

# 陽子・クラスターノックアウト反応による原子核構造の研究

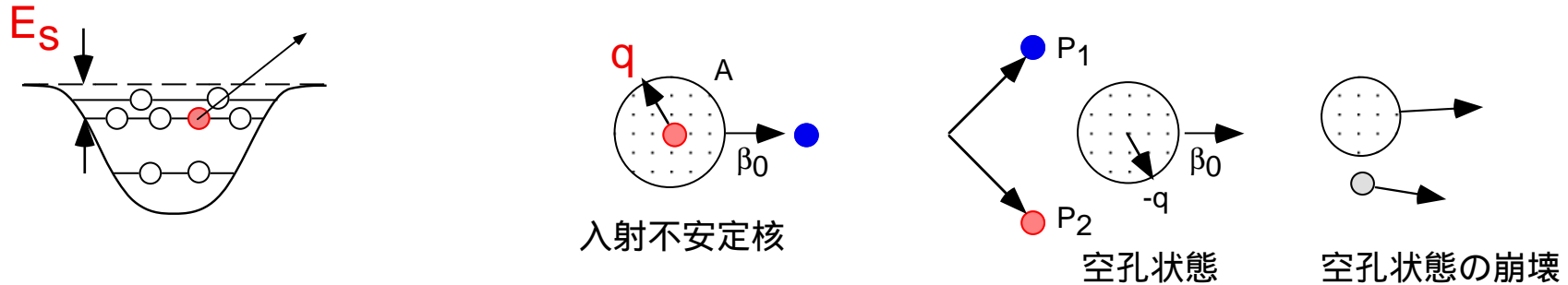
15P051

---

$9\text{-}^{16}\text{C}(\text{p},2\text{p})8\text{-}^{15}\text{B}$  @250 AMeV

大関和貴、渡辺極之、関陽子、松田洋平、篠原督和、  
直井由紀、三木俊也、大津秀暁、小林俊雄 (東北大)  
石元茂、鈴木祥仁 (高工研)  
高橋豊 (阪大RCNP)  
高田栄一 (放医研)

不安定核からの(p,2p)陽子Knockout反応



核内陽子の単一粒子軌道  $\psi_p \equiv \langle \Psi_{A-1} | \Psi_A \rangle$

分離エネルギー ( $E_s, S_p$ )  $E_s = \gamma(r_{p_1} + r_{p_2}) \cdot \beta - \gamma(T_1 + T_2) - (\gamma - 1)m_N - \frac{q^2}{2M_{A-1}}$

運動量分布 ( $q$ )  $q = (p_1 + p_2) - \left[ \frac{\gamma}{\gamma + 1} (r_{p_1} + r_{p_2}) \cdot \beta + (M_A - M_{A-1}) \right] \beta \quad \frac{d\sigma}{dq}$

空孔状態の崩壊様式

反応機構： pp準弾性散乱によるknockout反応

入射粒子波長  $\ll$  核子間距離

入射エネルギー  $\gg$  分離エネルギー、Fermi運動量

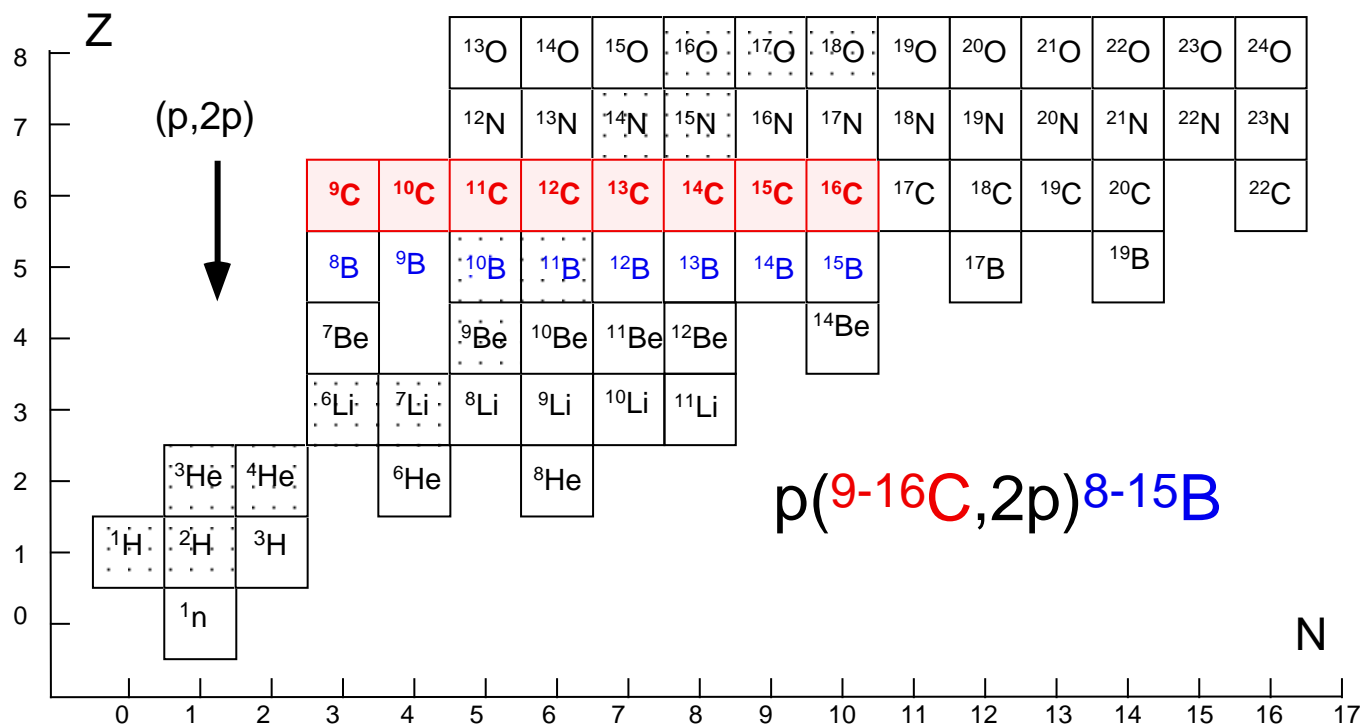
"高"エネルギー不安定核ビームが必要： HIMACでの実験

# 研究対象

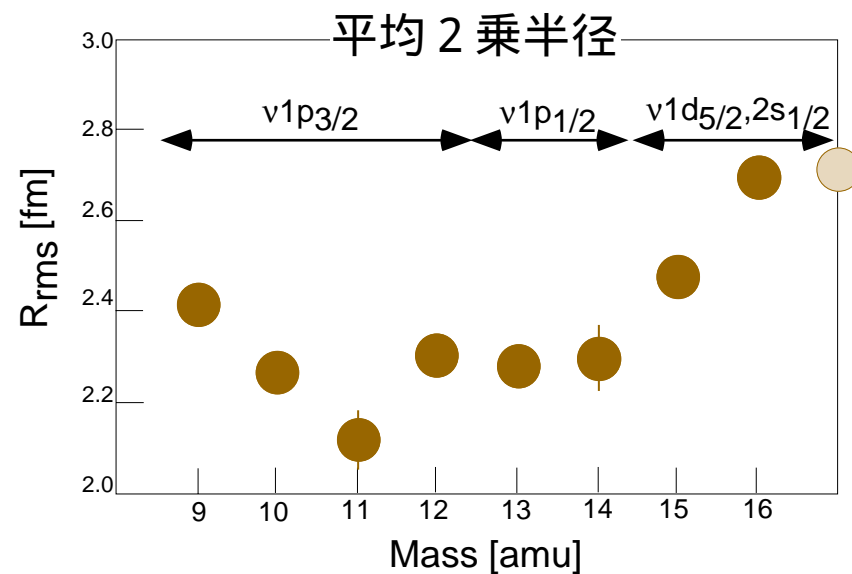
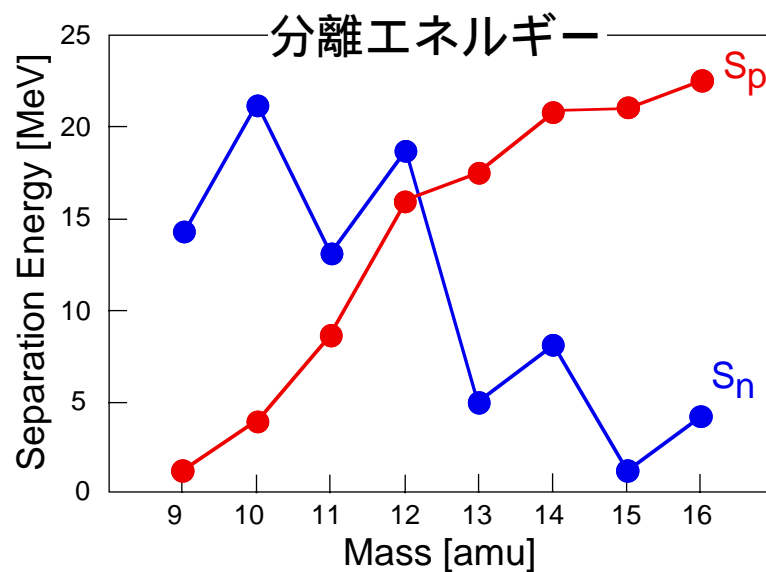
炭素同位体

2次ビーム：  
9-16C @250AMeV

1次ビーム：  
18O @350AMeV  
12C @400AMeV



陽子 / 中性子軌道



## データ収集と解析

---

### データ収集（固体水素標的）

15,16C @250AMeV (18O @350AMeV) 2月

13,14C @250AMeV (18O @350AMeV) 7月

9-12C @250AMeV (12C @400AMeV) 10月

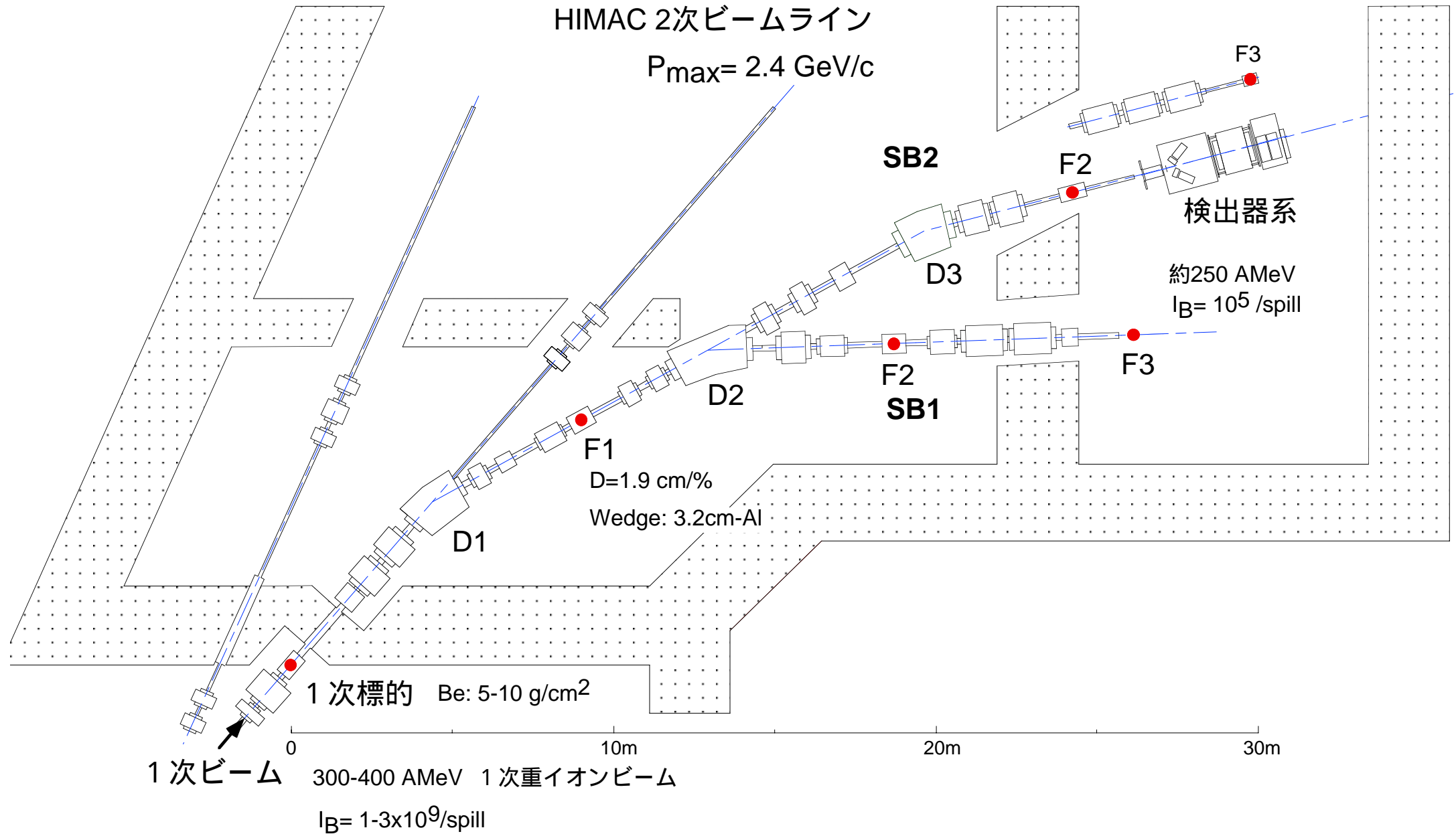
### データ解析

全データを一通り解析する

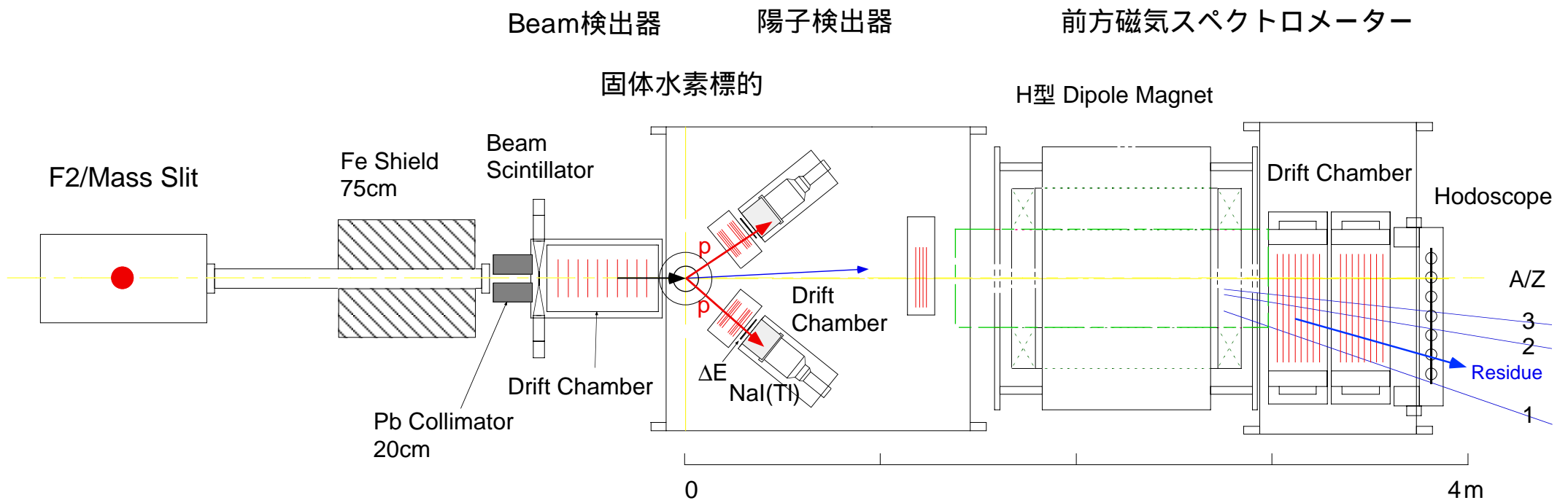
normalizationを含めてあまり変ではない

まだ色々問題はあるが

# 2次ビームライン



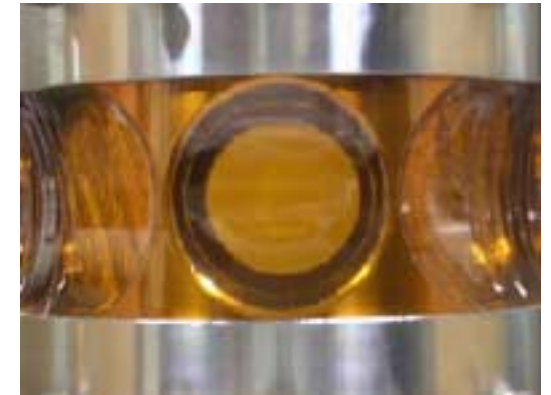
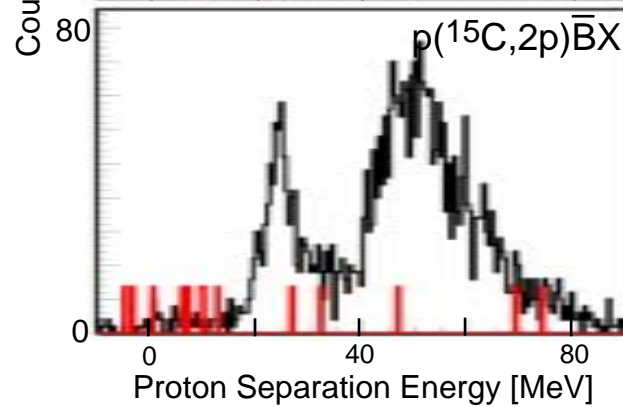
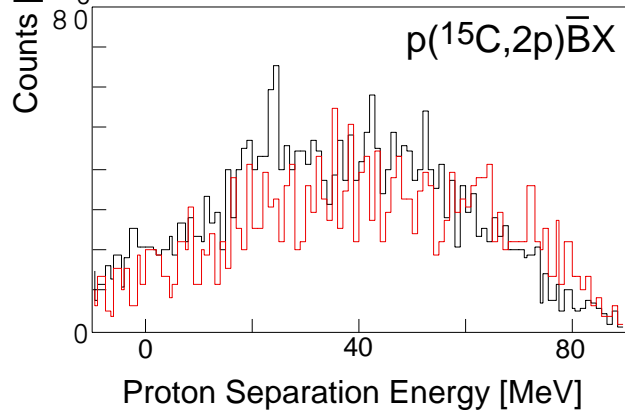
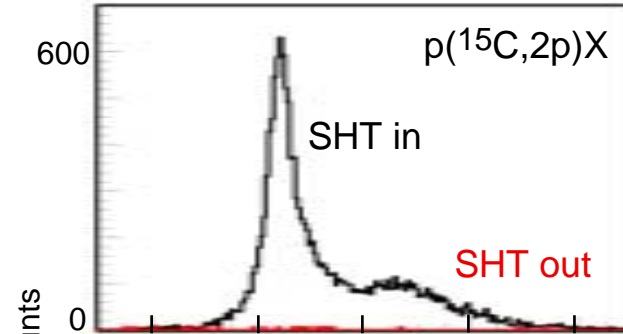
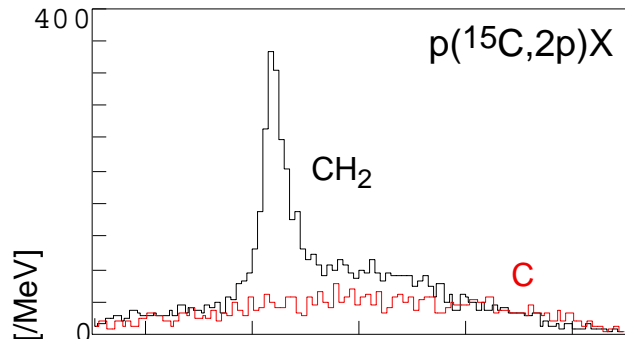
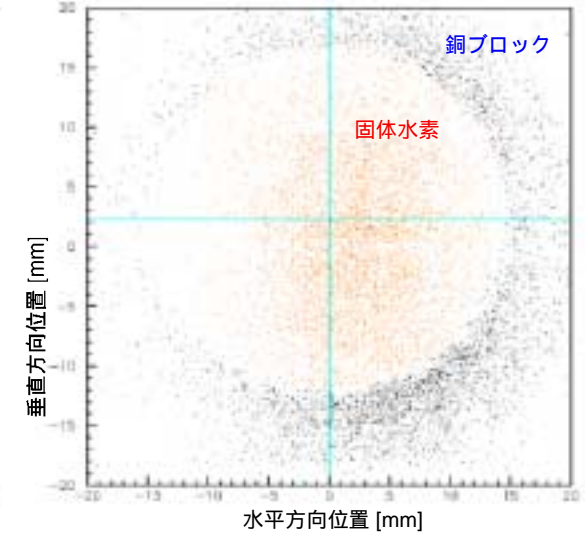
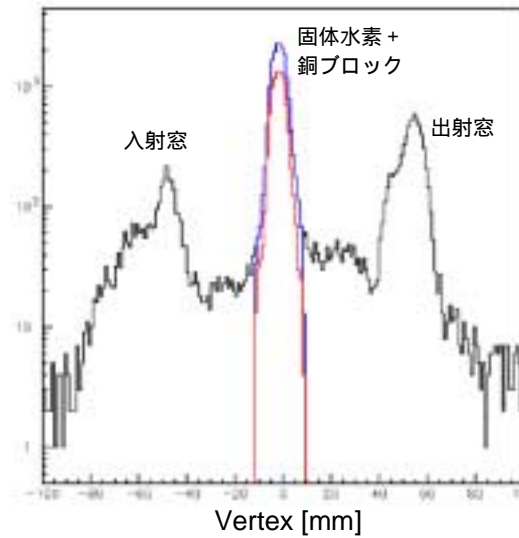
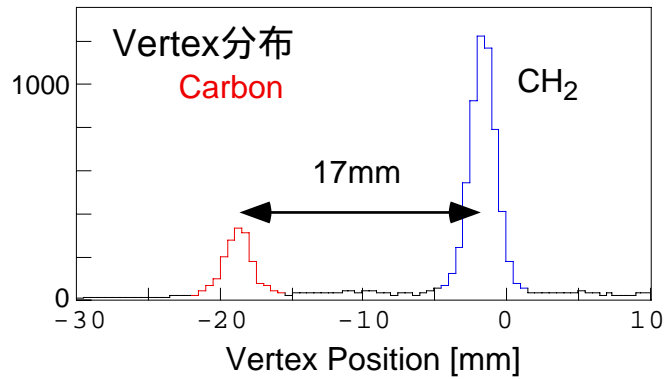
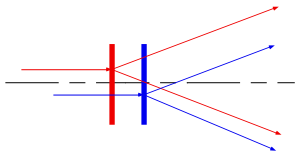
# 実験SETUP @F3



# 陽子標的

CH<sub>2</sub>(100mg/cm<sup>2</sup>)-C(50mg/cm<sup>2</sup>)

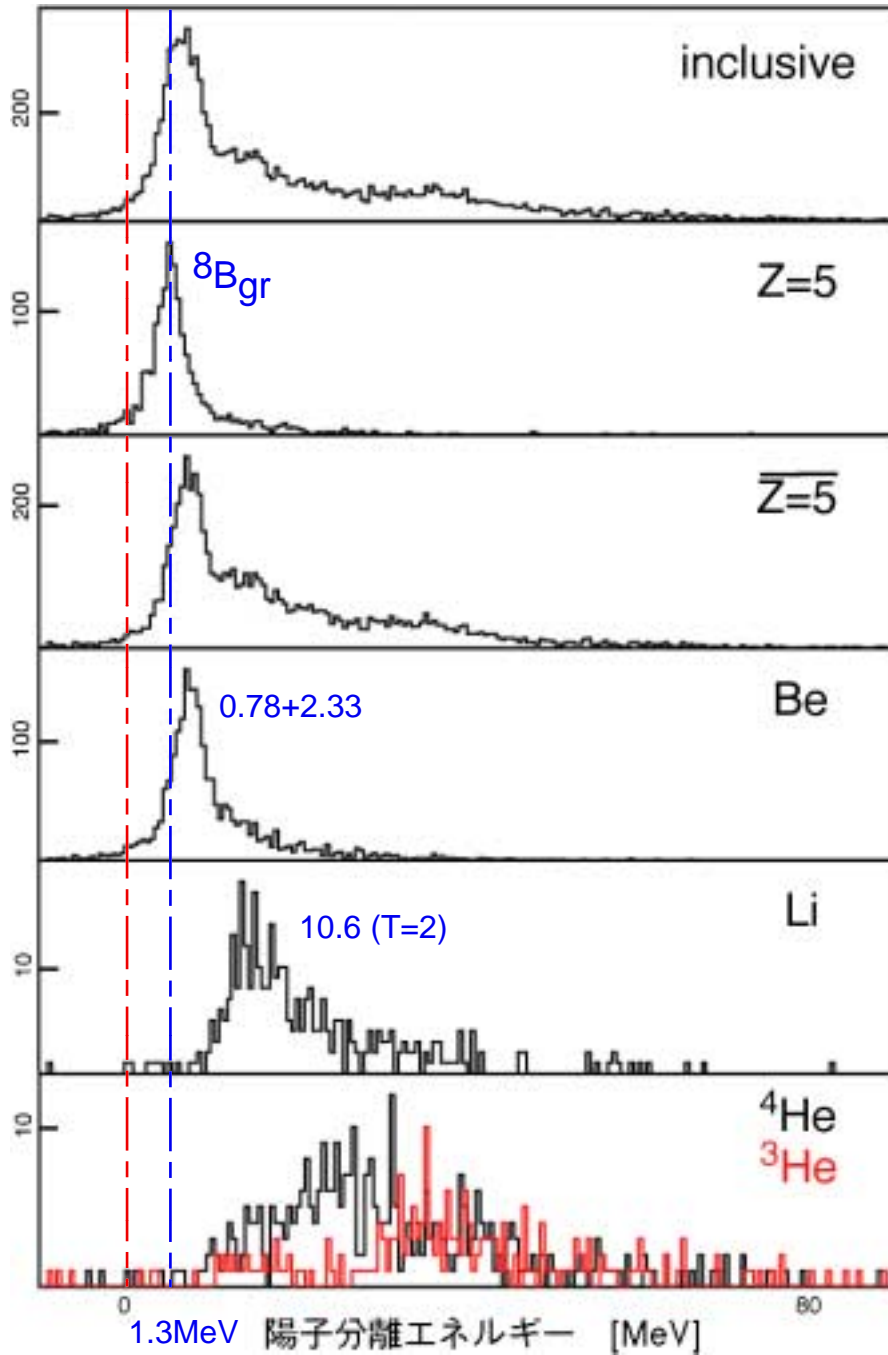
固体水素：直径30mm, 厚さ5mm (窓：9mmマイラー)



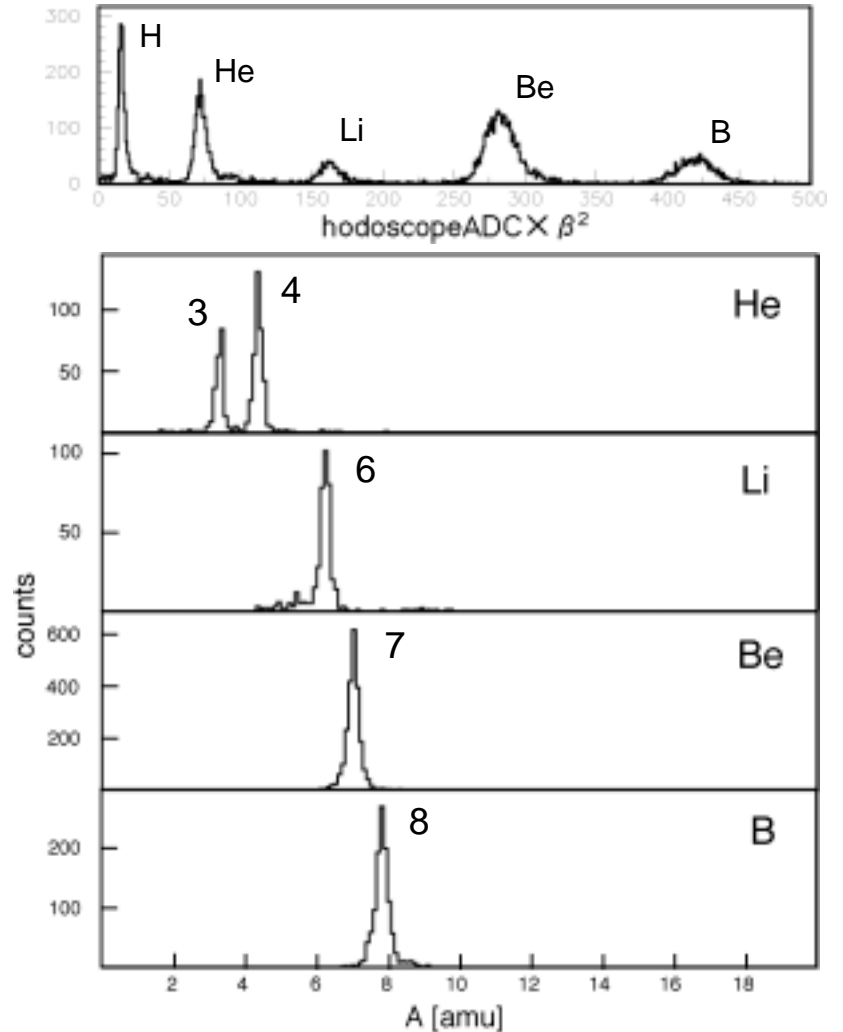


# $p(^9\text{C}, 2p)^8\text{B}$

陽子過剰核の例



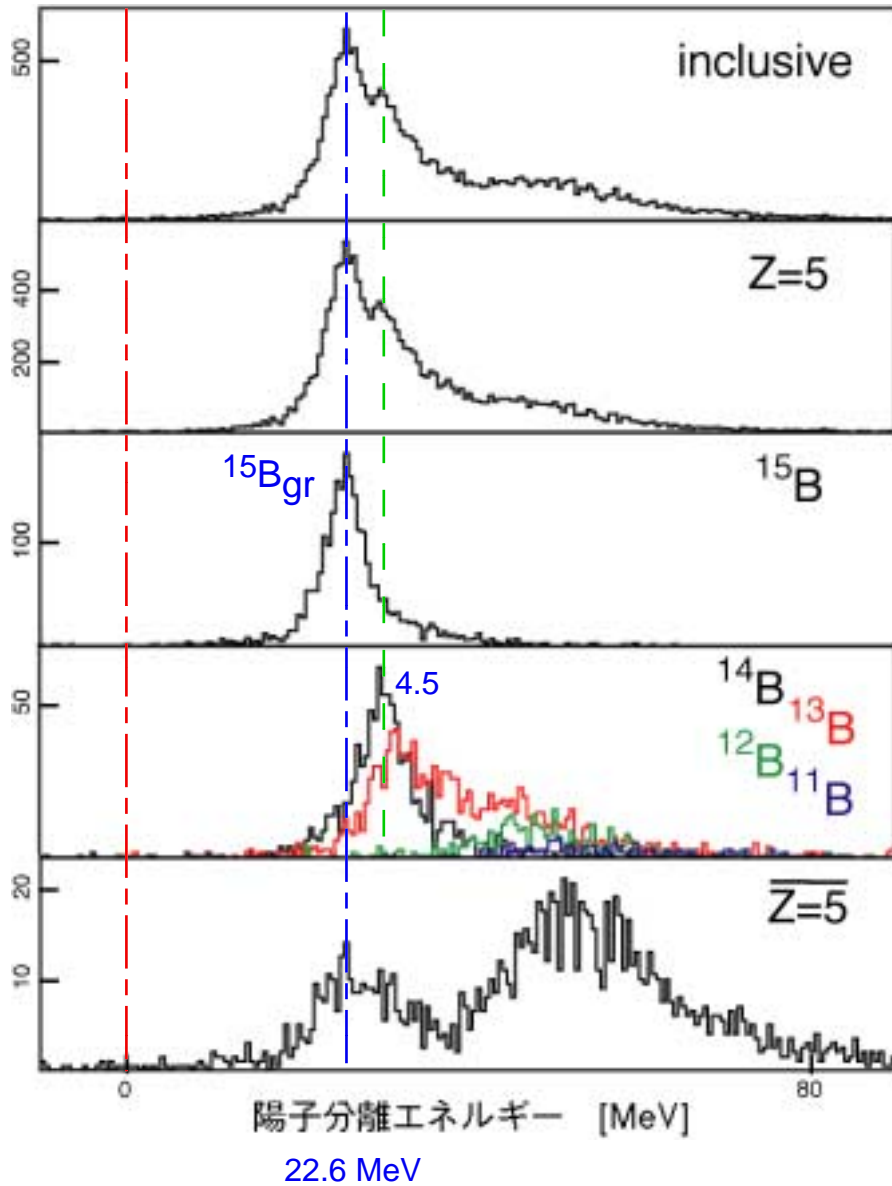
$\frac{13.0}{^9\text{B}+n}$   
10.6 0+ T=2  
2.32 3+  
 0.78  
gr 2+  $\frac{0.14}{^7\text{Be}+p}$   
 $^8\text{B}$





# $p(^{16}\text{C}, 2p)^{15}\text{B}$

中性子過剰核の例



$\frac{18.2}{^{14}\text{Be}+p}$

$\frac{12.0}{^{11}\text{B}+4n}$

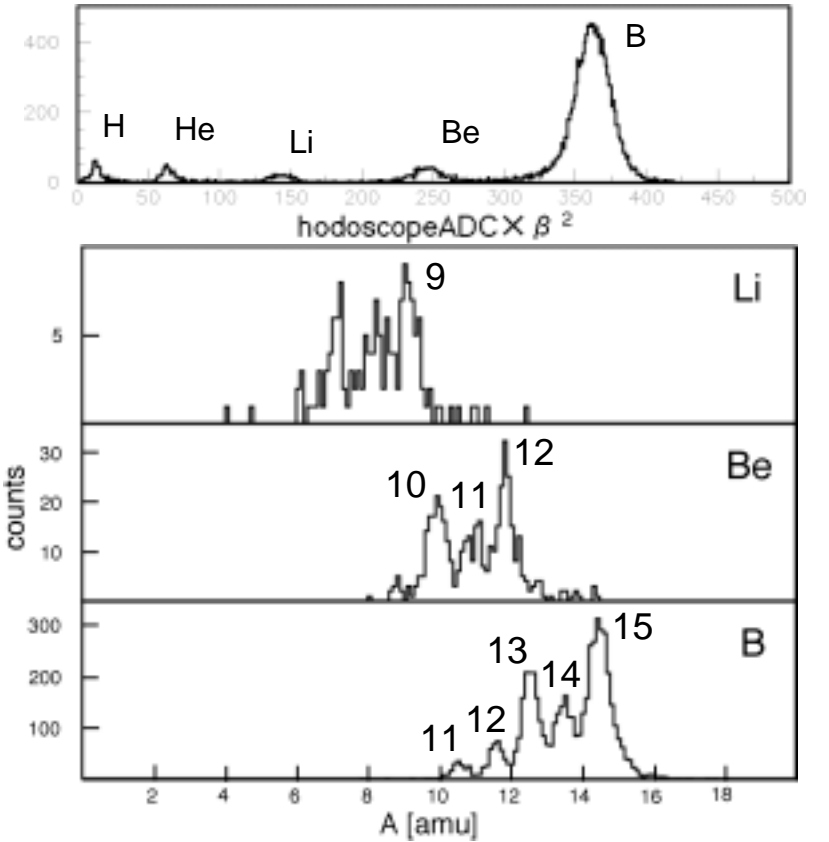
$\frac{8.62}{^{12}\text{B}+3n}$

$\frac{4.5?}{3.74}$

$\frac{13}{\text{B}+2n}$

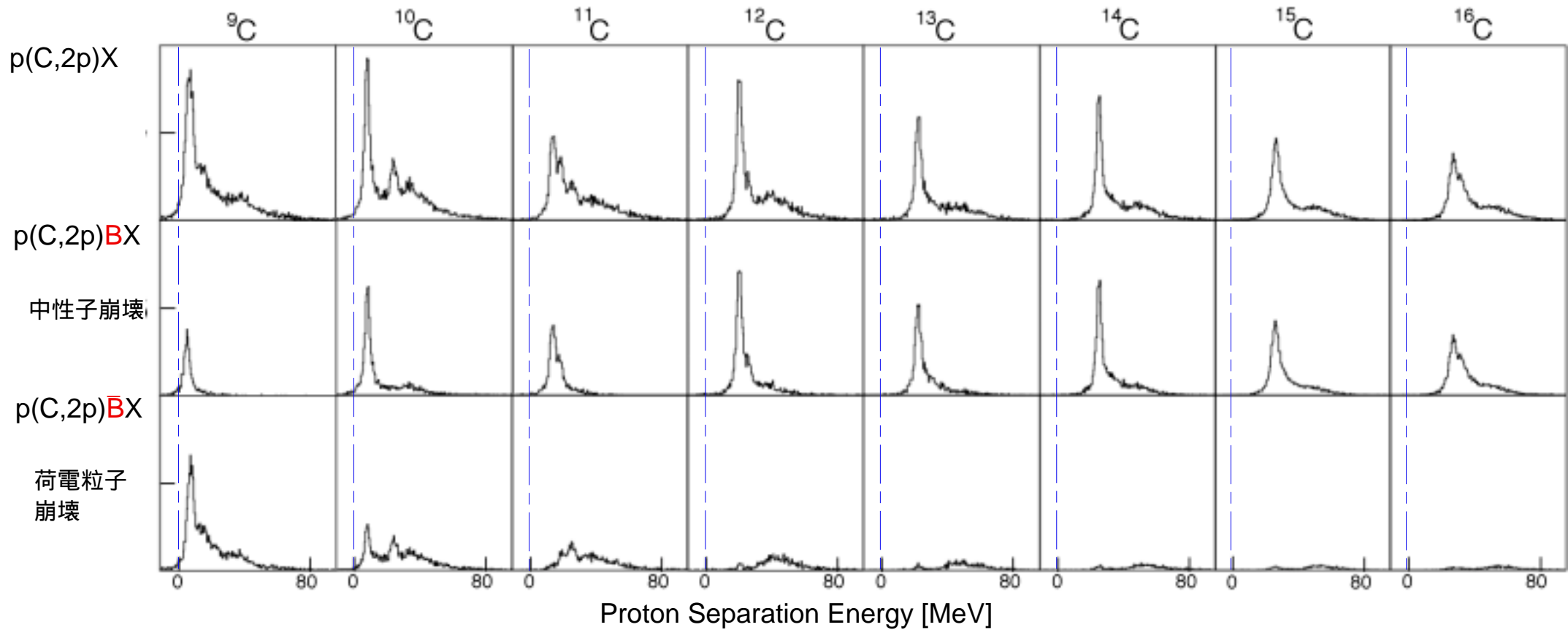
$\frac{2.77}{^{14}\text{B}+n}$

$\frac{gr?}{^{15}\text{B}}$



# 陽子分離エネルギー分布

$$\rho(A_C, 2p)^{A-1}B$$



Offset(2-3MeV)有り:  $A-1B_{gr}$ で校正

荒く言うと: 狭いp-hole状態 + 広いs-hole状態、中性子過剰になるにつれて深く。

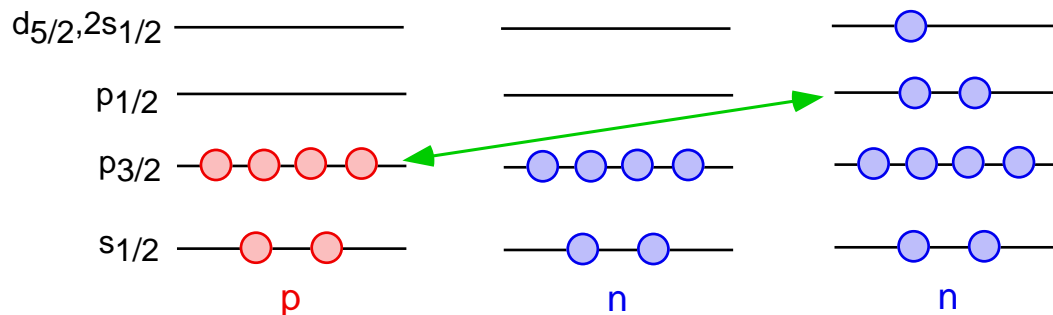
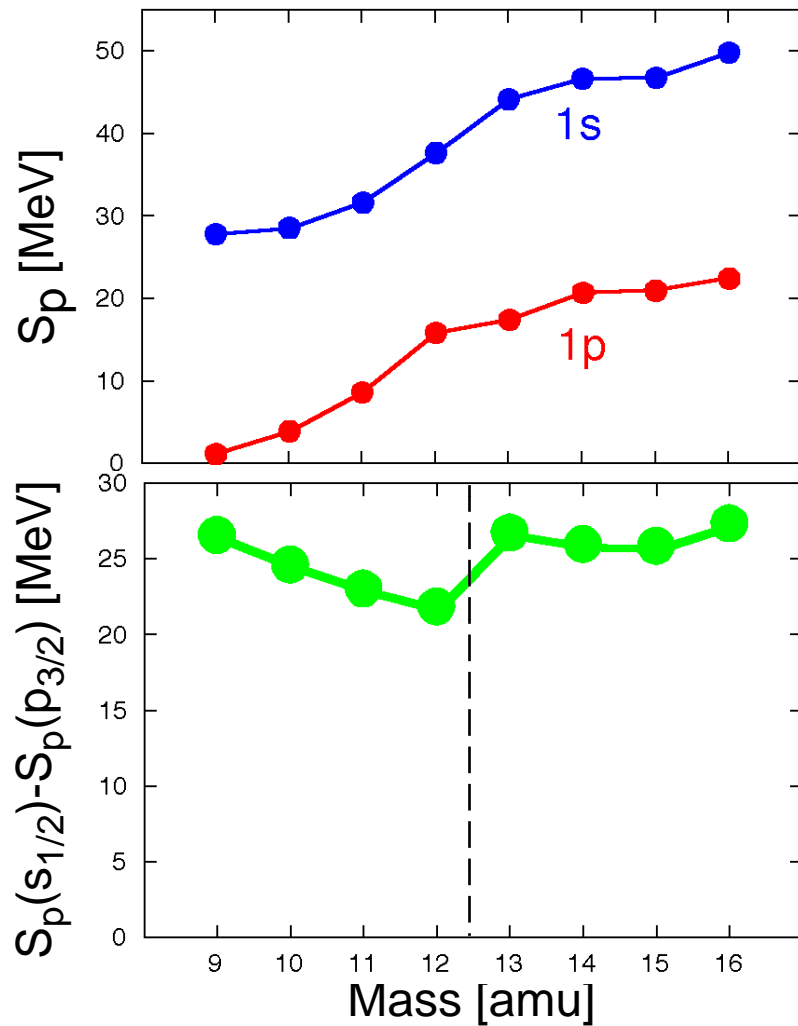
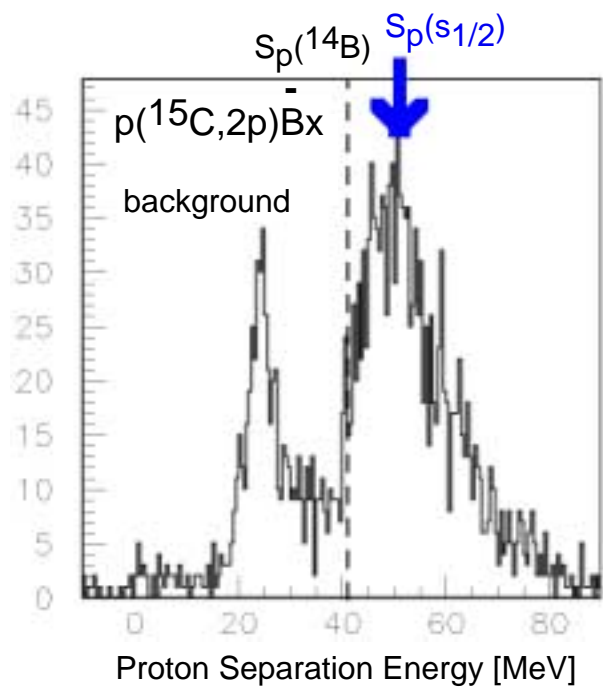
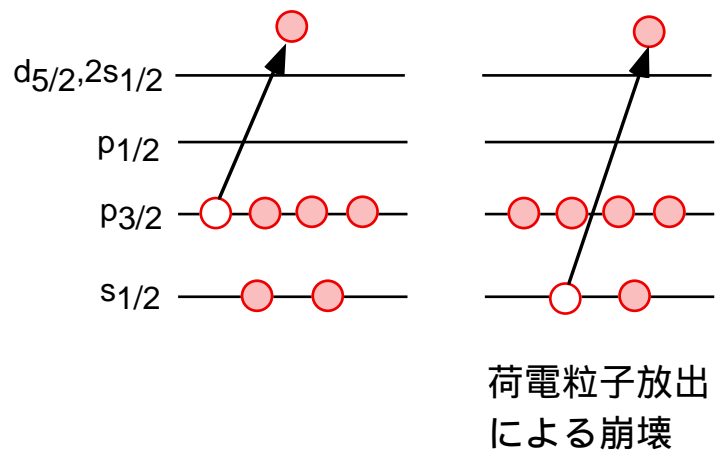
陽子1s, 1p軌道の間隔、1s状態の中

陽子過剰側:  $T=T_{gr}+1$ の高励起状態が見える

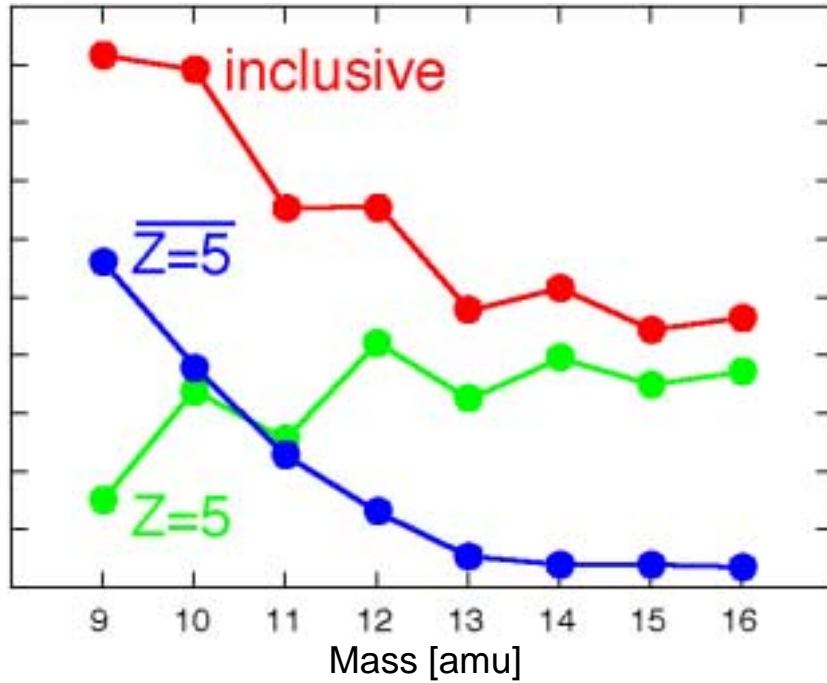
中性子過剰側: 荷電粒子崩壊率が少なくなる

中性子過剰Boron同位体の励起状態

# 陽子軌道エネルギー：s<sub>1/2</sub>, p<sub>3/2</sub>



# (p,2p)断面積—相対強度

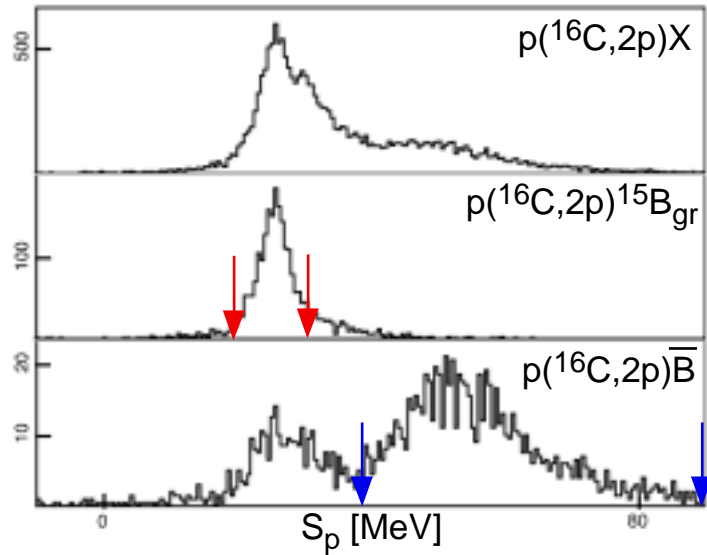


空孔状態が中性子放出で崩壊：  
ほぼ質量によらず一定  
odd/even効果

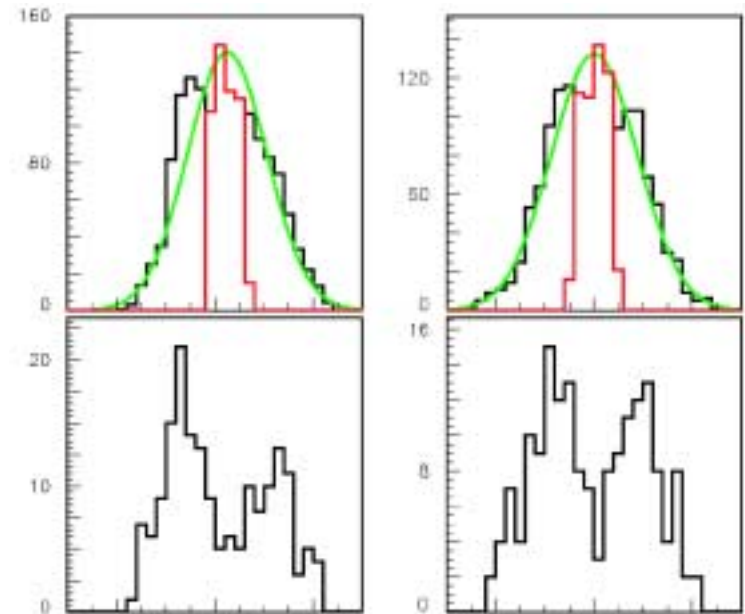
空孔状態が荷電粒子放出で崩壊：

# 核内陽子運動量分布

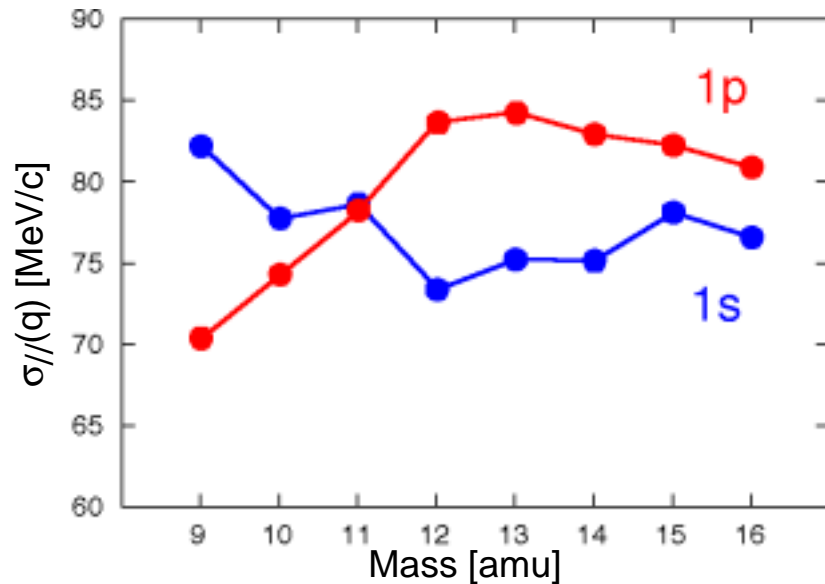
分離エネルギーを選択した運動量分布



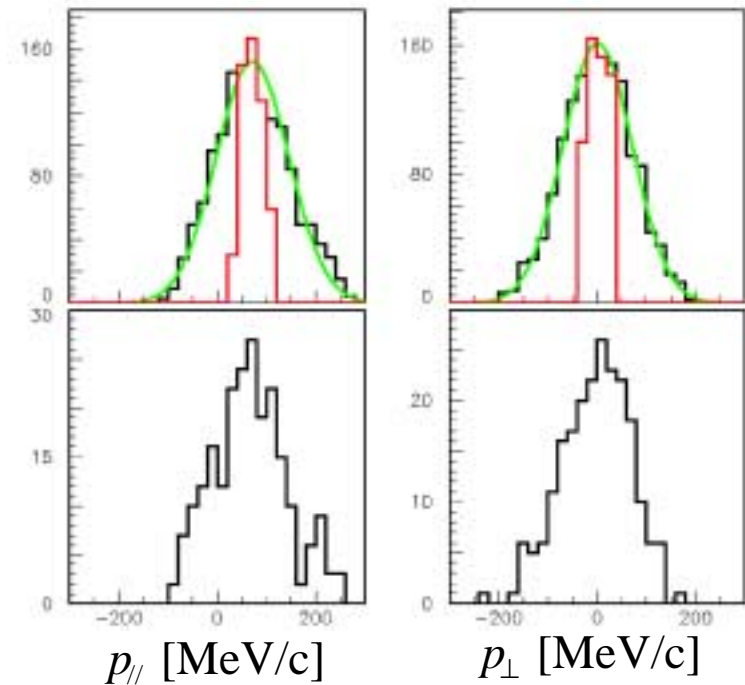
$$\frac{d\sigma}{dp}(p_{3p})$$



運動量分布  $d\sigma/dp_{//}$  の巾 (rms)



$$\frac{d\sigma}{dp}(s_{1p2})$$



$p_{//}$  [MeV/c]

$p_{\perp}$  [MeV/c]

## Summary

---

入射エネルギー250AMeVでの $p(^9\text{-}^{16}\text{C}, 2p)^8\text{-}^{15}\text{B}$ 反応の系統的データを取得

$^{15,16}\text{C}$  @250AMeV ( $^{18}\text{O}$  @350AMeV) 2月

$^{13,14}\text{C}$  @250AMeV ( $^{18}\text{O}$  @350AMeV) 7月

$^9\text{-}^{12}\text{C}$  @250AMeV ( $^{12}\text{C}$  @400AMeV) 10月

固体水素標的の使用

安定動作

S/Nの改善：s軌道からのknockoutには必要不可欠

データ解析

一通り解析：あまり変ではない。詳しい解析を続行

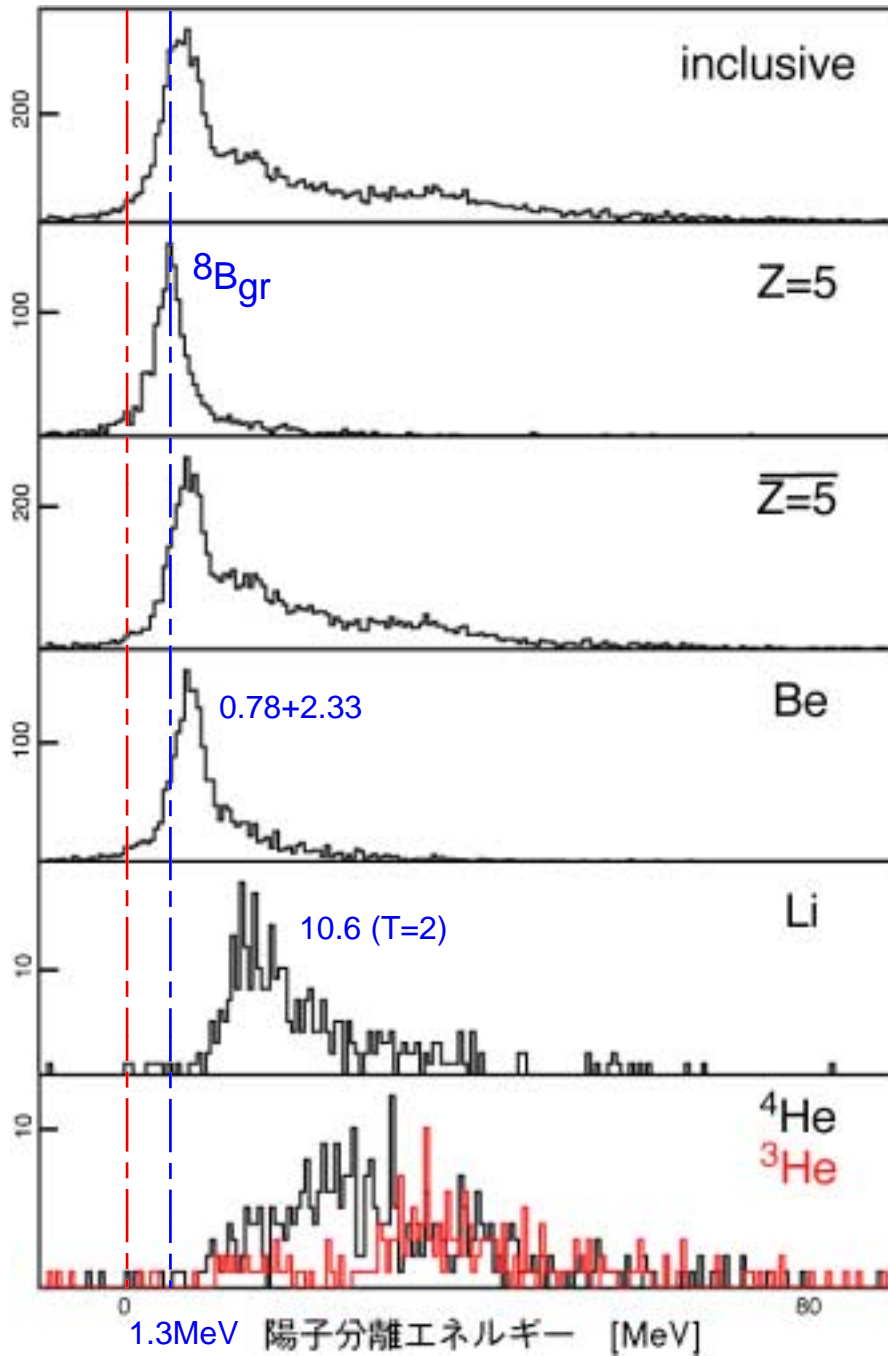
軌道の分離エネルギー + 運動量：

B同位体の励起状態

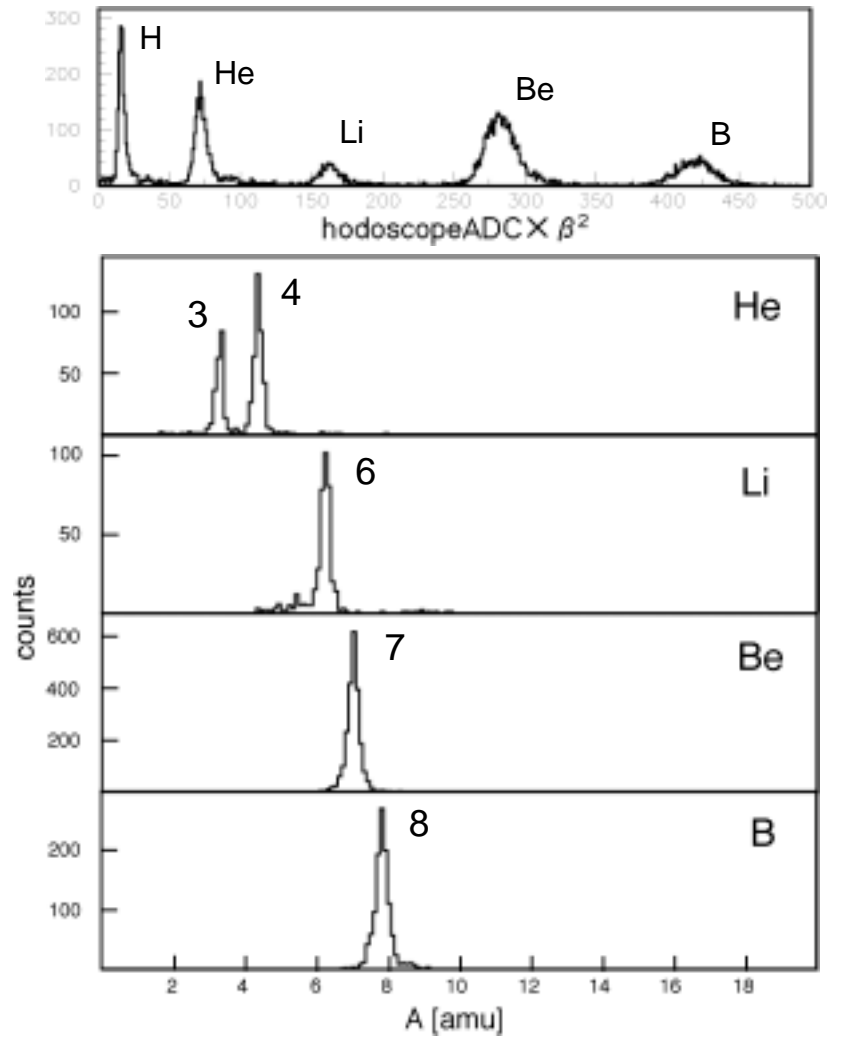
平成16年度

解析とまとめに専念

# $p(^9\text{C}, 2p)^8\text{B}$

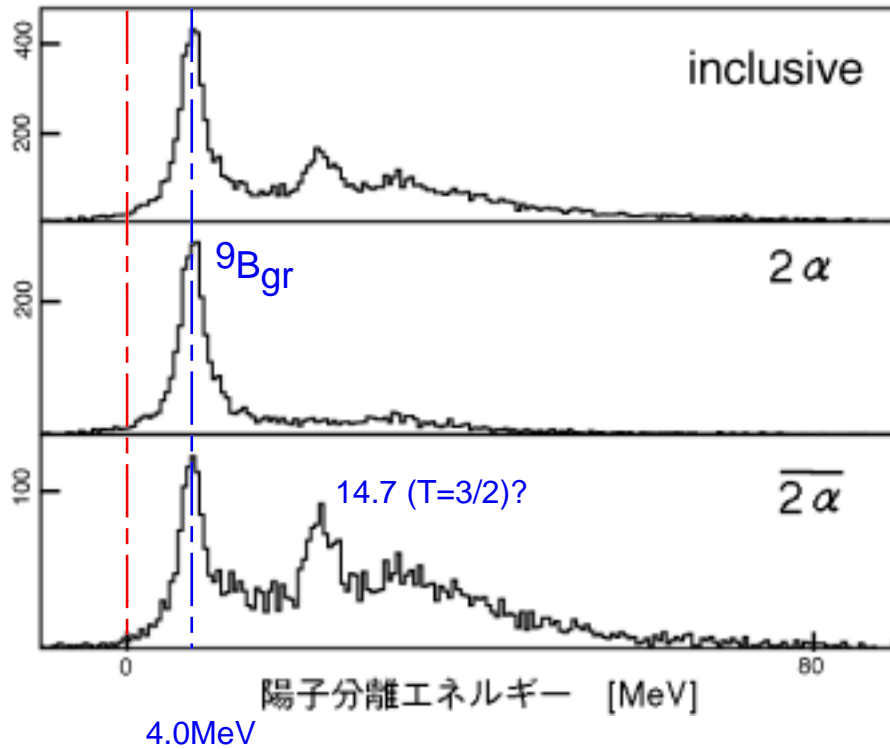


$\frac{13.0}{^9\text{B}+n}$   
10.6 0+ T=2  
2.32 3+  
0.78  
gr 2+  $\frac{0.14}{^7\text{Be}+p}$   
 $^8\text{B}$

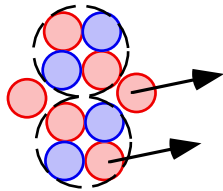
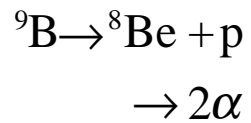
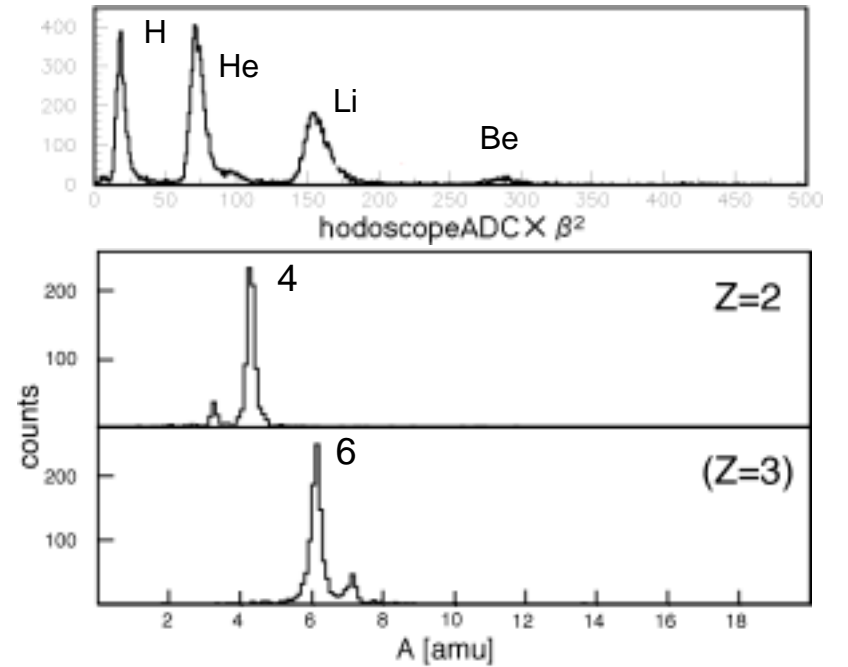




# $p(^{10}\text{C}, 2p)^9\text{B}$

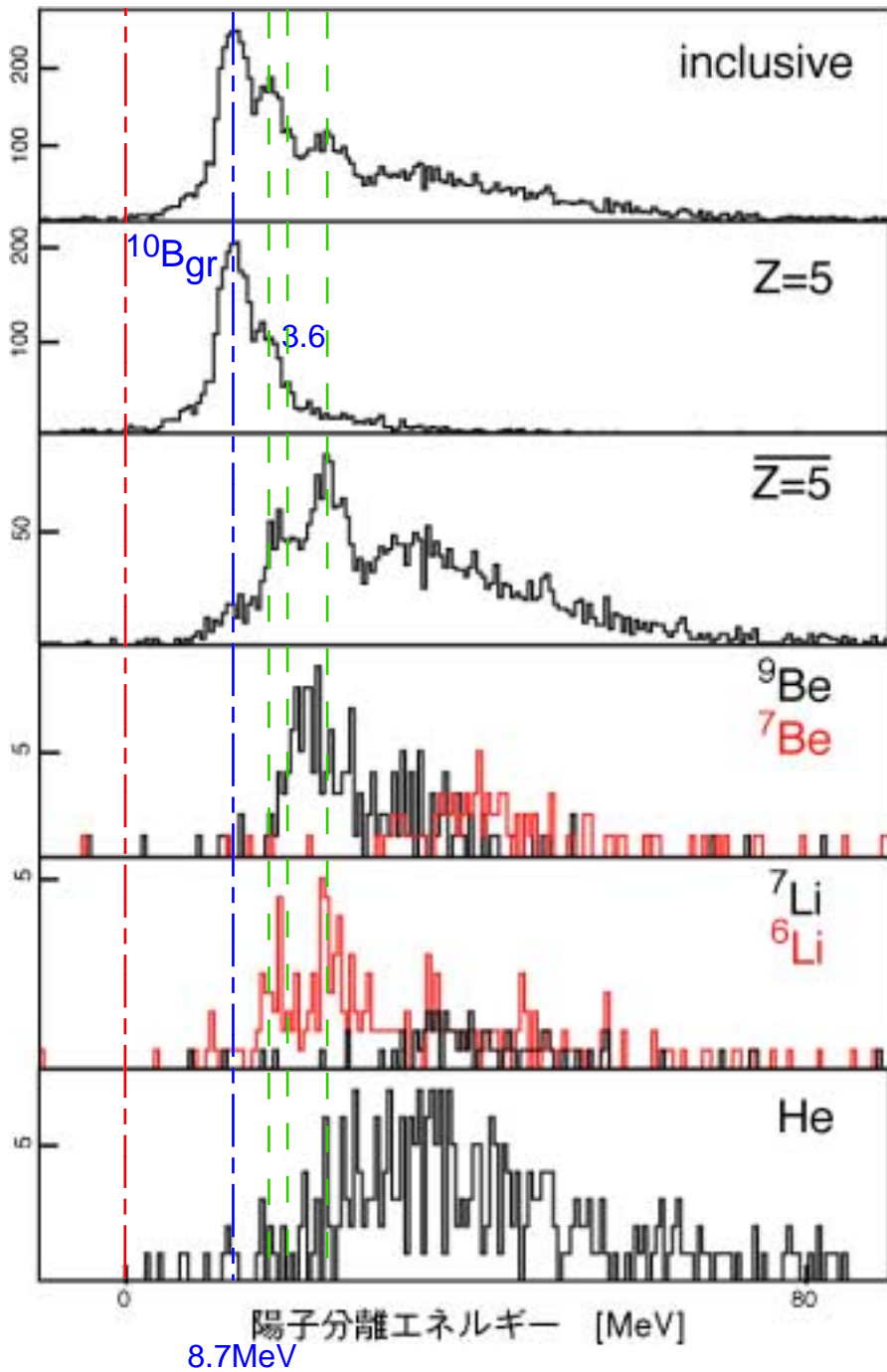


14.7 3/2 - T=3/2



$$\frac{\text{gr } 3/2^-}{^9\text{B}} \quad \underline{-0.185} \quad ^8\text{Be} + p$$

# $p(^{11}\text{C}, 2p)^{10}\text{B}$



10.9?

8.44  
 $^9\text{B}+n$

6.59

6.4?

$^9\text{Be}+p$

6.03

$^8\text{Be}+d$

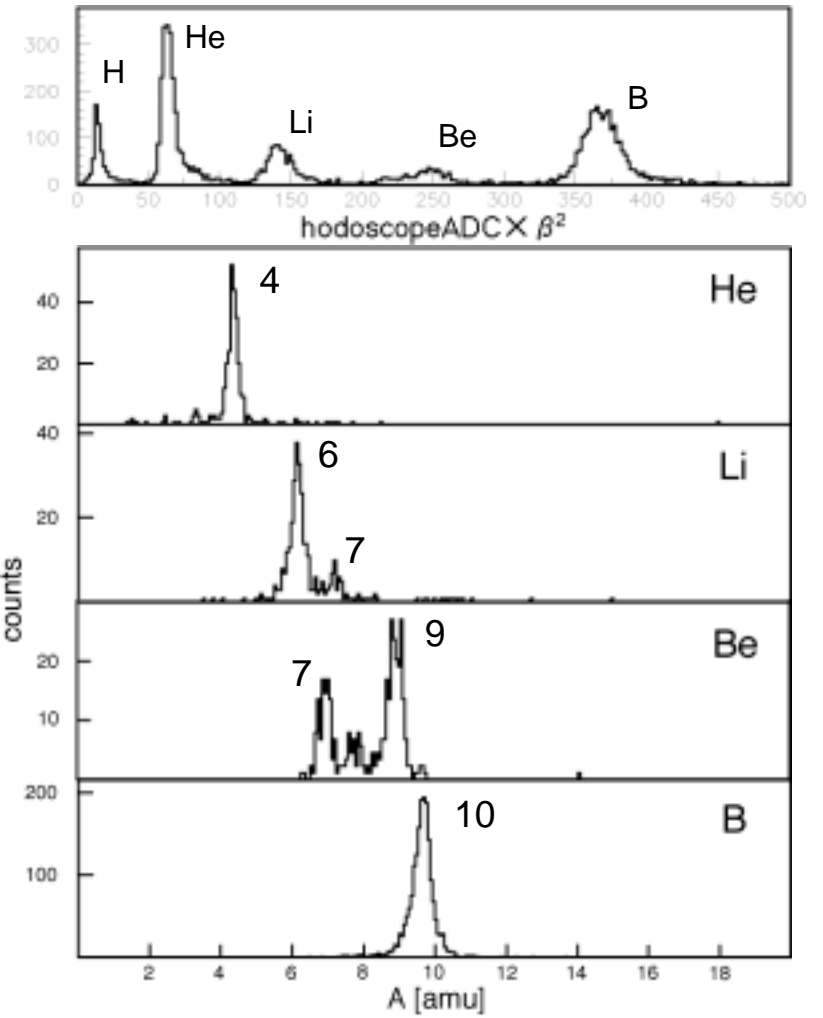
4.3?

4.46

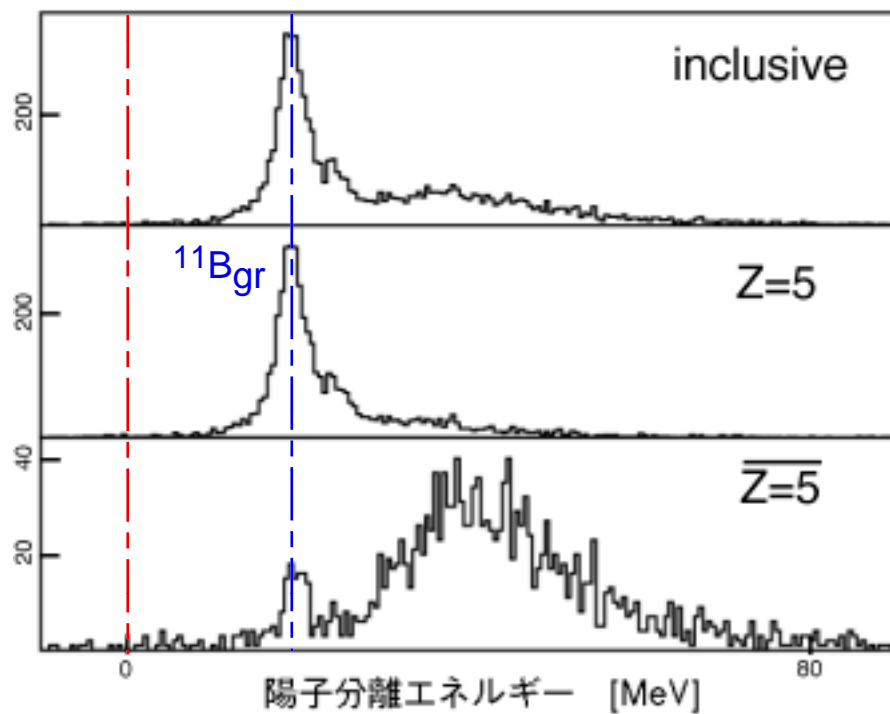
$^6\text{Li}+\alpha$

gr 3+

$^{10}\text{B}$



# $p(^{12}\text{C}, 2p)^{11}\text{B}$



16.0 MeV

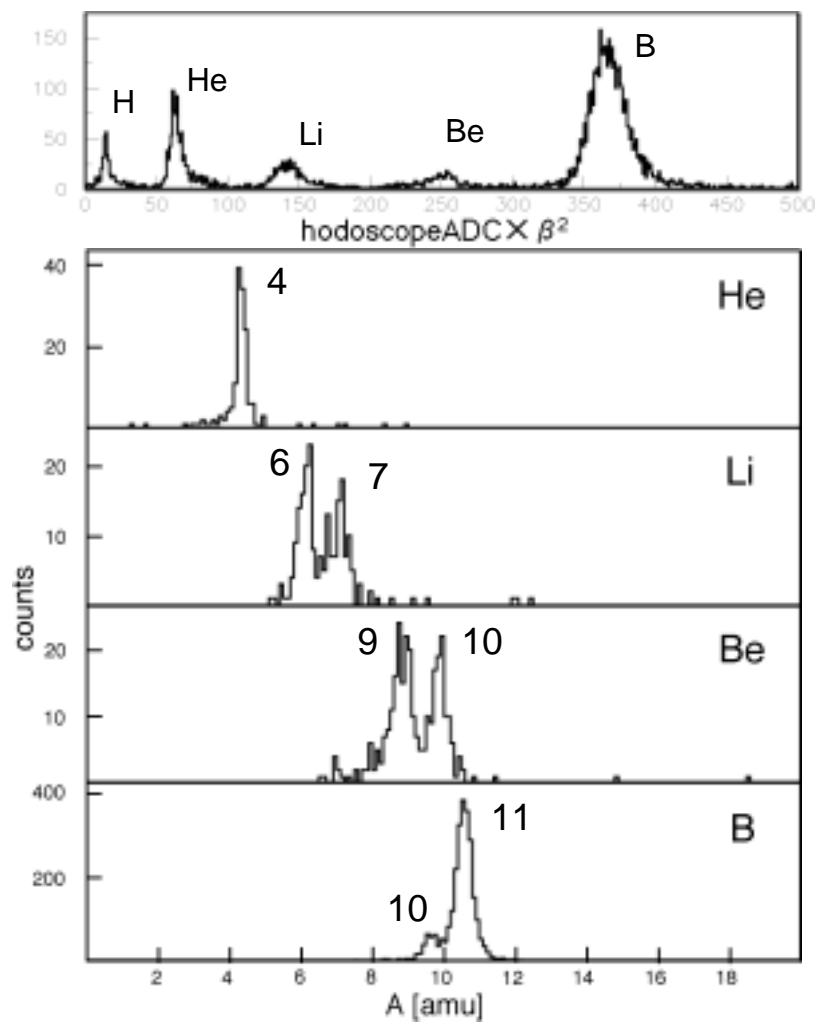
11.45  
 $^{10}\text{B}+n$   
 ---  
 11.23  
 $^{10}\text{B}+p$

5.02 3/2-

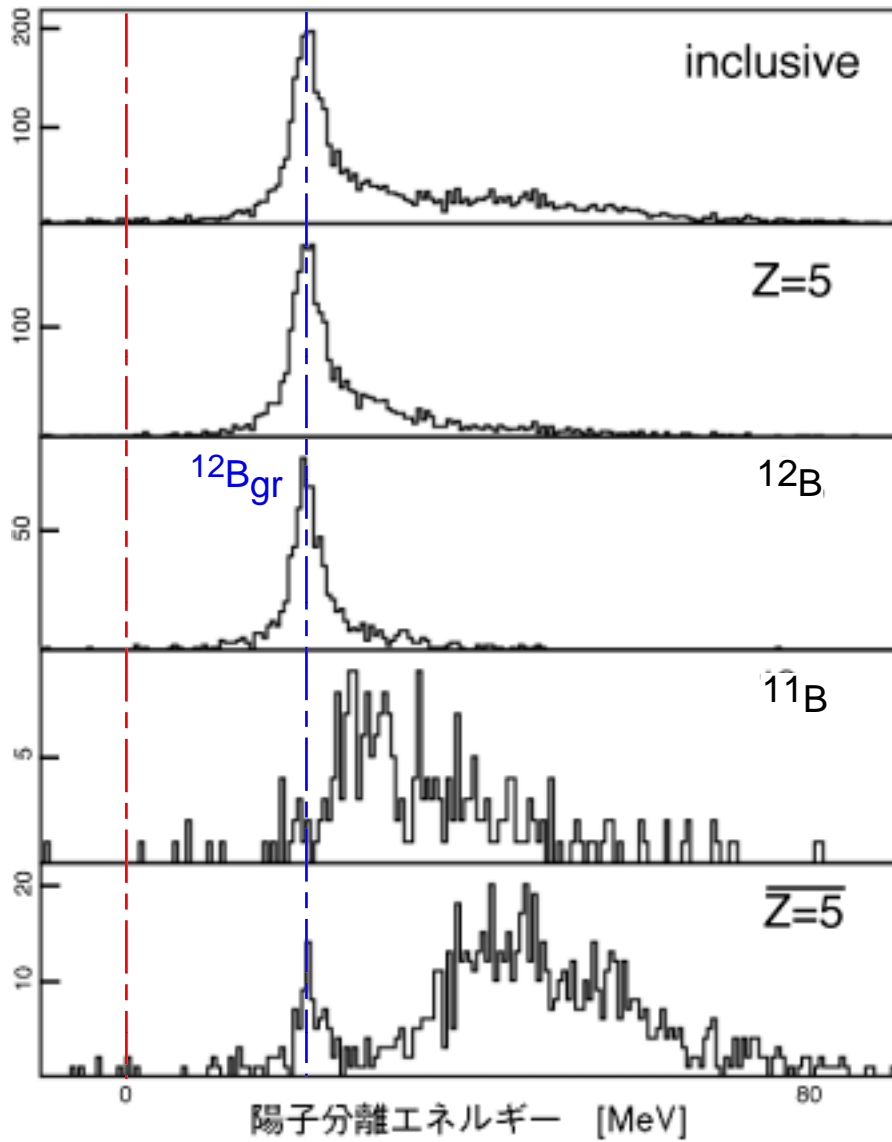
2.13 1/2-

gr 3/2-

$^{11}\text{B}$



# $p(^{13}\text{C}, 2p)^{12}\text{B}$



17.5 MeV

0.95 2+  


---

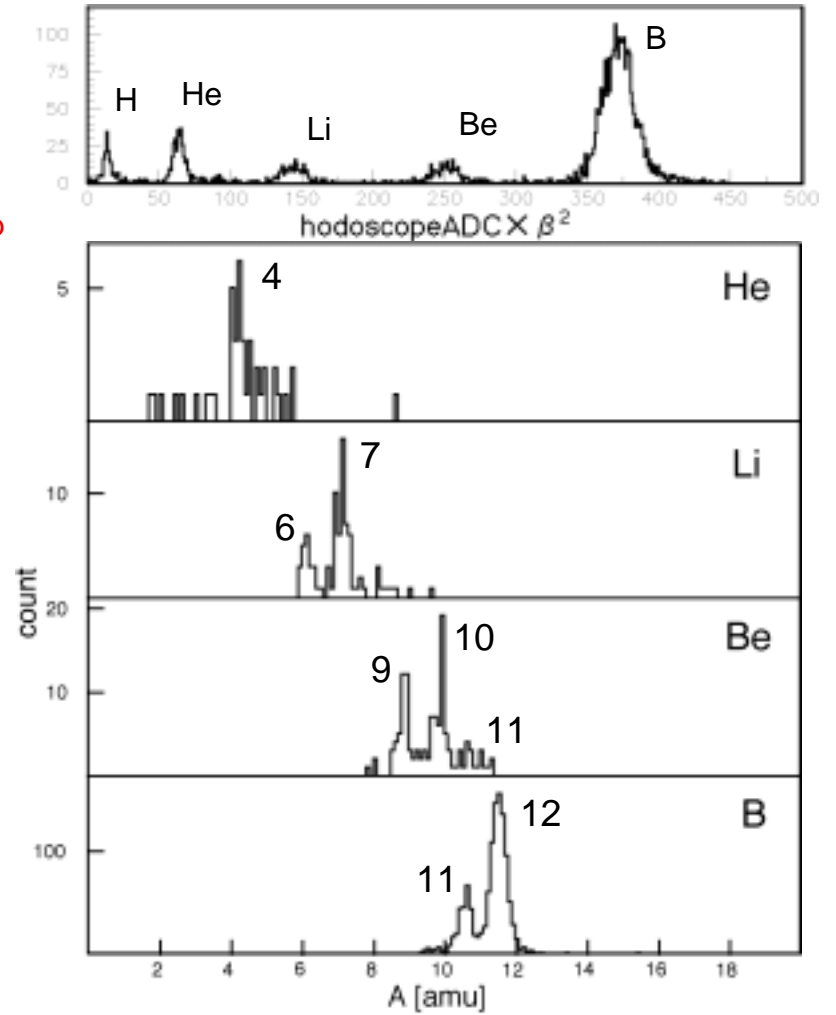
 gr 1+  


---

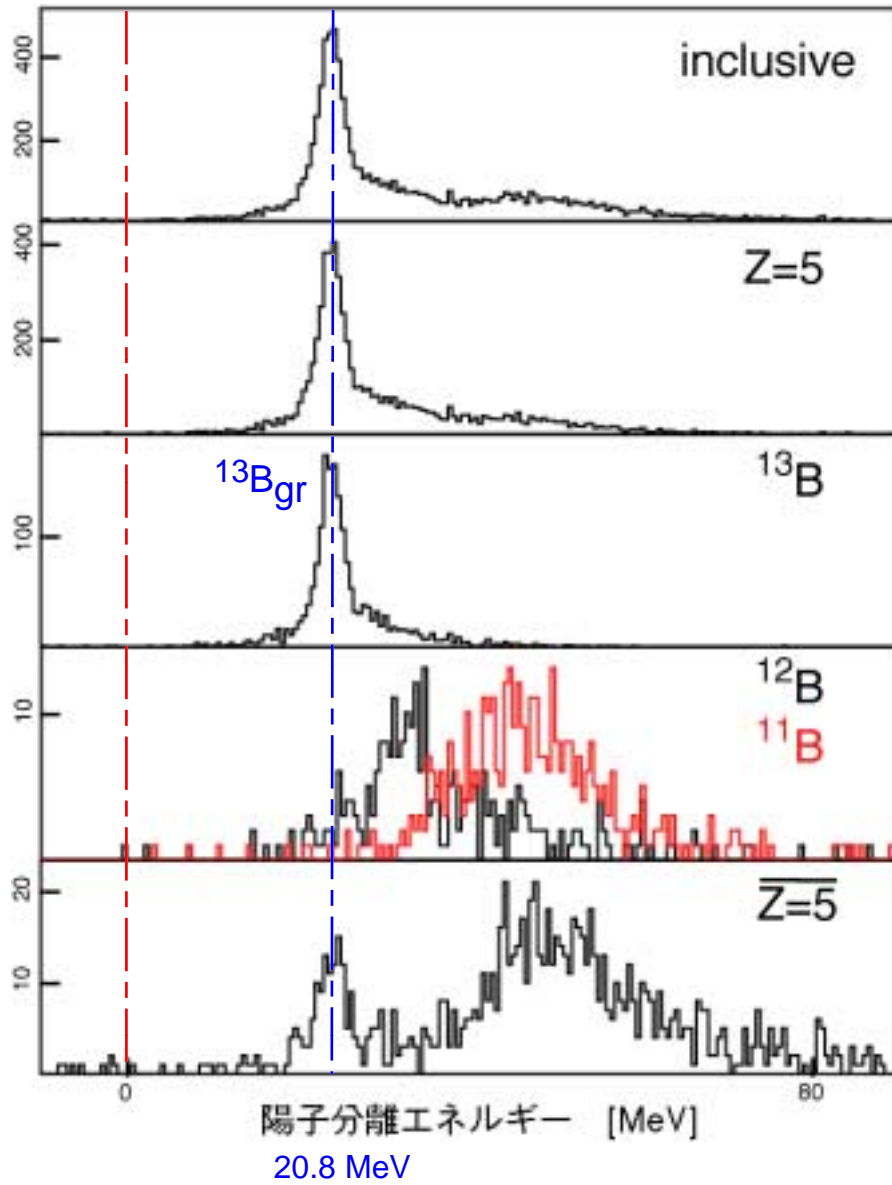
 12B

14.09  
 $\overline{11\text{Be}+p}$

3.37  
 $\overline{11\text{B}+n}$



# $p(^{14}\text{C}, 2p)^{13}\text{B}$



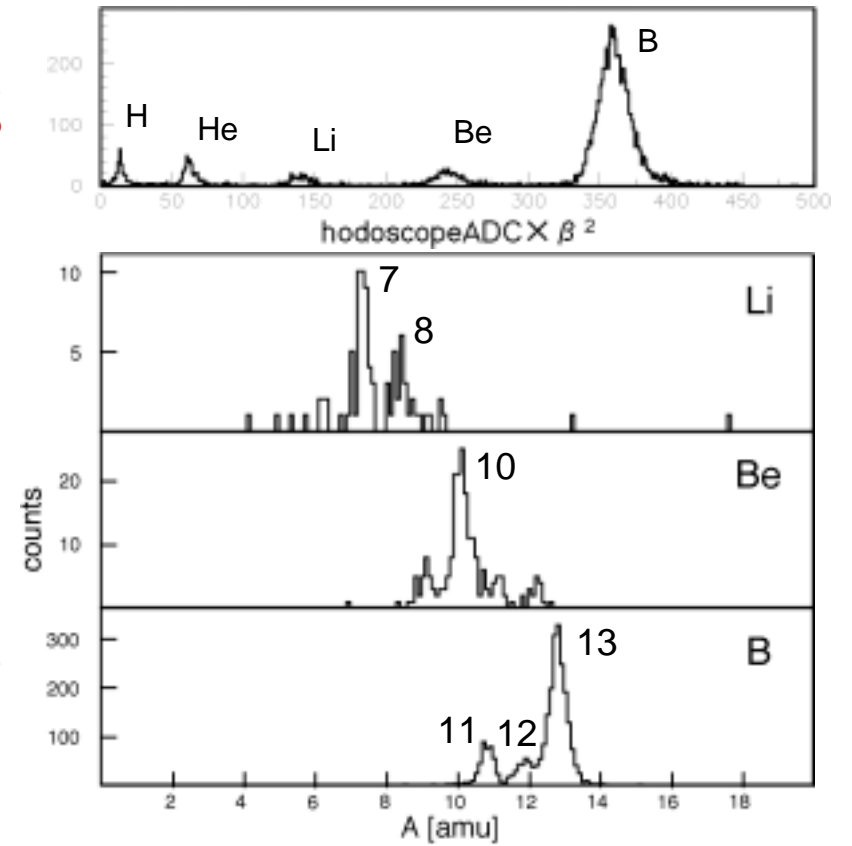
15.8  
 $^{12}\overline{\text{Be}}+p$

8.25  
 $^{11}\overline{\text{B}}+2n$

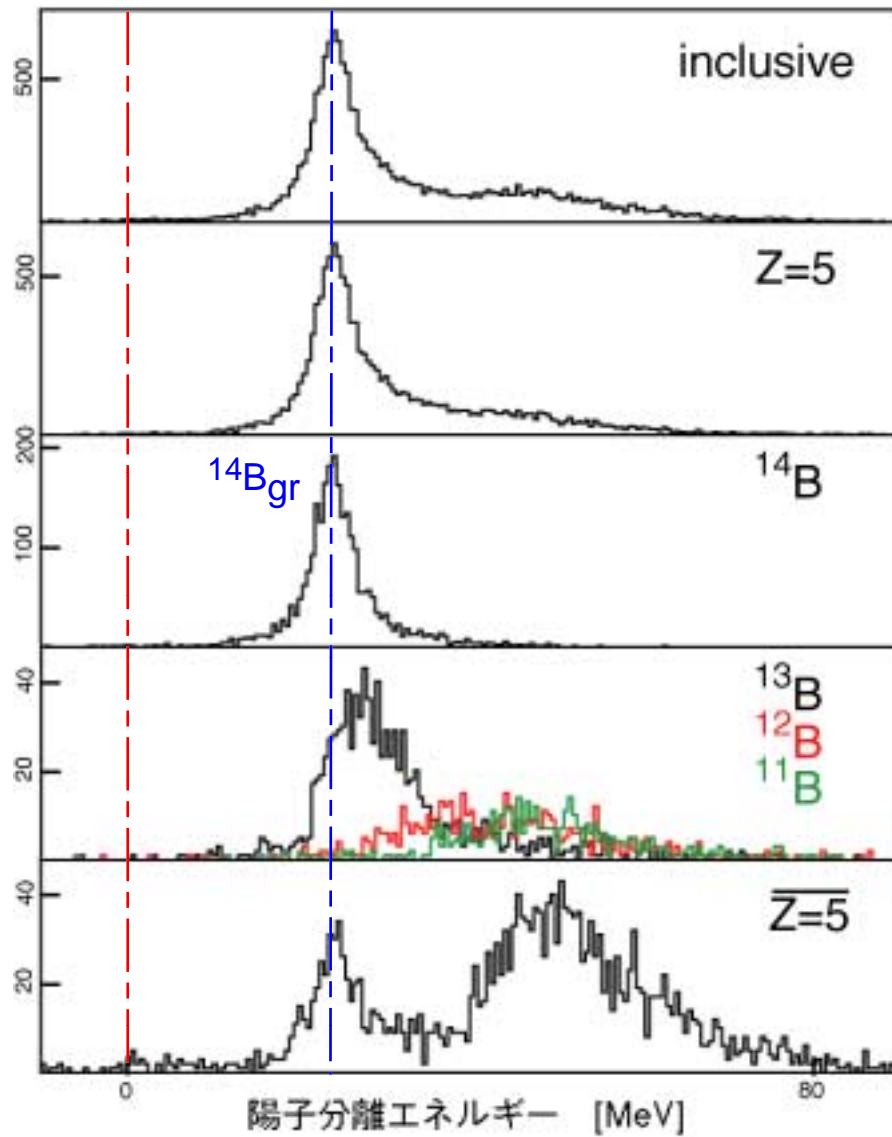
4.88  
 $^{12}\overline{\text{B}}+n$

3.5 ?

gr 3/2-  
 $^{13}\text{B}$



# $p(^{15}\text{C}, 2p)^{14}\text{B}$



21.1 MeV

$18.8$  —  
 $^{13}\text{Be}+p$

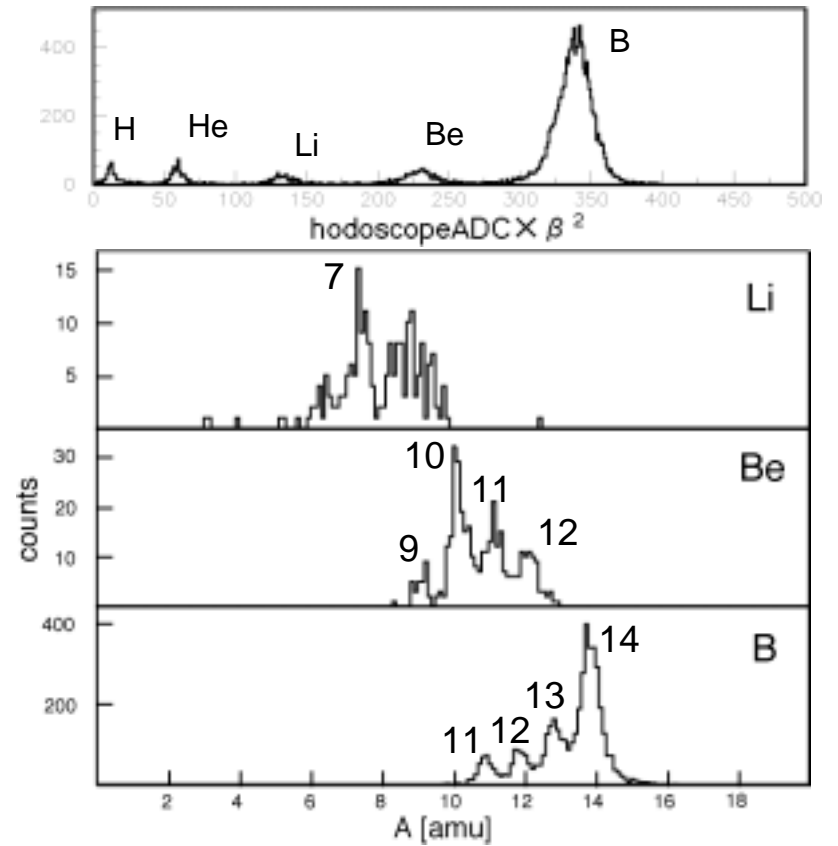
$9.22$  —  
 $^{11}\text{B}+3n$

$5.85$  —  
 $^{12}\text{B}+2n$

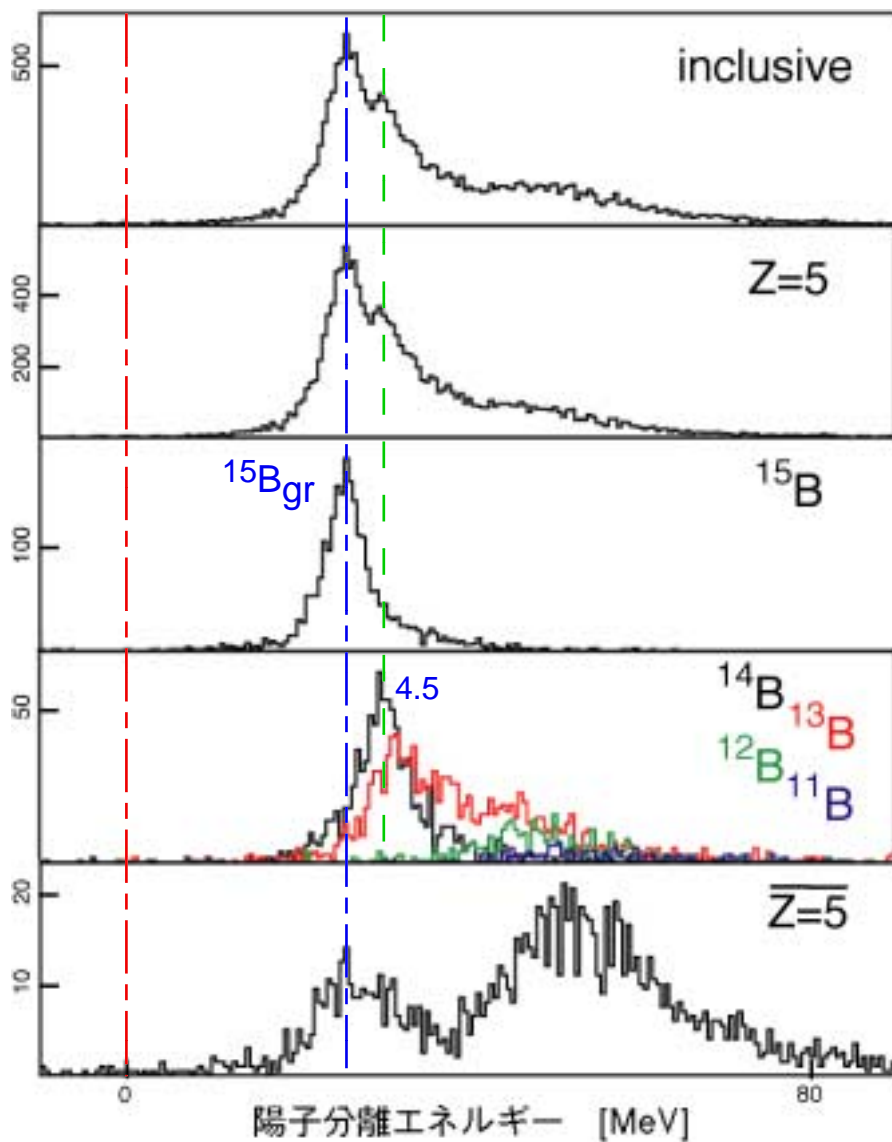
$1.86$  2-

$0.74$  1-?  $0.97$  —  
gr 2-  $^{13}\text{B}+n$

$^{14}\text{B}$



# $p(^{16}\text{C}, 2p)^{15}\text{B}$



22.6 MeV

$\frac{18.2}{^{14}\text{Be}+p}$

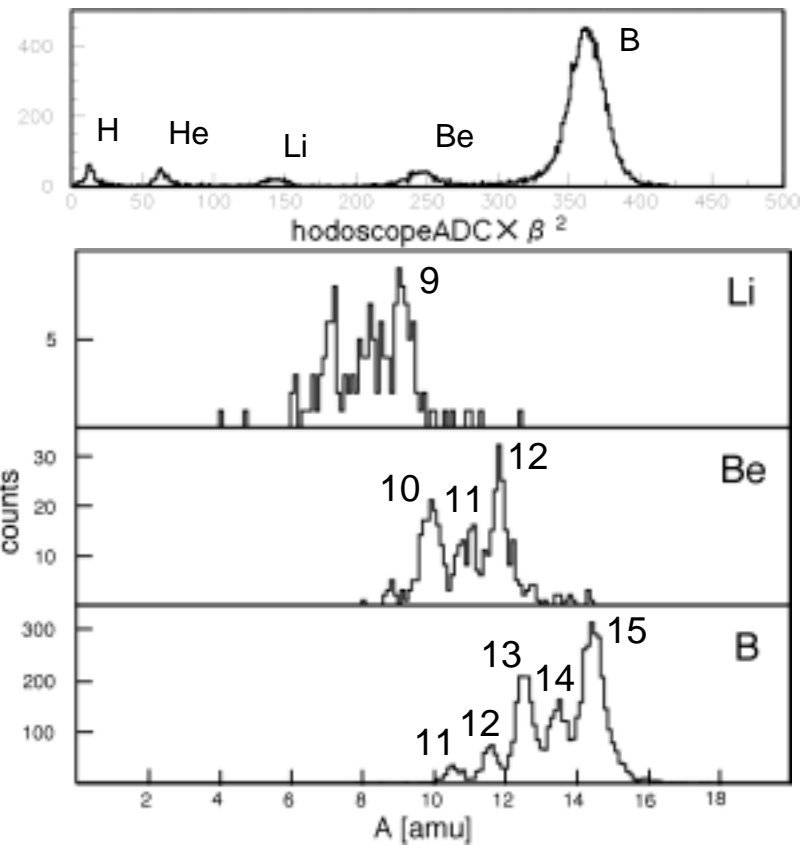
$\frac{12.0}{^{11}\text{B}+4n}$

$\frac{8.62}{^{12}\text{B}+3n}$

$\frac{4.5?}{^{13}\text{B}+2n}$

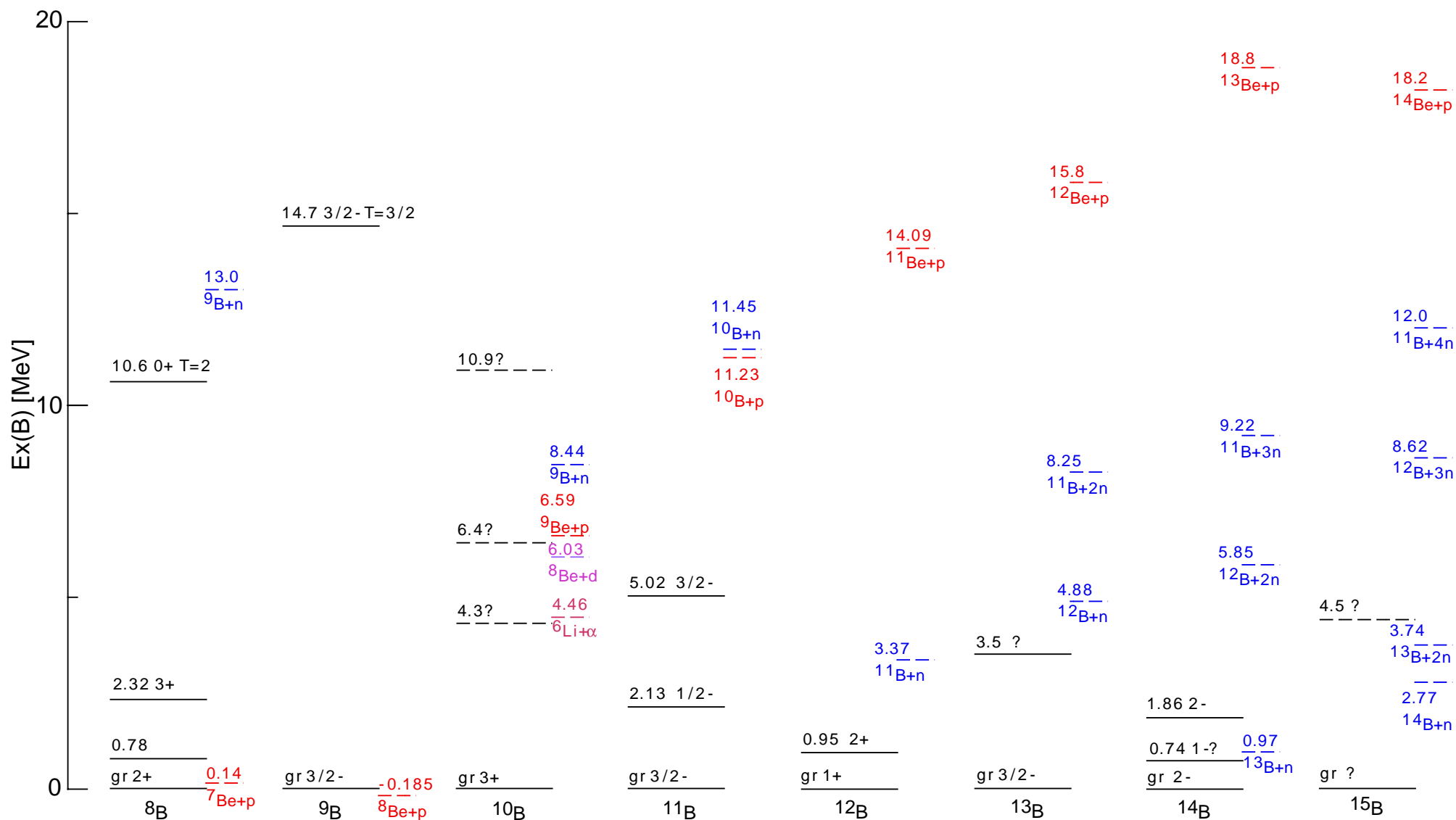
$\frac{2.77}{^{14}\text{B}+n}$

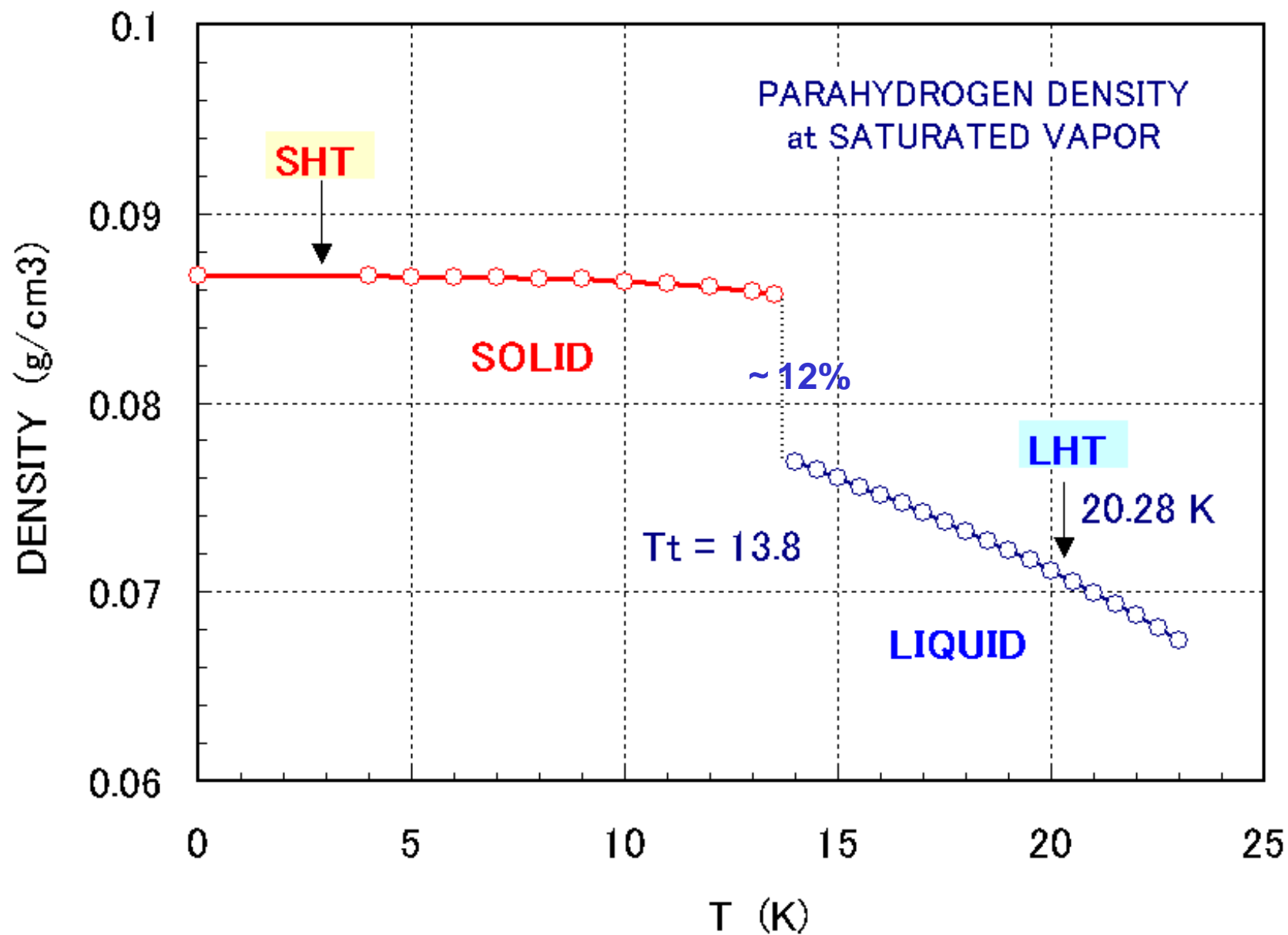
$\frac{gr?}{^{15}\text{B}}$





# 空孔状態 ( ボロン同位体 ) の系統性





# ターゲットセル

- 低酸素銅
- 穴径 30 mm $\phi$  厚さ 5 mm (CH<sub>2</sub> 3.3 mm相当)
- 両面 9  $\mu\text{m}^t$  マイラー (接着剤 STYCAST1266)
- Pt-Co抵抗温度計



ターゲットセル

0.0434 g/cm<sup>2</sup>

$E_{loss} = 0.0868$  MeV

for  $Z = 1$  M.I.

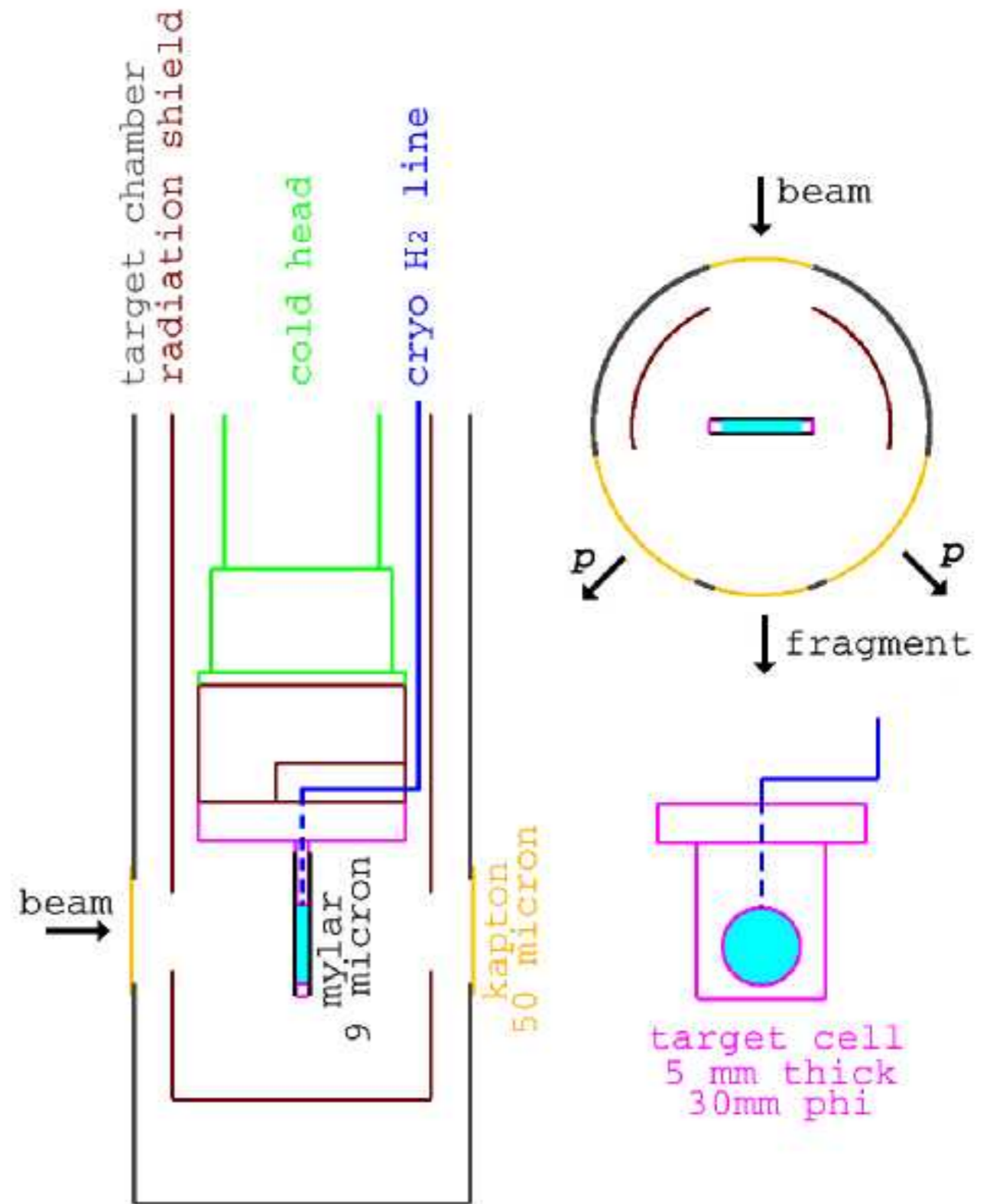
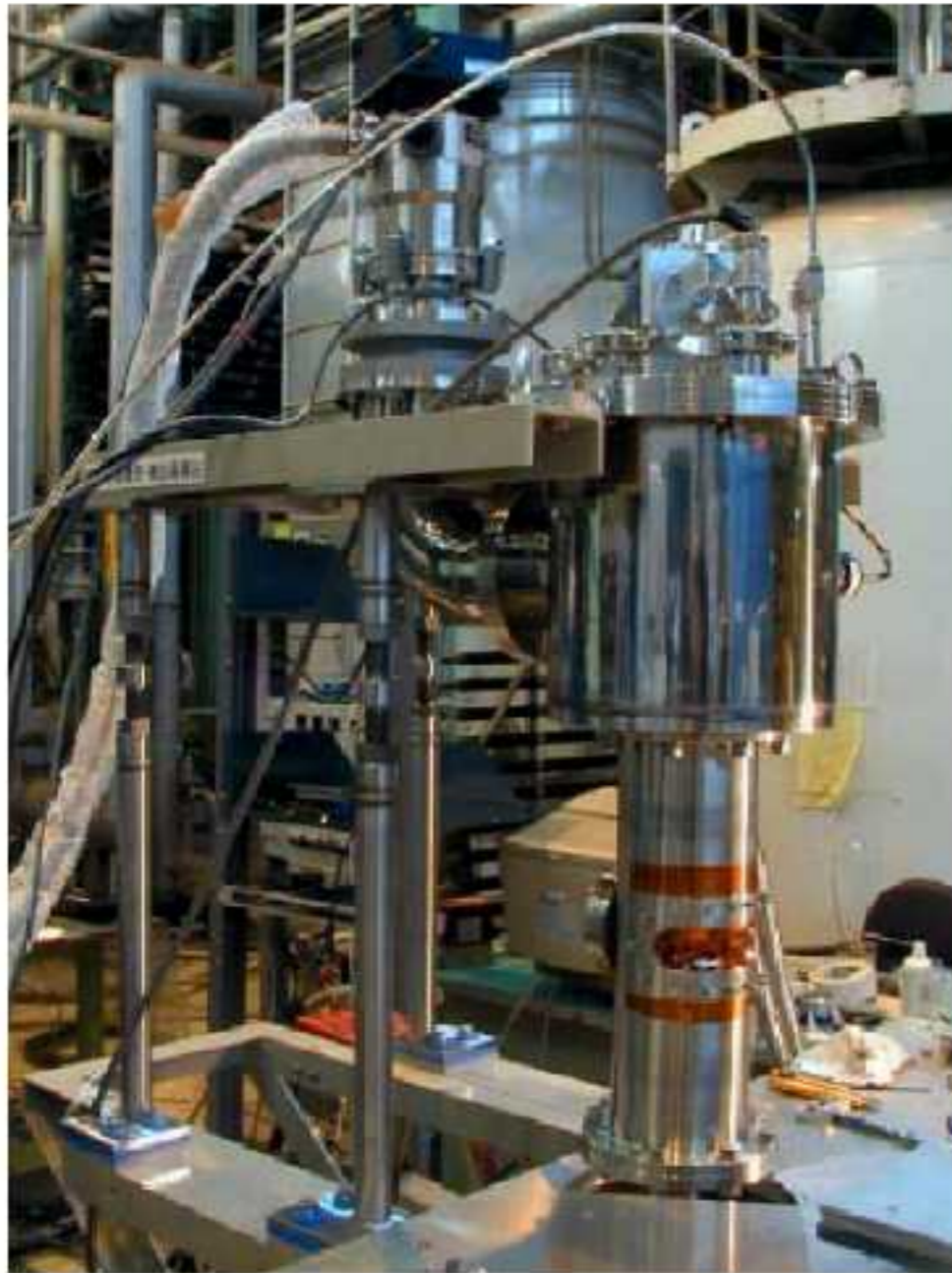


冷凍機へ取付



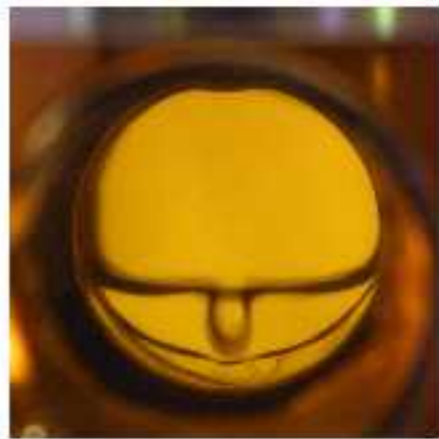
熱シールド

# ターゲットチェンバー





# 固体水素標の作成

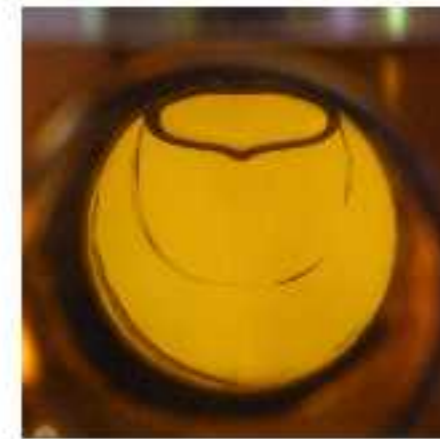


23 sec

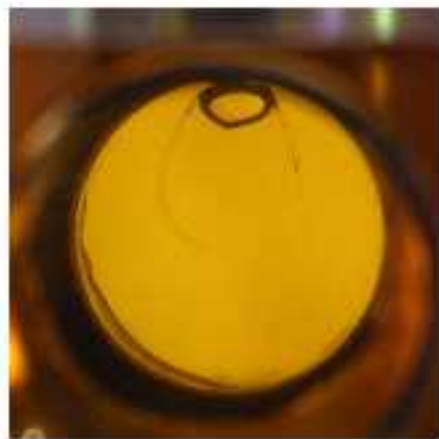
液体/固体



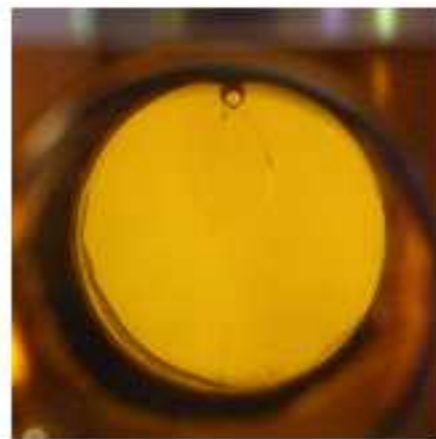
85 sec



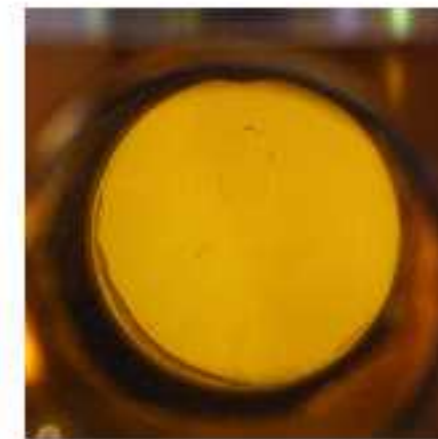
167 sec



221 sec



255 sec



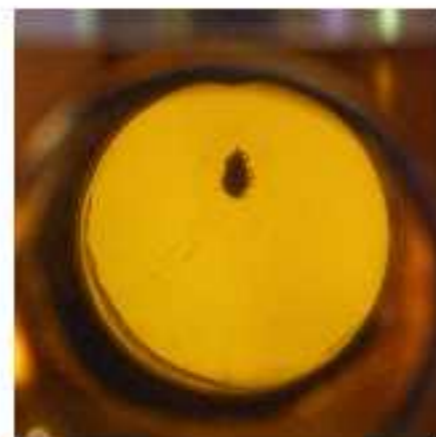
267 sec

流量0



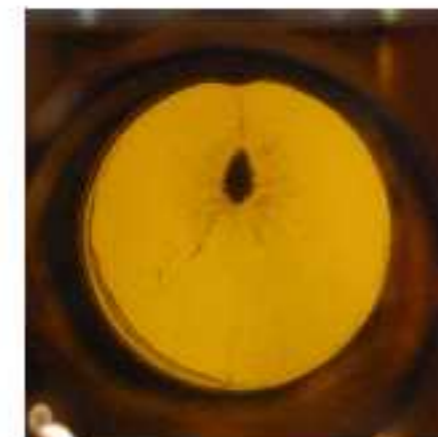
277 sec

"す"



315 sec

完成



6 hour

---

300.0Torr  
64.6Torr  
(空洞  
“す”)



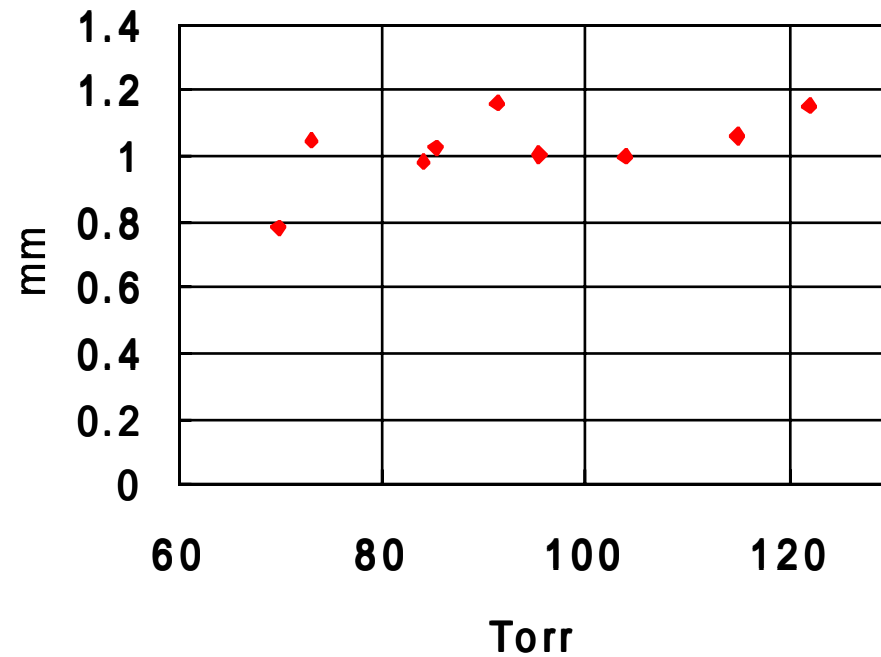
330.2Torr  
85.4Torr  
(“す”なし)



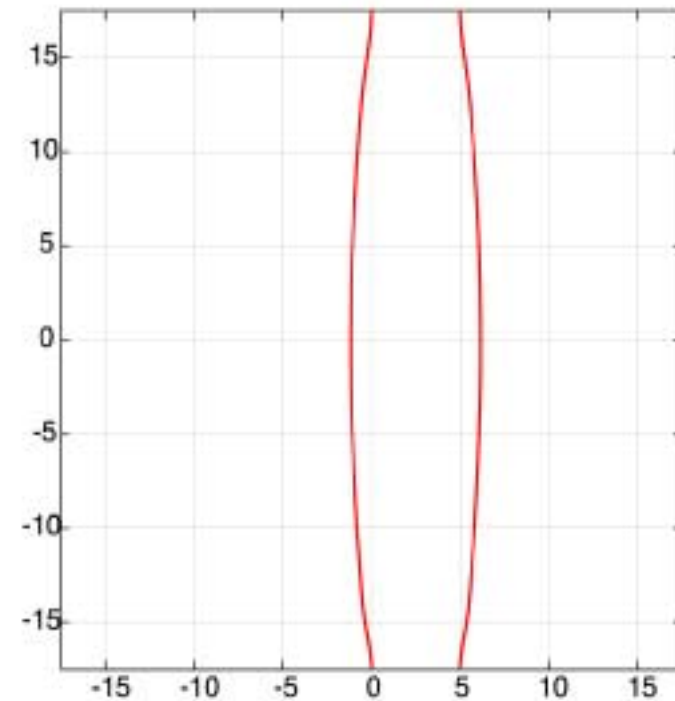
370.1Torr  
122.1Torr  
(“す”)



## 最終圧力と膜の膨らみ



## 膨らみの様子

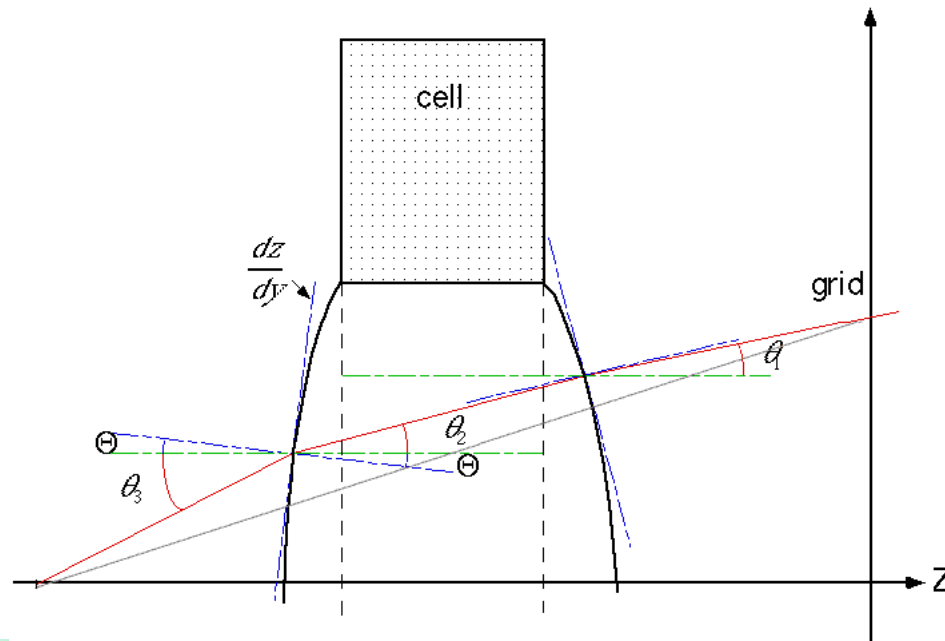


片側最大1.16mm  
(335.0 91.5Torr)



# 固体水素の厚さ測定

## Grid法



各位置における  
膨らみの微係数  
 $\frac{dz}{dy}(=\tan\Theta)$ を  
求める



# 冷凍装置

## 住友重機 極低温冷凍装置 SRDKシリーズ

### ■ RDK-415E (4KGM冷凍機)

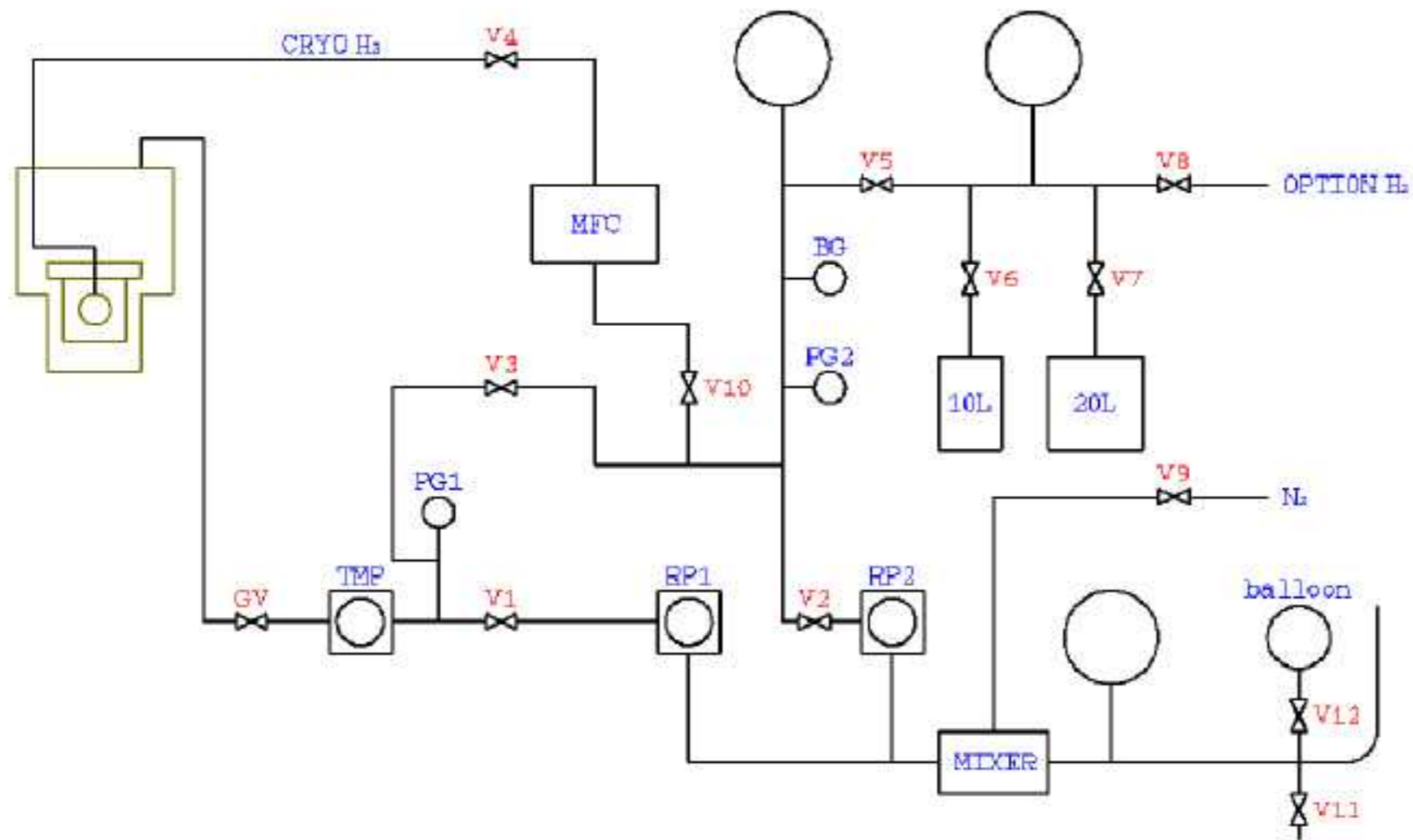
- 二段式GMサイクル
- 冷凍能力(50/60 Hz)…一段 35/45 W at 50 K  
二段 1.5/1.5 W at 4.2 K
- 寸法…幅 152 mm×長さ 294 mm×高さ 567 mm
- 重量…約17.6 kg

### ■ CSW-71C (水冷式圧縮機ユニット)

- 外形寸法…幅 450 mm×長さ 500 mm×高さ 684 mm
- ヘリウムガス圧力 封入圧力…1.60-1.65 MPa at 20 °C  
運転圧力…2.10-2.30 MPa
- 要求電源仕様 入力電圧…AC 200 V/50,60 Hz, 3相  
定格電流…25 A  
必要電源容量…9 kVA
- 重量…約117 kg



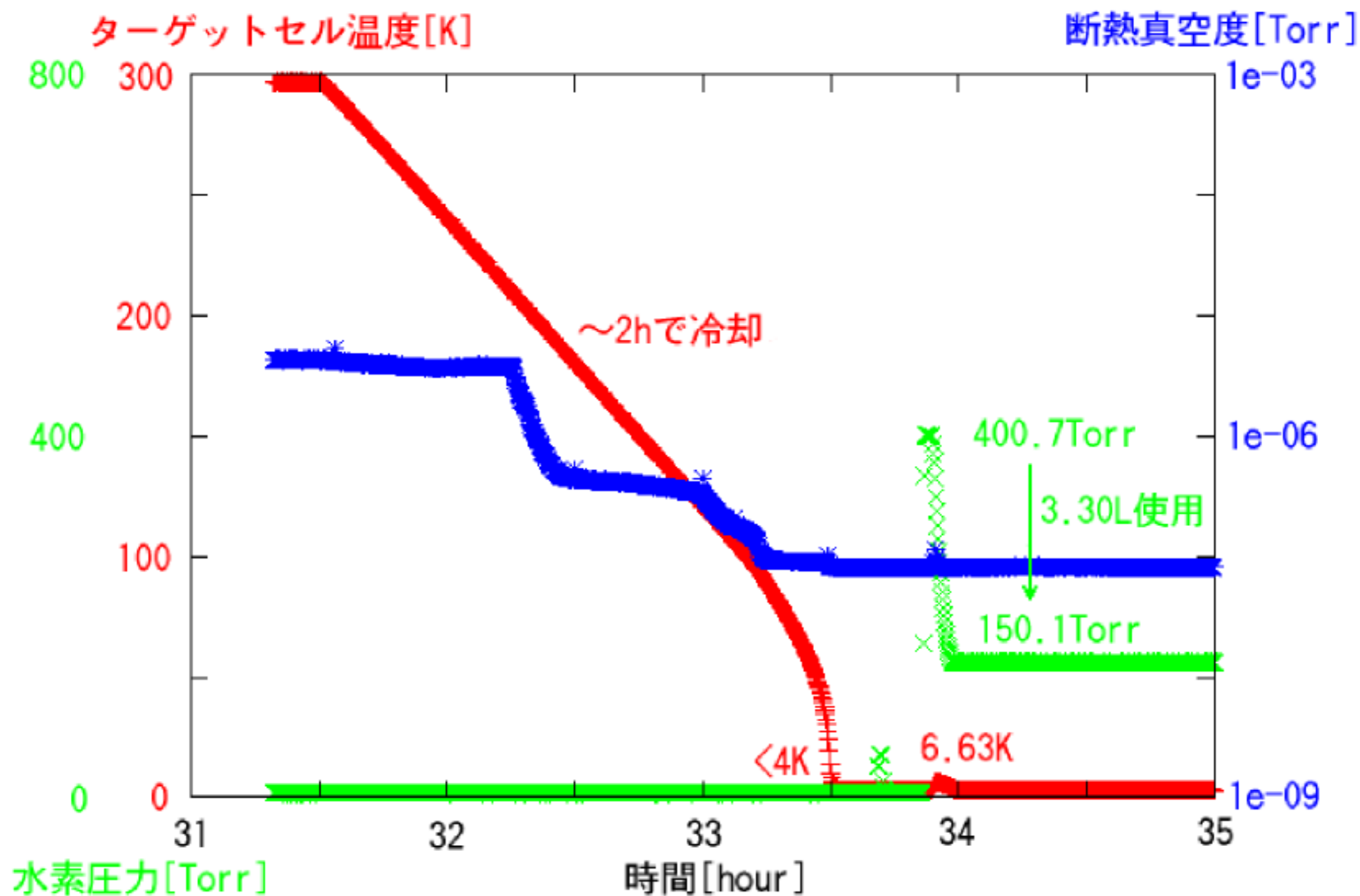
# ガスフロー系



操作パネル



# 状態モニタ

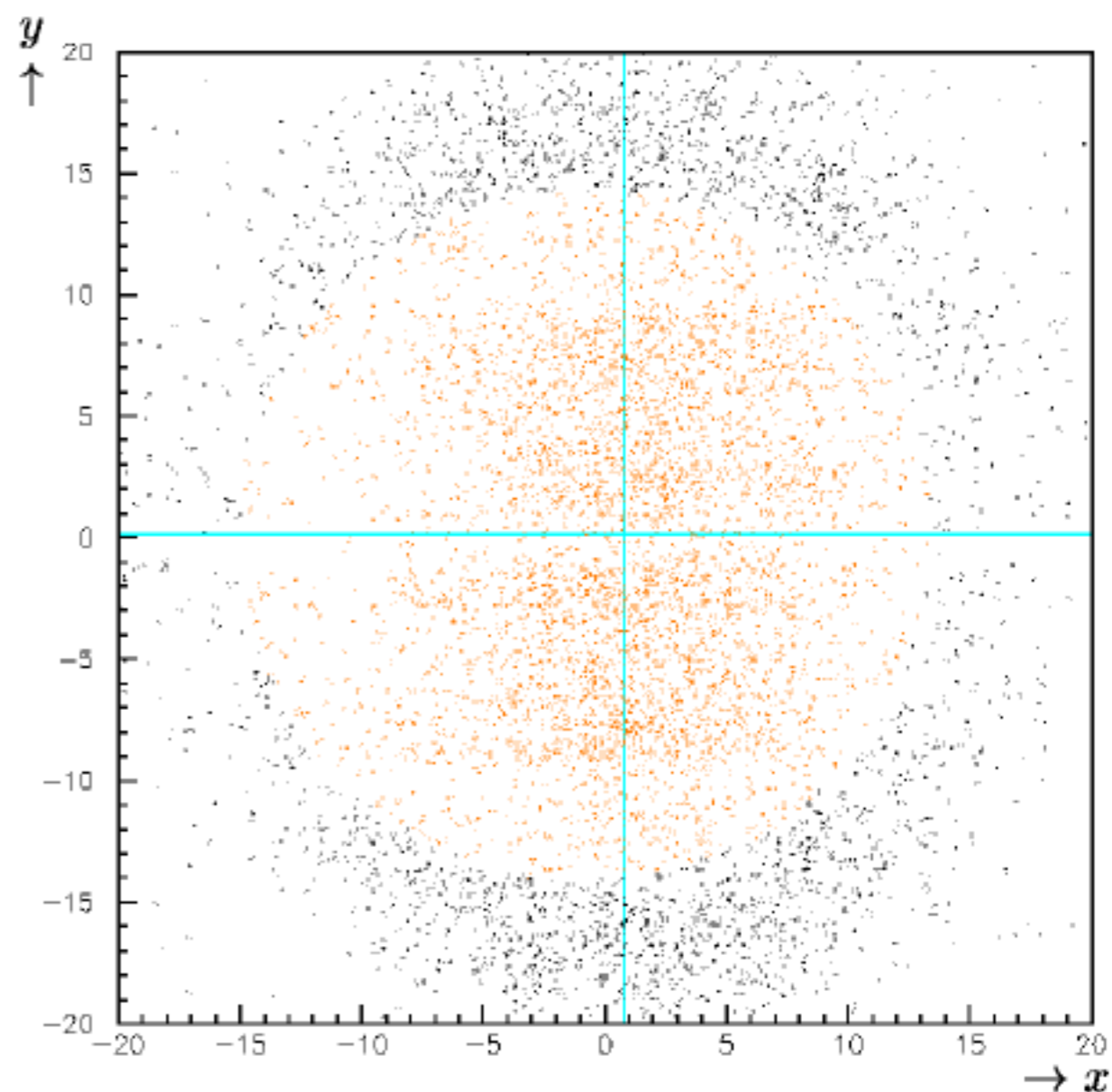
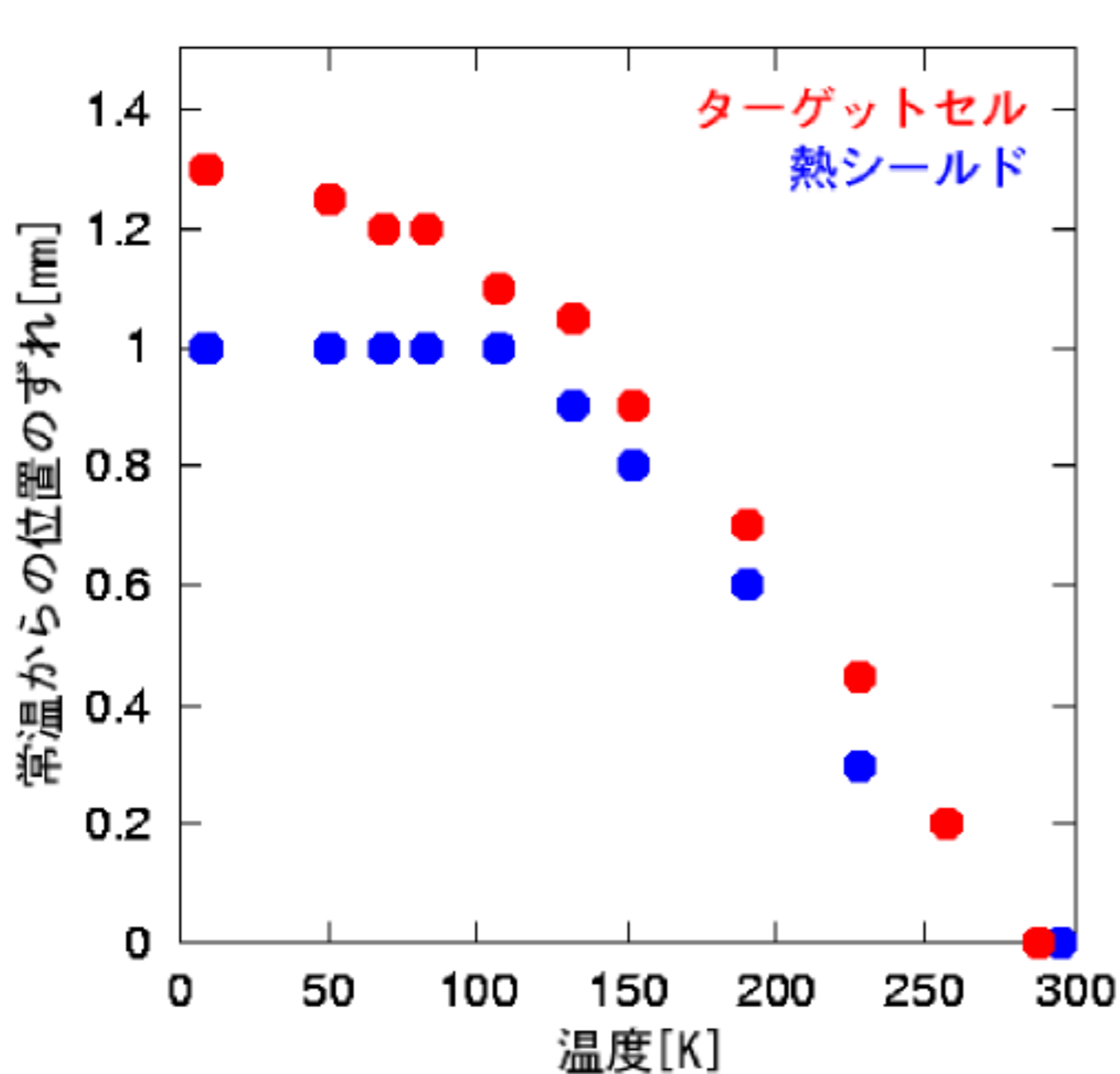


- 固体水素作成後は実験終了 (約 110 h 後) まで安定



# 熱収縮による位置のずれ

熱収縮による位置のずれを考慮する必要がある

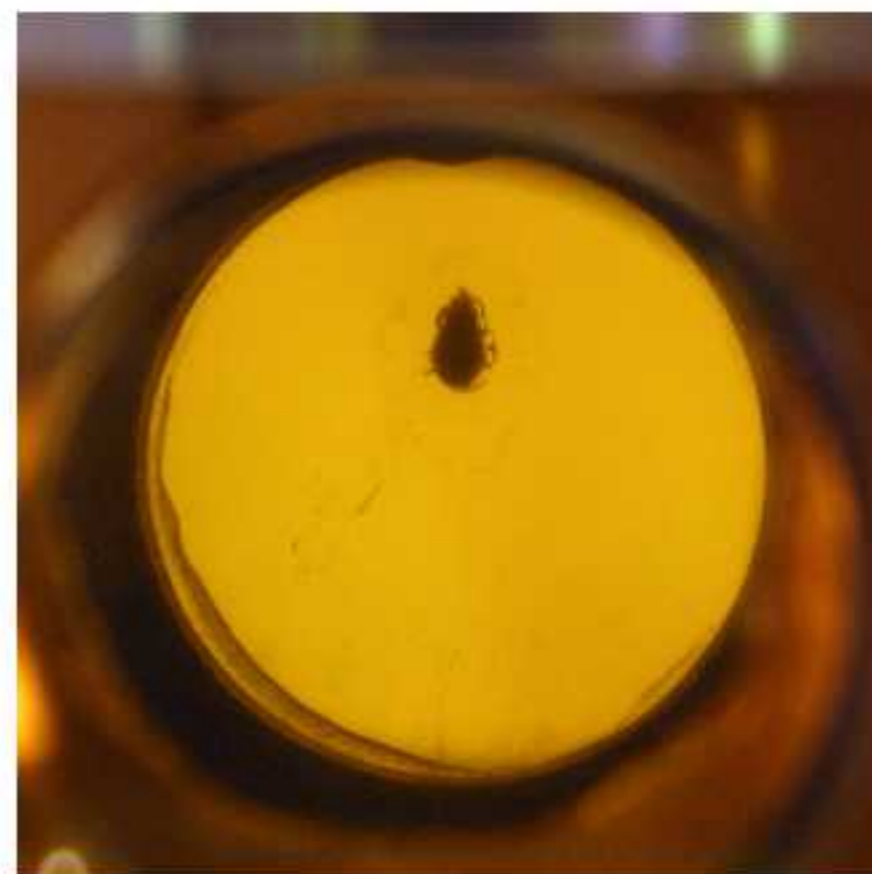


ターゲット中心がビームラインの高さと一致するように追加工

# 膜の膨らみ

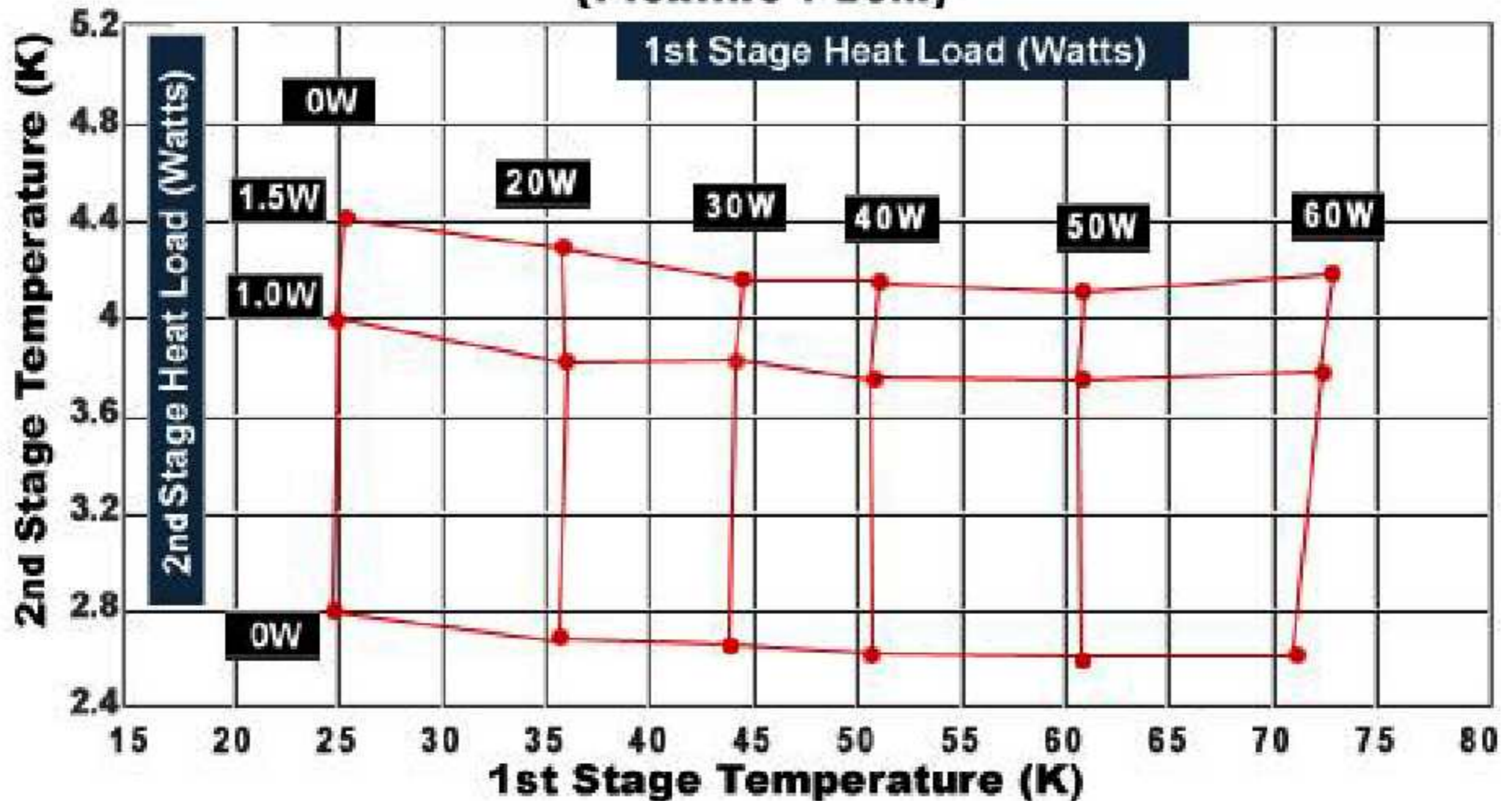
- セル容積  $15^2\pi \times 5 = 3.53 \text{ cm}^3$
  - 固体水素作成に使用した水素 3.30 L (気体, 1 atm)
  - 水素の密度
    - 気体...0.0898 mg/cm<sup>3</sup>
    - 液体...0.0710 g/cm<sup>3</sup>
    - 固体...0.0868 g/cm<sup>3</sup>
- ↓
- 固体水素体積  $3.42 \text{ cm}^3$  セル容積と3%で一致
- 液体水素の蒸気圧 60 Torr (14 K)

膜の顕著な膨らみはない？



# ロードマップ

**RDK 415 Typical Load Map (50Hz)**  
(Flexline : 20m)

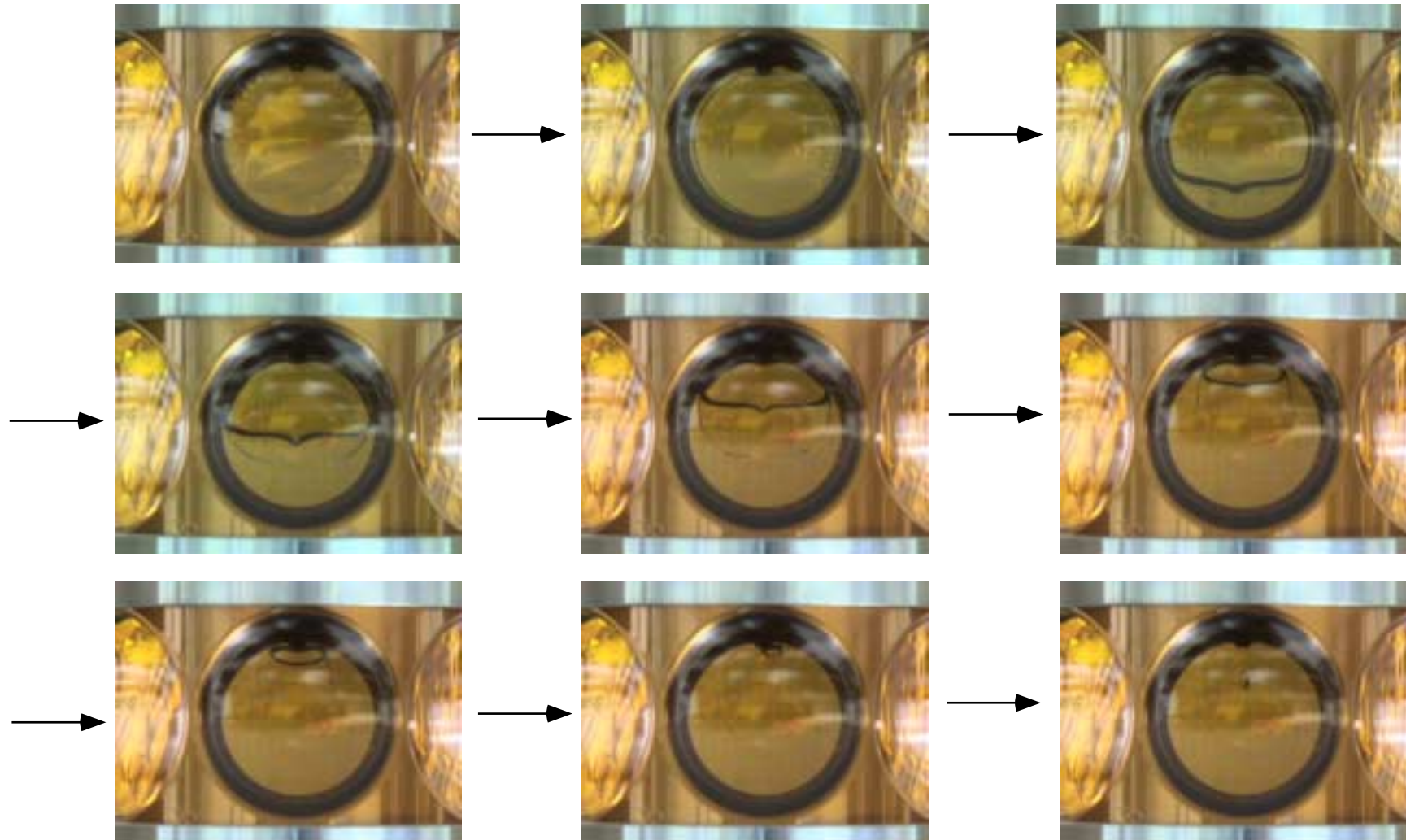




# 固体水素のできる様子

---

固化時間      ~ 10min (      ~ 8K)

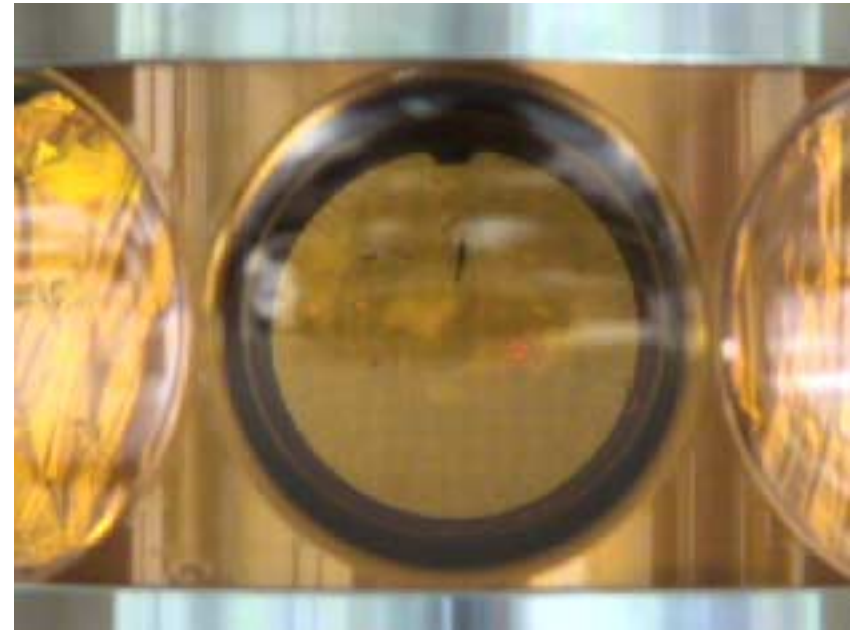
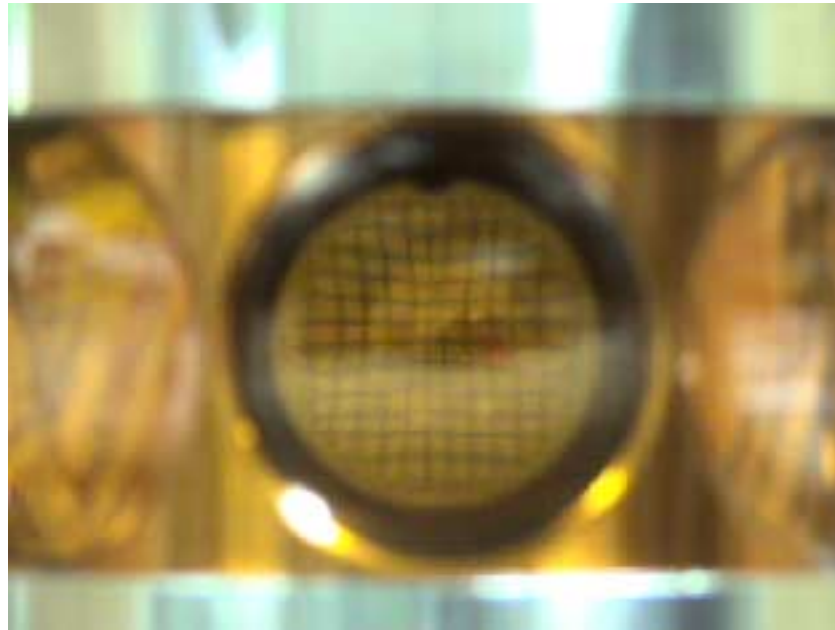




## • 固体水素作成における問題点

---

厚さの一様性と"す"



“す”とは

水素：液体 固体 体積減少

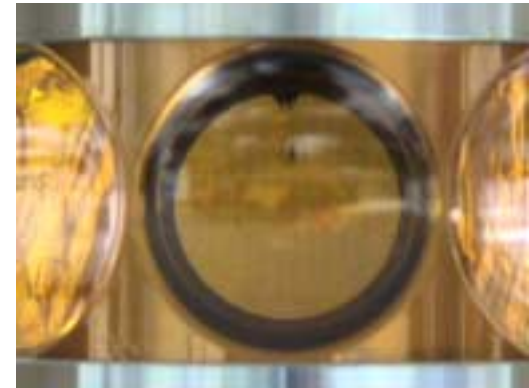
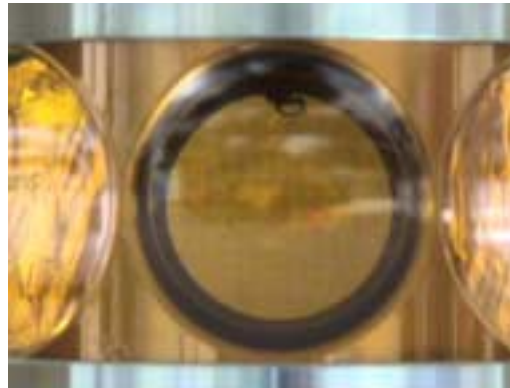
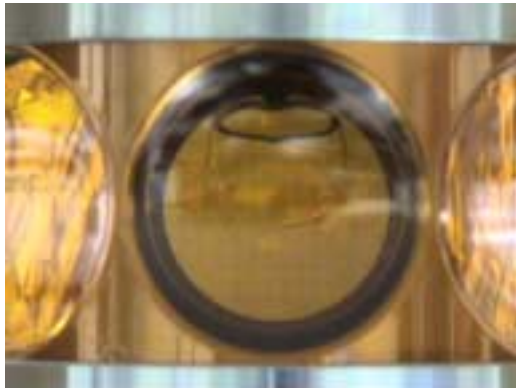
液体が固体に閉じ込められて固化する時 にご  
きる、ひも状のひびのようなもの

# “す”のない固体水素の条件

---

## 圧力依存性

圧力が高い “す”になる



圧力が低い 空洞 “す”になる



# 圧力による固体水素のでき方

