

日中韓フォーサイト事業令和元(2019)年度採択課題 中間評価資料(進捗状況報告書)

1. 概要

研究交流課題名 (和文)	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		
日本側拠点機関名	国立研究開発法人理化学研究所		
研究代表者 所属部局・職名・氏名	仁科加速器科学研究センター・室長・上坂友洋		
相手国側	国 名	拠点機関名	研究代表者 所属部局・職名・氏名
	中国	北京航空航天大学	物理学院・准教授・Baohua Sun
	韓国	成均館大学校	自然科学部物理学科・准教授・Kyungyuk Chae

2. 研究交流目標

申請時に計画した目標と現時点における達成度について記入してください。

※新型コロナウイルス感染症拡大の影響により、申請時に予定していた共同研究の実施、セミナーの開催及び研究者交流等が困難又は延期せざるを得なかった場合、当初目的の達成に向け代替的に行った取組があれば、その成果も含めて記入してください。

○申請時の研究交流目標

アジア初の新元素ニホニウム²⁸⁹の合成、中性子星合体现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。本事業では、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)、中国では中国科学院近代物理研究所 HIRFL 施設、と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。

具体的には、1) 上記加速器施設群における実験への相互参加促進、2) 3カ国間研究集会の定期的開催による実験—理論連携研究促進、3) 国際スクール開催及び短・長期派遣による若手人材育成、を行う。現時点では、上記分野において日本は世界のトップを走っており、中韓がそれを追いかける状況にある。一方、中韓は HIAF 施設、RAON 施設の完成を目前に控え、原子核物理学がこれまでにない盛り上がりを見せており、多くの優秀な若手研究者が育ちつつある。日本のリーダーシップのもと、中韓との強い協力体制で国際研究拠点を確立することにより、高い国際的競争力を維持し続けることができる。

○目標に対する達成度

上記目標に対する2年分の計画について

(※期間延長対象課題の令和2年度事業については、延長期間終了日までの状況を踏まえること。)

- ☐ 研究交流目標は十分に達成された。
- ☐ 研究交流目標は概ね達成された。
- ☐ 研究交流目標はある程度達成された。
- ☒ 研究交流目標はほとんど達成されなかった。

【理由】

本事業の最も重要な目的は、日中韓3国が持つ最先端加速器施設理研RIビームファクトリー、阪大RCNPサイクロトロン施設、中国HIAF及びHIRFL、韓国RAONでの加速器実験を共同して行い、そこから出てくる新しい実験結果を三カ国の実験・理論研究者を中心として議論をし、新しい研究を展開することである。本事業は2019年夏に発足し、同年12月にキックオフミーティングを開催したが、その直後に始まったコロナウイルス蔓延は国際交流をほぼ全面的に止めてしまった。この状況は、本事業の中心活動である加速器施設での国際共同実験を完全に阻んでいる。オンライン会議でできる範囲の議論は進めているが、加速器施設での国際共同実験ができなければ本事業の本来の目的は全うできない。

このような困難な状況のもと、本事業では上記のスタンスを崩すことなく2019年度、2020年度予算は国際共同研究が再開した際に用いる実験装置整備当てることとした。実験装置開発においては目覚ましい進展があったが、これはあくまでも本事業による研究交流の準備という位置づけである。

3. これまでの研究交流活動の進捗状況

※新型コロナウイルス感染症拡大の影響により、申請時に予定していた共同研究の実施、セミナーの開催及び研究者交流等が困難又は延期せざるを得なかった場合、代替的に行った取組があれば、その内容及び成果も含めて記入してください。

(1) 令和3年7月末までの研究交流活動(期間延長対象課題の令和2年度事業は延長期間終了日までの状況を含む)について、「共同研究」、「セミナー」及び「研究者交流」の交流の形態ごとに、派遣及び受入の概要を記入してください。

※各年度における派遣及び受入実績については、「中間評価資料(経費関係調書)」に記入してください。

○共同研究

【概要】

2019 年 12 月に本事業のキックオフミーティングを、本事業と同時に開始した「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」との合同で実施した。日中韓三カ国での加速器施設の現状を共有し、本研究の中心テーマである超重元素合成反応、新同位体生成反応、宇宙における超重元素合成の各課題に対し、今後の進め方について議論を行った。元素合成のうち特に速い中性子捕獲過程(r 過程)に関わる理論モデルを集約する研究が提案され、“A3LIB”プロジェクトとしてスタートし、2020 年 1 月には京都大学で 1 回目の研究打合せを実施した。新同位体生成については、現在不定性の大きいウランの飛行核分裂による不安定核生成機構の研究に重点を置くこととし、反応理論研究がなすべきこと、今後取得すべきデータについて議論を行った。超重元素合成に関しては、同分野の研究者が一同に会する国際シンポジウム SHE2019 が日本国内において開催される機を活かして、共同研究グループのインフォーマルミーティングを開催し、より詳細な共同研究計画を立案した。以上、順調なスタートを切ったが、年度末に始まったコロナウイルス蔓延により加速器運転と国をまたいだ移動の見通しが立たなくなった。

2020 年 2 月の全く見通しの立たない状況のもとで、三カ国の PI はオンライン会議を実施し、

- ・各国の加速器施設での共同研究実験がこの事業の柱であり、その立ち位置は変えるべきではないこと。
- ・国境を越えた移動が可能となるまでは、将来の共同研究実験に向けた検出器開発を各国で行うこと。

の方針を確認した。しかし、その後コロナウイルス蔓延の影響はより激しくなり、2020 年度前期には各国での加速器施設運転そのものが停止せざるを得ない状況に陥ってしまった。このような大変難しい状況の中どう進めるべきか三カ国の PI 間のオンラインミーティングを重ね、各国のコロナウイルスに対する対応状況と各加速器施設の状況を共有した上で議論を行った。2020 年 11 月に開催した年次総会でも、この方向性に則り各国で行っている検出器開発連携に向けたセッションを企画し、今後の方針について議論を行った。

日本側拠点では、「原子核と元素の存在限界到達」する上で最大の鍵となる、超重元素ビームの粒子識別を向上させるためのイオンチェンバーやキセノンガスシンチレータの開発、核反応実験での生成粒子のエネルギーと散乱角度を精度良く決めるためのシリコンストリップ検出器と GAGG:Ce シンチレーション検出器の製作・開発を進めた。いずれの開発も順調に進んでおり、従来の技術では困難であった 1) イオンチェンバーを用いた、RI ビームファクトリーのエネルギー領域(核子当り 100–200 MeV)での超重元素($Z>80$)の原子番号同定、2) キセノンガスシンチレータを用いた毎秒 10^5 個以上という大強度重イオンビームに対する原子番号同定、3) GAGG:Ce シンチレータを用いた核子当り 100–200MeV の高エネルギー荷電粒子の高分解能エネルギー測定が可能となった。これらの結果は、現在論文準備中、もしくは 2022 年 10 月韓国で開催される重イオン科学分野での技術開発に関する最大の国際会議である“International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Related Topics”にて同開発を主導した若手研究者により報告予定である。

○セミナー

	令和元年度	令和2年度 (期間延長対象課題は終了日まで)	令和3年度4～7月末 (令和3年度事業として上記期間に実施したもの)
国内開催	1 回	1 回	0 回
海外開催	0 回	1 回	0 回
合計	1 回	2 回	0 回

【概要】

日本学術振興会日中韓フォーサイト事業「21 世紀の原子核物理学」キックオフミーティング

年次総会もホスト国である中国主導で完全オンライン開催となった。こちら、オンサイトのキックオフミーティングを大きく越える 130 名の参加者があり熱気ある議論が行なわれた。「共同研究の実施状況」で述べたように、総会の最後に検出器の共同開発に関するセッションを設け、国境を越えた移動が可能となった際に行う共同研究実験を見据えた開発を連携して行うための議論を行った。こちらも詳細は、<https://indico.rcnp.osaka-u.ac.jp/event/1577/>に詳しく掲載している。

特筆すべきは、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。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 とともに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。講師、プログラム、参加者については、<https://www.cns.s.u-tokyo.ac.jp/ja/research/summer-school/>に詳しく掲載されているので、そちらを参照されたい。

○研究者交流

【概要】

2019 年 12 月に実施したキックオフミーティングにおける交流を除き、日中韓フォーサイト事業の本来の趣旨である、国境を越えた交流により研究者が対面で交流し、ともに研究及びネットワークを構築するための交流は、コロナウイルス蔓延により全く実現できていない状況にある。

繰り返しになるが、本事業で最も重要な交流が各国の加速器施設での国際共同実験である。三カ国の研究者が互いの加速器施設で研究を実施することにより、各施設の特徴に合致した独自性ある研究プログラムを進め、それを通じて東アジアにおける研究交流拠点を構築するのが本事業の目指すところである。この点は、若手研究者にとってより重要であり、研究キャリアの初期に複数の研究環境を知ることが視野拡大に大きな寄与があると考えている。そこで本事業では、定期的な研究状況共有を除き、オンラインミーティングによる代替を行わないという方針のもと進めている。

(2) (1)の研究交流活動を通じて、申請時の計画がどの程度進展したか、以下の観点から記入してください。

○世界的水準の研究交流拠点の構築状況

・日本側拠点機関及び相手国拠点機関の交流によってえられた、世界的水準の国際研究交流拠点となりうるような学術的価値の高い成果

上記で繰り返し述べたように、コロナウイルスの蔓延により各国の加速器施設で共同実験が行える状況になかったため、論文としての成果は限られたものしか出ていない。しかし、本事業が契機となりいくつかの共同研究がスタートしていることを強調したい。加速器施設を用いた原子核物理学研究は、プロポーザルと呼ばれる実験提案書を各施設の実験課題採択委員会に提出することによりスタートする。本事業のキックオフミーティングや年次総会における議論がきっかけとなり、本事業のメンバーが加わる実験提案が既にいくつもなされている。一般に実験提案書は非公開が原則であるため、この資料にてその内容を開示することはできないが、これらは世界水準の国際研究交流拠点の種となるものである。国境を越えた交流が可能となった後には速やかにこれらの共同実験研究を実施し、拠点形成を進める予定である。

・研究交流活動の成果から発生した波及効果

現時点でまだ波及効果はないが、上記の実験提案の一部は各施設の国際実験課題採択委員会で高く評価され、元素合成や超新星爆発、中性子星に関わる宇宙物理学などの周辺分野に影響を与えるものと考えている。

○若手研究者育成への貢献

・若手研究者が身につけるべき能力・資質等の向上に資する育成プログラムの実施及びその効果

本事業では、若手研究者の育成において最も重要なこととして、複数の研究環境の中で自身の研究を行い、また異なった視点を持つ研究者との交流により複眼的な視点を養う機会を与えること、最先端の研究に触れる機会を増やすこと、と位置づけた。

上でも述べた国際サマースクールでは、世界トップレベルの研究者による講義を受ける機会を若手研究者に与えた。2020年度以降はやむを得ずオンライン開催となったが、それによるポジティブな効果としては、参加者数が倍増したこと、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、である。一方、若手研究者が他国の同年代研究者と席を並べて講義を受け、ともに議論する機会を用意することができなかったのは残念である。

また、本事業の中心に据えた、現在稼働中の RIBF, RCNP, HIRFL で行われる実験研究への若手研究者派遣は、コロナウイルス蔓延のため実現できなかった。特徴、性能、研究文化の違う三カ国の加速器施設での研究を通じて、研究現場での実績を持ち、かつ広い視野、将来展望を持った若手研究者を育成していく、というプログラムは、今後国境を越えた移動が可能となり次第進める。

・日本と交流相手国における次世代の中核を担う若手研究者の研究ネットワーク構築状況

キックオフミーティングや年次総会を経て部分的に若手研究者のつながりができている部分もあるが、こ

れもやはり各加速器施設とともに実験遂行することにより、本格的なネットワーク構築となる。これも国境を越えた移動が可能となり次第進める。