

量子メスに向けたレーザー駆動イオン型ビームインジェクターの開発

榊 泰直^{A)}, 小島 完興^{A)}, 畑 昌育^{A)}, チン タンフン^{A)}, 宮武 立彦^{B)}, 松本 悠椰^{B)},
野田 悦夫^{C)}, 大友 清隆^{D)}, 筒井 裕士^{D)}, 野村 真史^{D)}, 黒木 宏芳^{E)}, 清水 祐輔^{E)},
原田 寿典^{E)}, 井上 典弘^{E)}, 白井 敏之^{C)}, 近藤 公伯^{A)}

A) QST Kansai, B) Kyushu Univ., C) QST Inage
D) Sumitomo Heavy Industries, E) Hitachi Zosen

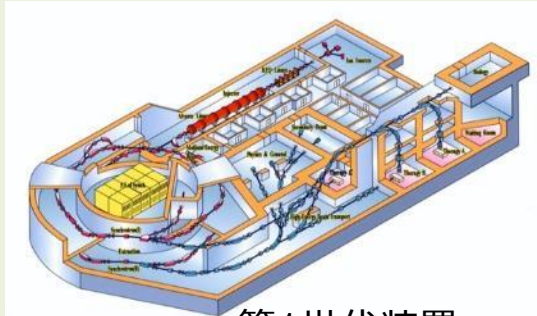
令和 5年 8月 30日

第20回日本加速器学会年会 日本大学

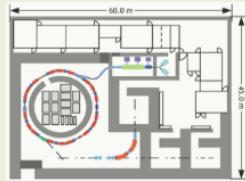


- 1) 量子メス開発プロジェクト
- 2) イオン加速手法のブレークスルー
- 3) 産官学連携による新型イオン入射装置の開発
- 4) 原型機の完成と速報データ

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



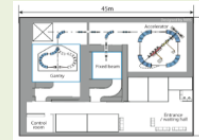
第2~3世代装置
(例：2010年群馬大学)
60 x 45m、140億円
(1/3程度)



2016年開発開始

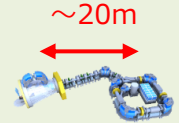
量子メス

(画期的な小型化による国内外の普及へ)



第4世代装置
より小型化と高性能化
45x34m (1/6程度)

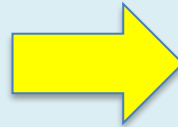
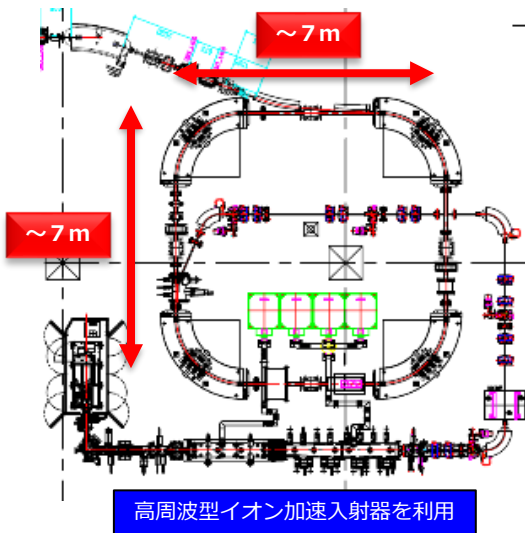
超伝導技術
マルチイオン照射



第5世代装置
さらなる小型化
10x20m (1/40程度)

レーザー加速
小型超伝導回転ガントリー

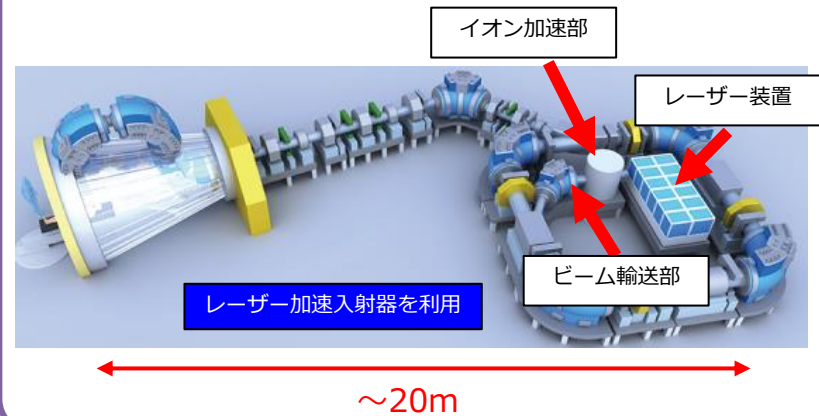
第4世代量子メスの構想図



第4世代→第5世代
量子メスへの挑戦

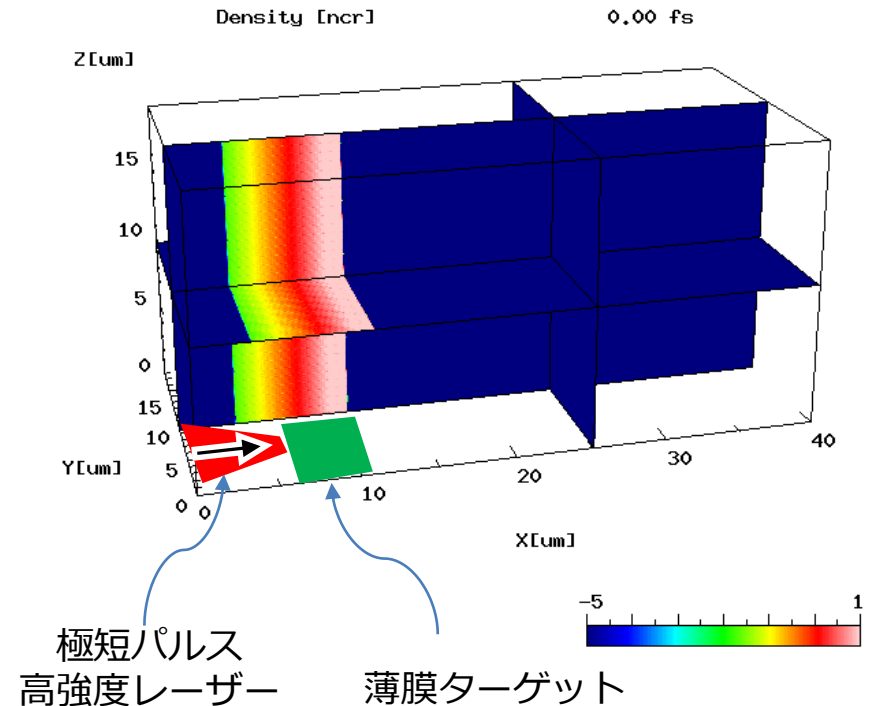
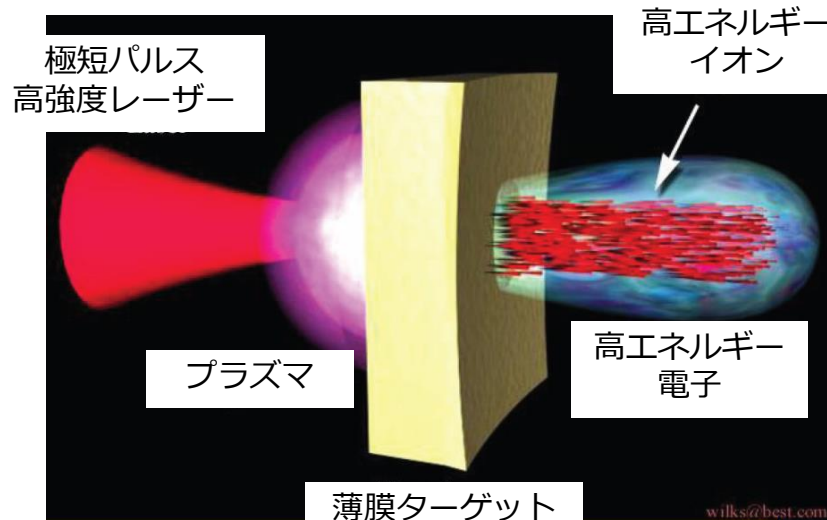
高周波型加速の入射器を“レーザー加速入射器”に

第5世代量子メスの構想図



西暦2000年頃：

瞬間出力千兆ワット(10^{15} W)のレーザー装置を使うと
原子核実験につかえるような高エネルギー陽子が発生することを発見



高周波型イオン加速入射器 (第4世代) ⇒ レーザー加速入射器 (第5世代)

重粒子線治療装置用レーザー駆動イオン加速型入射器の開発

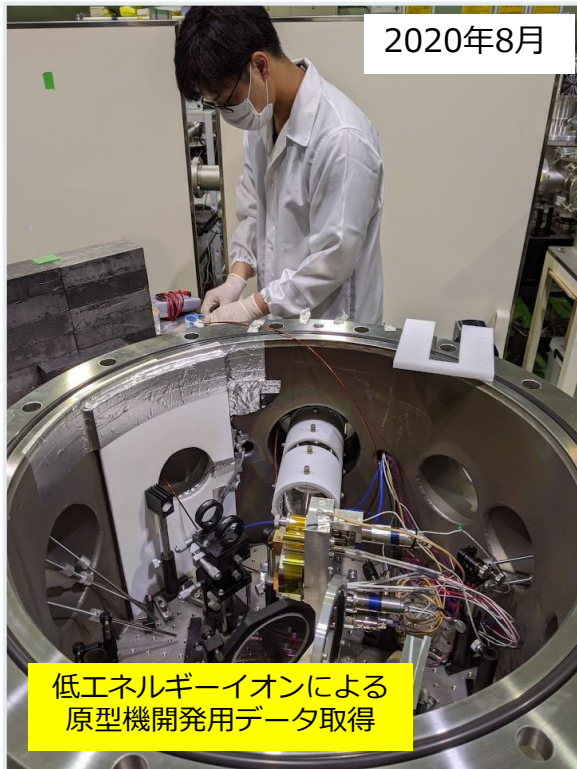
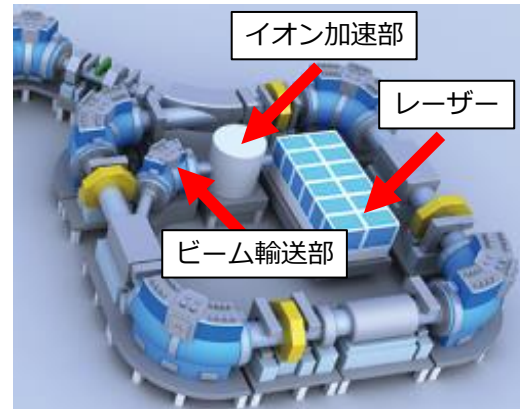
JST未来社会創造事業 大規模プロジェクト型 (2017年度～) の開始



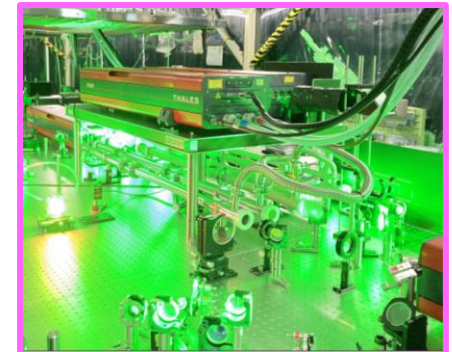
『粒子加速器の革新的な小型化及び高エネルギー化につながるレーザープラズマ加速技術』

基礎研究レベル

⇒ 社会実装技術へ



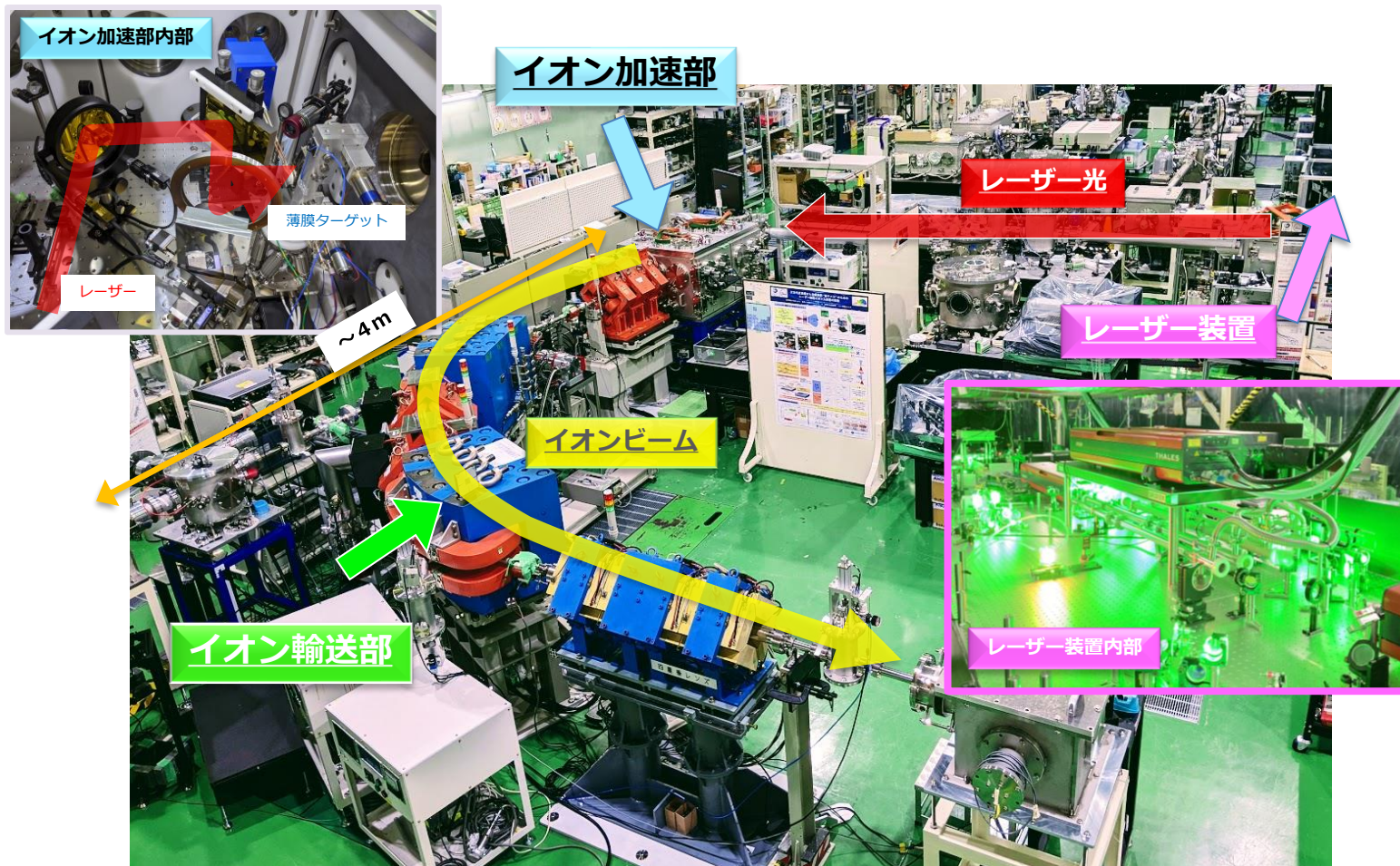
2020年8月



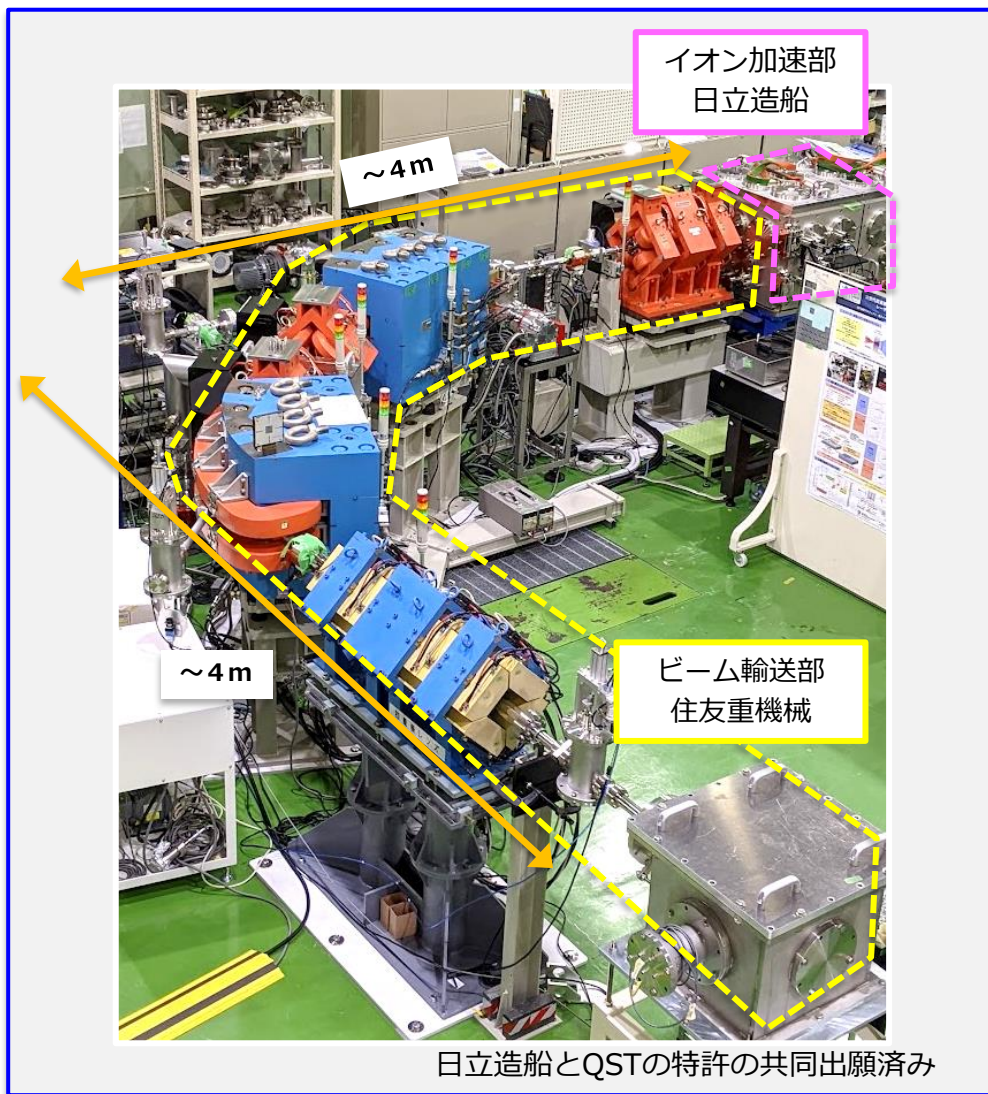
イオン入射器開発において必要な課題

- 1) 重粒子加速に最適なレーザー装置
小型高強度レーザー装置の開発
- 2) 重粒子発生用ターゲット装置 (イオン加速部)
高繰り返し高純度炭素生成ターゲット装置の開発
- 3) 下流加速器への重粒子輸送装置 (ビーム輸送部)
高効率なビーム輸送技術およびビーム診断技術の開発

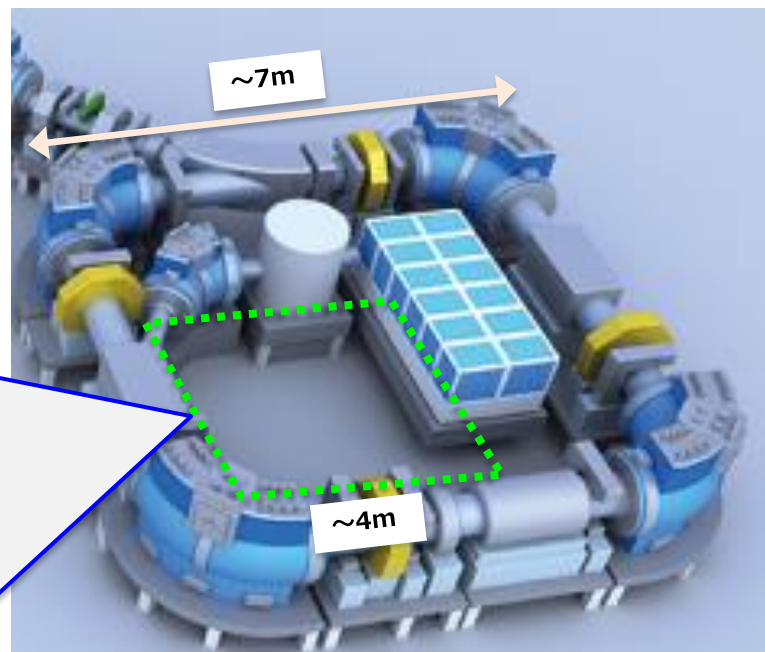
低エネルギーイオンによる
原型機開発用データ取得



- | | | |
|-------------|-------------------------------------|----------|
| 8/31 WEO11: | レーザー駆動重イオン加速のための誘導加熱による表面汚染の高速除去 | 小島 (量研) |
| 8/31 THP52: | 量子メスプロジェクトに向けたレーザーイオン入射器シミュレーションの進展 | 畑 (量研) |
| 8/29 TUP53: | レーザー駆動イオン加速機構における高品質イオンビーム生成 | 宮武 (九大院) |
| 8/30 WEP02: | レーザー加速ビームラインによる大電流ビーム輸送PICコードの検証 | 松本 (九大院) |
| 8/30 WEP46: | レーザー加速イオンの超伝導シンクロトロンへの直接入射の検討VI | 野田 (量研) |



産官学連携で開発した各装置を
最適化配置し原型機を構築



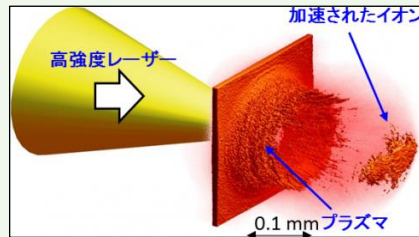
一般的な加速器の設計コードで用いられる

『ビーム軌道の式』から高精度に装置が計算可能である ⇒ 多くの加速器施設で実証済み

$$r_m'' + \frac{\gamma' r_m''}{\beta^2 \gamma} + \frac{\gamma'' r_m}{2\beta^2 \gamma} + \left(\frac{qB}{2mc\beta\gamma} \right)^2 r_m - \left(\frac{P_\theta}{mc\beta\gamma} \right)^2 \frac{1}{r_m^3} - \frac{\varepsilon_n^2}{\beta^2 \gamma^2 r_m^3} - \frac{K}{r_m}$$

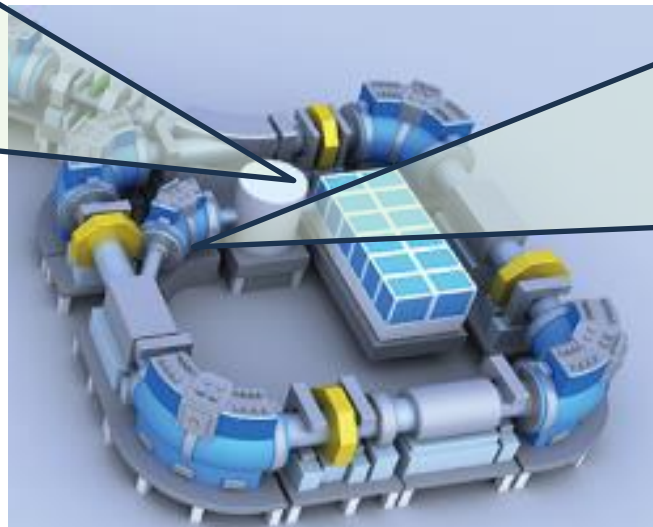
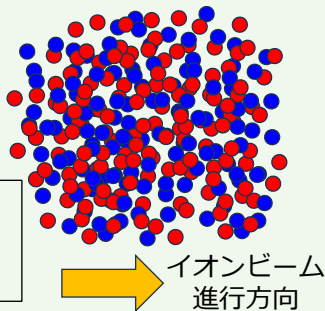
磁場制御の項
電場の項
エミッタンスの項
空間電荷の項

“Theory and Design of Charged Particle Beams”, Martin Reiser, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co (2008)



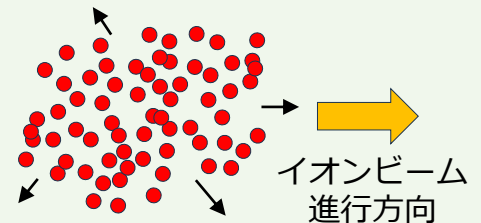
- 電子
- イオン

電子雲をまとった
高密度プラズマ
(電気的中和状態)



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



磁石

レーザー加速部⇒イオン輸送部

- ・ 極短パルスビームの空間電荷効果の変化は？
- ・ エミッタンスはどのように変化するか？

理解されて
いない！

	2017-2020 (基礎データ取得)	2021-2023 (原型機開発)	2024-2026 (実証機技術開発)			
レーザー装置 (QST)	レーザー品質の向上	レーザー光の高繰り返し技術装置開発	原型機 の 製 作	統合 試 験 実証に向けた 課題の調査	安定な レーザー装置 の開発	実証 装置 の 設 計
イオン加速基礎 (QST)	炭素イオン加速 シミュレーション研究	炭素イオン加速実験による基礎データの取得			炭素イオン ビーム品質向 上用パラメー タの決定	
イオン加速部 ターゲット装置 (日立造船)	高純度炭素発生の基礎研究	高純度炭素発生可能な ターゲット装置の開発			実証用炭素イ オンの安定的 生成ターゲッ トの開発	
ビーム輸送部 (住友重機)	レーザー加速による低エネルギーイオン(10keV)ビームによる輸送試験	イオン入射器原型機の ビーム輸送装置の最適 化計算			高効率ビーム伝 送のための装置 および手法の開 発	

第5世代量子メス入射器の早期実現を目指して、
2026年度末頃には「シンクロトロン入射の実証装置」の設計が
可能となるように技術開発を進めていく

2016年頃まで、まだまだ**基礎研究レベル**にあった**レーザー駆動イオン加速手法**の**社会実装**を目指し、**産官学連携**による**装置開発**によって、**世界で初めて装置の原型機**を完成させた。

統合実験を開始し、**既存加速器よりレーザー駆動イオン加速のビーム品質のほうがよい**という結果が出始めた。

原型機から実証機の早期実現を目指した**研究開発**を推進する