

1MW大強度核破砕中性子源での ビーム平坦化技術開発

明午 伸一郎¹⁾, 大井 元貴¹⁾, 坪 淳¹⁾,
池崎 清美¹⁾, 池崎 清美¹⁾, 川崎 智之¹⁾, 西川 雅章¹⁾
福田 昌平¹⁾, 藤森 寛²⁾

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

● はじめに

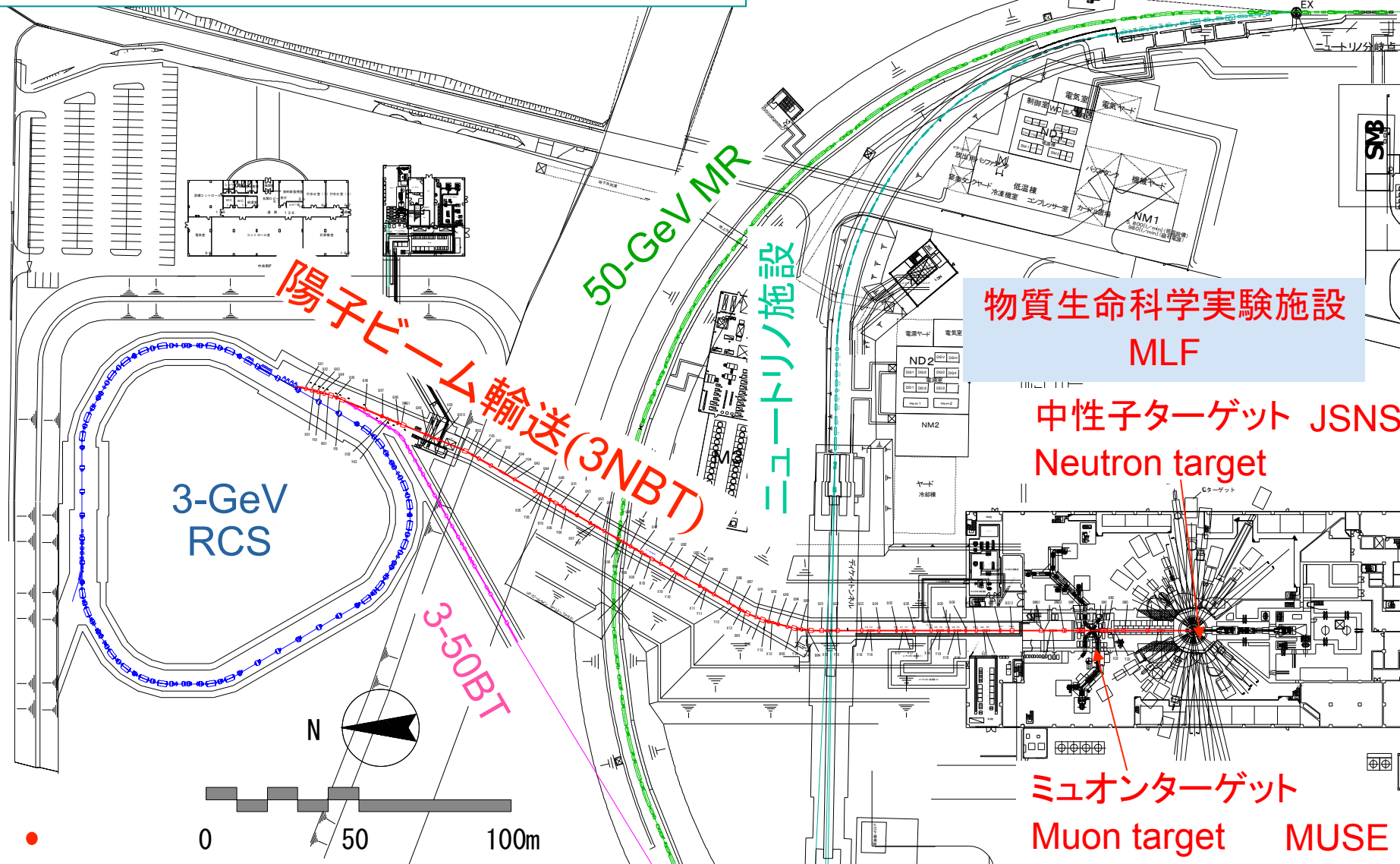
- J-PARC核破砕中性子源とミュオン源
- ビーム輸送施設 3NBT

● 非線形オプティクスを用いたビーム平坦化技術開発

- SADを用いたビーム調整ツールの開発
- 0.8MWビームを用いた実験
- ビーム運転の現状・今後

陽子運動エネルギー(Proton kinetic energy): 3 GeV
 ビーム出力(Beam power): 1 MW
 ビーム電流(Beam current): 333 μ A
 8.3x10¹³ p
 繰返し(Repetition): 25Hz

全長(Total length) 314 m
世界最長のビーム輸送施設(1MWクラス)
 Longest beam transport for MW class
 accelerator facilities in the world



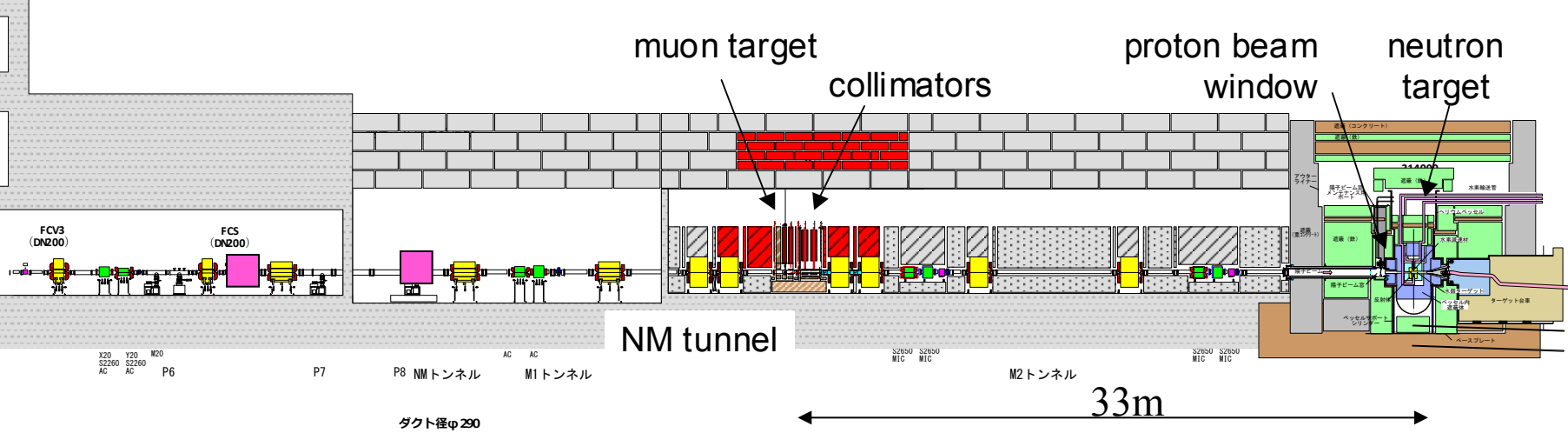
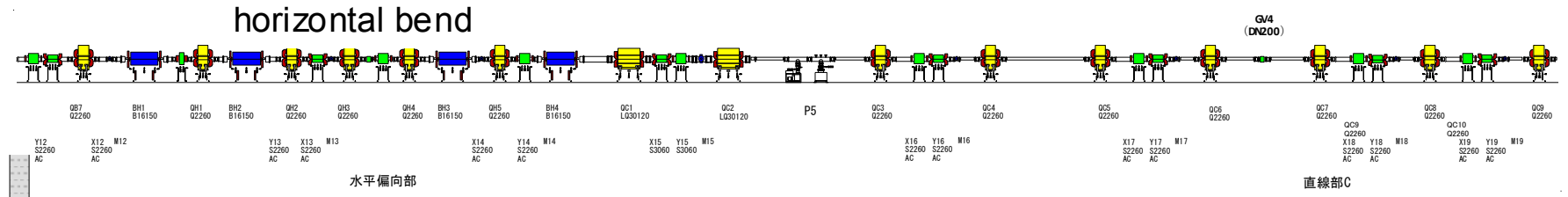
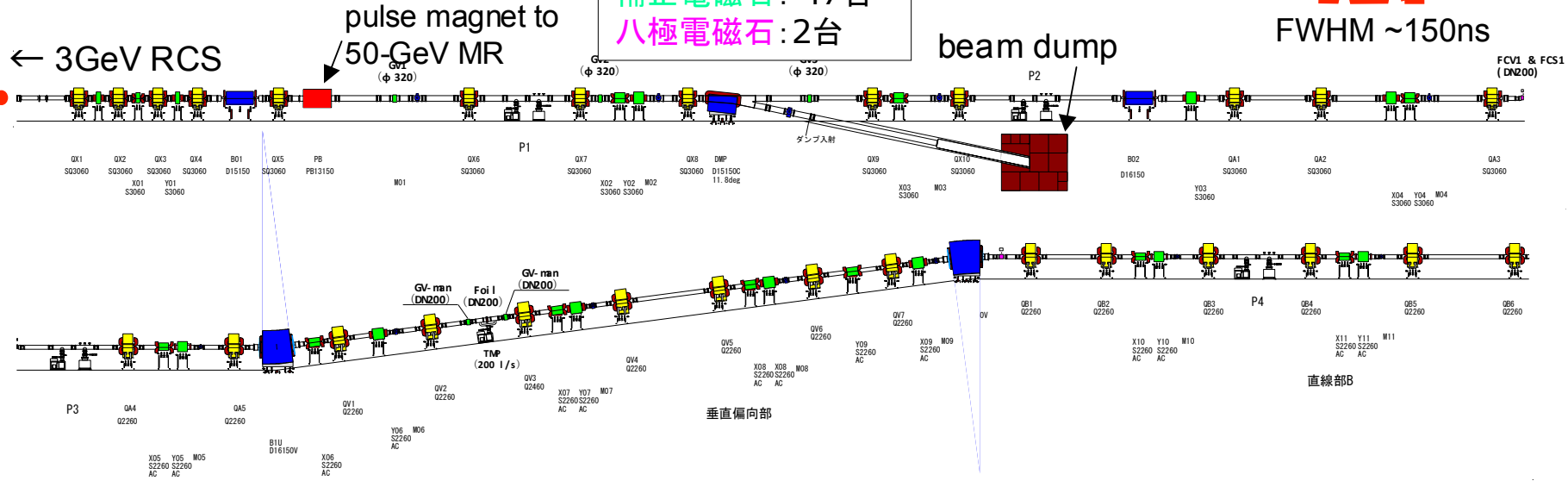
全長 314m

偏向電磁石: 9台
四極電磁石: 54台
補正電磁石: 47台
八極電磁石: 2台

パルス時間構造



FWHM ~150ns



MLFの2つのターゲット

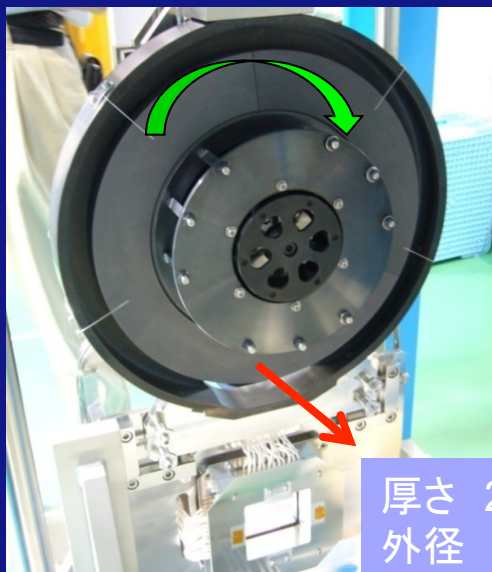
● ミュオン生成用ターゲット

- グラファイト
- 世界最大強度

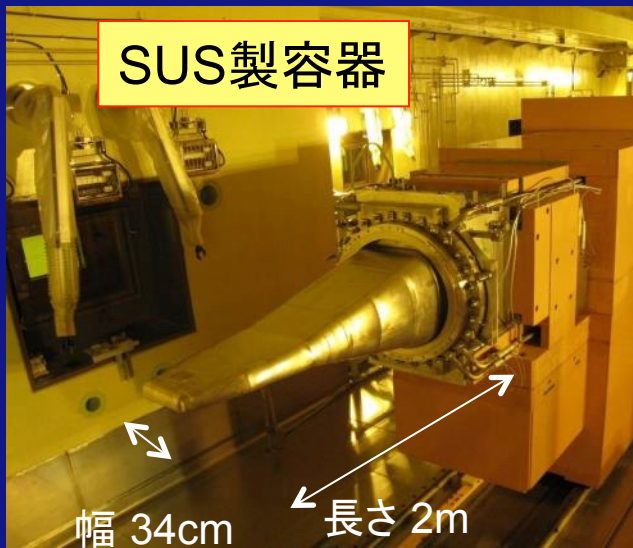
● 中性子生成用ターゲット

- 水銀ターゲット(陽子の飛程以上の長さ)

世界最大強度の
パルス中性子

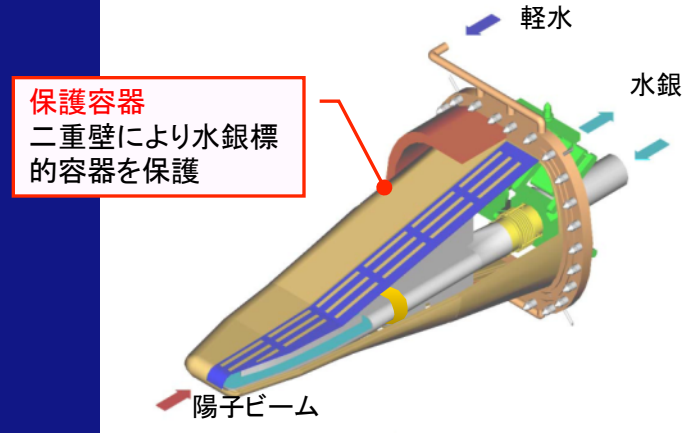
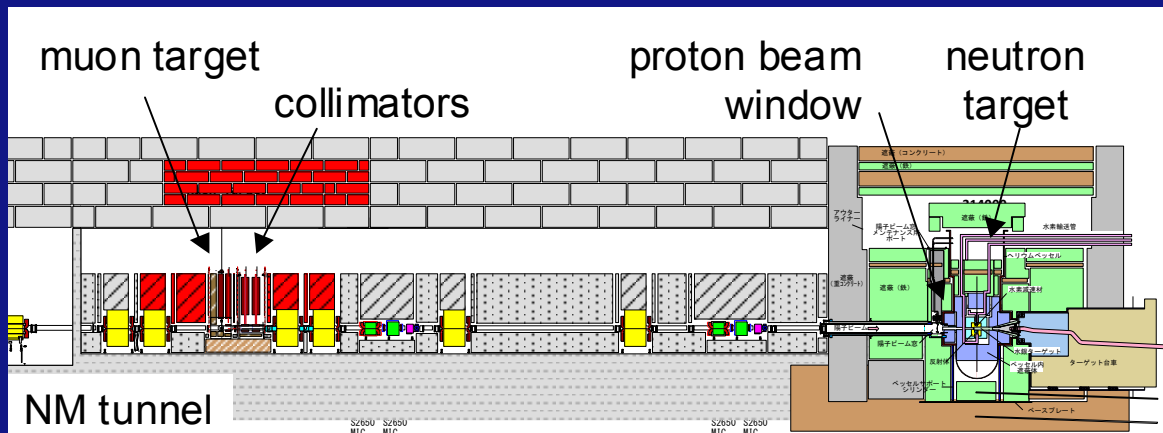
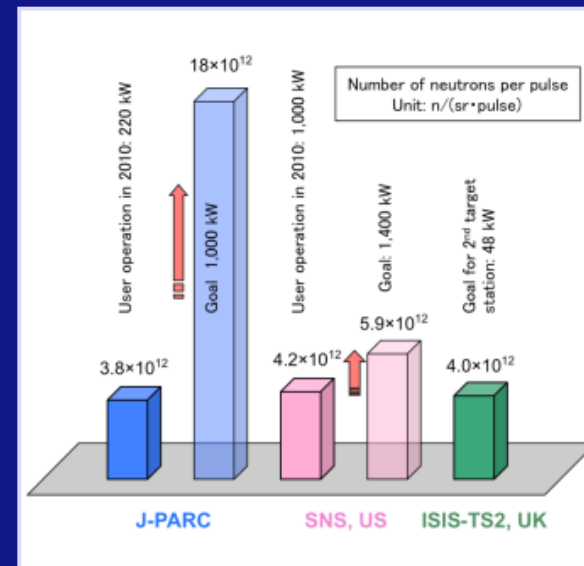


厚さ 2cm
外径 $\Phi 33\text{cm}$



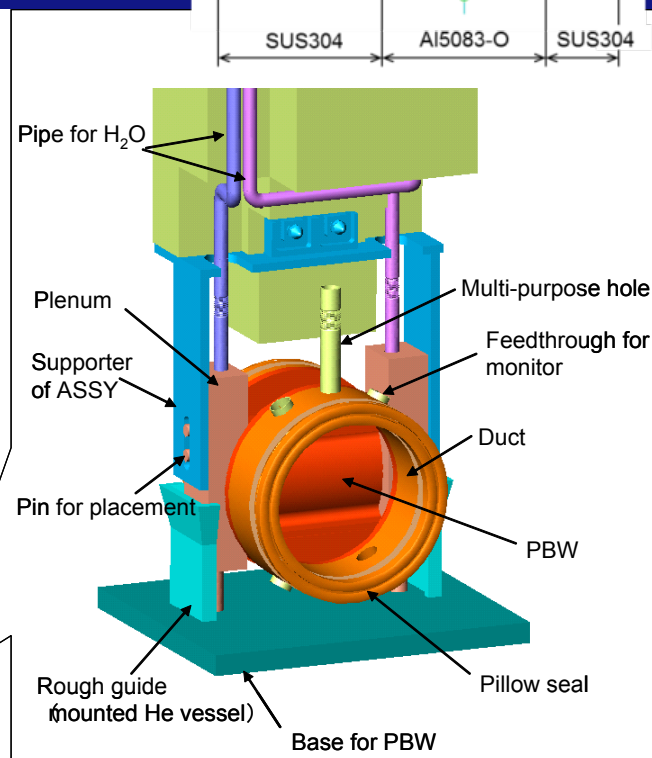
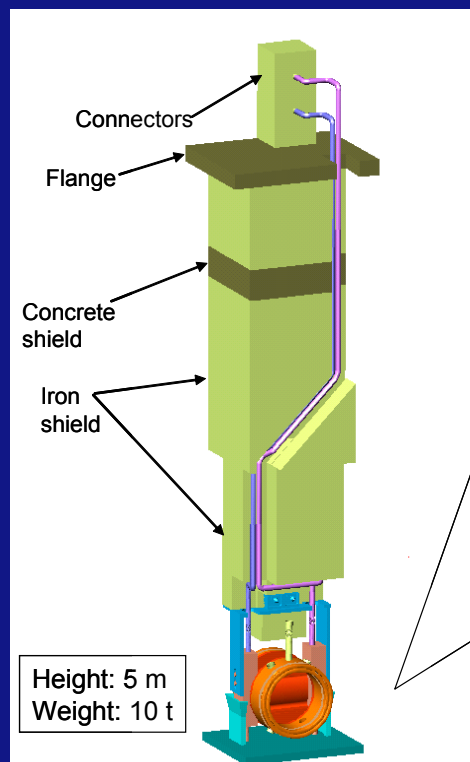
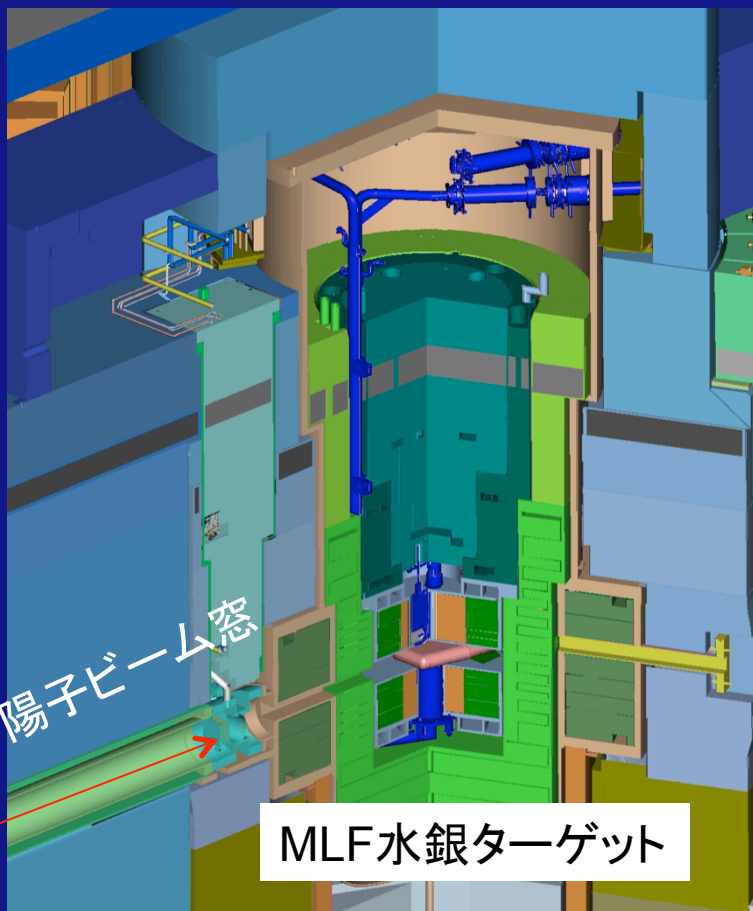
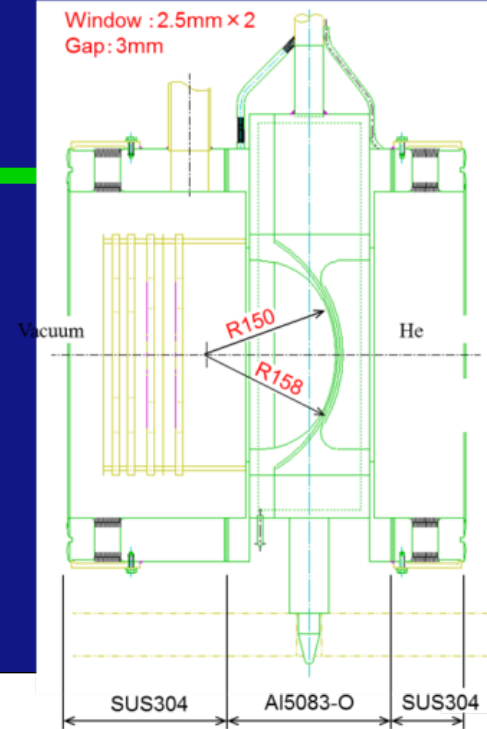
SUS製容器

幅 34cm ← 長さ 2m



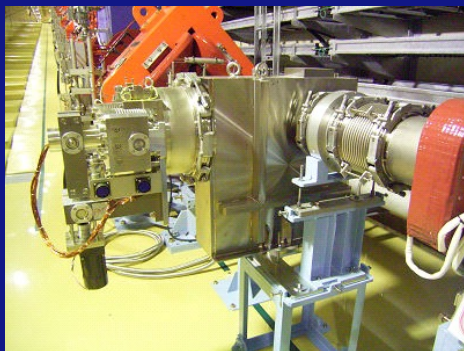
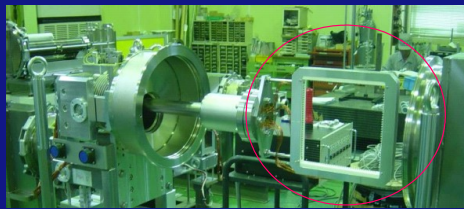
陽子ビーム窓

- 真空領域とヘリウム領域の隔壁
 - アルミ 厚さ 2.5mm x 2枚
- ビーム運転に重要なビームモニタを配置

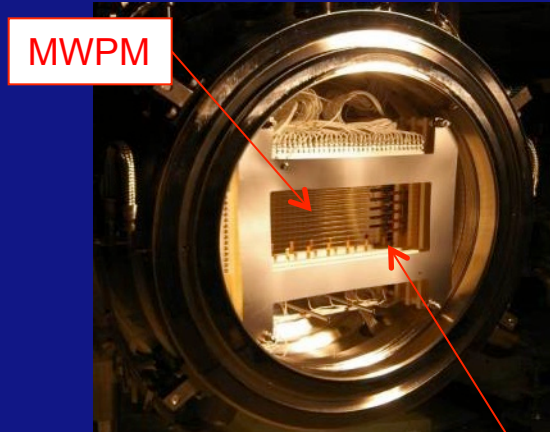


大強度陽子ビームモニタ

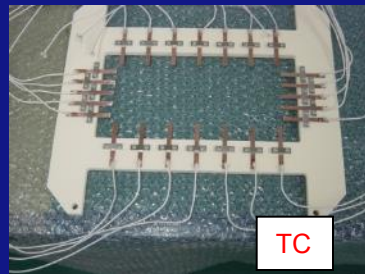
- 大強度ビーム運転には必要不可欠
- ビームプロファイルモニターとハローモニター (オンラインタイプ)
 - Multi Wire Profile Monitors (MWPMs) (15台設置) : 炭化ケイ素 (SiC) ワイヤ
 - 陽子ビーム窓にも固定型のMWPMを設置
- 2Dイメージ: イメージングプレート(IP)による放射化測定法 (オフラインタイプ) ビーム照射後に測定



MWPM



MWPM



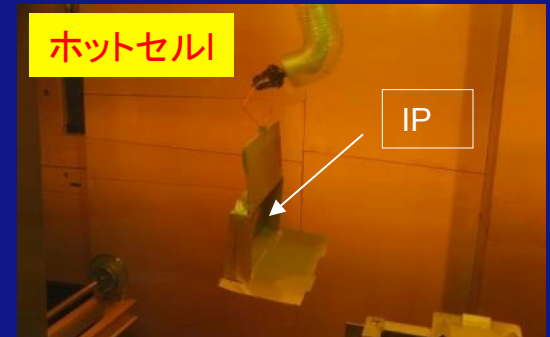
TC

陽子ビーム窓モニタ



ハローモニタ

- ・ SEC
- ・ TC



ホットセル

IP



Target

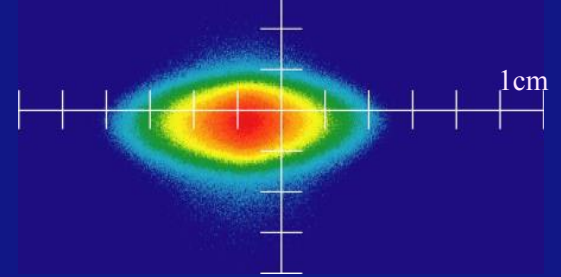
遠隔操作

イメージングプレート(ビーム君)

線形オプティクスでのビーム拡大

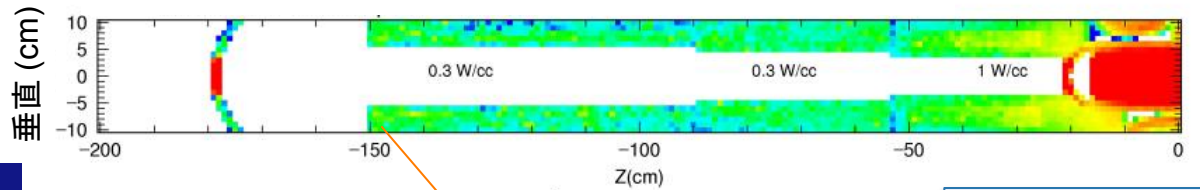
- RCSのビーム：位相空間でガウス分布
- ピーク密度の減少：ビームをターゲット上で拡大し密度を減少させる

2Dプロファイル測定結果



発熱密度の計算：陽子ビーム窓の散乱

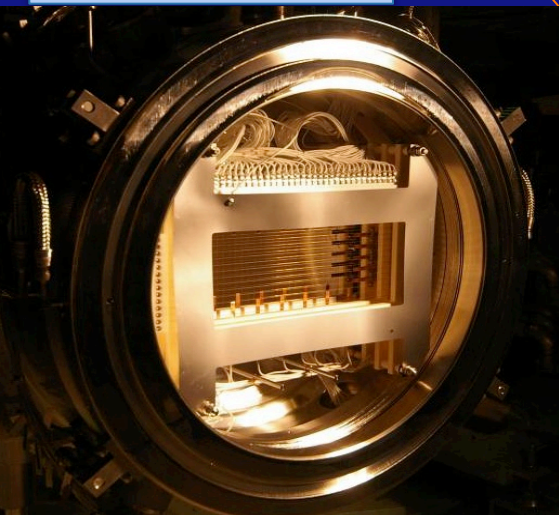
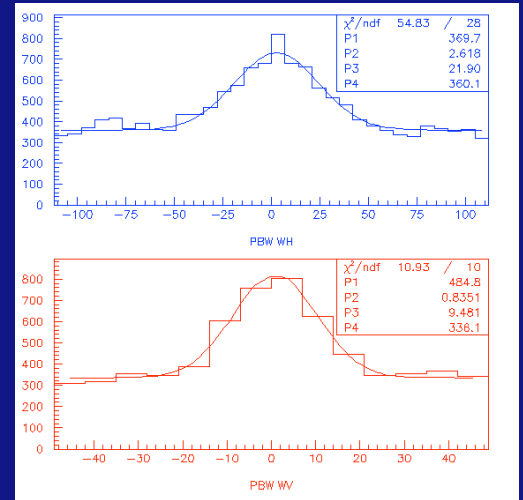
ビーム条件と無関係に1 W/ccの発熱



陽子ビーム窓
(Al 5mm-t)

水銀ターゲット

MWPMによる測定



周辺部発熱密度 < 1W/cc
 $\sigma_{h,v} < 37\text{mm}, 17\text{mm}$
 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

大強度ビーム運転の問題

MW級の**大強度陽子ビーム**と人類の戦いの序章

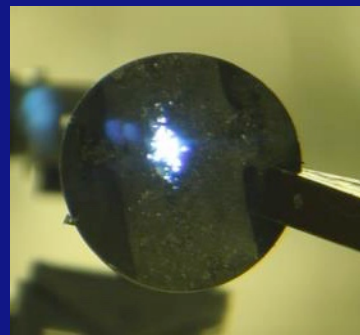
- ターゲット容器に著しい損傷:
ビーム入射時の衝撃に伴うピッチング損傷
- ヘリウムバブルは振動の低減を観測しているが、実際の損傷に対する影響は未知
- ビームプロファイル(ピーク電流密度)が重要
 - ターゲットのピッチング損傷 (ピークの**4乗**に比例)
 - ラスタリング(スキャニング)では対応不可能(∵ピークの**3乗**にしかない)

チャレンジングなJSNS

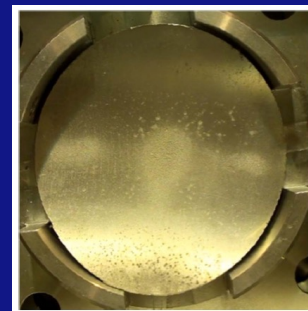
- JSNS: 25Hz, RCS
ミュオンターゲット有り
- SNS(ORNL): 60Hz, ストレージリング
ミュオンターゲット無し

電流密度の低下は極めて重要

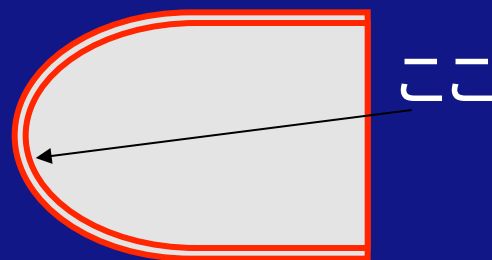
SNS



JSNS



5 cm



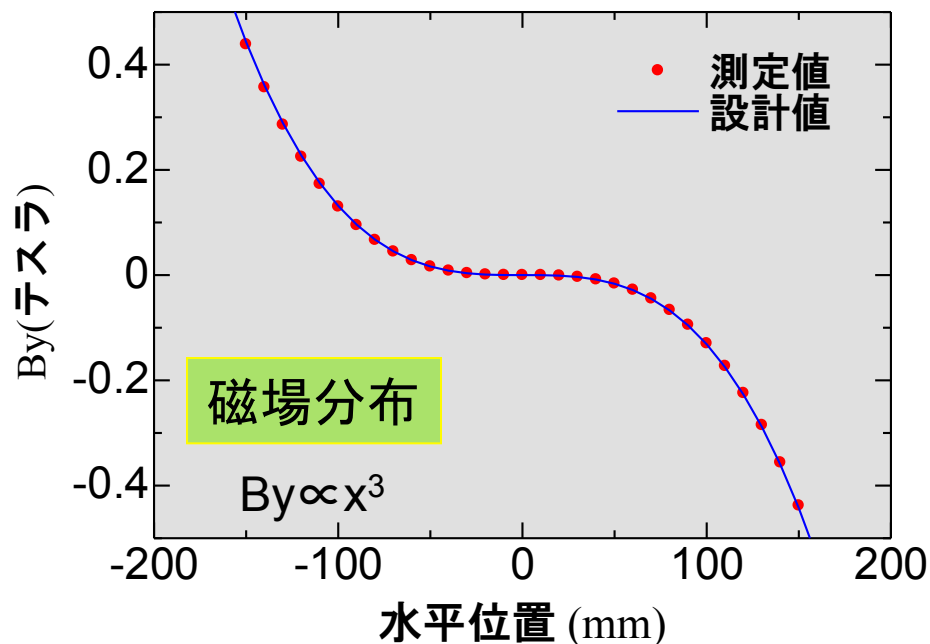
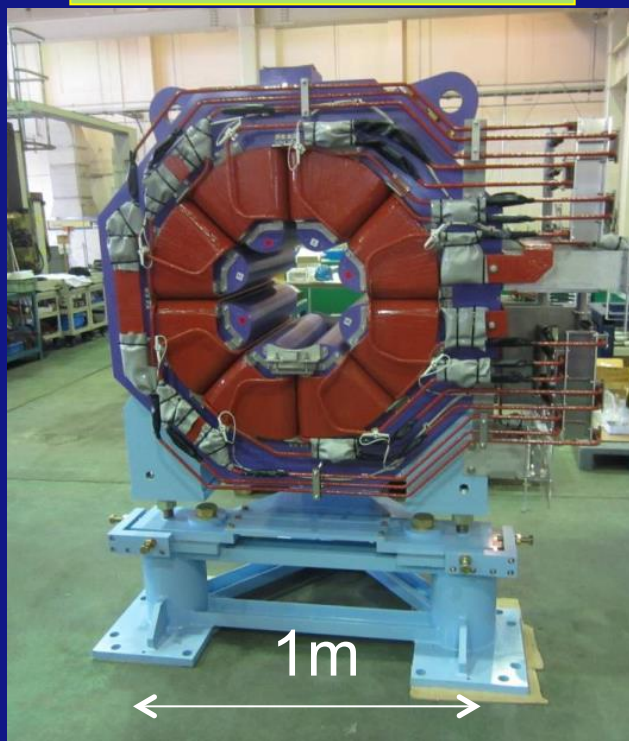
ターゲット容器模式図

- 多重防護壁構造(4重)が漏洩防止
- 中間層のHeガス内の放射性物質を常時監視

ビーム平坦化技術の開発

- 八極電磁石を用いた線形ビームオプティクスによるビーム平坦化(MWクラスの大強度加速器施設にて**世界初の試み**)
- ビームのピーク密度の減少を図る

製作した八極電磁石



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

八極電磁石によるビーム平坦化

- 線形光学ではどの場所でもガウス分布
 - 幅を広げてピーク電流を低下が困難
 - 非線形光学でビームを平坦な分布にしピークを低減

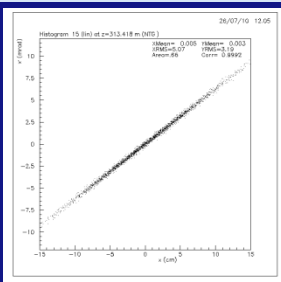
八極電磁石 非励磁/励磁の
ビームプロファイルの比較
(計算値)

八極無し w/o OCT

八極電磁石 w/ OCT

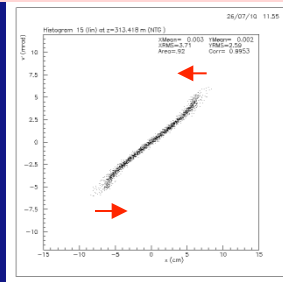
位相空間分布
Phase space
distribution

角度 Divergence



位置 Position

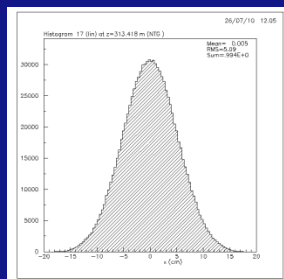
角度 Divergence



位置 Position

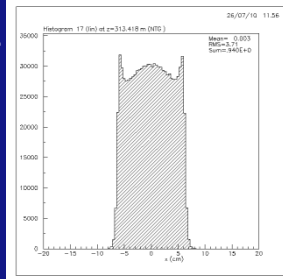
水平方向分布
Horizontal
distribution

強度 Intensity

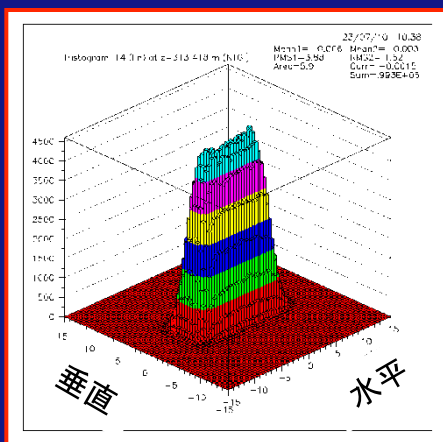
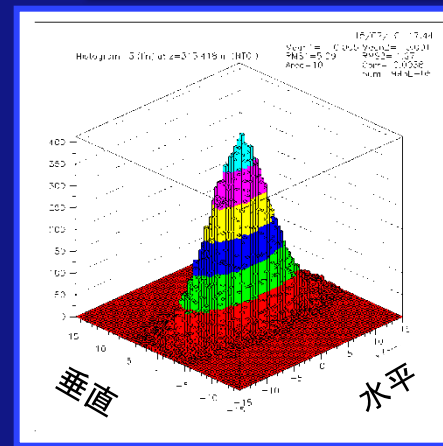


位置 Position

強度 Intensity



位置 Position



動物に例えると



ハウンド

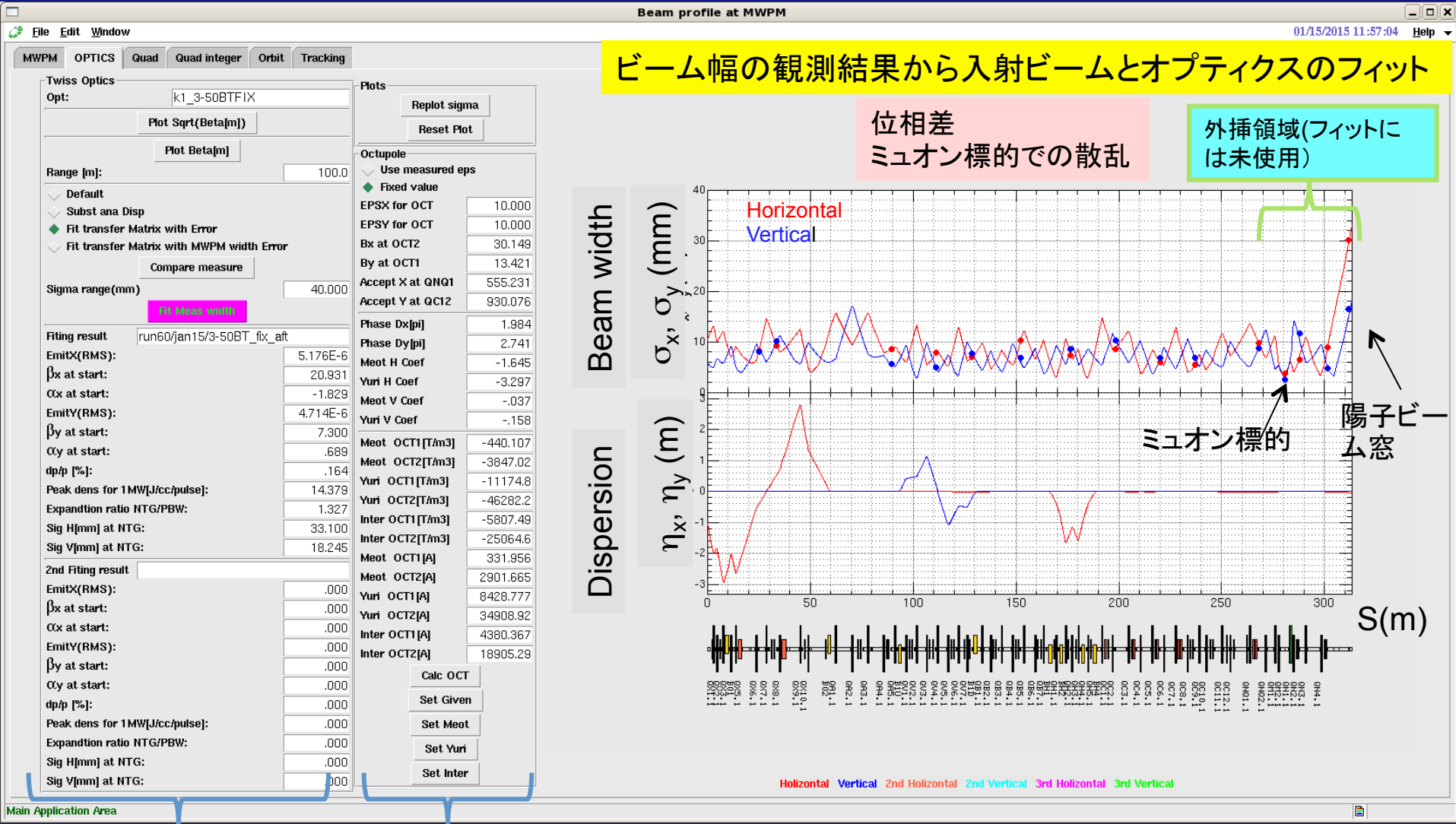


ブルドッグ

原理: 裾野のビームを高次の
磁場で中心に畳み込む

SADを用いたツールの作成

ツールにより瞬時に複雑な調整が可能、ミュオン標的までの散乱を含むプロフィール計算可能



ビーム幅の観測結果から入射ビームとオプティクスフィット

位相差
ミュオン標的での散乱

外挿領域(フィットには未使用)

Beam width

Dispersion

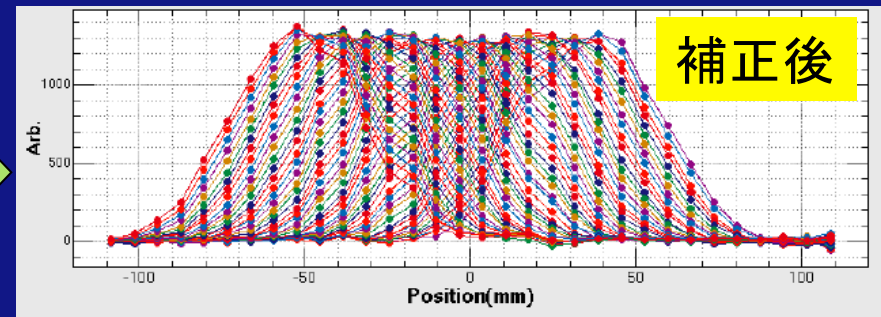
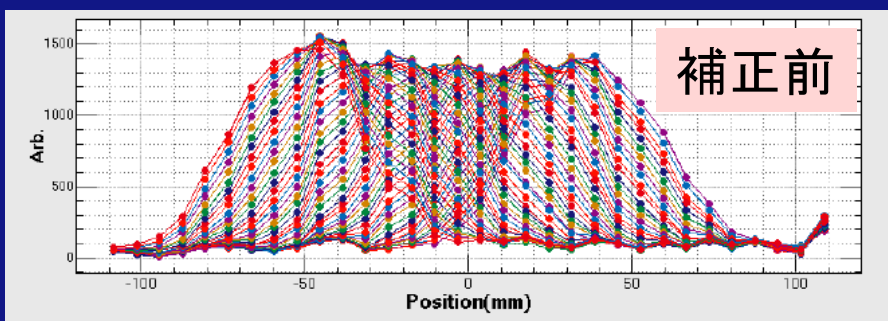
入射ビーム条件

八極電磁石条件

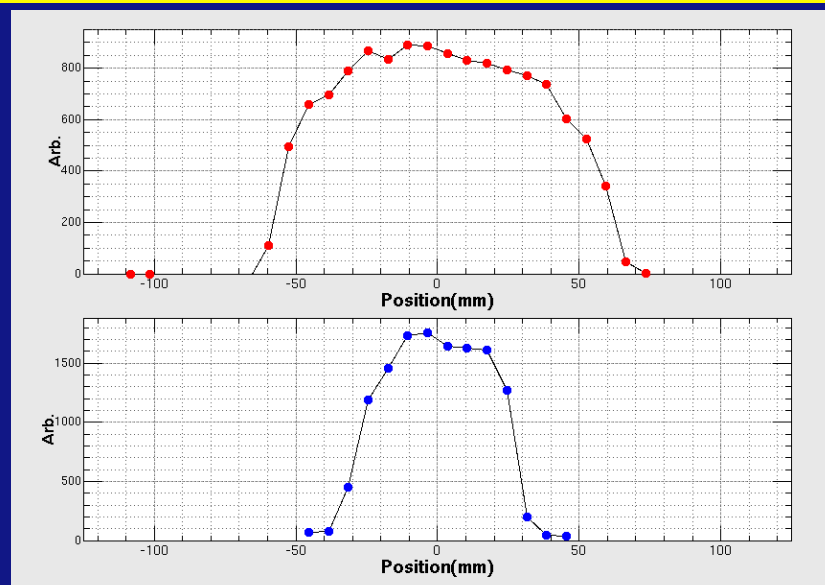
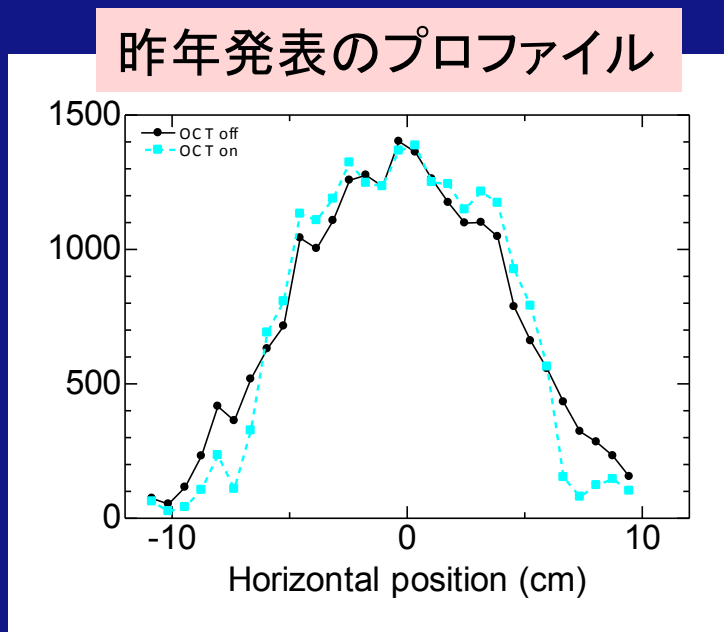
RCSの出射ビーム診断が瞬時に可能

MWPMの校正

- 細いビームでスキャンした結果を基にピーク高さが均一になるようにペDESTALとワイヤ感度を補正(補正值最大 6%)



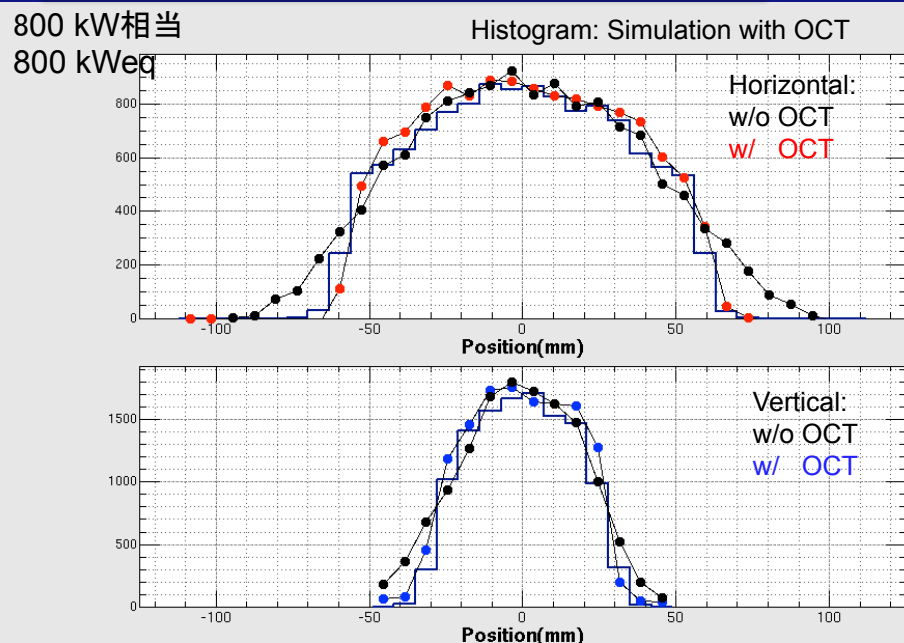
補正後のプロファイル(歪みが無くなった)



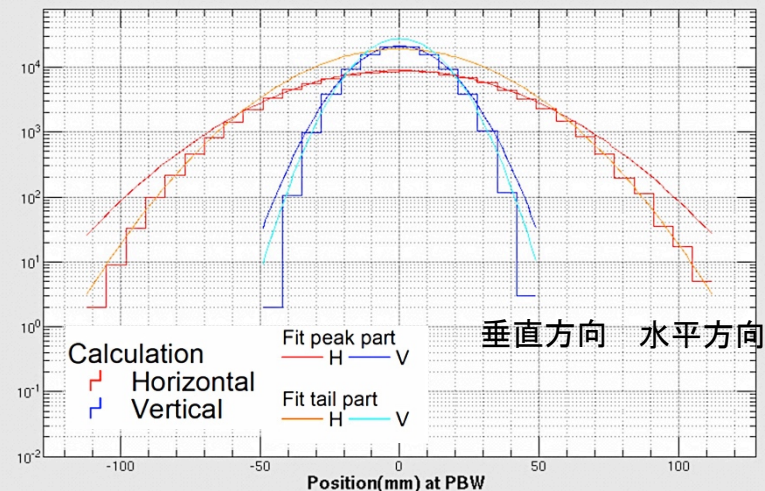
八極電磁石の効果

- 八極電磁石の入・切り状態で比較
- ビーム形状: 予想通りの平坦な分布を確認

八極電磁石励磁時のプロフィール
(実測値との比較)



八極電磁石励磁時のプロフィール(計算)

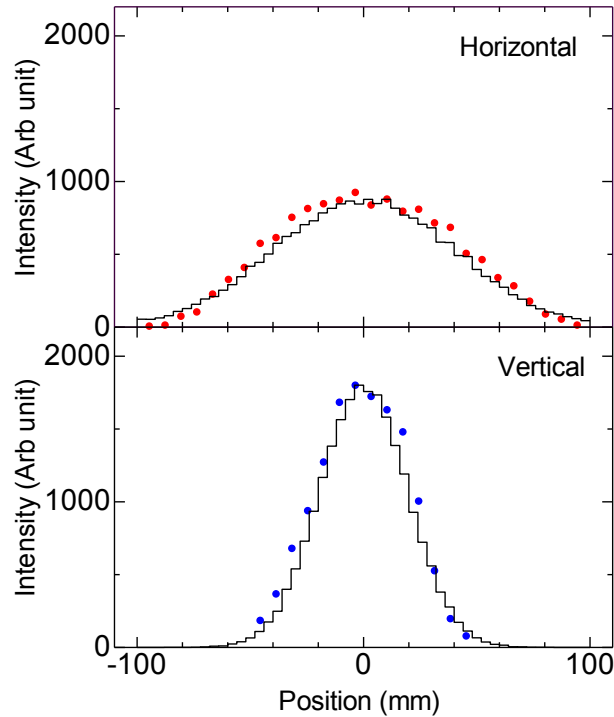


計算は実験と良い一致を示す
→設計通りに低減可能

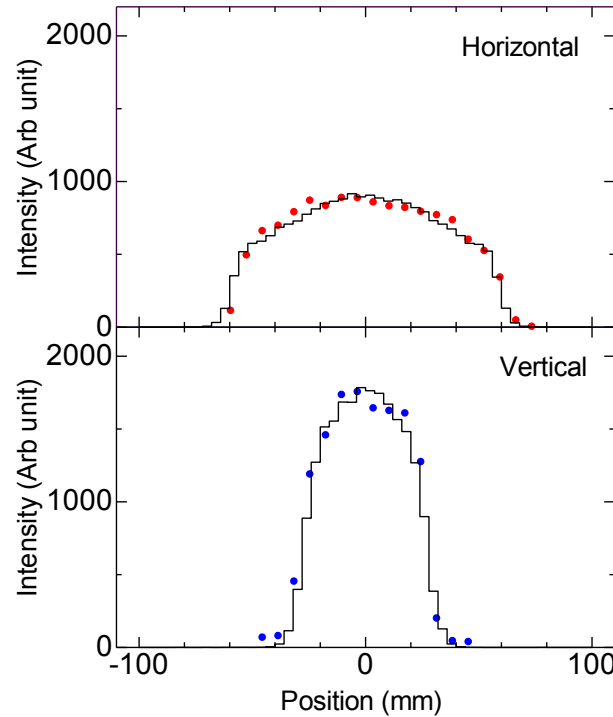
- ビーム裾部強度は1/10倍に
- 八極電磁石により発熱密度のピークを**35%減少**
裾部フィット: 20.2 J/cc/pulse
ピーク部フィット: 14.9 J/cc/pulse

実験と計算のプロファイルの比較

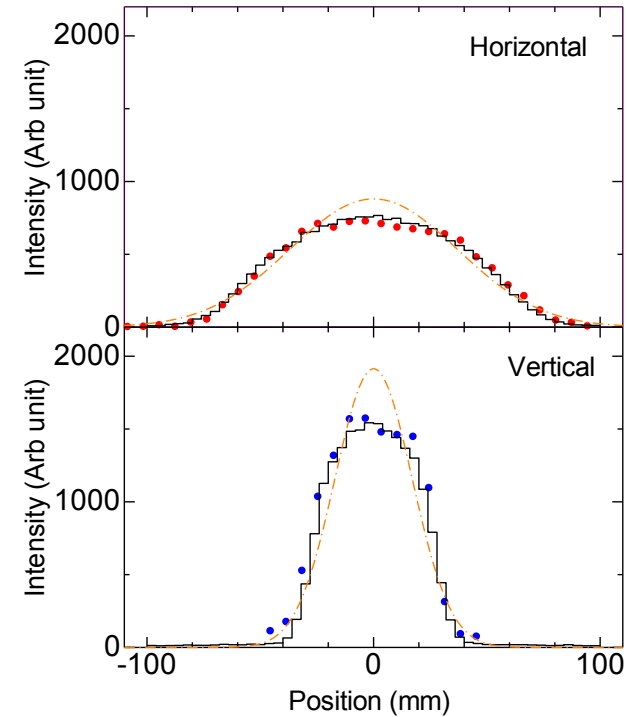
OCT 0A



OCT 698A



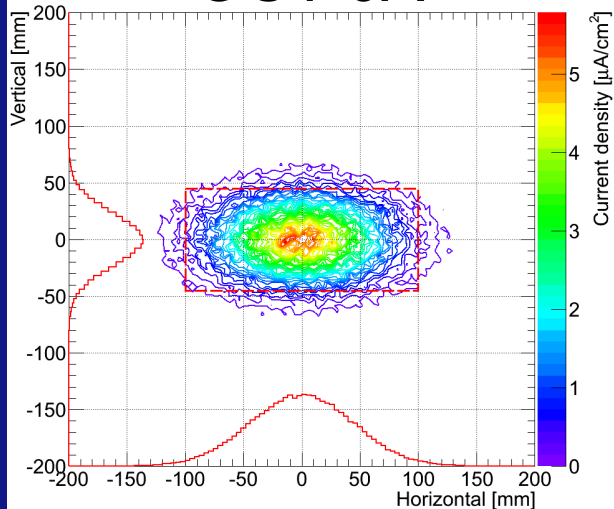
OCT 698A
+ ミュオン標的有り



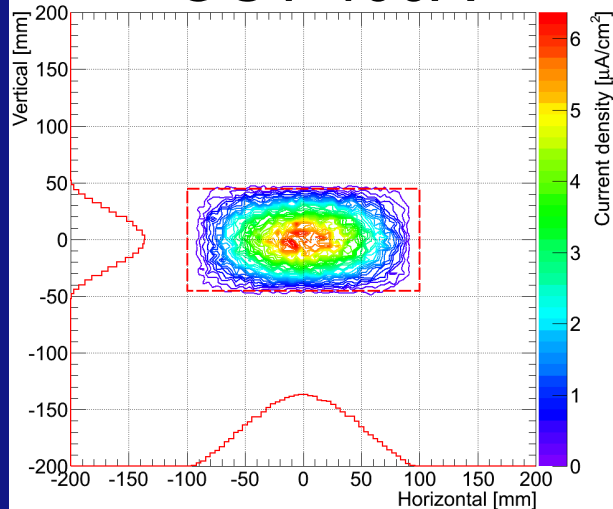
- 計算は実験と良い一致を示す(ミュオン標的の散乱の影響も正しく評価している)
- 線形オプティクスの場合に比べ水平方向 14%, 垂直方向 20%のピーク減少により合計で約40%のピーク密度減少が可能
- 八極電磁石周辺で僅かにビームロス発生→ β を減少しても30%減少可能

中性子標的でのプロフィール(計算)

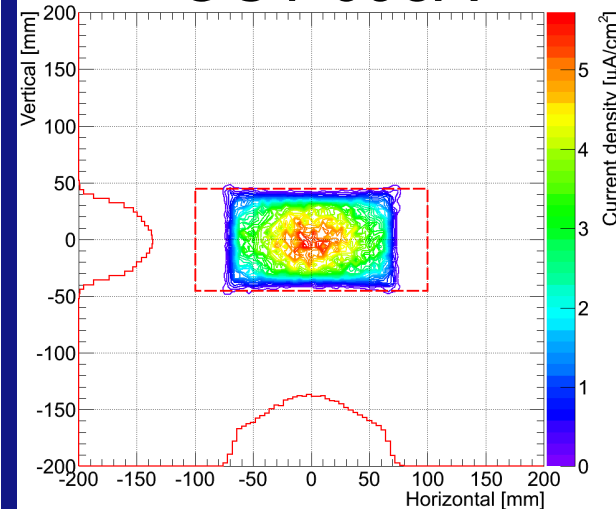
OCT 0A



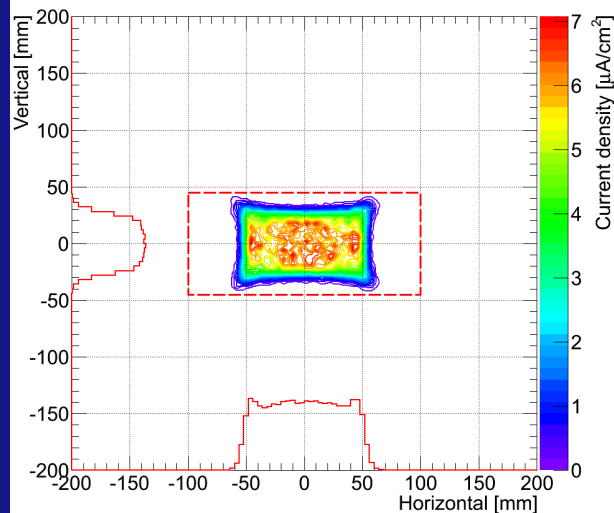
OCT 400A



OCT 698A

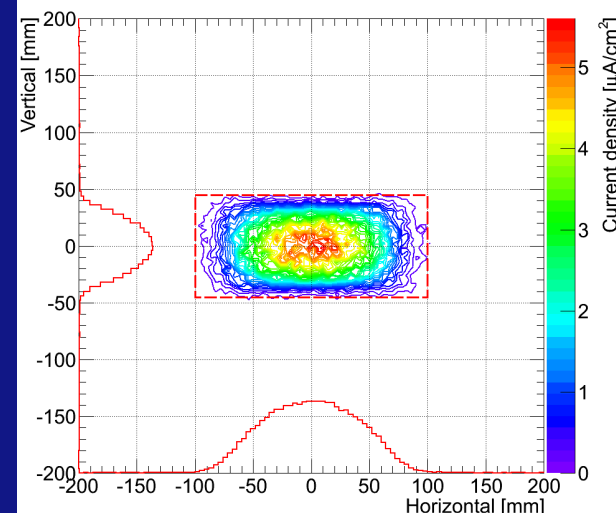


OCT 1200A



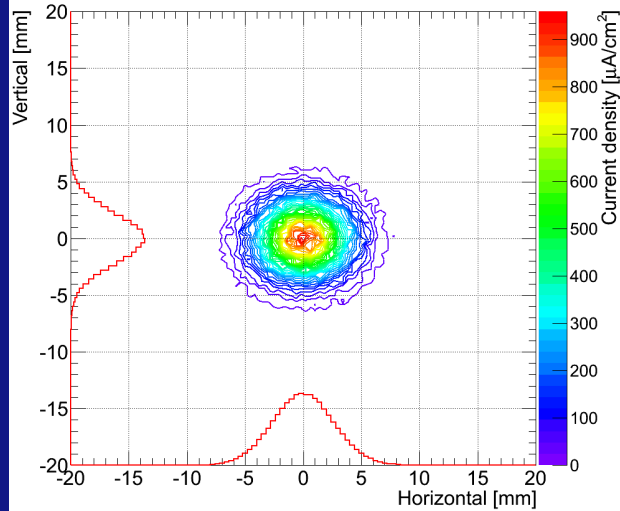
- 中性子標的入口のアパチャと同じ面積となる理想的な形状となる
- 平坦化と八極電磁石近傍のビームロスが競合する→八極下流の四極を花形ダクト化により更なる平坦化を目指す

OCT 698A ミュオン標的有

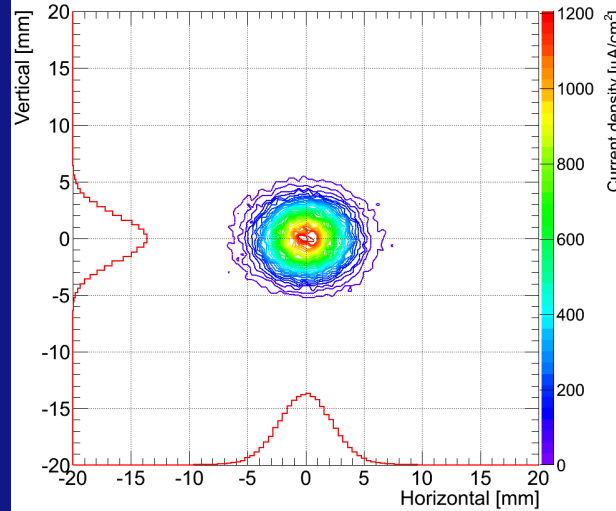


ミュオン標的でのプロフィール(計算)

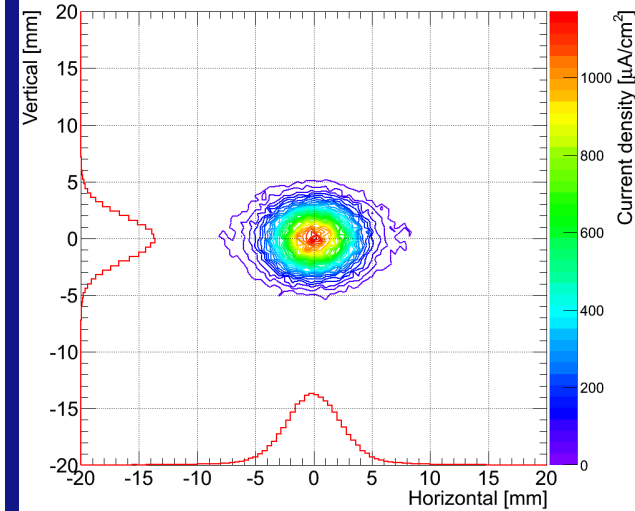
OCT 0A



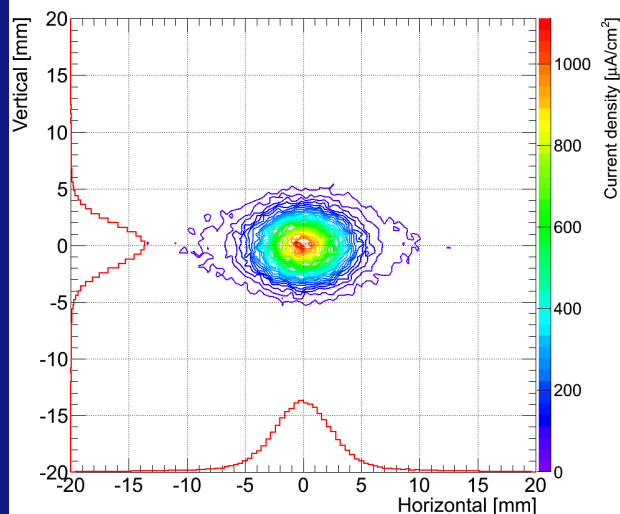
OCT 400A



OCT 698A



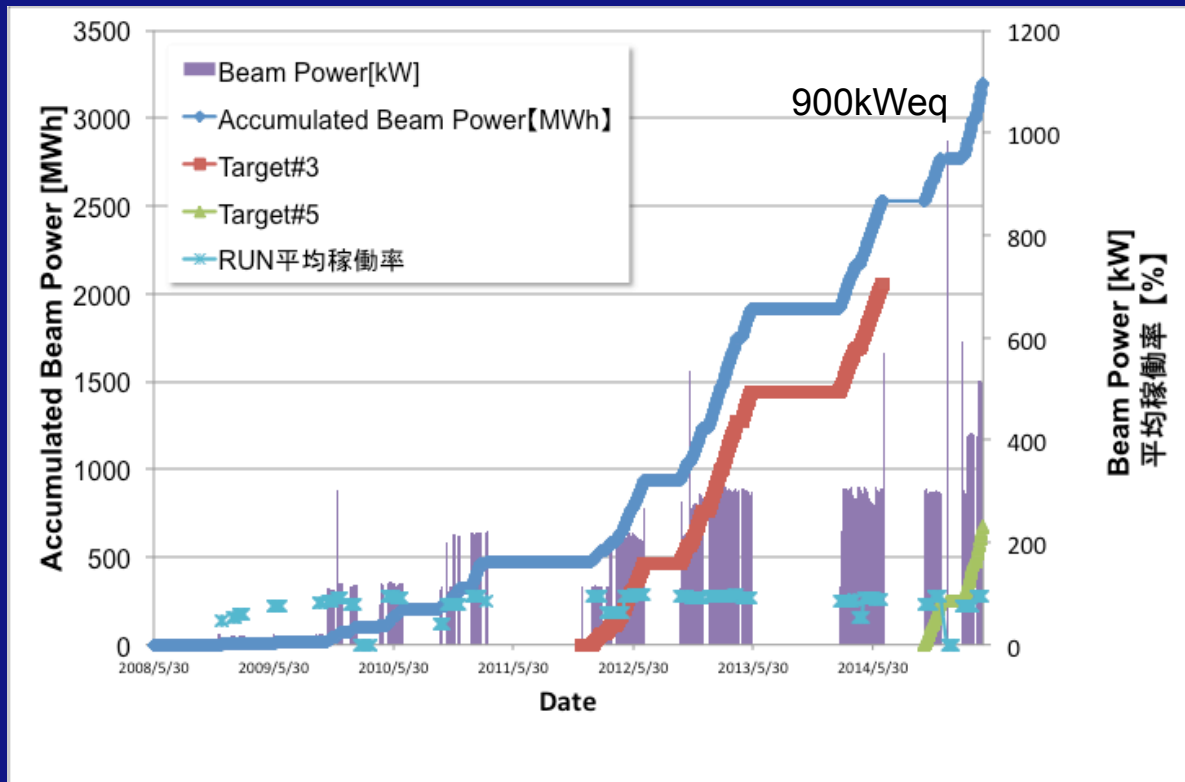
OCT 1200A



ミュオン標的にビーム幅と形状は
変化なし → ミュオンの利用運
転に影響無しに中性子標的にお
けるビームの平坦化が可能

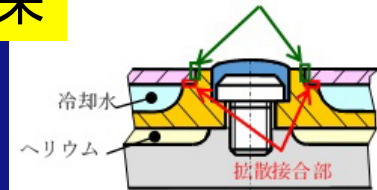
MLFのビーム運転履歴

- 500 kWの安定運転を達成(4月30日に水銀ターゲット冷却水漏れにより停止 原因:溶接部の不良)
- 溶接部を強固にしたターゲットに交換後に500kW運転を再開
- 約1ヶ月で100kWごとにビーム出力増強し来年に1MWを目指す
- さらに大強度運転を: **目指せ2MW!**



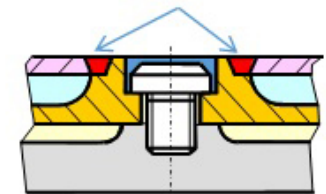
従来

シール溶接 (冷却水層のパウダリー)



新規

開先加工の上、
TIG 溶接でパウダリーを形成



- 核破碎中性子源の大強度陽子ビームの調整 & 運転
 - SADによるツール作成
 - 短時間で効率的な非線形のオプティクス調整
 - 約1MWのテスト運転および500 kWの利用運転開始(ギネス申請中)
 - 非線形ビーム光学によるビーム平坦化
 - 利用運転で使用
 - 30%程度のピーク電流密度を低下が可能
 - ピッチング損傷は約80 %低減
 - ミュオン標的でビームを狭め散乱の影響を更に減らす予定
 - 来年から1MWの利用運転を目指す