

d(K-,n)反応による $\Lambda(1405)$ 粒子の 精密分光実験のための 液体重水素標的開発(2)

大阪大学核物理研究センター野海研究室

川崎 新吾

2012/09/07

The J-PARC E31 Collaboration

阪大理、阪大RCNP^A、理研^B、KEK^C、東大理^D、東大教養^E、東工大理^F、京大理^G、大阪電通大^H、INFN-Torino^I、INFN-LNF^J、SMI^K、ソウル国立大^L、ミュンヘン工大^M、Torino大^N、Victoria大^O、東北大理^P

○川崎新吾、井上謙太郎、榎本瞬、太田岳史、阪口篤志、吉田幸太郎、味村周平^A、野海博之^A、板橋健太^B、岩崎雅彦^B、應田治彦^B、大西宏明^B、岡田信二^B、佐久間史典^B、友野大^B、馬越^B、山崎敏光^B、飯尾雅実^C、石元茂^C、岩井正明^C、鈴木祥仁^C、関本美知子^C、豊田晃久^C、石川隆^D、佐藤将春^D、鈴木隆敏^D、施赫將^D、竜野秀行^D、橋本直^D、早野龍五^D、藤原裕也^D、松田恭幸^E、康寛史^F、徳田真^F、佐田優太^G、永江知文^G、平岩聡彦^G、藤岡宏之^G、福田共和^H、溝井浩^H、D.Faso^I、O.Morra^I、M.Bragadireanu^J、C.Curceanu^J、C.Guaraldo^J、M.Iliescu^J、D.Pietreanu^J、D.Sirghi^J、F.Sirghi^J、P.Böhler^K、M.Cargnelli^K、石渡智一^K、J.Marton^K、鈴木謙^K、E.Widmann^K、J.Zmeskal^K、H.Bhang^L、S.Choi^L、H.Yim^L、P.Kienle^M、L.Busso^N、G.Beer^O、塚田暁^P

目次

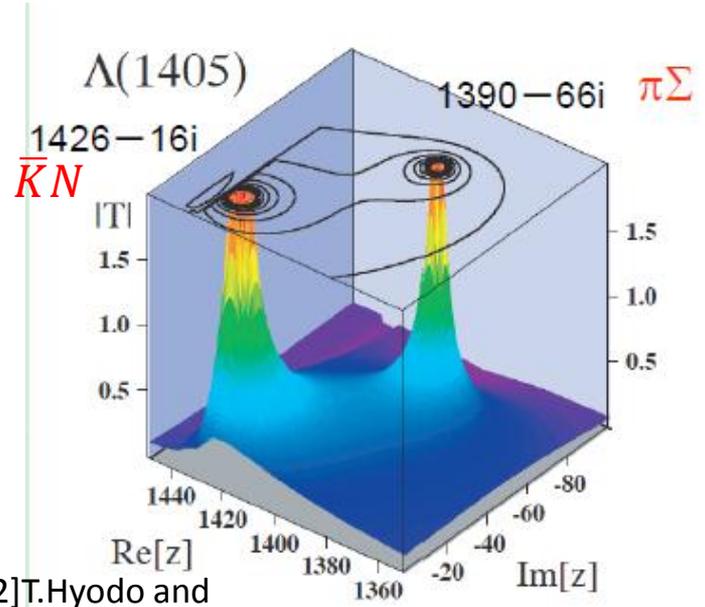
1. $\Lambda(1405)$ 研究背景
2. J-PARC-E31実験
3. 液体重水素標的開発
 - A) 実機セットアップ
 - B) 標的容器の固定
 - C) 水素液化試験
 - D) 冷却能力
4. まとめ

$\Lambda(1405)$ 研究背景・動機

$$I = 0, J^P = \frac{1}{2}^-, m = 1405.1 \pm_{1.0}^{1.3} \text{ (MeV)}, \Gamma = 50 \pm 2 \text{ (MeV)} \text{ (PDG-2011)}$$

クォーク模型では
 $\Lambda(1405)$ (u,d,s)の第一励起状態
sクォークを含まない励起状態を含めて一番軽い粒子
→単純な構成子クォークで説明できていない

これに対して
・K-pの分子共鳴状態が Λ のスペクトル近傍に極を持つことが
カイラルユニタリーモデルによって示唆されている。



→ $\Lambda(1405)$ はこうした2つの共鳴状態の重ね合わせである可能性
他にも $\Lambda(1405)$ に対するクォーク模型以外のモデルがある

励起状態ハドロン
内部構造の理解

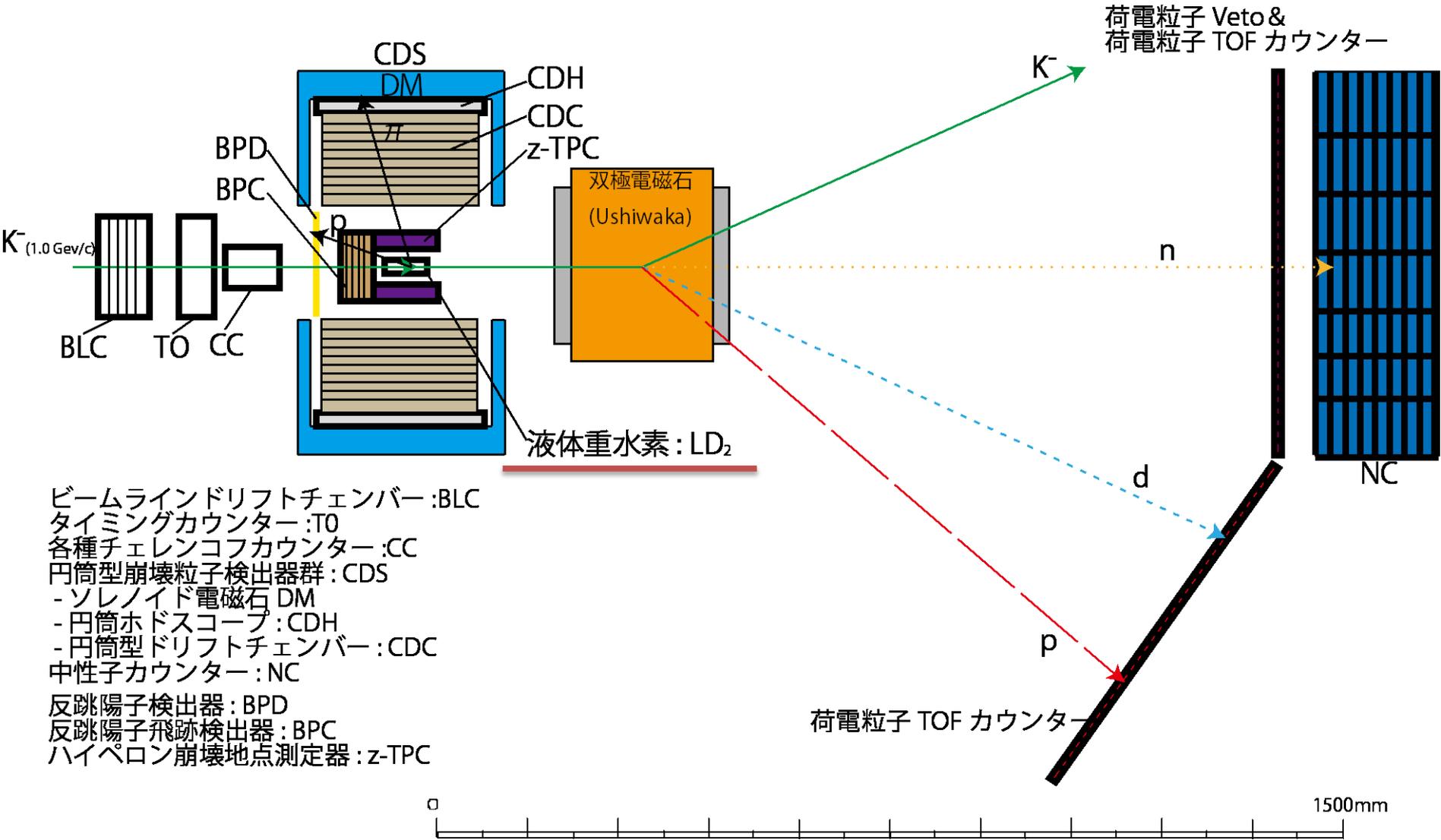
↓
クォーク-ハドロン形成の理解

[2] T. Hyodo and A. Weise, Phys. Rev. C 77, 035204 (2008)

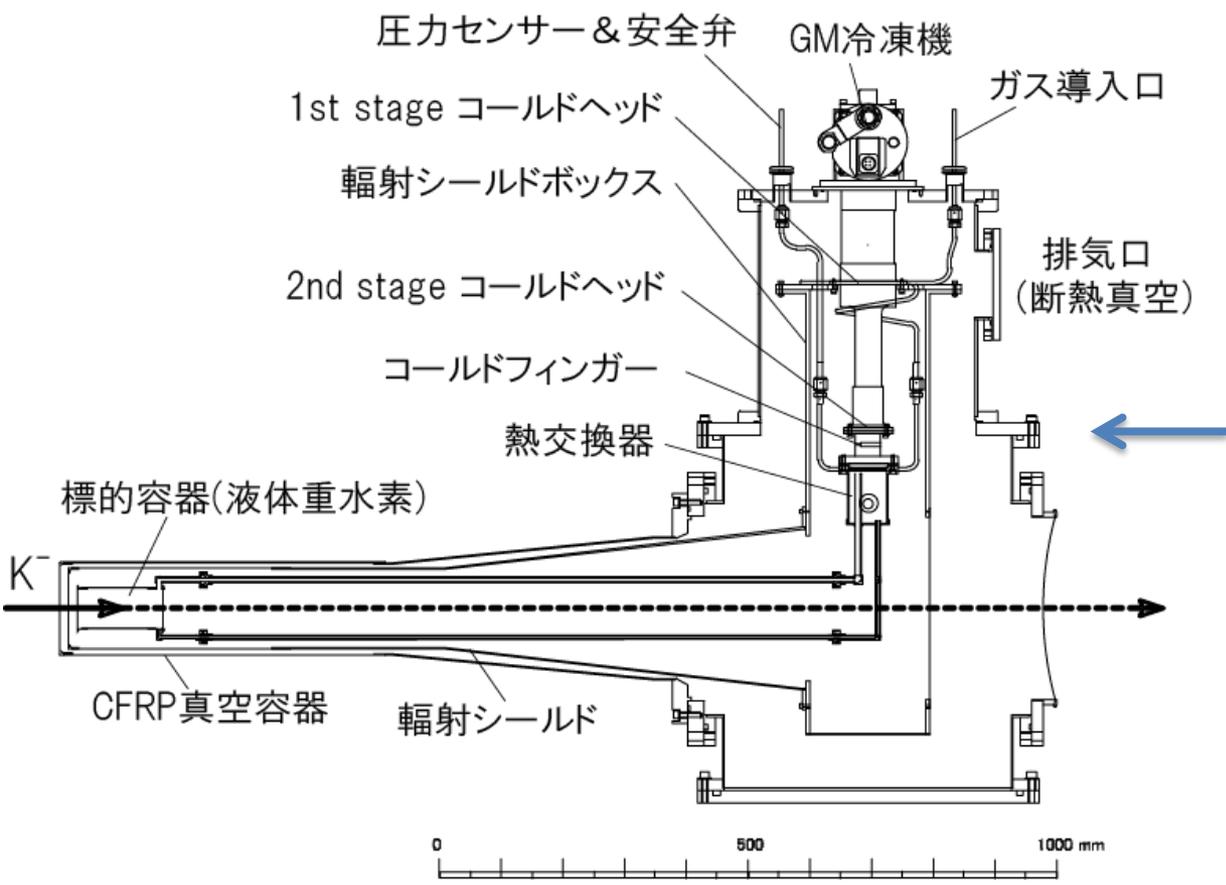
E31実験セットアップ

場所: J-PARCハドロンホール、K1.8BR

$d(K^-, n)\Lambda$ 反応を用いて $\Lambda(1405)$ の直接生成を行い、
→ 共鳴状態のピーク位置、崩壊幅を調べる。



E31用液体重水素標的



液体重水素標的の構成

- E31実験からの要請
- ・標的周りの物質量の抑制
 - ・反応断面積測定値の一定保持のため液体重水素温度の安定保持

標的の周りに高い立体角で測定器がくるようにし、かつ装置そのものが検出の邪魔にならないような設計

標的の特徴

- ・GM冷凍機による高熱伝導蒸留器冷却、輻射シールド冷却
- ・ヒーターでの温度調整
- ・蒸留器→標的容器(液体) 標的容器→蒸留器(ガス)、重水素循環システム
- ・冷却器真空断熱

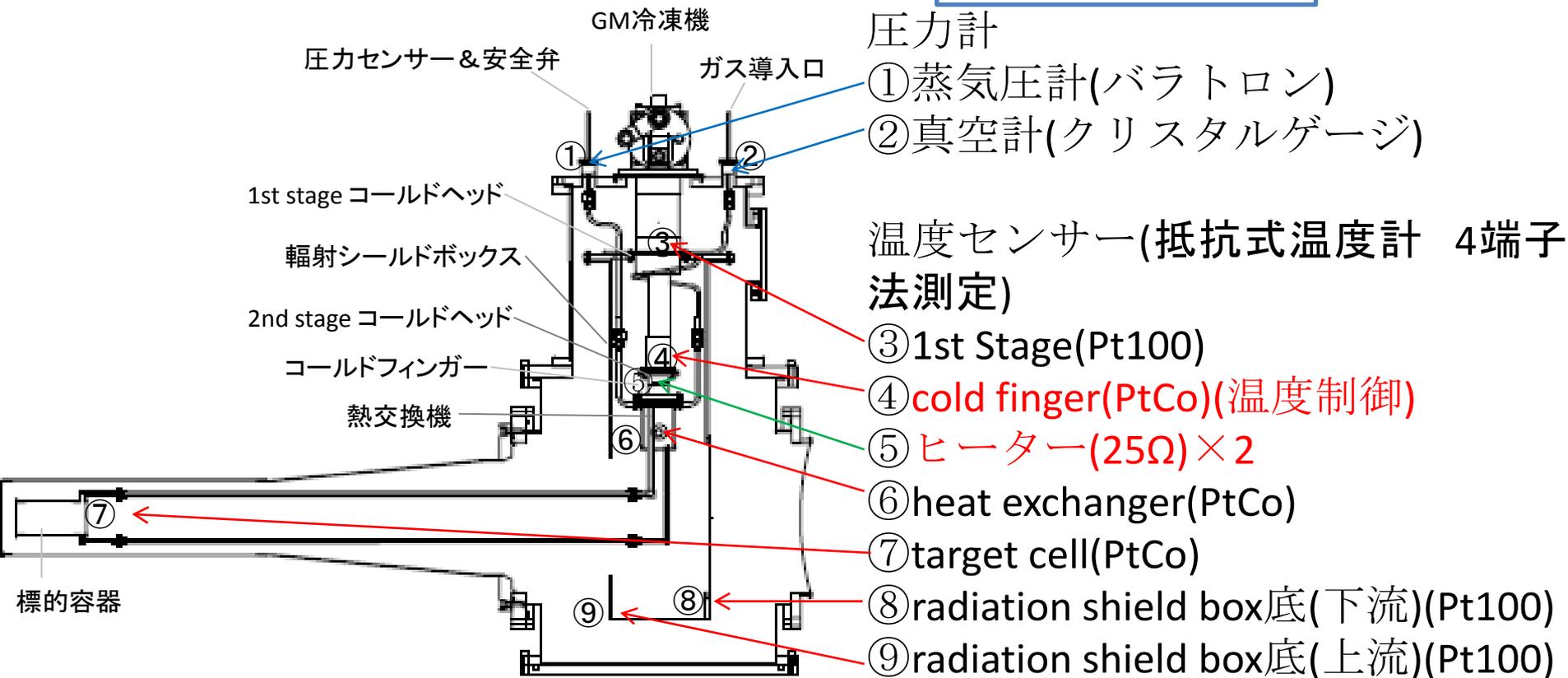
(GM冷凍機仕様)

1st Stage	50 K @35 W
2nd Stage	4.2 K @1.5 W

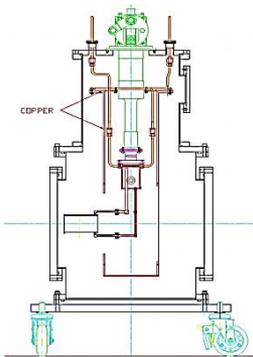
重水素	
沸点	23.8 K
融点	18.7 K

実機セットアップ

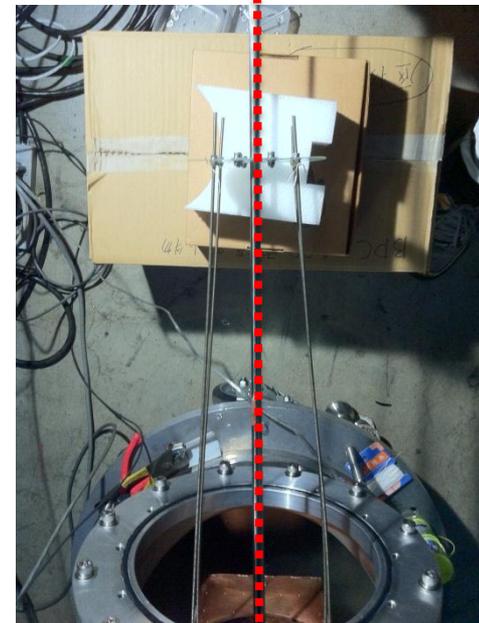
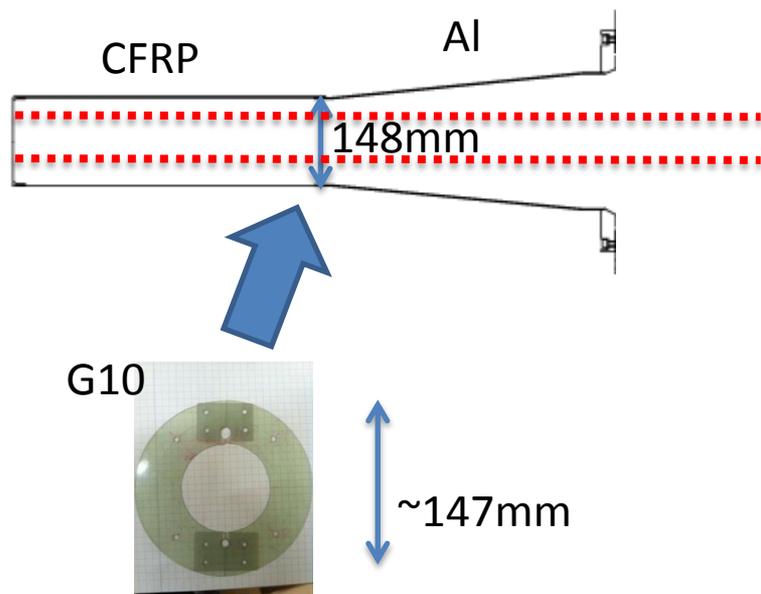
センサー類配線図



前回



標的容器の固定



容器位置のズレによる検出効率への影響

鉛直方向に標的容器を5mmずらした時の検出効率の変化

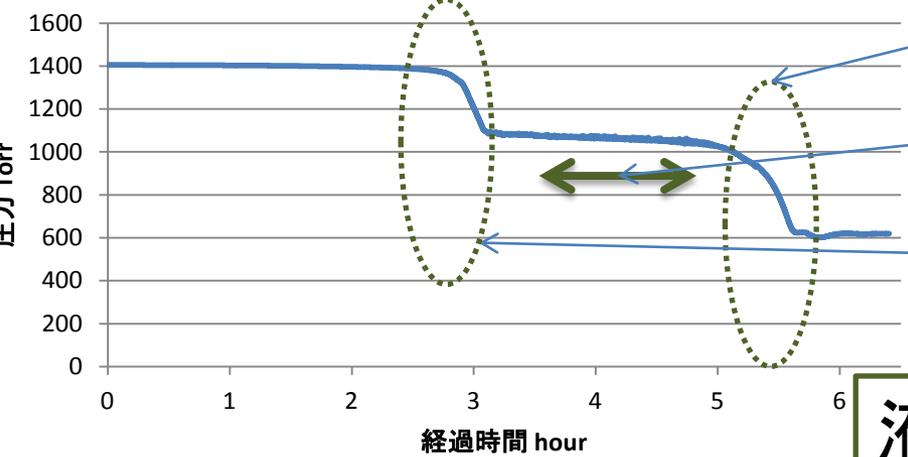
崩壊モード	移動前	移動後
$\Sigma^+(\pi^+, n), \pi^-$	$7.95 \pm 0.13 \%$	$8.045 \pm 0.13 \%$
Σ^0, π^0	$0.89 \pm 0.02 \%$	$0.912 \pm 0.02 \%$
$\Sigma^-(\pi^-, n), \pi^+$	$20.67 \pm 0.22 \%$	$20.85 \pm 0.23 \%$

影響なし

標的容器への液体水素循環試験

水素を熱交換器に入れた状態から20 Kまで冷却

熱交換器内の圧力の時間変化



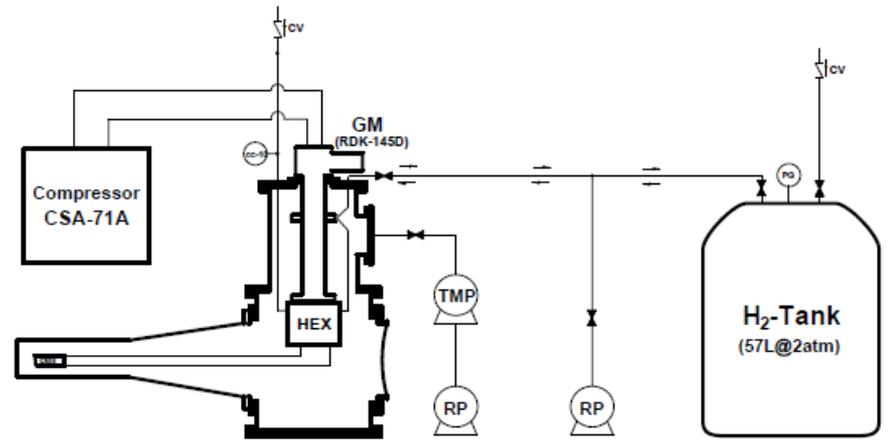
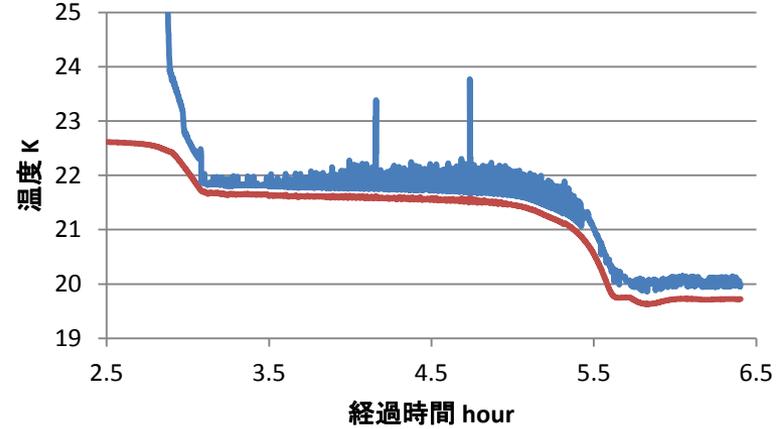
配管、標的容器冷却完了、
標的容器に液が溜まり始める。

配管、標的容器冷却中

熱交換器に液が溜まり始める。
→配管に流れ込む。

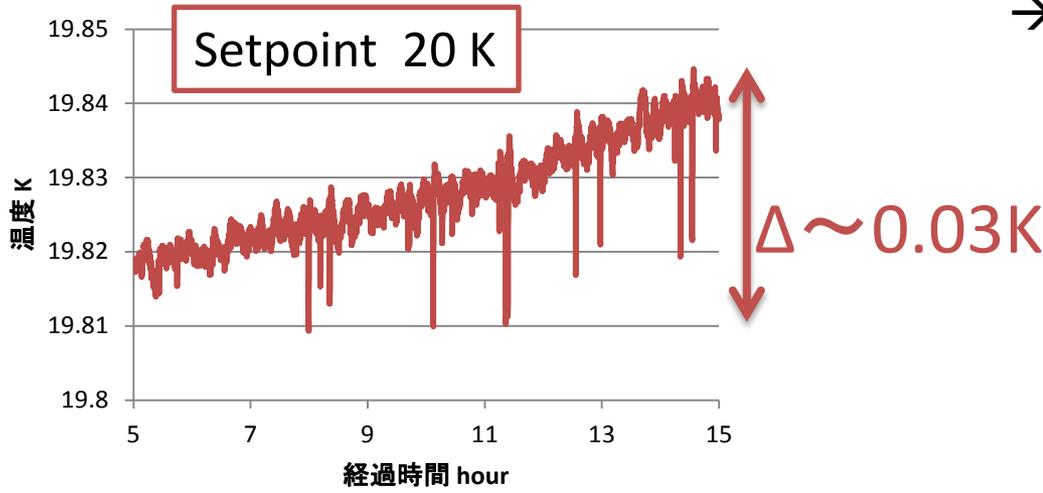
液化がおこり、標的容器への
液体水素の移動が起こっている

配管、標的容器冷却中の蒸気圧温度 と熱交換器温度の時間変化

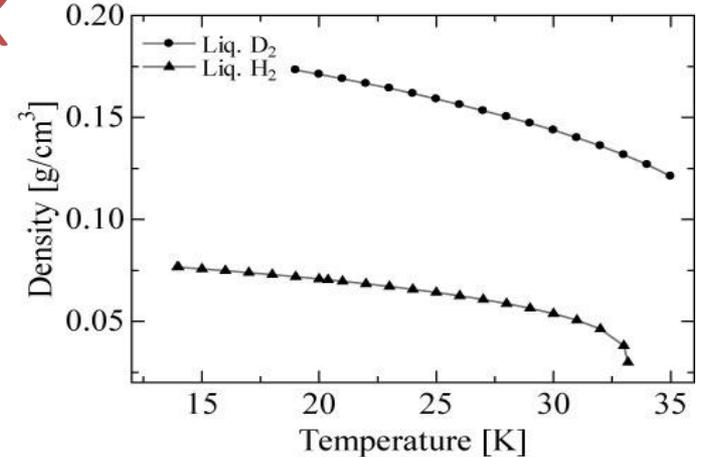


液体の安定した温度制御

水素圧力から推定した液体水素温度

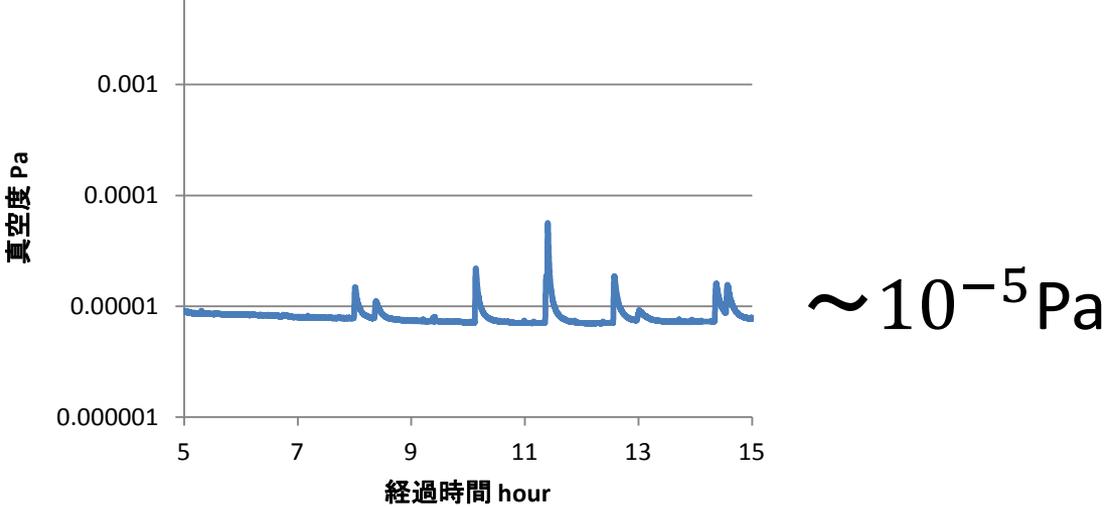


液体水素の密度の揺らぎ $\sim 0.03\%$
→ 反応断面積の測定値の揺らぎ $\sim 0.03\%$
反応断面積の統計誤差(数%)に対して十分な精度である。



液体重水素(水素)の密度と温度関係

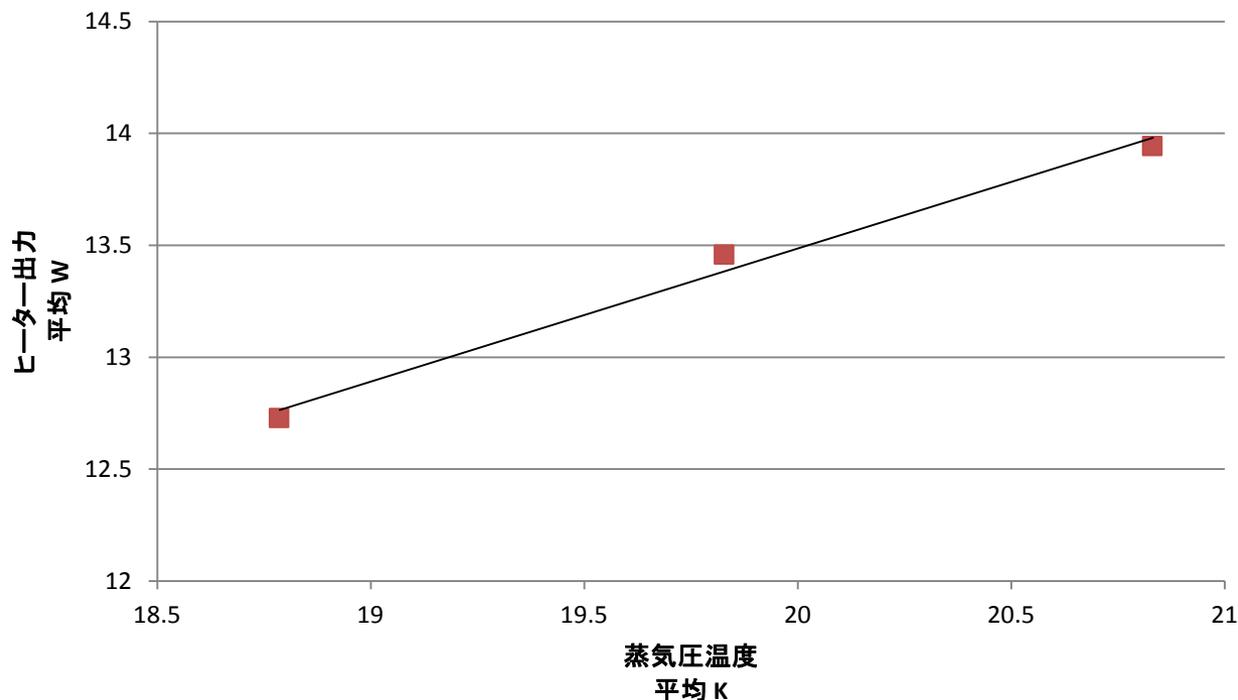
安定した真空度



冷却能力の測定

標的容器はスーパーインシュレーターで覆う

液体水素温度領域での
冷却能力(熱交換器を各温度
にするのに必要なヒーター出力)



~ 13.5W(20K)

十分な液化能力を保持

まとめ

E31実験用液体重水素標的開発を行なった。

- ・実機での少量水素の冷却液化(液化させるのにかかる時間~6hour)及びその熱交換器-標的容器間の循環を確認(標的容器に~14ml)。
- ・液化させた水素の長時間(10時間)保持を確認
- ・標的容器の位置のズレによる検出効率への影響。
- ・装置の十分な液化能力(余力~13.5W)

結論

今回の冷却試験で、開発した液体重水素標的(実機形態)と温度制御システムが正常に働くことが示された。

BACK UP

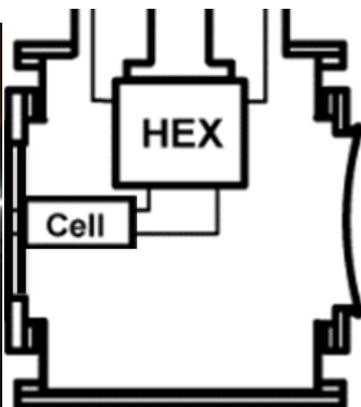
冷却能力の測定

標的容器をスーパーインシュレーターで覆う

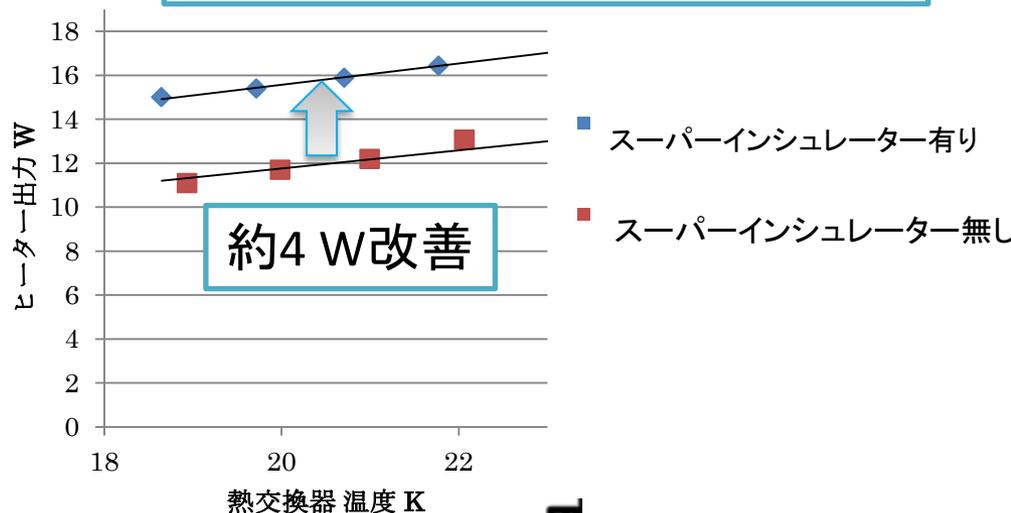
輻射シールドより
物質量の少ない
スーパーインシュレーター
と比較する



スーパーインシュレーター
で巻かれた標的容器



液体水素温度領域での
冷却能力(熱交換器を各温度
にするのに必要なヒーター出力)



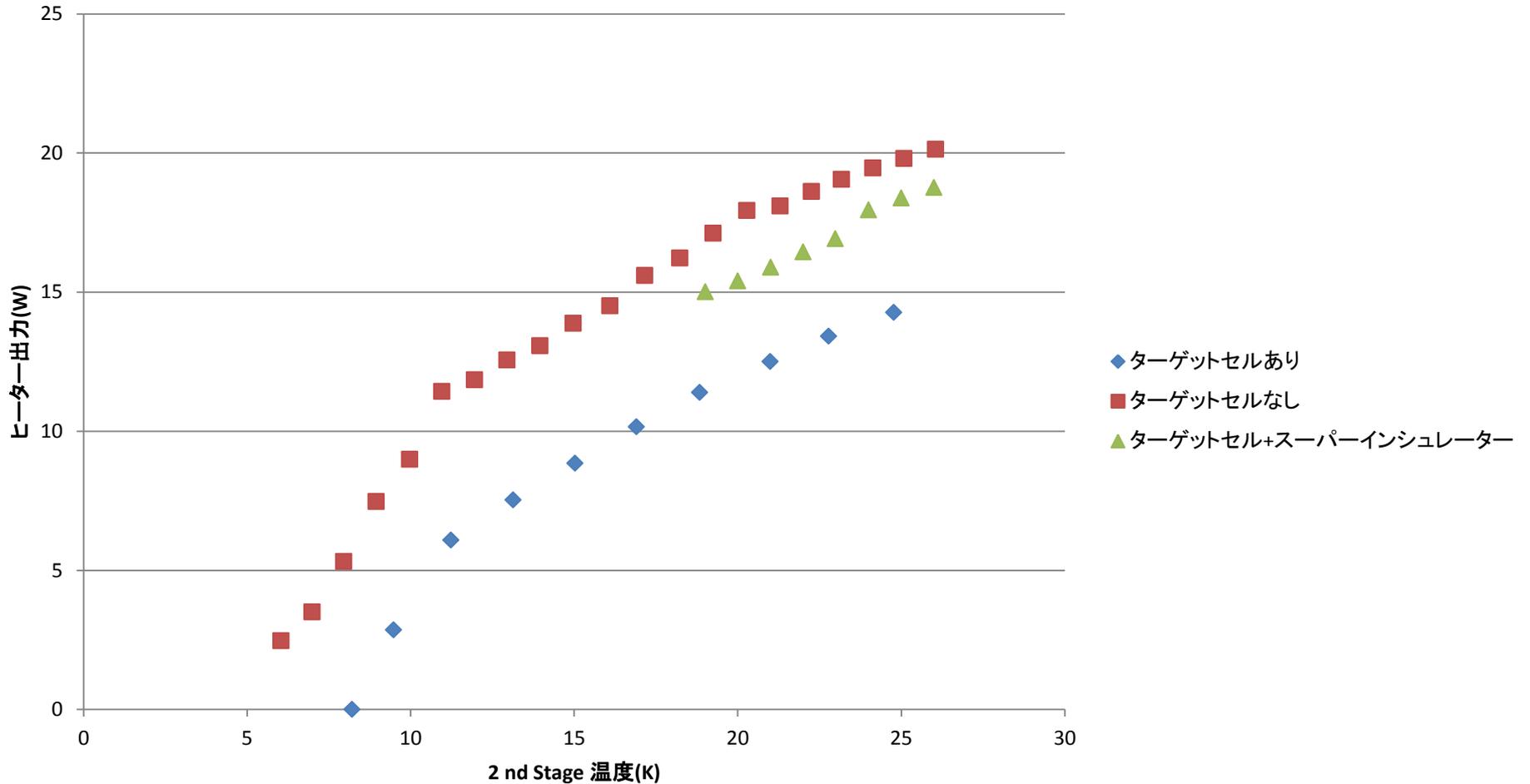
約4 W改善



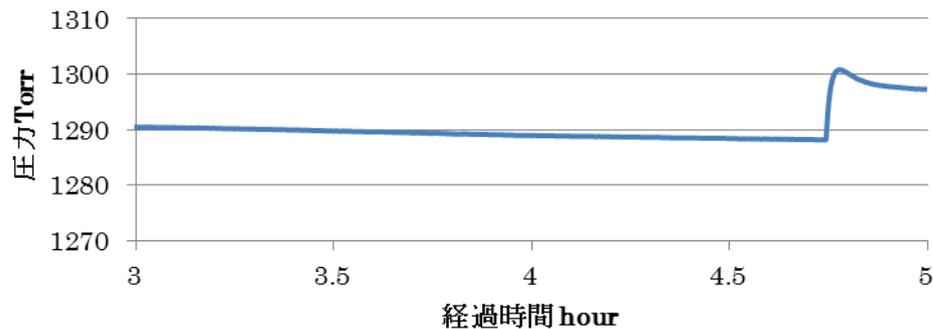
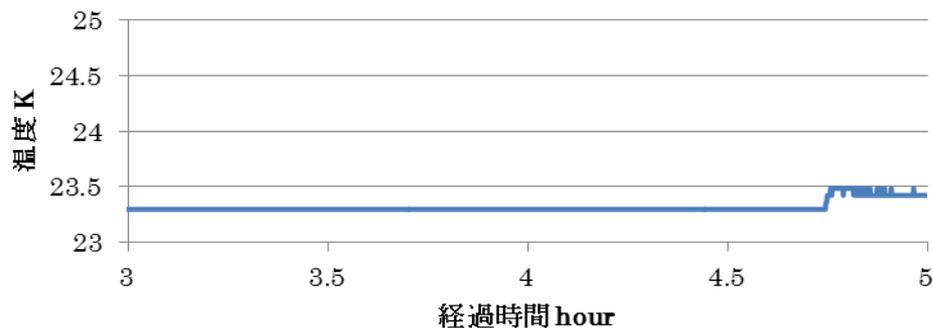
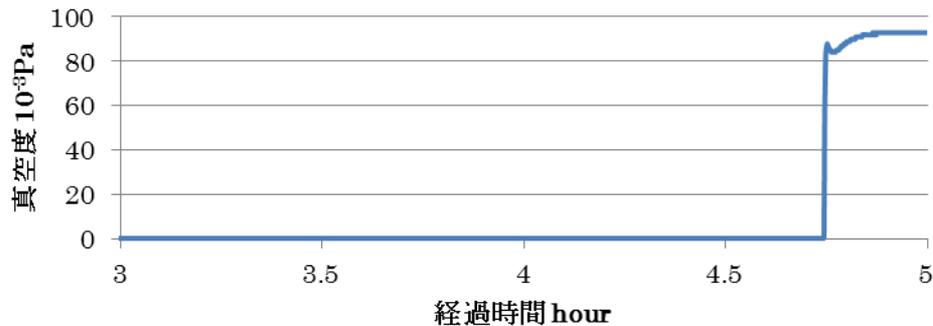
標的容器までの配管
への熱輻射 ~6 W

輻射シールドがなくても
液化は期待できる。

クーリングパワー(液体水素温度領域外を含む)



低温での標的容器のリーク



真空度、熱交換器の圧力、温度が同時に悪くなる。



標的容器リーク発生による
断熱真空の悪化
真空容器からの熱負荷による
熱交換器の温度上昇、水素圧力上昇

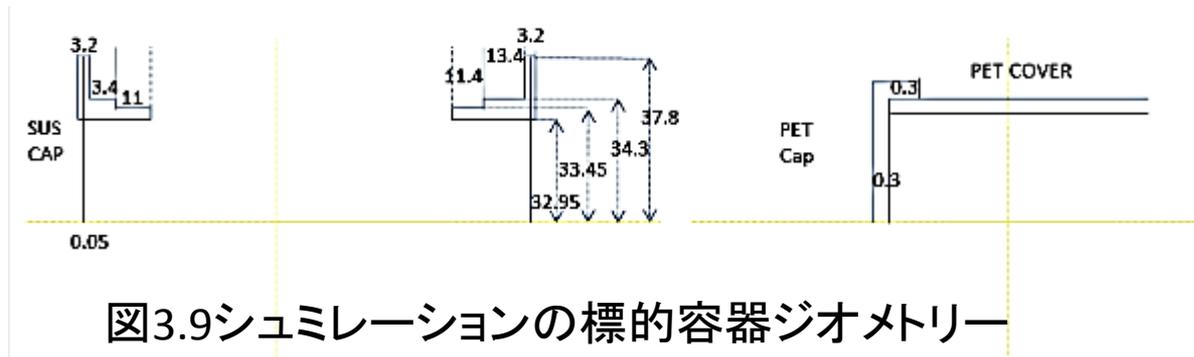


図3.9 シミュレーションの標的容器ジオメトリ

測定器の説明

p : 後方散乱の傾向

→ BPD-time of flight法による運動量測定

→ BPC-崩壊直後の軌道測定(運動量, 崩壊地点)

n : 前方散乱

→ NC-time of flight法による運動量測定

π^\pm : ソレノイドによる婉曲

→ CDC-婉曲軌道の測定(運動量, 崩壊地点)

TPC-z方向崩壊地点の測定

崩壊モードの同定

①, ② ↔ 他 π^\pm 両方の測定 →

① ↔ ② γ と π^\pm とのmissing mass → Σ 質量と一致する π の符号の違い

③, ⑤ ↔ ④ π^- と p のinvariant mass → ③, ⑤は Λ 質量と一致

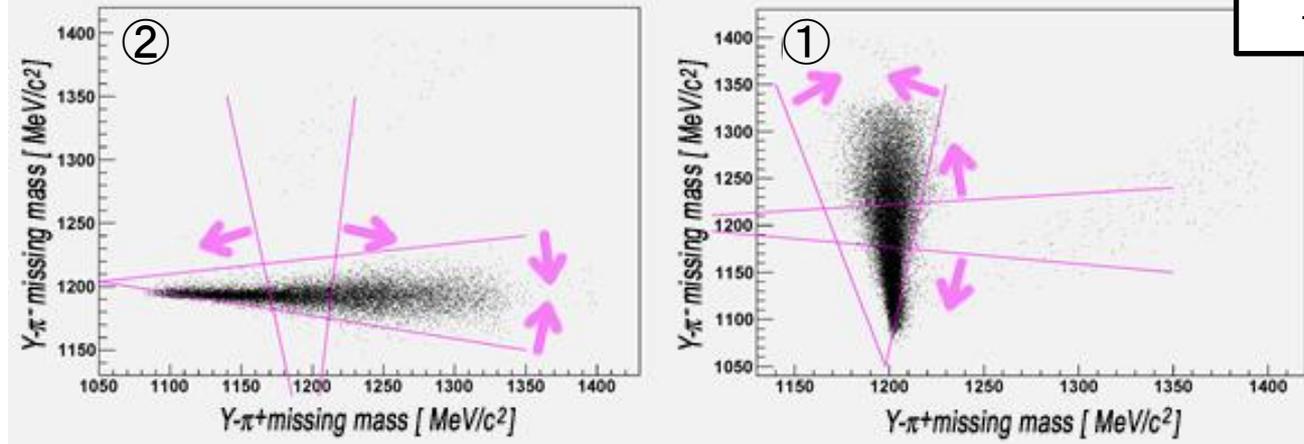
③ ↔ ⑤, ④ γ と $(\pi^- + p)$ とのmissing mass → ③は γ の分 π^0 質量より大きい

崩壊モード検出条件の評価

① ↔ ②

Υ - π^\pm missing massカット条件

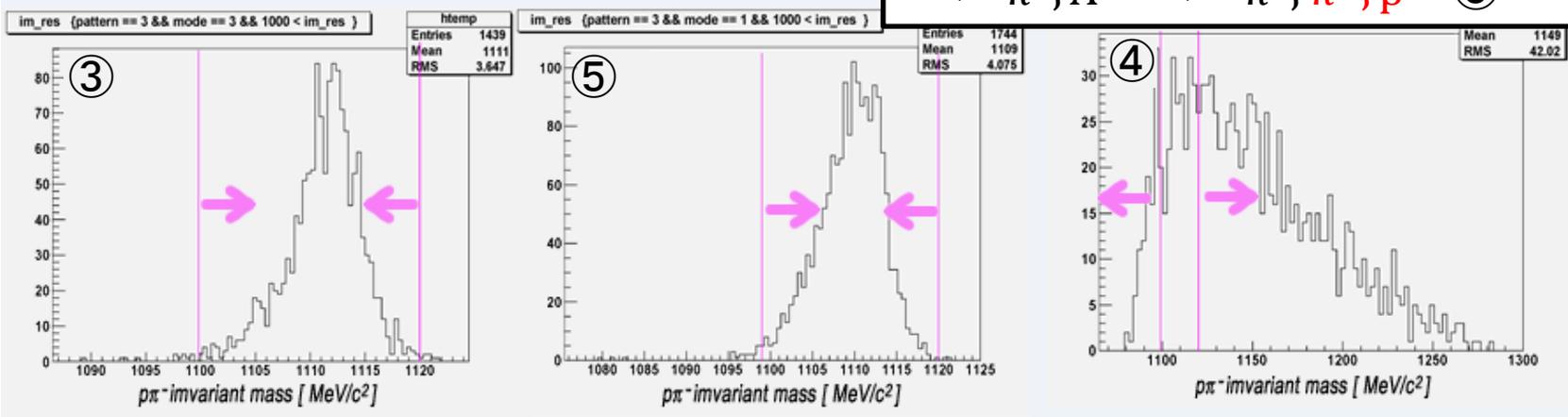
$\Upsilon \rightarrow \pi^+, \Sigma^- \rightarrow \pi^+, \pi^-, n \dots$ ①
 $\rightarrow \pi^-, \Sigma^+ \rightarrow \pi^-, \pi^+, n \dots$ ②



③, ⑤ ↔ ④

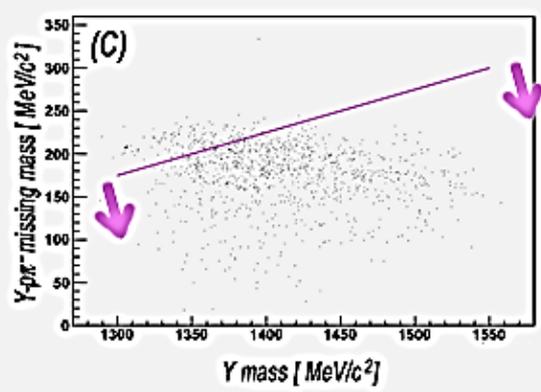
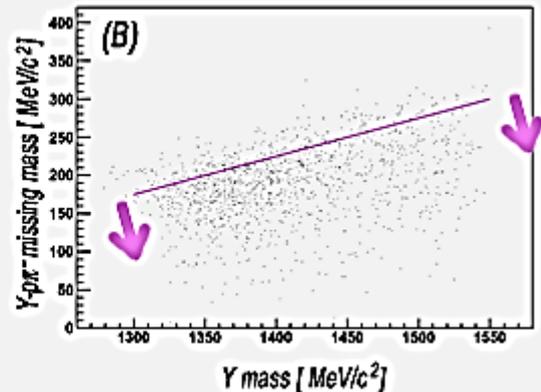
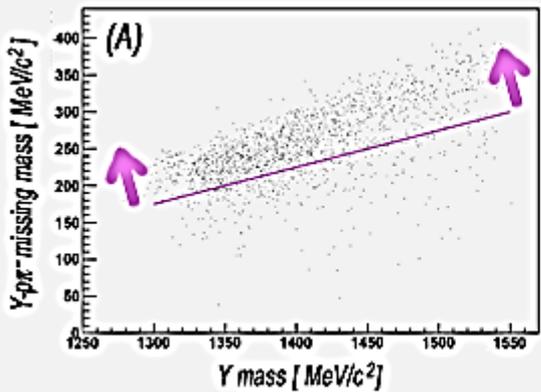
$\pi^- + p$ invariant massカット条件

$\Upsilon \rightarrow \pi^0, \Sigma^0 \rightarrow \pi^0, \gamma, \Lambda \rightarrow \pi^0, \gamma, \pi^-, p \dots$ ③
 $\rightarrow \pi^-, \Sigma^+ \rightarrow \pi^-, \pi^0, p \dots$ ④
 $\rightarrow \pi^0, \Lambda \rightarrow \pi^0, \pi^-, p \dots$ ⑤



③ ↔ ⑤, ④

$\Upsilon - (\pi^- + p)$ missing mass



K-(d,Y)n 反応 Υ

- π^0, Σ^0
- π^+, Σ^+
- π^-, Σ^+
- $\pi^0 \Lambda$

→ $\Lambda(1405)$

→ $\Sigma^*: J^P = \frac{3}{2}^+, I = 1$

π^\pm, Σ^\mp は $I = 1$
との干渉項が混ざる

容器物質による検出効率への影響

- ・PET Cylinder の厚さ
- ・Beam Window の素材 SUS vs PET

← Geant4によるシミュレーション

後方散乱pは $\Lambda(1405)$ と直接結びついた崩壊モード π^0, Σ^0 の崩壊粒子
→SUSウィンドウによるp検出の影響

PET円筒の厚さに関する検出効率の変化

崩壊モード	t = 0.3 mm	t = 0.6 mm
$\Sigma^+(\pi^0, p), \pi^-$	$1.09 \pm 0.03 \%$	$1.08 \pm 0.03 \%$
Σ^0, π^0	$1.25 \pm 0.03 \%$	$1.26 \pm 0.02 \%$
Σ^-, π^+	$18.7 \pm 0.2 \%$	$18.6 \pm 0.2 \%$

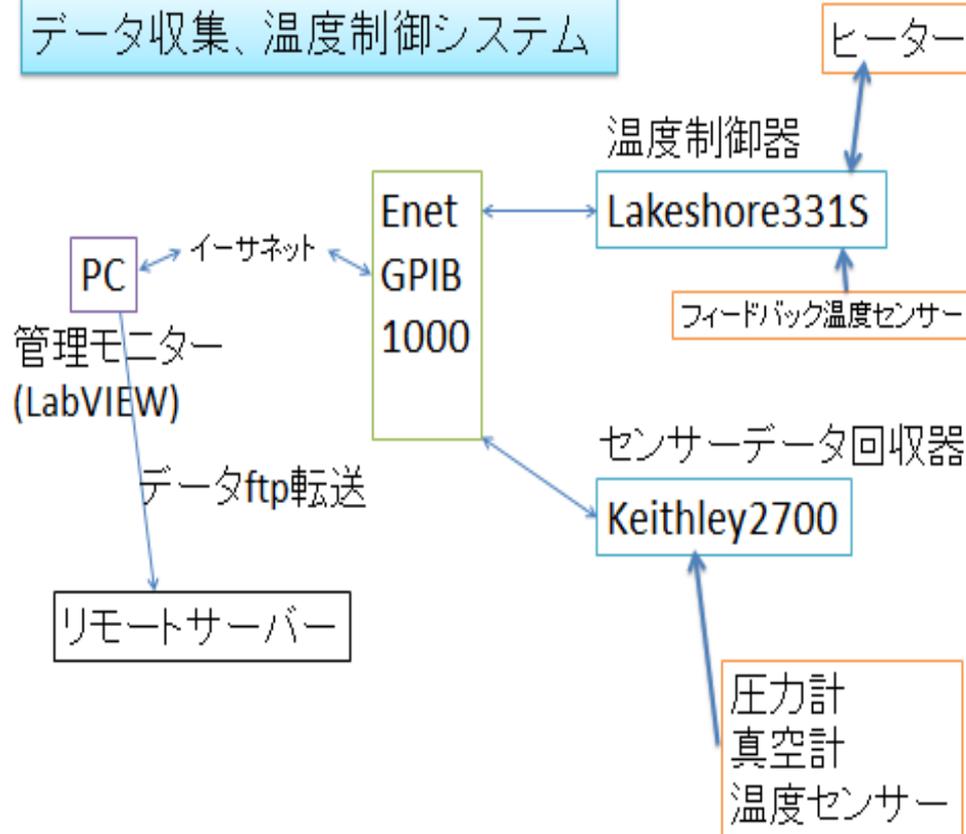


PET厚さの範囲
0.25-0.3mmに影響なし

温度コントロールシステムの詳細

標的の各温度をリモートで監視する。
冷却中、重水素の
固化(凝固点 18.7 K: 1 atm)を防ぐために
温度調整を行う。

データ収集、温度制御システム



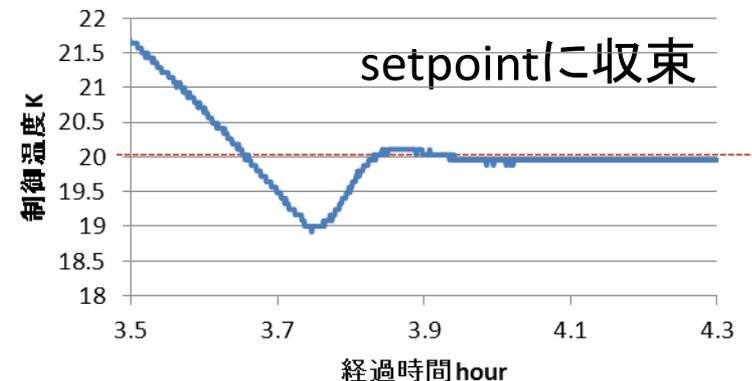
Lakeshore → ヒーターへの
出力電流量制御(PID制御)

PID制御

Heater Output

$$= P \left\{ e + I \int e dt + D \frac{de}{dt} \right\}$$

e : setpoint - feedback reading



耐圧試験、リークの確認

冷却前に標的容器にかける圧力 2気圧(空気の混入を防ぐ)

- ・標的容器単体耐圧試験

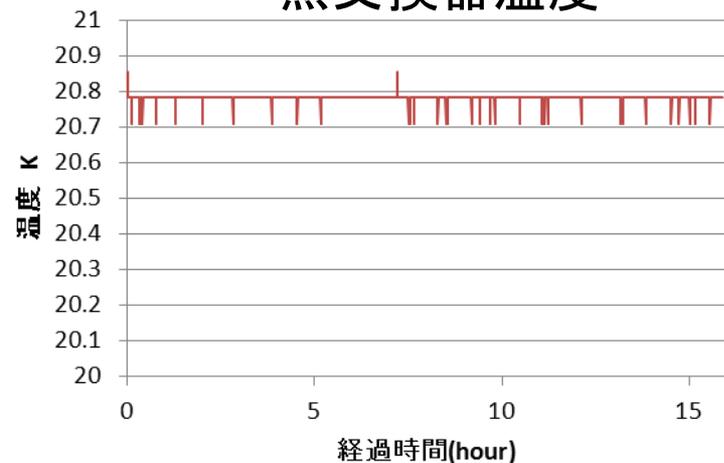
ヘリウムガス 4気圧 1時間 → 変化なし

- ・熱交換器への取り付け

- ・重水素ラインのリーク確認

真空容器の真空度 5.1×10^{-3} Pa 18時間後 → 変化なし

20.8 Kで長期安定保持(16時間) 熱交換器温度



$20.8 \pm 0.5K$

液体水素の密度の揺らぎ $\sim 0.14\%$
→反応断面積の測定値の揺らぎ $\sim 0.14\%$

反応断面積の統計誤差(数%)に対して無視できる。

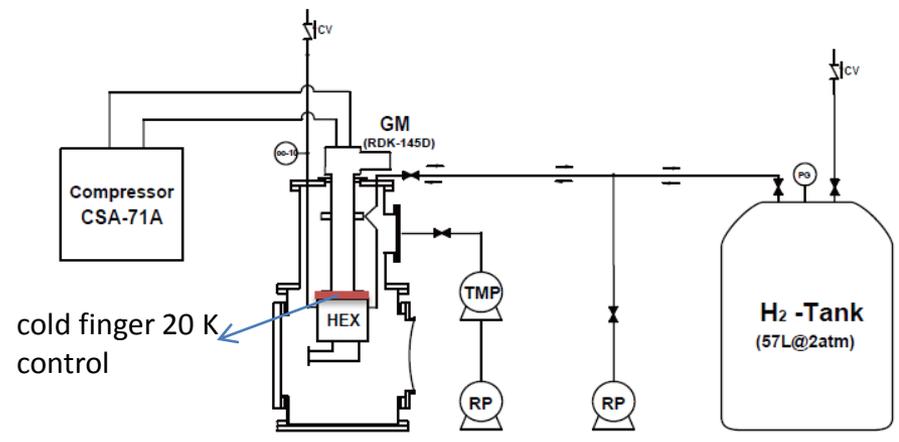
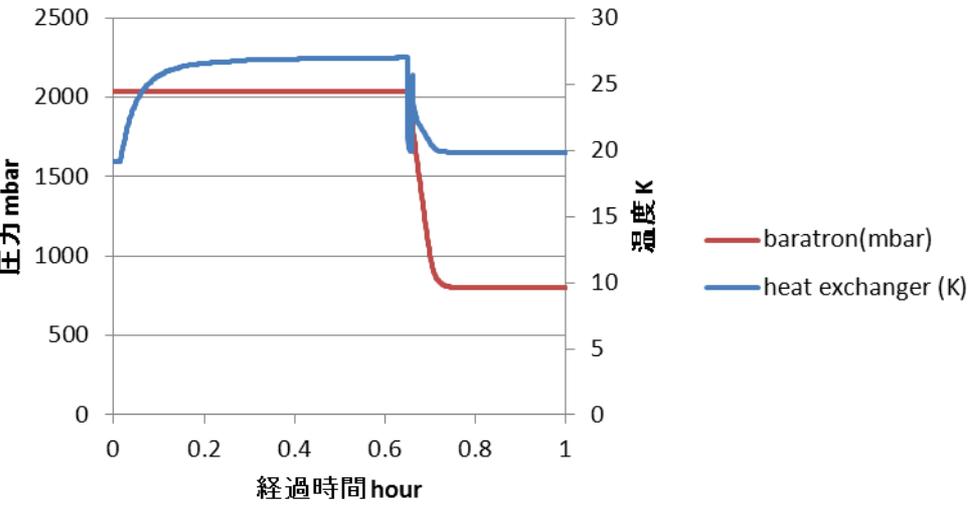
標的開発項目

- 標的容器(薄肉材料を用いた容器の試験)
- 重水素温度制御システムの構成(システムの安全性)
- 標的組み立て
- 蒸留器単体での水素液化試験(液化の成功、
温度一定保持)
- 標的容器への循環試験(標的冷却の確認)
- 冷却能力測定(能力の有意な改善)

熱交換器単体水素冷却試験

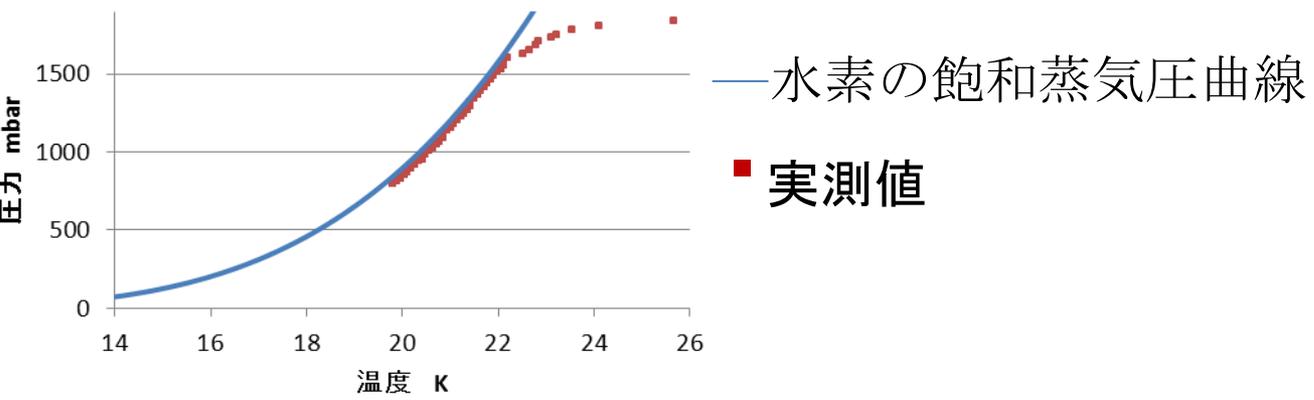
20 Kに制御された熱交換器に室温の水素を入れる

熱交換器内の温度と圧力の時間変化



標的運転セットアップ

冷却中の水素圧力



容器物質による検出効率への影響

・Beam Window の素材 SUS vs PET

← Geant4によるシミュレーション

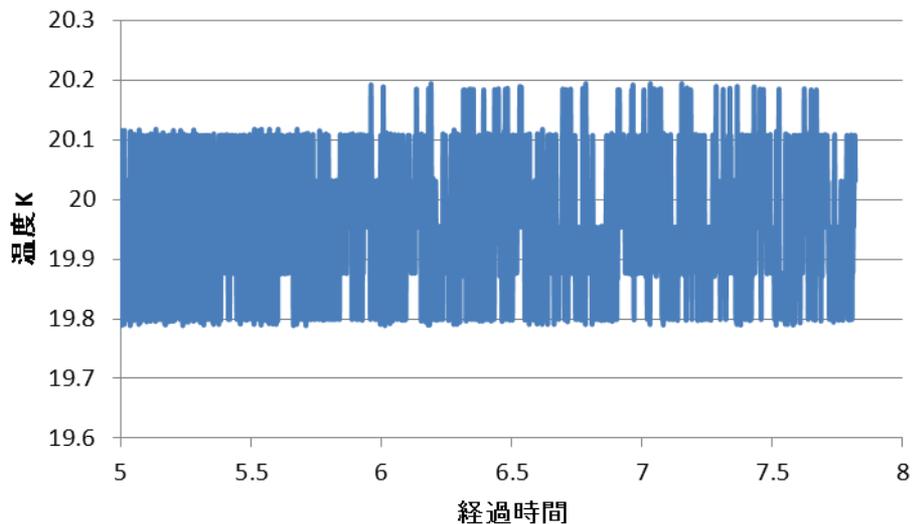
後方散乱pは $\Lambda(1405)$ と直接結びついた崩壊モード π^0, Σ^0 の崩壊粒子
→SUSウィンドウによるp検出の影響

PETキャップとSUSウィンドウの検出効率

崩壊モード	PETキャップ	SUSウィンドウ
$\Sigma^+(\pi^0, p), \pi^-$	$1.07 \pm 0.05 \%$	$1.11 \pm 0.07 \%$
Σ^0, π^0	$1.23 \pm 0.02 \%$	$1.24 \pm 0.02 \%$
Σ^-, π^+	$18.4 \pm 0.25 \%$	$18.2 \pm 0.31 \%$

→ SUSウィンドウの採用
SUSウィンドウの方が
強度がある。

温度制御 (cold finger)



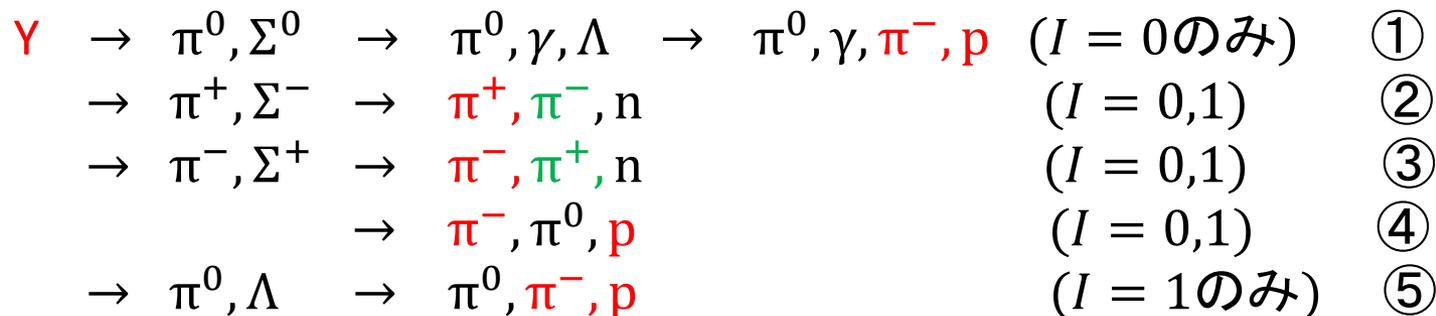
J-PARC-E31実験

$d(K^-, n)\Upsilon$ 反応を用いて $\Lambda(1405)$ の直接生成を行い、
→ 共鳴状態のピーク位置、崩壊幅を調べる。

$d(K^-, n)\Upsilon$

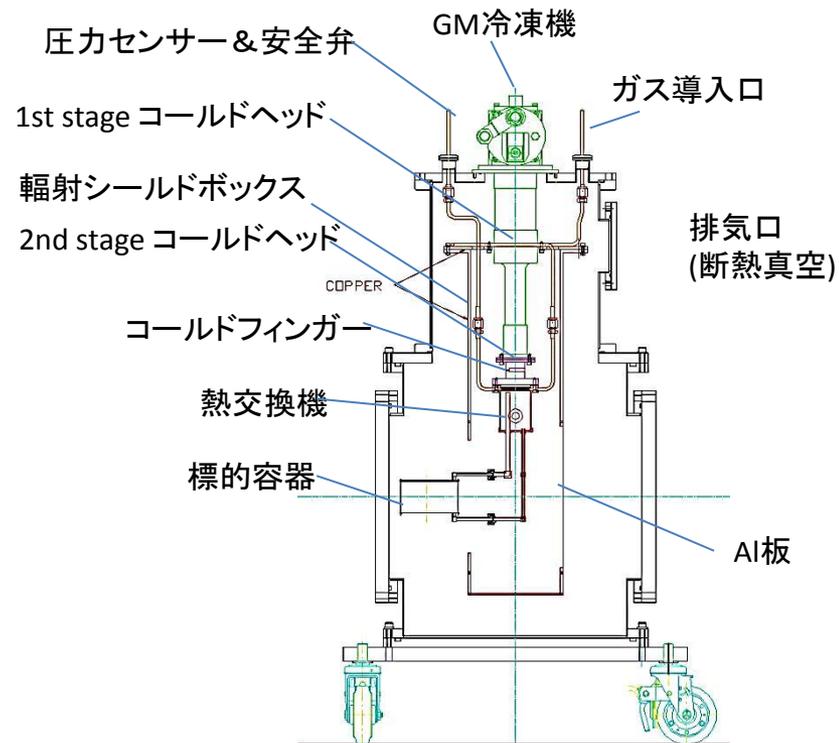
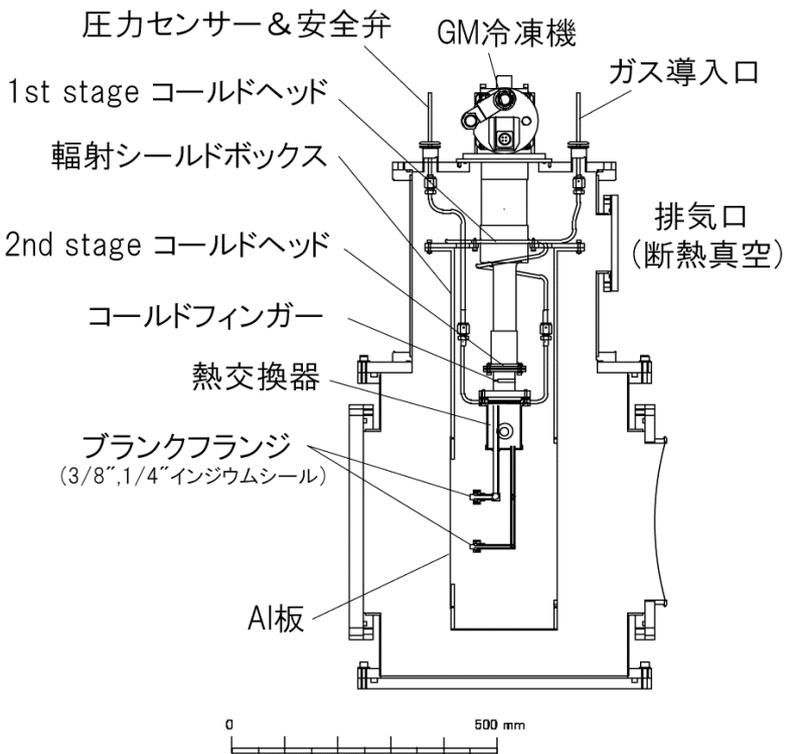
・前方に中性子(n)を散乱させることで K^- とpの散乱状態を実現する。

反応によって生成されるハイペロン(Υ)の崩壊



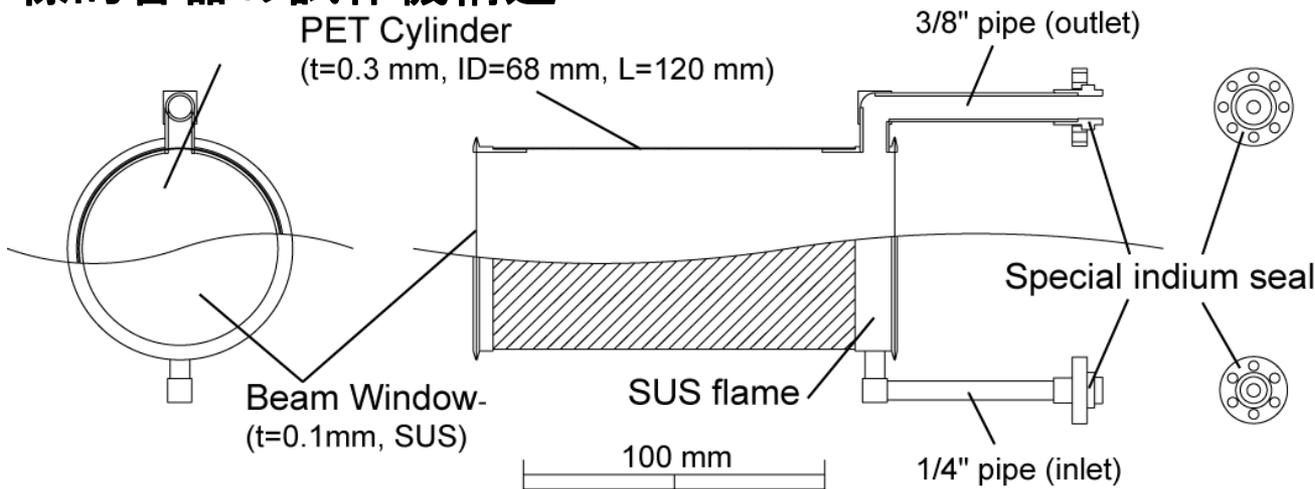
- ①は Υ と $(\pi^- + p)$ のmissing massの違いから④,⑤と区別される。
 - ④は π^- とpのinvariant massから①,⑤と区別される。
- ②, ③は π^\pm を捕まえることで他のモードから区別される。 Υ と π^+ あるいは Υ と π^- から組んだmissing massによりお互いを区別する。

→ これによりアイソスピンのモードをすべて分離する。



標的容器

標的容器の試作機構造



耐圧テストの様子
(差圧:4 atm)

・運転時にかかる圧力: 2atm

容器物質による検出効率への影響

・Beam Window の素材 SUS vs PET

PETキャップとSUSウィンドウの検出効率

崩壊モード	PETキャップ	SUSウィンドウ
$\Sigma^+(\pi^0, p), \pi^-$	1.07 ± 0.05 %	1.11 ± 0.07 %
Σ^0, π^0	1.23 ± 0.02 %	1.24 ± 0.02 %
Σ^-, π^+	18.4 ± 0.25 %	18.2 ± 0.31 %