

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 プロジェクト紹介および成果概要

2024年8月5日

プログラスマネージャー (PM)

佐野 雄二

(分子科学研究所)

「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

## — レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証 —

- Pj 紹介：目的、体制、スケジュール
- レーザーによる電子加速の開発成果
- レーザーによるイオン加速の開発成果
- 高強度レーザー技術の開発成果

Pj: プロジェクト

# レーザー加速で加速器を小型化

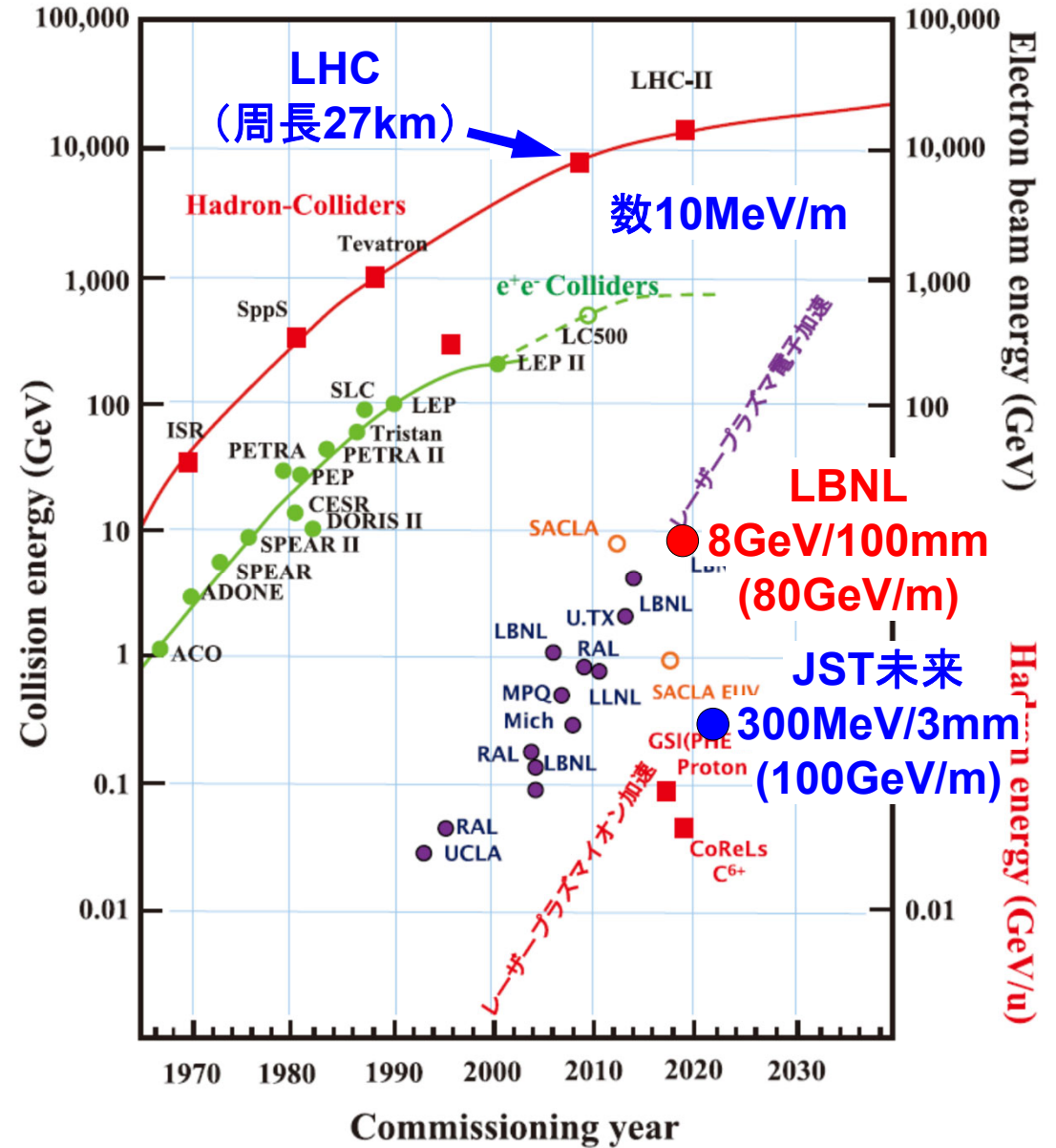
加速器は学術・産業・医療などの広範な分野で不可欠な基盤技術

- 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、セキュリティー
- 創薬、粒子線がん治療

[www.zmescience.com/science/physics/lhc-produces-first-results](http://www.zmescience.com/science/physics/lhc-produces-first-results)



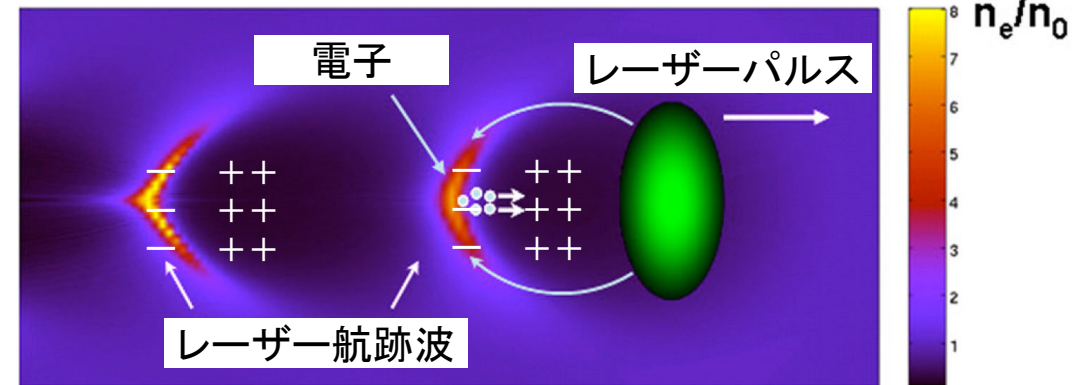
LHC (陽子・陽子衝突型リング 周長27km)



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

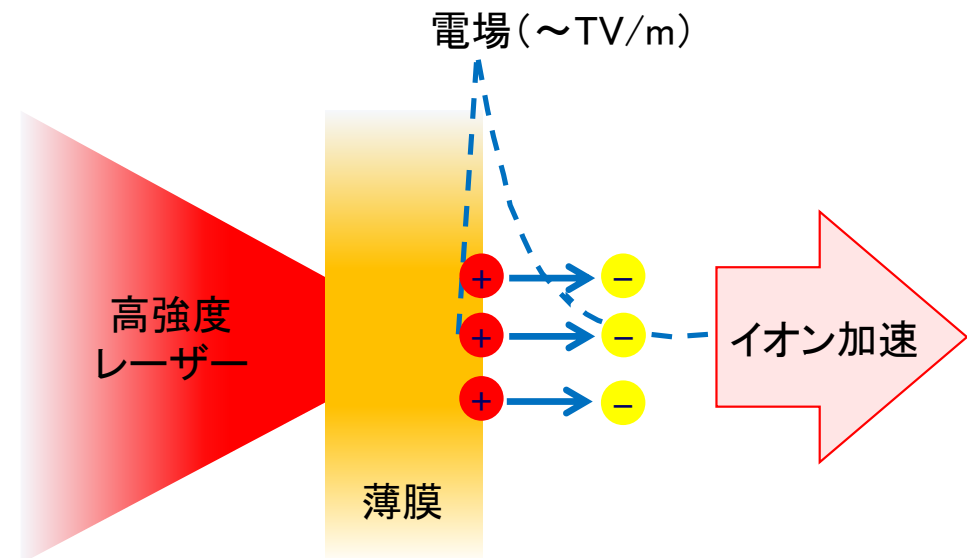
ガスへの高強度レーザーの照射で電子が押し退けられ、プラズマ波(航跡波)が発生。電子がプラズマ波に波乗りするようにして加速(LWFA: Laser Wake-field Acceleration)。



加速勾配 (~50 GeV/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 (~TV/m) で、シース場が形成。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)

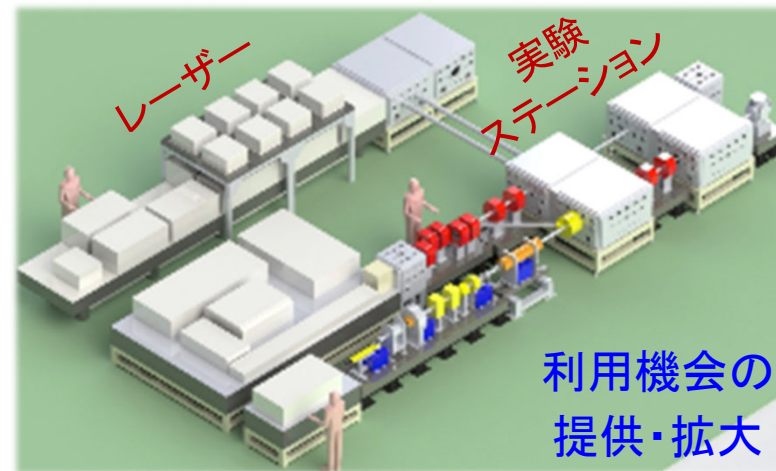


# レーザープラズマ加速の社会実装イメージ



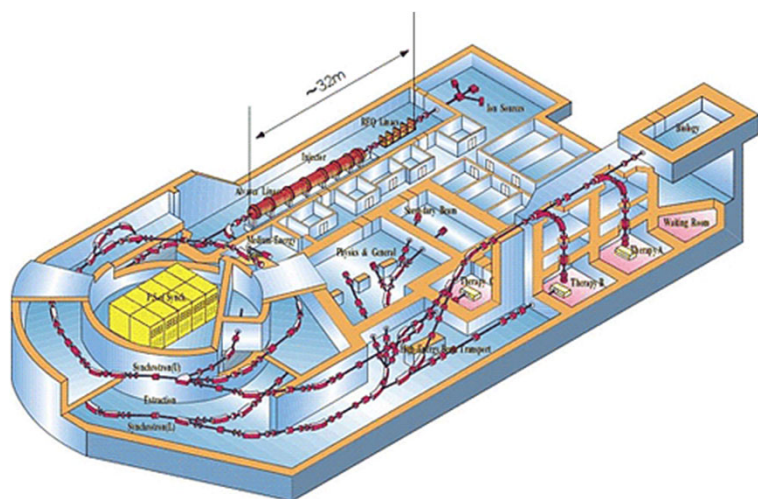
X線自由電子レーザー SACLA

レーザー加速



次世代X線自由電子レーザー(XFEL)

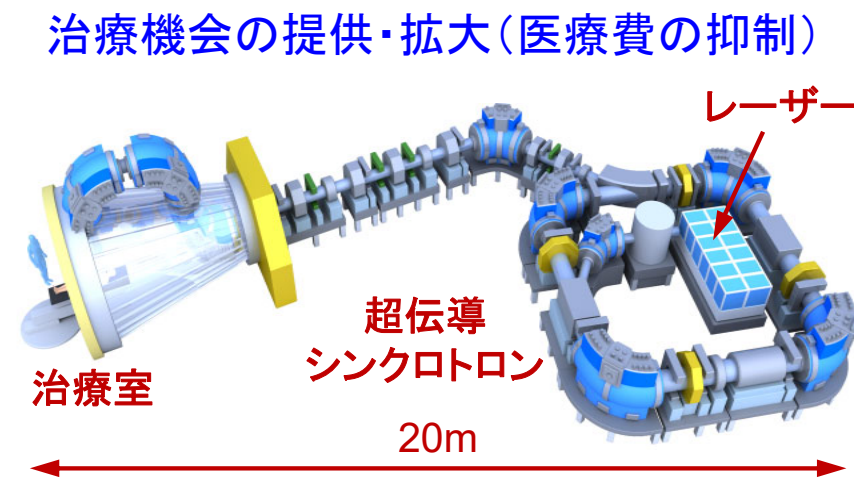
利用機会の提供・拡大



重粒子線がん治療装置 HIMAC

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

レーザー加速



次世代重粒子線がん治療装置(量子メス)

超伝導シンクロトロン

20m

## レーザープラズマ加速の社会実装の姿

- 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フォームの整備とユーザー利用

## 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(シミュレーション+要素検証)、入射器の高度化・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設計、要素技術の更なる展開

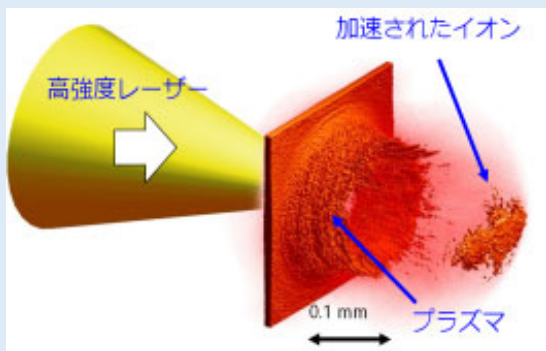
## ステージ2(2021~23年度)の成果

- 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

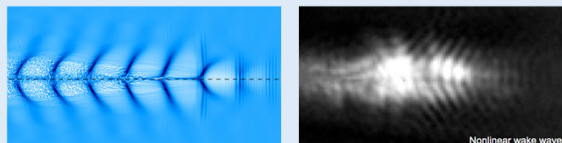
- 体制構築、加速システム検討、要素技術の発掘・育成、研究インフラの整備

## イオン加速技術

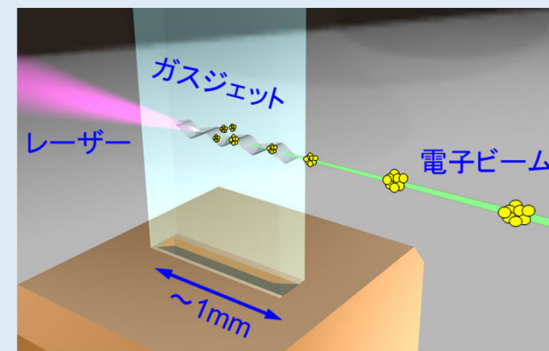


## シミュレーション・計測技術

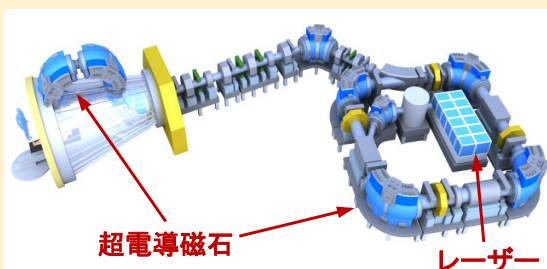
### プラズマ加速場



## 電子加速技術



## 小型重粒子線がん治療装置

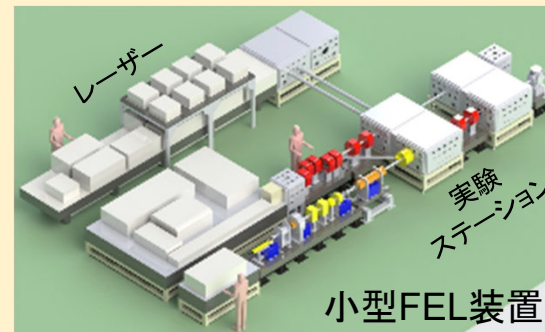


## 加速システム開発



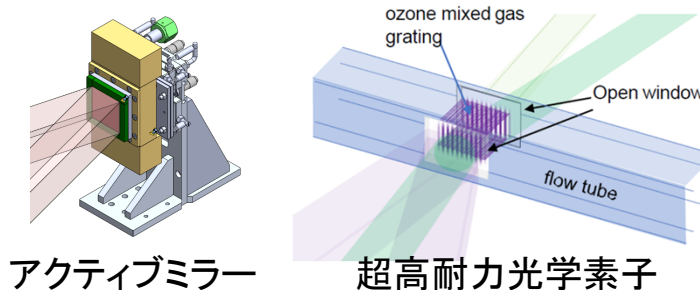
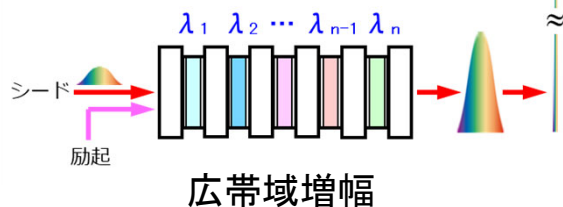
将来

将来

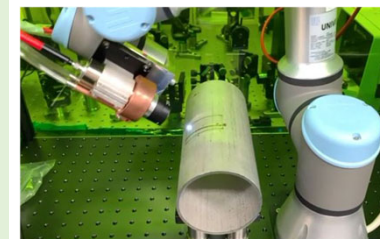


小型FEL装置

## 加速用レーザー技術

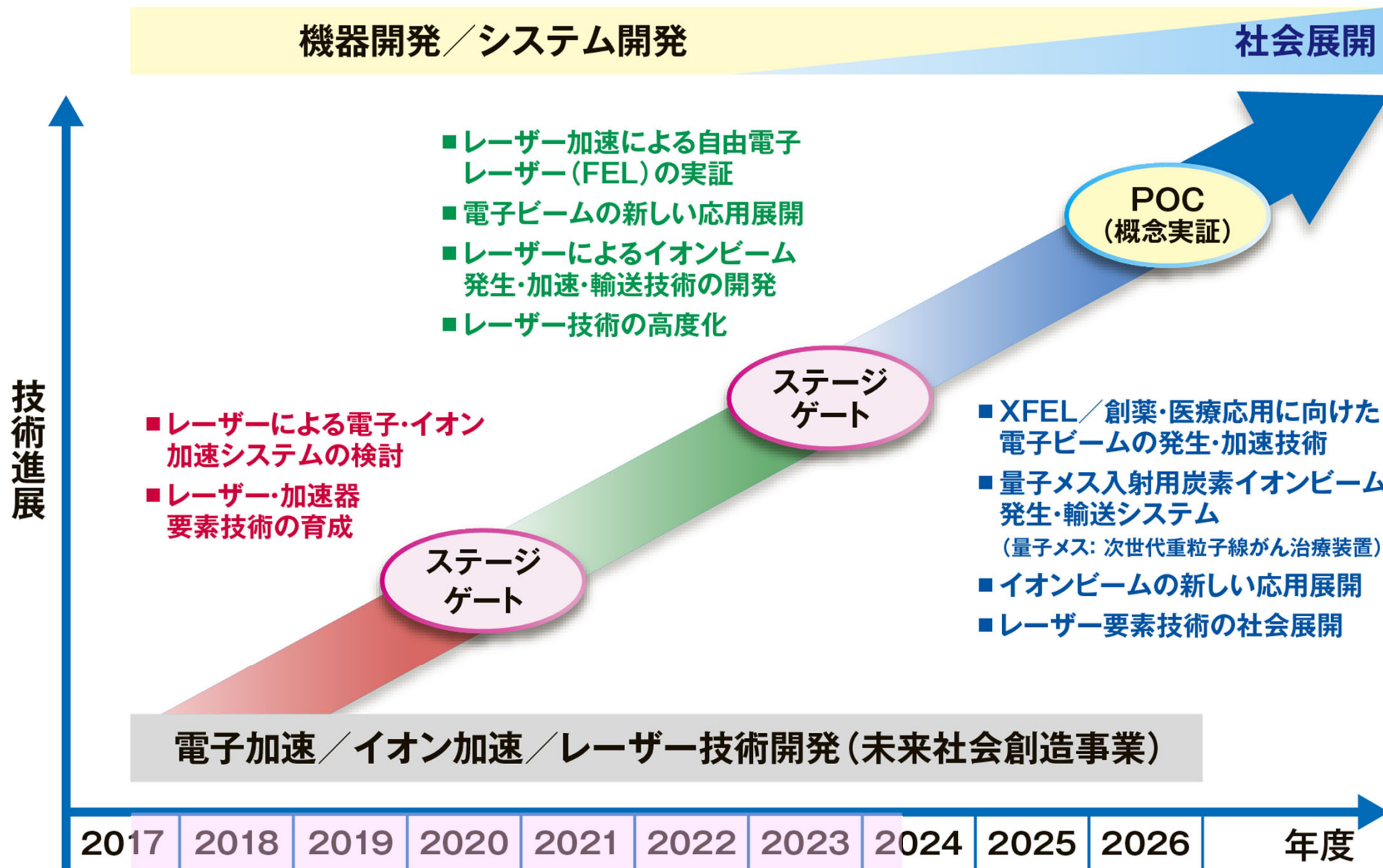


## 応用展開

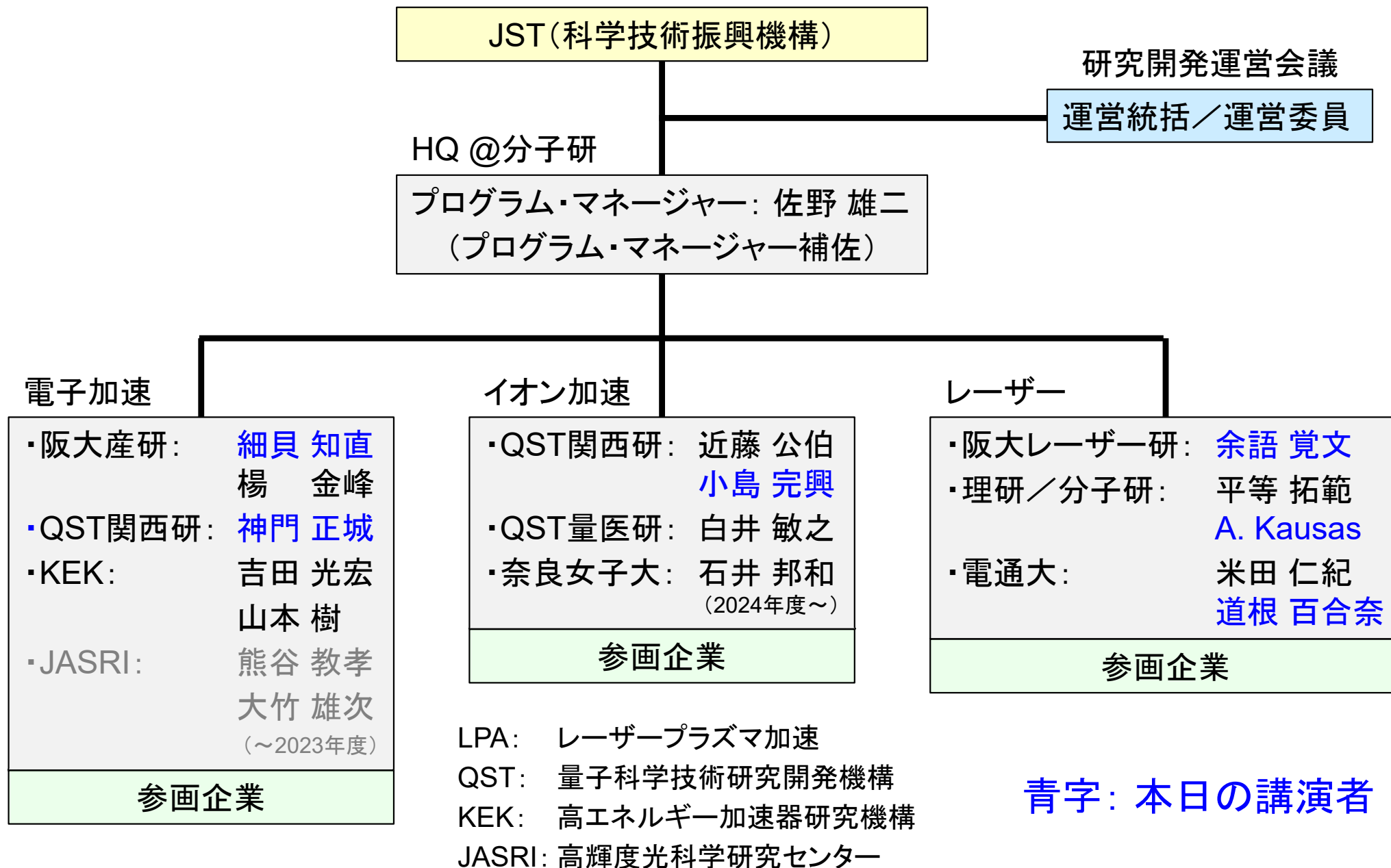


## 共通基盤技術・加速器技術

# LPA プロジェクトのロードマップ







# LPA プロジェクト 開発体制



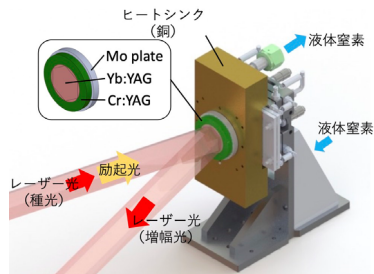
参画企業 18社		
株式会社LAcubed	金属技研株式会社	株式会社トヤマ
株式会社オカモトオプティクス	シグマ光機株式会社	株式会社NAT
有限会社オクギ製作所	真空光学株式会社	日本防振工業株式会社
株式会社オハラ	住友重機械工業株式会社	株式会社ピーエムティー
株式会社オプトクエスト	株式会社大興製作所	日立造船株式会社
京セラSOC株式会社	東海光学ホールディングス株式会社	株式会社ユニタック

「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

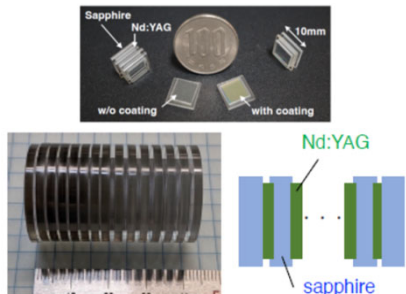
# 本日の講演の位置づけ

## レーザー開発

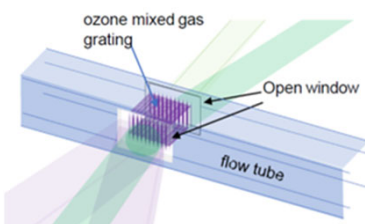
### ④ アクティブミラーによる高平均出力レーザー



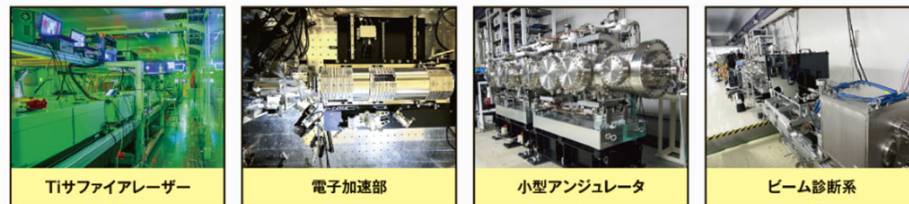
### ⑤ 常温接合による小型高出力レーザーチップ



### ⑥ オゾンガスによる高耐力光学素子

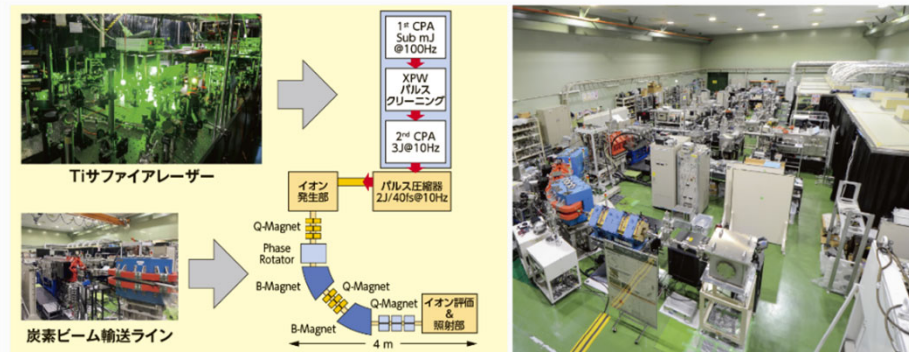


## 電子加速プラットフォーム(播磨)



- 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
- 高エネルギー電子ビームの創薬・医療応用に着手

## イオン加速プラットフォーム(木津)



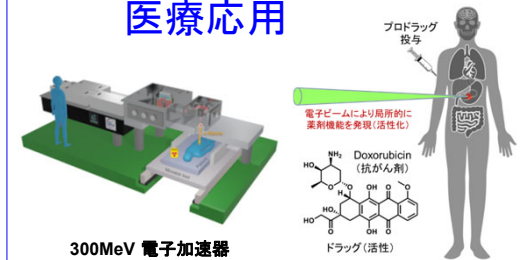
- 高出力レーザーによる炭素イオン加速、量子メスイオン入射器の一連の動作を実証
- レーザー加速イオン(高電荷密度)の応用に着手

## 電子加速

### ① 高品質電子ビームとFEL増幅の実証

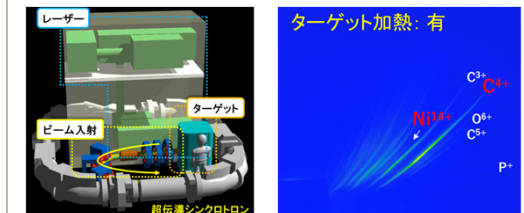


### ② 電子ビームの創薬・医療応用



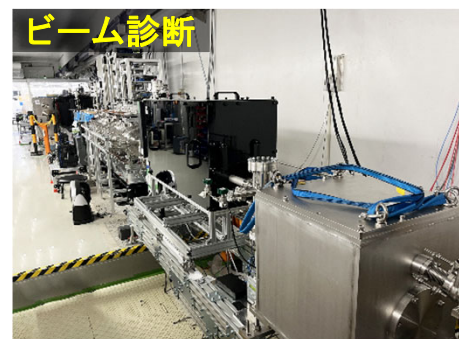
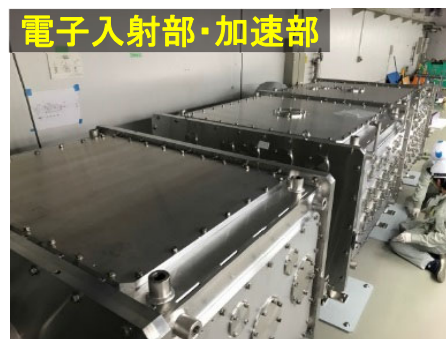
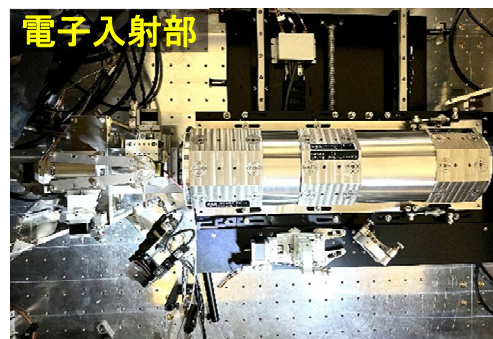
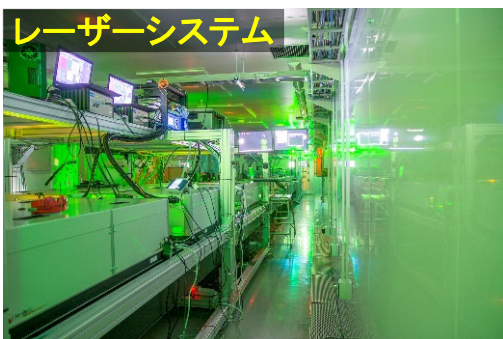
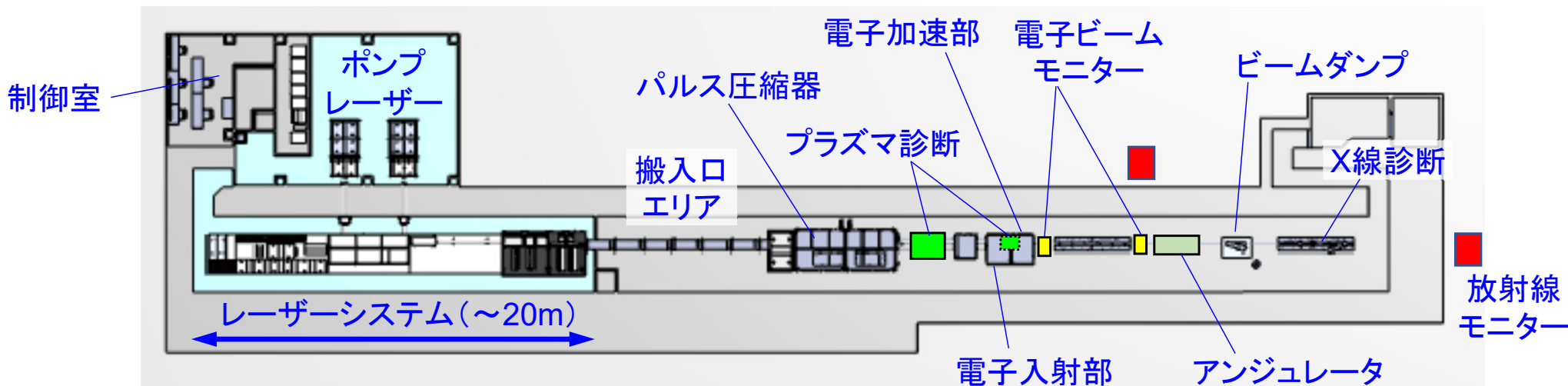
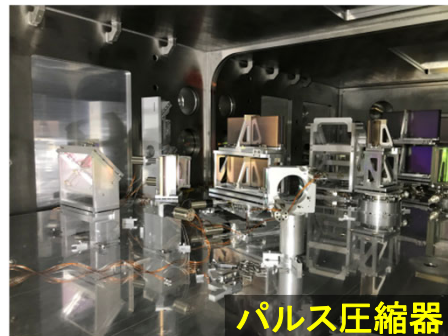
## イオン加速

### ③ レーザー加速によるイオン入射器

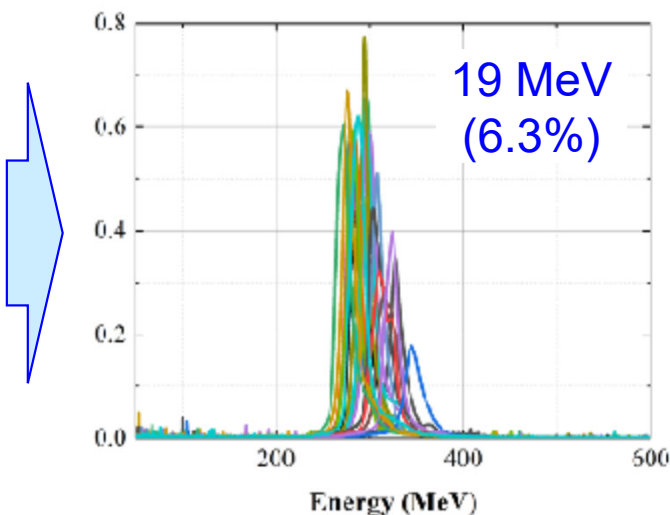
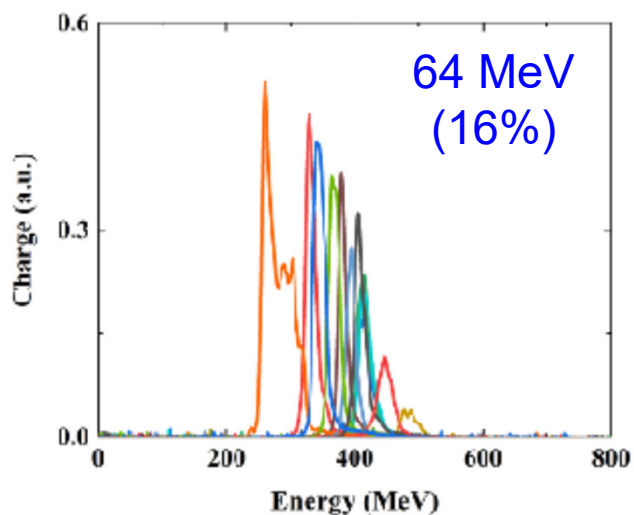


- レーザーによる電子加速
- レーザーによるイオン加速
- 高強度レーザー技術開発

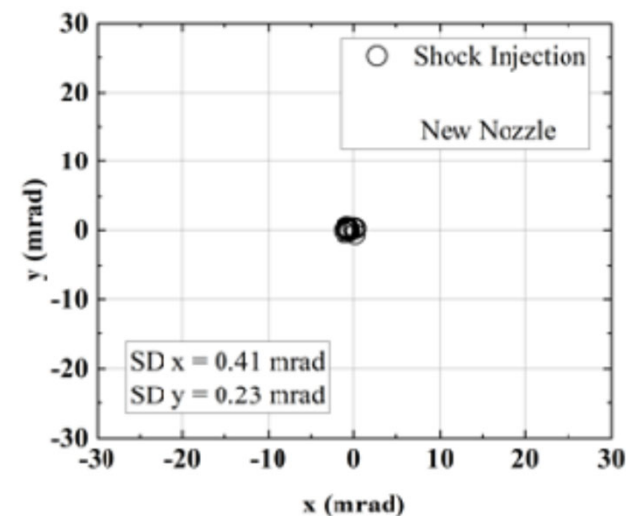
# レーザーによる電子加速 成果概要



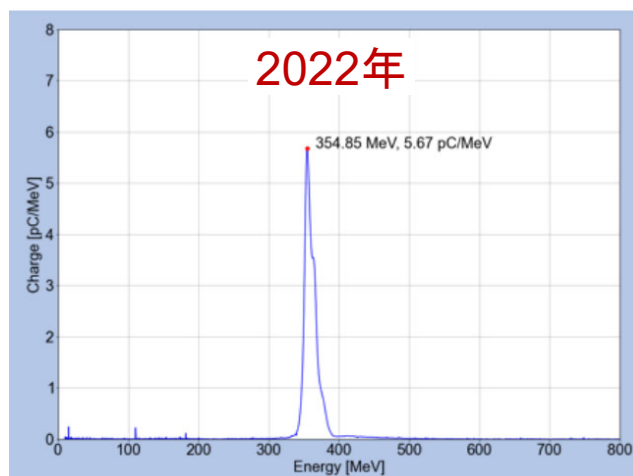
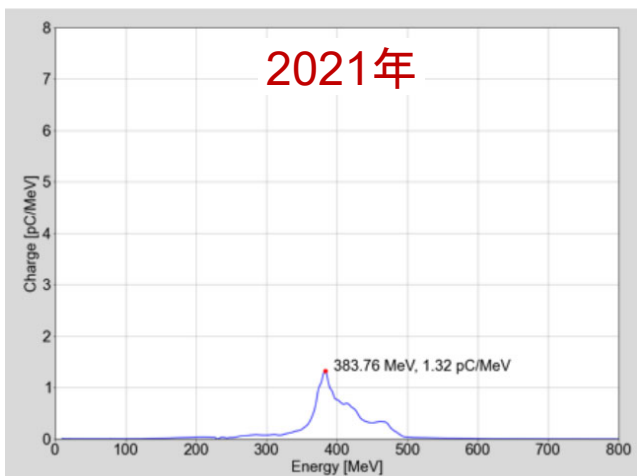
# レーザー加速電子ビームの性能



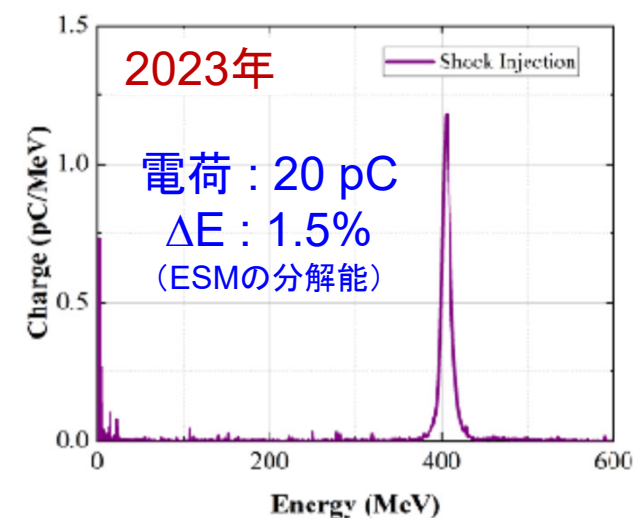
加速エネルギー安定性



電子ビームの位置安定性



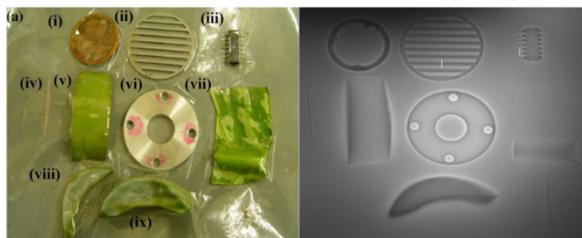
エネルギースペクトル



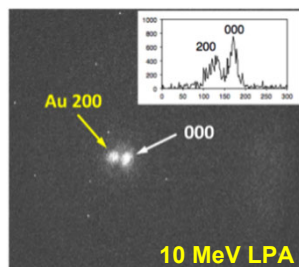
# レーザー電子加速 ベンチマーク

	JST未来	SIOM (中国)	Hamburg (独)	HZDR/SOLEIL (独/仏)	LBL (米国)
レーザー パワー	23 TW (小型) (0.5 J, 22 fs)	200 TW (~4.8 J, 24 fs)	50 TW (2 J, 42 fs)	70 TW (2.1 J, 30 fs)	850 TW (31 J, 35 fs)
入射方式	衝撃波入射	衝撃波入射	イオン化入射	イオン化入射	自己入射
電子 エネルギー	360 MeV (±6%)	490 MeV	368 MeV (±2.4%)	188 MeV (±3.2%)	7.8 GeV
エネルギー 拡がり(rms)	0.59% Best 0.36%	Best 0.34%	6% (±27%)	6.3% (±0.8%)	—
エミッタンス		0.25 mm-mrad		0.36 mm-mrad	
電荷量	20 pC (±60%)	22.8 pC	25 pC (±11%)	~75 pC (Max 110 pC)	5 pC (7 - 8.5 GeV)
バンチ長 (rms)	< 3 fs (推定値)	1.6 fs (推定値)		6.3 fs (±10%)	
繰返し	0.03 Hz		1 Hz		
特記事項 (開発状況)	・低エネルギー ノイズなし ・FEL増幅	SASE FEL 増幅(27 nm)	連続運転で 安定電子発生	Seed FEL 増幅(260 nm)	最高加速 エネルギー

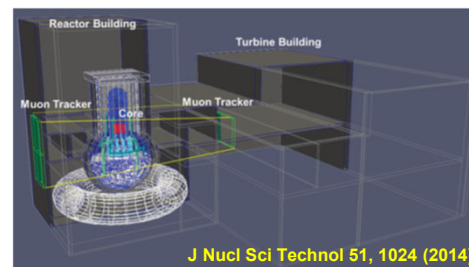
Phys Rev Accel Beams 22, 074701 (2019)



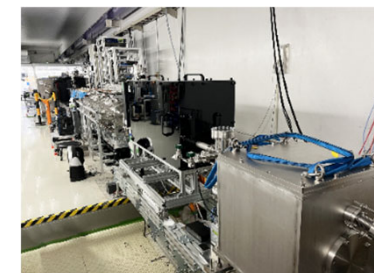
電子線ラジオグラフィ(~50 MeV LPA)



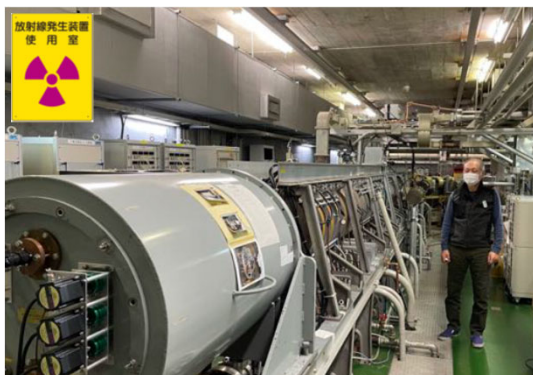
電子線回折



GeV電子によるミュオン生成

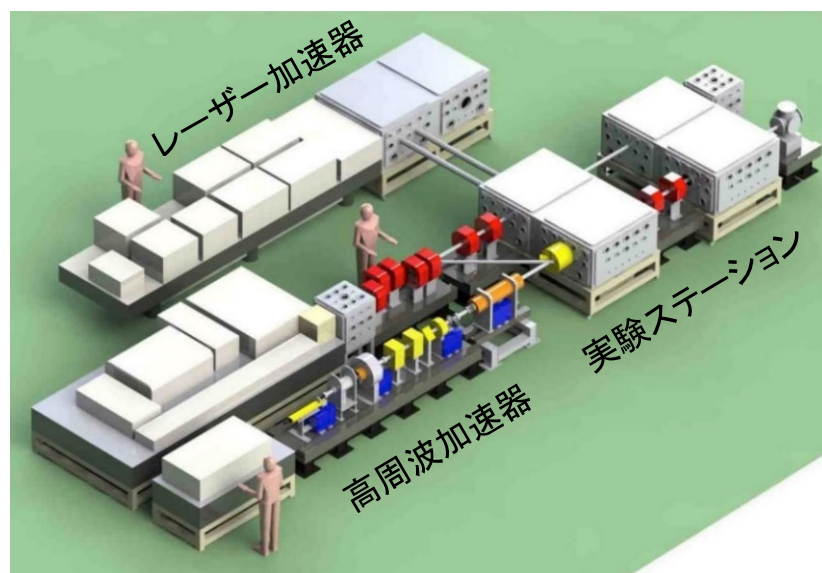


FEL (400 MeV LPA)

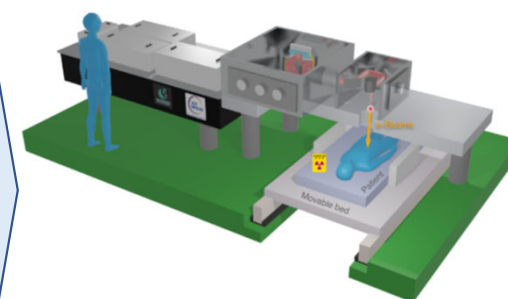


30MeV ライナック(数十mの建屋)

レーザー加速



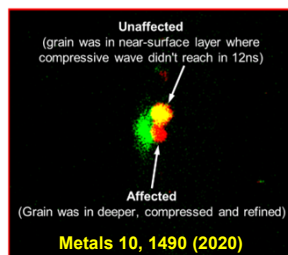
単機能化



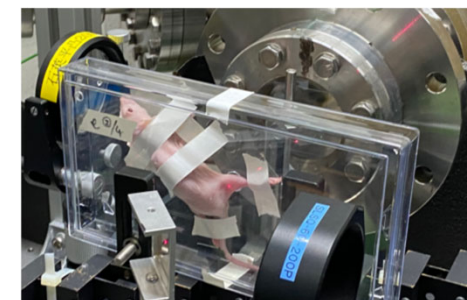
300 MeV 電子加速器  
(創薬・医療応用)



電子蓄積リング(光源利用)

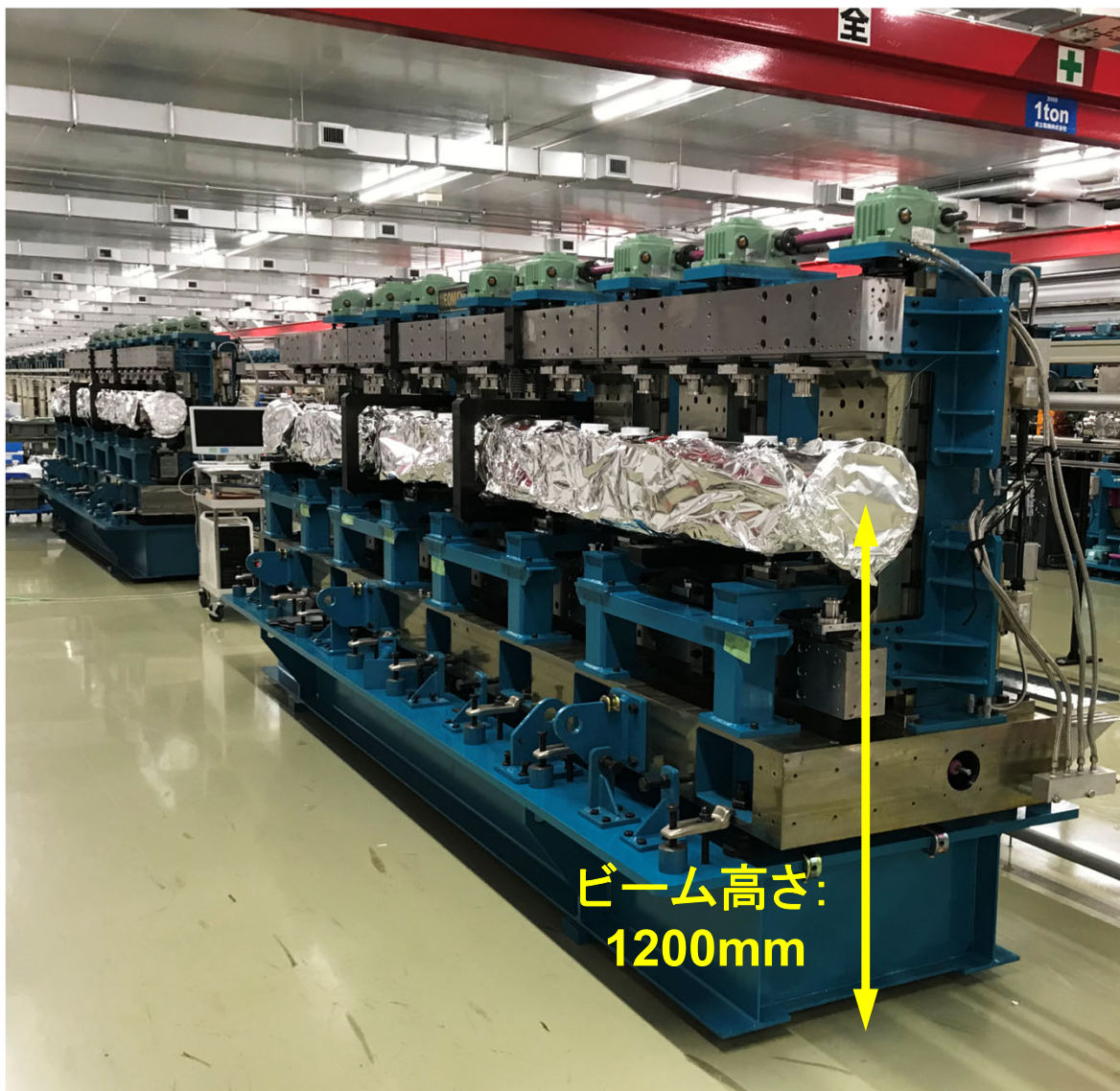


材料物性評価(ポンププローブ実験)



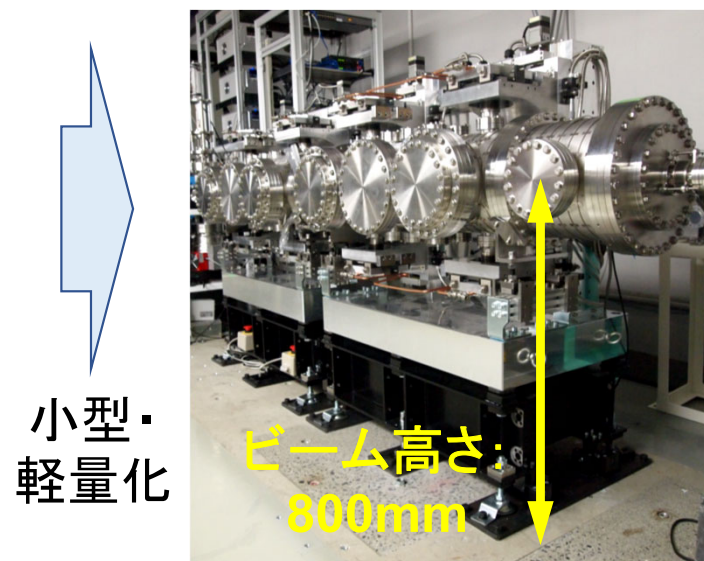
電子ビームの創薬・医療応用  
(プロドラッグ活性化)





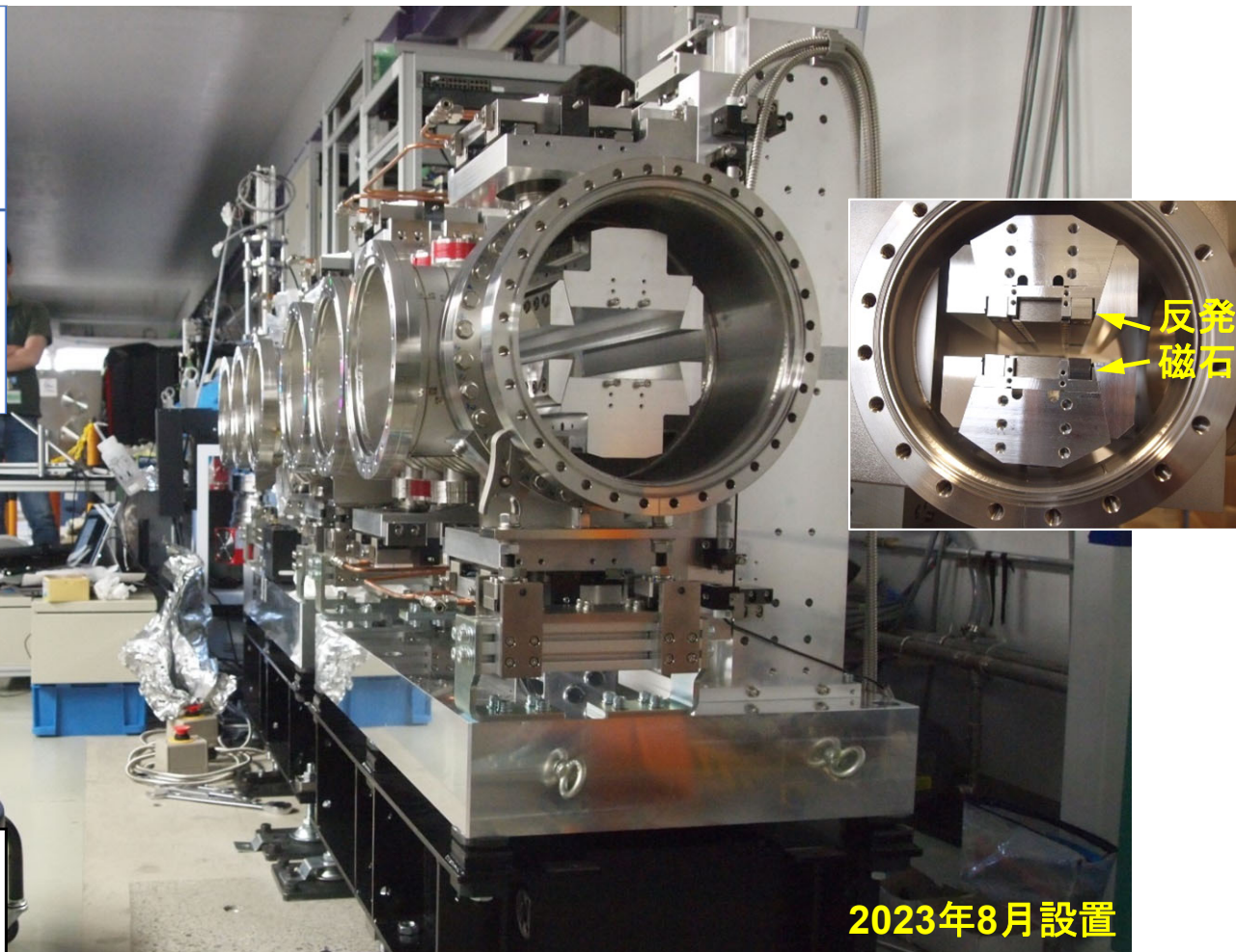
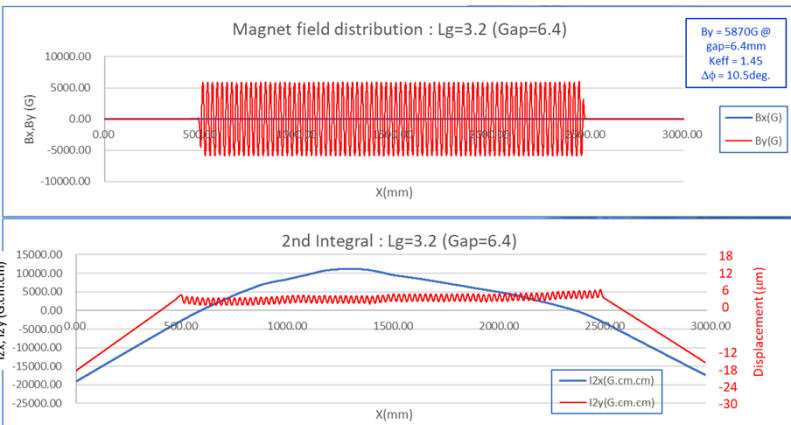
旧SCSS アンジュレータ(4.5m ユニット)

- 磁力相殺による構造簡素化とアルミニウム合金の多用により、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

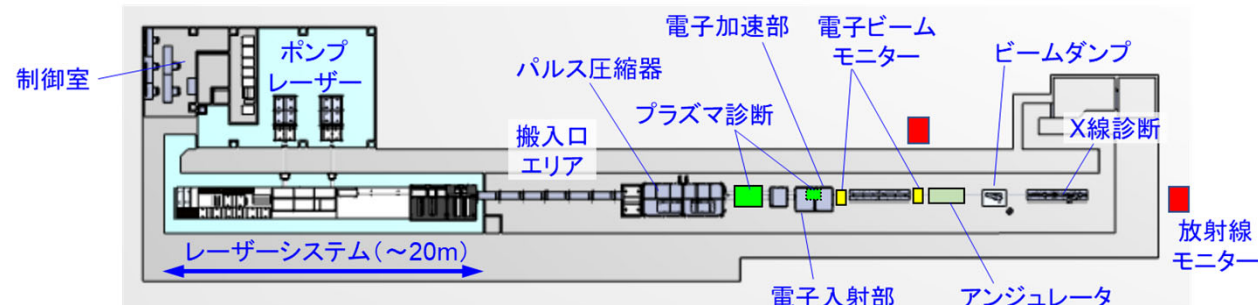
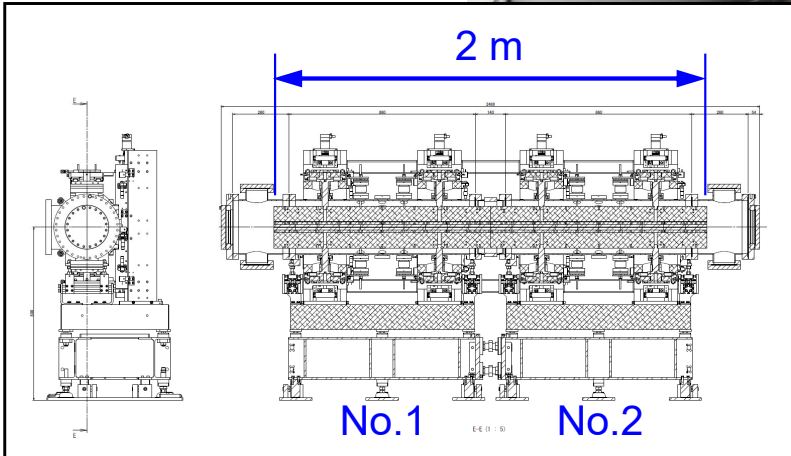


JST未来アンジュレータ(1m×2)

# FEL 実証用アンジュレータの設置



2023年8月設置



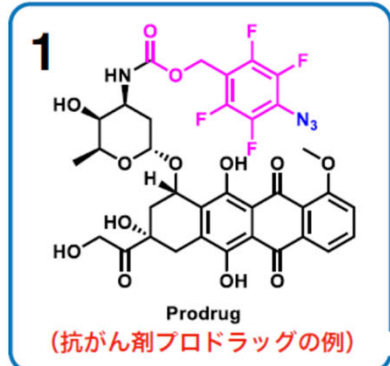
「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」 2024年度シンポジウム  
開催日 : 2024/08/05 場所 : 科学技術振興機構 東京本部別館

## 電子ビームをトリガーとするプロドラッグ化学治療

(体内では不活性な薬剤を体幹深部の患部に輸送)

・透過性の高い高エネルギー電子ビームを照射すると体幹深部の局所でプロドラッグが変換・活性化され機能を発現する。

特許出願中



多種の病気の治療に利用可能 (たとえば、脳など)

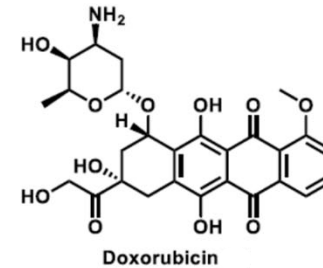
電子ビーム照射により体幹深部の局所で  
活性化薬剤に変化→機能発現

2

高エネルギー電子ビーム

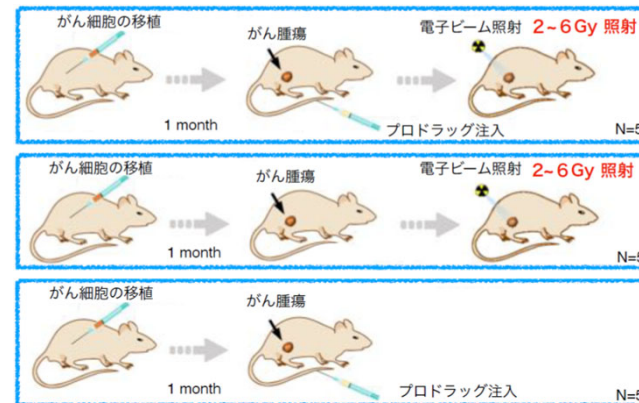
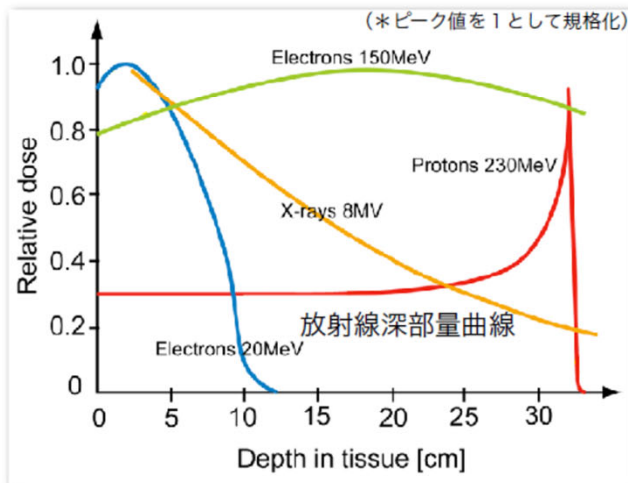
機能発現のトリガーとして  
体幹深部の患部に届く

3



電子ビーム照射で抗がん剤に変化

放射線深部透過曲線

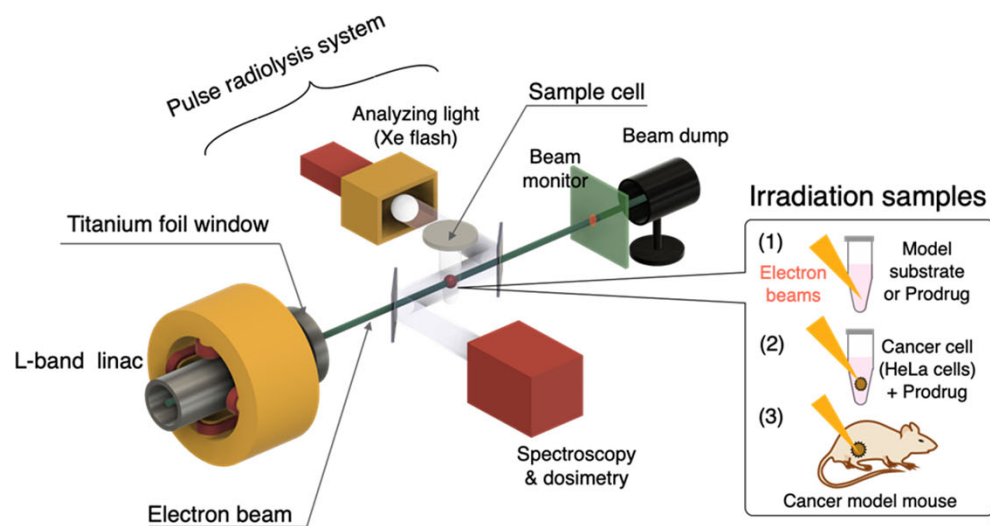


プロドラッグ  
+  
電子ビーム

電子ビーム

プロドラッグ

## バンドライナック(阪大・産研)

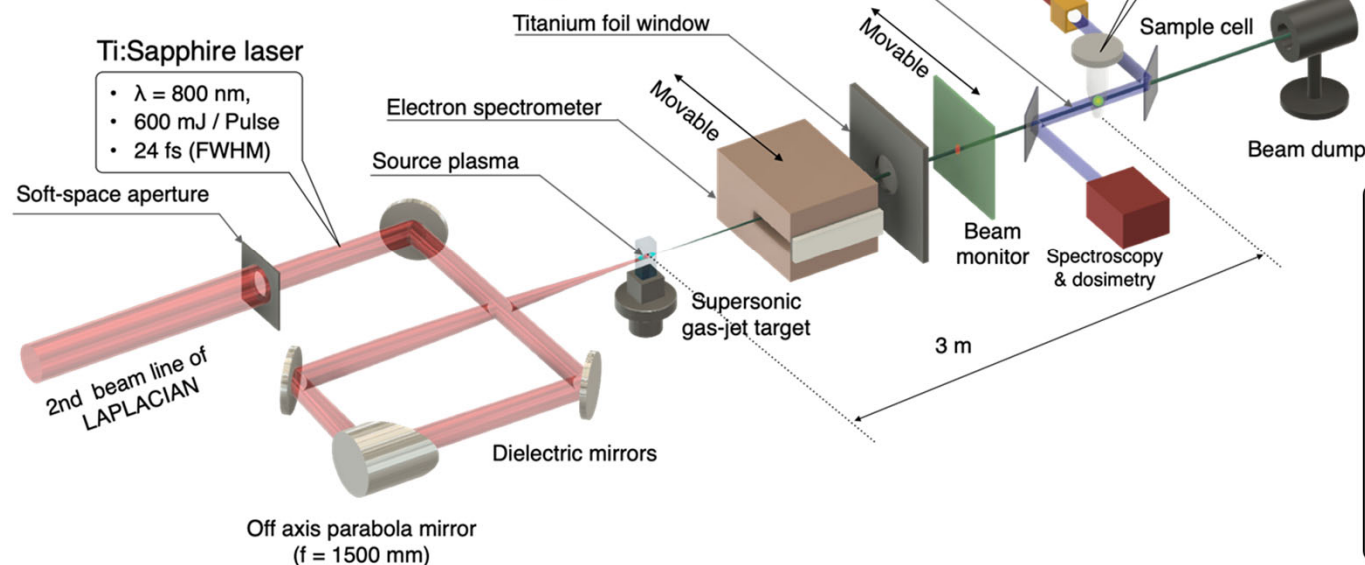


### E-beam on sample

- 27 MeV
- $\Delta E/E \sim 3\%$  (FWHM)
- $< 30 \text{ nC} / \text{Pulse}$
- 8 ns (FWHM)
- Diameter  $\sim 5 \text{ mm}$
- **Dose:  $\sim 1.0 \text{ Gy/Pulse}$**
- Rep rate: 0.1Hz or 0.03Hz



## レーザー電子加速(SPring-8)



### E-beam on sample

- Ionization injection
- $E \sim 10 - 300 \text{ MeV}$ (FWHM)
- $< 100 \text{ pC} / \text{Pulse}$
- 120 ps (FWHM)
- Diameter  $\sim 5 \text{ mm}$
- **Dose:  $\sim 0.15 \text{ Gy/Pulse}$**
- Rep rate: 0.03Hz

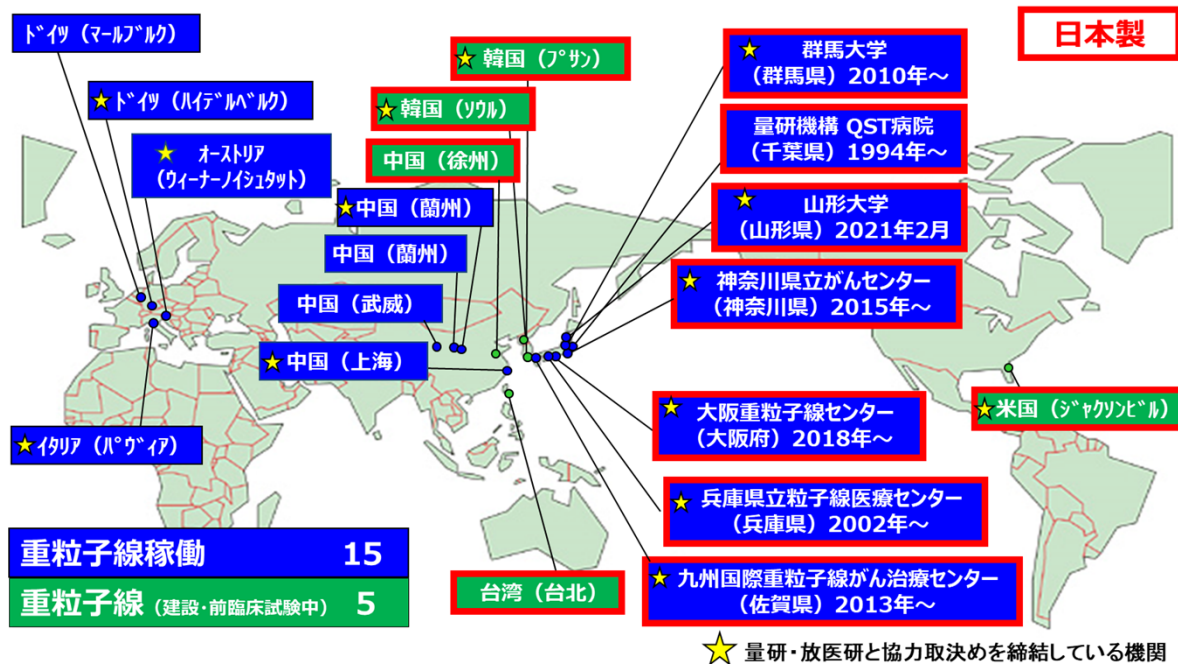
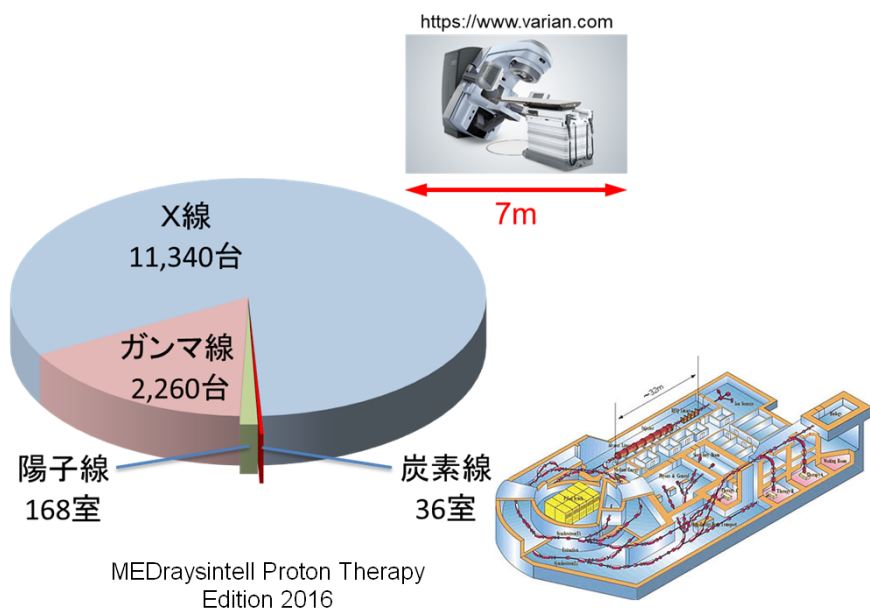


- レーザーによる電子加速
- レーザーによるイオン加速
- 高強度レーザー技術開発

# レーザーによるイオン加速 成果概要

# 重粒子線がん治療装置の状況

- 重粒子線がん治療は世界に誇る日本発の技術。装置の半数以上が日本製
- 大規模病院への導入は一段落。大幅な小型化で更なる普及・差別化を図る
- 超伝導・レーザー加速技術により装置を革新し、競争力の更なる向上を図る
- レーザー加速による実用的なイオン入射技術を開発し、システム化



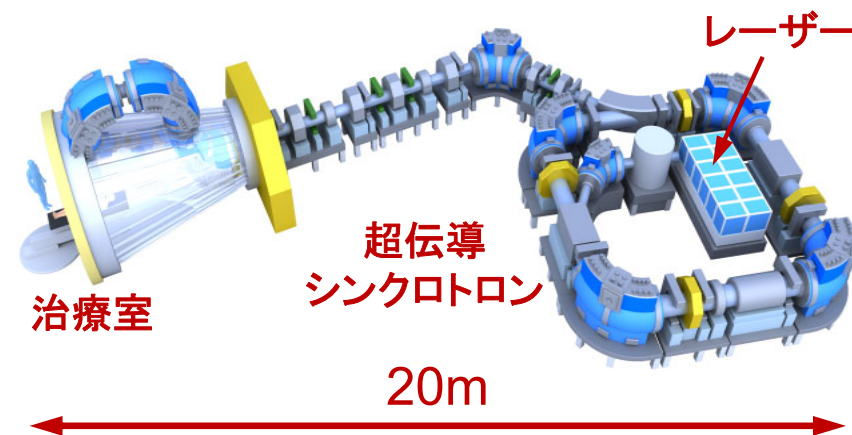
世界の放射線治療装置  
(粒子線は治療室数)

世界の重粒子線がん治療装置  
(2022/3現在)

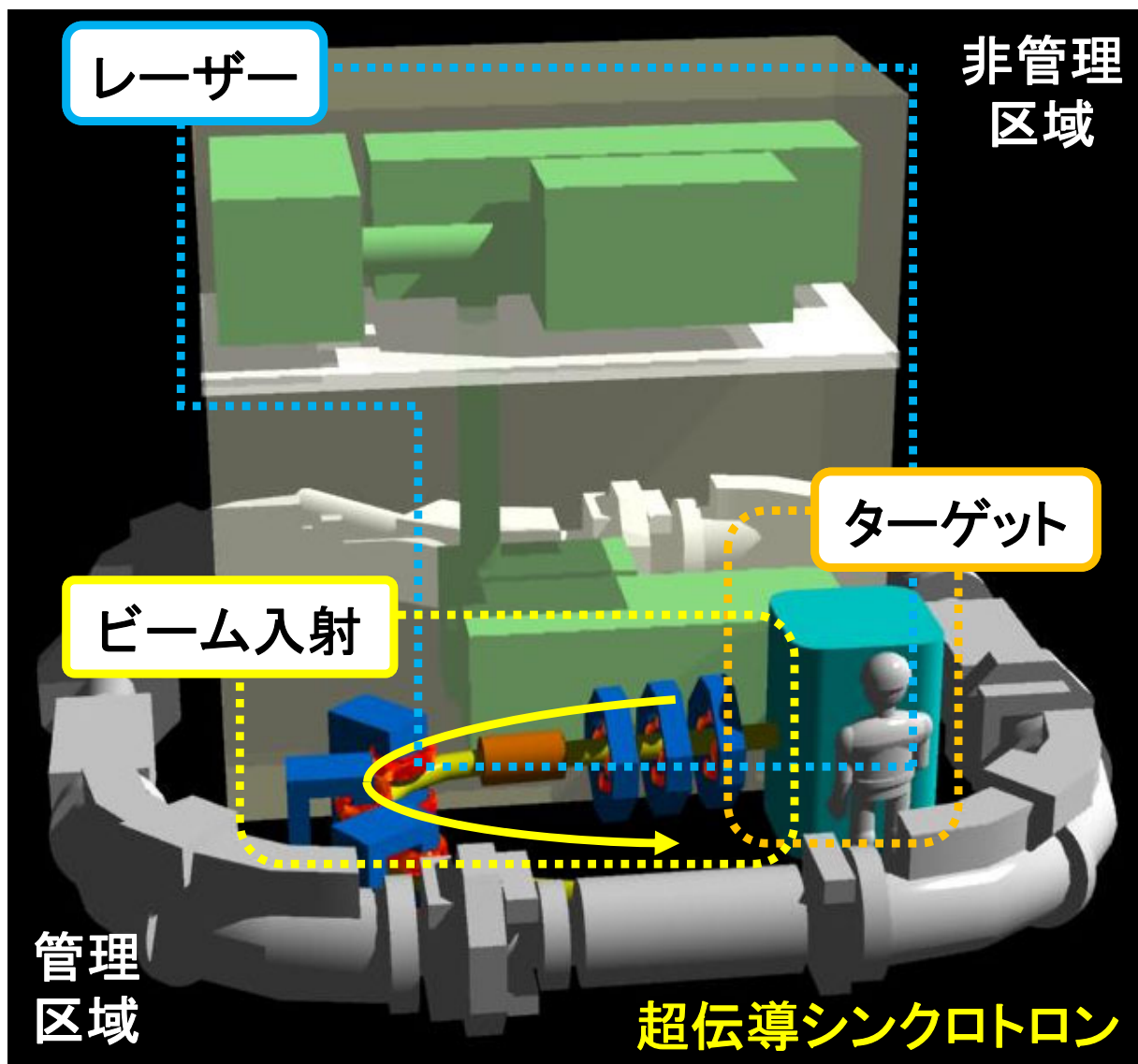
## 重粒子線がん治療施設



## 次世代重粒子線がん治療装置 (量子メス)



- 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)



## レーザー

高品質パルス  
パルスエネルギー  
繰り返し, etc.

## ターゲット

高純度炭素の繰り返し供給  
真空度、デブリ対策, etc.

## ビーム輸送・入射

有限立体角成分の捕集  
ビーム輸送  
バンチ圧縮(位相回転)  
真空度、モニター, etc.

## 相互作用

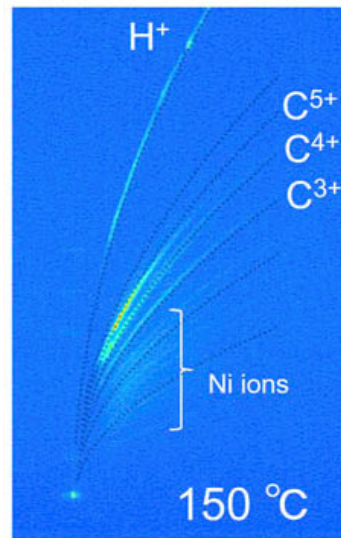
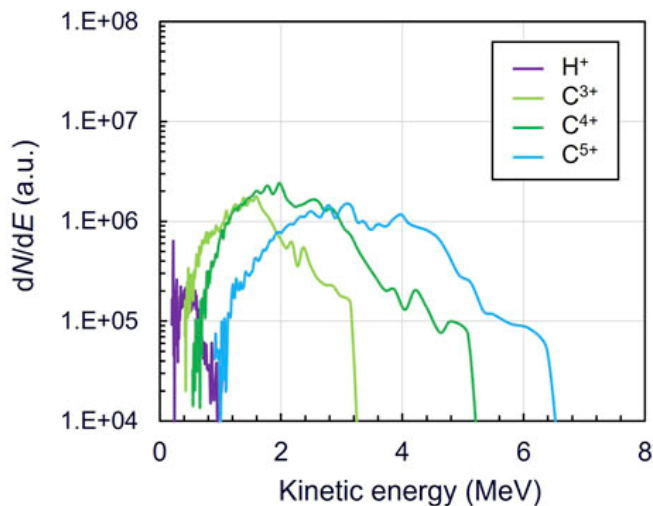
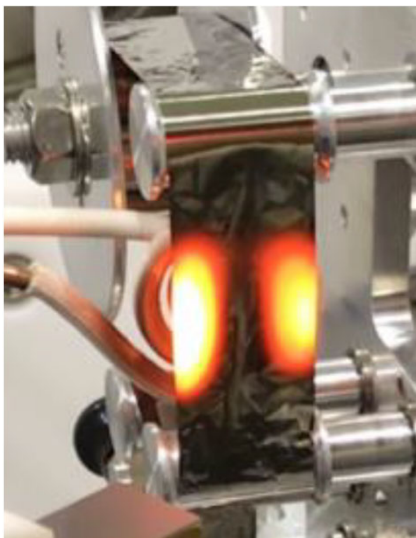
レーザーと薄膜プラズマ  
炭素ビーム発生特性  
レーザー仕様、効率, etc.





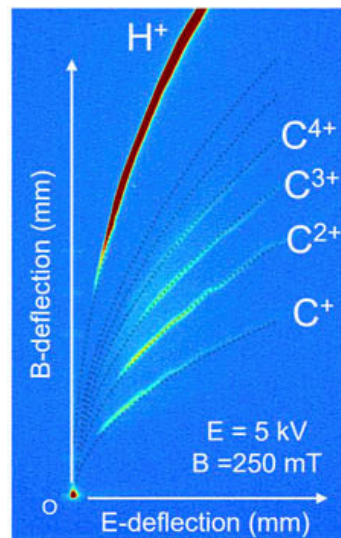
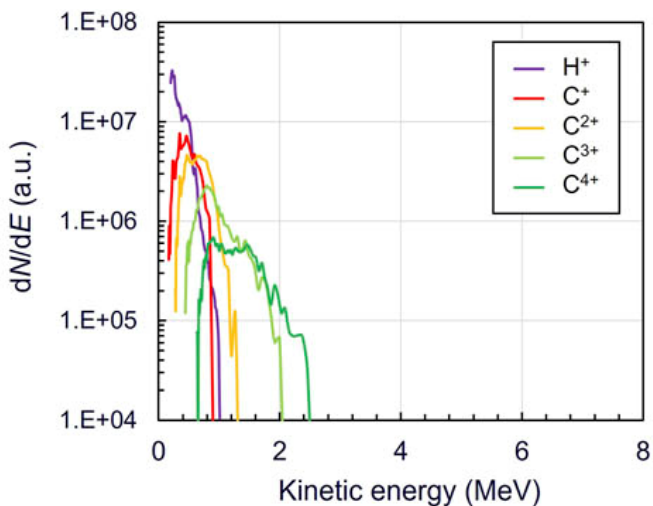
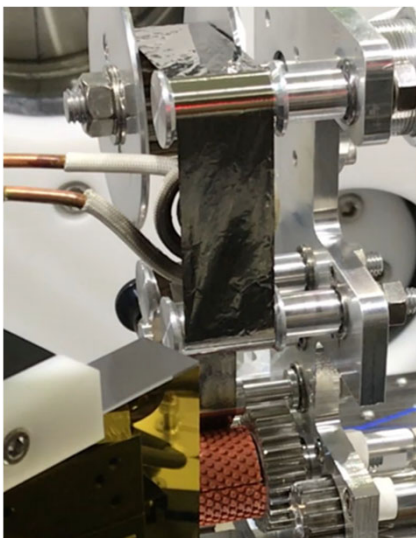
# ターゲット加熱による炭素イオンの高純度化

## ターゲット加熱 あり



ターゲットの加熱で  
プロトンを抑制、炭  
素を効率的に加速

## ターゲット加熱 なし



**Matter and Radiation at Extremes**  
极端条件下の物質と輻射

Vol. 8, Iss. 5, Sep. 2023  
ISSN 2468-2047  
eISSN 2468-080X  
CN 51-1768/04

**Induction heating for desorption of surface contamination for high-repetition laser-driven carbon-ion acceleration**

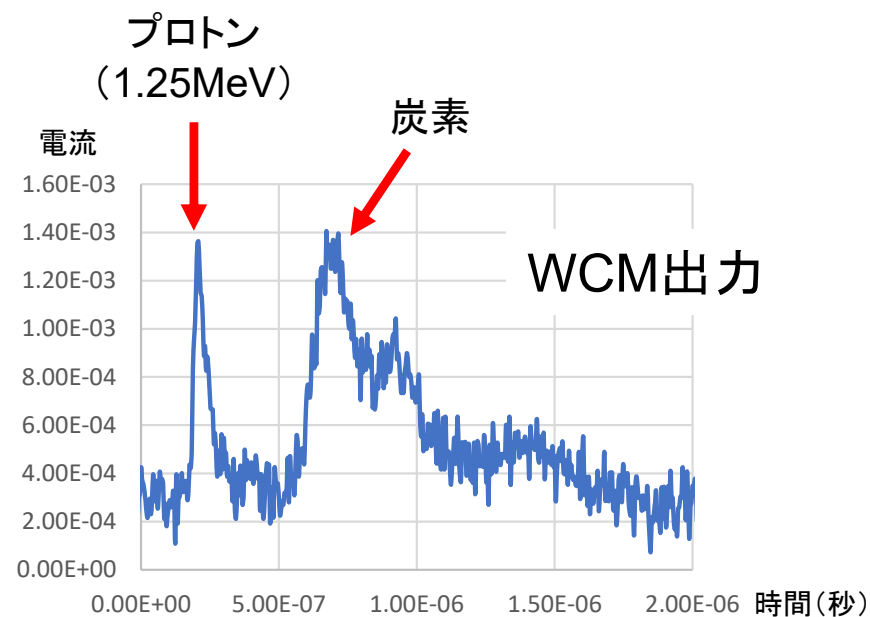
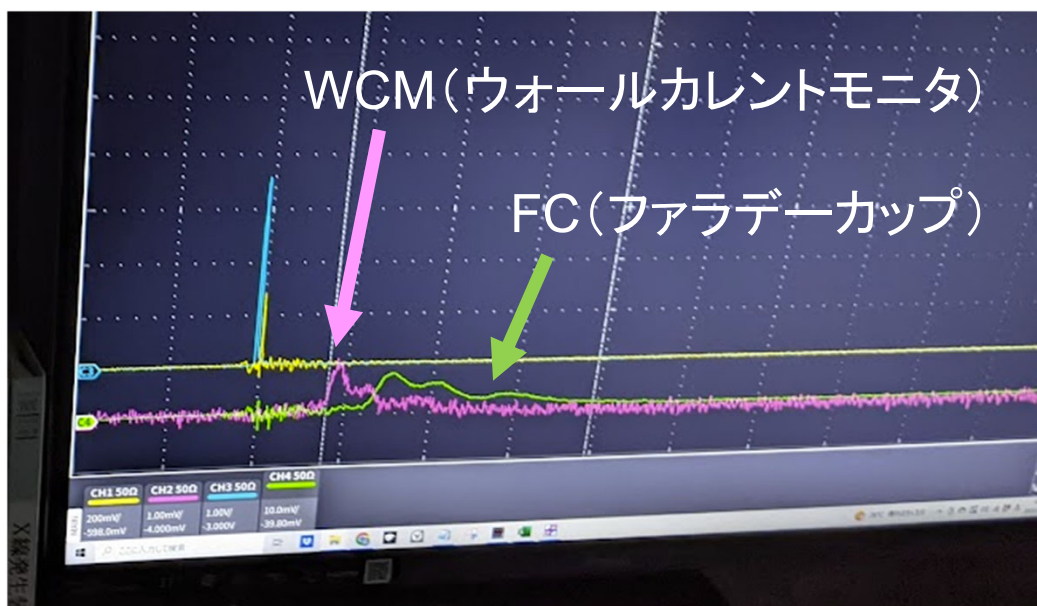
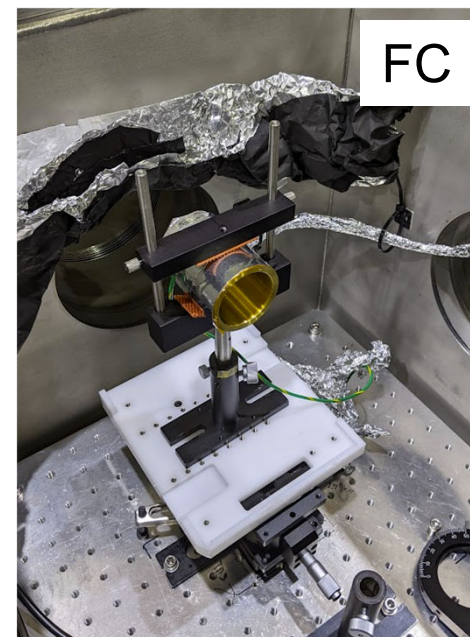
Sadaoki Kojima, Tatsuhiko Miyatake, Hironao Sakaki, Hiroyoshi Kuroki, Yusuke Shimizu, Hisanori Harada, Norihiro Inoue, Thanh Hung Dinh, Masayasu Hata, Noboru Hasegawa, Michiaki Mori, Masahiko Ishino, Mamiko Nishiyuchi, Kotaro Kondo, Masaharu Nishikino, Masaki Kando, Toshiyuki Shirai, and Kiminori Kondo

Available Online: [pubs.aip.org/mrpe](https://pubs.aip.org/mrpe)

Science and Technology Information Center, China Academy of Engineering Physics  
Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics  
Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics  
Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

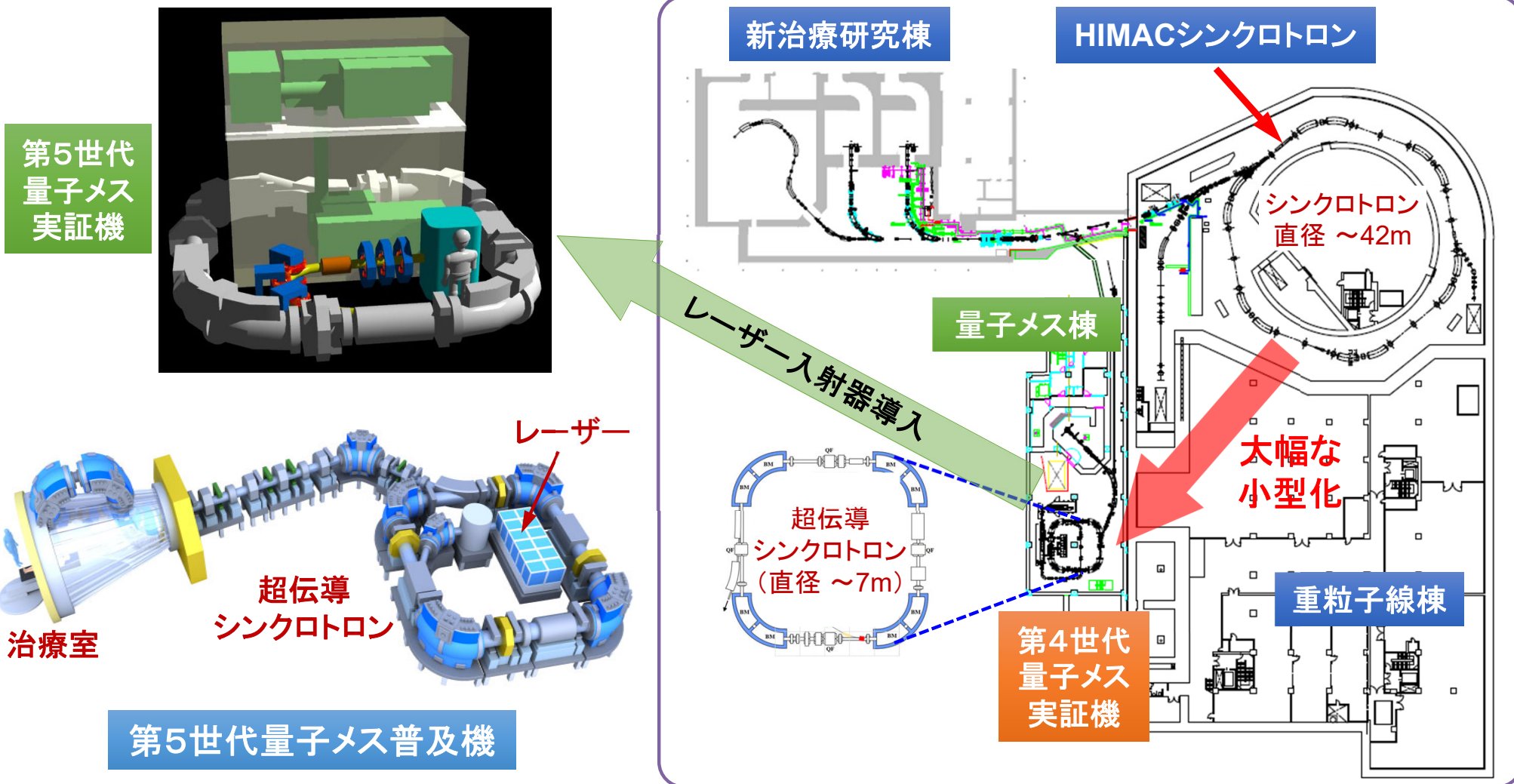
S. Kojima, H. Sakaki, et al.,  
Matter and Radiation at  
Extremes, 8, 054002, 2023

# イオンビーム輸送実験結果の一例



# QST量子メスプロジェクトにおける位置づけ

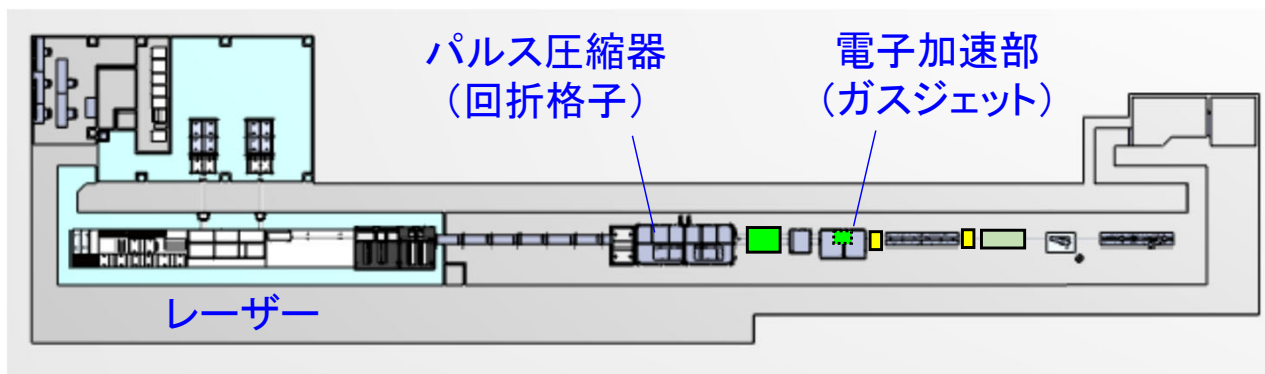
- QST稲毛に量子メス棟の建設を開始、今年度(2024年度)完成予定
- 超伝導シンクロトロンを開発・導入し、第4世代量子メス実証機を建設
- レーザー入射器の導で第4世代を更に小型化、第5世実証機とする



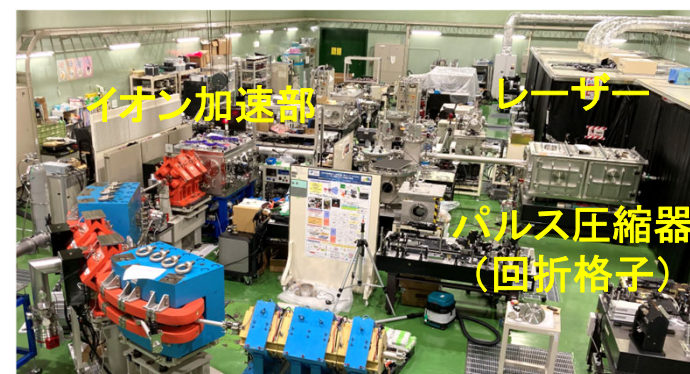
- レーザーによる電子加速
- レーザーによるイオン加速
- 高強度レーザー技術開発

# 高強度レーザー技術開発 成果概要

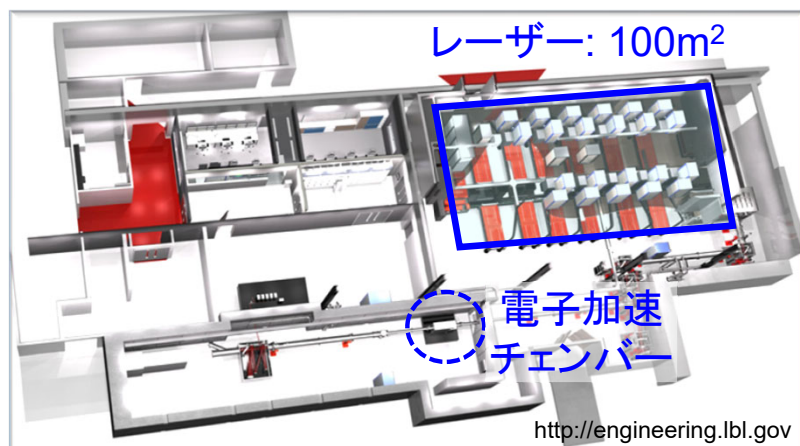
- レーザー加速は従来の1千倍超の加速勾配を持ち、システム小型化に期待
- 加速部に比べてレーザーが巨大、レーザーの小型化・高効率化開発が必須
- 光学部品も大型で高価、高耐力素子開発によるシステム小型化を目指す



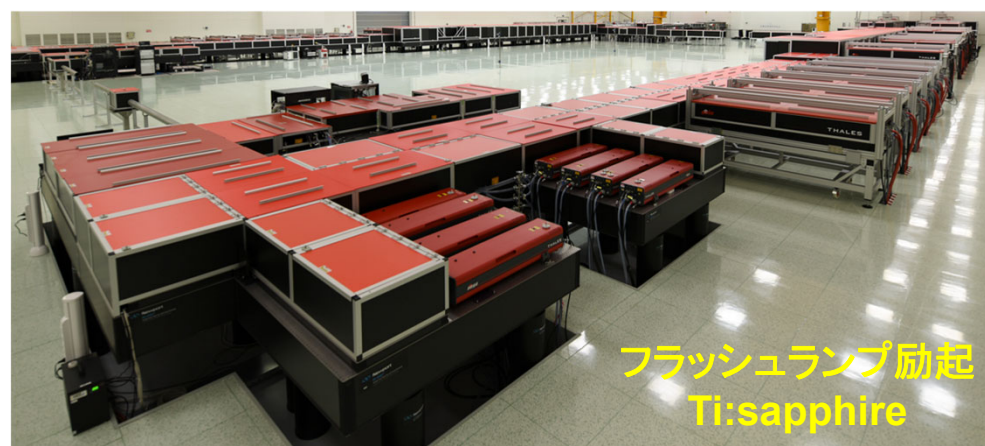
電子加速プラットフォーム(播磨)



イオン加速プラットフォーム(関西研)

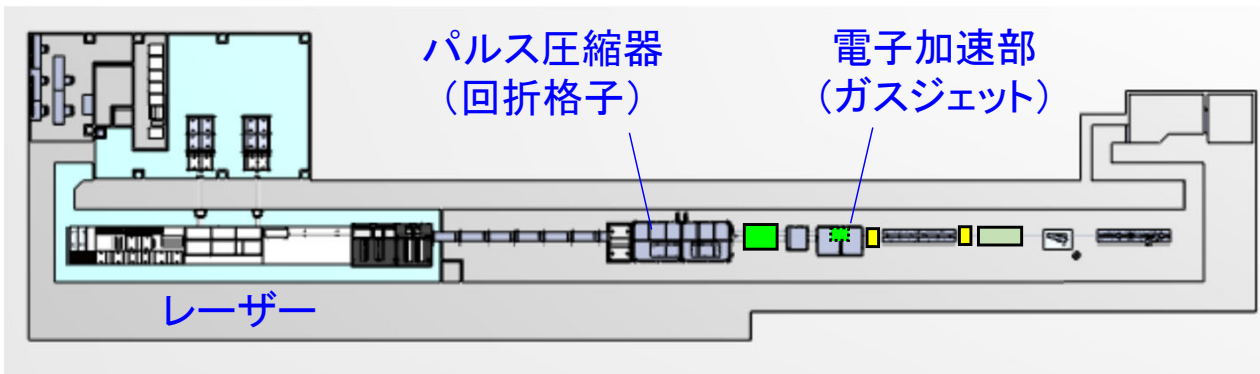


BELLA(米LBNL)



10 PW レーザー(ルーマニア ELI-NP)

- 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



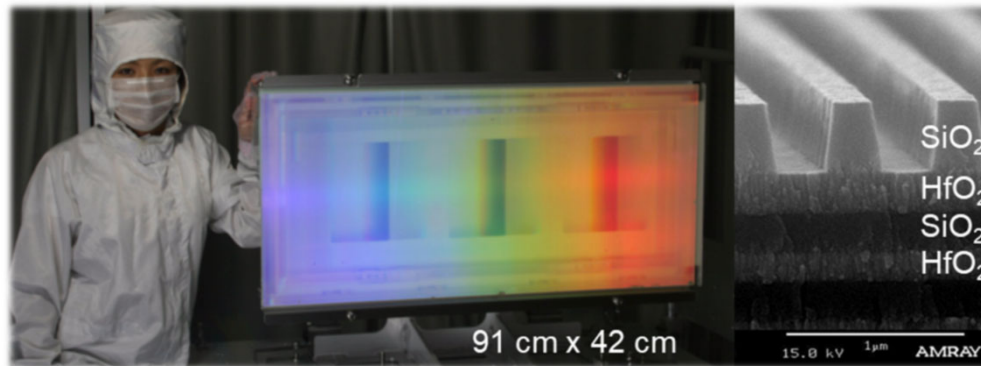
電子加速プラットフォーム (SPring-8)

高出力レーザー用回折格子

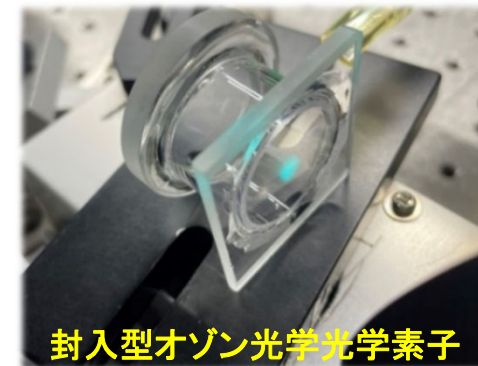


イオン加速プラットフォーム (関西研)

超高耐力光学素子 (オゾン素子) 開発



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

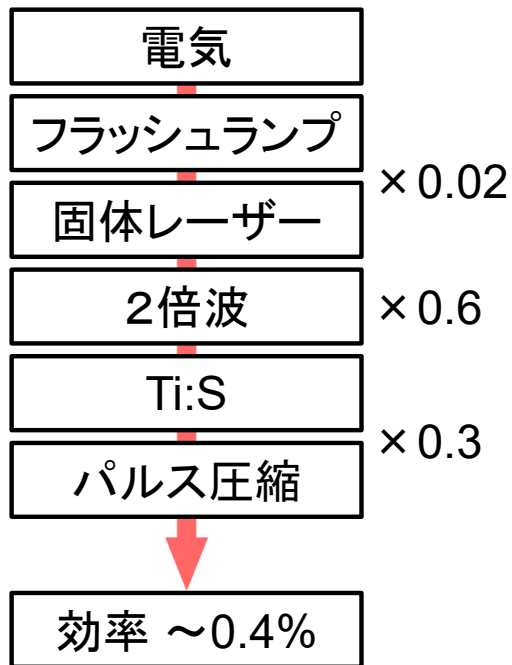


損傷閾値 (LIDT) の系統的な評価と改善

# 加速用レーザーの小型・高効率化

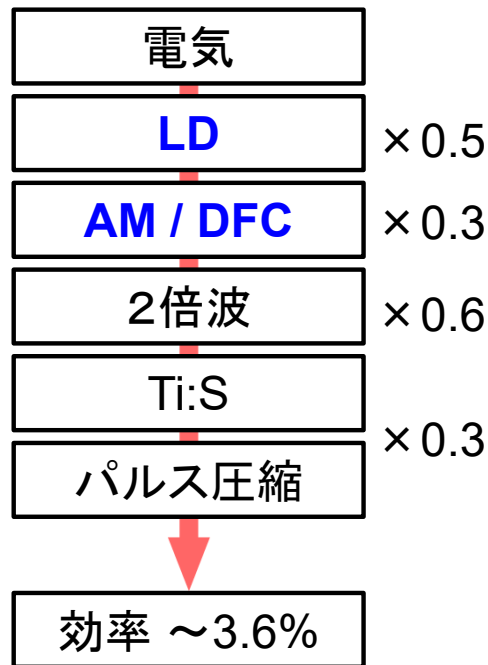
## POC

フラッシュランプ励起 Ti:S



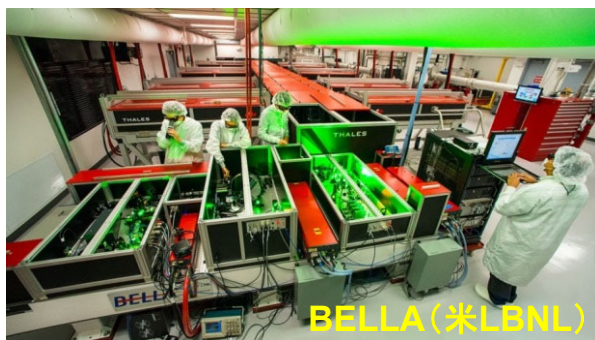
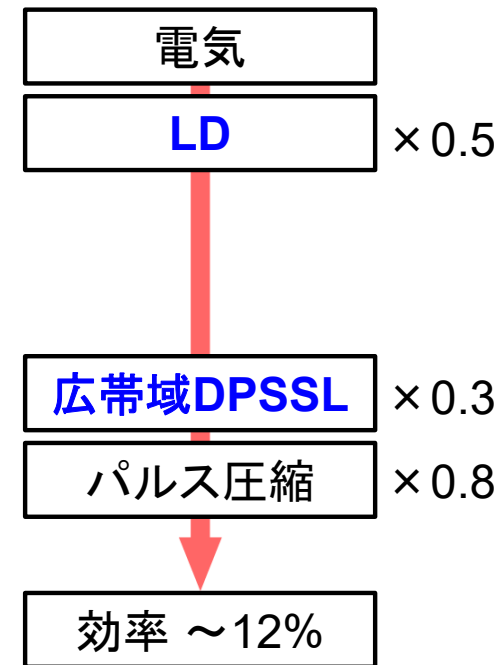
## 次世代

LD励起: 高繰返し(Ti:S)

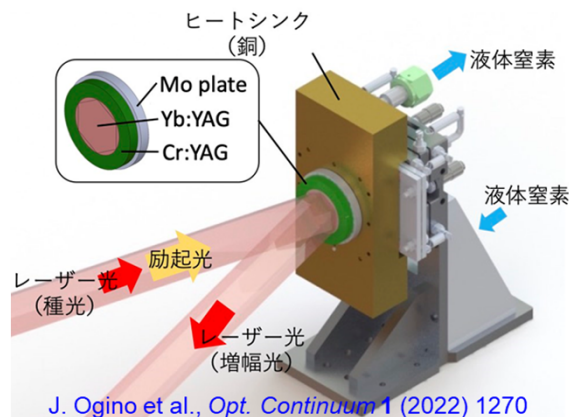


## 次々世代

新媒質: 高効率



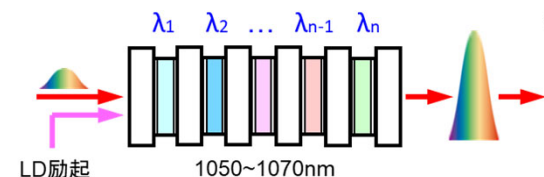
Ti:sapphire 10 PW レーザー



Yb:YAG アクティブミラー

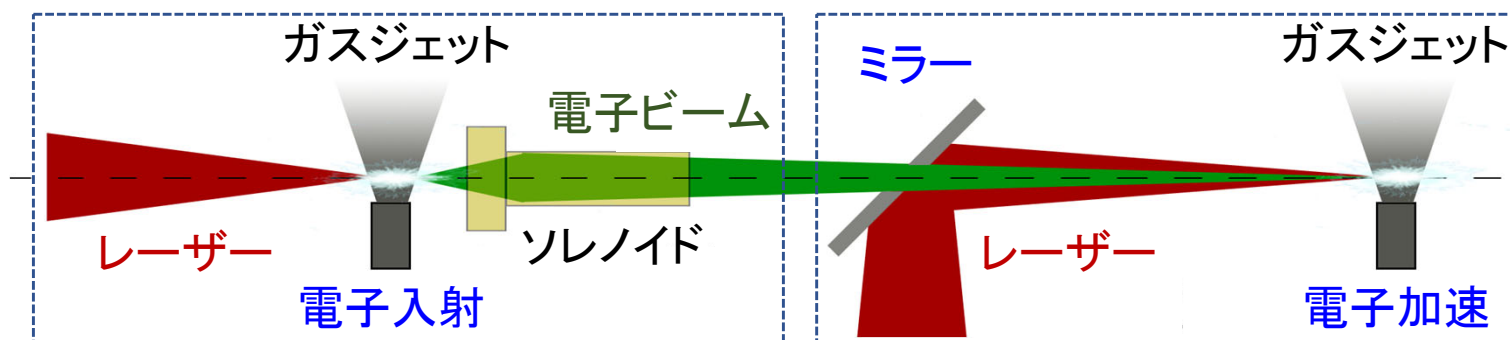
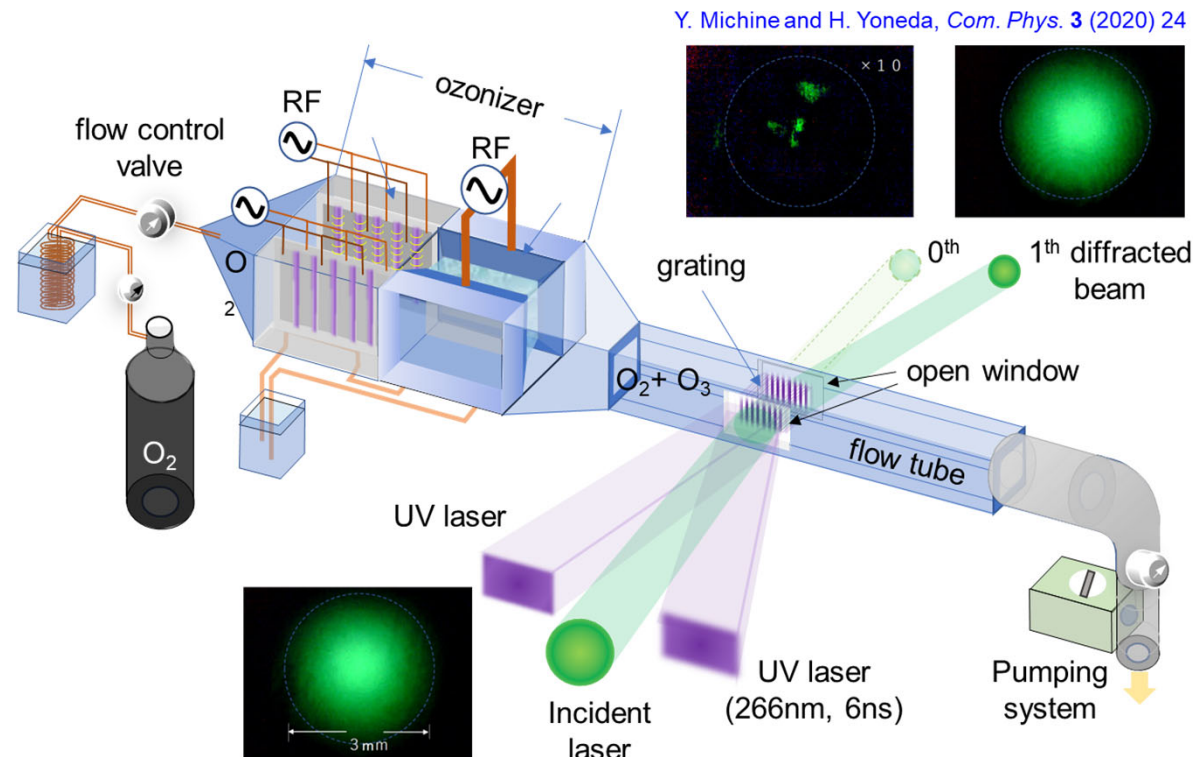
広帯域レーザー媒質 (セラミックス)

スペクトル合成による広帯域化

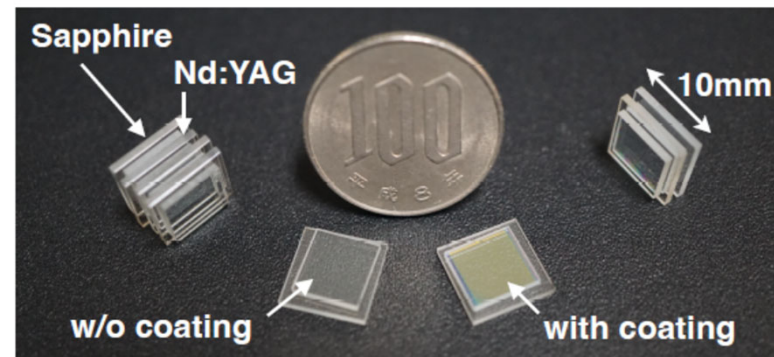
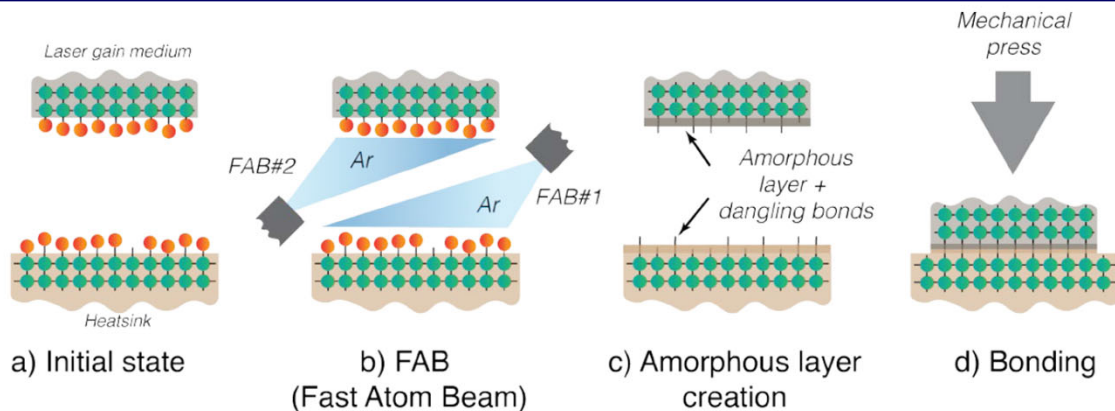




- オゾンガス光学素子 ( $1\text{kJ}/\text{cm}^2$ )
  - ✓ 高耐力ミラー (電子多段加速)
  - ✓ 回折格子 (電子・イオン加速)
  - ✓ 空間フィルター (レーザー)
  - ✓ デブリシールド (イオン加速)
  - ✓ レーザー加工への展開、など
- 高耐力光学薄膜 ( $100\text{J}/\text{cm}^2$ ) による光路縮小、システム小型化

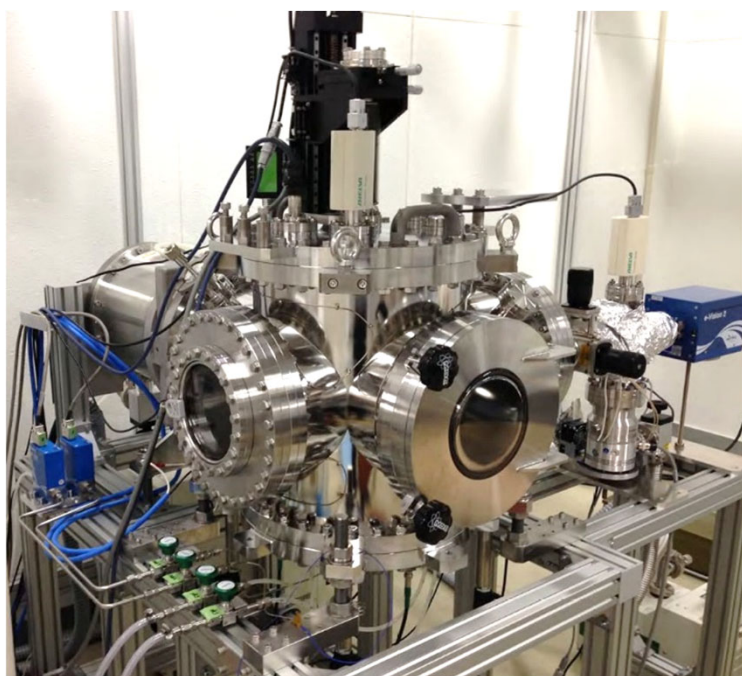


電子多段加速：ミラーとガスジェットの距離を短くしたい

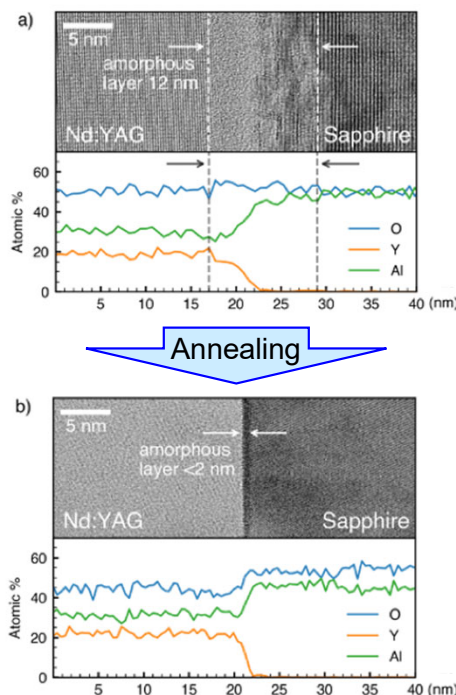


## 表面活性とアモルファス層による常温接合

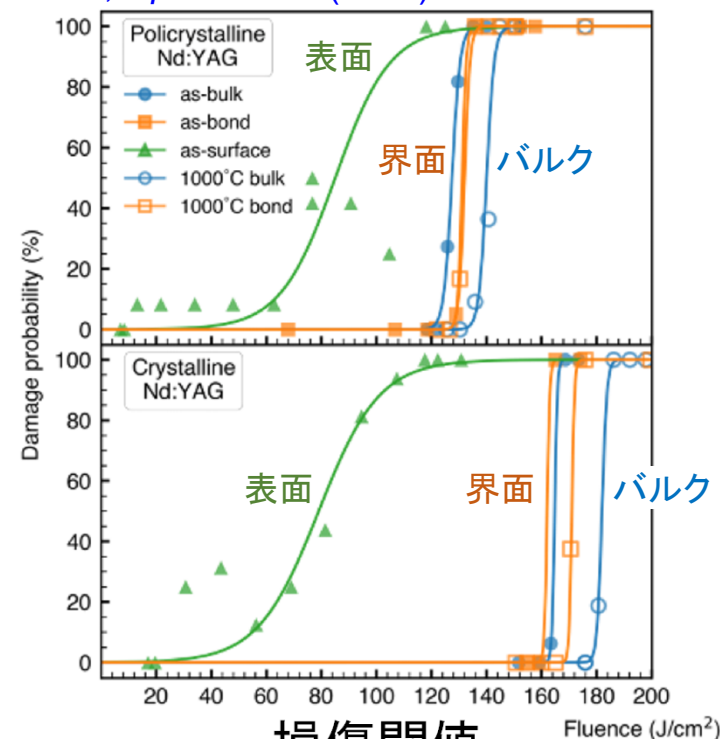
A. Kausas and T. Taira, *Opt. Lett.* **47** (2022) 3067



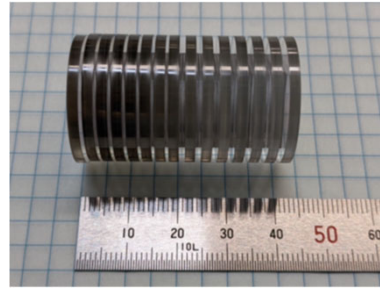
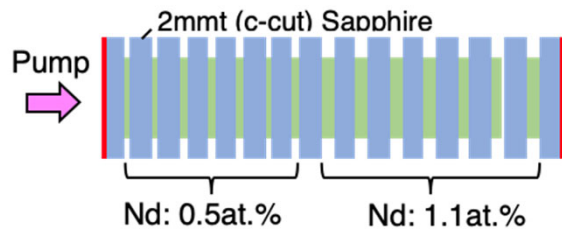
常温接合装置



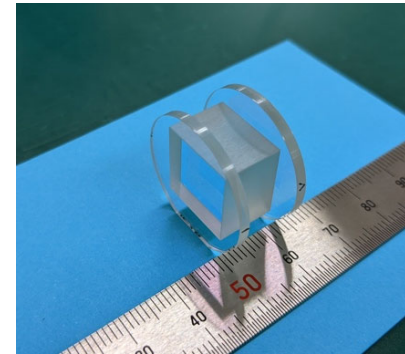
界面の TEM / EDX



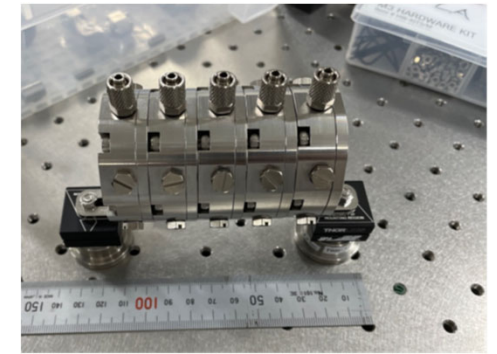
損傷閾値



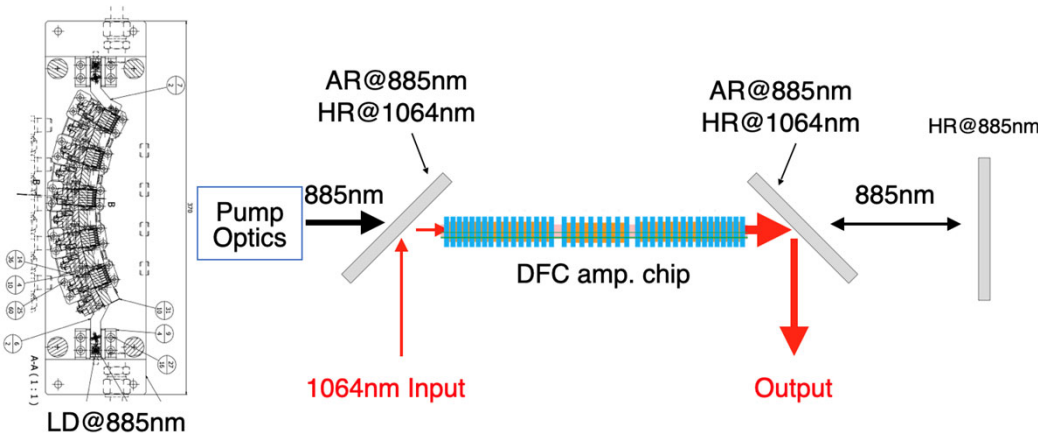
DFCチップ



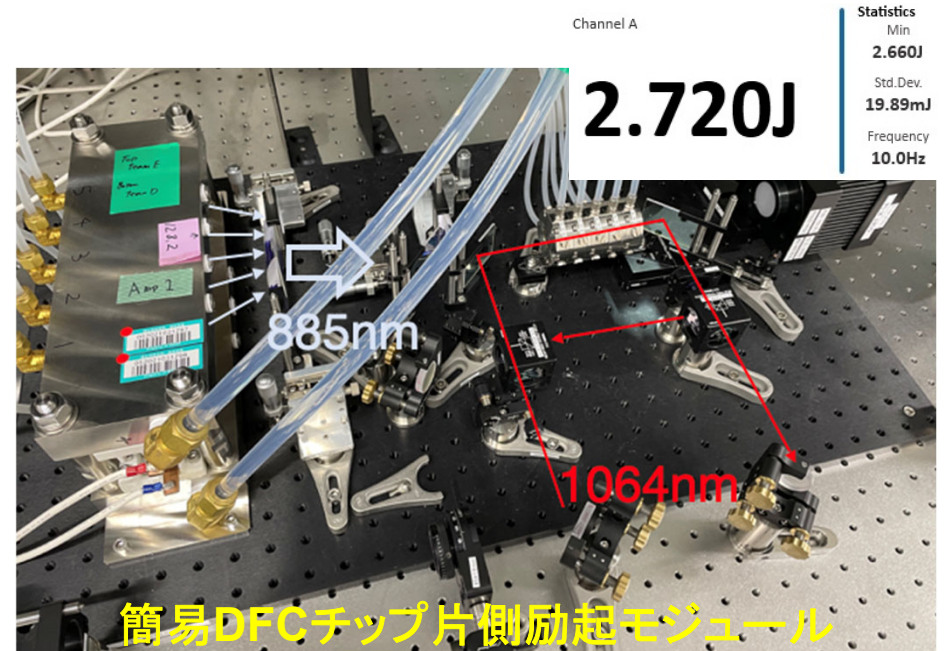
簡易DFCチップ



水冷ジャケット

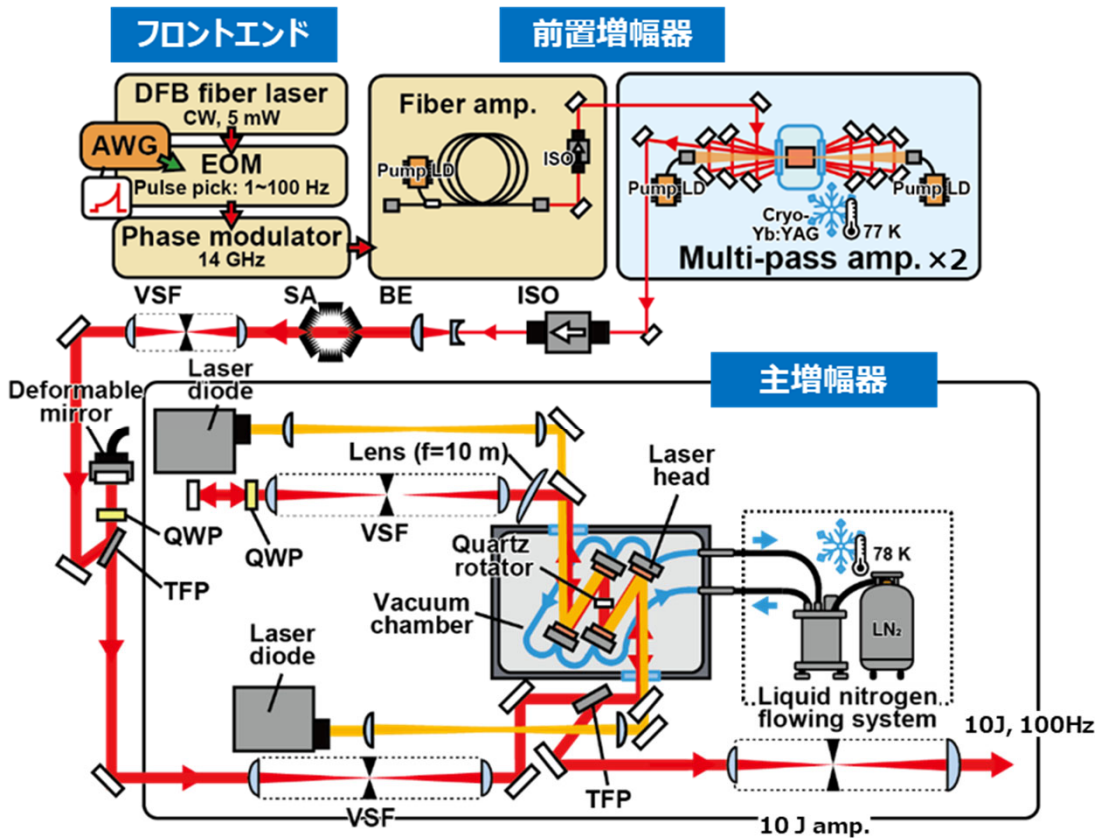


DFCチップ片側励起モジュール

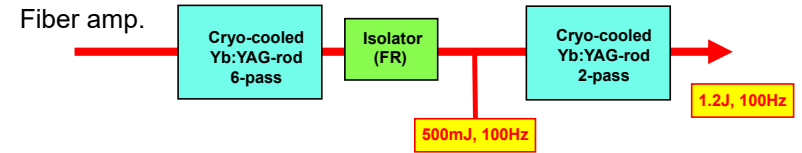


簡易DFCチップ片側励起モジュール

簡易DFC(ブロック)で > 2J × 10Hz、DFCで > 2J × 25Hz を達成



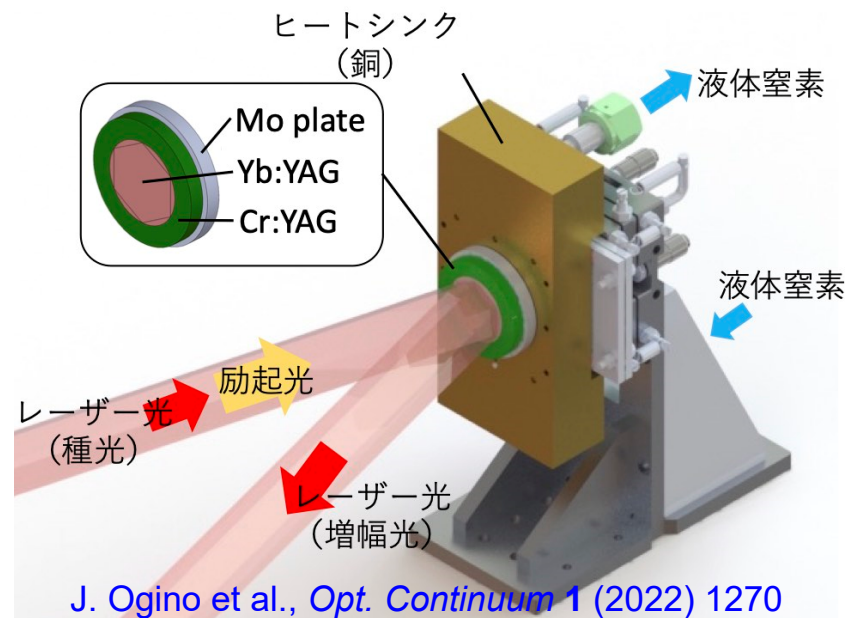
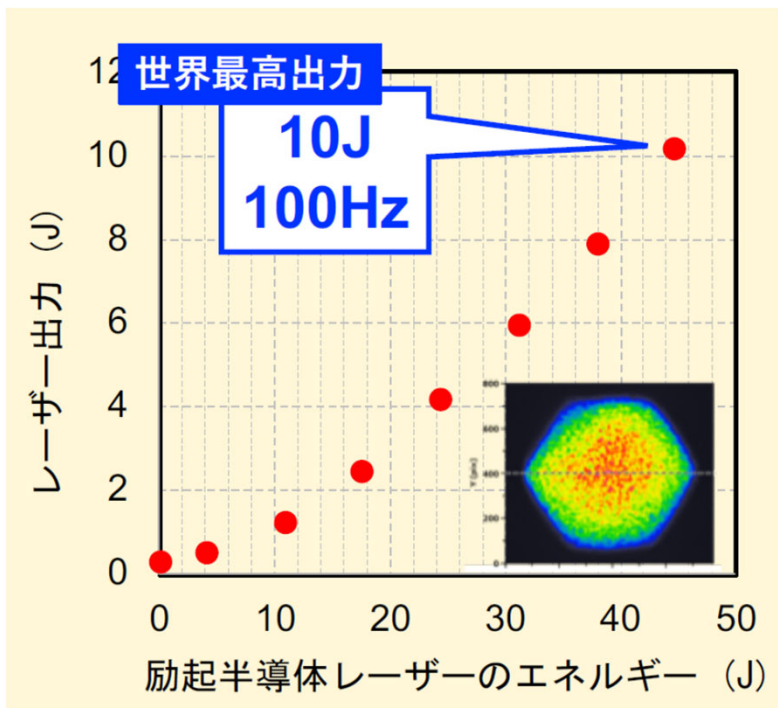
非公開



Yb:YAGロッド増幅器の構成

非公開

- 10J級では世界最高平均出力(1kW)
- 独自技術で実現した世界初の5cm級熱伝導冷却型アクティブミラー
- 純国産(5社以上の国内企業の連携)



Yb:YAG アクティブミラー

- 次世代加速用 Ti:sapphire レーザー (10J, 100TW, 100fs, 100Hz) 向けの励起レーザーとして活用可能



30 × 35 × 40 cm



- 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)
- 将来の小型XFELを目指した「電子加速」、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
- ステージ1～2(2017～23年度)の主要な開発成果
  - ✓ 電子加速: 安定な電子入射器の開発、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)入射器
  - ✓ 要素技術開発、加速～輸送の一連のシステム動作
  - ✓ 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など
- ステージ2までの成果を基に、ステージ3(2024～26年度)の目標(POC)を達成するとともに、産業界との連携・共創による技術の高度化・成熟化とシステム化を推進し、社会課題の解決に貢献していく