

氏 名	長谷川 和 男
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成 2 年 3 月 28 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 原子核工学専攻
学 位 論 文 題 目	核融合炉構成材におけるガンマ線生成断面積 に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 梶山 一典
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 梶山 一典 東北大学教授 平川 直弘 東北大学教授 中村 尚司 東北大学助教授 古田島久哉

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

将来のエネルギー源として核融合炉の研究開発が推進されている。多くの核融合反応の中でも、最も実現可能性が高いとされる D-T 反応では、発生するエネルギー ($Q = 17.6\text{MeV}$) の 8 割が中性子に与えられ、いわゆる「14MeV 中性子」が生成する。中性子は核融合炉構成材との相互作用でエネルギーを失い、非弾性散乱に代表される反応では、この過程に伴いガンマ線で生成する。核融合炉におけるブランケット部分での発熱の 4 割、超電導マグネット部分での発熱の 9 割以上は、中性子の入射により生成するガンマ線によるものである。このように、核融合炉で発生する熱の評価やガンマ線に対する遮蔽設計に、ガンマ線生成断面積は不可欠なデータとなる。

核融合炉の核設計には、14MeV までの中性子エネルギー領域に対するデータが要求される。しかし、8 MeV から 14MeV までのエネルギー領域は、設計における高い重要性にもかかわらず、単色中性子発生源の問題から、他のエネルギー領域に比較して精度の高い測定データが非常に乏しい現状にある。

本研究は、8~13MeV の中性子エネルギー領域における単色中性子源を開発し、ガンマ線生成断面積の測定と、値の精度を高める解析手法の確立を目的とする。

第2章 8～13MeV領域の中性子源の開発と γ 線生成断面積の測定

本章では、8～13MeV領域の単色中性子源の開発と、ガンマ線生成断面積の測定について述べた。

日本原子力研究所タンデム加速器により加速した重陽子を重水素ガスターゲットに衝撃し、 $D(d, n)^3\text{He}$ 反応を用いて7.8および10.0MeVの中性子を生成した。それ以上のエネルギーで急激に増大するブレイクアップ中性子の影響を避けるために、 $^1\text{H}(^{11}\text{B}, n)^{11}\text{C}$ 反応を用いた中性子源を開発し、11.5および13.0MeVの中性子を生成した。本研究ではこれらの中性子源の特性を調べ、単色中性子源として十分に使用可能であることを明らかにしてガンマ線生成断面積の測定に適用した。

ガンマ線生成断面積の測定は、核融合炉におけるガンマ線の生成に重要な元素であるC, O, Al, Si, Fe, Ni, Cu, PbおよびBiを対象とした。試料の形状は円柱形であり、測定角度は 90° である。他の測定結果との比較や生成するガンマ線の角度依存性を調べるために、中性子エネルギー11.5MeVでは 125° における測定も行なった。

ガンマ線の測定には、 $3''\phi\times 6''$ のNaI(Tl)検出器を $10''\phi\times 10''$ の環状NaI検出器と組み合わせてアンチコンプトンモードで使用した。また、測定試料で散乱された中性子によるバックグラウンドの除去のために γ -TOF法を採用した。

第3章 測定データ解析手法の開発

本章では、ガンマ線生成断面積の測定により得られたデータに対する解析手法について述べた。測定されたガンマ線波高分布からエネルギー分布を得るために、ガンマ線検出器の応答行列を用いてアンフォールディングを行わなければならない。本研究では、応答行列を求めるための計算コードNAIRESPをはじめとし、データ解析に必要な次の計算コード群を開発作成した。

測定試料が有限の大きさを持つことに起因するサンプルサイズ効果に対し、MNSCATとCOMPCALCの2つのモンテカルロコードを開発することにより補正を行った。

MNSCATは円形形状の測定試料内部における中性子エネルギー分布を計算するコードであり、この結果より試料内での中性子の減衰や多重散乱の効果の補正を行った。

COMPCALCはサンプルサイズ効果の中でも、ガンマ線に関係する補正を行うコードである。中子と試料との相互作用でガンマ線が発生した場合、このガンマ線は試料自身でコンプトン散乱を受け、低エネルギーの連続ガンマ線を生成する。従来の補正手法では測定された全てのガンマ線に対して減衰の補正を行うために、コンプトン散乱によるガンマ線の部分が過大な評価となることが、COMPCALCの結果により明らかになった。その他の補正として、 $D(d, n)$ 反応に伴うブレイクアップ中性子(10MeVの中性子を生成した場合)、 $^1\text{H}(^{11}\text{B}, n)^{11}\text{C}$ 反応に伴う ^{11}C の励起状態に対応する中性子(同13MeV)が若干生成するが、本研究では、これらに対する補正も考慮した。

結果に対する詳細な解析ならびに誤差の評価により、本研究で得られたガンマ線生成断面積の測定値が、信頼性の高いものであることを確認した。

第4章 γ 線生成断面積の測定結果と討論

本章では、測定ならびに解析より得られたガンマ線生成断面積を示し、従来の白色中性子源を用いた測定結果や評価済み中性子核データとの比較を行った。

得られたエネルギー微分ガンマ線生成断面積の例として、Fig. 1 に中性子エネルギー 11.5MeV における Fe の結果を示す。微分断面積の結果より、連続成分は角度依存性が認められないこと、白色中性子源を用いた測定は単色中性子源よりも高い結果を与えること、などが明らかになった。

微分ガンマ線生成断面積のピーク部分に着目し、その面積を積分することで離散成分のガンマ線生成断面積を導出した。その例として、Fig. 2 に C の 4.44MeV のガンマ線生成断面積を示す。離散成分の結果より、白色中性子源を用いた測定は単色中性子源を用いた測定に比較し、系統的に低い値を与えることが明らかになった。

微分ガンマ線生成断面積のスペクトル全体を積分することで、ガンマ線の全生成断面積であるエネルギー積分ガンマ線生成断面積を導出した。

本研究の測定手法は連続および離散の両成分を同時に測定可能とし、得られた結果は工学的・物理学的に応用範囲が広いものである。

第5章 結 論

本章は総括であり、本研究で開発した中性子源とガンマ線生成断面積の測定および解析手法により、次の結論が得られた。

- (1) 核融合炉の核設計において高い重要性を持ちながら、測定データが非常に乏しい中性子エネルギー 8～13MeV 領域で、単色中性子源を用いた精度の高い測定法を確立し、その妥当性と汎用性をガンマ線生成断面積測定により検証した。
- (2) 測定データの解析および補正のための計算コードを開発作成し、ガンマ線生成断面積を求める解析手法を確立した。
- (3) (1) ならびに (2) の成果をもとにして、主要な核融合炉構成材について、単色中性子源による信頼度の高いガンマ線生成断面積の測定値が得られた。これらの結果から、従来の測定値や評価値と比較ならびに検討を行ない、問題点を明らかにすることができた。

本研究で確立した単色中性子源を用いた測定手法は、その応用として、核融合炉核設計の基礎データを整備する上での今後の指針を与えるものである。

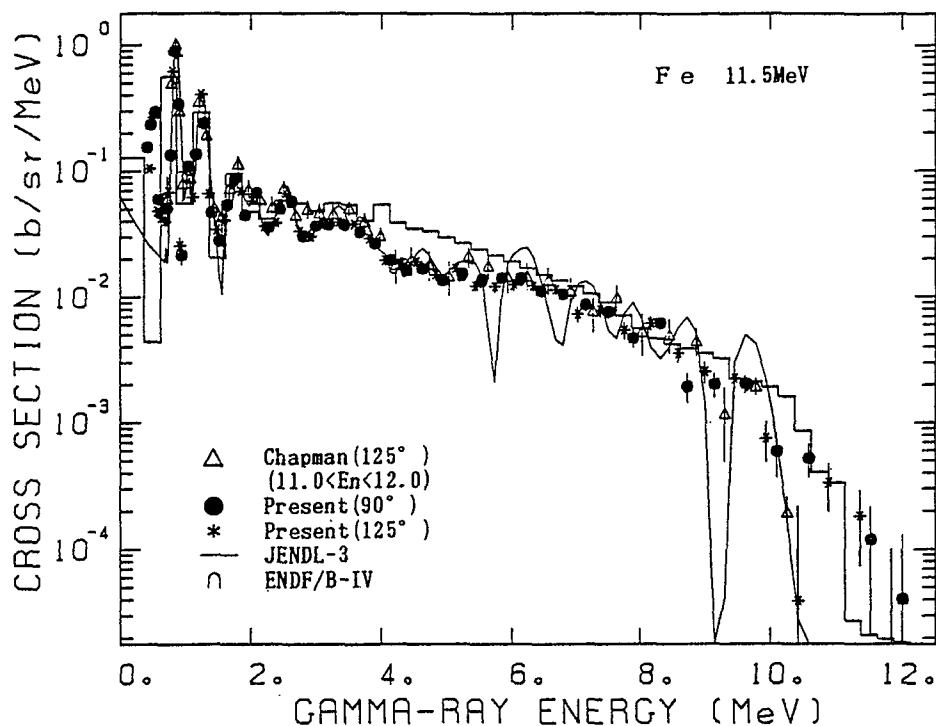


Fig. 1 中性子エネルギー 11.5MeV における Fe のエネルギー微分ガンマ線生成断面積

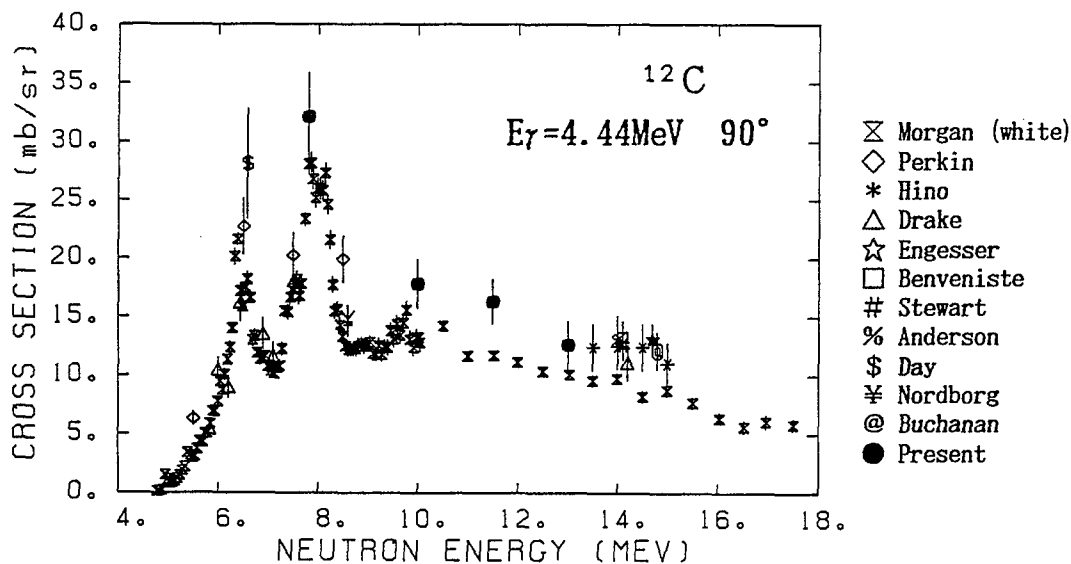


Fig. 2 C の離散成分ガンマ線生成断面積

審 査 結 果 の 要 旨

重水素と三重水素を燃料とする核融合炉において発生する14MeVの中性子は、炉構成物質と相互作用を起しエネルギーを失うとともにガンマ線を発生させ、ガンマ線の一部は熱に変換され他は外部に漏洩する。従って、炉の核設計においてはガンマ線生成断面積が基礎的データとして重要となる。従来、8から14MeVの領域で単色中性子によるガンマ線生成断面積データが皆無であった。本論文は、この欠落したエネルギー領域の単色中性子を発生させる線源を開発し、これによるガンマ線生成断面積の測定を行った成果をまとめたもので全編5章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、8から14MeV領域の単色中性子を発生させる線源と、これに用いてガンマ線を測定した結果について述べている。日本原子力研究所タンデム加速器により重水素を加速し重水素ガスターゲットに衝撃させて10MeVの中性子を、また、ほう素イオンを加速して水素ガスターゲットに衝撃させ11.5および13MeVの中性子を発生させる。これらの特性を詳細に調べ、中性子が単色として十分使用しうることを明らかにしている。これは有用な成果である。これらの中性子源を用い核融合炉構成物質9種類について放出されるガンマ線を測定している。

第3章は、前章で得られた測定値の補正についての考察である。詳細な解析を行って本研究で得られたガンマ線生成断面積の信頼性を高めており、これは優れた成果である。

第4章では、第3章で解析されて得られた離散成分、および連続成分の微分、積分断面積と従来の白色中性子による測定結果および評価済み核データを比較検討し、問題点を指摘するとともに本研究の結果が確度の高いことを明らかにしている。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、従来欠落していたエネルギー領域の単色中性子を発生させる方法を開発し、それをを用いて核融合炉構成物質のガンマ線生成断面積を測定し実用上確度の高いデータを提供したもので原子核工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。