レーザープラズマによる イオン加速技術の開発

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構
近藤 公伯

令和４年６月７日
「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1回シンポジウム
– レーザー駆動イオン加速システムの開発 –

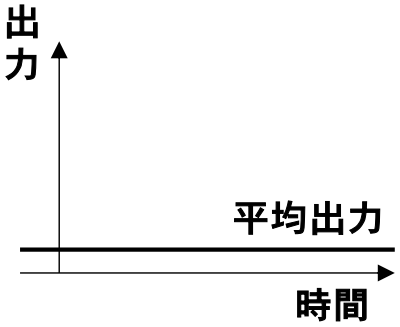
内容

- ✓ 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
- ✓ 量子メス開発へ向けた未来社会創造事業での取り組み POC (Proof of concept)
- ✓ 開発の現状
- ✓ 今後の取り組み

レーザーで極端に高いパワーを発生

✓ 高出力レーザー

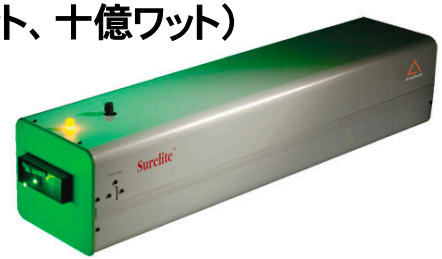
レーザー加工機

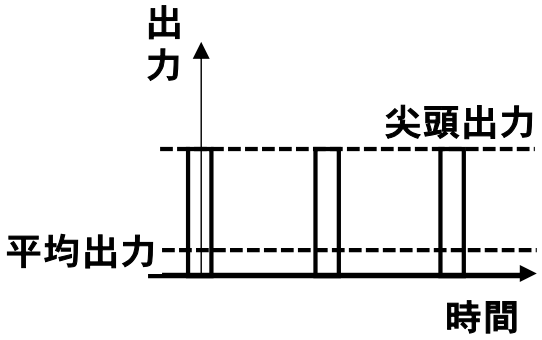


✓ パルスレーザー

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

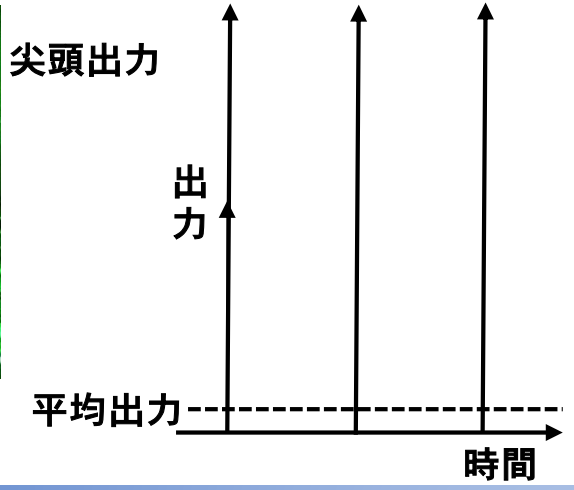
メガワット、ギガワット
（百万ワット、十億ワット）



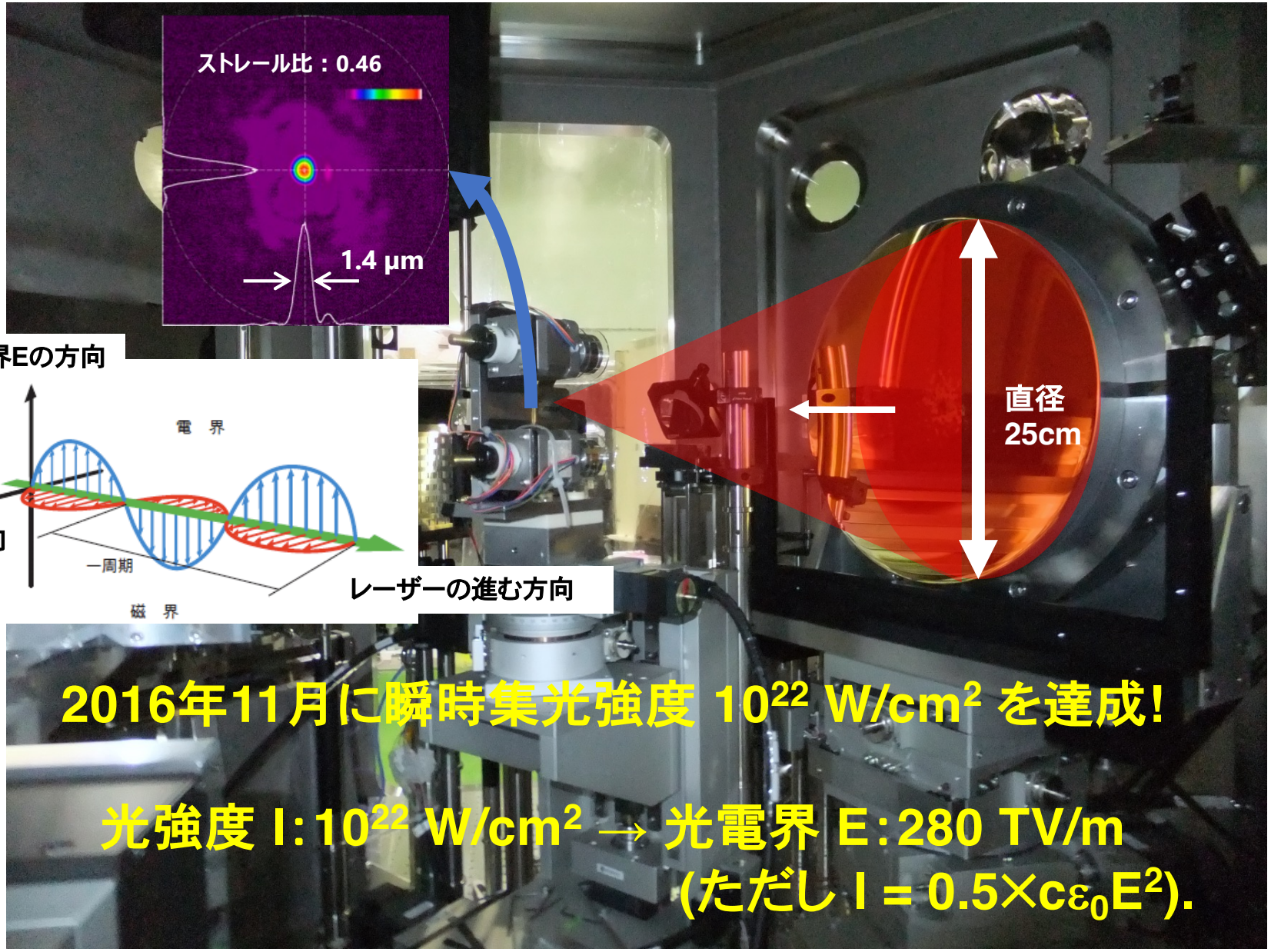


✓ <u>極短パルス高出力レーザー</u>

ピコ秒、フェムト秒
尖頭出力はマイクロ秒のそれの
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



極限サイズまで絞り込んで高強度を

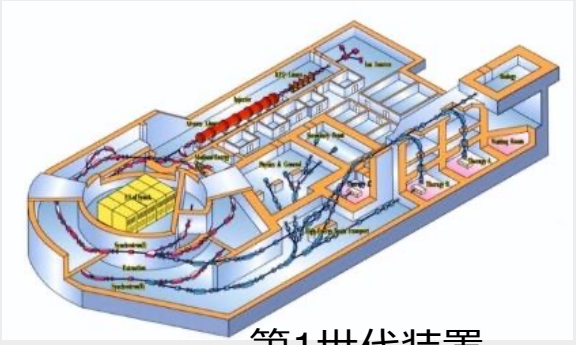


JST MIRAI 未来社会創造事業

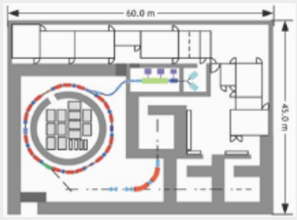
量子メス開発プロジェクト

QST

重粒子線がん治療装置

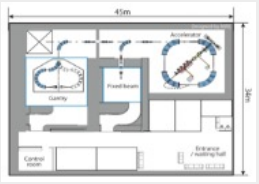


第1世代装置
1994年 放医研
120 x 65m、320億円

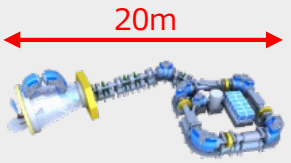


第2~3世代装置
(例：2010年群馬大学)
60 x 45m、140億円
(1/3程度)

量子メス



第4世代装置
より小型化と高性能化
45x34m (1/6程度)
超伝導シンクロトロン
マルチイオン照射



第5世代装置
さらなる小型化
10x20m (1/40程度)
レーザー加速

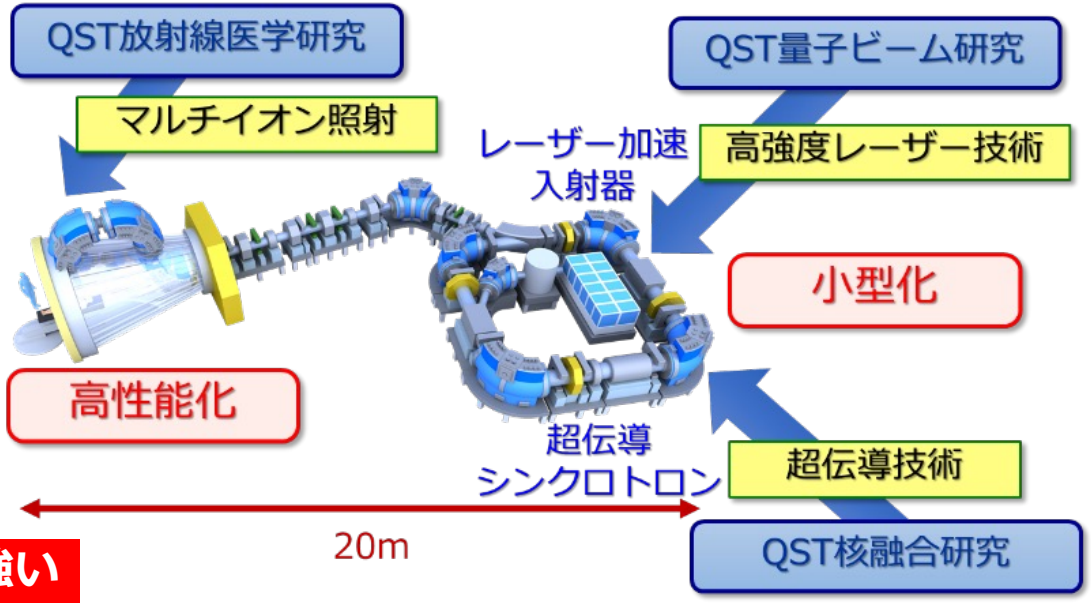
課題解決

- **装置が巨大で高額**

→超伝導技術とレーザー加速技術により、
画期的な小型化による国際的普及へ

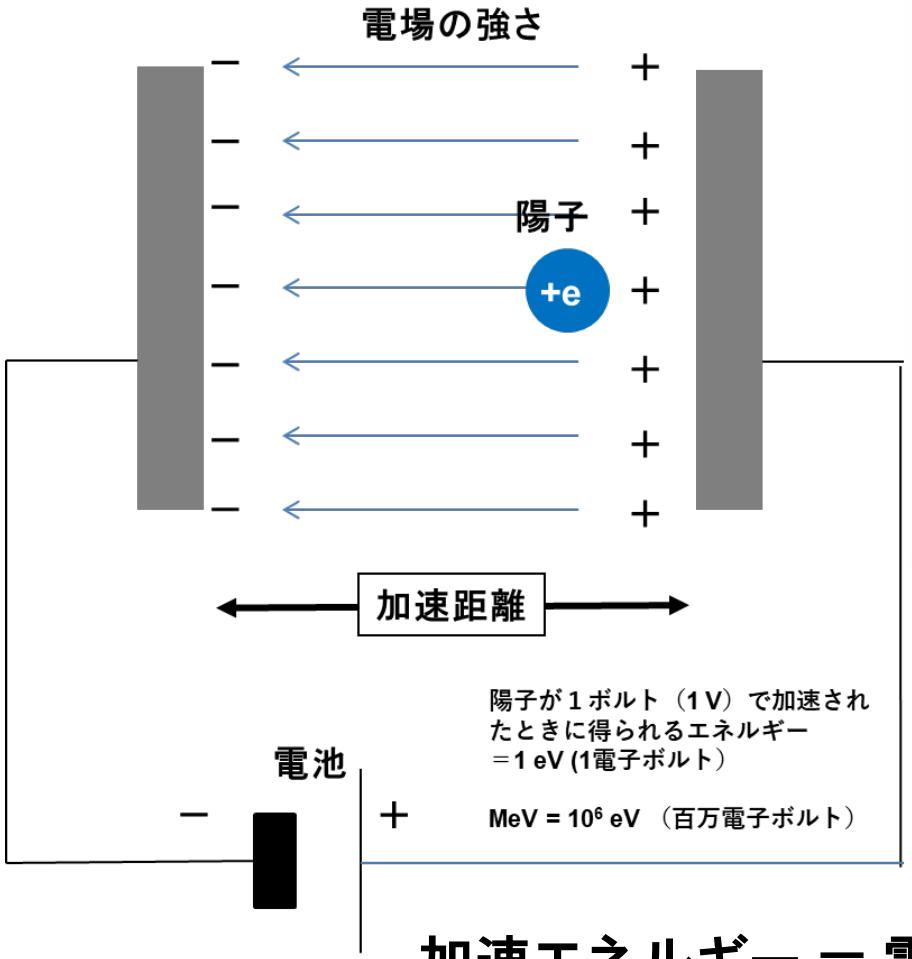
- **腫瘍によっては、除去が完璧ではない**

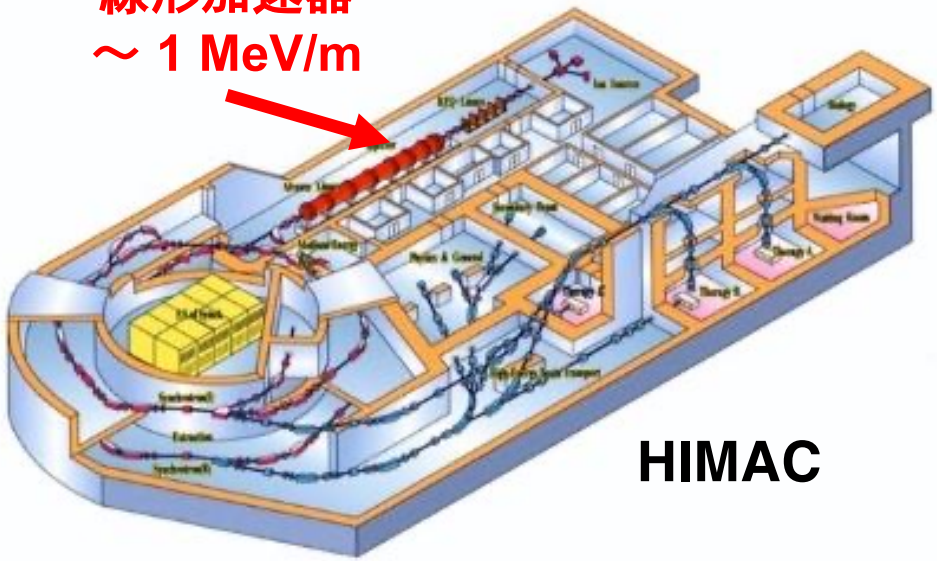
→マルチイオン照射技術により、
治療短期化に向けた高性能化を実現



量子科学技術により課題を解決し、日本の強い優位性を堅持して国際的なシェアを獲得

従来技術による加速器小型化の限界





マイクロ波管が供給できる加速電界の強さには放電限界があるため加速器は巨大化せざるを得ない

加速エネルギー ＝ 電荷量×電場（電界）の強さ×加速距離

放電限界の壁を超えるために、レーザープラズマによる加速を行う

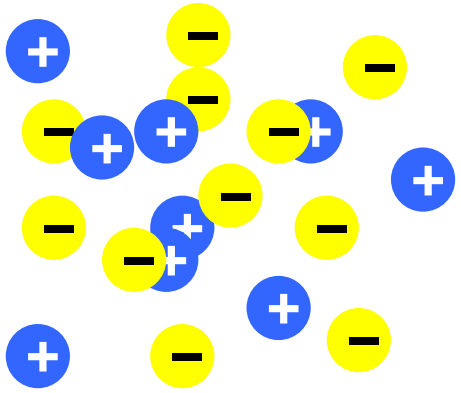
レーザープラズマ加速技術

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

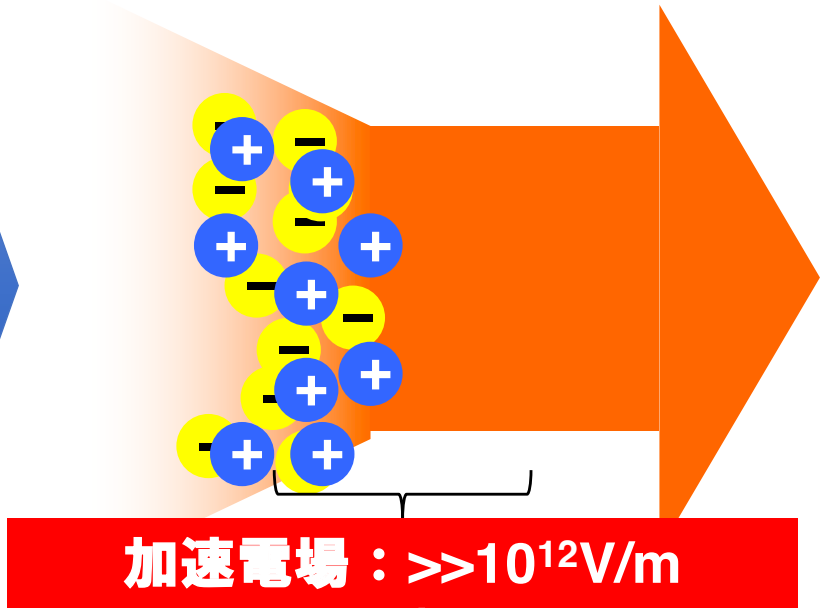
通常のプラズマ状態

電子とイオンの混合ガス



超高強度
レーザー

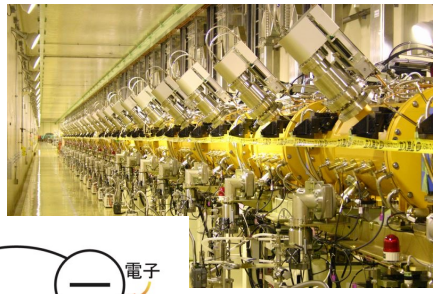
強い光で電子を押して
電荷が分離したプラズマ状態を作る

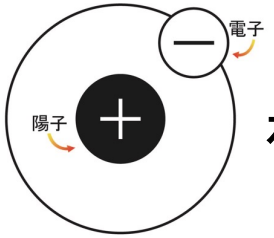


プラズマにより、放電限界を超えて、桁違いに大きな加速電場が発生できる

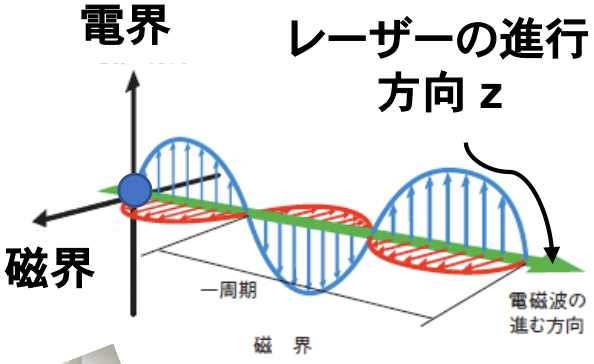
極限的レーザー強度の電界の強さ

レーザー瞬時強度 (W/cm^2)@1μm	レーザー瞬時電界 (V/m) @1μm		対応事象
1.3×10^{9}	10^{8}	一億	加速管の放電限界
3.5×10^{16}	5.1×10^{11}	五千億	電離
1.4×10^{18}	3.2×10^{12}	三兆	電子が光速に
10^{20}	2.8×10^{13}	三十兆	イオン加速用に開発するレーザー
10^{22}	2.8×10^{14}	三百兆	J-KAREN極限集光
4.6×10^{24}	5.9×10^{15}	六千兆	陽子が光速に
4.6×10^{29}	1.3×10^{18}	一百京	真空破砕





水素原子



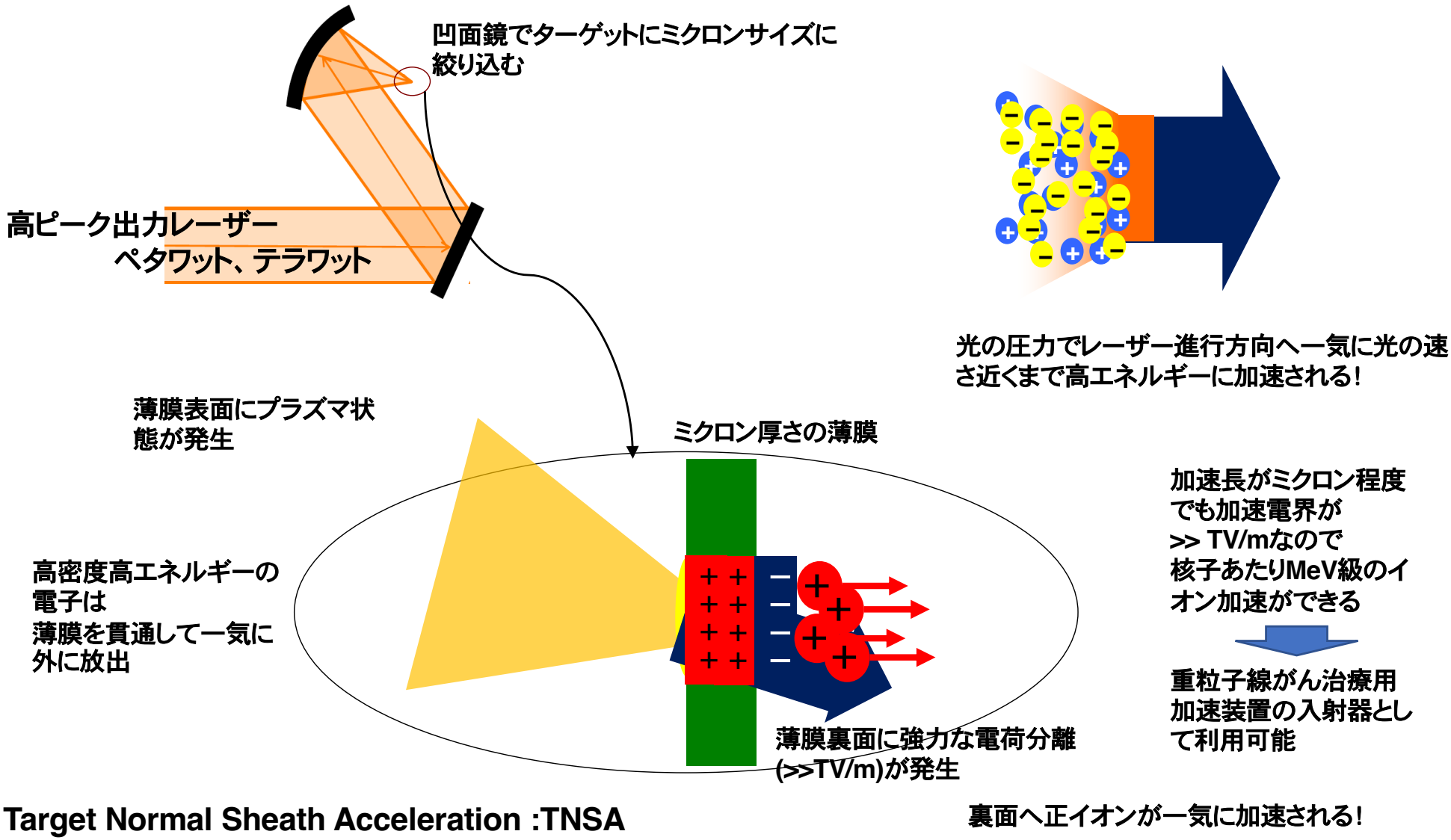
$p_z = mc(\gamma-1)$

$\gamma = (1- (v/c)^2)^{-0.5}$

陽子質量/電子質量 ～ 1800

高強度レーザーでイオンを加速できる

レーザー駆動イオン加速の原理

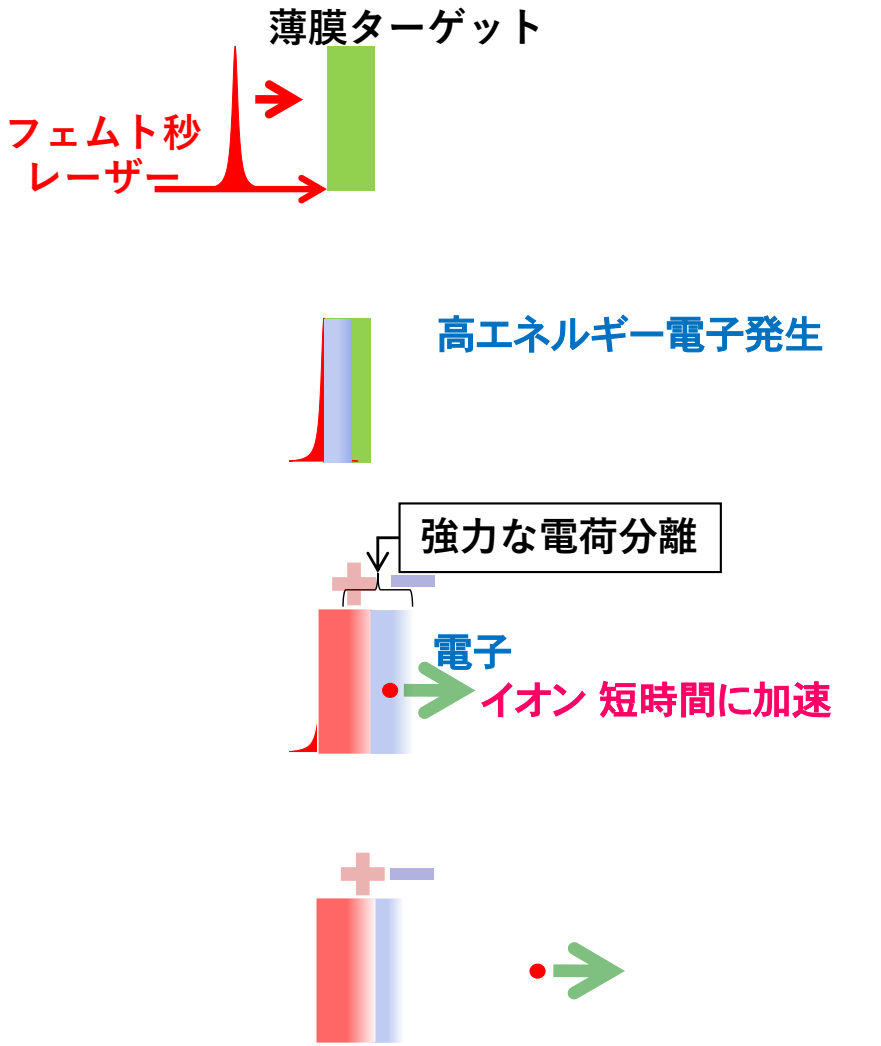


Target Normal Sheath Acceleration :TNSA

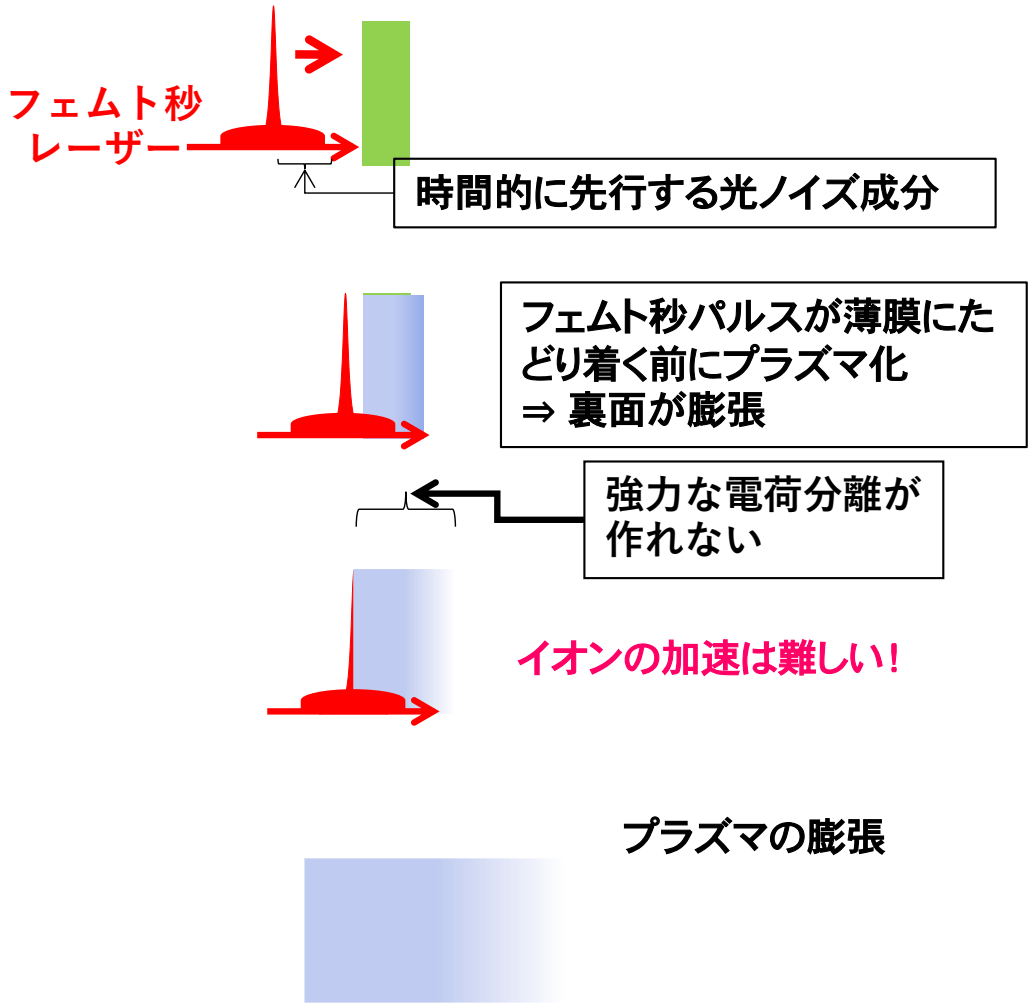
裏面へ正イオンが一気に加速される!

高品質なレーザーパルスが必要

理想的なフェムト秒パルス

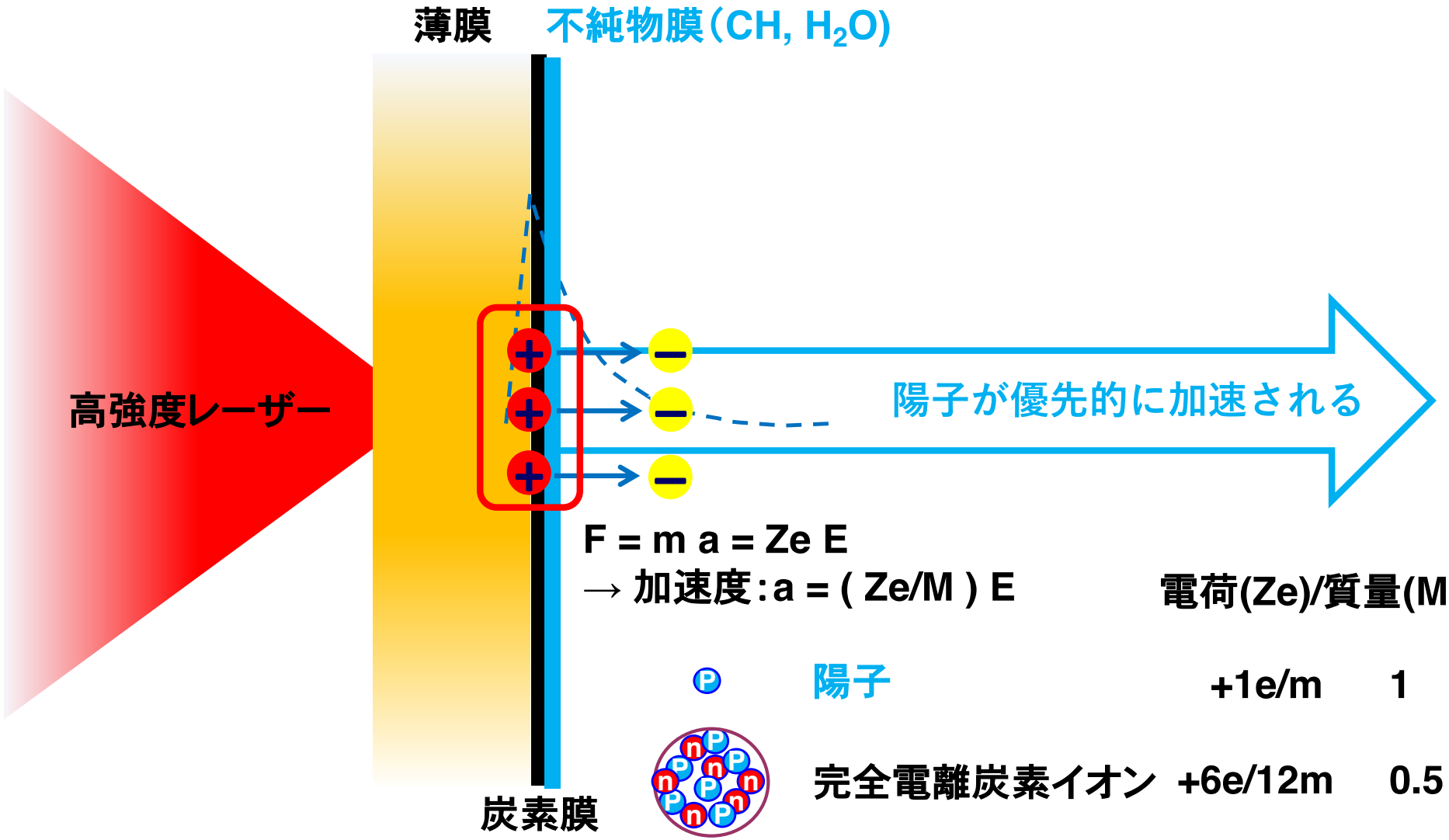


フェムト秒パルスが時間的に先行する光ノイズ成分を含む



炭素イオンより陽子が優先的に加速される

・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



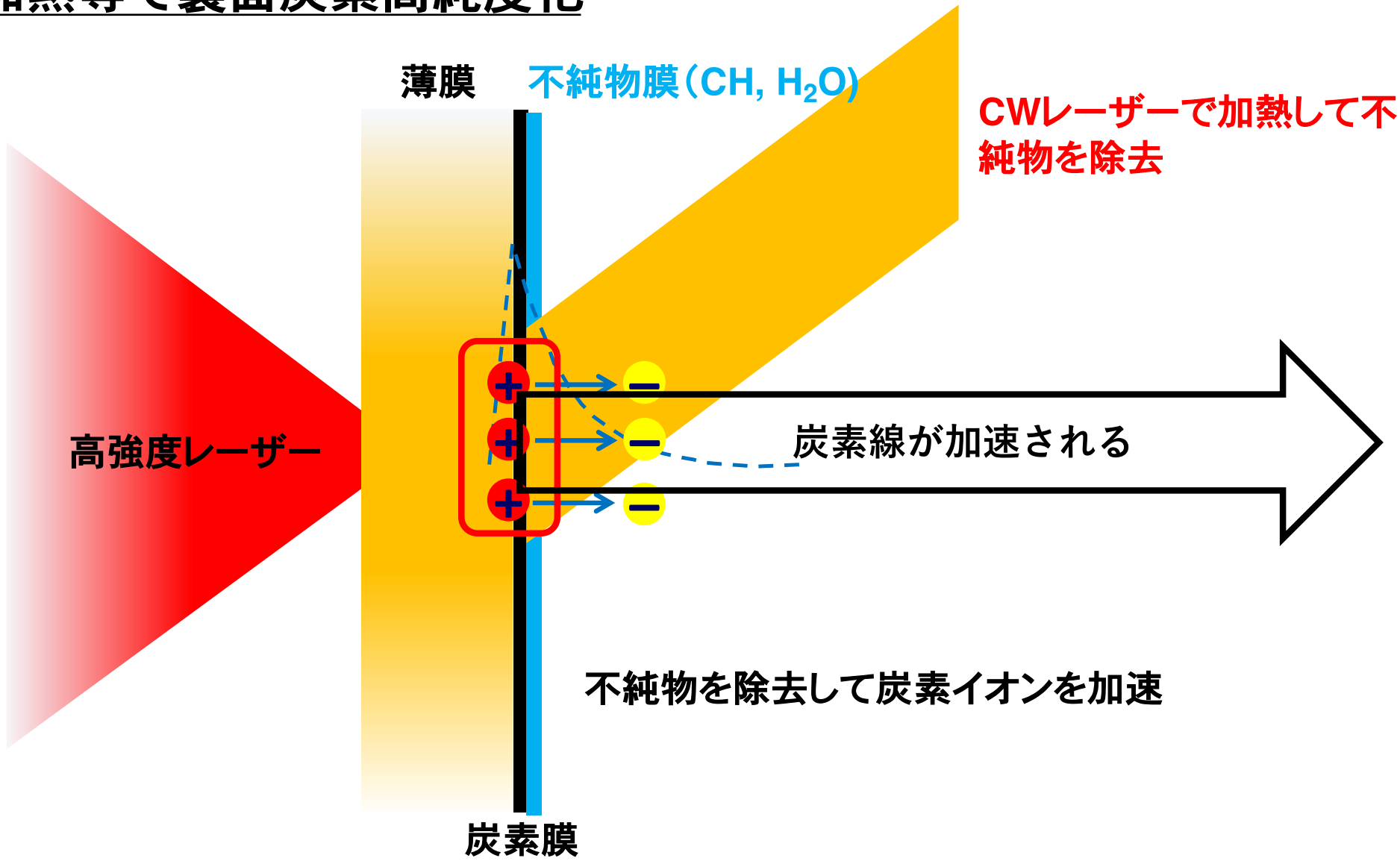
$F = m\,a = Ze\,E$

→ 加速度：$a = (Ze/M)\,E$

		電荷(Ze)/質量(M)	
P	陽子	+1e/m	1
	完全電離炭素イオン	+6e/12m	0.5

不純物を除去して炭素イオンを加速

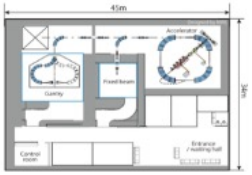
加熱等で裏面炭素高純度化



量子メス開発プロジェクト

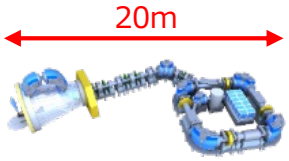
量子メス

第4世代装置
より小型化と高性能化45x34m (1/6程度)



超伝導シンクロトロン　マルチイオン照射

第5世代装置
さらなる小型　10x20m (1/40程度)



レーザー加速

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
超伝導シンクロトロン	要素技術開発				設計	治療実証機製作・試験				治療
マルチイオン照射	要素技術開発				臨床試験					
レーザー加速	技術実証機建設				技術実証機高度化					

第4世代装置の普及（2026～）

第5世代治療実証機の建設

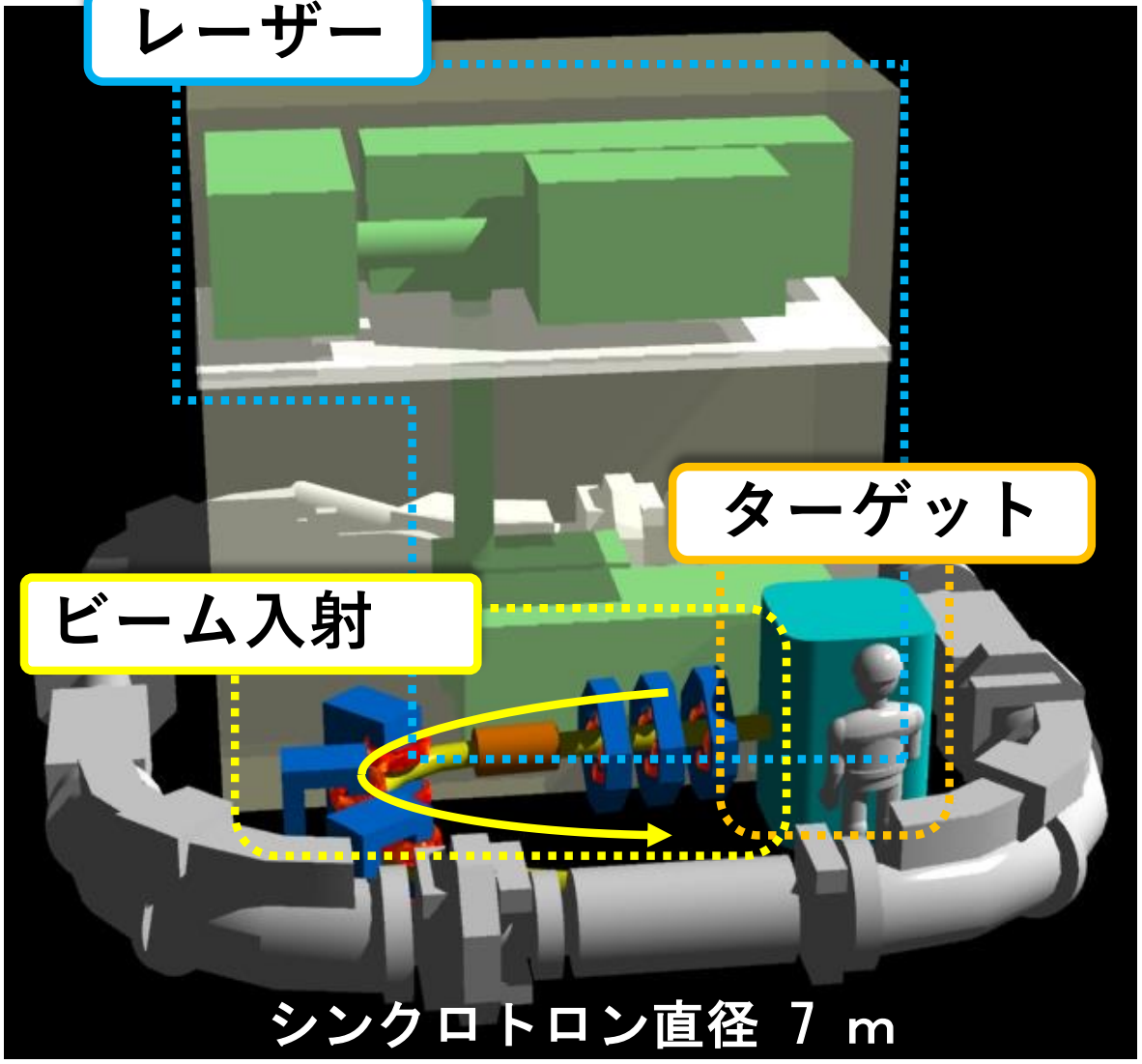
JST-MIRAI LPA　ステージ１　ステージ２　ステージ３

レーザー駆動イオン加速のPOC

レーザー駆動イオン加速技術により、核子当たり4MeV の炭素イオンをシンクロトロン加速器に1 %エネルギー幅で10^8個/パルス以上入射できること、炭素純度は99%以上、繰り返しは10Hz以上、2分間以上連続運転、レーザー駆動イオン入射器とシンクロトロンを合わせた大きさは10m×10mの病院治療室に設置できること

シンクロトロン入射可能な全体システム設計図を描けること

要素技術ごとに開発を進めて統合試験



レーザー

高品質パルス
パルスエネルギーや繰り返し etc.

ターゲット

高純度炭素が繰り返し供給できる
真空度、デブリ対策 etc.

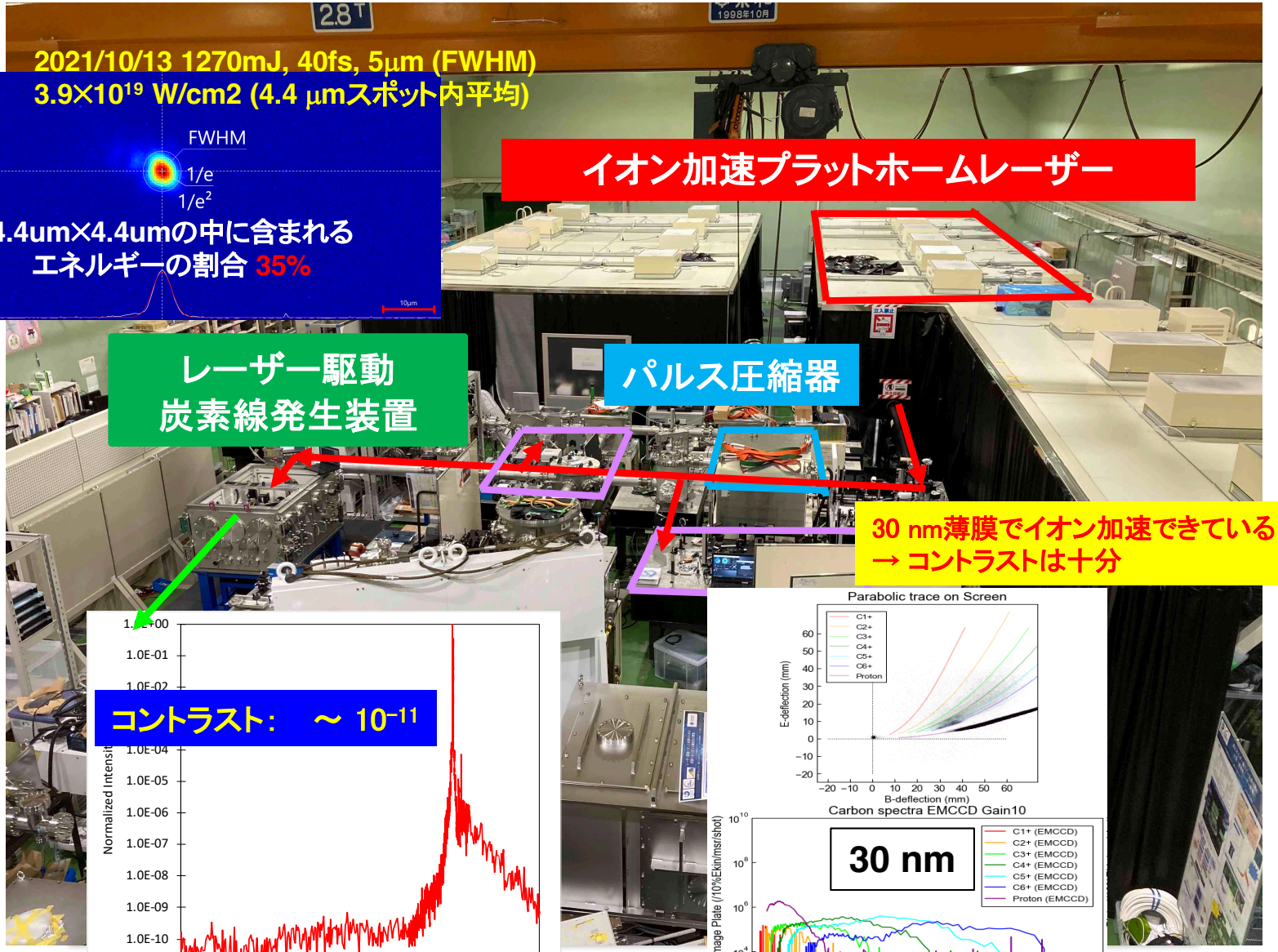
ビーム入射

有限立体角成分の捕集と伝送
バンチ圧縮（位相回転）
真空度、入射評価 etc.

相互作用（レーザーと薄膜プラズマの相互作用物理）

必要なレーザーのスペック ターゲットや周辺 炭素ビーム発生特性

イオン加速プラットホームを整備し高度化



By T. Dinh, S. Kojima et al.

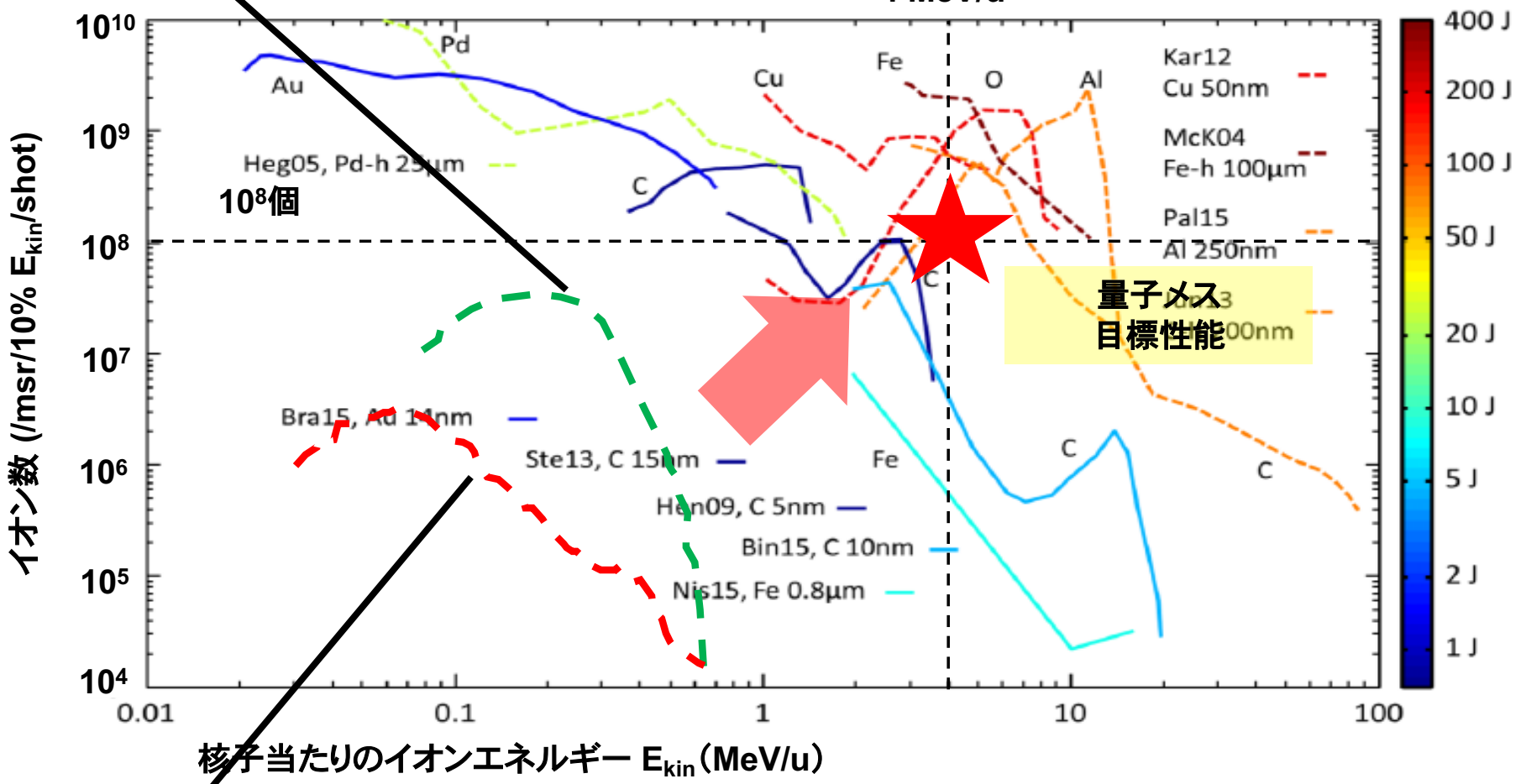
小型高出力レーザーで十分な炭素線を発生を目指す

C^{4+}イオン

J.Schreiber *et al.*
Review of Scientific Instruments 87, 071101 (2016)

4 MeV/u

炭化ポリイミド標的
（ QST 2020 ）



量子メス
目標性能

Ni基板+多層グラフェン
（ QST 2020 ）

量子メスプロジェクトの目標性能にイオン数（縦軸）が3倍、
エネルギー（横軸）が6倍で達成可能な領域に到達した。

今後の取り組み

JST-MIRAI LPA	2017-2020 ステージ１	2021-2023 ステージ２	2024-2026 ステージ３	
レーザー	高コントラストフロントエンド	高コントラスト1 J/40 fs@10 Hz	高度化	統合実験
ターゲット （日立造船）	高純度炭素発生の工夫 10 Hzデモ	10 Hzで高純度炭素発生可能なターゲット	高度化	
相互作用	イオン加速PFJ-KAREN 3D PIC	MeV/u級炭素線の発生	高効率化	
ビーム入射・モニター （住友重機）	10 keV/u輸送デモ	MeV/u級輸送デモ	高度化	

シンクロトロン入射可能な全体システム設計図を描けること

まとめ

- 極短パルス高ピーク出力レーザーを用いることで薄膜を利用して量子メスの入射器に資する炭素線が原理的に発生できることを示した。
- 未来社会創造事業の大規模プロジェクト型LPAの一つとして2026年度の最終年度にPOCを達成すべく、研究開発を進めている。
- 現在のステージ２では、核子あたりMeV級の炭素イオンを発生し、有限立体角分の診断をするためにレーザー、ターゲット、ビーム入射とモニターの開発を進めている。
- 相互作用実験の結果、イオン加速プラットホームレーザーのさらなる高度化が必要なので対応を検討中。