

レーザー駆動による短パルス・高密度イオンビームの新しい応用

奈良女子大学：石井邦和，熊谷嘉晃，

大石沙也加，今村日向子，岡野朱莉，飯田祥子，浅野くるみ，林若奈

QST関西研：榊泰直，小島完興，赤松憲



奈良女子大学
Nara Women's University

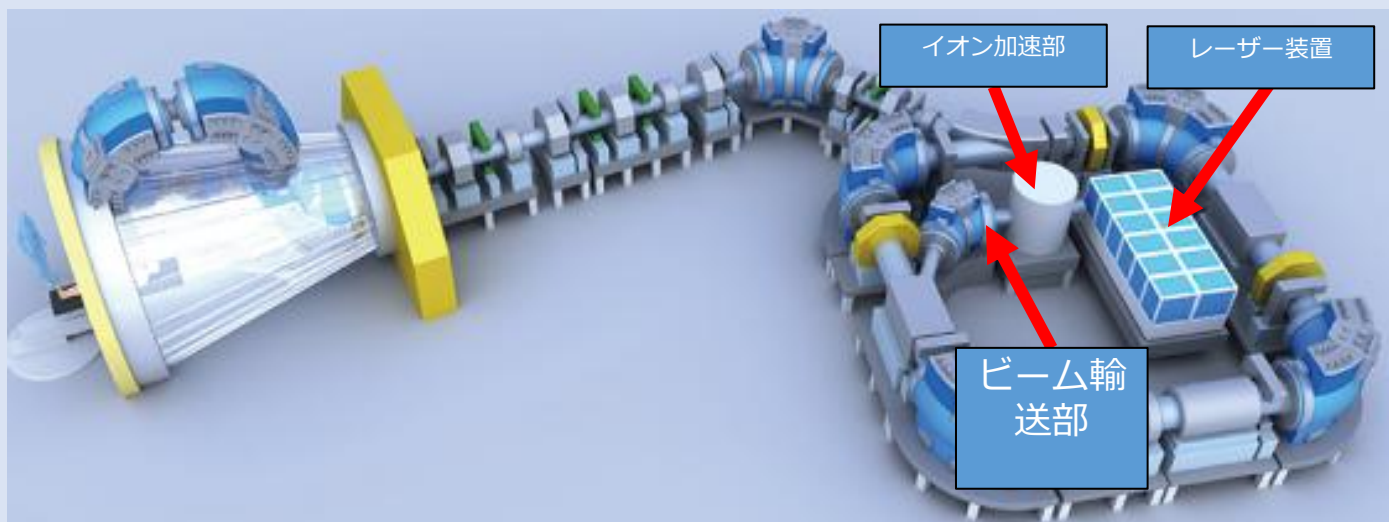


2024年度より未来社会創造事業 本プロジェクトに参入

「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」 2025年度第1回シンポジウム
ー イオン加速システムとハイパワーレーザーの開発 ー 2025/09/01開催

次世代重粒子線がん治療 第5世代量子メス

レーザー駆動加速器による入射器の小型化



POC : 4 MeV/uの炭素を1%バンド幅あたり 10^8 個/pulse, 10Hzで99%以上の高純度で輸送できる

短パルス高密度MeVイオンビーム

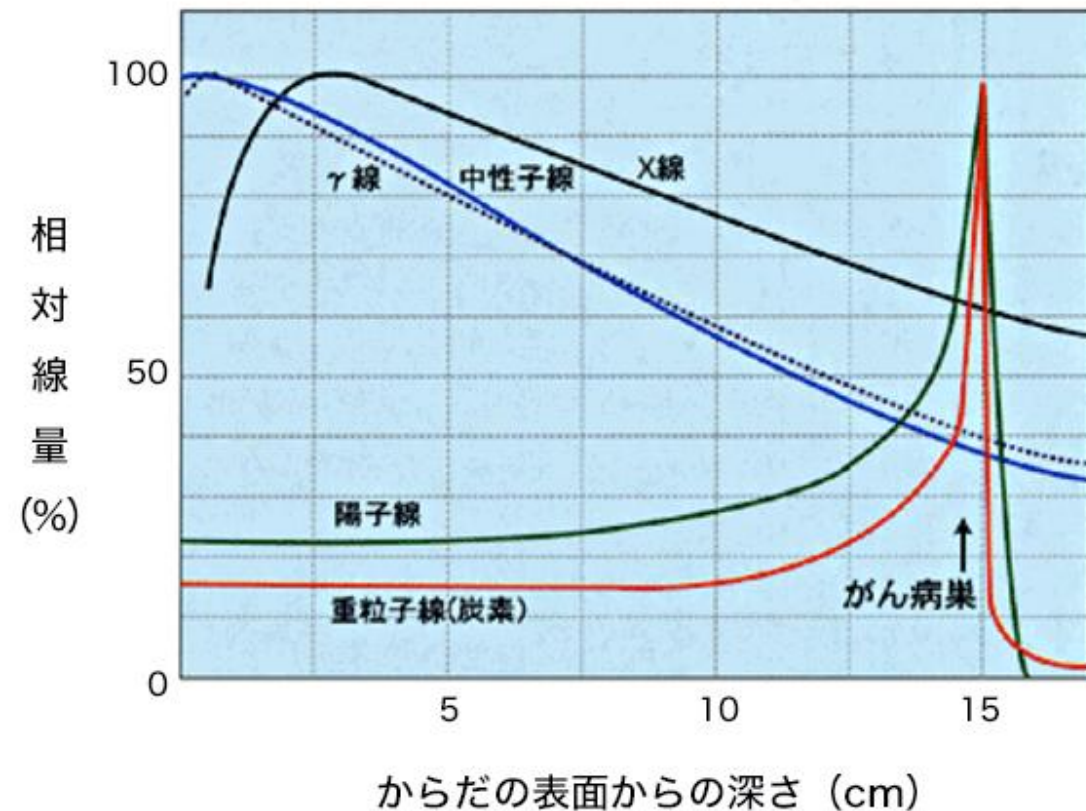
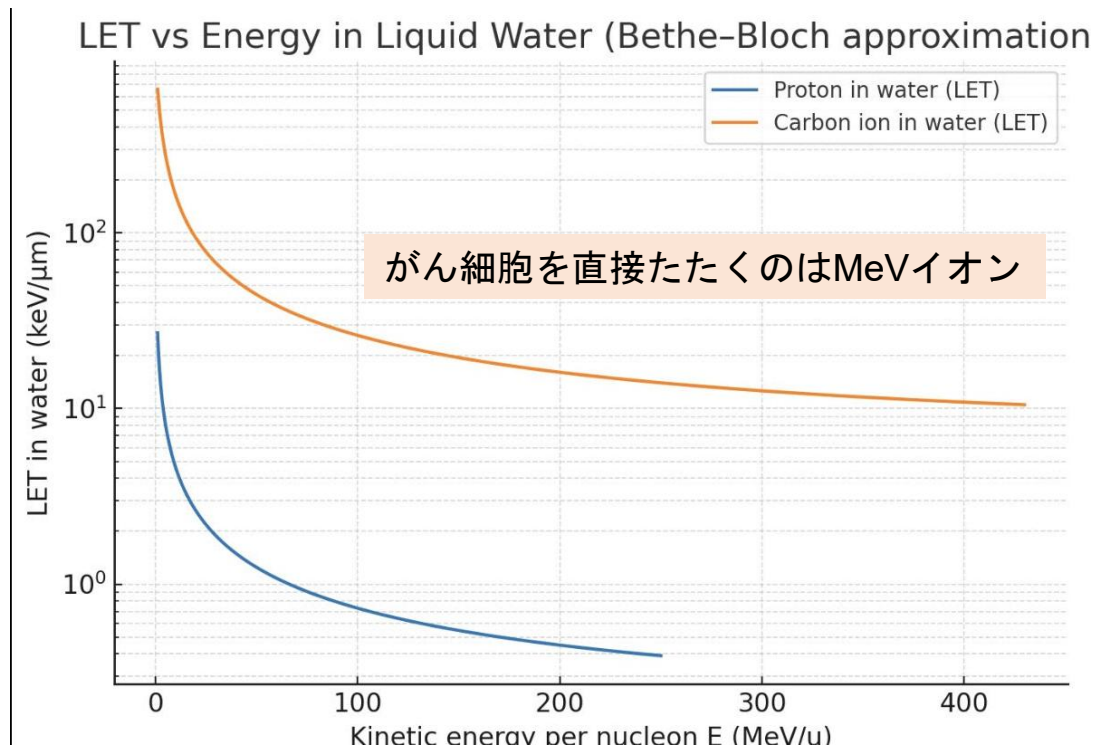


超伝導シンクロトロンによる加速



治療室

重粒子線がん治療



QST 病院HPより転載

FLASH効果

高線量率で照射すると治療成績が良い

	FLASH-RT	CONV-RT
線量率	非常に高い(≥ 40 Gy/s、場合により 10^6 Gy/s)	低～中程度(0.001～0.4 Gy/s)
照射時間	極短: 数十～数百ミリ秒以内に完了	数秒～数分～複数回分割照射(フラクショニング)
正常組織への影響	ダメージが抑制される(正常組織保護)	ダメージが蓄積しやすい(副作用リスクあり)
腫瘍制御	同等以上の効果(場合によっては優位)	十分な効果が得られているが正常組織に制限あり
主な仮説メカニズム	酸素枯渇、フリーラジカル動態、免疫応答や血液循環の違いなど	標準的な放射生物学による累積的損傷動態
研究・実用状況	前臨床段階／一部臨床試験あり。装置・線量計など技術的課題あり	標準的に確立・普及済み。治療実績豊富

世界各国の研究機関で、重粒子線×FLASHの研究が進行中

短パルス高密度MeVイオンビーム

量子メス原型器

0.5 MeV - 4 MeV/u

単バンチパルスビーム

10^8 protons / pulse

10^8 C6+ ions / pulse

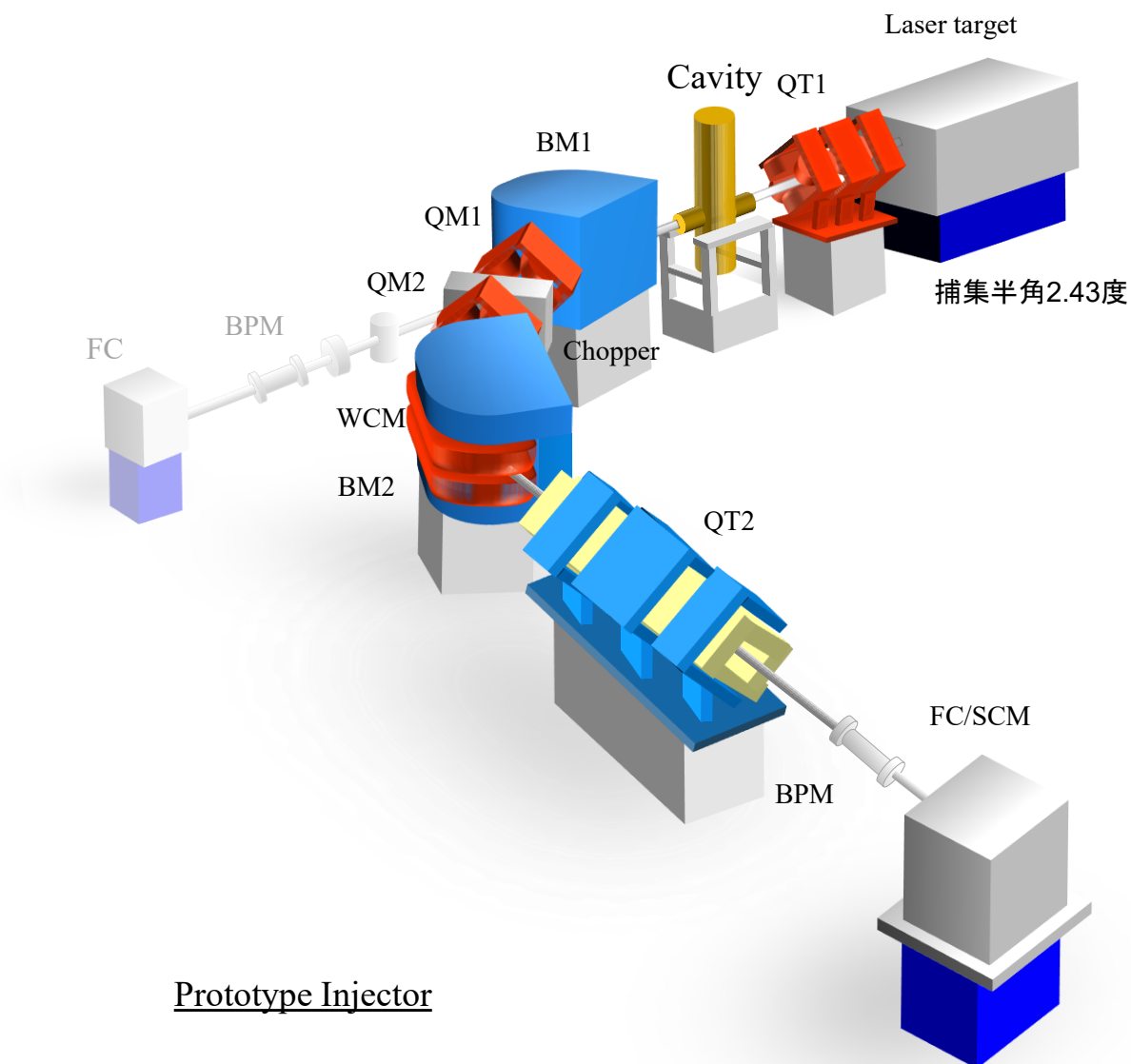
様々なイオン種, ブロードエネルギー

重要となる技術開発要素

空間的収束(Qトリプレット)

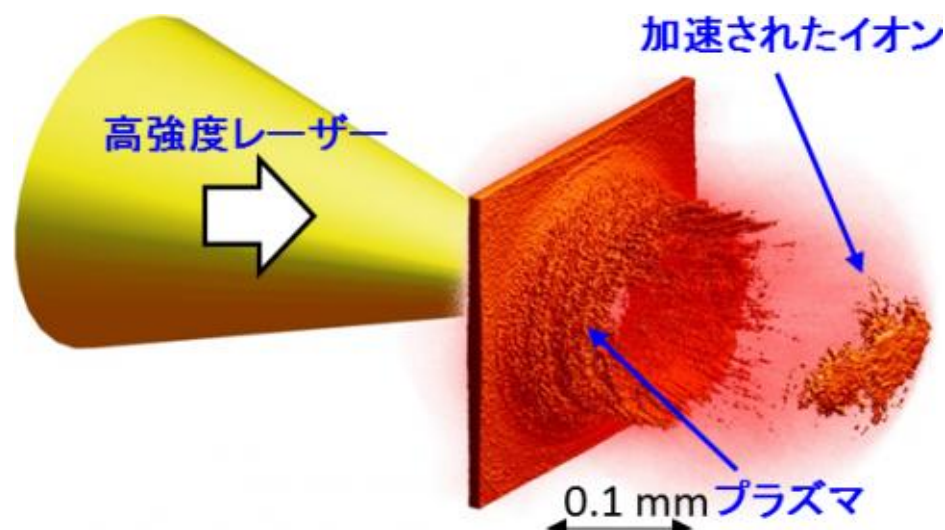
時間的収束(位相回転空洞)

高純度化(磁場剛性+チョツパ)



Prototype Injector

レーザー駆動イオン入射器の特徴と高純度化



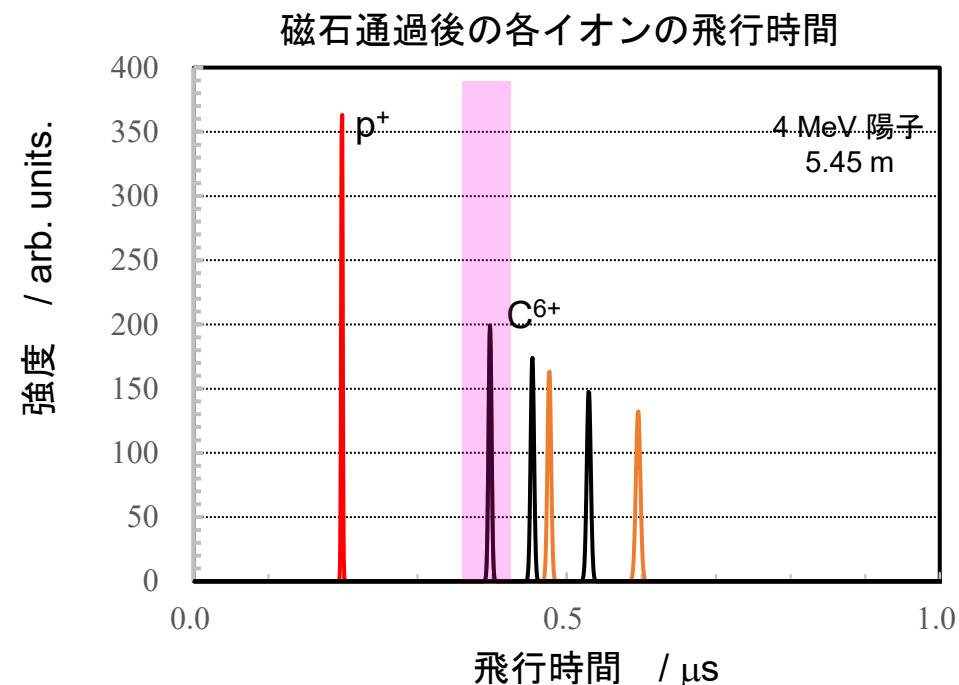
レーザー集光点から瞬間的にイオンが飛び出す！

そのイオンは幅広いエネルギー幅（速度幅）を持ち、
標的表面に付着した不純物も加速される

高純度化が必須となる

磁場による偏向は磁場剛性により決定される

$$B\rho = \frac{mv}{qe}$$



チョッパーによる切り出しが有効

量子メス原型器

0.5 MeV - 4 MeV/u

単バンチパルスビーム

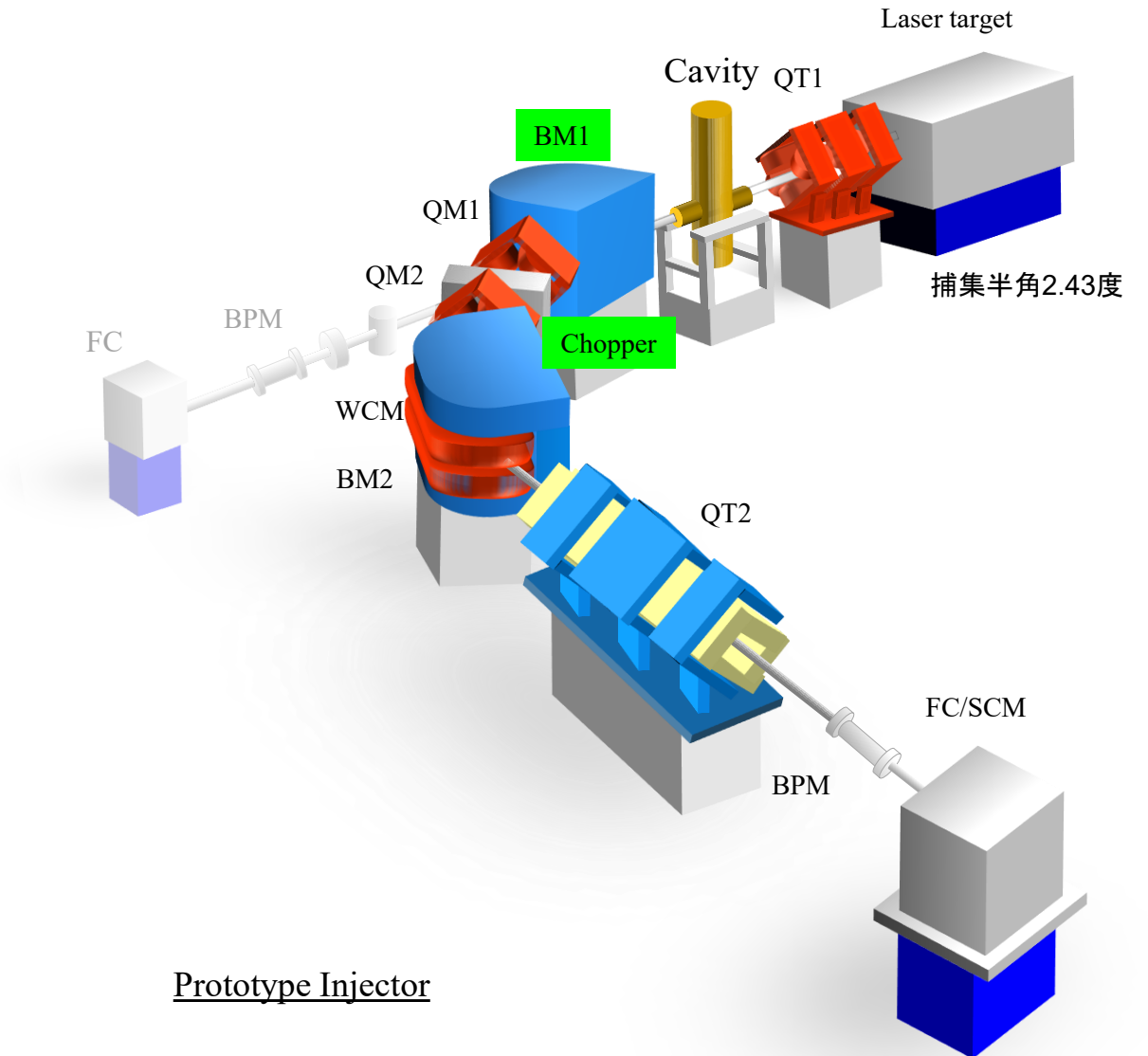
10^8 protons / pulse

10^8 C6⁺ ions / pulse

様々なイオン種, ブロードエネルギー

時空間的収束(Qトリプレット+位相回転空洞)
高純度化(磁場剛性+チョッパ)

短パルス高密度MeVイオンビーム



MeVイオン加速器としての可能性

タンデム型イオン加速器@奈良女子大学

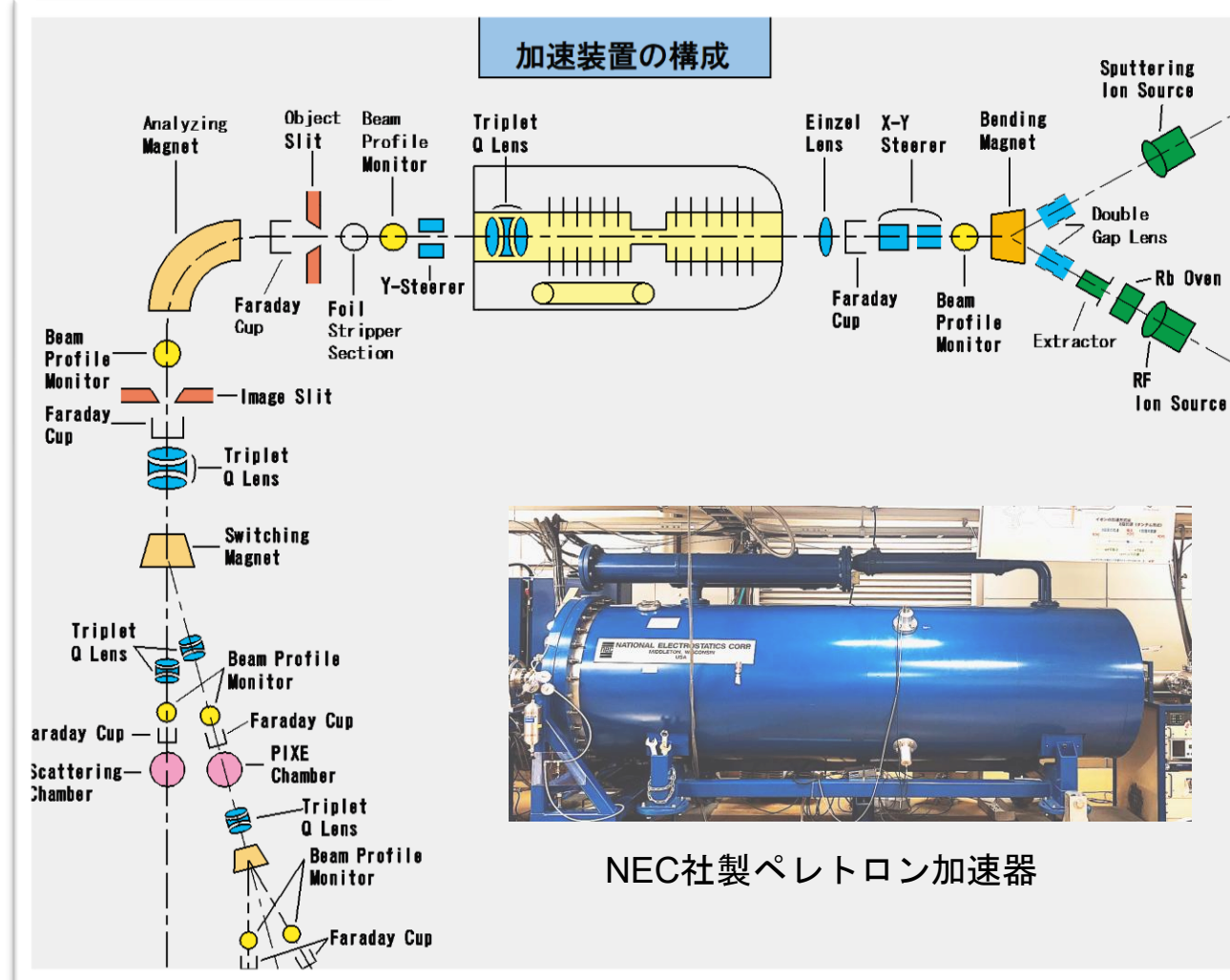
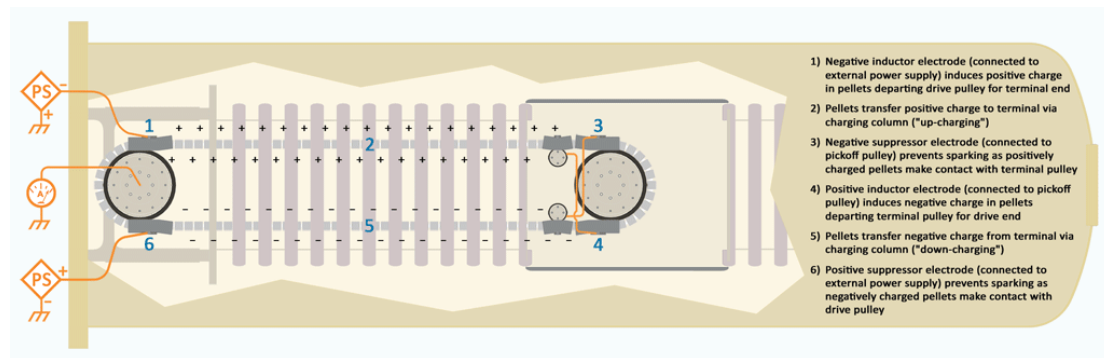
0.5 MeV - 3.4 MeV

連続ビーム

10^{10} protons / 1s

10^{10} C²⁺ ions / 1s

単一イオン種, 単色エネルギー



NEC社製ペルトロン加速器

レーザー駆動イオン入射器

タンデム型イオン加速器

ビームエネルギー 0.5 MeV - 4 MeV/u

0.5 MeV - 3.4 MeV/u

ビーム形態 単バンチパルスビーム

連続ビーム

陽子線 10^8 protons / pulse

10^{10} protons / 1s

炭素線 10^8 C⁶⁺ ions / pulse

10^{10} C²⁺ ions / 1s

現状レーザー駆動イオン加速器のパルスは1Hz, POCでは10Hzであり, パルス幅は1ns以下である

時空間的密度 10^{17} particles / cm²s

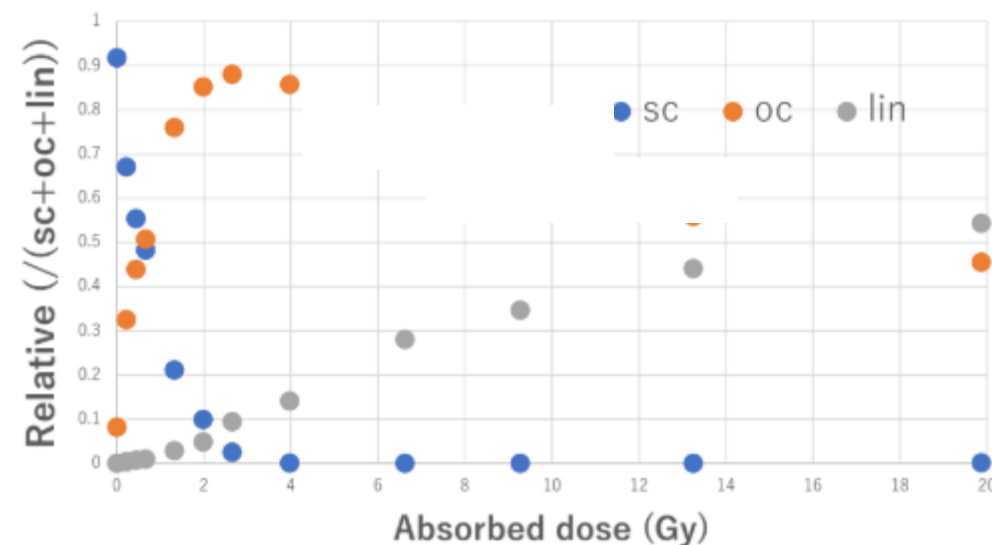
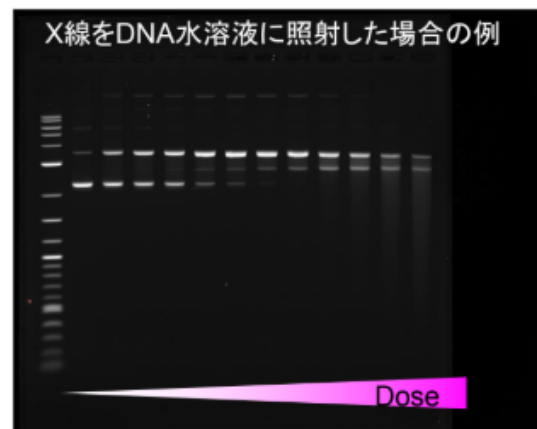
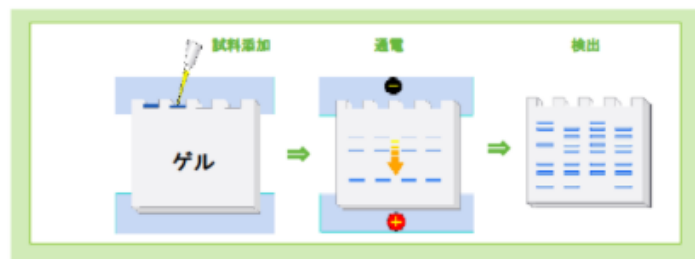
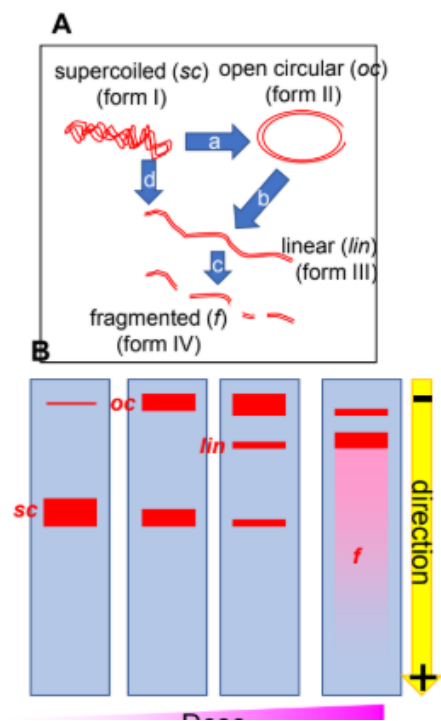
10^{10} particles / cm²s

短パルス高密度MeVイオンビーム

DNA照射実験@QST関西研+奈良女

乾燥DNA照射実験：粒子線による直接効果の解明
→ DNAを対象とするイオンビーム照射実験

pUC19プラスミドDNA、分子量：約180万、2686塩基対



タンデム加速器と量子メス入射器のイオンビーム照射効果の比較

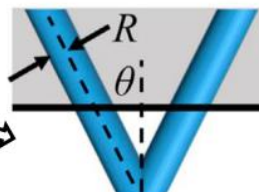
フルエンス率の違い

DNAを構成する高分子の物理的破壊メカニズム（直接効果）のフルエンス率依存性，時間発展をみる
→ FLASH効果の物理的側面

液膜照射実験@奈良女

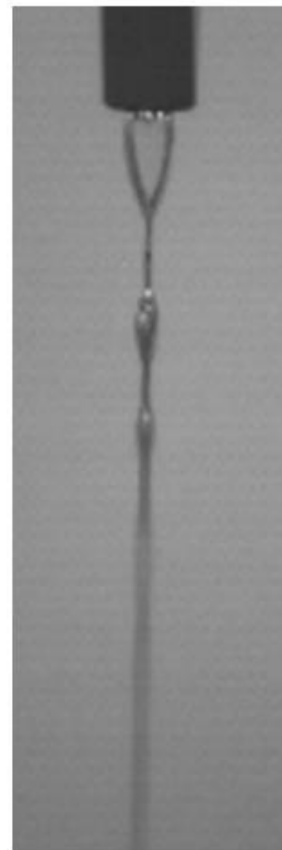
- ・真空中に液体の膜を作成する技術の確立
- ・液体の阻止能（LET）の絶対値測定が可能に

Microfluidic chip

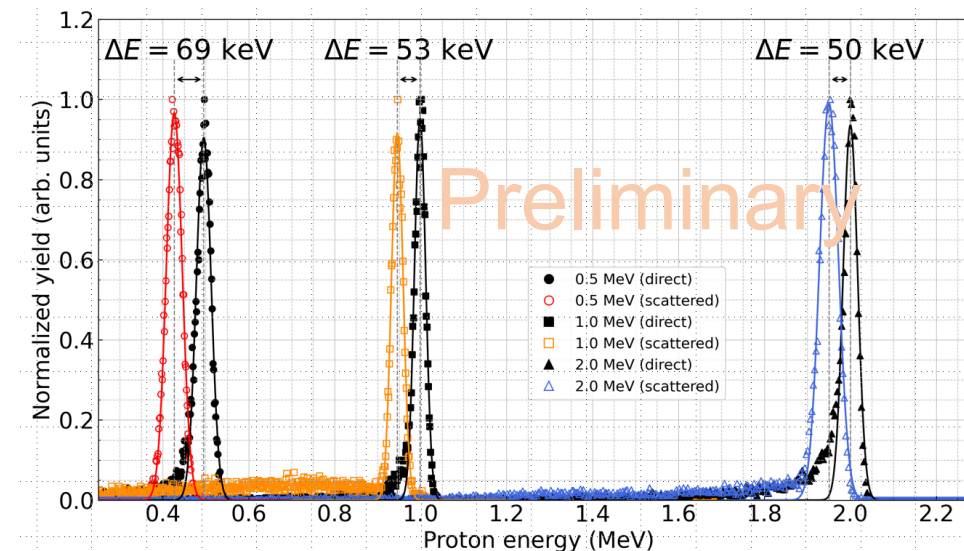


Front. Mol. Biosci., 9 (2022) 1048932

液膜生成チップ。2つの流路から放出された液体が真空中で合流し液膜となる。



陽子線のエネルギー損失



将来的にはDNA水溶液とし，ラジカル生成および拡散メカニズムを見たい

→ FLASH効果の物理化学的側面からの解明

✓ MeVイオン加速器の主な使用用途 @CHATGPT

1. 材料分析・材料改質

・RBS(Rutherford Backscattering Spectrometry)

→ 材料表面・薄膜の組成・厚さを非破壊で分析。

・PIXE(Particle Induced X-ray Emission)

→ 微量元素の高感度分析に使用。

・イオンビームアナリシス(IBA)全般

→ 高精度で材料中の元素分布を調べる。

・イオン注入

→ 半導体・ナノ材料などの表面物性改質(導電性・硬度などの変化)。

2. 医学・生物学分野

・ラジオアイソトープの製造

→ PET(陽電子放射断層撮影)などの医療用トレーサの生成。

・細胞・DNA損傷の研究

→ 高LET(線エネルギー付与)放射線の影響を調べる放射線生物学の基礎研究。

・放射線治療の前臨床研究

→ 重粒子線治療や陽子線治療の線量分布や影響評価。

3. 核物理学・原子核研究

・軽イオンや重イオンを使った核反応の研究

→ 原子核構造や反応機構の解明。

・核データの取得

→ 原子力や宇宙放射線対策などの基礎データとして活用。

4. 考古学・文化財の非破壊分析

・PIXEやRBSを使って文化財の構成元素を分析

→ 顔料の分析、保存状態の評価など。

5. 産業応用

・半導体製造プロセスでの材料分析

・機械部品の表面硬化処理(イオン注入)

・新素材の開発・評価

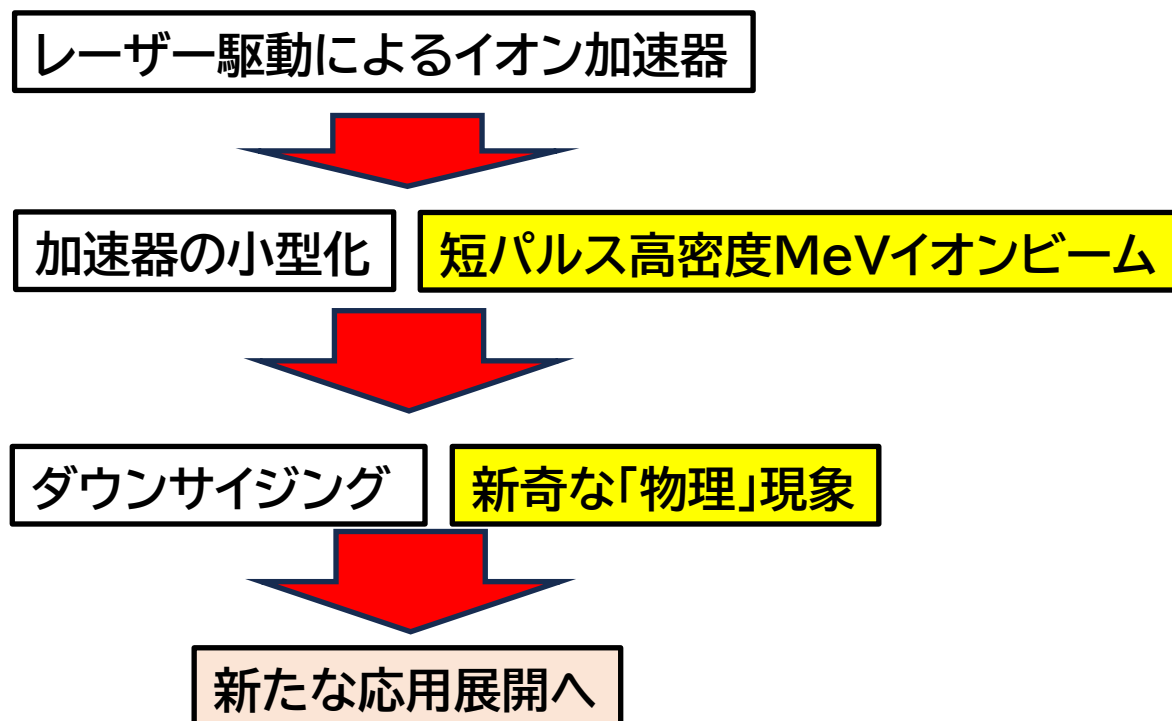
6. 放射線物理学, 原子物理学研究

・衝突研究, 阻止能(LET), 電荷移行, SIMS

→ 反応素過程の解明, 基礎データ収集

まとめ

本プロジェクトにおいて達成されつつあるレーザー駆動短パルス高密度MeVイオンビームの紹介を行った
量子メス入射器としてだけでなく、既存のMeVイオン加速器と比肩すべき性能
さらに短パルス性と高密度性を併せ持つ性能を持つ





ご清聴ありがとうございました