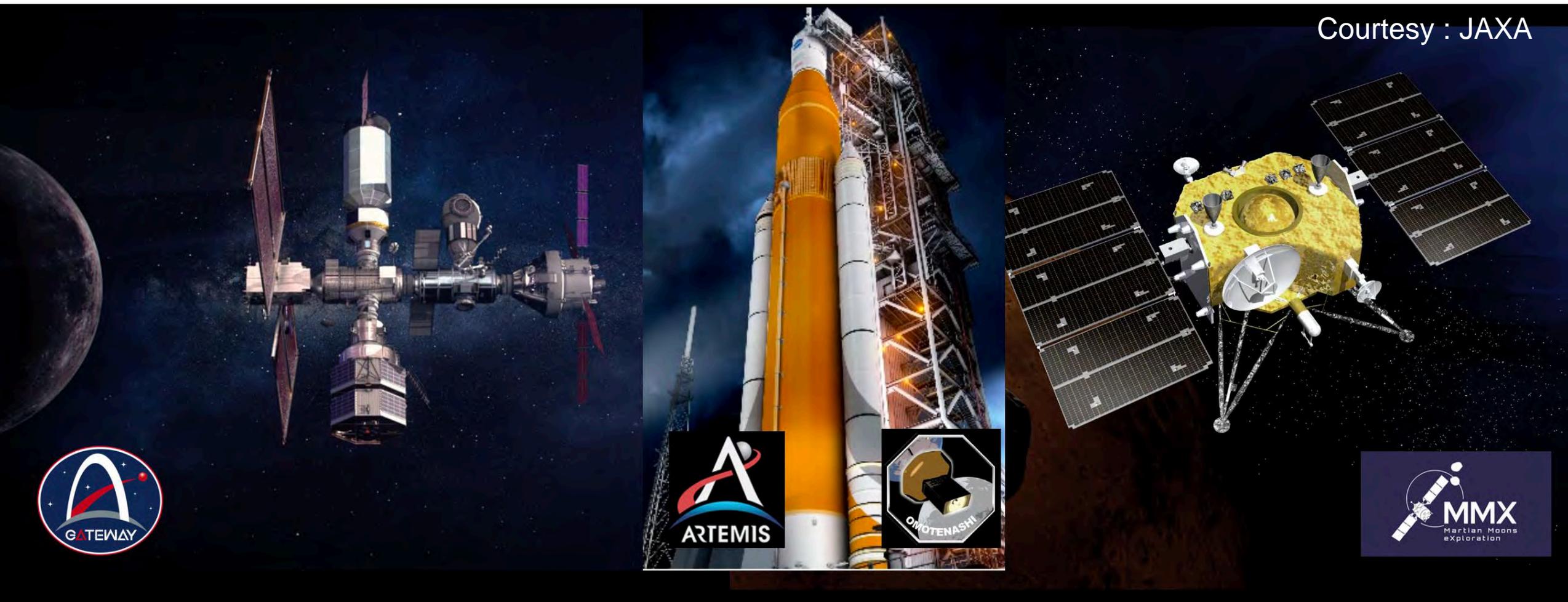


ビーム窓の散乱を利用した数GeV二次陽子利用法の高度化 2

Courtesy : JAXA



(J-PARC/JAEA) 明午 伸一郎、山口 雄司、岩元 大樹

日本加速器学会 2025年8月6日 東京都市大学・世田谷キャンパス

- 背景
 - 宇宙用の荷電粒子スペクトロメータ
- ビーム窓の散乱を利用した試験
 - 0.4 GeV陽子の測定結果
 - 1~3 GeV陽子の測定結果
 - 考察
- まとめ

ビーム窓の散乱を利用した試験

情報通信研究機構: National Institute of Information and Communications Technology

CHARMS-p (Charging and Radiation Monitors for Space weather Proton-measuring inst.)

宇宙の天気予報
ひまわり搭載予定: 打上げ2028年



概念検討に着手 (TRIAL)	EM設計・製造・試験	FM設計・製造・試験	納入	打ち上げ	宇宙天気予報業務での利用開始
2020	2021	2024	2025	2028	

※気象衛星ひまわり後継機への相乗り搭載を想定

太陽フレア対策や月探査計画:
数GeV程度の荷電粒子スペクトロメータの地上試験が必要
⇒ J-PARCにおける試験の強い要望

- 数GeV陽子を利用できる施設は国内で**J-PARCのみ**
- 大強度陽子を取扱うため、利用者への一次陽子ビーム供給は**困難**
- パルス計数のために、パイルアップを生じない**低強度ビーム供給**が必要
⇒ ビームダンプ入射窓の**散乱による陽子利用法**を開発
- 供給する陽子エネルギー**スペクトル評価**が必要
⇒ 加速器施設の核設計の基礎となる核計算モデルの検討が可能
- 共同研究を開始(JAXA, NICT)

JAXA: ARTEMIS計画 月面用 Lunar-RICHeS

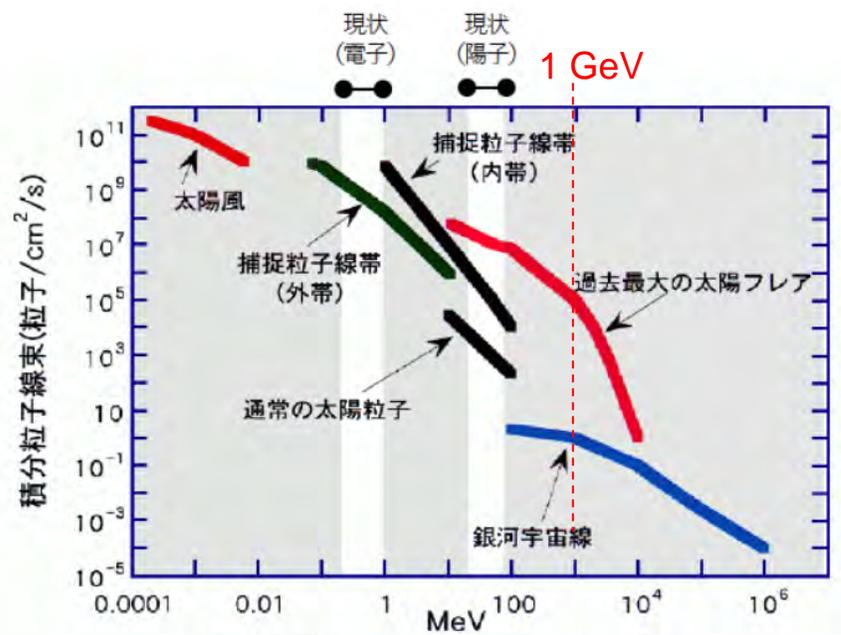


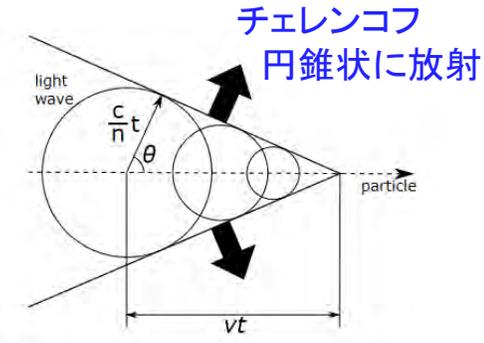
図 宇宙放射線のエネルギースペクトル
※ 総務省「ひまわりの高機能化研究技術開発」基本計画書

数GeV陽子スペクトル測定が必要

目的1:
宇宙用スペクトロメータ開発・核計算モデルの高度化
• 陽子スペクトルおよび核反応断面積測定

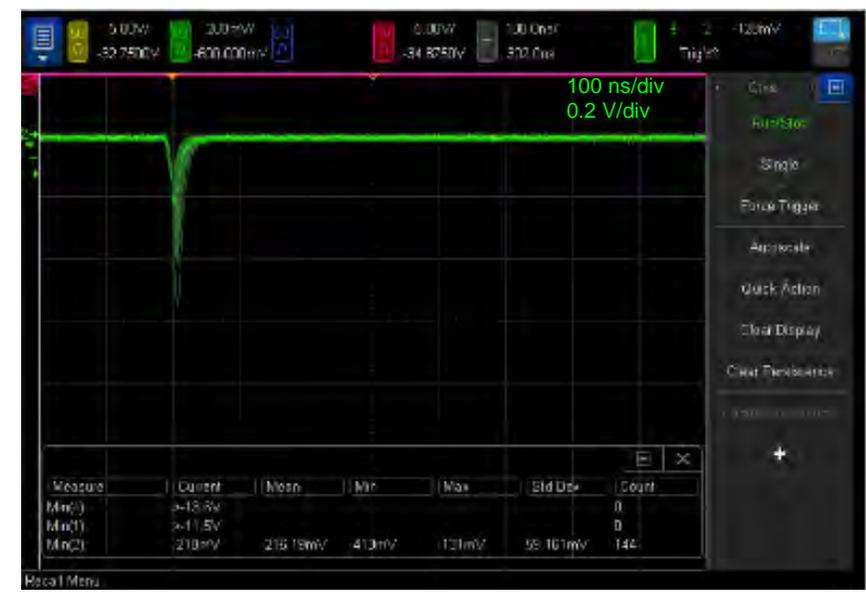
チェレンコフ放射を用いたビームロスモニタ

- J-PARC中性子源・ミュオン源(MLF) 1MWの運転を達成
- 標的付近のビームロス制御:
標的の放射線(主に中性子)と区別できない
- 高エネルギー閾値を有するビームロスモニターの開発が重要
 - チェレンコフ放射に基づくビームロスモニタ開発

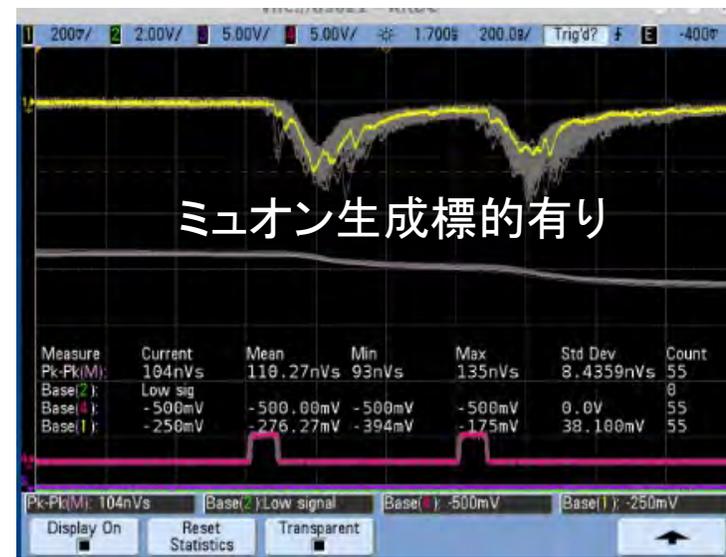


宇宙線ミュオンによる信号

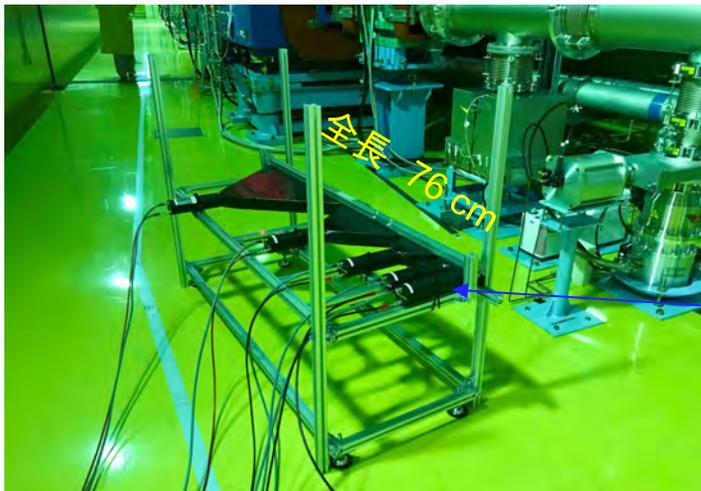
ビームロスのみ測定可能なBLMが理想



目的2:
チェレンコフに基づくロスモニタ開発



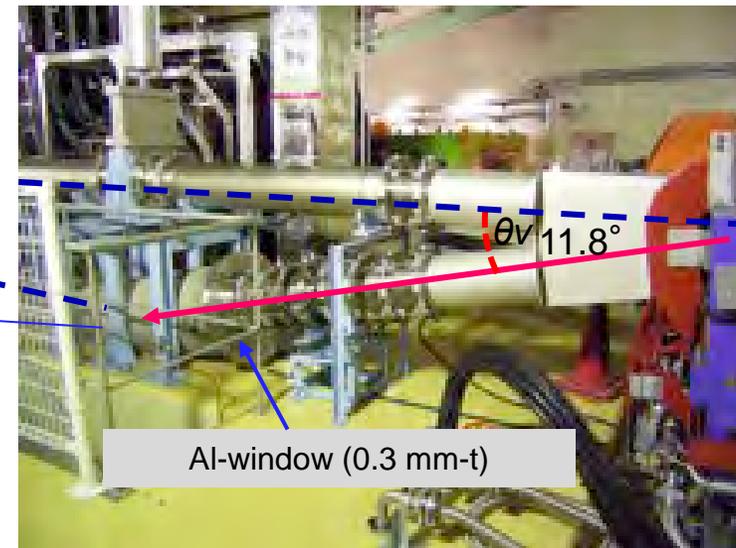
- プラスチックシンチレータ(EJ200)を5台(dE1-E5)をテレスコープ型として設置
- Al窓から14 m離れた散乱角度 13° (水平 5.6° , 垂直 11.8°)の位置に設け、スペクトルをカロリメトリックに測定(デジタイザ Struct SIS3316 0.25Gsps、テクノエーピー APV8108 1Gsps)
- パイルアップ防止のため、通常運転より7桁程度低いビーム強度 ($\sim 10^7$ 個/shot)を使用

Plastic scintillators $\square 50$ mm

ビームダクト(厚さ6 mm-t)が浅い角度の横断により実効的に27 mm-tとなる。

14 m 5.6° θ_h
全散乱角度 $\theta = 13^\circ$

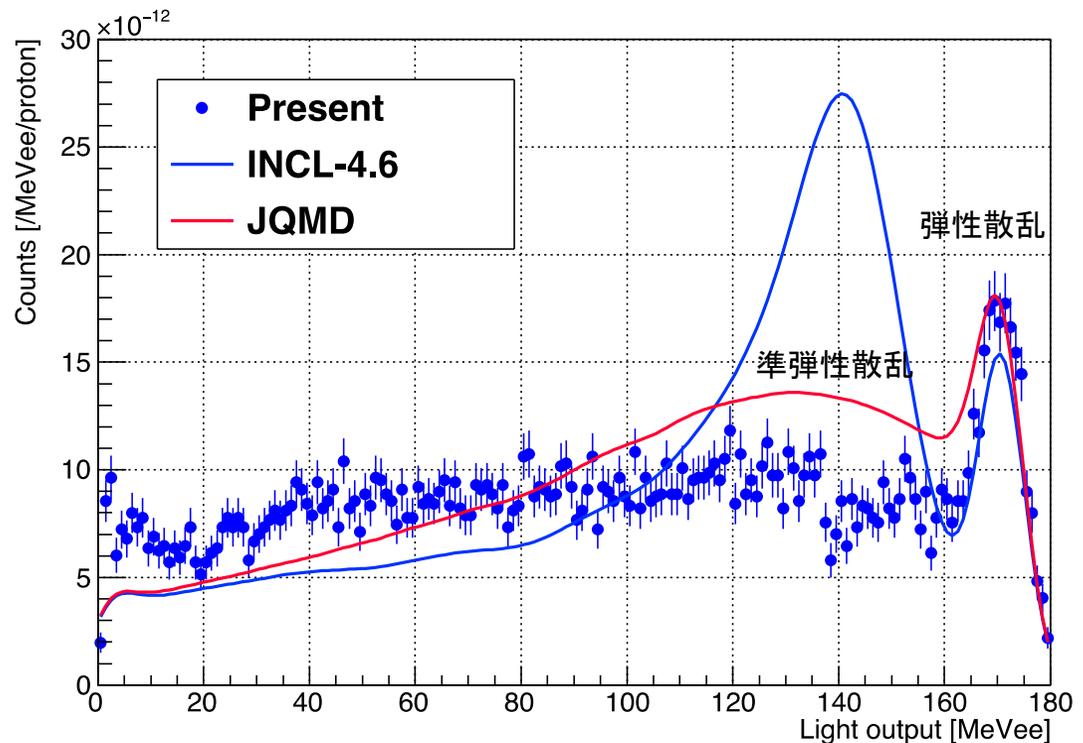
3NBT ビームダンプ(RCS出口)



	厚さ [mm]	停止陽子エネルギー [MeV]	測定可能な散乱陽子エネルギー [MeV]
dE1	10	32.5	151
dE2	50	87.6	177
dE3	100	152	223
dE4	200	245	302
dE5	400	385	432

- 弾性散乱により一次陽子に等しい陽子の利用が可能
- エネルギーを変化させ0.4~3 GeVの試験が可能
- PHITSやFLUKAで陽子スペクトルが計算できるものの、照射位置でのスペクトル測定が必要

- AI窓の入射から検出をシンチレータ発光量としてPHITSにより計算 (MeVee:1 MeV電子相当発光量)
- 核計算モデル :
 - 1) **INCL-4.6** (核内カスケード) + GEM (脱励起モデル)
 - 2) **JQMD** (量子論的分子動力学) + GEM (脱励起モデル)

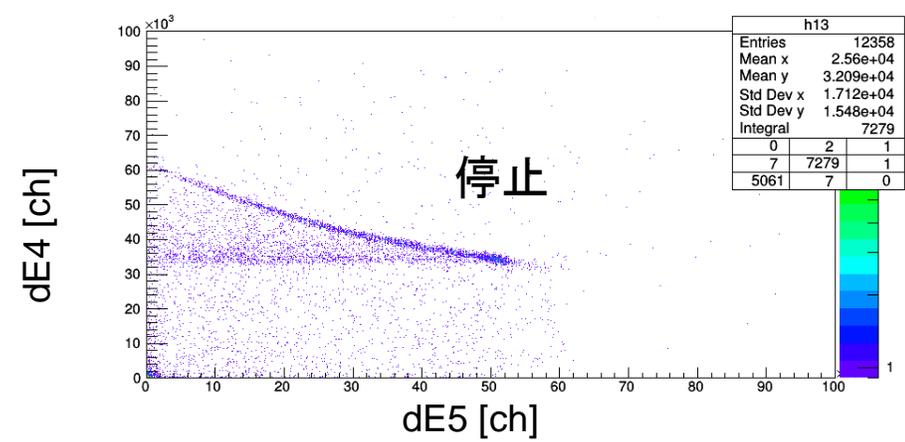
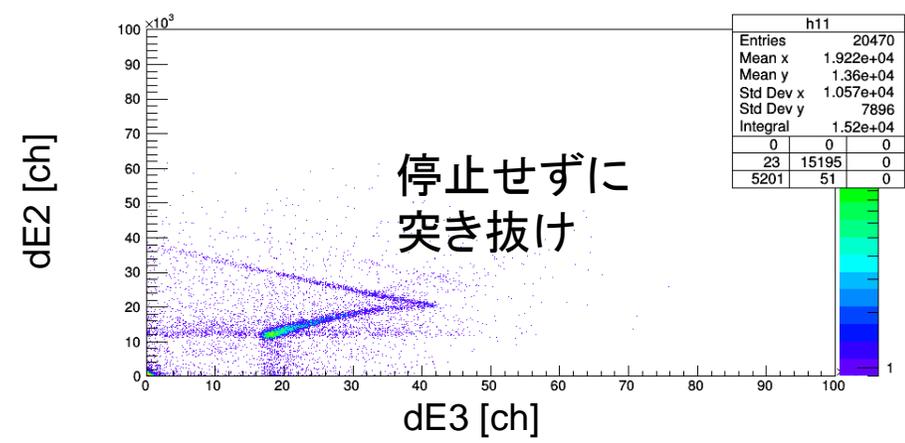


弾性散乱部検出効率
~35%

弾性散乱断面積:
PHITS 24.2 mb/sr
実験値*1 27.2 ± 0.9 mb/sr

*1: Heiberg, J. Phys. Rev. 106, 1271 (1957)

400 MeV陽子の測定結果

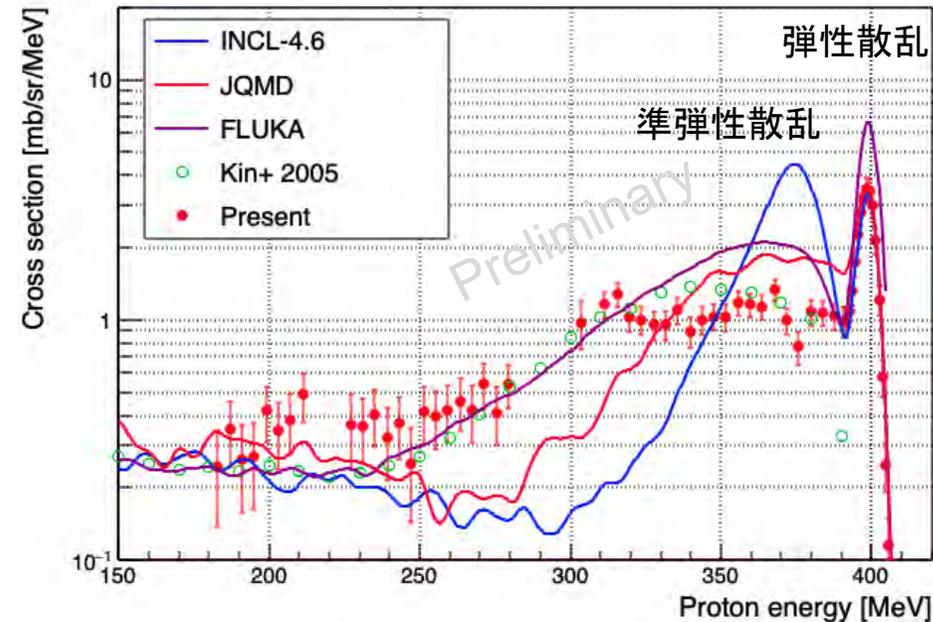
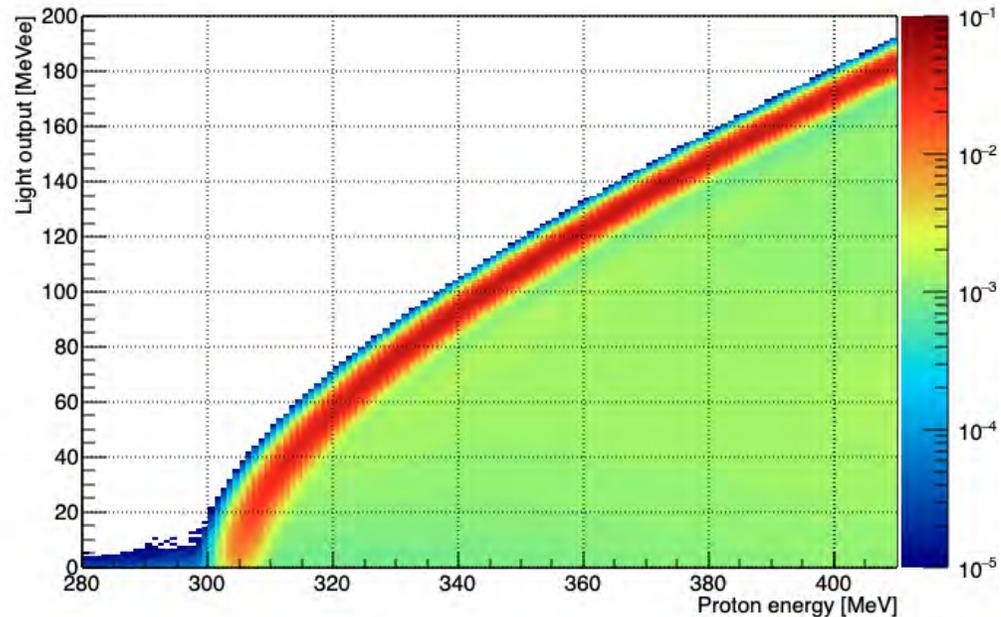


0.4 GeV陽子の断面積(DDX)の導出

- 核計算モデル高度化のため $^{27}\text{Al}(p, xp)$ 反応の二重微分断面積(DDX)が重要であるが、データは少ない
 - ※ 1 GeV以上の入射陽子のデータは一例のみ、物理的な解釈不可の怪しいデータ
- DDXの導出: 陽子輸送のエネルギー損失や非弾性散乱による減衰の考慮が必要
 - ⇒ デコンボリューション(アンフォールディング)によりDDXを導出
- 応答関数行列: PHITS 計算 (JQMD), アンフォールディング: RooUnfoldを用いたベイズ推定法を適用

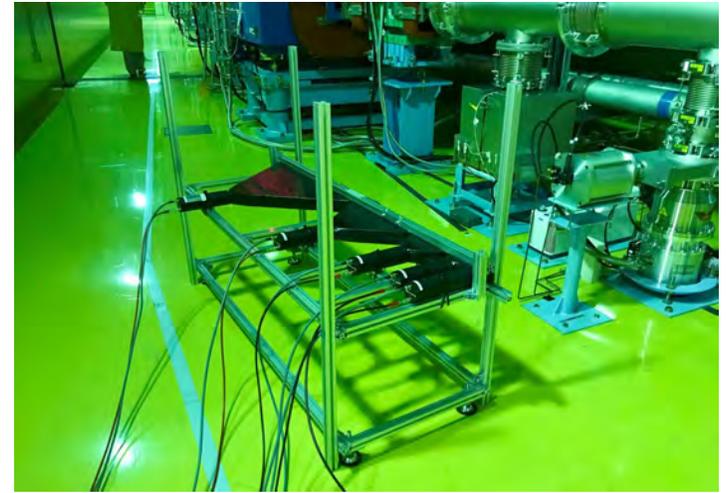
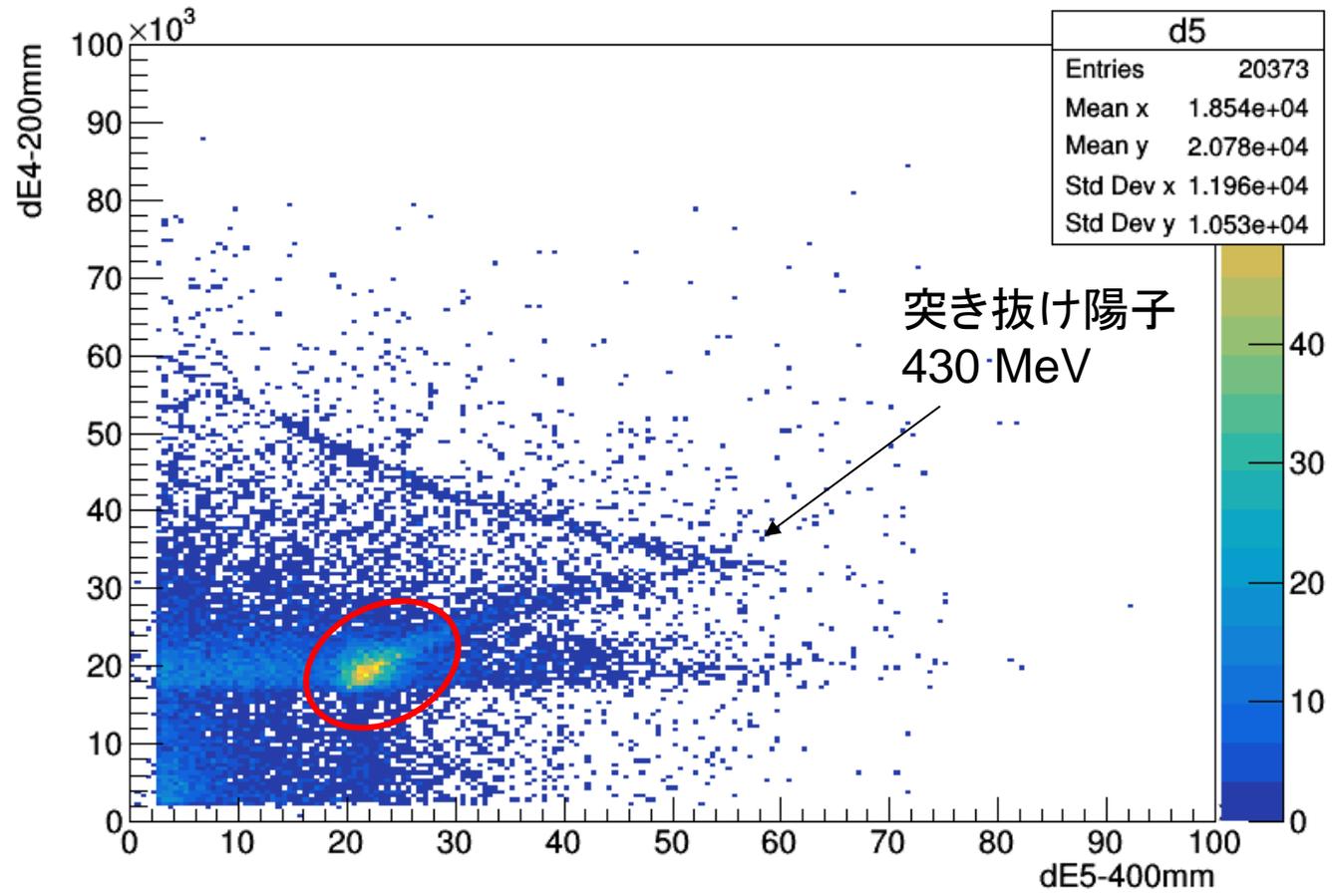
$M = RS$, M: 測定値, R: 応答関数行列, S: DDX

PHITSの計算による応答関数行列



- 実験はJQMDおよびFLUKAの計算を支持する
- 他の実験データKin+ (RCNP)のデータと良い一致を示す。
Kin+ 測定角度 20° 、本実験 13°

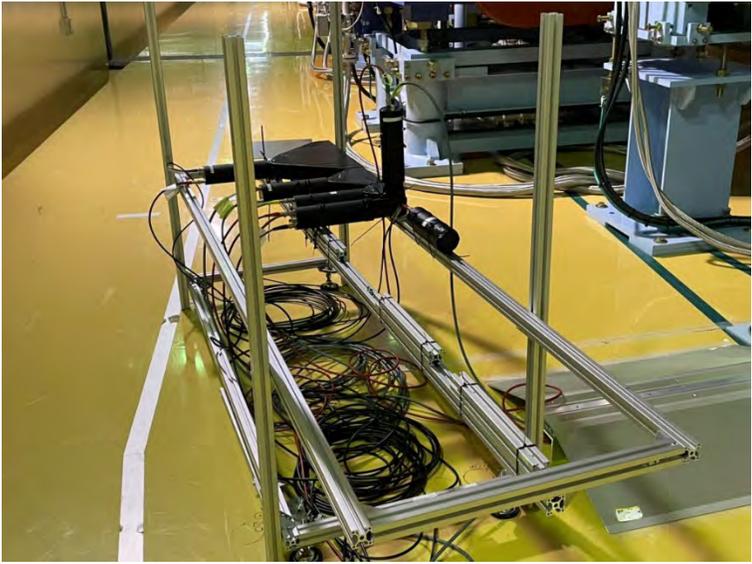
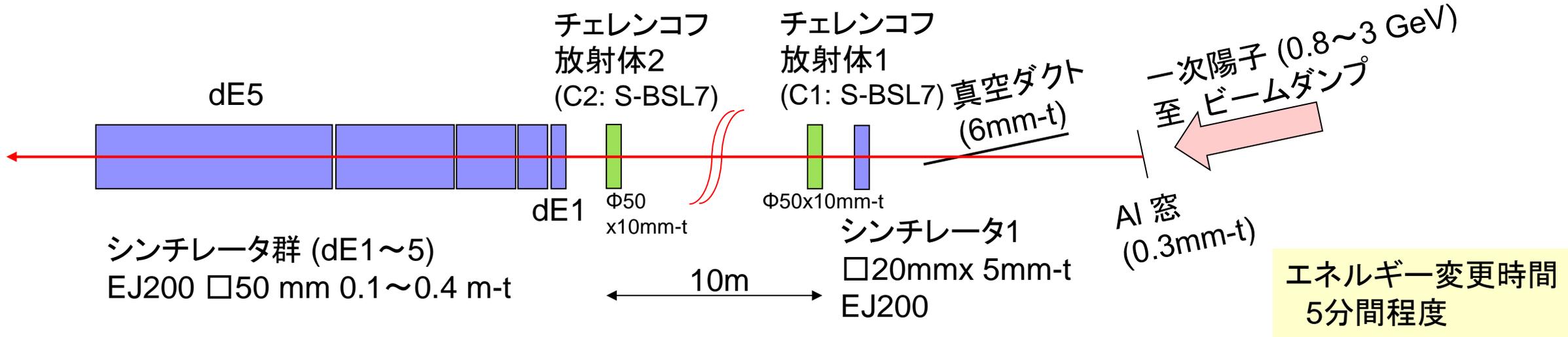
3 GeV入射陽子のカロリメトリックな測定



	厚さ [mm]	停止陽子エネルギー [MeV]	測定可能な散乱陽子エネルギー [MeV]
dE1	10	32.5	151
dE2	50	87.6	177
dE3	100	152	223
dE4	200	245	302
dE5	400	385	432

- 陽子の明確な帯が測定が観測されたが、エネルギースペクトル測定は困難
- 厚いシンチレータを用いても陽子スペクトル測定は困難
- カロリメトリックでない測定法が必要

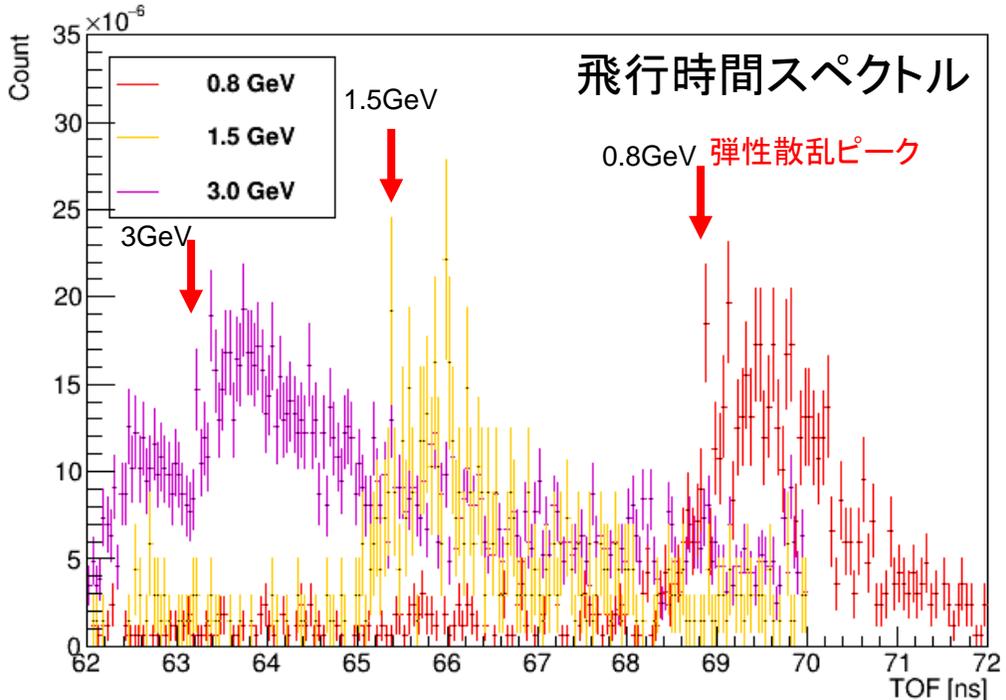
チェレンコフ放射体を用いたスペクトル測定



- 数GeV陽子測定:
厚いプラスチックを用いても弾性散乱の明確なピークは観測不可
- **チェレンコフ放射体を用いた飛行時間法**による散乱陽子スペクトル測定を行った

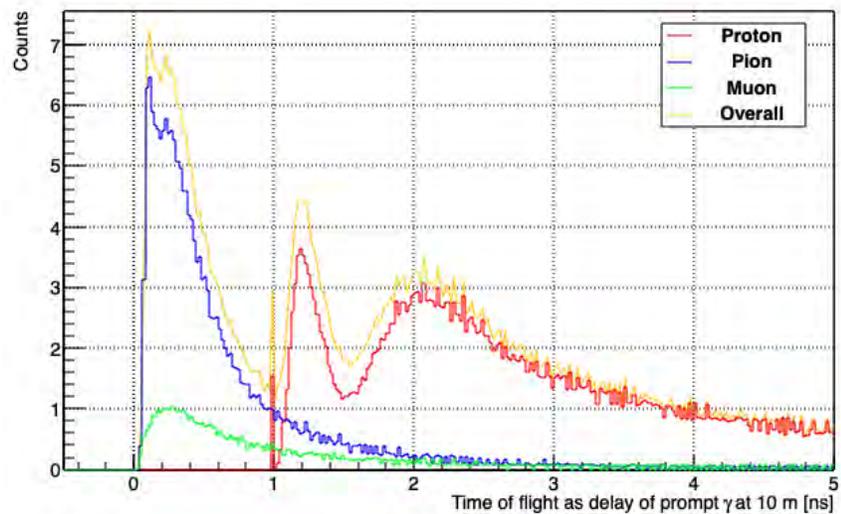
飛行時間スペクトル

シンチレータ等で同時計測(<5ns)された事象から飛行時間スペクトルを導出

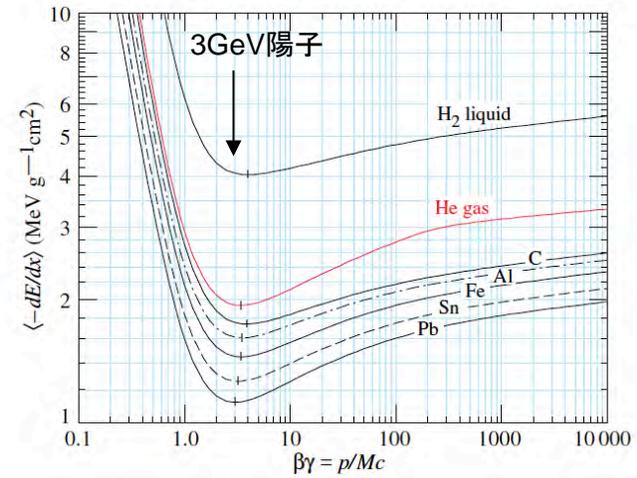


時間分解能(弾性散乱) $\sim 60\text{ps}$

飛行時間スペクトル(FLUKA計算 3GeV)



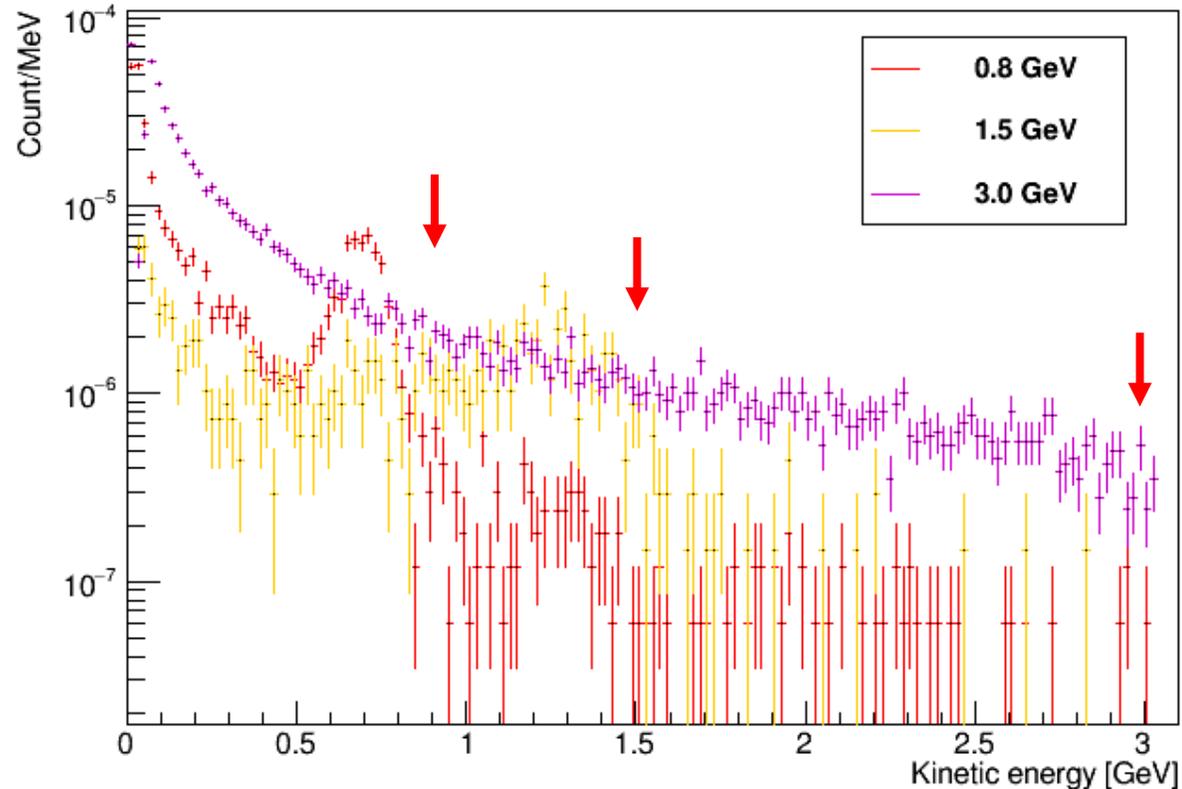
阻止能



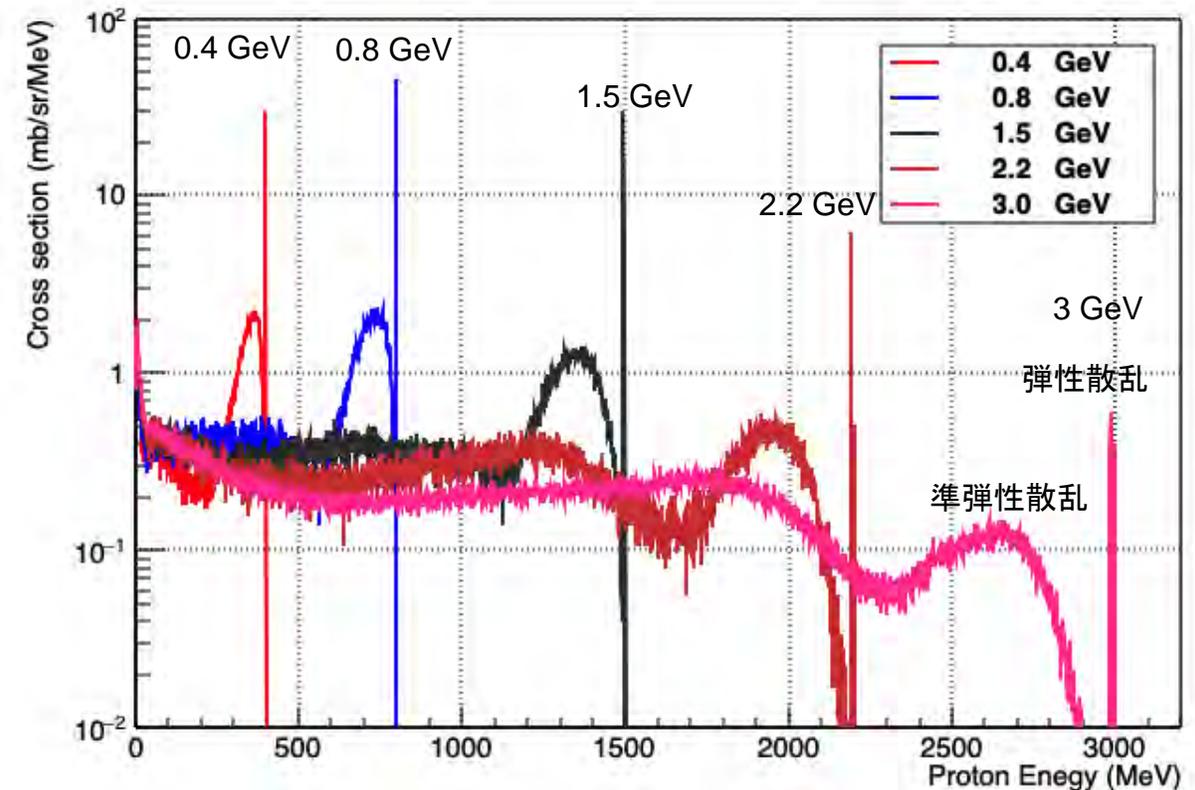
阻止能: 粒子によらず β の関数
 $f(\beta\gamma) = f(\beta/(1-\beta^2)^{0.5})$

- 飛行時間および阻止能は粒子に関わらず光速比 β のみ関数となり、本手法で陽子と中間子(π, μ)の弁別は不可能
- 計算で求めた中間子スペクトル形状より、寄与差し引く予定

実験値 (陽子エネルギースペクトル)

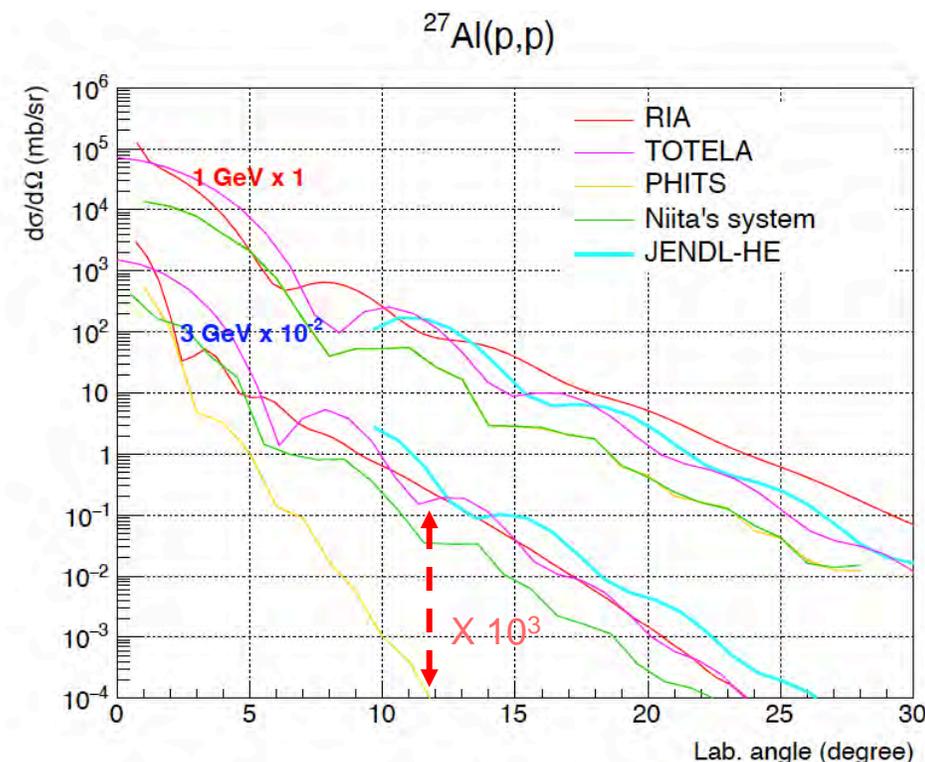
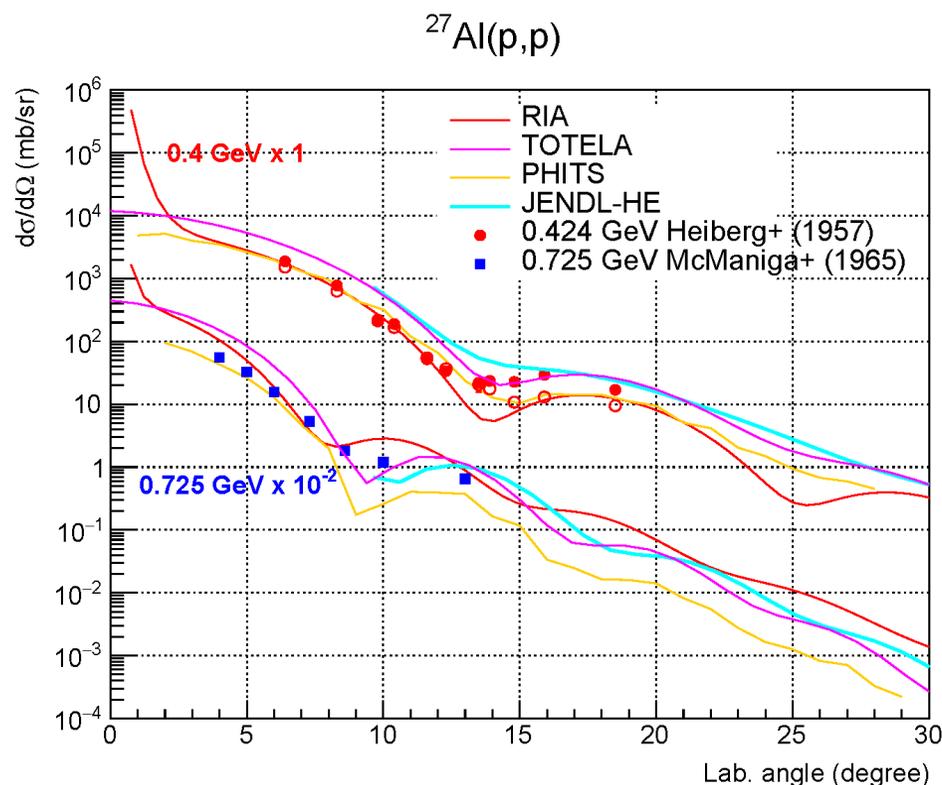


FLUKAの計算結果(二重微分断面積)



- 弾性散乱のピークを確認
- 概ね予想通りのスペクトルとなるが、中間子の影響などを差し引いた今後の詳細な解析が必要

- 光学モデル(RIA, TOTELA), PHITS, 仁井田のシステマティック, JENDL-HE2007と比較
 RIA: Relativistic Impulse Approximation 千葉先生 (旧 東工大)
 JENDL-HE2007 ENDF utility (国枝氏, JAEA 核データセンター)

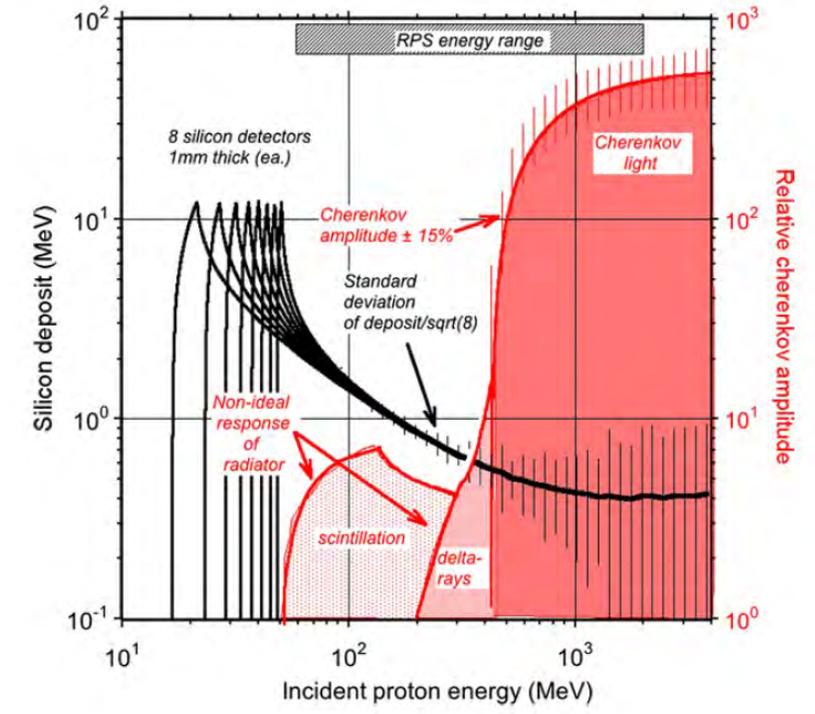
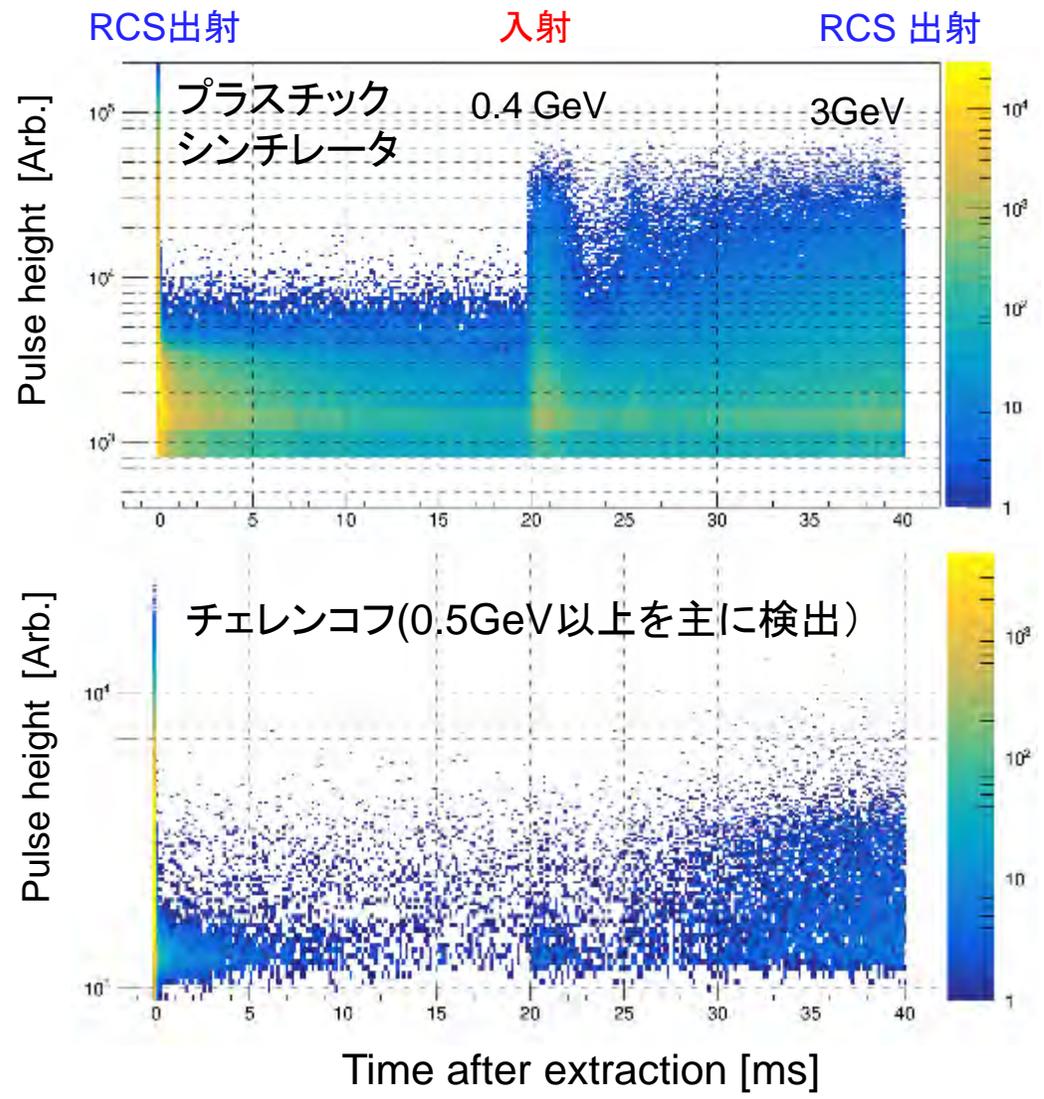


- 実験データ $E < 0.73$ GeVのみ
- 全ての核計算モデル: 実験とよい一致

- PHITS: $E < 1$ GeVで仁井田のシステマティックを使用
 $E \geq 1$ GeV 別のシステマティックを使用
- 今後の実験データ取得により明確にする

チェレンコフ放射によるビームロス計測

測定場所でビームロス計測
: ~1MW運転中 (MLF利用運転中に計測)



既にNSLS-IIで使用され, CERNで検討中

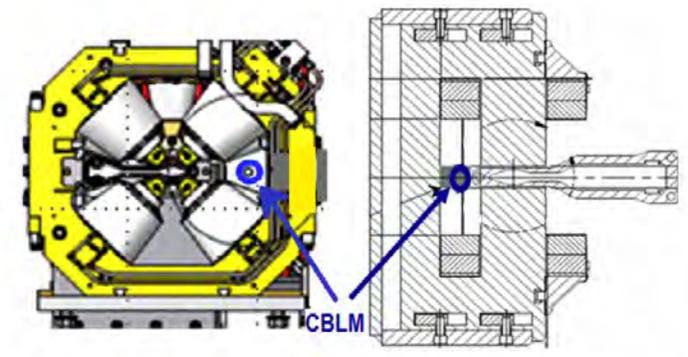
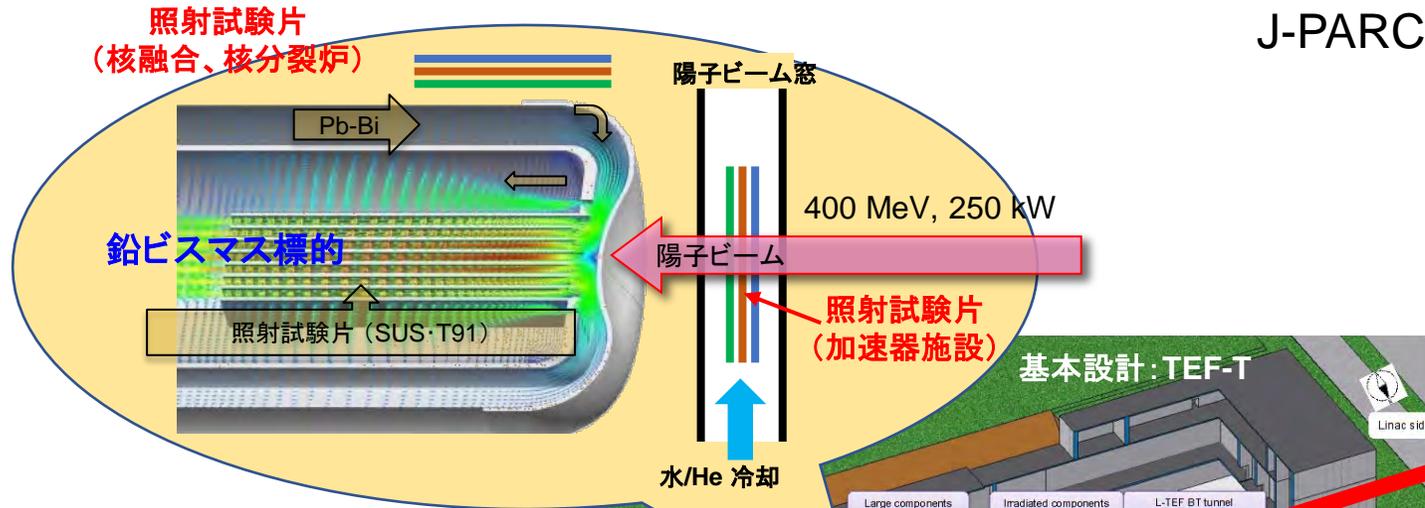


Figure 4: Locations of the CBLM RR inside the magnet yokes toward the inside of ring VC for NSLS-II.

J-PARC陽子ビーム照射施設(計画)



J-PARC



Linac のH⁺ ビーム
 400 MeV, 250 kW, 625 μ A, peak 50 mA
 Width 500 μ s, Rep. 25 Hz

- 一部の陽子ビームを切り分け
- 強度、パルス幅等を柔軟に変更可

1. 材料照射

- 高エネルギー加速器施設 (ADS含む)
- 核融合、核分裂炉

2. 半導体素子の中性子によるソフトエラー試験

J-PARC実験施設

3. RI 製造

4. 陽子ビーム利用

ホットラボ
 • 照射試料の照射後試験 (PIE)
 • RI 製造のための化学処理

PIE 試験片

LINAC upgrade
 25 Hz \rightarrow 50 Hz

直ぐそこにある加速器 LINAC

物質・生命科学実験施設

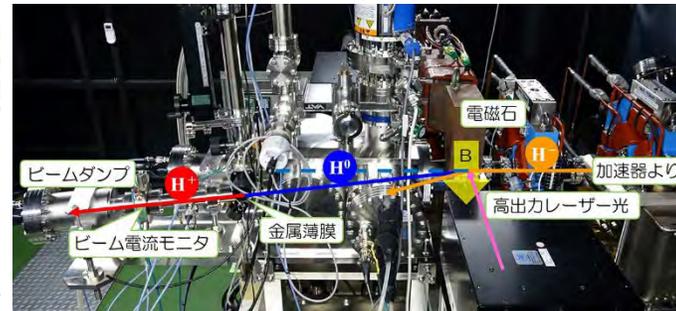
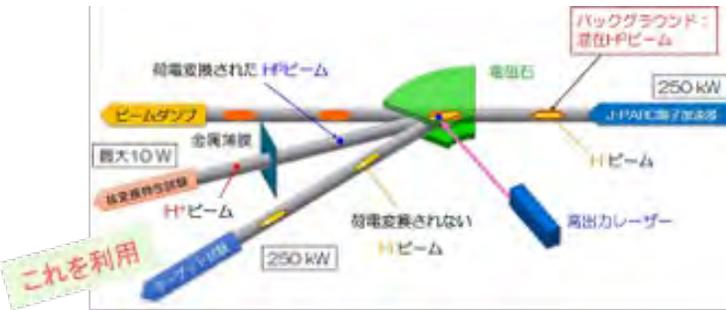
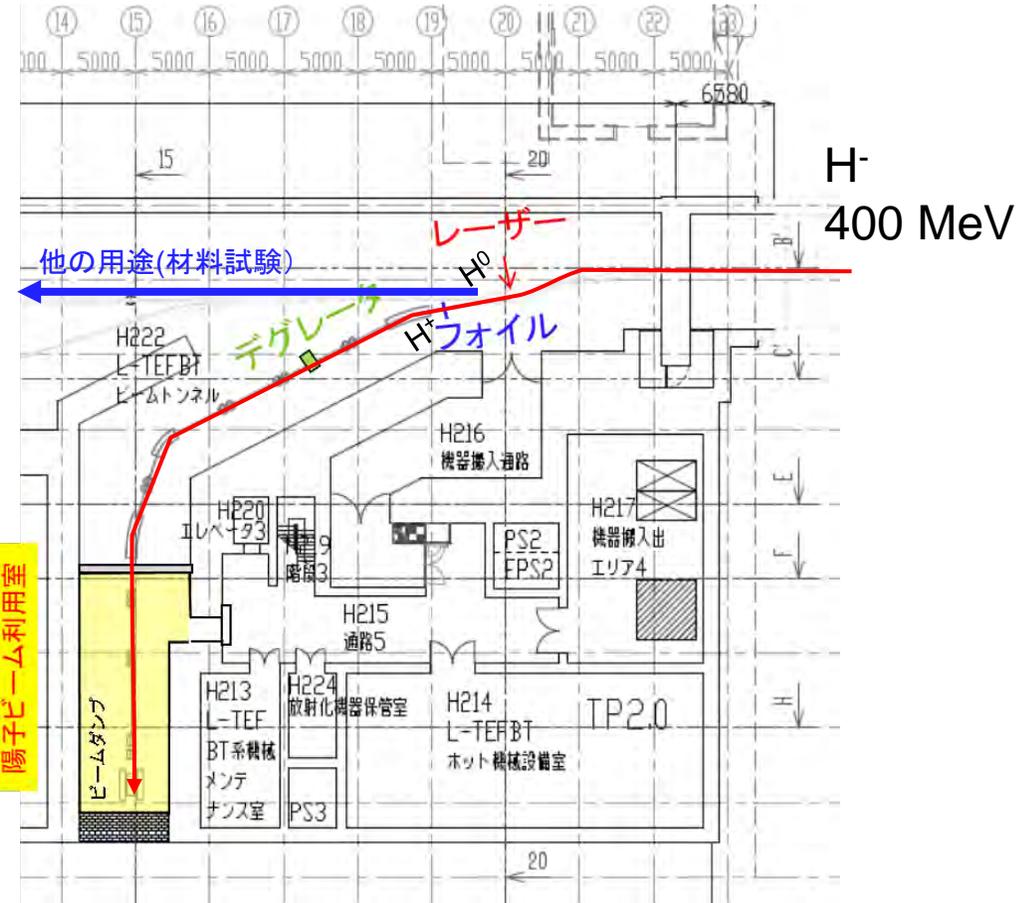
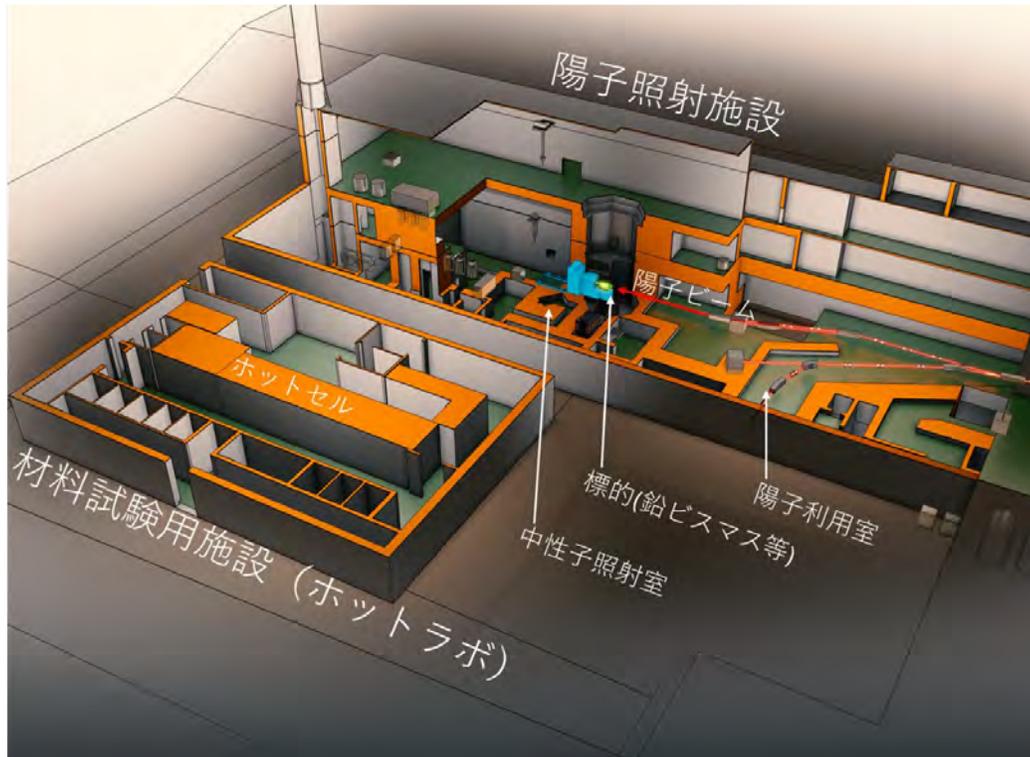
ニュートリノ実験施設

ハドロン実験施設

※大強度陽子加速器ビーム出力律速
 標的・ビーム窓の放射線損傷

- 宇宙用スペクトロメータの試験： ビーム窓の散乱陽子を利用した方法の高度化
 - 0.4 GeV陽子入射のAl(p,xp)反応の二重微分断面積(DDX)を取得し、計算モデルとの比較検討
 - 数GeV陽子入射スペクトルをチェレンコフ放射に基づく飛行時間で測定
 - JAXA・NICT 宇宙用スペクトロメータ試験を開始
- チェレンコフに基づくビームロスモニタの開発
 - 高エネルギー粒子の選択性を確認
- 今後の課題：
 - 中間子の寄与を差し引いた数GeV陽子のスペクトル測定およびDDXの導出

陽子ビーム照射施設



目的1
宇宙用半導体デバイスの試験
• 様々な陽子エネルギー供給に関する検討

- レーザー荷電変換(H⁺ -> H⁰) + 磁場中の分離によるビーム取出し
- 大気中での陽子照射試験