

J-PARC RCS パルス陽子ビームを活用した  
ミュオン電子転換過程の探索実験  
— DeeMe —  
(Direct-electron-emission-by-Muon-to-electron conversions)

清矢 良浩 (阪公大理)

On behalf of the DeeMe Collaboration

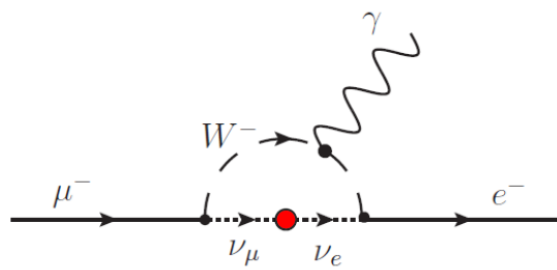
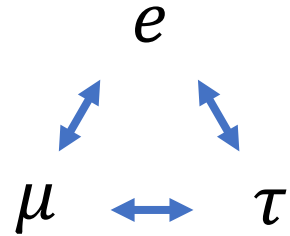
2023/03/18

素粒子現象論研究会 2022 (2023/03/16-18)

大阪公立大学 杉本キャンパス 学術情報総合センター 1階文化交流室

青木正治<sup>A</sup>, Douglas Bryman<sup>B</sup>, 長谷和哉<sup>C</sup>, 東野祐太<sup>A</sup>, 池上雅紀<sup>D</sup>, 入江吉郎<sup>E</sup>, 金子聡<sup>C</sup>,  
河村成肇<sup>E</sup>, 金正倫計<sup>D</sup>, 小林仁<sup>E</sup>, 牧村俊助<sup>E</sup>, 松本浩<sup>E</sup>, 明午伸一郎<sup>D</sup>, 三原智<sup>E</sup>, 三宅康博<sup>E</sup>,  
長尾大樹<sup>A</sup>, 中津川洋平<sup>F</sup>, 名取寛顕<sup>E</sup>, 西口創<sup>E</sup>, 沼尾登志男<sup>G</sup>, 大森千広<sup>E</sup>, Stefan Ritt<sup>H</sup>,  
Pranab Saha<sup>D</sup>, 齊藤直人<sup>E</sup>, 清矢良浩<sup>C, I</sup>, 志垣賢太<sup>J</sup>, 下村浩一郎<sup>E</sup>, Patrick Strasser<sup>E</sup>,  
田川椋平<sup>C</sup>, 手島菜月<sup>E</sup>, Nguyen Duy Thong<sup>K</sup>, Nguyen Minh Truong<sup>L</sup>, 山本風海<sup>D</sup>,  
山本和弘<sup>C, I</sup>, 山崎高幸<sup>E</sup>, 吉井正人<sup>E</sup>

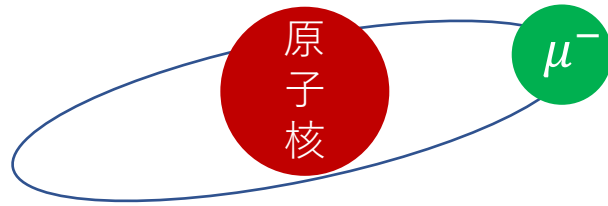
阪大理<sup>A</sup>, UBC<sup>B</sup>, 阪公大理<sup>C</sup>, JAEA<sup>D</sup>, KEK<sup>E</sup>, 和歌山県立医大<sup>F</sup>,  
TRIUMF<sup>G</sup>, PSI<sup>H</sup>, NITEP<sup>I</sup>, 広島大<sup>J</sup>, VNUHCM-US<sup>K</sup>, UD-Davis<sup>L</sup>



- 荷電レプトン間の遷移は検出されていない。理由は不明。
- ニュートリノ振動を通しては可能。
  - しかしとても小さい効果:  $BR(\mu \rightarrow e\gamma) < 10^{-54}$ .
  - 今の実験技術では検出不可能。

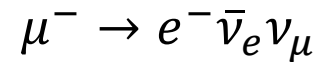
- 標準模型を超える多くのモデルでは CLFV を含む。
  - 加速器技術の発展によりビームの高強度化が進んでいる。
    - 探索感度は  $O(10^4)$  TeV に及ぶ (Snowmass 2021 レポート RF5)
  - もし検出されれば新物理の決定的な証拠。

ミューオン原子 (1S)

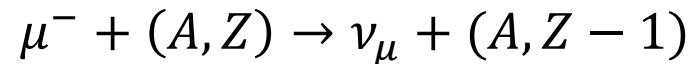


## ● 素粒子標準模型プロセス

1. Muon Decay in Orbit (DIO)



2. Muon Capture (MC) : C=8%, Si=66%



寿命  $\tau_\mu \approx \mu\text{s}$  のオーダー

- $\tau_\mu(\text{C}) = 2.0 \mu\text{s}$

- $\tau_\mu(\text{Si}) = 0.76 \mu\text{s}$

## ミューオン・電子転換過程 (新物理)



- 荷電レプトンフレーバ非保存過程の一つ
- 信号 = 単色遅延電子 ( $\approx 105 \text{ MeV}/c$ )
- DIO が主要 BG

先行研究：分岐比 (MC を 1 とする) 上限値

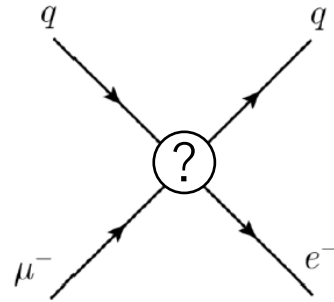
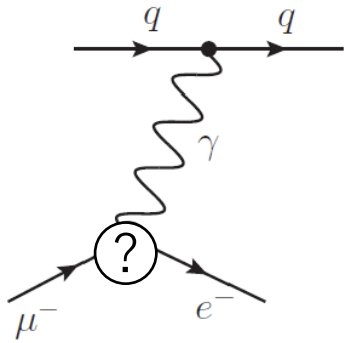
- $4.6 \times 10^{-12}$  (Ti) TRIUMF (1988)
- $4.3 \times 10^{-12}$  (Ti) SINDUM-II @ PSI (1993)
- $7 \times 10^{-13}$  (Au) SINDUM-II (2006)

# ミューオン・電子転換過程

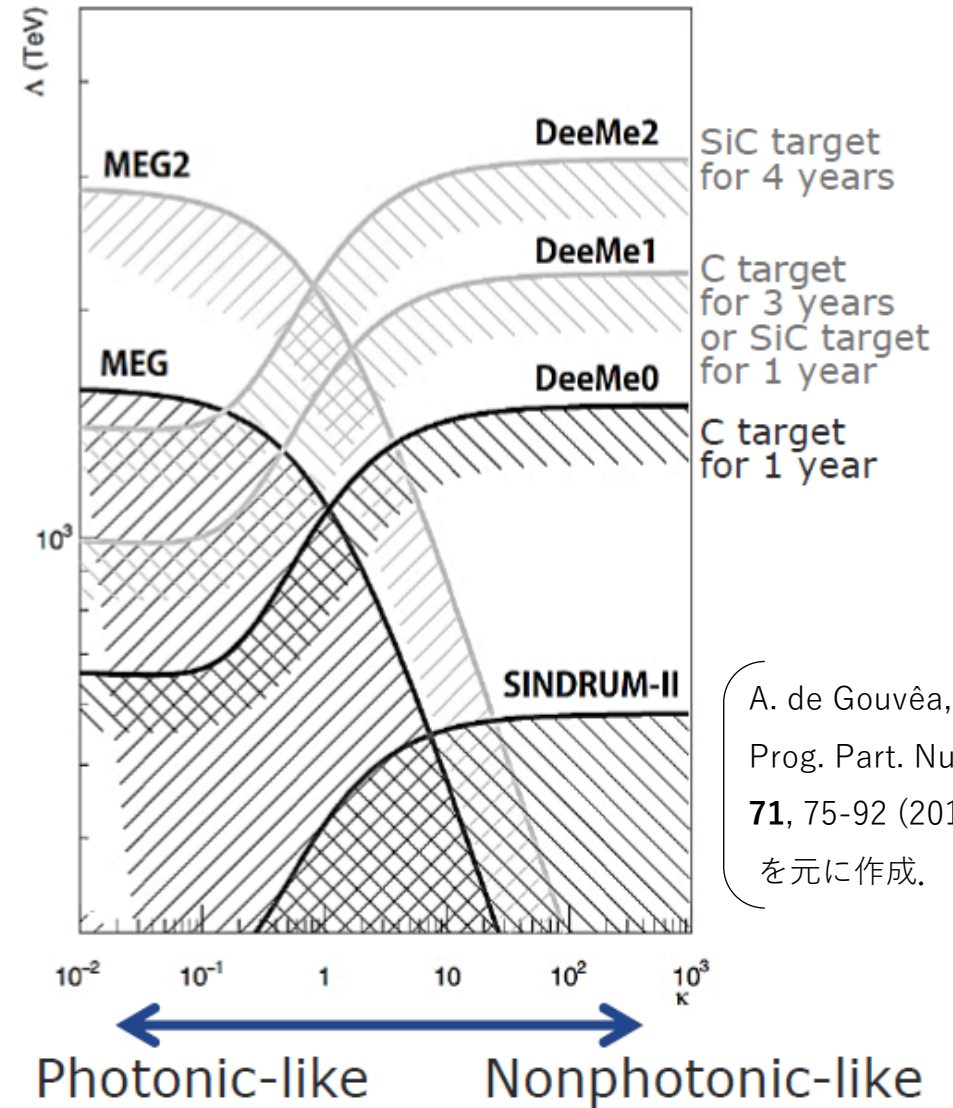
Photonic

$$\mathcal{L} = \frac{1}{1 + \kappa} \frac{m_\mu}{\Lambda^2} \bar{\mu}_R \sigma^{\mu\nu} e_L F_{\mu\nu} + \frac{\kappa}{1 + \kappa} \frac{1}{\Lambda^2} (\bar{\mu}_L \gamma^\mu e_L) (\bar{q}_L \gamma_\mu q_L)$$

Non-photonic

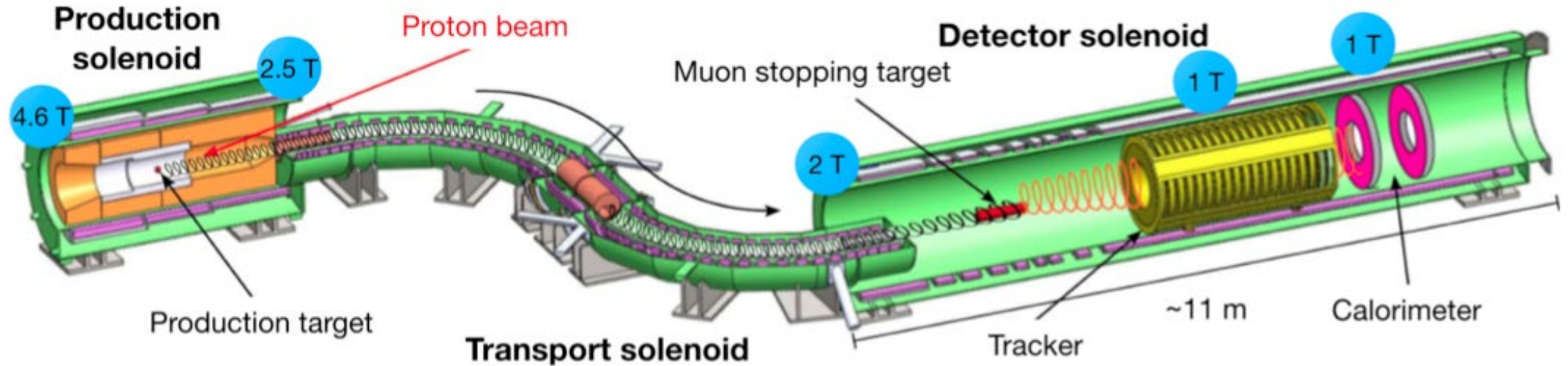


- MEG 実験 ( $\mu \rightarrow e\gamma$  探索) は photonic に感度.
- DeeMe は両方 (相補的)
  - 単一事象感度 (分岐比 @ 1 事象検出)
    - $\sim 10^{-13}$  (炭素標的, データ取得 1 年間)
      - 一桁良い感度.
      - 炭素標的を用いた探索は初.



A. de Gouvêa, P. Vogel,  
Prog. Part. Nucl. Phys.  
**71**, 75-92 (2013)  
を元に作成.

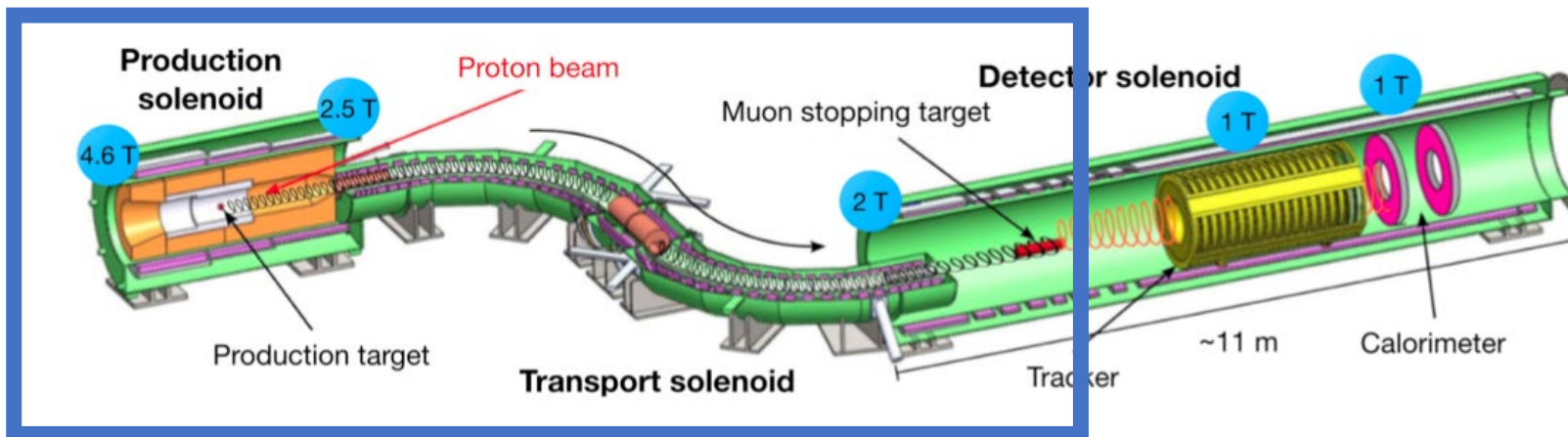
## 大規模実験の例：Mu2e (Fermilab)



- Al target
  - Run 1 ( $10^{-16}$ ) : 2025~2026
  - Run 2 ( $10^{-17}$ ) : 2029 Start

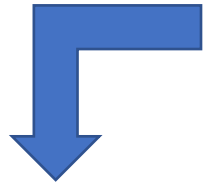
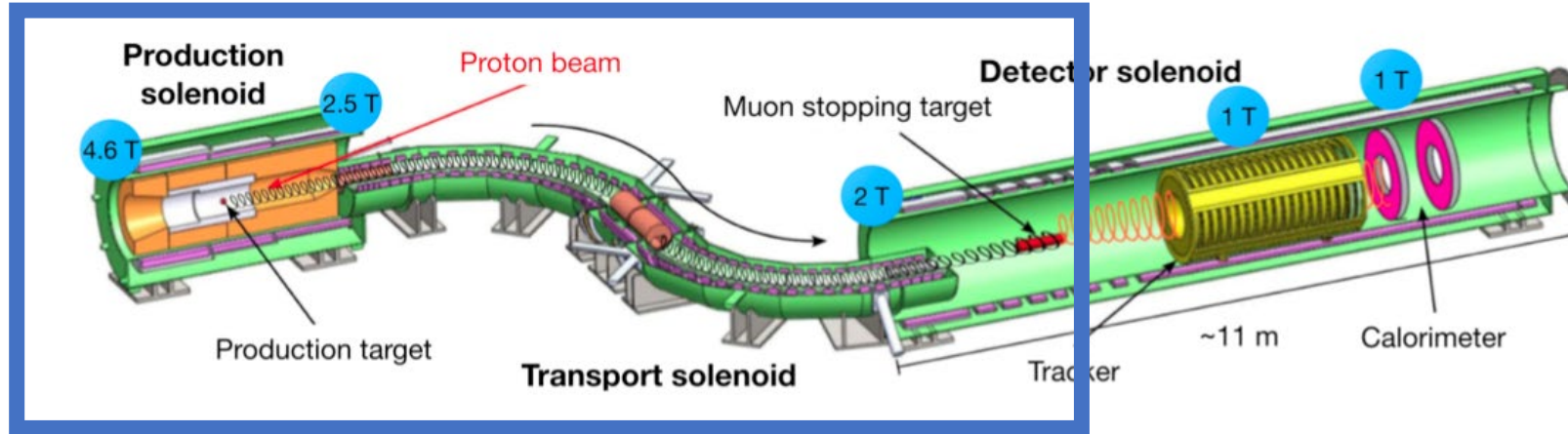
- COMET (Al target)
  - Phase I ( $10^{-15}$ ) : 2022~2023 start
  - Phase II ( $10^{-17}$ ) : 202? start

# DeeMe の特徴

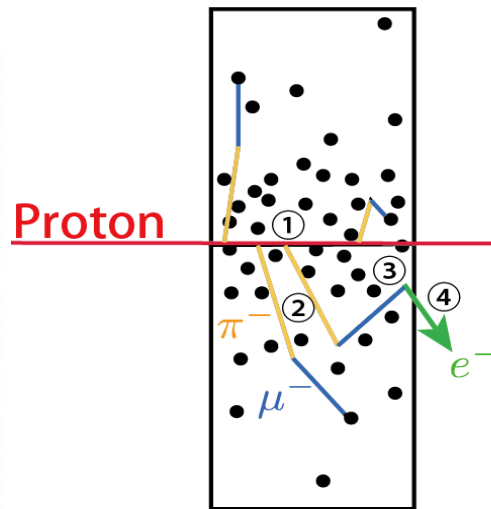


炭素標的（直径 33 cm）

# DeeMe の特徴



炭素標的 (直径 33 cm)



Production Target

- ①  $\pi^-$  Production
- ② in-flight  $\pi^- \rightarrow \mu^-$
- ③ Muonic Atom Formation
- ④  $\mu^-$ -e Conversion

- 一次陽子標的内で生成されたミュオン原子を利用.
- 標的から出てくる  $\mu^-$ -e 転換電子は汎用ビームラインで輸送し実験エリアで運動量測定
- 小型, シンプル, 低コスト, 短期間.
- 異なる手法→バックグラウンドや系統誤差が異なる.



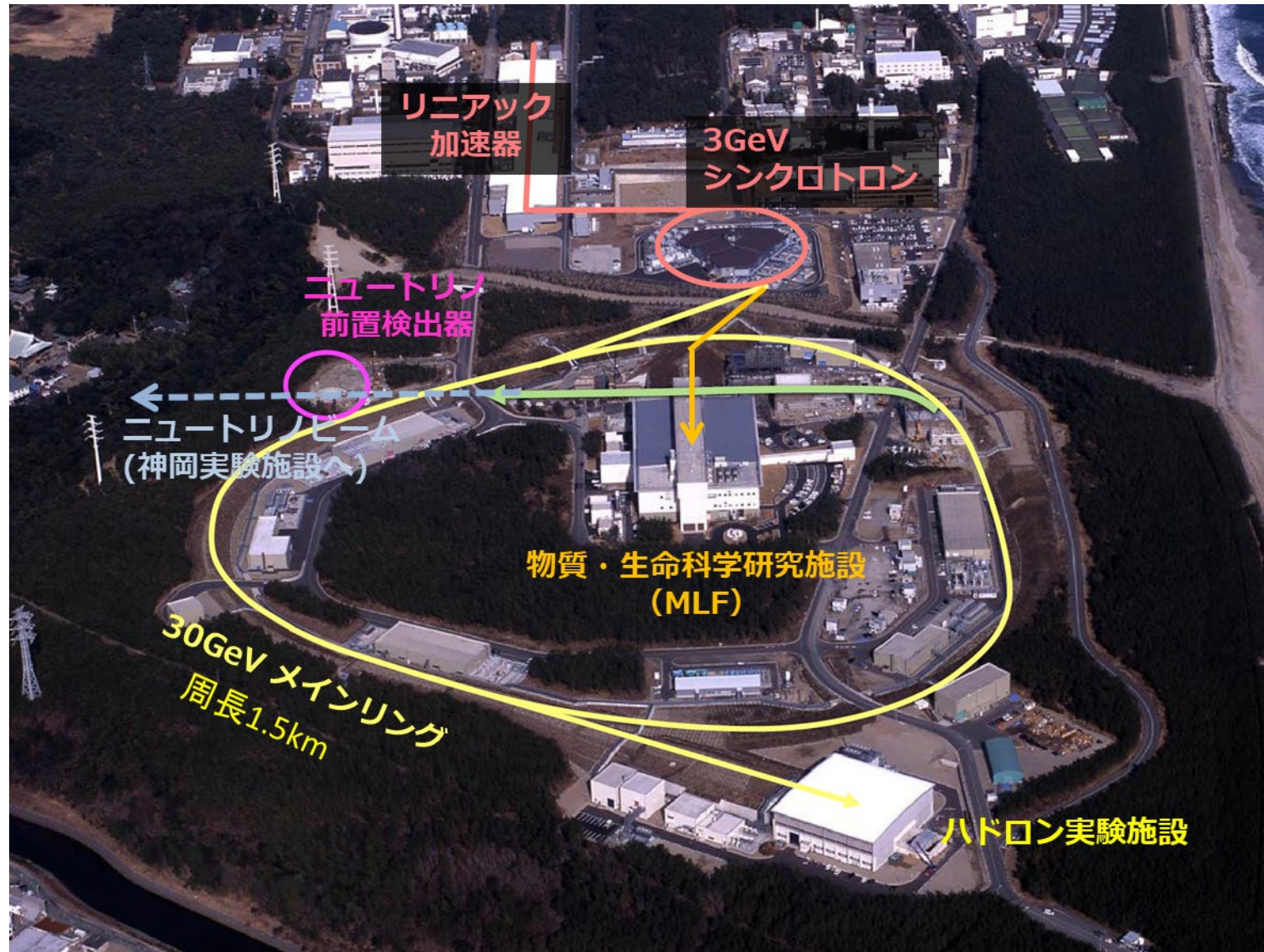
# J-PARC (大強度陽子加速器施設)

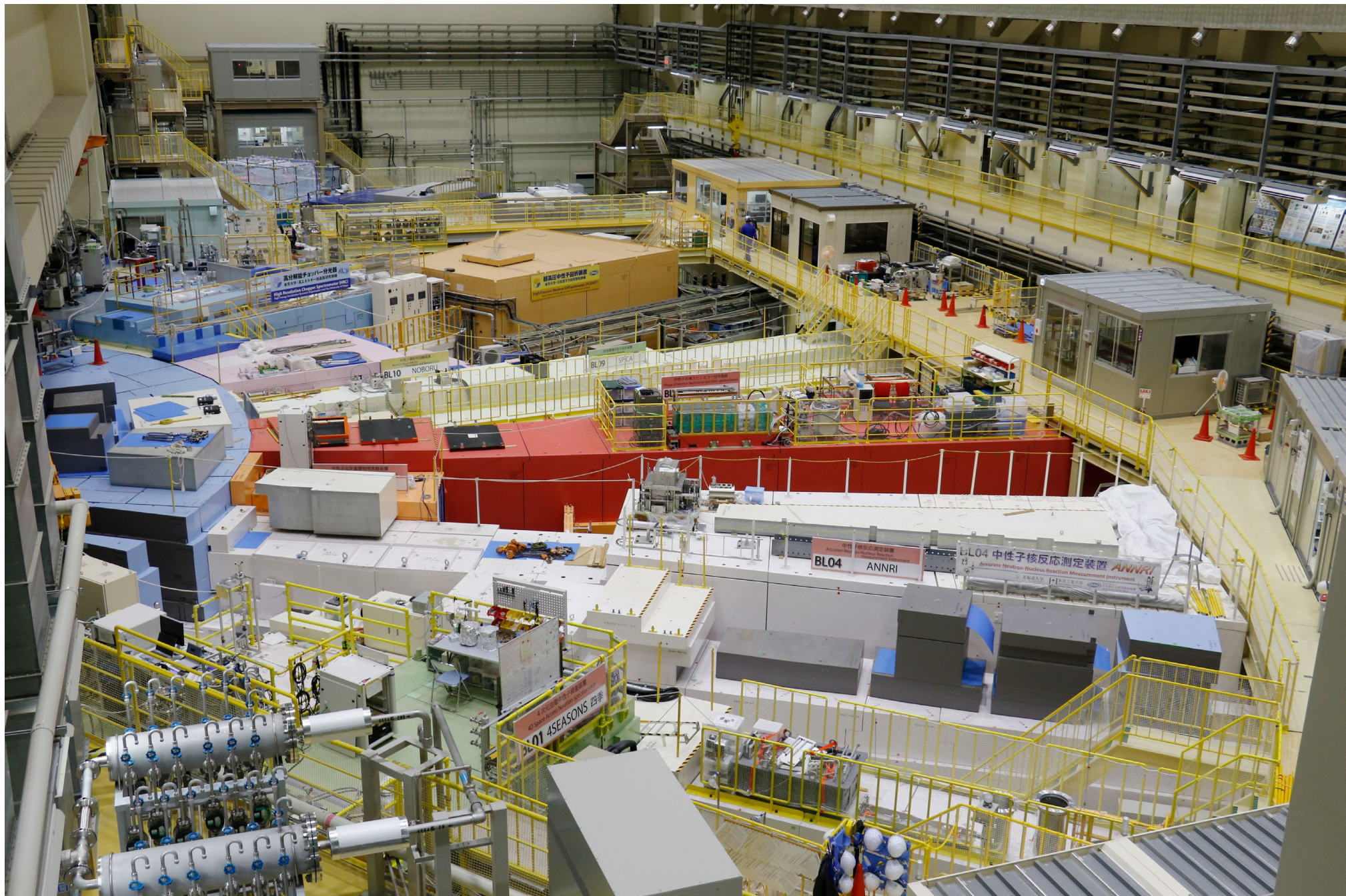


大阪から概ね6時間かかります

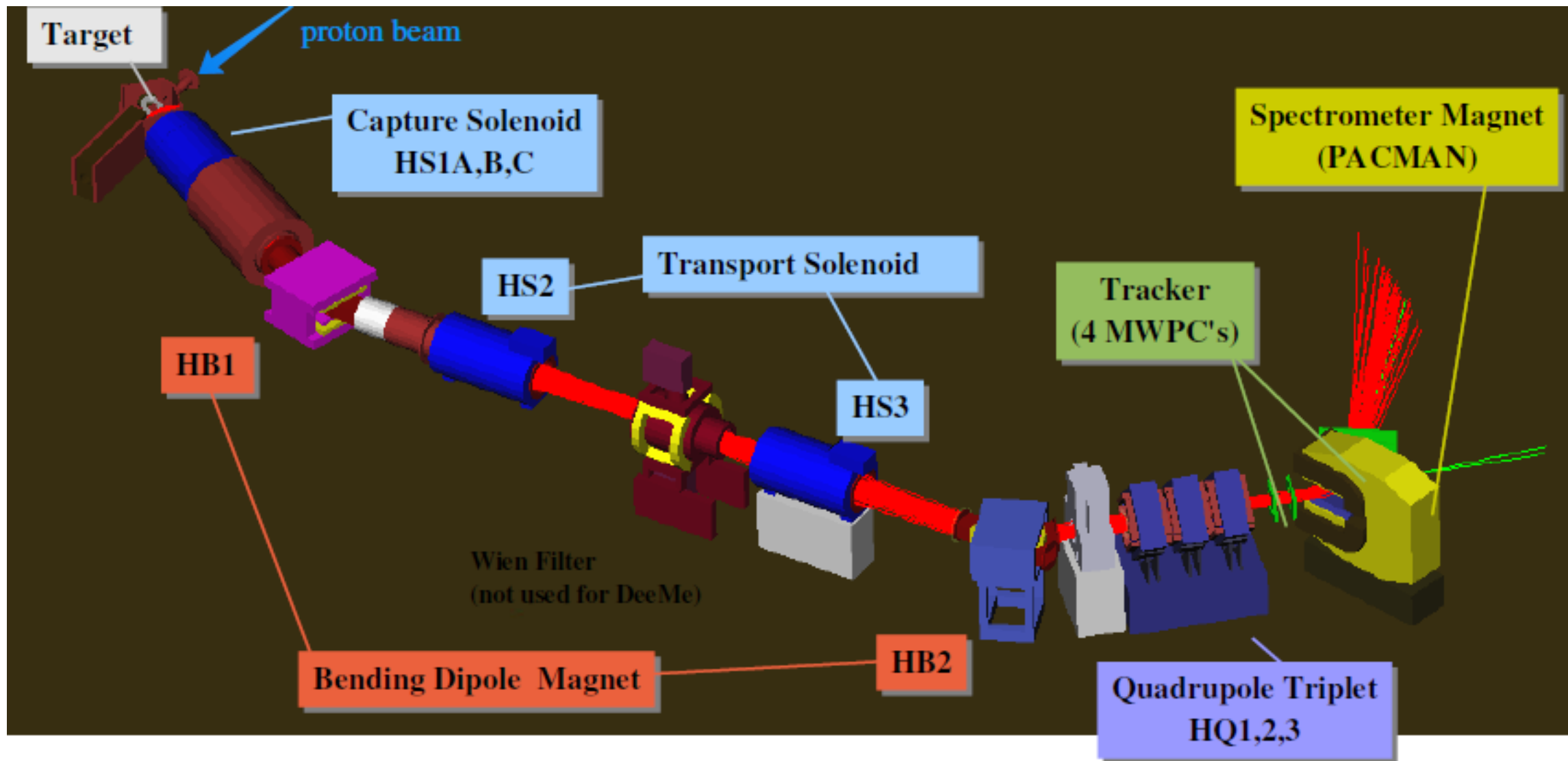
茨城県那珂郡東海村

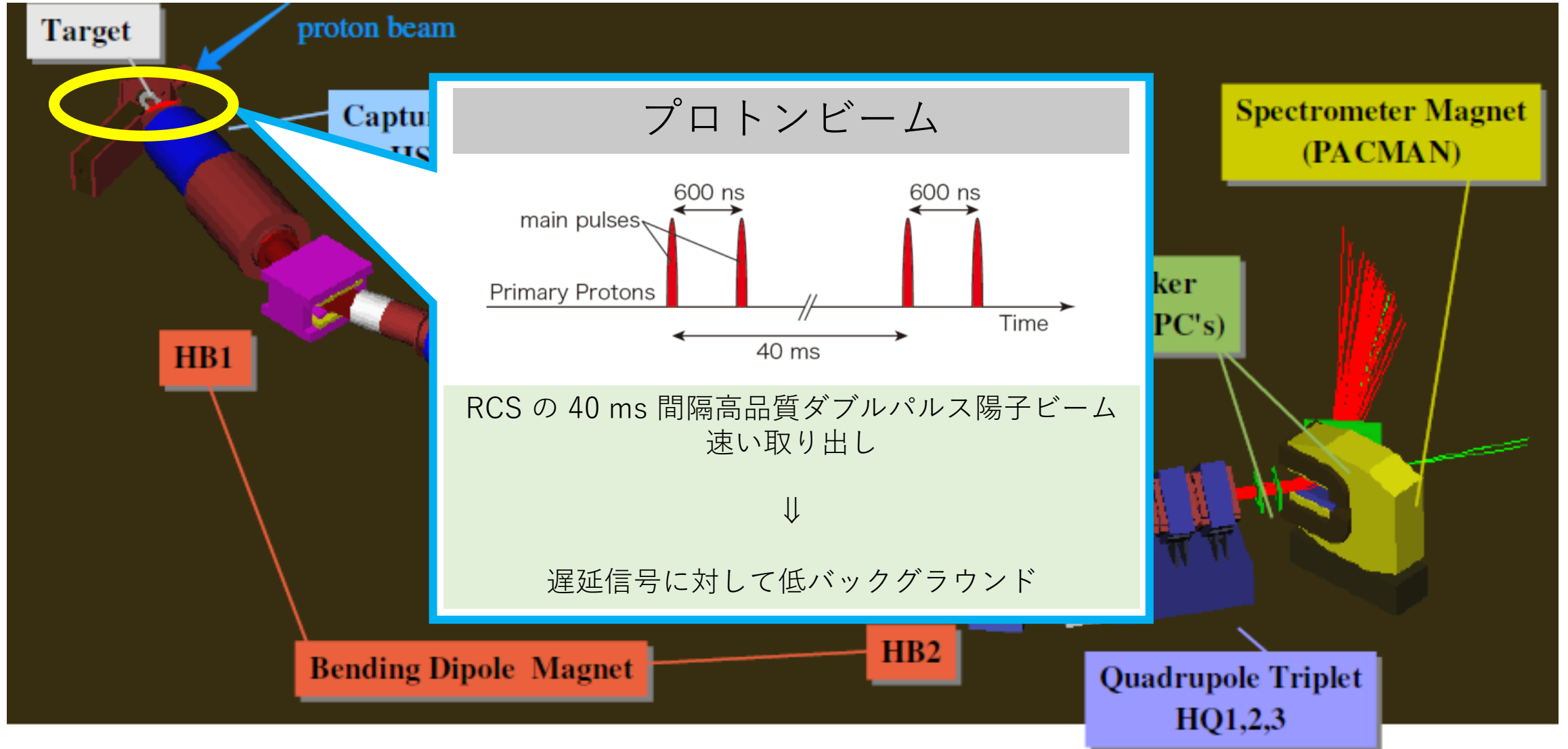
# J-PARC (大強度陽子加速器施設)

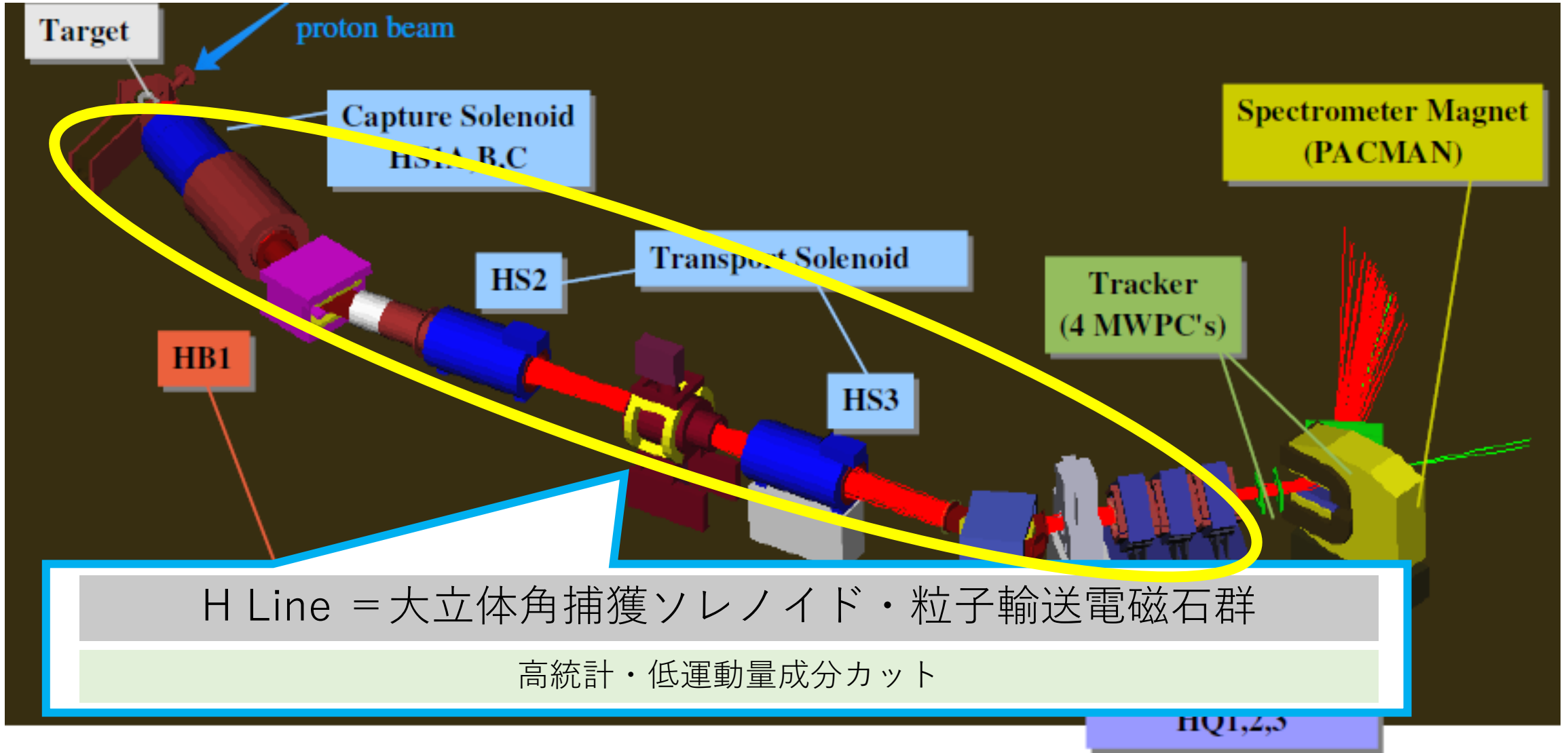












Target

proton beam

HB

DeeMe 磁気スペクトロメータ

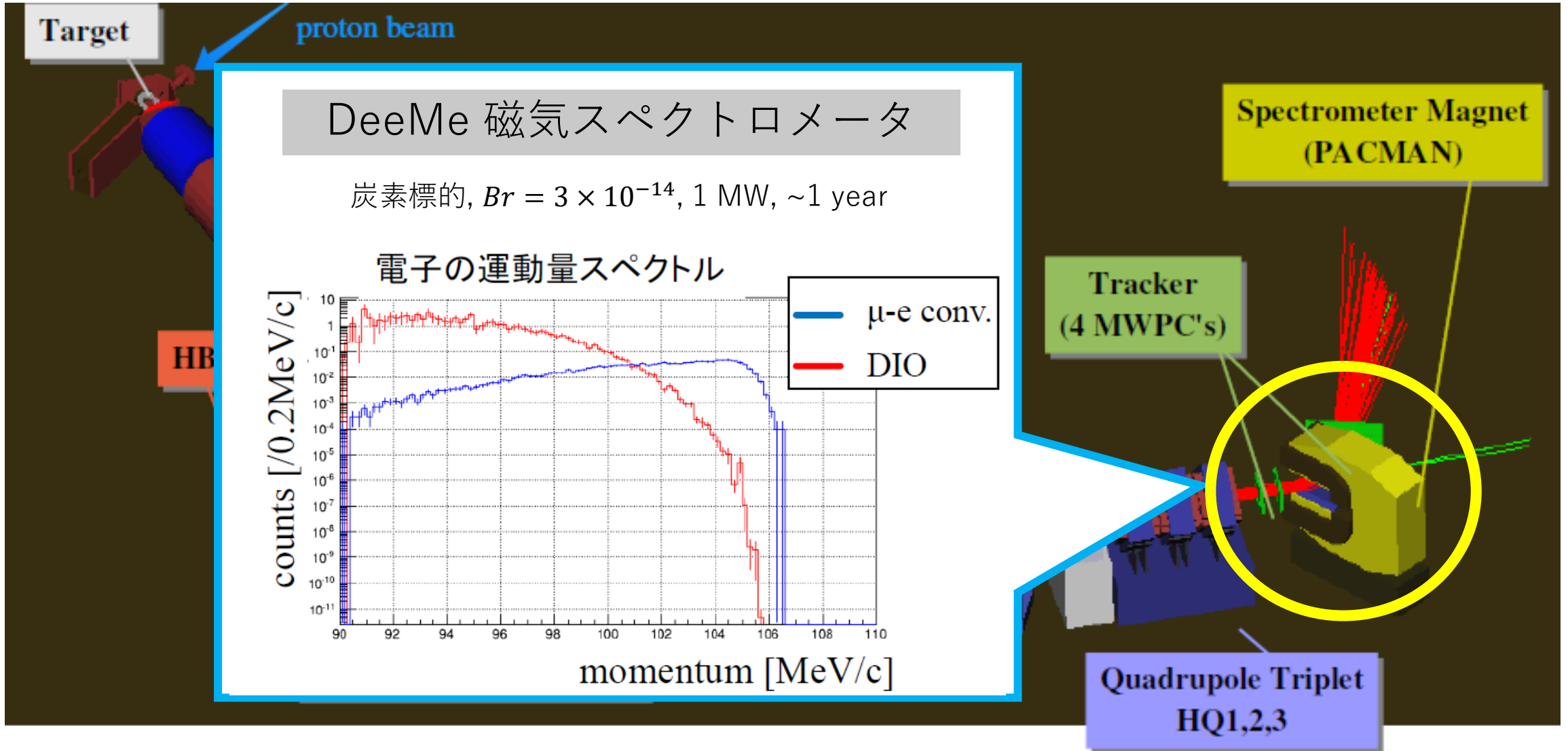
Spectrometer Magnet (PACMAN)

Tracker (4 MWPC's)

Quadrupole Triplet HQ1,2,3

MWPC 2 台 + 双極電磁石 + MWPC 2 台





- ちなみに . . .

$$1 \text{ MW} = 2 \times 10^{15} \frac{\text{protons}}{\text{s}} \rightarrow 10^{10} \frac{\text{muonic atoms}}{\text{s}} \quad (\text{シミュレーション})$$

現実のこの 1 秒を研究室の計算機でまともにシミュレーションしたとすると  
~200 年かかります . . .

- 1次陽子標的からの汎用ビームラインを使用（低コスト）



- 陽子照射の瞬間に発生する大量の荷電粒子（即発バースト）
  - $O(10^{14})$  個が直接検出器に到来。（普通、検出器は1個の荷電粒子を検出するもの）



- 検出器に対して高負担（破損の可能性、あるいは飽和により検出不能に陥る）

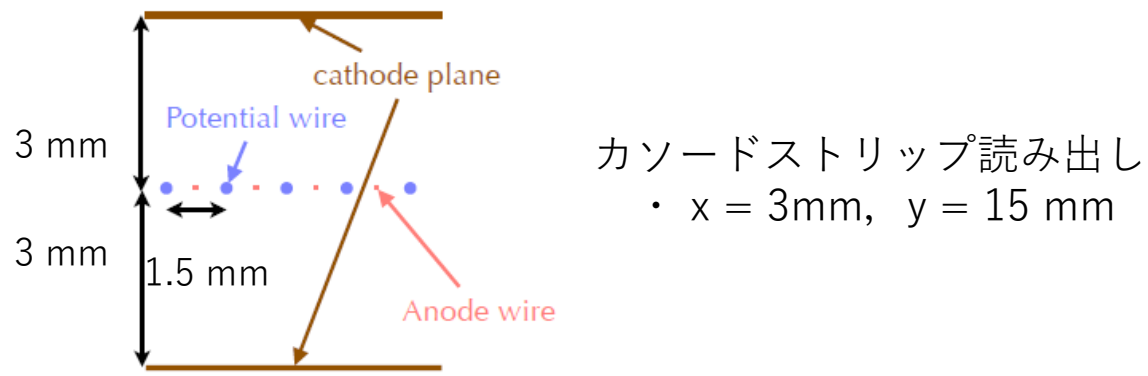


- 瞬間的にビームをダンプするキッカー電磁石の導入？→高額なので没

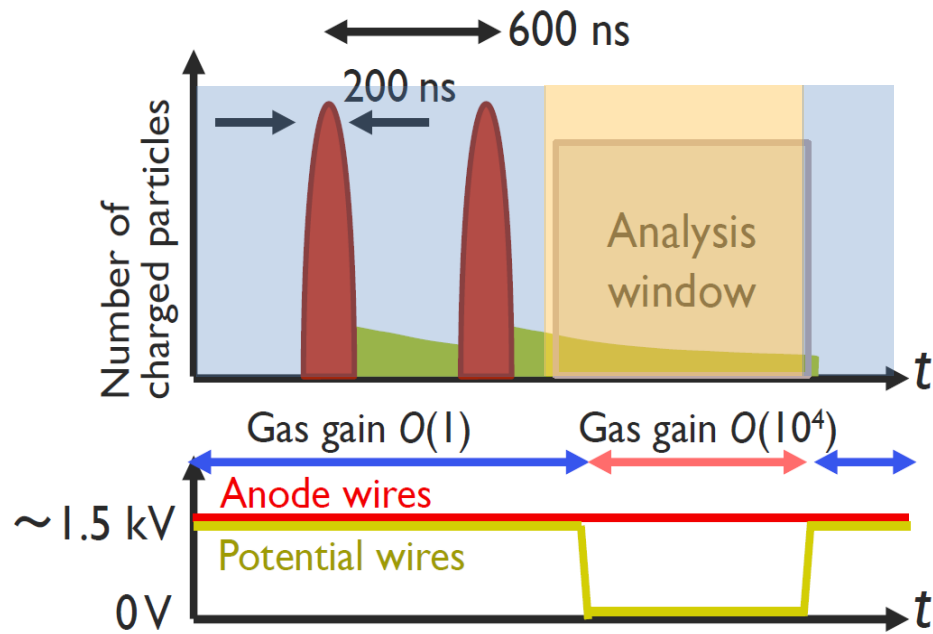


今までにない全く新しい検出技術開発が必要

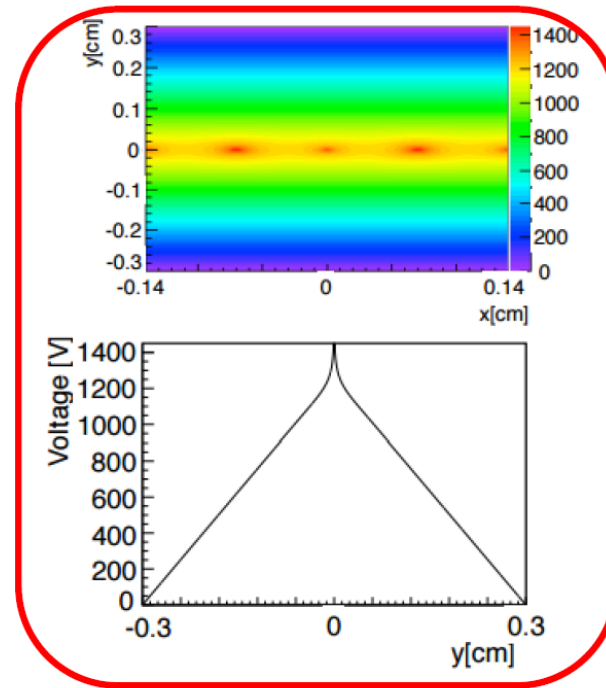
# DeeMe 検出器の特徴：HV スイッチング



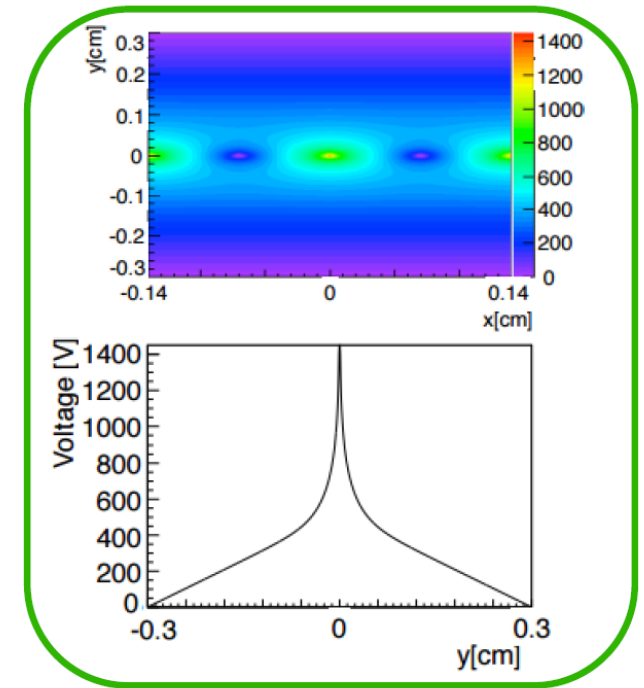
カソードストリップ読み出し  
・  $x = 3\text{mm}$ ,  $y = 15\text{mm}$



即発バースト =  $70\text{ GHz/mm}^2$

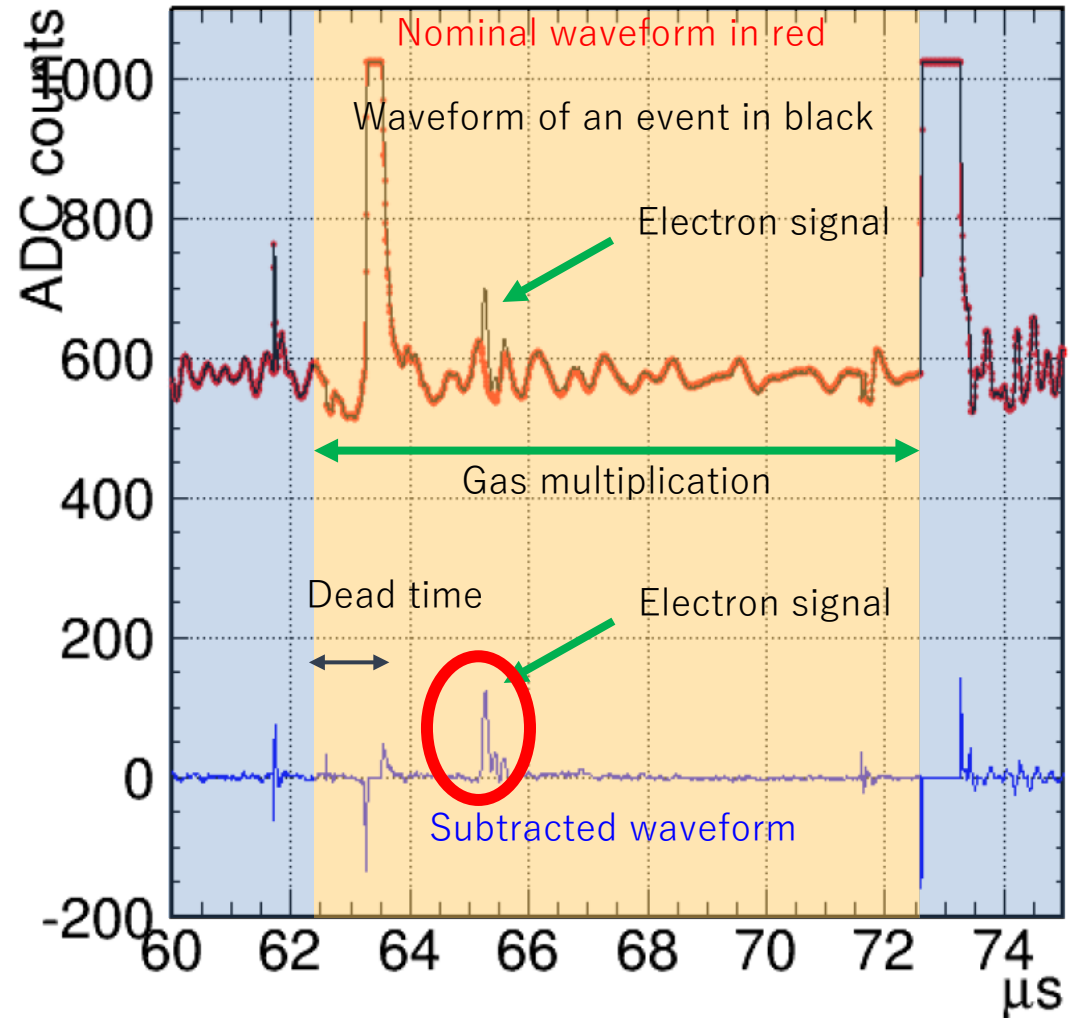
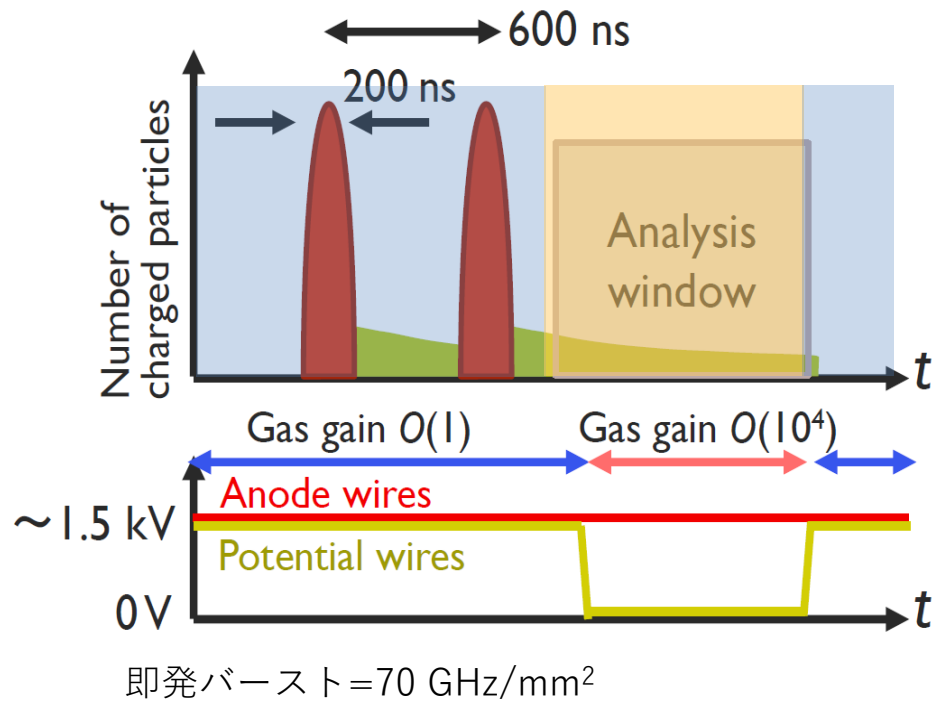
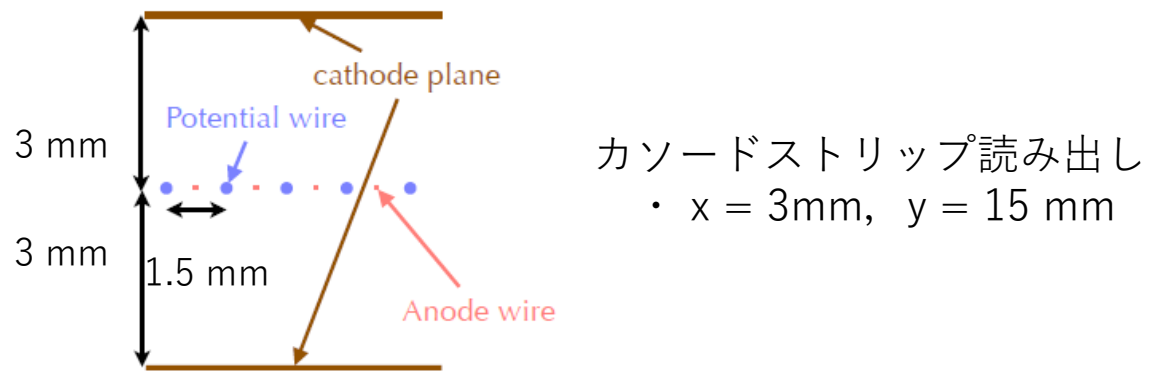


OFF



ON

# DeeMe 検出器の特徴：HV スイッチング



Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 999 (2021) 165228



Contents lists available at [ScienceDirect](#)

## Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/nima](http://www.elsevier.com/locate/nima)



## Development of a multiwire proportional chamber with good tolerance to burst hits



N. Teshima<sup>a,b,\*</sup>, M. Aoki<sup>c</sup>, Y. Higashino<sup>c</sup>, H. Ikeuchi<sup>a</sup>, K. Komukai<sup>a</sup>, D. Nagao<sup>c</sup>,  
Y. Nakatsugawa<sup>d</sup>, H. Natori<sup>e</sup>, Y. Seiya<sup>a,b</sup>, N.M. Truong<sup>f</sup>, K. Yamamoto<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Osaka City University, Graduate School of Science, Osaka 558-8585, Japan

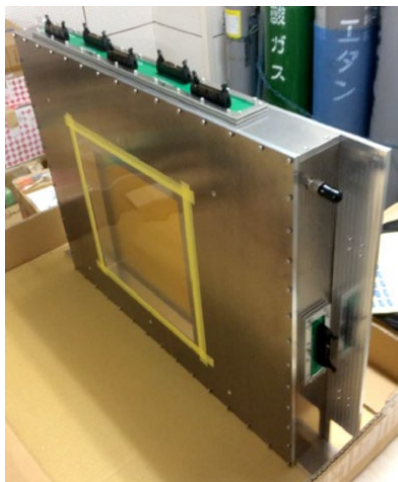
<sup>b</sup> Nambu Yoichiro Institute of Theoretical and Experimental Physics, Osaka 558-8585, Japan

<sup>c</sup> Osaka University, Graduate School of Science, Osaka 560-0043, Japan

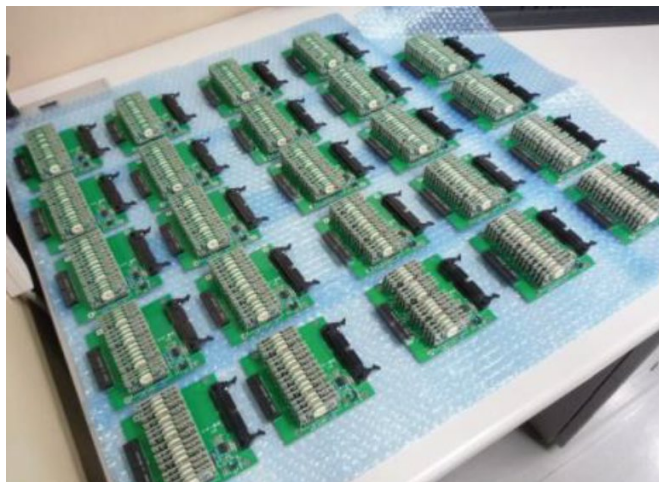
<sup>d</sup> Institute of High Energy Physics (IHEP), Beijing 100-049, China

<sup>e</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Ibaraki 305-0801, Japan

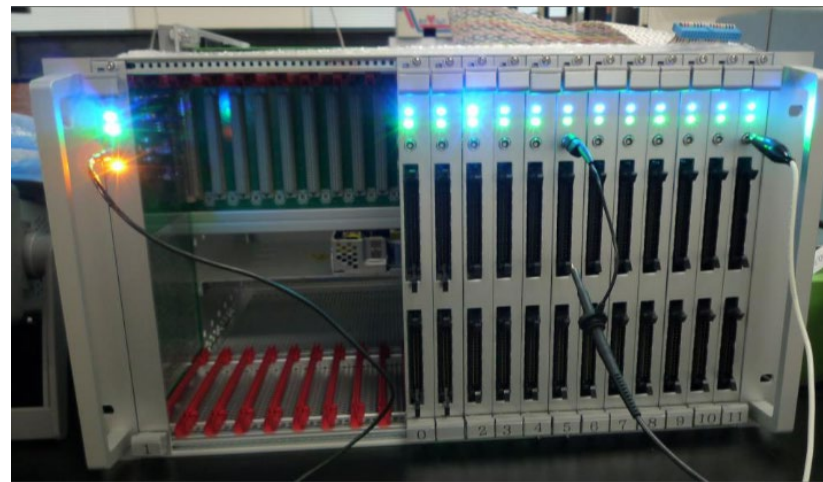
<sup>f</sup> University of California at Davis, Department of Physics, One Shields Avenue Davis, CA 95616, USA



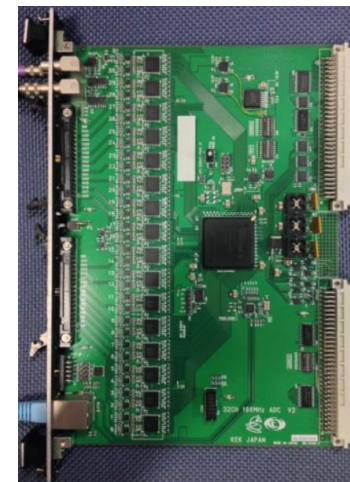
MWPC



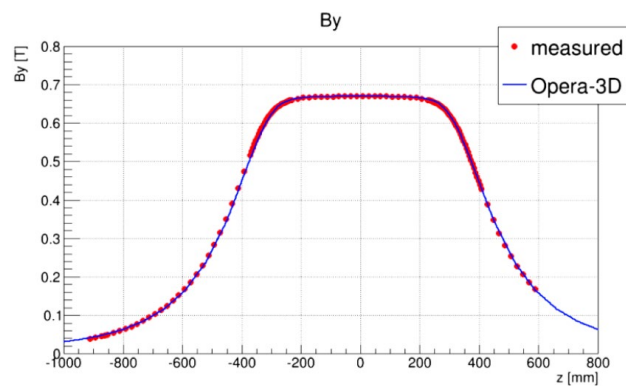
Preamps



Preamp power-supply and readout boards



FADC boards

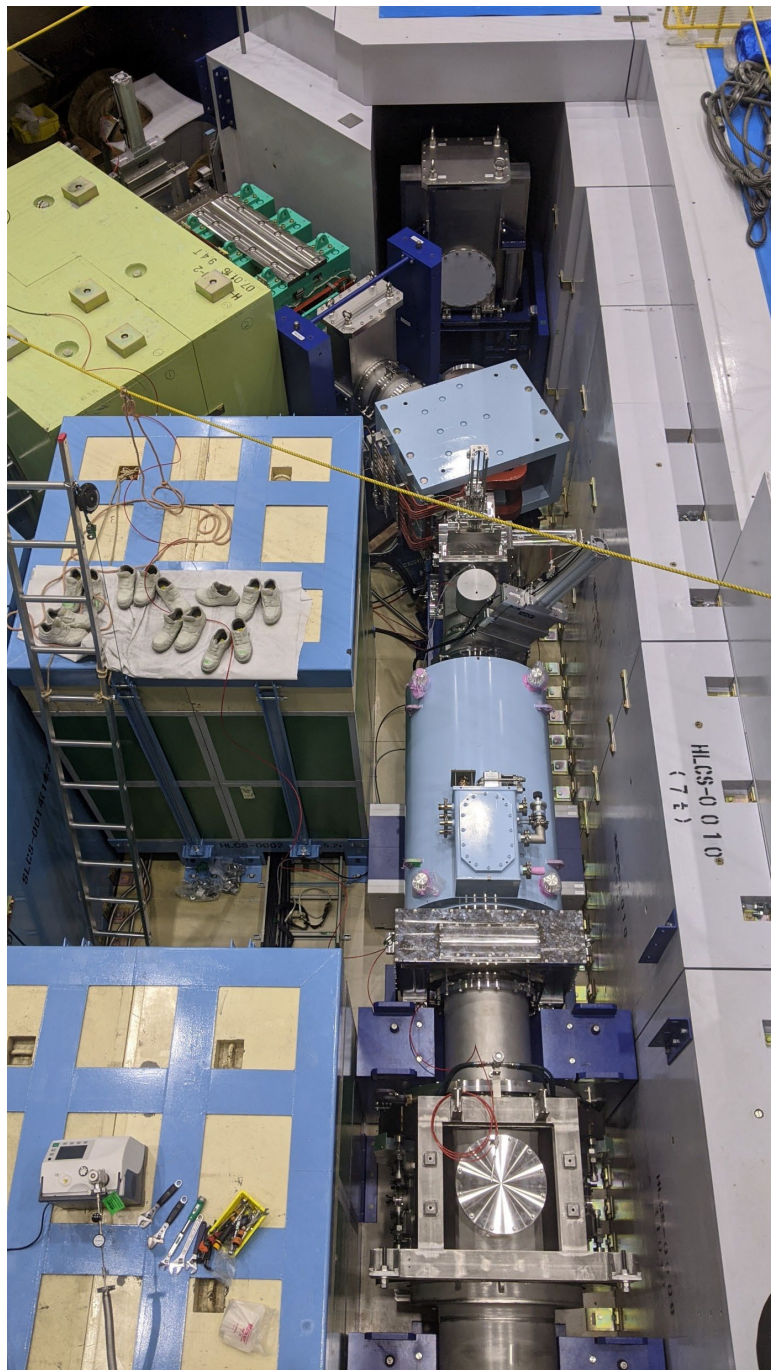


Magnet and B field map



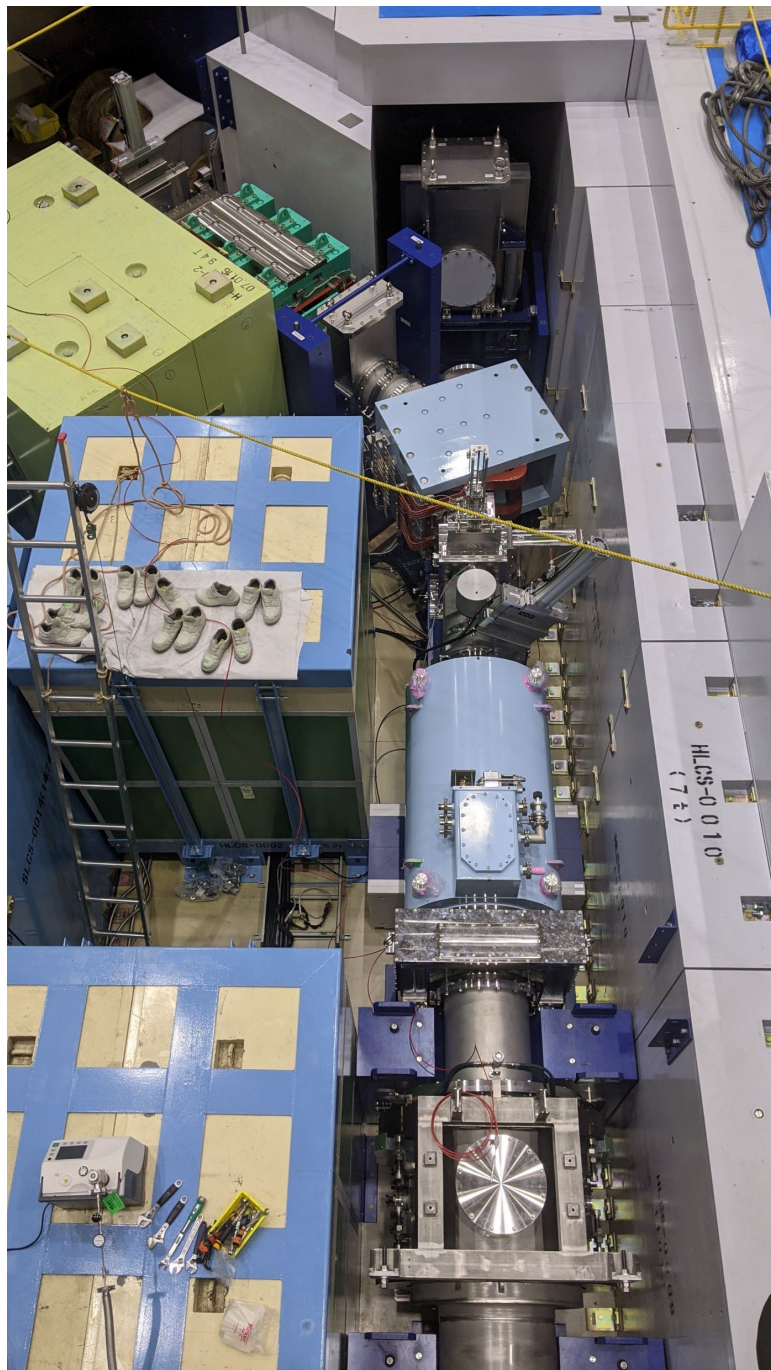
DAQ (データ取得システム)

Completed.



ついにビームライン完成。ビーム運転調整開始 (2022/1/15)。

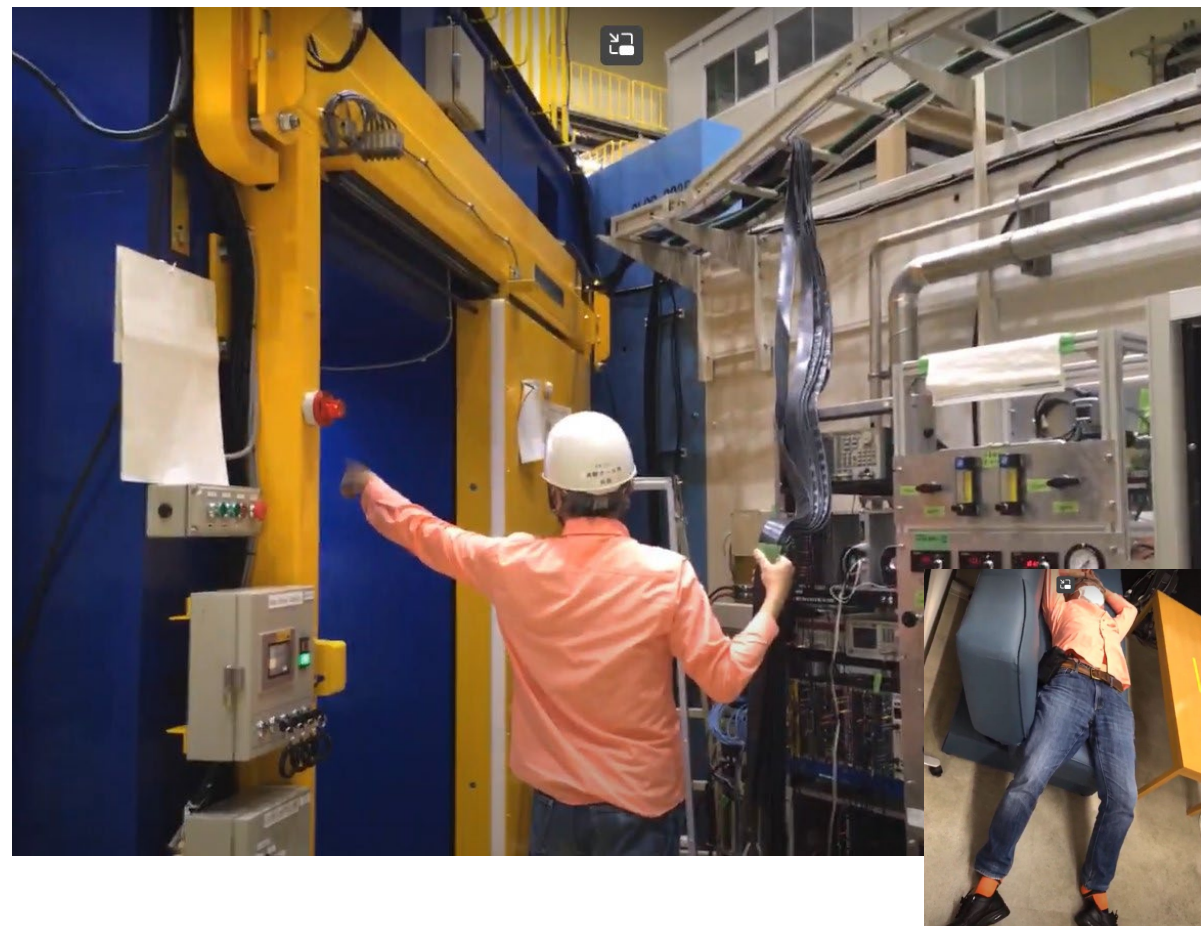


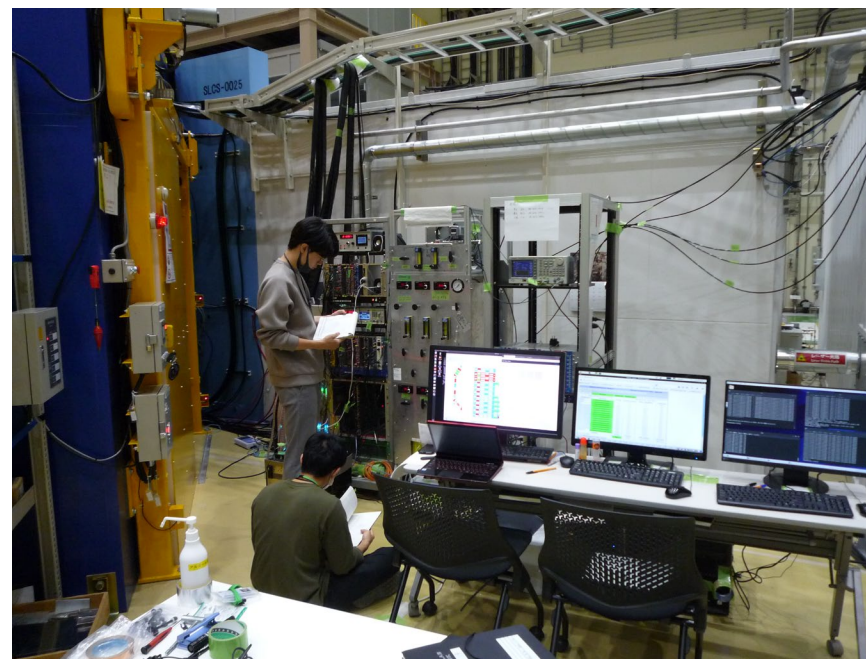
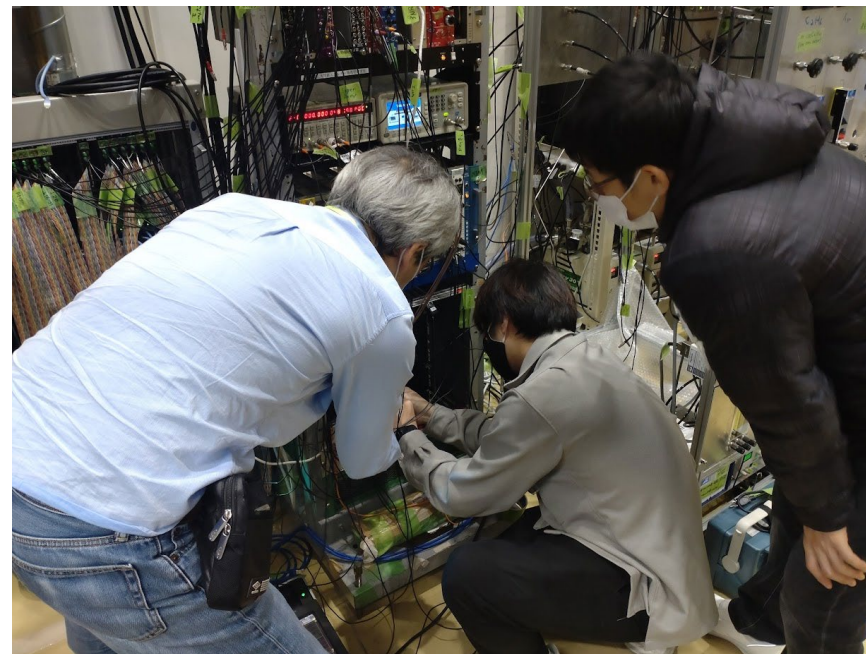
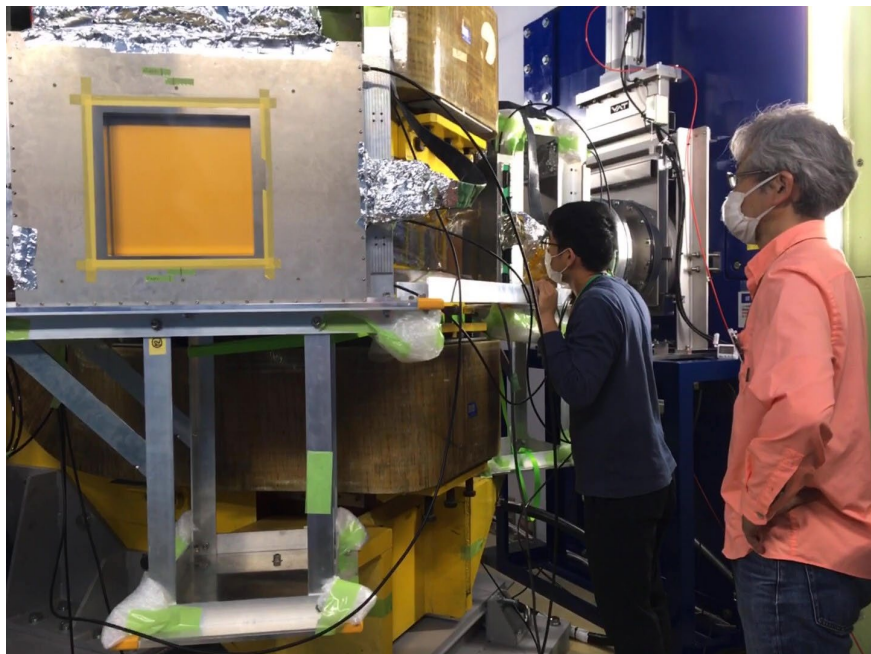


ついにビームライン完成。ビーム運転開始 (2022/1/15)。

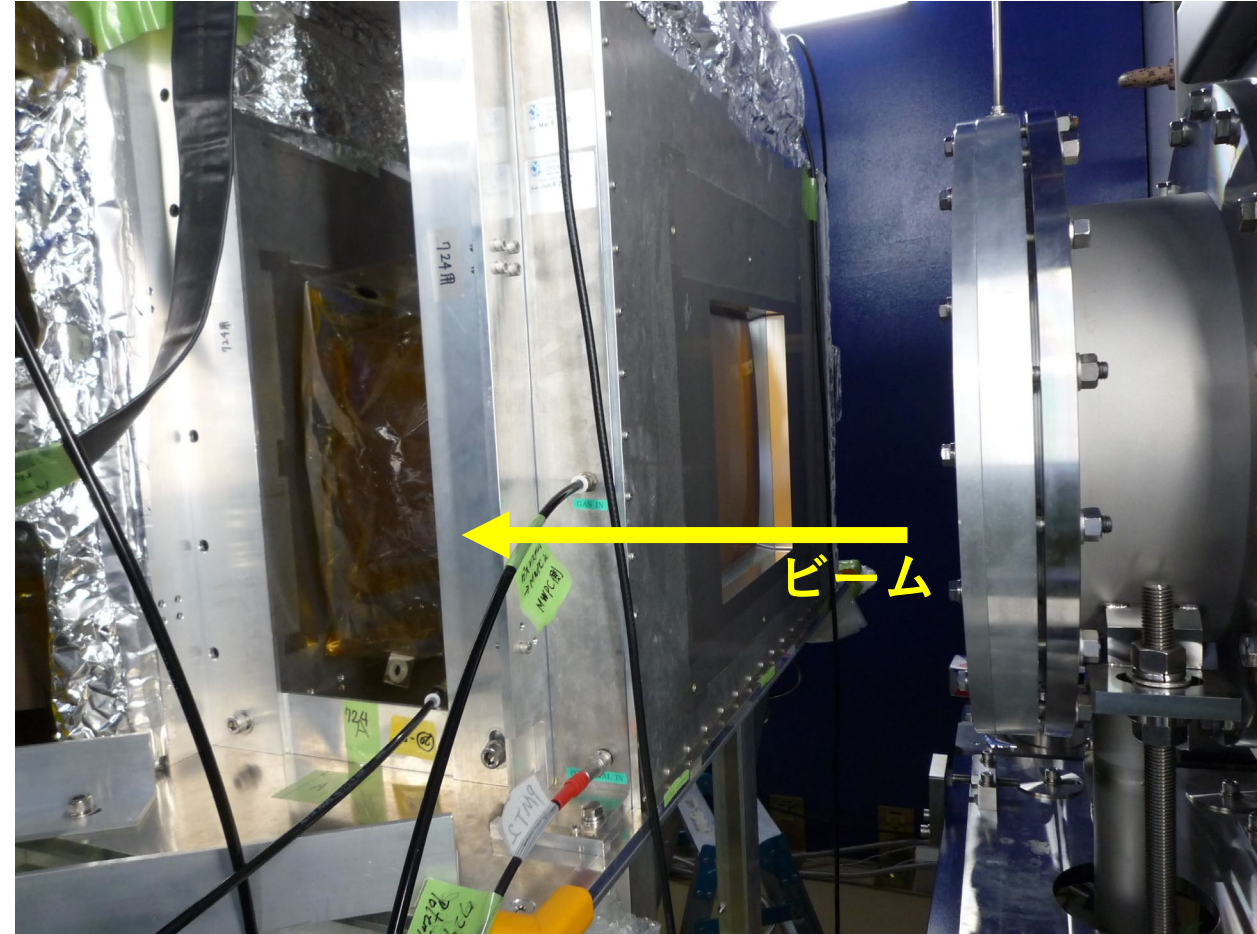
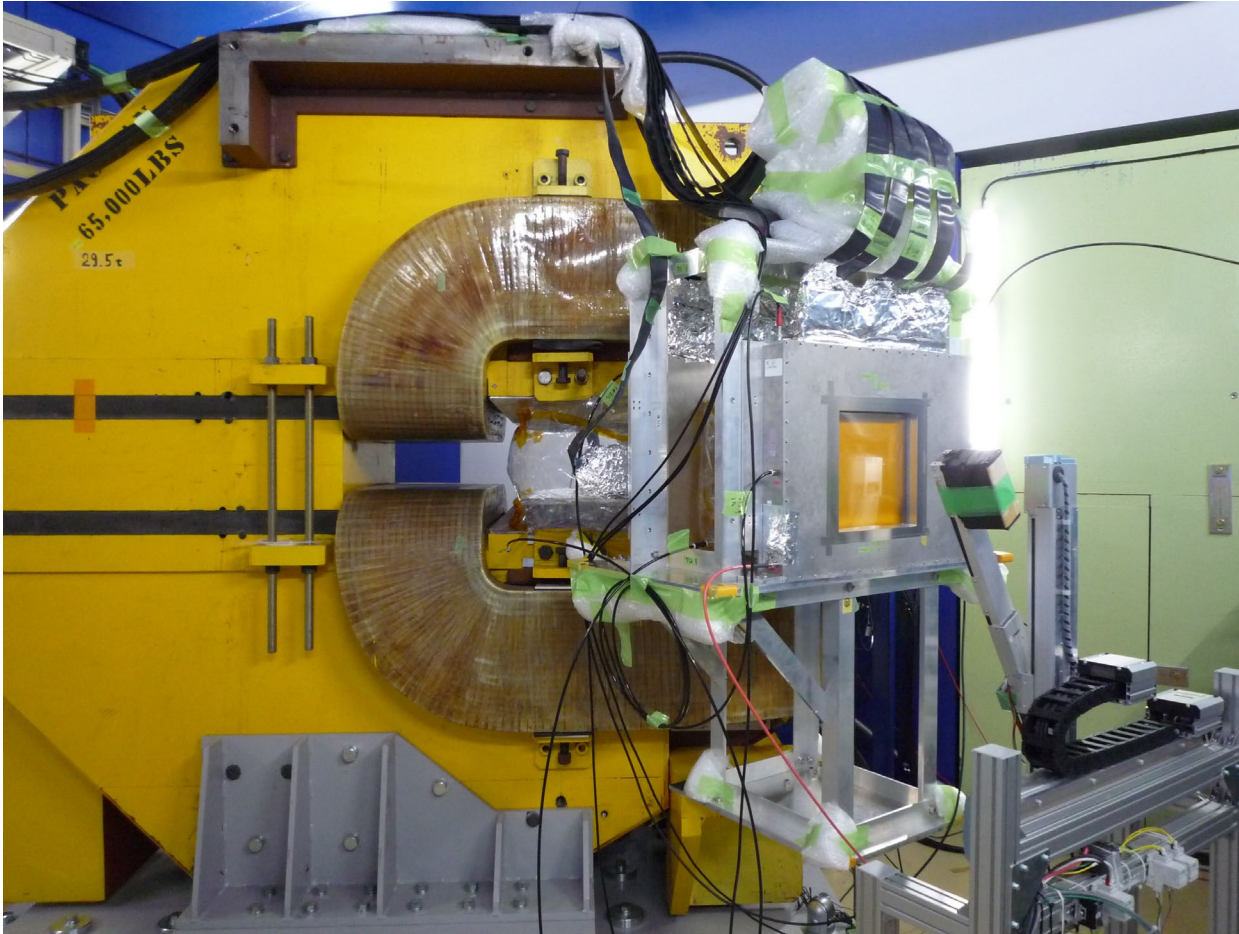
- 2009 年度：J-PARC MLF 炭素標的中のミュオン原子収量の測定 ( $\sim 10^{10}$  個/s @ 1 MW) .
- 2010 年度：KEK 物質構造科学研究所実験課題審査委員会第一次審査採択.
- 2012 年度：検出器開発開始（基盤(S)（2012～2016））
  - 2012 年 9 月：青木さんが市大に説明に来る.
- 2013 年度：第 1 期（2014–2018）5ヶ年計画として第二次審査採択（実験遂行承認）.
- 2017 年度：実験開始に向けて準備継続（基盤(A)（2017～2019））
- 2018 年度：検出器開発完了. H ライン未完成. 第 2 期計画（2019–2023 年度）として 5 年延長.
- 2021 年度：実験開始に向けて準備継続（市大学内予算）. H ライン完成.
- 2022 年度：DeeMe 実験開始.

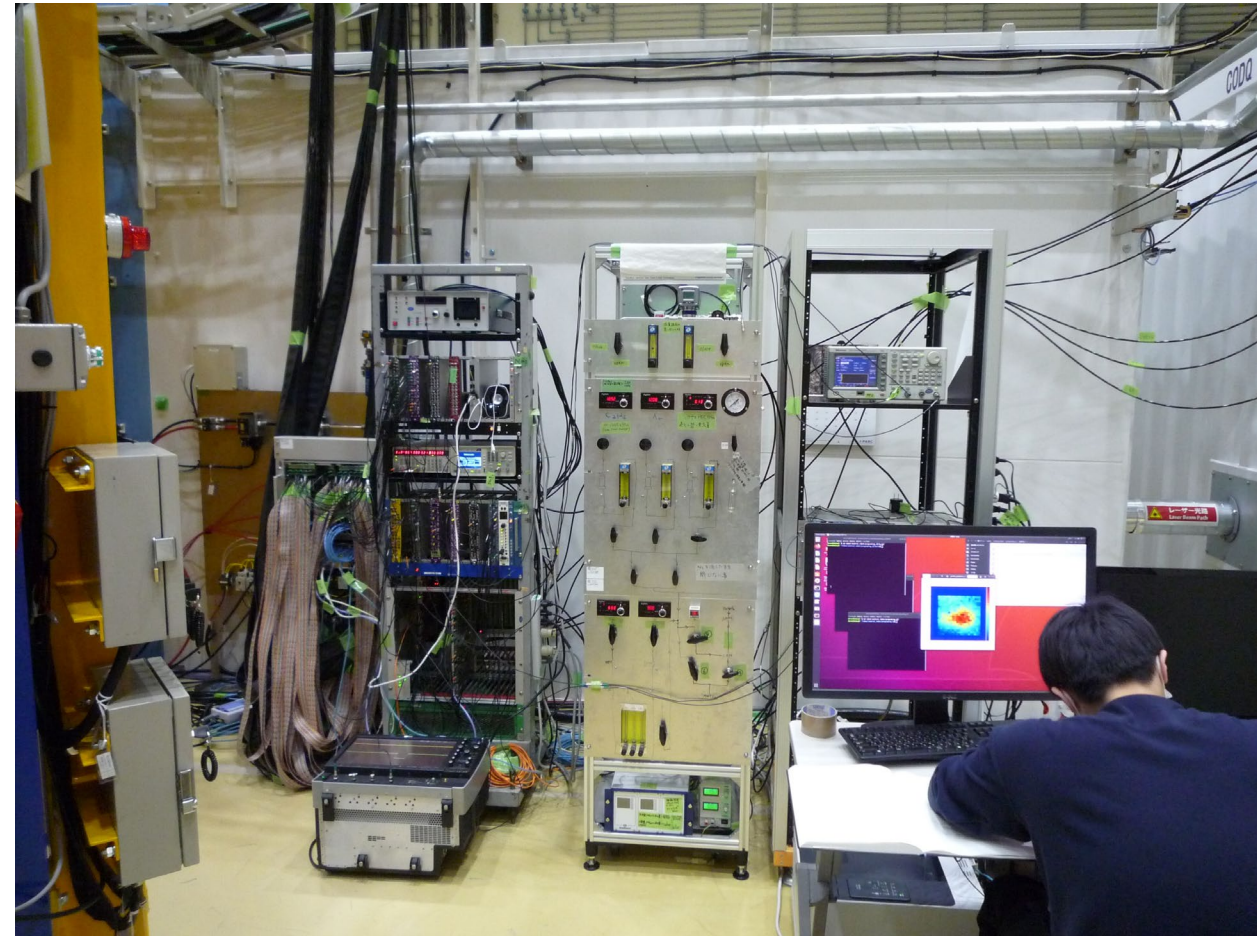
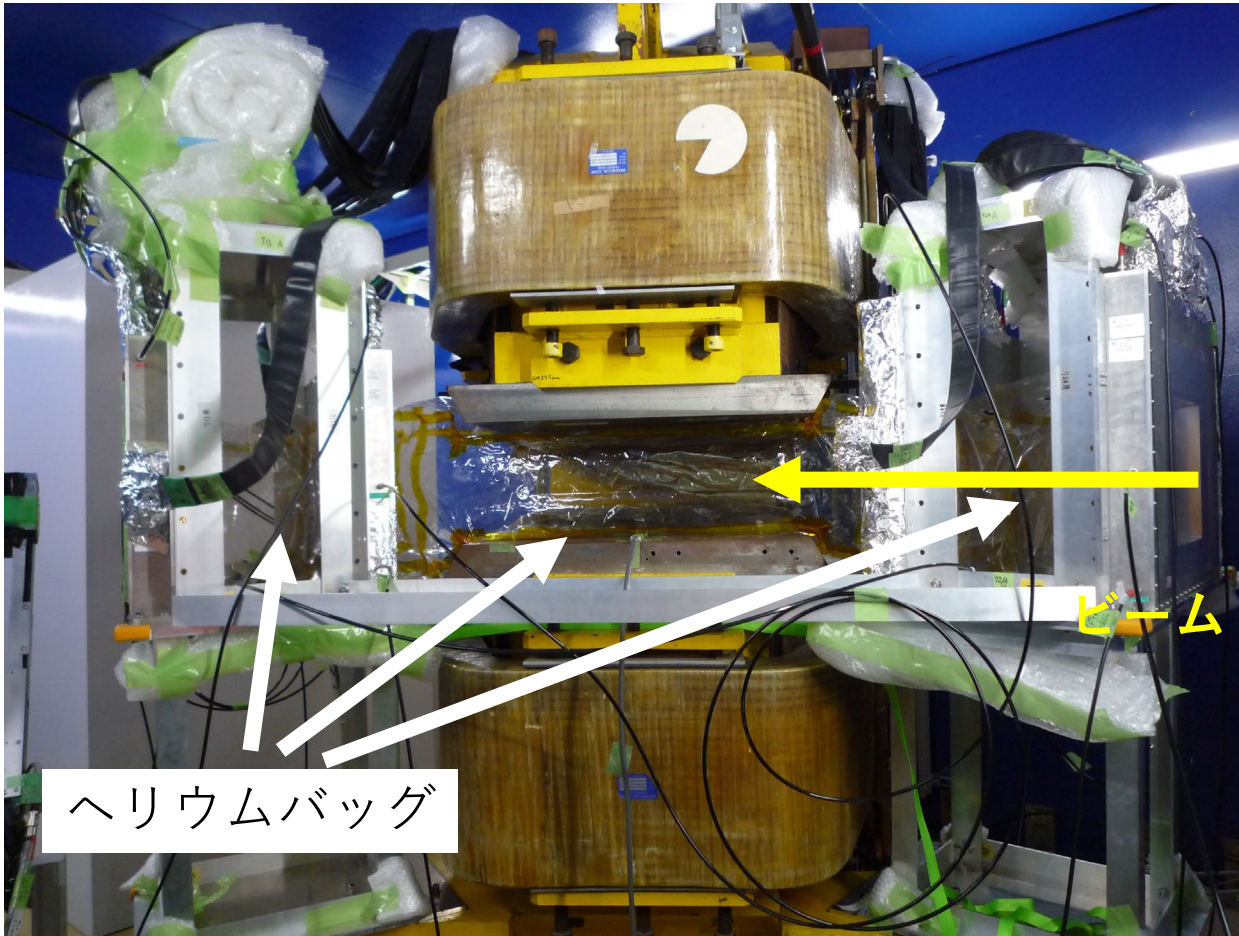
2022/5月～：ついに DeeMe 検出器設置，調整開始。









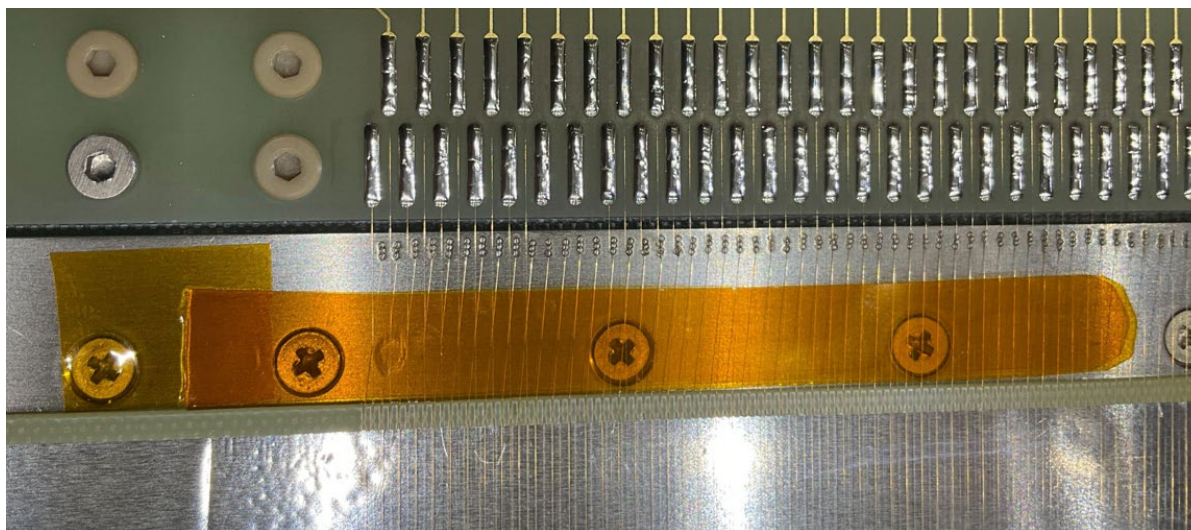


- ビームパワー：700 kW ~ 800 kW
- 初段の捕獲ソレノイド（3つのソレノイドからなる）の電流
  - 想定電流（フルパワー） = (2500, 2500, 1500) A
  - 現時点で (1500, 1500, 0) A
    - フルパワーと (1500, 1500, 900) A では 10 倍感度が違う。



- 壊れました・・・

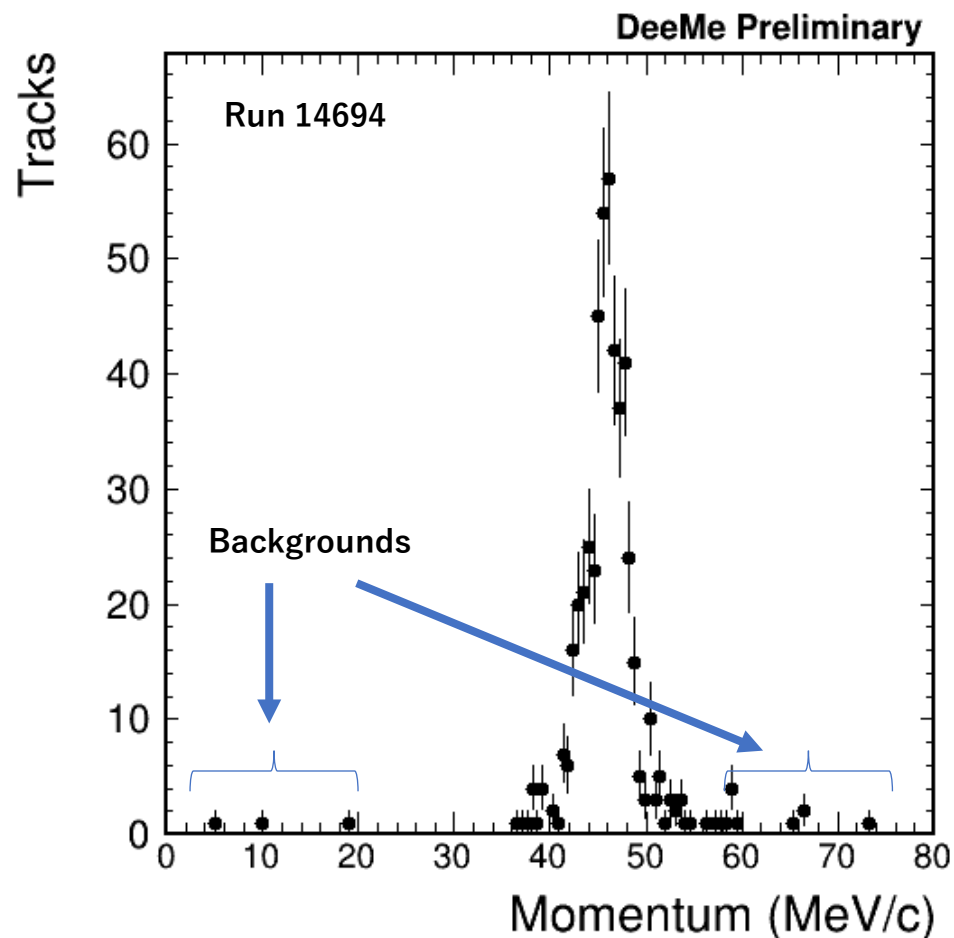
- MWPC 1 台で頻繁な放電。最終的にワイヤ切断が発生。
- 切断ワイヤを除去し、カプトンテープを挿入し修復を試みたり・・・



- 3 回目の切断で断念。 → 根本的な修理を業者に依頼。（2022/10 完了）

Mode10.Page46 (04)

Sun Feb 12 11:35:31 2023



- 運動量再構成に成功！

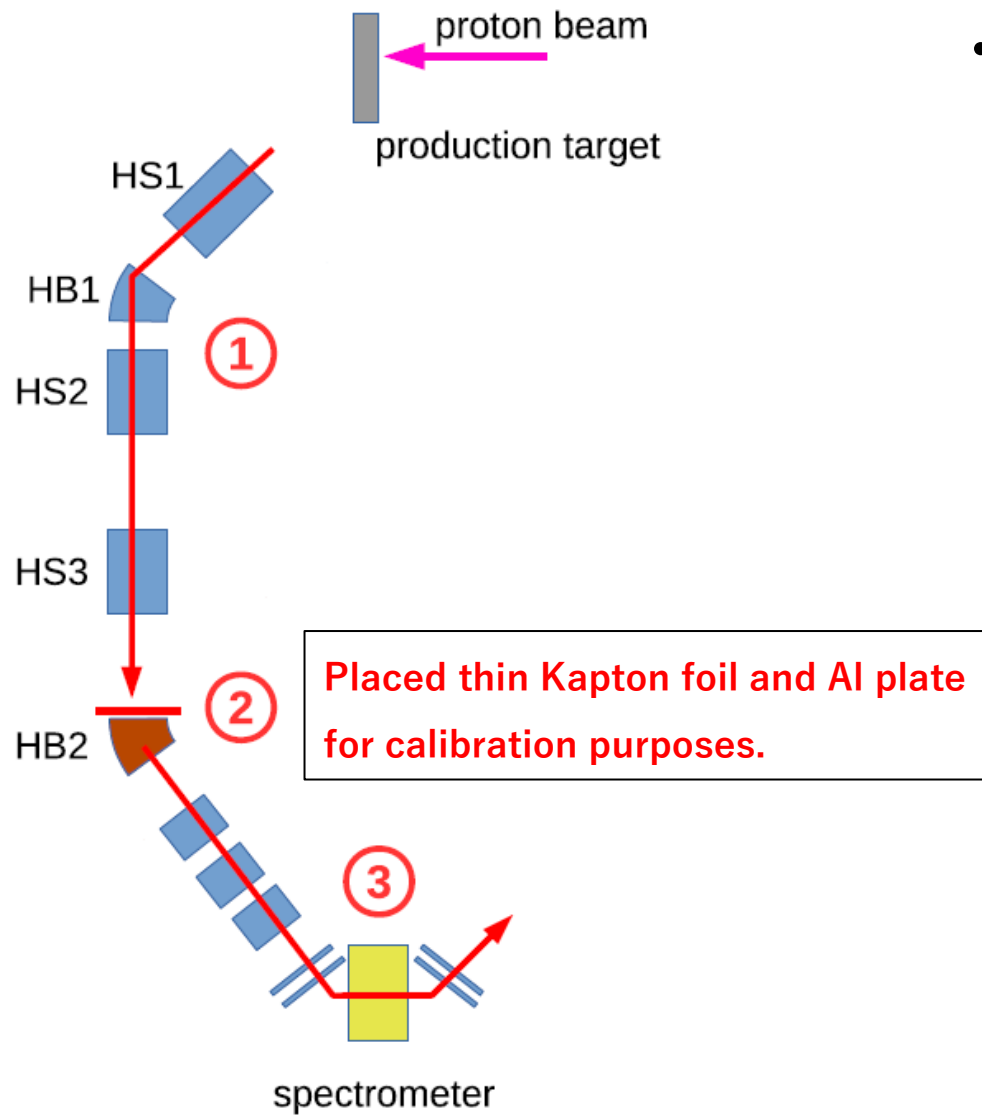
- ビームライン設定
  - 正 50 MeV/c 輸送

- しかしながら,

- バックグラウンドが存在.

- おそらくノイズの accidental coincidence.

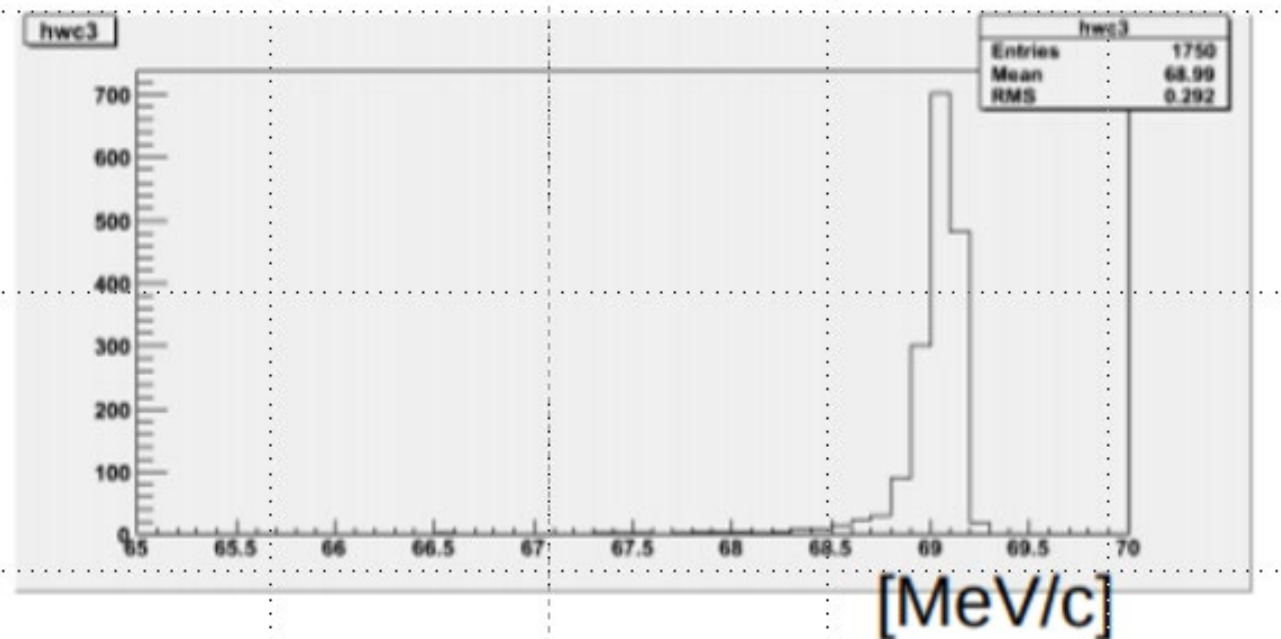
- 調査中.

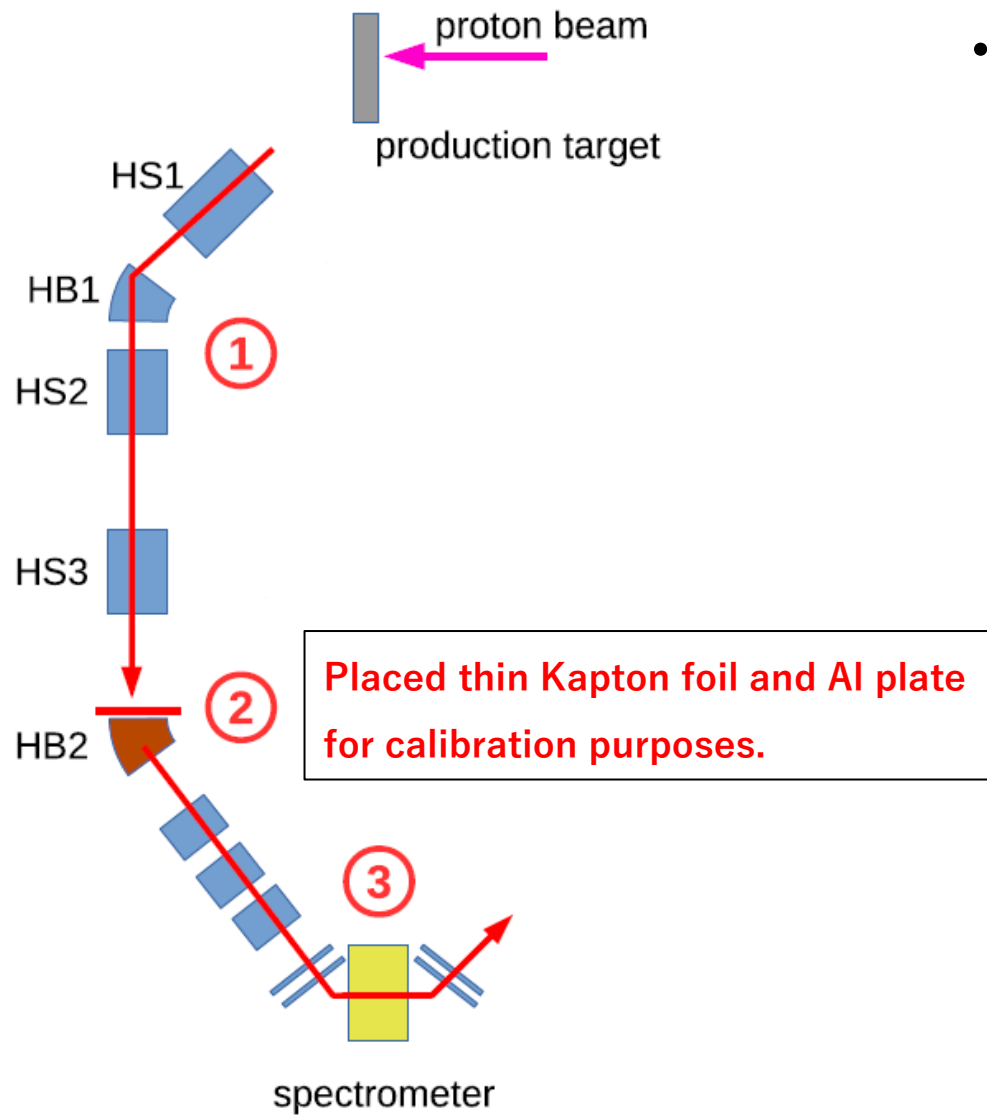


- $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$  の陽電子

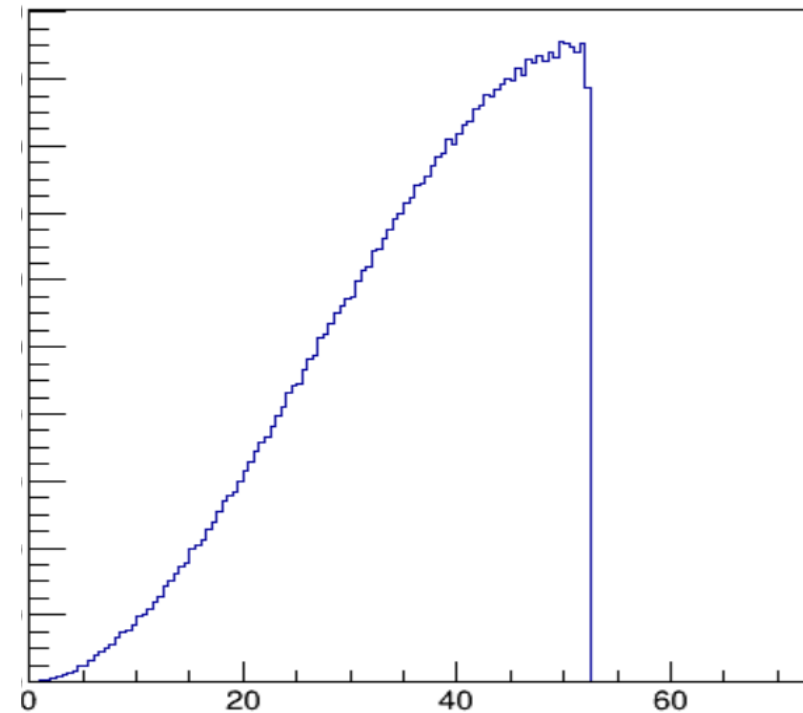
- ビームライン途中に置いたアルミニウム板に  $\pi^+$  を止める
- 2体崩壊で生成される陽電子 ( $69.3 \text{ MeV}/c$ ) で較正.

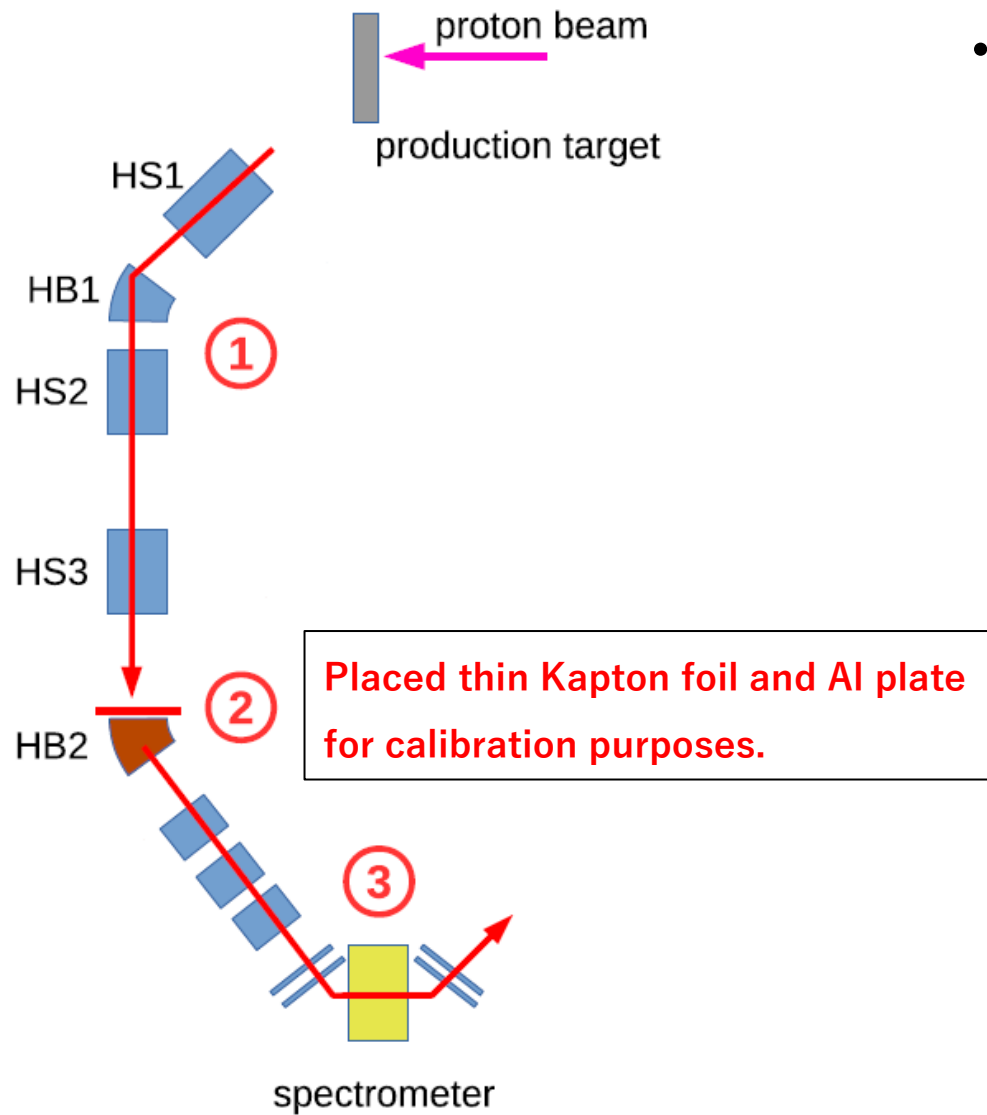
momentum spectrum @ spectrometer





- $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$  の陽電子
- ビームライン途中に置いたカプトンテープに  $\mu^+$  を止める
- 崩壊陽電子のエッジ (52.8 MeV/c) で較正.



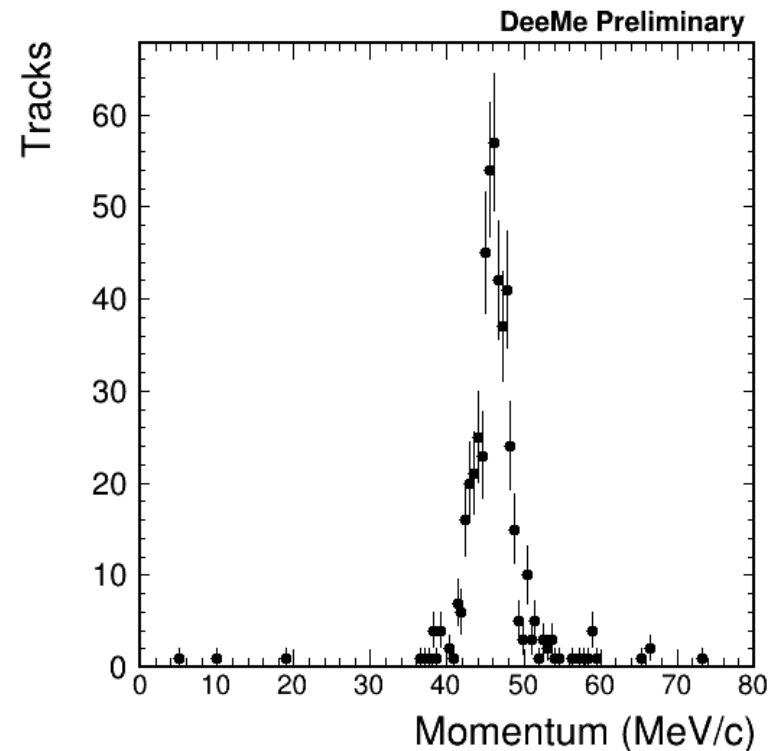


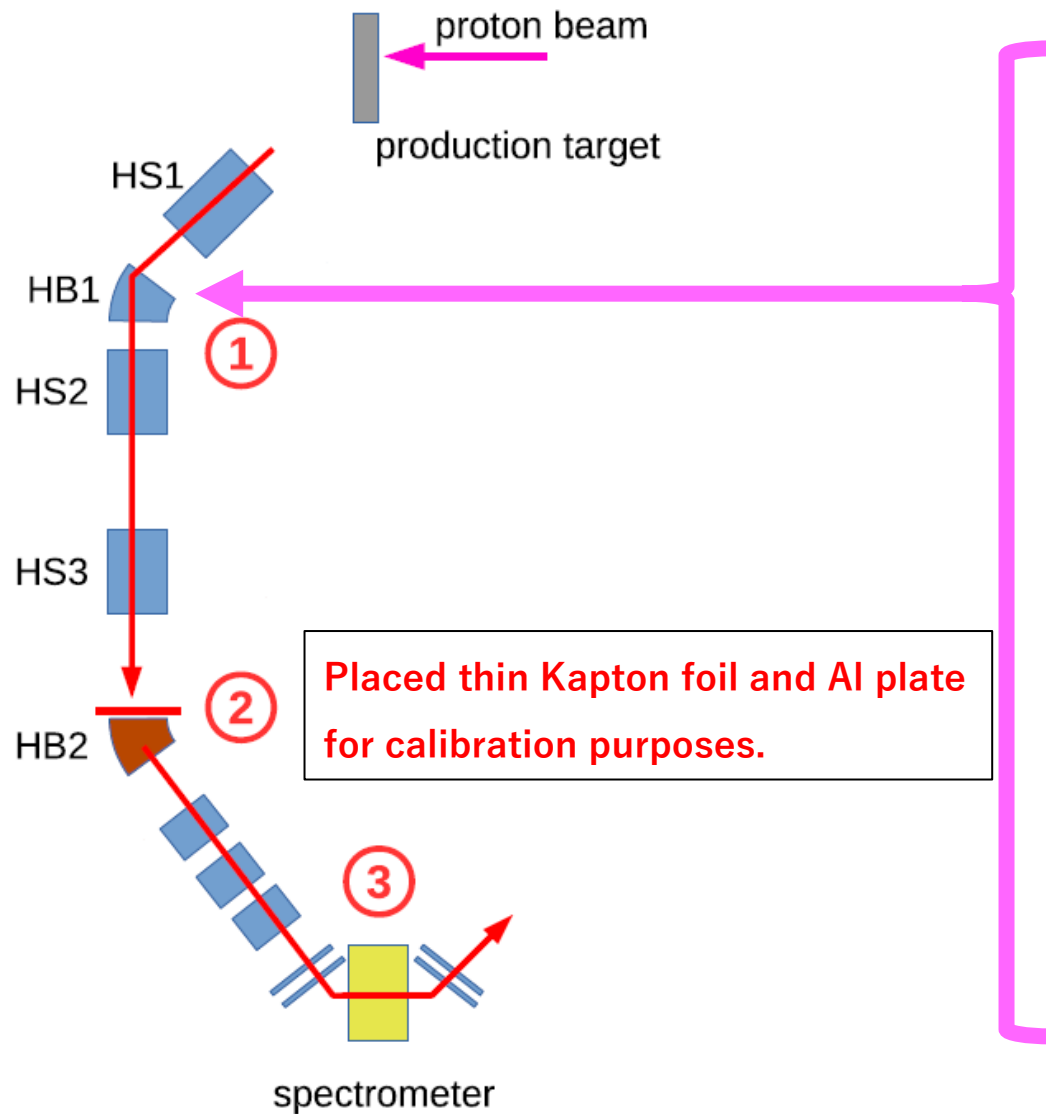
•  $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$  の陽電子

- ビームライン途中に置いたカプトンテープに  $\mu^+$  を止める
- 崩壊陽電子のエッジ (52.8 MeV/c) で較正.

Mode10.Page46 (04)

Sun Feb 12 11:35:31 2023





• しかし！

- HB1 をオフにしても運動量再構成されるイベントが存在.
- 標的から直接 HB1 をヒットするガンマ線が高運動量陽電子を生成し、それが検出器まで到来しているらしい.
- 調査中.

- DeeMe コミッショニングを開始した.
  - 基本的に全システム問題なく稼働.
  - いくつかの解決すべき課題が存在.
    - Accidental coincidences.
    - 運動量較正において HB1 で生成される高運動量の陽電子バックグラウンド.
    - 調査中.
- 2023 年度は DeeMe 実験遂行を承認されている最後の年度.
  - 検出器調整後, すみやかに物理データ取得を開始する予定.

**大強度ビーム・低コスト実験でどこまでできるか知見を積み重ねたい.**

Backup