

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 6 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820450

研究課題名(和文) 広範なエネルギーのあらゆる粒子に対応したはじき出し損傷モデルのための実験的研究

研究課題名(英文) Experimental research of radiation damage model for various particles in wide energy region

研究代表者

岩元 洋介 (Iwamoto, Yosuke)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力基礎工学研究センター・研究副主幹

研究者番号：10391327

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：陽子線治療用加速器などの金属材料の照射損傷評価を対象とした、照射損傷計算モデルの検証のため、高エネルギー(20MeV～1GeV)陽子照射に対する金属の照射損傷の測定手法を開発した。その結果、様々な加速器施設で利用可能な小型極低温照射装置の開発に成功し、照射中、銅のナノオーダーの電気抵抗増加を測定可能とした。実験値は、国際原子力機関IAEAの共同研究活動「初期の放射線損傷断面積」に活用され、その中間とりまとめ報告の中で採用された。

研究成果の概要(英文)：The measurement method of radiation damage on metals under high-energy proton irradiations has been developed to validate the radiation damage model used for radiation damage estimation on materials in accelerator facilities. As results, we developed the small cryogenic irradiation device which is available in various accelerator facilities and measured resistivity increase with nano-ohm order under irradiations. The data has been reported in the IAEA's research activity on "Primary radiation damage cross sections".

研究分野：原子力学

キーワード：照射損傷 高エネルギー 陽子 極低温 はじき出し断面積

1. 研究開始当初の背景

(1) J-PARC ADS ターゲット試験施設(TEF-T)等の加速器機器の健全性を見積もり、安全に稼働するため、放射線による構造材の照射損傷を評価することが重要となる。この指標として、はじき出し断面積を用いて計算されるDPA値(照射によりはじき出された格子原子数の、照射領域に存在する全格子原子数に対する比)がある。研究代表者は、従来の20MeVまでの中性子の核反応だけでなく、1TeVまでの様々な粒子の核反応について、粒子輸送計算コードPHITSを活用したDPA値を計算できる照射損傷計算モデルを開発してきた。

(2) 照射損傷計算モデルの精度の検証に必要な実験値として、米国ブルックヘブン国立研究所(BNL)によるGeV単位の陽子照射に対する銅のはじき出し断面積があるが、TEF-T等の設計評価で必要な20MeVから1GeVの陽子照射に関する実験値は世界的に皆無であった。実験値は、欠陥の修復が生じない極低温環境下(15K以下)での照射欠陥(格子間原子と空孔の生成)に伴う金属の電気抵抗率増加(ρ)及びビームフルエンス(個/m²)の測定値を用いて表される。これまで唯一の実施例となるBNLでの実験手法は、サンプルの冷却に、取扱いが煩雑な液体ヘリウム冷媒を必要としたため、液体ヘリウムを取り扱えない施設での適用は不可能であった。

2. 研究の目的

(1) 高エネルギー陽子照射に対する照射損傷計算モデルの高精度化を目的とする、様々な加速器施設で実験可能な、はじき出し断面積の測定手法を開発する。

3. 研究の方法

(1)本研究では、京都大学原子炉実験所FFAG加速器施設の125MeV陽子ビームラインの照射チェンバーを用いて、可搬型の小型冷凍機を活用した無冷媒による電気抵抗測定手法を開発した(図1)。

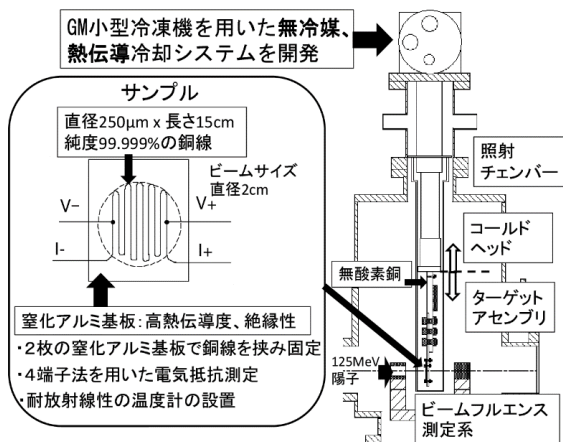


図1 本研究により開発した極低温陽子照射装置。サンプル付属のGM冷凍機を照射チェンバー上部から挿入。

ここでは、4K程度まで冷却可能な市販の全長50cm程度のギフォード・マクマホン(GM)冷凍機のコールドヘッドに無酸素銅及びアルミニウム板からなる高熱伝導度の熱伝導体を通して、サンプルを無冷媒で簡便に熱伝導冷却する手法を考案した。幾何形状及び純度が既知のサンプルの使用、及び簡便なサンプル交換を可能とするため、サンプルに市販の高純度の銅線を採用し、サンプルを高熱伝導度かつ電気絶縁性を持つ窒化アルミニウム板で挟み込む構造とした。また、照射中にサンプルの温度を正確に測定するため、サンプルを覆う窒化アルミニウム板上に放射線耐性の強いセルノックス抵抗温度計を固定する手法を考案し、照射中のサンプルの温度変化をリアルタイムで測定する手法を開発した。はじき出し断面積の評価に必要なナノオーダーの電気抵抗の変化を精密に測定するため、電流源付ナノボルトメータのデルタモードを活用した電気抵抗測定手法を開発した。

4. 研究成果

(1) 本装置の冷却試験結果から、サンプル上の温度を300Kから12Kまで冷却し、電気抵抗を52mΩから28.8µΩ(約1/1700)まで低減させることに成功し、数十ナノ程度の照射欠陥による電気抵抗変化を測定できる環境を確立した。開発した極低温陽子照射装置を用いて、エネルギーが125MeV、ビーム強度が1nAの陽子照射環境において、図2に示すようにリアルタイムで揺らぎが数ナノ程度の微小な電気抵抗変化の測定が可能となり、ビーム照射中もサンプル温度を常に13K以下の極低温環境下に保持することに成功した。

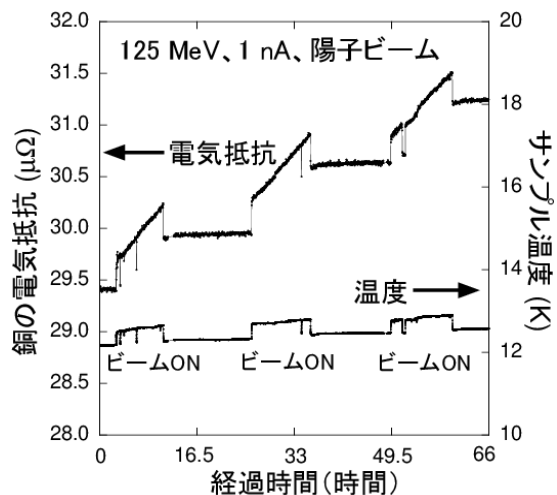


図2 エネルギー125MeVの陽子照射環境における、銅の電気抵抗変化とサンプルの温度変化。

(2) 確立した測定装置を活用した実験で得た照射欠陥に伴う銅の電気抵抗の増加とビームフルエンスから、125MeV陽子に対する銅のはじき出し断面積を初めて取得した。その結果、図3のように、核反応モデルを含まな

い従来の照射損傷計算モデル SRIM は、本実験値及びBNLにおける実験値を著しく過小評価するのに対し、研究代表者が開発した核反応の寄与を含むPHITSのはじき出し損傷モデルは、核反応生成物によるはじき出し損傷を考慮した計算を行うため、実験値を格段に良く再現することを明らかにした。

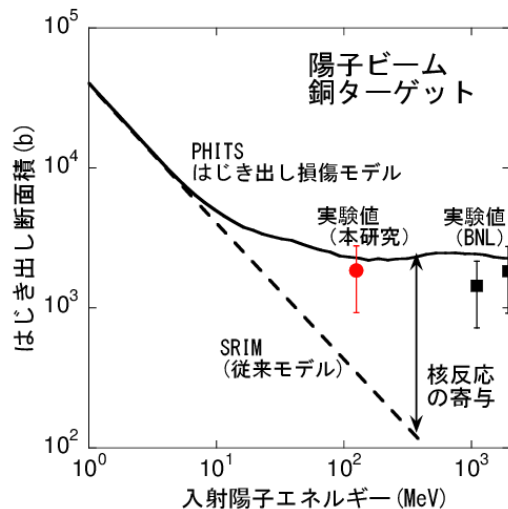


図3 陽子ビームエネルギーに対する銅のはじき出し断面積。赤丸：本研究の実験値、四角：BNLにおける実験値、実線：PHITSによる計算値、点線：SRIMによる計算値。

(3) さらに、図1のターゲットアセンブリにヒーターを装着して、照射後の焼鈍(アニール)による照射欠陥の消滅過程を以下の手順で実施した。

温度コントローラを用いて、サンプル上の温度を12Kから15Kにする。

10分間、サンプルの温度を15Kに保つ。

アニール後、12Kまで冷却し、そのときの電気抵抗を計測する。

その後、アニール温度を5~100K毎挙げ、~の操作を300Kまで繰り返す。

図4にアニール温度に対する、放射線照射による電気抵抗増加の熱回復を示す。

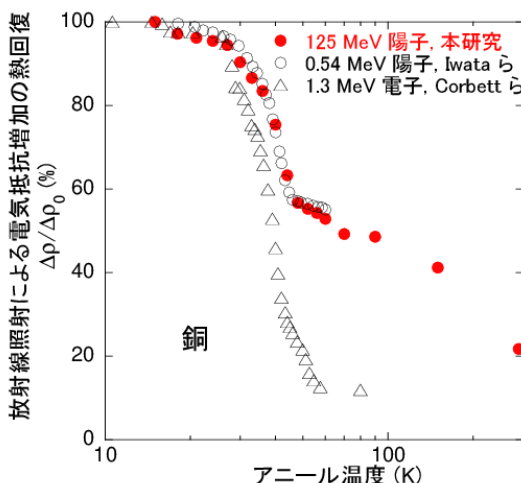


図4 アニール温度に対する、放射線照射による電気抵抗増加の熱回復。

125MeV 陽子照射に対する銅の熱回復は、0.54MeV 陽子照射による熱回復と同程度であること、300Kのアニールに対し約20%欠陥が残ることがわかった。

(4) これらの実験値は、国際原子力機関 IAEA の共同研究活動(CRP)「初期の放射線損傷断面積」の評価活動に活用し、その中間とりまとめ報告(INDC(NDS)-0691)の中で採用された。国際ワークショップ「超伝導磁石材料における放射線効果」(RESMM'15)では、熱回復の実験値は加速器施設での超伝導磁石のクエンチ(超伝導状態の消失)評価に必要な不可欠との総意があり、引き続き実験の継続を強く要請された。今後は、本研究により開発した極低温照射装置を活用して、様々なエネルギー、金属に対する系統的なはじき出し断面積を測定し、損傷モデルの信頼性を向上させるための検証と改良を進める。アニールによる欠陥消滅過程も明らかにする。

<引用文献>

G.A. Greene et. al.,
Direct measurements of displacement cross sections in copper and tungsten under irradiation by 1.1-GeV and 1.94-GeV protons at 4.7 K,
Proceedings of Sixth International Meeting on Nuclear Applications of Accelerator Technology (AccApp'03),
Ja Grange Park, Illinois, USA, 2004, p.881-892.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 2件)

Yosuke Iwamoto, Toshimasa Yoshiie, Makoto Yoshida, Tatsushi Nakamoto, Masaaki Sakamoto, Yasutoshi Kuriyama, Tomonori Uesugi, Yoshihiro Ishi, Qiu Xu, Hiroshi Yashima, Fumiaki Takahashi, Yoshiharu Mori, Toru Ogitsu,
Measurement of the displacement cross-section of copper irradiated with 125 MeV protons at 12 K, Journal of Nuclear Materials 458 (2015) 369-375. 査読有
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.12.125>

Y. Iwamoto,
Calculations of PKA spectra and kerma factors using PHITS code and measurement of displacement cross section of copper irradiated with 125 MeV protons
Summary Report of the Second Research Coordination Meeting of the IAEA CRP, Primary Radiation Damage Cross Sections, INDC(NDS)-0691, (2015) p22-27. 査読無
<https://www-nds.iaea.org/publications/indc/indc-nds-0691.pdf>

〔学会発表〕(計 3件)

Yosuke Iwamoto (代表),

Measurement of damage rate of copper irradiated with 125 MeV protons at 12 K and comparison with PHITS results,
Radiation Effects in Superconducting Magnet Materials 2015(RESMM '15),
2015年5月11-14日
「イーストランシング (米国・ミシガン州)」

岩元洋介(代表),

極低温下での陽子照射による銅の電気抵抗変化測定のための装置開発
第49回京都大学原子炉実験所学術講演会
2015年1月28-29日
「京都大学原子炉実験所 (大阪府・熊取町)」

岩元洋介(代表),

125MeV 陽子照射による銅のはじき出し断面積測定の検討、日本原子力学会 春の年会
2014年3月26日
「東京都市大学 (東京都・世田谷区)」

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩元 洋介 (IWAMOTO, Yosuke)

日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門
原子力基礎工学研究センター・研究副主幹

研究者番号：10391327

(2) 研究協力者

義家 敏正 (YOSHIE, Toshimasa)

京都大学・原子炉実験所・研究員

研究者番号：20124844

吉田 誠 (YOSHIDA, Makoto)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師

研究者番号：70379303

中本 建志 (NAKAMOTO Tatsushi)

高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター・教授

研究者番号：20290851

栗山 靖敏 (KURIYAMA Yasutoshi)

京都大学・原子炉実験所・助教

研究者番号：60423125