



# レーザー駆動による 量子ビーム加速器の開発と実証

## 成果の概要と今後の計画

2021年6月25日

プログラム・マネージャー  
(分子科学研究所)

佐野 雄二

# ご説明内容

---

## — レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証 —

- レーザープラズマ加速：開発の背景
- レーザープラズマ加速の原理・特徴
- 開発の目標・体制
- ステージ1の成果概要
- ステージ2の計画

# 開発の背景：加速器の巨大化

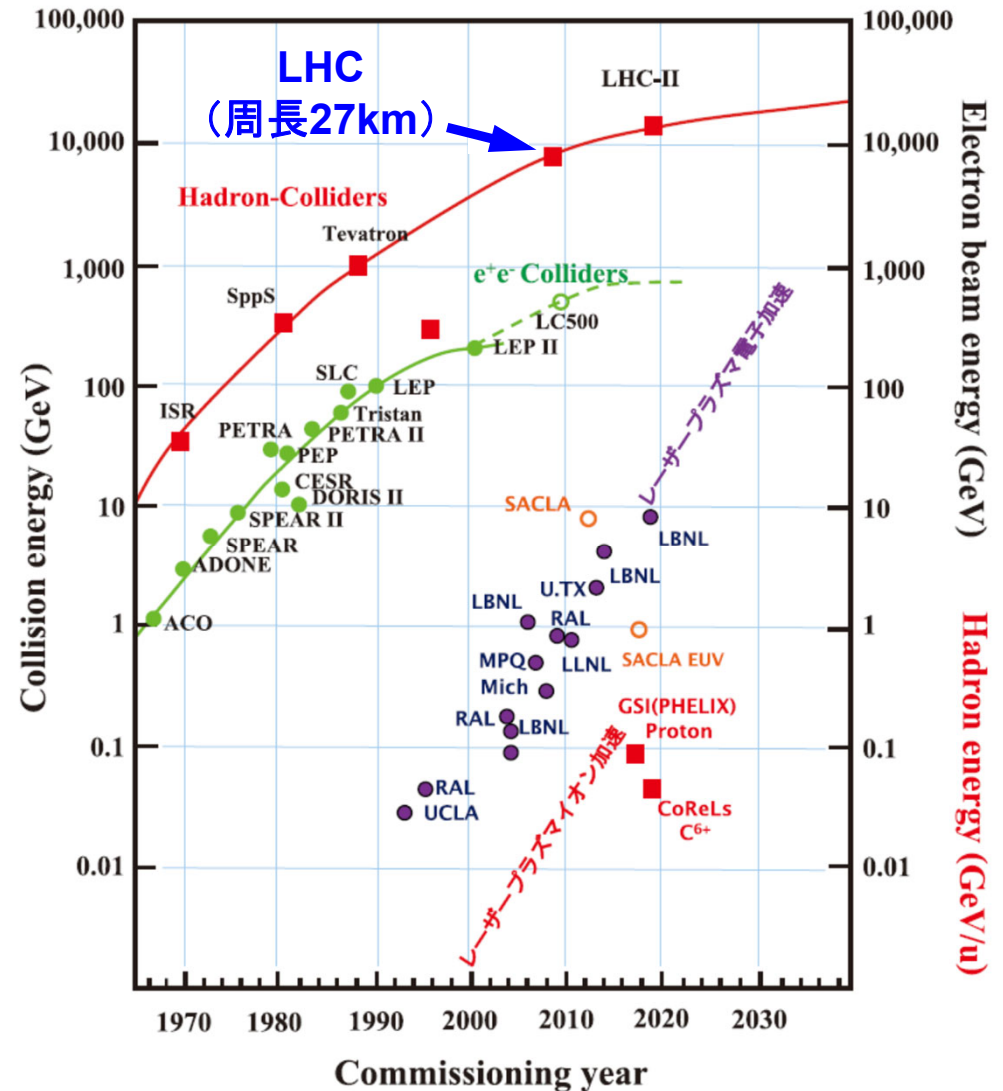
加速器は学術・産業・医療など広範な分野で不可欠な技術基盤

- 新物質・新材料の創製
- 分析、非破壊検査、年代測定
- 育種、滅菌・殺菌、重合、架橋
- 荷物検査、セキュリティー
- 創薬、粒子線がん治療



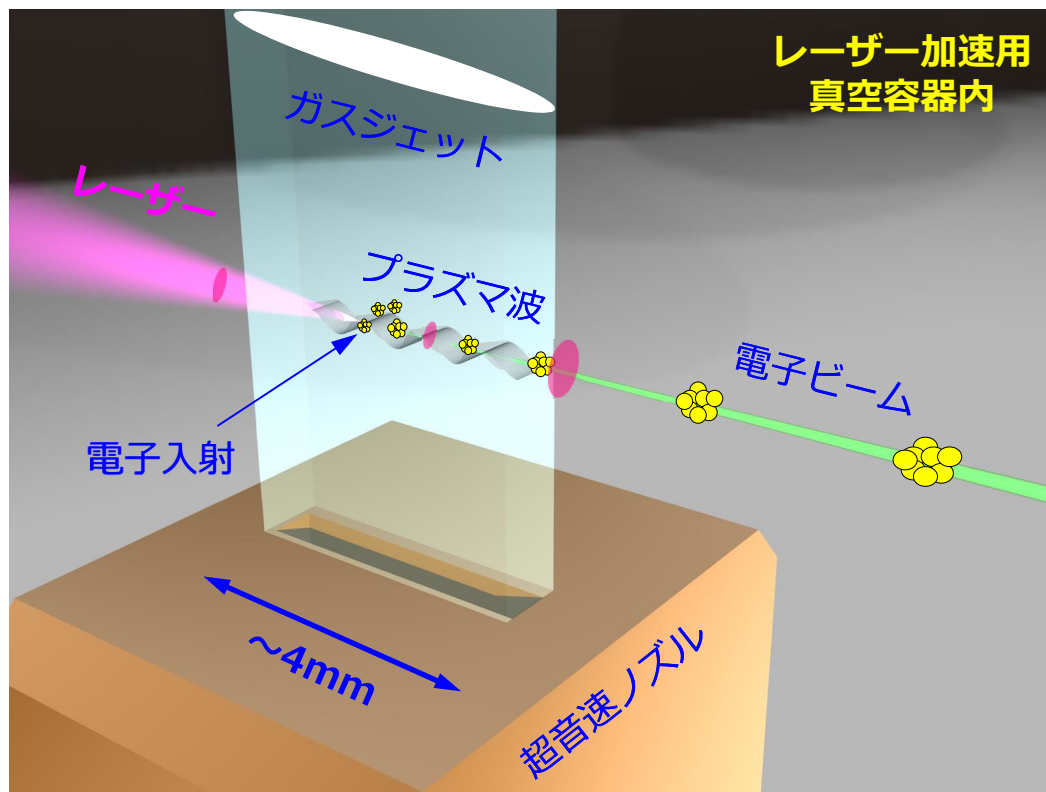
LHC (陽子・陽子衝突型リング 周長27km)

## 加速器の発展

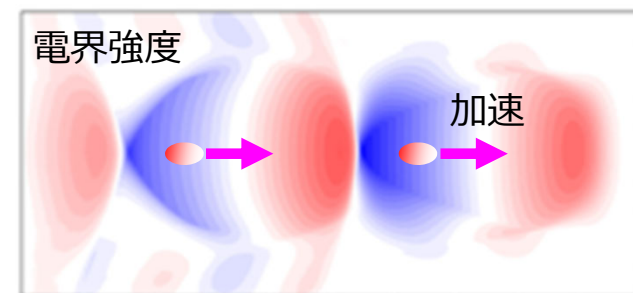
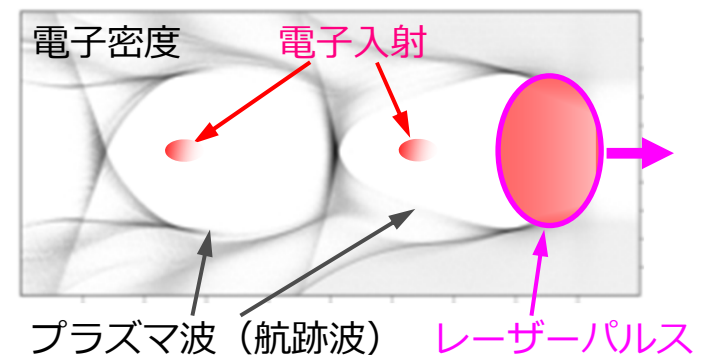


# レーザーによる電子加速の原理

- 真空中のガスジェットに高強度レーザーを集光
- 電子が押し退けられ、プラズマ波（航跡波）が発生
- 平衡状態に戻ろうとする電子の衝突で、種電子発生
- プラズマ波の電場で種電子が加速（電子入射）



船による波（航跡波）



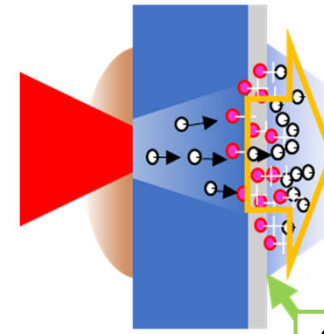
# 電子発生（電子入射）のイメージ

---



# レーザーによるイオン加速の原理

- 真空中の薄膜に高強度レーザーを集光
- 電子が激しく振動し、レーザーの進行方向へ加速
- 高エネルギーの電子は薄膜を貫通し、外部に放出
- 電荷分離 (TV/m) が発生し、イオンが加速・放出 (TNSA : Target Normal Sheath Acceleration )



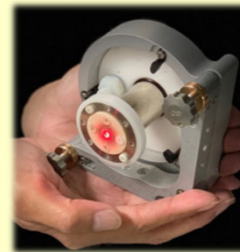
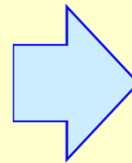
シース場(TV/m)でイオンが加速される

## レーザープラズマ加速の特徴

- 加速電界強度が通常型の加速器の3～5桁高い ➡ 原理的に小型化・高エネルギー化が可能



通常型電子加速器  
( $\sim 20$  MeV/m)



電子加速用プラズマチャンネル  
( $\sim 20$  GeV/m)

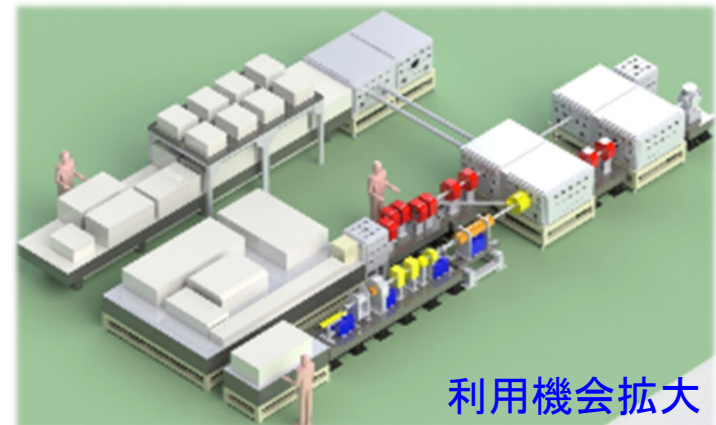
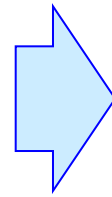
- 高強度化 (大電荷)、高品質化 (安定性・再現性・単色性) の実現には高い技術的課題



# レーザープラズマ加速による未来社会の例



X線自由電子レーザー SACLA



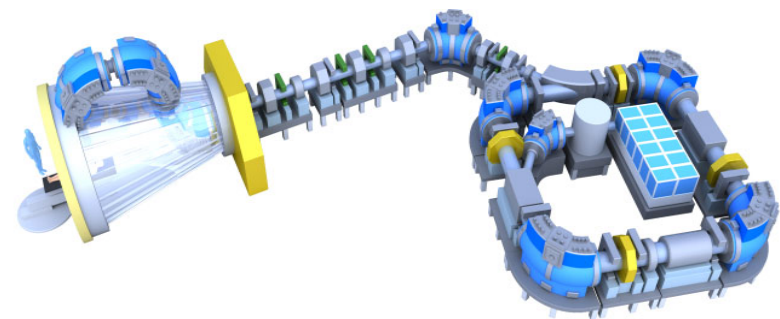
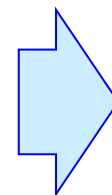
利用機会拡大

次世代X線自由電子レーザー(XFEL)



重粒子線がん治療装置

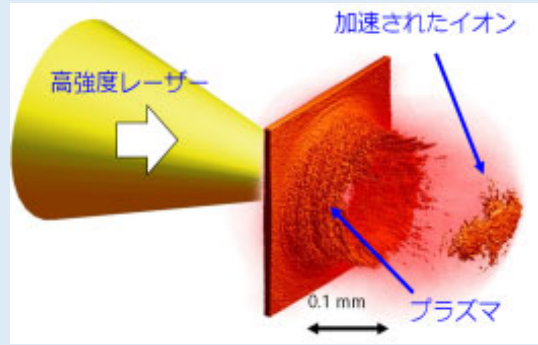
医療機会の提供(医療費の抑制)



量子メス(次世代重粒子線がん治療装置)

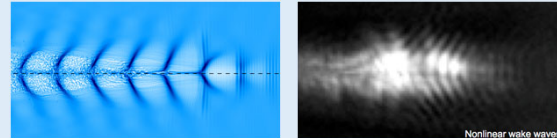
# 開発内容とプロジェクトの POC (概念実証)

## イオン加速技術

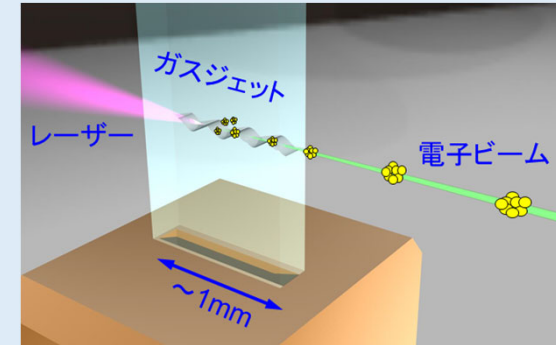


## シミュレーション・計測技術

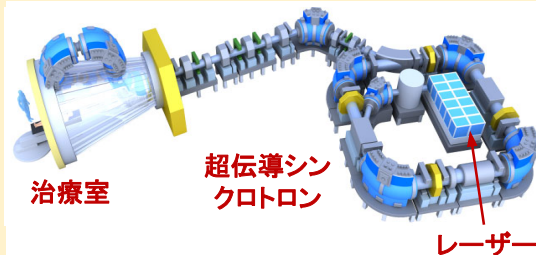
### プラズマ加速場



## 電子加速技術



## 小型重粒子線がん治療装置

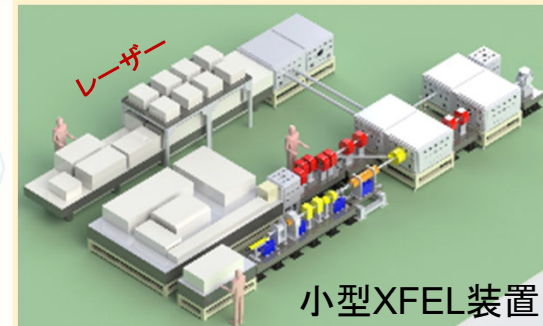


## POC (電子加速) 開発

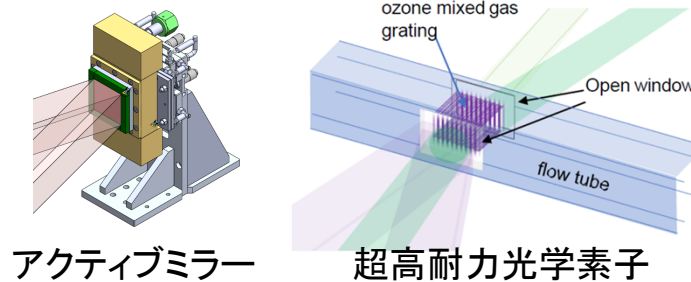
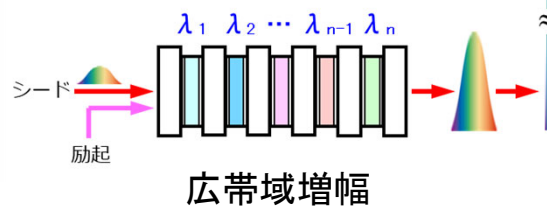
- XFEL (10 keV) の実現に必要な電子ビーム発生・加速技術

## POC (イオン加速)

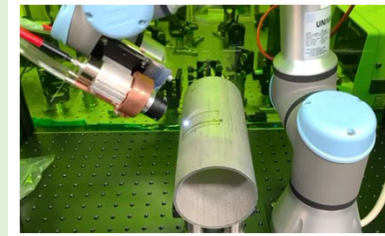
- 量子メスの入射器として利用できる  $C^{6+}$  ビーム生成システム



## 加速用レーザー技術



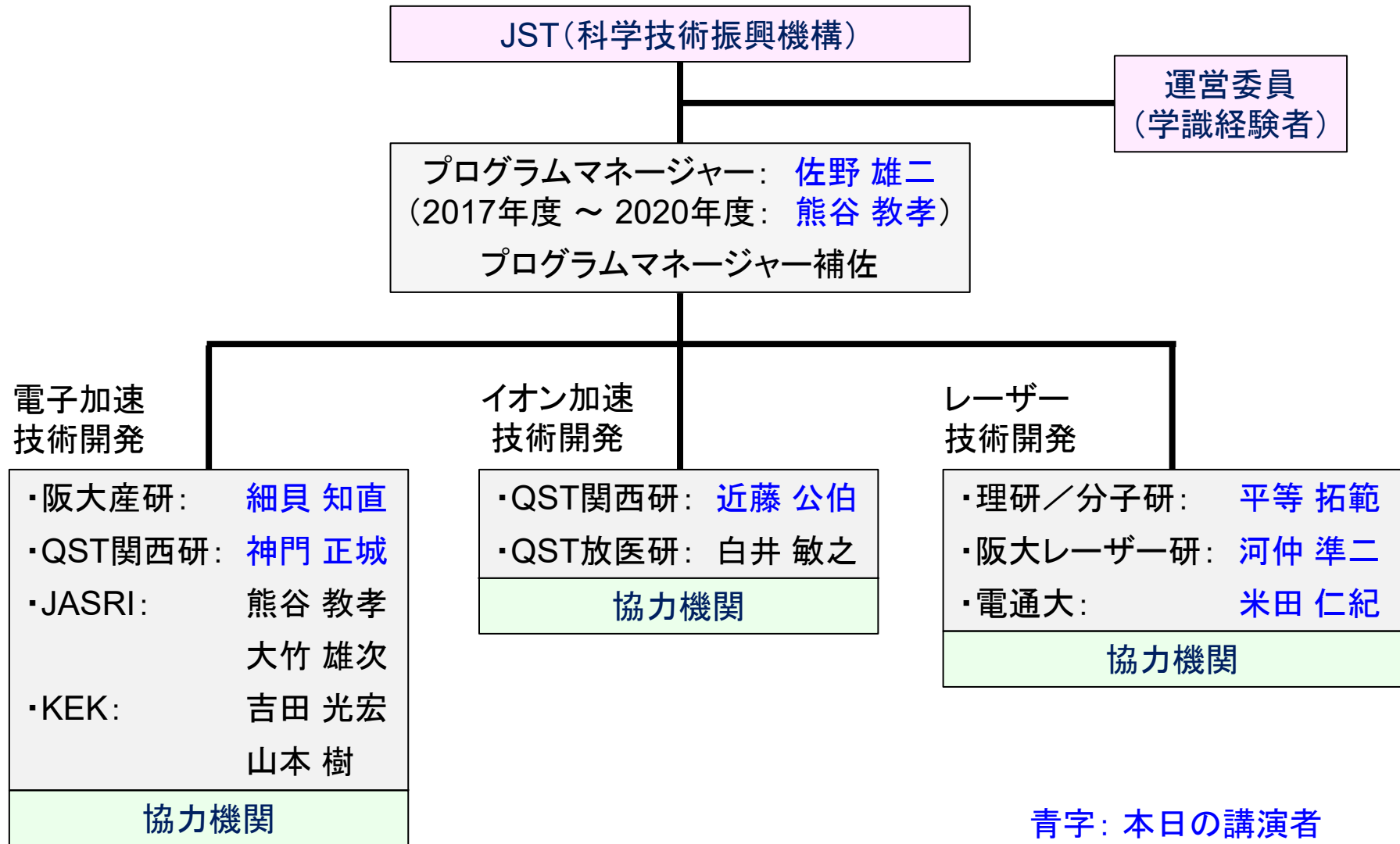
## 応用展開



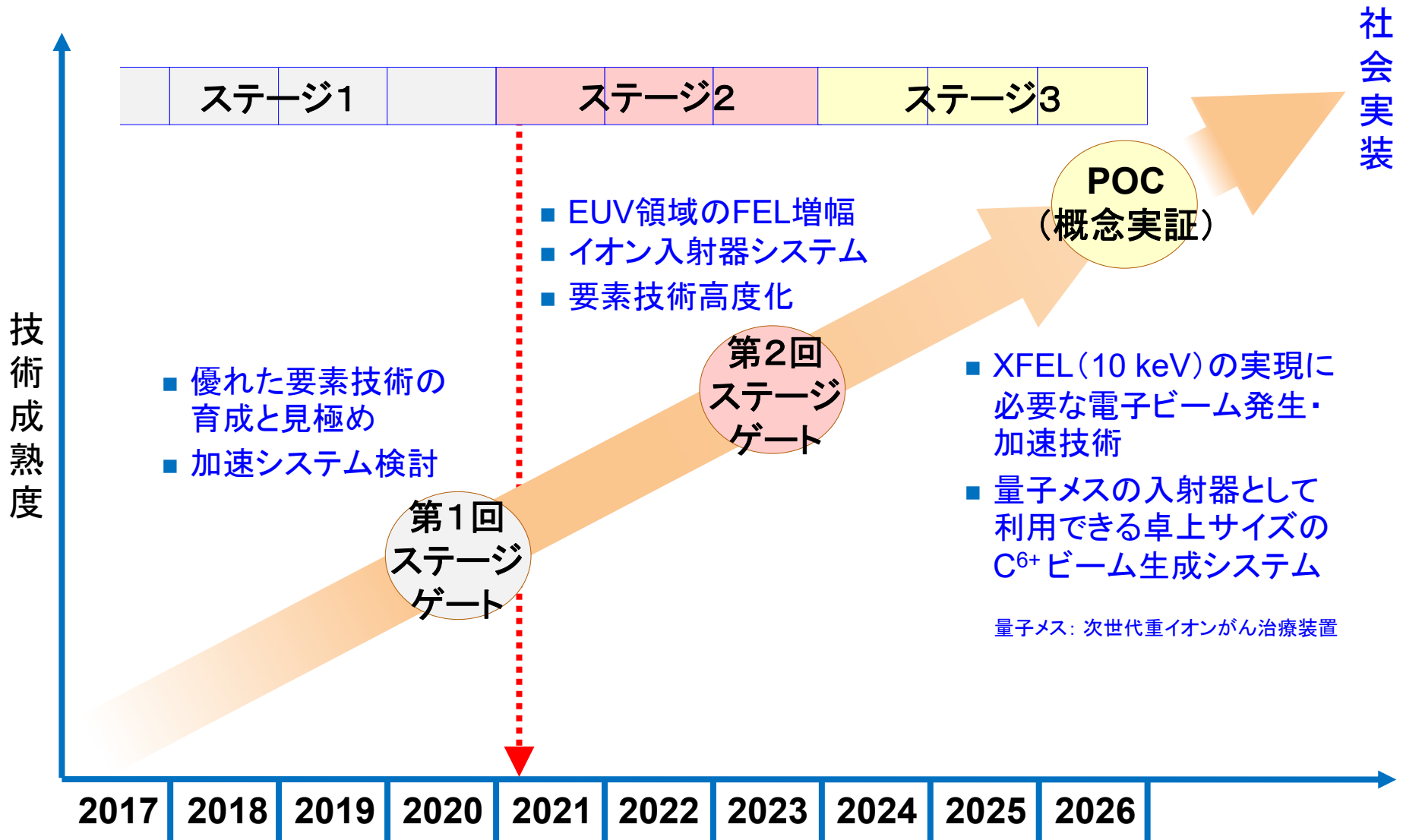
## 共通基盤技術・加速器技術



# 開発体制（2021年度）



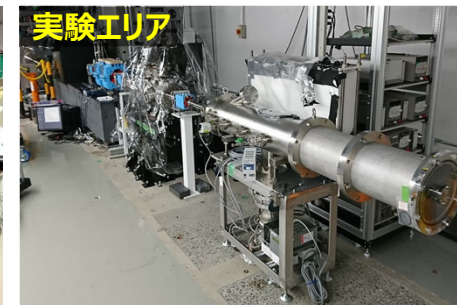
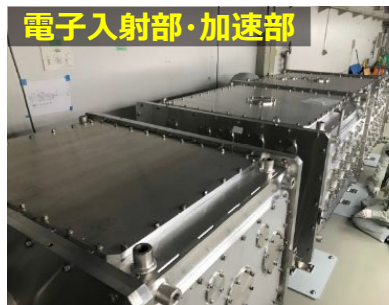
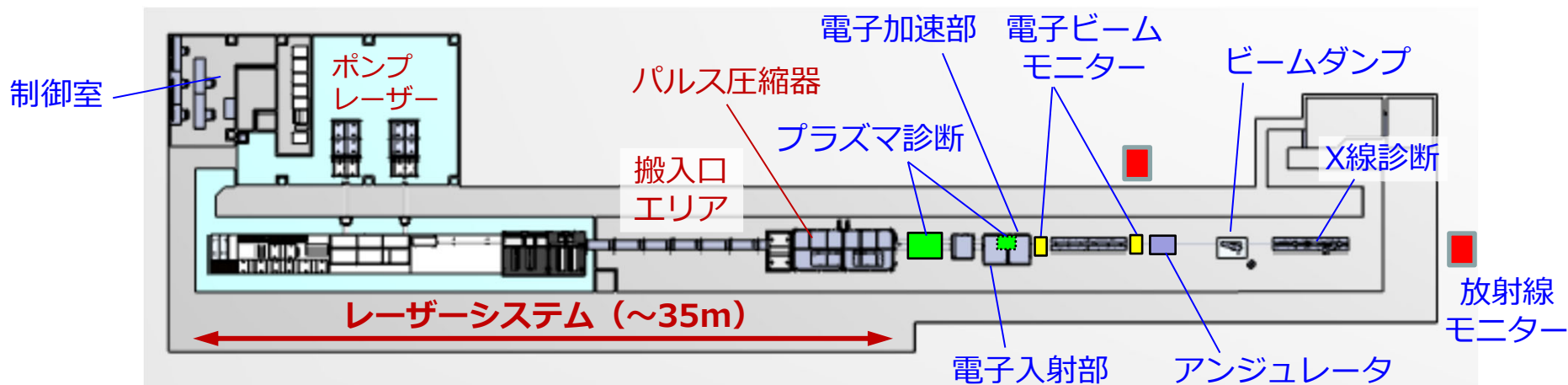
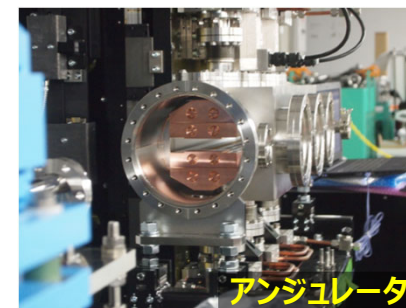
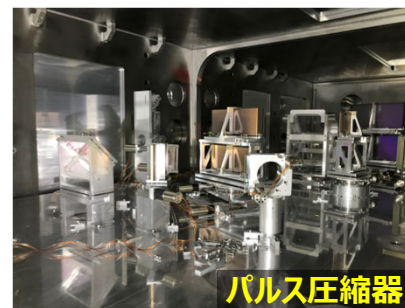
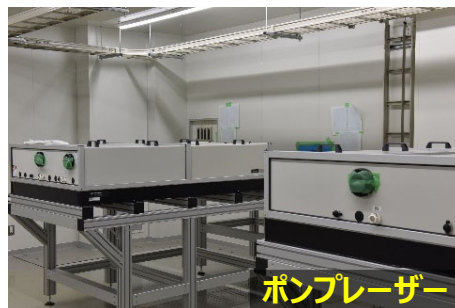
# 開発の展開と POC への道すじ



---

# ステージ1の成果概要

# 電子加速プラットフォームの整備（播磨）

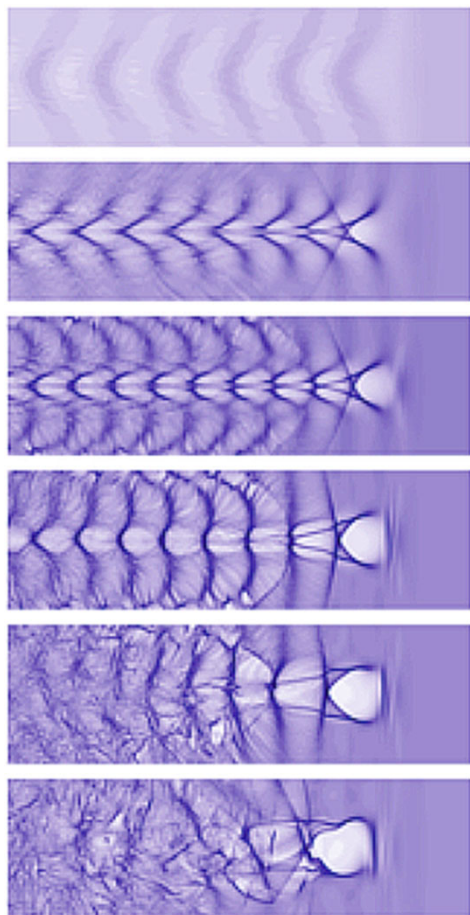
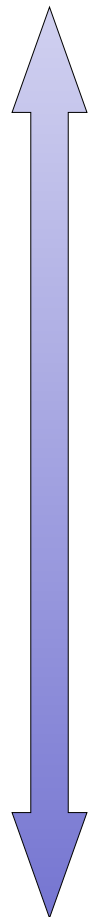




# 安定性を重視した加速スキーム・レーザー構成

レーザー出力：小  
ガス密度：小

電場：弱



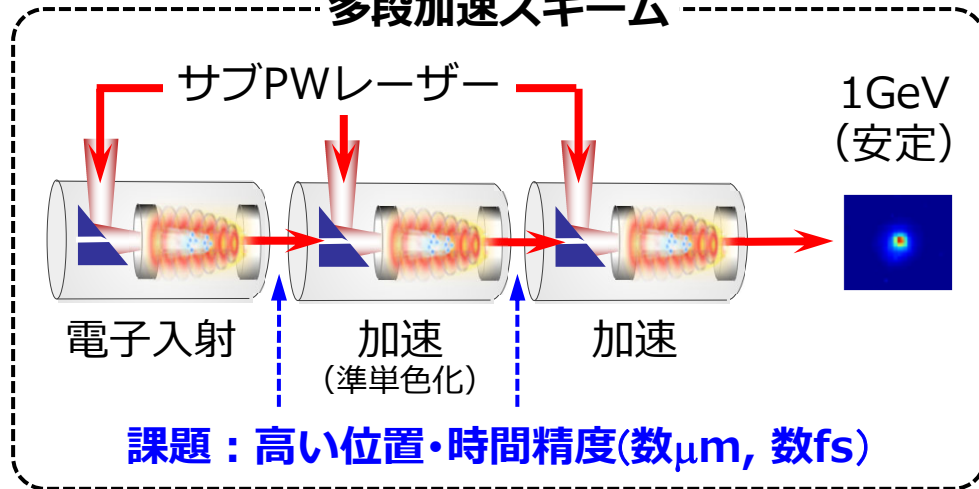
安定な加速

入射・強い加速

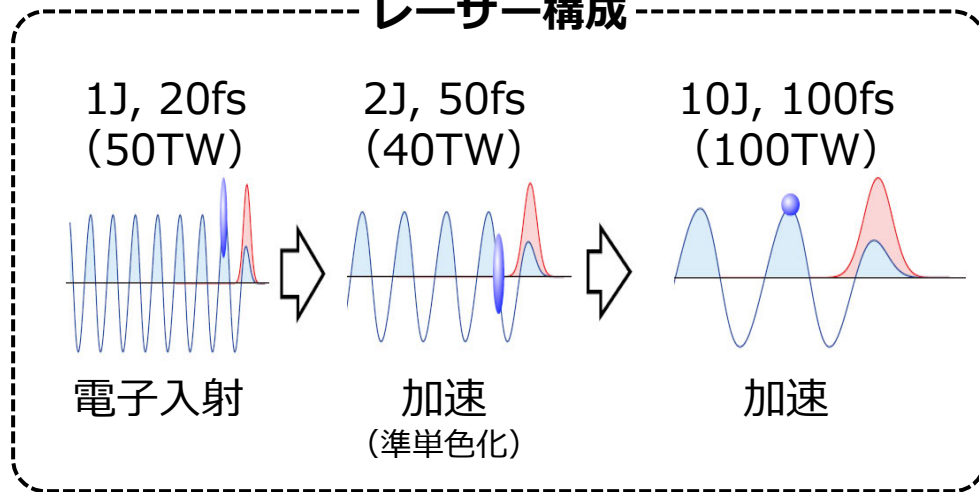
レーザー出力：大  
ガス密度：大

電場：強

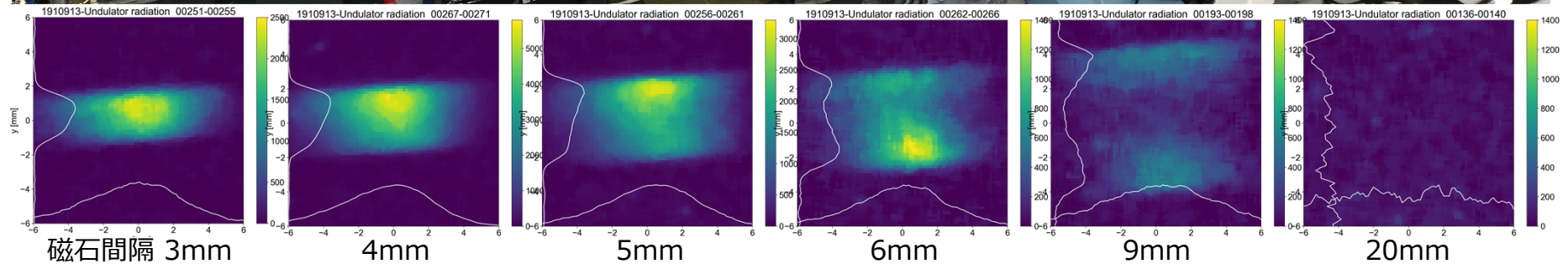
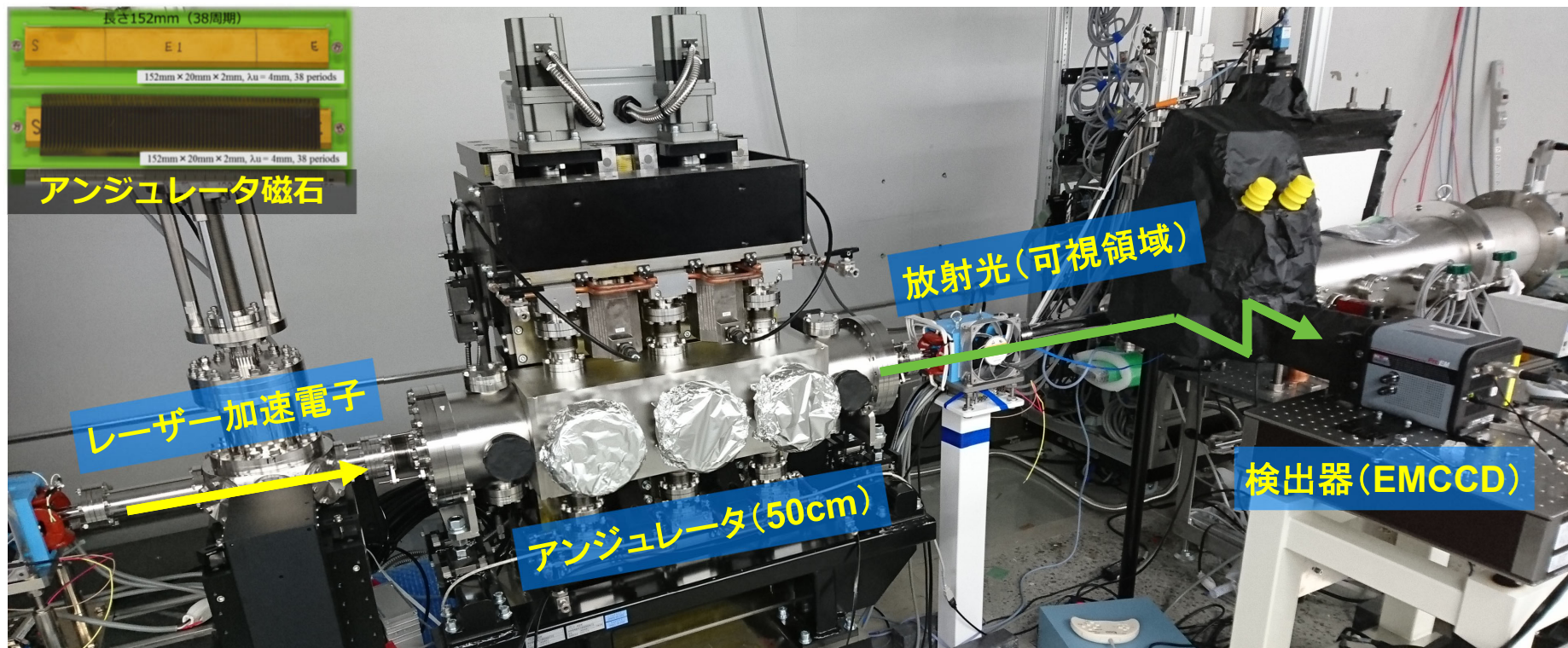
## 多段加速スキーム



## レーザー構成



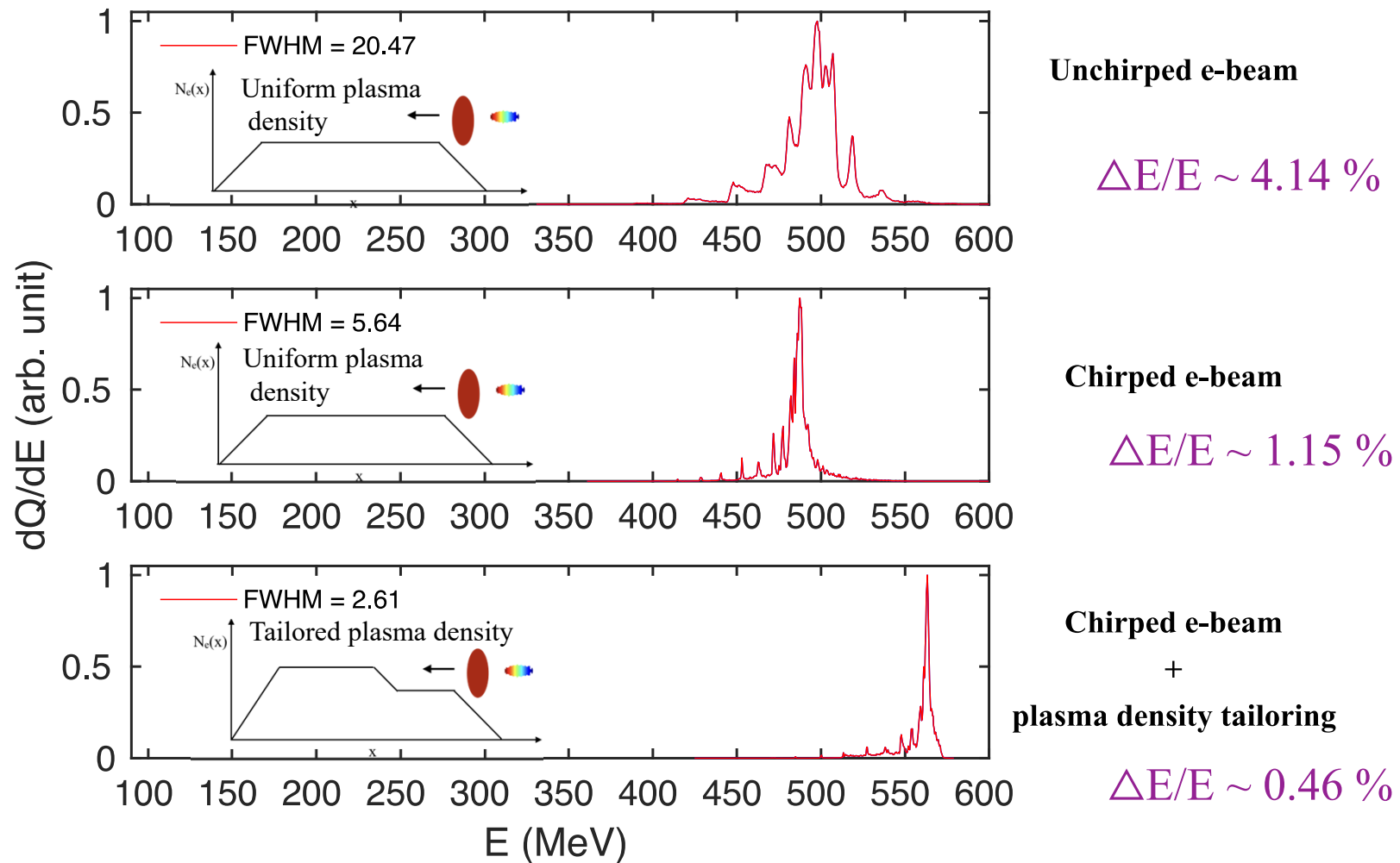
# レーザー加速電子による放射光発生



## レーザー加速電子とマイクロアンジュレータによる放射光の観測

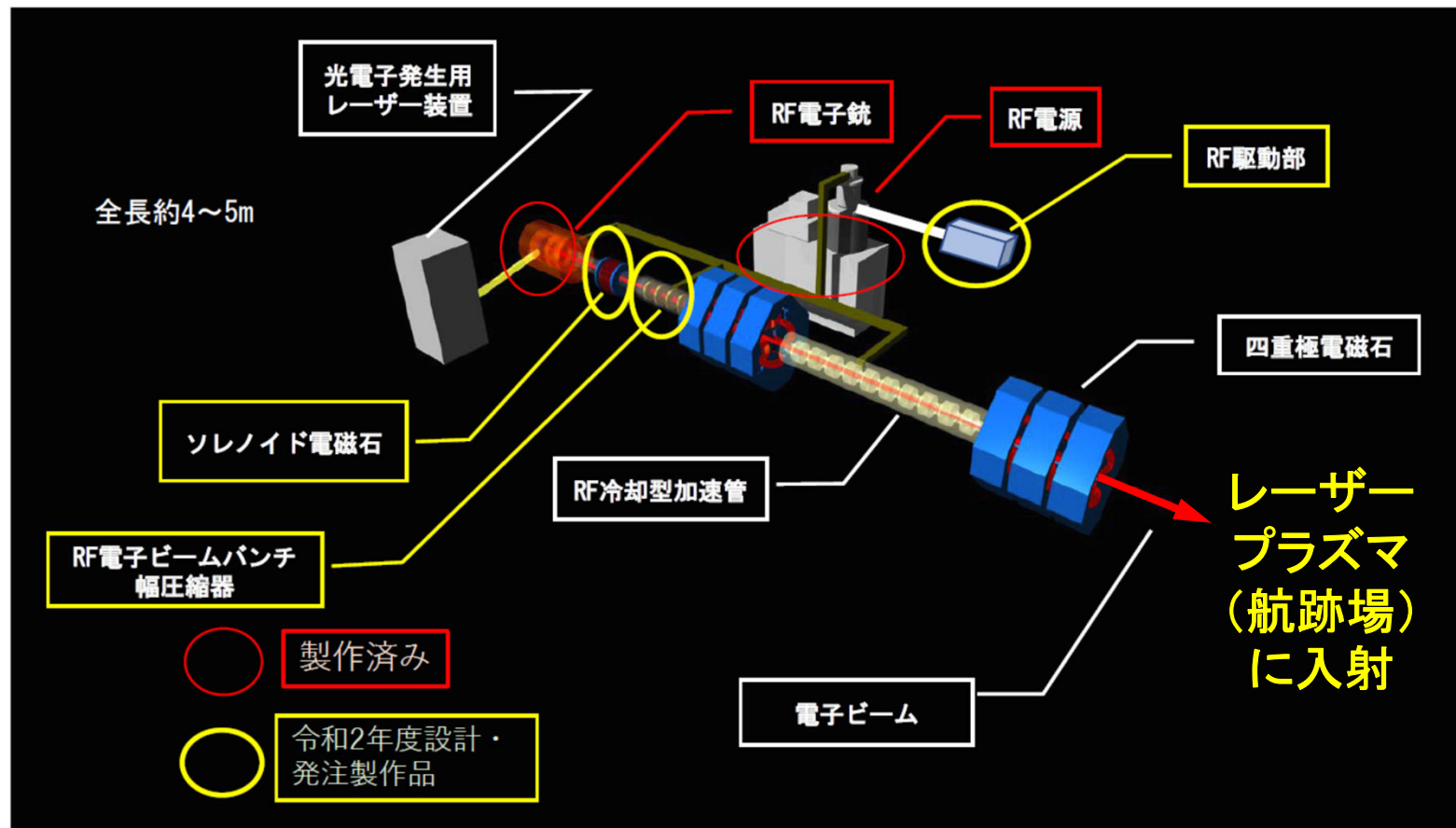
# シミュレーションを活用した電子ビーム制御

## プラズマで加速された電子ビームのエネルギースペクトル (PIC シミュレーション)





# レーザープラズマ（航跡場） 診断用線型加速器

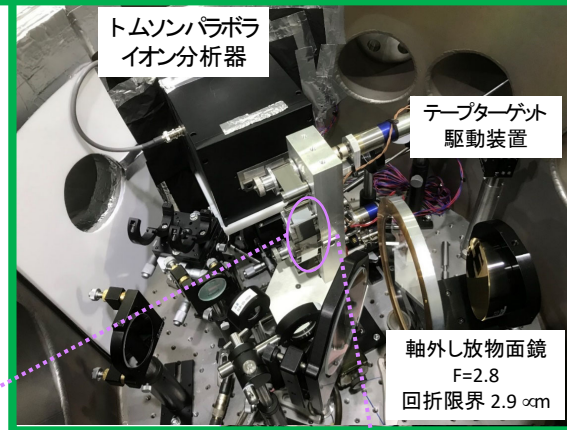


線型加速器の安定な電子ビームをレーザープラズマに入射し、加速場の計測・診断に活用

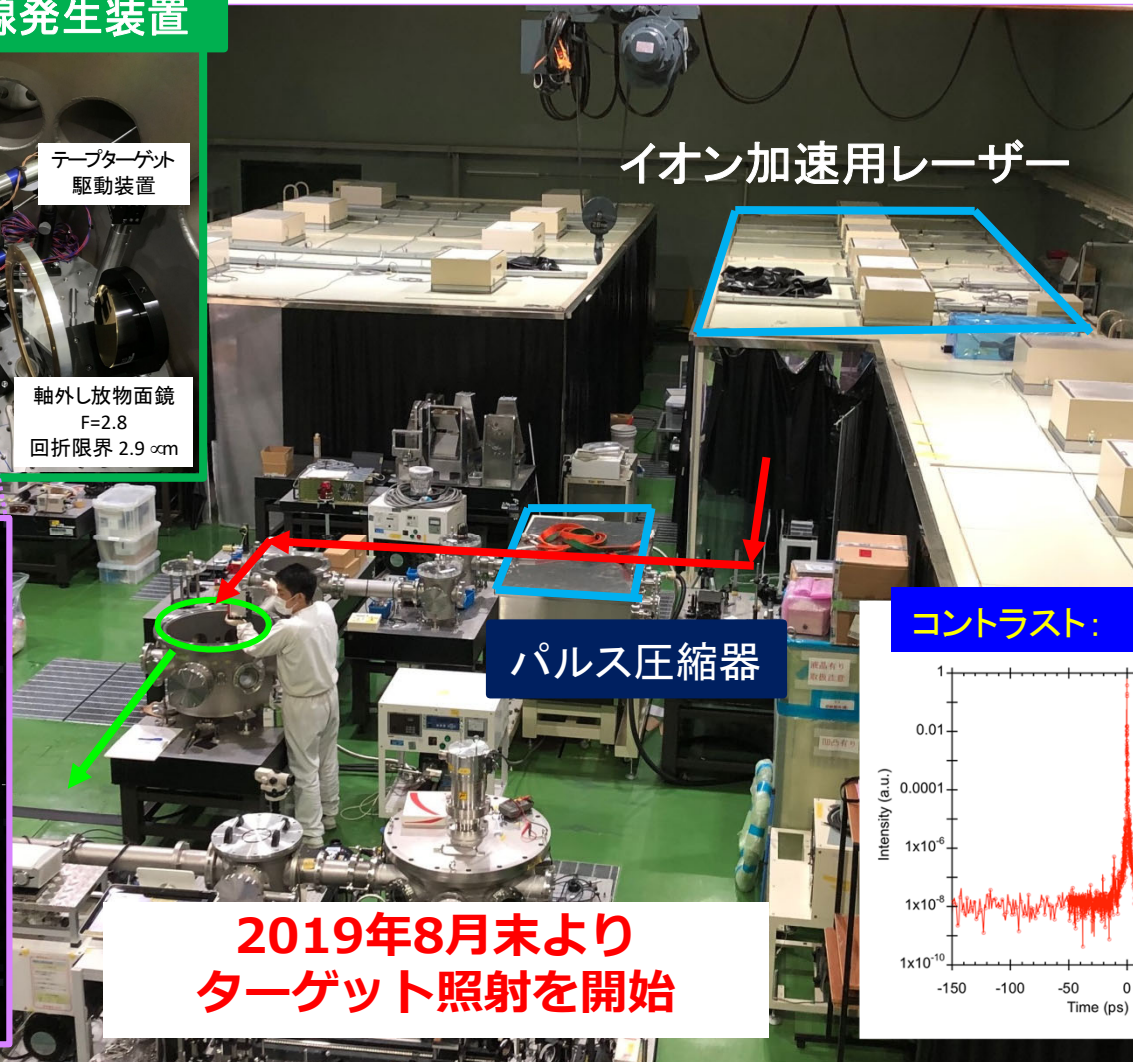


# イオン加速プラットフォームの整備（木津）

## レーザー駆動炭素線発生装置



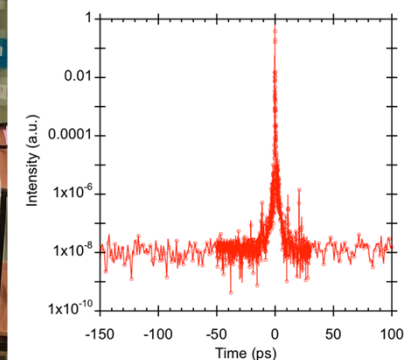
## イオン加速用レーザー



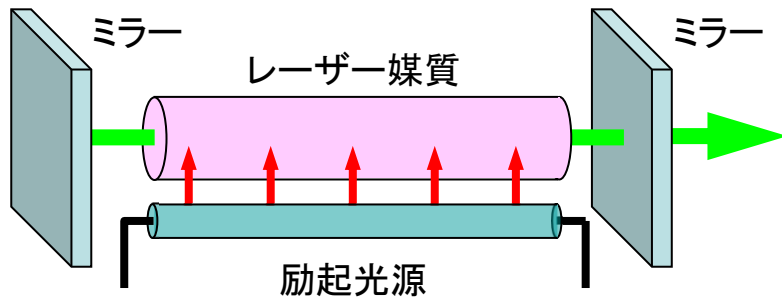
FWHM X 4.0  $\mu\text{m}$   
FWHM Y 3.9  $\mu\text{m}$

最大強度レーザー  
850 mJ, 80 fs  
 $5 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$

コントラスト:  $10^{-8} \sim$

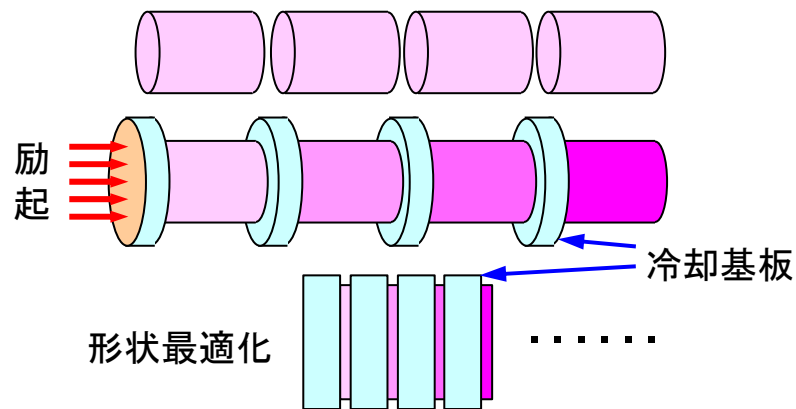


# 室温動作 DFC チップレーザーの開発

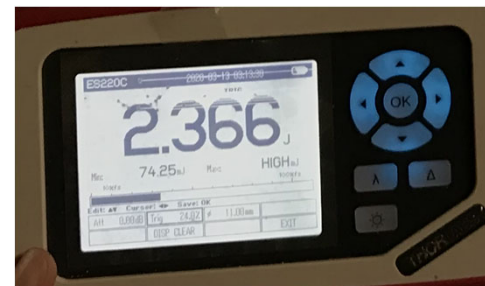
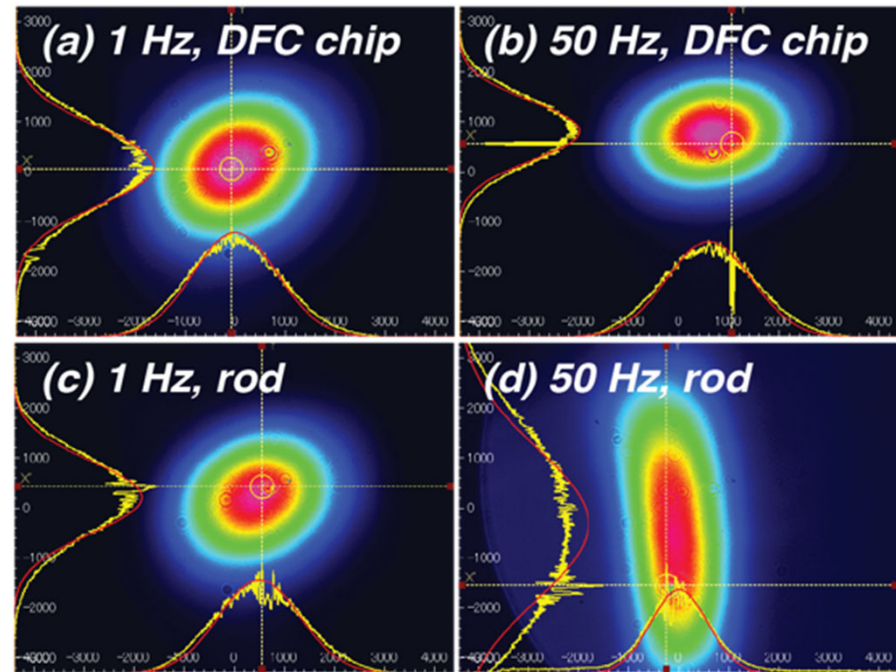


ロッド型レーザーの構成

冷却を促進する構造を  
接合で実現



高出力化のためのDFC構造  
(DFC: Distributed Face Cooling)



@ 1064 nm

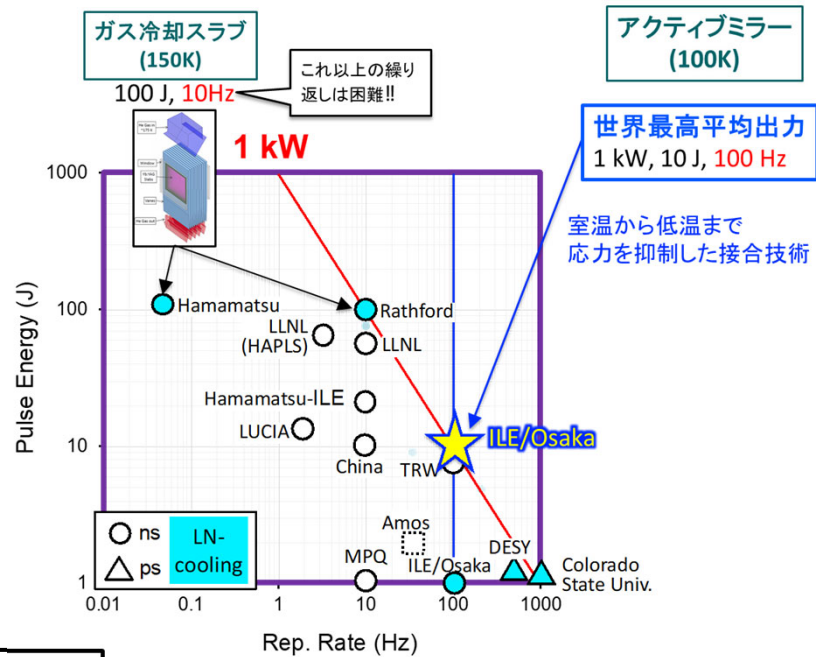


@ 532 nm

>2J, 50Hz を室温動作で実証

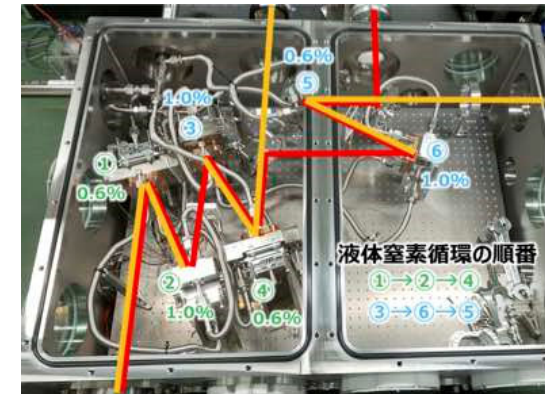


# アクティブミラーによる大出力パルスレーザー



小型・堅牢

プロトタイプ  
(これまで)

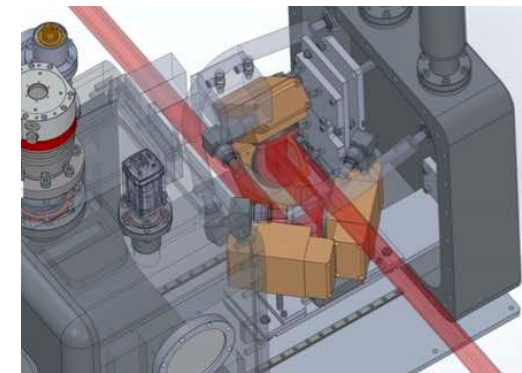


3D配置・一体化ホルダー

小型 (光学サイズ < 1/25)

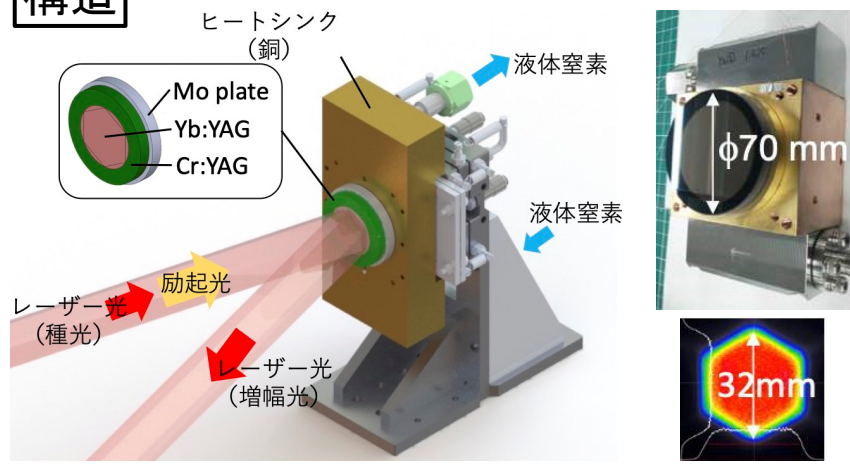


30 cm x 35 cm x 40 cm

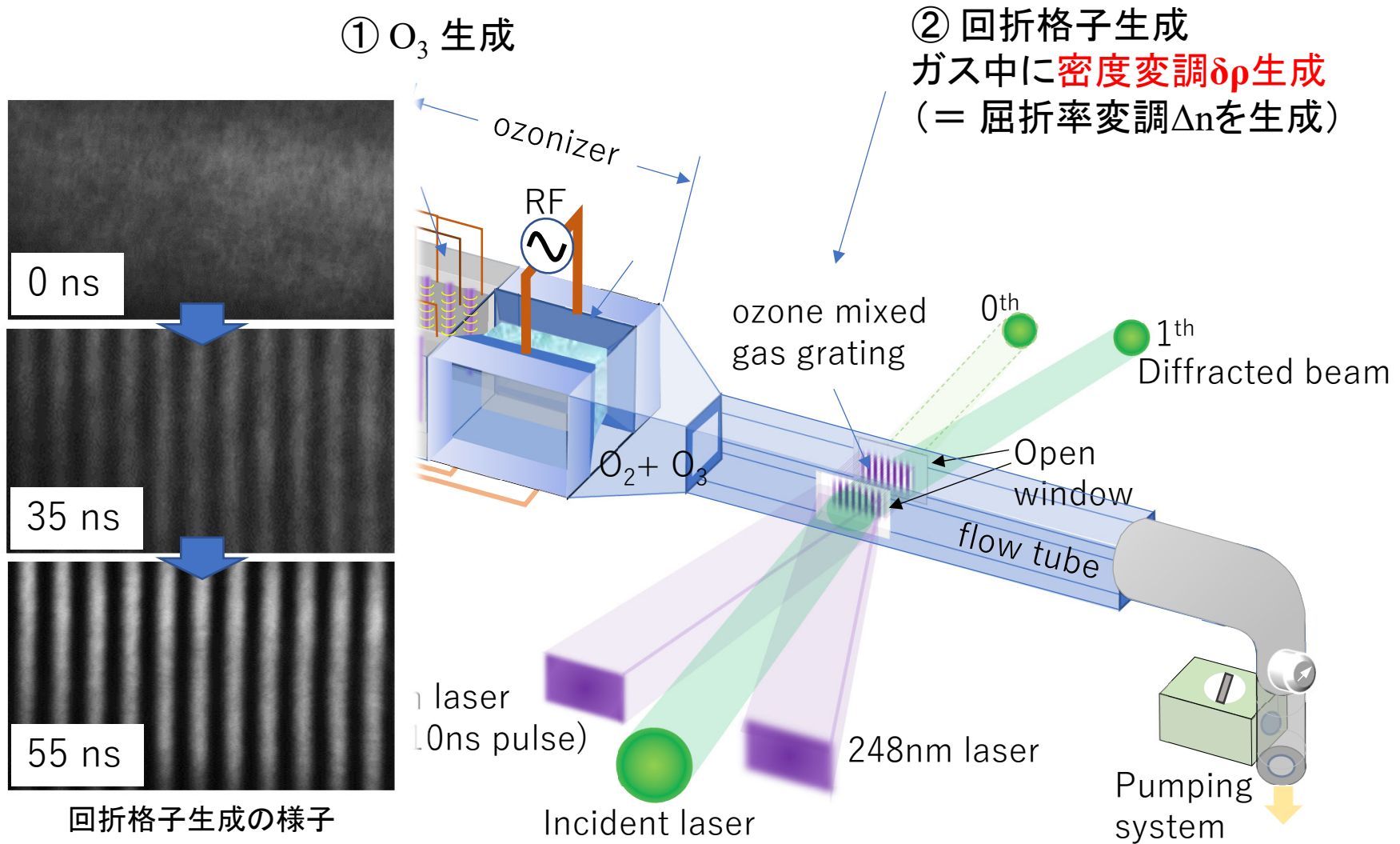


堅牢 (がっしり固定)

構造



# レーザー書込み気体回折光学素子の開発



Y. Michine and H. Yoneda, *Com. Phys.* **3**, 24 (2020)

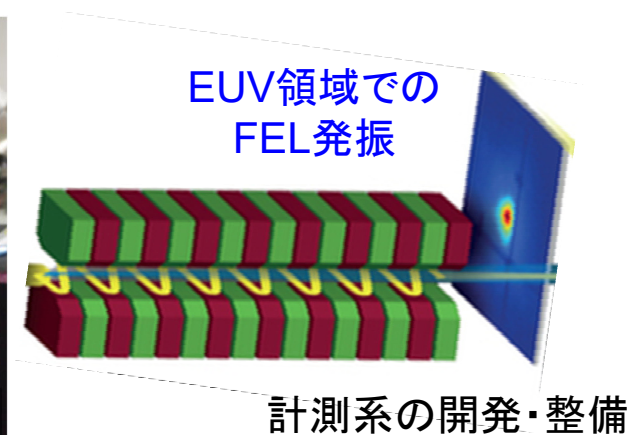
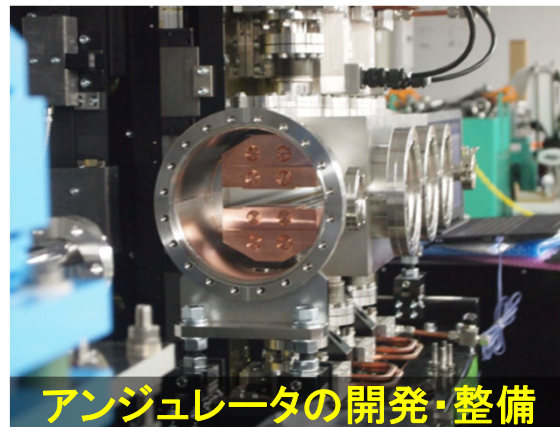


---

# ステージ2の計画

## ステージ2の開発計画（電子）

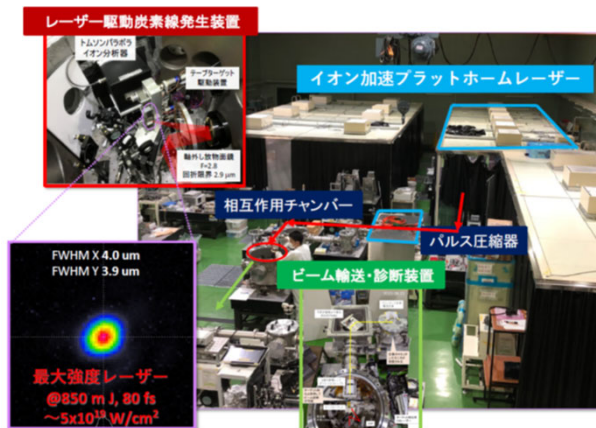
電子加速プラットフォーム（理研播磨）にて、レーザープラズマ加速された電子ビームをアンジュレーターに入射し、EUV領域で放射光の増幅を確認する。アンジュレーター長さは5 m以下とする。また、電子加速についてはEUV光を達成できる数百MeV程度の加速エネルギー、電荷量10 pC/パルス、バンチ長10 fs以下、エネルギー分散( $\Delta E/E$ ) 0.1%以下を達成する。更にその結果を踏まえ、小型XFEL実現に求められるレーザー装置の仕様を明確化する。



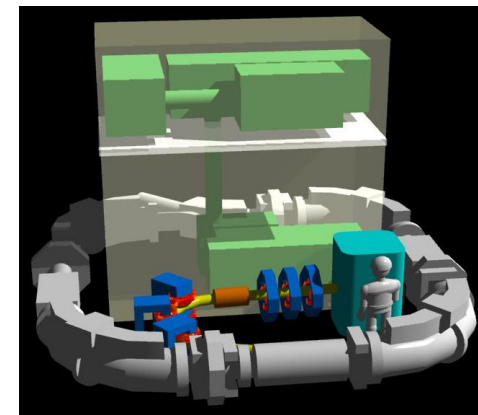
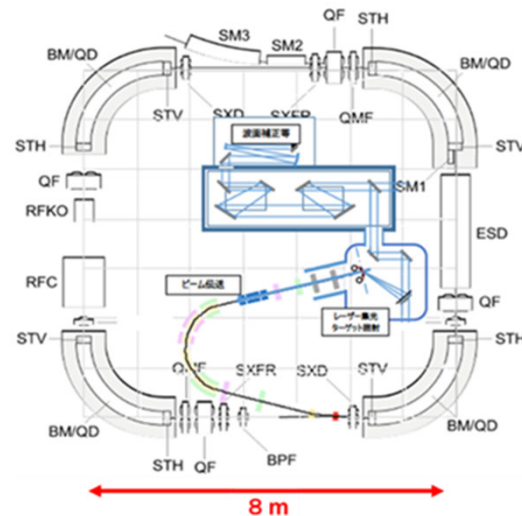
電子加速プラットフォーム（播磨）

# ステージ2の開発計画（イオン）

イオン加速プラットフォーム(QST関西研)にて、プラットフォームレーザー(Ti:sapphire)、レーザー駆動炭素線発生装置、計測用ビームライン、リアルタイムイオンモニターを組合わせた**入射器の実証実験**を行う。シミュレーションを併用し、核子あたり4 MeVの $C^{6+}$ を立体角(1 msr)当り10%のバンド幅で $10^8$ 個以上シンクロトロンに入射するためのスケーリング則を求める。また、**レーザーへの要求仕様**を明確化し、シンクロトロン内への入射器の**設置方法**を検討する。



プラットフォームレーザー整備



## 入射器とシンクロトロンの関係

# ステージ2の開発スケジュール

	2021	2022	2023	
電子加速	入射器(ガスジェット)高度化			
		キャピラリー加速実験(多段加速)		
	バンチ計測システム開発			
	EUV・X線計測器の開発			
	プラットフォームレーザー整備(10Jライン)		EUV-FEL実験開始	EUV-FEL実験
	アンジュレータ設計・製作			
	ライナック整備・試験			移設準備(JASRI → 阪大・産研)
イオン加速	炭素イオン加速スキーム最適化			
	ターゲットシステム開発			
	炭素イオンビームライン開発			
	プラットフォームレーザー整備(10 <sup>20</sup> W/cm <sup>2</sup> )			
			入射器(実験機)統合試験	
レーザー	励起レーザー安定化		Ti:sapphireへの組み込み開始	
	要素技術開発/FS(超高耐力素子、大口径素子、広帯域増幅技術、新結晶開発)			
			加速用レーザーシステムの検討	



# おわりに

- 「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」がJST未来社会創造事業(大規模プロジェクト型)に採択され、2017年11月に10年プロジェクトとして始動
- 将来の小型XFELを目指した「電子加速」、小型がん治療装置を目指した「イオン加速」、およびその実現に必要な「高強度小型レーザー」にかかわる研究開発を推進
- 今年度より、**ステージ2**の開発(2021～2023年度)を開始。電子加速では「**EUV領域の放射光の増幅**」を、イオン加速では「**入射器の実証**」を目指す。レーザー技術の更なる高度化を推進し電子・イオン加速に貢献、産業展開を図る
- ステージ1の開発をご支援いただいた皆様に感謝。ステージ2でも、変わらぬご支援をいただきたい



**JST  
MIRAI 未来社会創造事業**

*With accelerators and lasers, we can realize a new era that has never been imagined before.*