

# IFMIF/EVEDA原型加速器(LIPAc)の 入射器のビーム特性改善

第13回日本加速器学会年会

2016/8/10

発表者: 一宮 亮 (量研機構六ヶ所)

近藤 恵太郎, 新屋 貴浩, 杉本 昌義, 春日井 敦, 坂本 慶司, 奥村 義和,  
Benoit Bolzon<sup>1</sup>, Raphaël Gobin<sup>1</sup>, Francesco Scantamburlo<sup>2</sup>,  
Giuseppe Pruneri<sup>3</sup>, Luca Bellan<sup>2</sup>, Juan Knaster<sup>2</sup>, Hervé Dzitko<sup>4</sup>

量研機構六ヶ所, <sup>1</sup>CEA/Saclay France, <sup>2</sup>INFN/Legnaro Italy,  
<sup>3</sup>IFMIF/EVEDA Project Team, <sup>4</sup>F4E Garching Germany

# 目次

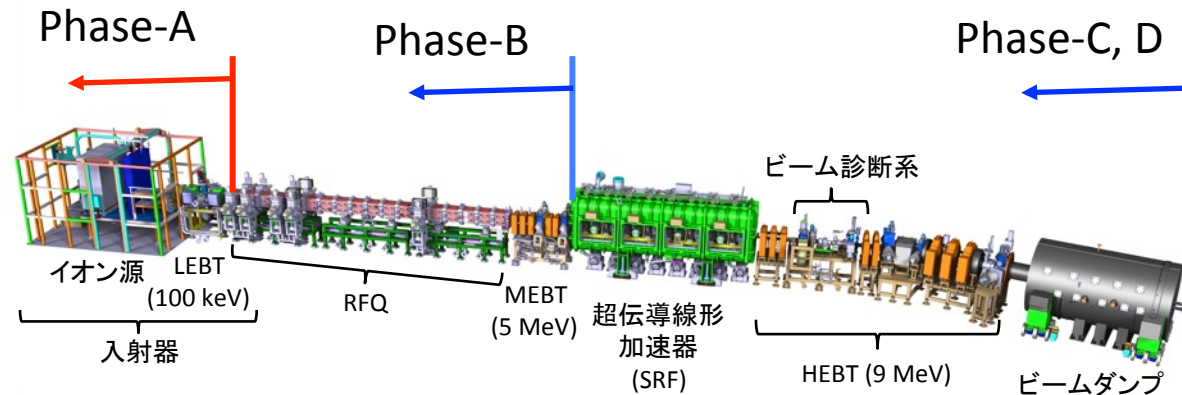
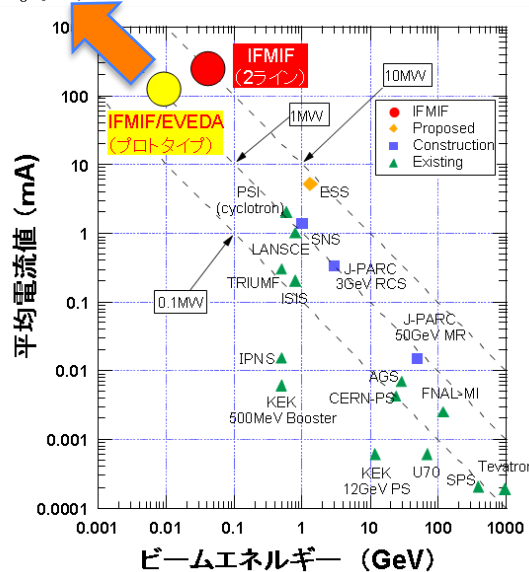
1. IFMIF/EVEDA原型加速器(LIPAc)の目的と本研究の位置付け
  - 大電流CW重陽子加速器の技術実証を行う試験加速器
2. イオン源・入射器開発の現状と報告内容(ビーム特性改善)
  - 重陽子ビームの目標は概ね達成。RFQコミッショニング初期には放射化しやすい重陽子ビームは使いたくない。
  - 同速度( $\beta$ )・同等の空間電荷効果(K)な陽子ビームの評価を行う。  
(今回の報告内容)
3. 入射器の設計と診断系
4. 得られたビームのデータと議論
5. まとめ

K(一般化パービアンズ: 空間電荷効果の影響を表現する無次元パラメータ)

# IFMIF/EVEDA(LIPAc)の現状

- IFMIFは**加速器駆動型中性子源**を用いた、核融合炉の $10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>/s以上の高速中性子束による炉材料試験施設である。
- 加速器駆動型中性子源に必要な大電流** (avg. 125mA) 40 MeV **CW重陽子加速器**の技術実証を行うための**試験加速器**としてIFMIF/EVEDA(LIPAc)を建設し実験を進めている。
- 入射器単体のPhase-A試験をこれまで行ってきており、入射器としてはRFQを含めたPhase-B試験に向けた最終調整段階。

$$K = \frac{I}{I_0} \frac{2}{\beta^2 \gamma^3} \text{空間電荷効果: 大}$$



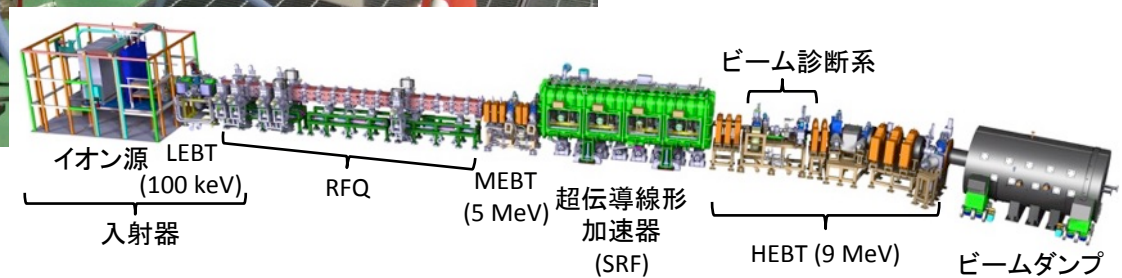
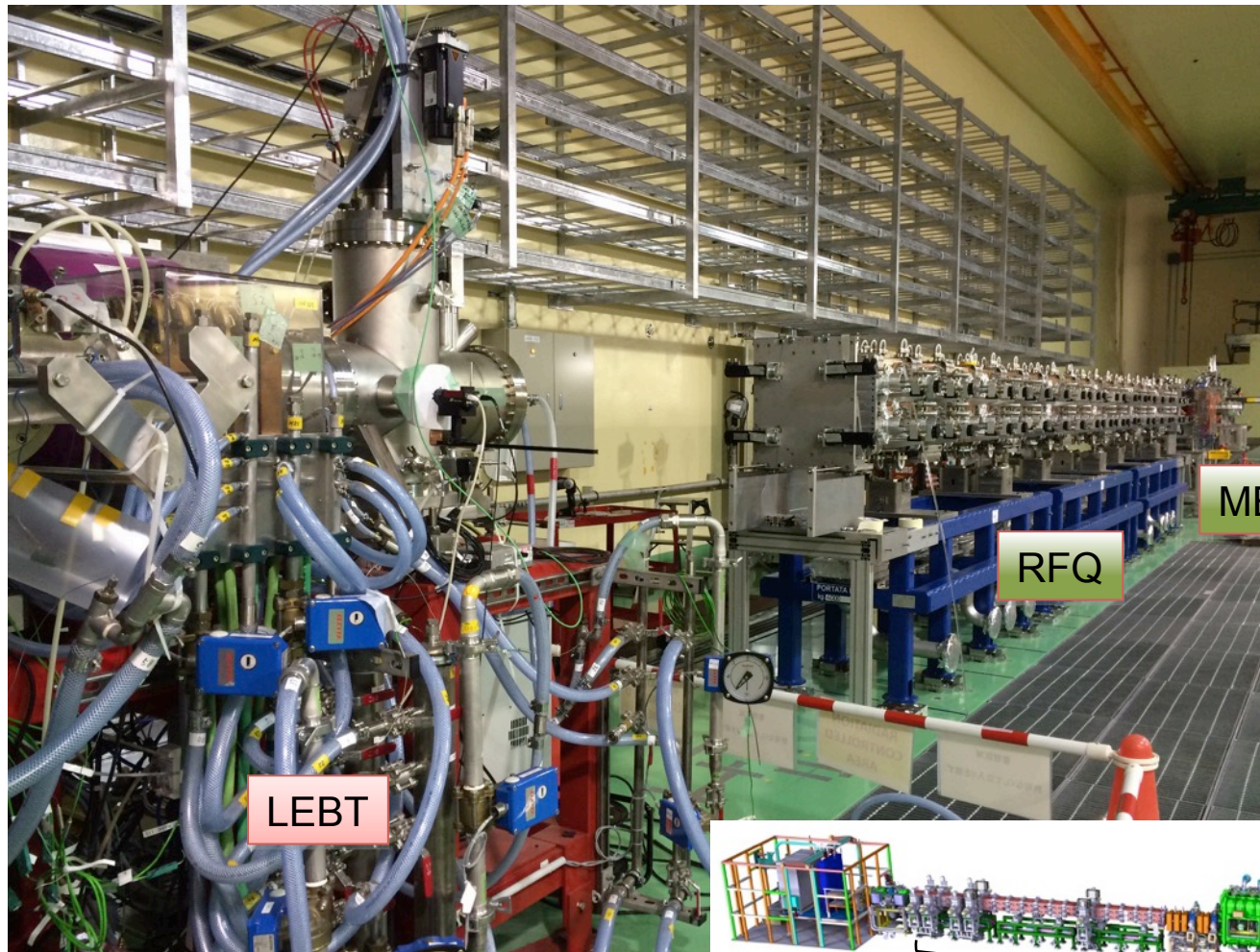
LIPAc(Linear IFMIF Prototype Accelerator)の全体構成図

他の大型ハドロン加速器との比較

# 接続を待つRFQ

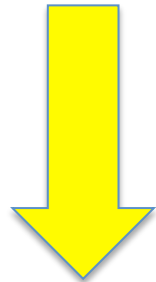
LIPAc RFQの諸元

パラメータ		単位
全長	9.814	m
セル数	489	
最小アパーチャ	3.476	mm
全RF+ビーム電力	1.6	MW
ビーム電流	125	mA
透過率(Gaussian)	93.7	%
エミッタンス(In/Out)	0.25/0.26	mm mrad
ビームパワーロス	1291	W
最大電圧(1.76Kp)	24.7	MV/m



# RFQコミッショニングに向けて

- 加速器を(リモートコントロールではなく)ハンズオンメンテナンスするためには、加速器内のビームロスの抑制が必須(透過率: 93.7%, ビームロス:1391 W)。
- RFQ以下を高透過率でビーム輸送するためには、**低エミッタンスかつマッチングの良い**ビームを入射器が供給しなければならない。
- RFQコミッショニング初期には放射化しやすい重陽子ビームは使いたくない。100 keV重陽子ビームと同速度( $\beta$ )・同等の空間電荷効果(K)な50 keV**陽子ビーム**を用いる。
  - Lorentz  $\beta$ :  $\beta(100 \text{ keV D}^+) = \beta(50 \text{ keV H}^+)$
  - 一般化パービアンスK:  $K(140 \text{ mA}, 100 \text{ keV D}^+) \doteq K(70 \text{ mA}, 50 \text{ keV H}^+)$



ビームエネルギー1/2、電流1/2の低電力のため、放電やビームロスでの熱負荷はかなり軽減される。

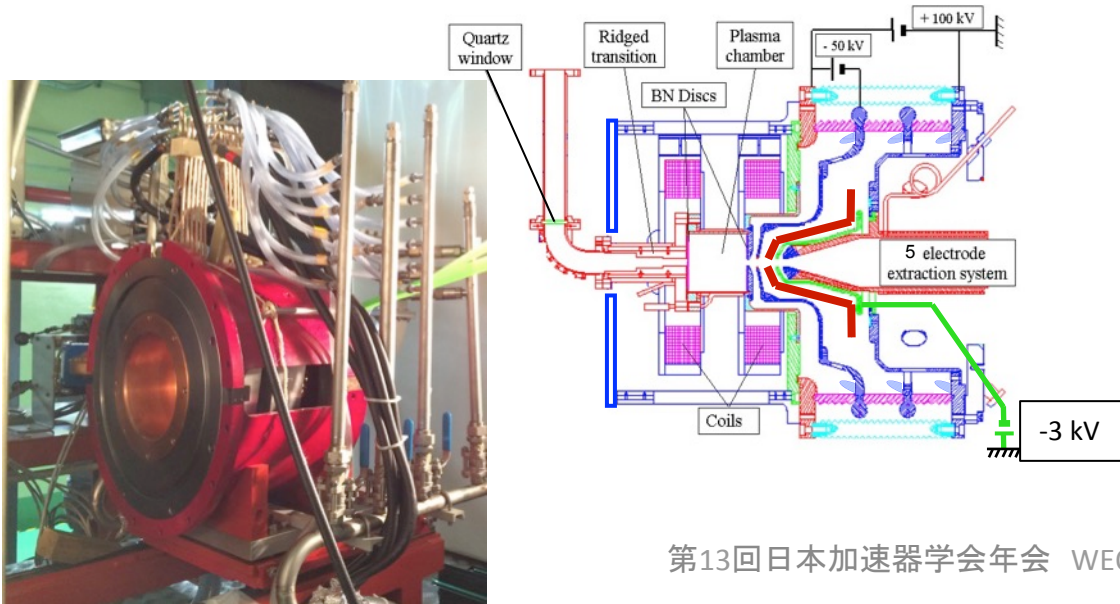
重水素ビーム用の設計なので、そのままではエミッタンスは維持できない。

- プラズマ電極径の小径化やそれに伴うイオン源パラメータの変更で、70 mA陽子ビーム時の低エミッタンス化を図る。

# 入射器の概要

## ECRイオン源

- 2基のソレノイド電磁石、5枚電極(プラズマ・中間加速・第1GND・リペラ・第2GND)構成。2.45 GHzのRF。H<sup>+</sup>、D<sup>+</sup>の2種類の加速。
- 2段階加速を行うための中間電極を設置し、引き出し電流及びエミッタンスの制御をおこなっている。
- 100 mA級の大電流ECRイオン源であり、ビームロスやビーム・ガス散乱による二次電子の逆行(バックストリーミング)による電極・イオン源本体の損傷は重要な問題となる。2枚のGND電極間に抑制(Repeller)電極を設置、-3 kV以上の負電圧を印加して逆行電子を防いでいる。



パラメータ		単位
RF周波数	2.45	GHz
RF電力(最大)	1000	W
運転モード	Pulse/CW	
加速電圧(H <sup>+</sup> )	50	keV
ビーム電流(H <sup>+</sup> )	70	mA
加速電圧(D <sup>+</sup> )	100	keV
ビーム電流(D <sup>+</sup> )	140	mA
rmsエミッタンス	<0.25(許容: 0.30)	$\pi$ mm mrad

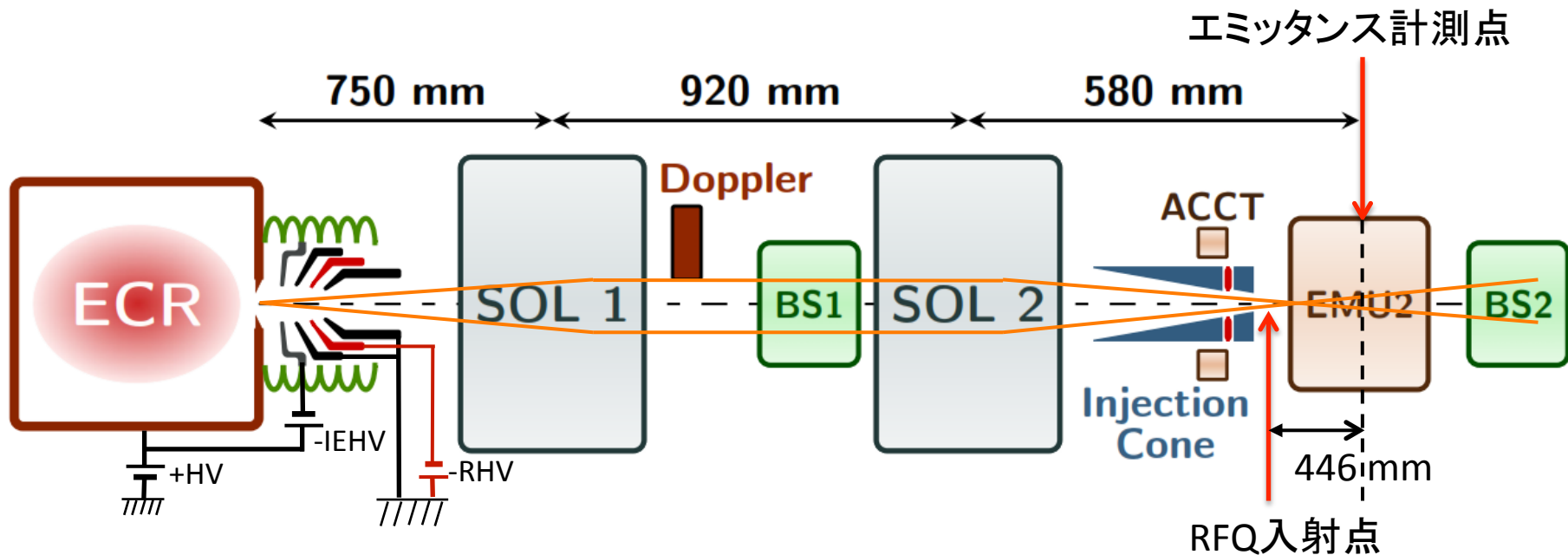
LIPAcイオン源の諸元

# イオン源内のBN板の損傷



# LEBT+診断チェンバ

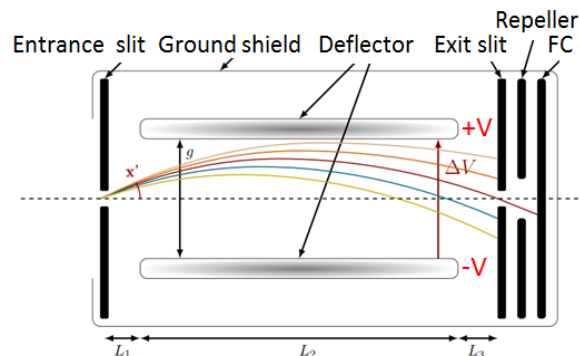
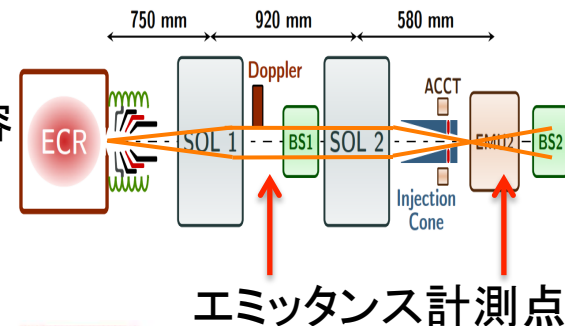
- イオン源からの100 keV重陽子ビーム、50 keV陽子ビームを収束させつつ、後段加速器であるRFQの入射条件(エミッタンス、Twissパラメータ)に合うよう輸送する。
- ビーム診断系: エミッタンスメータ(EMU), FC式電流計(BS1, BS2)、ACCT, 4Grid分析器(空間電位計測)
  - エミッタンスメータは、熱負荷を低減するためRFQ入射点よりも446 mm下流に設置した。(ウエストよりも下流)



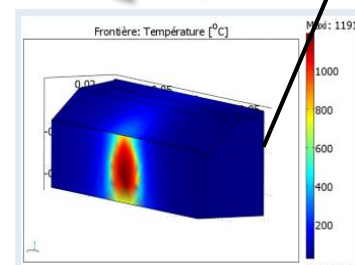
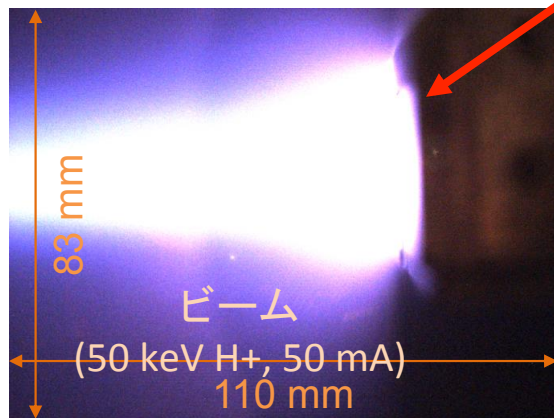
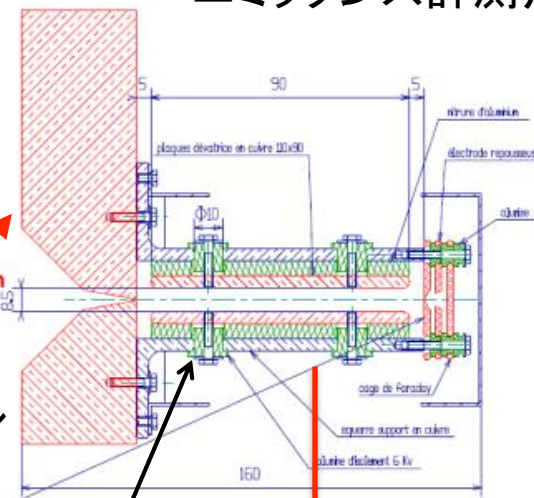


# 大電流用エミッタースメータ

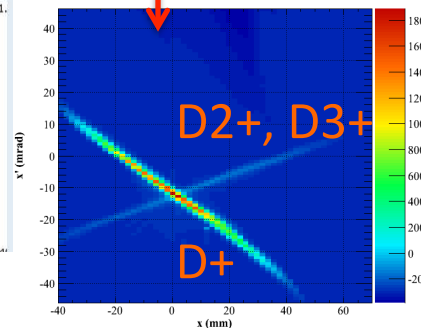
- アリソンスキャナー型エミッタースメータ
  - 水冷タングステンパネル(1200°C): 15 kW / 30 mmφまで許容
  - ±10 kVデフレクター
  - 3 kVリペラ電極(2次電子抑制)
  - 設置位置をソレノイド間にすることで、イオン種弁別が可能。



水冷タングステンパネル



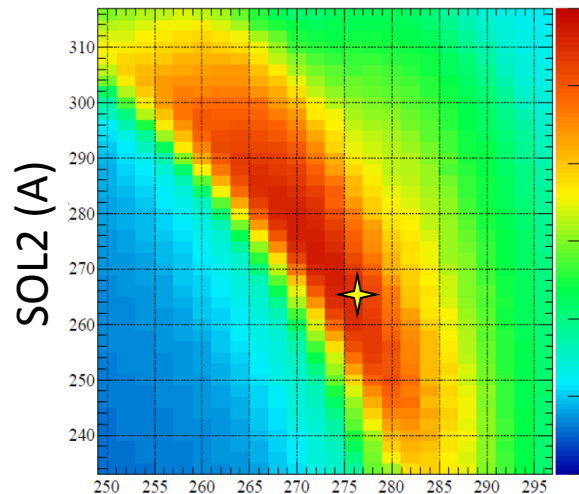
最高温度は  
1200°C



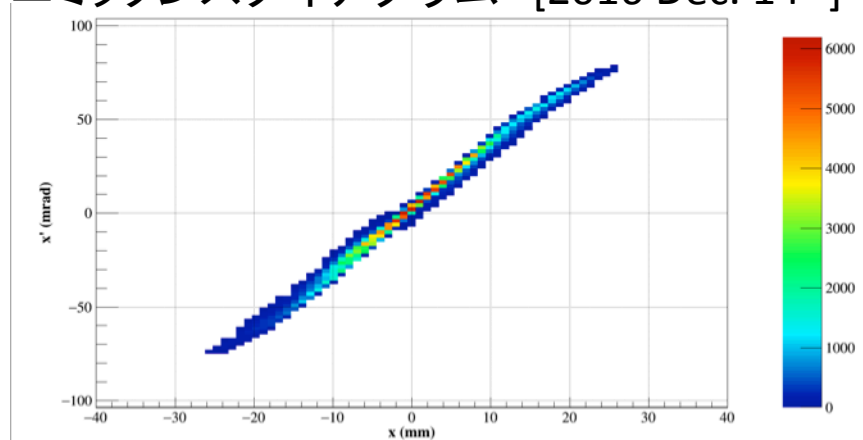
イオン種弁別の例

# 重陽子ビーム

- D+(100 keV): 140 mA,  $\epsilon_{\text{rms}}=0.234 \pi \text{ mm mrad}$ を達成。



エミッタンスダイアグラム [2016 Dec. 14<sup>th</sup>]

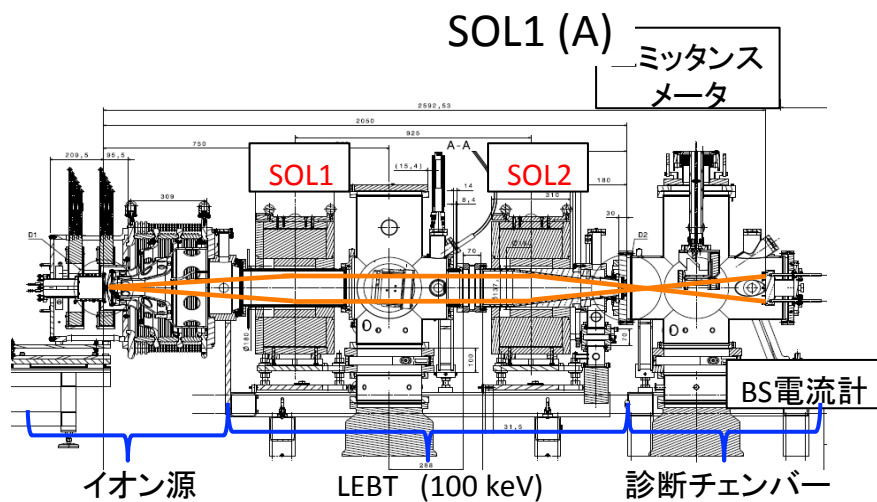


計測データ:

- $\epsilon_{\text{rms}}=0.234 \pi \text{ mm mrad}$
- $I_{\text{BS}}=142 \text{ mA}$  (BS電流計: 到達したD+ビーム量)
- $I_{\text{ext}}=152 \text{ mA}$  (HV電源からの引き出し電流)

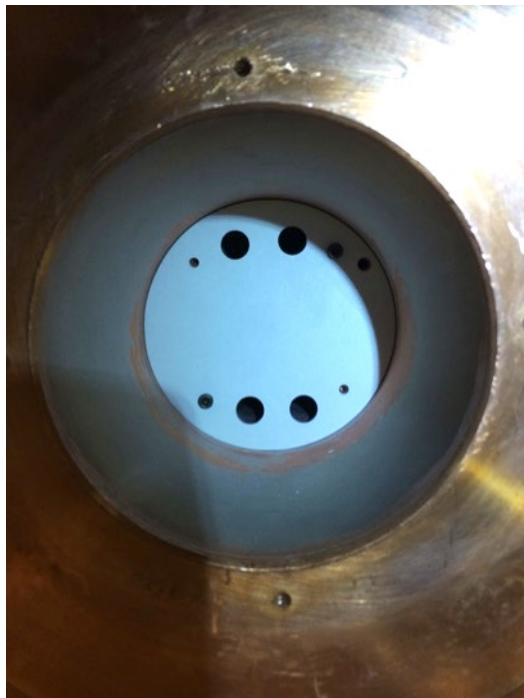
パラメータ:

- HV=100 kV, IE=43 kV,
- SOL1=277 A, SOL2=266 A
- Duty Cycle: 9.7%



# H<sup>+</sup>ビーム実験のための構成変更

- プラズマ電極径の小径化(12 mmφ→10 mmφ)やそれに伴うイオン源パラメータの変更で、70 mA 陽子ビーム時の低エミッタンス化を図る。
- イオン源内のBN板の交換
- ECR共鳴用磁石による磁場の調整

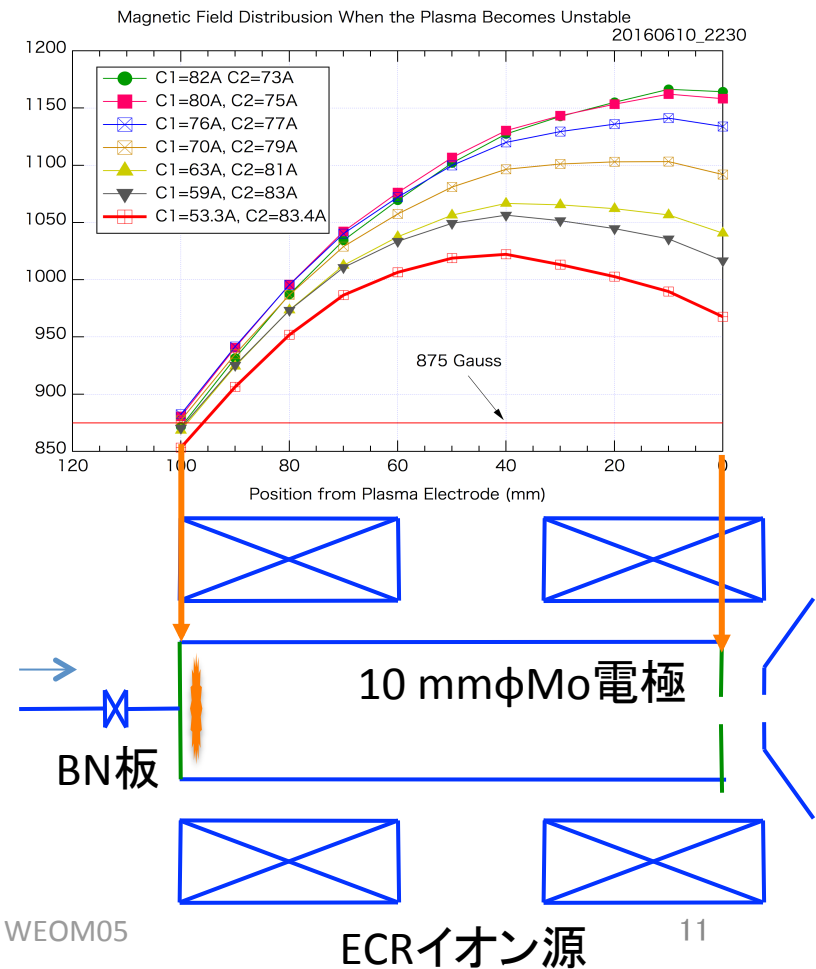


交換後のBN板

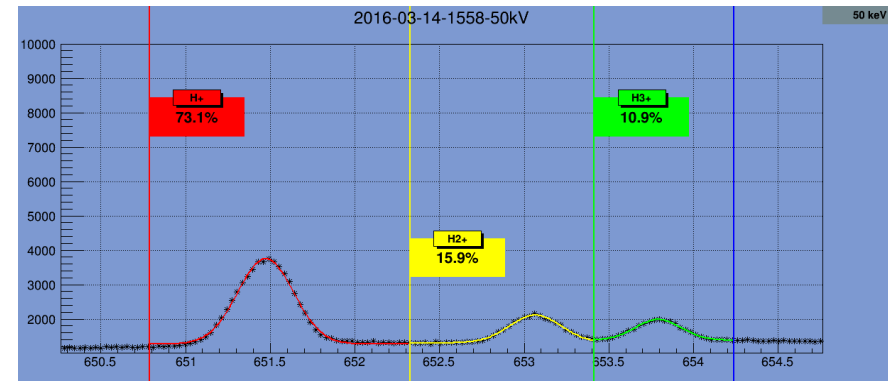
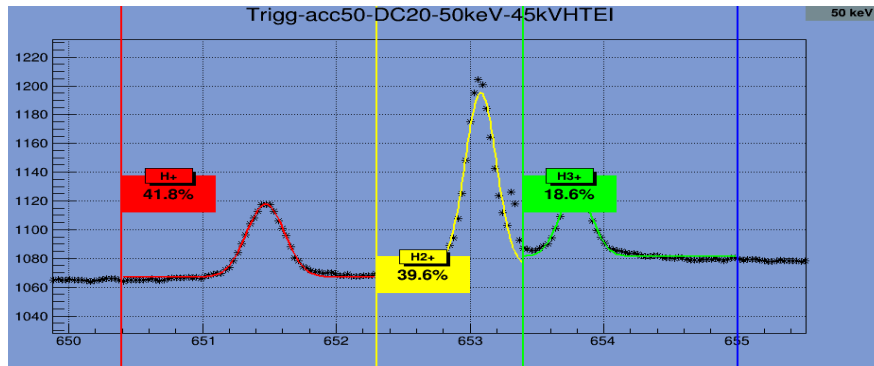


10 mmφ電極(Mo)

イオン源の磁場分布

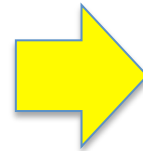


# H<sup>+</sup>ビーム実験のためのパラメータ調整



調整前:

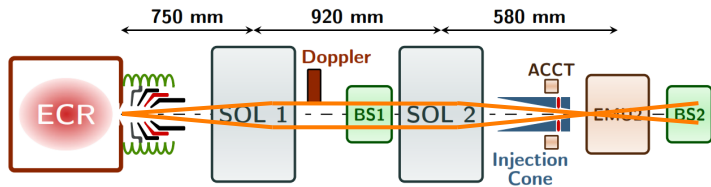
- 電極径: 12 mmφ (D+用)
- プロトン比: 42%
- ビーム電流: 32 mA
- エミッタンス: 0.32 π mm mrad



調整後:

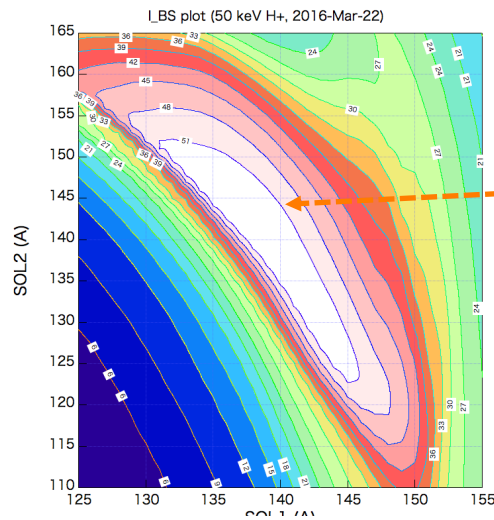
- 電極径: 10 mmφ (D+用)
- プロトン比: 73%
- ビーム電流: 54 mA
- エミッタンス: 0.26 π mm mrad

目標の 70 mA の電流には届かないものの、D+用に設計された電極でもビーム径縮小に伴うオプティクス変更と磁場調整などにより、ほぼ目標に近いエミッタンス (<0.25 (許容: <0.30) π mm mrad) が得られた。

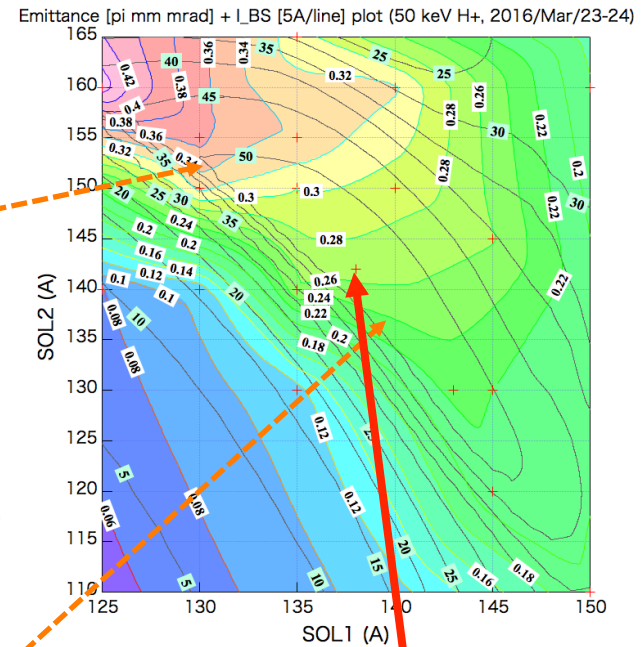


# H<sup>+</sup>ビーム実験

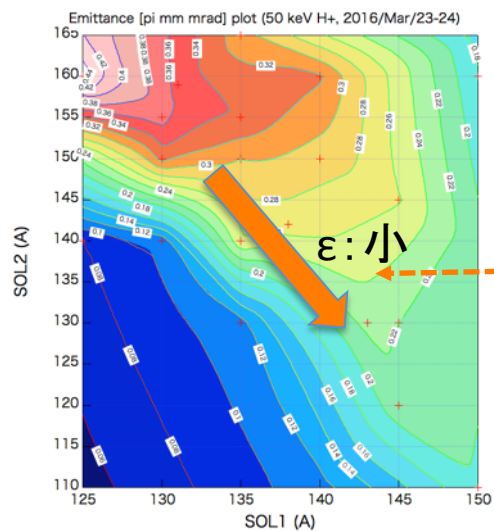
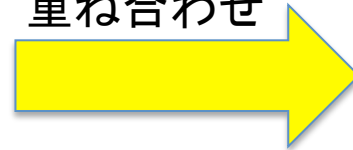
- ソレノイド電磁石を振った時のビーム電流・エミッタンスの分布を測定



ビーム電流(IBS)  
50 mA



重ね合わせ

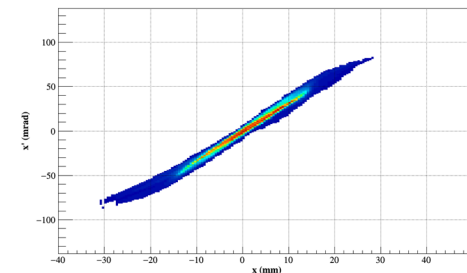


Emittance

0.24  $\pi$ .mm.mrad

$$\epsilon = 0.26 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$$

$$I_{BS} = 54 \text{ mA}$$



# まとめ

- 加速器駆動型中性子源に必要なCW重陽子加速器の技術実証を行うための試験加速器としてIFMIF/EVEDA(LIPAc)を建設し実験を進めており、RFQへの入射のための入射器調整運転の最終段階。
- 重陽子の目標は概ね達成。RFQコミッショニング初期にはビームロスがまだ多く、放射化しやすい100 keV重陽子は使いたくない。代わりに、同速度( $\beta$ )・同等空間電荷効果(K)の50 keV陽子ビームを用いることにした。
- 50 keV陽子ビームはプラズマ電極径を小さくするオプティクス変更と磁場調整などにより、ほぼ目標のエミッタンス( $0.26 \pi \text{ mm mrad}$ )を得た。電流量は現状55 mA。目標の70 mAには届かないが、低放射化でのコミッショニングは概ね可能になった。
- 今後、さらなるエミッタンス低減とRFQアクセプタンスへのマッチングの向上を進めていく。