



# ITER調達に向けた 加熱装置開発の現状

井上多加志  
原子力機構

H23合同研究会 @筑波大  
2011.7.20

1. 東日本大震災による被災状況
2. 170 GHzジャイロトロンとECH開発
3. 1 MeV負イオン加速器とHVブッシング開発

# JT-60実験準備棟 (NBI)

室内



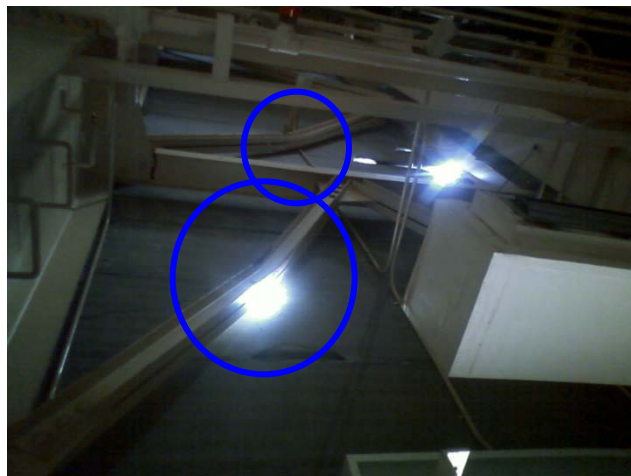
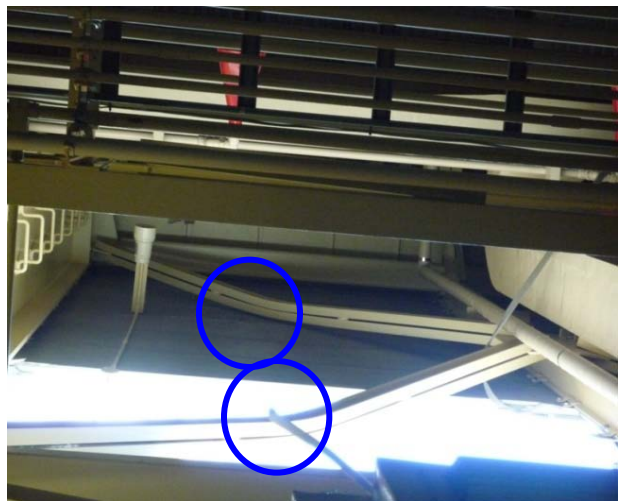
屋外



応急補修(雨仕舞い)後



主柱間の筋交いが折れ曲がり、座屈。外側に折れ曲がった箇所では壁を押し出し、コンクリートパネルが落下。

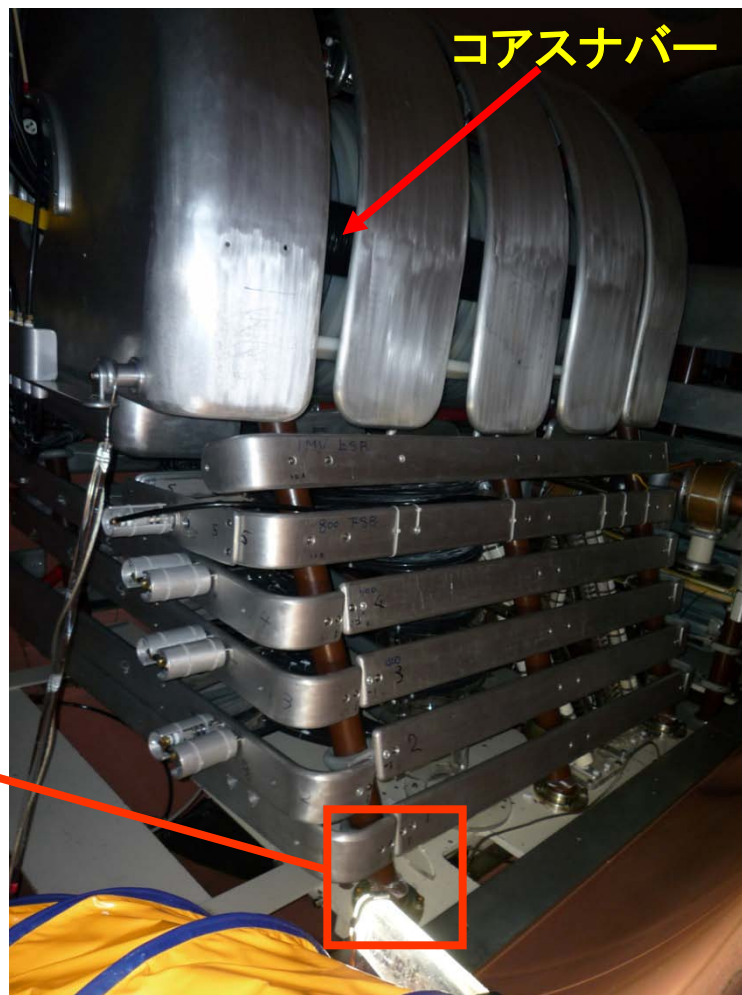


筋交い141本/180本が座屈、半数以上が壁パネル側に折れ曲がっており、余震・強風によりさらにパネル落下の可能性：**被災度は「中破」判定、立ち入り禁止。**  
**クレーンが使用できず、R&Dに支障をきたしている。**

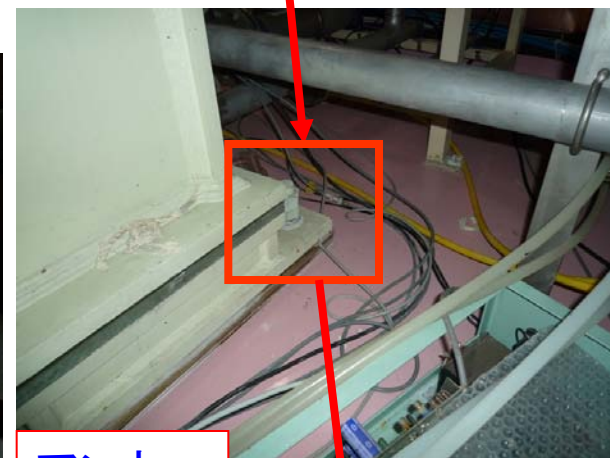
試験中だった  
高電圧ブッシング：  
外観に異常なし



コアスナバー：  
絶縁支柱が全て破損し、傾斜



信号ケーブルがはさまる



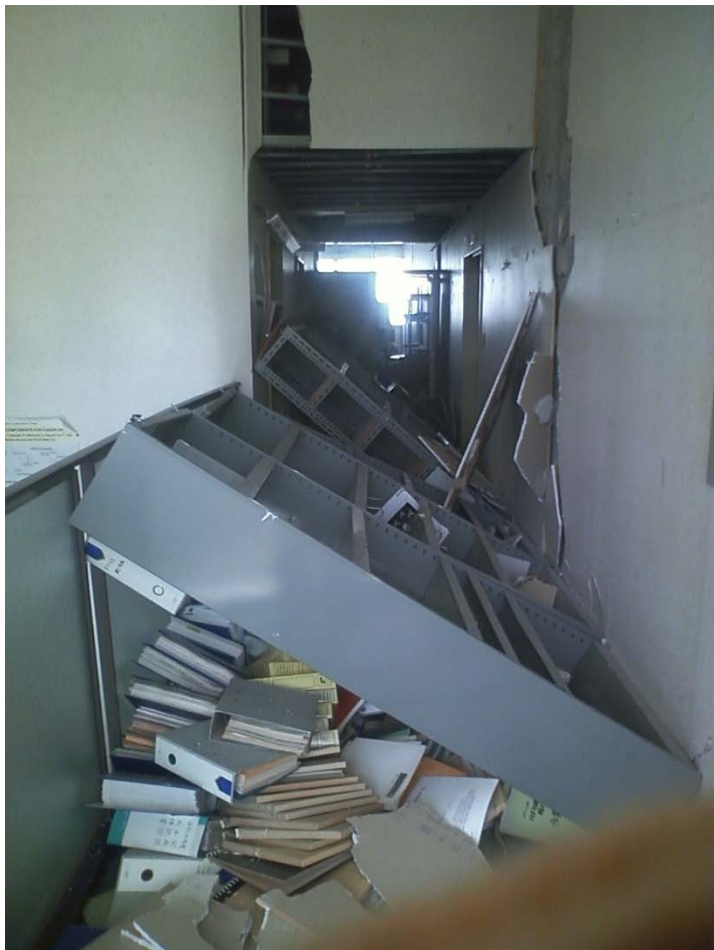
アンカー



エポキシ製  
絶縁支柱の破断



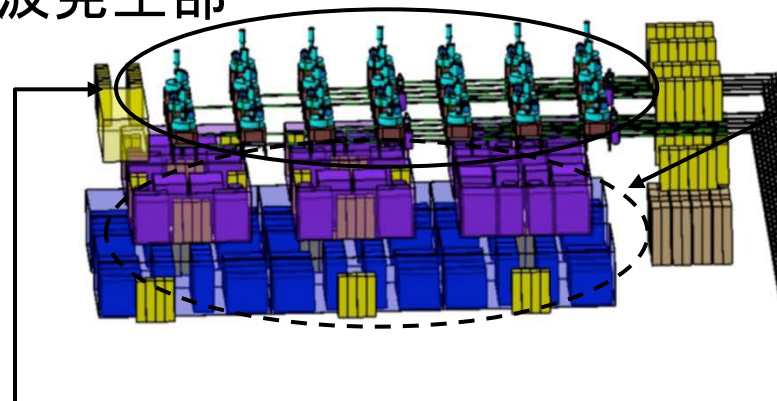
ITER調達に向けた耐電圧試験の実施が困難



本棚の転倒、天井板の崩落  
被災度は「中破」判定、居室部分は立ち入り禁止。

# ECH system load sharing (planned)

ミリ波発生部



電源(容量: ~60MVA)



伝送系(性能仕様)

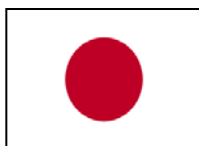
伝送効率: 92%以上  
パルス幅: CW(定常)



gyrotron (performance specification)

- ・周波数/出力/効率: 170GHz/1MW/50%以上
- ・モジュレーション周波数: 1kHz以上
- ・パルス幅: 500秒以上

全24本中、JAは8本を調達



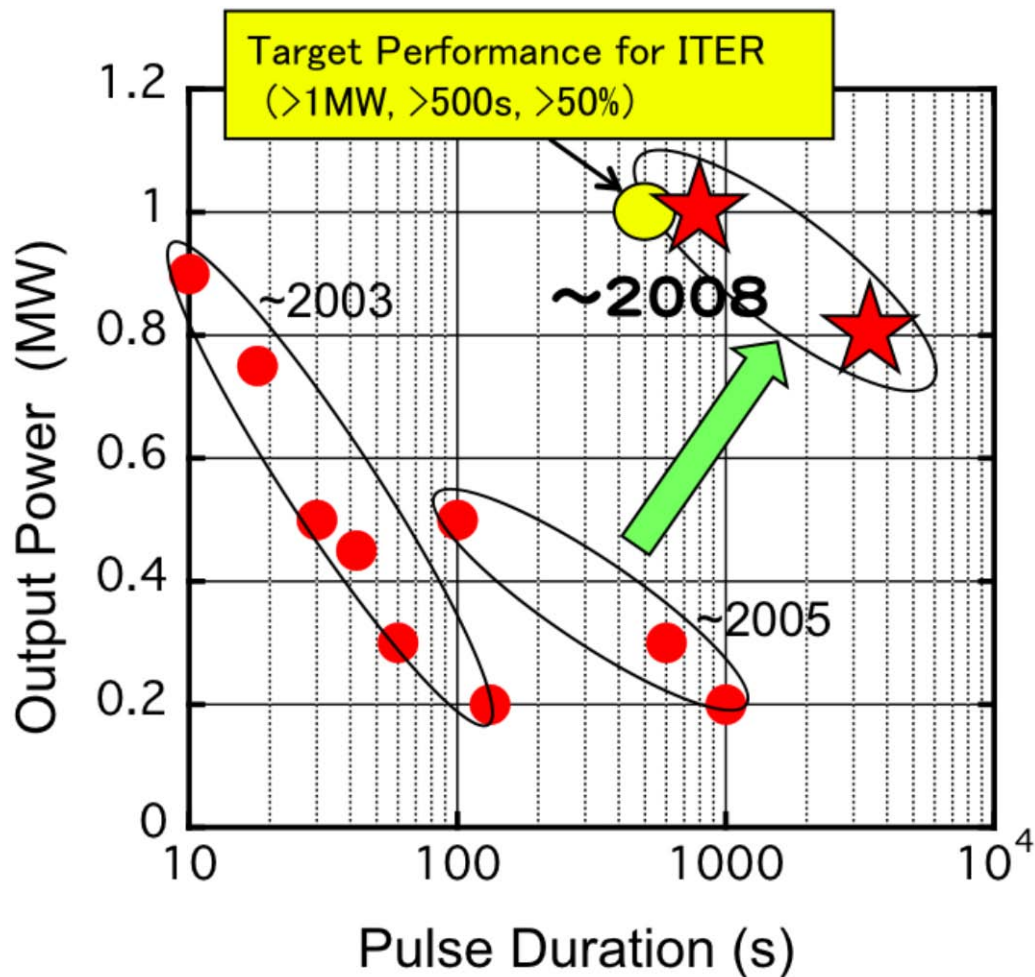
launcher (construction specification)

- ・入射パワー: 20MW
- ・トロイダル入射角度: 20°~45°
- ・パルス幅: CW(定常)
- ・遮蔽性能、耐電磁力、etc...

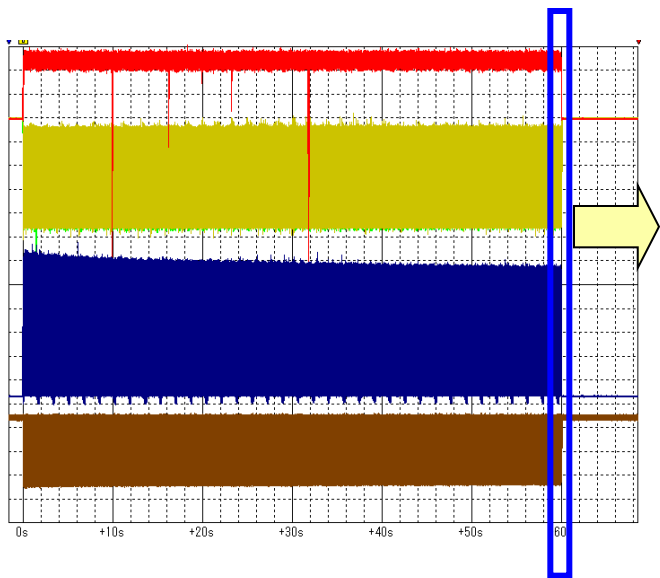
水平ポート分を調達(1機)



ITER-J5M2



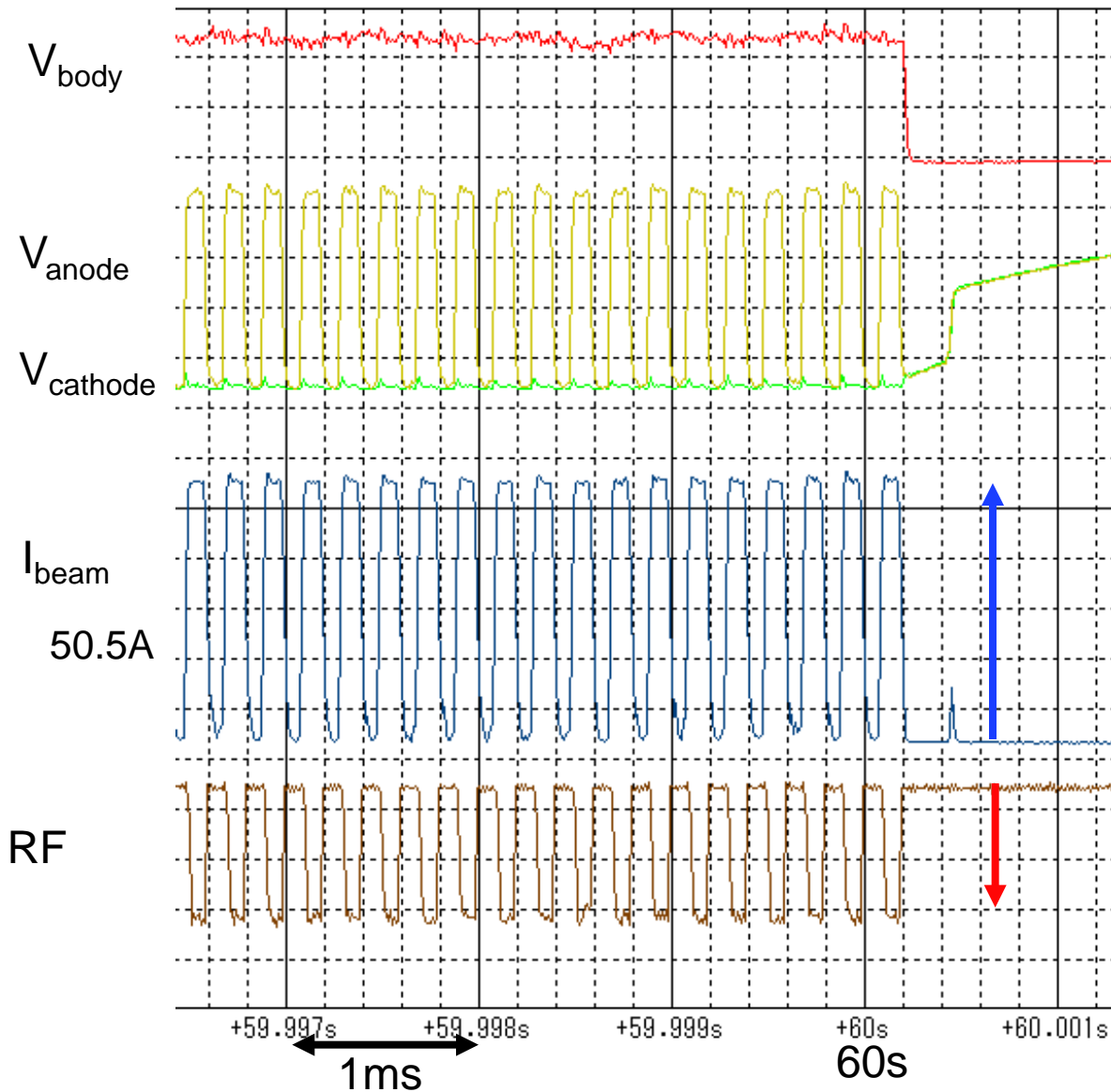
- ITERの要求性能(1MW/800s)を世界に先駆けて達成(2006)
- 1.5MW/4sec at 110GHz gyrotron for JT-60SA



ITER target  
5kHz/50s  
(0.5MW-1MW) mod.



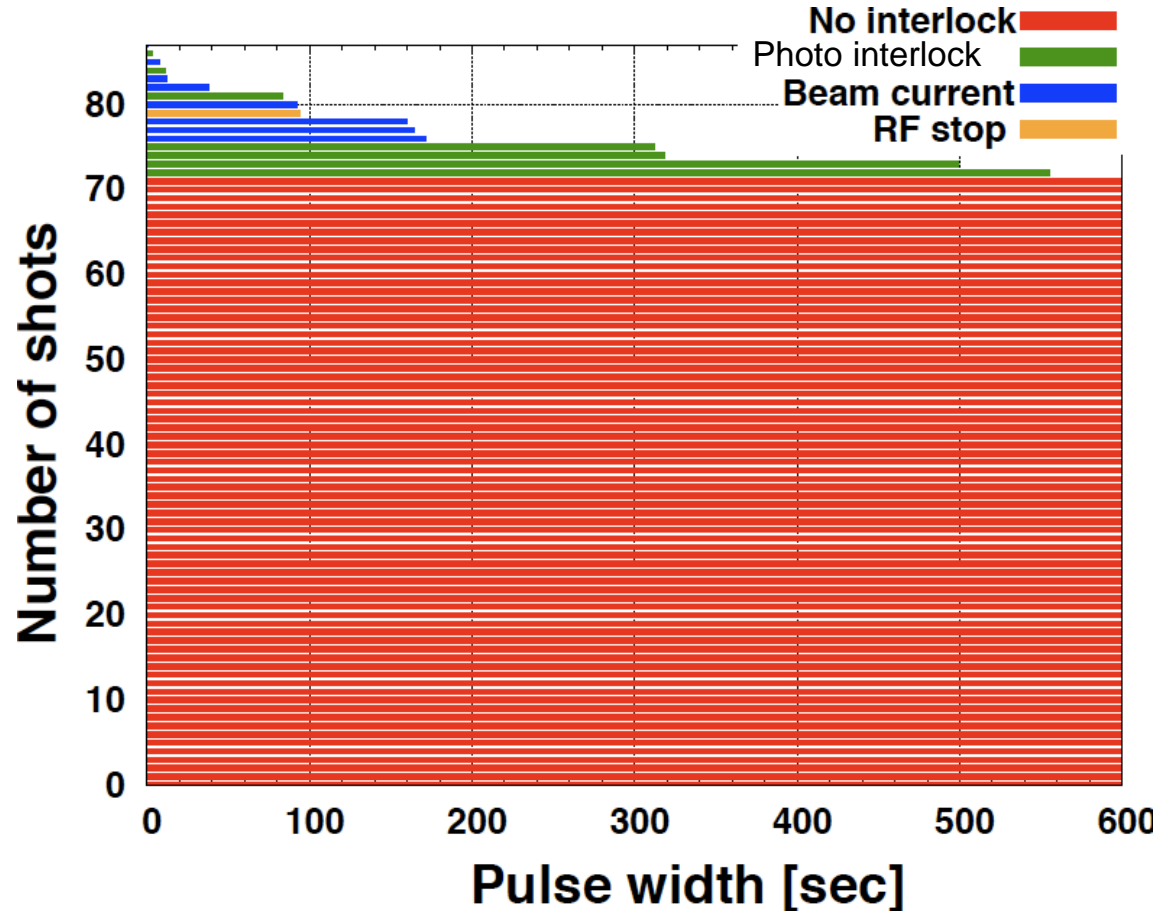
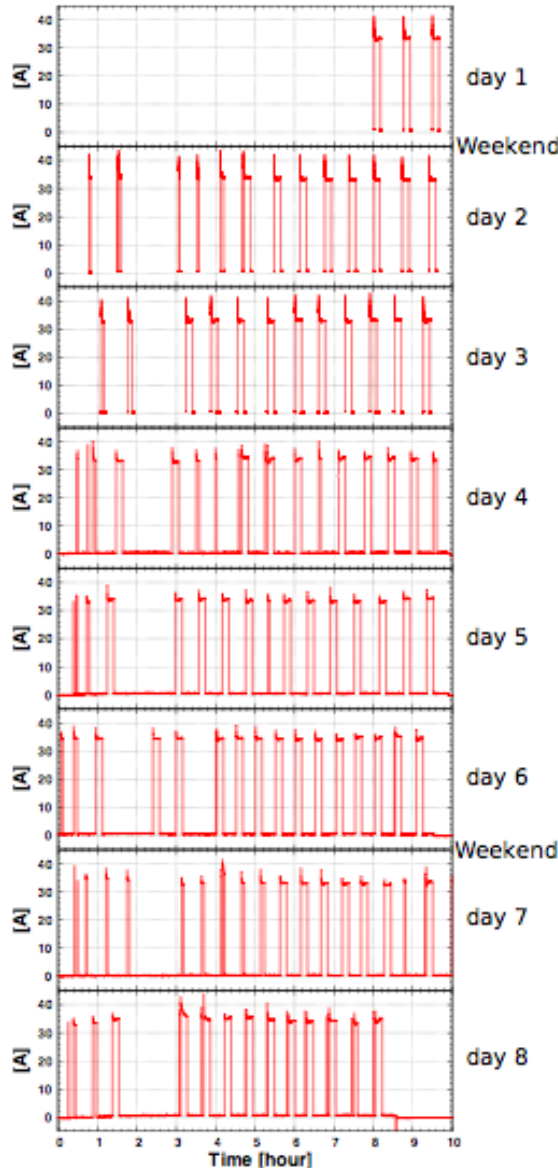
Attained  
5kHz/60s  
Full 1.1MW mod.



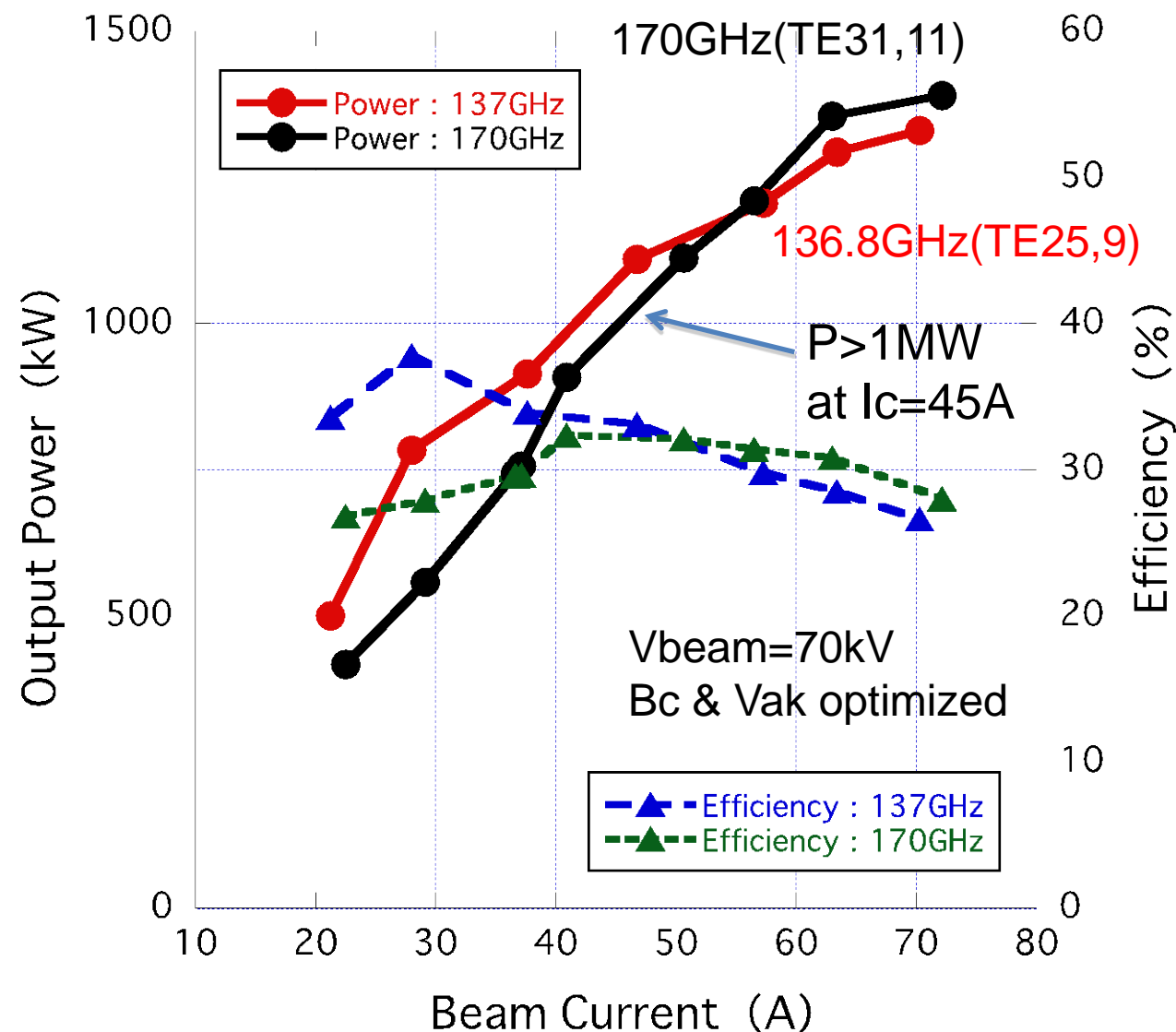
NTM制御等に必要な出力微調整を出力変調により実現



800kW/600s/every 30min/8 days



全88ショット中、72ショットで600秒の長パルスを達成  
 Next : Quick recovery scenario during shot



- 磁場強度を変えて、異なる二つの周波数で発振
- 短パルス(1 ms)ながら、170 GHz、137 GHzの二周波数発振に成功。
- 効率約30%以上
- 長パルス化、エネルギー回収器運転による高効率化試験を実施中。

# 3. 1 MeV負イオン加速器とHVブッシング開発

## ITER NBIの調達分担(予定)

### 中性粒子入射装置(NBI)

入射加熱パワー: 16.5 MW

(2機 + NBTF)

電源低電圧部 2機 + NBTF

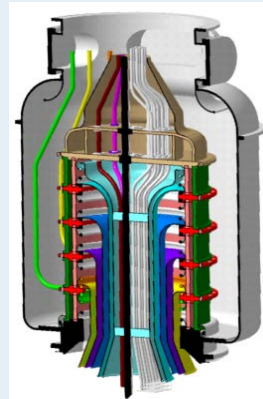
EUが3機を製作

1 MV電源高電圧部 2機 + NBTF JAが3機を製作

- 1 MV 加速電源直流発生器
- 1 MV 絶縁変圧器
- 伝送系 (トランスミッションライン、全長 100 m)
- 1MV 試験電源、模擬負荷

1機: EU予算  
2機: 日本予算

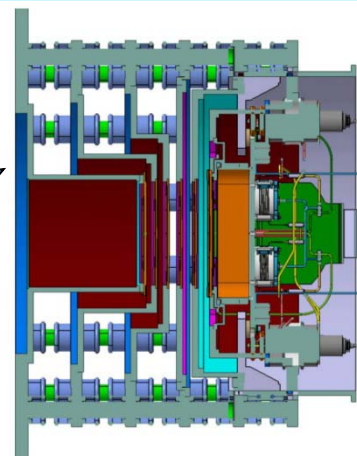
### HVブッシング 2機 + NBTF



JAが3機を製作  
1機: EU予算  
2機: 日本予算

電源(SF<sub>6</sub>絶縁ガス雰  
囲気)から電力を真  
空中のイオン源/加速  
器に導入

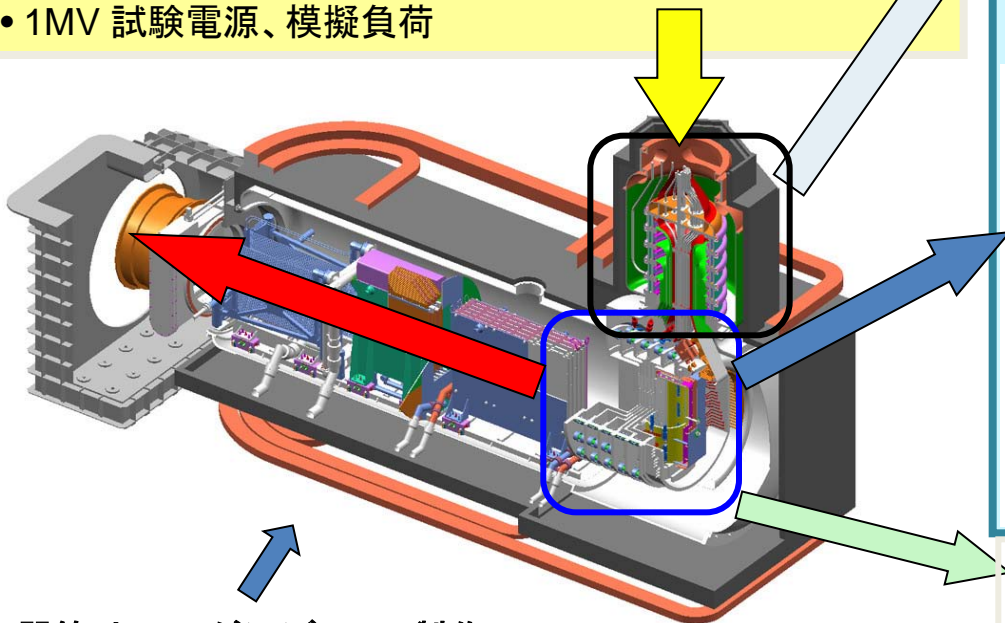
加速器2機 + NBTF  
・EUが1機を製作  
・JAが1機を  
日本予算で製作



1 MeV、40 Aの  
負イオンを加速する  
大型静電加速器  
MAMuG加速器  
に決定('08.5)

イオン源  
EUが製作

RF負イオン源に  
決定('07.7)



容器等は、EUがほぼ100%製作

# 実規模モックアップブッシング試験

## 単段モックアップ試験

世界最大のセラミック(内側)とFRP(外側)



## 2段モックアップ試験(定格400 kV)

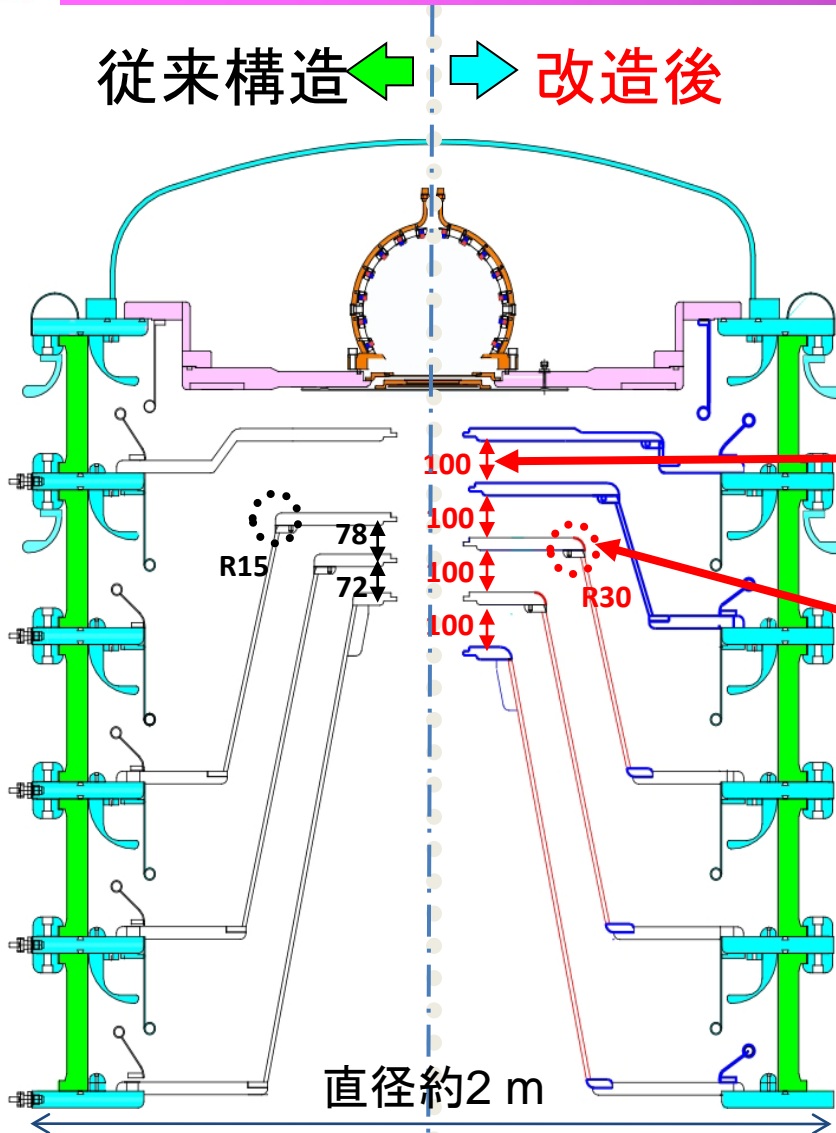


2段分のモックアップを製作し、耐電圧試験を開始。376 kVで震災により中断。

- (1) 定格の120% (-240 kV: BD時の電源最高過電圧) で2時間保持に成功。
- (2) 電源過渡応答時間に対応した長パルス条件 (-220 kV, 5時間) でも高電圧絶縁を達成。

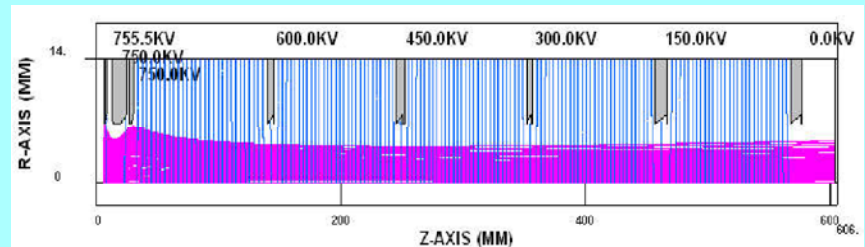
# MeV級加速器の改造(2009)

従来構造 ← → 改造後



- 電極と支持枠の間など、1 mm程度の段差、ギャップ等(陰極側)の対向面に放電痕あり。
- 解析より局所電界強度3 kV/mm以上と判明。局所電界緩和のため:
  1. 電極と支持構造間真空絶縁距離を延長 72 mm → 100 mm
  2. 電極支持板周囲のコーナー部 R15 → R30

加速ギャップ延長によるビームレット発散角の増大は許容可能なレベル

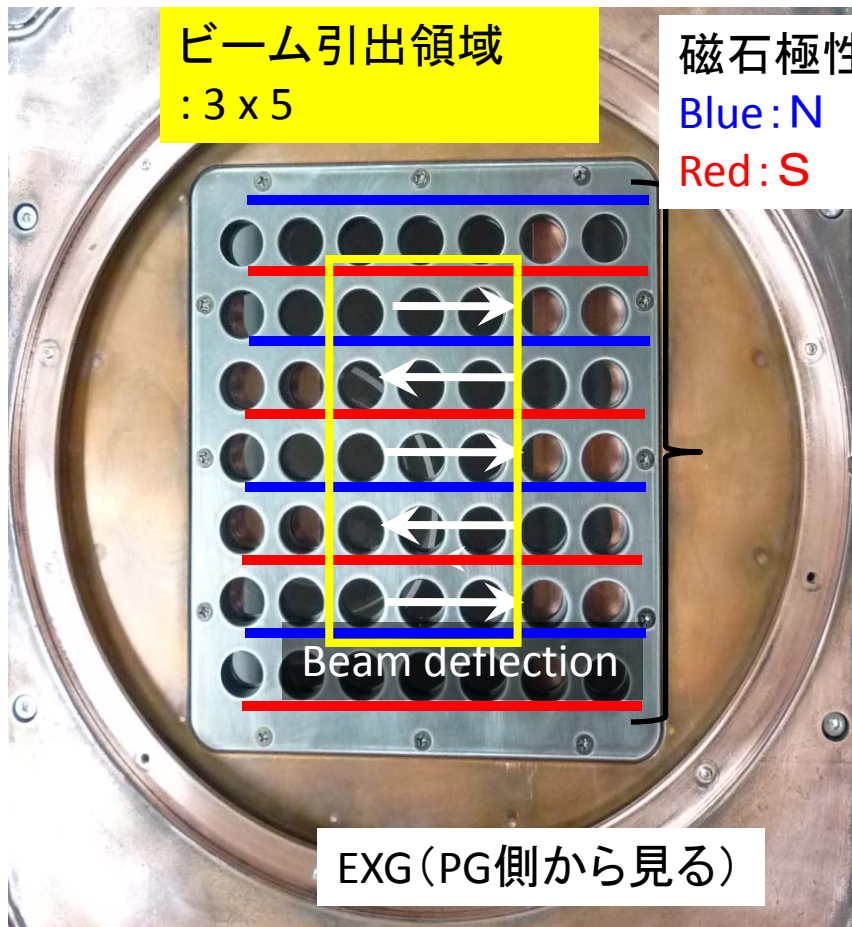


10<sup>-4</sup> Paの真空中で1 MVを1時間以上にわたり安定保持

# 負イオンビームの偏向

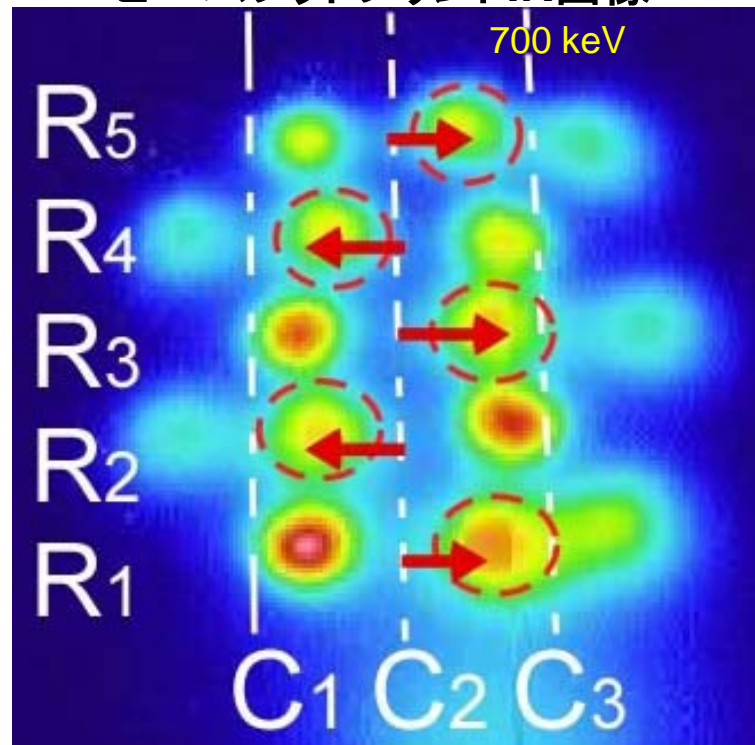
ビーム引出領域  
: 3 x 5

磁石極性  
Blue: N  
Red: S



EXG (PG側から見る)

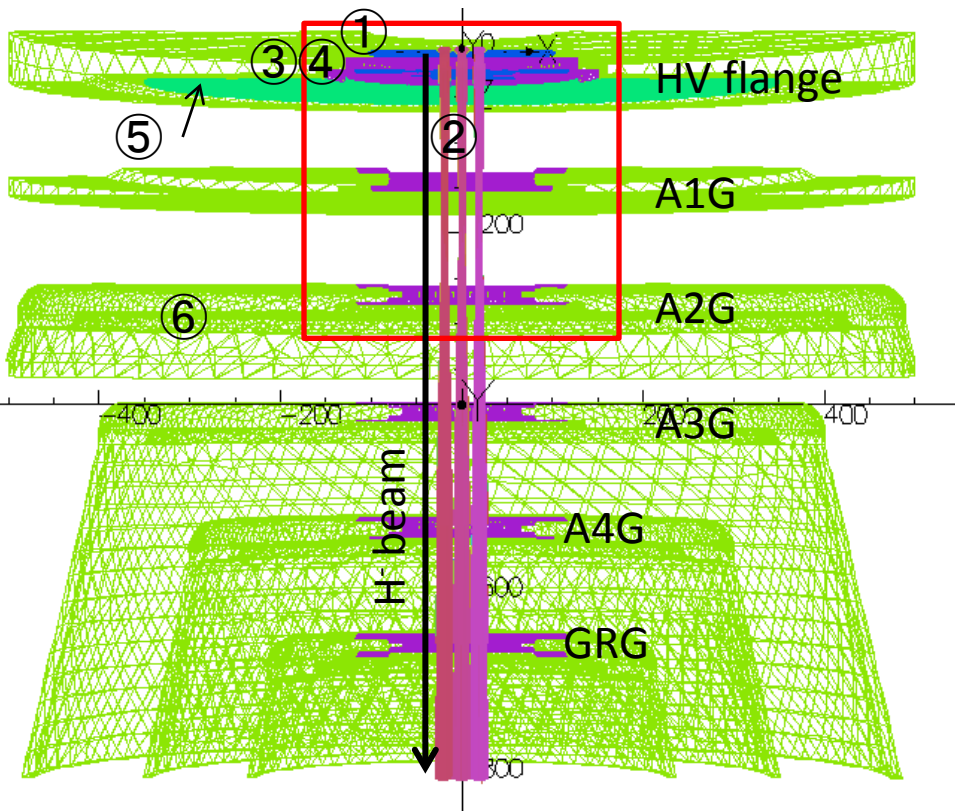
2.5 m下流の1D CFCターゲットにおける  
ビームフットプリントIR画像



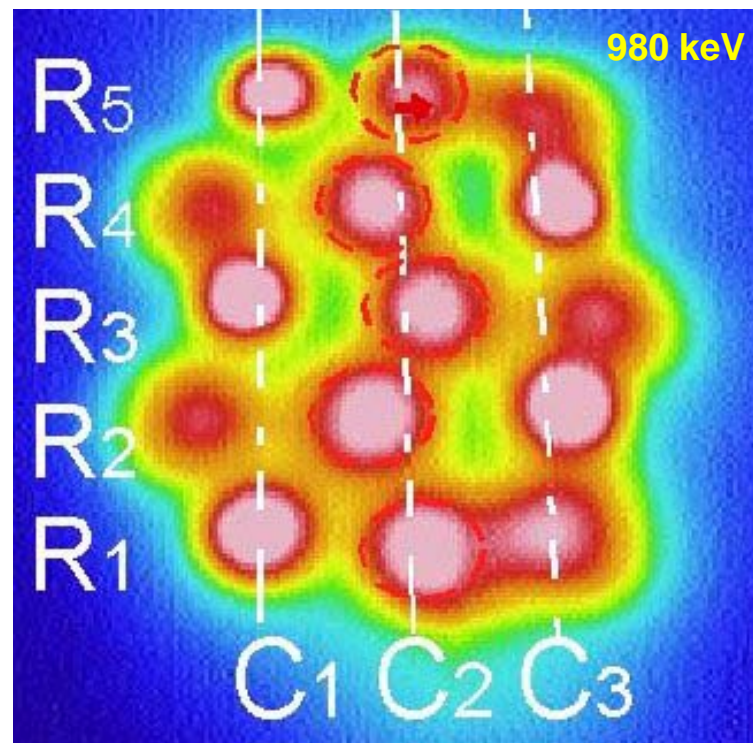
- **磁場偏向**: ESG内の電子抑制磁場により、各行で左右交互に偏向
- **空間電荷反発**: ビームレット間隔が電極孔間隔よりも拡大

- 磁場偏向と空間電荷反発による偏向が
- 互いにキャンセルしあうビームは高強度、
  - 同方向に働くビームは電極で損失し、ターゲットでの強度が弱い。

## 大規模3次元マルチビーム軌道解析



## 偏向補正後(2011年1月)

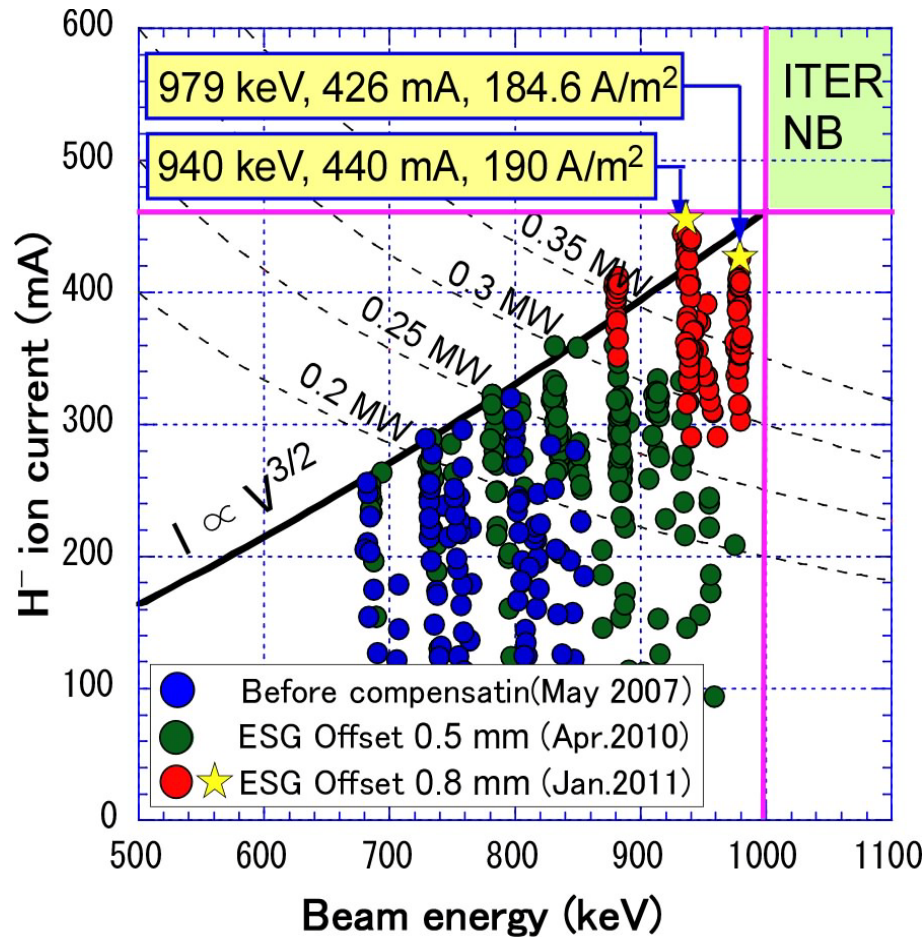


- ① 磁気フィルターと電子抑制磁場
- ② 負イオン剥離損失による加速途中の電流低減
- ③ ESG(電子抑制)電極での孔ズレ: 0.5 mm
- ④ ESG背面の電界補正板(FSP): 厚さ1 mm
- ⑤ EXG、ESG背面の大型電界平滑板
- ⑥ 電極支持枠構造

- 引出し電極下部において、
- 電極孔を意図的に軸ズレ
  - 多孔部周囲に高さ1mmの段差を設け、加速静電界を制御して負イオンビームを偏向と逆方向に補正偏向

# 0.98 MeV, 185 A/m<sup>2</sup> H<sup>-</sup>加速を実証

MeV級負イオン加速器開発  
 (目標: 1 MeV, 200 A/m<sup>2</sup> H<sup>-</sup>イオン生成)



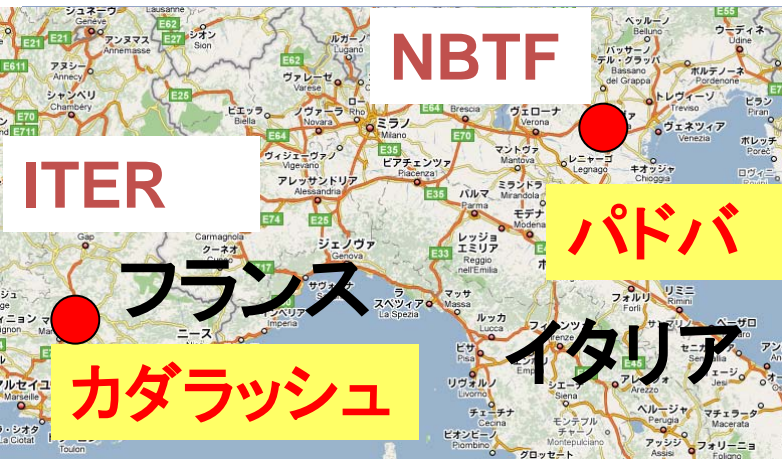
ビーム偏向を補正する改良の結果、**ビーム加速中の耐電圧性能が改善**、2011年1月、0.98 MeV, 185 A/m<sup>2</sup> の水素負イオン加速を実証





# NBTF@パドバ建設予定地

既存試験施設の電源容量から、電流値は要求性能の1%にも満たない。  
目的：実機同等のNBIを建設し、1 MeV、40 A、3,600秒入射の実証



# まとめ

- 東日本大震災により建屋に大きな被害を受け、特にNBI開発に支障をきたしているが、ITER調達への影響を最小限とするよう、ITER機構と協議を行っている。
- 世界に先駆けてITERの要求性能(1MW/800s)を達成した170 GHzジャイロトロン開発においては、5 kHz変調、繰り返し運転における信頼性実証に成功し、二周波数ジャイロトロンの開発を推進している。
- 1 MV真空絶縁はNBI開発における長年の課題であったが、絶縁距離拡大と曲率大径化による局所電界の緩和、並びにビーム軌道偏向の補正により大幅な改善を見た。その結果、
  - 実規模モックアップブッシングにおいて、240 kV1時間保持成功、
  - 0.98 MeV, 185 A/m<sup>2</sup> の水素負イオン加速を実証した。