

非線形光学を用いたJ-PARC核破砕中性子 源へのビーム輸送技術開発

*Development of beam transport to spallation
neutron source at J-PARC with non-linear optics*

明午 伸一郎¹⁾, 大井 元貴¹⁾, 坏 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

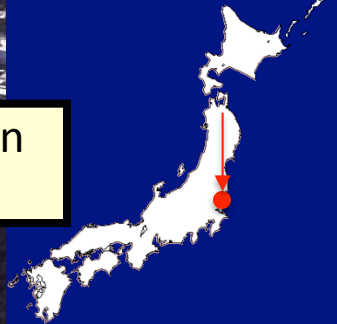
- 緒言
- J-PARC MLFのビーム運転状況
 - ターゲットの状況
- 非線形光学を用いたビーム平坦化
 - 原理
 - MLFへの適用
 - 最適化のための考察
- まとめ
- 今後の課題



Hadron Experiment Facility

30GeV Synchrotron MR (0.75MW)

Materials & Life Science Facility (MLF)



Bird's eye photo

3GeV Synchrotron RCS (25Hz,1MW)

Neutrino Exp. Facility (294km to Super KAMIOKANDE)

Transmutation Facility (TEF) (Phase II)

Linac 400MeV(50mA)

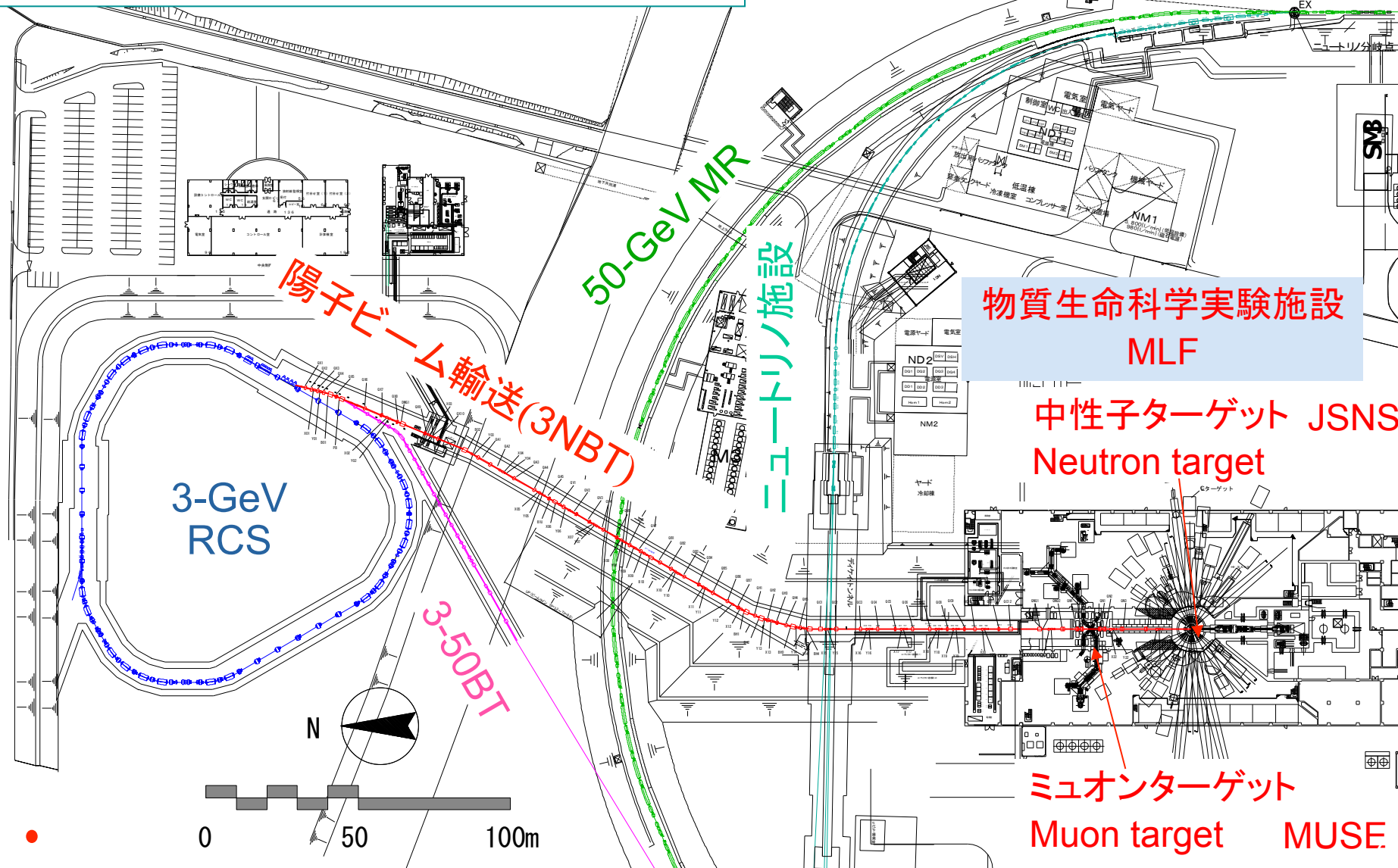
JRR-3M 800m to MLF

- JFY2007 Beam
- JFY2008 Beam
- JFY2009 Beam

J-PARC = Japan Proton Accelerator Research Complex

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
 繰返し(Repetition): 8.3x10¹³ p
 25Hz

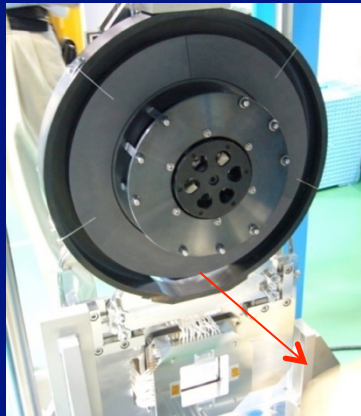
全長(Total length) 314 m
世界最長のビーム輸送施設(1MWクラス)
 Longest beam transport for MW class
 accelerator facilities in the world



Targets placed at MLF

Muon target

- Carbon graphite (IG430)
- 8% beam lost (80 kW loss)
- Highest intensity in the world

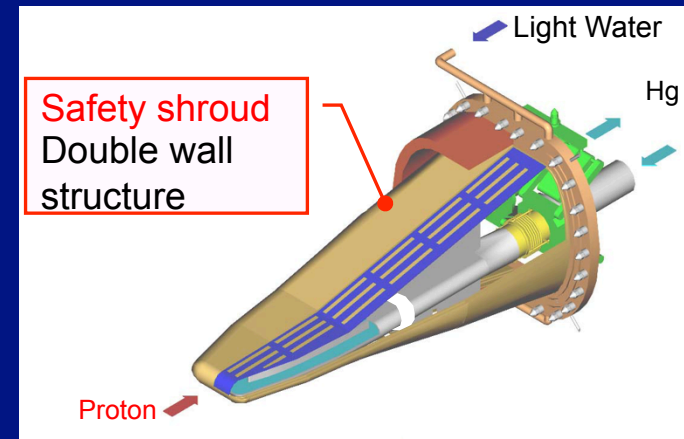
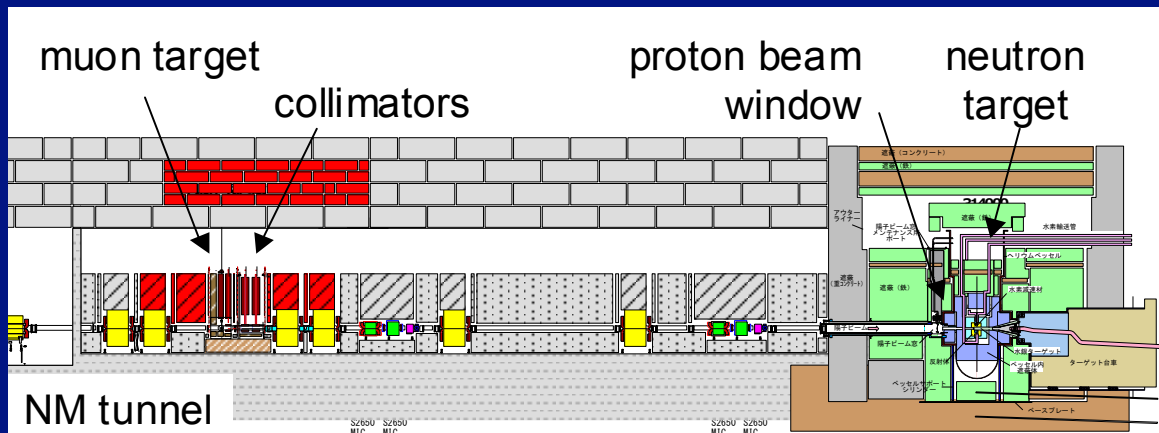
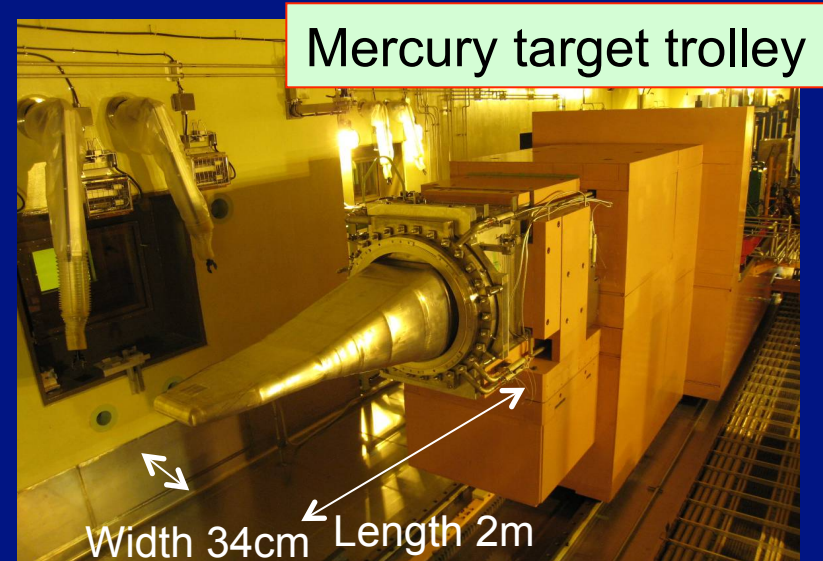


Rotating target

Thick. 2cm
Diam. 30 cm

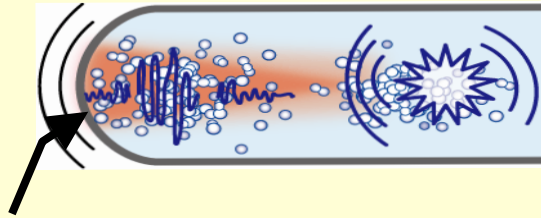
Neutron target

- Mercury
- Highest pulse intensity in the world



Efforts to mitigate cavitation damage with gas micro-bubbles

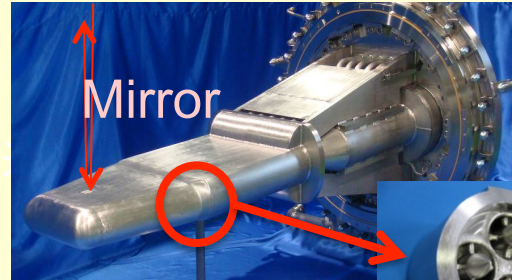
Mercury target vessel



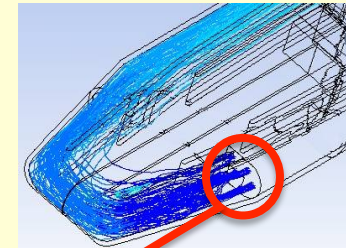
Beam window (2.5 mm-t)
Most vulnerable to cavitation damage

$$\text{Damage} \propto P^4$$

Vibration measurement with a Laser Doppler Vibrometer (LDV)



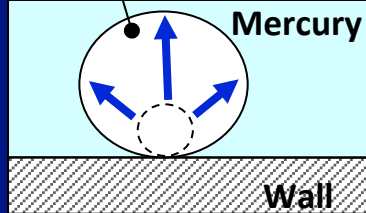
He-gas micro-bubbles injecting into Hg target



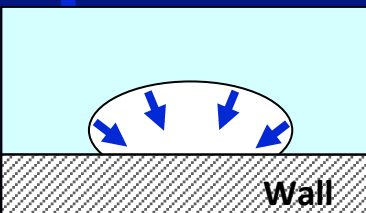
Bubbling distribution

Swirl type bubbler

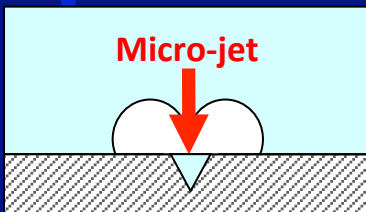
Cavitation bubble



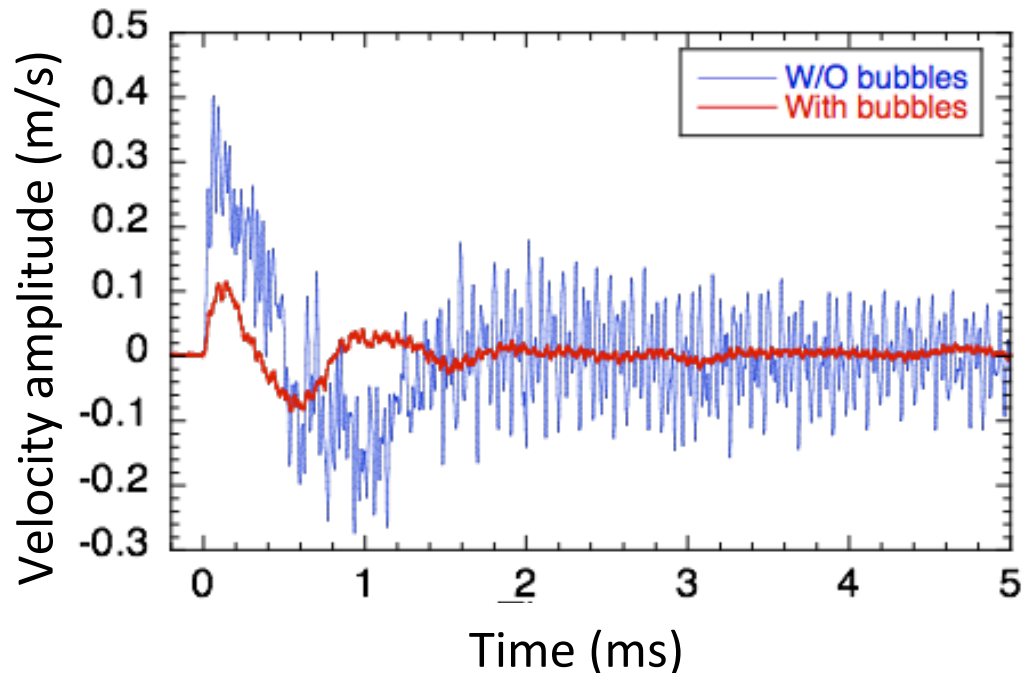
Bubble inflates by the mercury negative pressure.



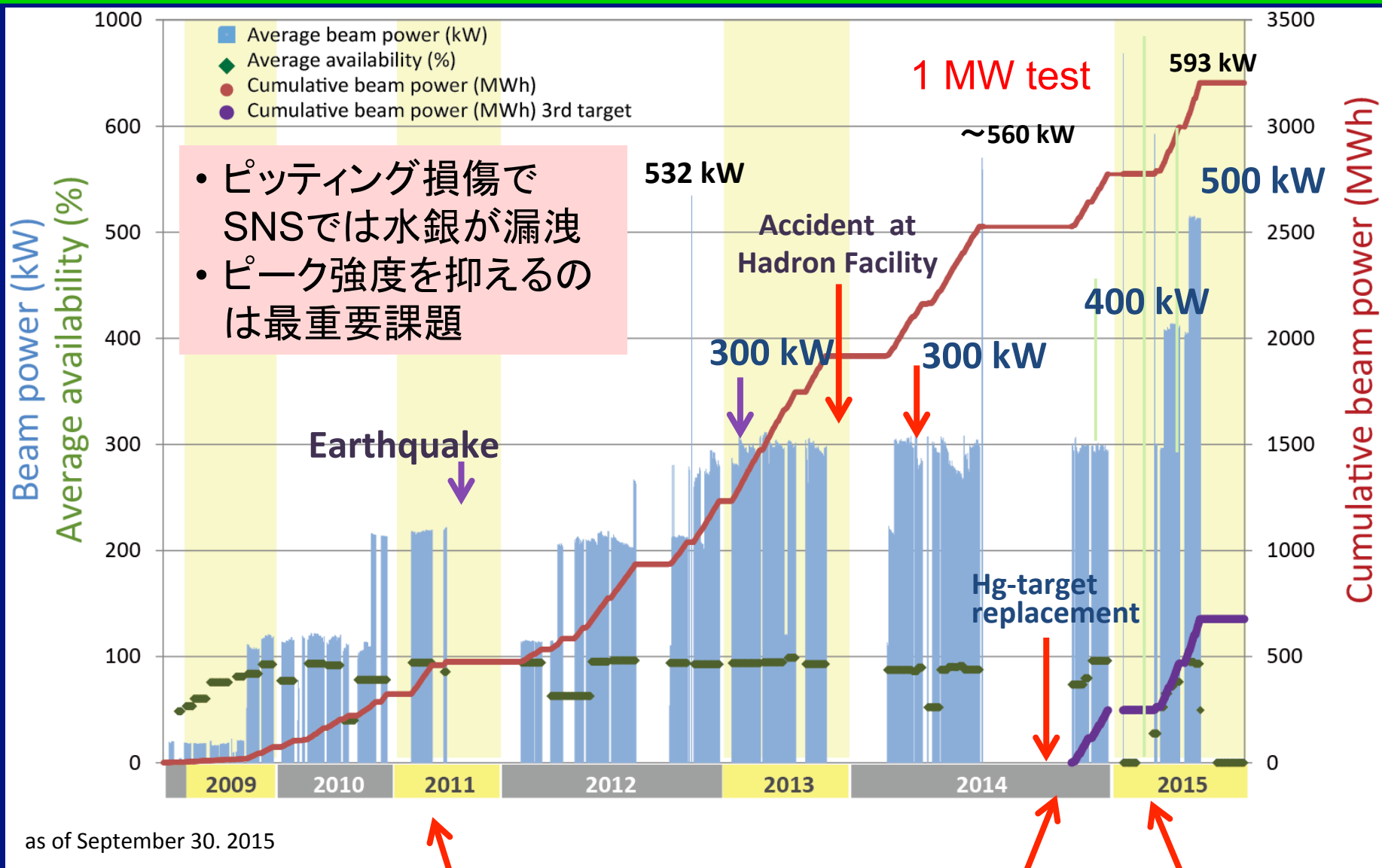
Cavitation bubble shrinks rapidly.



Shrink energy concentrates to one point



Operational history of JSNS



• ピッチング損傷で SNSでは水銀が漏洩
 • ピーク強度を抑えるのは最重要課題

Hg-target replacement

~1 month interruption due to the fire in MLF

Interruption due to a trouble of Hg-target

非線形光学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

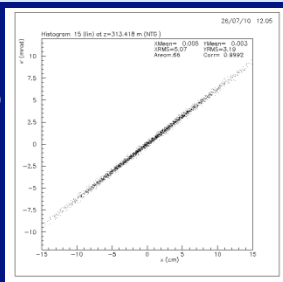
八極電磁石 非励磁/励磁の
ビームプロファイルの比較
(計算値)

八極無し w/o OCT

八極電磁石 w/ OCT

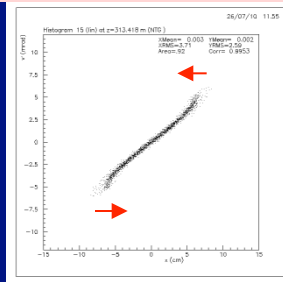
位相空間分布
Phase space
distribution

角度 Divergence



位置 Position

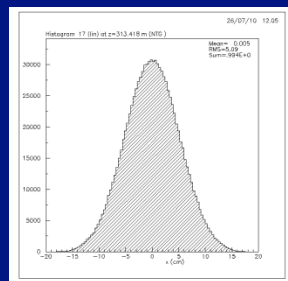
角度 Divergence



位置 Position

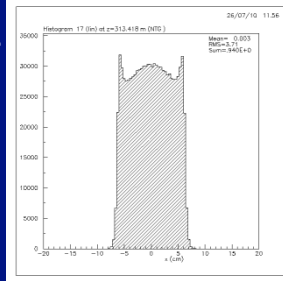
水平方向分布
Horizontal
distribution

強度 Intensity

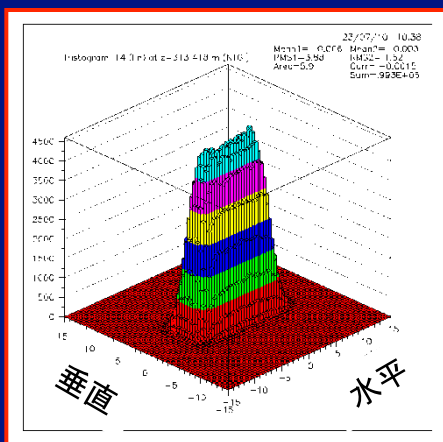
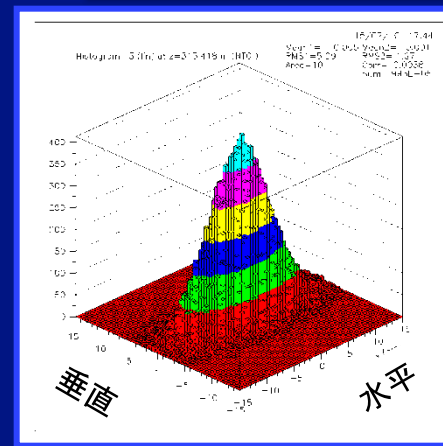


位置 Position

強度 Intensity



位置 Position



動物に例えると



ハウンド



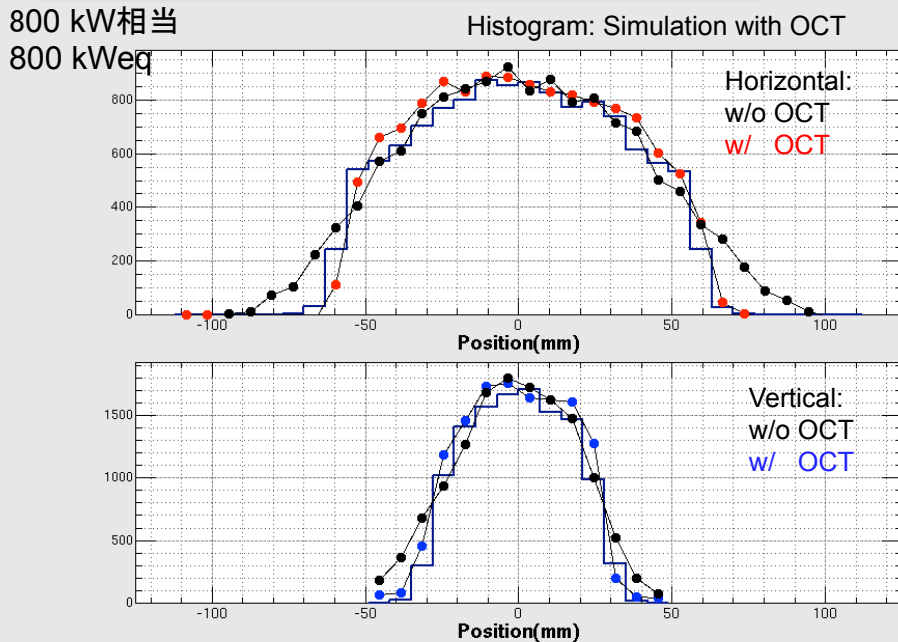
ブルドッグ

原理: 裾野のビームを高次の
磁場で中心に畳み込む

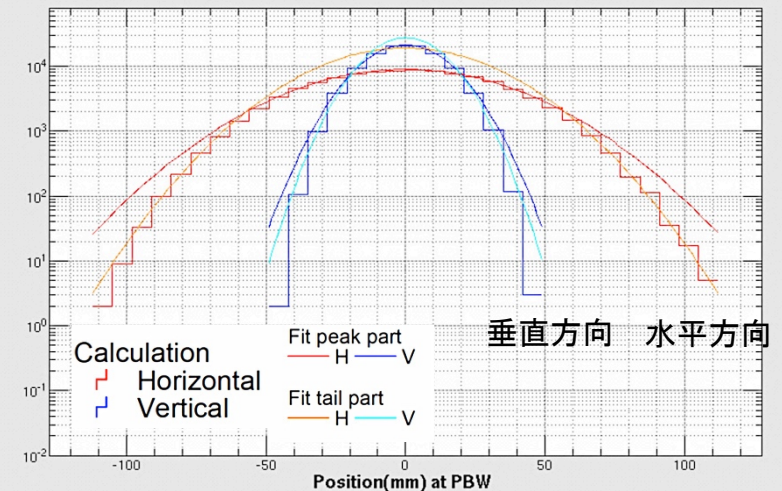
MLFへの適用

● 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ァイル
(実測値との比較)



八極電磁石励磁時のプロファイル(計算)



計算は実験と良い一致を示す
→設計通りに低減可能

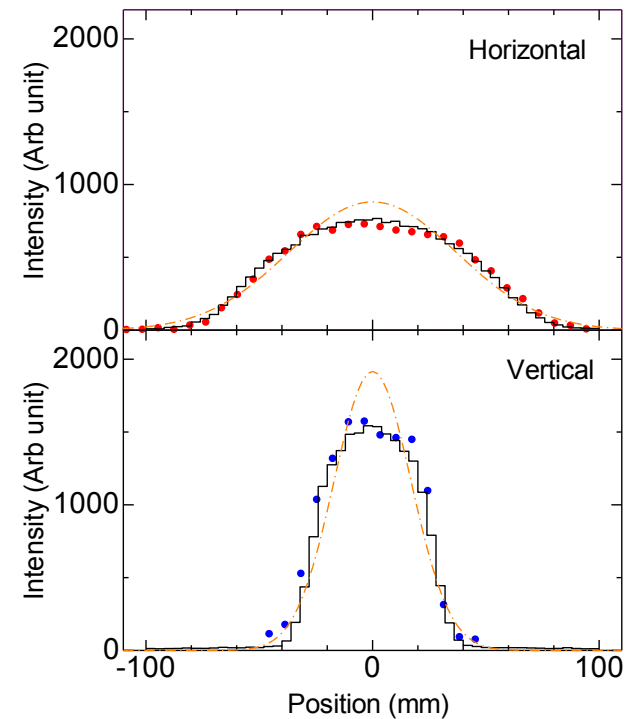
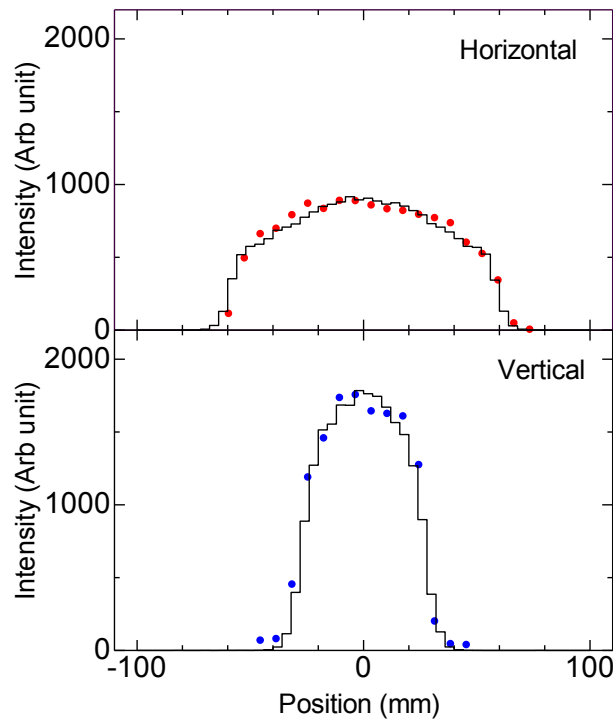
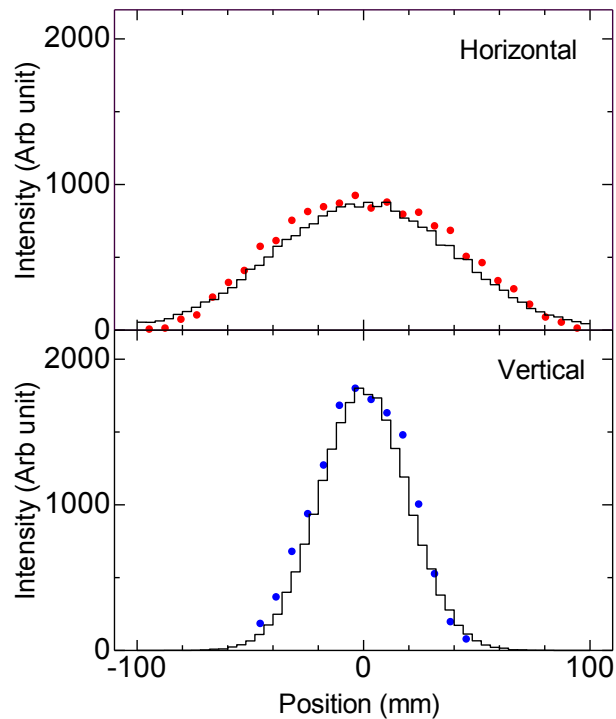
- ビーム裾部強度は1/10倍に
- 八極電磁石により発熱密度のピークを**35%減少**
裾部フィット: 20.2 J/cc/pulse
ピーク部フィット: 14.9 J/cc/pulse

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(ミュオン標的の散乱の影響も正しく評価)
- 線形光学に比べ水平方向 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

八極電磁石を用いたビーム 平坦化の考察

八極を用いる場合の位相空間分布

- 特異点にビームが収束
- 位相が発散の場合には極度に発散

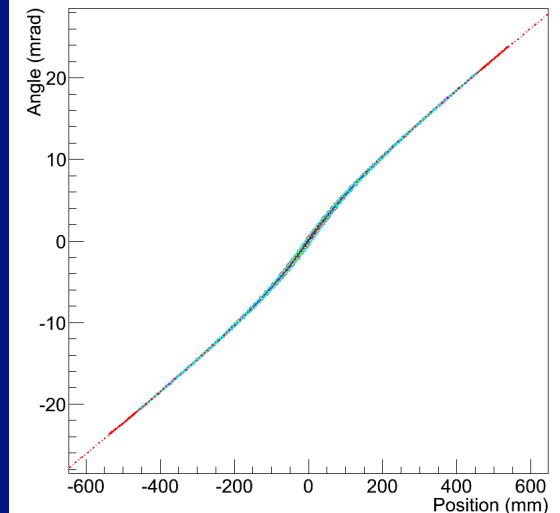
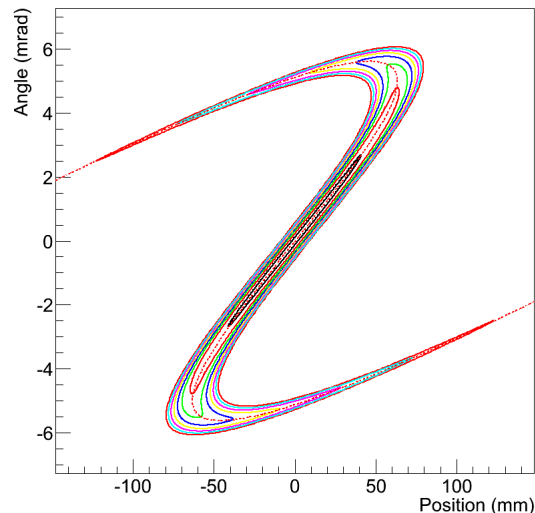
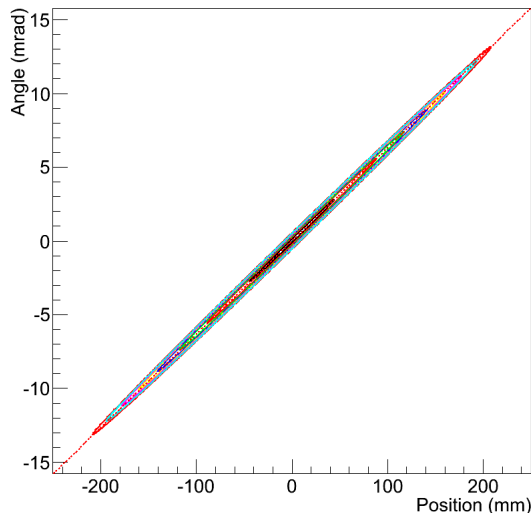
TRAIN-TRAIN by 真島昌利

「いい奴ばかりじゃないけど悪い奴ばかりでもない」

線形光学

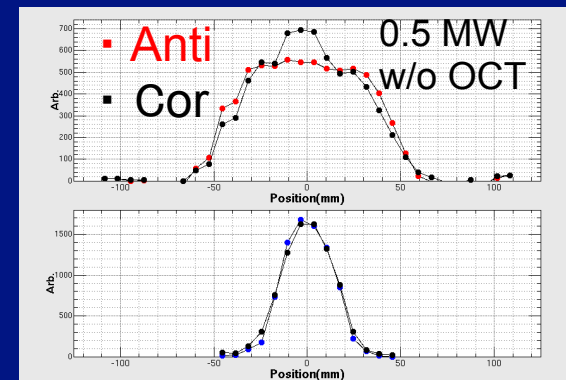
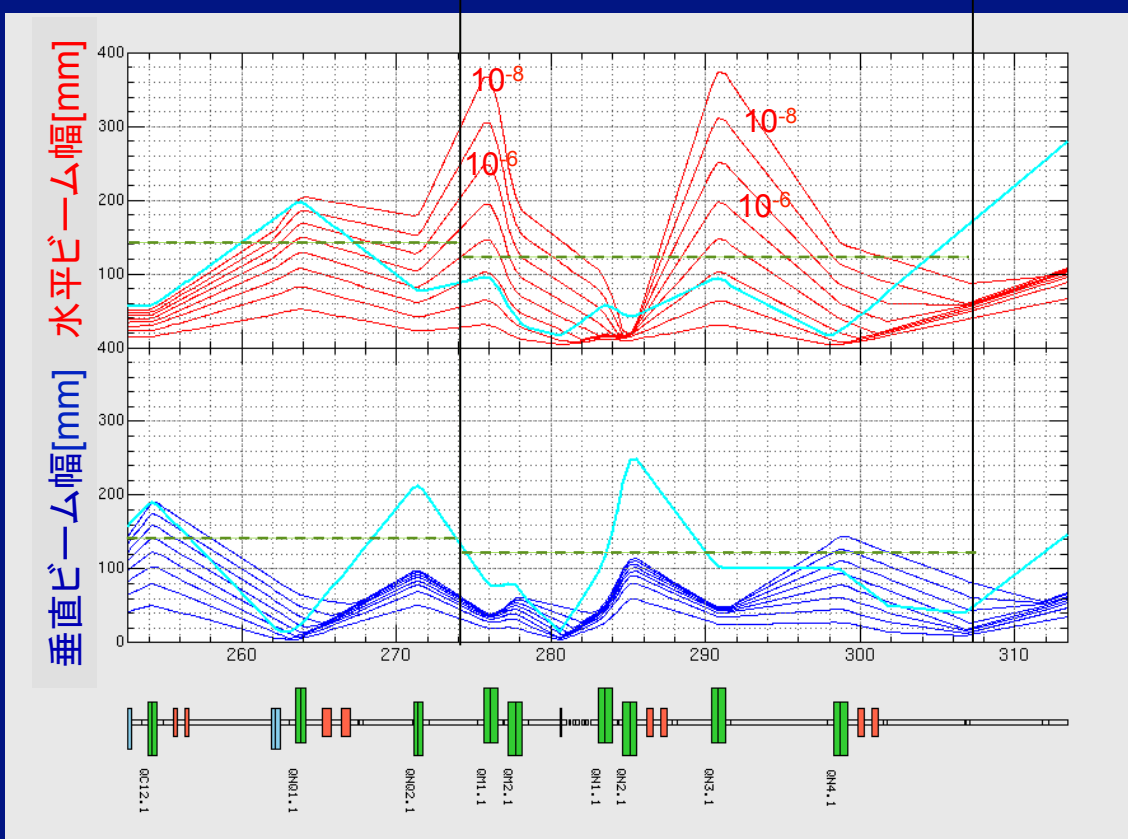
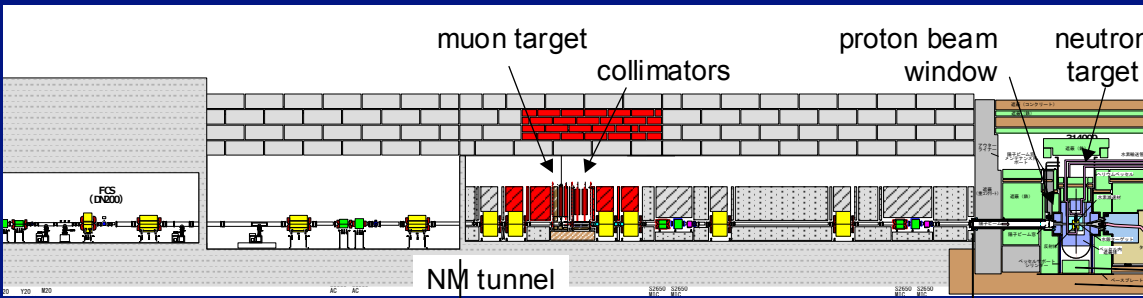
非線形光学(収束)

非線形光学(発散)



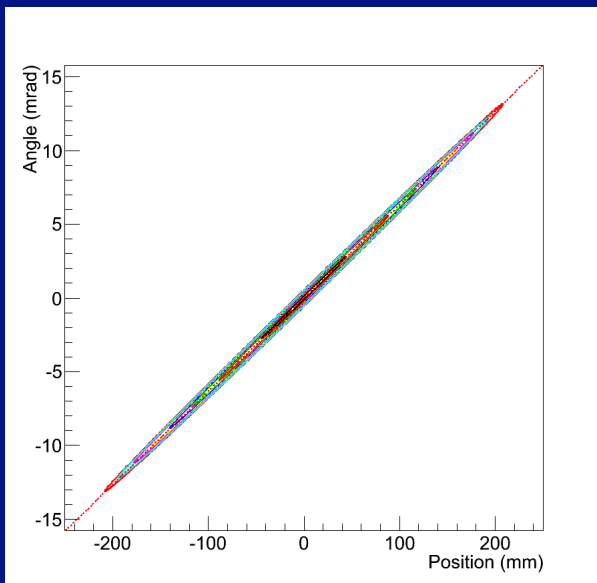
ビームエンベロープの計算

- 包括線からビームロスの計算が可能
- 位相によりビームが広がるため K_8 を抑えた光学が望ましい
- ミュオン標的周辺で数十Wのロスがあるが標的で生成する放射線と同程度あるので問題にはならない
- 水平方向はanti-correlated pointにより K_8 を低下できロスをさらに低減可能

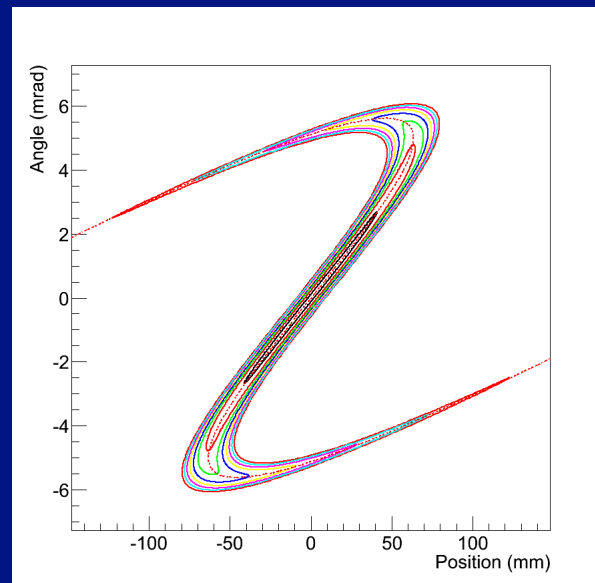


八極を用いる場合の位相空間分布

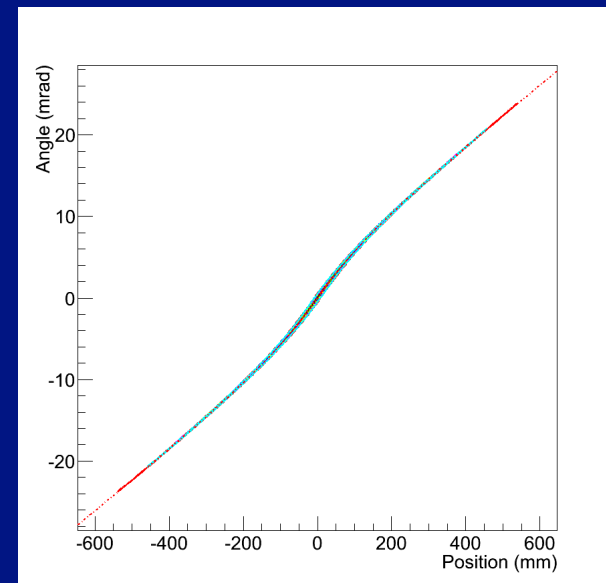
線形光学



非線形光学(収束)



非線形光学(発散)



フィラメントモデル

$$\begin{pmatrix} x_t \\ px_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{12} & T_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ px_1 - K_8 x_1^3/6 \end{pmatrix}$$

角度の広がりを無視すると
直線上なモデルが成立

$$px_1 = -\alpha/\beta x_1$$



八極下流側のビーム位置

$$x_l \rightarrow x_t$$

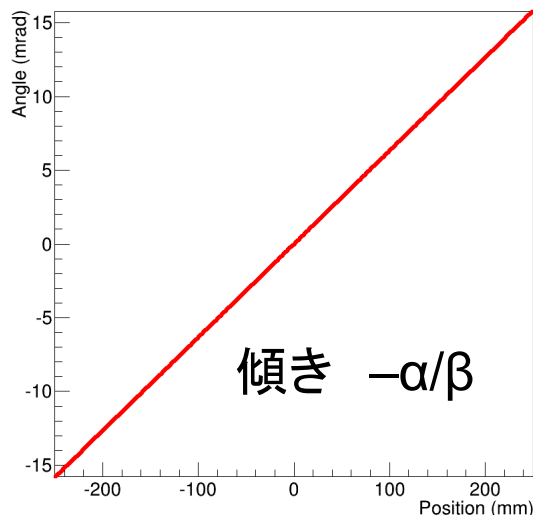
$$x_t = \lambda_3 x_1^3 + \lambda_1 x_1$$

$$\lambda_1 = \sqrt{\beta_t/\beta_1} \cos \phi, \lambda_3 = -K_8 \sqrt{\beta_t \beta_1} \sin \phi / 6$$

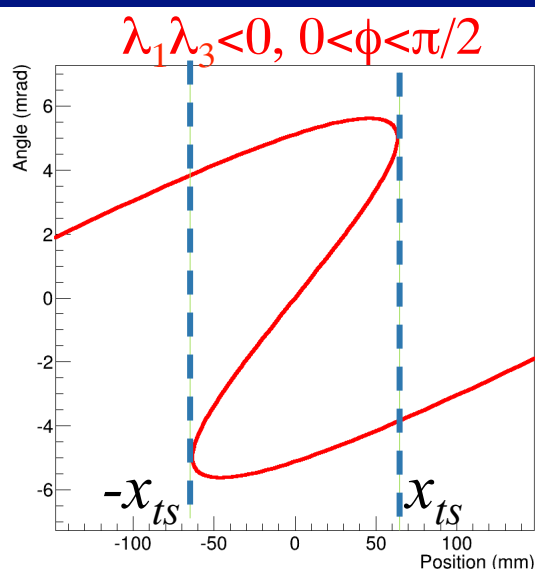
特異点(3重解) $x_{ts} = 2/3 \lambda_1 \sqrt{-\lambda_1/3\lambda_3}$

$$g(x_t) = f(x_1) dx_1 / dx_t = f(x_1) / (\lambda_1 + 3\lambda_3 x_1^2)$$

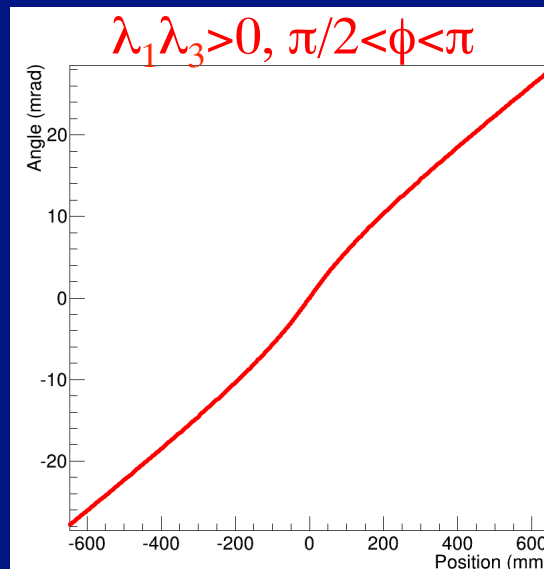
線形光学



非線形光学(収束)



非線形光学(発散)



平坦化に必要な八極磁場(K_8)

$$x_{ts} = 2/3\lambda_1 \sqrt{-\lambda_1/3\lambda_3}$$



$$K_8 = 8 \cos^3 \phi \beta_t / 9 x_{ts}^2 \beta_1^2 \sin \phi$$

標的で平坦となる領域(x_{ts} : 特異点)を決定すれば K_8 が決定

F. Meot等 PRST AB 3,
103501 (2000)

フィラメントモデルを用いて8
極+12極電磁石により平坦化

$$x_{ts} = 4/3\sigma = 4/3 (\beta_t \epsilon)^{1/2}$$



$$K_8 = \cos^3 \phi / 2\epsilon \beta_1^2 \sin \phi$$

百合等 PRST AB 10, 10401(2007)

フィラメントモデルを用いて多極の
電磁石により完全なる平坦化

$$K_{2n} = \frac{(n-2)!}{(n/2-1)!} \frac{(-1)^{n/2}}{(2\epsilon\beta)^{n/2-1}} \frac{1}{\beta \tan \phi} \quad (n = 4, 6, 8, \dots)$$

$$K_8 = 1/\epsilon\beta^2 \tan \phi$$

八極単独だとサ
イドピーク発生

$$x_{ts} = \sqrt{\pi/2} \sqrt{\epsilon\beta_1} |\cos \phi|$$

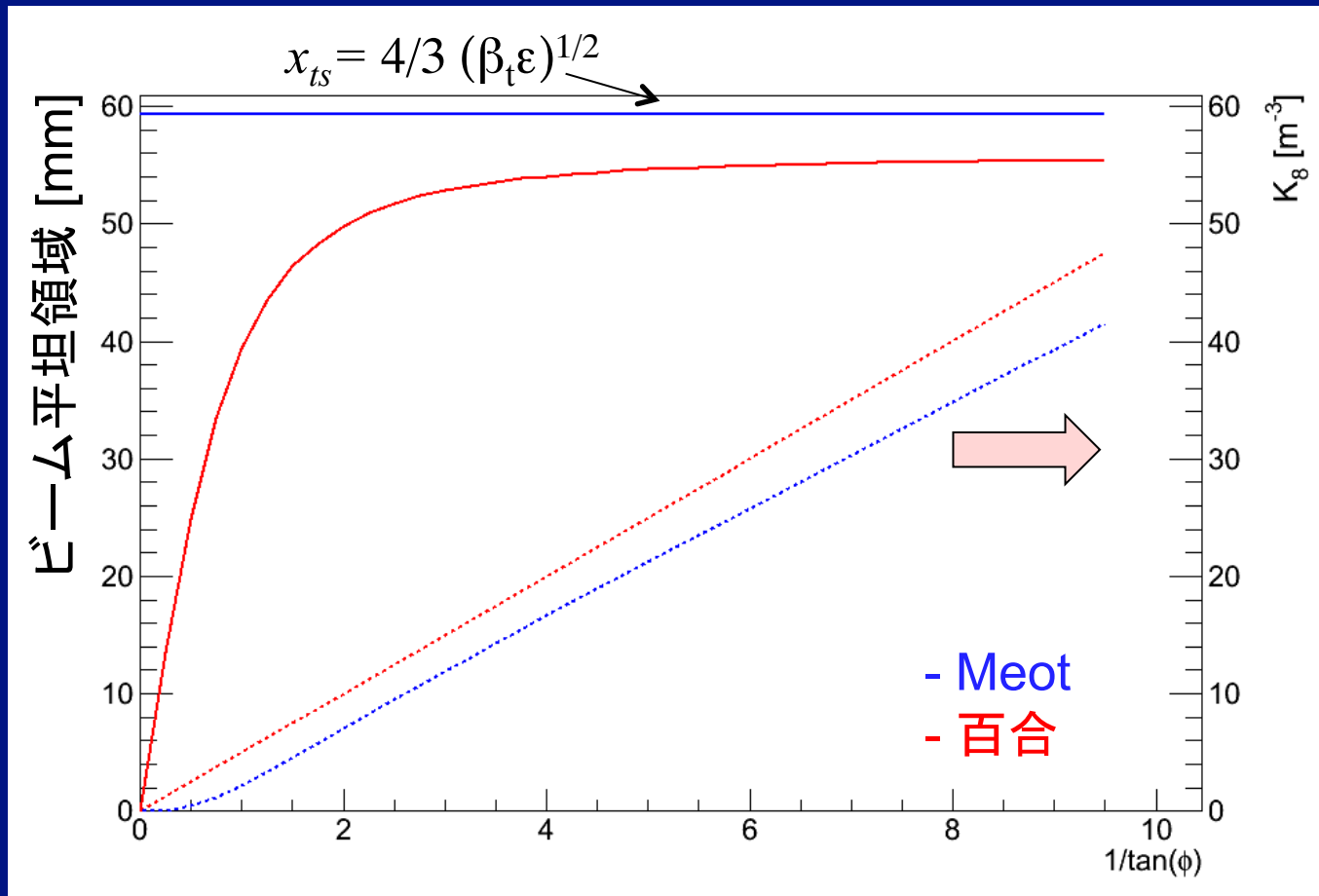


$$K_8 = \frac{16}{9\pi\epsilon\beta_1^2 \tan \phi} \cong 0.545/\epsilon\beta_1^2 \tan \phi$$

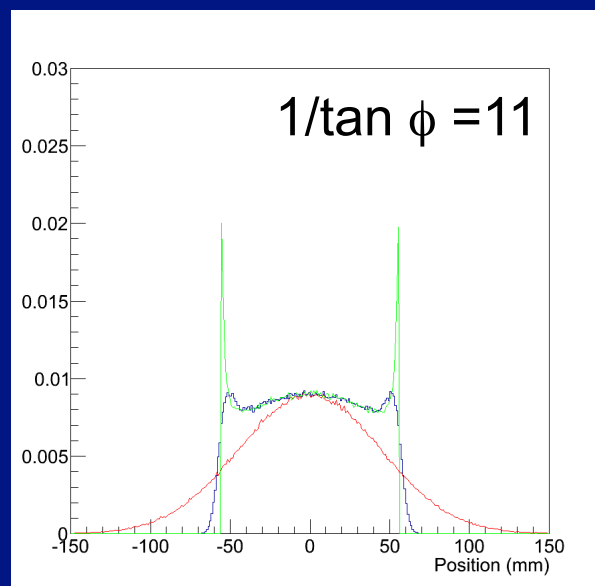
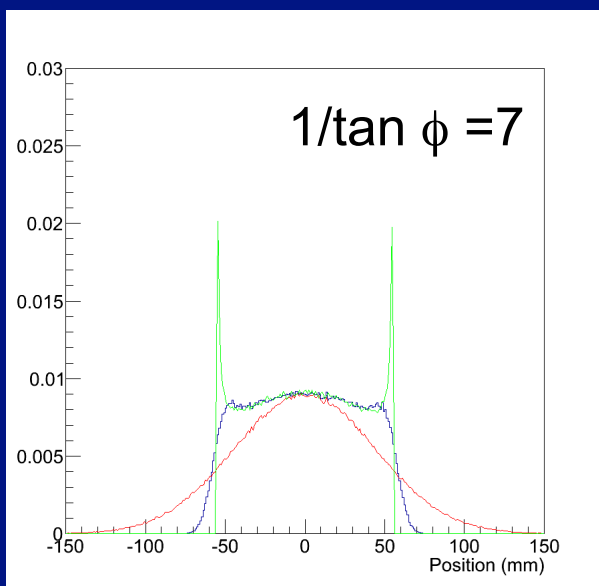
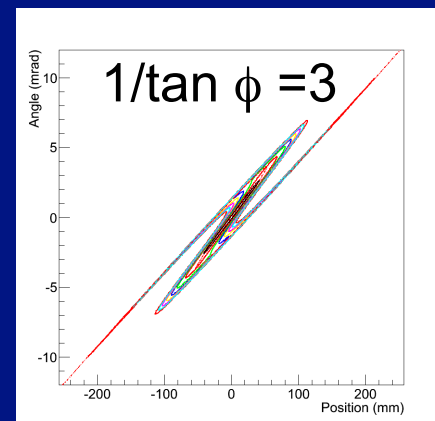
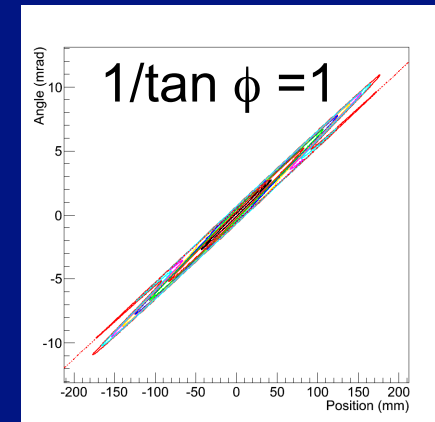
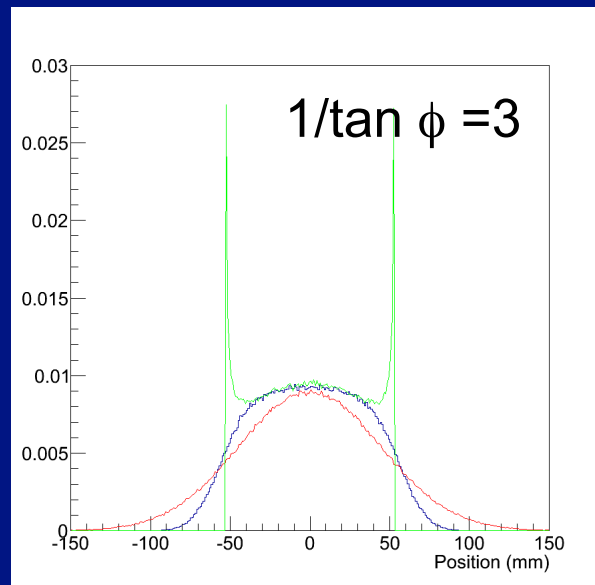
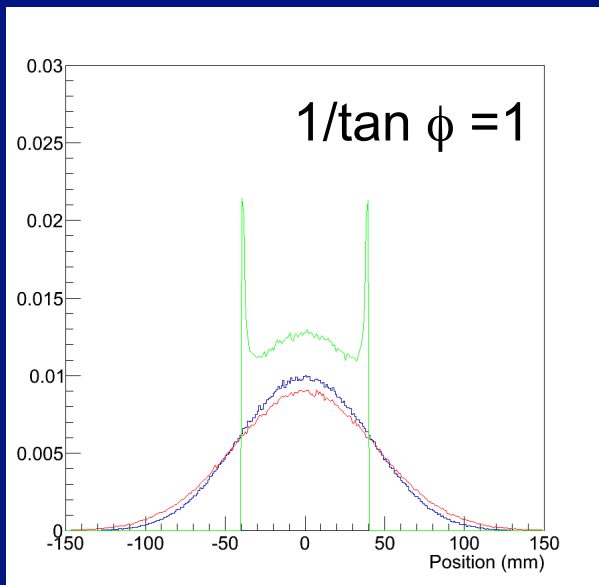
必要な磁場強度と位相進行差

1/tan ϕ が小さければ必要なK8も小さい

→ 1/tan ϕ を小さくなる位相進行差を選択すればいいのか？



最適となる位相進行差とは？

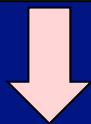


1/tan $\phi = 3 \sim 7$ が良い
何故か？

何故(1/tan φ = 3~7が良いのか?)

フィラメントモデルは便利であるが限界:
特異点では無限大の強度となる

$$g(x_t) = f(x_1)dx_1/dx_t = f(x_1)/(\lambda_1 + 3\lambda_3x_1^2)$$



フィラメントモデルに角度の広がりを考慮

$$g(x_t)dx_t = f(x_1)dx_1 + f(x_1)dp_{x_1}$$

特異点周辺では $dx_1/dx_t = 0$

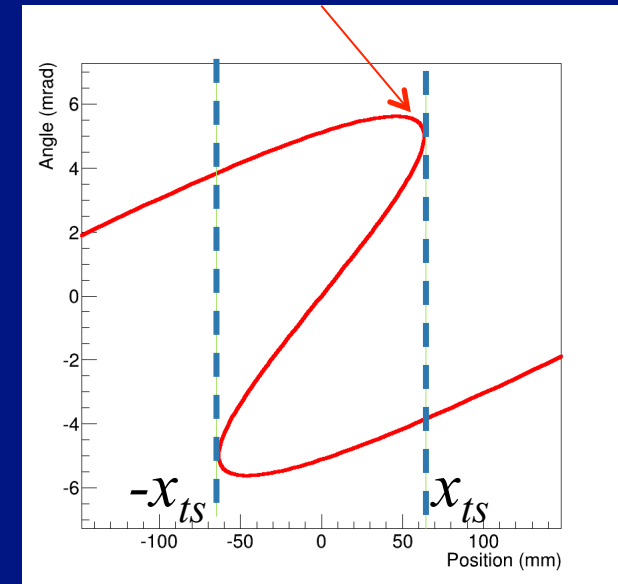
$$g(x_{ts}) = f(x_{1s})dp_{x_1}/dx_t \quad dp_{x_1}/dx_t = (\sqrt{\beta_t/\beta_1} \sin \phi)^{-1}$$

$F \equiv$ 特異点における強度/中心の強度

$$F \sin \phi = \exp\left(-\frac{x_{1s}^2}{2\epsilon\beta_1}\right)$$

$$\phi = \arcsin(\exp(-9\pi/16)/F) \quad 9\pi/16 = 0.171$$

零の幅に有限の分布



$F=1 \quad 1/\tan \phi = 5.8$
 $F=0.5 \quad 1/\tan \phi = 2.8$
($\phi 20^\circ$)

一般解としての最適となる ϕ

$$F \sin \phi = \exp\left(-\frac{x_{1s}^2}{2\epsilon\beta_1}\right)$$

$$\phi = \arcsin(\exp(-9\pi/16)/F)$$

本検討の最適値(一般解) :

$$2.8 < 1/\tan \phi < 5.8 \quad 9.8 < \phi < 19.7$$

CSNSの検討結果

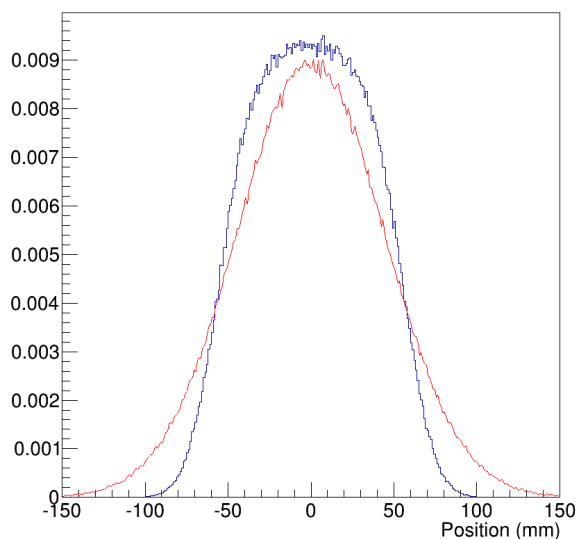
CSNSのTwissパラメータのみ限定

$$1/\tan \phi = 4.2$$

$$\phi = 13.5^\circ$$

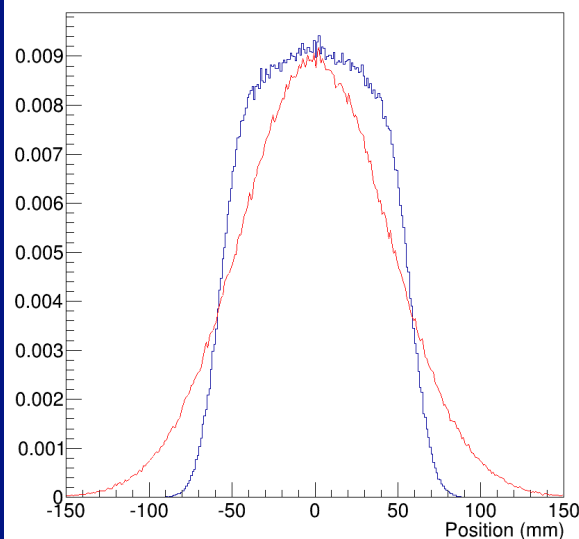
F=0.5

$$1/\tan \phi = 2.8, \phi = 19.7^\circ$$



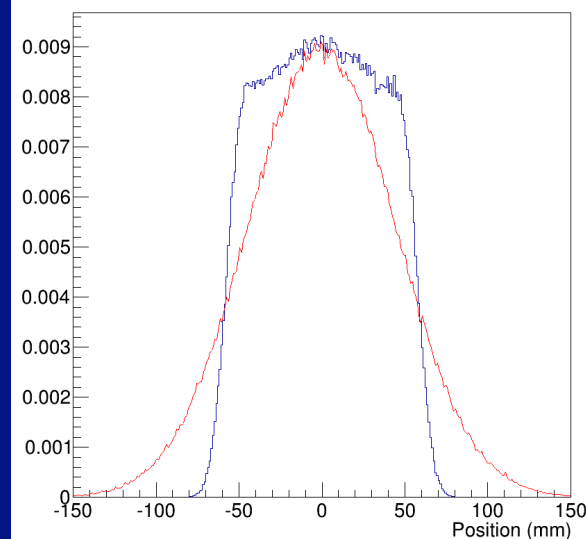
F=0.7

$$1/\tan \phi = 4, \phi = 14^\circ$$



F=1.0

$$1/\tan \phi = 5.8, \phi = 9.8^\circ$$



- 水銀ターゲットのピッチング損傷緩和のために非線形光学によるビーム平坦化の技術を開発した。ピークの電流密度は30%低減し、ピッチング損傷緩和は80%低減できる見込みを得た。
- 八極電磁石1台を用いる場合でビームが磁場が平坦となるパラメータを考案した
 - ロスが発生しない程度に八極電磁石で β を拡大
 - ターゲット上のビーム幅から β を決定 $\sim (\beta\varepsilon)^{0.5}$
 - 位相進行差 Φ を $1/\tan \Phi = 3\sim 5$ となるように調整

● 今後の課題

- Anti-correlated paintによる非線形光学の最適化
- 12極電磁石を用いたビームロスの低減

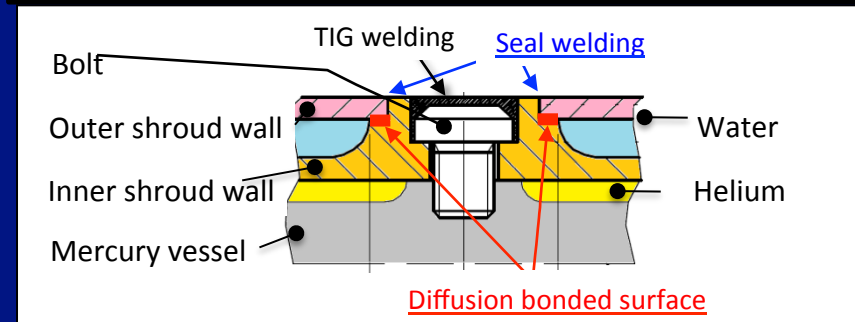
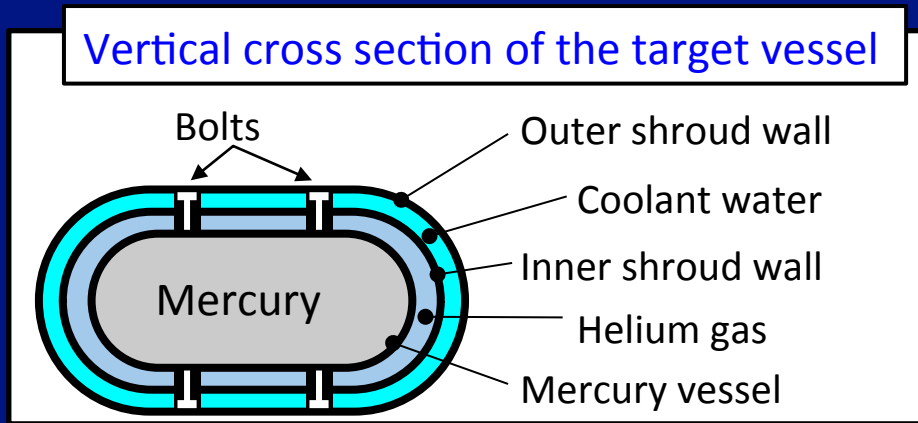
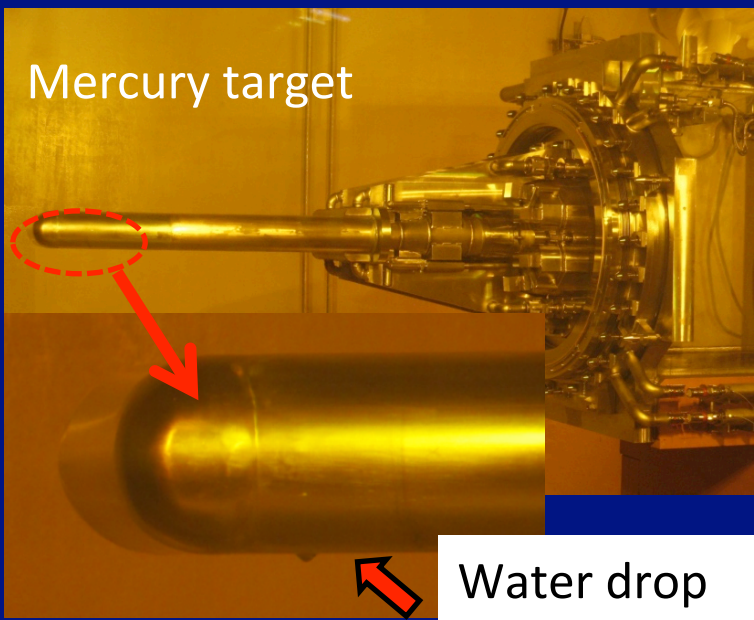
ご清聴ありがとうございました

大強度加速器施設には辛抱が必要!



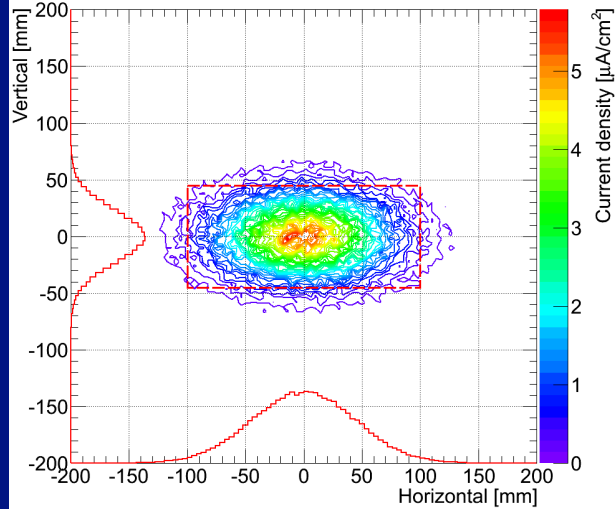
Water leak events at mercury target

- In April 2015, water leak was found during 0.5 MW beam operation. Water in target shroud soaked out through the defect of the welding.
- On Nov 2015, water leaked into inner shroud so that we can not find the leaked point (possibly defect of melting around mirror).
- Since no robust target remains, operational beam power is decided to be 200 kW.

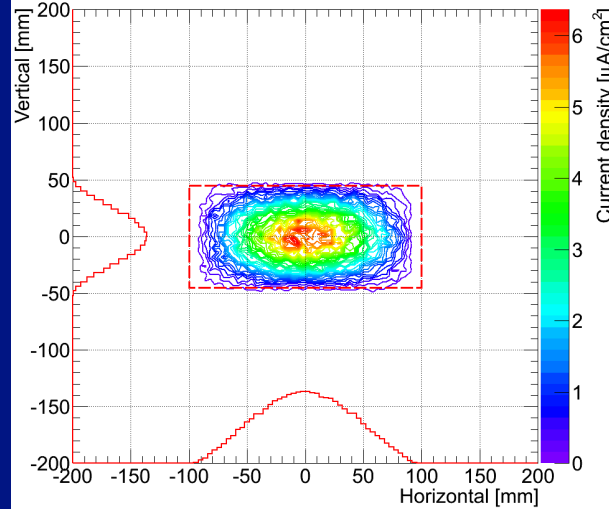


中性子標的でのプロフィール(計算)

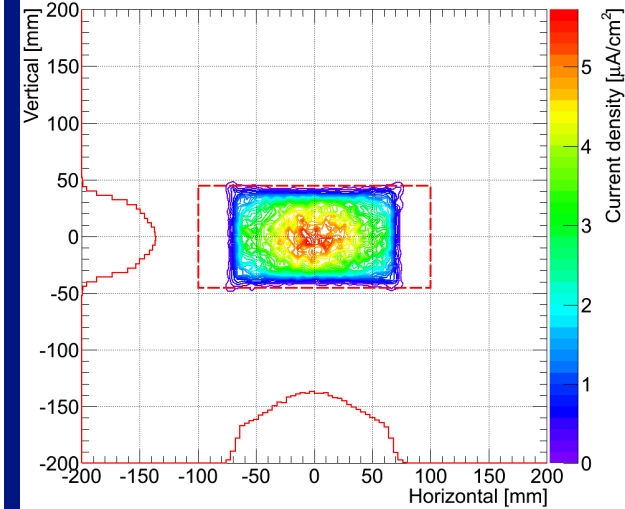
OCT 0A



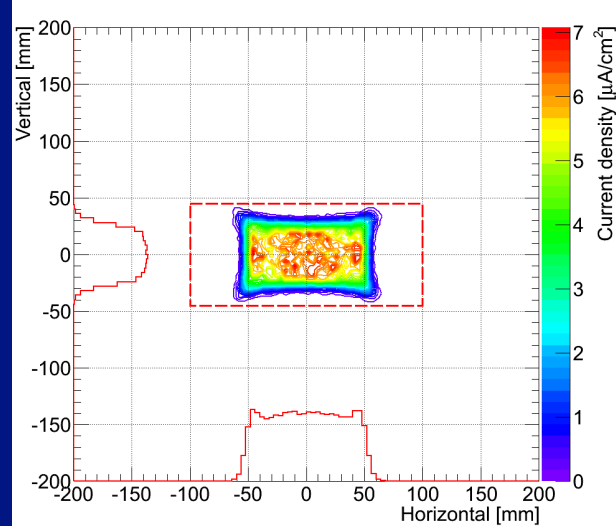
OCT 400A



OCT 698A

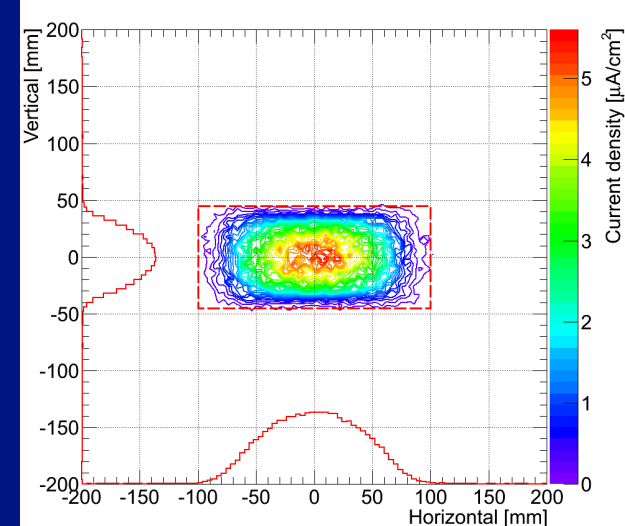


OCT 1200A



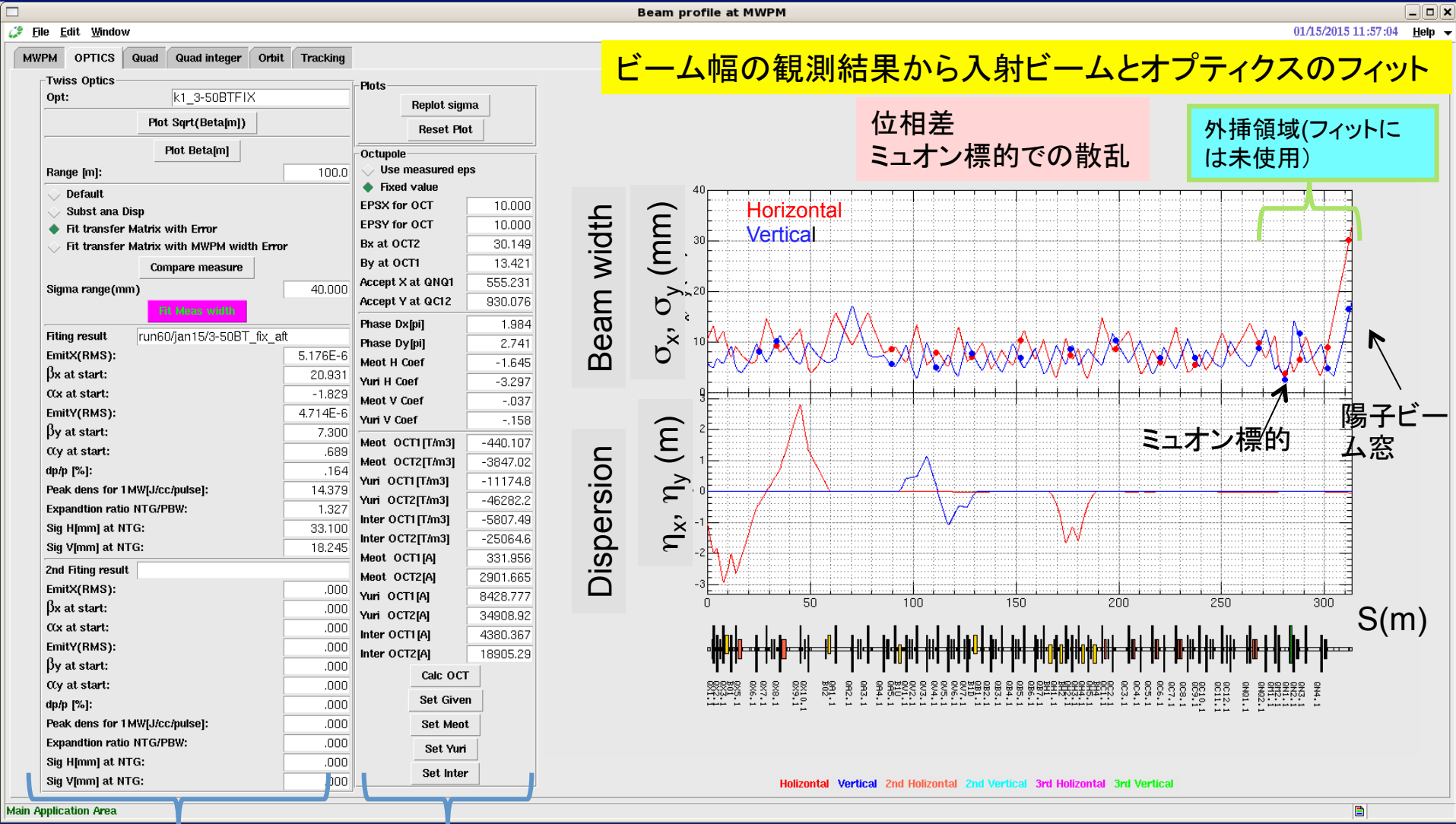
- 中性子標的入口のアパチャと同じ面積となる理想的な形状となる
- 平坦化と八極電磁石近傍のビームロスが競合する→八極下流の四極を花形ダクト化により更なる平坦化を目指す

OCT 698A ミュオン標的有



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