



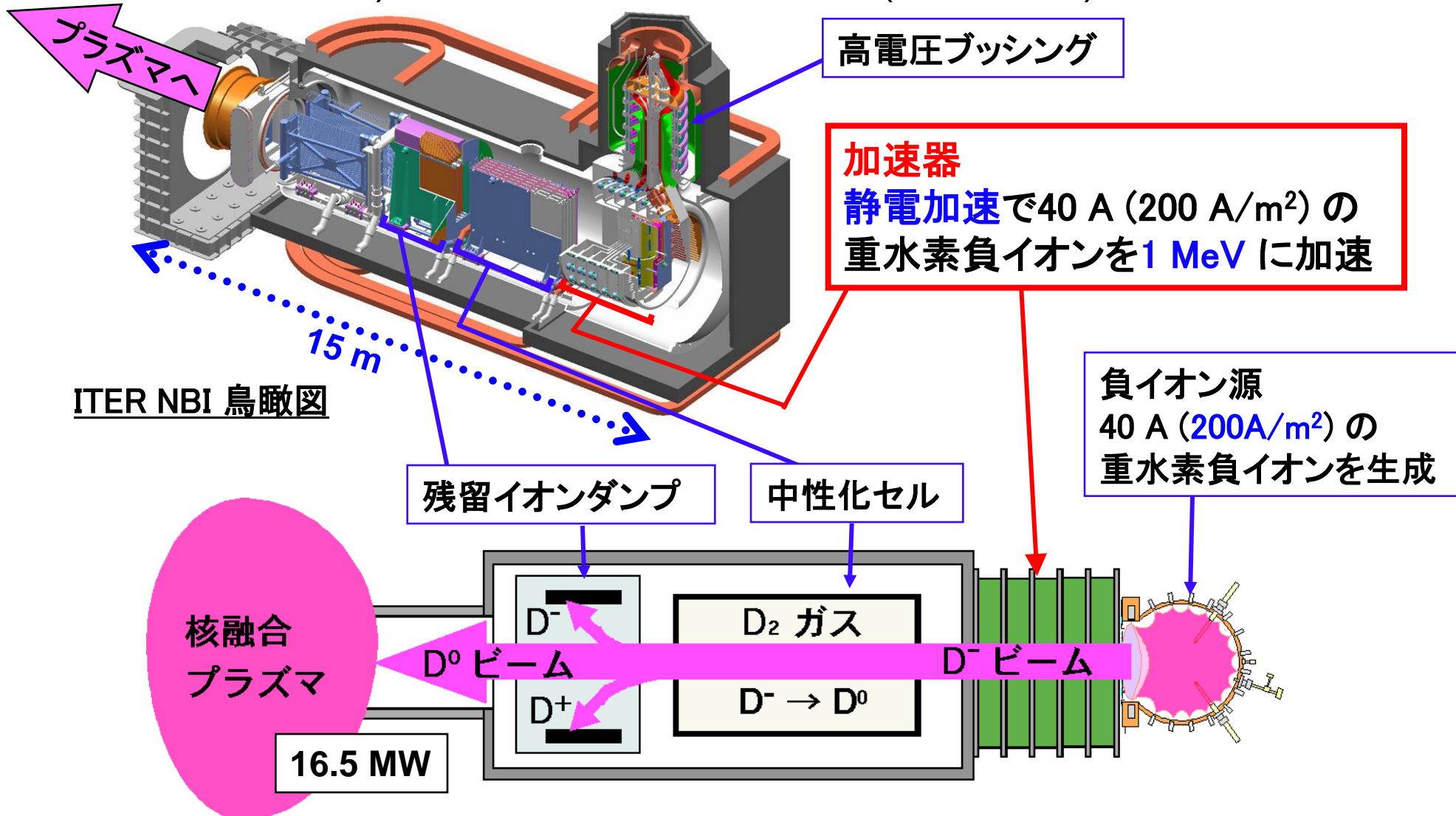
ITER NBI用負イオン加速器開発の現状

谷口 正樹

原子力機構 核融合研究開発部門
加熱工学研究グループ

ITER用中性粒子入射加熱装置(NBI)

- NBIの役割
- 1) 中性の重水素ビームでプラズマを加熱する
 - 2) プラズマ中に電流を流す(電流駆動)



電源

• 低圧電源機器 (2 sets by EU)

• 高電圧機器 (2 sets by JA)

- -1 MV DCG for accelerator
- -1 MV insulating transformer
- transmission line (> 100 m in total)
- - 1 MV test power supply and dummy loads

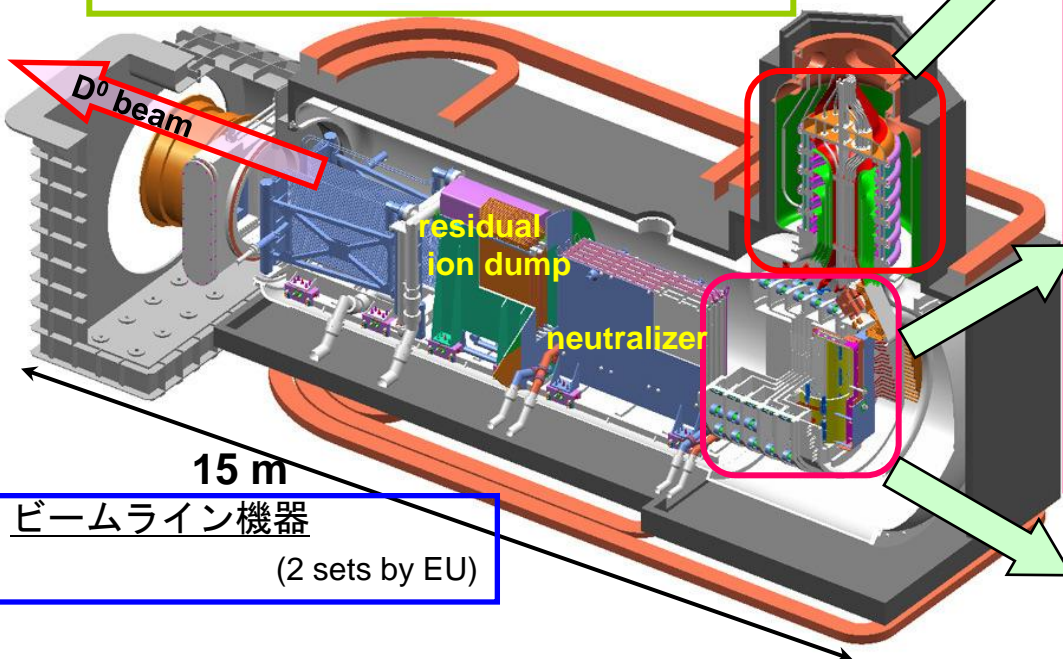
HV ブッシング (2 pcs by JA)



Feed through for electric power and cooling water from SF₆ atmosphere in the power supply to accelerator / ion source inside vacuum.

(2 NBs on ITER)

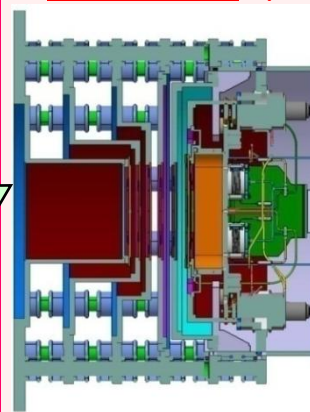
Injection power: 16.5 MW/unit



ビームライン機器

(2 sets by EU)

加速器 (1 pcs by JA)



• Five-stage electrostatic accelerator to generate 1 MeV, 40 A D⁻ ion beams.

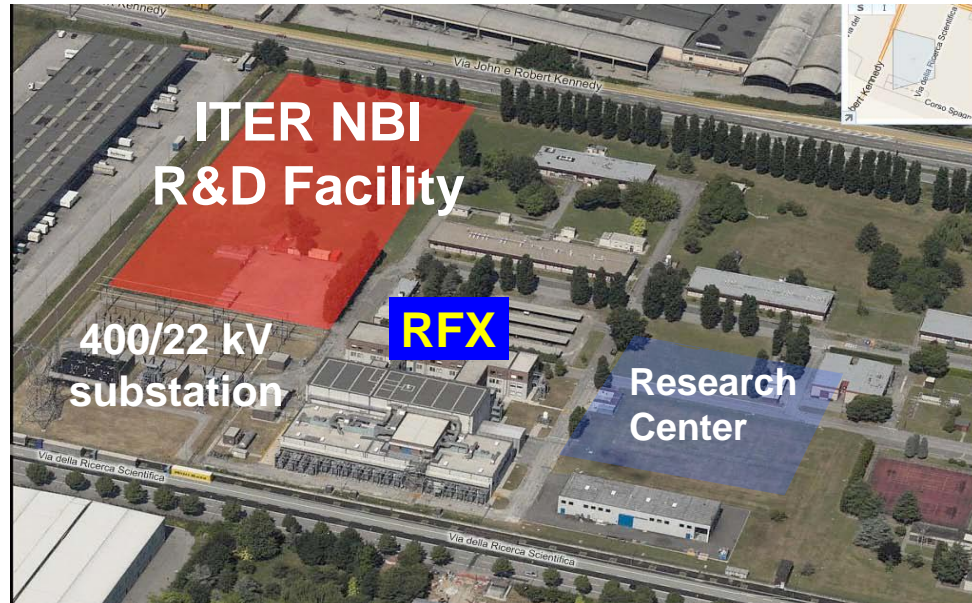
• MAMuG (Multi-aperture Multi-Grid) concept was chosen as ITER baseline('08.05).

イオン源 (2 pcs by EU)

RF-driven negative ion source ('07.07)

NBI試験設備(NBTF)@Padova

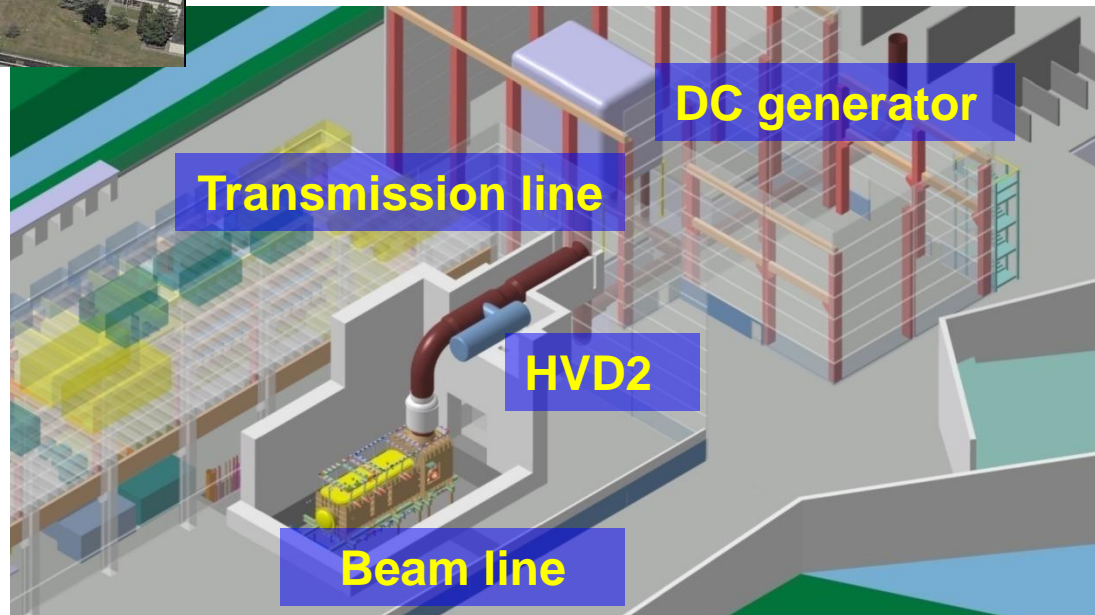
フルサイズのNBI試験設備をイタリア・パドバのRFX研究所に建設し、試験を行う。



- ✓ Subject to approval by ITER Council in November 2009.
- ✓ JA will procure the same component as ITER NBI after approval by ITER Council.

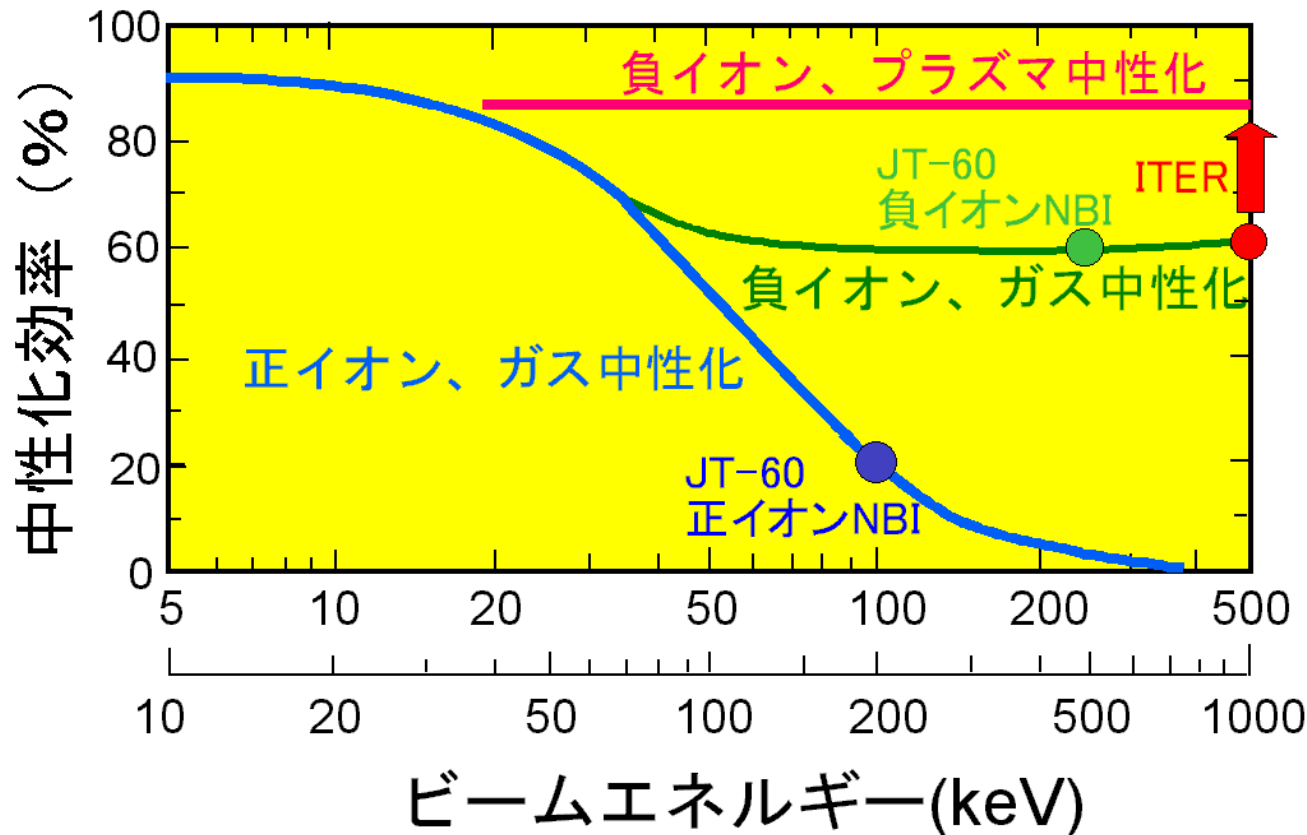
✓ The test facility will be constructed and operated in the same layout as NBI #1.

1 MeV, 40 A, 3600 sの実証



負イオン源の必要性

中性化効率のビームエネルギー依存性



正イオンでは~1 MeVでの中性化効率はほぼゼロ

負イオンでは1 MeVでも~60%の中性化効率



負イオンによる
NBIが不可欠

MeV級イオン源試験装置

ITER NBI へ向けた開発目標

1 MeV、40 A (200 A/m²) の負イオン (H⁻) ビーム



MeV級加速器

SF₆ タンク
(SF₆ at 0.6 MPa)

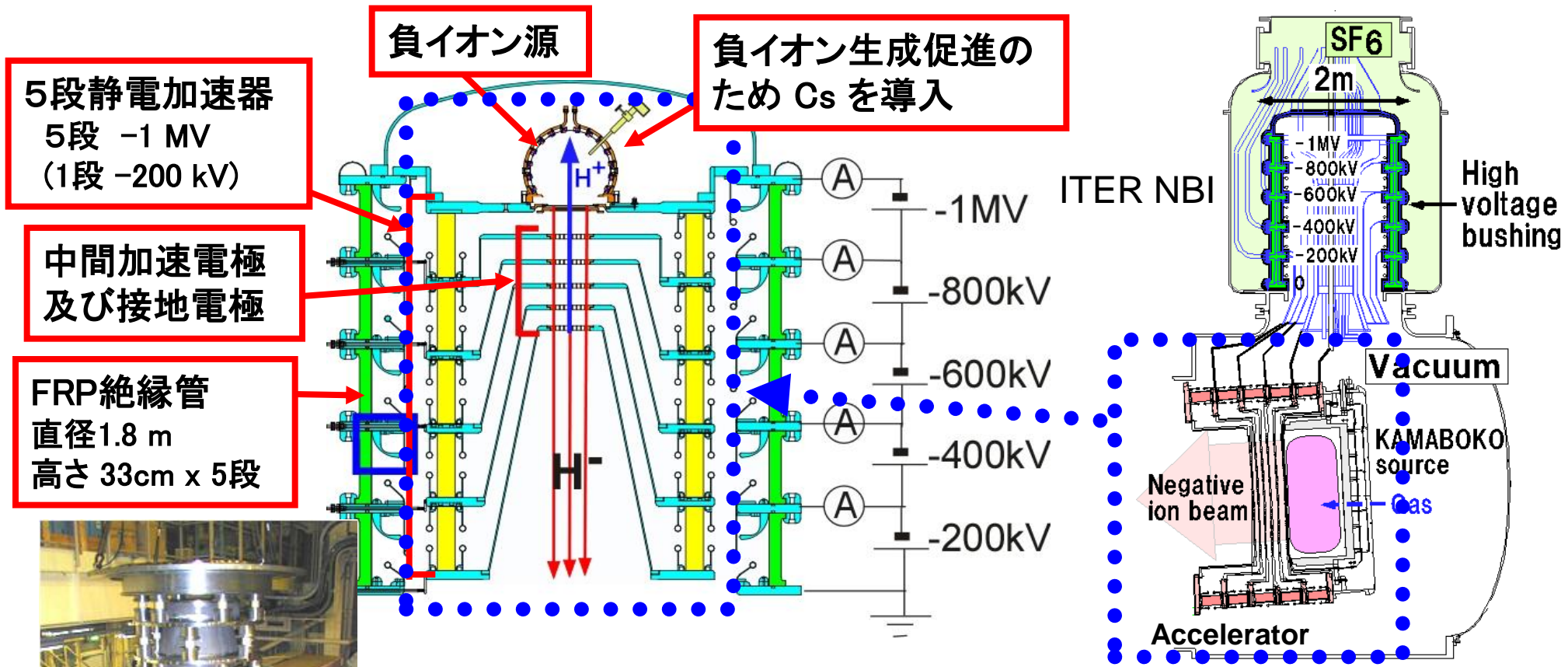
アンペア級のイオンビーム、電子ビームを1 MeV以上のエネルギーに加速した例はない。

JAEAでは、MeV級イオン源試験装置において、1 MeV、0.5 A (200 A/m²)、~10 s の負イオンビーム加速を目指した試験を続けている。

MeV級イオン源試験装置

- コックロフト・ワルトン型高圧発生装置
- 最大電圧 **DC -1 MV**
- 最大電流 **0.5 A**
- パルス幅 **60 s** (繰り返し率 1/60)
- MeV級加速器 (5段静電加速器)

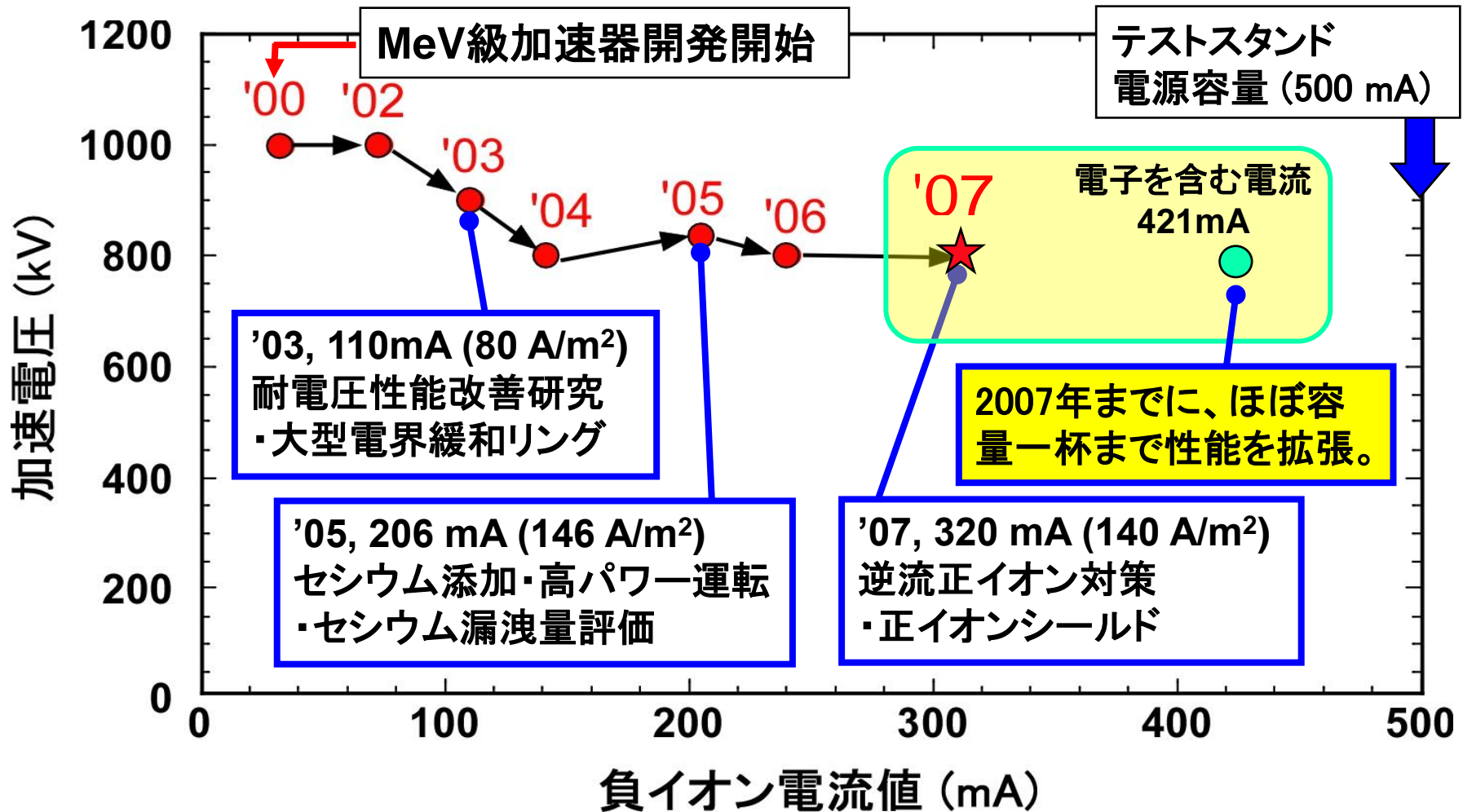
MeV級加速器と開発課題



NBI用加速器の課題

- 1 MVを真空下で絶縁する必要がある。
- 大電流 (1 MV, 200 A/m²) のイオンビームを長パルス (~10 s) 加速する必要がある。

MeV級加速器開発の進展

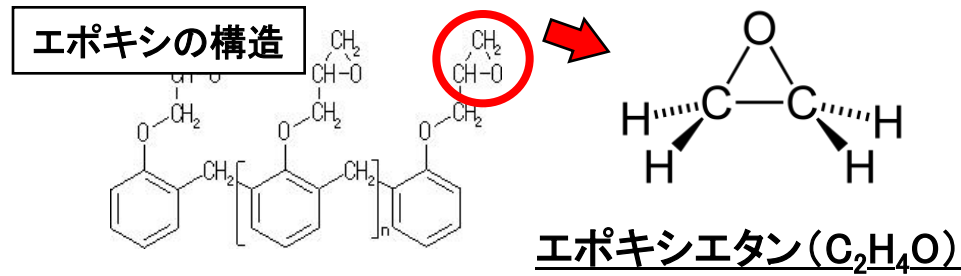


- 耐電圧性能の改善と 1 MeV, 200 A/m² の実証
- 08年度より、水冷電極を持つ新加速器にて長パルス加速試験を開始

FRP絶縁管の耐電圧改善

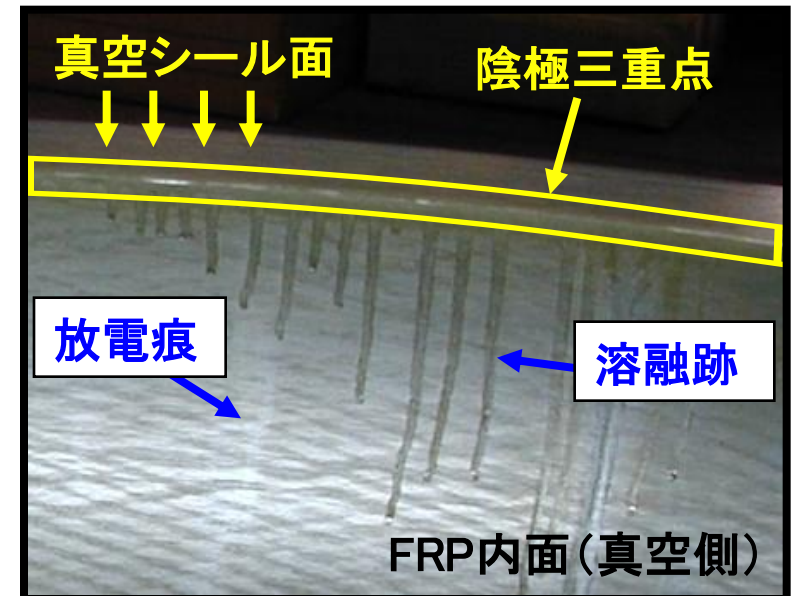
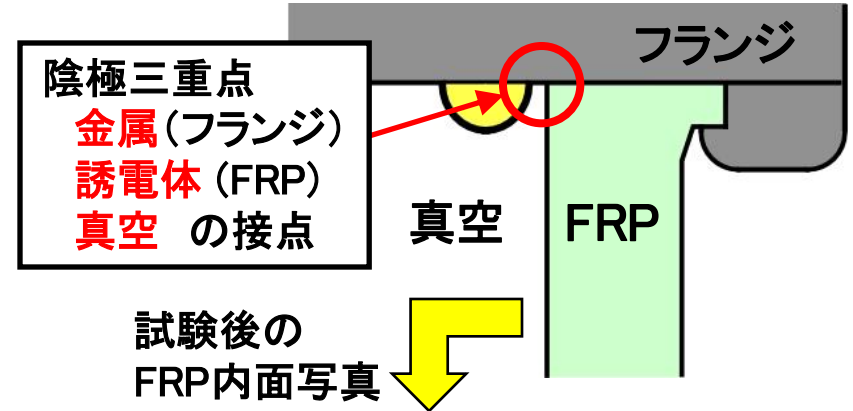
MeV級加速器開発の初期には、真空容器であるFRP製絶縁管で絶縁破壊が頻発。FRP絶縁管の耐電圧改善に取り組んだ。

- ・ 絶縁破壊時に放出される脱ガス分析結果
 - ⇒ 炭化水素系ガス(分子量 44)の放出
 - ⇒ FRPの主成分であるエポキシから遊離



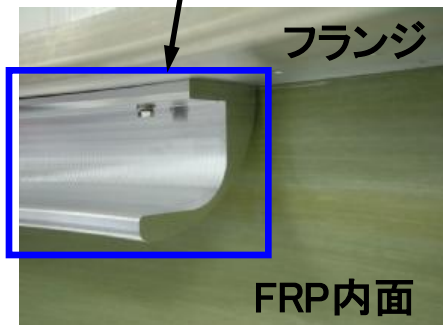
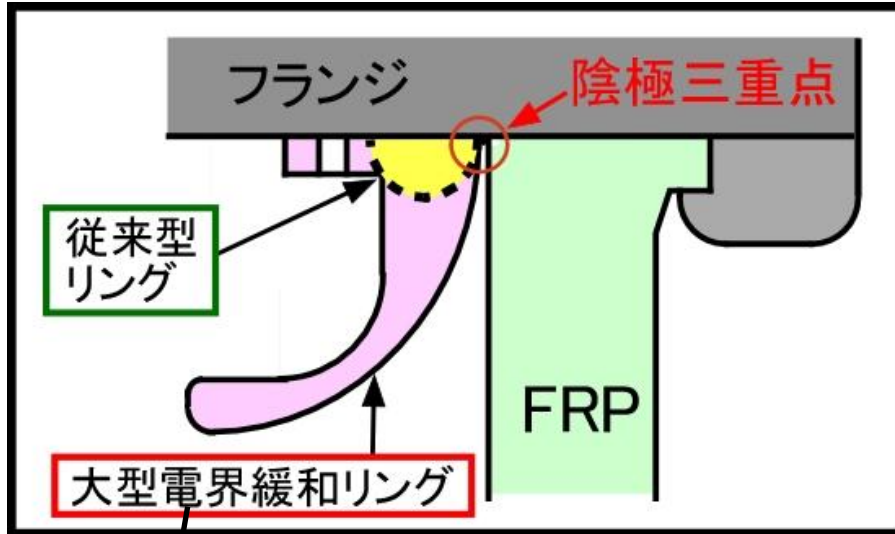
- ・ 高電圧印加後の加速器内部
 - ⇒ 陰極三重点からFRP が溶融

- ・ 陰極三重点での電界集中により微小放電発生
 - ⇒ FRP(融点約100°C)の溶融・ガス放出
 - ➡ 沿面放電による絶縁破壊



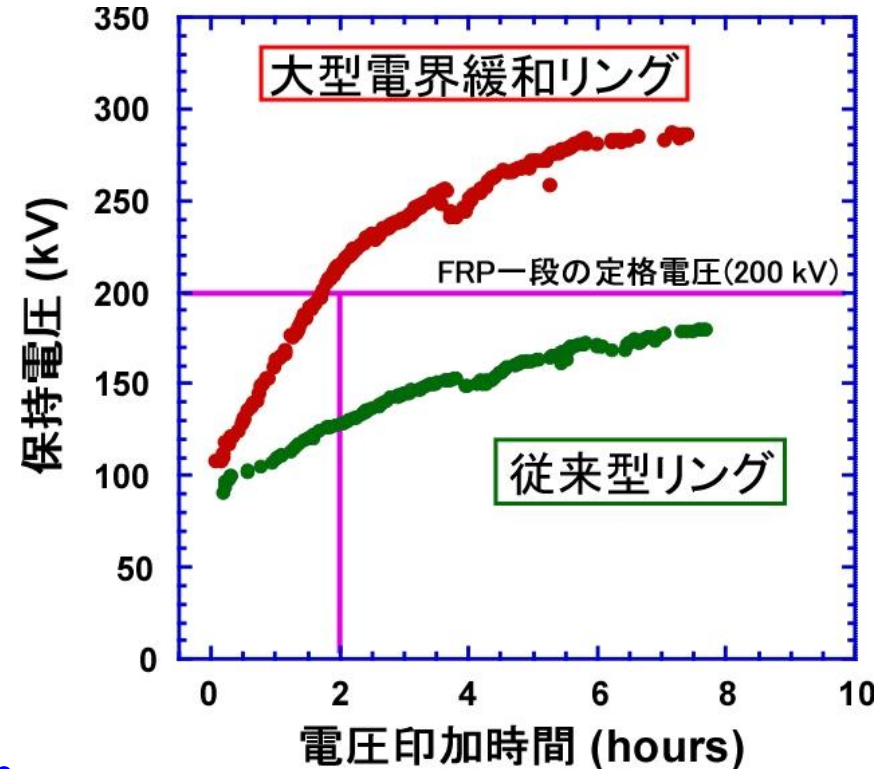
大型電界緩和リング

陰極三重点での電界集中緩和のため、
電界緩和リングの形状を変更



三重点の電界
従来型リング 3.6 kV/mm
⇒ 大型電界緩和リング
1.2 kV/mm

FRP 1段の耐電圧試験結果

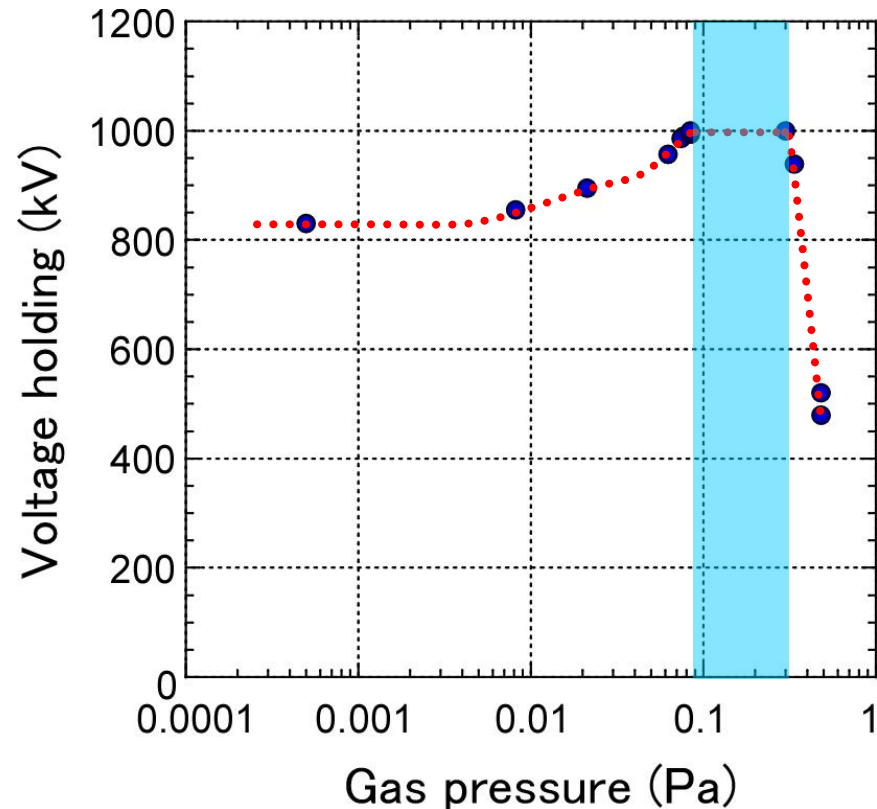
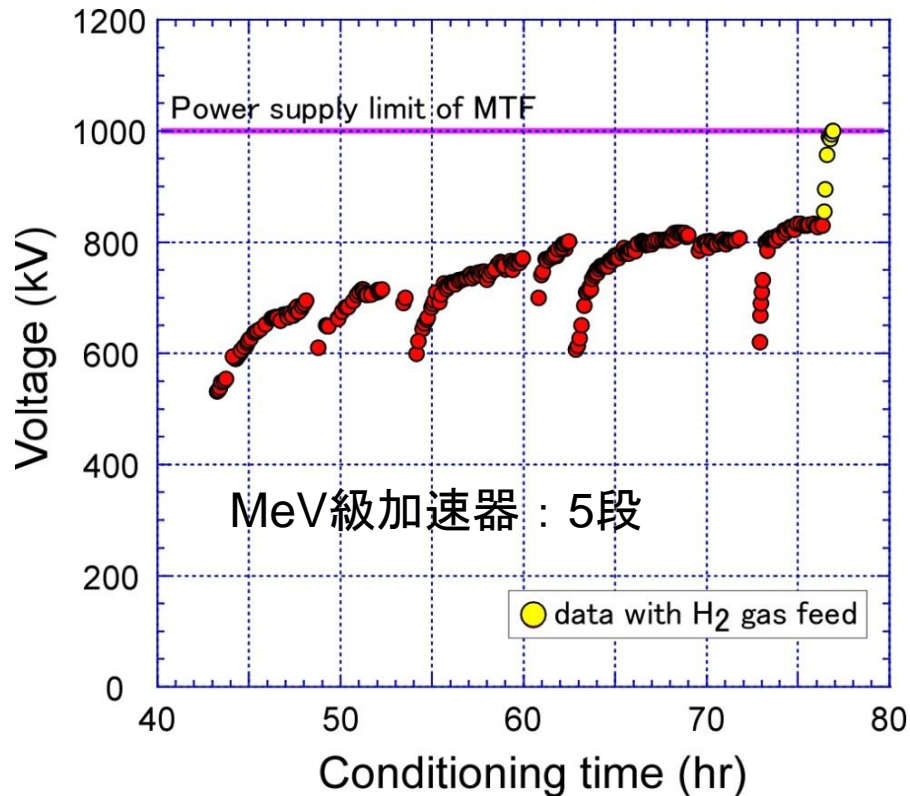


- 定格の200 kVまで2時間で到達
- 280 kVを安定に保持可能

電界緩和リングによりFRP製絶縁管の大幅な耐電圧向上に成功した。

MeV級加速器の耐電圧特性

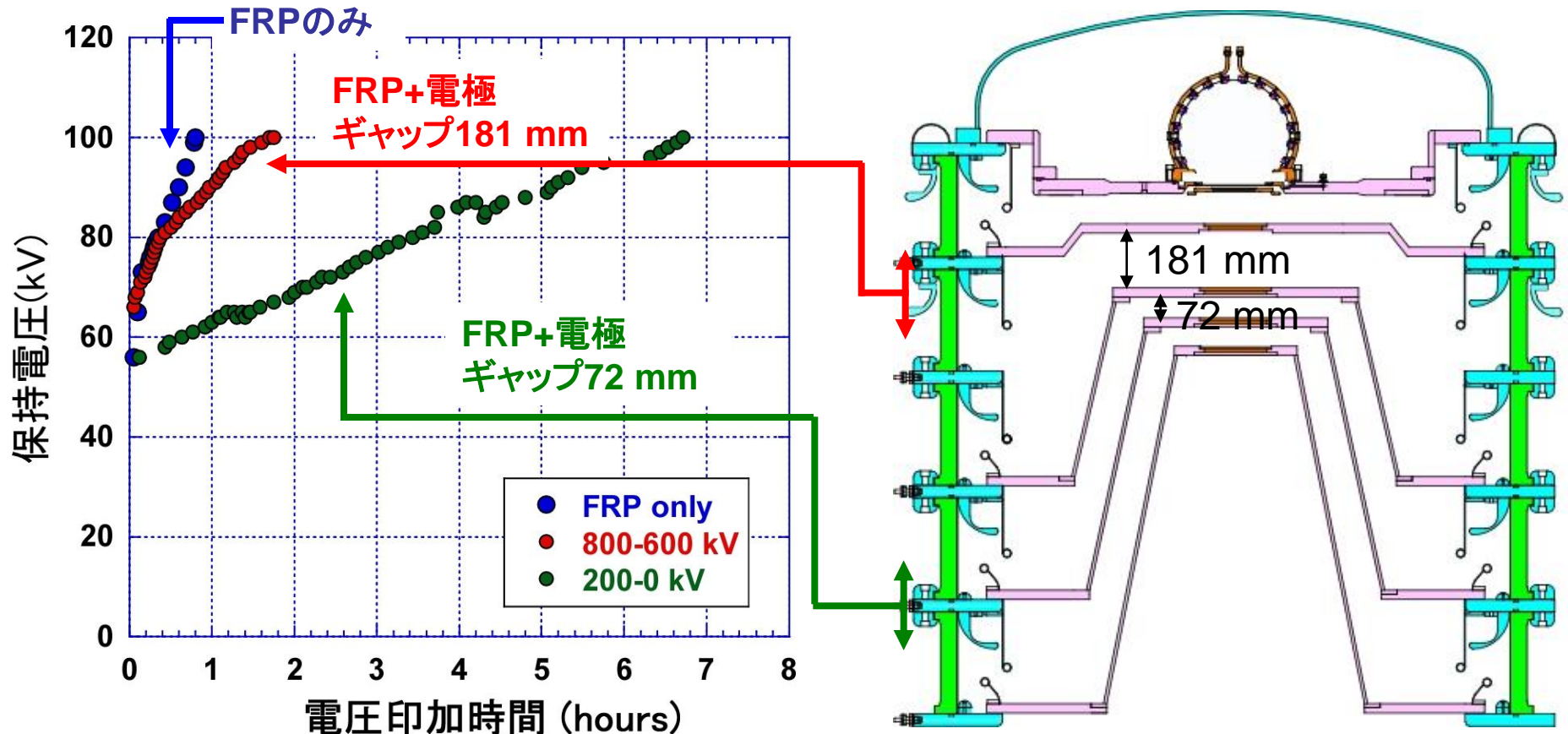
電界緩和リングを取り付けた絶縁管に加速器を入れ、耐電圧試験を行った。



- ~35時間のコンディショニングで835 kVにて飽和。
- 水素ガスの導入で耐電圧は向上。
- 1 MVの安定保持のためには水素ガスを0.1 Pa 導入することが必要。

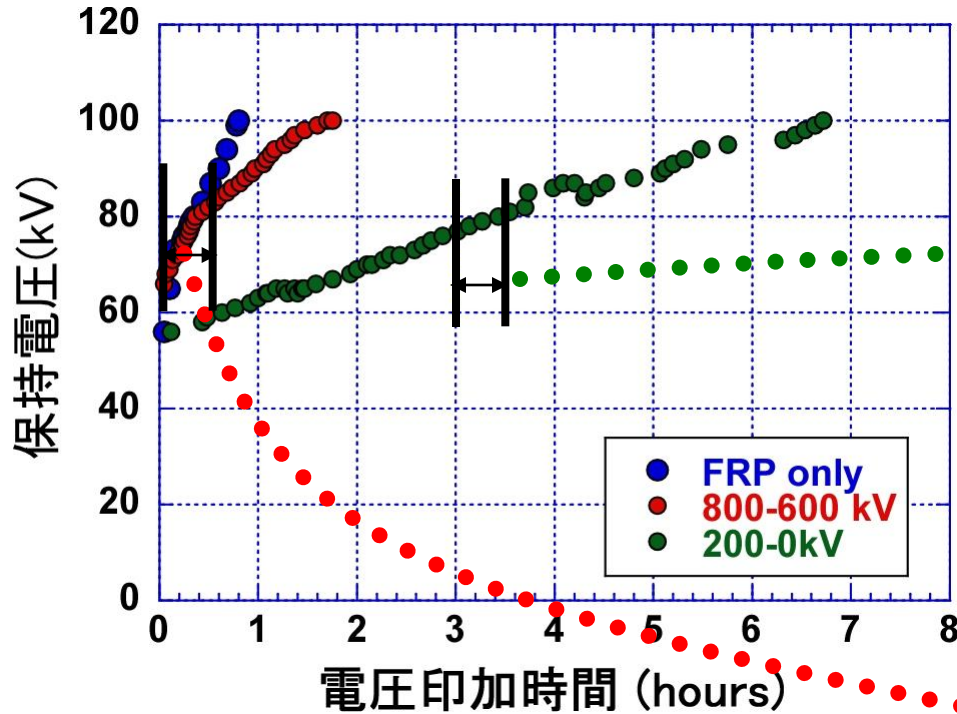
加速器+FRP(単段)の耐電圧

ガス導入なしでの 1 MeV安定保持を目指し、1段ごとの耐電圧特性を調べた。

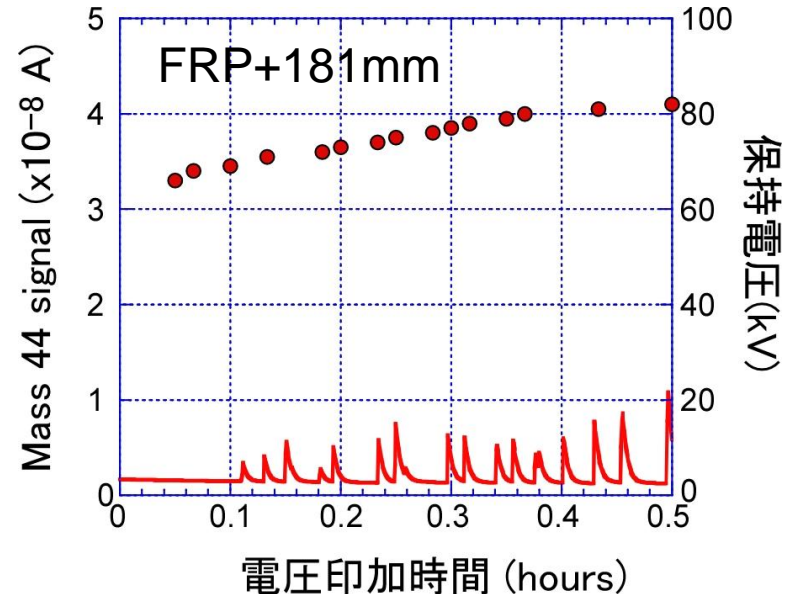
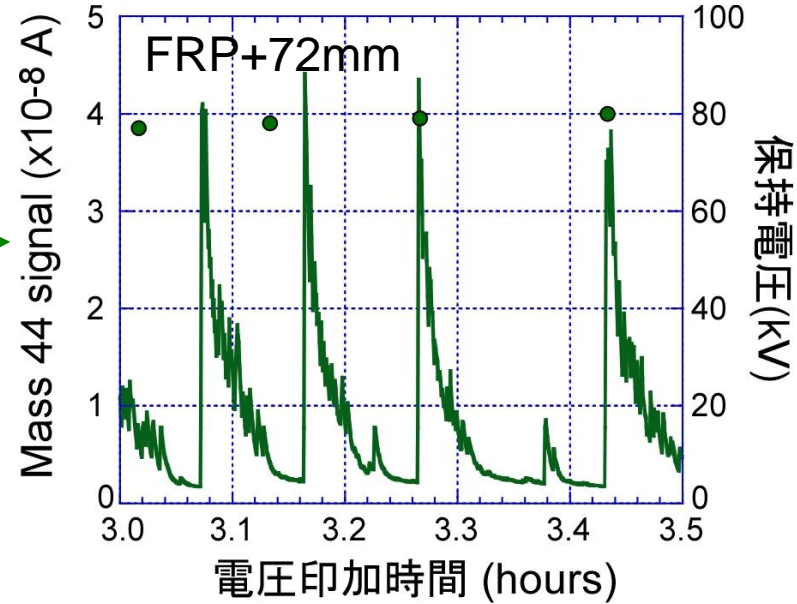


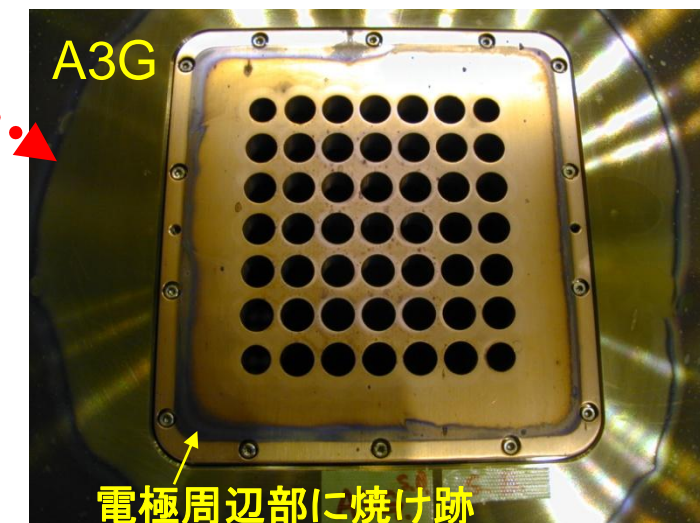
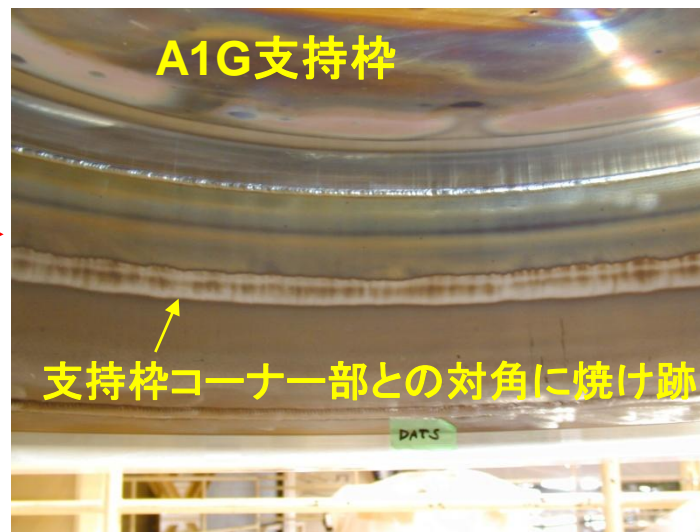
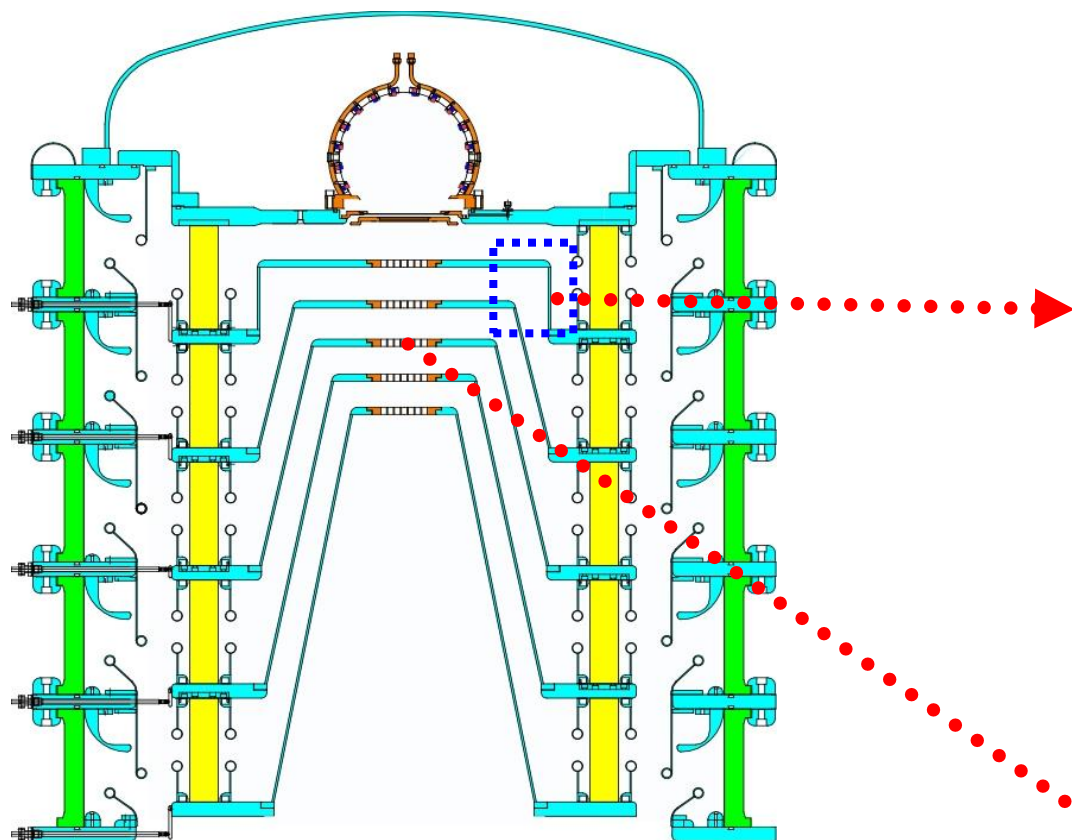
- 加速器を設置後、1段ずつ電圧を印加(他段は短絡)。
- 電極がある場合、FRPのみに比べ100 kVまでの到達に時間がかかる。
- 電極ギャップが短いほどコンディショニングに時間が必要。

電圧印加時の放出ガス



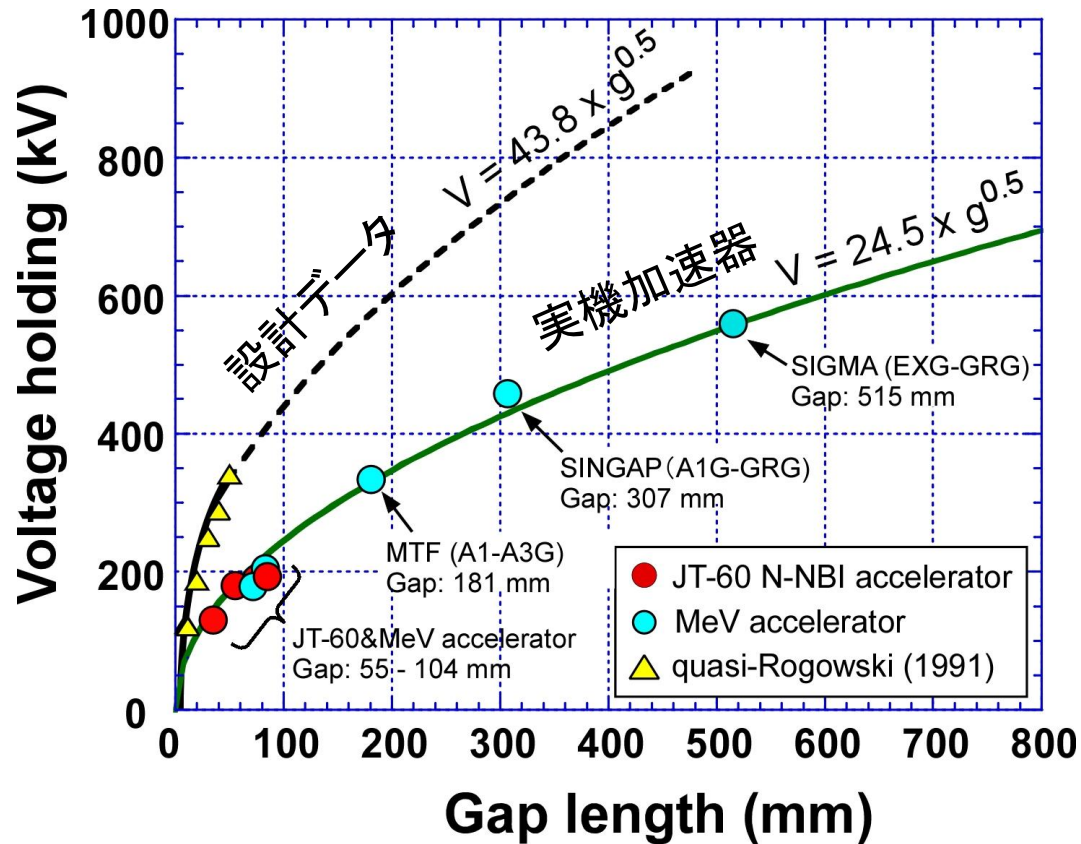
- FRP絶縁管のみの場合には、ガス放出は非常に少ない。
- 電極間ギャップが短い段ほどガス放出が多い。
- 電極間でのガス放出がコンディショニングを律速している。
→電極間の放電抑制が加速器の耐圧向上に必要





- 電圧印加後の加速器内部には多種・多数の放電痕が観察される。
- 特に、段差やコーナーなど電界の集中部に焼け跡が多く見られる。
- 電極間の放電が絶縁破壊を誘起している。

MeV級加速器の耐電圧性能

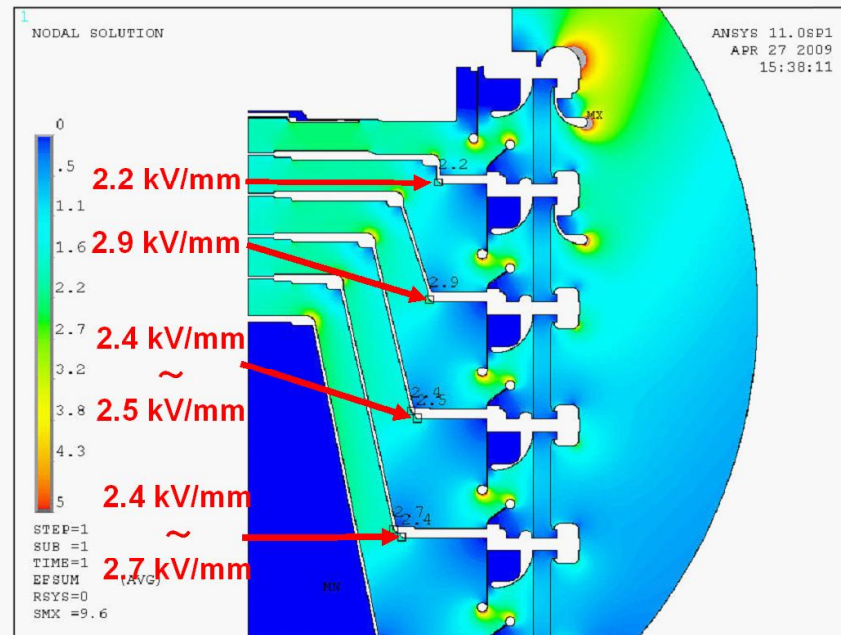


- MeV級加速器/JT-60 N-NBI用加速器の耐電圧は同一のクランプ曲線で整理される。
- 実機の耐電圧は、設計データとして用いられた小型電極の耐電圧より50%も低い。
- 電極のエッジ・ボルト等の電界集中が耐電圧を決めている？
- 1 MV(1段 200 kV)の安定保持のためには、現状の72 mmのギャップは十分でない。

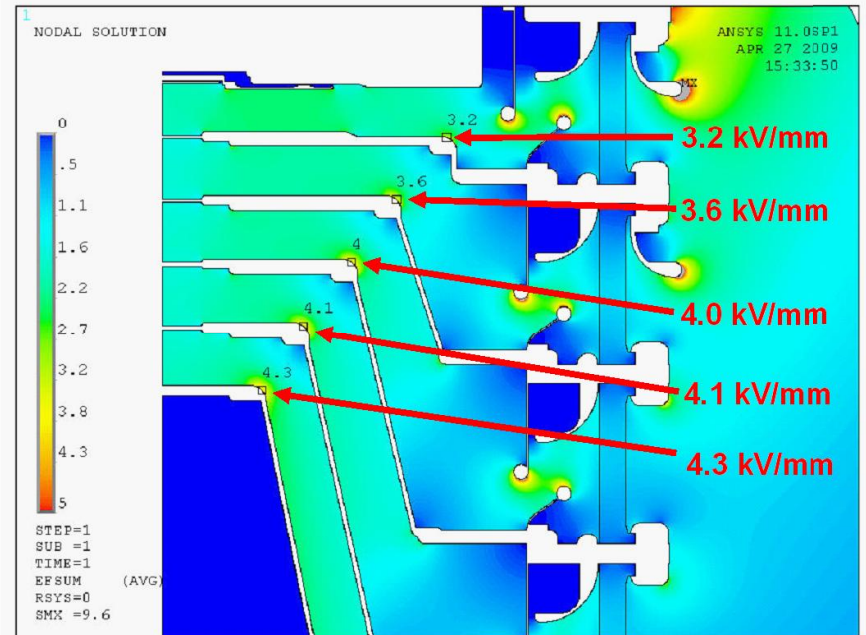
1MeV安定保持に必要なギャップ長を100 mm(1段240 kV)と設定し、新MeV級加速器を改造。

新MeV級加速器の電界計算結果

陰極側電界強度



陽極側電界強度

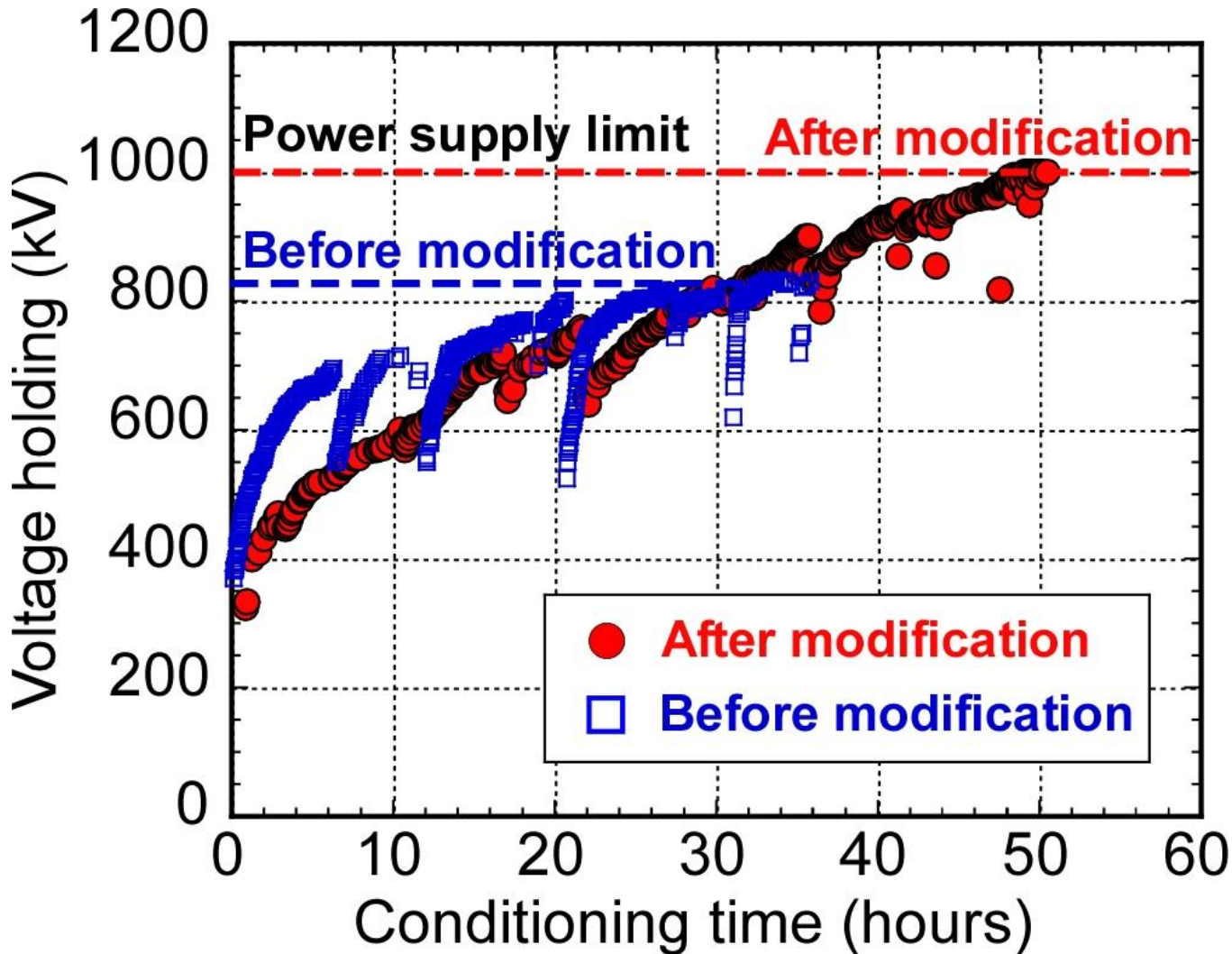


最大電界強度 (kV/mm)

	改造前	改造後
陰極側	4.9	2.9
陽極側	6.4	4.3

新MeV級加速器では、ギャップ間を100 mmとすると共に、支持枠コーナー部での電界集中低減を行った。

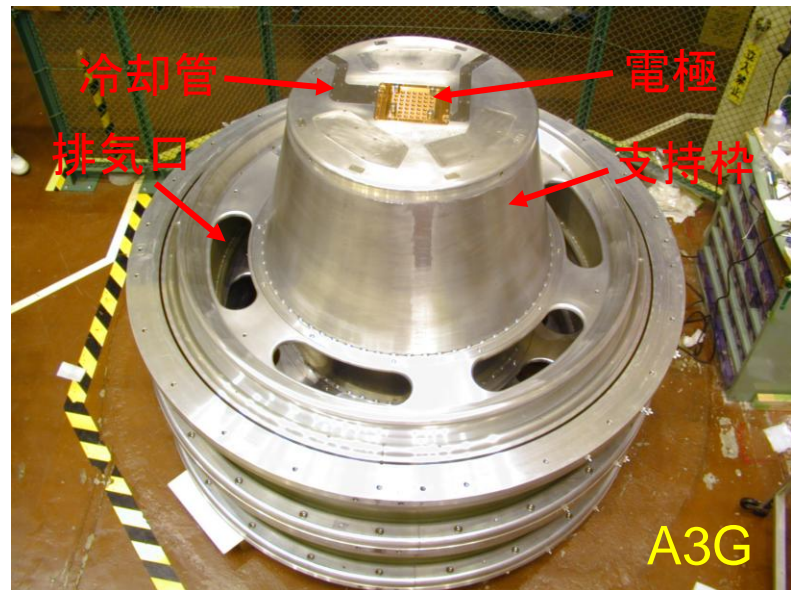
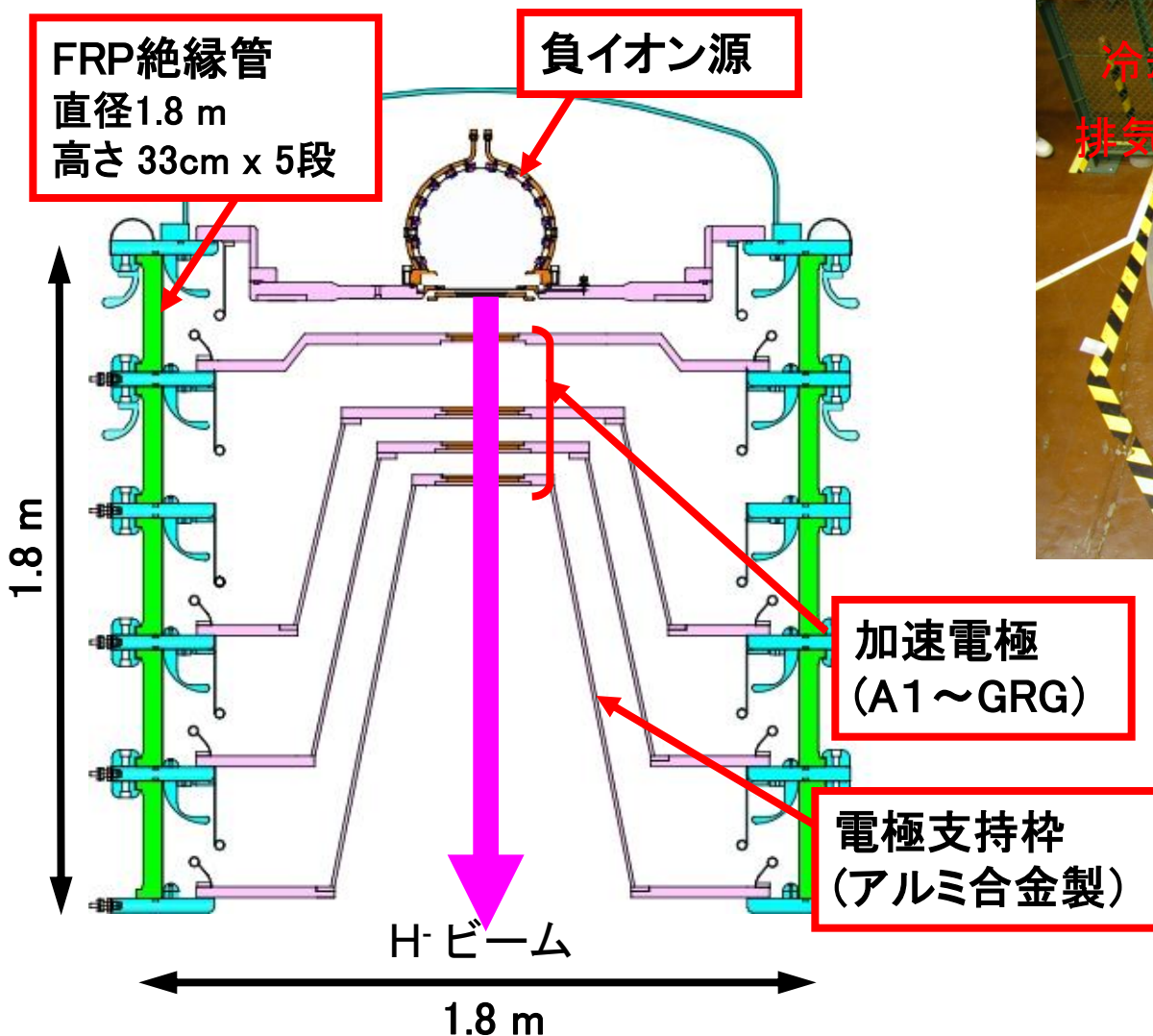
改造後のMeV級加速器の耐電圧



- ガス導入無しで、1 MVの安定保持(67 min)に成功した。
- 現在、Cs添加下での大電流負イオン加速試験を実施中。

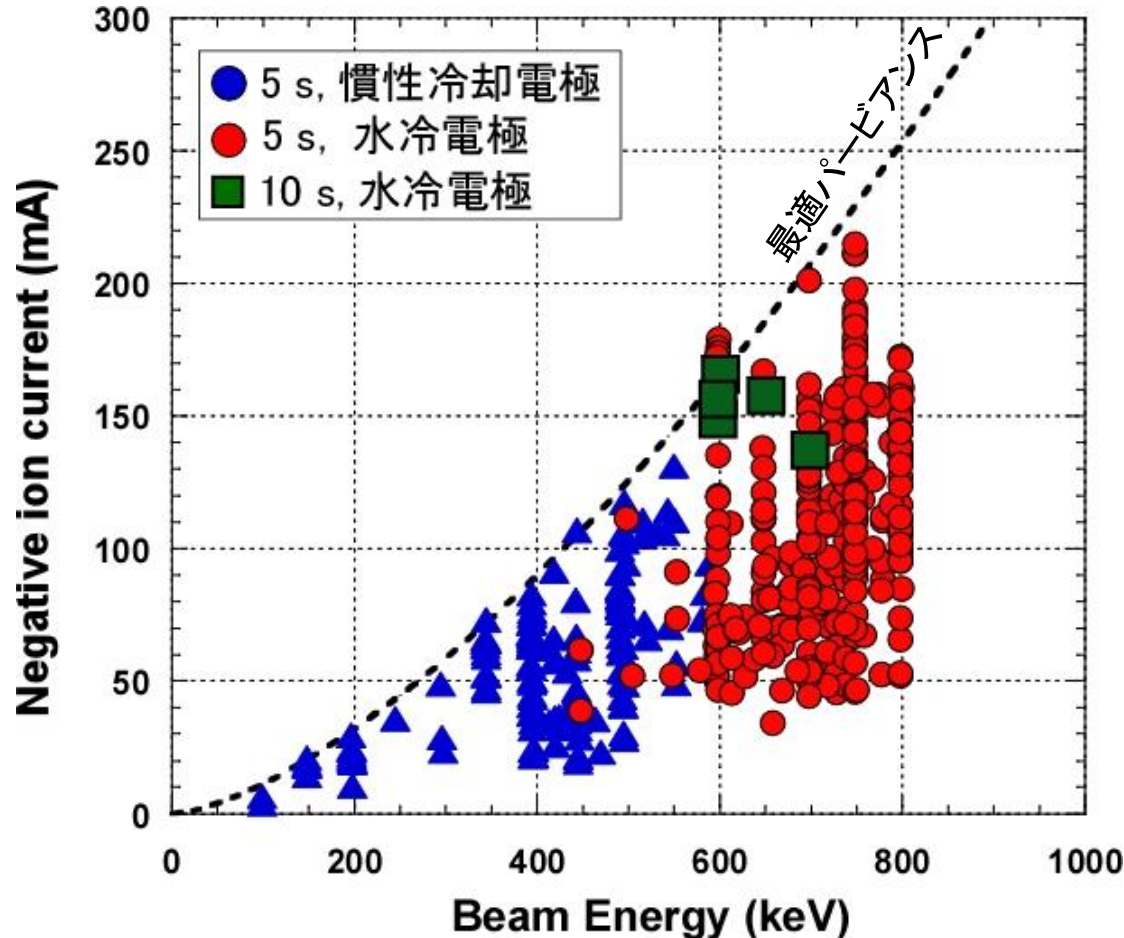
MeV級加速器の長パルス化開発

- MeV級加速器の長パルス化のため、水冷加速電極を組み込んだ。
- 加速段数合理化のため、第2加速電極(A2G)を省略。



長パルス加速試験結果 (1)加速負イオン電流

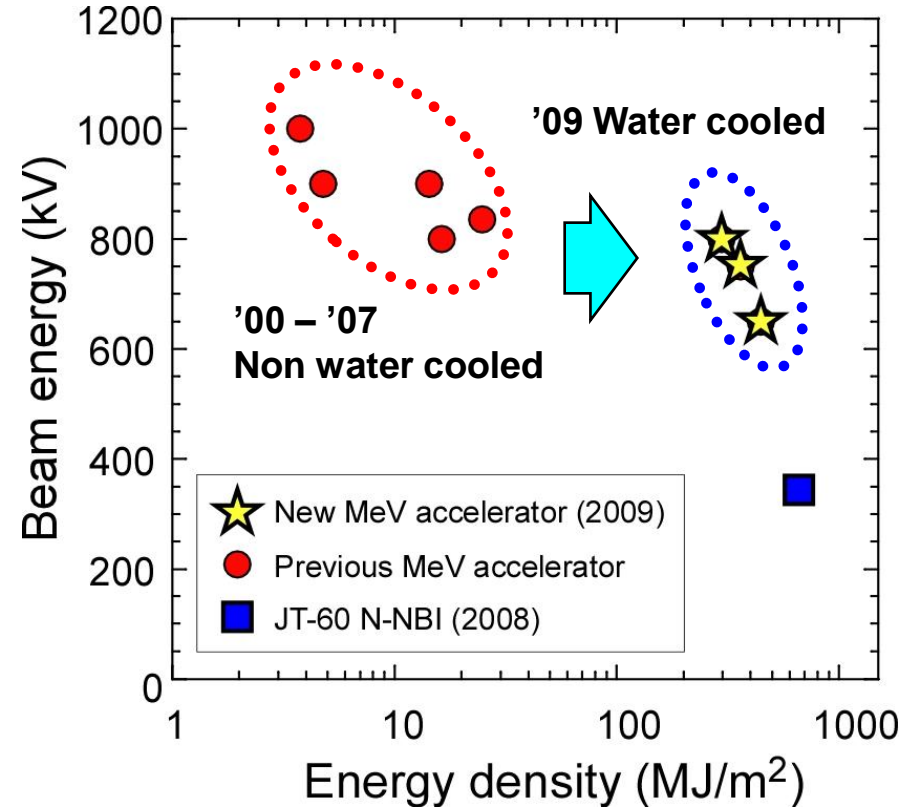
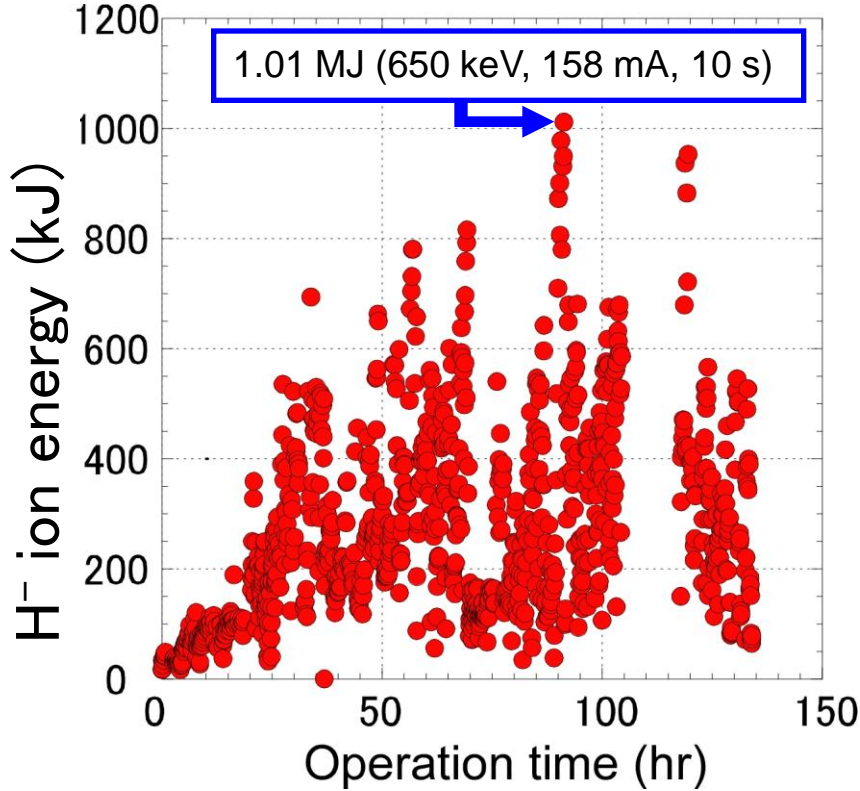
- 慣性冷却加速器での低パワー・長パルス試験 ('08 Sep. – '08 Dec.)
- 水冷加速器での長パルス試験 ('09 Apr. – '09 Jun.)



Energy & Current of 5 - 10 s shots

- 慣性冷却加速器では、550 keV, 131 mA, 5 s の負イオン加速に成功。電極に溶融等の損傷はなかった。
- 水冷加速器では最適パービアン条件で750 keV, 221 mA 5 s, 600 keV, 166 mA, 10 sの負イオン加速に成功した。
- $V_{acc} > 800$ keVでは、ビーム加速中の絶縁破壊が頻発。過大な電極熱負荷が原因と推定。
- 試験後の分解・点検の結果、電極に溶融が生じていた。

長パルス加速試験結果 (2)加速負イオンパワー

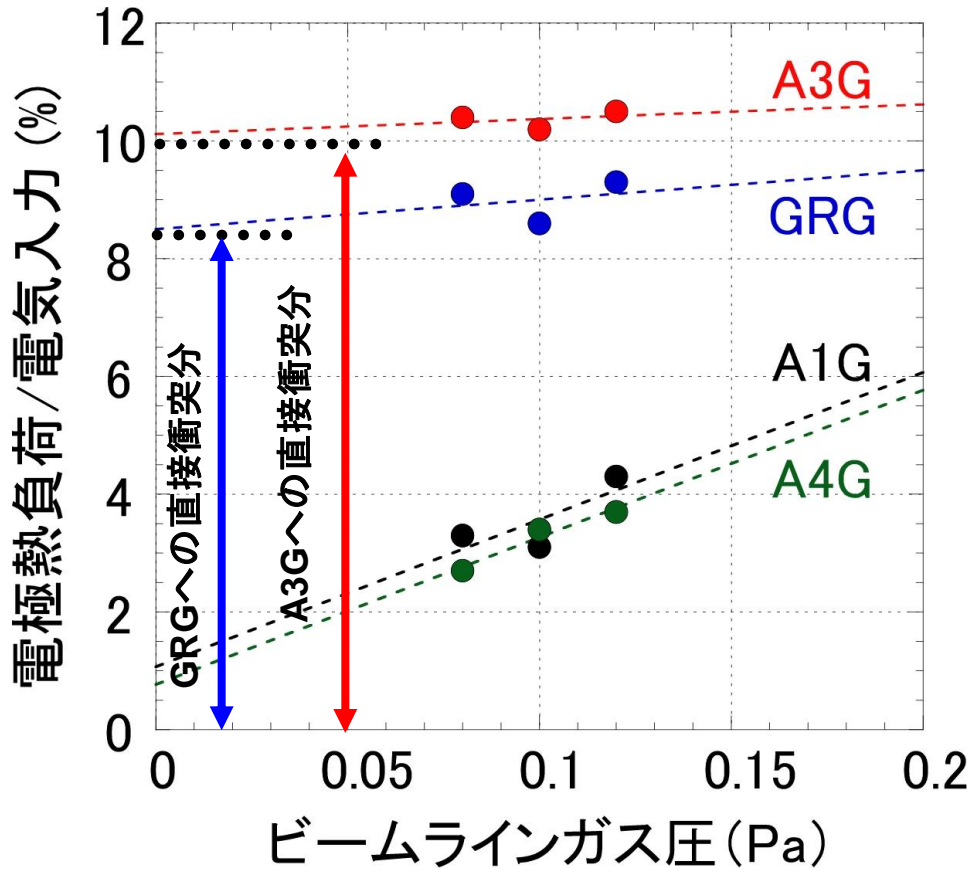


$$\text{Energy density (MJ/m}^2\text{)} = \text{Energy (V)} \times \text{Current (A)} \times \text{Pulse length (s)} / \text{Aperture area (m}^2\text{)}$$

- 約3ヶ月間に渡る長パルス加速試験を実施。負イオン源内に添加したCs (8.2 g)による耐電圧の劣化は見られない。
- 最大負イオン加速パワーは、1.01 MJ (650 keV, 158 mA, 10s) に到達した。
- 加速パワー密度は従来より1桁高い445 MJ/m²に達した。

長パルス加速時の電極熱負荷

500 keV, 最適パービアン条件の下で、3 s加速時における電極熱負荷のビームラインガス圧依存性を測定



- 電極熱負荷
=ビームの衝突+2次電子の衝突
- ガス圧 0 Paへの外挿からビームの直接衝突割合を評価
 - A1G 1 %
 - A3G 10 % (16 kW)
 - A4G 1 %
 - GRG 8.5 % (13 kW)
- A3G, GRG へのビームの直接衝突による熱負荷が非常に高い
- 電子抑制磁場によるビームの偏向が高い電極熱負荷の原因
- EAMCCコードによる2次粒子挙動解析 (水野)

原子力機構では、ITER NBIに向け、1 MeV・アンペア級負イオン加速器 (MeV級加速器) の開発を行っている。

- 大型電界緩和リングによりFRP絶縁管の耐電圧は大きく改善した。
- 実機の耐電圧は、設計データとして用いられた小型電極の耐電圧より50%も低い。
- 上記結果からMeV級加速器での必要なギャップ長を100 mmと設定して改造を行った結果、ガス導入無しで1 MVの安定保持に初めて成功した。
- 長パルス加速試験では、750 keV, 221 mA 5 s, 600 keV, 166 mA, 10 s の負イオン加速に成功した。
- 次回長パルス加速試験に向け、偏向補正法の開発、加速器内2次粒子挙動のシミュレーション (水野) を現在行っている。