

宇宙開発機器のためのJ-PARCにおける陽子ビーム

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 2024年7月31 山形テラス

- 宇宙用半導体デバイス試験のための施設
 - 陽子ビーム照射施設計画
 - 陽子供給法の検討

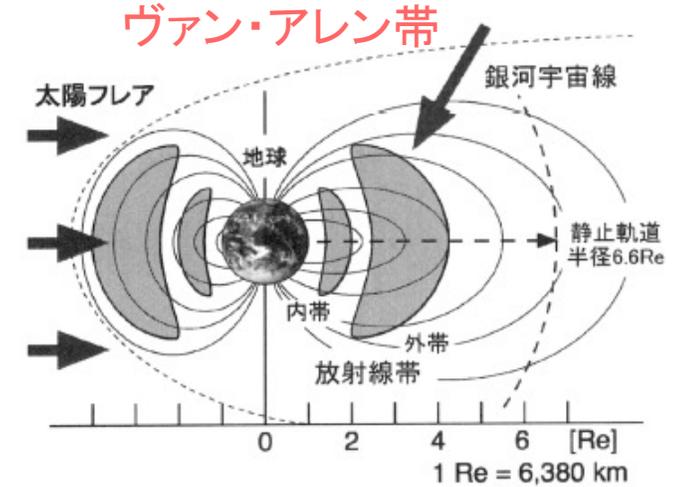
- 宇宙での荷電粒子スペクトロメータの試験
 - ビーム窓の散乱を利用した試験
 - 測定結果と考察

- まとめ

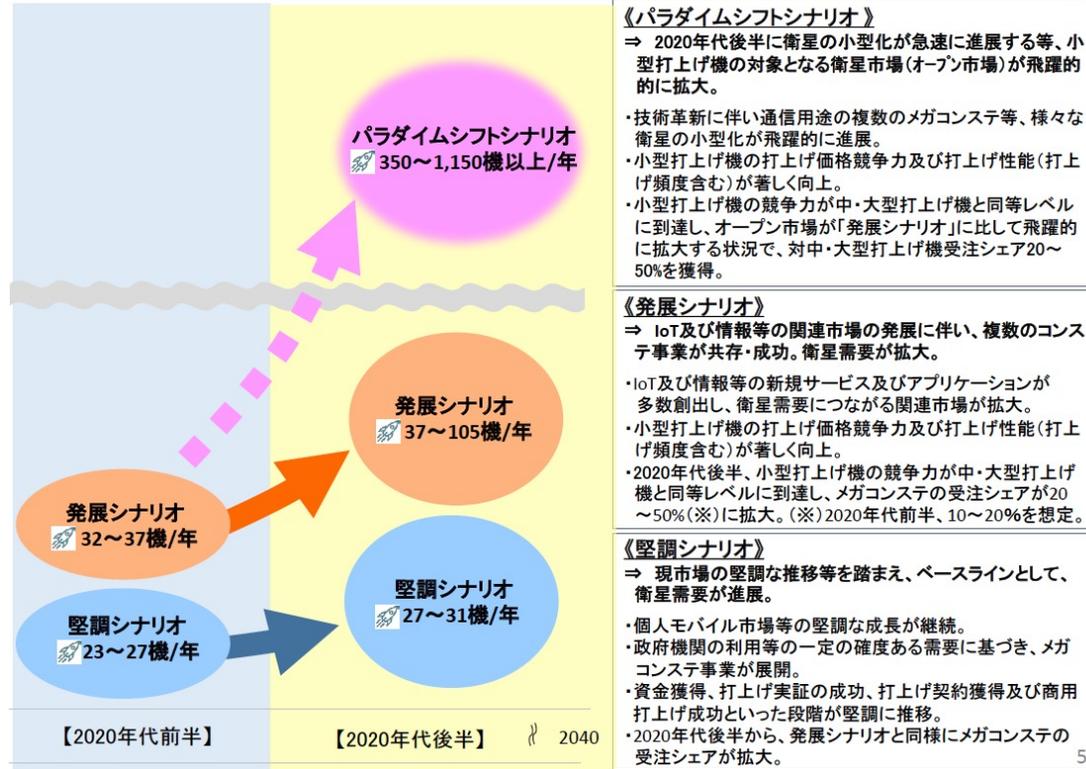
宇宙用半導体デバイス試験の需要

- 宇宙衛星の需要は急激に高まる
- シングルイベント効果(Single Event Effect : SEE)の発生は致命的になるため**地上試験**が重要

- 最大フラックス粒子: **陽子**
- 通信衛星の打上げ活発
- 放射線の影響が少ない低軌道 (< 0.3 Re)
民生品(COTS品)活用



小型打上げ機の需要予測概要



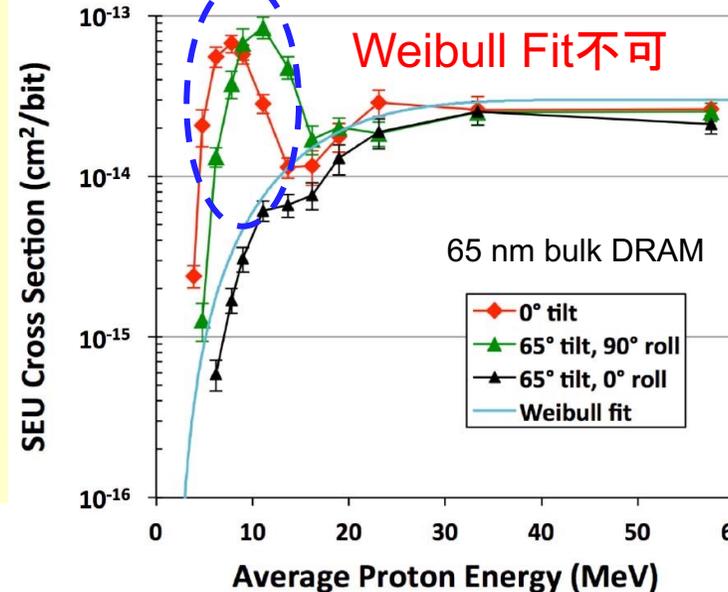
《パラダイムシフトシナリオ》
⇒ 2020年代後半に衛星の小型化が急速に進展する等、小型打上げ機の対象となる衛星市場(オープン市場)が飛躍的に拡大。
・技術革新に伴い通信用途の複数のメガコンステ等、様々な衛星の小型化が飛躍的に進展。
・小型打上げ機の打上げ価格競争力及び打上げ性能(打上げ頻度含む)が著しく向上。
・小型打上げ機の競争力が中・大型打上げ機と同等レベルに到達し、オープン市場が「発展シナリオ」に比して飛躍的に拡大する状況で、対中・大型打上げ機受注シェア20~50%を獲得。

《発展シナリオ》
⇒ IoT及び情報等の関連市場の発展に伴い、複数のコンステ事業が共存・成功。衛星需要が拡大。
・IoT及び情報等の新規サービス及びアプリケーションが多数創出し、衛星需要につながる関連市場が拡大。
・小型打上げ機の打上げ価格競争力及び打上げ性能(打上げ頻度含む)が著しく向上。
・2020年代後半、小型打上げ機の競争力が中・大型打上げ機と同等レベルに到達し、メガコンステの受注シェアが20~50%(*)に拡大。(※)2020年代前半、10~20%を想定。

《堅調シナリオ》
⇒ 現市場の堅調な推移等を踏まえ、ベースラインとして、衛星需要が進展。
・個人モバイル市場等の堅調な成長が継続。
・政府機関の利用等の一定の確度ある需要に基づき、メガコンステ事業が展開。
・資金獲得、打上げ実証の成功、打上げ契約獲得及び商用打上げ成功といった段階が堅調に推移。
・2020年代後半から、発展シナリオと同様にメガコンステの受注シェアが拡大。

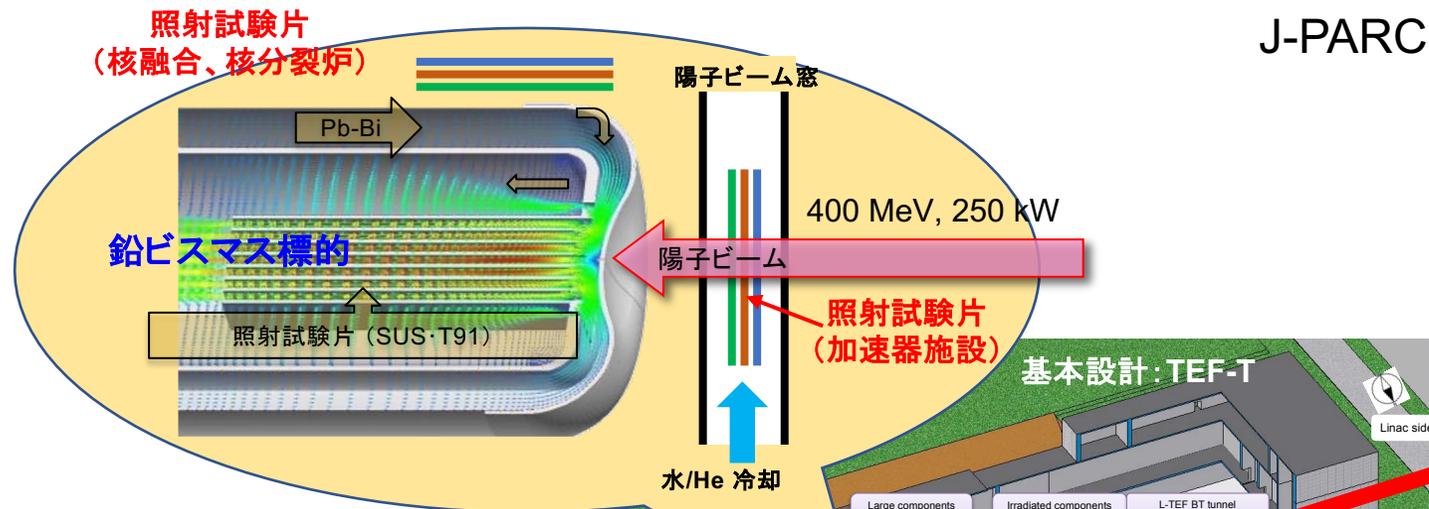
半導体デバイスに対する宇宙放射線照射効果 高橋 REAJ Vol 36 8 pp. 450 (2014)

シングルイベント発生断面積(巨大)



- 幅広いエネルギー(数 MeV~数百 MeV程度)の陽子照射が可能な試験施設が必要
- 大気中の試験が必要
- 国内の**照射機会**が圧倒的に**不足**
⇒ 宇宙開発基金

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

PIE 試験片

3. RI 製造

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

4. 陽子ビーム利用

LINAC upgrade
 25 Hz \rightarrow 50 Hz

直ぐそこにある加速器 LINAC

J-PARC実験施設

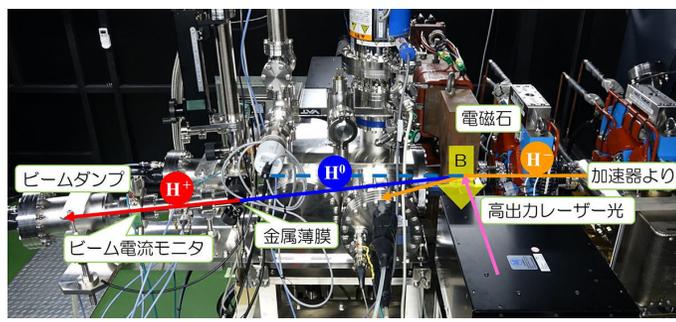
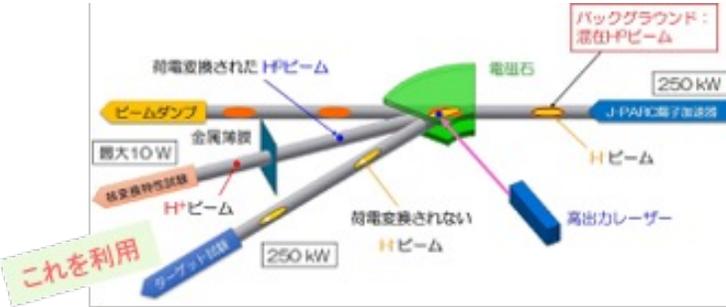
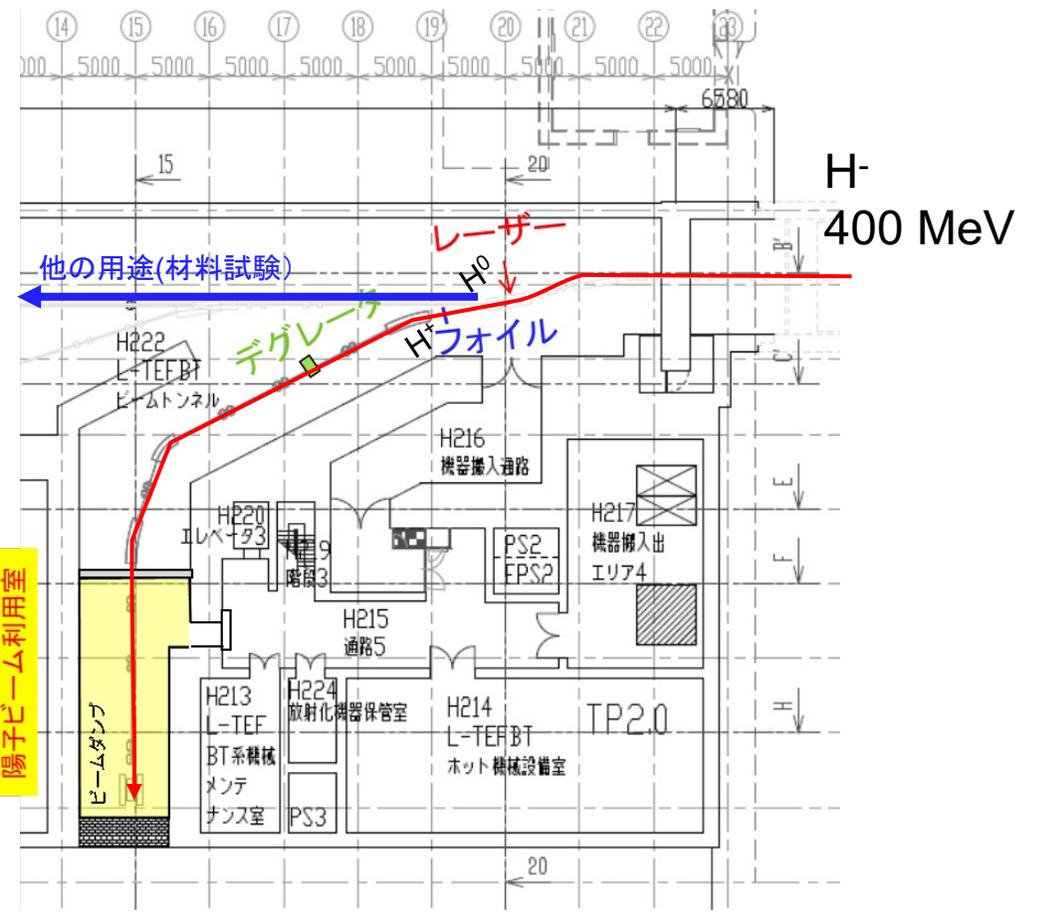
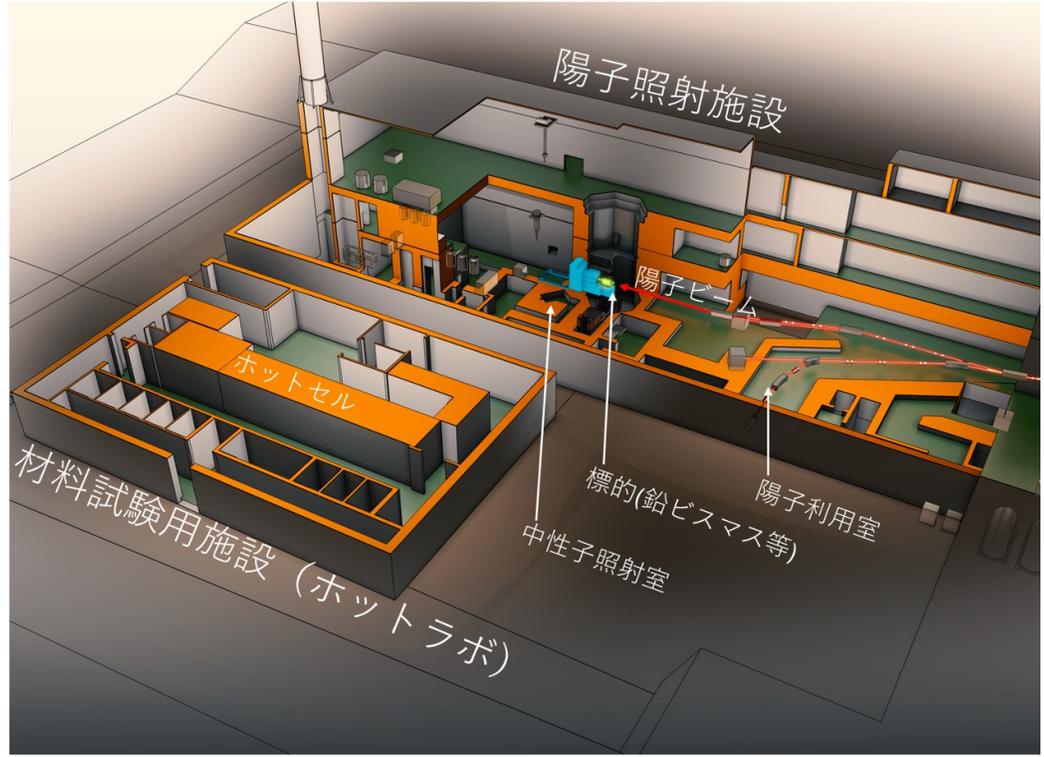
物質・生命科学実験施設

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

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

ビーム窓の散乱を利用した試験

情報通信研究機構：NICT

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



JAXA: ARTEMIS計画 月面用 Lunar-RICHeS

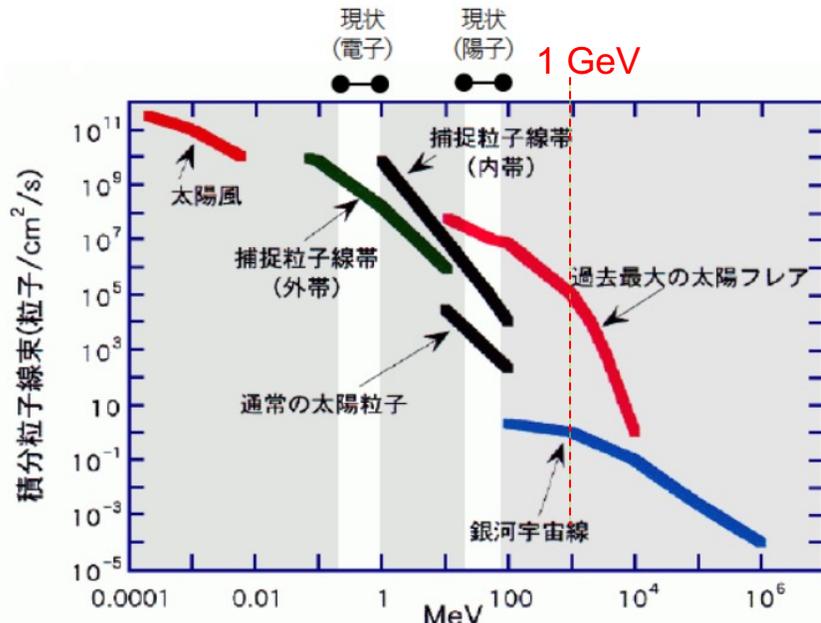


図 宇宙放射線のエネルギースペクトル

※ 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

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での試験の問い合わせがあった

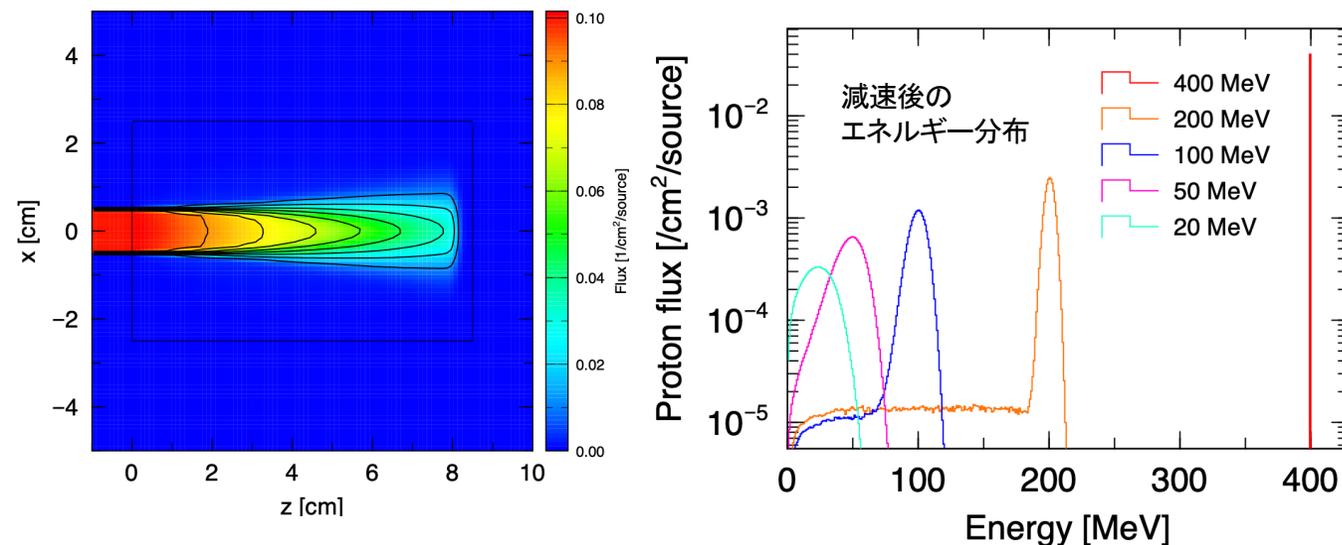
- 数GeV陽子を利用できる施設は国内でJ-PARCのみ
- 大強度陽子を取扱うため、利用者への一次陽子ビーム供給は困難
- パルス計数のために、パイルアップを生じない低強度ビーム供給が必要
⇒ ビームダンプ入射窓の散乱による陽子利用法を開発
- 供給する陽子エネルギースペクトル評価が必要
⇒ 加速器施設の核設計の基礎となる核計算モデルの検討が可能
- 共同研究を開始(JAXA, NICT)

目的2:

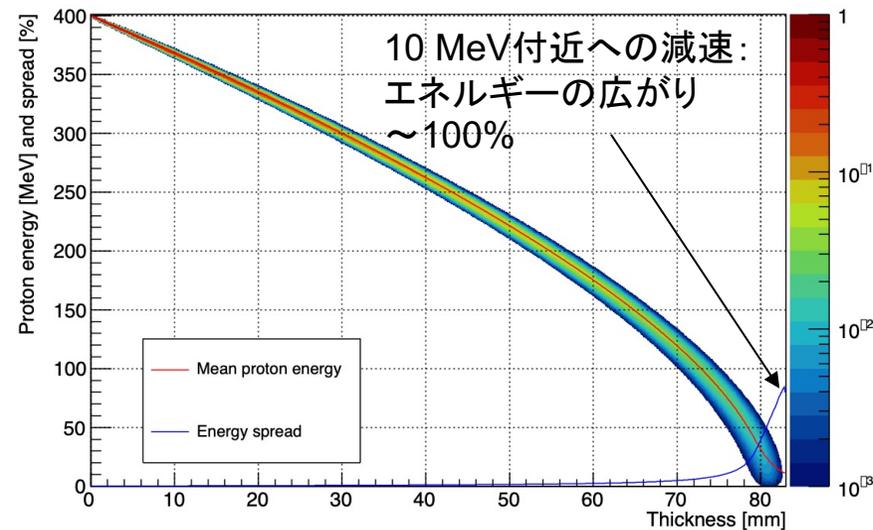
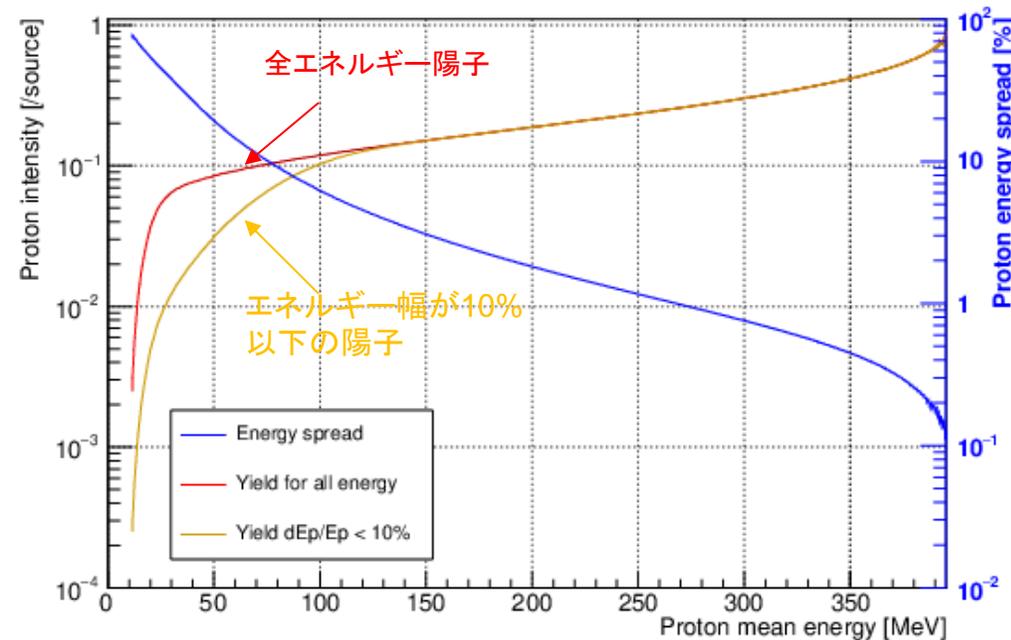
宇宙用スペクトロメータ開発・核計算モデルの高度化

- 陽子スペクトルおよび核反応断面積測定

デグレータ(タングステン製)内の陽子の振舞い

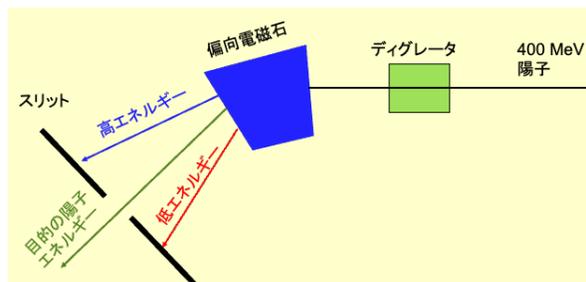


10%以下のエネルギー幅を選択し供給



- 減速過程のストラグリングによりエネルギー幅が増大

磁場とスリットによる選択

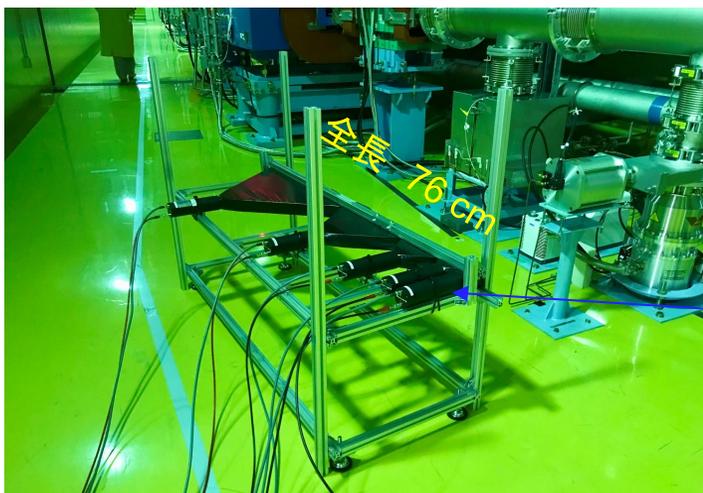


- 収率は $<10^{-3}$ に低下するものの、 ~ 10 MeV陽子の供給が可能
- 空气中・ビーム窓によるエネルギーの広がりはあるものの、数MeV陽子の照射も可能か

ビーム窓の散乱陽子 スペクトル測定

- 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) ※但し400 MeVまで
- 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

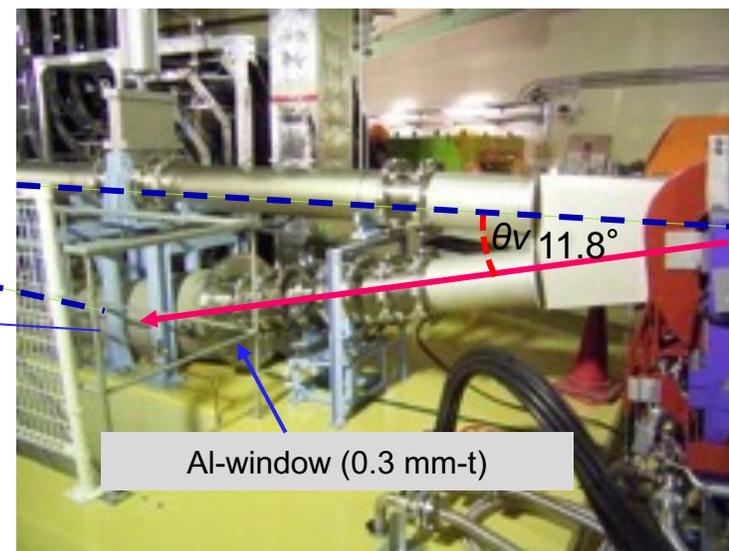
Plastic scintillators $\square 50$ mm



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)

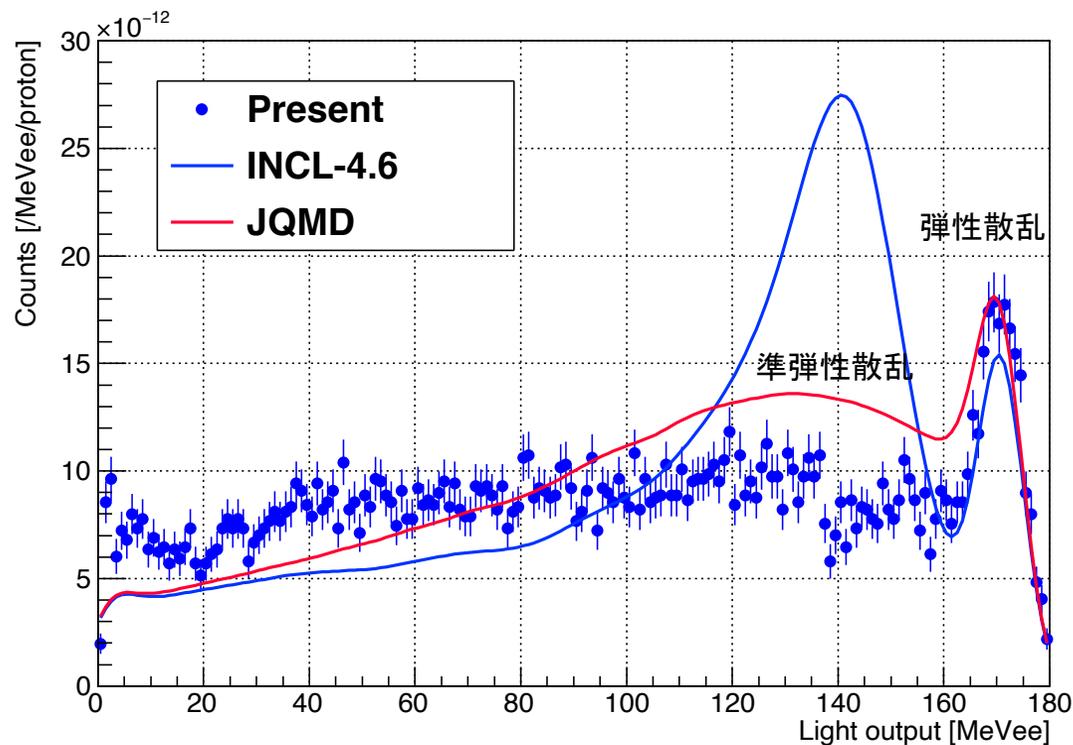


Al-window (0.3 mm-t)

	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
- ただしスペクトルの測定が必要

- 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 :
 - INCL-4.6 (核内カスケード) + GEM (脱励起モデル)
 - JQMD (量子論的分子動力学) + GEM (脱励起モデル)

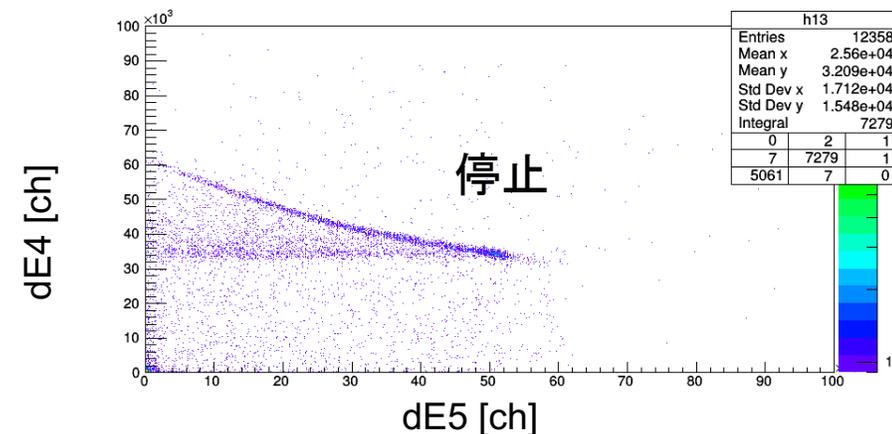
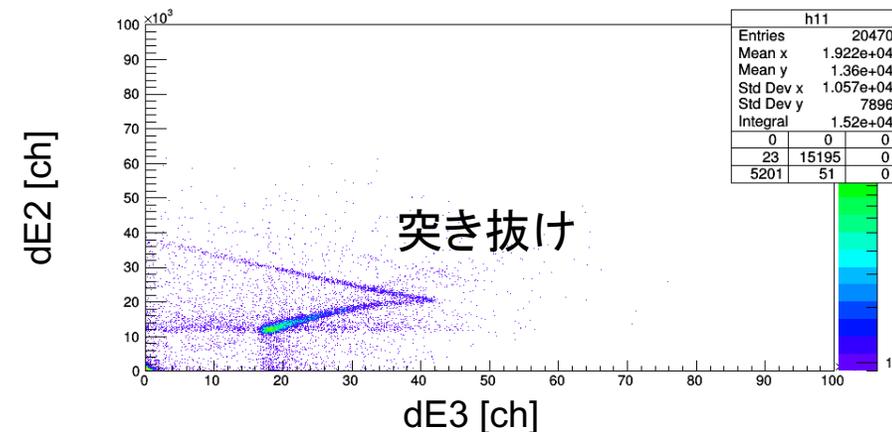


弾性散乱部検出効率
~35%

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

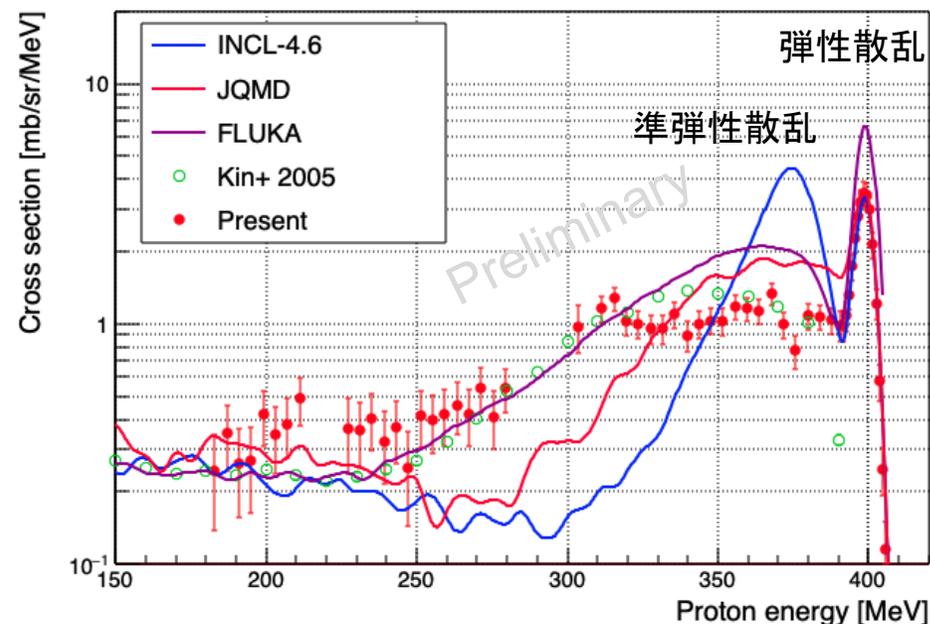
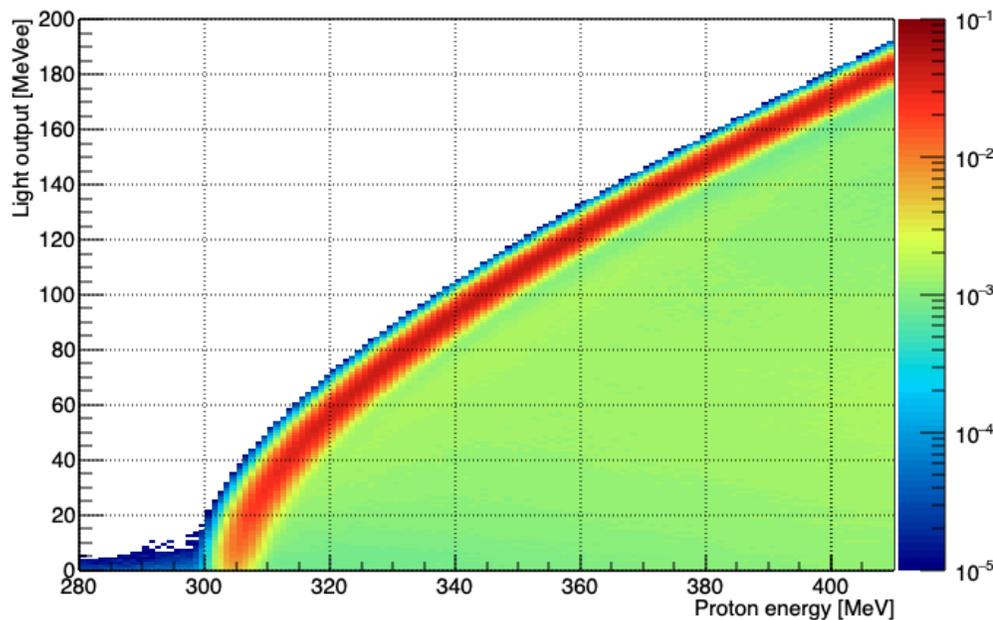


0.4 GeV陽子の断面積(DDX)の導出

- 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、物理的に解釈できない怪しいデータ
- 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

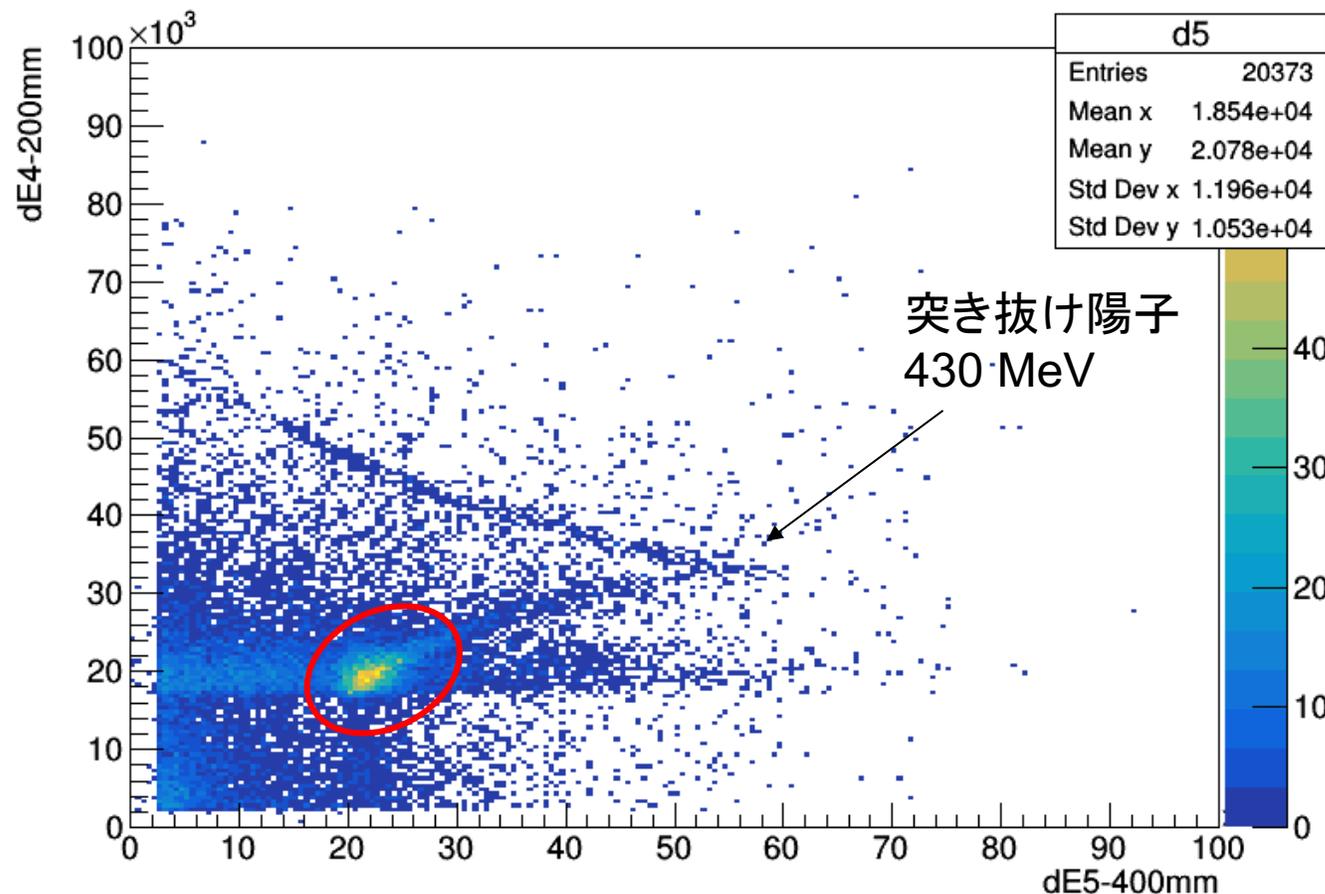
$M = RS$, M: 測定値, R: 応答関数行列, S: DDX

PHITSの計算による応答関数行列

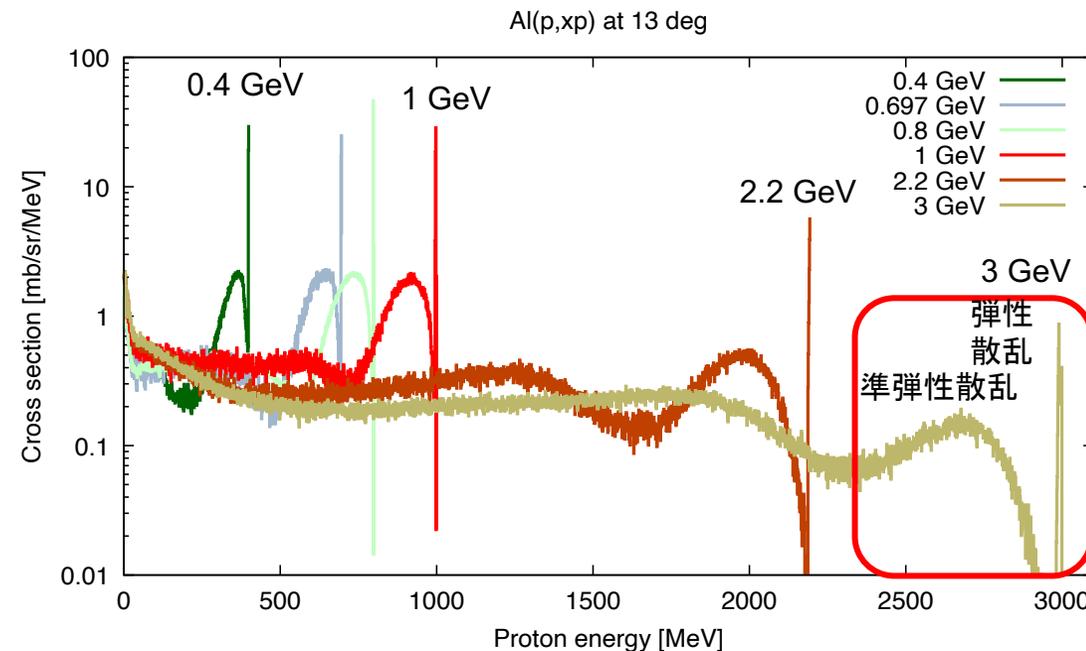


- 実験はJQMDおよびFLUKAの計算を支持する
- 他の実験データKin+ (RCNP)のデータと良い一致を示す。
Kin+ 測定角度 20° 、本実験 13°

3 GeV陽子の結果



FLUKAの計算結果

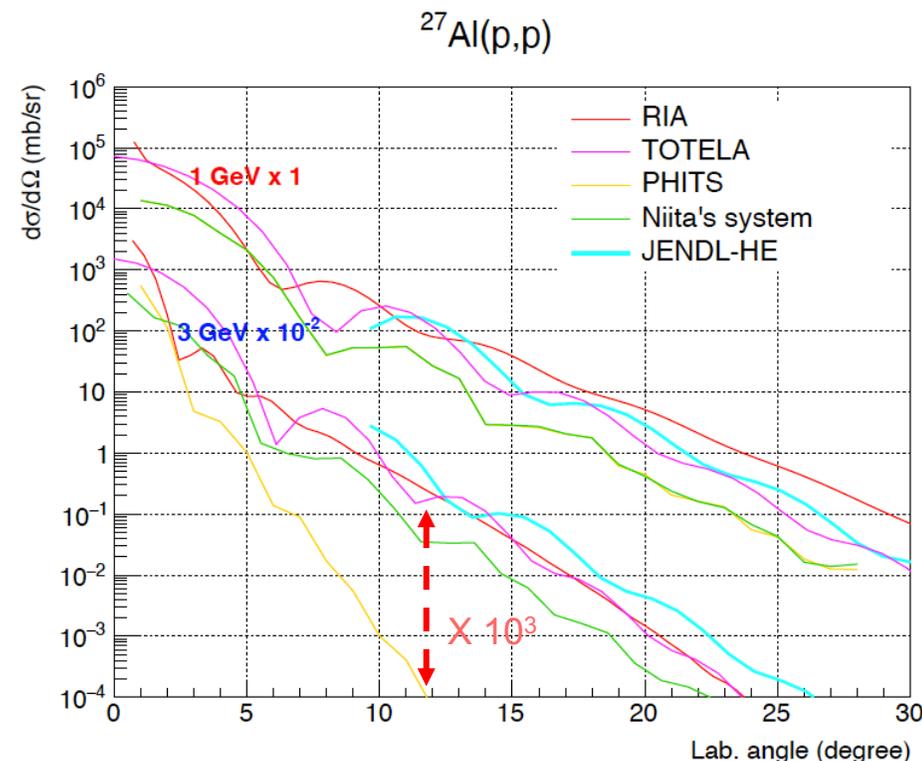
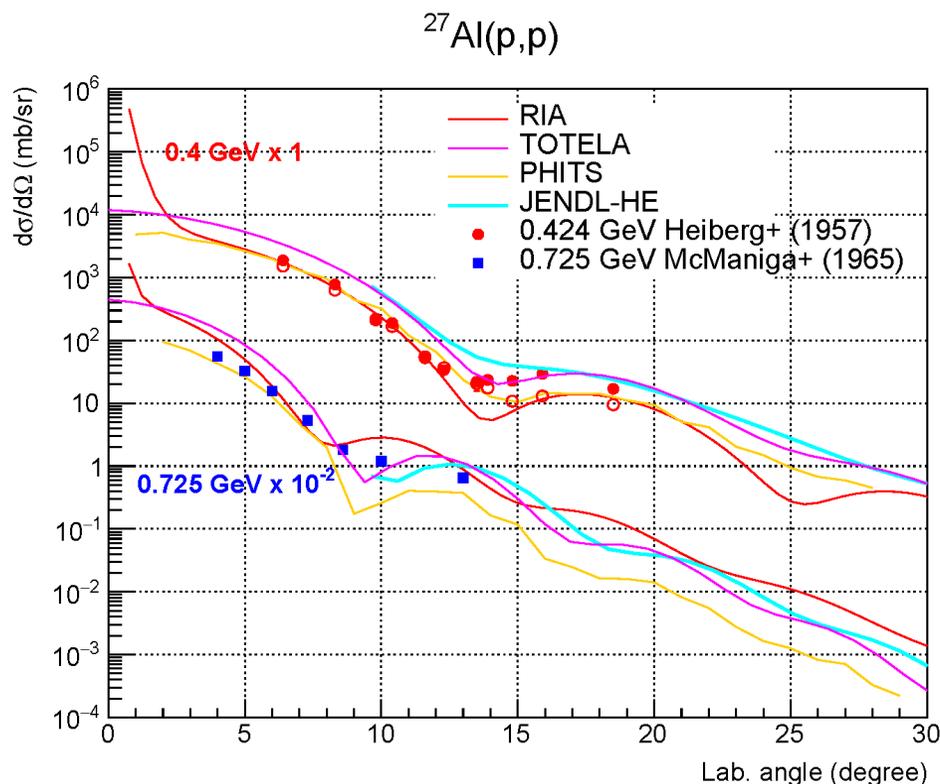


高時間分解能検出器による飛行時間測定で今後詳細に測定する予定

- 明確な陽子測定が観測されたが、弾性散乱と準弾性散乱が明確な分離が困難
- 今後の解析: 400 MeV以下のデータを取得

陽子弾性散乱 角度微分断面積

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



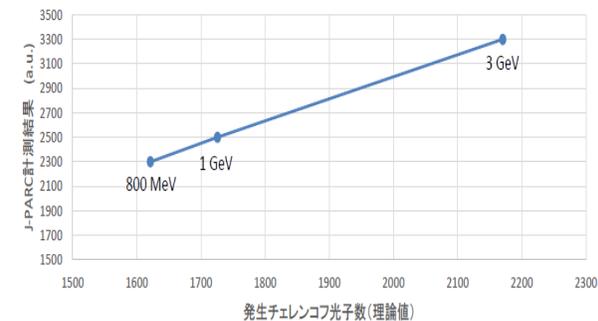
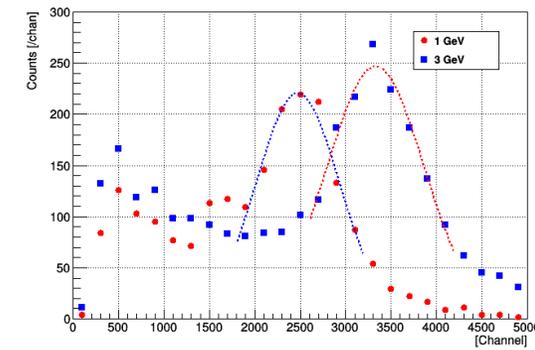
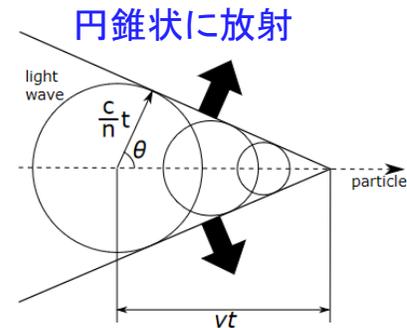
- 実験データ E<0.73 GeVのみ
- RIA, PHITS, JENDL-HE 実験とよい一致

- PHITS : E<1 GeVで仁井田のシステマティックを使用
 E≥1 GeV 別のシステマティックを使用
- 将来の測定で明確にする予定

JAXAおよびNICTの荷電粒子検出器試験

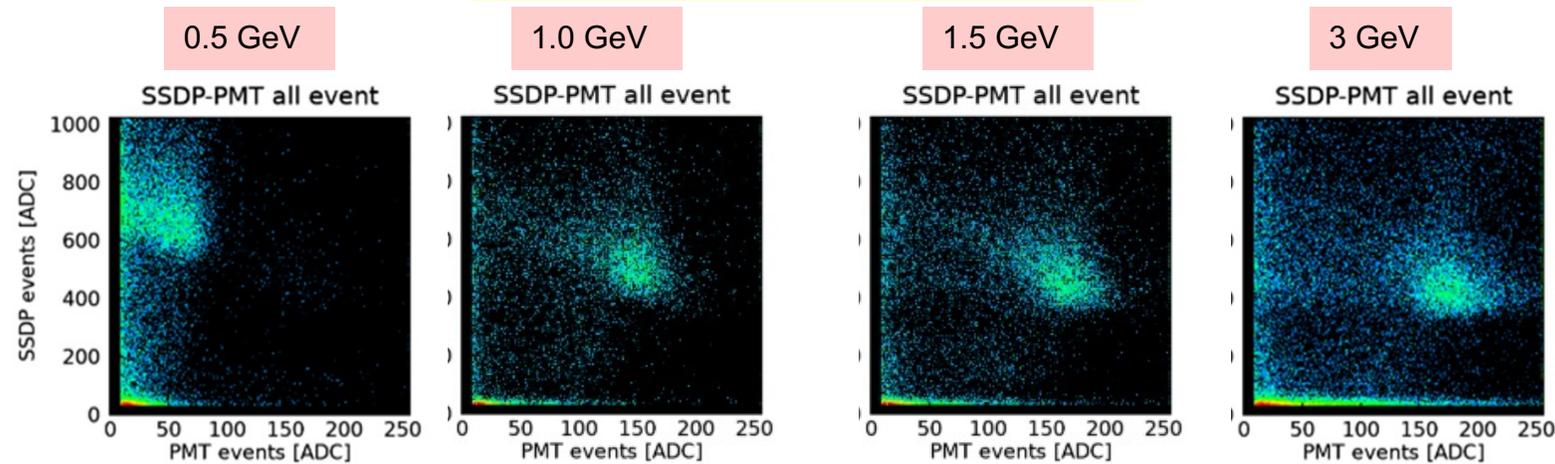
チェレンコフ放射に基づくスペクトル測定

β : 光速比(v/c)、 n : 屈折率
チェレンコフ光 $\propto (\beta^2 n^2 - 1)^{-1/2} (\beta n)^{-2}$

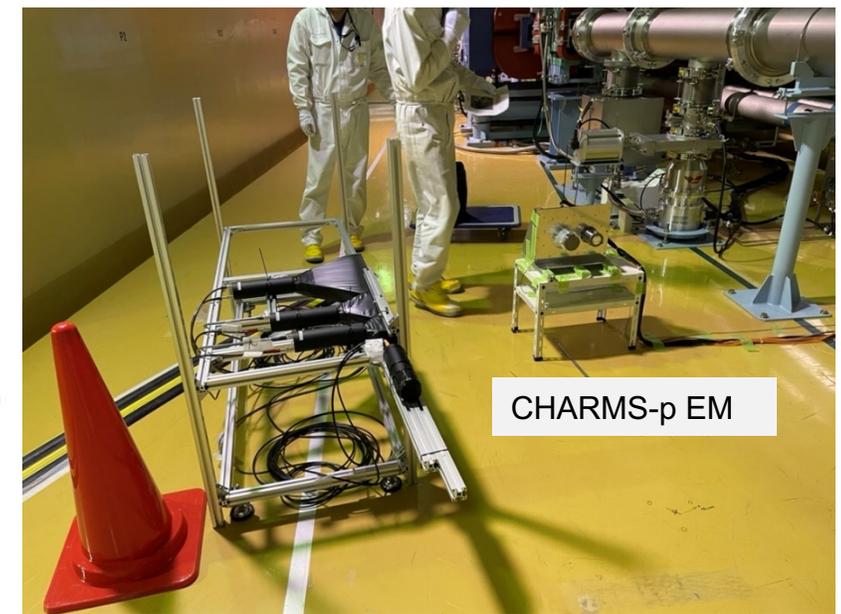


JAXA・J-PARCおよびNICT・J-PARCと共同研究契約を結び、2023年3月より試験を開始

NICT CHARMS-pの試験結果



CHARMS-p EMモデルの試験



- NICTの工学モデル(EM)の試験を完了
- フライトモデル(FM)の試験を将来実施予定
- 宇宙開発計画に貢献した

提供: 大辻、NICT

- 今後高い需要が予測される宇宙用半導体デバイス試験のため、陽子ビーム照射施設での検討
 - ディグレート減速＋磁場による単色化：
デバイス試験に必要な数MeV～400 MeV供給の可能性を得た。
- 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
 - 400 MeV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
 - JAXA・NICT 宇宙用スペクトロメータ試験を開始
- 今後の課題：
 - 陽子ビーム照射施設： 陽子輸送の詳細な検討
 - ビーム窓の散乱： 数GeV陽子のスペクトル測定＋断面積測定