

2010.10.19 宇宙環境シンポジウム@東京国際フォーラム

ISS船内における能動型・宇宙放射線線量計測器 PS-TEPCの開発

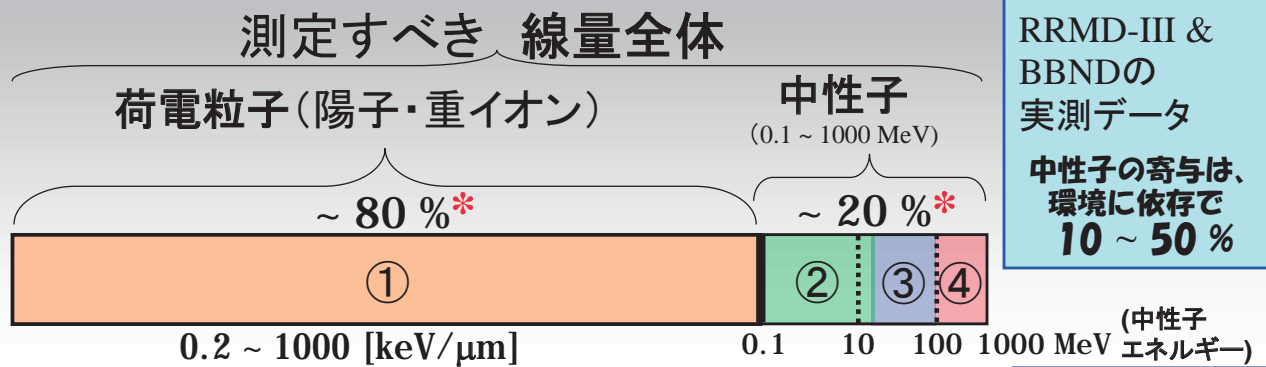
Development of an active space dosimeter PS-TEPC onboard the ISS

PS-TEPC : Position-Sensitive Tissue Equivalent Proportional Chamber

慶應義塾大学・医学部・物理学教室／
JAXA・宇宙医学生物学研究室
寺沢 和洋

早大・理工研／JAXA・宇宙環境G 道家忠義
京大院・理学研究科 身内賢太郎、谷森達
KEK・放射線科学センター 佐々木慎一、俵裕子、
齋藤究、高橋一智
JAXA・宇宙環境G 松本晴久、込山立人、
JAXA・船内利用ミッションG 布施哲人
放医研・基盤技術センター 内堀幸夫、北村尚

宇宙放射線線量計測の現状



*STS-89でのRRMD-III & BBNDの実測データ

中性子の寄与は、環境に依存で10 ~ 50%

- ① RRMD-IIIでほぼ網羅(荷電粒子の97~98%)
- ② BBNDで網羅(中性子エネルギーで0.1~15 MeV)
- ③ FIB(SEDAP)で網羅(中性子エネルギーで15~100 MeV) (但し、暴露部)
- ④ どうするか? → 開発中のSFC, PS-TEPC(両方測定)

現状で線量全体の90%近くを網羅

但し、既存の中性子線量計は誤差が大 (factor 2 ~ 1 オーダー?)
なので、線量寄与が20%と言っても、その倍以上もあり得る。
→ 十分な測定精度を持った中性子線量計が必要
→ 裏を返せば、測定精度がなければ、中性子線量計測は、現状(BBND×(2 ~ 2.5) ⇒ 0.1 ~ 1000 MeV)で十分。

T. Doke et al., Radiat. Meas., 33 (2001) 373-387
H. Matsumoto et al., Radiat. Meas., 33 (2001) 321-333
T. Koga et al., Radiat. Meas., 33 (2001) 287-291
T.W. Armstrong et al., Rad. Meas., 33 (2001) 229-234.

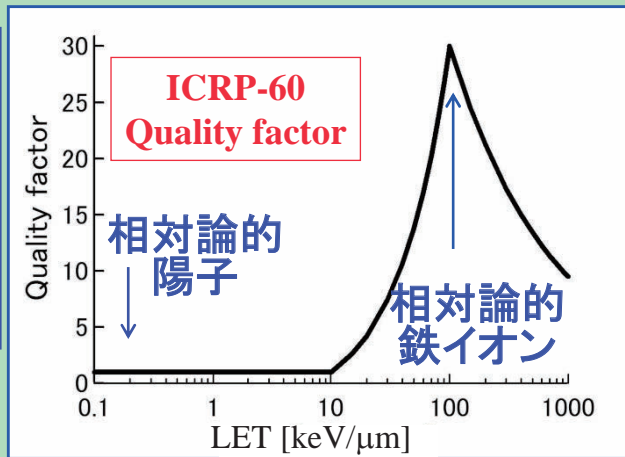
宇宙放射線・被曝線量の評価方法

$$D = k \int f(L_\infty) L_\infty dL_\infty$$

$$H = k \int Q(L_\infty) f(L_\infty) L_\infty dL_\infty$$

$$H = D \cdot \bar{Q}$$

L_∞ : LET in water
(Stopping power of water)
 $Q(L_\infty)$: Quality factor (線質係数)
LETの関数として与えられる
 $f(L_\infty)$: Differential LET distribution
 k : 単位換算係数(定数)



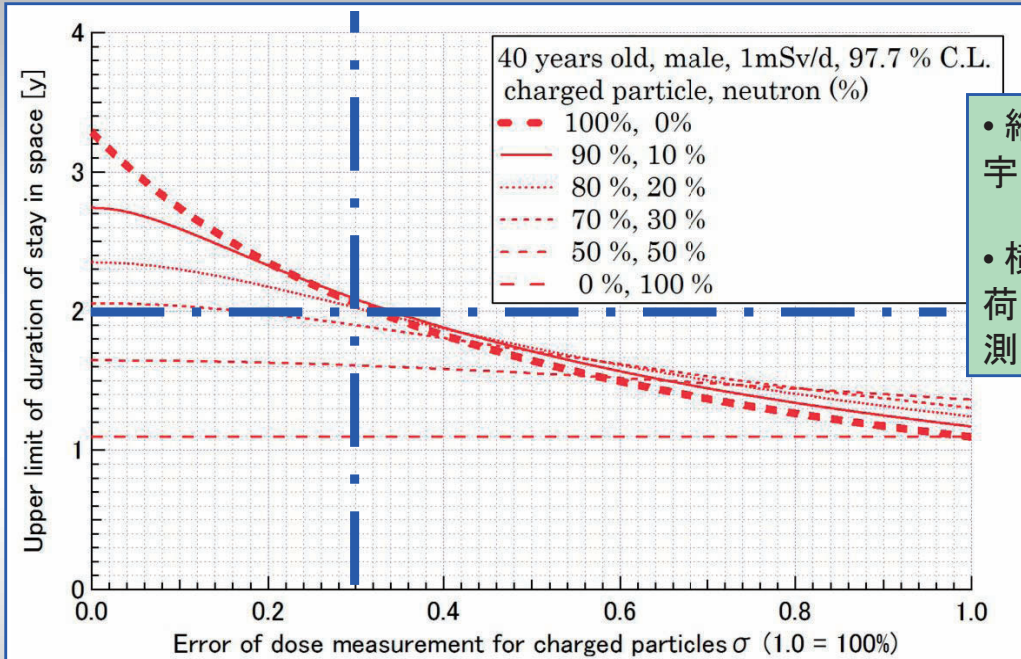
D : Absorbed dose (吸収線量)
 H : Dose equivalent (線量当量)
 \bar{Q} : Effective quality factor (実効線質係数)

→ **LET分布**の測定が本質的、**線量当量**で評価

LET: Linear Energy Transfer 線エネルギー付与、(cf. 実効線量)
 $LET = E / R$ [keV/μm-water] E: エネルギー R: 飛程

3

測定精度と宇宙滞在期間(上限)の関係 (中性子込みで)



• 縦軸:
宇宙滞在期間

• 横軸:
荷電粒子に対する
測定精度

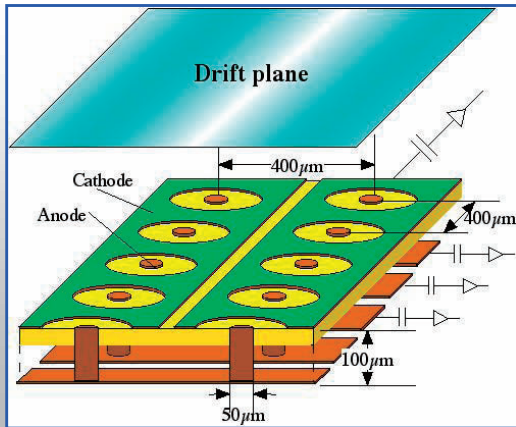
- 40歳男性の生涯被曝限度: 1200 mSv
→ 1 mSv/d で、全てのエラーがゼロなら、3.3年
- 荷電粒子 + 中性子で 1 mSv/d としている
- 中性子の測定精度を100% (あくまで)としている

- 仮に2年を目標にするとやはり30%以内か?
- NCRP-142等での勧告と同様になる

4

PS-TEPCについて

- 生体組織等価ガス・物質(中性子に感度)、
- 位置有感性(LET分布の正確な測定)、
- 全方向性(これまでは 4π でも方向性あり or 立体角限定)
→ μ -PICによるGas-TPC (PS-TEPC)
- 比例計数管&ストリップ電極による2次元位置決定
- 電離した移動電子によるZ軸の位置決定
→ 3次元放射線飛跡検出器として動作



- 400 μ m ピッチ電極
- 陽極、陰極共に
256chで、65536 ピクセル
- サイズ : 10 cm \times 10 cm
- ガスゲイン : $\sim 10^4$ (max.)
- 宇宙線天文学から
線量計測へ応用

Micro-Pixel Chamber (μ -PIC) の構造図

5

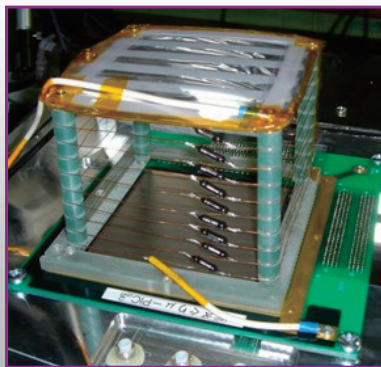
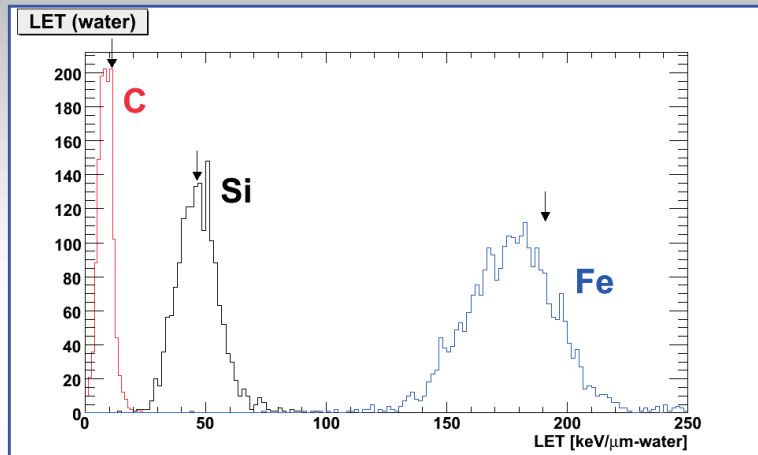
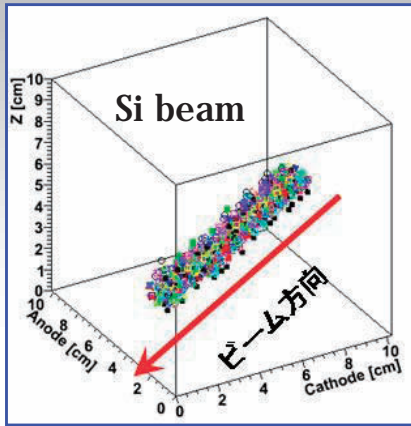
宇宙放射線線量計に求められる性能の比較

条件 \ 線量計	TEPC	DOSTEL	RRMD-III	PS-TEPC
LETの十分な精度での測定 (応答関数の σ)	\times ¹⁾ 51%	\bigcirc ¹⁾ 17 %	\bigcirc	\bigcirc
リアルタイム計測	\bigcirc ¹⁾	\bigcirc ¹⁾	\bigcirc	\bigcirc
イベント毎の評価	Δ ¹⁾	Δ ¹⁾	\bigcirc	\bigcirc
生体等価性	\bigcirc	\times	\times	\bigcirc
中性子への感度	\bigcirc	\times	\times	\bigcirc
コンパクトなシステム	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
全方向性(4π)	\bigcirc	\times	\times	\bigcirc
最小電離粒子の検出	Δ	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
LET 範囲 [keV/ μ m]	0.4 ~ 1200	0.1 ~ 120	0.1 ~ 700	0.1 ~ 700

1) リアルタイム性を捨て真のLET分布を得るには、deconvolution が必要

6

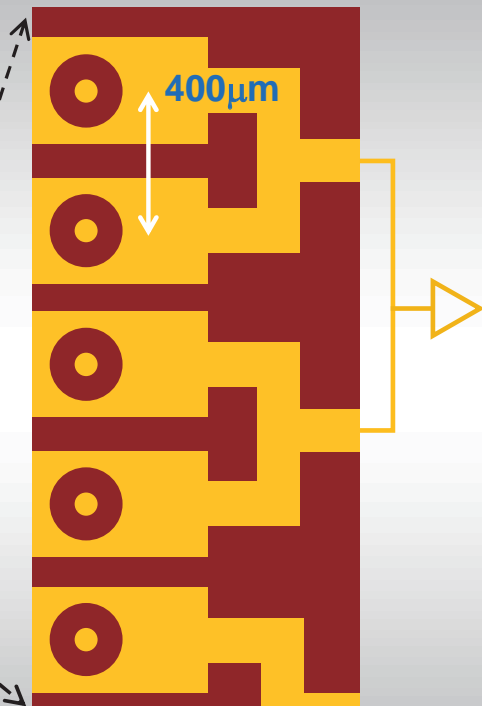
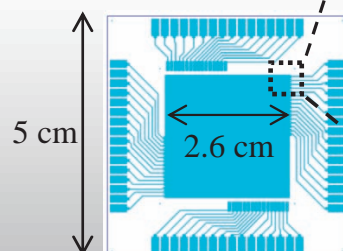
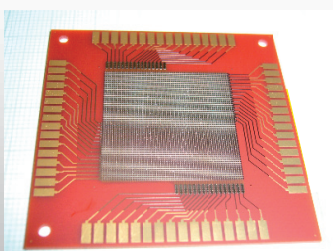
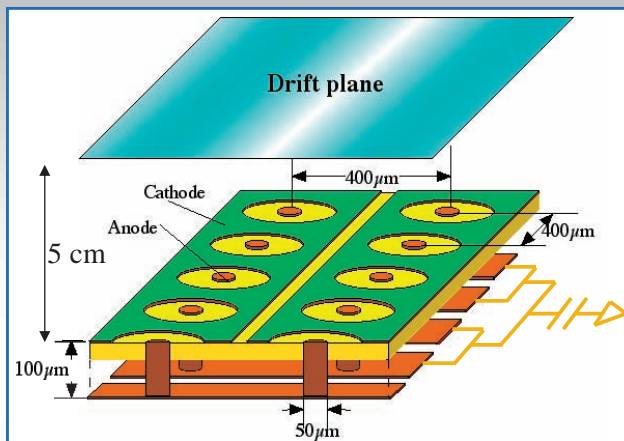
μ-PICによる重イオン照射テスト（プロトタイプ）



- 有効領域: $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$
- Ar(90%) + エタン(10%) : 1気圧
- 放医研HIMAC
- He 230 MeV/n, C 400 MeV/n, Si 800 MeV/n, Fe 500 MeV/n
- シンチレーター(ビーム出口)による外部トリガ

7

検出器の小型化（3号機）

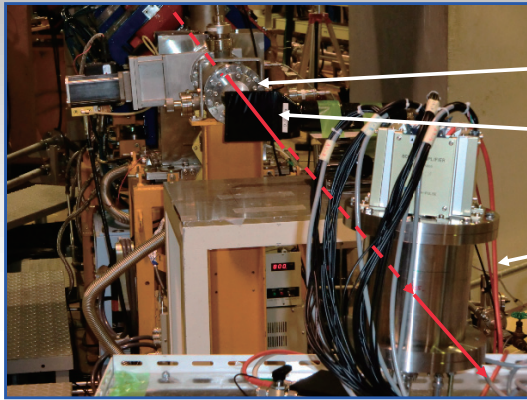


全ストリップのsumから、各ch読み出しへ
(ストリップ4本で1ch に対応とした)

有効体積: $2.5 \times 2.5 \times 5 \text{ cm}^3$
x, y : 各16ch (strip 4 ch sum)

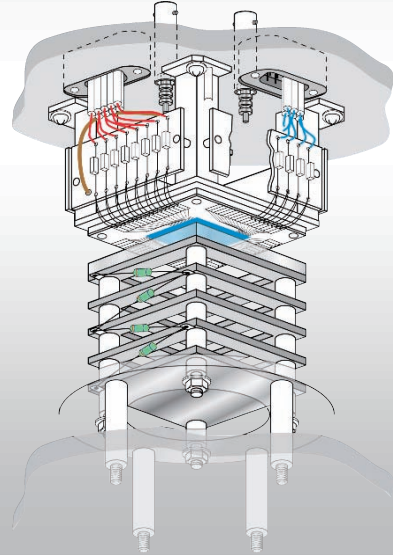
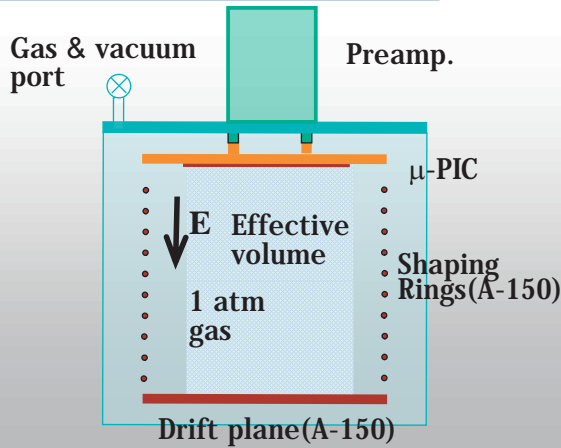
8

検出器の配置 @ HIMAC, 放医研



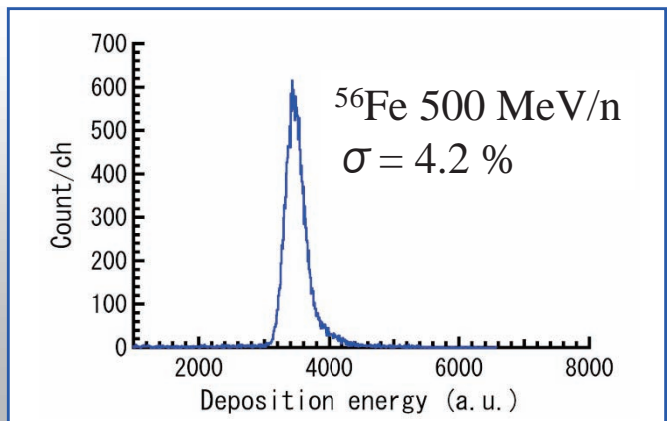
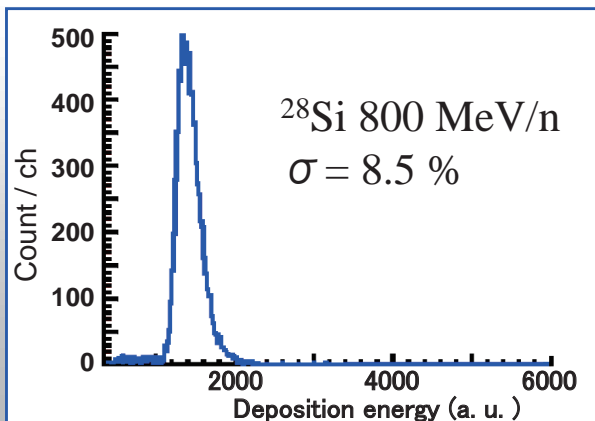
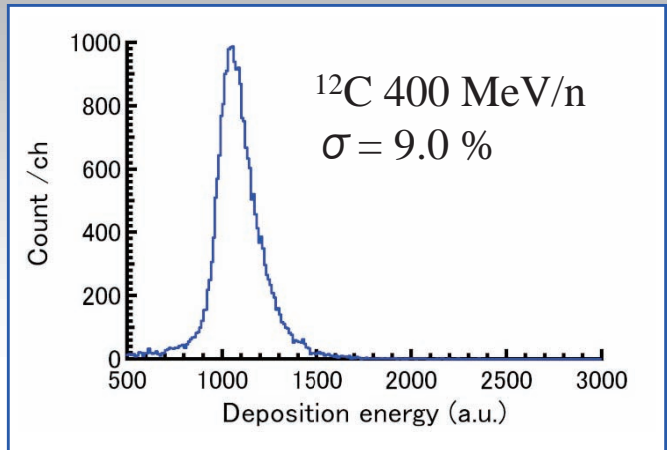
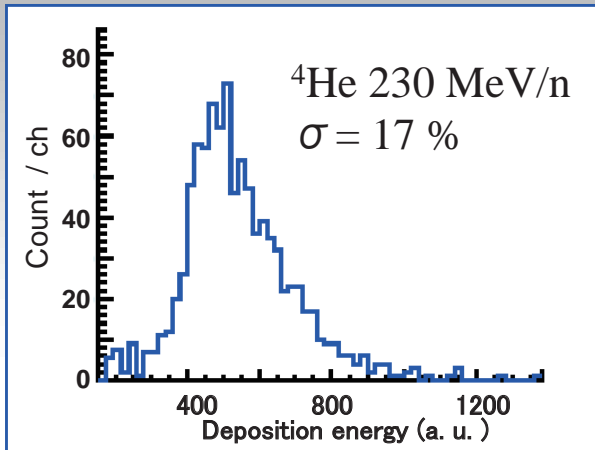
Beam window
Plastic Scintillator
Detector

^4He 230 MeV/n
 ^{12}C 400 MeV/n
 ^{28}Si 800 MeV/n
 ^{56}Fe 500 MeV/n



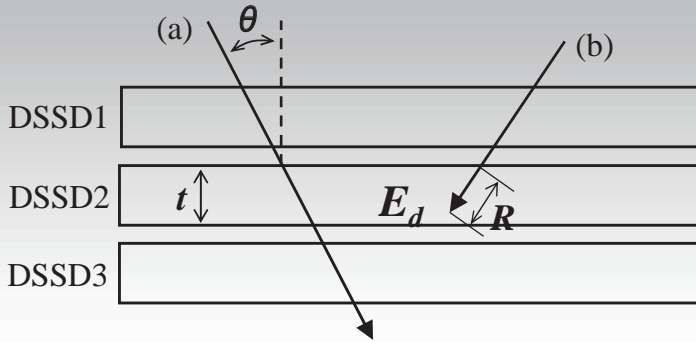
9

PS-TEPC内でのエネルギー付与分布



10

RRMD-III によるLET(線量)リアルタイム測定



T. Doke et al., Mutat. Res., 430 (1999) 191-202



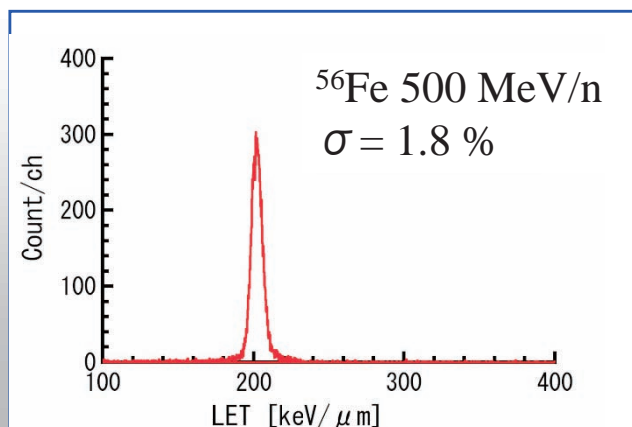
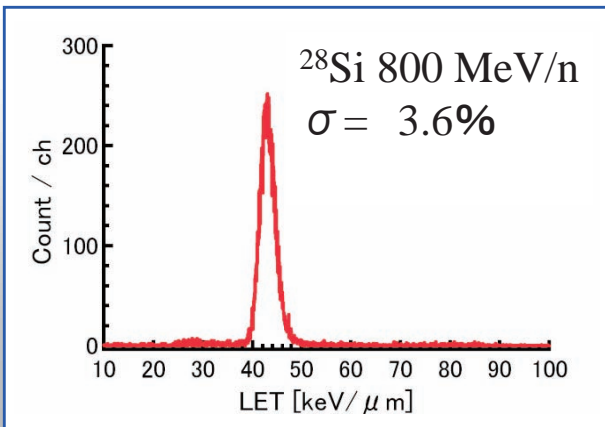
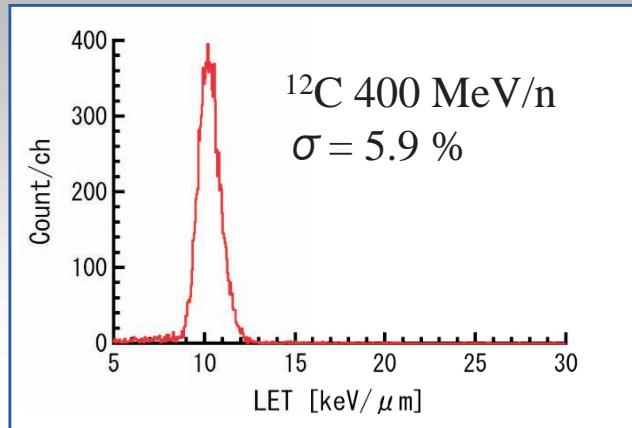
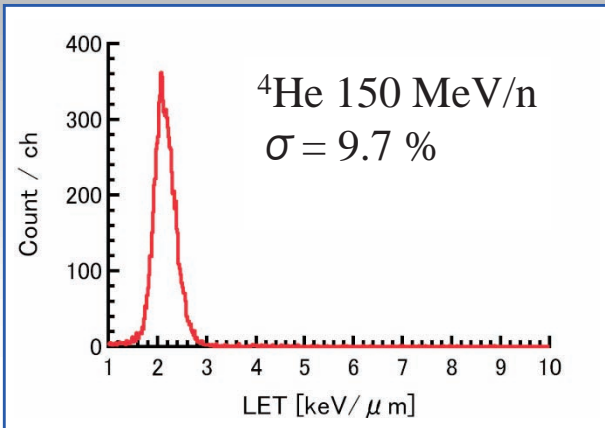
RRMD-III

- (a) 突抜け粒子
 $LET = E_d / (t / \cos\theta)$
 - (b) 2枚目で止まった粒子
 $LET = E_d / R$
- $\Delta E \cdot E$ 粒子弁別と
 飛程とエネルギーの関係
 → Rの決定
- $LET_{water} [keV/\mu m]$
 $= LET_{Si} \times 1.20 / 2.33$

- 粒子毎のLETの評価が可能
- 入射角度
- 検出器内での粒子の通った長さ
 過去のスペース・シャトル・ミッション
 STS-84, 89, 91で実測

→ 全体の誤差：10%程度 (各粒子の分解能、校正誤差、位置分解能などを考慮)
 荷電粒子については【現状で十分な測定精度を達成】

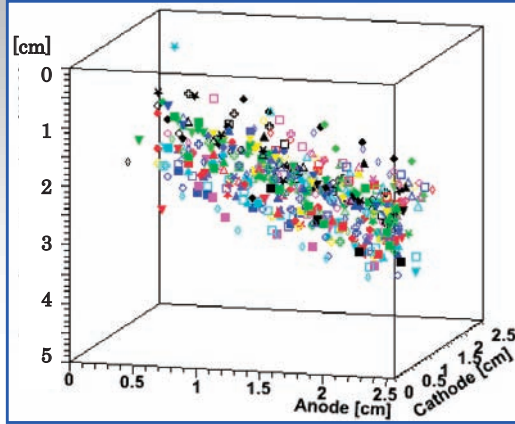
RRMD-IIIで測定されたLET分布



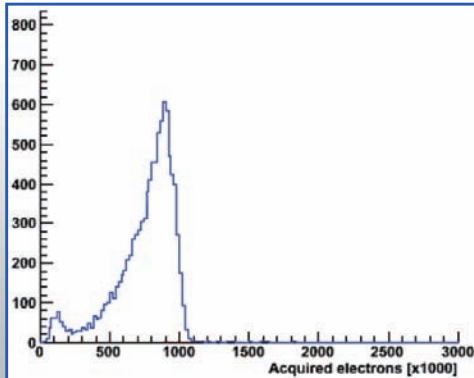
エネルギー付与分布からLET分布への変換

Preliminary

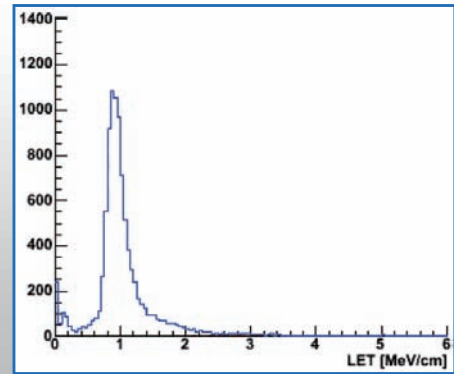
^{56}Fe 500 MeV/n
 プロパンベースの
 生体組織透過ガス
 ・ C_3H_8 : 55%
 ・ CO_2 : 39.6%
 ・ N_2 : 5.4%



観測された
3次元飛跡



エネルギー付与分布



LET分布

13

まとめ

- ・各ストリップから読み出し可能な4 ch のsum 測定系を製作した。
- ・He, C, Si, Fe のビームを利用したRRMD-IIIの結果との比較から、PS-TEPCにおいて、~ 30 % 以内の測定精度が達成できる可能性が示唆された。

今後・搭載後の将来的な課題

- ・他の粒子についても照射試験を実施予定 (proton, Ar など)
- ・中性子についても実施する
 (但し、中性子も荷電粒子についての測定に帰着)
- ・LET分布 (track length の評価) の最適な求め方
- ・PS-TEPCとしての動作安定性の実証: ~ 数ヶ月以上
 (TEPC, μ -PICを組み合わせた場合として)

14