



Title	Unique Features of Deuteron-Induced Inclusive Reactions
Author(s)	中田, 響
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/101913">https://hdl.handle.net/11094/101913</a>
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、<a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">大阪大学の博士論文について</a>をご参照ください。

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## 論文内容の要旨

氏 名 ( 中 田 響 )

論文題名

Unique Features of Deuteron-Induced Inclusive Reactions  
(包括的重陽子入射反応の特質)

## 論文内容の要旨

包括的反応とは、特定の粒子のみを測定し、それ以外の系の状態は規定しない反応である。この反応は、標的核の終状態を規定しない場合と、入射粒子の終状態を規定しない場合の2種類に分けられる。ここで、規定されない状態は、膨大かつ様々な状態をとりえるため、一般に包括的反応の記述は困難になる。それにもかかわらず、重陽子入射の包括的反応は、応用・基礎物理の両面で重要な役割を果たす。

応用面では、重陽子加速器を用いて中性子源を得る施設であるInternational Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF)において、放出中性子断面積を正確に評価するため、標的核の終状態を規定しない(d,d'x)反応が重要である。IFMIFでは、(d,nx)反応を用いて断面積が評価されるが、厚い標的が用いられるため、入射重陽子が非弾性過程によって輸送され、エネルギーを失った重陽子(d')が2次的に(d,nx)反応を引き起こす影響も無視できない。このため、(d,nx)反応だけでなく、(d,d'x)反応の記述も必要となる。しかし(d,d'x)反応は、現象論モデルによる記述にとどまっており、量子力学的モデルによる記述・理解が求められている。

基礎物理の観点からは、入射粒子の終状態を規定しない重陽子入射1陽子ロックアウト反応 $A(d,x)B+p$ が、中性子過剰核を効率的かつ選択的に生成する上で重要である。近年、RIKENで、中性子過剰核に対して $A(d,x)B+p$  および  $A(p,x)B+p$  反応の逆運動学実験が行われた。その結果、重陽子入射の断面積は陽子入射と比較して約1.5倍となり、重陽子の有用性が明らかになった。一方で、入射粒子の数の違いから直観的には断面積が2倍になると予想されるが、実際にはそれを下回る結果が得られることが明らかになった。この直観との差異の原因は、理論モデルの不足のため、未だ解明されていない。このように、包括的重陽子入射反応は、中性子源の評価、中性子過剰核生成過程の理解において重要である。また、その記述には、膨大な状態の関与に加え、重陽子入射反応の特質である「屈折」と「分解」を適切に考慮する必要がある。

本研究の目的は、包括的重陽子入射反応である(d,d'x)反応と $A(d,x)B+p$ 反応を記述することである。また、重陽子の屈折と分解が包括的反応に及ぼす影響を定量的に明らかにすることである。本研究により、包括的重陽子入射反応において、その特質である屈折・分解を考慮することが、反応メカニズムの理解および実験データの再現のために必要不可欠であることが明らかになる。

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( 中 田 響 )		
	(職)	氏 名
論文審査担当者	主 査 特任教授	緒方 一介
	副 査 教授	保坂 淳
	副 査 教授	川畑 貴裕
	副 査 教授	民井 淳
	副 査 准教授	吉田 賢市

## 論文審査の結果の要旨

包括的反応とは、核反応の終状態において、系の一部の状態のみを指定し、他は指定しないものを指す。一般に包括的反応の断面積は大きく、応用上重要であるが、関与する終状態の数は膨大であり、その理論的記述は困難であることが知られている。本論文の対象は、様々な包括的反応のうち、重陽子が関与するもの、特に重陽子によって原子核中の核子を1つ叩き出す、包括的ノックアウト反応である。このとき、重陽子を測定し残留原子核の状態を指定しない場合と、残留核の状態だけを指定し重陽子を測定しない場合を考えることができる。核反応の標準的表記法にならえば、前者は  $A(d, d')x$  あるいは  $(d, d')x$ 、後者は  $A(d, x)B+p$  と表記される。ここで  $x$  は粒子の種類や状態が指定されていない様子を表す記号である。本論文は、量子力学的反応模型を用いてそれぞれの過程を実効的に記述するとともに、それらの過程において、先行研究で見落とされてきた重陽子の特性が極めて重要な役割を果たすことを明らかにしたものである。

1 つ目の  $(d, d')x$  反応は、応用上重要な反応と考えられている。現在、国際核融合材料照射施設 (IFMIF) において、重陽子を厚い標的に入射し、分解によって生成される大強度中性子を材料照射試験に供する計画が進められている。この中性子生成反応自体は、微視的核反応模型に基づく計算コードシステム DEURACS で記述することができる。しかし IFMIF で使用する標的は極めて厚いため、分解の前に、重陽子が標的内の原子核と反応し、エネルギーの一部を失う可能性が示唆されている。このプロセスの主要成分が  $(d, d')x$  反応である。本論文では、陽子による包括的ノックアウト反応— $(p, p')x$  反応—を記述する模型として定評のある半古典歪曲波模型 (SCDW) を適用することで、 $(d, d')x$  反応の量子力学的記述を初めて遂行した。計算には、1 つの核子を叩き出す、いわゆる1段階過程のみが取り入れられており、その描像が成り立つと期待される、移行エネルギーが小さな領域で実験データを概ね再現することに成功した。また、原子核の一体ポテンシャルの影響で、重陽子の流束 (伝播) の方向が変化する、いわゆる屈折の効果が、データの再現のためには極めて重要であることを明らかにした。さらには、 $(d, d')x$  反応と  $(p, p')x$  反応で、原子核の反応領域に大きな違いがあることも明らかにした。

2 つ目の  $A(d, x)B+p$  反応は、不安定核物理において、中性子過剰核を効率的に生成する反応として提案されたものである。ある中性子過剰核  $A$  から陽子を叩き出すと、より中性子過剰な原子核  $B$  が生成される。このとき、重陽子 (2 つの核子) を使って原子核を叩けば、陽子 (1 つの核子) で叩いたときよりも有意に大きな断面積が得られるのではないかと、これが、提案の背景にある素朴な期待である。本論文では、ノックアウト反応を記述する標準的模型である歪曲波インパルス近似 (DWIA) を拡張することで、重陽子の終状態を特定しないノックアウト反応の記述に初めて成功した。また、反応過程の詳細な分析により、計算する終状態に重陽子の分解を取り入れることが本質的に重要であること、陽子と比べて重陽子の吸収効果が大きく、重陽子を用いることの優位性 (断面積の増大) は、単純な期待ほど大きくはならないことを示し、実際に得られた実験データの傾向の説明に成功した。

このように、本論文は、重陽子が関与する包括的反応過程の記述を行い、屈折や分解といった、反応過程の中で発現する重陽子の特質の重要性を定量的に明らかにしたものであり、本研究で開発された手法や得られた知見は、IFMIF 周辺の核データ研究や不安定核物理に対して大きなインパクトを与え得るものである。

以上より、本論文は博士 (理学) の学位論文として十分に価値のあるものと認める。