

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

Courtesy : JAXA



(J-PARC/JAEA) 明午 伸一郎、山口 雄司、岩元 大樹

- 背景
- J-PARCにおける測定
 - 測定手法
 - 測定結果
- 考察
 - $Al(p, xp)$ 反応二重微分断面積(DDX)
 - 原子核反応モデル(核内カスケード)との比較
- まとめ

情報通信研究機構: NICT

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

ひまわり搭載予定: 打上げ2028年



JAXA: GATEWAY

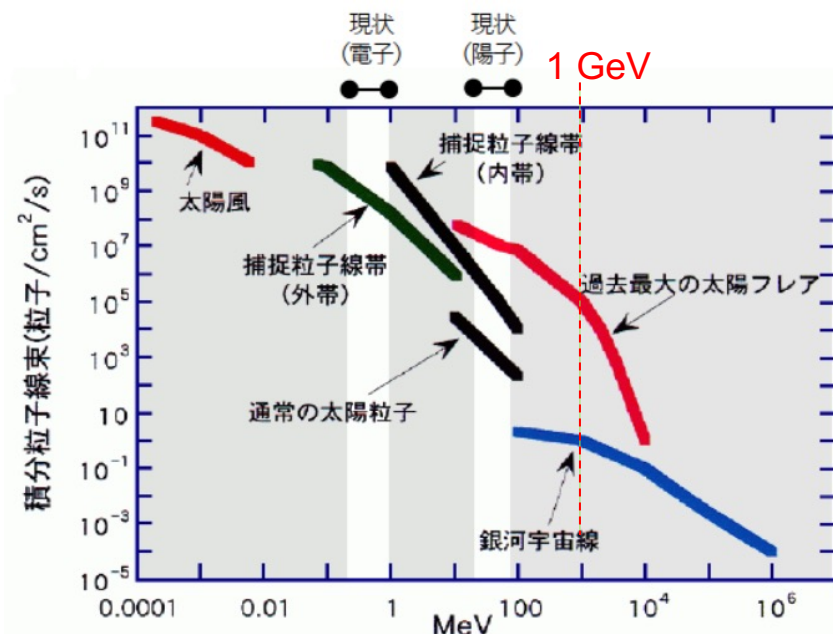


図 宇宙放射線のエネルギースペクトル

※ 総務省「ひまわりの高機能化研究技術開発」基本計画書

核データおよび核内カスケードモデルの検証のため陽子が原子核に入射し陽子を放出する(p, xp)反応の二重微分断面積(DDX)実験データは必要(幾つかの実験データはあるが決して十分ではない)

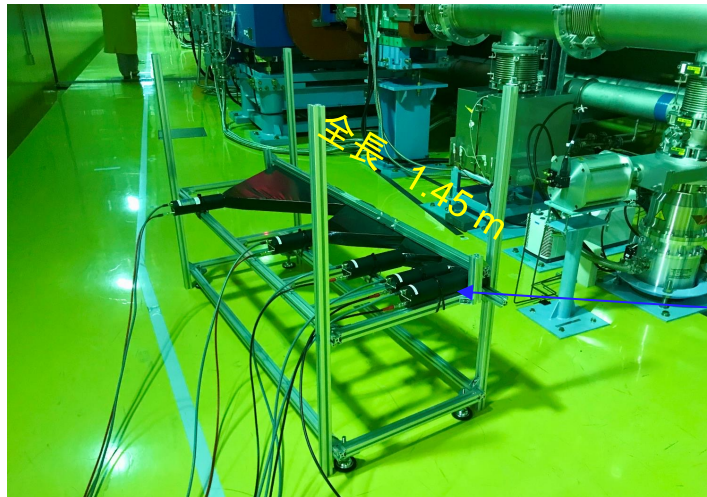
宇宙開発において陽子(特に数GeV付近)を用いたセンサー(荷電粒子スペクトロメータ)の地上における試験が必要

- 数GeV陽子を供給できる施設は国内でJ-PARCのみとなるが、大強度陽子を取扱うため、利用者への陽子供給は困難
- パルス計数のために、パイルアップを生じない低いビーム強度の供給が必要
⇒ 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開発(本年3月より利用開始)

本研究:
核計算モデルの検証・向上のため400 MeV陽子入射のAl(p, xp)反応による陽子スペクトルおよびDDXを測定する。

- 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

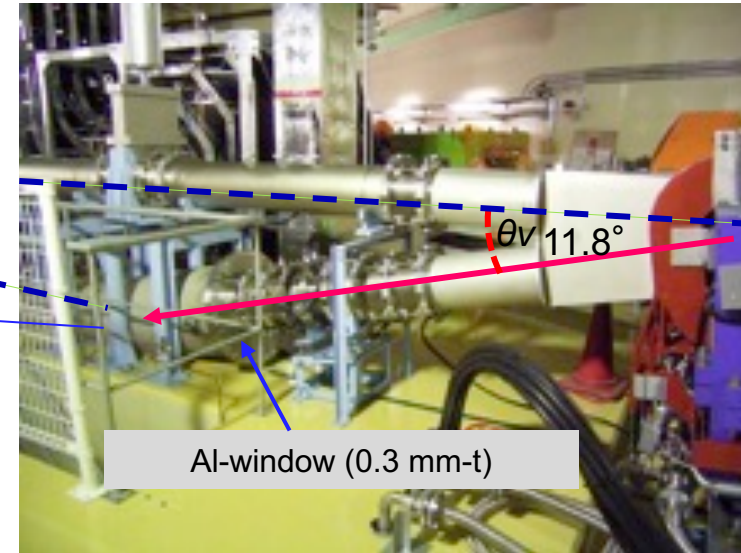
Plastic scintillators $\square 50$ mm



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

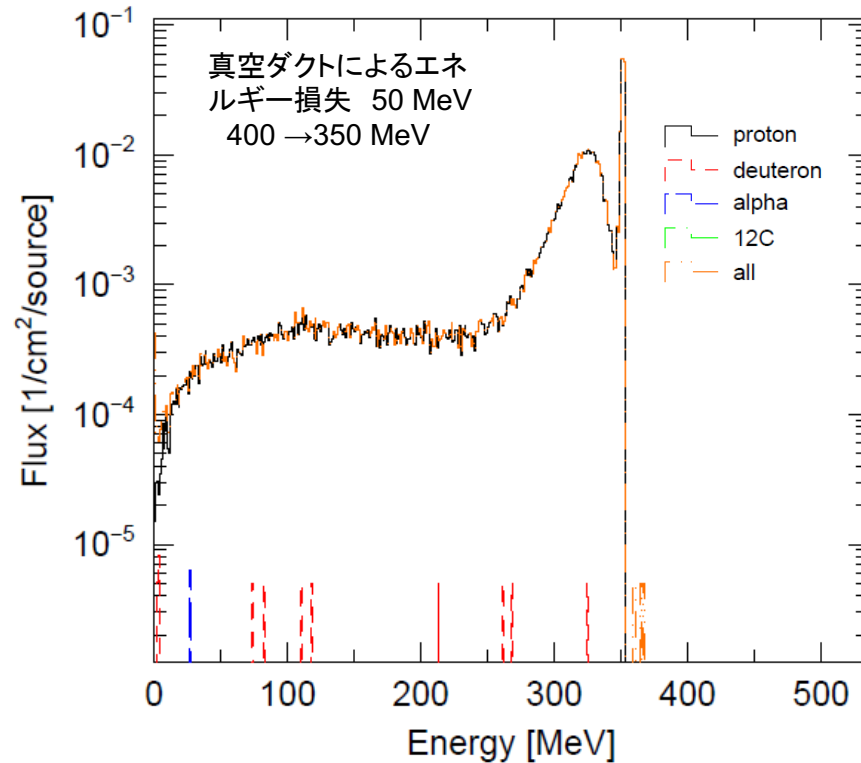
3NBT ビームダンプ



| | 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 |

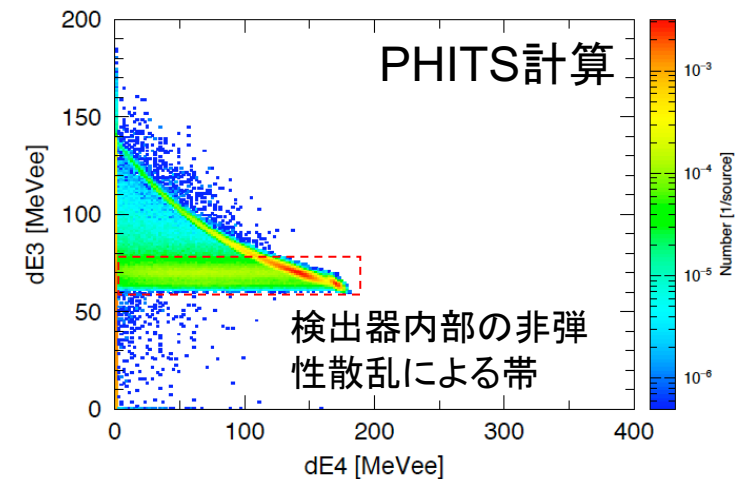
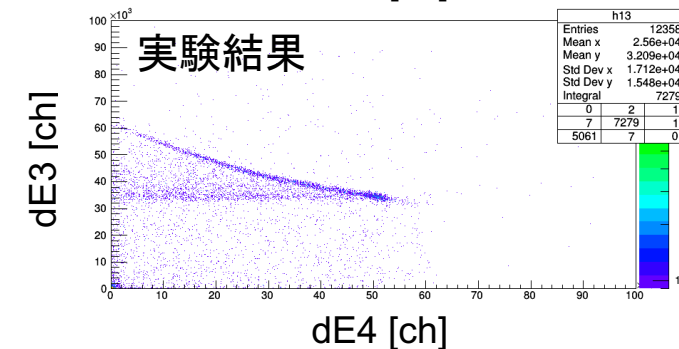
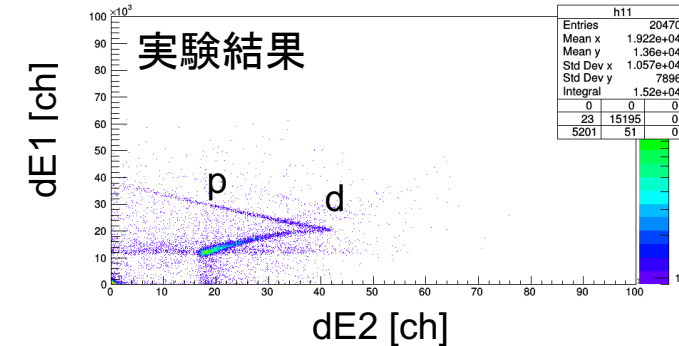
- 中性子源(MLF)の停止期間中に実験を実施
- 利用運転期間中は高感度ビームロスモニタとして使用

真空ダクト外の陽子スペクトル
PHITS(INCL-4.6/GEM)による計算



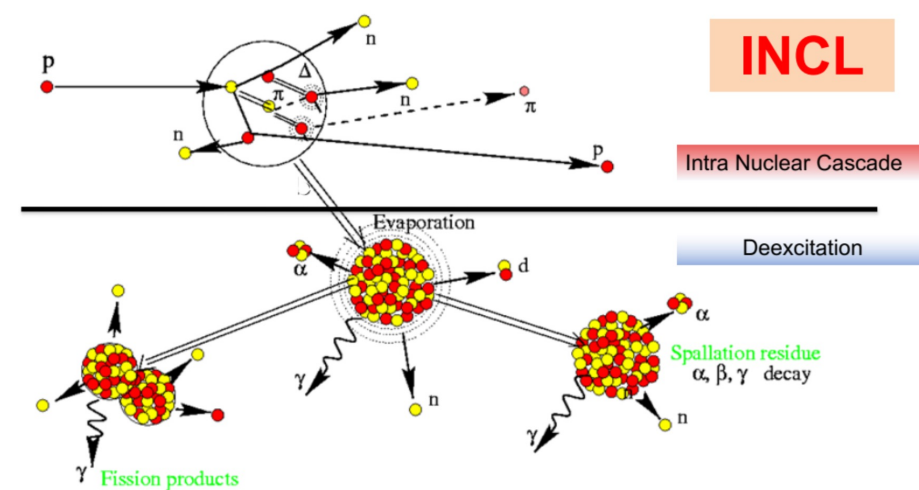
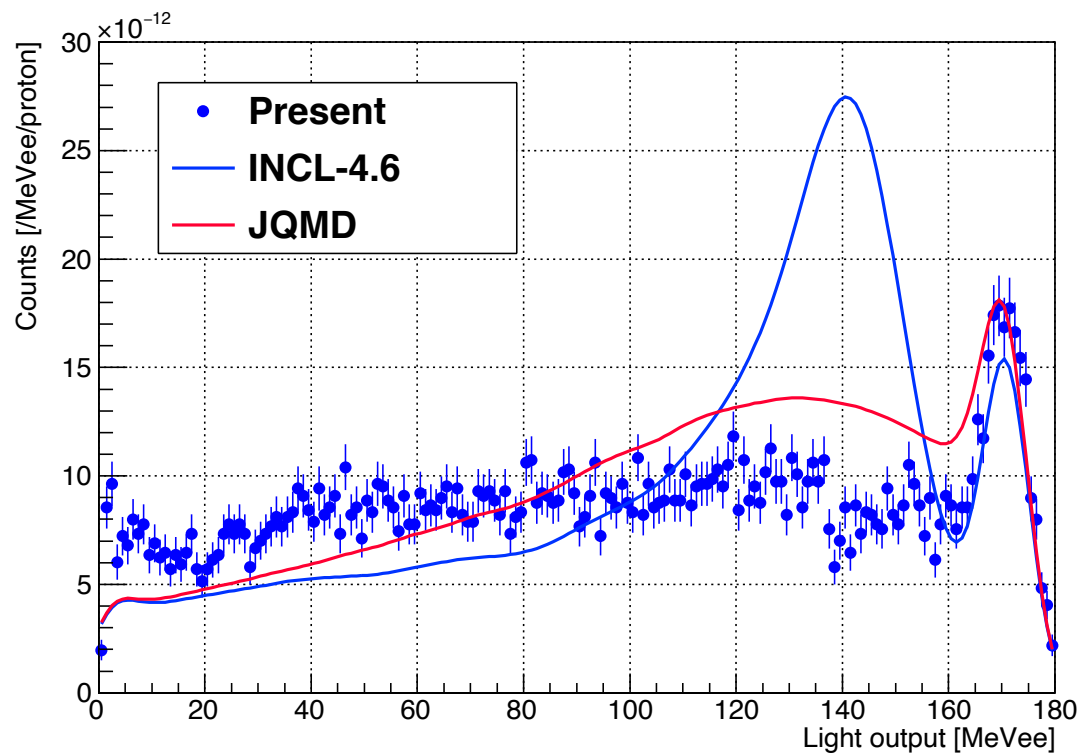
- 陽子ビーム400 MeVを用いる場合、検出器に入射する弾性散乱のピークエネルギー350 MeV
- 中間子(π , μ)のエネルギーは十分低く ($E < 200$ MeV), ピーク付近には影響を与えない
- Al(p,xp)の二重微分断面積(DDX)を陽子源として検出器の応答を計算(INCL-4.6/GEM)

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



0.4 GeV陽子を用いた測定結果:

- Al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
 - 2) JQMD(量子論的分子動力学) + GEM



弾性散乱部検出効率
~35%

弾性散乱断面積:

PHITS 24.2 mb/sr

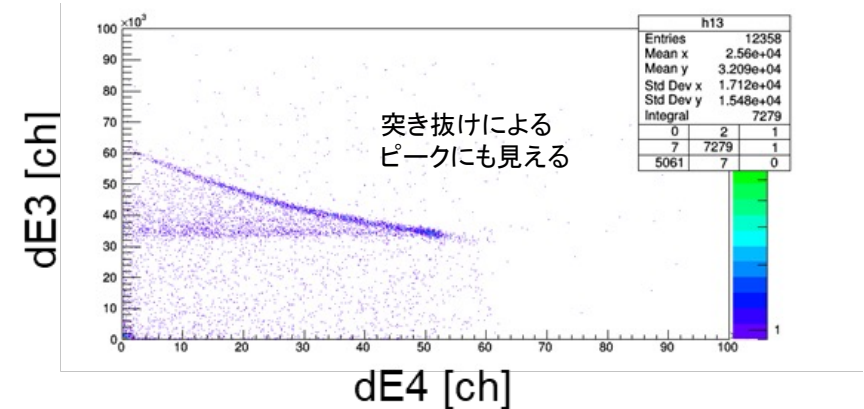
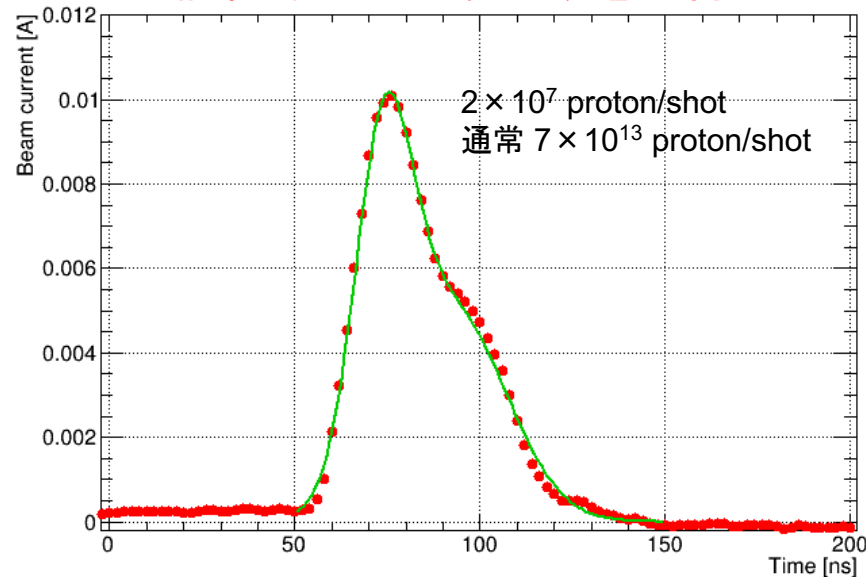
実験値*1 27.2±0.9 mb/sr

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

以下のことが懸念されたため別途試験を実施

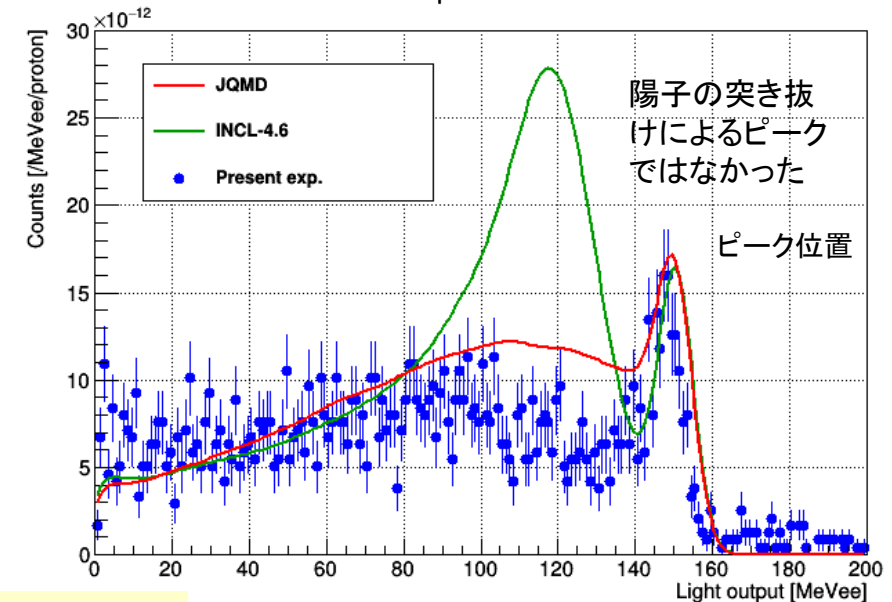
- 入射陽子強度:
ビーム強度モニターのノイズが大きく強度の不確定性が高い
→ **プリアンプ導入・平均化**により**信頼**うるビーム強度を取得
- 弾性散乱部付近の信号飽和や検出器の突き抜けが考えられる
検出器前部の**ステンレス板(10 mm-t)**の**設置**による応答測定
→ 信号の飽和と陽子が突き抜けていないことを確認

パルス毎に平均化し、プリアンプで増幅した陽子ビーム強度信号
→ **信頼**ある入射陽子数を取得



ステンレス板(SS) 10 mmを設置した際の比較
予想通りのピーク位置の振舞い

→ **信号の飽和と陽子の突き抜けは無く、ピークを正しく計測**



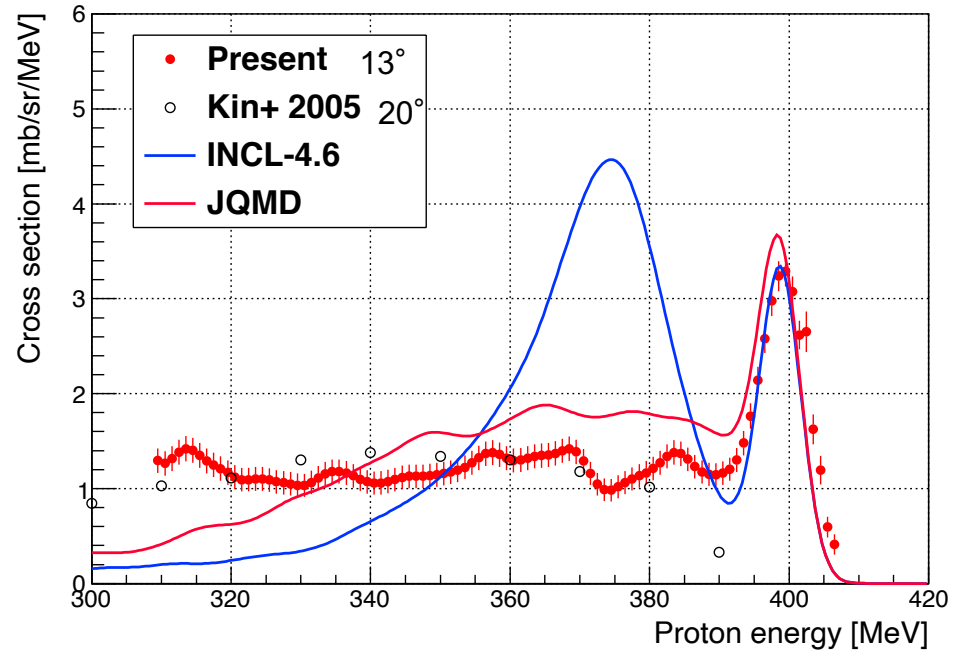
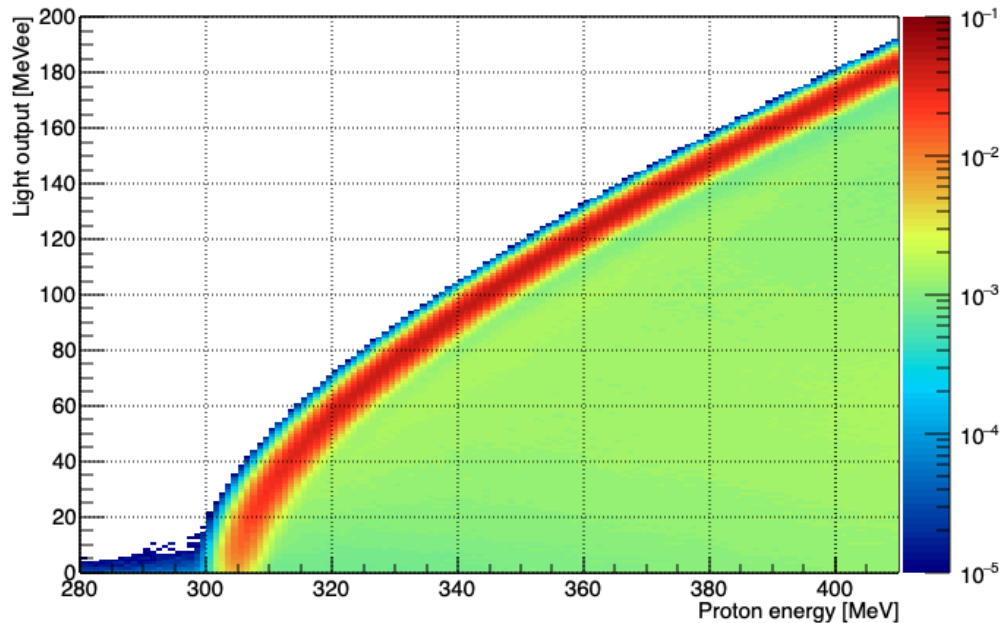
実験に問題ないことを確認

断面積(DDX)の導出

- 核計算モデルや他の実験データと比較検討のためAl(p,xp)反応の二重微分断面積(DDX)を導出した。
- シンチレーション光による測定結果は、エネルギー損失過程や陽子の非弾性散乱による減衰を考慮する必要があるためDDXと一意的でない
→ デコンボリューション(アンフォールディング)によりDDXを導出した。
- 応答関数行列: PHITSによる計算
- アンフォールディング: RooUnfoldを用いベイズ推定法に基づき解となるDDXを導出した。

$M = RS$, M: 測定値, R: 応答関数行列, S: DDX

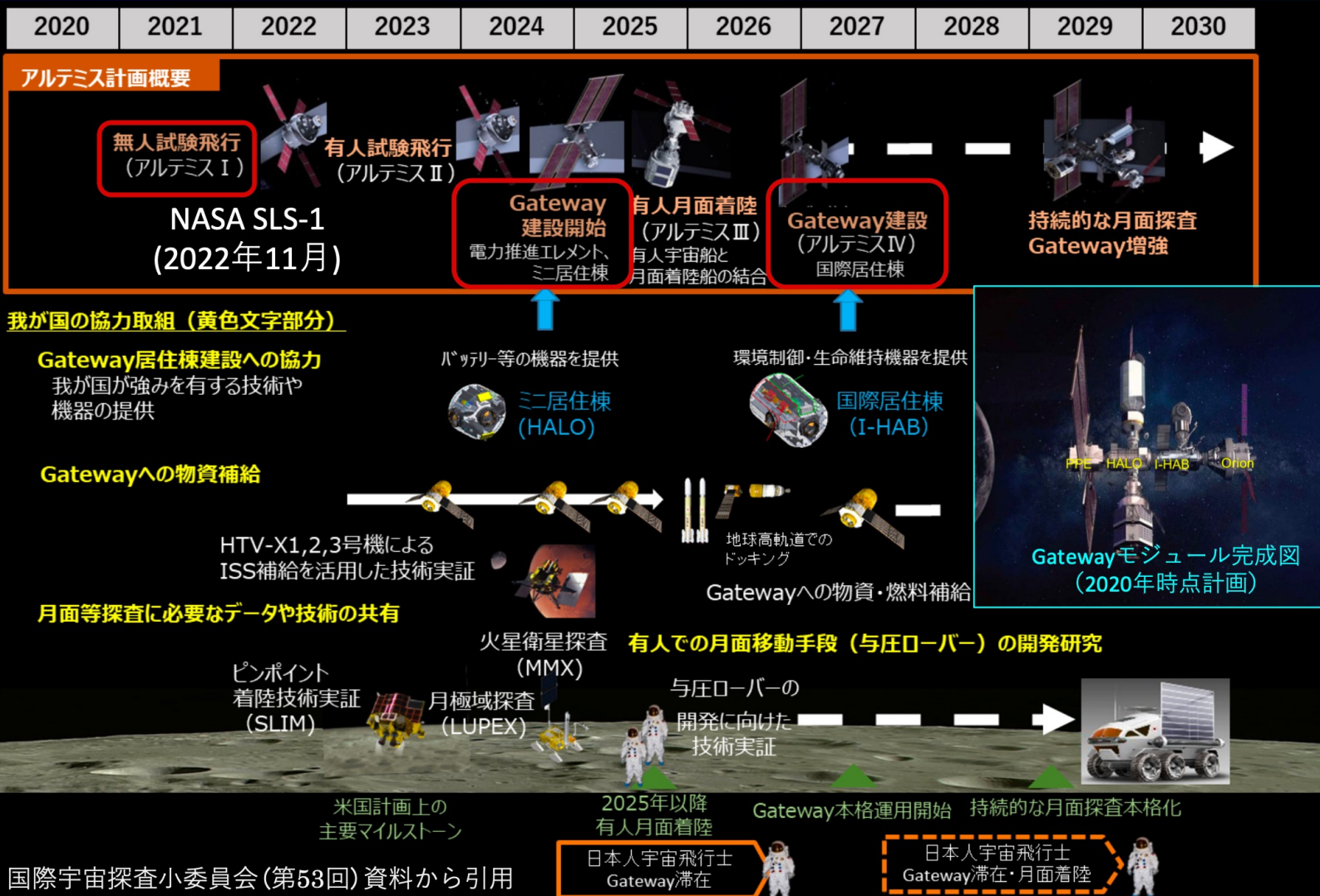
PHITSによる応答関数行列(計算)



- 実験はJQMDの結果を支持する
- 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°

JAXAおよびNICTとの共同研究

(参考) 国際宇宙探査「アルテミス計画」関連の我が国の協力取組

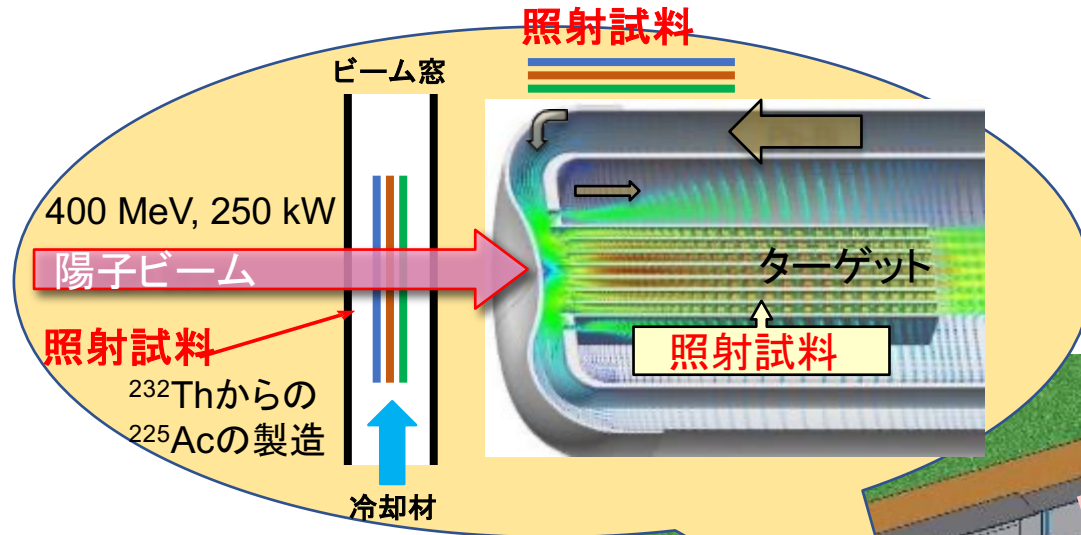


JAXA&NICTと共同研究契約を結び、本年3月より陽子を用いた試験を開始した



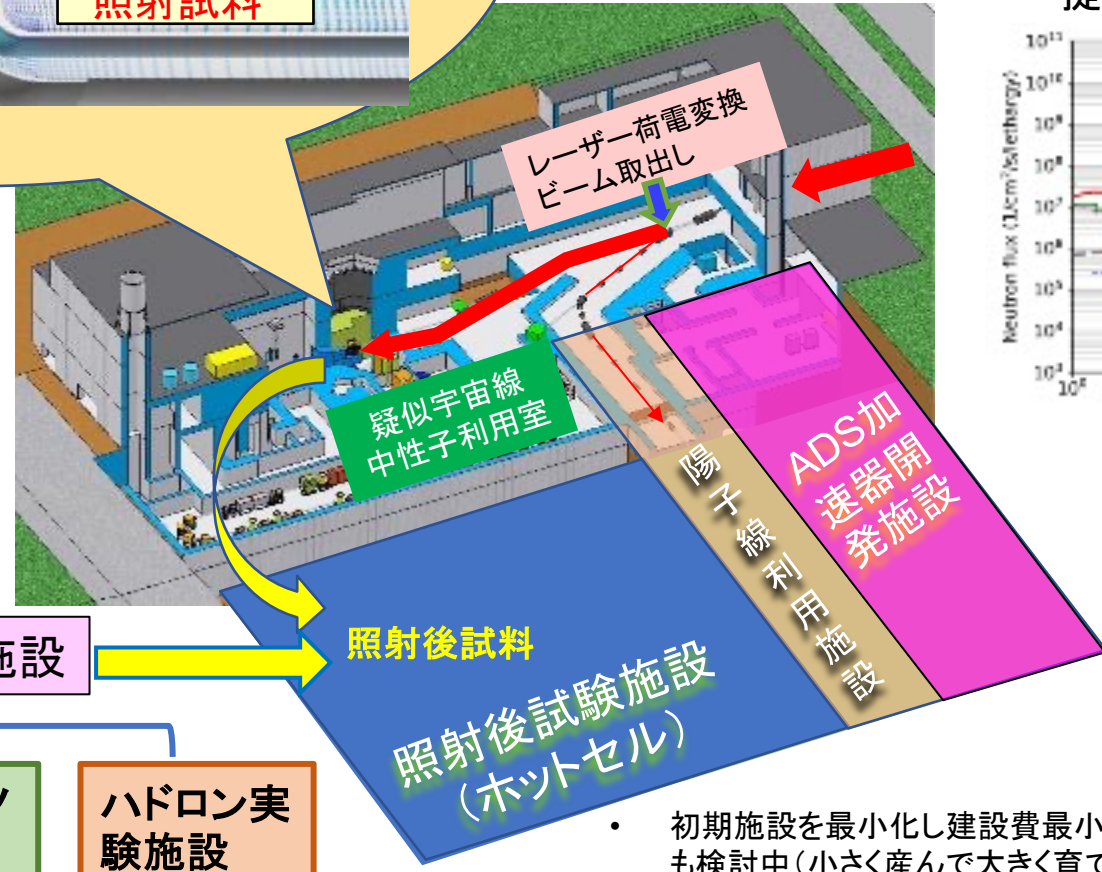
2024年にGateway建設開始:
JAXAのスペクトロメータ開発は急務!

J-PARC陽子照射施設(計画)

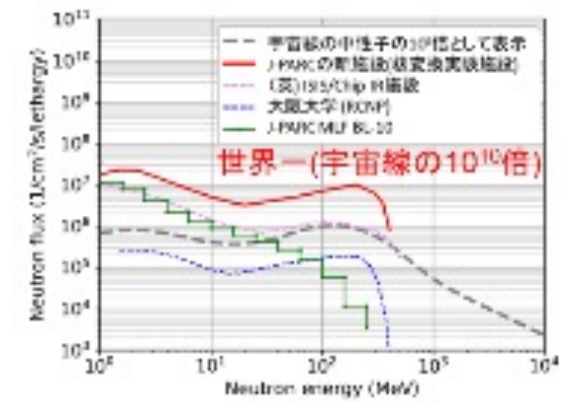


核変換実験施設
 ADSターゲット試験施設(TEF-T)
 の設計技術を踏襲
 ※Thの使用許可取得予定
 (少量核燃料使用施設)

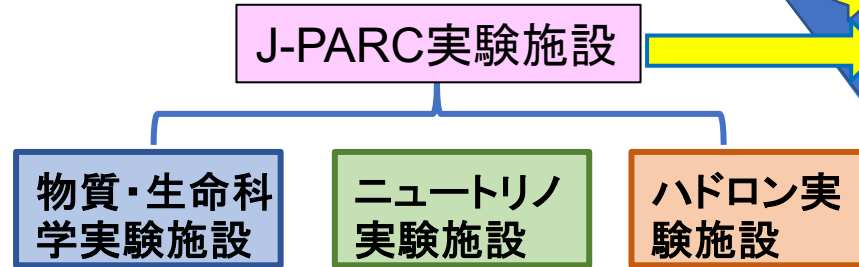
- 多目的利用
1. 材料照射試験 中性子・陽子照射および照射後試験(PIE)
 2. 半導体・ソフトウェア用疑似宇宙線中性子利用
 3. 革新的医療RI創製(²²⁵Acなど)
 4. 宇宙開発のための陽子線利用



提供中性子場



ユーザーコミュニティを設立
 ※ユーザー募集中



初期施設を最小化し建設費最小化とすることも検討中(小さく産んで大きく育てる)

- 0.4 GeV陽子のビーム窓(AI)における散乱陽子を用いて、陽子スペクトル測定し、アンフォールディングにより二重微分断面積(DDX)を導出し計算モデルとの比較検討
- 利用者に提供する陽子スペクトルは単色性の強いものとなった。
- 他の実験との比較
 - RCNPにおける測定結果とほぼ良い一致
- 計算との比較
 - 準弾性散乱をINCL-4.6は3倍程度過大評価するのに対し、JQMDは比較的良い一致
- 今後の課題：
 - 低エネルギー一部のDDX導出および高い入射陽子エネルギーに対する検討、他の角度のAI標的核の測定
- 本年3月よりJAXA・NICTの試験を開始した。