



ビーム窓の散乱を利用した数GeV 二次陽子利用法の開発

Development of secondary GeV protons utilization using scattering at beam window

(J-PARC/JAEA) 明午 伸一郎、山口 雄司
中野 敬太、杉原 健太

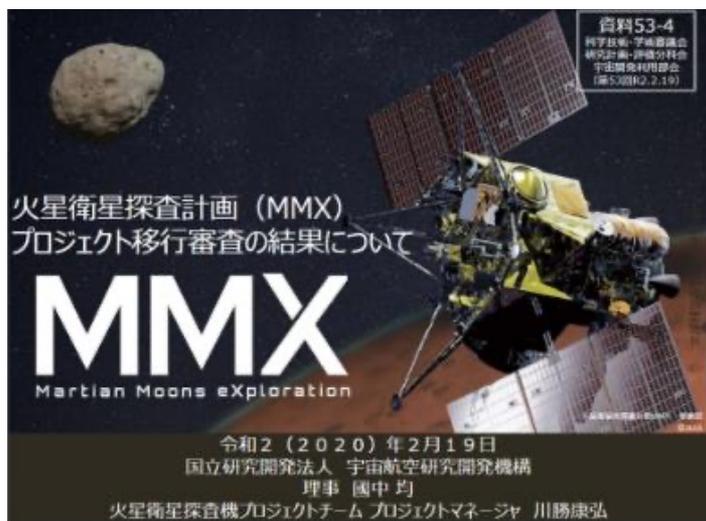
日本加速器学会年会 2022年10月20日

PASJ2022 THOB01, S. MEIGO

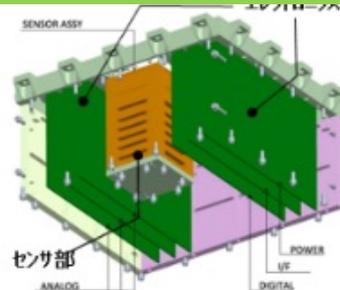
- はじめに
- 目的
- J-PARCにおける測定
 - 手法
 - 測定結果
 - PHITSとの比較
- 先行研究のAIの陽子ビーム入射の二重微分断面面積(DDX) とPHITSとの比較
- まとめ

JAXA: 火星衛星探査計画 **MMX** (MMX: Martian Moons Exploration) 打上げ 2024年、帰還 2029年

情報通信研究機構
CHARMS (Charging and Radiation Monitors for Space weather) 打上げ 2028年



Interplanetary
Radiation
Environment Monitor
(IREM) □20 mm



宇宙開発において陽子(特に太陽フレアで重要な数GeV領域)を用いたセンサー(スペクトロメータ)の地上における試験が必要となりJ-PARCに陽子利用の問い合わせがある。

- 国内で数GeV陽子を供給できる施設は、J-PARCが唯一となる
- 大強度陽子を取扱うため利用者への供給は困難(特に真空に対する問題がある)
- パイルアップの生じない低強度のビーム供給が必要
- J-PARCのビームダンプに設置した入射窓の散乱による陽子利用を考案
- 散乱陽子は核反応モデル検証のために重要な実験データとなる。

目的: 宇宙開発の要求や大強度陽子加速器施設の核反応モデルの高度化に資するため、ビームダンプの窓から散乱する陽子スペクトルの特性を評価する。



散乱陽子利用法

- 衛星搭載センサーをビーム進行方向に対し前方に設置
- アルミ窓のAl(p,xp)反応による準単色スペクトルの陽子利用可能
- センサーに入射する陽子の強度は一次ビームに比べ ($\sim 10^{-9}$ 倍)低くなり、パイルアップを防止可能
- 大気中設置となり測定自由度が高い

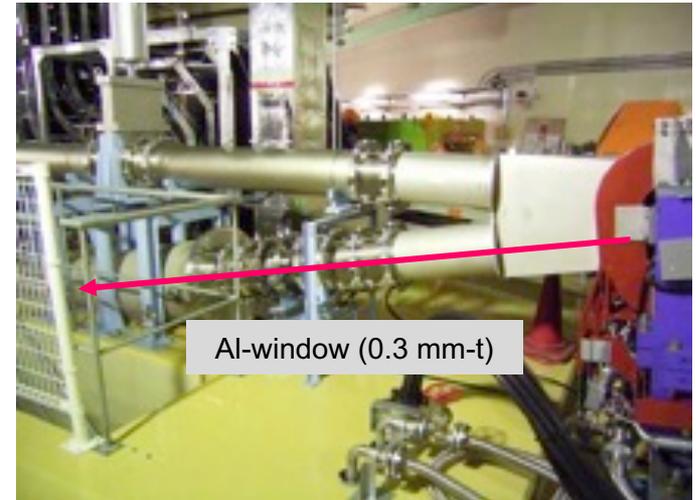
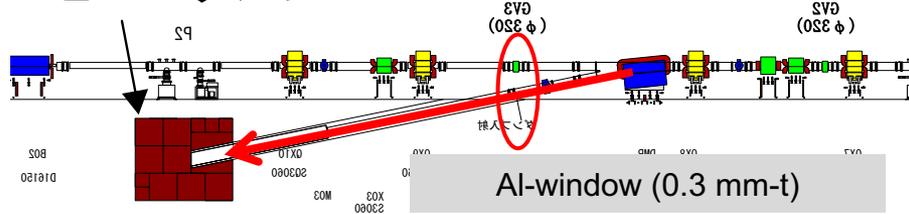
パイルアップ防止

計数率 $\ll 1$ カウント/ショット

至 MLF

3GeVシンクロトロン (RCS)

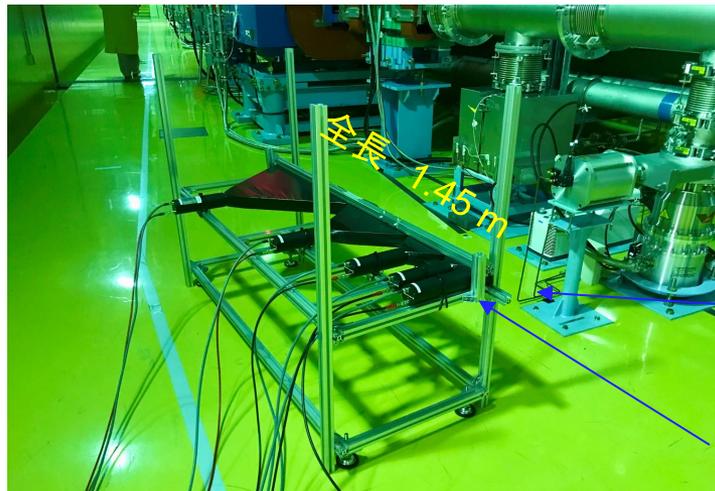
ビームダンプ



- 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°)の位置に設置
- エネルギースペクトルをカロリメトリックに測定(デジタイザStruct SIS3316に入力)
- パイルアップ防止のため、通常運転より~7桁低いビーム強度 ($\sim 10^7$ 個/shot)を使用

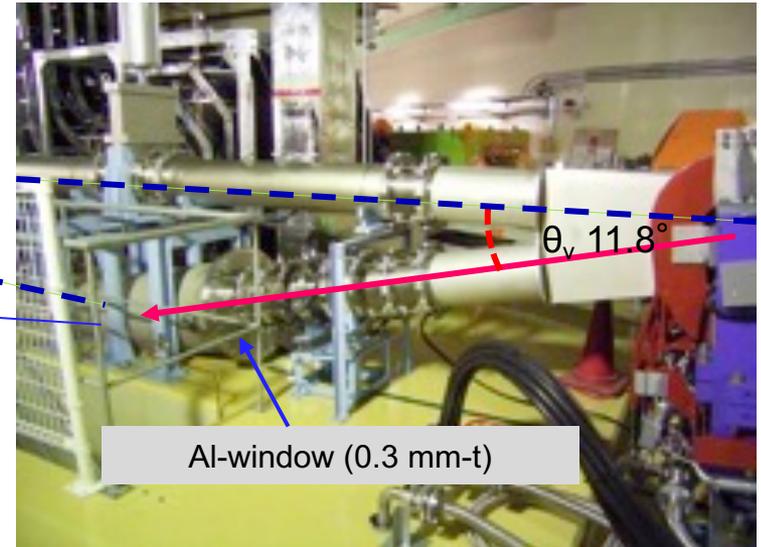
Plastic scintillators $\square 50$ mm

3NBT ビームダンプ



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

14 m $\theta_h 5.6^\circ$
合計 $\theta = 13^\circ$



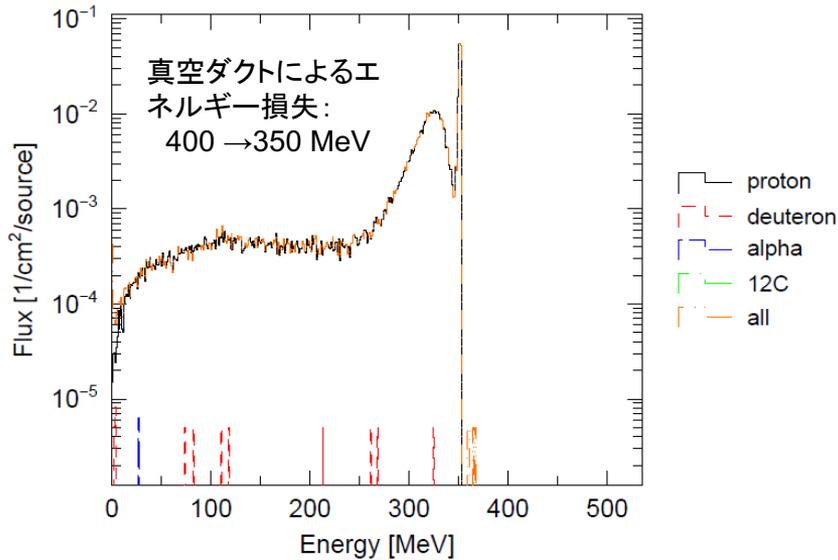
	厚さ [mm]	停止陽子エネルギー [MeV]	測定可能な散乱陽子エネルギー [MeV]
dE1	50	22	123
dE2	100	149	220
dE3	200	240	297
dE4	400	383	428
E5	700	597	636

- 中性子源施設(MLF)の停止期間中に実施
- 利用運転期間中は高感度ビームロスモニタとして使用

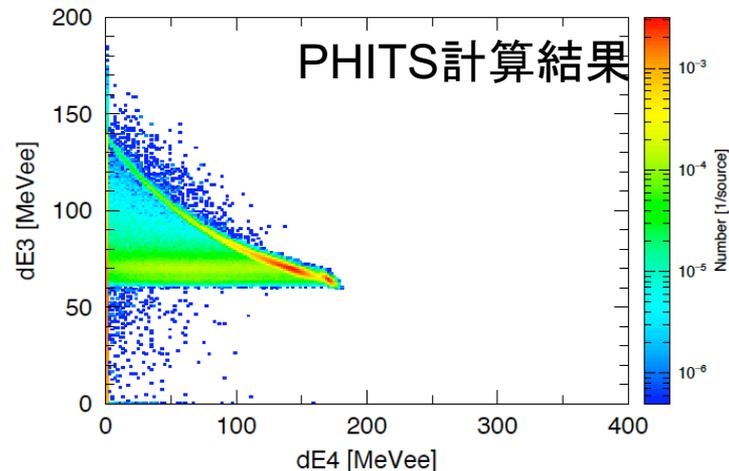
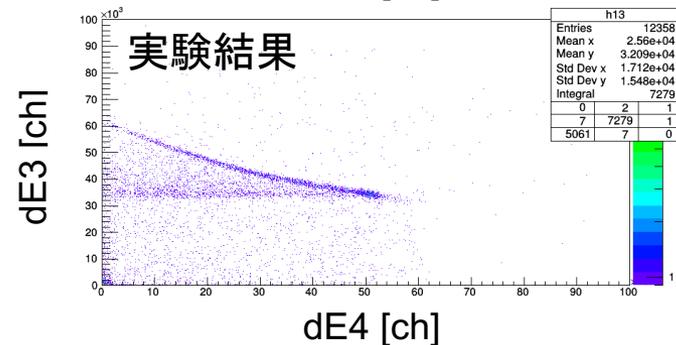
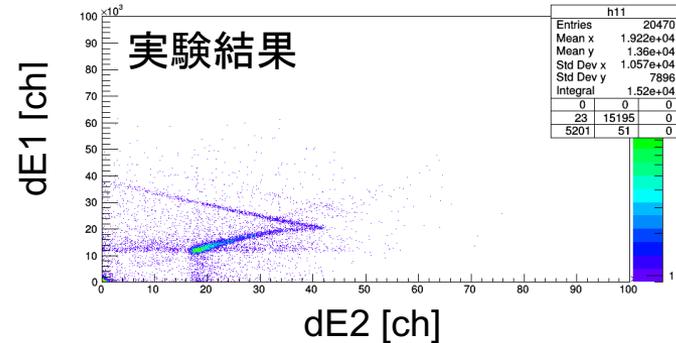
スペクトルの測定結果

dE1-4において検出時間差<10 nsを検出事象としてデータ処理

真空ダクト外における陽子スペクトル
PHITS(INCL-4.6/GEM)による計算



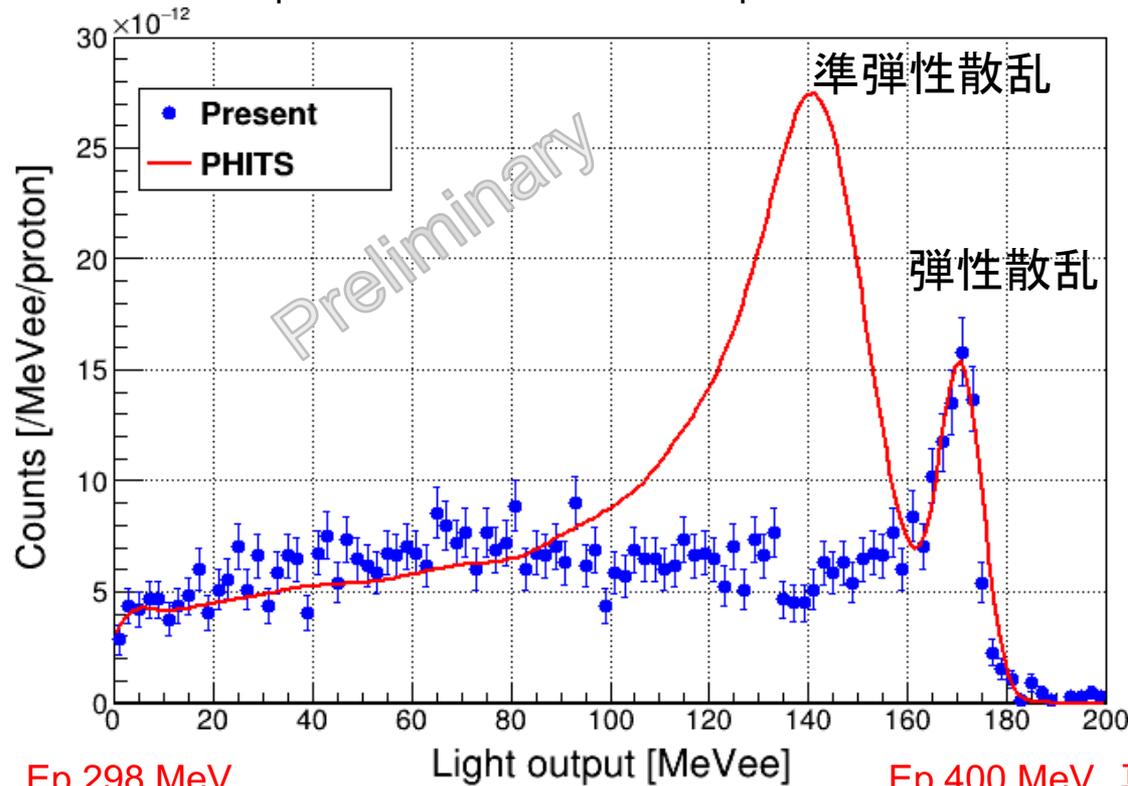
- 陽子ビーム400 MeVを用いる場合、検出器に入射する弾性散乱によるピークエネルギー350 MeV
- 中間子(π および μ など)のエネルギーは十分低く ($E < 200$ MeV)、ピーク部付近のエネルギー利用では問題にならない



0.4 GeV陽子を用いた測定結果:

- Al窓の入射から検出までをシンチレータの発光量としてPHITS(INCL-4.6/GEM)により計算 (MeVee:1 MeV電子相当発光量)
- 実験値の弾性散乱の発光量を計算ピーク位置に規格化
- PHITSの計算は実験の弾性散乱ピーク分解能(~2%)でスミア
- 縦軸はビーム窓への入射陽子1個あたりに規格化し比較

Spectrum of detector #4 for Ep 0.4 GeV



弾性散乱部の
ピーク効率=~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)

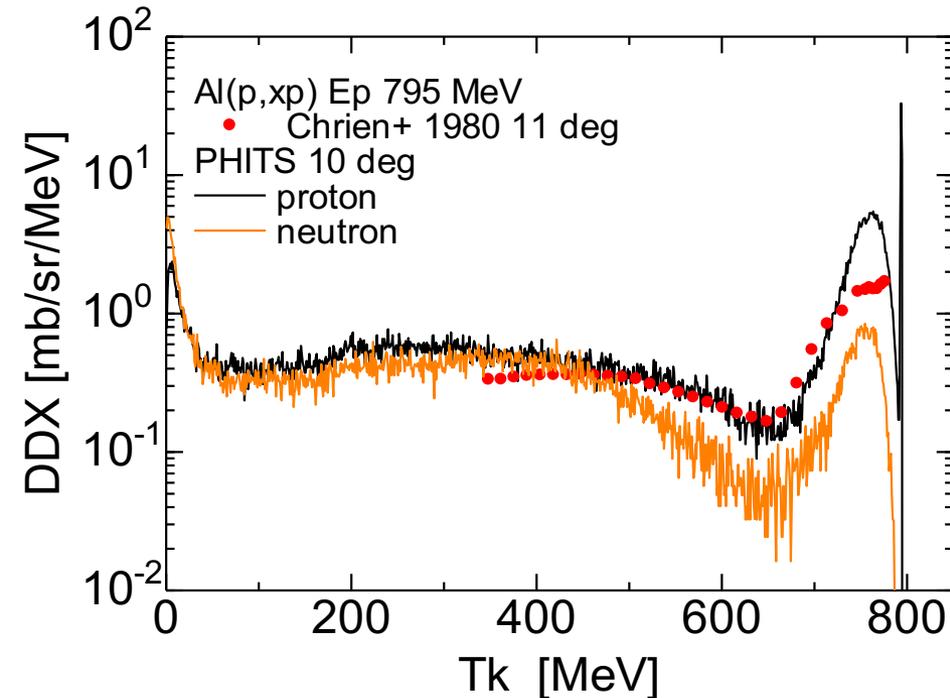
※将来の解析
(dE1-3)により
Ep>124 MeV
のスペクトル導
出は可能

Ep 298 MeV

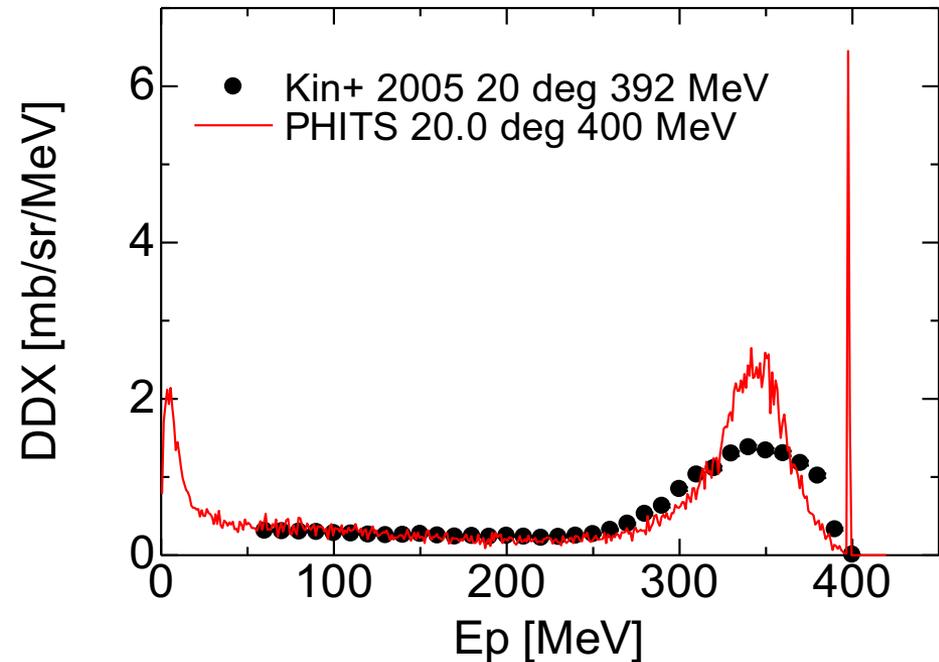
Light output [MeVee]

Ep 400 MeV 真空中の陽子エネルギー

準弾性散乱の計算の過大評価の理解のため、Alに陽子を入射する際に陽子を放出するAl(p,xp)反応の二重微分断面積(DDX: double differential cross section)における、先行研究とPHITSの計算結果との比較を示す。



R.E. Chrien, et. al., Phys. Rev. C 21, 1014 (1980)



T. Kin, et. al., Phys. Rev. C 72, 014606 (2005)

PHITS(INCL-4.6): 準弾性散乱を2~3倍程度 過大評価
→ **本実験結果と同様な傾向を示す。**

* 将来の解析により本実験結果より断面積を導出する予定

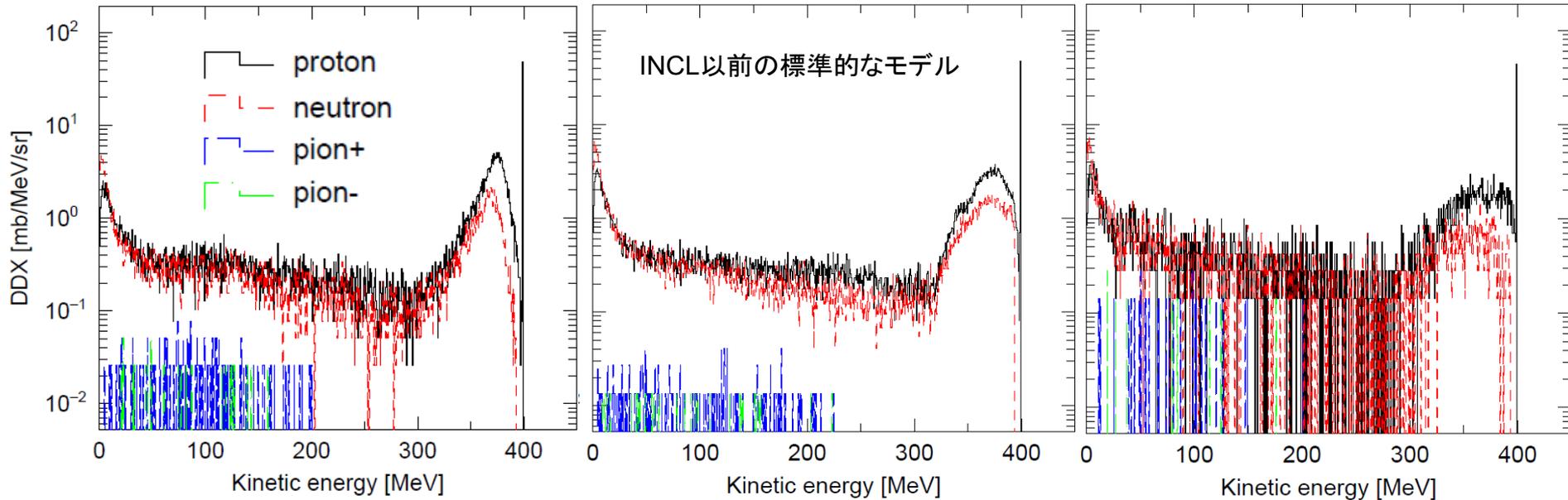
INCL-4.6, Bertini, JQMDモデルによるDDXの比較

QMD:
量子論的運動力学

INCL-4.6

Bertini

JQMD



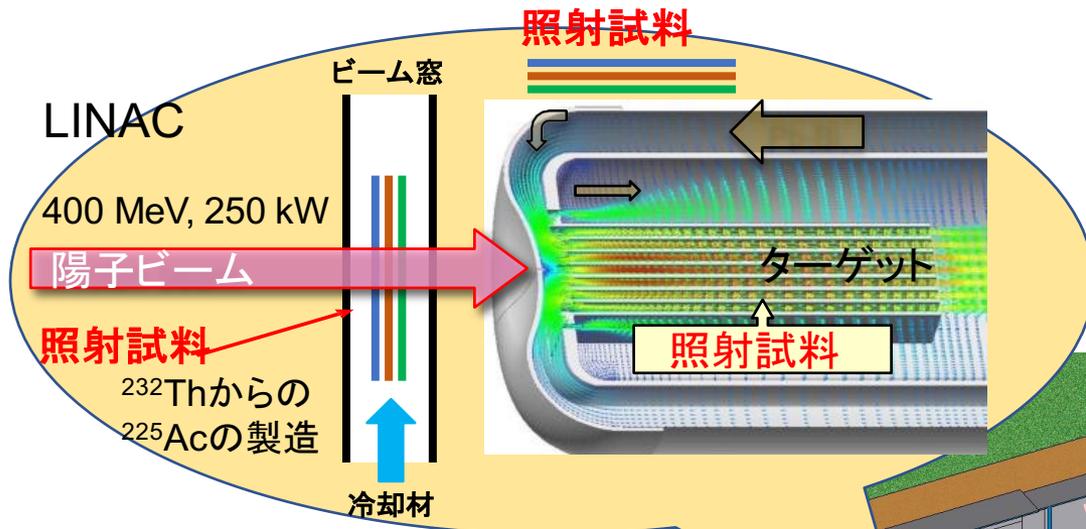
カスケードモデル： 原子核反応の入口(核子をパチンコ玉のように近似し計算を行う)

INCL-4.6は準弾性散乱を鋭く高いピークを与える。

準弾性散乱断面積のピーク:

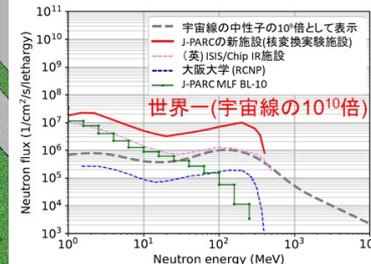
INCL-4.6 > Bertini > JQMD(実験を再現しよう)

多目的利用に向けた新施設建設



核変換実験施設
ADSターゲット試験施設
(TEF-T)の設計技術を踏襲

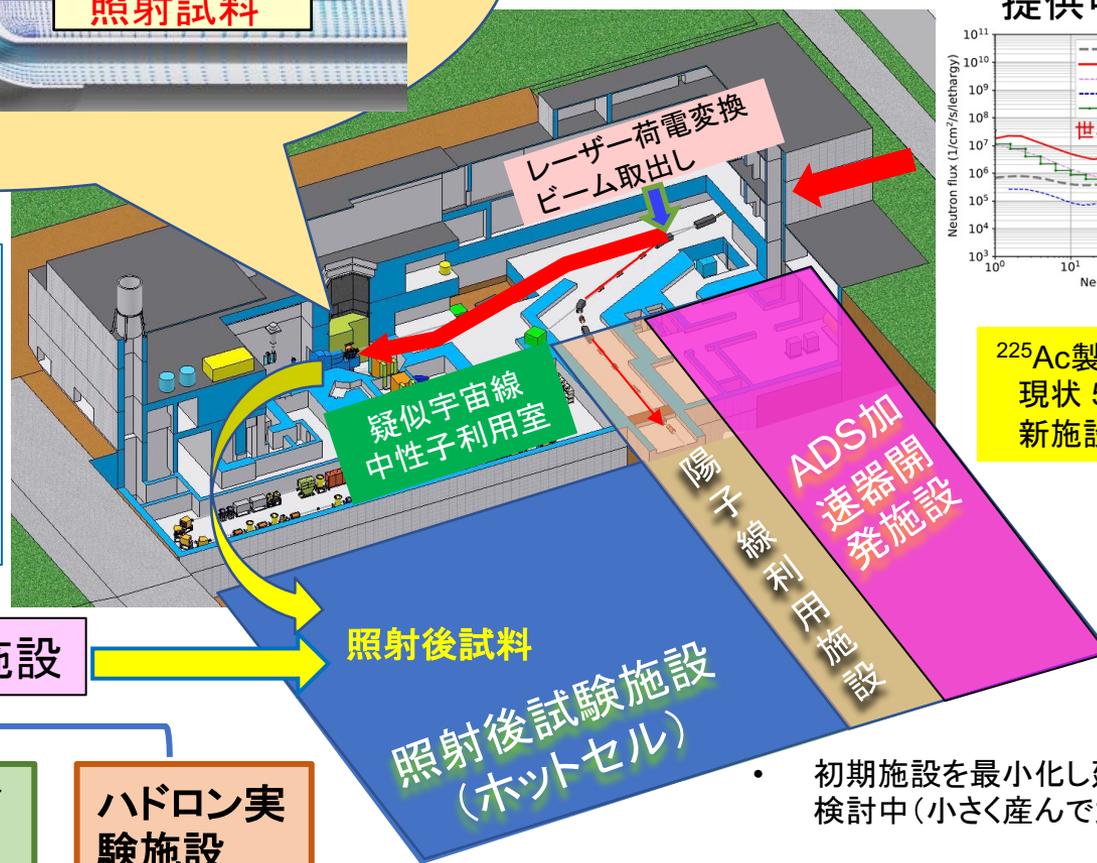
提供中性子場



225Ac製造量
現状 5.5 GBq/年
新施設 ~1 TBq/年

多目的利用

1. 標的構造材の中性子・陽子照射および照射後試験(PIE)
2. 半導体・ソフテラー用疑似宇宙線中性子利用
3. 革新的医療RI創製(225Acなど)
4. 宇宙開発のための陽子線利用



J-PARC実験施設

照射後試料

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

- 初期施設を最小化し建設費最小化も検討中(小さく産んで大きく育てる)

- 宇宙開発利用のために、J-PARCのビームダンプ入射窓による散乱陽子用いた提供手法を考案し、実験的に検証した。
- 実験によるスペクトルは準単色陽子となり、PHITSとの比較により、ほぼ予想通りのスペクトル分布・強度となることを確認した。
- PHITS INCL-4.6の計算との詳細検討：
 - 準弾性散乱の断面積を過大評価
 - 先行実験との比較でも同様な傾向を示す
- ビーム窓の散乱陽子による宇宙開発利用は可能と考えられる。
- 今後の課題：
 - $Al(p, xp)$ 反応断面積を導出
 - 0.4 – 3 GeV陽子のスペクトル測定（高エネルギーに対してはチェレンコフカウンターが有効）