

日本のスピニ物理学の展望

# CERN COMPASS の偏極標的

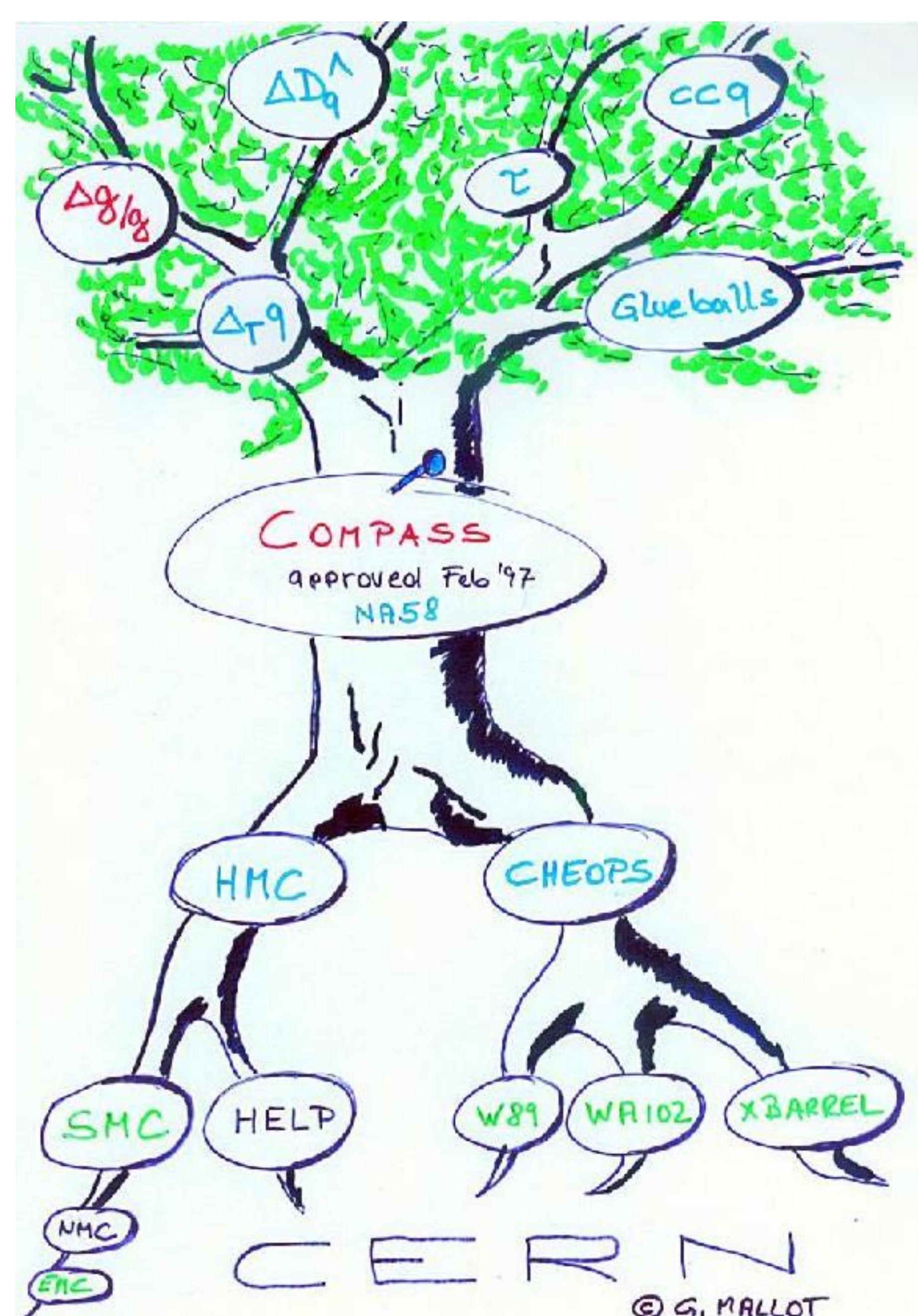
糠塚元氣 (理研 BNL 研究センター, 山形大学)





# もくじ

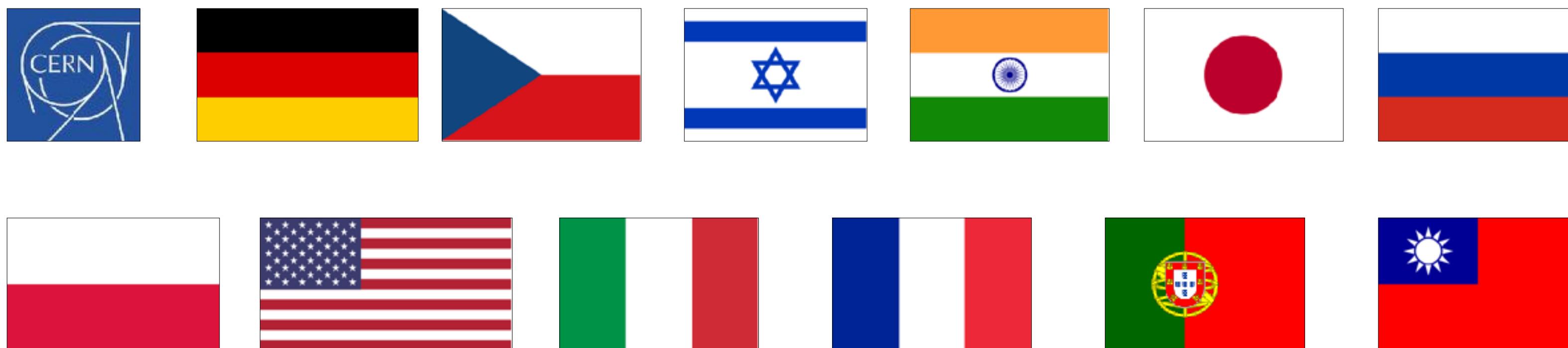
- **COMPASS 国際共同研究**
  - セットアップ
  - データ収集ラン
- **COMPASS 偏極標的**
  - 偏極、動的核偏極法
  - 標的物質
  - $^3\text{He}/^4\text{He}$  希釈冷凍
  - COMPASS PT マグネット
  - マイクロ波
  - 偏極度測定システム
  - 測定結果
- **まとめ**



# COMPASS 国際共同実験

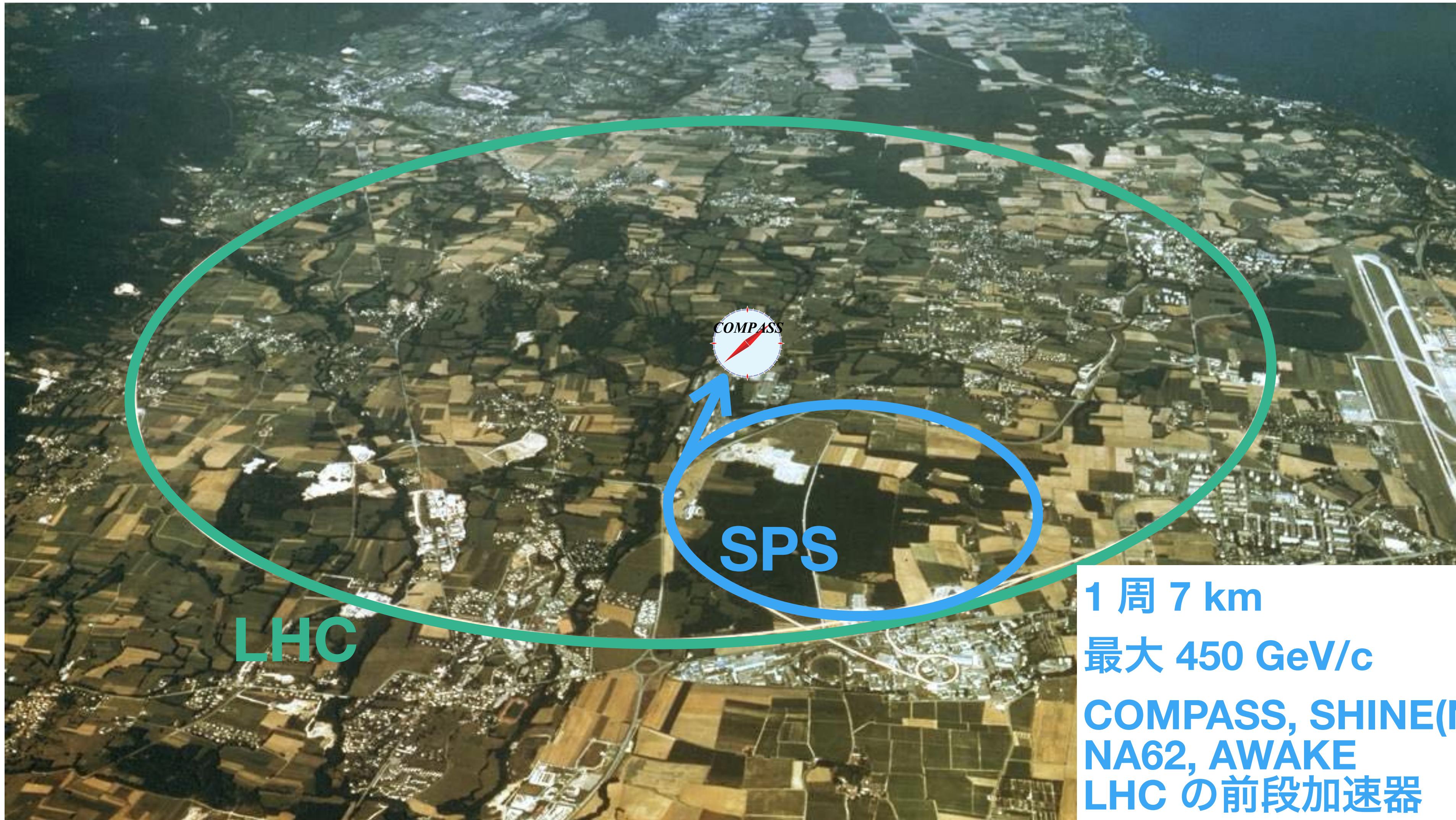
**CO**mmun **M**uon and **P**roton **A**pparatus  
for **S**tructure and **S**pectroscopy

- ・核子構造とハドロンスペクトロスコピーの実験
- ・12 力国 200 人以上のスタッフと学生からなる研究グループ
- ・CERN の SPS から供給されるビームと固定標的を用いる
- ・2002 年からデータ収集開始
- ・日本グループは偏極標的と物理解析で貢献してきた



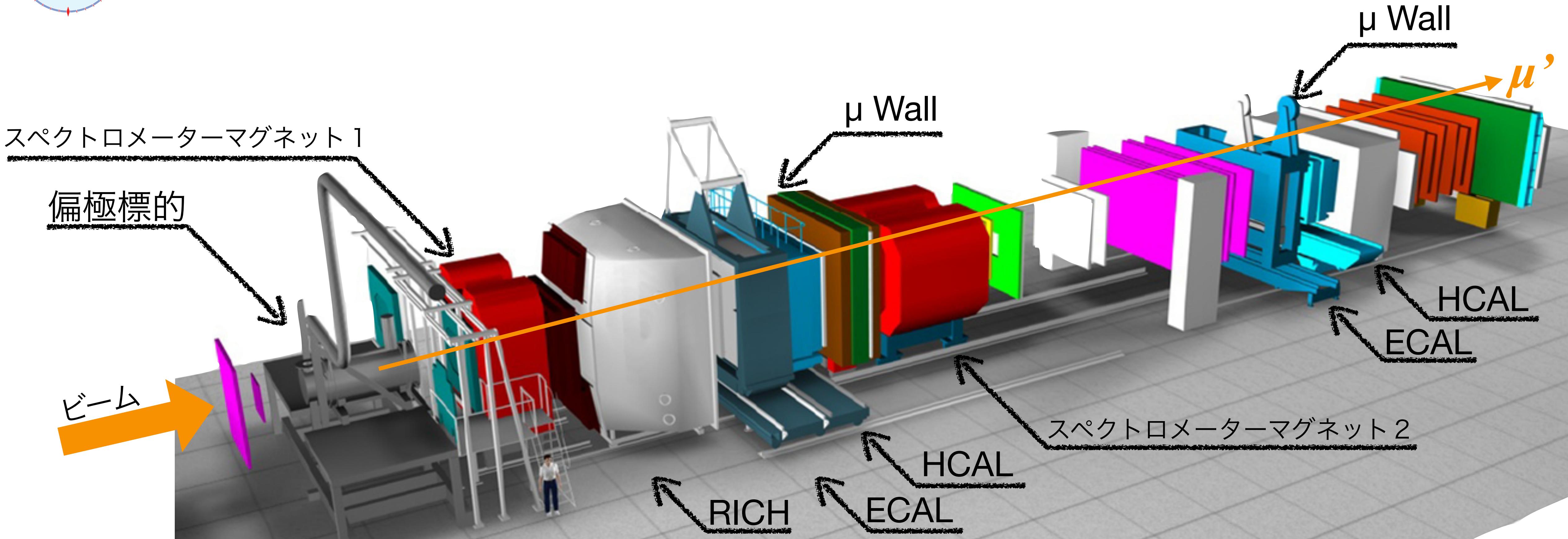


# COMPASS 国際共同実験





# COMPASS の典型的なセットアップ

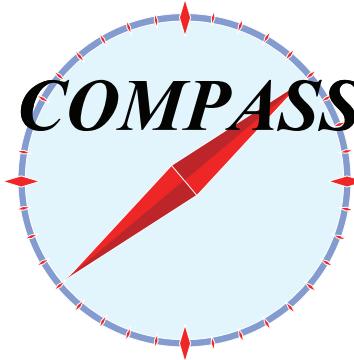


ビーム: 160 ~ 190 GeV/c  
~ $10^8$  particle/s  
縦偏極  $\mu$ 、ハドロン

スペクトロメータ:

- 350 以上のトラッキング面
- 180 mrad 以内をカバー

- ECAL & HCAL
- RICH
- $\mu$  wall



# COMPASS のデータ収集

年	プログラム	ビーム (GeV/c)	ターゲット
02 - 04	SIDIS	$\mu^\pm$ , 160	${}^6\text{LiD}$ , 縦・横偏極
	SIDIS	$\mu^+$ , 160	${}^6\text{LiD}$ , 縦偏極
	SIDIS	$\mu^+$ , 160	$\text{NH}_3$ , 縦・横偏極
08 - 09	ハドロンスペクトロスコピー		
10	SIDIS	$\mu^+$ , 160	$\text{NH}_3$ , 横偏極
11	SIDIS	$\mu^+$ , 200	$\text{NH}_3$ , 縦偏極
12	DVCS 試験ラン	$\mu^\pm$ , 160	Liquid $\text{H}_2$
14	DY 試験ラン	$\pi^-$ , 190	$\text{NH}_3$
15	DY	$\pi^-$ , 190	$\text{NH}_3$ , 横偏極
16 - 17	GPD	$\mu^\pm$ , 160	Liquid $\text{H}_2$
	DY	$\pi^-$ , 190	$\text{NH}_3$ , 横偏極
19-20	CERN Long Shutdown 2		
21	SIDIS	$\mu^+$ , 160	${}^6\text{LiD}$ , 横偏極

← d-quark Transversity



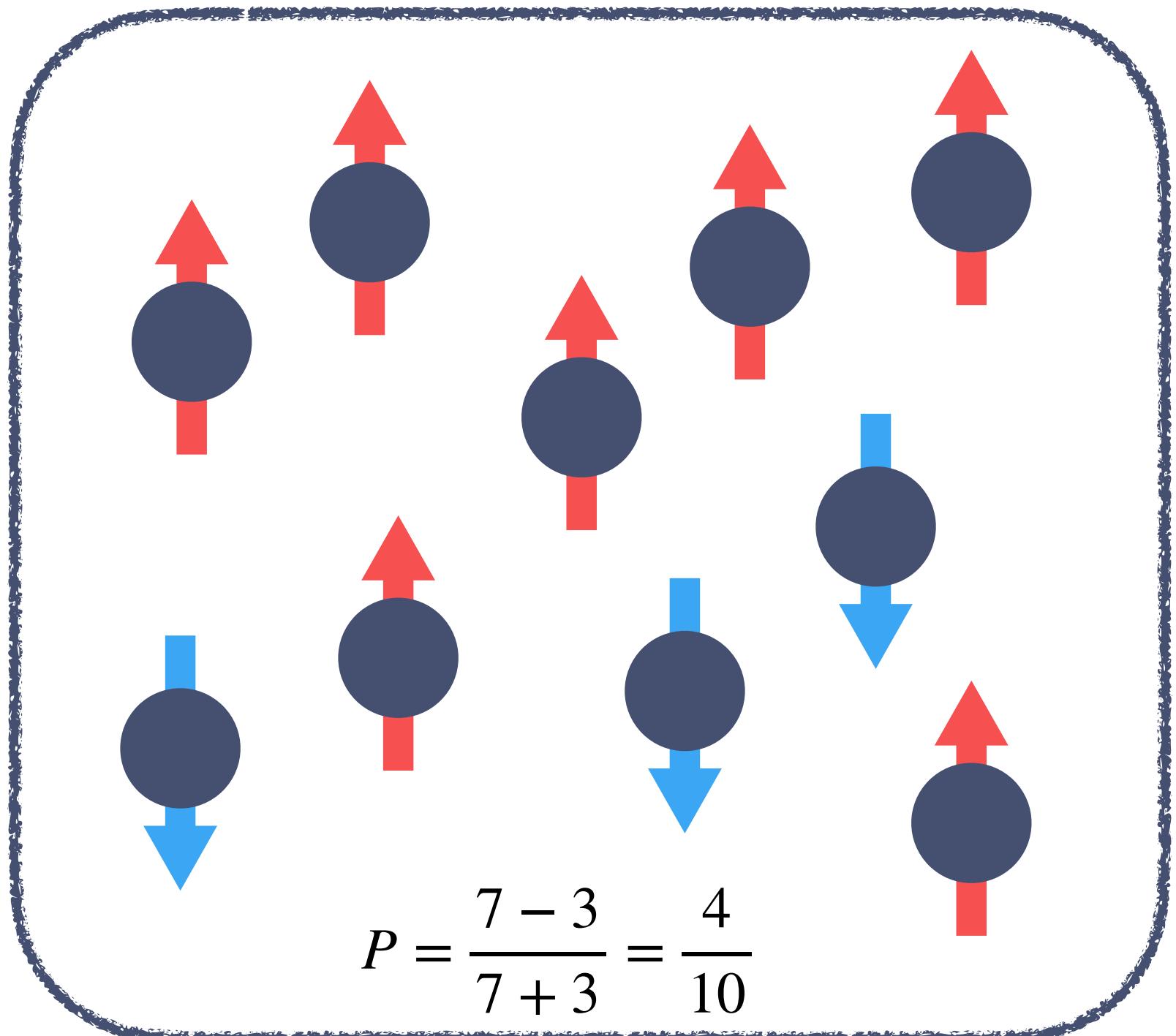
# もくじ

- COMPASS 國際共同研究
  - セットアップ
  - データ収集ラン
- COMPASS 偏極標的
  - 偏極、動的核偏極法
  - 標的物質
  - $^3\text{He}/^4\text{He}$  希釈冷凍
  - COMPASS PT マグネット
  - マイクロ波
  - 偏極度測定システム
  - 測定結果
- まとめ



# 偏極

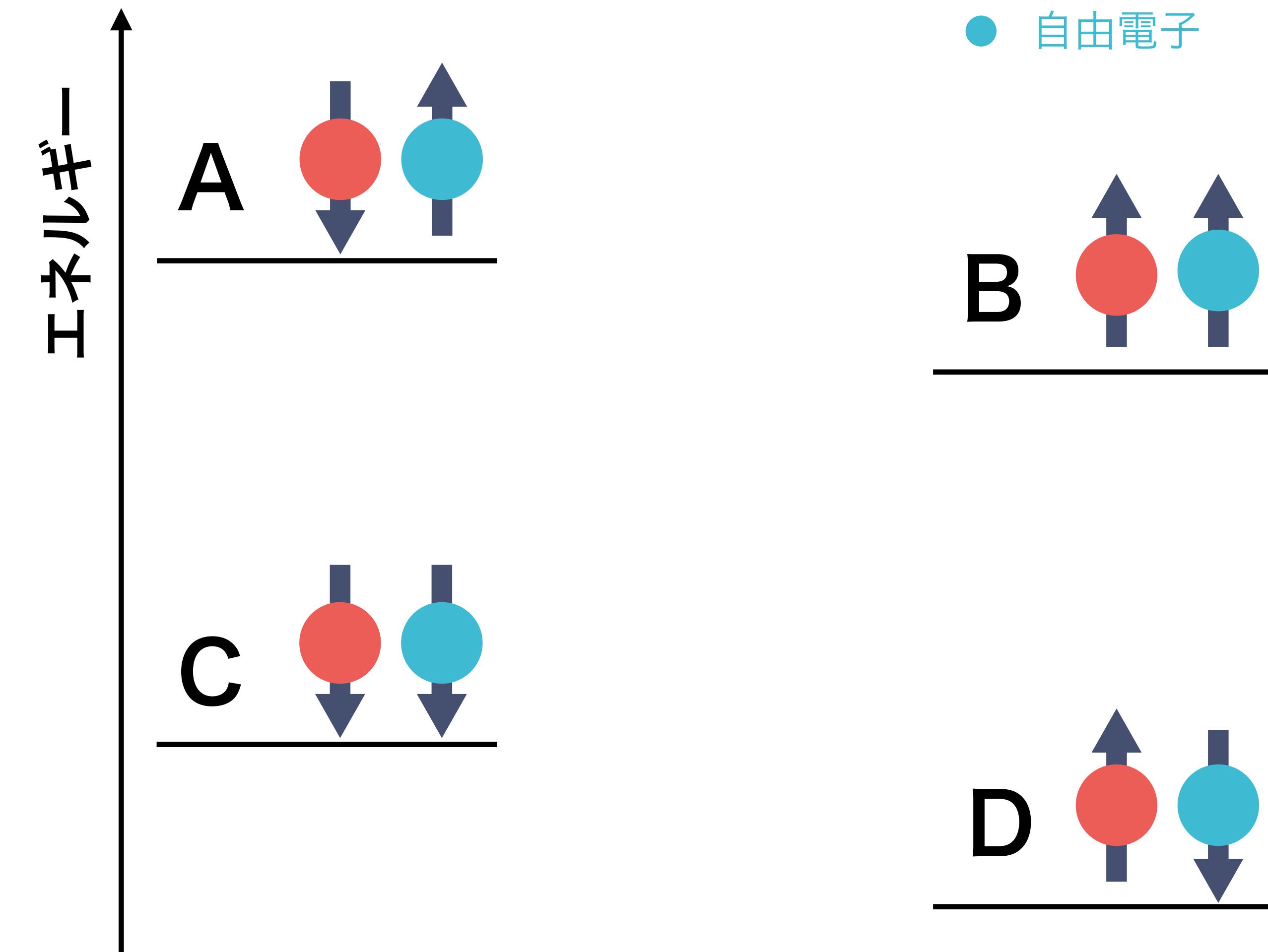
- 偏極度 :  $P \equiv \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-}$
- 熱平衡状態 (TE) では,  $P_{TE} = \tanh\left(\frac{\mu B}{k_B T}\right)$
- COMPASS PT の典型的な環境 0.1K, 2.5T では  
陽子 :  $\sim 1\%$ , 電子 :  $\sim 100\%$
- 動的核偏極 (DNP) 法で電子の高偏極を陽子に移す





# 動的核偏極

陽子・電子の対は磁場中で 4 つのエネルギー準位をとる



DNP 法による陽子の負偏極の模式図

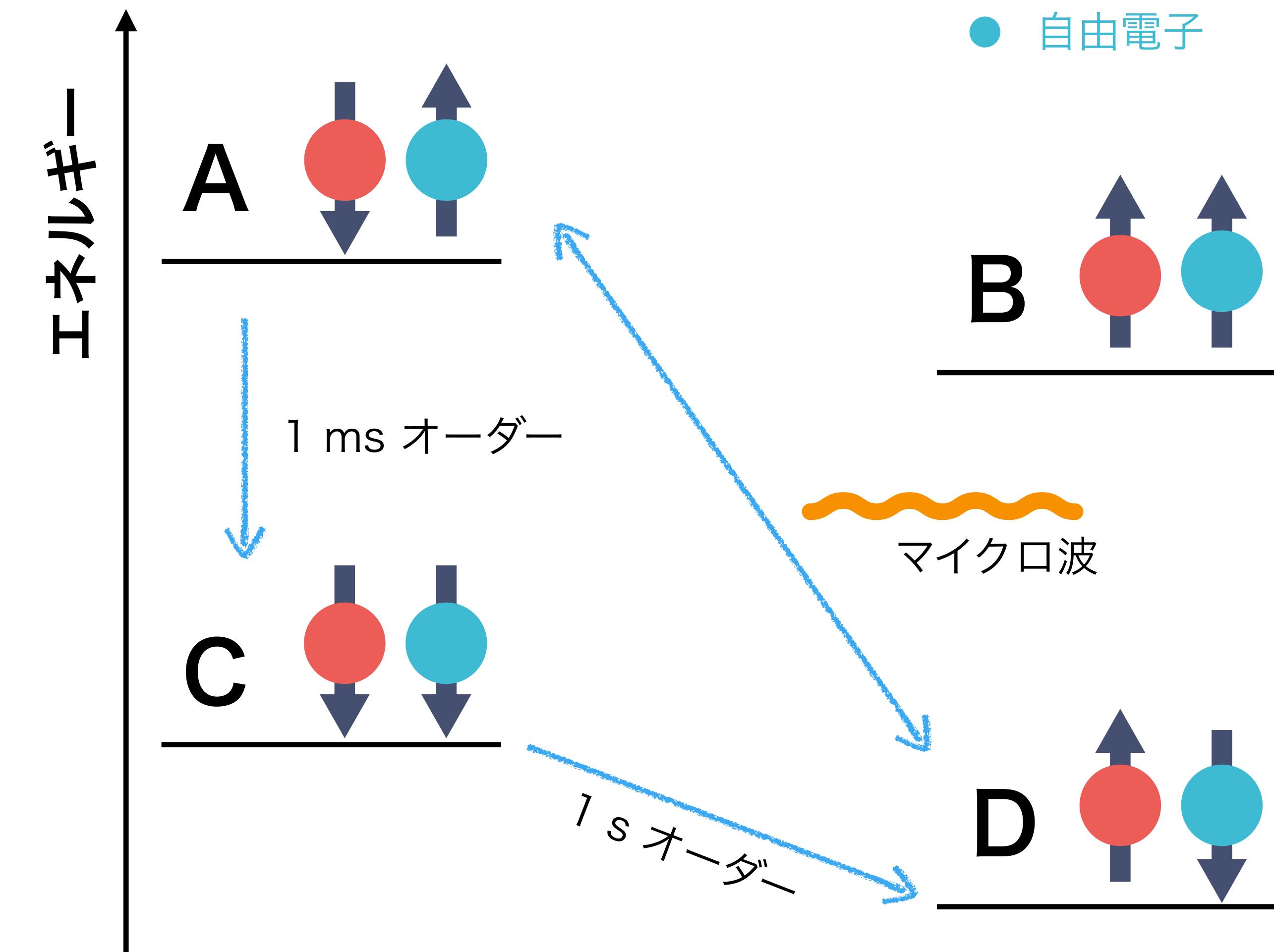


# 動的核偏極

陽子・電子の対は磁場中で 4 つのエネルギー準位をとる

陽子負偏極を得るには

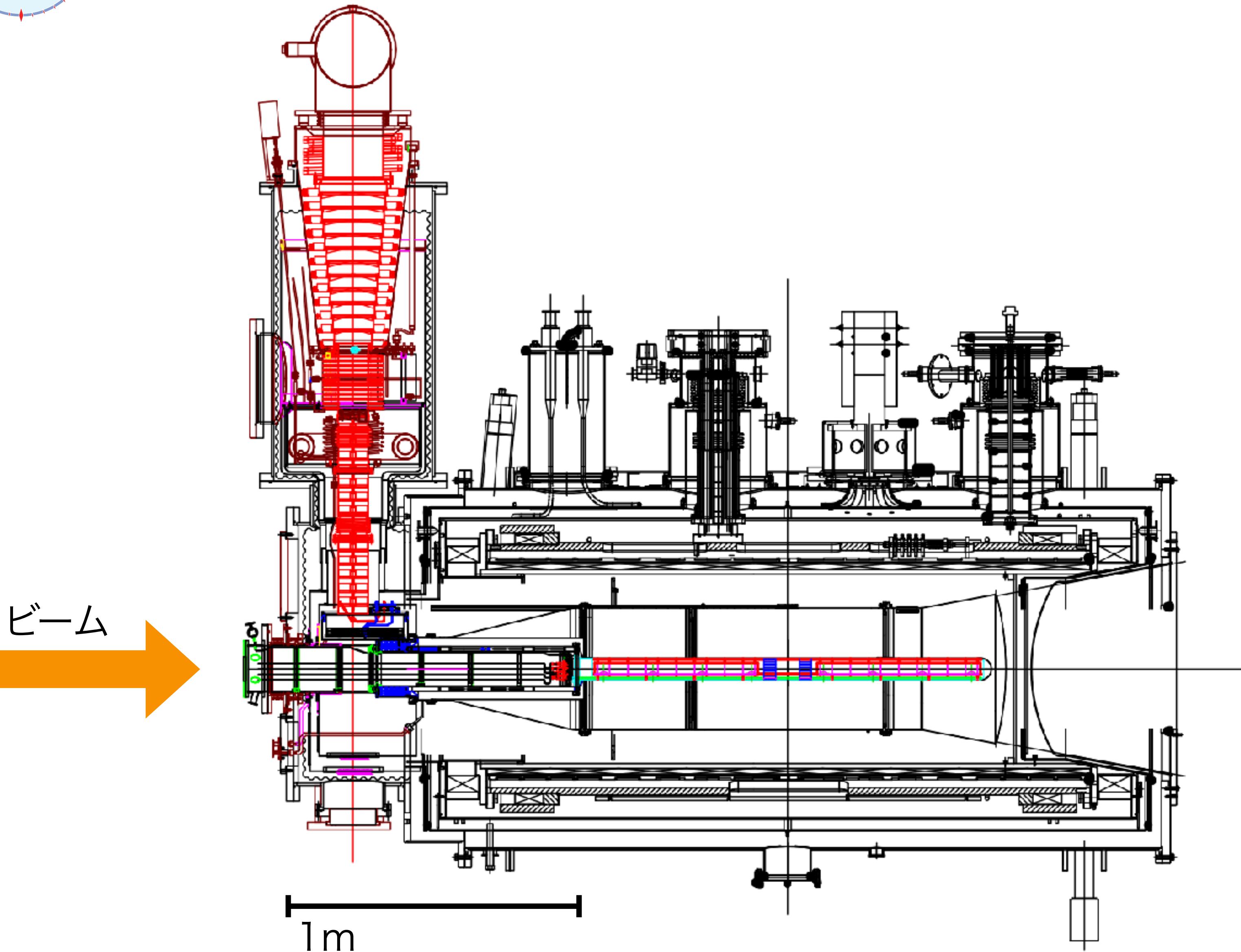
1. 準位差 A-D のエネルギーを持つマイクロ波を照射し, D→A の遷移を起こす
2. A→C→D の順に緩和
3. A→C は 1 s オーダー, C→D は 1 ms オーダーで緩和するため, 状態 C がたまる



DNP 法による陽子の負偏極の模式図



# COMPASS 偏極標的

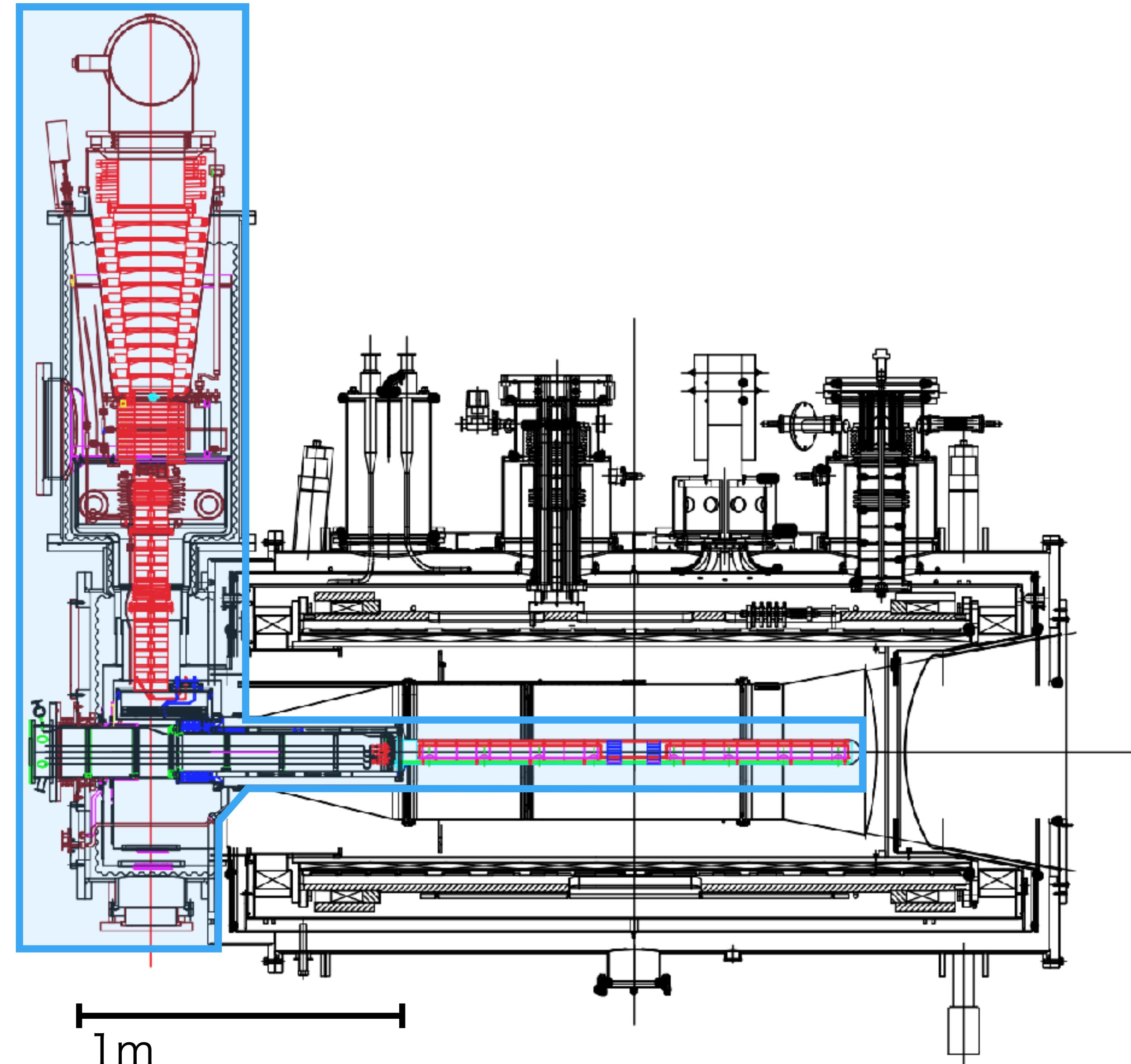


CERN COMPASS の偏極標的、糠塚元氣（理研BNLセ・山形理）



# COMPASS 偏極標的

ビーム  
→



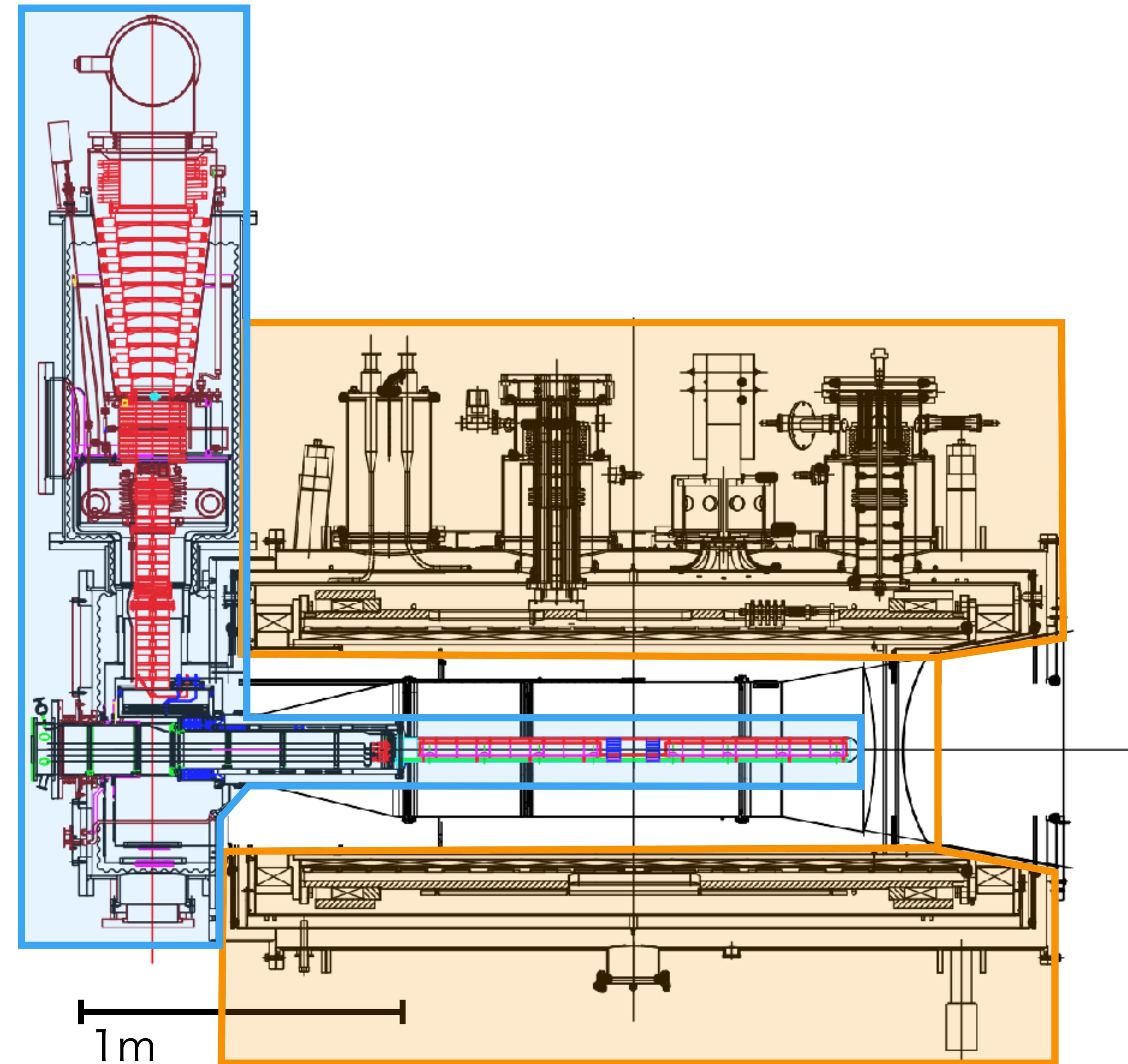
キーワード  
極低温

- ・ 到達温度 50 mK
- ・ 冷却能力 350 mK@300mK



# COMPASS 偏極標的

ビーム  
→



キーワード  
極低温

- ・ 到達温度 50 mK
- ・ 冷却能力 350 mK@300mK

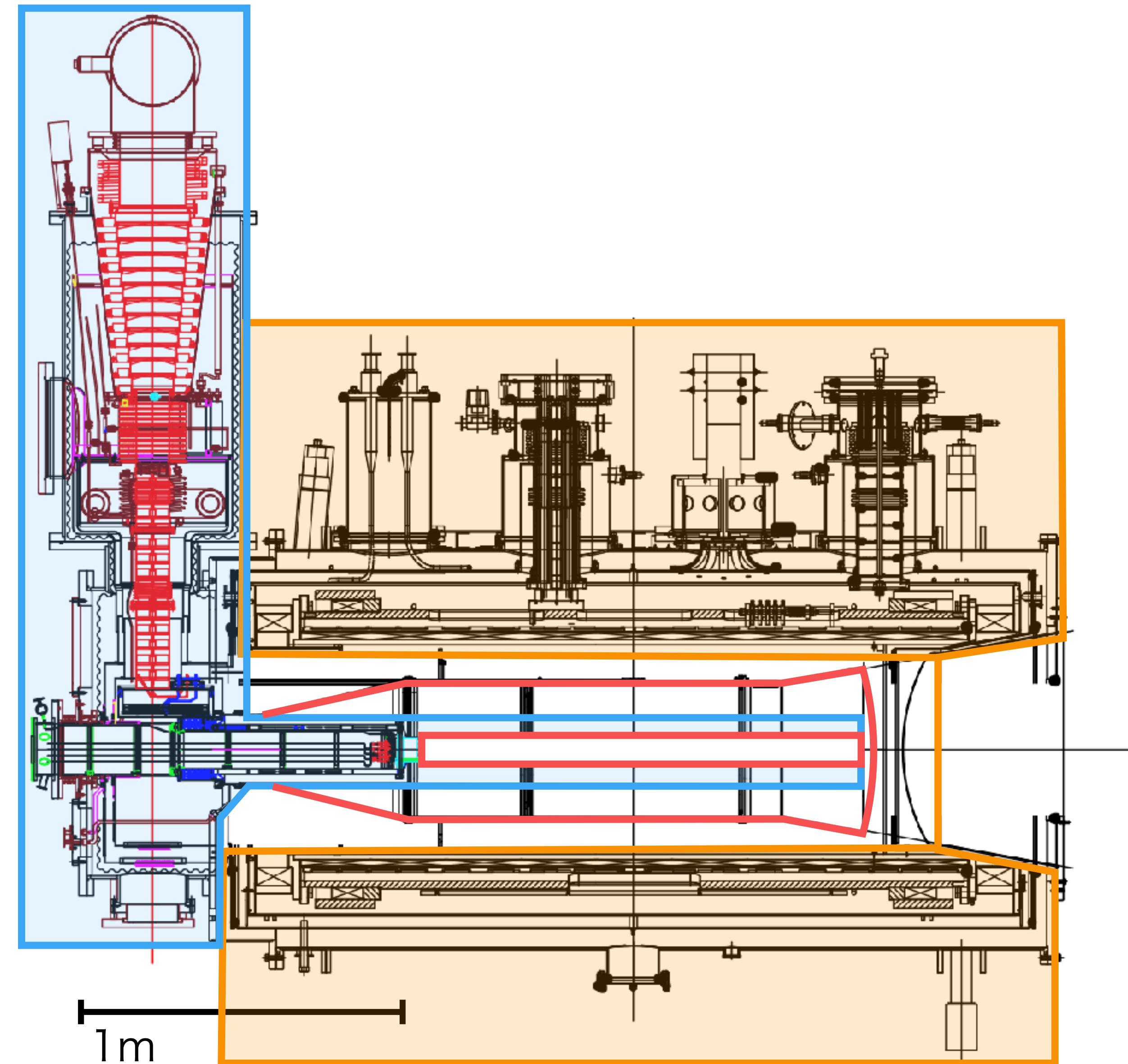
高磁場

- ・ ソレノイド：縦方向 2.5 T
- ・ ダイポール：横方向 0.6 T
- ・ アクセプタンス 180 mrad



# COMPASS 偏極標的

ビーム  
→



キーワード  
極低温

- ・ 到達温度 50 mK
- ・ 冷却能力 350 mK@300mK

高磁場

- ・ ソレノイド：縦方向 2.5 T
- ・ ダイポール：横方向 0.6 T
- ・ アクセプタンス 180 mrad

動的核偏極

- ・ 標的物質： $\text{NH}_3$ ,  ${}^6\text{LiD}$
- ・ 標的セル：2, 3 セル
- ・ マイクロ波：70 GHz
- ・ NMR システム：10 ch



# COMPASS PT: 標的物質、標的セル

	偏極目的核	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	Dilution factor
NH <sub>3</sub>	H	0.85	3 / 17
<sup>6</sup> LiD	D	0.82	4 / 8

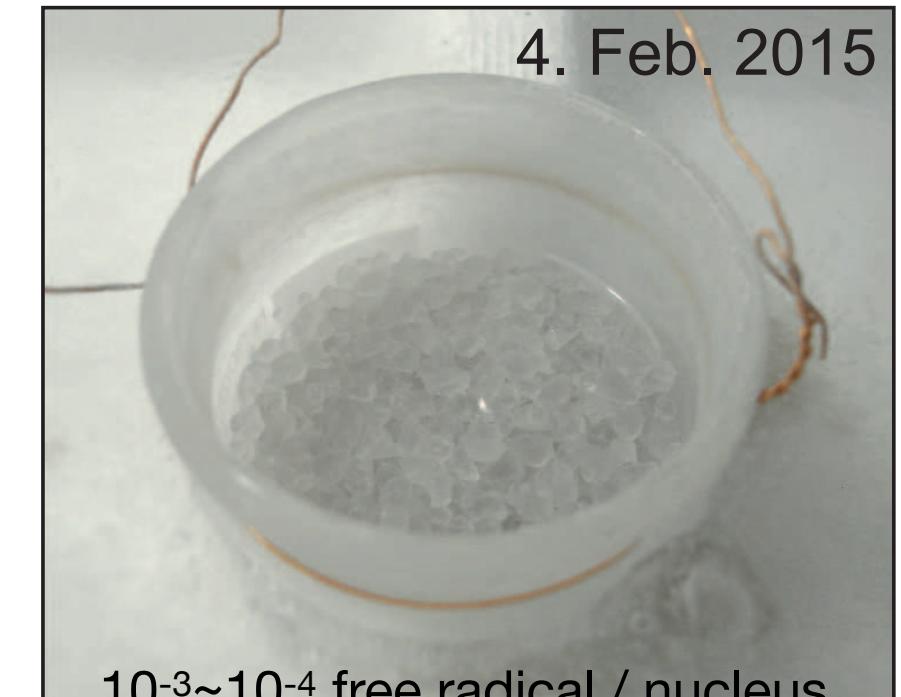


固体 NH<sub>3</sub>



# COMPASS PT: 標的物質、標的セル

	偏極目的核	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	Dilution factor
NH <sub>3</sub>	H	0.85	3 / 17
<sup>6</sup> LiD	D	0.82	4 / 8



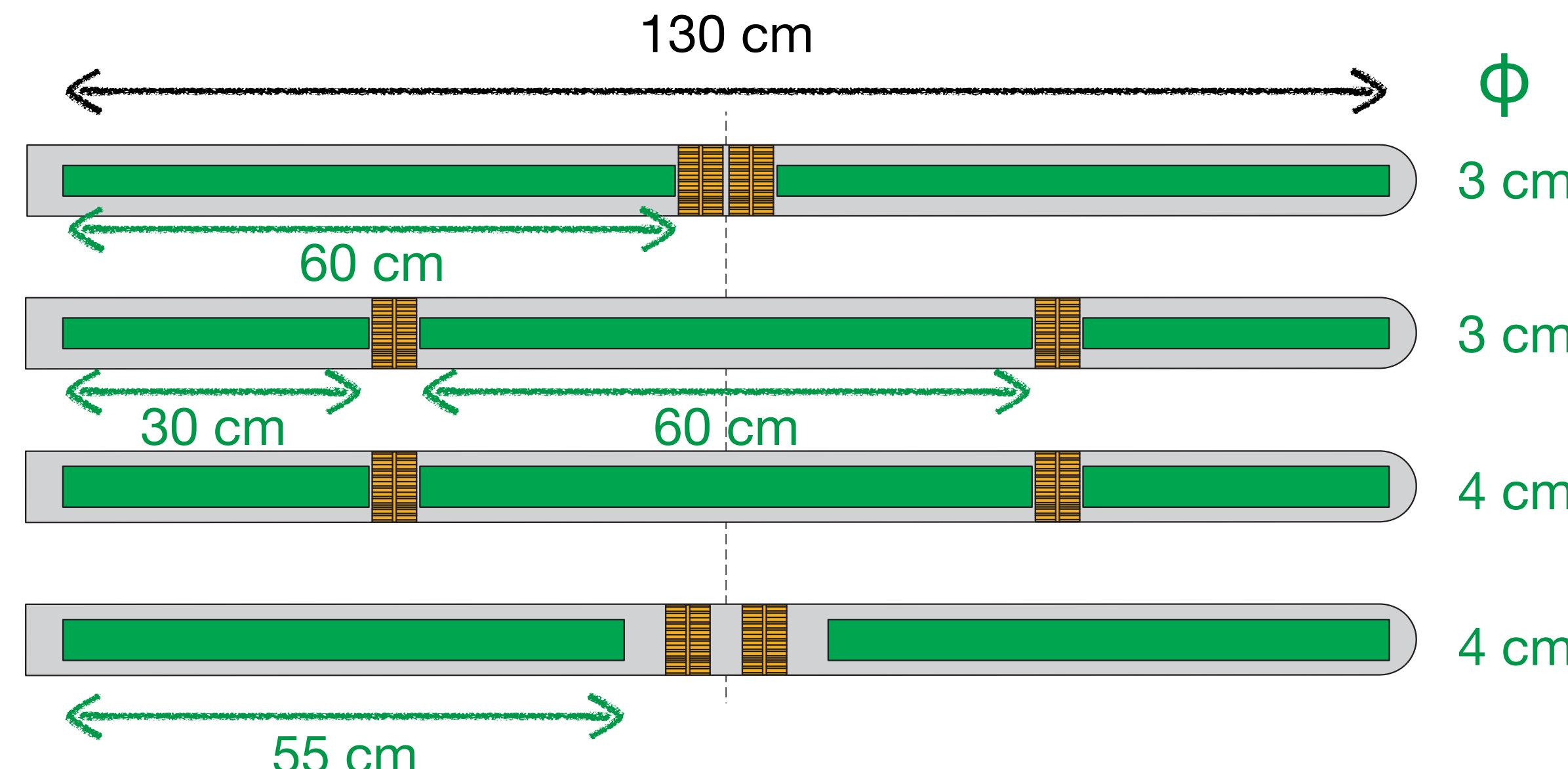
固体 NH<sub>3</sub>

COMPASS  
(2002 - 2004, 0.848 L)

COMPASS  
(2006, 0.848 L)

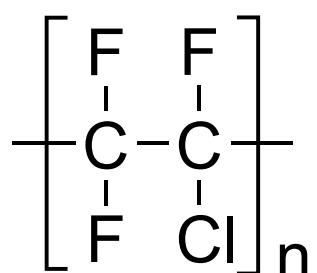
COMPASS  
(2007 - 2011, 1.508 L)

COMPASS II  
(2014 - 2015, 1.382 L)



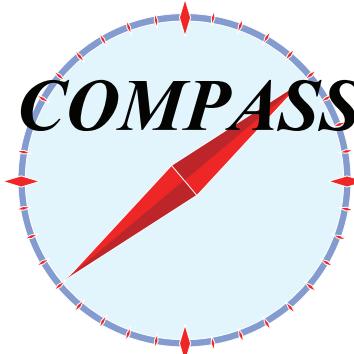
セルの材質

~ 2014, 2021 : ポリアミド  
2015, 2018 : PCTFE

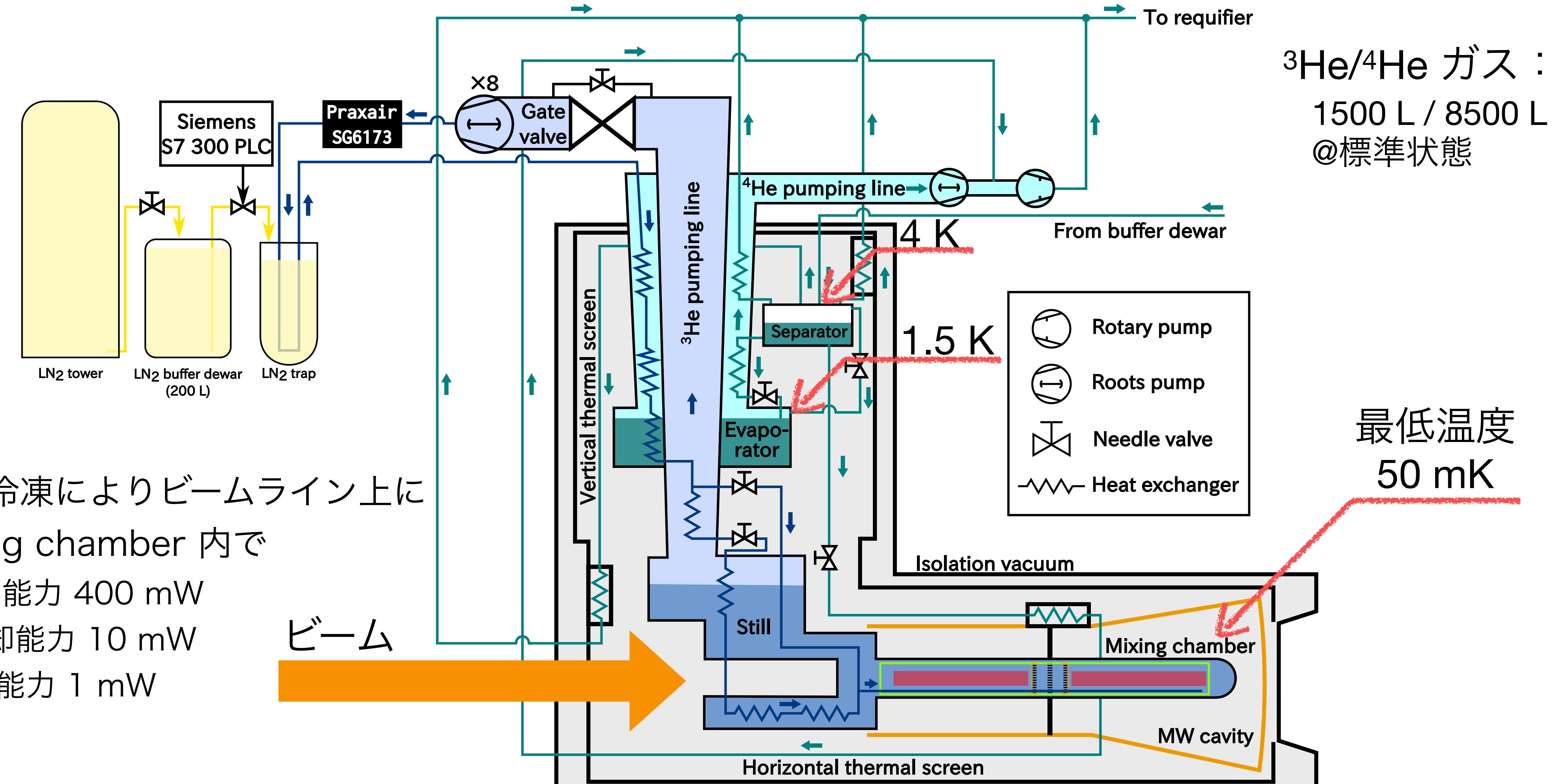


Microwave Stopper  
Target Cell

A. BERLIN, Ph.D. thesis, Ruhr-Universität Bochum, 2015



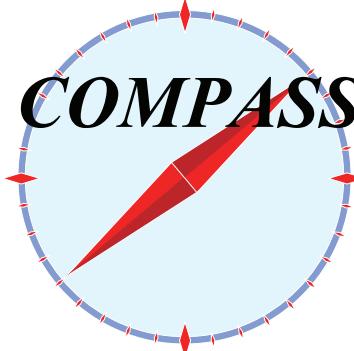
# COMPASS PT: 冷却システム



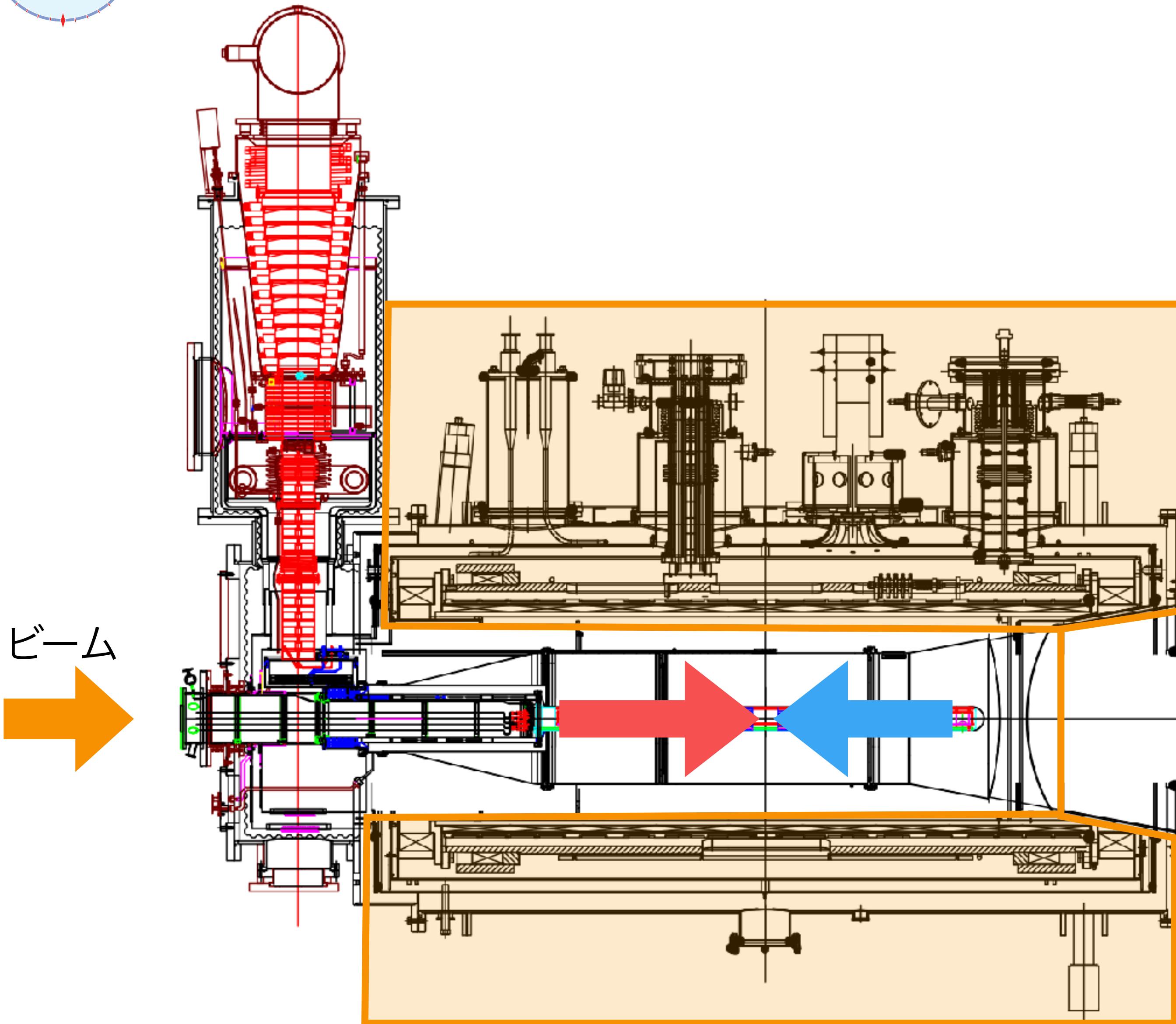
${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  希釈冷凍によりビームライン上に位置する mixing chamber 内で

- 300 mK, 冷却能力 400 mW
- 100 mK, 冷却能力 10 mW
- 60 mK, 冷却能力 1 mW

を実現する



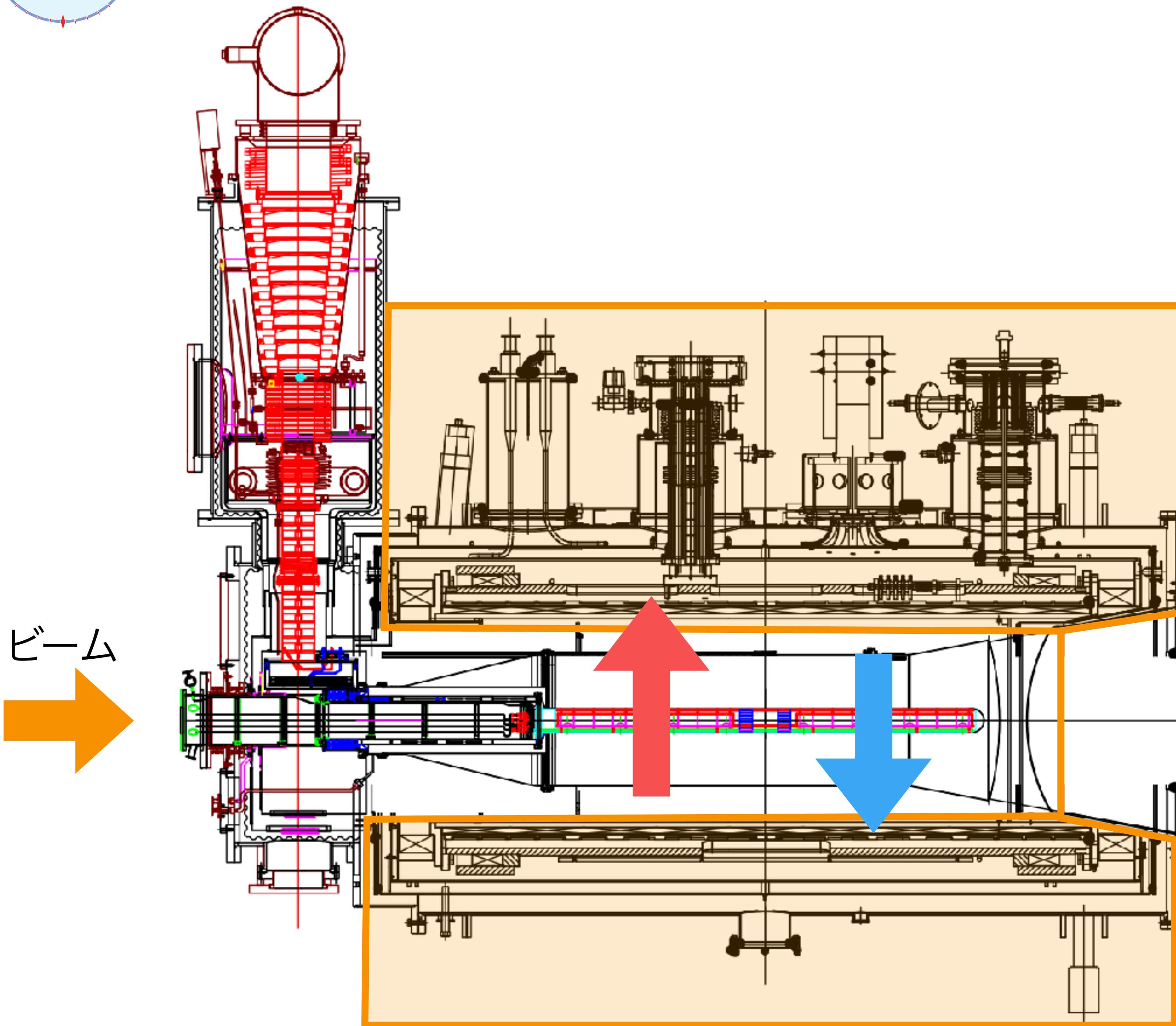
# COMPASS PT: マグネット



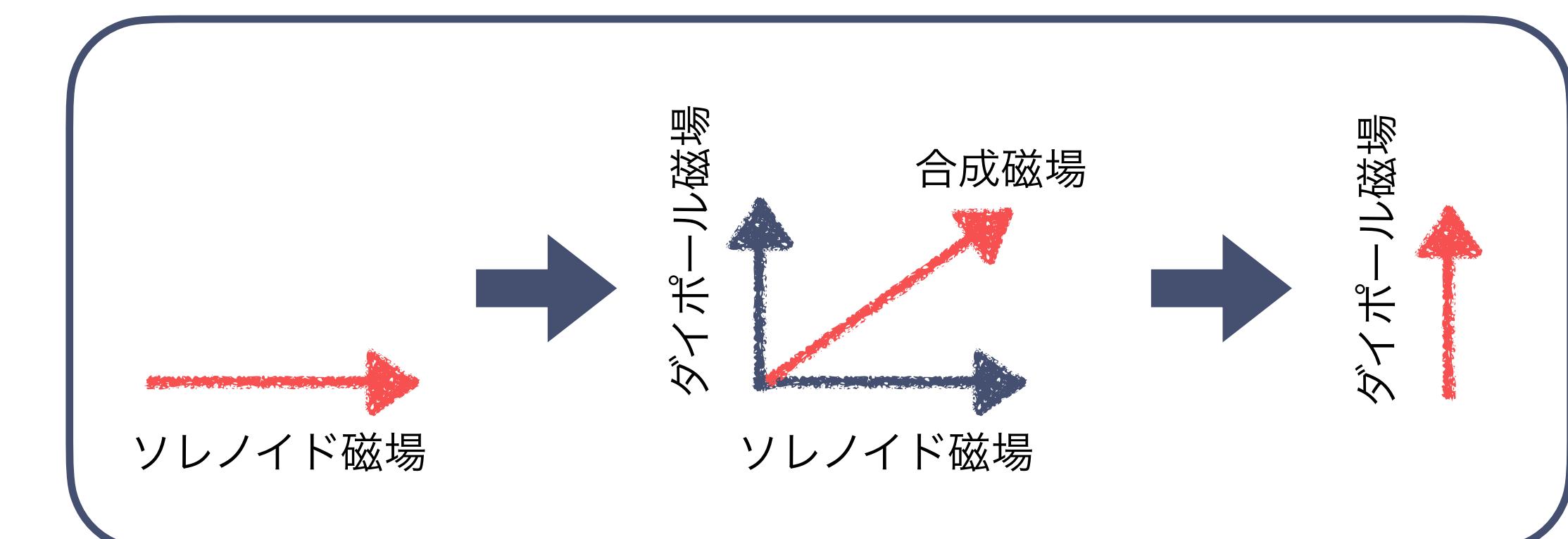
- 2.5 T ソレノイド磁石で標的を  
縦方向に偏極させる



# COMPASS PT: マグネット



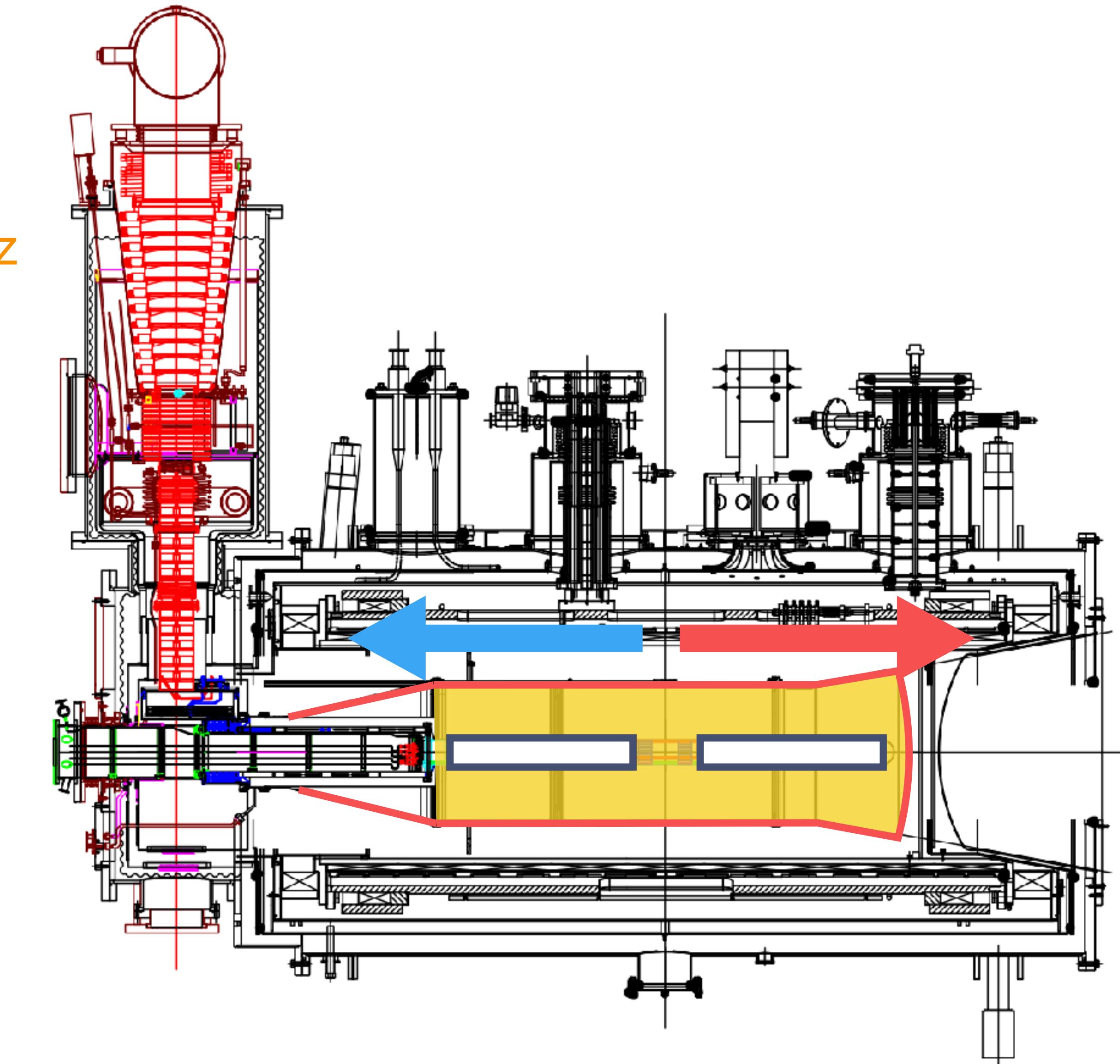
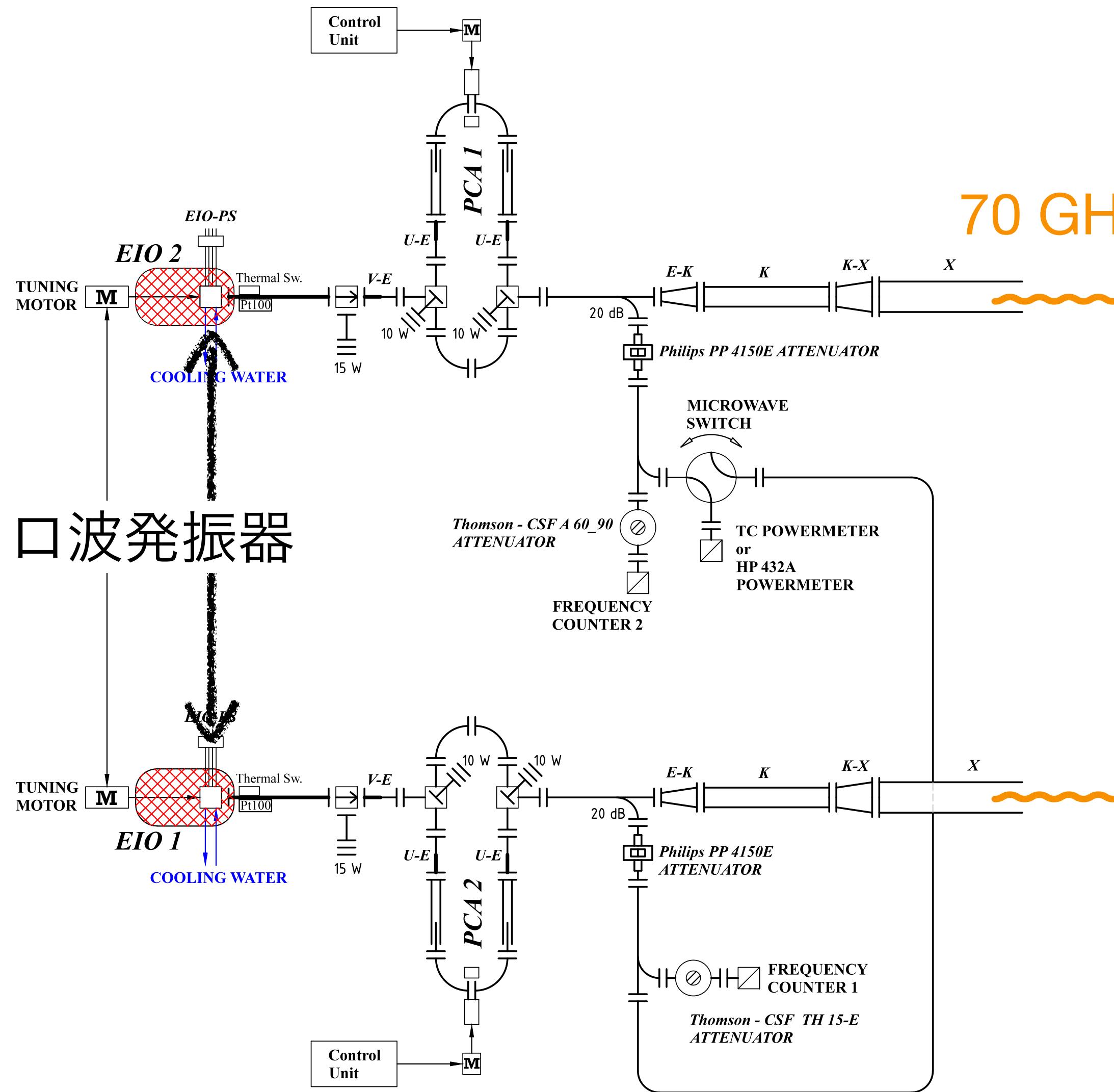
- 2.5 T ソレノイド磁石で標的を  
縦方向に偏極させる
- 横偏極標的が必要なときは、



のように、0.6 T ダイポール磁石も使い、  
縦偏極を横に回転させ、ダイポール磁石で  
偏極を保持する。

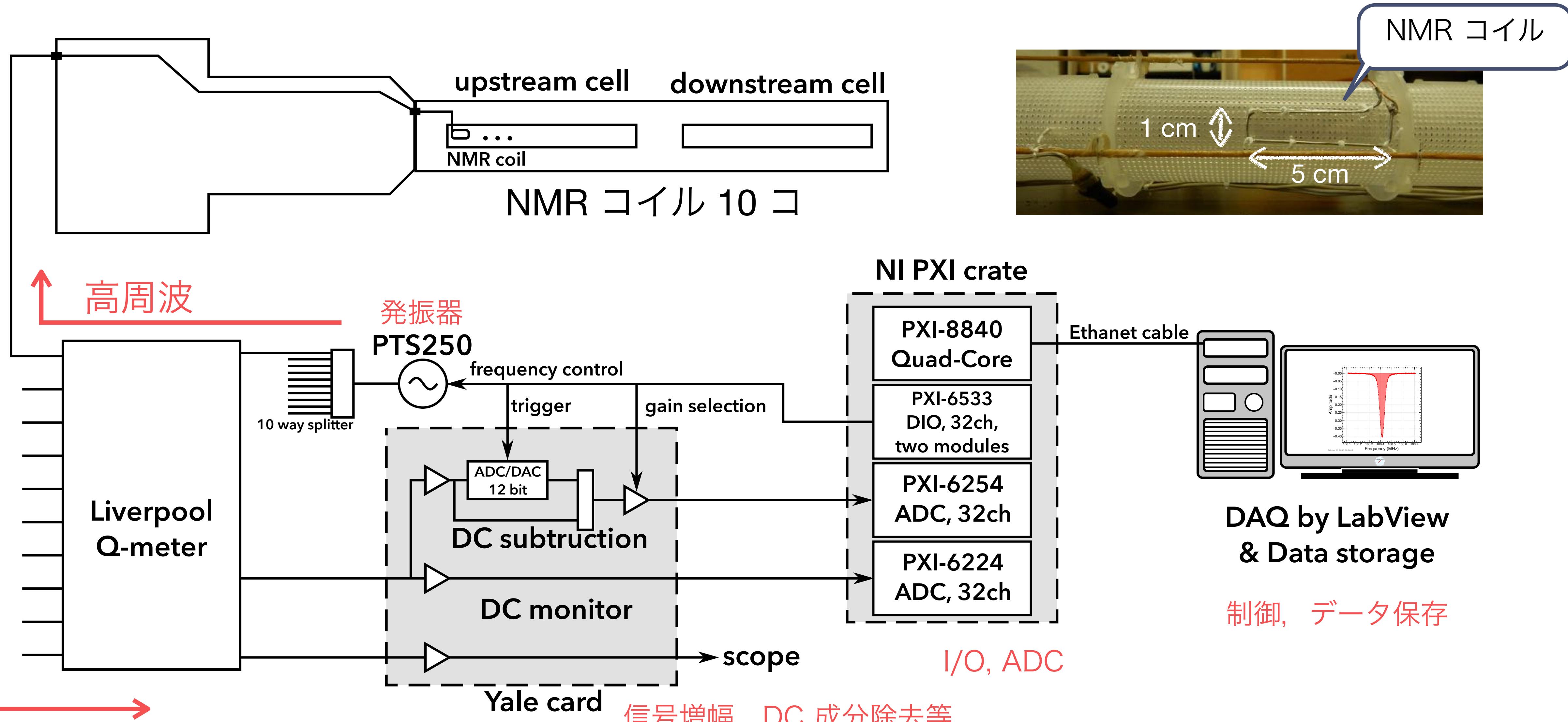


# COMPASS PT: マイクロ波





# COMPASS PT: 偏極度測定システム





# COMPASS PT: 偏極度測定

NMR 信号面積  $S$  と偏極度  $P$  の比例関係を利用する

TE キャリブレーション

- 信号面積と偏極度の比例定数を決定する
- TE 時の面積  $S_{TE}$  と標的物質を抜いたときの面積  $S_{TE, \text{empty}}$  を測定する
  - DNP 不可能な目的核（標的物質以外の物質、不対電子がないため）による寄与を取り除く

$$P = CS = \frac{P_{TE,1K}}{S_{TE,1K} - S_{TE,\text{empty},1K}} S$$



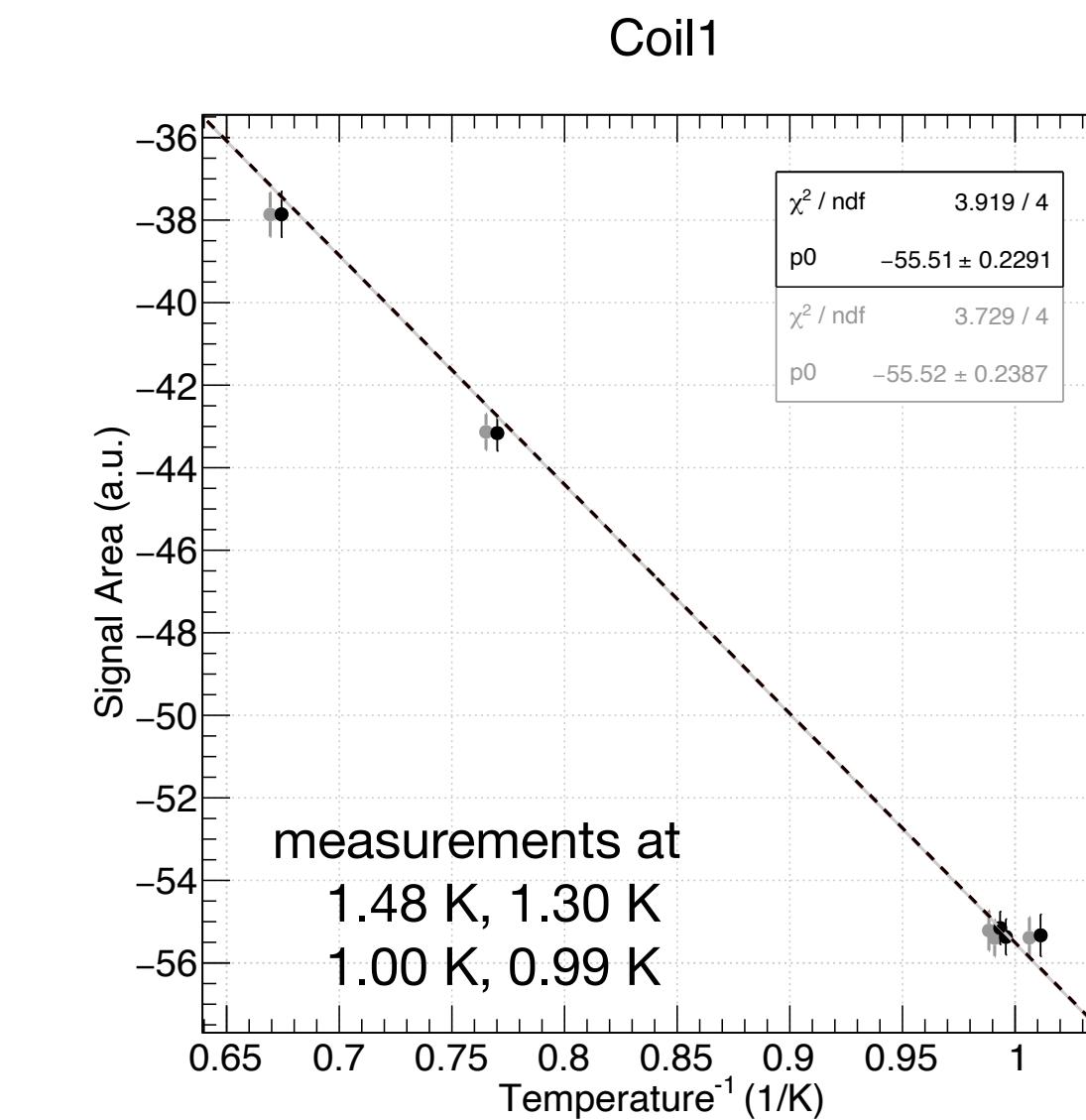
# COMPASS PT: 偏極度測定

NMR 信号面積  $S$  と偏極度  $P$  の比例関係を利用する

TE キャリブレーション

- 信号面積と偏極度の比例定数を決定する
- TE 時の面積  $S_{TE}$  と標的物質を抜いたときの面積  $S_{TE, \text{empty}}$  を測定する
  - DNP 不可能な目的核（標的物質以外の物質、不対電子がないため）による寄与を取り除く

$$P = CS = \frac{P_{TE,1K}}{S_{TE,1K} - S_{TE,\text{empty},1K}} S$$





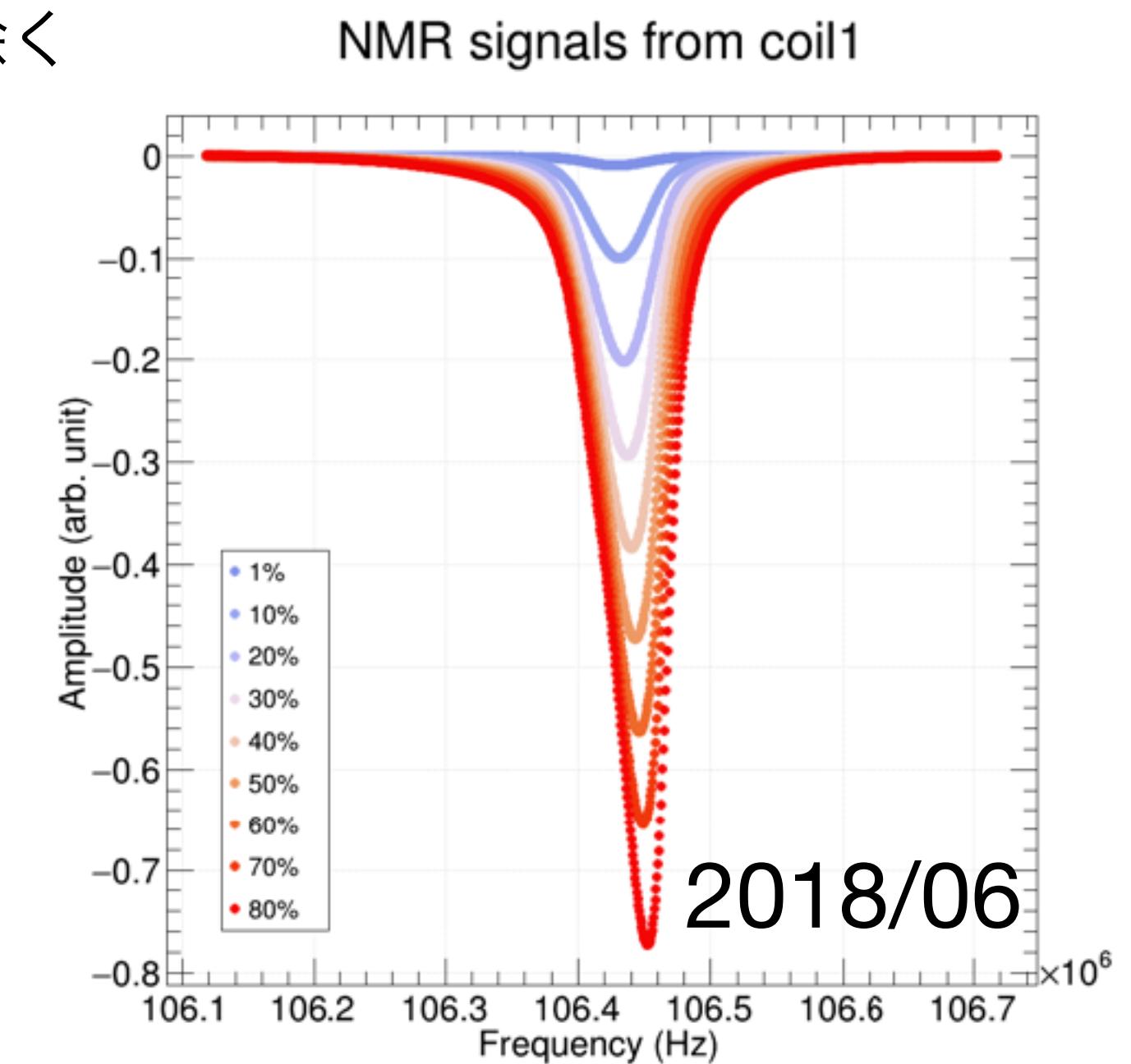
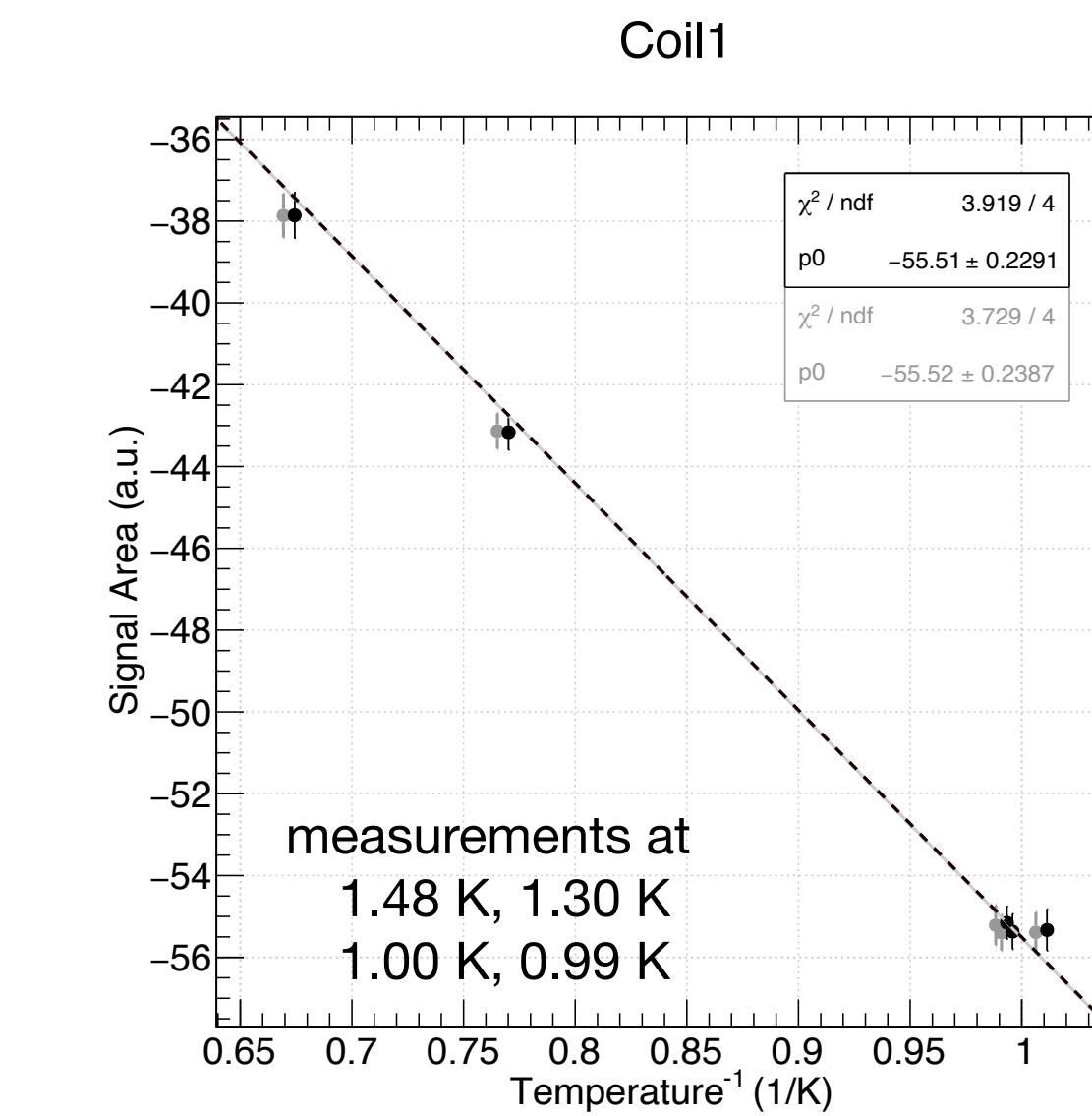
# COMPASS PT: 偏極度測定

NMR 信号面積  $S$  と偏極度  $P$  の比例関係を利用する

TE キャリブレーション

- 信号面積と偏極度の比例定数を決定する
- TE 時の面積  $S_{TE}$  と標的物質を抜いたときの面積  $S_{TE, \text{empty}}$  を測定する
  - DNP 不可能な目的核（標的物質以外の物質、不対電子がないため）による寄与を取り除く

$$P = CS = \frac{P_{TE,1K}}{S_{TE,1K} - S_{TE,\text{empty},1K}} S$$





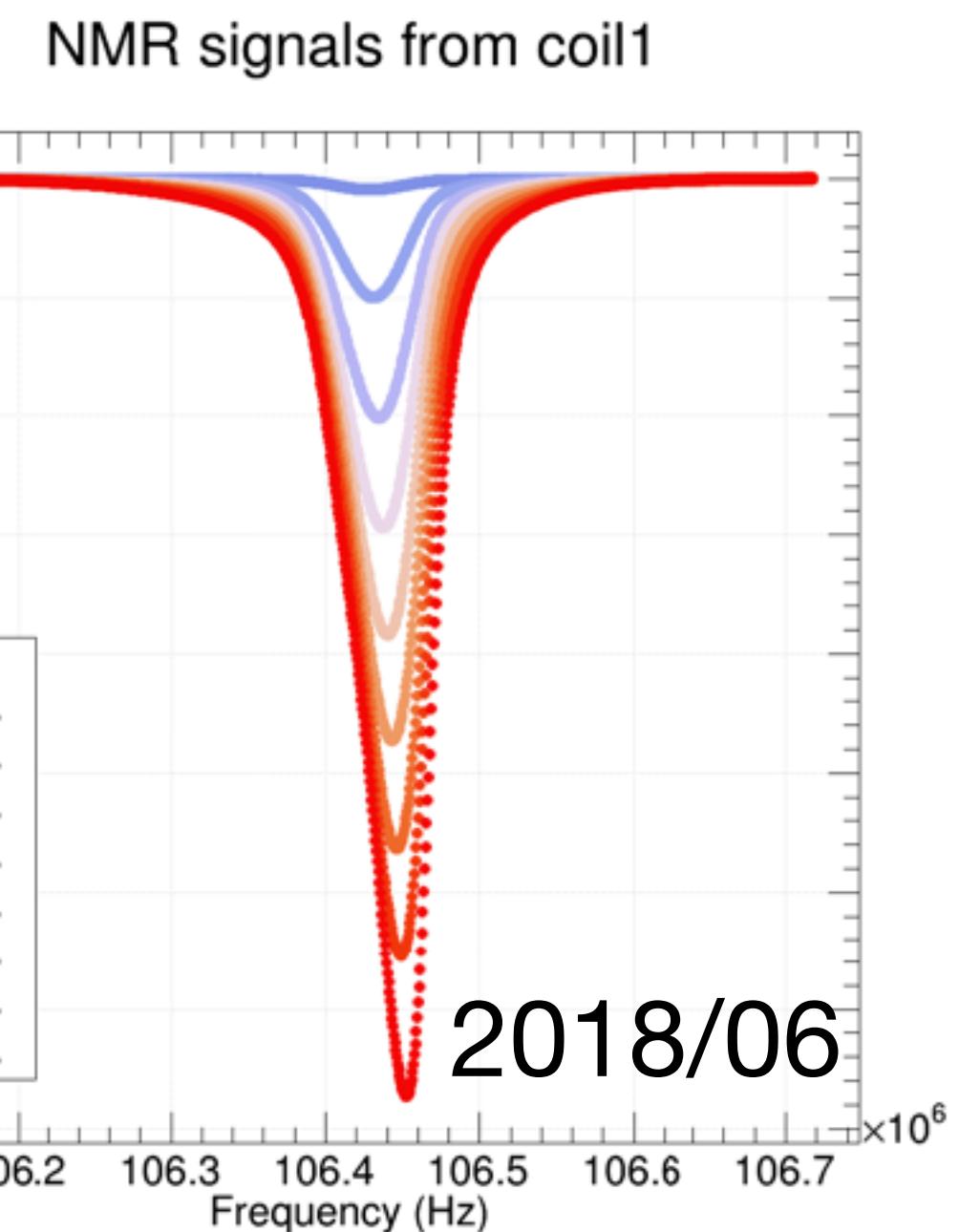
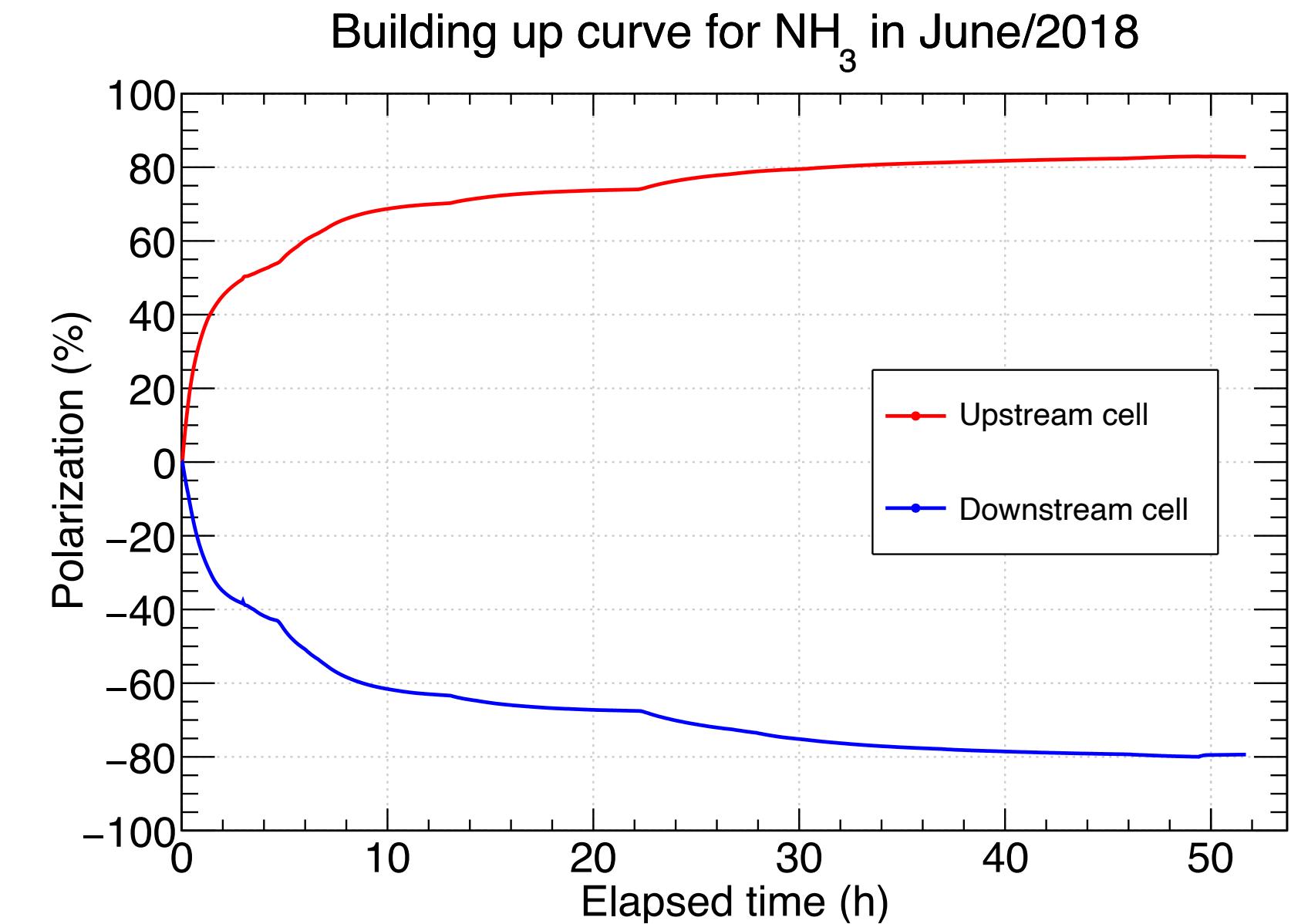
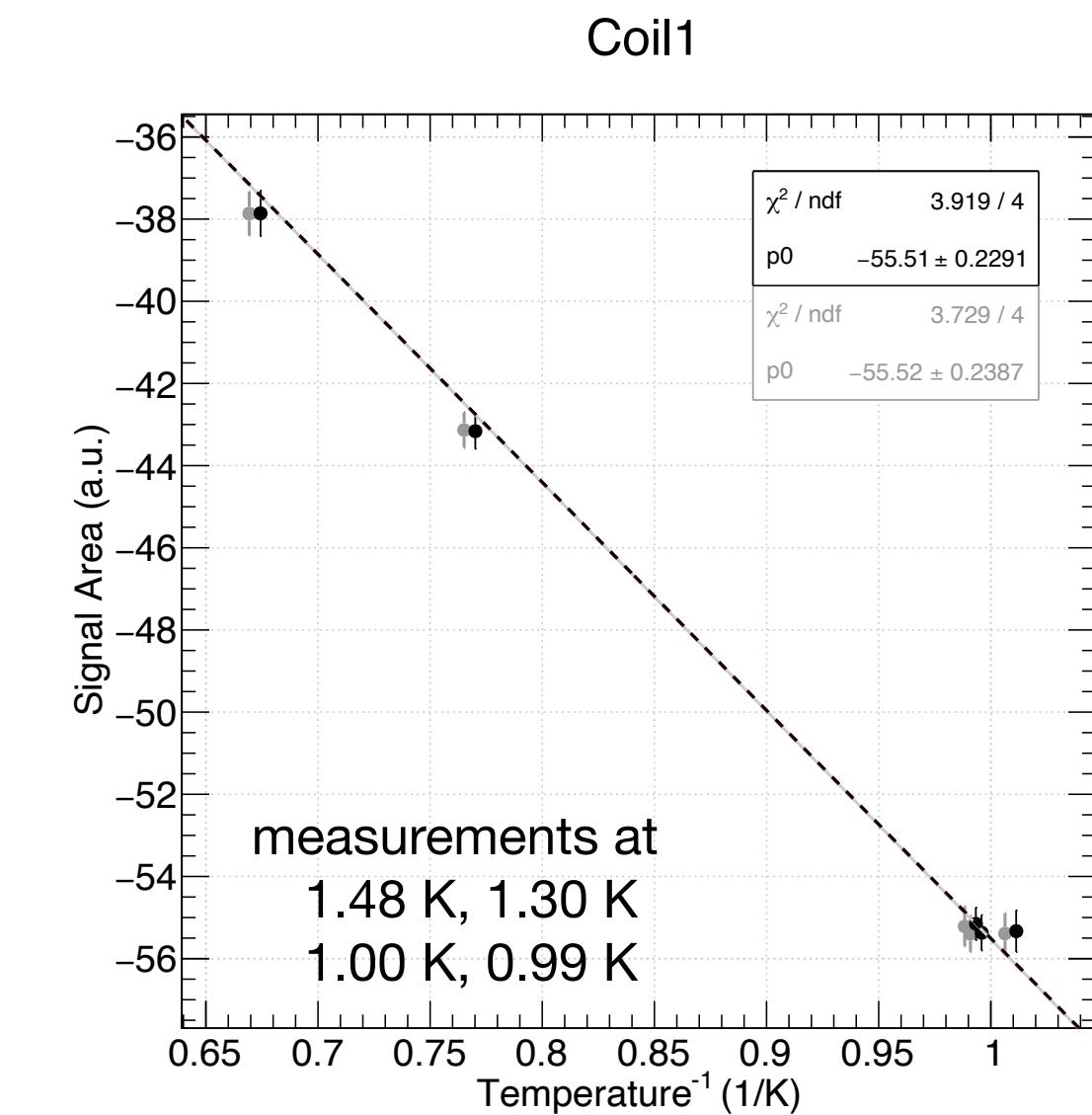
# COMPASS PT: 偏極度測定

NMR 信号面積  $S$  と偏極度  $P$  の比例関係を利用する

## TE キャリブレーション

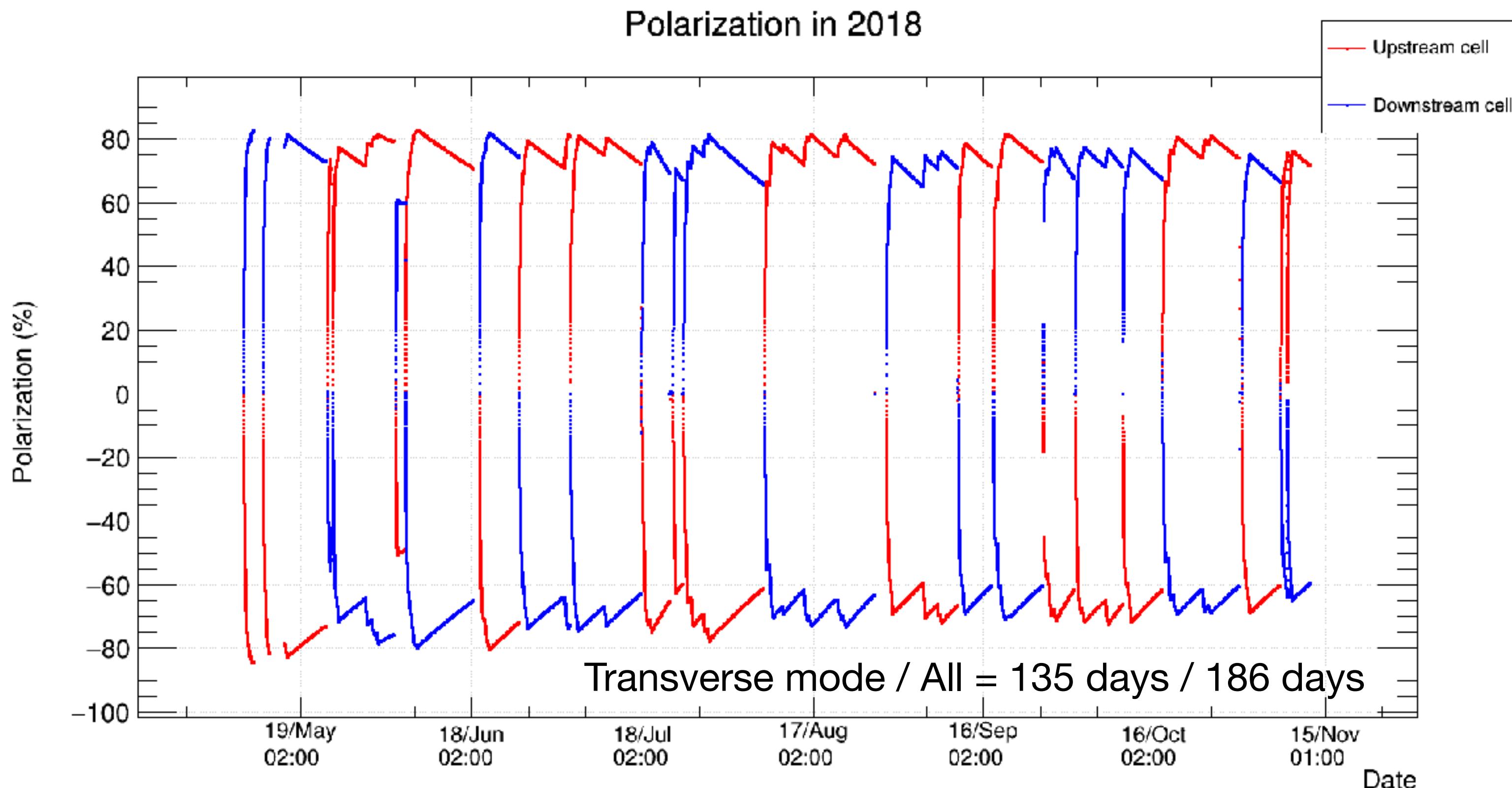
- 信号面積と偏極度の比例定数を決定する
- TE 時の面積  $S_{TE}$  と標的物質を抜いたときの面積  $S_{TE, \text{empty}}$  を測定する
  - DNP 不可能な目的核（標的物質以外の物質、不対電子がないため）による寄与を取り除く

$$P = CS = \frac{P_{TE,1K}}{S_{TE,1K} - S_{TE,\text{empty},1K}} S$$





# COMPASS PT: 測定結果



2018 年 DY ランでの偏極度の平均値

config	Mean	Mean
Up: + Down: -	76.29	-68.27
Up: - Down: +	-68.47	73.57

2018 年 DY ランでの緩和時間

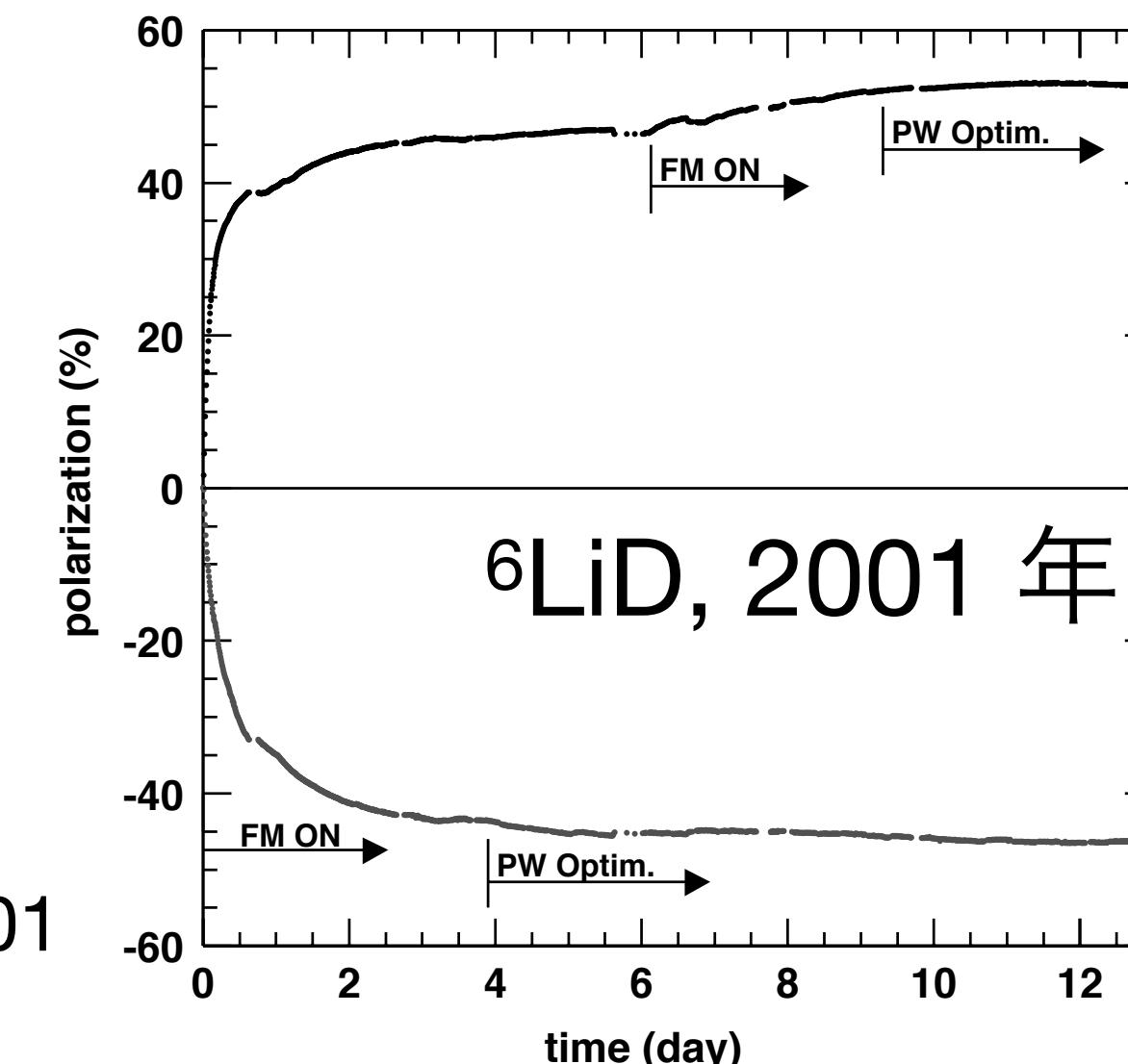
config	Upstream cell (h)	Downstream cell (h)
Up: + Down: -	1400	1000
Up: - Down: +	1000	1200



# COMPASS PT: 測定結果

## 偏極度

標的	偏極度	所要時間 (日)
$\text{NH}_3$	80	1
$\text{NH}_3$	90	1~2
${}^6\text{LiD}$	30~40	1
${}^6\text{LiD}$	50	>7
${}^6\text{LiD}$	56	>10



NIMA498(2003)101

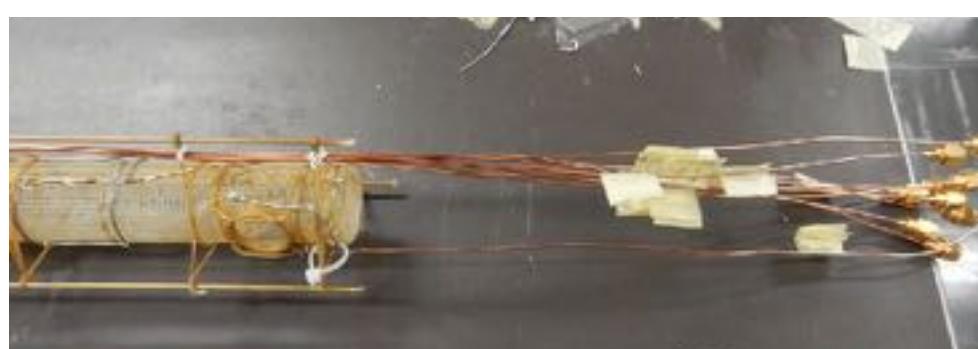
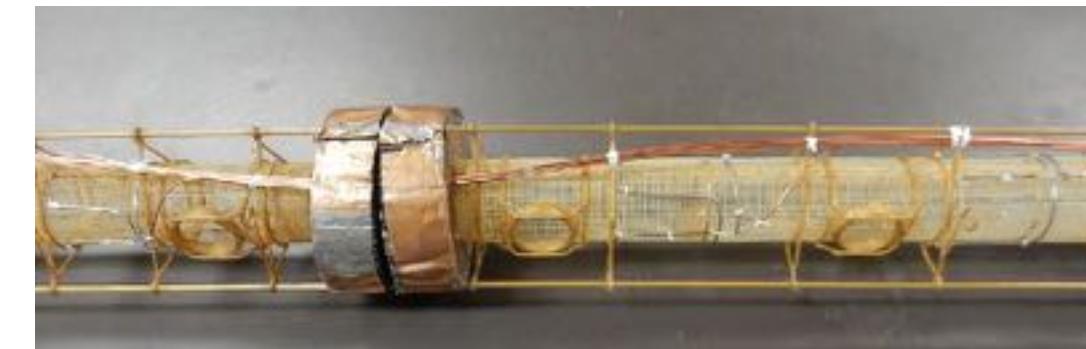
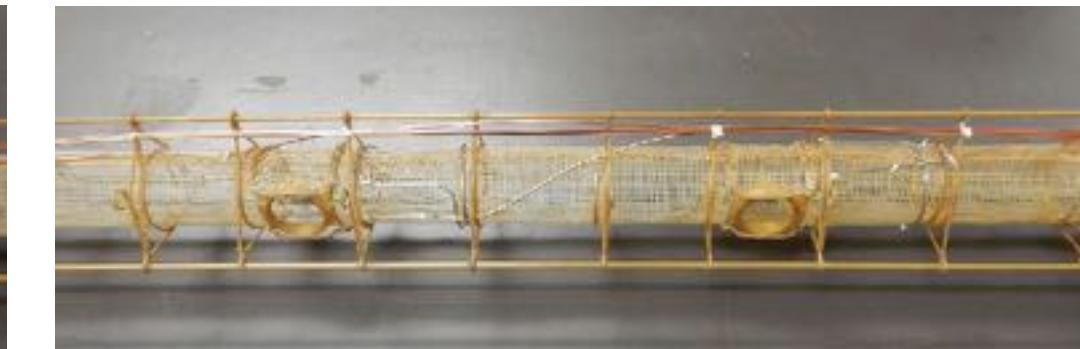
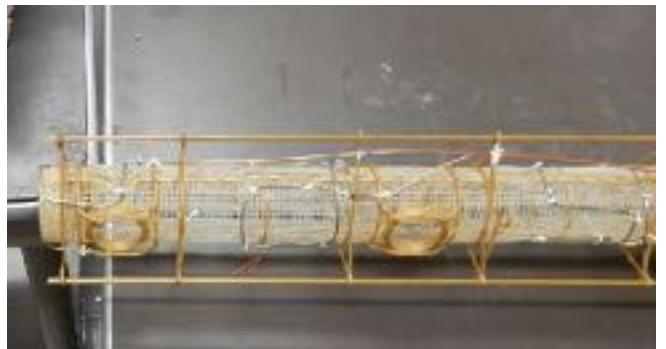
## 緩和時間

標的	偏極	磁場 (T)	ビーム	緩和時間 (h)
SMC, $\text{NH}_3$	横	0.5	$\mu$	500
$\text{NH}_3$	縦	1.0	$\mu$	9000
$\text{NH}_3$	横	0.6	$\mu$	9000
$\text{NH}_3$	横	0.6	$\pi$	1000
${}^6\text{LiD}$	縦	2.5	$\mu$	>15000
${}^6\text{LiD}$	横	0.5	$\mu$	2000

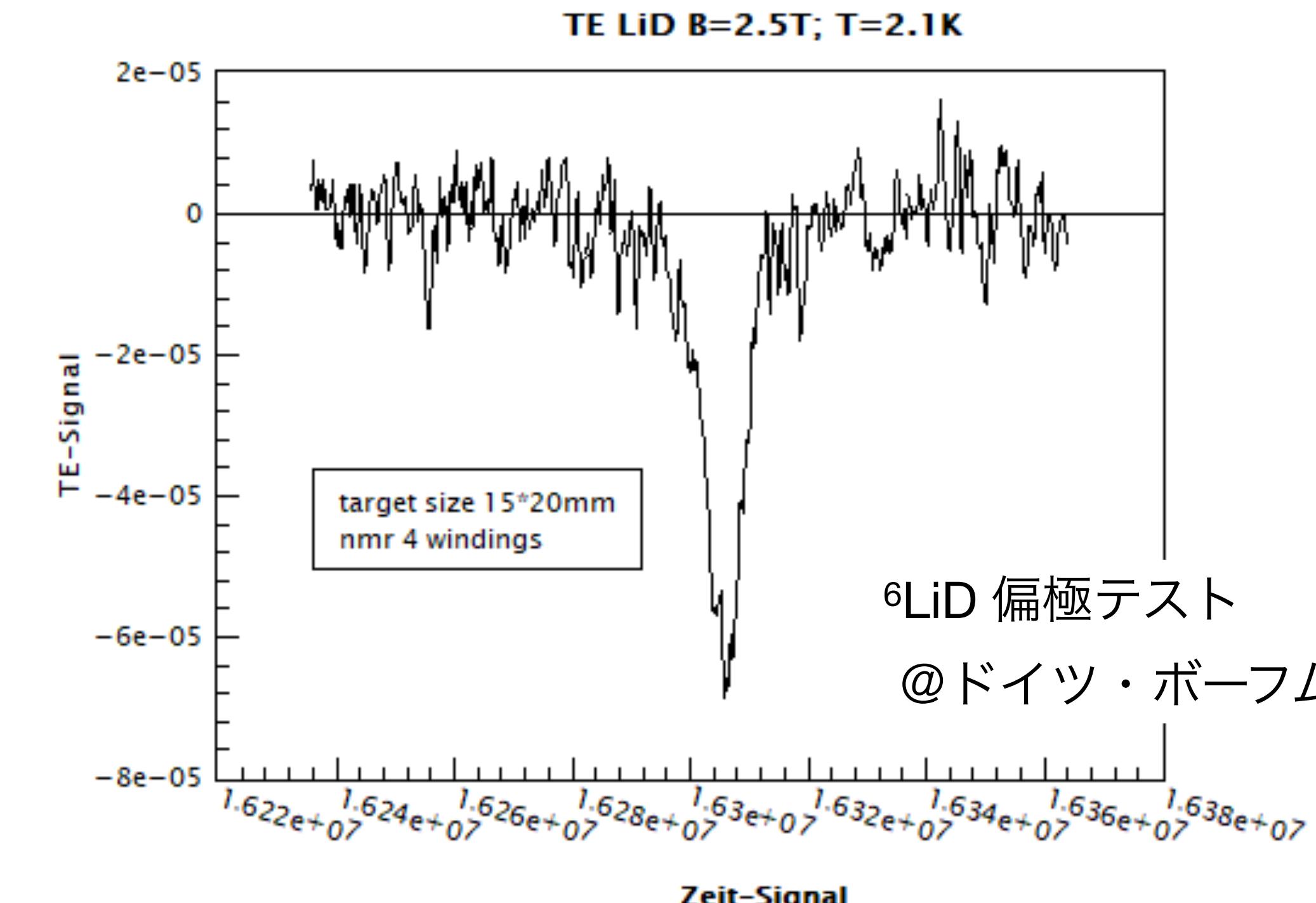


# COMPASS PT: 2021 年 SIDIS ラン

3 セルセットアップの準備



MW キャビティの最適化



2021 年：偏極  $\mu$  ビームと横偏極  ${}^6\text{LiD}$  の深非弾性散乱測定  
準備中 . . .



# まとめ

- COMPASS は CERN SPS のビームと偏極標的を用いた核子構造、  
ハドロンスペクトロスコピーの研究を行っている。
- COMPASS 偏極標的システム

## 極低温：

- $^3\text{He}/^4\text{He}$  希釈冷凍
- 到達温度 50 mK
- 冷却能力 350 mK@300mK

## 高磁場

- ソレノイド：縦方向 2.5 T
- ダイポール：横方向 0.6 T
- アクセプタンス 180 mrad
- 合成磁場で偏極を縦→横に回転させられる

## 動的核偏極

- 標的物質： $\text{NH}_3$ 、 $^6\text{LiD}$
- 標的セル：2, 3 セル
- マイクロ波：70 GHz、2 系統同時稼働でセルごとに偏極の向きを変えられる
- NMR システム：10 ch
- 2021 年 偏極  $\mu$  ビームと横偏極  $^6\text{LiD}$  標的の SIDIS 測定に向けた準備中