

加速器施設の安全性向上の研究 一金属構造材の放射線損傷を高精度で評価一

明午 伸一郎*1 Meigo Shin-ichiro 岩元 洋介^{*2} Iwamoto Yosuke 松田 洋樹*1 Matsuda Hiroki

1. はじめに

近年の大強度加速器の発達により、様々な工学的 利用が展開されている。J-PARCでは、2000年より 工学及び物理研究のための様々な加速器施設の建設 が行われて来た。これら施設の1つに、陽子をター ゲットとなる原子核に入射し, その原子核が中性子 や陽子等の核子を多数放出する核破砕反応を利用し た核破砕中性子源である物質・生命科学実験施設 (MLF) がある。核破砕反応において中性子生成数 は、陽子ビームのエネルギーにビーム電流を乗じた ビーム出力に比例するため、大強度の中性子を得る には高い出力を持つ大強度陽子加速器が必要とな る。MLFは2008年に運転を開始し、既に陽子ビー ム出力 600 kW の運転により大強度のパルス中性子 ビームを利用者に安定供給しており、2020年には 短期間ながら1MWの利用運転を行った。また、 陽子ビームを入射したターゲットで生成するニュー トリノやK中間子等のハドロンを利用した素粒子・ 原子核物理の実験が、ニュートリノ実験施設及びハ ドロン実験施設で繰り広げられている。

これらの実験施設は J-PARC の1期計画と位置付 けられ,2008~2009年から利用運転が行われてい る。更に J-PARC では、2期計画として加速器駆動 システムの研究開発のための新たな実験施設¹⁾の建 設を計画している。原子力発電所の使用済み核燃料 には、燃え残った U 等の他に、核分裂反応や中性 子捕獲反応等により生成した放射性物質が含まれ る。これらの放射性物質の中には、人体に対する有

害度や環境負荷が比較的大きく半減期の長い Np, Am 及び Cm 等のマイナーアクチノイドが存在する。 これらを選択的に分離し、その物質の特性に応じて 処理・処分できれば、使用済み核燃料からの環境負 荷を大きく低減できる可能性がある。有害な元素を 分離し、核反応により異なる元素に変換する技術を 「分離変換技術」と称し、(国研)日本原子力研究開 発機構(以下,原子力機構と略す)では、この技術 の研究開発を進めている。分離変換技術の一環とし て、加速器と未臨界原子炉を組み合わせ、運動エネ ルギー数 GeV の高エネルギーの陽子を Pb や Bi 等 のターゲットに照射し,発生した中性子によりマイ ナーアクチノイドを核分裂反応で連鎖的に核変換す るシステムを「加速器駆動システム (ADS)」(図1 参照)と称する。原子力機構が提唱する ADS²⁾では、 数 GeV かつ大強度 (ビーム出力 30 MW) の高エネ ルギー陽子ビームを Pb・Bi からなる液体金属ター ゲットに入射し、核破砕反応により生成した中性子 を未臨界となる原子炉を駆動する中性子源として利 用する。J-PARCでは、ADSのターゲットに関する 研究開発を精力的に行っており、重要な課題の1つ として液体金属ターゲットのビーム入射部であり大 強度陽子ビーム照射に耐えうるビーム窓の開発が挙 げられる。

ADS のビーム窓は常に大強度陽子ビームにさら されるために,窓の放射線損傷評価が重要となる。 また,J-PARC の既存の施設でもビーム窓は用いら れており,MLF,ニュートリノ実験施設,及びハ ドロン実験施設において,それぞれアルミニウム合



図1 原子力機構が提案する加速器駆動システム (ADS)の概要²⁾

金, チタン合金, 及び Be 等の金属が窓材料として 用いられており, 多岐にわたる金属元素の放射線損 傷評価が重要となる。

2. 材料損傷評価基準(原子あたりの弾き出し数)

ビーム窓等の材料の放射線損傷の基準には、原子 あたりの弾き出し数(dpa)が広く用いられている。 一般に、材料の照射による脆化等の効果は、dpaに よってよく表されることが知られており、原子炉や 核融合炉の構造材の評価にもdpaが用いられてお り、dpaは放射線損傷の基準(物差し)となる。 dpa は原子の弾かれやすさを表す「弾き出し断面積」 σ (E) に各粒子の強さ(粒子束 Φ (E))を乗じ,粒 子のエネルギー範囲で積分して導出される。しかし, ADS で重要な GeV エネルギー領域において弾き出 し断面積の実験データはほとんど無く,dpa 計算結 果の妥当性が評価できないという問題があった。特 に,ADS のビーム窓はフェライト系耐熱鋼及びス テンレス鋼等の鉄鋼製であるため鉄の断面積データ が重要であるものの,これまでの研究では Fe に対し て 20 MeV 以上のエネルギー領域で実験データが存 在しなかった。このため,ADS 開発に必要なエネ ルギー領域及び材料に対する実験データが全くな く,計算による損傷評価の妥当性や信頼性が検証で きなかった。また,加速器の電磁石のコイル等に用 いる銅については,数百 MeV の陽子に対する実験 データは存在したものの,エネルギー依存の弾き出 し断面積を計算する複数のモデル間で3倍程度の大 きな違いがあった。このため,GeV 領域における 弾き出し断面積の実験データの取得が喫緊の課題で あった。

3. J-PARC における弾き出し断面積測定実験

本研究では、J-PARC の3 GeV シンクロトロン加 速器施設(RCS)で加速された陽子ビームを用い. FeやCu等の加速器構造材に用いられる元素の陽子 に対する弾き出し断面積を測定した³⁾。陽子ビーム を Fe 等の金属試料に照射すると、原子の弾き出し により金属の格子中に損傷が生じる。この状態の金 属では、マティーセン則に従い電子の流れが阻害さ れ、電気抵抗が高くなる性質を持つ。弾き出し原子 1個で起きる電気抵抗変化は他の研究により分かっ ているため、陽子ビーム入射による電気抵抗変化か ら、弾き出された原子の数を導出できる。更に、そ の原子の数を試料に入射した陽子強度(陽子束強度) で除することで、弾き出し断面積を得ることができ る。本研究では、FeとCu等の金属試料に0.4~ 3 GeV のエネルギーを有する陽子ビームを入射し、 試料の電気抵抗変化から弾き出し断面積を導出し た。ただし、 試料の温度が極低温でない場合には、 熱運動により損傷が緩和し、実際の陽子照射に伴う

弾き出し断面積に起因する電気抵抗変化を正確に測 定できない問題があった。そこで本研究では,試料 を4K程度の極低温に冷却し,損傷の緩和を抑えた。

極低温状態の金属は、電気抵抗の温度依存がほと んど無くなるため、原子の弾き出しによる微弱な電 気抵抗変化が測定可能となる。これまでの同様の実 験では、極低温に冷却するために液体ヘリウムを用 いた冷凍機が用いられていたが、大量の液体ヘリウ ムを用いる大がかりな装置となり、冷却方法も複雑 であった。そのため、限られた大きさを持つ真空容 器内で試料に陽子ビームを照射する加速器施設での 使用は困難となり、加速器施設における弾き出し断 面積の実験的研究は、これまでにほとんど行われて いなかった。近年の冷凍技術の進歩で、小型の冷却 機により液体ヘリウムを取り扱わずに極低温への冷 却が可能となり、加速器施設での実験が行えるよう になった。本研究では、小型の冷却機の中に、極低 温で熱伝導率が小さい優れた絶縁体である窒化アル ミニウムに試料端部を固定し、陽子ビーム入射時の 電気抵抗変化を測定した。試料には直径 0.25 mm 及 び長さ50mmのワイヤーを用い,照射実験の前に 試料を融点付近まで昇温し, 欠損がほとんど無い状 態とした。また、試料ワイヤー以外に陽子ビームが 当たり不要な核反応が起こらないようにした(図2) 参照)。実験開始当初は、真空容器外部からの熱侵 入を十分に防止できなかったため、試料の温度を 10K程度にしか冷却できなかった。冷却試験の試 行錯誤の結果、熱侵入が少ない細い抵抗測定用ワイ ヤーと、熱侵入を遮断するヒートアンカーの採用等



図2 J-PARC で実施した実験装置の概要 左図:3 GeV シンクロトロン加速器施設に設置した冷凍機付き真空容器,中央:冷凍機,右図:鉄試料



図3 本研究で得た鉄及び銅の陽子に対する弾き出し断面積と、他の実験データ及び計算値との比較 PHITS コードに NRT モデル及び arc モデルを組み込み弾き出し断面積との比較を示す

により外部の熱侵入を徹底して防止することができ, 試料の温度を4K程度にまで冷却可能となった。ま た, 直径 0.25 mm の試料の中心に陽子ビームの位 置を合わせる高精度なビーム制御技術が必要であっ たが, J-PARC で培った陽子ビーム制御・測定技術⁴⁾ を最大限に活用することでこれを可能とした。以上 の工夫により, ADS で用いられる陽子ビームのエ ネルギー領域における Fe と Cu の弾き出し断面積を 測定し, 特に Fe については世界初のデータとなった。

4. 実験と計算モデルの比較検討

取得した弾き出し断面積を計算モデルによる断面 積と比較した結果を図3に示す。放射線による材料 の損傷評価は、近年の計算科学の進歩により飛躍的 に発展しており、JAEA で開発を進めている PHITS コード 5 を活用した研究が進められてきた。弾き出 し断面積は、低エネルギー陽子の場合にはクーロン 散乱による弾き出しが支配的となり. エネルギーが 高くなるにつれクーロン散乱の効果は減少し、核破 砕反応等の原子核反応による二次粒子生成反応によ る効果が支配的となる。このため、弾き出し断面積 の評価には、クーロン散乱と原子核反応の適切な評 価手法が必要となる。本研究では、PHITS に原子の 弾き出しモデルを組込み。,弾き出し断面積を計算 した。まず、原子炉の燃料被覆管や構造材、核融合 炉等の材料の損傷評価にこれまで一般的に用いられ てきた NRT モデル⁷⁾ との比較を行った。NRT モデ ルは考案者 (Norgett, Robinson 及び Torrens) の頭文 字の略称となり,計算値は10 MeV 以下の陽子に対 する実験値と比較的よい一致を示すことが知られて いた。本実験データにおける数 GeV 領域のエネル ギー範囲では,計算値は実験値の2~3 倍であり, これまでのNRT モデルによる dpa 評価には問題が あることが明らかになった。

最新の分子動力学法 (MD) に基づく評価では,弾 き出された原子は低温状態であっても 10 ps 程度の極 めて短い時間において、一定の割合で元の状態に戻 る非熱的再結合を考慮した(Athermal Recombination Correction: arc) モデルの有用性が様々な研究により 示唆されている[®]。そこで, arc モデルを PHITS コー ドに組み込み、弾き出し断面積を計算した。この結果、 arc モデルの計算値は本実験値及び先行研究となる低 エネルギー領域における実験値 9-12) と良い一致を示 した。低エネルギー領域において,NRT モデルと arc モデルの違いは少ないものの、エネルギーの増加と 共に違いが顕著となる。この理由は、弾き出される 標的原子や二次粒子のエネルギーの増加に従い、非 熱的再結合の効果が高くなるためである。arc モデル の適用により高い精度で材料の損傷評価が行えるよ うになった。

5. まとめと今後の展望

本研究成果より、ADS の GeV 領域の陽子ビーム エネルギーにおける弾き出し損傷は arc モデルの適 用により精度良く評価できることを示した。これに より、ADS のビーム窓のみならず、J-PARC 実験施 設のビーム窓や MLF 核破砕中性子源の水銀ター ゲットの鉄鋼製容器等,高エネルギー加速器施設で 使われる材料の損傷を精度良く評価できるようにな り,加速器施設の安全性向上に貢献した。

今後において, J-PARCのメインリングシンクロ トロン (MR),米国のフェルミ国立研究所 (FNAL) や欧州原子核研究機構 (CERN)の加速器 (SPS) を用い,更に高いエネルギー領域の弾き出し断面積 測定を行い,高エネルギー領域における損傷評価の 研究を進める予定である。

謝辞

本研究開発を進めるにあたり,共同研究者となる 吉田 誠,前川 藤夫,岩元 大樹,長谷川 勝一,中本 建志, 石田 卓,牧村 俊助の各博士に感謝します。また,実 験を進めるにあたり,J-PARC センターの加速器ディ ビジョンを筆頭に,安全ディビジョン等数多くの方 の協力をいただき感謝します。実験装置の製作にお いて,コミヤマエレクトロン(株)の方々には格別の ご支援をいただきここに感謝します。本研究は,文 部科学省の原子力システム研究開発事業による委託 業務として,日本原子力研究開発機構が実施した 「J-PARC を用いた核変換システム (ADS)の構造材 の弾き出し損傷断面積の測定」による。

参 考 文 献

- 1) 核変換ディビジョン, J-PARC 核変換実験施設 技 術設計書 -ADS ターゲット試験施設 (TEF-T)-, JAEA-Tech., 2017-003 (2017)
- Tsujimoto, K., et al., J. Nucl. Sci and Technol., 44, 483-490 (2007)
- Matsuda, H., et al., J. Nucl. Sci and Technol., 57, 1141-1151 (2020)
- 4) Meigo, S., et al., Phys. Rev. Accel. Beams, 23, 062802 (2020)
- 5) Sato, T., et al., J. Nucl. Sci and Technol., **55**, 684-690 (2018)
- Iwamoto, Y., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A, 27, 57-64 (2012)
- 7) Norgett, M., et al., Nucl. Eng. Des., 33, 50-54 (1975)
- 8) Nordlund, K., et al., Nat. Commun., 9, 1084 (2018)
- 9) Jung, P., J. Nucl. Mater., 117, 70-77 (1983)
- 10) Iwamoto, Y., et al., J. Nucl. Mater., 458, 369-375 (2015)
- 11) Iwamoto, Y., et al., J. Nucl. Mater., 508, 195-202 (2018)
- Greene, G., et al., Proc. of 6th Int. Meet. on Nucl. Application of Accel. Tech. (AccApp'03), Illinois, USA (2004)

(*1日本原子力研究開発機構 J-PARC センター
*2日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター)