

宇宙開発機器のための J-PARC における陽子ビーム

PROTON BEAM UTILIZATION FOR SPACE DEVELOPMENT EQUIPMENT AT J-PARC

明午 伸一郎 ^{*,A)}, 山口 雄司 ^{A)}, 岩元 大樹 ^{A)}

Shin-ichiro Meigo ^{*,A)}, Yuji Yamaguchi ^{A)}, Hiroki Iwamoto ^{A)}

^{A)} J-PARC Center Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

Abstract

In the development of satellite onboard equipment for space development, test using protons in a wide energy range from several MeV to several GeV is crucial. However, there are few accelerator facilities in the world that can supply protons in the energy range above 400 MeV. In Japan, J-PARC is the only facility to be applied this purpose. The use of protons in space development is extremely high, space agencies have had strong requests for testing onboard satellite cosmic ray sensors. However, the requirement of high-stability operation at J-PARC makes it difficult to integrate the test equipment into the vacuum chamber. It is also difficult to obtain the weak beam required for the test. For this reason, we developed a method using protons scattered at the beam window and started testing the sensor in collaboration with JAXA and NICT. Since data on beam scattering is important but scarce in proton accelerators, we have started measuring the data as Double Differential cross section (DDX). Also, we plan to proceed to built Proton Beam Irradiation Facility at J-PARC to adapt the requirement of space uses' to test Single Event Effect (SEE). In this facility, a laser charge converter will be used to extract a weak beam from the high-intensity 400 MeV H^- beam of LINAC. Degradator will be used to provide a proton beam with the energy required by the user.

1. 頭語

宇宙衛星などに搭載する半導体機器の放射線を用いた試験は、打上げ前に必要となり、この試験のために陽子ビームを利用者に供給することは、宇宙開発において重要となる。特に衛星搭載用の半導体におけるシングルイベント効果 (SEE) は、衛星において重大な影響を与えるため、宇宙開発において重要な試験と位置付けられる。SEE を引き起こす荷電粒子は、宇宙では陽子が最大フラックスとなるため、陽子を用いた試験が重要となる。近年、民間企業による軌道が 2,000 km 以下となる低軌道 (LEO) 衛星の開発が意欲的に進められている。LEO は地磁気により高軌道衛星より放射線の影響が小さくなるため、対放射線性の低い搭載機器の使用が可能となることが予測される。このため LEO 衛星では、安価な民生品 (COTS) の使用可能性が示唆される。COTS 品を用いた LEO 衛星の打上げ数は急激に伸びており、今後も多数の打上げが予想されるため、COTS 品の陽子を用いた試験が重要となる。SEE の試験は、半導体単体のみならず実装したボード全体に対する大気中での照射試験が望まれるため、広いビーム照射野も必要となる。SEE の試験は、エネルギーを 20 MeV から数百 MeV に徐々に上げて評価するため、陽子エネルギーを短時間で変更できる施設が望ましい。

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) では月面での有人計画を立案しており、これらの環境下での宇宙飛行士の放射線被曝に対する管理が重大な課題の一つとなる。JAXA では、ARTEMIS 計画 [1] として月面での人類の持続的な活動を目指しており、宇宙飛行士の被ばく管理のために 2 GeV まで測定可能な、荷電粒子スペクトロメータ Lunar-RICHeS [2] の開発を進めている。さらに情報通信研究機構 (NICT) では、太陽フレアにおける地球軌道上での放射線を常時観測し、「宇宙の天気予報」

を実施している。太陽フレアやコロナ質量放出では、数 GeV 程度のエネルギーを持つ陽子が地球に飛来することがある。このため、宇宙天気被害を引き起こす高エネルギー陽子の監視の必要がある。NICT ではこの高度化のため、将来の衛星ひまわりに数 GeV 陽子が測定可能なスペクトロメータ CHARMS-p [3] を搭載する予定となる。宇宙環境用スペクトロメータの動作試験や荷電粒子に対する応答関数の測定を、衛星搭載前に実施することが重要となる。打ち上げスケジュールは既に決定しているため、これに間に合う開発試験が必要がある。スペクトロメータ開発の一部は機密事項となるため、輸出管理などの規制への対応が困難となる。海外での試験を行うのは困難となり、国内の加速器施設での試験実施の強い希望が JAXA および NICT からある。日本において 400 MeV 以上の運動エネルギーの粒子を提供できる施設は非常に乏しく、数 GeV 陽子では J-PARC が国内で唯一提供できる環境となる。しかし、J-PARC には陽子ビームが利用可能な施設は現在なく、ハドロン実験施設による二次ビームとしての利用は可能であるものの、素粒子・原子核物理研究が主目的の施設となるので、課題申請による試験を得るのは実質的に困難となる。

一方、J-PARC の 3 GeV シンクロトロン (RCS) [4] は、400 MeV から 3 GeV までの陽子の利用が可能となる。これまでに射出タイミングを変更することにより、数 GeV 領域の一次陽子ビームを用いた材料研究 [5,6] および原子核実験 [7,8] など進めており、宇宙利用においても重要な加速器として位置づけられる。加速器への試験機器の設置は、ビーム損失抑制に必要な高真空維持の要求と相反するため容易ではない。さらに RCS の特性上、射出ビームが瞬間的に大強度となるため、スペクトロメータの検出信号にパイルアップが生じるので、パルス計測が適用できない問題がある。

これらの問題の解決のため、我々は 3NBT ビームダンプの入口に設置したビーム窓の散乱による陽子利用の開発を進めてきた。加速器トンネルに入域し測定装

* meigo.shinichiro@jaea.go.jp

置の調整を行う機会は少ないものの、この方法ならば加速器の真空と安定した運転に影響を与えずに試験が可能となり、大型機器の試験も可能となる。また、二次陽子の利用によりスペクトロメータに入射する陽子強度も著しく低く抑えられ、パイルアップを生じることなく測定することが可能となる。ただし、散乱された陽子は弾性散乱の他に、ブロードなエネルギースペクトルを有するため、事前の陽子スペクトルの測定が必須となる。

最前方方向の散乱陽子の実験データは、PHITS [9] などの一般的に核計算を行う計算コードやそのモデルの検証するのに必要となる。特に、このデータは、核計算の入口となる核内カスケード (INC) の検討で非常に重要なものとなる。JAEA が検討を勧めている加速器駆動システム (ADS) [10] の核計算には、PHITS コードが用いられ実験データとの比較検討は重要となる。しかしながら、核計算モデルを検証する十分な実験データは存在せず、特に 1 GeV 以上の弾性散乱の実験データは全くないため、実験データの取得が重要となる。

以上の要求から、我々は宇宙用半導体の SEE 試験のために、陽子ビーム照射施設の建設の検討を進めている。さらに、宇宙で用いるスペクトロメータの数 GeV 領域の試験のため、大強度陽子加速器施設における核計算の高度化のため、アルミニウム製のビームダンプ窓で散乱した陽子スペクトルと核反応断面積の測定に着手した。本稿では、これらの現状について報告する。

2. 陽子ビーム照射施設

陽子ビーム照射施設の全体の鳥瞰図を Fig. 1 に示す。施設の中心部にターゲットステーションを配し、図の右手側にビームライントンネルを設ける。本施設では、宇宙機器の陽子照射のみならず、近年非常に着目されている ^{225}Ac , ^{99}Mo などの医療用 RI の製造、地上における半導体デバイスのソフトエラー試験、さらに原子炉・核融合炉・高エネルギー加速器施設の材料照射試験を進める計画となる。材料研究のため、陽子ビーム照射施設に隣接して材料試験用の施設 [11] も建設する計画となる。陽子ビーム照射施設に導入するビームは、LINAC で 400 MeV に加速された負水素 (H^-) イオンビームとなる。ビームは、マクロパルス幅 0.5 ms においてチョッパーによる中間パルスがない時間構造となり、ピーク電流 50 mA、ビーム出力 250 kW となる。本施設に輸送するビーム繰返しは 25 Hz とするため、LINAC の現状 25 Hz から 50 Hz にアップグレードする予定となる。陽子ビームラインには、レーザー荷電変換技術 (LCE) [12] を導入する予定となり、レーザーにより H^- から電子を一つ剥ぎ取り、 H^0 に変換した後に磁場により H^- と H^0 を分離し、さらに H^0 を金属箔により H^+ に変換し、陽子ビームとして利用者に供じる。この技術は、核変換物理実験施設 (TEF-P) に 10 W 以下のビームを用いるために開発されており、利用者の要望に応じビーム出力などを容易に変更できるものとなる。本施設では、LCE で取り出されたビームを陽子ビーム利用室に輸送し、宇宙機器などの開発のための試験を可能とする構想となる。

宇宙機器は、SEE の発生が深刻な問題となるため、陽

子の照射を用いた試験が重要となる。この試験では、数 MeV から数百 MeV の陽子を用いて SEE 発生事象を評価するために、試験を効率的に行うために短時間のエネルギー変更できることが望ましい。この要求を満足するため本施設では、400 MeV 陽子を金属板などのデグレータにより減速させて供給する計画とする。様々な厚さからなるデグレータで減速したのちに、偏向電磁石とスリットにより均一のエネルギー (単色化) したビームを供給する方法を計画している。リニアックのビームの安定性は極めて優れているため、デグレータ下流の電磁石などのパラメータが一度取得すれば、同じ値を用いることにより速やかにエネルギー変更が可能となる。ただしエネルギー確率的な減速過程において、デグレータでの減速課程のエネルギーストラグリングにより陽子エネルギーが広がることや、デグレータ内の原子核との相互作用により陽子ビーム強度の低下が懸念されるため、デグレータ中の陽子の振る舞いに関して PHITS による計算で調査した。

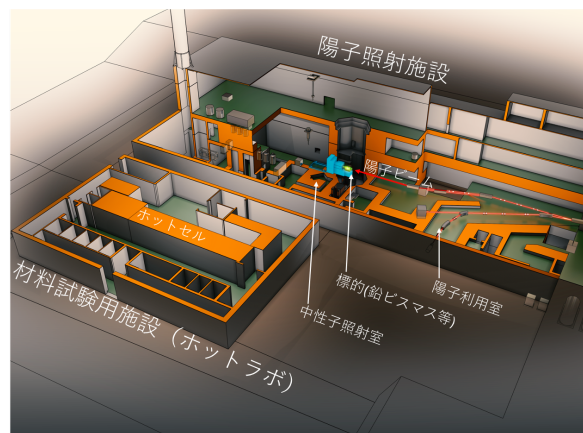


Figure 1: Birds-eye's view of the proton beam irradiation.

2.1 数 MeV から 400 MeV 陽子の供給法の検討

デグレータに対するビームに対する影響を PHITS コードを用いて調べた。デグレータの材料にはタングステン (密度 19.3 g/cm^3) を用いた。計算の簡略化のため、直径 10 mm の一様分布な 400 MeV の陽子ビームが断面が $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ のデグレータに入射する際の陽子の分布評価した。タングステン製のデグレータ内の陽子フラックスの分布を、計算した。400 MeV 陽子のタングステン中の飛程は 79 mm となり、ビーム進行とともにビーム幅は多少広がるものの、極端に大きくならないことが示された。横軸にデグレータ内の進行方向の位置、縦軸に陽子エネルギーとして陽子エネルギー分布を二次元コンターとして Fig. 2 に示す。各位置における平均エネルギーを赤線として示し、エネルギーの広がりを青線として示す。タングステンの深さ 70 mm 以下の領域において、陽子の平均エネルギーはほぼ単調に減少する。単調減少する範囲では、通過後の陽子エネルギーは 100 MeV 以上となる。通過後のエネルギーが 100 MeV 以下となるデグレータ厚さにおいて、平均エネルギーは急激に減少する。このため、100 MeV 以下の陽子のエネルギーを制御するためには、デ

グレータの厚さを詳細に調整する必要があるため、100 MeV 以下の利用ではデグレータの厚さが連続的に変更できる構造が望ましい。この対応として、楔型のデグレータの採用により、デグレータにビームが当たる位置を詳細に調整可能とするのが考えられる。100 MeV 以上の陽子では、急激なエネルギー変化が無いため、厚い板による非連続的な変更する方法でも可能と考えられる。

利用者に供給する陽子収率とエネルギーの広がりとの関係を調べた。横軸に平均エネルギー、縦軸に相対的な収率とエネルギーの広がりとして、Fig. 3 に示す。エネルギーの広がり、ガウス関数のフィッティングにより広がり (1σ) を導出し、これを用いた。デグレータによる陽子エネルギーの減少とともに、陽子の収率は減少し、図中の赤線は全てのエネルギーにおける収率を示す。利用者が希望する 20 MeV 以上のエネルギー領域で、陽子の収率は 10% 以上となった。

宇宙搭載器の半導体試験では、SEE 発生率を陽子のエネルギー関数として測定するため、利用者はエネルギーが単色エネルギーの陽子を希望する。このため、Fig. 3 の赤線で示す収率となる陽子を全て利用することはできない。供給する陽子のエネルギー広がり、可能な限り狭いのが理想であるが、本検討では 10% 以下とした。Figure 3 の橙色の実線に、エネルギーの広がりが 10% 以下となる陽子の収率を示す。20 MeV 陽子のエネルギーの広がりが 10% 以下と強度は、400 MeV 陽子に対し 0.1% 程度となる。LCE により 10 W のビームを取り出す場合において、400 MeV 陽子は 25 nA のビーム電流となり、エネルギーの広がりが 10% 以下となる 20 MeV 陽子ビーム電流は、タングステンデグレータの場合に 25 pA 程度となる。照射試験で用いるビーム径を $\phi 2$ cm の分布を均一なものと仮定すると、陽子のフラックスは 5×10^7 /cm²/s となる。SEE 試験では試料放射化の防止のため、低フラックスの陽子ビームを一般的に用いるため、十分な値と考えられる。ビームが強すぎる場合には、荷電変換に用いるレーザー出力の調整に強度を下げる事が可能と思われる。一様なビーム照射が望まれる場合もあるため、ラスタリングや八極電磁石を用いた非線形ビーム光学 [13] による照射も検討している。本施設では大気中のビーム照射を想定しており、照射部直前にビーム窓による真空の隔壁が必要となるが、簡略化のため本検討では窓におけるエネルギー損失は無視した。窓および空気でのエネルギー損失とその広がりを考慮すると、数 MeV 程度のエネルギーの広がりが 10% 以上のビーム照射が可能となると考えられる。今後、陽子の輸送計算により照射位置でのビーム幅を評価する。施設の放射線安全では、デグレータの放射化と放射線遮蔽なども考慮する必要があるため、これらについて今後する。

3. 窓の陽子散乱を用いた試験

J-PARC RCS は、ビーム調整のためにビームダンプ (3NBT ダンプ) を設けている。このビームダンプは地下に設置しており、11.8° の垂直偏向によりビームを入射する [14,15]。ビームダンプ入口には、真空雰囲気との分離のため、アルミニウム製の窓 (厚さ 0.3 mm) を設置

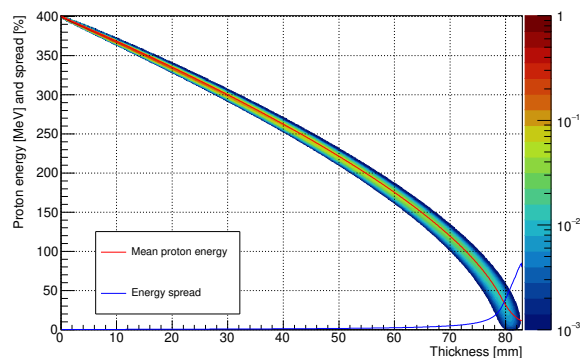


Figure 2: Relative yield and energy spread of protons in the tungsten degrader along the beam direction.

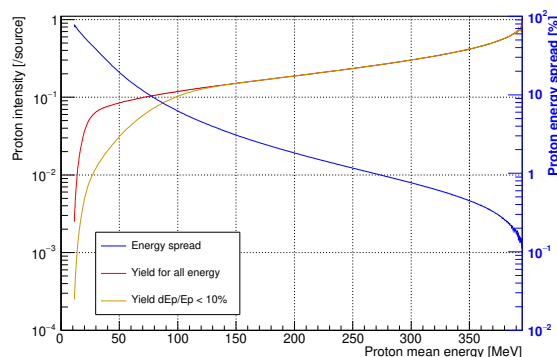


Figure 3: Relative yield and energy spread of protons as a function of extracted proton energies for the tungsten degrader.

しており、ダンプを用いる際にはこの窓でビーム散乱が生じる。本実験では、400 MeV 陽子がビームダンプ窓で散乱される陽子のエネルギースペクトルを測定した。実験の前に予備計算を行い、本実験が問題なく実施できることを確認した。その後、検出器を設置した実験を行い、実験と PHITS による計算との陽子スペクトルを検出器の応答関数として比較した。さらに、放出角度とエネルギーに関する二重微分断面面積 (DDX: Double differential cross section) をアンフォルディング法により導出し、計算と比較した。

3.1 予備計算

PHITS を用いて検出器入り口の陽子スペクトルの予測計算を行った。計算では、標準的な核内カスケードモデル INCL-4.6 [16] と脱励起状態の蒸発過程に GEM を用いた。この結果、弾性散乱による高エネルギー部に予想の通りの鋭いピークを有し、弾性散乱よりわずかに低いエネルギーにおいて、準弾性散乱による幅の広いピークが生じることが示された。

窓で散乱した陽子は、ビームダクト (SUS304 厚さ 6 mm) を浅い角度 (約 13°) で横断するため、ダクトを脱出する陽子から見ると厚さは実効的に約 27 mm と比較的厚いものとなり、弾性散乱による 400 MeV 陽子は約

50 MeV 程度のエネルギーが損失することが判明した。

3.2 測定に用いた検出器

Table 1 に示すプラスチックシンチレータを用いて、散乱陽子のスペクトルを測定した。シンチレータは、ビーム窓から 14 m 離し、陽子ビームに対し水平方向に対し 5.6° の角度の位置に配置した。陽子ビームはダンプへの入射に垂直方向に 11.8° 傾斜するため、陽子から検出器を見ると合計で、13° の角度の位置に相当する。プラスチックシンチレータには断面が 50 × 50 mm のものを用い、それぞれ Table 1 に示す長さのものを合計 5 台用いた。カウンターテレスコープとして検出器を配置し、光電子増倍管の信号をデジタイザー Struct SIS3316 [17] により測定した。すべての検出器に対し同時計測を行い、ダンプから発生する放射線の偶発的事象の観測を除去した。同時計測のゲート幅は 10 ns とし、この時間幅内に隣接する検出器で優位な検出事象が観測された事象をシグナルとして取り扱った。SIS3316 では、FPGA 内に 64 bit の長い時間レコードを有しており、測定開始時刻を基準とする絶対的な時間測定により同時計測した。

Table 1: Plastic Scintillators Used in the Experiment

	Thickness [mm]	Stopping energy [MeV]	Primary energy [MeV]
dE1	10	32.5	151
dE2	50	87.6	177
dE3	100	152	223
dE4	200	245	302
dE5	400	385	432

通常、マクロパルス幅 (50 μ s 以上) のビームを RCS に入射する。本試験では、LINAC のチョッパーで形成する 1 中間バンチ (ビーム幅 10 ns 程度) の適用により、微弱なビーム形成は可能となる。測定ではビームのチョップ幅を 12 ns とし、1 中間バンチを用いて 25 Hz の繰り返しで実施した。1 ショットあたりの陽子ビームの強度は 2×10^7 個とし、25 Hz でのビーム強度をわずか 0.2 W 程度とした。RCS の利用運転では約 1 MW のビーム出力となり、利用運転の約 7 桁低い強度で実施した。微弱なビーム強度測定のため、上流に設置した CT の出力を利得 100 倍となるアンプで増幅した。波形を逐次サンプリングとともに平均化し、複数のガウス関数を用いてフィッティングを行い、1 ショットあたりの入射陽子数を導出した。これにショット数を乗じることで入射陽子の総数とした。

3.3 400 MeV 陽子の二重微分断面積 (DDX) の導出

400 MeV 陽子の陽子スペクトル検証のため、測定結果より DDX を導出した。測定で得たシンチレータの光出力は、シンチレータに入射する陽子のエネルギースペクトルとシンチレータの発光分布、すなわち応答関数のコンボリューションとなる。このため、絶対的な DDX の導出には、応答関数によるデコンボリューション (アンフォールディング) が必要となる。各単色エネルギー

の陽子に対するシンチレータの応答関数を PHITS で求めた。計算の起点は陽子が入射するアルミニウム窓とし、ビームダクトや空気およびシンチレータにおける全ての相互作用も考慮し、シンチレータで観測される応答として求めた。この応答関数行列を用いて、観測されたシンチレーション光分布に RooUnfold [18] を用いてアンフォールディングを行った。RooUnfold では、ベイズ推定法に基づく解の導出が可能となり、これを適用した。測定で得られた DDX の結果を、Fig. 4 に示す。弾性散乱によるピークは 400 MeV 付近に生じ、350 MeV 付近にエネルギー幅の広い準弾性散乱によるピークを観測した。比較のために、RCNP において 392 MeV 陽子を用いた先行研究 [19] による DDX の結果を示す、本実験に用いた 13° とほぼ等しい 20° の散乱角で測定した。先行研究の 370 MeV 以下の値は、本実験結果を支持するものとなることが判明した。本実験結果には明確なピークが観測されたので、これにより、準単色な 400 MeV 陽子を利用者に提供できることが判明した。なお先行研究のデータでは明確な弾性散乱のピークが測定されなかった。この原因は不明であるが、測定角度が異なることが原因の一つとして考えられる。

本実験の結果を元に、PHITS で推奨される核内カスケードモデル (INCL-4.6 [16]) および量子論的分子動力学 (JQMD [20]) モデルを用いた計算との比較検討した。計算による弾性散乱によるピークのエネルギー幅ピークは、 δ 関数状の鋭いピークとなるため、実験の幅と合致するように計算値をスマアした。この結果、Niita の systematics [21] を用いた PHITS の弾性散乱の角度微分断面積の値は、実験とよい一致を示すことが明らかになった。一方、380 MeV 付近における INCL-4.6 の準弾性散乱の値は、3 倍程度に過大評価することが明らかになった。この過大評価は、他の実験 [22] との比較でも観測されているので、INCL-4.6 における課題が明確になった。一方、JQMD は、若干の違いはあるものの、概ね良い一致を示すことが明らかになった。さらに、CERN で開発された FLUKA [23,24] との比較を行った。FLUKA の弾性散乱の断面積は、本実験の値を過大評価しているものの、準弾性散乱断面積の値およびスペクトル形状は実験をよく再現することがわかった。以上より、400 MeV 陽子を用いる際の検出器位置の陽子スペクトルは、弾性散乱に PHITS、準弾性散乱などの反応に FLUKA を用いた組み合わせが、実際の値を再現することが判明した。以下に述べる数 GeV 陽子の測定も開始したが、FLUKA の計算が実際の値に近いものと考えられる。

3.4 3 GeV 陽子の DDX 測定

陽子入射の Al の弾性散乱の角度微分断面積は、0.7 GeV まで実験データ [25] が存在するため、実験との比較検討できる。この結果、PHITS に適用される Niita の systematics は実験をよく再現することが知られている。しかし、1 GeV 以上の実験データは存在しないため、比較検討は行えない。計算による 1 GeV と 3 GeV 陽子の弾性散乱断面積を、Fig. 5 に示す。この図では、PHITS、相対論的インパクト近似モデル (RIA [26])、Pearlstein [27] の光学モデル計算 (TOTELA [28])、評価済み核データライブラリ (JENDL-HE [29])、および Niita の systematics

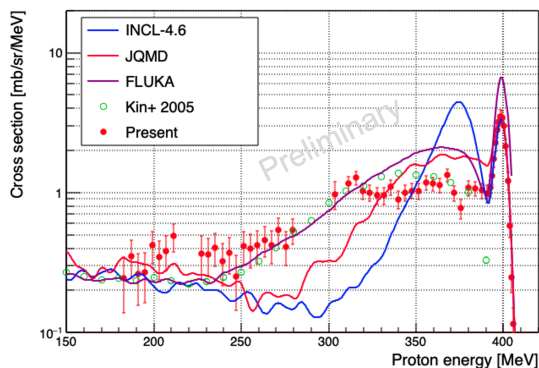


Figure 4: DDX of Al(p,xp) reaction obtained by the present experiment compared with another experimental data [19], calculation with PHITS using INCL-4.6 and JQMD, and FLUKA.

の比較を示す。PHITSは、1.6 GeV陽子と厚い水銀標的と金属箔の放射化を用いた積分実験 [30] において、Niitaのsystematicsではビーム進行方向での最前方の過小評価が見られたため、1 GeV以上のエネルギーでは別のモデルを適用する。本モデルは、Fig. 5より他の計算に比べ 10° 付近の断面積を2桁程度過小評価することがわかる。しかし、1 GeV以上の実験データが存在しないため、この断面積データ取得は加速器施設の放射線評価などにおいて重要となる。

本測定では5台のシンチレータを用い、400 MeV陽子の場合には十分に停止することができたが、数 GeV陽子の場合には停止させることは不可能であった。厚いシンチレータを下流に用いて停止させることを試みた。しかし、厚さ400 mm以上のシンチレータの適用はシンチレーションの集光率悪化を引き起こし、このため明確なスペクトルは観測されなかった。3 GeV陽子の測定結果を、横軸にdE5および縦軸にdE4の測定値としFig. 6に示す。3 GeV陽子は、検出器で停止せずわずかに一部のエネルギー付与しかしないため、明確なエネルギー測定は困難となり、弾性散乱と準弾性散乱の分離は困難であった。今後、上流に10 ps程度の高時間分解能の有する検出器(チェレンコフ放射体)を上流に設置することにより、検出器間の飛行時間法によるスペクトル測定により、高分解能のエネルギースペクトル測定を行う予定である。この測定により、衛星搭載のスペクトロメータの高度化に資するとともに、核反応断面積データの取得により核反応モデルの高度化に資する予定である。

4. 結語

宇宙用半導体のSEE試験のため、数 MeV から 400 MeV の陽子を提供可能な陽子ビーム照射施設の検討した。400 MeV をデグレータで減速し単色陽子を供給を考慮しており、減速過程での陽子のエネルギーの広がりやビーム強度に関し評価した。この結果、本施設でSEE試験に要求される仕様は満足できる見通しがたった。陽子ビーム照射施設の建設により、今後発展が予想さ

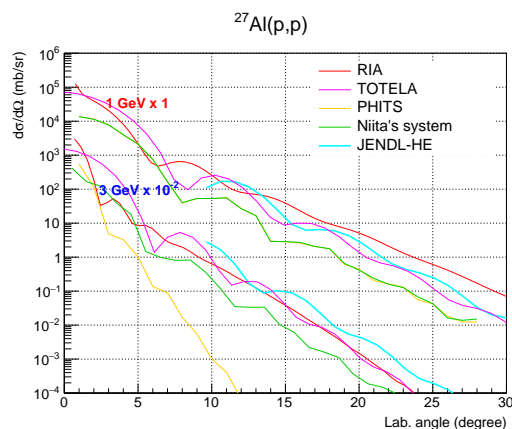


Figure 5: Comparison of angular distribution of elastic cross section by calculations for 1- and 3-GeV protons.

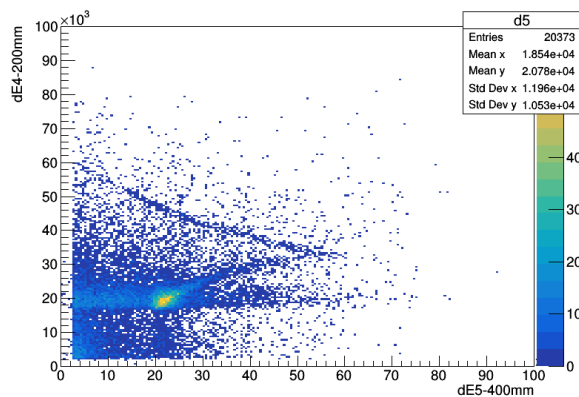


Figure 6: Result of 3-GeV protons observed by dE4 and dE5 detectors showing clear proton band and penetration of protons.

れる宇宙開発事業に貢献できるものと考えられる。

衛星搭載用のスペクトロメータ開発のため、ビームダンプに設置した窓による散乱陽子のエネルギースペクトルを測定した。400 MeV陽子の窓の弾性散乱による陽子強度は、PHITSの計算と一致し、得られたスペクトルは準単色となることが示された。測定データの解析により、Al(p,xp)反応のDDXを導出した。本測定データは、先行研究と概ね良い一致を示すとともに、核計算モデルの検討および改良に繋がった。本データにより、利用者に信頼おける陽子スペクトルを提供することが明確になった。窓の散乱陽子の利用により衛星搭載用スペクトロメータの試験が問題なく実施できることを示した。

謝辞

本実験を遂行するにあたり、J-PARCのLINACおよびRCS、中性子源セクション、放射線安全セクション、核変換ディビジョンの方々の御協力に感謝いたします。また、RIAの計算では、東工大千葉敏先生に感謝いたします。

参考文献

- [1] NASA, “ARTEMIS 計画”, <https://www.nasa.gov/humans-in-space/artemis/>
- [2] 永松 愛子 他, “ARTEMIS 計画における宇宙放射線環境計測分野の重点化とダイナミックレンジエネルギー spektrometer Lunar-RICHeS の開発”, 応用物理学会 東京都市大学 3 月 2024.
- [3] NICT, “CHARMS 開発計画”, <https://seg-www.nict.go.jp/event/oh2022assets/pdf/2.pdf>
- [4] K. Yamamoto *et al.*, “Design and actual performance of J-PARC 3 GeV rapid cycling synchrotron for high-intensity operation”, *J. Nucl. Sci. and Technol.*, 59:1174, 2022.
- [5] H. Matsuda *et al.*, “Measurement of displacement cross-sections of copper and iron for proton with kinetic energies in the range 0.4 – 3 GeV”, *J. Nucl. Sci. and Technol.*, 57:1141, 2020.
- [6] S. Meigo *et al.*, “Measurement of displacement cross section of structural materials utilized in the proton accelerator facilities with the kinematic energy above 400 MeV”, *EPJ Web Conf.*, 239:06006, 2020.
- [7] H. Matsuda *et al.*, “Measurement of thick target neutron yield at 180° for a mercury target induced by 3-GeV protons”, *Nucl. Instr. Meth. B*, 483:33, 2020.
- [8] H. Takeshita *et al.*, “Measurement of nuclide production cross sections for proton-induced reactions on Mn and Co at 1.3, 2.2, and 3.0 GeV”, *Nucl. Instr. Meth. B*, 511:30, 2022.
- [9] T. Sato *et al.*, “Features of Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS Version 3.0”, *J. Nucl. Sci. and Technol.*, 55:684, 2018,
- [10] K. Tsujimoto *et al.*, “Research and Development Program on Accelerator Driven Subcritical System in JAEA”, *J. Nucl. Sci. and Technol.*, 44:483, 2007.
- [11] 斎藤 滋 他, “J-PARC 照射後試験施設概念検討”, JAEA-Tech. 2023-025, 2024.
- [12] H. Takei *et al.*, “Low-power proton beam extraction by the bright continuous laser using the 3-MeV negative-hydrogen linac in Japan Proton Accelerator Research Complex”. *J. Nucl. Sci. and Technol.*, 58(5):588, 2021.
- [13] S. Meigo, M. Ooi, and H. Fujimori, “Two-parameter model for optimizing target beam distribution with an octupole magnet” *Phys. Rev. Accel. Beams*, 23:062802, 2020.
- [14] S. Meigo *et al.*, “Beam commissioning for neutron and muon facility at J-PARC ”, *Nucl. Instr. Meth. A*, 600:41, 2009.
- [15] S. Meigo *et al.*, “Evaluation of the 3-GeV proton beam profile at the spallation target of the JSNS”, *Nucl. Instr. Meth. A*, 562:569, 2006.
- [16] A. Boudard *et al.*, “New potentialities of the Liège intranuclear cascade model for reactions induced by nucleons and light charged particles”, *Phys. Rev C*, 87(014606), 2013.
- [17] STRUCK, “SIS3316 16 Channel VME Digitizer Family”, <https://www.struck.de/sis3316.html>
- [18] L. Brenner *et al.*, “Comparison of unfolding methods using RooFitUnfold”, *Int. J. Mod. Phys. A*, 25(24):2050145, 2020.
- [19] T. Kin *et al.*, “Proton production cross sections for reactions by 300- and 392-MeV protons on carbon, aluminum, and niobium”, *Phys. Rev C*, 72(014606), 2005.
- [20] K. Niita *et al.*, “Analysis of the (N,xN) reactions by quantum molecular dynamics plus statistical decay model”, *Phys. Rev C*, 52, 2620, 1995.
- [21] K. Niita, “High Energy Particle Transport Code NMTC/JAM”, JAERI-Conf 2001-002, page 964, 2001.
- [22] R. E. Chrien *et al.*, “Proton spectra from 800 MeV protons on selected nuclides”. *Phys. Rev. C*, 21:1014, 1980.
- [23] C. Ahdida *et al.*, “New Capabilities of the FLUKA Multi-Purpose Code”, *Frontiers in Physics*, 9(788253), 2022.
- [24] G. Battistoni *et al.*, “Overview of the FLUKA code”, *Annals of Nucl. Ene.*, 82:10, 2015.
- [25] P. G. McManigal *et al.*, “Polarization and Differential Cross Sections in Proton-Proton and Proton-Nucleus Scatterings at 725 MeV”, *Phys. Rev.*, 137(B620), 1965.
- [26] C. J. Horowitz *et al.*, “The Relativistic Impulse Approximation”, *Computation Nuclear Physics I: Nuclear Structure*, 1990:129.
- [27] S. Pearlstein, “Systematics of Neutron Emission Spectra from High-Energy Proton Bombardment”, *Nucl. Sci. Eng.*, 95:116, 1987.
- [28] T. Fukahori *et al.*, “JENDL High Energy File”, *J. Nucl. Sci. and Technol.*, 39(sup2):25, 2002.
- [29] Y. Watanabe *et al.*, “Status of JENDL High Energy File”, *J. Korean Phys. Society*, 59(2):1040, 2011.
- [30] H. Nakashima *et al.*, “Research Activities on Neutronics under ASTE Collaboration at AGS/BNL”, *J. Nucl. Sci. and Technol.*, 39(sup2):1155, 2002.