

T2K実験次期ミュオンモニター性能評価のための 遷移放射光による電子ビームプロファイル測定

東北大理，大阪公大理^A，東理大理工^B，京都大理^C，
KEK核素研^D，NITEP^E

笠間奏平，市川温子，瀧藤航一，中村輝石，川村悠馬^A，清矢良浩^{A,E}，
本條貴司^A，山本和弘^{A,E}，山本達也^A，石塚正基^B，木河達也^C，
安留健嗣^C，松原綱之^D，Megan Friend^D，中平武^D，
他T2K Collaboration

2022/9/8 日本物理学会2022年秋季大会

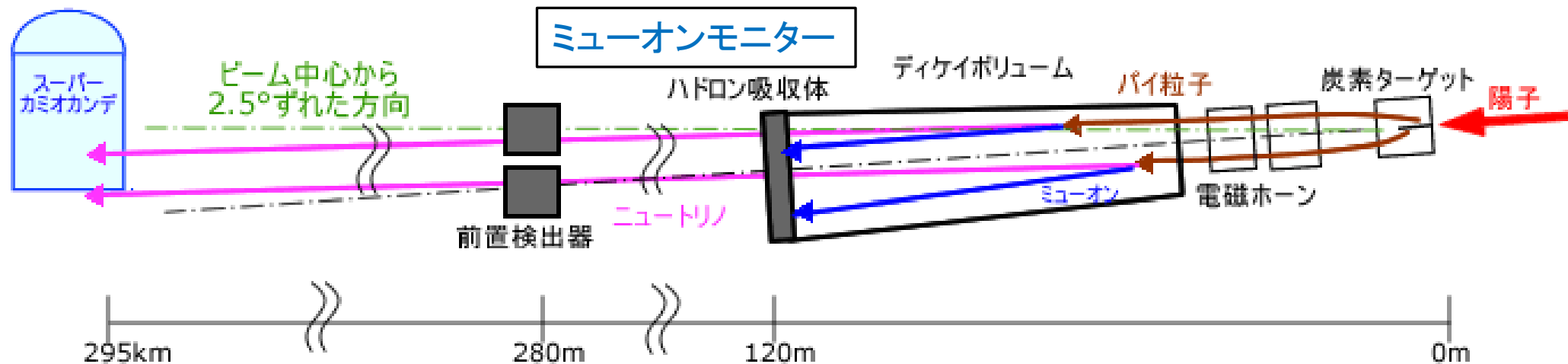
目次

~~8aA422-7~~との連続講演

- T2K実験におけるミュオンモニター
 - 電子増倍管
- 第3回電子ビーム照射試験
 - 遷移放射光によるビームプロファイル測定
 - 電子増倍管へのビーム照射の評価

T2K実験

- 295kmの距離を利用した長基線ニュートリノ振動実験。
- $\pi \rightarrow \mu + \nu$ の崩壊により生じるニュートリノを利用。
- ニュートリノと反ニュートリノの振動確率の違いから、CP対称性の破れを測定。
- ビーム強度を3倍にする計画。



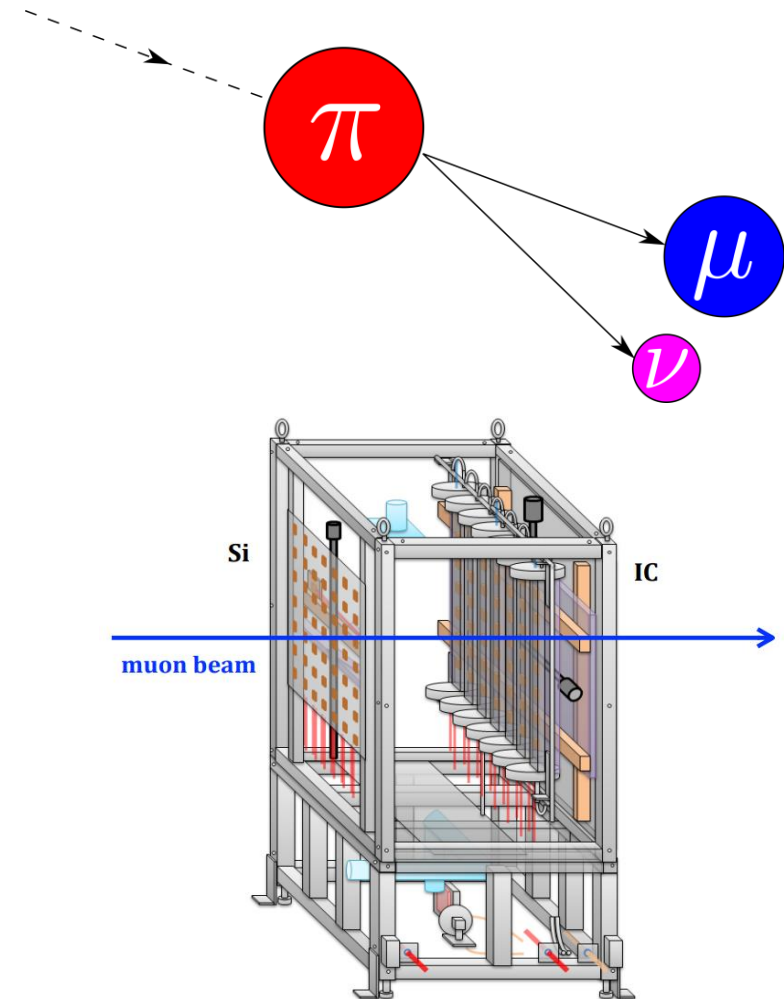
<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/sk/t2k.html>から引用, 追記

ミューオンモニター

- ミューオンのビーム強度と方向の測定から、ニュートリノビームを測定。
- シリコンPINフォトダイオード (Si) とイオンチェンバー (IC)
- ミューオンビームのフラックス
 - 現在 1.5×10^6 muons/cm²/s
 - 将来 4.2×10^6 muons/cm²/s

強度の増加により、

- 放射線耐性が懸念される。
- ICは、空間電荷効果による信号量の減少。
- 特に、Siは毎月の交換が必要。



Y Ashida et al., PTEP.2018, 103H01, 2018

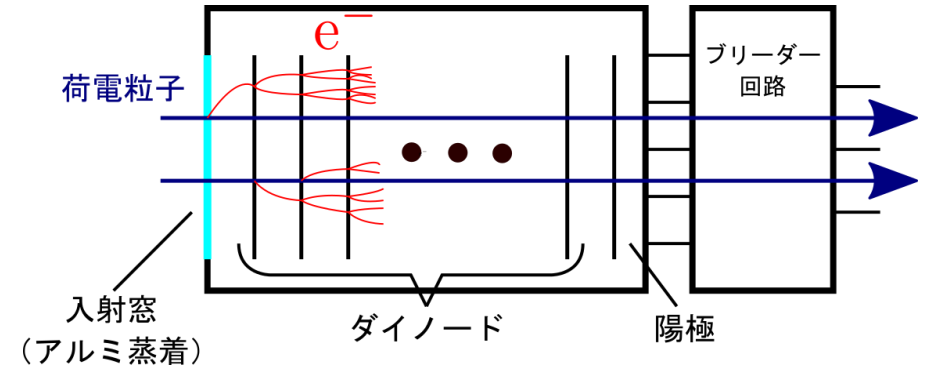
ミュオンモニターの次期センサー

電子増倍管 (EMT)

- PMTの光電面をアルミ蒸着に変更。
- これまでのビームテストの結果から、十分な線形応答性と放射線耐性。

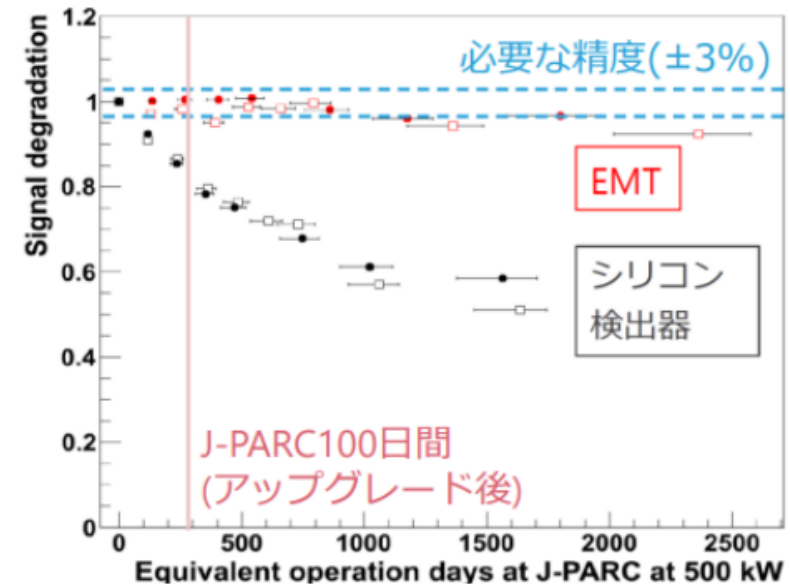
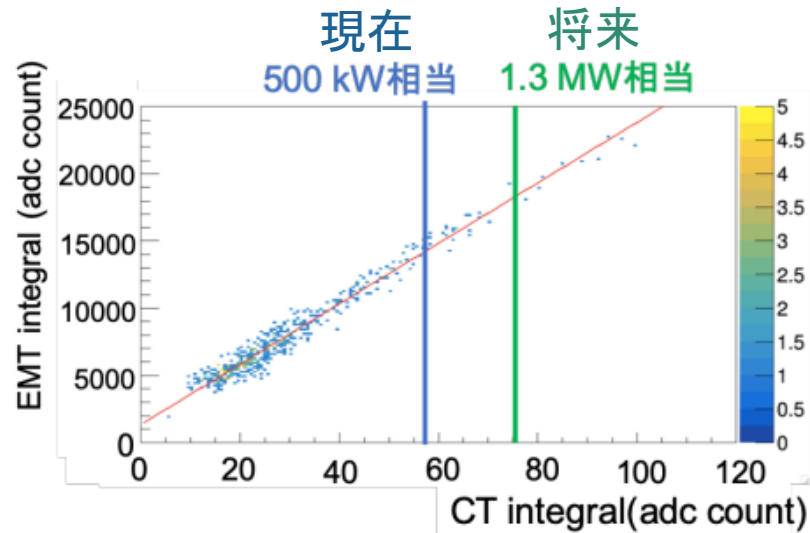


14.6 mm



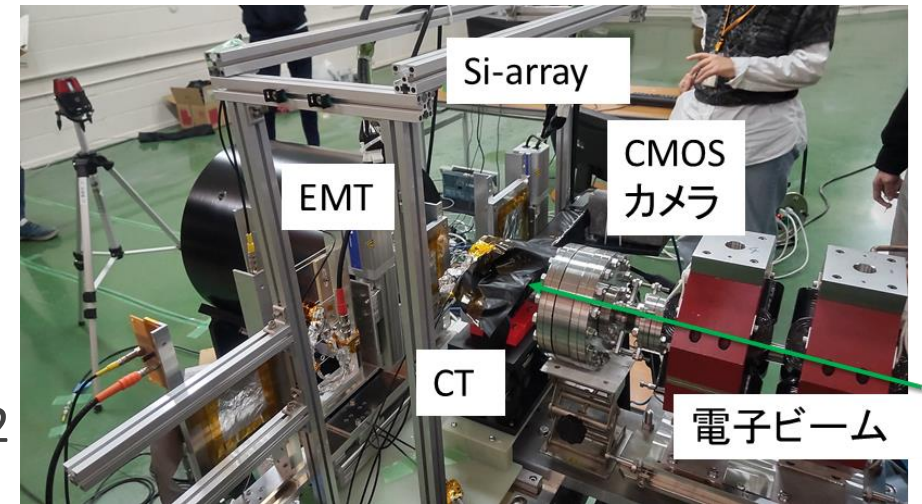
放射線耐性

線形応答性



第3回ビームテスト@ELPH

- 目的
 - EMTの放射線耐性の試験
 - EMTに将来T2K運転1000日相当の放射線耐性を与える。
 - EMTの初期不安定性の測定
 - EMTの放射線劣化の原因の特定
- 東北大学電子光物理学研究センター(ELPH), 2021/10/20-/22
- シンクロトロン入射用線形加速器(電子, ~90 MeV)



ビームの種類	周波数[Hz]	電流[nA]	パルスごとの電荷 [nC/pulse]	目的
低強度	7	0.007	0.001	EMTの信号の測定
中強度・高強度	7	2-160	0.3-20	EMTへ放射線損傷を与える

現在や将来の
ミュオンビーム
相当

- 2種類のビームを交互に照射し, EMTの放射線耐性を評価。

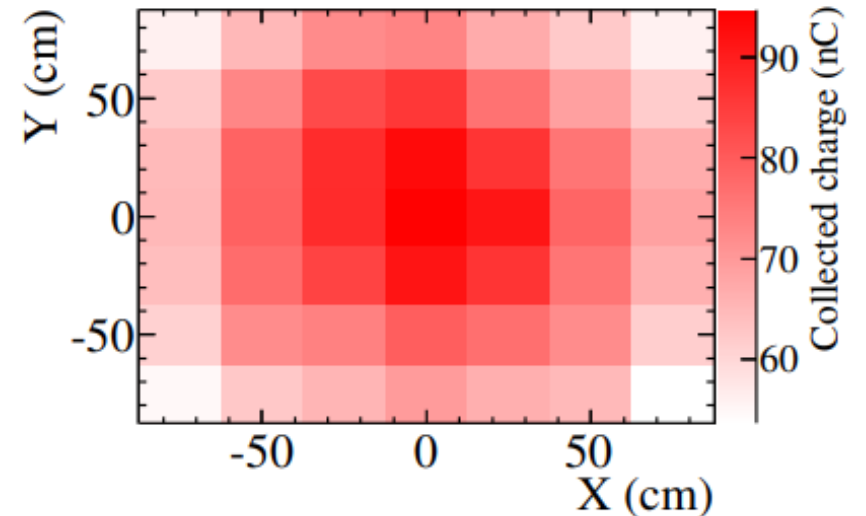
ビームの広がり

- ビームの広がりとEMTの大きさ
 - T2K実験におけるミュオンビームの広がり
 $\sigma \sim 1 \text{ m}$
 - ビームテスト@ELPHの電子ビームの広がり
 $\sigma \sim 1 \text{ mm}$
 - EMTのダイノードの大きさは一辺8.8 mmの正方形。

EMT全体の直径は14.6 mm

- ビームテストにおける問題点
 - EMTに対して、電子ビーム@ELPHの幅が小さい。
 - EMTに対し、一様にビーム照射できない。

ミュオンビーム@T2K



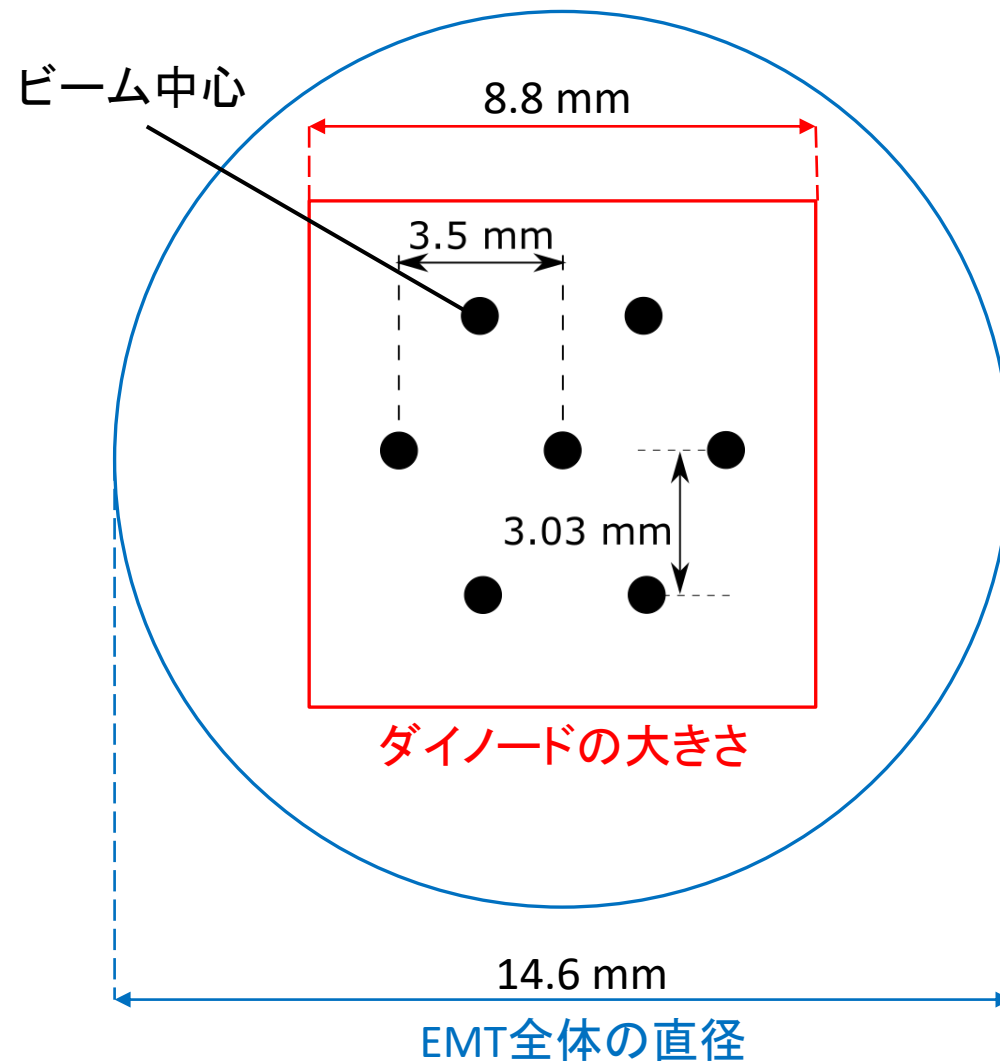
K. Suzuki et al., Prog. Theor. Exp. Phys., 053C01(2015)



中強度・高強度のビーム照射方法

- 一様に照射するための改善方法
EMTを動かし, 正六角形と中心の7点照射。
 - EMTへの一様な電子ビームの照射が期待できる。
-
- 中・高強度ビームモニターが必要。
 - EMTへの照射の一様性の測定
 - EMTへの照射効率の測定
 - これまで使っていたビームモニター(Si-array)では, 測定できない。

OTRモニターの導入



光学遷移放射(OTR)モニター

● 遷移放射

- 荷電粒子が誘電率の異なる媒質を通過したとき、電磁波が発生する現象。

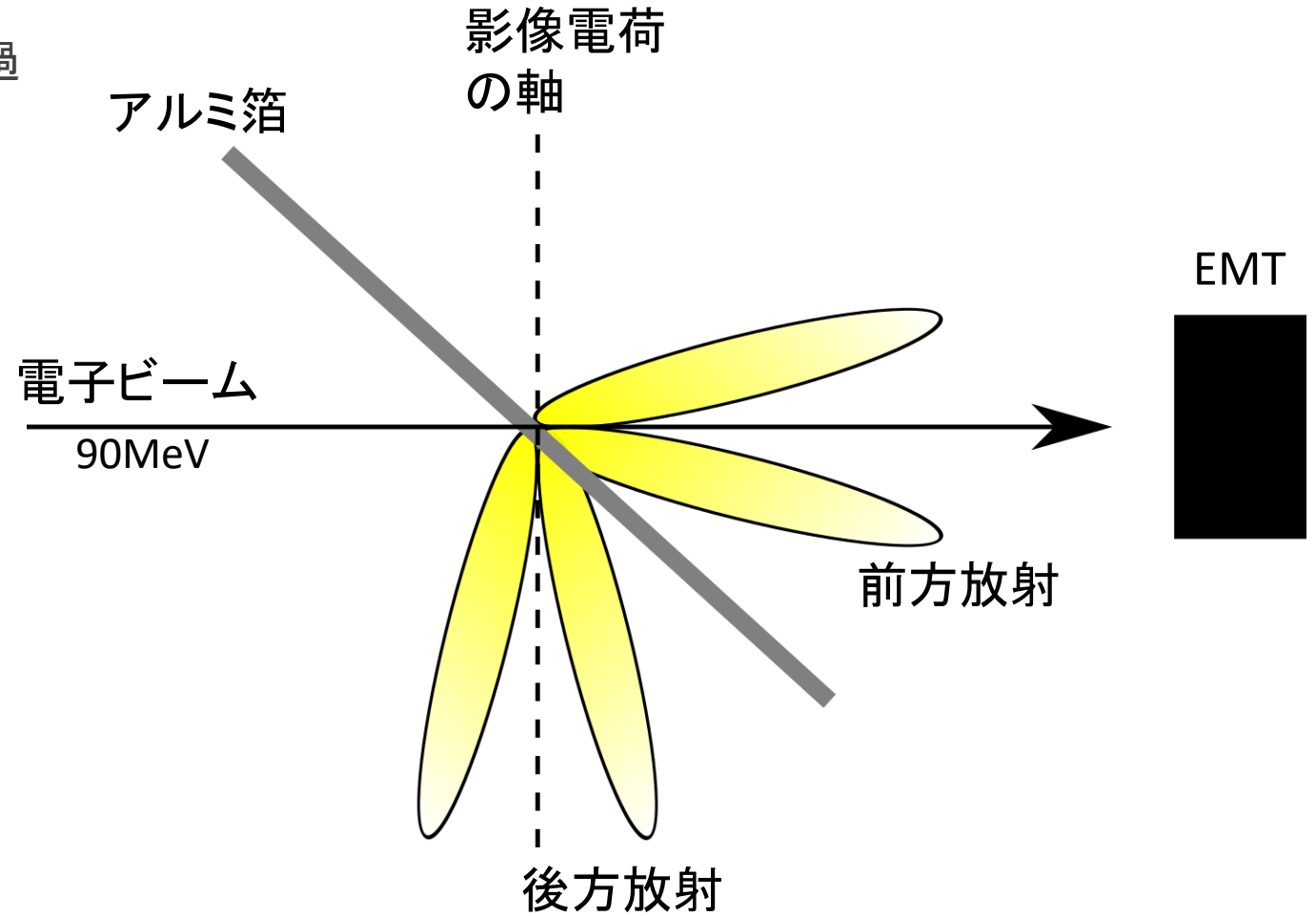
● 中・高強度用のビームモニター

- 金属箔をスクリーンに利用するため、放射線に強い。
- 可視光領域の後方放射を利用。

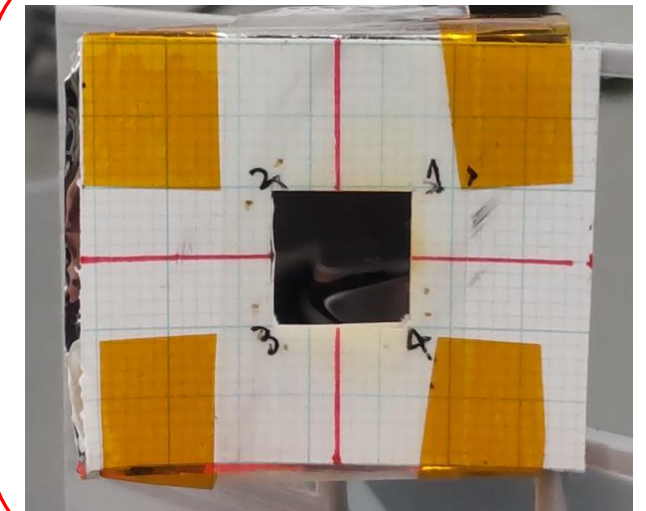
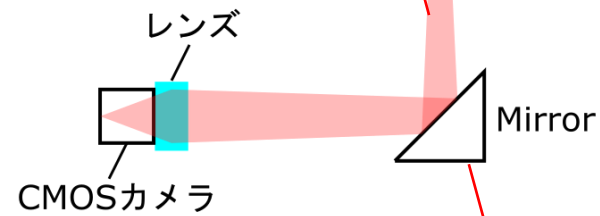
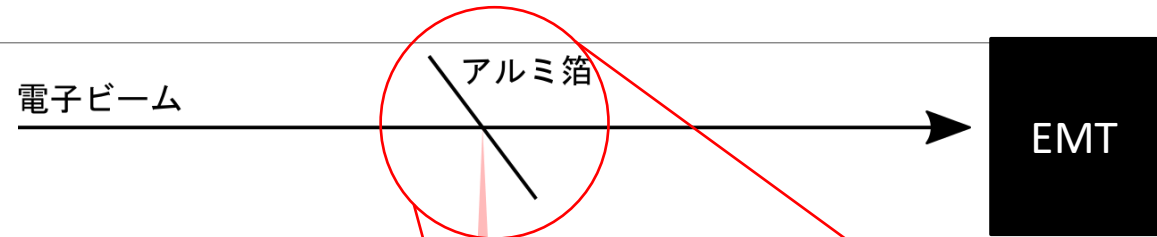
● 導入目的

- 高強度ビームの広がりを見て、
 - EMTへの照射効率
 - EMTへの照射の一様性を調べる。

OTR(Optical Transition Radiation)

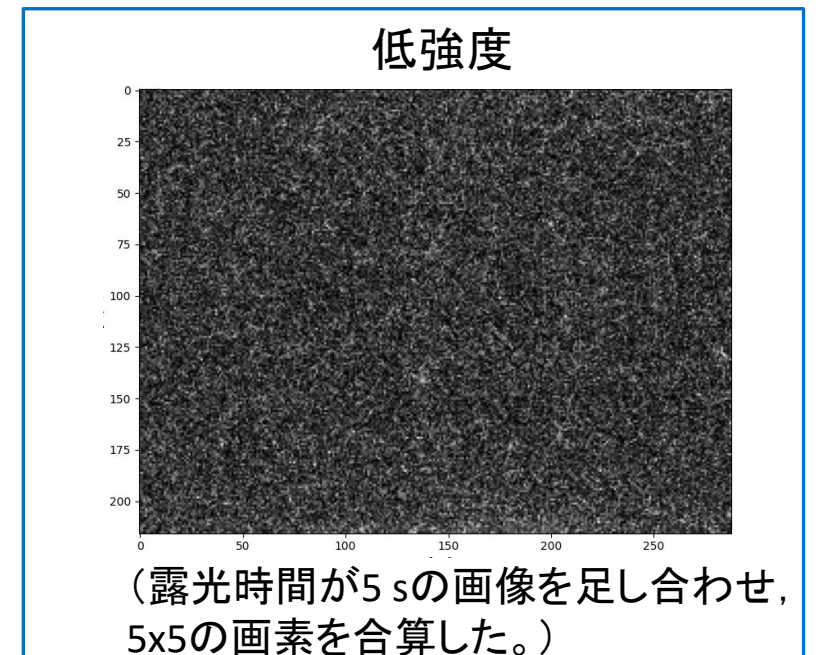
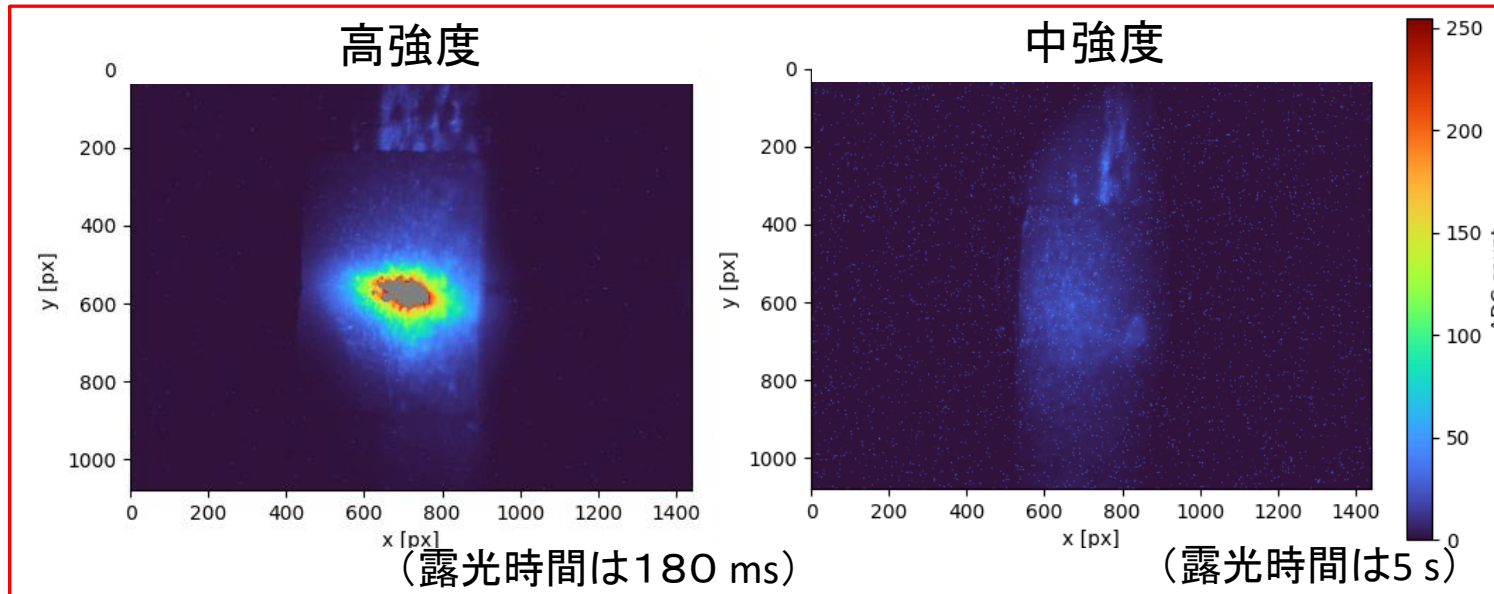


セットアップ



- 0.05 mmのアルミ箔
- 鏡, レンズ, CMOSカメラによる結像光学系
- 方眼紙による位置較正
- 目標の分解能は0.1 mm。

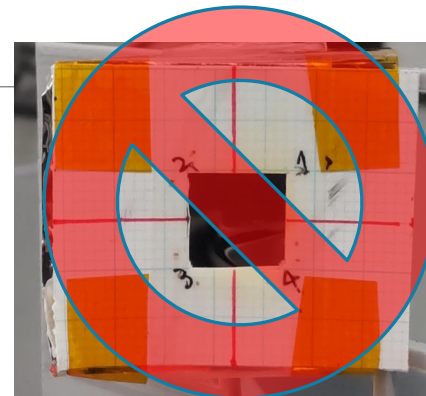
ビーム像の撮影



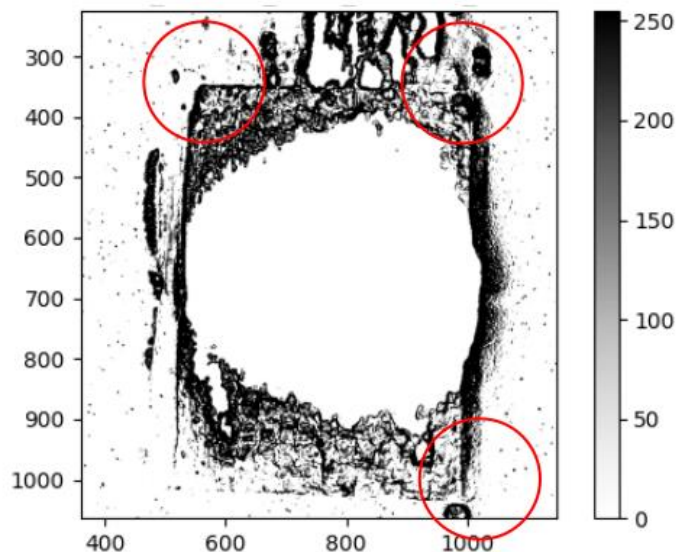
- 中強度, 高強度の撮影に成功。
- 低強度の信号は見えなかった。
- アルミ箔の範囲が足りないので、ビーム全体の撮影ができていない。
- 高強度では、ビーム像の一部が飽和してしまっている。

距離補正

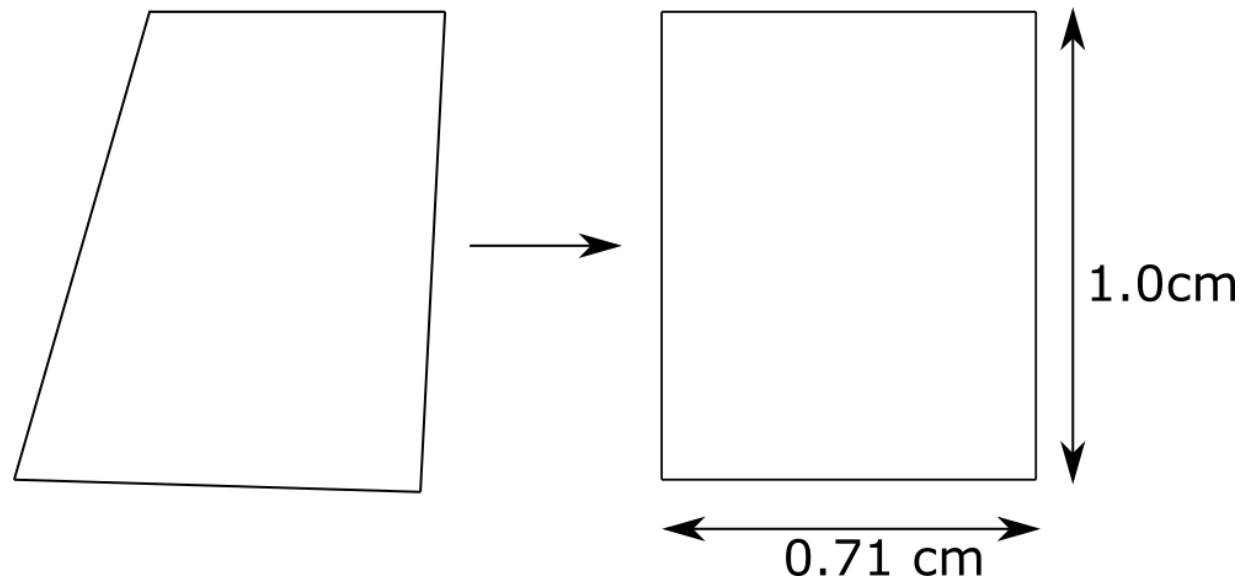
- カメラの固定が失敗したので、位置較正ができなかった。
- 代わりに、エッジ検出による位置較正を行った。
 - エッジ検出により、見える頂点(例:下図の赤丸)を決めた。
- 射影変換で距離補正を行った。



エッジ検出の例

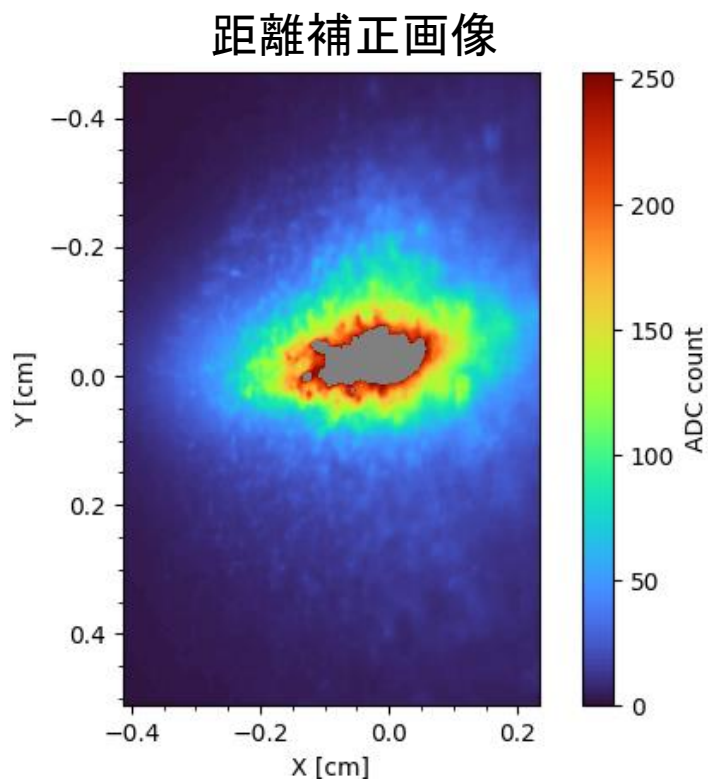


射影変換の模式図

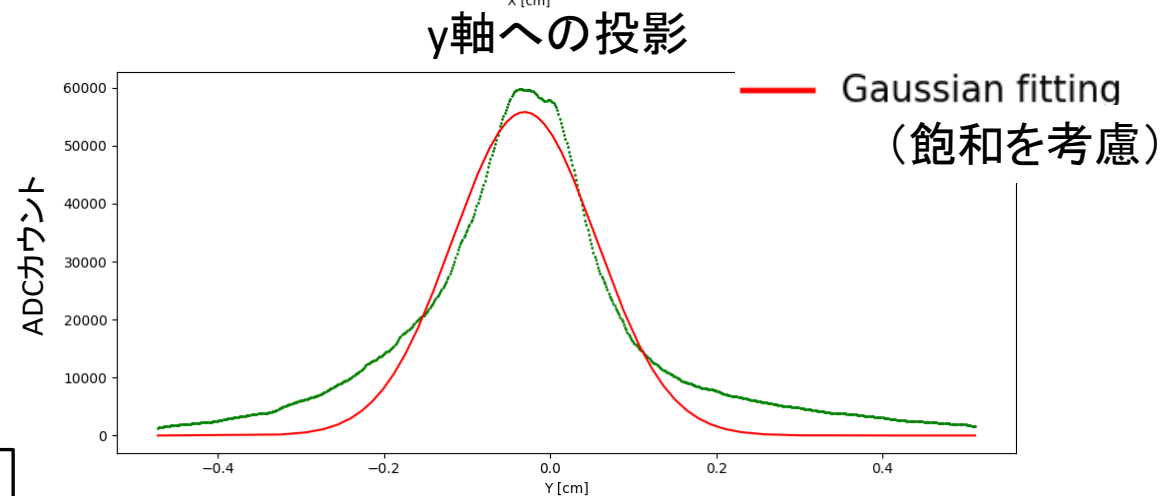
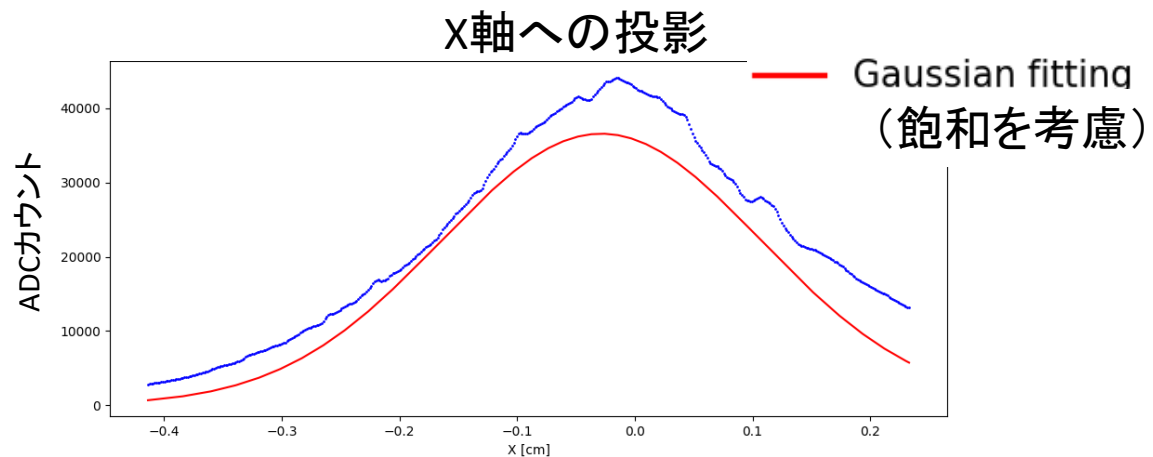


距離補正画像

- 射影変換の結果から、距離補正画像を得る。



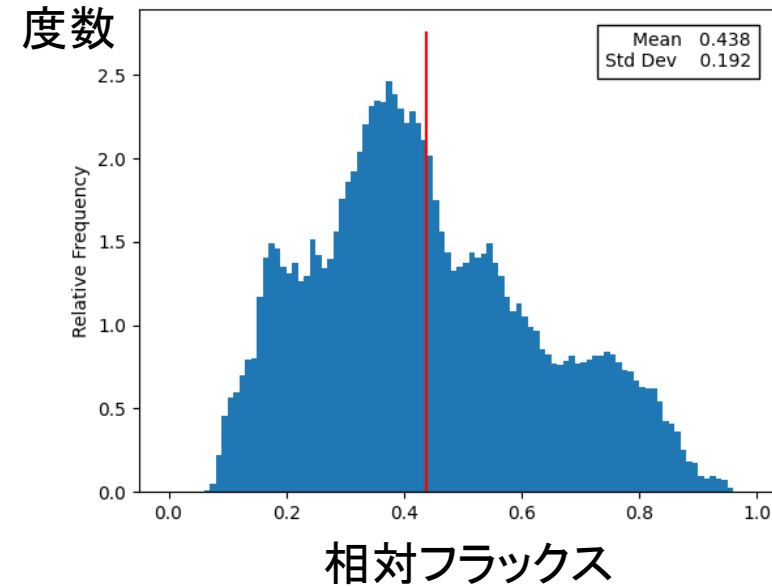
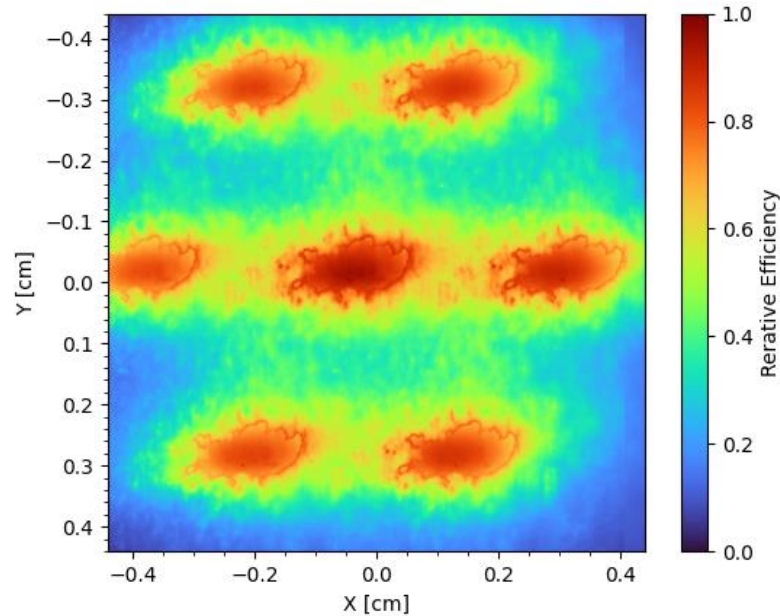
大強度 $\sigma_x \sim 1.4 \text{ mm}$ $\sigma_y \sim 0.9 \text{ mm}$ 中強度 $\sigma_x \sim 1.7 \text{ mm}$ $\sigma_y \sim 2.9 \text{ mm}$



ビームの大きさはEMTに比べて小さい。

EMTへの照射効率と非一様性

再構成したEMT上の
電子ビームの
相対フラックス



欠けた部分は、外挿し、相対フラックスを求めた。

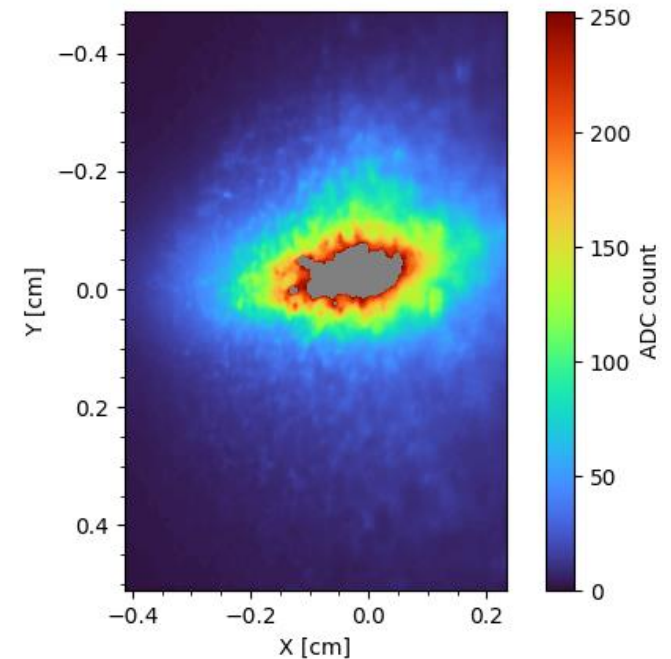
- EMTへの照射効率は、75%
- 場所によって照射量には、3倍程度のばらつき。

従来

Si array (低強度) では、85%

第3回ビームテストまとめ(OTRモニター)

- 電子ビーム (90 MeV, 7 Hz, 0.3-20 nC/pulse) のビームプロファイル測定。
 - 中・高強度ビームの一部の撮影はできた。
 - $\sigma \sim 1$ mm
 - 関数を仮定したもとの、EMTへの照射効率と非一様性を確認できた。
 - EMTへの照射効率 $\sim 75\%$ と 3倍程度の照射量のばらつき
 - T2K実験における一様なビームとは異なる状況で、放射線耐性の評価に3倍程度の不定性が生じる結果。
- OTRモニターの課題
 - 高強度におけるビーム像の一部飽和が見られた。
 - アルミ箔の範囲が狭かった。
 - 光学系の固定。



第4回ビームテスト

-> 8aA422-7

●目的

●EMTの放射線劣化の原因の特定

●照射方法の改良

◆7点照射では、不十分だった。

●EMTの温度依存性の評価

●OTRモニターの改良を予定。

●光学系の改良

●広いダイナミックレンジ(≧30 dB)の確保。

- 低強度ビームプロファイルを行うSi arrayとの比較。
- 高強度でも、ビーム像全体の撮影を可能にする。

●リモートによるカメラの操作。

- ビームの種類に合わせた撮影方法の変更。
- 撮影枚数の増加。

予定しているビーム強度

ビームの種類	周波数[Hz]	電流[nA]	パルスごとの電荷 [nC/pulse]
低強度	7	0.007	0.001
高強度	7	160	20

などなど...

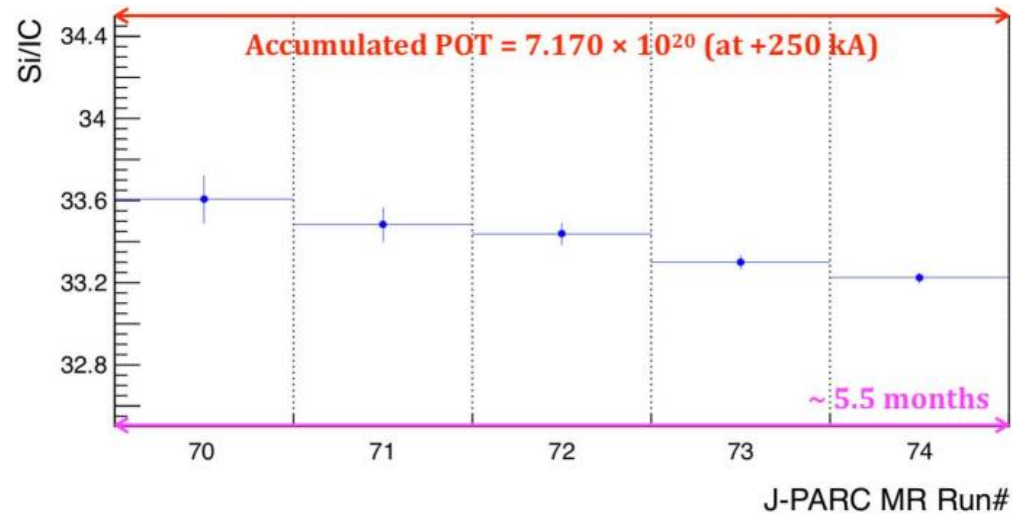
まとめ

- T2K実験では、ビーム強度が3倍になる予定。
- 放射線耐性の要求を満たす電子増倍管(EMT)の導入を計画。
- ビームテストにおける、OTRモニターの導入。
 - 高強度ビームの一部撮影ができた。
 - EMTへの照射効率は75%, **3倍程度の照射量のばらつき**。
 - EMTの放射線耐性の評価に、3倍程度の不定性が生じうる。
- 第4回ビームテストでは、EMTの放射線耐性の評価を確実なものにしたい。
 - OTRモニターと照射方法の改良。

Backup

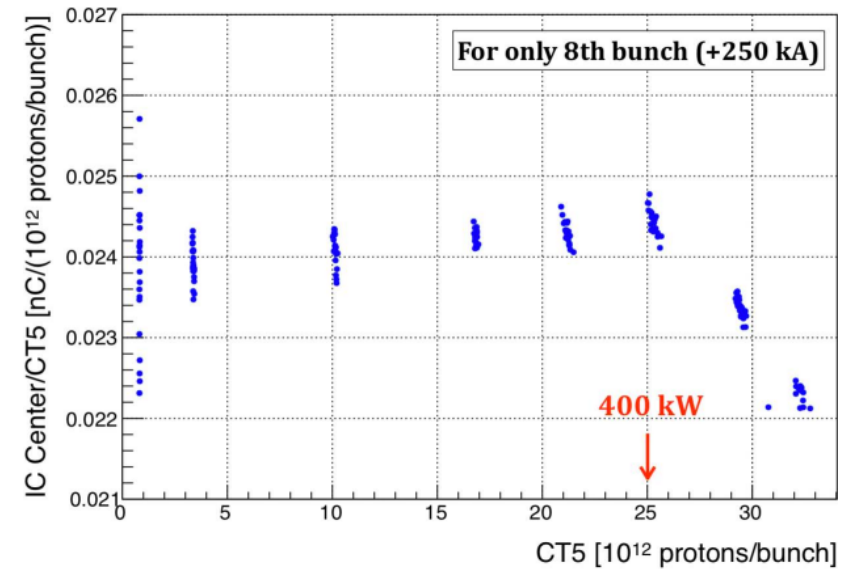
ミュオンモニターにおける問題点

●SiとICの信号比



- ICの信号は安定。
- Siは、現在のビーム強度の5か月照射で1%の信号量低下。(要求される安定性は3%)
- 将来、Siは1か月程度の交換が必要。

●ICの線形応答性



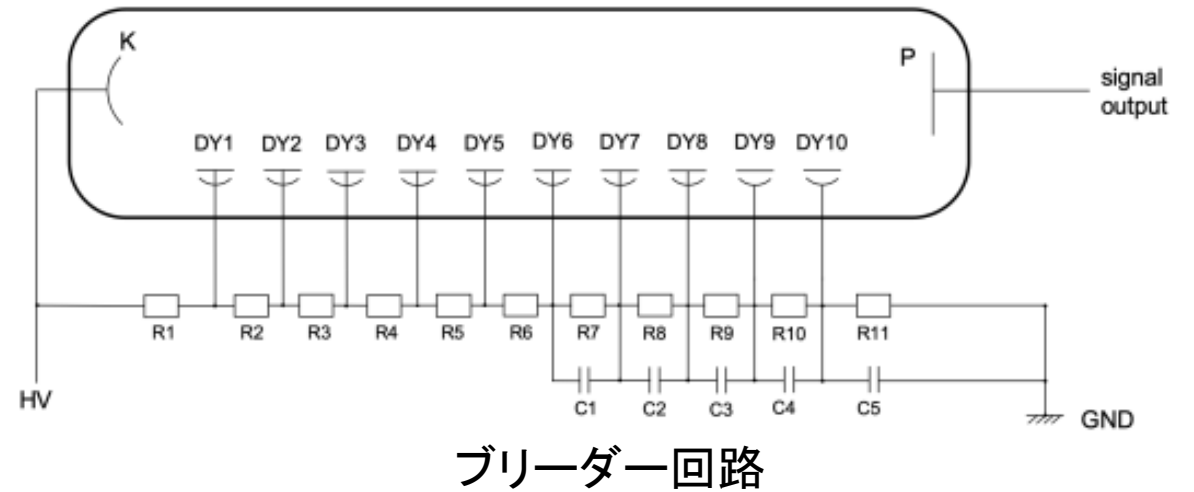
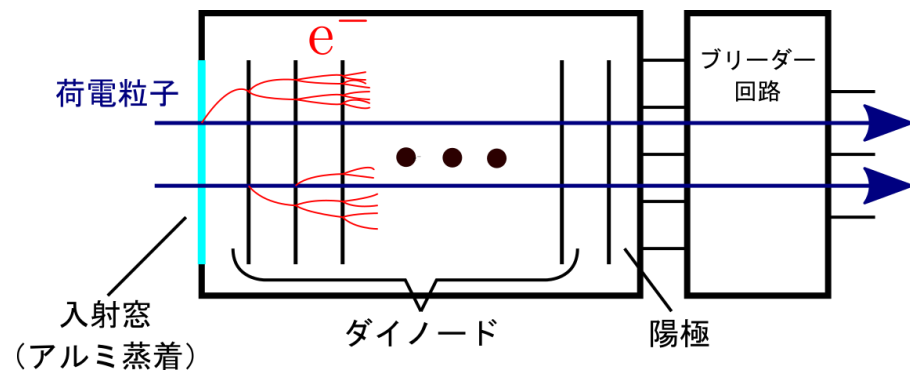
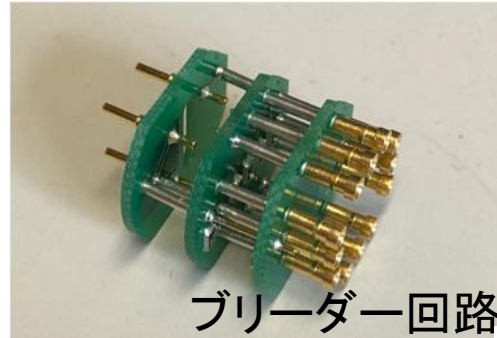
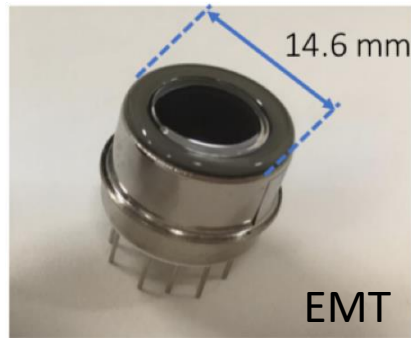
- 400KW以上において、空間電荷効果による信号量の減少。

現在500 kW -> 将来1.3 MW

次期ミュオンモニター

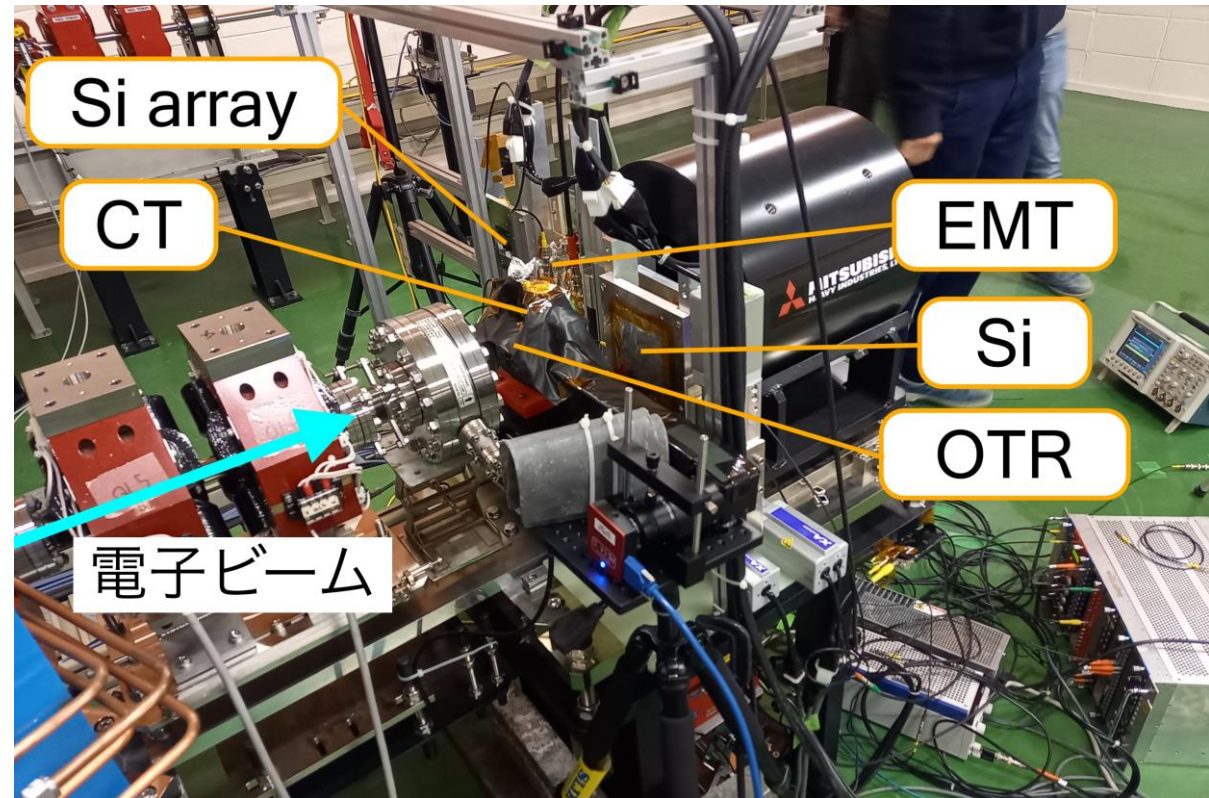
電子増倍管 (EMT)

- 浜松ホトニクス社のR9880-110の光電面を通常の通常のアルカリ光電面からアルミ蒸着に変更。

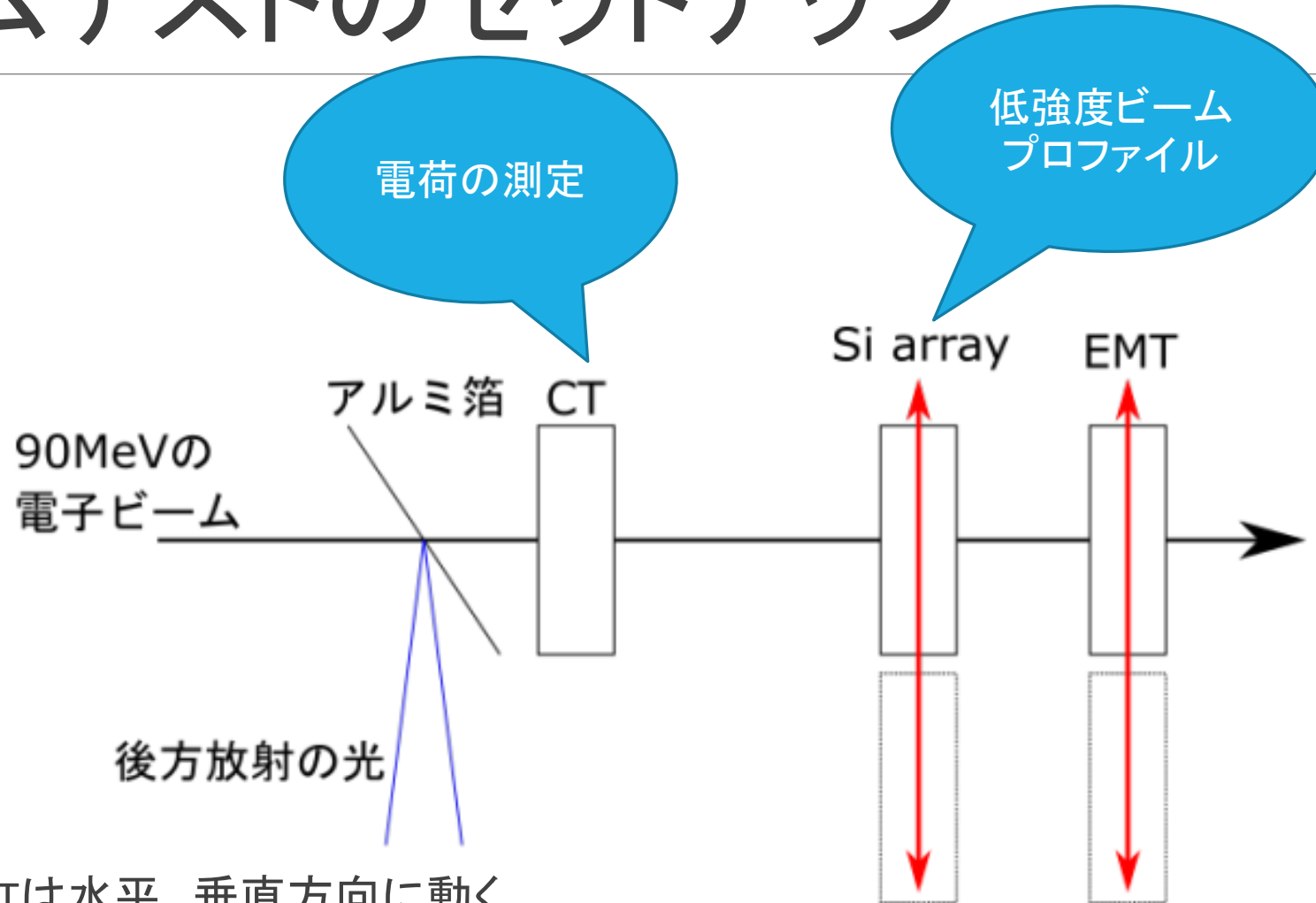


ビームテストのセットアップ

- EMT
 - 低強度ビームでゲイン測定
 - 高強度で放射線劣化
- OTR
 - 高強度のビームプロファイル測定
- CT
 - 高強度ビームの強度を測定
- Si array (講演番号, 8aA422-7)
 - 低強度ビームのプロファイル測定
- Si PIN フォトダイオード (Si)
 - 低強度ビームの強度を測定



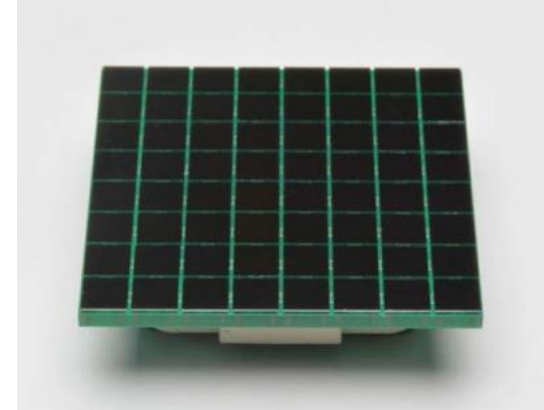
ビームテストのセットアップ



- Si arrayとEMTは水平、垂直方向に動く。

Si array

- 浜松ホトニクス製の64素子Siフォトダイオードアレイ(S13620-02)。
 - 低強度ビームのプロファイル測定
- 2次元の8x8素子アレイ。
- 素子間のピッチは, 3 mm。
- 素子サイズは, 2.8 mm x 2.8 mm。
- 受光面サイズは, 2.5 mm x 2.5 mm。

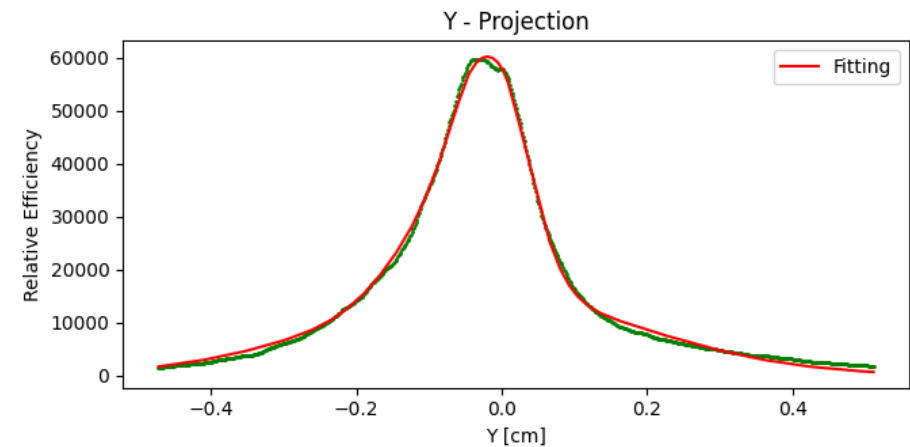
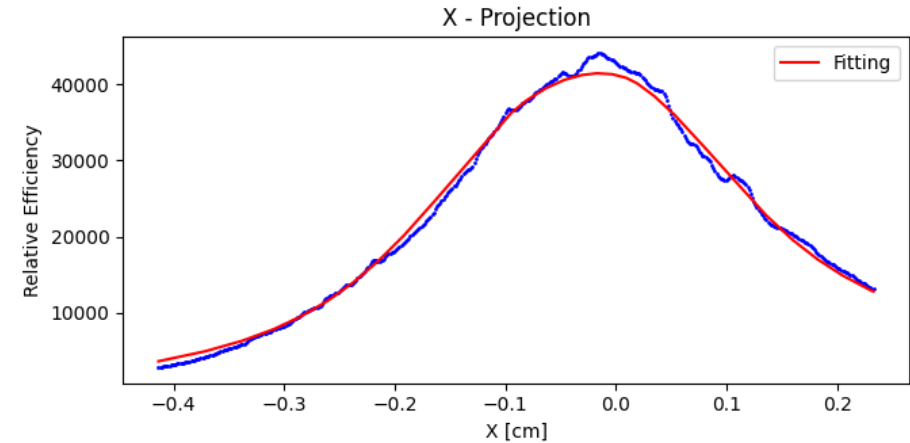
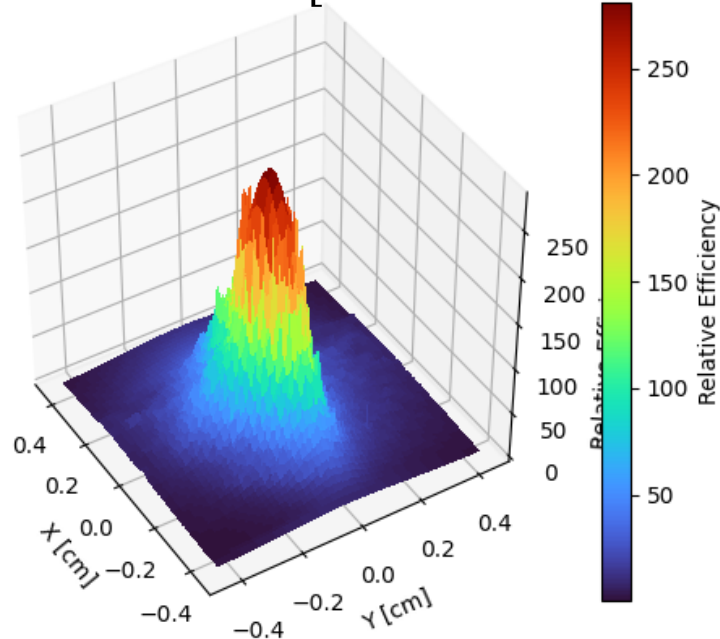


Si array

ビーム形状の決定

- ビーム全体の形状は撮影できていない。
 - ADCカウン트의飽和と, アルミ箔の範囲の不足による。
- 3つの2次元ガウス関数の和を仮定し, 外挿を行った。

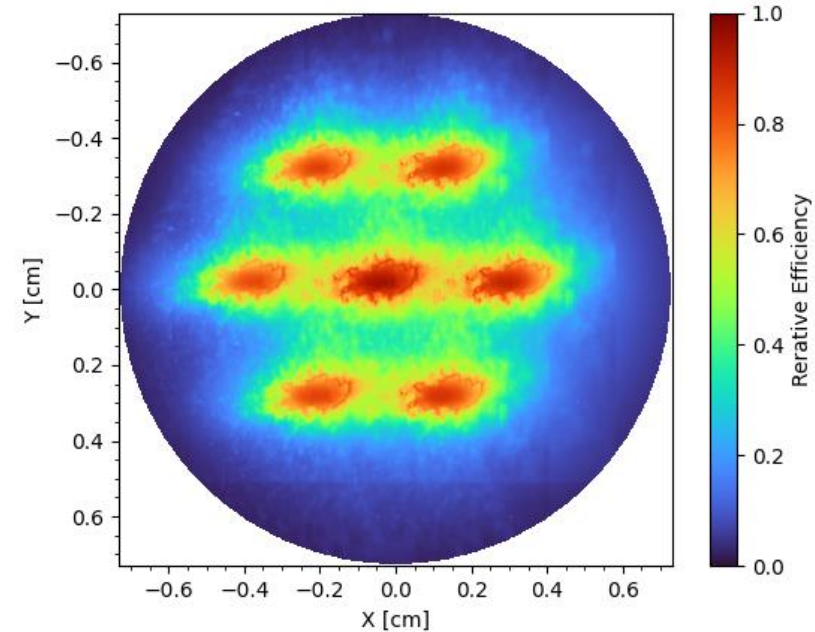
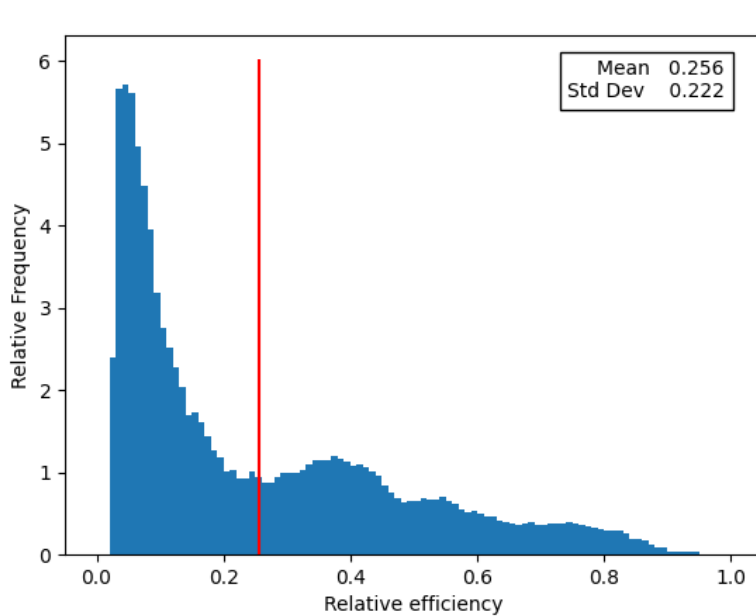
$$f(x,y) = \sum_{i=1}^3 A_i \exp \left[-\frac{(x - \mu_{x,i})^2}{2\sigma_{x,i}^2} - \frac{(y - \mu_{y,i})^2}{2\sigma_{y,i}^2} \right]$$



ADCカウンと電荷量が比例関係にならない
現在調査中

EMTの全体領域の照射効率

EMTへ照射された
電子ビームの
相対フラックス

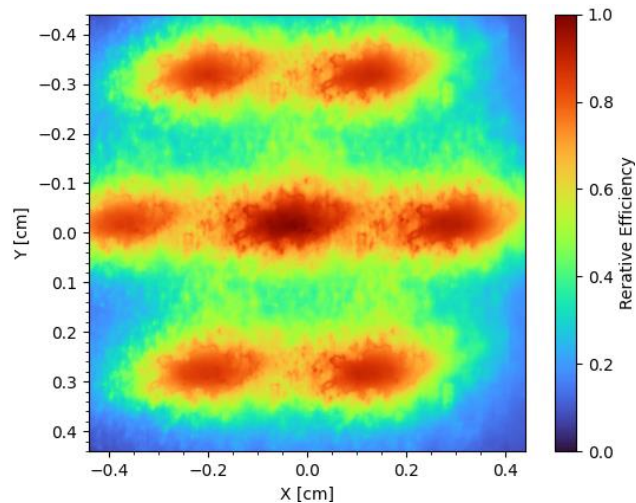


- 放射線耐性の評価では、EMT全体に対する照射効率も重要な値になりうる。
- EMT全体への照射効率は、95%

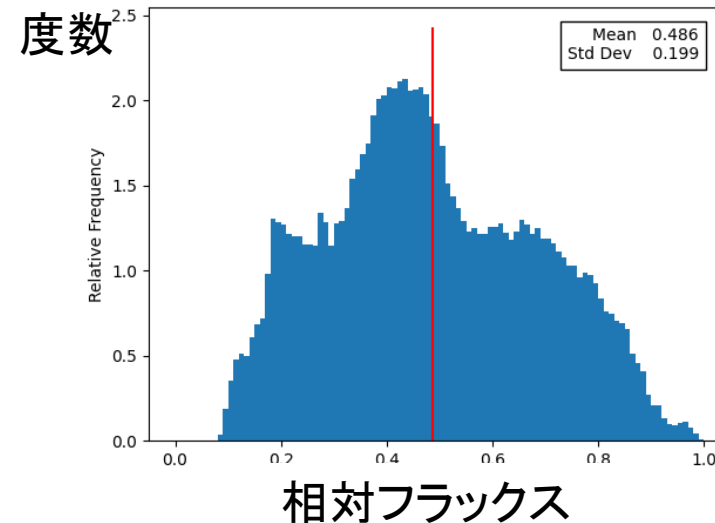
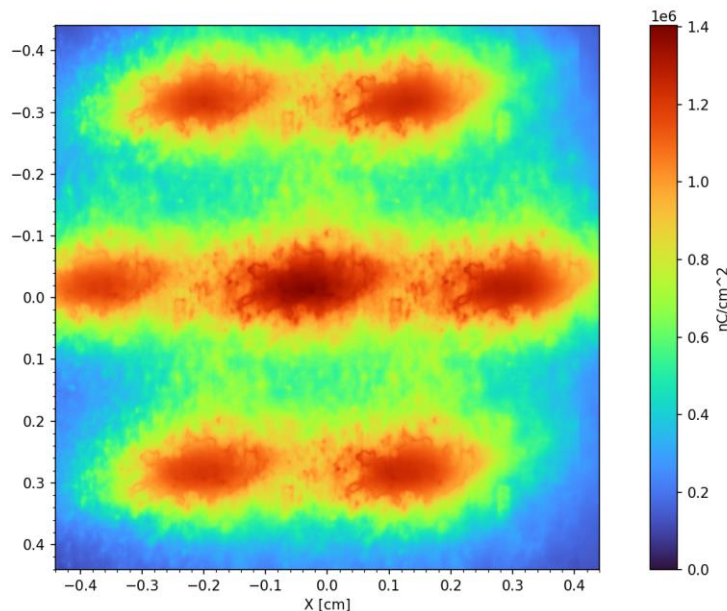
EMT有効領域への照射効率は、75%

EMTへの照射効率と非一様性

再構成したEMT上の
電子ビームの
相対フラックス



再構成したEMT上の
電子ビームの
フラックス

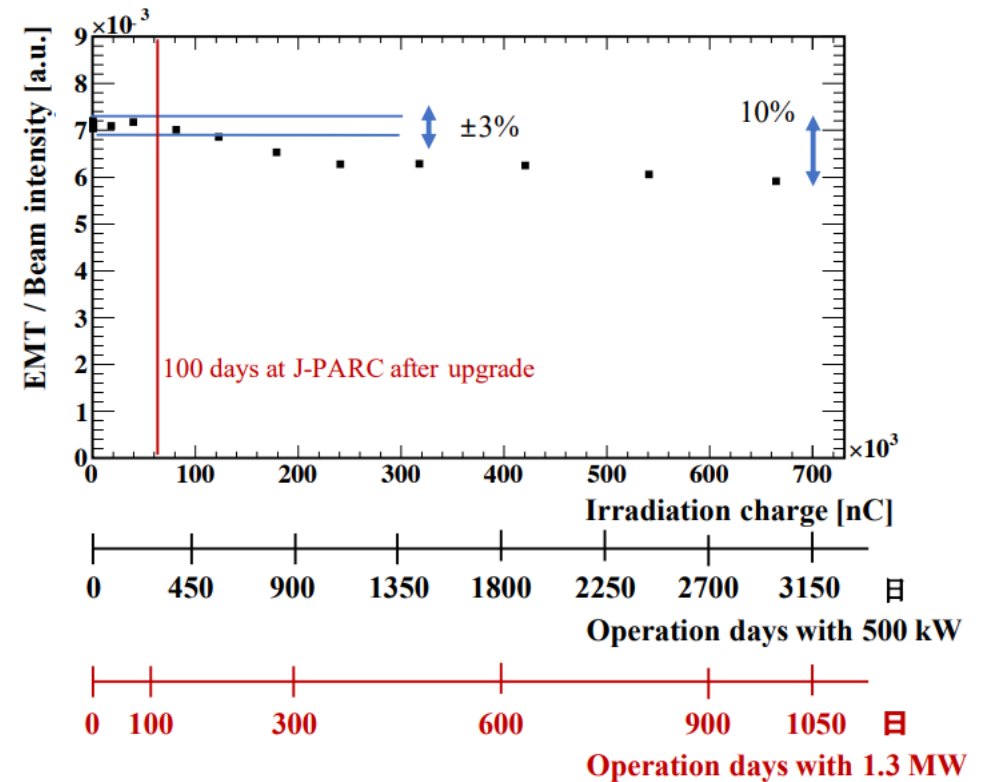


- XDA0803に照射時に撮影した高強度ビームプロファイルから、再構成。
- 撮影できた高強度ビームについてすべて足し合わせた。
- CTを通過した電荷量は、 700×10^3 nC。

EMT放射線耐性の評価(1)

- 縦軸は、ビーム強度で規格化したEMTのゲイン。
 - 横軸は、EMTに照射した電子ビームの電荷量。
- ▶ 将来のビーム強度での100日照射で、EMTの信号減少は3%以下。
- ▶ 将来のビーム強度での1000日分照射で、EMTの信号減少は10%以下

第3回ビームテスト



この表は、EMTへの照射効率85%としている。

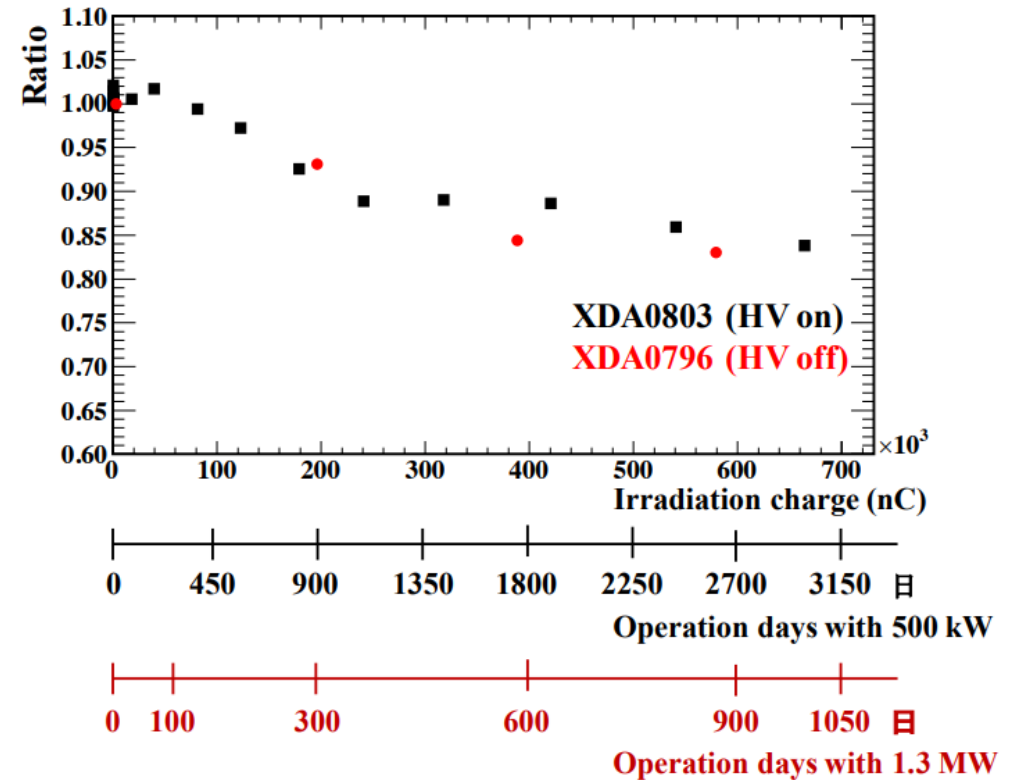
EMT放射線耐性の評価(2)

第3回ビームテスト

- 第3回ビームテストにおけるEMT放射線耐性の評価

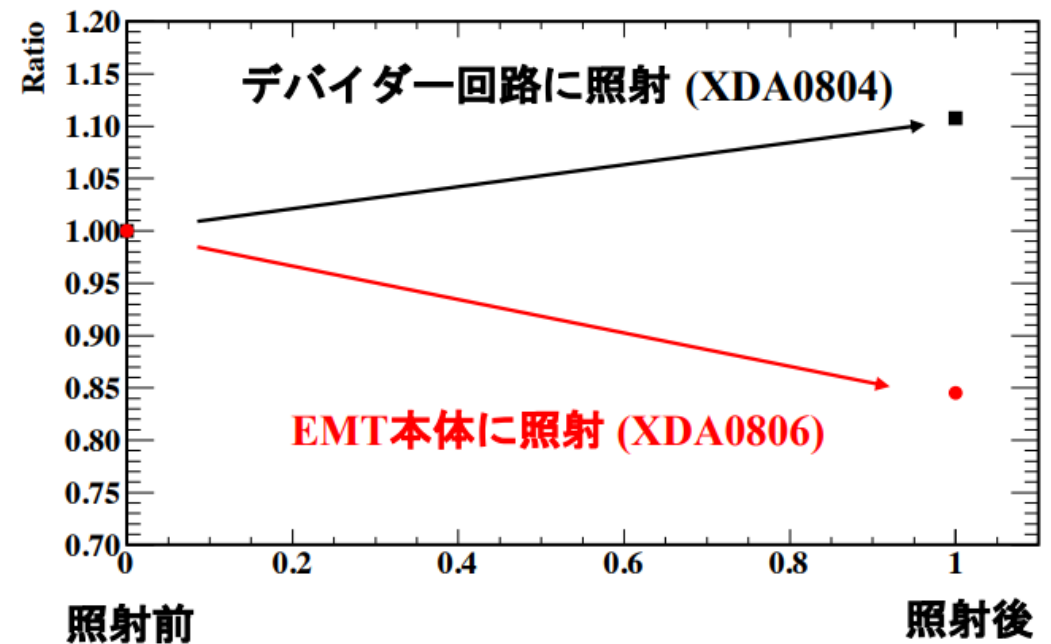
- 照射中のHVのON/OFFにかかわらず信号の減少が見られた。

- 信号増幅による下流ダイノードの劣化が原因ではない。



EMT放射線耐性の評価(3)

- 500 kW, 3000日分の高強度ビームを照射した。
- ブリーダー回路のみに照射した場合, 信号量に10%の増加が見られた。
 - 高強度照射されたブリーダー回路と高強度照射されていないEMTの組み合わせ。



第4回ビームテストの目的

- カソード劣化の検証
 - 初段をショートさせたブリーダー回路を用いる。
- 回路の放射線耐性
 - 照射の前後で回路の抵抗値や電気容量の変化を測定する。
- 温度依存性の測定
 - 電子ビーム照射による信号の温度依存性を測定する。

