

審査の結果の要旨

氏名： 小川 達彦

本研究は近年深刻な問題となっている中高エネルギーの陽子やイオンによる放射化を正確に評価するために、①放射線輸送計算シミュレーションの放射化予測精度究明、②精度向上に必要なシミュレーションの改善点の究明、③放射化を予測する手法の精度を検証するためのベンチマーク実験結果の提供、④イオンの直接照射を受ける物体の放射化断面積の提供、を目的として行われたものである。

第1章では、近年の中高エネルギー加速器において放射化が深刻な問題であることを示し、先行研究の知見ではその広範な見積もりが困難であることを述べた。そこで、本研究では放射化を見積もる予測手法として放射線輸送計算シミュレーションに注目したこと、それに沿って研究の目的を設定したことを述べた。

第2章として、本研究で用いた手法について述べた。検出器の校正法や誤差の評価方法、本研究で用いたシミュレーションコード (FLUKA, PHITS) とその使用法などを示した。

第3章では、中高エネルギーイオンにより直接照射を受けるターゲットの放射化について述べた。第1節では、鉄ターゲットへの中高エネルギーイオン(230 MeV/u He, 400 MeV/u C, 800 MeV/u Si) 照射により発生した放射性核種について、測定値とシミュレーションの比較を論じた。その結果、シミュレーションは約3倍の範囲内で実験結果を再現すること、評価精度が特に低い条件が判明したことを述べた。第2節と第3節では、第1節で断面積のエネルギー依存性が課題となったことから、断面積をエネルギーの関数として測定する手法について述べた。第2節では、500 MeV/u の鉄イオンを炭素ターゲットに照射し、鉄イオンの破砕片を計測することで断面積を測定する手法を考案したが、目的とする精度に達しないことを述べた。第3節では、鉛のターゲットに炭素イオン(400 MeV/u)を照射し、鉛ターゲット中に生成する核破砕片を計測することで断面積を測定する手法について述べた。これにより、鉛と炭素の反応による核種生成断面積 23 種類が 50 点弱のエネルギーにおいて得られ、計算コードとの比較を論じた。

第4章では、中高エネルギーイオン(230 MeV p, 230 MeV/u He, 400 MeV/u C, 800 MeV/u Si)に鉄ターゲットが照射されることで、周辺のコングリートにおいて発生する放射化について述べた。第1節では、ターゲットの前方に配置されたコングリート(遮蔽体)で発生する放射化を、中性子捕獲、核破砕の放射化検出器 (Au, In, Mn, W, Al, Bi)で測定し、シミュレーションと比較した。その結果、発生する放射能は、シミュレーションによって3倍の範囲内で再現できること、乖離の原因は線源となる中性子のスペクトルをシミュレーションが正しく計算できないことにあると示された。第2節では、ターゲットの側方に配置されたコングリート(遮蔽体)において発生する放射化を、中性子捕獲、核破砕の放射化検出器で測定し、シ

シミュレーションによる計算値との比較について述べた。その結果、発生する放射能は、シミュレーションによって約4倍の範囲内で再現できることが示され、その乖離に最も影響するのが、ターゲットから放出される中性子のスペクトルであったことを述べた。

第5章では、本研究を通して行ったシミュレーションの実際の施設への適用性を確認する目的で、欧州原子核研究所のATLAS検出器を例に、遮蔽コンクリート内での放射化反応を計算した。その結果汎用的な性能の計算機(CPU 2.8GHz)を用いて15日以内で、10%の統計精度を持つ計算値が得られた。計算結果は物理的な背景から鑑みて妥当なものであり、適切な計算値が得られていることが確認された。

第6章では、本研究で得られた成果を以下のように総括した。放射線輸送計算コードは4倍の範囲内で放射能の評価を行うことが可能であり、実際の廃止措置で要求される精度(10倍)と比べて十分に良い精度である。また、本研究を通じて行われた実験とシミュレーションの比較から、シミュレーションの問題点を明らかにすることができ、たとえばFLUKAコードにおける原子核反応モデルRQMDとBMEの接続性の問題が明らかになった。それらの計算コードの問題点はコードの開発チームにフィードバックされ、その改良に貢献した。また、断面積や放射化のベンチマークデータなど、今後シミュレーションの検証以外に汎用的に使えるデータの提供も行った。

本研究の成果は、中高エネルギーの陽子・イオン加速器において発生する放射化を予測し、廃止措置時の廃棄物処分を効率的に行うことを可能にするものである。また、本研究で得られた各種のデータは、計算コードの改良や断面積データの提供を通して中高エネルギー加速器施設における放射線安全の高度化に寄与することが期待できる。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。