位置有感型比例計数箱PS-TEPCによる機上試験データの解析

高エネルギー加速器研究機構(KEK)
岸本 祐二

背景

被ばく線量の比較

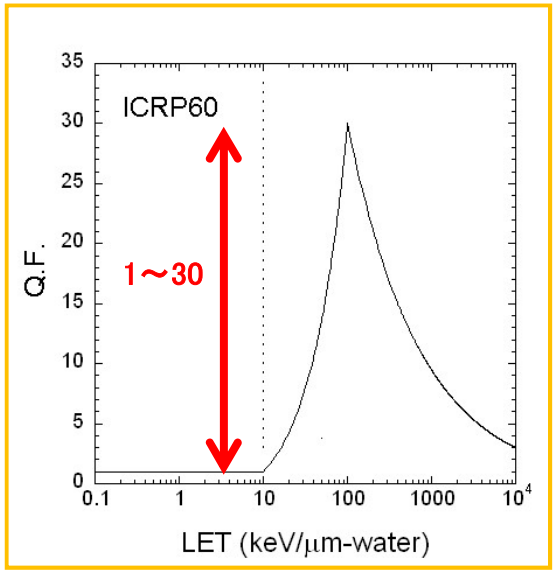
地上　　：　2 ～ 3 mSv/year (自然放射線)
宇宙機内 : 0.1 ～ 1 mSv/day (フレア時は急増)

※In SPE (Solar Particle Emission) : >100 mSv/day

宇宙環境で被ばく要因となる線質と寄与

宇宙機内　　: 荷電粒子 (80%), 中性子 (20%)*1
月面（計算値）: 荷電粒子 (93%), 中性子 (7%)*2

*1: Measured (STS-89), *2:Calculated (Spa. Rad 2006)



線質係数

線量計測におけるエラーが 30%（1σ）以内であることが望ましい
National Council of Radiological Protection Report No. 142(NCRP-142)

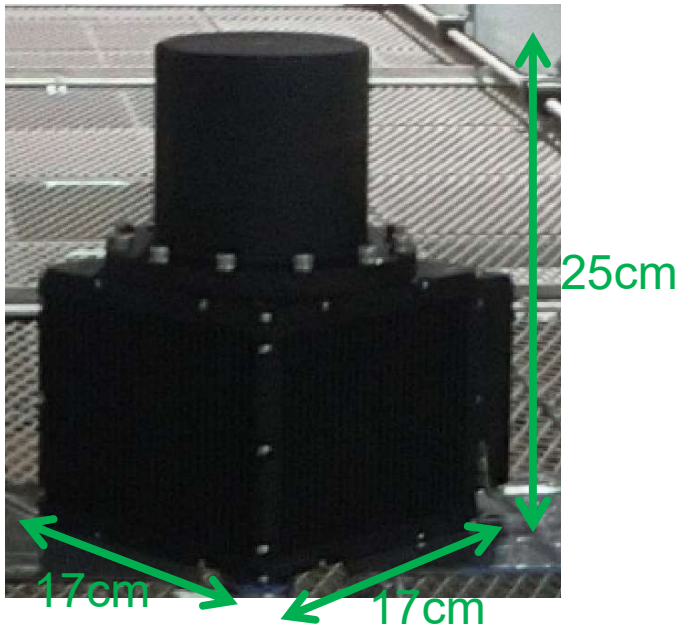
線量当量 = 線質係数Q(LET) x 吸収線量

LET(Linear Energy Transfer, 線エネルギー付与)

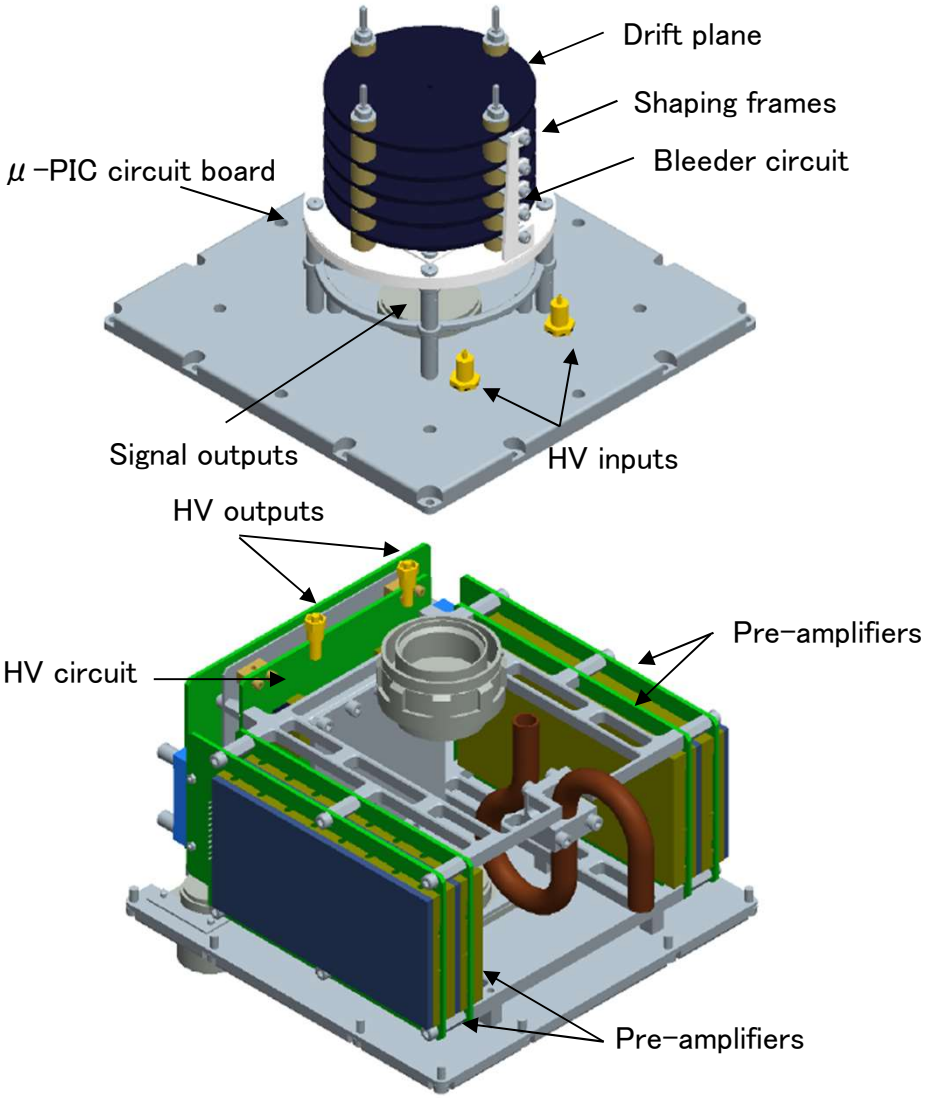
= Energy deposition / Path length

→ 吸収線量だけでなく、**LET**も同時に測定できる線量計

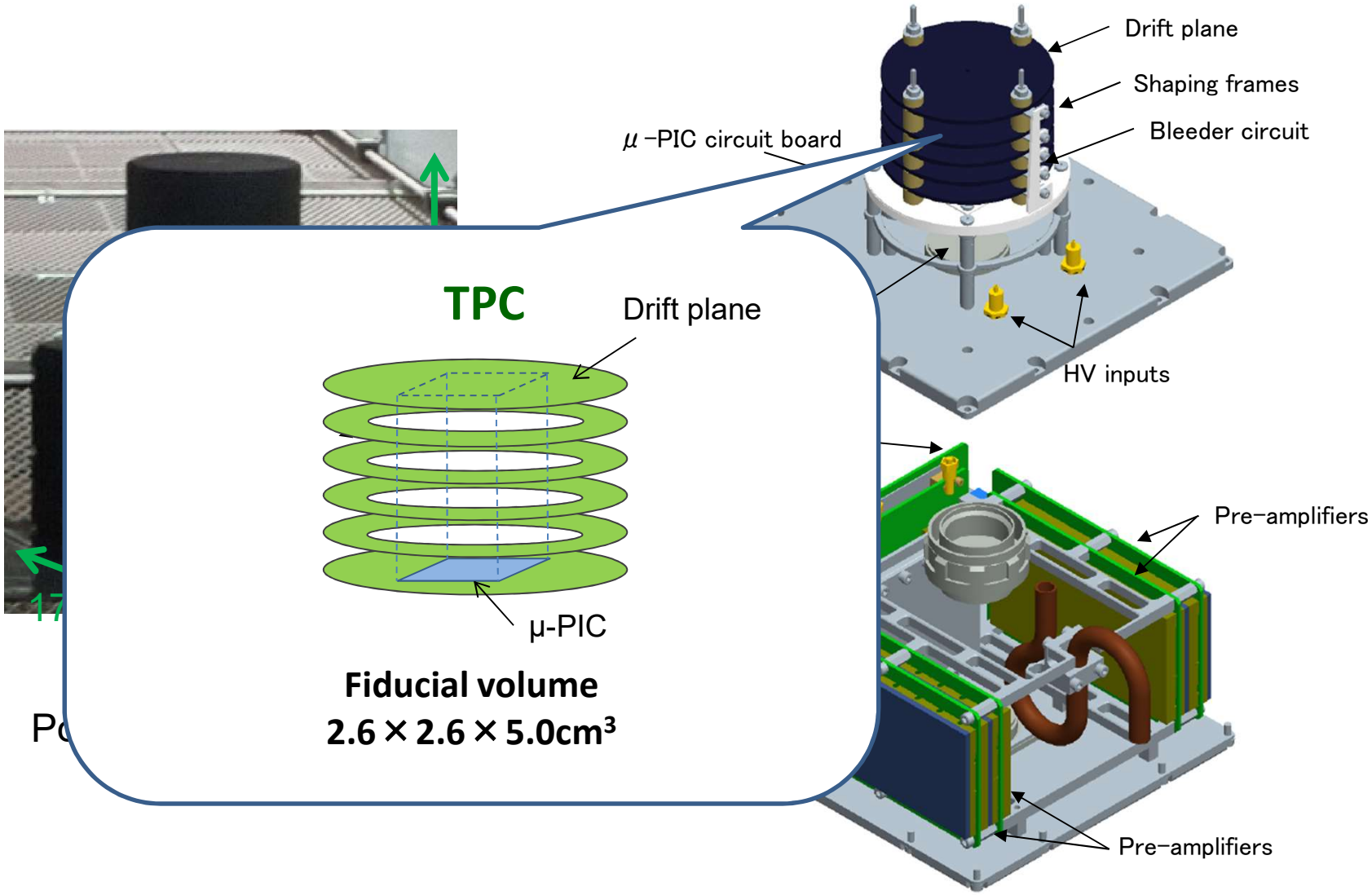
PS-TEPCの構造



Power consumption : 8.99W



PS-TEPCの構造


Drift plane
Shaping frames
Bleeder circuit
μ-PIC circuit board
HV inputs
TPC
Drift plane
μ-PIC
Fiducial volume
2.6×2.6×5.0cm³
Pre-amplifiers
Pre-amplifiers

Experiment on board the International Space Station

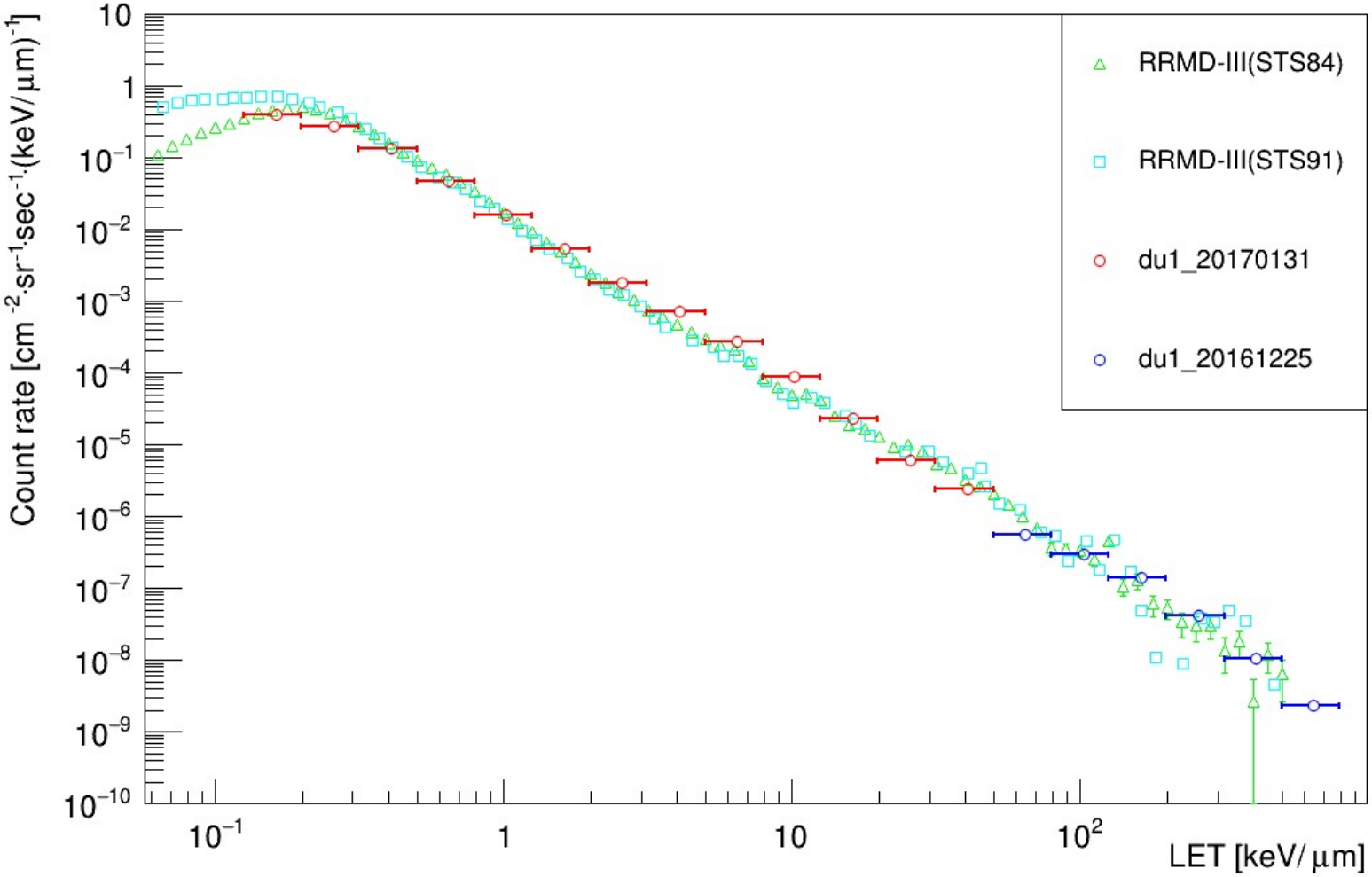
Objectives

- Tests of operation in space environment（Oscillation, Discharge）
- Demonstration of performance for cosmic rays（Dynamic range, Flux,　(Flare response)）
- Measurement of dose rate actually（comparison with other dosimeters(PADLES, TEPC)）
- Duration of experiments：3 months(Full success criteria)

On December 9, 2016 at 22:26:47(JST), a flight model of PS-TEPC was launched by a H2B rocket. It was installed in the ISS on December 14.

Date	Event
2016.12.9	PS-TEPC was launched.
2016.12.14	PS-TEPC was installed on the wall of JEM
2016.12.14～12.28	PS-TEPC was booted up, checked status and set parameters.
2016.12.28～	Measurement started

LET flux


Count rate [cm^{-2}·sr^{-1}·sec^{-1}·(keV/µm)$^{-1}$]
10
1
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
10^{-5}
10^{-6}
10^{-7}
10^{-8}
10^{-9}
10^{-10}
10^{-1}
1
10
10^{2}
LET [keV/µm]
RRMD-III(STS84)
RRMD-III(STS91)
du1_20170131
du1_20161225

LET分布の誤差評価

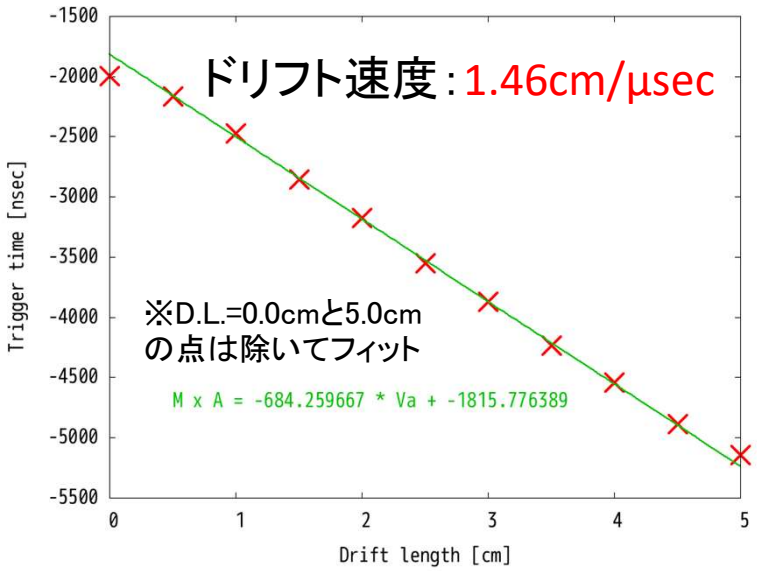
LET　＝　Energy / Length

＜Lengthの誤差＞
① ドリフト速度の測定誤差
② ドリフトに伴うDiffusion

＜Energyの誤差＞
③ W値の誤差
④ エネルギー校正起因の誤差
⑤ エネルギー分解能
⑥ ドリフト中の電荷減衰効果に伴う誤差

飛跡長の誤差①（ドリフト速度の測定誤差）

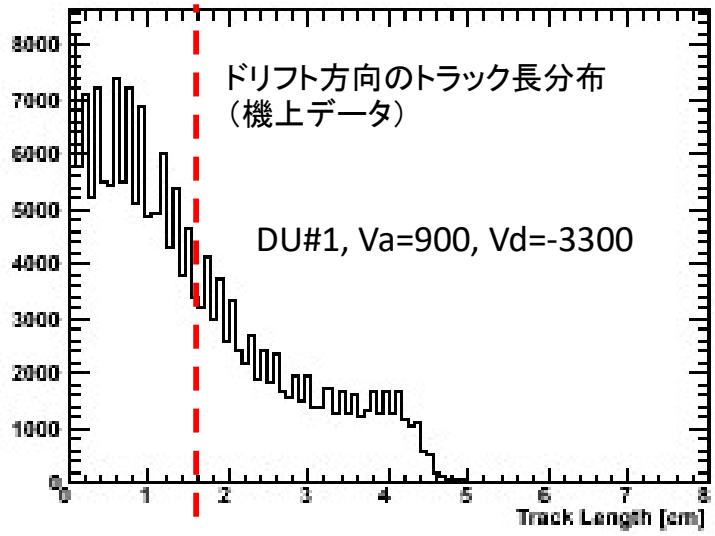
ビームの照射位置を変えたデータからドリフト速度を確認した。使用したデータは2014年12月のHIMAC実験でのDU#1にFe500MeV/nを照射した際のデータ。ベストフィット直線の傾きの逆数を取ることでドリフト速度を評価。



※上の場合のフィットパラメータのエラー（1σ）は

a1	= -684.26	+/- 4.645	(0.6789%)
b1	= -1815.78	+/- 13.07	(0.7198%)

D.L.=0.0～0.5cmと4.5～5.0cmのドリフト速度は端点のみに影響するので、右のドリフト速度が適用されるのはトラックの一部分であり、かつ、イベントも限定される。こちらもモンテカルロで実効的な誤差を決めるのがよさそう。



平均1.52

左のドリフト速度のエラー（±0.68%）による飛跡長のドリフト方向のエラーを飛跡長のドリフト方向長さの平均値（1.52）を用いて下記の通り見積もることにする。

$$0.68 * 0.01 * 1.52 * 10^4 = 100\ [\mu m]$$

飛跡長の誤差②（Diffusionの見積もり）

ドリフト方向のDiffusion σ_x = sqrt(2Dt)
垂直方向のDiffusion σ_v = sqrt(6Dt)

t = time to drift [sec]
D = kTμ/e

k : Boltzmann's constant (8.617 * 10^{-5} [eV/K])
T: Absolute temperature [K]
e: electron charge
μ: Ion mobility

$\mu = W_+/E$

W_+: drift velocity [cm/sec]
E: electric field [V/cm]

kT = 0.025 [eV] (at normal conditions)

e = 1.60 * 10^{-19} [c]

For flight model(TEM 1 atm, Vd=3300 V)

W_+ = 1.46 * 10^6 [cm/sec]
E = 3300 / 5.0 = 660 [V/cm]
t = 5.0 / W_+ = 3.42 * 10^{-6} [sec]

ドリフト方向のDiffusion : σ_x = 197 [μm]
ドリフト方向と垂直方向のDiffusion : σ_v = 342 [μm]

飛跡長として考えるとこれらが両端で見えるとして

σ_x '= sqrt($\sigma_x^2 + \sigma_x^2$) = sqrt(2) * σ_x = 279 [μm]
σ_v '= sqrt($\sigma_v^2 + \sigma_v^2$) = sqrt(2) * σ_v = 483 [μm]

Sauli, Fabio. Gaseous Radiation Detectors: Fundamentals and Applications (Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics and Cosmology) を参照

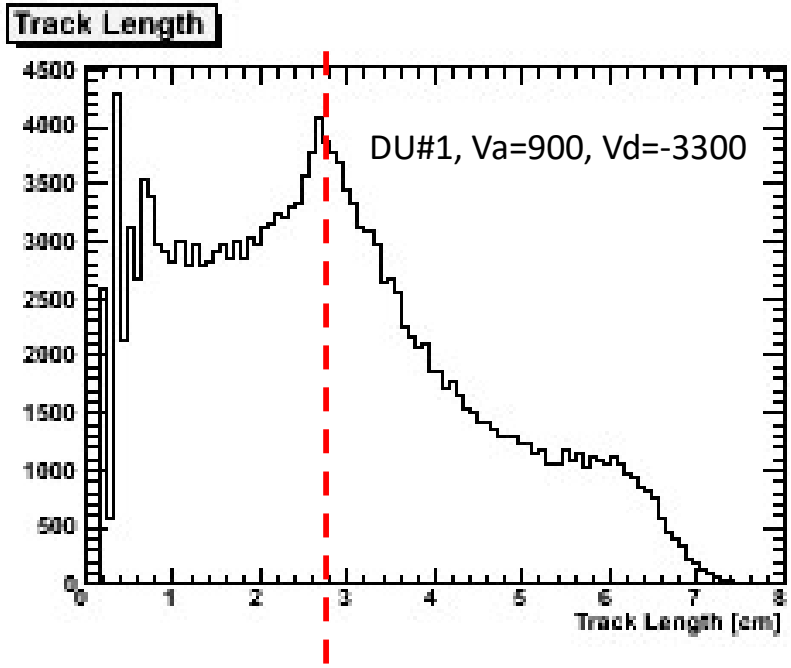
飛跡長の誤差③(トータル)

σ_L：飛跡長に対する誤差
σ_v：飛跡長のドリフト方向と垂直方向のエラー
σ_x：飛跡長のドリフト方向のエラー
σ_d：ドリフト速度のエラーによる飛跡長のドリフト方向

$\sigma_L = \mathrm{sqrt}(\sigma_v^2 + \sigma_x^2 + \sigma_d^2) = \mathrm{sqrt}(279^2 + 483^2 + 100^2) = 567$ [μm]

飛跡長の平均値は右図から2.79 cm

誤差の割合：$5.67 * 10^{-4} / 2.79 = 2.03$ %



W値の誤差

ICRU REPORT 31, “Average Energy Required To Produce An Ion Pair” より引用

For TE gases, measurements have been made only recently. Kemmochi (1976) gave values for several mixtures. For Rossi's TE gas (nominal composition: 64.4 percent CH_4, 32.4 percent CO_2, and 3.2 percent N_2 by partial pressure), the following values have been observed:

31.0 eV (Kemmochi, 1976); α（Am-241）
30.72 eV (Krieger, 1976); α（Am-241）
31.44 eV (Chemtob *et al.*, 1977); Argon(25-500keV)
31.05 eV (Nutton, 1976). - (Private communication)

In each case, the composition of the gas varied slightly from nominal. The average value is $W = (31.1 \pm 0.3)$ eV.

この値を使用することにする。

エネルギー校正データにおける誤差
（核種間におけるMxAの差違）

2016年7月のHIMAC実験データを使用

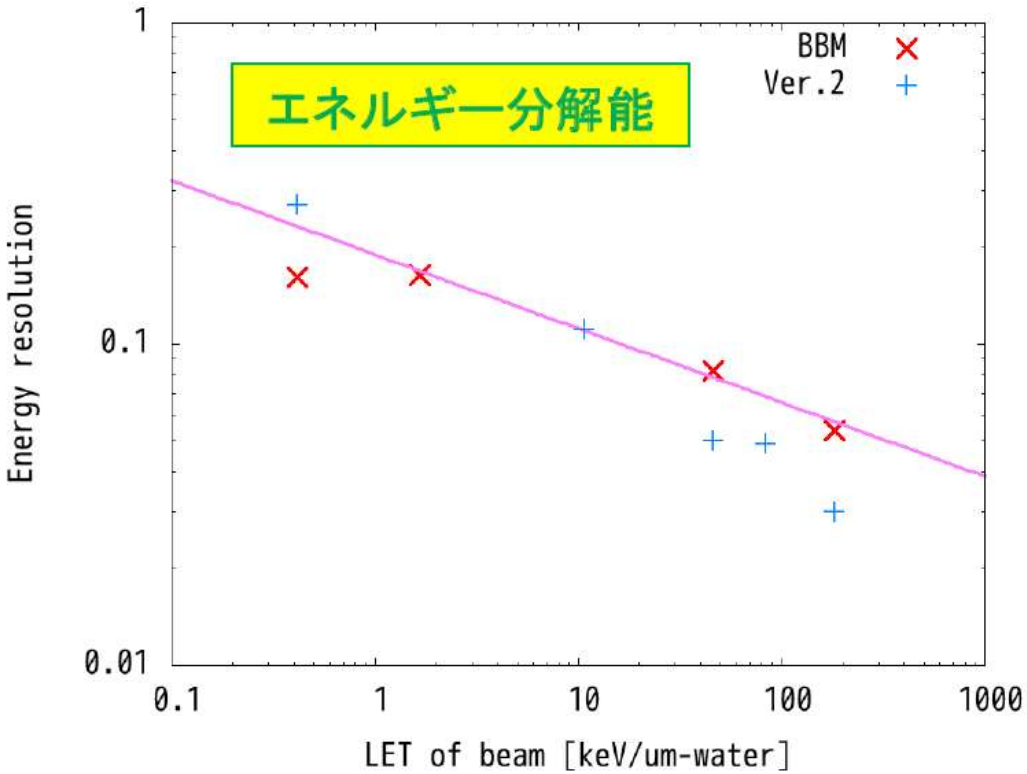
ビーム種	印加電圧Va [V]	Energy(測定値) [MeV]	Energy(計算値) [MeV]	MxA	MxAの平均値
H230	900	1.54E+01	1.15E-02	1.33E+03	1.08E+03
C400		2.46E+02	2.98E-01	8.24E+02	
Si800	675	5.30E+01	1.27E+00	4.17E+01	4.31E+01
Fe500		2.30E+02	5.15E+00	4.45E+01	

※計算値はSRIM2008により算出

Va	MxAの平均値	MxAの平均値のエラー(-側)	MxAの平均値のエラー(+側)
900	1.08E+03	-2.55E+02	2.55E+02
675	4.31E+01	-1.43E+00	1.43E+00

Va	MxAの平均値	MxAの平均値のエラーの割合(-側)	MxAの平均値のエラーの割合(+側)
900	1.08E+03	-2.36E-01	2.36E-01
675	4.31E+01	-3.32E-02	3.32E-02

エネルギー分解能



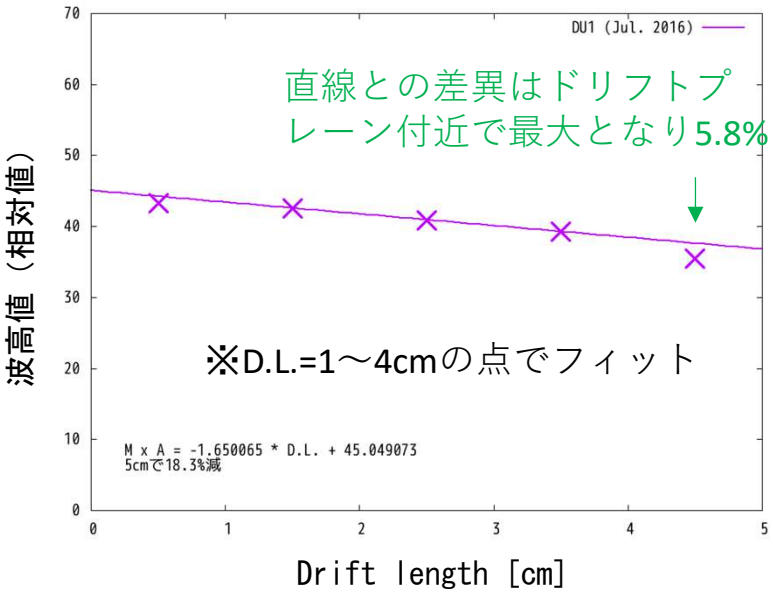
分解能（1σ）の仮想曲線

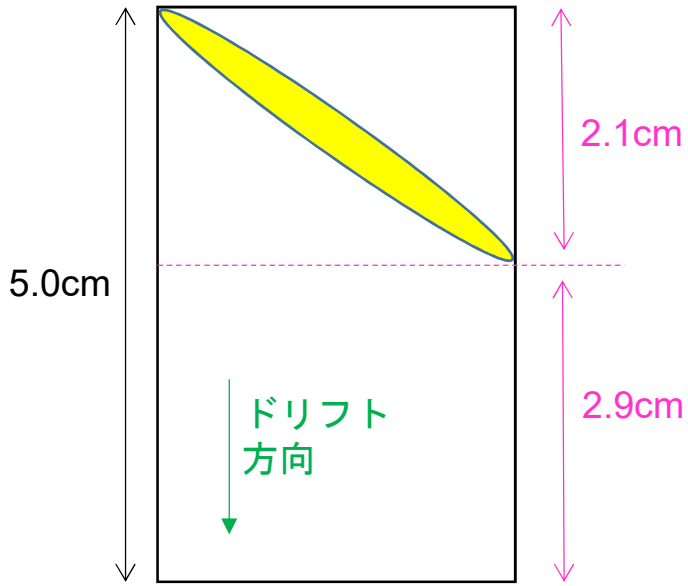
$R(LET) = 0.19 * LET^{-0.23}$

1粒子のエネルギー決定時に分解能分のエラーが含まれてしまうため、これも入れ込む。

ドリフト中のアテネーションによる誤差

ビームの方向はAnodeストリップと平行方向。Va=650、Vd=3300で測定。





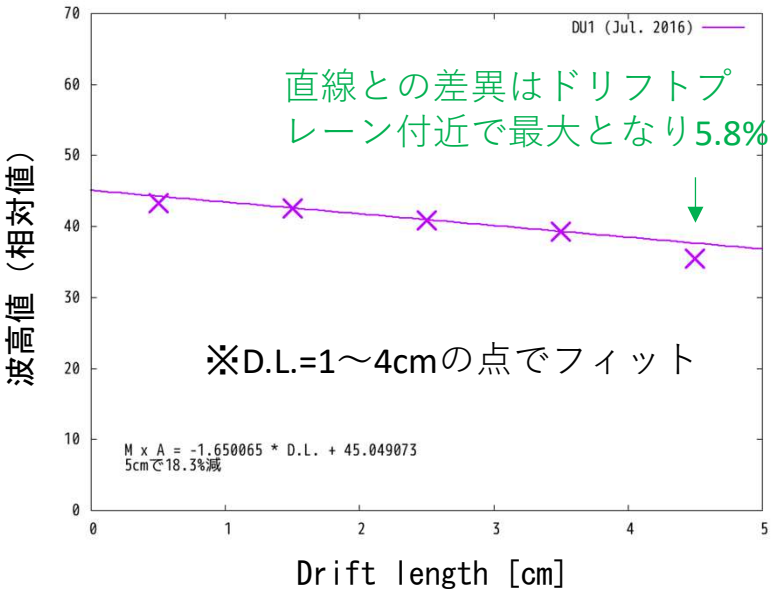
MxA = A * (Drift Length) + B

A	= -1.65006	+/- 0.03666	(2.222%)
B	= 45.0491	+/- 0.09643	(0.214%)

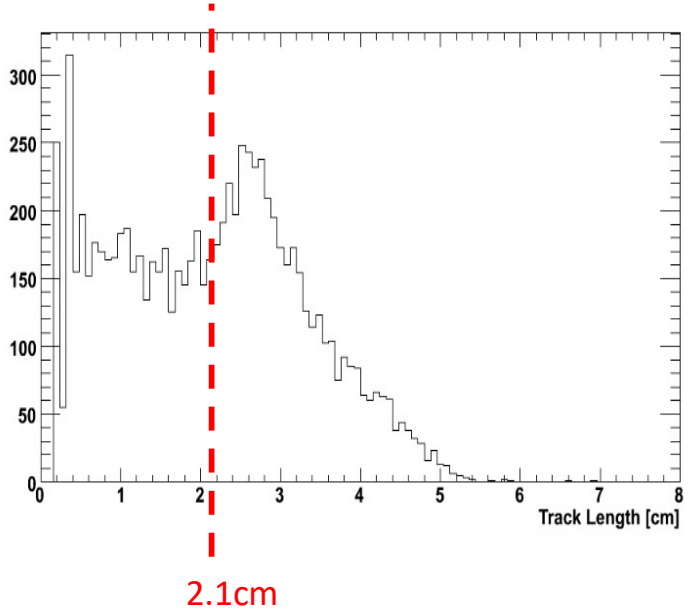
平均的なDrift長が機上データより、2.1cm。その場合、トラックの絶対的なZ座標としては2.9cm分の自由度を持つ。そのため、左の式で補正しても、±5.3%程度の幅を持つ。より正確に見積もるにはモンテカルロ計算をすべき。また、ドリフトプレーン付近では直線からのずれが大きく、5.8%のずれがあるが、トラックのごく一部にのみ影響し、トータルの電荷に対する寄与は小さい。

ドリフト中のアテネーションによる誤差

ビームの方向はAnodeストリップと平行方向。Va=650、Vd=3300で測定。



ドリフト方向のトラック長（機上データ）



MxA = A * (Drift Length) + B

A	= -1.65006	+/- 0.03666	(2.222%)
B	= 45.0491	+/- 0.09643	(0.214%)

平均的なDrift長が機上データより、2.1cm。その場合、トラックの絶対的なZ座標としては2.9cm分の自由度を持つ。そのため、左の式で補正しても、±5.3%程度の幅を持つ。より正確に見積もるにはモンテカルロ計算をすべき。また、ドリフトプレーン付近では直線からのずれが大きく、5.8%のずれがあるが、トラックのごく一部にのみ影響し、トータルの電荷に対する寄与は小さい。

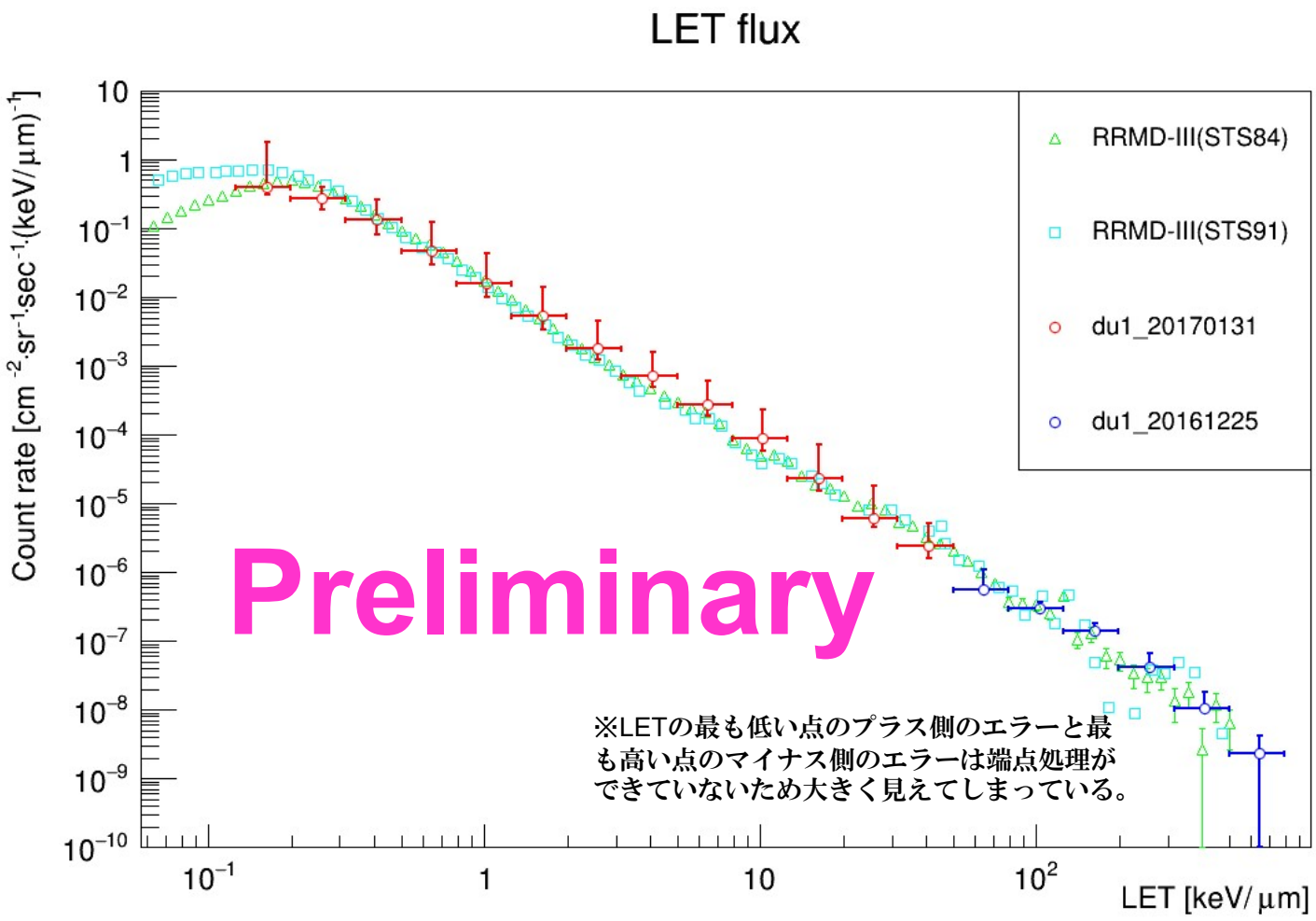
システマティックエラーのまとめ

種別	項目	単位	中心値	誤差	相対誤差
Lengthのエラー	飛跡長	cm	2.79E+00	5.67E-02	2.03E-02
Energyのエラー	W値	eV	3.11E+01	3.00E-01	9.65E-03
	エネルギー校正時のエラー（低HV）		4.31E+01	1.43E+00	3.32E-02
	エネルギー校正時のエラー（高HV）		1.08E+03	2.55E+02	2.36E-01
	ドリフト中のアテネーションによるエラー				5.30E-02
	エネルギー分解能(1σ)				0.19 * LET^-0.23

種別	項目	-	-	高HV													低HV									
	bin番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
	LET(中心値)	0.064622	0.102419	0.162324	0.257266	0.407739	0.646223	1.02419	1.62324	2.57266	4.07739	6.46223	10.2419	16.2324	25.7266	40.7739	64.6223	102.419	162.324	257.266	407.739	646.223	1024.19	1623.24	2572.66	4077.39
Lengthのエラー	飛跡長	2.03E-02	2.03E-02	2.03E-02	2.03E-02	2.03E-02	2.03E-02	2.03E-02	2.03E-02	2.03E-02	2.03E-02	2.03E-02	2.03E-02	2.03E-02	2.03E-02	2.03E-02	2.03E-02	2.03E-02	2.03E-02	2.03E-02	2.03E-02	2.03E-02	2.03E-02	2.03E-02	2.03E-02	2.03E-02
Energyのエラー	W値	9.65E-03	9.65E-03	9.65E-03	9.65E-03	9.65E-03	9.65E-03	9.65E-03	9.65E-03	9.65E-03	9.65E-03	9.65E-03	9.65E-03	9.65E-03	9.65E-03	9.65E-03	9.65E-03	9.65E-03	9.65E-03	9.65E-03	9.65E-03	9.65E-03	9.65E-03	9.65E-03	9.65E-03	9.65E-03
	エネルギー校正時のエラー（低HV）	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02
	エネルギー校正時のエラー（高HV）	2.36E-01	2.36E-01	2.36E-01	2.36E-01	2.36E-01	2.36E-01	2.36E-01	2.36E-01	2.36E-01	2.36E-01	2.36E-01	2.36E-01	2.36E-01	2.36E-01	2.36E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	ドリフト中のアテネーションによるエラー	5.30E-02	5.30E-02	5.30E-02	5.30E-02	5.30E-02	5.30E-02	5.30E-02	5.30E-02	5.30E-02	5.30E-02	5.30E-02	5.30E-02	5.30E-02	5.30E-02	5.30E-02	5.30E-02	5.30E-02	5.30E-02	5.30E-02	5.30E-02	5.30E-02	5.30E-02	5.30E-02	5.30E-02	5.30E-02
	エネルギー分解能(1σ)	3.57E-01	3.21E-01	2.89E-01	2.60E-01	2.34E-01	2.10E-01	1.89E-01	1.70E-01	1.53E-01	1.38E-01	1.24E-01	1.11E-01	1.00E-01	9.00E-02	8.10E-02	7.28E-02	6.55E-02	5.89E-02	5.30E-02	4.77E-02	4.29E-02	3.86E-02	3.47E-02	3.12E-02	2.81E-02
LETのエラー		4.32E-01	4.03E-01	3.77E-01	3.56E-01	3.37E-01	3.21E-01	3.08E-01	2.97E-01	2.87E-01	2.79E-01	2.73E-01	2.67E-01	2.63E-01	2.59E-01	2.56E-01	9.86E-02	9.33E-02	8.88E-02	8.50E-02	8.18E-02	7.91E-02	7.68E-02	7.50E-02	7.34E-02	7.21E-02

LET fluxにおける誤差の見積もり

系統誤差と統計誤差の平方和を取りエラーバーを表示したもの



まとめ

- 宇宙機内用のリアルタイム線量計としてPS-TEPCの開発を行っている。
- 2016年12月9日、HTV6によりISSへ打ち上げ。日本実験モジュール船壁への取り付け後、実環境での動作実証試験を行った。2018年4月2日運用終了。
- LET分布の誤差の評価を行った。下記の誤差を考慮した。

＜Lengthの誤差＞
① ドリフト速度の測定誤差
② ドリフトに伴うDiffusion

＜Energyの誤差＞
③ W値の誤差
④ エネルギー校正起因の誤差
⑤ エネルギー分解能
⑥ ドリフト中の電荷減衰効果に伴う誤差