

未来社会創造事業 大規模プロジェクト型 平成29年度(2017年度)採択

技術テーマ：粒子加速器の革新的な小型化及び高エネルギー化につながるレーザープラズマ加速技術

## レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証

# プロジェクト成果／レーザーと加速器 技術の融合による新しい応用展開

2025年11月7日

プログラムマネージャー(PM)

佐野 雄二

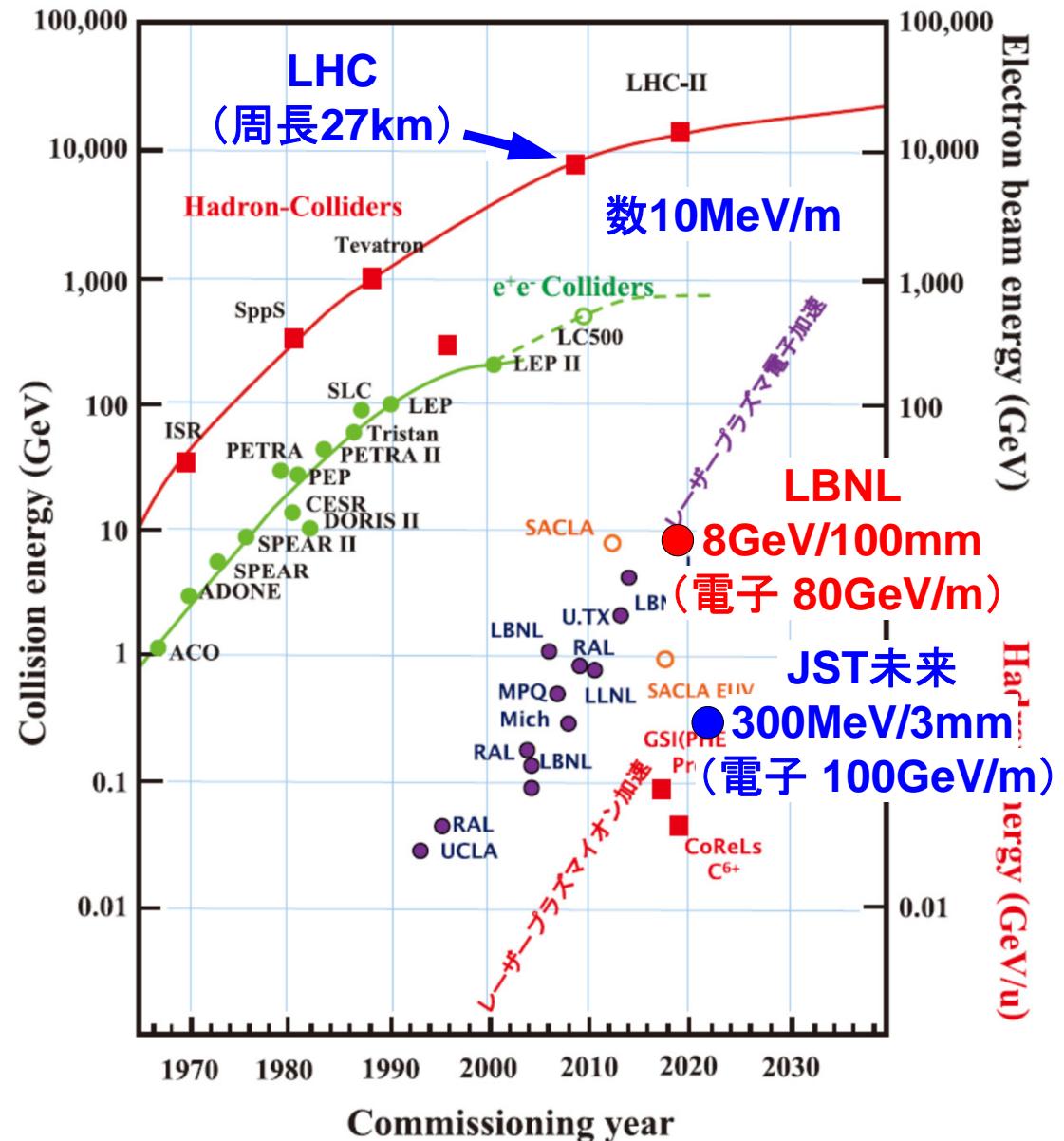
## 「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」

- 開発の概要：背景・目標・体制
- レーザーによる電子加速の開発
- レーザーによるイオン加速の開発
- 高強度レーザー技術の開発

# 加速器におけるレーザー加速の位置付け

加速器は学術・産業・医療などの広範な分野で不可欠な基盤技術

- 新物質・新材料の探索・創製
- 分析、非破壊検査、年代測定
- 育種、滅菌・殺菌、重合、架橋
- 荷物検査、セキュリティ
- 創薬、粒子線がん治療



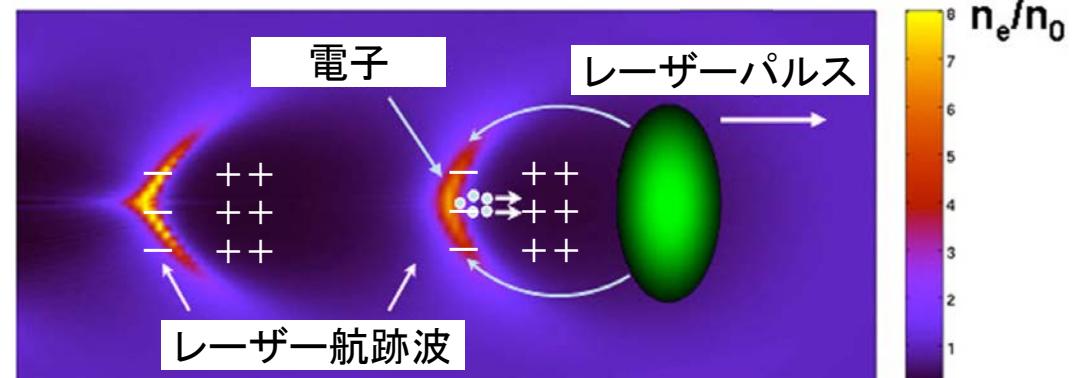
レーザー加速は従来の1千倍超の加速勾配 → 加速器を小型化するポテンシャル

## ■ レーザーによる電子加速

ガスへの高強度レーザーの照射で電子が押し退けられ、プラズマ波(航跡波)が発生。電子がプラズマ波に波乗りするようにして加速。

LWFA: Laser Wake-field Acceleration

プラズマ波長  $\sim 10\mu\text{m}$  ( $\rho = 10^{18}/\text{cc}$ )  $\rightarrow 30\text{fs}$



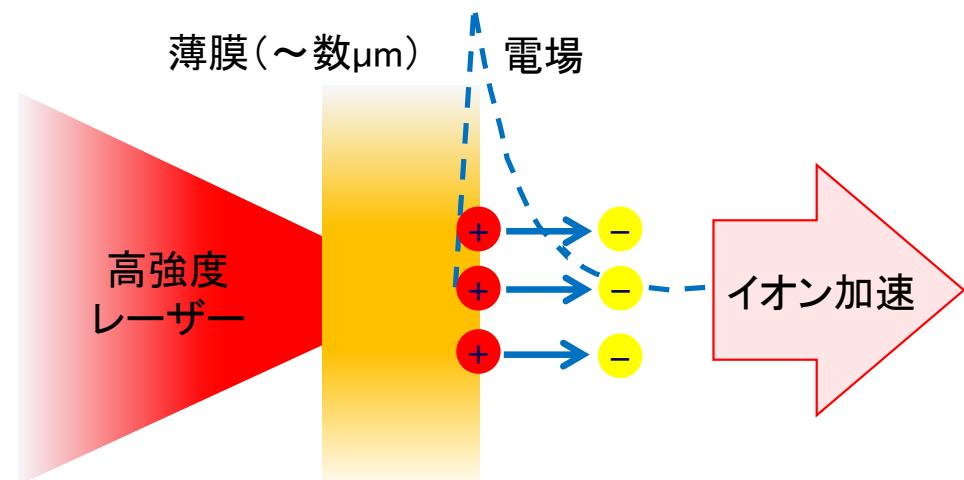
電場(加速勾配):  $\sim 100\text{GV/m}$

## ■ レーザーによるイオン加速

薄膜への高強度レーザー照射による電荷分離( $\sim \text{TV/m}$ )で、シーズ場が形成。ターゲットの裏面からイオンが引出され、加速。

TNSA: Target Normal Sheath Acceleration

薄膜( $\sim \text{数}\mu\text{m}$ )

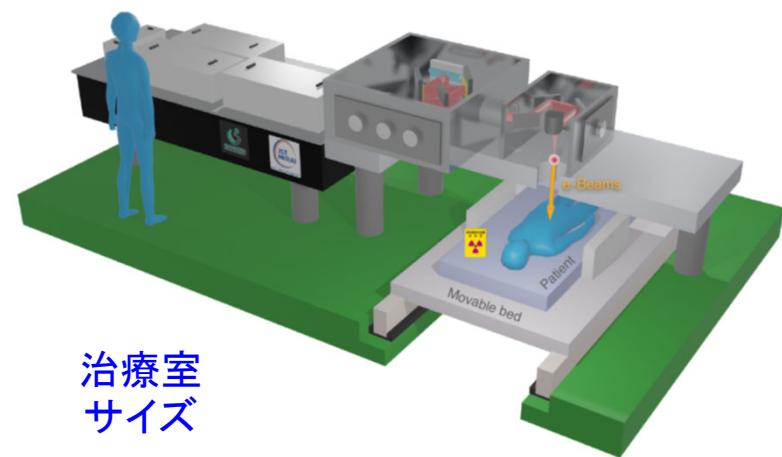
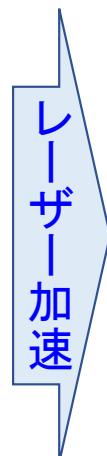


電場(加速勾配):  $\sim \text{TV/m}$

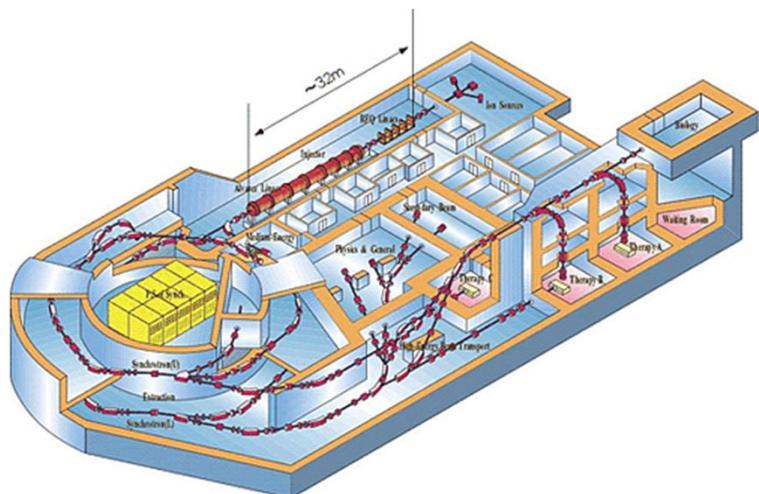
# レーザープラズマ加速の社会実装イメージ



X線自由電子レーザー SACL

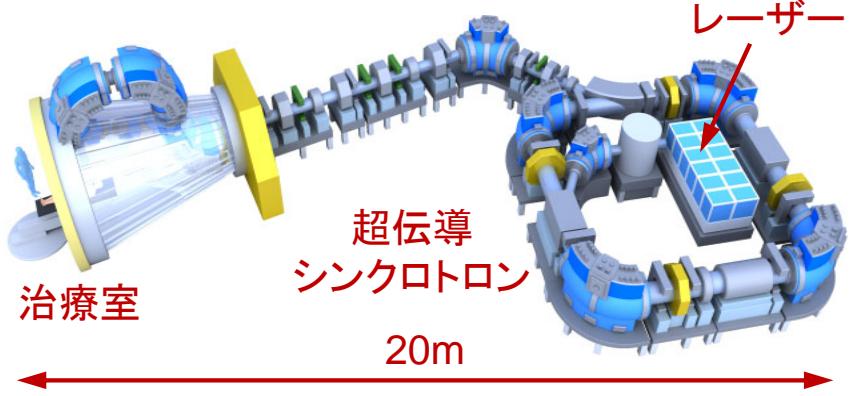


## ～300MeV電子ビームの創薬・医療応用



## 重粒子線がん治療装置 HIMAC

<https://www.qst.go.jp/site/qms/1584.html>



## 次世代重粒子線がん治療装置(量子メス)

## レーザープラズマ加速の社会実装

- 超小型のレーザー粒子加速器を、学術・産業・医療など広範な分野で活用
- 最先端レーザー加速器を備えたプラットホームの整備とユーザー利用

----- JST 未来社会 LPA プロジェクト「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」 -----

### ステージ3(2024~26年度)の目標

- |         |   |
|---------|---|
| ■ 電子加速  | 10KeV領域のXFELの実現に必要な電子ビームの発生・加速：<br>入射器の高度化、多段加速シミュレーション、応用の推進 |
| ■ イオン加速 | 4MeV/u 炭素イオンのシンクロトロンへの入射器としての実証                               |
| ■ レーザー  | 加速用レーザーシステムの検討、要素技術の更なる展開                                     |

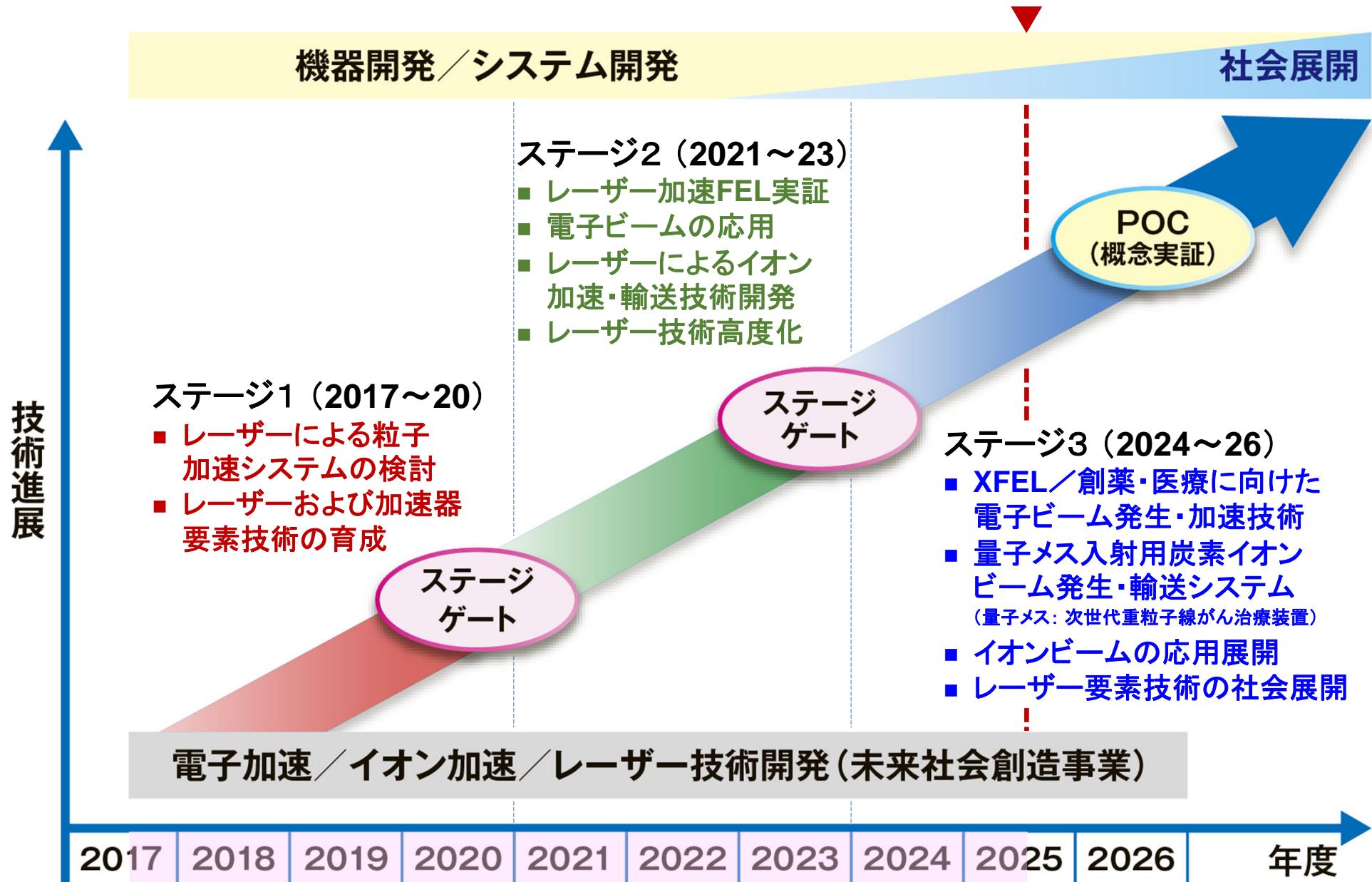
### ステージ2(2021~23年度)の成果

- |         |                               |
|---------|-------------------------------|
| ■ 電子加速  | XUV波長域のFEL発振、電子ビームの創薬・医療応用に着手 |
| ■ イオン加速 | 入射器に必要な一連の動作確認(イオン発生・輸送・検出)   |
| ■ レーザー  | 高出力パルスレーザー要素技術の開発・産業展開        |

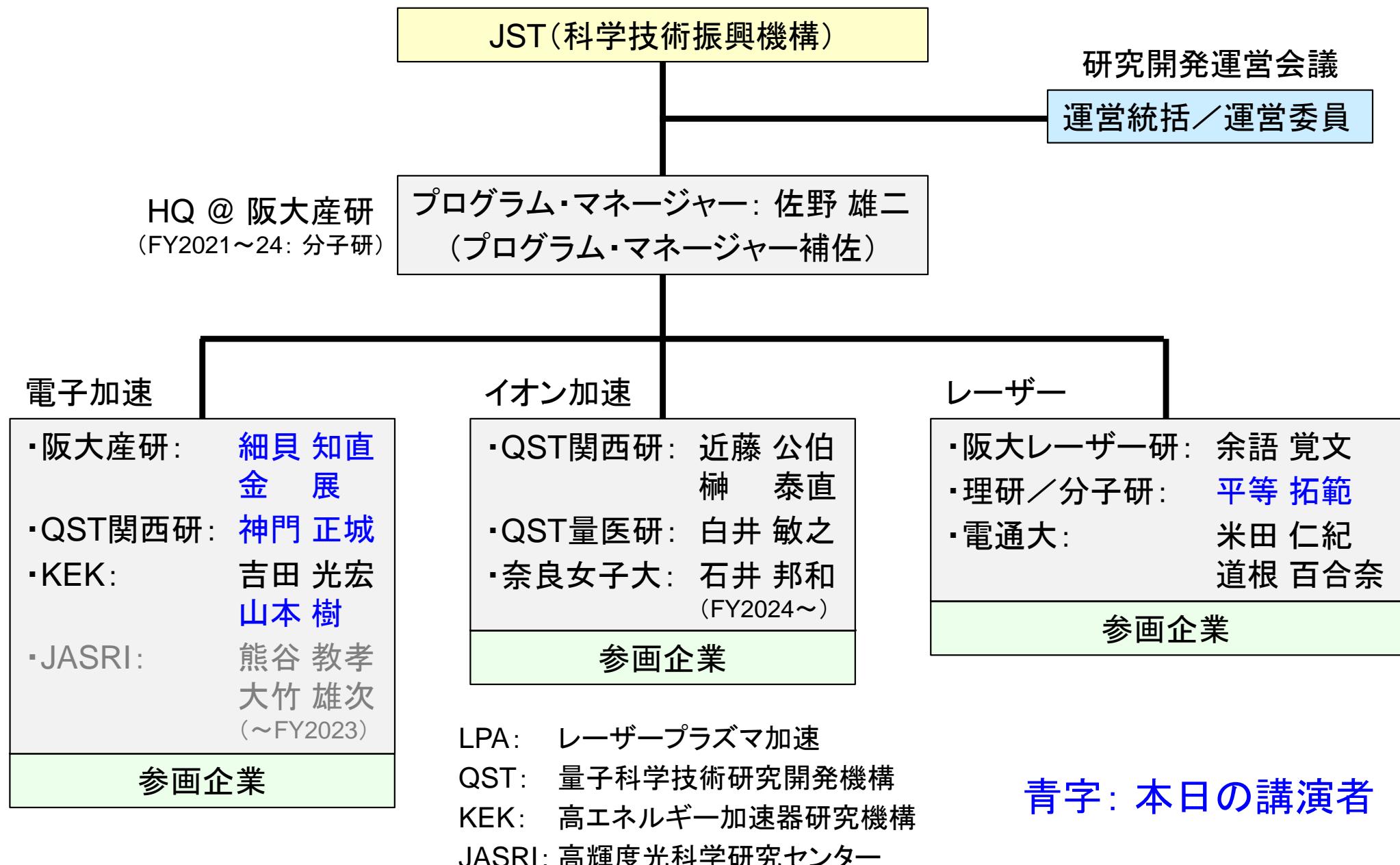
### ステージ1(2017~20年度)の成果

- システム検討、研究インフラ整備(加速プラットホーム、レーザー開発設備)

# LPA プロジェクトのロードマップ



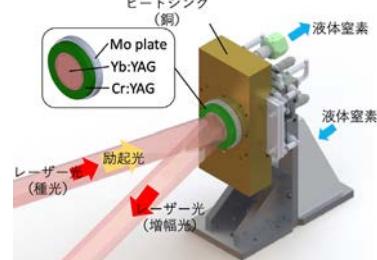
# LPAプロジェクトの体制と本日の講演者



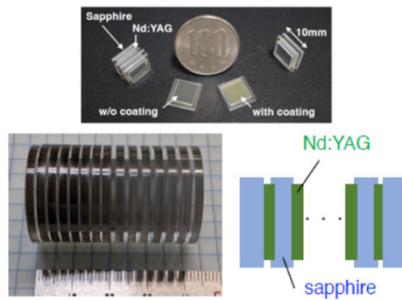
# LPAプロジェクトの開発内容

## レーザー開発

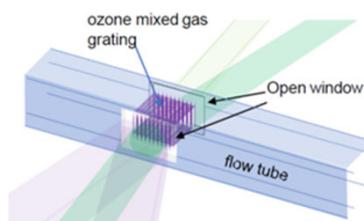
### アクティブミラーによる高平均出力レーザー



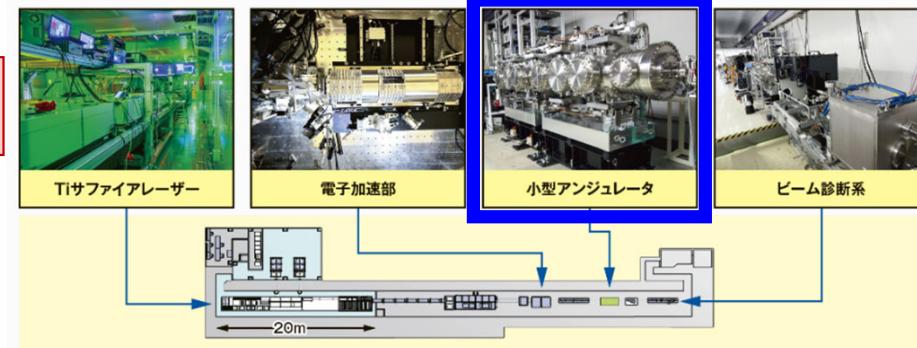
### 常温接合による小型高出力レーザーチップ



### 長期信頼性光学素子 超高耐力ガス光学素子

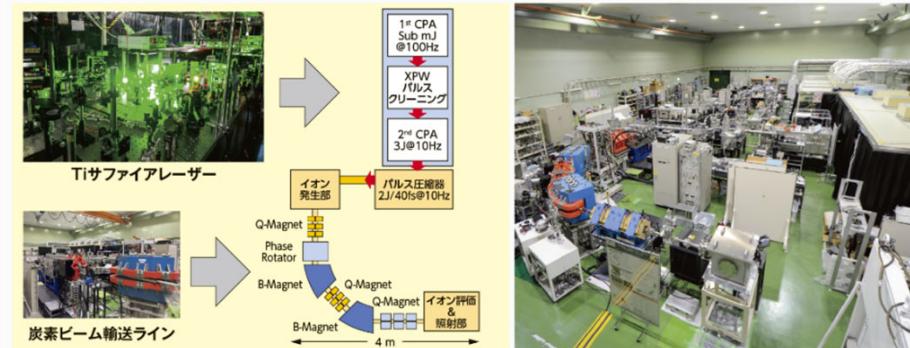


## 電子加速プラットホーム(播磨)



- 高出力レーザーによる安定な電子加速と自由電子レーザー(FEL)を実証、高エネルギー加速の検討
- 数百MeV電子ビームの創薬・医療応用に着手

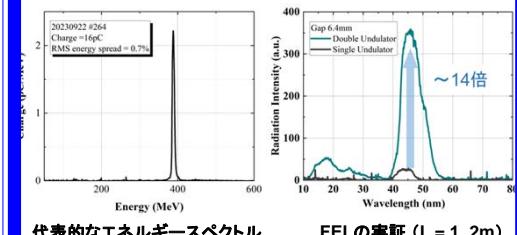
## イオン加速プラットホーム(木津)



- 高出力レーザーによる炭素イオンの加速、量子メスイオン入射器の一連の動作を実証
- レーザー加速イオン(高電荷密度)の応用に着手

## 電子加速／応用

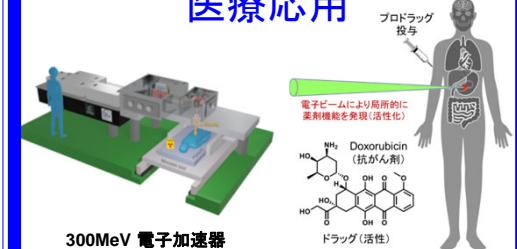
### 高品質電子ビームの発生とFEL増幅の実証



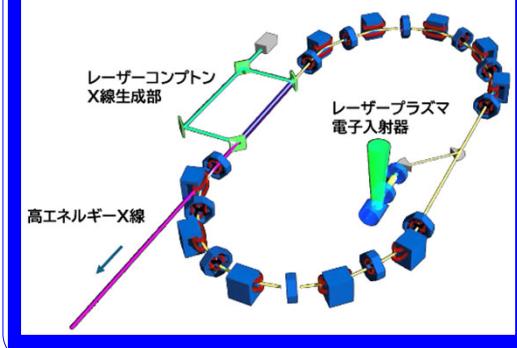
代表的なエネルギースペクトル

FELの実証 (L = 1, 2m)

### 電子ビームの創薬・医療応用



### 電子蓄積リング (光源利用)



# レーザーによる電子加速

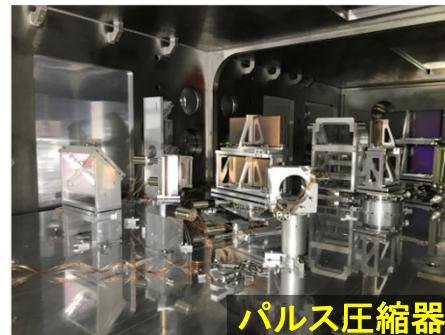
# 電子加速プラットホーム(理研播磨地区)



制御室



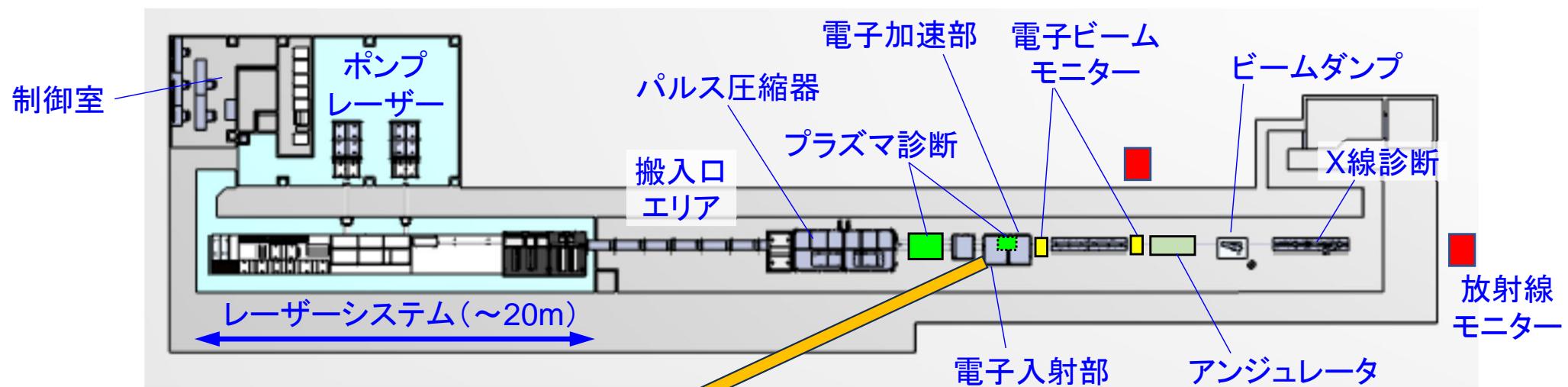
ポンプレーザー



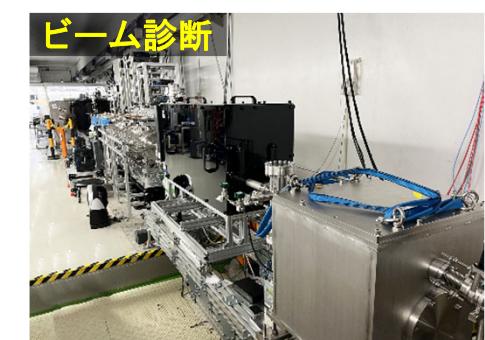
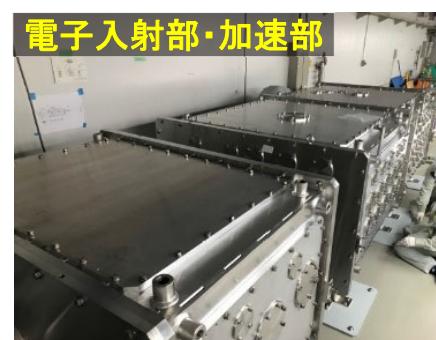
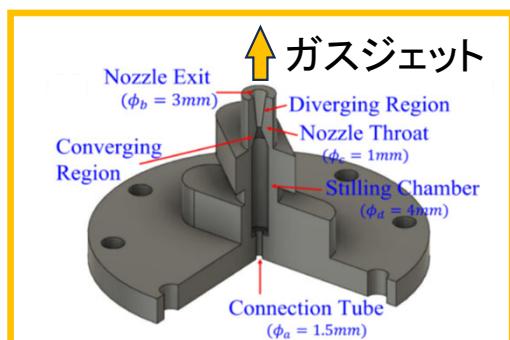
パルス圧縮器



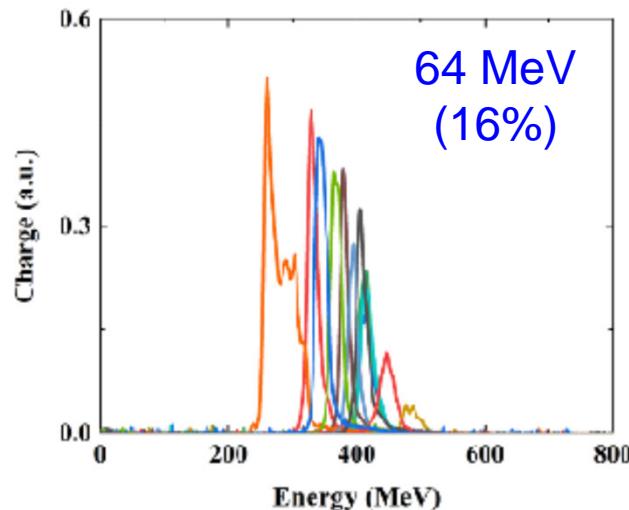
アンジュレータ



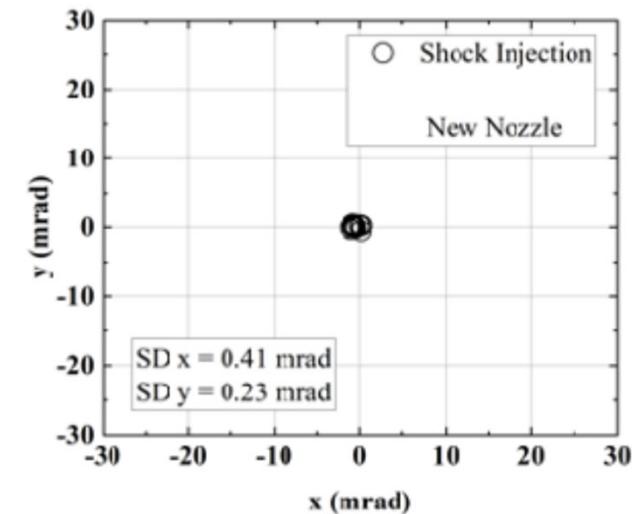
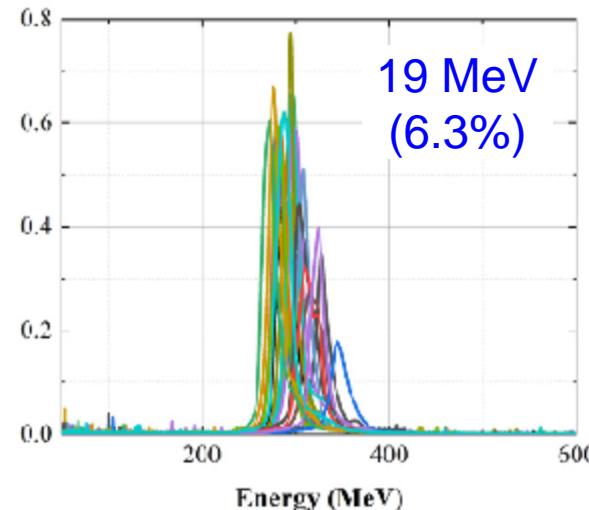
数mmで数百MeVの加速



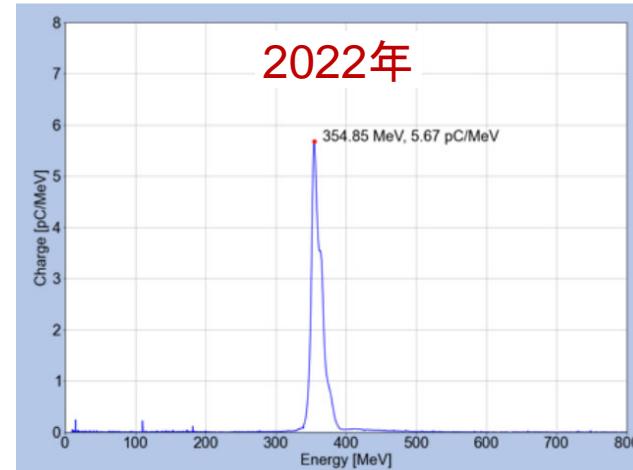
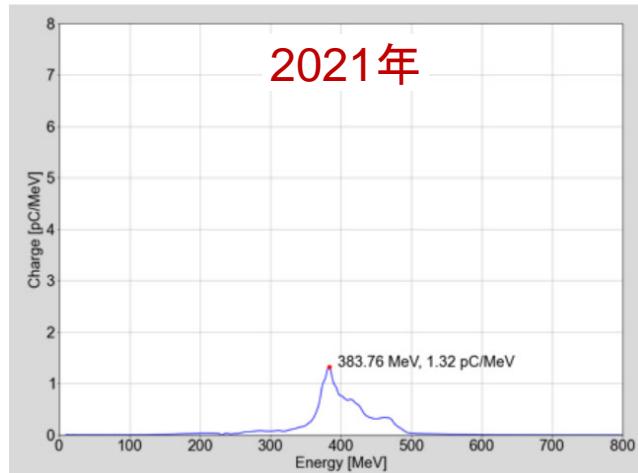
# レーザー加速電子ビームの性能向上



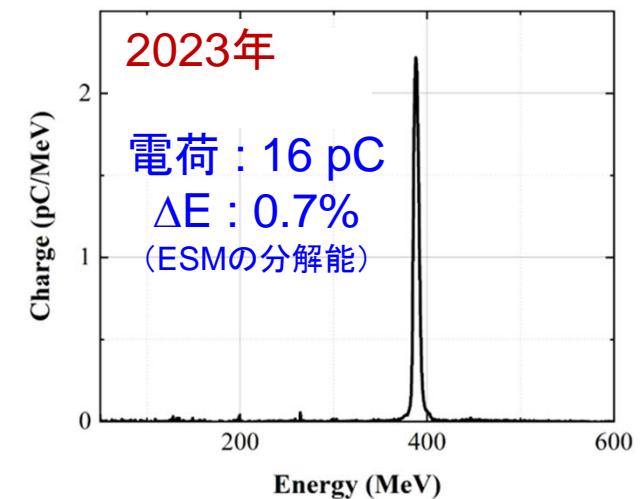
加速エネルギー安定性



電子ビームの位置安定性

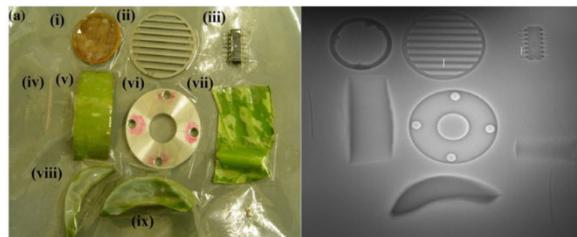


エネルギースペクトル

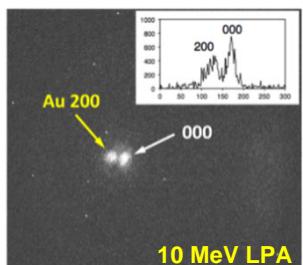


# レーザー加速による電子ビームの応用

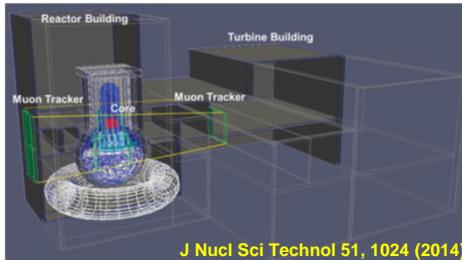
Phys Rev Accel Beams 22, 074701 (2019)



電子線ラジオグラフィ( $\sim 50\text{MeV LPA}$ )



電子線回折(10MeV)



ミュオン生成(GeV電子)

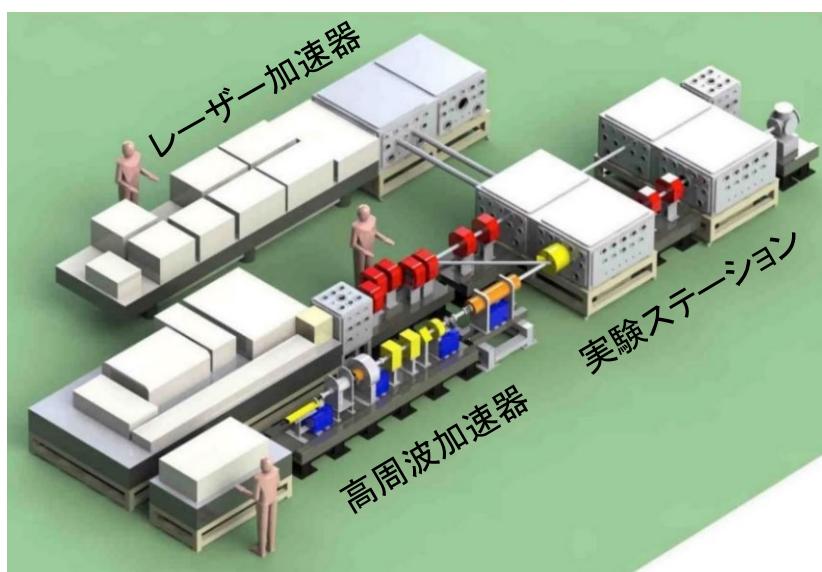


FEL(400MeV LPA)

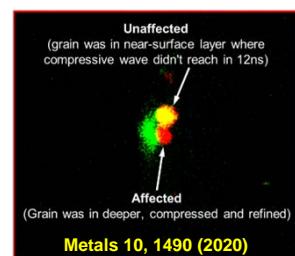
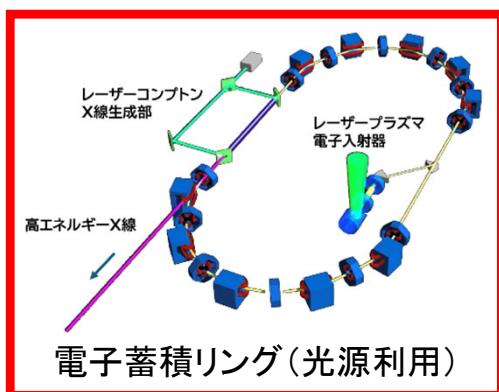
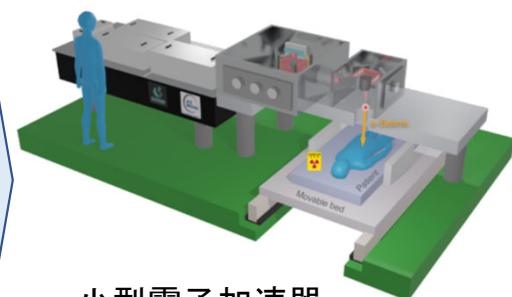


30MeV ライナック(数十mの建屋)

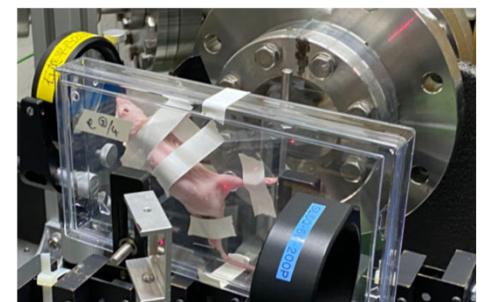
レーザー  
加速



単機能化

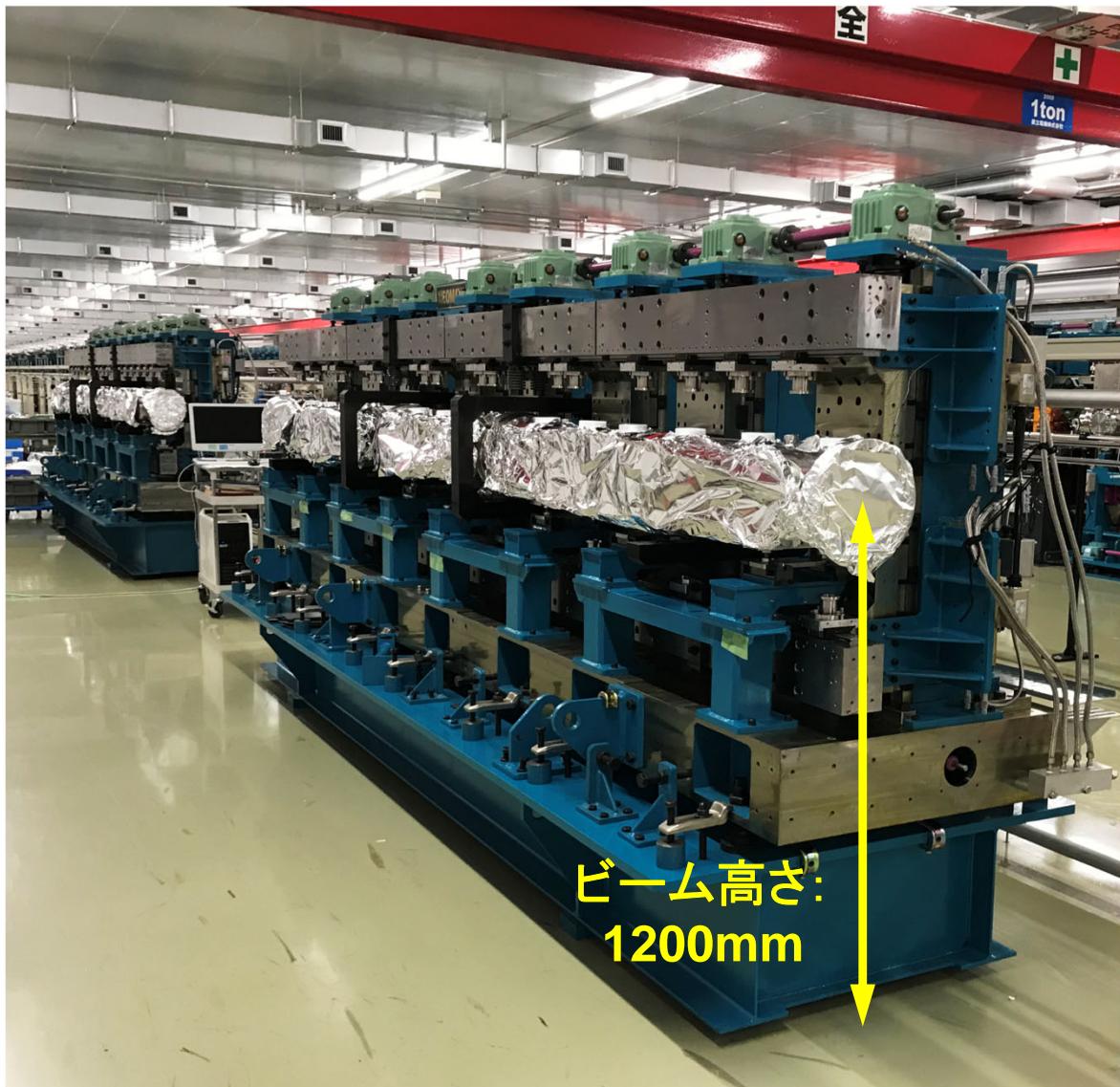


材料評価(ポンププローブ実験)



電子ビームの創薬・医療応用  
(プロドラッグ活性化)

# FEL 実証用アンジュレータの開発

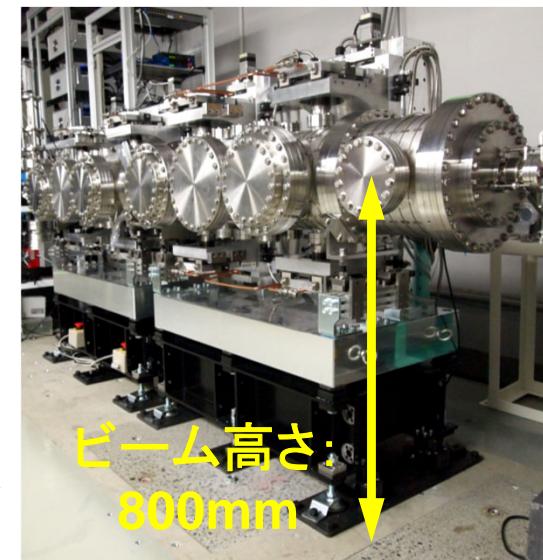


旧SCSSS アンジュレータ(4.5m ユニット、10トン)

- 磁力相殺による構造簡素化とアルミニウム合金化により、小型・軽量化を達成(< 500kg/m)
- 1m 長さのユニット化設計  
→ ニーズに応じた対応

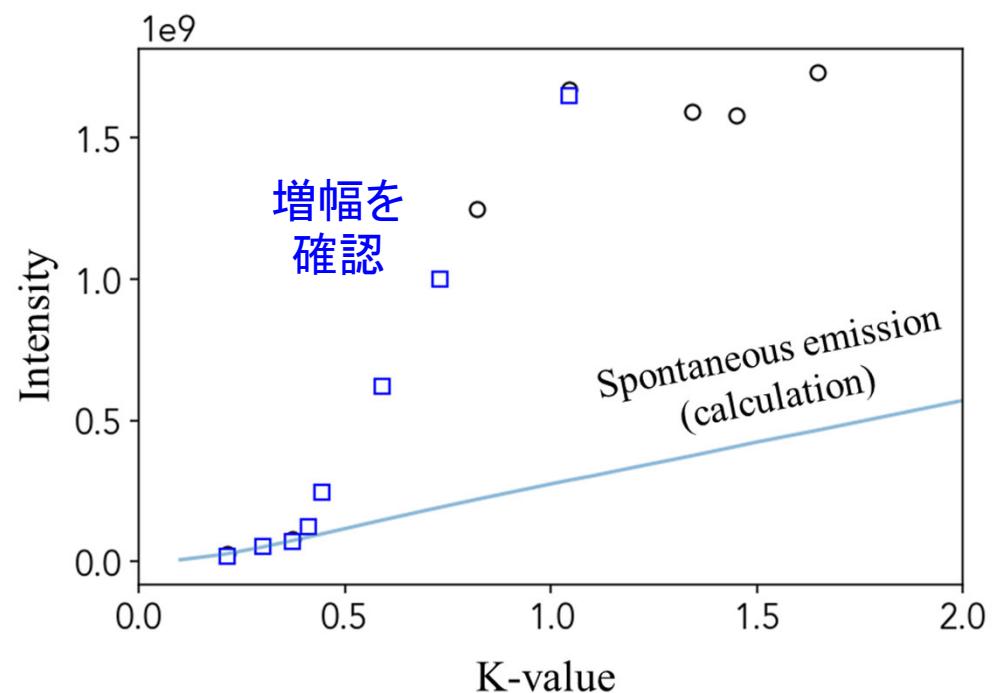
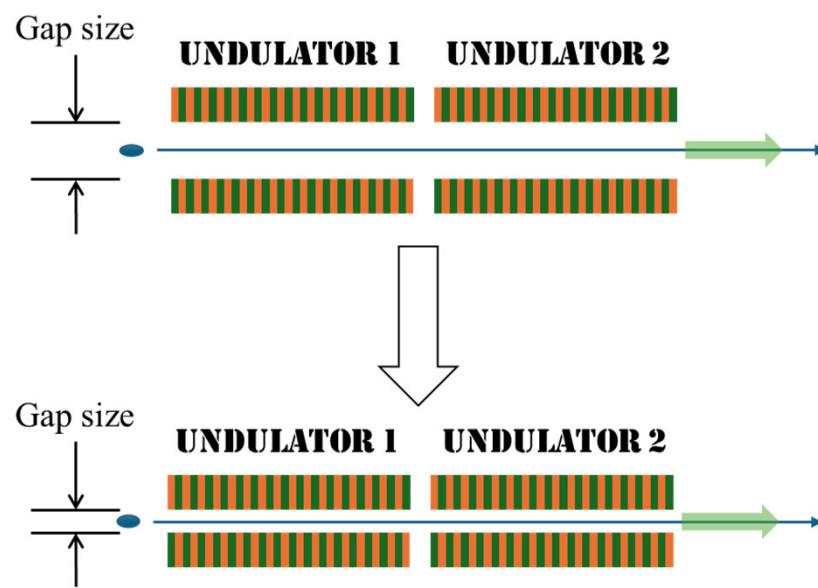
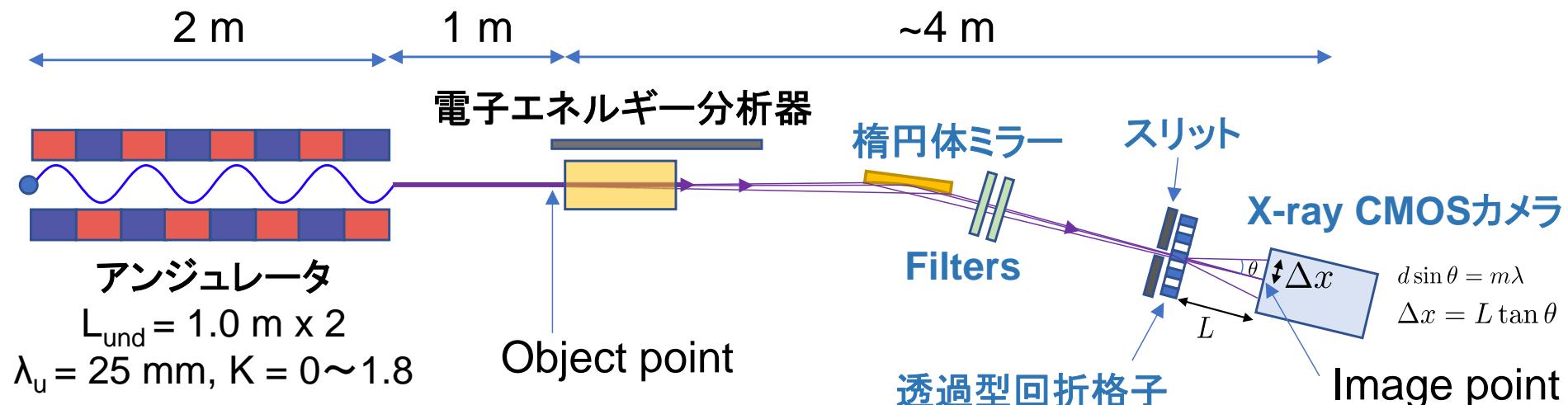


小型・  
軽量化

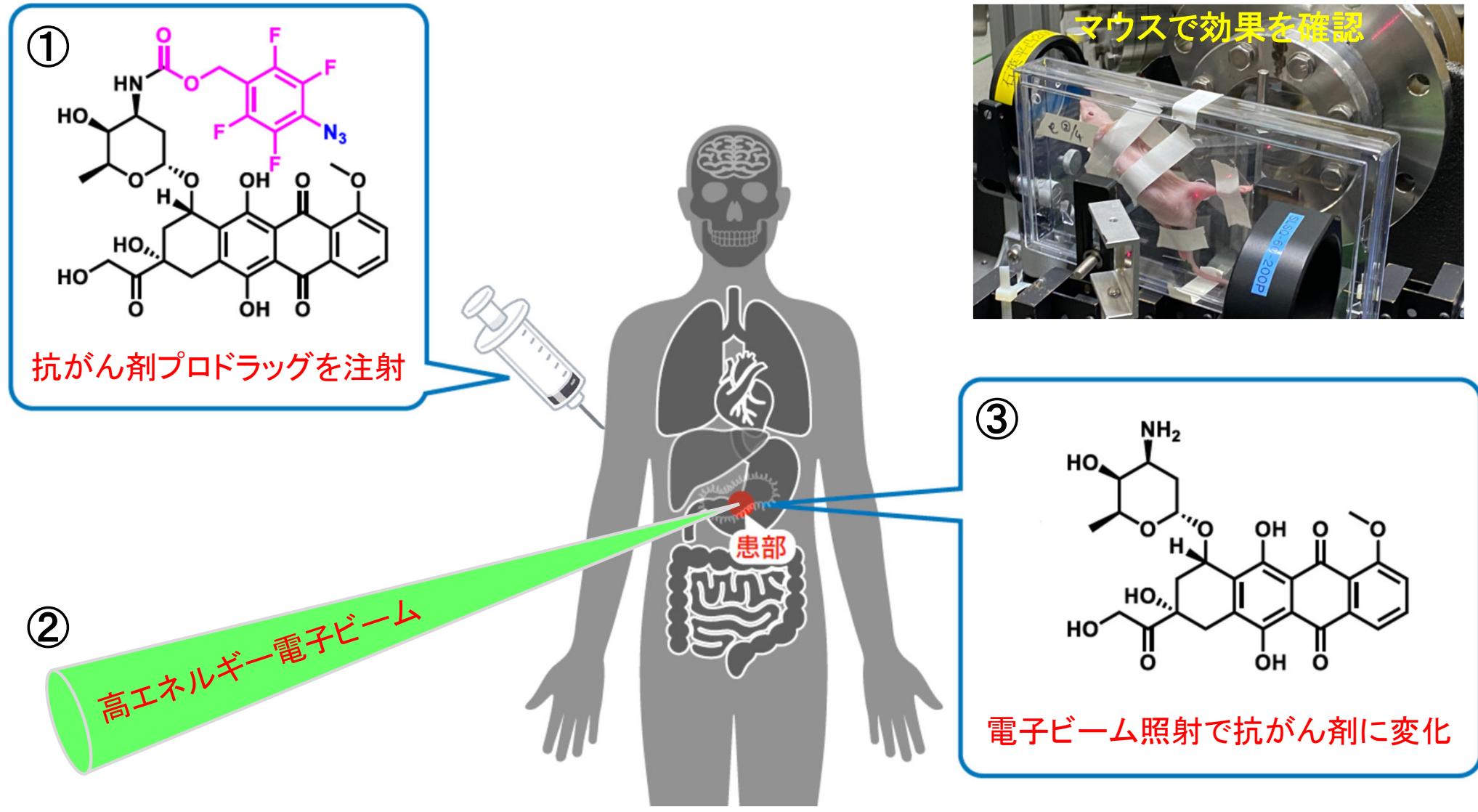


JST未来アンジュレータ(1m × 2)

# アンジュレータ・ギャップと放射光特性



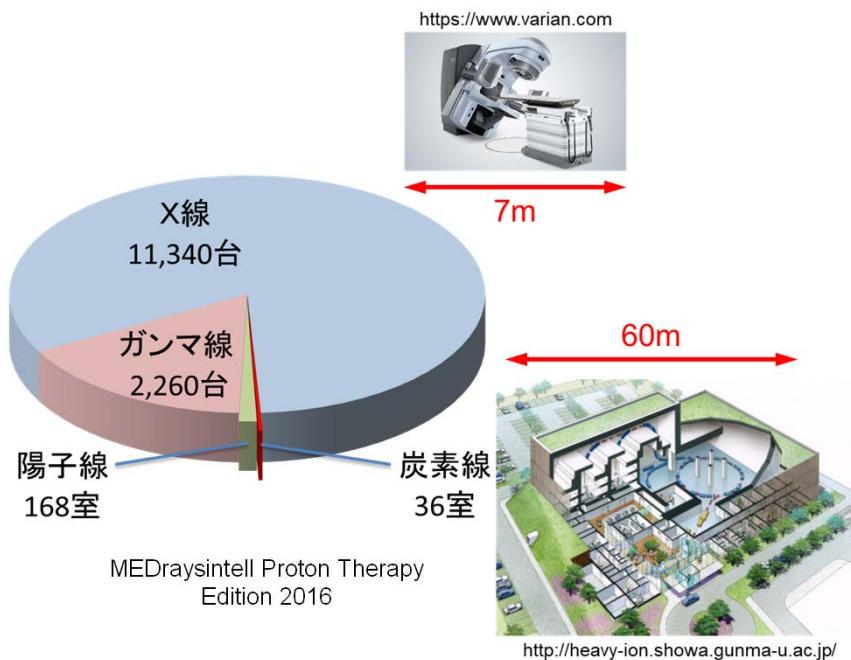
# 数百MeV電子ビームの創薬・医療応用



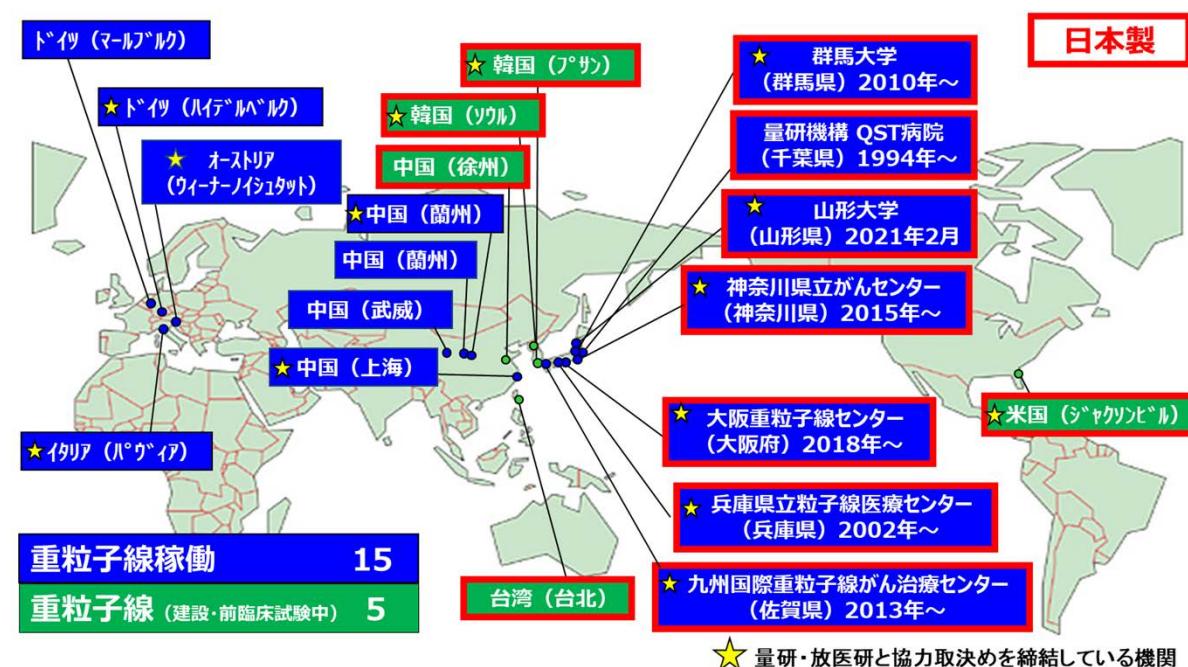
# レーザーによるイオン加速

# 重粒子線がん治療装置の状況

- 重粒子線がん治療は身体的な負担が小さく、日帰り治療が可能など、ニーズが高い
- 国内7施設で治療可能な患者数は毎年4千人程度で、新たに見つかる患者の0.4%
- 世界に誇る日本発の技術であるが、装置の大きさ・コストが広範な普及のネック
- 超伝導・レーザー技術で既存の治療室に入る装置(量子メス)を開発し、普及を図る
- 世界の放射線治療装置の半数を15年で量子メスに置き換えるには、毎年500台出荷



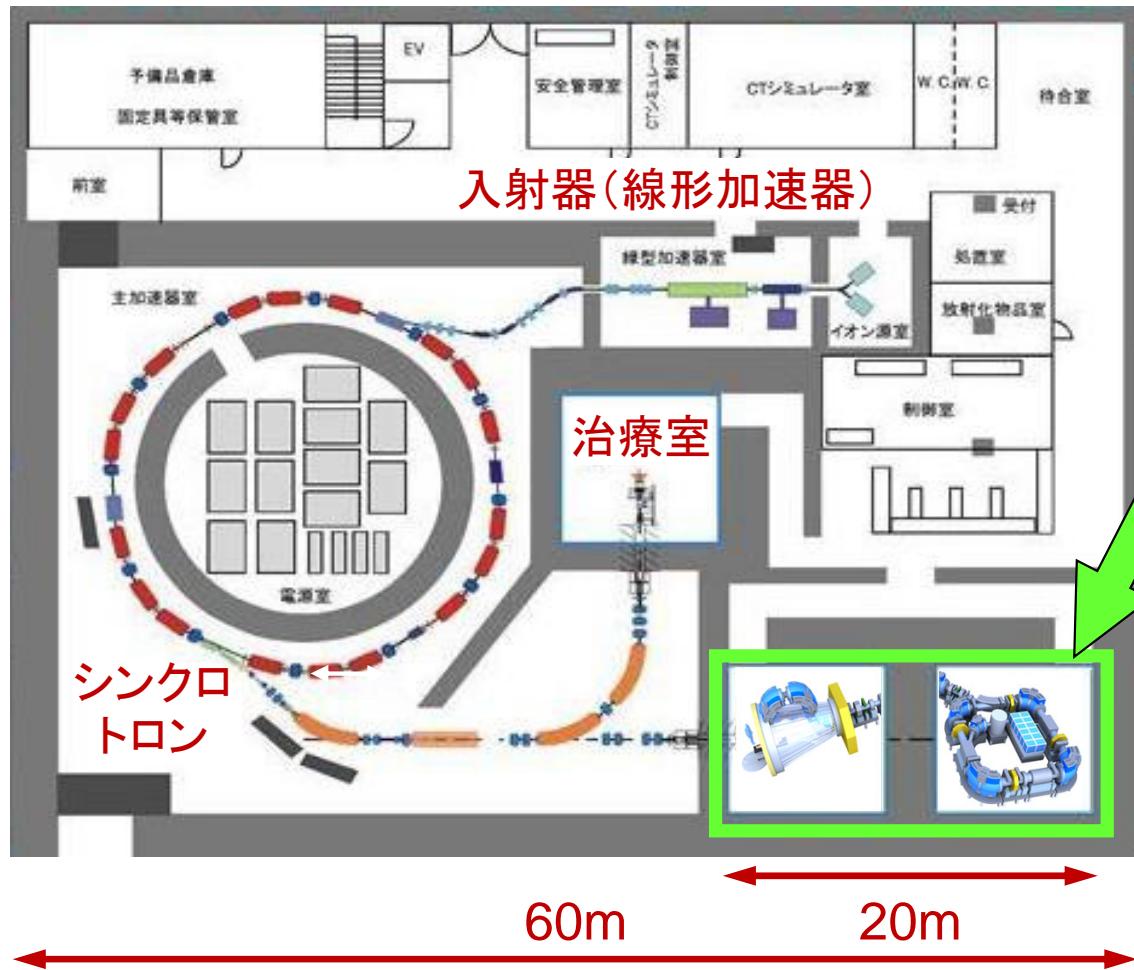
世界の放射線治療装置  
(粒子線は治療室数)



世界の重粒子線がん治療装置  
(2022/3現在)

# 重粒子線がん治療装置の高度化

現行の重粒子線がん治療施設(第2～3世代)



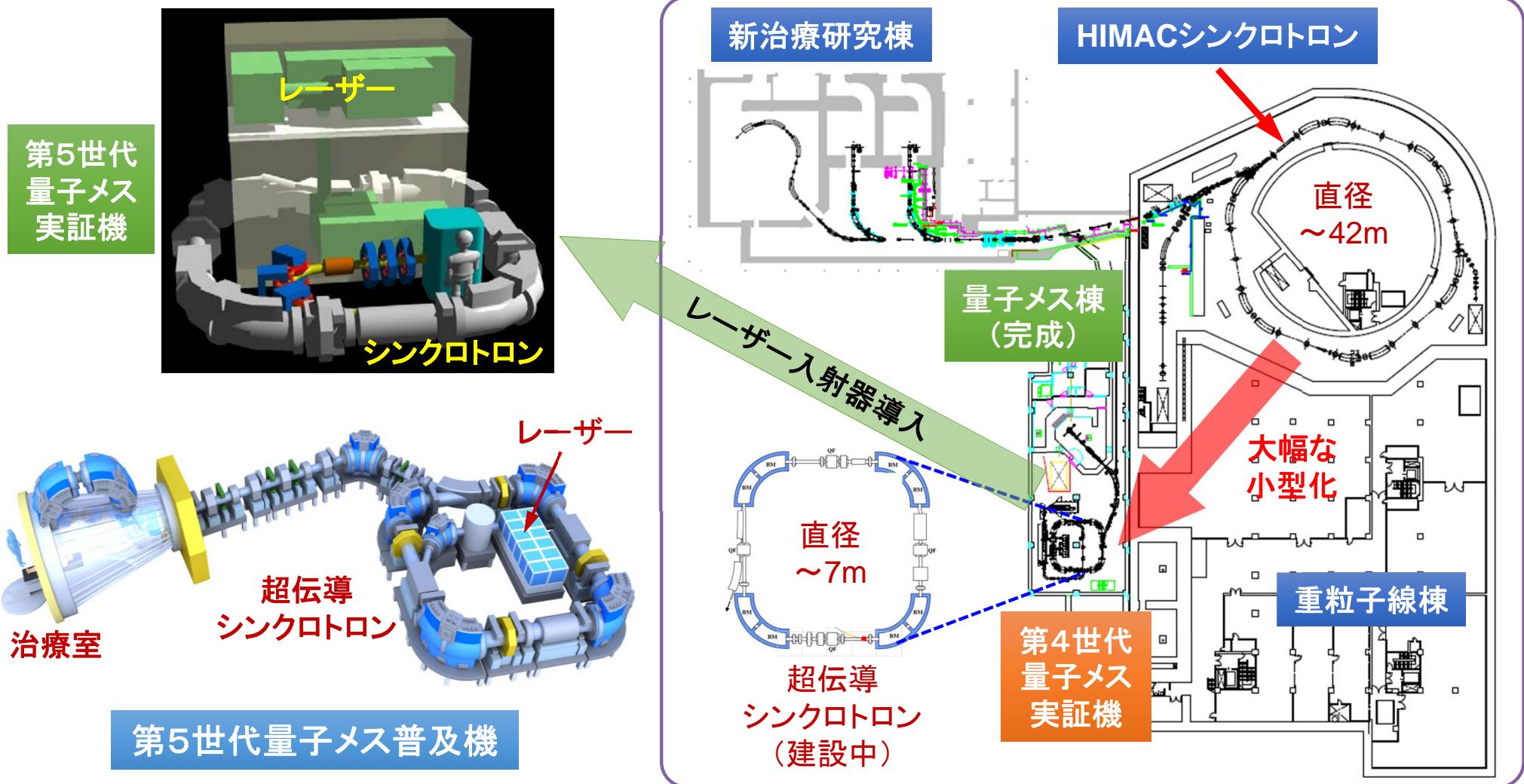
次世代重粒子線がん治療装置  
(量子メス／第5世代普及機)

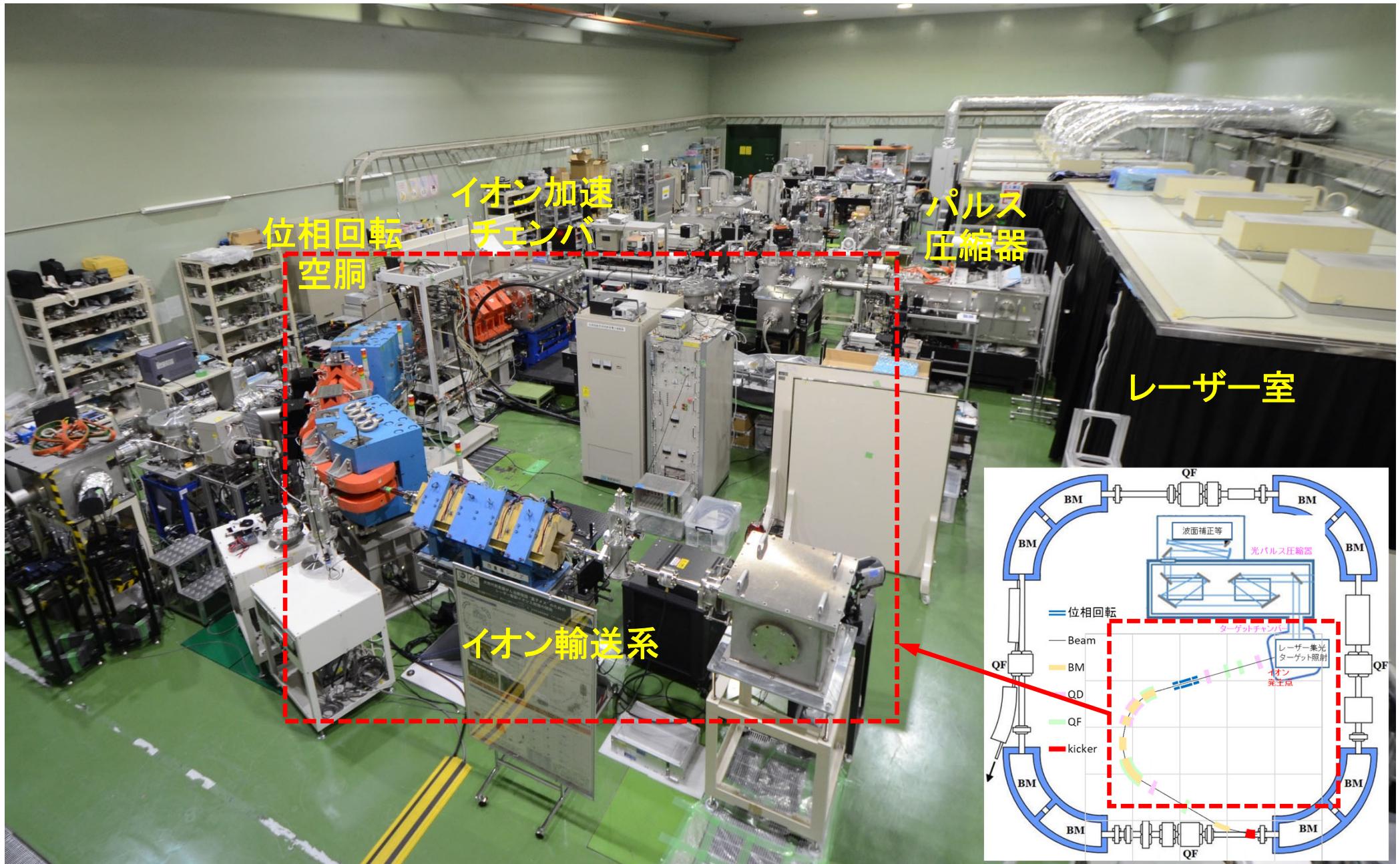


- レーザー加速による入射器小型化
- 超伝導によるシンクロトロン小型化 (QST量子メスプロジェクト)
- 臨床技術開発(治療短期化)による治療室数の削減(QST)

# QST量子メスプロジェクトにおける位置づけ

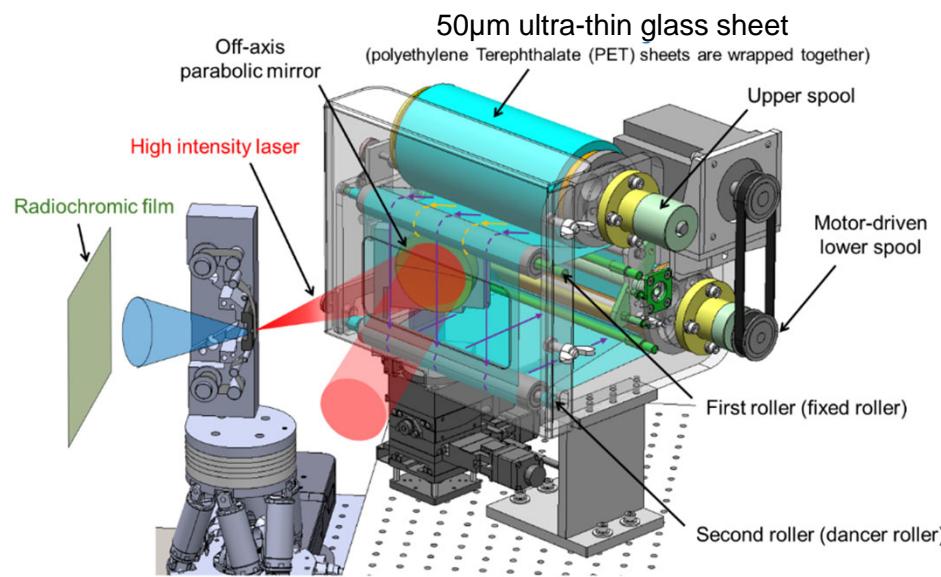
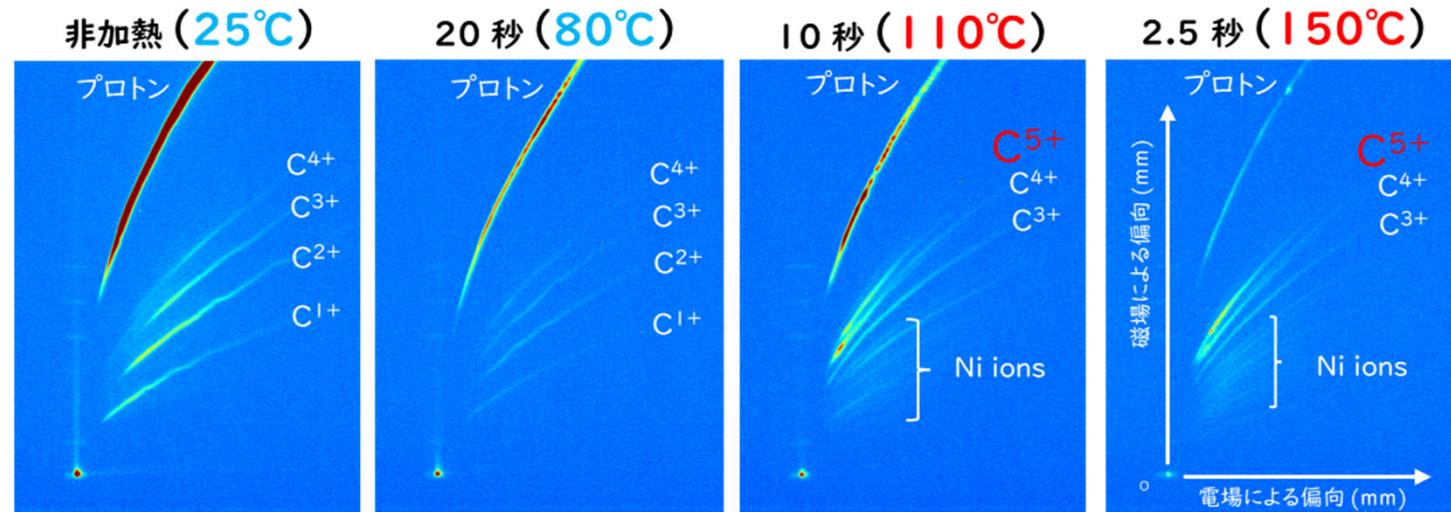
- QST: 量子メス棟が完成し、第4世代実証機(超伝導シンクロトロン)を建設中
- JST未来: レーザー入射器開発 → 第4世代を更に小型化した第5世代実証機



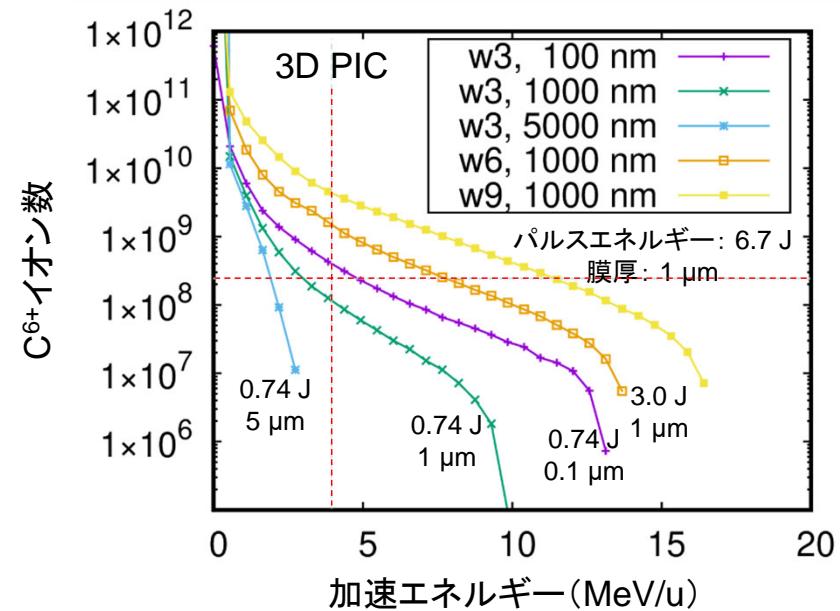


# イオン加速技術の進展

炭素イオン加速性能の  
薄膜温度依存性



薄膜ガラス(50μm)によるデブリシールドの開発



C<sup>6+</sup>の加速特性: スポット径(w)と炭素膜厚依存性  
( $1.4 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$ , 50 fs)



Google 提供



› 情報公開 › アクセス › ご要望・お問合せ › 採用情報 | 日本語 English

JSTについて

事業紹介

事業成果

データベース

調達情報

公募・研究契約

刊行物・レポート

[JST トップ](#) > [プレス一覧](#) > 共同発表

2025(令和7)年9月27日

量子科学技術研究開発機構(QST)

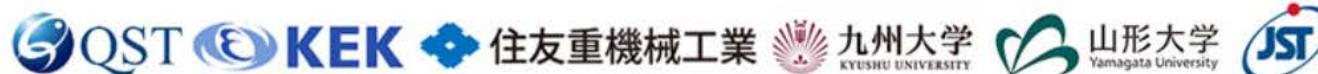
高エネルギー加速器研究機構

住友重機械工業株式会社

九州大学

山形大学

科学技術振興機構(JST)



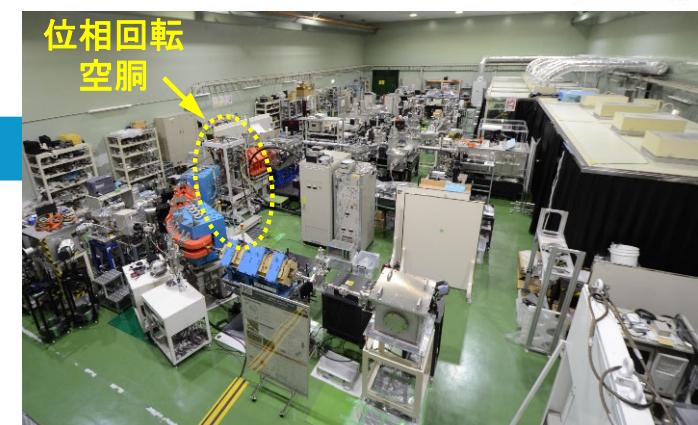
## がん治療装置の普及を促進する「量子メス」に必要なイオン数の達成に見通し

～レーザー光で加速したイオン速度を整えて個数を10倍増やす 産業応用にも期待～

X ポスト

### ポイント

- 重粒子線がん治療装置の小型化のカギを握るレーザー加速技術はイオン数の不足が課題であった
- 位相回転空腔の導入により、目的の速度のイオン個数を10倍増やすことに水素イオンで成功
- 重粒子線がん治療の普及に役立つだけでなく、原子力材料の耐久性研究など幅広い応用にも期待



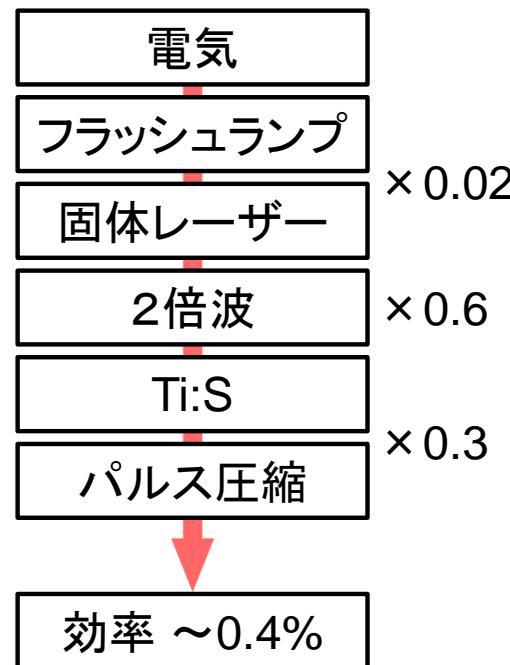
「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」2025年度第1回シンポジウム  
– 電子加速システムと高強度小型レーザーの開発 – 2025/11/07開催

# 高強度レーザー技術開発

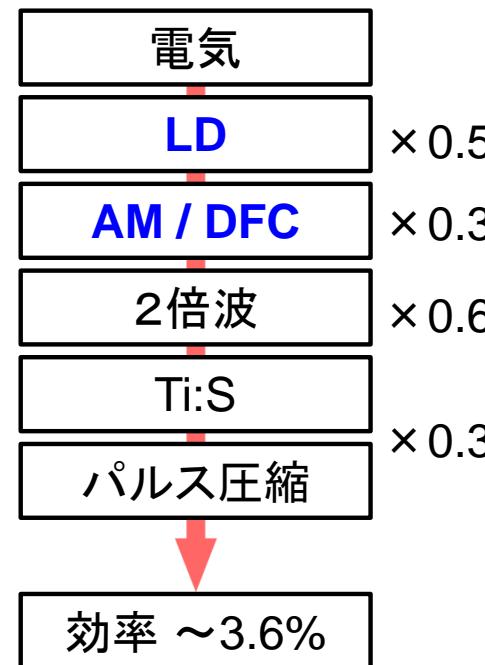
「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」 2025年度第1回シンポジウム  
– 電子加速システムと高強度小型レーザーの開発 – 2025/11/07開催

# 加速用レーザーの小型・高効率化

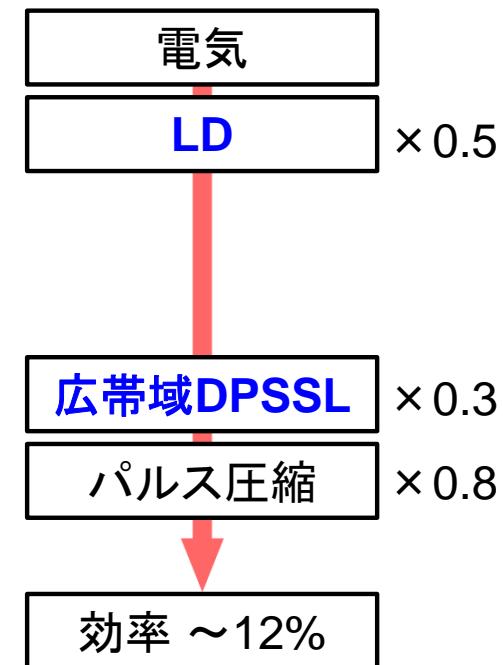
## JST未来社会 POC フラッシュランプ励起Ti:S



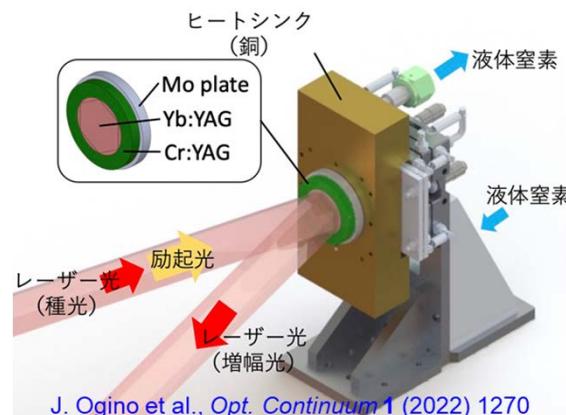
## 次世代 LD励起: 高繰返しTi:S



## 次々世代 新媒質: 高効率



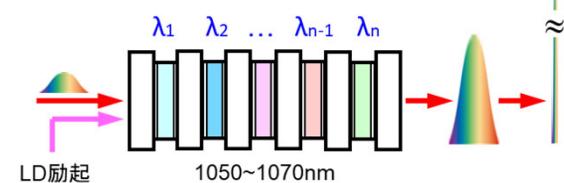
Ti:sapphire 10 PW レーザー



Yb:YAG アクティブミラー

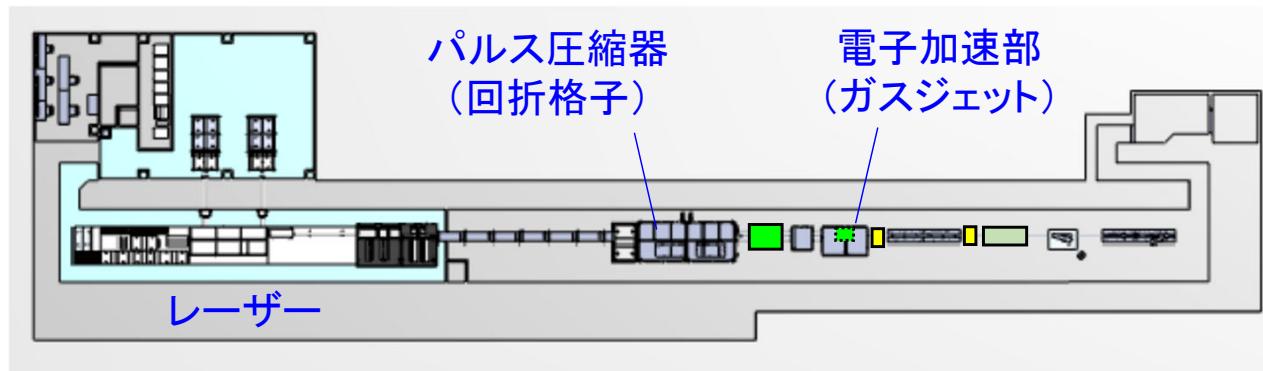
広帯域レーザー媒質  
(セラミックス)

スペクトル合成による  
広帯域化



# 電子・イオン加速におけるレーザー技術

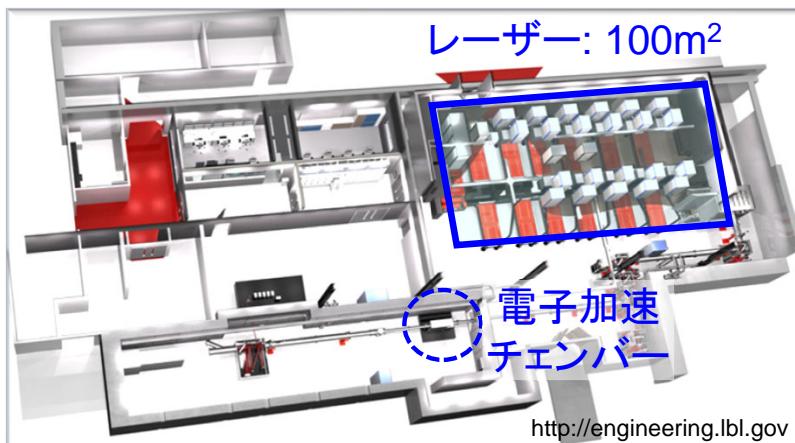
- レーザー加速は従来の1千倍超の加速勾配を持ち、システム小型化に期待
- 加速部に比べてレーザーが巨大、レーザーの小型化・高効率化開発が必須
- 光学部品も大型で高価、高耐力素子開発によるシステム小型化を目指す



電子加速プラットホーム(理研播磨)



イオン加速プラットホーム(関西研)



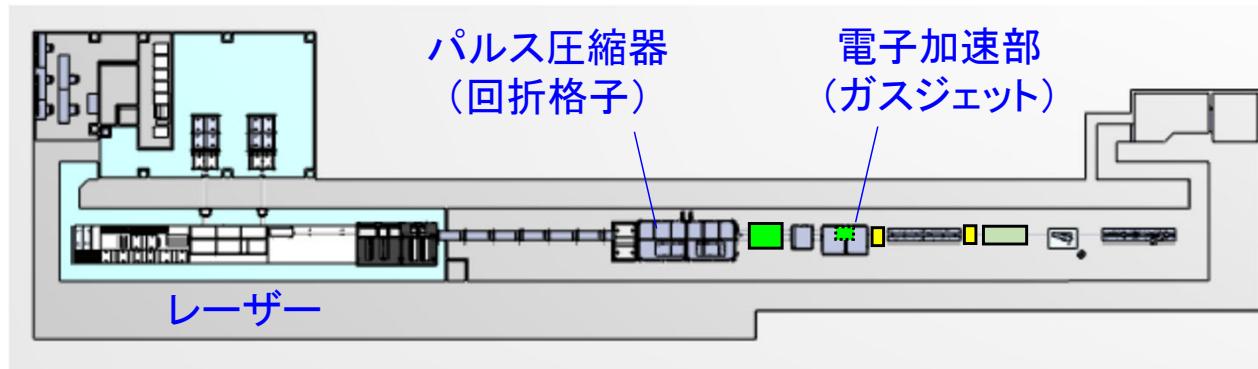
BELLA(米LBNL)



10 PW レーザー(ルーマニア ELI-NP)

# 電子・イオン加速におけるレーザー技術

- レーザー加速は従来の1千倍超の加速勾配を持ち、システム小型化に期待
- 加速部に比べてレーザーが巨大、レーザーの小型化・高効率化開発が必須
- 光学部品も大型で高価、高耐力素子開発によるシステム小型化を目指す



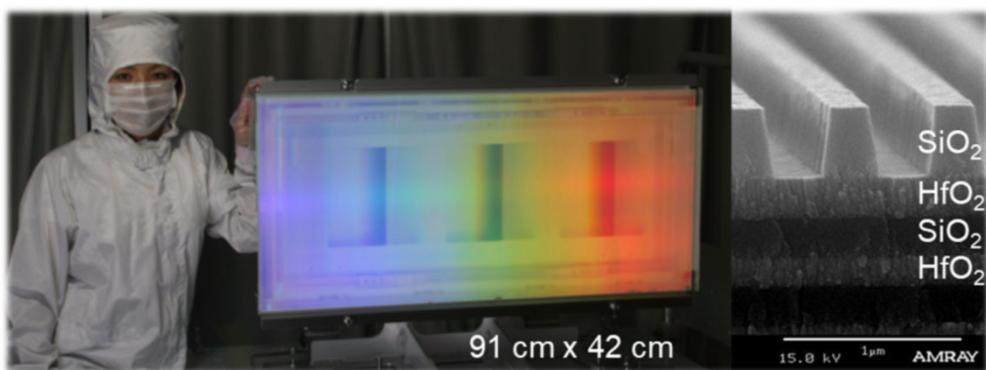
電子加速プラットホーム(理研播磨)

高出力レーザー用回折格子

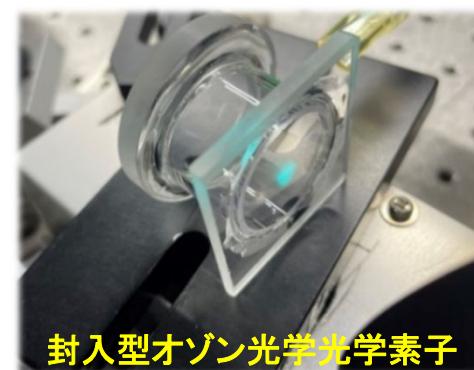


イオン加速プラットホーム(関西研)

超高耐力光学素子(オゾン素子)開発



Plymouth Grating Laboratory / Okamoto Optics / ILE, Osaka Univ.

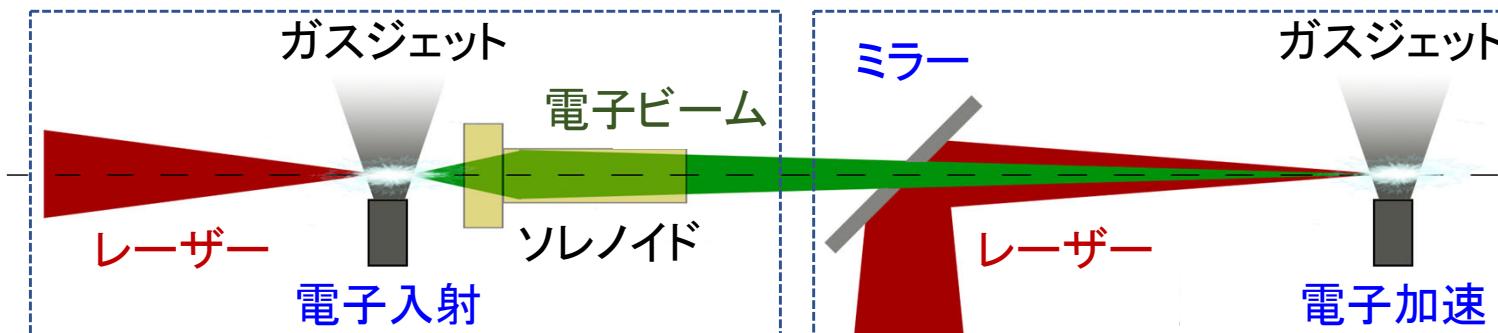
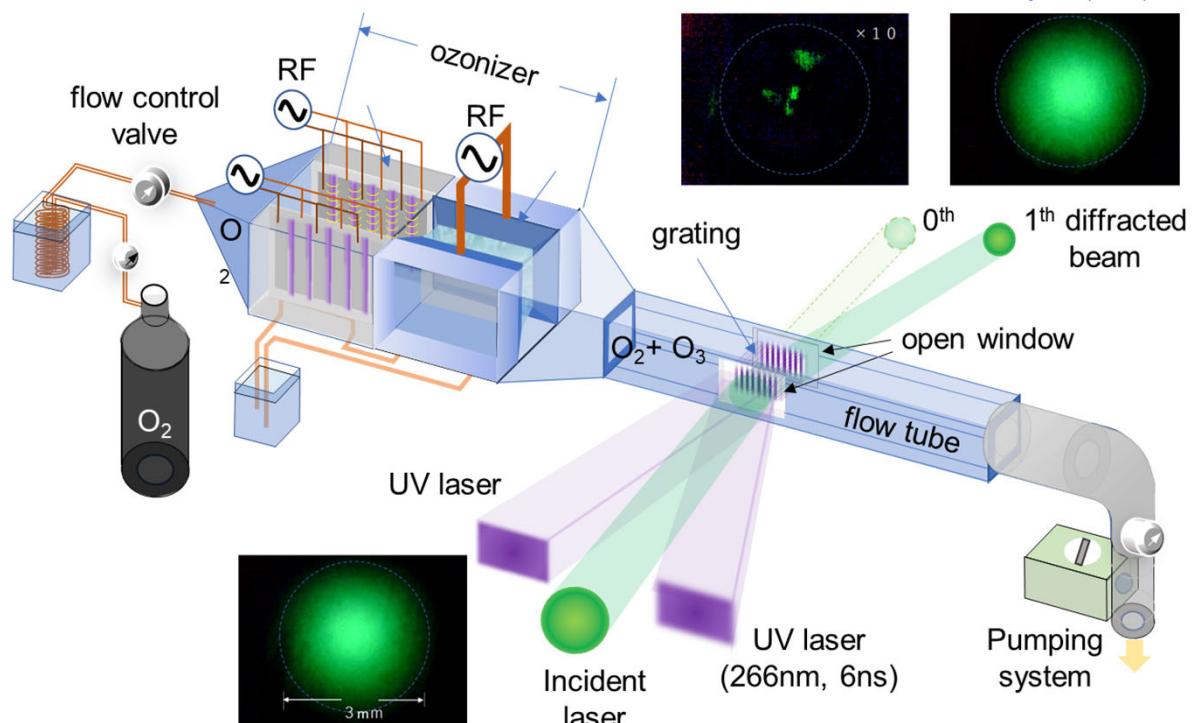


封入型オゾン光学光学素子

損傷閾値(LIDT)の系統的な評価と改善

# 電通大 超高耐力光学素子の開発

- オゾンガス光学素子 ( $1\text{kJ/cm}^2$ )
  - ✓ 高耐力ミラー(電子多段加速)
  - ✓ 回折格子(電子・イオン加速)
  - ✓ 空間フィルター(レーザー)
  - ✓ デブリシールド(イオン加速)
  - ✓ レーザー加工への展開、など
- 高耐力光学薄膜 ( $100\text{J/cm}^2$ ) による光路縮小、システム小型化



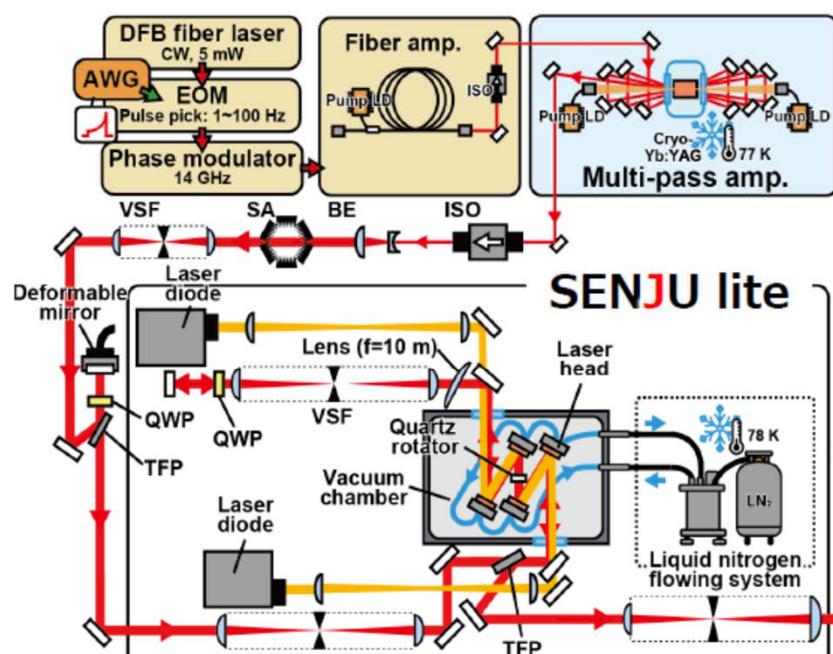
電子多段加速：ミラー・ガスジェット間の距離短縮による小型・安定化



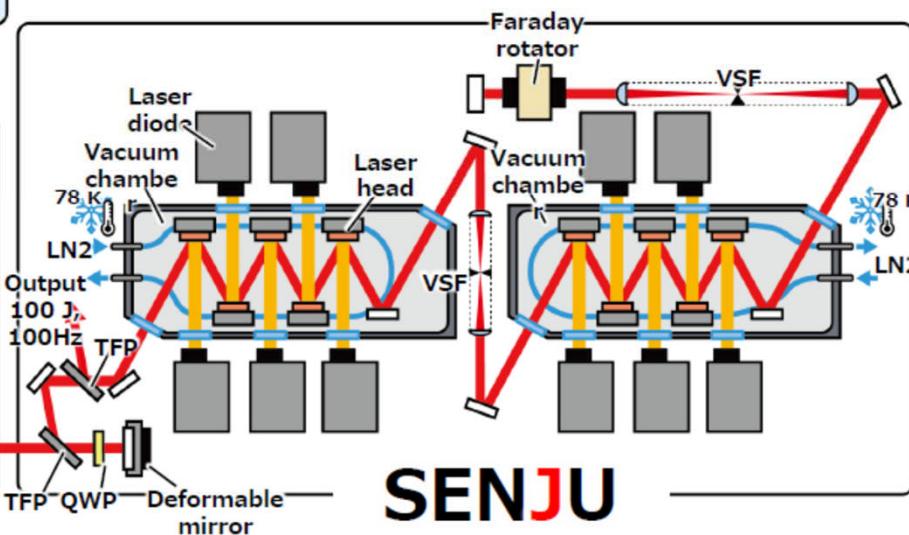
100J × 100Hz システム SENJU



<https://www.ile.osaka-u.ac.jp/research/rdl/introduction.html>

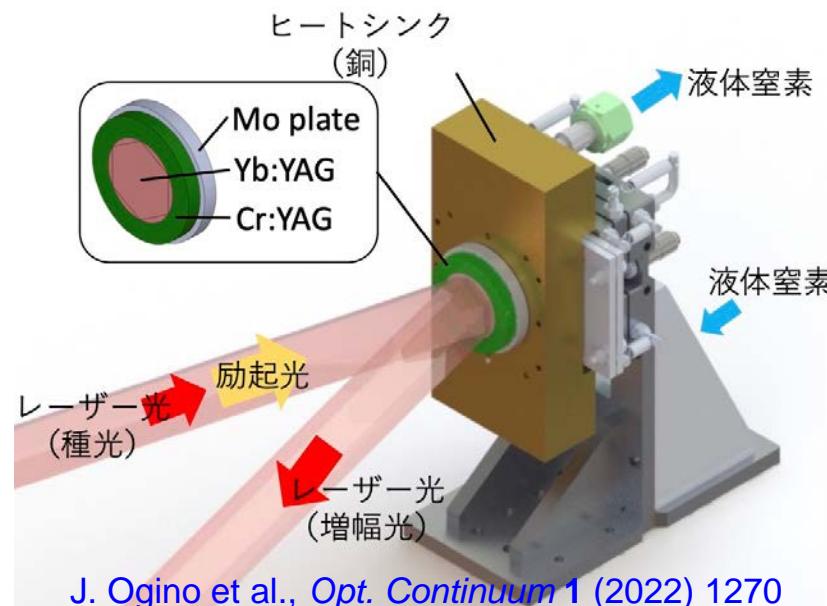


10J × 100Hz システム(SENJU lite)

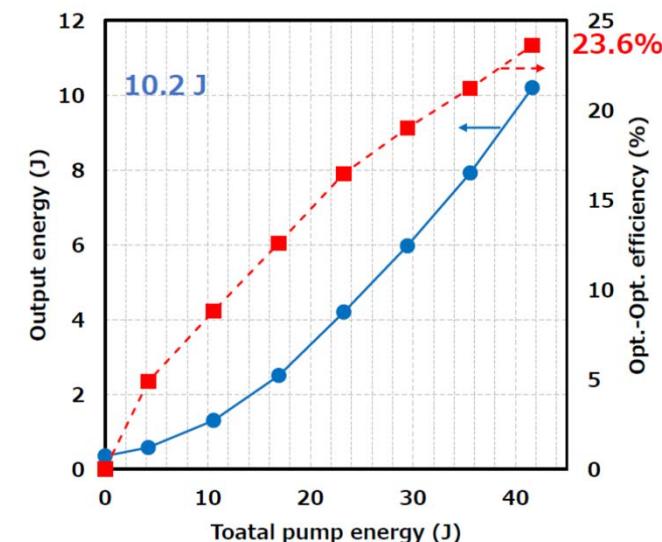


100J × 100Hz  
システム  
SENJU

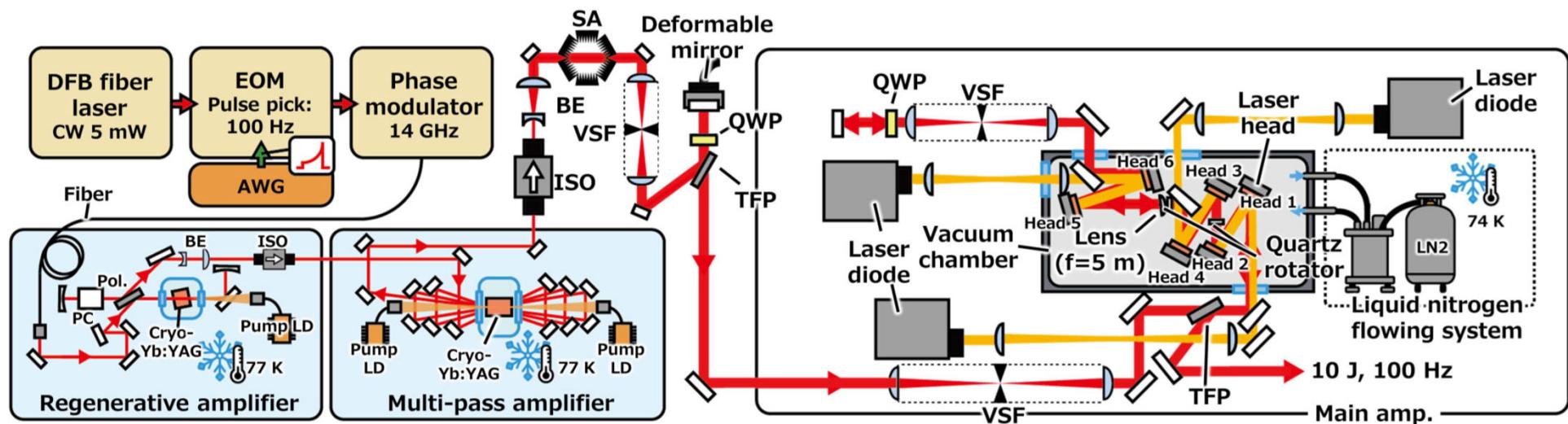
# 阪大レーザー研 SENJU lite: 10J × 100Hz



J. Ogino et al., Opt. Continuum 1 (2022) 1270

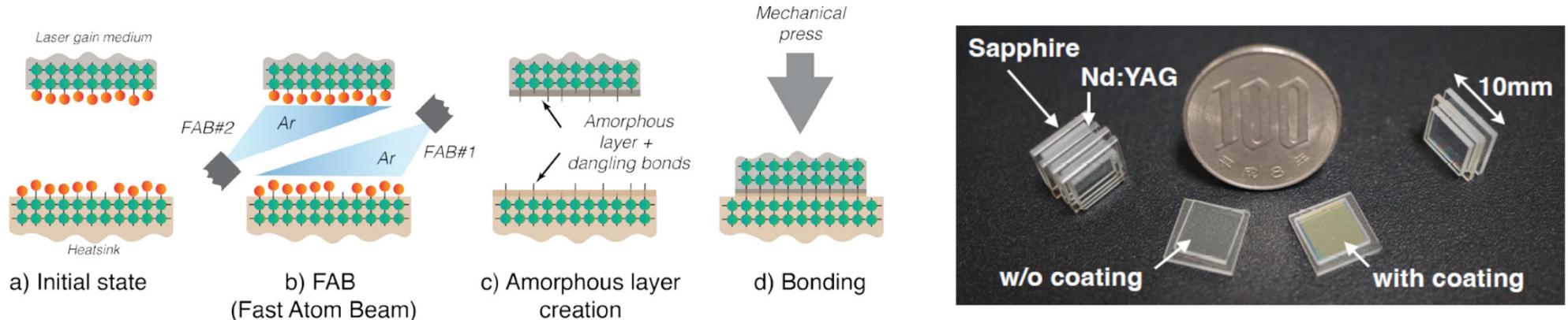


10J × 100Hz 動作データ



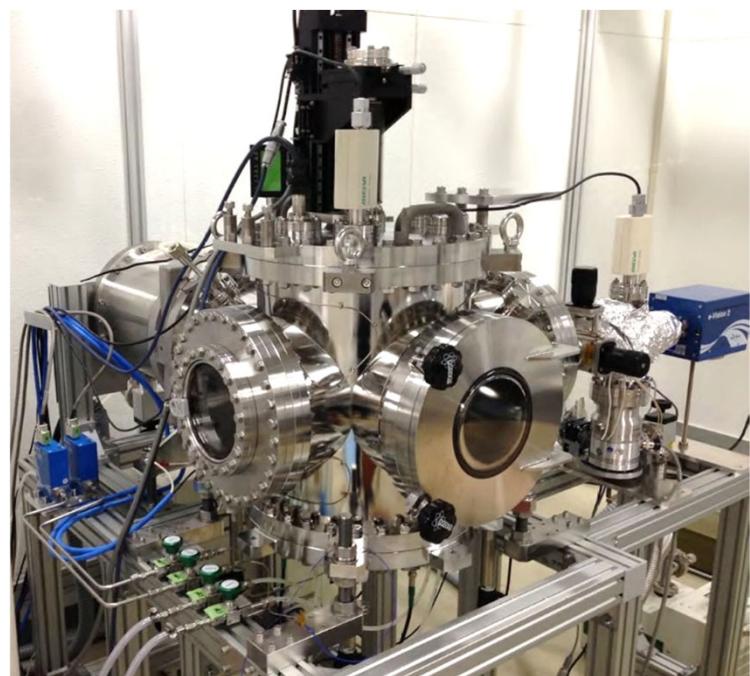
10J × 100Hz システム(SENJU lite)の構成

# 分子研／理研 光学素子の接合技術開発

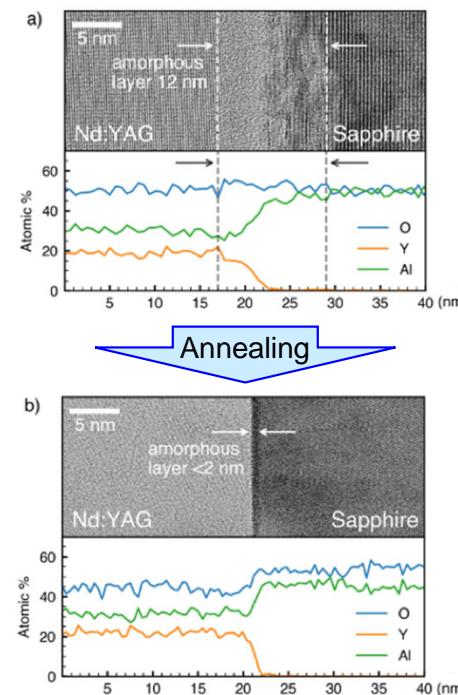


## 表面活性とアモルファス層による常温接合

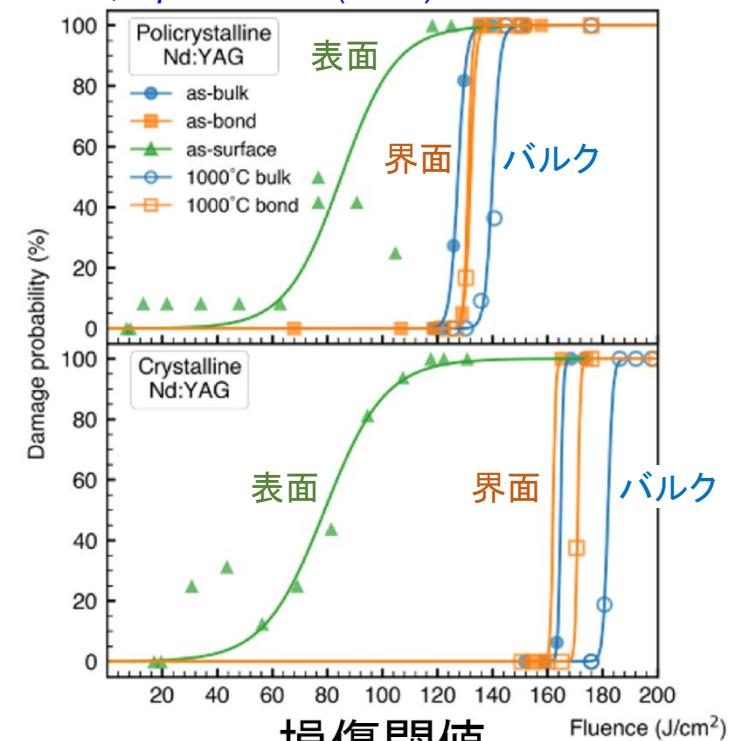
A. Kausas and T. Taira, *Opt. Lett.* **47** (2022) 3067



常温接合装置

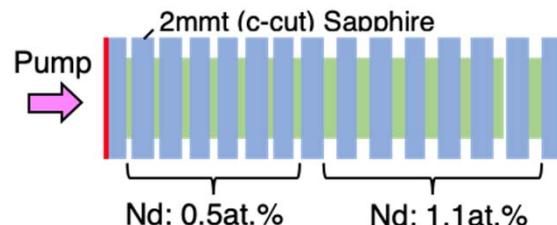


界面の TEM / EDX

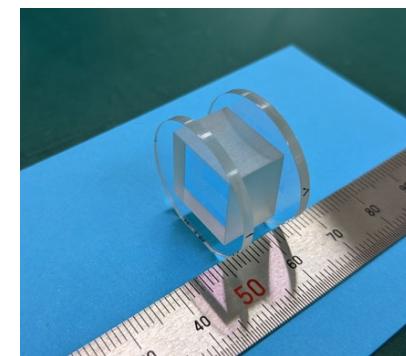


損傷閾値

# 分子研／理研 サブナノ秒レーザーモジュール



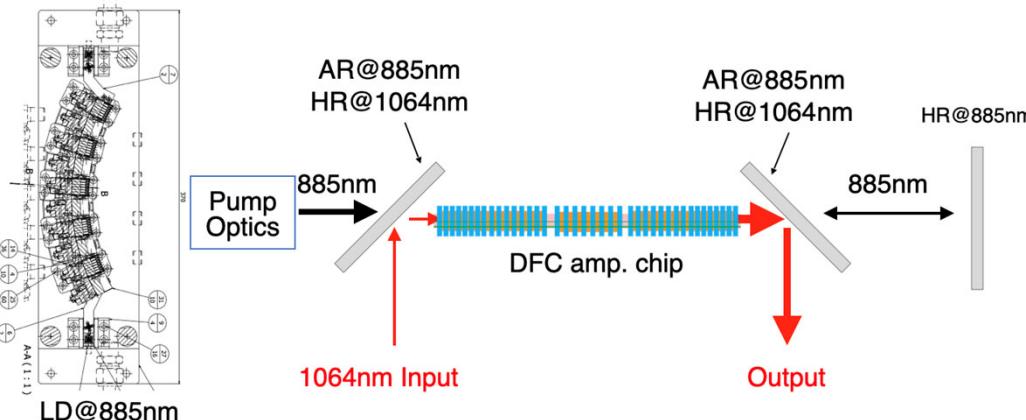
DFCチップ<sup>°</sup>



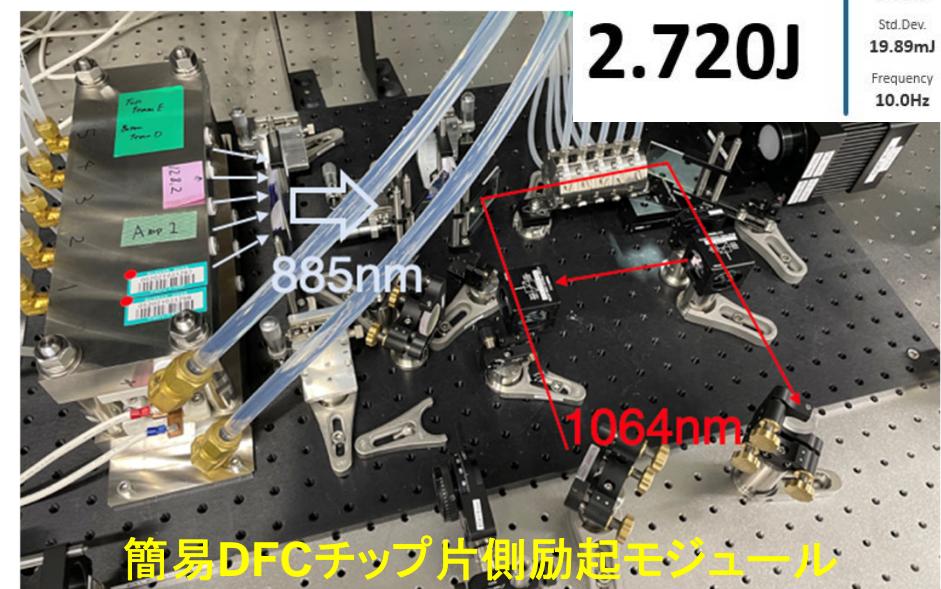
簡易DFCチップ



水冷ジャケット



DFCチップ片側励起モジュール

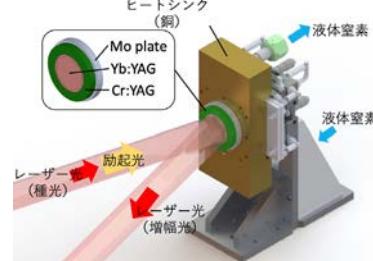


簡易DFC(ブロック)で  $> 2\text{J} \times 10\text{Hz}$ 、DFCで  $> 2\text{J} \times 25\text{Hz}$  を達成

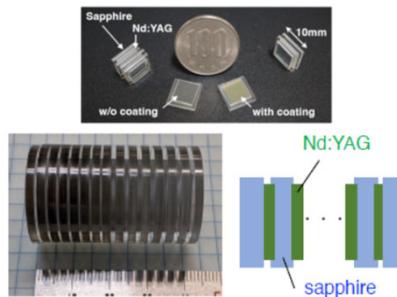
# LPAプロジェクトの開発内容

## レーザー開発

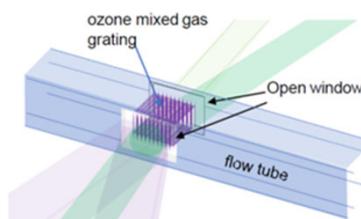
### アクティブミラーによる高平均出力レーザー



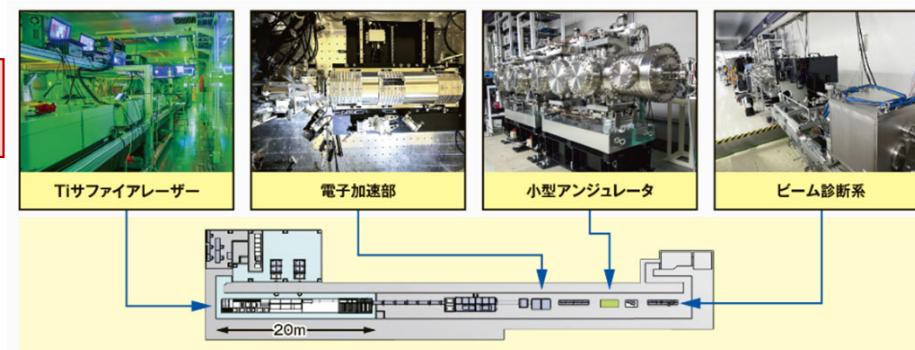
### 常温接合による小型高出力レーザーチップ



### 長期信頼性光学素子 超高耐力ガス光学素子

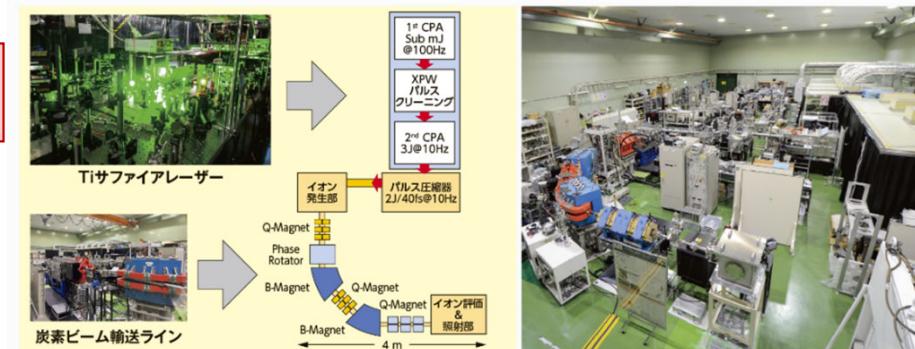


## 電子加速プラットホーム(播磨)



- 高出力レーザーによる安定な電子加速と自由電子レーザー(FEL)を実証、高エネルギー加速の検討
- 数百MeV電子ビームの創薬・医療応用に着手

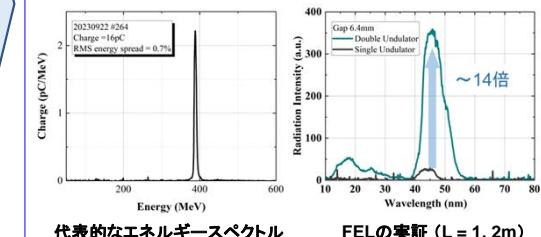
## イオン加速プラットホーム(木津)



- 高出力レーザーによる炭素イオンの加速、量子メスイオン入射器の一連の動作を実証
- レーザー加速イオン(高電荷密度)の応用に着手

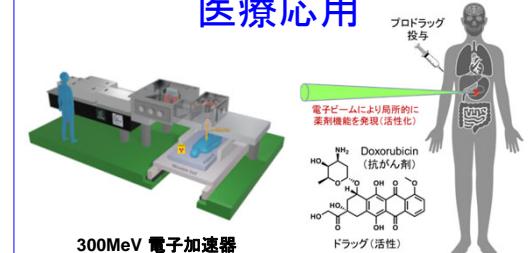
## 電子加速／応用

### 高品質電子ビームの発生とFEL増幅の実証



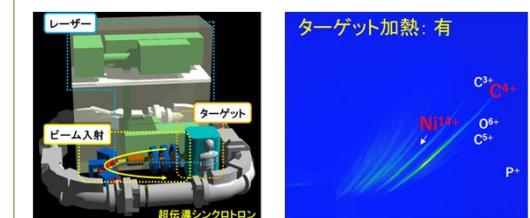
代表的なエネルギースペクトル FELの実証 (L = 1, 2m)

### 電子ビームの創薬・医療応用



## イオン加速／応用

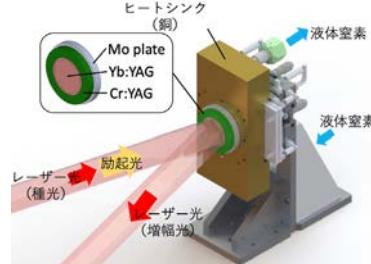
### 量子メス入射器に必要な一連の動作と新しい応用



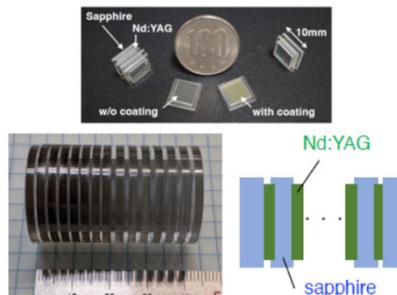
# 今後の展開／技術課題

## レーザー開発

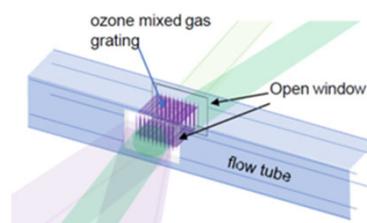
### アクティブミラーによる高平均出力レーザー



### 常温接合による小型高出力レーザーチップ



### 長期信頼性光学素子 超高耐力ガス光学素子



## ■ 電子加速

- ✓ 電子入射：加速エネルギーの安定化
- ✓ 電子ビーム創薬・医療応用の展開（医薬理工の連携）
- ✓ GeV加速：高エネルギー物理への展開
- ✓ FEL：アト秒への展開、P&P実験、他

## ■ イオン加速

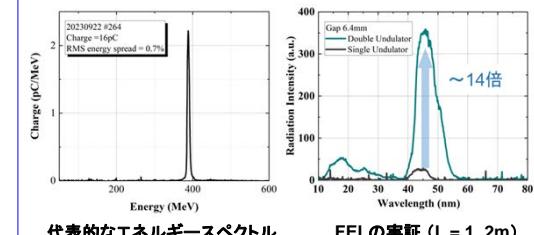
- ✓ システム：量子メス入射器設計データベースの構築(第5世代実証機)
- ✓ 要素技術：更なる高度化・定量化、参画企業による製品化
- ✓ 高密度シングルイオンバンチの応用

## ■ レーザー開発

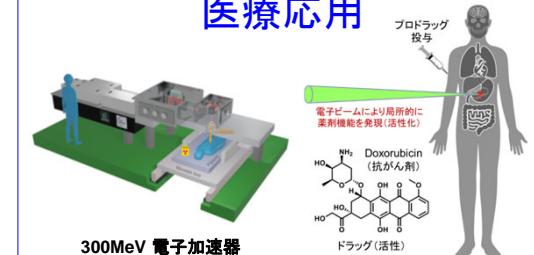
- ✓ 要素技術：ベンチャー・コンソーシアム設立、共同研究・実用化推進、など
- ✓ 加速用レーザーシステムとしての展開

## 電子加速／応用

### 高品質電子ビームの発生とFEL 増幅の実証

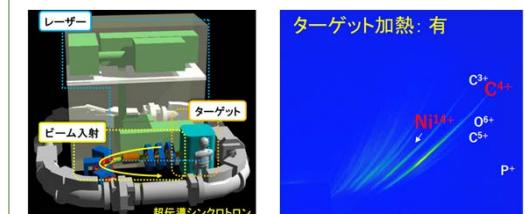


### 電子ビームの創薬・医療応用



## イオン加速／応用

### 量子メス入射器に必要な一連の動作と新しい応用



## まとめ

- 2017年11月、「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」がJST未来社会創造事業・大規模Pj型に採択(最長10年、2026年度まで)
- 安定な「電子加速」とそれによるFELの実現、小型がん治療装置を目指した「イオン加速」、それらの実現に必要な「高強度レーザー」の開発を推進
- これまでの主な開発成果
  - ✓ 電子加速： 安定な電子ビームの発生、XUV領域のFEL増幅  
電子ビームを使用した創薬・医療応用研究の立上げ
  - ✓ イオン加速： 次世代重粒子線がん治療装置(量子メス)の入射器要素技術開発、加速～輸送の一連のシステム動作  
イオンビームの新しい応用技術開発着手
  - ✓ レーザー： 新構造小型高出力レーザー(AM、DFC)、超高耐力光学素子、新奇広帯域レーザー媒質の開発など
- これまでの研究開発成果を基に産業界との連携・共創を更に深めることで、技術の高度化・システム化を推進。社会課題の解決に貢献していく



未来社会創造事業

*Accelerator and laser technologies converge to ignite a new frontier beyond imagination.*