

# 「RFイオンガイド型同位体分離装置を用いた 中性子過剰核の研究」

**Tohoku RF-IGISOL**

**RIKEN**

**Y. Miyashita**

**Tohoku Univ, CYRIC**

**K. Shimada、H. Ouchi、S. Izumi、A. Sasaki、T. Wakui、T. Shinozuka**

**SCRIT ISOL**

**RIKEN**

**Y. Miyashita, T. Suda, M. Wakasugi, T. Emoto, T. Hori, M. Hara, S. Ito, S. Wang**

**JAEA**

**S. Ichikawa**

**Rikkyo Univ**

**K. Kurita, M. Togasaki**

**Tohoku Univ**

**T. Tamae**

## Contents

- Tohoku RF-IGISOL による不安定核生成
- 核磁気モーメントの測定(最近の成果)
- (RIKEN における SCRIT 用 ISOL の計画)

# 天体核物理への興味

元素生成のメカニズムの解明

⇒ 中性子過剰核の 質量、半減期、中性子放出確率の実験値(測定値)が必要。

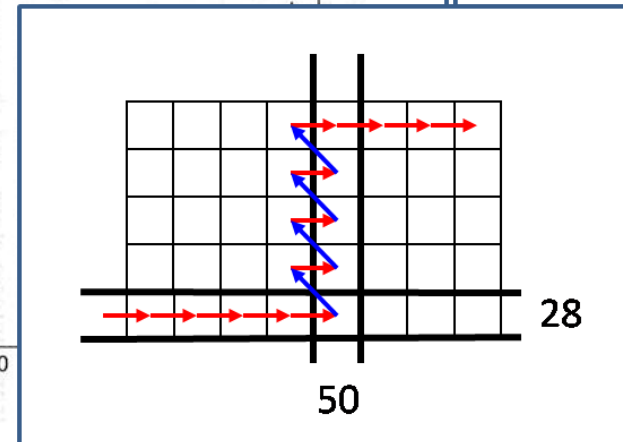
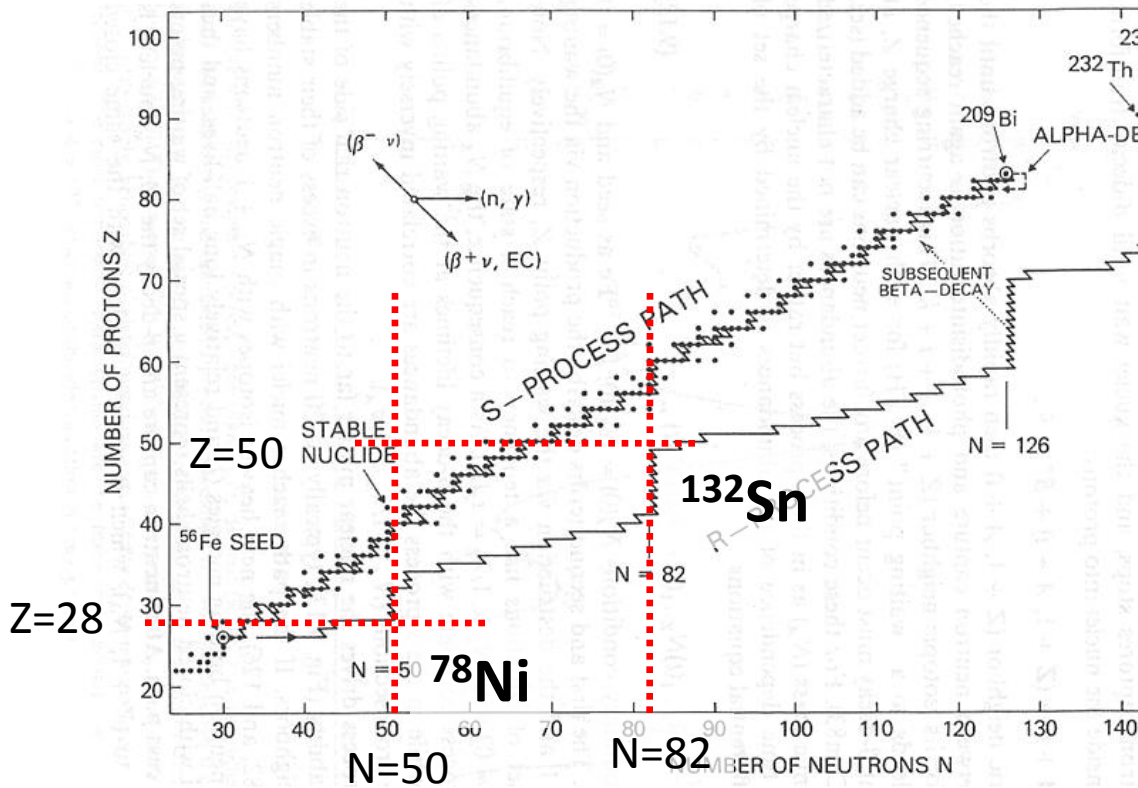
⇒ 特に二重魔法数の<sup>78</sup>Ni、及びその近傍の核を調べることで、

r-processのウェイトングポイントの状態を調べることに繋がる。

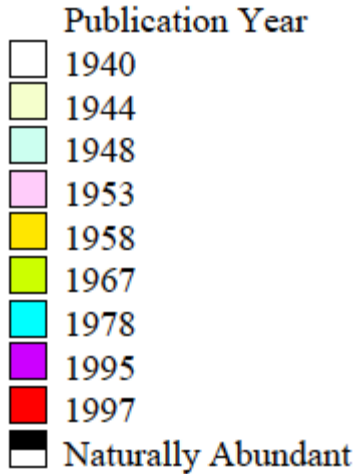
# 中性子過剰核の核構造への興味

⇒ 魔法数の消失(N=8,20,40)と出現(N=6,16,30)

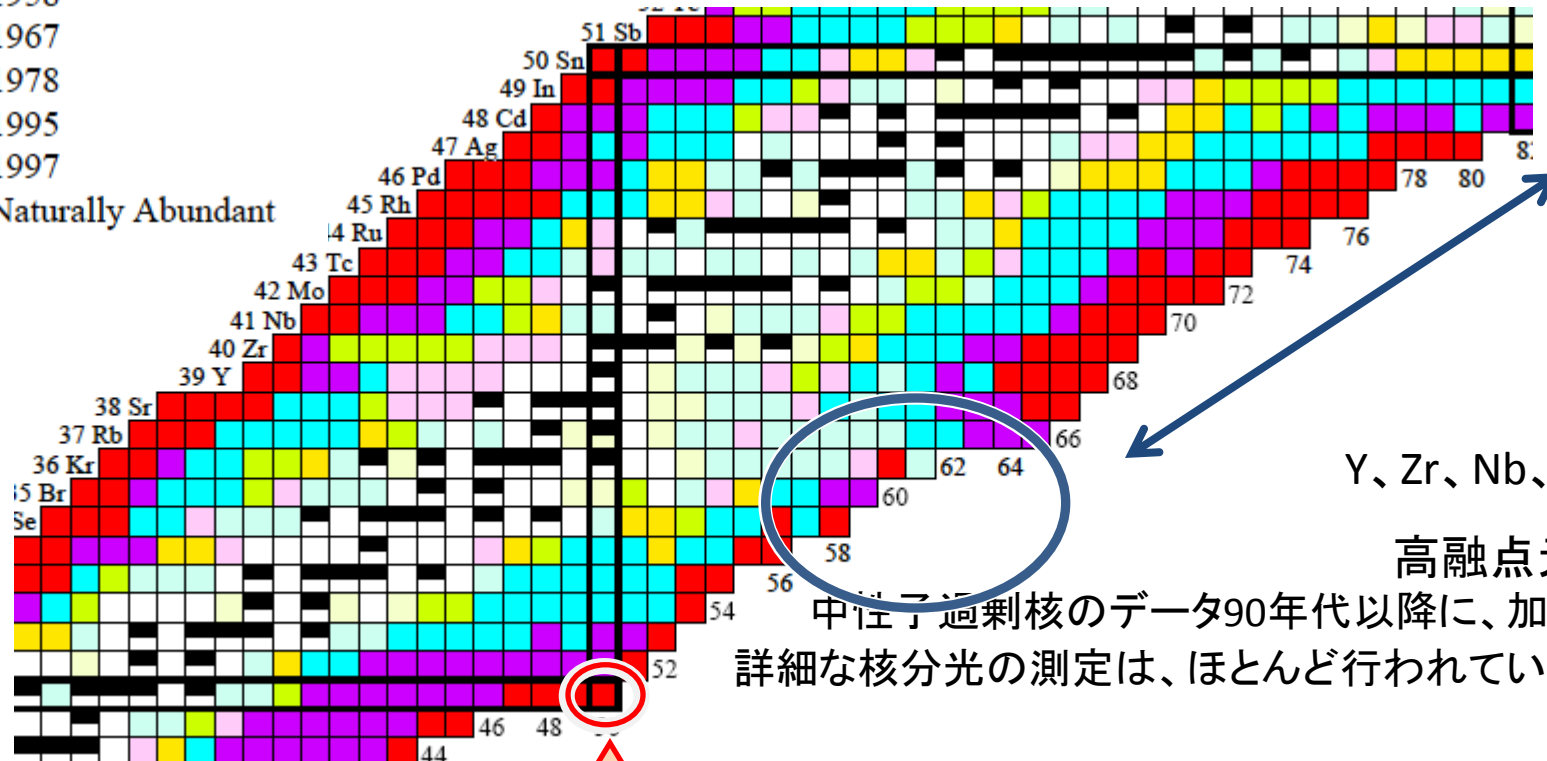
⇒ **核磁気モーメントの測定** (核の配位構造などの議論、軌道エネルギー)



# Evolution of the *Table of Isotopes*



中重核領域のTable of Isotopesのデータになった年の変遷



Y、Zr、Nb、~Ag

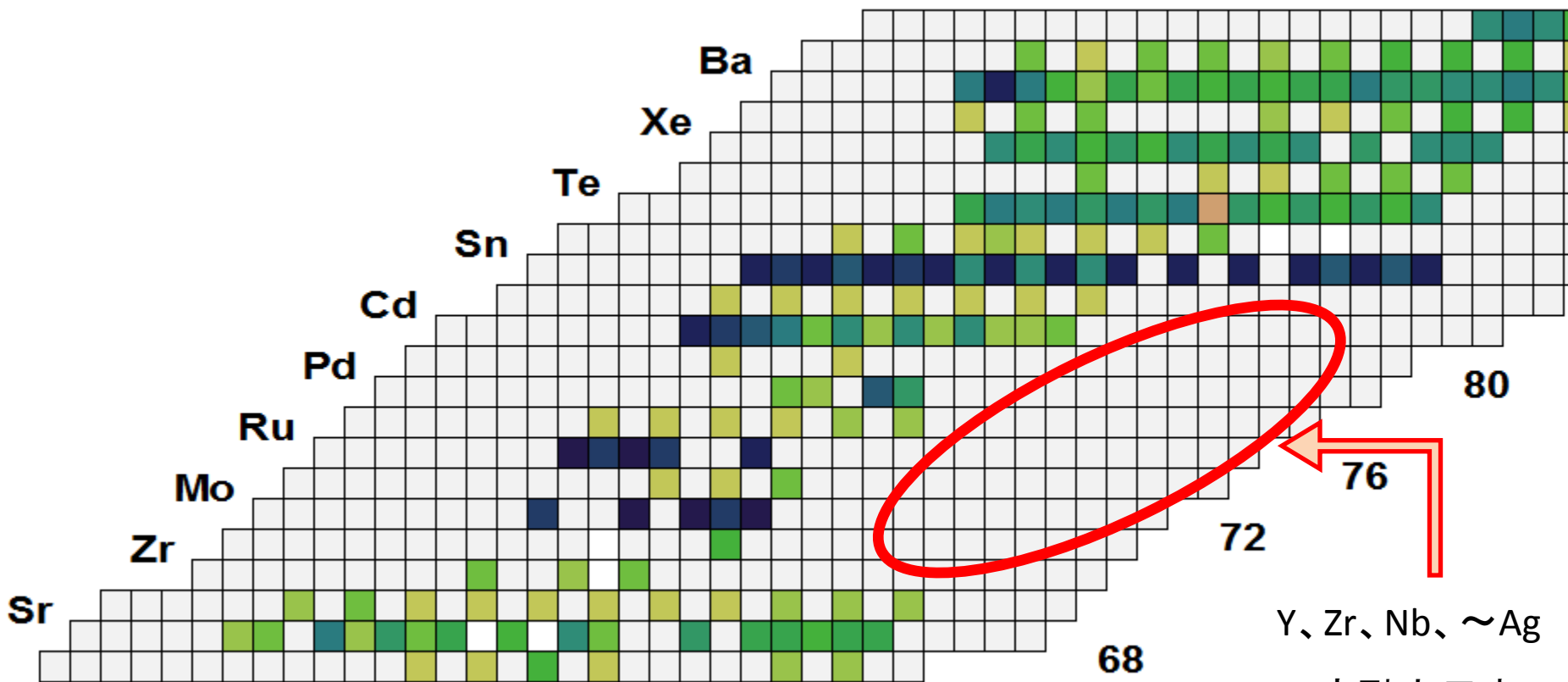
高融点元素:

中性子過剰核のデータ90年代以降に、加わる。  
 詳細な核分光の測定は、ほとんど行われていない。

<sup>78</sup>Ni

# 中重核領域の核磁気モーメントの測定

- 核磁気モーメントが測定されている原子核に色をつけた。

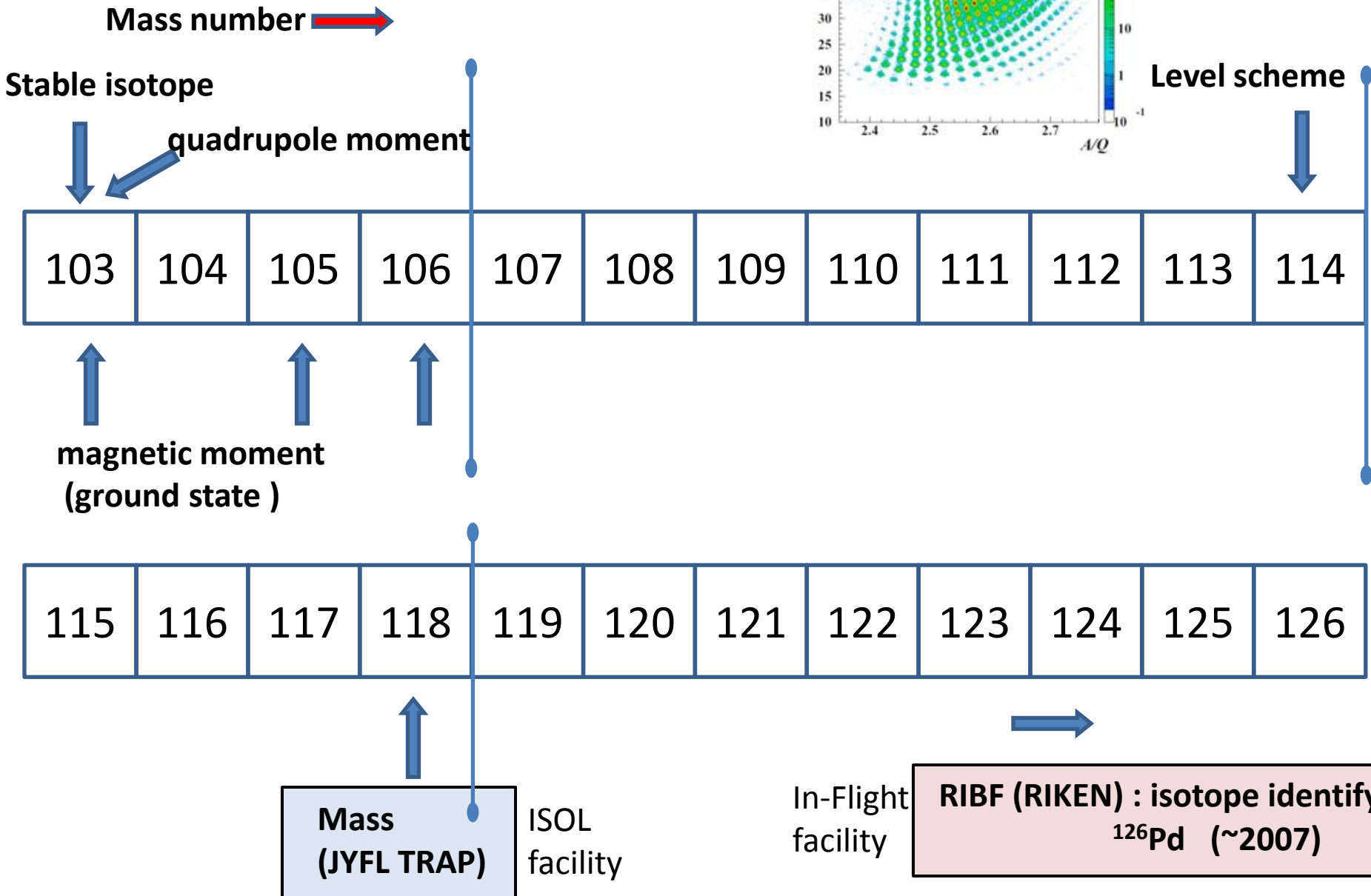
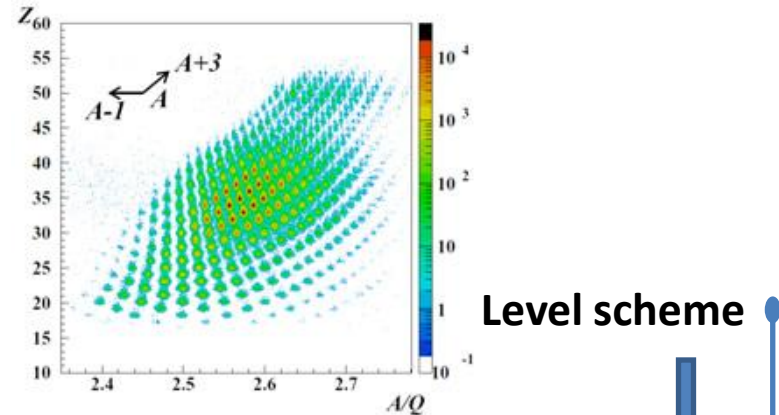


Y、Zr、Nb、～Ag

高融点元素：

中性子過剰核の核磁気モーメントのデータはほとんどない。

# Rhodium Isotope



# ISOLDE-type ISOL

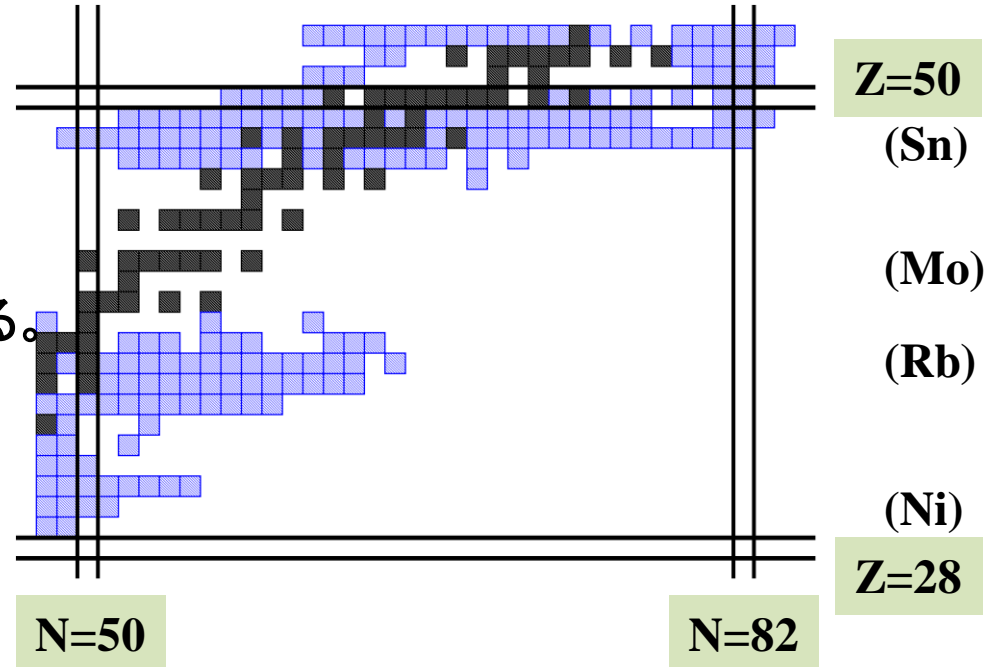
- ・高温に熱せられた標的上で、核反応を起こさせ、不安定核を生成。主として熱拡散によって目的の核をイオン源へ移動させる。
- ・収量の多いもので  $10^{11}$  ion s / sec 得られる。

・Thick and high temperature target production at ISOLDE CERN

Alkali metal, Alkali earth metal -- ◎

- ・得る事が可能な原子核は化学的性質に依存し、蒸発しやすい元素に限られる。

⇒ 高融点元素の Y ~ Pd は得ることが出来ない。



In the nuclear chart, radioactive nuclei obtained by ISOLDE type ISOL system are marked Blue.

# IGISOL

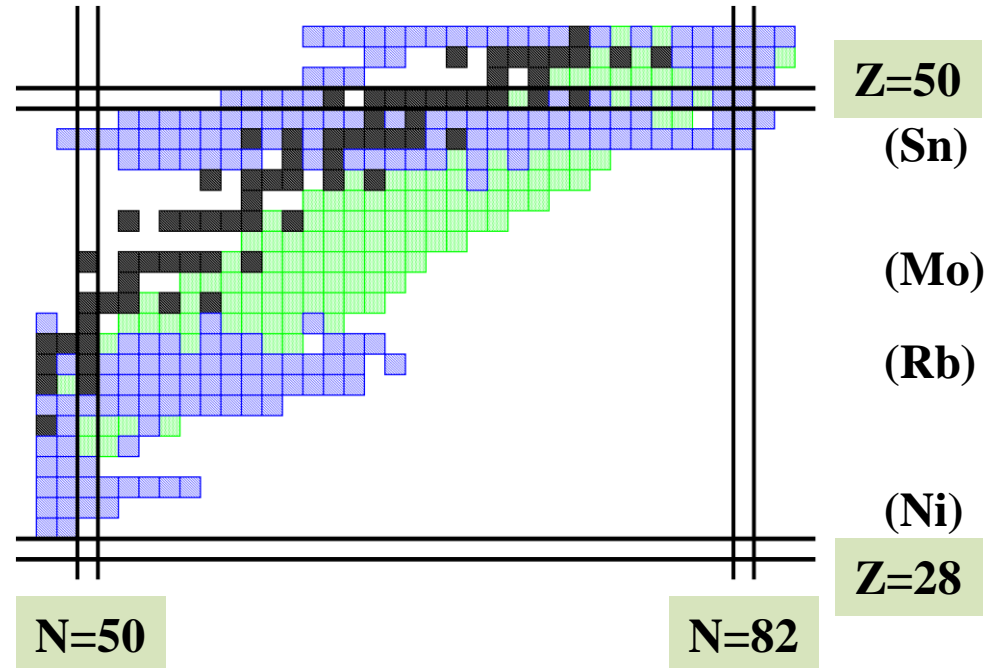
- ・ 全ての元素において化学的性質に依存せずに引き出すことを可能にするために、標的で生成された原子核を標的から反跳させガスとの衝突で反跳核を静止させ、またそのガスの流れで、質量分離装置へ輸送する。

Recoil of nuclei from the target are stopped by gas collision.  
⇒ unlimited chemical property.  
Include of refractory element.

nuclei are transported by gas flow.

- ・ ガス流に任せた引き出しを行っているために引き出し時間は、ガスの掃き出し時間に依存する。

そのために、短寿命核を対象にしたシステムでは、ガスセルの大きさが制限され、同時に反跳核の静止能力も制限される。

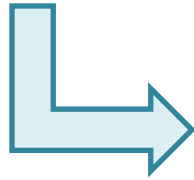


In the nuclear chart, radioactive nuclei obtained by ISODE type ISOL system are marked Blue.

Radioactive nuclei obtained by IGISOL system are marked Green (Sendai, Jyvaskyla)



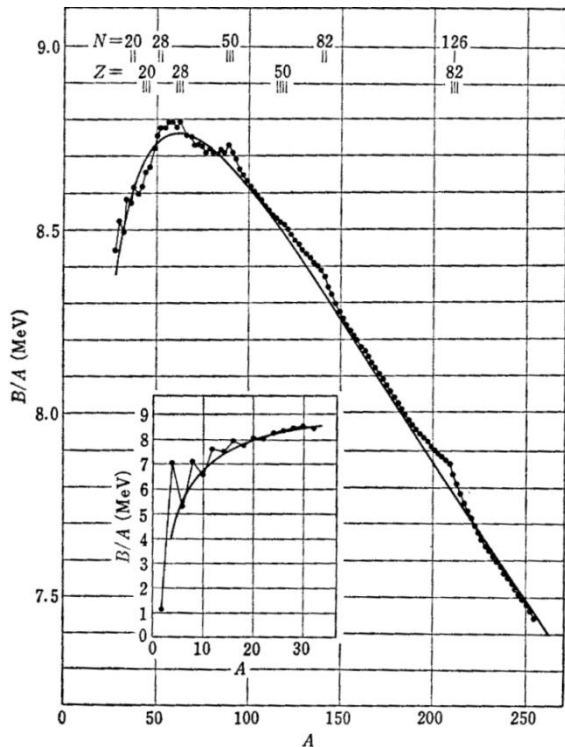
**IGISOL法の限界（引き出し収量の制限）**



**RF-IGISOL法への展開**

# IGISOL ; gas cell volume

核分裂反応による  
中性子過剰核生成  
を用いたRF-IGISOL

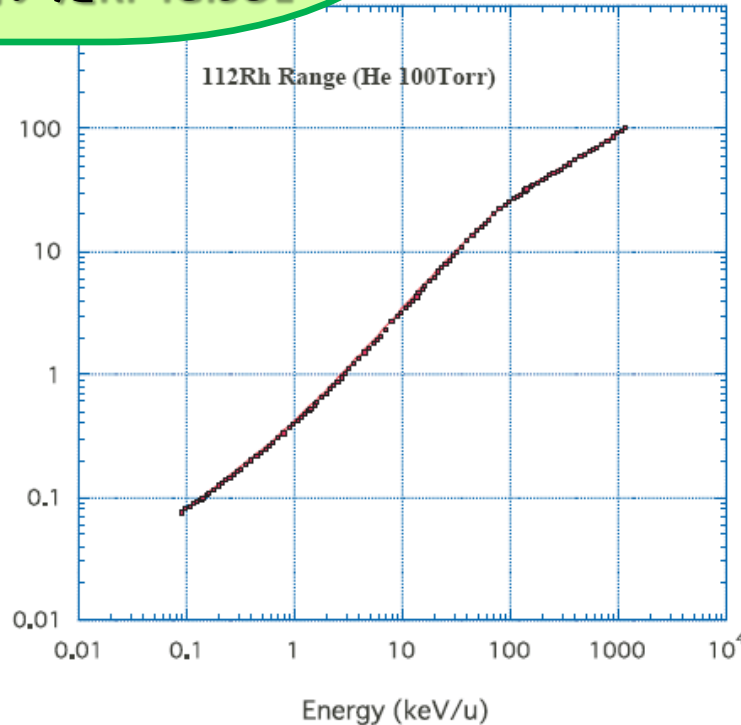


核子1個当たりの結合エネルギーと質量数の関係

ウランウム領域(A~240)では、 $B/A \sim 7.6$  MeV  
分裂生成物領域(A~120)  $B/A \sim 8.5$  MeV

一回の核分裂により放出されるエネルギー  
は  $240 \times (8.5 - 7.6) = 210$  MeV

核子当り  $\sim 1$  MeV/u



核分裂による生成核である $^{112}\text{Rh}$ の  
Heガス 100 Torr 中での飛程。

核分裂生成物を全て、静止させ引き出す  
ためには 100 cm の長さが必要。

$\rightarrow V = 10^6$  [cm<sup>3</sup>]

# ガスセルからの引き出し時間、引き出し手法

ガス流のみの引き出しでは、引き出し時間は、ガスセル体積とノズルコンダクタンスに依存する。

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \left( \frac{2\gamma}{\gamma+1} \right)^2 \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{1/\gamma-1} \left( \frac{\mathfrak{R}}{MT_0} \right)^{1/2} P_0 T$$

$$Q = C_{noz} \cdot p_0$$

$$C_{noz} = 1.42 \times 10^4 \frac{d^2}{\sqrt{MT_0}}$$

$$t_{extr} = V_{cell} / C_{noz}$$

$C_{noz}$	nozzle conductance
$d$	nozzle diameter
$T_0$	temperature
$M$	molecular weight
$V_{cell}$ [cm <sup>3</sup> ]	the volume of the cell
$t_{extr}$ [s]	the extraction time of the ions from the cell

He gas  $M = 4$ 、 $T_0 = 293$  K、 $d = 0.5$  mm

$t_{extr} = 96.4$  msec の引き出し時間達成のためには、

半減期が $\sim 100$  msecの不安定核を引き出すためには……

Gas cellの体積を  $V = 10$  [cm<sup>3</sup>] にする必要がある。

⇒ ベータ崩壊の半減期の短い短寿命不安定核を引き出すためには、ガスの流れによる輸送のみによる輸送では体積が制限される。

- ・引き出し収量の増加のためには、ガスセルを大きくしたい。
- ・ガスセルを大きくしてもガスの流れだけでは短寿命核を引き出す事ができない。



⇒ 電場による輸送、(輸送速度の上昇) + 100 cm の長さのガスセル。  
+ (**0.5 mm**の出口穴)

可能か？さらに、

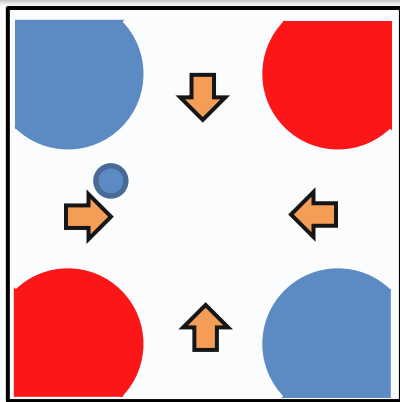
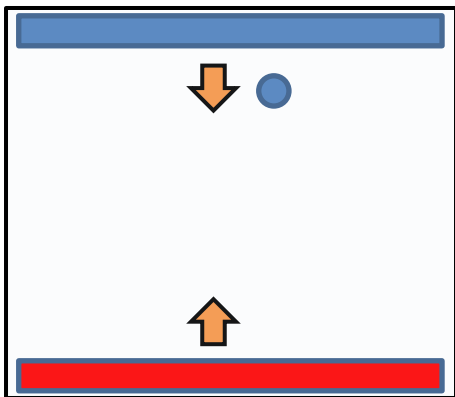
イオンはドリフト運動 (He 30Torrでの平均自由行程 $1\mu\text{m}$ )

⇒ イオンは全て忠実に電気力線に沿って運動し、陰極に衝突。

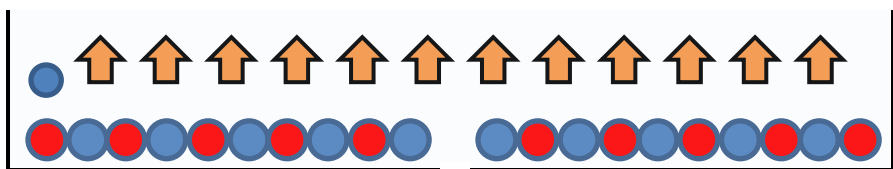


・静電場(DC電場)のみを用いた、ガスセル内のイオンの輸送、引き出しは不可能

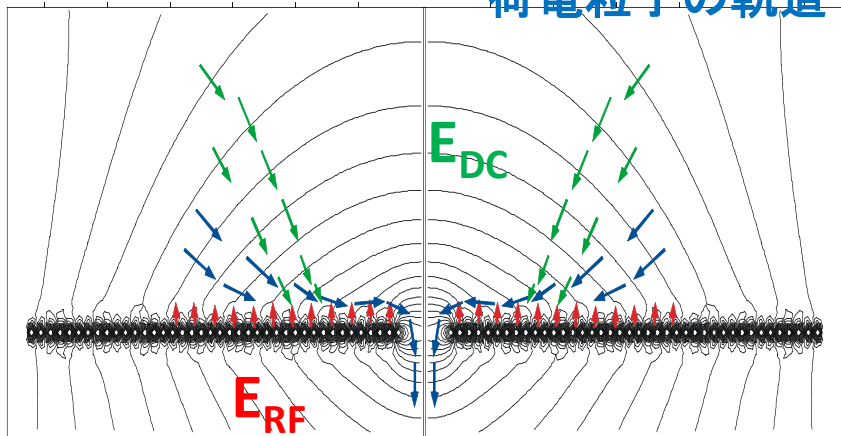
陰極に衝突するなら、陰極に反発する力を加えよう！！



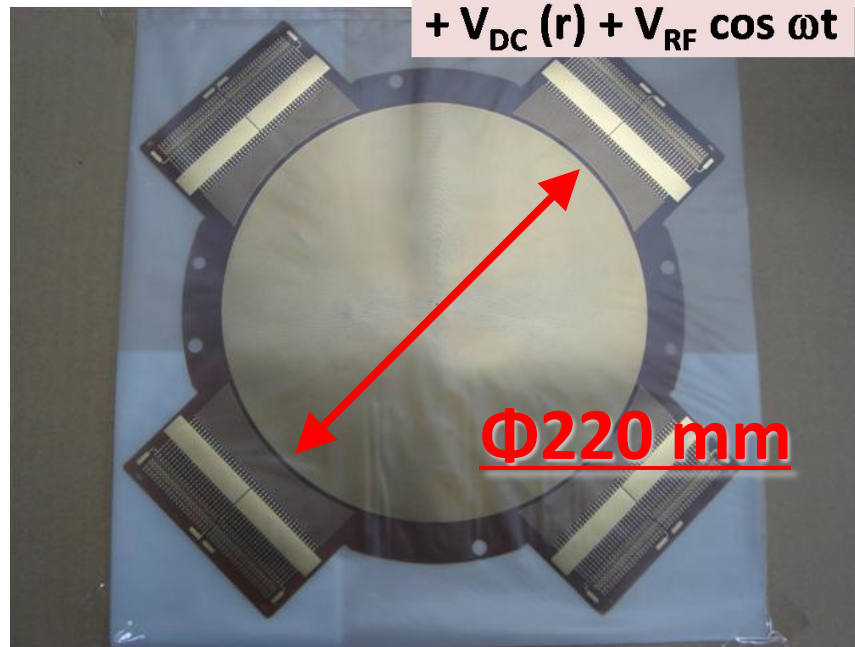
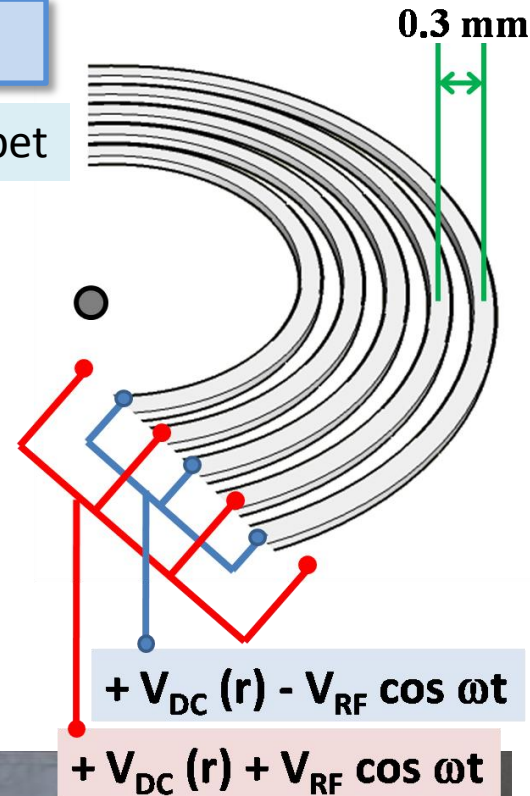
並行平板高周波トラップ 四重極高周波トラップ



荷電粒子の軌道



RF-Carpet



高融点元素も含めたあらゆる原子核を引き出したい。

・ISOLDE type ISOL



・IGISOL法



・IGISOL法で引き出す事が出来る限界収量を超えた装置を作りたい。



・引き出し収量の増加のためには、ガスセルを大きくしたい。

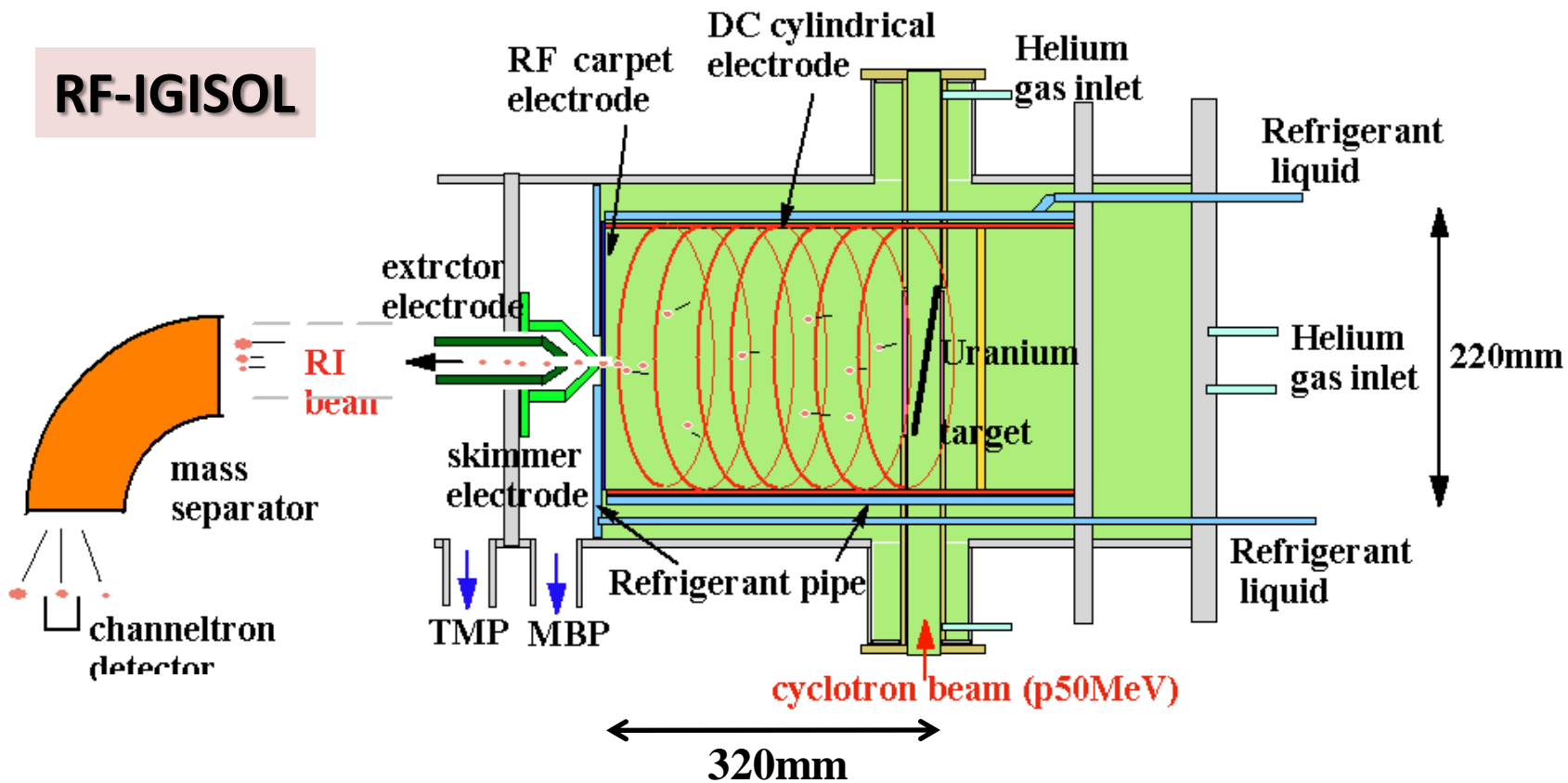


- ・ガスセルを大きくしてもガスの流れだけでは短寿命核を引き出す事ができない。
- ・ガスセル内のDC電場による輸送、引き出しは平均自由行程から不可能



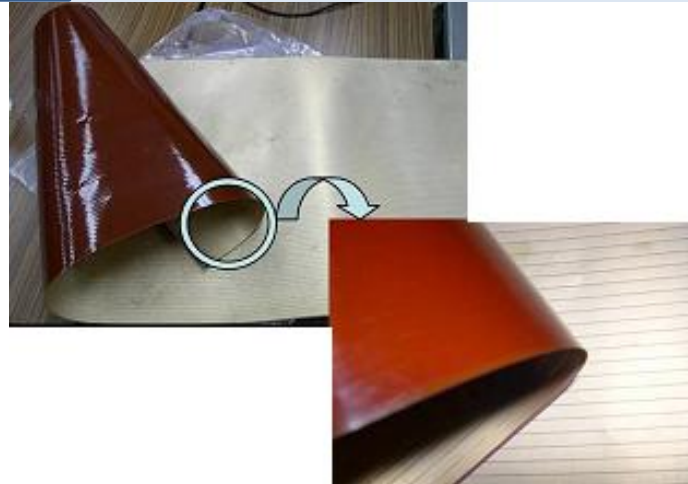
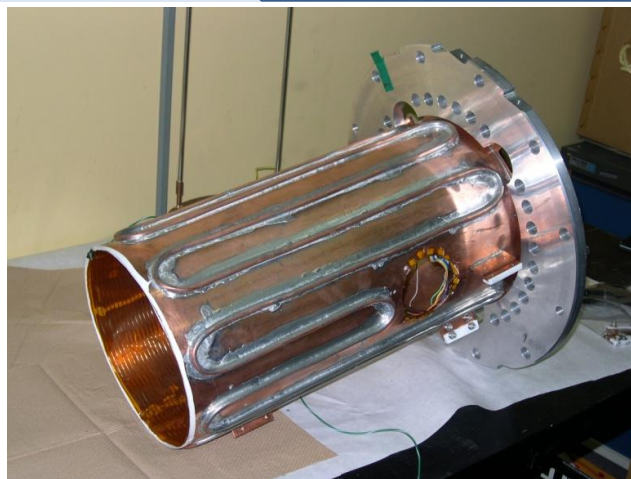
・大型のガスセルとRF電場を用いた輸送とを組み合わせたRF-IGISOLを制作

# RF-IGISOL

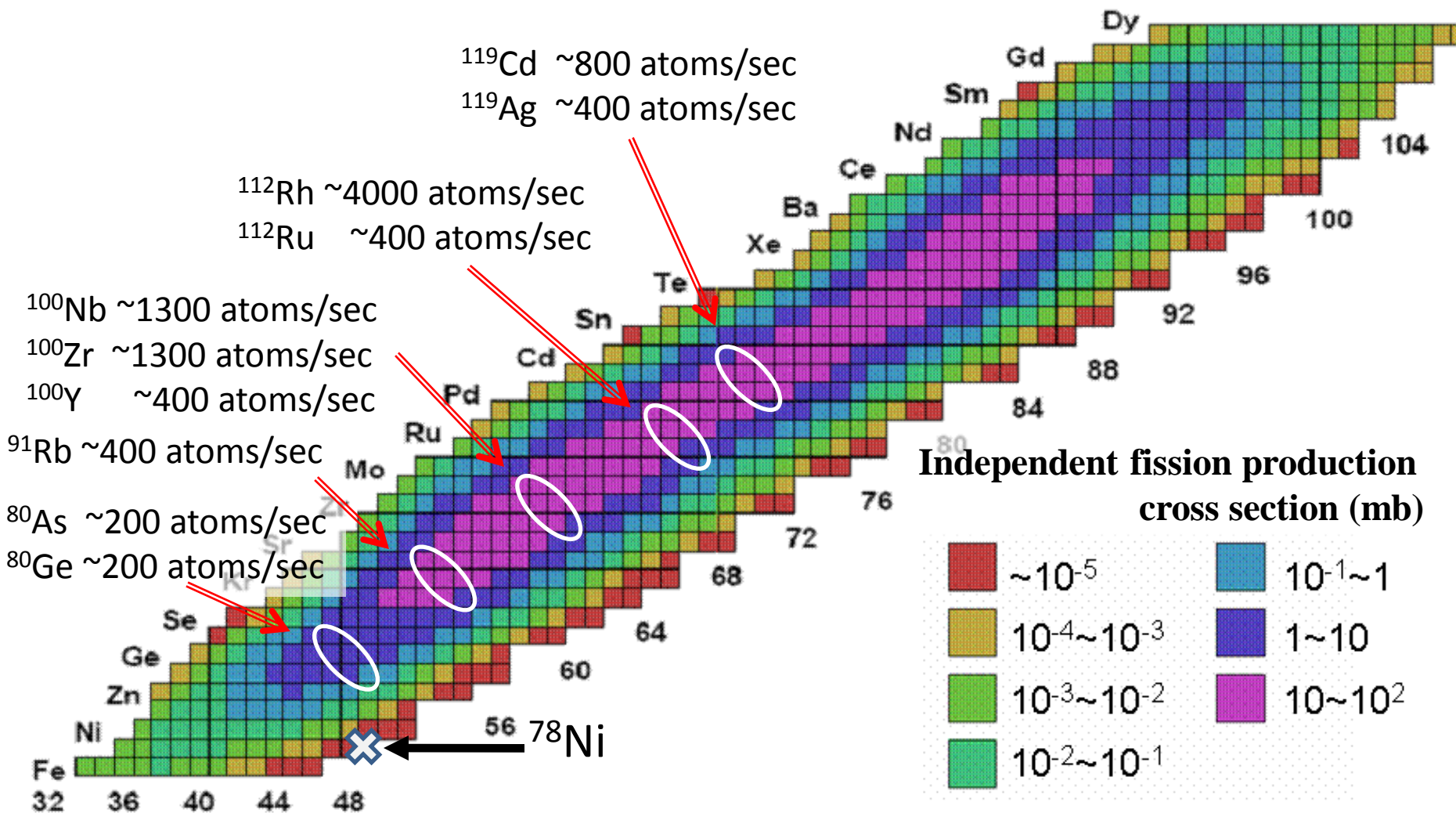


•  $^{238}\text{U}$  ( p,fission ) reaction at  $E_p = 50 \text{ MeV}$ ,  $I_p \sim 1 \mu \text{ A}$ , 天然ウラン (  $20 \text{ mg/cm}^2$  )

側面部 DC電極



# Production yields at TOHOKU RF-IGISOL (proton intensity = 1 $\mu\text{A}$ ) May, 2007

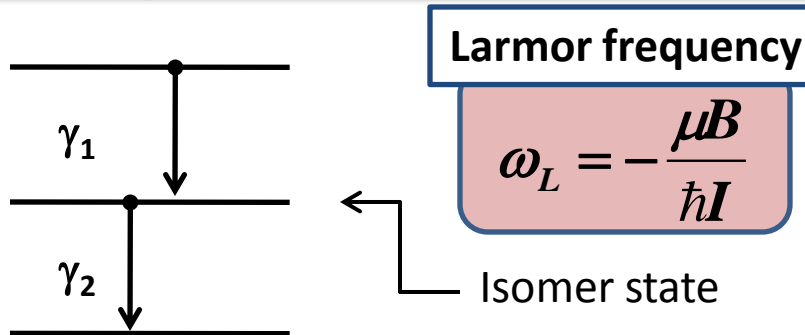


・ RF-IGISOL法を用いる事で核分裂の生成断面積の大きい領域では、  
 (数秒の半減期の原子核では) **4000 ~ 6000 atoms/sec** の収量を得る。

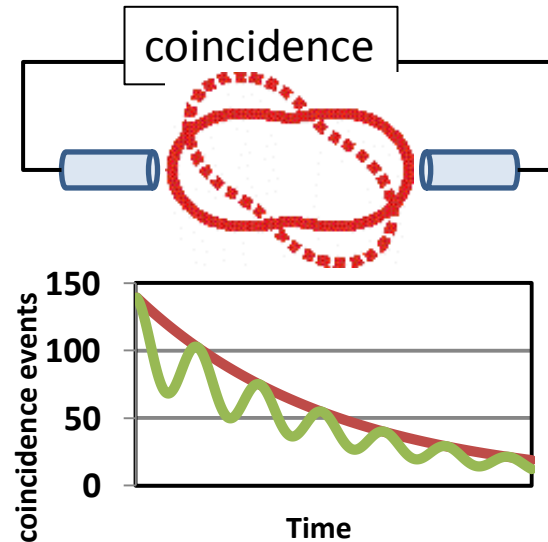
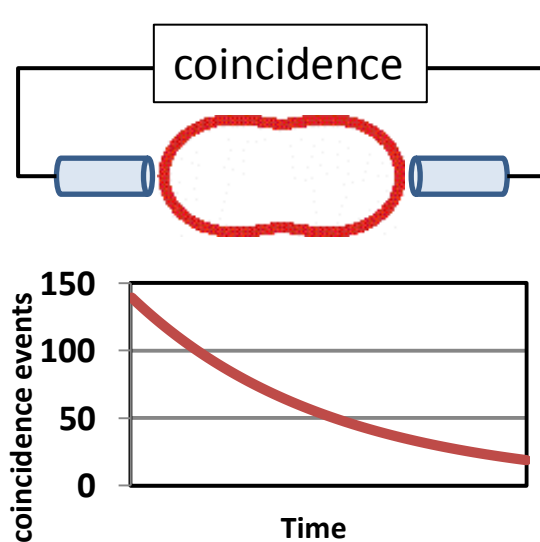


# TDPAC法を用いた核磁気モーメントの測定

# TDPAC (Time differential Perturbed Angular Correlation)



アイソマー準位の寿命の間だけラーモア歳差運動をし、角度分布が回転する。アイソマー準位の崩壊時間スペクトルを測定する事でラーモア周波数を決定することができる。



$$N(\theta, t) = \text{const} \cdot \exp(-\lambda t) W(\theta - \omega_L t)$$

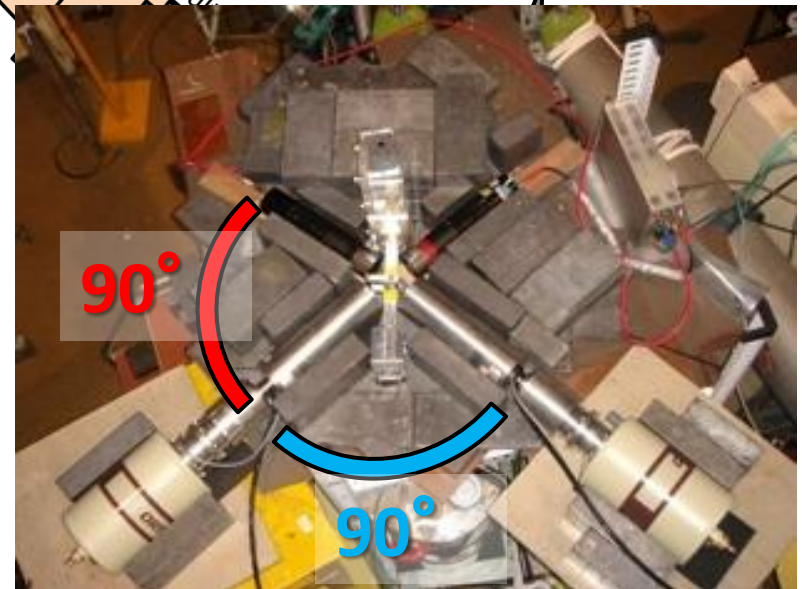
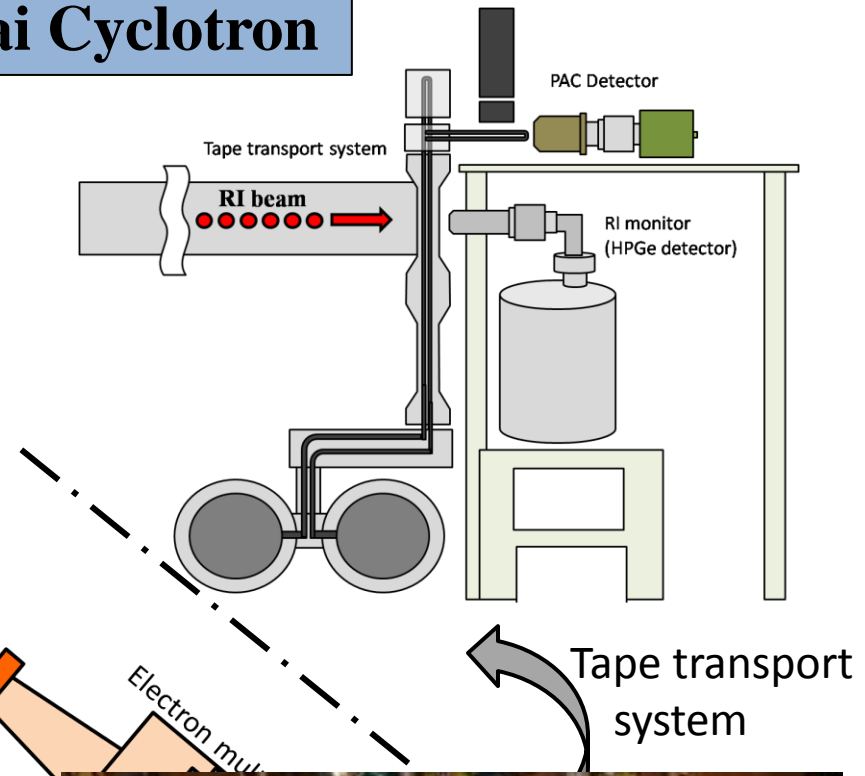
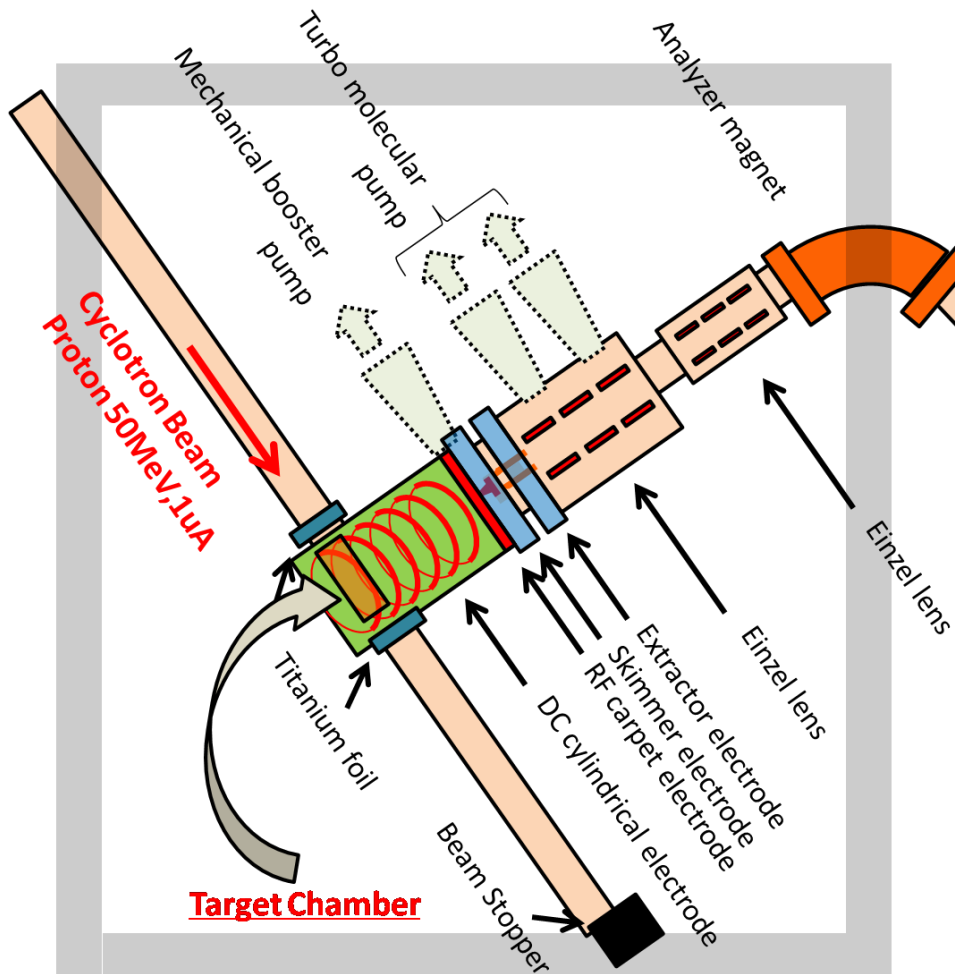
$$= \text{const} \cdot \exp(-\lambda t) \sum_k A_{2k} P_{2k}(\cos(\theta - \omega_L t))$$



$$R(t) = \frac{N(180^\circ, t) - N(90^\circ, t)}{N(180^\circ, t) + N(90^\circ, t)} \approx \frac{3}{4} A_{22} \cos(2\omega_L t)$$

# On-Line experiment Setup at Sendai Cyclotron

U(p,fision) reaction  
 at  $E_p = 50\text{MeV}$ ,  $I \sim 1\mu\text{A}$   
 Natural Uranium target  
 ( $20\text{mg}/\text{cm}^2$ )



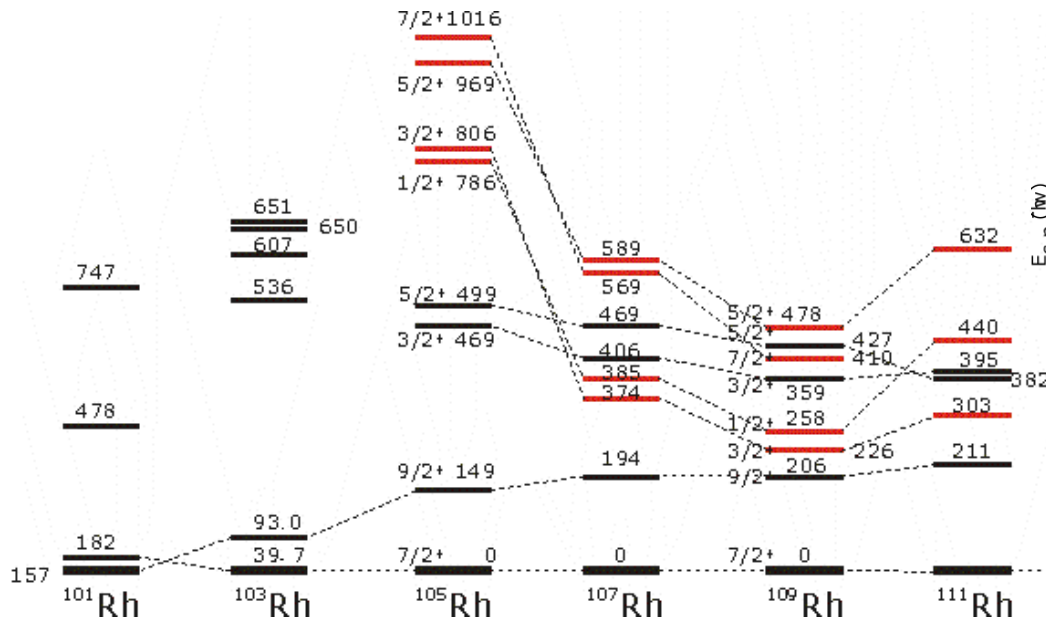
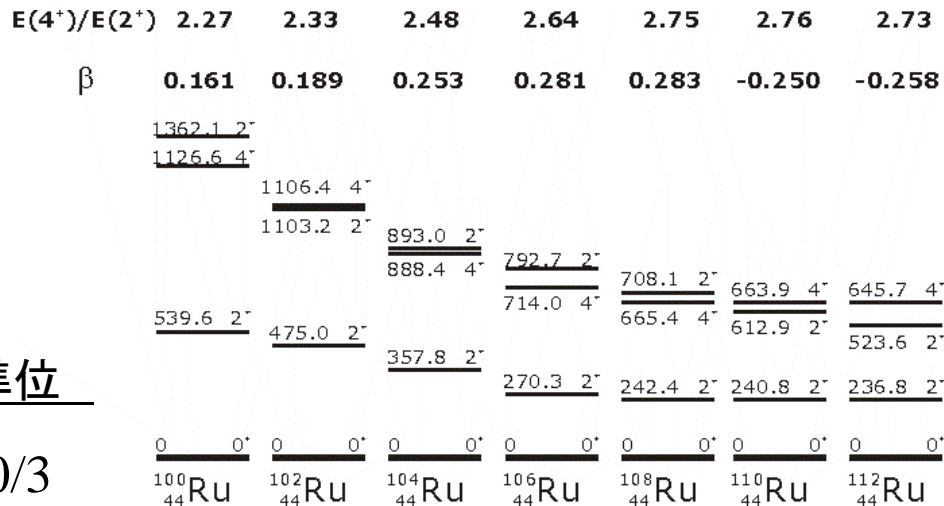
# ① $^{109}\text{Rh}$ ( $Z=45, N=64$ )



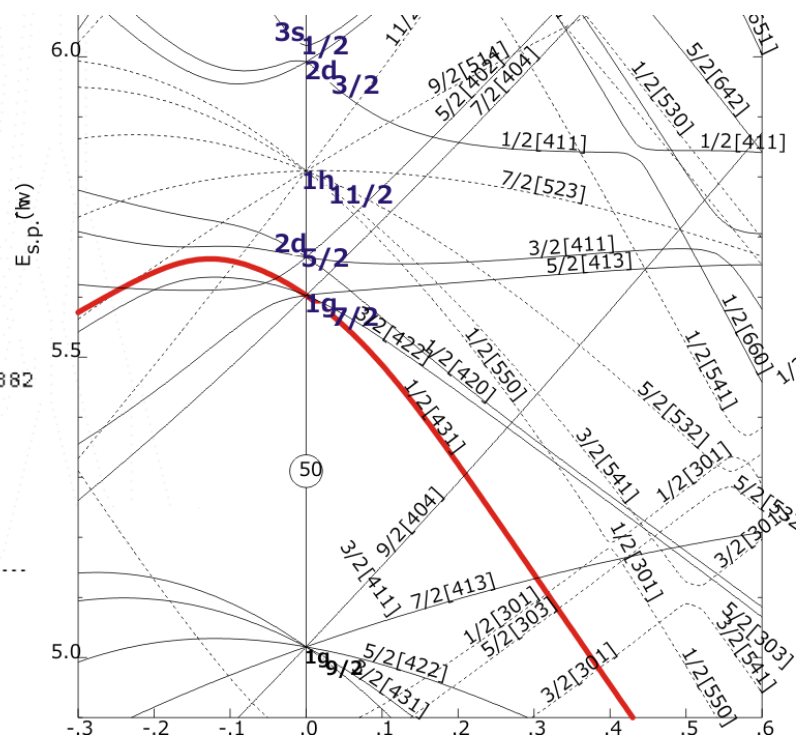
Y. Miyashita (CYRIC, Tohoku/RIKEN)  
(miyasita@riken.jp)

## 回転楕円形に変形した核の偶-偶核の励起準位

$$E(I) = (\hbar^2/2g)I(I+1) \Rightarrow E(4) / E(2) = 10/3$$

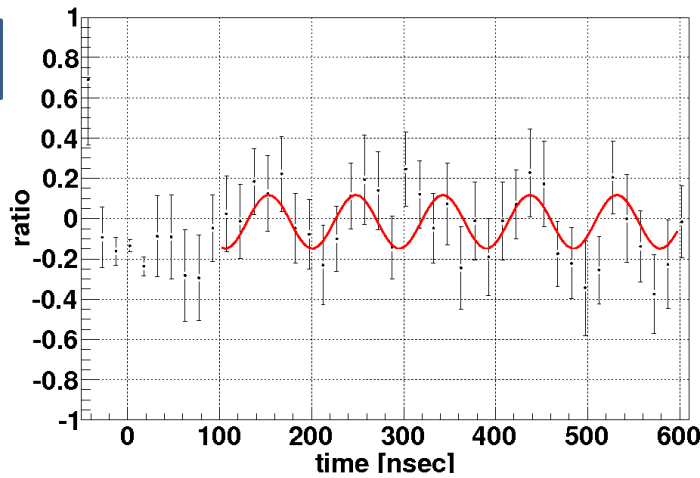


Rh 同位体の正パリティ準位

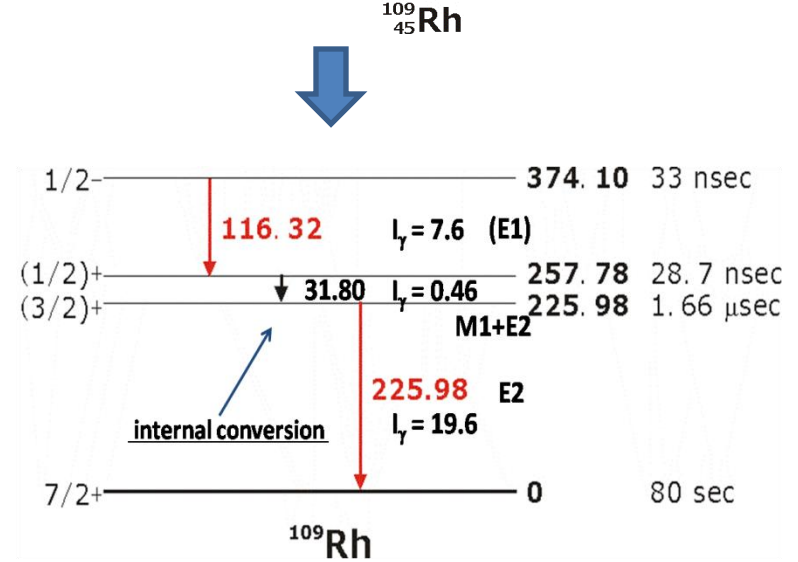
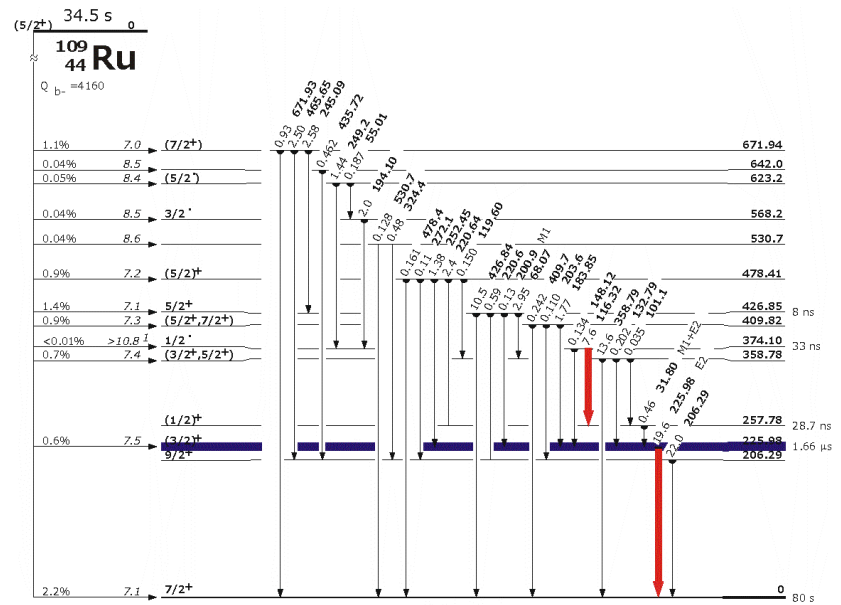
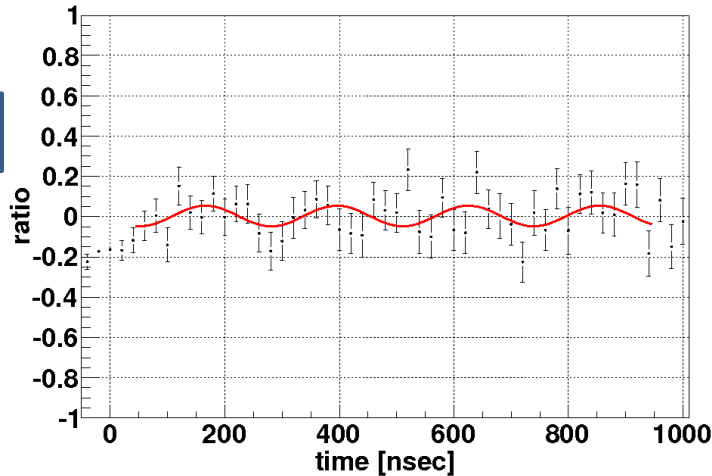


陽子のNilsonダイアグラム ( $1g_{9/2} \sim 3s_{1/2}$ )

$B = 1.09 \text{ T}$



$B = 0.34 \text{ T}$



	$I^\pi=3/2^+$	$I^\pi=5/2^+$
experiment	$1.17^{+0.23+0.03}_{-0.02-0.03}$	$1.95^{+0.38+0.05}_{-0.03-0.05}$
$\mu (2^+ \otimes g_{7/2})$	1.4781(2)	1.8672(2)
schmidt 值	+4.793	-0.124

(核磁子单位)

$\mu(g_{7/2}) = {}^{123}\text{Sb} (g_{7/2})$   
 $\mu(2^+) = \text{random } g \text{ factor}$

②

$^{132}\text{I}$  ( $Z=53, N=69$ )

1. S. Gorodetzky, N. Schulz, J. Chevallier, and A. C. Knipper, J. Phys(Paris) **27, 521 (1966)**

M. Tanigaki (KUR) tanigaki@rri.kyoto-u.ac.jp  
submitted to Physical Review C

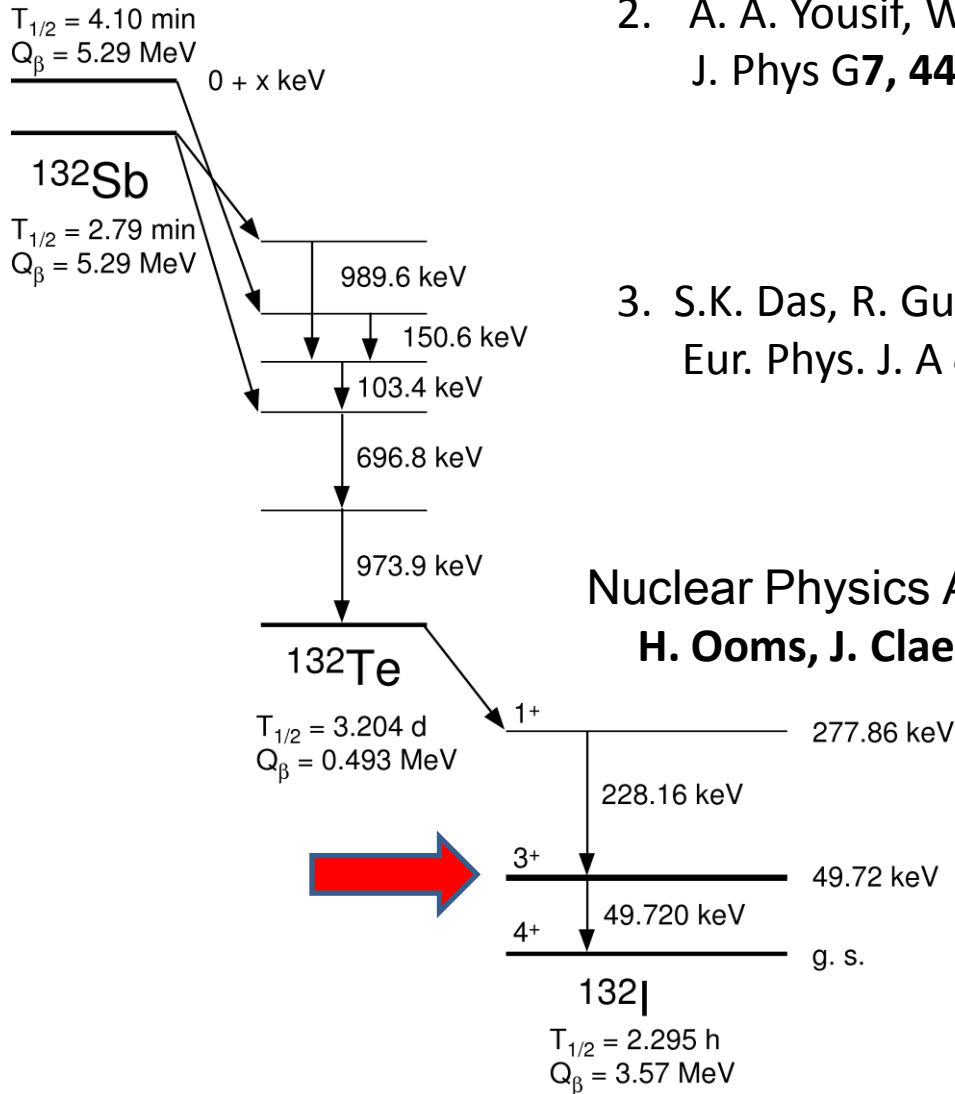
**0.96(3) ns** measured for the 50 keV state  
by  $\gamma(\text{plastic}) - \gamma(\text{plastic})$  TAC spectrum[1]

2. A. A. Yousif, W. D. Hamilton, and E. Michelakakis, J. Phys G7, **445 (1981)**

**7.14(14) ns** measured for the 50 keV state  
by  $\gamma(\text{plastic}) - \gamma(\text{NaI(Tl)})$  TAC spectrum[2]

3. S.K. Das, R. Guin, S.K. Saha Eur. Phys. J. A **4, 1{3 (1999)**

**2.94(11) ns** measured for the 50 keV state  
by  $\gamma(\text{NaI(Tl)}) - \gamma(\text{NaI(Tl)})$  TAC spectrum[3]



Nuclear Physics A321(1979)180-188

H. Ooms, J. Claes, F. Namavar, H. Van De Voorde and M. Rots

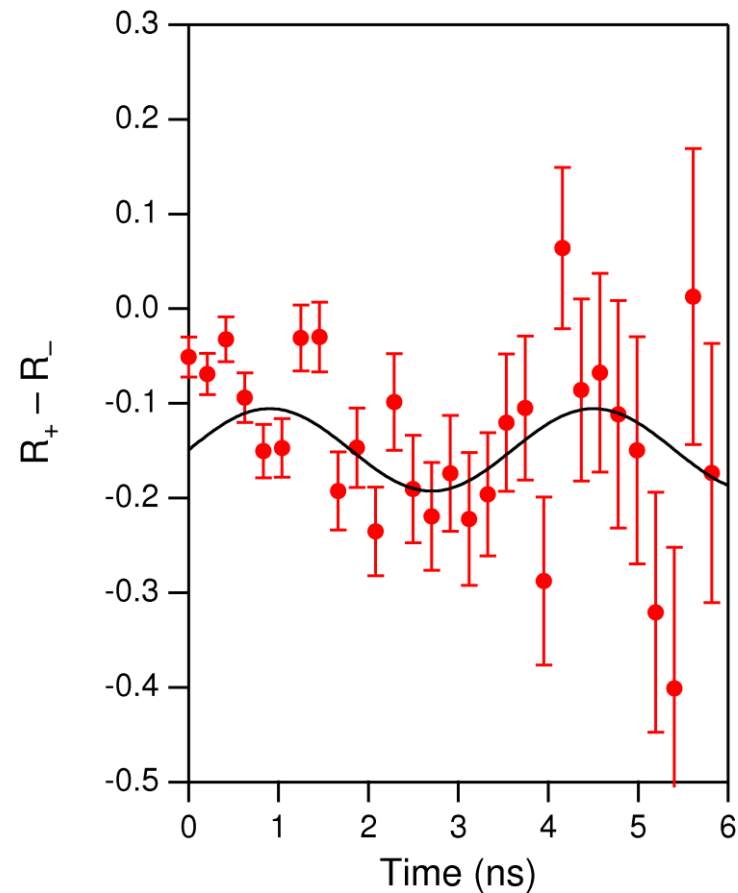
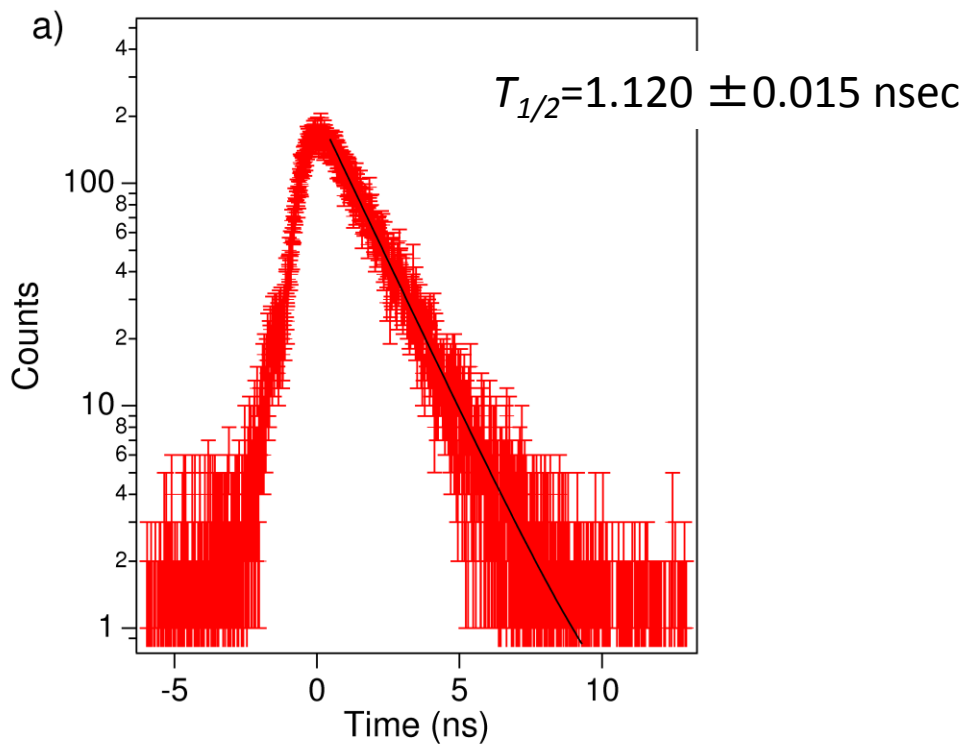
TIPAC measurement

$$\theta_L = \omega_L \times \tau \quad \left( \omega_L = g \frac{\mu_N B}{\hbar} \right)$$

1.34(4) nsとして計算

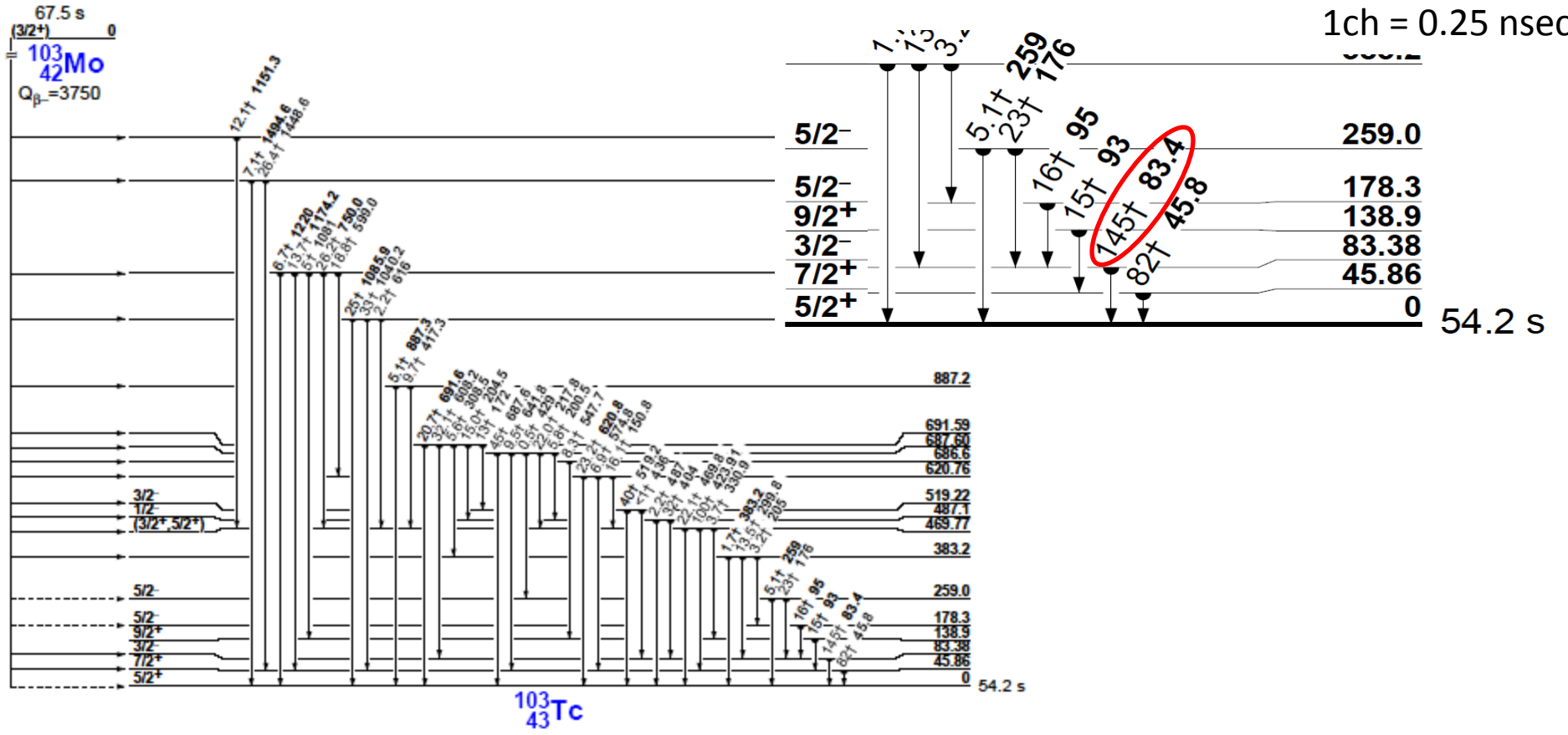
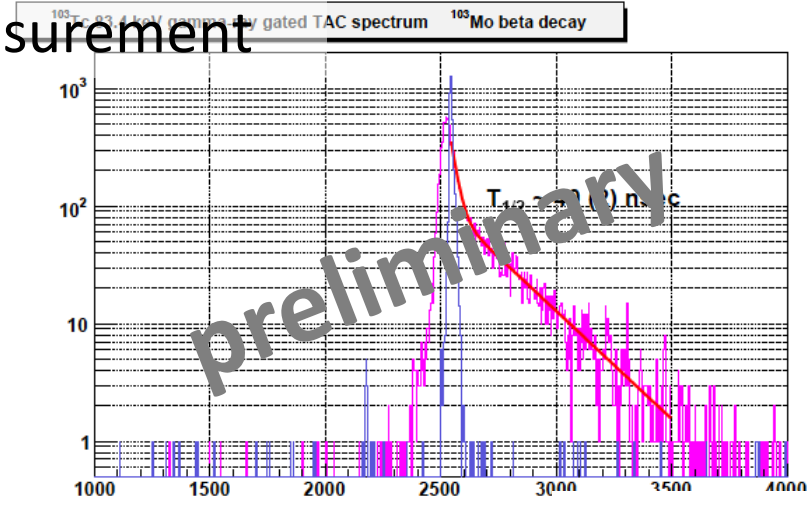
$$\left( \omega_L = g \frac{\mu_N B}{\hbar} \right)$$

Ni の内部場を利用したTDPAC測定 ( $B_{\text{hf}} = +26.5 \pm 0.5$  T)



# ③ $^{103}\text{Tc}$ low spin isomer half life measurement

Y. Miyashita (CYRIC, Tohoku/RIKEN)

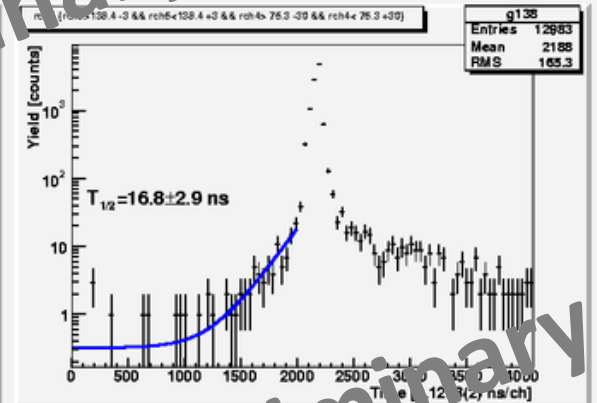
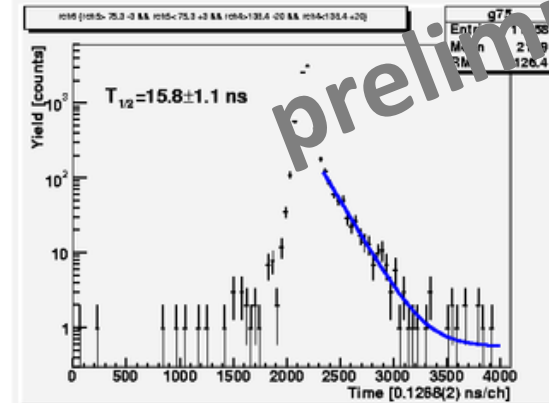
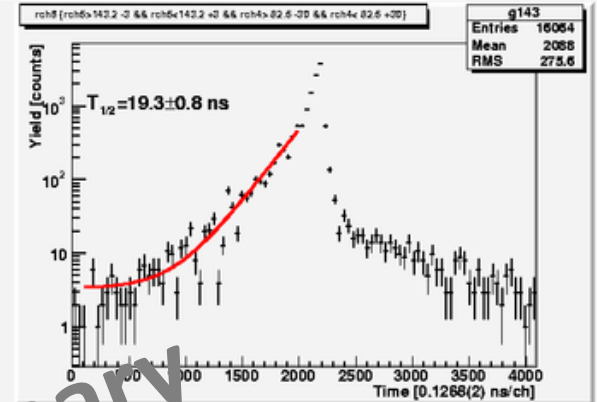
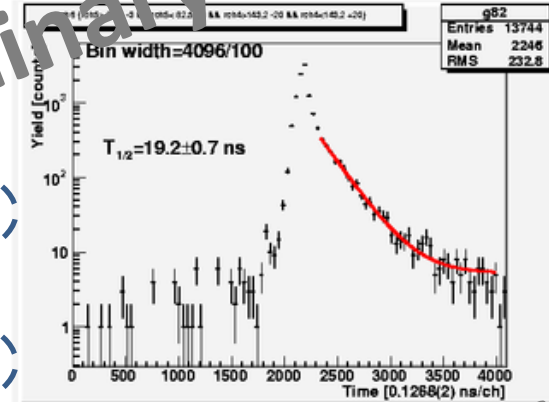
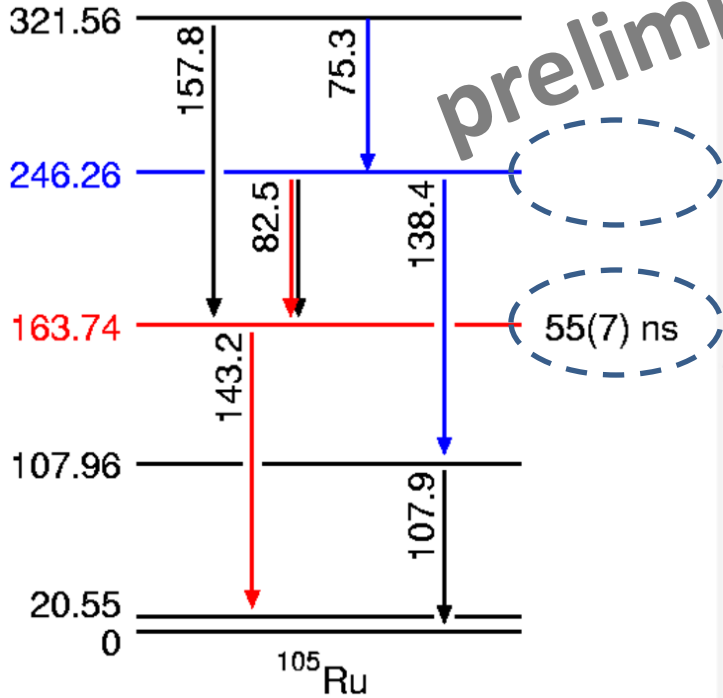




4

# $^{105}\text{Ru}$ low spin isomer half life measurement

K. Shimada (CYRIC, Tohoku) shimada@cyric.tohoku.ac.jp

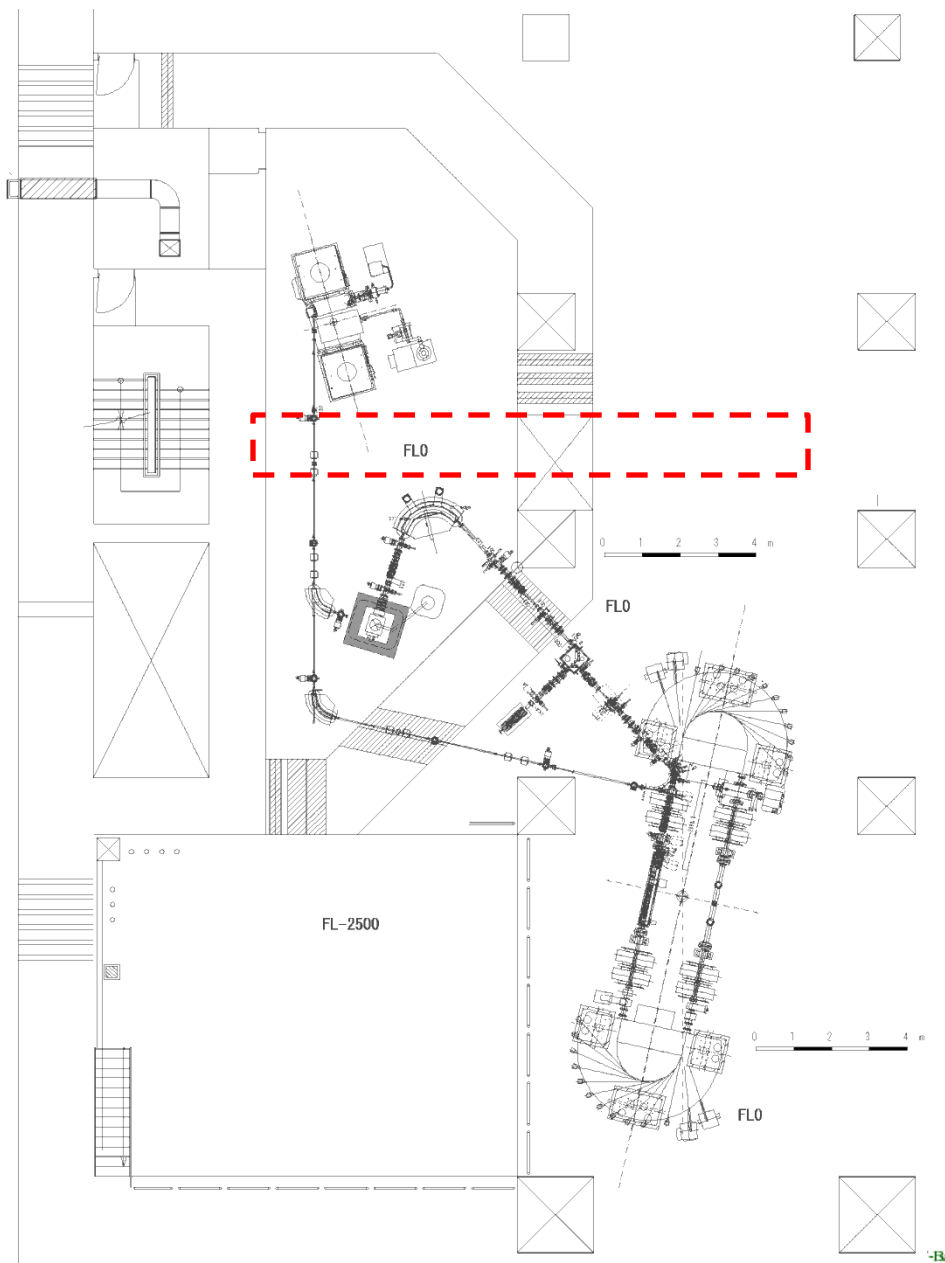


- Preliminary result

- 163.74 keV の準位の寿命: 55 ns  $\rightarrow$  19 ns?
- 246.26 keV の準位の寿命:  $\sim$ 16 ns?

- $^{109}\text{Rh}$  低励起準位の核磁気モーメントの測定
- $^{132}\text{I}$  低励起準位の核磁気モーメントの測定
  
- $^{103}\text{Tc}$  低励起準位アイソマー半減期の測定
- $^{105}\text{Ru}$  低励起準位アイソマー半減期の測定

# SCRIT ISOL

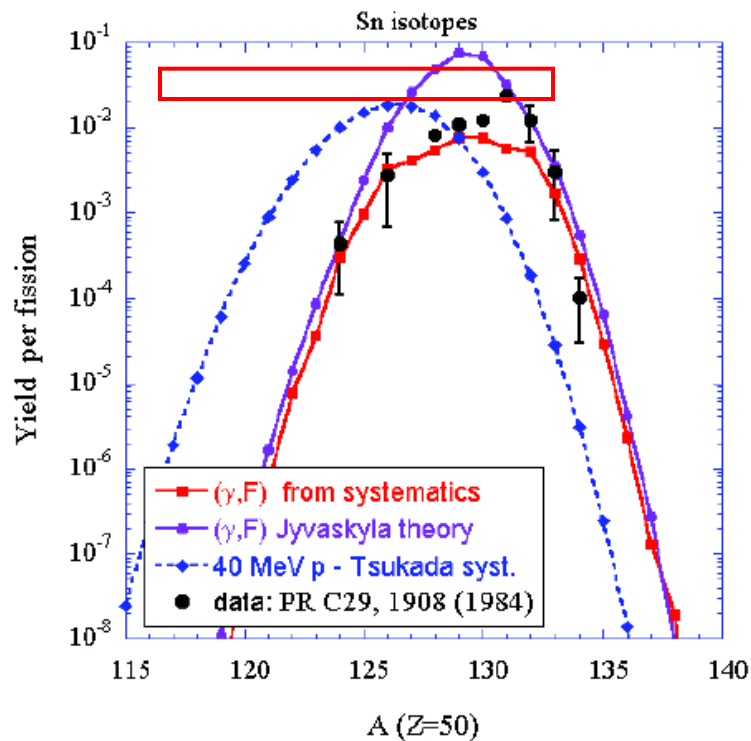


Electron driver => photo fission

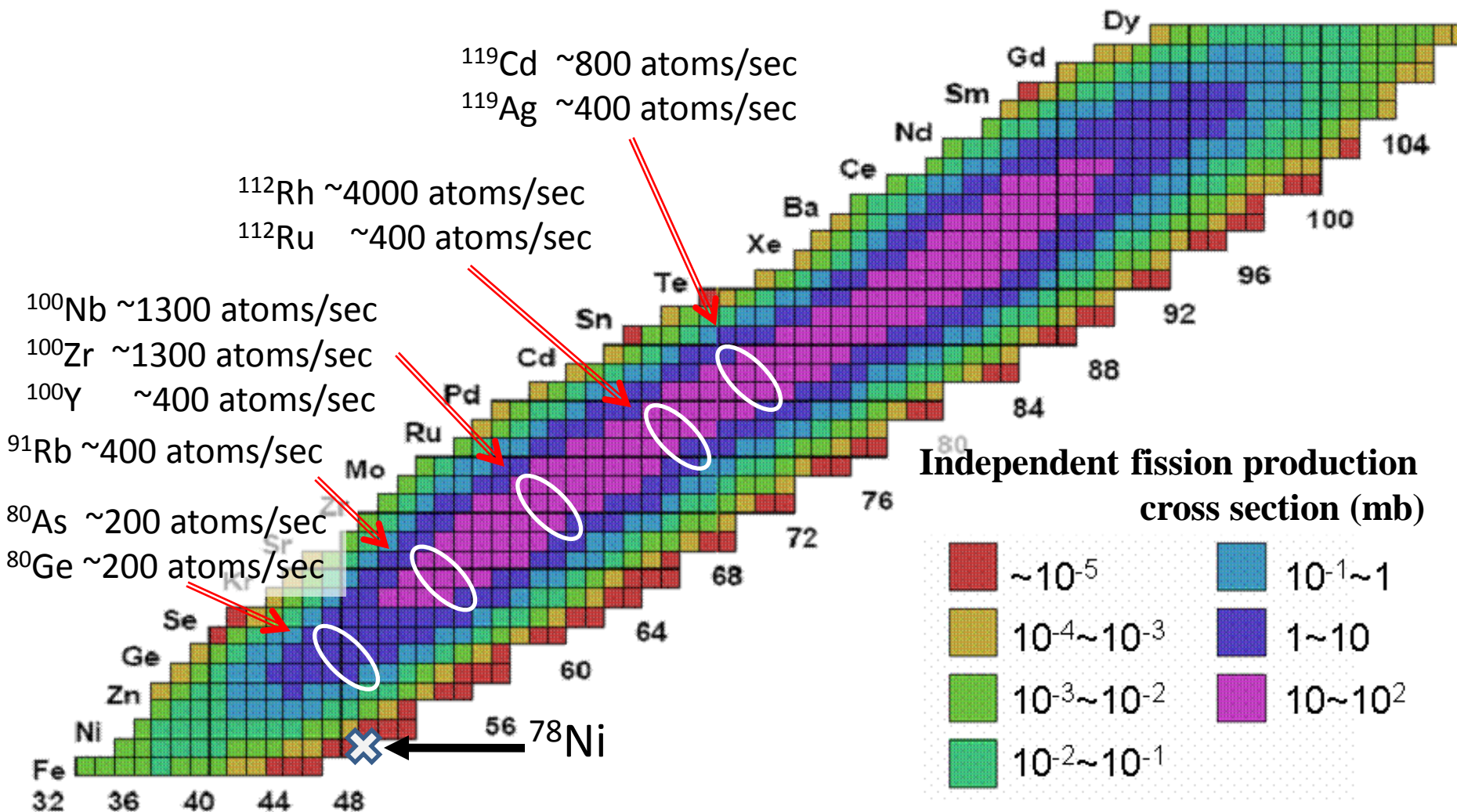
$$E_e = 150 \text{ MeV}, I_e = 11 \mu\text{A}$$

$\rightarrow 2 \times 10^{11}$  fission/sec  
 $^{132}\text{Sn} = 2 \times 10^9$  atom/sec  
 $\Rightarrow 2 \times 10^7$  atoms/sec  
 ( extraction efficiency  $\sim 1\%$  )

from eRIBs'07 Workshop Reported by Jim Beene



# Production yields at TOHOKU RF-IGISOL (proton intensity = 1 $\mu\text{A}$ ) May, 2007



- Tohoku AVF cyclotron (K=110) を利用して、低速中性子過剰核ビームが得られるのでぜひぜひ実験に来てください。
- SCRIT ISOLも数年後には完成しますので、ご期待下さい。