

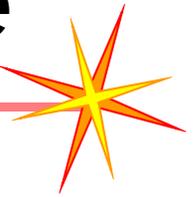
# 炭素線治療用 超伝導回転ガントリーの開発

岩田佳之

放射線医学総合研究所



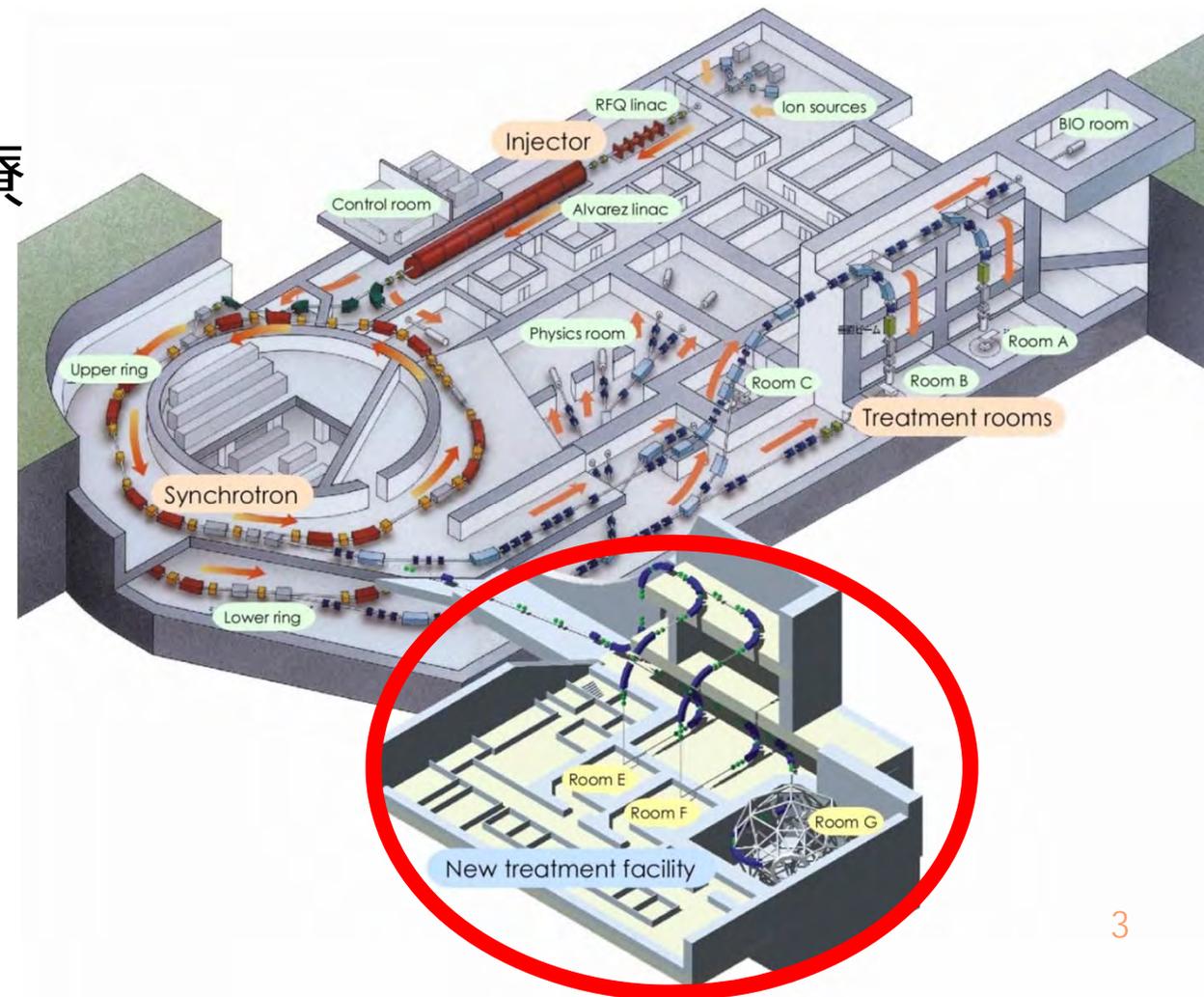
2016/8/10



- イン트로ダクション
- 開発について
- 製作について
- ビーム試験
- まとめ



- Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC)
  - イオン種: p~Xe
  - $E/A=800 \text{ MeV} @ A/Z=2$
- 10000名以上の患者を治療
- 新治療研究棟
  - 治療室E、治療室F  
水平・垂直固定ポート  
**(治療運用中)**
  - **治療室G**  
**回転ガントリーポート**



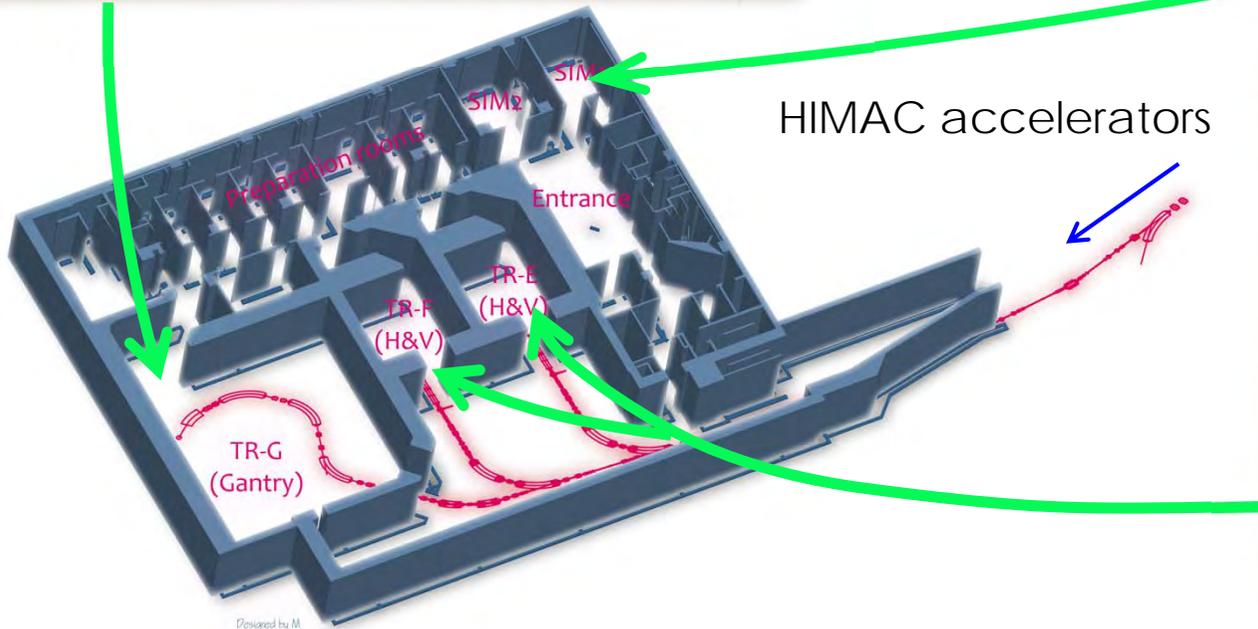
# 治療フロア(B2F)



治療室G



CTシミュレーション室



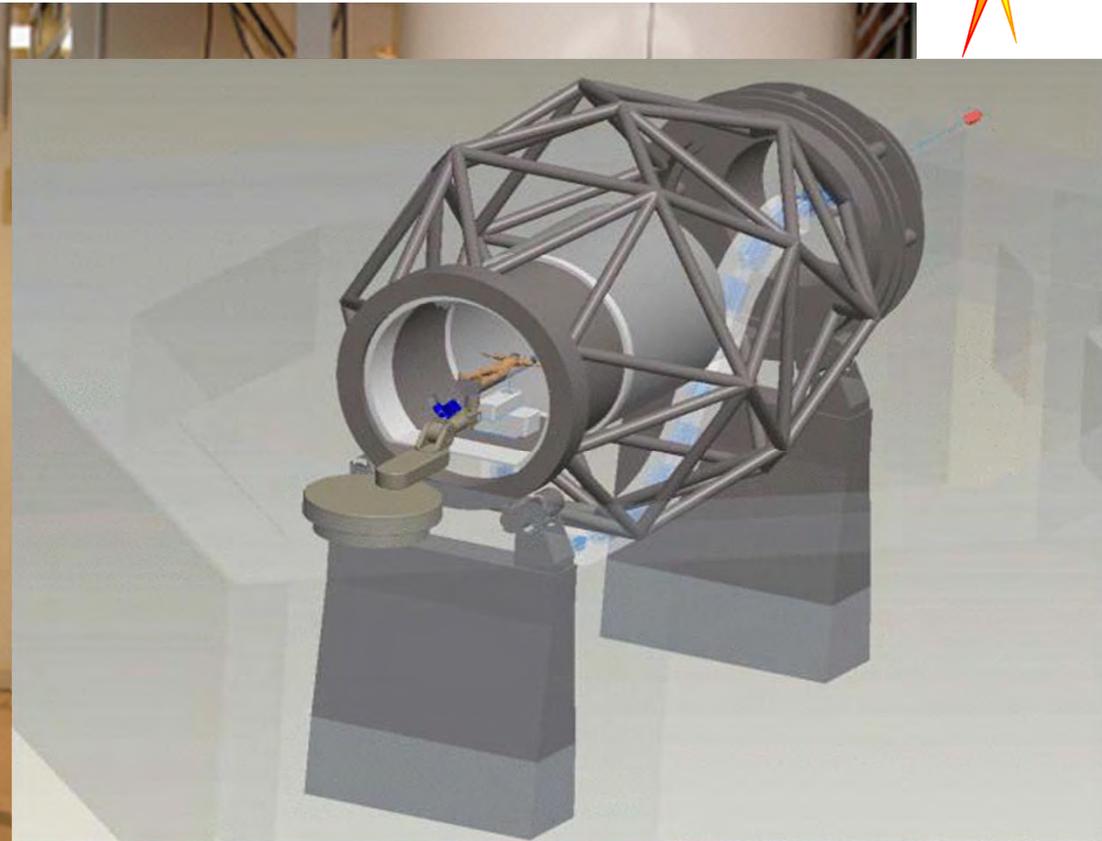
治療室E (及びF)

# 回転ガントリーについて



## 【回転ガントリーの利点】

1. 患者を傾ける必要がない
2. 精密な線量分布形成が可能
3. Intensity Modulated Ion Therapy (IMIT)



0-360度の如何なる方向からも  
ビーム照射が可能

固定照射ポートでの治療例（肺がん4門照射）

# 粒子線治療用回転ガントリー



## 陽子線用回転ガントリー

- 近年では一般的に採用
- 商用ベースで製作可能

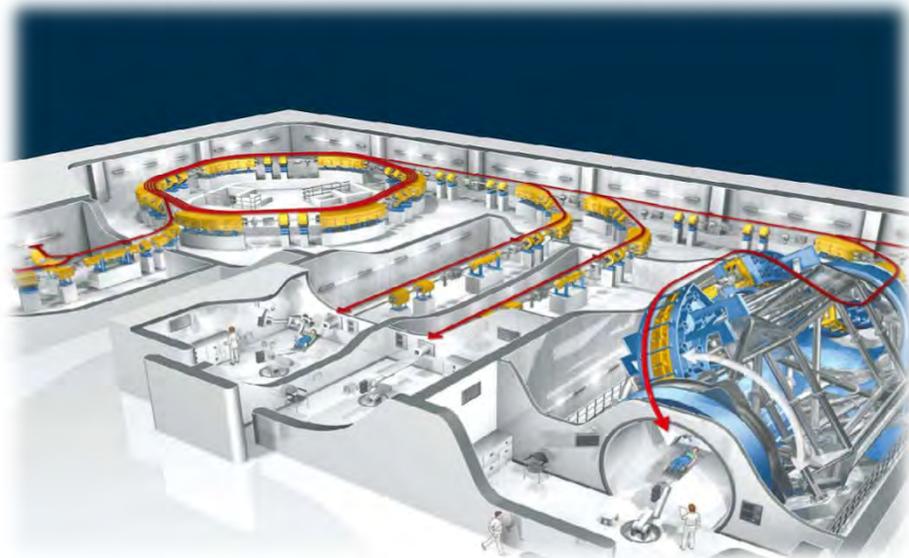
## 炭素線用回転ガントリー

- 所要 $B\rho$ が陽子線用に比べ約 3 倍必要
  - 電磁石及び、構造体が非常に大型
  - 製作が困難



# HITの回転ガントリー

- **世界初の炭素線用ガントリー**
  - Heidelberg Ion Beam Therapy Center (HIT)
  - 2012年11月より治療運用開始
  - 総重量：650トン  
(回転部重量：600トン)

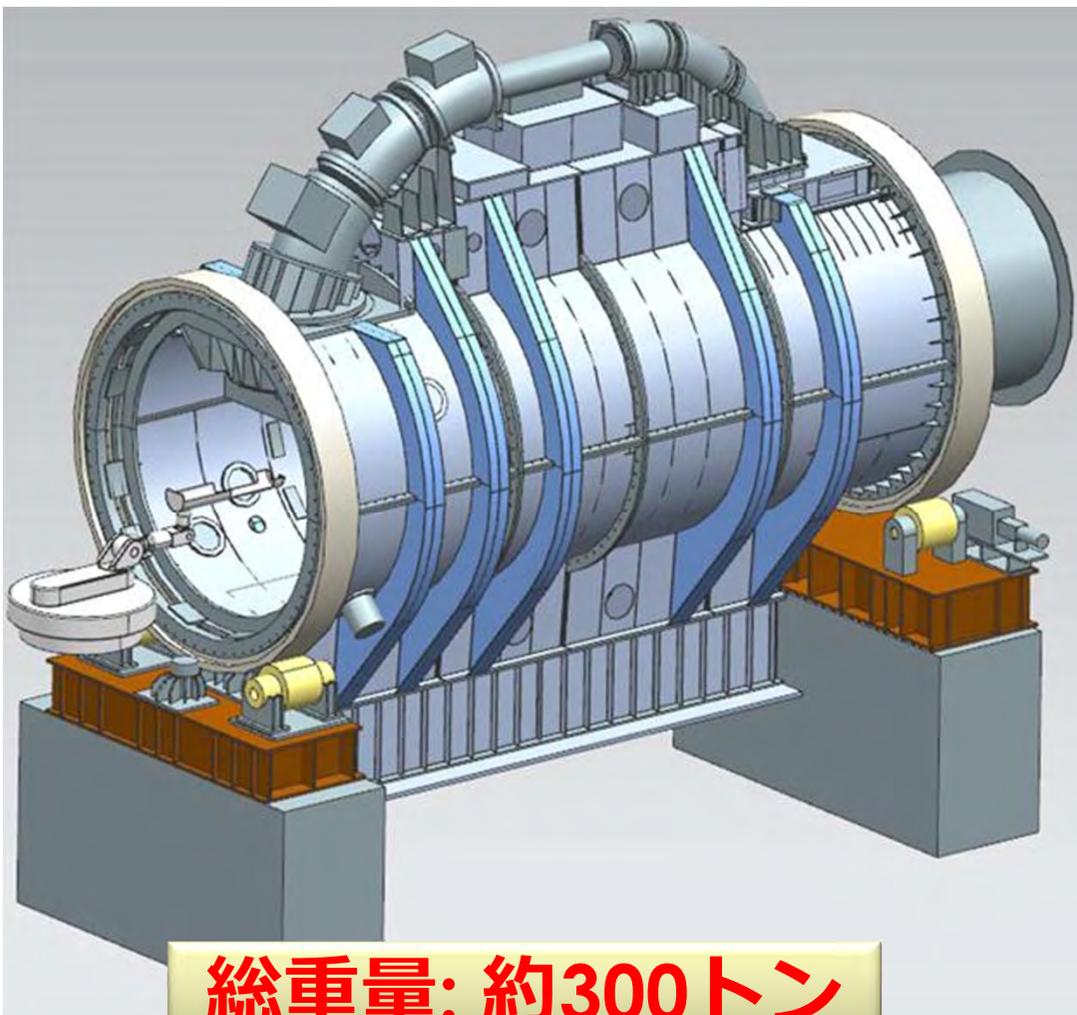


# 超伝導回転ガントリーの開発



機能結合型超伝導電磁石の採用

イオン種 :  $^{12}\text{C}$   
照射方法 : 3D高速スキャンニング  
エネルギー : 430 MeV/n  
最大水中レンジ : 30 cm in water  
ビーム軌道半径 : 5.45 m  
全長 (リング間) : 14 m



総重量: 約300トン

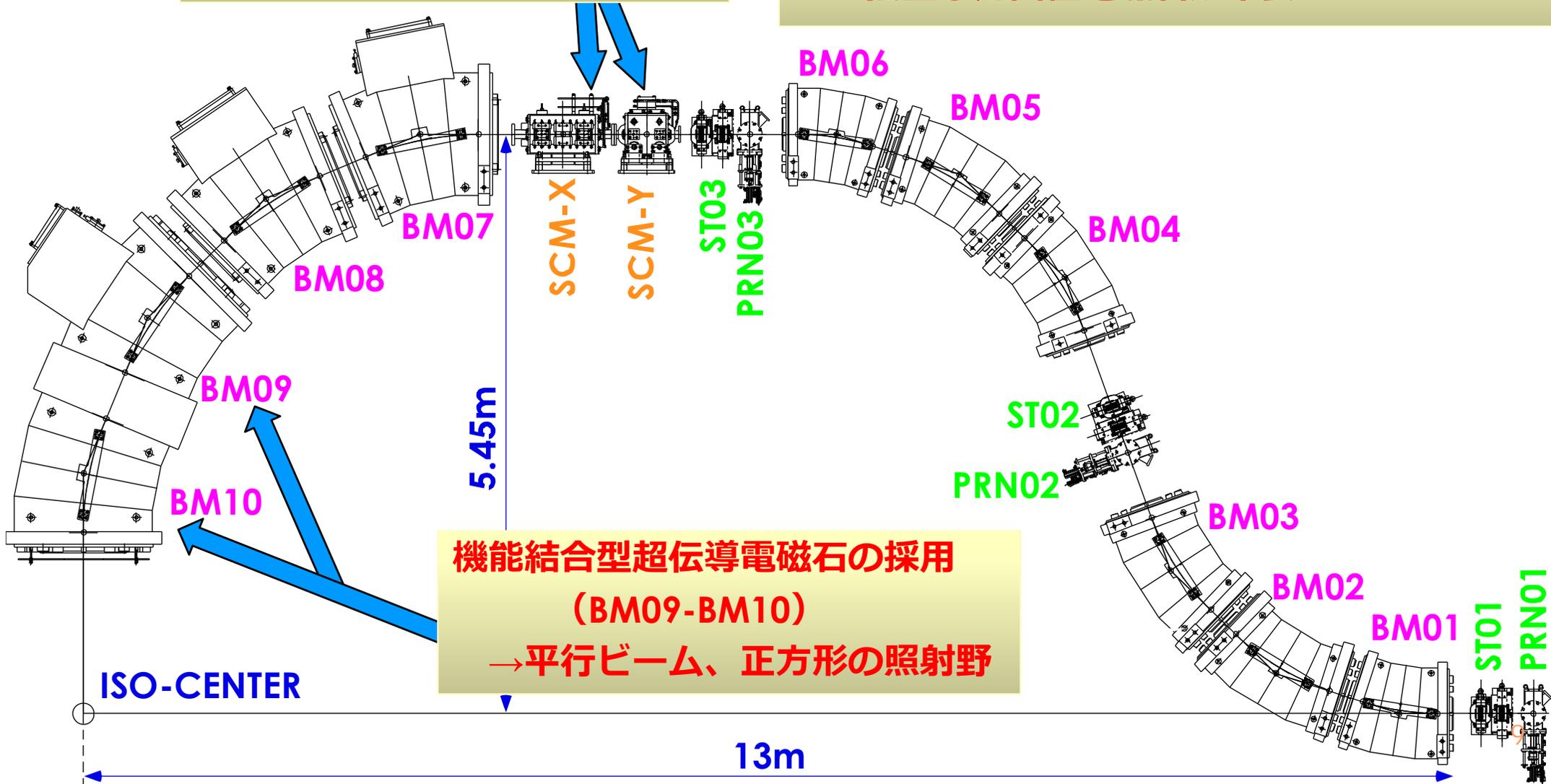
サイズ及び総重量の  
大幅な低減を実現

# ビームラインレイアウト



頂上部にスキャニング電磁石  
→大きな照射野サイズ

機能結合型超伝導電磁石の採用(BM01-BM06)  
→独立した四極電磁石が不要



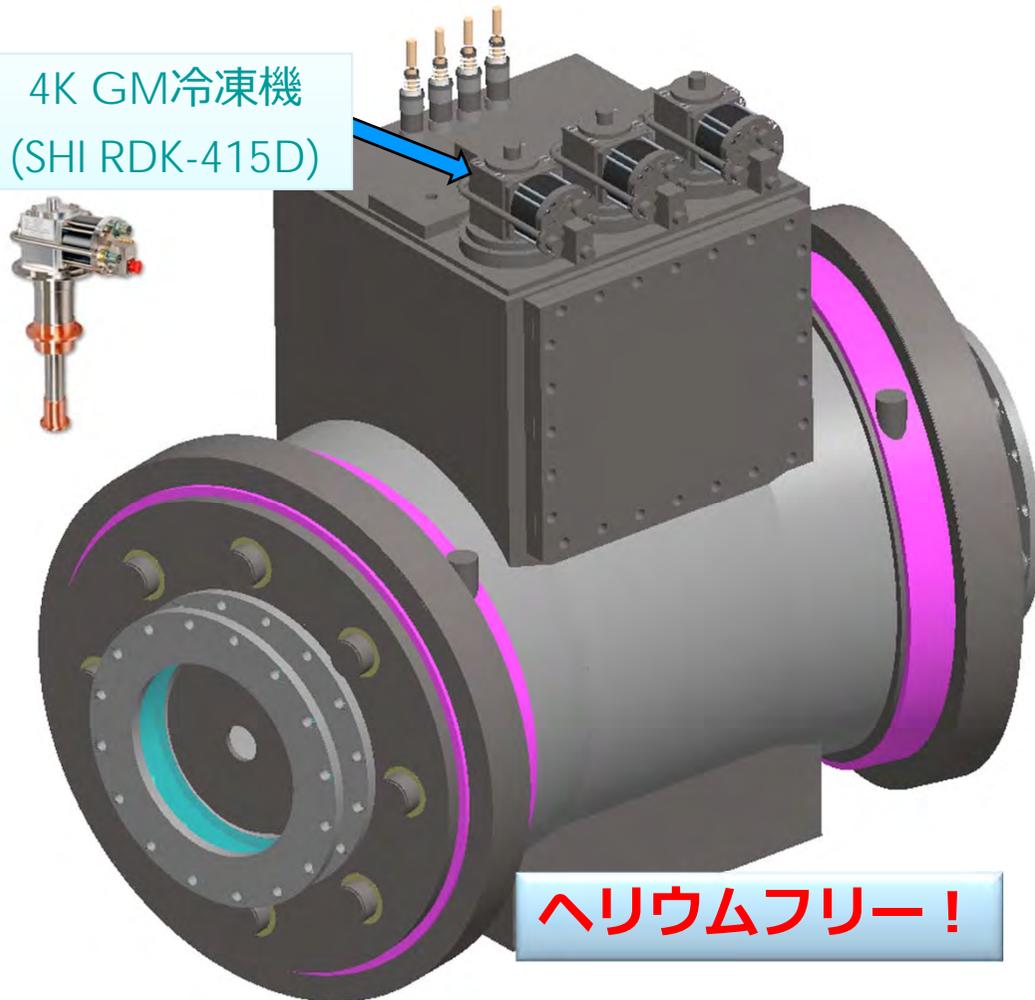
機能結合型超伝導電磁石の採用  
(BM09-BM10)  
→平行ビーム、正方形の照射野

# 超伝導電磁石の開発



超伝導電磁石(BM02-05)

断面図



Vacuum chamber

Cold yoke

Beam duct  
( $\phi 60\text{mm}$ )

Dipole coil

Quadrupole coil

250mm

330mm

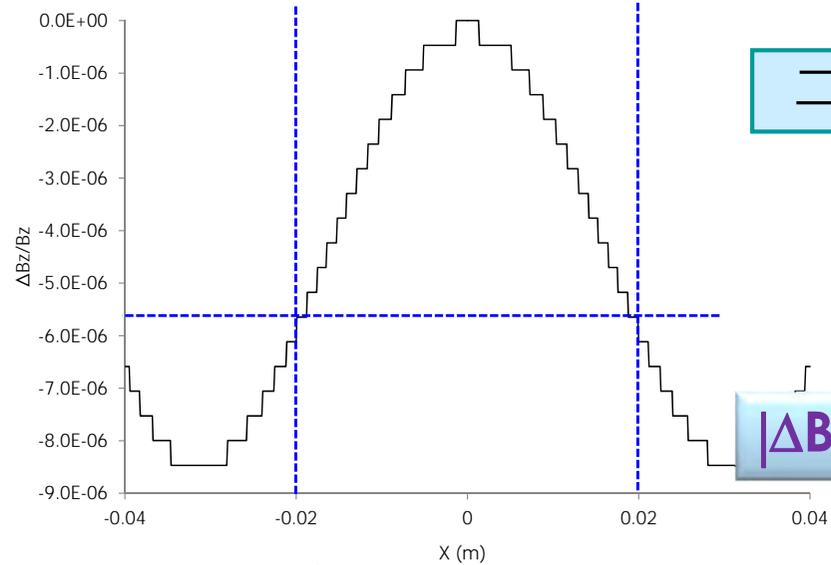
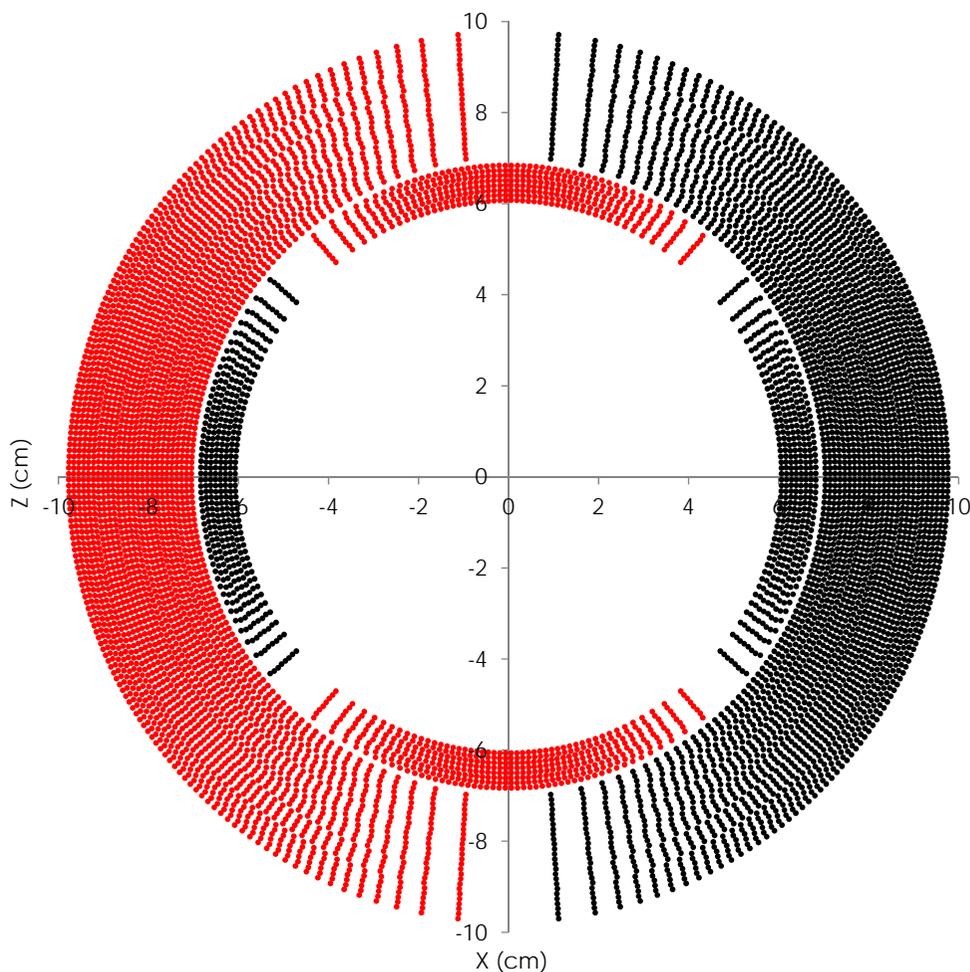
345mm

二極及び四極コイルは  
独立励磁可能

# 超伝導コイルの設計

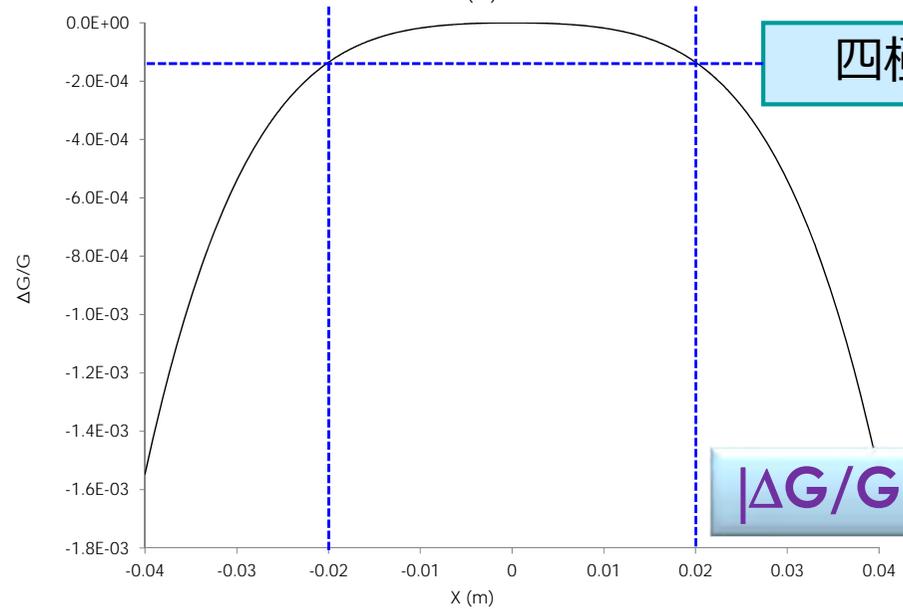


2 D磁場計算  
(BM02-BM05)



二極コイル

$$|\Delta B/B| < 6 \times 10^{-6}$$



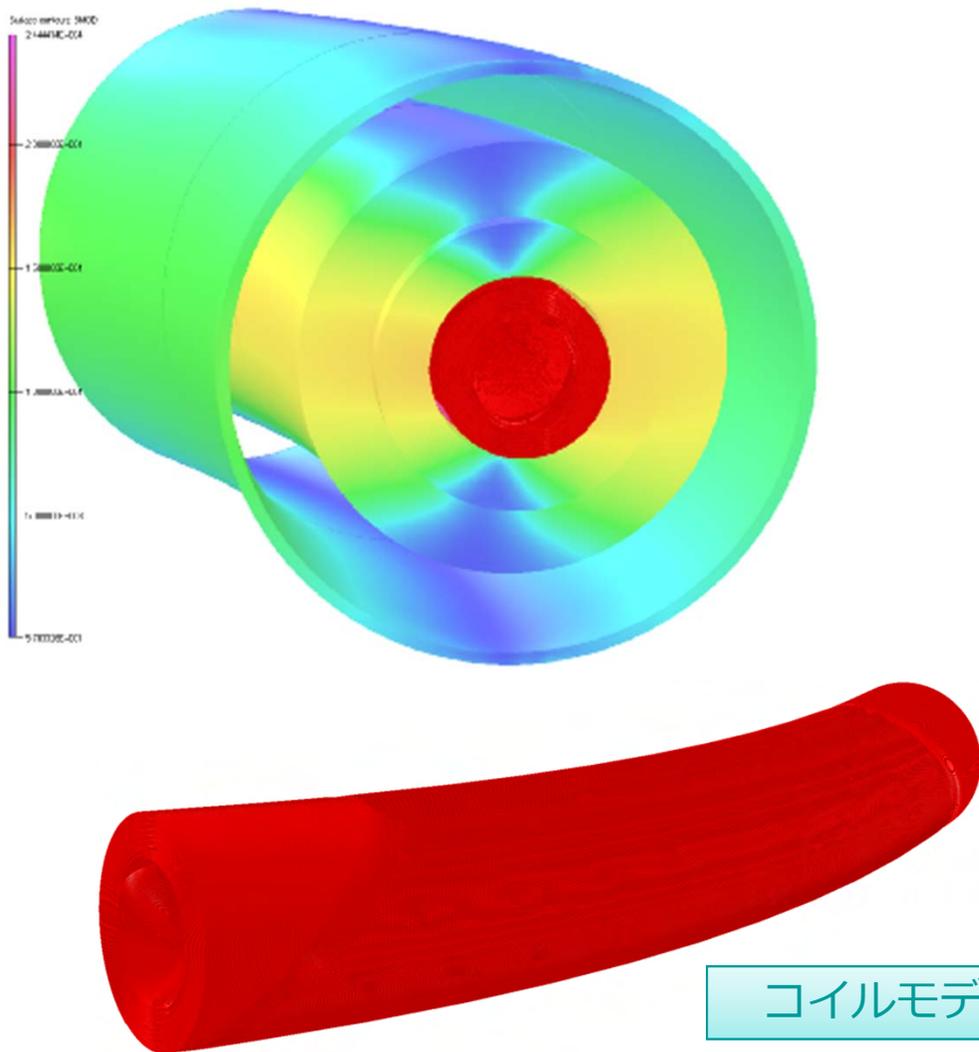
四極コイル

$$|\Delta G/G| < 2 \times 10^{-4}$$

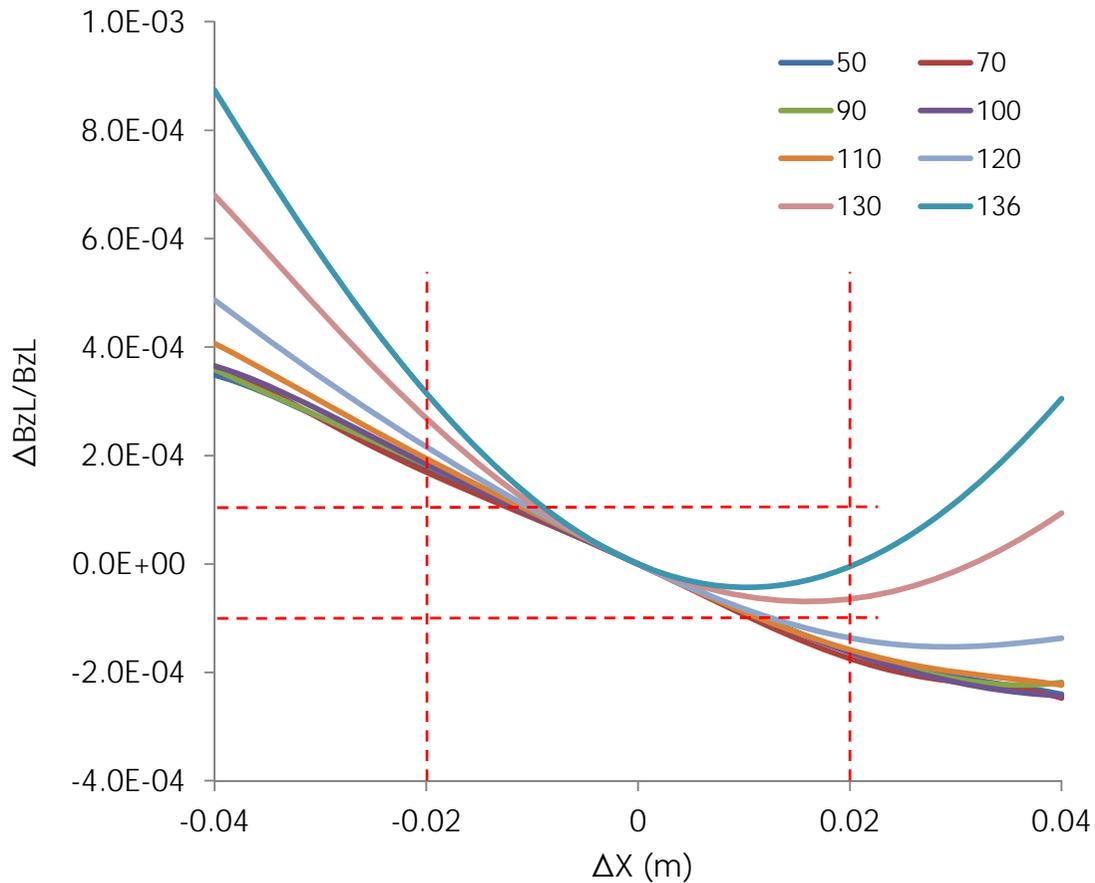
# Opera-3dによる3D磁場計算



コイルを精密にモデル化

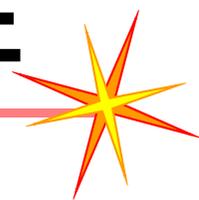


コイルモデル



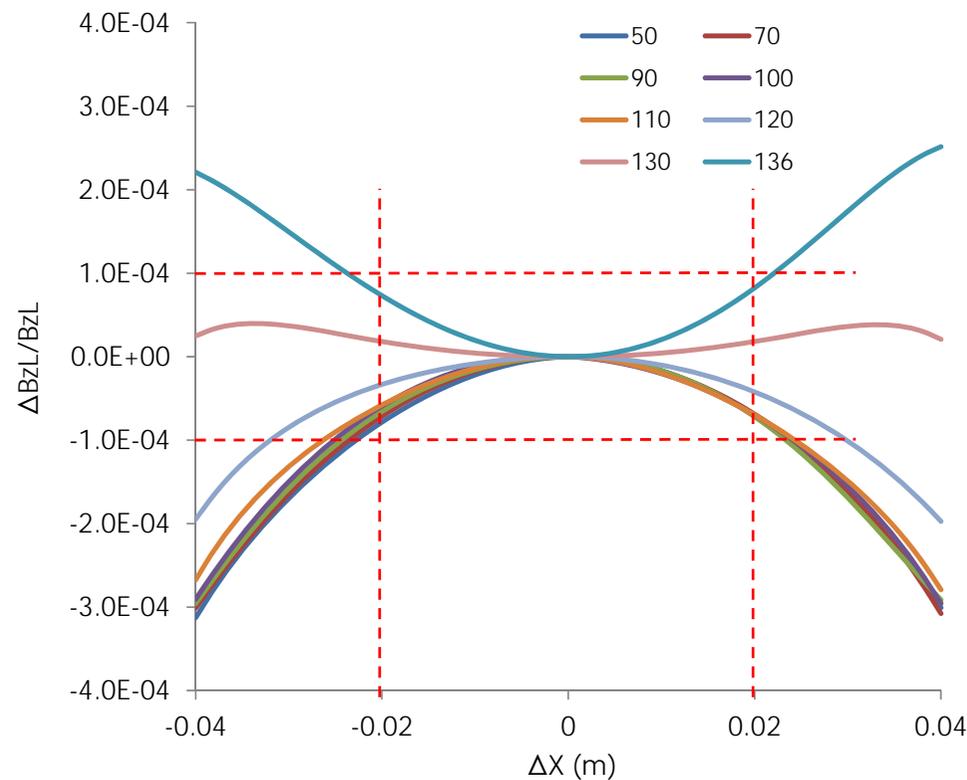
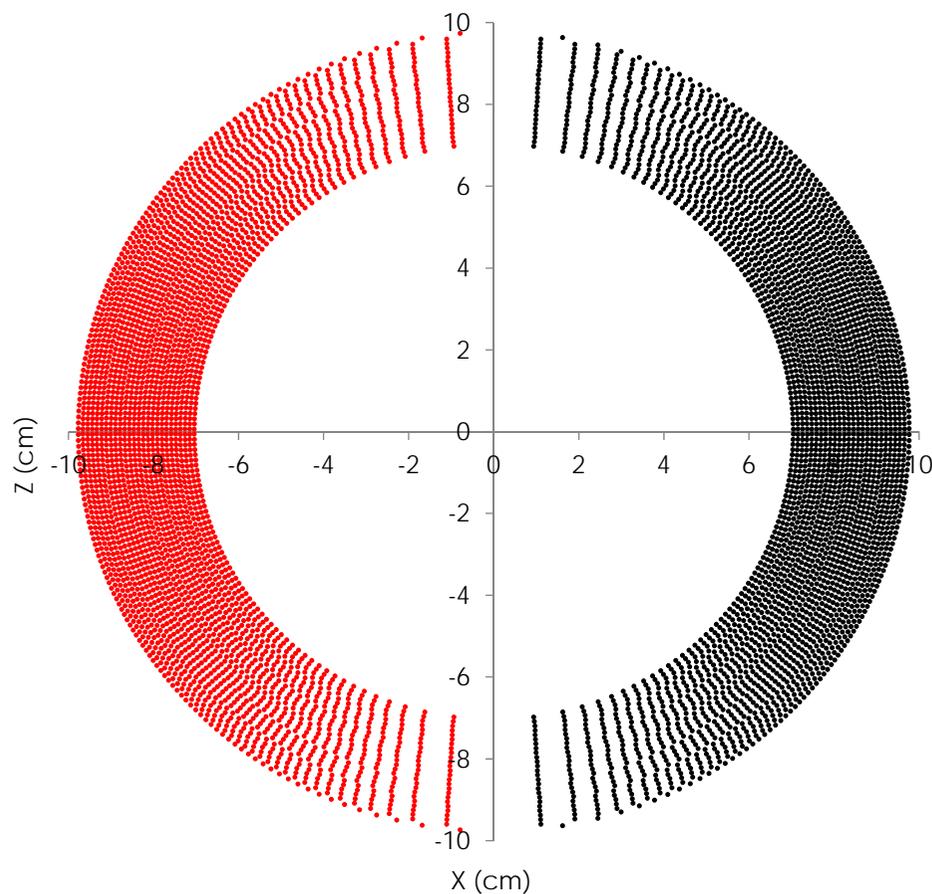
$|\Delta BL/BL| < 4 \times 10^{-4}$

# 磁場均一度補正



BL積の均一度を改善するため、  
最外層のコンダクタ位置を最適化

補正後のBL積均一度

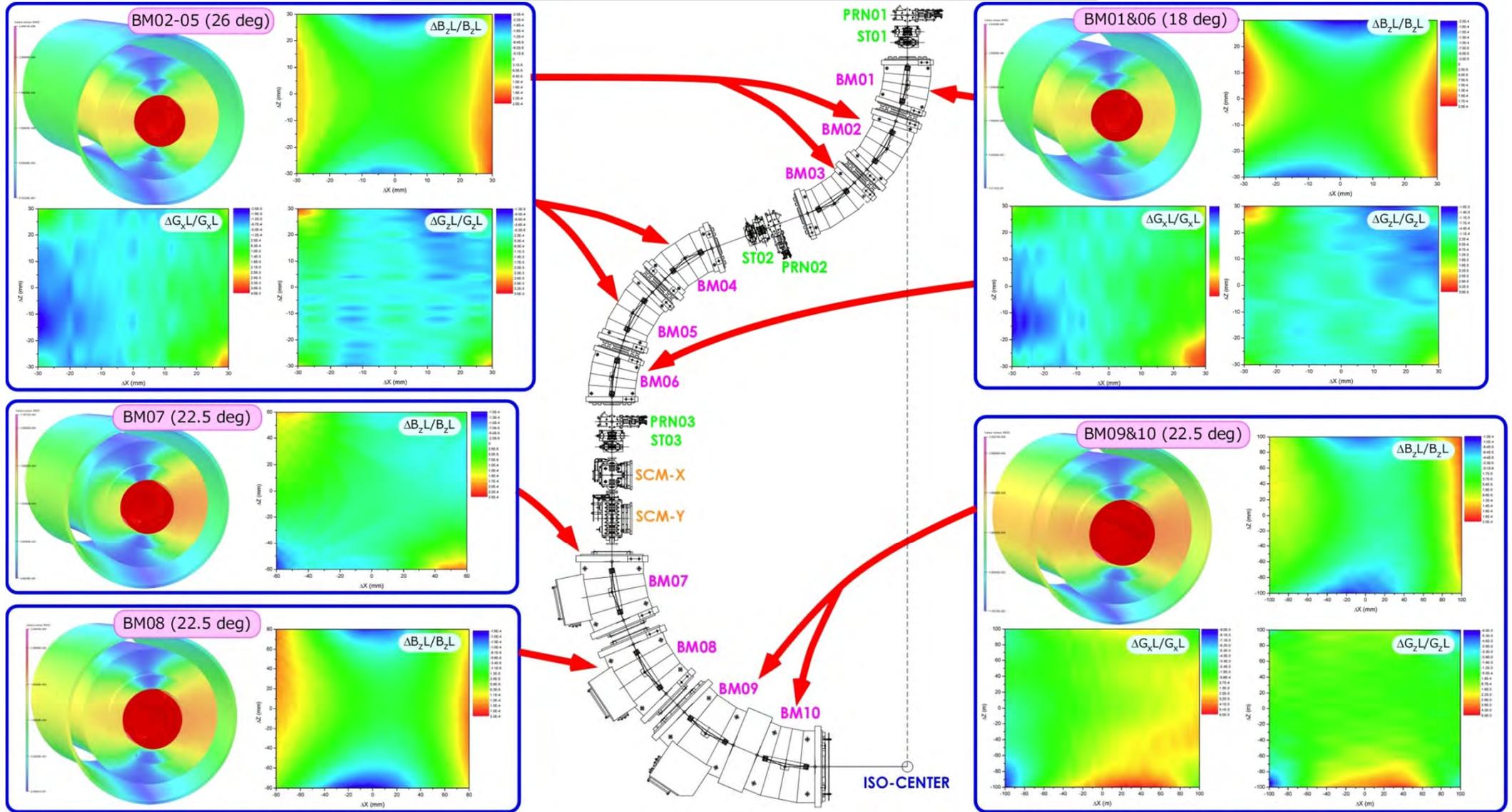


**$|\Delta BL/BL| < 1 \times 10^{-4}!$**

# 超伝導電磁石の設計



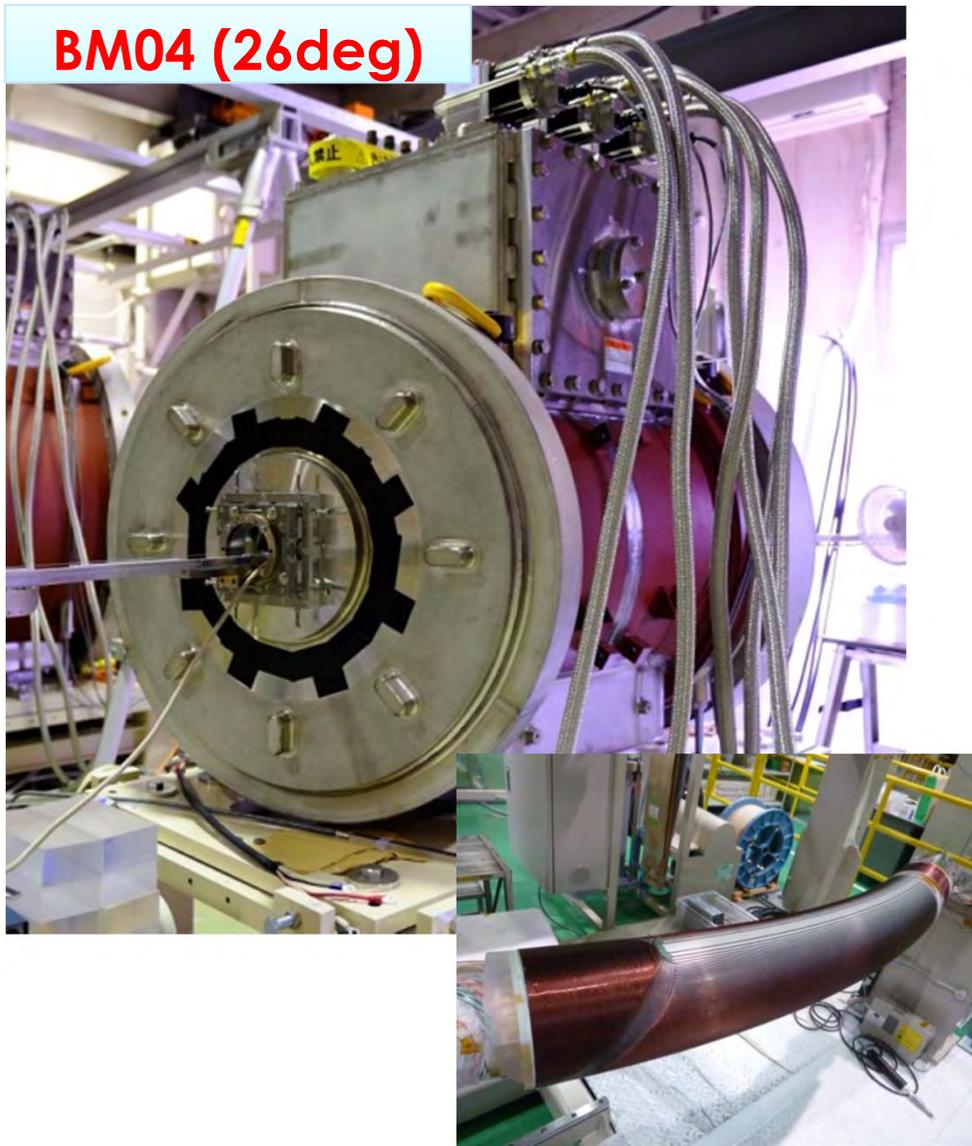
全超伝導電磁石はOpera-3dにより設計



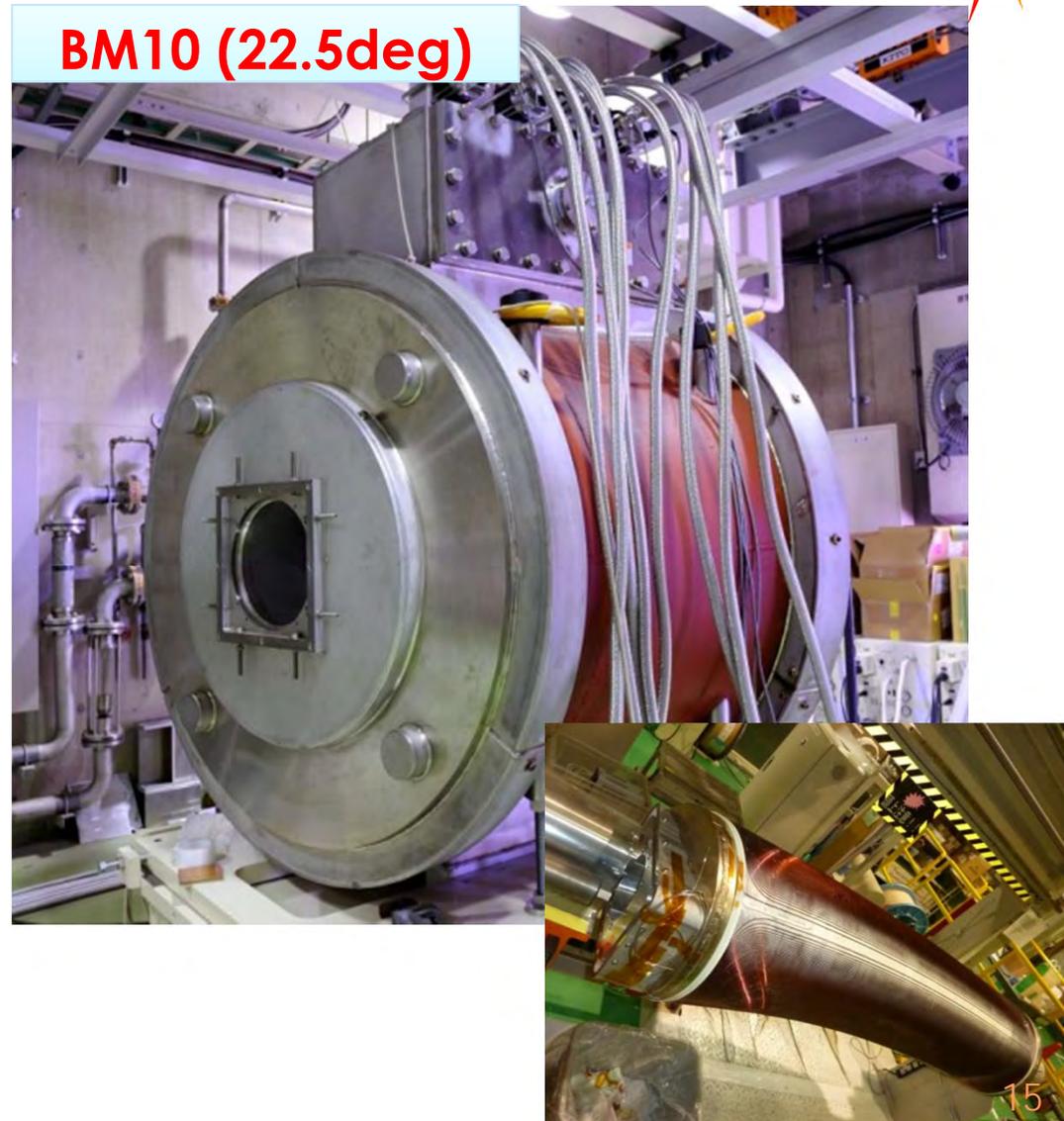
# 超伝導電磁石の製造



BM04 (26deg)



BM10 (22.5deg)

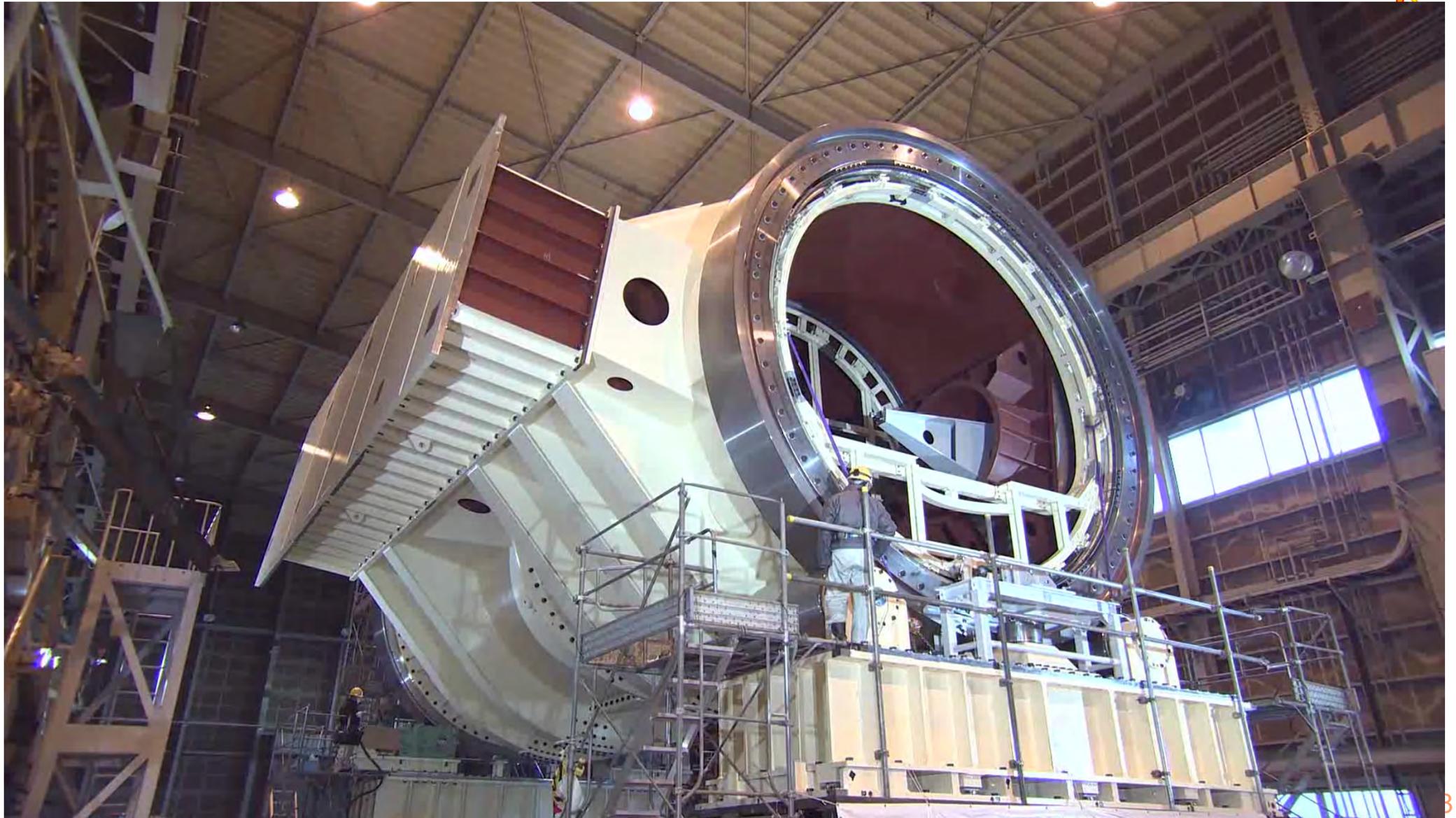


# 回転構造体の製造（東芝京浜事業所）





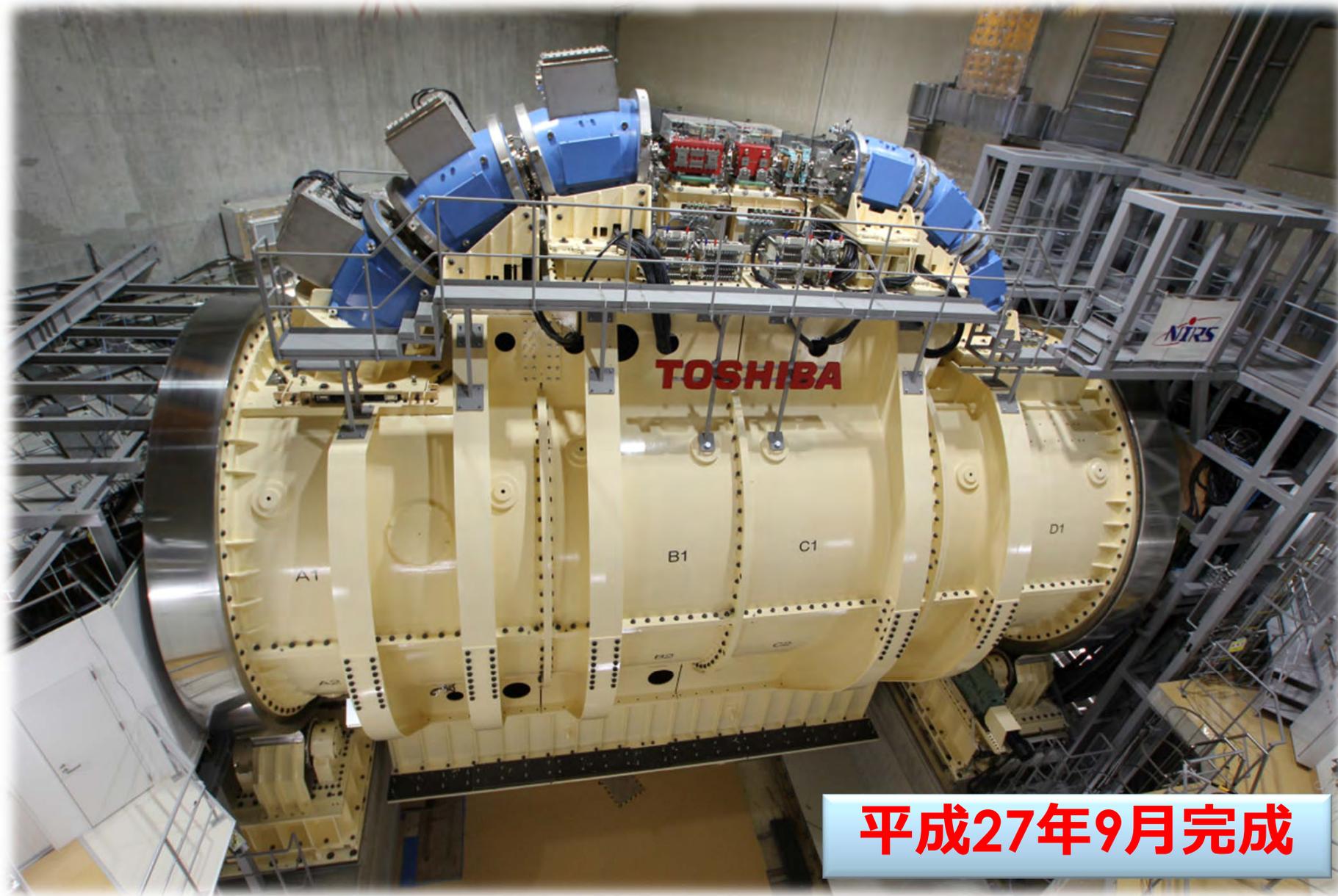
# 工場における回転試験



# 放医研への輸送



# 放医研にて組立

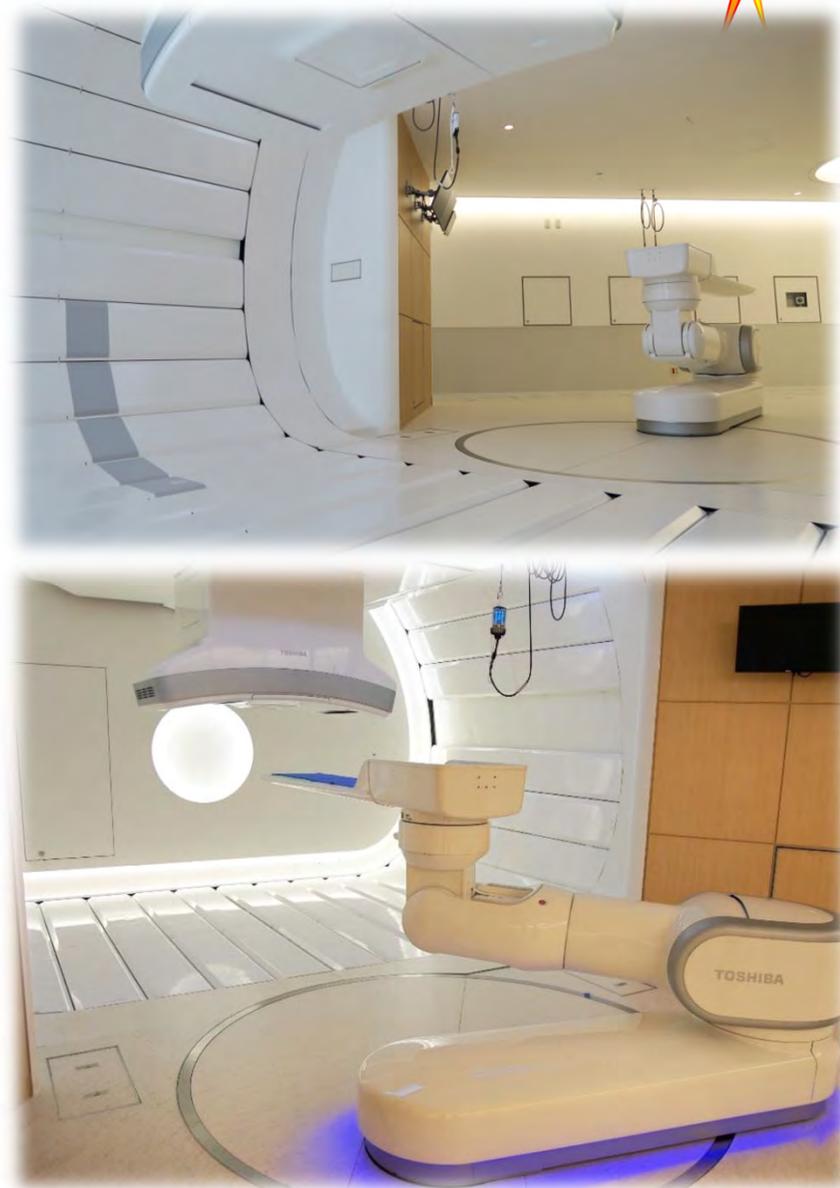


平成27年9月完成

# G治療室の整備状況

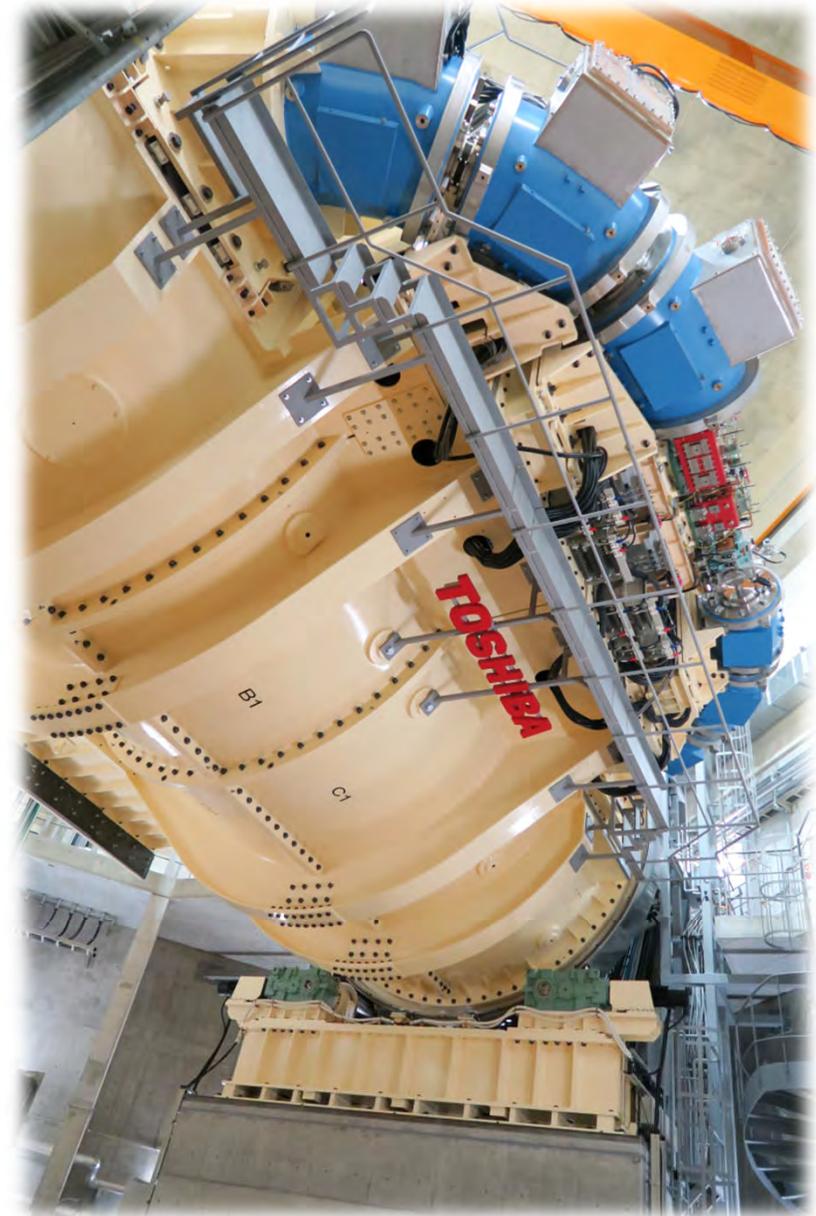
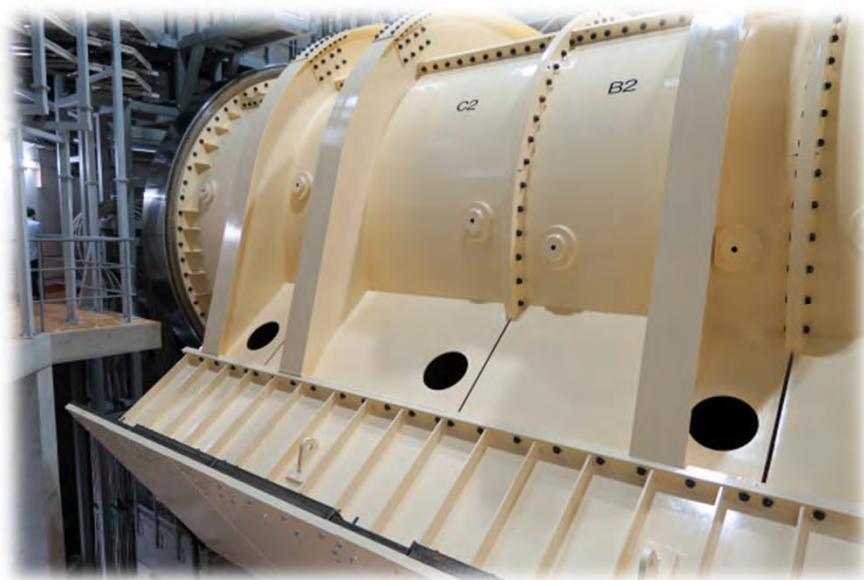


## 治療室G



# 超伝導回転ガントリー

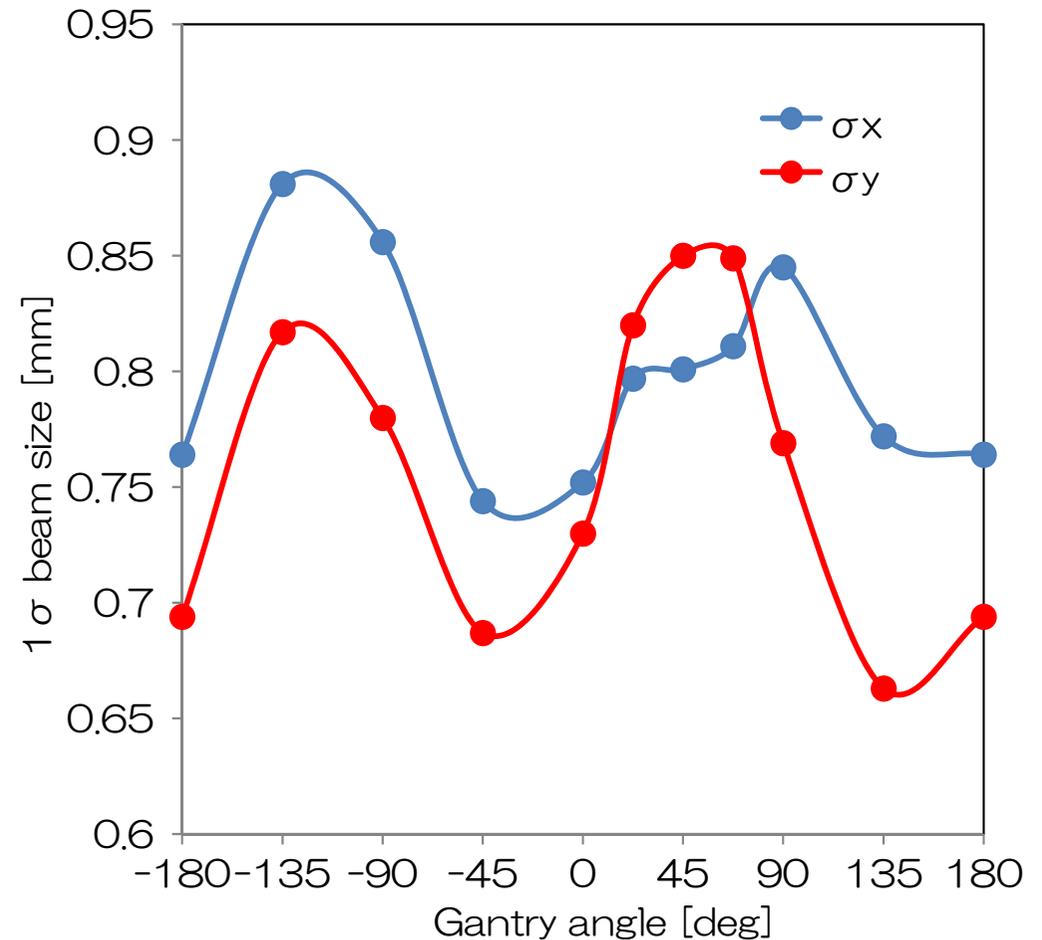
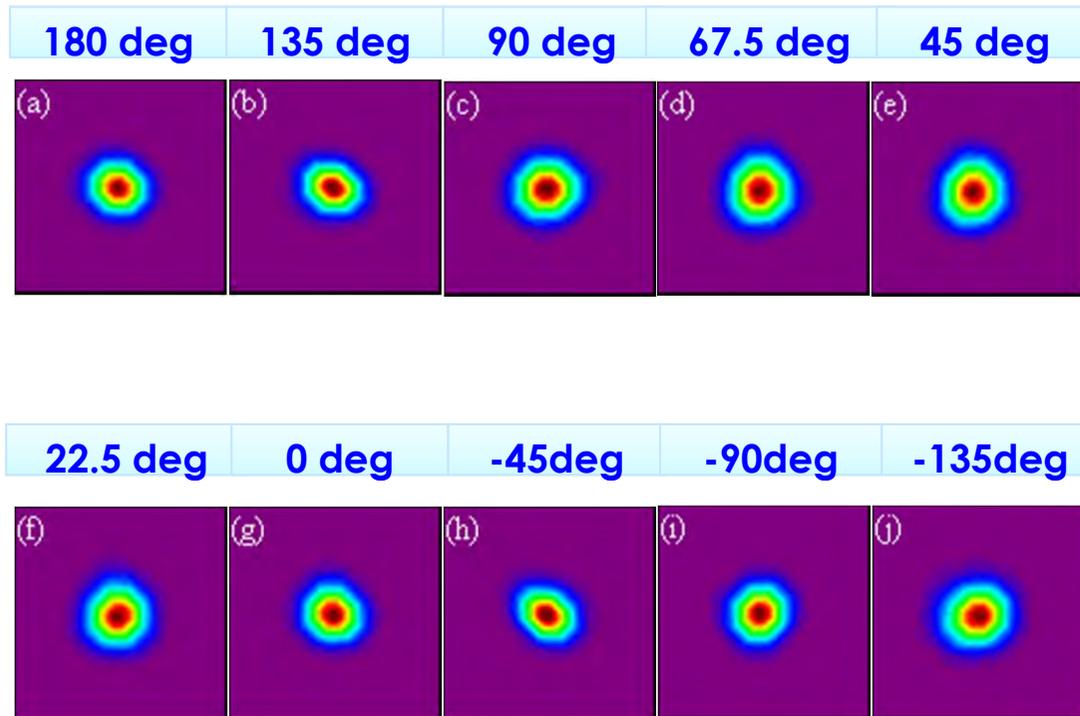




# ビームサイズ・形状の調整



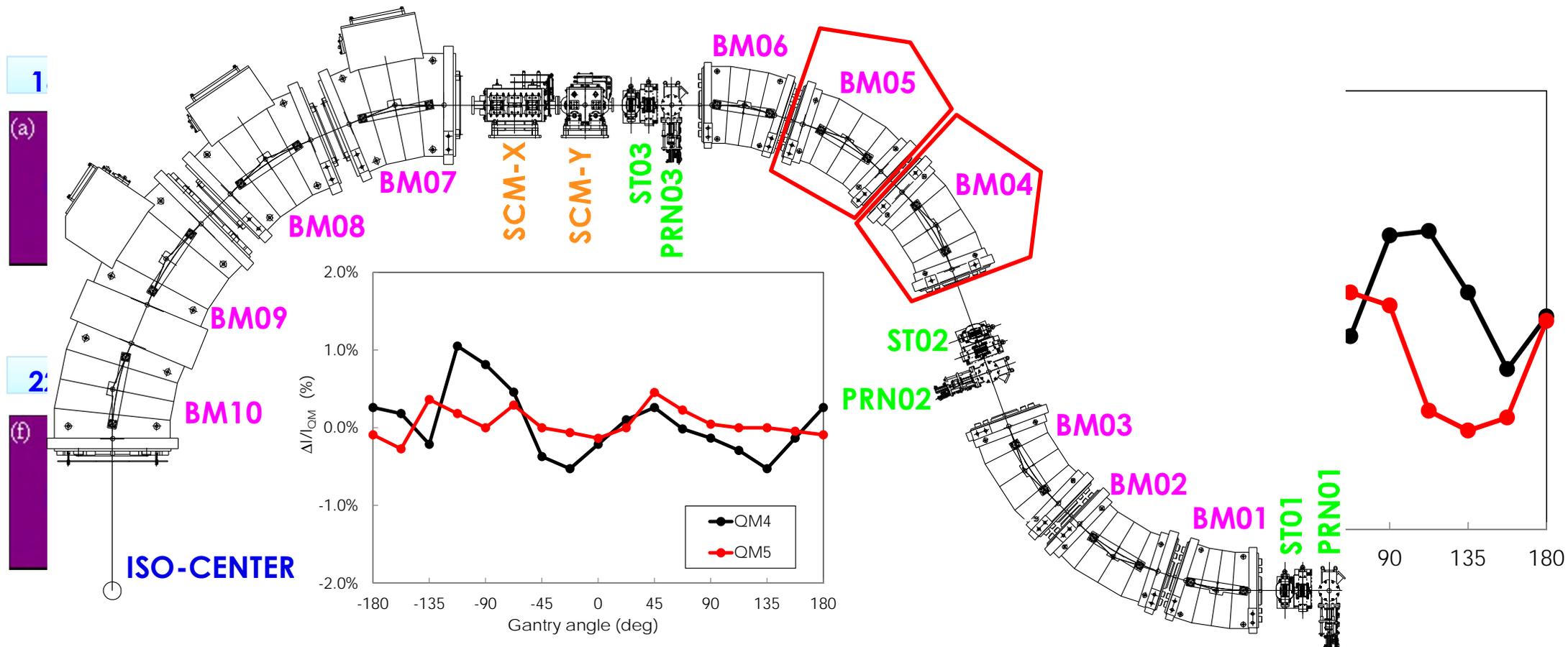
- ビームサイズ・形状の角度依存性
- ビームエネルギー：E=430 MeV/u



# ビーム形状の調整



- 超伝導四極の微調整 (BM04, BM05)
- 所期のスポット形状・サイズを得た



# 様々なエネルギーに対する調整

- 26種のエネルギーに対して、ビームスポット調整実施  
( $E=430\sim 55.6$  MeV/u)

- MOP126 松葉俊哉

「炭素線治療用超電導回転ガントリーのビームコミッショニング」

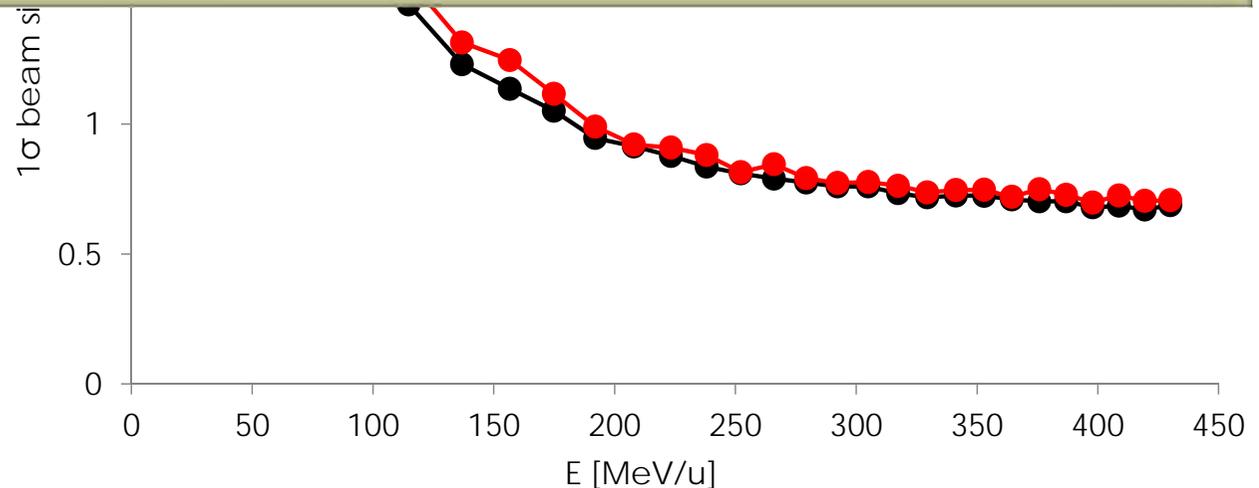
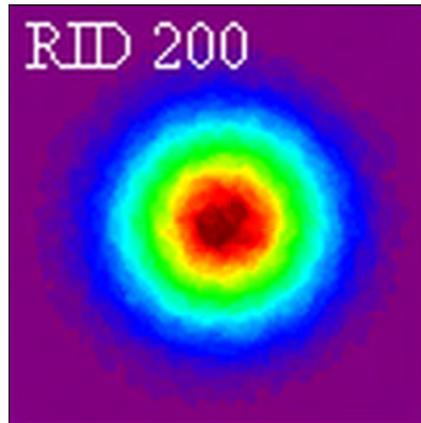
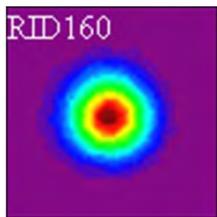
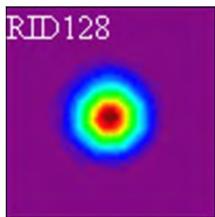
- MOP101 藤本哲也

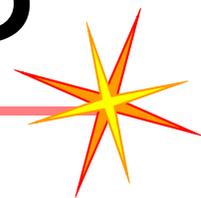
「散乱体を利用した遅い取り出しビームのエミッタンス整合」

238 MeV/u

174 MeV/u

55.6 MeV/u





- **重粒子線がん治療**
  - **良好な治療実績 ( $\geq 10,000$ 名)**
- **超伝導回転ガントリーの開発**
  - **機能結合型超伝導電磁石の開発**
  - **超伝導電磁石採用により大幅な小型化**
  - **ビーム調整試験を継続中**
  - **今秋からの治療利用を開始予定**





- 野田耕司, 白井敏之, 藤田敬, 松葉俊哉, 佐藤眞二, 古川卓司, 原洋介, 水島康太, 皿谷有一, 丹正亮平, 早乙女直也
- 藤本哲也, 荒井弘樹 (AEC)
- 折笠朝文, 高山茂貴, 長本義史, 松田晋也 [他多数]  
(東芝)
- 荻津透 (高工不研)
- 雨宮尚之 (京大工)
- 尾花哲浩(核融合研)