



Title	Systematic study on nuclear radii of neutron-rich Zr isotopes and their shell evolution
Author(s)	高山, 元
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/105636
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、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

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 (高 山 元)	
論文題名	Systematic study on nuclear radii of neutron-rich Zr isotopes and their shell evolution (中性子過剰Zr同位体における核半径の系統的研究と殻構造進化)
論文内容の要旨 Zr 同位体 ($Z = 40$) は、陽子殻が pf 殻まで充填されていることから、準魔法数的な性質を示す核種として知られている。中性子過剰側では $N = 56$ で準魔法数的挙動が示唆されており、第一励起 2^+ 状態の高いエネルギー、大きな二中性子分離エネルギー、ならびに荷電半径におけるキンク構造などの実験事実が報告されている。一方、$N = 60$ では球形から変形への急激な構造変化が起こり、^{110}Zr 近傍まで強い変形が持続すると考えられている。この変形は、低い 2^+ エネルギー、大きな $B(E2)$ 値、荷電半径の急激な増大といった観測結果から広く受け入れられている。理論的には、これらの現象はいずれも殻構造進化に起因するものと理解されている。$N = 56$ における準閉殻性は、$\nu d_{5/2}$ 軌道の充填による準閉殻ギャップ形成に対応し、その強さが $Z = 40$ で最大となることから、同調体 (isotone) 方向の殻構造進化を示唆する興味深い現象である。一方、$N \geq 60$ における変形は、$\nu g_{7/2}$ 軌道占有の進行に伴う陽子 $\pi g_{9/2}$ 軌道への 2p-2h (2 粒子-2 空孔) 励起によって誘起される集団的変形、すなわち type-II 殻構造進化として理解されている。 本研究では、これらの殻構造進化や変形が中性子を含む核密度分布にどのように反映されるかを直接検証するため、質量数 $A = 89 - 109$ の Zr 同位体を対象に、相互作用断面積測定による核物質半径の導出を行った。実験は理研仁科センター RIBF において二度実施し、BigRIPS および ZeroDegree 分光器を用いて、炭素標的に対する相互作用断面積を、核子あたり約 200 MeV から 300 MeV の条件で測定した。高精度な同位体依存性の議論を可能とするため、粒子識別、輸送効率、荷電状態成分に起因する系統誤差の低減を図り、相互作用断面積を高い信頼性で決定した。 得られた相互作用断面積から、修正光学極限近似に基づくグラウバー計算を用いて核物質半径の導出を行った。得られた核物質半径は、事前の予想とは異なり、$N = 60$ において変形に起因する明確なジャンプは観測されなかった。さらに、その後 $N = 69$ に至るまで、球形領域とほぼ同一のトレンドが継続するという結果が得られた。得られた核物質半径を平均場計算の球形解と比較することで中性子も含めた原子核全体の変形度の評価を行ったところ、対応する原子核全体の四重極変形パラメータ β_2 は、主に陽子分布に対して推奨されている値 ($\beta_2 \approx 0.4$) を大きく下回ることが示された。また、既存の荷電半径測定結果と組み合わせることで中性子分布半径を導出し、その変形度を評価したところ、中性子側はこの領域ではほぼ球形に近い結果が得られた。これらの結果は、$N \geq 60$ における変形が主として陽子に起因するものであり、中性子分布は大きく変形していない可能性を示唆している。すなわち、陽子と中性子で変形度が異なる可能性が示された。また、$N = 56$ 魔法性については、本研究で得られた物質半径が正のキンクと矛盾しない結果を示しており、荷電半径、二中性子分離エネルギー、2^+ のエネルギーなどの実験結果で見えている $N = 56$ における不連続性と合わせると、$N = 56$ の準閉殻構造を示唆すると考えられる。 これらの結果は、殻構造進化に起因する準閉殻や変形の発現に関する従来の理解に対し、新たな制約を与えるものであり、Zr 同位体における殻構造進化の理解を深める上で重要な知見を提供するものである。	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 （ 高 山 元 ）			
論文審査担当者	(職)		氏 名
	主 査	教授	福田 光順
	副 査	教授	川畑 貴裕
	副 査	教授	民井 淳
	副 査	准教授	吉田 賢市
	副 査	准教授	小林 信之

論文審査の結果の要旨

本論文は、中性子過剰 Zr 同位体における殻構造進化と変形の発現が、核物質分布にどのように反映されるかを明らかにすることを目的とし、対象同位体核種の相互作用断面積測定を通して得られた核物質半径についての系統的な研究について述べている。著者らは、理研仁科センター RI ビームファクトリー (RIBF) において実施された二度の実験により、質量数 $A = 89-109$ という非常に広い質量数範囲の Zr 同位体について、炭素標的に対する相互作用断面積を測定し、核物質半径を系統的に導出した。

得られた核物質半径は、従来予想されていた $N = 60$ 以上の領域における急激な変形、少なくとも実験的にこれまで観測されている陽子側の変形、に起因する明確な不連続性を示さず、 $N = 69$ に至るまで球形領域とほぼ同様のトレンドが継続することが示された。この結果は、Zr 同位体における変形の理解に新たな視点を与えるものである。さらに、平均場計算の球形解核物質半径計算値との比較から導出された変形パラメータは、 $N = 60$ 以上の領域で陽子分布に対して知られている大きな変形度 ($\beta_2 \sim 0.4$) よりもかなり小さく ($\beta_2 \sim 0.1-0.2$)、原子核全体としての変形が限定的であることが示された。

また、既存の荷電半径データと組み合わせることで中性子分布半径を評価した結果、中性子分布は $N \geq 60$ の領域においてほぼ球形に近いことが示唆された。これらの結果は、当該領域で観測される変形が主として陽子分布に起因し、陽子と中性子で変形度が異なる可能性を示すものであり、大変興味深い。

一方、 $N = 56$ を境にして物質半径が正のキंकと整合的な挙動を示しており、荷電半径、二中性子分離エネルギー、 2^+ 状態エネルギーなどの既存の測定値と合わせて、 $N = 56$ における準閉殻構造の存在を示唆する結果が得られている。

以上より、本論文は Zr 同位体における殻構造進化と変形の理解に重要な実験的制約と示唆を与えるものであり、原子核構造研究に対して有意義な貢献をなすものと評価できる。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値あるものと認める。