



量子メス加速器のための レーザー駆動イオン入射器の開発

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 (QST)
関西光量子科学研究所
レーザー駆動イオン加速器開発プロジェクト

主任研究員
博士(理学)

小島 完興



本研究は、JST未来社会創造事業・QST革新プロジェクトの予算支援のもと実施されています

- QST(関西地区):** 榊 泰直, ギン タンフン, 畑 昌育, 森 道昭, 長谷川 登, 石野 雅彦,
青山 誠, 伊東 富由美, 山本 洋一, 錦野 将元, 神門 正城, 近藤 公伯
- 日立造船株式会社:** 黒木 宏芳, 清水 祐輔, 原田 寿典, 井上 典洋
- 住友重機械工業株式会社:** 大友 清隆, 戸内 豊, 筒井 裕士, 松原 雄二
- 九州大学:** 松本 悠椰, 村川 真宙
- 奈良女子大学:** 大石 沙也加, 岡野 朱莉, 熊谷 嘉晃, 石井 邦和
- QST(千葉地区):** 宮武 立彦, 白井 敏之

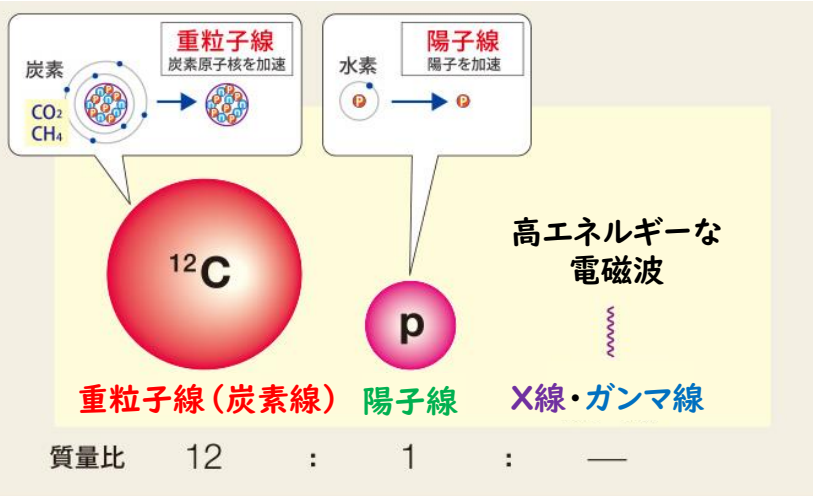


「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」 2024年度シンポジウム

開催日 : 2024/08/05 場所 : 科学技術振興機構 東京本部別館

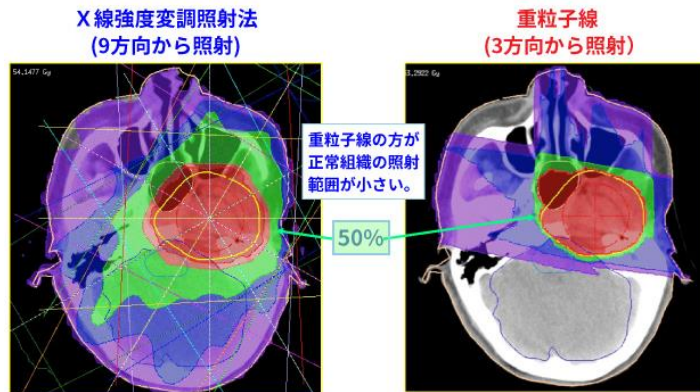
重粒子線（炭素線）がん治療のメリット

治療に使う放射線の種類



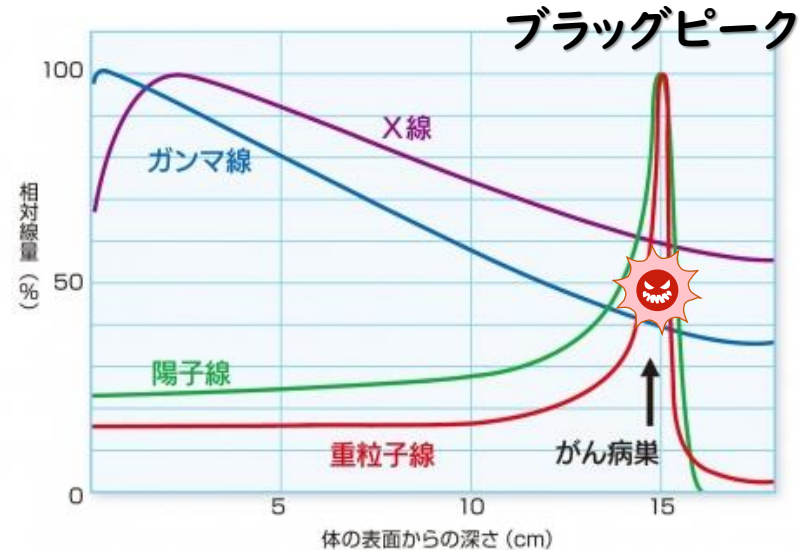
出典：大阪重粒子線センターHPから

QST病院の治療例（X線との比較）

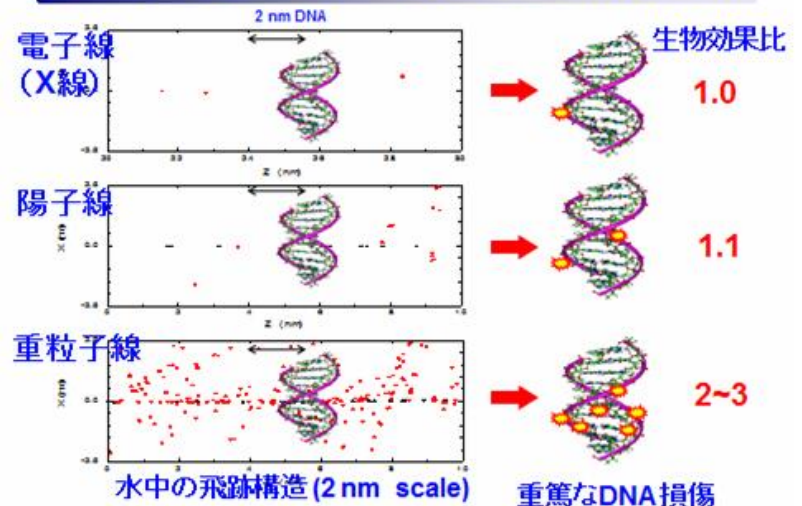


線量分布 赤：96%，緑：50%，青：30%，紫：10%

各種放射線の生体内における線量分布



NIRS 電離密度とDNA損傷修復と致死効果



「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」 2024年度シンポジウム

開催日：2024/08/05 場所：科学技術振興機構 東京本部別館

世界に広がる重粒子線がん治療装置



- 重粒子線
 - 重粒子線 (新規)
 - 重粒子線 (計画中)
 - 陽子線
 - 陽子線 (建設中)
- * 稼働停止中、建設停止中

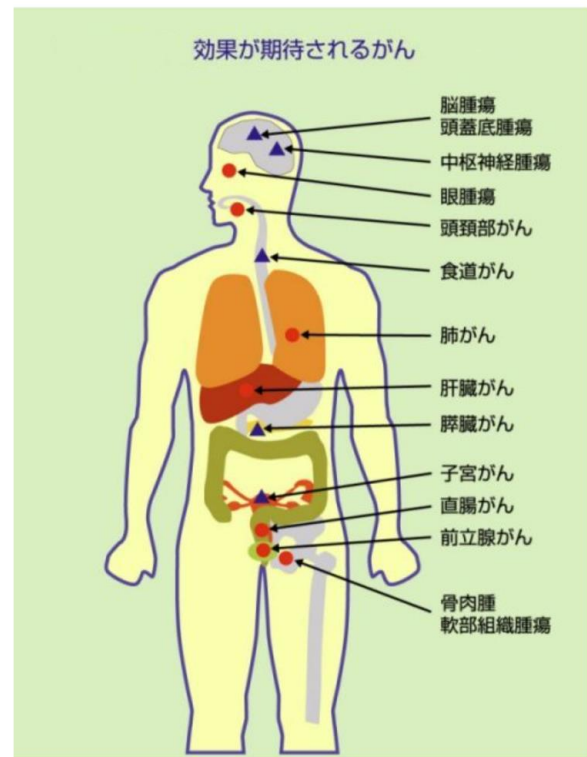
保険診療の範囲が13個の病例に拡大している。例えば、

- 早期肺癌※ (I期からIIA期までの肺癌に限る)
- 限局性の骨軟部腫瘍
- 頭頸部悪性腫瘍 (口腔・咽喉頭の扁平上皮癌を除く)
- 限局性および局所進行性前立腺癌 (転移を有するものを除く)
- 局所進行性膀胱癌
- 局所大腸癌 ※ (手術後に再発したものに限り) など

主な放射線がん治療装置

出典: SankeiBiz

種類	主なメーカー	国旗	国
X線	パリアンメディカルシステムズ		米国
	シーメンス		ドイツ
陽子線	IBA		ベルギー
	日立製作所		日本
重粒子線	三菱電機		日本
	三菱電機 2018年から関連部門を日立製作所と統合		日本
	東芝		日本



保険適用となった粒子線治療と費用(希少ながんでない場合) 出典: がん治療費.com

	保険適用になったがん	これまで (先進医療) の自己負担額	保険診療での自己負担額 (3割負担の場合)	高額療養費制度利用時の自己負担
陽子線治療※1	①小児がん 骨軟部腫瘍 頭頸部がん	約276万円	①約70万円 ②約50万円	8万円~17万円程度 ※一般的な年収の方の場合
	②前立腺がん			
重粒子線治療※2	①骨軟部腫瘍 頭頸部がん	約315万円		
	②前立腺がん			

治療の選択肢になってきた

「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」 2024年度シンポジウム

開催日 : 2024/08/05 場所 : 科学技術振興機構 東京本部別館

重粒子線がん治療装置の歩み

1994年

326億円 146億円(建物) 180億円(装置)



直径 32m

放医研HIMAC
120 m × 65 m

課題解決

- 装置が巨大で高額

建設費の半分は専用の建物の建設費
⇒ 既設の建物への設置は
コスト面と敷地確保の面でも有利

1台当たり
年間700人を治療

@山形大学
(出典: 東日本重粒子センター-HP)



2010年

150億円

直径 20m



群馬大学
60 m × 45 m (1/3)

2030年?

50億円?



直径 8m

次世代加速器“量子メス”
20 m × 10 m (1/40)

原因①. イオン入射器が長い

原因②. シンクロトン加速器が大きい

レーザー駆動イオン加速

高強度レーザー

加速されたイオン

0.1 mm プラズマ

15m ⇒
量子メス 5m

超伝導電磁石

提供：東芝エネルギーシステムズ株式会社

1.48T ⇒
量子メス 3.5T

光速の73%

光速の11%

曲げる

加速

8 m

→超伝導技術とレーザー加速技術により
画期的な小型化・国際的な普及へ

2000年にイオン加速の歴史的な発見

レーザー駆動イオン加速の原理

- ①. **高強度レーザー**の照射により電子が激しく振動しレーザー進行方向へ高エネルギー (MeV級) に加速される

レーザー駆動炭素イオン

- ②. 裏面へ飛び出した**高速電子**が標的中のイオンとの間で分極電場を生成する

- ③. **分極電場**がレーザー駆動イオンを加速する

集光強度
 $> 10^{19} \text{ W/cm}^2$

高強度
レーザー

スポット径
数 μm

標的薄膜
(最大でも数 μm)

高速電子

分極電場 $\sim \text{TV/m}$ (従来加速器 100 MV/m)

加速電場の強度は、これまでの加速器の数万倍

いままで 15m 必要であった加速距離が、数 μm に**桁違いに短縮**

世界初のレーザー駆動イオン入射器の原型機が完成

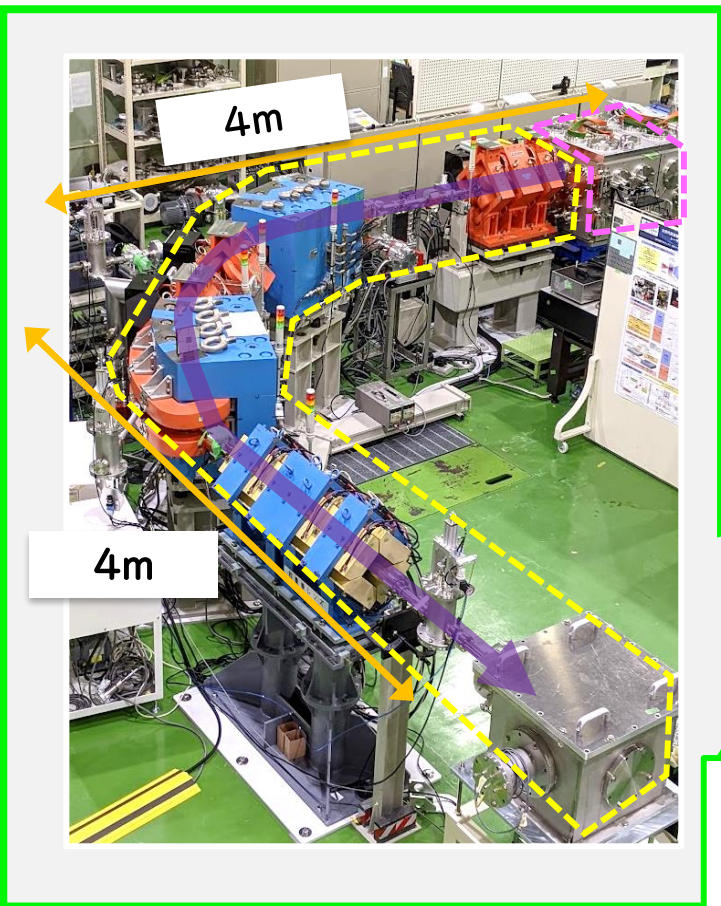
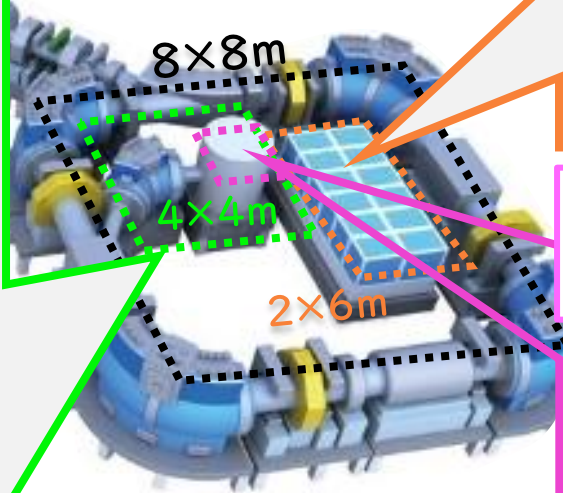
①. 高強度レーザー
(関西光量子科学研究所)



②. イオン加速部
(日立造船との共同研究)



③. イオン輸送部
(住友重工との共同研究)

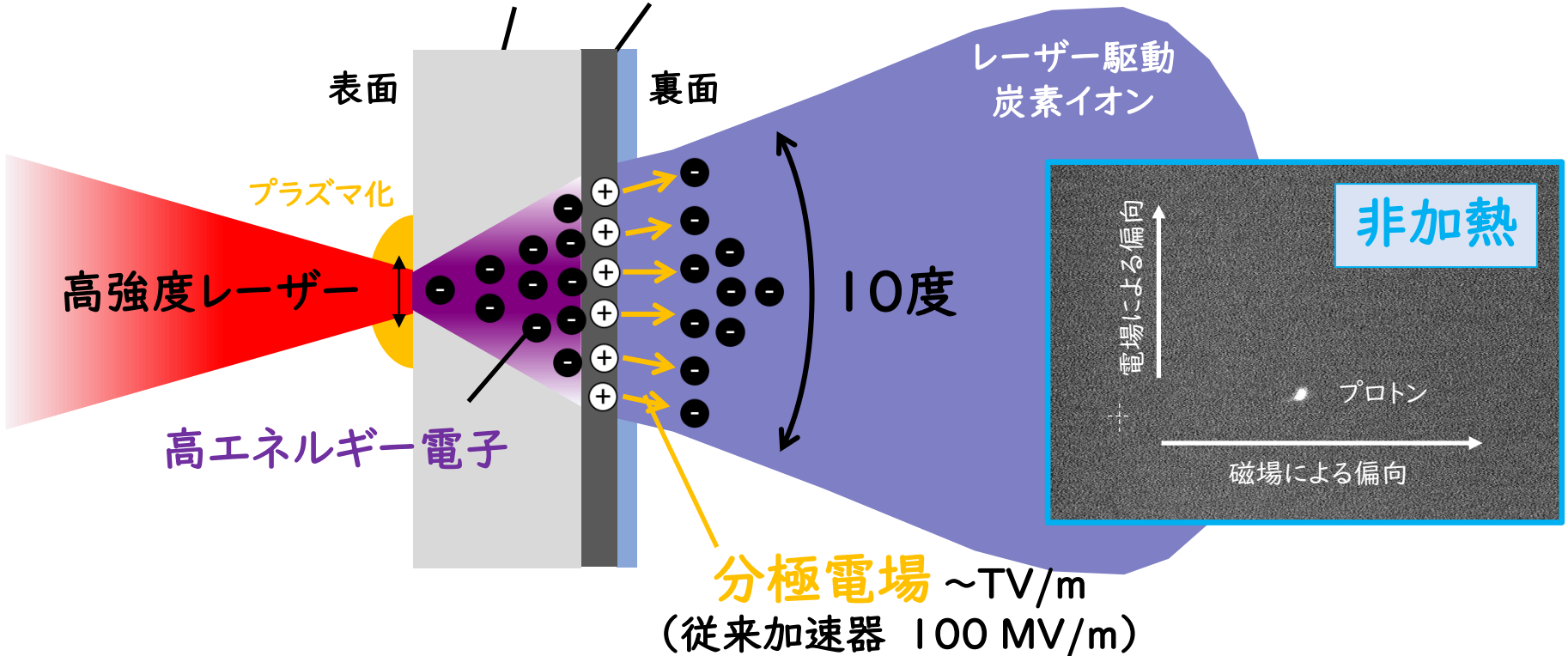


超伝導シンクロトロンリングの内側を模擬した面積に、
レーザー駆動イオン入射器の原型機を建設し性能試験を開始した

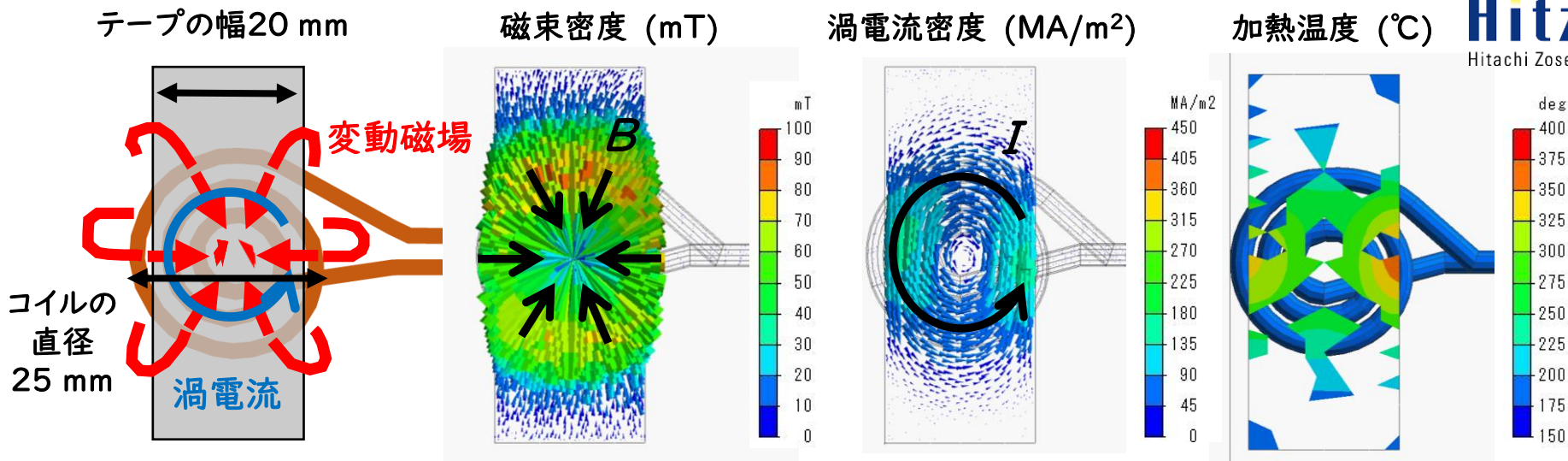
研究成果①：炭素イオンの高繰り返し・高安定な加速

2層標的薄膜テープ
ニッケル基板 2 μ m+炭素層 100nm

+表面吸着層(水や油)

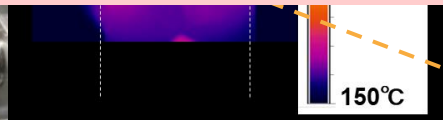
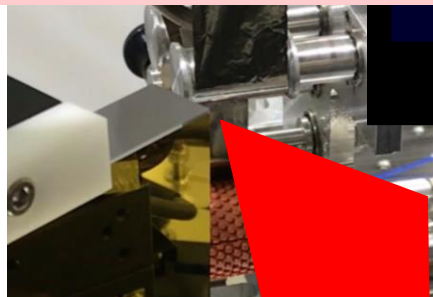


表面吸着層の除去 ⇒ 250°C以上に加熱する
レーザー照射すると、標的に穴が空く ⇒ 標的を入れ替える
1秒間に10回の速さで標的を入れ替え・加熱する装置を開発



誘導加熱のメリット

- ①非接触で加熱⇒高速で標的交換が可能
- ②表皮効果によって、実効的な抵抗値が高くなる⇒高速で昇温が可能
- ③コイル形状によって電流の流れ方を制御可能⇒周囲の光学部品を熱から守る



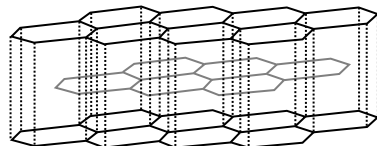
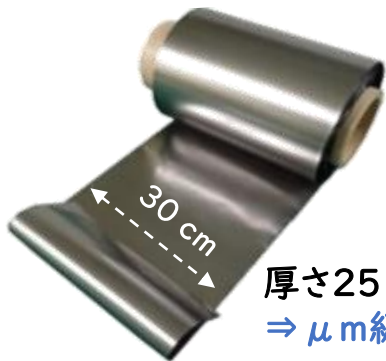
加熱開始後、わずか100msで300°Cまで温度が上昇

どんな標的を加熱するか？

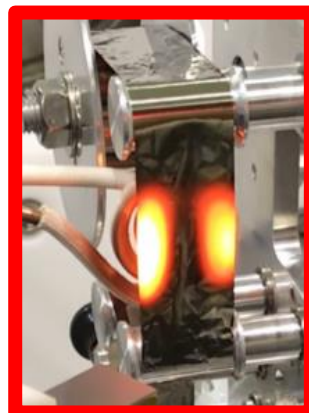
- ⇒①炭素原子を含み、②水素を含まない、
- ③厚さ数 μm に加工が容易、④高繰り返し供給が可能

高純度な炭素標的(グラファイト) **×**

(出典:カネカ HP)

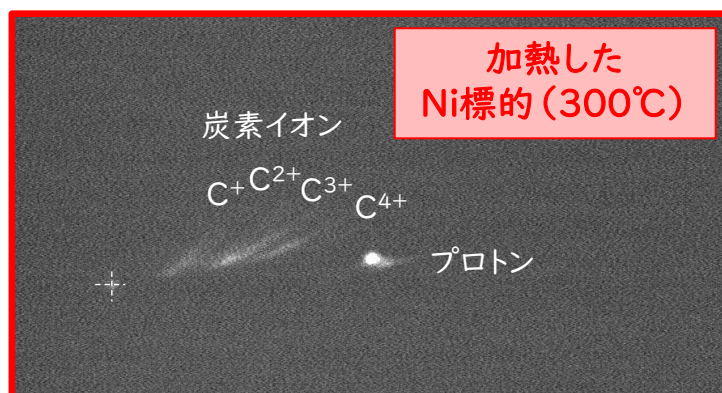
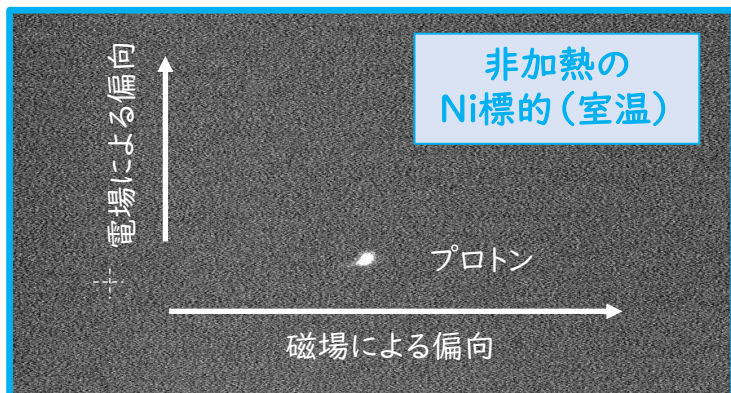


厚さ $25\mu\text{m}$ のグラファイトシート(市販化)
⇒ μm 級の厚みでは脆く、搬送が難しい



○ μm 級のニッケル薄膜を標的に採用

- ・触媒作用(遷移金属)によって加熱されたNi表面ではCH結合が切断
⇒水素(H)は気体として排出
⇒炭素(C)はニッケル表面に固溶
- ・強磁性体のため、誘導加熱に効果的
- ・融点が高い



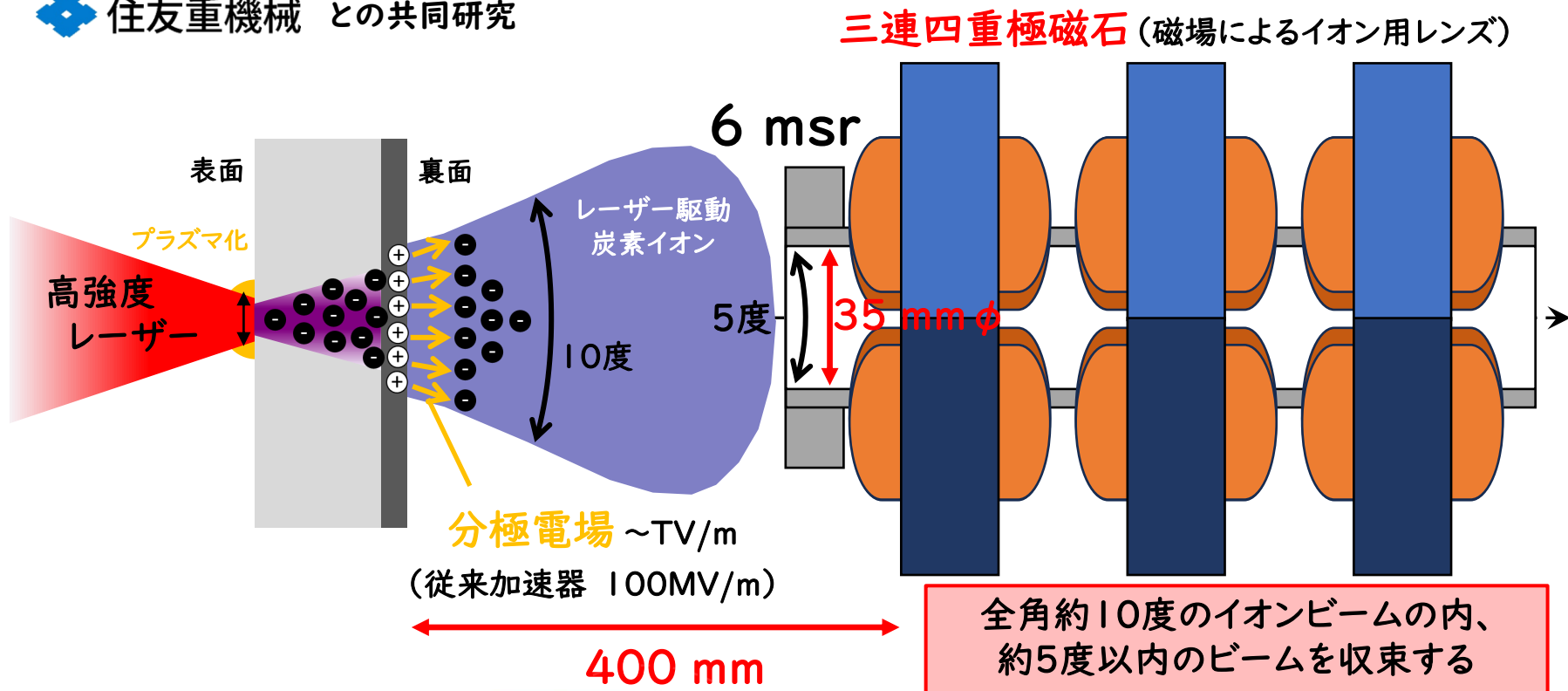
Hitz
Hitachi Zosen
との共同研究

論文: Sadaaki Kojima et al., Matter and Radiation at Extremes 8, 054002 (2023).

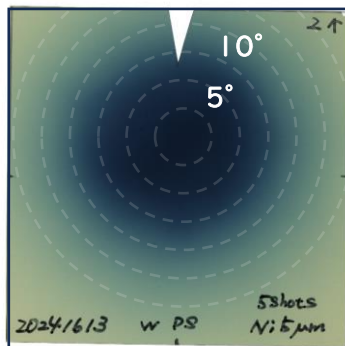
特許申請: 特願:2022-190747, 国際出願:PCT/JP2023/41213

研究成果②： 加速されたイオンの全体粒子数の計測

住友重機械 との共同研究



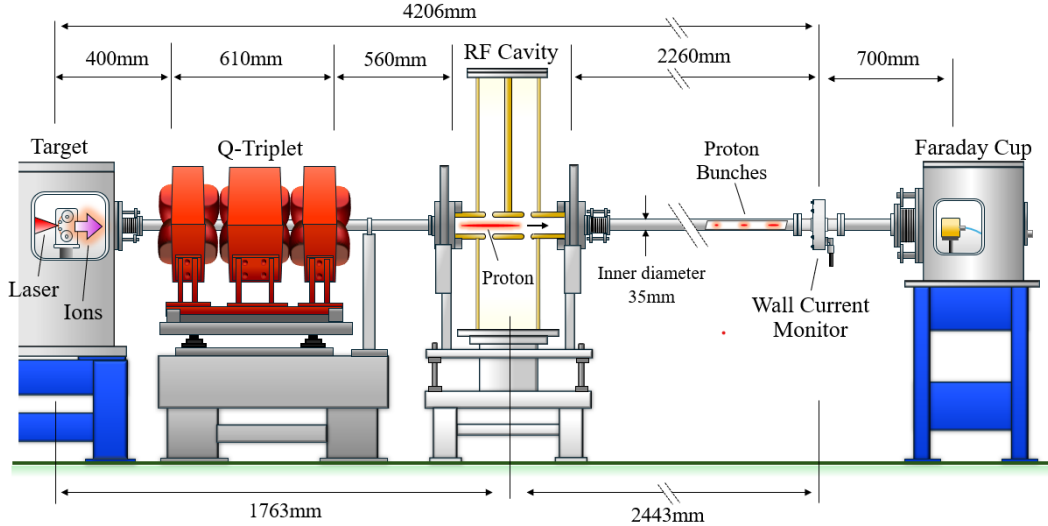
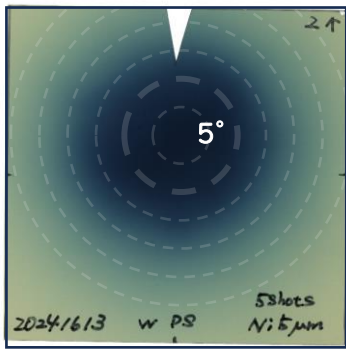
ラジオクロミック
フィルム
(イオンビームによって着色)



均一なイオンビームが
全角で10度の発散角で
加速されている

研究成果②: 加速されたイオンの全体粒子数の計測

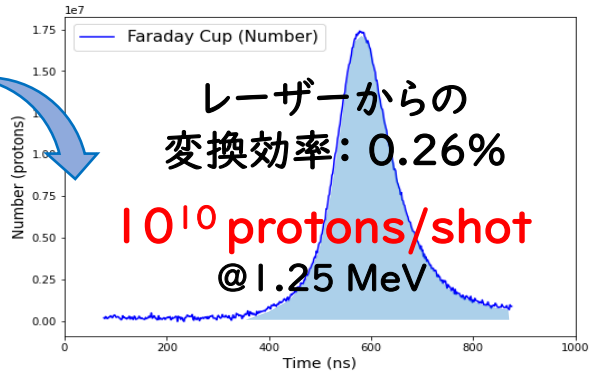
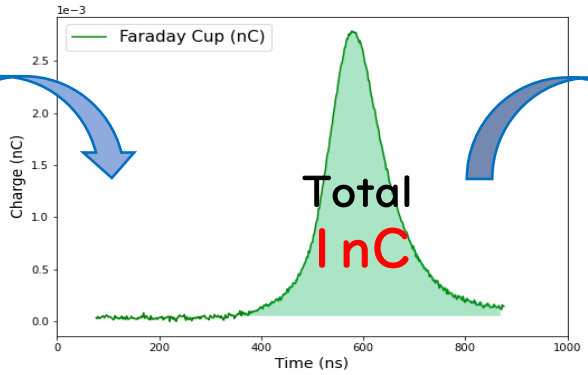
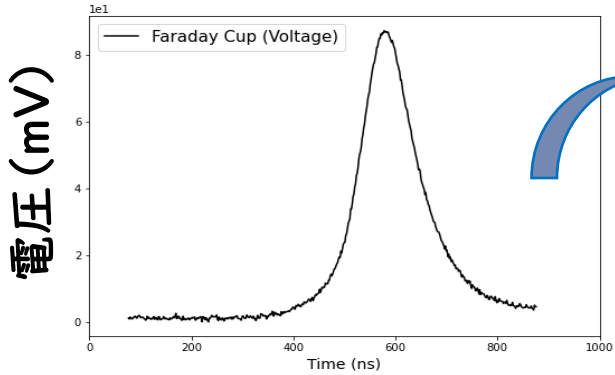
住友重機械 との共同研究



電流 = 電圧/抵抗
(抵抗 = 50Ω)

電荷量 = (電圧/抵抗)/時間ステップ
(時間ステップ = 1.6 ns)

イオン数 = 電荷量/素電荷
素電荷 = 1.602e-19 [クーロン]

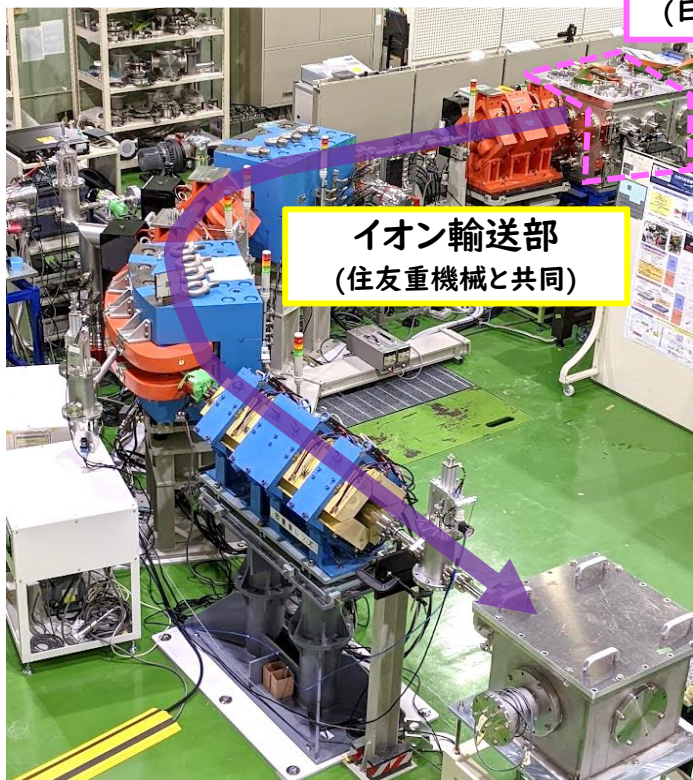


イオン用レンズとファラデーカップの組み合わせによって
msr級の大きな立体角でレーザー駆動イオンの粒子数の計測が可能になった

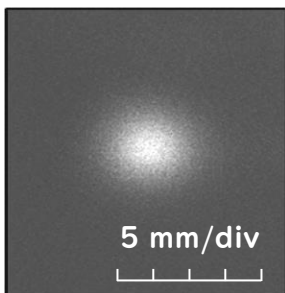
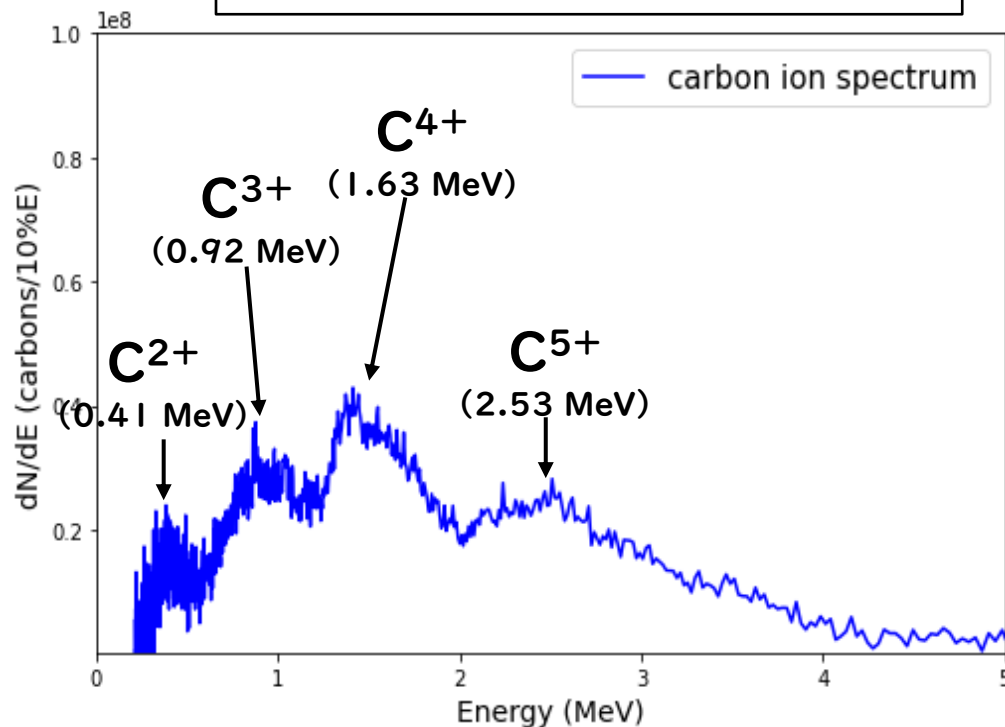
住友重機械 との共同研究

イオン加速部
(日立造船と共同)

壁電流計測 (非破壊)
によるの炭素イオンの
エネルギー分布の全数計測



イオン輸送部
(住友重機械と共同)



炭素イオンの空間分布
(C⁴⁺, 1.63 MeV
3%バンド幅)

⇒4価の炭素イオンを
直径10mm程度で輸送

四重極磁石で収束し
加速した炭素イオンの全数を計測
⇒4×10⁷個の炭素イオンを観測

レーザー駆動イオン入射器の達成値

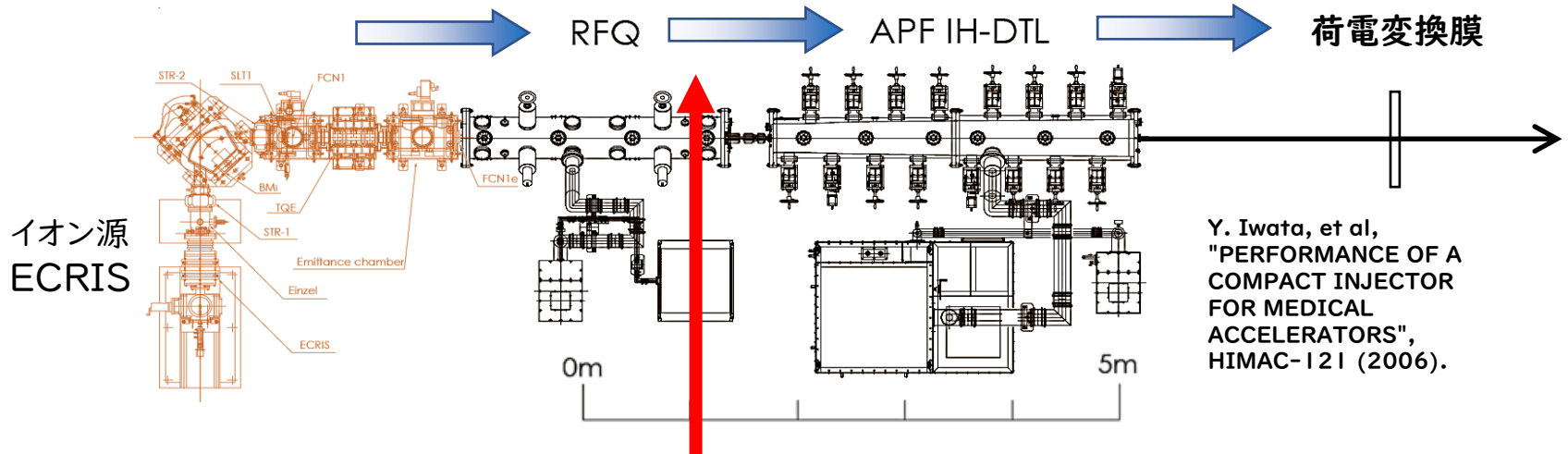
HIMACにおける
既存のイオン入射器

C⁴⁺
10 keV/u

C⁴⁺
610 keV/u

C⁴⁺
4 MeV/u

C⁶⁺
4 MeV/u



現在の実験値

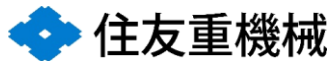
- ・価数 : **5価**
- ・エネルギー : **400 keV/u (最大)**
- ・イオン数 : **5 × 10⁷ 個/shot程度**
- ・エミッタンス: **0.055 π mm mrad**



最終目標値

- ・価数 : **6価**
- ・エネルギー : **4 MeV/u**
- ・イオン数 : **10⁸ 個/shot**
- ・エミッタンス: **1 π mm mrad**

必要なレーザー強度 **10¹⁹ W/cm² (0.75J)** **10²⁰ W/cm² (2J)**



皆様

本日はご来場ありがとうございました
今後とも、未来社会創造事業 JPMJ17A1
「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」
へのご支援宜しくお願い致します



ご清聴ありがとうございました

