

令和6（2024）年度 日中韓フォーサイト事業成果報告書

【1. 日本側拠点機関名】

国立大学法人大阪大学

【2. 日本側研究代表者 所属部局名・職名・氏名】

核物理研究センター・教授・青井考

【3. 日本側協力機関名】

該当なし

【4. 研究課題名】

核子から核物質にいたる量子多体系の織りなす極限条件下の多彩な核構造

【5. 研究分野】

原子核物理学。その中でも、最も基本となる核子（陽子と中性子）から、中性子数と陽子数の組み合わせが天然に存在する原子核と大きく異なる短寿命の不安定核や、地球上には存在しない超高密度物質である中性子物質などに渡るひろい系を対象とし、そこに現れる特異な構造を明らかにする。

【6. 実施期間】

2019年8月～2024年7月（5年間）

【7. 全交流期間を通じた目標】

原子核物理の最前線では、中性子数や陽子数を制御して天然に存在しない不安定原子核の実験が可能になり、様々な核反応を高分解で分析する技術の進展と併せて核構造の理解が大きく深化している。現在日本には世界の原子核物理分野を牽引する加速器施設が存在し、さらに数年後には中国、韓国で次世代の加速器施設が稼働を開始するなど、世界の原子核研究のなかでアジアの存在感がますます高まることは間違いない。このような好機の中で、日中韓の3カ国が強い交流をもつ仕組みを作ることの意義は極めて大きい。本事業では、核子から核物質に至る広義の原子核における特異な構造を日中韓の協力のもと、以下の3つの視点で解き明かす。

A. 極限状態下の原子核の特異な構造の解明

不安定核ビームを用いた実験研究が可能になると、中性子ハロー構造や魔法数の消滅や新魔法数の出現などの新奇な構造が主として軽い領域で見つかり、原子核研究に新しいパラダイムをもたらした。こうした特異構造は重い質量領域ではさらに多様化し、ハローと変形の相乗効果、多中性子クラスター、励起エネルギー軸に向けた殻構造進化、異なる変形状態の共存と混合など多彩な特異構造の発現が予想されている。

B. r 過程及び s 過程に関わる原子核構造の解明

我々の身の回りのあらゆる物質を構成する元素は天体における原子核反応で生成された。鉄よりも重い原子核は r 過程及び s 過程と呼ばれる中性子捕獲と β 崩壊の連鎖で合成されると考えられており、実際に、重力波により観測された中性子星合体は r -過程の存在を強く支持するものであった。こうした元素合成過程を理解するために、原子核物理からのアプローチとして、 r 過程及び s 過程に関与する原子核構造を解明する。

C. 状態方程式

核物質の状態方程式は原子核物理的な観点に加え中性子星の構造を決定するという観点での重要性を持つ。中性子星の芯部での中性子過剰物質の圧力と重力との釣り合いや、殻

令和6（2024）年度 日中韓フォーサイト事業成果報告書

部において原子核が析出してできるいわゆるパスタ相の形成とその動態を理解するために、様々な環境における状態方程式を知る必要がある。

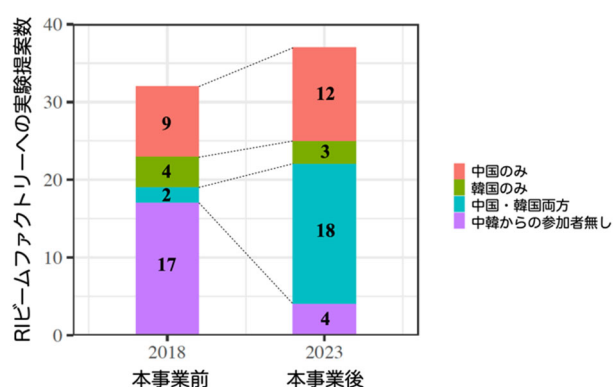
これらの重要課題に、最先端の加速器を駆使し、理論的にも *ab initio*、殻模型、平均場、クラスターなど多彩な手法で挑む。中性子過剰領域での殻構造が r 過程経路を支配しており、また、対相関やアルファ相関の変質は状態方程式に大きな影響を与えるなど、3 つのテーマは互いに強く関連しており、複合的に研究を遂行する。

【8. 日中韓を中核とする世界的水準の研究交流拠点の構築状況】

本事業では、本課題と同時に始まった「原子核と元素の存在限界到達に向けた反応ダイナミクスの研究」（以下、「核反応課題」と密接な連携を取ることににより進めてきた。特に、キックオフミーティングやラップアップミーティングを含む年会、若手を対象としたスクール活動は両課題で一体となって実施し、RI ビームファクトリーでの実験なども両課題で両課題が有機的に協奏し、ユニークな核反応により新しい核構造を明らかにする流れができた。この連携が非常に上手く機能したことにより、研究交流拠点構築（【8】）、若手研究者の育成（【9】）、事業終了後の（【11】）が大きく進んだ。以下ではこの点を明らかにするために、核構造課題との共通するパラグラフを「†」で明示する。

原子核研究は優れた物理テーマの選定と先進的な加速器、検出器によって推進される。安定核ビーム施設として大阪大学 RCNP サイクロトロン施設という安定核軽イオンビームで世界一の高分解能をもつユニークな加速器施設があり、日中には重イオンタンデム加速器施設がある。不安定核研究分野では日本の RI ビームファクトリーに加えて韓国の RAON が本事業期間中に完成し、実験を開始した。実施予定の多くの実験は RI ビームファクトリーや RCNP サイクロトロン施設で実施されている研究の発展であり、検出器技術を含めて本事業の貢献は極めて大きい。中国においては、HIAF 施設が完成目前という状況にあり、やはり本事業による研究に基づいた技術開発や実験テーマの策定が重要な役割を果たしている。日中韓3カ国はこのように、本課題の実施期間に大きく進展するポテンシャルを備えていた。その環境下で本事業を実施したことにより日中韓三カ国の結束が強まり、更にそれを軸とした欧米諸国との国際共同研究が進んだ。

†中韓の拠点機関を中心とする原子核物理コミュニティとの連携が強化されたことは、例えば理研 RI ビームファクトリーへの実験提案数に如実に表れている。右図が本事業開始前（2018 年）と本事業開始後（2023 年）の状況を示している。本事業前は中韓いずれかの研究者が参加している実験提案は全体の 47%（ $=15/32$ ）に過ぎなかったのが、本事業後では、89%（ $=33/37$ ）に激増している。特に中韓両方の研究者が参加している提案が 2 から 18 に大幅に増えているのが印象的である。このことから、本事業が RI ビームファクトリーでの研究における日中韓連携に大きな役割を果たしたことが分かる。この傾向は他の加速器施設でも同様である。

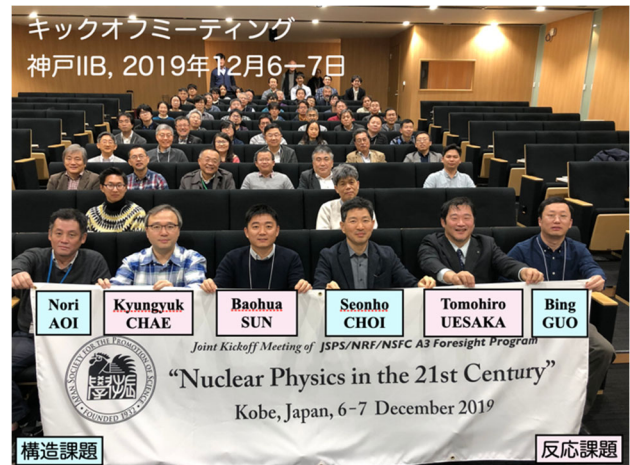


†2019 年 12 月に神戸で開催したキックオフミーティング（右図）では、本課題と核反応課題がそれぞれ 3 つ設定した計 6 つのテーマについて、日中韓での共同研究について議論した。これらの議論からスタートした連携が前述した各加速器施設での日中韓共同研究の大幅な増加につながった。開始半年後の 2020 年 1 月よりコロナ禍が始まったのは、本事業にとって大きな痛手であった。しかし、見方を変えれば、コロナ禍により国際共同研究が悲劇的なダメージを受けた中でも日中韓の良好な関係が継続され、国境を越えた移動が可能となった直後速や

令和6（2024）年度 日中韓フォーサイト事業成果報告書

かに日中韓の国際共同研究が開始できたのは、本事業があったからこそだと言える。コロナ禍の初期には全ての加速器施設の運転が止まり、数ヶ月後に施設運転が開始した後も国境を越える移動ができないため、国際共同実験の実施は叶わなかった。

そこで、コロナ禍中は、各国で行われている検出器開発を連携させるコーディネーションを行った。その結果、大阪大学が主導するガンマ線トラッキング検出器と中韓のクローバー型ゲルマニウム検出器を欧州のクラスター型ゲルマニウム検出器と組み合わせたHiCARI検出器を用いたRIビームファクトリでの精密実験の実現、アクティブガス標的の日中共同開発、が実現しつつある。これらの検出器は日中韓共同で提案された実験研究で用いられるものである。



以下、本課題で設定した3つのテーマについての世界的水準の研究交流拠点の構築状況について述べる。上でも述べたように核反応課題と融合したため、本課題開始当初に本課題で設定したテーマ実現のために核反応課題との有効な共創が実現した。

A. 極限状態下の原子核の特異な構造の解明

核構造研究は実験手法から見たときに主としてガンマ線測定と粒子測定で進められる。主としてガンマ線測定に基づくアプローチとして、本課題では上で述べた HiCARI コラボレーションの形成に加え、高エネルギー分解能、高時間分解能ガンマ線検出器であるLaBr3に基づく4 π アレイであるIDATEN コラボレーションが立ち上がった。HiCARI コラボレーションについては既にRIBFでの実験が完了し、現在データ解析が終盤に迫っている。IDATEN コラボレーションについては、実験課題が RIBF 課題助言委員会で採択され、実験実施を待っている。

主として粒子測定に基づくアプローチとして、本課題では、SAMURAI コラボレーションでの研究が大きく進展した。本課題が始まる前から想起されていた研究も含めて多くの研究が本課題によって進展し、韓国 IBS、北京大学、北京師範大学、IMP 中国科学アカデミー、等とのコラボレーションが進み、テトラ中性子の観測や最後の二重魔法数候補核である酸素 28 の観測に成功するなど、大きな成果を得た。

B. r 過程及び s 過程に関わる原子核構造の解明

本テーマは、核反応課題との強い連携を活かして進めたものである。まず元素合成シミュレーションに用いる核構造計算ライブラリーを日中韓連携で開発する「A3LIB」計画が本事業のもと吉田賢市氏の主導により開始された。この計画では密度汎関数理論を用いて、速い中性子捕獲過程(r プロセス)に関わる中性子過剰原子核の質量 [H. Gil, et al., Phys. Rev. C 108, 044316 (2023)]と寿命 [K. Yoshida, et al. Phys. Rev. C 108, 034305 (2023)]の予言を行った。実験研究としては、RI ビームファクトリーの OEDO ビームライン、CRIB 装置、原子力研究機構タンDEM加速器施設での天体核反応研究が進められた。以上の研究は本課題終了後も継続され大きな成果を産むと予想される。

C. 状態方程式

状態方程式については、現在最も注目されているパラメータのひとつである核物質の非圧縮率のアイソスピン依存性について、その精度と信頼度を上げることを目指し、原子核における単極遷移強度分布の測定に用いるためのアクティブ標的 (TPC) の共同開発テーマとして主に中国との共同研究が初められた。日本が進めてきた大強度ビームを照射可能な TPC の設計・運用技術をベースに中国でも新たに TPC 開発が進められ、大型 TPC を制作する際の手法の一つである連結型 TPC の開発基盤が整えられた。アクティブ標的 TPC の実証として HIMAC において Xe 同位体、Kr 同位体における逆運動学重陽子非弾性

令和6（2024）年度 日中韓フォーサイト事業成果報告書

散乱の測定を行い、世界で初めて逆運動学非弾性散乱における多重極展開を実現させるに至った。

理論面からも、以前から重要と考えられていたテンソル力と短距離斥力の状態方程式の密度依存性への効果を調べるために、それらを高運動量を持つ核子対への励起という形で取り入れた現実的な核力を用いて核物質の状態方程式を記述することに成功した。

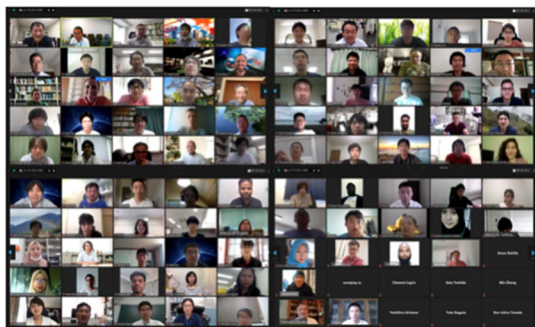
【9. 次世代の中核を担う若手研究者の育成】

本事業では、常に若手研究者の育成に注力して進めてきた。年次総会でも若手研究者に積極的に講演を依頼し、中韓との共同研究を促してきた。その効果は、本事業の5年間に日本国内で、11名の若手研究者を含む21名の参加者が上位職に昇進されたことにもあらわれている。中韓でもこれを越える人数の若手研究者が研究所や大学等で職を得、本事業に関わる研究で活躍している。これらの方々はいずれも不安定核物理学の時代を担う方々であり、本事業は若手の育成に大きな貢献をしたといえる。

若手研究者の育成は2つのアプローチで行った。1つ目は実際に現場で研究を進めることによる育成で、特に実験研究では加速器施設における比較的大規模なチームの中で同年代の研究者と切磋琢磨し、基本的な実験技術を身につけつつ独自の研究を展開する方法が極めて有効である。本事業の前半はコロナ禍のためにこのアプローチには大きな制限があったが、後半には研究交流が急速に進み、特にRCNPサイクロトロン施設での原子核中のテンソル力の役割の研究、RIビームファクトリーにおける殻構造進化研究、A3三カ国でのアクティブ法的開発、RAON加速器施設での実験開始に向けたさまざまな研究計画検討や装置開発において若手の活躍が顕著で、研究の進展という観点だけでなく若手の育成という観点でも大きな成果が上がった。

†若手を対象としたスクールが2つめのアプローチで、特に力を入れたのは2019年度より本事業が共催を開始した国際サマースクールである。この国際サマースクールは東京大学大学院理学系研究科附属原子核科学研究センター（以下東大CNS）が2002年より開催を続けてきたもので、中国・韓国を中心とするアジアにおける若手育成という、本事業とその趣旨を同じくしているため、本事業研究代表者と東大CNSが議論を行い、共催することとした。2019年度は本事業開始直後の同年8月開催だったため、参加する大学院生の参加支援にとどまったが、2020年度以降は本事業の研究代表者が組織委員として加わり、講師の選定から実施まで東大CNSと協力して行った。

A3F-CNSSS20
(完全オンライン)



A3F-CNSSS23
(ハイブリッド開催)



2020年度はコロナウイルス蔓延の影響により初めて完全なオンライン開催となった。このような開催形式は初めてのことであり、かつ各国で使用しているオンライン会議ソフトも必ずしも標準化されていない状況下での開催となったため、東大CNSともども苦労しながら開催にこぎつけた。しかしその苦労は報われ、従前のオンサイト開催時から比べ倍以上となる203名の参加者を得た。また、オンサイト開始時には考えにくかったアフリカや原子核物理が盛んではない東南アジアからの参加者があったこともオンライン開催の大きな効果であった。このサマースクールを通じて日中韓三カ国を中心としながら、同分野における全世界的な若手

令和6（2024）年度 日中韓フォーサイト事業成果報告書

育成に大きな貢献ができた。また、中国側では「Nuclear Physics School for Young Scientists (NUSYS)」と称されるサマースクールが開始された。本事業ではこのスクールへの大学院生派遣を行った。日本と中国のサマースクールを連携させる検討も本事業参加者の間で始まっており、将来的には東アジア地域の若手研究者育成を目指すスクールを一体となっていく機運が高めることに成功した。

【10. 中間評価指摘事項への対応】

中間評価で頂いた指摘は、

しかし、新型コロナウイルス感染症拡大状況下でも学生やPDの派遣や受け入れは可能であったと考えられ、たとえば定期的なオンライン講義シリーズの開催など、より一層の努力が求められる。

というものであった。頂いた指摘には最大限対応すべく、定期会合やスクールのオンライン配信などに努めてきた。実際のところ、中間評価後比較的短時間で国境を越えた移動が可能となり、2023年度初めから阪大核物理研究センターサイクロトロン施設で、2024年度から理研RIビームファクトリー施設にて日中韓の共同研究実験を開始することができたが、頂いた指摘への対応は、コロナ禍の如何に寄らず研究者間の交流を推進するもので、直接的な交流と目的に応じて使い分けて活用することで研究交流の効果を上げることができた。

【11. その他の成果・今後の課題・展望等】

本事業の成果をまとめ、今後を展望するラップアップミーティングを核反応課題と合同で2024年7月に実施した。上に記したような成果を基にした議論を行うと同時に、ここで醸成された3カ国のネットワークを今後さらに発展させることを確認した。今後の展開に関わる具体的な計画を以下何点かあげる。

†本事業で活性化した日韓の連携が大型外部資金獲得につながった。2024年に韓国NRFが国際共同研究強化を目的として公募した大規模研究資金である「Top-Tier プロジェクト」に、本事業（核構造課題および核反応課題）に深く関わった韓国基礎科学院、ソウル国立大学などの研究者が、理研仁科加速器科学研究センターや東大CNSなど日本の研究機関をパートナーとして応募し、採択件数全分野でわずか4件という狭き門を突破し採択を勝ち得た。この新規プロジェクトでは、韓国RAON施設と理研RIビームファクトリーでの日韓共同研究を進めるために、約2億円/年×10年の予算を投じるものである。

高エネルギー分解能トラッキングガンマ線検出器アレイや高時間分解能ガンマ線検出器アレイIDATENによる核構造研究、アクティブガス標的を用いた宇宙における元素合成研究などがTop-Tierプロジェクトのもと本格的に花開き、国際的にもトップレベルの研究成果が創出されることとなる。

また、中国で完成間近のHIAF加速器施設における実験や検出器開発が本事業で検討され、そのコミュニティは今後も継続され、RAONがそうであったように、HIAF加速器施設の稼働開始時の速やかな研究の遂行に貢献することが期待されている。

†本事業で強化・拡張しつつある研究ネットワークを、2024年の事業終了後も継続してほしいという参加者からの強い要望があり、本課題と核反応課題の日中韓代表者6名で検討を行った。検討の結果、アジア原子核物理協会(ANPhA)のもとで継続する枠組みを構築するのが最善との結論に至った。ANPhA理事会には、本事業の代表者のうち2名（本課題の中国代表者のGuo Bing氏と核反応課題の日本代表者の上坂氏）が理事として加わっており、現在具体的な組織形態と運営方針について検討が進められている。

†【8】でも述べたように、本事業による成果は今後数年で多く論文発表されると同時に、本事業を契機として始まった共同研究は大きく広がって行くこととなる。本報告を書くにあたり、参加者に「A3フォーサイト事業が研究に与えた影響」と「中韓との今後の連携の見通し」

令和6（2024）年度 日中韓フォーサイト事業成果報告書

についてアンケートを取ったが、多くの参加者から本事業で芽生えた共同研究を更に発展させて行きたいという意気込みを表明されている。