

# 量子メス開発の現状について (レーザー駆動イオン入射器開発)

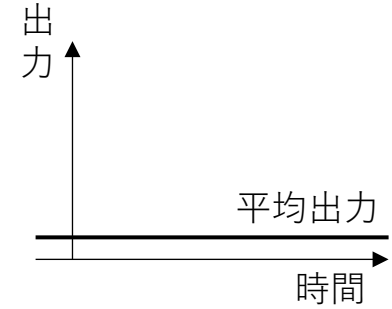
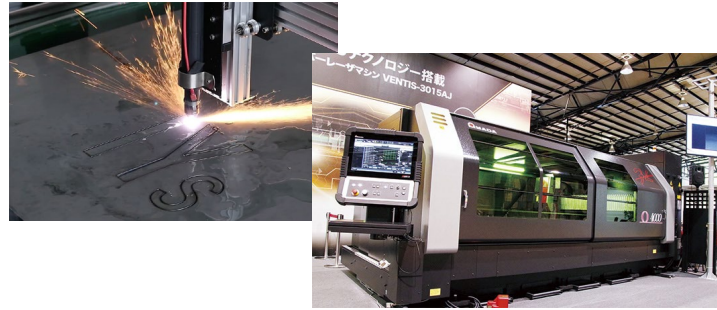
量子科学技術研究開発機構  
関西光量子科学研究所

- ✓ 極短パルス高ピーク出力レーザーを使ったプラズマによるイオン加速
- ✓ 加速装置にするための技術的課題と開発目標
- ✓ レーザー加速入射器開発の現状
- ✓ 今後の取り組み

- ✓ 極短パルス高ピーク出力レーザーを使ったプラズマによるイオン加速について
- ✓ 加速装置にするための技術的課題と開発目標
- ✓ レーザー加速入射器開発の現状
- ✓ 今後の取り組み

## ✓高出力CWレーザー

レーザー加工機



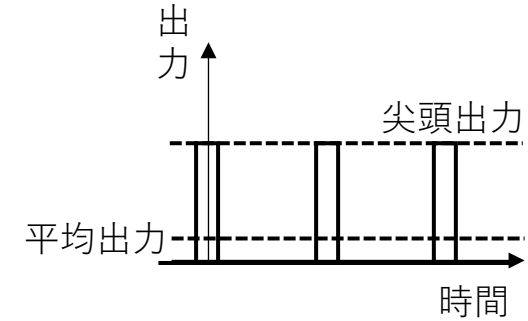
## ✓高出力パルスレーザー

尖頭出力が高い

→ より広い応用ができる

パルス幅：マイクロ秒、ナノ秒

メガワット、ギガワット  
(百万ワット、十億ワット)



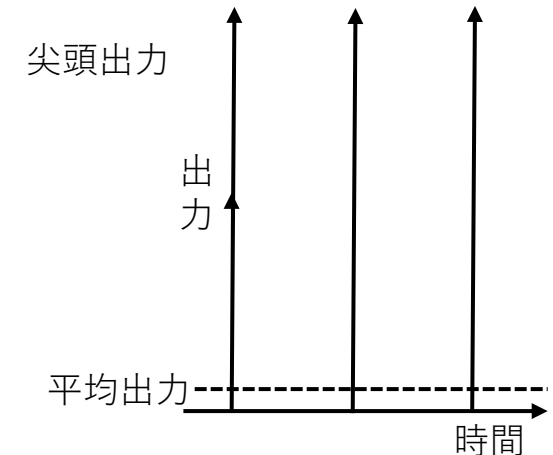
## ✓極短パルス高出力レーザー

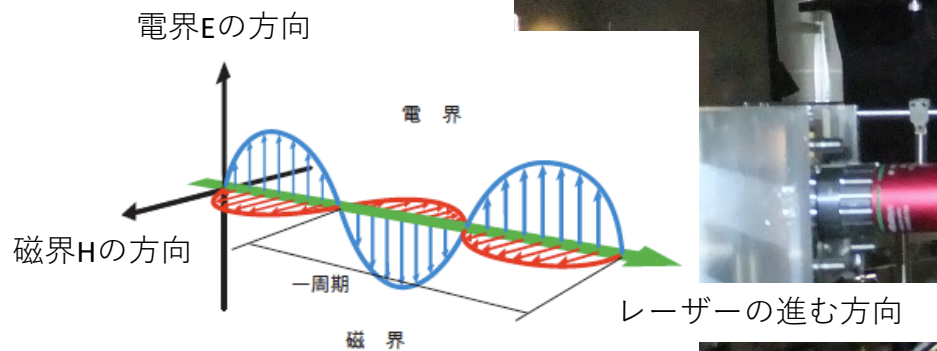
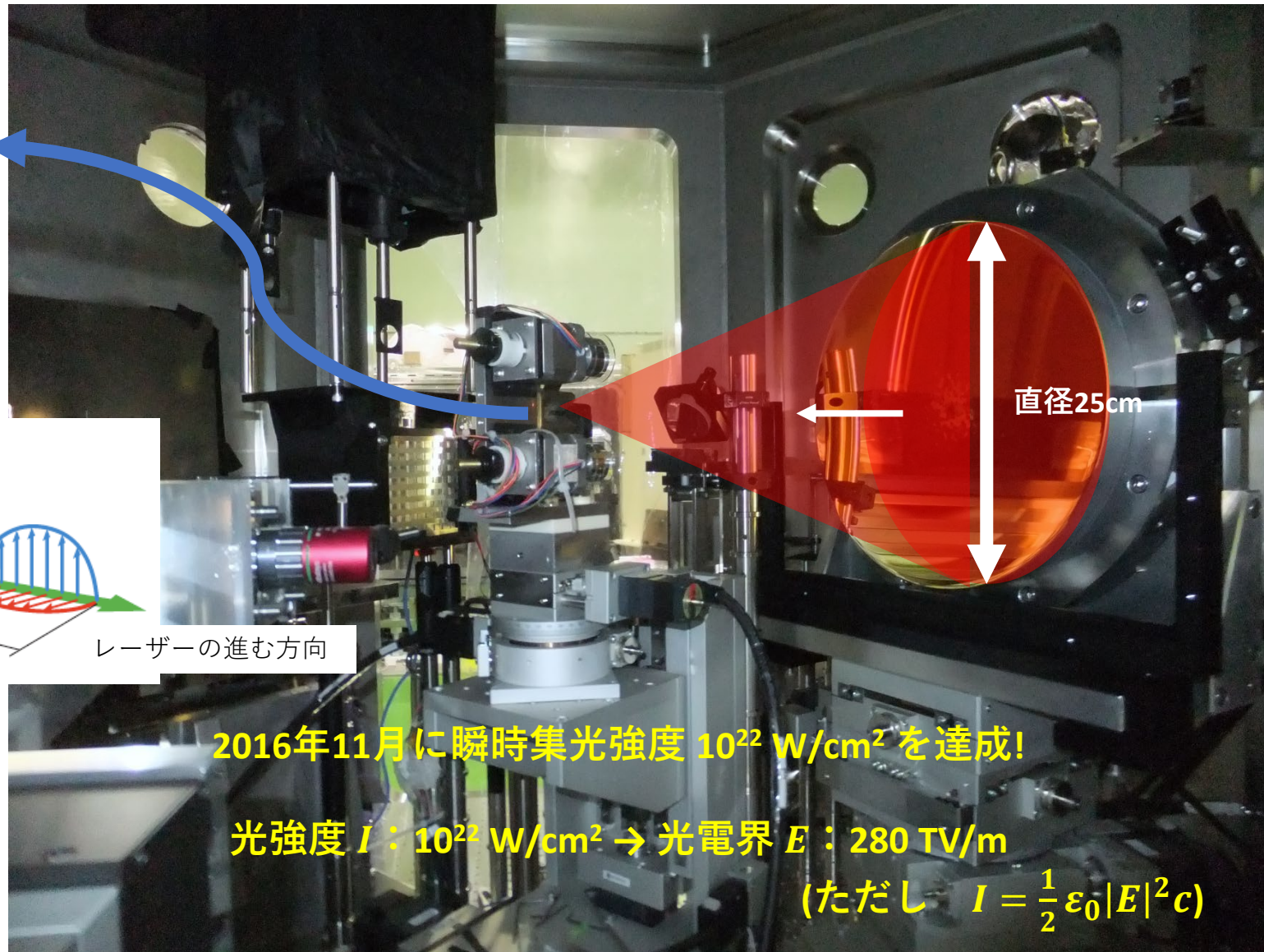
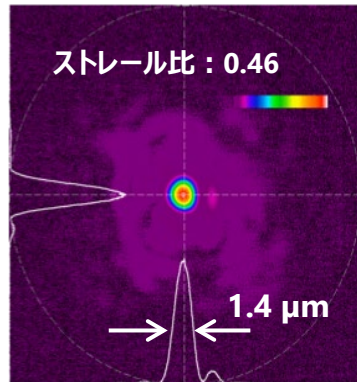
ピコ秒、フェムト秒

尖頭出力はマイクロ秒のそのの  
百万倍、一億倍!

→ さらに広がる応用

科学研究用、フェムト秒レーザー加工、  
フェムト秒レーザー手術





2016年11月に瞬時集光強度  $10^{22} \text{ W/cm}^2$  を達成!

光強度  $I : 10^{22} \text{ W/cm}^2 \rightarrow$  光電界  $E : 280 \text{ TV/m}$

(ただし  $I = \frac{1}{2} \epsilon_0 |E|^2 c$ )

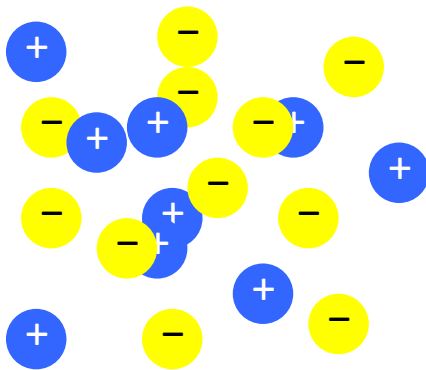
小型加速器実現のためには加速電場を高める必要があるが限界がある

放電限界の壁 ～ 100 MV/m ( $10^8$  V/m : 1メートルで1億ボルト)

壁を越えるとプラズマ状態

通常のプラズマ状態

電子とイオンの混合ガス



超高強度  
レーザー

強い光で電子を押し  
電荷が分離したプラズマ状態を作る

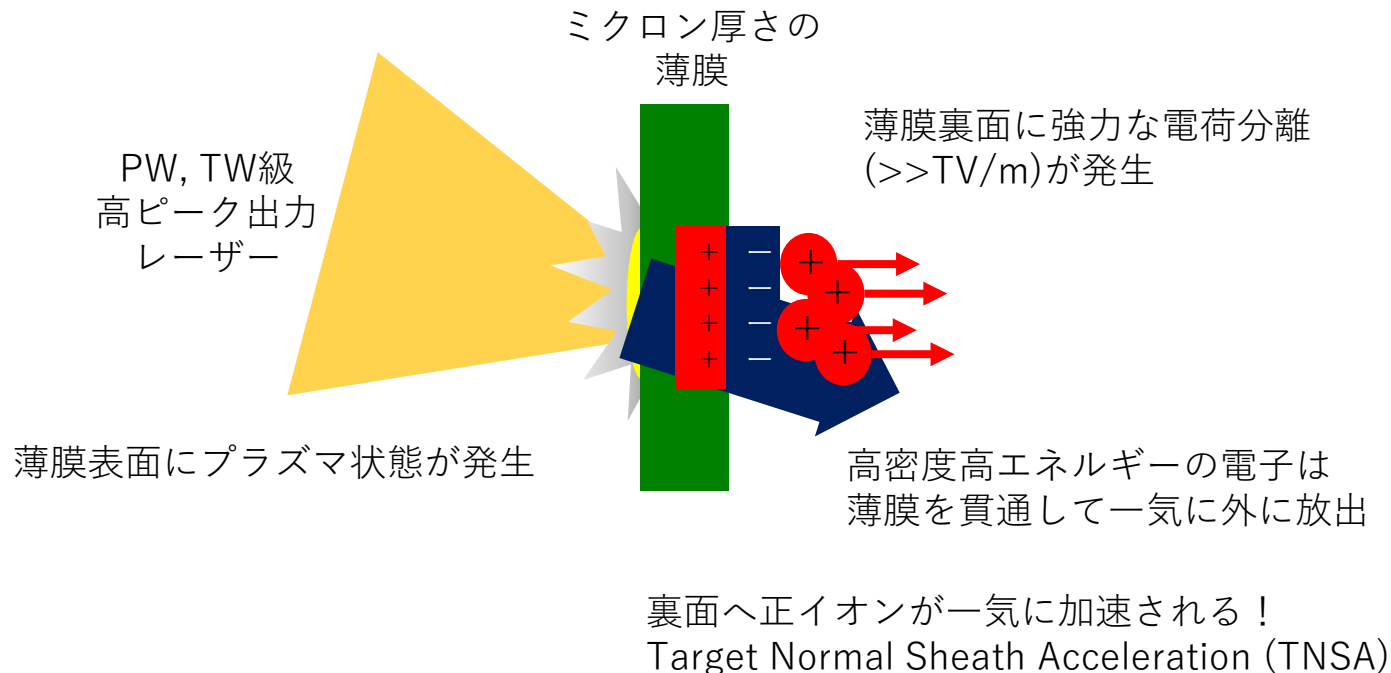
加速電場 :  $\gg 10^{12}$  V/m (TV/m)

プラズマにより、放電限界を超えて、桁違いに大きな加速電場が発生できる

## 高ピーク出力レーザーによるイオンの加速

陽子質量/電子質量  $\sim 1800$

→ 現在のレーザー技術で直接光速近くまで加速できるのは**電子**

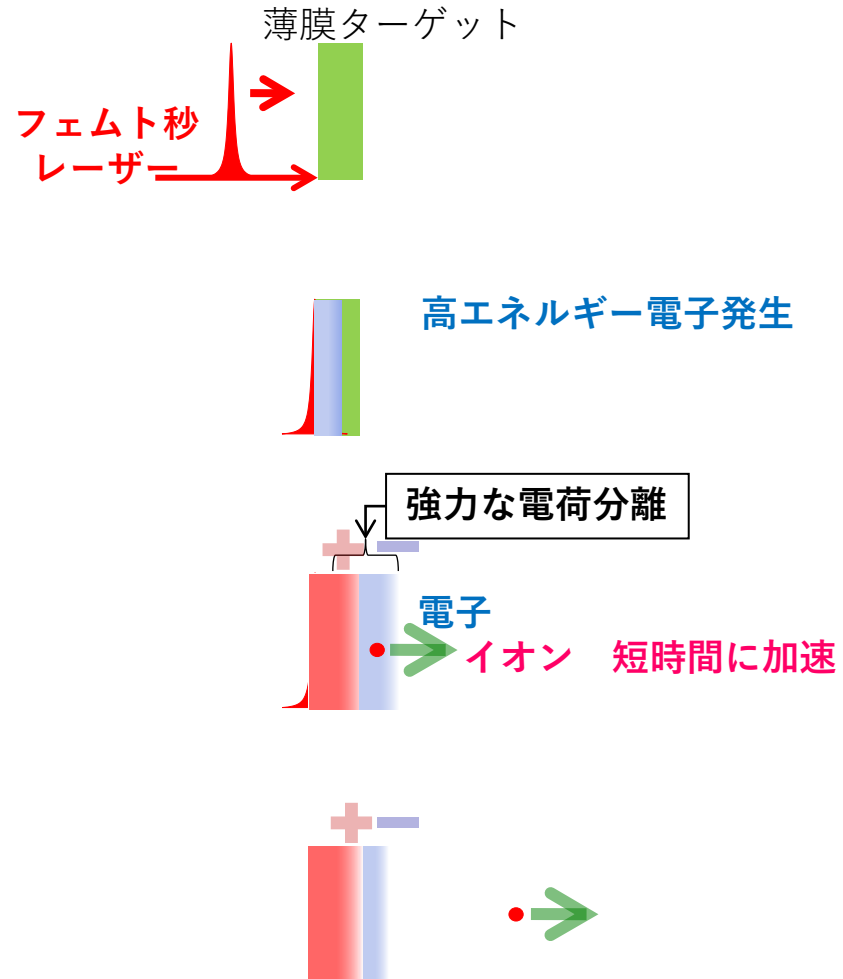


## 技術課題

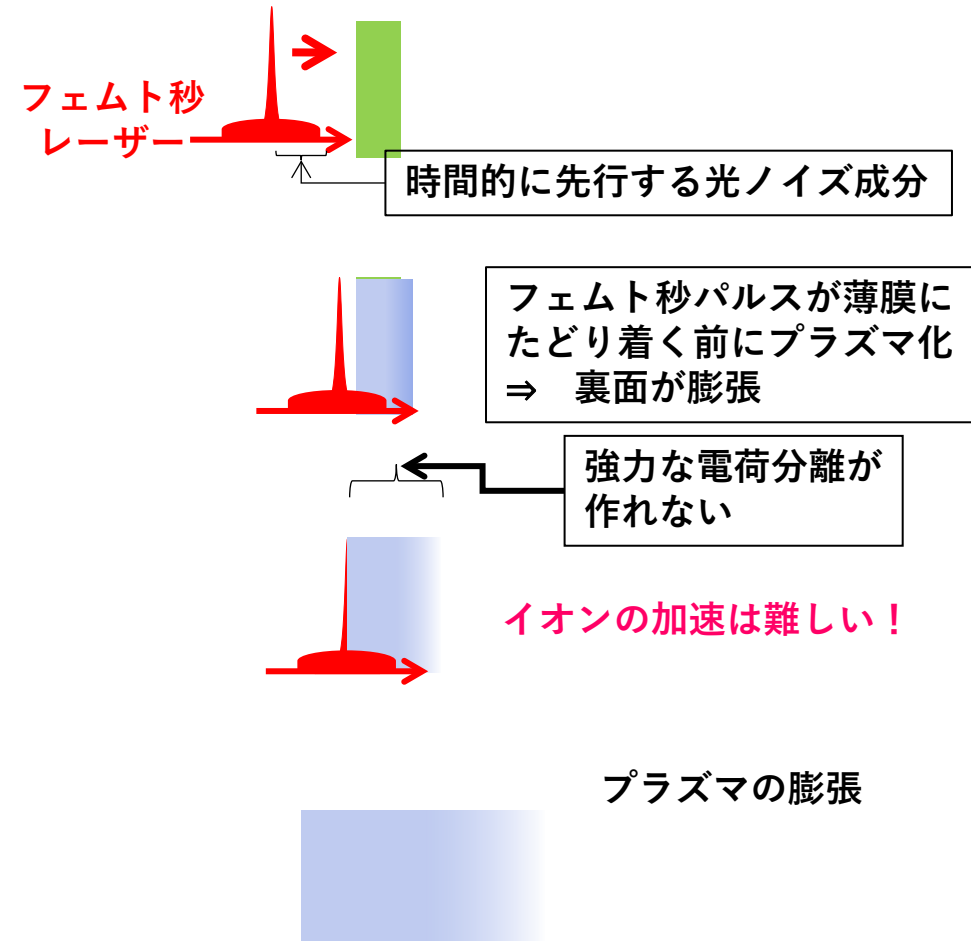
- ・ プレパルスが徹底的に抑制された十分ピーク出力の高い高繰り返しレーザーが必要
- ・ 陽子以外の加速の際にはターゲット裏面の不純物の除去が必要
- ・ レーザー照射時のデブリ対策
- ・ 電子をまとったイオンビームの輸送
- ・ 時間的に極めて高密度のイオンビームの取り扱い

- ✓ 極短パルス高ピーク出力レーザーを使ったプラズマによるイオン加速について
- ✓ **加速装置にするための技術的課題と開発目標**
- ✓ レーザー加速入射器開発の現状
- ✓ 今後の取り組み

## 理想的なフェムト秒パルス

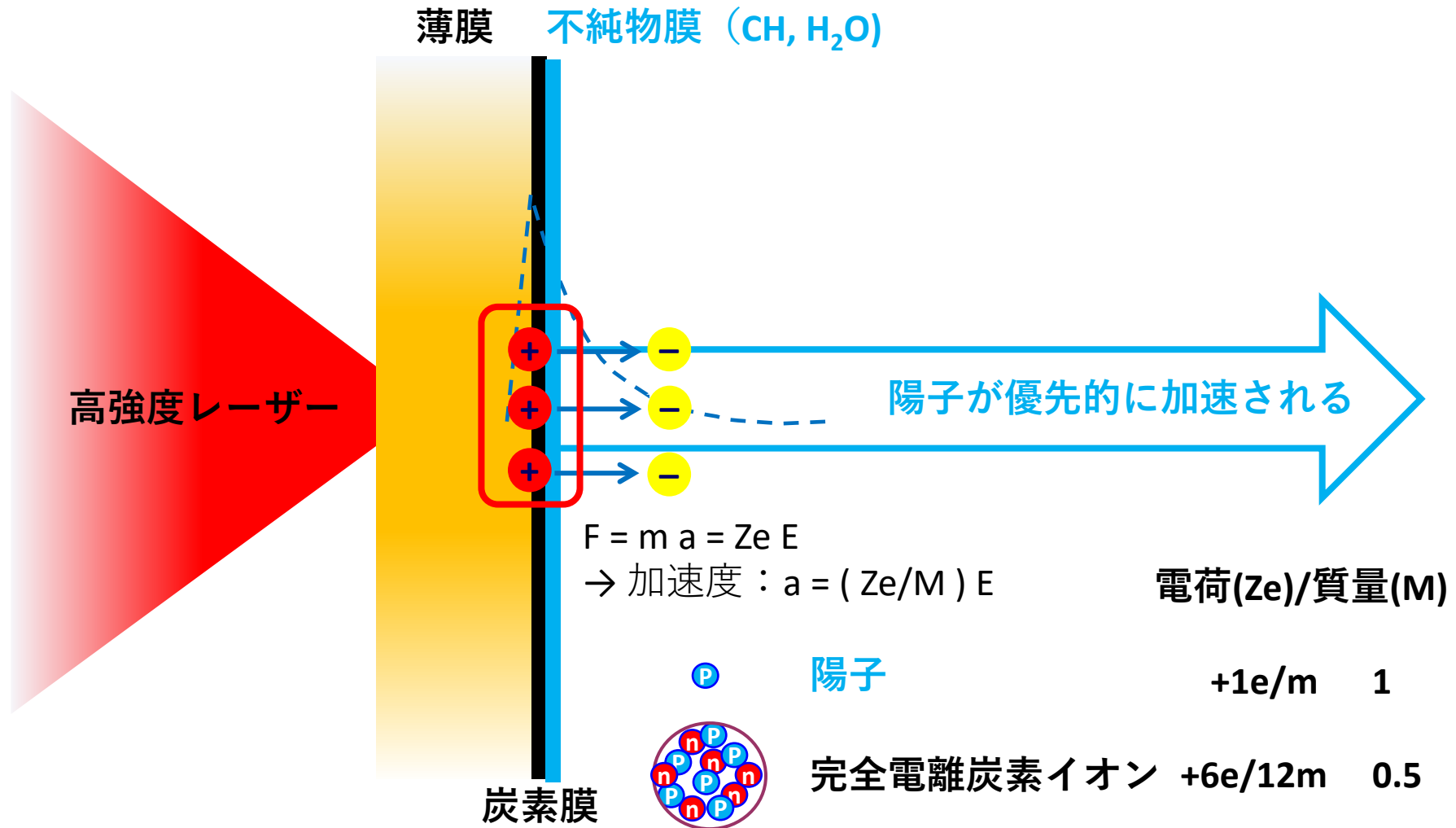


## フェムト秒パルスが時間的に先行する光ノイズ成分を含む

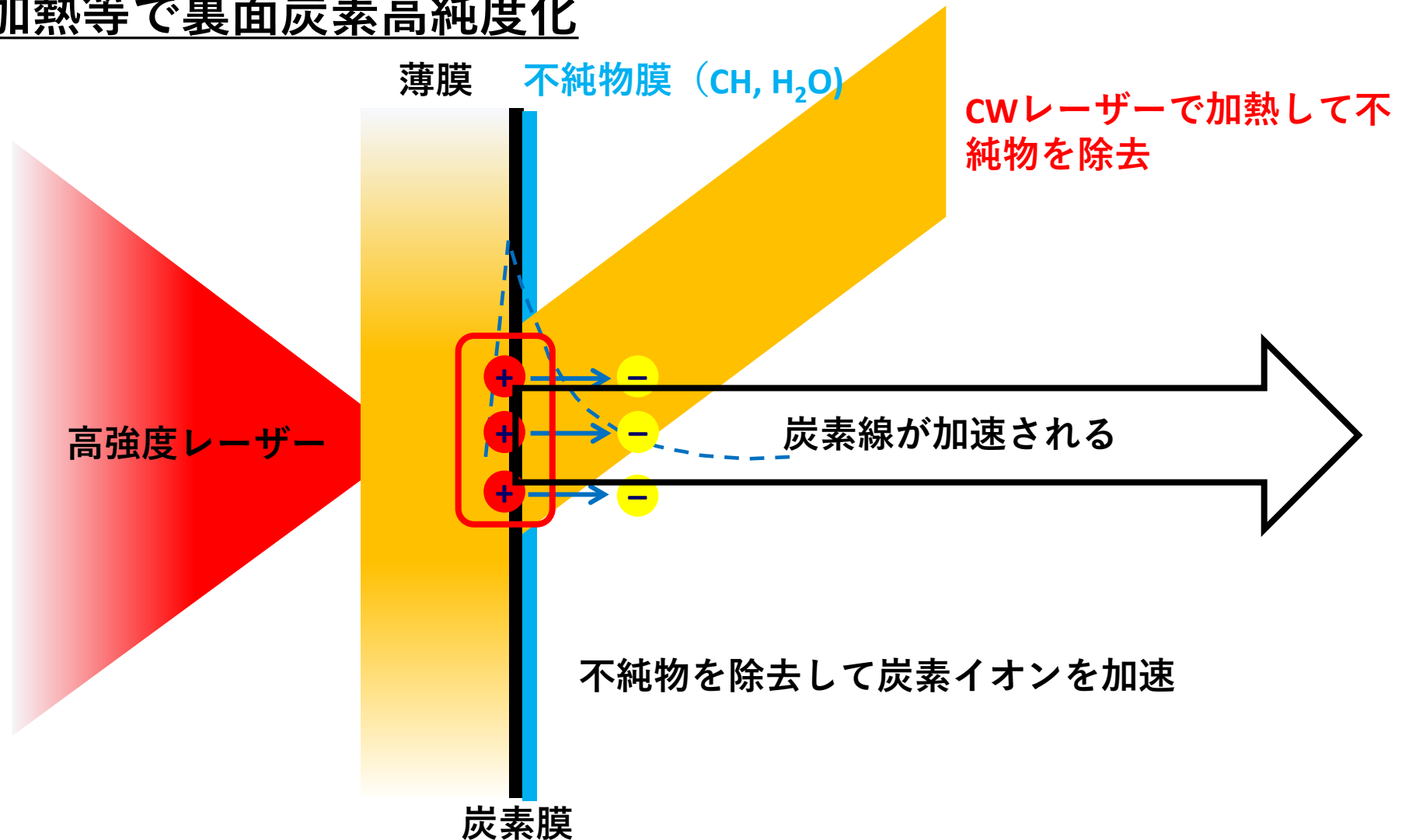


開発目標：10Hz以上のイオン発生に十分な性能を有する小型レーザー装置を開発

- ・ 真空チャンバー中に曝されると瞬時に不純物層が表面に形成される

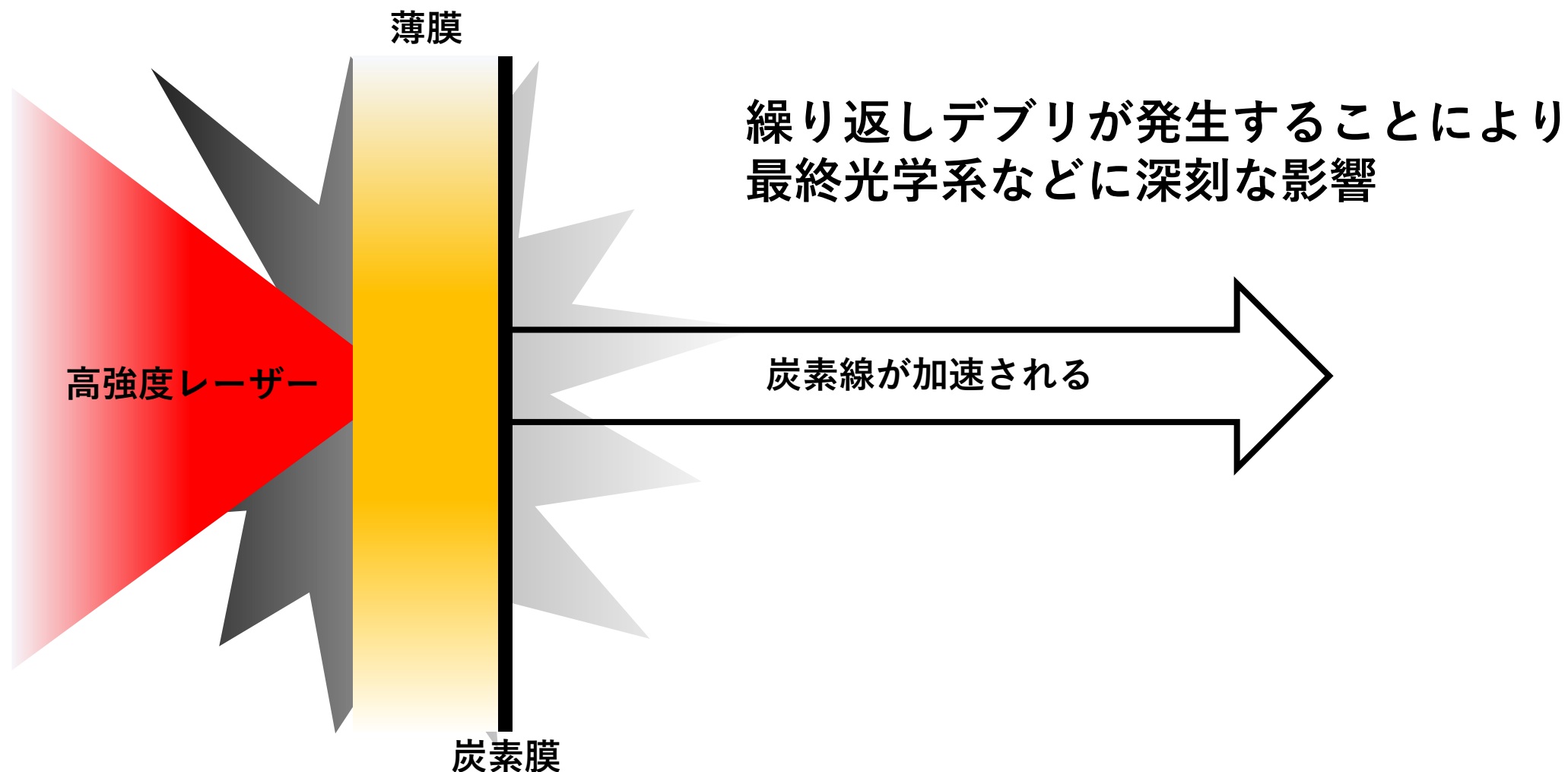


## 加熱等で裏面炭素高純度化

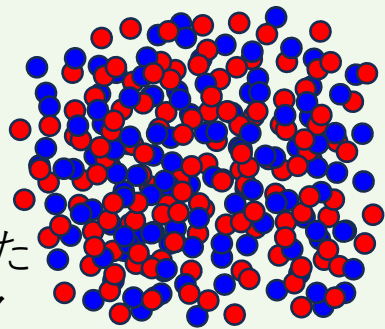
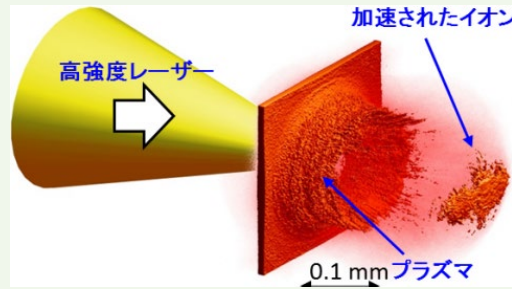


- 開発目標
- ・ 10 Hz以上の高繰り返しでレーザーイオン加速用のターゲット供給
  - ・ 99%以上の高純度炭素線が効率よく発生できる機構

## 10Hzの繰り返しでプラズマが発生

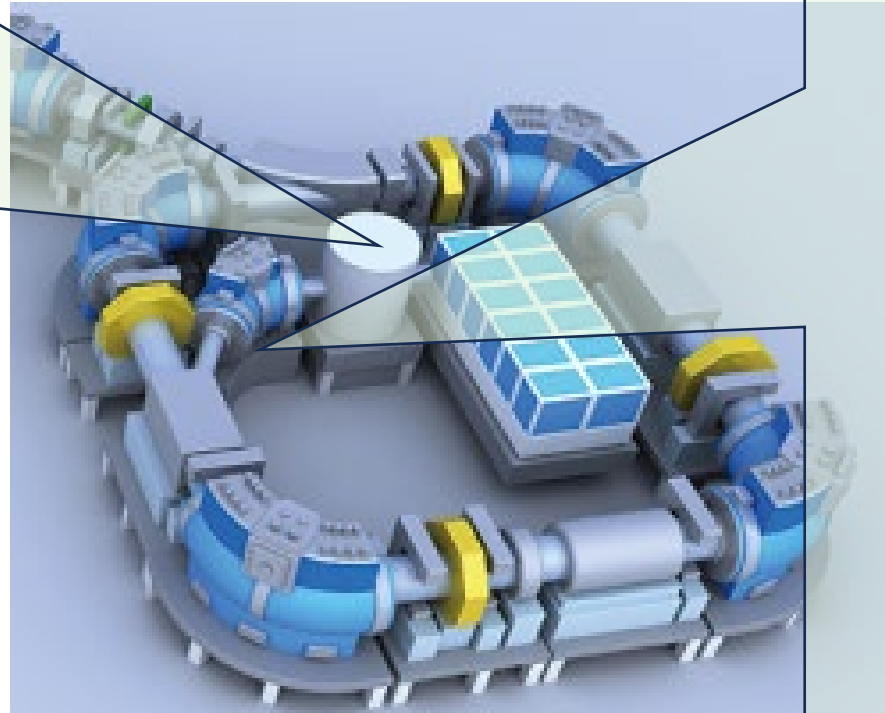


開発目標 ・ ターゲットから発生するデブリが最終光学系等に影響しない機構の開発



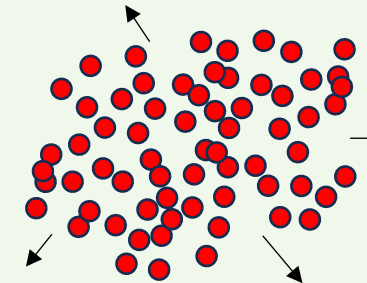
電子雲をまとった  
高密度プラズマ  
(電気的中和状態)

イオンビーム  
進行方向



プラズマ中の電子が磁場  
にて取り去られること  
による急激な正電荷ビーム  
状態での空間電荷効果に  
よる斥力の影響

磁石

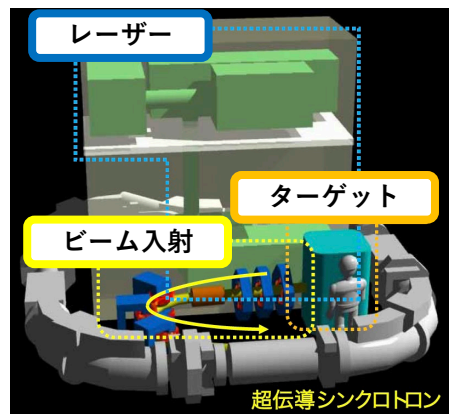
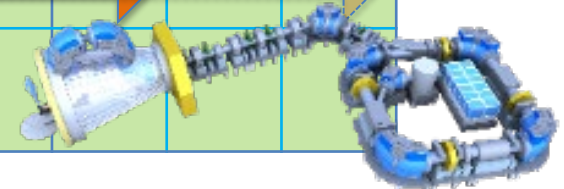
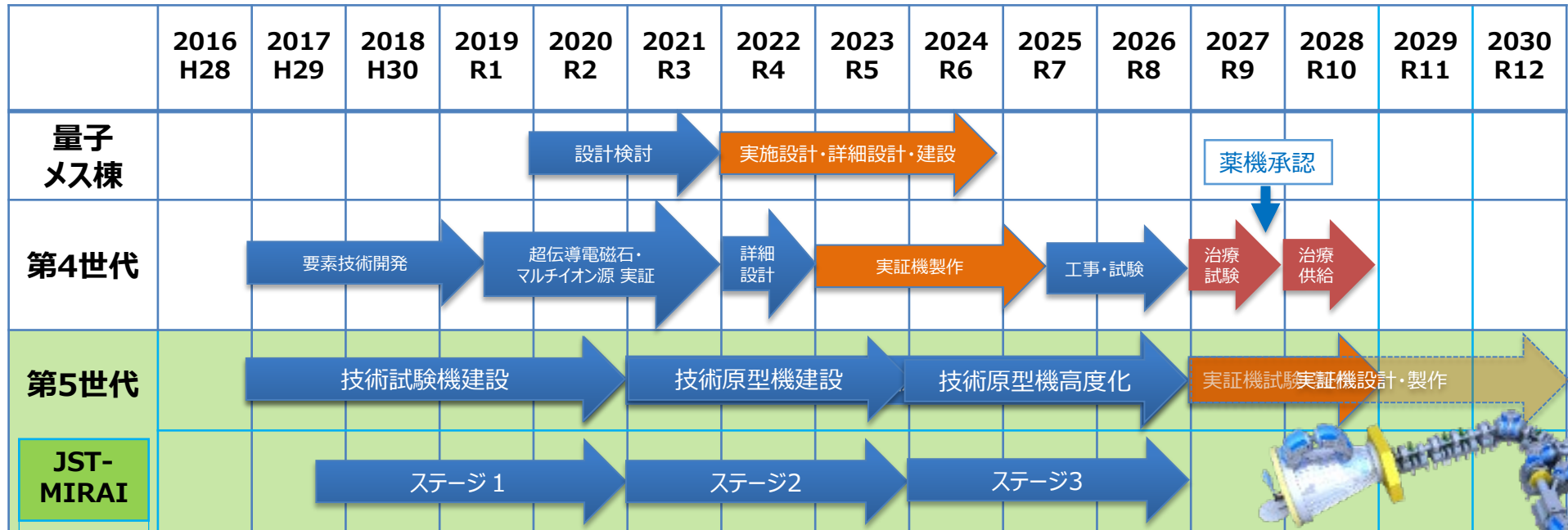


イオンビーム  
進行方向

磁石

レーザー加速部⇒イオン輸送部  
ビームが進むにつれて、空間電荷効果が過渡的に変化

- 開発目標：
- ・十分な捕集（電子をまとったイオンビーム）と伝送（空間電荷効果）
  - ・位相回転によるバンチ圧縮で10%バンド幅を1%バンド幅に圧縮

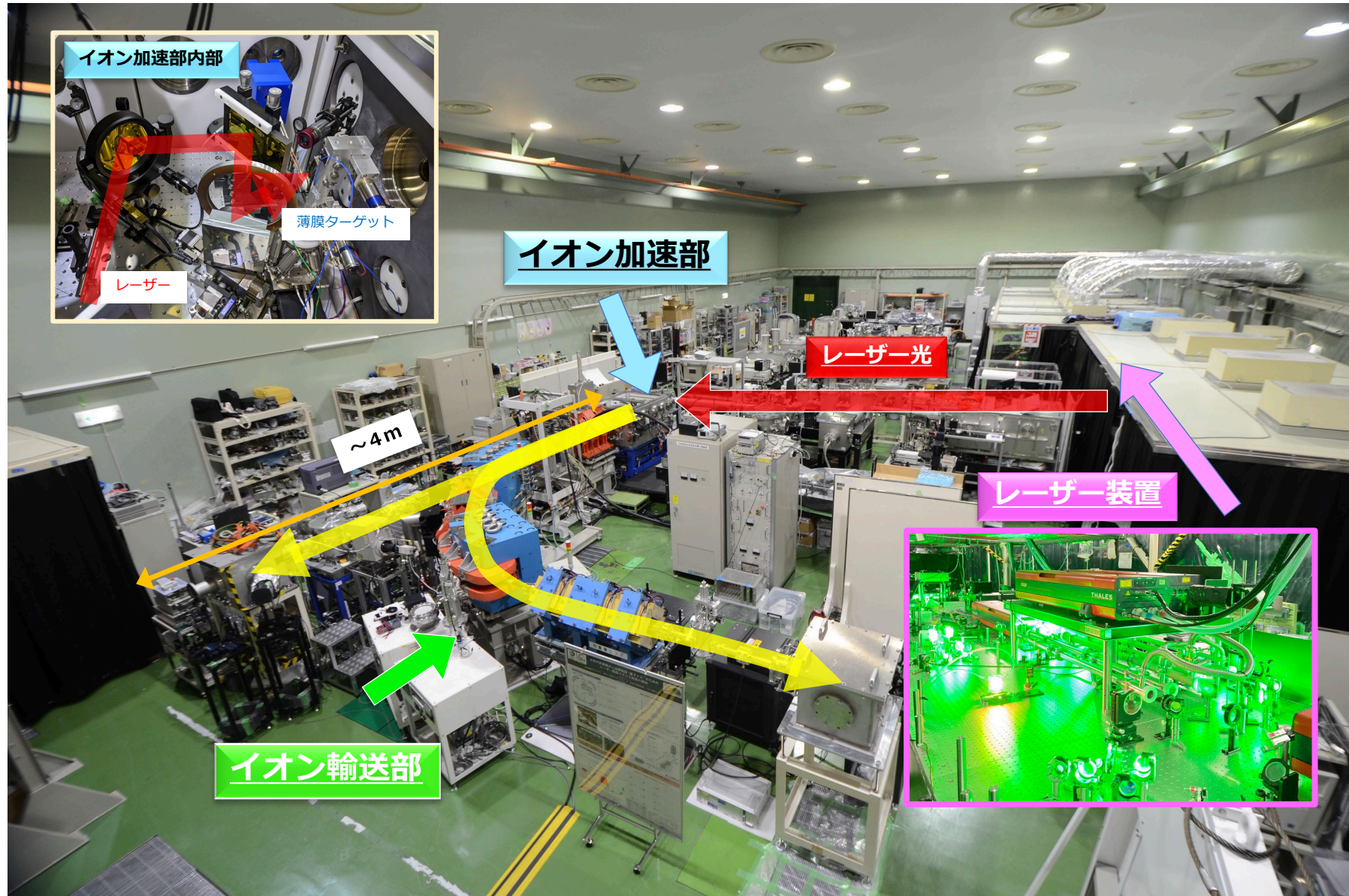


	コミットメント			コミットメント			
レーザー	高コントラストフロントエンド開発	イオン加速用2 J/40 fs@10 Hz	デモと電流試算に必要なスペックへ高度化	統合実験と入射設計	X J@10 Hz以上に高度化	実証機製作のための運転供給	実証機による実証実験
ターゲット (カナデビア)	高純度炭素発生 of 工夫 10 Hzデモ	10 Hzで高純度炭素発生可能なターゲット	IH加熱型ターゲットの改良		高繰り返し高純度実現		
ビーム入射・モニター (住友重機)	既存装置による10 keV/u 輸送デモ	原型機を使ったMeV/u級輸送デモ	原型機データによる計算コード最適化		実証機用ビーム入射ラインの設計・制作		

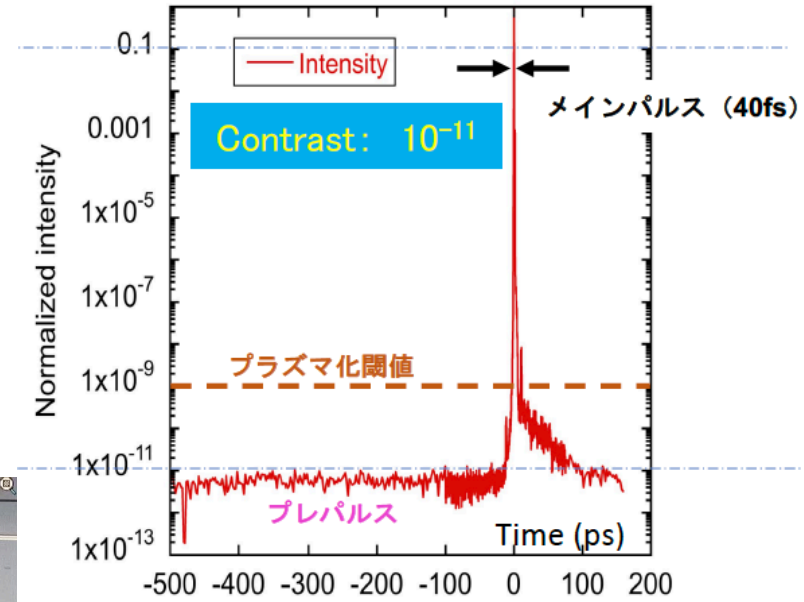
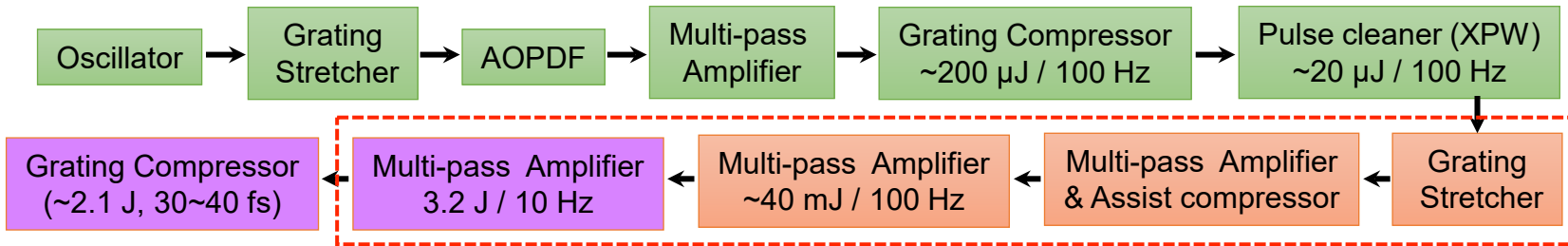
点線部分は予算獲得を前提とした検討

技術目標：4 MeV/uの炭素を1%バンド幅あたり10<sup>8</sup>個/pulse、10 Hzで99%以上の高純度で入射できる

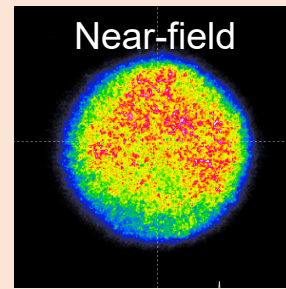
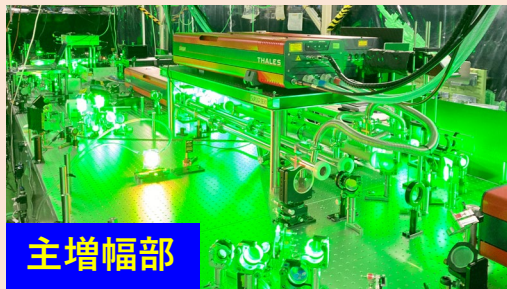
- ✓ 極短パルス高ピーク出力レーザーを使ったプラズマによるイオン加速について
- ✓ 加速装置にするための技術的課題と開発目標
- ✓ **レーザー加速入射器開発の現状**
- ✓ 今後の取り組み



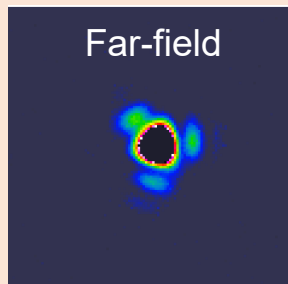
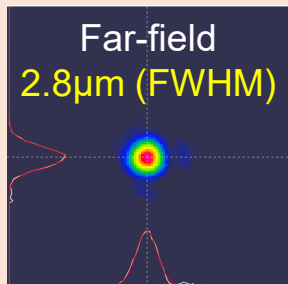
T. H. Dinh, et al., "Highly Stable and Efficient Spatiotemporal Filtering in Cross-Polarized Wave Generation via Nonlinearity Tailoring in Multi-Plate Crystals", Opt. Express 33 21318 (2025)



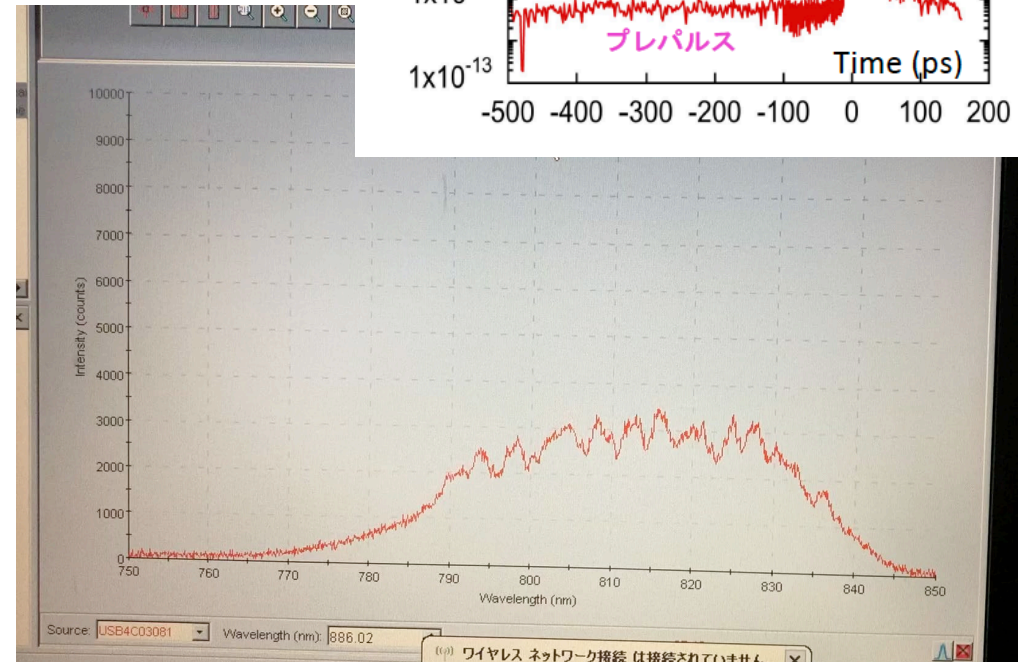
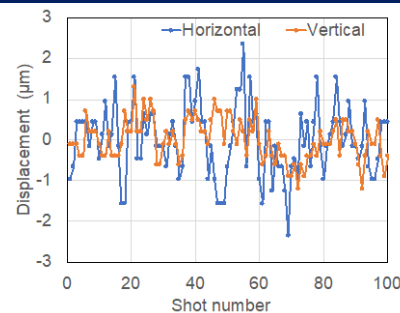
## ~3.2J/10Hz 主増幅部 (励起レーザー: 6ビーム・計7.3J)

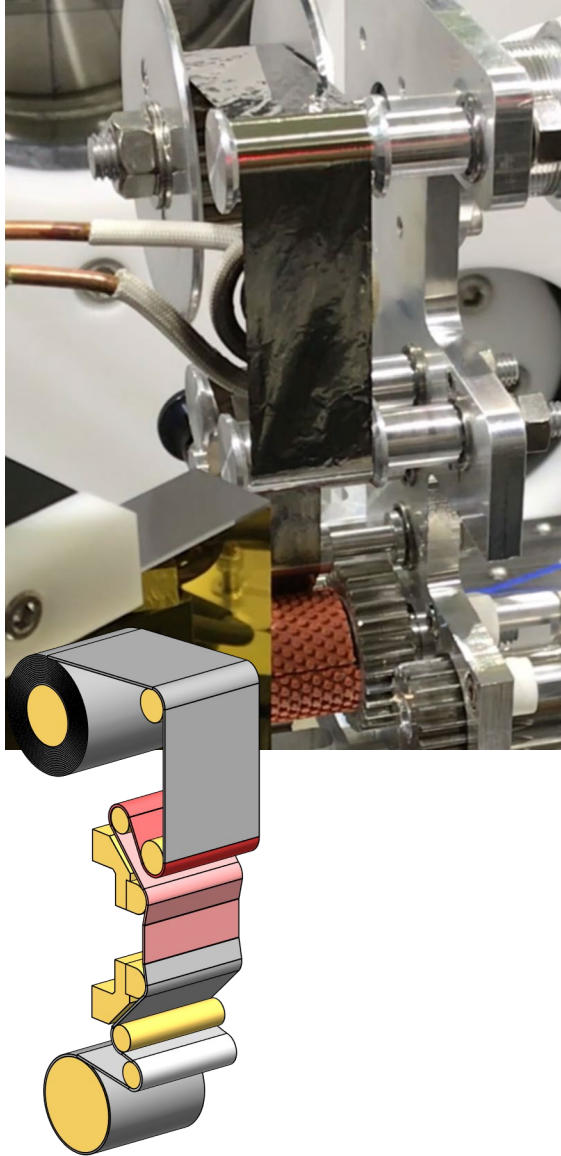


## 集光性能 (F#2.8 OAP)



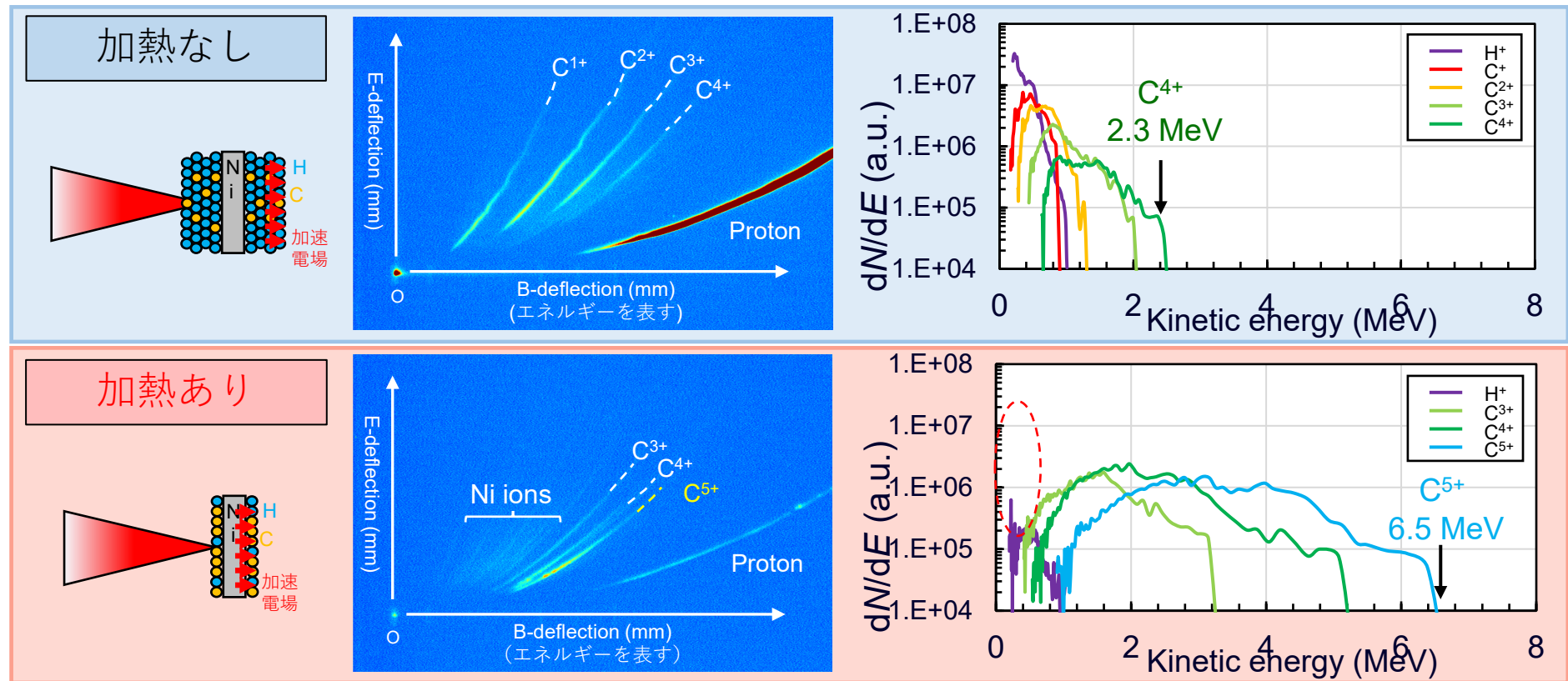
## 集光位置の安定性(2σ<1.8μm)





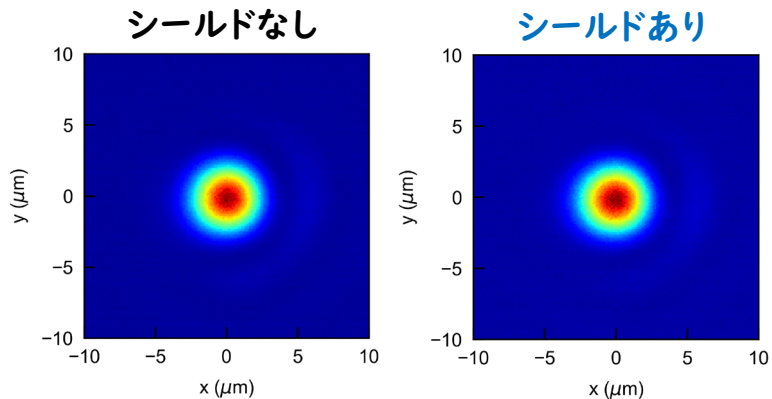
250°C以上に加熱することでプロトン加速が抑制され、  
炭素イオンが効率的に加速

標的表面に吸着された水分子層を除去が可能



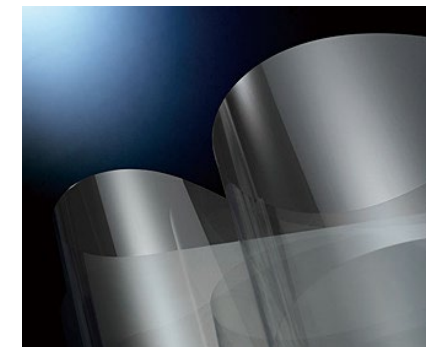
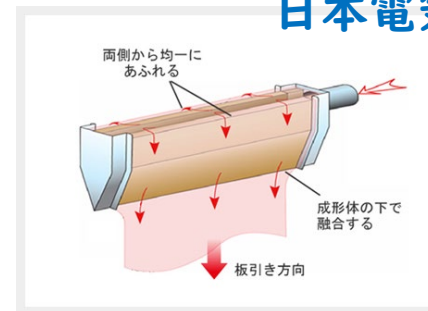
S. Kojima, et al., Matter and Radiation at Extremes 8, 054002 (2023)

## レーザー集光スポット

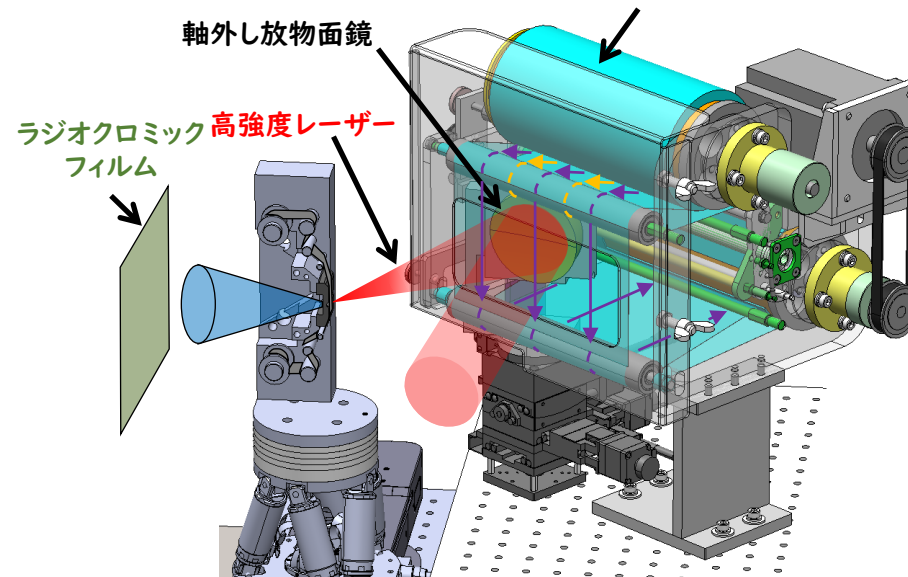


デブリシールドを通過後も  
レーザースポットに変化なし  
⇒透過波面精度がよい

## 日本電気硝子製の超薄板ガラス



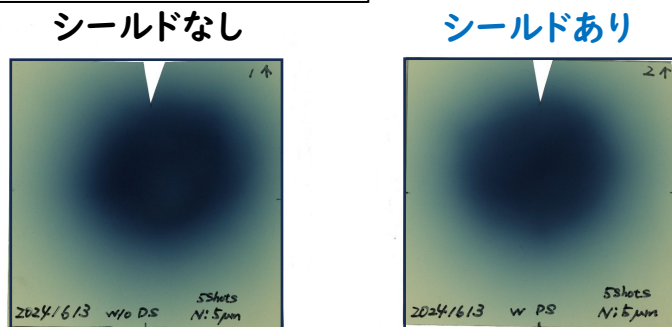
## 超薄ガラスデブリシールド (50 μm X 20m)



約2000ショット後のデブリシールド  
(10Hz換算で約3分)

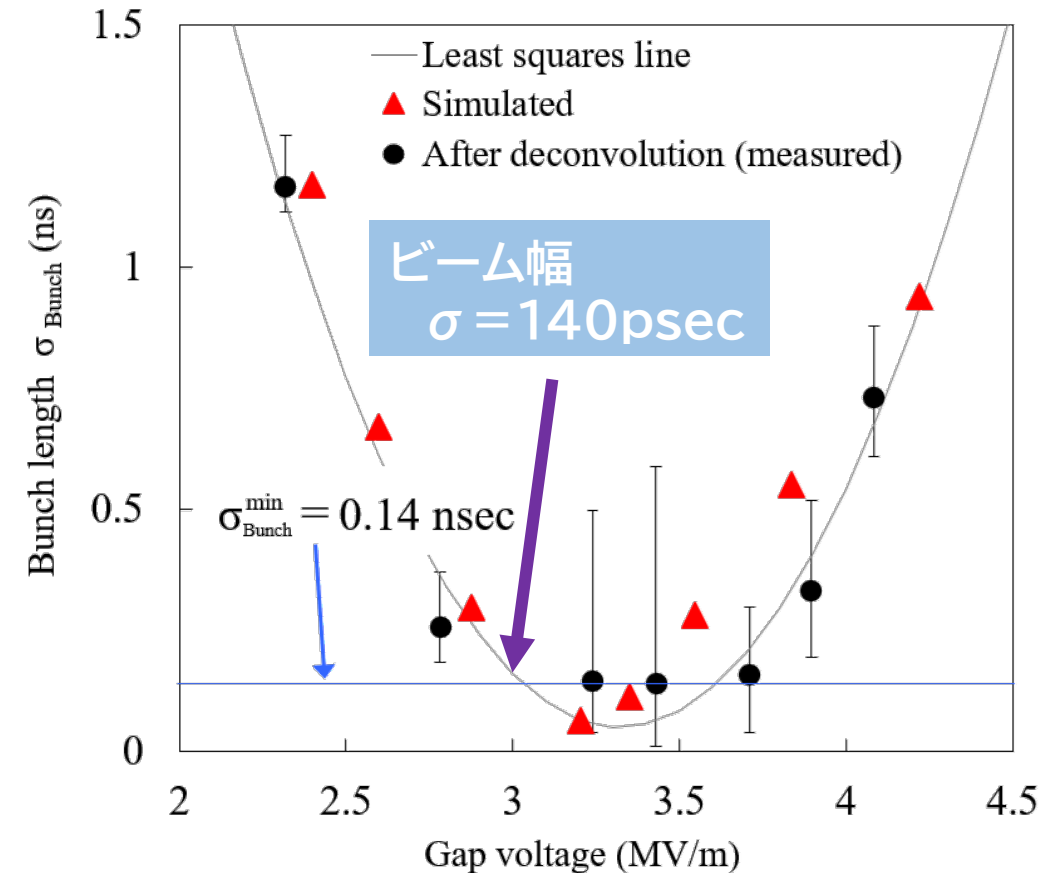
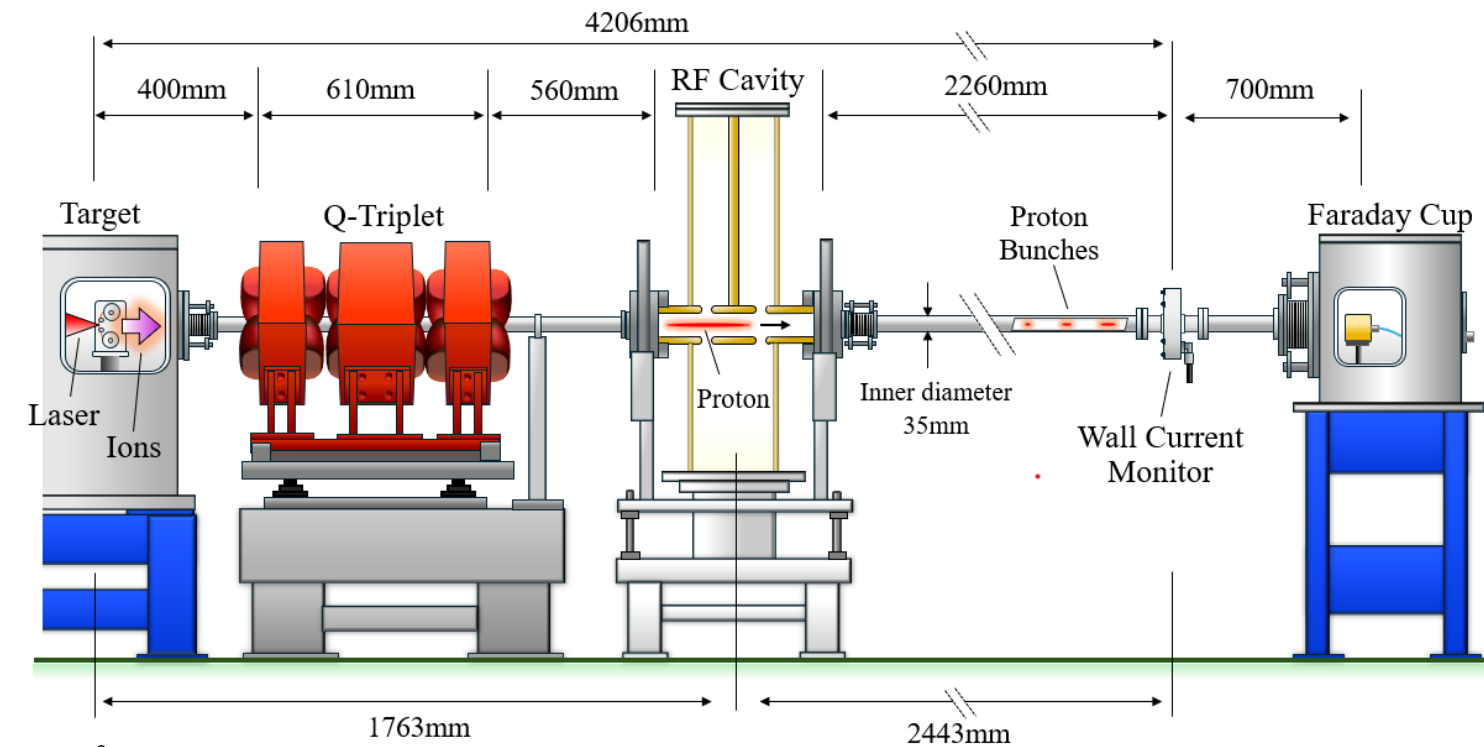
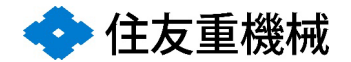


## イオンビームの形状



デブリシールドを通過後も、均一な分布のイオンが加速された

## 位相回転空洞によるイオンビームの短バンチ化およびエネルギー制御



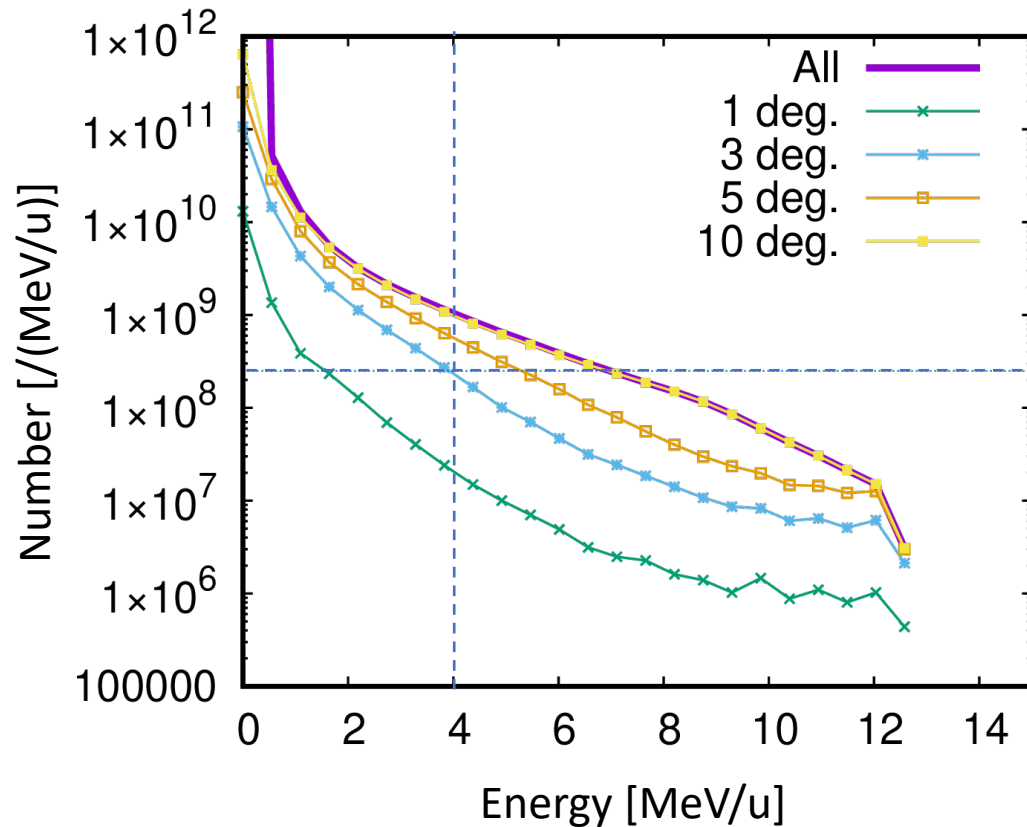
プレスリリース

「がん治療装置の普及を促進する『量子メス』に必要なイオン数の達成に見通し〜レーザー光で加速したイオン速度を整えて個数を10倍増やす！ 産業応用にも期待〜」、

榊泰直、小島完興、2025年9月27日

陽子1.5MeVバンチ  
 $dE = \pm 0.76 \sim 2.3\%$   
 イオン個数  $> 4 \times 10^7$  個/バンチ/1%bw

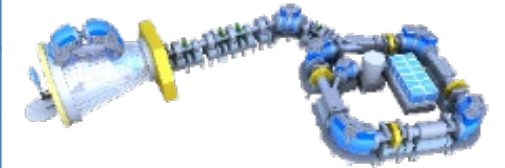
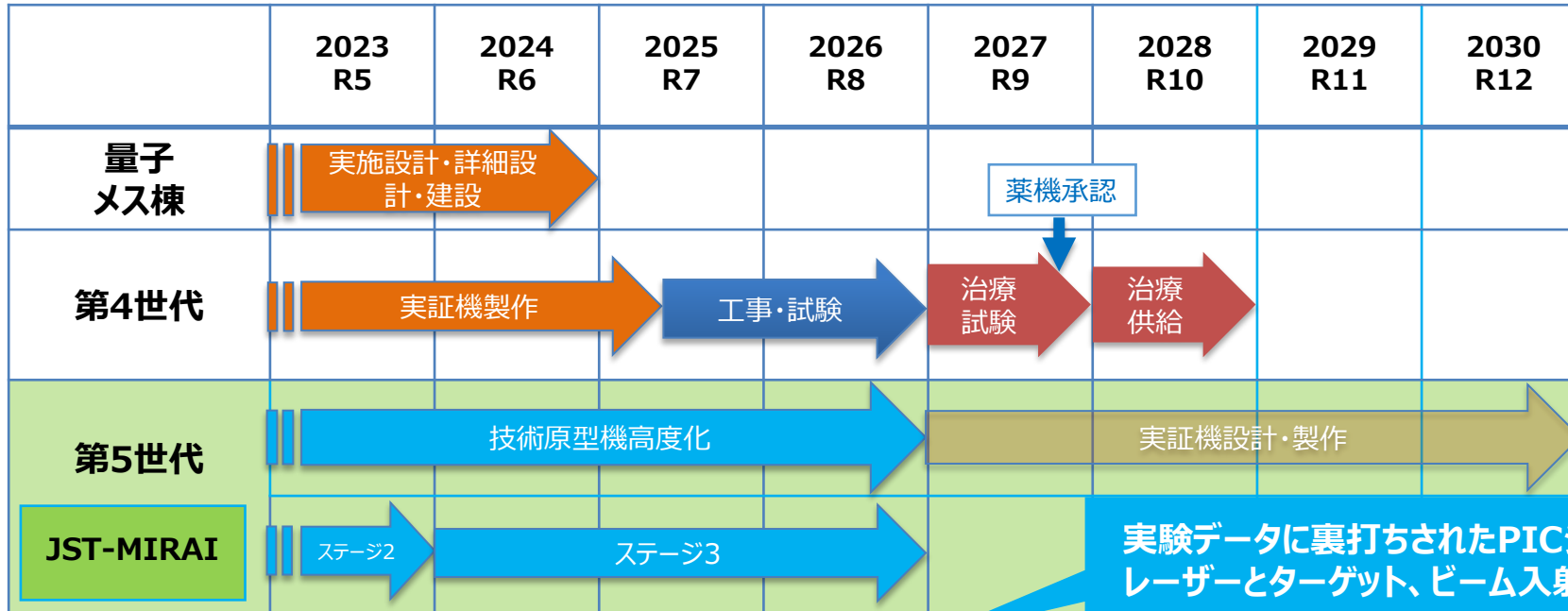
Laser cond.  $\lambda_L = 1000 \text{ nm}, a_0 = 10, t_L = 15T_L = 50 \text{ fs}, r_L = 3.0\lambda_L = 3.0 \text{ }\mu\text{m}, E_L = 2968 \text{ mJ}$   
 Target cond.  $\text{C}^{6+}, n_e = 60n_{cr}, d_{thick} = \lambda_L (d_{eff} = 2.7\lambda_L), L_{pre} = \lambda_L$   
 Other cond.  $1500 * 1920 * 1920 \text{ cells}, \lambda_L = 50 \text{ cells}, (2 + 12) \text{ particles/cell}, \text{Periodic in YZ, abs. in X}, 600 \text{ fs}$



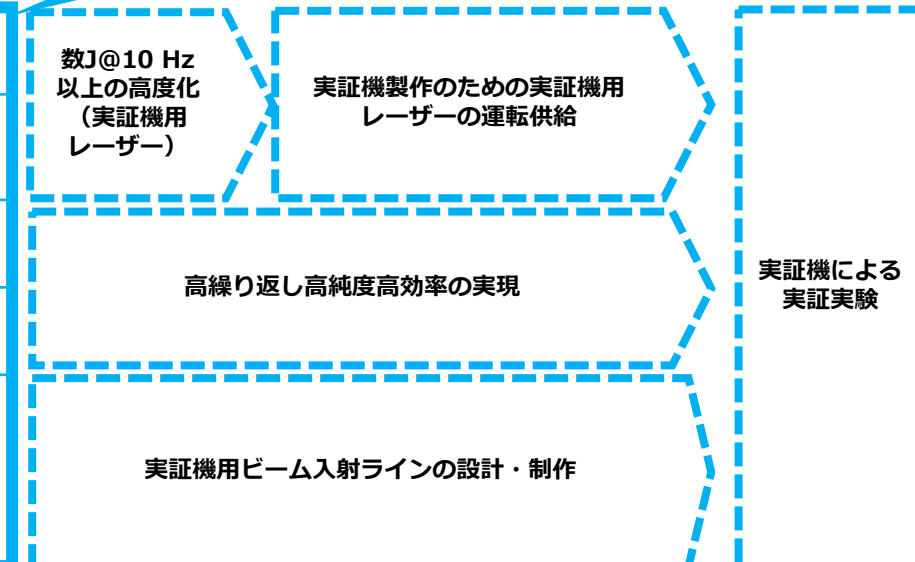
- 3 J級レーザーで  $a_0 = 10$  を達成すれば、標的としてミクロン厚の炭素薄膜を採用することで、半角3度の捕集角で量子メス入射器の要求をクリアすることができる。

- ✓ 極短パルス高ピーク出力レーザーを使ったプラズマによるイオン加速について
- ✓ 加速装置にするための技術的課題と開発目標
- ✓ レーザー加速入射器開発の現状
- ✓ **今後の取り組み**

# 今後の計画：ロードマップ



レーザー	1J@10Hzの供給	2J@10 Hz安定動作への高度化	2J@10Hzの供給	2J@10Hzの供給
	2 J@10 Hz安定動作の検討		実証機用レーザーの検討	実証機用レーザー開発着手
ターゲット(カナデビア)	ガラス薄膜テープ型デブリシールドの検討	IH加熱型の改良	IH加熱型の改良	IH加熱型の稼働
		デブリシールド着手	デブリシールド開発	デブリシールド稼働
ビーム入射・モニター(住友重機)	Q磁石、偏向磁、位相回転空洞の設置、稼働	原型機でのデータ収集、コード作成	データ収集、コード最適化	実験と計算による実証機的设计
		チョッパー着手	チョッパー開発	



点線部分は予算獲得を前提とした検討

- 第5世代量子メス実現に向けた取り組みの継続
- 国産の高出力レーザー技術確立を目指した取り組み  
→ 核融合ベンチャー等との協力の検討
- レーザー駆動イオン加速特有の短バンチ特性を積極的に生かした取り組み  
→ 原子力材料の評価や半導体検査、新物質合成、FLASH効果など