 = \frac{2\pi}{3d}$ である。n=0の波を基本波、 $n=\pm 1,2$ …の波を空間高調波と いう。 電場の計算

この式に数値を入れて $E_z(r, z)$ を求めて、MATHEMATICAで図示する。今回の計算ではディスクの周期dを 35[mm],管内波長 $\lambda_g$ を105[cm]、 $\frac{c}{c_c}$  = 0.0067とする $\frac{2}{3}$   $\pi$ モードの加速管で計算を行った。この値を④式に 代入すると

$$\theta = \beta_0 d = \frac{2\pi}{\lambda_g} * d = \frac{2\pi}{105} * 35 = \frac{2}{3}\pi$$
  
となる。⑦式の一部をオイラーの公式を使い式変形すると  
$$e^{j(\omega t - \beta_n z)} = \cos(\omega t - \frac{2\pi - 6\pi n}{3d}z)$$

この式にω=2π \* 2856GHzとd=35[mm]を代入すると

 $\cos(2\pi * 2856 * 10^6 t - \frac{2\pi - 6\pi n}{105}z)$ となる。係数を整えると、n=0,-1,1の時のそれぞれの $E_z(r, z)$ は n=0の時

$$0.8\cos\left((2\pi * 2856 * 10^9 t - \frac{2\pi}{105}z\right)$$

n=1の時

 $0.03\cos\left((2\pi * 2856 * 10^9 t - \frac{8\pi}{105}z\right)$ 

n-=-1の時



図5からエネルギー差が一番大きのは位相が200度の時だとわかる。この位相の時の波長の中での位置 は図4より波長の中心部分であることが分かる。

次に3本目の加速器の位相が200度の時の粒子の進行方向におけるエネルギーの平均的な大きさを図6,エ ネルギーの広がりを図7で示した。



図6から3本目の加速管ではほとんどエネルギーが増えていないが、図7よりエネルギーの広がりが3 本目の加速器を通る際に大きくなっていることが分かる。

加速器によって粒子は波長にのって山部分では加速されるが波長の谷部分では減速してしまう。波長の 中心部分にあるときは加速も減速もしないが、実際は前方にいる粒子や後方にいる粒子があるので加速 さる粒子と減速される粒子も生まれることで粒子ごとにエネルギー差が生まれてしまう。このエネルギ 一差によって粒子が曲がり切れずに偏向電磁石に粒子がぶつかることで放射線が発生する。

#### まとめ

今回の計算を通して加速管内で粒子が電場によって加速していて、複数の波を重ねた正弦波によって 不均一に加速させられていることが分かる。また、ASTRAよりエネルギー差は波長の中止部分の加速 も減速もしないところを通る際に起こる前方部分の粒子と後方部分の粒子よる差によっておこること が分かった。

#### 参考文献

[1]電子線形加速器の基礎 5.加速管・立体回路山口誠 http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt3.ht ml [2]陽子加速器の加速管田村潤 http://accwww2.kek.jp/oho/oho17/OHO 17\_txt/06\_Tamura\_Jun.pdf

# 短時間光パルスによる金属応力測定 物理学科 4年 1103 根岸慧

共同研究者:伊東幸輝 指導教員:住友洋介

## 且的

この研究は短時間光パルスを使った金属応力の測定方法を確立させ金属拡散結合の評価をすることである。

## 研究方針

時間を変数としたときの応力の変化を測定する方法である時間 分解分光という手法を用いて金属応力の時間的変化をピコ秒レー ザーを用いて測定、分析する。

金属内には自由電子が動いていて、電子はレーザーで熱を得ると 運動が活発になり、金属全体として熱を帯びる。また、加工された 金属の内部には応力が生じ密度の差が生まれる。熱は密度が高いエリア では速く、密度が低いところではより遅く伝わる。この性質を 使いレーザーを金属試料に当て熱の伝わりを調べることで金属内の 応力を観測、解析する。ピコ秒レーザーを用いることで金属内で電 子がどのように進んでいくかを観測できるようになる。

## 実験結果

当初使っていた光チョッパー(写真 I 左)はファンに厚紙を張り付けて 作ったが固定が困難で動かすと振動がデータにノイズとしてのって しまうため、出力調整が可能な焦電ディテクタに切り替えた。しかし 変更後もまたディテクタのシャッター開閉のノイズがのってしまった。





左の資料はレーザーフラッシュ 法に依る熱拡散率測定の方法で ある。測定方法としてはかなり 近く参考にした。



写真Ⅱ 光チョッパーの変更(左:ファンに厚紙を張った 右:周波数変更可能光チョッパー)

### 光チョッパーの振動がノイズ(図Ⅱ)としてデータに出てきてしまうので 光学台共有せずそれぞれ別々にして再度実験を行った。 左の写真Ⅲがその様子である。



写真Ⅲ 光チョッパーを光学台から外した後の 実験装置全体像



図Ⅱ 光チョッパー開閉ノイズ

実験装置の改善後再度実験を行った。 反射鏡を使って光チョッパーを光学台の 外に設置した。これによりディテクタで 観測するデータからノイズを取り除くこ とが出来たため、再度観測をした(図 皿)。

図皿はチョッパーを5Hzにした時の データであるが実験結果として意味があ るデータではない。

原因はレーザーの出力が弱すぎる事により金属放射による赤外線が弱すぎること が考えられる。



図Ⅲ ノイズ取り除いた後の観測データ

本研究ではナノ秒レーザーを使った実験装置、実験環境の構築で ある。また、使用した実験器具等は以下の通りである。これらを上 の写真 I のように配置した。

520 nmナノ秒レーザー、金属試料、レンズ、コントローラー付き 光チョッパー、焦電ディテクタ、ブラックポリエチレン膜、焦点距 離100 mm凸レンズ

ナノ秒レーザーから出た光を金属試料に当て反射した可視光、赤 外線を観測することで金属の状態や情報を観測する。観測は、場所 別、時間別、レーザーの周波数別に行おうと考えている。

## 考察&今後の展望

本実験で測定しようとしている微量の赤外線を測定するにはより感度の良 いセンサーが必要になる。しかし、高感度すればするだけ他の実験装置の振 動や熱が無視できなくなる。そのため実験装置全体としては規模が大きくな るが光学台を分けるなどノイズを取り除く工夫が不可欠であった。 また、もう一つのアプローチとしてレーザーの出力を上げるという事、 チョッパーの振動の開閉時でノイズサイズが異なることを利用してレーザー が当たっている時間と当たってない時間を比較して放射される赤外線を調べ る方法が考えられる。

データがきちんととれるようになれば、反射する可視光と放射する赤外線 の関係から金属試料の情報が取り出せるようになり研究が進むと考えられる。

参考文献
1, 濵口宏夫 「時間分解振動分光法」
2, 阿子島めぐみ 「レーザーフラッシュ法による熱拡散率測定」

# 自由電子レーザーによる中赤外光周波数コム生成に向けた試験調和共振器の作成



## <u>1. 研究背景</u>

現在日本大学では、電子線形加速器を用いて共振器型自由電子レーザー装置で 2.856 GHz の高繰り返しで高強度な中赤外光パルス生成を得意としている。また、水素関連分 子には固有の吸収帯域があり、日本大学の加速器の波長領域が合致している。水素の特 定の結合エネルギーに短時間集中照射することで、水素を脱離させるような非線形反応 の可能性を探るのには必要な高輝度なレーザーとして日本大学の加速器が適している。

実際に、

水素関連分子の波長領域内の吸収帯域 → 2 ~ 4 µm 日本大学の線形加速器の波長領域 → 2 ~ 5 µm

であり、高輝度、高繰り返しの発振を行えること加速器の特徴であり、中赤外帯域での 基本波発振を行えることが日本大学の線形加速器の大きな特徴である。



現在、グリーンな水素の生成方法としては触媒を利用した電気分解があげられるが、 水素社会としてより効率の良い水素生成法が求められている。そこで、脱炭素に向け、 水素の新しい発生方法として、水素関連の固有エネルギー集中照射による分子操作で 水素の超効率生成を目指す。

水素の超効率生成を目指すにあたって、高輝度な光(光周波数コム)の生成が必要 となる。しかし、電子ビームからつくられる自由電子レーザーにより生成されるパル スの位相は、電子ビームのショットノイズによるランダム性を持つようになるため、 高繰り返しのパルス間での位相同期が必要となる。そこで、ランダム性が大きいパル スの位相を同期させる位相同期システムの構築を行う[4,5]。

## <u>2. 高繰り返し光周波数コム開発</u>

## ・光周波数コムの生成

加速器で生成される高繰り返し光パルスの位相は、パルス間での相対位相がそろってお らず、その成分強度は周波数空間において広がりを持った成分強度となってしまっている。 そこで、光のパワーを高くするために光周波数コムを利用する。光周波数コムとは、高繰 り返しの光パルスを積算した結果、離散的な周波数成分となり、エネルギーが離散部分に 集中することで高くなる。そのため、位相をそろえると積算したときに特定の周波数成分 を飛躍的に高めるという特性を用いるために、位相同期システムの構築を行う必要がある。



日本大学の共振器は、2枚の凹面鏡で形成され、周期的な磁気回路で生成・増幅された 光パルスが共振器内を周回する。この光パルスは往復間隔やってくる電子パルスと相互作 用することにより、電子パルスからエネルギーを受け取り、強度が指数関数的に増幅し高 強度な短時間パルスを形成する。この共振器内で生成される光パルスは、電子ビームの ショットノイズに影響されるため、パルスはそれぞれ独立していて位相に相関がなく、ラ ンダム性が大きい。そのため、ランダム性の大きい光パルスの位相を同期させ、相関性を 持たせたい。

位相を同期させる方法として、スプリッター



# <u>3. 試験共振器について</u>

調整難易度の高い位相同期システムの導入方法を確立させるために、試験的な共振器を 作成する。試験共振器を構築する凹面鏡のうち2枚については、実際の日本大学の加速 器で用いている凹面鏡と同様の R = 3700 mm の金コートミラーを利用し、凹面鏡間の 距離については日本大学の加速器内の共振器長と同じ 6718 mm になるように作成した。

位相同期させるための1パルス間分ずらした位置に設置 する曲率の異なる3枚目の凹面鏡については、ガウシア ンビームの転送行列から計算し、R = 3653 mm を使用 している。



試験共振器概要図



実際の試験共振器

で一部のパルスを取り出し、共振器内に1パ ルス間分短い経路で曲率の異なる3枚目の凹 面鏡を設置することで位相の同期を行うこと ができる。この位相同期方法については、位 相同期自由電子レーザー[1]-[3]として提案 ・実証されている。光周波数コムの特性を十 分に引き出すためも位相同期を行う必要があ る。

# <u>4. 入射系について</u>

入射系の調整を行う前に、はじめに2枚の凹面鏡の位置調整、光軸の調整を行う。その 後、共振器内でのビームプロファイルに合うように、レンズを用いてレーザーの入射光 学系を調整する必要がある。レンズを置く位置については、転送行列を用いてレンズの 置く位置を計算した。さらに、レンズの位置を求めた後、共振器の安定化条件の転送行 列から計算した理論値のビームサイズと等しくなるようにレンズの位置を微調整し、レ ンズの位置を決定した [4,5]。



ビームサイズは凹面鏡からの距離 500 mm の位置を 0 点としてカメラを用い て写真を撮影する。その後、撮影した 写真からガウス分布におけるビームサ イズ  $\sigma$  を読み取り、理論値のビームサ イズ  $\omega$  と比較する。

# <u>5. 実験結果</u>

## i )

計算から得られたレンズの位置を微調整した 後、2枚の凹面鏡での入射系の調整を行い、 ガウスビームにおける理論値のビームサイズ と比較した結果。ここで、ビームサイズはガ ウスビームの強度が 1/e<sup>2</sup> になるところを基 としている。



iii)位相同期させるための3枚目の凹面鏡





2 枚の凹面鏡での周回確認



2枚の凹面鏡での入射光学系の調整を行った後、実際に共振器内での複数回(2周程度)の周回をしていることを確認する。その後、3枚目の凹面鏡のインストールと調整を行う。調整については、2枚の凹面鏡で調整した共振器内ビームプロファイルに合うように調整する。

<u>6. 考察・まとめ</u>

今回の実験結果から、ランダム性を持ったパルスに曲率の異なる凹面鏡を1パルス間分 ずらして設置する、位相同期システムの調整方法を確立できたと考えている。今後は、 3枚目の凹面鏡を設置したときのビームサイズの精度を上げていくこと、光のパワーが 実際に強くなっていることを確認していきたい。 また、今回自身で試験的な共振器から位相同期システムの調整方法を確立できたことで、 今後は日本大学の加速器内に位相同期システムを構築し、実際に水分子に照射し、水素 の超効率生成を行っていきたいと考えている。 (R3653)を導入したときの R3700 の 凹面鏡と R3653 の凹面鏡のビームサイ ズの比較

## 参考文献

[1] Eric B. Szarmes, Stephen V. Benson, John M.J. Badey, "Mode control on short-pulse FELs using a Michelson-mirror resonator", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Volume 296, Issues 1–3, Pages 98-109, (1990).
[2] D. Oepts, R. J. Bakker, D. A. Jaroszynski, A. F. G. van der Meer, and P. W. van Amersfoort, Phys. Rev. Lett. 68, 3543 (1992).
[3] Pardis Niknejadi et.al., Phys. Rev. Accel. Beams 22, 040704 (2019).
[4] 久保田月野, 他, PASJ2024 THP060.
[5] Y. Sumitomo, et.al., JACoW LINAC2024, TUPB095.

PHITSによるy線の遮蔽シミュレーション

指導教員 住友洋介 発表者 日南健 共同研究者 大和紗也香 倉田瑞希 土屋颯太



ジオメトリーの作成

放射線計算コード「PHITS」を用いてシミュレー ションを行った。まず、アンジュレーター付近の環境 を簡易的に作成した。線源は半径2.5cmの円面状電子 線とし、それを最初の鉛に全面衝突させ、散乱γ線の 仮想発生源とした。遮蔽は厚さ5cm、断面積は  $30 \text{cm} \times 30 \text{cm}$ とした。さらに、 $\gamma$ 線の吸収線量を確か めるために、遮蔽の後ろの地点Aと、ストレートライ ンの適当な地点Bに、それぞれ半径5cmの水球を設置 した。(以降、遮蔽の後ろにある水球を水球A、スト レートラインにある水球を水球Bとする) 次に、測定するものの設定を行う。2つの水球A、B の表面1cm<sup>2</sup>当たりにどれほどの粒子数が当たって いるのかを示す粒子フラックスと、水球の吸収線量の 総量を、電子とγ線の2つの場合のデータを取るよう



7.62E-20

7.65E-03

9.25E-03

記録なし

設定した。



シミュレーション結果と

図2 γ線(左)と電子(右)の粒子フラックス

図2の粒子フラックスの結果を見ると、遮蔽物による遮 蔽が出来ていることが目に見えて分かる。ただ、表1を 見ると、γ線のシミュレーション結果と実際の測定値と は、数値にかなりの差があり、また水球Aのシミュレート において、γ線は測定できなかった。PHITSの講習会に おいては、似たようなシミュレーションにおいて10000回 で試行を行っており、統計誤差が十分に小さい結果が出 ていた。そのため、最初は試行回数1万回で行っていた。 しかし、電子やγ線の粒子フラックスが出ているにもか かわらず、吸収線量の結果が出ないのはおかしいと思っ たため、試行回数を250万回にし(試行回数を100倍する と統計誤差は約1/10になる)、また水球の設定が間違っ ていないか確かめるために、γ線に加えて電子の吸収線 量も測定するよう設定に付け加えることで水球がしっか り設定されているかを確認した。その結果、水球Aの電子 の吸収線量と、水球Bの電子とγ線の測定結果は出たが、 水球Aのγ線の測定結果は出なかった。

考察・今後の展望

実際の測定結果とシミュレーション結果が大きく異 なった原因は、今回PHITS内で作成したジオメトリーが、 壁面や他の細かい構成要素を省略した簡易的なもので あったことだと考える。また、表1のガラス線量計の測 定結果は実際にビームを一定時間照射したデータをもと に作成しているのに対し DUITSでは時間積分け得られ

実測値の比較	に作成しているのに対し、Thirsでは時間損力は得られ た結果に時間分をかけることで出していることと、γ線 の貫通力は電子と比べてとても高いことから、γ線の吸
PHITSによる電子と $\gamma線の粒子フラックスを図2に$ テオ ホカ 水球 $\Lambda$ レPの $\chi$ 線吸収線景 $\mu$ 地占 $\Lambda$	収線量のシミュレーションが難しかったことも考えられ
小9。また、小塚AとDのγ級吸収稼重と、地点A (アンジュレーター側面と上面)、地点Bでのガラス	る。 また、水球Aのγ線吸収線量は出なかったものの、実測
線量計による実際の吸収線量の測定結果をまとめたも のを表1に示す。シミュレーション結果は、設定した	値ではBの位置の方が線量値が数倍高いことが示されており、遮蔽による線量値の大小はシミュレーションによっ
照射を250万回試行し、すべての試行による結果の和 を試行回数で割ったものである。	て定性的に理解することが出来たと考えられる。今後は、 定量的に理解するために、ビームや室内の構造などの詳
	細を取り込んでいきたい。

最後に、手伝ってくれた先生方や先輩方、ありがとうございました。 参考文献

大和 学術講演会https://docs.google.com/presentation/d/1F6KRlNACxwA5-9czkycf5fXQqrU5Xyva/edit#slide=id.p1

PHITS ユーザーマニュアル manualJ-phits.pdf

PHITS講習 phits-lec03-en.ppt

## 高速電波バーストの模擬実験のためのインターロック装置

## 物理学科 4年 1135 山口晴矢 指導教員 住友洋介 共同研究者 伊東幸輝 高岸太陽 根岸慧

## 目的

現在、高速電波バーストの原理解明のため、研究が盛んに行われている。そこで、日本大学では、電子加速器を利用して、高速電波バースト現象の再現実 験を行いたいと考えている。





(1) 租排気としてのスクロールポンプを使い実験管を

約 10<sup>-1</sup>[Pa]にする

(2) ターボポンプを使い、実験管を約 10<sup>-4</sup> [Pa] にする。

(3) 低真空と高真空を分けるバルブを閉め、イオンポンプを使い

高真空 側を約 10<sup>-6</sup> [Pa]にする。

(4) イオンポンプ電源におけるセットポイントを設定して、バル ブを少しずつ開く。

(5) 低真空側から高真空側にリークしてセットポイントを上回る とゲートバルブが閉まる

(6) イオンポンプ電源からの真空値に相当する電圧出力をオシロ スコープで確認する。

電子ビームの電流量とチタン膜の溶融時間



低真空から高真空にリークが起こった際に、閾値を超えてから、少し時間が空 いてインターロック装置が作動しているので、少量のリークでも感知できるよ うな装置が必要になると考える。

## 参考文献

- 1) Detection of a bright burst from the repeating fast radio burst 20201124A at 2 GHz, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 75, Issue 1, Pages 199-207, 2023
- 2) 一般社団法人日本チタン協会,2024年12月13日
- 3) PHITS, 2024年12月13日

4) 伊東幸輝 著、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システムの高精度化、THP078、 PASJ2024

日本大学大学院 日本大学 理工学研究科 理工学部 電子工学専攻 電子工学科 大谷研究室

M1 藤野一風 教授 博士/工学 大谷昭仁

## テラヘルツ波を用いた 賦形剤測定に関する研究

研究背景

医薬品には、薬品成 分の他に賦形剤という 添加物が存在する、薬 品成分の吸収スペクト ル測定が進む反面、賦 形剤の吸収スペクトル 測定は未だない。

そこで, 産業技術総 合研究所と日本大学 電子線利用研究施設 (LEBRA)の協力の元, 電子線加速器を用いて 賦形剤の吸収(指紋)ス ペクトルの測定を行う.

#### 目的

医療錠剤から薬品 成分,賦形剤を特定す るためにあらかじめ各 賦形剤毎に高精度の 指紋スペクトルのデー タベース構築行う.

#### 内容

本研究では賦形剤 の打錠圧力,含有量が THz 吸収スペクトルに 与える影響を明らかに する.



概要(研究背景、目的、内容) テラヘルツ波分光分析 賦形剤サンプル 結果と考察

### テラヘルツ波分光分析

テラヘルツ波は電波と光の中間にあたる周波数 帯の電磁波であり、物質をすり抜ける直進透過性 と分子を振動させ吸収スペクトルを測定するといっ た特性を併せ持つ.この特性を利用した分光法が テラヘルツ波分光分析である.その中でも高いス ペクトル精度が必要であるため、本研究ではフー リエ変換型分光法の1種であるFTIR(Fourier Transform Infrared Spectrophotometer)型テラヘ ルツ波分光法を採用した.FT-IR型テラヘルツ波 分光法では、干渉計での光路差を利用することで 光路差0の時に強め合う波長を作り出しインター フェログラムを算出する.インターフェログラムをフ ーリエ変換することで吸収スペクトルを求めること ができる.

### 賦形剤とサンプル作成

賦形剤とは,錠剤の形状を保持し,崩壊を防ぐ 形状維持,湿気や温度変化などの外的要因から 保護する安定性向上,錠剤が消化器官内で薬品 成分が適切な速度で吸収されるようにする放散速 度制御等,その役割は多岐にわたるものである. サンプル錠剤化方法として直接打錠法を採用し た.直接打錠法は,水分による吸収が顕著に表れ るテラヘルツ波分光分析において,水や溶液を使 用しないため,水分によるデータの変動を防ぐこと が可能となる.



#### 図1 マイケルソン干渉計概略図

### 結果と考察

測定はダイラクトーズ-S(フロイント産業)を使用 した。測定圧力は、高圧 1.8 kN,中圧 1.0 kN,低 圧 0.5 kN である。以下に透過率・吸収率の測定 結果を示す.吸収スペクトルはいずれも 1.35 THz で確認され、打錠圧力低下により吸収が増 加する傾向が確認された。ランベルト・ベールの 法則によると、吸収強度はサンプル中の吸収体 の濃度と光が通過する経路長に比例し、

#### $A = \varepsilon \times c \times l$

と表される. ただし, A:吸光度(absorption), ε: モル吸光係数, c:濃度, I:光が通過する経路長 (サンプルの高さ)である. ここで, ランベルト・ベ ールの法則に基づき、濃度は低下するものの経 路長増加がそれを上回り、吸収強度が高まった と考えられる。さらに、気孔率変化や散乱効果も 寄与する可能性があり、今後検討が必要であ る.



# 高精度光学湿度計測の実現に向けたテラヘルツ帯 水蒸気吸収スペクトルの測定

The Measurement of Terahertz Water Vapor Absorption Spectrum for Realizing High-Precision Optical Humidity Measurement

住山 智基(日本大学・理工学部・電子・4年)大谷 昭仁(日本大学・理工学部・電子・教員)境 武志(日本大学・量科研・教員)

# ①研究背景

湿度は身近な物理量であるが,現在 の市販されている湿度計は,極めて精 度が低い.光学的計測法の1つである非 分散赤外吸収法を利用して,大気に含 まれる微量ガス検出の高精度計測が行 われているが,中赤外域で吸収の大き い水蒸気には実用化されていないのが 現状である.



# ②目的

一般的な湿度計の湿度の精度は±5%, 精度が高いものでも±2%程度であるた め,既存の湿度計よりも一桁以上精度 のよい光学湿度計測の実現に向け,テ ラヘルツ分光法を用いて,水蒸気吸収 スペクトルの測定を行い,評価する.

# ③原理

今回の水蒸気スペクトル測定には, マイケルソン干渉計を使用した. 移動鏡による透過光の強度を各地点 で測定することにより,インターフェ ログラムを取得し,フーリエ変換する ことでスペクトルを得ることができる.



測定できた範囲は0.5~2.0[THz]程までであり、両方の測定で観測することので きた吸収ピークは、0.75、1.10、1.15、1.21、1.42、1.67[THz]であった。これら のピーク値は水蒸気固有の吸収スペクトルであると考えられる。また、過去の データと今回の測定で、一度しか観測されていないピーク値は、水蒸気固有の ピーク値とは断言ができない。これらは、測定でビーム(光源)の質や光学系の



測定試料のある場合のインターフェ ログラムを $I_{sam}(\tau)$ ,測定試料のない場 合のインターフェログラム(バックグ ラウンド時)を $I_{bag}(\tau)$ とすると,透過 率 $T(\tau)$ と吸光度 $A(\tau)$ は以下の式で表す ことができる.

$$T(\tau) = \frac{\int I_{sam} (\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau}{\int I_{bag} (\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau}$$
  
透過率  
$$A(\tau) = -\log T(\tau) = \frac{\int I_{bag} (\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau}{\int I_{sam} (\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau}$$
吸光度

調整による光路差の影響があると考える.



回帰線と計測値の誤差を絶対値計算した結果,測定から分かった6つの吸収 ピークの中で1.42[THz]が標準偏差0.04ほどで測定することができた.つまり,目 的であった精度については,最小二乗法による回帰線からは約4%の誤差がある ことが分かる.絶対湿度0.6[g/cm<sup>3</sup>]では,約0.1%という高精度で計測すること ができたが,絶対湿度4.5 [g/cm<sup>3</sup>]以上では,4%以上の誤差が生じてしまってい る.測定する湿度を増やすことで,回帰線の精度を上げることができるため,誤 差を小さくできるのではないかと考えている. 今回の測定を通して,高精度の光学湿度計の実現には,1.42[THz]での吸光度が 重要であると考える.

本研究成果は,2024年競輪とオートレースの補助事業の研究にて得られたものです.

## 日本大学量子科学研究所 電子線利用研究施設 令和6年度運営員会

・令和6年度電子線利用研究施設の状況報告・議事録

2025/2/28

#### 日本大学量子科学研究所電子線利用研究施設 令和6年度運営委員会議事録

日時:2025年2月28日(金) 12:00 - 12:45 場所:理工学部船橋校舎14号館2階1423 教室

参加者:早川恭史(日大量科研)、境(同左)、野上(同左)、宍倉(同左)、高橋(同左)。順不同、敬称略。 On-line 参加:大垣(京大)、恵郷(KEK)。順不同、敬称略。

- 議題1 令和5年度第1回運営委員会議事録確認(資料1参照) 問題なし
- 議題2 施設報告
  - 2-1. 共同利用について
    - ・ビーム利用時間の減少⇒マンパワー不足、見学等が多かったため。
    - ・FEL実験が多めの配分になった。
    - ・大きなトラブルはなかった。
    - ・クライストロンのRFアンプ、FELユーザービームラインの分岐切り替えミラー、PXRのSi (400)結晶、THz乾燥空気雰囲気光学系などの交換・導入を行った。
  - 2-2. トラブルについて
    - ・クライストロン2号機高周波出力窓での放電
- ・電子銃カソードの経年劣化⇒予備はあるが新たに購入が難しいので、現在使用しているものを長く使って、時期をみて交換
  - ・水漏れ問題⇒対処療法的工事でしのいだ
  - ・AVR の故障⇒デモ機でテスト中
  - ・モジュレータ室の冷媒漏れ⇒修理
  - 2-3. その他
    - ・クリーンルームを通常実験室に改造した。テーブルコーチで局所的なクリーン環境は確保した。
    - ・化学物質取扱いの厳密化のため、基本的に施設でユーザーの薬品は保管しない。施設に持ち込む薬 剤は厳密な管理をお願いする。
  - 2-4. Q and A
    - Q (大垣) 現在使用中の Si(400)結晶を低エネルギー用結晶に戻してユーザー実験に問題はないのか?
    - A (早川) 使い道によるが、高エネルギー結晶では DEI など先端的手法が使えない状況なので、低 エネルギーの方が利用範囲は広い。
    - Q (大垣) AVR がまだ安定化しないのは?
    - A (早川) これまでサイラトロンの調整などで対処してきていたのが 12 月に至ってついに動かな

くなったという状況。

- Q (大垣) 船橋市内の瞬停の原因は?
- A (早川) 雷等の自然現象が原因。
- 議題3 本年度の有効課題リスト(資料3参照) 特に問題なし。
- 議題4 令和7年度共同利用課題採択審議
  - 4-1. 課題審查
    - 今回は6件の申請があり、そのうち4件が継続課題、2件が新規課題であった。 古い書類形式の申請者には足りない部分を個別で確認済み。 審議の結果、全課題を採択した。
  - 4-2. Q and A
    - Q (恵郷) 継続課題の場合、成果報告等は義務付けているのか?
- A (早川) 義務はないが、成果が出た場合は報告をお願いしている。兼任所員は年報の提出をお願いしている。
  - Q (恵郷) いつまでも継続できるのか?
  - A (早川) 課金しているので支払ってくれればいつまででも OK.
  - Q (恵郷) 時間にまだ余裕があるようだが、新規課題数を増加することはできるのか?
  - A (早川) できる。
  - Q (大垣) 多くの人が複数のビームを使っているのは良い。大いに宣伝すべき。 FEL と THz のポンププローブはできるのか?
  - A (早川) まだビームライン整備の途上で実現できていない。

議題5 令和7年度の運営委員について

- 5-1. メンバー
  - ・松戸歯学部金田教授は今年度で定年退職されるので同学部岡田教授を推薦されている。
  - ⇒岡田教授にお願いする。
  - ・上記以外は来年度も継続とする。
- 5-2. Q and A

Q (恵郷) 岡田先生は課題申請しているが、審査のときはどうするのか?申請者と選択者が同一なのは問題になるのではないか?

- A (早川) 今は同席してもらっている。
- C (大垣) 京大では予算付けのときは席を外してもらうようにしている。
- C (恵郷) (第三者に)説明できるようにしておく必要がある。
- A (早川) 利用申請の応募が増え実験可能時間を超えるような場合が出てきたときは、運営委員が 申請者となった場合は審査時の同席などについては改めて検討する。

議題6 使用料金について

・消費税問題

内部利用者は消費税がかからないが、外部利用者にはかかる。

インボイス問題で扱いが面倒になっている。

このため、内税方式として使用者には総額で請求することとする。

- 6-2. Q and A
  - Q (大垣) 使用料金はずっと変わっていないが良いのか?
  - A (早川) 大学側から値上げしろとも言われていないのでそのままにしている。
- 7. その他

・令和 6 年度ユーザーズミーティングにおいて、施設報告以外に、共同利用、その他成果報告として、THz に関する口頭発表 1 件、PXR に関する口頭発表 2 件、FEL に関する口頭発表 1 件、各光源の応用利用に関するポスター発表 15 件に関して成果内容の確認がなされ、発表が承認された。各発表内容に関しては発表資料を参照のこと。

以上

#### 令和6年度 電子線利用研究施設の状況報告

1. 電子線形加速器共同利用

2月21日までのビーム(光源)利用実験 87件 388時間

(時間数は光源の試験実験を含めたビーム加速時間)

FEL	63 件	249 時間
PXR	13 件	68 時間
THz	11 件	70 時間

令和6年度も前年同様、主に老朽化に伴う短期的なトラブルは数多く発生したものの、長期シャットダウンを伴うトラブルには至らず、比較的順調に利用研究を実施することができた。しかしながら、マンパワー不足や、見学対応などの休止などが積み重なったこともあり、ビーム加速時間前年度より減少した。

昨年度から、クライストロン前段の RF アンプを、既存とは別メーカーの機器に更新することを進めて いる。今年度は2台目の置き換えを実施し、現状は問題なく稼働している。

FEL において、アンジュレータについては修繕後問題なく稼働しているが、クライストロン窓の状態が 思わしくないため、パルス幅 11µs 以下の運転が続いている。結果的に FEL 強度、特にフルバンチモー ドでの強度の制約となっている。ユーザー棟の FEL ビームラインは2系統に分岐しているが、ビームライ ンを切り替えるミラーの再現性が悪く、これまでは実験室の多い方の系統に固定し、利用研究に FEL を 供してきた。もう一方の系統は真空リークもあり、FEL 実験室としては長年利用されずにいた。今年度は Q-LEAP プロジェクトの資金により新しい切り替えミラー装置を作成し、量子科学研究所予算で設置と 配管を実施した。後述のように旧クリーンルームを通常の実験室に転換したことにより、FEL ユーザー実 験に利用可能な実験室が3室増えることとなった。その内の1室を当面 Q-LEAP 関連実験専用として運 用する予定である。

PXR については、ユーザーの NEDO プロジェクト資金により Si(400)結晶を導入した状態のまま運用 を続けている。40keV 以上のエネルギーの単色X線イメージングが可能になったが、強度が弱く測定系 も十分揃っていないという問題がある。今年度末で NEDO プロジェクトの区切りが付いたこともあり、結 晶を実績のある Si(220)などに交換することを検討している。

THz 光源については、産総研との科研費による共同研究でビームラインの整備が進められている。 乾燥空気雰囲気での測定も大谷研究室協力のもと可能となり、実用的な吸収分光測定が可能になって いる。テラヘルツ帯域のコヒーレントチェレンコフ光源、コヒーレント遷移放射光渦光源開発なども進めて おり、光源開発も進捗している。

加速器・光源のトラブル

・クライストロン 1 号機、2号機のコンディショニングを実施しながら運用する状態が続いているが、特 に 2 号機で高周波出力窓での放電が頻発している。パルス幅 20µs での運転は難しい状況であり、 マクロパルス幅を11µs 程度に制限して FEL 運転を行う状態が続いている。

- ・電子銃カソードに経年劣化の兆候があり、交換時期が近づいている。しかし近年の円安の影響や 材料費高騰など複数の影響からカソードの価格が跳ね上がっており、調達が難しくなっている(昨 年は納期1年以上、約200万円/個@最低5個から、まで上昇中)。国内での調達を考慮して進 める必要があると思われるが、過去に実施した国内メーカーのカソードテスト状況からまだ難しい状 況である(通常施設よりも取り出しているビームのパルス幅が長いことが原因の1つ)。他大学でも カソードの入手問題が発生しており、協力して分割購入するなど検討が必要であると思われる(た だし、利用している施設、カソード取り付けフランジ形状、互換性も考慮する必要もあり)。
- ・モジュレーター室とレーザー室間の隙間からの水漏れ問題に対し、4月末に対策工事を実施した。 根本的な解決ではないが、対処療法的に床上浸水の可能性を低減することはできている。
- ・12月下旬にクライストロンモジュレータ電源に200Vを供給している安定化電源(AVR)が故障した。 ログを確認すると前年度末3月から出力変動が大きくなっているのが認められ、遂に必要な容量を 供給できない故障に至ったと思われる。応急処置として、商用電源からの200Vを直接使うように調 整したが、安定性の低下が全ての光源の品質に影響を与えている。2月中旬に既存とは別のメーカ ーのデモ機を借りて試験することにしたが、問題が無ければ年度明けに購入を進める。
- ・2 月上旬にモジュレータ室の室温が高くなったため調べると、室内機付近での冷媒漏れが発覚した。 2月中旬に修理を行った。
- ・今年度も船橋市内域の瞬時停電により、細かなトラブルの原因となっている。
- ・検出器のパーツや PC、モータードライバー、通信機器 AC アダプターのような小物の故障も多くなっており、その対応に時間が割かれている。

共同利用に大きな支障が出るような故障は無かったが、老朽化によるトラブルが無視できない状況が続いている。また、人員不足のため、共同利用の実験時間に制約が生じている。

2. 主要解析装置の利用状況(2025年2月22日まで)

令和6年度 延べ利用件数 386件

X 線回折装置合計 21 件

ラマン・AFM・フーリエ赤外分光:管理対象外

使用年数が20年以上経過しており、保守・修理が問題となってきている。X 線回折装置 3 台すベ てメーカーによる定期保守契約の対象外となっているため、故障の場合の対応は都度修理依頼とな る。代替部品が無い装置も出てきており、今後はベストエフォート的な運用に限られることになる。 X線解析装置以外の機器は、関係ユーザーに任せ、施設側の管理対象外となっている。

3. その他

・ユーザー棟の空調更新工事を昨年度実施し、従来クリーンルーム出会った部屋は通常の実験室となった。その代替として、プッシュ型のテーブルコーチと呼ばれる装置により、部分的にクリーン環境を構築し、作業できるようにした。

・近年、化学薬品の管理に厳格さが要求されるようになり、また労働法規に則った安全対策のため 有機溶剤作業用ドラフトを設置している。また 2024 年 4 月から新しく労働安全衛生法が施行され、 管理対象物質がかなり増えた。リスクアセスメント対象物は法令改正前の 674 物質から令和 8 年 (2026 年)には 2300 種類程度まで増え、令和 9 年(2027 年)以降もさらに追加される予定となっ ている。

(参考 URL https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000099121\_00005.html) 実際に現場で実験を行っている学生は、労基法の適用外になるため、指導教員から学生への周知、 注意喚起、利用方法の確認、管理方法、化学物質の保管管理、リスクアセスメントの実施と共有が 別途必須である(学生に対しては、学校教育法や学校保健法の適用があり、大学は、学生との関係 でも健康診断や危険防止など、必要な措置を講じる義務がある)。施設の薬品を取り扱っている各部 屋では掲示等でユーザーに注意喚起しているが、予算・マンパワーの両面での制約があり、管理、 注意喚起、正しい取扱い方法の細部まで管理しきれない。<u>原則として劇毒物、特定化学物資の持ち</u> 込みは制限している。

### 令和6年度日本大学量子科学研究所 電子線利用研究施設ユーザーズミーティング

- 発行日 令和7年6月
- 編集・発行 日本大学量子科学研究所 電子線利用研究施設 〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 日本大学量子科学研究所電子線利用研究施設 http://www.lebra.nihon-u.ac.jp