

レーザー駆動イオン加速器の開発成果

量子科学技術研究開発機構 関西光量子科学研究所

近藤 公伯

「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」 2023年度シンポジウム

開催日 : 2023/08/02 場所 : 科学技術振興機構 東京本部別館

PI: 近藤 公伯 サブPI: 白井 敏之

A) QST関西研

榊 泰直、小島 完興、宮武 立彦 (九州大学)、松本悠椰 (九州大学)、
森 道昭、Thanh Hung Dinh、長谷川 登、岡田 大、近藤 修司、石野 雅彦、錦野 将元、
西内 満美子、福田 祐仁、近藤 康太郎、今 亮、神門 正城、
宮坂 泰弘、桐山 博光、
畑 昌育、守田 利昌、James Koga、Timur Esirkepov

B) QST量医研

岩田 佳之、水島 康太、野田 悦夫

C) 京大化研

時田茂樹、橋田 昌樹、阪部 周二

D) 東海大学総合科学技術研究所

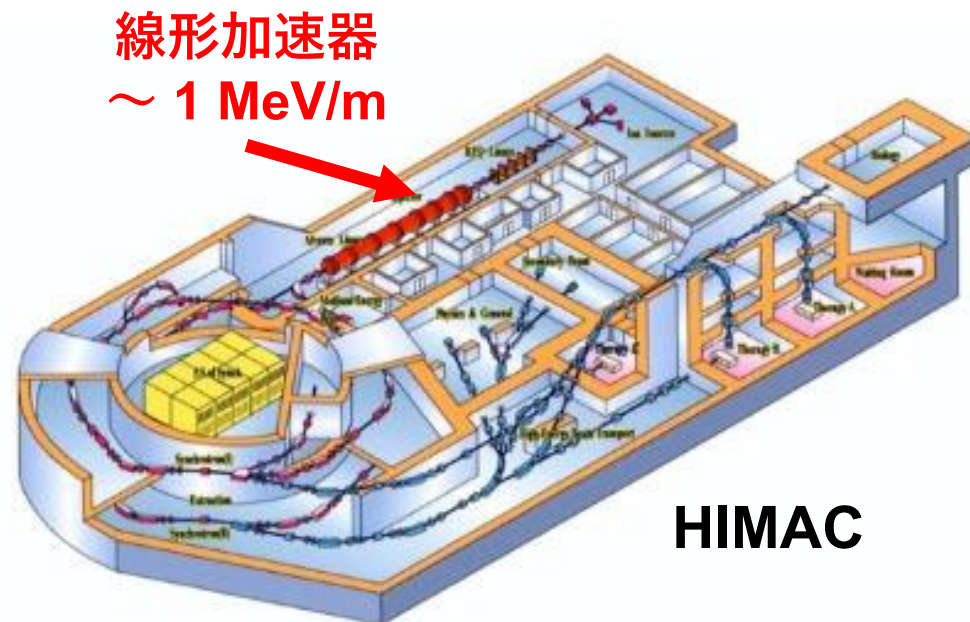
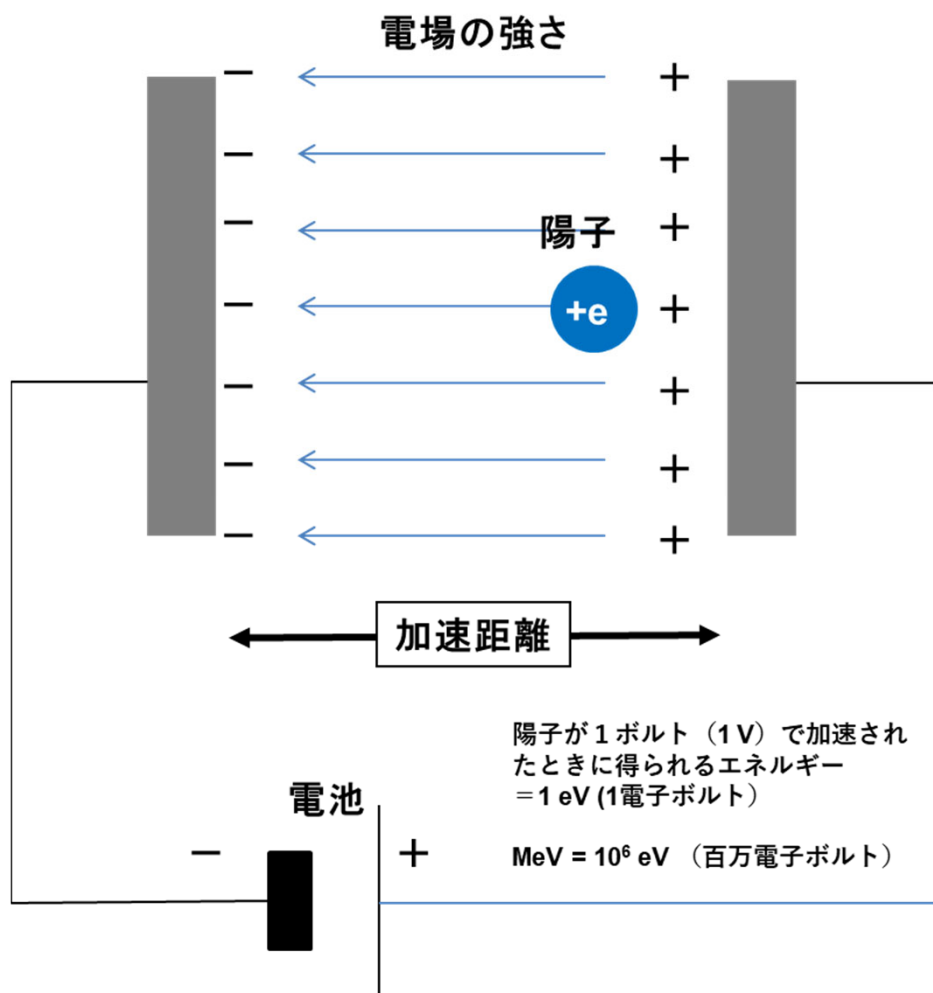
橋田 昌樹

E) 民間企業

住友重機械工業(株)、日立造船(株)

- ✓ 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

- ✓ 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



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

$$\text{加速エネルギー} = \text{電荷量} \times \text{電場 (電界) の強さ} \times \text{加速距離}$$

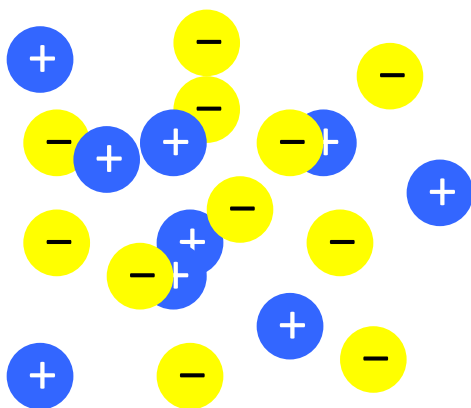
放電限界の壁を超えるために、レーザープラズマによる加速を行う

放電限界の壁 \sim 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

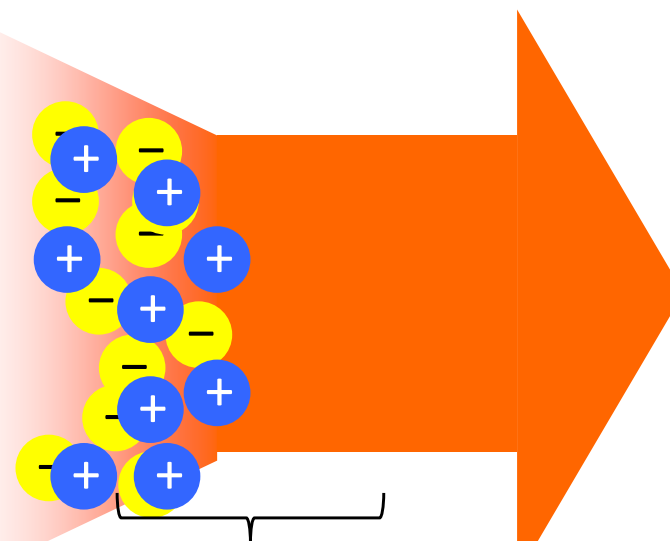
通常のプラズマ状態

電子とイオンの混合ガス



短パルス
超高強度
レーザー

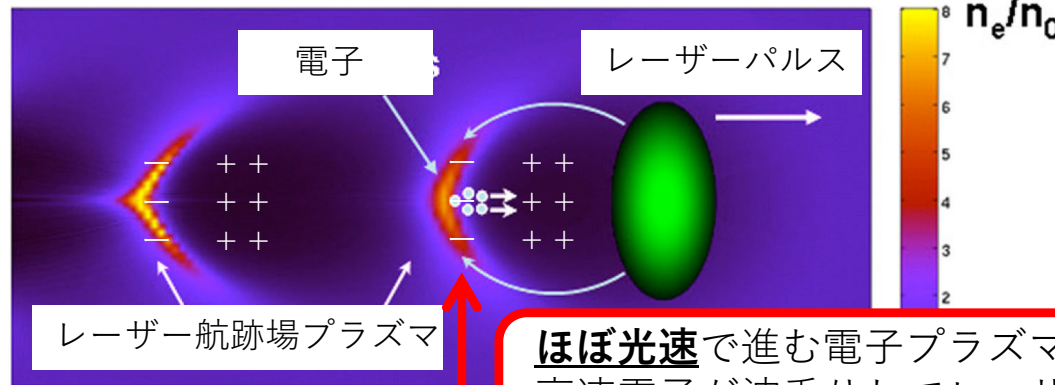
強い光で電子を押し
電荷が分離したプラズマ状態を作る



加速電場 : $\gg 10^{12}$ V/m (TV/m)

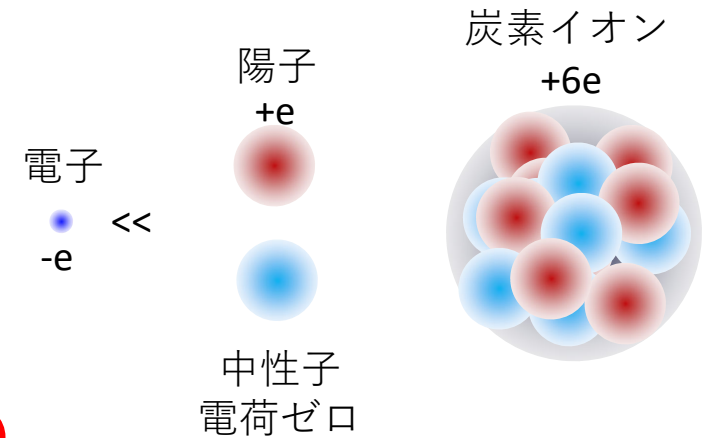
プラズマにより、放電限界を超えて、桁違いに大きな加速電場が発生できる

レーザー航跡場プラズマによる電子加速

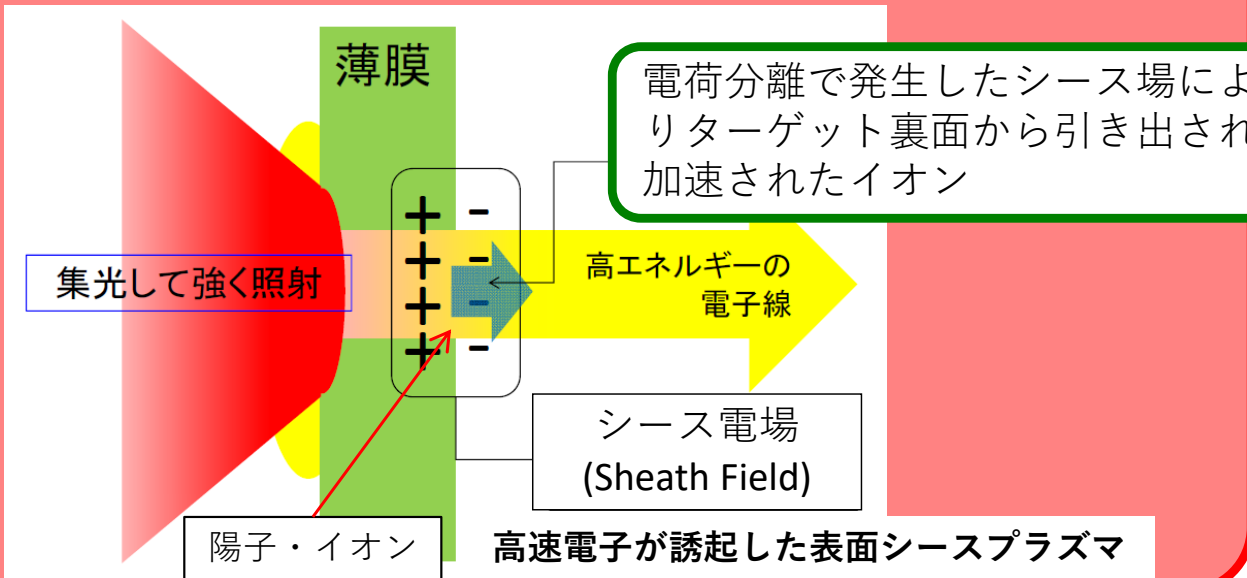


光が透過可能な低密度ガスプラズマ

ほぼ光速で進む電子プラズマ波に高速電子が波乗りしてレーザーパルスの進行方向へ加速



Target Normal Sheath Accelerationによるイオン加速



電荷分離で発生したシース場によりターゲット裏面から引き出され加速されたイオン

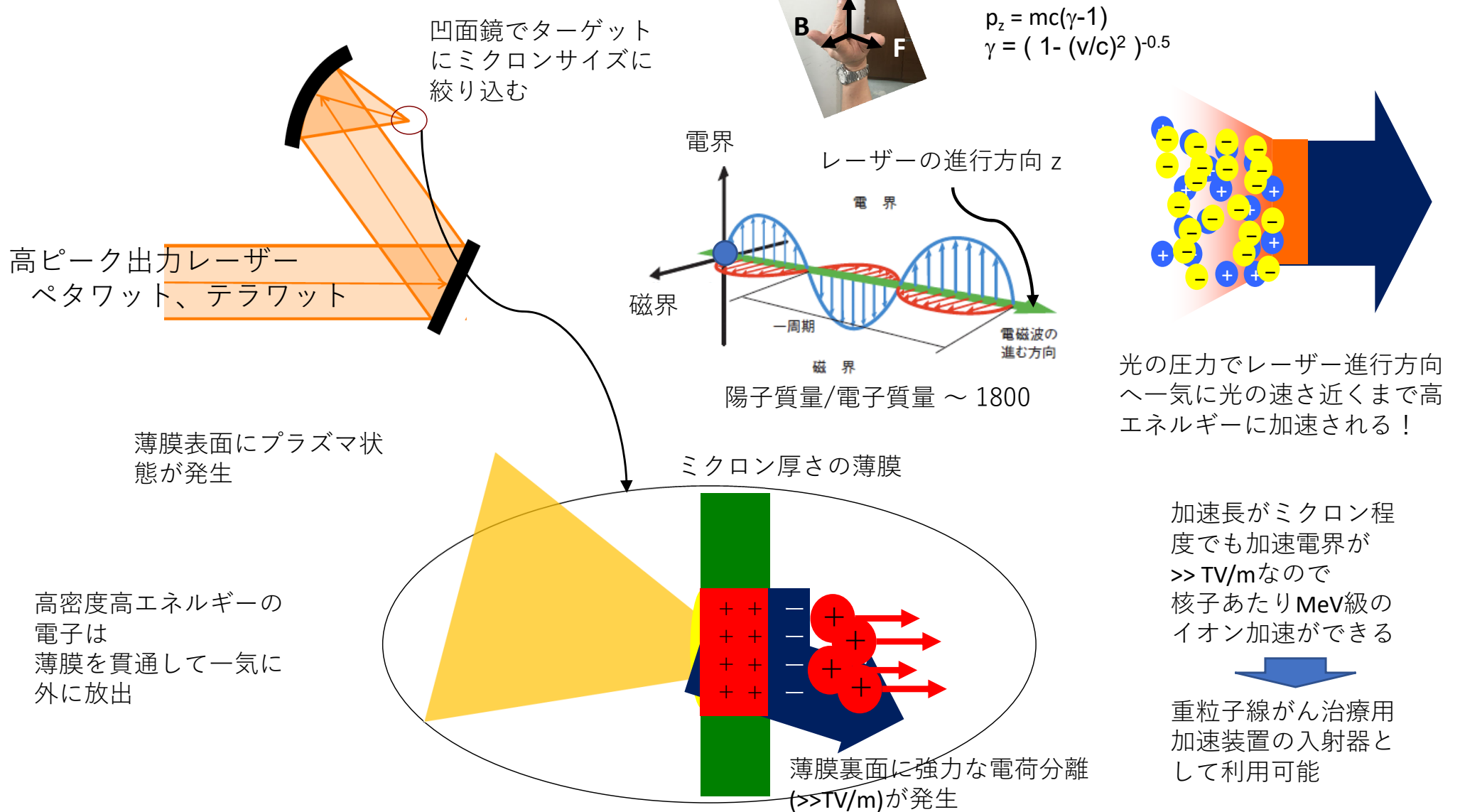
陽子の質量 ~ 電子の質量 × 1800

(粒子のエネルギー)

$$= \begin{cases} (\text{粒子の質量}) \times c^2 & v \sim c \\ \frac{1}{2} \times (\text{粒子の質量}) \times v^2 & v \ll c \end{cases}$$

陽子や炭素イオンの加速は電子に比べてよりエネルギーを要する

レーザー駆動イオン加速の原理

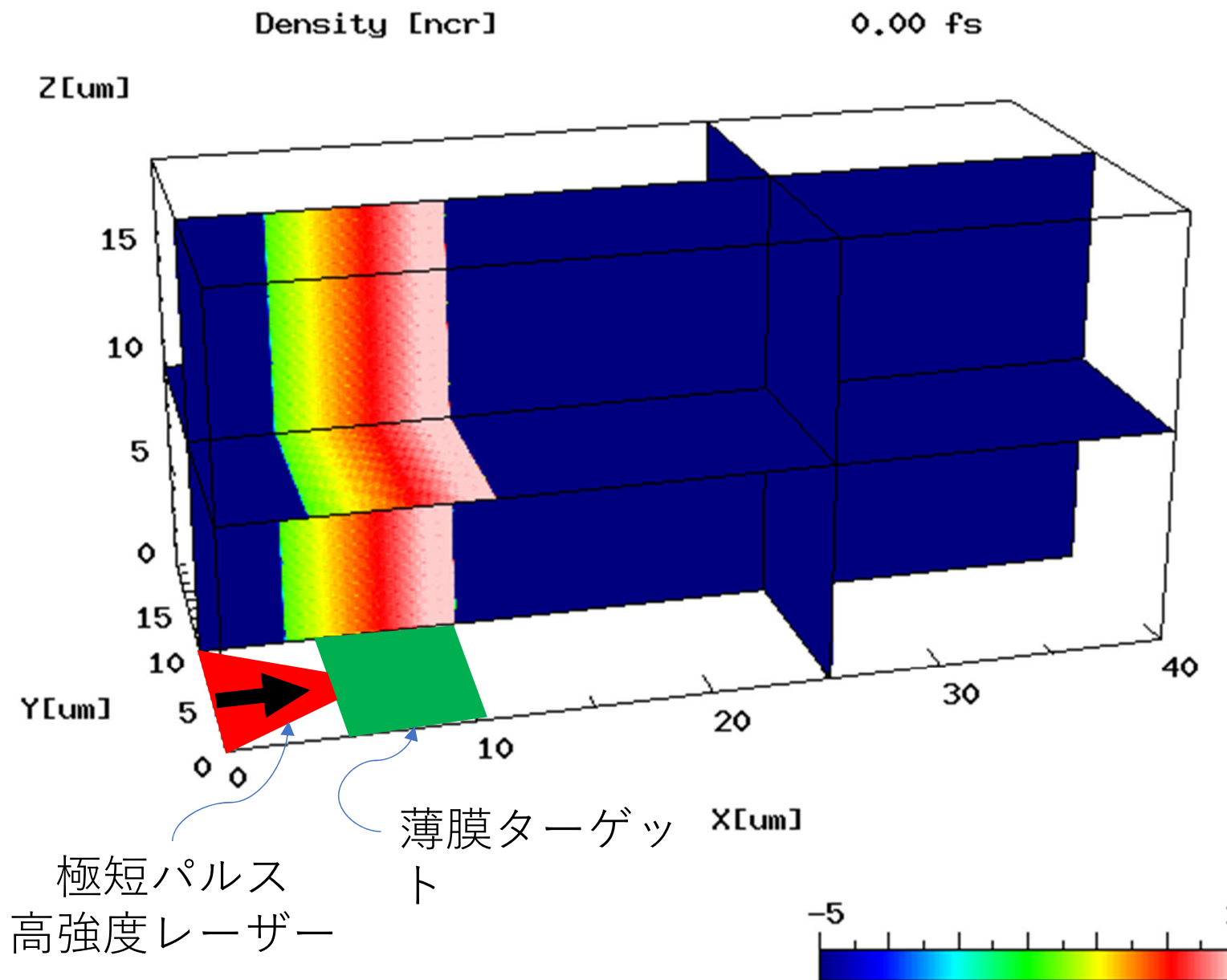


$$p_z = mc(\gamma - 1)$$

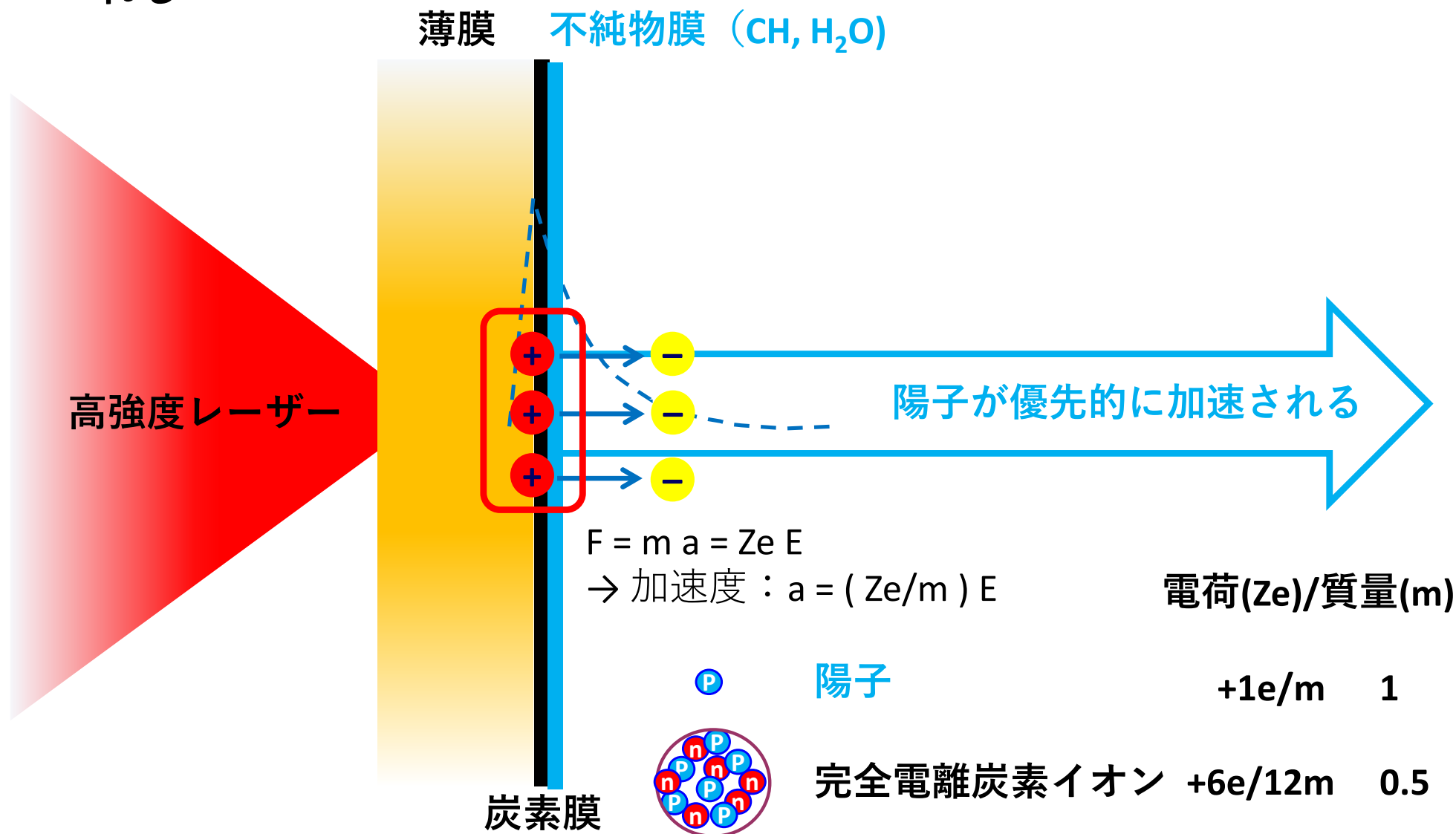
$$\gamma = (1 - (v/c)^2)^{-0.5}$$

Target Normal Sheath Acceleration :TNSA

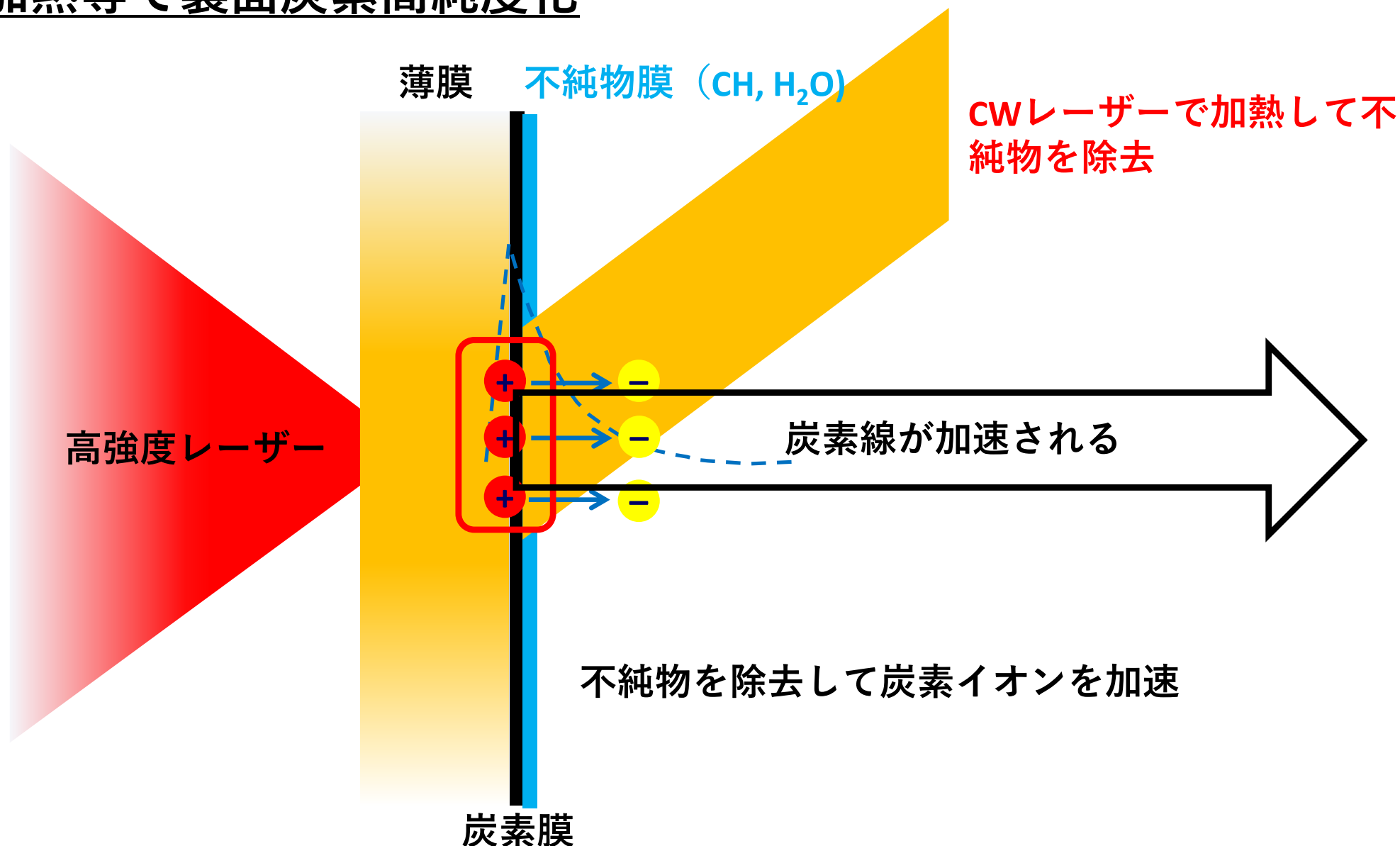
裏面へ正イオンが一気に加速される！



- ・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

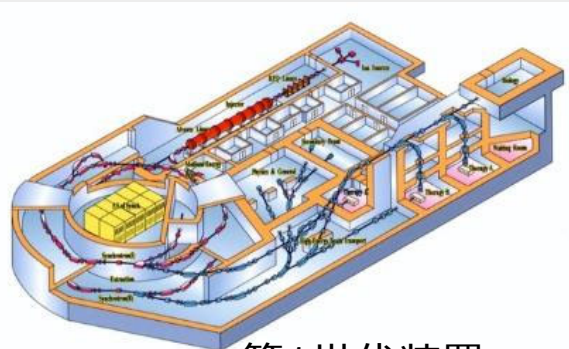


加熱等で裏面炭素高純度化



- ✓ 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

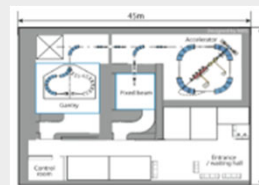
重粒子線がん治療装置



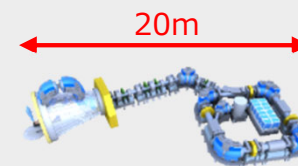
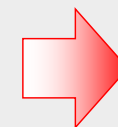
第1世代装置
1994年 放医研
120 x 65m、320億円



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



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



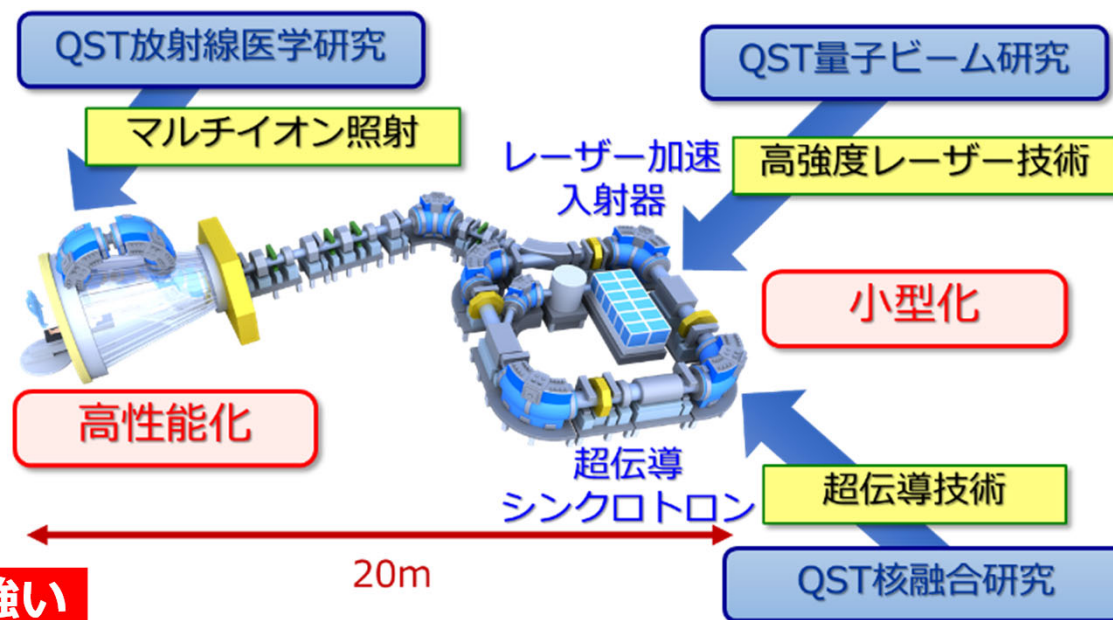
第5世代装置
さらなる小型化
10x20m (1/40程度)
レーザー加速

量子メス

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**

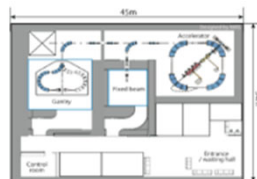
量子科学技術により課題を解決し、日本の強い優位性を堅持して国際的なシェアを獲得



量子メス

第4世代装置

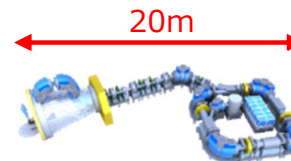
より小型化と高性能化 45x34m (1/6程度)



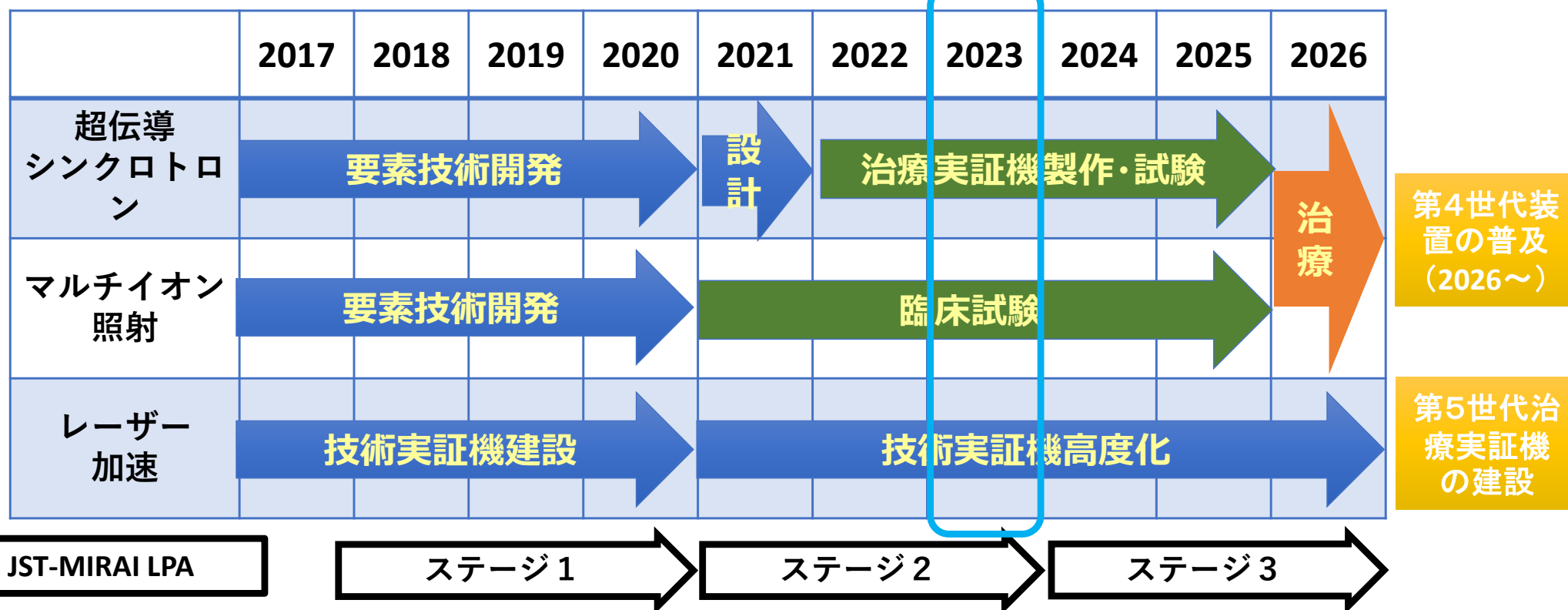
超伝導シンクロトロン マルチイオン照射

第5世代装置

さらなる小型 10x20m (1/40程度)



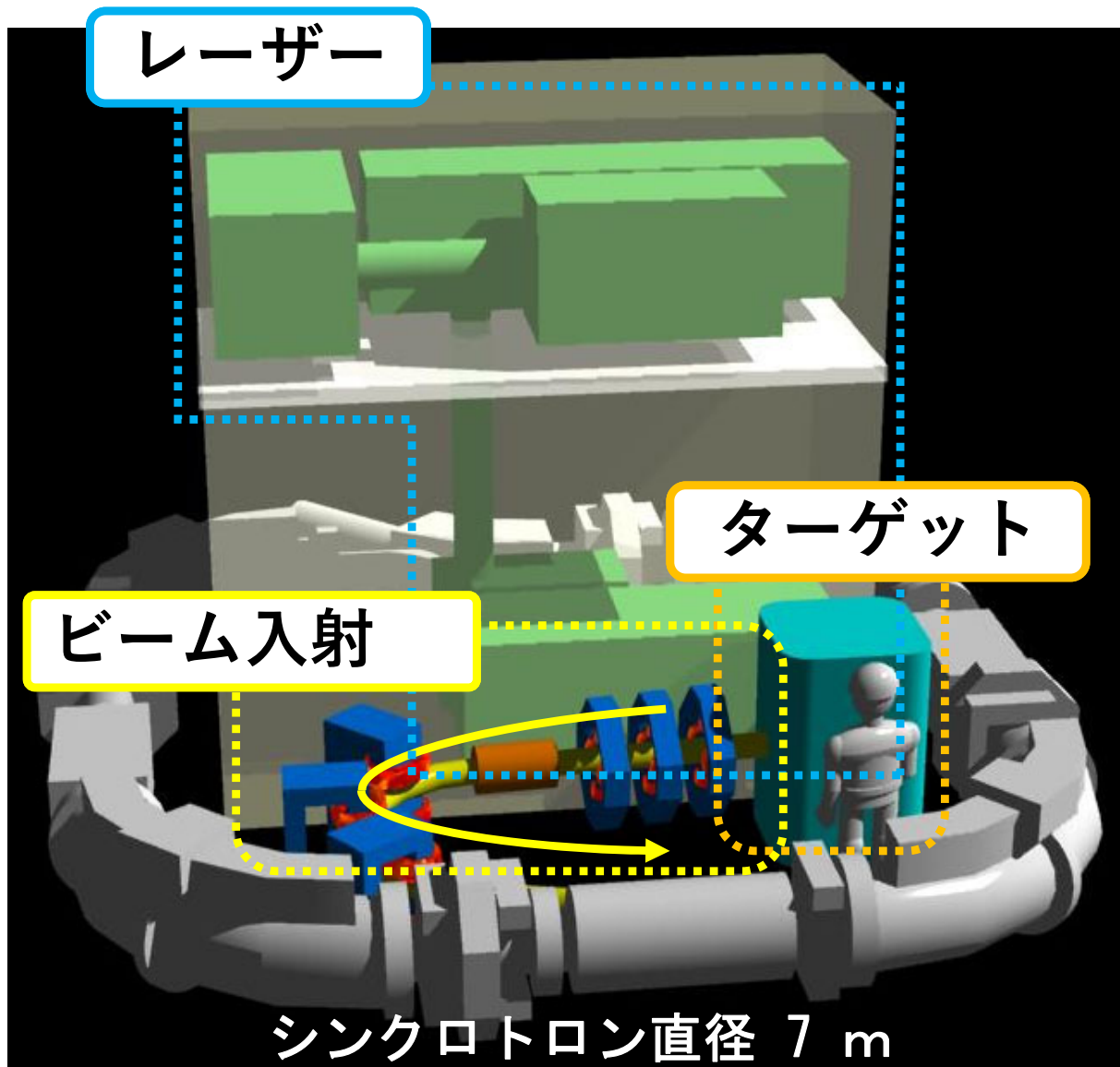
レーザー加速



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



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.

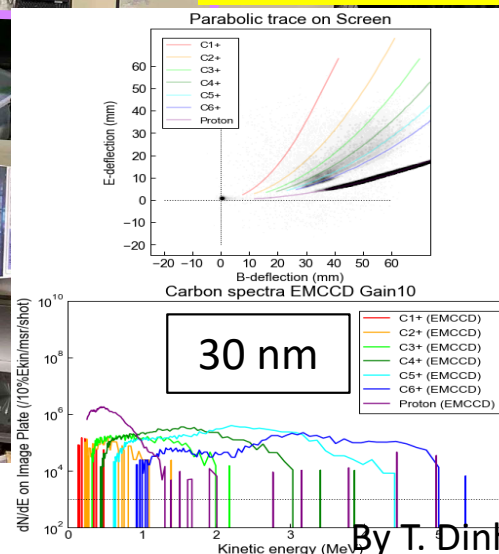
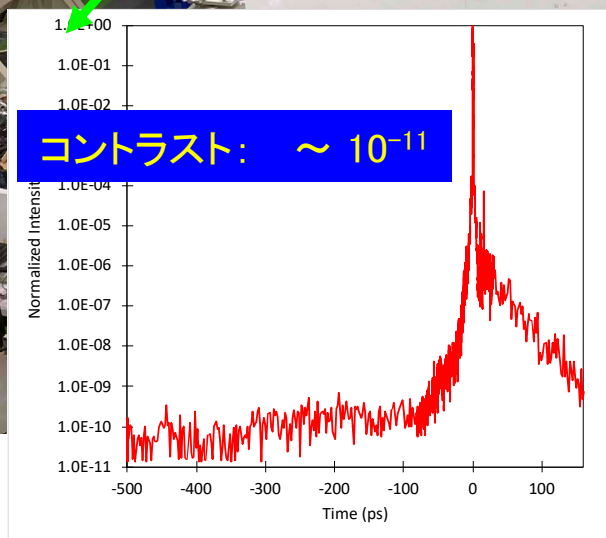
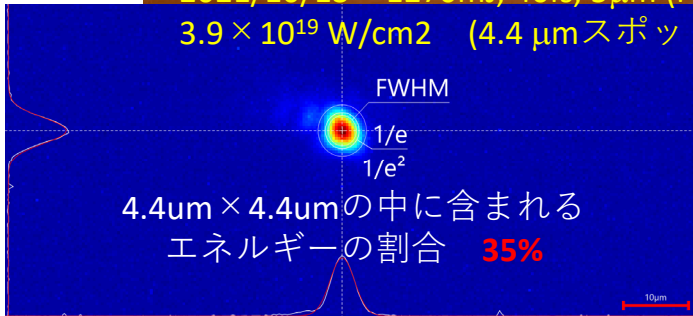
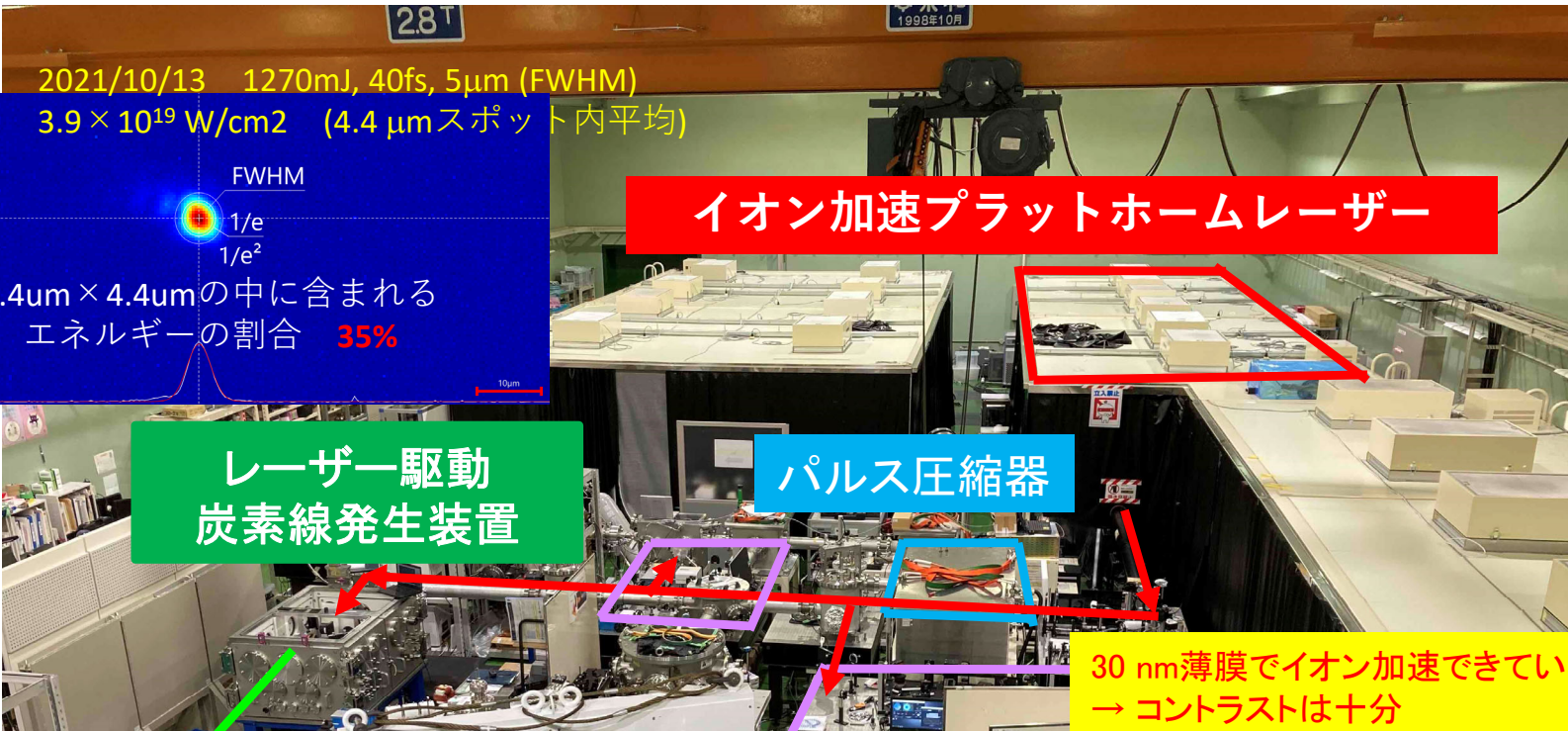
| JST-MIRAI LPA | 2017-2020 ステージ1 | 2021-2023 ステージ2 | 2024-2026 ステージ3 |
|--------------------------|---------------------------|-------------------------------|--|
| レーザー | 高コントラストフロント トエンド | 高コントラスト 1 J/40 fs@10 Hz | 概念実証へ向け た高度化 (パルスエネルギー、 繰り返し、etc) |
| ターゲット (日立造船) | 高純度炭素発生 の工夫 10 Hzデモ | 10 Hzで高純度炭 素発生可能な ターゲット | 高純度炭素発生 の安定化のため の改良、デブリ 対策、etc |
| 相互作用 | イオン加速PFJ-KAREN 3D PIC | MeV/u級炭素線 の発生 | 炭素イオン発生 特性の解明 →レーザー条件 の明確化 |
| 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 | バンチ圧縮等 による高イオン数 密度ビーム伝送 |

統合試験

概念実証実験

今ここ

- ✓ 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

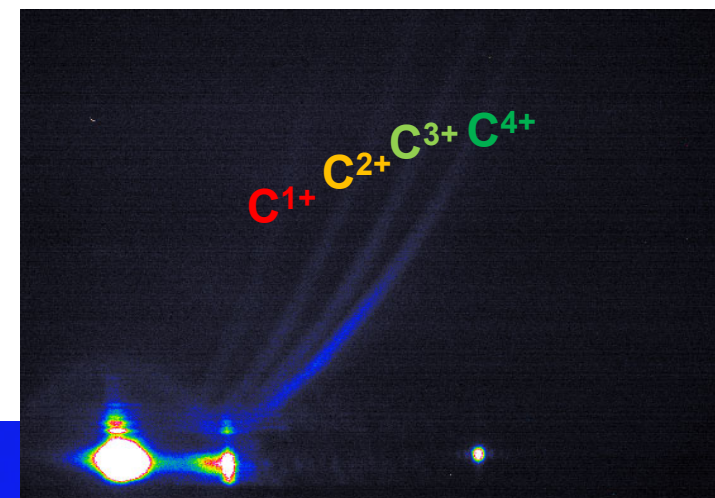
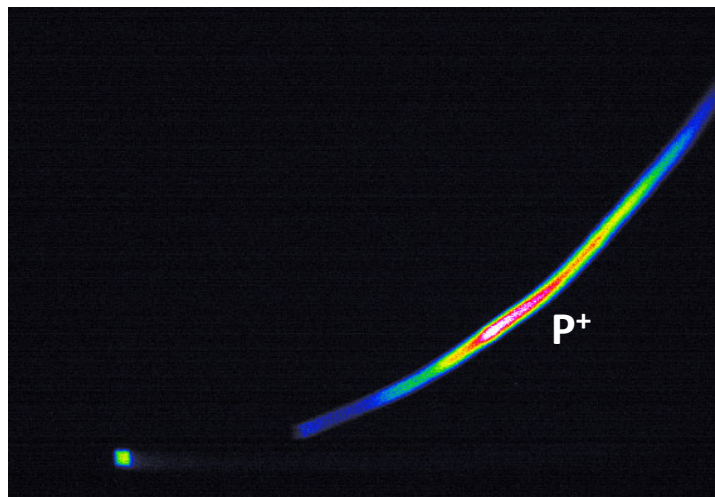


By T. Dinh, S. Kojima et al.

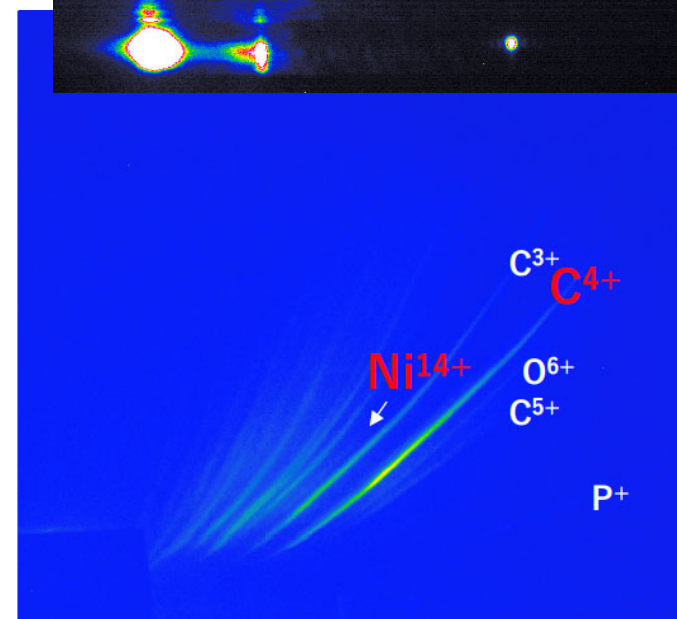
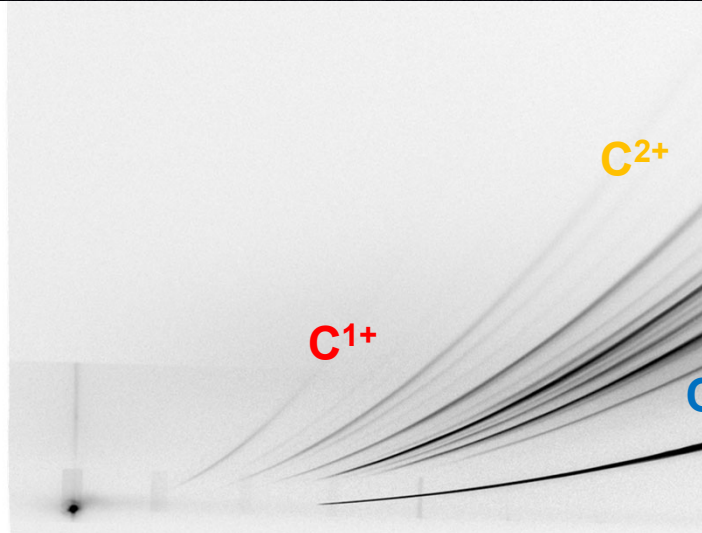
加熱なし

加熱あり

SG1
 圧縮前640mJ,
 80fs, 5 μ m
 (FWHM)
 5.4×10^{18} W/cm²
 (5 μ mスポット内平均)



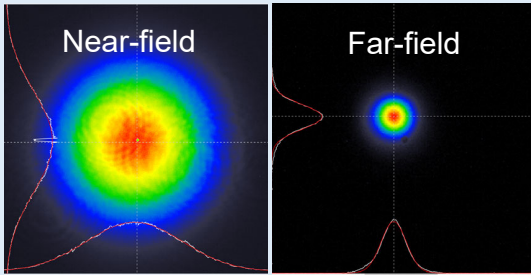
SG2
 圧縮前1270mJ,
 40fs, 5 μ m (FWHM)
 3.9×10^{19} W/cm²
 (4.4 μ mスポット内平均)



核子あたりMeV級のC6+ビーム伝送・診断の実現のためには、
 照射強度をより高くする必要があります。

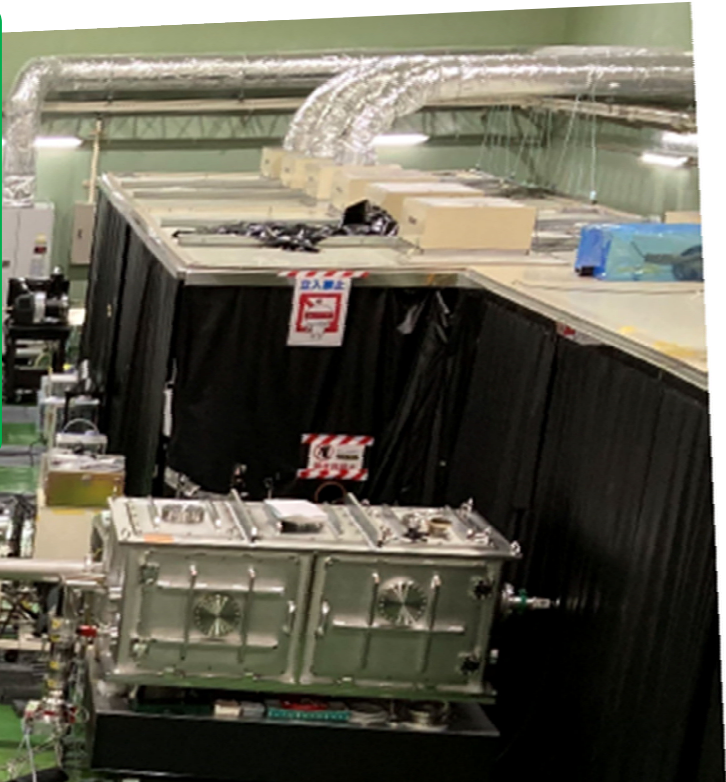
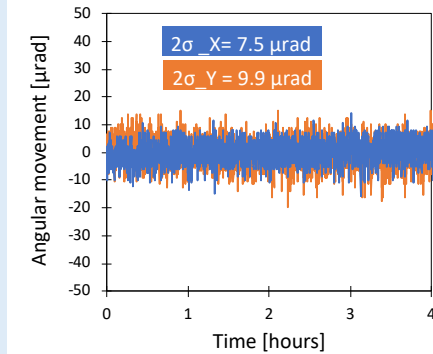
→ **イオン加速プラットフォームレーザーのさらなる高度化が必要**

➤ 高ビーム品質 ($M^2 = \sim 1.02$)



高品質シード光の発生

➤ 高安定ビームポインティング

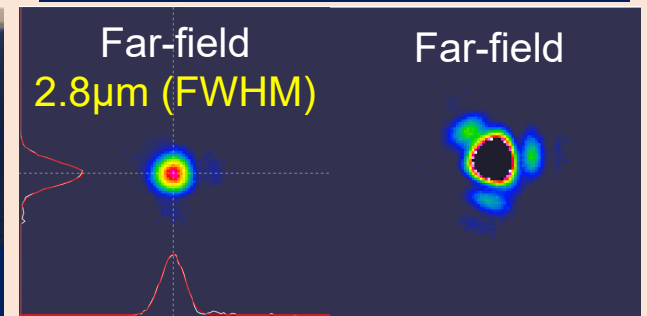
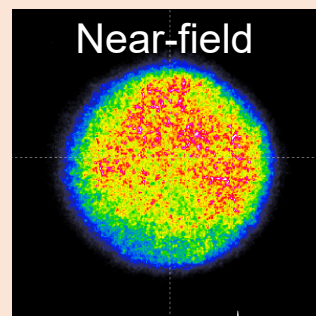


~3.2J/10Hz 主増幅部 (励起レーザー: 6ビーム・計7.3J)

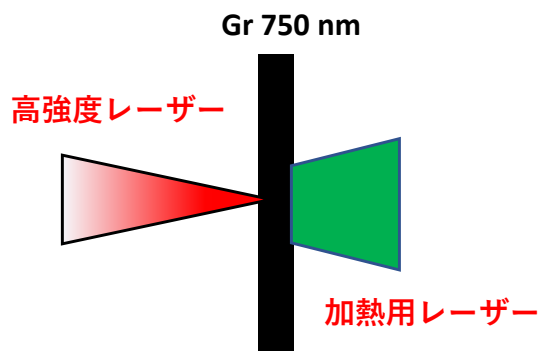
➤ F#2.8 OAPによる集光径



主増幅部



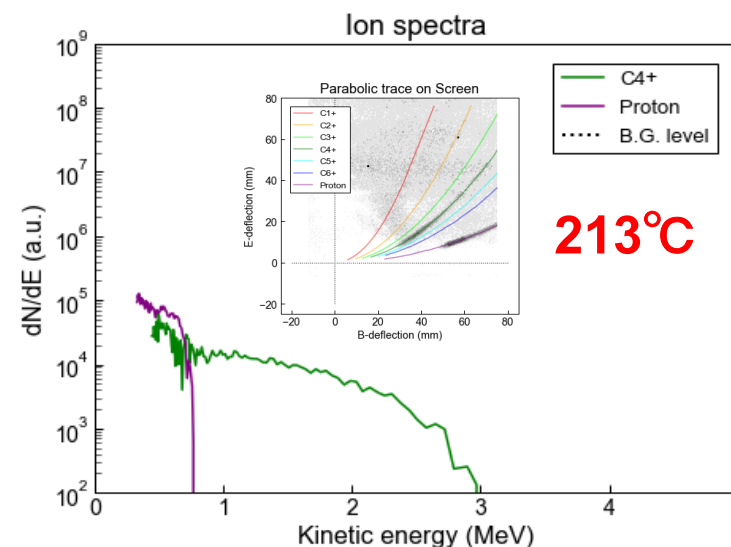
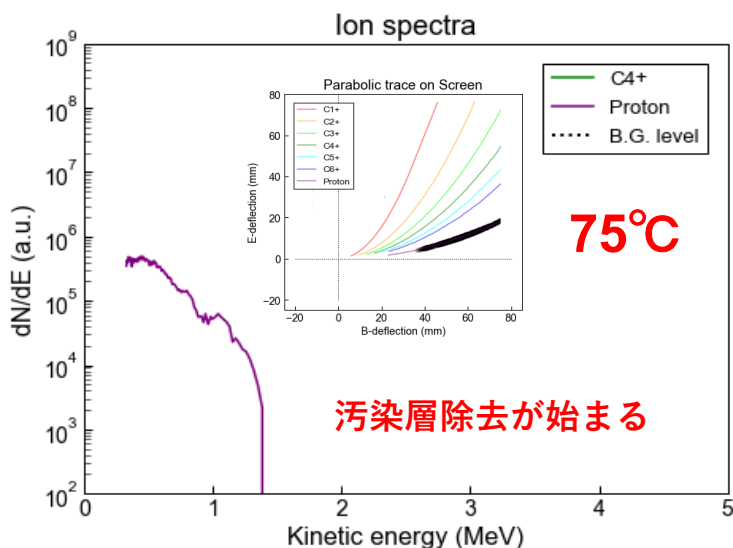
By S. Kojima, H. Sakaki



必要な加熱温度をレーザー加熱法によって明らかにした。

3.5A (0.13W)

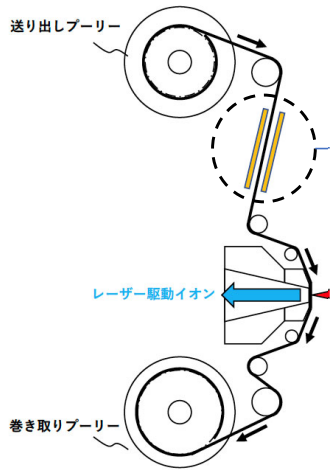
4A (0.28W)



By S. Kojima, H. Sakaki

Hitz 日立造船
Hitachi Zosen

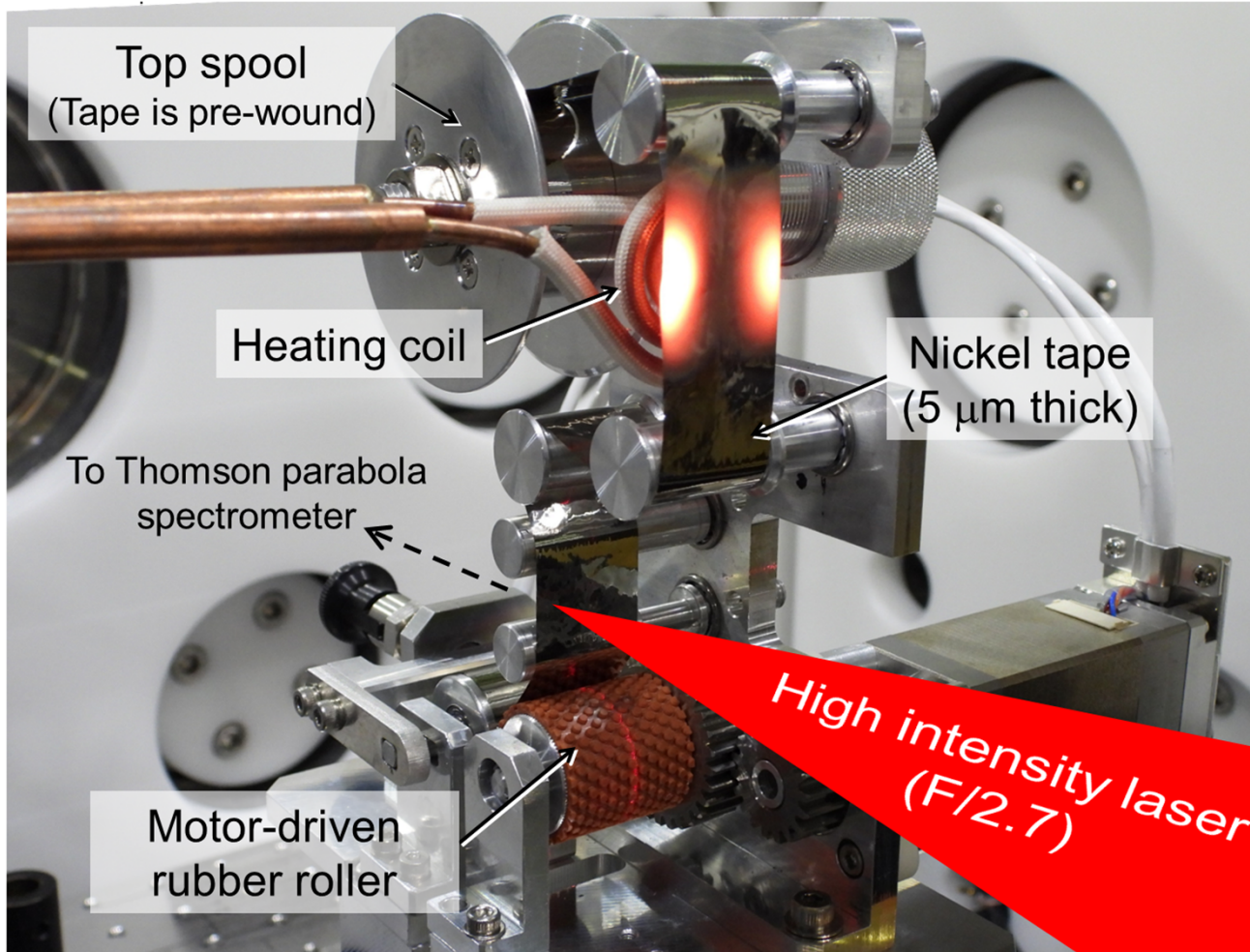
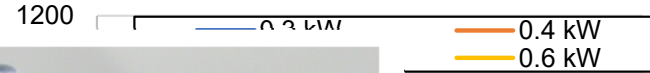
IHヒーター加熱特性



高周波出力：
0.28 kW~2.8 kW (Max)
3カ電流・12 A

20 mm

0.05 Pa (ターボポンプ運転時)



Top spool
(Tape is pre-wound)

Heating coil

Nickel tape
(5 μm thick)

To Thomson parabola
spectrometer

Motor-driven
rubber roller

High intensity laser
(F/2.7)

上に加熱

00:30.0 00:40.0
: sec : msec

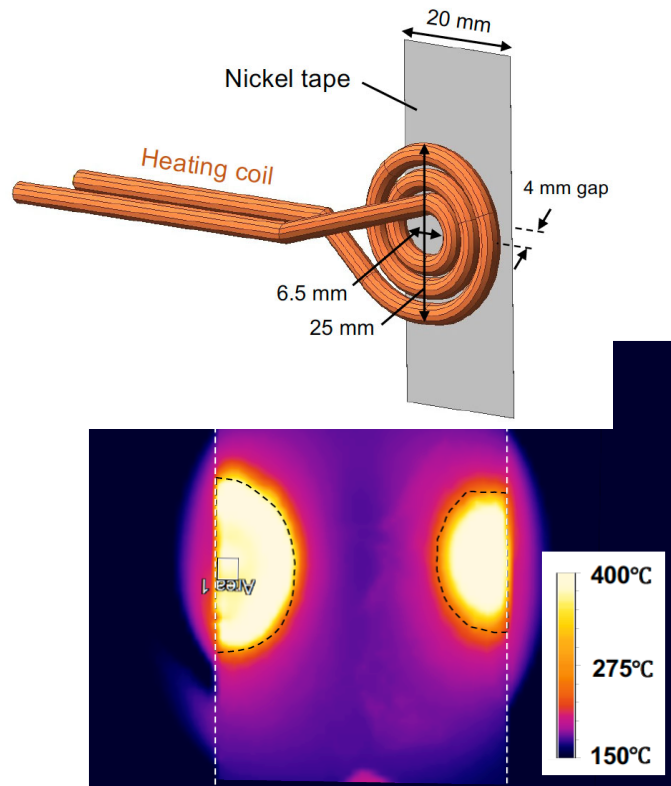
を離れても、
は100°C以上を維持している

0.05 Pa

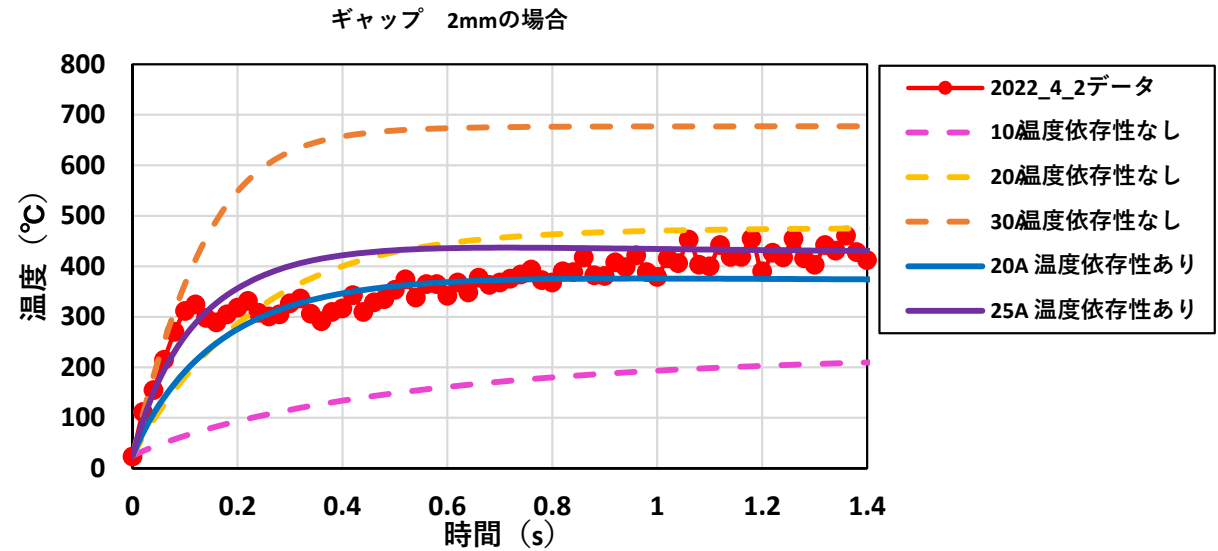
:03.0 00:04.0 00:05.0
: sec : msec

By S. Kojima, H. Sakaki

Hitz 日立造船
Hitachi Zosen



有限要素法による数値シミュレーションによる再現

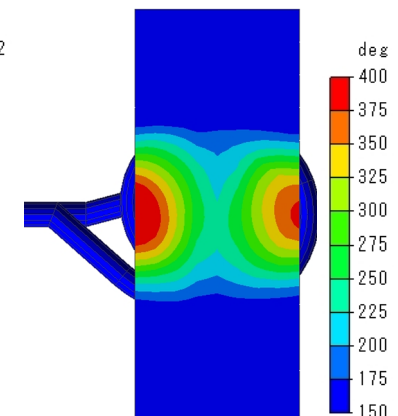
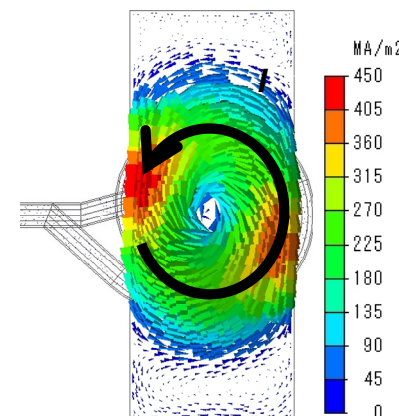
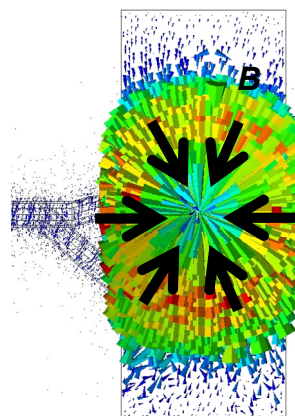
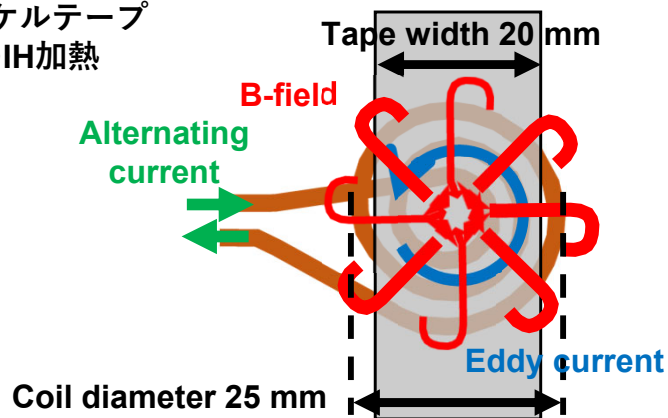


磁束密度(mT)

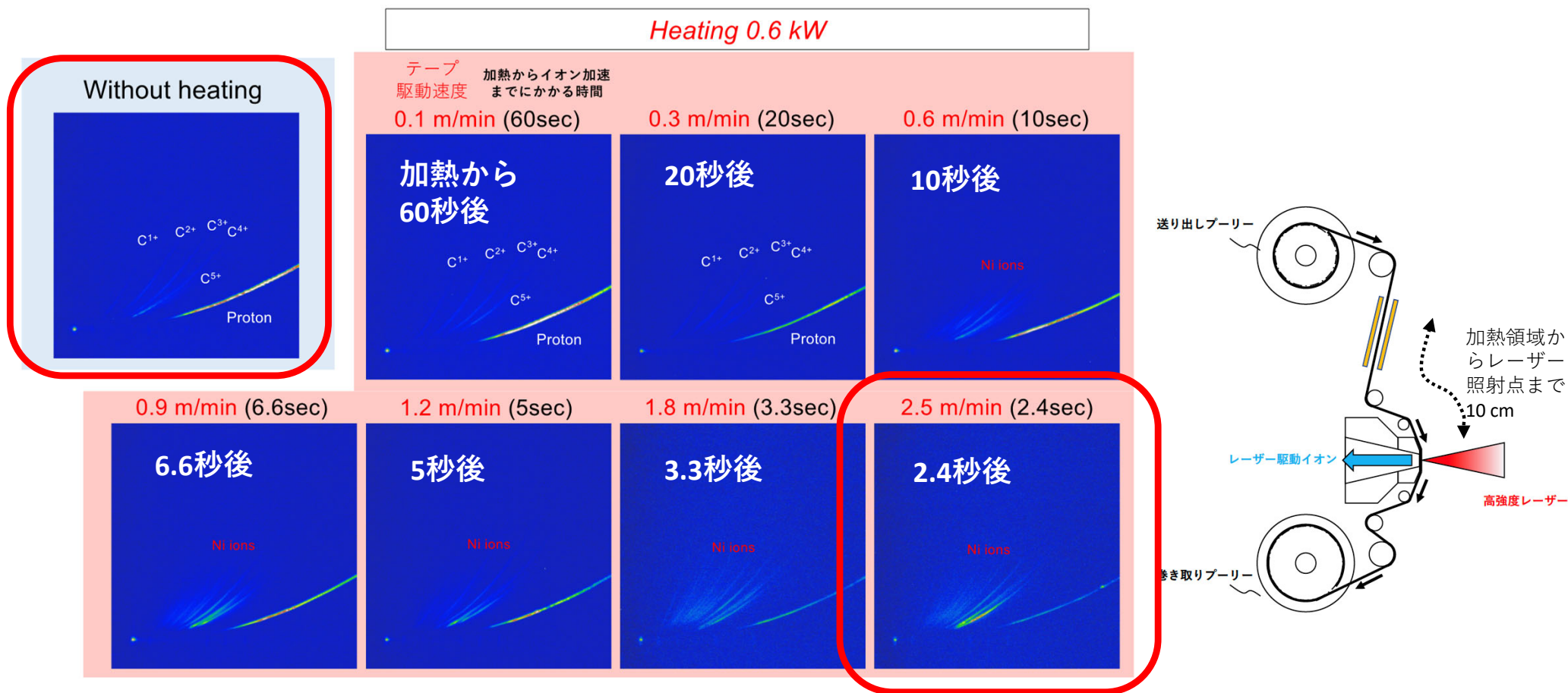
渦電流密度(MA/m²)

温度分布(°C)

ニッケルテープのIH加熱



By S. Kojima, H. Sakaki, et al.

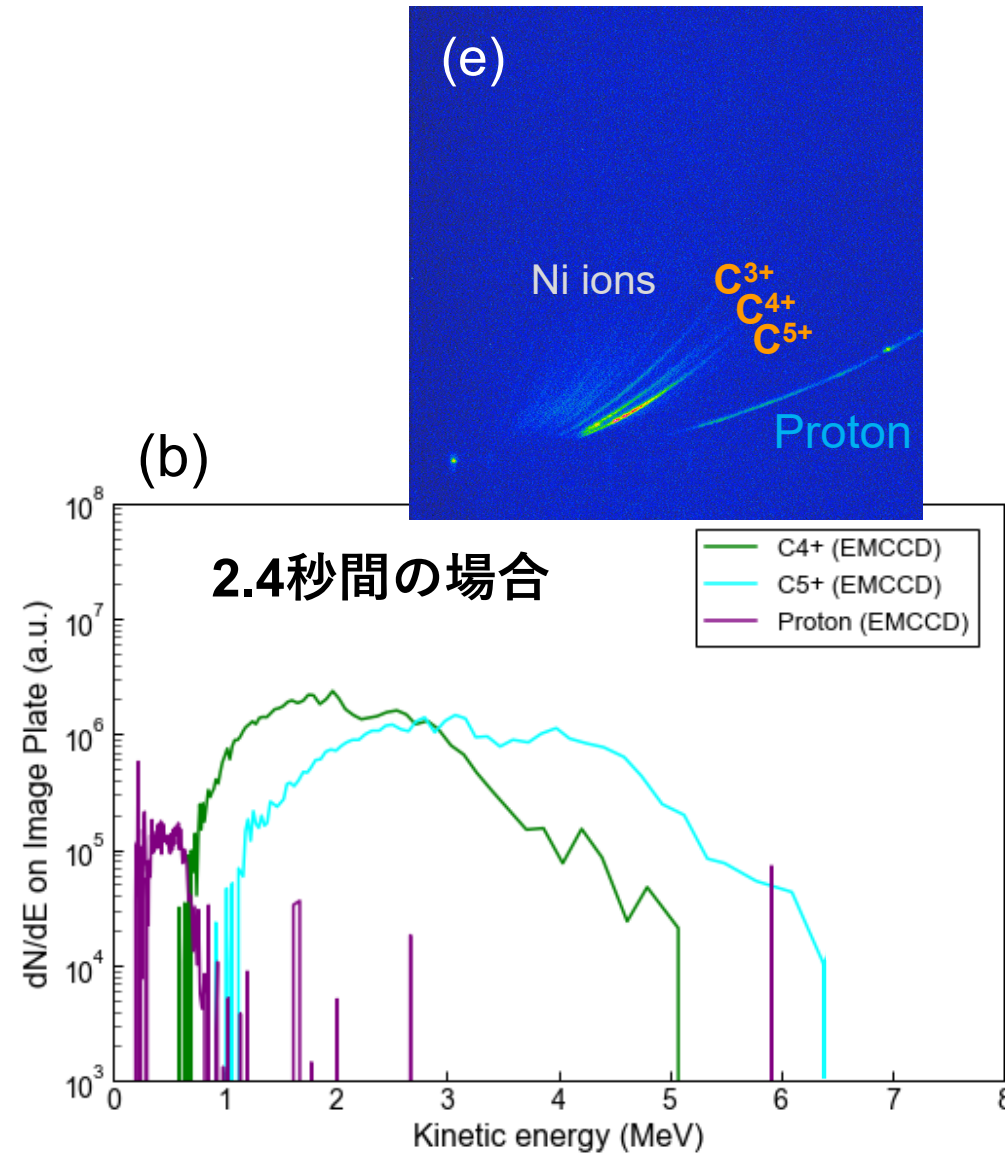
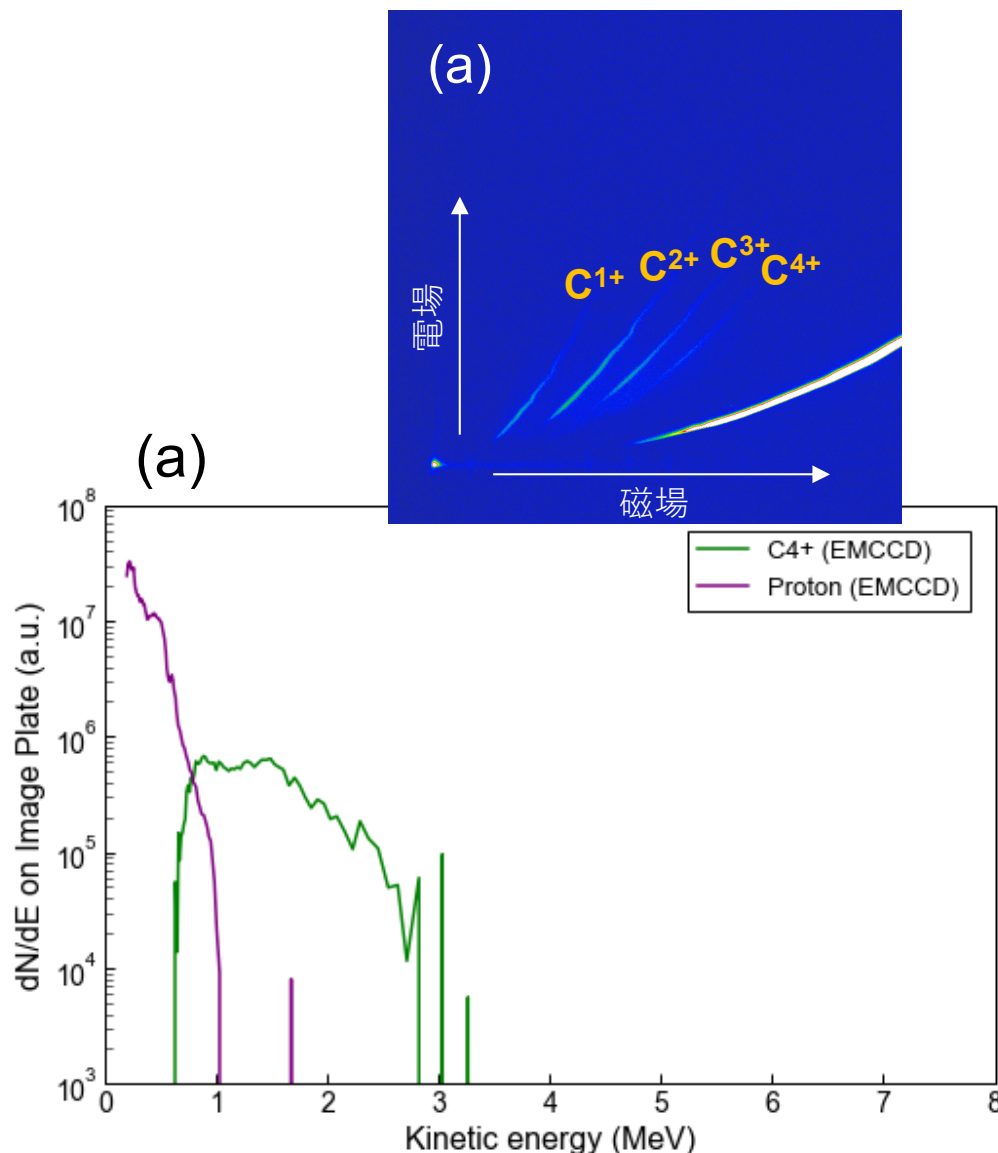


By S. Kojima, H. Sakaki, et al.

No heating

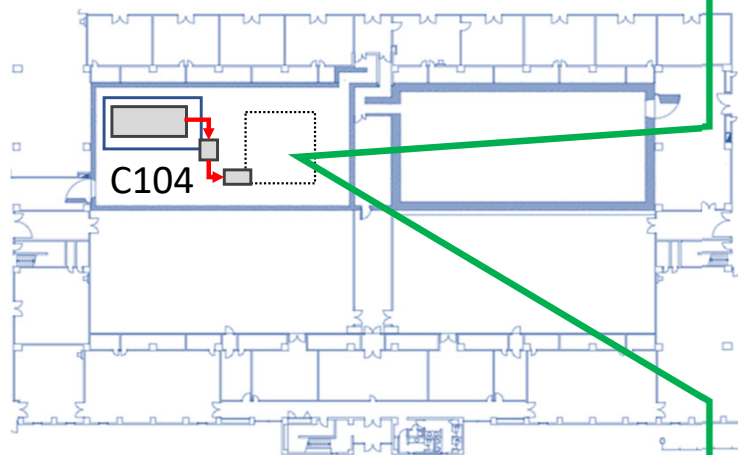
Heating (0.6kW)

2.4 s

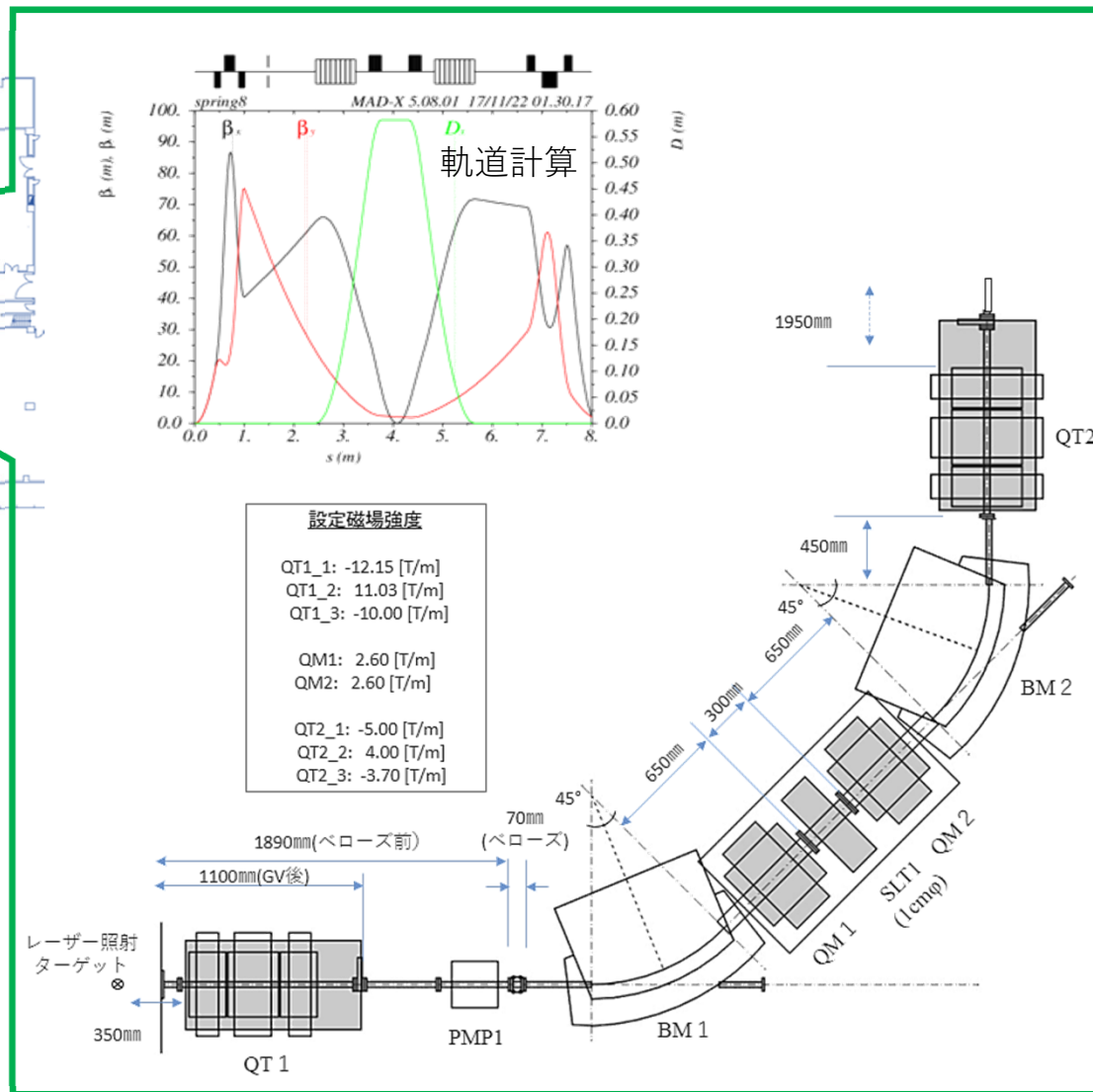


SPring 8 (理研) の四重極磁石、偏向磁石、並びに東工大の四重極磁石を借用、譲受しQSTへ移設を進め統合実験を進める

By H. Sakaki, S. Kojima et al.



SPring-8旧入射器ライナックの磁石を借用 (QT1, BM1, BM2, Q1, Q2)



ビーム輸送を行い軌道計算のベンチマーク試験を実施

会場 日本大学工学部船橋キャンパス

会期 2023年 8/29 (火) - 9/1 (金)

第20回 日本加速器学会年会 ホーム

第20回日本加速器学会年会

主催：日本加速器学会

共催：日本大学量子科学研究所電子線利用研究施設

後援：日本大学工学部、船橋市

協賛：（公財）ちば国際コンベンションビューロー

会期：2023年8月29日(火) - 9月1日(金) 4日間

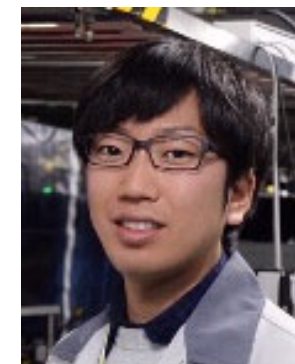
会場：日本大学工学部船橋キャンパス

千葉県船橋市習志野台 7-24-1

東葉高速鉄道「船橋日大前」駅より徒歩1分（東京メトロ東西線乗り入れ）



榊泰直 上席研究員



小島完興 主任研究員

URL：<https://www.cst.nihon-u.ac.jp/campus/funabashi/>

「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」2023年度シンポジウム

開催日：2023/08/02 場所：科学技術振興機構 東京本部別館

- ✓ 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

| 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 | 統合試験 概念実証へ向けた高度化 (パルスエネルギー、繰り返し、etc) 高純度炭素発生 の安定化のための改良、デブリ 対策、etc 炭素イオン発生 特性の解明 → レーザー条件 の明確化 バンチ圧縮等による高イオン数 密度ビーム伝送 |
| 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 | |
| 相互作用 | イオン加速PFJ-KAREN 3D PIC | MeV/u級炭素線の発生 | |
| 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 | |
| 概念実証実験 | | | |

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

- 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。
- レーザー装置はパルスエネルギーを2倍向上した。
- ターゲット装置は連続して高純度炭素イオン発生が見込めるIH加熱型を試作し、有効性が確認できた。
- 発生した核子あたりMeV級のイオンビームの伝送ラインを据え付けてイオンビーム伝送試験を予定している。
- 第3ステージへ向けた、初めてのレーザー装置、ターゲット装置、ビーム伝送・診断装置を統合実験準備が整った。
- 第2ステージの統合試験で得られた知見等に基づき、第3ステージでは各要素技術の高度化による概念実証実験を行う。