プラズマ・イオンビームの基礎と応用に関するスクール@理化学研究所

2025/2/20-21

レーザーイオン源によるリチウムビームを利用した加速器中性子源開発の取り組み

高橋 一匡, 佐々木 徹, 菊池 崇志

長岡技術科学大学

岡村 昌宏

Brookhaven National Laboratory

Outline

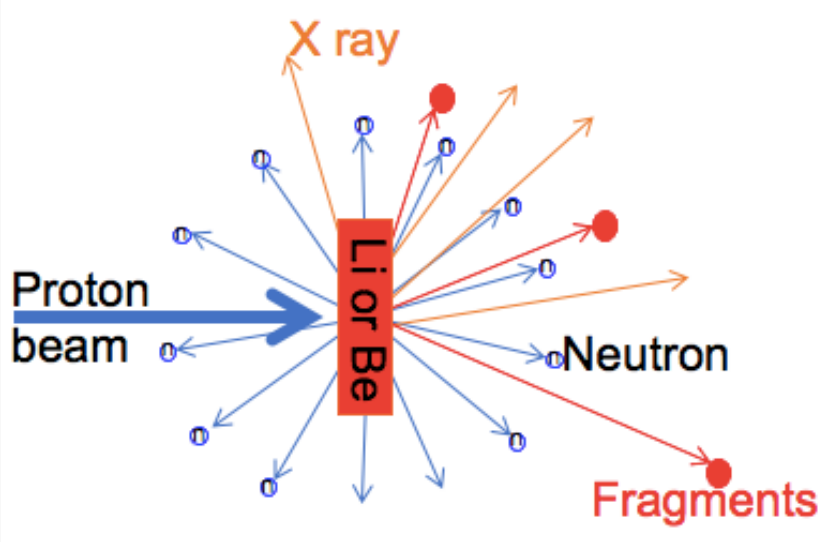
- 背景
- 大電流リチウムイオンビーム供給技術
  - レーザーイオン源とソレノイド磁場による
    プラズマ輸送
  - 直接プラズマ入射法 (DPIS)
- 関連する最近の取り組み
- まとめと展望

典型的な加速器中性子源と
リチウムビームを用いた加速器中性子源

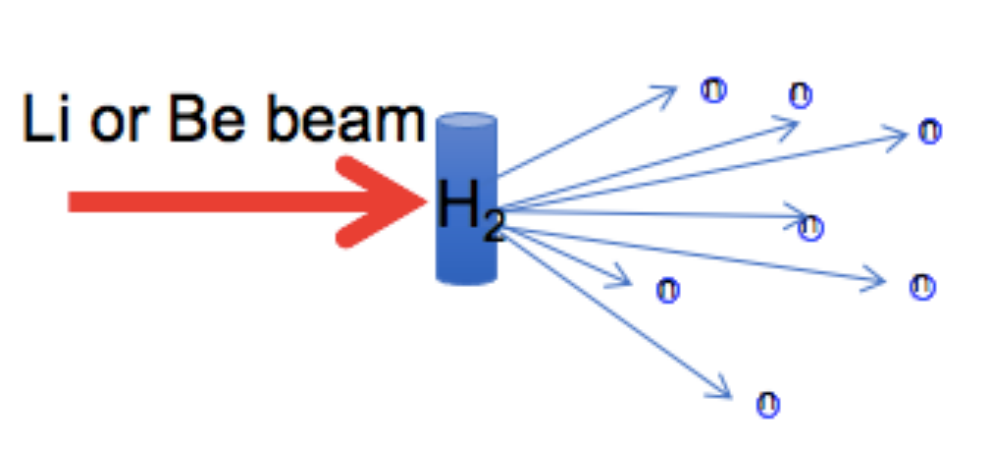
$$^{7}\mathrm{Li} + \mathrm{p} \rightarrow {}^{7}\mathrm{Be} + \mathrm{n} - 1.64\ \mathrm{MeV}$$

$$^{9}\mathrm{Be} + \mathrm{p} \rightarrow {}^{9}\mathrm{B} + \mathrm{n} - 1.85\ \mathrm{MeV}$$

inverse kinematic reaction



Isotropic neutron production

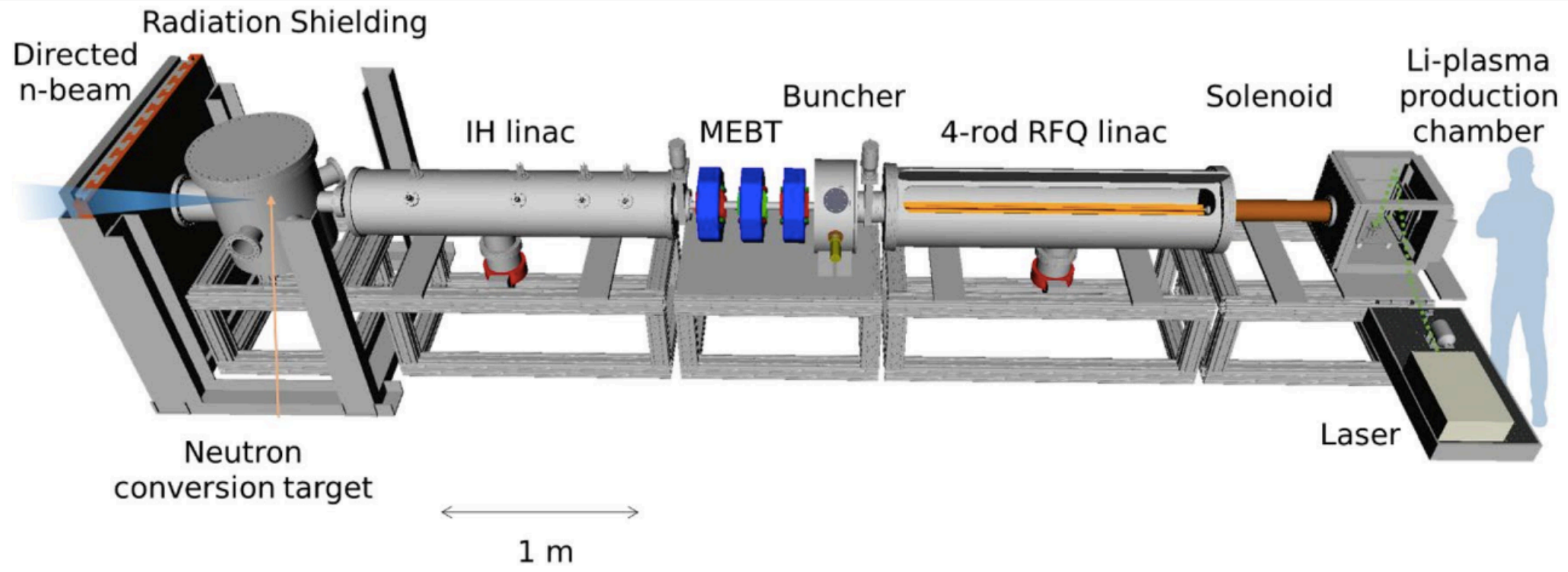


High directivity neutron

- 通常は陽子ビームをリチウム, ベリリウムのターゲットに入射
- 重いリチウムを入射ビームにすることで発生中性子は前方に集中
- リチウムビームでは0度方向の中性子フラックスは25 -100倍との試算

EPJ Web of Conferences **169**, 00018 (2018)

リチウムビームによる加速器中性子源の概略



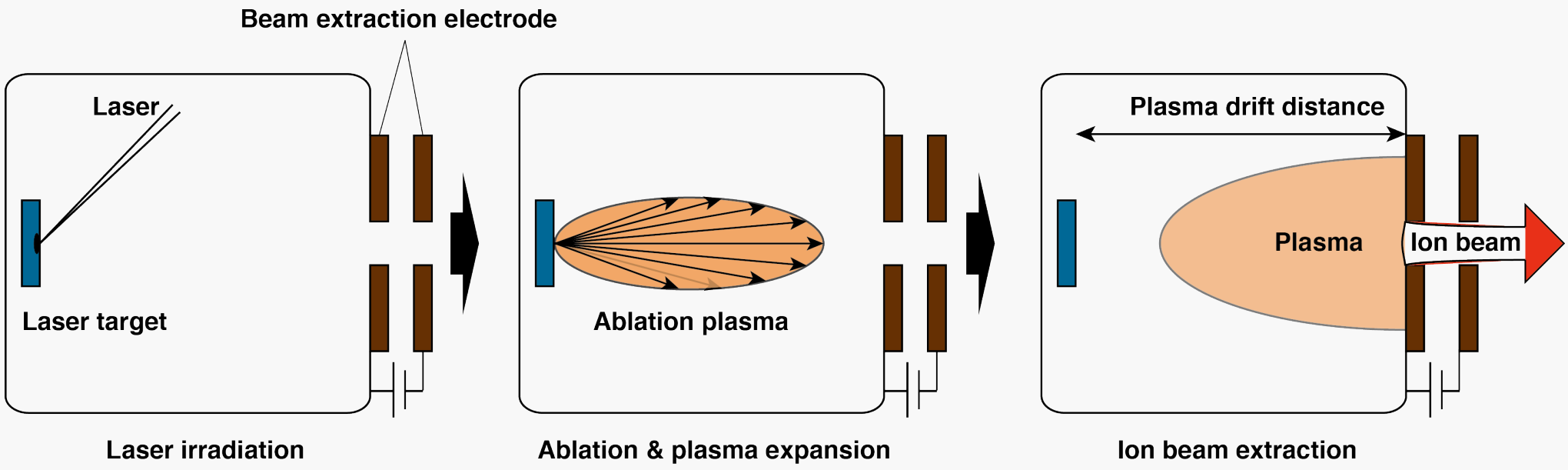
M. Okamura, S. Ikeda, T. Kanesue, K. Takahashi, A. Cannavó, G. Ceccio, A. Cassisa, Scientifc Reports (2022) 12:14016

- リチウムイオンをイオン源から供給しRFQとIH線形加速器で15 MeV程度のエネルギーまで加速
- リチウムビームを水素リッチな中性子変換ターゲットに照射

Outline

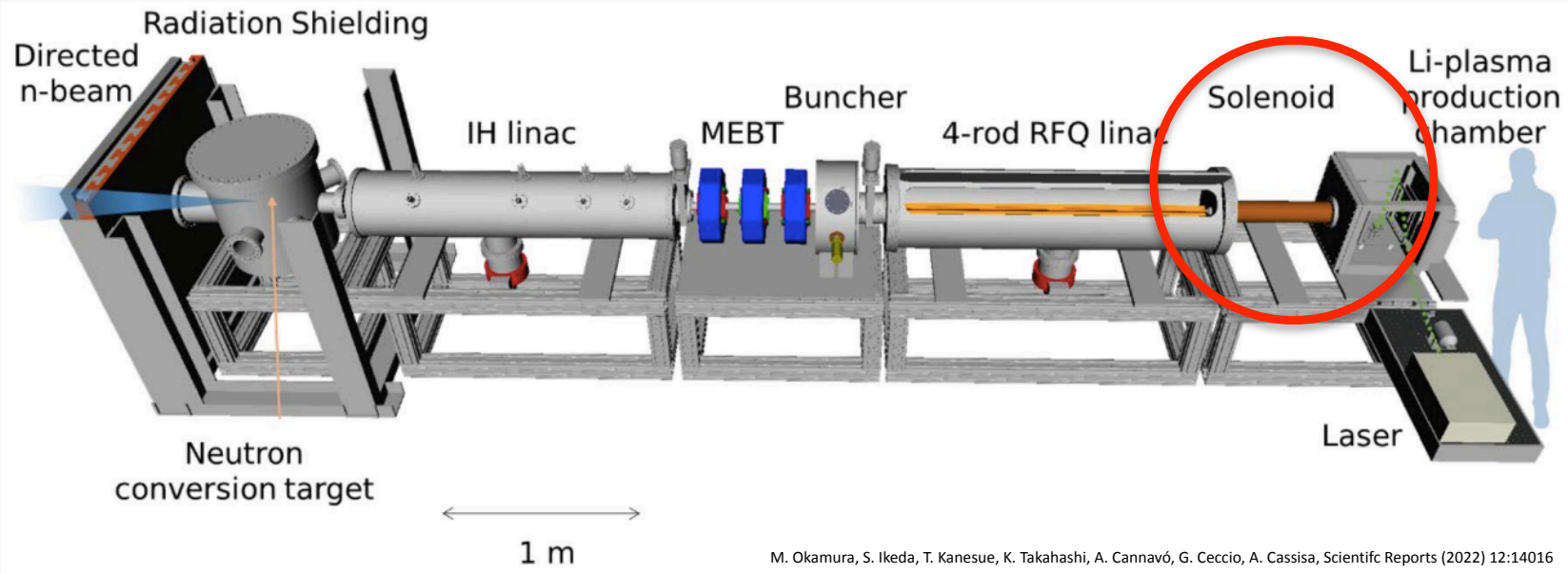
- 背景
- 大電流リチウムイオンビーム供給技術
  - レーザーイオン源とソレノイド磁場による
    プラズマ輸送
  - 直接プラズマ入射法 (DPIS)
- 関連する最近の取り組み
- まとめと展望

レーザーイオン源



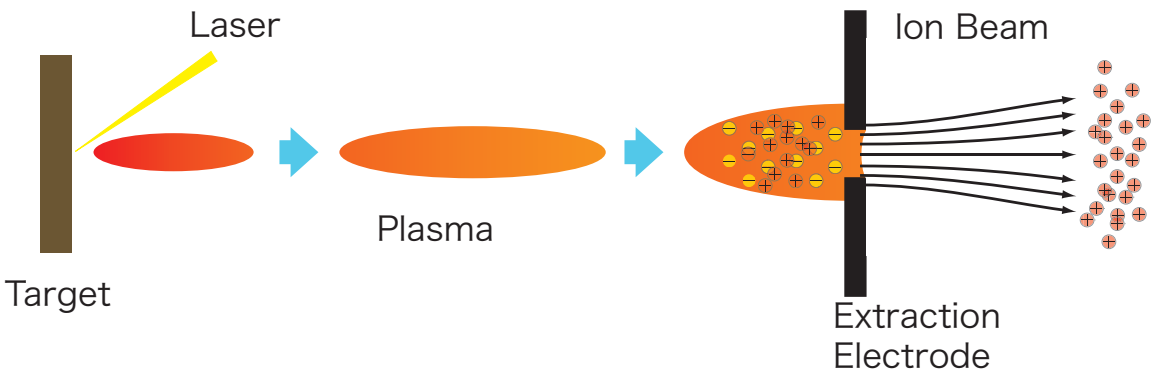
- レーザーを用いてプラズマ生成
- 比較的高密度なプラズマを利用可能
- イオンの加速は外部から与えた電界による

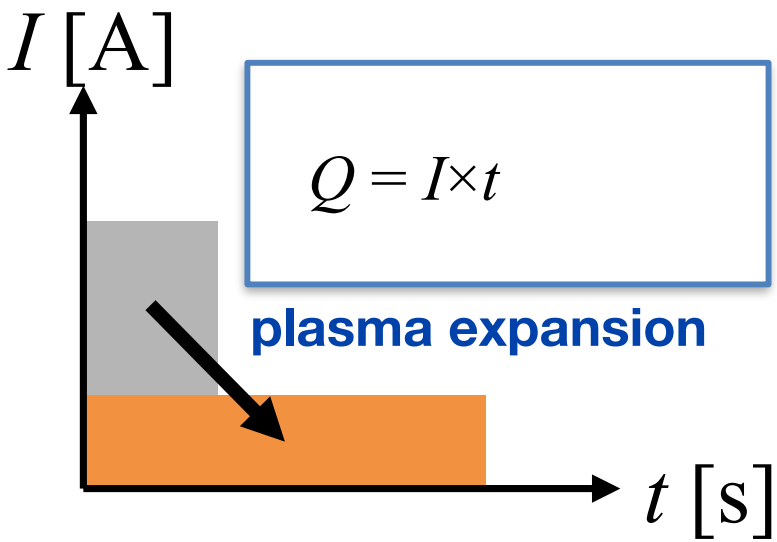
レーザーイオン源によるイオン供給の特性



M. Okamura, S. Ikeda, T. Kanesue, K. Takahashi, A. Cannavó, G. Ceccio, A. Cassisa, Scientifc Reports (2022) 12:14016

Schematic of laser ion source

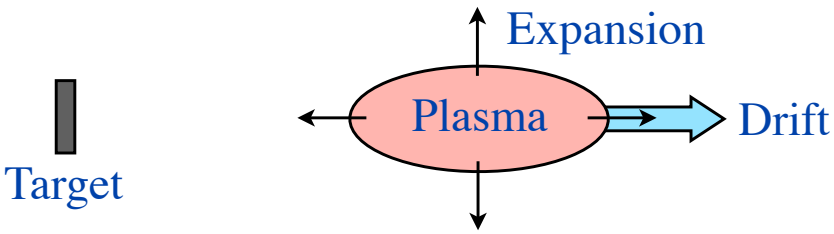




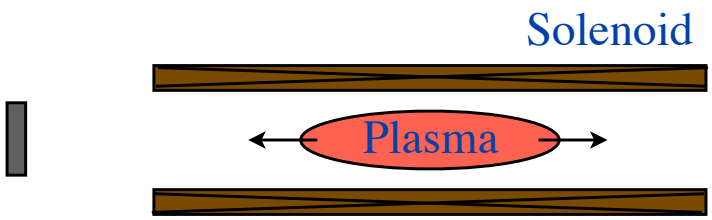
ソレノイド磁場によるレーザープラズマの輸送

Conceptual image

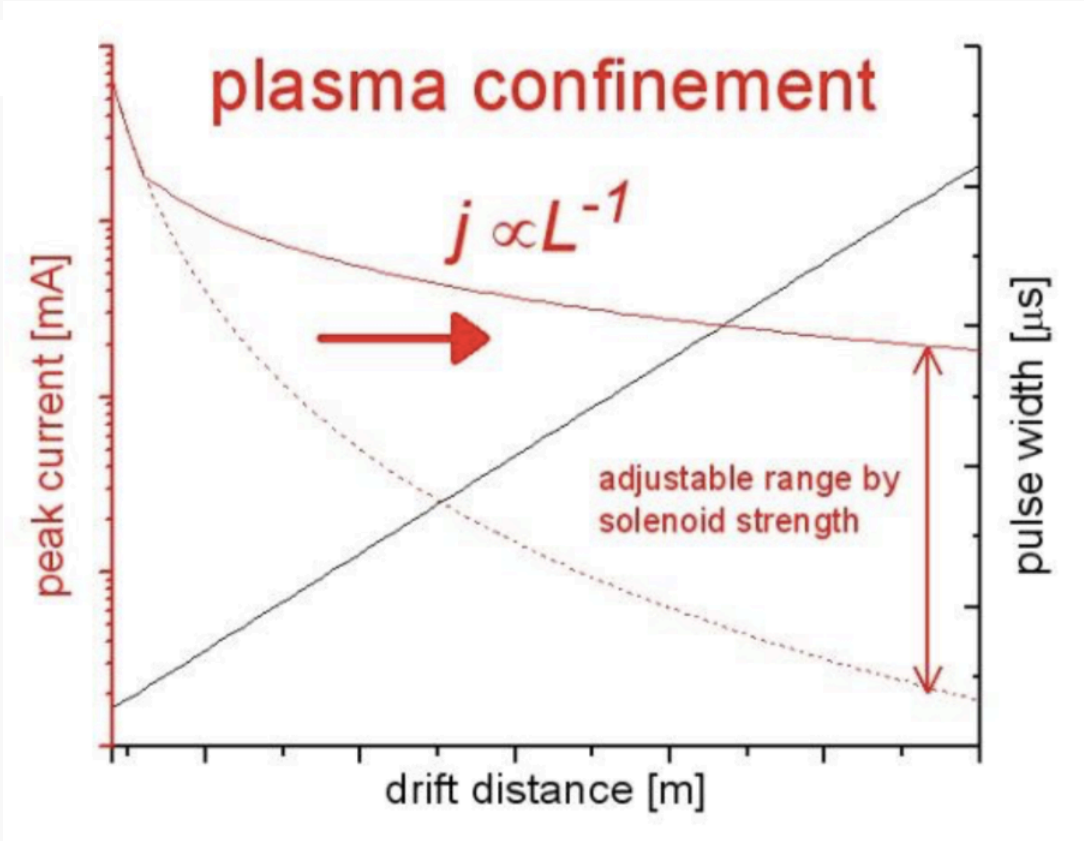
Free expansion



Plasma confinement

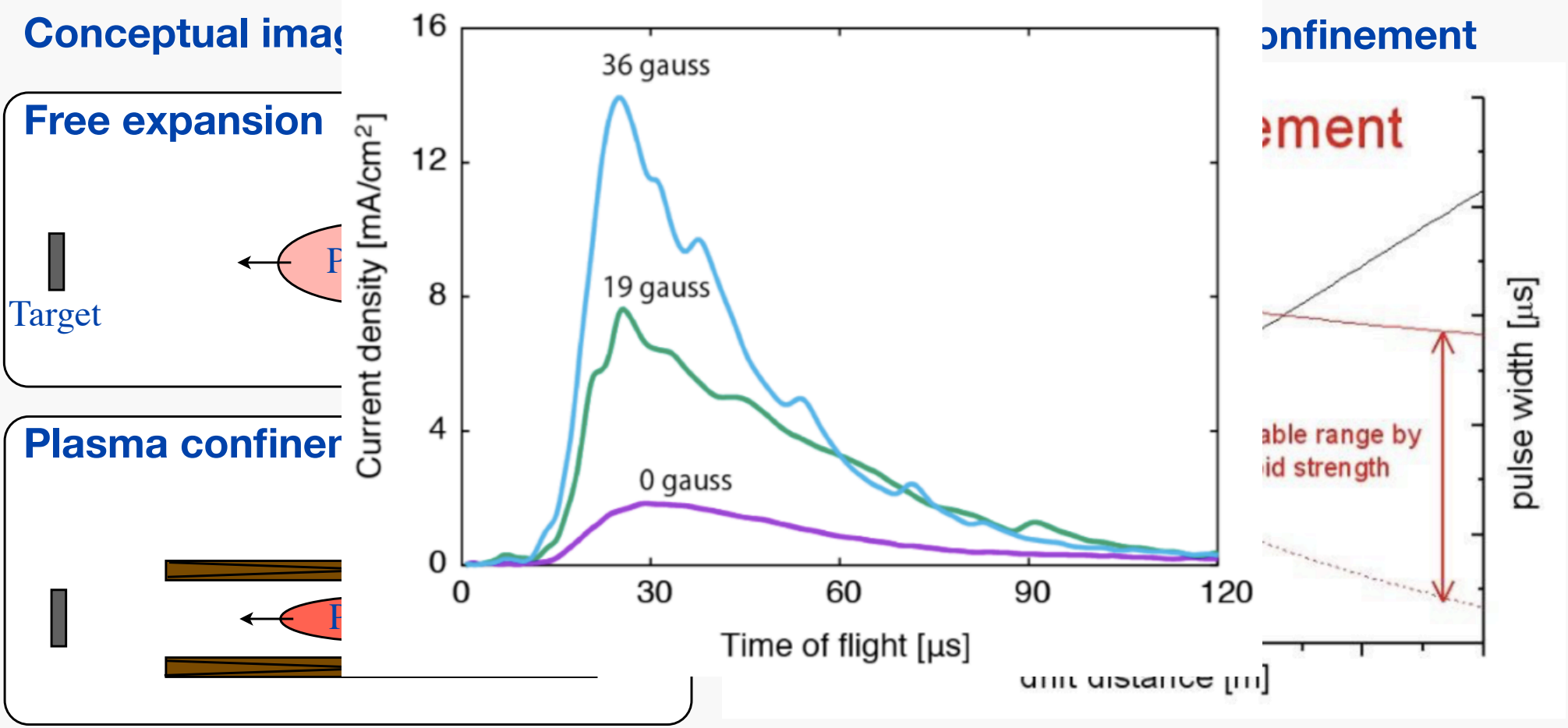


Expected effect of plasma confinement



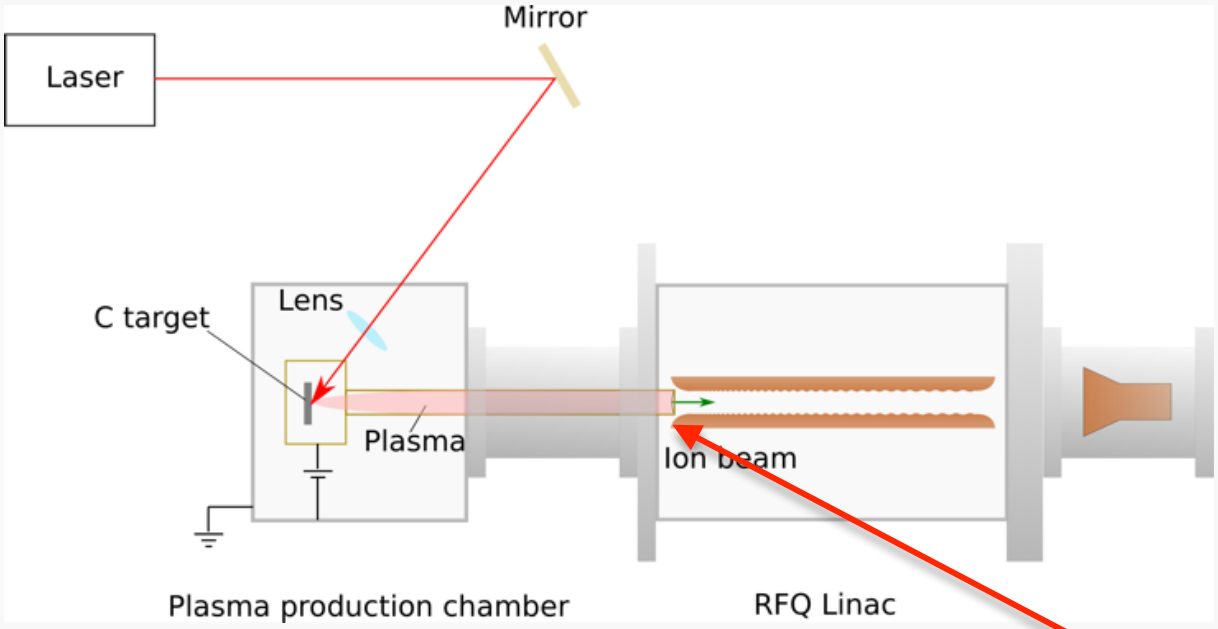
- プラズマは自由空間で３次元的に膨張 >> $j \propto L^{-3}$
- 径方向の膨張を制限できれば >> $j \propto L^{-1}$

ソレノイド磁場によるレーザープラズマの輸送

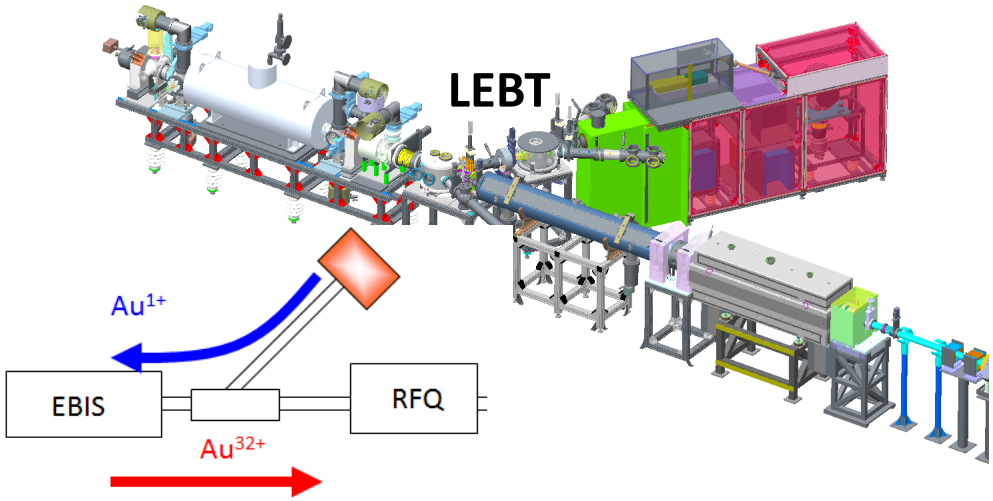


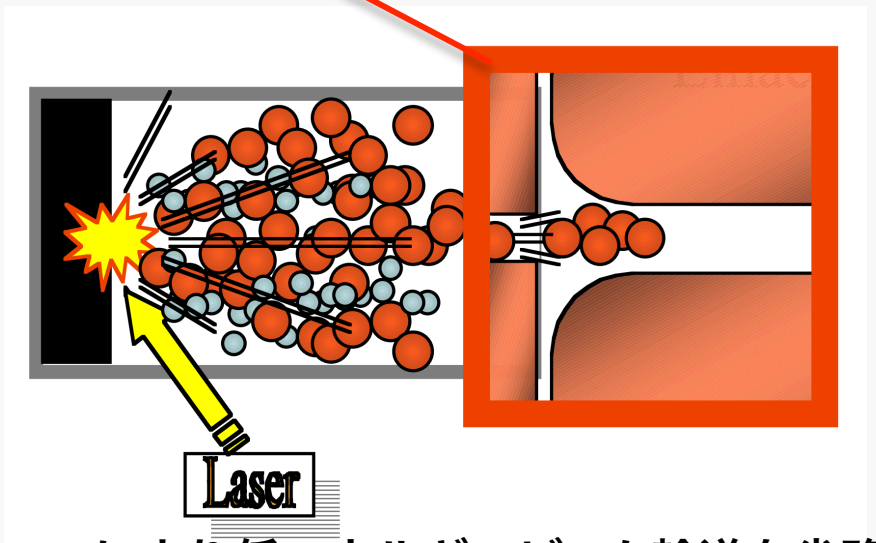
- プラズマは自由空間で３次元的に膨張 >> $j \propto L^{-3}$
- 径方向の膨張を制限できれば >> $j \propto L^{-1}$

Direct plasma injection scheme (DPIS)



Front end of the RHIC AGS complex (BNL)

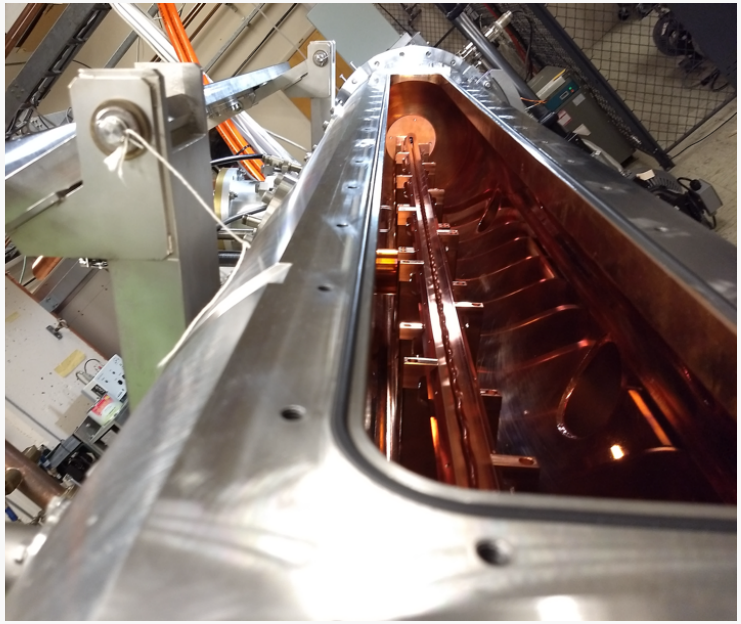


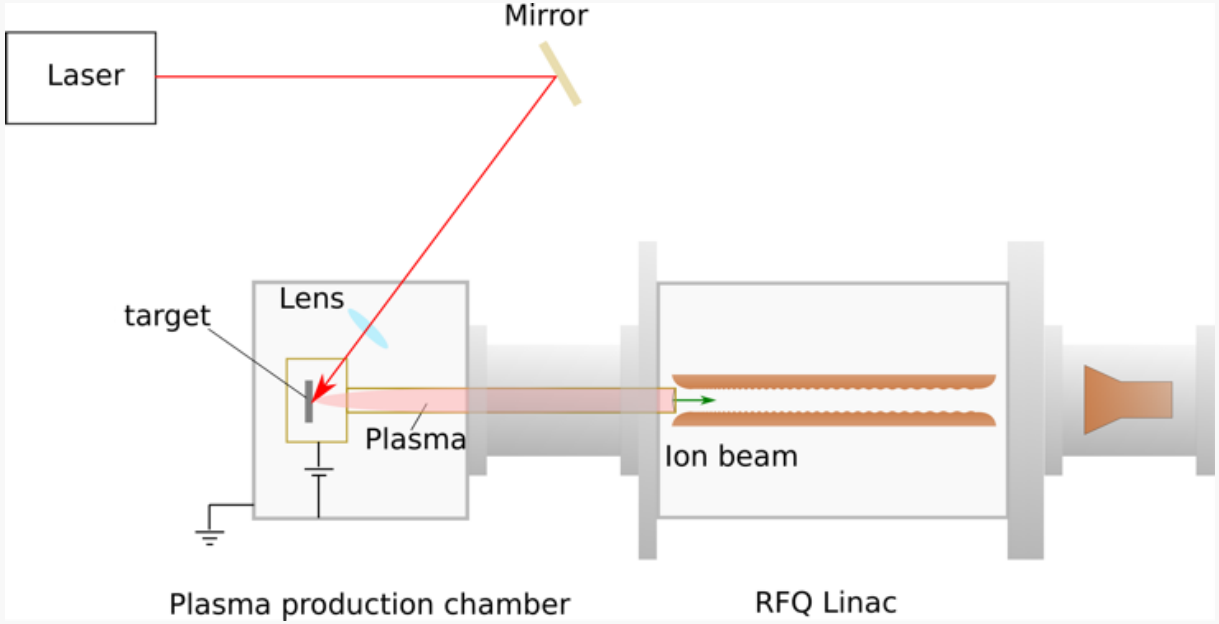


DPIS により低エネルギービーム輸送を省略

輸送中のビームロスを回避可能

リチウムビーム加速に用いるRFQ線形加速器

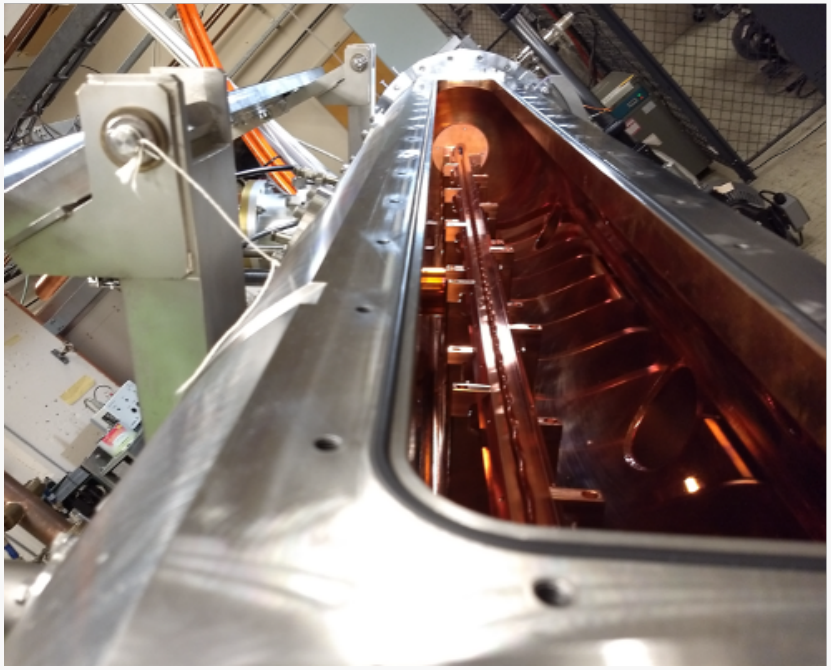




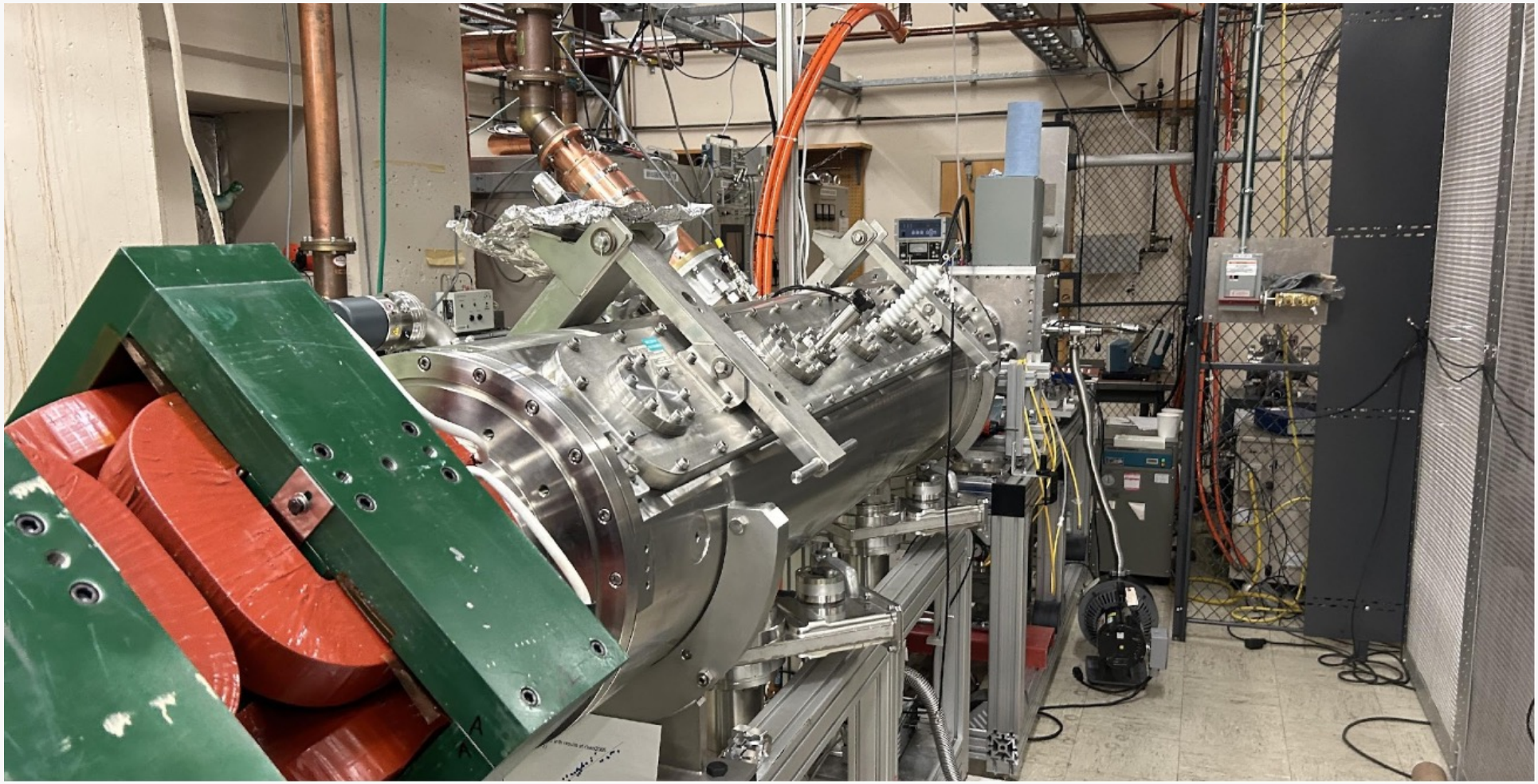
Basic parameters of RFQ linear accelerator

Parameter	Value
Structure	4 Rod
Frequency	100 MHz
Input energy	22 keV/n
Output energy	204 keV/n
Input beam current	50 mA
Transmission	80%
RFQ length	1977 mm

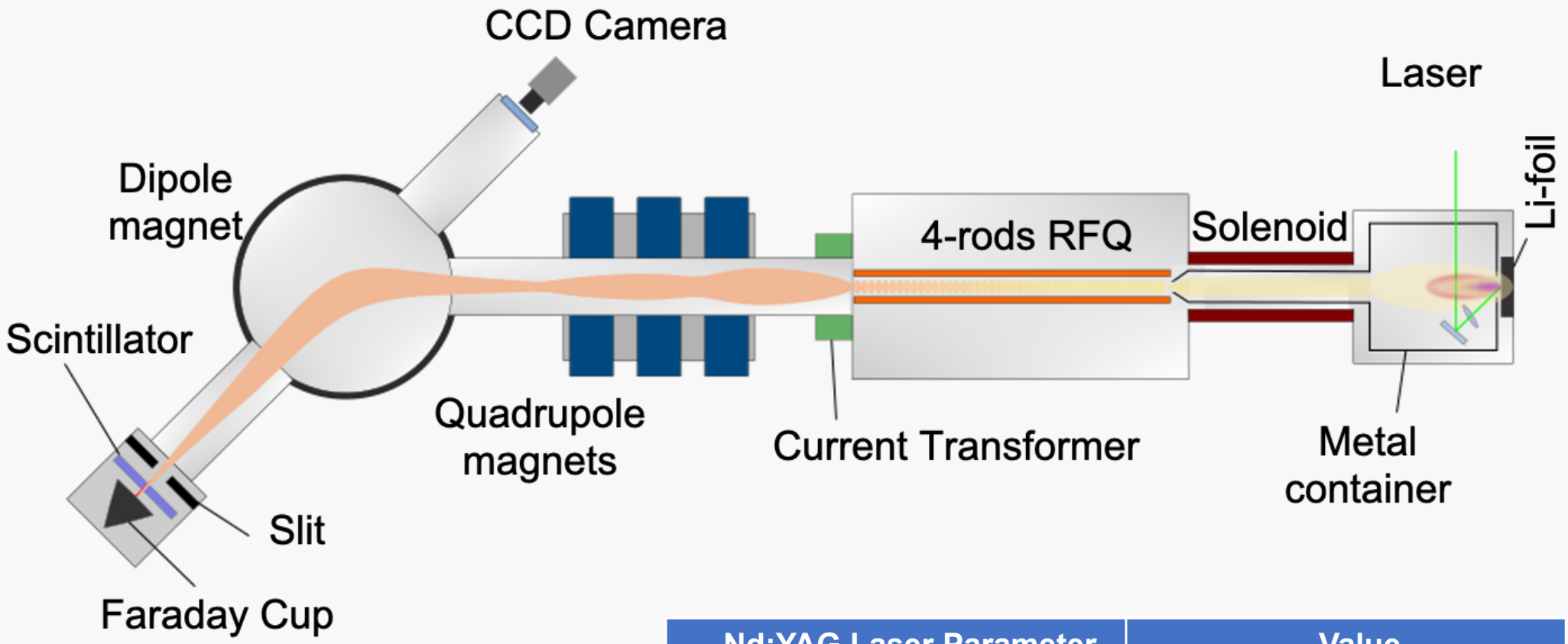
リチウムビーム加速に用いるRFQ線形加速器



リチウムビーム加速に用いるRFQ線形加速器



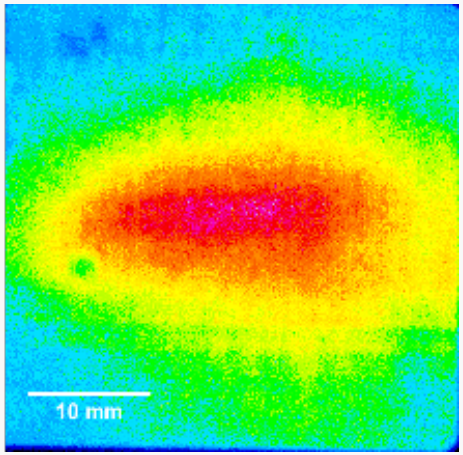
リチウムビーム加速試験　実験セットアップ全体像



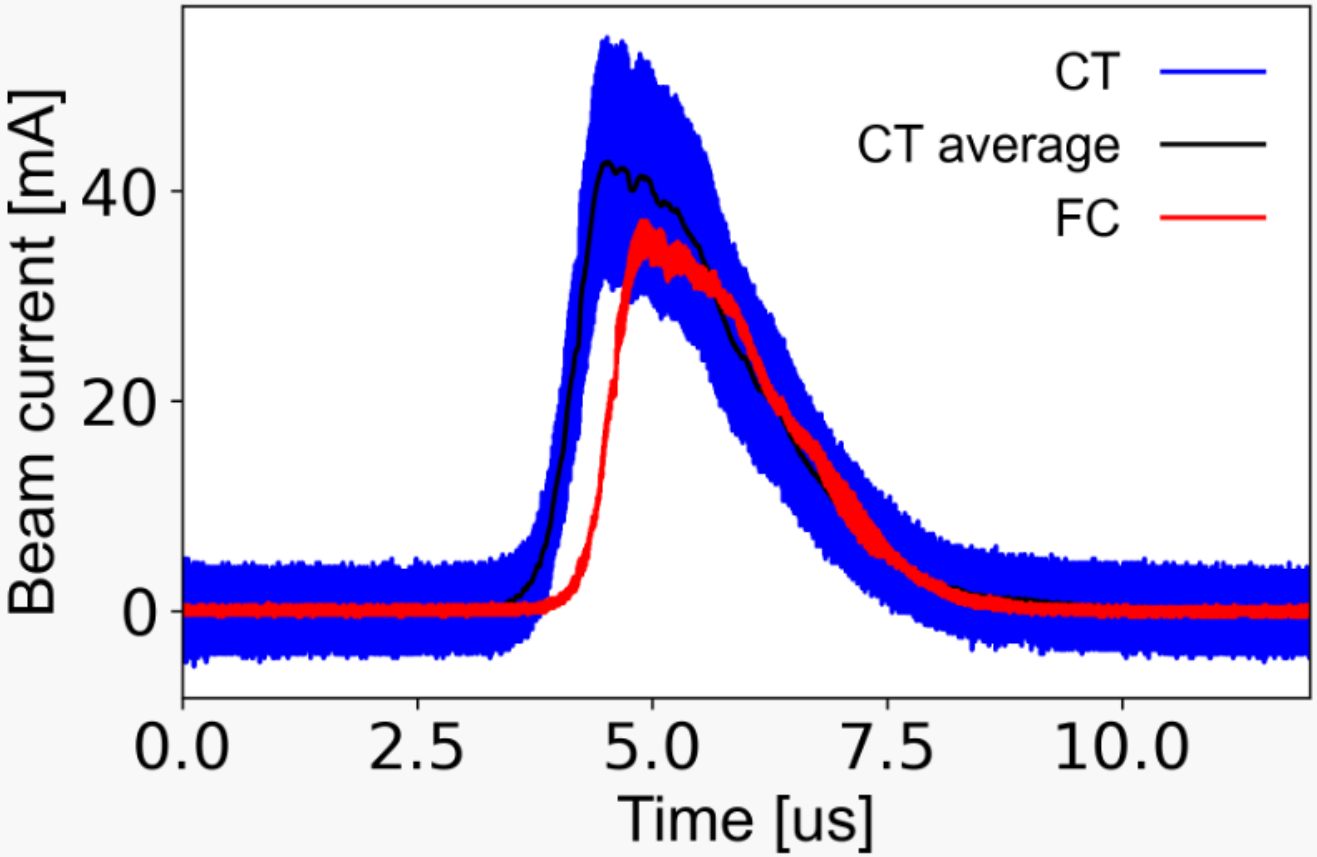
Nd:YAG Laser Parameter	Value
Wavelength	1064 nm
Energy	800 mJ
Intensity	10^{12} W/cm^2

M. Okamura, S. Ikeda, T. Kanesue, K. Takahashi, A. Cannavó, G. Ceccio, A. Cassisa, Scientifc Reports (2022) 12:14016

$^{7}Li^{3+}$ ビームの加速結果



Scintillator beam image

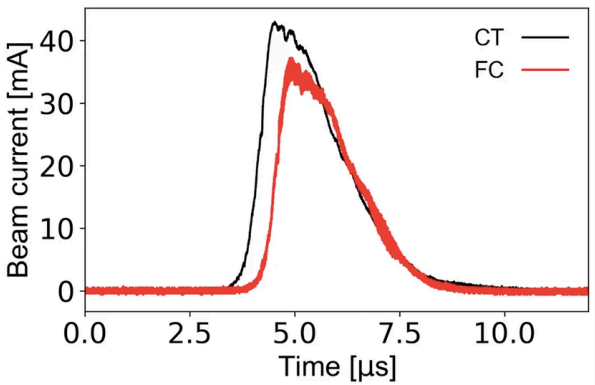


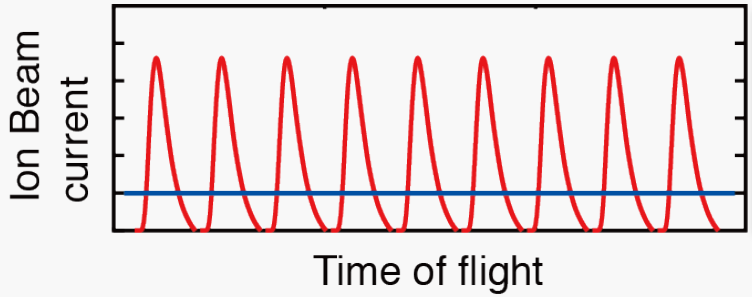
M. Okamura, S. Ikeda, T. Kanesue, K. Takahashi, A. Cannavó, G. Ceccio, A. Cassisa, Scientifc Reports (2022) 12:14016

Outline

- 背景
- 大電流リチウムイオンビーム供給技術
  - レーザーイオン源とソレノイド磁場による
    プラズマ輸送
  - 直接プラズマ入射法 (DPIS)
- 関連する最近の取り組み
- まとめと展望

関連する最近の取り組み
1. 高繰り返しレーザー(≧1kHz)によるプラズマ生成検討

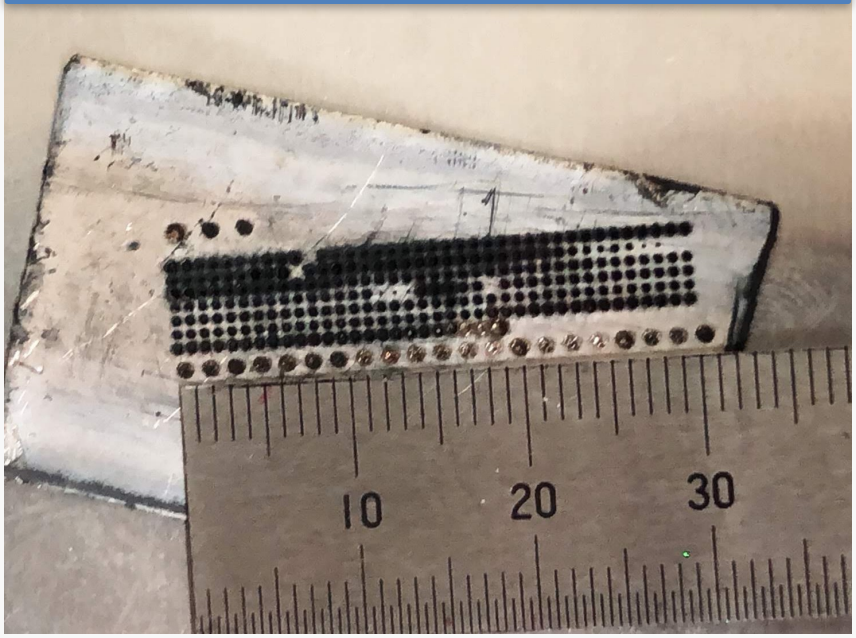




High average current >> high repetition is needed

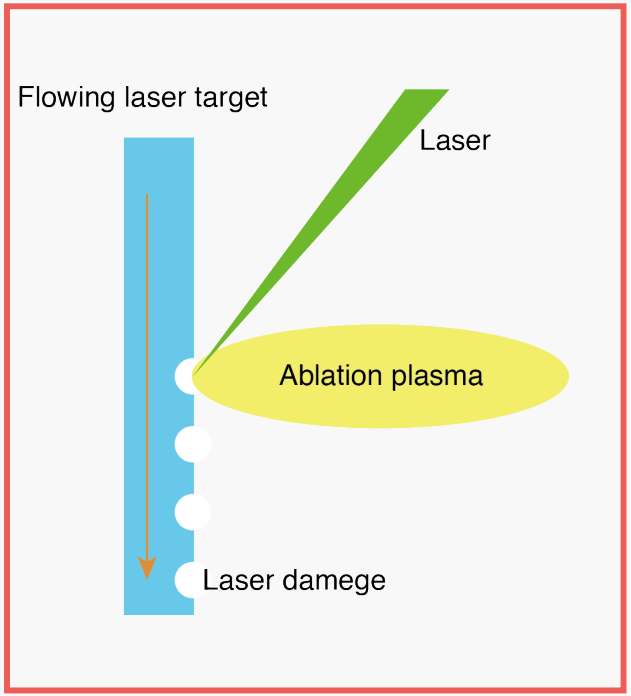
Laser with frequency of 10 kHz at maximum

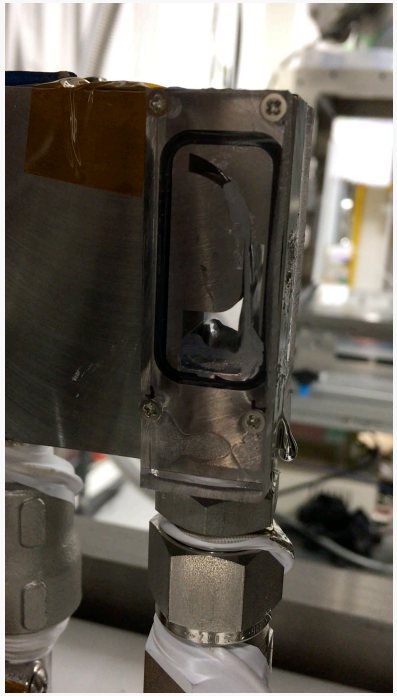
Lithium target after laser irradiation

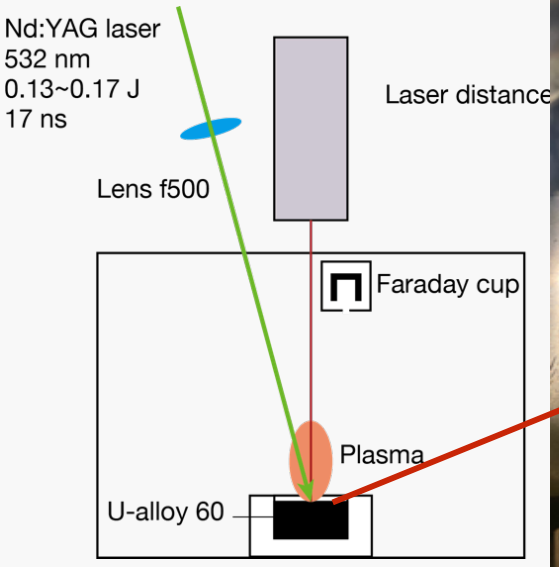


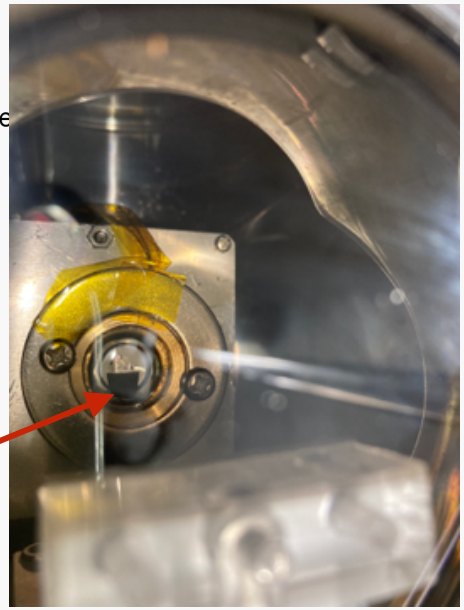
関連する最近の取り組み
1. 高繰り返しレーザー(≧1kHz)によるプラズマ生成検討

高繰り返しのレーザー照射に向けレーザーの照射に伴う損耗を回復可能な液体ターゲットの検討







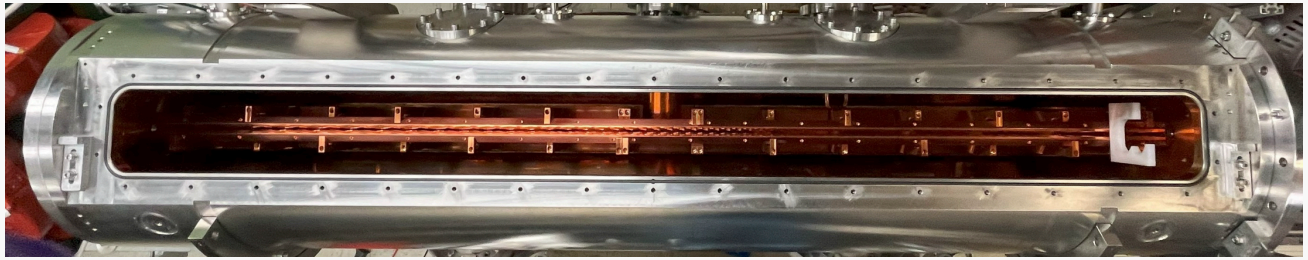


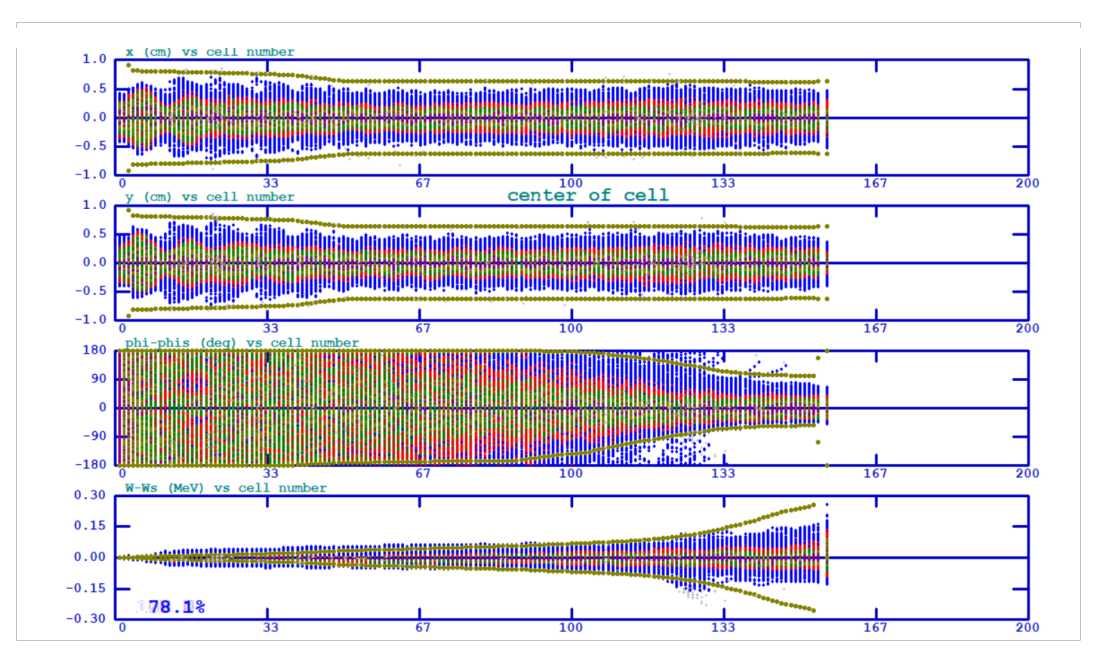
This system was tested using a low melting point alloy.

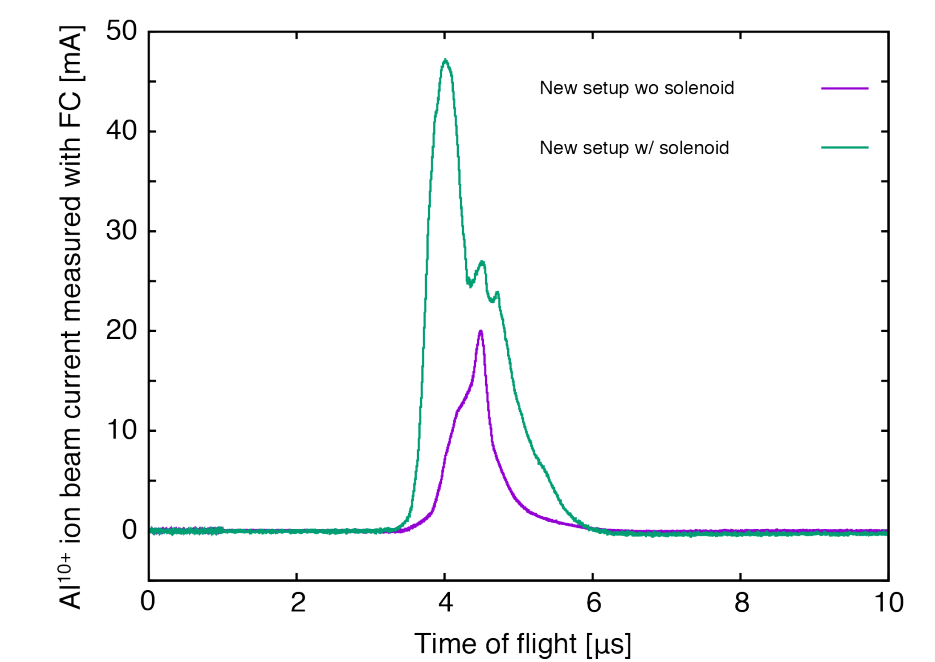
A. Cannavò et al 2024 JINST 19 P06017

関連する最近の取り組み
2. RFQ加速器rod電極の刷新

100 mAのリチウムビームを加速可能なrod電極の開発



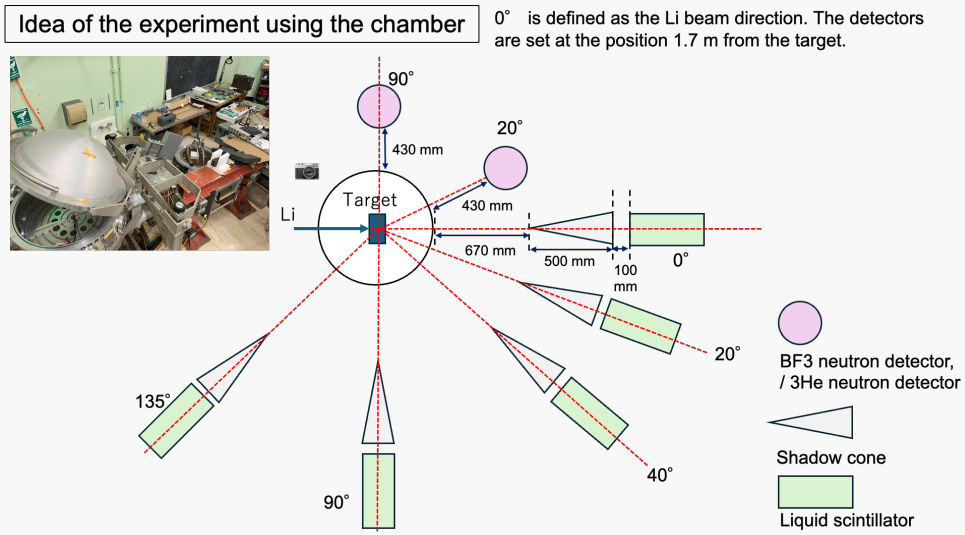




- 電極アパーチャサイズが可変な電極の採用により大電流化
- セットアップが完了し実験開始

関連する最近の取り組み
3. リチウムビームによる中性子発生実験

BNLのタンデム加速器を用いてリチウムビームによる中性子特性分析



Beam particle: Li-7
Beam current: 100 nA
Beam energy: 14 to 56 MeV

- 中性子の分布の取得, 解析中
- ターゲットシステムの検討

まとめ

- リチウムビームを用いた加速器中性子源を提案
- レーザーイオン源とDPISを用いてRFQ線形加速器で30 mA以上のリチウムイオンビーム加速に成功

展望

- 高繰り返しレーザーによるプラズマ供給
- シングルショットベースで100 mAのリチウムビーム加速
- 中性子発生のためのビームターゲット周りの研究開発