

FRO702

産業用100 mA級マイクロ波イオン源の開発



住友重機械工業株式会社

○村瀬 龍、村田 裕彦、高橋 伸明、横山 一博

1. 開発背景
2. 設計
3. ビーム試験
4. まとめ

1. 開発背景

2. 設計

3. ビーム試験

4. まとめ

- 産業用イオン加速器は、**医療**や**半導体製造**などの分野で広く使用されている
- 照射スループットを高くすることが顧客価値として求められている
- スループットを高くするためには大電流のビームが必要があり、そのためには**大電流ビームを生成できるイオン源**が必要となる
- 当社では、産業用イオン加速器に組み込むことを目標として**大電流イオン源の開発**を行った

イオン加速器を使用した当社グループの製品群



NeuCure
Boron Neutron Capture Therapy System

BNCTシステム



イオン注入装置



相澤病院陽子線治療センター

陽子線治療システム



治療・診断用RI合成に
用いられるサイクロトロン

【イオン源開発目標】

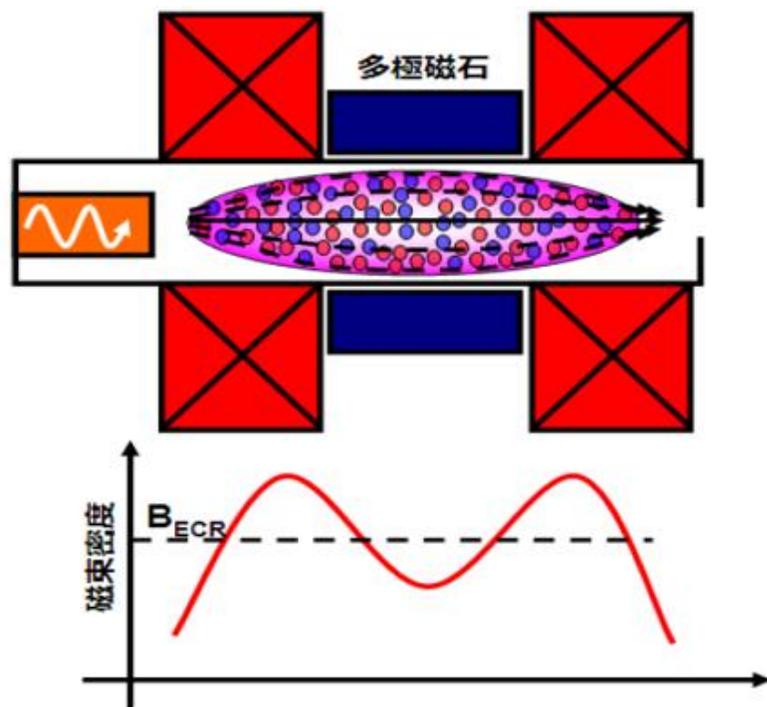
当社グループ製品への組み込みの観点から、以下の目標を設定

項目	目標
加速粒子	H ⁺
ビーム加速エネルギー	45 keV
ビーム電流	120 mA以上
運転モード	CW

上記を達成可能なイオン源として「マイクロ波イオン源」の開発を実施

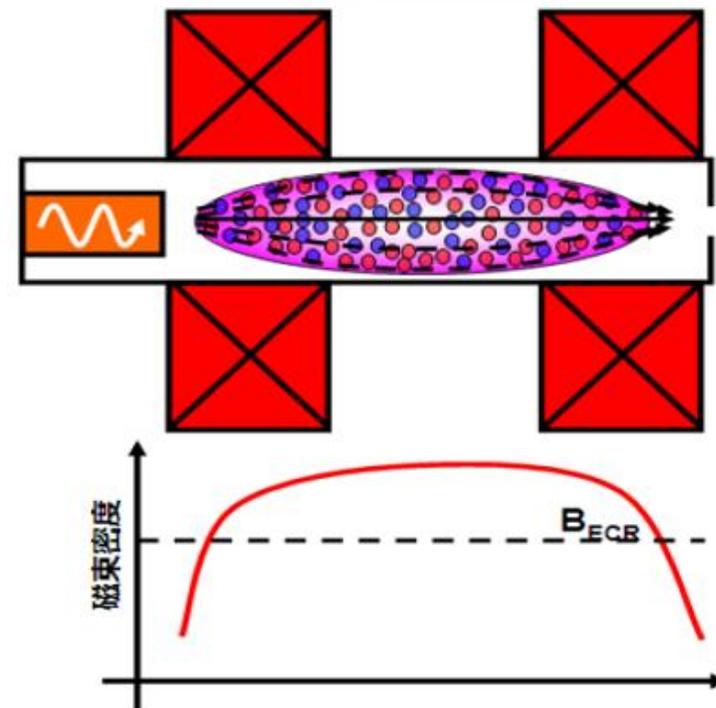
- 無電極のためメンテナンスフリー
- 1 価イオンの大電流ビームの生成に適する

◆ ECRイオン源



- ミラー磁場あり (min-Bを持つ)
- カस्प磁場あり
- 多価イオン生成に利用

◆ マイクロ波イオン源 (Off-resonance型)



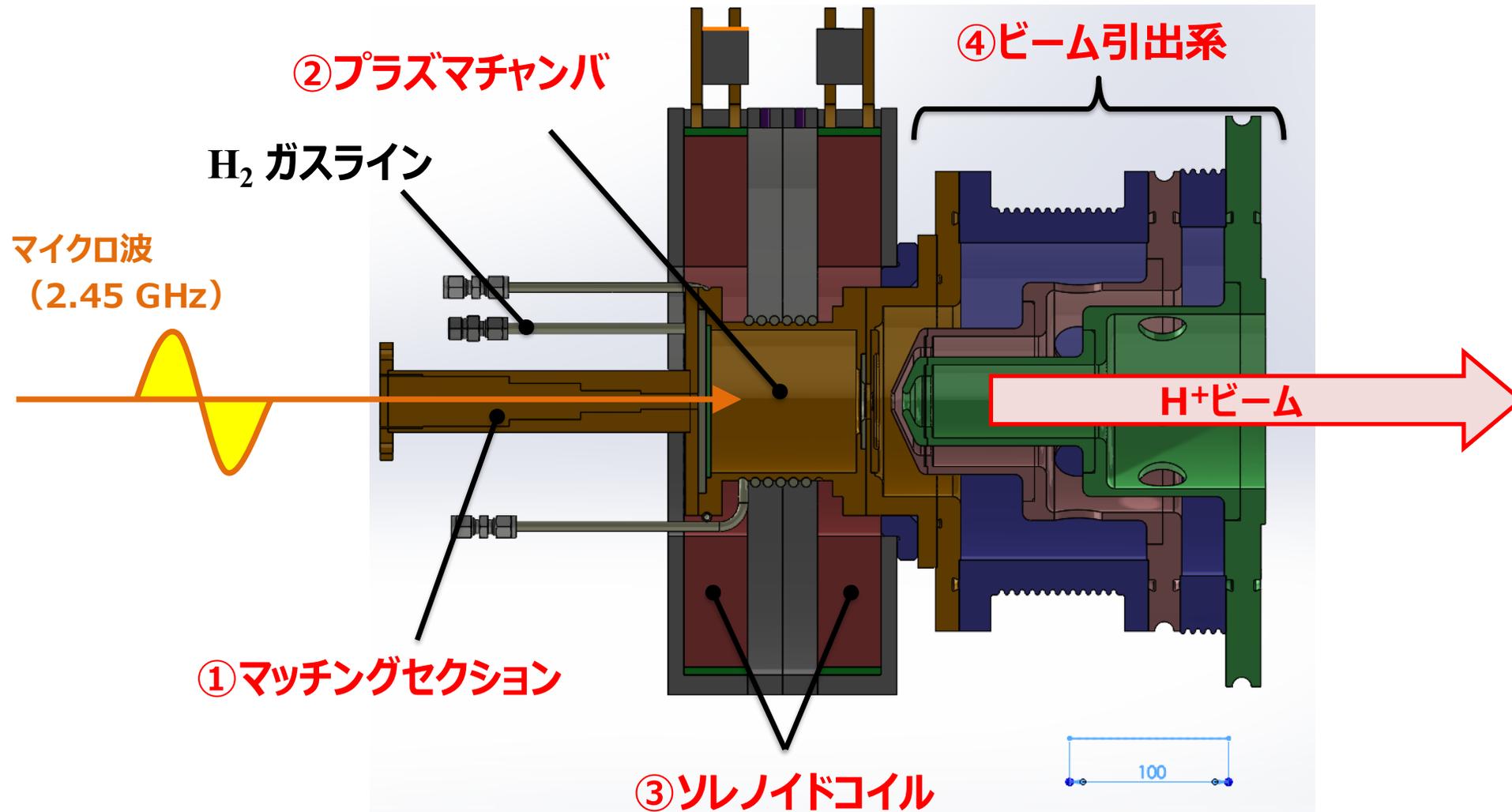
- ミラー磁場なし (一山型)
- カस्प磁場なし
- 1価大電流イオン生成に利用

1. 開発背景

2. 設計

3. ビーム試験

4. まとめ



各コンポーネントについて設計を実施

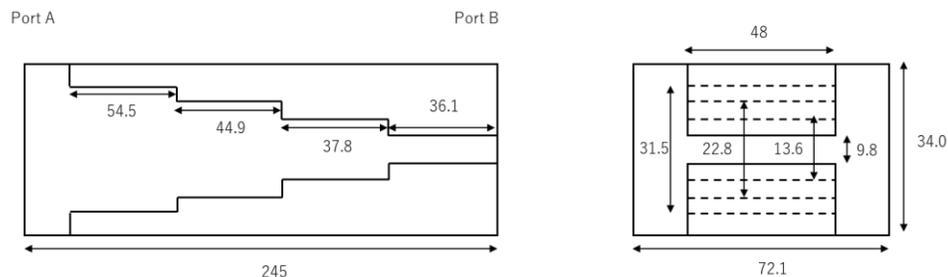
導波管（矩形）とプラズマチャンバ（円筒）のインピーダンス整合が必要

（整合しないとマイクロ波が境界で反射）

→ インピーダンス整合のためのリッジ型マッチングセクションを設計

解析的手法

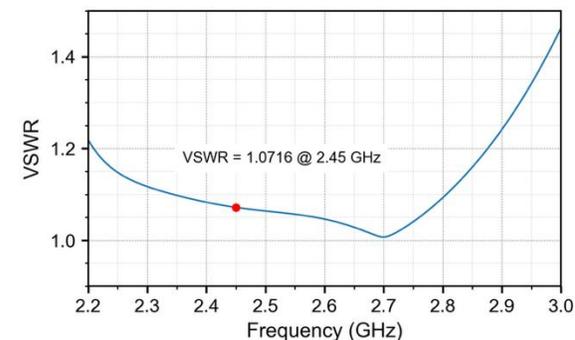
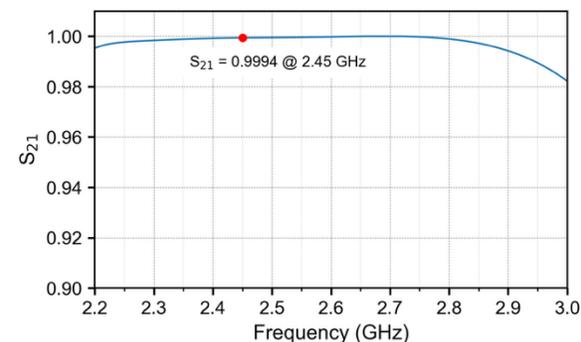
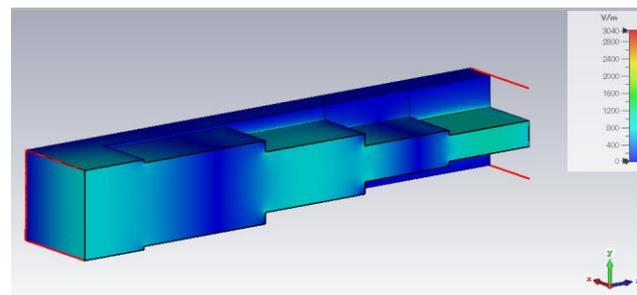
文献[1]で紹介されている解析的手法
（小反射理論、閉形式表示、Marcuvitzの
等価回路公式…）
を参照し、リッジの寸法を決定



[1] A. Misra *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 85, 063301 (2014)

数値シミュレーション（CST Studio Suite）

電磁場計算を実施し、Sパラメータ、VSWRを確認



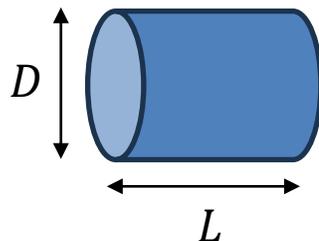
設計上のマイクロ波透過率：
99.94 % (VSWR = 1.0716)
@2.45 GHz

プラズマチャンバ = 円筒型空洞共振器

→ チャンバ内で強い電界が得られるように円筒の径 D と長さ L を最適化する

解析的手法

- 矩形導波管内の伝搬モード : TE_{11}
- 円筒共振器での共振モード : TE_{111}



◆ 径 D の条件

- TE_{11} モードが伝搬し、その次の TM_{01} モードが伝搬しない
- WR284導波管(幅72.1 mm, 高さ: 34.0 mm)が接続できる

→ $D = 90$ mmに設定

◆ 長さ L の条件

TE_{mnp} モードの共振周波数

$$f = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{2\rho'_{mn}}{D}\right)^2 + \left(\frac{\pi p}{L}\right)^2}$$

$$c_0 = 2.998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

$$m = n = p = 1$$

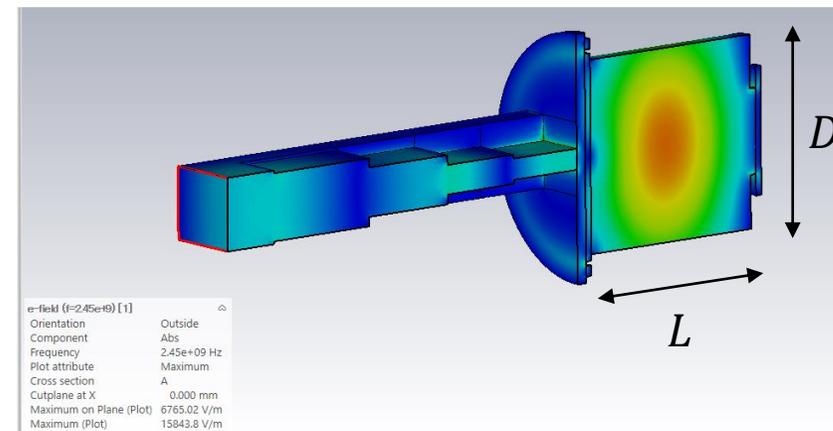
$$\rho'_{11} = 1.841$$

(第一種1次Bessel関数の導関数の1番目のゼロ点)

$f = 2.45$ GHz, $D = 90$ mmを代入して L を求める

→ $L = 101.2$ mmに仮決定

数値シミュレーション (CST Studio Suite)



マッチングセクションと組み合わせたモデルについて、 L を変えて計算。電界が最大となる寸法を探す

→ $L = 105.6$ mmに最適化

プラズマがカットオフ密度以上になるとマイクロ波が反射される
→ 磁場を印加することで、反射されずに高密度のプラズマを生成できる

◆ 高密度プラズマ生成に必要な軸上の磁場分布の条件[2]

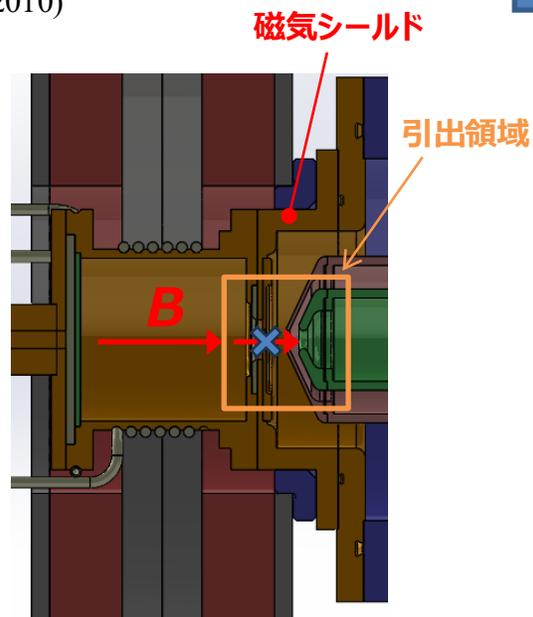
- I. プラズマチャンバの両端でECR磁場 B_{ECR} となること ($B_{\text{ECR}} = 87.5 \text{ mT} @ 2.45 \text{ GHz}$)
- II. チャンバ内部における磁場強度 B について、 $B_{\text{ECR}} \leq B \leq 1.3B_{\text{ECR}}$ となること

[2] S. Gammino *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 81, 02B313 (2010)

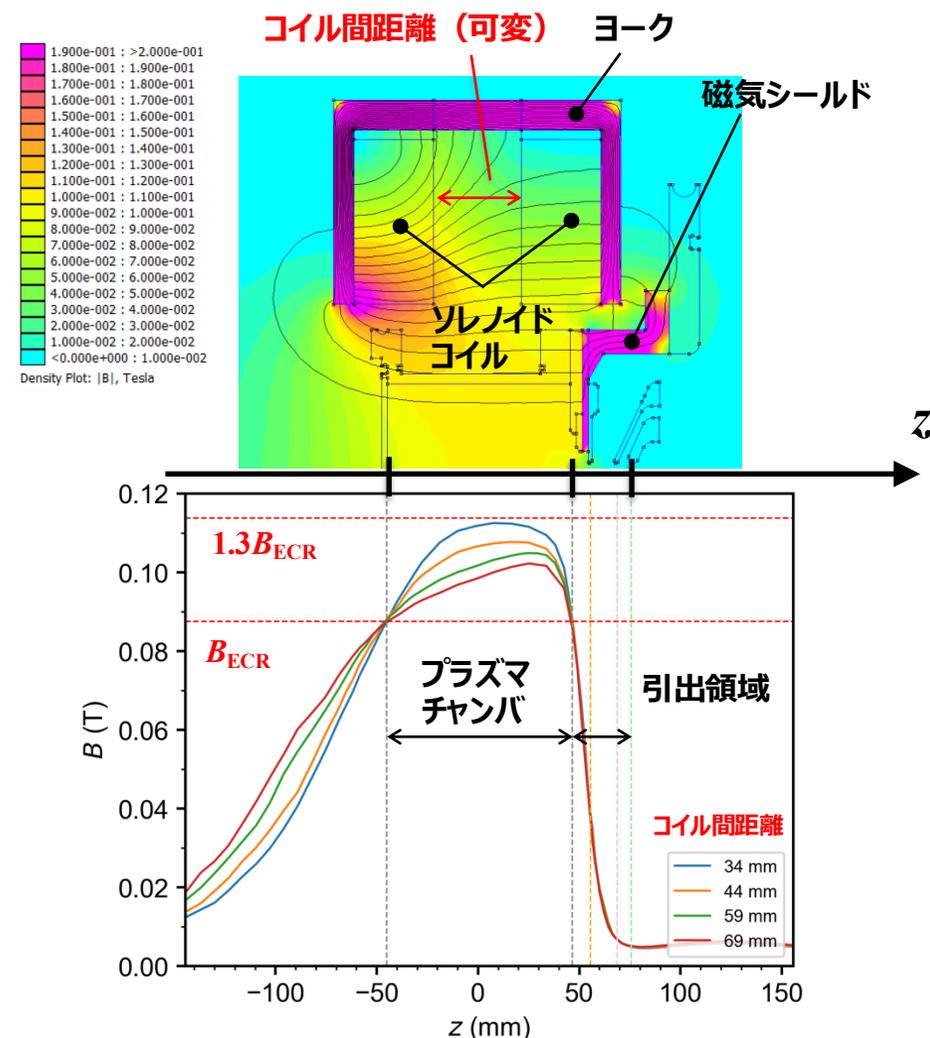
◆ 引出電極への漏れ磁場の低減

引出領域へ磁場が漏れることにより、放電が促進される恐れがある

→ 磁気シールドによって漏れ磁場を低減させる設計



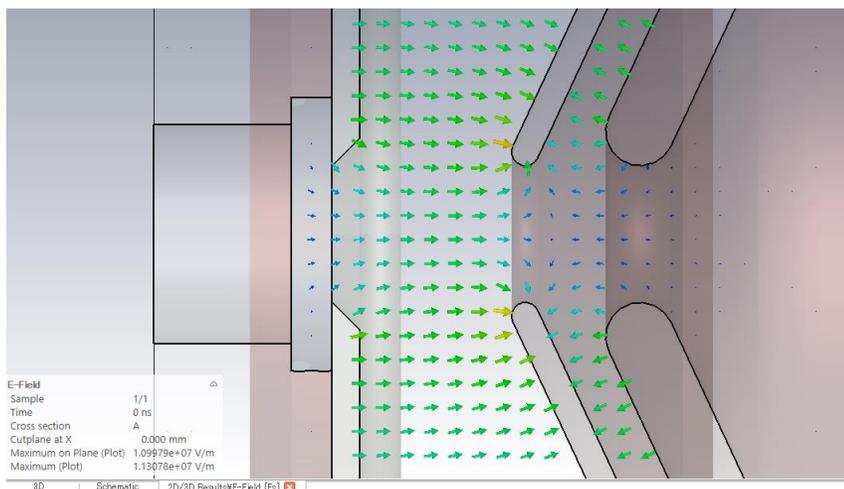
静磁場計算 (FEMM)



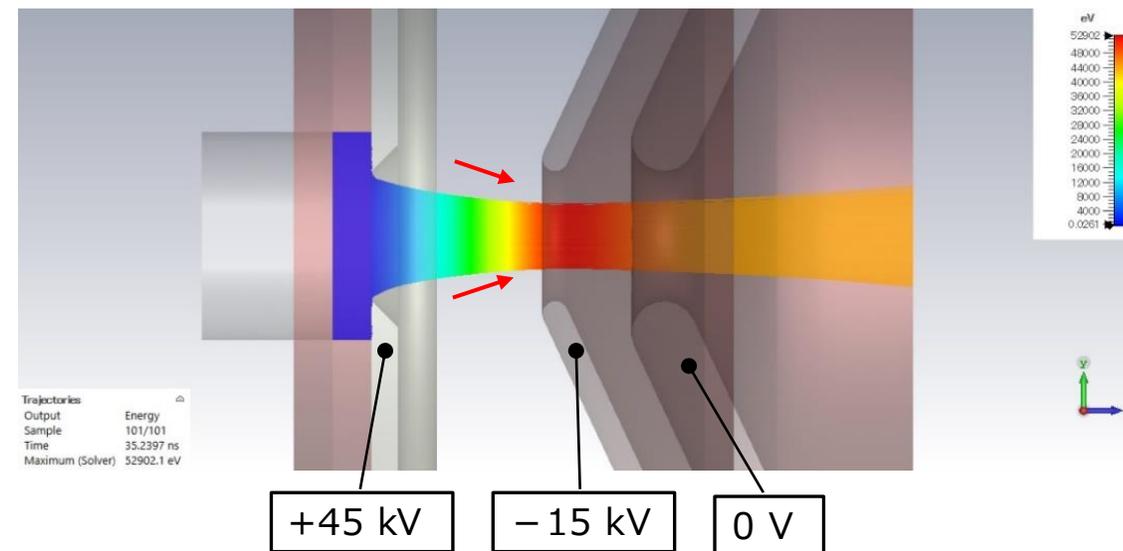
大電流ビームでは空間電荷効果が顕著になりビーム発散が強くなる

→ ビーム収束効果を持つ引出電極を設計

電場計算



ビーム軌道計算 (CST Studio Suite)



- 3枚電極 (Accel-Decel方式)
- 引出開口径 : 10 mm
- ビームの空間電荷を含めた軌道計算を実施し、発散角が小さいビームを引き出せるように、引出電極形状やギャップ長を決定

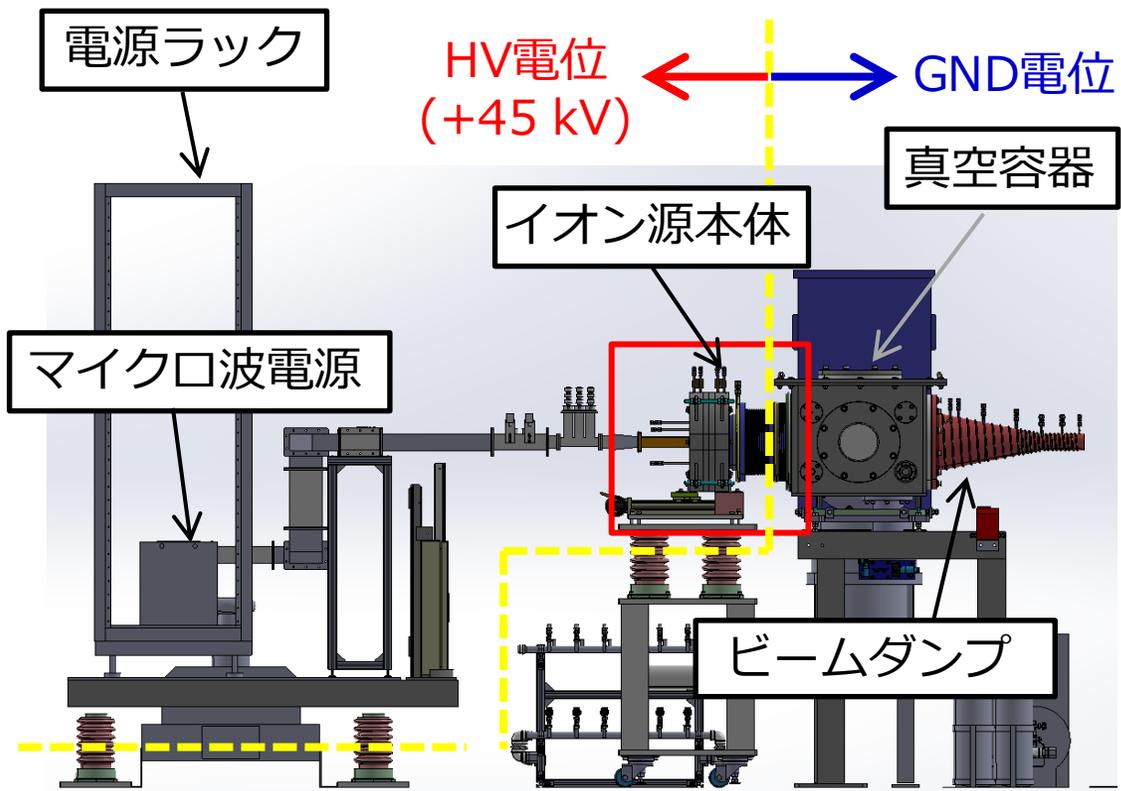
1. 開発背景

2. 設計

3. ビーム試験

4. まとめ

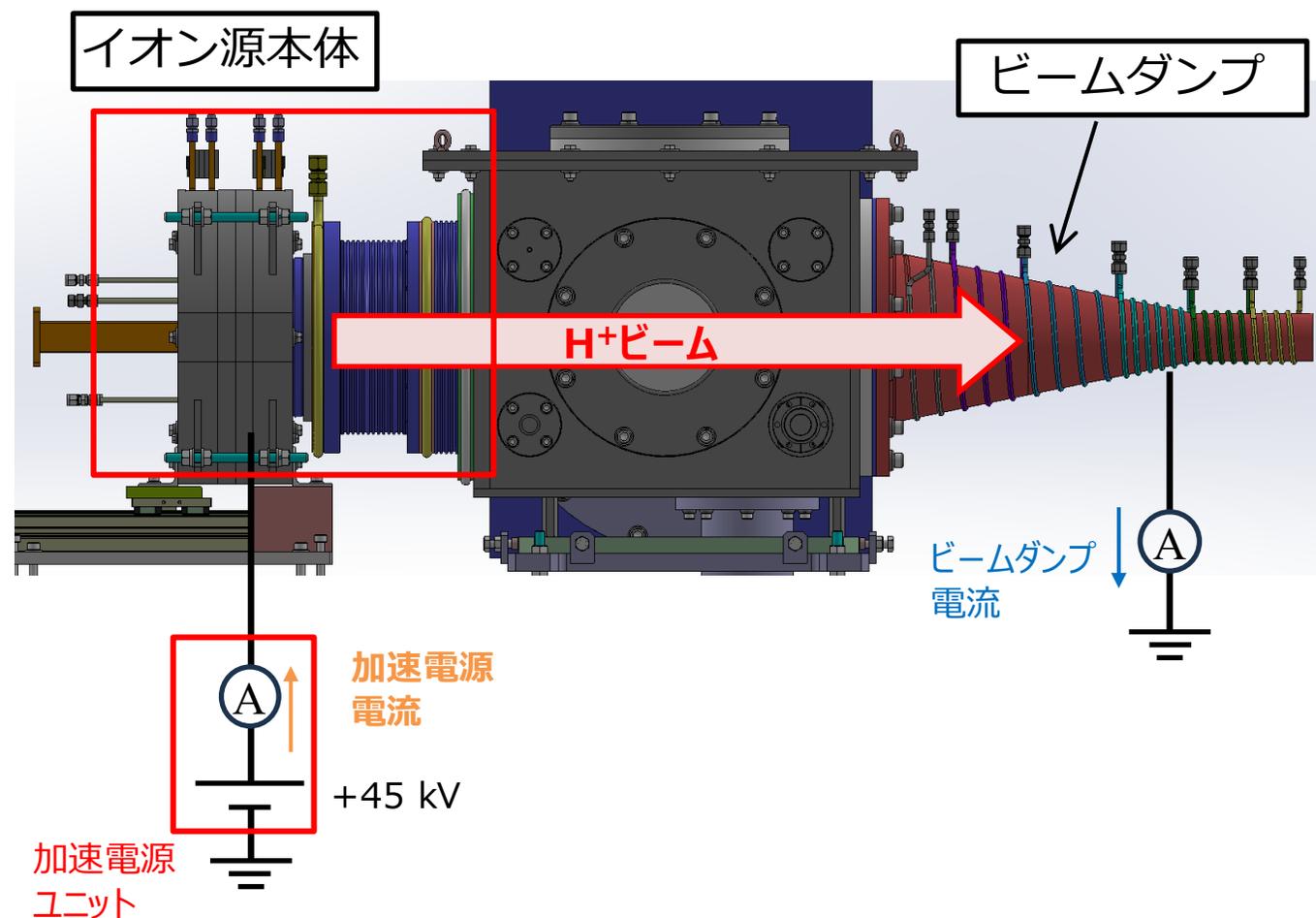
◆ テストスタンド3Dモデル



◆ テストスタンド写真

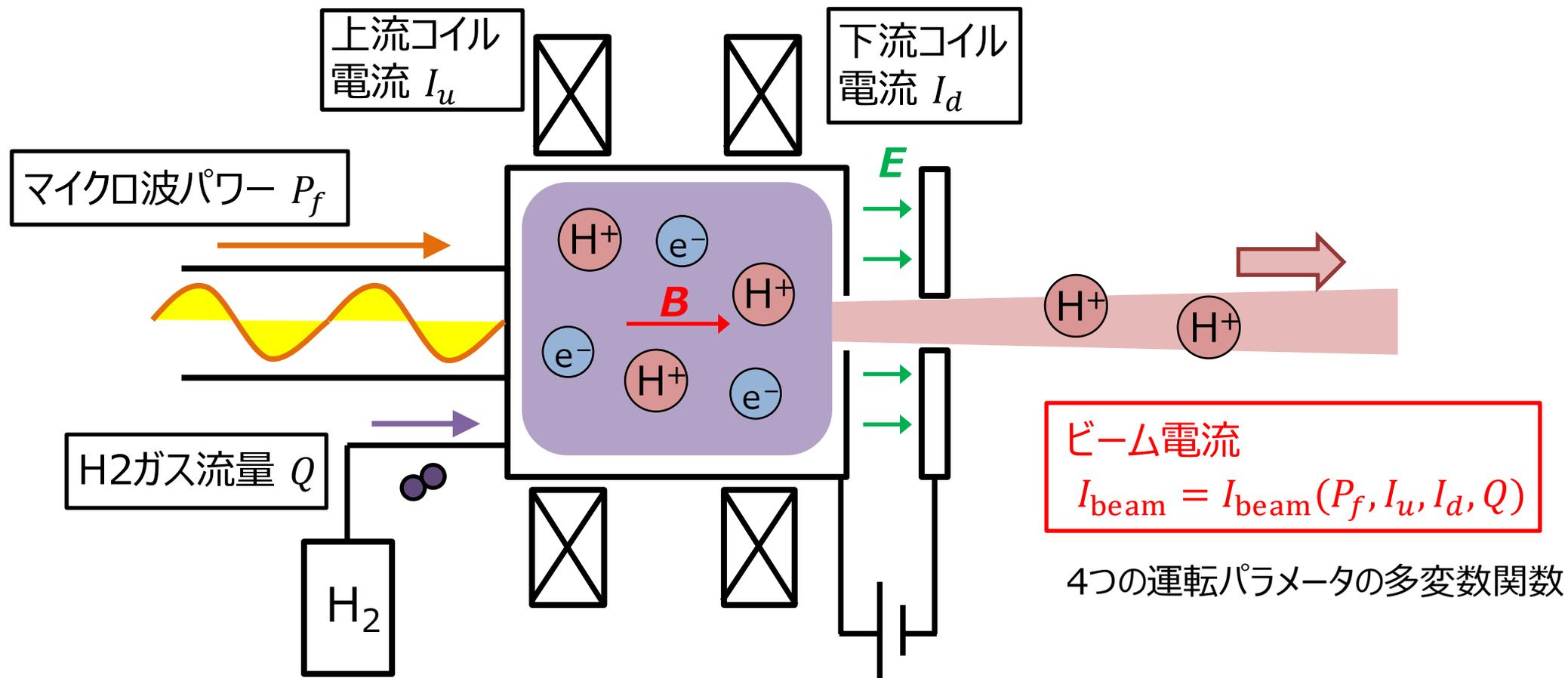


◆ ビーム電流評価方法



- ビーム電流の評価は、**ビームダンプ電流**あるいは**加速電源に流れる電流**で行った
- 質量分析器はないため、H₂プラズマで生成する全てのイオン種 (H⁺, H₂⁺, H₃⁺) の電流を測定している
- 過去の文献から、典型的にH⁺の割合は80%程度であるため、以下では**全ビーム電流に占めるH⁺の割合を80%と仮定する**
- → 120 mA H⁺ビームを得るためには、**全ビーム電流で120 mA/0.8 = 150 mAを目指す**

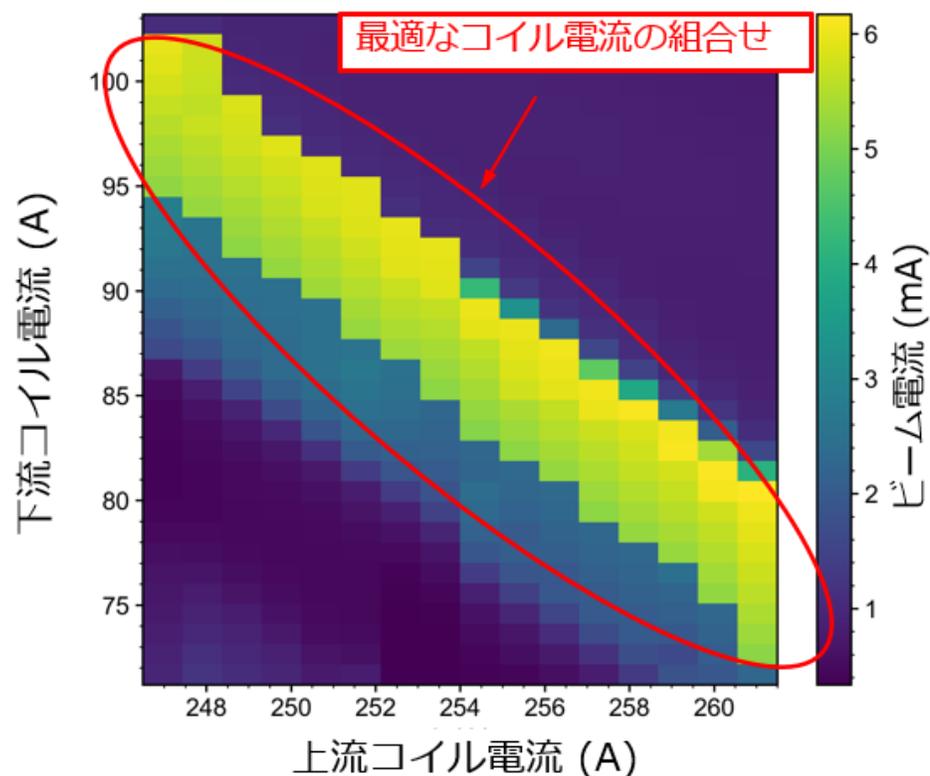
◆ ビーム電流に影響を与える運転パラメータ



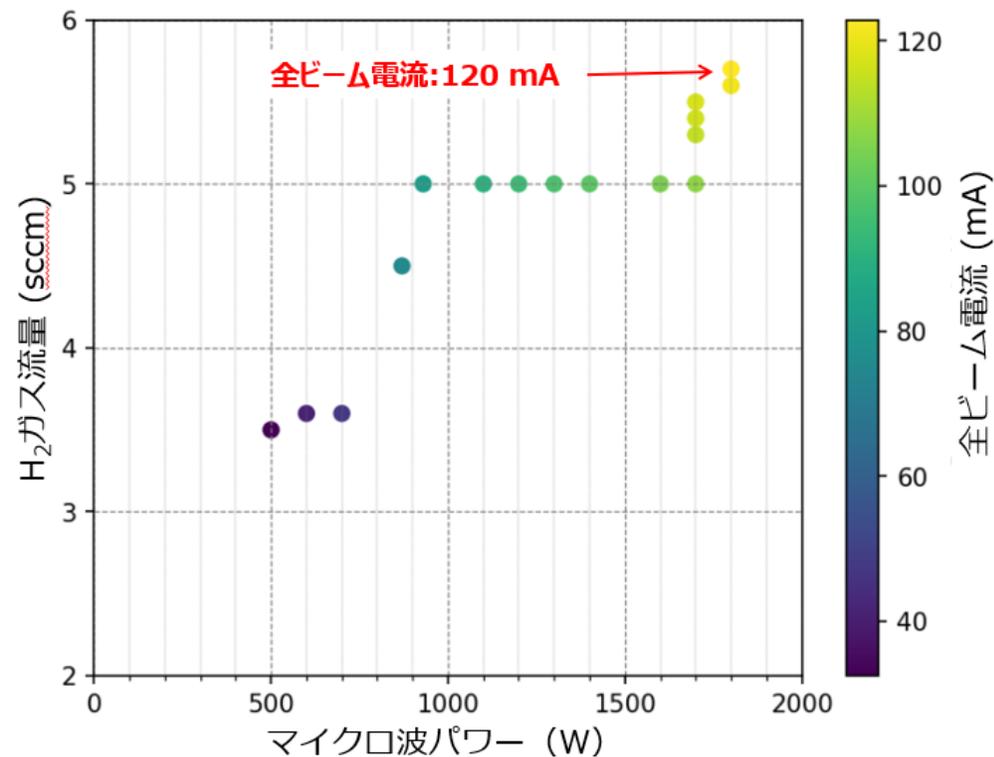
4つの運転パラメータによってビーム電流が決まる

→ 応答の様子を見ながらパラメータを変え、ビーム電流が増加する方向を探す

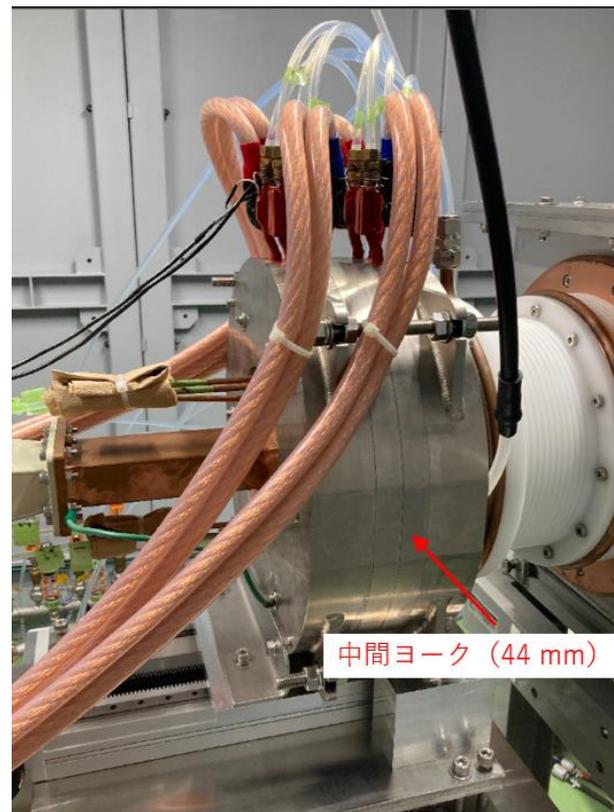
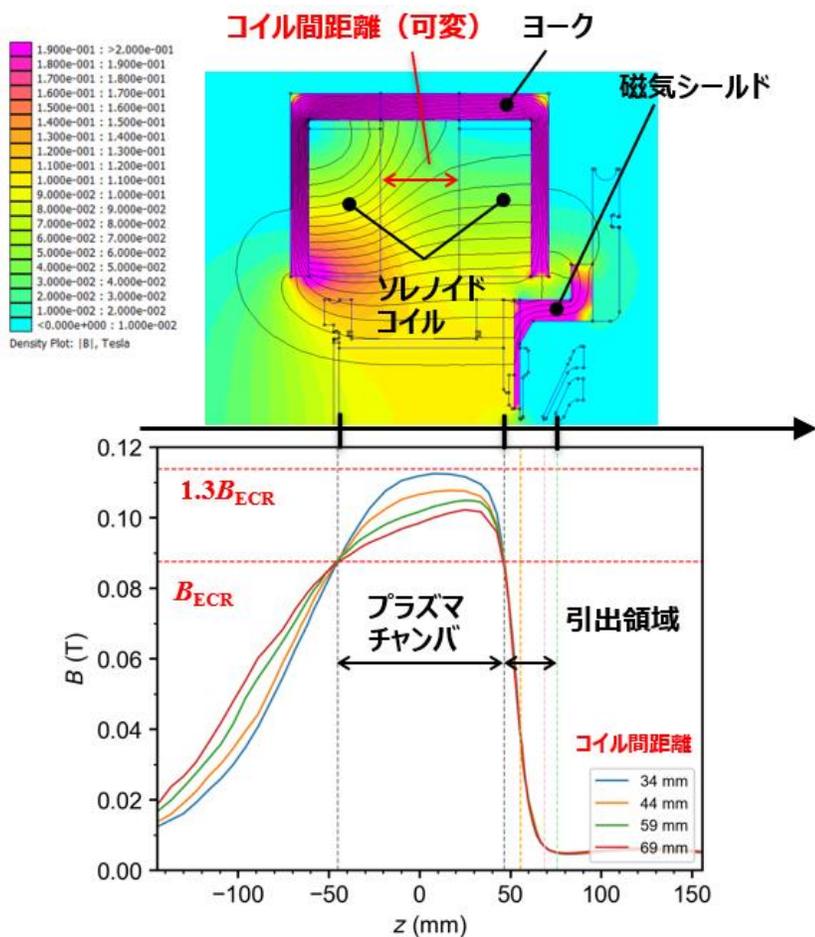
◆ ソレノイドコイル電流依存性



◆ マイクロ波パワー、ガス流量依存性

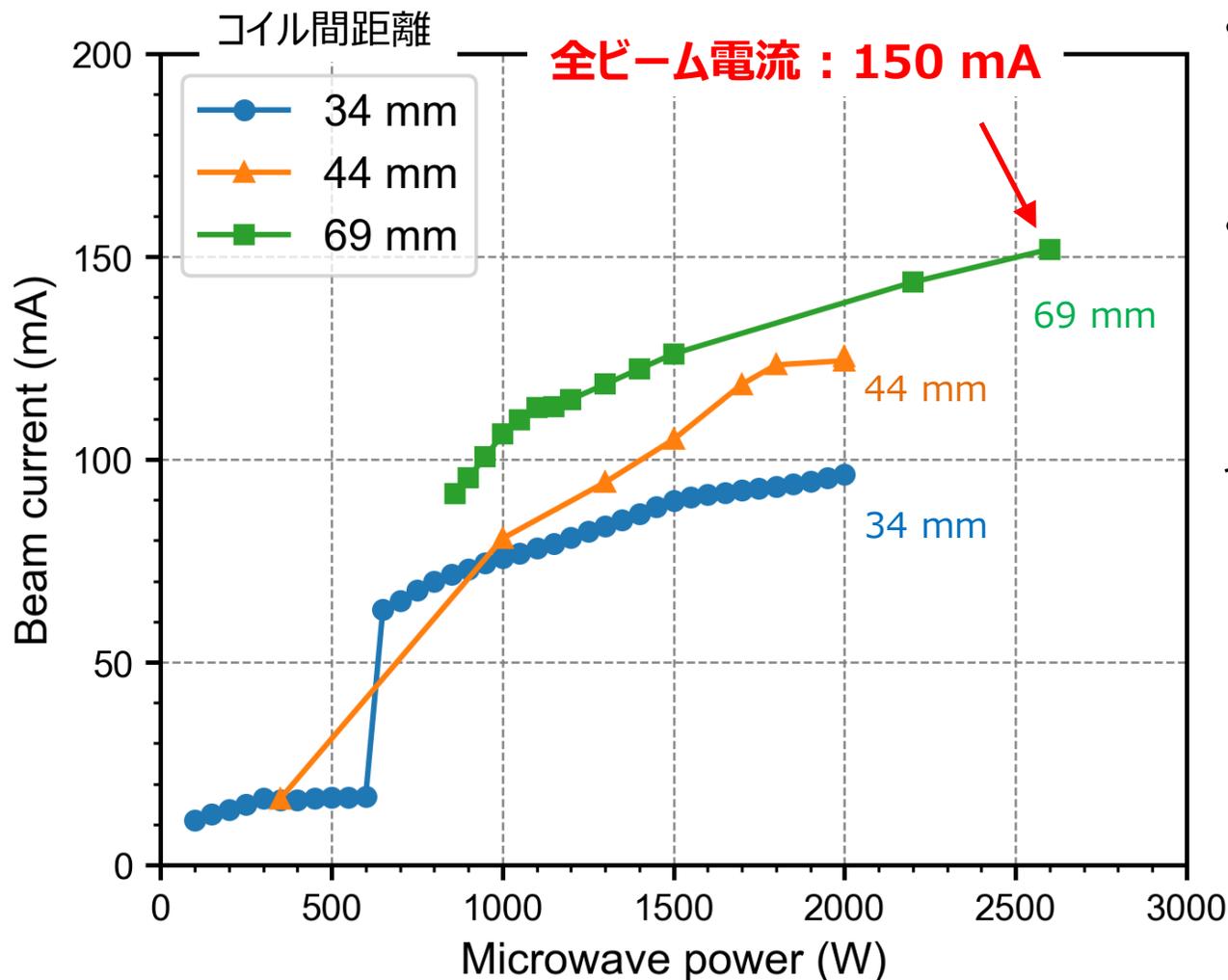


4つの運転パラメータを変化させたときのビーム電流量の変化を調査
→ **全ビーム電流 120 mA (H⁺ビームは100 mA程度) 止まり**



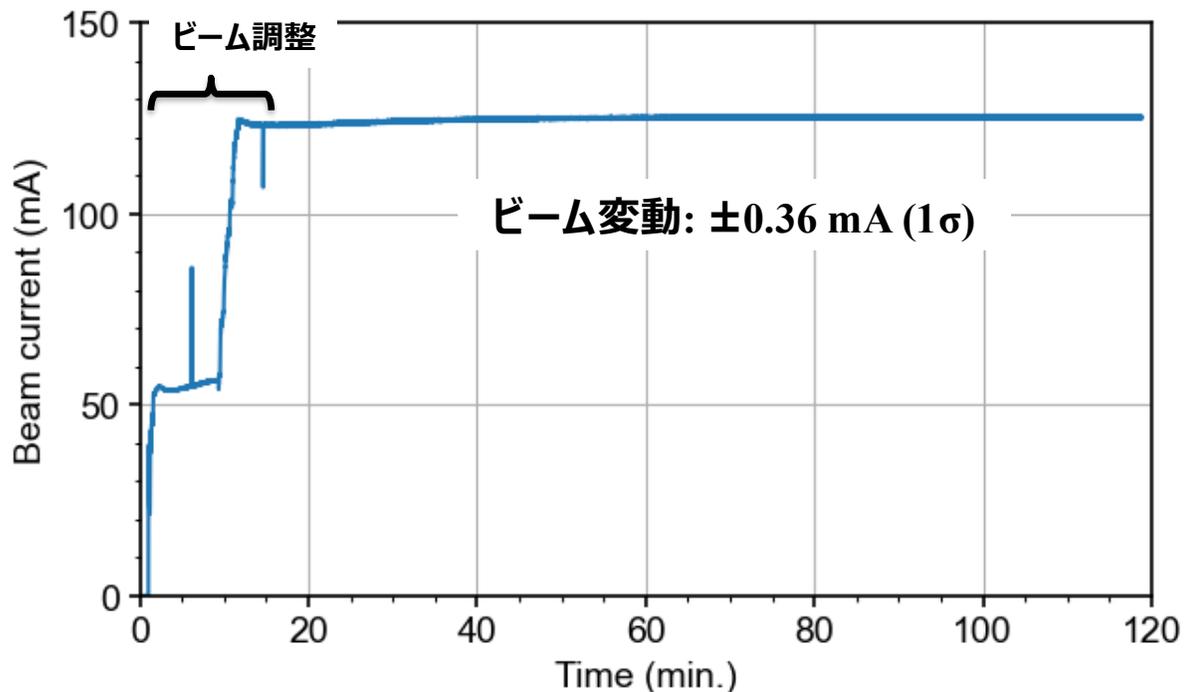
- 2つのソレノイドコイル間の距離は可変 (距離を変えることで磁場分布が変化)
- 今回は4つの中で調整可能 (34, 44, 59, 69 mm)
- 当初はずっと44 mmで試験していたが、34 mmと69 mmについても試験

◆ コイル間距離を変えたことによる効果

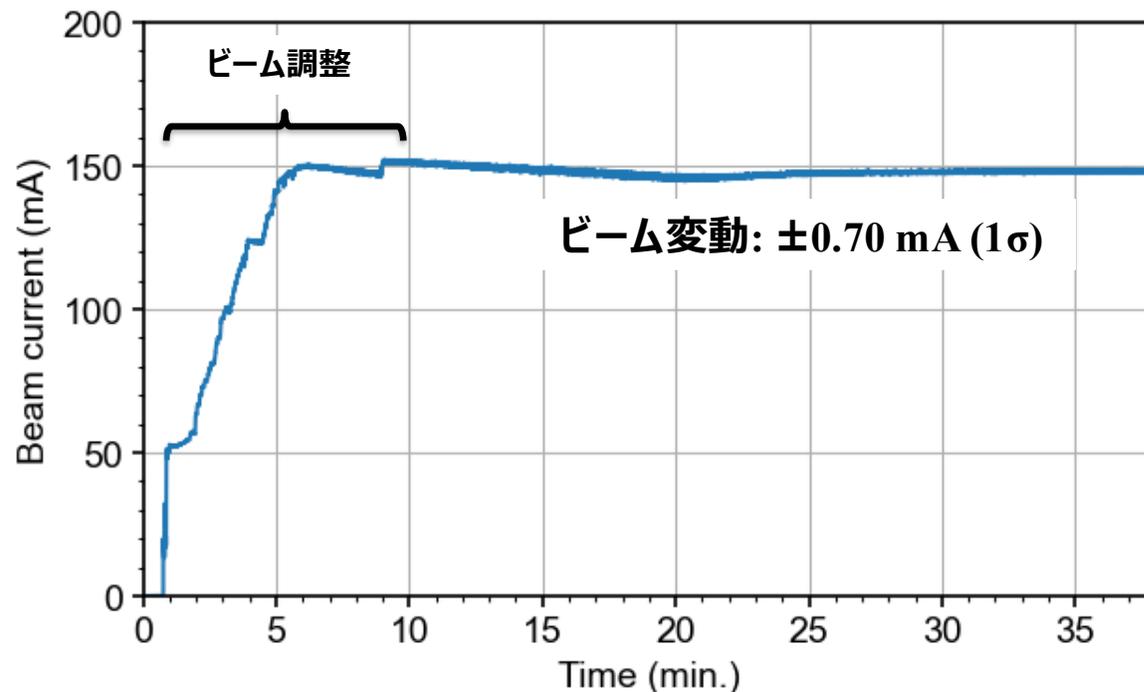


- コイル間距離が広いほど、ビーム電流が多くなることがわかった
- コイル間距離が69 mmの時にマイクロ波を2600 W 入力することで、**全ビーム電流150 mA (H+ビーム ~120 mA) が得られ、目標達成**
(34 mm、44 mmの時は、ビーム電流は2000 Wで飽和し、それ以上マイクロ波パワーを上げてビームは増加しなかった)

全ビーム電流120 mA条件：110分無放電



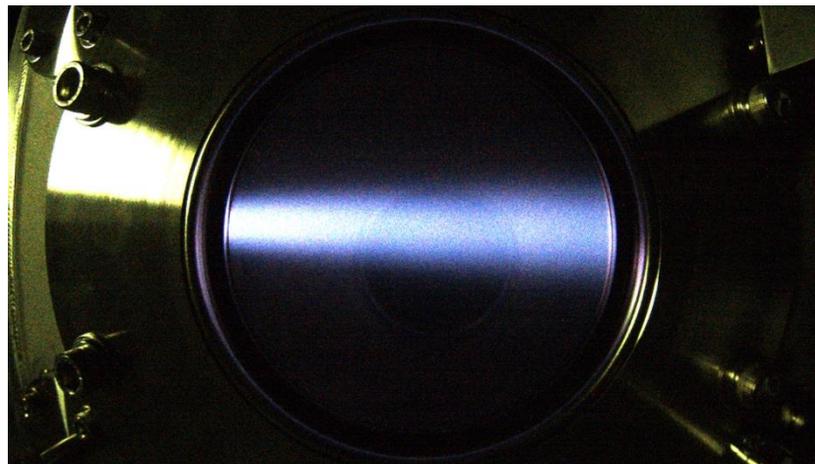
全ビーム電流150 mA条件：30分無放電



長時間運転時にもビーム電流の変動は小さい

1. 開発背景
2. 設計
3. ビーム試験
4. まとめ

- 産業用イオン加速器への適用を目指して、2.45 GHzマイクロ波で駆動するCW大電流H⁺イオン源の開発を行った
- ビーム試験によって、**45 keV, 150 mA (H⁺は約120 mAと推定)のビーム引出しを達成した**
- ビーム電流150 mAの条件で約30分間安定したビームを得ることができた



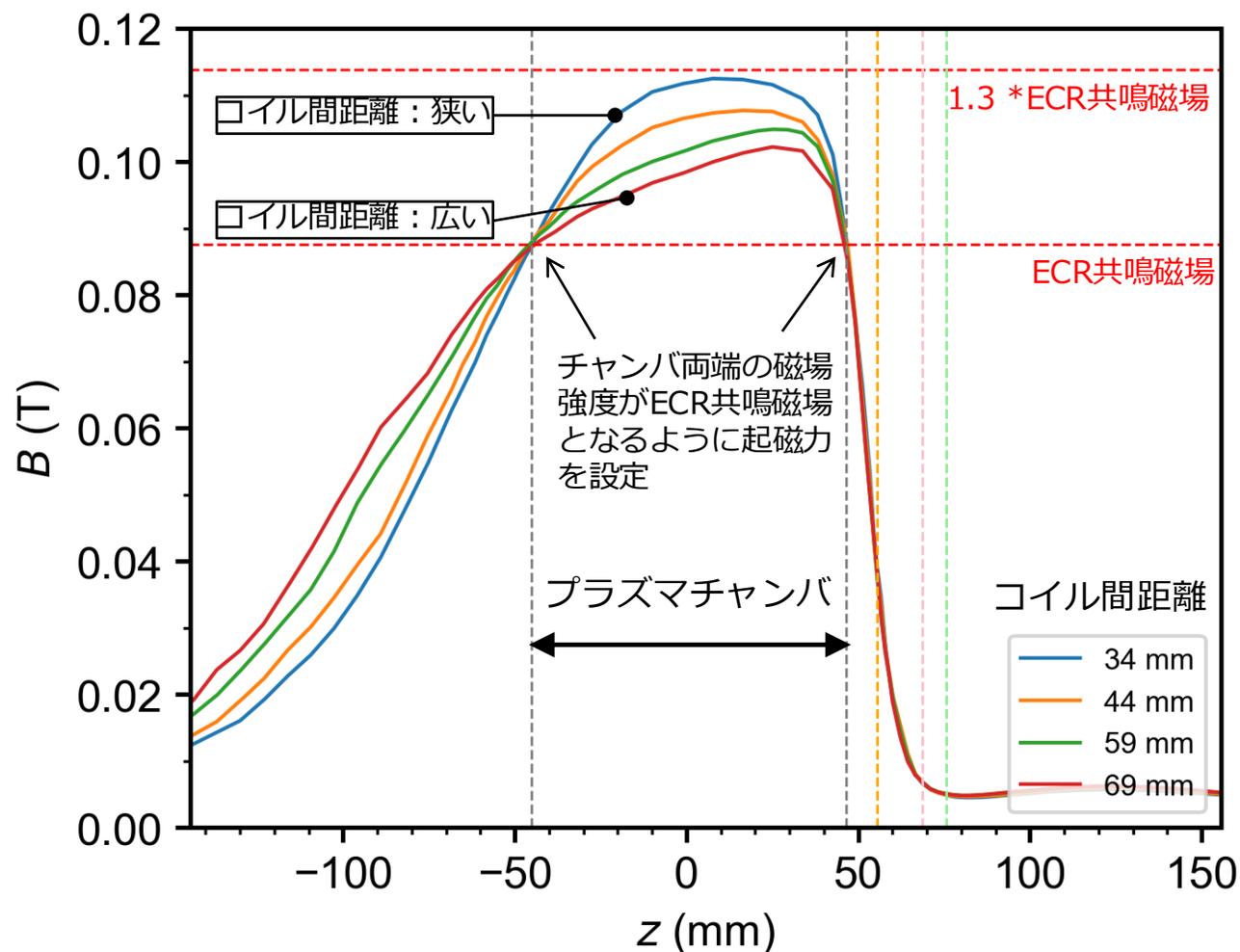
Arガスを導入した時のビームの様子



補足資料

◆ コイル間距離を変えることの意味

各コイル間距離 d_{coil} に対するz軸上の最適な磁場分布



- コイル間距離を変えると、**プラズマチャンバ軸上の磁場分布が変化**
- チャンバ両端の磁場強度がECR共鳴磁場となるようにコイル電流を設定するとすると、コイル間距離の変化は、磁場分布に以下の変化をもたらす
- チャンバ端での勾配がなだらかなほど、ECR共鳴吸収を起こす電子が多くなる(?)

コイル間距離	チャンバ内磁場強度	チャンバ端の磁場勾配
狭い	強い	急峻
広い	弱い	なだらか