

イオン加速技術の開発成果と展望

量子科学技術研究開発機構 量子ビーム科学部門
関西光科学研究所 光量子科学研究部

近藤 公伯

JST-MIRAI 「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」 シンポジウム
2021年6月25日（金）10時～14時
Zoom webinarによるオンライン開催

PI: 近藤 公伯 サブPI: 白井 敏之

QST関西研

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

QST放医研

岩田 佳之、水島 康太、野田 悦夫

京大化研

橋田 昌樹、井上 峻介、阪部 周二

民間企業

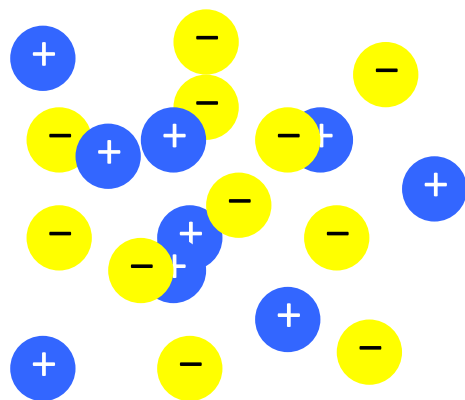
住友重機械工業（株）、日立造船（株）

- ✓ レーザープラズマによるイオン加速研究
- ✓ 重粒子線がん治療とレーザー加速器の利用
- ✓ JST-MIRAIの目標
- ✓ 現在の研究開発と成果
- ✓ 展望

- ✓ レーザープラズマによるイオン加速研究
- ✓ 重粒子線がん治療とレーザー加速器の利用
- ✓ JST-MIRAIの目標
- ✓ 現在の研究開発と成果
- ✓ 展望

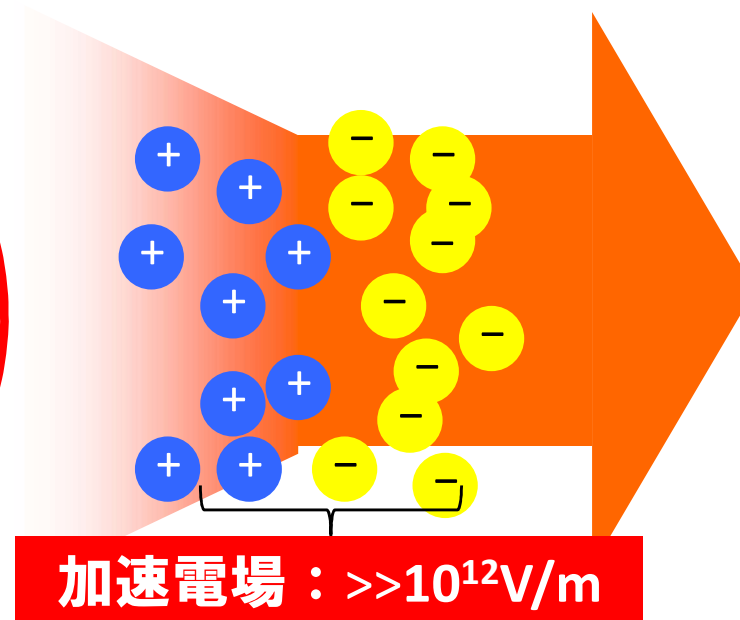
通常のプラズマ状態

電子とイオンの混合ガス



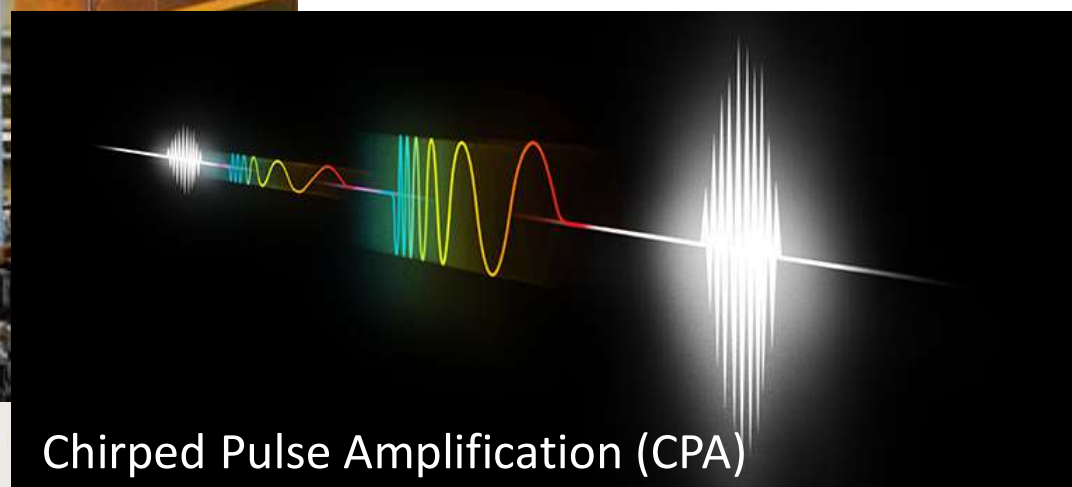
高出力
極短パルス
レーザー

光の圧力で電荷が分離したプラズマ状態を作る

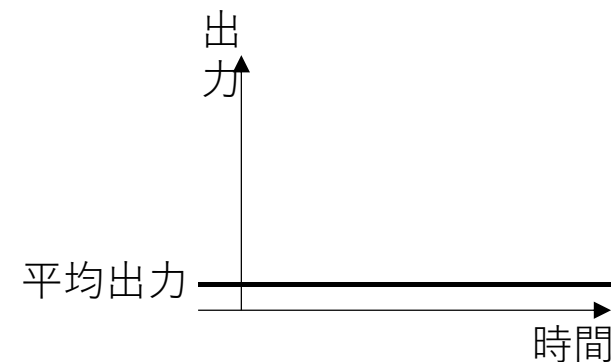


プラズマにより、放電限界を超えて、桁違いに大きな加速電場が発生できる

2018年のノーベル物理学賞は [Arthur Ashkin](#), [Gérard Mourou](#) and [Donna Strickland](#).



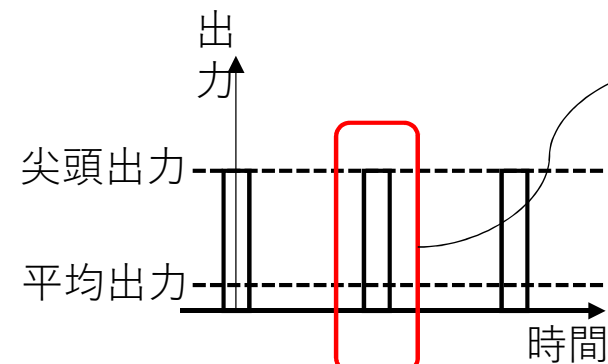
✓CW高出力レーザー



✓高出力パルスレーザー

尖頭出力が高い

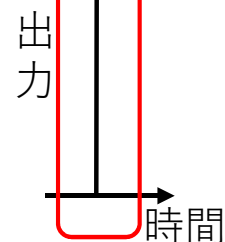
→ パルス幅：マイクロ秒



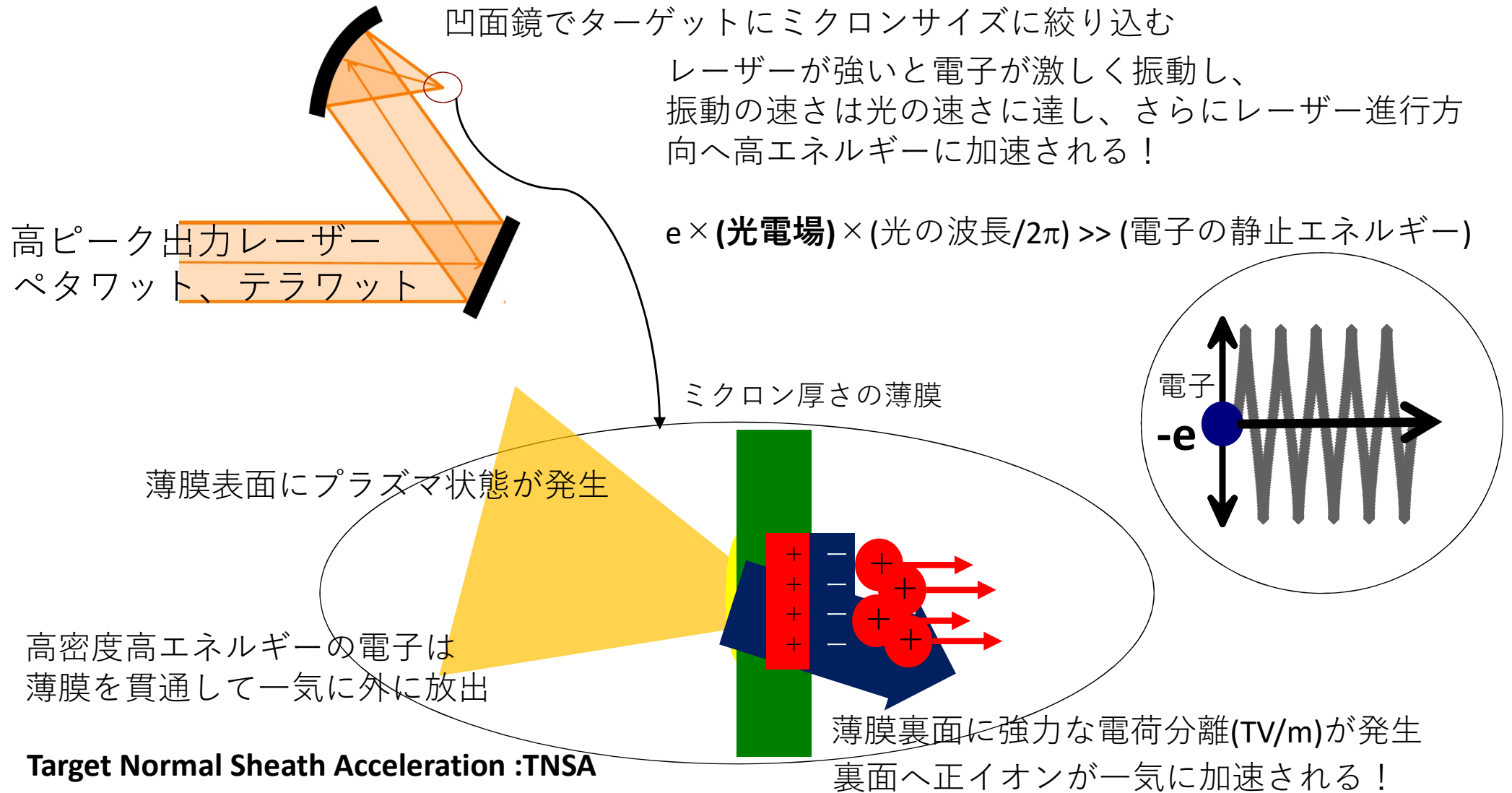
✓高出力極短パルスレーザー

ピコ秒、フェムト秒 尖頭出力はマイクロ秒の百万倍、一億倍!

→ 尖頭出力はペタワット（千兆ワット）やテラワット（一兆ワット）



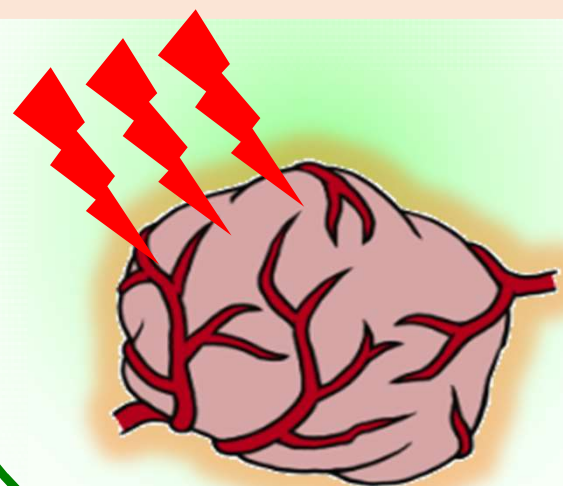
レーザー駆動イオン加速の原理



Target Normal Sheath Acceleration :TNSA

- ✓ レーザープラズマによるイオン加速研究
- ✓ 重粒子線がん治療とレーザー加速器の利用
- ✓ JST-MIRAIの目標
- ✓ 現在の研究開発と成果
- ✓ 展望

次世代重粒子線治療 (量子メス)



固形がん（原発腫瘍塊）

分子標的治療

微小転移がんをピンポイントに治療

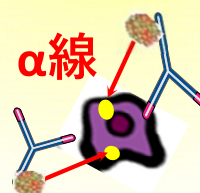
標的アイソトープ治療

治療抵抗性の多発転移巣にも高い治療効果を期待

転移巣

分子標的治療

標的アイソトープ治療



がん死ゼロを目指す

・副作用が少ない



賦活化効果

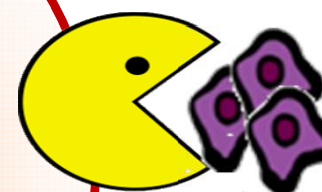
・高いQOL維持

・免疫機能温存

・免疫活性化作用もある可能性



ブレーキ阻止
or アクセル増強



免疫制御治療併用

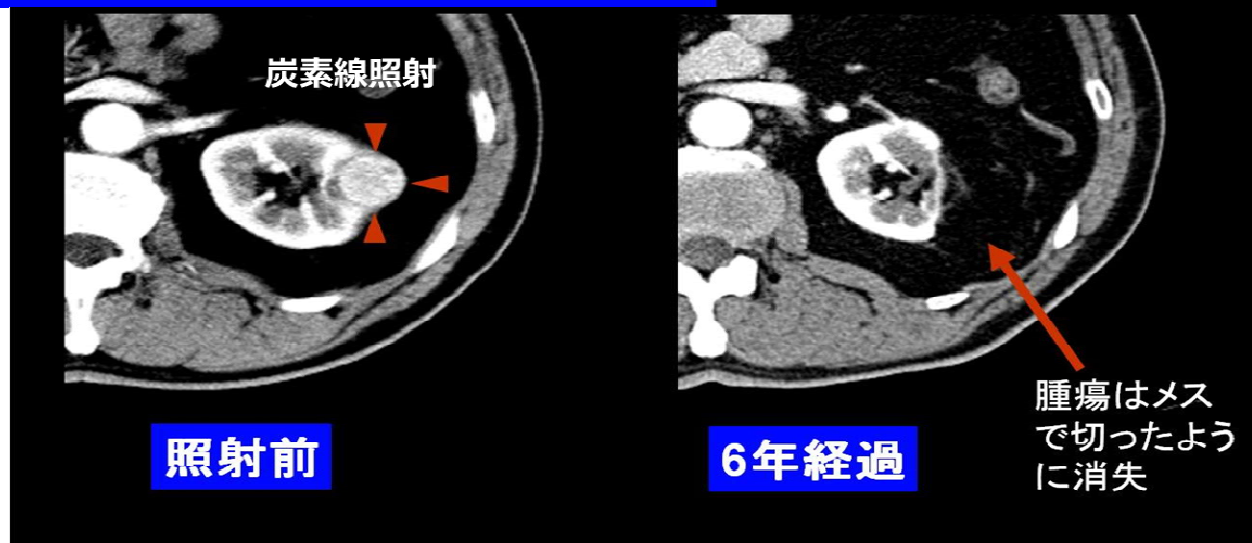
ブレーキの抑制（免疫チェックポイント療法）やアクセル増強等によりがん免疫を賦活化する

量子科学技術研究開発機構
放射線医学総合研究所 QST病院

千葉県稲毛



腎癌 重粒子線治療 80.0GyE / 16回



- 炭素ビームは、生物効果が
高く、線量を腫瘍に集中で
きるため、体にメスを入れ
ずにがんを“切除”するこ
とが可能。

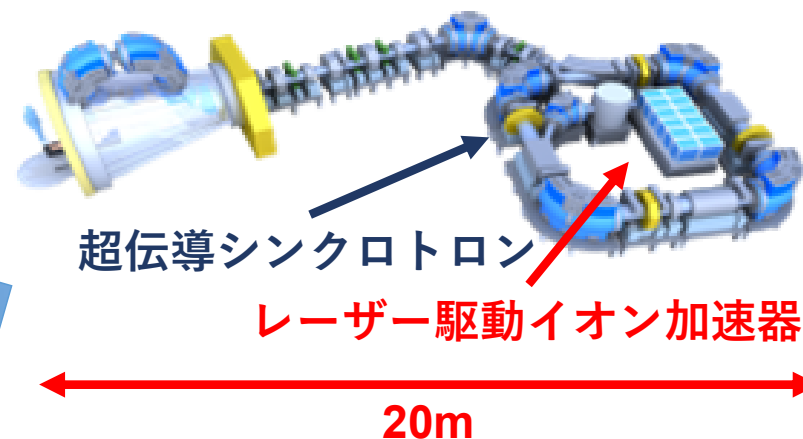
既存の炭素線がん治療施設



シンクロトロン

炭素線治療室

次世代炭素線がん治療施設



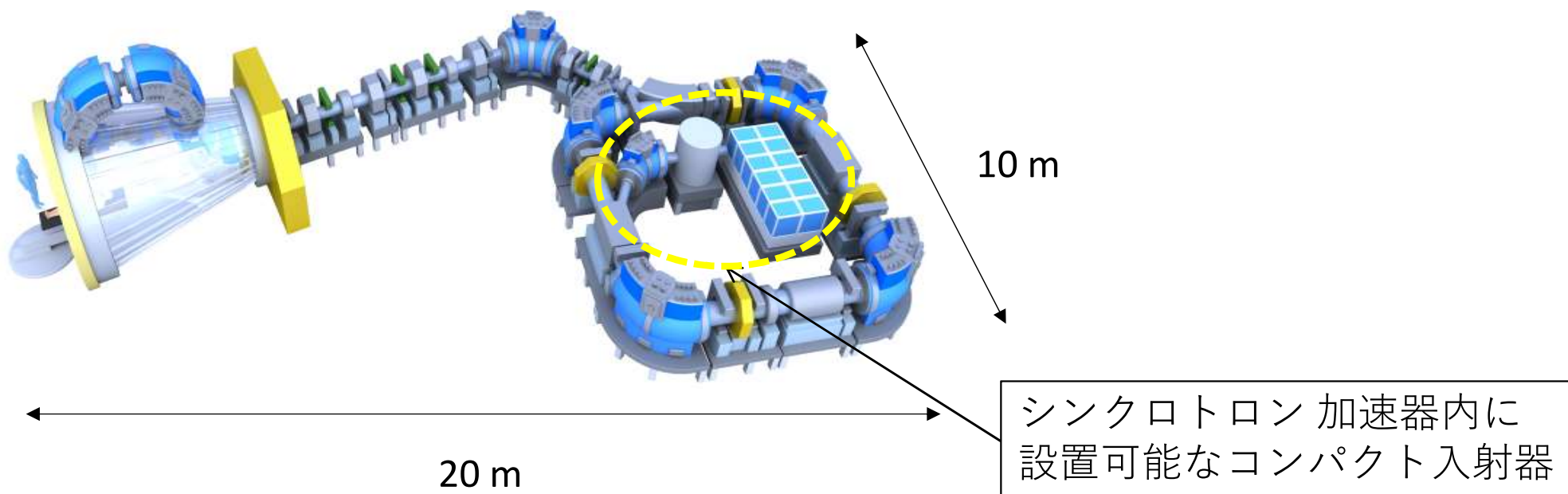
- ・ レーザー駆動イオン加速技術による入射器の大幅な小型化
- ・ 超伝導電磁石技術によるシンクロトロンの小型化
- ・ 治療短期化の臨床技術開発による治療室数の削減

- ✓ レーザープラズマによるイオン加速研究
- ✓ 重粒子線がん治療とレーザー加速器の利用
- ✓ **JST-MIRAIの目標**
- ✓ 現在の研究開発と成果
- ✓ 展望

治療に必要な炭素イオン数は 4×10^9 個程度であり、超伝導シンクロトロンでは、空間電荷効果の制限から蓄積粒子数は 10^9 個程度である。治療時間（通常100秒程度）を顕著に延ばさないために、1回の入射時間を2秒とし、多重入射効率を50%と仮定すると、 10^9 個を蓄積するためには、**1%エネルギー幅、10Hzで、炭素イオンを 10^8 個/パルス以上入射できることが求められる。**

$$10^8 \text{ 個/パルス} \times 10 \text{ Hz} \times 2 \text{ 秒} \times 0.5 = 10^9 \text{ 個}$$

さらに、炭素イオンに酸素などの不純物イオンが混入した場合、線量の均一性を悪化させる。粒子線治療ガイドラインの線量一様性の基準である $\pm 3\%$ から、不純物の許容量を1%と設定し、**炭素線純度は99%以上**とした。



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**

- ✓ レーザープラズマによるイオン加速研究
- ✓ 重粒子線がん治療とレーザー加速器の利用
- ✓ JST-MIRAIの目標
- ✓ 現在の研究開発と成果
- ✓ 展望

レーザー加速入射器

レーザー部

高繰り返しパワーレーザー

10 Hzの高出力レーザー

ターゲット部

レーザー薄膜相互作用による
高エネルギー多価イオン発生

2秒間で 2×10^9 個相当の4 MeV/u
炭素線の発生@ $\pm 10\% \text{b.w.}$

ビーム輸送・診断部

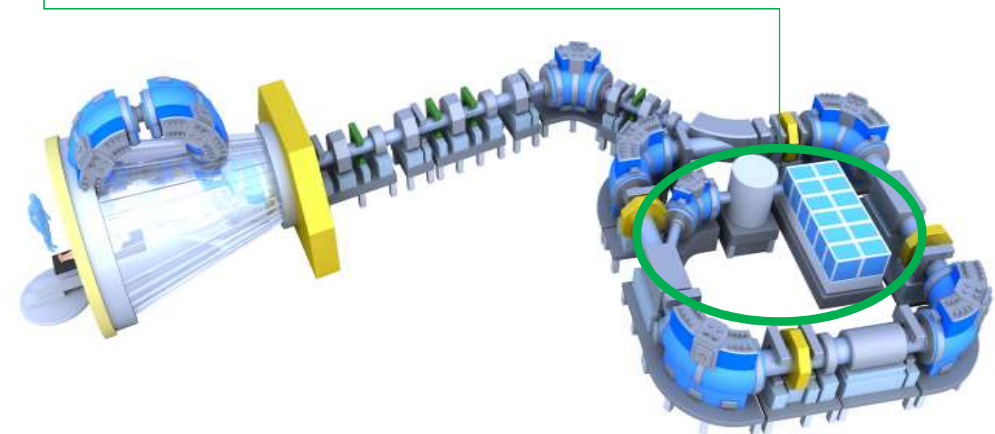
ビーム輸送・マッチング・セクション

1×10^9 個4 MeV/u炭素線@ $\pm 1\% \text{b.w.}$

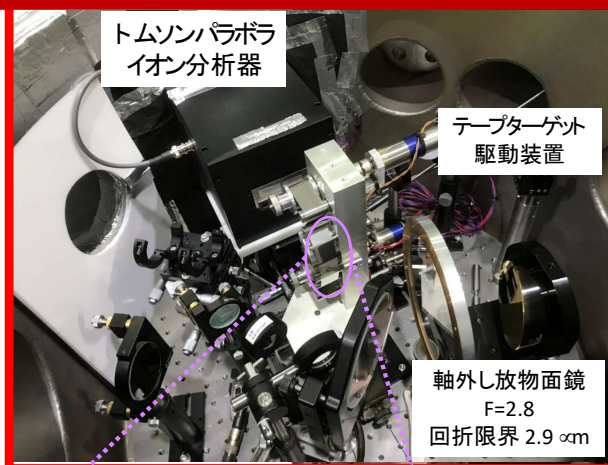
シンクロトロン加速器

ガントリー

患者



レーザー駆動炭素線発生装置



イオン加速プラットフォームレーザー

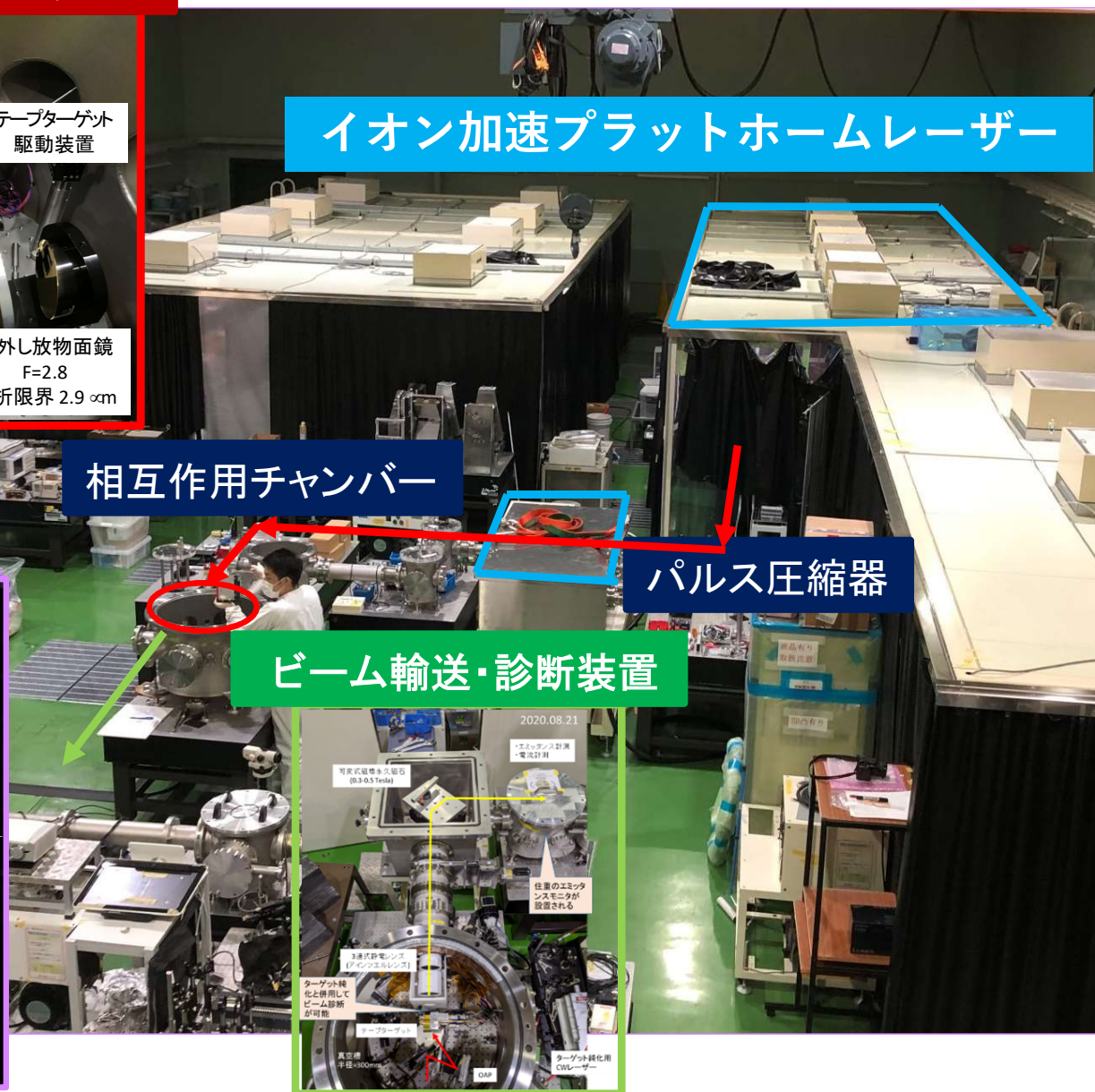
相互作用チャンバー

パルス圧縮器

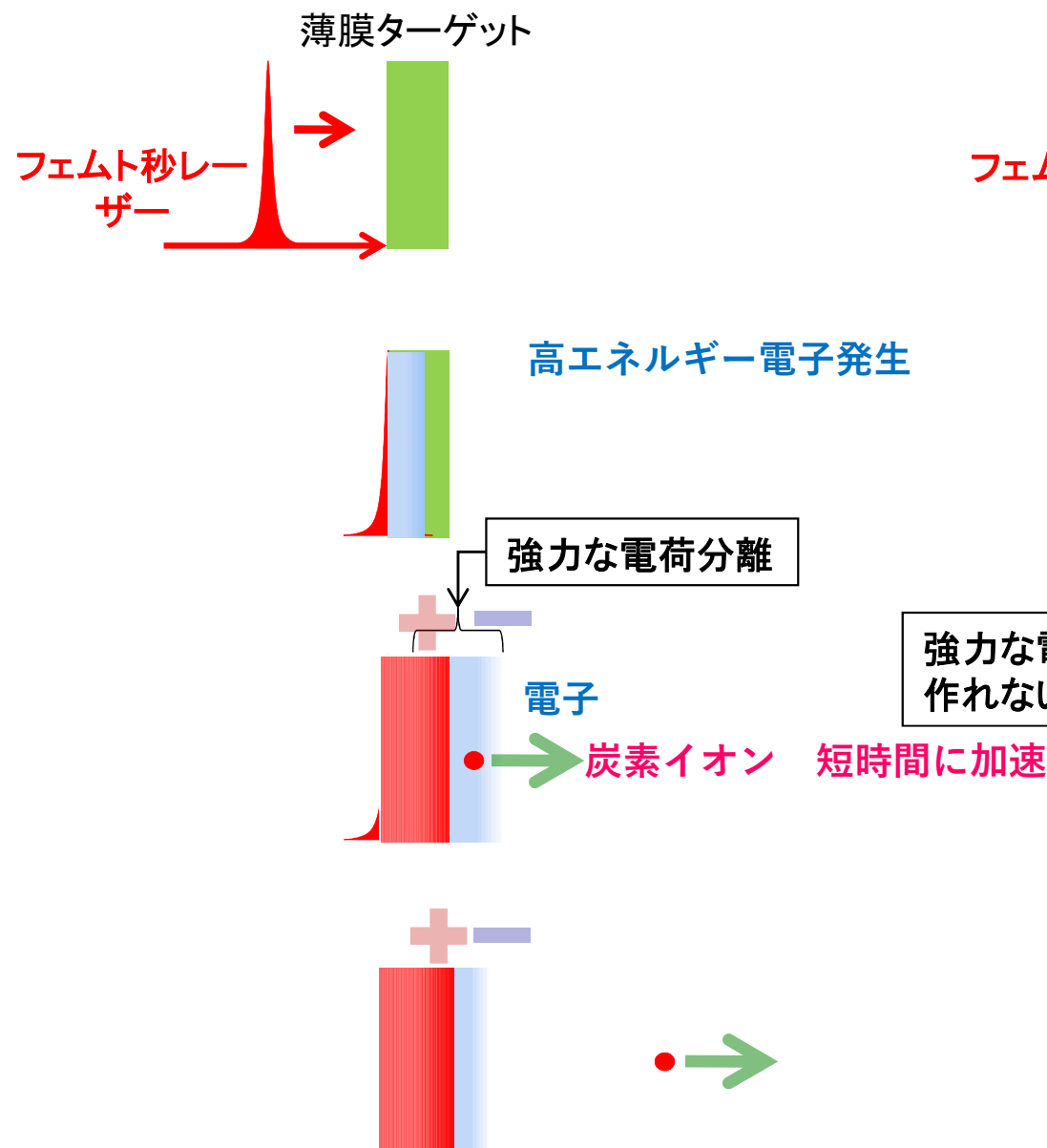
ビーム輸送・診断装置

FWHM X 4.0 μm
FWHM Y 3.9 μm

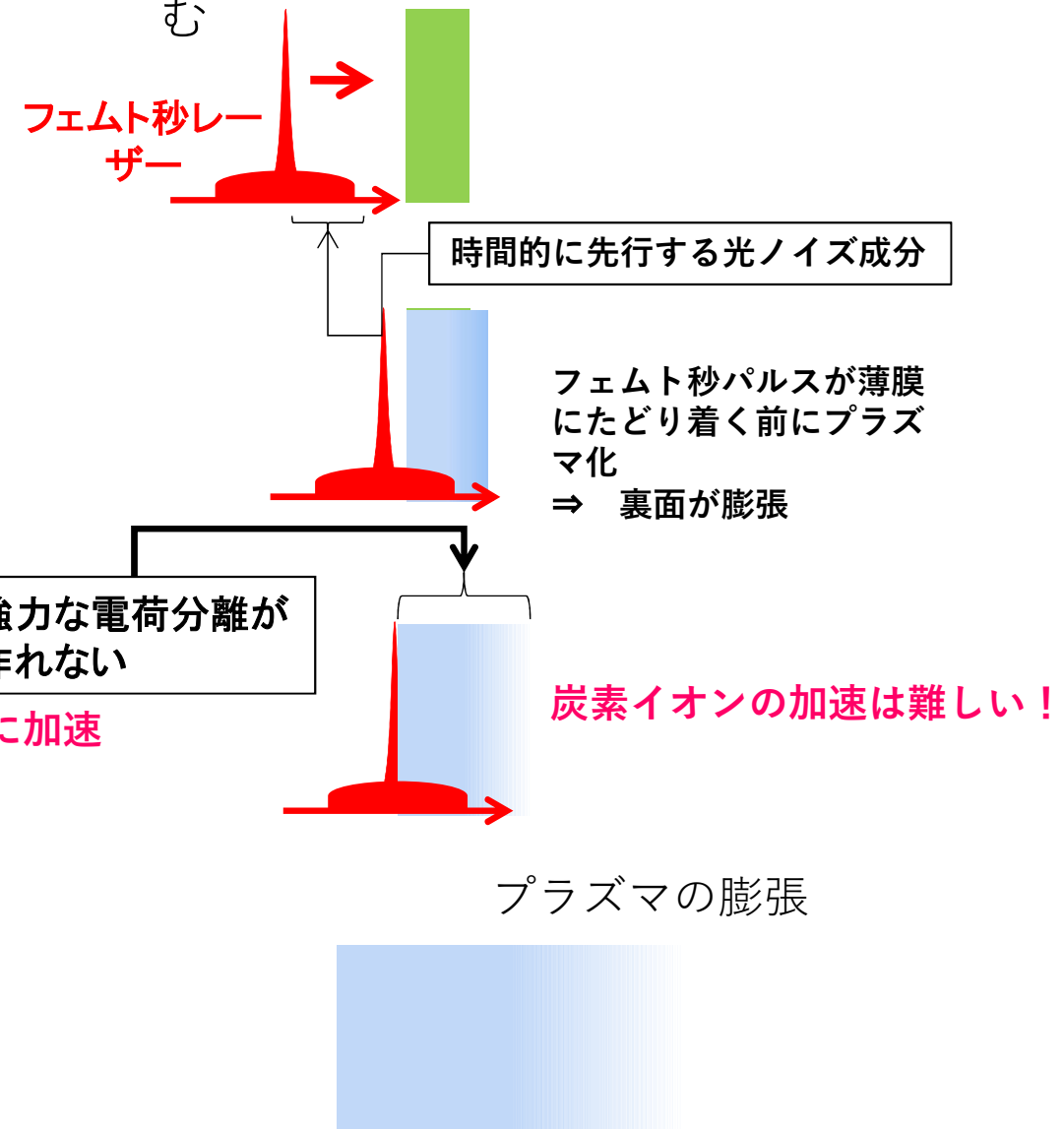
最大強度レーザー
@850 mJ, 80 fs
 $\sim 5 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$

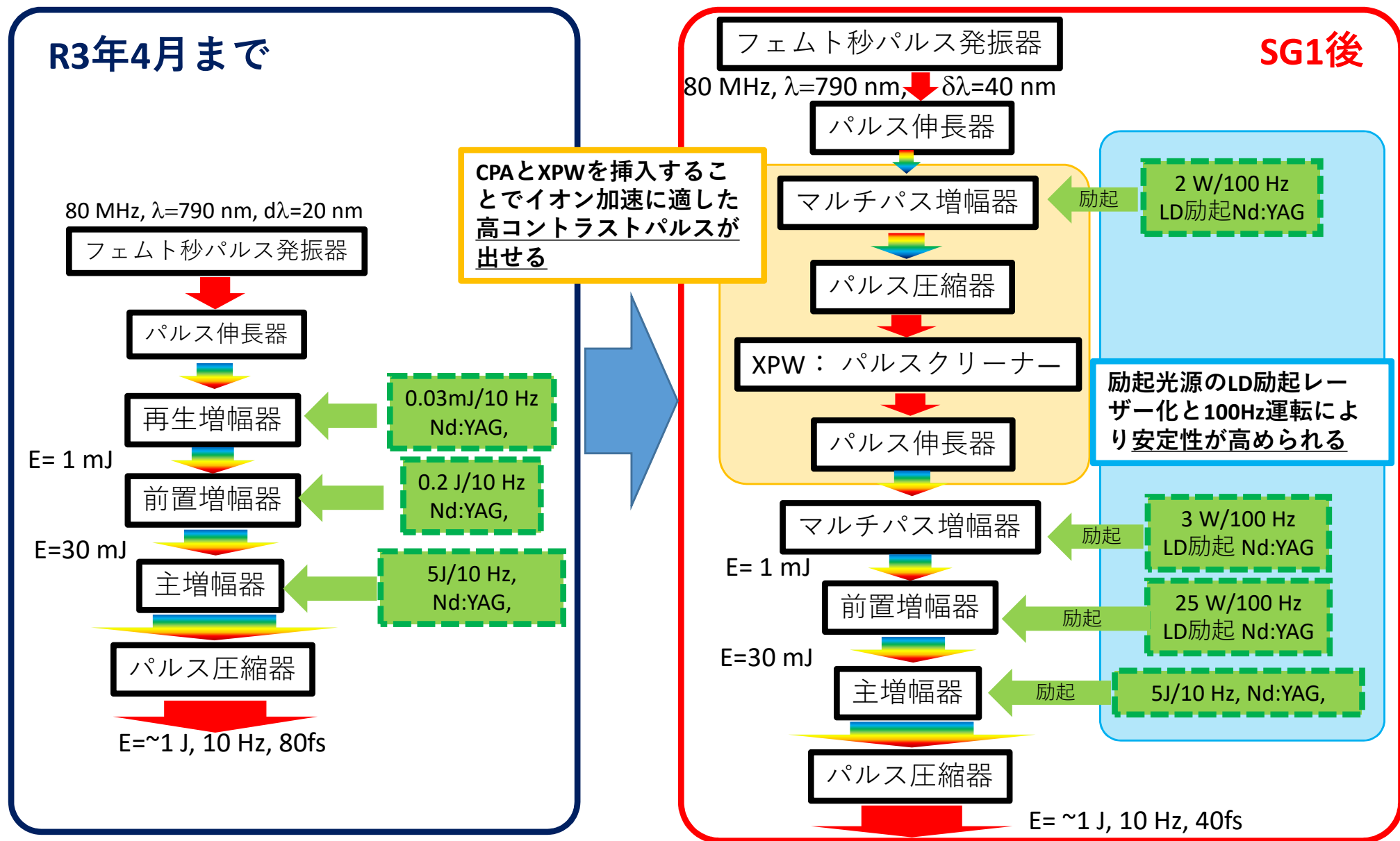


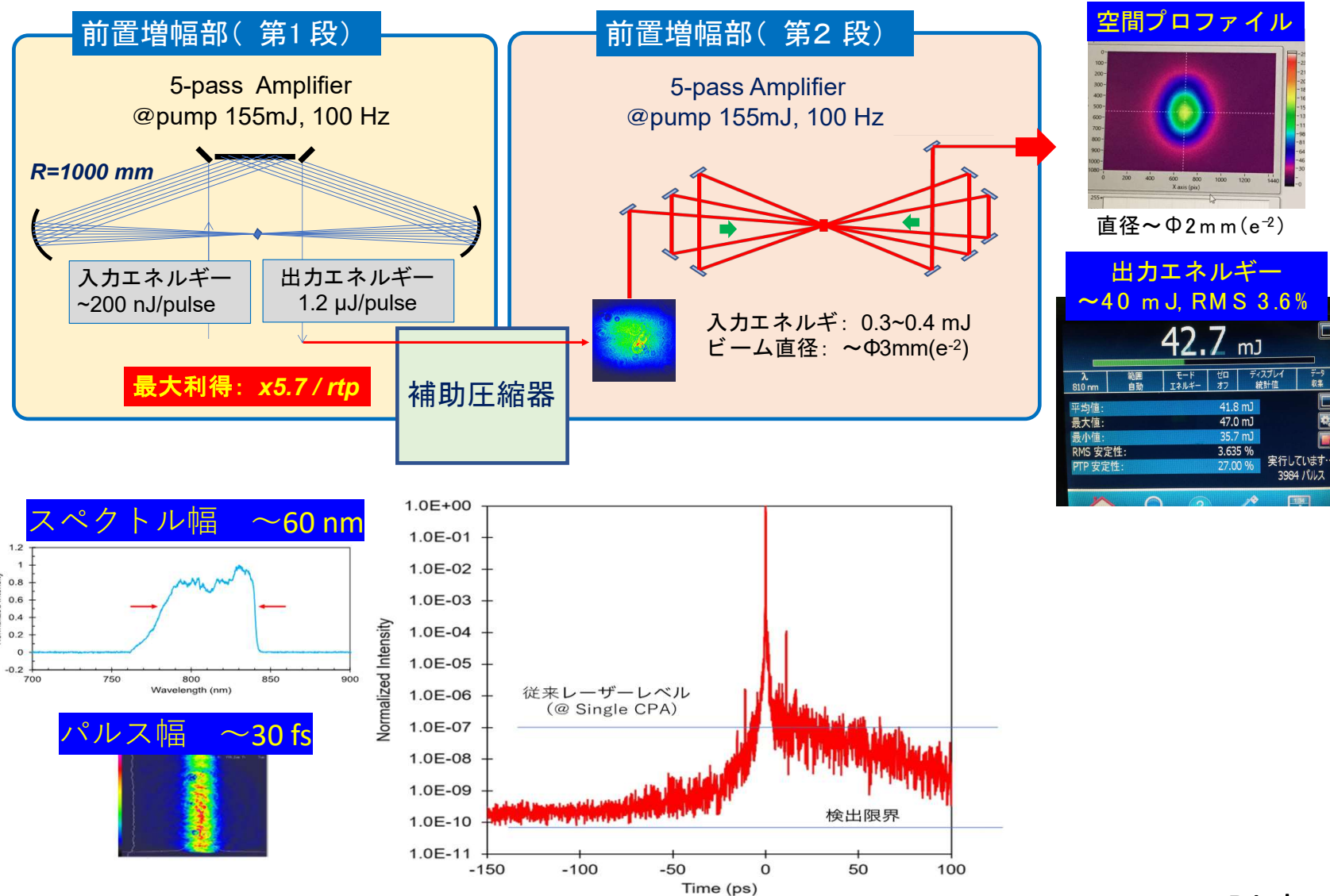
理想的なフェムト秒パルス



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



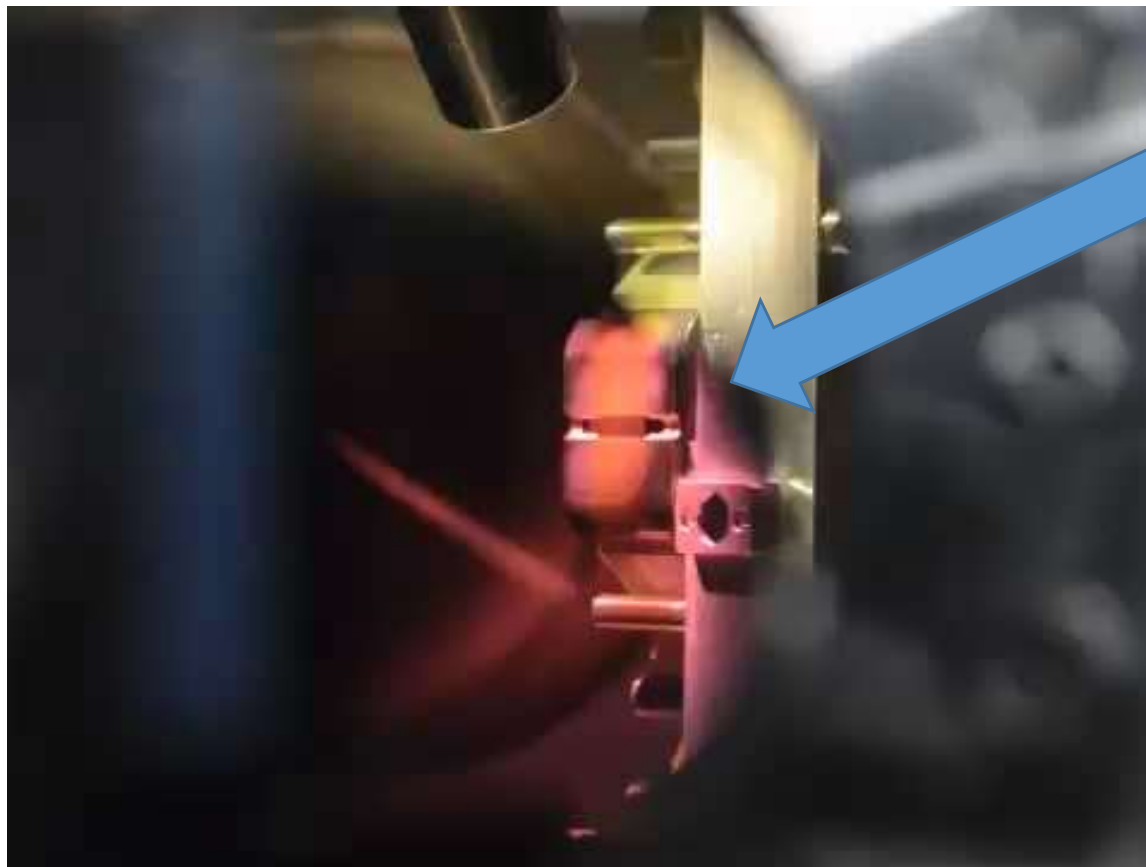




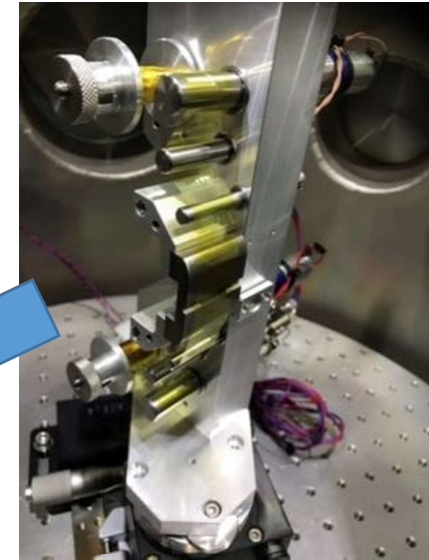
Dinh、森 他

薄膜テープターゲット・駆動機構の開発

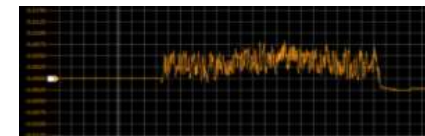
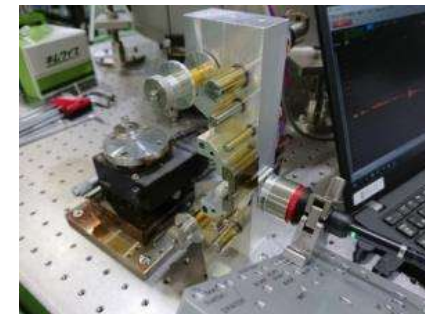
空気中でのレーザー照射 10mJ-10Hz



500発の連続照射を実現

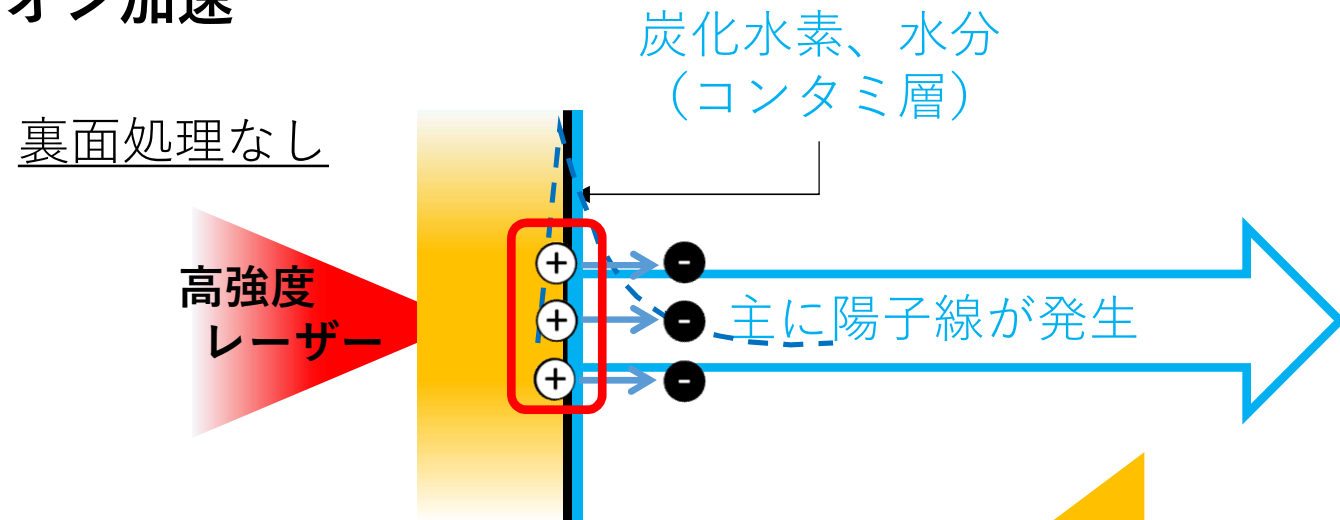


テープターゲット安定駆動評価試験

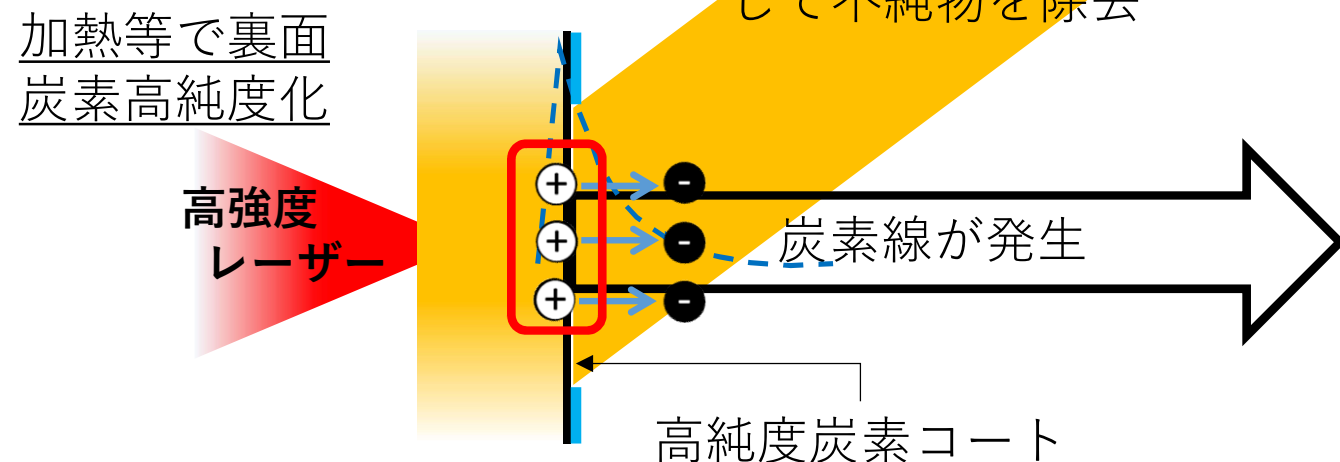


2cm/sの速度 で $\pm 2.5 \mu\text{m}$ 程度
(OAPレイリー長: $30 \mu\text{m}$ 程度)

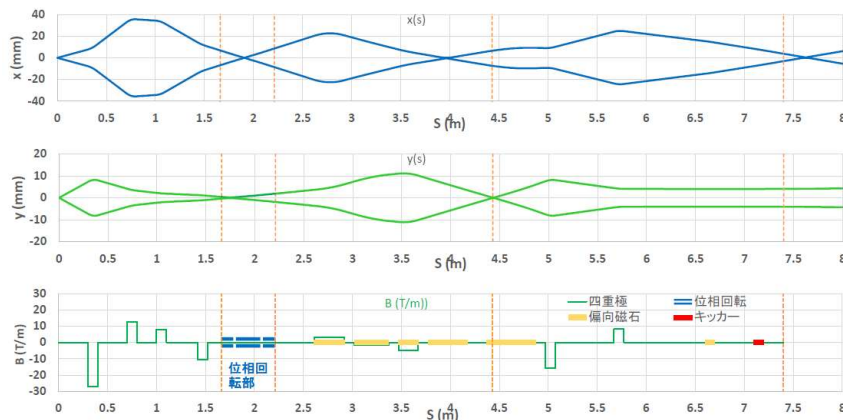
通常のレーザー駆動イオン加速



不純物を除去して炭素イオンを加速



Beam Envelope



計算条件

発生イオン数： 1×10^8 個/10%b.w./msr

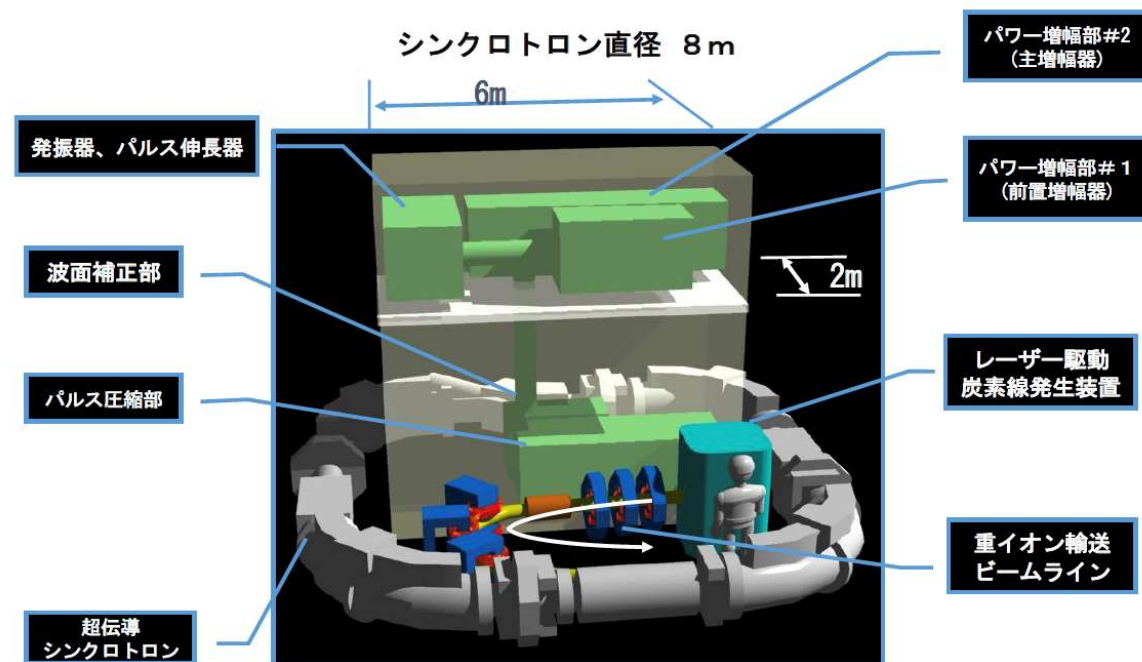
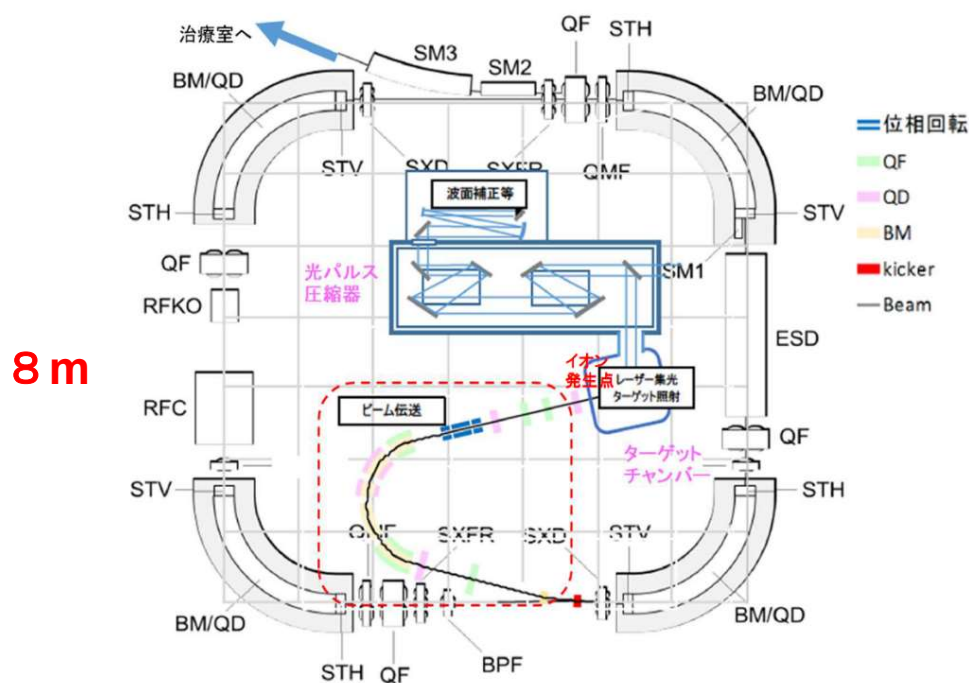
計算結果

アクセプタンス： 1.9 msr ($\pm 25 \times 12 \text{ mrad}$)

1回入射粒子数： 1.3×10^8 個

20回入射粒子数： 1.6×10^9 個

野田 他



- ✓ レーザープラズマによるイオン加速研究
- ✓ 重粒子線がん治療とレーザー加速器の利用
- ✓ JST-MIRAIの目標
- ✓ 現在の研究開発と成果
- ✓ 展望

2019

2025

2030

2035

