

# uPICの宇宙飛行士被曝モニタへの応用 PS-TEPC (Position Sensitive Tissue Equivalent Proportional Chamber)

第11回 MPGD研究会 (東北大学)

神戸大学 身内賢太郎



岸本 祐二<sup>1</sup>, 佐々木 慎一<sup>1</sup>, 高橋 一智<sup>1</sup>, 齋藤 究<sup>1</sup>,  
寺沢 和洋<sup>2</sup>, 身内 賢太郎<sup>3</sup>, 布施 哲人<sup>4</sup>, 永松 愛子<sup>4</sup>,  
勝田 真登<sup>4</sup>, 伊藤 裕一<sup>4</sup>, 松本晴久<sup>4</sup>, 森國城<sup>4</sup>, 谷森 達<sup>5</sup>,  
窪 秀利<sup>5</sup>, 内堀 幸夫<sup>6</sup>, 北村 尚<sup>6</sup>, 道家 忠義<sup>7</sup>

高エネルギー加速器研究機構(KEK)<sup>1</sup>, 慶応義塾大学<sup>2</sup>, 神戸大学<sup>3</sup>, 宇宙航空研究開発機構(JAXA)<sup>4</sup>, 京都大学<sup>5</sup>, 放射線医学総合研究所<sup>6</sup>, 早稲田大学<sup>7</sup>

# はじめに

- $\mu$ PIC 宇宙に出ます。
- 2015/8/26 HTV6打ち上げ(予定)@種子島  
⇒ ISS「きぼう」船内実験第二期後半課題

宇宙ステーション補給機「こうのとり」(HTV)

(H-II Transfer Vehicle)



JAXA ホームページより



# レキシ

2004.12.4 @ 京都大学

## $\mu$ -PICを用いた位置有感生体等価比例計数管(PS-TEPC) の宇宙放射線線量等量計測器への応用

PS-TEPC : Position-Sensitive Tissue Equivalent Proportional Counter

早稲田大学・理工学総合研究センター &  
宇宙航空研究開発機構・総合技術研究本部

寺沢和洋、道家忠義

京都大学大学院・理学研究科

身内賢太郎、永吉勉

高エネルギー加速器研究機構・放射線科学センター

佐々木慎一、俵裕子

宇宙航空研究開発機構・総合技術研究本部

松本晴久

PS-TEPC計画も  
この年にスタート

# レキツ

## the $\mu$ -PICalcio

	odds	
1: $\mu$ -PIC の総生産が1000枚突破	× 7	
2: $\mu$ -PIC によって分子量100万以上の巨大たんぱく質の構造が解析される	× 5	
3: $\mu$ -TPCがリニアコライダーでの事象を捉える	× 6	⇒ × 300
4: $\mu$ -TPCがJ-PARCの中性子ビームラインの半数以上の実験で用いられる	× 18	
5: $\mu$ -TPCによって「暗黒物質の風」の検出	× 12	
6: $\mu$ -TPCによって100以上のMeVガンマ線天体を検出	× 10	
7: MeVガンマカメラで初期がんを100例発見	× 8	
8: NASAロゴ入りの $\mu$ -TPCベースの宇宙線被爆モニタが宇宙に出る	× 5	
9: $\mu$ -PIC がかに星雲からのX線偏光を10 $\sigma$ で検出	× 6	高田のみ1
10: 谷森さんがノーベル賞	× 200	

まだ 達成はなし。 → あと10年続ける理由!?  
谷森さんのodds高すぎた。失礼しました。

# 本題

# 背景

宇宙環境では地上に比べて2桁程度高い線量の被ばくを受ける。被ばく線量に寄与する線質も地上と異なり、荷電粒子と中性子が支配的である。

スペースシャトル内  
(実測値)

荷電粒子80%  
中性子20%

(STS-89, RRMD-III, BBND)

※中性子割合に対するエラーは大きい

月面上  
(計算値)

荷電粒子93%  
中性子7%

(T. Komiyama, Spa. Rad. 2006)

(NCRP-142, ICRU 1992)

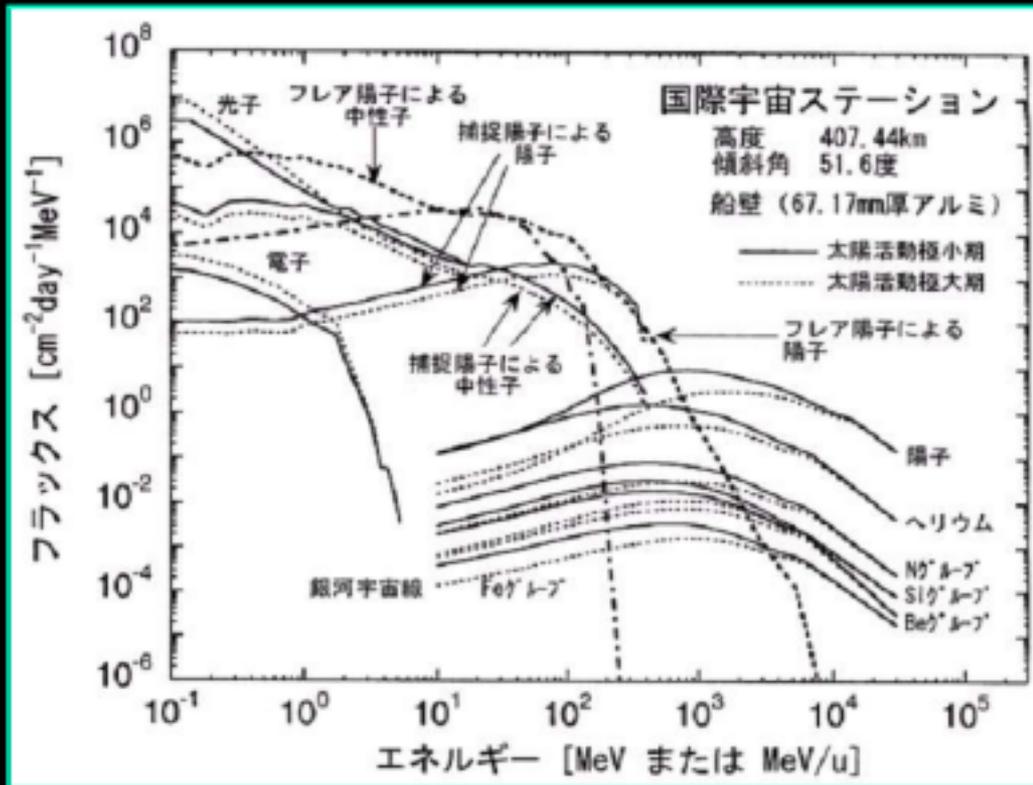
**測定器依存の精度で30 %以内が目標**

ただし、両線質を同時に十分な精度でリアルタイム測定できる  
宇宙環境用線量計はない

→ 別種の線量計を組み合わせでの使用が強いられる  
荷電粒子と中性子を測定できる線量計

→ **位置有感型比例計数箱 (PS-TEPC) の開発**

# 宇宙放射線環境（低高度～400 km、船内）



有人サポート委員会、宇宙放射線被曝 管理分科会報告書、NASDA (2001)



2013年11月7日  
 ~2014年5月14日

## 宇宙放射線のエネルギースペクトル @ISS内 (18 g/cm<sup>2</sup>)

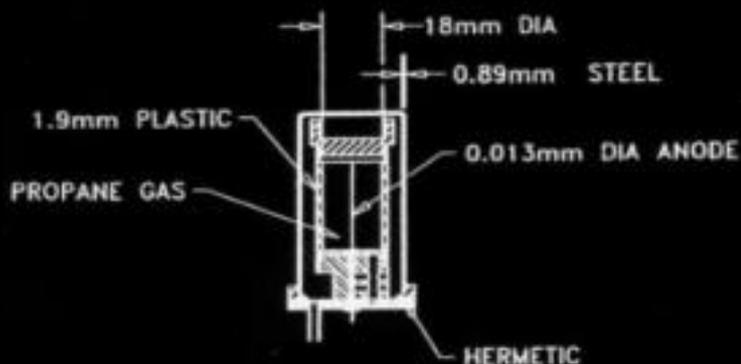
- 銀河宇宙線 (陽子～鉄)
- 捕捉粒子(陽子)
- フレア粒子(陽子)

- 線量: 地表の100倍程度を定常的に被曝 (+ 太陽フレア)  
**0.5 ~ 1 mSv/day** (+ 超大型フレアでは船外でSvオーダー)
- 放射線の種類とエネルギー:  
 荷電粒子 (陽子・重イオン(～鉄イオン)): **数100MeV/n**がピーク  
 中性子: **0.1 ~ 1000 MeV**

# 原理的な応答関数 (LET分布) とその標準偏差 (系統誤差)

TEPC (円筒形)

アメリカ・NASA

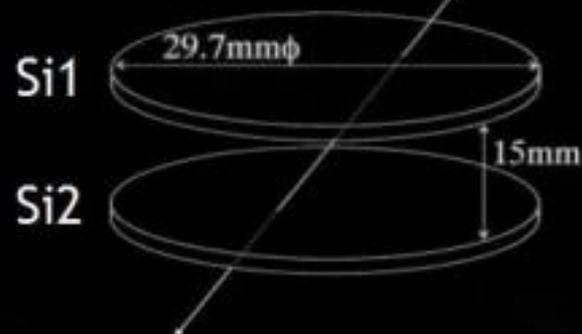


TEPC (球形)

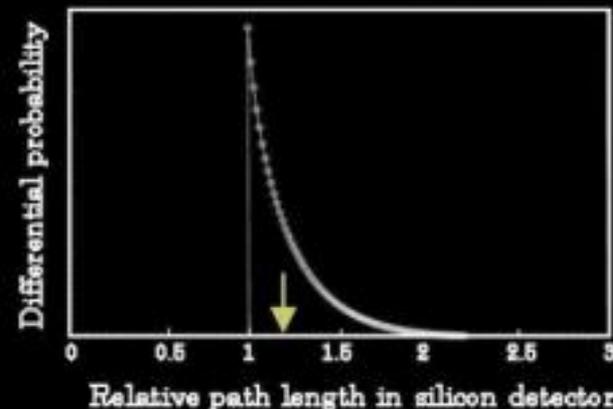
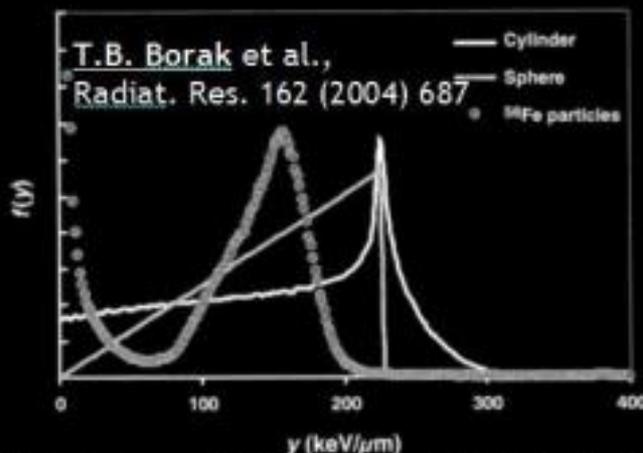
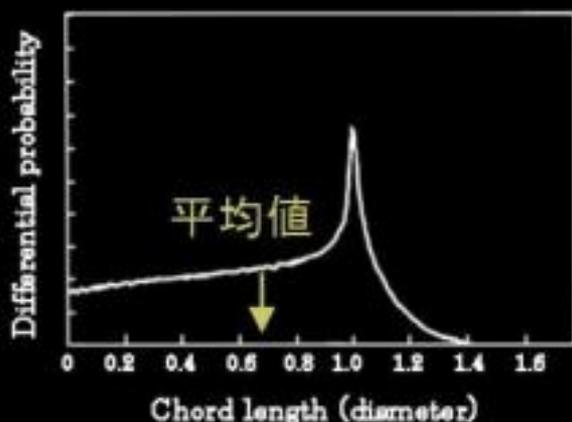


DOSTEL

ドイツ・Kiel大学



中性子に感度悪



同じエネルギーを持った同じ粒子が、一様等方的に入射した際のLET分布 (理想はデルタ関数)

平均値	0.67	0.67	1.2
$\sigma$ (%)	51 (>30)	35 (>30)	17

系統誤差が大

線量当量  $H =$  吸収線量  $D \cdot$  線質係数  $Q$  (LETの関数)  
を正しく求めるために、

LET = Deposited Energy / Path Length

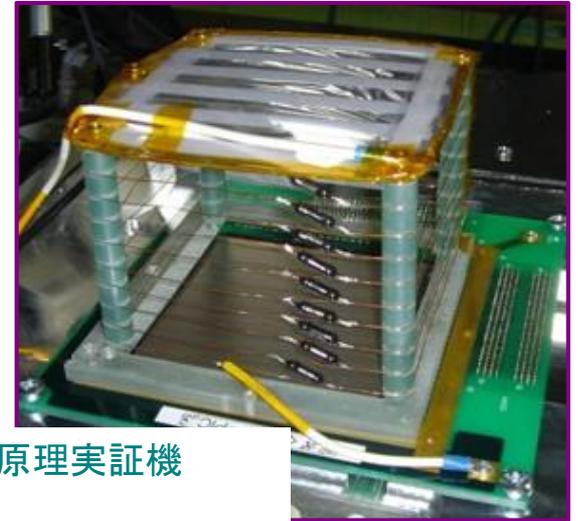
## $\mu$ -PICによる3次元Gas-TPC を使う

- ⋈ **位置有感性 (LET分布の正確な測定)**
- ⋈ 生体組織等価ガス・物質 (中性子にも感度)
- ⋈ 全方向性 (これまでは $4\pi$ でも方向性あり or 立体角限定)

# 検出器の話

# 開発経過

年月	開発内容
2004年～2005年	京大 $\mu$ PICによる原理実証
2007年～	ver. 1 開発
2010年 ～	Ver.2による性能評価
2013年 ～ <b>現在</b>	BBMによる性能評価 FMの製作・各種試験
2015年 ～	FM打ち上げ・機上試験



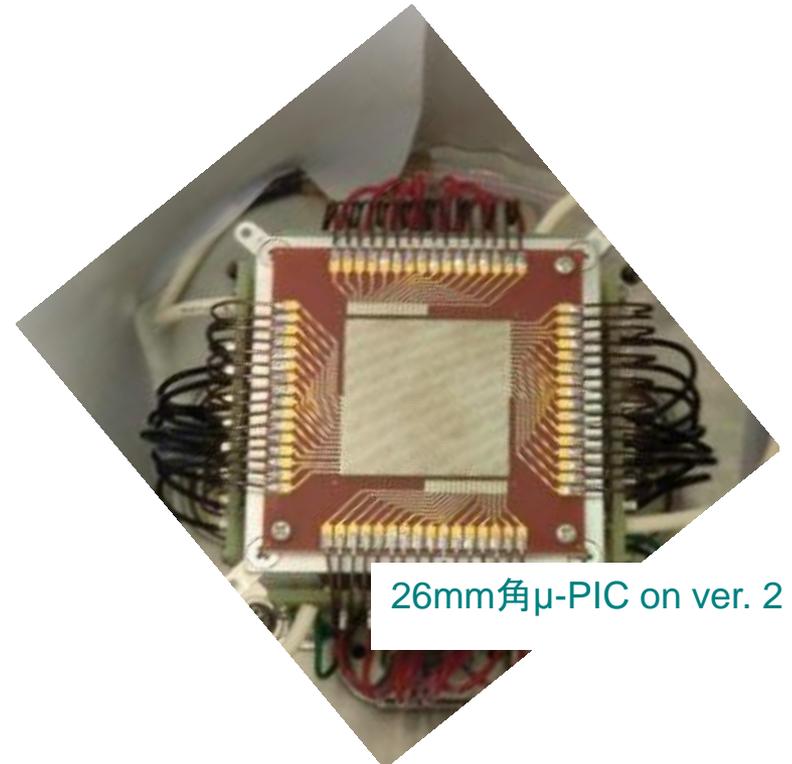
10cm角 原理実証機

## Ver.2→BBM

- ・ 新しい $\mu$ -PIC基板
- ・ 極板構造の修正
- ・ プリアンプ等回路の集積化

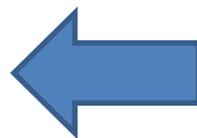
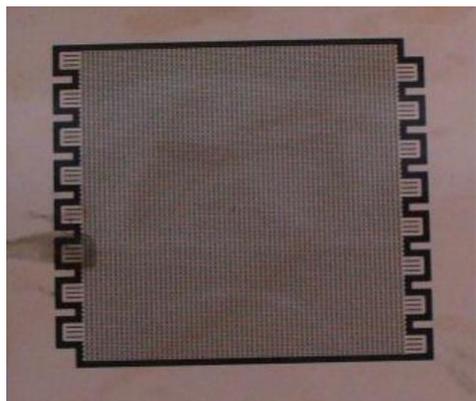
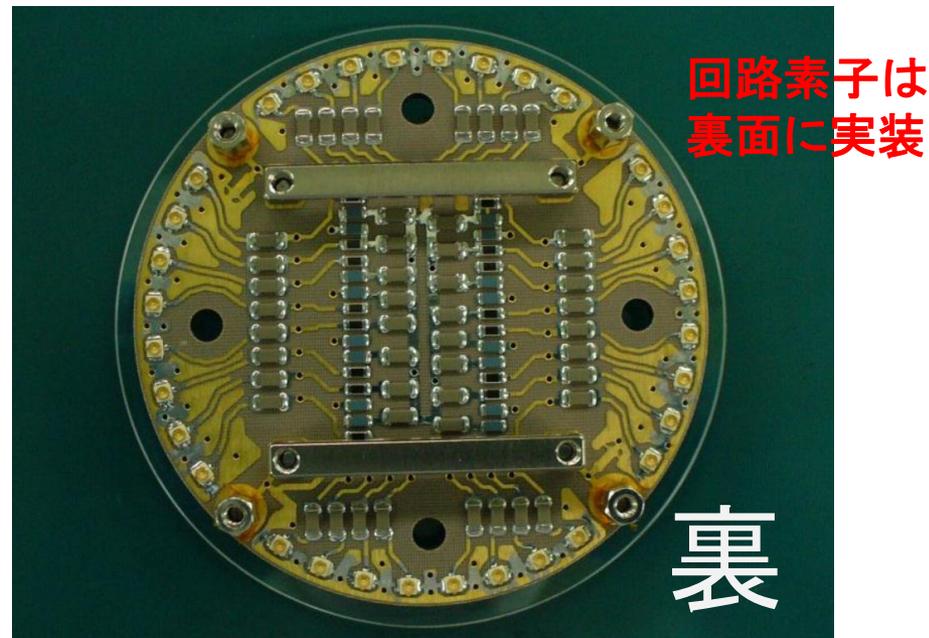
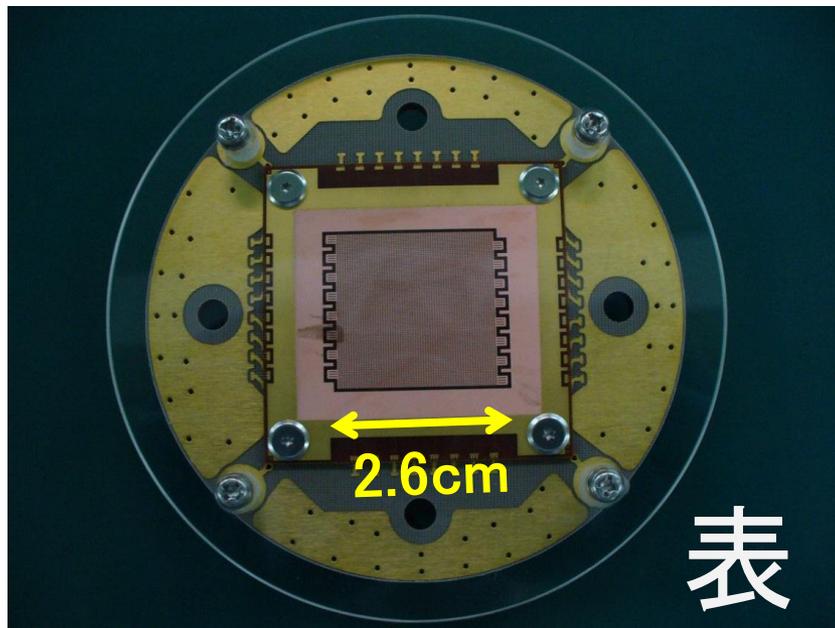


BBMによる動作の確認、性能の評価

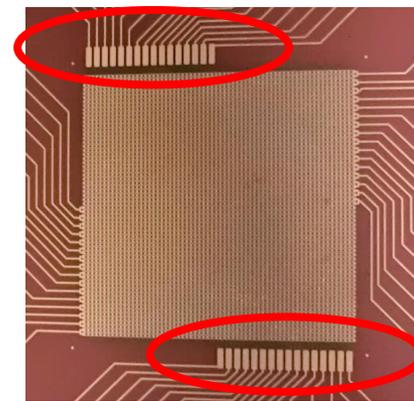


26mm角 $\mu$ -PIC on ver. 2

# $\mu$ -PIC基板(BBM,FM)

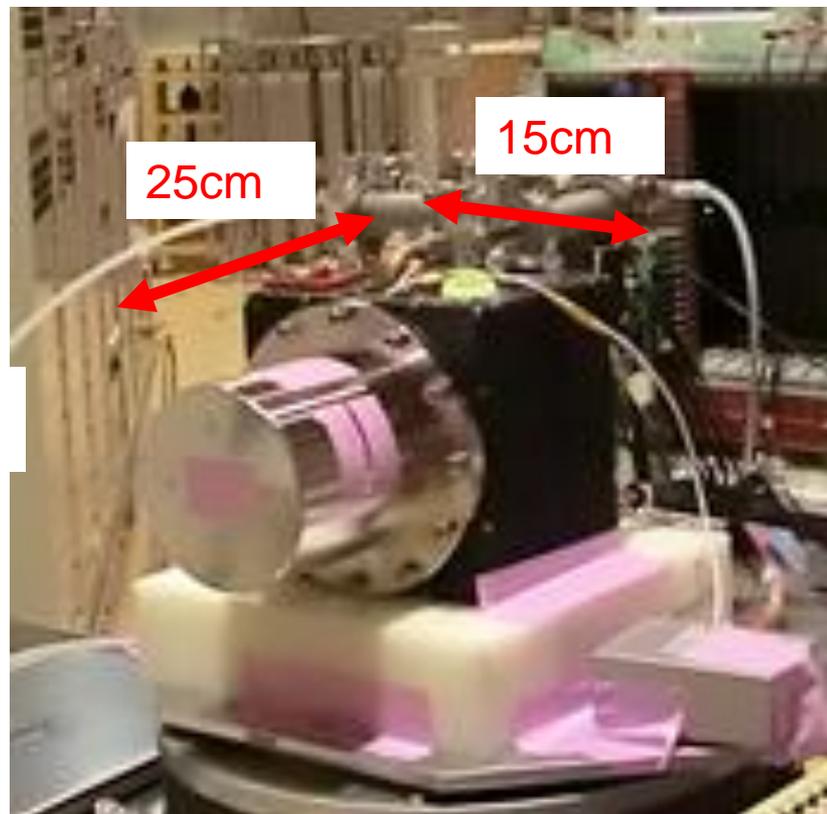
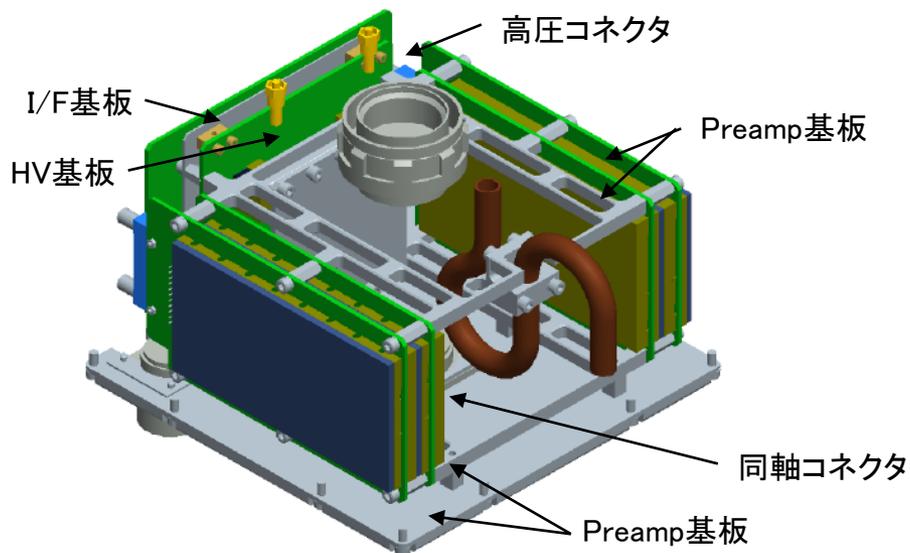
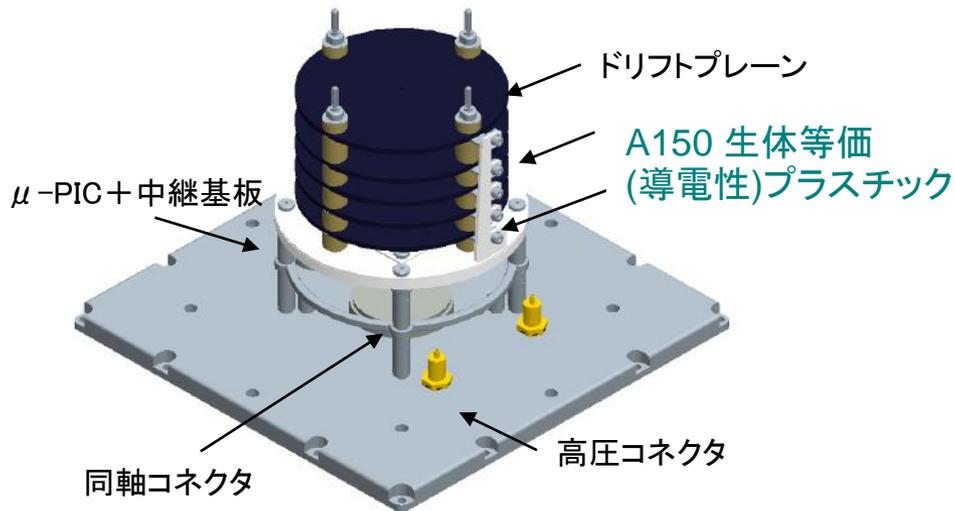


Anode極板が見えないように改良

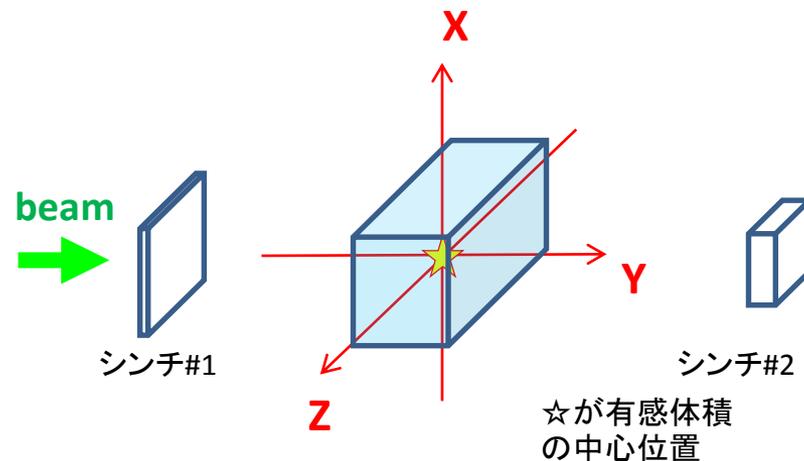
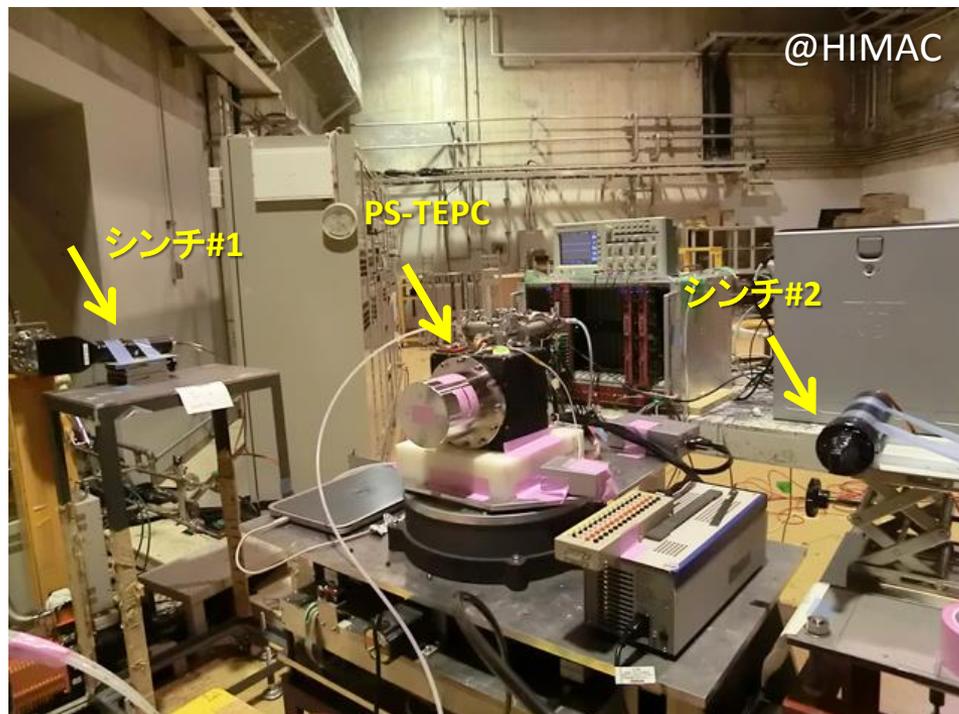


# BBM SPECS

## Bread Board Model



- $\mu$ -PIC : Anode **64 strips**, Cathode **64 strips**
- 検出領域:  **$2.6 \times 2.6 \times 5.0 \text{ cm}^3$**
- 読出し : 32ch (4 strips/ch)  $\Rightarrow$  250MHz FADC
- TCP フィールドケージ:  
**生体等価(Tissue- equivalent)プラスチック (A-150)**
- Gas: (P- and M-) **生体等価ガス** 1気圧
  - P-TE gas ( $\text{N}_2$  :5.4%,  $\text{CO}_2$ :39.6%,  $\text{C}_3\text{H}_8$ :55%)
  - M-TE gas ( $\text{N}_2$  :3.2%,  $\text{CO}_2$ :32.4%,  $\text{CH}_4$ :64.4%)
- 0.2-700 keV/ $\mu\text{m}$  by 2モジュール

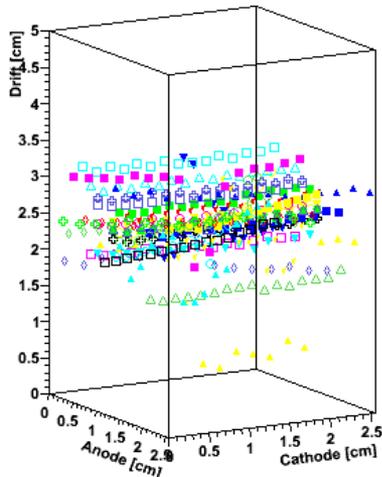


入射位置と方向

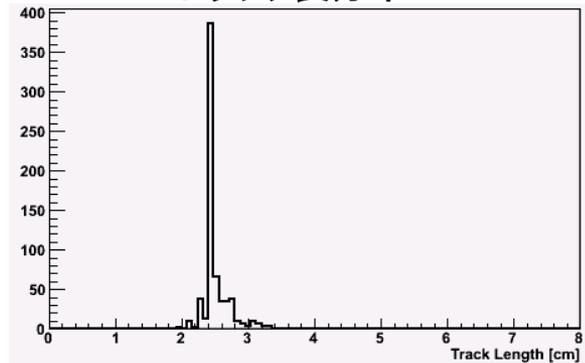
- M-TE ( $N_2:3.2\% + CO_2:32.4\% + CH_4:64.4\%$ ) : ガスフローで動作させた。
- 気圧はバロトロンで測定し、指示値の変動は実験を通して1%以下であった。
- ビーム径は約1cm。
- シンチ#1と#2のコインシデンストリガーによりデータ取得。

## BBMの動作確認(M-TE 1atm)

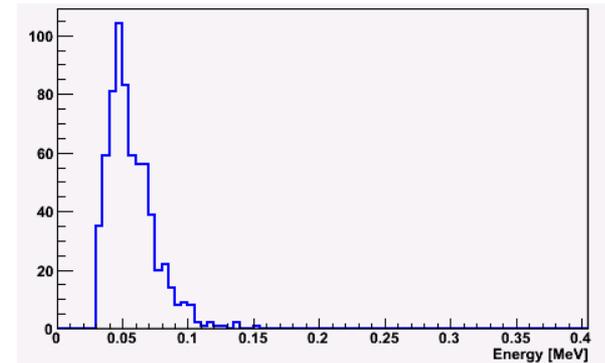
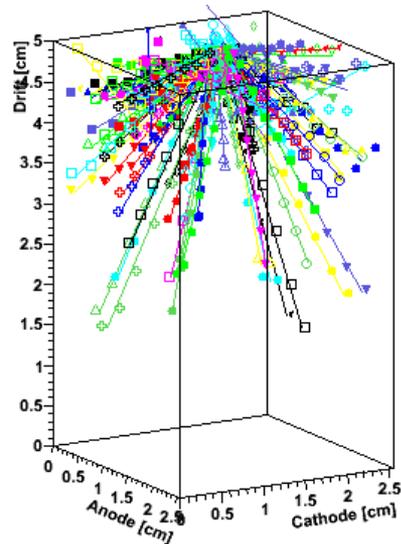
He230MeV/n照射時

トラック  
イメージ

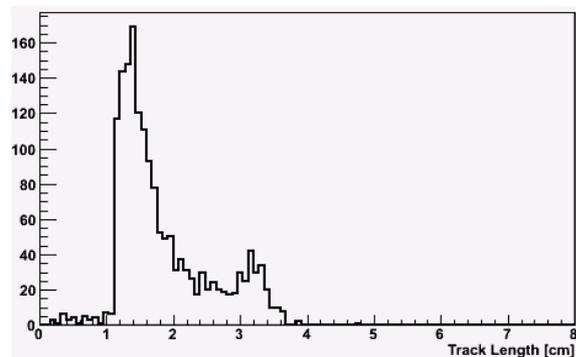
トラック長分布



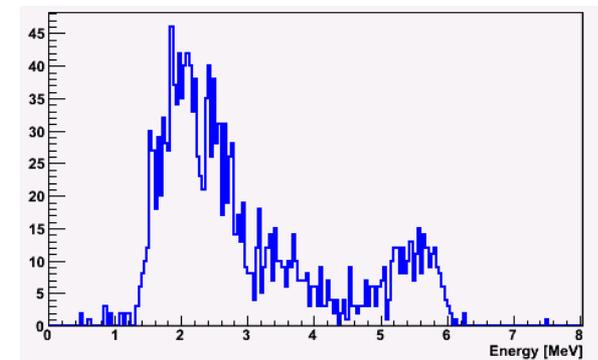
エネルギースペクトル

5.5MeV  $\alpha$  (Am-241) キャリブレーショントラック  
イメージ

トラック長分布



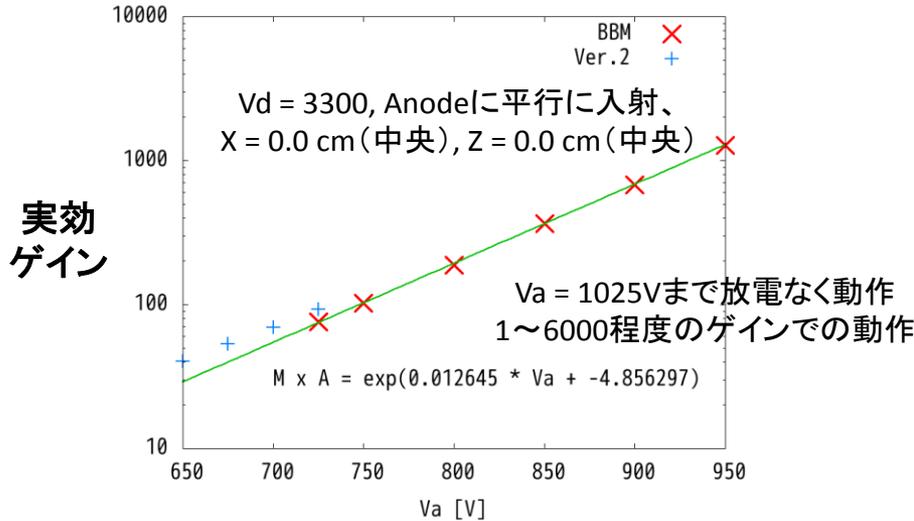
エネルギースペクトル



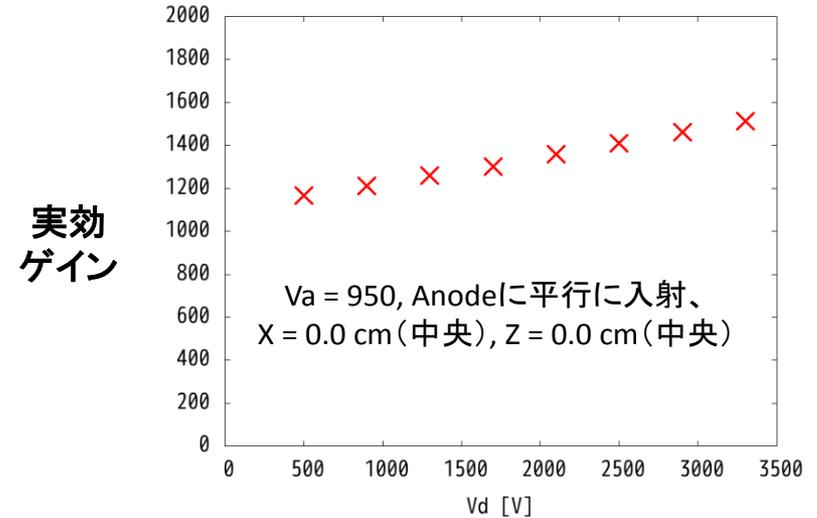
それぞれの照射条件の特徴が再現されている

# BBMの基礎特性 (Si800MeV/n照射時)

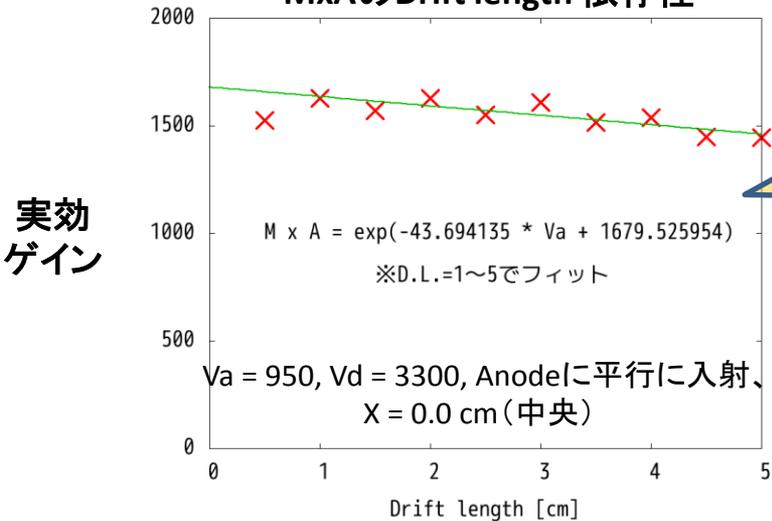
ゲインカーブ



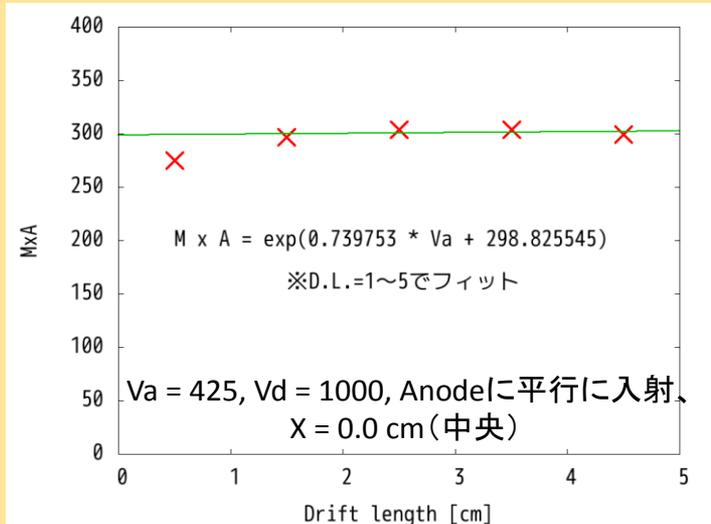
サチュレーションカーブ



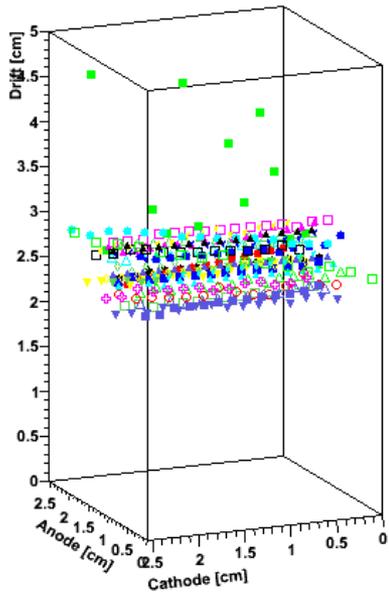
MxAのDrift length 依存性



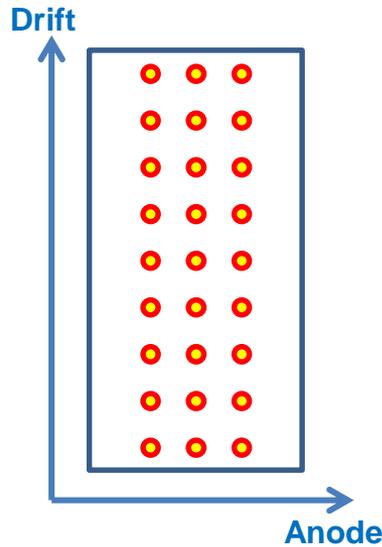
Ar 90%+ C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 10% 1atmの場合



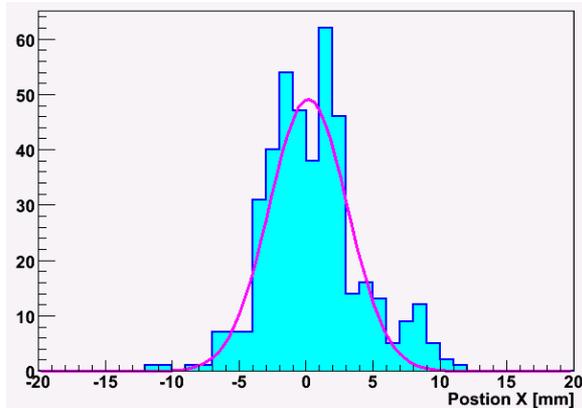
# トラック位置の再現性



5mmおきに9×3箇所に入射

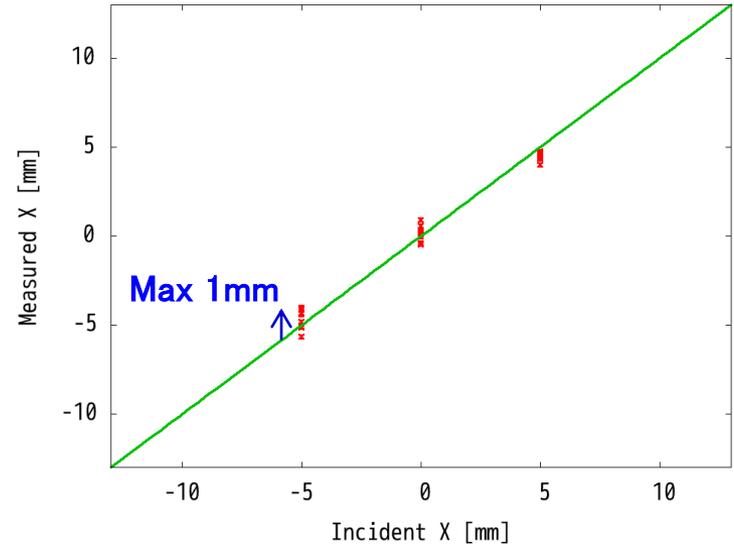


Anodeの軸に  
Projection

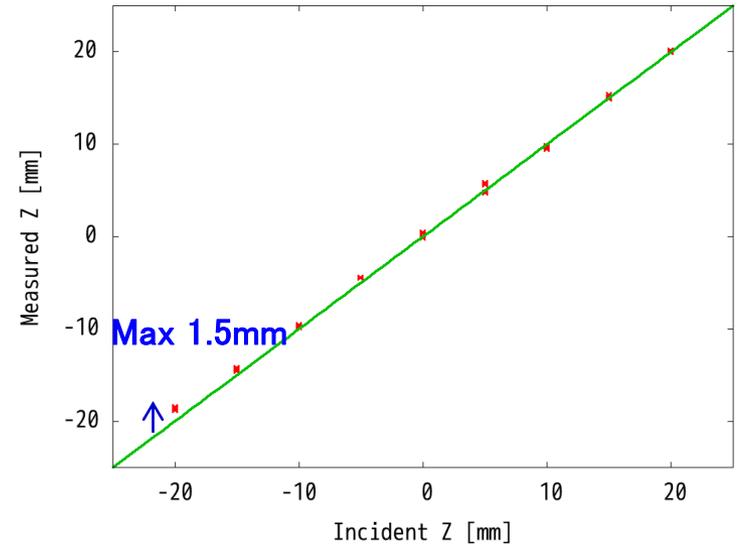


中心値をプロット

Anode方向のトラック位置

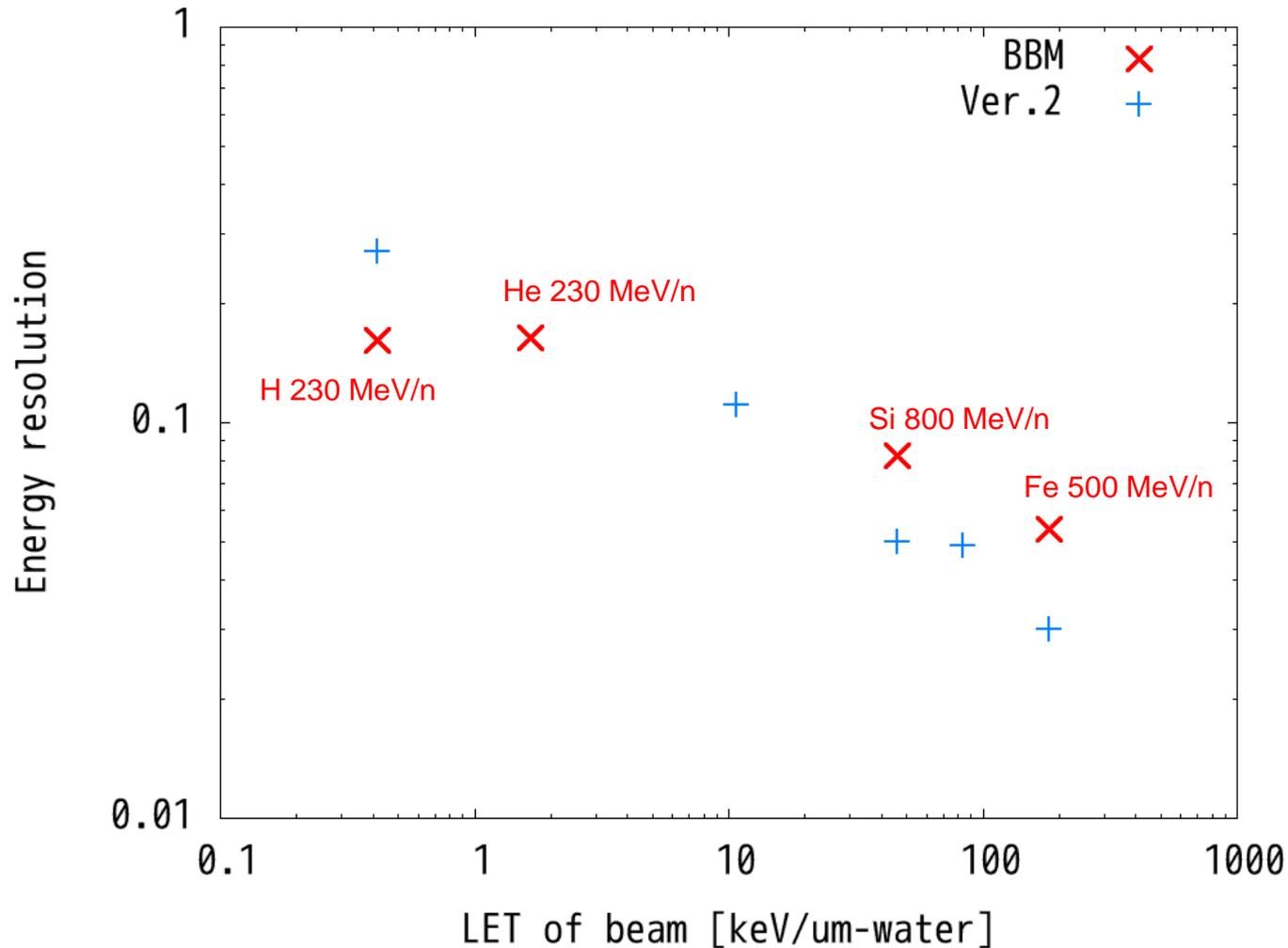


Drift方向のトラック位置



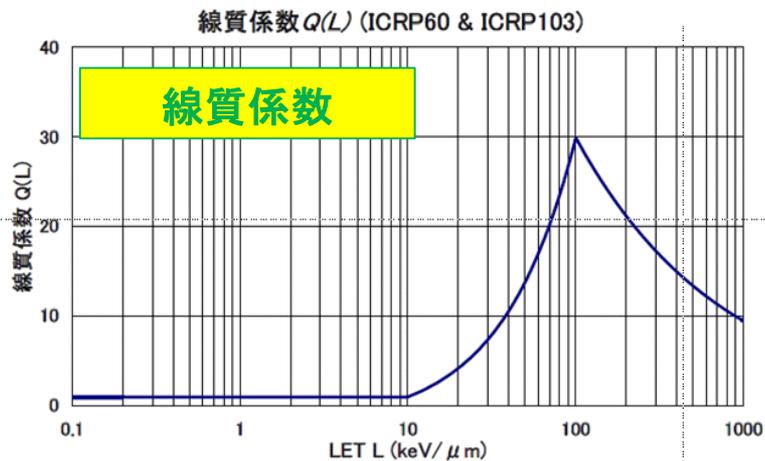
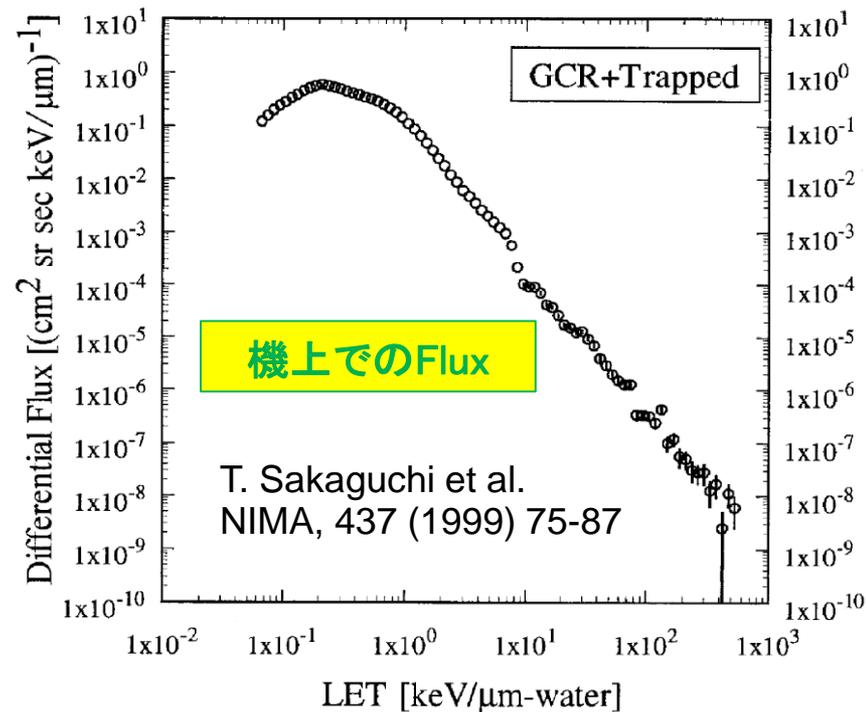
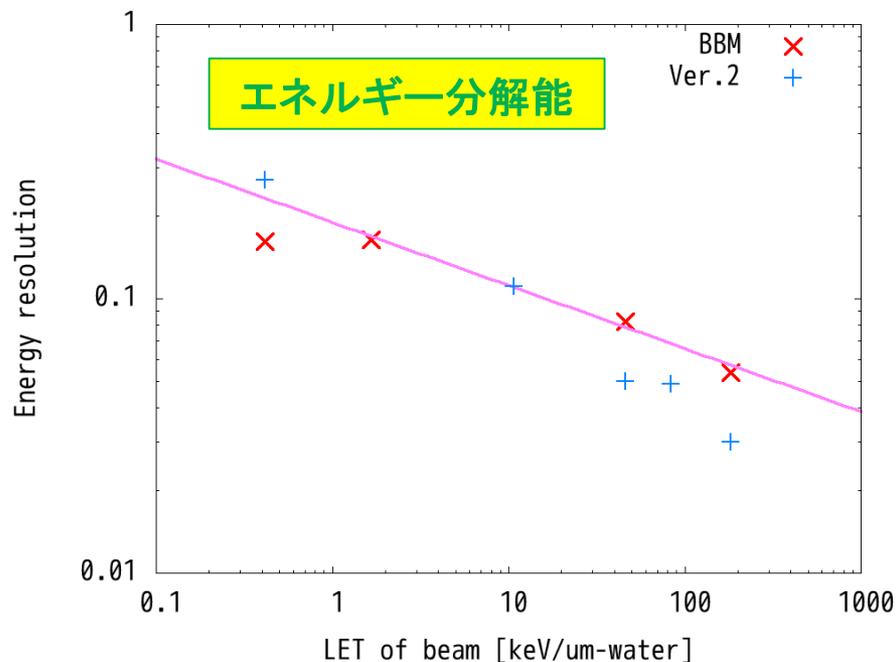
実用上十分なトラック精度。きれいなドリフト電場ができている。

## エネルギー分解能



SiとFeに関してはVer.2よりも分解能がやや悪い傾向がある。H, Heに関してはVer.2と同等かそれ以上の分解能が出ている。

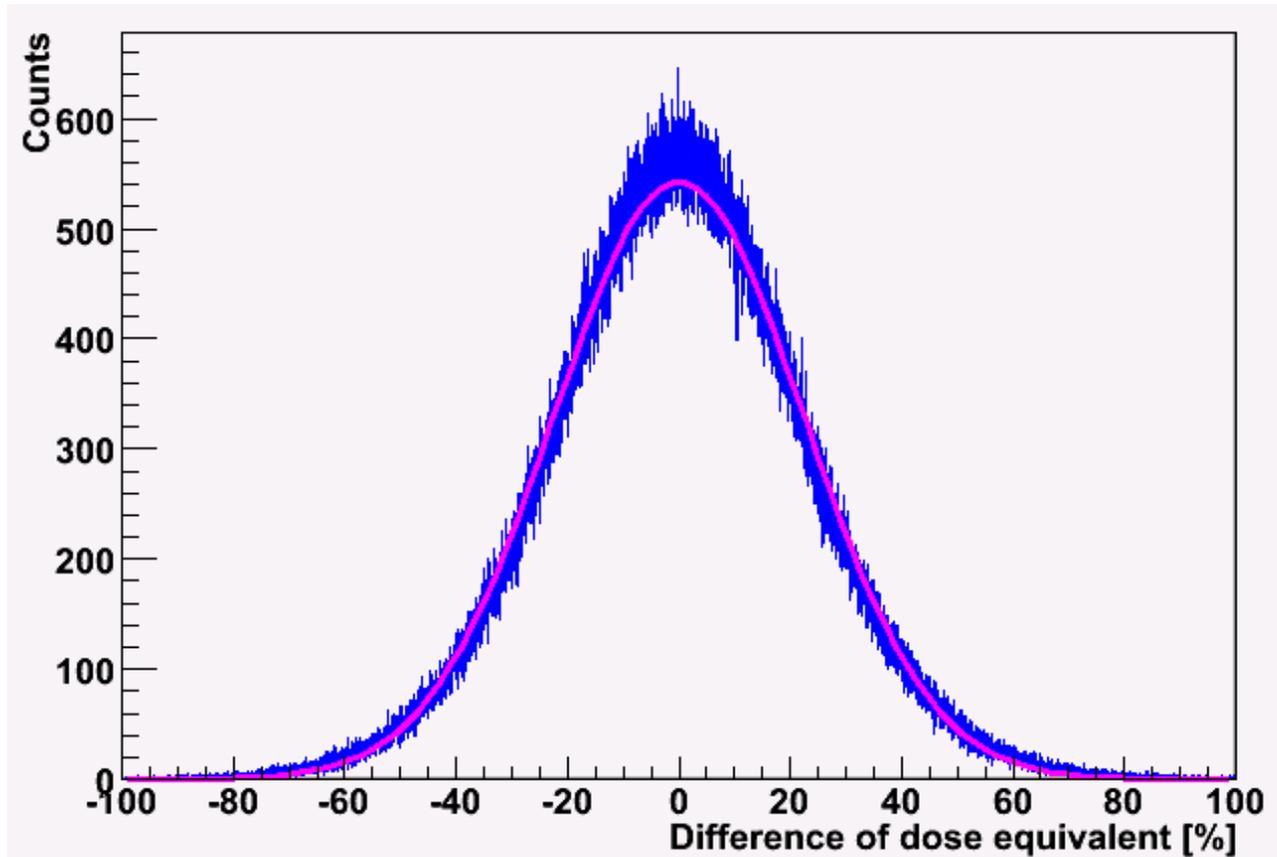
# 線量当量の決定精度の見積もり



- ① 分解能の代表的な曲線を決める
- ② Fluxの分布で入射粒子のLETを決める。
- ③ LETをエネルギー分解能の曲線決められる $\sigma$ を用いてガウシアンで振る
- ④ 線量当量[Sv]を計算する

# 線量当量の決定精度

エネルギーを振らなかった場合と振った場合の差異をフィル



得られた分布はほぼガウシアンになり、 $1\sigma=22.5\%$ と見積もれた。

NCRP142, ICRU1992勧告 ( $1\sigma \leq 30\%$ ) を満足する

# まとめ

- ✓  $\mu$ -PICの応用として、宇宙環境での利用を目的とした線量計として位置有感型比例計数箱(PS-TEPC)の開発 2004年～
- ✓ 試作品 (BBM) : 良好に動作。
- ✓ エネルギー分解能とフラックスから線量当量の決定精度をモンテカルロシミュレーションで見積もったところ、**22.5%(1 $\sigma$ )**の精度と見積もれた。これは**NCRP-142, ICRU 1992**勧告を満足する。
- ✓ **2015年8月**打ち上げ予定