

強力なレーザーを使った純度 100%の陽子ビーム発生技術

量子科学技術研究開発機構 関西光量子科学研究所
光量子ビーム科学研究部
上席研究員 福田 祐仁

2025年2月6日

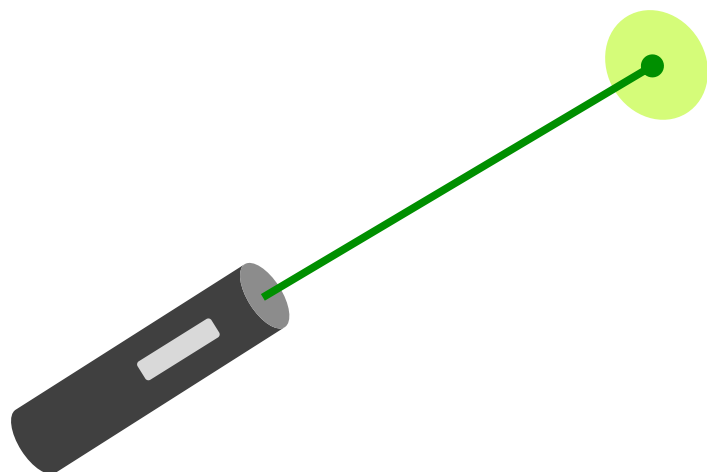
新技術の概要

- 超高強度のレーザーを、クライオ技術を用いて発生させた水素クラスターターゲットに照射し、エネルギーがそろった純度100%の高エネルギー陽子ビームを繰り返し発生させる技術。
- 従来加速器では不可能な高エネルギー極短パルス陽子ビームにより、宇宙・原子力分野での材料損傷解明・新材料開発への応用、核融合反応を利用したコンパクトな中性子パルスビーム源開発への応用、などが期待。

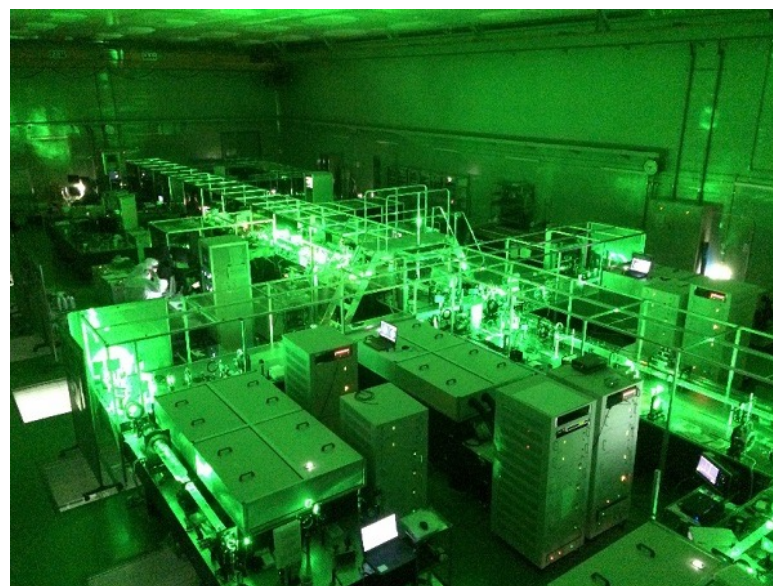
QST関西研の高強度レーザー “J-KAREN-P”

- ・ 世界で最も強力な光を発生させることの出来るレーザー装置の1つ

レーザーポインター



高強度レーザー



世界トップクラスの超短パルス高強度レーザーJ-KAREN-P
<https://www.qst.go.jp/site/kansai-dapr/>

- ・ 平均出力: 1 ミリワット ($\text{mW} = 10^{-3} \text{ W}$)
($\text{W} = \text{J/s}$)



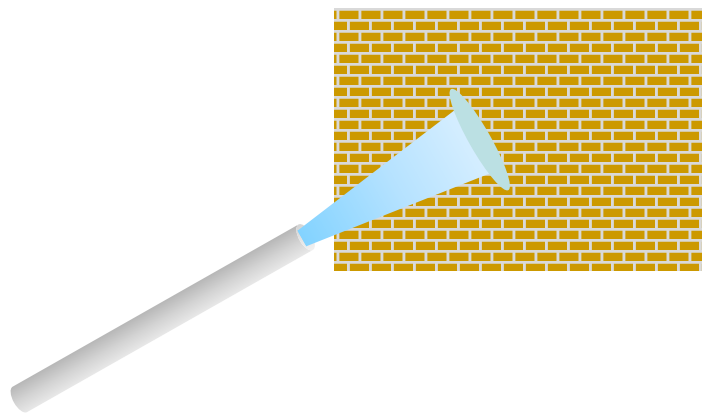
- ・ ピーク出力: 1 ペタワット ($\text{PW} = 10^{15} \text{ W}$)

100京倍

2018年ノーベル物理学賞を受
賞した技術(CPA法)を利用

強力なレーザーの何が凄いのか？

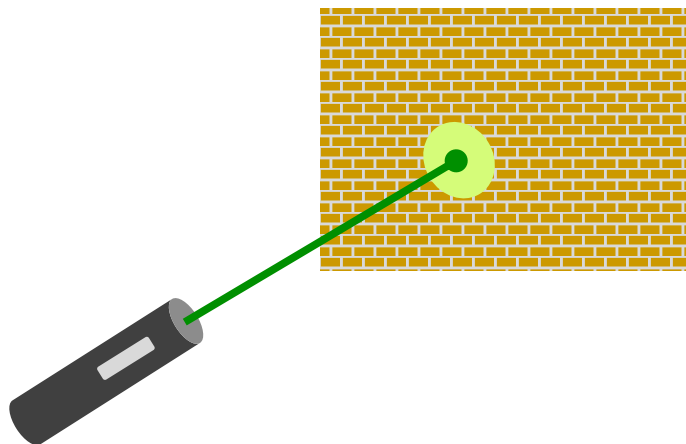
1. 水の圧力：水圧



水圧で壁の汚れを落とす！
(ゴミ粒子を弾き飛ばす)

2. 光の圧力：光圧

- ・光を受ける物体の表面に働く圧力



光圧でゴミ粒子を弾き飛ばす
ことは出来るか？

強力なレーザーの光圧は、太陽の中心の圧力と同じ

太陽光の光圧

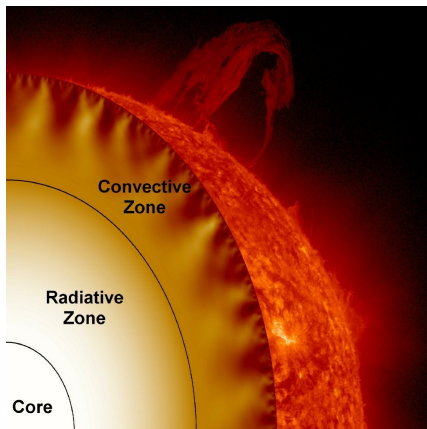
$$P = 5 \times 10^{-6} \text{ Pa} \quad (\text{大気圧の} \underline{10^{-11}} \text{。とても小さい!})$$
$$= 0.000000000001$$

J-KAREN-レーザーが生み出す光圧

$$P = 3 \times 10^{15} \text{ Pa} \quad (\text{大気圧の} \underline{10^{10}} \text{倍! とても大きい!})$$
$$= 1000000000000$$

太陽核(核融合が起こっている中心部分)の圧力

$$P = 4.3 \times 10^{15} \text{ Pa}$$



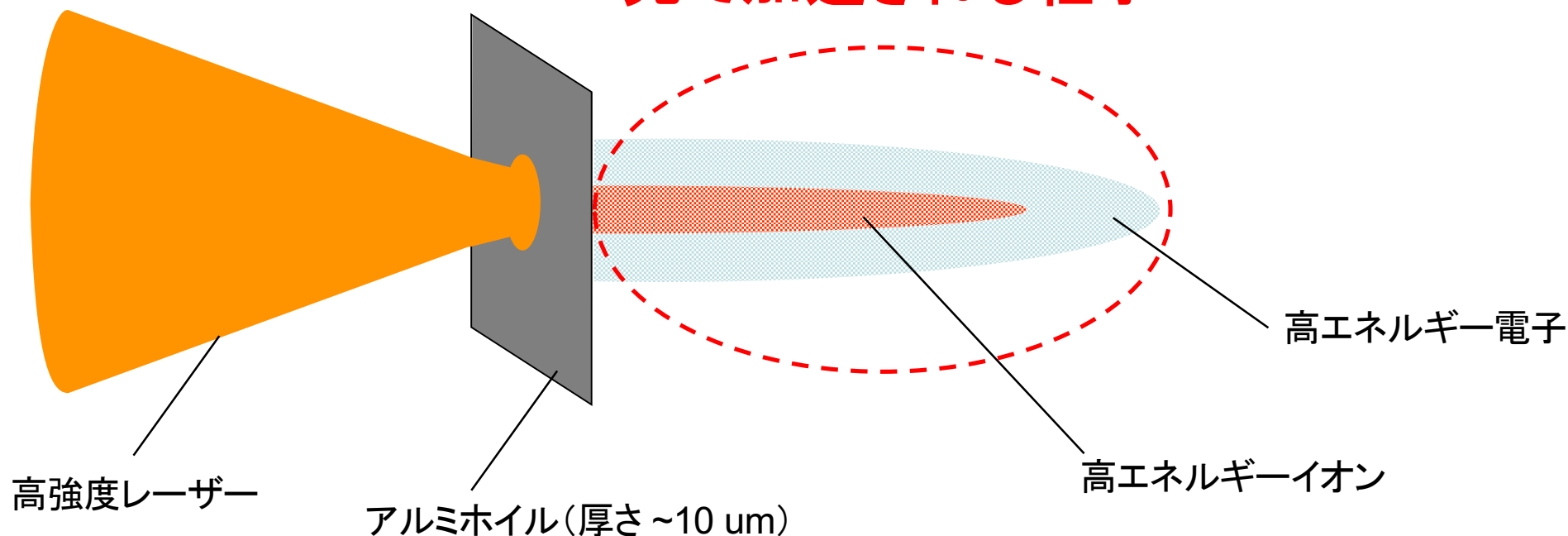
The Solar Interior

<https://solarscience.msfc.nasa.gov/interior.shtml>



光で粒子を加速することが出来る！

光で加速される粒子



アルミホイルから飛び出す粒子の速度は、光の速度にまで達する！



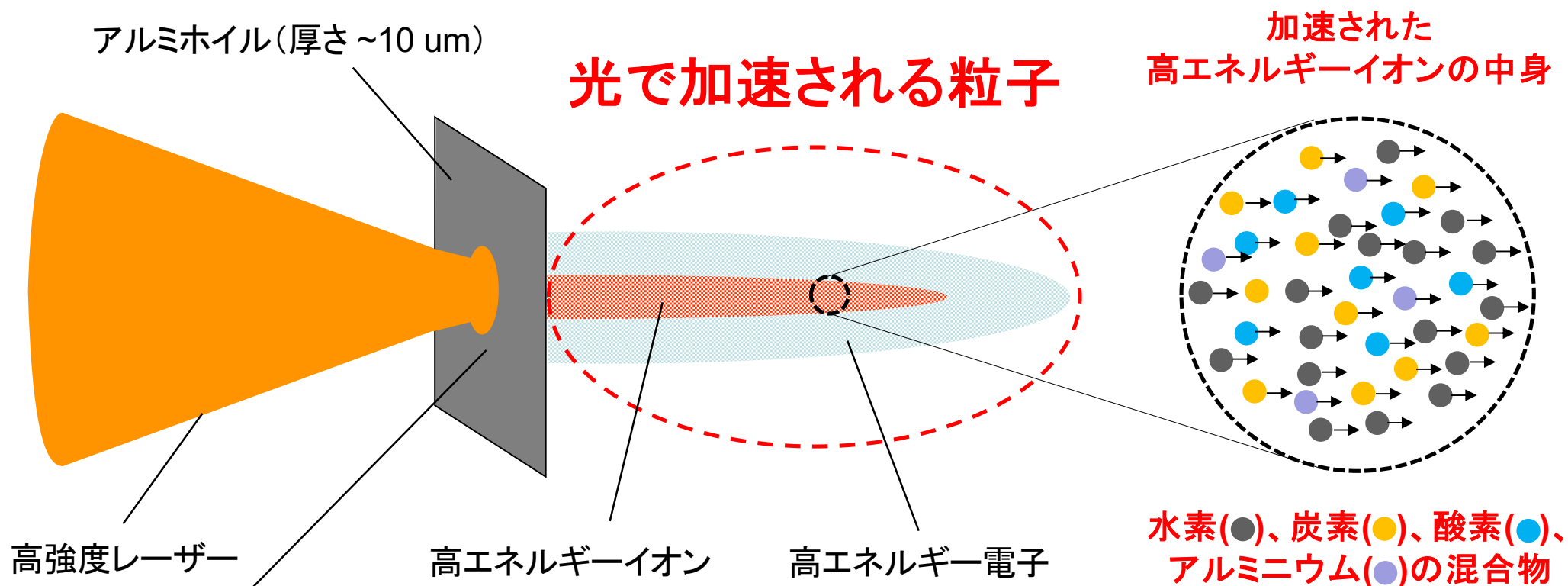
光を用いて粒子加速器を作ることが可能！

従来の陽子ビーム加速技術とその問題点

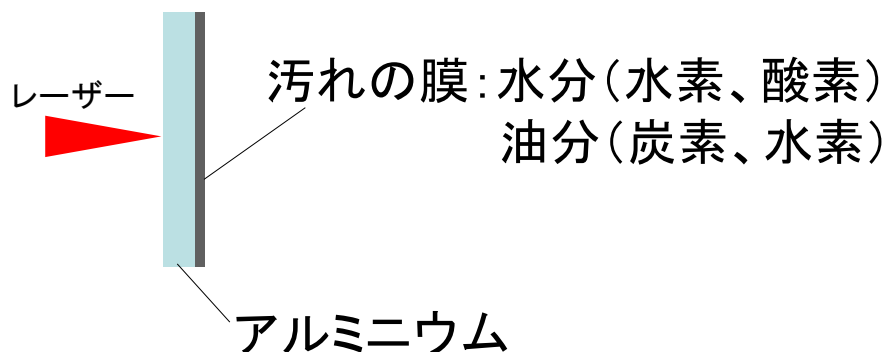
従来の金属などの薄膜ターゲットを用いたレーザー駆動陽子ビーム発生研究では、

ターゲット表面に付着している不純物に由来する炭素イオンや酸素イオンもレーザー照射によって同時に発生する

等の問題があり、陽子のみを選択的に繰り返して発生させることが大きな課題であった。



ターゲットの
表面は汚れ
ている！

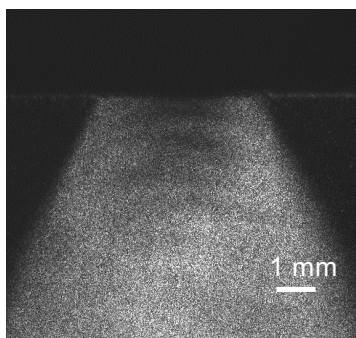
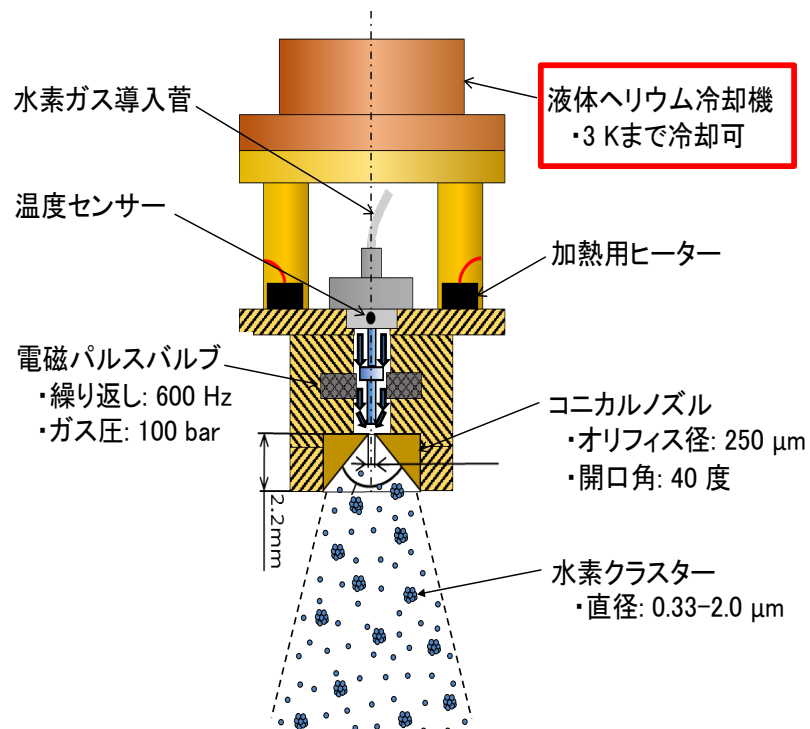


汚れの膜を取り去ると、、
ターゲット物質(アルミニウム)
のみが加速され、陽子ビー
ムは得られない。

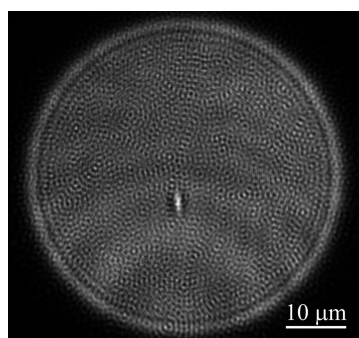
新技術の特徴・従来技術との比較

- クライオ技術の導入により、水素ガスを固体にし、陽子ビームの元となる水素そのもので作られたターゲット（=水素クラスター）を用いることにより、メガ電子ボルトの純度100%の陽子ビームを繰り返して発生させることに成功した。
- この技術では、周辺機器を劣化させる原因となるデブリ（=ターゲットの破片）が発生しないため、100 Hzの繰り返し陽子ビーム発生が可能となった。

マイクロ水素クラスターターゲット生成装置



シュリーレンイメージ

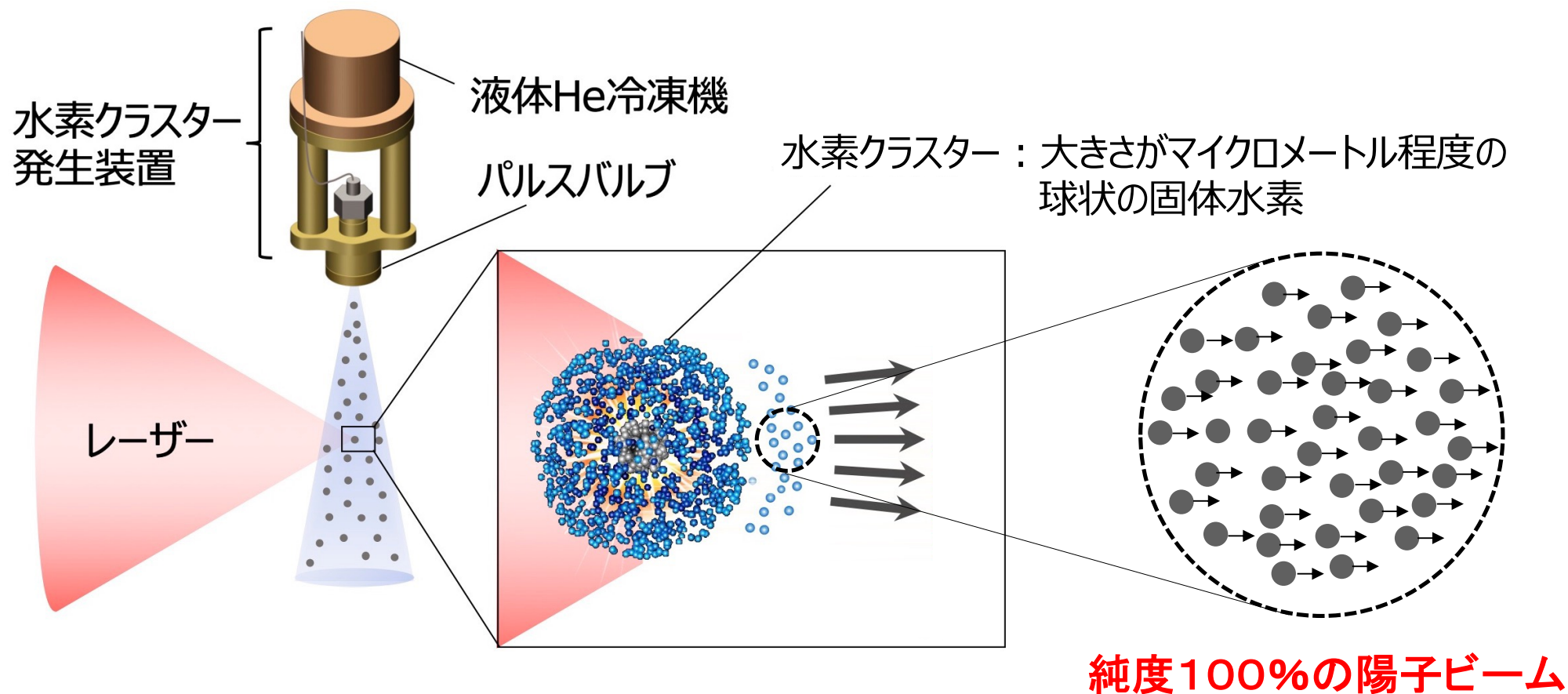


高倍率顕微鏡観察



直径0.3～2.0 μm の水素クラスター生成(世界初・唯一)

マイクロ水素クラスターターゲットからの陽子ビーム



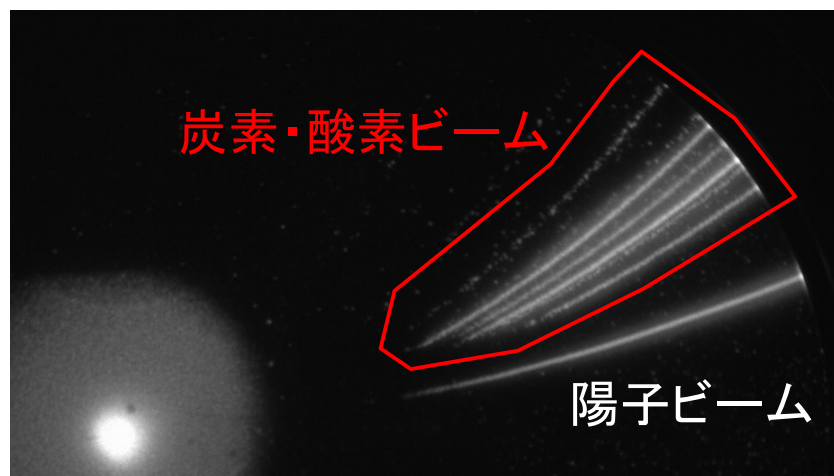
レーザー駆動陽子ビーム
加速器の実現
へ向けて大きく前進

新技術の特徴・従来技術との比較-続き

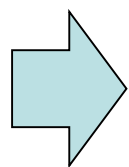
- ターゲットの発生条件を最適化することで、エネルギー幅の狭い陽子ビームを発生させたり、エネルギーの変動を低く抑えた陽子ビームを発生させることが可能となった。
- 本技術は、高純度で高いエネルギー安定性を持つ陽子ビームの発生を可能にする基盤技術となることが期待される。

新技術の特徴・従来技術との比較-続き

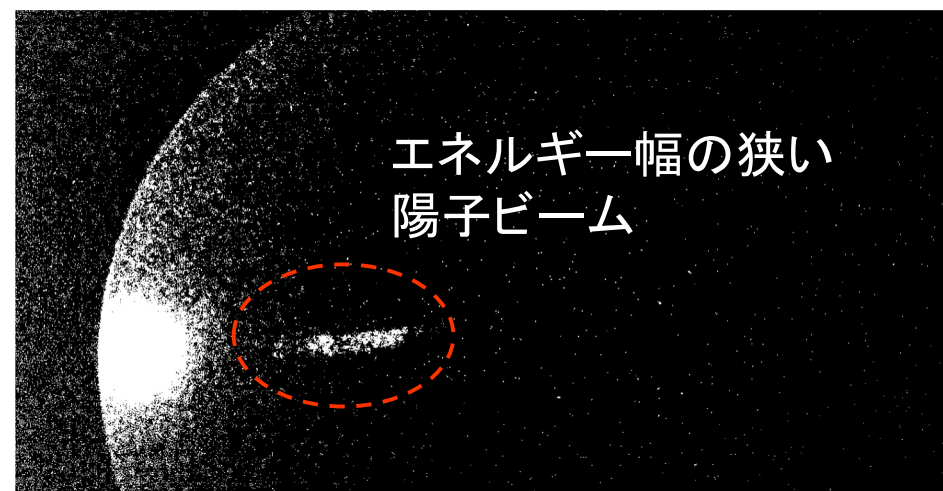
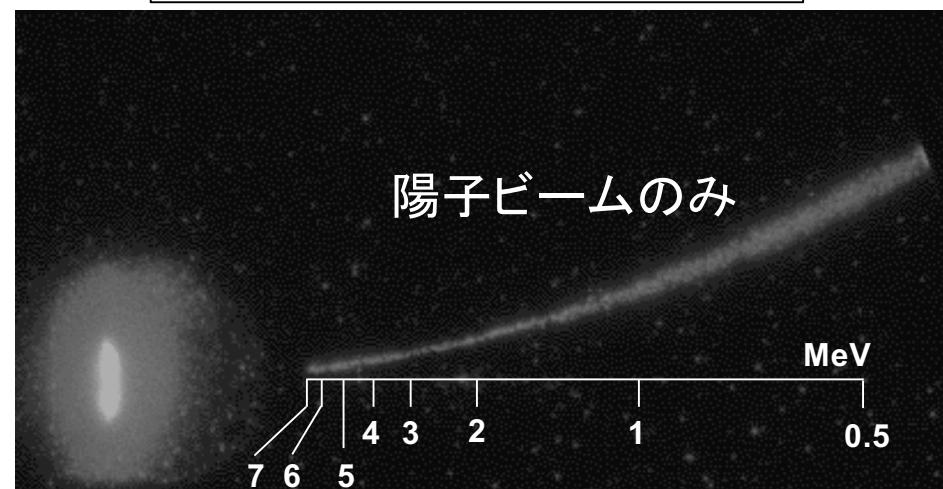
従来技術による方法



エネルギー幅の狭い
陽子ビームを発生



本技術による方法



想定される用途

- 高強度レーザーは、比較的低い電力で稼働し、教室程度のスペースに装置の設置が可能なため、高い繰り返しで長時間安定に動作する省電力でコンパクトな陽子ビーム加速器の実現につながることが期待される。
- これまで未知だった放射線による材料損傷を解明し、宇宙・原子力分野での新材料開発に貢献することが期待される。

想定される用途-続き

- 水素の代わりに重水素を用いることで、中性子を発生させることが可能であるため、中性子による物質診断や核融合研究のテストベンチとしての利用が期待される。

実用化に向けた課題

- 現在、水素クラスターの大きさを直径約0.3マイクロメートル程度にそろえることで、エネルギー変動を約11%に抑えた陽子ビームを発生させることが可能なところまで開発済み。
- 水素クラスターの大きさを直径約1マイクロメートル程度にそろえる技術開発が未解決である。これが可能となると、医療応用可能な陽子ビームを発生させることが期待できる。

企業・研究機関への期待

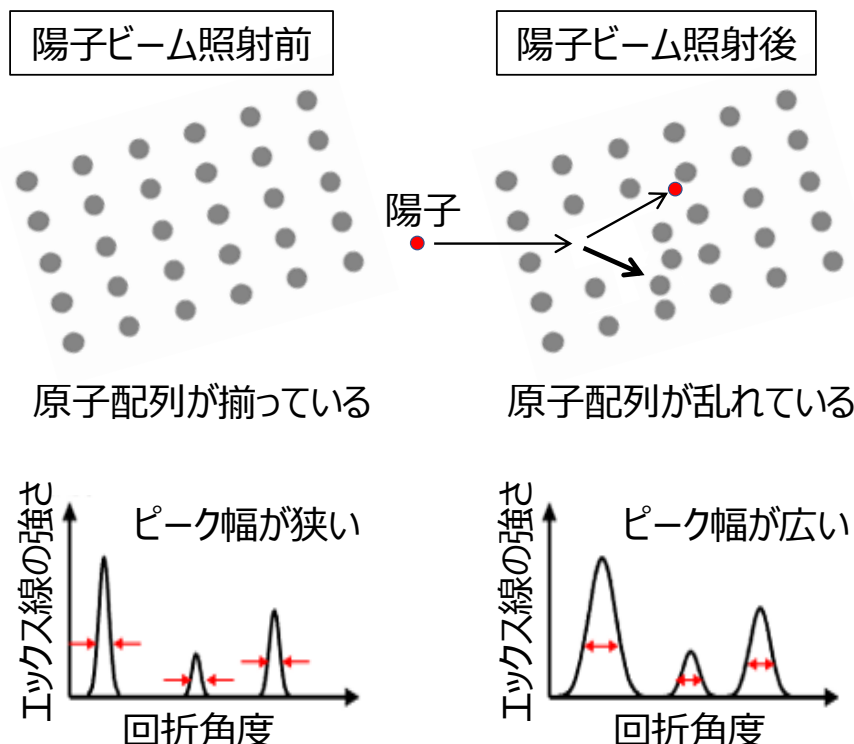
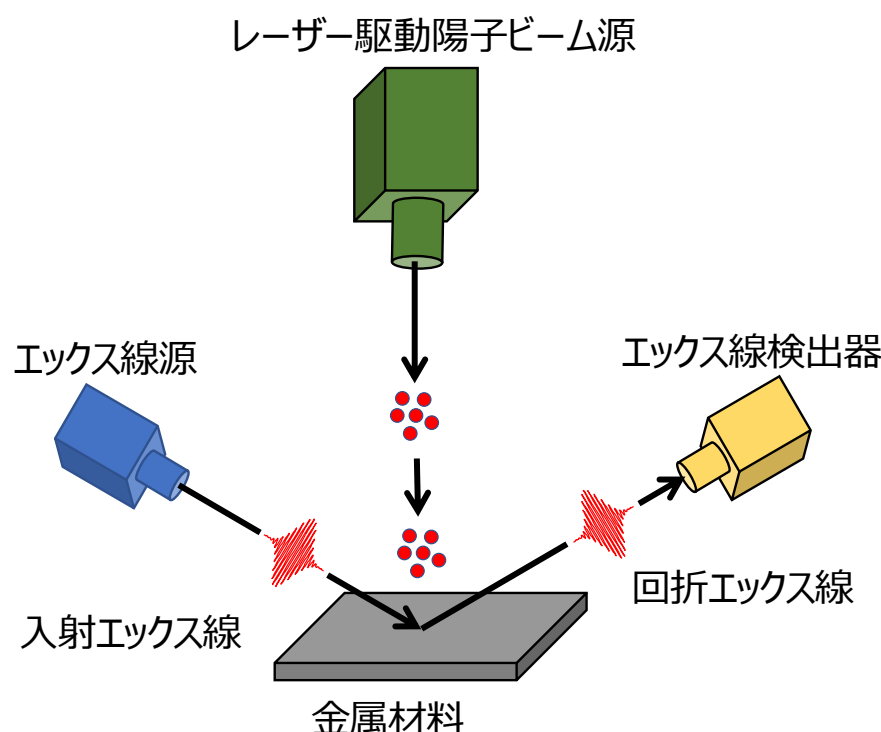
- 宇宙・原子力分野などでの新材料開発をおこなっている企業、中性子診断や核融合分野への展開を考えている企業・研究機関には、現状の本技術の導入が有効と思われる。
- 将来的な医療応用を念頭に置いた場合、クライオ技術を用いた微粒子発生、サイズ制御、サイズ計測技術を有する企業・研究機関との共同研究を希望します。

企業・研究機関への貢献、PRポイント

- 本技術を用いることで、これまで不可能であった、放射線（陽子・中性子）による材料損傷の瞬間を捉えて分析することにより、材料劣化のメカニズムを解明し、放射線の影響が強い宇宙や原子力環境に耐えうる新材料開発などに貢献することが期待される。

本技術で可能になることの例

レーザー駆動陽子ビームとエックス線を用いた劣化プロセスを模擬する実験
-放射線による材料劣化の解明-



金属材料に陽子ビームを照射する前と後で、エックス線回折の手法を用いて金属材料中の原子配列の様子を観測します（左）。時間幅が短いレーザー駆動陽子ビームとエックス線を用いることで、材料内部の原子配列が変化する瞬間の様子を観察し、劣化が起こる原因を明らかにします（右）。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称：イオン加速方法およびイオン加速装置
- 出願番号：特願2023-141144
- 出願人：量子科学技術研究開発機構、神戸大学*
- 発明者：福田祐仁、金崎真聡*、井上千裕*

産学連携の経歴

- 2023年- EX-Fusion社と共同研究開始

お問い合わせ先

量子科学技術研究開発機構
イノベーション戦略部 知的財産活用課

T E L 043-206-3027
e-mail chizai@qst.go.jp