

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】

国立研究開発法人理化学研究所

【2. 日本側研究代表者 所属部局名・職名・氏名】

仁科加速器科学研究センター・部長・上坂友洋

【3. 日本側協力機関名】

該当なし

【4. 研究課題名】

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

【5. 研究分野】

原子核物理学

【6. 実施期間】

令和元年（2019年）8月～ 令和6年（2024年）7月 （5年間）

【7. 全交流期間を通じた目標】

アジア初の新元素二ホニウム¹⁰⁹の合成、中性子星合体現象で強い証拠が得られた速い中性子捕獲過程(r過程)元素合成に関わる不安定原子核の生成、重いカルシウム同位体(質量数52--60)で見られる新奇現象、と現在人類の手が届く限界にある元素・原子核で高い学術的価値を持つ研究が進められている。原子核と元素の存在限界への絶え間ない挑戦を行うことが、21世紀の原子核物理学にとって決定的に重要である。本課題では、1) 超重元素の合成、2) 新放射性同位元素の合成、3) 宇宙における重元素合成、における反応ダイナミクスの研究を推進する国際研究拠点の構築を行う。この目標を達成するために、日中韓3カ国の重イオン加速器施設における実験研究とそれに関連する理論研究を有機的に結びつけ、これを通じて、3カ国を中心とした国際共同研究の強化、実験―理論連携研究の更なる推進、若手人材育成を行う。現在、日本では理化学研究所RIビームファクトリー(RIBF)及び大阪大学核物理研究センター・サイクロトロン施設(RCNP)などの最先端加速器が稼働し、平行して、中国のHIAF、韓国の基礎科学研究所RAONの次世代施設の建設が進められている。これらの加速器施設は、加速粒子、加速エネルギー、加速方法が異なっている。これらを戦略的に活用する国際研究拠点を3カ国を中心して確立することにより、アジアが原子核物理学分野で世界をリードすることができる。

【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】

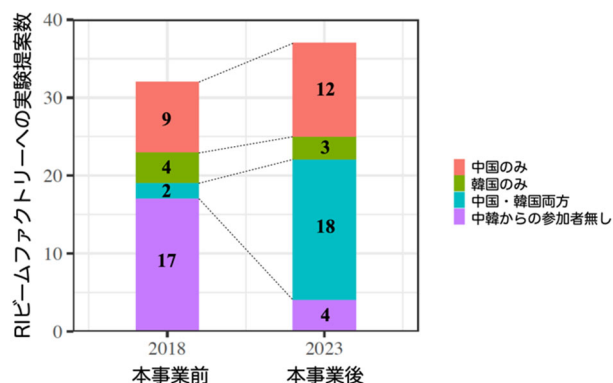
本事業では、本課題と同時に始まった「核子から核物質にいたる量子多体系の織りなす極限条件下の多彩な核構造」(以下、「核構造課題」)と密接な連携を取ることににより進めてきた。2023年度以降はコロナ禍による遅れを取り戻すべく、課題間連携をより強化し融合的に活動を行った。この連携が非常に上手く機能したことにより、研究交流拠点構築(【8】)、若手研究者の育成(【9】)、事業終了後の(【11】)が大きく進んだ。以下ではこの点を明らかにするために、核構造課題との共通するパラグラフを「+」で明示する。

原子核物理学分野において、稼働中の理化学研究所RIビームファクトリー、大阪大学核物理研究センターサイクロトロン施設に加え、建設が進められてきた韓国のRAON、中国のHIAFは世界トップレベルの加速器施設であり国際研究拠点である。本事業開始以前は、各施設にて欧米

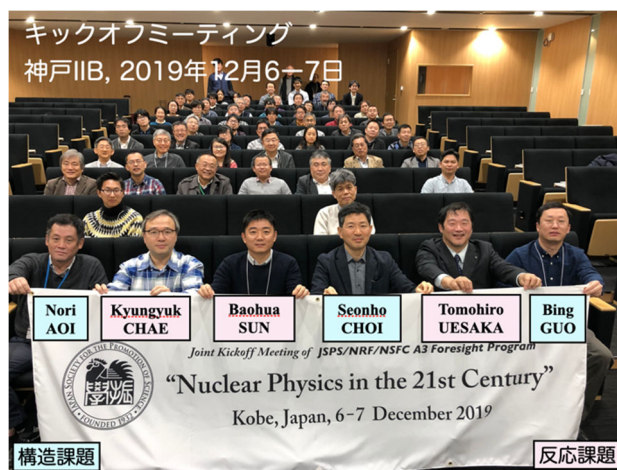
令和6（2024）年度 日中韓フォーサイト事業成果報告書

亜諸国との研究交流・共同研究が独立して行われていたが、本事業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、本課題と核構造課題が設定した 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、理研が主導する検出器アレイ TOGAXSI の建設への中韓の参加、韓国基礎科学院が建設した LAMPS 検出器の RI ビームファクトリーへの導入が実現しつつある。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。

「超重元素の合成」研究に関しては、理研 RI ビームファクトリーで行われている実験と、韓国 RAON 施設で将来行われる実験に関する理論研究が近畿大と韓国釜山大及び基礎科学院のグループにより進んだ(有友嘉浩, Youngman Kim, Chang-Hwan Lee 氏ら、日本物理学会 2022 年秋季大会など)。

「新放射性同位元素の合成」研究では、2 つの大きな進展があった。1 つ目は原子番号 80 を越える重元素の識別に関する技術的進展である。重い不安定核を用いた実験研究は、宇宙における金やプラチナなどの起源、核分裂機構やアルファ崩壊の理解に関わるものであり、近年その重要性が高まっている。そのため、この領域の新放射性元素合成は喫緊と課題となっている。本事業

令和6（2024）年度 日中韓フォーサイト事業成果報告書

の支援のもと行った粒子識別の高度化では、検出器に用いるガスをキセノンにすることにより、これまで不可能だった重元素に対する原子番号の決定を可能とした(吉本ら [arXiv:2401.08679](https://arxiv.org/abs/2401.08679))。2つ目は、次世代の新放射性元素合成法である、「2段階合成法」を開発する国際共同研究が本事業のもと開始したことである。2023年2月に実施した本事業年次総会を契機として、韓国基礎科学院の DeukSoon Ahn 氏の声掛けにより日中の研究者を巻き込み始まった計画では、現在用いられている2つの異なる手法である「ISOL 法」と「飛行法」を組み合わせた「2段階合成法」により従来法単体では不可能な高い合成率を実現する。これは飛行法で世界最高性能を持つ理研 RI ビームファクトリーと、ISOL を有する韓国 RAON 施設を連携させることにより可能となる研究であり、今後大きく発展すると期待される。

「宇宙における重元素合成」研究は、核構造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。

[†] 原子核物理学の実験研究分野では、加速器実験実施から2—5年後に論文として発表されるのが通常であり、2020—2022年のコロナ禍後再開した国際共同実験による成果の多くは本事業終了後発表されることとなる。

【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。また、年次総会では、優れたポスター発表をした若手研究者にアジア原子核物理協会(ANPhA)賞を授けるなどの取り組みを行った。その効果は、本事業の5年間に日本国内で、8名の若手研究者を含む18名の参加者が上位職に昇進されたこと、4名(田中純貴氏、久保田悠樹氏、吉田数記氏、田中聖臣氏)が日本物理学会若手奨励賞を受賞したことにもあらわれている。中韓でも北京大学、中国近代物理研究所、韓国基礎科学院などを中心として、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。

[†] 本事業を進める上で一つ印象的だったのは、2023年2月、コロナ禍後初となる対面(中国研究者は已然国外に出ることができなかったためオンライン参加)での年次総会を大阪で開催した際、韓国から大学院生を含む20名を超える若手研究者が参加し、彼らから「久しぶりの国際研究集会が楽しみで、興奮している。A3 フォーサイトにとっても感謝している」という声が聞けたことだった。2024年7月に韓国大田で行った最後の年次総会で、若手研究者の声を聞く特別セッションを設けた際、「A3 フォーサイト開始前と後で各加速器施設の国際環境が大きく変化し、今では日中韓の研究者が入り混じって研究するのが当たり前になった。我々の世代がこの方向をより進め発展させて行きたい。」というコメントが日本の若手研究者から寄せられた。

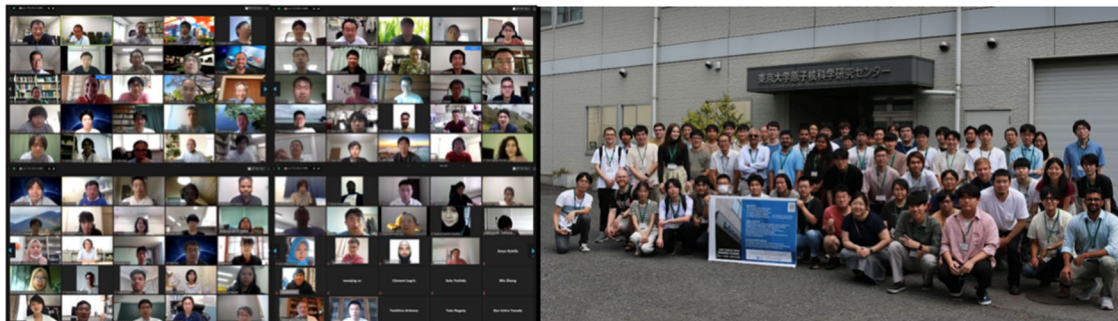
[†] 上記と並行して行ってきたのが、2019年度より本事業が共催を開始した国際サマースクールである。この国際サマースクールは東京大学大学院理学系研究科附属原子核科学研究センター(以下東大CNS)が2002年より開催を続けてきたもので、中国・韓国を中心とするアジアにおける若手育成という、本事業とその趣旨を同じくしているため、本事業研究代表者と東大CNSが議論を行い、共催することとした。2019年度は本事業開始直後の同年8月開催だった

令和6（2024）年度 日中韓フォーサイト事業成果報告書

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、

一方で、コロナ禍収束がいつになるかは現時点でも定かでなく、一層の長期化に対応する選択肢が準備されるべきであろう。3_か国の相互往来による共同実験研究実施を事業の支柱と位置付け、その方針を現在まで堅持する本事業実施者らの姿勢は称賛に値するが、状況の回復が遅い可能性もあり、その時でも共同研究を推進できるアイデアを積極的に考えて頂きたい。というものであった。しかしながら、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。

【11. その他の成果・今後の課題・展望等】

†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。本事業の代表者もこのプロジェクト申請において貢献をした。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。

Top-Tier プロジェクトの中心テーマである、「2段階放射性同位元素合成法」の開発、TOGAXSIを用いた原子核反応・構造研究、LAMPS検出器のRIビームファクトリーへの導入などは、本事業が端緒を開いた研究であり、これら新しいプロジェクトで更に発展し、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。この研究では、日本のRIビームファク

令和6（2024）年度 日中韓フォーサイト事業成果報告書

トリーと、韓国で2024年度にユーザー運転を開始したRAON施設を組み合わせることによるシナジー効果により、研究のさらなる発展を目指すものである。この視点は、本事業が当初に設定したスコープと全く同じものであり、本事業のコンセプトに沿って5年間で培った協力関係と連携体制があって初めて実現したものである。核子当たり200—300MeVのエネルギー領域をカバーするRIビームファクトリー、核子当たり20MeV以下をカバーするRAONフェーズ1施設に加え、中国のHIAF施設(核子当たり800MeVまでをカバー)が来年完成する見込みである。広いエネルギー領域の重イオンビームを組み合わせることが有益な、核反応ダイナミクスの研究において、アジアは他の地域にはない類まれな研究環境が用意される。

†この背景を受けて、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、本課題と核構造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（上坂及び核構造課題の中国代表者のGuo Bing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。

過去、各国が主として自国の計画のみを考えて来たアジア地域の原子核物理研究分野において、アジア・ワイドでの将来計画を考える雰囲気醸成が進んでおり、実際ANPhAにおいて具体的な活動が始まりつつあるが、本事業はこの雰囲気醸成にも一役買ったと言える。

【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」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。