

J-PARC核破碎中性子源における非線形 ビーム光学を用いたビーム拡大システム の開発

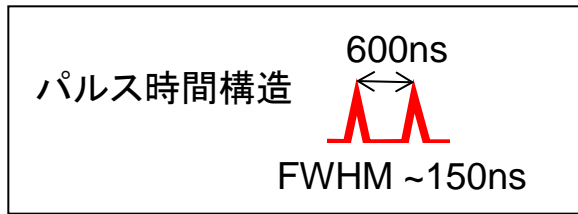
明午 伸一郎¹⁾, 大井 元貴¹⁾, 坏 淳¹⁾,
池崎 清美¹⁾, 藤森 寛²⁾

1) JAEA/ J-PARC, 2) KEK/J-PARC

- 背景
- 非線形ビーム光学による平坦化
- 八極電磁石の概要とインストール
- ビームプロファイルの結果
 - シミュレーション計算との比較

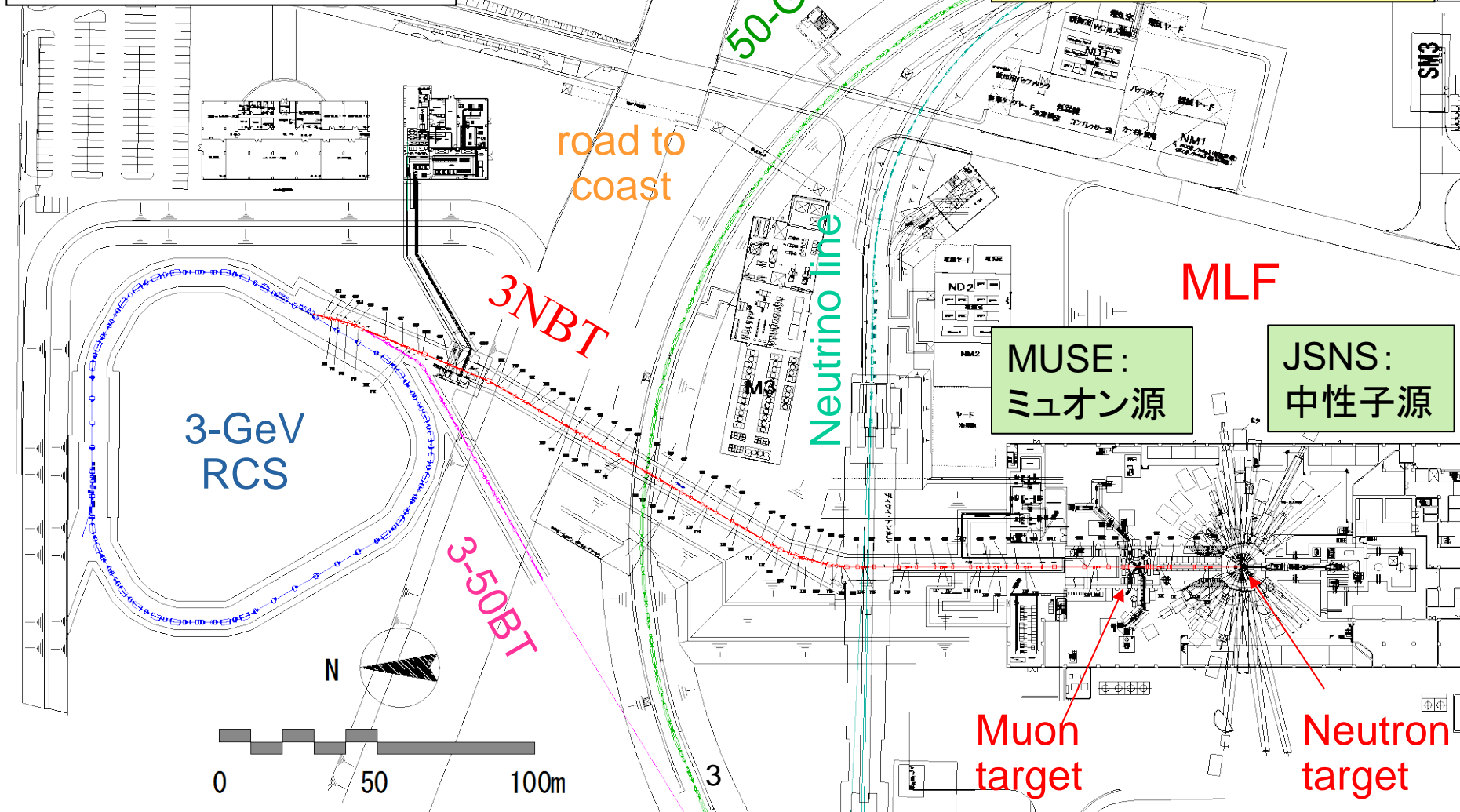
- まとめ

J-PARCと物質・生命科学実験施設(MLF)



Length of BT: 314m

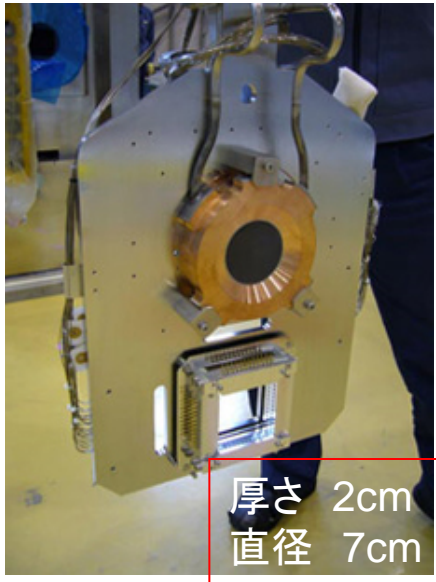
陽子エネルギー:	3GeV
ビーム出力:	1MW
繰り返し:	25Hz



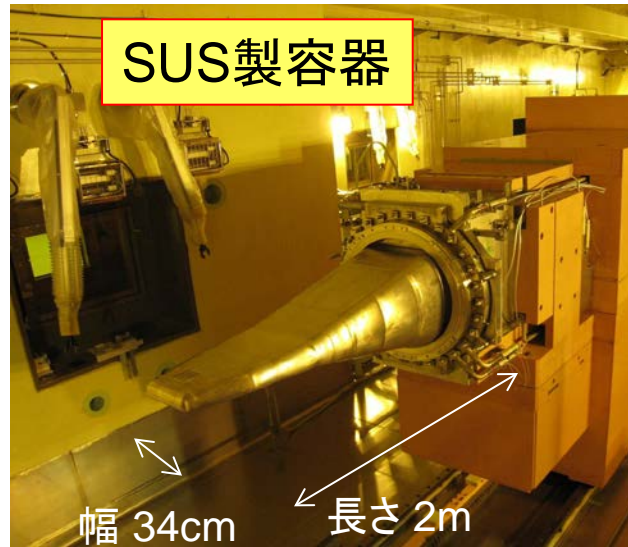
MLF内の2つのターゲット



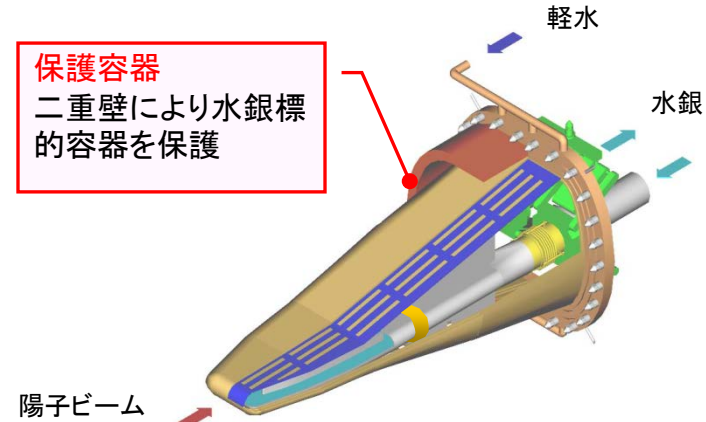
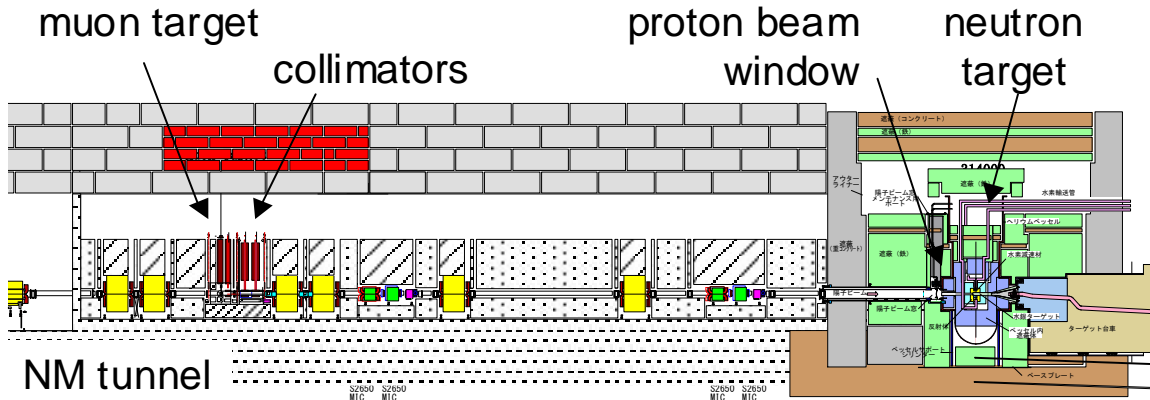
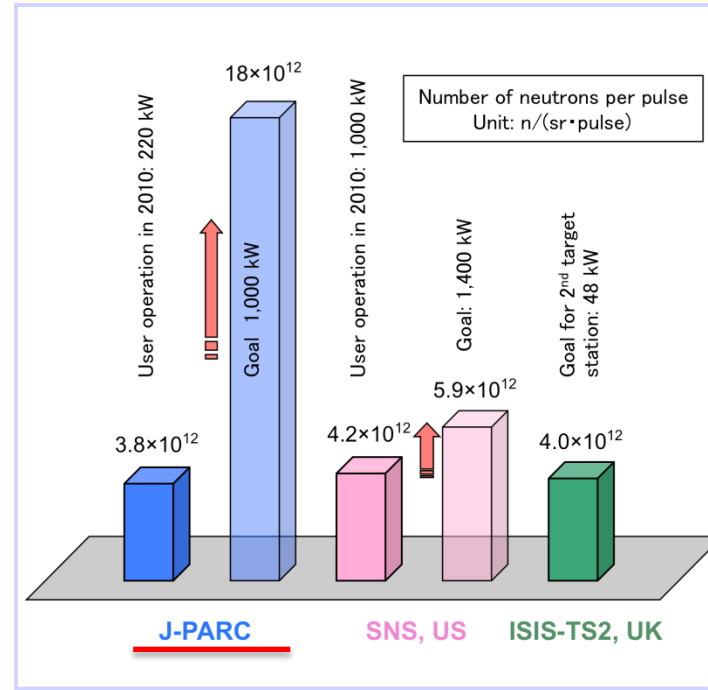
- ミュオン生成用
 - 炭素ターゲット
 - 世界最大強度



- 中性子生成用
 - 水銀ターゲット
 - 世界最大強度



中性子源の強度の比較



大強度ビーム運転における問題



大強度陽子ビーム(MW級)と人類との戦いの序章

- ターゲット容器に著しい損傷:
ビーム入射に伴うピッチング損傷
- ビームのピーク電流密度が重要
 - ターゲットのピッチング損傷
損傷 \propto ピーク⁴ (P4則)
 - ラスタリングでは意味が無い
損傷 \propto (全面積/静止時面積)³

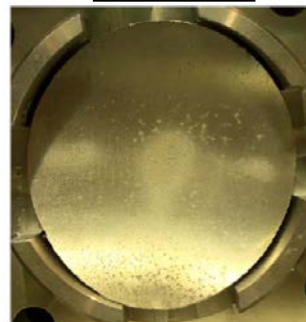
JSNS: 世界的に見て過酷な条件

- JSNS: 25Hz, シンクロトロン(RCS),
ミュオン生成標的 有り
- SNS(ORNL): 60Hz, ストレージリング,
ミュオン生成標的 無し

ピーク電流密度の減少は重要

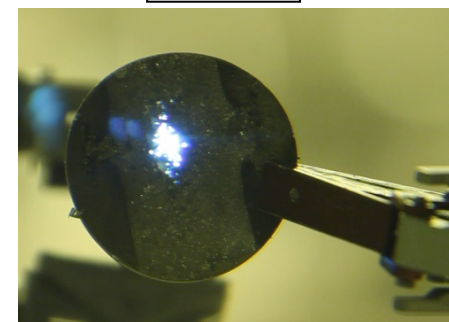
使用後のターゲット容器の状態

JSNS



僅かに損傷

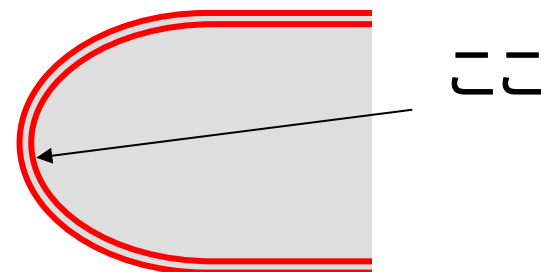
SNS



孔が貫通

“王”字状の損傷

※ 多重容器構造のため水銀は漏洩しない

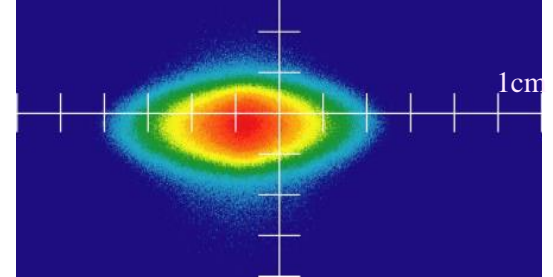


ターゲット容器模式図

線形オプティクスでのビーム拡大

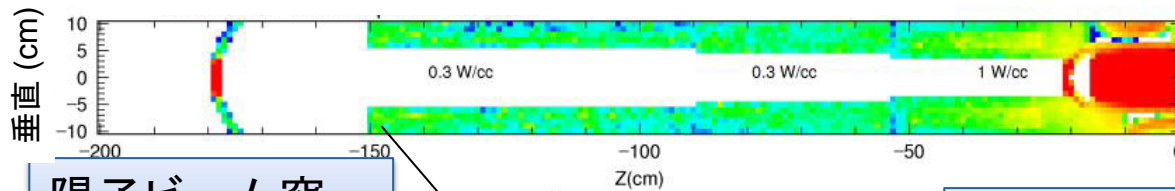
- RCSのビーム：位相空間でガウス分布
- ピーク密度の減少：ビームをターゲット上で拡大し密度を減少させる

2Dプロフィール測定結果



発熱密度の計算：陽子ビーム窓の散乱

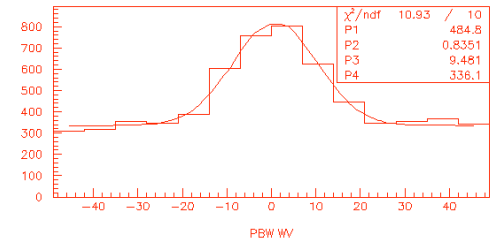
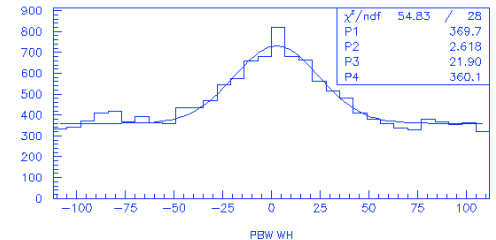
ビーム条件と無関係に1 W/ccの発熱



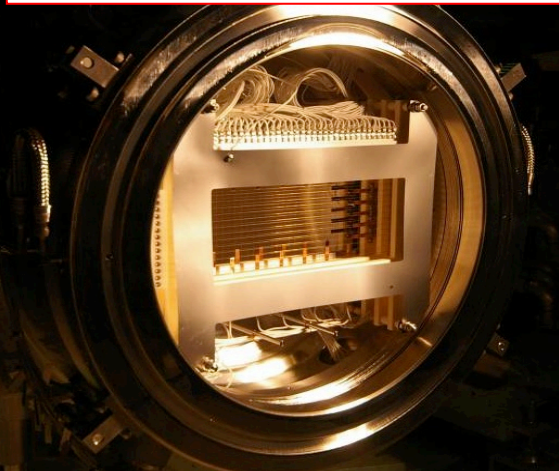
陽子ビーム窓
(Al 5mm-t)

水銀ターゲット

MWPMによる測定



プロフィールモニタ: MWPM



熱電対



周辺部発熱密度 <math>< 1\text{W/cc}</math>

$\sigma_{h,v} < 37\text{mm}, 17\text{mm}</math>$

14 J/cc/pulse @1MWが下限

SNS(1MW)の~2倍

分布形状を変える必要がある

ビーム平坦化技術の開発



- ピーク電流密度減少のため非線形ビーム光学によるビーム平坦化技術を開発(八極電磁石を使用)

製作した八極電磁石

SAP066: 藤森氏 等

原理: 裾野のビームを高次の磁場で中心に畳み込む

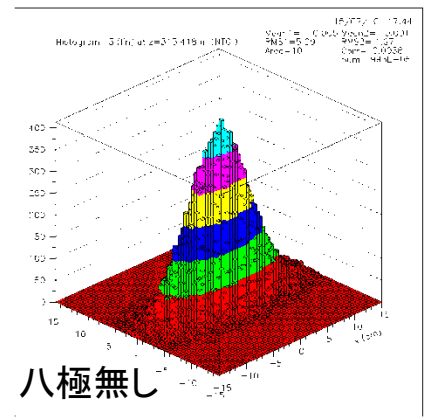
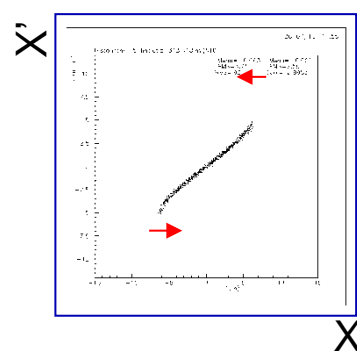
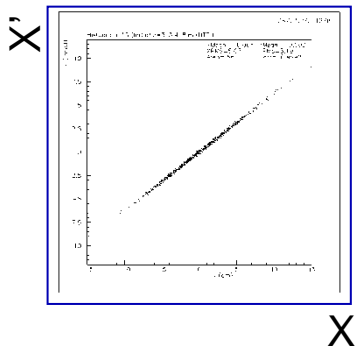
ターゲット上での2Dプロフィール



位相空間

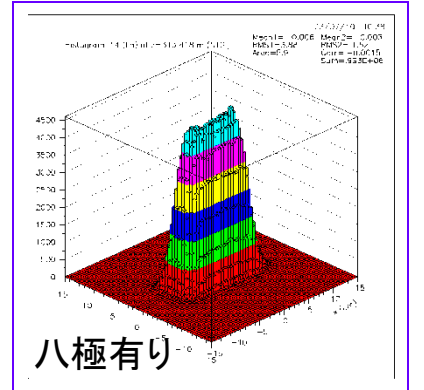
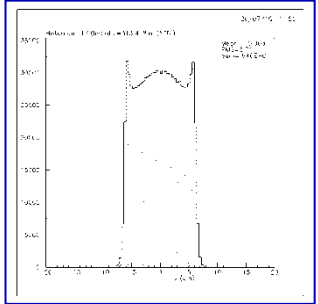
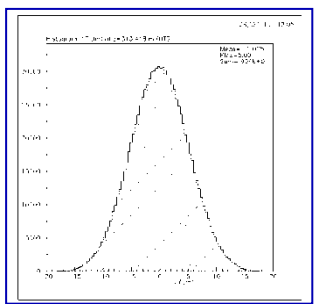
線形

非線形



八極無し

空間分布(プロフィール)



八極有り

八極電磁石(800T/m³)
重量: 6 t, 両極性
O3060(幅1.2m,磁極長0.6m)

非線形ビーム光学



- 線形光学(既存)から変更

八極電磁石(OCT1,2)上で $\beta \sim 200\text{m}$ に増加(ビーム拡大)

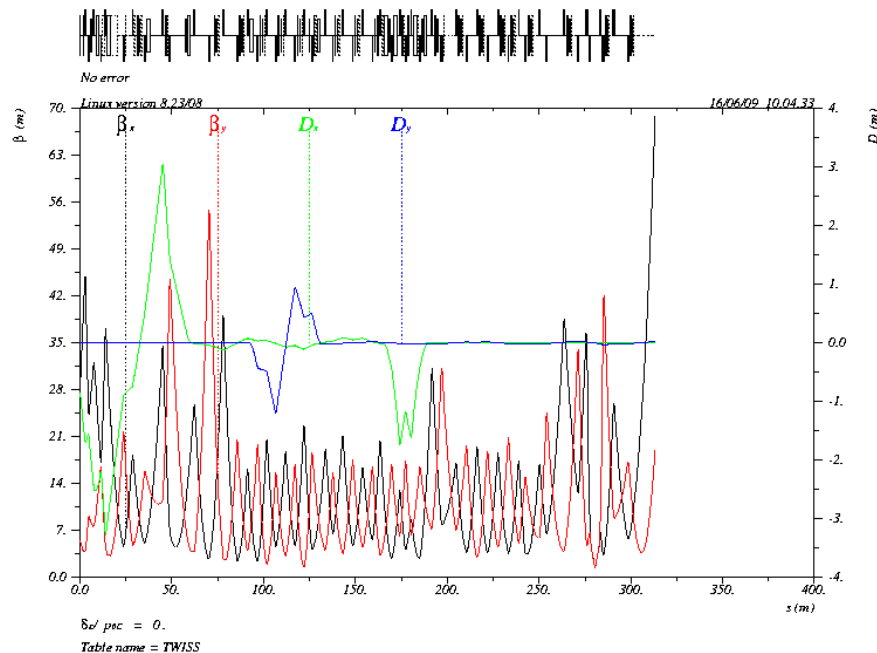
必要な八極磁場: $K_{\text{oct}} = 1/\varepsilon\beta^2 \tan\phi$

ε : RMS エミッタンス, ϕ : 進行位相差(八極・ターゲット間)

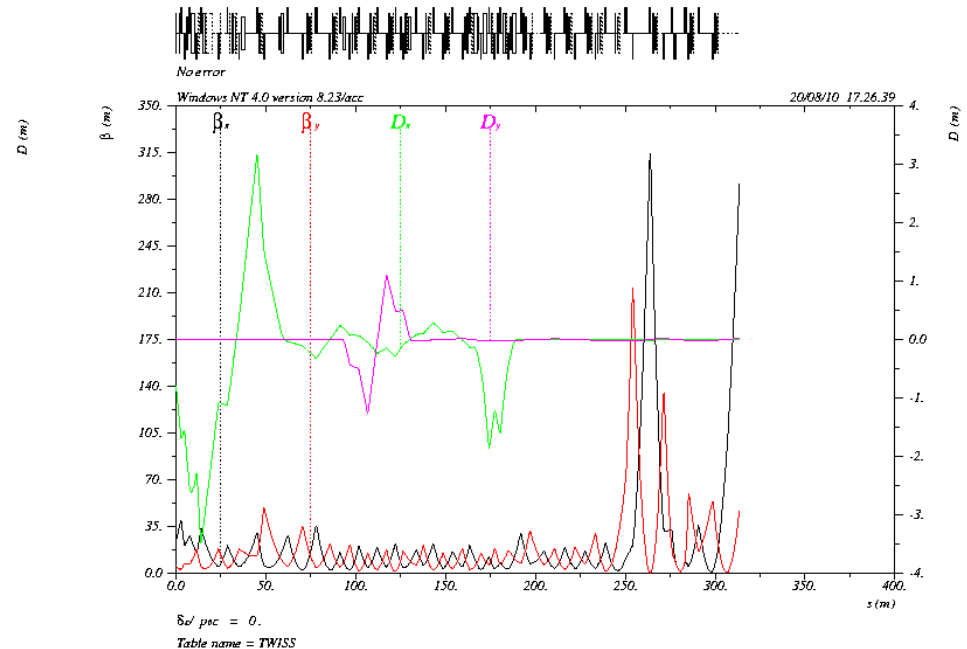
- ビームアクセプタンス(横方向): $324\pi\text{mmmrad} \Rightarrow$ 約 $200\pi\text{mmmrad}$

- 0.3 MWの実運転では特に大きなビームロスや放射化は無し
- シミュレーション計算では1 MW運転時も大きな損失無し

(既存) 線形光学



非線形ビーム光学

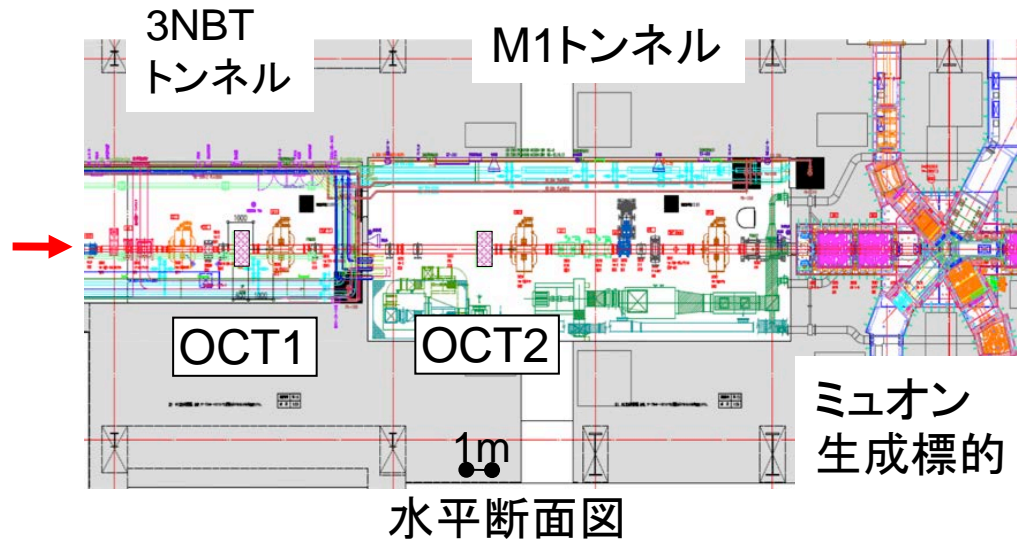


八極電磁石設置

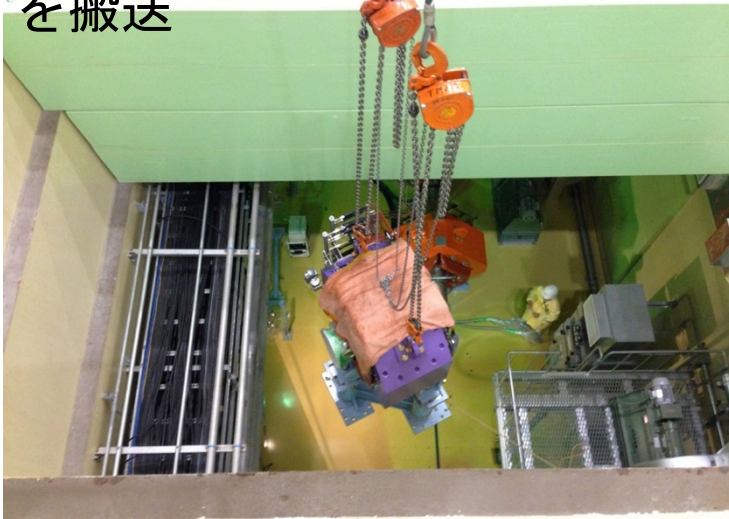


● 八極電磁石設置(昨年7月)

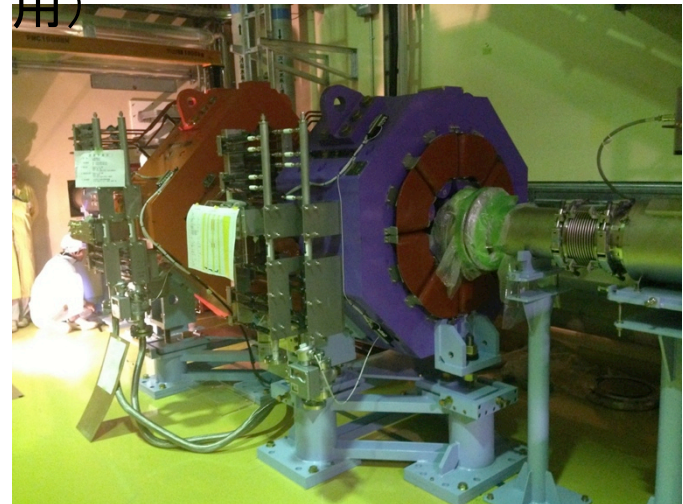
- OCT1,OCT2を3NBT及びM1トンネルに設置
- ビーム位置モニタ(BPM)をOCT1,2に設置
- 新規に補正電磁石を設置



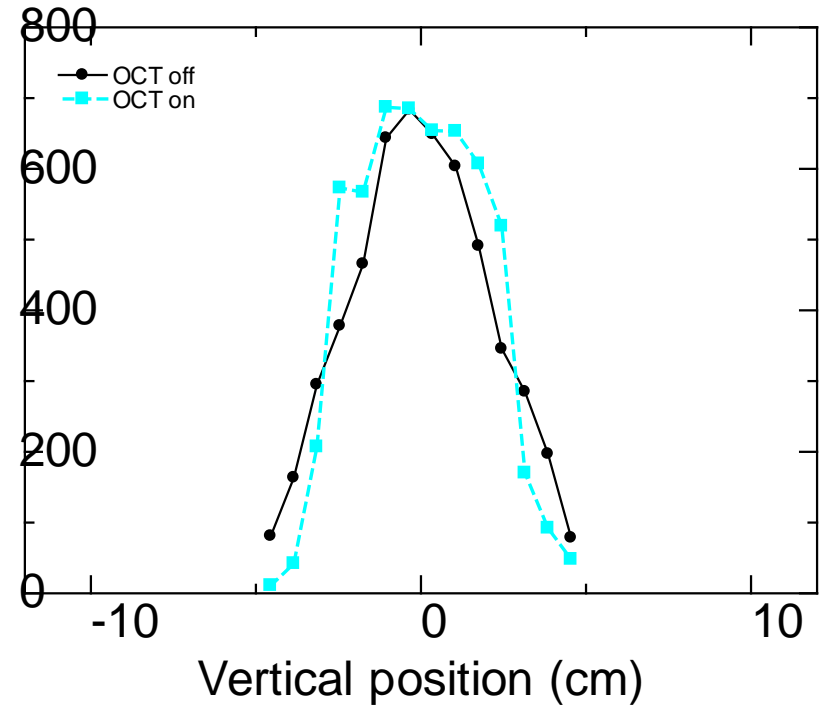
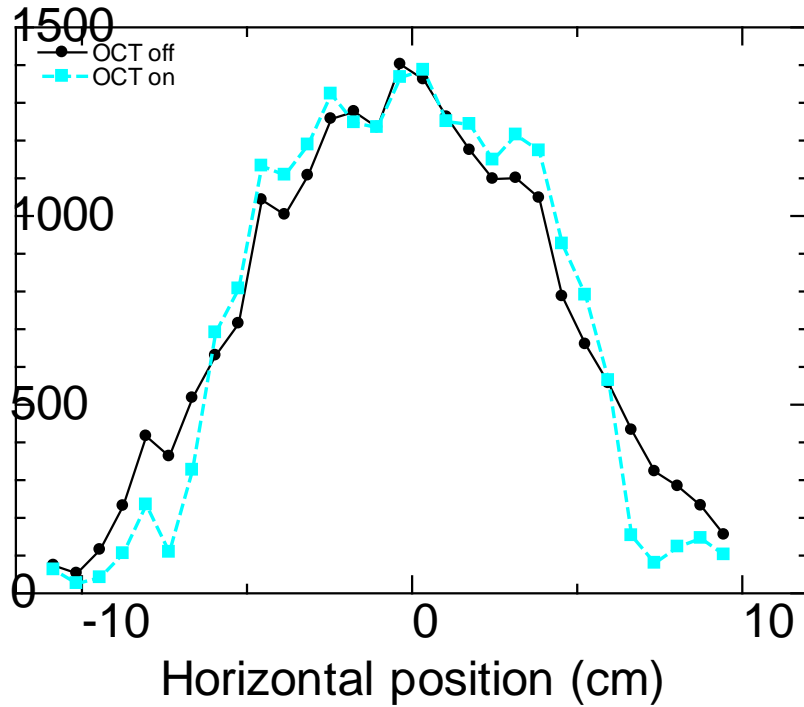
遮へいブロック(M1トンネル)を開放しOCT2(水平用)を搬送



3NBTトンネルの最下流部に設置したOCT1(垂直用)



八極励磁による効果



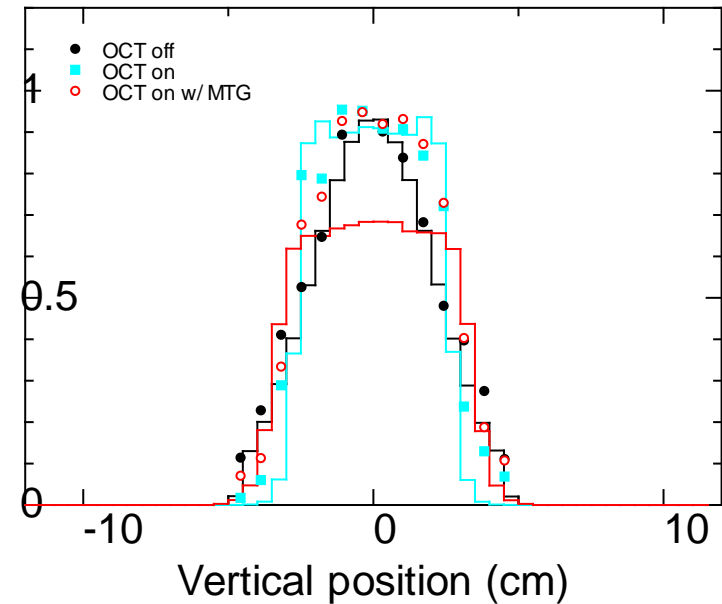
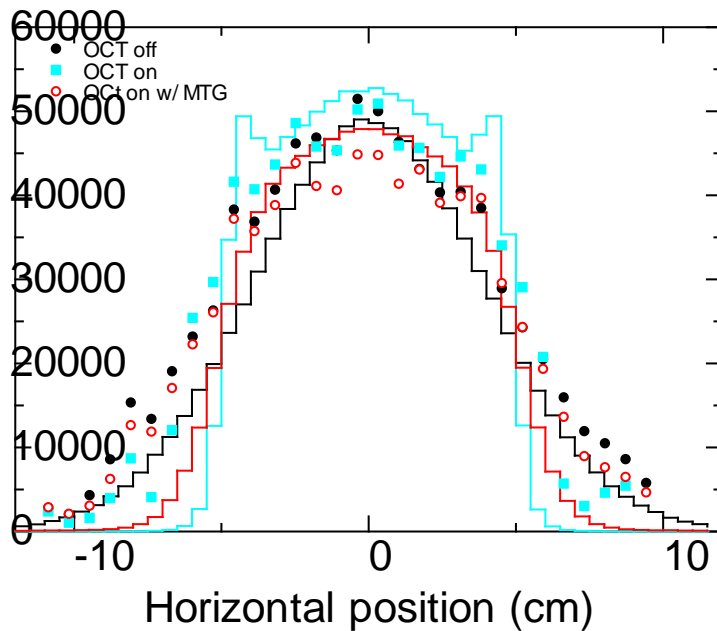
- 八極励磁により分布が平坦になることを確認

計算との比較



計算 (DECAY-TURTLE PSI版 実線) との比較

- 八極励磁無しの場合に一致するように縦軸を規格化
- ミュオンターゲット有り+八極励磁有りの結果も示す

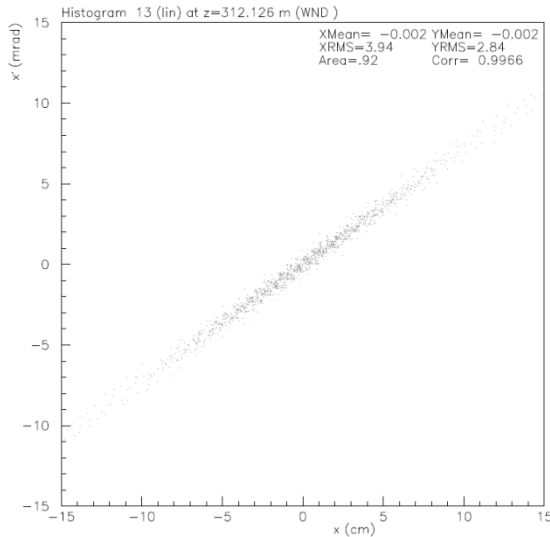


- 八極励磁の結果は実験の分布と良い一致を示す。
- ミュオンターゲット有り(ビームに照射)場合も再びガウス分布に近づくものの実験は計算より影響は少ない

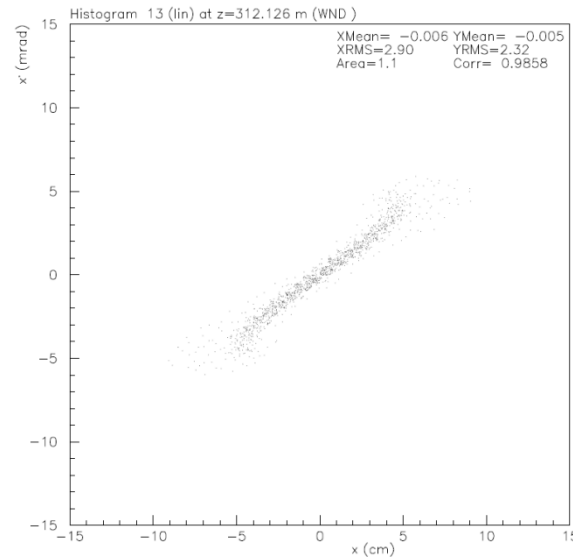
位相空間分布とプロファイル



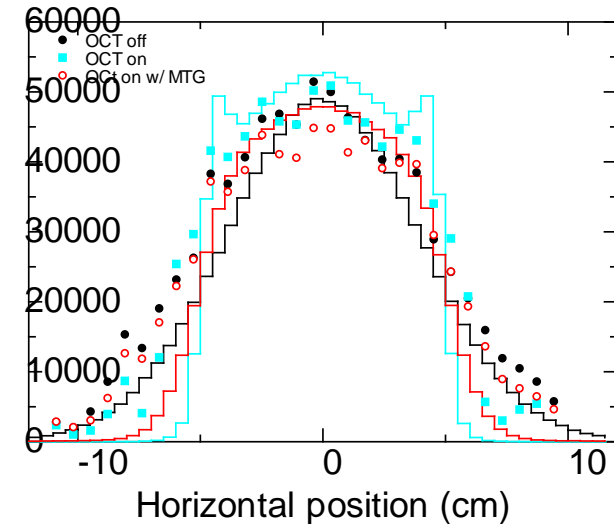
八極励磁無し



八極励磁有り



プロファイル



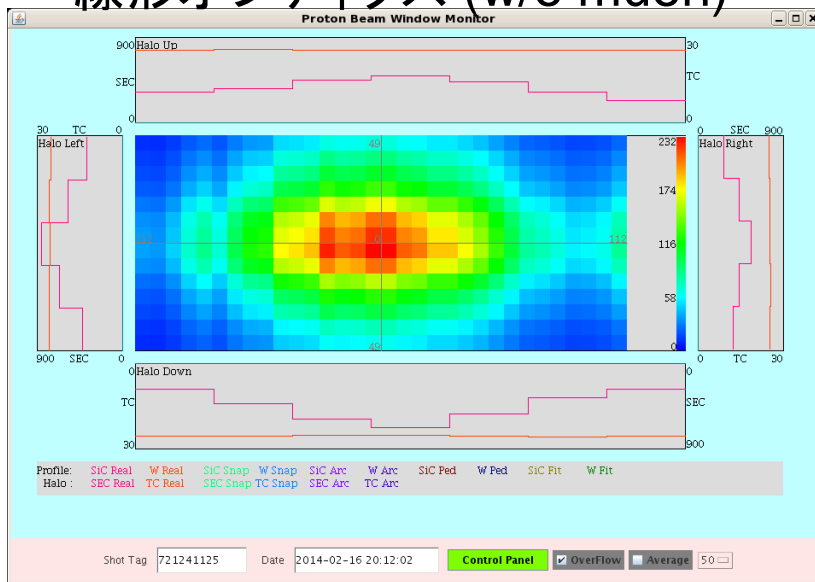
ピークの挙動が実験と計算で異なる

- 計算： 八極励磁により分布を中心に曲げたために中心のピークは上昇
- 実験： 八極励磁に伴いピークが変更しなかったのは、実際のハローの強度は計算より少ないことが考えられる

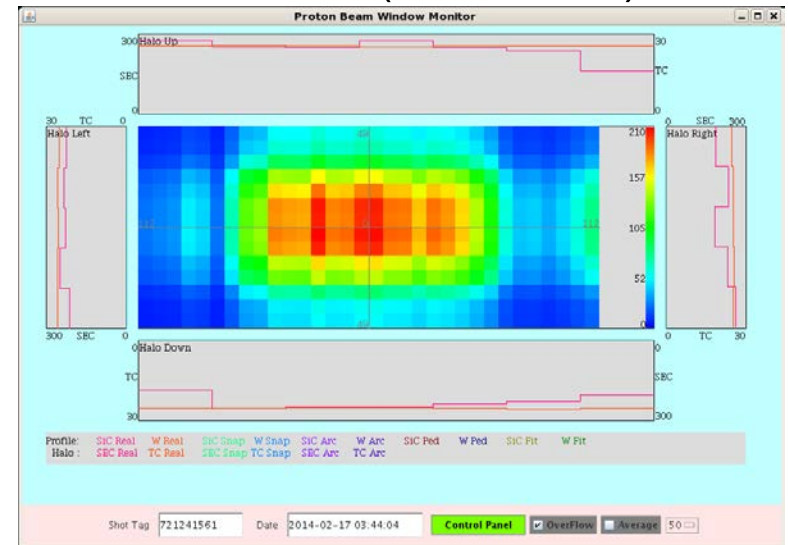
ビームハローへの影響

- 八極励磁によりビームハローが大幅に減少
 - 計算通りに周辺部のビームが収斂
 - 約1/3倍となる。

線形オプティクス (w/o muon)



八極励磁 (w/o muon)

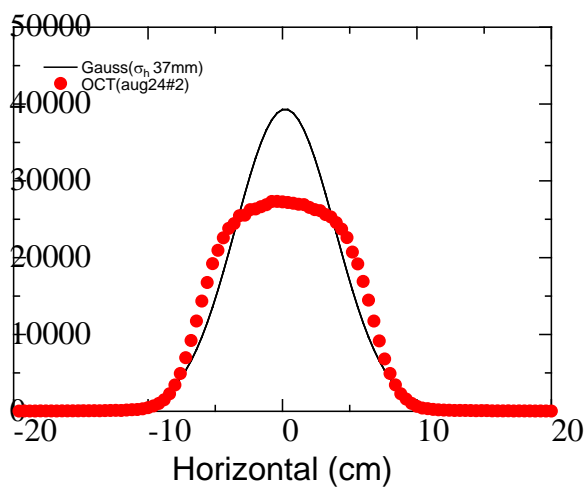


- 周辺部の発熱密度も1/3となる

1MWにおけるプロファイルの予想

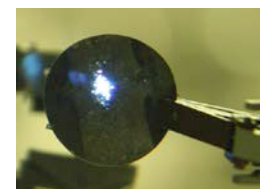
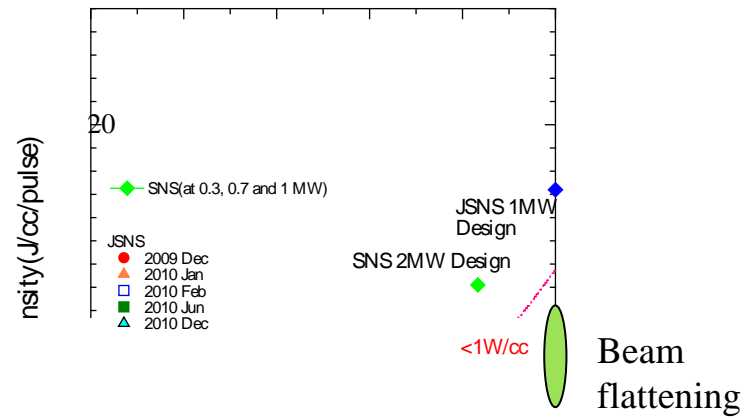
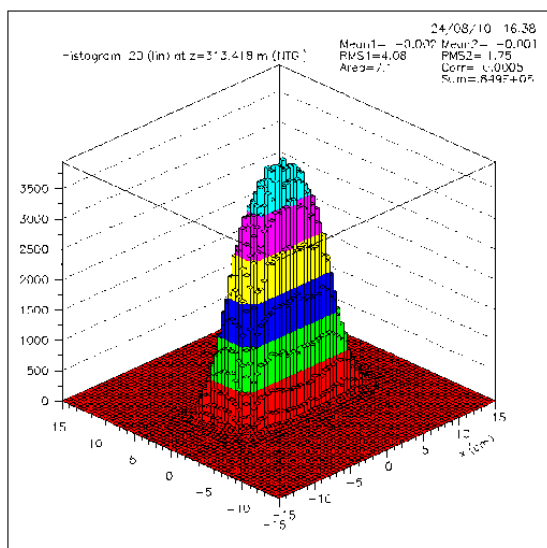
線形光学による限界までビームを拡大した分布との比較

ピーク電流密度: $5.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($1.3 \times 10^{12} / \text{cm}^2 / \text{pulse}$)
 ピーク発熱密度: $9.4\text{J}/\text{cc}/\text{pulse}$



- 40%のピーク低減 ⇒
 ピッチング損傷90%低減
- ミュオン標的上の散乱の影響を計算は過大に評価しているので実際の分布はさらに平坦

ピーク発熱密度とビーム出力(25Hz換算)



Beam power at 25 Hz (kW)

まとめ



- 八極電磁石を用いたオプティクス設計方法を開発
 - 設計計算通り周辺部のビームを高次の磁場で収斂していることを確認
 - ピーク低減(設計値の40%)を達成できる見込み
⇒ ピッチング損傷を90%削減できる見込み
 - 中性子ターゲットステーションでの放射線量低下
 - MW級のハドロン加速器では世界最初の試み
 - 10月にはゴールとなる1MWの試験を実施予定
- 今後の課題
 - ミュオンターゲット上でのクーロン散乱の改良
 - 二次元オンライン型プロフィールモニタの開発