



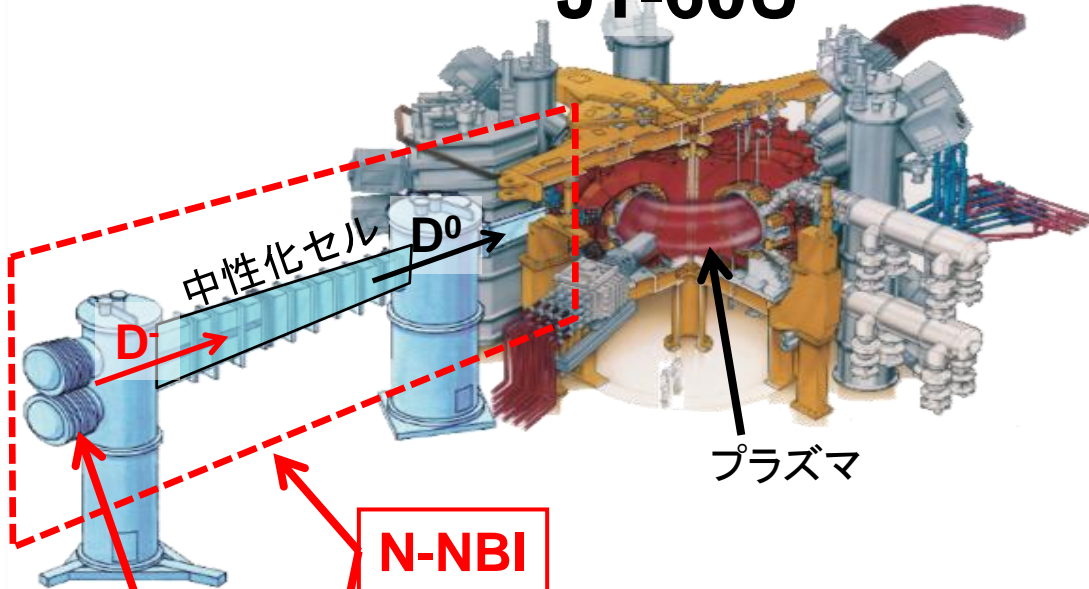
第13回若手科学者によるプラズマ研究会「プラズマ加熱・制御技術の進展と展望」
原子力機構那珂研、平成22年3月10～12日

JT-60SAに向けた負イオン源の高耐電圧改造と 500keVビーム加速の実証

田中豊、小島有志、花田磨砂也、JT-60NBIグループ
日本原子力研究開発機構

JT-60 N-NBI

JT-60U



JT-60Uでは、プラズマ加熱・電流駆動の研究のために、1996年に世界で初めて、N-NBI(定格:500keV、10MW)を導入。

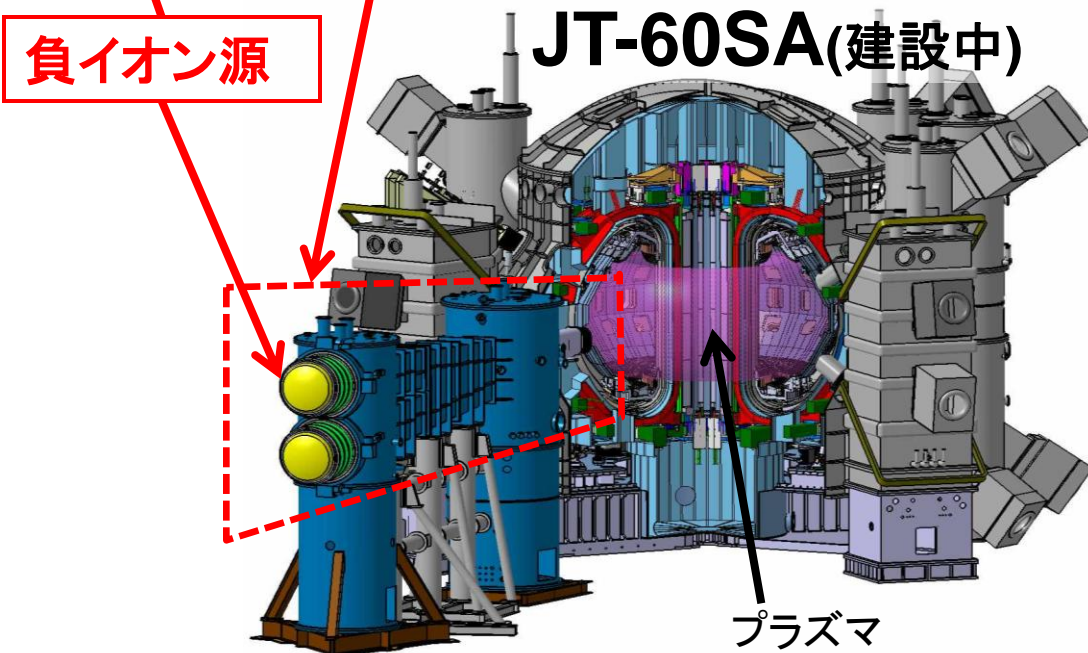
JT-60UでのN-NBIの達成値

□最高ビームエネルギー:
410keV@1.9MW、0.5秒

□最長パルス幅:
30秒@340keV、1.7MW



JT-60SA(建設中)



JT-60SAでは、既存設備を再利用し、N-NBIを運転する予定。

JT-60SAでのN-NBIの目標値

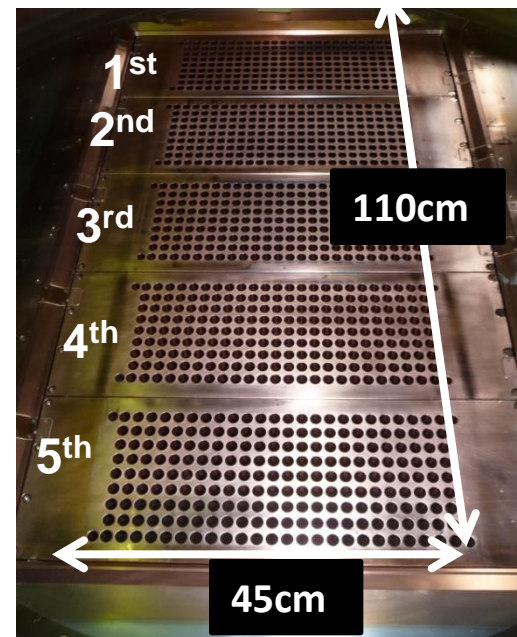
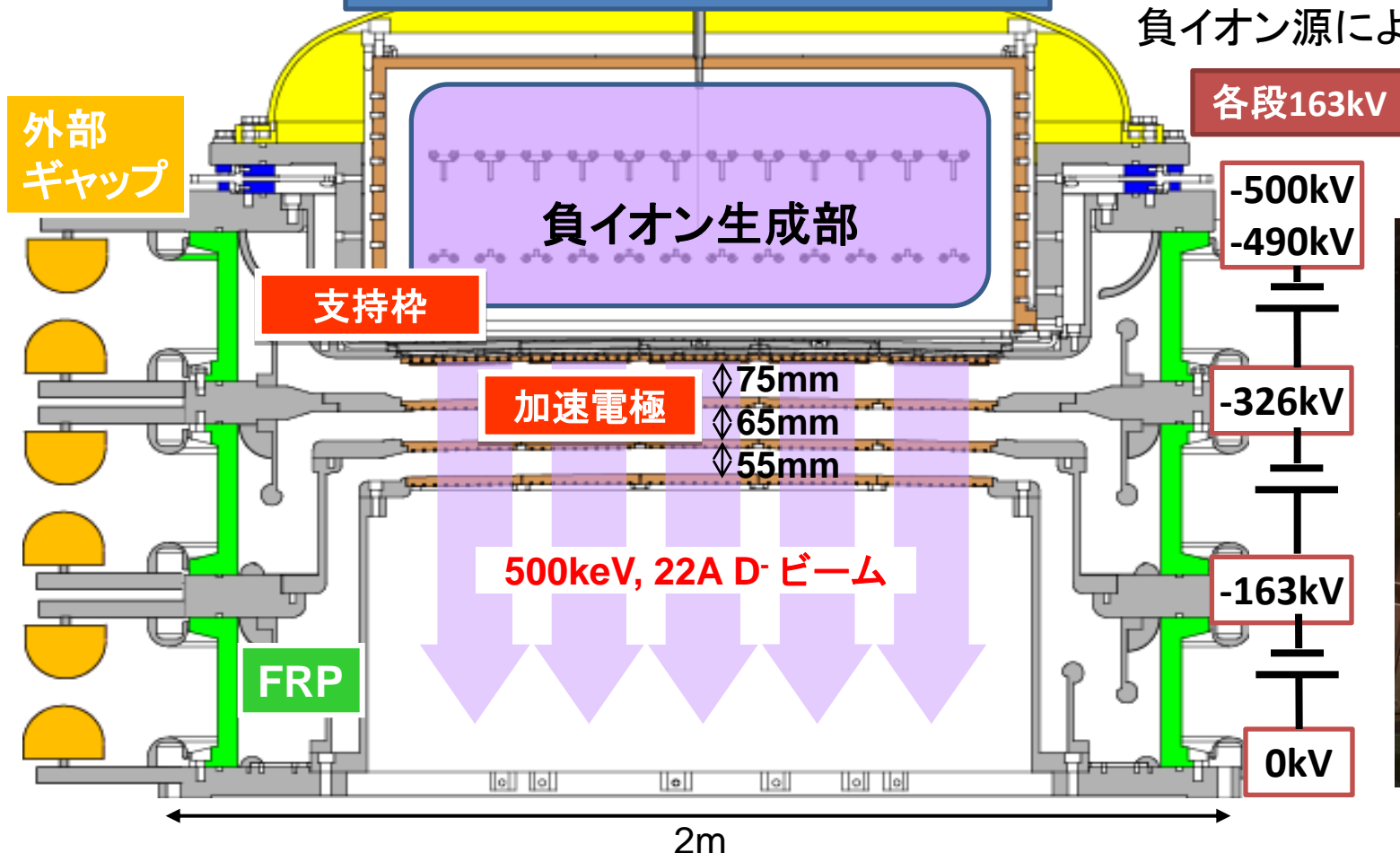
□500keV、10MW、100秒入射

現在のN-NBIの大幅な
パワーアップが必要

JT-60 N-NBI用負イオン源

多段(3段)-多孔(1080穴) 静電加速器

現在のJT-60 N-NBIの性能は、主に負イオン源によって制限されている。



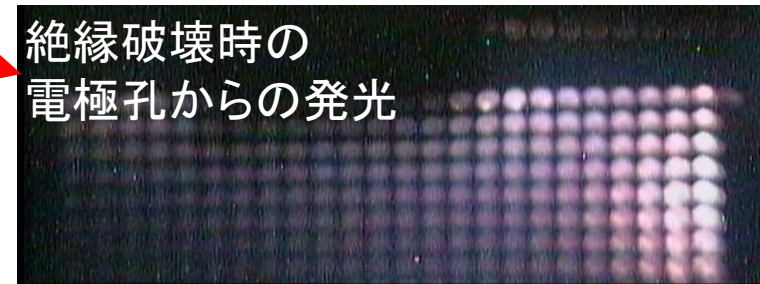
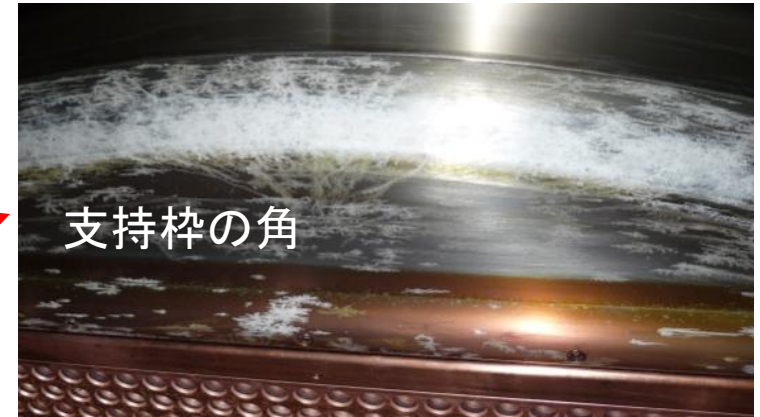
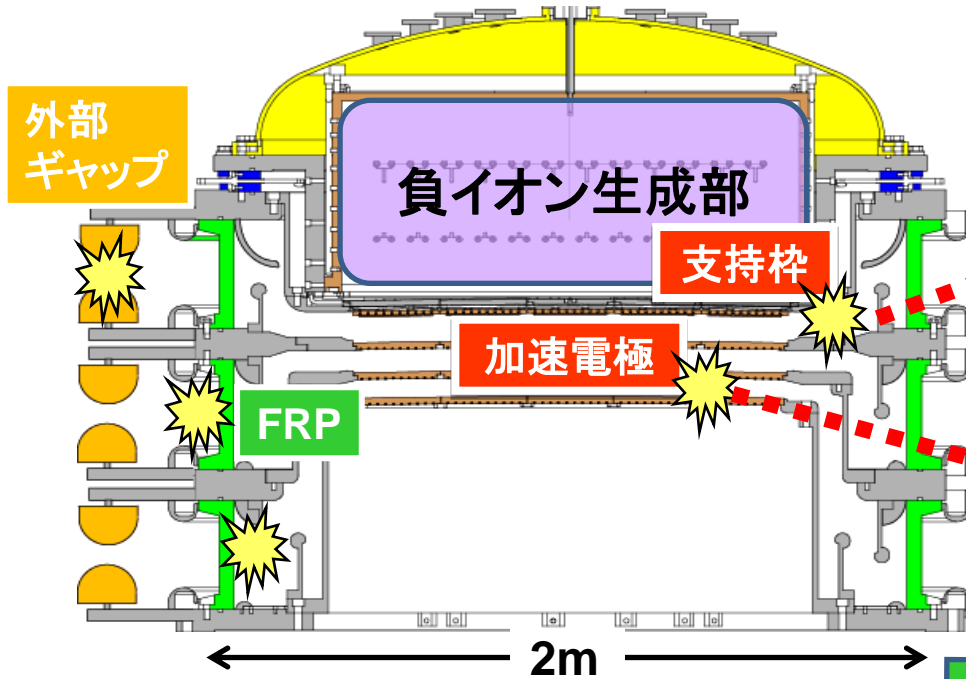
負イオン源の問題点:

- ①負イオン生成の非一様性
- ②ビーム衝突による電極熱負荷
- ③負イオン加速部での絶縁破壊

ビームエネルギー・
パワーを制限して
いる主原因。

絶縁破壊を抑制し、500keVビームを実証。

負イオン源加速部での絶縁破壊



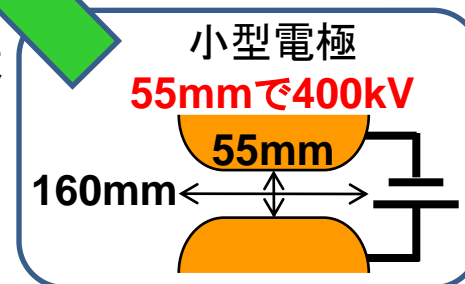
絶縁破壊の原因

- 真空電極放電@加速電極、支持棒
- 真空沿面放電@FRP
- 大気電極放電@外部ギャップ
- 大気沿面放電@FRP

絶縁破壊時、

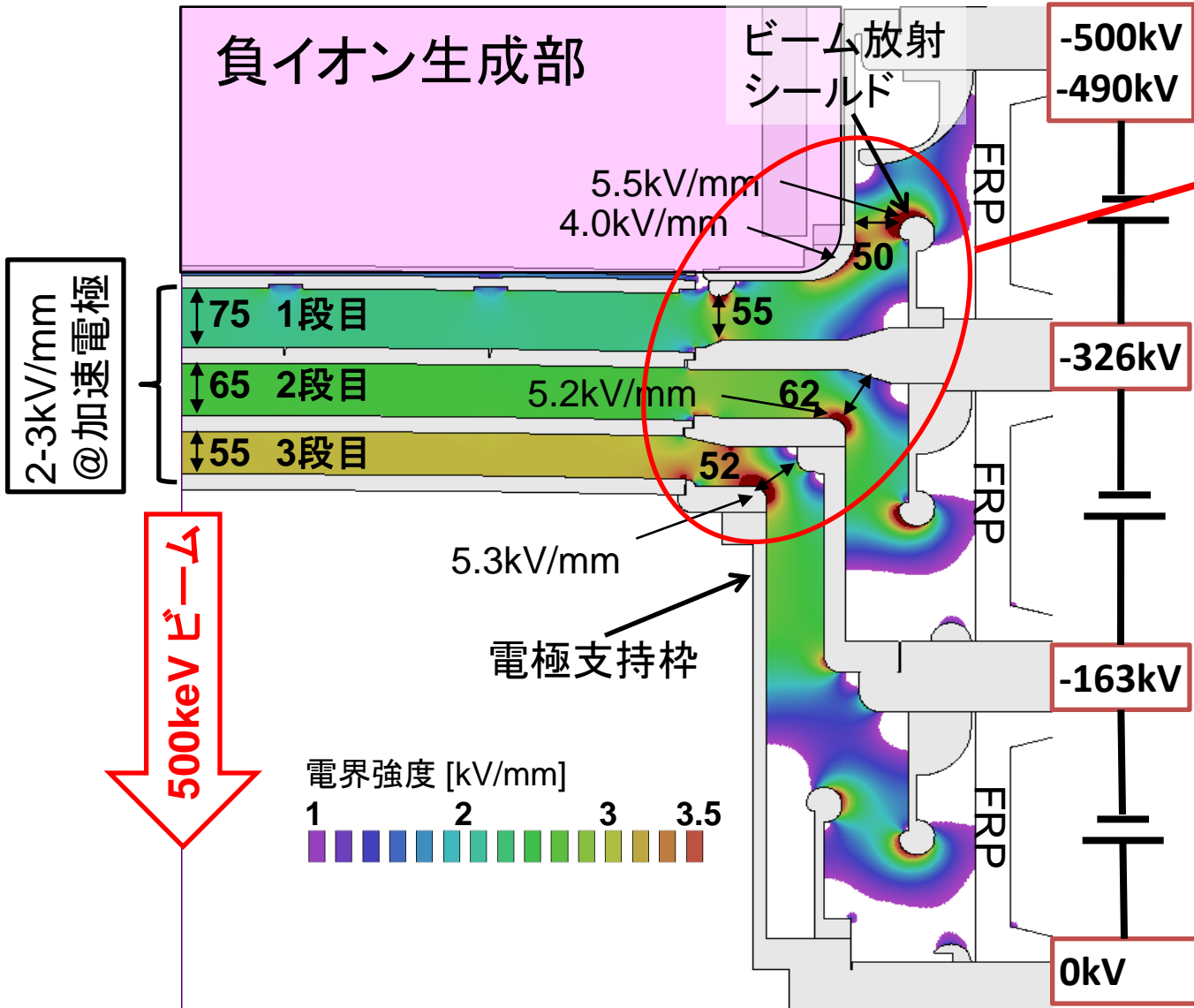
- 大気放電は、発生していない。
- 真空度悪化、制動X線、発光が観測される。
- 電極・支持棒に多数の放電痕が存在。
→絶縁破壊は、真空中での電極間放電が原因。

面積
2桁大



現在の負イオン源の電極間距離は、小型電極の耐電圧を基に設計
→大型で、複雑な構造を持つ電極の耐電圧は調べられていない。

負イオン源内の電界強度分布



4-5.5kV/mm
 @電極支持柱周辺部
 +ビーム放射シールド

加速電極間だけでなく、最短位置でのギャップも、耐電圧に影響を及ぼす可能性。

電極間ギャップを広げると、電界が低減し、耐電圧が改善。

↑ ↓
 耐電圧とビーム収束性能は両立するか？

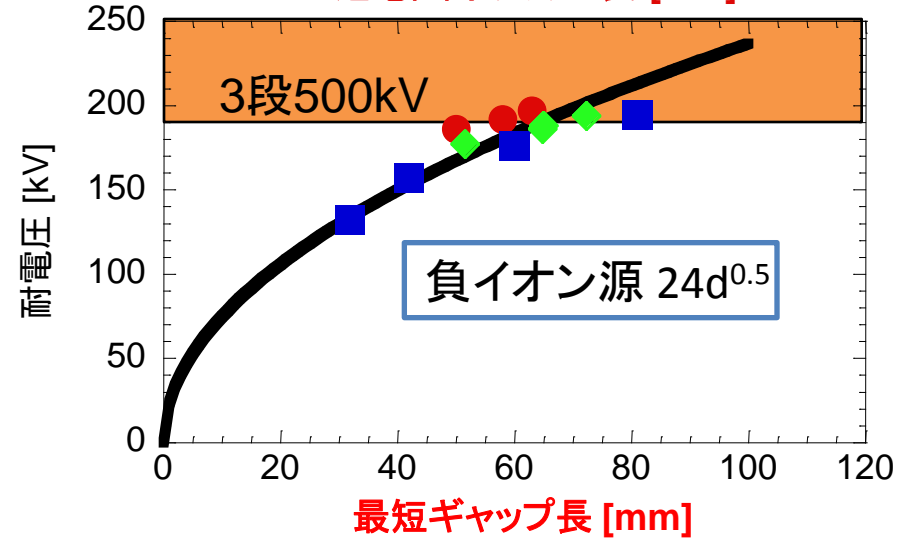
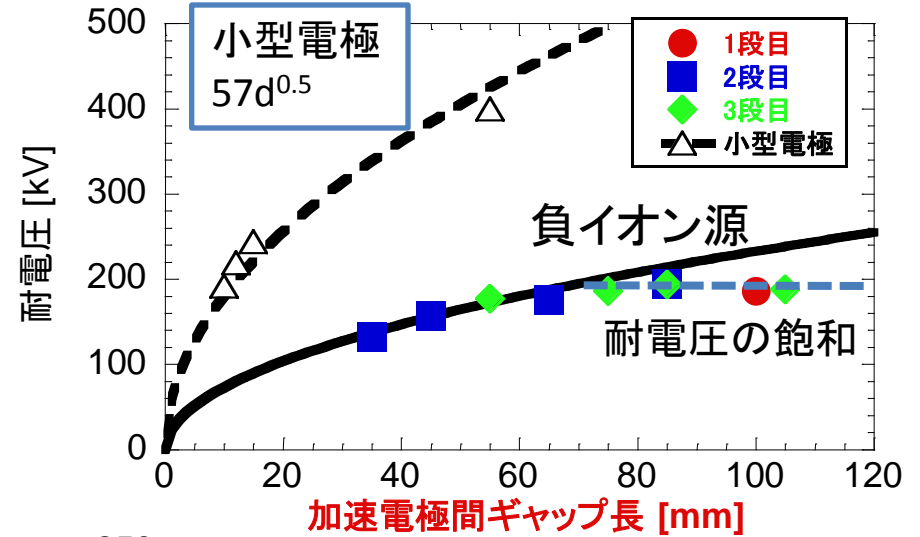
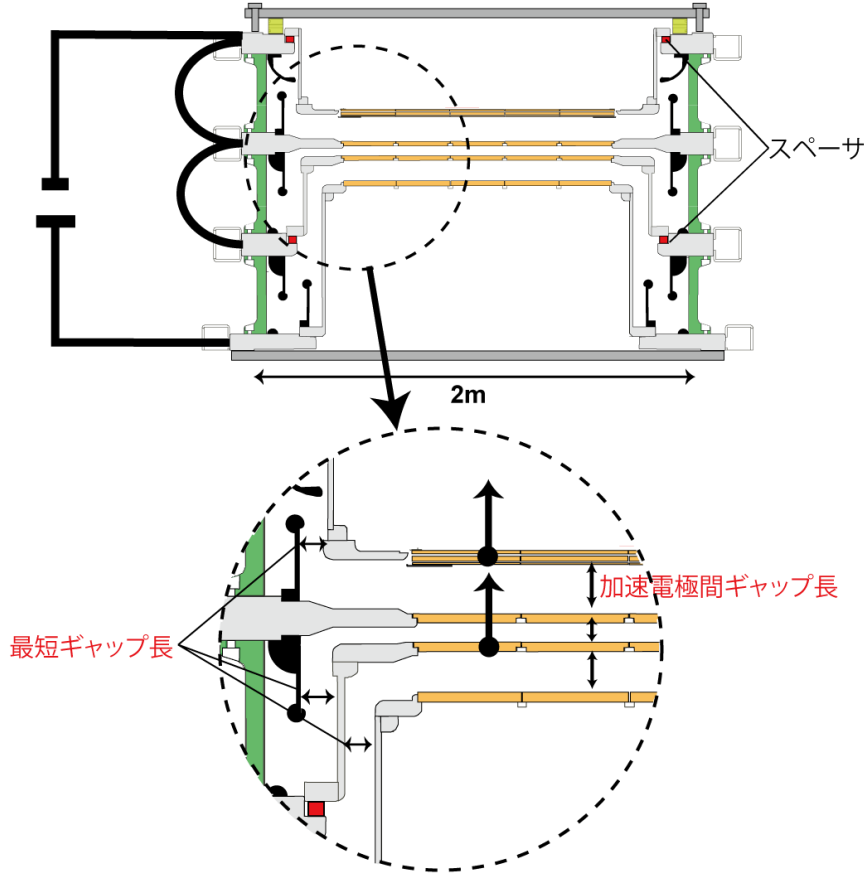
電極間ギャップを広げすぎると、ビーム収束性能が劣化。(105mmが限界)

ビーム収束が悪化しない範囲で耐電圧を改善できるか調べるために、単段耐電圧のギャップ長依存性を取得する。

単段耐電圧のギャップ長依存性

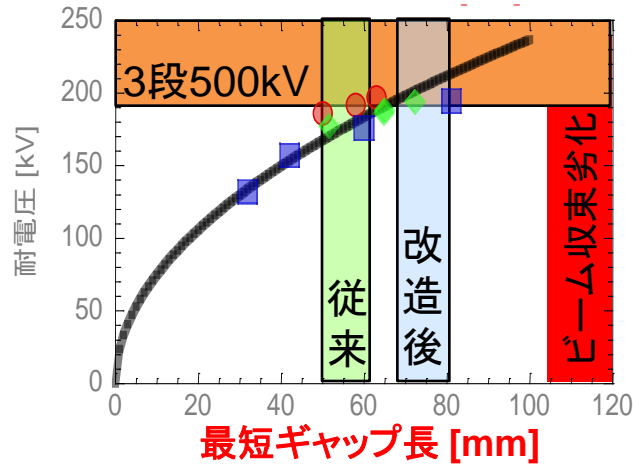
加速部の単段耐電圧試験

- 電極高さは、スペーサーで調整。
(冷却配管を切断しているため、ビーム加速不可能)
- 1段に電圧を印加。他の2段はショート。

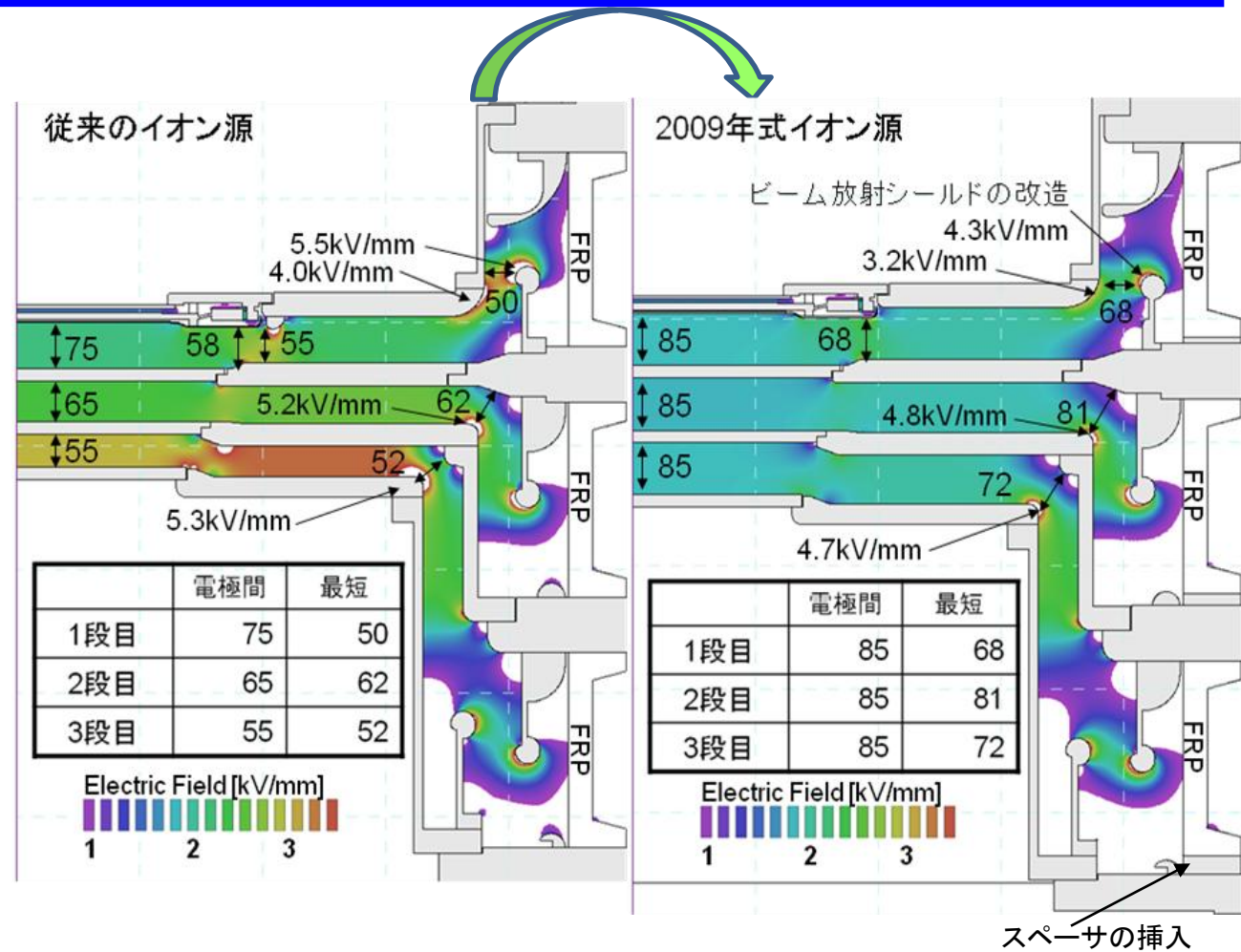


- 負イオン源の大面積電極は、小型電極の半分程度の耐電圧性能である。
- 加速電極間のギャップ長拡大では耐電圧が飽和する。
- 最短ギャップで耐電圧が制限されている。→最短ギャップを広げる必要有り。

負イオン源の改造

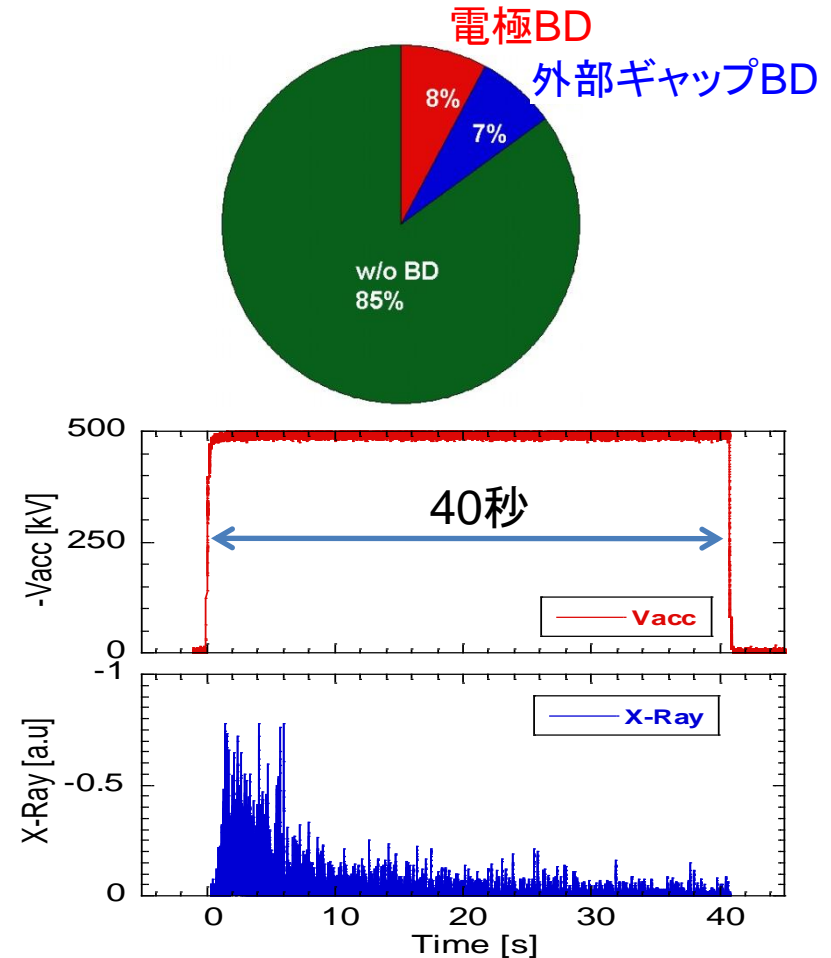
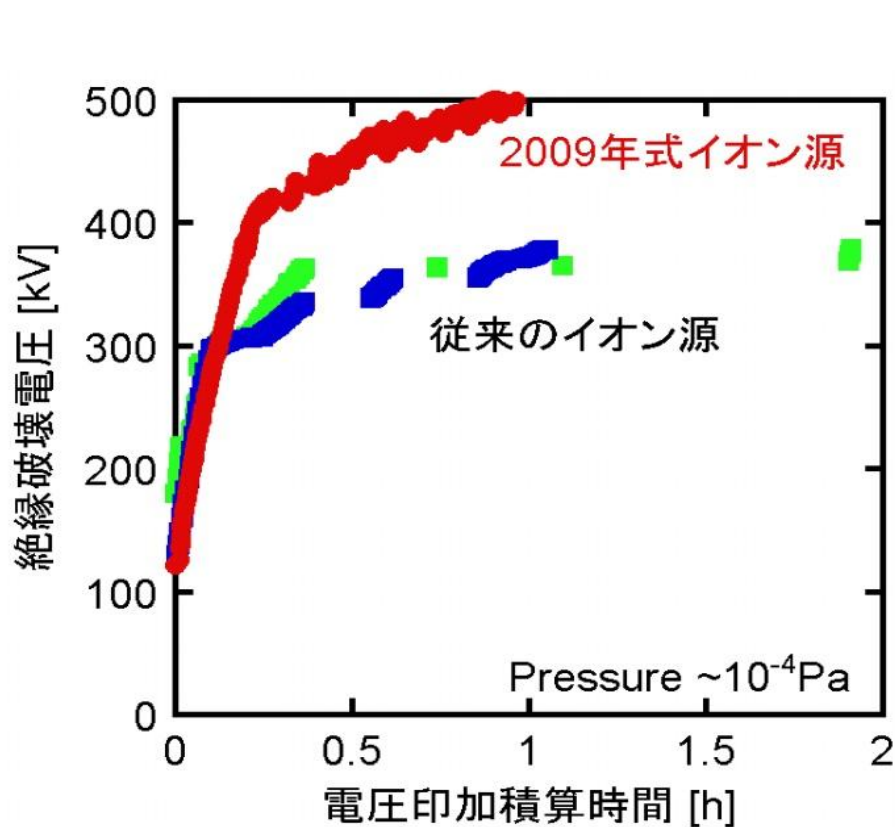


ビーム収束が劣化しない範囲で電極間ギャップを拡大し、各段190kV以上に耐電圧を改善できる。
(3段500kVに10%のマージンを確保)



- 単段試験の結果を基に、各段85mmのギャップを選択。
- スパーサをFRP部に挿入。ビーム放射シールドを改造。
- 支持枠周辺部、ビーム放射シールドでの高電界は、7~20%緩和。
(4-5.5kV/mm@従来のイオン源→3.2-4.8kV/mm@2009年式イオン源)

改造イオン源の耐電圧性能

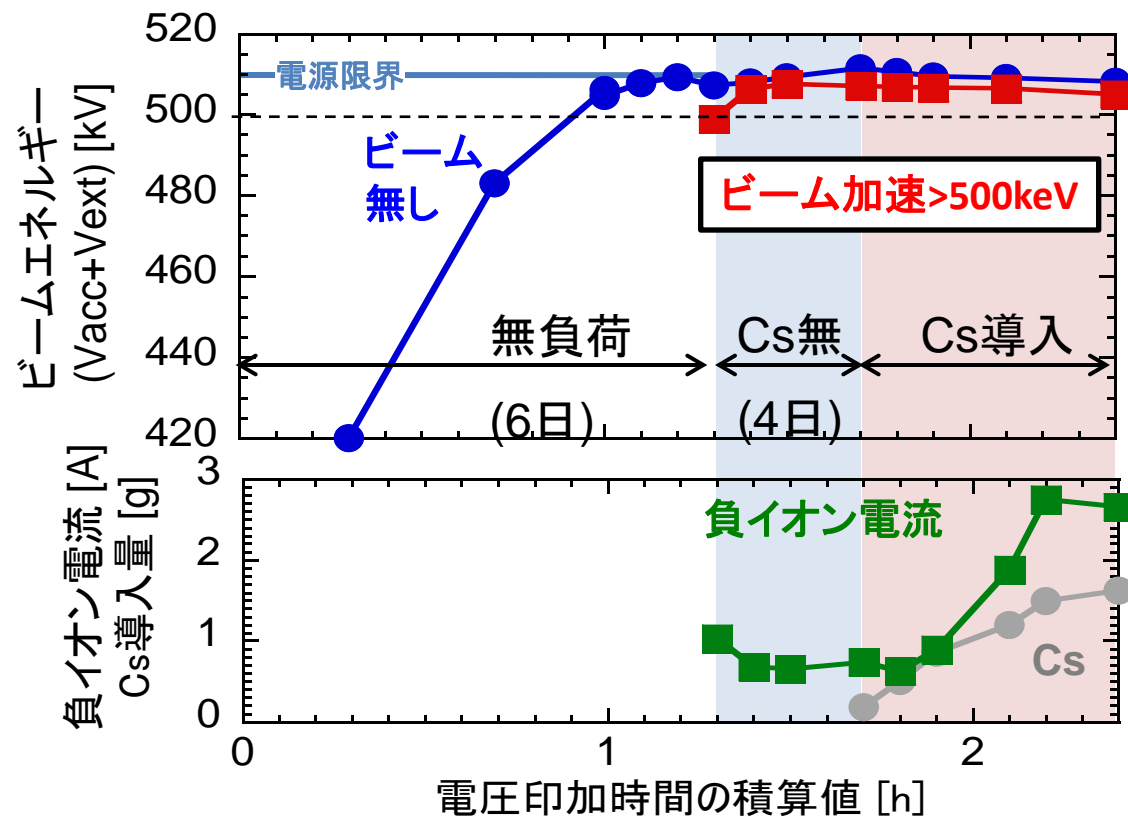
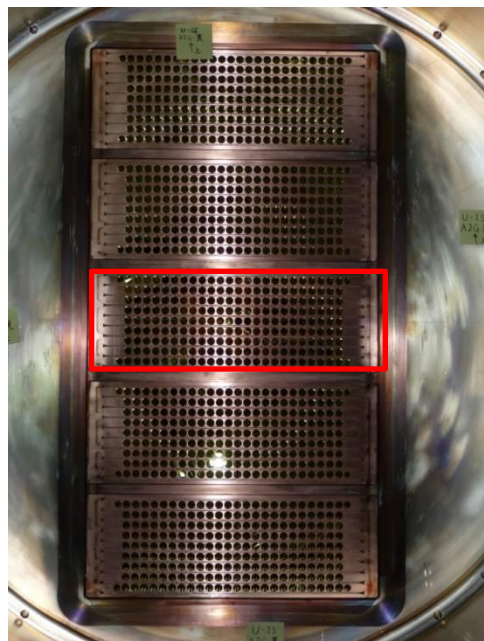


ビーム加速を行わずに、改造イオン源の耐電圧性能を調べた。

- 1時間のコンディショニング後、500kVに到達し、これまでの最高値450kVを大幅に更新。
- 500kVでの真空絶縁破壊確率は8%で、安定に電圧を保持可能。
- 絶縁破壊すること無く、加速電源の制限パルス幅である40秒間安定に維持。
→JT-60SAにおける100秒入射に向け、見通しを得た。

500keVビーム加速

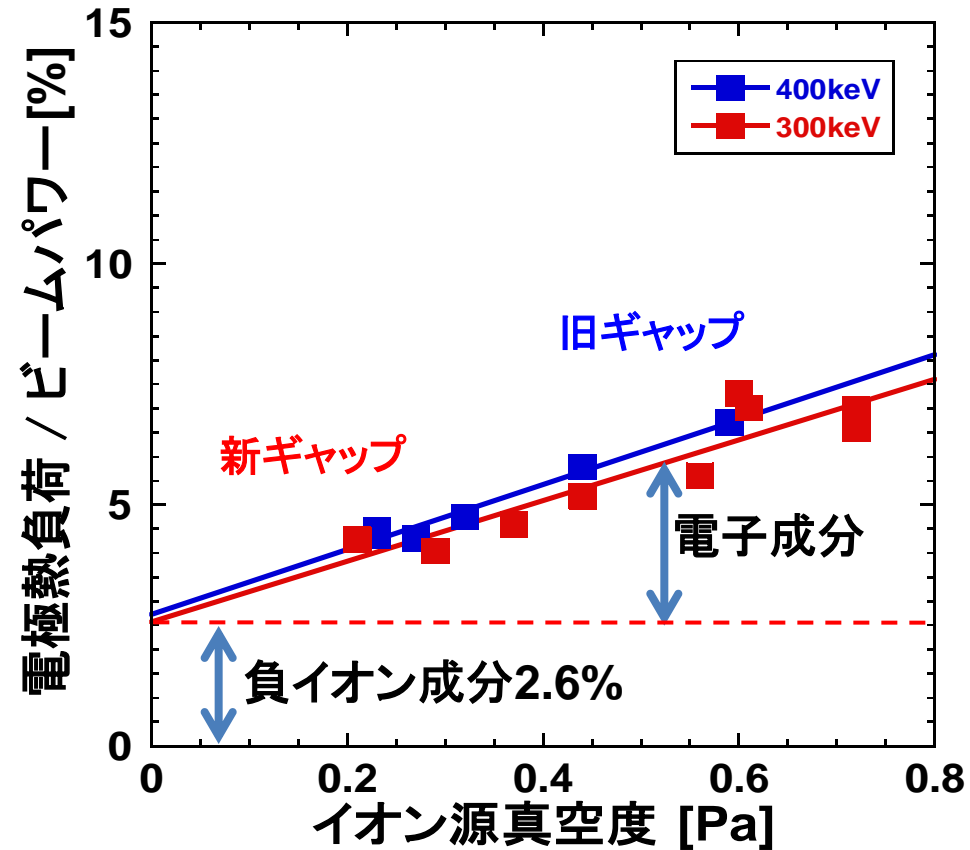
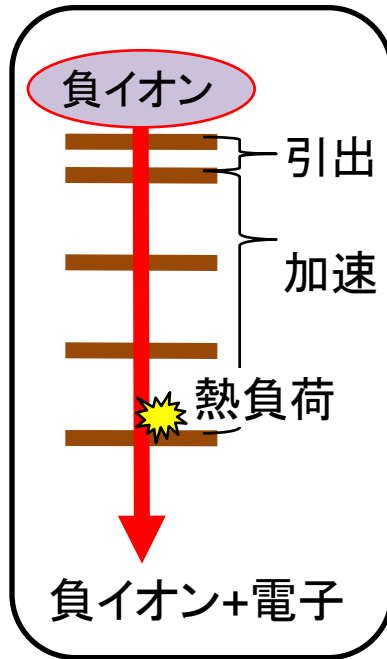
負イオン源の中心の電極1枚のみ
でビーム加速を実施
(JT-60SAでの要求値: 4.4A/電極1枚)



- 500keVのビーム加速に成功(最高507keV, パルス幅0.8秒)
- 無負荷耐電圧からの耐電圧減少は15kVと小さい。

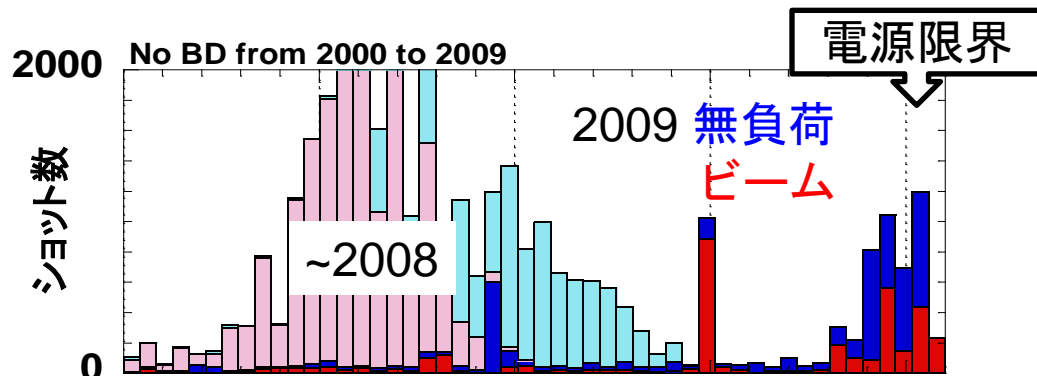
85mm新ギャップで耐電圧は改善⇒ビームの性能を熱負荷で評価

新ギャップでのビーム性能



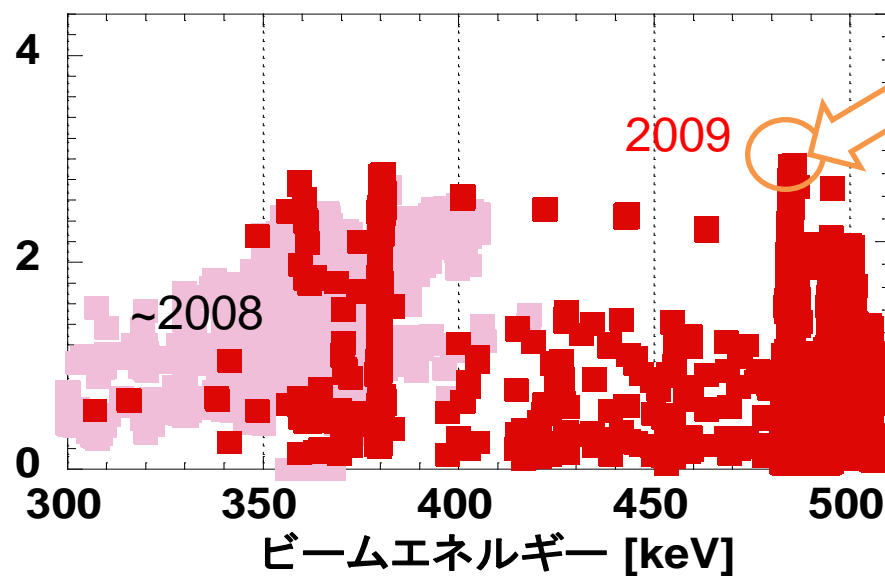
- ガス圧力依存性から電極熱負荷に対する負イオン成分は2.6%で従来と同程度
新ギャップでのビームの性能劣化は無い事が確認できた。

2009年の達成値



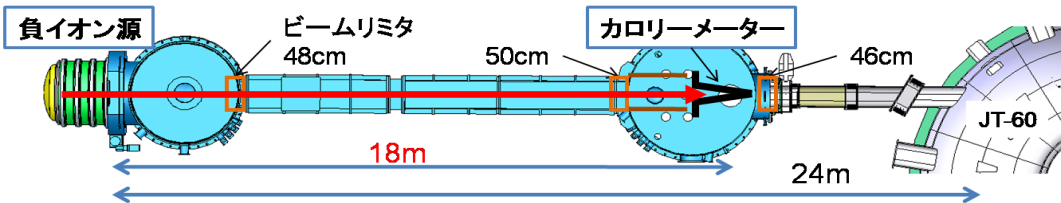
2009年の達成値	
ビームエネルギー	負イオン電流
507keV	~1A
486keV	2.8A (4.4A=130A/m ² が10MWに相当)

カロリメーターでの
負イオン電流量 [A]



18m離れたカロリメーター(=プラズマに入射可能なビーム)で500keV,3A級のビーム加速に成功
(電流密度84A/m²、設計値130A/m²)

JT-60SAで500keV, 10MW, 100s入射に向けて、耐電圧性能が大きく進展した。



まとめ

負イオン源加速部の大幅な耐電圧改善に成功し、実機N-NBIで500keVのビーム加速を実現した。

「無負荷耐電圧」

- JT-60負イオン源の耐電圧のギャップ長・最短距離依存性を明らかにした。
- 実験結果に基づき局所電界を低減して、真空状態で3段500kVの耐電圧を実現した

「ビーム耐電圧」

- ビーム加速による真空無負荷耐電圧からの耐圧劣化は15kV程度と小さい値であり、今回の範囲の電流の増加は耐電圧への影響が小さい事を明らかにした。
- ビームの性能を劣化させることなく、耐電圧を改善することができた。

「耐電圧に関する今後の課題」

- 大気側のFRP縁面放電の耐電圧(単段160kV程度から大気側放電増加)
- 局所電界と耐電圧の関係を明らかにし、大型イオン源の耐電圧設計指標を確立する。