



# 反応断面積実験の概要

— RIKEN-RIPS, GSI-FRSからBigRIPSへ —

埼玉大理 山口貴之

「RIBF-Day1 実験を睨んだミニワークショップ」

Jan.13, 2006

# Contents

- 反応／相互作用断面積の定義、実験方法、これまでの測定
- 高エネルギーでの測定: GSI-FRSのセットアップ
  - LBL/GSIでこれまで測定された核半径
- GSIでの最近の実験 (S250: Krの核半径)
  - 検出器の開発 (TOFカウンター, TEGIC)
  - S250の予備的な結果
- 中間エネルギーでの測定: RIKENでの反応断面積測定
  - RIPSでのセットアップと検出器開発
  - 最新の実験 (R394n:  $^{22}\text{C}$ の核半径)
- BigRIPSでの反応断面積測定
  - セットアップ
  - LISEによる1st order simulation
- まとめ

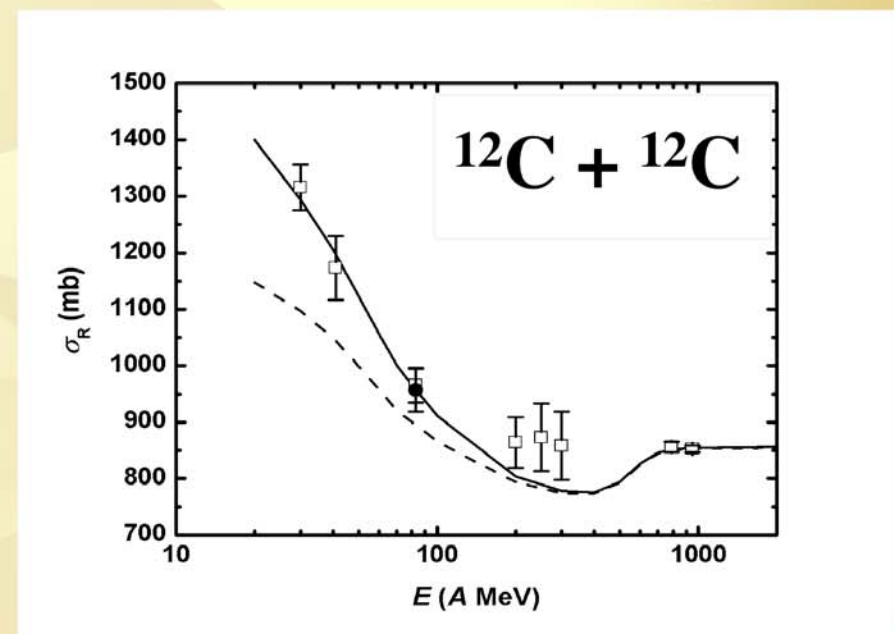
# 相互作用断面積と反応断面積 — 半径と密度分布を決定する —

- 相互作用断面積  $\sigma_I$

- 核種が変化する断面積
- 核半径 ( $R_p$ ) と関係づけられる (Glauber Model)
  - $\sigma_I = \pi[R_p + R_t]^2$

- 反応断面積  $\sigma_R$

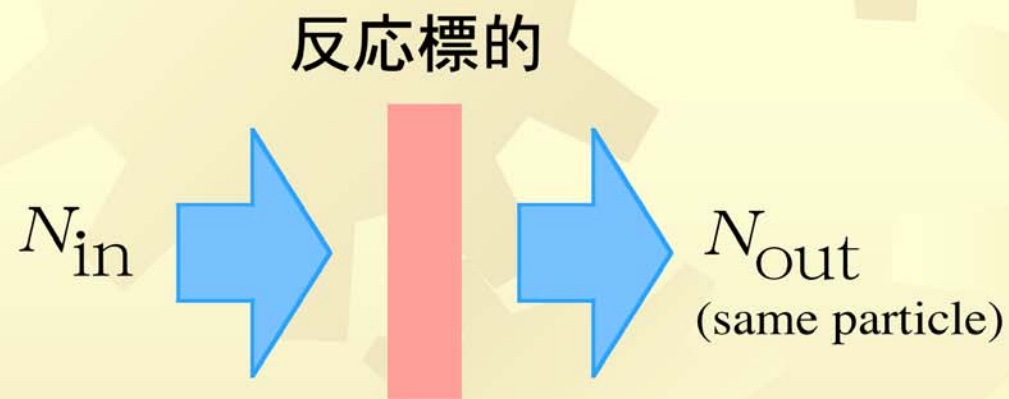
- 反応する全断面積  
(非弾性散乱を含む)
- 高エネルギーでは  
 $\sigma_I = \sigma_R$



## 測定原理

- Transmission法 (直接法)

反応標的に入射する粒子数 ( $N_{in}$ ) と出射する粒子数 ( $N_{out}$ ) の比を測定する



$$\sigma_R = \frac{1}{t} \ln \left( \frac{N_{in}}{N_{out}} \right)$$

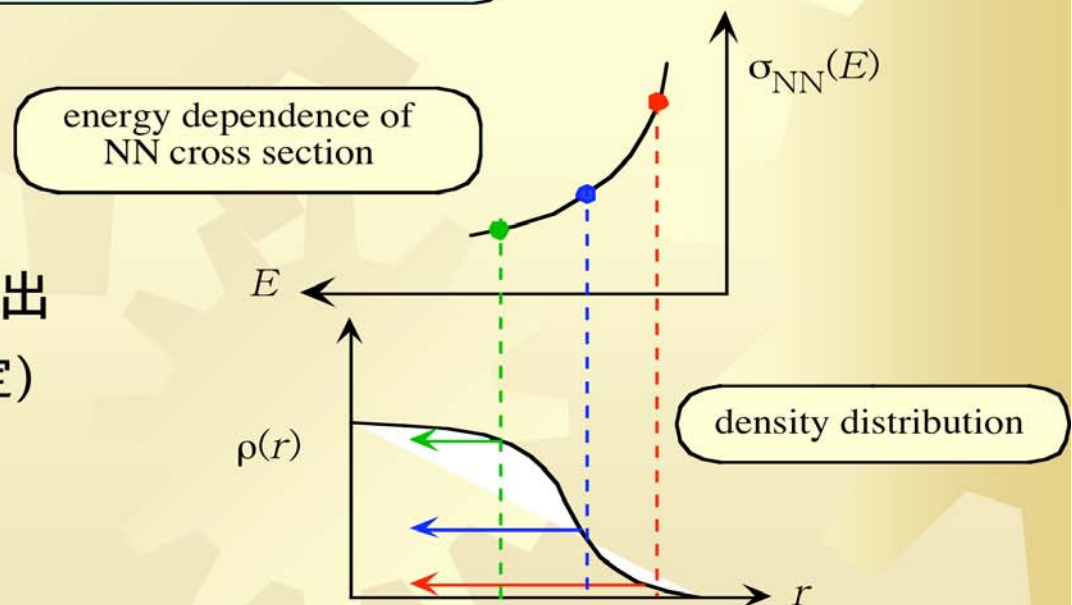
# Glauber Model

## — 核半径と密度分布の導出 —

- 高エネルギーでの核半径の導出に用いている optical limit

$$\sigma_R = \int (1 - T(b)) d^2b$$
$$T(b) = \exp\left[-\sigma_{NN} \int d^2s \rho_T^z(|\vec{b} - \vec{s}|) \rho_P^z(s)\right]$$

- エネルギー依存性を利用した密度分布の導出 (中間エネルギーでの測定)



# Transmission法による相互作用・反応断面積のこれまでの測定

- 相互作用断面積 ( $\sim 1 \text{ GeV/u}$ ) :
  - LBLでの中性子ハロー $^{11}\text{Li}$ の発見 (Tanihata)
  - GSI-FRSでの核半径の測定
    - Glauber Modelが成り立つ高エネルギーでの測定
    - $A < 40$ の核種はほぼすべて測定
      - Na同位体の中性子スキンの発見 (Suzuki)
      - $N=16$ 新魔法数 (Ozawa)
- 反応断面積 (数 $10 \text{ MeV/u}$ ) :
  - エネルギー依存性による密度分布の決定
    - $^{11}\text{Be}, \dots$ の密度分布 (Fukuda)
      - Glauber Modelに修正を加える → 課題

# 様々な測定方法

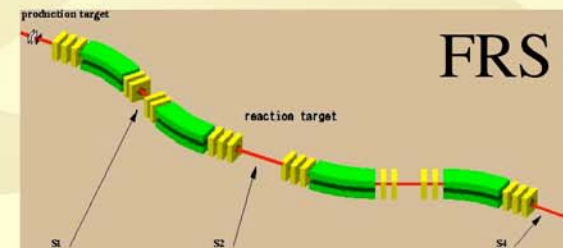
## — 反応標的の下流の粒子識別 —

- 分析磁石を用いた粒子識別 ( $B\rho$ - $\Delta E$ -TOF法)

- HISS (LBL)

- Fragment Separatorを用いた粒子識別 ( $B\rho$ - $\Delta E$ -TOF法)

- FRS (GSI) → BigRIPS



- Si telescope/stackによる粒子識別 ( $\Delta E$ -E法)

- RIKEN, MSU, GANIL, IMP, 他

### 最近の成果:

- 四重極磁石を用いたTOF法による粒子識別( $\Delta E$ -E-TOF法)

- RIKEN (RIPS-TQ/STQ):  $^{15-17}\text{C}$ ,  $^{17}\text{B}$ ,  $^{23}\text{Al}$ , ...

- 厚い減衰板を用いた ( $\Delta E$ -TOF法)

- HIMAC, RIKEN:  $^8\text{B}$ ,  $^{12}\text{C}$ , ...

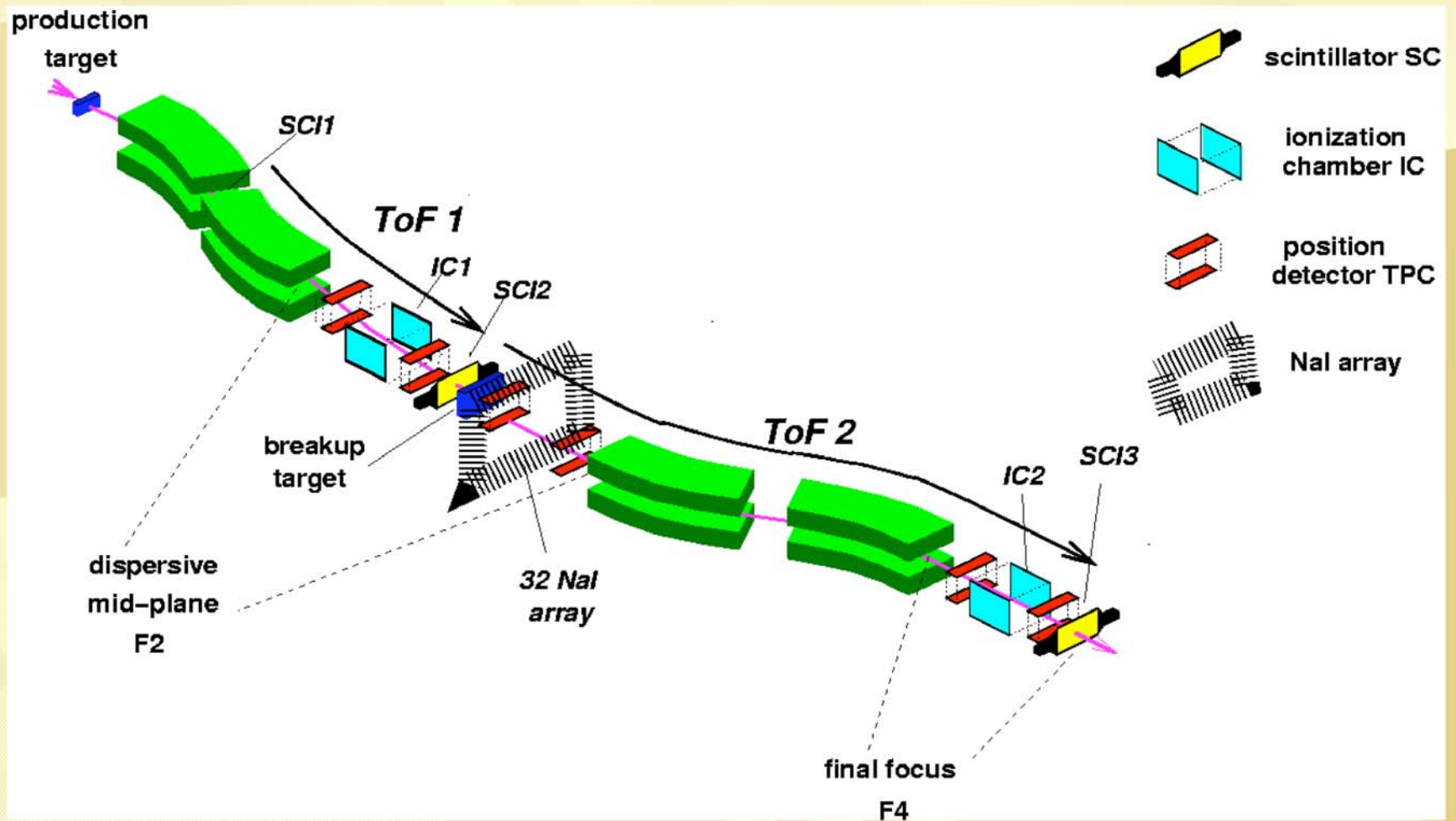


# GSI-FRSを用いた実験

相互作用断面積から核半径を決定する



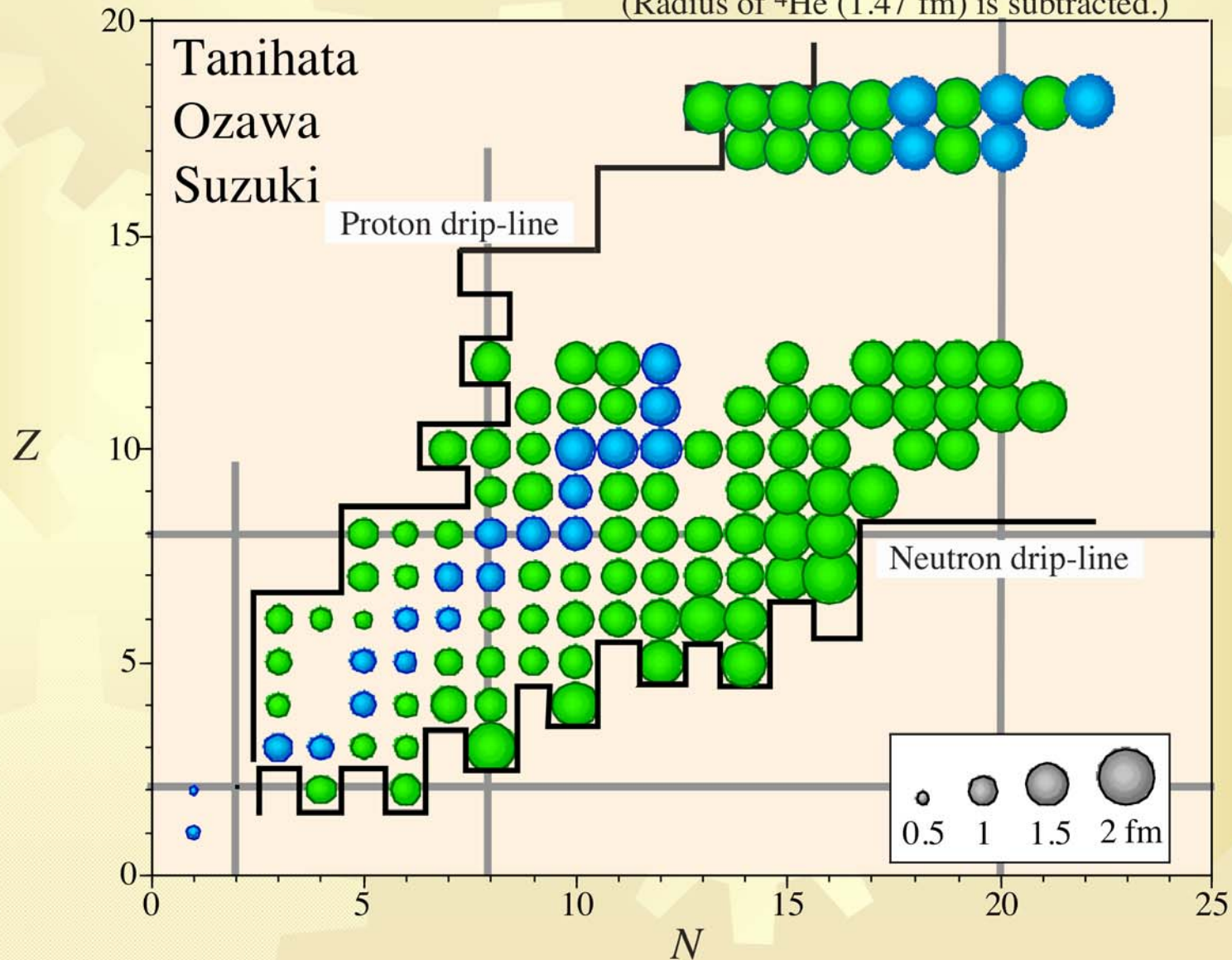
# GSI-FRSでの一般的なセットアップ



# これまで測定された核半径 (LBL/GSI)

Nuclear radii determined from  $\sigma_R$  at  $\sim 1$  A GeV

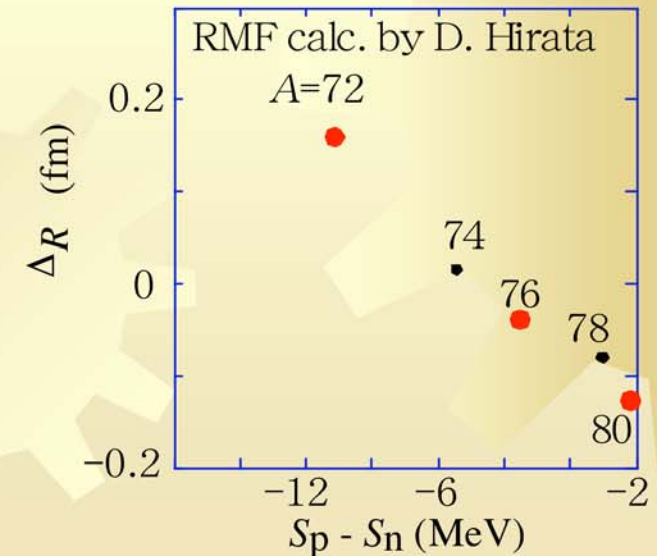
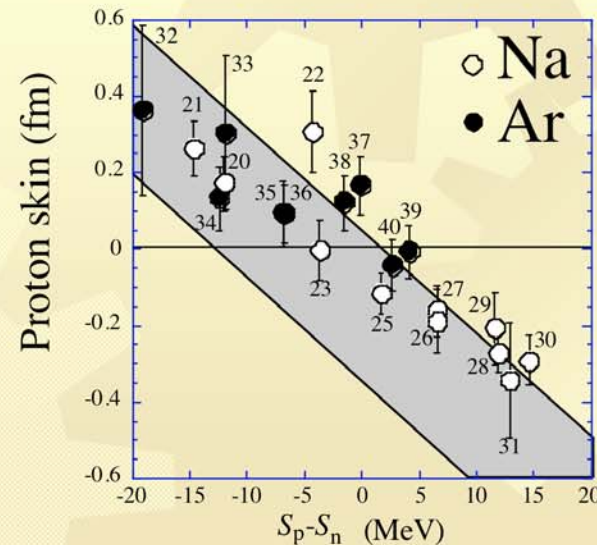
(Radius of  $^4\text{He}$  (1.47 fm) is subtracted.)



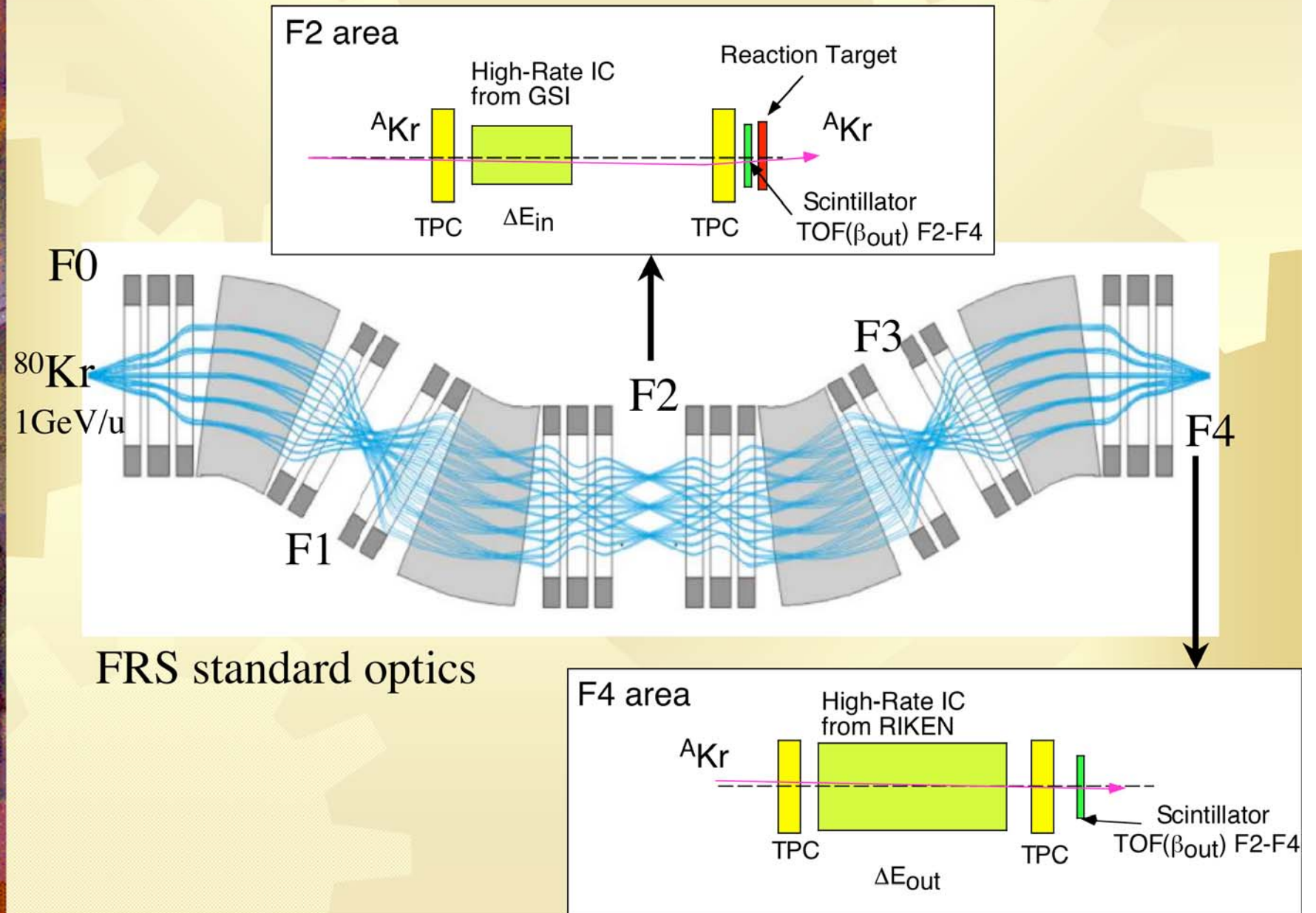
# GSIでの最近の実験 (S250)

## — これからの方向性 —

- 72-80Kr isotopeの核半径の測定
  - 中重核の核半径の系統的な研究
  - 陽子スキンの定量化
    - Isotope shiftから荷電半径が既知 (CERN-ISOLDE)
  - EOSの解明に向けて
    - スキンの厚さと $S_p - S_n$ の関係



# S250のセットアップ



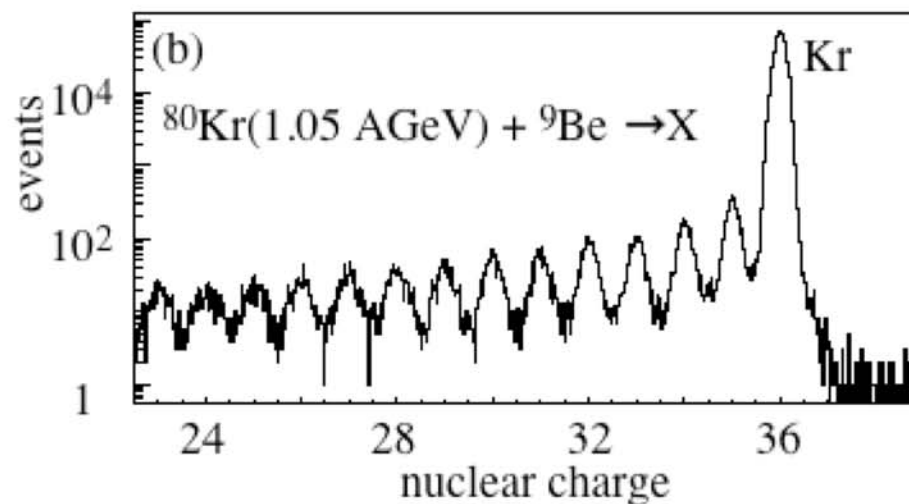
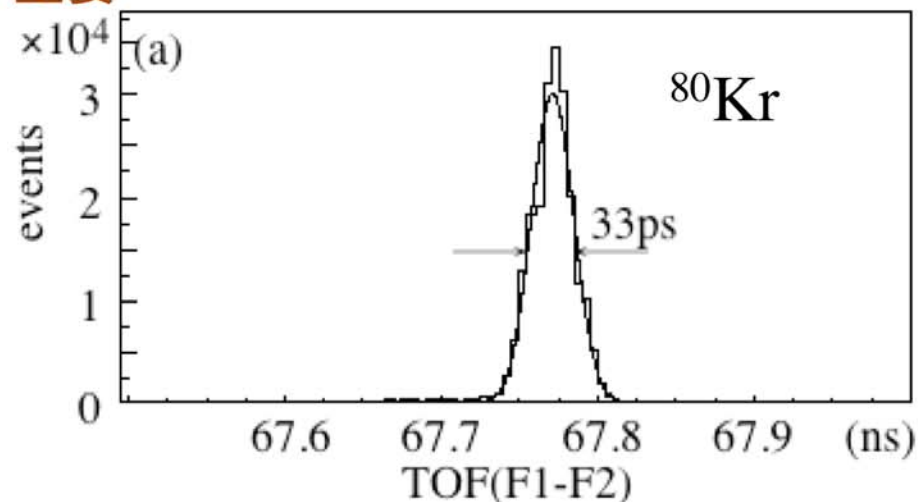
# 検出器の開発

断面積実験では粒子識別が重要

- TOF検出器
  - Ultrafast timing scintillation counter (Nishimura)

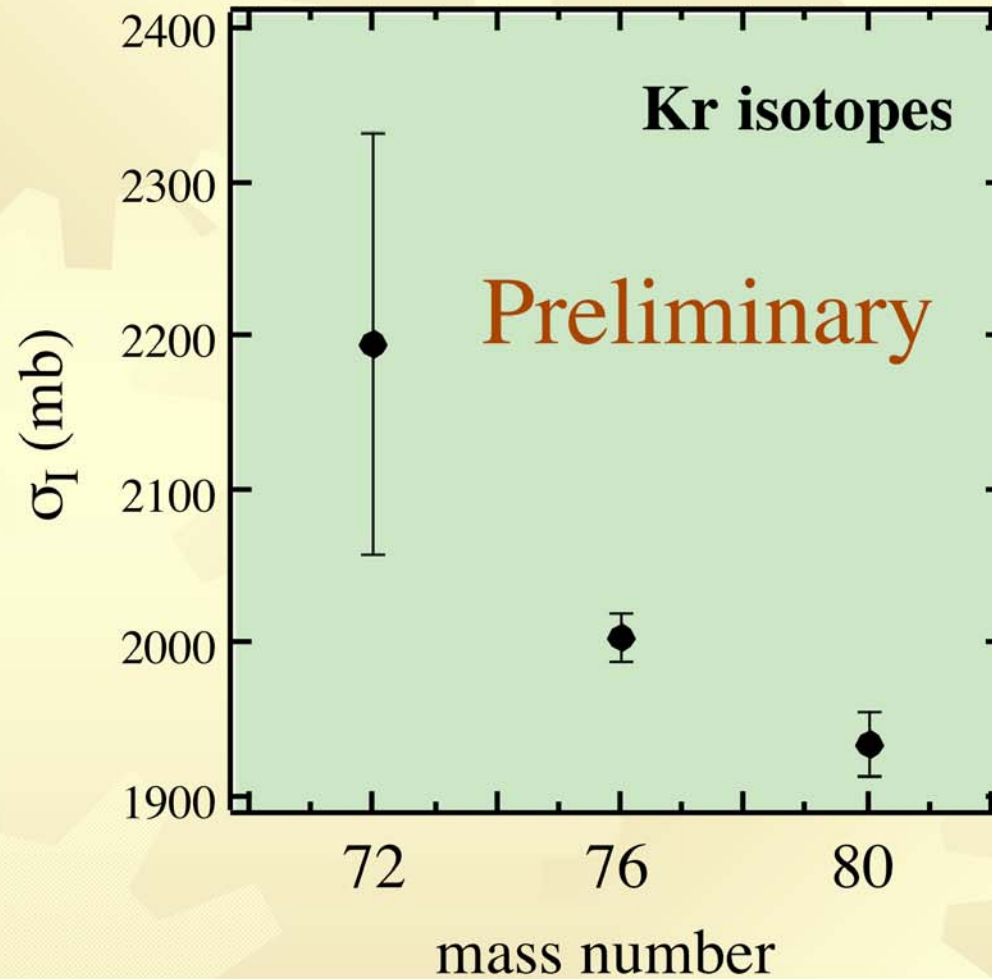
- $\Delta E$ 検出器: TEGIC
  - Tilted Electrode Gas Ionization Chamber (Kimura)

$$\Delta Z = 0.33 \text{ (FWHM)}$$



# Preliminary Result of S250

— 相互作用断面積の質量数依存性 —



今後の課題:  
アイソマーの混入

陽子driplineに近づくにつれ断面積の増加が観測された

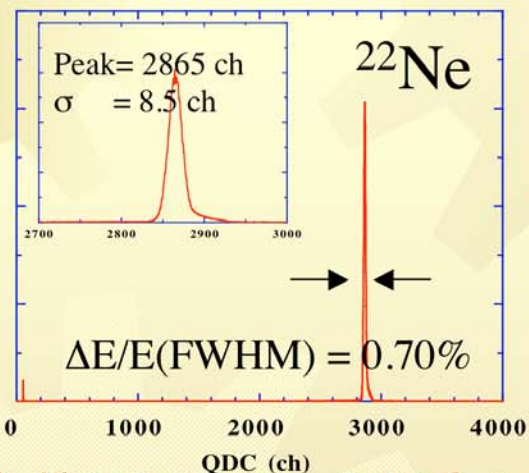
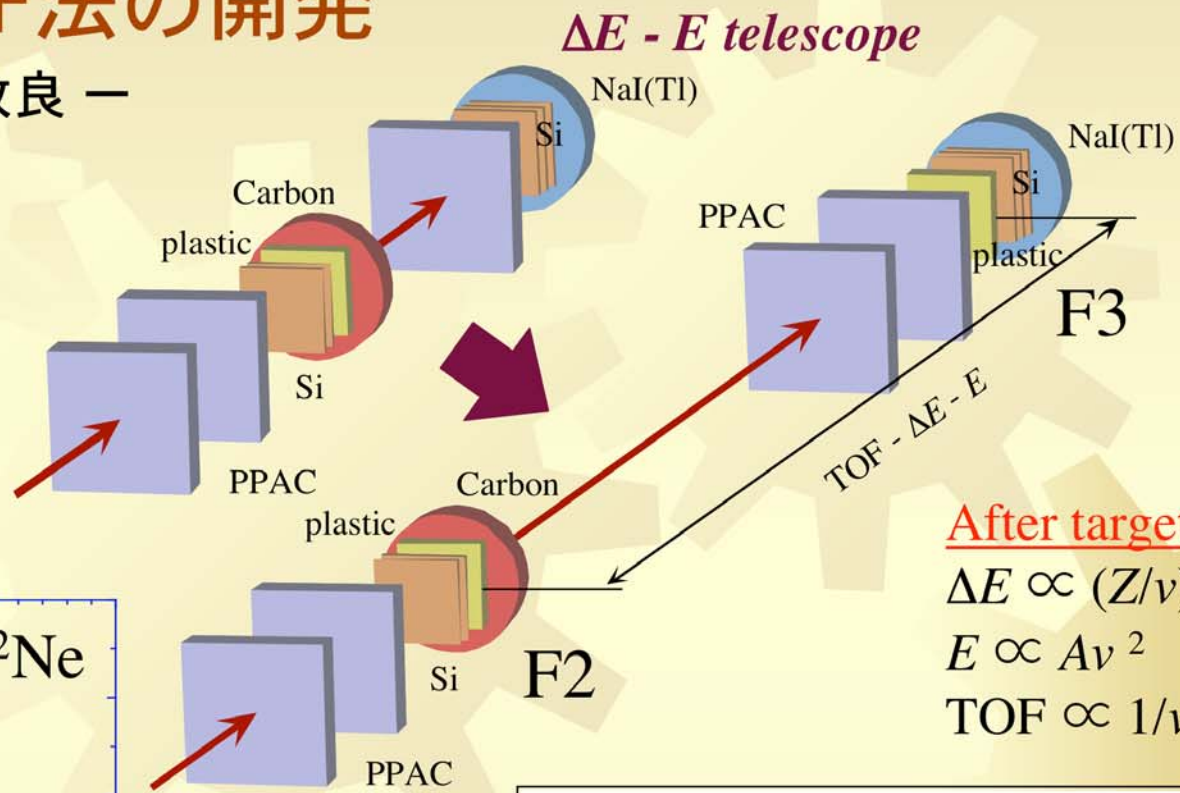


## RIKENでの最近のactivity

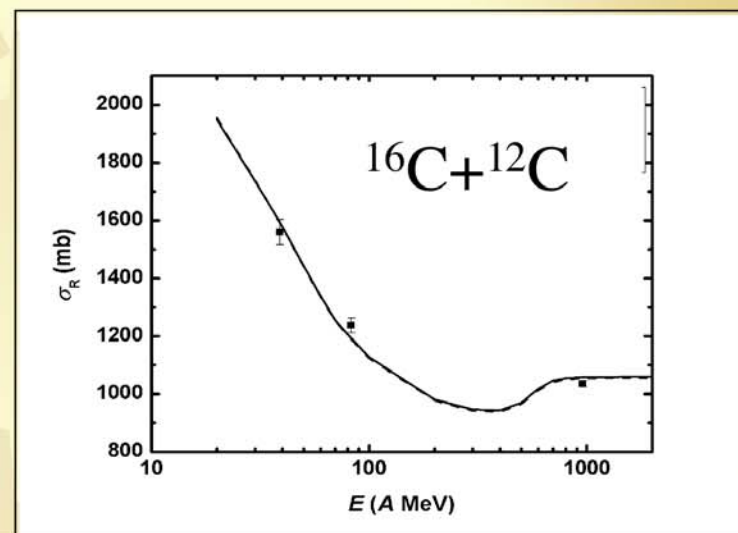
中間エネルギーで反応断面積を測定する  
エネルギー依存性から密度分布を決定する

# RIKEN-TOF法の開発

— 分解能の改良 —

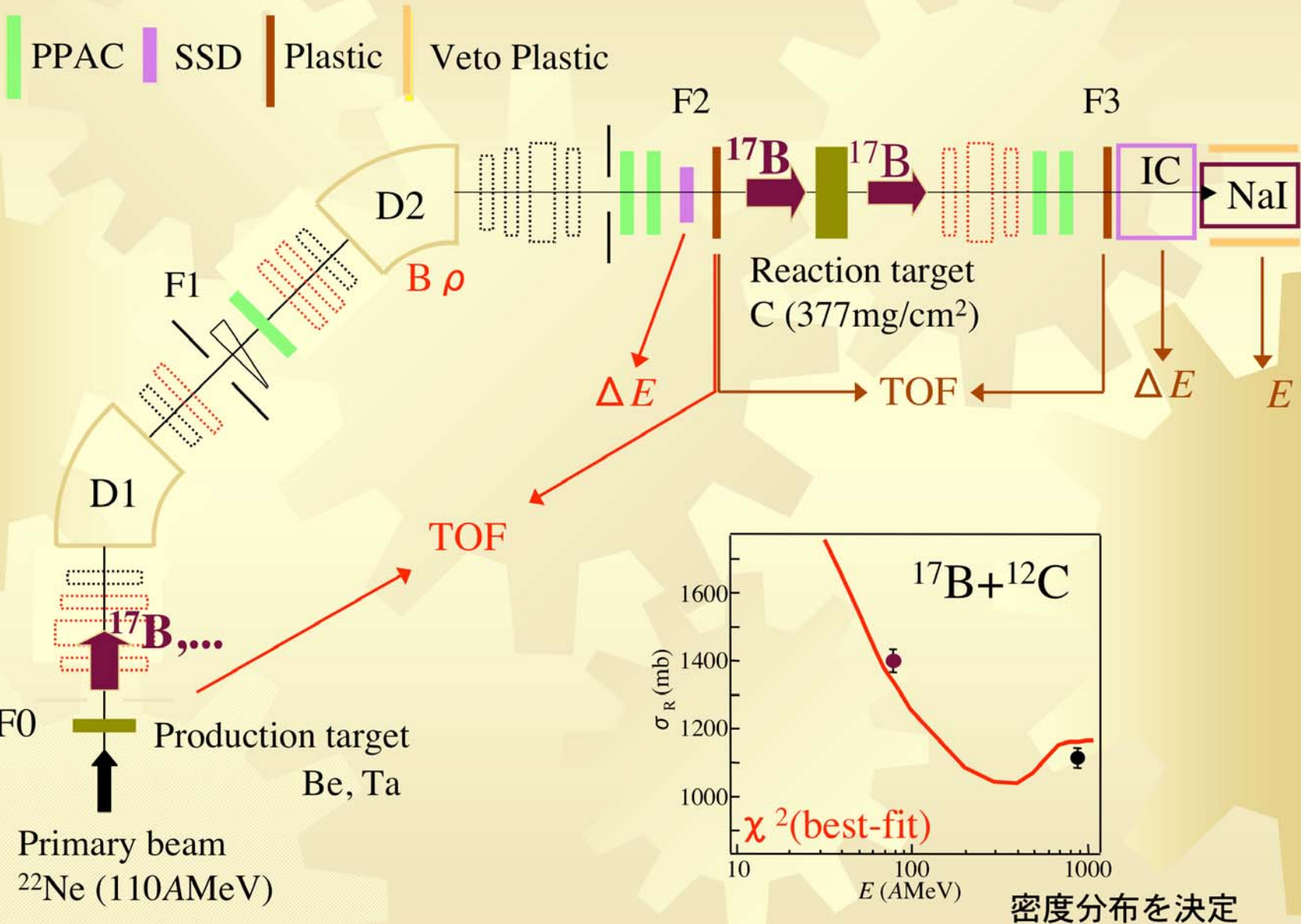


無機シンチレータの重イオンに対する  
 エネルギー分解能が非常に良い (Suda)



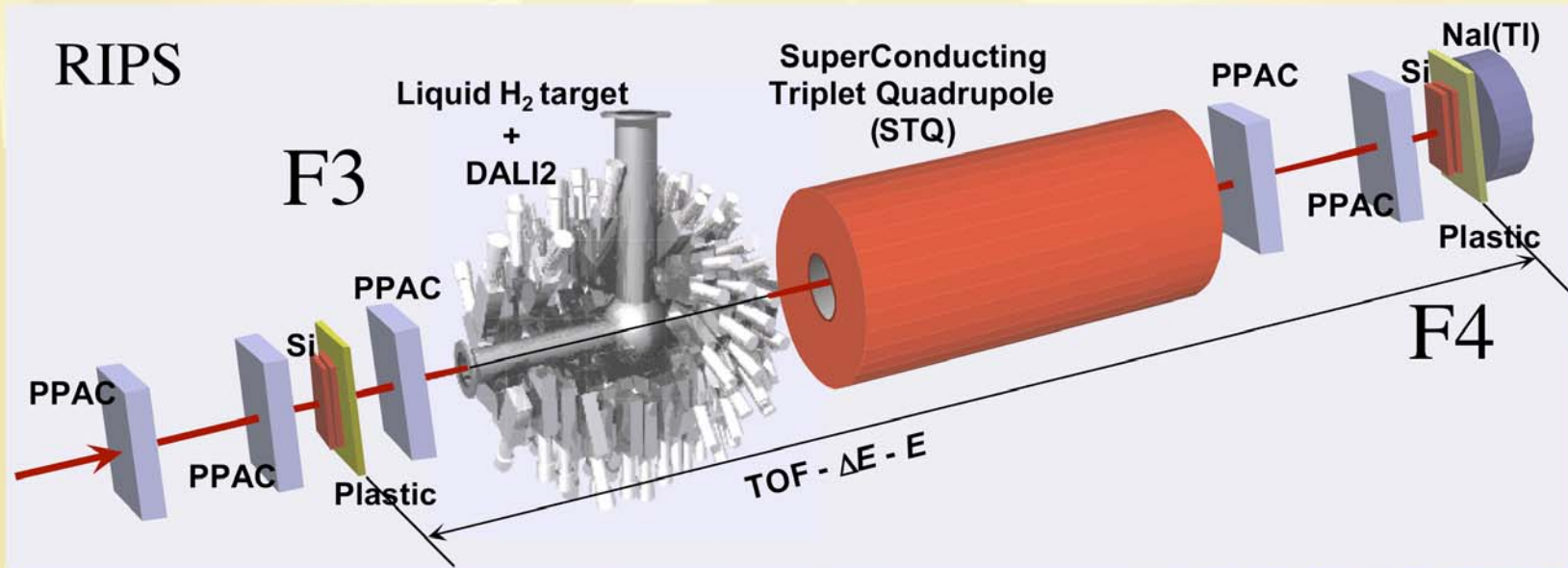


# RIPSでのセットアップ

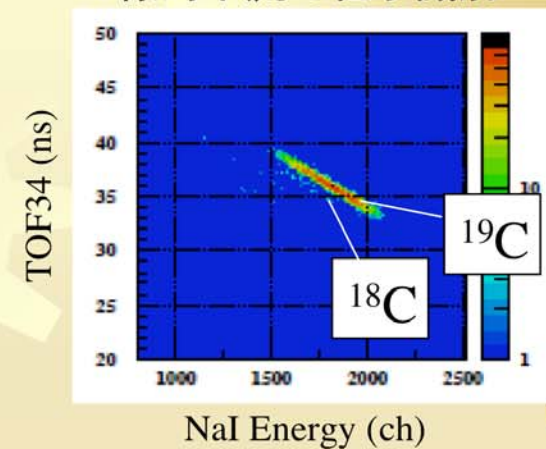


# RIKENでの最近の実験 (R394n)

## 中性子ドリップライン核 $^{22}\text{C}$ の核半径測定



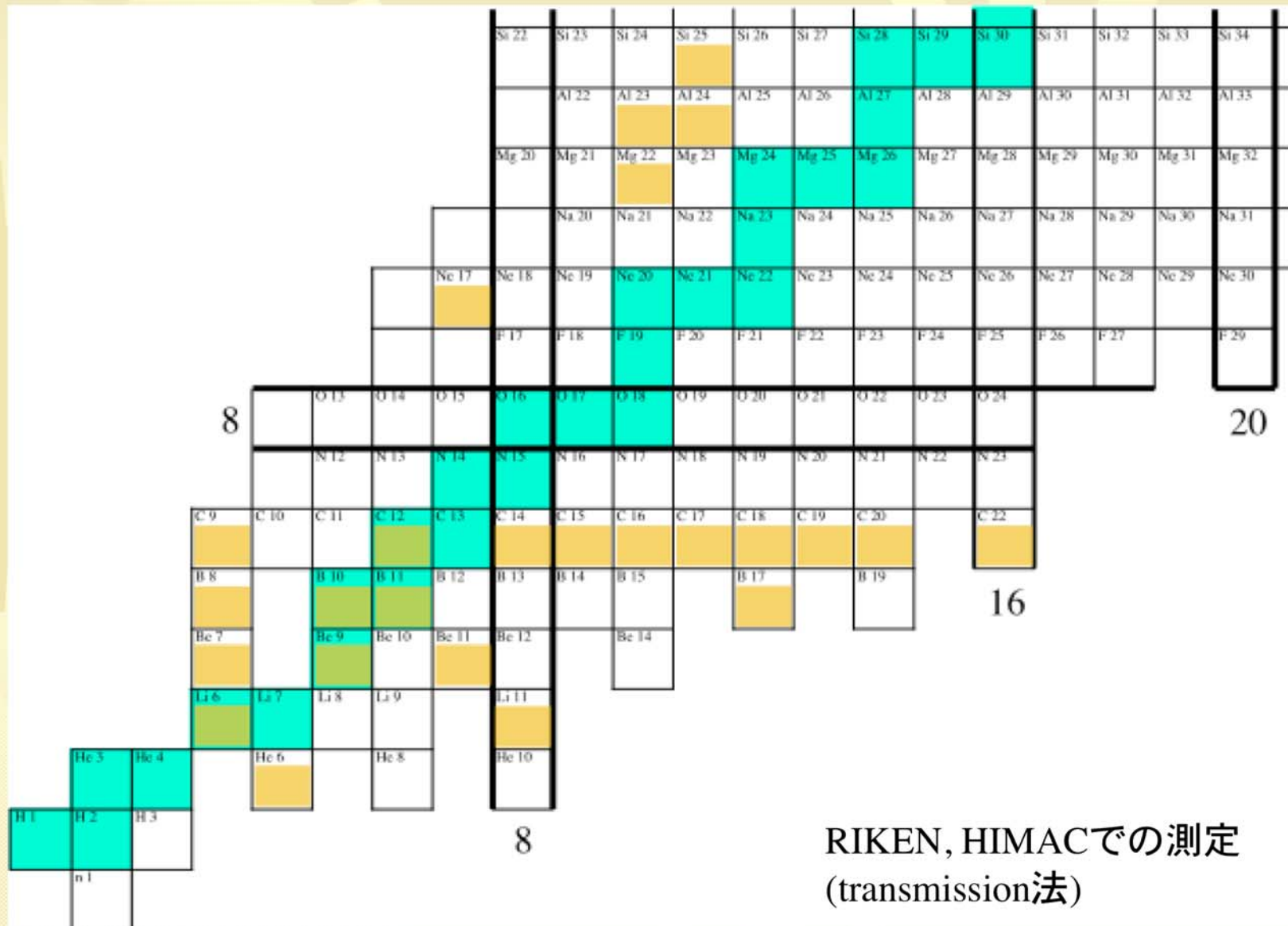
$^{19}\text{C}$ 標的の下流の粒子識別



BigRIPSでの測定に向けての新機軸

- ◆ 液体水素標的 → 標的に核構造の不確定さがない  
標的を厚くして反応率をかせぐ
- ◆ 超伝導Triplet Qマグネット → 大アクセプタンス

# 中間エネルギーでの反応断面積の測定

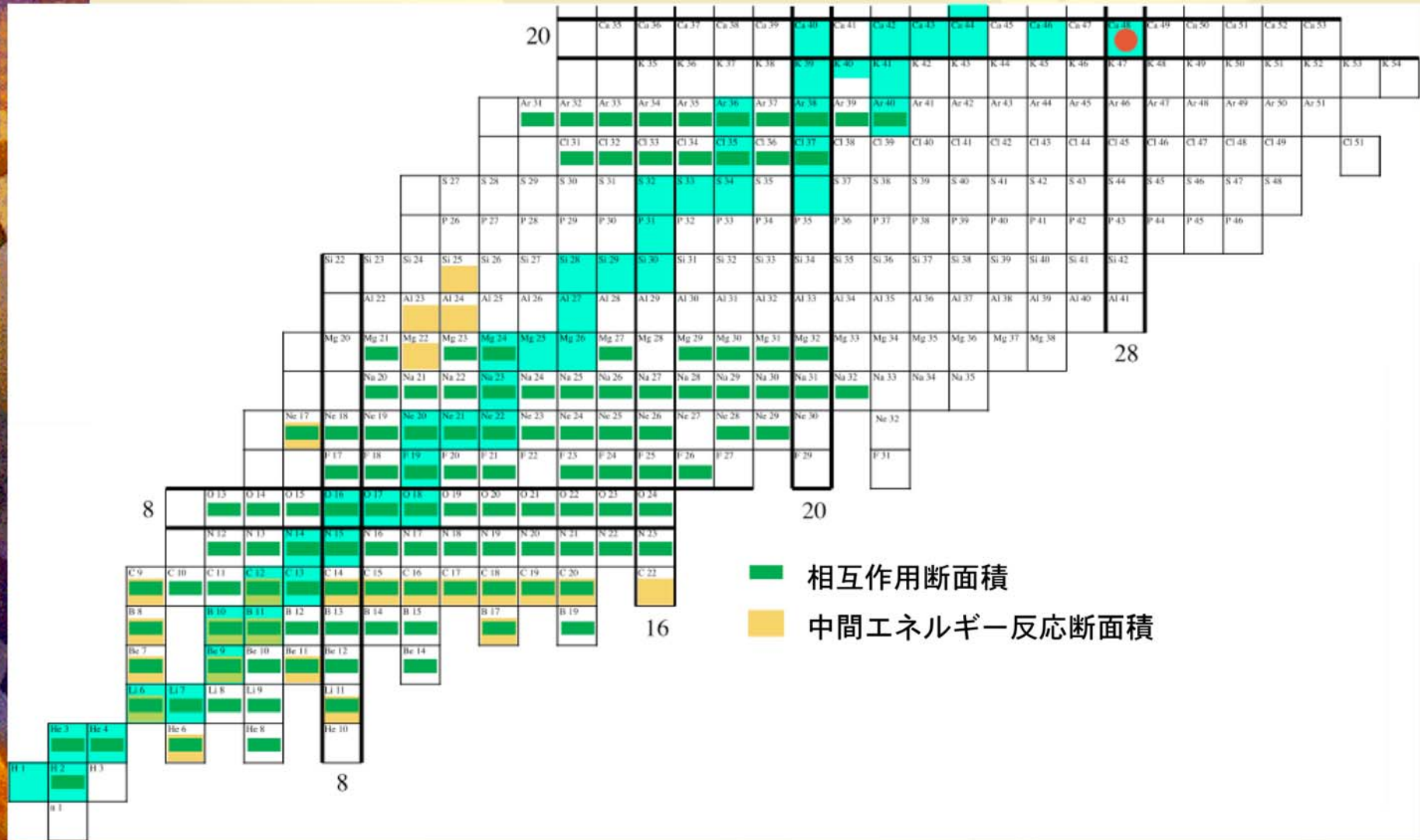




## BigRIPSでの測定

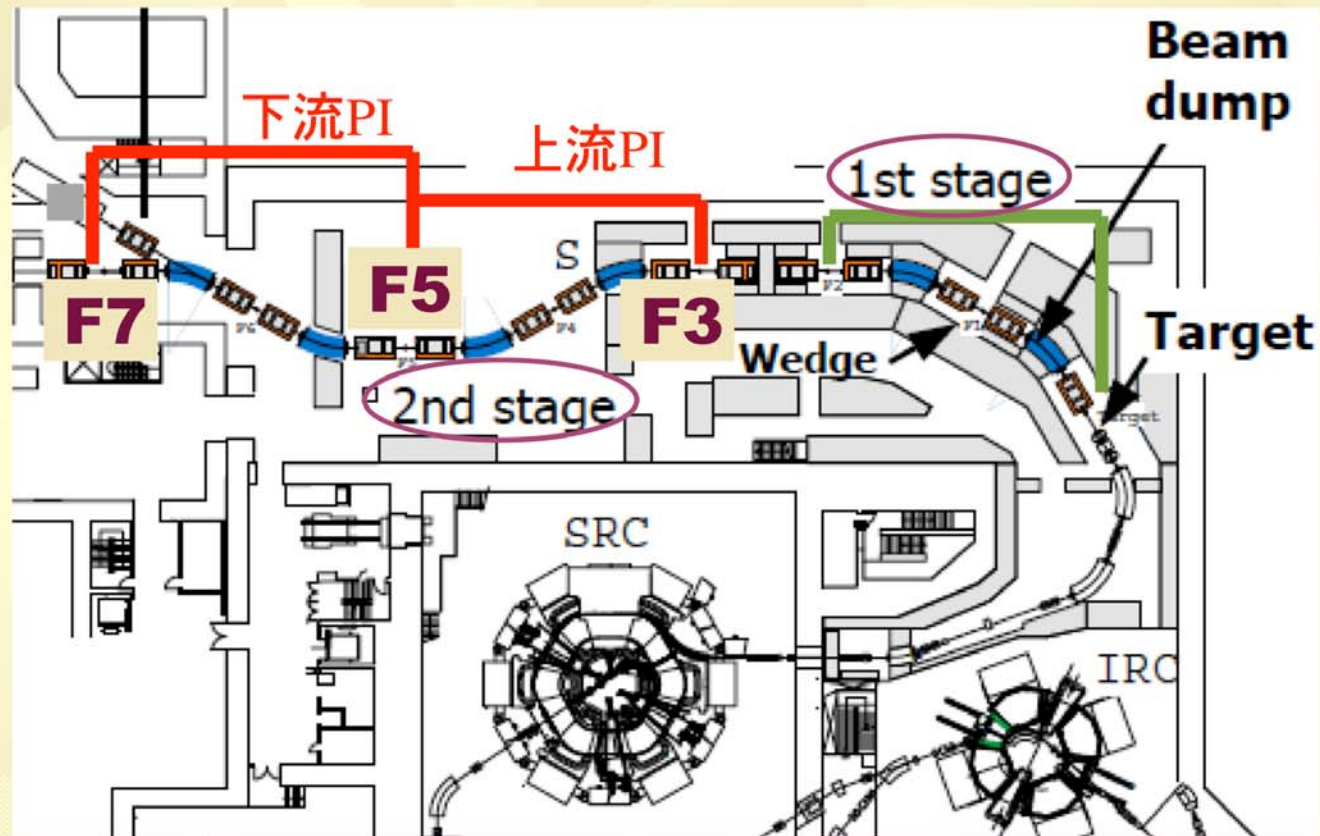
エネルギー範囲: 100~250MeV/u  
より重い核の半径を系統的に測定する

# これまで測定された相互作用断面積と反応断面積



# BigRIPSでのセットアップ

F5反応標的: Liq./Sol. H<sub>2</sub>, <sup>12</sup>C  
粒子識別法:  $B\rho$ - $\Delta E$ -TOF法



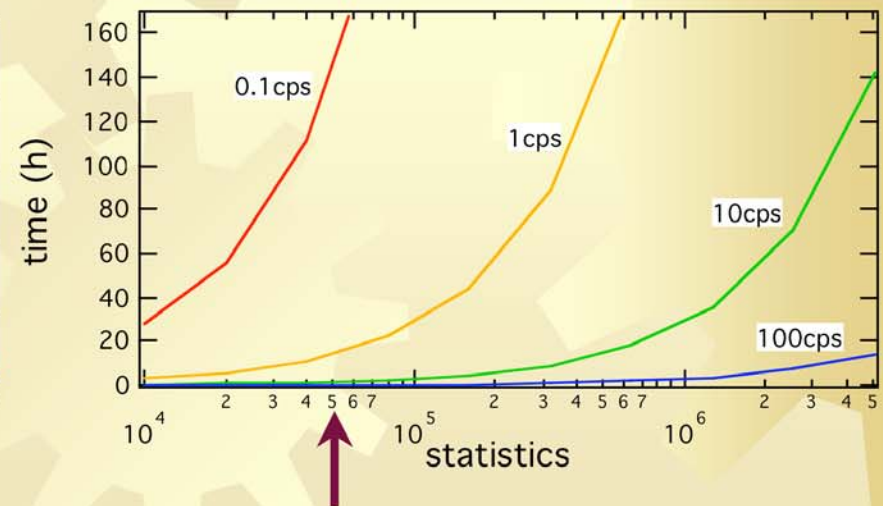
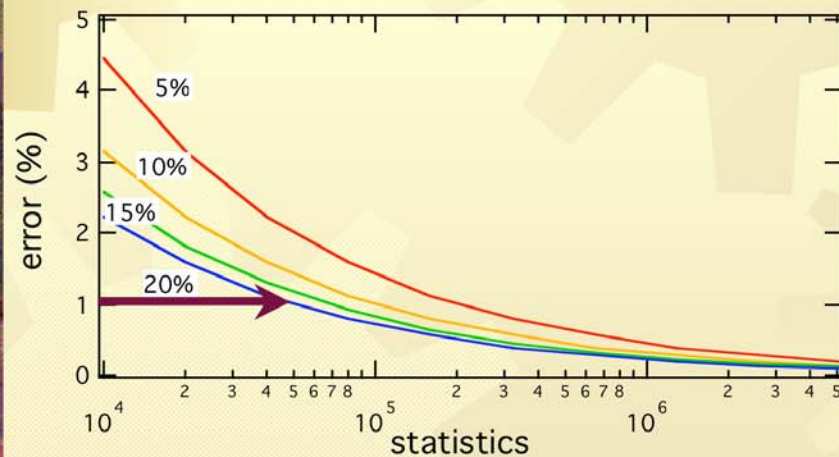
$\Delta E$  : TEGIC (F5, F7)

TOF: Fast Plastic (F3-F5, F5-F7)

$B\rho$  : PPAC (F5, F7)

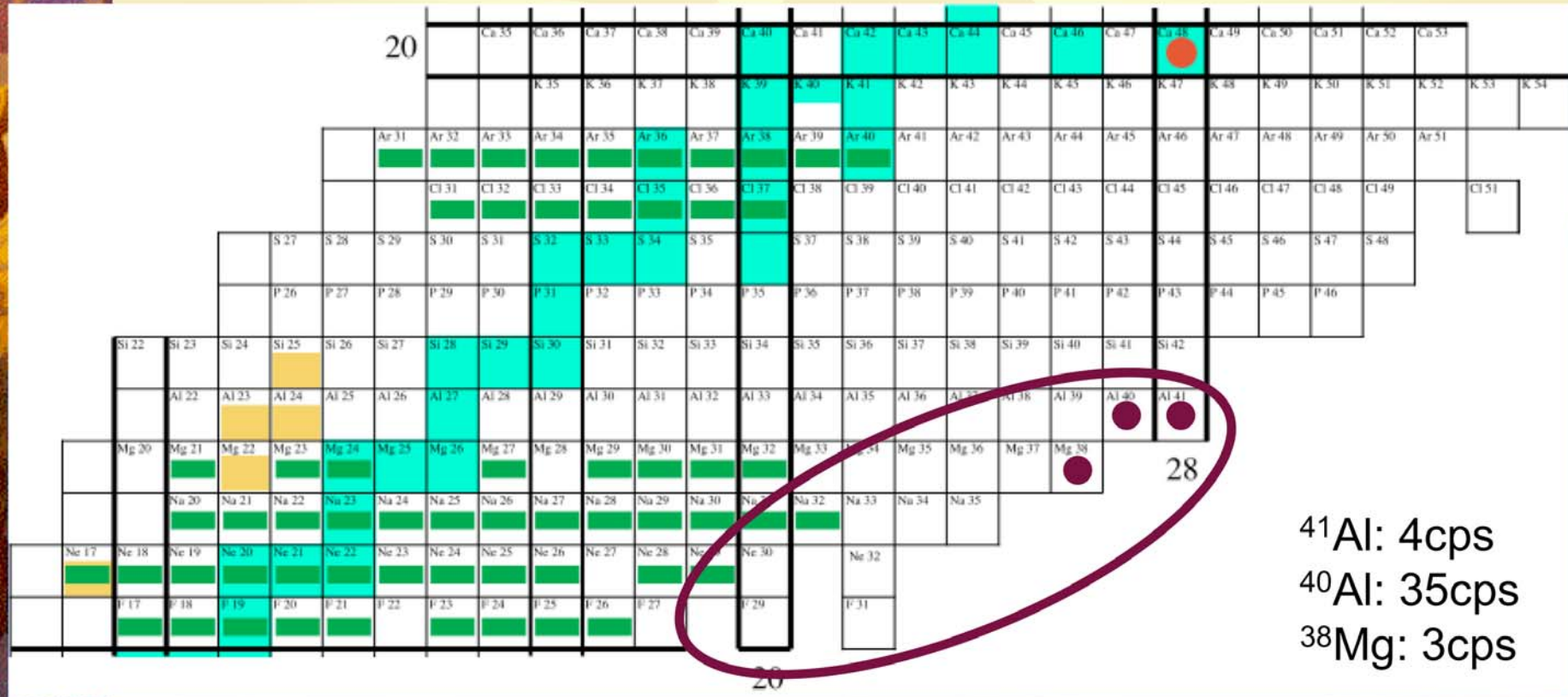
# LISEによる1st order simulation

- Primary:  $^{48}\text{Ca}$ , 350MeV/u, 500pnA
- Production target: 回転型C (厚さはYieldを最大に)
- Production cross-section: EPAX2
- F1 degrader: R/3 (反応標的でE~200MeV/uに)
- 反応標的: 固体 $\text{H}_2$  (100mm, 反応率~20%)



# BigRIPSでの測定 (案1)

## — $^{48}\text{Ca}$ ビームを使う —



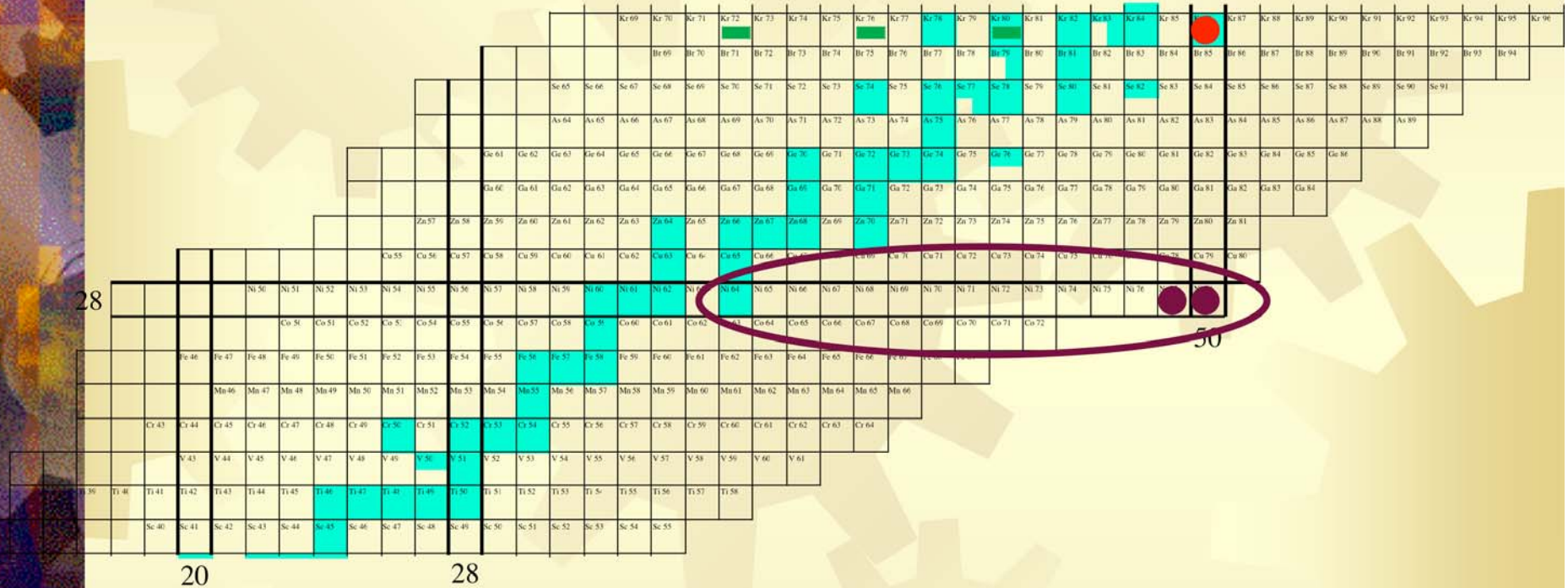
- I.  $^{48}\text{Ca}$ から中性子ドリップライン核 (F, Ne, Na, Mg)を測定する
- II. Al, Si,...系統的な測定

→ これまでの経験からfeasible & promising



# BigRIPSでの測定 (案2)

## — Ni isotopeのドリップライン近傍 —



Primary  $^{86}\text{Kr}$  (500pnA) : Fragmentation  $\rightarrow$   $^{78}\text{Ni} \sim 0.2$  cps  
 $^{77}\text{Ni} \sim 2$  cps

測定不可能ではないが、U-fissionを使うべきか (収量10倍)

課題: Zが大きくエネルギーが低いので、transmissionのsimulation studyが必要

# Summary

## ● これまで

- 高エネルギー: 核半径の系統的な測定 (GSI)
- 中間エネルギー: 新方法の開発, 密度分布の決定 (RIKEN)

## ● BigRIPSでは

- これまでの経験をもとに、より重い核の核半径を測定する  
Day-One実験として
  - 案1:  $^{48}\text{Ca}$  → F~Alのドリップライン核
  - 案2: U fission/ $^{86}\text{Kr}$  → Niアイソトープ

## 全共同研究者

Aiba T., Aoi N., Baba H., Becker F., Behr K-H., Bei Y.B., Bruenle A., Burkard K., Cai X.Z., Chen J.G., Chen Z.Q., Chiba M., Chinda T., Fang D.Q., Fukuda M., Geissel H., Guo W., Guo Z.G., Hashizume Y., Hosoi M., Inafuku K., Ivanov M., Iwasa N., Izumikawa T., Janik R., Kanazawa M., Kanungo R., Karagiannis C., Kato T., Katori K., Kimura K., Kitagawa A., Kobayashi K., Komuro M., Kondoh Y., Koyama R., Kurokawa M., Li J.X., Ma C.W., Ma G.L., Ma Y.G., Mandal S., Mao R.S., Matsubara H., Matsumasa T., Matsuta K., Mihara M., Minamisono T., Momota S., Morimoto K., Motobayashi T., Muenzenberg G., Nakabayashi T., Nakajima N., Nakajima S., Nakajima Y., Nishimoto M., Ohnishi T., Ohtsubo T., Onishi T., Ozawa A., Prochazka A., Ren Z.Z., Sato M., Shen W.Q., Shindo M., Shinoda R., Shinohara M., Shinozaki W., Sitar B., Stremen P., Su Q.M., Suda T., Suemmerer K., Sugawara K., Sun Z.Y., Suzuki H., Suzuki T., Takahashi M., Takechi M., Takeshita E., Takeuchi S., Takisawa A., Tanaka K., Tanihata I., Tian W.D., Togano Y., Toki H., Wang J.S., Wang K., Wang M., Wei Y.B., Xiao G.Q., Xiao Z.G., Yamada K., Yamaguchi Y., Yan T.Z., Yasuno T., Yoshida A., Yoshida K., Yoshitake M., Zhan W.L., Zhang H.Y., Zheng T., Zhong C., Zuo J.X.