

# レーザー加速電子の小型高エネルギー X線源への展開

量子科学技術研究開発機構(QST)

神門 正城

## 阪大産研

細貝知直PI  
金展subPI  
Naveen Pathak  
Alexei Zhidkov  
水田好雄  
Driss Oumbarek

Zhenzhe Lei  
誉田 義英  
Alexandre Rondepierre  
Yanjun Gu  
佐藤 新悟

## QST

中新信彦subPI  
黄開  
大東出  
小瀧秀行

森道昭  
林由紀雄  
James Koga  
Timur Esirkepov

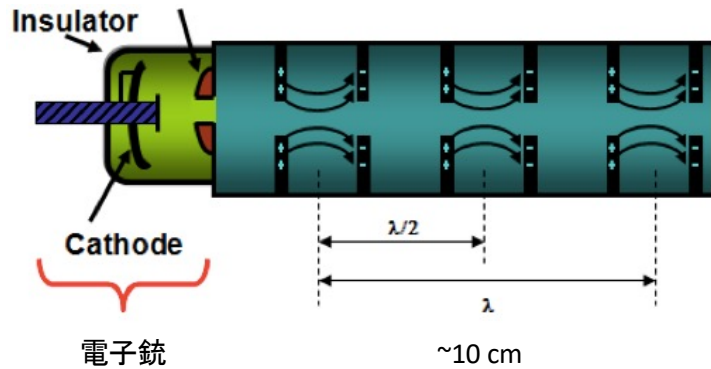
## 金属技研

設楽 弘之  
長澤 豊  
橋本 秀宏  
竹内 浩  
土屋 将央

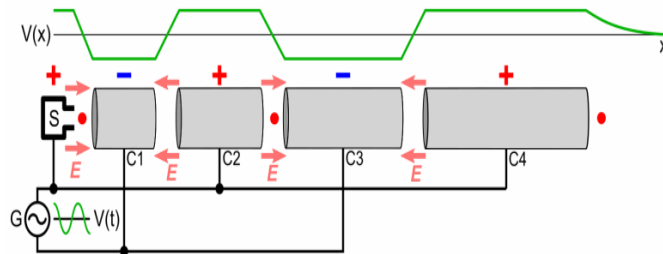
「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」2022年度第2回シンポジウム  
— 電子加速システムの開発 —  
2023年2月28日（火）

- レーザー加速（レーザープラズマ加速）とは
- プロジェクトでの目標
- レーザー電子加速の現状のビーム性能
- 高エネルギーX線の要求
- 高エネルギーX線の実現するアイデア
- まとめ

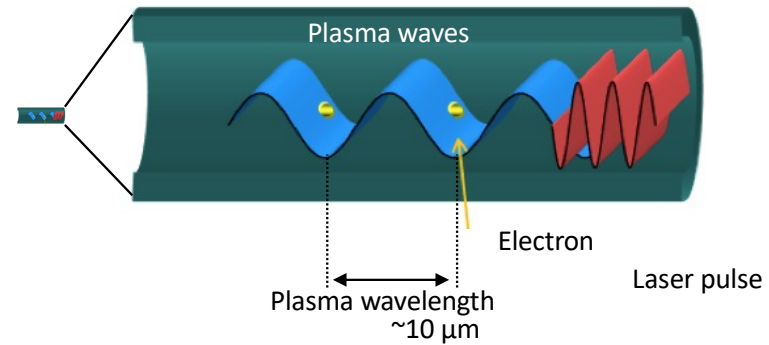
## 高周波加速器(リニアック)



電子銃  
加速勾配 ~10-100 MV/m

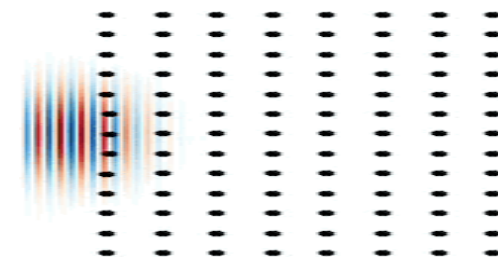


## レーザープラズマ加速



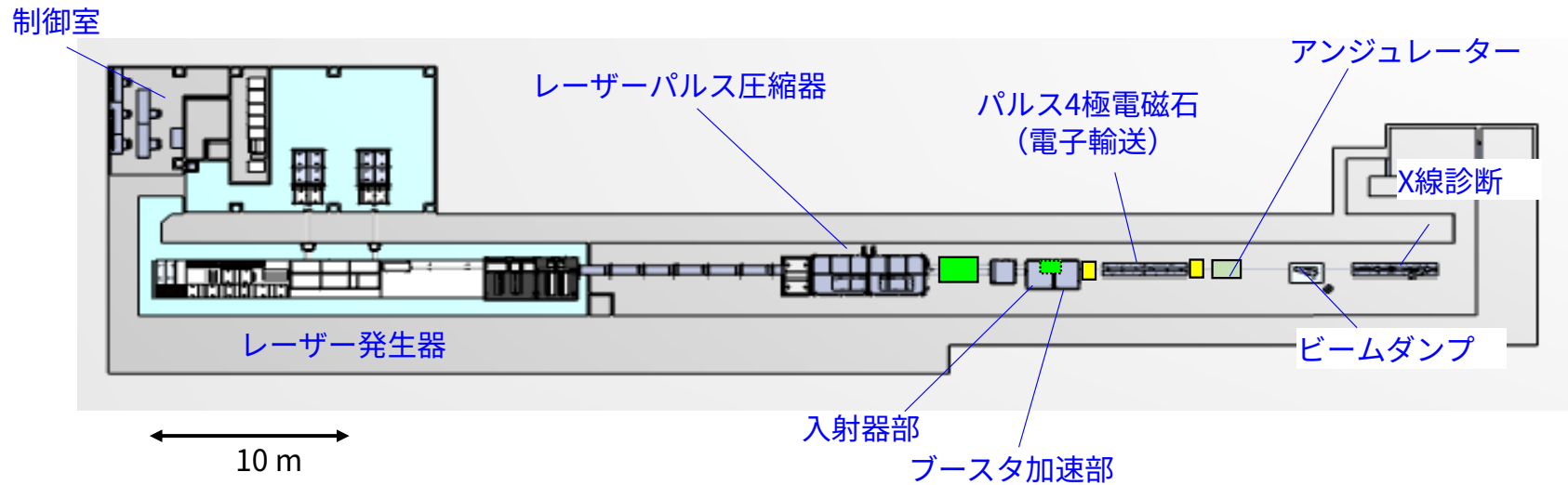
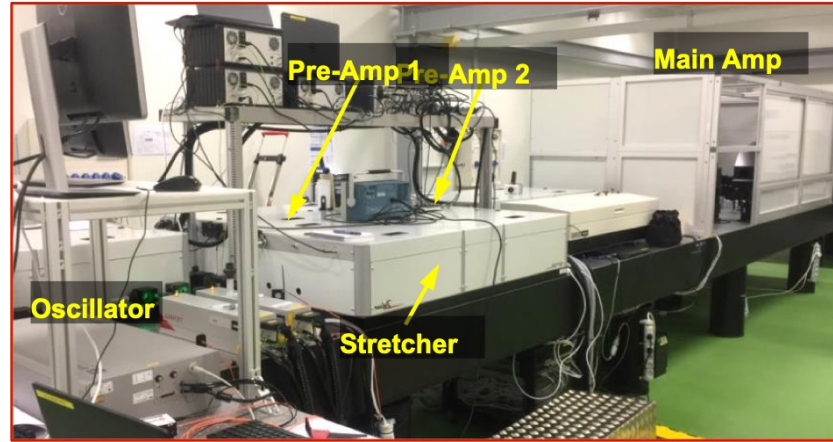
加速勾配 ~10-100 GV/m

~1000倍の  
加速勾配  
→小型化が可能

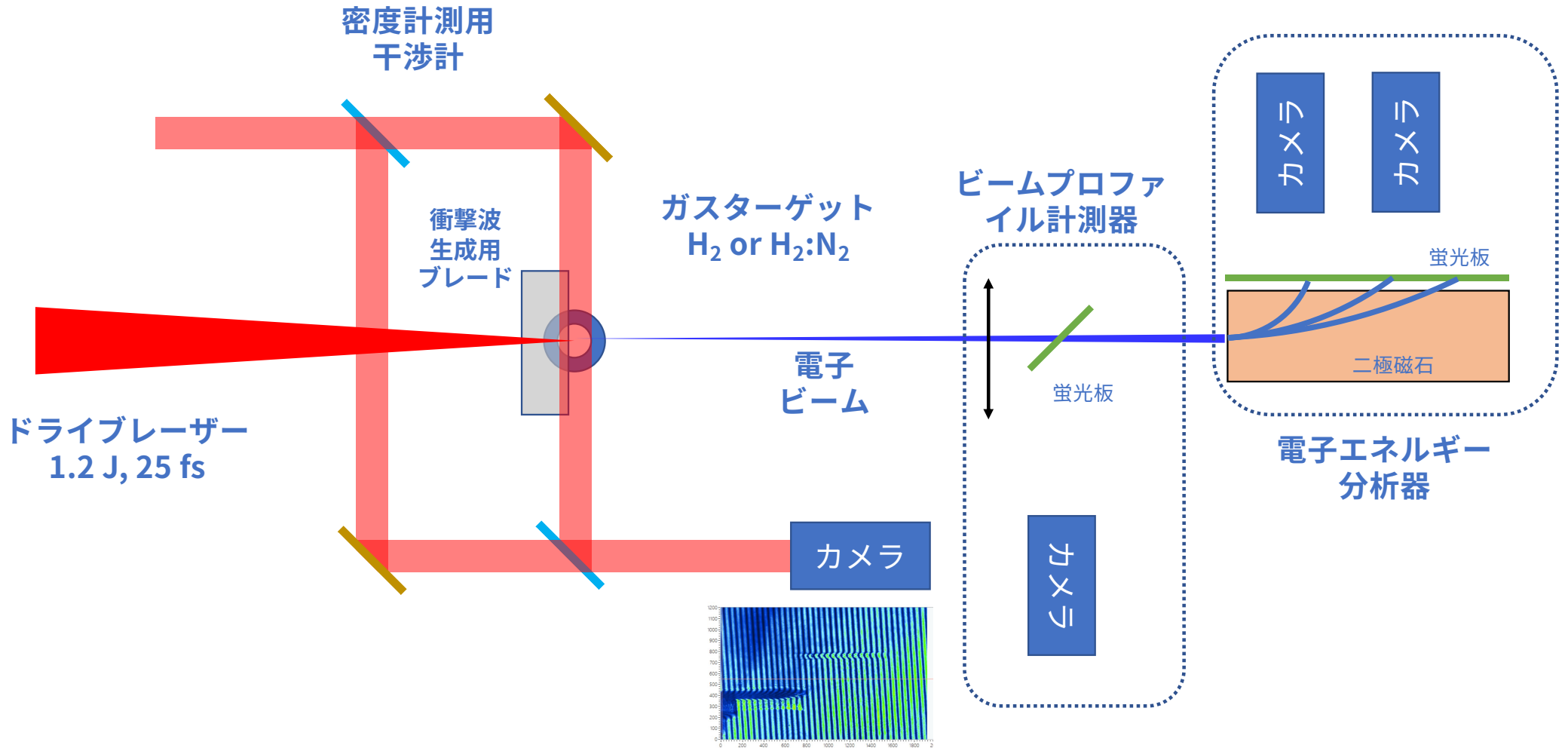


[https://en.wikipedia.org/wiki/Linear\\_particle\\_accelerator](https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_particle_accelerator)

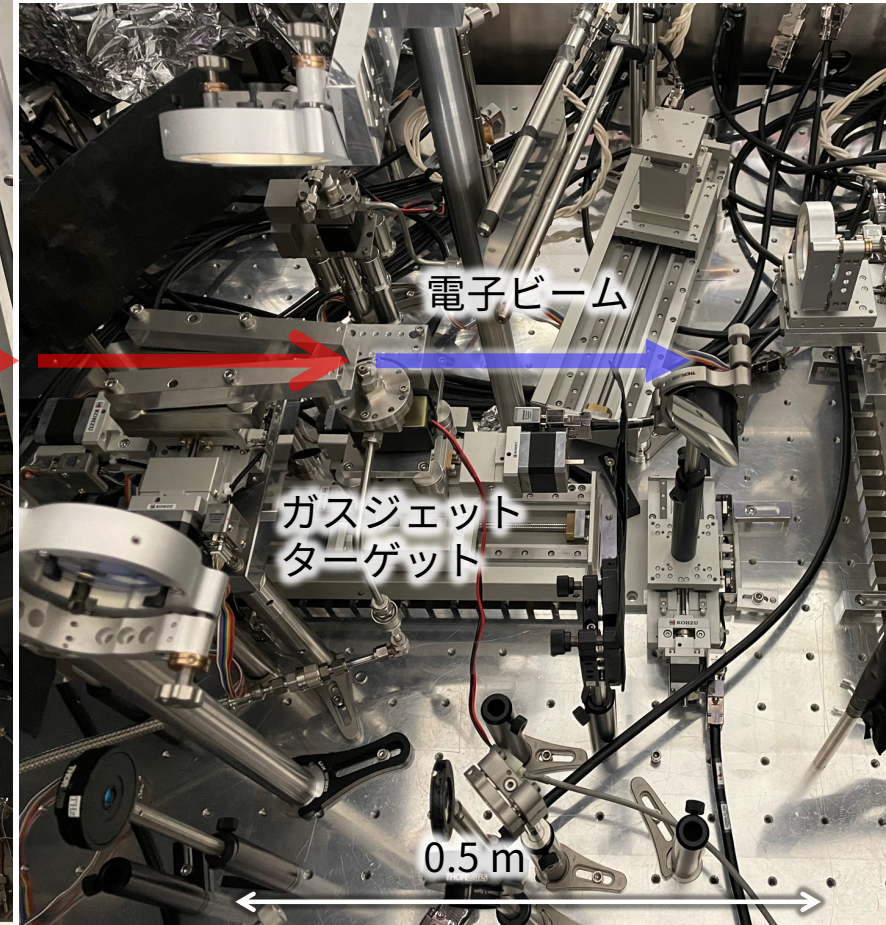
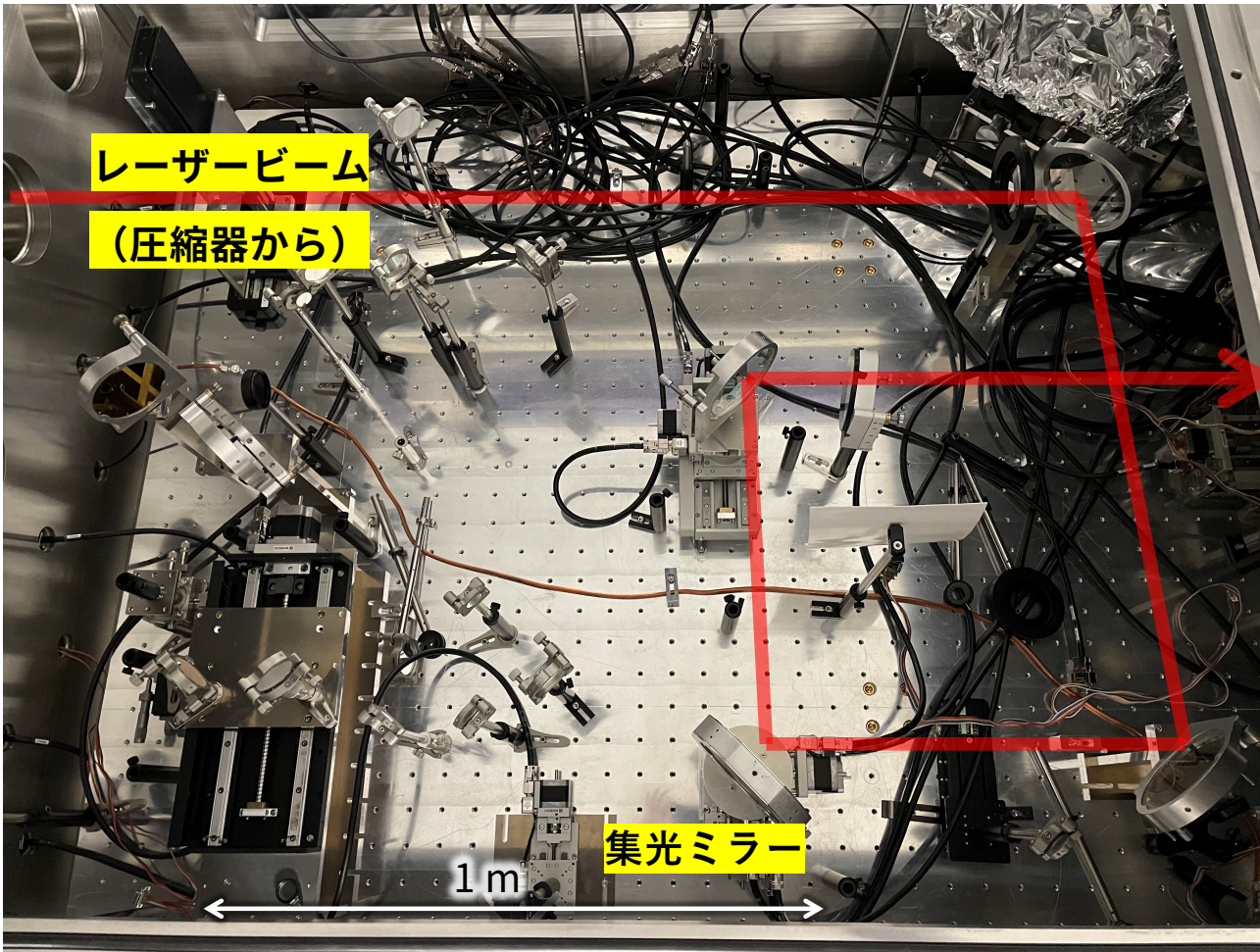
<http://wp.lancs.ac.uk/spiral/research/laser-driven-plasma-wakefield-acceleration/>



# 電子発生実験体系図



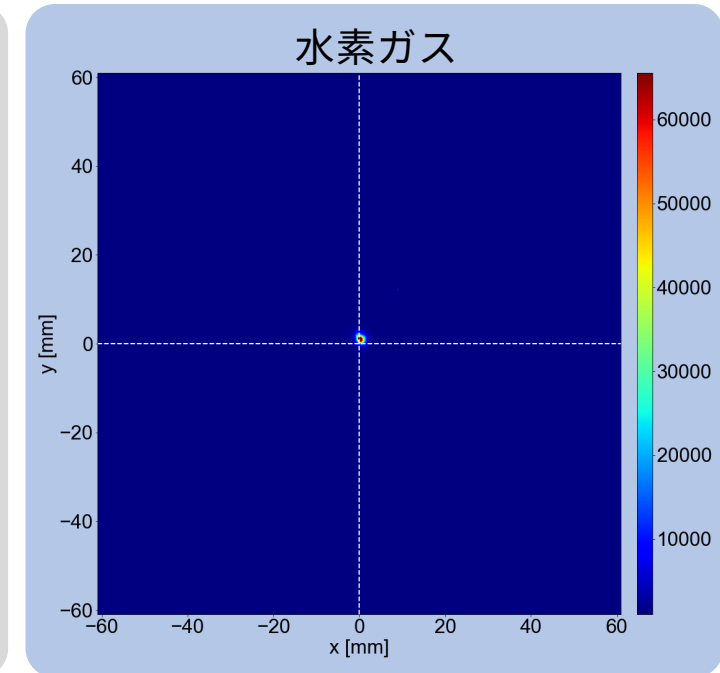
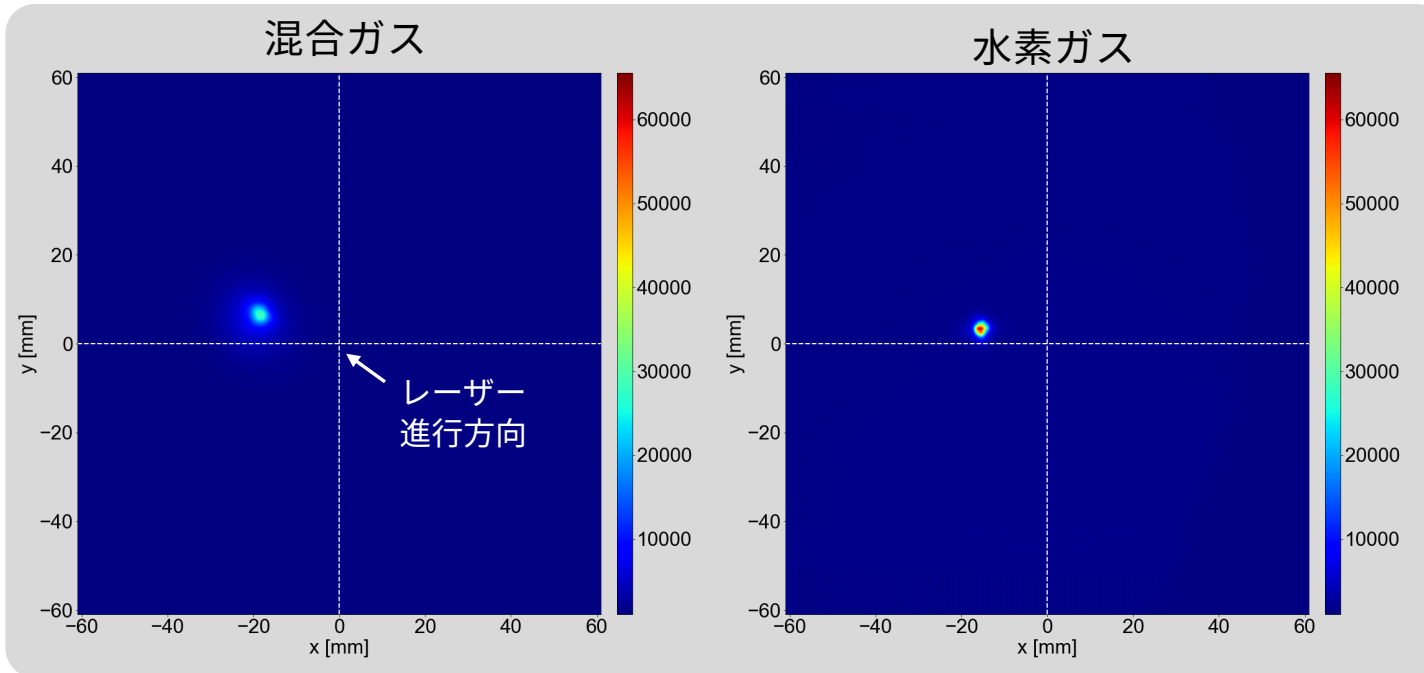
# 電子発生実験装置



## レーザープロフィール改善(Nakanii et al., APEX 2023)

従来法

プロフィール改善後



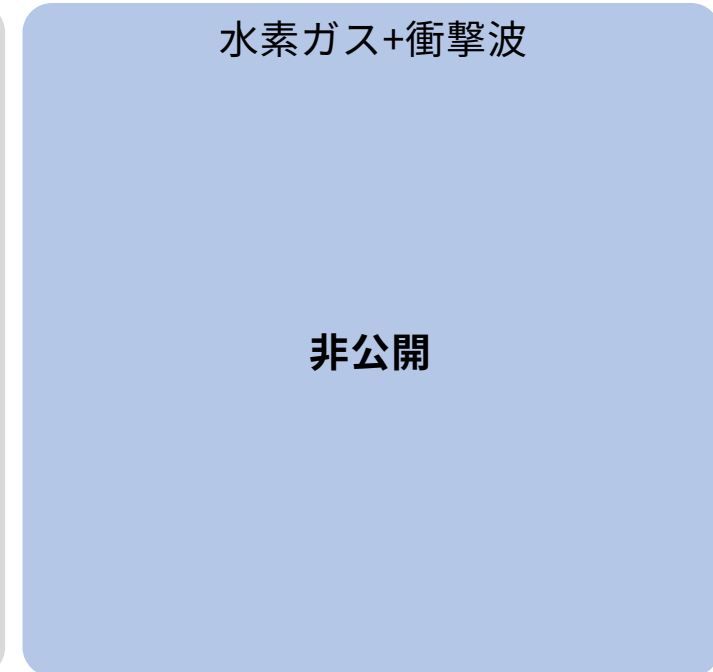
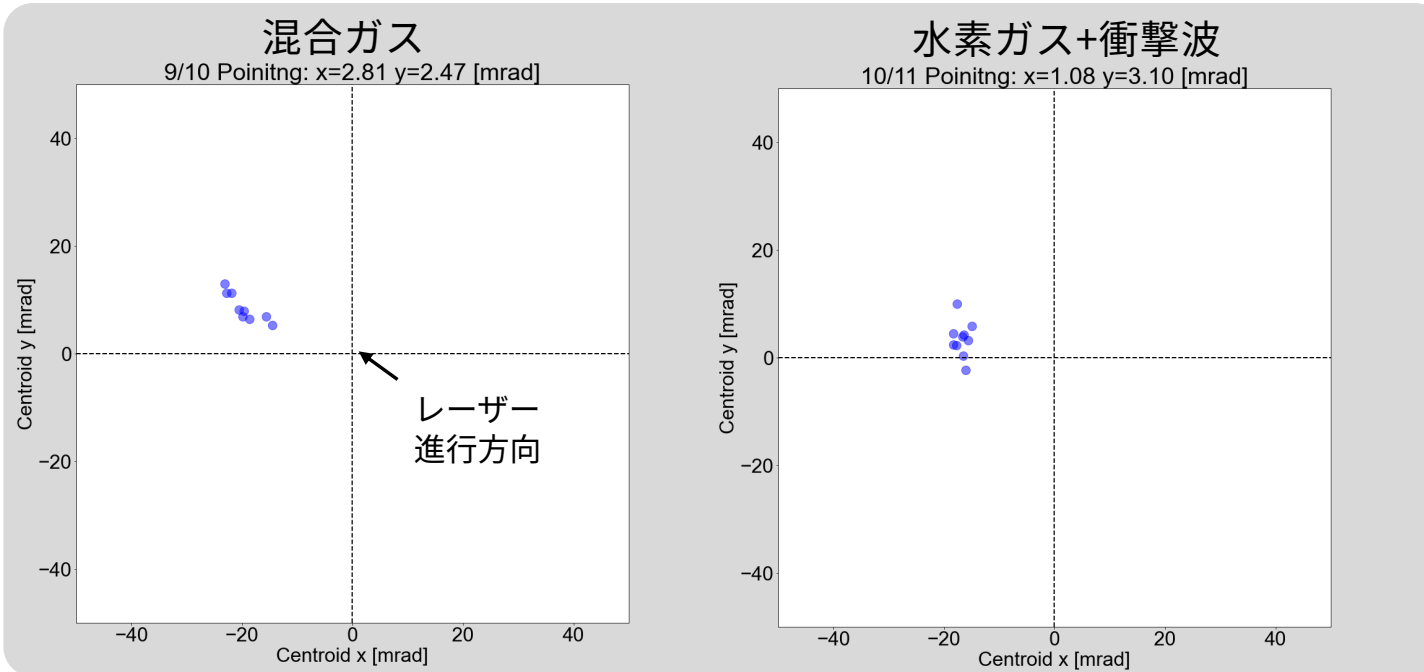
- ☹ レーザー進行方向から電子ビームがずれる
- ☹ ビームサイズが大きい

- ☺ レーザー軸と電子が一致
- ☺ ビームサイズが小さい

特許技術によるレーザープロファイル改善(Nakanii et al., APEX 16 026001, 2023)

従来法

レーザープロファイル改善



- ☹ レーザー進行方向から電子ビームがずれる
- ☹ ビームのポインティングが揺らぐ (~1.8-2.6 mrad)
- ☺ 比較的高い電子発生率 (>90%)

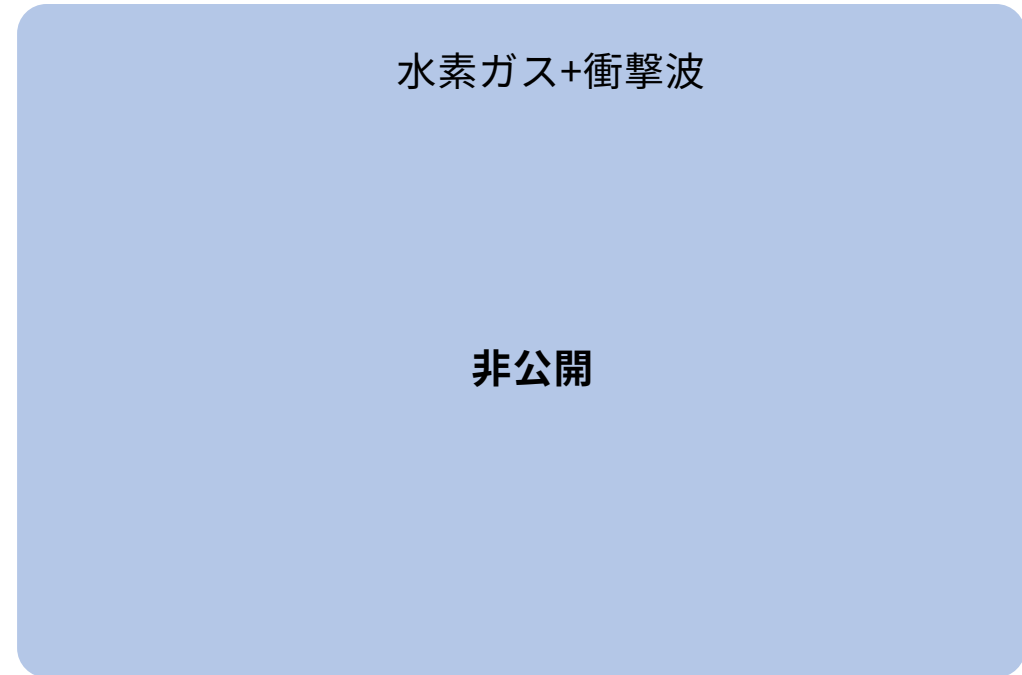
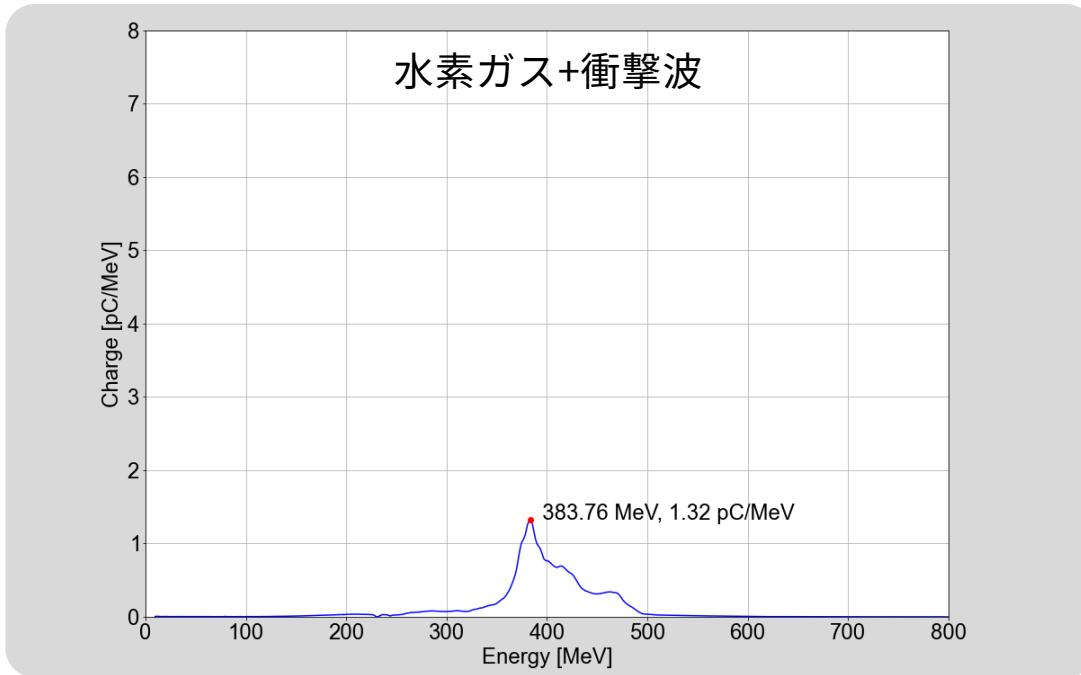
- ☺ レーザー軸と電子が一致
- ☺ 揺らぎ ~0.6 mradに改善



特許技術によるレーザープロファイル改善(Nakanii et al., APEX 16 026001, 2023)

従来法

レーザープロファイル改善



- ☹ エネルギー拡がり大きい
- ☹ ピーク電荷量が低い

- ☺ エネルギー拡がり小さい
- ☺ ピーク電荷量が高い

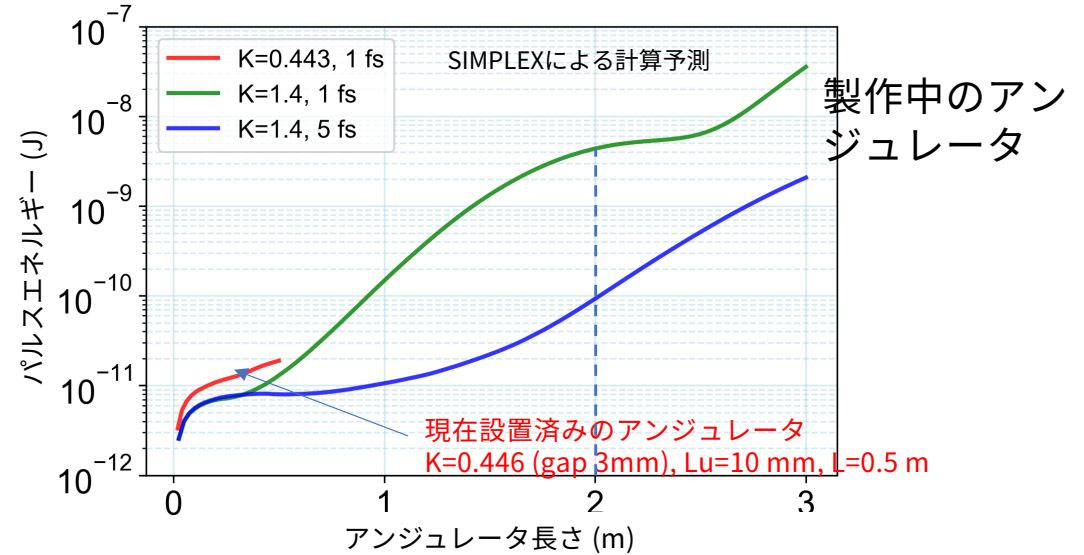
## ✓ビームポインティング安定性の向上

非公開

## ✓狭いエネルギー分布の生成

非公開

電子ビーム		
電子エネルギー	$E_p=250$ MeV	
電荷量	27.3 pC in $1/e^2$	
エネルギー拡がり	$\sigma/E_p=0.52\%$ (rms)	
エミッタンス	0.2 mm-mrad (仮定)	
バンチ長	1 or 5 fs (rms)	
アンジュレータ	現在設置済み	製作中
K値	$K=0.446$	$K=1.4$
周期長	$\lambda_u=10$ mm	$\lambda_u=25$ mm
長さ	$L=0.5$ m	$L=2$ m



XUV-FEL実証に必要な電子の生成に成功

# 世界的な位置付け (ベンチマーク)

Rev3

		本プロジェクト	SIOM (中国)	Hamburg (ドイツ)	HZDR (ドイツ)	LBNL (米国)
レーザー	パワー	48 TW (1.2 J, 25 fs)	200 TW (~4.8J, 24 fs)	50 TW (2J, 42fs)	70 TW (2.1J, 30 fs)	850 TW (31 J, 35 fs)
加速方式		衝撃波入射	衝撃波入射	イオン化入射	イオン化入射	自己入射
電子	エネルギー	378 MeV (±14%)	490 MeV	368 MeV (±2.4%)	188 MeV (±3.2%)	7.8 GeV
	rmsエネルギー 拡がり	0.59% (±38%) Best0.36%	Best 0.34%	6% (±27%)	6.3% (±0.8%)	-
	エミッタンス		0.25 mm-mrad*		0.36 mm-mrad	
	電荷量	17 pC (±60%)	22.8 pC	25 pC (±11%)	~75 pC (Max 110pC)	5 pC (7 GeV- 8.5 GeV)
	rmsバンチ長	<[25.7 fs*] [±9.0%]	[1.6 fs] シミュレーション		6.3 fs (±10%)	
	繰り返し	0.03 Hz		1 Hz		
特長		<ul style="list-style-type: none"> <li>低エネルギーノイズなし</li> <li>小型レーザー</li> </ul>	27 nmのSASE FEL増幅	連続運転で安定電子発生	260 nmのSeed FEL増幅	最高エネルギー

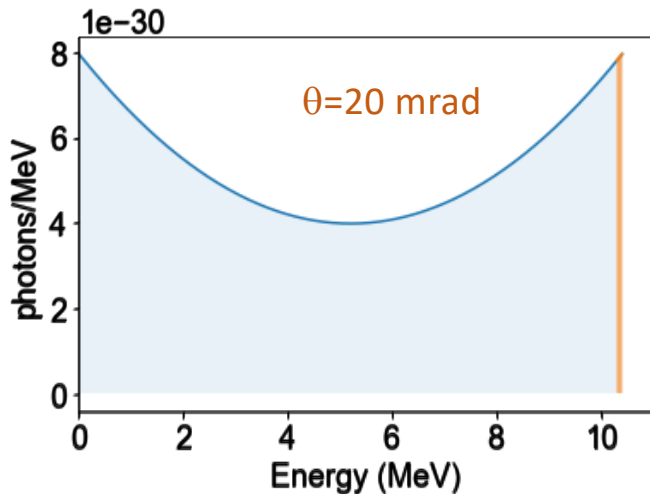
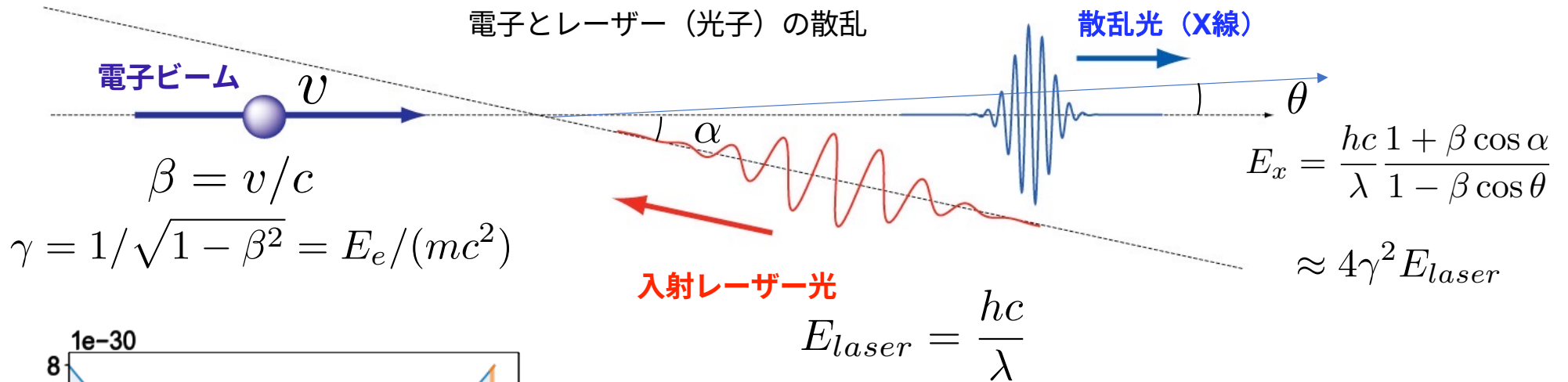
FELを志向しているレーザープラズマ加速の比較(LBNLは最高エネルギーのため掲載)

- XUV（極端紫外領域）のFELは実現間近
- エンドユーザーからの要求（櫻井先生の発表）
  - HIP接合の健全性検査（工場での）、100 keV~MeV, 0.1%のエネルギー分散

MeVの高エネルギーX線はFELでは難しい

→逆コンプトン散乱はどうか？

# 逆コンプトン散乱



- 電子のエネルギーの2乗と入射光子のエネルギーに比例した**高エネルギー光子**（X線，ガンマ線）が得られる。
- 散乱エネルギーと光子エネルギーには相関があり、前方方向を切り出すことで**準単色のX線**を取り出せる。

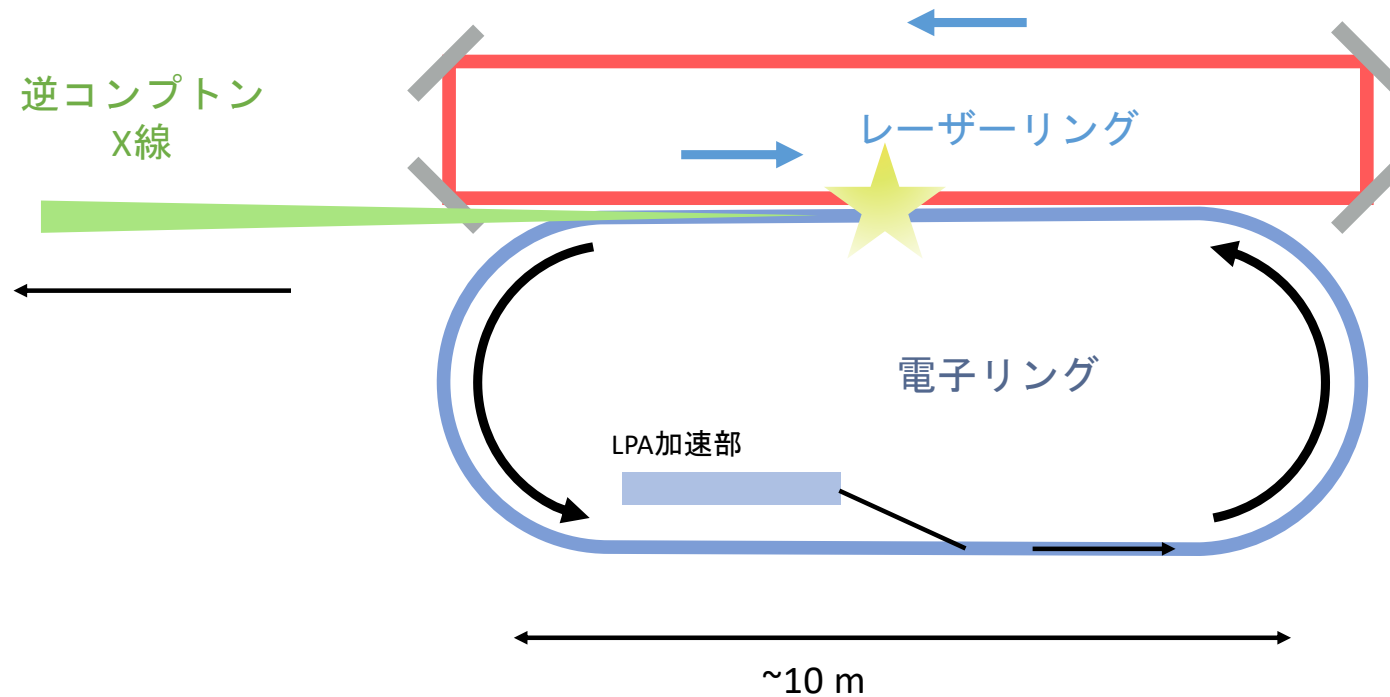
- 櫻井先生の手法（コンプトンプロファイル）では
- X線 0.1%程度のエネルギー拡がりが必要
- テストをおこなっているSPring-8では、 $\sim 10^{11}$  ph/s程度のflux
- 実機では、100 keV(SPring-8)ではなく厚みがあるため MeV程度は必要？

逆コンプトン散乱は断面積が小さいので、レーザー加速+レーザーでは高々10 Hzの繰り返し (**fluxが足りない！**)

エネルギーは出せそうであるが、**エネルギー拡がり**はFELと同程度の難易度  
**安定度も必要**

# 小型高エネルギーX線発生方法

## レーザープラズマ加速+電子蓄積リング



- 電子ライナックはLWFAで小型化
- 衝突レーザーもリング化で効率良く逆コンプトン散乱X線を生成

※繰り返しが高いため、レーザー部はCWレーザーでもよい（当面は）

入射器はレーザー加速で小型化。安定度、単色性は蓄積リング（加速器技術）で担保。お互い（レーザー加速と既存加速器）の欠点を補い合うソリューション

			1 MeV	10 MeV
電子エネルギー	$E_e$	MeV	240	760
	$\gamma$		489.2	1506.8
	$\beta$		0.99999791	0.99999978
入射角度	$\alpha$	deg.	10	10
観測角度	$\theta$	deg.	0	0
レーザー波長	$\lambda_0$	nm	1070	1070
光子エネルギー	$\hbar\omega_0$	eV	1.16	1.16
X線エネルギー	$E_x$	MeV	1.0	10.0
0.1%の観測角度	$\theta_c$	deg.	0.0037	0.0012
レーザー集光サイズ	$\sigma_{Wp}$	$\mu\text{m}$	100	100
	$\sigma_{Hp}$	$\mu\text{m}$	100	100
電子集光サイズ	$\sigma_{We}$	$\mu\text{m}$	100	100
	$\sigma_{He}$	$\mu\text{m}$	50	50
レーザーパワー	$P_L$	W	5000	5000
レーザー光子数	$N_p$	ph/s	2.7e22	2.7222
電流	$I_e$	mA	50	50
電子数	$N_e$	e/s	3.1e17	3.1e17
バンチ長	$\sigma_{Le}$	mm	33	33
周回周波数	$f_r$	MHz	12	12
X線の数 (0.1%)	$N_x^{obs}$	ph/s	1.1e13	1.1e13

電子蓄積リングはまだ設計完了していないので既存のリングなどからの概算

サイズはB=1.2Tを仮定し、1MeV, 10 MeVで  
曲率半径 0.67 m, 2.1 m

Fujikura製ファイバーレーザー  
CW, 5 kW, 1070 nm



パルスレーザーを用い、Green光, UV光などを利用することで電子エネルギーを下げることは可能

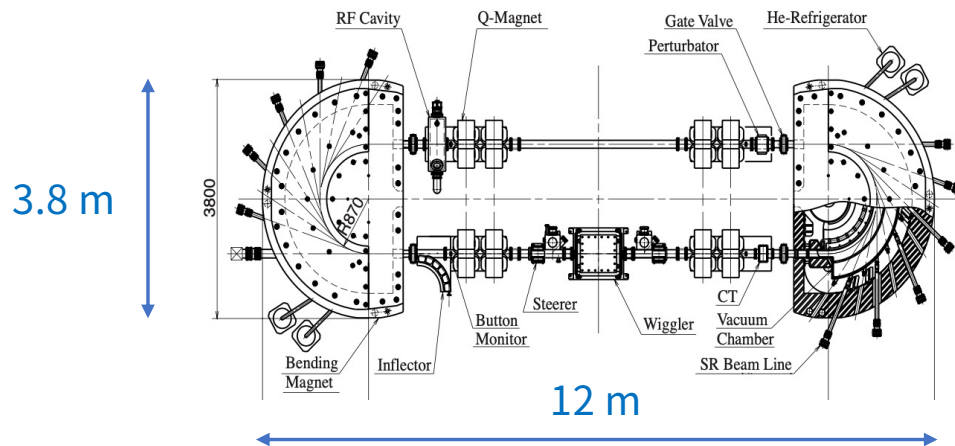
レーザー加速電子に特化したリングの設計、  
コスト、サイズを含めた最適化が必要



# 住友重機械工業 AURORA-2D



- Race Track型
- シンクロトロン 150~700 MeV
- 常伝導の磁石
- 300 mA
- 立命館、広島大学、理研にて稼働中
- ~12 x 3.8 m<sup>2</sup>



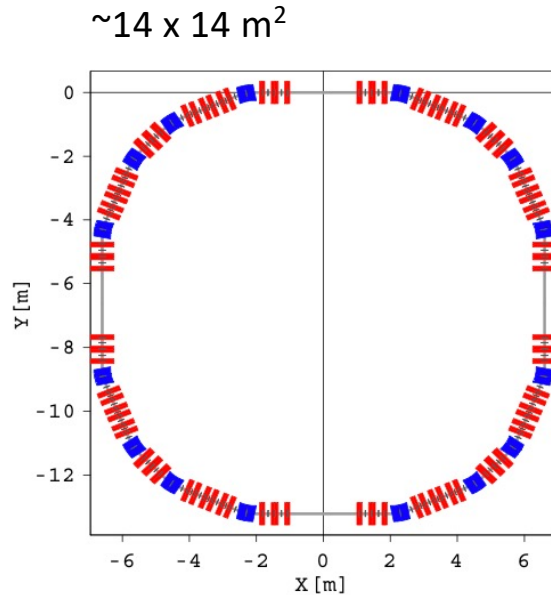
入射器：150 MeV マイクロトロン **3 m x 1.5 m, 20t**  
 入射器：150 MeV リニアック **~15 m**

堀利匡, 博士論文 2002 (広島大学)

T. Hori et al., EPAC98, MOP10G (1998)  
 宮出、加速器 2, 388 (2005)

- ・レーザープラズマ加速で入射を行おうという計画
- ・広いエネルギー (運動量) アクセプタンス  $\pm(6\sim 8)\%$
- ・フェムト秒の電子バンチを目指す (我々と異なる)

電子エネルギー 50-500 MeV



A. Papash et al., IPAC2017

Parameter	3Q-split lattice
Energy range, MeV	50 – 500
Magnetic rigidity, T·m	$B \cdot R = 0.167\text{--}1.67$
Circumference, m	44,112
Ring footprint (FLUTE Bunker), m	$13,5 \times 13,5$
Ring periodicity	4 (two $45^\circ$ FDF-DBA)
Split DBA super-cell (cell/–cell)	$2 \times 22,5^\circ / -(2 \times 22,5^\circ)$
Straight sections	$4 \times 2$ m
Momentum compaction	$6,03 \times 10^{-3}$
SR losses/turn (50/500 MeV)	<1 eV / 4,3 keV
Horizontal damping partition $J_x$	1,397
Damping time $\tau_x / \tau_y / \tau_z$ , seconds	24 / 34 / 21 (50 MeV)
RF frequency / $F_{\text{ROT}} / h_{\text{RF}}$ (MHz)	3000 / 6.8 / 440
Injection energy/ inj.energy spread	50 MeV / $\sigma_p = 2 \cdot 10^{-2}$
Inj.beam emittance(norm/unnorm)	<10 mm·m / <100 nm·r
Natural emitt/nat.en.spr. (no IBS)	0,18 nm·r / $\sigma_p = 4 \cdot 10^{-5}$
Betatron tunes $Q_x / Q_y$	5,844 / 8,461
Phase advance (supercell) hor/vert	$\mu_x = 2.92\pi / \mu_y = 4.23\pi$
Natural Chromaticity (per cell)	$\xi_{x/y} = -16 / -21$ (-4/-5)
Dynamic Accept X/Y (incl. errors)	120/20 (70/10) mm·m
Beta-functions–middle straight, m	$\beta_{x/y} = 1.8 / 1.2$
DBA Dispersion max (distr), m	0.25 ( $\pm 0.15$ )
Dynamic Aperture hor / vert, mm	(-14...+18) / ( $\pm 6$ )
Momentum acceptance (bare lat.)	$\pm 6+8 \%$

## エンドユーザーの課題

核融合用ブランケット  
HIP接合

良い接合面と悪い接合面がある  
どのように検査・管理するか？

接合面に析出する酸化物が原因

## 金属技研

QST六ヶ所研

## 技術解決 未来社会

レーザープラズマ電子加速を用いた  
単色・高エネルギーX線発生装置  
(工場に設置可能な大きさ)

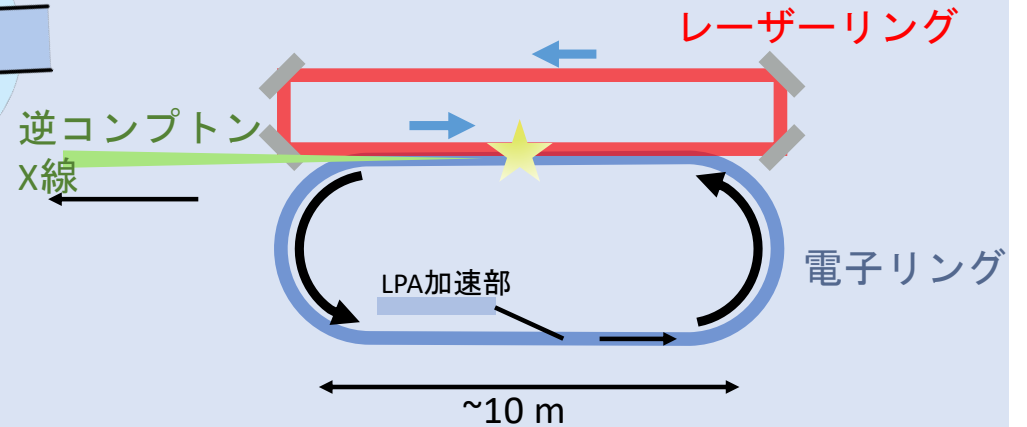
レーザープラズマ入射器+蓄積リング  
良いところ取りで、実用化を短縮化

## 学術機関での基礎研究

高エネルギーX線を用いた  
コンプトンプロファイル技術が使え  
ないか？

SPring-8などで実証実験

群馬大学 櫻井先生



現在、金属技研様と一緒にリングの設計中

- 本プロジェクト（未来社会創造事業）では、レーザープラズマ加速による加速器の小型化を行い、XUV領域（10~100 nm)の自由電子レーザー(FEL)増幅を実証する予定
- 金属技研様からご提案頂いた**社会課題**（核融合ブランケットなどの接合健全性・**非破壊検査**）について、群馬大学 櫻井先生の計測技術を取り入れ、レーザープラズマ電子加速と加速器技術（蓄積リング）の組合せで**高フラックスの高エネルギーX線**を作り、計測に取り組む
- 他にも使いたい用途などがあれば是非お知らせください！

謝辞：

本研究を進めるにあたり、議論させて頂いた方々に感謝致します。

QST 六ヶ所研究所

野澤貴史

QST 高崎量子応用研究所

前川雅樹

群馬大学理工学府

櫻井浩