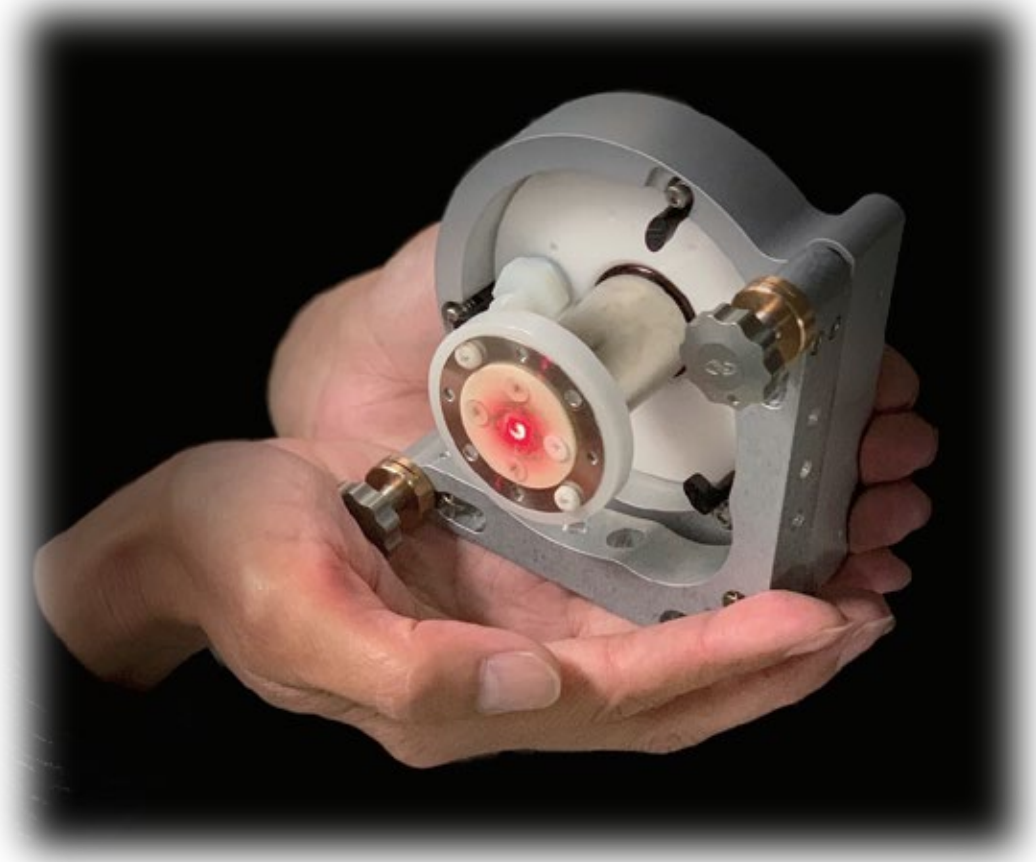




放電型レーザープラズマ加速装置

プロジェクトのホームページ
<https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/lpa/>



お問い合わせ先

大阪大学産業科学研究所
第2研究部門 量子ビーム物理研究分野
JST未来社会創造事業 LPA事務局
〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘8-1
e-mail: lpa-hq@ims.ac.jp

レーザー駆動による 量子ビーム加速器の開発と実証

Development and demonstration of
laser-driven quantum beam accelerators



プログラマージャー (PM)

佐野 雄二
SANO YUJI

JST未来社会創造事業

研究開発の概要

加速器の革新的小型化を可能にするレーザープラズマ駆動型加速技術について、実用化が可能であることを見極められる段階（概念実証、proof-of-concept、POC）まで研究開発し、自由電子レーザーや重粒子線がん治療装置などの幅広い分野における汎用基盤技術に発展させることを目指し、以下の三つの課題に取り組む。

- ① 加速エネルギー数GeVの電子加速器の卓上型加速器（数メートルサイズ）の実証
- ② 加速エネルギー4 MeV/uのC⁶⁺イオン卓上型（長さ6m×幅2m）入射器の設計実証
- ③ 安定で信頼性が高く、利便性の高いコンパクトでモジュール化されたレーザーシステムの開発

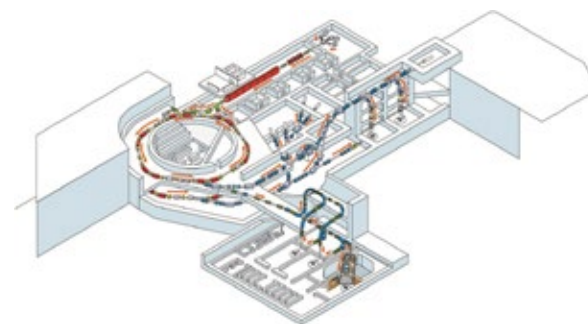
加速器とは？

加速器は1932年のコッククロフト・ウォルトン型加速器（800kV）に始まり、当初は原子核研究に用いられ、様々な発明によりそのエネルギーを高め、性能を向上させてきた。

現在では、

- 学術的利用（原子核・素粒子など）
- 医療（がん治療、病原検査、薬剤製造など）
- 工業的利用（滅菌、殺菌、セキュリティなど）
- 農業的利用（食品照射、品種改良など）
- 2次発生ビームの利用
 - 放射光利用
 - 中性子利用
 - ミュオン利用

と多岐に渡り、なくてはならない基盤的な装置となっている。



HIMAC (QST)
重粒子線がん治療装置
120m × 65m

加速器の課題は？

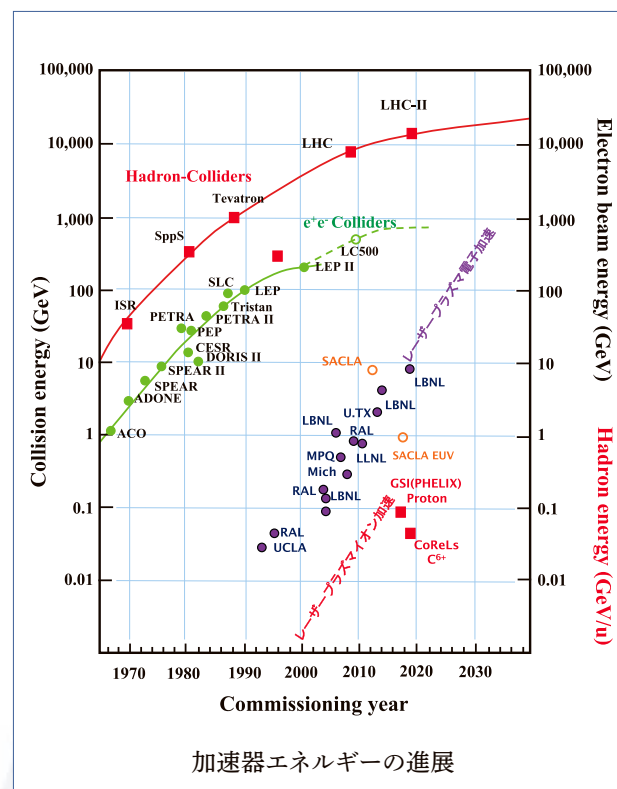
特に、高エネルギー物理学研究用の加速器の大きさは、地球上では限界に近い直径6km、一周の長さが20kmにも及んでいる。また放射光や中性子等の先端基盤施設でも直径数100m、病院に併設される重粒子線がん治療用加速器でも直径40mに達する。

これらを小型化することで、建設費や運転経費を安価にしたいという要望が学術・産業・医療界などから出ている。

原理的な限界

既存の加速器の大きさは、1つには金属製の加速管表面での放電限界（～150MV/m）で制限されている。

この限界を打ち破る加速器技術がレーザープラズマを利用した量子ビーム加速器「レーザープラズマ加速器」である。



本プロジェクトの技術課題

- ① レーザー航跡場加速（LWFA）による、高安定・高品質な1GeV級電子ビームの生成技術の確立とそれを利用したXUV自由電子レーザー実証と利用

- 安定なレーザー輸送系の構築
- ガスジェット、キャピラリー内プラズマの安定生成
- サブフェムト秒精度のタイミングシステム
- 室温、湿度、振動等変動を高精度に抑制する環境制御システム

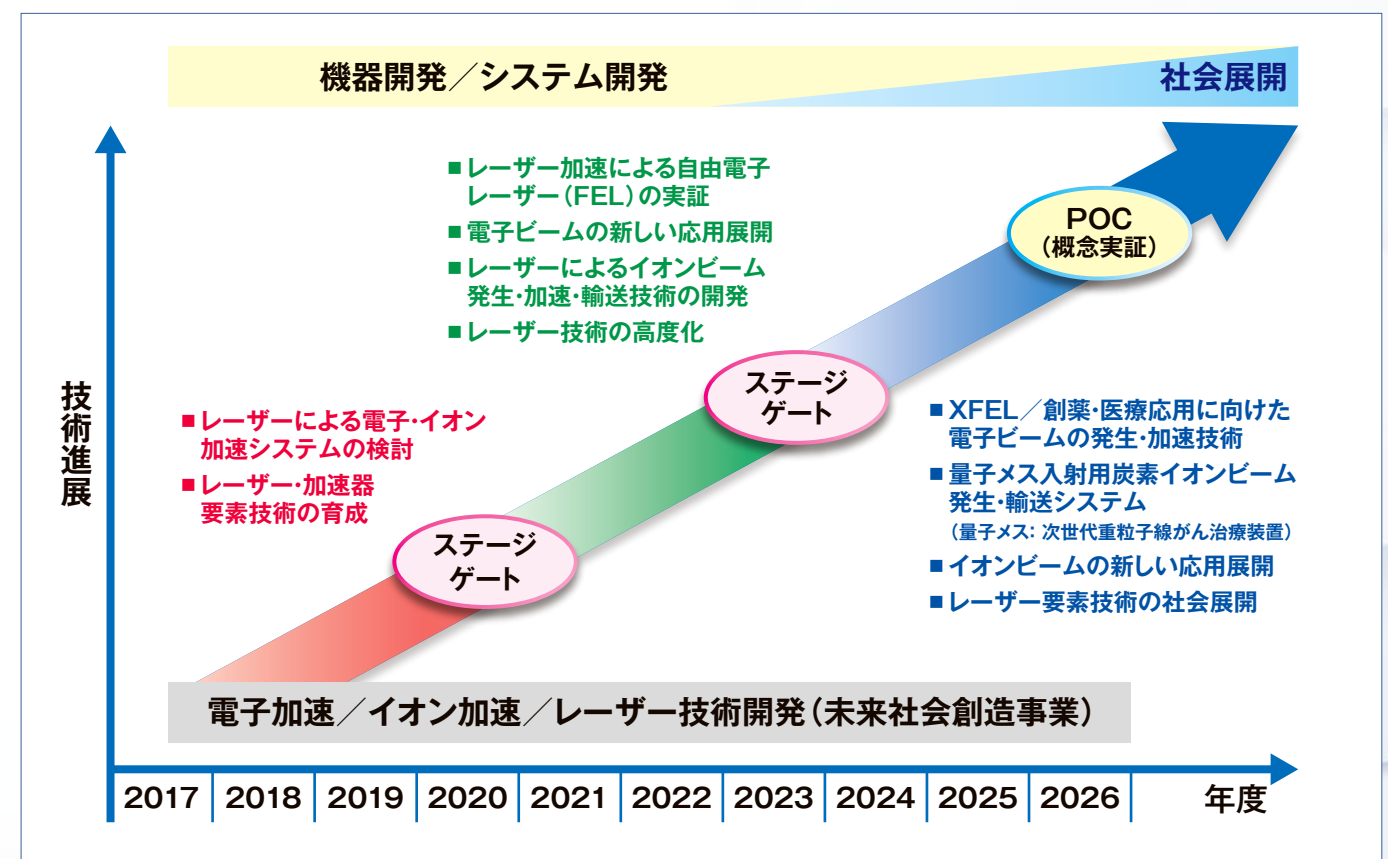
- ② 重粒子線がん治療装置へのイオン入射器として適用が可能なレーザープラズマイオン加速を実証

- 高輝度・MeV級イオンビームの生成とビームのマニピュレーション技術の確立
- 高繰り返し動作可能な薄膜ターゲット技術
- エネルギー拡がりを圧縮するデバンチャー技術

- ③ パルスエネルギー数ジュール級、繰り返し100Hz級で、コンパクトで利便性の高いレーザーシステムを構築

- 機器の効率化
- 高除熱技術
- モジュール化技術の開発と性能実証
- 新規利用分野の開拓（モジュールレーザーはレーザープラズマ加速だけでなく基礎科学・産業・医療に幅広く展開）→大量生産による大幅なコストダウンを見込む

研究開発のロードマップ



開発体制

オールジャパン体制でレーザー加速実証プラットフォームを構築

JASRI (～2024年3月) 高輝度光科学研究センター

高品質外部入射電子加速器開発

PI 熊谷 教孝 名誉フェロー
サブPI 大竹 雄次 サブグループリーダー

研究開発協力機関
東京大学、日本大学



理化学研究所 放射光科学研究センター(理研RSC)/ 自然科学研究機構 分子科学研究所(分子研)

小型集積レーザー(TILA)モジュール開発

PI 平等 拓範 グループディレクター/特任教授

研究開発協力機関

高エネルギー加速器研究機構、核融合科学研究所、
QST関西光量子科学研究所

研究連携機関

TILAコンソーシアム



大阪大学 産業科学研究所/ 理化学研究所 放射光科学研究センター(理研RSC)

レーザー電子加速

PI 細貝 知直 教授/チームリーダー

サブPI 楊 金峰 准教授

研究開発協力機関

東北大学



高エネルギー加速器研究機構(KEK) 加速器研究施設/ 物質構造科学研究所

XFELシステムの小型化に向けた研究開発

PI 吉田 光宏 教授

サブPI 山本 樹 特任教授



電気通信大学 レーザー新世代研究センター

レーザー要素技術開発

PI 米田 仁紀 教授



大阪大学 レーザー科学研究所

レーザー開発 高繰り返し化

PI 余語 覚文 教授

研究開発協力機関

千葉工業大学、核融合科学研究所
京都大学



量子科学技術研究開発機構(QST) 関西光量子科学研究所

量子ビーム高精度診断系

PI 神門 正城 所長



奈良国立大学機構 奈良女子大学

イオンビームの高純度化

PI 石井 邦和 准教授



量子科学技術研究開発機構(QST) 関西光量子科学研究所/ 量子医科学研究所

レーザーイオン加速

PI 近藤 公伯 上席研究員(関西研)

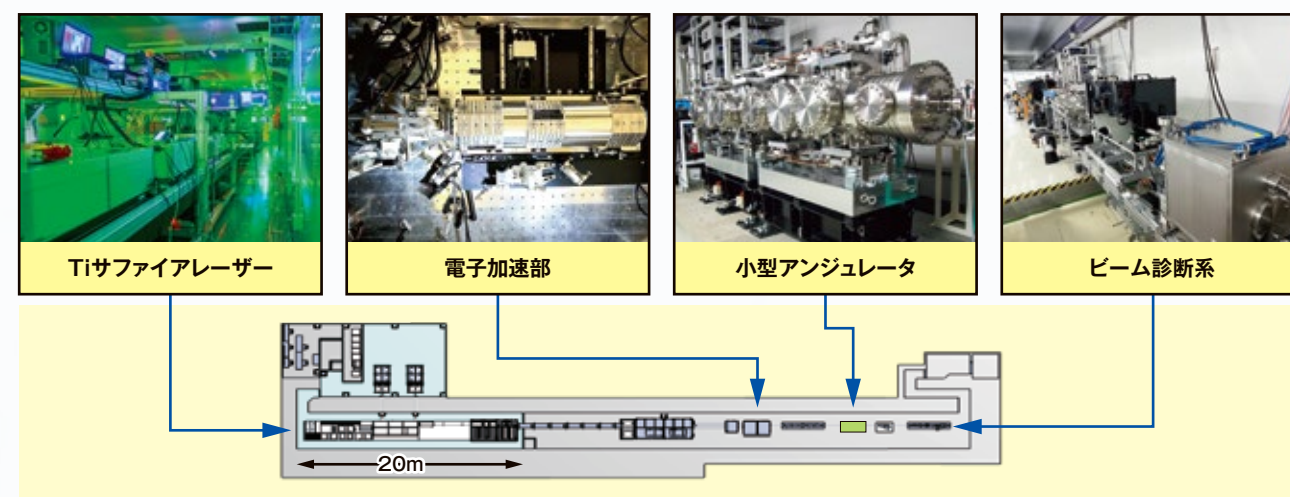
サブPI 白井 敏之 副所長(量医研)

研究開発協力機関

京都大学化学研究所、東海大学総合科学技術研究所



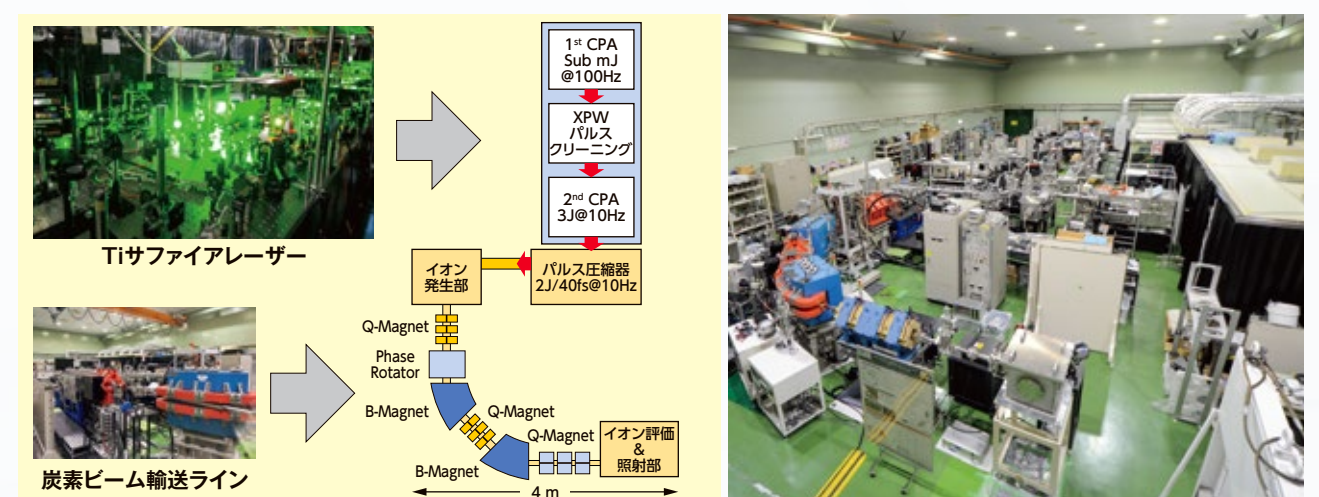
開発拠点(A) 電子加速プラットフォーム(理研RSC)



高出力レーザーを用いて電子加速と自由電子レーザーを実証



開発拠点(B) イオン加速プラットフォーム(QST関西研)



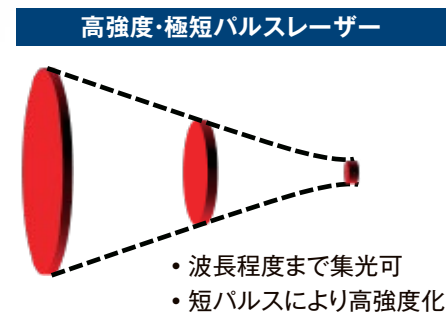
高出力レーザーを用いてイオン入射器の一連の動作を実証

レーザープラズマ駆動量子ビーム加速器とは？

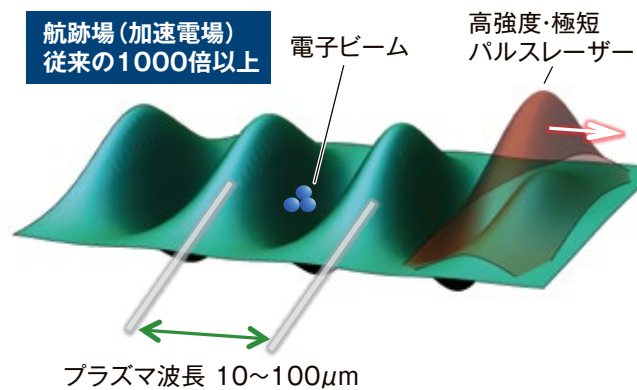
レーザーの持つ高い電場の利用

近年発展している高強度・極短パルスレーザーを集光すると、極めて高い電場・磁場を発生できる。

例えば、ピークパワー10TWのレーザー（エネルギー 300mJ、パルス幅 30fs）を10 μ mに集光すると、 6.4×10^{18} W/cm²という強度となり、電場は、 6.9×10^{12} V/m = 6.9TV/mという高い値になる。



①レーザー航跡場電子加速 (Laser Wake Field Acceleration, LWFA)

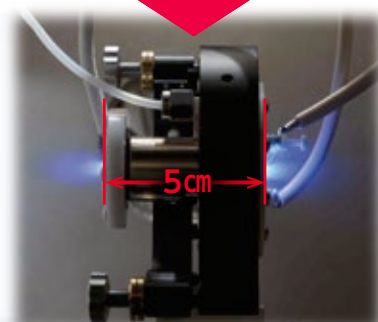


- ①レーザーの持つポンデロモータビリティにより、電子を押しつける。
- ②イオンは重くて動けないので、電子とイオンの荷電分離が起こり、レーザーのパルス長とプラズマ波長が同程度であればプラズマ波(航跡場)が励起される。
- ③この航跡場は、薄いプラズマの中をほぼ光速で進行するので電子の加速に適している。

LWFAで桌上自由電子レーザーや放射光装置を実現させる



SACLAの
C-band主加速管システム



放電型レーザープラズマ加速装置

全長230mの加速管を20cm程度に小型化
米国では、20cmで7.8GeVを達成
日本では、5cmで1.0GeVを達成

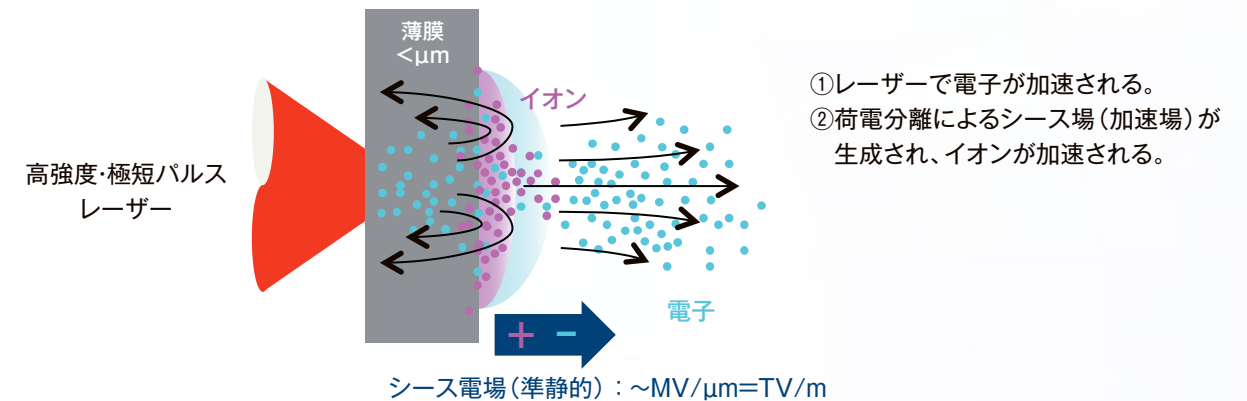
概念実証POC

- 硬X線領域での自由電子レーザーおよび放射光装置の実証機設計に必要なデータを提示
- XUV領域での自由電子レーザーを実証

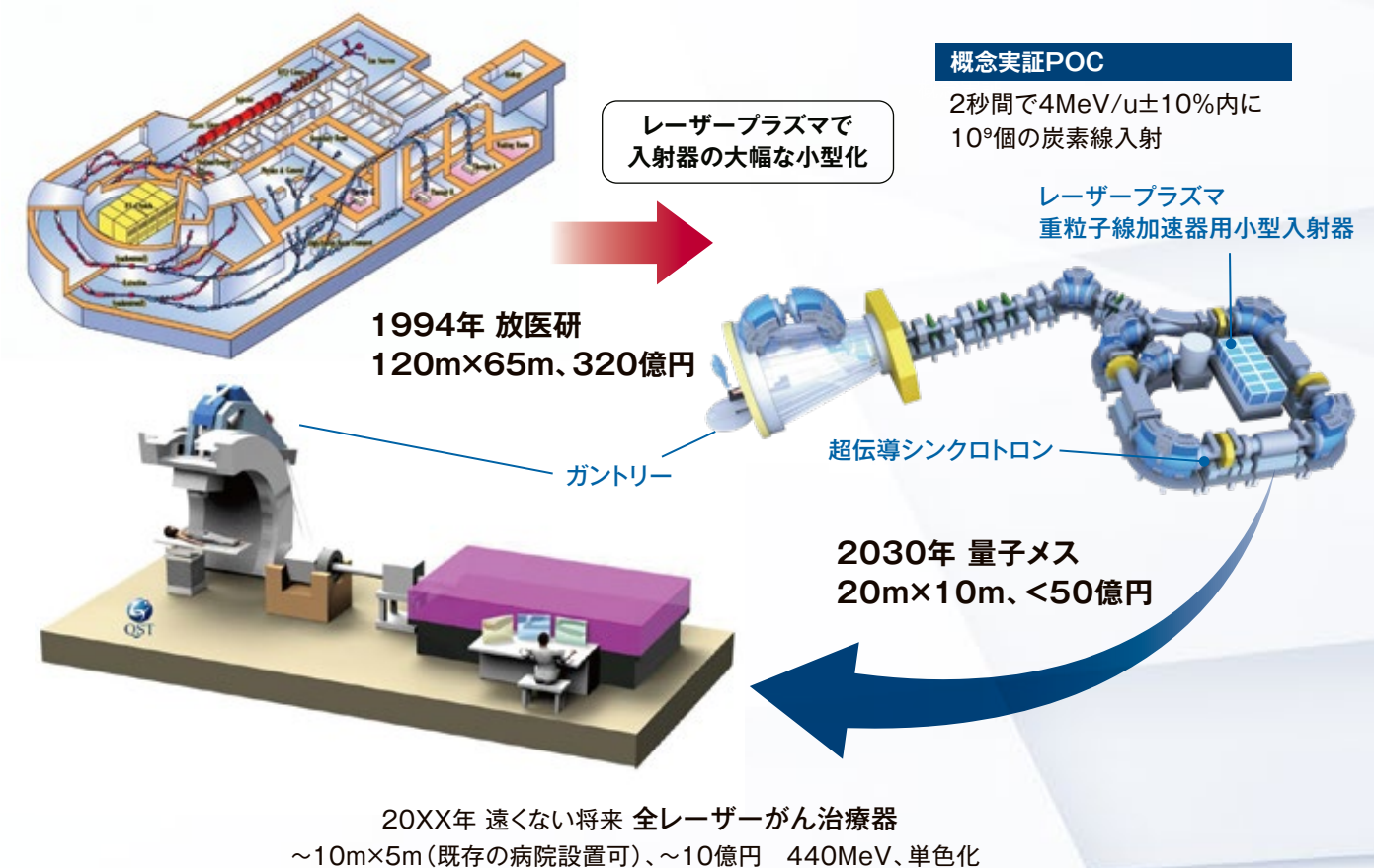
プラズマが保持する高い電場

金属でできた加速空洞は絶縁破壊による限界があるが、プラズマはイオン化した状態であり、高い電場を保持できる。また、プラズマによりレーザーの横波を加速に使える縦波に変換できる。

②レーザーイオン加速 (Target Normal Sheath Acceleration, TNSA)



がん治療用重粒子(炭素)線加速器を小型化する



だれでも、どこでも、いつでも利用を可能にするため、最新の加速器技術を駆使し装置の小型化を目指す。
(量子メスの重粒子線加速器用入射器をレーザープラズマで超小型化)