

# 重イオンビームの産業利用 (非生物系)

理化学研究所 仁科加速器研究センター

産業利用開発チーム 吉田 敦 (チームリーダー) 神原 正

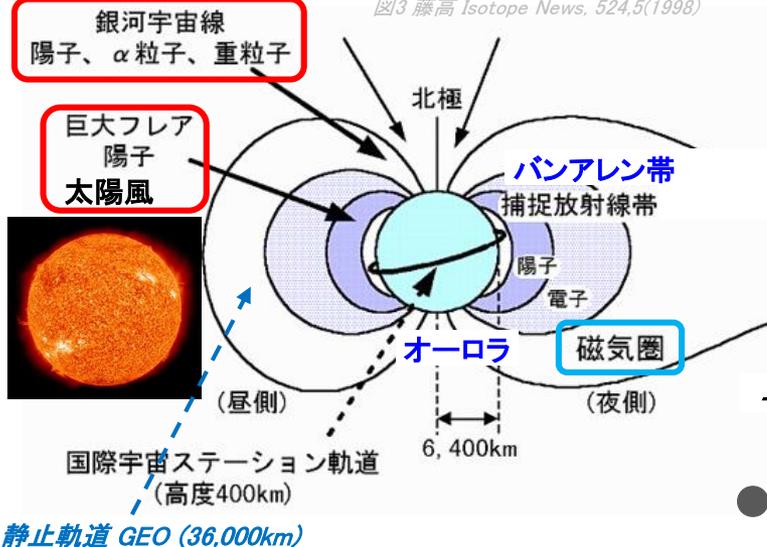
- 宇宙利用半導体の重イオン耐性試験
- 空气中照射ビームの特性評価  
(フラックス、LET、ビーム不純物の測定手法)





## 宇宙環境の放射線

ref) RIST ATOMICA (09-02-07-09)  
図3 藤高 Isotope News, 524,5(1998)

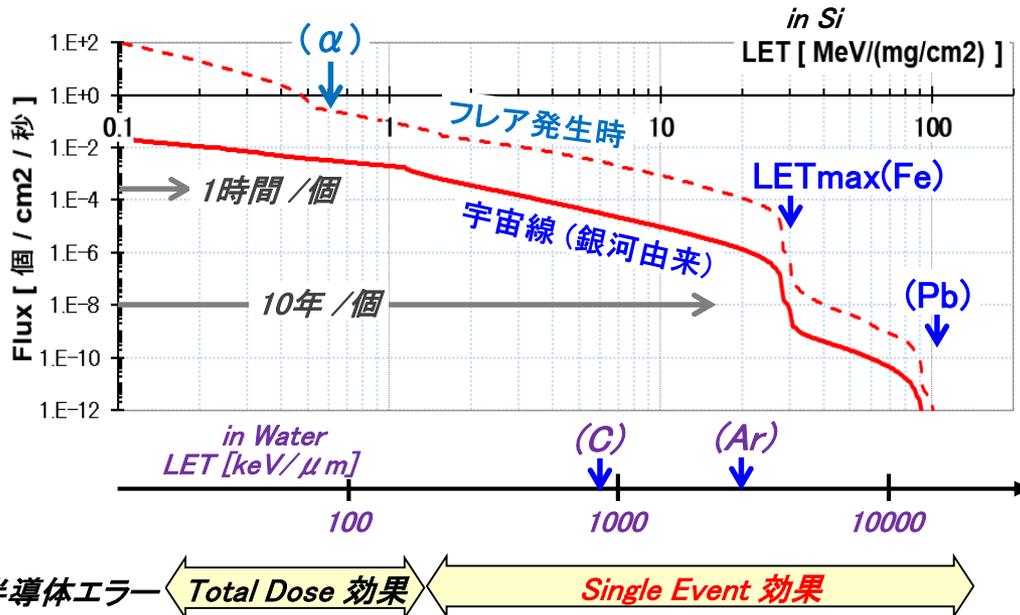


- 惑星探査 → 地球磁気圏の外へ
- 宇宙線(特に重粒子線)に曝される
- 動作保証: 探査期間 ~10年間

(\*) LET : Linear Energy Transfer (dE/dX)

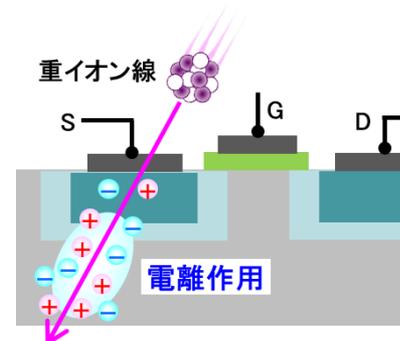
## 宇宙線の LET(\*) フラックス分布

ref) NASA, CRÈME96  
@ 静止軌道 GEO



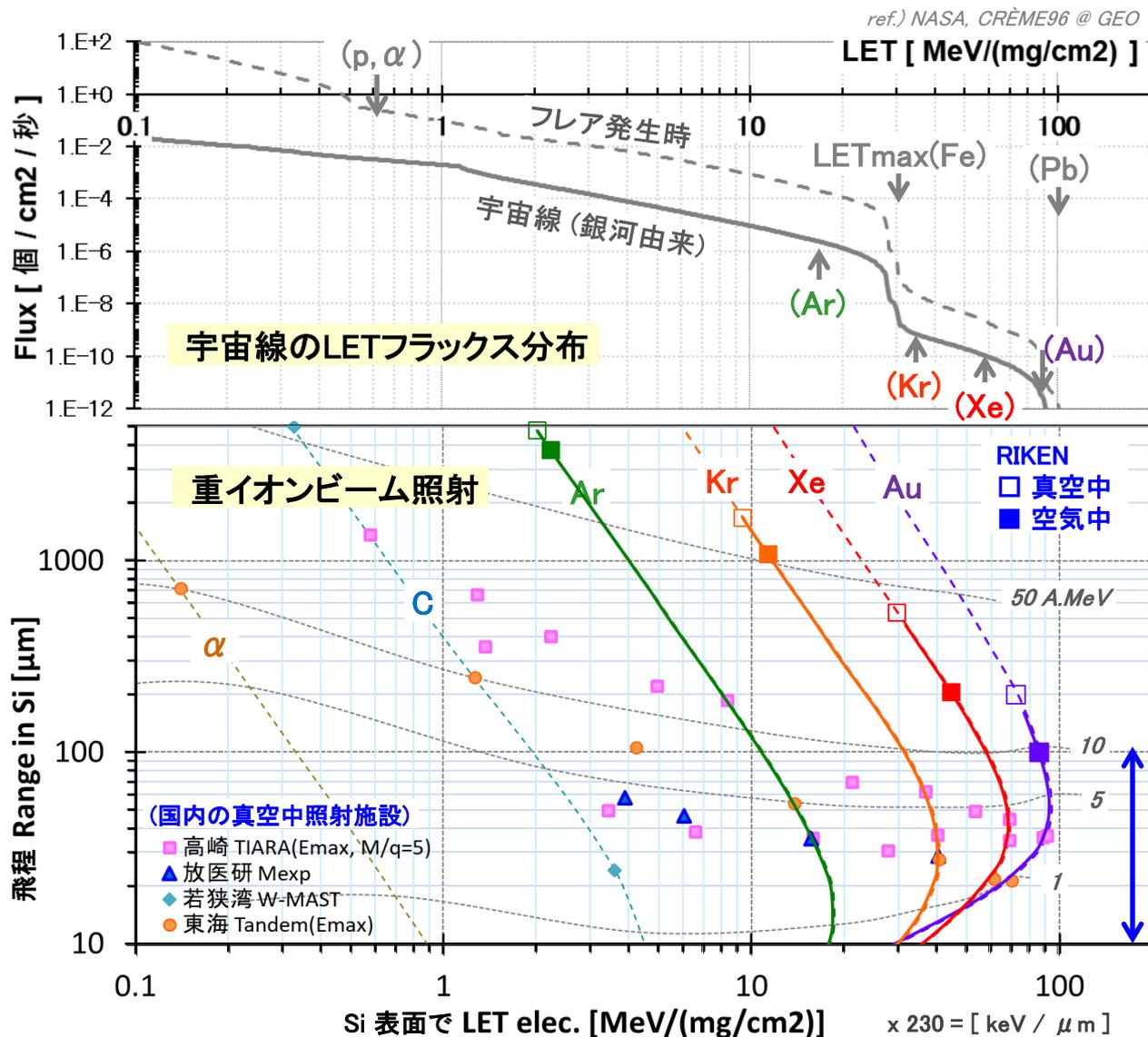
- 重イオン粒子線 "1発" でエラー発生  
シングルイベント効果(SEE)

- 高集積化: 保持電荷小さい。  
→ Bit反転しやすい。
- パワー半導体: 高電場勾配がある  
→ 最悪、焼損破壊



➡ ロケット打ち上げ前に、重イオンビームで耐性試験が必要

# LET vs. Range (国内重イオン照射施設)

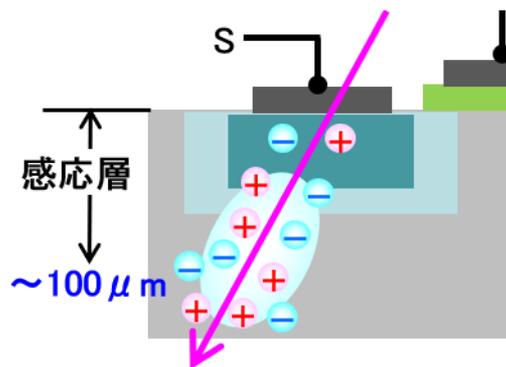


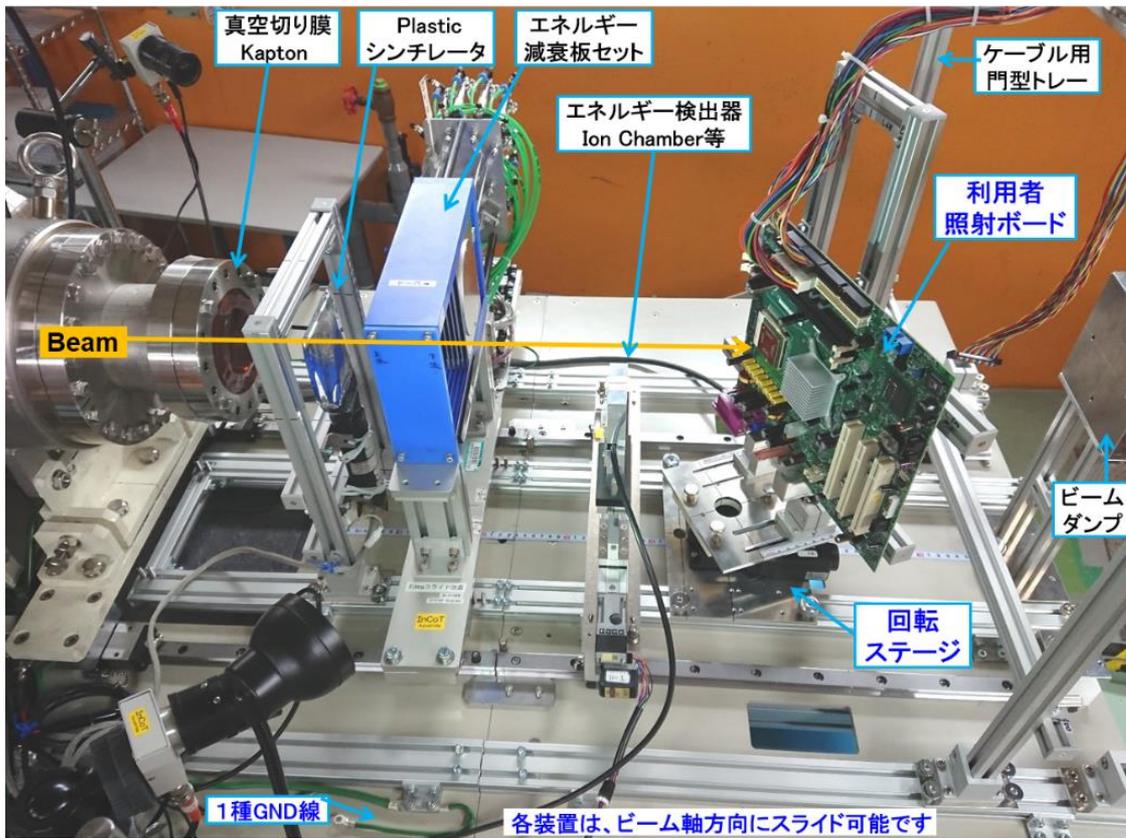
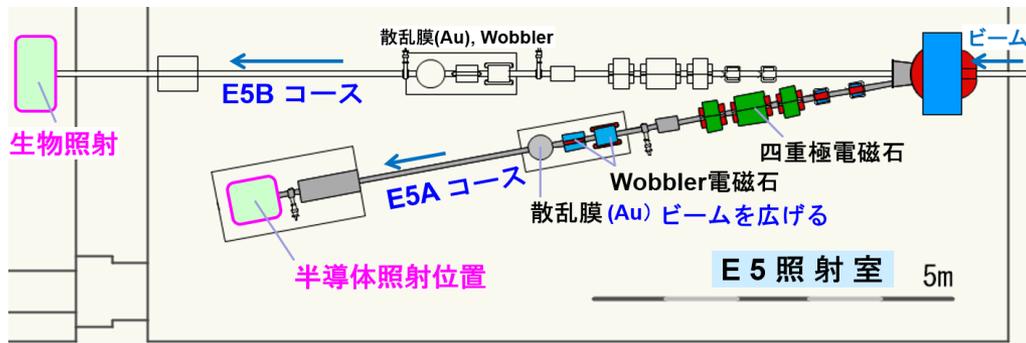
- 理研の高エネルギービーム  
真空中 → 空气中取出し時  
40Ar 95 → ~90 [A.MeV]  
84Kr 70 → ~62  
136Xe 39 → ~20  
197Au 18 → ~10  
その後、  
アルミ製エネルギー減衰板で  
LETを調整可能。

- エネルギーを調整して  
広い LET範囲 で測定できます。

★ 半導体照射に必要なRange

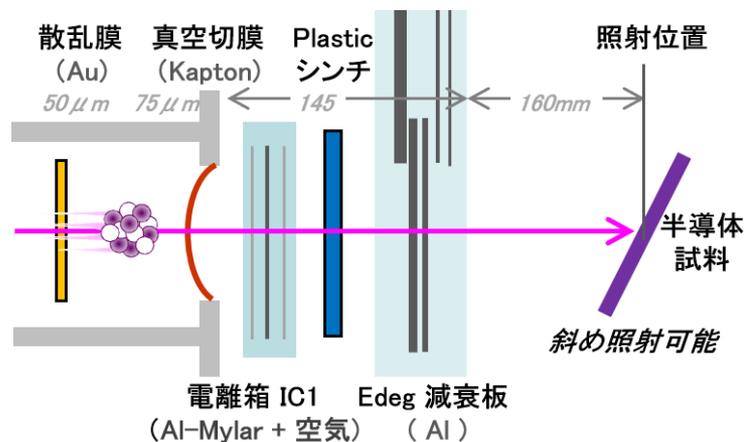
表面から 50~100 μm で良い





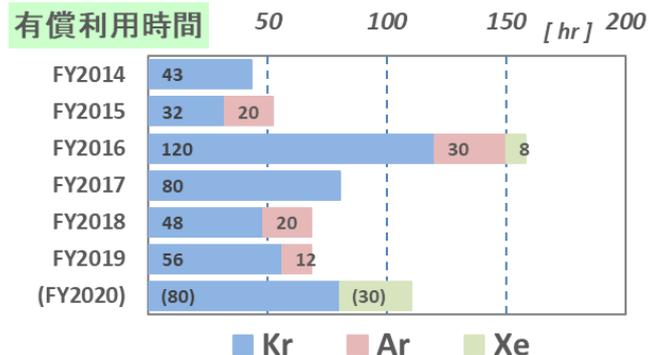
## 半導体照射用のビームコース

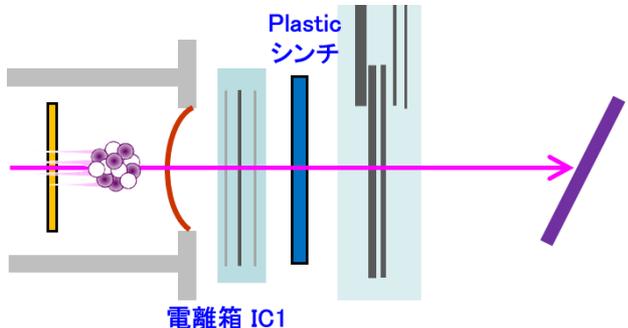
- ビームライン構成は生物照射とほぼ同じ



- 社内試験と同じセットアップで空中で照射できます。

- 利用料金 約 7万円/時間





## ビームフラックス [個/cm<sup>2</sup>/秒] 測定

- ★ シングルイベント評価では、フラックス値が必要  
Dose [Gy] ではなく、**個数**を数えています。
- **電流値 vs 個数** を較正して、  
広い範囲 (数個 ~ μA) でフラックス値を求めています。

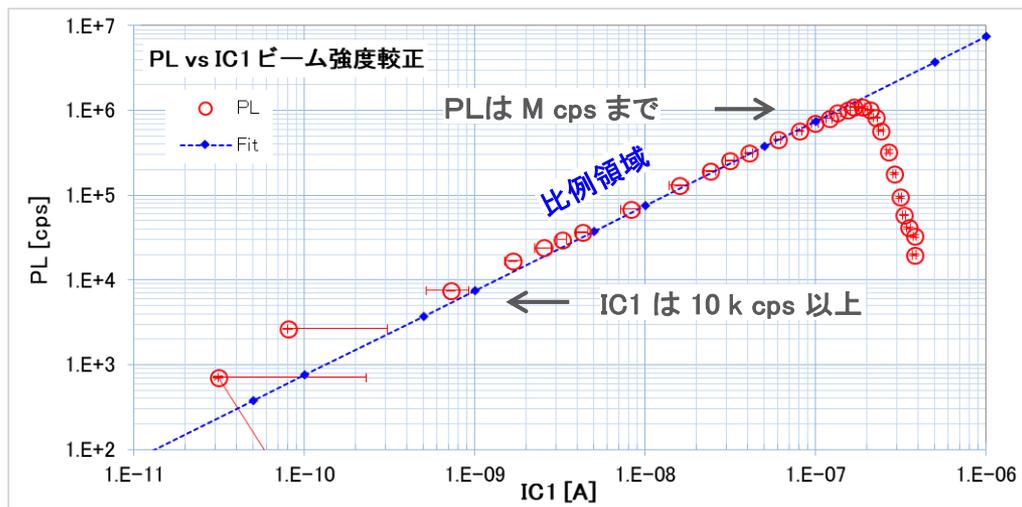


**大型電離箱 (IC1)**  
**高フラックス用 (電流計測)**  
穴径 Φ5cm 充填気体=空気  
電極 アルミ蒸着Mylar 24 μm相当



**プラスチックシンチレータ(PL)**  
**低フラックス用 (個数計測)**  
有効サイズ □56x56mm  
シンチ EJ-212 500~100 μm厚  
遮光アルミ蒸着 Mylar 48 μm厚

どちらもビームラインに常設・常時モニター



目標 Flux 個/cm <sup>2</sup> /秒	PL [cps]	IC1 [A]
3.5E+04	6.87E+05	9.14E-08
9E+07	1.77E+09	2.35E-04

PL [cps] =	7.505E+12 * IC1 [A]
IC1 [A] =	1.330E-13 * PL [cps]
ゼロ点を通る事を仮定してます	
<b>Beam照射 円面積</b>	IC1 穴で決まる
半径 2.5cm	<b>19.63</b> [cm <sup>2</sup> ]



**VERITAS** 株式会社 *www.veritastk.co.jp*

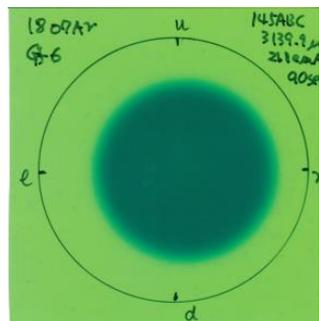
**GAFCHROMIC<sup>®</sup>**  
DOSIMETRY MEDIA, TYPE HD-V2

Active Layer - 8 microns

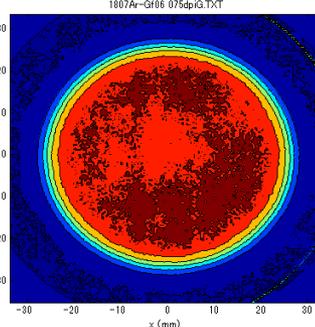
Polyester Substrate - 97 microns

- ・光子吸収線量測定用・透明フィルム
- ・大線量用: 10~1000Gy ( $E_\gamma = 0.1 \sim 1\text{MeV}$ )
- ・暗室不要、現像処理不要

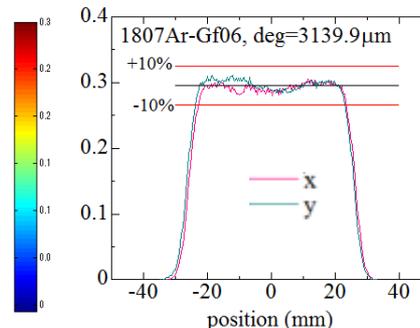
GAFフィルム



吸光度分布



X,Y軸上の吸光度



Ar 95A.MeV 空气中照射 LET= 6 [MeV/mg/cm<sup>2</sup>] : ビーム電流 2eAで90秒露光

★ GAFフィルムは、手軽で便利です

● 高価な読取り機が不要

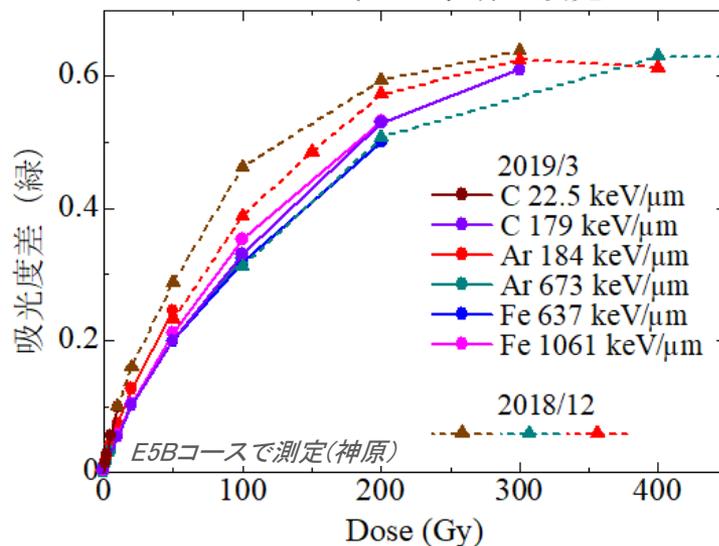
- (1) パソコン用スキャナで読取る
- (2) RGB画素データを CSVに変換  
(無料ソフトあり)
- (3) MS-Excel で、  
画素ごとの「吸光度」を算出

(参考文献)

上松、花屋、小嶋 (JAEA 高崎研)  
「GAFフィルム線量計とイメージスキャナを  
組み合わせた、簡便なイオンビームの  
2次元線量相対分布計測システム」  
*RADIOISOTOPES*, 57 87-98 (2008)

★ 重イオンビームの Dose量評価 にも使えそうです

HD-V2フィルム、緑色吸光



● HD-V2: 重イオンでは  
約200Gyで吸光度が飽和。

● 核種が異なり、  
LETも50倍程異なっても、  
吸光度の違いは約50%程度。

→ 照射施設間で  
Dose量を比較する時  
の目安になりえる

# LET測定(1) Range 測定



(\*) SRIMコード: Stopping & Range In Matter

## ★ Rangeの精密測定を行っています

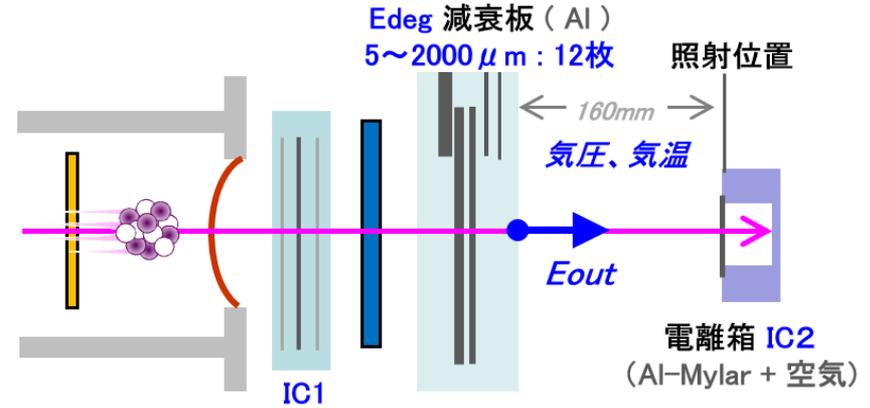
● maxLET近傍での照射希望が多いので

- 1) Edeg厚 [μm] vs. 電離箱 IC2 [A] を測定。
- 2) SRIMコード(\*) の Range曲線に Fit させる。

パラメータ *ExpR*:  $E_{out} = 0$  となる Edegの厚さ

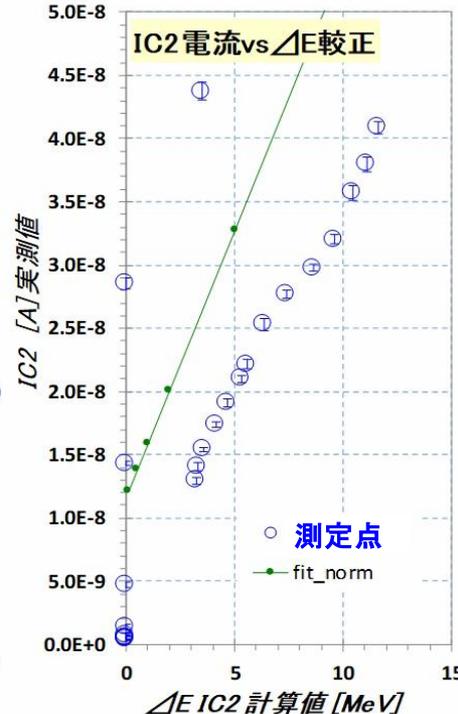
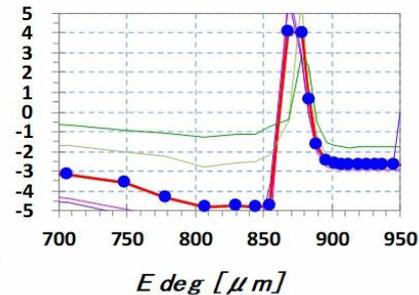
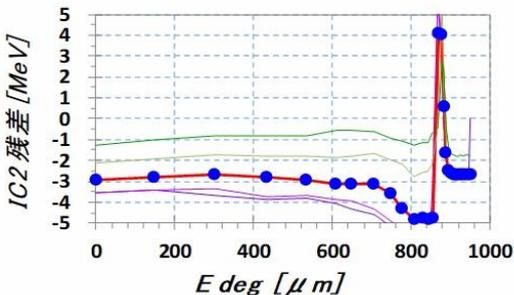
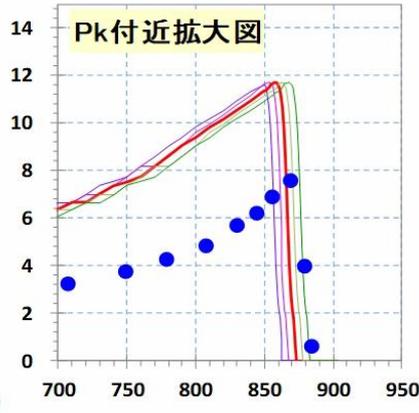
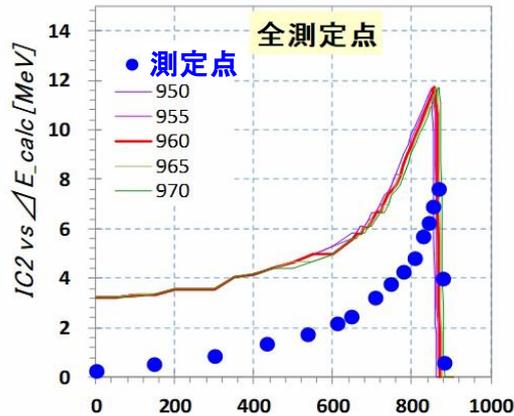
こうすると  $E_{out} = Range^{-1} (ExpR - Edeg厚)$  で逆算可能

※ MS-Excel で一連の SRIM 計算をしています。



1802Kr

*ExpR* = 960.0 [μm] ← 972.0 : Best Fit

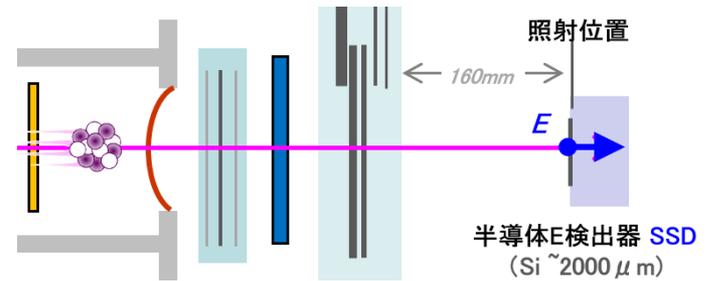
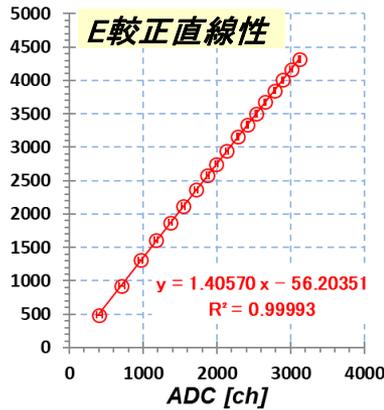
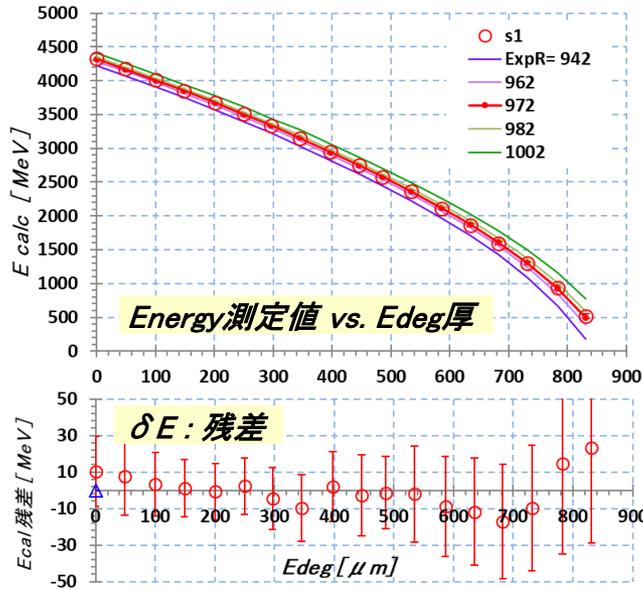


★ 空气中照射の場合、  
dE/dX(LET)モデル計算に  
頼らざるを得ない !

- モデル誤差 ±数% ある
- 半導体業界で標準の、SRIMコードで統一
- 加速器からのエネルギー変動を気にして毎回測定しています。

Kr 70A.MeV の場合、  
真空中 E ±0.5% 変動は、  
Range ~±10 μm に相当。

# LET測定(2) Energy 測定

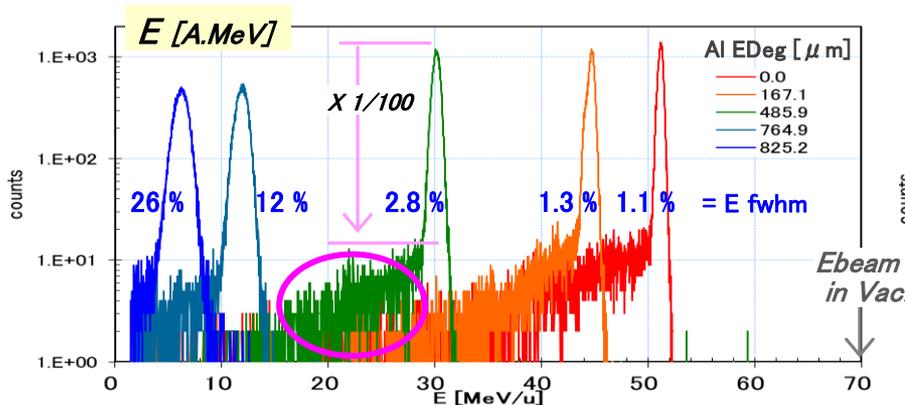


★ 照射位置のビームEも測定しています

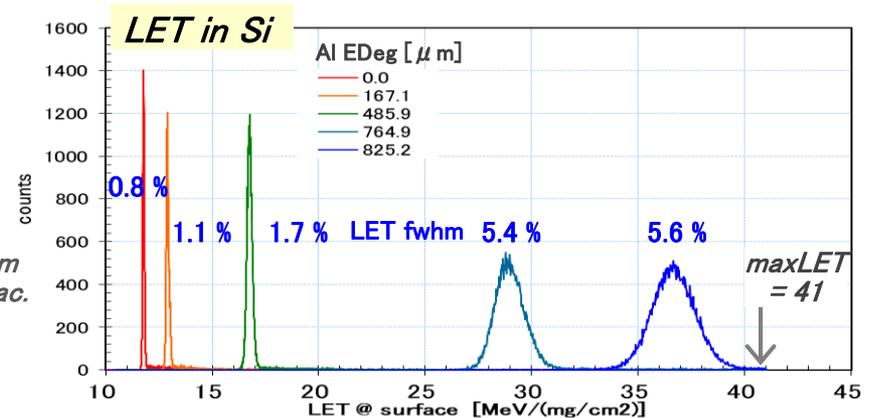
● 求めた ExpR値を用いてSRIM計算したE値と良く一致する事を再確認します

★ エネルギー幅 → LET幅を算出します

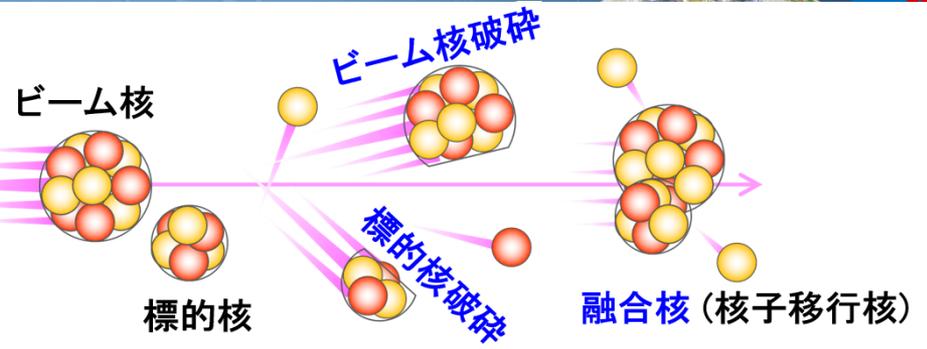
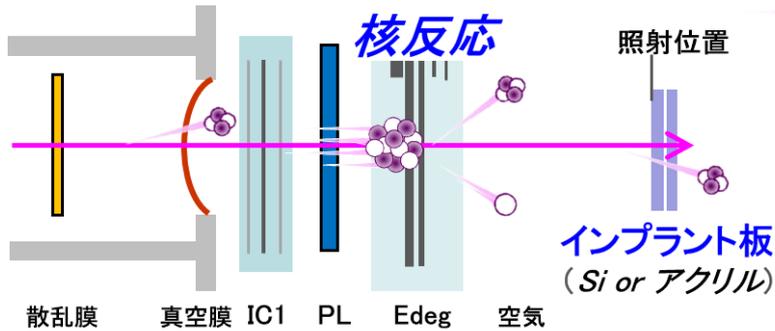
- SRIMでEスペクトル → LETスペクトルに変換。
- Edegを厚くすると、**ストラグリング**で幅が広がっています。



核反応生成物など  
(ビーム不純物)



# 核反応による「ビーム不純物」(1)



ビームエネルギー	> 数 10 A.MeV	数 10~5 A.MeV
ビーム・標的核より	軽くなる	重くなる
LET値	小さくなる	大きい(影響大)

## ★ (実測) 放射化学的分析

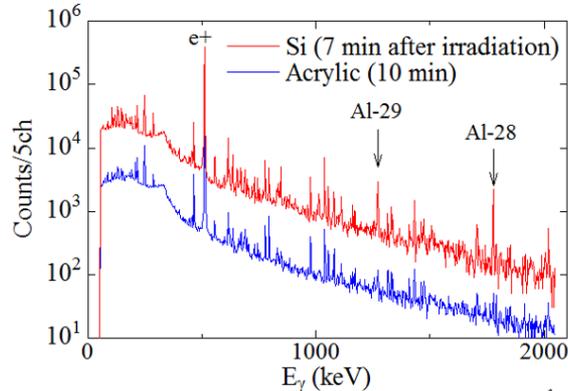
- インプラント板に埋め込まれた  $\gamma$  線放出核を Ge検出器で核種同定

照射時間: ~10min

$\gamma$  線計測: 7min後~3ヶ月後迄

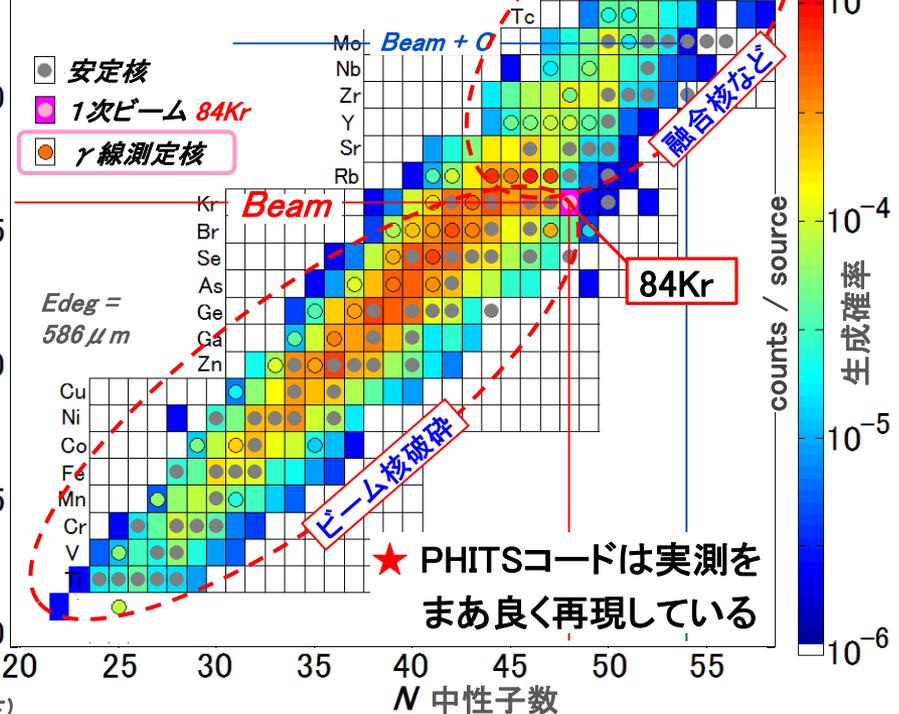
残留核種の Lifetime 分析も行い、  
長寿命核種(~60核種)を同定した。

T.Kambara (NSREC2018)



## 核反応生成物の強度分布

測定値 vs. PHITSコード(\*) 計算値



★ PHITSコードは実測を  
まあ良く再現している

(\*) PHITSコード (JAEA)

Particle & Heavy Ion Transport code System 9

# 核反応による「ビーム不純物」(2)

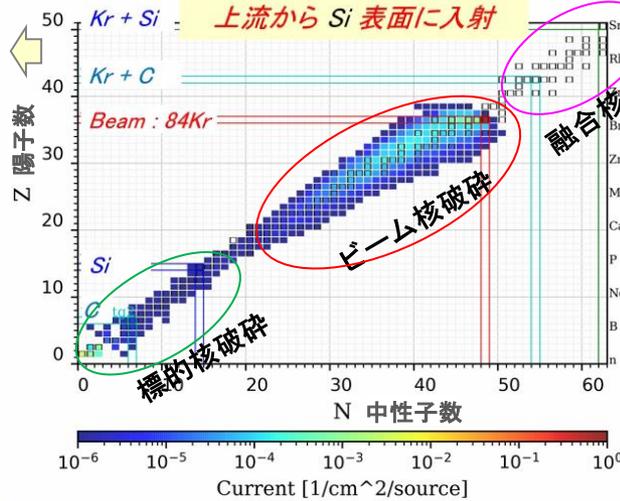
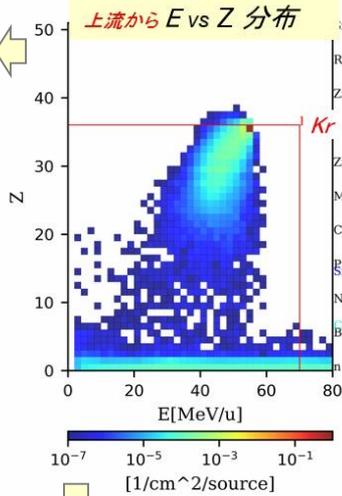
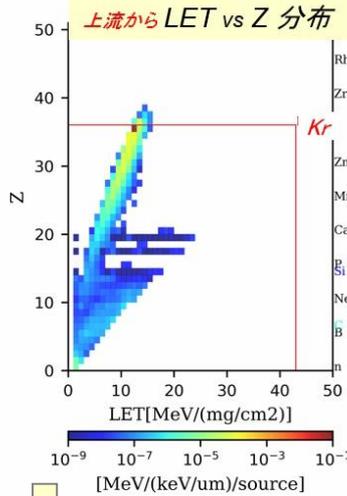


## ビーム+不純物の変化 (PHITS計算)

Beam : 84Kr 70A.MeV  
照射試料: Si 20 μm

Edeg: 010 μm

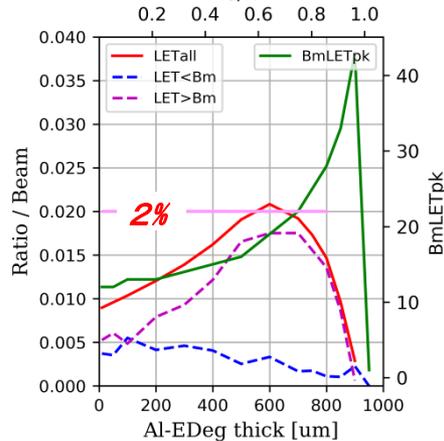
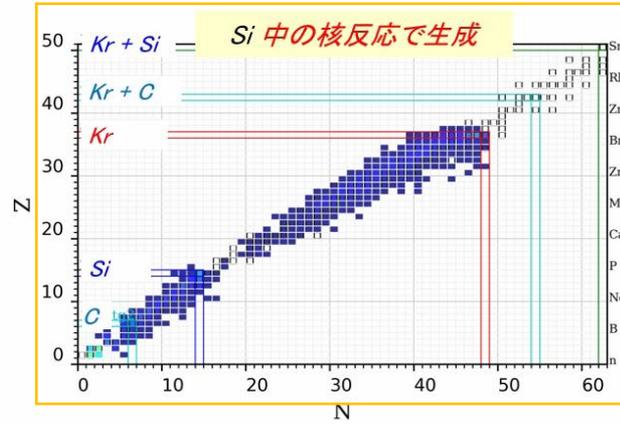
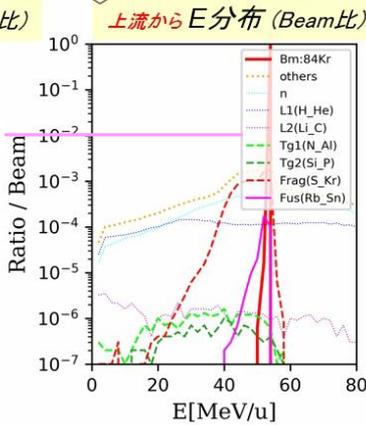
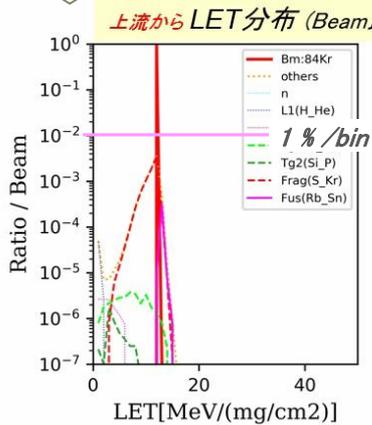
散乱膜: Au 45.8um  
真空膜: Kapton 78um  
IC1: Al 14um Mylar 24um  
PL: EJ212 100um  
Edeg: Al 10~950um  
Air1: 14.5cm Air2:16.0cm  
照射: Si 20um Beam: 1E+7個



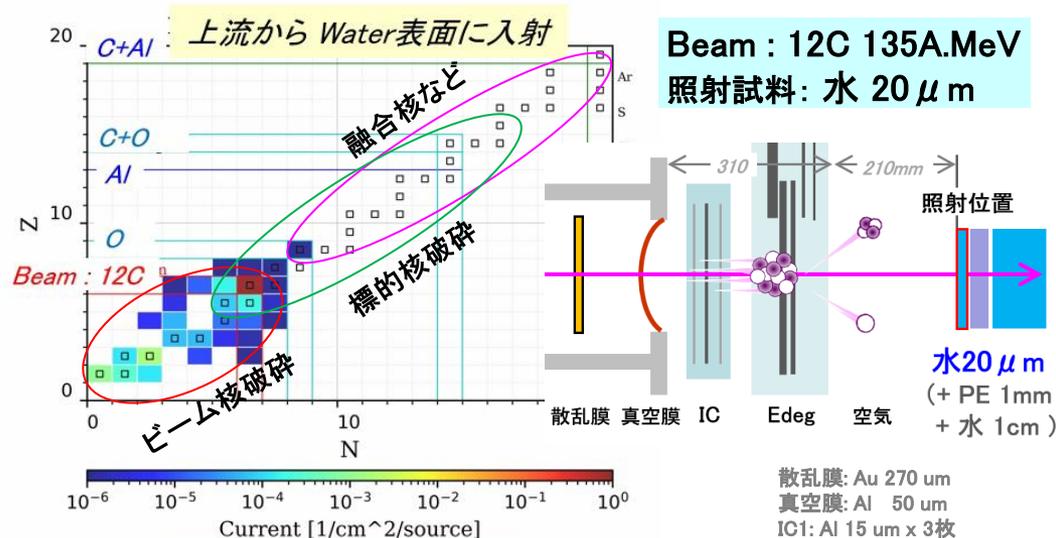
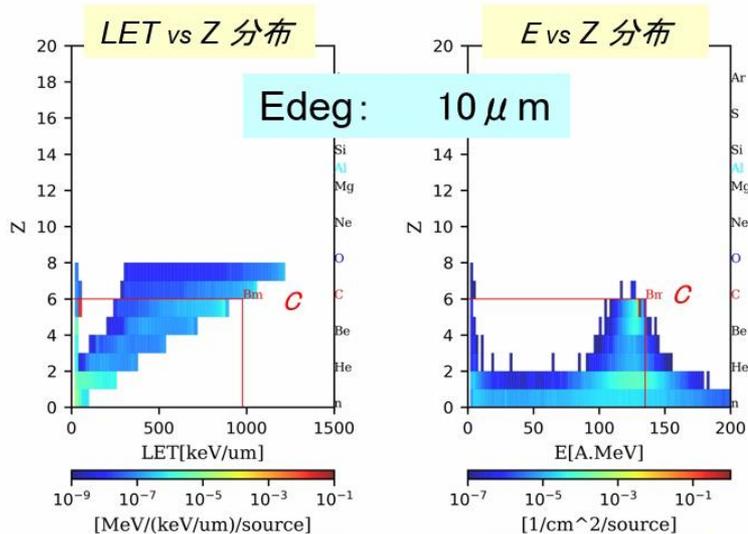
★ 核反応は、照射試料中でも起こります。

● Edegが厚くなると…  
ビームEが下がり、  
ビーム核破砕が減少  
融合核などが増加

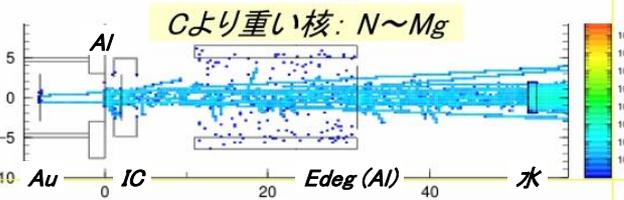
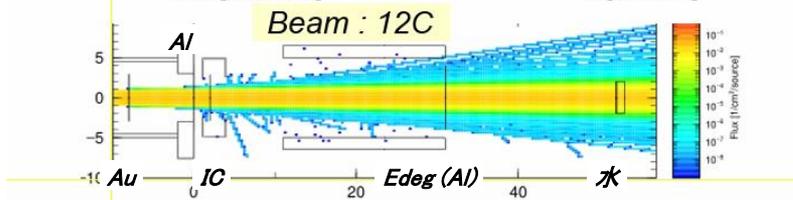
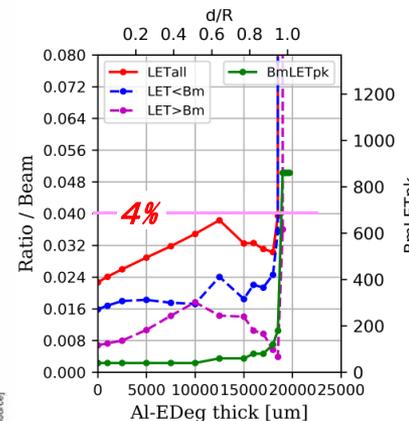
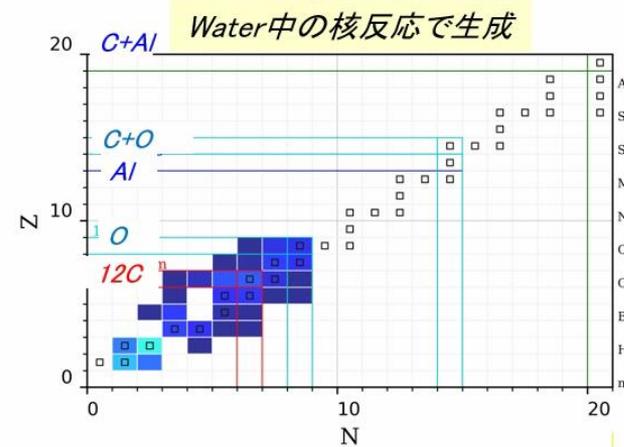
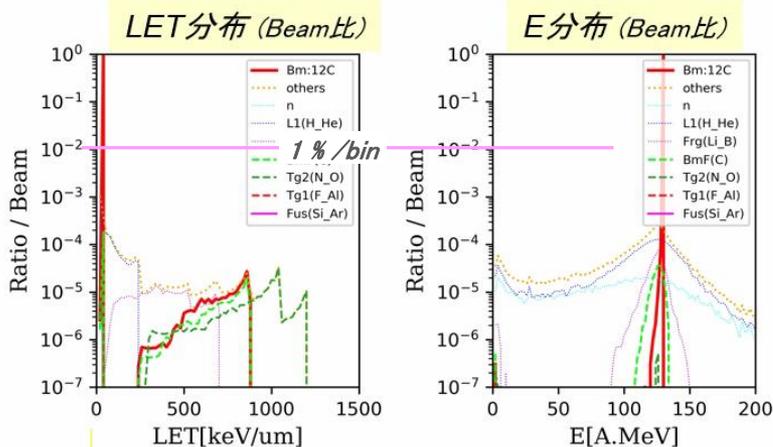
● 上流からの不純物割合  
Krビームの場合、  
Range~60%付近で最大



不純物核種  
Krビーム ≲ 2%

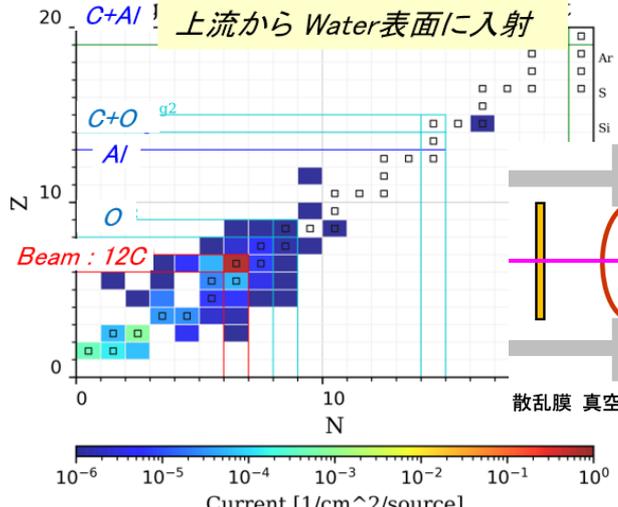
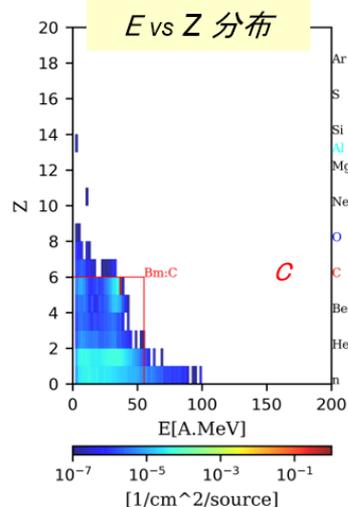
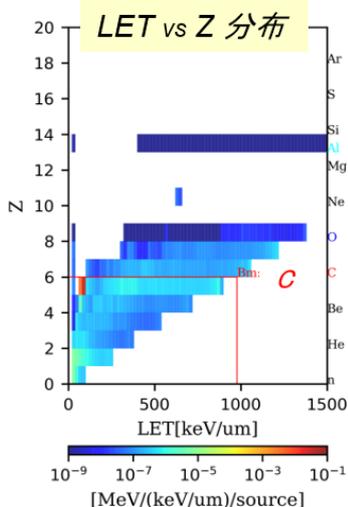


散乱膜: Au 270 μm  
真空膜: Al 50 μm  
IC1: Al 15 μm x 3枚  
Edeg: Al 1000~1900 μm  
Air1: 31 cm Air2: 21 cm  
照射: 水 20 μm Beam: 1E+7個



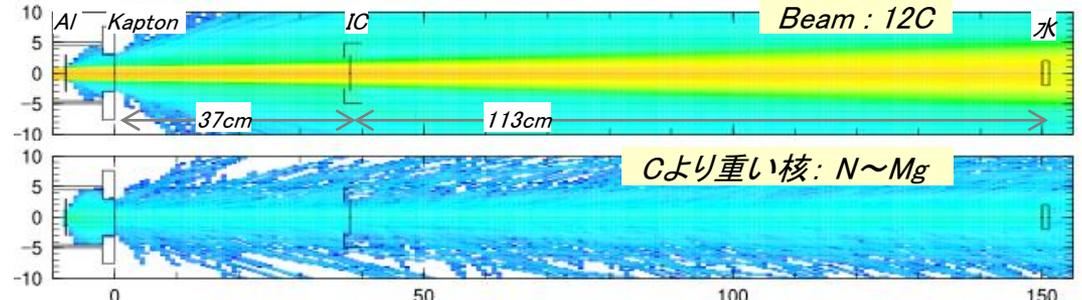
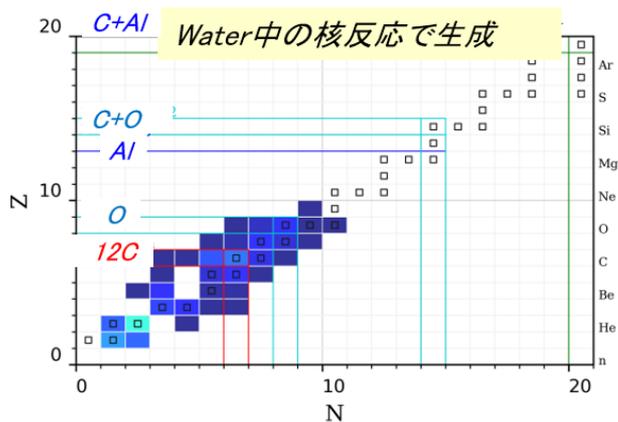
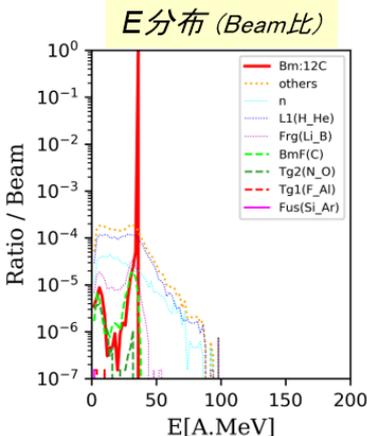
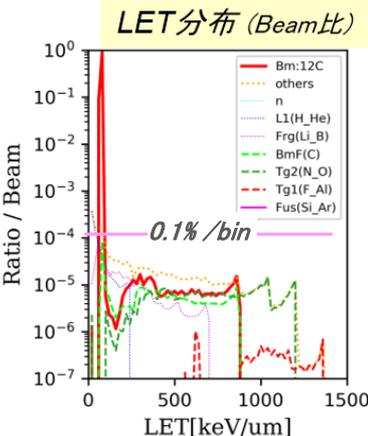
不純物核種 / Kr ビーム ≲ 4%

# 12C : PHITS計算(2) @ WMAST



**Beam : 12C 55A.MeV (660MeV)**  
**照射試料: 水 20 μm**

散乱膜: Al 1500 μm  
真空膜: Kapton 100 μm  
IC1: Kapton 25 μm x 3枚  
Air1: 37 cm Air2: 113 cm  
照射: 水 20 μm Beam: 1E+7個



**不純物核種 Kr ビーム**  $\lesssim 1.6\%$

以上、

理研仁科センター・半導体照射コースの

「空气中照射ビームの特性評価」について

ご紹介申し上げます。

以下、

当チームの コマーシャル です。



- 豆知識 Tips集 >
- SRIMfit >

## Excelのマクロ関数として、SRIM-2013計算 →

`=srEnewGas($C$13, $J20, $K20, $O$13, $O$17)`

- ▶ サンプル画像
- ▶ ダウンロード
- ▶ インストール
- ▶ 応用例
- ▶ Eng.ver.

### Excel で SRIM-2013 の Range, LET, ΔE 計算 (SRIMfit)

#### SRIMfit とは？

● SRIMfit は、重イオンビームの物質中での Range や LET, ΔE 計算を、Microsoft Excel で行うためのマクロ関数ライブラリーです。

### ユーザー インターフェイス

ユーザー定義の AddIn関数 として手軽に使えるように、関数のヘルプメッセージを用意しました。

The screenshot shows the 'fx' formula bar and the '関数の挿入' (Insert Function) dialog box. The '関数の検索' (Search for functions) field contains 'srEnew'. The '関数の種類' (Category) is set to 'SRIMfit'. The '関数名' (Function name) is 'srEnew'. The '関数の引数' (Function arguments) window shows:
 

- WS: "srim40Ar\_Si" (Worksheet name)
- E0: 95 (Energy in MeV/u)
- Tum: 0 (Target thickness in μm)

 A note states: "この関数は、エネルギー: Eion [MeV/u] のイオンが、[Target 通過後] のエネルギー: Enew [MeV/u] を返します。" (This function returns the energy Enew [MeV/u] of ions with energy Eion [MeV/u] after passing through the target.)

先ほど紹介した、LET測定 of Excelシートも、  
下記 HP からダウンロードできます！

当チームのWebページ <http://ribf.riken.jp/sisetu-kyoyo/>

The spreadsheet shows the following data tables:

Header	Beam	Mat	WS.name	Dens	maxLET@MeV/u	Mat.name
Header	40Ar	Si	srim40Ar_Si	2.32	18.7	Silicon
		Al	srim40Ar_Al	2.70	18.5	Aluminum
		Air	srim40Ar_Air	1.2E-03	25.1	Air (Dry ICRU-104(gas))
		Kapto	srim40Ar_Kapton	1.42	27.3	Kapton(Polyimide Film ICRU-179)

通過後の値 srEnew()で計算	真空	真空切り膜	Edeg膜	空気(大気圧)			
Beam	Z	MeV/u	MeV	μm	MeV/u	mm	MeV/u
40 Ar	18	95.0	3800	75.0	94.39	50.0	93.74
LET(Si)		2.03	[MeV/(mg/cm2)]	2.04		2.05	2.07
Range(Si)		4668	[μm]	4615		4559	4461
Long.Strg(Si)		175	[μm]	174		172	169
Later.Strg(Si)		27	[μm]	27		26	26
Range(Al)		4126	[μm]	4079		4029	3942
Range(Air)		8256	[mm]	8163		8064	7889

step=	Al-Edeg	E1	LET	E2	LET
μm	MeV/u	MeV/(mg/cm2)	MeV/u	MeV/u	MeV/(mg/cm2)
0	92.53	2.07	90.08	2.12	
100	91.14	2.10	88.85	2.14	
200	89.75	2.12	87.63	2.16	
300	88.36	2.15	86.34	2.18	
400	86.95	2.17	85.03	2.21	
500	85.50	2.20	83.73	2.23	
600	84.04	2.23	82.43	2.26	
700	82.59	2.26	81.12	2.29	
800	81.13	2.29	79.76	2.32	
900	79.57	2.32	78.40	2.35	
1000	78.00	2.36	77.05	2.38	
1100	76.44	2.39	75.69	2.41	
1200	74.87	2.43	74.28	2.44	
1300	73.23	2.47	72.83	2.48	
1400	71.58	2.51	71.37	2.52	
1500	69.94	2.56	69.92	2.56	
1600	68.27	2.60	68.45	2.60	
1700	66.53	2.66	66.88	2.65	
1800	64.80	2.71	65.32	2.69	
1900	63.06	2.76	63.76	2.74	
2000	61.22	2.83	62.18	2.79	
2100	59.32	2.90	60.54	2.85	
2200	57.43	2.97	58.89	2.92	

Graph: LET, E @ Si 表面. The x-axis is Al-Deg Thick [μm] (0 to 4000) and the y-axis is LET in Si [MeV/(mg/cm2)] (0 to 16). The red line represents LET and the blue line represents E1. LET increases with thickness, while E1 decreases.