

# 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

2023年8月2日

プログラムマネージャー (PM)

佐野 雄二  
(分子科学研究所)

## ー レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証 ー

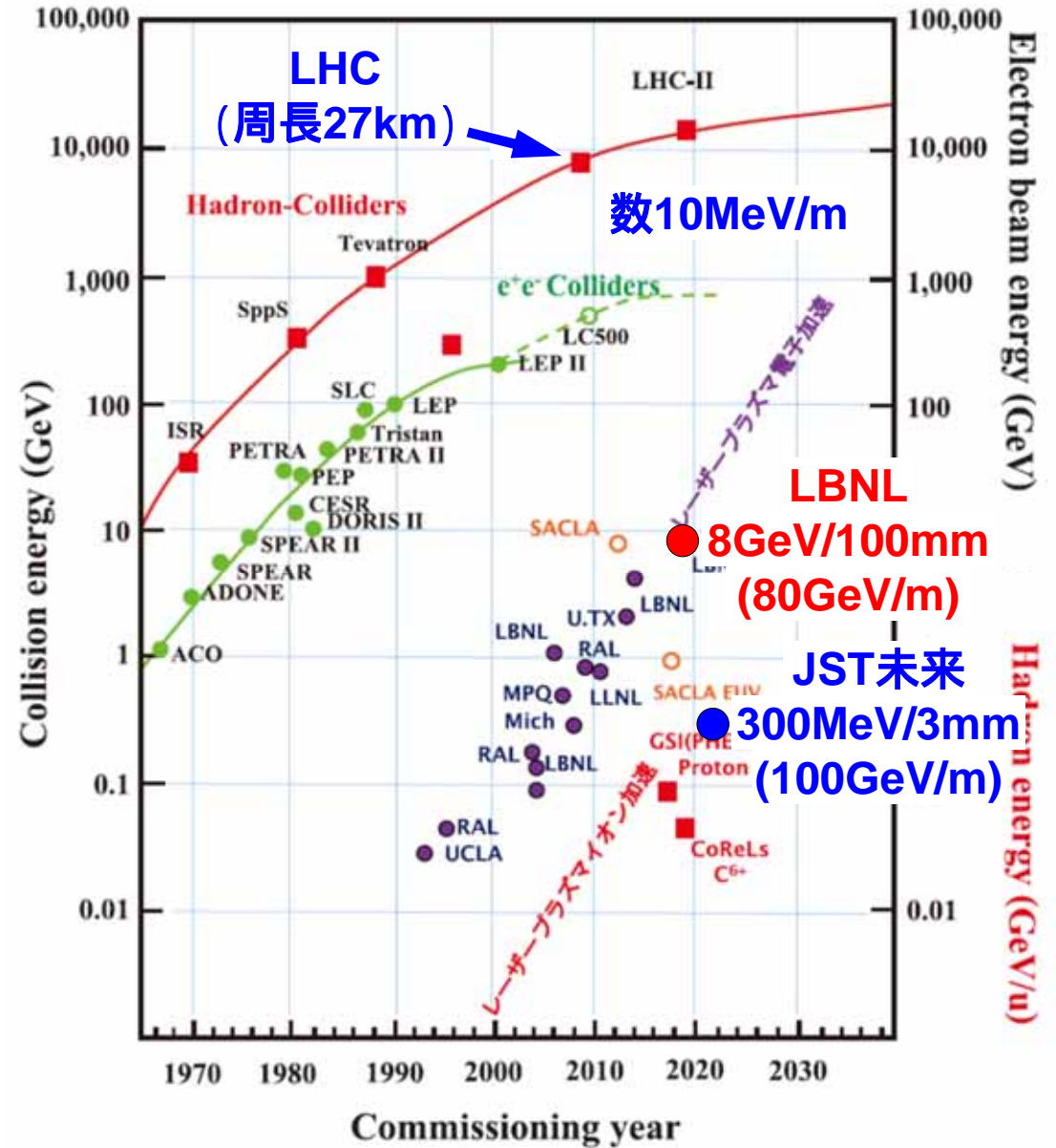
- 開発の全体概要
- レーザーによる電子加速技術の開発
- レーザーによるイオン加速技術の開発
- 高強度レーザー技術の開発

# 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)

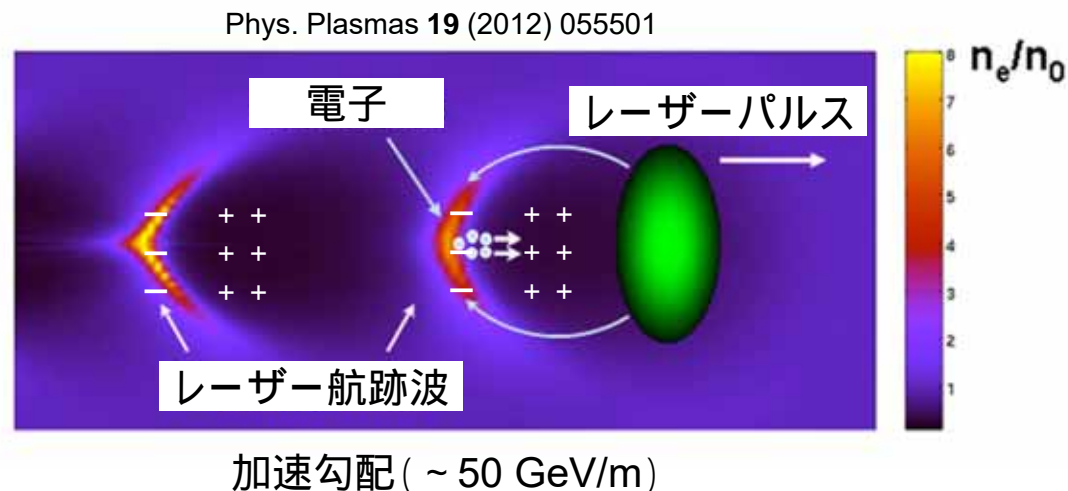


レーザー加速は従来の1千倍超の加速勾配

加速器を小型化するポテンシャル

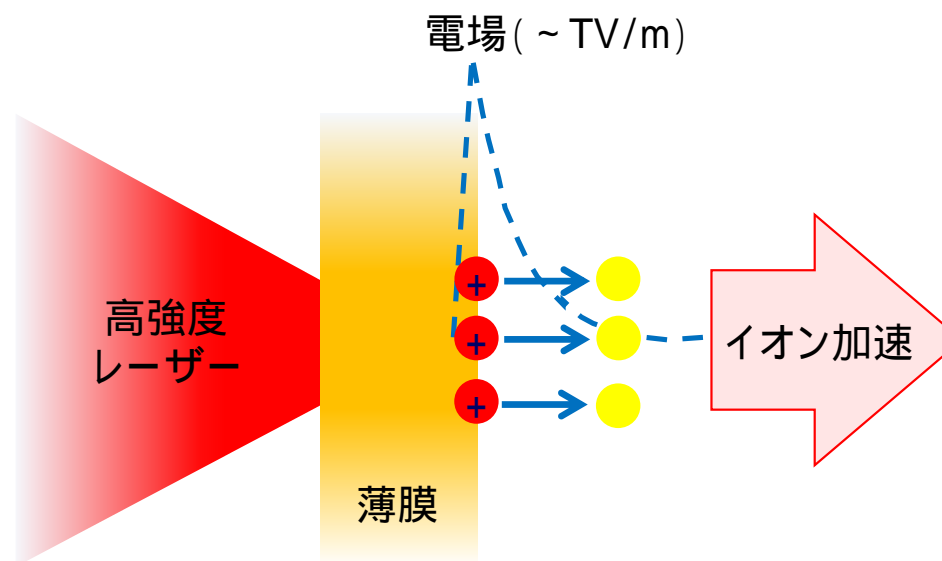
## ■ レーザーによる電子加速

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)。



## ■ 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)

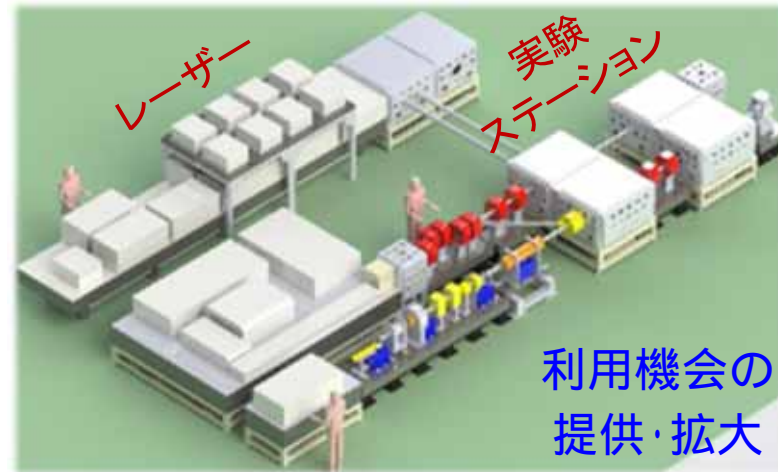




X線自由電子レーザー SACLA

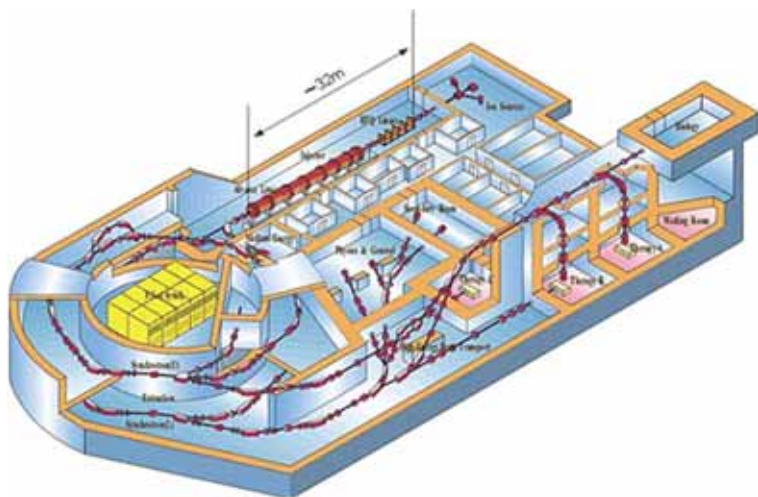
<http://xfel.riken.jp/eng>

レーザー加速



次世代X線自由電子レーザー (XFEL)

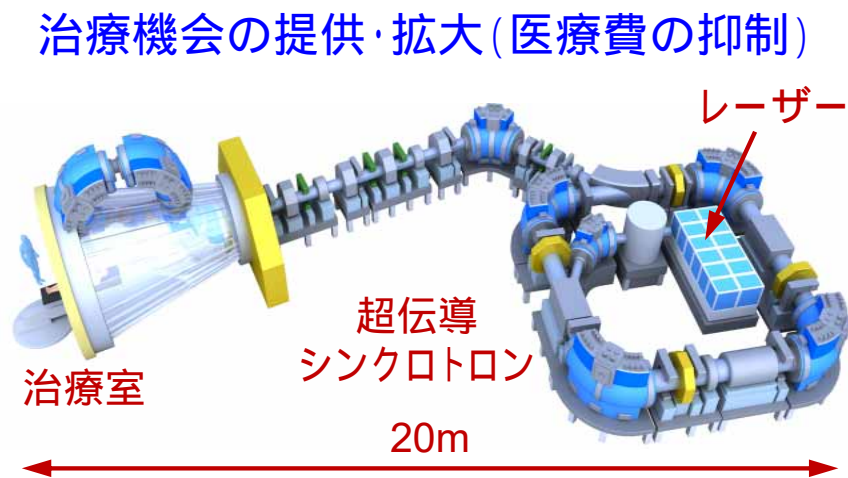
利用機会の提供・拡大



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

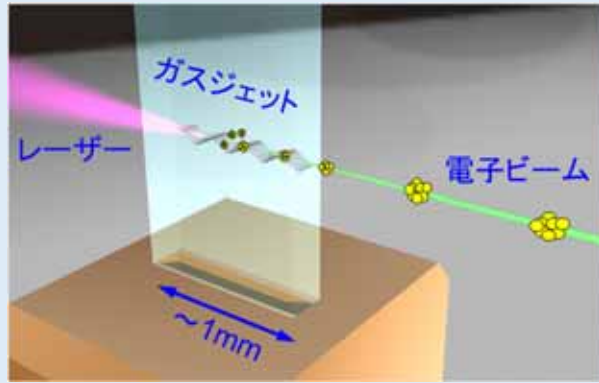
- 電子加速 10KeV領域のXFELの実現に必要な電子ビームの発生・加速 (シミュレーション + 要素技術の検証)、応用開発の推進
- イオン加速 4MeV/u 炭素イオンのシンクロトロンへの入射器としての実証
- レーザー 加速用レーザーシステムの設計、優れた要素技術の産業展開

## ステージ2 (2021 ~ 23年度)の目標・実施内容

- 電子 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 炭素イオンの発生・輸送・検出の入射器としての一連の動作
- レーザー 高出力パルスレーザー要素技術の開発

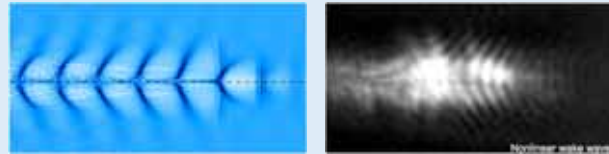
# レーザープラズマ加速プロジェクトの内容

## 電子加速技術

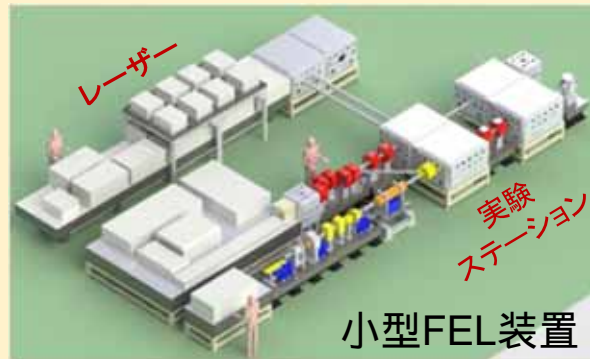
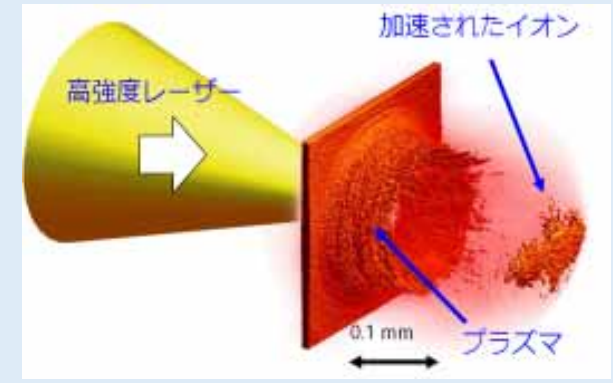


## シミュレーション・計測・診断

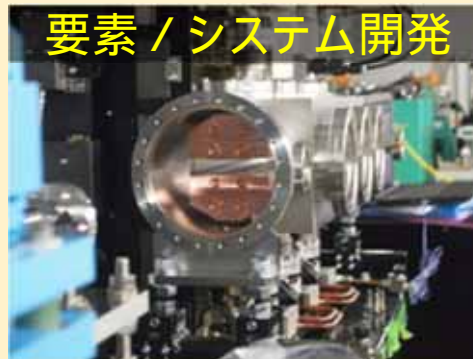
### プラズマ加速場



## イオン加速技術



将来

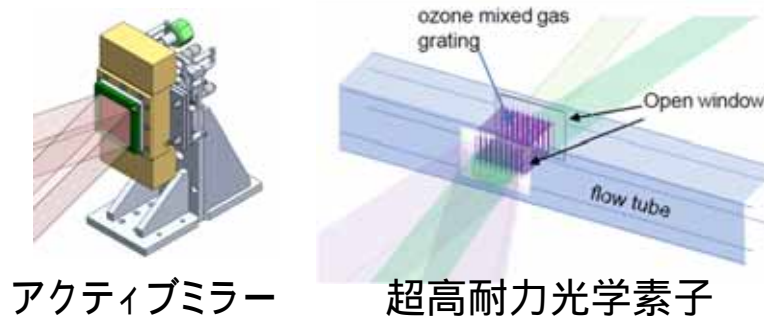
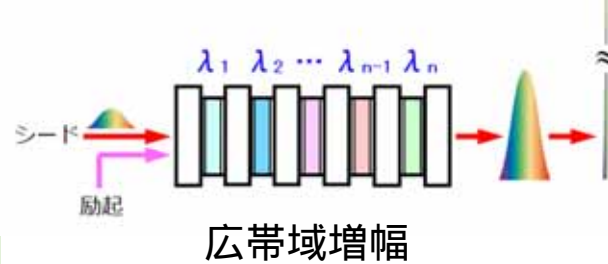


将来

## 小型重粒子線がん治療装置



## 加速用レーザー技術



## 応用展開



## 共通基盤・加速技術

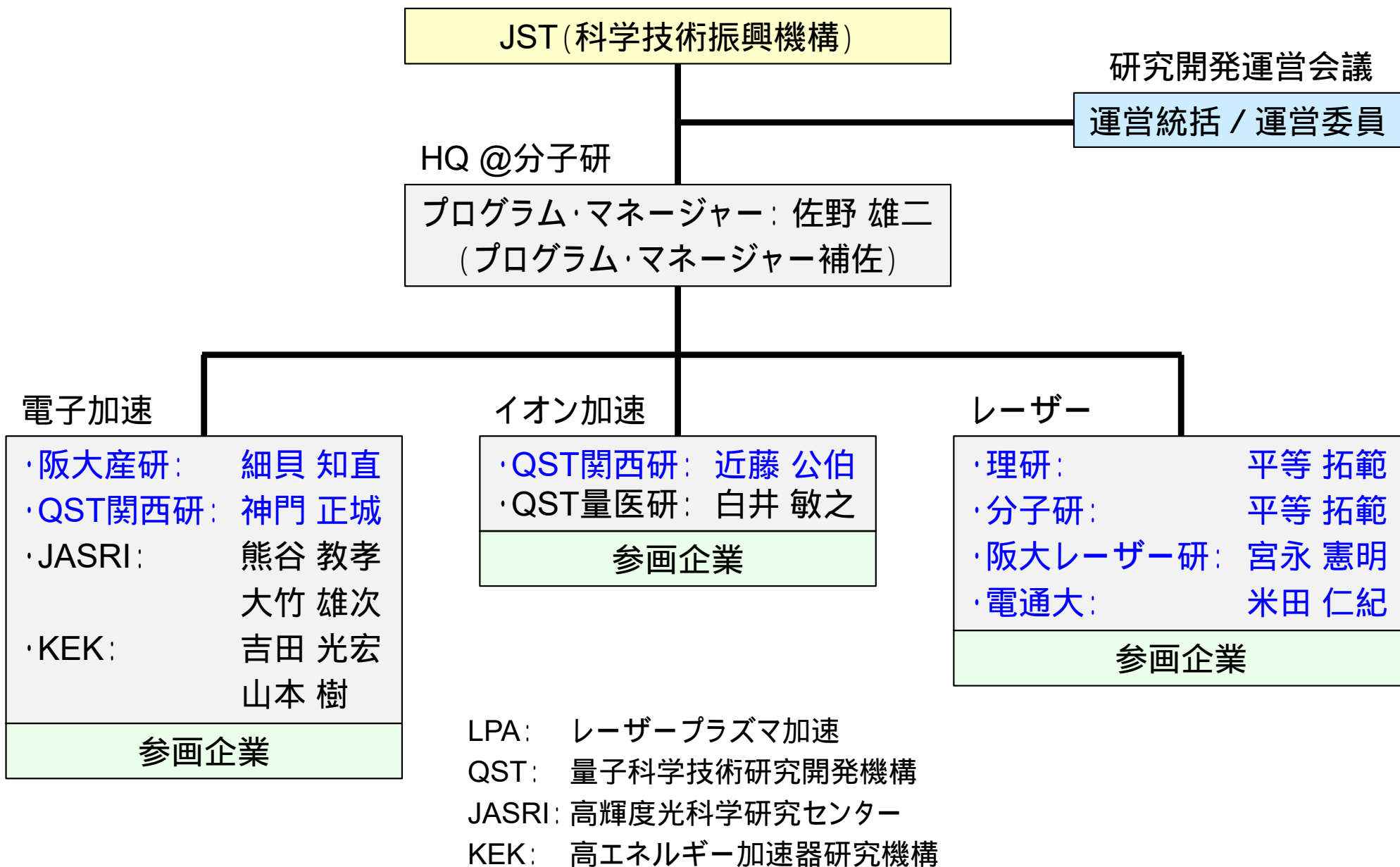
# 研究開発スケジュール

▼ 現在

未来社会	ステージ	第1ステージ SG1				第2ステージ SG2			第3ステージ		
	年度	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
未来社会	電子加速 	<ul style="list-style-type: none"> <li>電子加速プラットフォーム整備</li> <li>ガスターゲット技術開発</li> <li>電子加速技術開発</li> <li>モニター / 制御技術開発</li> <li>ビームライン / アンジュレータ</li> </ul>				<ul style="list-style-type: none"> <li>レーザー波面改良</li> <li>ガスターゲット改良開発</li> <li>アンジュレータ開発</li> <li>XUV-FEL実証</li> <li>電子ビーム応用開発</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>電子ビーム高度化 (FEL応用、XFEL)</li> <li>電子ビーム応用開発 (創薬・医療応用)</li> <li>非破壊検査、等</li> </ul>		
	レーザー	<ul style="list-style-type: none"> <li>アクティブミラー / DFCレーザー</li> <li>超高耐力光学素子</li> </ul>				<ul style="list-style-type: none"> <li>要素技術の高度化</li> <li>応用開発</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>加速用レーザーへ展開</li> <li>応用展開 / 産業利用</li> </ul>		
	イオン加速 	<ul style="list-style-type: none"> <li>イオン加速プラットフォーム構築</li> <li>薄膜ターゲット技術開発</li> <li>イオン加速技術開発</li> <li>ビーム入射 / モニター開発</li> </ul>				<ul style="list-style-type: none"> <li>高コントラスト化</li> <li>加速イオン高純度化</li> <li>炭素イオン入射器としての一連の動作確認</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>高度化 / 高効率化</li> <li>入射器システム実証 (QST量子メス: 第5世代装置)</li> </ul>		
QST	量子メス	<ul style="list-style-type: none"> <li>超伝導シンクロトロン</li> <li>マルチイオン照射</li> <li>要素技術開発</li> </ul>				<ul style="list-style-type: none"> <li>実証機開発 (第4世代)</li> </ul>			 <p>www.qst.go.jp/site/press/20230413.html</p> <p>www.qst.go.jp/site/press/20220524.html</p>		

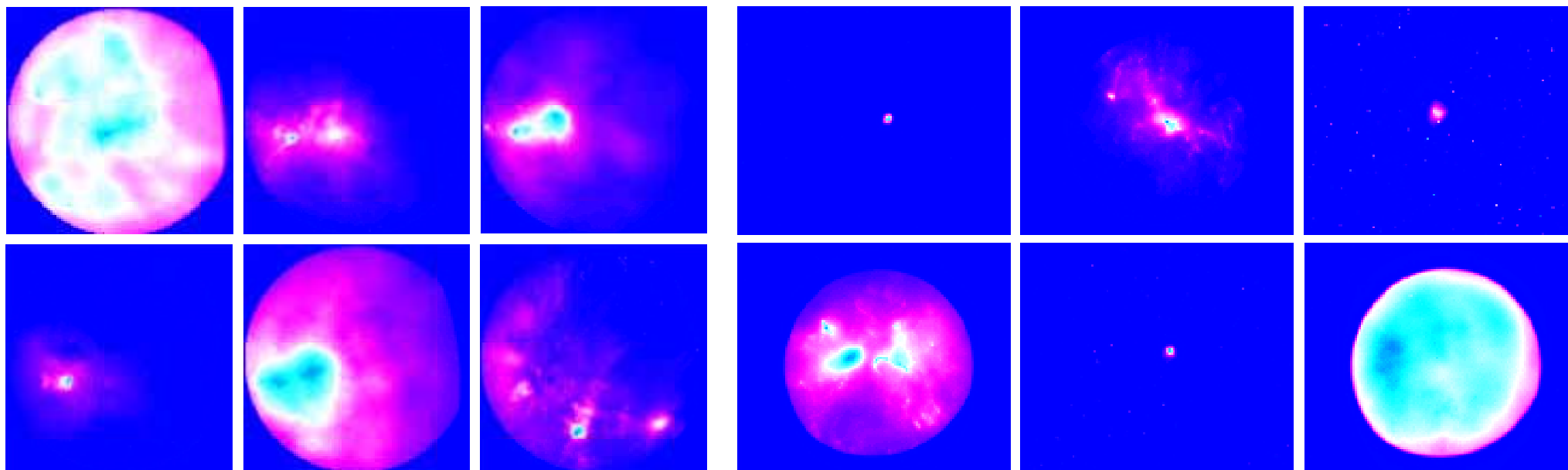
「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」 2023年度シンポジウム  
 開催日 : 2023/08/02 場所 : 科学技術振興機構 東京本部別館





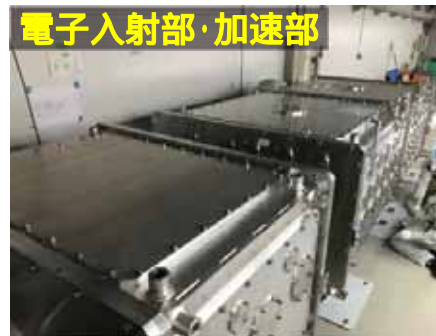
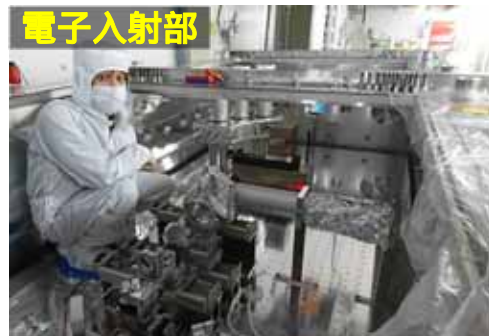
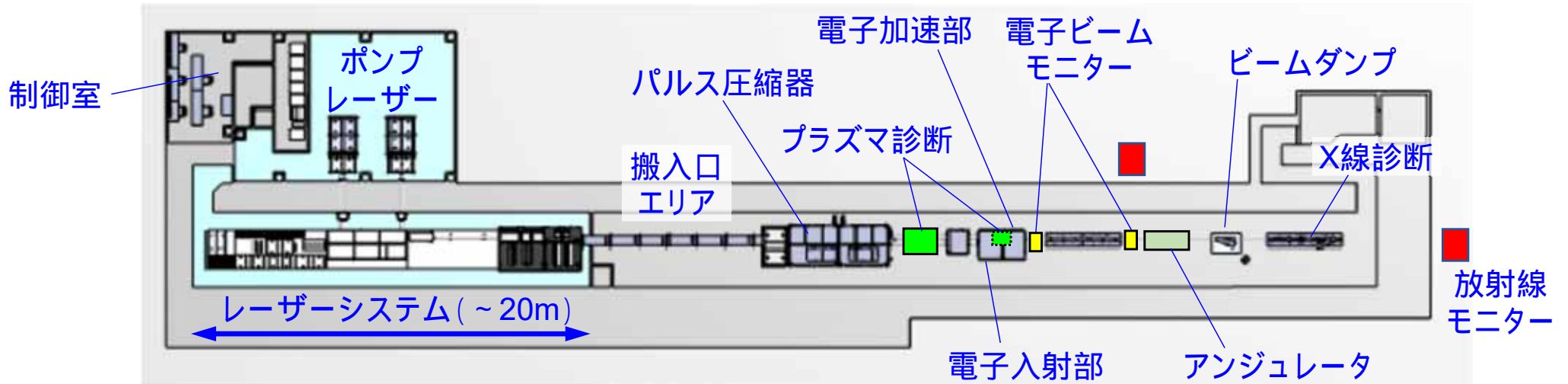
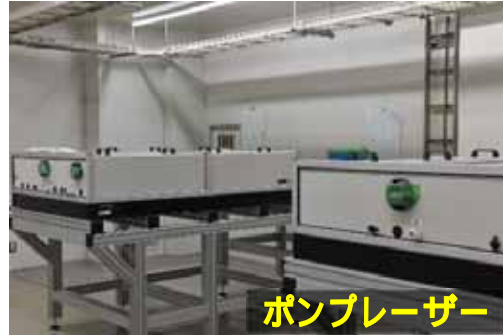
- レーザーによる電子加速
- レーザーによるイオン加速
- 高強度レーザー技術開発

# レーザーによる電子加速

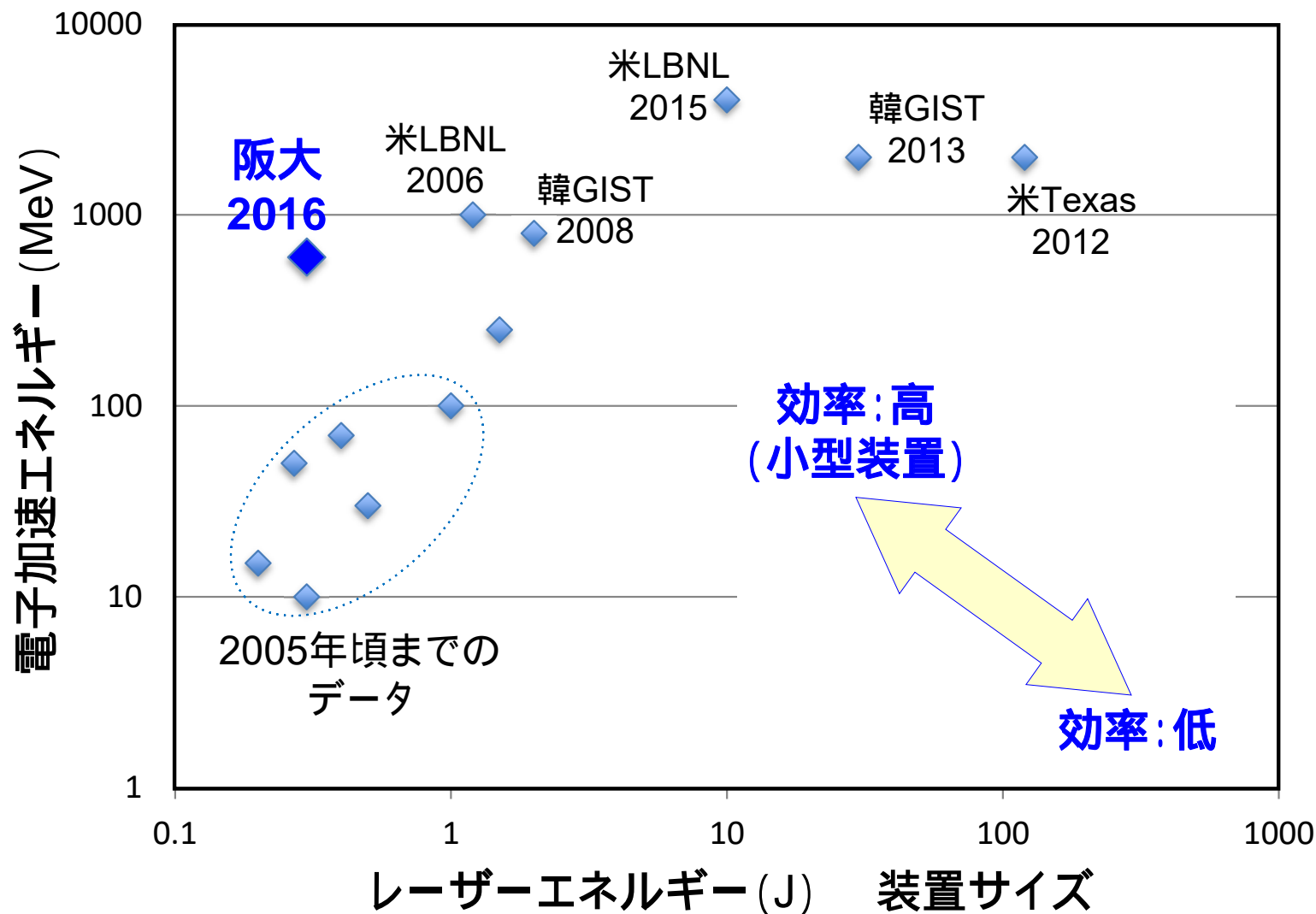


～10年前のレーザー加速電子ビーム

# 電子加速プラットフォーム(理研播磨)

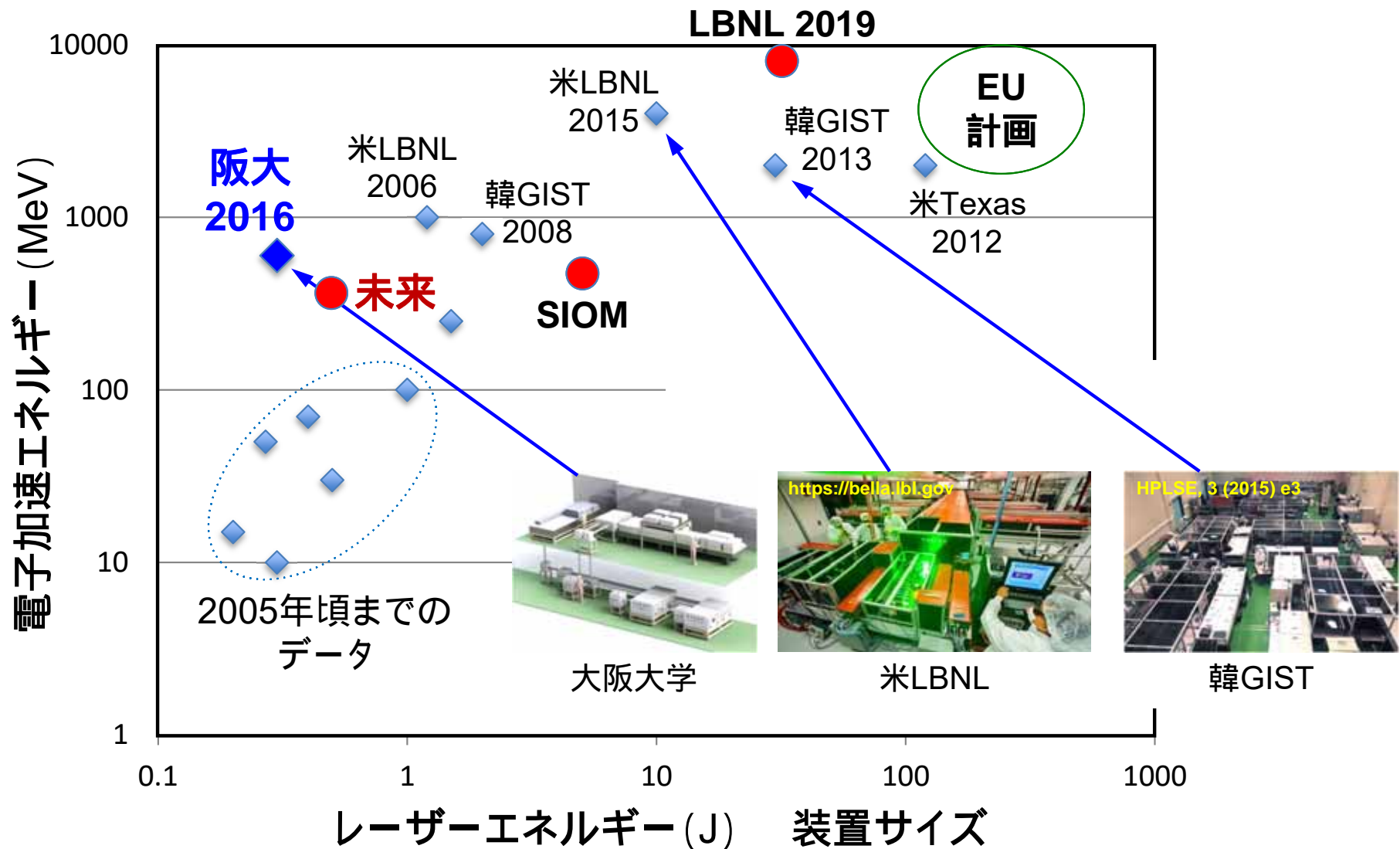


# 電子加速ベンチマーク(エネルギー効率)



日本は世界最高効率のレーザー電子加速の実績

# 電子加速ベンチマーク(エネルギー効率)



日本は世界最高効率のレーザー電子加速の実績

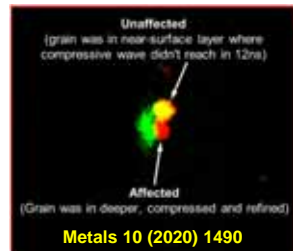
# レーザー電子加速 / FEL ベンチマーク

	JST未来	SIOM (中国)	Hamburg (独)	HZDR/SOLEIL (独/仏)	LBNL (米国)
レーザー パワー	23 TW (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		
特長	・低エネルギー ノイズなし ・小型レーザー	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 エネルギー

Phys Rev Accel Beams, 22 (2019) 074701



電子線ラジオグラフィ (~ 50 MeV LPA)

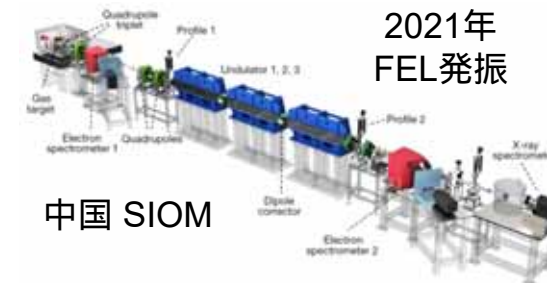


材料物性評価 (ポンププローブ実験)



Nature, 595 (2021) 517

2021年  
FEL発振



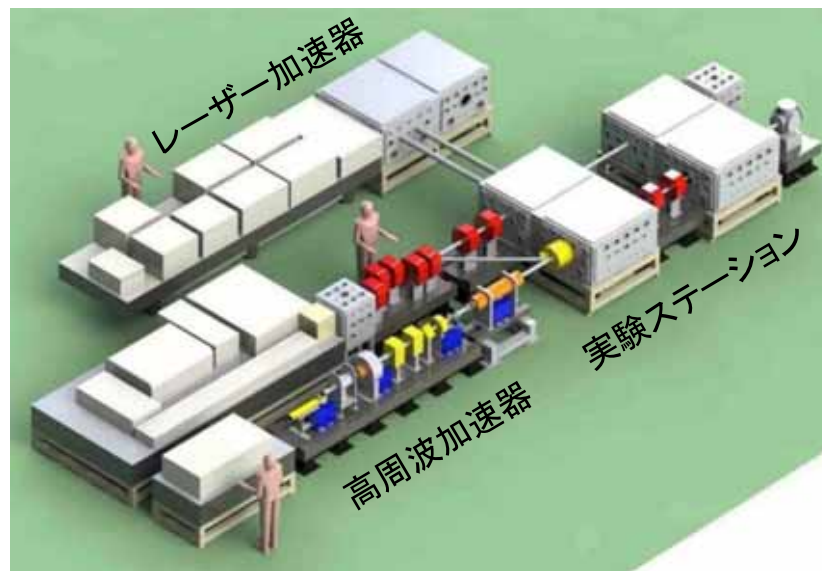
中国 SIOM

FEL (490 MeV LPA)

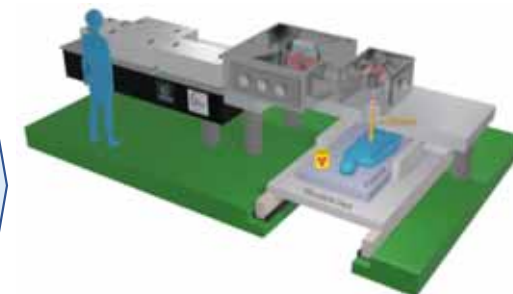


30MeV ライナック (数十mの建屋)

レーザー加速



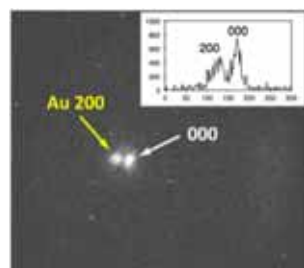
単機能化



300 MeV 電子加速器  
(創薬・医療応用)



電子蓄積リング (光源利用)



電子線回折 (10 MeV LPA)



電子線・X線がん治療装置  
<https://www.varian.com>



電子ビームの創薬・医療応用  
(プロドラッグ活性化)



# 電子加速および応用開発スケジュール

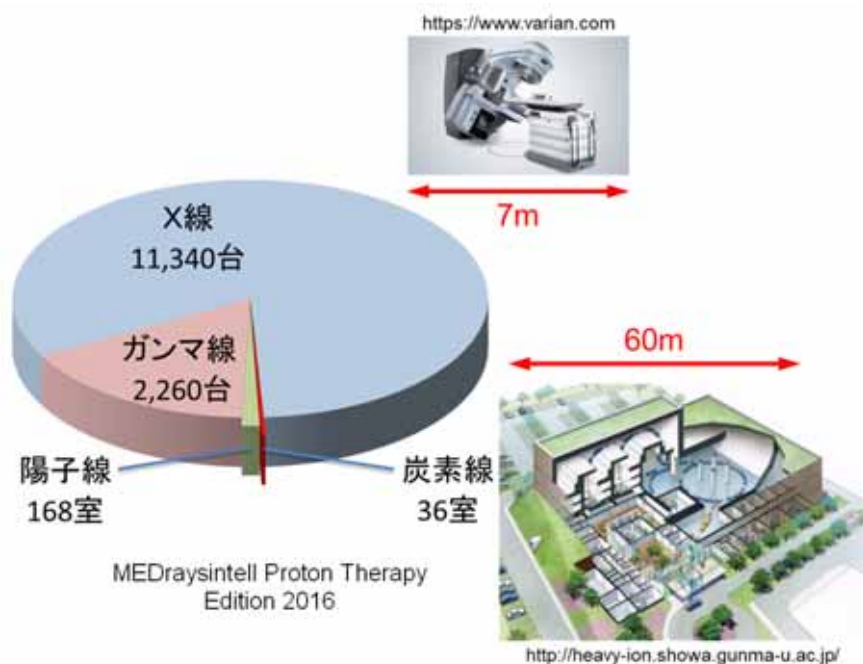
	第2ステージ		第3ステージ			FY2027 ~
	FY2022	FY2023	FY2024	FY2025	FY2026	
電子ビーム XUV-FEL	要素技術	ガスジェット高度化	計測高度化、加速機構(シミュレーション含む)			
		レーザー波面制御		制御技術開発		
	システム化(ビームライン/検出器)		提案活動(NEDO、他)		POC	
	アンジュレータ	XUV-FEL実験	FEL高度化	FEL応用開発/プラットフォーム化		別プロジェクトへ
		1m	2m(1m+1m)			
多段加速 (高エネルギー化)		仕様検討	シミュレーション研究	提案活動		別プロジェクトへ
創薬・医療 応用	(播磨)	レーザープラズマ加速による	創薬・医療基盤技術	創薬・医療応用開発		別プロジェクトへ
	(産研)	Linacによる	創薬基盤技術	光免疫療法・光線力学療法との融合		
		創薬原理実証	マウス実験、他			
創薬プラット ホーム	(産研)	Linacの産研への移設検討		播磨Linac移設	Linac運用	施設開放
		概算要求	概算要求	建屋改修工事	レーザー導入検討	企業への開放
外部との 協力		提案活動準備	提案: 文科省, JST, NEDO, AMED 等		クラウドファンディング、他	
			特許・論文・プレス	加速器メーカーとの連携	製薬会社/投資ファンド/等	

- 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

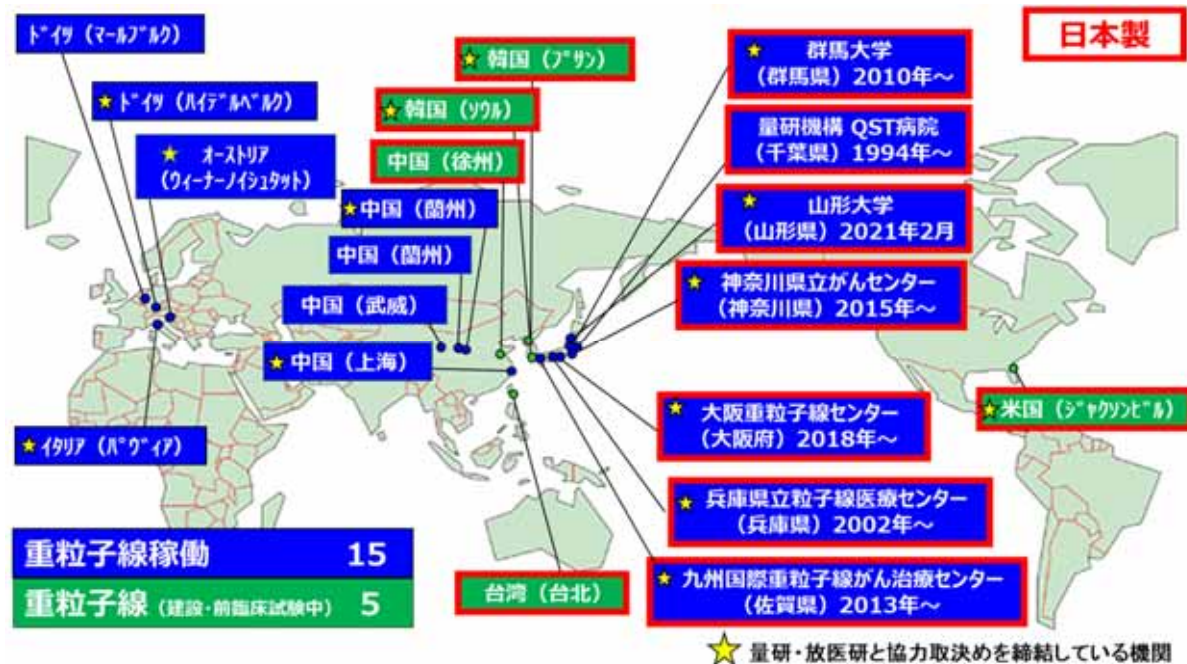
# レーザーによるイオン加速

# 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技術・装置を革新し、競争力を維持・向上
- 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



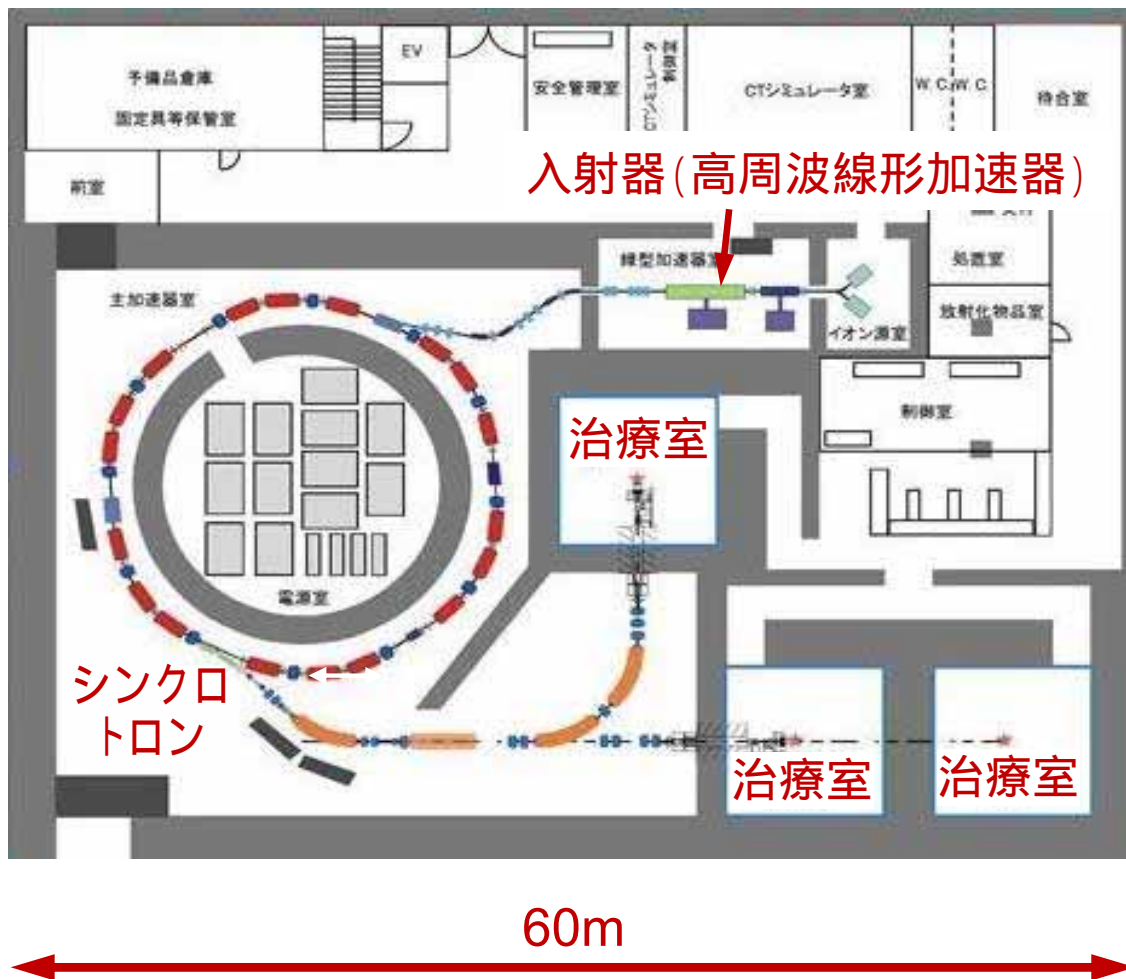
世界の放射線治療装置  
(粒子線は治療室数)



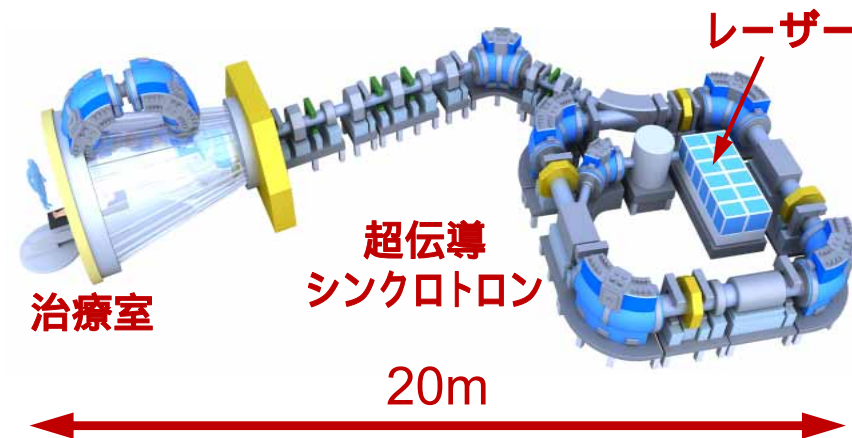
世界の重粒子線がん治療装置  
(2022/3現在)

## 重粒子線がん治療施設

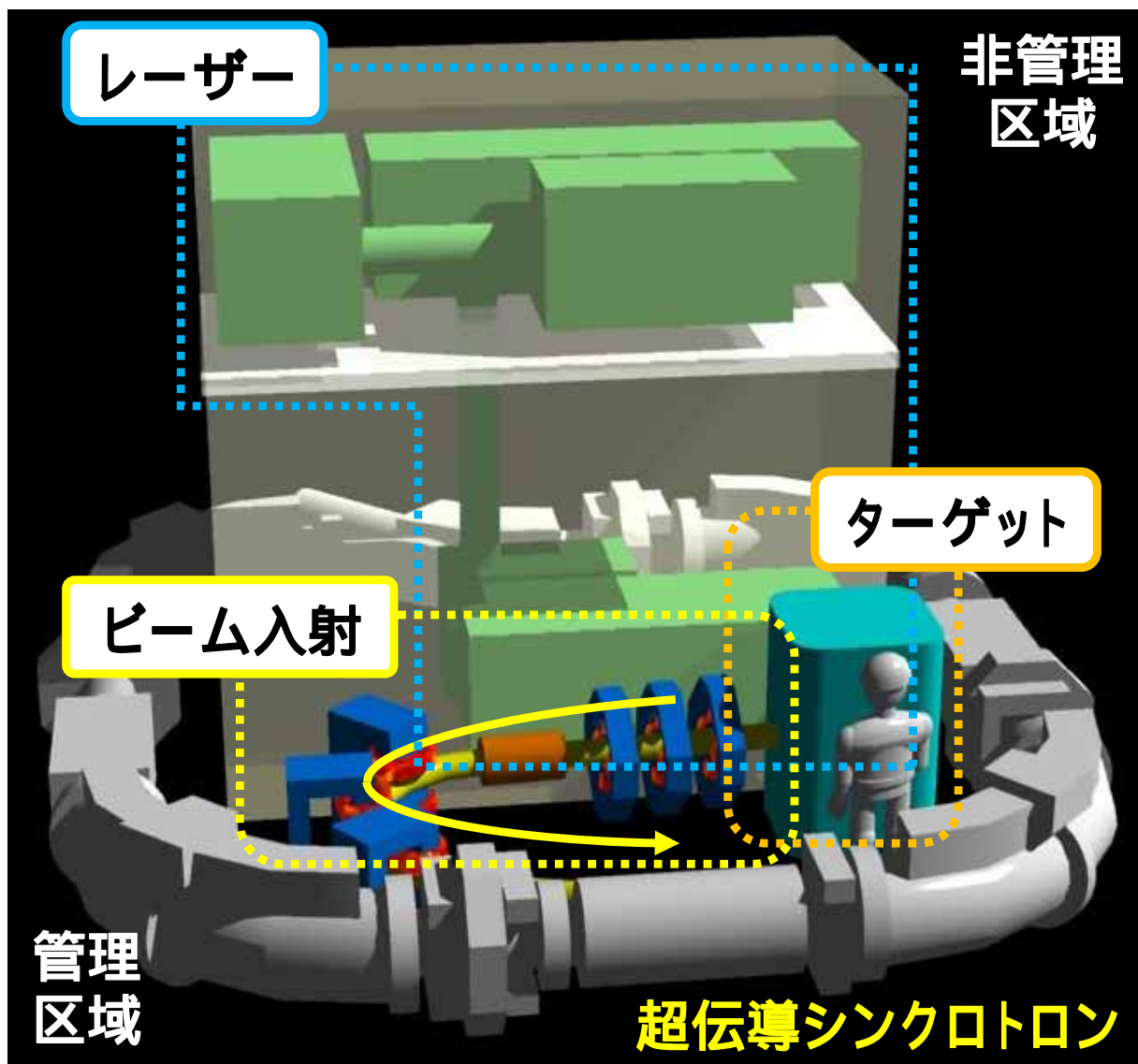
[www.antm.or.jp/05\\_treatment/0208.html](http://www.antm.or.jp/05_treatment/0208.html)



## 次世代装置 (量子メス)



- 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)
- レーザー加速による入射器小型化
- 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.

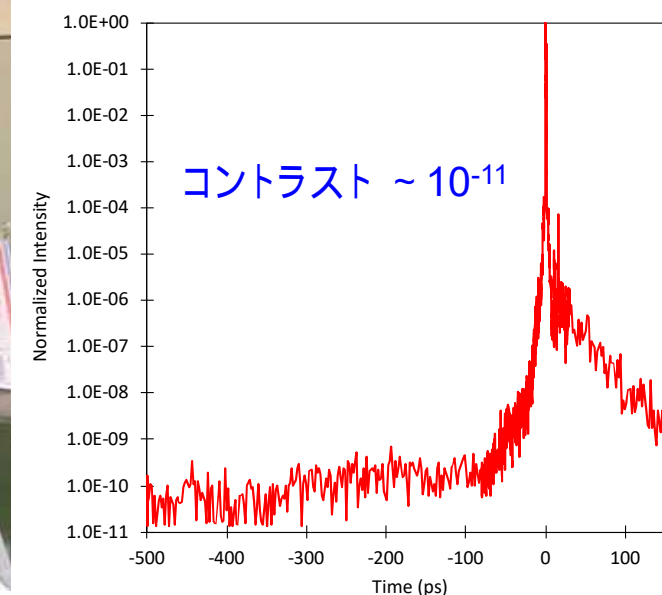
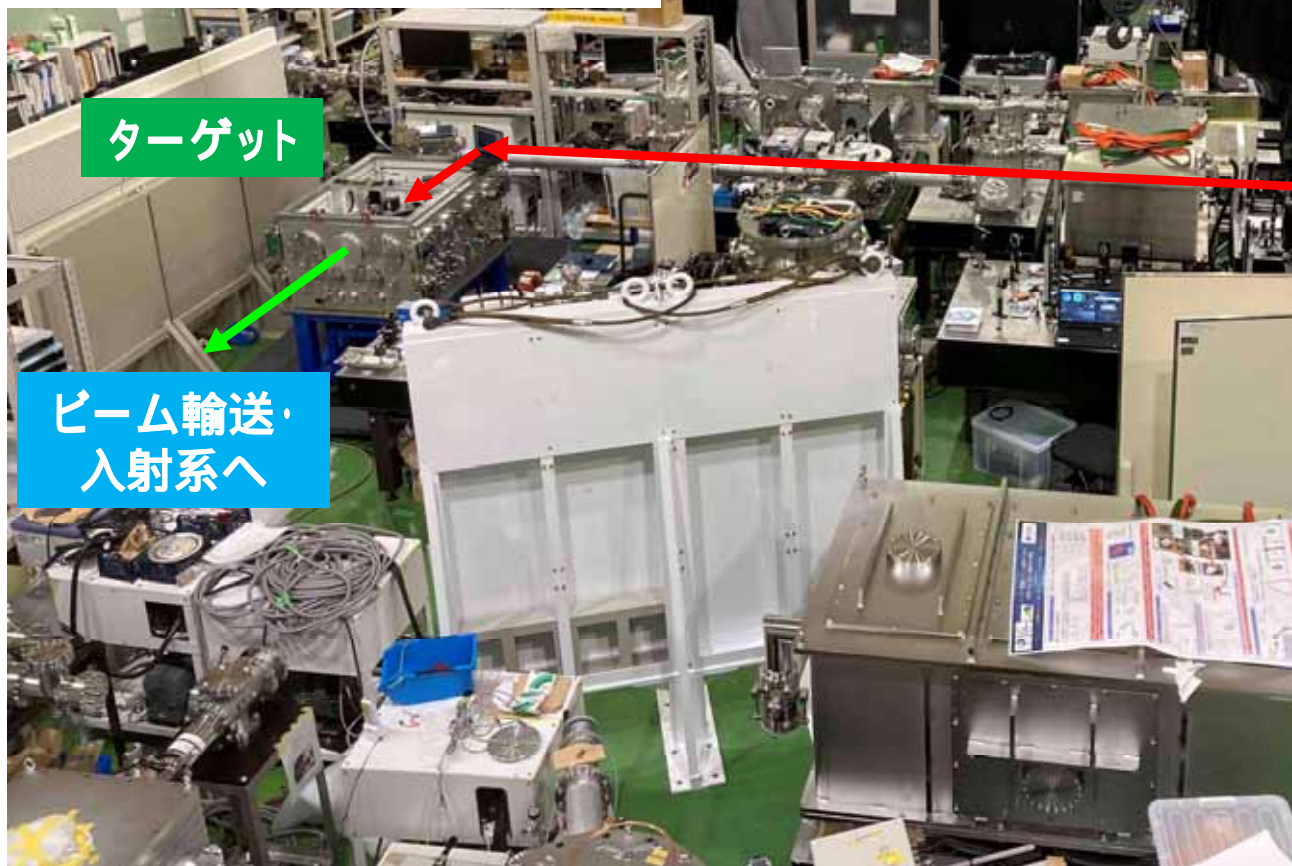
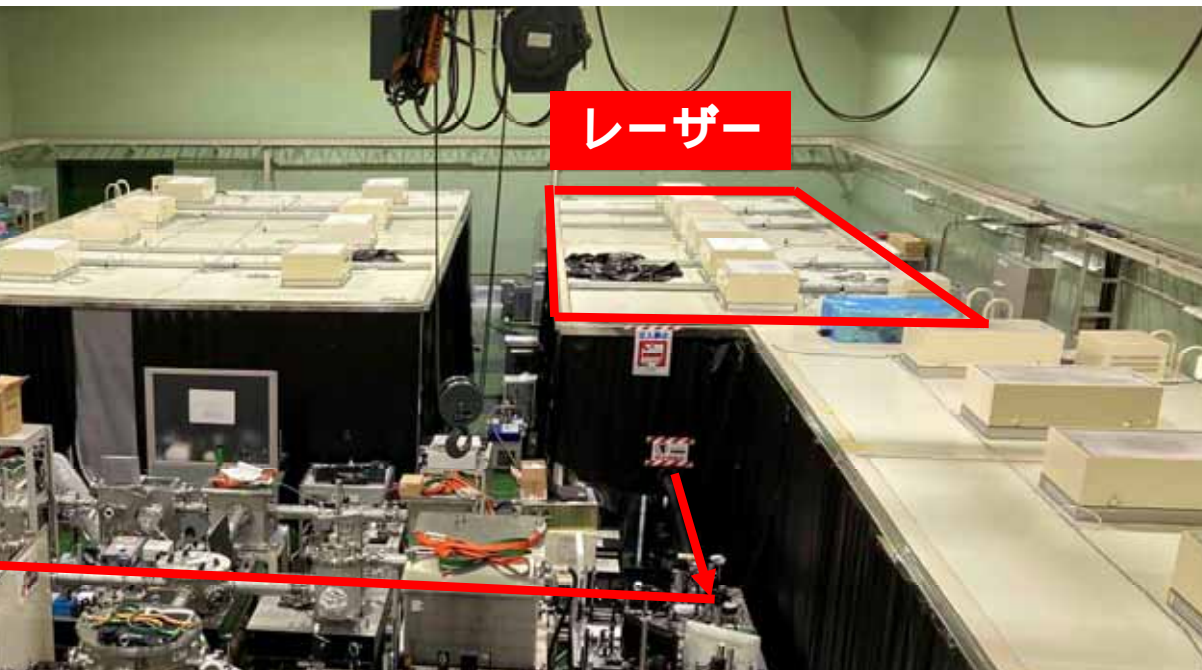
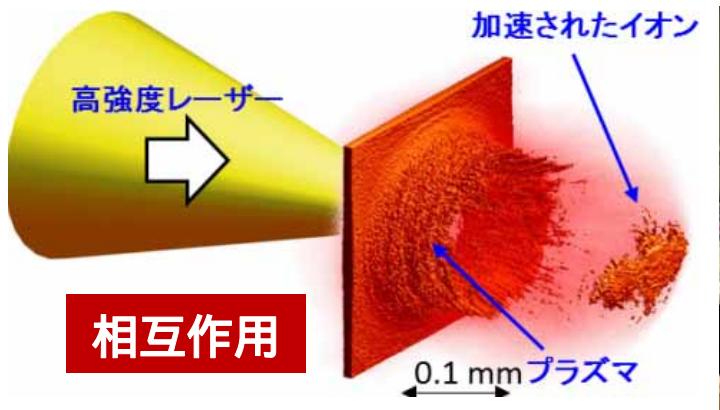
## ビーム輸送・入射

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

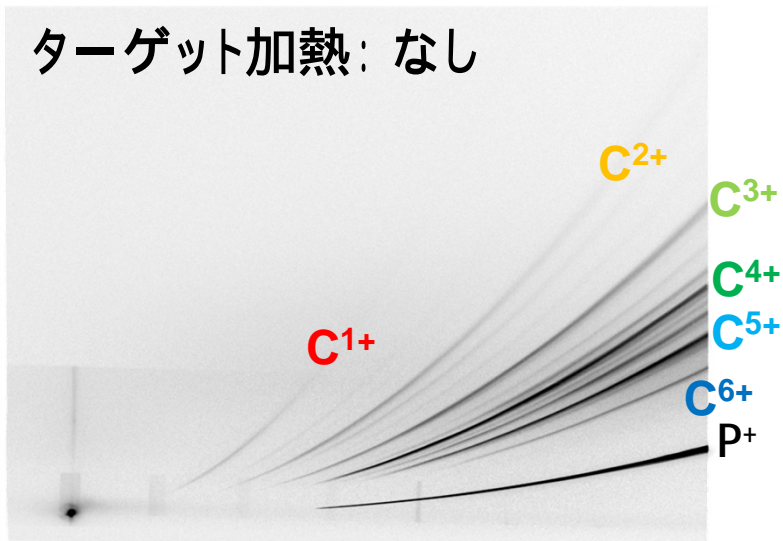
レーザーと薄膜プラズマ  
炭素ビーム発生特性  
レーザー仕様、効率, etc.

# イオン加速プラットフォーム (QST関西研)

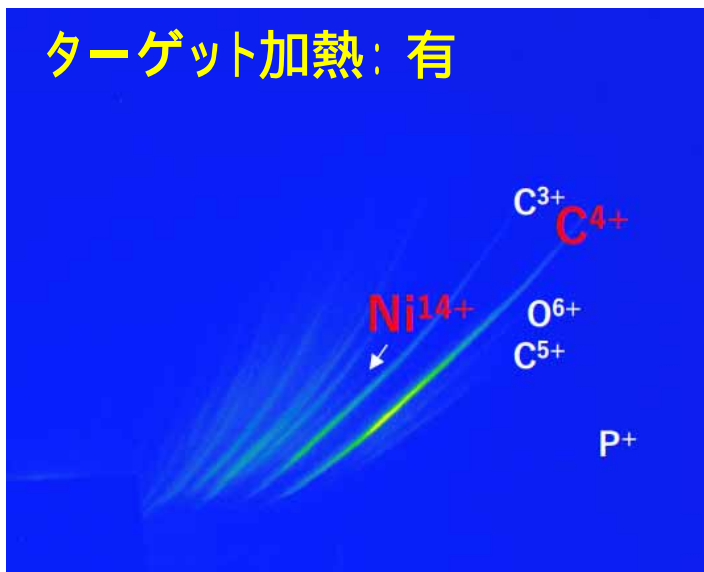


## 炭素イオン高純度化

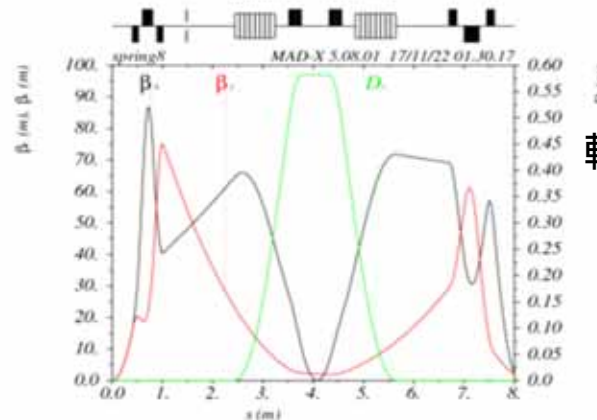
ターゲット加熱：なし



ターゲット加熱：有



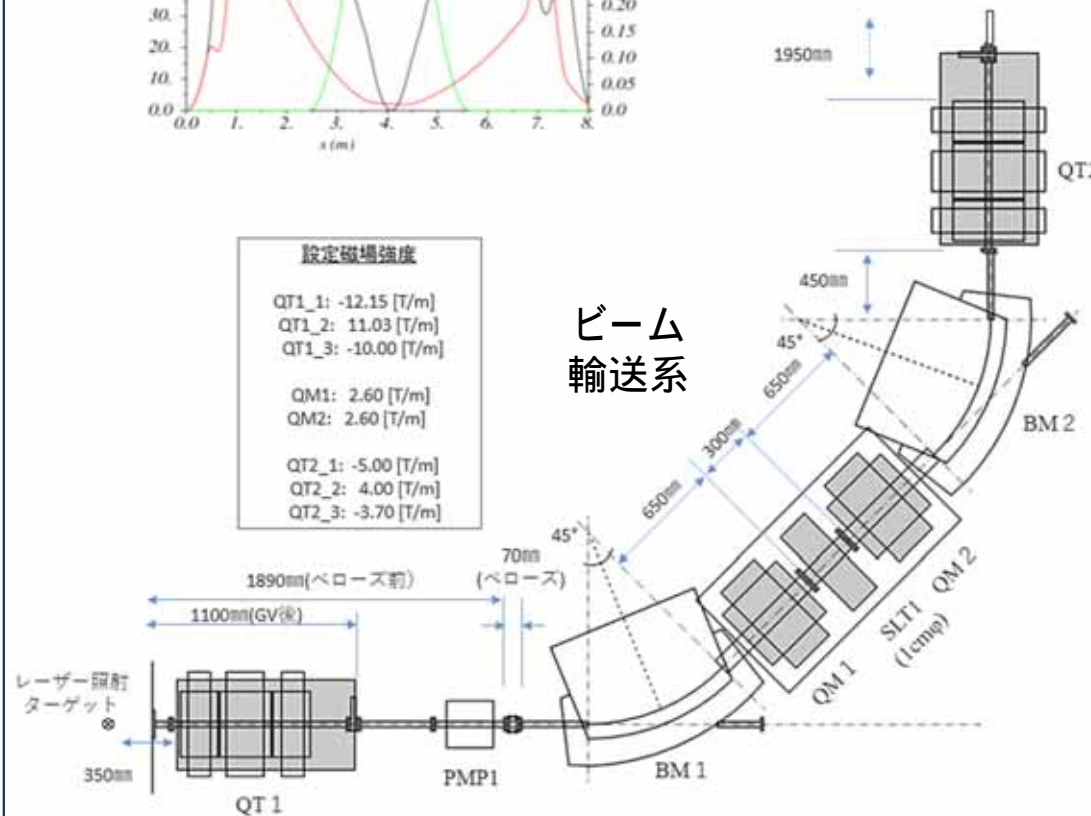
## ビーム輸送系



軌道計算

設定磁場強度

QT1_1:	-12.15 [T/m]
QT1_2:	11.03 [T/m]
QT1_3:	-10.00 [T/m]
QM1:	2.60 [T/m]
QM2:	2.60 [T/m]
QT2_1:	-5.00 [T/m]
QT2_2:	4.00 [T/m]
QT2_3:	-3.70 [T/m]



▼ 現在

JST-MIRAI LPA	2017-2020 第1ステージ	2021-2023 第2ステージ	2024-2026 第3ステージ
レーザー	高コントラスト フロントエンド	高コントラスト 1 J, 40 fs, 10 Hz	概念実証へ向け た高度化 (パルスエネルギー、 繰り返し、etc)
ターゲット (日立造船)	高純度炭素発生 の工夫 10 Hzデモ	10 Hzで高純度 炭素発生可能な ターゲット	高純度炭素発生 の安定化のため の改良、デブリ対 策、etc
相互作用	イオン加速PF J-KAREN 3D PIC	MeV/u 級 炭素線の発生	炭素イオン発生 特性の解明 → レーザー条件 の明確化
ビーム入射・モニター (住友重機)	10 keV/u 輸送デモ	MeV/u 級 炭素線 輸送デモ	バンチ圧縮等 による高イオン数密 度ビーム伝送

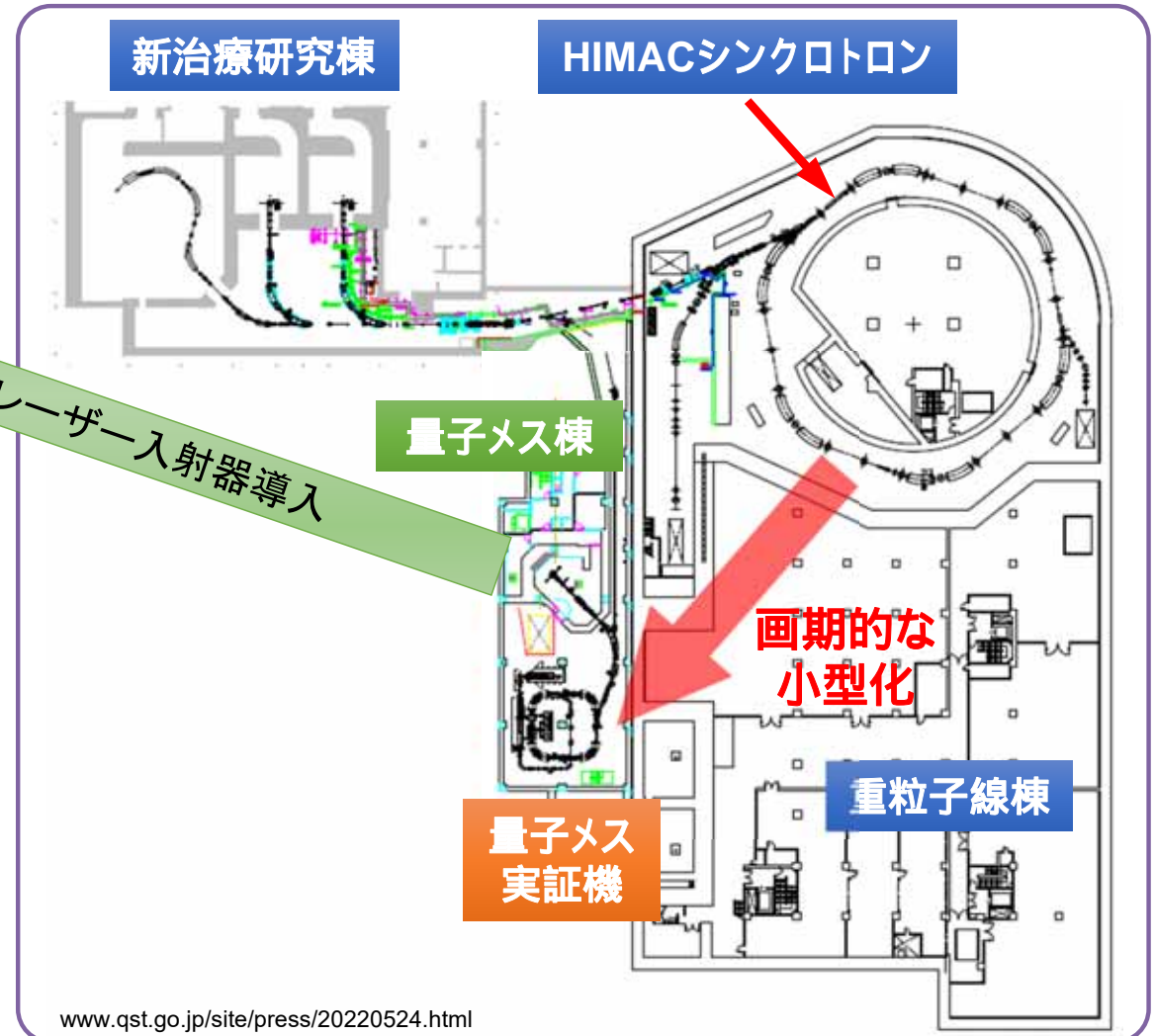
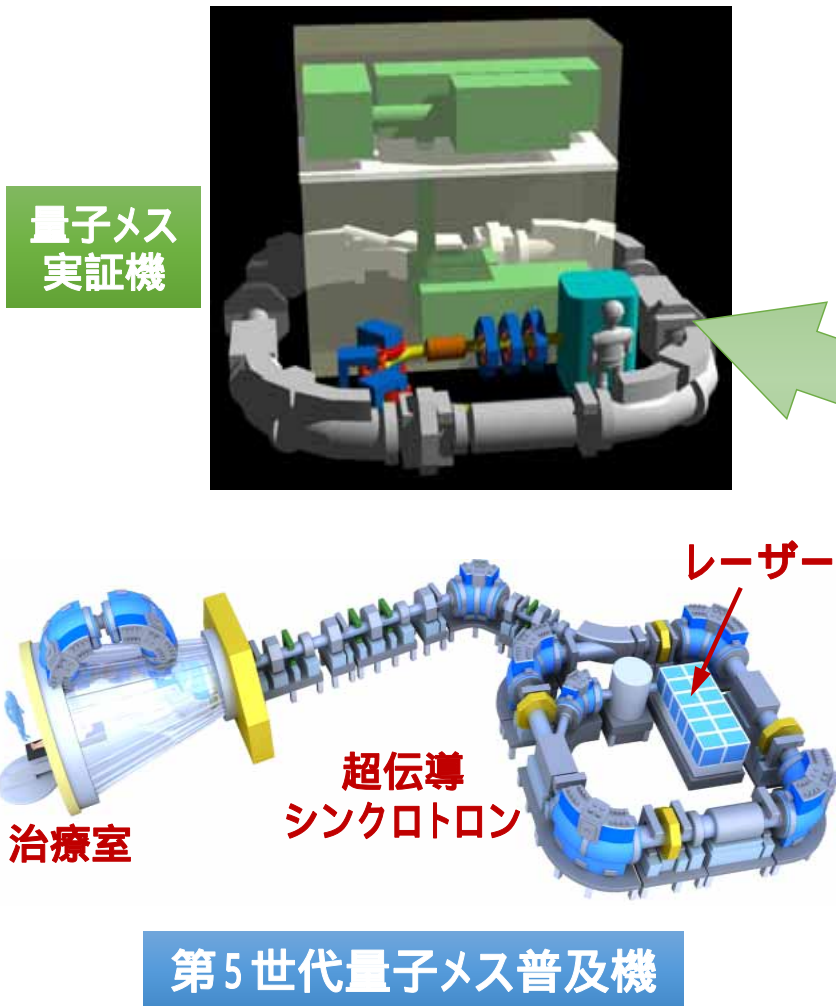
統合試験

概念実証実験

炭素イオンのシンクロトロンへの入射が可能なレーザー入射器技術を確立



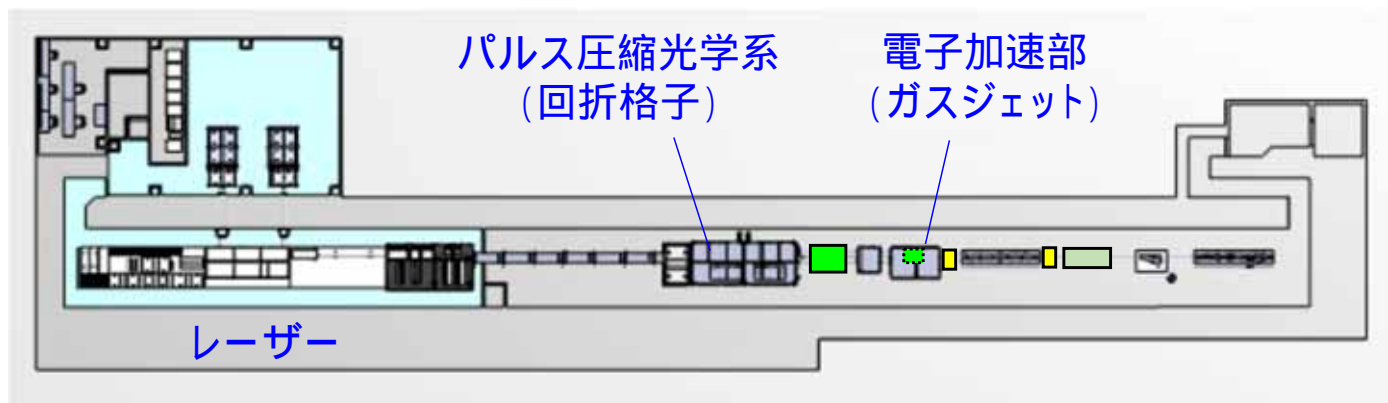
- QST稲毛に量子メス棟の建設を開始。2024年度に完成予定
- 並行して超伝導シンクロトロンを開発・導入し、量子メス実証機を建設
- レーザー入射器の導入により、量子メスの実証機とする



- 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

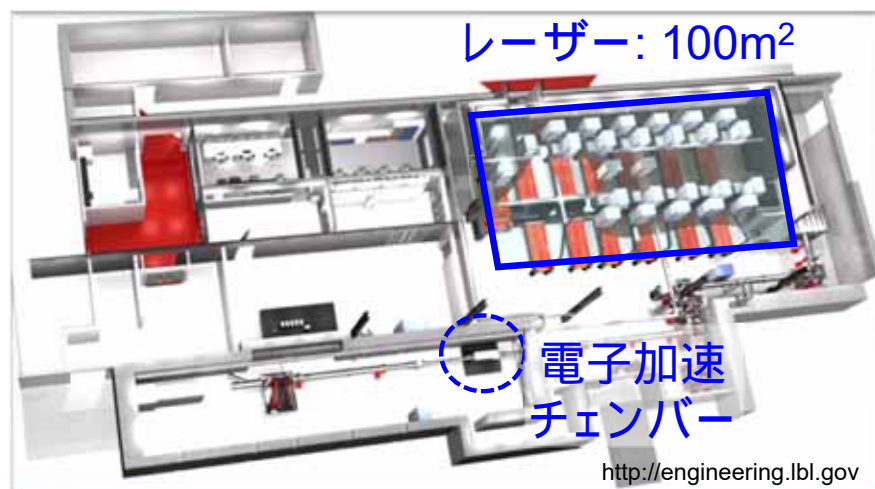
# 高強度レーザー技術開発

- レーザー加速：従来の1千倍超の加速勾配(数百MeV電子 / 数mm)
- レーザーシステムの小型化・高効率化・安定化の開発が必須

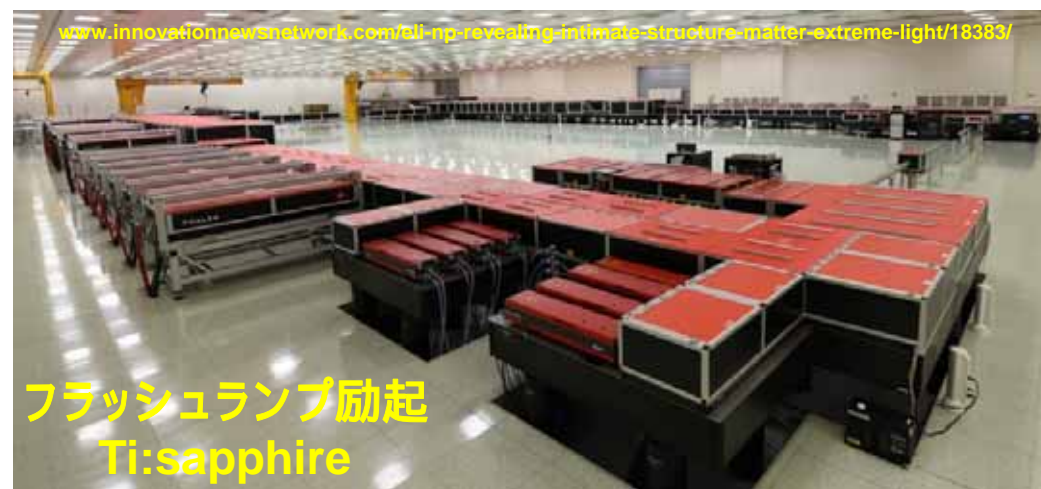


フラッシュランプ励起  
Nd:YAG, Nd:glass

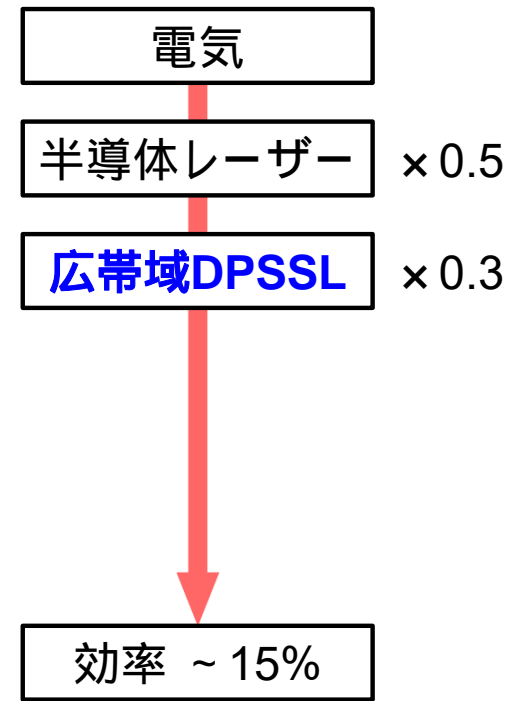
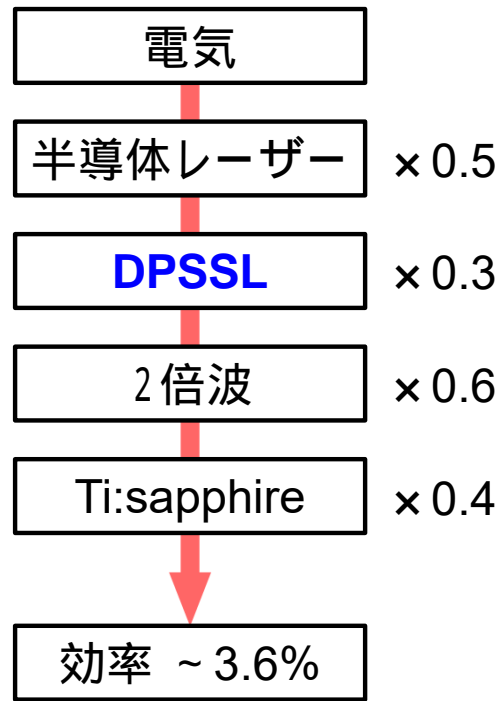
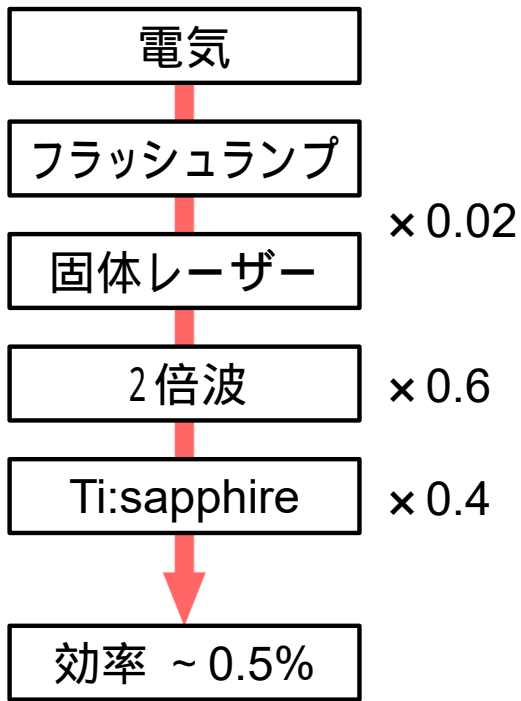
レーザー電子加速プラットフォーム(理研播磨)



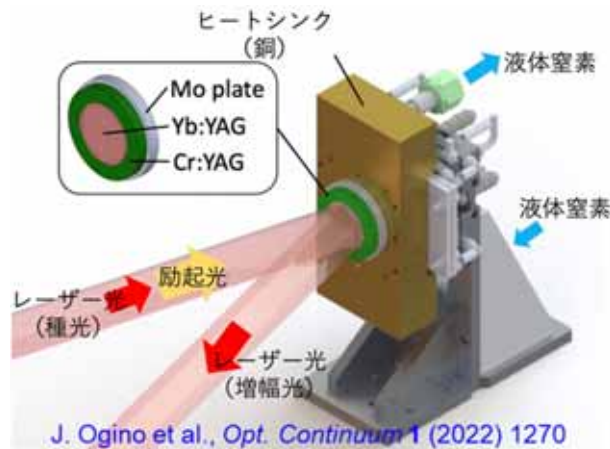
BELLA(米LBNL)



1 PW レーザー(ルーマニア ELI-NP)



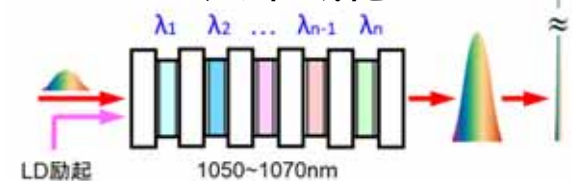
Ti:sapphire 1 PW レーザー



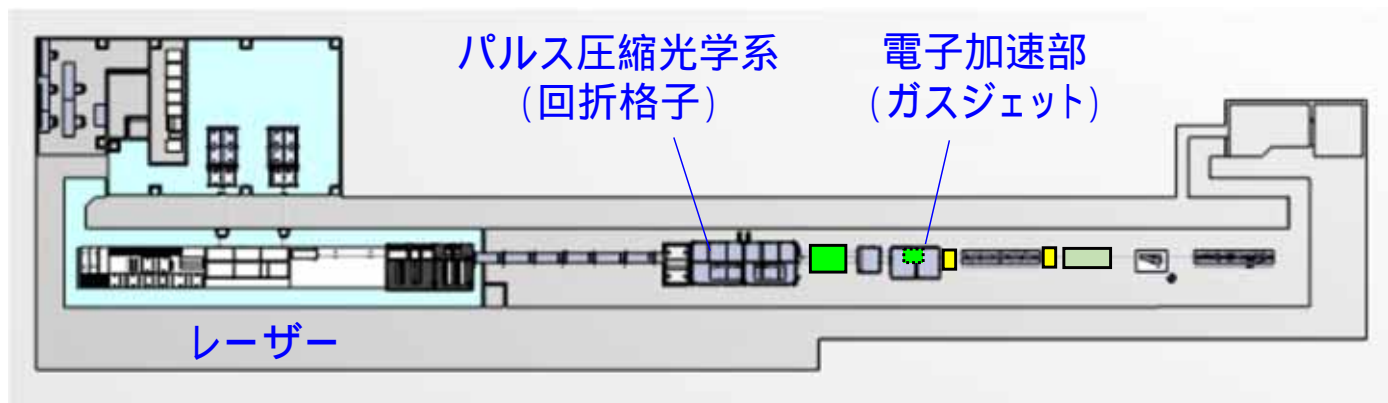
Yb:YAG アクティブミラー

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

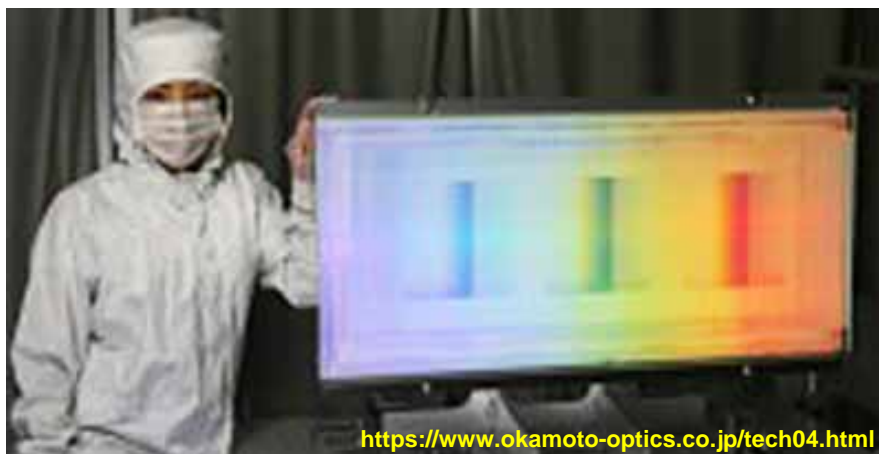


- レーザー加速：従来の1千倍超の加速勾配(数百MeV電子 / 数mm)
- 高出力化に伴い光学部品も大型化。損傷に強い光学素子が必要



パルス圧縮用光学系：  
反射型回折格子

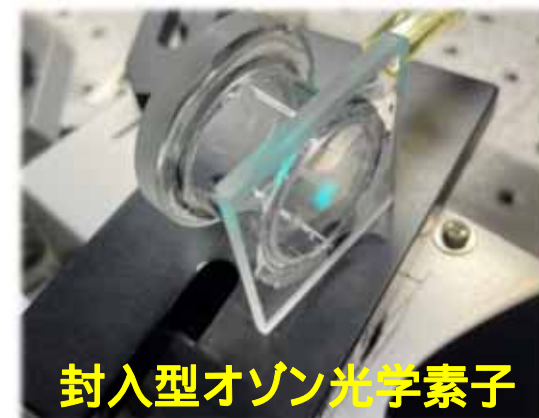
レーザー電子加速プラットフォーム(理研播磨)



<https://www.okamoto-optics.co.jp/tech04.html>

高性能反射型回折格子

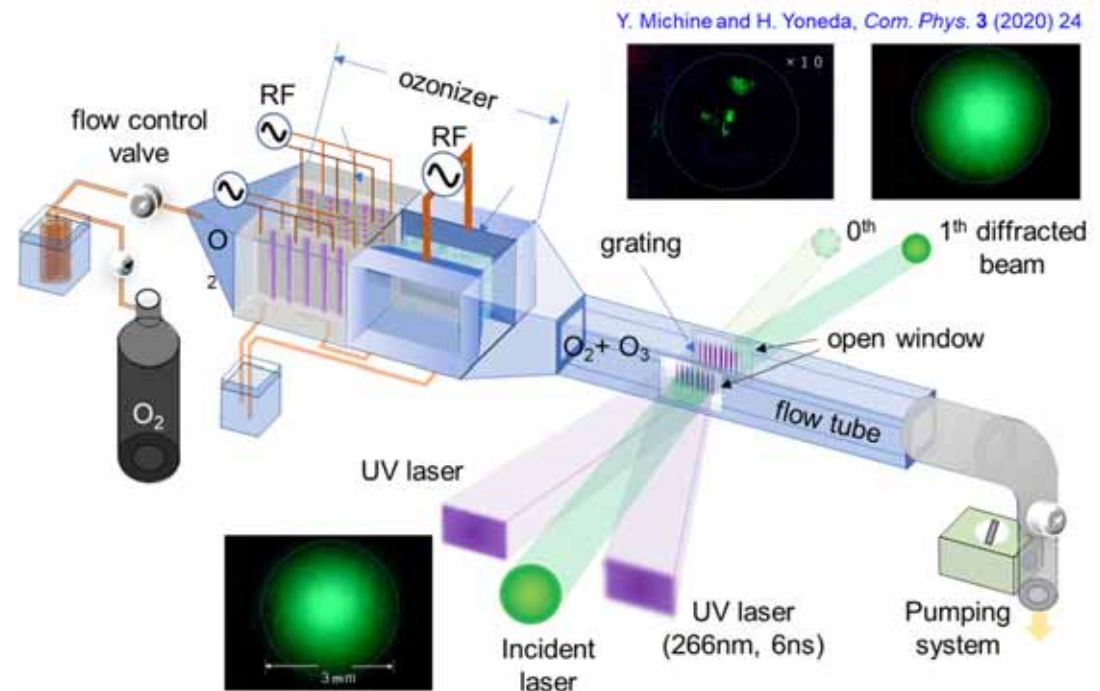
- 損傷閾値(LIDT)の系統的な評価と改善
- 超高耐力光学素子(オゾン素子)開発



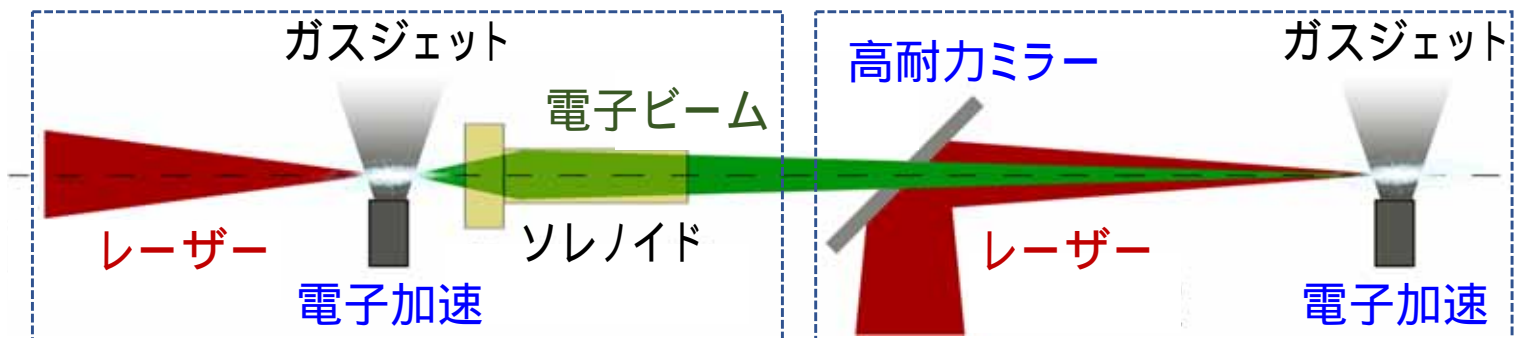
封入型オゾン光学素子

## 超高耐力光学素子の応用

- 高耐力ミラー
- レーザー加工デブリ対策
- イオン加速デブリ対策
- パルス圧縮用回折格子



多段レーザー電子加速における応用



レーザー多段加速スキーム

# 研究開発スケジュール

▼ 現在

未来社会	ステージ	第1ステージ SG1				第2ステージ SG2			第3ステージ		
	年度	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
未来社会	電子加速 	<ul style="list-style-type: none"> <li>電子加速プラットフォーム整備</li> <li>ガスターゲット技術開発</li> <li>電子加速技術開発</li> <li>モニター / 制御技術開発</li> <li>ビームライン / アンジュレータ</li> </ul>				<ul style="list-style-type: none"> <li>レーザー波面改良</li> <li>ガスターゲット改良開発</li> <li>アンジュレータ開発</li> <li>XUV-FEL実証</li> <li>電子ビーム応用開発</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>電子ビーム高度化 (FEL応用、XFEL)</li> <li>電子ビーム応用開発 (創薬・医療応用)</li> <li>非破壊検査、等</li> </ul>		
	レーザー	<ul style="list-style-type: none"> <li>アクティブミラー / DFCレーザー</li> <li>超高耐力光学素子</li> </ul>				<ul style="list-style-type: none"> <li>要素技術の高度化</li> <li>応用開発</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>加速用レーザーへ展開</li> <li>応用展開 / 産業利用</li> </ul>		
	イオン加速 	<ul style="list-style-type: none"> <li>イオン加速プラットフォーム構築</li> <li>薄膜ターゲット技術開発</li> <li>イオン加速技術開発</li> <li>ビーム入射 / モニター開発</li> </ul>				<ul style="list-style-type: none"> <li>高コントラスト化</li> <li>加速イオン高純度化</li> <li>炭素イオン入射器としての一連の動作確認</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>高度化 / 高効率化</li> <li>入射器システム実証 (QST量子メス: 第5世代装置)</li> </ul>		
QST	量子メス	<ul style="list-style-type: none"> <li>超伝導シンクロトロン</li> <li>マルチイオン照射</li> <li>要素技術開発</li> </ul>				<ul style="list-style-type: none"> <li>実証機開発 (第4世代)</li> </ul>			 <p>www.qst.go.jp/site/press/20230413.html</p> <p>www.qst.go.jp/site/press/20220524.html</p>		

- 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
- 第1～第2ステージ(2017～23年度)の主要な開発成果(予定含む)
  - ✓ 電子加速: 安定な電子入射器の開発、XUV領域のFEL発振  
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: 重粒子線がん治療装置(量子メス)の入射器に必要な要素技術開発、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、超高耐力光学素子等  
高出力レーザーの小型化に必要な要素技術開発  
加速用レーザーのシステム検討
- 第2ステージ(2021～23年度)の目標、第3ステージ(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とシステム化を推進し、社会課題の解決に貢献していく





**JST  
MIRAI 未来社会創造事業**

*With accelerators and lasers, we can realize a new era that has never been imagined before.*