

# 核破碎中性子源のための非線形光学による ビーム収束技術

*Nonlinear beam focus for a spallation neutron source*

明午 伸一郎<sup>1)</sup>,  
大井 元貴<sup>1)</sup>, 坪 敦<sup>1)</sup>, 西川 雅章<sup>1)</sup>, 藤森 寛<sup>2)</sup>

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

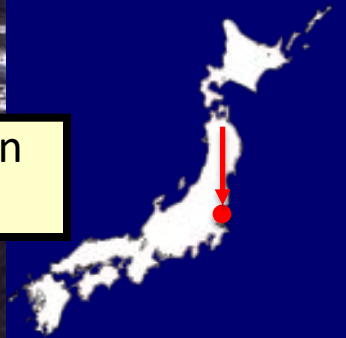
- 緒言
- J-PARC MLFのビーム運転状況
- 非線形光学を用いたビーム収束
  - 原理
  - ファラメントモデルを用いた解析
  - トラッキングによる最適条件の探索
- まとめ



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)

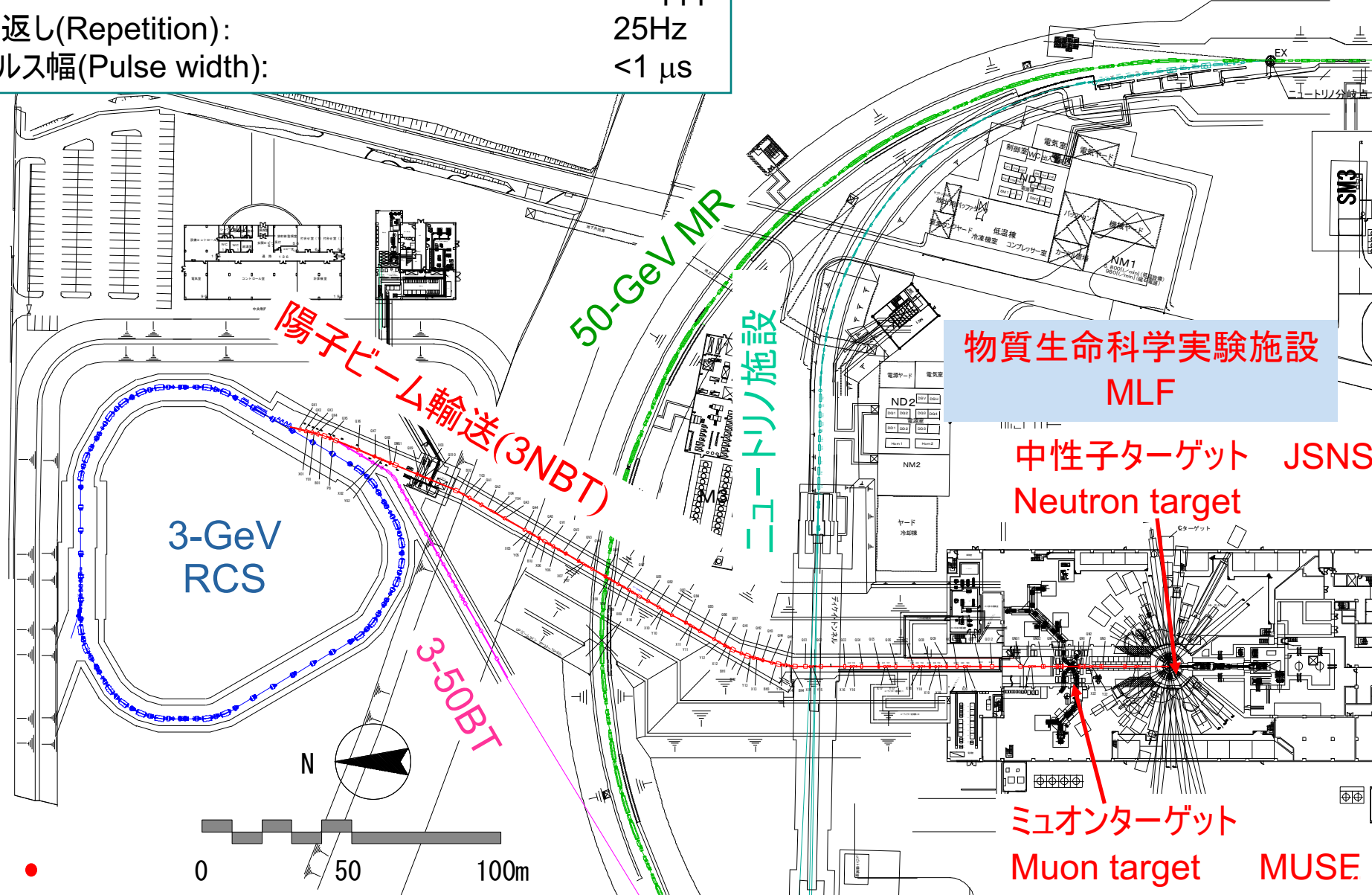
JRR-3M 800m to MLF

- 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  $\mu$ A  
 8.3x10<sup>13</sup> ppp  
 繰返し(Repetition): 25Hz  
 パルス幅(Pulse width): <1  $\mu$ s

RCSから標的までのビーム輸送  
 全長(Total length) 314 m  
**世界最長のビーム輸送施設(1MWクラス)**





# Targets placed at MLF

## Muon target

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

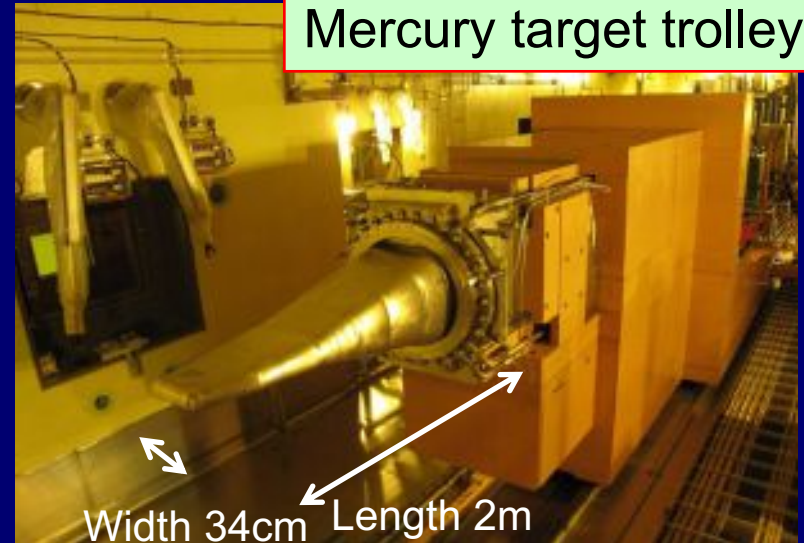
## Neutron target

- Mercury
- Highest pulse intensity in the world



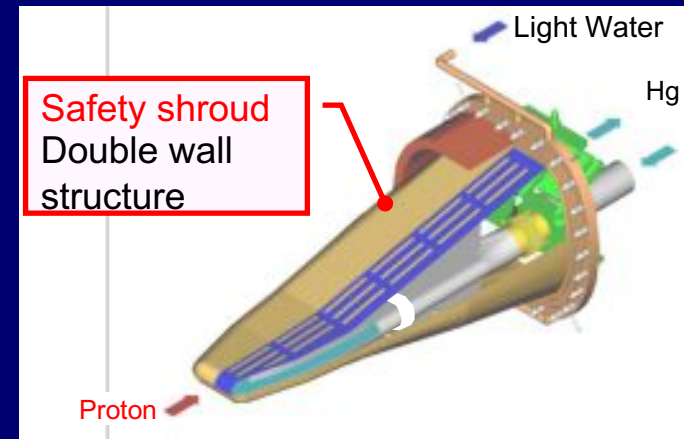
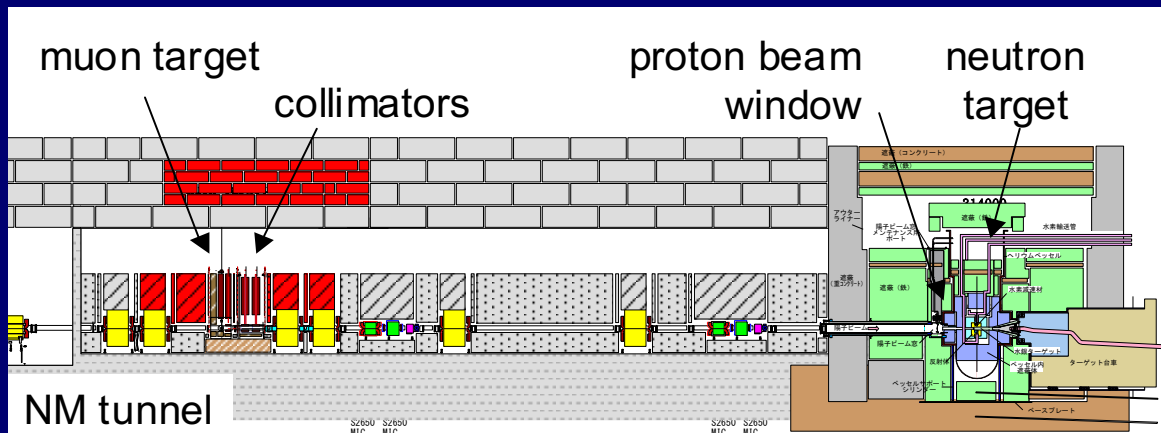
Rotating target

Thick. 2cm  
Diam. 30 cm

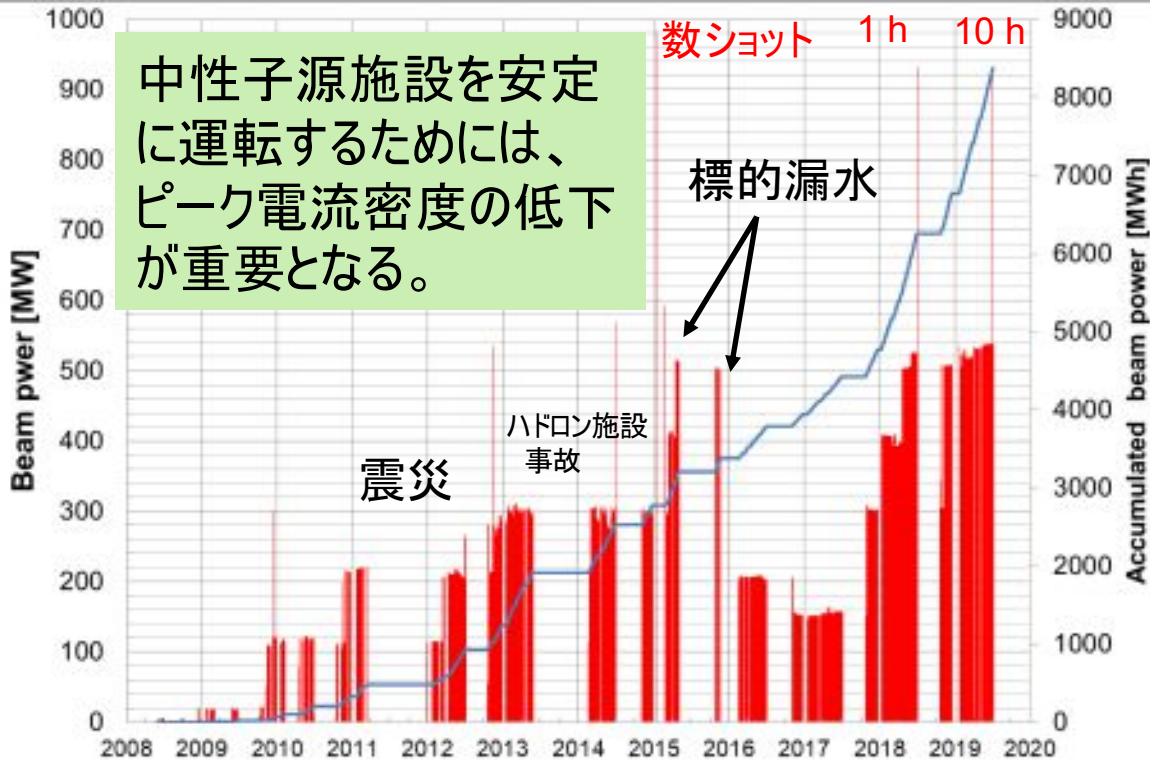


Mercury target trolley

Width 34cm Length 2m



# MLFの運転履歴

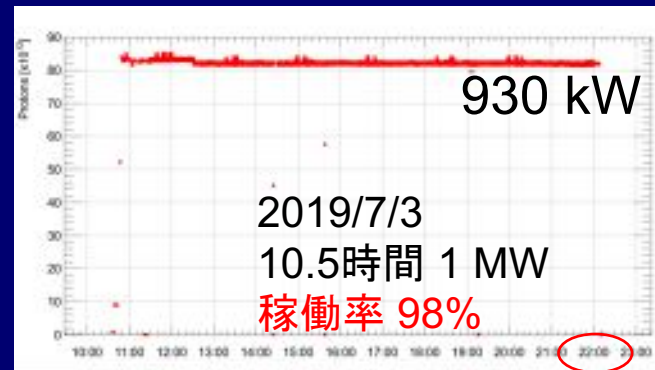


中性子源施設を安定に運転するためには、ピーク電流密度の低下が重要となる。

## 1 MW試験

- 年に1度のセブスタディー
- 万が一のことを考慮し22時迄に終了(22時のシンデレラ)

## 1 MW 長期間試験



1 MW 1時間試験(2018/7)

- 大強度陽子ビーム(MW級)と人類との戦いの序章
- ターゲット容器に損傷発生
  - 水銀内部で生じた圧力波→容器にピitting損傷が発生
  - ヘリウムバブル導入により緩和



SNS標的容器

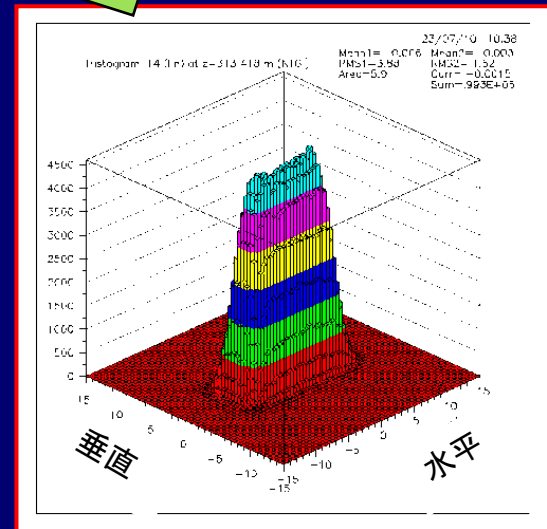
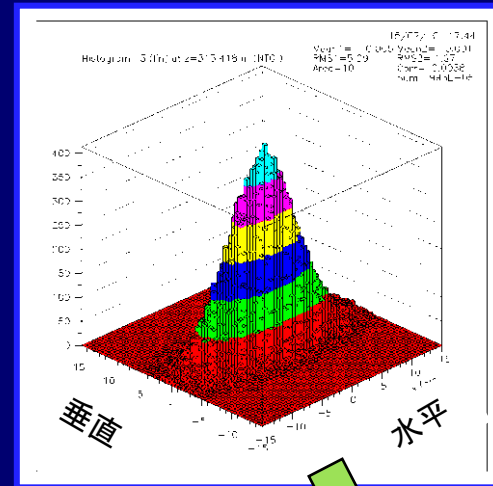
水銀

# 非線形光学によるビーム収束

## 線形光学：任意の場所でガウス分布

- 周辺部発熱等が律速となり、拡幅によるピーク電流密度の低下は困難
- 非線形光学でビーム周辺部を収束し平坦な分布にしピークを低減

## 八極電磁石 非励磁/励磁のビーム形状の比較(計算値)

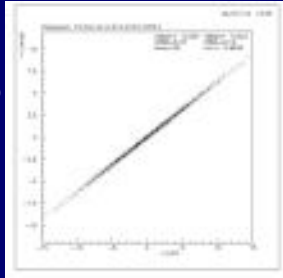


### 線形光学

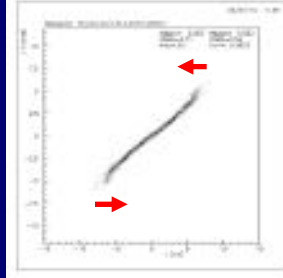
### 非線形収束

位相空間分布

角度 Divergence



角度 Divergence

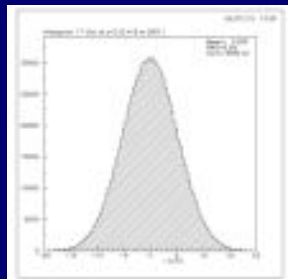


位置 Position

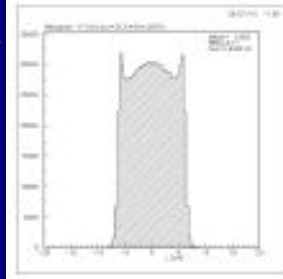
位置 Position

空間分布

強度 Intensity



強度 Intensity



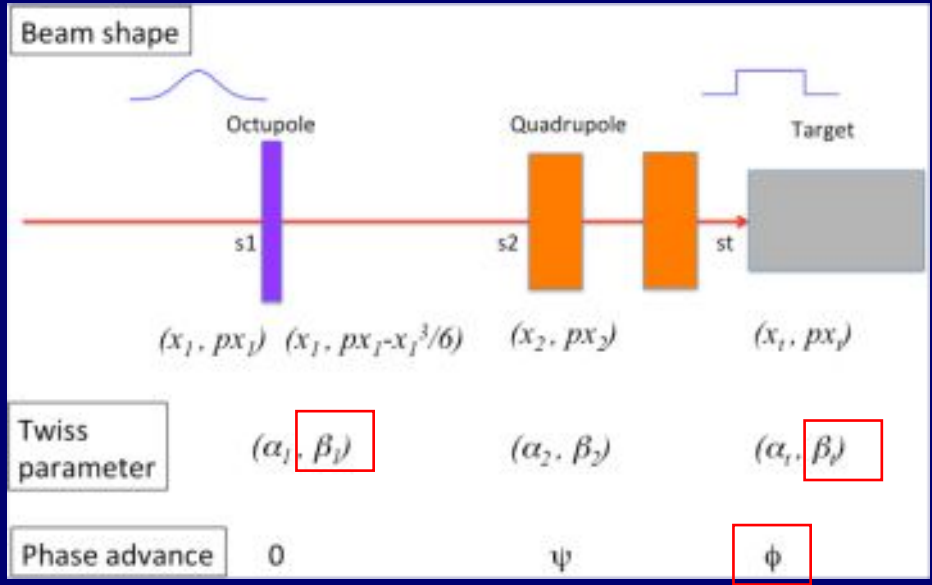
位置 Position

位置 Position

原理：裾野のビームを高次の磁場で中心部に畳み込む

# 非線形光学の位相空間分布

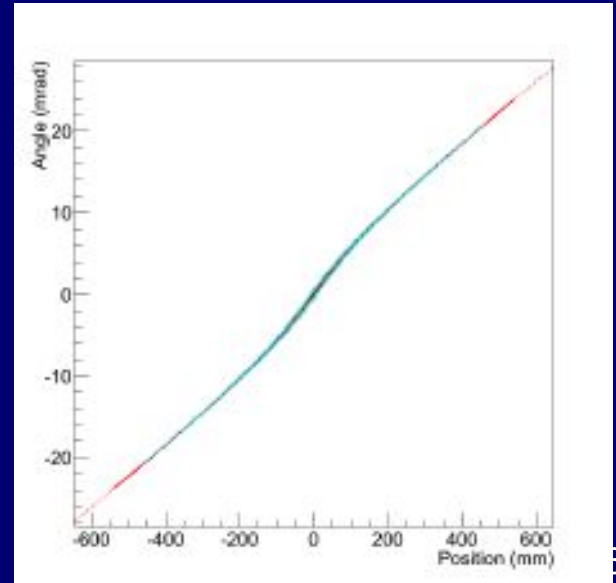
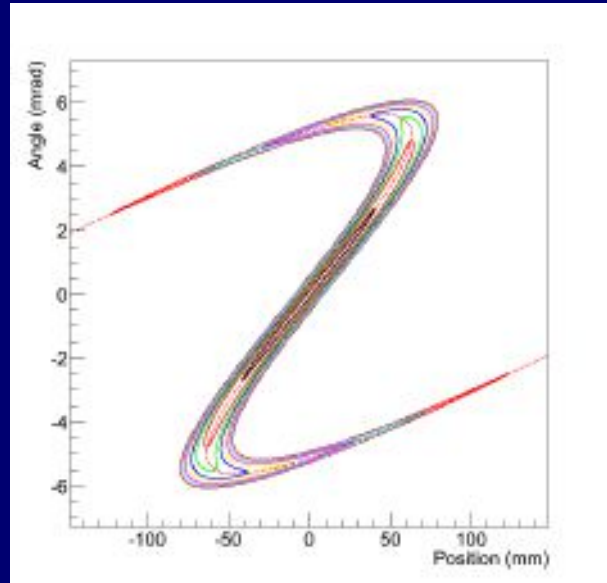
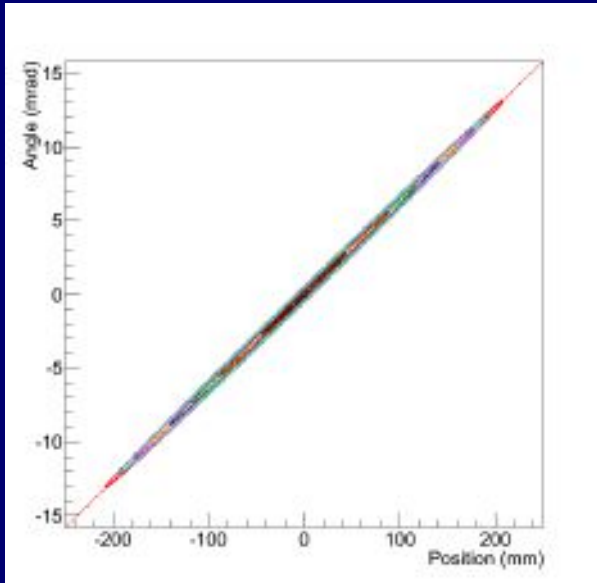
- 位相空間分布で  
ガウス分布を仮定(RCSでは良い  
仮定)



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し、線上で  
ガウス分布となるフィラメントモデル  
が成立

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

任意な八極下流側のビーム位置

$$x_l \rightarrow x_t$$

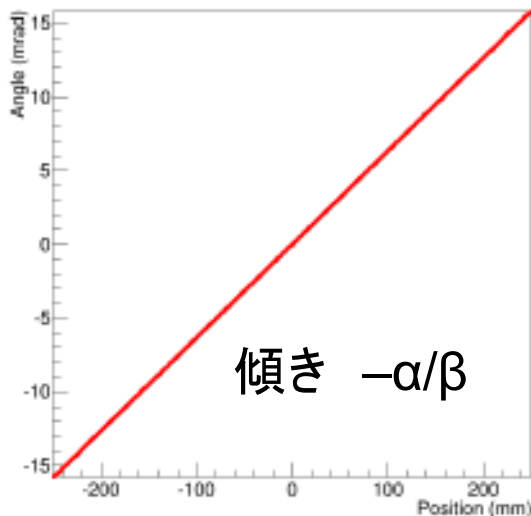
$$x_t = \lambda_3 x_1^3 + \lambda_1 x_1$$

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

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

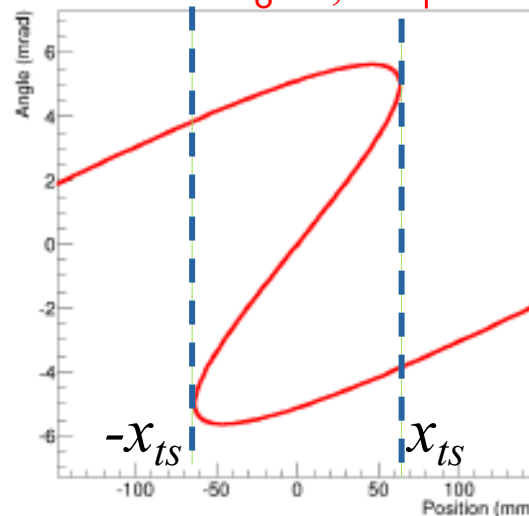
$$g(x_t) = f(x_1) dx_1 / dx_t = f(x_1) / (\lambda_1 + 3\lambda_3 x_1^2)$$

線形光学



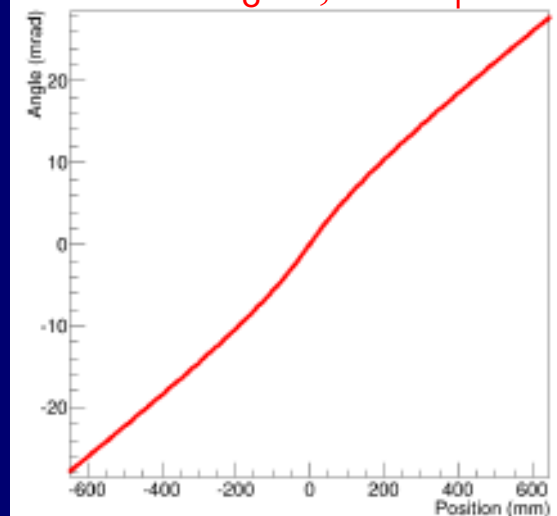
非線形光学(収束)

For  $K_8 > 0, 0 < \phi < \pi/2$



非線形光学(発散)

For  $K_8 > 0, \pi/2 < \phi < \pi$



# 平坦化に必要な八極磁場( $K_8$ )

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

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



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

F. Meot等 PRST AB 3, 103501 (2000)

フィラメントモデルを用いて8極および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)

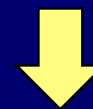
フィラメントモデルを用いて多極の電磁石により完全なる平坦化

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

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

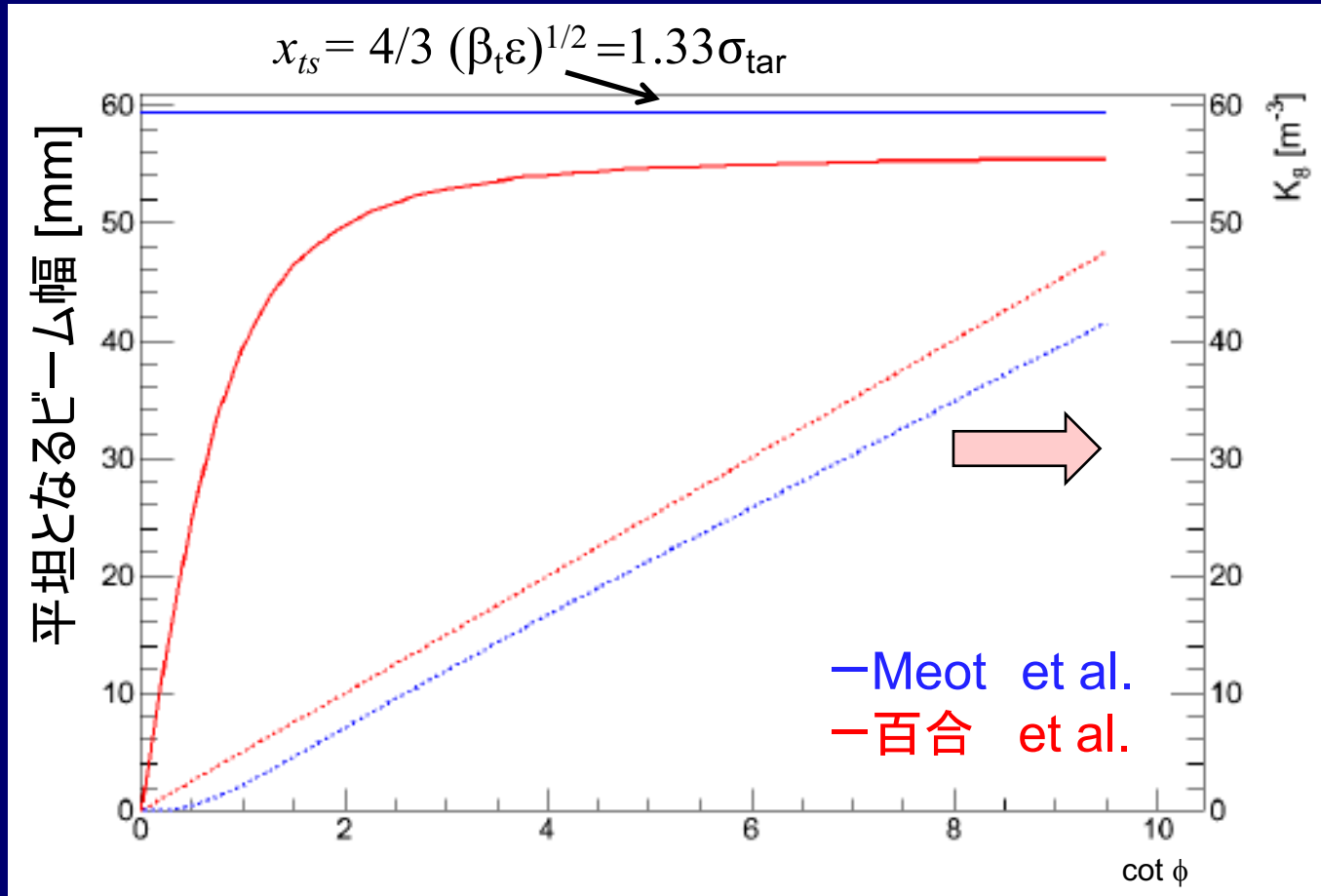
八極のみの場合は周部にピーク発生

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



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

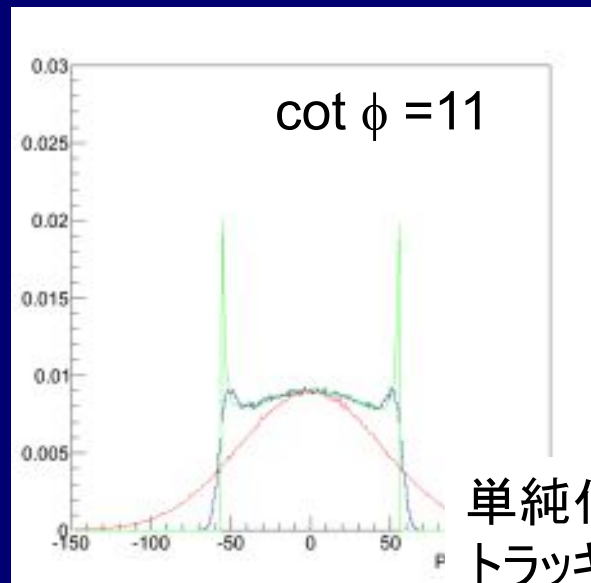
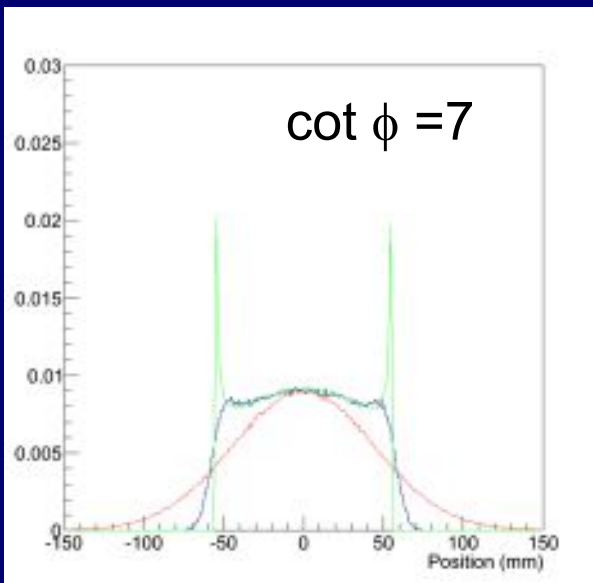
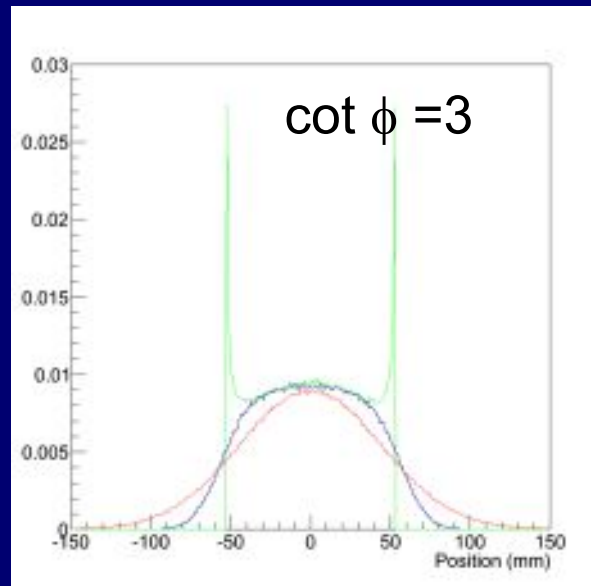
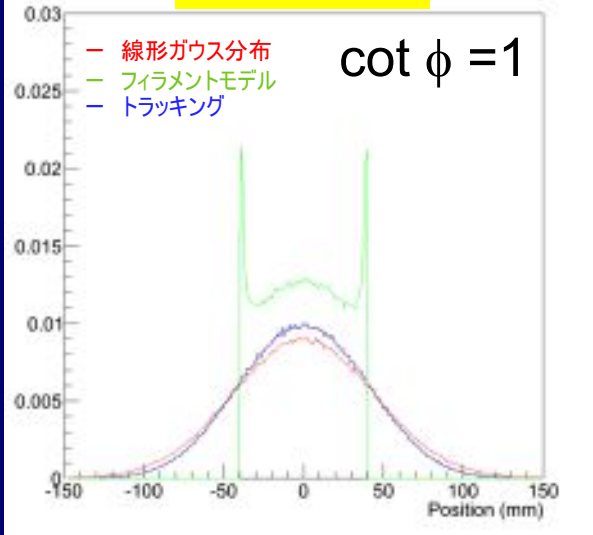
# 必要な磁場強度と位相進行差



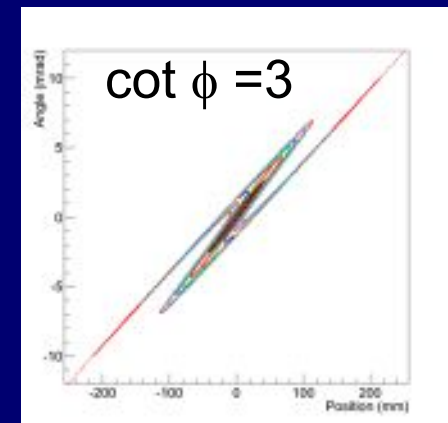
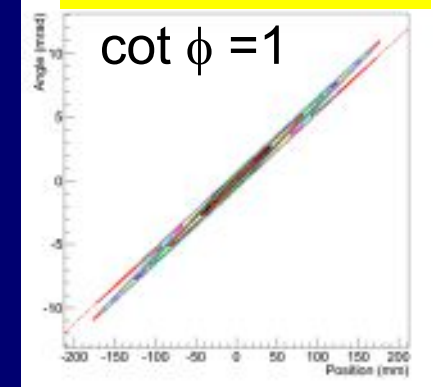
cot  $\phi$ が小さければ必要な八極磁場( $K_8$ )も小さい  
→ cot  $\phi$ が小さくし、 $K_8$ を低くすることで非線形収束する？

# 最適な位相進行差( $\phi$ )

## 空間分布



## 位相空間分布



$\cot \phi \ll 3$ : 効果なし  
 $\cot \phi = 3 \sim 7$ : 収束性良好

単純化なフィラメントモデルでは限界  
トラッキングによる詳細な調査が必要



# トラッキングによる評価

- フィラメントモデルでは詳細な検討が不可
- 位相空間分布の正規化により一般化した議論

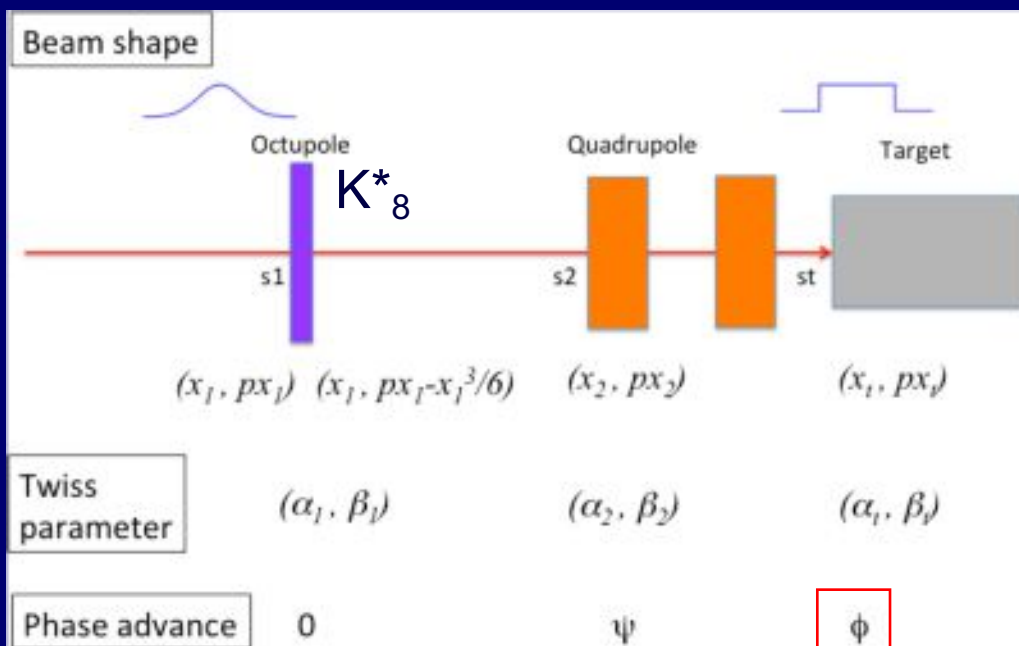
標的位置:  $\sigma_t = x_t / (\epsilon \beta_t)^{1/2}$   
 八極磁場:  $K^*_8 = K_8 \epsilon \beta_1^2$   
 ※無次元数

フィラメントモデル解(Meot等)

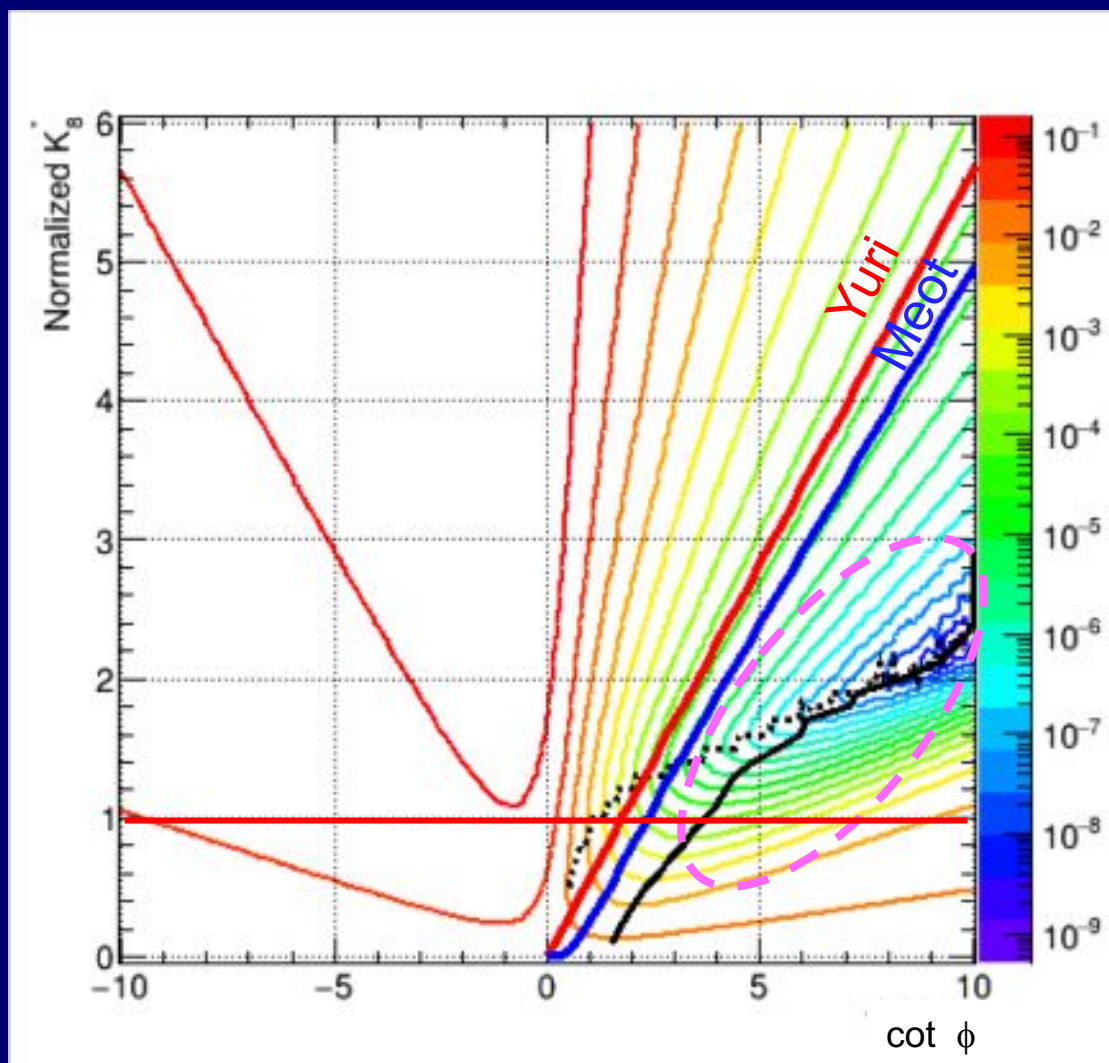
$$K_8 = \cos^3 \phi / 2\epsilon \beta_1^2 \sin \phi$$

パラメータ:  $K^*_8, \cot \phi$

- 一般化した議論が可能
- 上記のパラメータに関し標的上のプロファイルを追跡(粒子数  $2 \times 10^{11}$ )



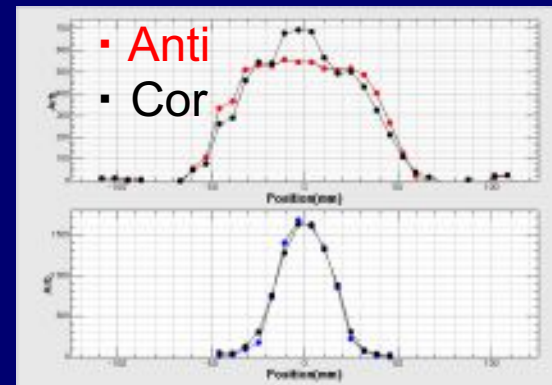
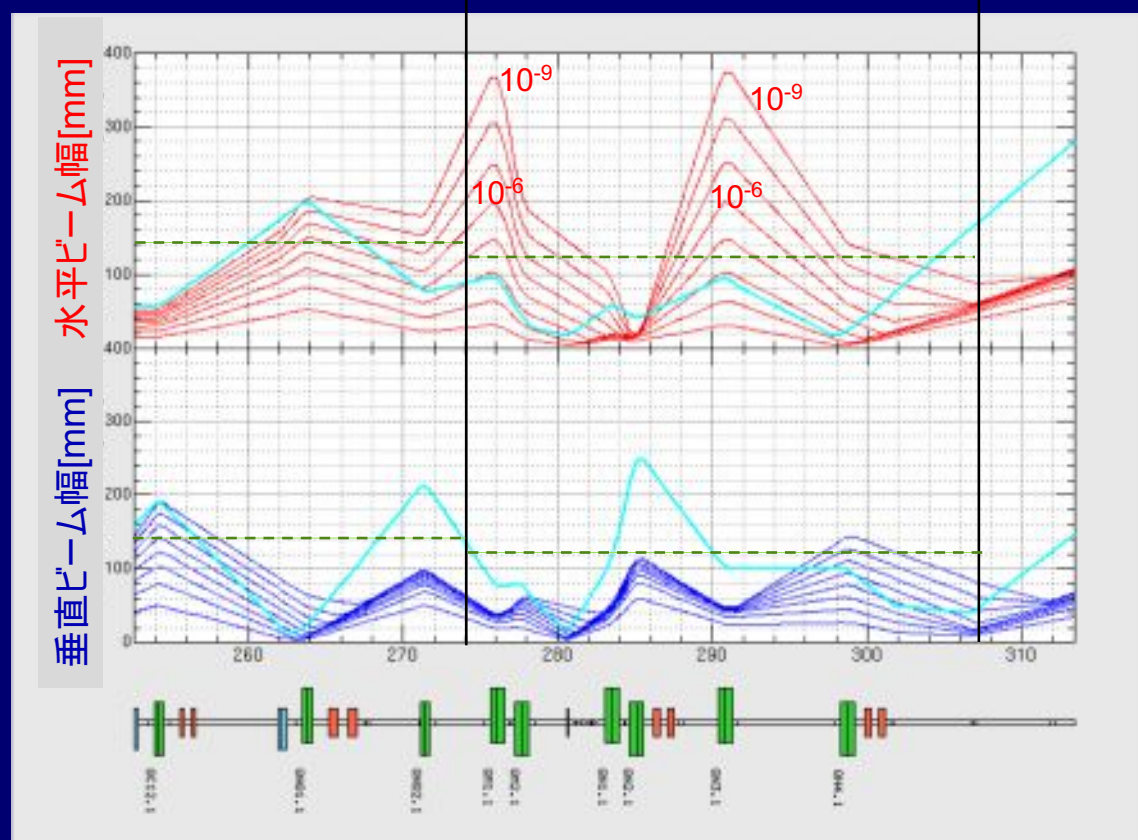
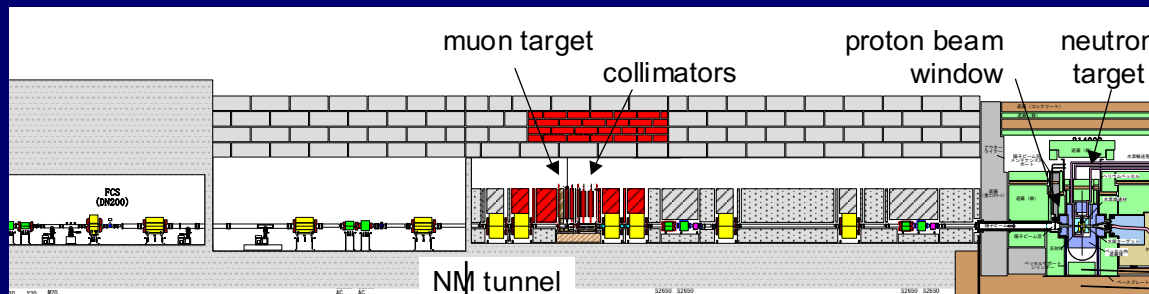
# トラッキングによる計算結果



- 標的上で $2.5\sigma_t$ の外側に位置する粒子の割合を評価  
(ガウス分布: 1.2%)
- $\cot \phi > 3$ : 急激に低下
- フィラメントモデルの解析結果(Meot等)より低い $K_g^*$ で十分
- ロスを抑えた状態で水銀標的上のビームを非線形光学で収束し、ピーク密度を下げる  
 $K_g^* \sim 1$ ,  $\cot \phi \sim 3$

# ビームロスの評価

- ミュオン標的周辺:常に数kWの損失があるため、10 W/m程度の損失は許容範囲
- 八極磁場(K<sub>8</sub>) ~1: 特に大きなロスはなく、残留の線量率、冷却水の放射能濃度は問題ない
- 1 MW時では0.5 MW時に比べ水銀標的入口の線量率が50%となり、効果が増大した

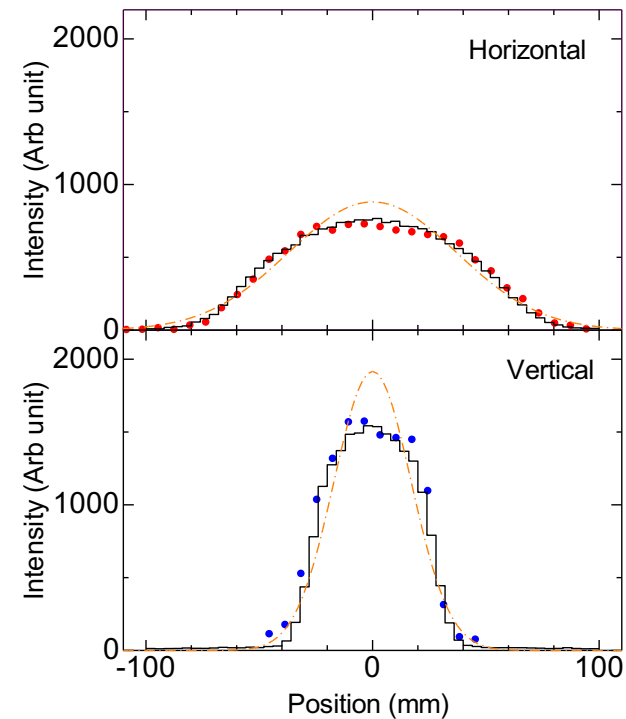
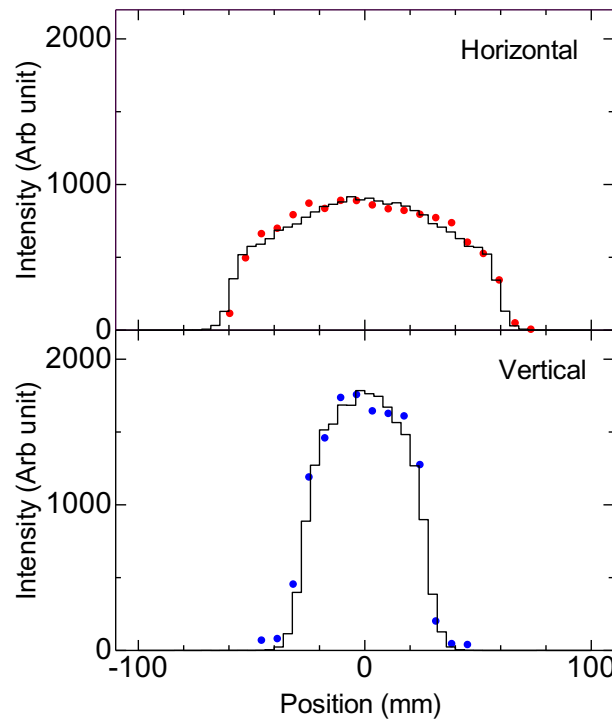
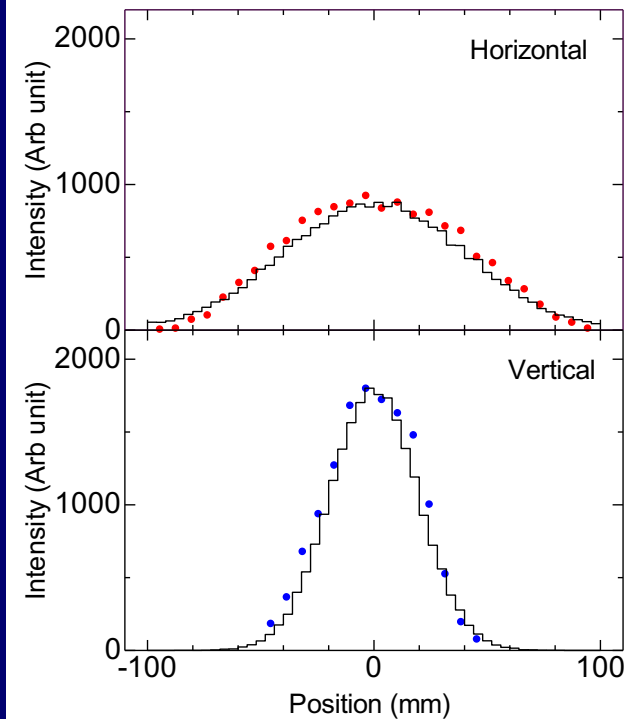


# 実験と計算のプロファイルの比較

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~30%のピーク密度減少が可能

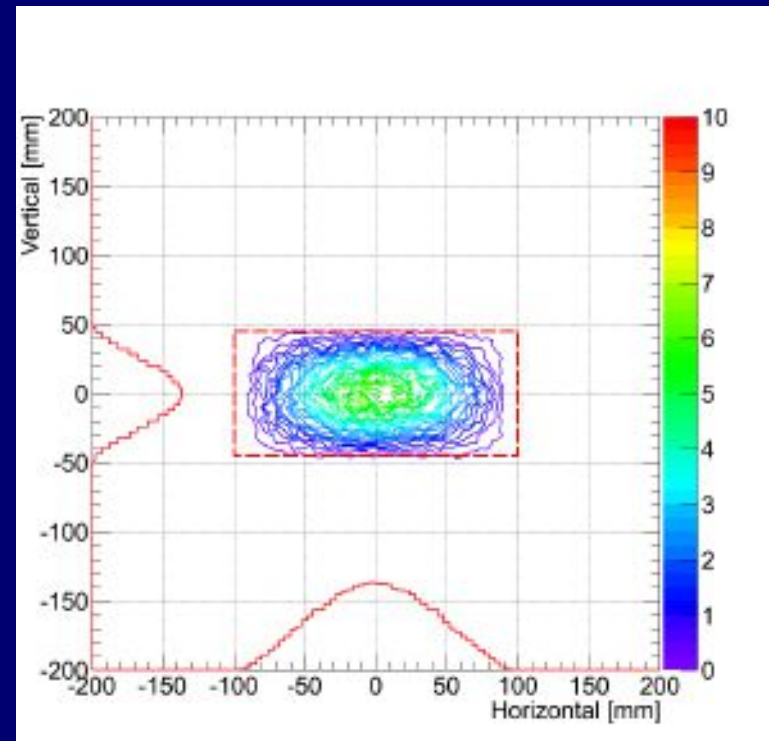
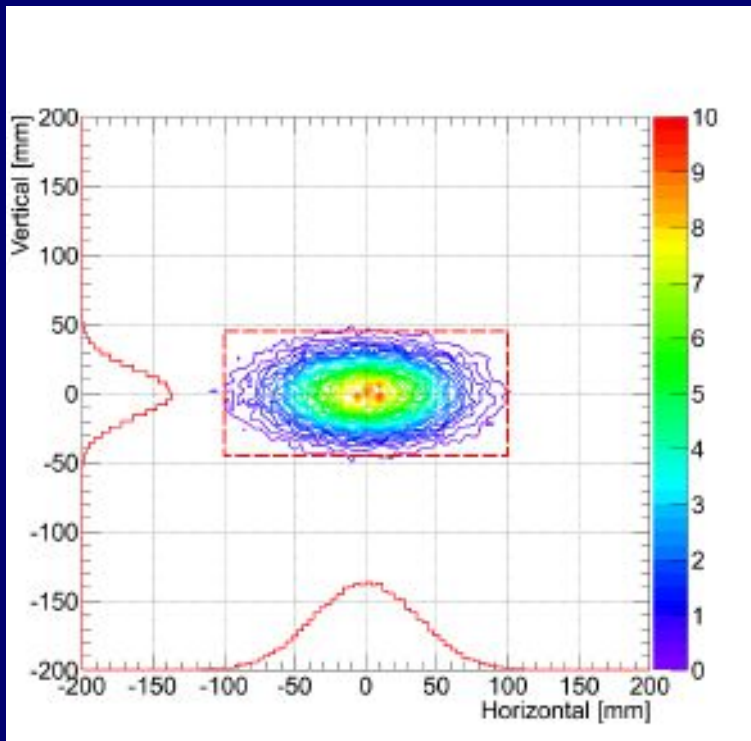


# 標的における電流密度

## 1 M運転時における条件で最大電流密度を評価

線形

非線形(400A, ミュオン標的なし)



- 30%の電流密度の低下が可能
- ピッチング損傷は80%抑制可能

- 核破碎中性子源の水銀標的におけるビームに起因する損傷緩和のため、非線形光学によるビーム収束技術を開発を行った。
- 標的におけるビーム形状最適化
  - トラッキングで一般化した評価： $K_8^*(=K_8 \epsilon \beta_1^2)$ ,  $\cot \phi$ の導入
  - ビームロスを抑え、ピーク電流密度を抑えるためには $K_8^* \sim 1$ ,  $\cot \phi \sim 3$ がほぼ良好な解
- 1 MWの安定運転に貢献
  - MLFの水銀標的のピーク電流密度 $\sim 30\%$ 抑制可能
- 今後の予定
  - MLFの出力増加： 来年の夏 $\sim 700$  kW
  - 1週間程度の1 MW運転を計画中(no moreシンデレラ)

# ご清聴ありがとうございました



RIP 大吉