

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9月1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 —

- Pj 紹介：加速原理、開発目標・体制
- 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

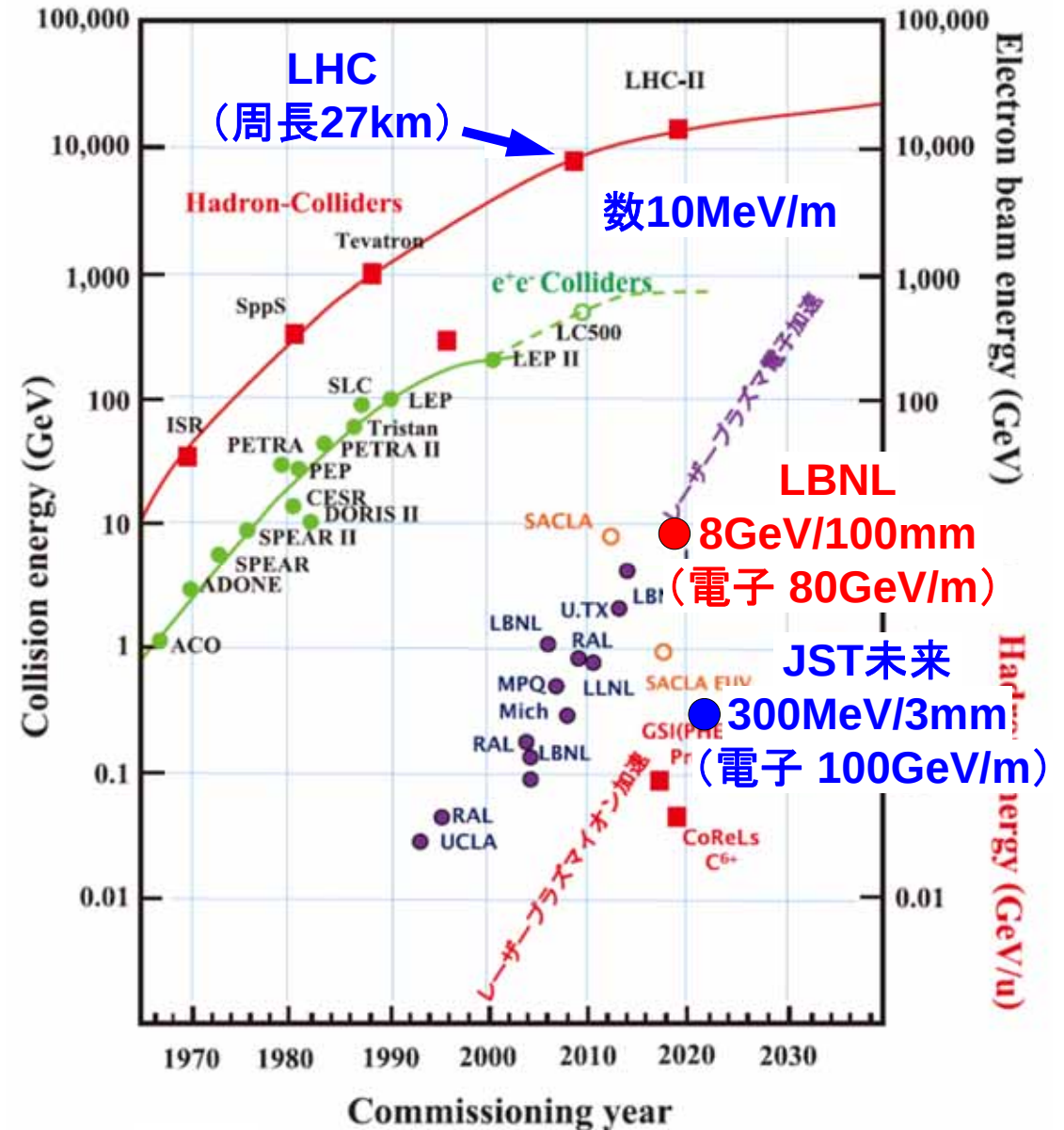
- 新物質・新材料の探索・創製
- 分析、非破壊検査、年代測定
- 育種、滅菌・殺菌、重合、架橋
- 荷物検査、セキュリティー
- 創薬、粒子線がん治療



www.zmescience.com/science/physics/lhc-produces-first-results

LHC(陽子・陽子衝突型リング 周長27km)

LHC(陽子・陽子衝突型リング 周長27km)



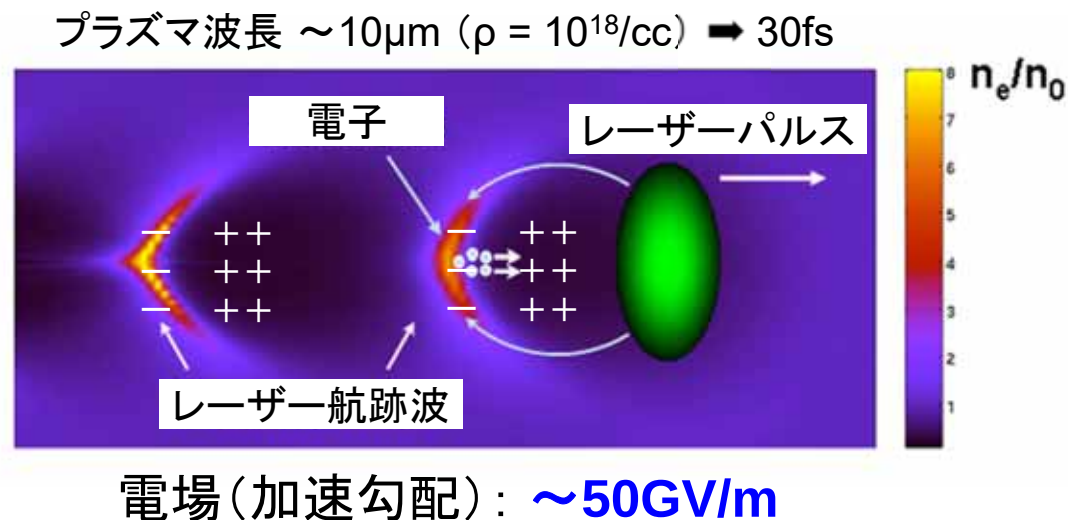
レーザー加速は従来の1千倍超の加速勾配 ➡ 加速器を小型化するポテンシャル

「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

■ 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。

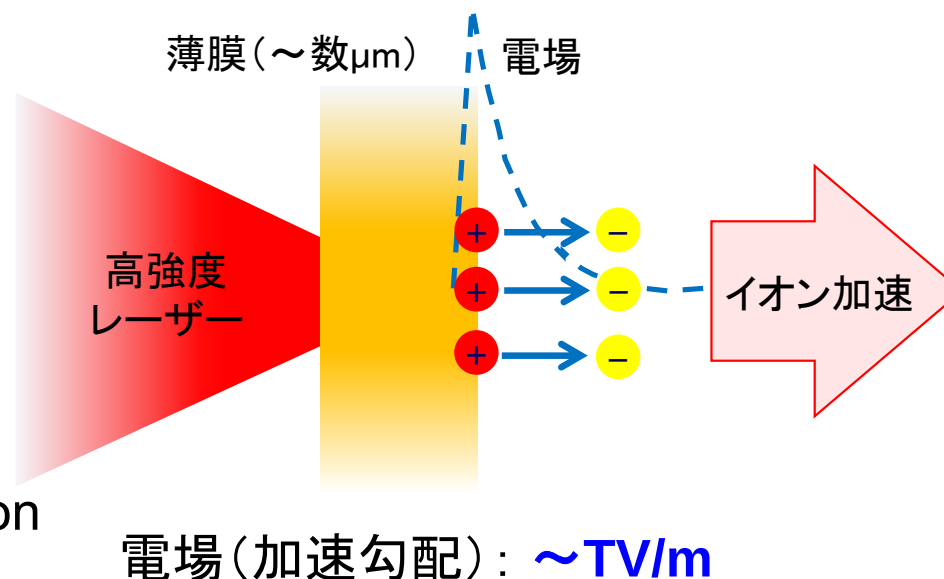
LWFA: Laser Wake-field Acceleration



■ 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

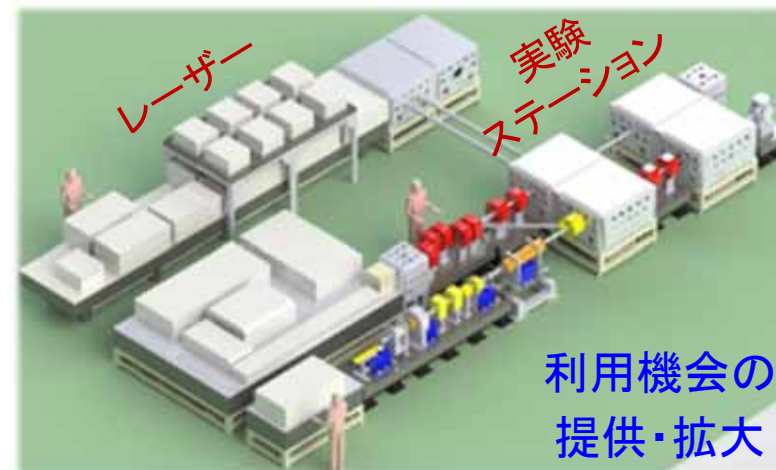


レーザープラズマ加速の社会実装イメージ

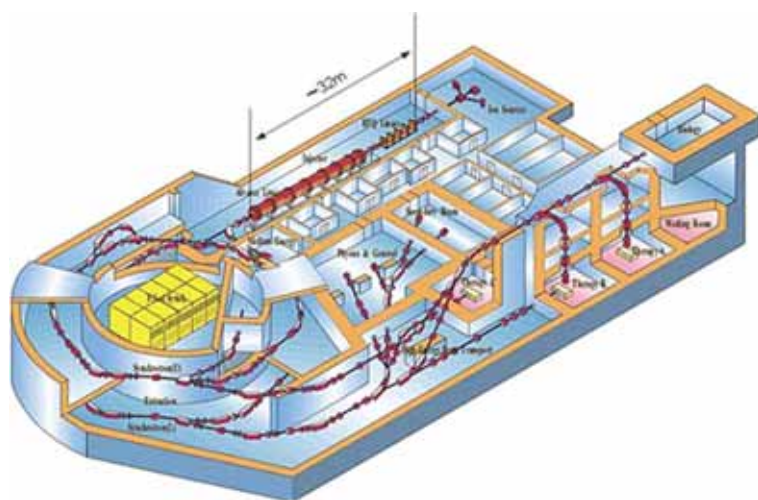


X線自由電子レーザー SACLA

レーザー加速



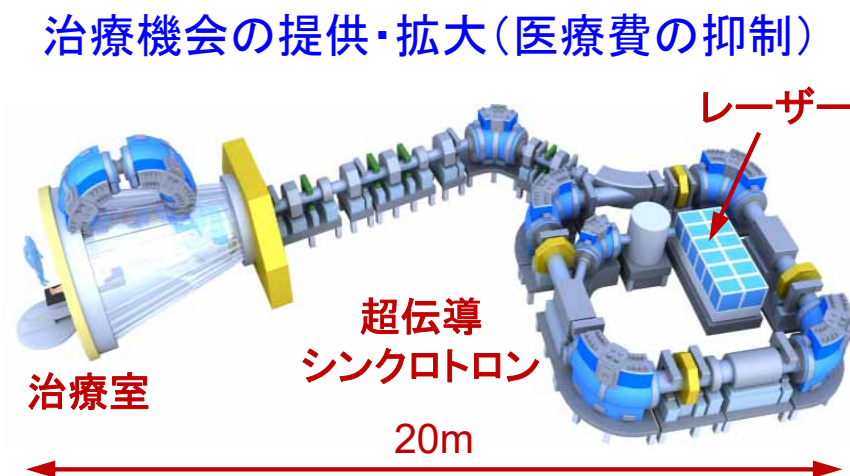
次世代X線自由電子レーザー(XFEL)



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)

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：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

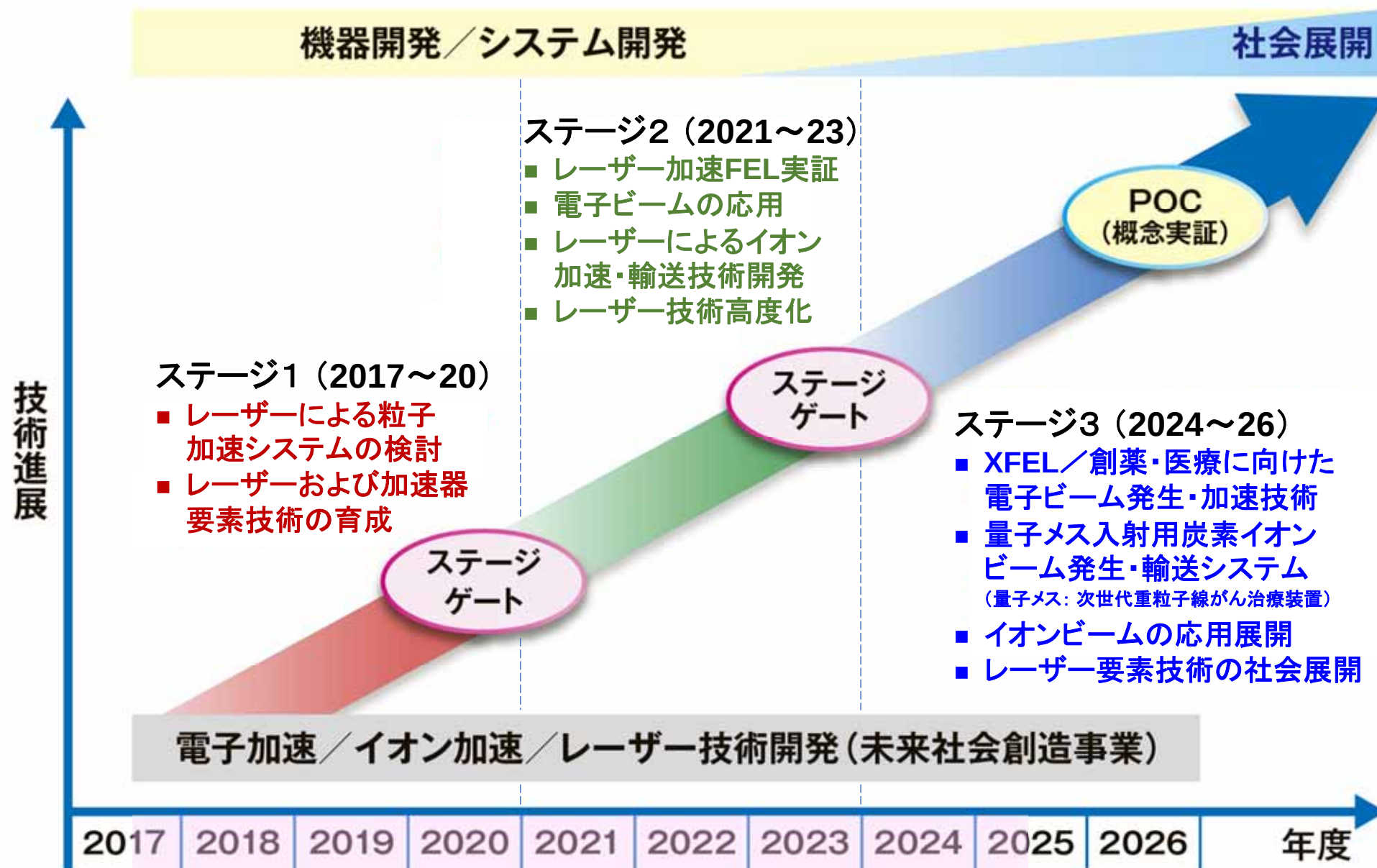
ステージ2(2021～23年度)の成果

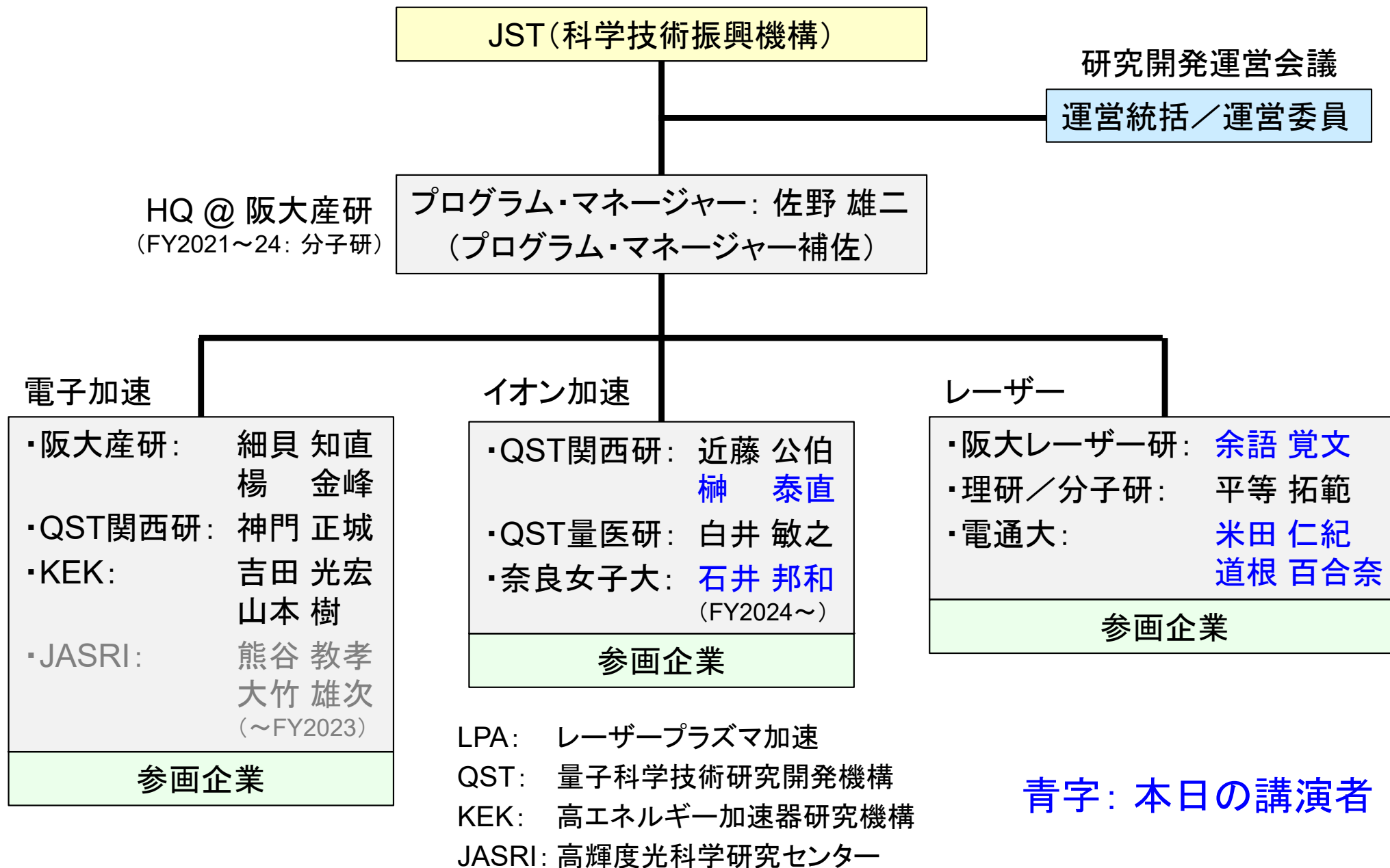
- 電子加速 XUV波長域のFEL発振、電子ビームの創薬・医療応用に着手
- イオン加速 入射器に必要な一連の動作確認(イオン発生・輸送・検出)
- レーザー 高出力パルスレーザー要素技術の開発・産業展開

ステージ1(2017～20年度)の成果

- 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

LPA プロジェクトのロードマップ



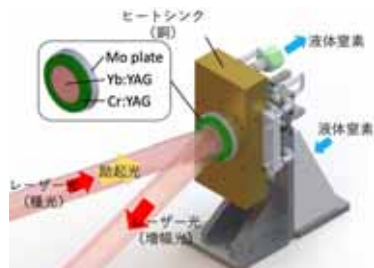


青字: 本日の講演者

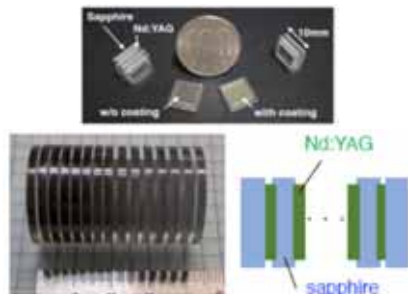
本日の講演の位置づけ

レーザー開発

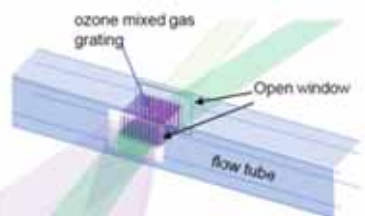
アクティブミラーによる
高平均出力レーザー



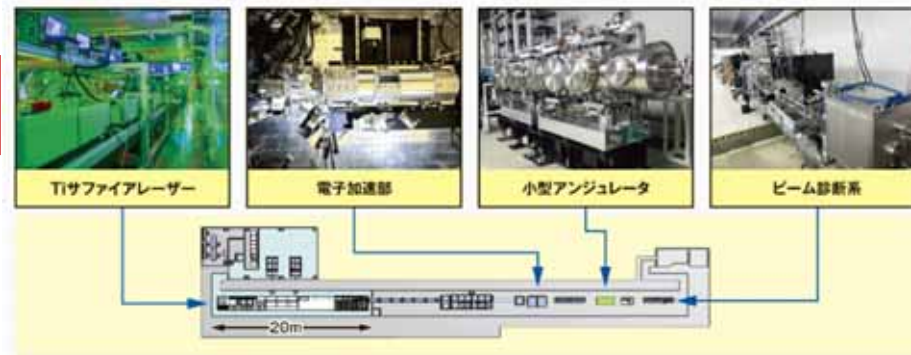
常温接合による小型
高出力レーザーチップ



長期信頼性光学素子
超高耐カガス光学素子

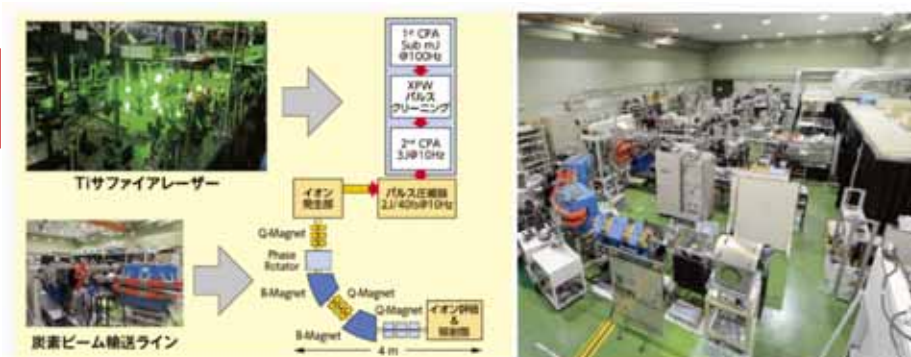


電子加速プラットフォーム(播磨)



- 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

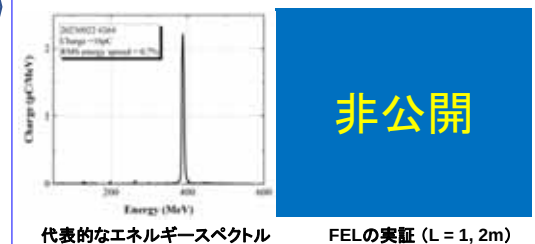
イオン加速プラットフォーム(木津)



- 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

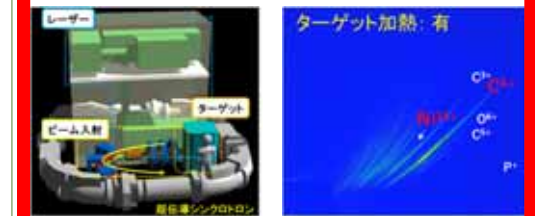


電子ビームの創薬・
医療応用

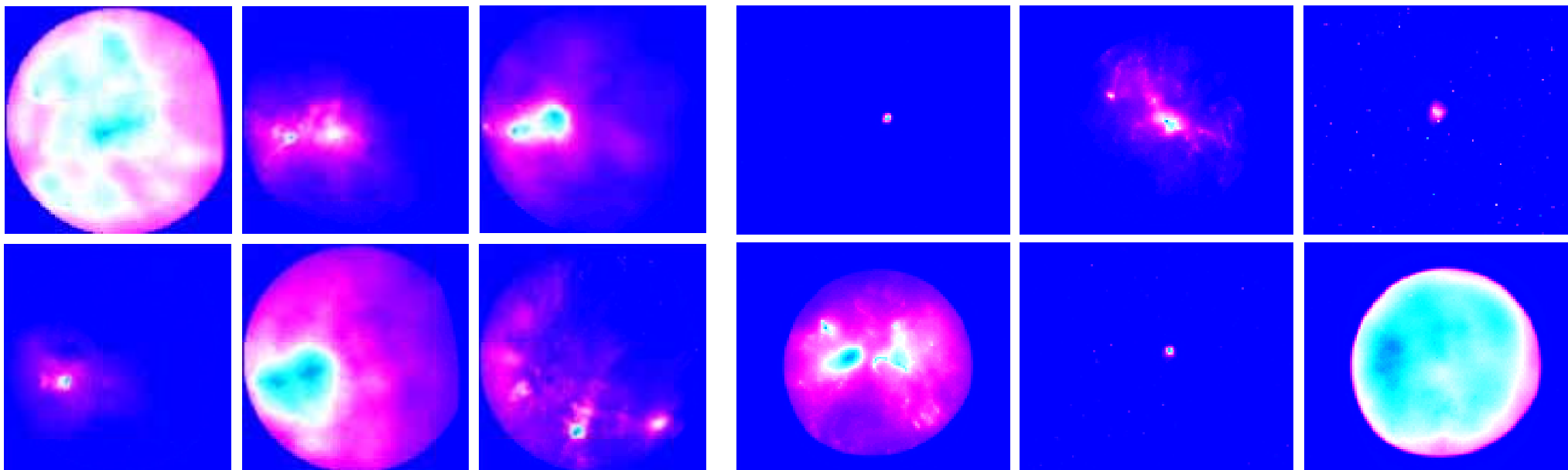


イオン加速／応用

入射器に必要な一連の
動作確認と新しい応用

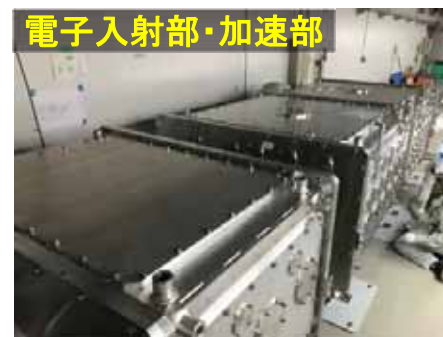
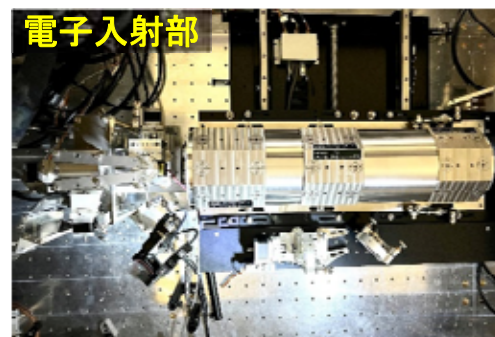
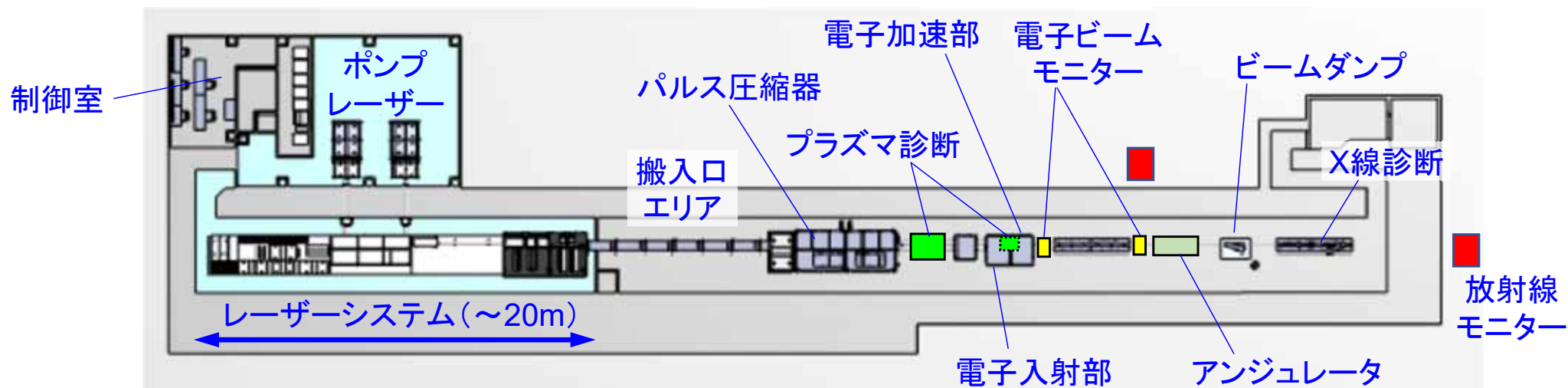
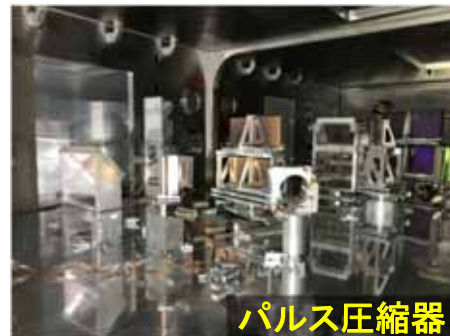


レーザーによる電子加速

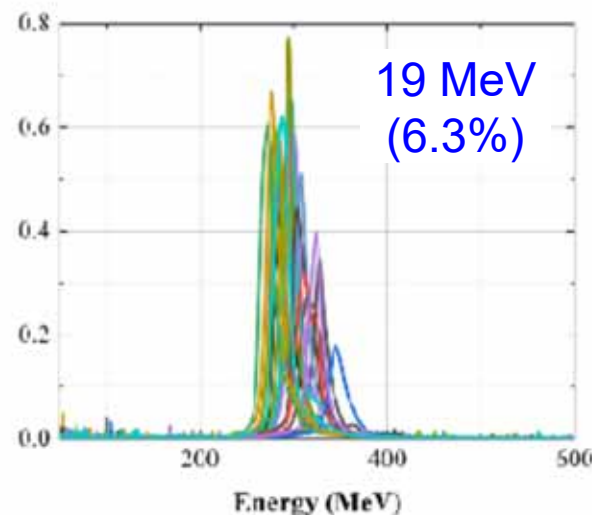
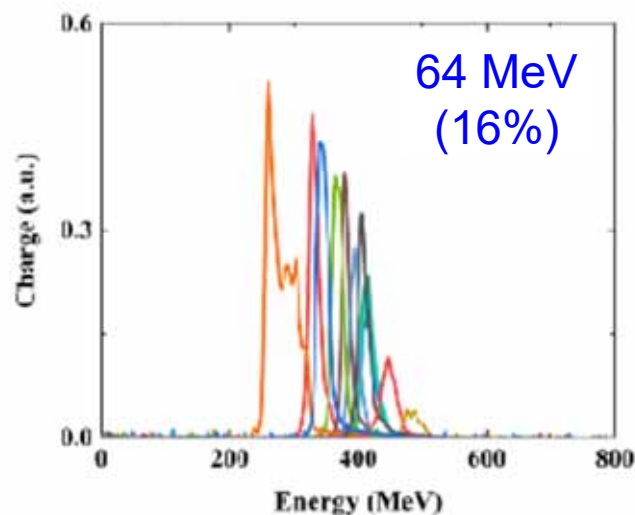


十数年前のレーザー加速電子(ビーム?)

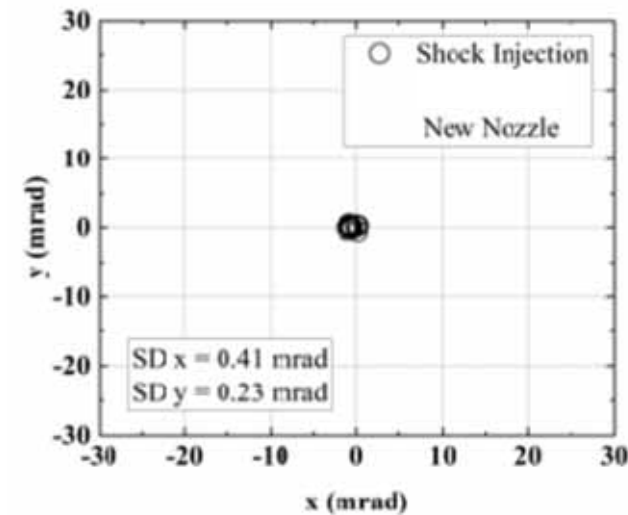
電子加速プラットフォーム（理研播磨地区）



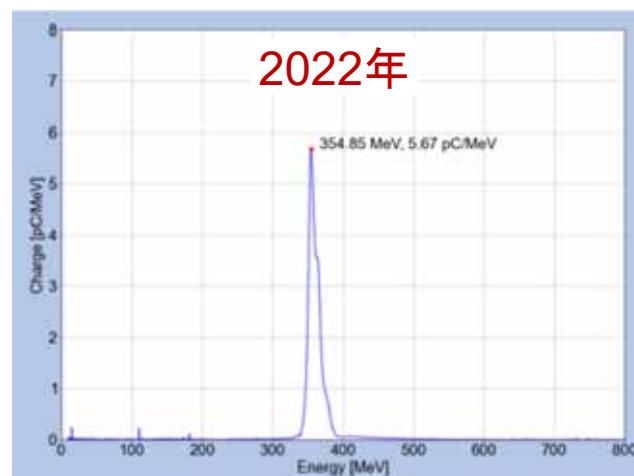
レーザー加速電子ビームの性能向上



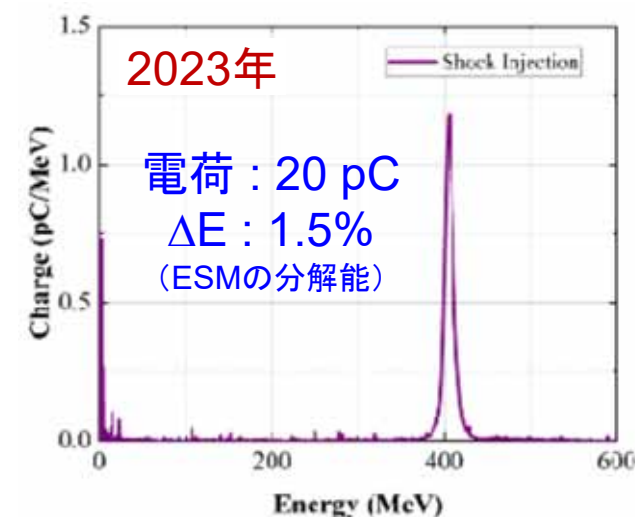
加速エネルギー安定性



電子ビームの位置安定性



エネルギースペクトル



レーザー電子加速 ベンチマーク

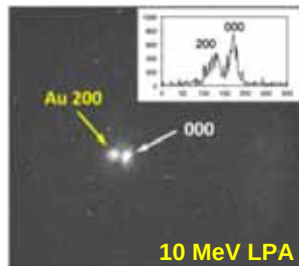
	JST未来	SIOM (中国)	Hamburg (独)	HZDR/SOLEIL (独/仏)	LBNL (米国)
レーザー パワー	23 TW (小型) (0.5 J, 22 fs)	200 TW (~4.8 J, 24 fs)	50 TW (2 J, 42 fs)	70 TW (2.1 J, 30 fs)	850 TW (31 J, 35 fs)
入射方式	衝撃波入射	衝撃波入射	イオン化入射	イオン化入射	自己入射
電子 エネルギー	360 MeV (±6%)	490 MeV	368 MeV (±2.4%)	188 MeV (±3.2%)	7.8 GeV
エネルギー 拡がり(rms)	0.59% 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)	・ノイズなし ・FEL増幅 (50 nm)	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

レーザー加速による電子ビームの応用

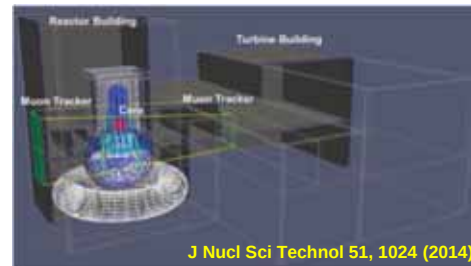
Phys Rev Accel Beams 22, 074701 (2019)



電子線ラジオグラフィ(～50MeV LPA)



電子線回折(10MeV)



ミュオン生成(GeV電子)

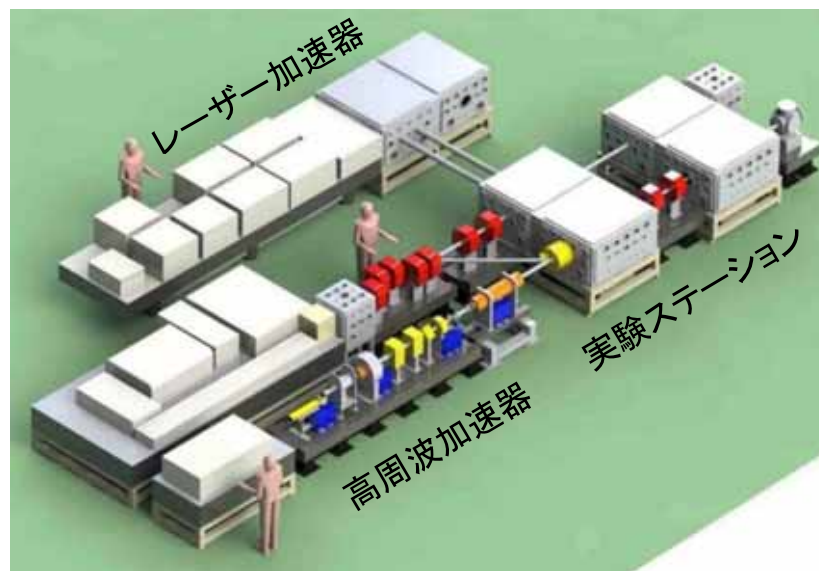


FEL(400MeV LPA)



30MeV ライナック(数十mの建屋)

レーザー加速



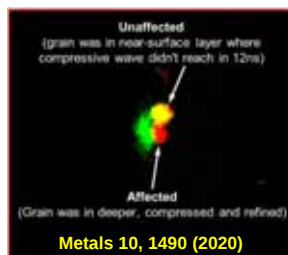
単機能化



小型電子加速器
(400MeV LPA)



電子蓄積リング(光源利用)



材料評価(ポンププローブ実験)



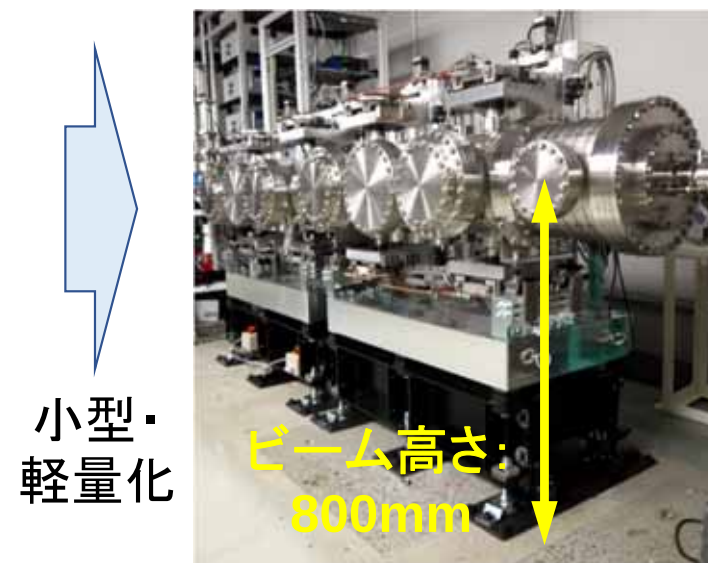
電子ビームの創薬・医療応用
(プロドラッグ活性化)

「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
— イオン加速システムとハイパワーレーザーの開発 — 2025/09/01開催



旧SCSS 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



JST未来アンジュレータ(1m×2)

非公開

非公開

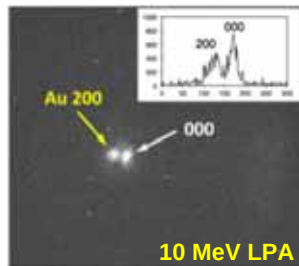
非公開

レーザー加速による電子ビームの応用

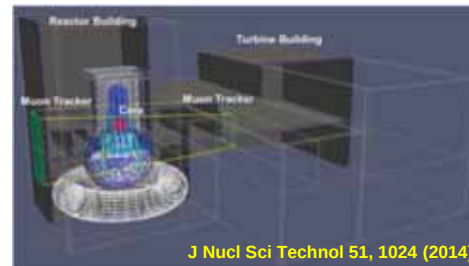
Phys Rev Accel Beams 22, 074701 (2019)



電子線ラジオグラフィ(～50MeV LPA)



電子線回折(10MeV)



ミュオン生成(GeV電子)

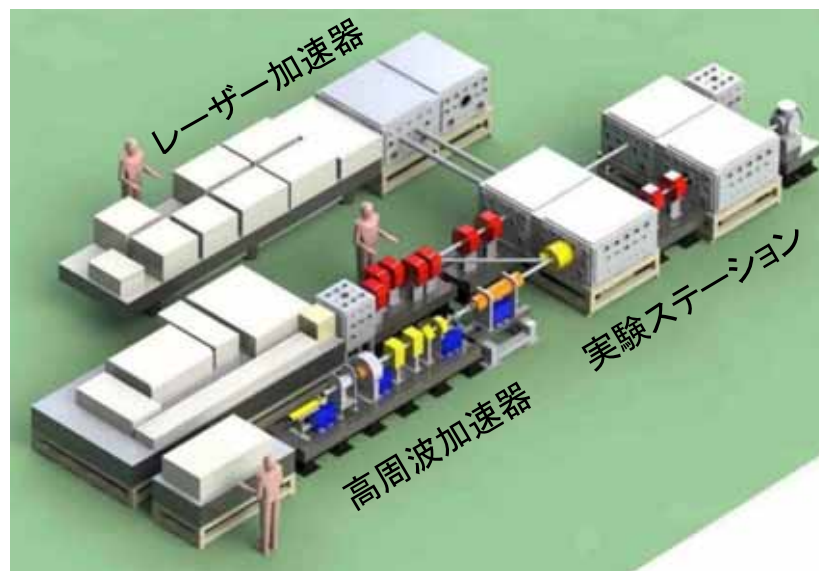


FEL(400MeV LPA)



30MeV ライナック(数十mの建屋)

レーザー加速



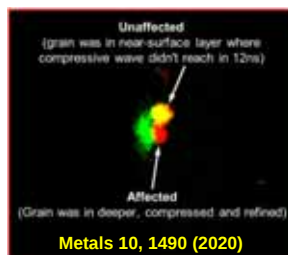
単機能化



小型電子加速器
(400MeV LPA)



電子蓄積リング(光源利用)

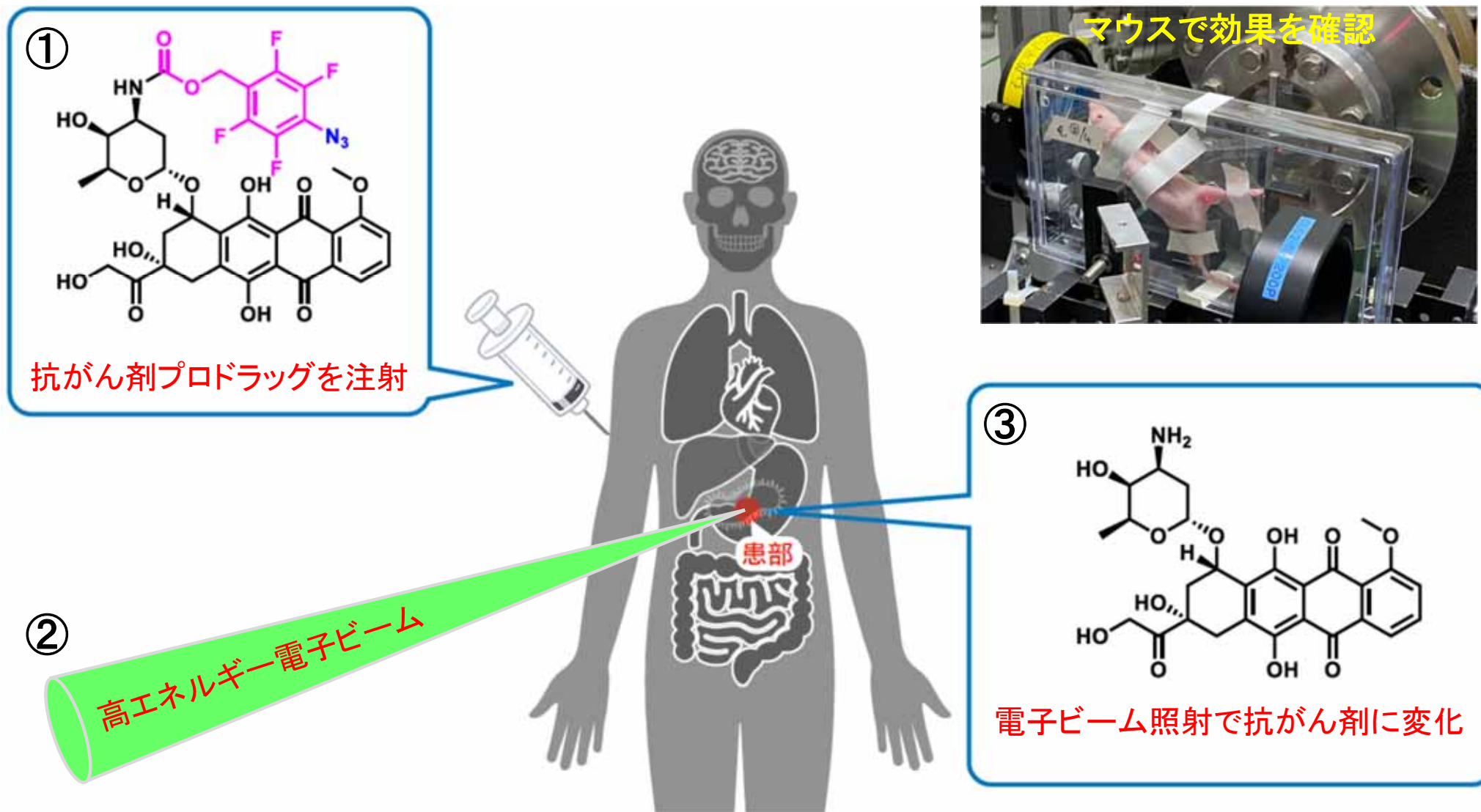


材料評価(ポンププローブ実験)



電子ビームの創薬・医療応用
(プロドラッグ活性化)

「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
— イオン加速システムとハイパワーレーザーの開発 — 2025/09/01開催

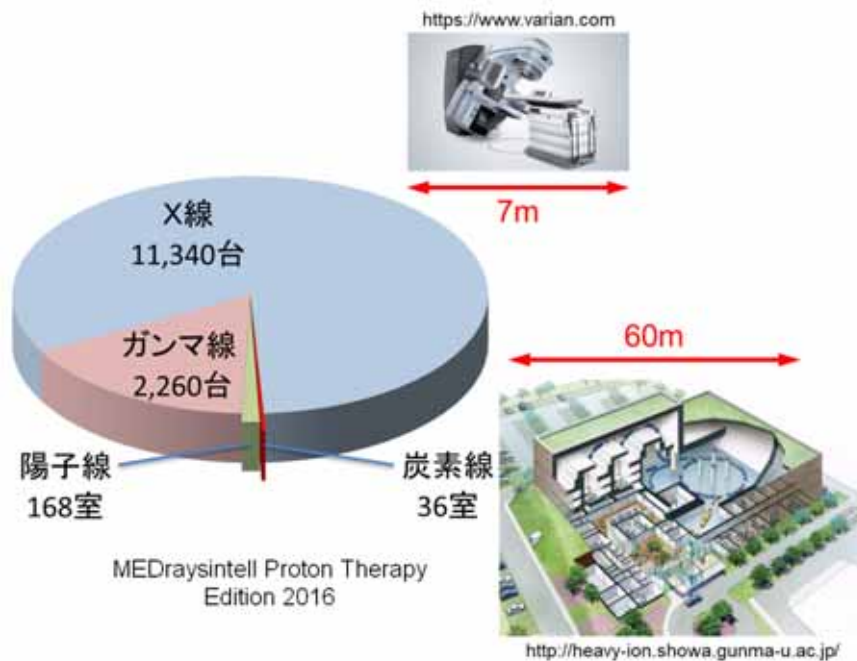


電子ビームをトリガーとするプロドラッグ化学治療

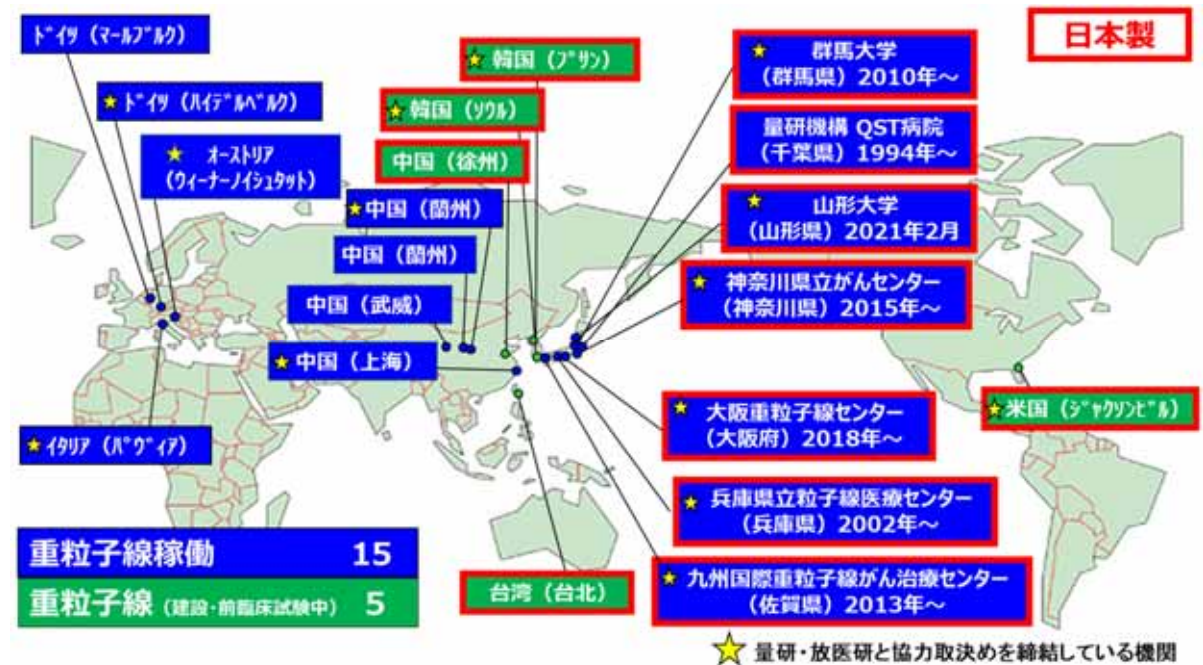
レーザーによるイオン加速

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



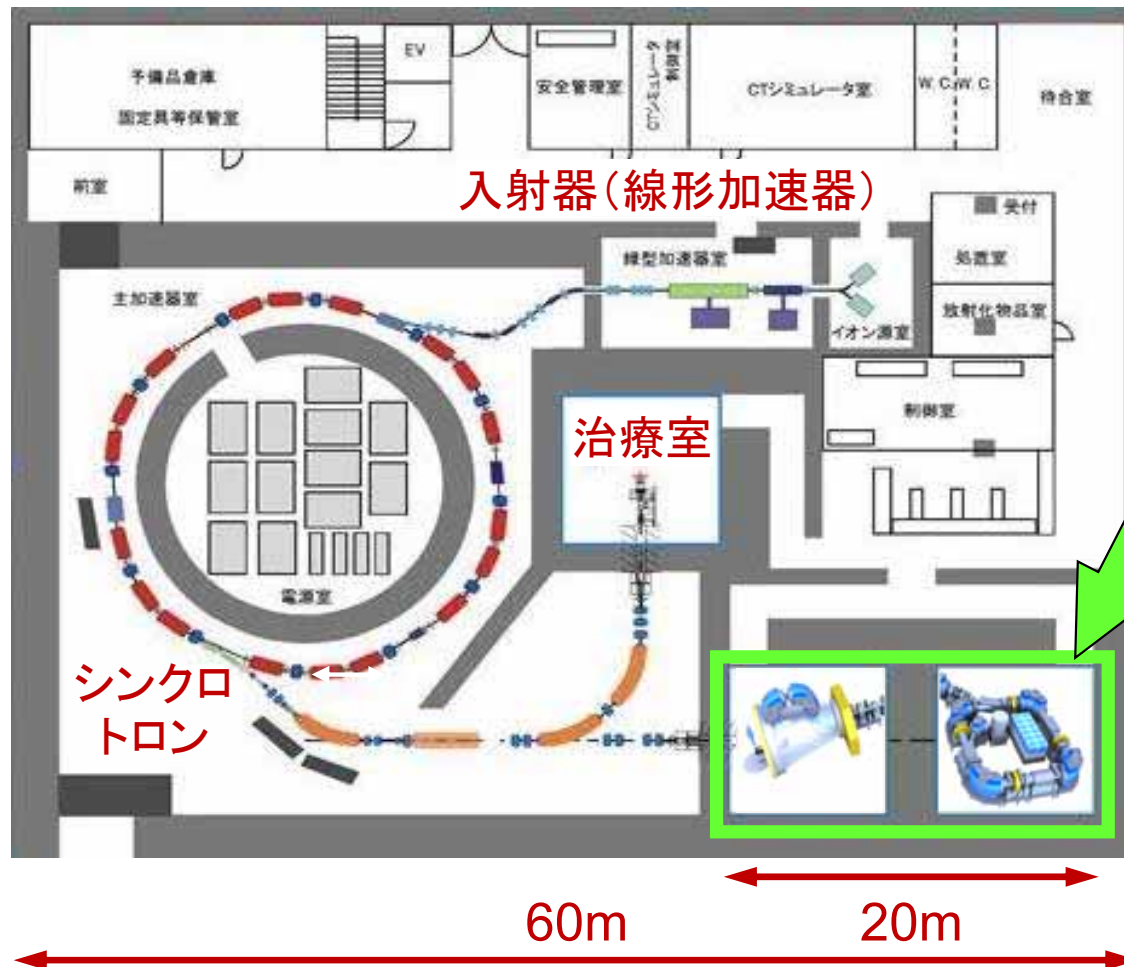
世界の放射線治療装置
(粒子線は治療室数)



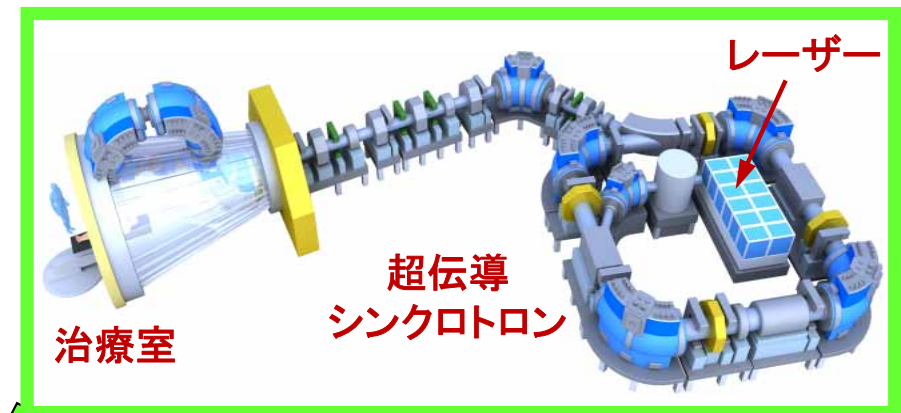
世界の重粒子線がん治療装置
(2022/3現在)

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）

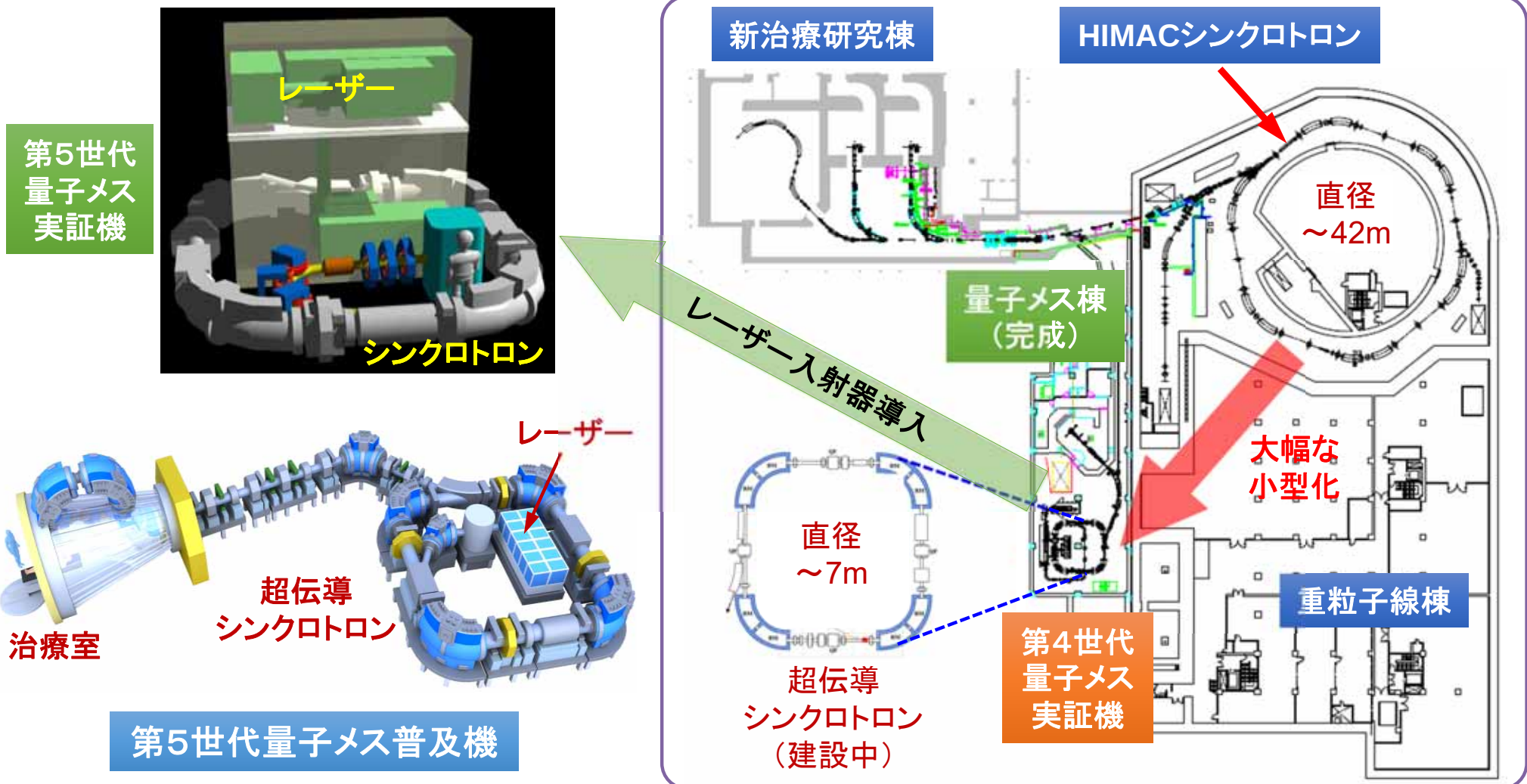


次世代重粒子線がん治療装置 （量子メス／第5世代普及機）

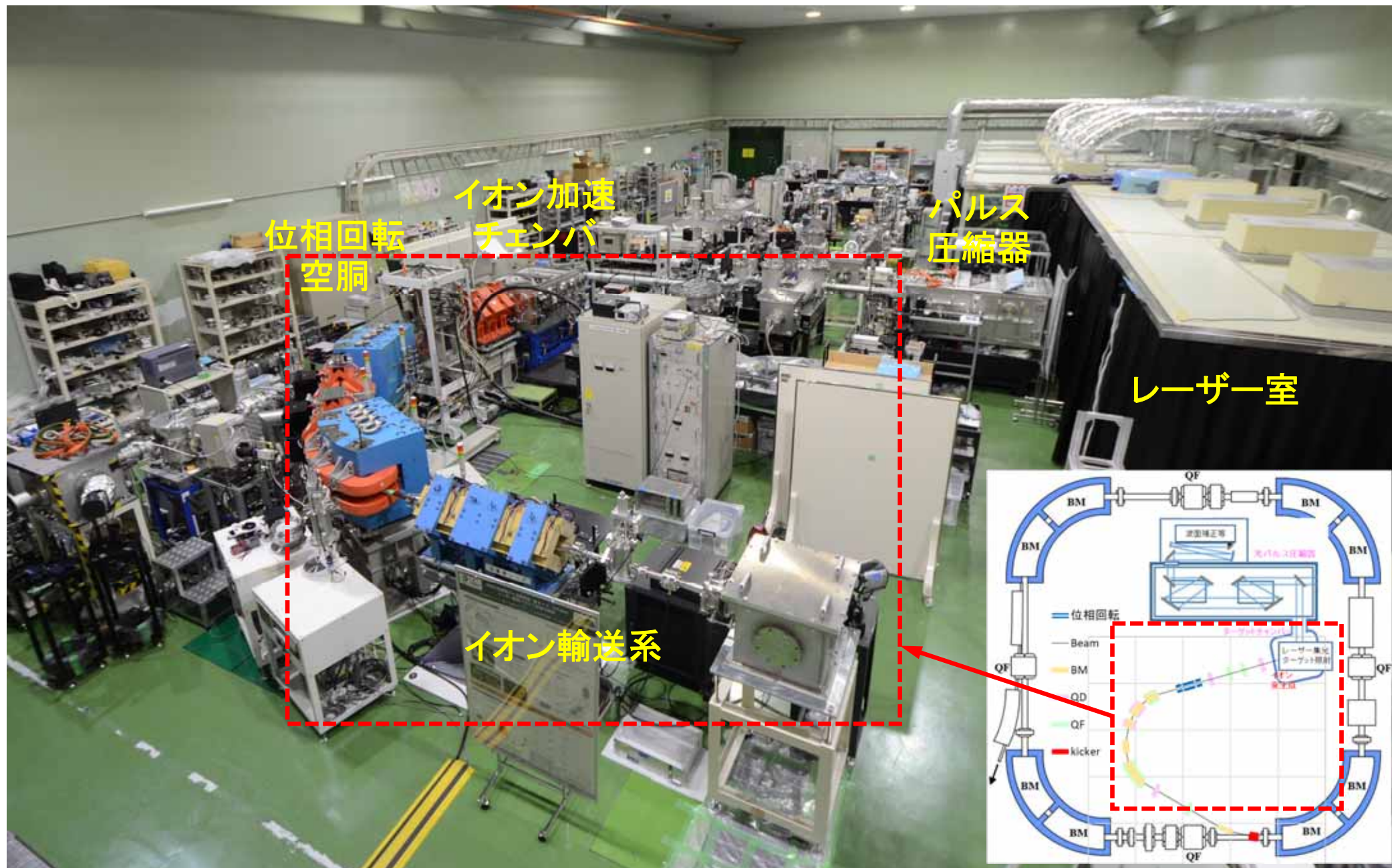


- 20m
- レーザー加速による入射器小型化
 - 超伝導によるシンクロトロン小型化（QST量子メスプロジェクト）
 - 臨床技術開発（治療短期化）による治療室数の削減（QST）

- QST: 量子メス棟が完成し、第4世代実証機(超伝導シンクロトン)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



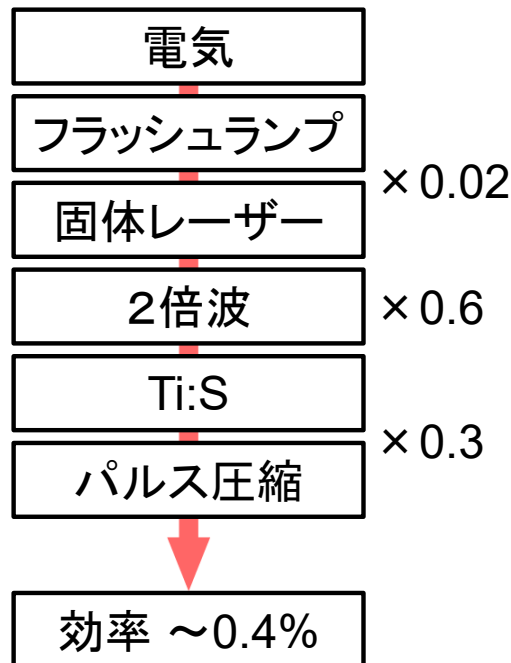
イオン加速プラットホーム (QST関西研)



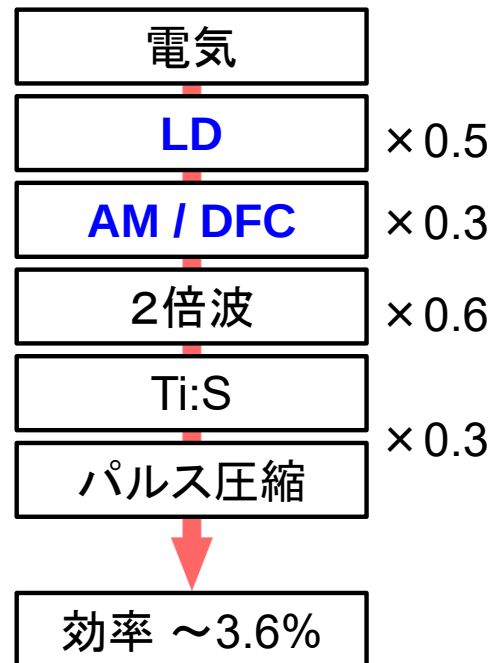
高強度レーザー技術開発

加速用レーザーの小型・高効率化

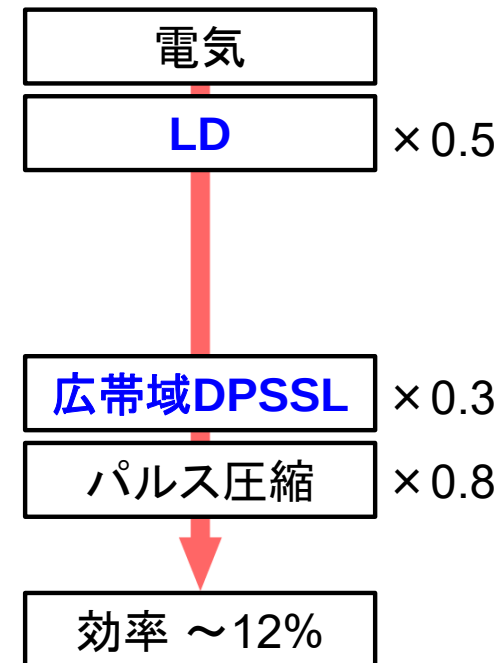
JST未来社会 POC フラッシュランプ励起Ti:S



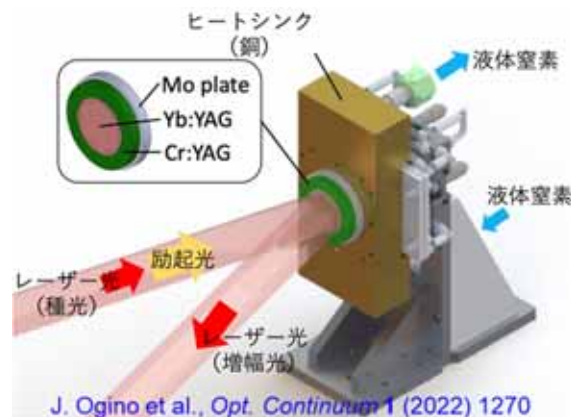
次世代 LD励起：高繰返しTi:S



次々世代 新媒質：高効率



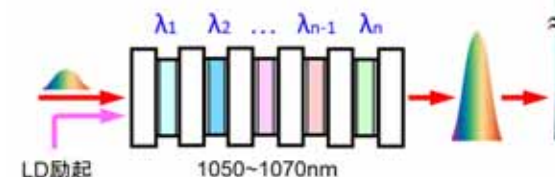
Ti:sapphire 10 PW レーザー



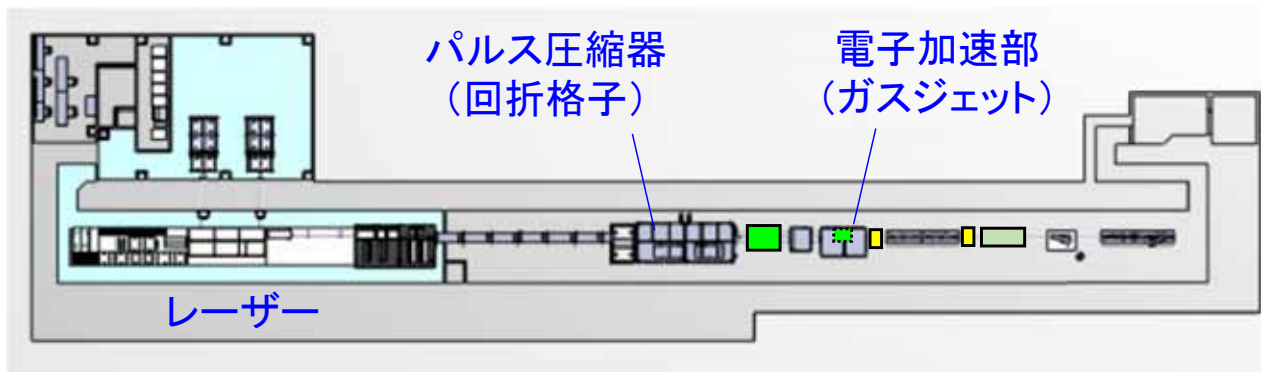
Yb:YAG アクティブミラー

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



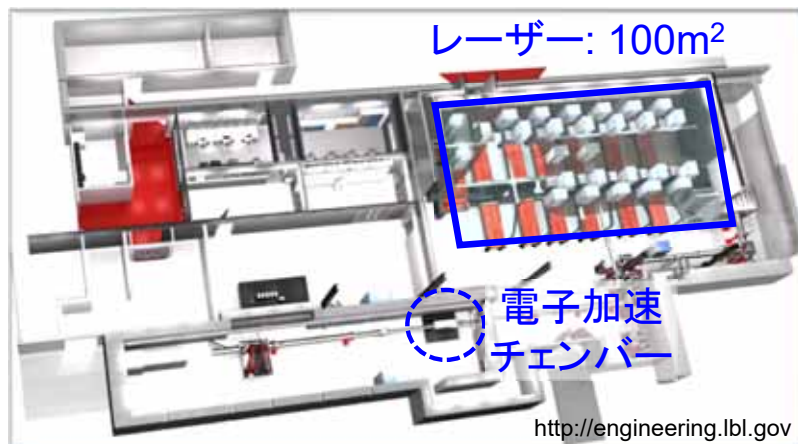
- レーザー加速は従来の1千倍超の加速勾配を持ち、加速器の小型化に期待
- 加速部に比べてレーザーが巨大、レーザーの小型化・高効率化開発が必須
- 光学部品も大型で高価、高耐力素子開発によるシステム小型化を目指す



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)

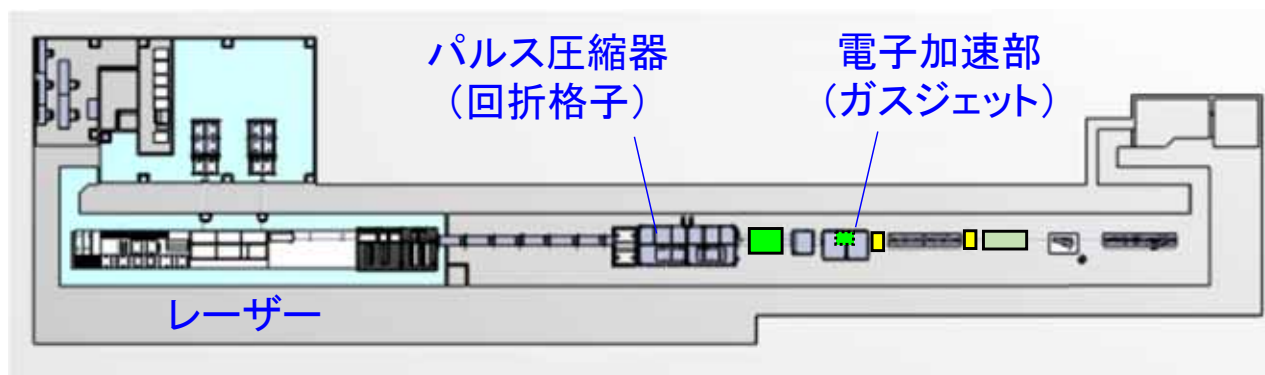


BELLA(米LBL)



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



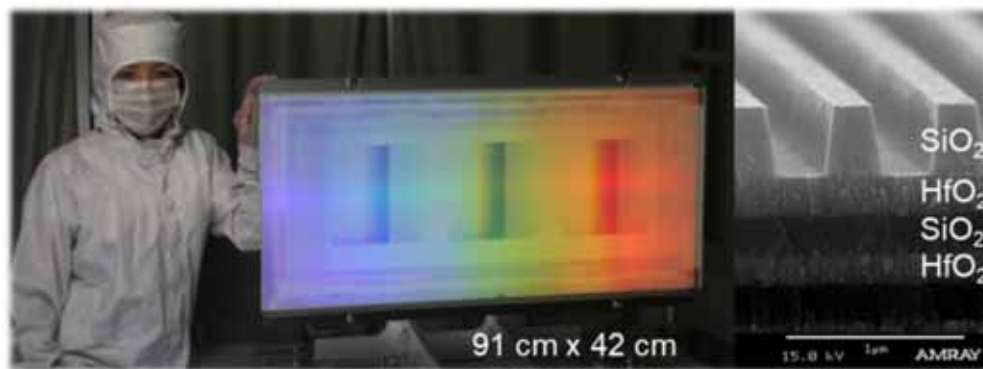
電子加速プラットフォーム (SPring-8)

高出力レーザー用回折格子

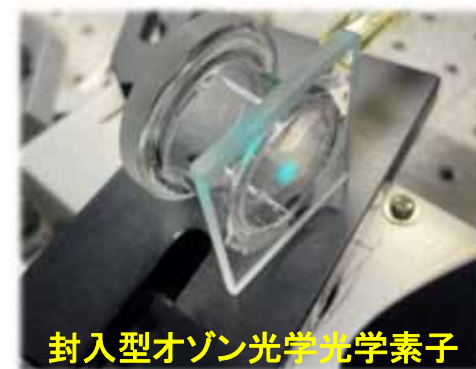


イオン加速プラットフォーム (関西研)

超高耐力光学素子 (オゾン素子) 開発

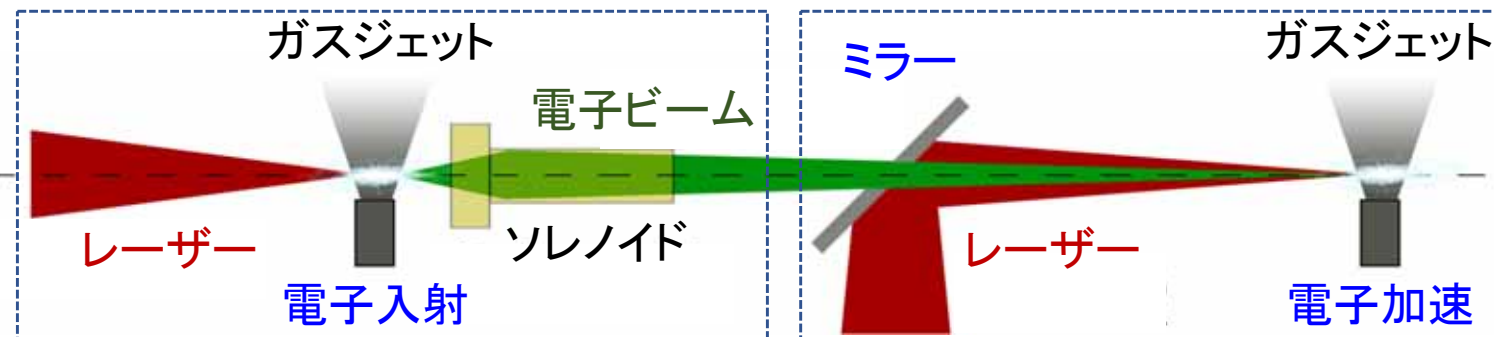
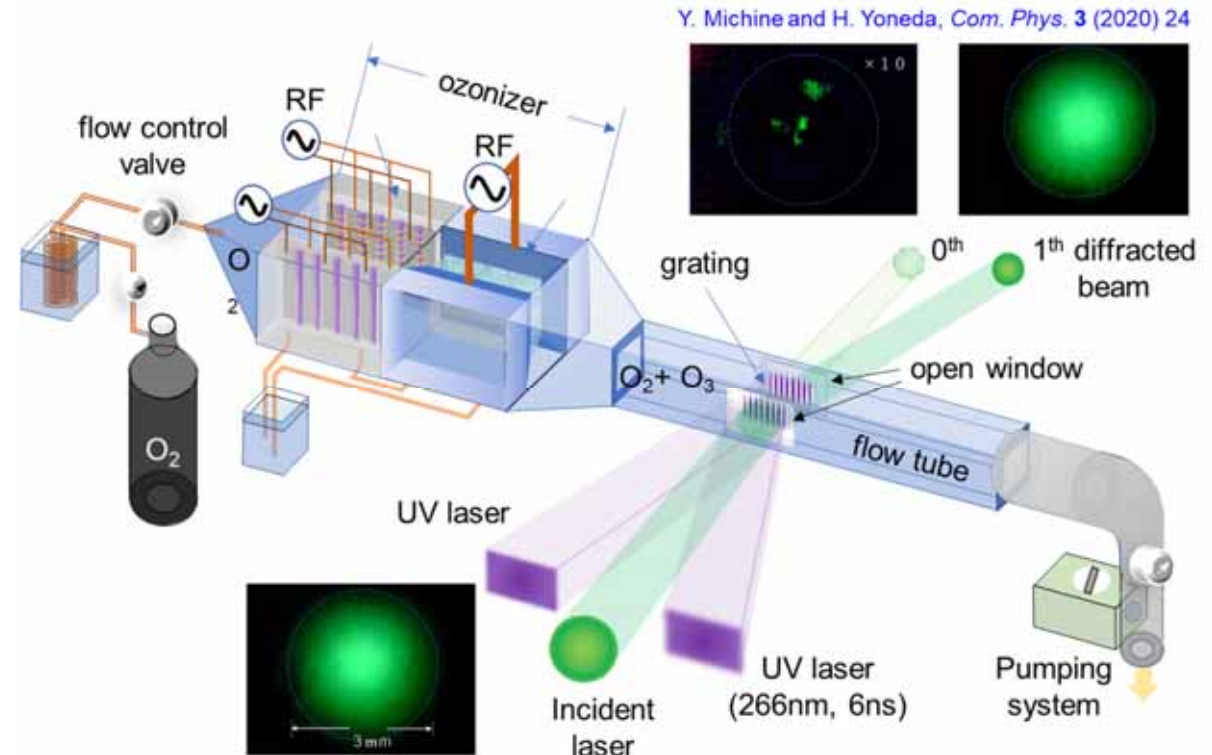


Plymouth Grating Laboratory / Okamoto Optics / ILE, Osaka Univ.

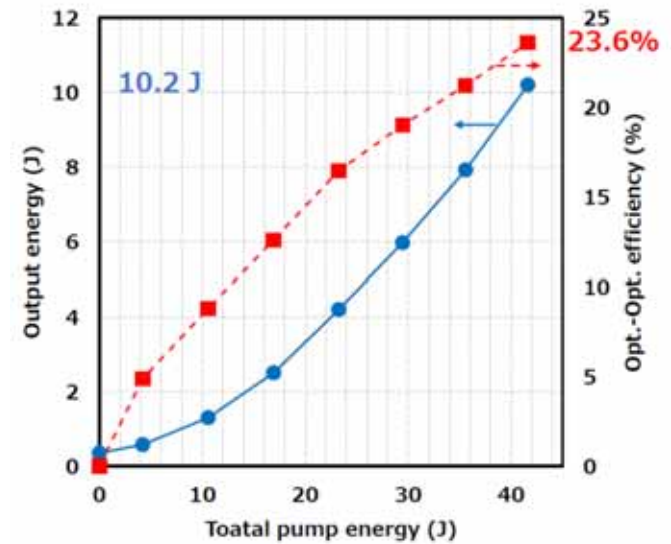
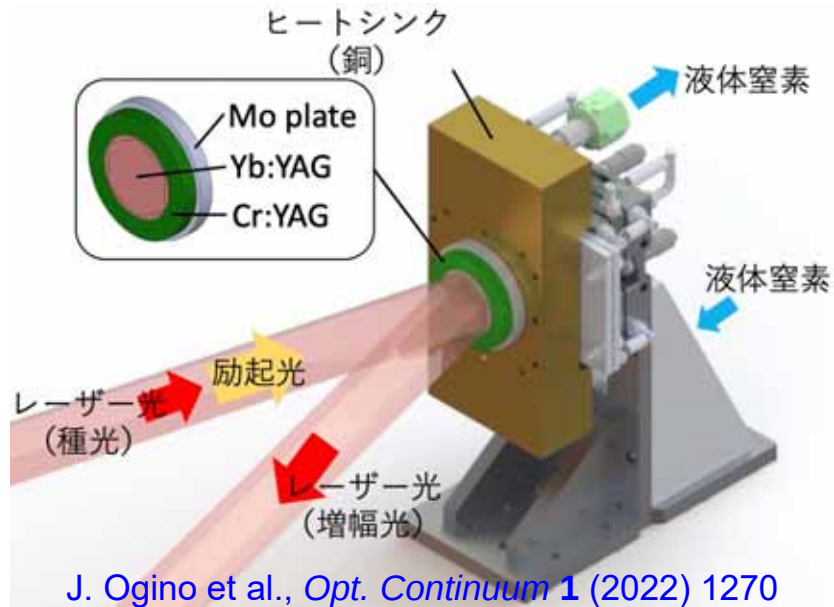


損傷閾値 (LIDT) の系統的な評価と改善

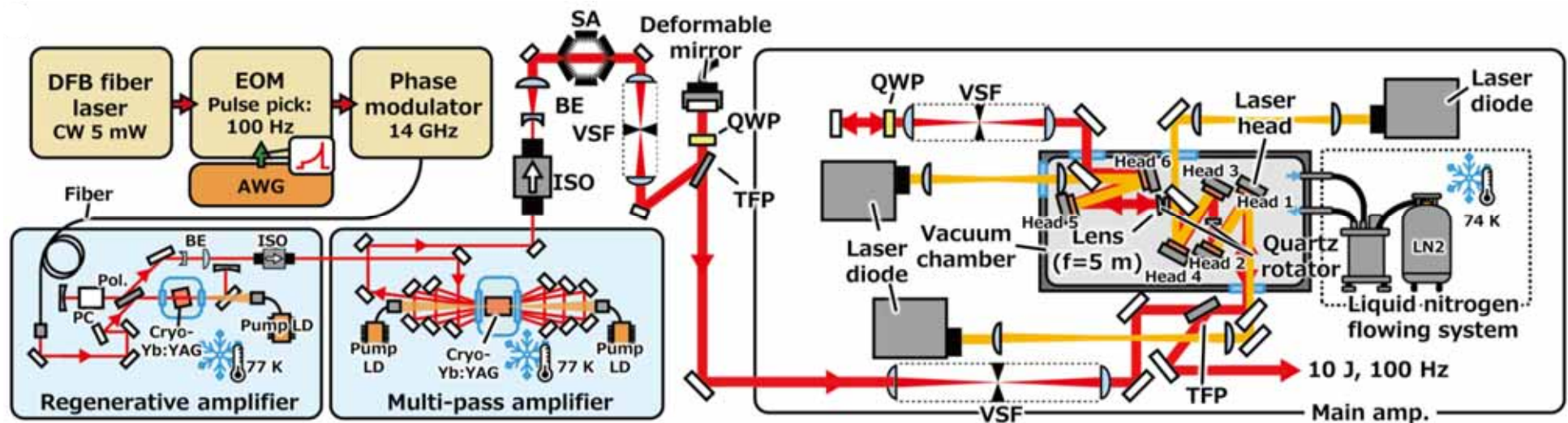
- オゾンガス光学素子 ($1\text{kJ}/\text{cm}^2$)
 - ✓ 高耐力ミラー (電子多段加速)
 - ✓ 回折格子 (電子・イオン加速)
 - ✓ 空間フィルター (レーザー)
 - ✓ デブリシールド (イオン加速)
 - ✓ レーザー加工への展開、など
- 高耐力光学薄膜 ($100\text{J}/\text{cm}^2$) による光路縮小、システム小型化



電子多段加速：ミラー・ガスジェット間の距離短縮による小型・安定化



10J × 100Hz 動作データ



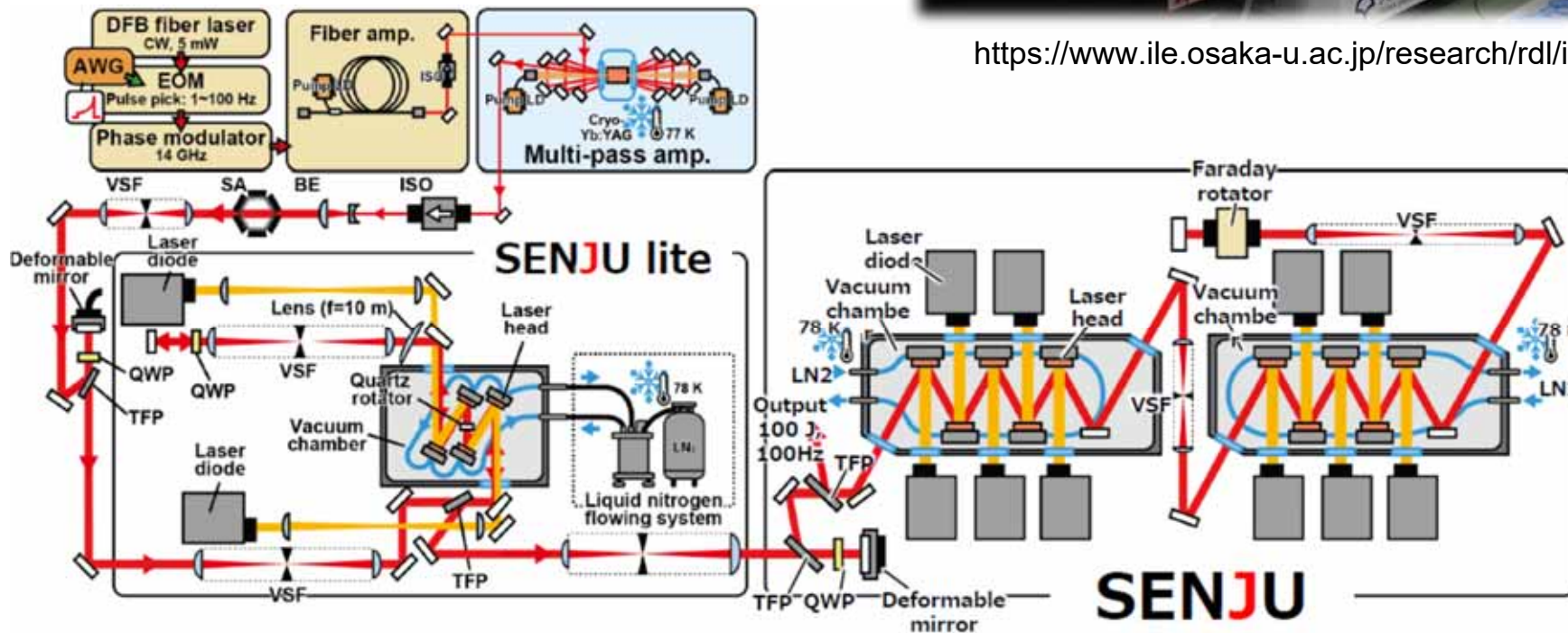
10J × 100Hz システム (SENJU lite) の構成



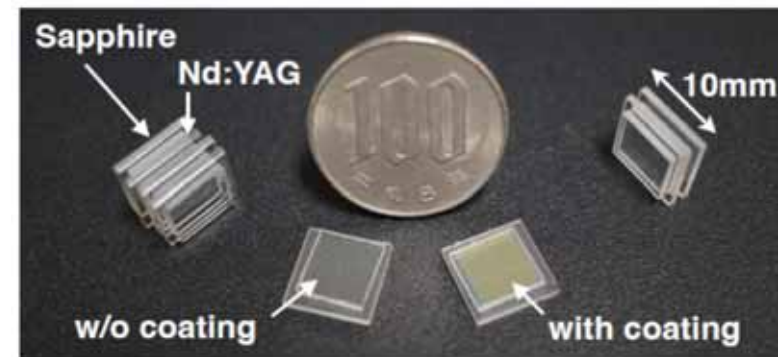
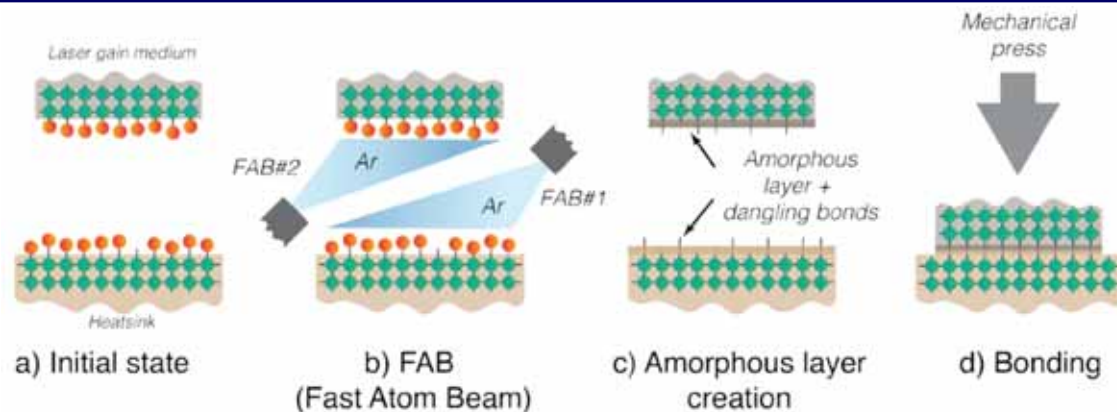
100J × 100Hz システム SENJU



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

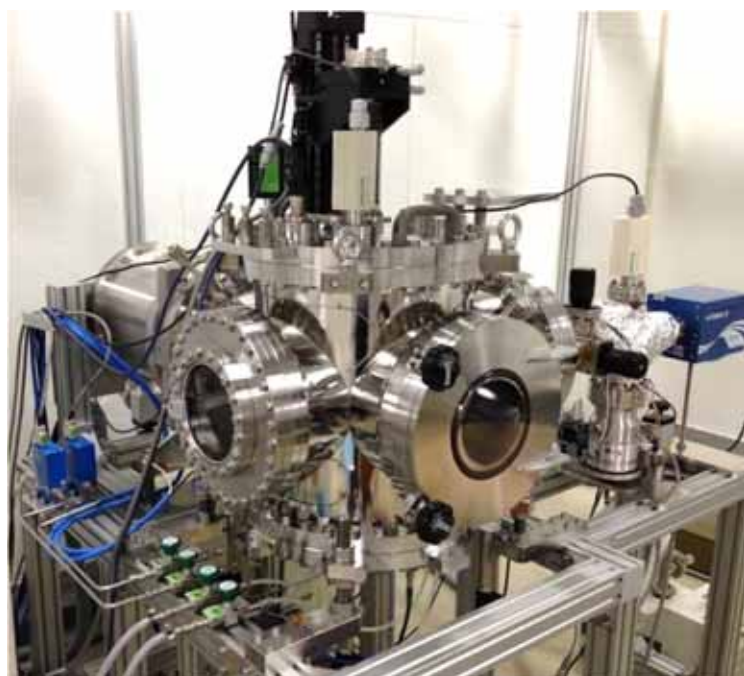


100J × 100Hz
システム
SENJU

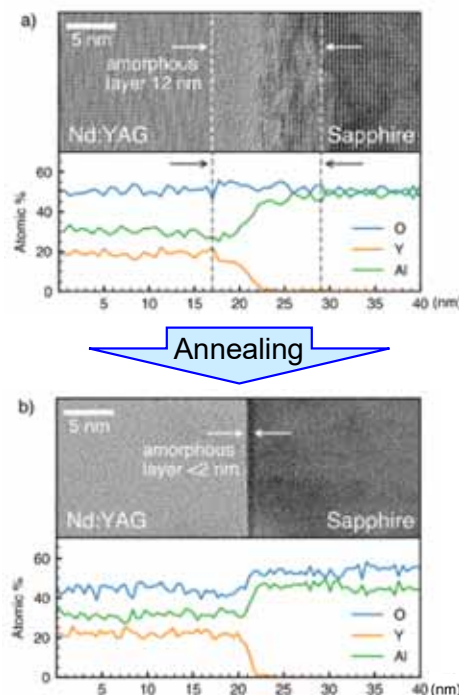


表面活性とアモルファス層による常温接合

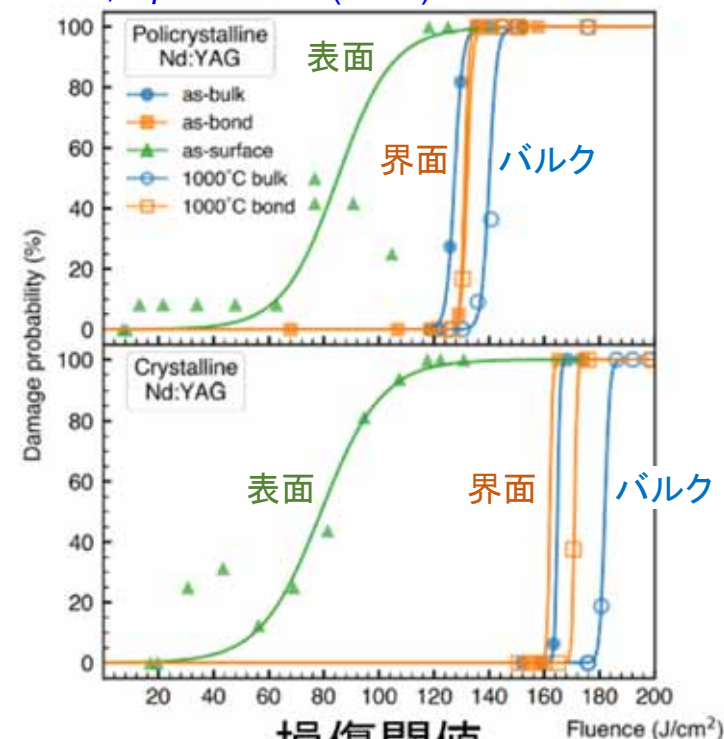
A. Kausas and T. Taira, *Opt. Lett.* **47** (2022) 3067



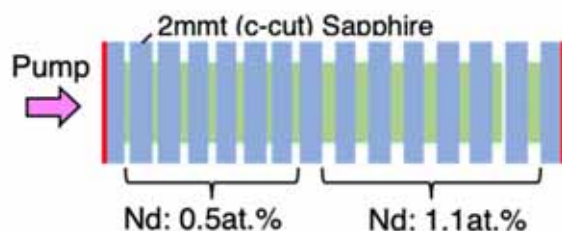
常温接合装置



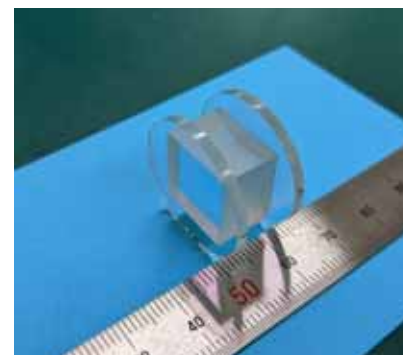
界面の TEM / EDX



損傷閾値



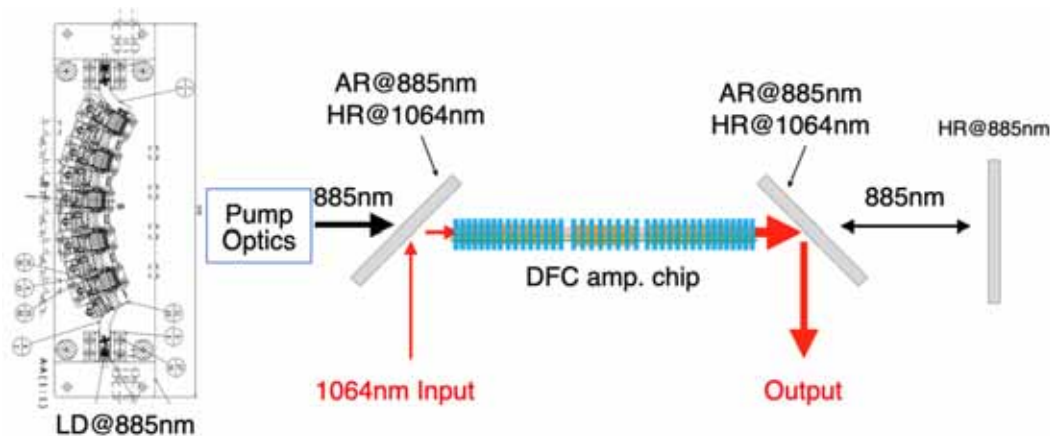
DFCチップ



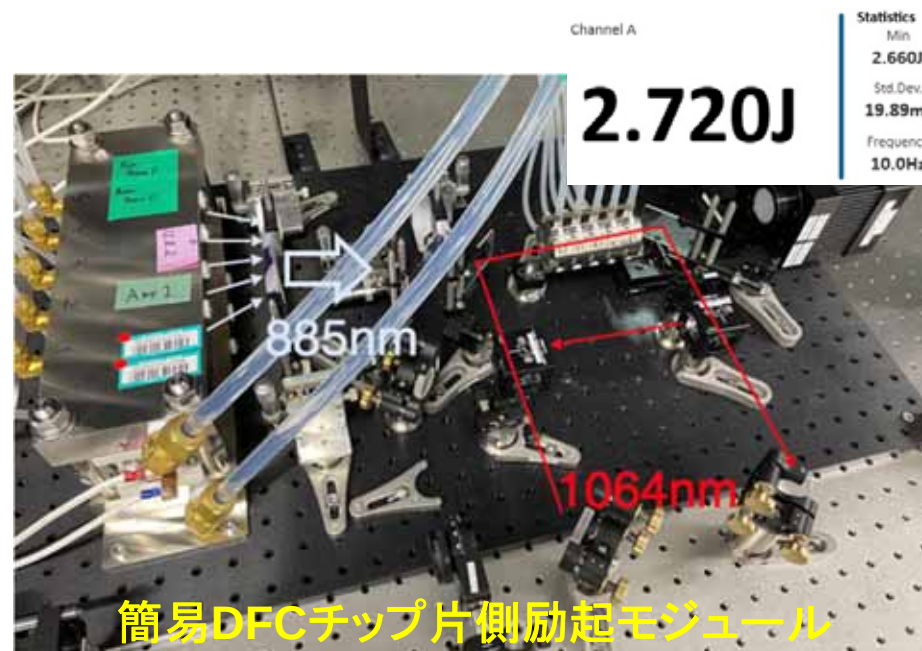
簡易DFCチップ



水冷ジャケット



DFCチップ片側励起モジュール



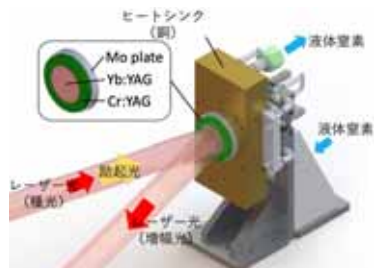
簡易DFCチップ片側励起モジュール

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

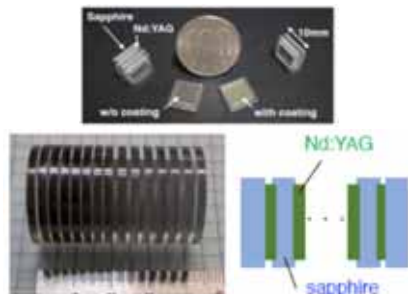
本日の講演の位置づけ

レーザー開発

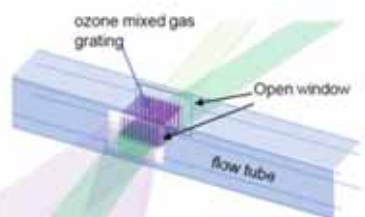
アクティブミラーによる
高平均出力レーザー



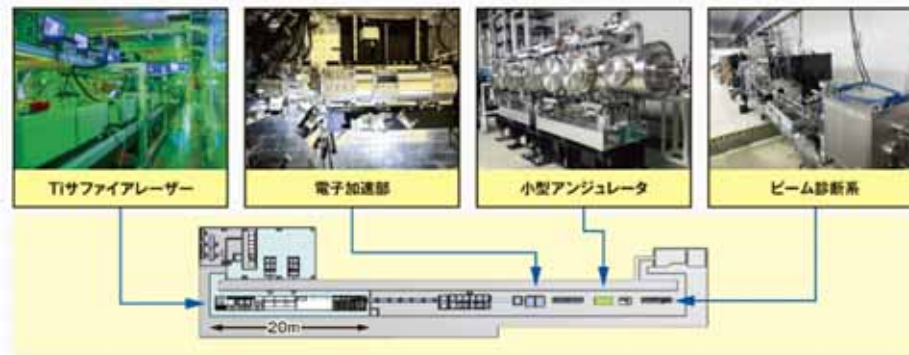
常温接合による小型
高出力レーザーチップ



長期信頼性光学素子
超高耐カガス光学素子

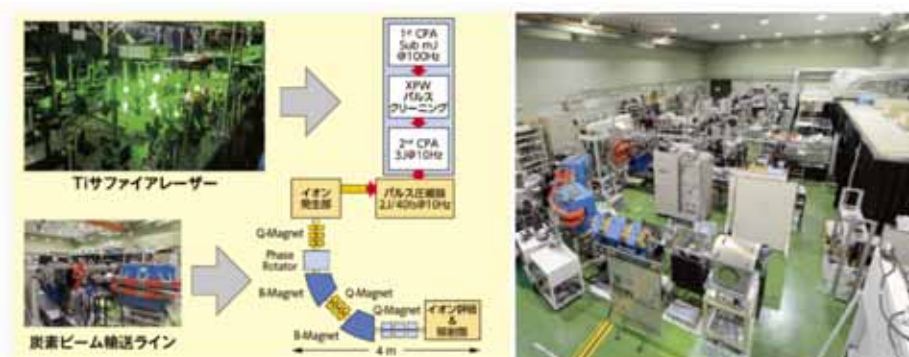


電子加速プラットフォーム(播磨)



- 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

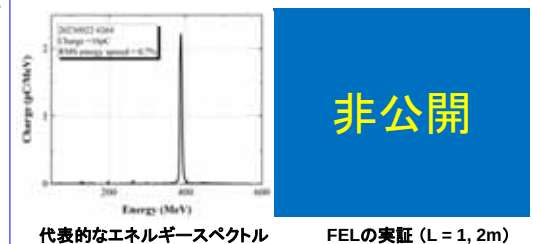
イオン加速プラットフォーム(木津)



- 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

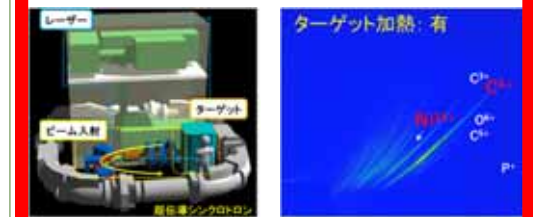


電子ビームの創薬・
医療応用



イオン加速／応用

入射器に必要な一連の
動作確認と新しい応用



■ 電子加速

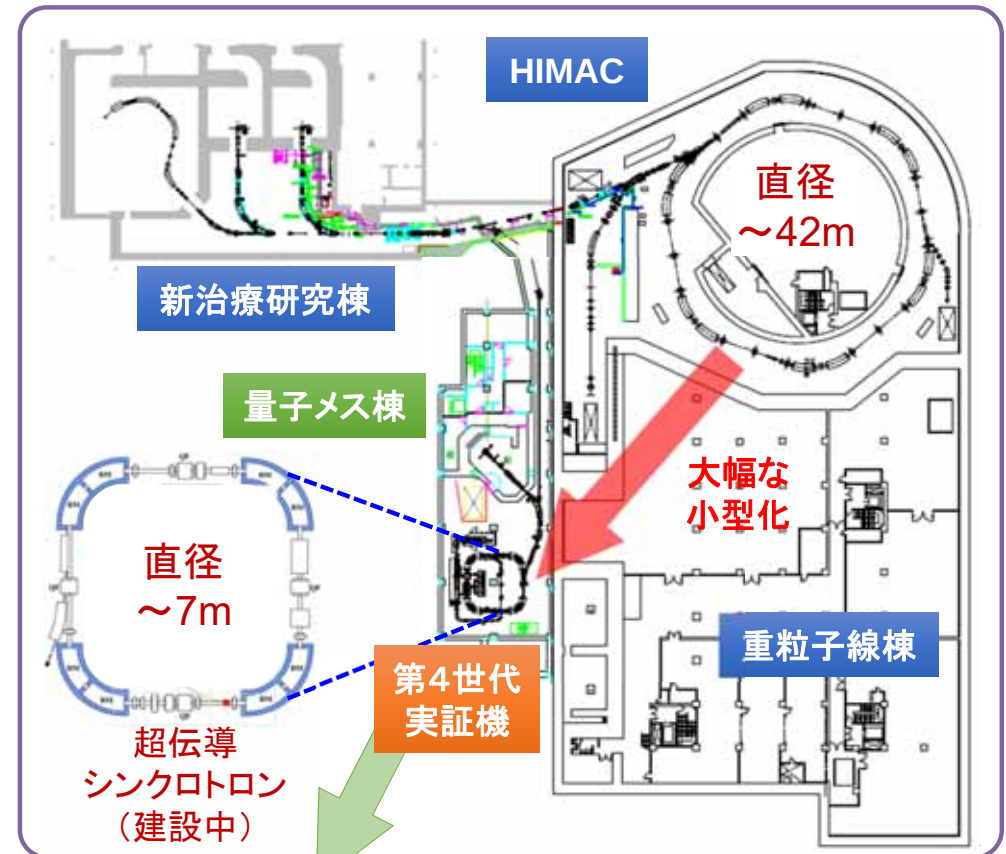
- ✓ 数百MeV電子：医薬理工連携による量子ビーム創薬・医療技術の新事業への展開
- ✓ GeV加速：ミュオン発生・加速などへの展開
- ✓ FEL：アト秒科学への展開、P&P実験、他

■ イオン加速

- ✓ QST量子メスPjと協力し、第5世代実証機入射器としての供用を目指す
- ✓ 要素技術は、企業との共同研究継続により、個別製品化を推進（ターゲット、デブリシールド、イオン輸送コード、計測技術、他）
- ✓ レーザーとターゲットとの相互作用の詳細化によるイオン発生量増大、レーザー小型化
- ✓ レーザー加速イオンビームの新しい応用

■ レーザー開発

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



第5世代実証機



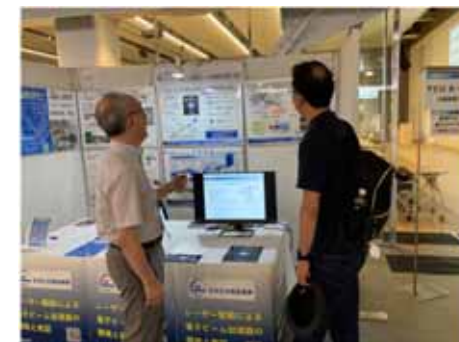
入射器実証機 (JST未来)

- 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
- これまでの主な開発成果
 - ✓ 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)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、技術の高度化・システム化を推進して社会課題の解決に貢献していく

- ホームページ: <https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/lpa//>
- パンフレット: ホームページからダウンロード可
- 展博出展: OPIE(4月)、日本加速器学会(8月)
- シンポジウム開催

第1回	2019年4月16日	@ 東京 station conference
第2回	2021年6月25日	オンライン
第3回	2022年6月7日	オンライン(イオン加速)
第4回	2023年2月28日	オンライン(電子加速)
第5回	2023年8月2日	@ JST東京本部別館
第6回	2024年8月5日	@ JST東京本部別館
第7回	2025年9月1日	オンライン(イオン加速、レーザー)
第8回	2025年11月頃	オンライン(電子加速、レーザー)
第9回	2026年度	対面開催、場所未定
- プレスリリース、論文発表
- 国際会議

Q-BASIS 2023	2023年4月24-27日	@阪大産研
Q-BASIS 2024	2024年11月11-14日	@阪大産研
Q-BASIS 2026	2026年(秋)	場所未定



日本加速器学会(2025年8月)



シンポジウム意見交換会(2023年8月)



Q-BASIS 2024(2024年11月)



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