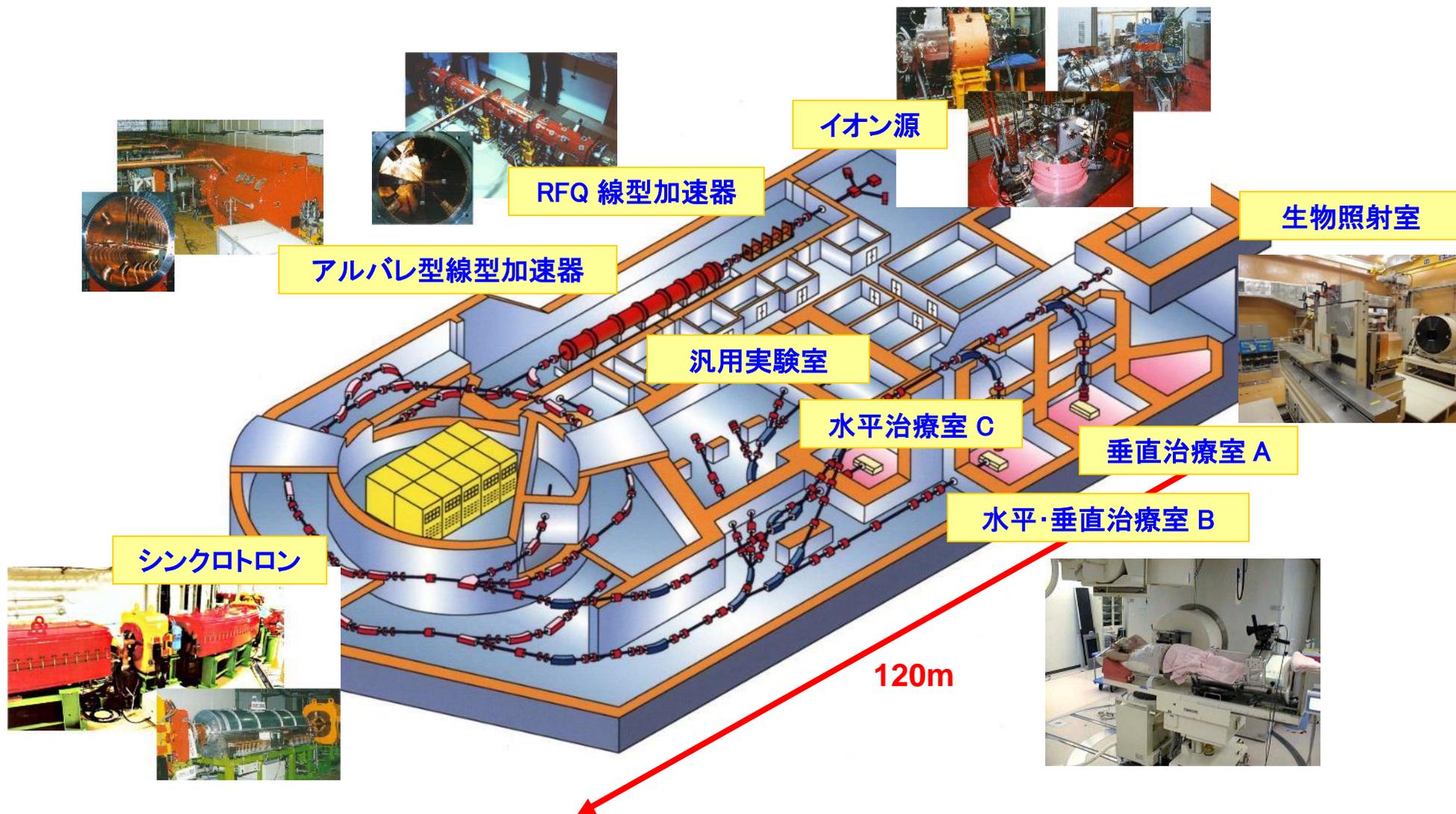


重粒子線治療装置の現状と今後

国立研究開発法人
量子科学技術研究開発機構
白井 敏之

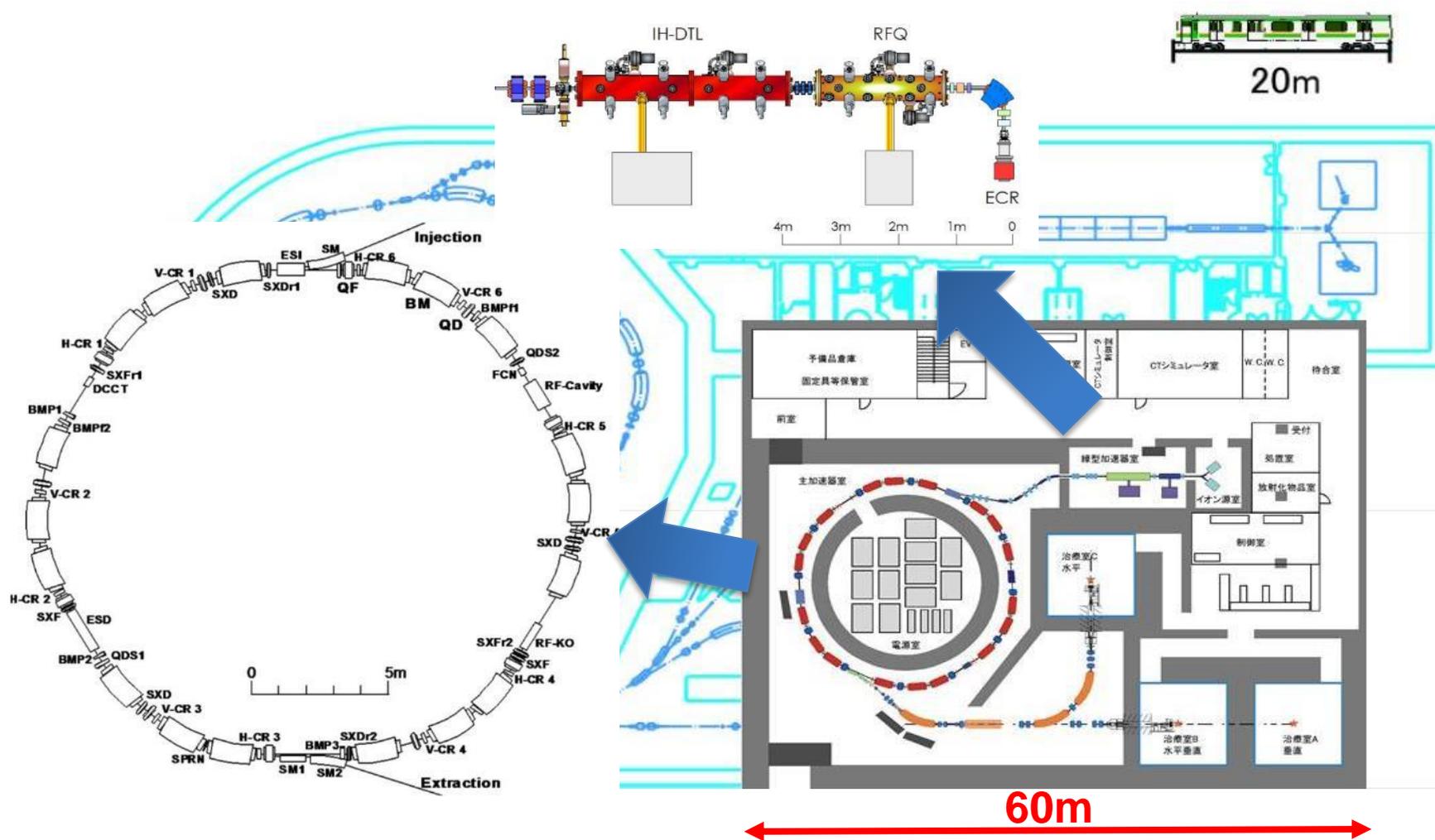
重粒子線がん治療装置HIMAC (1994~)



世界初の重粒子線治療の専用施設であり、1994年より臨床研究がおこなわれてきた。また、夜間・週末には、年間100課題を超える物理・生物の基礎研究が実施されている。

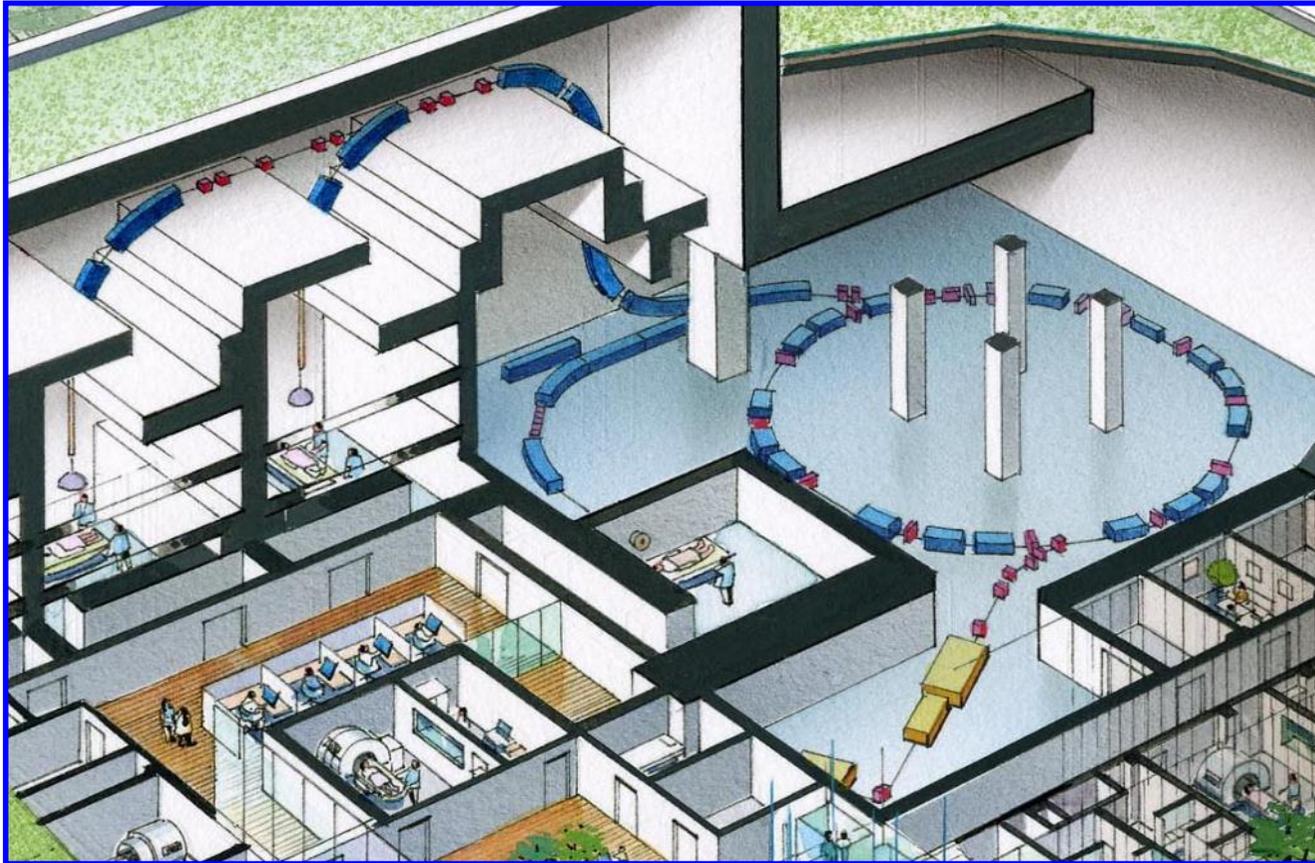
- 炭素線治療装置の進化
 - 治療装置小型化
 - 治療技術高度化
- 最近の炭素線治療施設
- 次世代炭素線治療装置(量子メス)に向けて

炭素線治療装置の小型化



放医研では2003年より、入射器に新しい加速方式を導入し、シンクロトロンを炭素線に最適化することで、コンパクトな炭素線治療装置を開発した。

群馬大学重粒子医学センター

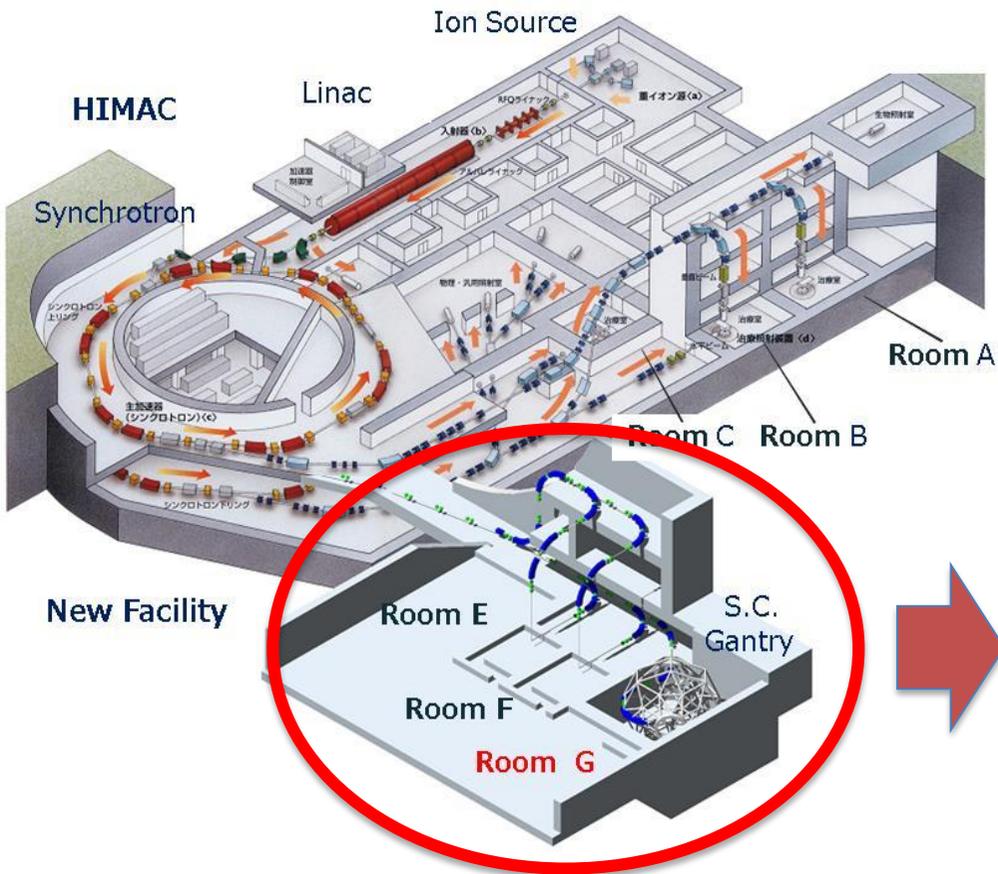


(<http://heavy-ion.showa.gunma-u.ac.jp/>)

- ◆ シンクロトロン直径
 - ~20 m
- ◆ 炭素線エネルギー
 - 400 MeV/u
- ◆ 治療室
 - 水平・垂直 x 1室
 - 水平 x 1室
 - 垂直 x 1室
- ◆ 照射装置
 - ワブラー照射装置
- ◆ 製造・販売会社
 - 三菱電機

小型炭素線治療装置は、群馬大学において実用化され、2010年より治療が開始された。国産の他の治療装置でもこの加速器が使用されている。

炭素線治療技術の高度化



新治療研究棟



CT simulation room



Gantry room



Room E & F



Room G

放医研では2006年より、より患者にやさしい治療を実現するために、HIMACの横に新治療研究棟を増設し、高速3次元スキャニング照射装置と超伝導回転ガントリーを中心とする新しい治療技術の開発を開始した。

ビーム照射方法の比較

■ 拡大ビーム照射法 (HIMAC) : 炭素ビームを拡げ機器で腫瘍の形に切り取る

- + ■ 照射時間が短い
- + ■ 腫瘍の動きに強く体幹部の照射ができる
- ■ 周辺の正常組織の線量が高くなる場所がある
- ■ 患者ごとに一部の機器を製作するため、腫瘍の縮小などの変化に対応しにくい



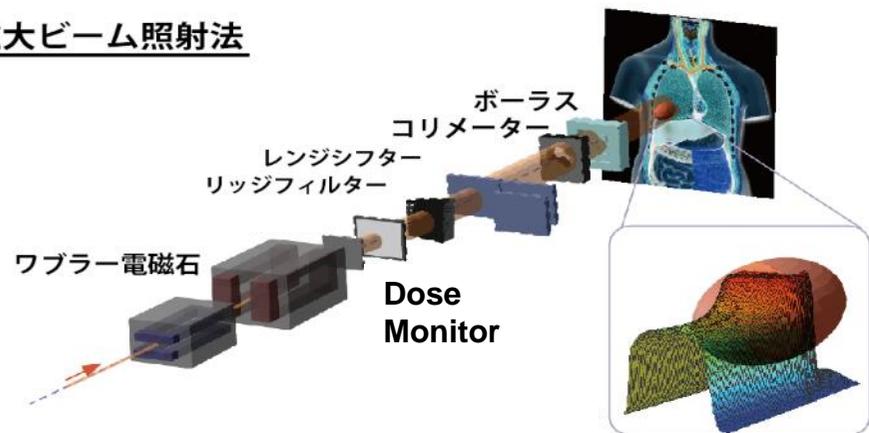
■ 3次元スキャニング照射法 (GSI) : 細い炭素ビームで3次元的に腫瘍を塗り潰す

- + ■ 周辺の正常組織の線量が低い
- + ■ 腫瘍の縮小などの変化に対応しやすい
- ■ スキャンするため照射時間が長い
- ■ 腫瘍の動きに弱く、肺・肝臓・すい臓などの照射に不向き

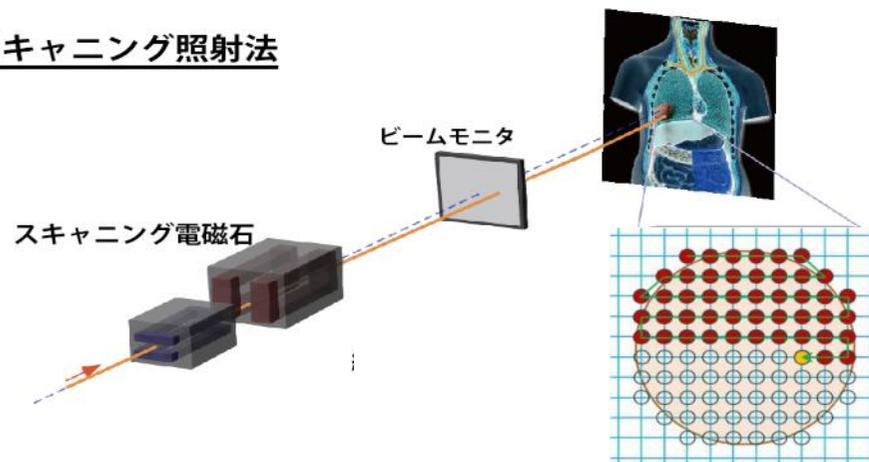


両方の長所を併せ持つ高速3次元スキャニング照射法を開発

拡大ビーム照射法

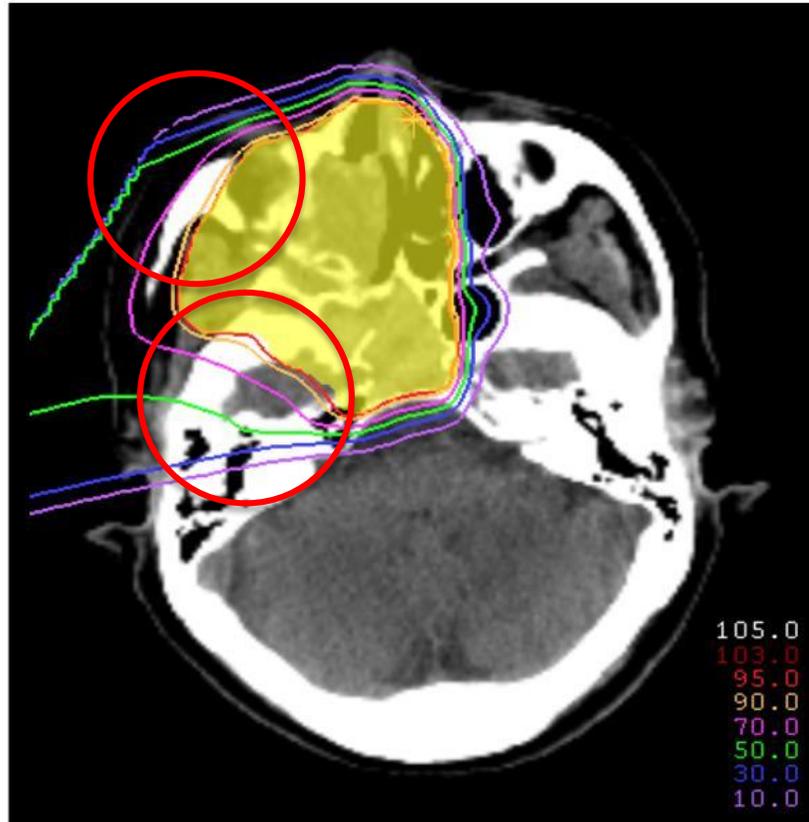


スキャニング照射法

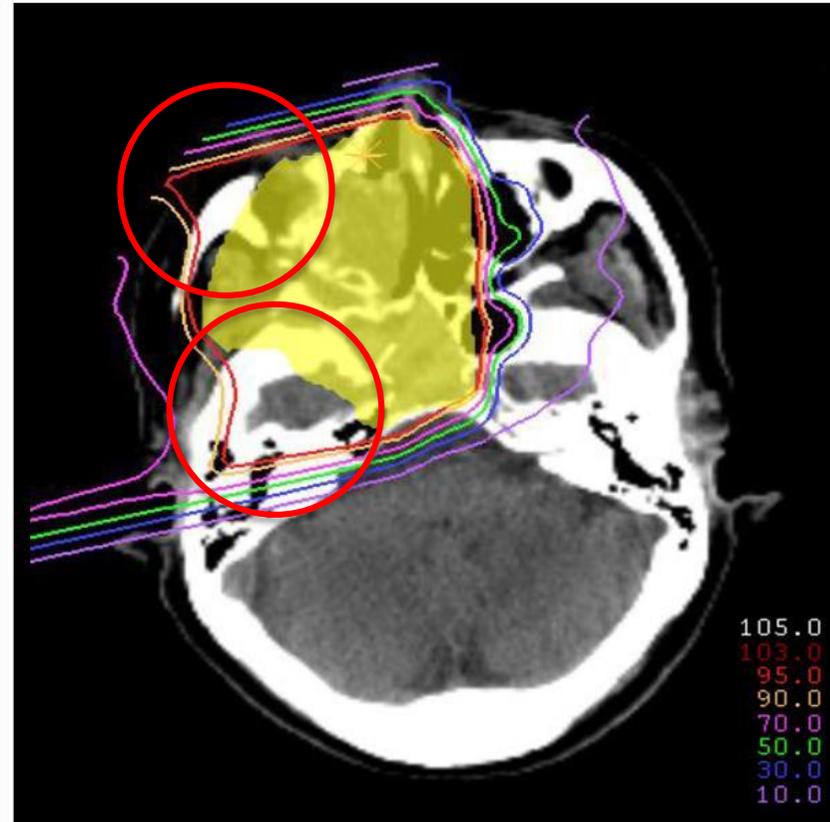


線量分布の比較

3次元スキャニング照射法

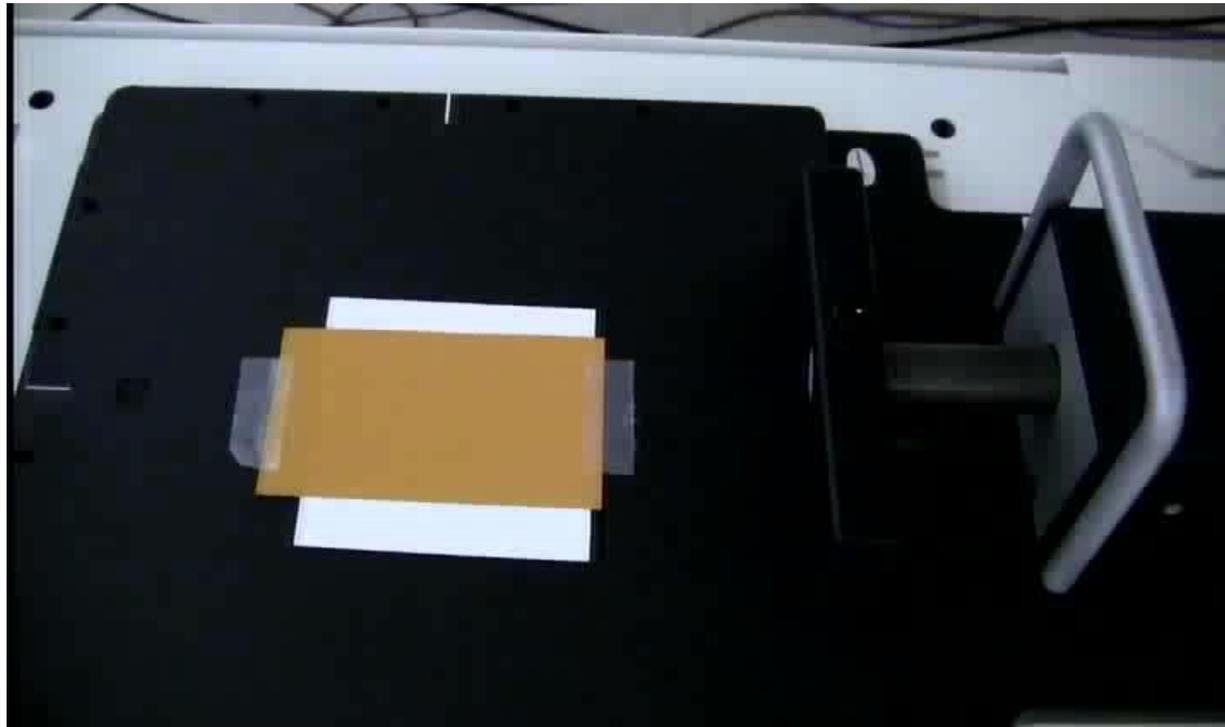


拡大ビーム照射法



スキャニング照射では、腫瘍領域（黄色）の境界と高線量領域の境界（赤線）がよく一致しており、正常組織の線量が低い。

移動標的への照射（フィルムでの模擬）



正弦波, $\pm 10\text{mm}$, 4 秒周期

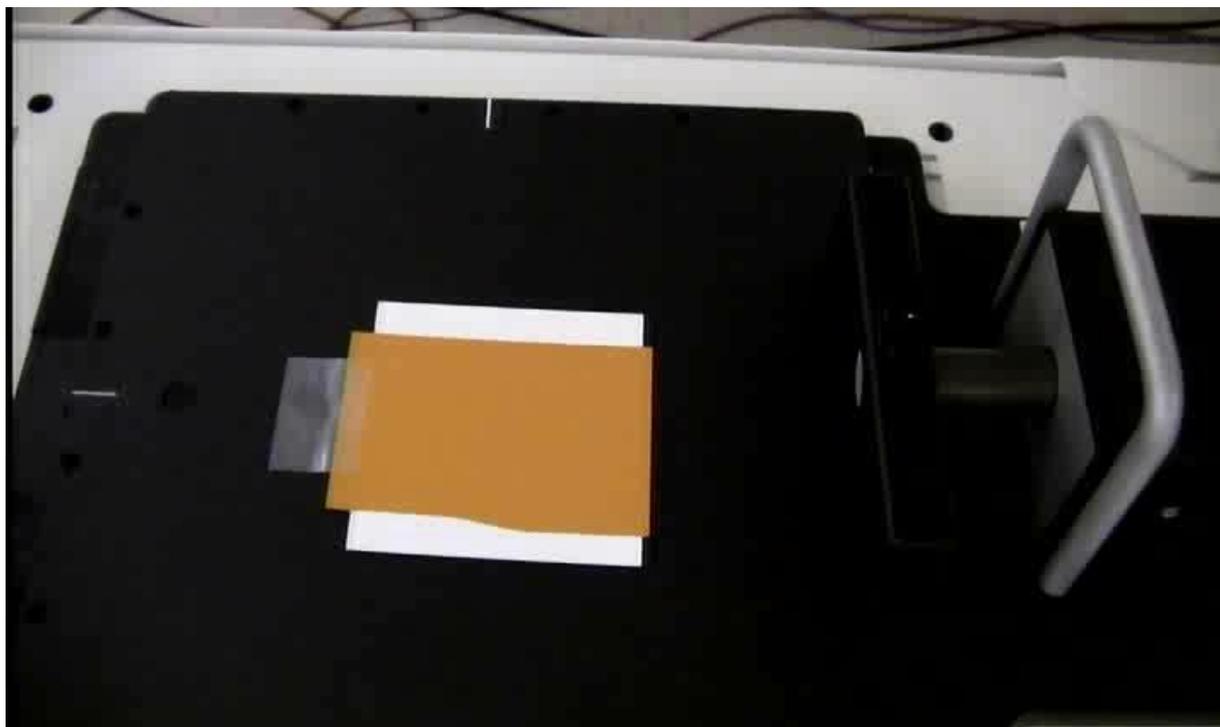
固定標的



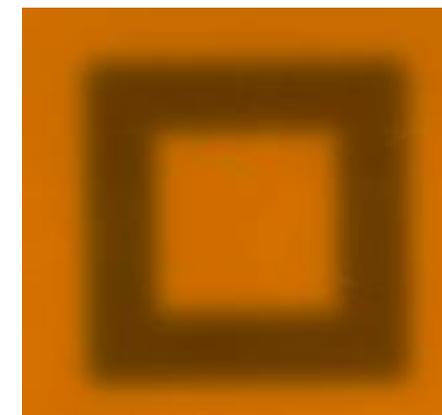
ビームの掃引と標的の移動が干渉し、正しく照射することができない。

高速3次元スキャニング照射装置

移動標的への照射（ゲート+重塗り）



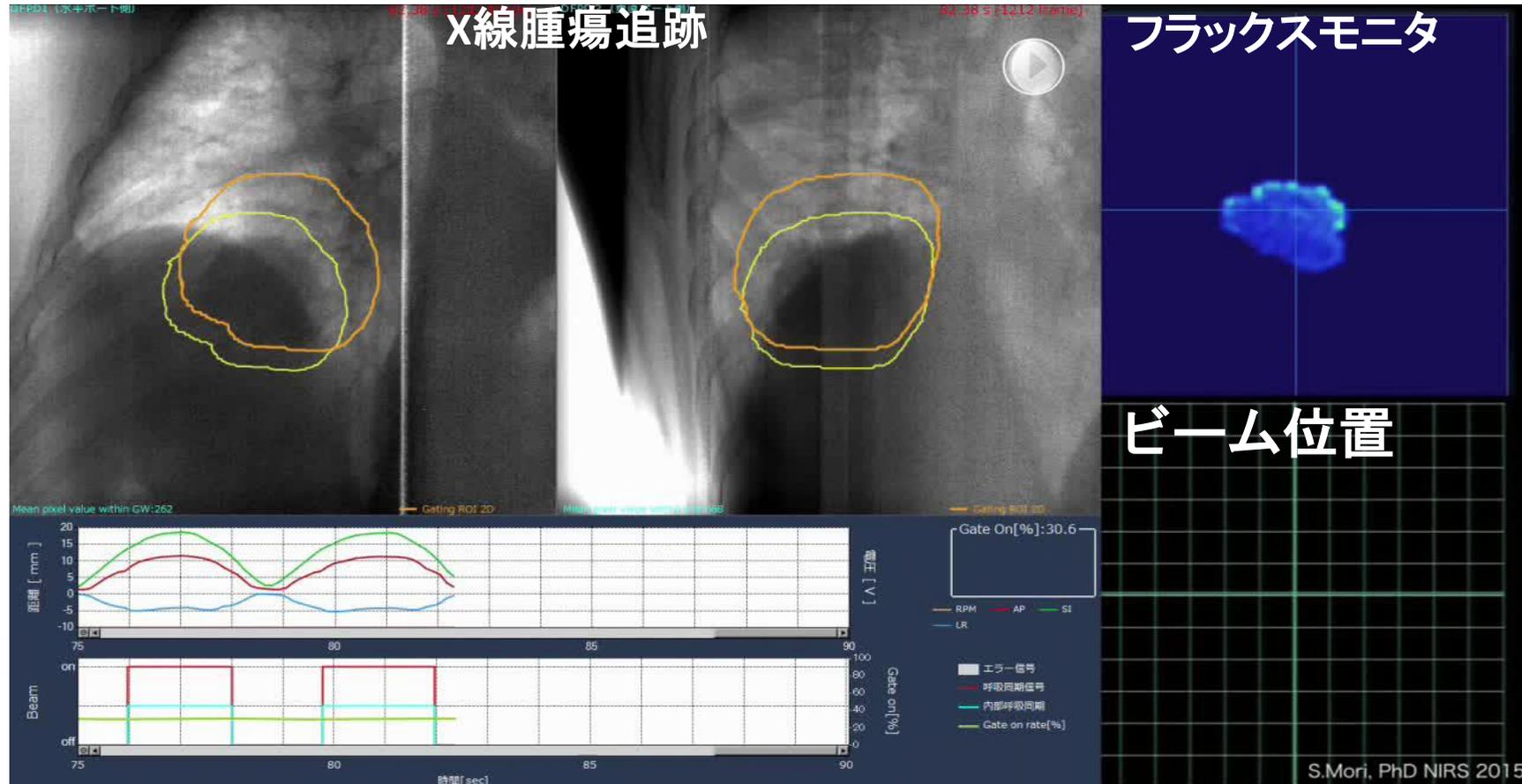
固定ターゲット



放医研では約100倍の速度をもつ高速スキャニング照射装置を開発し、一度の呼気時に1面を重塗りをすることで、肺・肝臓・すい臓の治療を可能とした。

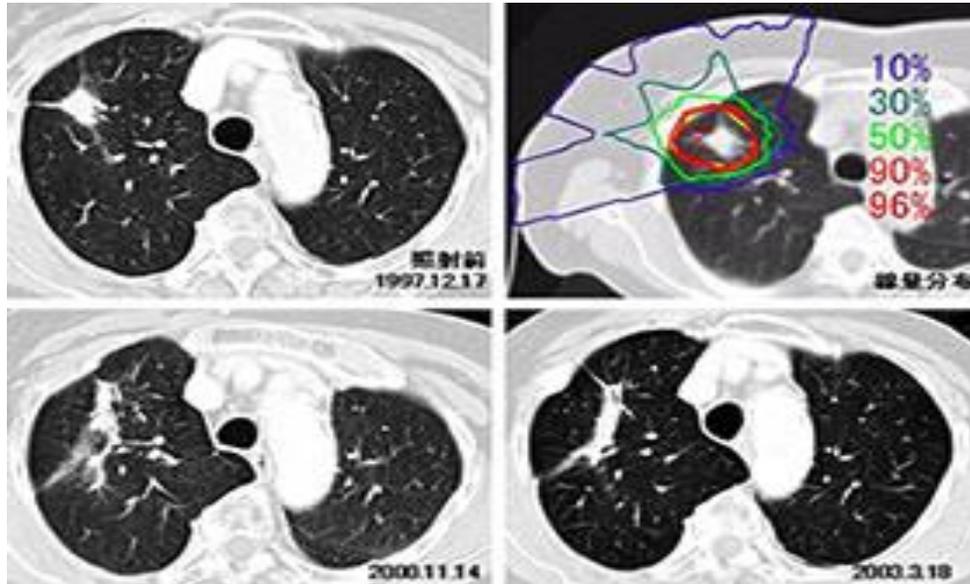
⇒ **日本で開発された技術であり、国産治療装置が優位性をもつ**

肺がんに対する呼吸同期スキヤニング照射



さらに、X線装置で腫瘍周辺の動きを直接観察し、炭素線の重塗り照射をすることで、大きな呼吸性移動をともなう臓器も正確に照射することができる。

肺がんの4方向照射



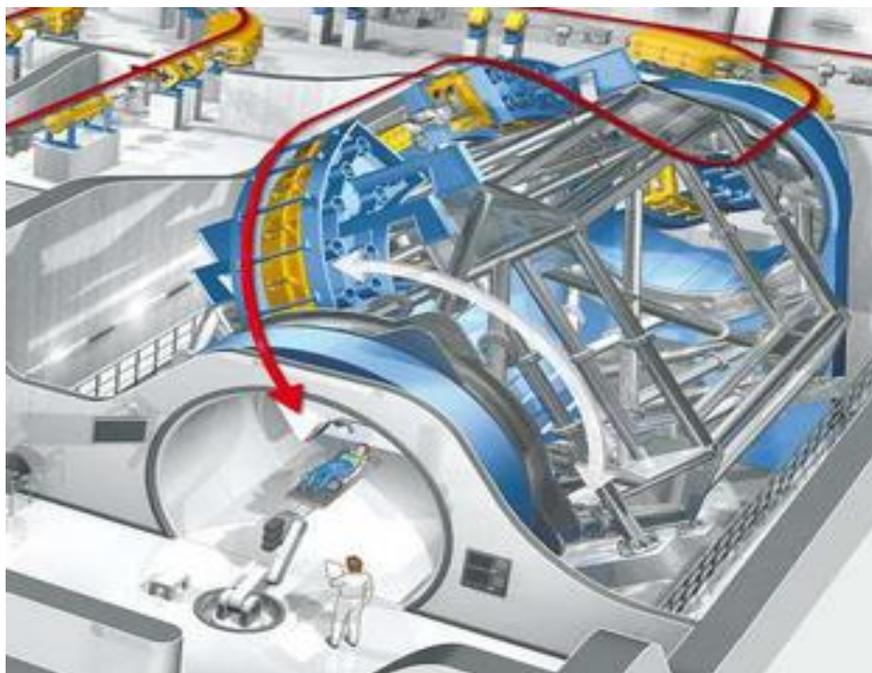
照射時の患者セットアップ



患者に負担をかけることなく、最適な方向から腫瘍に炭素線を照射するためには、炭素線治療においても、360度任意の方向から照射できる装置が必要。

ハイデルベルグ大学（ドイツ）

- 世界初の炭素線回転ガントリー装置
- 搭載する電磁石が大きく、回転ガントリー全体が大型化
 - 全長：～25 m
 - 回転部重量：～600 tons

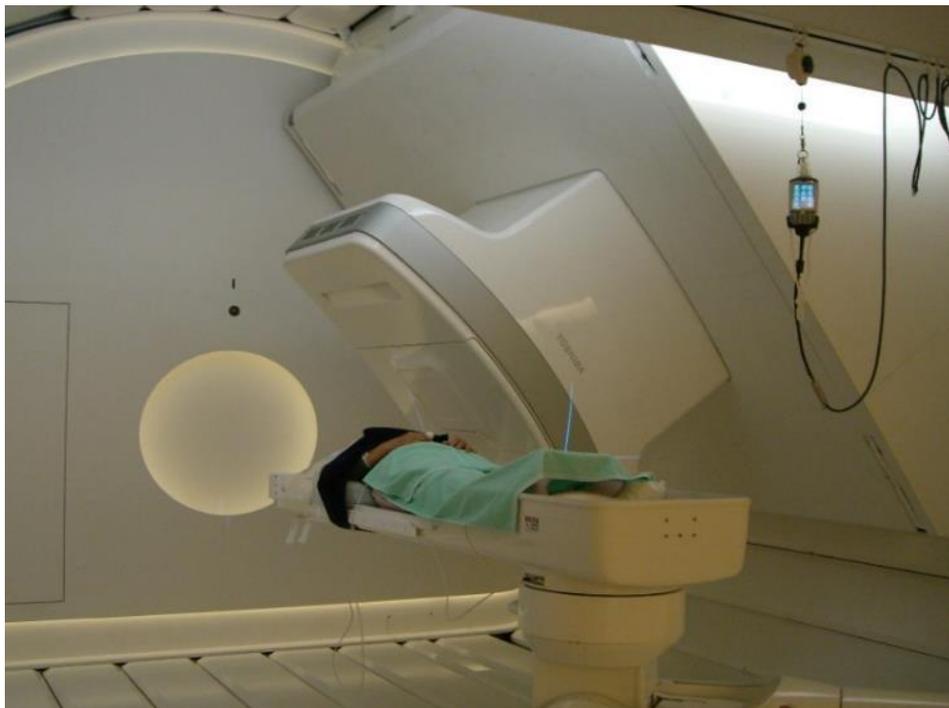


大きさと消費電力から普及は困難

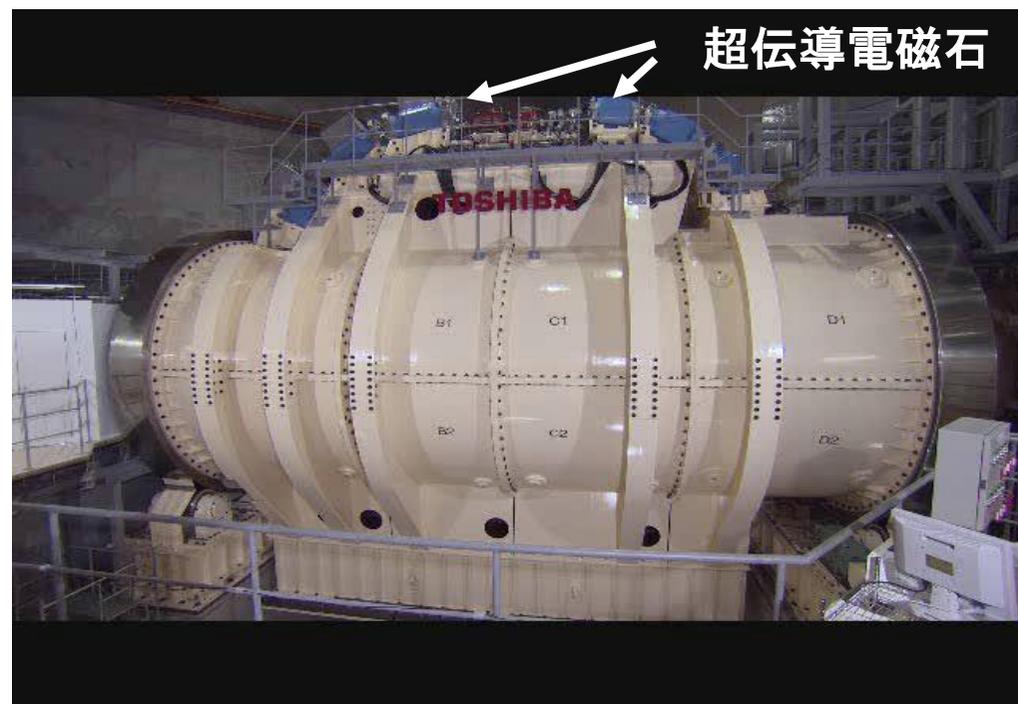
<http://idw-online.de/pages/de/news504069>

超伝導炭素線回転ガントリー

回転ガントリー治療室



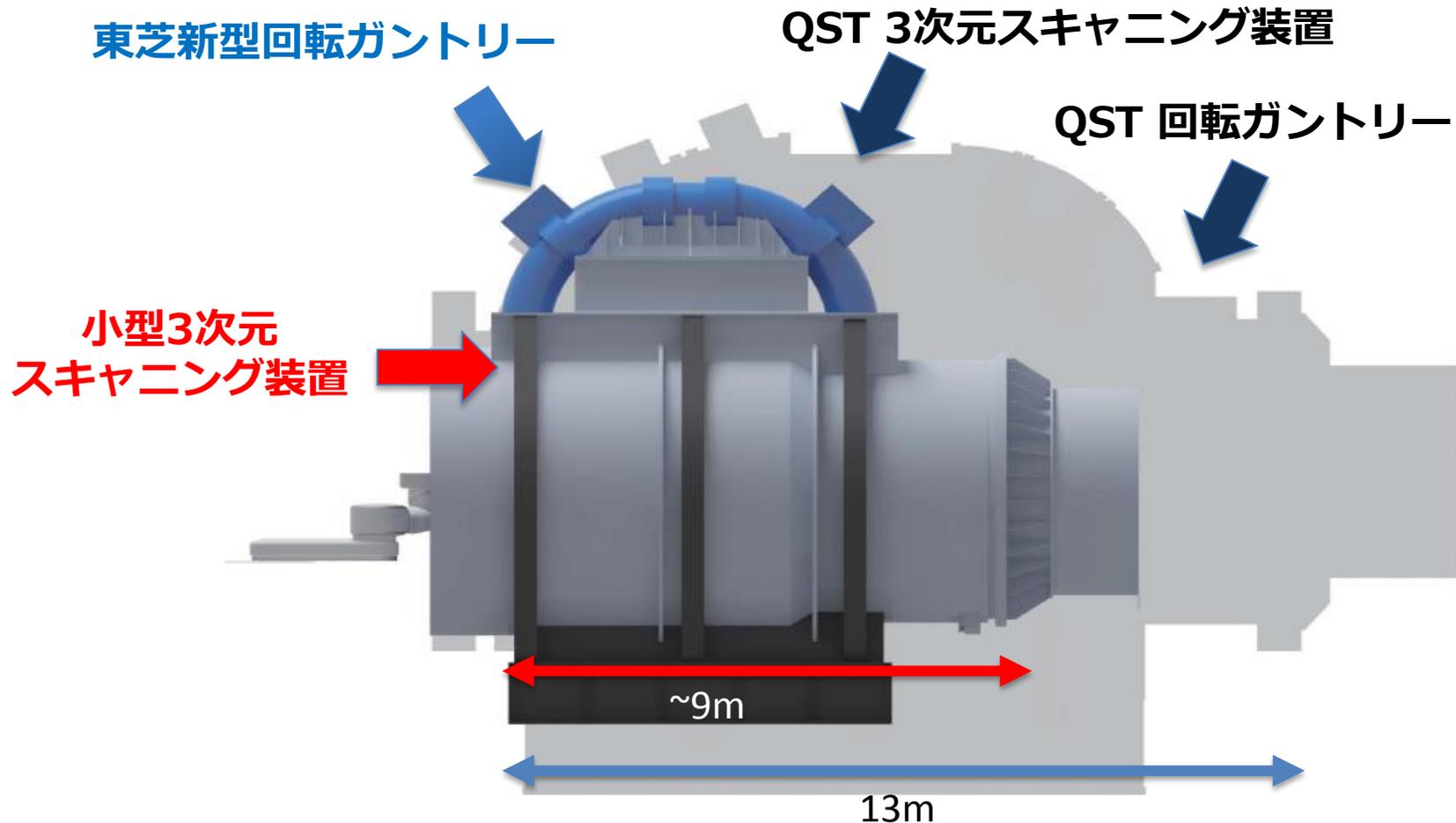
回転ガントリー本体



放医研では回転ガントリーに搭載可能な液体Heフリーの超伝導電磁石を開発することで、陽子線ガントリーの大きさに近い普及可能な装置を実現した。

⇒ 日本の超伝導電磁石技術を活かした装置であり、国産装置が優位性をもつ

東芝製炭素線回転ガントリー

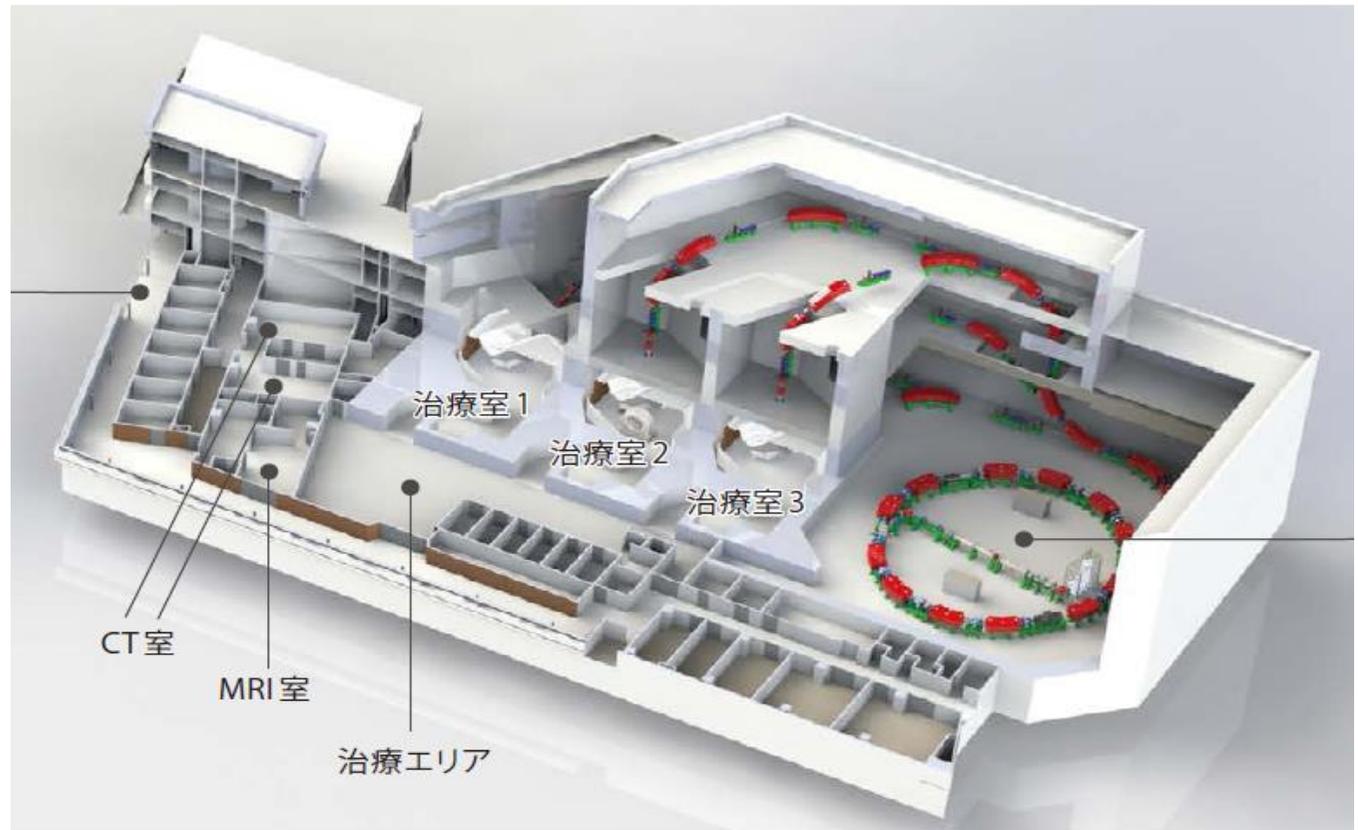


東芝製治療装置に搭載される回転ガントリーでは、放医研と共同開発した小型3次元スキャニング装置を搭載することで、さらに小型化が図られている。

- 炭素線治療装置の変遷
- 最近の炭素線治療施設
- 次世代炭素線治療装置(量子メス)に向けて

- ◆ シンクロトロン直径
 - ~20 m
- ◆ 炭素線エネルギー
 - 430 MeV/u
- ◆ 治療室
 - 水平・垂直 x 2室
 - 水平・45° x 1室
- ◆ 照射装置
 - 高速スキャニング照射装置
- ◆ 製造・販売会社
 - 日立

2018年治療開始

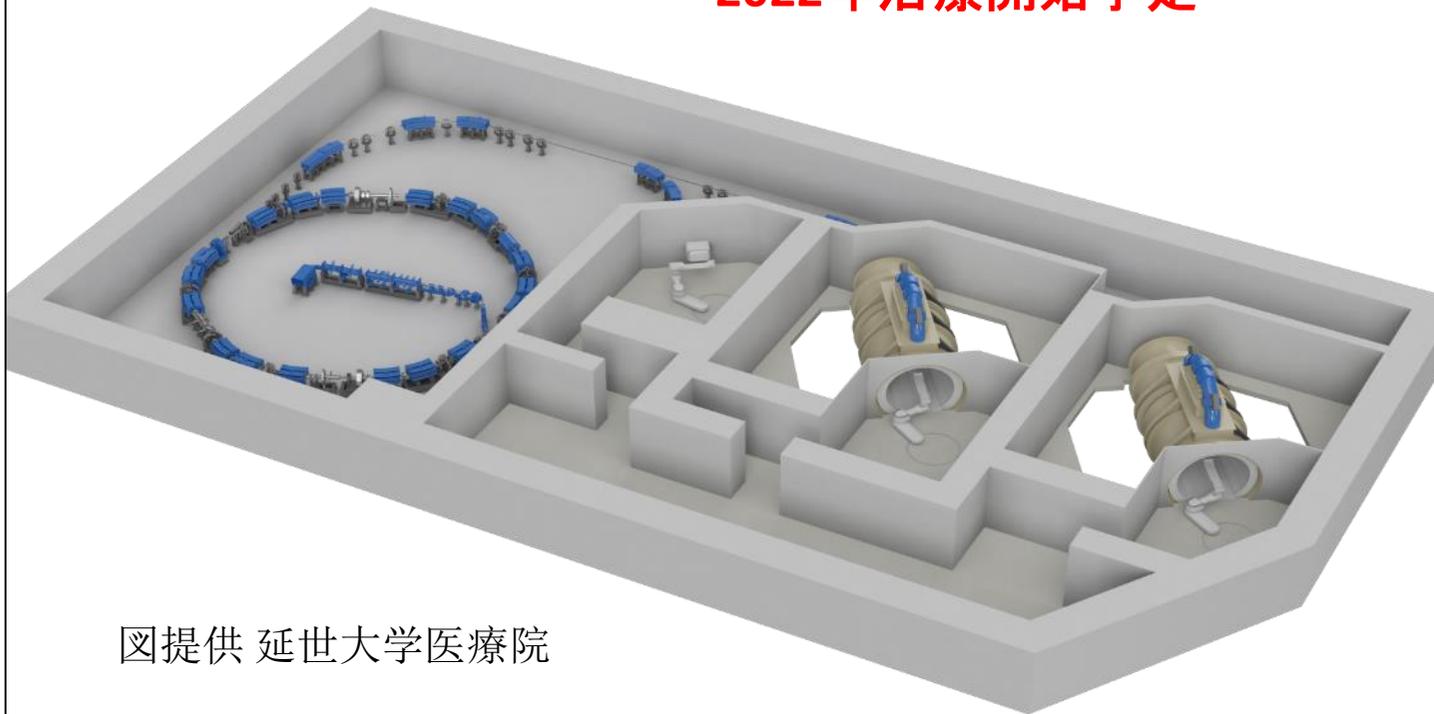


(<https://www.osaka-himak.or.jp/>)

延世大学医療院（韓国）

- ◆ シンクロトン直径
 - ~20 m
- ◆ 炭素線エネルギー
 - 430 MeV/u
- ◆ 治療室
 - ガントリー x 2室
 - 水平 x 1室
- ◆ 照射装置
 - 高速スキャニング
照射装置
- ◆ 製造・販売会社
 - 東芝

2022年治療開始予定



図提供 延世大学医療院

世界の炭素線治療施設と導入計画の現状



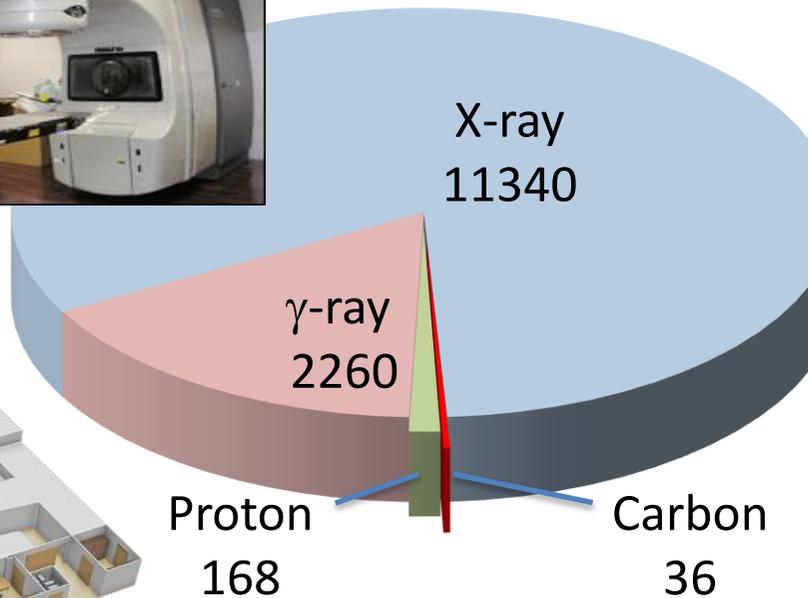
最近の炭素線治療施設は東芝、日立、IMP（中国近代物理学研究所）の3者が供給しており、アジアを中心に医療機関への導入が進んでいる。

- 炭素線治療装置の変遷
- 最近の炭素線治療施設
- 次世代炭素線治療装置(量子メス)に向けて
 - 治療装置小型化
 - 治療技術高度化

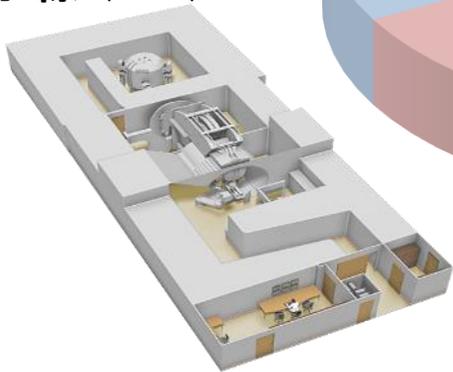
放射線治療装置の現状

2016年時点での世界の放射線治療装置数
(粒子線は治療室数)

X線

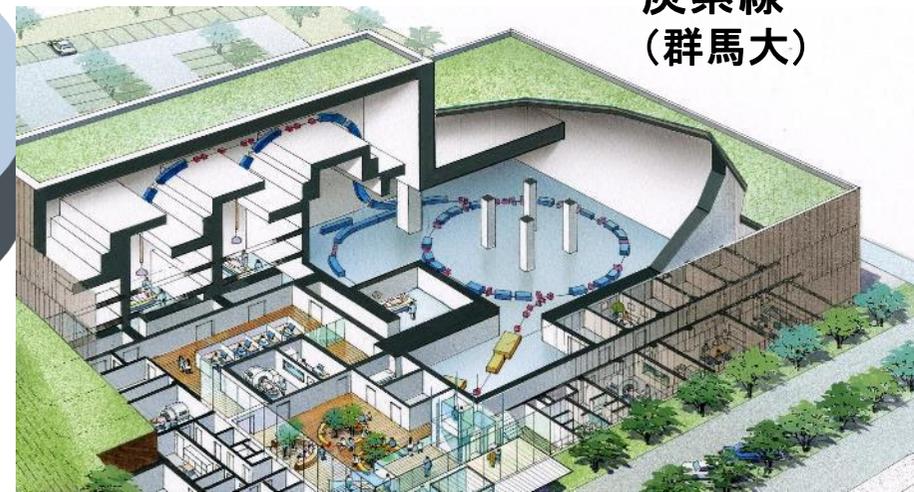


陽子線 (IBA)



(<https://iba-worldwide.com/>)

炭素線
(群馬大)

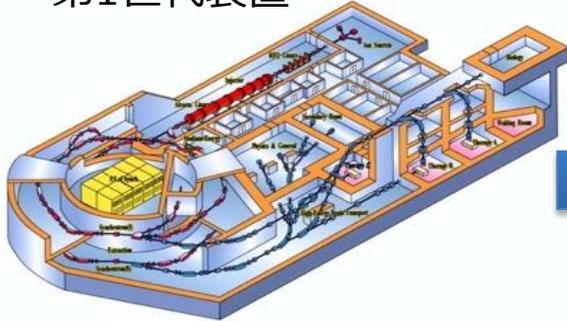


(<http://heavy-ion.showa.gunma-u.ac.jp/>)

大規模病院への現行炭素線治療装置の導入が一段落した後、さらなる普及には治療装置の小型化・低価格化が必須

次世代重粒子線がん治療装置（量子メス）

第1世代装置



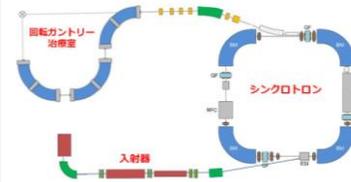
1994年放医研
120 x 65m

第2・3世代装置



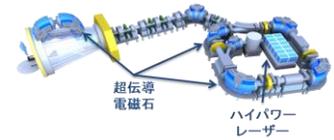
2010年群馬大学
60 x 45m

第4世代装置



超伝導技術
25 x 14m

第5世代（量子メス）



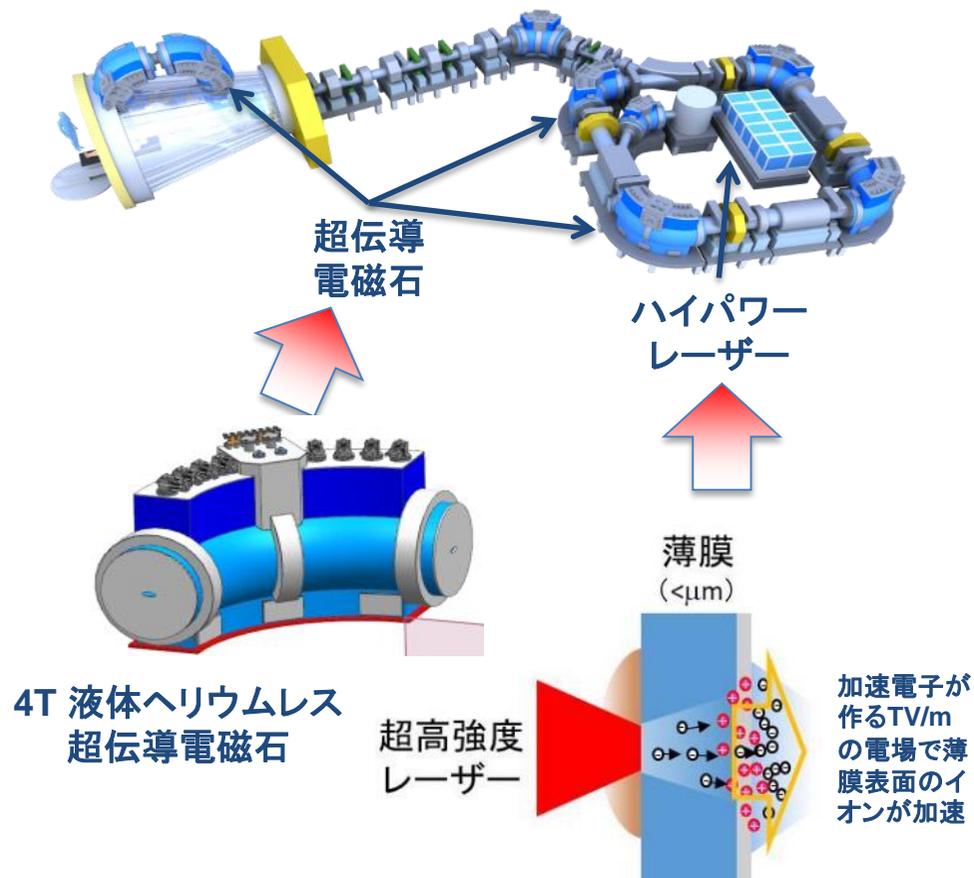
超伝導+レーザー
20 x 10m

小型化（既存の病院治療室に設置可能）
高性能化（腫瘍制御の向上と照射回数の削減）

量子メス

治療装置の小型化：レーザー加速 + 超伝導

小型炭素線治療施設



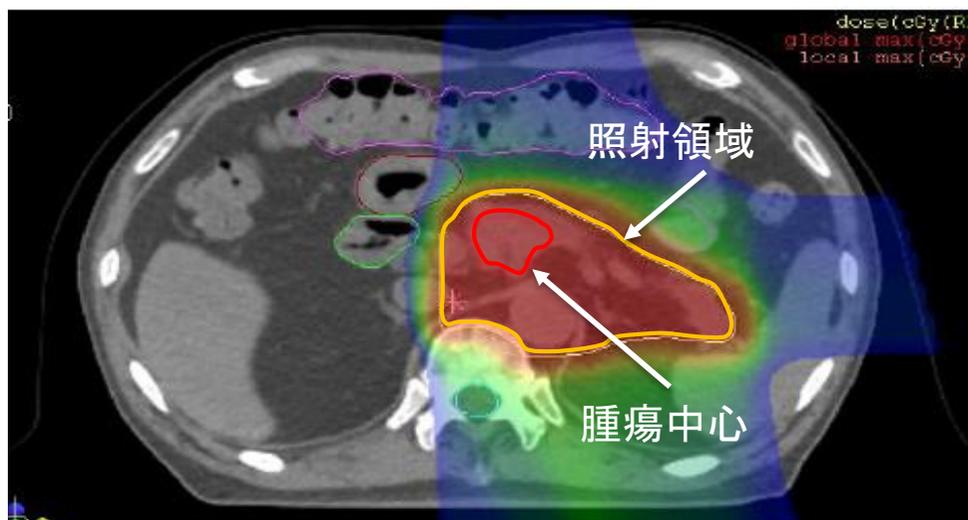
レーザー駆動イオン加速技術による入射器の小型化と、超伝導電磁石技術によるシンクロトロンの小型化により、病院治療室内に設置できる治療装置を開発する。

治療技術の高度化：マルチイオン照射

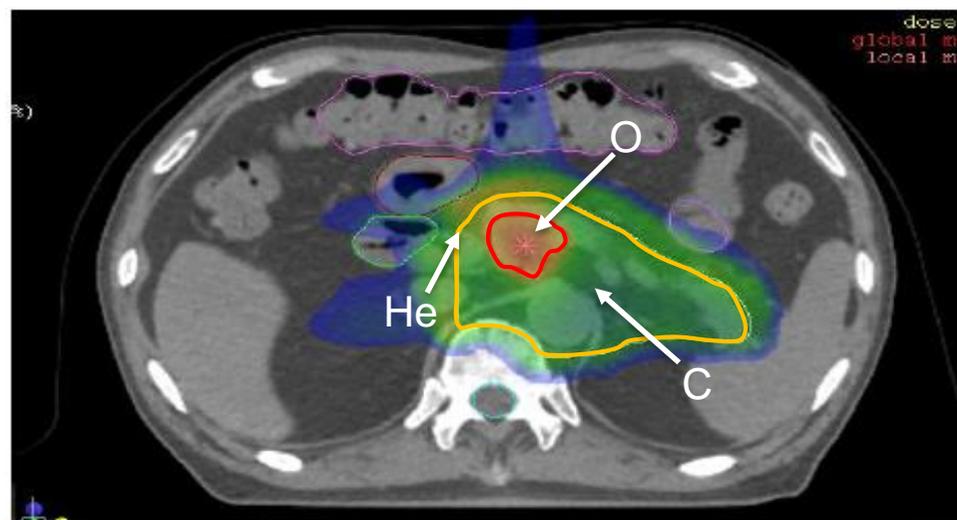
■ マルチイオン：照射領域によるイオンビーム種の最適化

- 腫瘍中心部には、炭素より生物効果の高い酸素 ⇒ **がんの再発抑制**
- 腫瘍中心の周辺、浸潤領域には炭素
- 正常組織近傍には、炭素より生物効果が低いヘリウム ⇒ **副作用低減**

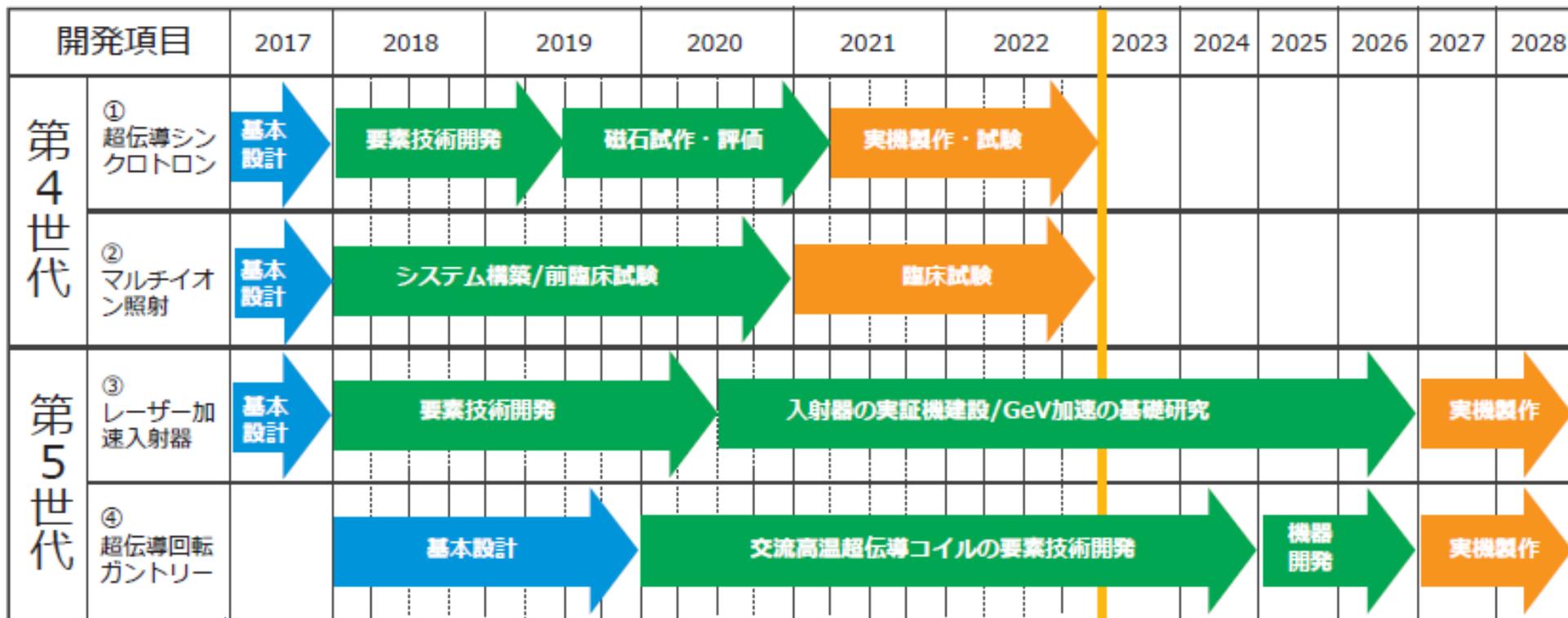
膵臓がん、ヘリウム、炭素、酸素を照射した場合の線量分布



膵臓がん、ヘリウム、炭素、酸素を照射した場合の生物効果(LET)分布



「量子メス」 研究開発ロードマップ



「量子メス」 研究開発包括協定を4社と締結

第4世代
開発目標

第5世代
開発目標

炭素線治療装置の現状と今後

- HIMAC稼働後の25年間に、放医研ではHIMACを小型化した炭素線加速器と、高速3次元スキャニング装置と超伝導回転ガントリーを中心とする新しい治療技術を開発してきた。
- 現在、これらの技術移転を受けた国内メーカー（東芝・日立）による、国際競争力のある炭素線治療装置の国内外の医療施設への提供が本格化している。
- 量研では、10年後を目標により小規模の病院でも導入可能な、次世代の高性能で小型の治療装置「量子メス」の開発を実施している。