

日米科学技術協力事業(高エネルギー物理学)

第8次評価委員会

報告書

2024年12月

目次

| | |
|---|----|
| 総括と提言 Executive Summary and Recommendations | 1 |
| 1. はじめに | 3 |
| 2. 全体評価 | 3 |
| 2-1. 日米事業の意義について..... | 3 |
| 2-2. 日米事業の形態及び運営について..... | 4 |
| 2-3. この6年間の活動の概略..... | 5 |
| 3. 個別評価 | 6 |
| B. 加速器技術の開発 | 7 |
| C. 測定器開発..... | 9 |
| 4. まとめ | 12 |
| 5. 謝辞 | 14 |
| 巻末資料 | 15 |

総括と提言 Executive Summary and Recommendations

総括

日米科学技術協力事業高エネルギー物理学分野は、1979年に開始され、46年にわたり継続して実施されてきており、今回は、その長い事業実施期間を踏まえたうえで、2018年～2023年の6年間について評価を行った。

この6年間で総計 58 課題が本事業の支援を得て遂行され、日米の長基線ニュートリノ振動実験のための共同研究、SuperKEKB のルミノシティ向上への SLAC の加速器研究者の協力、米国における Belle II 実験のためのリモートデータセンターの設置、ILC 建設に向けた加速器・測定器開発への協力など、日米の研究者の良好な協力関係が築かれていることがうかがえた。

また、2017 年度より米国エネルギー省 (DOE) に本事業の予算枠が設定され、マッチングファンド方式による日米双方での共同公募となり、前回の評価期間と比較して課題数の増加につながったことは、本事業が、新たな研究の創出につながる活発な交流の契機となり、期待通りに機能しているといえる。

2021 年度より、3 年間を上限とする複数年度の課題採択を開始し、研究計画を長期的に計画できるようにしたことも、二国間の交流をより円滑にし、期待通りに機能しているといえる。

なお、評価期間は、コロナ禍で世界が大きく変動した時期を含んでいるにも関わらず、数多くの成果発表が上がったことは高く評価される。

また、2019 年度から、日米の大学院生が希望する研究機関に滞在して研究を行うことを支援する「Ozaki Exchange Program」が設立された。設立 2 年目からの数年はコロナ禍により、期待していた交流に支障が生じたことは悔やまれるが、日米双方の大学院生の交流は、将来の高エネルギー物理学や周辺分野を担う若手の育成に非常に重要であり、今後更に多くの優秀な学生の応募があることを期待する。

時の変遷とともにその機能は変化し、予算規模は当初に比べて縮小されつつあるものの、国際的な共同研究を行うための基盤づくりの一助を成しており、高エネルギー物理学及びその関連分野の発展への寄与が高く評価される。

提言

- 2017年度より米国エネルギー省(DOE)に本事業の予算枠が設定され、マッチングファンドによる日米双方での共同公募が行われることになった。今後の本事業は共同公募を基本とするが、これまで同様に、原子核や宇宙分野における高エネルギー物理との関連が深い研究課題の提案や、日米の大学を含む広い関連分野の研究者による先端的共同研究を可能とするために、片側だけの申請による研究課題の設定を排除すべきではない。
- 大型研究プロジェクトに関連した研究課題だけではなく、将来の加速器技術や新しい測定器技術の開発など萌芽的研究の提案を推奨する。
- 国際的な共同研究に対応する基盤的な枠組みとして、本事業において築き上げた協力形態や成果をもとに、外部予算の獲得による更なる研究計画の発展につながることを期待する。
- 近年は本事業の予算規模もかなり縮小されてきているが、高エネルギー物理学及びその関連分野の発展への寄与は大きく、今後も現在の予算規模を維持しての事業の継続が望まれる。
- 今後もコミュニティーや機構にとって重要な課題を、トップダウンによりある程度の予算範囲で支援することを是とする。
- 2019年度から「Ozaki Exchange Program」が設立されたが、大学院生の交流は将来の高エネルギー物理学や周辺分野を担う若手の育成に非常に重要であり、双方の大学・研究機関の積極的な支援を期待したい。
- 本事業の意義や成果を広く周知するため、日米双方がより積極的な広報活動を展開すべきである。

1. はじめに

本報告書は、高エネルギー加速器研究機構の「日米科学技術協力事業高エネルギー物理学研究計画委員会規程」に基づき設置された「第8次評価委員会(以下「委員会」)」が、2018年度から2023年度までの研究活動を対象としつつ、日米科学技術協力事業高エネルギー物理学(以下、「日米事業」)全体の実績も含めて評価したものである。

委員会は、2024年10月から3回会合を行った。この間、主たる課題代表者へのヒアリング及び成果報告書に基づき、研究課題の評価を行った。また、46年にわたる本事業全体に関わる実績と、新しい段階にきた事業の意義などについても検討・討論を行い、それらを総括すると共に、今後の日米事業に対する提言をまとめた。

2. 全体評価

2-1. 日米事業の意義について

日米事業は、1979年の発足以来、46年の歴史を刻んできた。半世紀近い歴史の中で、本事業は高エネルギー物理学の発展とともに進化を続けてきた。この46年間で、我が国で稼働していた主たる加速器施設を用いて次の4期に分けることができる: 1) 12GeV陽子シンクロトロン期(～1980年代)、2) TRISTAN期(1980～90年代)、3) KEKB・初期J-PARC期(1990～2010年代)、4) SuperKEKB・大強度J-PARC期(2010年代～)。特筆すべきは、この46年間の協力を通じて、両国の研究者間に強固な信頼関係と人的ネットワークが構築されたことである。この関係は、単なる技術協力を超えて、次世代の研究者育成や新しい研究分野の開拓にも大きく貢献してきた。また、日米両国の強みを相互補完的に活かした研究体制は、世界の高エネルギー物理学の発展に重要な役割を果たしている。

まず、12GeV陽子シンクロトロン期においては、我が国の多くの大学が日米事業の支援を得て米国のSLAC、FNAL、BNLなどの大型加速器施設を用いた実験に参加し、数多くの大学院生や若手の研究者が現地に滞在して最先端の高エネルギー実験現場を経験することが出来た。これらの若手研究者が我が国初の電子陽電子衝突型加速器TRISTANでの実験で活躍することになった。次のTRISTAN期においても日本の大学からSLACのSLC実験やFNAL TevatronのCDF実験などのエネルギーフロンティア実験に参加し、若手研究者の育成に貢献してきた。KEKB・初期J-PARC期においては、継続して日本の大学・研究機関からCDF実験やBNLのRHIC実験に参加する一方、米国の研究者がBelle実験やT2K実験に参加するなど、日米双方の研究者が相手国の加速器施設を使う双方向の共同研究が行われるようになって

きた。そして最近のSuperKEKB・大強度J-PARC期においては、SLACの高エネルギー実験やFNALのTevatronが終了したことにより、日本から米国の加速器実験に参加するよりも、SuperKEKBやJ-PARCなど我が国の加速器施設を用いたBelle II、T2K、KOTOなどの実験グループに、多くの米国の研究者が参加するというように大きく変貌を遂げてきている。

このような背景のもと、2017年度から米国DOEに日米事業のための独自予算枠(年間約180万米ドル)が設定され、マッチングファンドによる日米双方での共同公募が開始された。これにより、両国の研究機関が対等な立場で研究計画を提案・実施できる体制が整い、より戦略的な日米協力の新たな段階に入った。この制度変更は応募課題数の増加をもたらし、新たな研究分野の創出や研究者間の交流活性化につながっている。

2-2. 日米事業の形態及び運営について

日米事業は、1979年5月に締結された「エネルギー及びこれに関連する分野における研究開発のための協力に関する日本国政府とアメリカ合衆国政府との間の協定」(以下「日米エネルギー協定」)の下に、1979年11月に締結した「高エネルギー物理学の分野における協力に関する日本文部省とアメリカ合衆国エネルギー省との間の実施取極」(以下「日米実施取極」)に基づき事業を開始した。

「日米エネルギー協定」は2005年9月に有効期間が満了となり失効した。しかし、同協定には「協定の終了は、履行の完了していない計画の実施には影響を及ぼさない」という条項があり、これにより、それまでと同様に事業が継続されてきた。その後、同協定が失効している状況を解決するため、既に1988年に日米間で締結されていた「日米科学技術協力協定」の下に、新たに高エネルギー分野の協力を定義づけるべく、2013年4月に文部科学省と米国DOEとの間に実施取極(Implementing Arrangement (IA))が締結された。この実施取極は高エネルギー分野以外にも様々な科学技術の分野を含んでいるため、IAの下に高エネルギー分野のための協力を定義すべく、2015年10月に高エネルギー加速器研究機構(KEK)とDOE間に事業取極(Project Arrangement (PA))が締結された。

日米事業の具体的な運営は、概ね以下のように行われている。

日本側ではKEKが代表機関となり、この事業のための予算枠を確保し、国内公募を行う。これに応じた国内大学等の研究グループが申請書を提出し、これをKEKに置かれた「日米科学技術協力事業高エネルギー物理学研究計画委員会」(以下「研究計画委員会」)及び日米の委員から構成される「日米合同委員会」において審査する。日米合同委員会において採択

された研究計画に対しては、KEK から物件費が、また、それに連動して日本学術振興会から旅費が支出されている。2016年度までは、米国側には日米事業に特化した予算は確保されておらず、課題の公募は日本側でのみ行われ、以上のように運営されてきた。

しかし、2016年11月よりDOEに日米事業のための予算枠が設定され(年間約180万米ドル)、2017年度より共同研究資金(マッチングファンド)方式による日米共同公募がスタートした。日本側の研究グループは研究計画委員会に、対応する米国側の研究グループはDOE科学局のOffice of High Energy Physicsに申請書を提出することになった。それぞれの課題は日米合同審査パネルにおいて審議され仮採択されたのちに、日米合同委員会において最終的な採択課題が決定されることになった。

2013年度より特別枠として、新たに日米の研究者が協力して研究を行おうとする場合の調査や打ち合わせを行うための旅費を支援するプログラムが設置された。

また、2018年には若手交流支援のOzaki Exchange Programが開始され、2021年度からは、複数年度での課題採択が行えるようになった。

日米事業の研究成果報告は、毎年度末に研究計画委員会において行われている。また、日米事業の評価に関しては、本評価委員会において、おおむね5年毎にその期間内に実施された研究課題の成果報告書やヒアリングなどに基づき評価を行い、その結果を報告している。

2-3. この6年間の活動の概略

本委員会が評価対象とする2018～2023 年度の活動について、最初に、日米事業のあり方に関する種々の取り組みについて、次に対象期間に採択されている研究課題の成果について評価する。

- ・ 第40回日米合同委員会 2018年 @東京・学士会館
Ozaki Exchange Programの実施について検討することで合意された。
- ・ 第41回日米合同委員会 2019年 @ハワイ大学
40周年のハワイシンポジウムの成功を受け、以降2年毎にハワイにてミニシンポジウムを開催することが合意された。
- ・ 第42回日米合同委員会 2020年 @オンライン(コロナの影響によりオンラインで開催)
米国側より複数年度での課題採択が提案され、次年度の公募から実施することが合意された。
日米合同での事業評価は、日本と米国とで評価サイクルが異なることが指摘され、

予定された次回の評価以降に検討することで合意した。

- 第43回日米合同委員会 2021年 @オンライン(コロナの影響によりオンラインで開催)
日米合同での事業評価について引き続き検討することで合意した。
- 第44回日米合同委員会 2022年 @SLAC/オンライン(コロナの影響によりハイブリッドで開催)
次の評価は日米それぞれ別々に実施するとし、それ以降合同での事業評価の可能性を検討することで合意した。
- 第45回日米合同委員会 2023年 @ハワイ大学
ORNL及びJLABへのOzaki Exchange Programでの参加者受け入れが検討された。

2018年12月に、Ozaki Exchange Programの公募が開始され、また、2021年10月に複数年度採択も可とする公募が開始された。

2018年～2023年の6年間における研究課題として、総計 58 課題が本事業の支援を得て遂行された(巻末資料 3)。

内訳は、A.実験関係 1 件(GLAST 1 件)、B.加速器技術関係 27 件(ILC 4 件、SuperKEKB 4 件等)、C.測定器開発関係 29 件(ニュートリノ 11 件、Belle II 1 件、ILC 1 件、ミューオン 2 件等)、D.素粒子理論・素粒子データグループ関係 1 件 となっている。

本期間の特筆すべき成果として、T2K 実験と NO ν A 実験の研究者の密接な協力によるニュートリノ振動パラメータの精密測定の大きな進展が挙げられる。また、SuperKEKB の世界最高ルミノシティ達成に向けて、SLAC の加速器研究者との協力により着実な進展が見られている。さらに、ILC 計画に向けた要素技術開発では、日米研究者の緊密な技術協力が進められており、次世代実験のための革新的な測定器開発においても、両国の強みを活かした相補的な技術開発が実現している。

採択課題数は 2018 年の 28 件から 2023 年の 34 件へと着実に増加しており、これは 2017 年度から開始された日米共同公募制度が効果的に機能していることを示している。特に、加速器技術と測定器開発分野での課題数の多さは、両国の研究者が本事業を重要な研究開発プラットフォームとして認識していることの証左である。

3. 個別評価

課題数の多い「B. 加速器技術の開発」及び「C. 測定器開発」の分野からそれぞれ4課題を抽出し、評価を行った。

B. 加速器技術の開発

B1 最先端加速器の技術開発研究（責任者：早野 仁司/道園真一郎/阪井寛志）

超伝導加速器は将来の高エネルギー加速器の基盤技術となるものであるが、その研究開発には、ヘリウム冷凍機、クリーンルームなど大規模なインフラが必要となる。本研究では、KEK が自ら保有するインフラに加え、米国側の資産を活用することで、超伝導加速器の先端的な課題に取り組み、着実に成果を重ねた。超伝導加速器を長期間にわたって運用している JLAB、SLAC の運転経験を共有できた点においても大きな意義があった。大型のヘリウム液化器を使わない運転を可能とするニオブ3スズ (Nb₃Sn) 空洞について、日米が分担して複数の製造方法による空洞の開発を進めたことは、超伝導加速器の省電力化、高効率化の実現、産業利用に道を拓く成果として評価する。ナノビーム研究については、ATF が国際共同研究のプラットフォームとして有効に機能しており、大強度ナノビームに固有の課題である高次収差補正、wakefield 解析の研究などに進展があった。複数年度での課題採択は、長納期の物品調達に役立った。

本課題は KEK 側の日米事業全体の中でもっとも大きなウェイトを占めているが、一方の米国側は予算的に少なく、しかも最近は減額傾向にあり、非常にバランスの欠いたものとなっている。超伝導加速器、ナノビームが KEK のミッションにおいて特に重要な研究テーマであることは理解するが、日米事業以外から獲得した研究資金等の状況も踏まえた上で、日米事業でカバーすべき研究内容と経費を見極める必要があるだろう。

B2 SuperKEKB と高ルミノシティコライダーのための開発研究（責任者：飛山 真理）

本研究では、運転中の SuperKEKB 及び将来の高ルミノシティコライダーに必要な加速器技術の研究開発を進めた。日本側では、SuperKEKB の目標性能の達成に必要な喫緊の課題への取組として、米国にとっては電子・陽電子コライダーのアクティビティが中断している現状での技術継承と人材育成の場として、本事業が有効に活用されている。DOE からほぼ同額のバランスの取れた予算が提供されるようになった結果、米国側での技術者の人件費支出、日本への出張旅費の支出がスムーズに行えるようになったことは、大きな改善であった。日米両者が対面で議論を交わしながらの SuperKEKB のコミショニングの進捗、また、国内大学院生が長期に米国研究所に滞在し指導を受けるなど、将来を見据えた若手人材育成策など、本事業の特色を生かした活動が見られる。研究期間の途中で米国側のメンバーに変更があったが、計画を修正し当初目的の達成に向けた努力を行っている点も評価できる。

日本側では日本学術振興会からの旅費に国内旅費が含まれないことから、機構外の別予算にて旅費の補填を行っている。必要とする国内旅費は加速器研究施設で補填するなどの支援を求めるとともに、関連する科学研究費助成事業等で旅費を補助した場合は、本事業のマッチングの対象とするよう検討すべきである。

B5 単原子層保護膜を用いた加速器用電子源フォトカソードの量子効率低下の克服(責任者:山本 将博)

本課題は、電子源としてのフォトカソードの量子効率の低下を抑制し、再利用を可能とするためにグラフェン単原子層による保護膜の効果を調べる、小規模な研究である。代表者は KEK 所属であるが、研究の拠点は名古屋大学にあり、実質的には郭助教(広島大学出身)が中心となっている。メンバーには広島大学と日本大学も入っている。グラフェン保護膜を使うアイデアは米国側で生まれたものであり、米国側で第一原理計算も組み合わせた保護膜の候補探索を進め、日本側ではカソード成分元素の蒸着順序や厚みを見直して多層膜を成膜した上に保護膜を付けて、量子効率の評価やフォトカソード寿命の定量を行っている。放射光 X 線光電子分光(XPS)による評価を行うための測定試料作成方法にも工夫している。その結果、寿命が長く量子効率の高いフォトカソードの膜構造を見出している。

本課題を進める上で、国内旅費を別予算に頼らざるを得ないという問題が提起されているが、現在のところは基礎研究の範囲であるので、規模的、内容的に科研費等を組み合わせることのできる小規模研究計画と言える。また、放射光 XPS の実験を SPring-8 で行っているために旅費が必要となるが、同様の実験は Photon Factory やあいち SR(名古屋大学グループが関わっている)でも行える内容と思われる。今後は他の外部資金や他の共同利用も視野に入れて、実装を目指した研究を期待したい。

B14 高磁場超伝導磁石の含浸のための高熱容量および耐放射線性有機樹脂(責任者:菊池 章弘)

エネルギーフロンティアのハドロンコライダー実験では、現在より高磁場の電磁石を安定に運用できれば、高いエネルギーの加速器をコンパクトに実現でき、また強いビーム収束によりルミノシティが向上する。加えて、放射光施設でもコンパクトなウィグラー、アンジュレーターを実現できる。超伝導体の中で実用的に最も高い磁場を出せるものは Nb_3Sn である。この線材は機械的強度が弱く、現在エポキシ樹脂を含浸して固定している。それでも巻線の変形による熱擾乱などから超伝導体が破れた(クエンチ)場合、巻線が安定してクエンチが起きなくなるま

でのクエンチトレーニング回数が大きいこと、また、線材に含侵するエポキシ樹脂の延性が十分でなく、クエンチ時に応力を受けて巻線が破断することなどの問題がある。そこでこの研究では、新たな含侵樹脂として RIMTEC 社(倉敷)の TELEIN を用いている。これは適度な延性を持つ、クエンチを起こしにくくする高比熱の金属を混ぜ込みやすい、固化する前の粘性が低く含侵しやすいといった特徴を持つ。

この研究は 2020 年度から 2023 年度まで行われている。これまでに日本側の研究では、含侵性の向上及び金属を混ぜ込むことによるガンマ線照射時の曲げ弾性低下抑制を確認し、TELEIN が固定剤として優れていることを示した。また、米国側が試作した小型磁石(2000A 級)で、クエンチ最小エネルギーの向上、クエンチトレーニング回数の低減を観測するなどの成果を得た。

このように、この計画研究では米国、日本が明快に役割を分担し、また、複数年度のメリットを生かし学会発表を行って当初計画を超えた発想を取り込むなどして、順調に研究を進めることができた。今後、ハドロンコライダー実験で求められる中性子による放射線耐性の検証、高エネルギー加速器で用いられる 10000A 級の磁石での動作検証など、実用化に向けた更なる研究が期待される。

C. 測定器開発

C1 大強度陽子ビーム生成標的・窓材料に関する先端的研究(責任者:石田 卓/牧村俊助)

本課題は、陽子加速器の大強度化の際に必要な、照射損傷・熱衝撃による劣化を抑えた標的材料や窓材料の開発を日米で協力して行うことを目的に、2016 年度よりスタートしている。本研究は、陽子加速器に限らず、原子炉や核融合研究にも波及効果が大きく、国際的には RaDIATE 国際協力(米国 Fermilab が代表機関で日米欧加 19 機関)の枠組の中での活動に位置付けられるが、日米協力事業の果たす役割が大きく、米国側ではもっとも大きな予算が配分されており、Fermilab、PNNL、BNL(BLIP)が参加している。日本側は KEK、JAEA の他、東京大、NIMS、愛媛大が参加しており、大学を通じた若手人材育成にも貢献している。標的材料や窓材料の開発には専用の照射施設(例えば 12MeV 程度の陽子照射施設)が要望されているが、現状としては日米欧(CERN-HiRadMat を含む)の陽子放射や重イオン照射ができる施設に開発した材料(窓材としてのチタン合金、標的材料としてのタングステン合金など)を送って実験しており、相互の連携が有機的に行われ、成果を上げている。特に、標的が実用されるまでには施設側の問題もあり、年数がかかると思われるが、ビーム窓の方は実用化への需要

が高いと思われるので、更なる研究開発が望まれる。また、照射損傷機構の研究も進めており、熱衝撃が複合的な効果を与えていることを実験的に明らかにし、原子の弾き出し(DPA)の定量化を進めていることを高く評価したい。

なお、複数年度にわたり計画が進められるようになったことは有効に働いているが、日本の研究費を米国で使う場合の手続きに日米の会計年度の違いや米国側の承認プロセスにより時間が掛かるため、複数年度のメリットが十分に活かせないようであるので、日米事業全体として改善を望みたい。

C3 大強度ニュートリノビームのための加速器とビームラインの研究・技術開発 (責任者: 中平武/Friend, Megan)

現在米国、日本の両国で長基線ニュートリノ振動実験が進行中(米: NOvA、日: T2K)であり、将来計画(米: DUNE、日: HK)に向けた建設も進んでいる。これらのための大強度のニュートリノビームラインに関する技術的問題は、米国 FNAL、日本 J-PARC で共通である。本計画では、本評価期間の 2018 年度から 2023 年度にかけて、以下のような多岐にわたる課題について共同研究を行った。

- (a) ビーム挙動の理解: 相手方の運転を担当し理解を深めるとともに、J-PARC RCS のアップグレードの設計をまとめた。
- (b) 大強度ビームの電子雲問題について、表面コーティングなどにより改善を試みている。
- (c) 陽子ビーム運転に関する機器: J-PARC におけるビームモニターをビーム飛来時にだけ動作させることによる長寿命化を 2021 年度までに行い、また J-PARC ビームハローモニターの設計を FNAL で応用してダイナミックレンジを大幅に(6 桁)拡張する作業が進んでいる。さらに、取り出したビームのモニターに FNAL の技術を応用したものが J-PARC で整備中である。
- (d) レーザーによる H⁺イオンの電子剥ぎ取り: 大幅な高効率化が期待できる。これまでに 3MeV の運転で 2021 年までに 16.5%のイオン中性化を達成した。現在 400MeV の H⁺ で原理検証中である。

(e) パイオン生成ターゲットの大強度運転に関する諸問題: 現在までに放射化したターゲットの扱いの改良を共同で検討している。今後はその無人化、収束ホーン磁石の改良を行う。

以上のように本計画は大強度ビームに係る多岐にわたる諸問題を解決し、また現在もその改良において多くの役割を果たしている。プロジェクトの内容が多様化したため、現在は研究計画委員会の提言に従い、上記(b)、(c)のうちハローモニター、(c)のうち取り出しビームのモニター、(d)及び(e)の5プロジェクトに分かれて研究を進めることにより、各チーム内の緊密な

連携で研究を加速し、かつ全体の情報交換によるアイディアの醸成を行っている。

これらの研究においては、実際に渡航して研究を共同で行うことが根本的な相互理解を促し、研究の動機を高めていることが報告された。本計画はニュートリノ振動の実験の実現に向けた基盤的な研究であり、実験の成功にとって非常に重要である。適正なサイズの研究区分化による効率的な研究経費の活用を今後も進め、確実に成果を上げていくことを期待する。

C4 J-PARC での中性 K 中間子稀崩壊実験 (責任者:小松原 健/山中 卓/野村 正)

本課題は、J-PARC ハドロン実験施設の KL line を使用した KOTO 実験の遂行に求められるデータ取得・解析や装置開発などを日米グループで協力して行うもので、2018～2020 年までは各単年度で、2021～2023 年は 3 年計画で行われた。ただし、2018 年度は日本側プロポーザルのみの提出となっている。単年度課題としては、検出器免震機構の追加、実験エリアの中性子遮蔽の強化、新設検出器のデータ読み出し、A/D コンバータモジュールの開発などが行われ、複数年度課題としてはデータ収集システム(DAQ)の増強が行われた。本事業の要の一つである電磁カロリメータは、2716 本のヨウ化セシウム(CsI)の結晶で構成されており、これは KTeV 実験に使用されていた結晶を過去の本事業の支援のもとで日本に移設したものである。2019 年には上流からの半導体光検出器による読み出しを追加し、CsI カロリメータを両側から読み出す手法が導入された。また、DAQ においては、近年のデバイスの老朽化・陳腐化のため、シカゴ大を中心にその刷新に着手している。

2016～2018 年のデータ解析で見られていた背景事象は、荷電 K 中間子の混入を原因とするものであったことが明らかとなり、それらを捕える検出器の開発・設置、新たな解析手法の導入が行われた。それにより、2021 年取得データの解析では、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の分岐比の上限値として世界記録を更新する 2.1×10^{-9} が得られており、高く評価できるものである。また、3 年にわたって行われた DAQ の増強により、2024 年の物理ランでは、増強前の 1.5 倍の処理能力が達成されており、複数年度課題としての実効性があったと考えられる。

KOTO 実験は $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索の感度を徐々に上げており、今後 4～5 年で 2021 年取得データに対して 10 倍以上のデータを蓄積し、 $(5-8) \times 10^{-11}$ の実験感度に達する見込みとなっている。日米の協力によって、更なる DAQ の増強も計画されており、今後の進展が期待できる。さらに、次世代実験「KOTO II」を計画中であり、欧州からの参加も期待されているが、引き続き米国側の協力は必要不可欠であり、米国グループの研究者の拡大が課題である。

C8 高精細・二重読み出しカロリメータ技術のための検出器の開発(責任者:大谷 航)

本課題は、将来のコライダー実験、特にヒッグスファクトリーに適した高性能カロリメータの開発である。高性能カロリメータの技術として、(1)チェレンコフ光とシンチレーション光の二重読み出し技術、(2) PFA (Particle Flow Algorithm) を実現するための高い位置分解能と三次元シャワー再構築のための高精細技術、(3)粒子識別に必要なピコ秒の速い時間計測技術、の三つを柱としている。チェレンコフ光検出器としては、RPC 技術を応用した DLC-RPC を日本側が主導して設計・製作し、米国がチェレンコフ放射体とフォトカソードの開発を担っている。チェレンコフ光検出器とシンチレーション光検出器の読み出しに必要な高時間分解能エレクトロニクスの開発は米国が担っている。日本側は、検出器のデザイン、カロリメータ設計のためのシミュレーションを担当している。双方で協力してプロトタイプを作製し、宇宙線を使った初期試験から、最終的にはビーム試験で性能を評価する計画である。

現時点までに、チェレンコフ光検出器とシンチレーション光検出器の要素技術の開発が進んでいる。プロトタイプによる試験から、いくつかの問題が見つかったが、解決可能のレベルである。つまり、チェレンコフ光検出器で見つかった問題点は、低い光量、イオンバックフローによるフォトカソードの QE 低下、フォトンフィードバックによる時間分解能の低下である。シンチレーション検出器では、両端読み出しで高い位置分解能が確認できた。シミュレーションでは、二重読み出し性能に最適な検出器のデザインを進めていて、高精細読み出し(PFA)、次は高時間分解能を組み込んだカロリメータの性能評価に取り組む。最終的には、プロトタイプ検出器を作製し、KEK の PF-AR でテストビーム実験をし、性能を評価する。

本研究は、予算分担を含め、日米間で有効な協力体制が築けている。3 年計画で、複数年度の課題採択が特にうまく機能したケースである。

4. まとめ

- 1) 1979 年の事業開始以来、日米事業は 46 年にわたり継続して実施されてきた。時の変遷とともにその機能は変化し、予算規模は当初に比べて縮小されつつあるものの、高エネルギー物理学及びその関連分野の発展への寄与は高く評価される。
- 2) 2018 年～2023 年の 6 年間で総計 58 課題が本事業の支援を得て遂行された。T2K 実験と NOvA 実験の研究者の密接な協力によるニュートリノ振動研究の進展、SuperKEKB のルミノシティ向上への SLAC の加速器研究者の貢献、米国における Belle II 実験のため

のリモートデータセンターの運用、ILC 建設に向けた加速器・測定器開発への協力など、日米の研究者の良好な協力関係が築かれている。

- 3) 2017 年度より米国エネルギー省 (DOE) に日米事業の予算枠が設定され、マッチングファンド方式による日米双方での共同公募が行われることになり、萌芽的な研究を含めた応募課題数の増加につながった。これは新たな研究分野の創出と活発な研究交流の契機となり、期待通りに機能していると評価できる。
- 4) 評価期間はコロナ禍で世界が大きく変動した時期を含んでいるにも関わらず、オンラインツールを効果的に活用することで研究活動を継続し、数多くの成果発表が上がったことは高く評価される。
- 5) 2021 年度より 3 年間を上限とする複数年度の課題採択を開始し、研究計画を長期的に立案できるようにしたことも、二国間の交流をより円滑にし、期待通りに機能しているといえる。
- 6) 2019 年度から開始された“Ozaki Exchange Program”は、日米の大学院生が希望する研究機関に滞在して研究を行うことを支援する重要な取り組みである。設立 2 年目からコロナ禍により物理的な交流に制限があったものの、オンラインを活用した交流を継続した。この経験は、将来の高エネルギー物理学や周辺分野を担う若手の育成における新しい可能性を示唆している。
- 7) 本事業は、基礎科学研究における国際協力の重要なモデルケースとして、今後も高エネルギー物理学の分野で重要な役割を果たすことが期待される。特に、次世代加速器計画の実現や、新しい物理現象の探索に向けた測定器開発において、日米協力は不可欠である。

本事業開始から 46 年を経て、日米の共同公募制度の確立や若手研究者育成プログラムの充実など、協力体制は着実に進化を遂げている。今後の本事業の発展に大きな期待が寄せられる。

5. 謝辞

本評価委員会報告書を作成するに当たり、会議の準備、資料の整理、原稿の校正等、様々な事務的支援で協力いただいた、高エネルギー加速器研究機構研究協力部国際企画課の皆様には感謝の意を表します。

卷末資料

資料1. 日米科学技術協力事業(高エネルギー物理学)第8次評価委員会名簿

| | | |
|-----|------------|---|
| 委員 | 青木 真由美 | 金沢大学理工研究域 数物科学系・教授 |
| | 小杉 信博 | 大阪大学核物理研究センター・特任教授 |
| | 中野 貴志(委員長) | 大阪大学核物理研究センター長 |
| | 中家 剛 | 京都大学理学研究科・教授 |
| | 羽島 良一 | 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 関西光量子科学研究所 光量子ビーム科学研究部・部長 |
| | 山崎 祐司 | 神戸大学大学院理学研究科・教授 |
| 事務局 | 戸本 誠 | 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・教授 |

資料2. 日米科学技術協力事業(高エネルギー物理学)第8次評価委員会の開催状況

| | 開催日時 | 会場 | 議事内容 |
|-----|-------------------------------|---------------------|--|
| 第1回 | 2024年10月24日(木) 10:00~12:00 | 高エネルギー加速器研究機構/オンライン | 日米事業に関する概要説明の後、評価方針、実施方法等について意見交換を行った。 |
| 第2回 | 2024年11月7日(木) 8:45~14:20 | 高エネルギー加速器研究機構 | 評価対象課題について、課題代表者等から成果報告等のヒアリングを行った。 |
| 第3回 | 2024年12月16日(月) 10:00~12:00 | 高エネルギー加速器研究機構/オンライン | 評価報告書の原案を基に、評価内容について意見交換・修正を行うとともに、全体評価について議論を行った。評価報告書の原案を基に、全体評価も含めた内容について議論を行い、最終版に向けての取りまとめ作業を行った。 |

資料3. 評価対象及び各研究課題の予算規模・学位取得者数・成果公表数

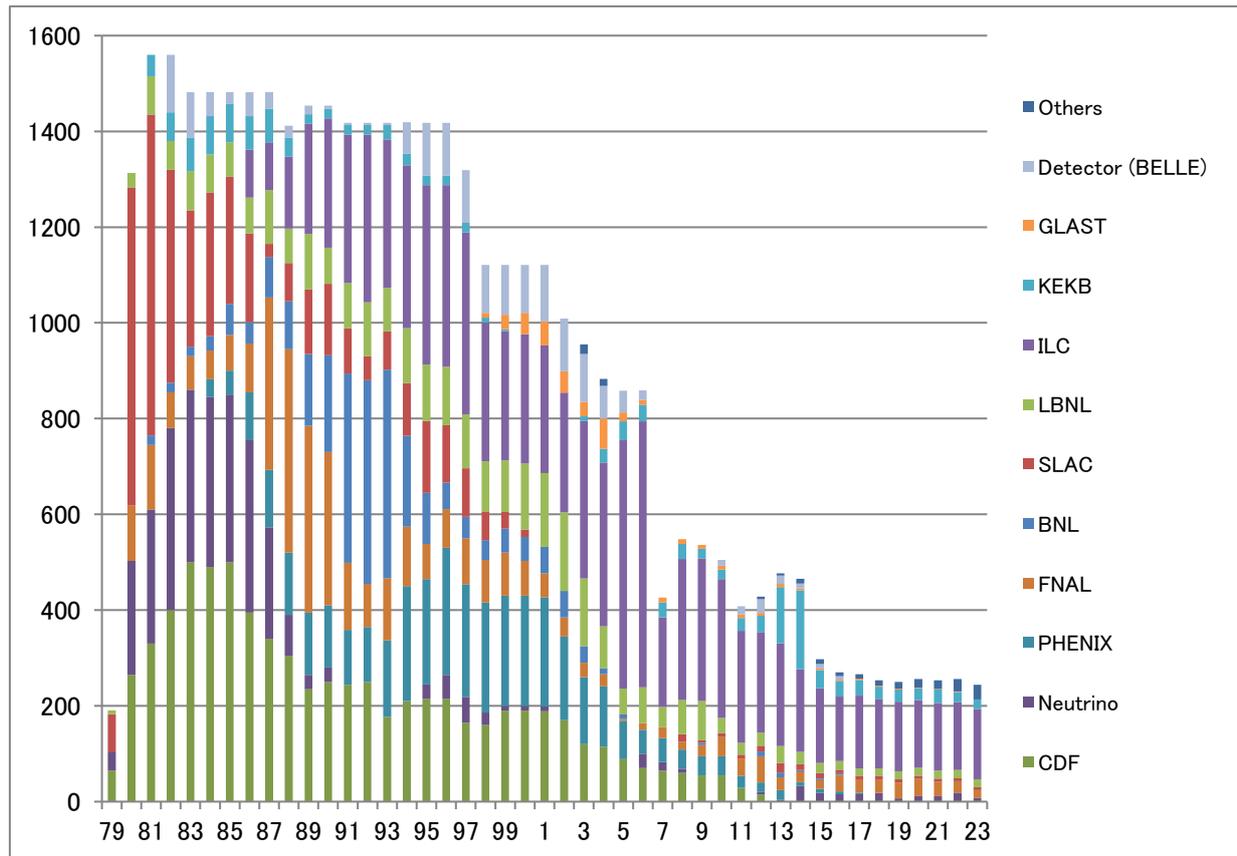
| | 実験課題 | 実験代表者 | 事業期間 | 評価期間中の運営費交付金配分額(百万円) | | | | | | | 合計 | 成果発表数 (評価期間中) |
|-----|---|----------------------------|---------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|------------------|
| | | | | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | | | |
| A1 | GLAST ガンマ線宇宙望遠鏡の開発/フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡の開発 | 大杉 節 /深沢 泰司 | 1998- 2022 | 2.4 | 2.0 | 1.5 | 1.3 | 1.3 | - | 8.5 | 71 | |
| B1 | 最先端加速器の技術開発研究 | 早野仁司/道園 真一郎 (2019~) | 2018- | 119.7 | 119.0 | 119.0 | 119.0 | 122.0 | 120.0 | 718.7 | 97 | |
| B2 | SuperKEKB と高ルミノシティコライダのための開発研究 | 飛山真理 | 2013- | 20.9 | 18.0 | 18.0 | 18.0 | 17.0 | 16.5 | 108.3 | 22 | |
| B3 | 2 ホウ化マグネシウムを用いた超伝導空洞の高効率・高加速勾配化の研究開発 | 阪井寛志 | 2018- | 2.9 | 2.9 | 4.0 | 4.0 | 6.0 | 5.5 | 25.2 | 7 | |
| B4 | SuperKEKB ビーム衝突点超伝導 4 極電磁石磁場中心振動測定装置の研究開発 | 大内徳人 | 2012- 2021 | 5.7 | 7.0 | 6.0 | 5.5 | - | - | 24.2 | 2 | |
| B5 | 単原子層保護膜を用いた加速器用電子源フォトカソードの量子効率低下の克服 | 山本将博 | 2018- | 2.5 | 2.5 | 3.5 | 3.5 | 3.4 | 4.0 | 19.4 | 7 | |
| B6 | 大強度ビームにおける遅い取り出し手法の開発 | 富澤正人 | 2017- 2021 | 4.8 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | - | - | 16.8 | 23 | |
| B7 | 高温超伝導磁石の加速器応用における新しい展開のための研究協力 | 荻津透 | 2018- | 1.9 | 1.9 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 15.8 | 13 | |
| B8 | SuperKEKB 超伝導電磁石アップグレードの研究開発 | 大内徳人/有本 靖 (2023~) | 2021- | - | - | - | 4.8 | 4.0 | 3.8 | 12.6 | - | |
| B9 | 超伝導加速空洞の表面処理の開発 | 梅森健成 | 2021- 2023 | - | - | - | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 12.0 | 6 | |
| B10 | リニアコライダのためのダンプリングリングの無い電子入射器開発 | 栗木雅夫 | 2017- 2021 | 3.3 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | - | - | 9.3 | 2 | |
| B11 | 素粒子加速器と検出器用電磁石3次元ホール素子磁場測定システムの設計と開発 | 大内徳人 | 2017- 2021 | 1.4 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | - | - | 7.4 | - | |
| B12 | 将来の加速器施設のための堅牢なスピン偏極電子源 | 郭 磊 (GUO Lei) | 2022- | - | - | - | - | 3.5 | 3.5 | 7.0 | 1 | |
| B13 | 高輝度超伝導 RF 電子銃の開発 | 許斐太郎 | 2017- 2019 | 3.8 | 3.0 | - | - | - | - | 6.8 | - | |
| B14 | 高磁場超伝導磁石の含浸のための高熱容量および耐放射線性有機樹脂 | 菊池章弘 | 2020- | - | - | 1.0 | 1.0 | 2.5 | 2.0 | 6.5 | 1 | |
| B15 | 線形加速器の性能向上に向けた機械学習技術の研究・開発 | 發知英明/劉勇 (Yong, Liu)(2022~) | 2021- | - | - | - | 2.5 | 4.0 | - | 6.5 | 1 | |
| B16 | 先進超極細 Nb3Sn 超伝導線材及び新奇ラザフォードケーブルの作製と評価 | 菊池章弘 | 2023- | - | - | - | - | - | 5.6 | 5.6 | - | |
| B17 | CBETA と cERL の連携による ERL 加速器技術の開発 | 宮島司 | 2019- 2019 | - | 5.0 | - | - | - | - | 5.0 | - | |
| B18 | 粒子加速器における暗電流起源放射線の影響および陽電子源シミュレーション統合ツール | 惠郷博文 | 2022- | - | - | - | - | 2.5 | 2.5 | 5.0 | 1 | |
| B19 | 効率及び費用対効果の高い常伝導高電界加速技術の開発 | 阿部哲郎 | 2018- 2023 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.7 | 0.4 | 4.9 | 5 | |
| B20 | 先端電子陽電子源の開発 | 榎本 嘉範 | 2023- | - | - | - | - | - | 4.5 | 4.5 | - | |

| | | | | | | | | | | | |
|-----|--|-------------------------|-----------|------|------|------|------|------|------|-------|----|
| B21 | 超伝導高周波加速クライオモジュールに用いられる機器の開発・研究 | 山本 康史 | 2023- | - | - | - | - | - | 4.5 | 4.5 | 3 |
| B22 | 高勾配進行波型超伝導加速空洞の開発 | 梅森健成 | 2023- | - | - | - | - | - | 2.3 | 2.3 | - |
| B23 | 先端加速技術の現状とそのアプリケーションの新規構想の調査に関する合同フォーラム | 吉田光宏 | 2022-2023 | - | - | - | - | 1.0 | 1.0 | 2.0 | 1 |
| B24 | SuperKEKB ビーム衝突点用超伝導 6 極電磁石システムの検討とプロトタイプ製作 | 大内徳人 | 2020-2020 | - | - | 1.0 | - | - | - | 1.0 | - |
| B25 | 超伝導共振空洞を用いた高周波重力波検出器の設計 | 新田 龍海 | 2023- | - | - | - | - | - | 1.0 | 1.0 | - |
| B26 | ILC コスト削減のための超伝導高周波技術の研究開発 | 道園真一郎 | 2017-2023 | 旅費のみ | 旅費のみ | - | 旅費のみ | 旅費のみ | 旅費のみ | 0.0 | 27 |
| B27 | Joining the commissioning of LCLS-II | Mathieu Omet | 2020-2021 | - | - | 旅費のみ | 0.0 | - | - | 0.0 | - |
| C1 | 大強度陽子ビーム生成標的・窓材料に関する先端的研究 | 石田卓/牧村俊助(2023~) | 2016- | 14.3 | 17.5 | 20.0 | 18.0 | 19.0 | 14.0 | 102.8 | 45 |
| C2 | 将来の電子陽電子衝突器のためのセンサーの研究開発 | 山本均/Daniel Jeans(2020~) | 2017-2021 | 14.3 | 14.0 | 16.0 | 10.0 | - | - | 54.3 | 7 |
| C3 | 大強度ニュートリノビームのための加速器とビームラインの研究・技術開発 | 中平武 | 2017- | 6.7 | 6.7 | 8.0 | 8.0 | 10.0 | 5.0 | 44.3 | 12 |
| C4 | J-PARC での中性 K 中間子稀崩壊実験 | 小松原健/山中卓/野村正(2021~) | 2012- | 8.6 | 10.0 | 10.0 | 6.0 | 5.0 | 2.8 | 42.4 | 9 |
| C5 | 次世代実験のための Geant4 カーネルと物理モデルの開発 | 佐々木節 | 2011- | 6.1 | 5.5 | 5.5 | 5.5 | 5.5 | 5.5 | 33.6 | 6 |
| C6 | 高エネルギー加速器実験用の高時間分解能をもつ半導体検出器の開発 | 中村浩二 | 2019- | - | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 5.7 | 4.6 | 22.3 | 20 |
| C7 | 光・粒子計測のための次世代超伝導検出器:大規模アレイ化に向けたユニバーサル検出器・読み出し系の開発 | 田島治 | 2017-2021 | 3.8 | 3.8 | 5.0 | 5.0 | - | - | 17.6 | 2 |
| C8 | 高精細・二重読み出しカロリメータ技術のための検出器の開発 | 大谷航 | 2022- | - | - | - | - | 6.5 | 5.5 | 12.0 | 1 |
| C9 | FNAL-LBNF のためのニュートリノビームライン機器の開発と技術設計 | 中平武/関口哲郎(2019~) | 2018- | 旅費のみ | 旅費のみ | 3.0 | 3.0 | 2.4 | 1.9 | 10.3 | - |
| C10 | ニュートリノ実験前置検出器のための3次元シンチレータトラッカーの開発 | 横山将志 | 2018-2018 | 6.7 | - | - | - | - | - | 6.7 | 15 |
| C11 | 神岡地下を拠点とする量子計測と極低温実験施設 | 石徹白晃治 | 2022-2022 | - | - | - | - | 6.0 | - | 6.0 | - |
| C12 | 将来の半導体検出器の開発を見据えた大面積な高速ビーム・テレスコープシステムの開発 | 中村浩二 | 2022- | - | - | - | - | 2.0 | 2.0 | 4.0 | - |
| C13 | 現行および将来の長基線ニュートリノ振動実験検出器のための研究開発 | 横山将志 | 2017-2018 | 3.8 | - | - | - | - | - | 3.8 | 21 |
| C14 | Hiding Data Access Times in HEP Distributed Workflow | 原隆宣 | 2019-2020 | - | 1.0 | 1.0 | - | - | - | 2.0 | - |
| C15 | J-PARC 及び Fermilab におけるミュオン g-2 実験のための超高精度磁場校正 | 佐々木憲一 | 2017-2019 | 1.0 | 1.0 | - | - | - | - | 2.0 | 1 |

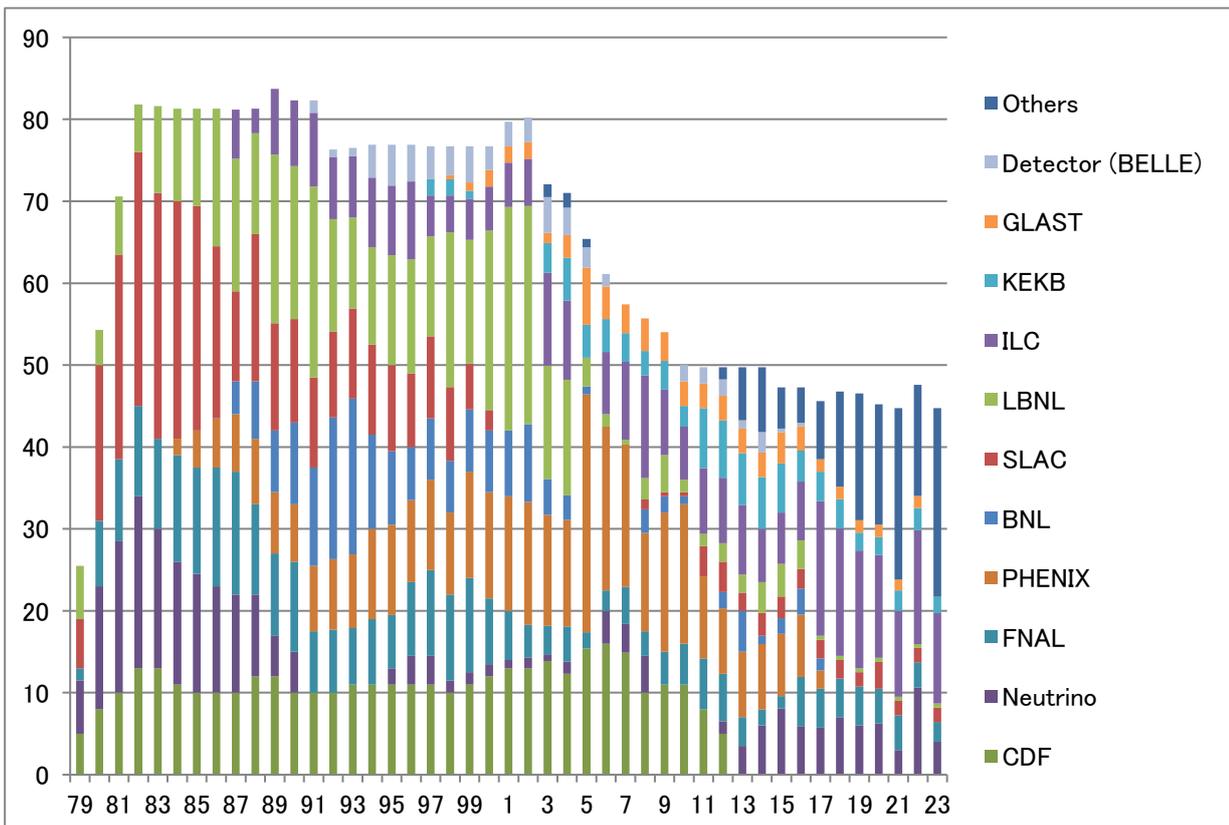
| | | | | | | | | | | | |
|-----|--|-------------------|-----------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|----|
| C16 | Belle II 実験における拡張性を考慮した自動化プロダクション・システムの開発 | 原隆宣 | 2016-2018 | 1.9 | - | - | - | - | - | 1.9 | 7 |
| C17 | 高エネルギー物理へ向けた量子アルゴリズムの最適化 | 寺師弘二 | 2020- | - | - | 旅費のみ | 1.0 | 0.1 | 0.1 | 1.2 | 5 |
| C18 | 紫外光検出の増幅機構付きシリコンドリフト検出器の開発 | 島添 健次 | 2023- | - | - | - | - | - | 1.2 | 1.2 | - |
| C19 | Development of Multi-PMT Photosensors for Future Neutrino Experiments | Mark Hartz | 2018-2018 | 1.0 | - | - | - | - | - | 1.0 | - |
| C20 | Development of the Framework for a Joint NOvA-T2K Neutrino Oscillation Analysis | Mark Hartz | 2019-2021 | - | 旅費のみ | 0.3 | 0.5 | - | - | 0.8 | - |
| C21 | 機械学習を用いたニュートリノ反応の多重微分断面積測定 | 木河達也 | 2022-2022 | - | - | - | - | 0.5 | - | 0.5 | - |
| C22 | g-2 実験における NMR 磁場測定装置校正の信頼性向上:水の磁化測定 | 佐々木 憲一 | 2023- | - | - | - | - | - | 0.5 | 0.5 | - |
| C23 | 強度フロンティア実験のためのインキュベーション・プラットフォーム | 橋本省二 | 2018-2023 | 旅費のみ | 旅費のみ | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.3 | - |
| C24 | A Joint NOvA-T2K Neutrino Oscillation Analysis | Mark Hartz | 2023-2023 | - | - | - | - | - | 0.2 | 0.2 | - |
| C25 | ハイパーカミオカンデ・DUNE 実験にむけたニュートリノ・原子核散乱プログラム NEUT の汎用インターフェース開発 | 早戸良成 | 2020-2020 | - | - | 0.1 | - | - | - | 0.1 | - |
| C26 | Enabling New Machine Learning Techniques for the Data-Driven Physics Modeling and Analysis of Long Baseline Neutrino Oscillation Experiments | de Perio, Patrick | 2023- | - | - | - | - | - | 0.1 | 0.1 | - |
| C27 | メガワット級大強度ビームのための電磁ホーン開発 | 多田将/関口哲郎(2021~) | 2015-2022 | 別予算から | 別予算から | - | 別予算から | 別予算から | 別予算から | 0.0 | - |
| C28 | JFETs for low-noise front-ends | 三好敏喜 | 2021-2021 | - | - | - | 旅費のみ | - | - | 0.0 | 2 |
| C29 | 核破砕中性子源を用いた水チェレンコフ検出器における低エネルギーニュートリノ非弾性散乱の研究計画ワークショップ | Roger Wendell | 2022-2022 | - | - | - | - | 旅費のみ | - | 0.0 | 1 |
| D1 | 素粒子データ情報に関する研究 | 日笠 健一 | 1979- | 15.3 | 16.6 | 17.0 | 16.6 | 17.0 | 16.6 | 99.1 | 38 |

資料4. 年度別採択件数及び配分額の推移

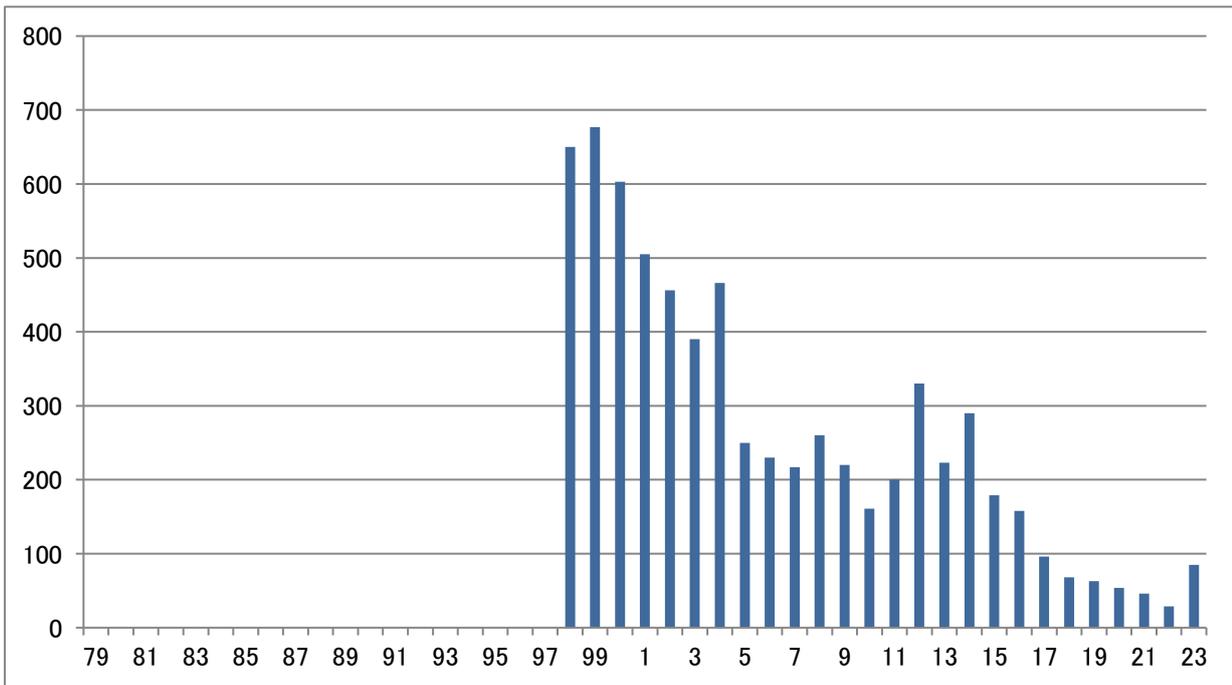
・物件費(百万円)



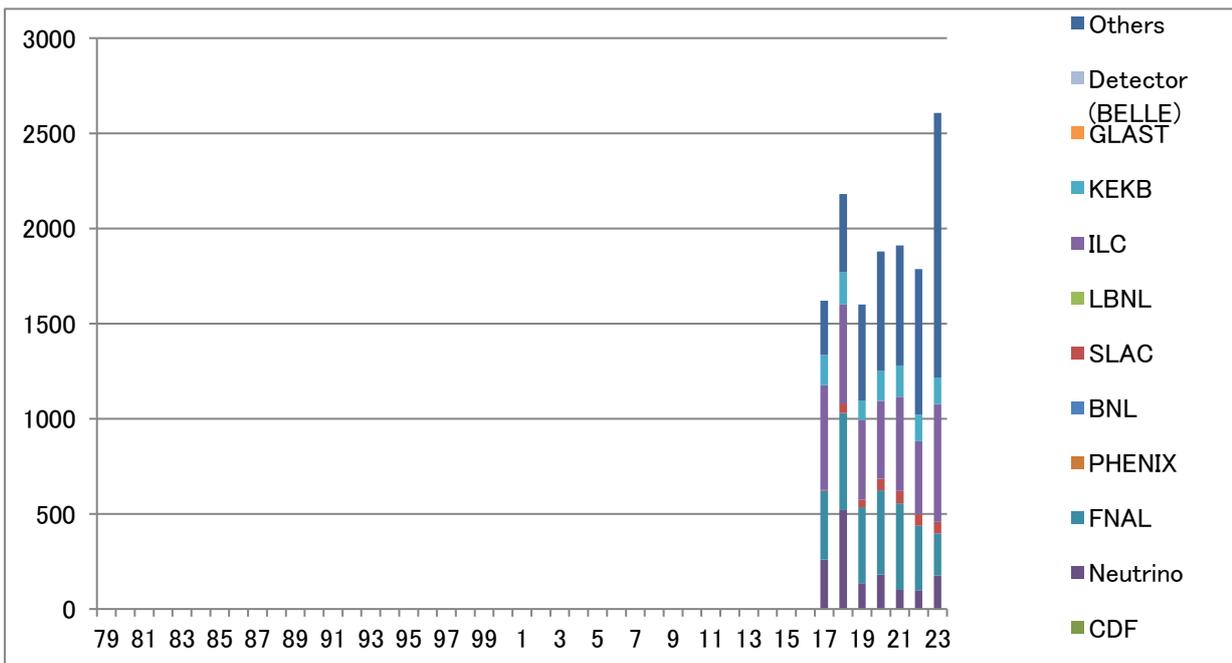
・旅費(百万円)



・物件費・米国執行(百万円)



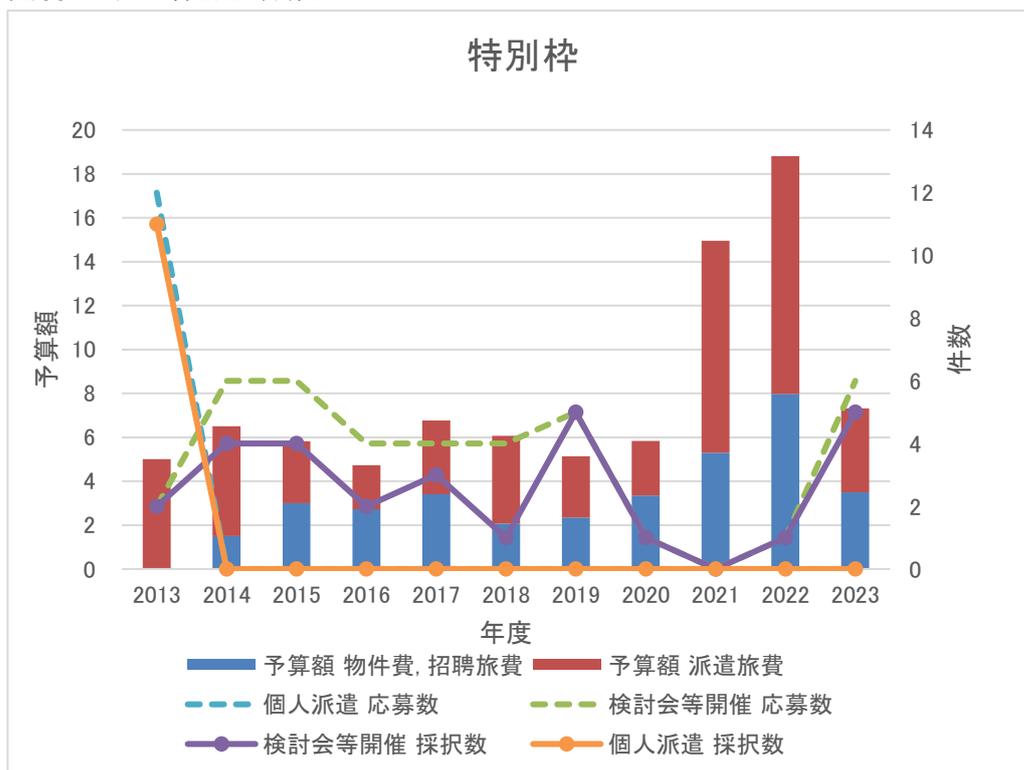
・米国予算(kUSD)



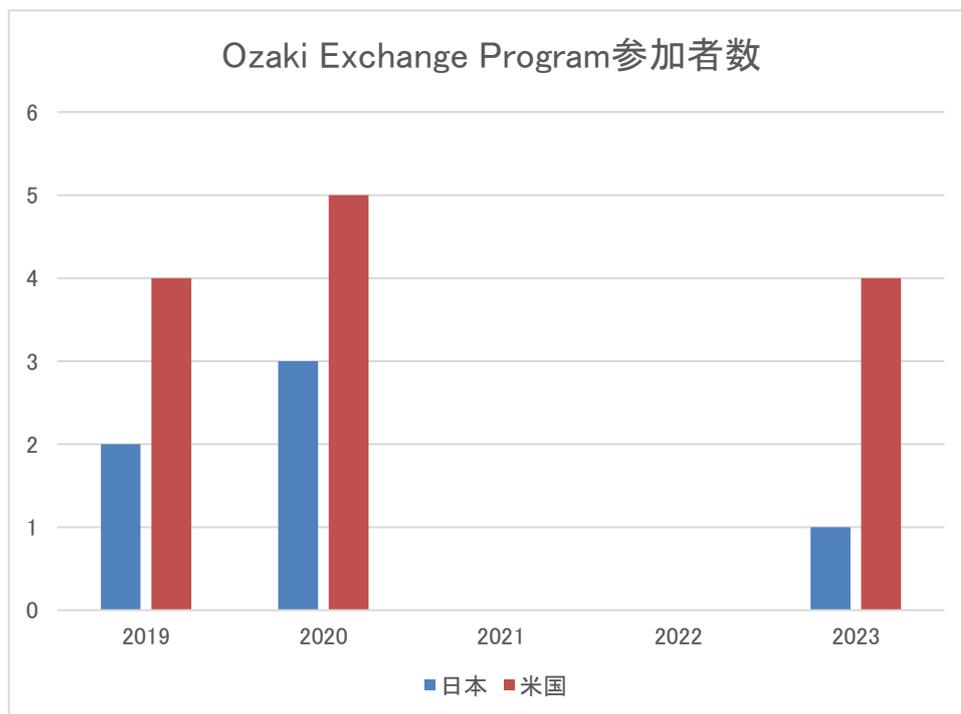
・採択課題件数

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 年度 | 1979 | 1980 | 1981 | 1982 | 1983 | 1984 | 1985 | 1986 | 1987 | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 |
| 課題件数 | 7 | 9 | 13 | 15 | 15 | 16 | 17 | 16 | 18 | 17 | 15 | 15 | 14 | 16 | 16 | 18 | 16 |
| 年度 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 |
| 課題件数 | 15 | 15 | 19 | 17 | 18 | 14 | 14 | 16 | 18 | 15 | 12 | 10 | 14 | 14 | 13 | 13 | 17 |
| 年度 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | | | | | | |
| 課題件数 | 17 | 19 | 20 | 24 | 30 | 28 | 28 | 30 | 31 | 30 | 34 | | | | | | |

資料5. 特別枠採択件数



資料6. Ozaki Exchange Program 参加者数



※ 2020年度の参加者のうち、日本2名、米国1名はコロナの影響により渡航できず辞退

※ 2021年度、2022年度はコロナの影響により募集せず