

# K中間子原子核探査実験のための 液体ヘリウム3標的

## Collaborator

S. Ajimura, G. Beer, H. Bhang, M. Cargnelli, J. Chiba,  
S. Choi, C. Curceanu, F. Diego, H. Fujioka, T. Fukuda,



理化学研究所 飯尾 雅実

高エネルギー加速器研究機構 石元 茂



for J-PARC E15&E17 Collaboration



## 発表の内容



### 1. 研究背景・目的

Collaborator

S. Ajimura, G. Beer, H. Bhang, M. Cargnelli, J. Chiba,

S. Choi, C. Curceanu, F. Diego, H. Fujiyoshi, T. Fukuda,

Y. Fukuda, C. Guaraldo, T. Hanaki, R. S. Hayano, A. Hirtl,

M. Iio, M. Iliescu, T. Ishikawa, S. Ishimoto,

T. Ishiwatari, K. Itahashi, M. Iwasaki, P. Kienle, B. Ligi,

J. Marton, Y. Matsuda, Y. Mitsuji, T. Nagai, T. Nakamura,

S. Okada, M. Ombretta, H. Ota, D. Pietreanu, A. Sakaguchi,

F. Sakuma, M. Sato, M. Sekimoto, D. Sirghi, F. Sirghi,

S. Suzuki, T. Suzuki, D. Tomoda, A. Tsubota, H. Ueda,

E. Widmann, T. Yamazaki, H. Yildirim, M. Zrazhnikov

### 2. 液体ヘリウム3標的

### 3. 開発状況

### 4. 装置設計

### 5. 今後の開発計画

Precision spectroscopy of Kaonic Helium  $3\ 3d \rightarrow 2p$  X-rays

# K中間子原子核探査実験のための液体ヘリウム3標的

J-PARC E15 Experiment

A search for deeply-bound kaonic nuclear states by in-flight  ${}^3\text{He}(K, n)$  reaction



## 1. 研究背景・目的



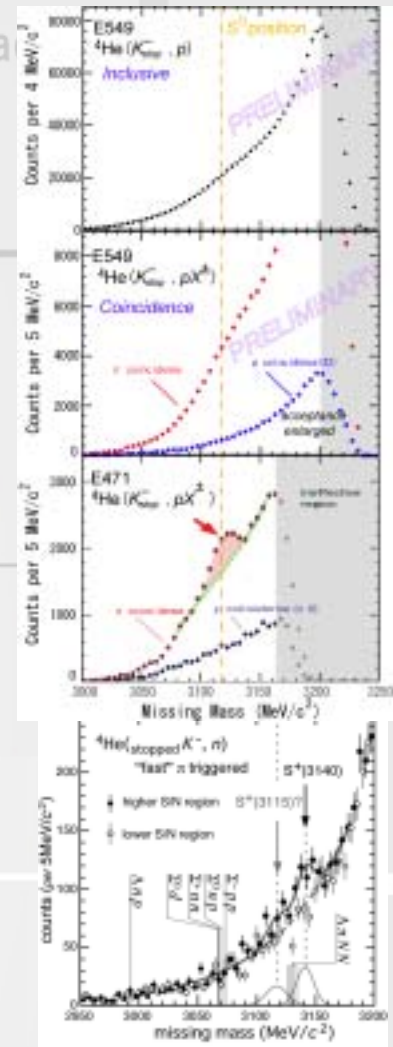
Y. Fukuda, C. Guaraldo, T. Hanaki, R. S. Hayano, A. Hirtl,  
M. Iio, M. Iliescu, T. Ishikawa, S. Ishimoto,  
T. Ishiwatari, K. Itahashi, M. Iwasaki, P. Kienle, B. Luigi,  
J. Marton, Y. Matsuda, Y. Mizoi, T. Nagae, H. Ohnishi,  
S. Okada, M. Ombretta, H. Outa, D. Pietreanu, A. Sakaguchi,  
F. Sakuma, M. Sato, M. Sekimoto, D. Sirghi, F. Sirghi,  
S. Suzuki, T. Suzuki, D. Tomono, A. Toyoda, H. Tatsuno,  
E. Widmann, T. Yamazaki, H. Yim, J. Zmeskal

Precision spectroscopy of Kaonic Helium  $3\ 3d \rightarrow 2p$  X-rays

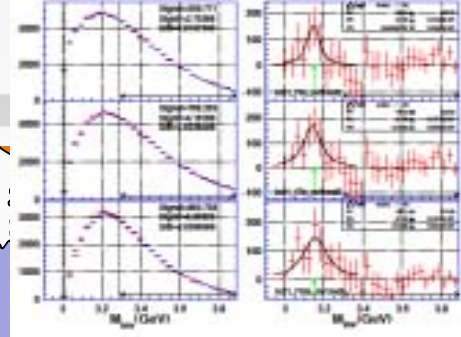
## K中間子原子核は存在するのか？

A search for deeply bound kaonic nuclear states by in-flight  $^3\text{He}(K^-, n)$  reaction

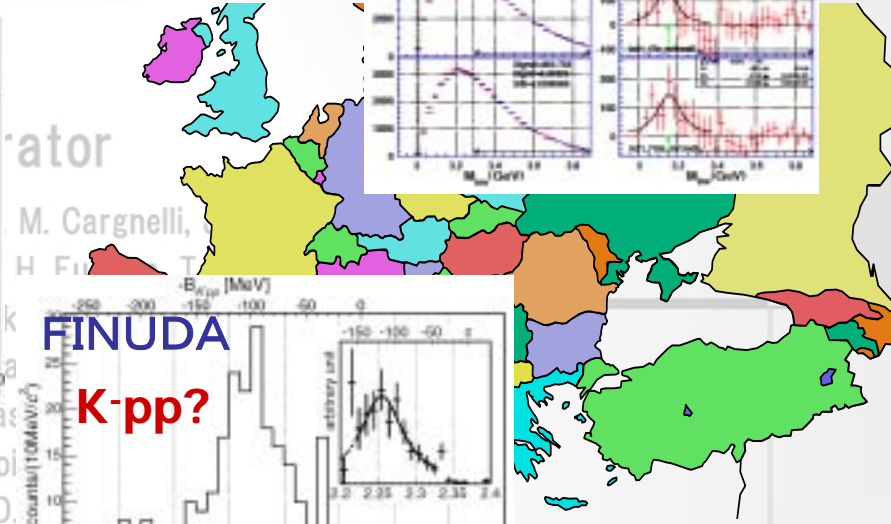
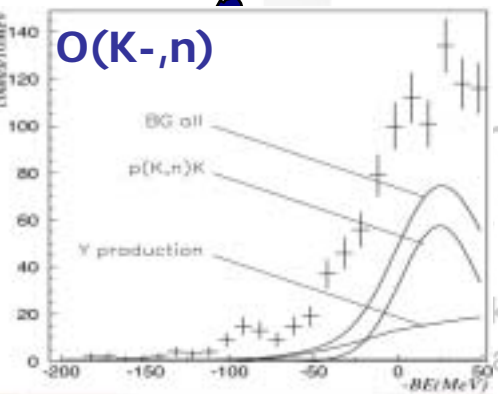
E549/KEK



FOPI/GSI

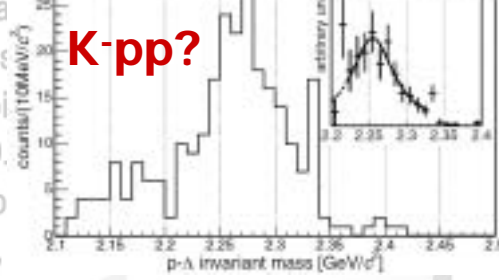


AGS E930



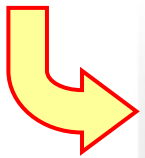
M. Cargnelli, H. Fil...

FINUDA



K-pp?

存否についての決定的な証拠は得られていない！

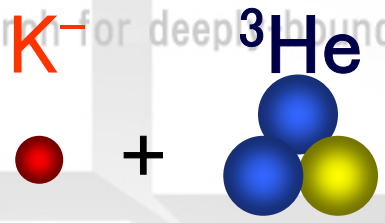


J-PARCで $^3\text{He}(K^-, n)$ 反応を利用した探査実験を行う

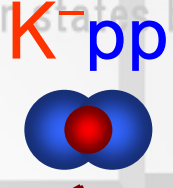
# $^3\text{He}$ 標的のメリット

J-PARC E15 Experiment

A search for deep bound kaonic nuclear states by in-flight  $^3\text{He}(K^-, n)$  reaction



反応



+



中性子測定による  
 $K^-pp$ 状態の同定

Missing Mass法

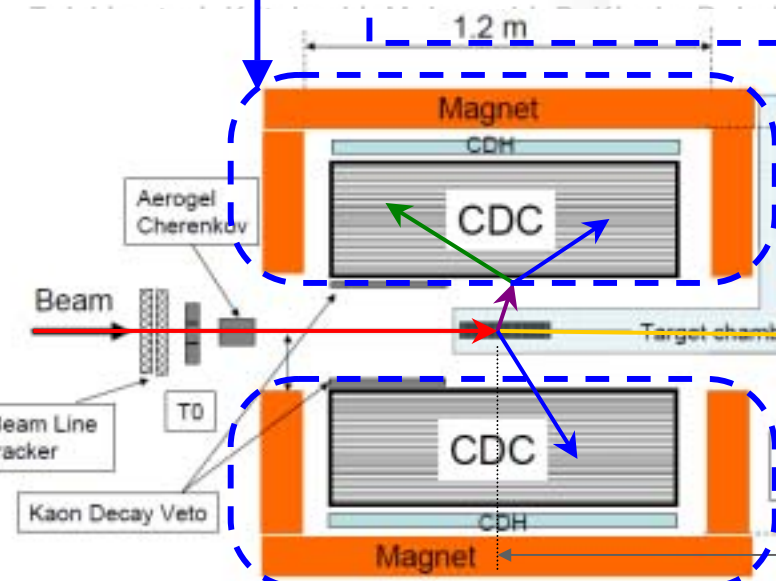


崩壊



崩壊粒子測定による  
 $K^-pp$ 状態の同定

不変質量再構成



ヘリウム3標的を用いることで、生成された $K^-pp$ 束縛状態はMissing Mass法および不変質量再構成の両面からの探索が可能となる

## K中間子ヘリウム3原子X線のエネルギーを測定する

K中間子ヘリウム原子

高分解能X線検出器によりエネルギーを測定

Silicon Drift Detector (SDD)

3d

3d → 2p X線

強い相互作用 2p

強い相互作用による2p軌道のシフトを~2eVの精度で決定する

クォーク相互作用 2p

シフト ↑

吸収



原子核

K中間子ヘリウム3原子X線は世界で初めて測定される！

# K中間子原子核探査実験のための液体ヘリウム3標的

J-PARC E15 Experiment

A search for deeply-bound kaonic nuclear states by in-flight  ${}^3\text{He}(K, n)$  reaction



## 2.液体ヘリウム3標的



Y. Fukuda, C. Guaraldo, T. Hanaki, R. S. Hayano, A. Hirtl,  
M. Iio, M. Iliescu, T. Ishikawa, S. Ishimoto,  
T. Ishiwatari, K. Itahashi, M. Iwasaki, P. Kienle, B. Luigi,  
J. Marton, Y. Matsuda, Y. Mizoi, T. Nagae, H. Ohnishi,  
S. Okada, M. Ombretta, H. Outa, D. Pietreanu, A. Sakaguchi,  
F. Sakuma, M. Sato, M. Sekimoto, D. Sirghi, F. Sirghi,  
S. Suzuki, T. Suzuki, D. Tomono, A. Toyoda, H. Tatsuno,  
E. Widmann, T. Yamazaki, H. Yim, J. Zmeskal

Precision spectroscopy of Kaonic Helium  $3\ 3d \rightarrow 2p$  X-rays

E549、E570実験で使用された超流動ヘリウム4標的

↳ 液体ヘリウム3標的へアップグレード!

<超流動ヘリウム標的の特徴>

- 標的容器の窓(ビーム方向): 75  $\mu\text{m}$  (マイラー)
- 標的容器の窓(横方向): 188  $\mu\text{m}$  (マイラー)
- 熱シールドの窓: 0.1 mm (アルミ)
- 真空容器: 0.9 mm (CFRP)

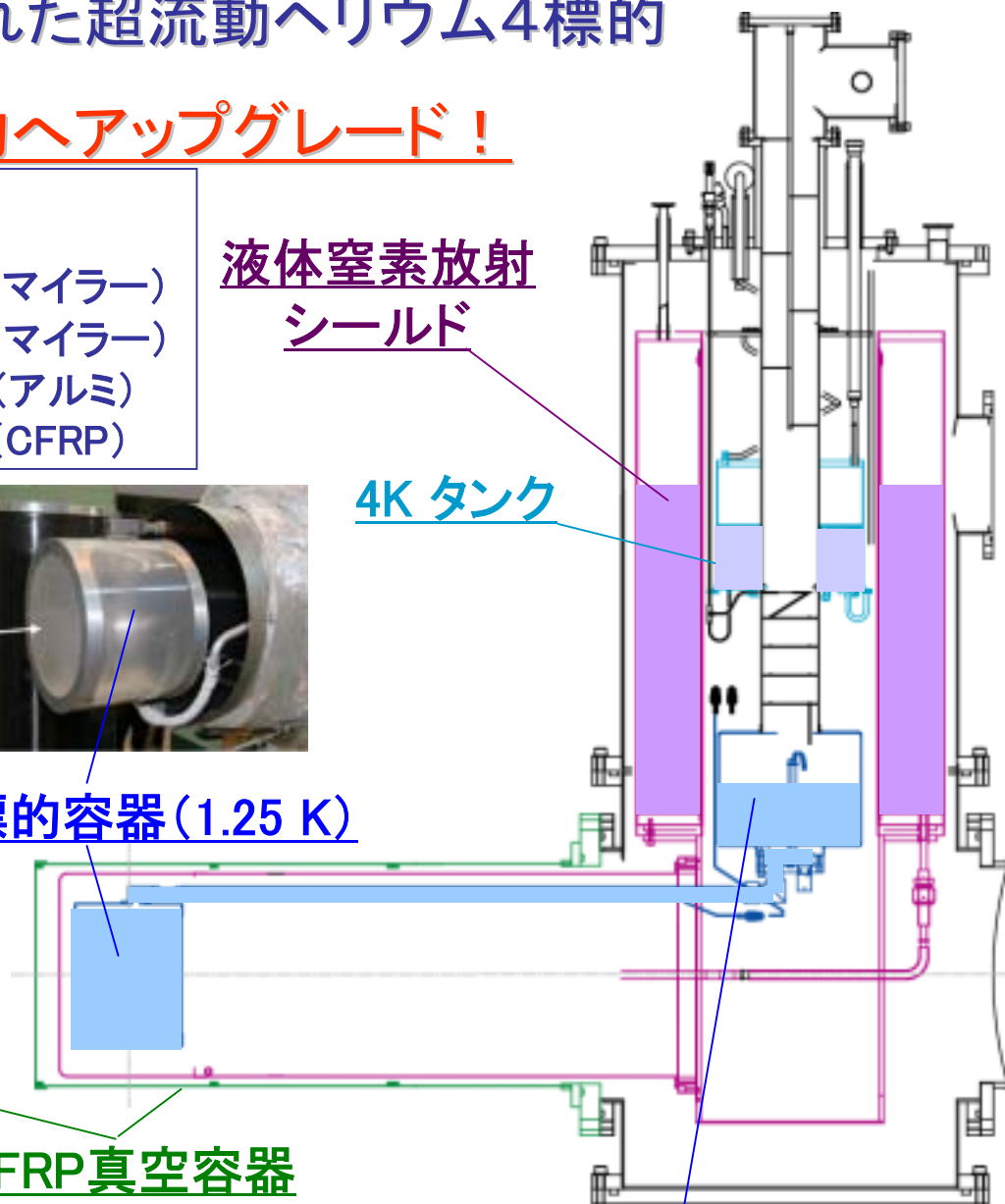
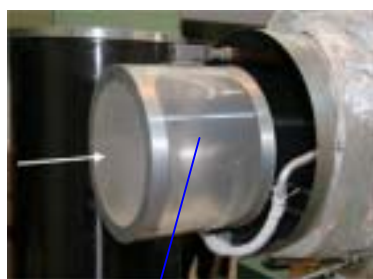
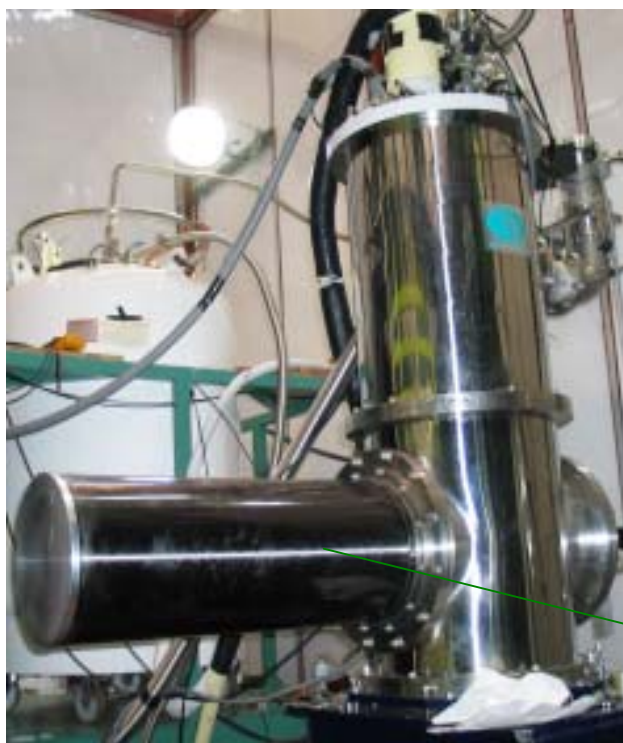
液体窒素放射  
シールド

4K タンク

標的容器 (1.25 K)

CFRP真空容器

リザーブタンク (1.25 K)





- 超流動ヘリウム4標的の性能 -

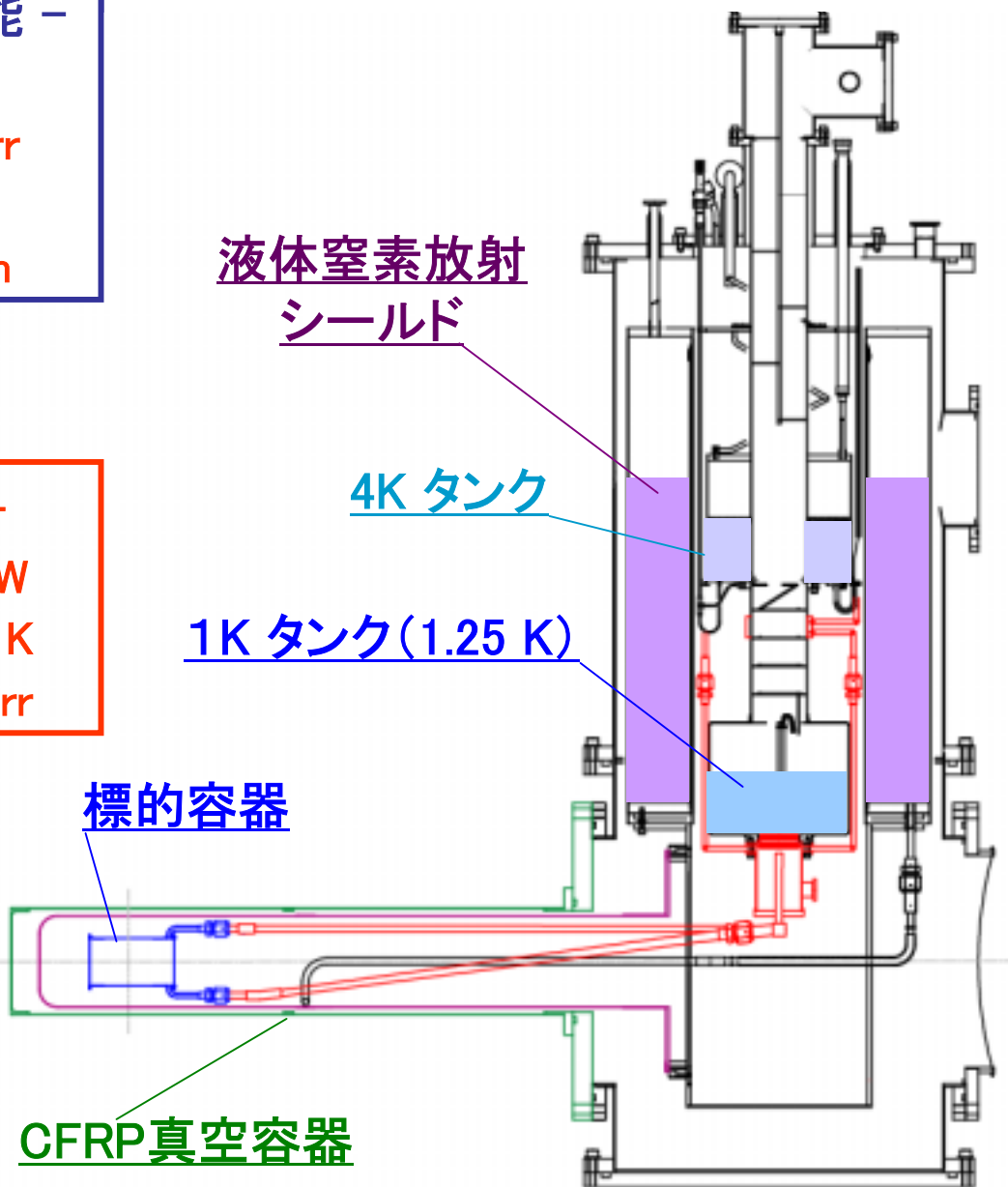
標的容器の温度 : 1.25 K  
 標的容器の圧力 : 1.1 Torr  
 1K部分への熱流入量 : 0.18 W  
 Heの消費量 : -0.2 l/h



- アップグレード後の性能 -

熱交換器から下流の熱流入 : 0.1 W  
 熱交換器の温度 : 1.30 K  
 熱交換器の圧力 : 28.4 Torr

ヘリウム3の1atmでの  
 沸点は **3.19 K** であるから、十分に液化させることが可能である



## - E17のための改良 -

- X線検出器を標的内部に配置
- Preampも標的内部に配置
- CFRP真空容器 (φ 250 mm)
- 放射シールド (φ 200 mm)

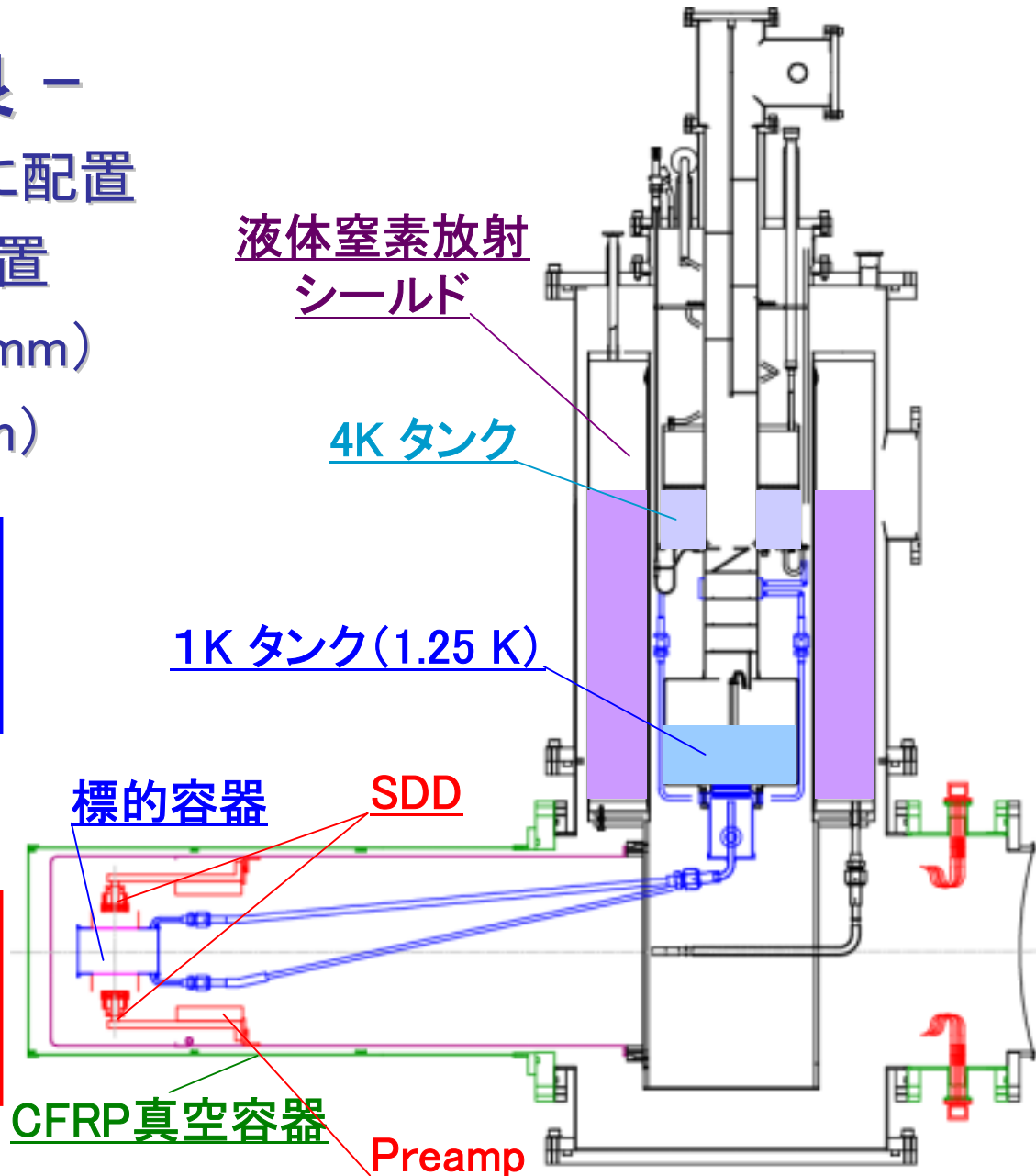
### - E15実験 -

熱交換器から下流の熱流入: 0.10 W  
 熱交換器の温度: 1.30 K



### - E17実験 -

熱交換器から下流の熱流入: 0.25 W  
 熱交換器の温度: 1.50 K



ヘリウム3を超流動にはできない(34気圧で2.6 mK)

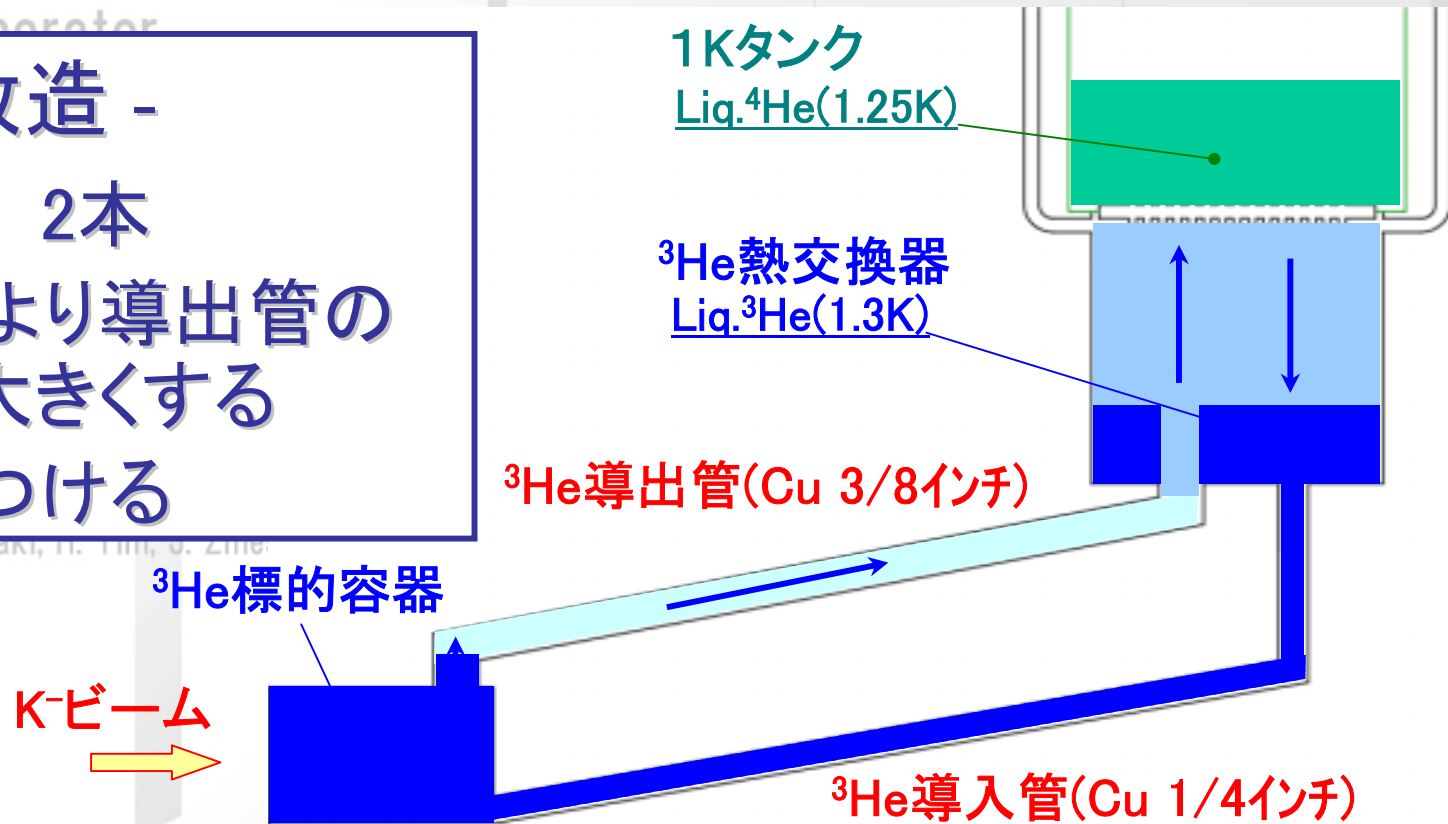
- 熱交換器と距離が長いと標的容器冷えない可能性がある



ヘリウム3を循環させ標的容器を冷却する!

## - 配管の改造 -

1. 1本 → 2本
2. 導入管より導出管の直径を大きくする
3. 勾配をつける



# K中間子原子核探査実験のための液体ヘリウム3標的

J-PARC E15 Experiment

A search for deeply-bound kaonic nuclear states by in-flight  ${}^3\text{He}(K, n)$  reaction



## 3.開発状況



Y. Fukuda, C. Guaraldo, T. Hanaki, R. S. Hayano, A. Hirtl,  
M. Iio, M. Iliescu, T. Ishikawa, S. Ishimoto,  
T. Ishiwatari, K. Itahashi, M. Iwasaki, P. Kienle, B. Luigi,  
J. Marton, Y. Matsuda, Y. Mizoi, T. Nagae, H. Ohnishi,  
S. Okada, M. Ombretta, H. Outa, D. Pietreanu, A. Sakaguchi,  
F. Sakuma, M. Sato, M. Sekimoto, D. Sirghi, F. Sirghi,  
S. Suzuki, T. Suzuki, D. Tomono, A. Toyoda, H. Tatsuno,  
E. Widmann, T. Yamazaki, H. Yim, J. Zmeskal

Precision spectroscopy of Kaonic Helium  $3\ 3d \rightarrow 2p$  X-rays

J-PARC E15 Experiment

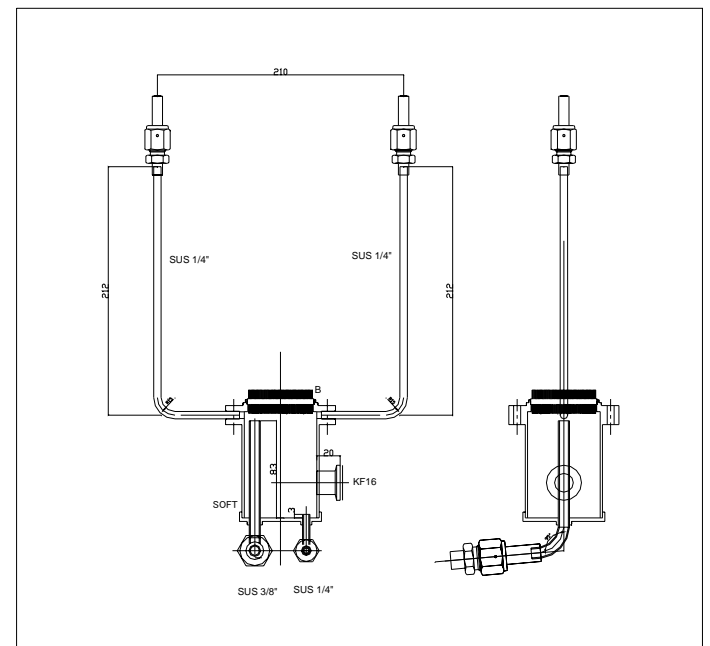
A search for the  $^3\text{He}(K, n)$  reaction

- $^3\text{He}$ 熱交換器の試作機を製作した。

素材: **銅**, KF16ポート×1

フィンの幅: 0.5 mm

フィンの間隔: 0.5 mm



J-PARC E15 Experiment

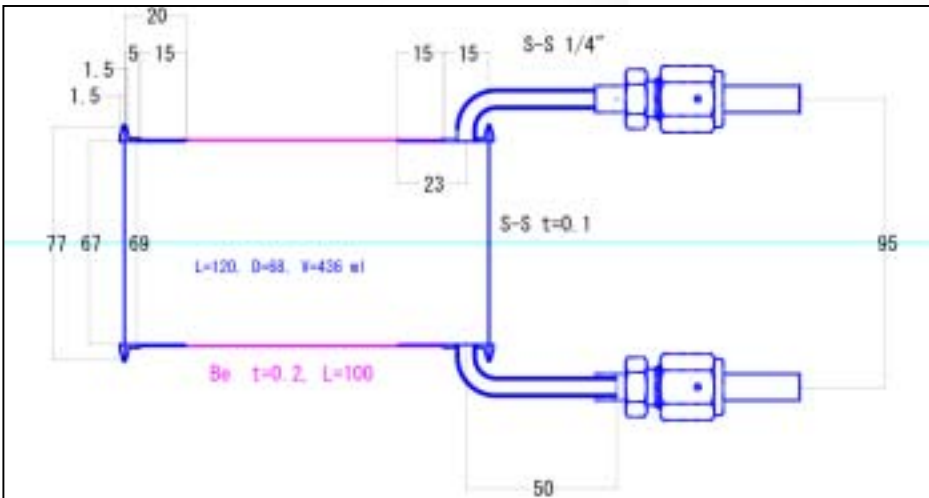
A search for deeply-bound kaonic nuclear states by in-flight  ${}^3\text{He}(K, n)$  reaction

## 容器の強度： 耐圧1気圧を想定

- 容積： 約450 ml
- ビーム軸方向のウィンドウ： SUS t=0.1 mm
- 銅まき部分： SUS t=0.1 mm  
(実機では、Be t=0.2 mm の予定)

Collaborator

S. Ajikawa, M. H. Ahn, M. Agnelli, J. Chiba, ...  
 S. Choi, C. Curceanu, F. Dierckx, H. Fujioka, T. Fukuda, ...  
 Y. Fukuda, C. Guaraldo, M. H. Hecht, R. S. Igarashi, A. ...  
 M. Iio, M. Iliescu, T. Ishikawa, S. Ishimoto, ...  
 T. Ishiwatari, K. Itahashi, M. Iwasaki, P. Kienle, B. Luigi,



## - 試験の方法 -

1. 真空チェンバーの中に標的容器をセット
2. チェンバー内を真空に引く
3. 標的容器にガスボンベより $^4\text{He}$ ガスを注入し加圧する
4. 圧力をモニターしつつ、リークレートを測定する



ヘリウムで0.1MPa(差圧0.2MPa)まで加圧しバルブを閉め20分間放置した。

👉 リークレート:  $\sim 10^{-11} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$  耐圧: 約2気圧!

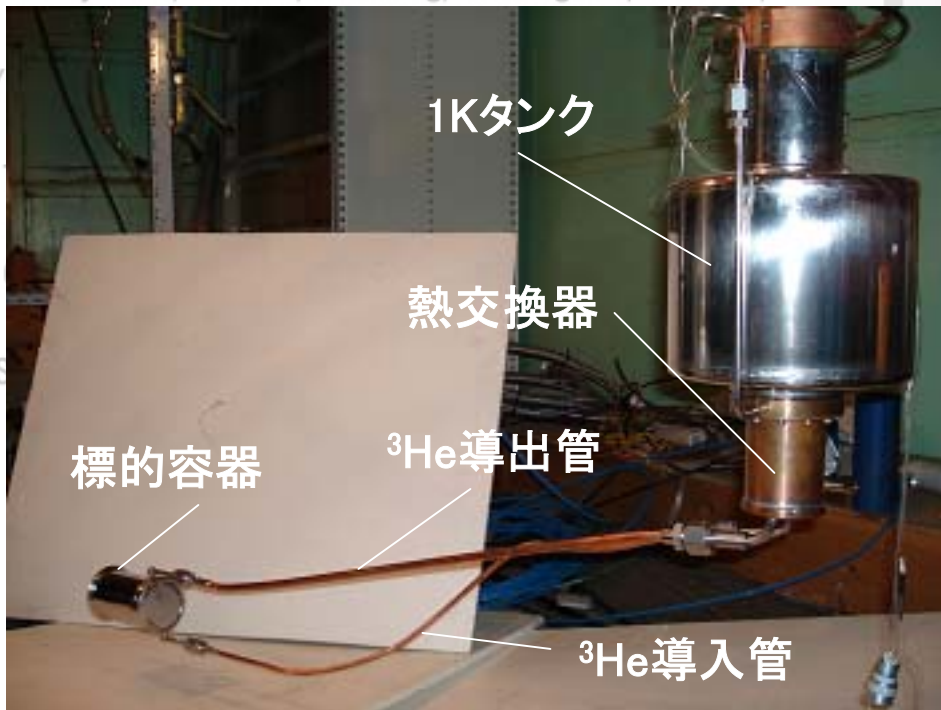
## J-PARC E15 Experiment

A search for deeply-bound kaonic nuclear states by in-flight  ${}^3\text{He}(K, n)$  reaction

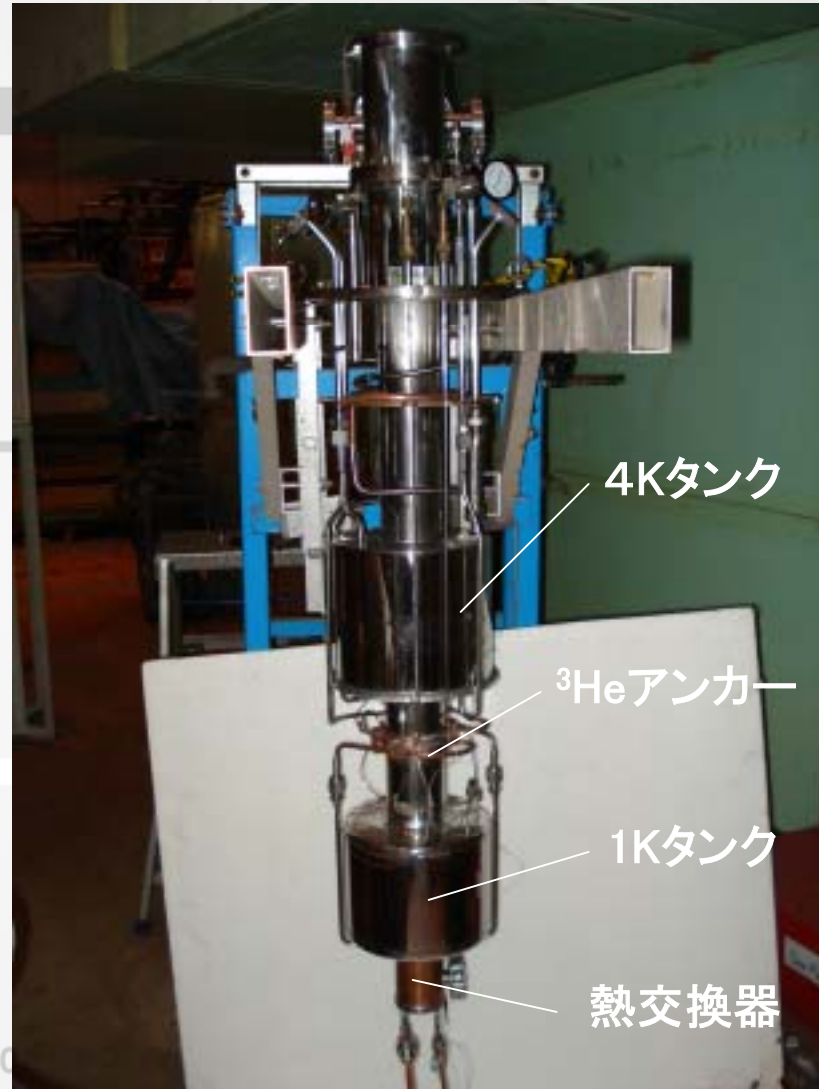
- 熱交換器、標的容器、ヘリウム3銅入出管など、組み立てた。ヘリウムガスによる加圧試験の結果大きなリークは見つからなかった。

Collaborator

S. Ajimura, G. Beer, H. Bhang, M. Cargnelli, J. Chiba,



## Cryostat



J-PARC E17 Experiment



# K中間子原子核探査実験のための液体ヘリウム3標的

J-PARC E15 Experiment

A search for deeply-bound kaonic nuclear states by in-flight  ${}^3\text{He}(K, n)$  reaction



## 4. 装置設計

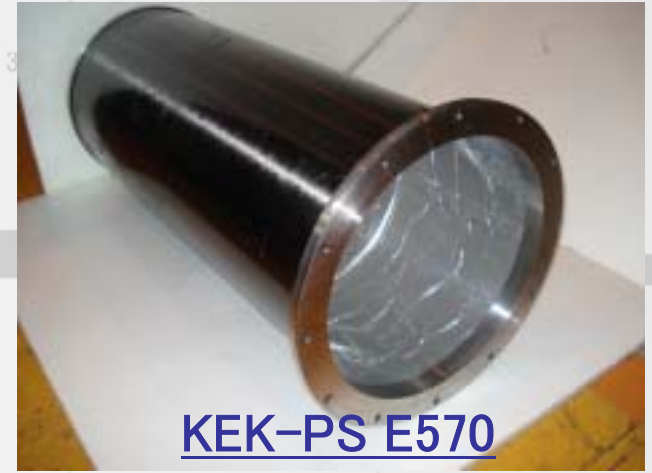


Y. Fukuda, C. Guaraldo, T. Hanaki, R. S. Hayano, A. Hirtl,  
M. Iio, M. Iliescu, T. Ishikawa, S. Ishimoto,  
T. Ishiwatari, K. Itahashi, M. Iwasaki, P. Kienle, B. Luigi,  
J. Marton, Y. Matsuda, Y. Mizoi, T. Nagae, H. Ohnishi,  
S. Okada, M. Ombretta, H. Outa, D. Pietreanu, A. Sakaguchi,  
F. Sakuma, M. Sato, M. Sekimoto, D. Sirghi, F. Sirghi,  
S. Suzuki, T. Suzuki, D. Tomono, A. Toyoda, H. Tatsuno,  
E. Widmann, T. Yamazaki, H. Yim, J. Zmeskal

Precision spectroscopy of Kaonic Helium  $3\ 3d \rightarrow 2p$  X-rays

J-PARC E15 Experiment

## CFRP真空容器設計のための耐圧計算

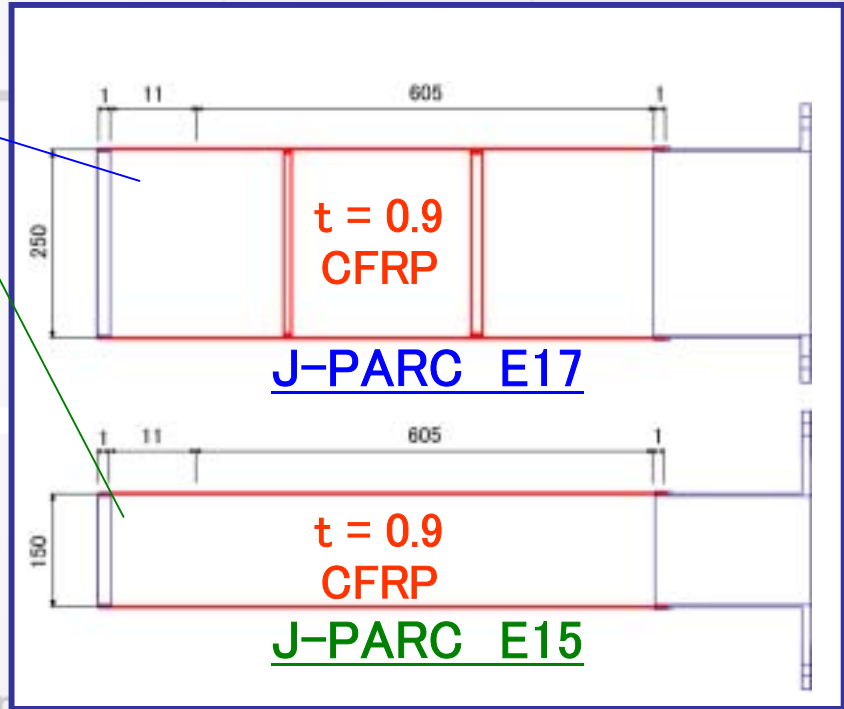
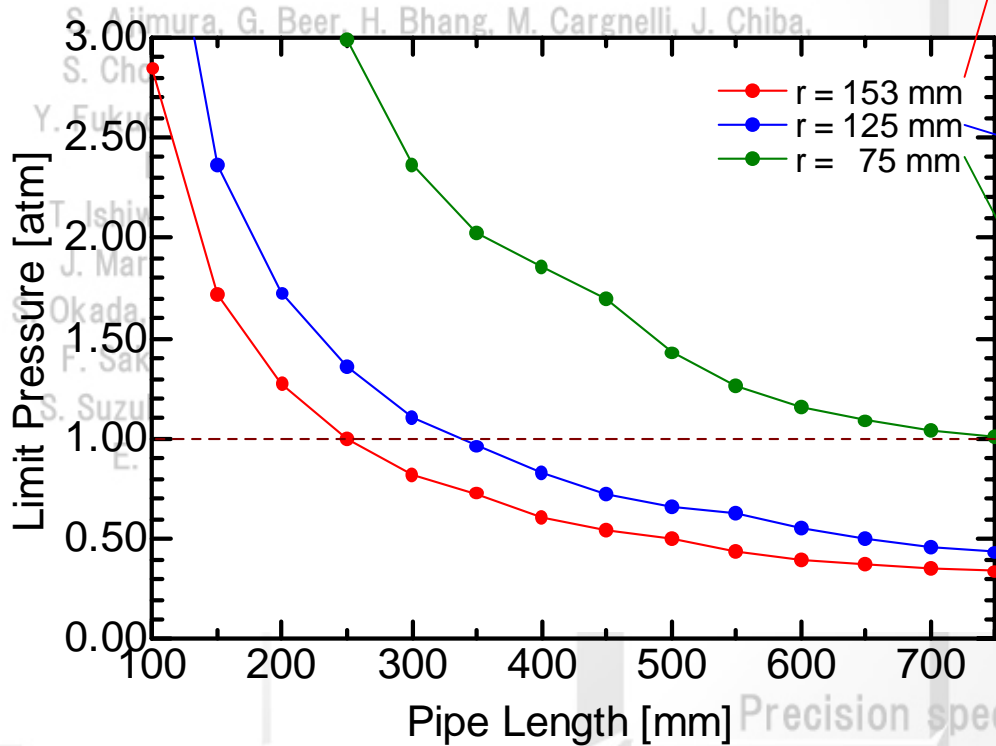


KEK-PS E570

E549実験用のCFRPでパラメータを規格化  
(安全ファクターを含む)

ヤング率: 63.5 [GPa]

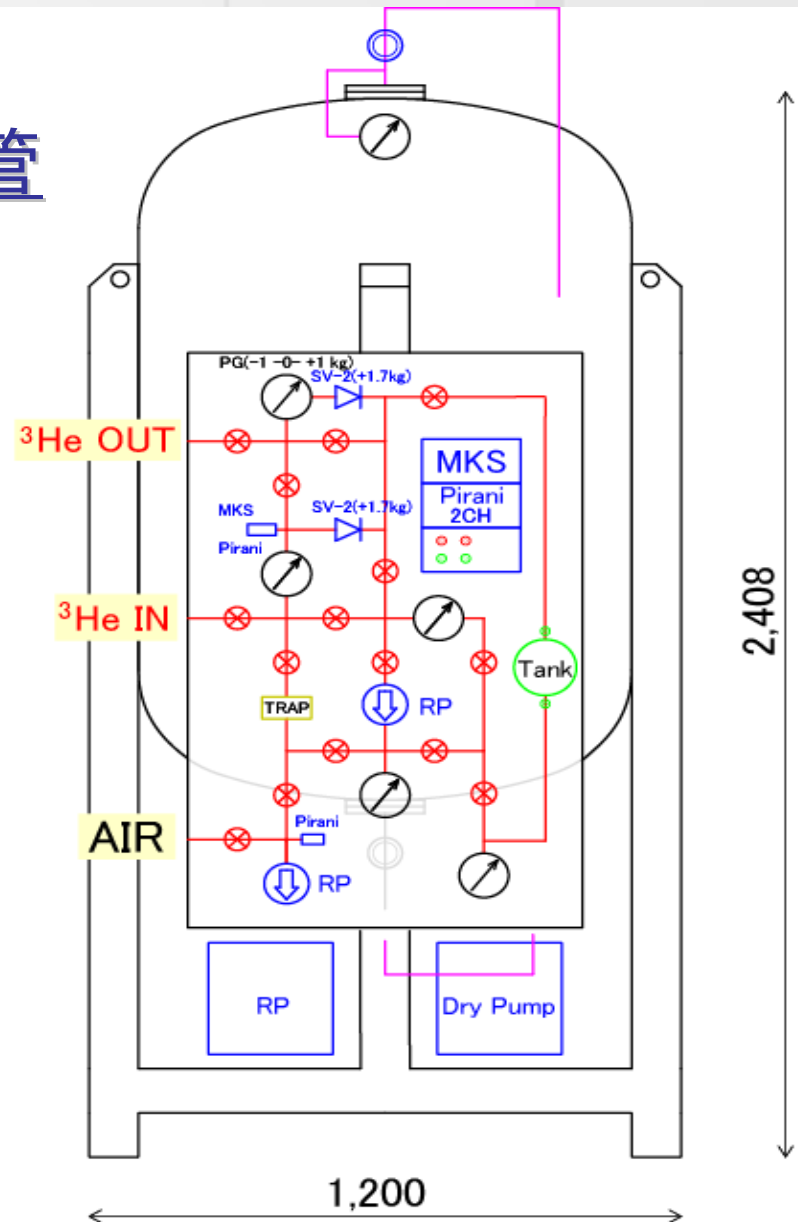
Collaborator



J-PARC E15 Experiment  
A search for deeply-bound kaonic n

## 用途

- 大気圧でヘリウム3ガスを保管
- ヘリウム3ガスの導入、回収
- 押し込みモード
- ヘリウム3の純化
- 強制外部循環 (バックアッププラン)





## 5. 今後の開発計画



- 今年度、ヘリウム4ガスを用いて冷却試験を行い、到達温度、熱流入、ガス内部循環などを綿密に調べ改良等を進めていく。
- 来年度、ガスハンドリングシステム、ベリリウムを用いた標的容器の実機、CFRP真空容器、放射シールドを製作する。
- 来年度には、ヘリウム3を150 ml(液体)程度購入しそれを用いた冷却テストを行い再来年度の完成を目指す。

Precision spectroscopy of Kaonic Helium  $3\ 3d \rightarrow 2p$  X-rays

## Collaborator

S. Ajimura, G. Beer, H. Bhang, M. Cargnelli, J. Chiba,  
S. Choi, C. Curceanu, F. Diego, H. Fujioka, T. Fukuda,  
Y. Fukuda, C. Guaraldo, T. Hanaki, R. S. Hayano, A. Hirtl,  
M. Iio, M. Iliescu, T. Ishikawa, S. Ishimoto,  
T. Ishiwatari, K. Itahashi, M. Iwasaki, P. Kienle, B. Luigi,  
J. Marton, Y. Matsuda, Y. Mizoi, T. Nagae, H. Ohnishi,  
S. Okada, M. Ombretta, H. Outa, D. Pietreanu, A. Sakaguchi,  
F. Sakuma, M. Sato, M. Sekimoto, D. Sirghi, F. Sirghi,  
S. Suzuki, T. Suzuki, D. Tomono, A. Toyoda, H. Tatsuno,  
E. Widmann, T. Yamazaki, H. Yim, J. Zmeskal