

# 73種の新RIを発見 —RIBFで加速する未踏の原子核世界の開拓—

福田 直樹  
Fukuda Naoki

## 1. はじめに

地球上には、金や鉄等天然に存在する安定な原子核が約 270 種類存在する。理論的には約 7,000～10,000 種類の原子核が存在すると考えられており、そのほとんどが放射性同位元素 (RI) と呼ばれる不安定な原子核である。

アーネスト・ラザフォードが 1911 年に「原子核」を発見してから現在までの約 100 年、原子核物理の研究は新しい原子核の生成 (発見) と共に発展してきた。最初に安定核や半減期 (寿命) の長い不安定核を対象に始まった研究は、その後、加速器を用いて人工的に RI を生成することができるようになると、加速器技術や RI 分離技術の向上と共に段階的により半減期の短い不安定核までその研究領域を拡大してきた。最近の研究では、陽子数に対して中性子数が過剰な「中性子過剰核」において、魔法数の消失や新たな魔法数の出現が発見され大きな注目を集めている。また、中性子過剰核では、「中性子ハロー構造」や「中性子スキン構造」等、通常安定核では考えられないような奇妙な構造も見つかっている。

理化学研究所 (理研) 仁科加速器科学研究センターでは、加速器施設での長年の実績を踏まえ、不安定核の研究を飛躍的に拡大するため、RI ビームファクトリー (RIBF) 加速器施設<sup>1)</sup>を設置し研究を展開している。同施設に設置された超伝導 RI ビーム生成分離装置 (BigRIPS)<sup>2)</sup>を用い、2007 年に初めて新しい RI を発見して以降、59 種の新 RI の発見に成功している。今回、理研を中心とする著者らの国際研究グループ (世界 11 か国から 33 の大学・研究機関が参加) は、2011 年から 2013 年にかけて、RIBF 加速器施設で供給可能なビームの強度がそれ

以前の約 10 倍に増強したこと、BigRIPS の RI 生成・分離技術が向上したことを受け、新 RI の発見に挑み、Mn から Er までの 73 種の新 RI の発見に成功した。ここでは、新 RI の生成実験の概要と結果について紹介する。

## 2. 新 RI 生成と超伝導 RI ビーム生成分離装置 BigRIPS

新 RI の生成実験では、光速の約 70% まで加速した  $^{238}\text{U}$  ビーム及び  $^{124}\text{Xe}$  ビームを生成標的である Be に照射し、 $^{238}\text{U}$  では「飛行核分裂反応」を、 $^{124}\text{Xe}$  では「入射核破碎反応」を利用して新 RI をビームとして発生させた。前者は質量数 50～150 の範囲で中性子過剰な RI を生成するのに有利であり、後者は陽子過剰な RI を生成するのに有利なのが特徴である。

生成された RI の中から、BigRIPS の第 1 ステージで中性子過剰又は陽子過剰な RI を分離選択し、それらを第 2 ステージ及びゼロ度スペクトロメータ (ZeroDegree) に通過させ、RI を同定するための粒子識別を行った (図 1)。粒子識別は、生成した RI の速度、検出器通過時のエネルギー損失量、及び磁気剛性 (磁場中での RI の曲がりにくさを表す量) を測定し、これらの情報から原子番号及び質量と電荷の比を導出することで行った (図 2)。

新 RI の生成数は極めて少なく (今回最も少ないものは 4 日間の測定で 1 個)、これらを高い信頼性で観測するためには、RI が BigRIPS 内を通過する際の速度や磁気剛性の決定精度 (分解能) を向上させること、加えて検出器の雑音信号により偶発的に観測される偽物の事象を徹底的に取り除く解析技術が必要不可欠である。著者らは、これら BigRIPS の

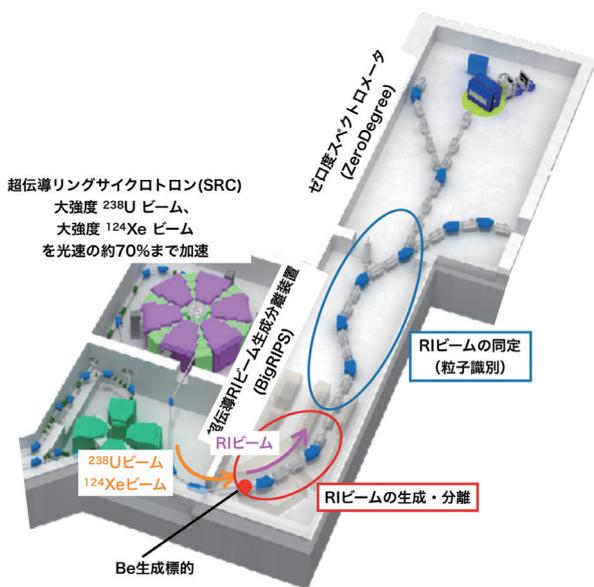


図1 新RIの生成実験が行われた超伝導RIビーム生成分離装置 (BigRIPS)

BigRIPSは、赤丸で示された第1ステージと青丸で示された第2ステージから構成されている。前者ではRIビームの生成・分離を、後者では粒子識別のための測定を行う。BigRIPSの下流に接続されているゼロ度スペクトロメータ (ZeroDegree) も粒子識別に利用される。

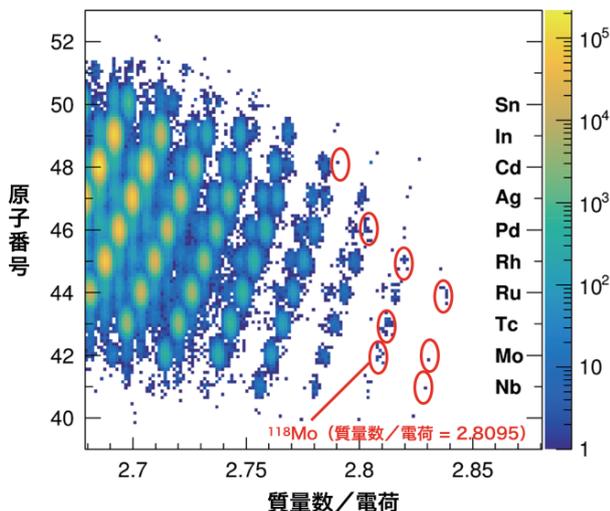


図2 今回発見した新RIを含む粒子識別図の一例

縦軸にRIの原子番号、横軸に質量数と電荷の比をプロットした粒子識別図。今回発見した新RI (73種の内の一部) は赤丸で示されている。<sup>118</sup>Moと<sup>119</sup>Nbはわずかに1事象の観測で同定に成功している。

収集・分析法を向上させることで、高効率・高分解能・高感度なRIの生成・粒子識別を実現し、今回、MnからEr (原子番号25から68) までの73種の新RIの発見に成功した。複数回に分けて実施された新RIの生成実験の結果は、実験ごとに4報の論文<sup>3-6)</sup>として発表された。

表1 生成した新RI全73種一覧

原子番号	新RI名	原子番号	新RI名	原子番号	新RI名	
25	<sup>73</sup> Mn	47	<sup>132</sup> Ag	58	<sup>156</sup> Ce	
26	<sup>76</sup> Fe	48	<sup>134</sup> Cd		<sup>157</sup> Ce	
27	<sup>77</sup> Co	49	<sup>136</sup> In	59	<sup>158</sup> Ce	
	<sup>78</sup> Co		<sup>137</sup> In		<sup>156</sup> Pr	
28	<sup>80</sup> Ni	50	<sup>139</sup> Sn	60	<sup>157</sup> Pr	
	<sup>81</sup> Ni		<sup>140</sup> Sn		<sup>158</sup> Pr	
	<sup>82</sup> Ni		<sup>141</sup> Sb		<sup>159</sup> Pr	
29	<sup>83</sup> Cu	51	<sup>142</sup> Sb	61	<sup>160</sup> Pr	
37	<sup>104</sup> Rb	52	<sup>144</sup> Te		<sup>161</sup> Pr	
40	<sup>113</sup> Zr	53	<sup>145</sup> Te	62	<sup>162</sup> Nd	
41	<sup>116</sup> Nb		<sup>146</sup> I		<sup>163</sup> Nd	
42	<sup>81</sup> Mo	54	<sup>147</sup> I	63	<sup>164</sup> Pm	
	<sup>82</sup> Mo		<sup>149</sup> Xe		<sup>165</sup> Pm	
	<sup>118</sup> Mo		<sup>150</sup> Xe		64	<sup>166</sup> Sm
	<sup>119</sup> Mo		<sup>149</sup> Cs			<sup>167</sup> Sm
43	<sup>121</sup> Tc	55	<sup>150</sup> Cs	65	<sup>169</sup> Eu	
	<sup>122</sup> Tc		<sup>151</sup> Cs		<sup>171</sup> Gd	
44	<sup>85</sup> Ru	56	<sup>153</sup> Ba	66	<sup>173</sup> Tb	
	<sup>86</sup> Ru		<sup>154</sup> Ba		<sup>174</sup> Tb	
	<sup>125</sup> Ru		<sup>155</sup> La		67	<sup>175</sup> Dy
45	<sup>127</sup> Rh	<sup>156</sup> La	<sup>176</sup> Dy			
	<sup>128</sup> Rh	<sup>157</sup> La	68	<sup>177</sup> Ho		
46	<sup>129</sup> Pd	57		<sup>157</sup> La	<sup>178</sup> Ho	
	<sup>130</sup> Pd			68	<sup>179</sup> Er	
	<sup>131</sup> Pd				<sup>180</sup> Er	

### 3. 73種の新RI

今回発見した新RIを表1に示した。<sup>81</sup>Mo, <sup>82</sup>Mo, <sup>85</sup>Ru, <sup>86</sup>Ruの4種は<sup>124</sup>Xeビームの入射核破砕反応で、それ以外の69種は<sup>238</sup>Uビームの飛行核分裂反応で生成された。また、図3には発見された新RIを核図表上で示した。

図4は、今回発見した新RIのうち、例としてMo同位体の生成断面積 (生成率) を質量数ごとにプロットしたものである。質量数が大きくなるほど生成率が低いことが分かる。これは、天然に存在する安定核<sup>100</sup>Moより中性子数が多いRIでは、中性子数が増えるほど生成率が低くなることを示している。図中、赤い長丸で囲まれた2点が今回発見した<sup>118</sup>Moと<sup>119</sup>Moで、黒い長丸で囲まれた3点は、2008年の理研RIBFの実験で発見された<sup>115</sup>, <sup>116</sup>, <sup>117</sup>Moである。

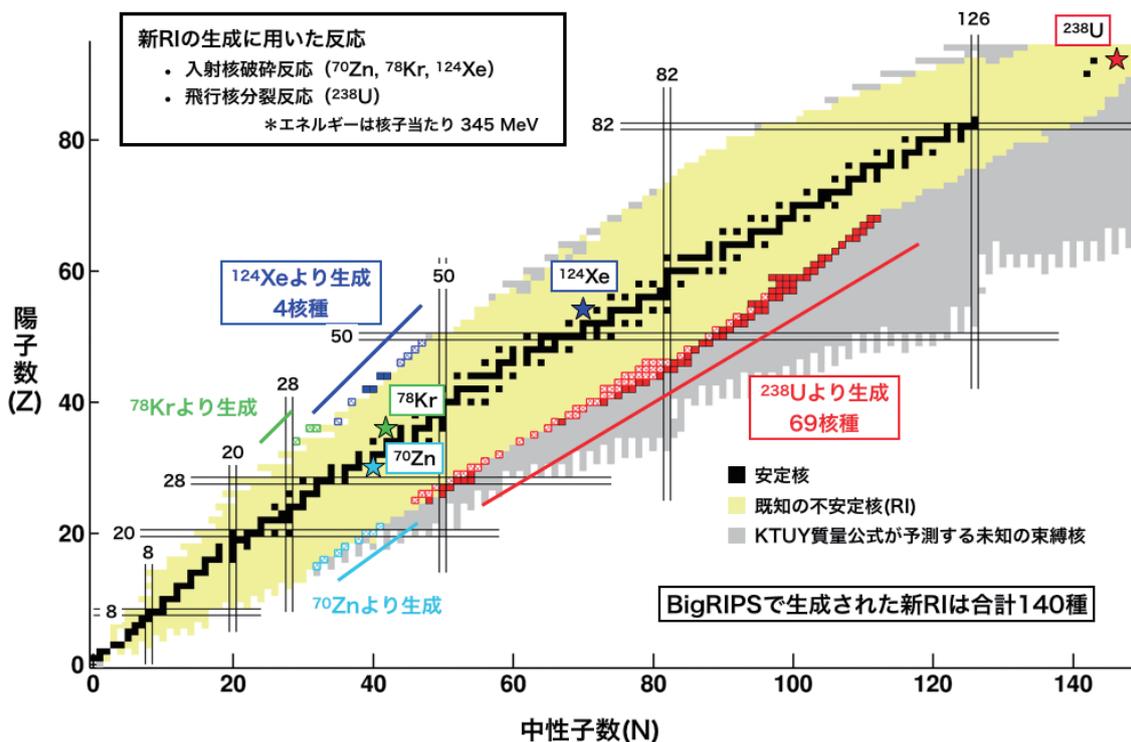


図3 核図表と発見された新 RI

発見された新 RI を核図表上に示した。新 RI は生成に利用したビームごとに色分けされている。赤色で塗られた原子核は  $^{238}\text{U}$  の飛行核分裂反応を用いて今回発見された新 RI、青色で塗られた原子核は  $^{124}\text{Xe}$  の入射核破砕反応を用いて今回発見された新 RI を示す。網掛けの原子核は本研究とは別に論文発表された新 RI、あるいは現在解析中の新 RI を示す。

過去に発見された中で最も生成率の低い  $^{117}\text{Mo}$  に対し、今回発見した  $^{119}\text{Mo}$  の生成率は約 1/500 と極めて小さく、いかに難しい実験であったかが分かる。具体的には、 $^{119}\text{Mo}$  の生成率は、実際の実験設定においてウランビームを 1,300 兆回 ( $1.3 \times 10^{15}$  回) 標的核に衝突させた場合に、わずか 1 個しか  $^{119}\text{Mo}$  が検出されないことを示している。これは 2016 年、理研仁科加速器科学研究センター超重元素研究開発部の森田浩介部長(九州大学大学院理学研究院教授)を中心とする研究グループが新元素発見を認定され命名権を得た Nh の生成率の更に 10 分の 1 の低さである。

図 5 は、1910 年以降に日本、英国、米国、ロシア、ドイツ各国から発表された新 RI の発見数を示したものである。理研では、RIBF が稼働を開始した 2007 年以降、BigRIPS を用いて合計 140 種の新 RI を発見している。この結果は、2010~2020 のところにプロットされており、RIBF の稼働により 2010 年以降の新 RI の発見競争において日本がトップに躍り出たことになる。

#### 4. 新 RI 生成に関連する最近の成果

RIBF では、今回の新 RI 生成に利用した  $^{238}\text{U}$ 、 $^{124}\text{Xe}$  以外のビームについても大強度ビームの利用が可能だ。ここでは、最近、RIBF で得られた新 RI 生成に関連する興味深い研究成果をいくつか紹介したい。

$^{78}\text{Kr}$  ビームの入射核破砕反応を利用すると  $^{124}\text{Xe}$  ビームの場合と同様に陽子過剰核を効率良く生成できる。この反応により、発見された陽子過剰な新 RI、 $^{72}\text{Rb}$  が、原子核の地図ともいえる核図表において天橋立のような構造を作っていることが明らかにされた<sup>9)</sup>。このような原子核は広い核図表上で未だ見つかったことがない。どのようなメカニズムで天橋立構造が発現するのか、他にも同様の原子核が存在するのかが非常に興味深い点である。

最近、 $^{70}\text{Zn}$  ビームの入射核破砕反応を用いて二重魔法数を持つ  $^{60}\text{Ca}$  を含む中性子過剰な 8 種の新 RI が発見された<sup>10)</sup>。これらの新 RI は、核図表において中性子をこれ以上付け加えられない境界である「中性子ドリップライン」の近傍に位置する原子核であり、それらが束縛した状態で存在するか否か(中

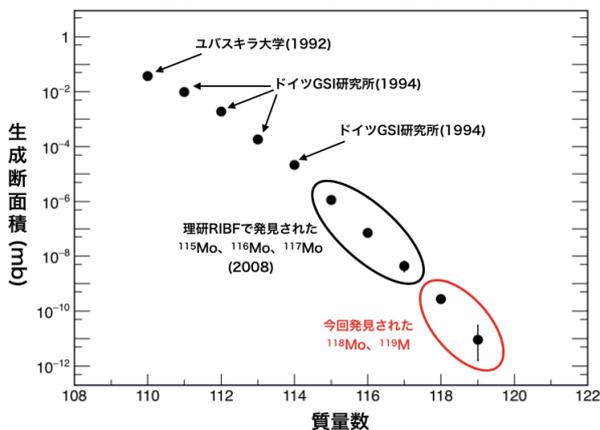


図4  $^{238}\text{U}$ の飛行核分裂反応で生成される中性子過剰モリブデン同位体の生成断面積

縦軸に生成断面積、横軸に質量数をプロットしたもの。赤い長丸で囲まれた2点が今回発見された $^{118}\text{Mo}$ 、 $^{119}\text{Mo}$ 。黒い長丸で囲まれた3点は2008年に実施された理研RIBFの実験で発見された $^{115}\text{Mo}$ 、 $^{116}\text{Mo}$ 、 $^{117}\text{Mo}$ を表す。フィンランドのユバスキラ大学、ドイツのGSI研究所で発見された $^{110-114}\text{Mo}$ も一緒に示されている。

中性子ドリップラインの内側か外側かは、理論モデル(原子核質量モデル)によって異なっている。今回の発見を用いて理論モデルを検証した結果、実験結果を再現する理論が $^{70}\text{Ca}$ の存在を予言していることから、二重魔法数核の超重同位体 $^{70}\text{Ca}$ の存在が強く示唆された。

大強度 $^{48}\text{Ca}$ ビームの入射核破碎反応を利用した中性子ドリップライン近傍の新RI探索も進められている。現在、中性子ドリップラインはO同位体まで実験的に確定しているが、F同位体より重い元素については約20年間も実験的な研究が進んでいない。近々、RIBFで実施された実験により、FとNe同位体の中性子ドリップラインについての結論が出されるかもしれない。

## 5. まとめと今後の期待

理研RIBFから発表された新RIは、今回の発見を含めると累計140種になった。本研究以降、更に加速器・BigRIPSの性能は向上しており、約54種の新RIが生成され、現在最終確認に向けた解析が進められている。今後、発見された新RIは、原子核の構造や反応の研究、宇宙における元素合成過程の解明等に利用されると期待できる。

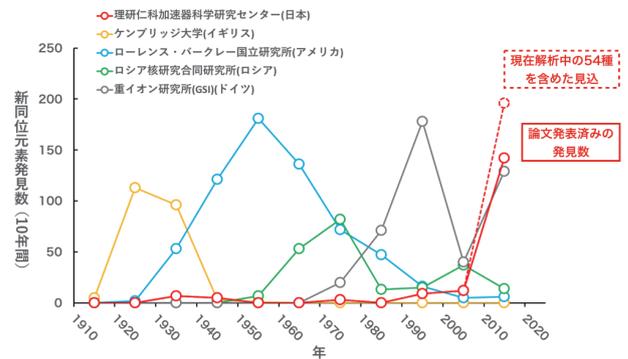


図5 1910年以降、各国の研究所・大学から発見された新RIの数

縦軸の発見数は10年ごとの累計で、横軸は論文発表年を表す。2010-2020では、先に論文発表した59種と今回の73種、更に2018年7月に論文発表した8種を含めると合計140種の新RIが理研RIBFから発表されたことになる。更に現在解析中の約54種も含めると、総計約194種の新RIの論文発表が見込まれる。各データについては、参考文献4)表17.1、及び8)を基に筆者が集計。

本成果は、原子核物理学の学術的重要性を持つだけでなく、RIBF加速器施設でのRIビームの生成・粒子識別能力の圧倒的な高さを示したものである。RIBF加速器施設は、施設の性能向上を実現しながら最終的には約4,000種類の新RIの生成を目指している。そのうちの約1,000種類は未発見の新RIである。今後、加速器システムやBigRIPSの新RI生成・粒子識別能力の更なる高度化を通じ、未踏の新RI発見に挑戦していきたい。

## 参考文献

- 1) Yano, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*, **261**, 1009 (2007)
  - 2) T. Kubo, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*, **204**, 97 (2003)
  - 3) N. Fukuda, *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **87**, 014202 (2018)
  - 4) Y. Shimizu, *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **87**, 014203
  - 5) T. Sumikama, *et al.*, *Phys. Rev. C*, **95**, 051601 (R) (2017)
  - 6) H. Suzuki, *et al.*, *Phys. Rev. C*, **96**, 034604 (2017)
  - 7) M. Thoennessen, *The Discovery of Isotopes*, Springer International Publishing Switzerland 2016.
  - 8) 「Discovery of Nuclides Project」ホームページ：  
<http://www.nsl.msui.edu/~thoennessen/isotopes>
  - 9) H. Suzuki, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **119**, 192503 (2017)
  - 10) O.B. Tarasov, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **121**, 022501 (2018)
- ((国研)理化学研究所 仁科加速器科学研究センター)