

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14630

研究課題名（和文）放射線検出器応答の再現モデル開発に向けた電子飛跡構造解析コードの開発と実験検証

研究課題名（英文）Development and experimental validation of an electron track structure code to develop a model for reproducing radiation detector response

研究代表者

平田 悠歩（Hirata, Yuho）

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 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター・研究員

研究者番号：30881057

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：放射線検出器の検出過程を理論的に再現することを目的とし、放射線の挙動をナノスケールで精密に計算できる新機能を放射線輸送計算コードPHITSに開発した。この新機能は検出器の評価に必須である励起電子の生成を模擬できる。さらに、開発した機能を応用して蛍光体検出器の粒子線に対する応答を予測するモデルを開発した。このモデルによる予測と実験値を比較することで、このモデルが検出過程を正確に再現していることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により開発されたシミュレーションコードは、放射線検出器の検出過程をナノスケールで精密に解析する能力を備えている。これにより、放射線検出器の測定結果の補正や新たな検出器の開発に役立てることが可能となり、正確な放射線量の評価を通じて、より安全な放射線利用に貢献できる。さらに、このコードは検出器応答の評価に限らず、様々な物質への放射線影響を評価するための汎用モデルとして使用可能である。これにより、材料損傷のメカニズム解析など、幅広い分野での応用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：The goal of this research was to theoretically reproduce the detection process of radiation detectors by developing a new feature in the radiation transport calculation code PHITS, which precisely calculates radiation behavior at the nanoscale. This new feature can simulate the generation of excited electrons, essential for evaluating detector responses. Additionally, a model was developed to predict the response of phosphor detectors to particle radiation. Comparisons with experimental data confirmed that this model accurately reproduces the detection process.

研究分野：放射線物理

キーワード：モンテカルロシミュレーション 放射線計測 電子挙動解析 消光現象 重粒子線

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

放射線のエネルギーに対する検出器応答の非線形性は、線量を正しく評価できない可能性があり重大な問題である。中でも、粒子線などの放射線種の違いにより検出器応答の線形性が変化する放射線種依存は、蛍光体においては消光現象や、半導体検出器においてはパルス波高欠損が知られており、放射線計測の重大な課題となっている。正確に線量を評価するためには、検出器応答の補正が必要であるが、多種類の放射線が混在する場では検出器の放射線種依存により補正係数の決定が困難である。

このような場においても放射線検出器の応答を補正するためには、検出器の応答変化を正確に予測する必要がある。そのためには、検出器に放射線が入射してから検出器信号として検出されるまでの過程を解析し、応答変化の原理を解明する必要がある。検出器に入射した放射線は一般的にエネルギー付与を繰り返し大量の二次電子を生成し、これらの二次電子が低エネルギーな電子となり電気信号や発光に変換されることで放射線が検出される。この過程の解析には低エネルギー電子の挙動をナノスケールで評価する必要があるため、実験的な評価は困難である。すなわち、放射線の検出メカニズムを明らかにし、その応答を正確に予測するためには理論的なシミュレーションによる解析が不可欠である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、放射線検出器が放射線を検出する詳細な過程を理論的に解明するため、放射線の挙動を精密に計算できるシミュレーションコードを開発することである。そこで、汎用的な放射線輸送計算コードとして様々な用途で用いられている電子・重イオン輸送計算コード (PHITS) において、放射線の挙動をナノスケールで追跡できる機能を開発する。さらに、開発した機能を使用して、放射線検出器の応答を予測し、その予測結果を実験値と比較することにより、開発したシミュレーションコードの精度を検証する。

3. 研究の方法

PHITS の飛跡構造解析モードは物質中の放射線の相互作用を一つ一つ再現し、入射粒子の挙動を逐次的に計算することができる。すでに、任意の物質中における粒子線の飛跡構造解析モードは実装されているが、電子線の飛跡構造解析モードで使用する断面積は物質に依存するため、電子線の飛跡構造解析は水や半導体シリコン(Si)などの特定の物質に限定されていた。放射線検出器物質においても電子線の飛跡構造解析を行うため、まず任意の物質で使用できる電子線飛跡構造解析モード (ETSART) を開発した。

ETSART の開発には電子線の電離と励起の断面積が必要である。本研究では新たに、物質の組成、密度、バンドギャップエネルギーから電離と励起の断面積を計算するモデルを開発した。この断面積モデルと PHITS の粒子輸送アルゴリズムを組み合わせることで PHITS の新機能として ETSART を開発した。

次に、PHITS を用いた検出器の検出メカニズム解析として、蛍光体の粒子線に対する消光現象を PHITS で再現した。蛍光体における消光現象は粒子線が高密度にエネルギーを付与したことによる、発光中心の局所的な飽和現象であると考えられる。そこで、この消光現象をシミュレーションにより再現するための発光ドメインモデルを開発した。このモデルでは、蛍光体が発光中心を一つ含む発光ドメインに分割し、蛍光体の発光量は励起電子を一つ以上含む発光ドメイン

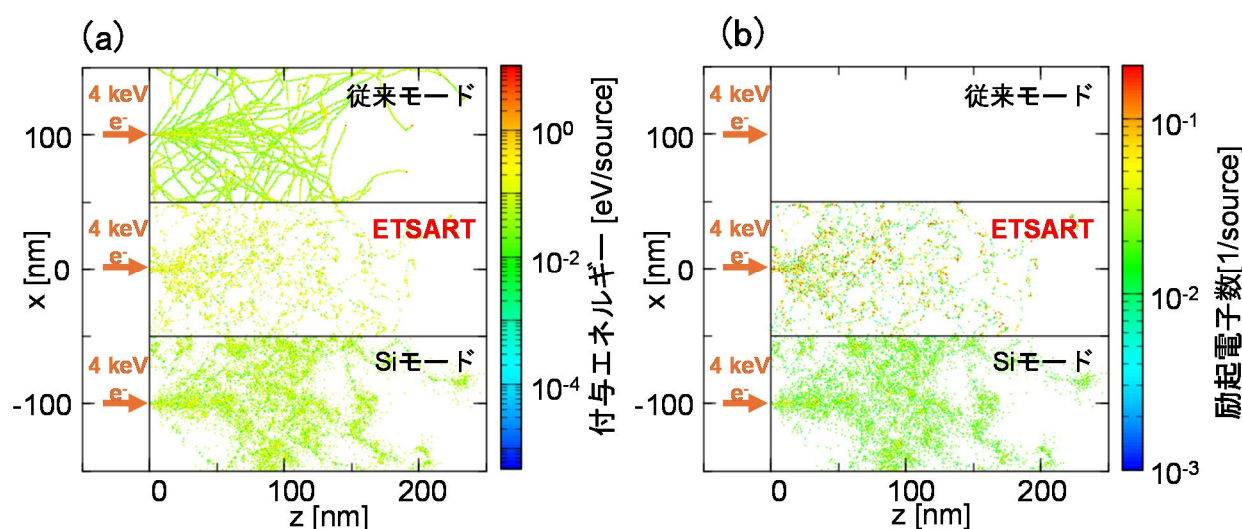


図1 PHITS で計算した Si 中の(a)エネルギー付与分布、(b)励起電子数分布

の数に比例すると仮定した。PHITS には粒子線の飛跡構造解析モードが実装されているため、今回開発した ETSART と組み合わせることで粒子線による励起電子の生成分布を計算することが可能である。PHITS で計算した励起電子分布と消光現象モデルを組み合わせて、線量計素子として使用されている蛍光体 BaFBr:Eu にヘリウム線と炭素線を照射した際の応答を再現し、実験値と比較した。

4. 研究成果

図1に半導体 Si に 4 keV の電子線を照射した際のエネルギー付与分布と励起電子の生成分布を示す。開発した ETSART は Si 用に開発された飛跡構造解析モード (Si モード) と同様に、電子線によるエネルギー付与分布をナノスケールで計算することができている。また、図1(b)に示す通り従来の電子輸送アルゴリズムでは計算できていなかった励起電子数分布を計算することが可能となった。次に、一つの電子を生成するのに必要なエネルギー (ϵ 値) を様々な半導体物質で計算した結果を図2に示す。計算した結果は約 10% 程度の精度で実験値と一致した。 ϵ 値は検出器の特性を表す重要な値となる。なお、従来 ϵ 値とバンドギャップエネルギーの関係は単純な直線モデルで考えられていたが、ETSART での計算によりその関係は非線形関数となることがわかった。これは、バンドギャップが大きいほど競合過程にエネルギーが使用されず、単位エネルギー当たりの励起電子の生成数が増加するため、 ϵ 値としては直線関係を想定した値よりも小さくなったと考えられる。

図3に BaFBr:Eu にヘリウム線と炭素線を照射した際の水中線量分布を示す。BaFBr:Eu の検出器出力は消光現象により、粒子線のエネルギー付与密度が高くなるブラッグピーク付近で低下している。PHITS を用いたモデルにより予測した線量分布は二種類の粒子線における BaFBr:Eu の消光現象を再現に成功した。

今回開発した飛跡構造解析モードや局所飽和モデルは蛍光体だけでなく様々な検出器の開発に理論的な根拠を与えるツールとして貢献することが期待できる。

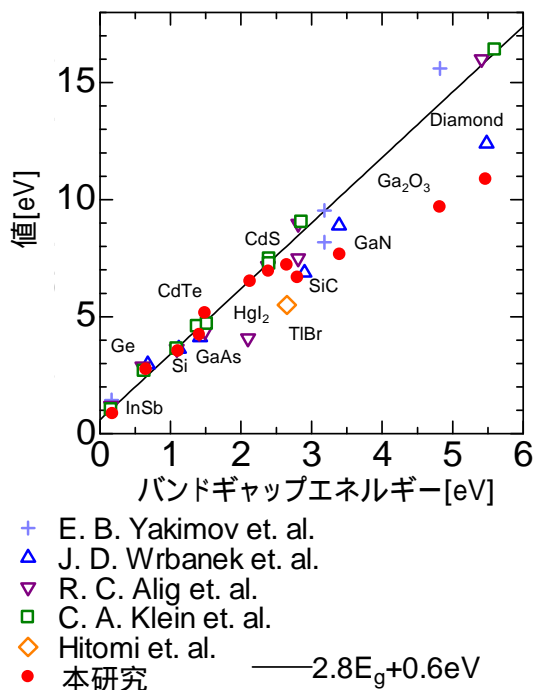


図2 ETSART で計算した ϵ 値と物質のバンドギャップエネルギーの関係

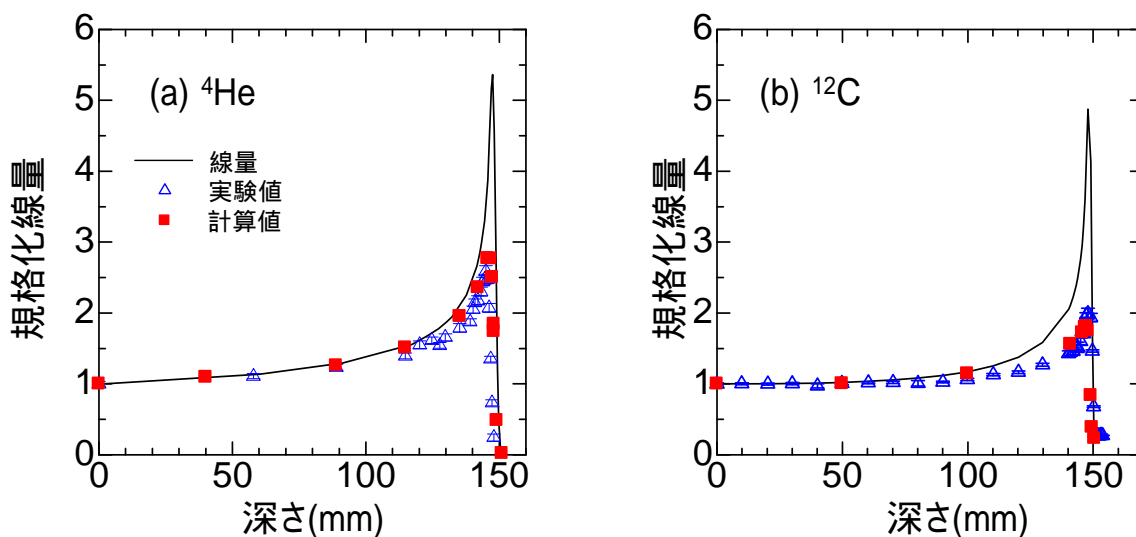


図3 BaFBr:Eu で測定した(a)⁴He、(b)¹²C の水中線量分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hirata Yuho, Kai Takeshi, Ogawa Tatsuhiko, Matsuya Yusuke, Sato Tatsuhiko	4. 巻 61
2. 論文標題 Implementation of the electron track-structure mode for silicon into PHITS for investigating the radiation effects in semiconductor devices	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 106004 ~ 106004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac8ae9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirata Yuho, Kai Takeshi, Ogawa Tatsuhiko, Matsuya Yusuke, Sato Tatsuhiko	4. 巻 62
2. 論文標題 Development of an electron track-structure mode for arbitrary semiconductor materials in PHITS	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 106001 ~ 106001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ad00f4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirata Yuho, Kai Takeshi, Ogawa Tatsuhiko, Matsuya Yusuke, Sato Tatsuhiko	4. 巻 547
2. 論文標題 Development of a model for evaluating the luminescence intensity of phosphors based on the PHITS track-structure simulation	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms	6. 最初と最後の頁 165183 ~ 165183
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2023.165183	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 平田悠歩、甲斐健師、小川達彦、松谷悠佑、佐藤達彦
2. 発表標題 マイクロな線量付与に着目した蛍光体放射線検出器の応答予測モデルの開発
3. 学会等名 応用物理学会 極限的励起状態の形成と量子エネルギー変換研究グループオンライン研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平田悠歩、甲斐健師、小川達彦、松谷悠佑、佐藤達彦
2. 発表標題 PHITSによる任意の物質に対する電子線飛跡構造計算に向けた基礎検討
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Hirata, T. Kai, T. Ogawa, Y. Matsuya, T. Sato
2. 発表標題 Analysis of radiation interactions in phosphors using the PHITS trackstructure mode for evaluating the response of radiation detectors
3. 学会等名 21st International Conference on Radiation Effects in Insulators (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関