

東北大CYRIC-RFIGISOLの現状

宮下裕次、長野哲也、大熊三晴、佐藤望、鈴木智和、
立岡未来、鶴養美冬、涌井崇史、山下航、山崎明義、篠塚勉

東北大CYRIC、東北大理

↑ 東北大学CYRIC 930型AVFサイクロトロン K=110

● 東北大CYRIC – “RFIGISOL”

RFIGISOLを理解するための実験

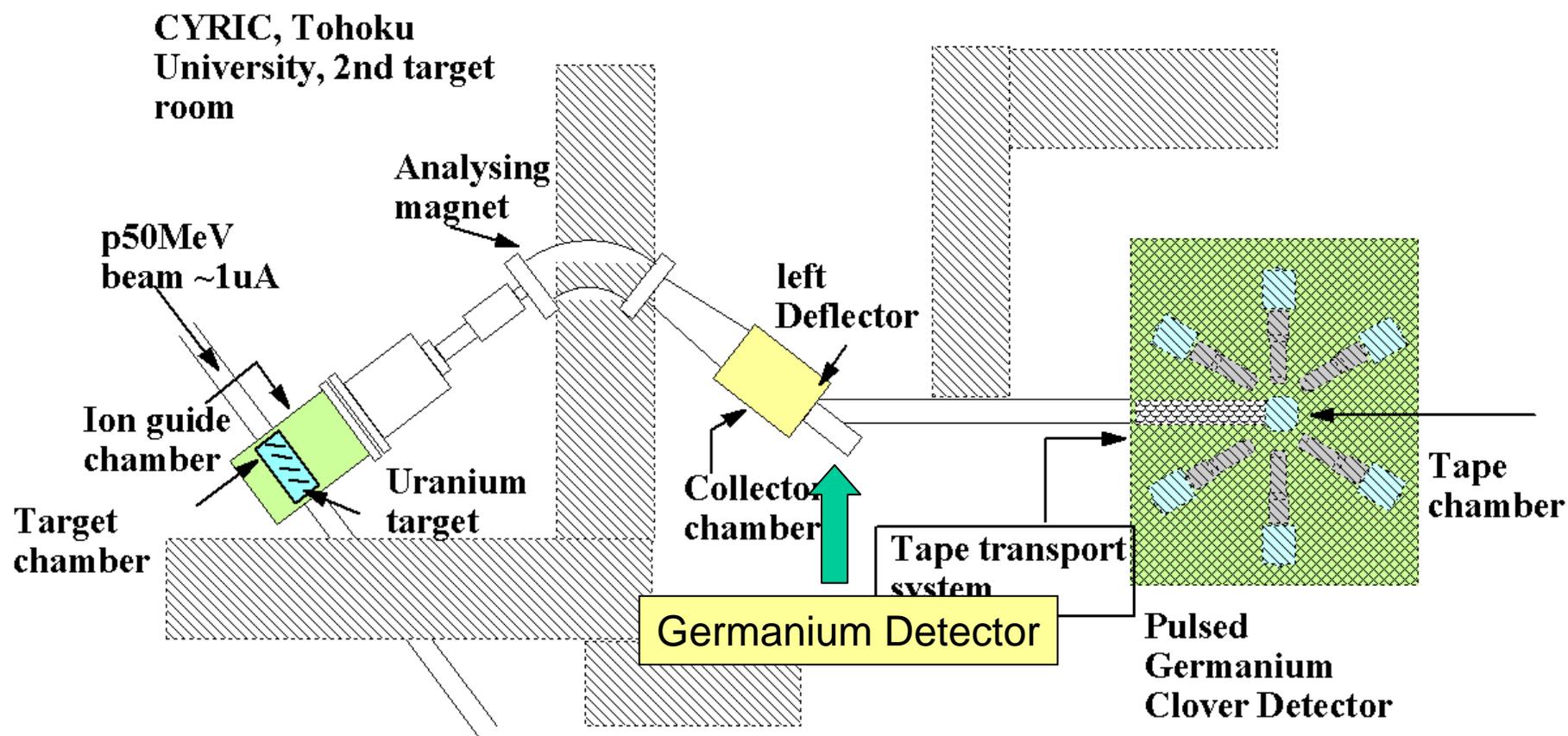
- RF – IGISOL / RF – CARPET
- バッファーガスに含まれる不純物ガスの影響

現状

- $^{238}\text{U}(p,f)$ 反応を用いた、中性子過剰核の輸送について

CYRIC-RFIGISOL; Radio Frequency Ion Guide ISOL

- ・東北大学サイクロロン・ラジオアイソトープセンター 第2TR - 31コース
- ・930型AVFサイクロロン (K=110MeV)
- ・RFイオンガイド法 + ISOL法 ⇒ 短寿命中性子過剰核を引き出し・輸送

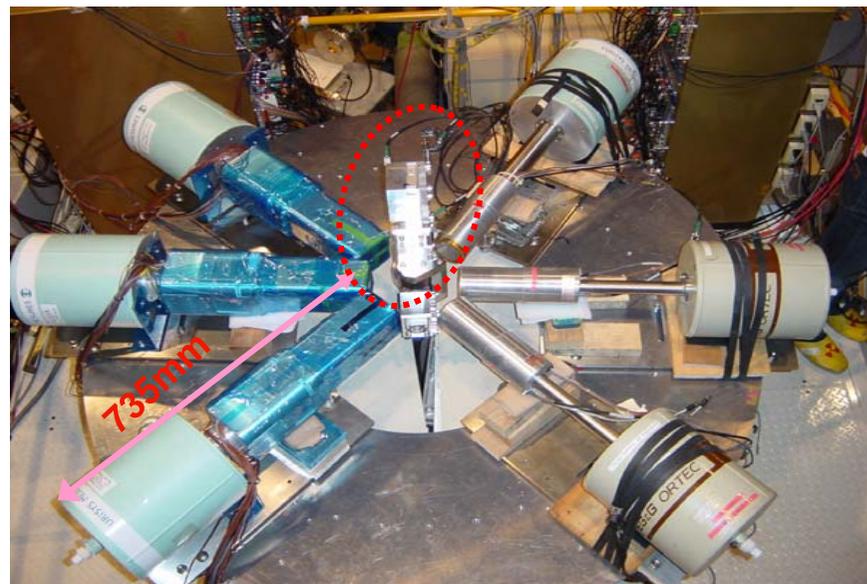


高速テープ輸送装置と 摂動角相関測定装置

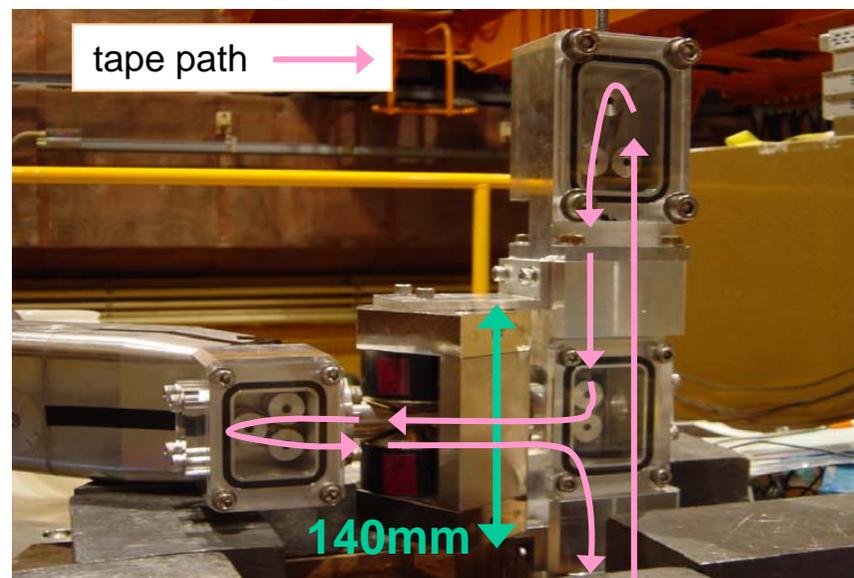
線源-clover ゲルマニウム検出器の距離16cm
x 6 efficiency = 1.42 % (@1MeV)
角度分解能18.1度
PAC用磁場強度:1.2T
Tape装置:上方へ220cmの距離を3秒で輸送



Tape transfer system



The detector system for PAC measurement system,
Using 3-clover Ge detectors and 3 single Ge detectors.



The permanent magnet with 1.2T of Nd magnet is installed
at the source position for the PAC measurement system.

● β 崩壊の安定曲線から遠く離れた、中性子過剰核の研究。

⇒質量、半減期、 Q_β 、スピン、核g因子...の測定。

⇒摂動角相関法を用いた、核g因子の測定。

⇒TIPAC, TDPAC法を用いた中性子過剰核の

低励起アイソマー準位 ($T_{1/2}=0.1\text{ns}\sim 0.1\mu\text{s}$) の核g因子の測定。

107Te	108Te	109Te	110Te	111Te	112Te	113Te	114Te	115Te	116Te	117Te	118Te	119Te	120Te	121Te	122Te	123Te	124Te	125Te	126Te	127Te
106Sb	107Sb	108Sb	109Sb	110Sb	111Sb	112Sb	113Sb	114Sb	115Sb	116Sb	117Sb	118Sb	119Sb	120Sb	121Sb	122Sb	123Sb	124Sb	125Sb	126Sb
105Sn	106Sn	107Sn	108Sn	109Sn	110Sn	111Sn	112Sn	113Sn	114Sn	115Sn	116Sn	117Sn	118Sn	119Sn	120Sn	121Sn	122Sn	123Sn	124Sn	125Sn
104In	105In	106In	107In	108In	109In	110In	111In	112In	113In	114In	115In	116In	117In	118In	119In	120In	121In	122In	123In	124In
103Cd	104Cd	105Cd	106Cd	107Cd	108Cd	109Cd	110Cd	111Cd	112Cd	113Cd	114Cd	115Cd	116Cd	117Cd	118Cd	119Cd	120Cd	121Cd	122Cd	123Cd
102Ag	103Ag	104Ag	105Ag	106Ag	107Ag	108Ag	109Ag	110Ag	111Ag	112Ag	113Ag	114Ag	115Ag	116Ag	117Ag	118Ag	119Ag	120Ag	121Ag	122Ag
101Pd	102Pd	103Pd	104Pd	105Pd	106Pd	107Pd	108Pd	109Pd	110Pd	111Pd	112Pd	113Pd	114Pd	115Pd	116Pd	117Pd	118Pd	119Pd	120Pd	121Pd
100Rh	101Rh	102Rh	103Rh	104Rh	105Rh	106Rh	107Rh	108Rh	109Rh	110Rh	111Rh	112Rh	113Rh	114Rh	115Rh	116Rh	117Rh	118Rh	119Rh	120Rh
99Ru	100Ru	101Ru	102Ru	103Ru	104Ru	105Ru	106Ru	107Ru	108Ru	109Ru	110Ru	111Ru								
98Tc	99Tc	100Tc	101Tc	102Tc	103Tc	104Tc	105Tc	106Tc	107Tc	108Tc	109Tc	110Tc								
97Mo	98Mo	99Mo	100Mo	101Mo	102Mo	103Mo	104Mo	105Mo	106Mo	107Mo	108Mo	109Mo								
96Nb	97Nb	98Nb	99Nb	100Nb	101Nb	102Nb	103Nb	104Nb	105Nb	106Nb	107Nb	108Nb	109Nb	110Nb						
95Zr	96Zr	97Zr	98Zr	99Zr	100Zr	101Zr	102Zr	103Zr	104Zr	105Zr	106Zr	107Zr	108Zr							
94Y	95Y	96Y	97Y	98Y	99Y	100Y	101Y	102Y	103Y	104Y	105Y	106Y								

←Z=50

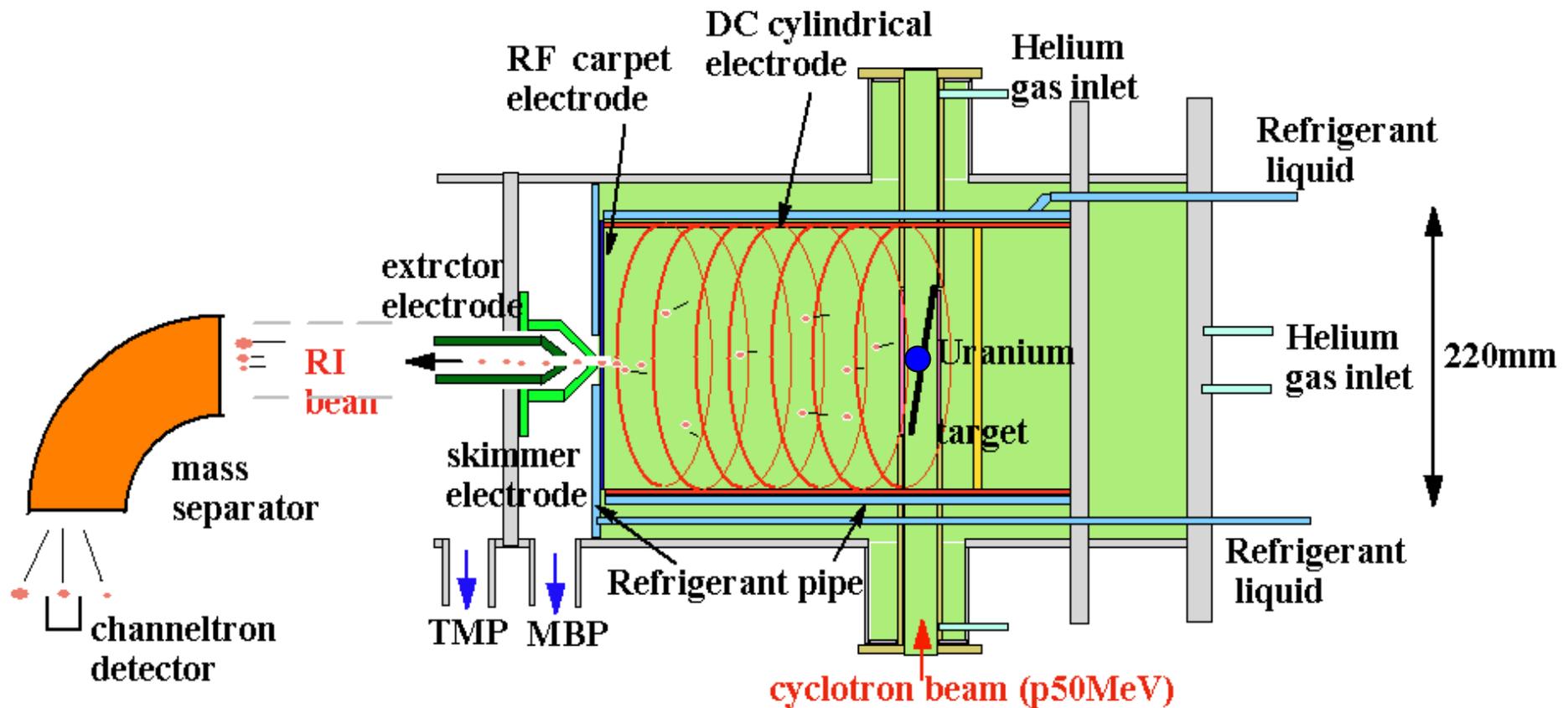
the nuclear g-factor measurement for the low lying isomeric states (half life has 0.1 ns ~ 0.1 μ s) of short-lived isotopes

- : nuclear g-factor has not been measured
- : nuclear g-factor has been measured
- : stable nuclide

しかし、未だ中性子過剰核の角相関をするには“輸送収量”が足りない。 ⇒ IGISOLの改良

CYRIC-RFIGISOL; Radio Frequency Ion Guide ISOL

- ^{238}U (p,fission) reaction at $E_p = 50 \text{ MeV}$, $I_p \sim 1 \mu\text{A}$,天然ウラン($20\text{mg}/\text{cm}^2$)
- イオンガイド法 + DC電場 + RF電場による輸送
- 静止容量の大きい大容量ガスセル($\sim 10000\text{cm}^3$)



- 東北大CYRIC – “RFIGISOL”

RFIGISOLを理解するための実験

- “RF – IGISOL / RF – CARPET”
- バッファーガスに含まれる不純物ガスの影響

現状

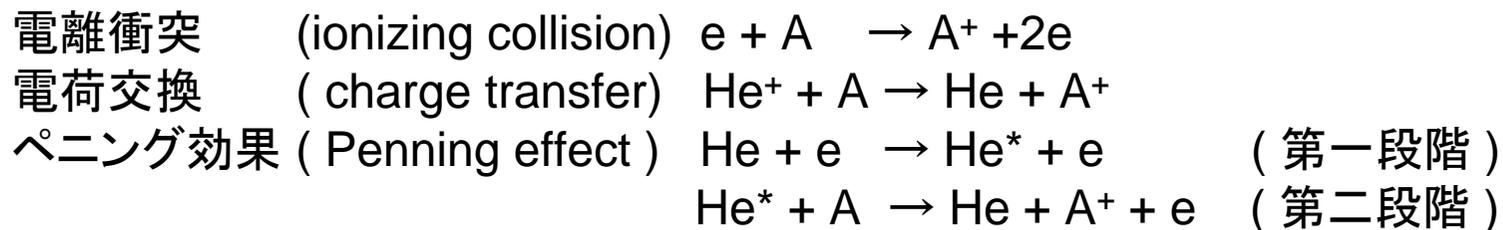
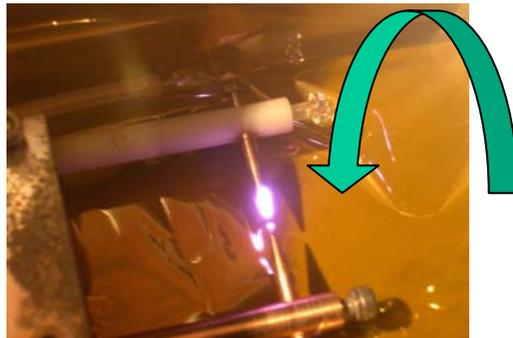
- $^{238}\text{U}(p,f)$ 反応を用いた、中性子過剰核の輸送について

放電型イオン源を用いた、RFIGISOLの性能評価

・放電型イオン源を用いてイオン化した、質量数の軽いイオン(質量数12などのイオン)を、RFIGISOLにて輸送し、直接イオンをピコアンメータを用いて測定を行いRFIGISOLの性能評価実験や電場パラメータの最適化実験を行った。

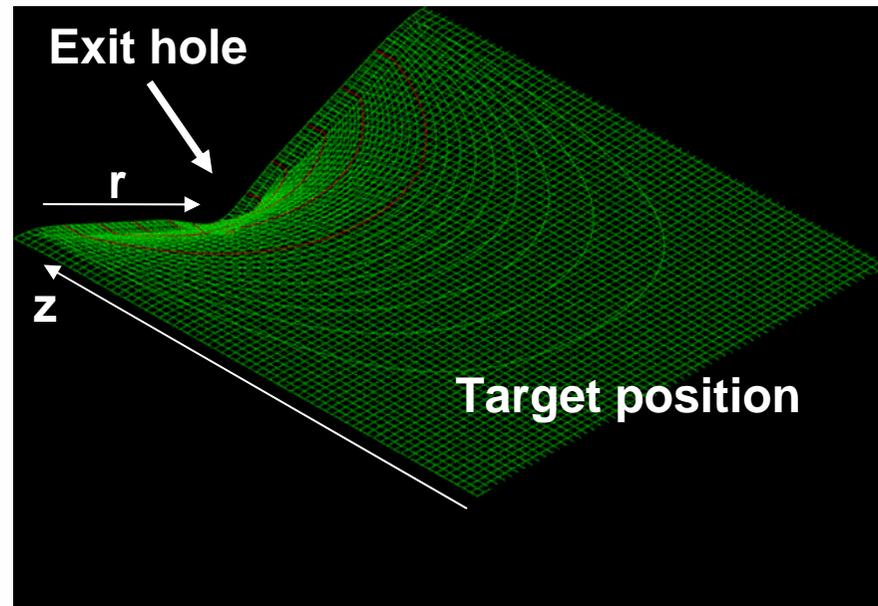
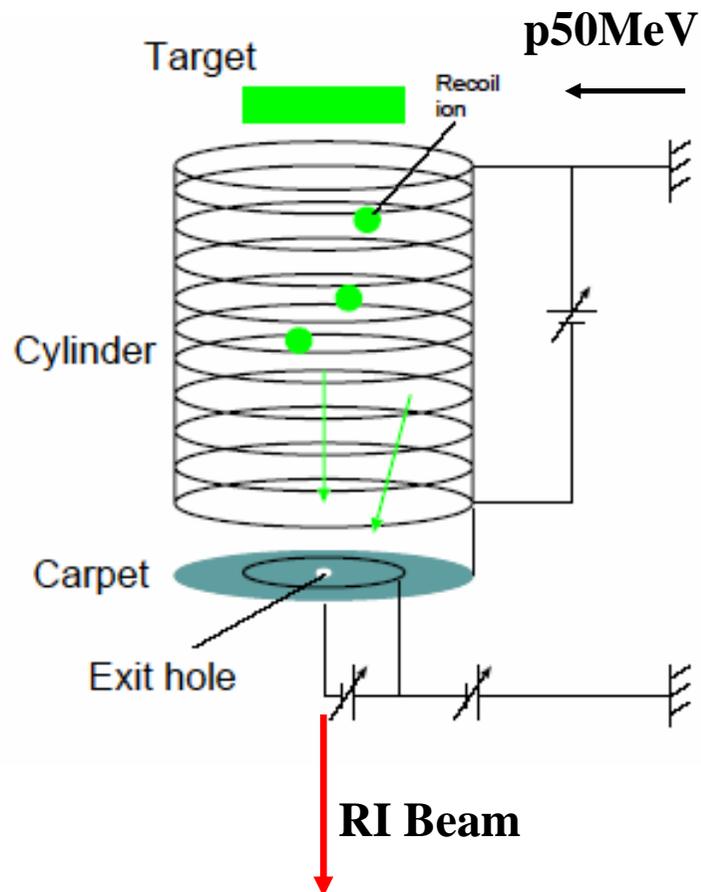
利点: 生成されるイオン数が多く、直接イオン測定が出来る。
: イオンが生成される位置を決める事が出来る。
: イオンの発生を制御出来る。

欠点: 放電のための電圧(spark voltage)がRFIGISOLがつくる電場に影響を与える。



イオンガイドガスセル内の電場構造

RFIGISOL内の r 方向に電位を与えるカーペット電圧と、 z 軸方向に電位を与えるシリンダー電圧と引き出されるイオン電流の関係、及びRFカーペットに印加するRFの有無により関係に与える影響を測定する。

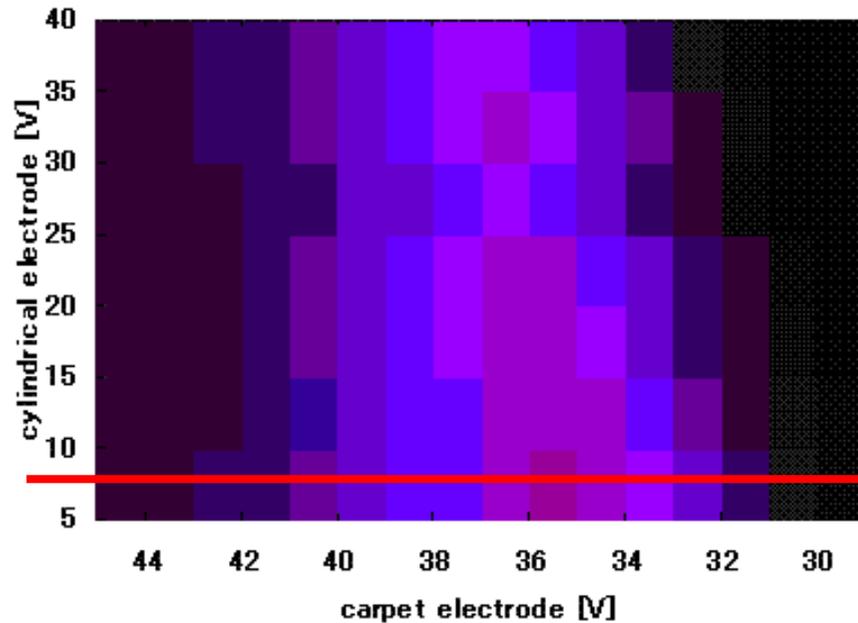


■ カーペット電圧-70V、シリンダー電圧0V

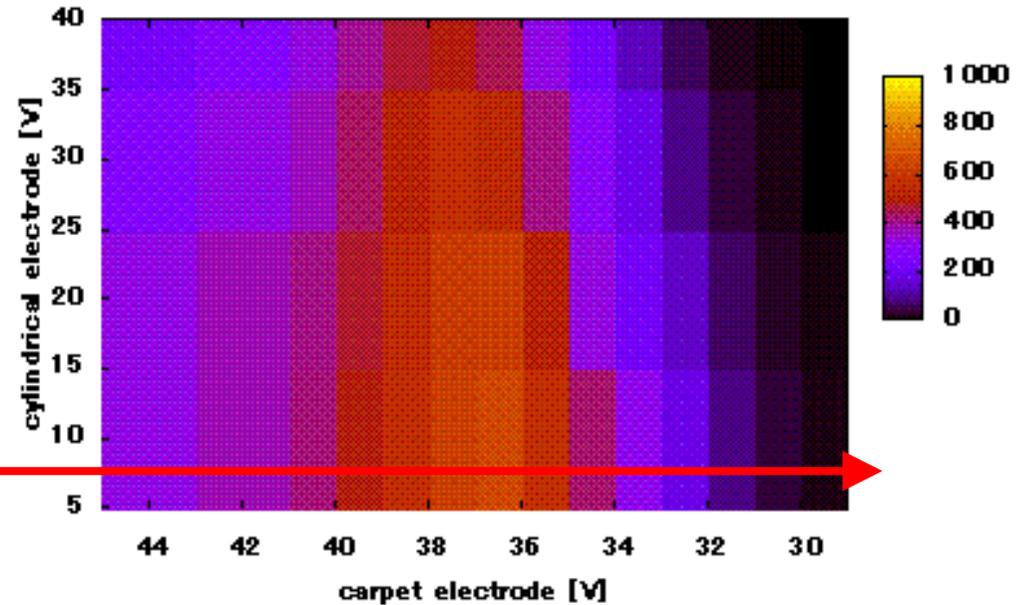
イオンガイドガスセル内の電場依存性

RFIGISOL内の r 方向に電位を与えるカーペット電圧と、 z 軸方向に電位を与えるシリンダー電圧と引き出されるイオン電流の関係、及びRFカーペットに印加するRFの有無により関係に与える影響を測定する。

RF Voltage Off



RF Voltage On

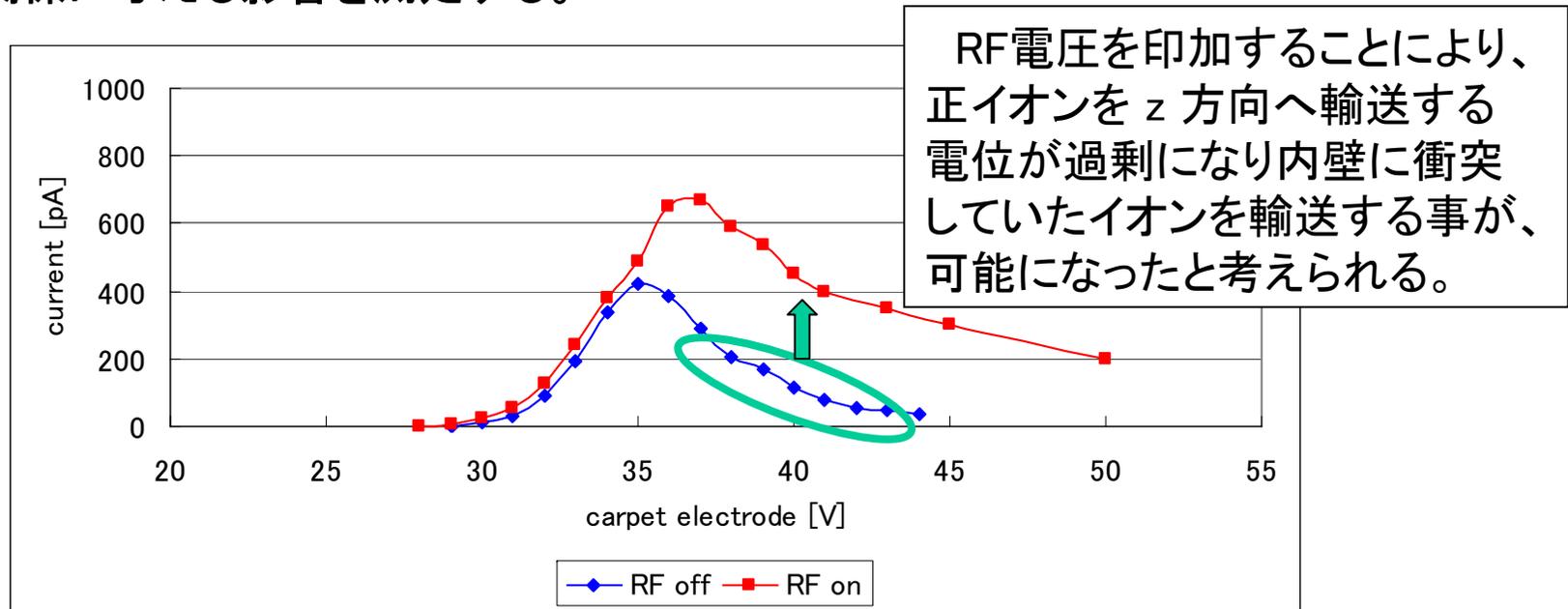


・引き出され、質量分離されたイオン電流値とカーペット電圧及び、シリンダー電圧との関係。左側がRFを印加しない時、右側がRF **3.65MHz 10W** を印加した時の関係である。

上の線のシリンダー電圧にて横軸をカーペット電圧、縦軸を引き出されるイオン電流値でグラフをプロットする。

RFカーペットに印加するRFの影響

特に、RFISOL内の r 方向に電位をカーペット電圧と、 z 軸方向に電位を与えるシリンダー電圧と引き出されるイオン電流の関係、及びRFカーペットに印加するRFの有無により関係に与える影響を測定する。

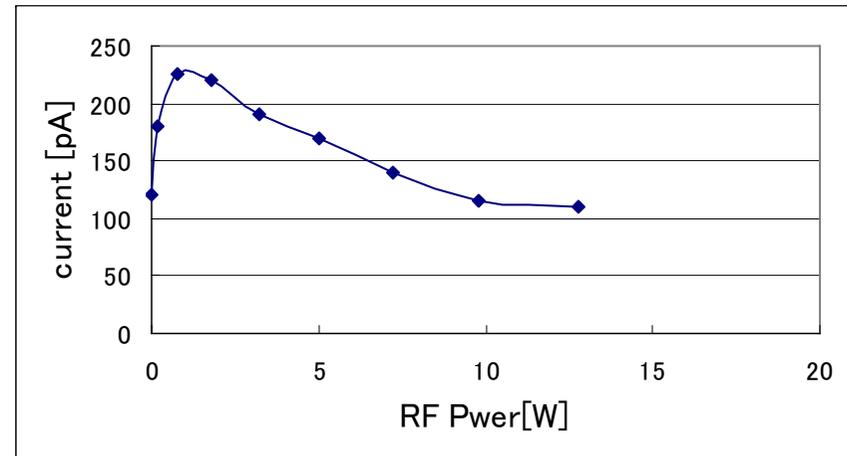


カーペット電圧に対して、引き出され質量分離されたイオン電流値をプロットする。カーペット電圧は、正イオンに対し r 方向に輸送するポテンシャルを作るだけでなく、 z 方向に輸送するポテンシャルをも作る。そのために、あるカーペット電圧を超えると引き出され質量分離されたイオン電流値は減少すると考えられる。

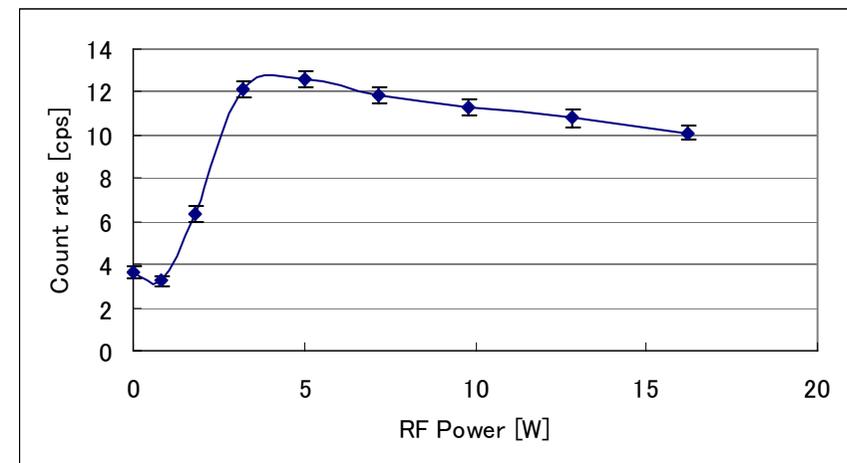
RFカーペットに印加するRFの電圧と収量の関係

イオンガイド内の電場を最適化した後に、RF Power の依存性を測定。

放電型イオン源を用いた実験
質量数:12(offline実験)



核分裂反応を用いた実験
質量数:112(online実験)



- 東北大CYRIC – “RFIGISOL”

RFIGISOLを理解するための実験

- RF – IGISOL / RF – CARPET

- バッファーガスに含まれる不純物ガスの影響

現状

- $^{238}\text{U}(p,f)$ 反応を用いた、中性子過剰核の輸送について

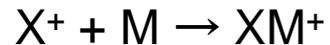
イオンガイドガスセル内のバッファーガスに含まれる不純物ガスの影響

大型のイオンガイド熱化ガスセル内では、核分裂反応による生成反跳核がヘリウムとの衝突による熱化、静止・輸送される過程においてヘリウムガス以外の不純物分子との分子化反応、中性化反応によりイオンの状態で引き出し不可能な状態になる。

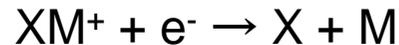
(1ppmの不純物でも~100%する。1ppb程度にする必要がある。*)

formation of molecular ions

* Sonoda T., Doctoral Dissertation (2004) Tohoku University

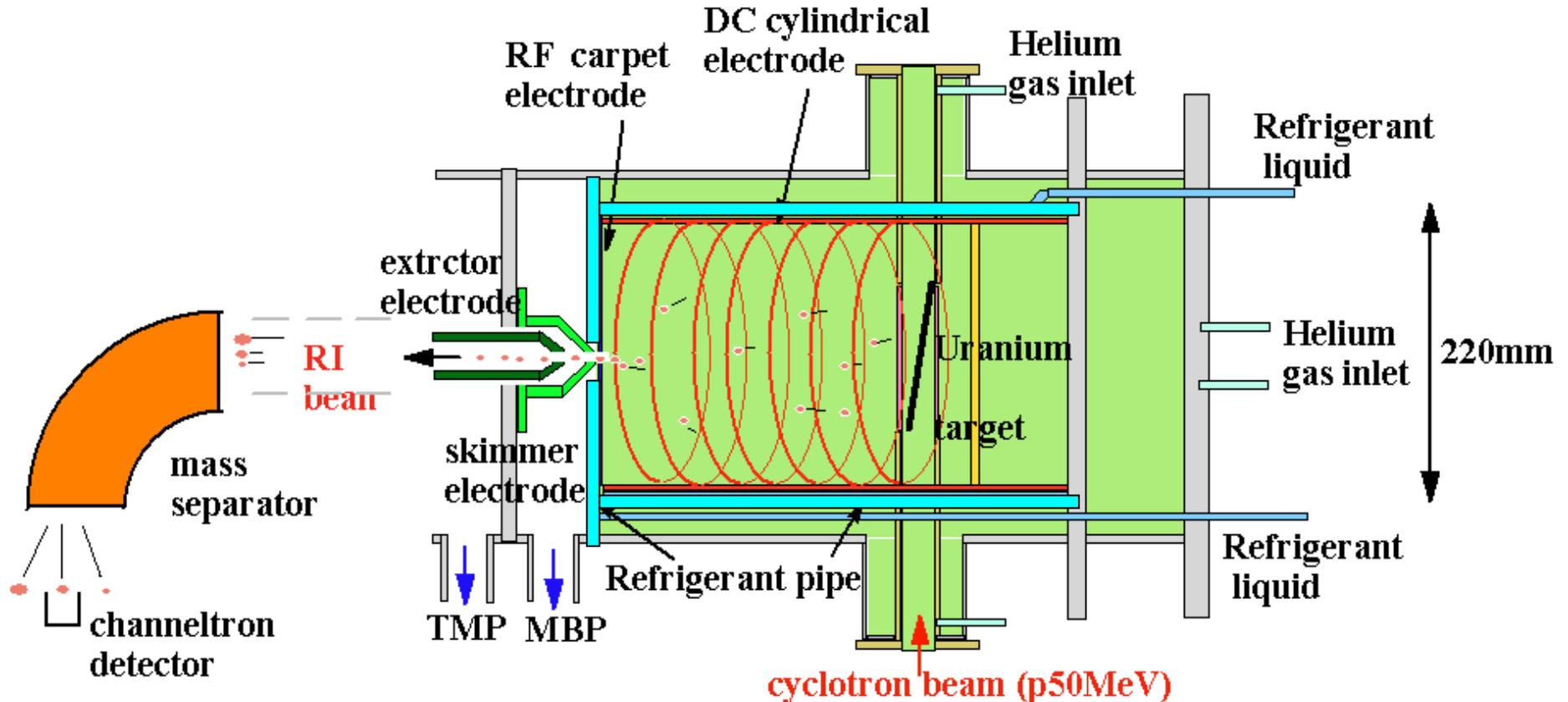


Dissociative neutralization of molecular ions



物理吸着過程を用いた不純物分子の削減の効果を狙い、熱化ガスセルの冷却を試みる。

熱化ガスセルの冷却



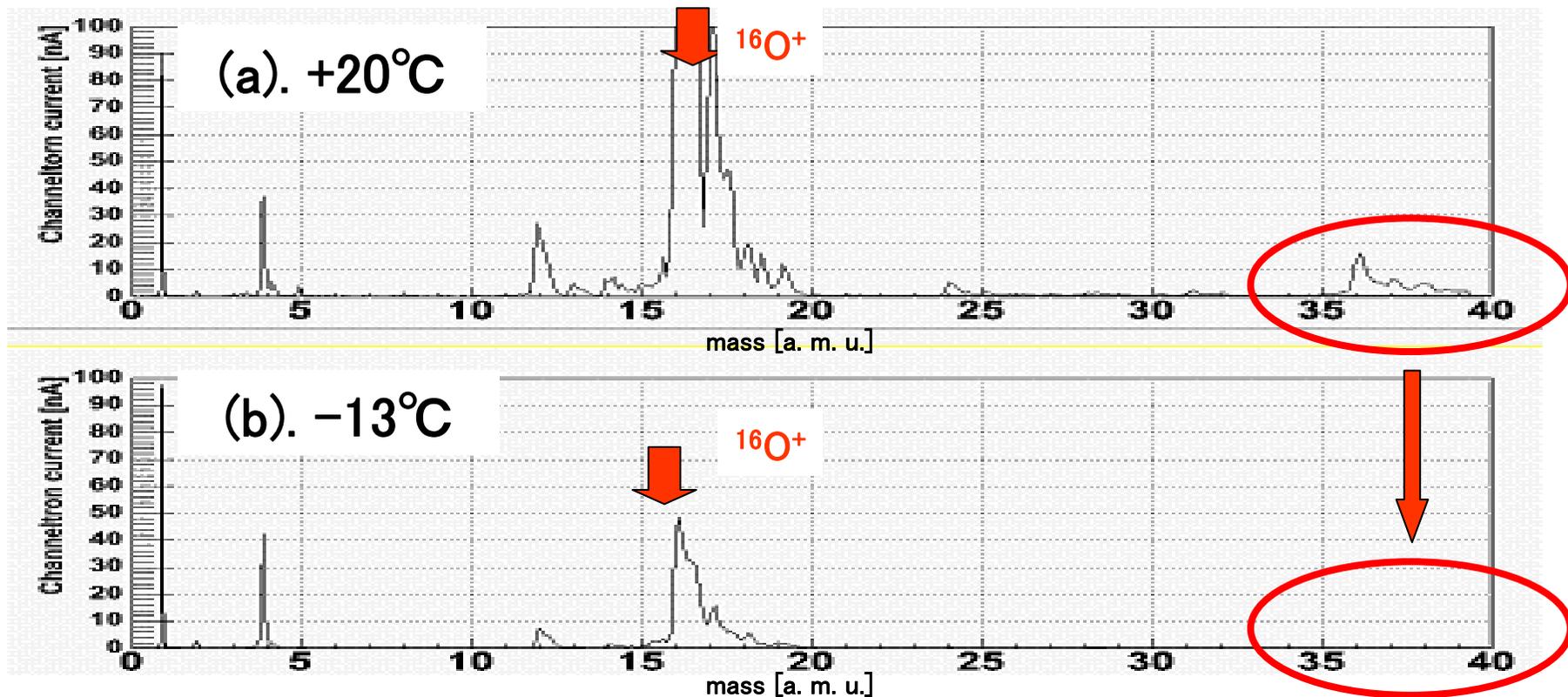
- ・恒温低温水槽と絶縁性フッ素系不活性液体フロリナート™FC77を用いて-20°Cまで冷却。
- ・物理吸着過程を用いた不純物分子の削減。

物理吸着における脱離速度の式

$$r_d = -\frac{d\sigma}{dt} = \nu_1 \sigma \exp(-E_d / RT)$$

r_d : 脱離速度、T: 温度
 σ : 吸着されている分子の表面濃度
 ν_1 : 頻度因子、 E_d : 脱離の活性化エネルギー

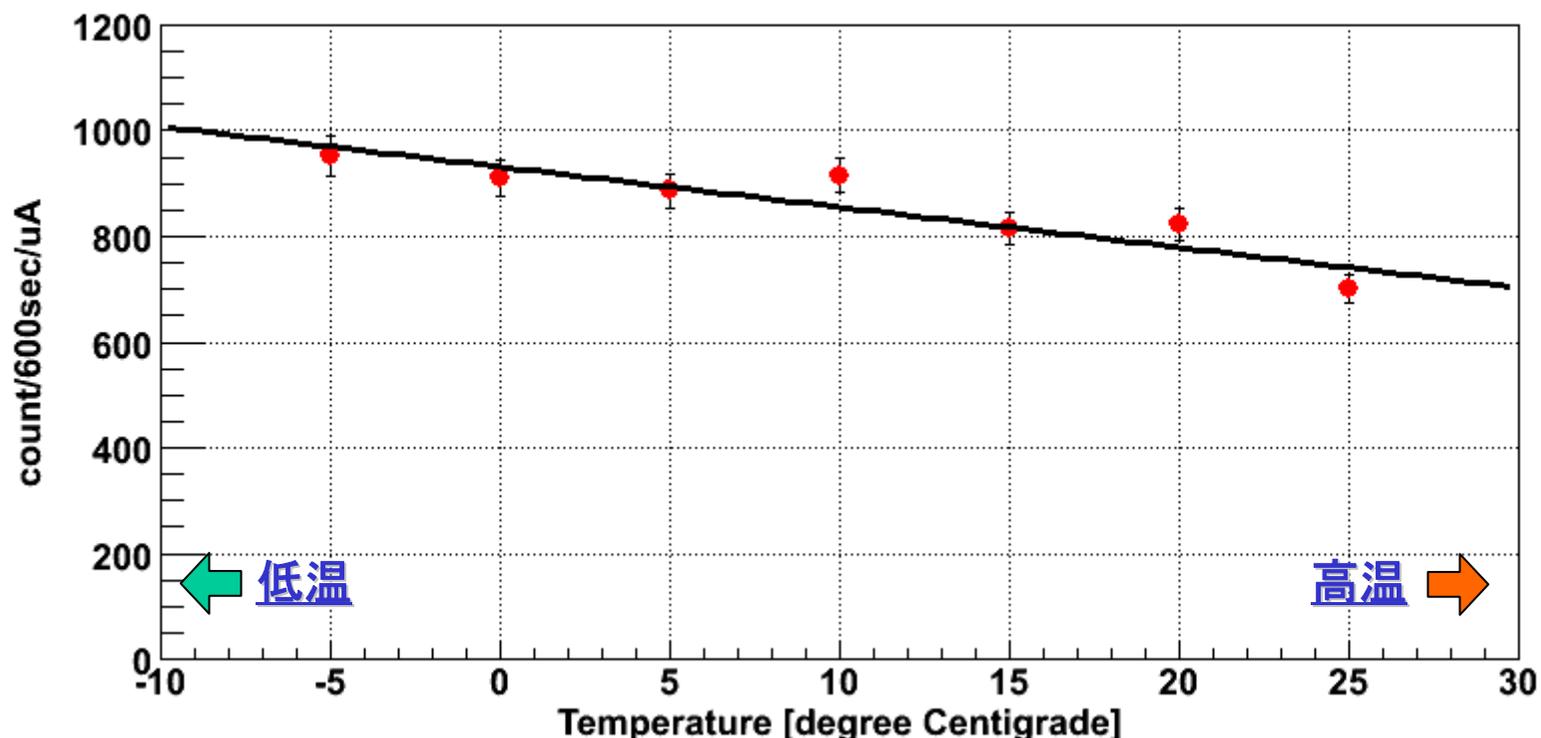
熱化ガスセルの温度とイオン引き出し収量について (バッファーガスに含まれる不純物をイオン化した結果)



Mass spectrum of impurity molecules. (extracted ion current as a function of mass number) Upward mass spectrum, temperature was 20 °C. Downward mass spectrum , temperature was -13°C.日本物理学会2006年春季大会 30aWF-4、N. Sato

単原子分子イオンや炭化水素イオンが大幅に減少。

熱化ガスセルの温度とイオン引き出し収量について (核分裂生成物 ^{112}Rh を輸送)



- ・ $^{238}\text{U}(p,\text{fission})$ reaction により生成された ^{112}Rh の輸送収量と熱化ガスセルの温度との関係
-10°C程度にまでガスセル冷却する事で、室温での収量に比べ30%の収量の増加が確認する事が出来る。

- 東北大CYRIC – “RFIGISOL”

RFIGISOLを理解するための実験

- RF – IGISOL / RF – CARPET
- バッファーガスに含まれる不純物ガスの影響

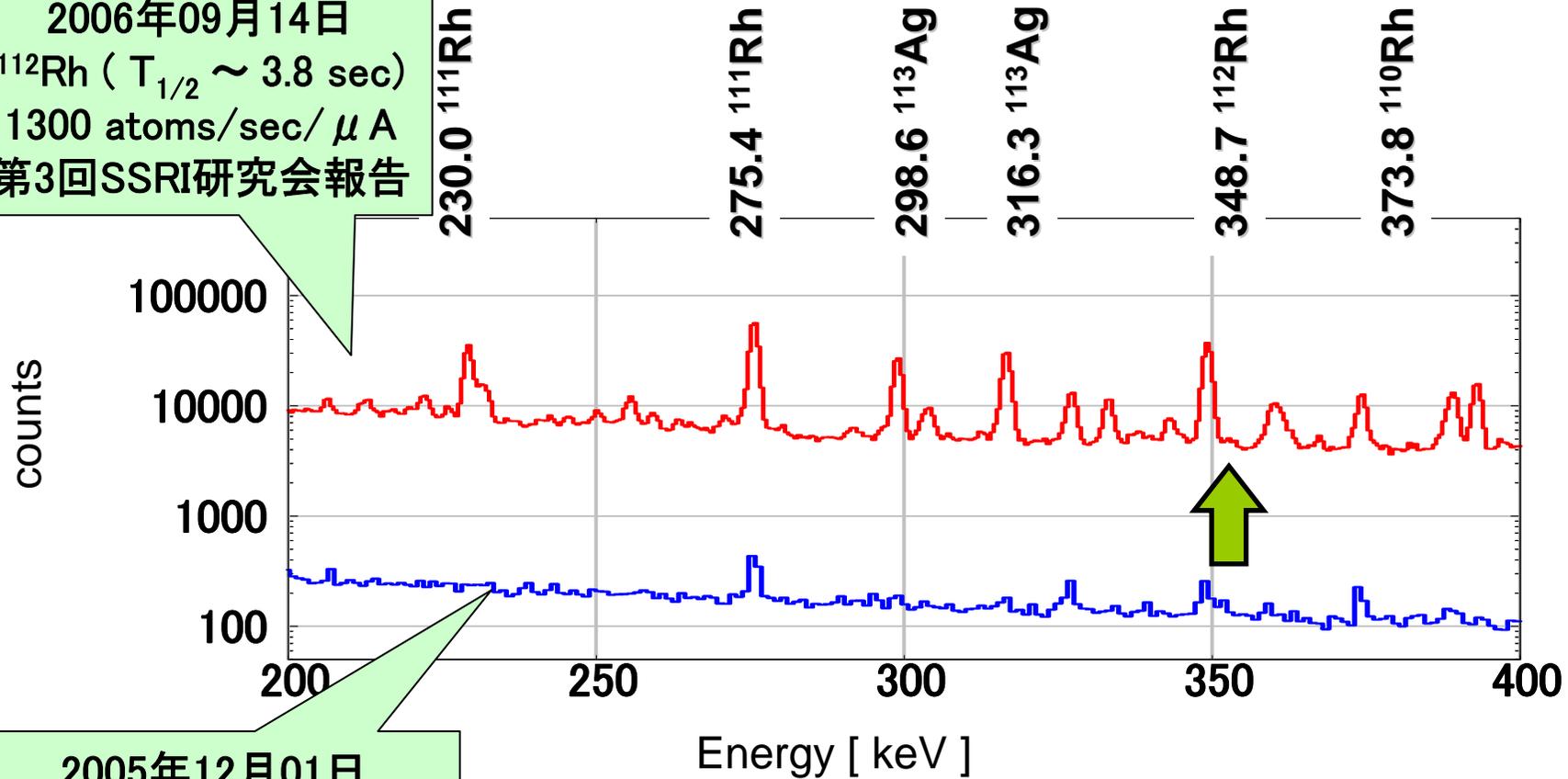
現状

- $^{238}\text{U}(p,f)$ 反応を用いた、中性子過剰核の輸送について

$^{238}\text{U}(p,f)$ 反応を用いた、中性子過剰核の生成・輸送について

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

2006年09月14日
 ^{112}Rh ($T_{1/2} \sim 3.8 \text{ sec}$)
 1300 atoms/sec/ μA
 第3回SSRI研究会報告



2005年12月01日
 ^{112}Rh ($T_{1/2} \sim 3.8 \text{ sec}$)
 7 atoms/sec/ μA
 第2回SSRI研究会報告

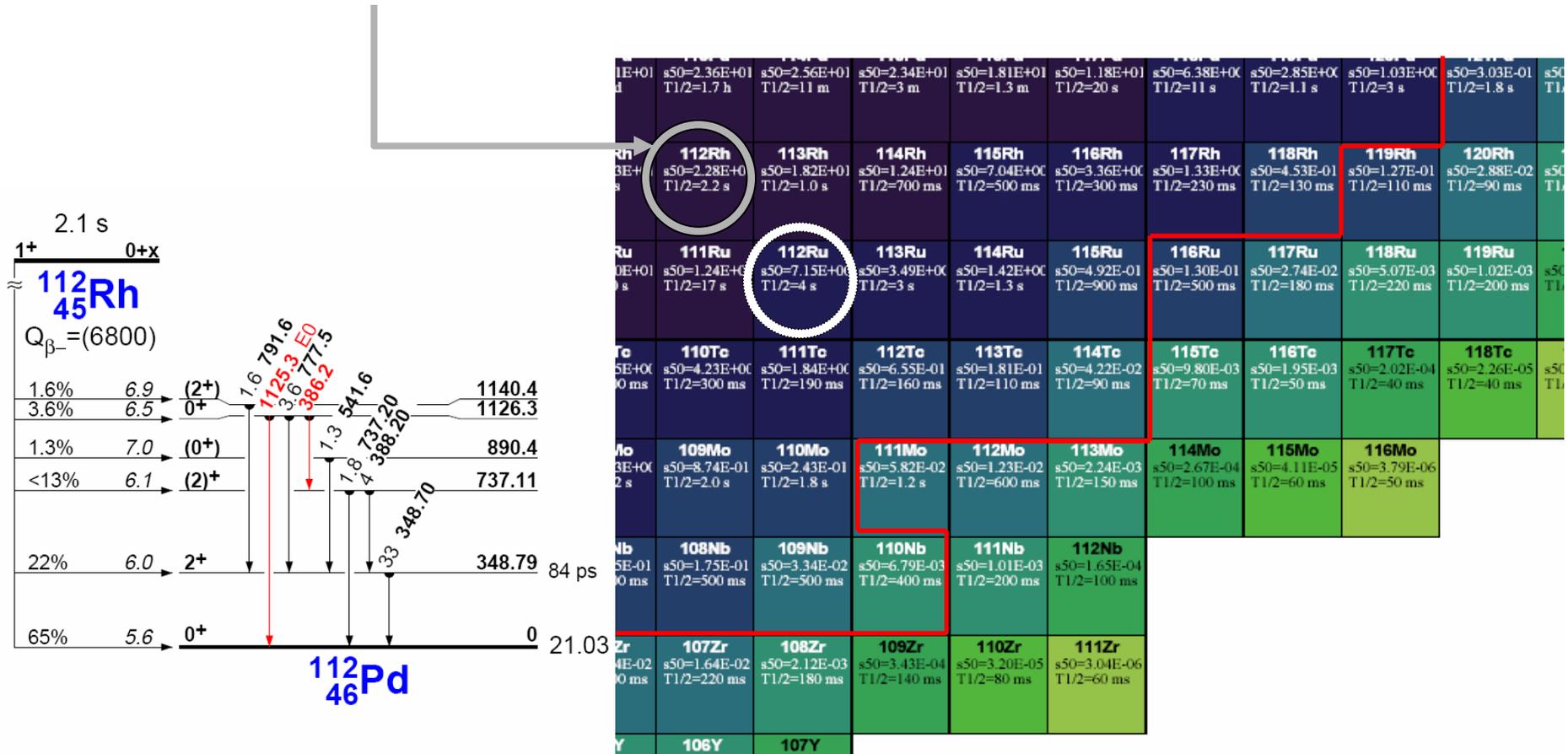
- 質量数112領域での γ 線スペクトル (7200sec)
- 質量分解能 ($M/\Delta M$) ~ 30

mass-separated yield (2006.9)

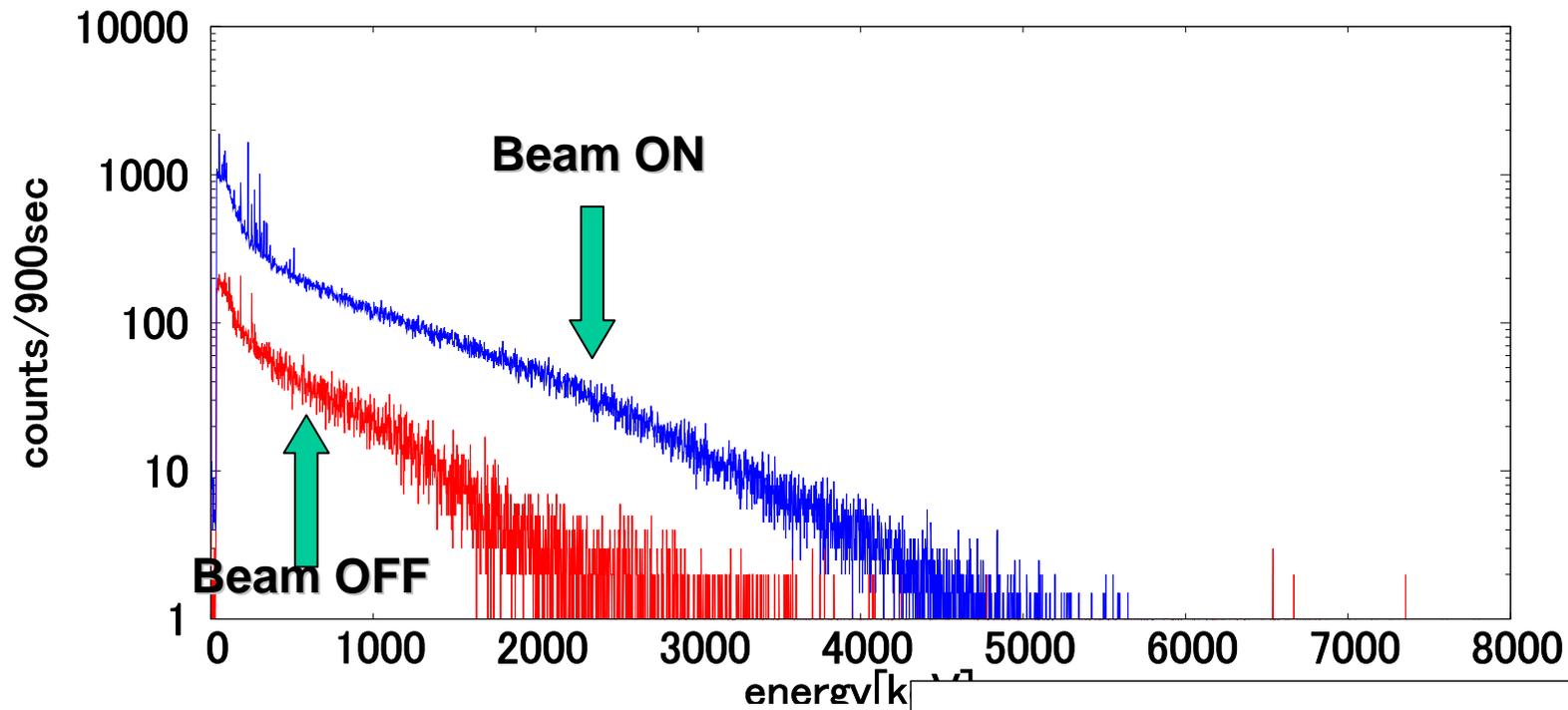
^{238}U (p,fission) reaction at $E_p = 50 \text{ MeV}$, $I \sim 1 \mu\text{A}$,天然ウラン($20\text{mg}/\text{cm}^2$)

^{112}Rh (6.8sec)、 ^{112}Ru (2.1sec): $\rightarrow \sim \underline{1300 \text{ atoms/sec}}$

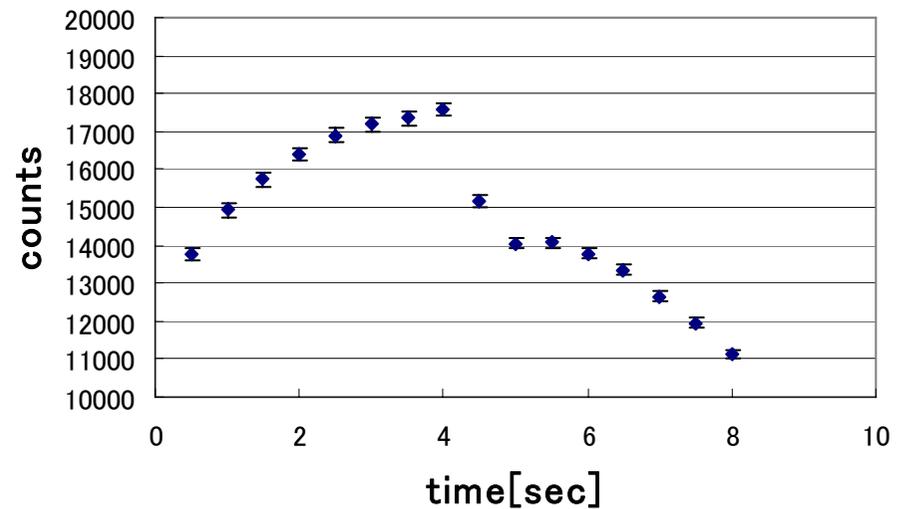
theoretical cross section $2.28\text{E}+01 \text{ mb}$



最近の測定結果



Leps を用いた β スペクトルと時間スペクトル



まとめ

・ 放電型イオン源を用いてイオン化した軽イオン(質量数12などのイオン)を、RFIGISOLにて輸送し、RFカーペットのRFバリイオン電流値の増加を確認した。

RFカーペットは効果がある。

・ 熱化ガスセルの温度を -10°C にまで冷却する事により、核分裂生成物の輸送収量の増加が測定された。質量の軽いイオンの減少したという結果(日本物理学会2006年春季大会 30aWF-4 N. Sato)と合わせると、冷却により物理吸着反応が進みバッファーガスのHeガスで

-20°C 程度の冷却でも収量の増加がある。

・ 放電型イオン源を用いたオフラインテスト等により、イオンガイド内の電場パラメータの最適化が進み、 ^{238}U を用いた核分裂反応においても質量分離された短寿命中性子過剰核の輸送収量の大幅な増加が確認された。

\Rightarrow ^{112}Rh ($T_{1/2} \sim 3.8 \text{ sec}$) : $\sim 1300 \text{ atoms/sec}/\mu\text{A}$

物量の測定が可能な収量