

日米科学技術協力事業(高エネルギー物理学)

第7次評価委員会

報告書

2019年 2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5年間の活動の概略 .....	5
3. 個別評価 .....	6
A. 実験 .....	6
B. 加速器技術の開発 .....	7
C. 測定器開発 .....	11
D. 素粒子理論・素粒子データグループ .....	23
4. まとめ .....	24
5. 謝辞 .....	25
巻末資料 .....	26

## 総括と提言 Executive Summary and Recommendations

### 総括

- 1) 1979年の事業開始以来、日米事業は40年にわたり継続して実施されてきたが、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) 2013年～2017年の5年間で総計44課題が本事業の支援を得て遂行された。  
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。  
また、高エネルギー関連の実験だけでなく、RHIC実験などの原子核研究者による実験や、GLAST、POLARBEAR IIなどの宇宙関係の観測研究にも支援が及んでいることを評価する。
- 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った。過去の評価委員会でも何度か指摘されてきたことであるが、ようやく双方向の公募が実現できたことは大きな進歩と考える。
- 4) 「ILCコスト削減のための超伝導高周波技術の研究開発」などコミュニティーや機構にとって重要な課題に関しては、公募ではなく機構長判断によるトップダウンで支援を行う仕組みを作ったことは妥当であると判断する。
- 5) 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。実際に共同研究につながった割合が4割程度であり、期待通りに機能しているといえる。
- 6) 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。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、多くの優秀な学生の応募を期待する。

## **提言**

- 1) 近年は日米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。
- 2) 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。今後の日米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。また、近年大型研究プロジェクトに関連した研究課題が顕著であるが、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。
- 3) 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。
- 4) 「特別枠」として、新たに共同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。実際に共同研究につながった割合が4割程度あり、期待通りに機能していることから、継続が望まれる。
- 5) 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。
- 6) 日米事業での成果を広く周知するための広報活動に、日米双方がもう少し積極的になるべきである。

## 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研究計画委員会規程」に基づき設置された「第7次評価委員会(以下「委員会」)」が、2013年度から2017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、2018年10月から4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、40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、2019年で40周年を迎えた。40年と言えば産声をあげた赤ん坊が「不惑」の年齢、即ち成熟した一人前の大人になる年である。40年間を、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期に分けることが出来る； 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～)。

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、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開始された。日米事業もようやく成熟期を迎えたように感じる。

## 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。

その後、「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が、同協定の「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」という条項により、それまでと同様に事業が継続されてきた。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月に文科省と米国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Project Arrangement (PA) 事業取極が締結された。

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、国内公募をおこなう。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研究計画委員会」(以下「研究計画委員会」、巻末資料5「日米科学技術協力事業高エネルギー物理研究計画委員会名簿」参照)、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(2017年予算としては

1,830,000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、2017年度には「ILCコスト削減のための超伝導高周波技術の研究開発」などコミュニティーや機構にとって非常に重要となる課題に関して、公募ではなく機構長判断によるトップダウンで支援が決定された。

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、本評価委員会で行われているように5年毎にその期間内に実施されたすべての研究課題に対して、成果報告書、ヒアリングなどにより評価を行い、その結果を報告している。

### 2-3. この5年間の活動の概略

本委員会が評価対象とする2013～2017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35回日米合同委員会 2013年4月11～12日 @SLAC

IAの下で日米の高エネルギー分野の協力に関する取極を作成するためのワーキンググループが設置された。

・第36回日米合同委員会 2014年4月24～25日 @一橋会館

萌芽的な研究への支援の重要性が認識された。

・第37回日米合同委員会 2015年4月16～17日 @PNNL

特別枠による旅費の支援の継続が合意された。

・第38回日米合同委員会 2016年4月4～5日 @KEK

マッチングファンドによる日米共同公募を行うための規則作りが検討された。

・第39回日米合同委員会 2017年4月19～20日 @BNL

日米合同審査パネルに関するガイドラインが合意された。

日米事業の新たな取り組みとして以下の取極が締結された。

- ・2013年4月 文科省－DOE間で日米科学技術協定下の実施取極  
Implementing Arrangement (IA)締結
- ・2015年10月 KEK－DOE間でIA下のProject Arrangement (PA)事業取極締結

日米事業の共同公募が実施された。

- ・2016年11月 日米共同公募開始

2013年～2017年の5年間における研究課題として、総計44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 4件(RHIC 3件、GLAST 1件)、B.加速器技術関係 12件(ILC 4件、SuperKEKB 3件等)、C.測定器開発関係 25件(ニュートリノ7件、Belle II 4件、ILC 3件、ミューオン 3件等)、D.素粒子理論・素粒子データグループ関係 3件 となっている。

特徴として、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。

また高エネルギー関連の実験だけでなく、RHIC実験などの原子核研究者による実験や、GLAST、POLARBEAR IIなどの宇宙関係の観測研究にも支援が及んでいることが評価される。

### 3. 個別評価

#### A. 実験

##### A1 RHICにおける高エネルギー重イオン衝突実験(RHIC/PHENIX)

##### A2 相対論的重イオン加速器を用いたクォーク・グルーオン・プラズマとQCD相図の研究

(責任者:江角 晋一)

QGP生成を観測するという目覚ましい業績を得ており、大成功だったと言える。今後は粘性等、QGP物性の基礎物理量を決める段階に来ている。反面、少数系散乱の高多重度事象でQGPと類似した現象が見つかる、解釈が定説となっていない観測量も存在するなど、今後の



研究に課せられた課題も多い。本研究は DOE-HEP ではなく NP の研究課題ではあるが、この時点での打ち切りを決めたのは、成果の刈り取りという意味では不十分だったのではないかと思える。次期計画の sPHENIX を日米枠としてサポートしないという決断は議論を尽くしたものの、米国で進める実験が減少している中、判断が問われる。

### **A3 RHIC における超前方粒子生成精密測定;RHIC forward 実験 (RHICf)**

(責任者: 塚 隆志)

宇宙線シャワーでのハドロン生成データ取得という目標で LHC にて始めた実験である。同様の目的で、衝突エネルギーの低い実験を RHIC で行った。RHIC は偏極陽子が加速できるため、スピン軸周りの非対称粒子生成のデータも得ている。嘗てないデータの取得がなされ、今後中央検出器との相関を取るなど、データ解析が進むことが期待される。

### **A4 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**

(責任者: 深沢 泰司)

1997 年の日本グループ(釜江・大杉)の GLAST project への参加を受けて、1998 年より本事業での支援が継続されている。高エネルギー実験研究者がシリコン半導体検出器の技術を持って宇宙分野に進出したものであるが、日米の研究者がそれぞれの専門性を活かした共同研究を遂行しており、2008 年のフェルミ衛星打ち上げ以降継続して GeV $\gamma$ 線の観測を広範囲かつ高い角度分解能で行っている。これまでに多くの $\gamma$ 線天体の発見、特に $\gamma$ 線パルサーの発見やダークマターの探索、銀河中心からの超過 $\gamma$ 線の観測などで数多くの成果を挙げている。最近の LIGO による重力波観測や IceCube による高エネルギーニュートリノの観測に伴い、フェルミ衛星の広視野を活かした同時観測の計画など特徴を活かした研究が企画されている。今期(2013~2017 年)においても 109 本の論文を発表するなど活発な研究が展開されており、今後も多くの成果が期待される。

## **B. 加速器技術の開発**

### **B1 リニアコライダーを含む先端加速器技術開発研究**

**B2 リニアコライダー加速器の技術開発研究** (責任者: 早野 仁司)

リニアコライダーを実現するための重要な加速器技術の開発を目指して 2008 年から実施してきている課題であり、主要なテーマが L バンド超伝導空洞の開発である。米国 JLAB、SLAC、

FNAL、Cornel. U.との協力のもと空洞の試作、4 本同時に溶接する技術開発、8 空洞をクライオモジュールに組み込んだ STF 試験などを実施してきた。加速電界として、2016 年に 30.5MV/m を実現した。同時にローレベル RF のデジタルフィードバック制御、フィールドエミッション試験、Nb 面への Sn 薄膜をコーティングした超伝導技術、Cu 基板への Nb コーティング技術、超伝導空洞内の表面処理技術、実ビームの位置やビームサイズ制御、極細ビームサイズ 41nm の実現など多岐にわたる基礎技術開発が行われており、重要な成果を上げてきたと評価できる。超伝導空洞の性能向上とコスト削減に関しては、並行して実施されている「ILC コスト削減のための超伝導高周波技術の研究開発」課題との整合性に留意して、効率的に研究開発を進めることが必要である。

### **B3 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)

SuperKEKB を念頭に次世代高ルミノシティコライダーの技術開発を実施しているが、衝突点位置、軌道フィードバック機器の開発、低結合インピーダンスコリメーターの開発、X 線を用いた個別バンチサイズ測定システムの開発、LABM(Large Angle Beamstrahlung Monitor)の開発、バンチ内振動抑制フィードバックシステムの技術開発、電子雲不安定を抑制する手法の確立、ビームビーム相互作用に関する数値シミュレーション、超伝導最終収束磁石の製作、磁場測定、振動測定など多岐にわたるものとなっている。衝突点でのビーム位置を最適に保持するためのディザリング技術も有効である。これら幅広い技術開発を実施するうえで KEK だけでは人的資源が不足しているが、日米協力事業を活かし SLAC、BNL、FNAL、ANL、LBNL、Cornell U.、Hawaii U.、Wayne St. U.、JLAB、Cal. Polytech. などの米国研究者と連携協力することによって多くの研究者の参加が得られ、また、若手の育成も進んでおり、非常に有用な成果も出つつある。豊富な経験を有する米国研究者の知見は貴重であり、今後も日米協力を活かしていくことが重要である。

### **B4 将来加速器に向けた高電界加速技術の開発**

(責任者:肥後 壽泰／阿部 哲郎)

常伝導加速空洞において加速電界 100MV/m を超える性能を目指し、X バンド(11.424GHz)の加速空洞の開発、および放電の発生機構の解明を行っている。シングルセルおよびマルチセル空洞の試作と試験を交互に繰り返すことで、性能向上を図っている。米国 SLAC と協力し、米国では化学研磨、種々の高パワーテストを行い、KEK では部品の組み立て、長期間の高電

界試験を実施した。放電発生率では、表面磁場や材料の固さなどが影響を与えることが明らかとなってきた。基礎的で、かつ重要な加速器技術の研究開発である。学生や若手の育成が課題である。

#### **B5 SuperKEKB・ナノビーム衝突点用超伝導コイルの建設及び振動測定装置の開発**

#### **B6 素粒子加速器と検出器用電磁石 3次元磁場測定システム**

(責任者: 大内 徳人)

SuperKEKB のビーム衝突点用超伝導電磁石で必要となる補正磁石の開発及び建設、Single Stretched Wire(SSW)磁場測定システムとビーム最終収束用超伝導 4 極電磁石の磁場振動測定装置の開発を、米国 FNAL、BNL と協力して実施した。超伝導補正磁石では、BNL が開発した Direct Winding Method を用いて約 0.35mm の超伝導線をコイルボビンとなるヘリウム容器内筒表面に直接接着することで、厚さ 1mm 以下の非常に限られた空間に必要な超伝導補正磁石を組み込むことができた。2012 年 6 月から製作を開始し、2015 年 3 月に磁石が納入され、2017 年 2 月に 2 台のクライオスタットに組み込みが完了し、現在はビーム運転に使用されている。SSW システムは、FNAL が開発したシステムをベースに SuperKEKB ビーム衝突点用に改善、製作したものであり、両機関の研究者が協力して磁場測定を行った。磁場振動測定装置は、ILC 用に BNL で開発されたものを、KEKB 用にプロトタイプを製作したものであり、BNL 研究者と協力して磁場測定を行い、その結果をもとにさらに改善中である。本事業によって、効果的に必要な技術開発研究が進められており、有効に成果を上げていると評価できる。

#### **B7 超伝導イオンリニアック用超伝導ソレノイド電磁石及びその関連技術の開発**

(責任者: 赤井 和憲)

MSU(ミシガン州立大学)の FRIB(Facility for Rare Isotope Beams)を念頭に置いた超伝導ソレノイド電磁石システムの開発を 2014-2016 に実施した。高性能、高信頼性、コスト効果的な製造が可能な収束/位置調整用超伝導ソレノイド電磁石パッケージの開発、及び、ソレノイド電磁石からの強い磁場が近接する超伝導加速空洞への影響を抑えるための磁気遮蔽の開発を目的としている。KEK にて 25cm 長の設計、プロトタイプの製作・試験を経てソレノイド電磁石パッケージを米国/MSU に技術移転し、そこで FRIB 用の 50cm 長の 8T ソレノイド電磁石パッケージを 4 台製作し、クライオモジュールに組み込んで性能試験を実施した。コスト効果に関しても、FRIB 受注者による製造において実証されている。磁気遮蔽に関しては、コスト削減のた

めにミューメタルを使うことにし、そのクライオ温度での透磁率の測定、FRIB クライオモジュールでの局所磁気遮蔽の設計、及び磁気遮蔽効果の評価を実施した。磁気遮蔽の効果も、FRIB クライオモジュールの中で 8T ソレノイド電磁石パッケージに対して有効性が実証されている。本課題は、加速器技術開発力の高い KEK と、ユーザ加速器を建設中の MSU が相互の持ち味を生かしながら協力することによって、迅速、かつ適時に技術開発に成功したものであり、日米科学技術協力事業の成功事例として評価できる。

#### **B9 高輝度超伝導 RF 電子銃の開発**（責任者:許斐 太郎）

将来加速器の利用を想定して超伝導高周波 (SRF) 電子銃の開発を SLAC と協力して実施するものであり、2017 年から本課題を開始した。SLAC タイプと KEK タイプの SRF 電子銃の特徴を比較することで新たな技術の開発に繋げ、次世代の加速器で活用できる高輝度な電子銃を開発するものである。現存の種々の SRF 電子銃のシミュレーション、新たな SLAC タイプや KEK タイプの SRF 電子銃のシミュレーションを実施した。カソード特性の評価、カソード設計や粒子フリー運転のための洗浄などを検討した。ビーム試験のための電子銃空洞、カソードロッド、カソードホルダー、ホットカソード取り付けチェンバーなどの構成機器の製作を進めた。SLAC-SRF 電子銃のビーム試験を成功裏に実施し、SLAC 電子銃システムの健全性を確認した。SLAC タイプは 199.6MHz、KEK タイプは 1.3GHz を採用している。バンチごとの電荷量が中庸で、高繰り返し運転が可能なものとして、SRF 電子銃はカソード面での電界を高めていくのに最適な手法であると言える。電子源の性能として新領域の開拓を目指しており、着実に成果が得られていくことを期待する。参加研究者の拡大、若手研究者の参加、育成が課題である。

#### **B10 国際リニアコライダーのための、ダンピングリング不要の電子入射器の開発**

（責任者:栗木 雅夫）

将来のリニアコライダーでの活用を目指してダンピングリングが不要となるような低エミッタンス、スピン偏極した電子入射器の開発に関する ANL との協力事業を、2017 年から開始した。狙いは、エミッタンス交換技術 (Round to Flat Beam Transformation (RFBT)、Transverse to Longitudinal Emittance eXchange (TLEX)、および強健なスピン偏極カソード) の開発であり、その技術実証のための POP 実験、リニアコライダー用入射器の設計開発である。シミュレーションによってソレノイド磁場やビームサイズがエミッタンス交換へもたらす効果を確認している。KEK-STF を利用して RFBT ビーム試験を、ANL-AWA を利用して TLEX 試験を実施する準備

をしている。GaAs 基板に  $\text{Cs}_2\text{Te}$  や  $\text{CsKTe}$  薄膜を利用することで、安定な NEA(Negative Electron Affinity)が形成されることを観測した。これらの研究開発が進むことによって、リニアコライダーへの貢献が期待される。米国 ANL からの参加者が 2 名のみであること、若手研究者の育成などが課題である。

#### **B11 高耐放射線性遅い取り出し装置の開発** (責任者: 富澤 正人)

J-PARC と FNAL 加速器において、高強度の遅い取り出しでの共通する問題点を日米合同で解決するプログラムである。FNAL での  $\text{Mu}2e$  実験用の高耐圧フィードスルーの絶縁液体の循環を向上させる開発が行われた。J-PARC の今後の大強度化に向けた重要な知見となる。日本側は旅費のみ、米側は物件費も出ているので、米側の進捗に従ってプロジェクトの成否を判定すべきである。大強度ビーム取り出しに向けたコラボレーションとしては意味があると思われるので、今後の展開は米側での判定に従えばよい。

#### **B12 ILC コスト削減のための超伝導高周波技術の研究開発**

(責任者: 道園 真一郎)

リニアコライダーでは建設コストに占める加速空洞の製作コストの比率が高いことから、超伝導高周波技術のコスト削減に向けた技術開発を、米国 FNAL、JLAB、Cornel.U.と協力して推進している。2013 年の TDR に対してエネルギーを半分の  $250\text{GeV}$  に下げること、リニアックの製作コストを半減した。さらに、Nb 材料生産において調達コストを下げることを考えている。Nb インゴットを直接ワイヤでカットすることで、空洞材料の生産工程を合理化し、コストの削減を図る。空洞の表面処理を工夫することで、加速電界を高く維持したうえで、Q 値も高くする技術開発を実施している。窒素ドープ、窒素インフュージョンと呼ばれる手法の試験を実施しており、加速電界の向上や、Q 値の向上を確認している。これらの製造技術の実用化、量産化が実現できた暁にはリニアコライダーの製作コストの低減がもたらされることから、今後の技術開発の効率的な実施と、迅速な目標性能の達成を期待している。

### **C. 測定器開発**

#### **C1 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)

本課題は、J-PARC のハドロン実験施設を用いて日米の K 中間子研究者が世界最高感度で  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  事象の探索を行うものである。本崩壊は CP 非保存過程であり、素粒子標準モデ

ルによる理論予想の精度も高いことから、標準モデルを超える物理への感度も高いと考えられている。実験の要である CsI カロリメータが米国から提供されているなど、過去の本事業による支援研究を基礎にした日米協力が対等な立場で遂行されている好例と言える。2006 年からの準備期間を経て2013 年からデータ収集を開始した。そこで得られた知見をもとに新しく円筒形の Veto 検出器を導入し、 $K_L^0 \rightarrow 2\pi^0$  バックグラウンドの低減に成功した。

2015 年取得のデータを用いた解析により分岐比の上限値として  $3 \times 10^{-9}$  が得られたが、これはこれまでの上限値を 10 倍改善するもので、高く評価できる。現在は標準モデルが予想する  $10^{-11}$  の感度を目指して、ビーム強度の増強に対応すべく中性子と光子を区別するためにカロリメータの改良を行うなど着実な努力が展開されている。

FNAL 研究所の KTeV 時代からの日米双方の資産が引き継がれており、日米協力の思想に良く合致している。今後は、本課題に参加する米国側の研究者の拡大に向け、何らかの対応が期待される。

## **C2 SOI 技術を用いた先進的ピクセル検出器の開発**（責任者：新井 康夫）

本事業は SOI (Silicon-On-Insulator) 技術を基礎とするピクセル型の放射線検出器を開発し、次世代レプトン・コライダーにおける崩壊点検出に用いるとともに、X 線や電子線を用いたイメージングへの応用を目指すもので、2012 年から 2014 年にかけて実施された。日本側は SOI 技術、特に 2 重シリコン層を用いる技術を確立し、放射線耐性の向上やセンサーと電子回路の間の干渉低減に成功した。また一枚のウェハを切り分けて多数のチップを作成する Multi Project Wafer Run を計画・実行した。アメリカ側では、LBNL が X 線や低エネルギー電子線を用いたテスト施設や半導体プロセス装置の一部を提供し、FNAL はチップ設計に関する専門知識、およびテスト用の高エネルギーハドロンビームを提供した。その結果、高エネルギー荷電粒子の飛跡検出に関しては、世界最高の位置分解能である  $0.65\mu\text{m}$  を達成した。更に、X 線イメージングへの応用も可能とし、既に X 線自由電子レーザー施設 (SACLA) の実験で使われている。本事業の成果が、科研費新学術領域研究「3 次元半導体検出器で切り拓く新たな量子イメージングの展開」(2013-2017 年)に引き継がれ、SOI 技術が多くの関連分野に波及したことは特筆に値する。

## **C3 POLARBEAR-II による宇宙マイクロ波背景放射偏光観測**

(責任者：羽澄 昌史)

2012 年度に採択され、2016 年度まで継続して遂行された研究である。ビッグバン宇宙論を

支持する宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の存在は有名であるが、ビッグバン以前に宇宙は指数関数的膨張を経験したというインフレーション宇宙論を検証する重要な手段が、理論の予言する原始重力波の存在を示す事である。本研究課題は、これを原始重力波により刻印されたCMBにおける大きな渦模様のBモード偏極を高精度で観測する事で実現しようとする意欲的なものであり、7588個のTESアレイからなるPOLARBEAR-II検出器システムをチリ・アタカマ高地に配置しての観測実験である。現在Bモードの観測は原始重力波観測のほぼ唯一の手段と考えられており、その成果が注目される重要な実験である。また、本事業が宇宙論分野にも踏み込んだものとしても特徴のある課題である。研究のハイライトの一つとして、POLARBEAR-Iのデータを用いてCMBにおけるBモード偏極(小さな渦模様)の情報だけを用いた世界初の重力レンズ効果の観測を達成した事が挙げられる。これはニュートリノ質量の総和への制限を課す事が出来るという意味でも重要であり、成果をまとめた2014年発表の論文はすでに計300件を超える高い引用を得ている。本研究による学位取得の件数も多く、若手育成の意味でも貢献しており、また多くの国際会議等での講演もある。本事業によるKEKとUC Berkeley, UC San Diego等との日米協力が効果的に機能したものと判断される。

#### **C4 高輝度電子・陽電子衝突型加速器で使用するPID検出器の開発**

#### **C5 Belle II 検出器の性能向上による新物理探索 (責任者:飯嶋 徹)**

TOPカウンターなどの測定器開発を日米事業を契機にDOEからの資金を得て共同で進めるプログラムである。嘗て米側の加速器のみで行われていた日米協業を日本側の加速器で行えるようになったと考えるべきである。Bファクトリー研究における日本の成功がもたらした状況として、高く評価できる。日米共同事業としても、米側の参加を促進するための良い枠組み設定になっていると考える。Belle IIはまだまだ稼働したばかりで成果はこれからであるが、すでに必要な検出器が期待通りに稼働していることを示すデータが得られており、今後期待できる。建設が済んだので、予算レベルは見直すことに成るのであろう。

#### **C6 先端高強度ミューオン源とミューオン素粒子物理学の展開**

(責任者:久野 良孝)

大阪大学、KEK、FNALが中心の日米協力である。

荷電レプトンのフレーバー保存の破れの新しい探索実験に関しては、 $\mu \rightarrow e\gamma$  (MEG-II)、 $\tau \rightarrow \mu\gamma$  (Belle II)などが行われようとしているが、 $\mu e$  転換探索実験は上記の2過程では不可能な光子を媒介しない過程を含むので、その意味で相補的な学術的意義のある実験である。米

国 FNAL 研究所でも COMET 実験と同等の感度を持つ Mu2e 実験が 2020 年に commissioning が始まると期待されるので国際競争は厳しい。国際協力としては日米ともに超伝導磁石、とくに高強度のミュオン源のための放射線耐性が優れたアルミニウム安定化超電導線 (aluminum-stabilized superconductor = AL-SC) の開発と関連した試験が行われた。中性子の照射試験も KURRI で 2011 年から 2012 年にかけて行われた。

この日米協力事業は 2014 年で終了し、現時点では再開する計画はない。COMET 実験は J-PARC で、Mu2e 実験は FNAL 研究所でそれぞれの準備が進んでいる。従って、日米は競争状態であり、今後の発展として、どのような協力を行うのかは今のところ検討中である。

### **C7 次世代実験のための新 GEANT4 カーネルの開発 (責任者:佐々木 節)**

Geant4 は放射線粒子と物質の相互作用を計算機シミュレーションにおいて忠実に再現することを目指したソフトウェアツールキットである。1994 年に CERN と KEK の協力により開発が開始されたが、20 年にわたる歴史の中で扱えるプロセスの拡張や精度の向上を経て、今や Geant4 なくして高エネルギー実験の遂行はあり得ないという状況にある。特に LHC や Belle II 実験など新しい物理現象の探索は実験データと Geant4 によるシミュレーションデータとの比較により行われるために、大量のシミュレーションデータが必要とされる。そのために計算速度の高速化と共に必要とされる計算資源は益々膨大化している。

本課題は上述した状況に対応すべく、SLAC と KEK の研究者が協力して Geant4 の並列化を目指す取り組みである。KEK では MPI(Message Passing Interface)を用いた並列化、そして SLAC ではマルチスレッド化による使用メモリーの削減に取り組んでおり、既に ATLAS 実験ではそれらの導入が試みられるなど着実に成果を挙げている。2020 年には version 11 として本課題の成果を取り入れたものをリリースするとのことで、予定通りの実施を期待したい。今後はゲーム機などに使用されている GPU を大量に用いた超並列計算への挑戦も視野に入れているが、GPU はビッグデータの処理などにもすでに利用されていることなどから自然な流れと考えられ、今後それらの研究者との共同研究も期待される。

本課題への参加者数が減少気味であるのが懸念されるが、非常に重要な課題であるので周りのサポートと共に参加者の努力を期待したい。

### **C8 J-PARC MLF 大立体角パルスミュオンビームラインを用いたミュオン基礎物理の発展 (責任者:三部 勉)**

J-PARC MLF に新しく H ラインを建設し、ミュオン g-2 実験、EDM 探索実験等を遂行する



為にBNLからの技術供与を受け日米共同開発を発展させることを目的としたプログラムであった。米側の貢献でキッカー電磁石の概念設計、ミューオンビームの軌道解析などが行われたほか、ビームモニターや高精度磁場測定などにも協力を得られ、Hラインの建設を進めることができた。ミューオンg-2/EDM実験はJ-PARCのプログラムアドバイザー委員会にてStage-2採択を得たとあるので、本プログラムの意義はあったと思われる。今後ミューオンg-2実験はFNALとJ-PARCで進むことになるが、目標とする測定量は同じでも測定原理は全く異なっている。有限値が得られたときのインパクトの大きさからみて両者の実験は相補的である。技術開発にとどまらない共同研究のあり方を模索すべきであろう。

### C9 ニュートリノ崩壊探索実験（責任者：金 信弘）

素粒子の質量の階層的構造の起源は未だに解明されていない。ニュートリノに関しては、ニュートリノ振動に関するデータから質量(2乗)差は知られているが、その絶対値は分かっていない。本研究は、ニュートリノ質量を、その崩壊現象の観測に依り求めようとするものである。しかし崩壊寿命は非常に長い事が予想されるので(標準模型にニュートリノ質量を取り込んでも、その寿命は現実的には観測不能な程に長い)、加速器で生成されたものでなく宇宙誕生直後に生成されたニュートリノの崩壊を検証しようというアイデアである。Left-Right Symmetric Model、MSSMといった標準模型を超える理論では、一般に標準模型の予言よりはずっと短い崩壊寿命が予言され、一方で、この計画ではCOBE等から得られている寿命の下限を大きく更新する事が期待されている。更に、こうした宇宙背景ニュートリノの観測が実現すれば、宇宙マイクロ波背景放射(CMB)では宇宙誕生から30万年後までしかさかのぼれない宇宙の歴史を、誕生直後にまでさかのぼる事が可能であり、その意味でも非常に重要な成果になると期待される。観測するモードはニュートリノの輻射崩壊である。これにより宇宙に遠赤外領域の背景放射が生じるため、これに十分な感度を持つ超伝導トンネルジャンクション(STJ)を用いた検出器を開発し、2020-2021年頃にロケット実験を行う予定である。FNALの研究者との日米協力を依るものである。遠赤外の高性能検出器の開発それ自体も意義深いものであると思われる。また、この課題による修士号の取得は8件である。この事業のサポートにより院生やポストドクが十分な期間アメリカの研究所に滞在可能となり、若手教育の意味でも有効であったとの事。

## **C10 Belle II データ再プロセス高度化のためのリモートデータセンターの設立**

## **C11 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**

(責任者:原 隆宣)

2018 年度より本格的なデータ収集が開始される Belle II 実験では総計~200PB の膨大なデータが保存・処理されることになっている。通常は RAW データの取り扱いは実験の実施場所である KEK のみで行われるが、自然災害・事故等による万一のデータ損失の可能性を除去するために KEK 以外の場所での RAW データセンターの設置が望まれていた。それを実現するために本事業の支援を得て米国の PNNL に KEK と同じ RAW データを保存するデータセンターが設置されることになった。このことにより、KEK の計算資源が RAW データを一早く処理して物理解析に使用される miniDST 等の作成に集中できるというメリットが生まれた。一方、Belle II 実験では RAW データの処理以外に、Geant4 を用いたシミュレーションデータの作成、研究者によるデータ解析など大量の job が取り扱われることになっているが、それらを行うための分散計算機システムが構築されている。そのシステムを最大限に有効利用するために、自動的に job を振り分け、作成された重要なデータのコピーを作成し、モニタを司る“プロダクション・システム”が本事業の支援の下に開発された。

米国側の都合により、2017 年に PNNL に設置されたデータセンターが BNL に移行することになったが、既に成功裏に移行されている。これまでの成果として日米間の RAW データの転送に必要な 100Gbps は 2016 年に確立されており、2018 年には同等の性能を持った別のネットワークも設立される。“プロダクション・システム”も 2018 年 9 月にそれまで稼働していた暫定版からフルスペック版に移行するなど、Belle II 実験の本格稼働を前にして日米の研究者が意思統一のもと計画通りのデータハンドリングシステムを準備したことは高く評価したい。

## **C12 先端シリコン技術による ILC 測定器の研究開発** (責任者:相原 博昭)

ILC へ向けたシリコン検出器開発である。特に、アルゴンヌとの協力で 3 次元シリコン測定器が、SLAC との協力で電磁カロリメーター用のシリコン読み出しが開発された。ここで試作された 3 次元シリコン測定器とはセンサー層、アナログ回路層、デジタル回路層を別々のウエハーに製作し、それらを直接(バンプボンディングではなく)貼り合わせるものである。実機は FNAL で製作された。36,864 あるピクセルはすべて読み出されたが、一部コンタクトが十分でない場所もあった。ILC に向けた基礎技術としては有望であり、今後実験条件に合わせた設計を進めることを提言している。ILC での電磁カロリメーターについては電磁シャワーを微細シリコンパッ

ドで読み出す方法が検討されている。本プロジェクトでは、まずセンサーに読み出し回路をバンプボンディングしたものを開発したが、コスト的にも性能的にも十分な結果が得られなかった。次の R&D としてモノリシック(センサーと回路を一体で積層する方式)センサー読み出しを提案している。

総額 3 千万以上を使い、様々な知見は得られたようであるが、最終目標に向けた達成度があまり明らかでない。本プロジェクトは ILC に向けた開発として C24 に引き継がれたと思われるが両者の継続性が不明である。単発ではなく、長期に構えて行うべきであろう。

### **C13 コライダー実験将来計画へ向けたシリコン検出器開発** (責任者:花垣 和則)

本事業は、HL-LHC, ILC, FCC などの将来の衝突型加速器のためのシリコン検出器(SOI 技術に基づくピクセルセンサー、改良 ATLAS ピクセル、LGAD)の開発を目的とするもので、2016 年にスタートした。個々の検出器の R&D は別途獲得する研究資金によって進め、本事業では FNAL・テストビーム施設(FTBF)を用いて、これらのプロトタイプテストを一括して行う。日本側では、ビームテストのためのデータ取得システムの準備とビームテストの遂行、および SOI ピクセル、ATLAS ピクセル、LGAD の開発を担当する。アメリカ側では、ビームテストのためのインフラの準備、LGAD の開発を担当する。これまで、それぞれの検出器の時間・空間分解能の評価などが行われた。これまでの成果としては、SOI をベースとする検出器においてサブミクロン、あるいはミクロンオーダーの空間分解能を実現したこと、ATLAS ピクセルサイズの小型化によって分解能を改善したこと、LGAD において 30 ピコ秒の時間分解能を達成したこと、などがあげられる。今後の課題としては、更に小型の SOI ピクセルの 3 次元イメージングへの応用、LGAD の放射線耐性の改善、などである。このプロジェクトを含め、幾つかの類似した将来に向けた測定器開発が進んでいる。技術的共通点も多いと思われるので、統合し、近々の開発を行いながら ILC に繋げていくような展開を求めたい。

#### **C14 大強度ビームを使ったニュートリノ実験のための先端技術研究**

#### **C15 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**

(責任者:横山 将志)

#### **B8 J-PARC キッカーシステム増強における工学的研究 (責任者:石井 恒次)**

#### **C16 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)

#### **C24 光電子増倍管群デジタル変換・読み出し用電子回路の開発**

(責任者:早戸 良成)

現在、日本においては T2K 実験、米国においては NOvA 実験というように双方において大強度ビームを用いた長基線ニュートリノ振動実験が同時進行で遂行されている。両グループはある意味で競合関係にあるが、基線長の違いから相補的な実験であるとも考えられる。2014 年から開始された本事業の課題では、両グループに共通な大強度加速器、ニュートリノビームライン、検出器、物理解析などを含む包括的な協力関係の構築を目指して、双方から約 50 名ずつの研究者が参加して開始された。共同研究が進展する中でより深い検討が必要な項目が独立した課題として本事業に提案されることになった。2015 年には電磁ホーンに関する課題(代表:多田将)、2016 年には放射線損傷に関する課題(代表:石田卓)、そして 2017 年には検出器と物理に関する課題(代表:横山将志)、大強度加速器とニュートリノビームラインの課題(代表:中平武)、PMT 読み出し電子回路の課題(代表:早戸良成)が独立した課題として提案されスタートした。

初期の共同研究の成果としては、2015 年に Compensation Kicker Magnet が J-PARC に設置されたこと、FNAL に疲労試験専用マシンが開発され、PNNL において J-PARC ニュートリノビームラインで使用された OTR 薄膜の放射線損傷の程度が調査されたこと、また、FNAL で開発されたビームロスがこれまでの 1/10 となるビーム形状モニター (WSEM) が J-PARC のニュートリノビームラインに設置されるなど実質的な成果が挙げられた。

2017 年から開始された検出器と物理に関する課題では、T2K と NOvA の両グループが共同してニュートリノ振動の  $\delta_{CP}$  と質量階層性の問題に取り組み 2021 年に結果を得るべく合同解析を開始した。過去の Belle と Babar 同様、成熟した競合関係にある大グループが共同して物理課題に挑戦する真摯な姿勢を高く評価する。一方、関連した検出器開発として液体アルゴン TPC の開発を日米が協力して進めている。

ニュートリノビームラインの課題では、リング用イオンプロファイルモニターの開発、負イオンビームのレーザーによる荷電変換の開発、ビームロス低減のためのビームダイナミクスの研究、

ロスが少ないビーム取り出しの開発、ターゲット施設の大強度化への研究など、FNAL と J-PARC の大強度ビームの増強で共通となる開発項目が挙げられおり、既に単なる情報交換ではなく共同で試験を実施するなど、密な共同研究が進行している。

PMT 読出し電子回路の課題では、Hyper-Kamiokande で使用する予定の 20 インチ光検出器からの電気信号読出しのために、新たに QTC (電荷-時間変換) 用 ASIC と FPGA を用いた 2 種類の TDC の開発を目的としている。1 年目ではあるが、既に Boston U. で開発された QCT と FPGA 利用 TDC のシステムで 1pC~2000pC の間で 1% の直線性を持ち 100 ピコ秒の時間分解能が達成されるなど、着実に成果が上がっている。

今後もニュートリノ研究は本事業の柱となっていくと考える。

### **C17 日米分散計算処理体制による ILC 測定器の最適化と物理研究の推進**

(責任者: 宮本 彰也)

ILC の測定器最適化のための日米協力である。KEK と PNNL が中心になって、世界的な GRID computing network を基盤技術として Monte Carlo events を生成して、ILC における物理実験の測定器を最適化することを目的とする。具体的にはヨーロッパ・日本が中心となっている ILD と、アメリカが中心となっている SiD という 2 基の測定器の最適化と、将来の物理解析の準備を行う。とりわけ LHC での物理解析の最近の結果を踏まえて、ILC での物理研究を、日米で協力して更に精査して理解をより深める。

GRID 用の disk system は PNNL において新たに購入し、また新たに開発された DD4hep based Geant simulation を用いて ILD と SiD 両機の最適化をすると同時に、理論では 6 次元の有効場理論の新たな ILC に物理にあつた様式を開発する。まずは重心系エネルギー 250 GeV に特化した物理を追求して将来においては ILC のエネルギーアップグレードも視野に入れて研究を行う。ILC に対して日本政府からの EOI があれば、日米の本件以外の ILC 実験に対する予算や人員も増加することが予想される。

### **C18 J-PARC MLF で行うステライルニュートリノ探索のための検出器開発**

(責任者: 丸山 和純)

この実験は日本 (KEK、JAEA、京大、阪大 (RCNP)、東北 (RCNS)) と米国 (Alabama、BNL、Florida、LANL、MIT) の collaboration で行われる。標準的なニュートリノ振動では説明のつかないニュートリノの現象と思われる異常がここ 15 年ほどで幾例か観測されている。これらの真否に判断を下すべく J-PARC MLF の中性子および

ニュートリノ源である水銀標的に 3 GeV 陽子ビームを衝突させてミューオンを生成・静止・崩壊させての 24m 離れた場所に設置された検出器で反 $\nu_{\mu}$ から反 $\nu_e$ の遷移を探索する。測定器は 50t の Gd を混入させた液体シンチレータを、192 本の PMT で覗くものであり、従来の delayed coincidence 法を用いる。既存建屋内の空きスペースを用いるので、早期に実験が始められる。バックグラウンドは宇宙線からの fast neutron と accidental background であるが 5 年の測定期間で約 100 事象であり、 $\Delta m^2 = 1.2 \sim 2.5 \text{ MeV}^2$  かつ  $\sin^2 2\theta = 0.003$  ではシグナルは 300-500 程度で十分に勝算がある。

2013 年から準備を始めて、2016 年には測定器開発の科研費を獲得し、2017 年 5 月には J-PARC PAC に提案書を提出、2018 年には stage-2 approval を得た。現在測定器を建設中であり JFY2018 中に実験を開始する予定である。実際の実験が始まれば超えなければならない問題があるので普通であり、それを乗り越えて進めていただきたい。

#### **C19 メガワット級大強度ビームのための電磁ホーン開発**（責任者：多田 将）

ニュートリノ T2K 実験のビームパワー増強に向けて、電磁ホーンの開発を行うものである。KEK では、ビームパワー 500kW において電磁ホーンを使用してきた実績を持っているが、将来の 1.3MW 運転に向けて更なる技術開発が必要となっている。米国 Colorado U. Boulder の研究者の経験を活かし、また、KEK の経験を踏まえて新たなホーン的设计、製作を進めている。2015 年からホーン No1 の設計を開始し、Colorado U.において 2016 年から製作を進め、2018 年 12 月に完成した。今後それを日本に輸送し、J-PARC において性能を確認することになっている。今後、同様の体制で、ホーン No.2 の製作も予定されている。過酷な条件で使用することから信頼性の高い電磁ホーンが必要であり、計画に沿って速やかに開発が進んでいくことが期待される。

#### **C20 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）

RaDIATE コラボレーションという、高強度加速器での窓材や標的の開発に絞った研究である。既に CERN の照射施設も利用しており、日米に閉じない国際協力になっている。このような耐放射線材料研究はブラックマジック的になりがちであるが、日本側が中心となって、システムチックな計測を粘り強く続けていけるプロジェクト設定になっている事には好感が持てる。日本では QST 六ヶ所で核融合炉向け材料の照射試験への準備が進んでいるわけで、すさまじい照射装置が出来上がる。今後は高強度加速器のための研究に閉じることなく、材料一般の放射性耐性に関わる共通の問題として取り組むべきではないだろうか。日米で継続して支援

することに問題はないが、どこかの時点で JAEA や QST 等とも協力し、より大きな枠組みに移すことにより「材料の放射性耐性・熱ショック耐性」という科学的基盤の構築にも貢献すべきだと感じた。

## **C21 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の磁場校正**

(責任者:佐々木 憲一)

本事業は日米(J-PARC および FNAL)でそれぞれ行われている g-2 実験において、磁場校正の精度を高め信頼性を向上させることを目的とする。そのために、日米双方で磁場校正のための NMR プローブを開発し、さらに両者を同一の実験施設でテストすることにより、系統的な不確定性の低減を図る。本事業は 2017 年にスタートしたばかりである。日本側は連続波 NMR のプローブの作成、材質の磁化率測定、磁場の均一化などを担当し、アメリカ側では磁場の絶対値校正のためのパルス NMR プローブの建設と高度化、異なるプローブを同じ磁場下でクロスチェックするための 3 次元移動ステージの改良などを担当する。2018 年 3 月に米国 ANL で 1.45T の磁場下における日米のそれぞれの NMR プローブの比較実験が行われたが、2つのプローブを移動するためのアルミステージの磁化率のために、移動に伴う磁場の変化が 1ppm に達し、個々のプローブの磁場決定精度(数 ppb)を上回ることが判明したため、現在磁化率の小さな材料でステージを作り直しているところである。g-2 の標準模型予言値からのずれの検証や EDM の検出については、標準模型を超える代表的な BSM 理論が現状の実験精度と同程度の予言をしていることもあり、磁場の均一化や磁場校正にともなう系統的誤差の低減は、実験の成否にとって重要なポイントとなる。本事業でいくつかの課題が明確になっており、今後の進展に期待する。

## **C22 高位置分解能飛跡検出のための陰イオンガス TPC の開発**

(責任者:身内 賢太郎)

日本(神戸大、京大、KEK)、米国(Hawaii、New Mexico、Wellesley College)の共同研究である。

このグループは本来、暗黒物質(WIMP)がどこかで発見されたのちに、その飛来方向を検出することを目的にしてガス増幅をベースにした飛跡検出器の研究開発を進めてきた。本研究での開発実績に関しては、New Mexico 大学が SF<sub>6</sub>に CF<sub>4</sub>を混合した新しいガスを開発し、神戸大でも性能確認した。神戸大は PIN による  $\alpha$  線トリガーを開発して Hawaii 大学に技術供与した。Wellesley College の MPGD に日本の電子回路を装着して  $\alpha$  線トラッキングに成功した。

将来構想としては、様々な読み出しを同時に比較可能なチェンバー(2017年に製作)を神岡に設置して、他のグループの検出器を呼び込み国際拠点を目指す希望である。

何を目的にするかにもよるが、暗黒物質探索に限れば実験に至るまでは遠い道のりであり、今後の発展としては、測定器開発が当該分野とは関係のない他の応用に進む可能性もあると考える。

### **C23 将来の電子陽電子衝突器のためのセンサーの研究開発** (責任者:山本 均)

ILCではILDとSiDの2種類の測定器が提案されているが、電磁カロリメータやハドロンカロリメータの開発において多くの共通した課題が存在し、それらに対して2017年より本事業の支援を得た取り組みが進められている。電磁カロリメータに関しては高い位置分解能を有する新しいシリコン半導体検出器が開発されており、ストリップ形状や信号読み出し方法の最適化、位置歪の修正などに取り組んでおり、プロトタイプによる試験が行われている。最近TOFカウンターによる粒子識別を目指して、Low Gain Avalanche Diode (LGAD)の開発が進められている。増幅率は10~100程度であるが、100ピコ秒以下の高い時間分解能と高いS/Nが特徴である。また逆型LGADは全受光面での増幅率の変動が少ない。すでにLGAD用の読み出し電子回路も開発され、様々な試験が行われている。今後、LGADの応用の拡大が期待される。

ハドロンカロリメータに関してはILD、SiDともにシンチレータの使用を基本としており、性能向上を目指してのシンチレータ材料、SiPM、大量生産方式、積層構造やgranularityの最適化などに関して共同研究を行っている。CERN SPSでのビーム試験に関しては欧州の研究者も含んだCALICEグループとの共同研究が行われている。

### **C25 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** (責任者:田島 治)

宇宙背景放射のB-mode偏極測定に関して、日本(京大、東大、KEK、東北大)、米国(LBNL、SLAC、Stanford、(UCB))の日米協力によって更なる技術開発を行い、また他の用途への応用を検討することを目的とする。

CMB B-modeの測定に関しては、将来これまでより一桁センサー数が多い米国のCMB-S4が席卷するものと思われる。本事業では、センサー数の増加にともなって必要とされる、読み出しの単純化などの開発を行っており、これは宇宙背景放射以外の用途、例えば暗黒物質探索、ニュートリノレス二重ベータ崩壊、トリチウム崩壊の精密測定、などにも魅力的な技術となると考えられる。例えば暗黒物質に対しては質量の低い領域を、低閾値、低エネルギーでの高



精度測定、大きな format-array の多重読み出しの技術による super-sensing が有効である。

日本では MKIDs (microwave kinetic inductance detector) と呼ばれる技術が開発された。これは信号のエネルギーによって Cooper 対が破壊されると超伝導細線の impedance が変化するが、この複数チャンネルに対して capacitance を少しずつ変えることで共振周波数をずらしながら 2 本線のペアからなる導波路に橋渡し上に配置し、共振周波数に相当する sin 波を送り込んで共振させることで複数チャンネルを読み出す技術である。Cooper 対を壊すエネルギーは非常に小さいので閾値は低く低質量の暗黒物質探索などに有望である。欠点は構造が単純なのでパラメータが少なく最適化が難しい場合があることだ。米国では  $\mu$ MUX という高度な読み出し技術が開発された。今後の発展としては、CMB B-mode 観測に加えて、最先端のアンテナや超伝導の回路技術で新しい応用を目指しており、他のグループへの技術供与や共同実験提案をするといった展開が可能であると思われる。

#### **D. 素粒子理論・素粒子データグループ**

##### **D1 素粒子データ情報に関する研究 (責任者: 日笠 健一)**

Particle Data Book として知られている Review of Particle Physics は、理論、実験を問わず素粒子・原子核物理のみならず、天体物理や宇宙論の分野の研究者にとっても欠かせない研究資料となっている。単なるデータのリストのみでなく、それぞれの分野・トピックに関する簡潔で明解な解説 (review) も付けられていて、大変有用である。この編纂と出版を司っているのが Particle Data Group である。その活動は日本とアメリカを含む国際協力に依るプロジェクトであり、実験データや論文の収集から始まり、その評価の後に Review of Particle Physics の編纂を行っている。日本からも 10 名程度の研究者が参画し、review の執筆などにおいて重要な役割を果たして来ている。日本側においては、その活動は日米協力事業に依ってサポートされていて、本事業が、こうした研究コミュニティにとって重要な活動を支えていることは大いに評価されるべきことと考える。

##### **D2 素粒子物理学の未来に向けた理論的研究 (責任者: 北野 龍一郎)**

この研究課題の目的は、日米における理論研究の核となるものを形成したいとの思いから、日米の理論研究者から成るチームを作り素粒子物理学、宇宙論における未解決問題に果敢に取り組む、というものである。こうした活動を先導するために、KEK 理論センターと FNAL 理論部共同でのワークショップを 2015、2016 両年に開催している。新理論構築には、アイデアの

交換といった、力量のある研究者間の交流が重要であると思われる。本事業のサポートで、そのために必要な旅費が賄われたことは、活動の大きな助けになったものと推察する。なお、このプロジェクトは理論家の交流事業であり、学位や論文の引用件数については該当無し、となっている。

### **D3 Belle II 理論連携基盤(B2TIP)** (責任者:橋本 省二/三島 智)

現在の素粒子理論の最も重要な使命は標準模型を超える物理(BSM)を探る事といっても過言ではない。最近始動した増強された B ファクトリー実験である Belle II 実験が、こうした BSM にどのような sensitivity やインパクトを持つかを、素粒子理論の立場から、実験家との密接な連携のもとに検討するというプロジェクトである。大きな成果を収めた Belle 実験では、小林・益川理論の予言する B メソンのシステムにおける大きな CP 非対称性を検証し、小林・益川理論を最終的に確立する、という大きく明確な目標があったが、数多ある BSM 理論の検証を、異なるタイプの加速器実験ではあるが B メソンの稀崩壊実験で既に注目される結果を出している LHCb 実験との競合の下で遂行して行くためには、良く練られた戦略的な物理解析の手法の確立が重要であろう。この 2015-2016 の 2 年間のプロジェクトでは、Belle II で想定される物理を、B の崩壊モードや unitarity triangle の 3 つの角度等によって 9 の課題(トピック)に分類し、それぞれに関するワーキング・グループ(WG)を組織して、KEK や PNNL、U. of Pittsburgh 等におけるミーティングを通して検討を行っている。それぞれの WG での検討の成果につき、もう少し報告が欲しかった気もするが、こうした検討の成果は、今年 8 月にアーカイブに投稿され、PTEP に掲載される予定の”The Belle II Physics Book” という 700 ページ近い論文集にまとめられており、これは 2 か月ほどで既に 46 件の引用を得ており注目度の高さが伺える。

## **4. まとめ**

- 1) 1979 年の事業開始以来、日米事業は 40 年にわたり継続して実施されてきたが、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(巻末資料 4「年度別採択件数及び配分額の推移」参照)、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) 2013 年～2017 年の 5 年間で総計 44 課題が本事業の支援を得て遂行された。  
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。

また、高エネルギー関連の実験だけでなく、RHIC 実験などの原子核研究者による実験や、GLAST、POLARBEAR II などの宇宙関係の観測研究にも支援が及んでいることを評価する。

- 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った。過去の評価委員会でも何度か指摘されてきたことであるが、ようやく双方向の公募が実現できたことは大きな進歩と考える。
- 4) 「ILC コスト削減のための超伝導高周波技術の研究開発」などコミュニティーや機構にとって重要な課題に関しては、公募ではなく機構長判断によるトップダウンで支援を行う仕組みを作ったことは妥当であると判断する。
- 5) 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。実際に共同研究につながった割合が 4 割程度であり、期待通りに機能しているといえる。
- 6) 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。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、多くの優秀な学生の応募を期待する。

本事業開始から 40 周年を迎え、日米の共同公募が開始されるなど形態は変化を遂げつつも、その重要性は益々高まっている。今後の本事業の発展に期待するところ大である。

## 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ご協力いただきました、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厚く御礼申し上げます。

## 巻末資料

### 資料1. 日米科学技術協力事業(高エネルギー物理学)第7次評価委員会名簿

委員	延興 秀人	国立研究開発法人理化学研究所 仁科加速器科学研究センター・センター長
	駒宮 幸男	早稲田大学 理工学術院総合研究所・上級研究員
	住吉 孝行(委員長)	首都大学東京・客員教授
	瀧川 仁	東京大学物性研究所 凝縮系物性研究部門・教授
	横溝 英明	一般財団法人総合科学研究機構(CROSS)・理事長
	林 青司	東京女子大学 現代教養学部・教授
事務局	小林 隆	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7次評価委員会の開催状況

	開催日時	会場	議事内容
第1回	2018年10月9日(火) 10:00~12:00	高エネルギー加速器 研究機構	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	2018年11月16日(金) 10:00~17:00	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	2018年12月18日(火) 13:00~16:00	高エネルギー加速器 研究機構	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。
第4回	2019年1月22日(火) 15:00~17:00	高エネルギー加速器 研究機構	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

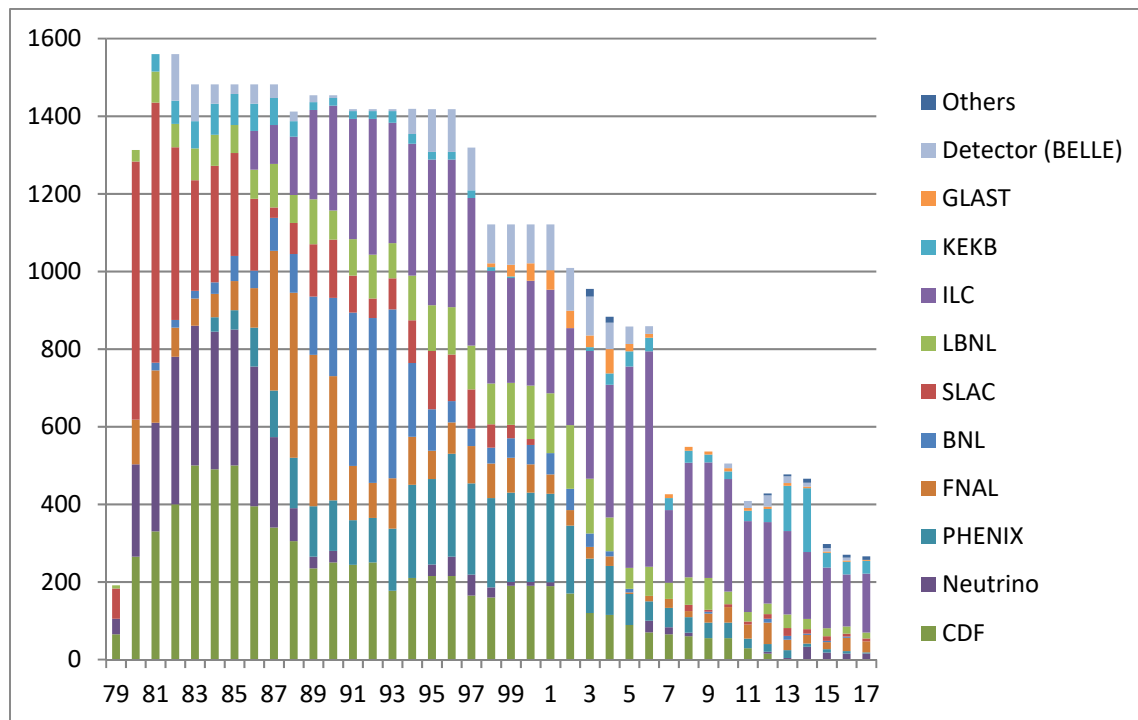
\*()は評価期間中

	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)						学位取得者数*	成果公表数*	
				2013	2014	2015	2016	2017	合計		論文(査読有り)	国際会議
A. 実験												
A1	RHIC における高エネルギー重イオン衝突実験 (RHIC/PHENIX)	小沢 恭一郎 /江角 晋一	1984 -2016	20.0	8.0	8.9	6.2	-	43.1	30(9)	183(49)	179(44)
A2	相対論的重イオン加速器を用いたクォーク・グルーオン・プラズマと QCD 相図の研究	江角 晋一	2017	-	-	-	-	3.0	3.0			
A3	RHIC における超前方粒子生成精密測定;RHIC forward 実験 (RHICf)	塔 隆志	2016 -2017	-	-	-	1.0	旅費のみ	1.0	-	-	(4)
A4	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-	7.0	4.0	3.6	3.1	2.7	20.4	27(4)	(109)	(69)
B. 加速器技術の開発												
B1	リニアコライダを含む先端加速器技術開発研究	横谷 馨 /早野 仁司	2008 -2014	200.0	165.0	-	-	-	365.0	(5)	(20)	(71)
B2	リニアコライダー加速器の技術開発研究	早野 仁司	2015-	-	-	148.0	128.0	126.0	402.0			
B3	SuperKEKB と高ルミノシティコライダーのための開発研究	飛山 真理	2013-	42.0	30.0	27.0	23.0	24.0	146.0	6(4)	75(9)	221(100)
B4	将来加速器に向けた高電界加速技術の開発	肥後 壽泰 /阿部 哲郎	2008-	10.0	2.9	4.0	1.0	1.0	18.9	-	22(4)	98(9)
B5	SuperKEKB・ナノビーム衝突点用超伝導コイルの建設及び振動測定装置の開発	大内 徳人	2012-	74.9	134.8	11.0	9.5	10.1	240.3	-	-	3(3)
B6	素粒子加速器と検出器用電磁石 3 次元磁場測定システム	大内 徳人	2017-	-	-	-	-	旅費のみ	0.0			
B7	超伝導イオンリニアック用超伝導ソレノイド電磁石及びその関連技術の開発	赤井 和憲	2014 -2016	-	100.0	1.0	0.5	-	101.5	-	(2)	(8)
B8	J-PARC キッカーシステム増強における工学的研究	石井 恒次	2013	旅費のみ	-	-	-	-	0.0	-	-	-
B9	高輝度超伝導 RF 電子銃の開発	許斐 太郎	2017-	-	-	-	-	5.0	5.0	-	-	-
B10	国際リニアコライダーのための、ダンピングリング不要の電子入射器の開発	栗木 雅夫	2017-	-	-	-	-	3.5	3.5	-	-	(1)
B11	高耐放射線性遅い取り出し装置の開発	富澤 正人	2017-	-	-	-	-	旅費のみ	0.0	-	(1)	(2)
B12	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-	-	-	-	-	旅費のみ	0.0	-	(0)	(40)
C. 測定器開発												
C1	J-PARC での中性 K 中間子稀崩壊実験	小松原 健 /山中 卓	2012-	14.0	22.5	18.0	13.0	10.0	77.5	12(9)	12(10)	101(37)
C2	SOI 技術を用いた先進的ピクセル検出器の開発	新井 康夫	2012 -2014	10.0	4.0	-	-	-	14.0	(3)	(~80)	(~70)
C3	POLARBEAR-II による宇宙マイクロ波背景放射偏光観測	羽澄 昌史	2012 -2016	10.0	7.0	4.0	3.0	-	24.0	9(9)	16(15)	~150(~100)
C4	高輝度電子・陽電子衝突型加速器で使用する PID 検出器の開発	飯嶋 徹	2010 -2013	17.0	-	-	-	-	17.0	-	22(20)	-
C5	Belle II 検出器の性能向上による新物理探索	飯嶋 徹	2014 -2016	-	10.0	9.0	7.5	-	26.5			

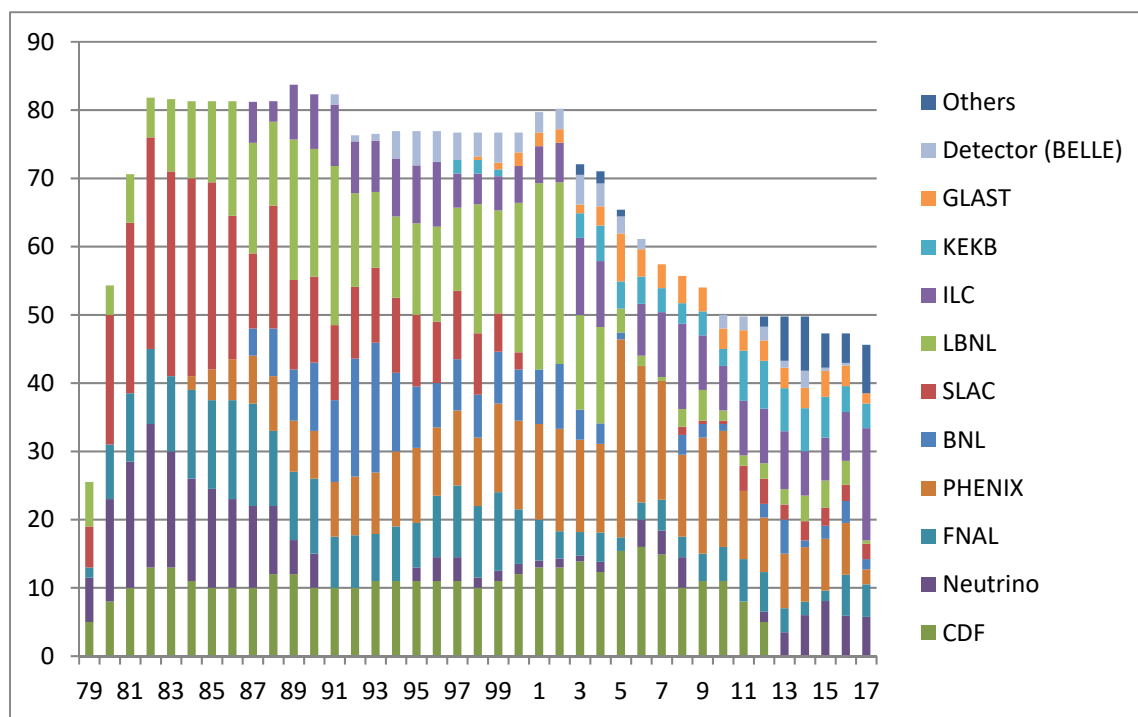
C6	先端高強度ミュオン源とミュオン素粒子物理学の展開	久野 良孝	2011-2014	13.0	旅費のみ	-	-	-	13.0	10(6)	51(9)	80(28)
C7	次世代実験のための新GEANT4カーネルの開発	佐々木 節	2011-	10.0	9.0	8.0	6.4	6.4	39.8	-	51(16)	57(16)
C8	J-PARC MLF 大立体角パルスミュオンビームラインを用いたミュオン基礎物理の発展	三部 勉	2012-2016	10.0	3.0	2.1	1.6	-	16.7	-	4(0)	89(18)
C9	ニュートリノ崩壊探索実験	金 信弘	2012-2014	4.0	3.0	-	-	-	7.0	-	9(8)	40(29)
C10	BelleII データ再プロセス高度化のためのリモートデータセンターの設立	原 隆宣	2012-2015	5.0	10.0	9.0	-	-	24.0	-	14(13)	47(46)
C11	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-	-	-	-	6.9	4.0	10.9	-	-	-
C12	先端シリコン技術によるILC測定器の研究開発	相原 博昭	2013-2016	15.0	7.5	6.8	5.0	-	34.3	-	(3)	(1)
C13	コライダー実験将来計画へ向けたシリコン検出器開発	花垣 和則	2016-2017	-	-	-	2.0	2.5	4.5	(1)	(5)	(8)
C14	大強度ビームを使ったニュートリノ実験のための先端技術研究	横山 将志	2014-2016	-	30.0	18.0	15.5	-	63.5	-	-	(17)
C15	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-	-	-	-	-	6.5	6.5	-	-	-
C16	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-	-	-	-	-	7.0	7.0	-	-	11(8)
C17	日米分散計算処理体制によるILC測定器の最適化と物理研究の推進	宮本 彰也	2015-2017	-	-	1.5	1.3	1.0	3.8	(1)	(5)	(86)
C18	J-PARC MLF で行うステライルニュートリノ探索のための検出器開発	丸山 和純	2015-2016	-	-	1.0	0.9	-	1.9	-	(3)	(8)
C19	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	2015-	-	-	(50.0)	(36.0)	(15.0)	(101.0)	-	-	-
C20	大強度陽子ビーム生成標的・窓材料に関する先端的な研究	石田 卓	2016-	-	-	-	19.3	16.0	35.3	-	(5)	(36)
C21	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の磁場校正	佐々木 憲一	2017-	-	-	-	-	1.0	1.0	-	-	-
C22	高位置分解能飛跡検出のための陰イオンガス TPC の開発	身内 賢太郎	2017	-	-	-	-	旅費のみ	0.0	(1)	(1)	(4)
C23	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	2017-	-	-	-	-	16.0	16.0	-	-	-
C24	光電子増倍管群デジタル変換・読み出し用電子回路の開発	早戸 良成	2017	-	-	-	-	2.0	2.0	-	-	(1)
C25	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-	-	-	-	-	4.0	4.0	-	(4)	(6)
D. 素粒子データグループ												
D1	素粒子データ情報に関する研究	日笠 健一	1979-	15.0	15.0	16.5	15.3	15.3	77.1	-	16(2)	-
D2	素粒子物理学の未来に向けた理論的研究	北野 龍一郎	2016	-	-	-	旅費のみ	-	0.0	-	-	-
D3	Belle II 理論連携基盤(B2TIP)	橋本 省二 /三島 智	2015-2016	-	-	旅費のみ	旅費のみ	-	0.0	-	(1)	-

### 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)



・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	1996	1997
課題件数	7	9	13	15	15	16	17	16	18	17	15	15	14	16	16	18	16	15	15
年度	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
課題件数	17	18	14	14	16	18	15	12	10	14	14	13	13	17	17	19	19	24	25

資料5. 日米科学技術協力事業高エネルギー物理研究計画委員会名簿

氏名	所属・職	※役職指定
◎岡田 安弘	高エネルギー加速器研究機構 国際協力・連携事業担当理事	※
徳宿 克夫	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・所長	※
山口 誠哉	高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設・施設長	※
小林 隆	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・副所長	※
石井 利和	高エネルギー加速器研究機構 理事/管理局長	※
伊藤 領介	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・教授	
小関 忠	高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設・教授	
大谷 航	東京大学素粒子物理国際研究センター・准教授	
戸本 誠	名古屋大学大学院理学研究科・准教授	
川越 清以	九州大学大学院理学研究院・教授 九州大学先端素粒子物理研究センター・センター長	
上垣外修一	理化学研究所仁科加速器研究センター・加速器基盤研究部 部長	
市川 温子	京都大学大学院理学研究科・准教授	

◎は委員長

(平成 31 年 2 月現在)



