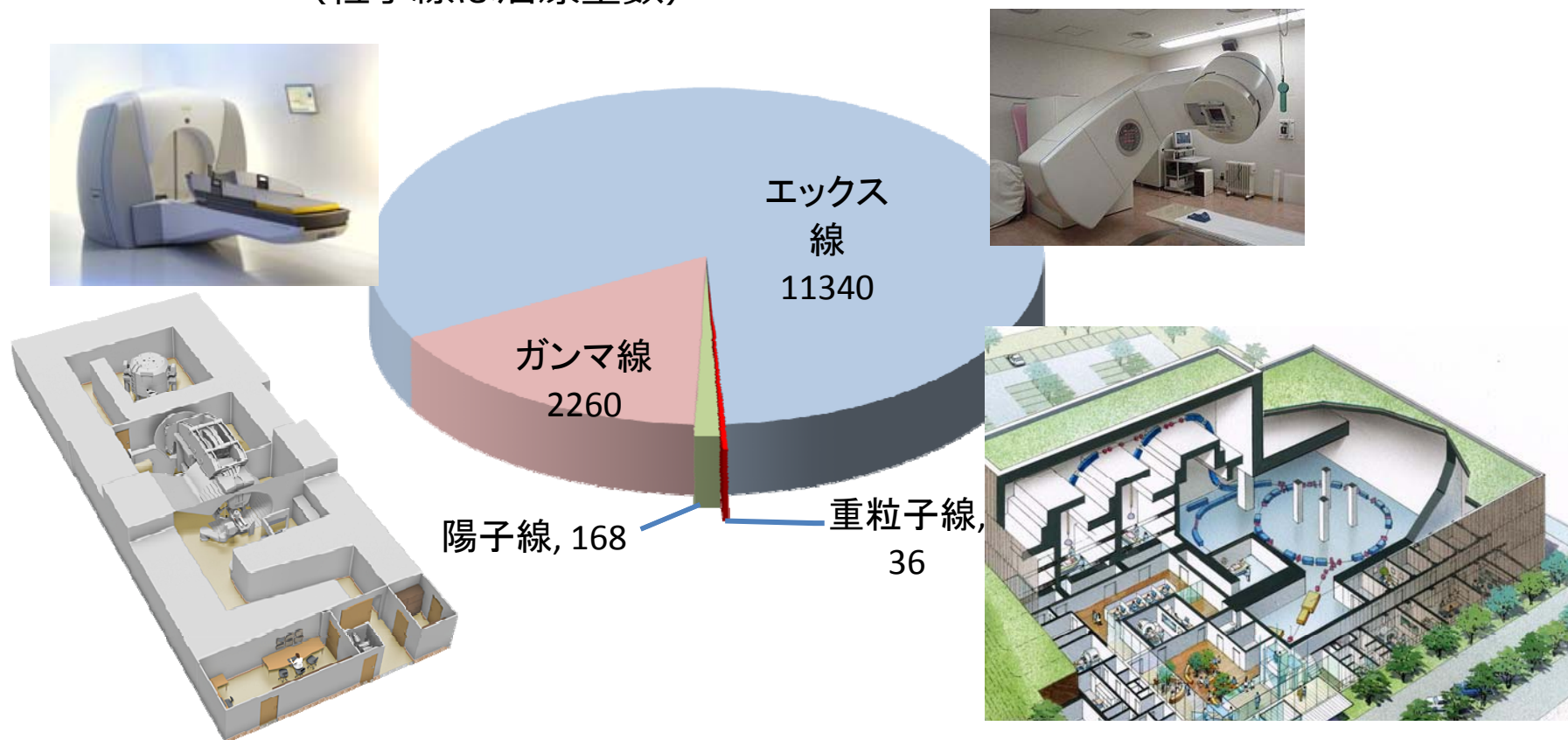


Q S T がん死ゼロ健康長寿社会シンポジウム

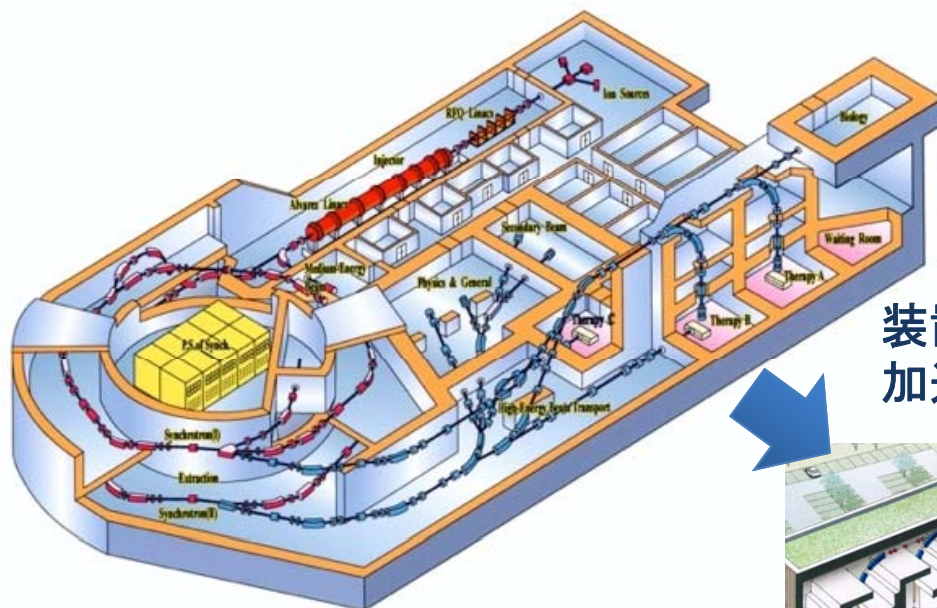
量子メス治療装置の開発

国立研究開発法人
量子科学技術研究開発機構
白井 敏之

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)



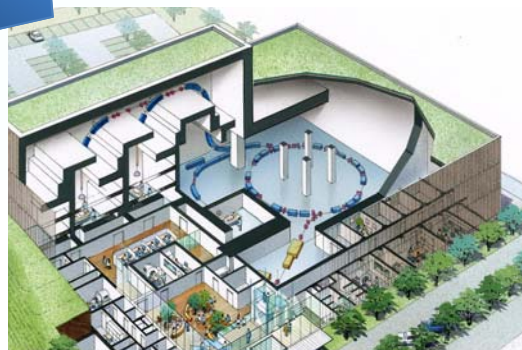
今後の普及には、治療装置の小型化・低価格化が必須



1994年 放医研HIMAC
120 x 65m

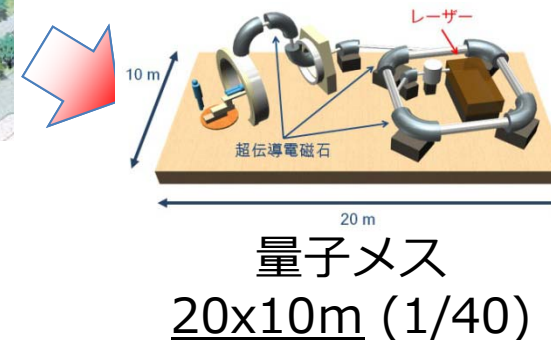
重粒子線治療には、炭素を光の速さ
近くまで加速する加速器が必要

装置の最適化と新しい
加速器技術による小型化



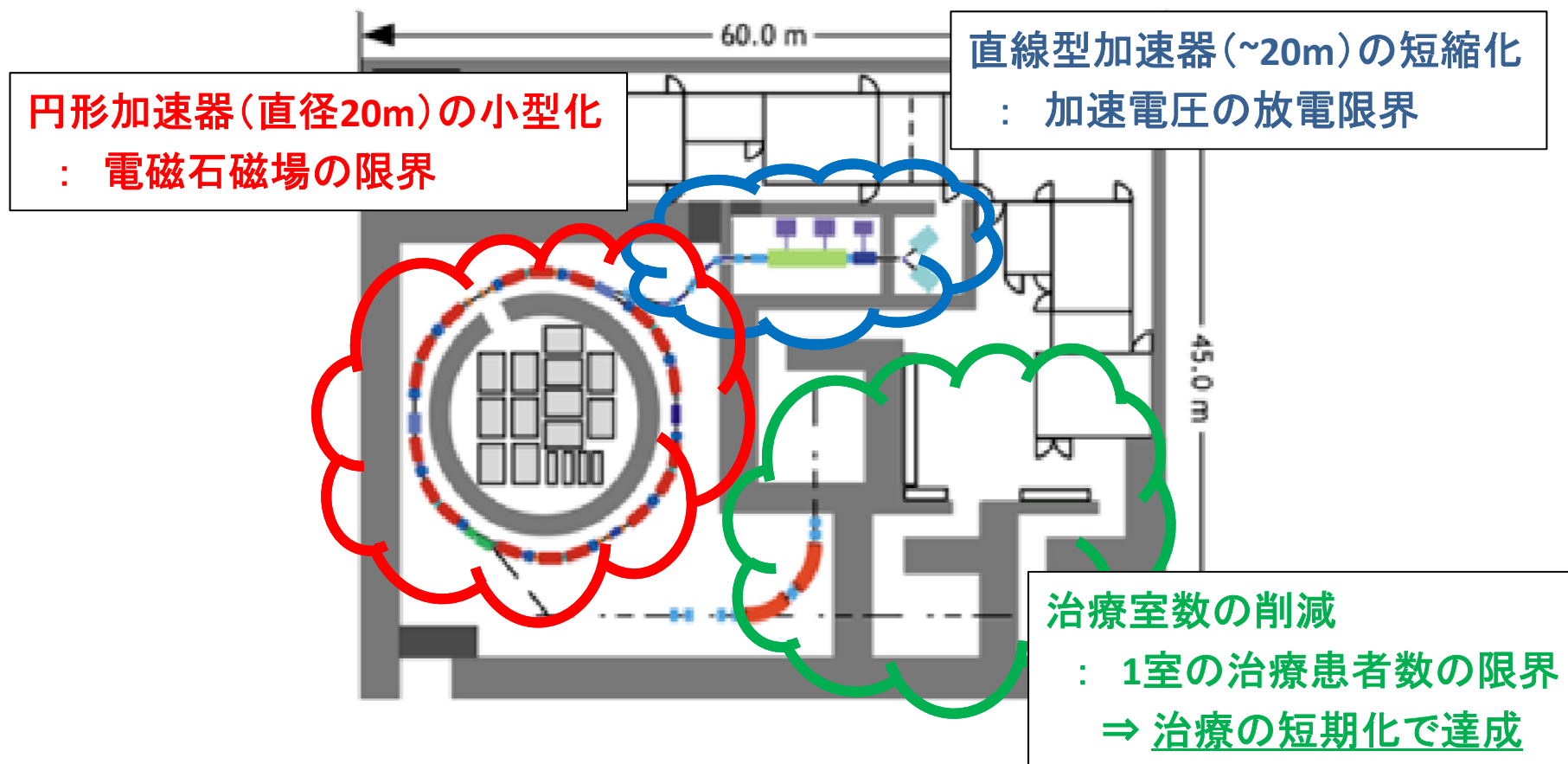
2010年 群馬大学
65x45m (1/3)

量子科学技術に
よる大幅な小型化



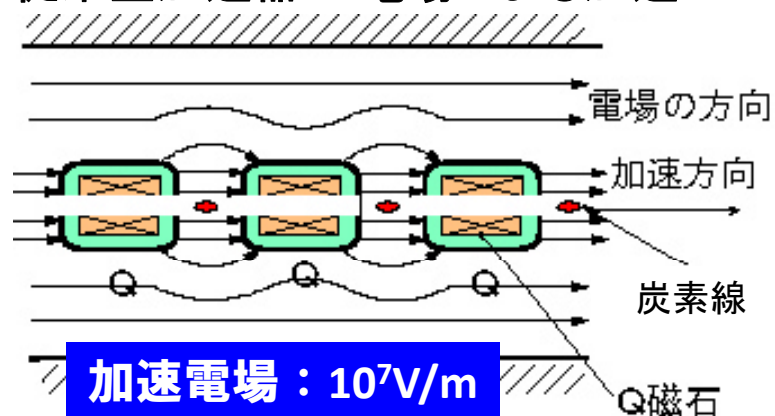
量子科学技術により、病院内に設置可能になるまで装置の小型化を
はかることで、装置・建物コストを下げ、 治療法の普及を目指す。

群馬大学型 重粒子線治療装置の平面図



装置小型化と低価格化が実現するためには、3つの限界を超える必要がある

従来型加速器： 電場による加速



小型化のためには電圧を上げる必要がある



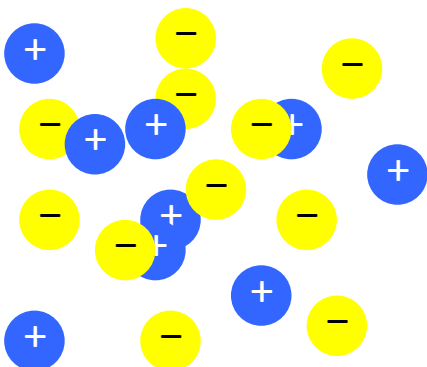
電圧を上げすぎると放電し、限界がある



放電のおきない、プラズマを加速に使う

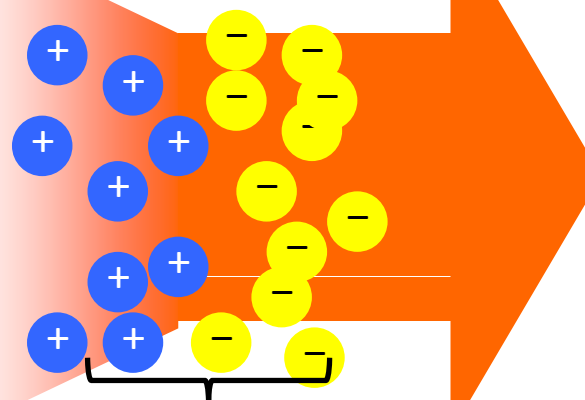
通常のパラズマ状態

電子とイオンの混合ガス



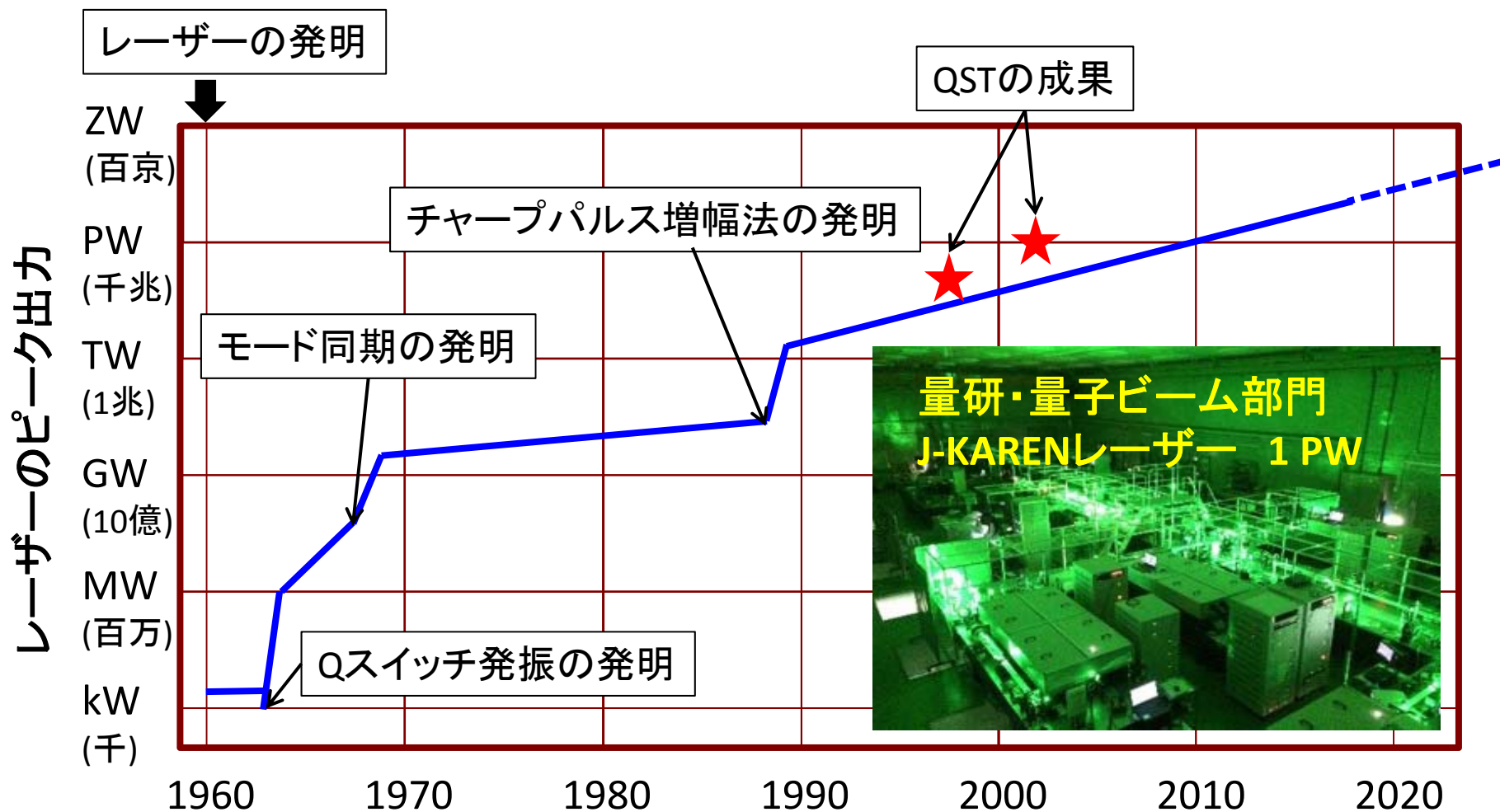
超高強度
レーザー

光の圧力で電荷が分離したプラズマ状態を作る



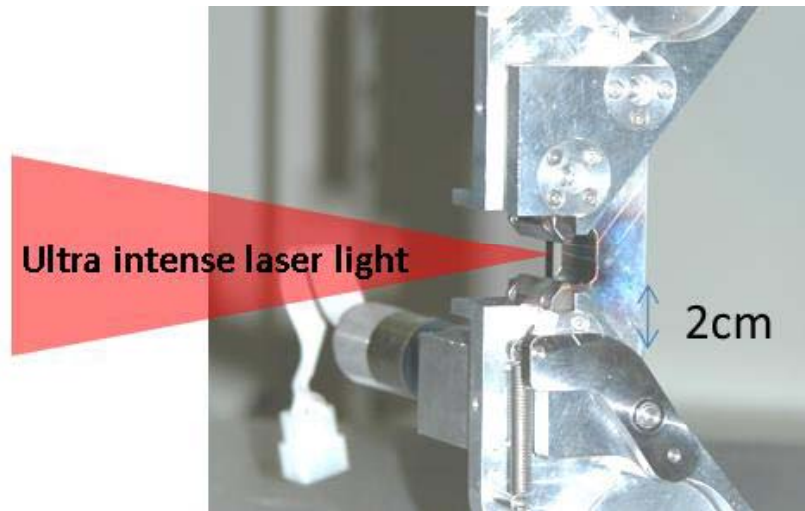
加速電場： $\gg 10^{12}\text{V/m}$

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

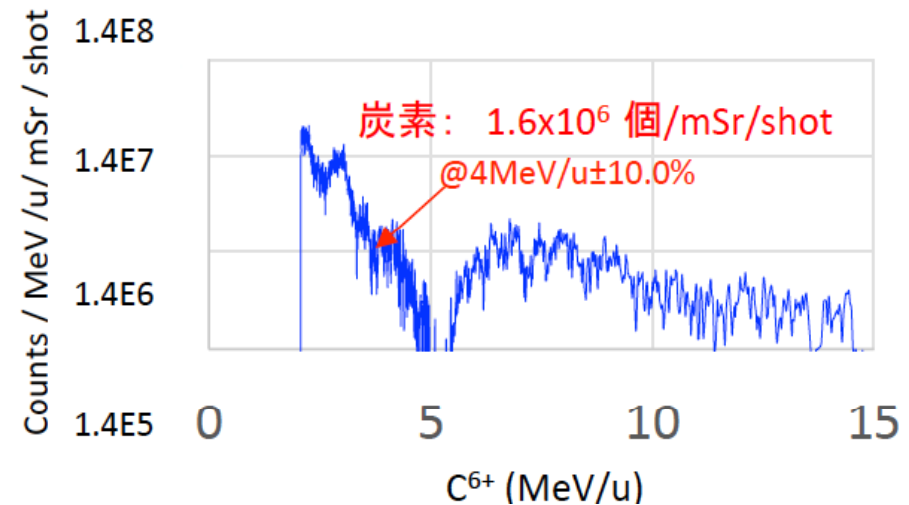


加速電場を決めるレーザーのピーク出力は、年々増加を続けている

レーザー加速装置



加速粒子エネルギー計測



実験パラメータ

レーザー	エネルギー	10 J	ターゲット	材質	CH
	パルス幅	40 fs		厚み	2 μm
	集光強度	$3 \times 10^{21} \text{ Wcm}^{-2}$			

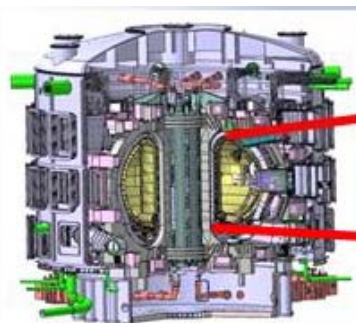
M. Nishiuchi, H. Sakaki et al., unpublished data

レーザー駆動イオン加速器は、既に実験室レベルでは、必要な炭素エネルギーが得られており、この技術を用いることで、既存の線形加速器(長さ~20m)を、数m程度にコンパクト化する。

- 超伝導状態(<4K)では電気抵抗が消失するため、大電流をロスなく流すことが可能となり、通常の電磁石(1.5T)より、大幅に磁場を高くできる。

⇒ 治療装置で使用する電磁石の小型化が可能

回転ガントリー向け
超伝導磁石 2.9 T
(量研・放医研部門)

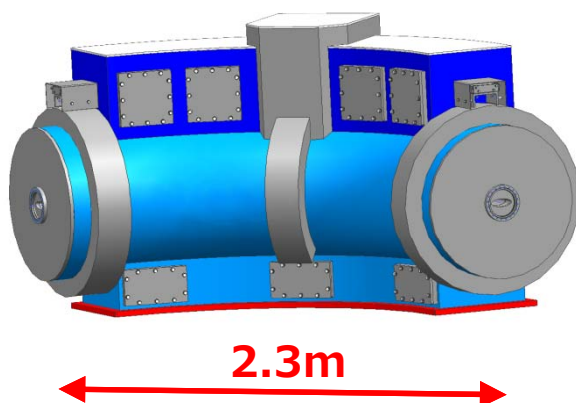


ITER(国際熱核融合実験炉) TF(トイダル磁場)コイル

核融合ITER向け
超伝導磁石 11.8 T
(量研・核融合部門)

量研機構には、超伝導電磁石技術の十分な実績がある

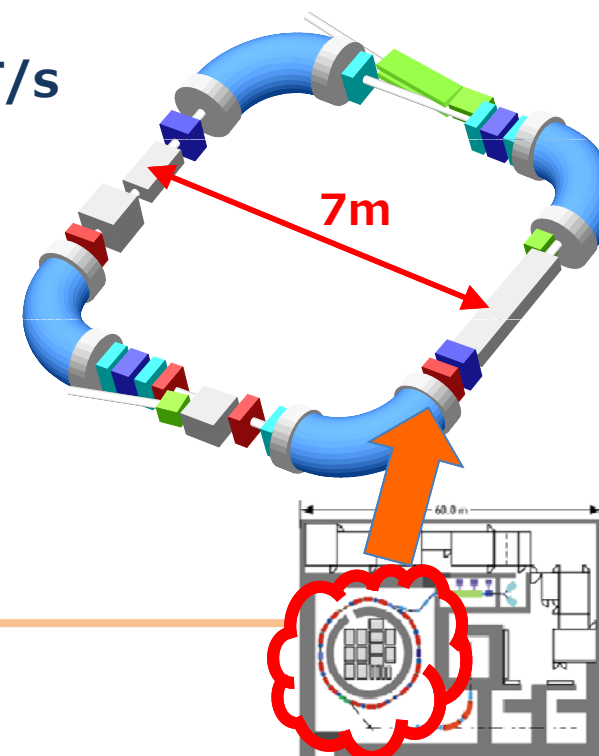
超伝導電磁石



- ✓ 超伝導電磁石（4台）
 - 偏向磁場: 4 T
 - 磁場変化率: $\sim 0.5 \text{ T/s}$
 - GM小型冷凍機

- ✓ 超伝導シンクロトロン
 - 4回対称構造
 - 周長: $\sim 28 \text{ m}$
 - 炭素エネルギー
 $4 \sim 430 \text{ MeV/u}$

超伝導シンクロトロン



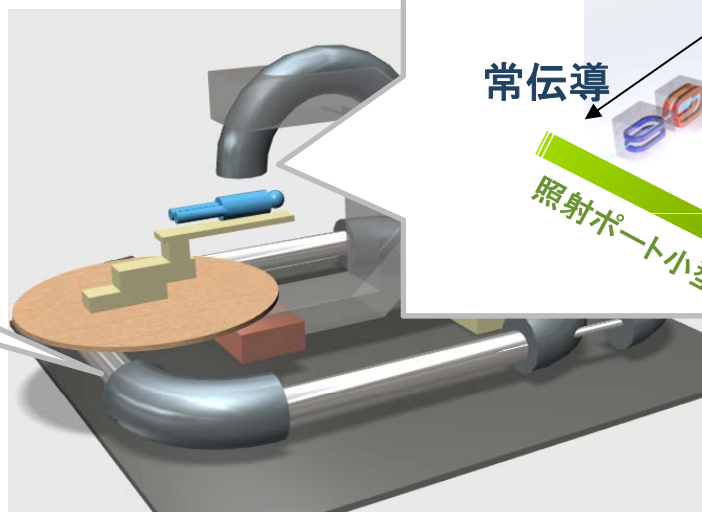
K. Mizushima et al., Proc. of the 14th PASJ meeting, p.1243, (2017)

超伝導電磁石技術により、既存の重粒子線治療装置の円形加速器（直径 $\sim 20\text{m}$ ）を、約1/10の設置面積にまで小型化する。

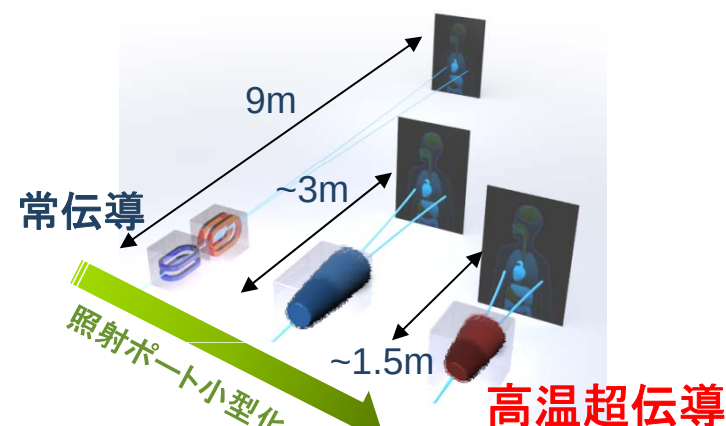
- 将来の高温超伝導技術の実用化で、より高い磁場を安価・容易に使用できる
⇒ 治療装置のさらなる低価格化、小型化が可能

6Tの高温超伝導磁石
によるさらなる小型化
と低価格化

超小型重粒子線がん治療



スキャニング照射装置
~2Tの高磁場によるさらなる小型化



超伝導技術の採用により、将来の技術の進歩に合わせ、
さらなる進化が可能になる。

次世代重粒子線治療

(量子メス)



固形がん(原発腫瘍塊)



免疫系

賦活化効果

量子メスには手術を一部置き換えることが求められる。そのためには、

- 腫瘍制御の向上
- 短期照射の実現(1回照射)

分子標的治療

微小転移がんをピンポイントに治療

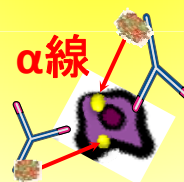
標的アイソトープ治療

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



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

がん死ゼロを目指す

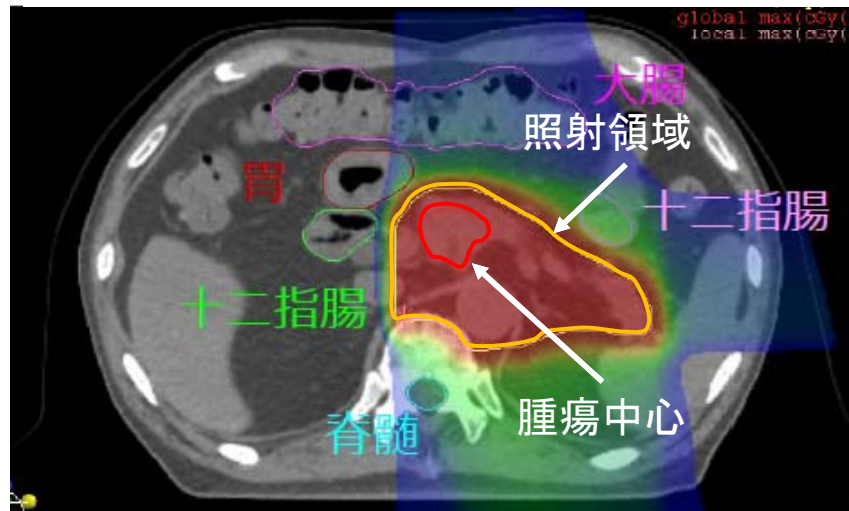
- 膵臓がんは、難治がんの代表であり、重粒子線（炭素線）治療でも局所制御が不十分
- 局所再発の抑制には物理線量(D)と生物効果(RBE)の増加が必要

$$D_{\text{clinical}} = D \times \text{RBE}$$

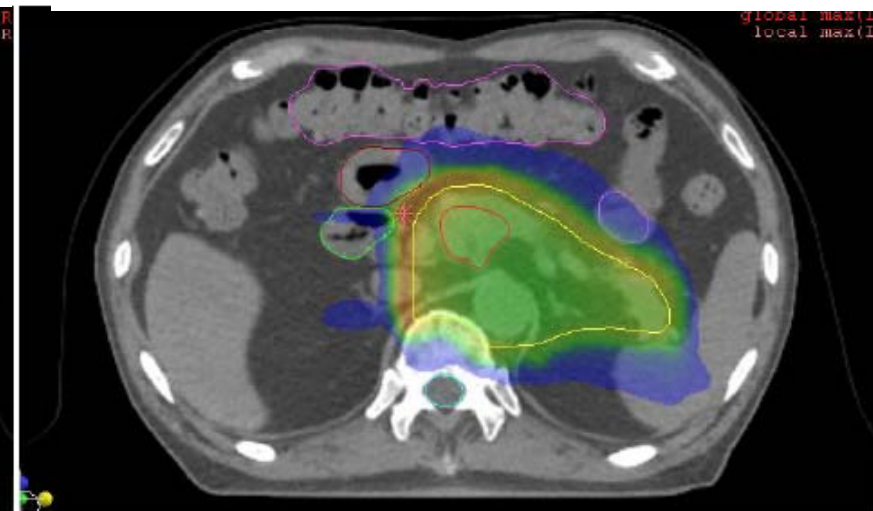
⇒ 膵臓は重要臓器に囲まれており、物理線量増加が困難

⇒ 炭素線だけでは生物効果を制御することは難しい

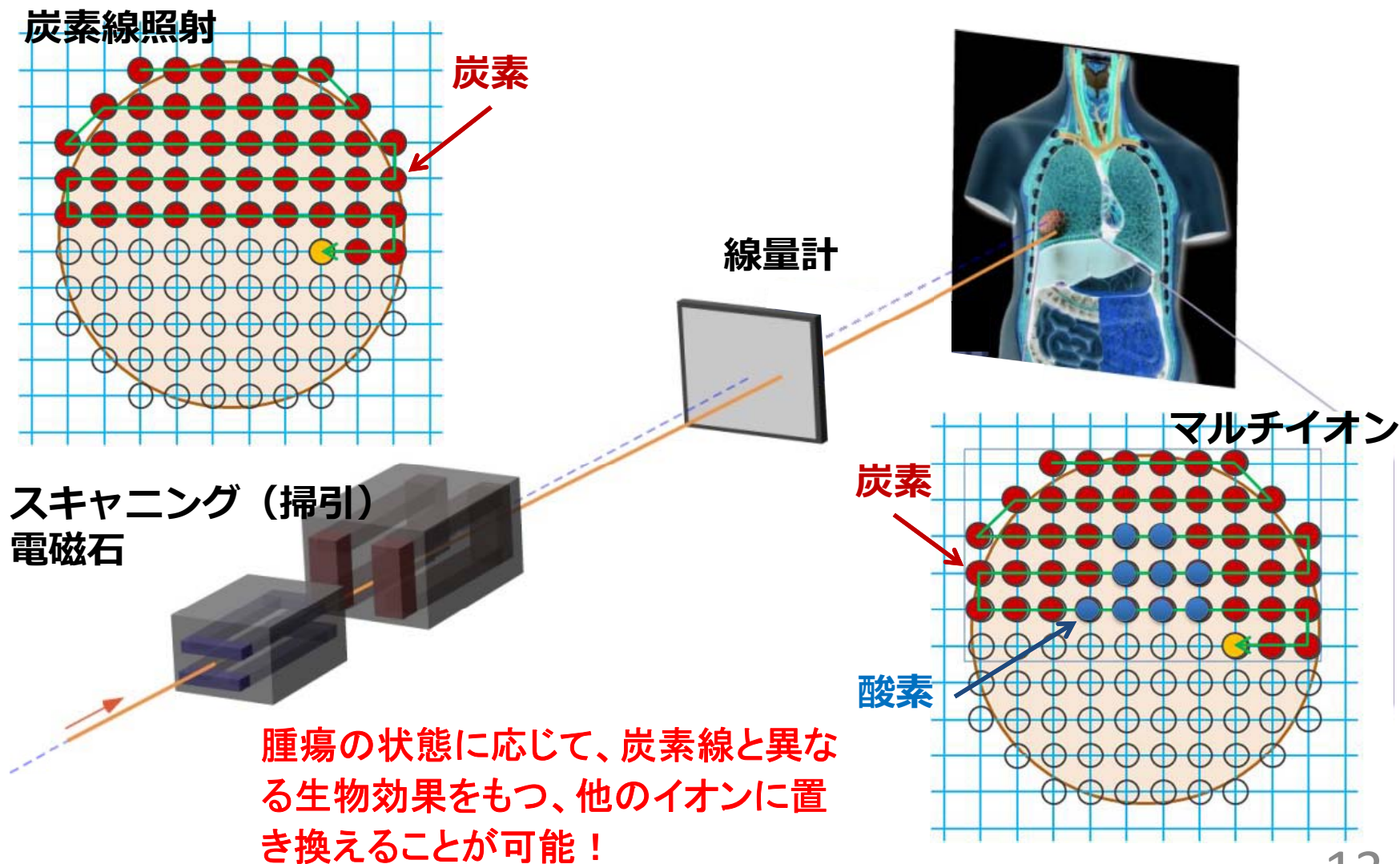
膵臓がんに、炭素線を照射した場合の
線量分布



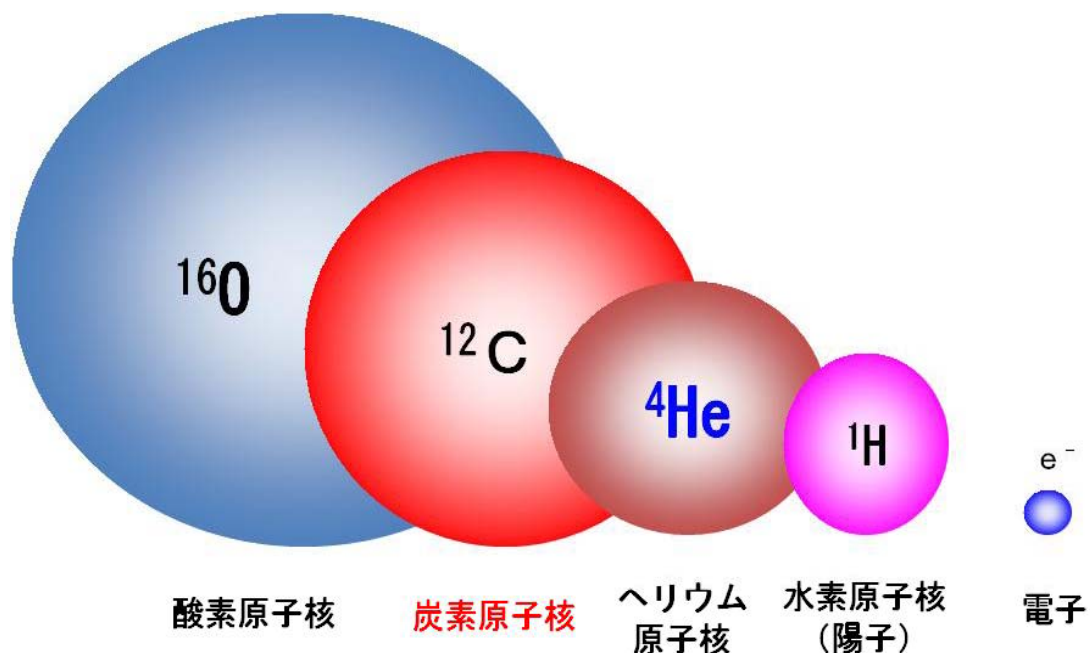
膵臓がんに、炭素線を照射した場合の
生物効果(LET)分布



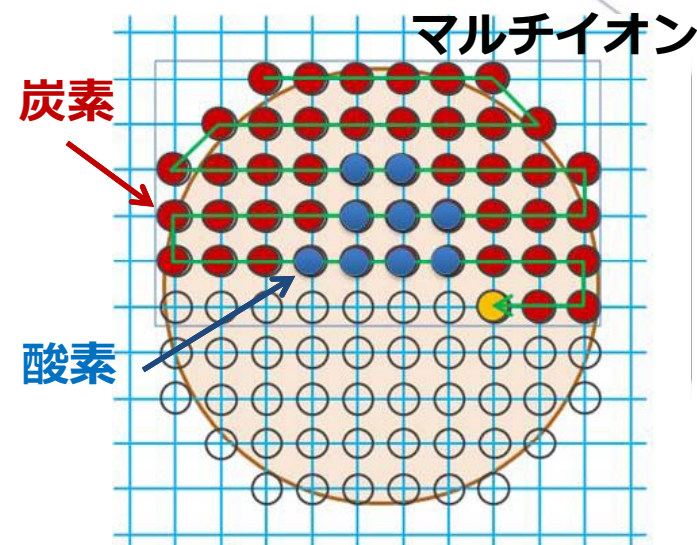
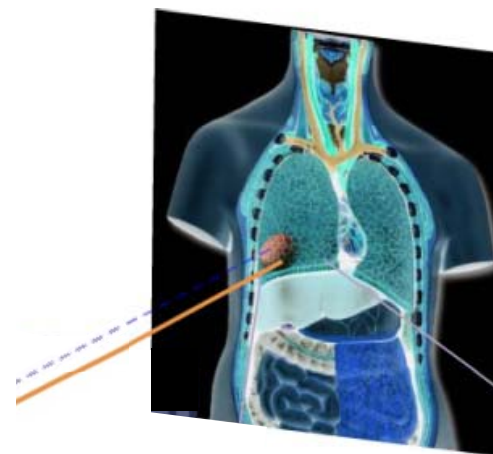
3次元スキャニング照射模式図



3次元スキャニング照射模式図



質量比 28800 : 21600 : 7200 : 1800 : 1

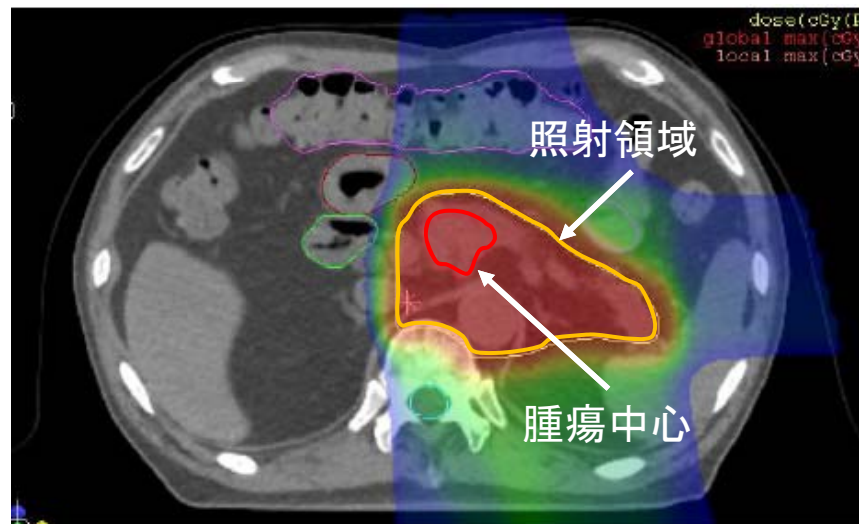


腫瘍の状態に応じて、炭素線と異なる生物効果をもつ、他のイオンに置き換えることが可能！

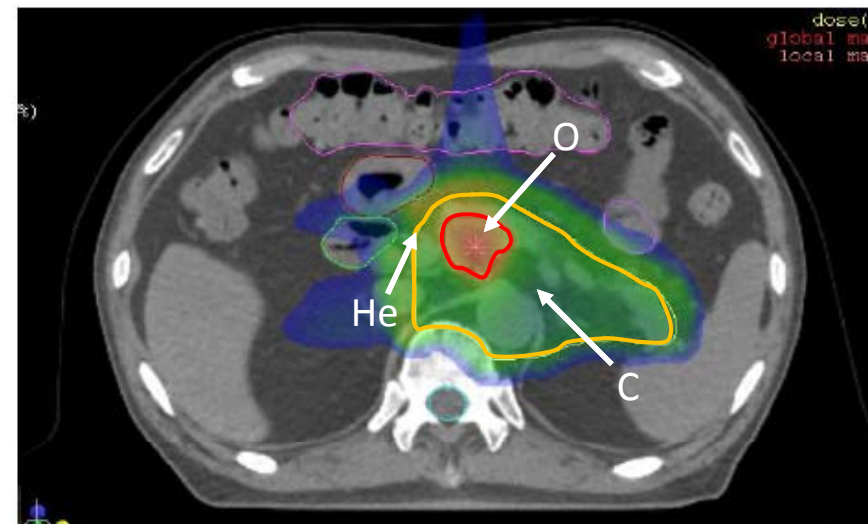
■ マルチイオン：照射領域によるイオンビーム種の最適化

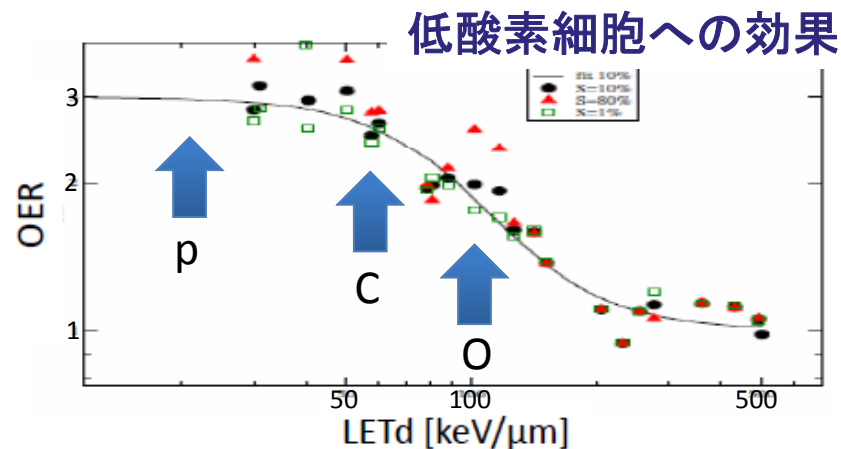
- 腫瘍中心部には、炭素より生物効果の高い酸素 ⇒ **がんの再発抑制**
- 腫瘍中心の周辺、浸潤領域には炭素
- 正常組織近傍には、炭素より生物効果が低いヘリウム ⇒ **副作用低減**

膵臓がんに、ヘリウム、炭素、酸素を照射した場合の線量分布



膵臓がんに、ヘリウム、炭素、酸素を照射した場合の生物効果(LET)分布

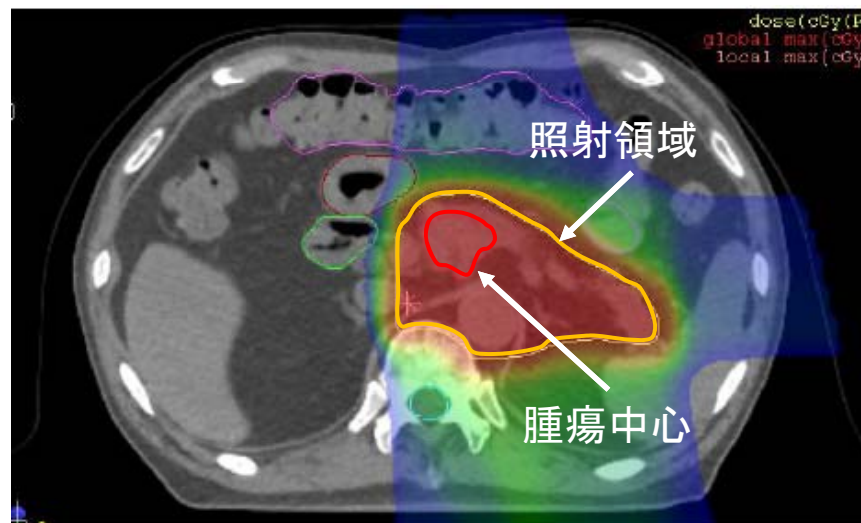




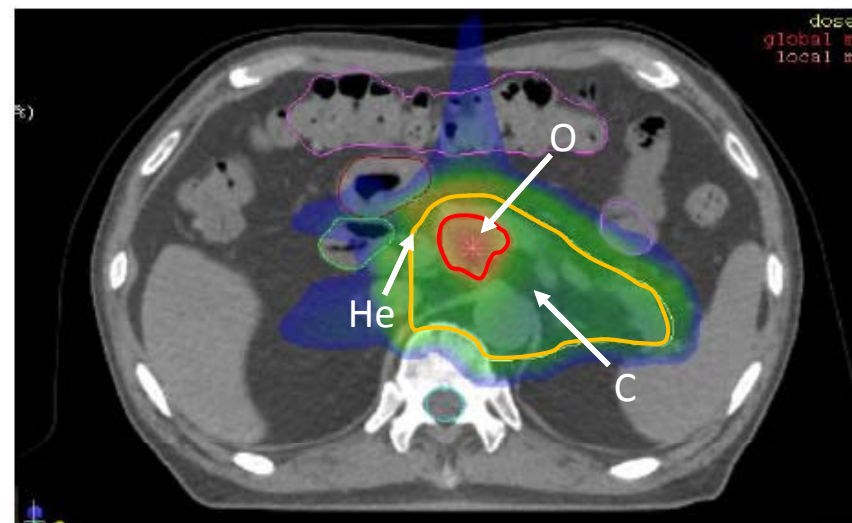
	LET keV/μm	OER
C-RT	45	~ 2.8
IMPACT	100	~ 1.5

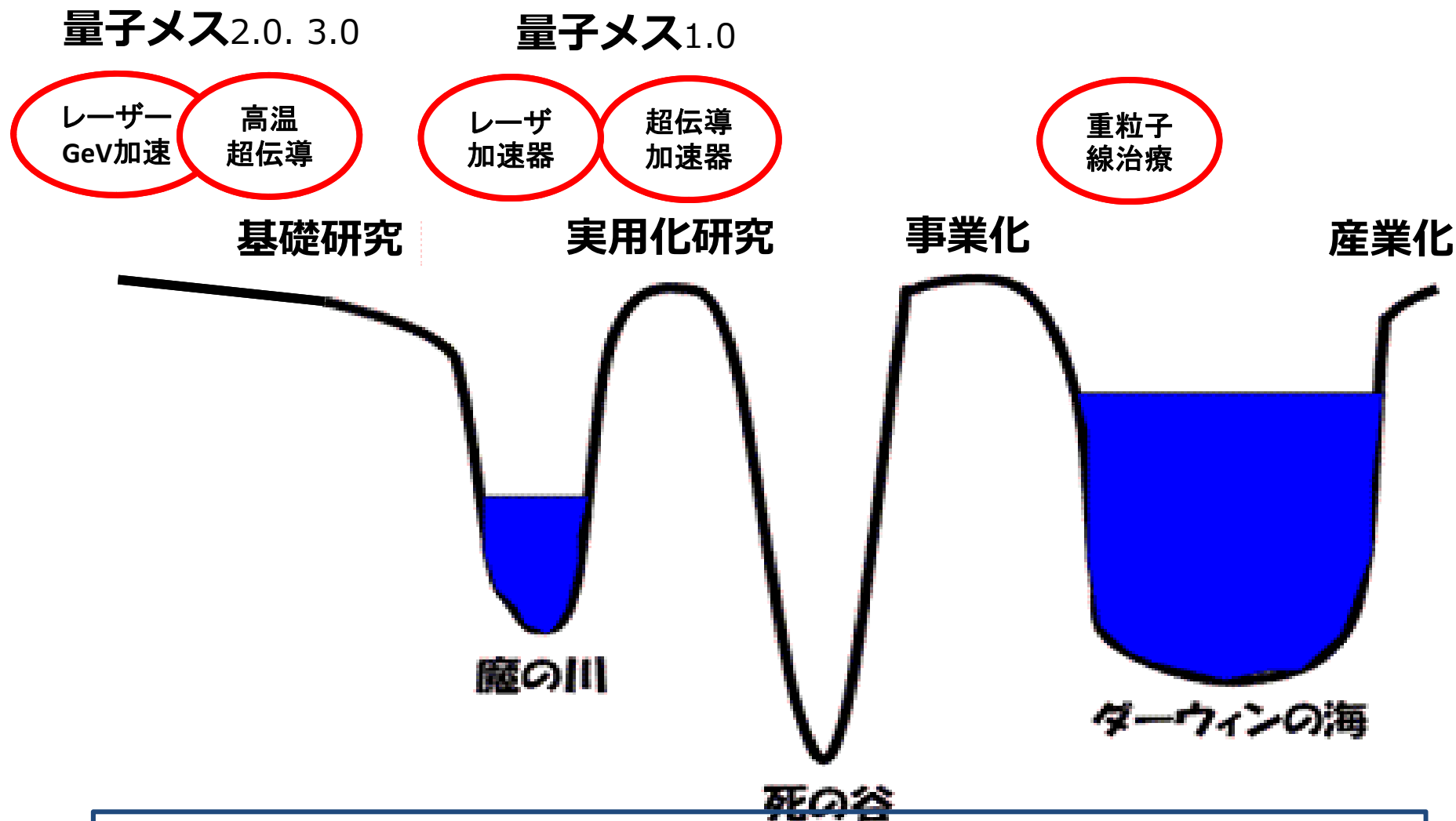
低酸素腫瘍領域に対して約2倍の効果

膵臓がん、ヘリウム、炭素、酸素を照射した場合の線量分布

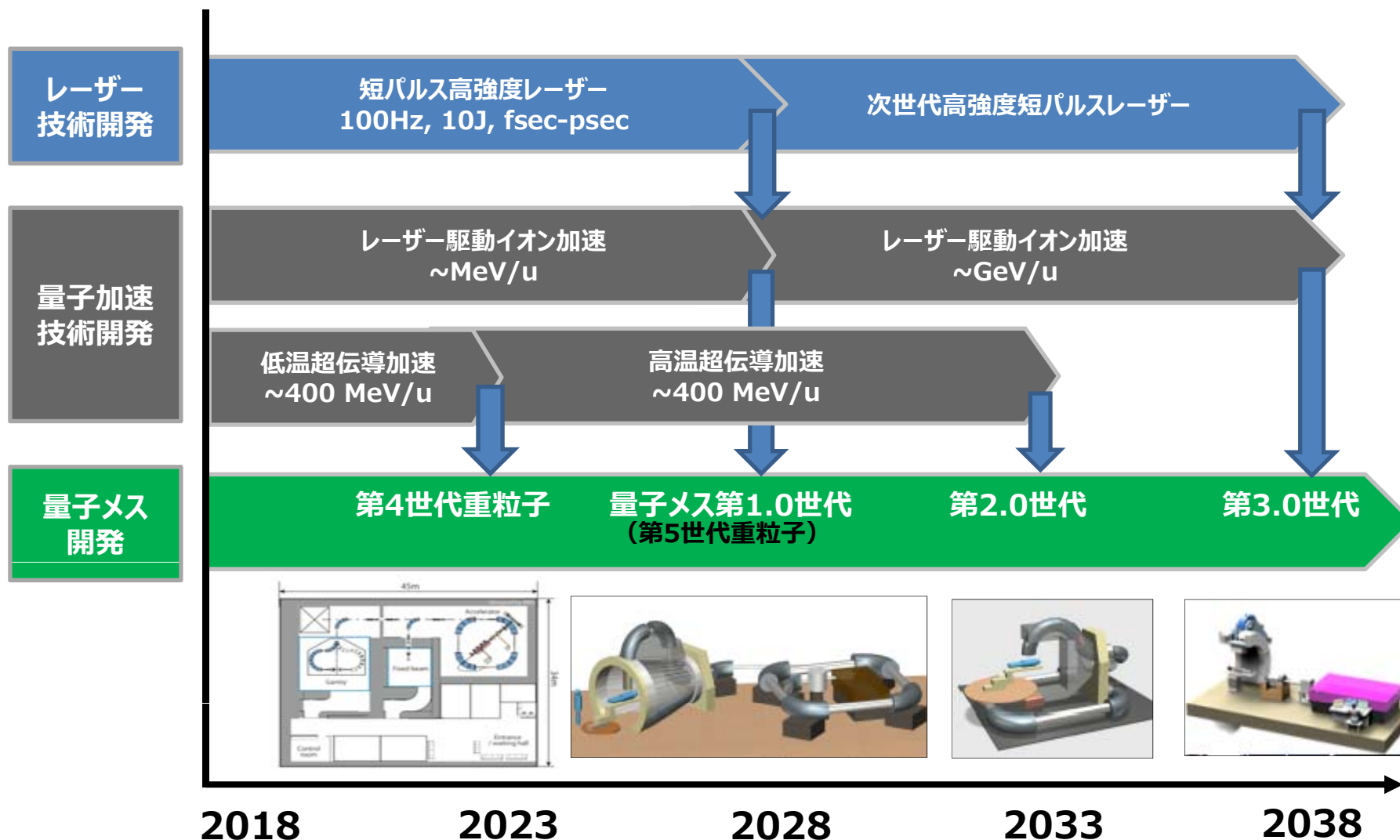


膵臓がん、ヘリウム、炭素、酸素を照射した場合の生物効果(LET)分布



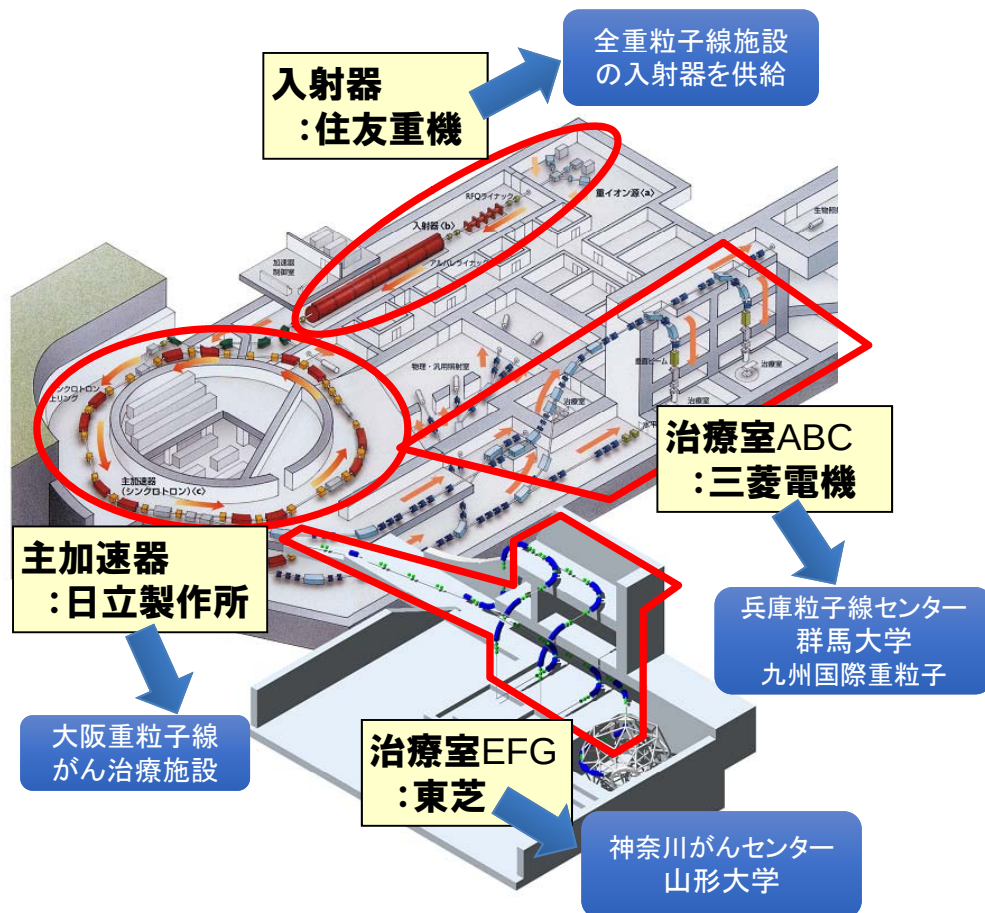


超伝導・レーザー加速技術を用いる量子メスを、事業化へ
つなげることで、治療の普及（産業化）へつなげる。

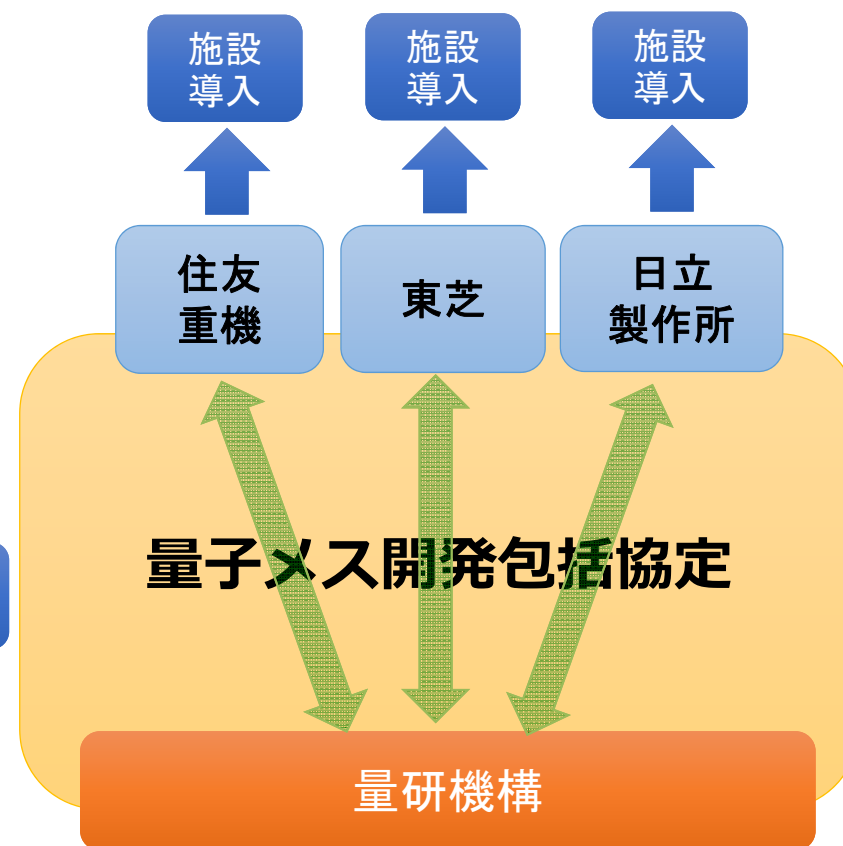


量子科学技術と医療技術の進歩に合わせ、量子メスは進化していく

HIMAC建設時の協力関係



量子メス開発時の協力関係



速やかな事業化（市場投入）のために、量子メスの開発は、国内粒子線治療機ベンダーと共同で進めている。

- ・ 量研の超伝導技術、レーザー駆動イオン加速技術により、重粒子線治療装置の超小型化・低コスト化を実現する。
 - ⇒ 病院内への設置も可能 ⇒ 海外も含めた普及展開
- ・ 生物効果の異なる複数のイオンを、腫瘍に照射することにより（マルチイオン照射）、オーダーメイドの線量・生物効果分布を実現。
 - ⇒ より高い治療効果 ⇒ 超短期治療 = 働きながら日帰り治療



- ・ 超高齢者社会を迎え、がん罹患数が急激に増大（日本：年間約100万人）する中、量子メスを国内外に普及させ、量子イメージング、標的アイソトープ治療、免疫療法などと組み合わせることで、「がん死ゼロ」の健康長寿社会を目指す。
- ・ 量子メスによって、日本主導の医療装置マーケットを創造し、放射線治療分野で、国内企業の国際的競争力を高める。