

フッ素とネオンの中性子ドリップライン決定と 超中性子過剰新同位元素ナトリウム-39の発見



久保 敏幸
Kubo Toshiyuki

1 はじめに

本記事は、理化学研究所 仁科加速器科学研究センターの RI ビームファクトリー (RIBF: Radioactive Isotope Beam Factory) において、筆者が研究グループの責任者として実験を遂行した研究「フッ素、ネオン、ナトリウムの中性子ドリップライン探索と超中性子過剰新同位元素ナトリウム-39の探索」について、その成果を解説したものである。中性子ドリップライン探索実験においては、フッ素 (F) とネオン (Ne) の中性子ドリップライン (各元素において中性子数が最も多い同位元素の存在限界) が、それぞれ ^{31}F (中性子数 22) と ^{34}Ne (中性子数 24) であることを初めて同定した。これは、1999年に酸素 (O) の中性子ドリップラインが ^{24}O (中性子数 16) と決定されて以来の成果で、20年ぶりに中性子ドリップラインの位置確定を Ne まで拡張し、原子核の地図の境界線を更新することに成功した。新同位元素のナトリウム-39 (^{39}Na) 探索実験においては、安定な ^{23}Na (中性子数 12) より中性子数が 16 個も多い超中性子過剰な同位元素 ^{39}Na (中性子数 28) を初めて生成・観測することに成功し、 ^{39}Na の原子核が束縛し存在することを突き止めた。これは、2002年に ^{37}Na が発見されて以来の発見で、20年ぶりに Na 同位元素の既知存在限界を更新することに成功した。

中性子ドリップラインの位置、あるいはその近傍における原子核の束縛や存在は、背景にある原子核

の構造を反映して決まる。したがって本成果は原子核構造の研究に大きなインパクトを与え、今回の元素領域の中性子過剰同位元素に出現する、特異で興味深い核構造に対する理解を促した。

本成果は、2019年11月¹⁾と2022年11月²⁾の2度にわたって *Physical Review Letters* 誌に発表されている。今回の解説記事は、その都度行ったプレスリリースで使用した、筆者が執筆した解説³⁾を元に加筆したものである。

2 中性子ドリップラインとは

同位元素の原子核に、中性子は何個まで付け加えられるか？例えば、酸素の場合、 ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O の3種が天然に存在する安定な同位元素 (安定核) である。これに中性子を付け加えた同位元素である ^{19}O , ^{20}O 等は、放射性同位元素 (不安定核) として β 崩壊によって時間をかけて核内の中性子が陽子へ変換されていくものの、中性子数 16 の ^{24}O までは陽子と中性子は結合し、束縛した原子核として存在する。しかし、更に中性子を加えて ^{25}O を作ろうとしても束縛せず、直ちに中性子を放出して崩壊してしまう。こうした原子核としての存在限界を核図表上で中性子ドリップライン (neutron drip line) と呼ぶ。

図1に質量公式の予言に基づく核図表を示す。中性子ドリップラインは、右側の中性子過剰側末端に位置する。広大な領域において中性子過剰同位元素が未知となっていて、ほとんどの元素の中性子ド

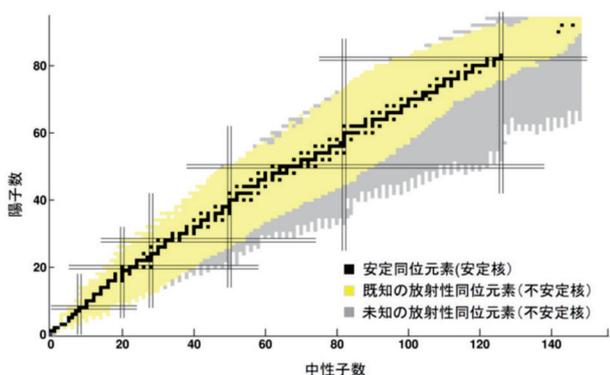


図1 核図表

灰色は未知の放射性同位元素を示し、質量公式によりその存在が予測されているが、未発見なものを指す。各元素について右側の中性子過剰側末端の存在限界が中性子ドリップラインに対応する。図中の二重線は、安定核近傍領域に出現する魔法数 8, 20, 28, 50, 82, 126 を示している。縦の線は中性子の魔法数、横の線は陽子の魔法数に対応する

リップラインが未確定であることが分かる。したがって、初めの「原子核に中性子は何個まで付け加えられるか」という問いは、原子核物理学において重要で基本的な問題であるが、未だ解決されていない。

中性子ドリップラインの近傍にある中性子過剰同位元素は、中性子の数が陽子に比べはるかに多い極限状態にある。そうした極限原子核においては、原子核の中で陽子と中性子を結び付けている核力は、天然に存在する安定な原子核とは異なる性質を持つ特異な原子核構造を出現させる。中性子ドリップラインの位置はどこに来るのか、あるいはその近傍の原子核が束縛するか否かは、こうした背景にある核構造に敏感である。したがって、中性子ドリップラインの位置決定は、中性子過剰領域に出現する核構造を解明する重要な手がかりを与えてくれる。更に、中性子ドリップラインは、ベンチマークとして核構造の理論計算に貢献すると共に、原子核の質量モデルの有効性を検証する重要な試金石となる。

3 中性子ドリップラインの探索

安定線から遠く離れた中性子過剰同位元素の生成は、今日の加速器技術や RI ビーム (radioactive isotope beam 又は rare isotope beam) の生成技術をもってしても容易でない。実際、本研究以前の中性子ドリップラインは、1999 年に陽子数 8 の酸素に対し ^{24}O と決定されて以来、それより陽子数が多い重い元素についての決定はなされていなかった。こ

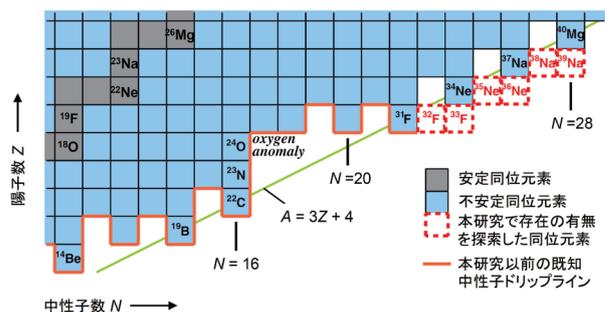


図2 本研究において中性子ドリップライン探索を行った領域を示す核図表

1999 年までに決定された酸素とそれより軽い元素の中性子ドリップラインが橙色の実線で示されている。緑の線は、 A を質量数、 Z を陽子数としたとき、 $A = 3Z + 4$ の式を満たす同位元素を結んだ直線を示す。本研究で存在の有無を探索した同位元素を破線の升目で示す。 ^{33}F 、 ^{36}Ne 、 ^{39}Na は、 $A = 3Z + 6$ の式を満たす超中性子過剰同位元素である

れは、重い元素になればなるほど中性子ドリップライン近傍の中性子数が陽子数に比べて格段に多くなるため、安定同位元素の重イオンビームを用いた生成反応では反応断面積が減少し、生成が極めて難しくなるからである。この困難を乗り越えるには、高い生成率 (production rate) をもたらす優れた実験条件の実現が必須である。

筆者らは、本研究において、「世界に冠絶する」を目標として設計・建設された、理化学研究所 仁科加速器科学研究センターの RI ビームファクトリー (RIBF)^{4, 5)} が供給する大強度重イオンビームと基幹実験装置である次世代型の超伝導 RI ビーム分離生成装置 BigRIPS^{6, 7)} を用い、20 年ぶりに酸素より重い元素である F (陽子数 9)、Ne (陽子数 10)、Na (陽子数 11) の中性子ドリップライン決定に挑戦した。RIBF の実験条件は、従来の施設・装置に比べて卓越した生成率を達成した。

本研究で行った中性子ドリップライン探索を図 2 の核図表に示す。本研究以前に存在が確認されていた最も中性子過剰な F, Ne, Na の同位元素は、それぞれ、 ^{31}F (中性子数 22)、 ^{34}Ne (中性子数 24)、 ^{37}Na (中性子数 26) である。本研究では、これらの元素の中性子ドリップラインを決定すべく、更に中性子過剰な同位元素である ^{32}F と ^{33}F 、 ^{35}Ne と ^{36}Ne 、 ^{38}Na と ^{39}Na の存在の有無の探索に挑戦した。 ^{33}F (中性子数 24)、 ^{36}Ne (中性子数 26)、 ^{39}Na (中性子数 28) の原子核は、中性子数が陽子数よりそれぞれ 15, 16, 17 個も多い超中性子過剰核である。

4 実験の概要

本研究では、RIBFの加速器系から供給される、光の速度の約70%（核子当たりのエネルギー345 MeV）まで加速された大強度 ^{48}Ca ビームを厚さ20 mmのBe標的に照射し、入射核破碎反応（projectile fragmentation）によって、前記探索目標の同位元素を含むRIビームを生成した。更に、超伝導RIビーム分離生成装置BigRIPSを用い、生成されたRIビームを収集・分離し、観測される同位元素の粒子識別（同定）を行った。 ^{48}Ca ビームの強度は、約500 pAにも達した。

RIBFとBigRIPSの構成や配置図、BigRIPSを用いたRIビーム生成の手法については、筆者らによる解説記事⁸⁾を参照。BigRIPSは、二段階型の飛行分離型RIビーム生成装置（two-stage in-flight fragment separator）である。その第1ステージでは、生成標的で生成され前方に放出される高速のRIビームを収集し、磁気分析に基づくアイソトープ分離（isotope separation）を行い、第2ステージでは更なるアイソトープ分離とRIビームの粒子識別（particle identification）を行う。BigRIPSは、大口径で高磁場の超伝導4極電磁石の使用により、大きなイオン光学アクセプタンスを実現し高効率のRIビーム収集能力を達成している。また、第2ステージにおいて高分解能イオン光学を実現し高分解能の粒子識別能力を達成している。これら、二段階構成並びに高効率のRIビーム生成と高分解能粒子識別を強く意識した仕様がBigRIPSの大きな特長である。

本実験における同位元素の粒子識別は、BigRIPSの第2ステージにおいて、飛行時間（速度）、磁気剛性値、物質通過中のエネルギー減衰量を事象ごとに測定し、それらの測定値から同位元素の陽子数 Z 及び質量数と陽子数の比 A/Z を導出することによって行った。より詳しい実験手法の説明については、元論文もしくは文献⁹⁾の解説記事を参照。

本実験は、大強度 ^{48}Ca ビームの使用とBigRIPSの持つ高いRIビーム収集能力により、探索目標の同位元素を含む中性子ドリップライン近傍の同位元素に対し、十分な生成率を実現した。また、精密データ解析を行い、粒子識別において十分な分解能と十分なバックグラウンド除去を実現した。

5 実験結果—FとNeの中性子ドリップライン決定—

図3と図4に示す二次元プロット図は、中性子ドリップライン探索において観測された同位元素の粒子識別図である。縦軸は同位元素の陽子数 Z 、横軸は質量数と陽子数の比 A/Z を示している。図中、島のように見える事象の集まりの各々が、観測された同位元素に対応する。図3は、BigRIPSの中心粒子を ^{33}F に合わせた場合、図4は、中心粒子を ^{36}Ne と ^{39}Na の中間に合わせた場合の実験結果である。これら中心粒子だけではなく、その近傍に位置する同位元素も十分な通過率をもってBigRIPSを通過する。図中に強く見えている事象は、近傍の既知同位元素である。各同位元素の事象は良く分離されていて、必要な粒子識別の分解能が達成され、バックグラウンド事象の除去についてもバックグラウンドフリー（background free）とも言える粒子識別が実現されている。

本測定時の ^{48}Ca のビーム電流は、 ~ 450 pA（ $\sim 3 \times 10^{12}$ 個/秒）であった。総照射量と照射時間は、図3の中心粒子を ^{33}F に合わせた場合は、それぞれ、 1.4×10^{17} 個と14時間で、図4の中心粒子を ^{36}Ne と ^{39}Na の中間に合わせた場合は、 7.8×10^{16} 個と7.8時間であった。

ドリップラインの探索は、中性子ドリップライン付近の同位元素が観測されるか否かを調べることにより行った。粒子識別図に明確に示されているよう

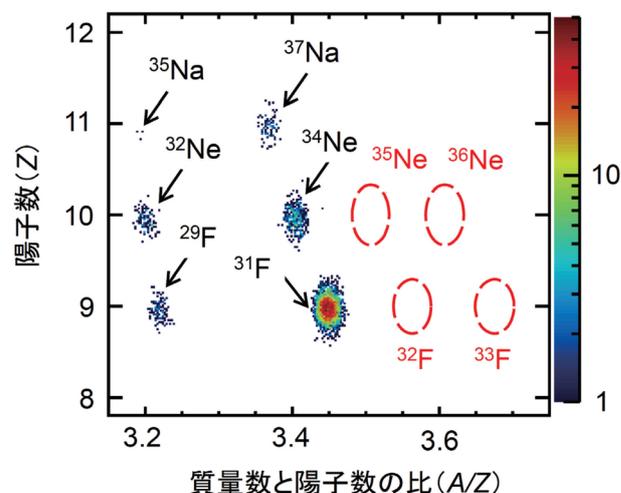


図3 中性子ドリップライン探索実験時の粒子識別図
BigRIPSの中心粒子を ^{33}F に合わせた場合

に、Fについては、 ^{31}F の事象が多く観測されているが、それより中性子数の多い ^{32}F と ^{33}F は期待される位置に全く観測されなかった。Neについては、 ^{34}Ne の事象は観測されたが、それより中性子数の多い ^{35}Ne と ^{36}Ne は全く観測されなかった。これらの結果は、 ^{32}F 、 ^{33}F と ^{35}Ne 、 ^{36}Ne の原子核が束縛しておらず、それらが存在しないことを示唆する。しかし、存在しても単に生成断面積が小さいか照射量不足のために観測されないという可能性があるため、それらを排除すべく統計的検定を実施した。その結果、高い信頼度でこれらの同位元素が存在しないと結論づけることができた。統計的検定の説明は、元論文又は文献9)の解説記事を参照。以上により、本実験は、FとNeの中性子ドリップラインをそれぞれ ^{31}F 、 ^{34}Ne と決定した。これは1999年のOの中性子ドリップライン決定以来の20年ぶりの成果となった。

Naの同位元素については、図4に示されるように、 ^{37}Na については多くの事象が観測されたが、 ^{38}Na は全く観測されなかった。しかしながら、驚くかな、1事象の ^{39}Na が観測された。図4において、 ^{39}Na の事象が来るべき位置を示す赤点線内に見える1つの点である。この1事象の観測は、 ^{39}Na が存在し、Naの中性子ドリップラインが中性子過剰側に延びる可能性を示唆する。筆者らは、この1事象に大いに興奮し、 ^{39}Na 探索に再挑戦する決意をした。

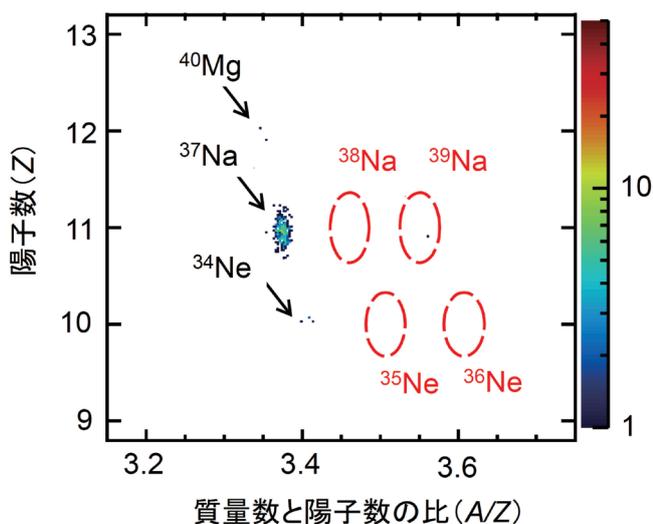


図4 中性子ドリップライン探索実験時の粒子識別図
BigRIPSの中心粒子を ^{36}Ne と ^{39}Na の中間に合わせた場合

6 実験結果—超中性子過剰新同位元素 ^{39}Na の発見—

^{39}Na 探索の再挑戦は、後年別実験として行ったが、実験方法は中性子ドリップラインの探索と基本的に同一である。主な違いは、BigRIPSの中心粒子を ^{39}Na に合わせ、生成条件を最適化したことである。

図5に、 ^{39}Na 探索実験における粒子識別図を示す。図に見られるように、筆者らは新同位元素 ^{39}Na の事象を明瞭に観測した。観測された事象の総数は9個で、疑いのない発見である。これにより、 ^{39}Na の原子核が束縛し、存在していることが明らかになり、中性子過剰Na同位元素の既知存在限界が20年ぶりに更新された。

本実験時のビーム電流は、 ~ 540 pAで、総照射量と照射時間は、それぞれ、 5.25×10^{17} 個と46.1時間であった。 ^{39}Na の生成断面積は、なんとフェムトバーン(fb: femtobarn)を切る小ささで、約0.5 fbと測定された。これは、RIビーム生成能力の高さを如実に示す数値である。

補足であるが、事象が観測されていない ^{38}Na が存在しないことを高い信頼度で確認した。 ^{35}Ne 、 ^{36}Ne の生成も再び実施し、 ^{34}Ne を中性子ドリップラインと決定した信頼度を更に高めることに成功した。

7 背景にある原子核構造

中性子の数が陽子に比べはるかに多い安定線から

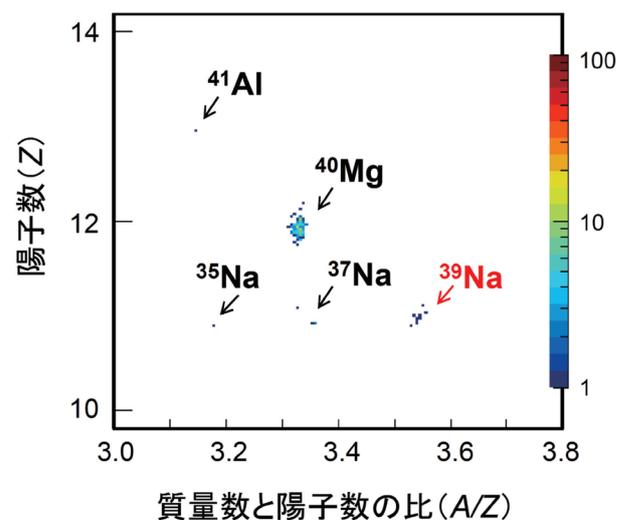


図5 新同位元素の ^{39}Na 探索実験時の粒子識別図
BigRIPSの中心粒子を ^{39}Na に合わせ、その生成条件を最適化した

遠く離れた中性子過剰原子核においては、核力は、中性子ハローのような特異な核構造を出現させたり、原子核の殻構造において、シェルギャップが変化する殻進化を生じさせたりする。この殻進化は、中性子の魔法数の消失や新しい魔法数の出現といった興味深い現象を出現させ、更に魔法数の消失は原子核の変形を引き起こす。こうした背景にある特異な核構造が反映され、中性子ドリップラインの位置やその近傍の原子核の束縛は決定されると考えられている。

本研究が対象とする元素の領域の中性子過剰同位元素では、陽子数 10–12、中性子数 20–22 の領域で「逆転の島 (Island of Inversion)」と呼ばれる特異な核構造が出現することが古くから知られている。この Ne, Na, Mg の逆転の島の領域では、魔法数 20 が消失し基底状態が変形して、回転バンドや強い電気四重極遷移といった核変形に特徴的な核構造が出現する。魔法数 20 が中性子過剰領域に行くと消失するというこの大発見はたいへん興味深く、大いに注目を集めた。

その後、理化学研究所の RIBF 等、RI ビーム生成施設の飛躍的發展に伴って、逆転の島の領域より更に中性子過剰側の核構造研究が可能になり、逆転の島の核変形は中性子数が更に増えた領域においても持続することが確かめられている。なんと、Mg の場合、次の魔法数である中性子数 28 を持つ ^{40}Mg まで核変形は持続し、魔法数 20 だけではなく魔法数 28 も消失していることが判明している。Na の場合は、中性子数 26 の ^{37}Na まで核変形が持続していることが判明している。更に、 ^{29}F (中性子数 20) の核構造が調べられ、逆転の島の変形領域は陽子数 9 の F にも拡張していることも確かめられている。

原子核は変形すると、核子はより強く結合し原子核はより束縛され、安定度が増す。したがって、中性子ドリップラインの位置決定やその近傍の原子核の束縛に対し、核変形は重要な役割を果たす。実際、**図 1** に示されるように、O から F, Ne, Na に移るとき、中性子ドリップラインの位置が急に中性子過剰側にジャンプする。これは oxygen anomaly と呼ばれるが、中性子数 20 から始まる核変形の出現によるものと考えられている。この核変形の役割は、最近大塚グループにより F, Ne, Na, Mg に対して行われた、最先端の大規模殻模型計算によっても確かめられている¹⁰⁾。

この大規模殻模型計算は、本研究において確定した F と Ne の中性子ドリップラインの ^{31}F と ^{34}Ne をみごとに再現し、 ^{39}Na を中性子ドリップラインとしてその存在を予言している。

中性子数 28 を持つ ^{39}Na の原子核が束縛するという今回の実験結果は、Na の中性子過剰核領域において、魔法数 28 が消失していることを示唆する。それにより基底状態が変形し、その結果より安定になり、 ^{39}Na は束縛し存在する。そして、Mg の場合と同様、Na の中性子過剰核の変形は、中性子数 20 から 28 まで持続する。こうした解釈は、前記の大規模殻模型計算の結果と良く符号する。

^{39}Na が中性子ドリップラインかどうかは、今回の実験からは結論できない。しかし、大規模殻模型計算が予言していることから、Na の中性子ドリップラインの最有力候補と考えられる。

8 まとめと今後の展望

図 6 に本研究の成果をまとめた核図表を示す。本研究は、理化学研究所 RIBF を用いたドリップライン探索並びに新同位元素探索実験により、F と Ne の中性子ドリップラインを ^{31}F と ^{34}Ne と決定し、超中性子過剰新同位元素 ^{39}Na を発見した。本研究の成果は、核構造の理解に大きなインパクトを与え、中性子の数が陽子に比べはるかに多い極限状態にある中性子過剰核に出現する、興味深い核構造や核力の解明に寄与することが期待される。

次なる挑戦としては、更に重い陽子数 11–13 の元素、Na, Mg, Al の中性子ドリップライン探索が考えられる。それには、更に中性子過剰な Na 同位元素の ^{41}Na (中性子数 30) の探索、 ^{42}Mg (中性子数 30) や ^{45}Al (中性子数 32) 等より陽子数の大きい超中性子過剰新同位元素の探索が含まれる。また、RI ビームを用いた核反応実験等、 ^{31}F , ^{34}Ne , ^{39}Na の核構造を直接的に調べる実験も興味深い。

本研究の成果は、RIBF の RI ビーム生成能力を如実に示している。実際、その生成能力により RI ビームの強度が飛躍的に増え、到達できる同位元素の領域や実行可能な実験の種類が格段に増えた。その結果、文献 11) にまとめられているように、新しい発見を含む、数多くの興味深い成果が得られている。それには、筆者が研究責任者を務めた、同位元素の

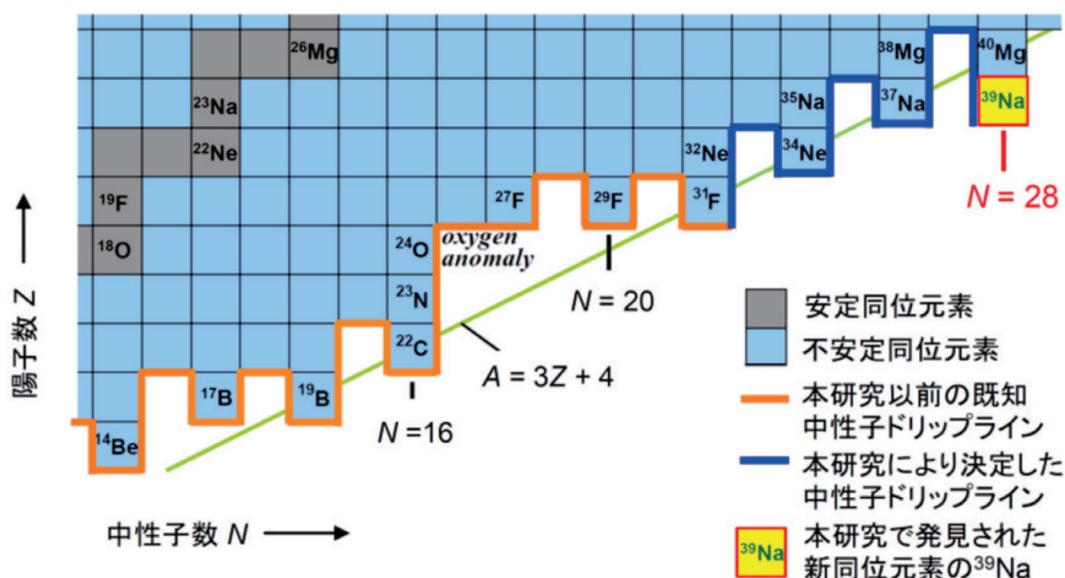


図6 本研究の成果をまとめた核図表

本研究で決定したドリップラインを青色の実線で、約20年前もしくはそれ以前に決定された酸素とそれより軽い元素のドリップラインを橙色の実線で示す。本研究で発見した超中性子過剰同位元素³⁹Naを黄色の枠で示す

フロンティア拡大を目指した一連の新同位元素探索実験も含まれる。この探索実験では、今までに²³⁸U, ¹²⁴Xe, ⁷⁸Kr, ⁷⁰Zn, ⁴⁸Ca ビーム等を用いた探索が行われ、中性子過剰側を中心に150種を超える新同位元素の発見がなされている^{5, 8, 12}。新同位元素の発見は、M. ThoennessenによるDiscovery of Nuclides Project¹³に良くまとめられている。

RIBFでは、大幅なビーム強度の増強を目指した高度化計画RIBF upgradeが進行中で、達成の暁には中性子過剰極限に向けた研究が更に進むと期待できる。米国においても最近大型RIビーム施設FRIBがミシガン州立大学で稼働し始め、ドイツでは大型RIビーム施設GSI FAIRを建設中である⁵。こうして、極限状態にある原子核の謎、宇宙の物質の起源等がより明らかにされていくと考える。

謝辞

元論文の文献1, 2)に共著者として名を連ねる、本研究の共同研究者の皆さまの貢献に対し、感謝申し上げます。大強度の⁴⁸Caビームを供給していただいた理化学研究所 仁科加速器科学研究センターの加速器グループの皆さまに感謝申し上げます。本研究で使用したBigRIPSの開発・建設やそれを用い

た一連の新同位元素探索に筆者と共に係わった方々の幾多の貢献に対し、感謝申し上げます。以上の貢献なしでは、本成果は成し得ませんでした。

参考文献

- 1) D. S. Ahn, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **123**, 212501 (2019)
- 2) D. S. Ahn, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **129**, 212502 (2022)
- 3) 理化学研究所プレスリリース
https://www.riken.jp/press/2019/20191119_1/index.html
https://www.riken.jp/press/2022/20221117_3/index.html
- 4) Y. Yano, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* **261**, 1009 (2007)
- 5) T. Kubo, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* **376**, 102 (2016)
- 6) T. Kubo, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* **204**, 97 (2003)
- 7) T. Kubo, *et al.*, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2012**, 03C003 (2012)
- 8) 大西哲哉, 久保敏幸, *Isotope News*, **666**, 展望, (2009)
- 9) 稲辺尚人, *Isotope News*, **772**, 展望, (2020)
- 10) N. Tsunoda, *et al.*, *Nature (London)*, **587**, 66 (2020)
- 11) T. Nakamura, *et al.*, *Prog. Part. Nucl. Phys.*, **97**, 53 (2017)
- 12) 福田直樹, *Isotope News*, **759**, Tracer (2018)
- 13) M. Thoennessen, Discovery of Nuclides Project, <https://people.nsl.msui.edu/~thoenness/isotopes/>

(理化学研究所 仁科加速器科学研究センター)