

## 大型研究計画に関する進捗評価について（報告）

B ファクトリー加速器の高度化による新しい物理法則の探求

2018 年（平成 30 年）8 月 30 日

科学技術・学術審議会 学術分科会 研究環境基盤部会  
学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会

# 目次

はじめに	3
「B ファクトリー加速器の高度化による新しい物理法則の探求」計画について	
1. 進捗評価の実施方法	4
2. 計画の概要	
（1）計画の概要と主な内容	6
（2）実施体制	6
（3）年次計画及び予算規模	7
3. 計画の進捗状況	
（1）科学目標の進捗状況	9
（2）情勢の変化があった場合の対応状況	11
（3）社会や国民からの支持を得るための取組、情報発信の状況	11
（4）年次計画における「プロジェクト推進に当たっての留意事項等」への 対応状況	13
（5）共同利用・共同研究を行うための実施体制の状況	16
（6）幅広い研究者が参画できる運用体制の状況	16
（7）プロジェクト推進に当たっての課題	16
4. 計画の進捗評価と今後の留意点	
（1）計画の進捗状況を踏まえた評価	17
（2）今後の事業の推進に当たっての留意点	17
備考（用語解説等）	20
科学技術・学術審議会 学術分科会 研究環境基盤部会 学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会 委員等名簿	23

## はじめに

文部科学省においては、学術研究の大型プロジェクトへの安定的・継続的な支援を図るべく、2012年度（平成24年度）に「大規模学術フロンティア促進事業」を創設した。

この事業は、世界が注目する学術研究の大型プロジェクトについて、科学技術・学術審議会 学術分科会 研究環境基盤部会 学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会（以下「作業部会」という。）が策定した「学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想 ロードマップの策定ーロードマップー」<sup>※1</sup>等に基づき、社会や国民からの支持を得つつ、国際的な競争・協調に迅速かつ適切に対応できるよう支援し、戦略的・計画的な推進を図ることを目的としている。

各プロジェクトの推進に当たっては、本作業部会が「大規模学術フロンティア促進事業の年次計画」（以下「年次計画」という。）を作成し、進捗管理を行っているところである。

他方、今回の進捗評価は、2018年（平成30年）5月の本作業部会において、現在の財政環境等にも鑑み、各プロジェクトの速やかな進捗管理の徹底を図るべく、2018年度（平成30年度）前半期に原則すべてのプロジェクトの進捗状況の確認を行うこととしたことを受けて実施したものである。

なお、同じく2018年（平成30年）5月の本作業部会において、「Bファクトリー加速器の高度化による新しい物理法則の探求」の年次計画上、科学目標3「B中間子などの精密測定による新しい物理法則の発見・解明」が開始される2019年度の進捗評価については、今回の進捗評価を通じてその実施の要否を本作業部会が判断することとしている。

進捗評価に当たっては、本作業部会において、実施機関である法人に対し、「学術研究の大型プロジェクトの推進方策の改善の方向性」（2017年（平成29年）3月本作業部会決定、以下「改善の方向性」という。）や現在の財政環境などに基づく課題を整理の上、これらの課題に主体的に対応するよう促していることに鑑み、従来の評価の観点に、

- ・ 実施機関による財政環境への対応が適切に行われたかどうか
- ・ 期末まで安定的・継続的にプロジェクトを推進することができるよう年次計画の内容の変更等が行われたかどうか

を加え、関係分野の専門家（以下「アドバイザー」という。）から助言を得つつ、委員が研究現場の状況を確認するための現地調査、ヒアリング及びそれらを踏まえた審議を実施した。

※1 本作業部会においては、日本学術会議の「マスタープラン」が示す学術的意義の高い大型プロジェクトのうち、推進に当たっての優先度が高いと認められるものを選定し、「ロードマップ」として策定している。2017年（平成29年）7月には「ロードマップ2017」を取りまとめた。

(URL) [http://www.mext.go.jp/a\\_menu/kyoten/1383666.htm](http://www.mext.go.jp/a_menu/kyoten/1383666.htm)

# 「B ファクトリー加速器の高度化による新しい物理法則の探求」計画について

## 1. 進捗評価の実施方法

### 現地調査・ヒアリング

今回の進捗評価に当たっては、改善の方向性に基づき、次のとおり、茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構（以下、「機構」という。）つくばキャンパスを、本作業部会委員及びアドバイザーからなる評価者 8 名が訪問して現地調査を実施した。

(1) 日 時： 2018 年（平成 30 年）7 月 19 日（木）10：40～17：20

(2) 参加委員： 現地調査に参加した評価者は、以下のとおり。（敬称略、○は主査）

（作業部会委員）栗原 和枝、井本 敬二、○小林 良彰、新野 宏、原田 慶恵、  
観山 正見

（アドバイザー）相原 博昭、中野 貴志

(3) 概 要：

#### ・現地視察（50 分）

筑波実験棟において機構から Belle II 検出器について説明を受けつつ、状況確認を行った。

#### ・機関からのヒアリング（40 分）

機構から、計画の概要、進捗状況等について説明を受けた後、質疑応答を行った。

（説明者）

山内 正則 高エネルギー加速器研究機構機構長、

石井 利和 同機構理事、

赤井 和憲 同機構加速器研究施設加速器第三研究系主幹、

後田 裕 同機構素粒子原子核研究所教授、

飯嶋 徹 名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構現象解析研究センター教授、

大淵 学 高エネルギー加速器研究機構財務部長、

河津 宏典 同部主計課長

#### ・研究者との意見交換（40 分）

Belle II 検出器に関して、設備の整備・管理・運用及び開発・実験・研究に携わる機構及び機構外の若手研究者等から、課題として感じていること等について、ヒアリングを行った。

・機関との意見交換（55分）

現地調査を踏まえ、年次計画の終了に向けた今後の推進方策や、年次計画終了後の方針等について、意見交換を行った。

・まとめ（45分）

以上を踏まえ、研究の進捗状況に係る確認及び今後の推進方策や留意事項等に係る検討を行った。その後、機構に、現地調査の結果の概要を伝達した。

**学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会における審議**

(1) 日 時： 2018年（平成30年）8月10日（金）13:30～16:30

(2) 審議事項： 進捗評価報告書（案）の審議

(1) 日 時： 2018年（平成30年）8月30日（木）13:00～15:00

(2) 審議事項： 進捗評価報告書（案）の審議

## 2. 計画の概要

### (1) 計画の概要と主な内容

KEK・B ファクトリー (KEKB) は世界最高のビーム衝突性能 (ルミノシティ) を実現し、B 中間子における CP 非対称性の発見による小林・益川理論の実験的検証をはじめ、素粒子物理学研究及び加速器科学の発展に大きく貢献し、世界的な中核拠点として、当該分野をリードしてきた。

本計画では、KEKB のビーム衝突性能を 40 倍に増強する SuperKEKB への高度化改造を行う。周長 3016m の KEKB 電子リング及び陽電子リング (衝突リング)、電子・陽電子線形加速器 (入射器) ならびに Belle 測定器を、既存の設備を最大限活用しながら、高度化のために必要な電磁石ならびに電磁石用電源、ビームパイプ、電子・陽電子源、検出器等の設備を製作して更新するなどして、改造する。また、周長 135m の低エミッタンス陽電子入射システム (ダンピングリング) を新設する。

SuperKEKB を運用し、KEKB の数十倍の物理実験データを蓄積することにより、宇宙初期に起こったはずの極めて稀な現象を多数再現し、これまでの実験で見つかっている標準理論だけでは説明が困難な現象 (シミュレーションと実験データの差) を手掛かりとして、新しい物理法則の発見・解明を目指すとともに、小林・益川理論のみでは説明できなかった、宇宙の発展過程で反物質が消え去った謎に迫る。この新たな物理法則の解明は、素粒子大統一理論の構築へとつながり、更に、現代宇宙論最大の謎である宇宙暗黒物質の正体・起源などを明らかにすることが期待される。

### (2) 実施体制

加速器の高度化改造と改造後の維持・運転は、機構の加速器研究施設が担当し、既存の Belle 測定器の改造及び維持・運転と運転開始後のデータ収集・データ解析は同・素粒子原子核研究所を中心的機関とする Belle II コラボレーションが担当する。この両者と共通基盤研究施設、管理局、国内の参加大学との連携を図るために「B ファクトリー計画推進委員会」を設置し、計画全体に関する意思決定を行う。さらに、「B ファクトリー加速器国際評価委員会」、「B ファクトリー実験国際評価委員会」を設置し、海外の学識経験者から加速器、測定器に関する技術的なアドバイスや、研究推進の方針についての広い意見を求める。

この研究計画は広く海外の研究者と協力して推進する国際共同研究であり、Belle II コラボレーションには、国内外の参加大学・研究機関の代表者からなる「参加機関代表者会議 (IB)」が置かれ、意思決定を行う。参加機関は実験データへの自由なアクセスや計算機資源などの利用が認められるかわりに、測定器・計算機の運転・維持に係る責務を分担する。

測定器の運転維持のための資金については、コラボレーション内部に「財政委員会 (FB)」を置き、予算案と分担について議論し、執行をモニターする。一方で、素粒子原子核研究所は、海外の財政機関等の参加者からなる「外部資金管理委員会 (FOP)」を招集し、分担と執行を監督している。また、外部資金管理委員会は「外部監査委員会 (SC)」に監査を依頼

している。

コラボレーションの戦略決定をスムーズに行うために、コラボレーション構成員の投票により選ばれた代表者、素粒子原子核研究所 Belle グループの責任者であるプロジェクト・マネージャー、財政委員会委員長を兼ねる財政担当者の3名がマネジメントを行う。また、コラボレーションの主要メンバーからなる「幹部委員会 (EB)」を置き、コラボレーションの意思決定を助ける。

Belle II コラボレーションには、2018年7月現在25ヶ国・地域の110機関から800名を超える研究者が参加している。日本からの参加機関は、高エネルギー加速器研究機構、千葉大学、カブリ数物連携宇宙研究機構、名古屋大学、奈良女子大学、新潟大学、大阪市立大学、東邦大学、東北大学、首都大学東京、東京大学、山形大学、北里大学、核物理共同体（大阪大学 RCNP、東京工業大学、東京大学地震研究所、宮崎大学、京都大学、昭和薬科大学、岐阜大学、JAEA、中央研究院（台湾）に、少人数ずつ所属する核物理学研究者がまとまって1機関として活動している）である。

### (3) 年次計画及び予算規模

SuperKEKB に係る年次計画及び予算規模は次のとおりである。

#### (年次計画)

計画名称	Bファクトリー加速器の高度化による新しい物理法則の探求												
実施主体	【中心機関】 高エネルギー加速器研究機構 【連携機関】 東京大学、名古屋大学、東北大学 （他9機関（国内）および85機関（国外））												
所要経費	建設費総額 314億円（設備費290億円、高度化経費24億円） 年間運用経費 約70億円	計画期間						建設期間 平成22～26年度 運転期間 平成27年以降（平成34年に計画を見直し） 【事前評価】平成22年7月 【進捗評価】平成27年9月					
計画概要	KEKBのビーム衝突性能をこれまでの40倍に増強することによって、宇宙初期に起こったはずの極めて稀な現象を再現、そこに現れる未知の粒子や力の性質を明らかにし、新しい物理法則の全容解明に寄与する。												
研究目標（研究テーマ）	1. 装置の高度化 2. 物理実験の継続によるデータの取得 3. B中間子などの精密測定による新しい物理法則の発見・解明												
年次計画	2013 (H25)	2014 (H26)	2015 (H27)	2016 (H28)	2017 (H29)	2018 (H30)	2019 (H31)	2020 (H32)	2021 (H33)	2022 (H34)	2023 (H35)		
1. 装置の高度化	装置の高度化による現行の40倍の衝突性能の達成												
KEKB加速器の高度化を図り、電子ビームと陽電子ビームのサイズをナノ・サイズに小さく絞ると同時に、電流量を2倍に増やすことによって、ルミノシティ（衝突頻度）を現在の40倍に高める。（最終目標値 $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ）	加速器の高度化（～26年度）		加速器の性能向上									期末評価	
2. 物理実験の継続によるデータの取得	物理実験の継続による現行の50倍のデータ量の蓄積												
高度化したKEKBの運転により、その性能向上を図りつつビーム衝突実験を行い、これまでのKEKB実験の50倍の量の実験データを蓄積する。（最終目標値 = 50 ab <sup>-1</sup> ）													
3. B中間子などの精密測定による新しい物理法則の発見・ ・ B中間子の稀な崩壊過程を高精度に測定し、仮説上の重い新粒子である超対称性粒子など、新しい物理の証拠を探索する。 ・ B中間子のタウニュウ-崩壊を精密に測定し、超対称性理論により存在が予言されている荷電を持った荷電ヒッグス粒子の証拠を探索する。 ・ 小林・益川理論が予言するB中間子のCP非対称性の大きさをさまざまな崩壊モードについて実験結果と比較することで新しい物理法則を探索し、その性質を検証する。	新しい物理法則の証拠の探索など												
評価の実施時期	-	-	進捗評価	-	-	（進捗状況の確認）	進捗評価	-	-	-	-		

(これまでの予算措置の状況)

建設費 : 716.2 億円 (1994 年度 (平成 6 年度) ~2018 年度 (平成 30 年度) までの経費)

運転経費・実験経費 : 1,216.1 億円 (1994 年度 (平成 6 年度) ~2018 年度 (平成 30 年度) までの経費)



### 3. 計画の進捗状況

#### (1) 科学目標の進捗状況

##### 1. 設備の整備状況

当初計画どおり、建設費総額 314 億円が措置された。当初計画にしたがって、2010～2014 年度（平成 22～26 年度）に予定した装置の高度化を実施した。

##### ①電子・陽電子衝突リングの建設

電子リング及び陽電子リング高度化改造の鍵となる各種装置の製作及び設置等の整備を計画通り実施した。

- ・ 電子及び陽電子ビームを低エミッタンスにするために必要な電磁石及び電磁石電源の製作及び据付けを完了した。
- ・ 陽電子リングにおける電子雲によるビーム不安定を防ぐための、また電子リングの放射光による発熱を緩和するための、新型ビームパイプへの更新を完了した。
- ・ ビーム電流を増強するために高周波源の増設及び加速空洞の改造及び配置最適化を完了した。
- ・ ビームの位置やサイズ、振動を精密に計測し、安定に制御するための新しい検出器や、更新したビームパイプに適合する測定用電極などの製作及び設置を完了した。
- ・ 衝突点の最終収束用超伝導電磁石を Phase 2 から稼働させる計画に沿って、製作を進めた。

##### ②電子・陽電子線形加速器の改造

入射器で生成される電子及び陽電子ビームを低エミッタンスにし、かつビーム電流を高めるために、新たな RF 電子銃の開発や陽電子源の増強を行うとともに、エミッタンスの増大を防ぐために入射器全体のアライメント精度を向上させた。

##### ③陽電子低エミッタンス入射システム（ダンピングリング）

Phase 2 以降は、線形加速器で生成される陽電子ビームを陽電子リングに入射する前に低エミッタンスにするためのダンピングリングが必要となる。計画どおりダンピングリング新トンネル及び建屋が完成し、大部分の加速器機器の製作を終えた。

##### ④Belle II 測定器の建設

2014 年度（平成 26 年度）までに、最も外側の中性 K 中間子・ミュオン粒子検出器の組み込み及び電磁カロリメータの新しい読み出し回路の装填が完了した。また、中央飛跡検出器（CDC）本体の建設が完了し、宇宙線によるテストを行った。他の検出器の建設もスケジュール通り順調に進んだ。2014 年度（平成 26 年度）末時点で、23 カ国・地域の 99 機関からの 600 名を超える研究者が共同で測定器の建設及び物理解析の準備を進めた。

##### 2. 運転と性能向上の状況

## ①Phase 1

2015 年度（平成 27 年度）に衝突リングの電磁石の精密測量・アライメント及び電磁石通電試験、高周波大電力試験及び加速空洞のコンディショニング、ビームパイプの真空排気等、加速器運転のための機器の立上げ調整作業等を行ない、2016 年（平成 28 年）2 月に SuperKEKB の Phase 1 運転を開始した。詳細な運転スケジュールは機構の他の電子系加速器（Photon Factory や PF-AR など）と調整のうえ決定された。Phase 1 運転では Belle II 測定器と最終段収束電磁石の組み込まれていない状態で低エミッタンスビーム調整及び高いビーム電流での運転が進められた。並行して衝突点付近での小規模な検出器から構成される BEAST 実験において加速器の条件変化から生じるさまざまな種類のバックグラウンドの測定が行われた。同年 6 月末まで行なった運転において、Belle II 測定器を衝突点に導入可能となるよう、リングの状態が整えられ、Phase 1 運転の目的が達成された。

## ②Phase 2

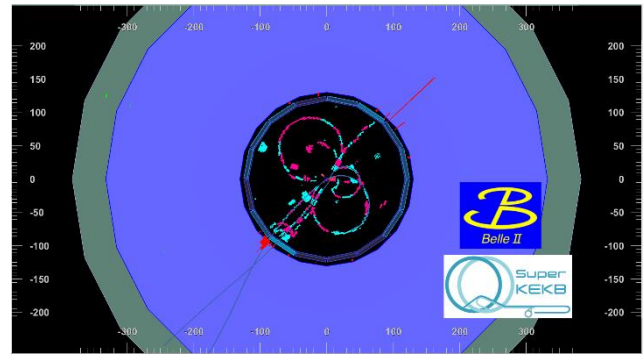
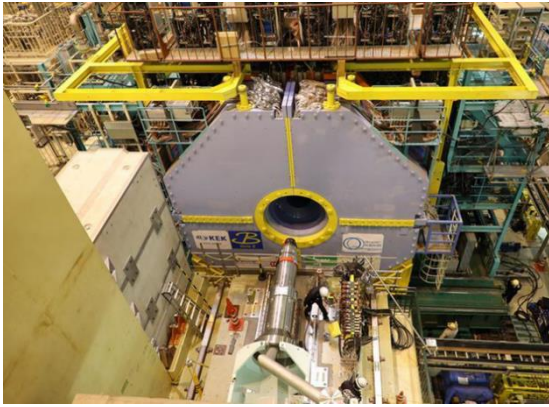
並行して、Belle II 測定器の建設を継続し、胴体部粒子識別装置（TOP）の設置、ソレノイド電磁石の磁場測定、中央飛跡検出器の導入が完了された。また、Phase 1 運転終了後に、最終収束超伝導電磁石を完成させて衝突点に設置し、Belle II 測定器をロールインして加速器と結合させ、合同の磁場測定を行うなど、Phase 2 のビーム衝突調整に移行するための衝突リングの改造作業を進められた。その後、前方粒子識別装置と前方カロリメータを設置し、また、Phase 3 運転から導入する VXD の代わりに、Phase 2 運転中にその領域のバックグラウンドをモニターするためのプロトタイプセンサーなどの一式を挿入するなど、Phase 2 運転に向けた改造作業を完了し、2018 年（平成 30 年）3 月から Phase 2 運転が開始された。

メインリングの Phase 2 運転開始に先立って、陽電子ダンピングリングの加速器機器の立上げ調整を進め、ビーム調整を行い、Phase 2 運転開始時までにダンピングリングを経由した陽電子リングへの入射が可能となった。

Phase 2 運転は順調に進み、3 月末までに電子・陽電子両リングへのビーム蓄積に成功した後、衝突点のビーム絞りこみと衝突調整を進め、4 月 26 日には初衝突事象が Belle II 測定器において観測された。その後も衝突点の絞り込みを段階的に強くするとともにビーム電流を高めるなどして衝突性能を上げ、新たなナノビーム大角度交差方式に関する科学的知見や今後の加速器の性能向上のための研究を深めた。7 月 3 日までにピークルミノシティが  $5 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  を上回るなど順調にビーム調整が進展している。

Belle II 測定器は各検出器の較正、アライメントなどの調整が進み、B 中間子や D 中間子、J/psi 粒子などの既知の粒子を再確認するなど、物理解析が可能な状態へと準備が整えられてきている。

2018 年（平成 30 年）6 月末に Phase 2 のビーム調整の進展を評価し、Belle II 測定器に VXD を安全に組み込める状況にまで装置及びビームの調整が進んだとの合意が得られ、予定通り 2018 年（平成 30 年）7 月で Phase 2 運転を終了して VXD を Belle II 測定器に組み込むなど Phase 3 に向けた作業に取り掛かることが決定された。



図： ロールインされた Belle II 測定器（左）  
電子・陽電子が初衝突した際のイベントディスプレイ（右）

### ③国際協力の状況

国内外の Belle II 参加機関・研究者の協力を得て Belle II 測定器の建設を行い、物理解析の準備を進めている。測定器建設費用約 50 億円のうち、約半分を海外が負担している。また、測定器運転維持費についてはデータセンターの運営基準を設け、中核計算機維持費やセキュリティに係る経費年間 2～3 億円のうち、現状で約 6 割を機構が、残りを海外が負担している。さらに、計算機運転維持費（2020 年の予定額で約 23 億円相当）の分担について合意し、現状で日本が 2 割、海外が 8 割となる枠組みを決めた。加速器の建設においては、国際的合意（IUPAP/ICFA ガイドライン）に基づきホストである機構が費用を負担しているが、超伝導補正コイルの製作、ビームサイズモニタやフィードバック機器等の先端的技術開発において、海外の主要な加速器研究機関の協力を得て進めた。また、加速器運転においても、海外の研究機関の研究者の協力を得てビーム性能向上の取り組みを進めている。

#### （2）情勢の変化があった場合の対応状況

イタリアで計画されていたライバルとなる同種の国際協力実験 SuperB 計画が 2013 年頃に経済的事情により実現を断念したため、Belle II に対する国際的期待がますます高まった。イタリア、カナダ、メキシコなどから SuperB 計画に参加していた研究者などが Belle II 実験に新規に参加した。さらなる勧誘活動が奏功し、新たにフランスとイスラエルが加入する中、既存の加入国からも新規機関が続々参加し、コラボレーションは拡大し大きく成長している。LHCb が物理解析において先行して成果を上げているが、2015 年以降も Belle II への新規加入が相次ぎ、2 カ国・11 機関・約 200 名の増加があった。

#### （3）社会や国民からの支持を得るための取組、情報発信の状況

2018 年 4 月に観測した SuperKEKB 加速器における電子・陽電子の初衝突は、世界中で 10 年に一度あるかないかの大きなマイルストーンであり、社会や国民の支持を得るための絶好の機会と捉え、それに向けて新聞・テレビなどメディア向けの情報提供に加え、イベント企画や Web サイトのニュース、インターネット中継など様々な方法を駆使してアウトリ

一斉活動が展開された。主な活動は以下の通り。

- ・ Belle II 測定器を SuperKEKB 加速器の衝突点にロールインする作業の様子を、インターネット上で生中継(2017年4月11日)/アクセス数が約3万6000件、コメント数が約1万3000件、集まった。
- ・ 都心でのサイエンスカフェ開催(2017年(平成29年)5月17日、2017年(平成29年)6月1日)。各80名~90名を集め好評を博した。
- ・ 高校生向けサイエンススクール Belle Plus のためのクラウドファンディング挑戦(2017年6月~7月)。約200万円(目標額の約2.5倍)の支援を得た。
- ・ KEK 一般公開における企画講演。物理の講演で262名を集めた。
- ・ 文部科学省エントランスの展示(1月4日-2月13日)及び、旧館1階ラウンジにおけるKEK特別講演会の開催(1月30日、約20名が出席)
- ・ メディア向け撮影会(2月20日。10社・約15名が出席)
- ・ メディア向け勉強会(3月13日に東京で開催。15社・約30名が出席)
- ・ SuperKEKB フェーズ2運転の開始をプレス発表・記者会見(3月23日)し、全国・地方の計19紙で報道された。
- ・ 電子・陽電子の初衝突の観測をプレス発表(4月26日)、記者会見(翌27日)し、全国・地方の計18紙の他、テレビでも報道された。
- ・ Belle II 中央制御室の準備の様子をインターネット上で生中継(4月20-27日)され全国2紙が紹介。アクセス数が約46万6000件、コメント数が約12万9000件、集まった。
- ・ SuperKEKB プロジェクト初衝突記念式を開催(6月26日、世界各国の研究機関の代表者など約350名が出席)し、全国・地方の2紙とテレビで報道された。

高校生や大学生などを対象とし、科学の面白さを伝えるための各種スクールを定期的で開催している。主なものは以下の通り。

- ・ Belle Plus: 高校生対象のサマーキャンプ。3泊4日で Belle II 研究者と同一体験をする。年1回実施し、第12回(2017年)は参加者24名。先述の通り、クラウドファンディングで多大な支援を得た。
- ・ 東南アジアスクール(PPSSEA): 東南アジアの大学生を対象として Belle II での研究を中心に素粒子物理一般の講義、実習を行う。5回目は2017年9月にマレーシアで開催し、5ヶ国44名が参加した。
- ・ 理系女子キャンプ: 日本の女子高校生を対象に、女性研究者が講演や体験談を披露する。2018年4月に7回目を開催、30名が参加した。
- ・ 実習、職場体験も積極的に行っている。2017年度は、21件682名の高校生等の実習及び8件35名の職場体験を受け入れた。
- ・ Belle 実験のデータの一部をインターネット上で公開し、実際に粒子探索の研究を体験してもらう B-Lab プログラムも継続しており、2018年7月現在で62校の高校生824名を含む1421名が参加した。

これらのイベントは、機構や IPNS のホームページのニュースとして積極的に情報発信するほか、毎週金曜日につくばセンターで開催中の KEK サイエンス・カフェ(5月25日で100回目)などの場も利用し、社会に広く知ってもらえるよう努力している。

#### (4) 年次計画における「プロジェクト推進に当たっての留意事項等」への対応状況

年次計画においては、「プロジェクト推進に当たっての留意事項等」として、以下の内容を掲載している。

##### ① 機構におけるより一層のガバナンスの強化

機構においては、事故等の事態を踏まえ、事業の着実な推進に当たっては、国際的な研究機関としての透明性ある適切なガバナンス体制を一層強化することが必要である。

##### ② 運転時間の確保の重要性

本事業の科学的意義や学術研究における我が国の国際的プレゼンスへの貢献は認められるところであるが、一方で、LHCb※15 や他の新物理探索実験に対する国際競争力とコミュニティにおける求心力を維持するためには、運転時間の確保が重要である。しかし、電気代の高騰などの外的要因に加え、我が国の厳しい財政状況下において、運転時間の確保に向けた予算の適切な確保を見通すことは困難な状況である。現在、運転・維持経費については、加速器本体は設置した国が負担し、測定器は国際共同で分担するという国際的合意に基づき推進されている。今後、海外の他のプロジェクトにおける国際的な経費分担の枠組みの在り方や、ホスト国としての多額の負担を踏まえて、日本の研究者の海外施設における相互便益の状況、加速器本体の運転・維持経費における海外負担割合の分析・評価を行うことにより、国際協調を基本とした運転経費の負担の在り方について検証を行うことが必要である。加えて、外部資金の獲得や既定経費の見直し、法人内資源の再配分等、機構としてもあらゆる努力を行っていくことが必要である。

なお、国は、検証の状況を踏まえつつ、本計画が着実に推進されるよう適切な支援に努めることが重要である。

##### ③ 国際情勢を踏まえた計画の最適化

Belle II 実験に対する国際的な期待が高まっている一方で、現在欧州の LHC において行われている LHCb 実験が順調にデータを集め、物理解析に成果を挙げている。こうした国際的な研究の情勢を注視しつつ、他実験施設との機能分化、相違点や優位点をより明確にし、独自の成果を生み出していくことが重要である。また、LHC をはじめとする海外の他のプロジェクトの進捗状況について十分な情報収集を図り、国際的な研究の情勢を踏まえ、計画の最適化に向けた検討を継続し、必要に応じて本計画の実施に反映させることが必要である。

##### ④ 社会・国民に向けた広報活動・情報発信の一層の推進

多額の国費を投入し、また成果への直結が見えにくい学術研究であるからこそ、幅広く社会・国民に計画そのものや科学的重要性について理解を深めてもらい、さらに本計画が支援されるような環境・雰囲気醸成することが、計画の安定的な推進に寄与するものであり、引き続きこうした取組の充実に留意することが必要である。その際、実験を通じて何が解明されるのか社会・国民にとってわかりにくいものが多いことから、わかりやすい説明の工夫が必要である。このような広報・情報発信の重要性は、大型装置を用いて真理

を追究する大型プロジェクトに共通することから、他の学術研究の大型プロジェクトと連携して、その意義等について、情報発信を推進することが必要である。また、⑥で指摘されるような開発技術などが国民生活や産業のイノベーションにどのように役立っているのかという情報も発信していくことが重要である。

#### ⑤ 人材の計画的育成と技術の継承

従来のBファクトリー実験には、多くの大学院生が実験研究に参画し、平成26年度までにはそのうち159名（国内57名）が博士号を取得して国内外の学界、産業界で活躍している。このように多くの大学院生等を受け入れ、素粒子物理学及び加速器科学の最先端の研究現場において教育・研究指導を行うことで、当該分野における人材育成に寄与してきた。本計画による加速器の高度化に伴う長期的な安定運用を目指すため、引き続き、若手研究者・技術者を育成し、現在関わっている研究者や技術者が積み上げてきた基礎技術を継承することが重要であり、そのための方針を明確にすることが必要である。

#### ⑥ 産業応用の可能性等の追求

本プロジェクトにおいては、低エミッタンスのビームをコントロールする手法について開発された。今後、こうした成果が、加速器産業をはじめ広くスピノフしていくよう、国立研究開発法人などの関係機関から協力を得ることも検討の視野に入れ、産業応用への橋渡しを積極的に行うことが必要である。

#### 【その他】

世界の研究者に開かれた国際的な頭脳循環の拠点として、若手研究者を含む幅広い研究者が活躍できる環境と研究支援体制を充実させることが望まれる。

これらへは以下のような対応が行われている。

#### 1. 機構におけるより一層のガバナンスの強化

- ・ 大きな運転事故なくここまで建設・運転を着実に遂行している。
- ・ 機構内外の議論と外部審査委員会による助言を受けて制定した KEK Project Implementation Plan (PIP) をガイドラインとして、SuperKEKB/Belle II を最優先で進めている。

#### 2. 運転時間の確保の重要性

- ・ 加速器本体の運転・維持経費に関しては、IUPAP/ICFA ガイドラインに基づき行っている。
- ・ 測定器や計算機の費用分担は、国際協調を基本とし、測定器運転維持費の約40%、計算機運転維持費の約80%を海外に負担してもらう枠組みに合意しており、その負担割合に基づき実際に運営が行われている。
- ・ 機構長のリーダーシップのもとで、努力している。

#### 3. 国際情勢を踏まえた計画の最適化

- ・ LHC 実験では、ヒッグス粒子を発見したものの、新物理に属する新粒子は全く発見されておらず、LHCb 実験及び Belle II 実験での探索に期待が集まっている。

- ・ LHCb 実験と Belle II 実験には、それぞれに得手不得手があり相補的であると言える一方で、広い範囲において競争関係にある。
- ・ LHCb 実験は、2018 年末～2021 年春まで、高度化のための長期シャットダウンを予定しており、その間に Belle II をしっかり立ち上げて、その後の競争に臨むべきである。
- ・ よって、国際情勢を踏まえると、可能な限り運転時間を確保し、LHCb 実験の再開までに測定感度を同等以上まで高めるため、加速器・測定器の性能を向上し、物理成果を速やかに得ることが望まれる。

#### 4. 社会・国民に向けた広報活動・情報発信の一層の推進

- ・ 2. (3) 社会や国民からの支持を得るための取組、情報発信の状況に記したとおり、社会・国民に向け広報活動・情報発信を活発に行っている。従前のメディアにとどまらず、SNS、ウェブ記事、クラウドファンディング、インターネット生中継などを通じ、科学が好きで本プロジェクトの情報を求めている人にとどまらず、広範な対象に向けて情報を伝えている。
- ・ 他の学術研究の大型プロジェクトとは、SNS や IPPOG(International Particle Physics Outreach Group) の枠組みを通じて連携するとともに、JACST(Japan Association for Science and Technology) を通じて国内のサイエンスコミュニケーションの連携を図るなど、効果的な情報発信に取り組んでいる。
- ・ イノベーションの情報発信については、企業との協力による成果物について、企業側から発信することを奨励している。それらの企業からの情報発信を機構から再発信すると効果が高いと考えられるが、一方で特定企業に対する便宜供与と取られないような注意が必要と思われる。

#### 5. 人材の計画的育成と技術の継承

- ・ 従来の Belle 実験から、2017 年度（平成 29 年度）までに 183 名（国内 64 名）が博士号を取得して国内外の学界、産業界で活躍している
- ・ Belle II 実験でも同様あるいはそれ以上に人材を輩出すると期待される。
- ・ 引き続き、小規模の更新・高度化の予定があり、物理解析のみならず、装置に触れるそれらの機会を活かし、人材育成を継続的に行っている。
- ・ 人件費の厳しいなか、外部企業と共同研究し技術発展を行っており、今後もその方針が継続される見込みである。

#### 6. 産業応用の可能性等の追求

- ・ 加速器研究施設において、企業等の研究者と共同で、産業等用加速器のための要素技術開発、実証器の研究開発を推進するとともに、加速器の産業利用の実用化をはかり、加速器の社会貢献に寄与する枠組みを作る検討が進められている。

#### 7. その他

- ・ コラボレーションの組織のみならず、作業現場・運転現場の国際化、加速器 - 測定器間コミュニケーションの国際化などを行い、運転体制を刷新し、若手を含め、様々な研究者が活躍できる頭脳循環拠点を提供している。
- ・ 多国籍参画ラボ事業を開始し、ラボの分室を設置し、二国間事業を推進し、外国人研究者の研究生活支援を充実させ、また、スクール・国際会議開催の支援を行うなど、URAにより機構の研究支援体制を強化している。

#### (5) 共同利用・共同研究を行うための実施体制の状況

- ・ Belle II 測定器の運転・維持費は、機構と他の大学・機関で半額ずつ負担している。他の大学・機関の分担は、物理論文の著者となる参加研究者のうち博士号の学位を有する者の数に比例して配分している。計算機資源の運転・維持については、参加研究者のうち博士号の学位を有する者の数に比例して配分している。運転・維持費の予算は財政委員会(Belle IIの組織)で議論し、各国の財政機関の代表者より構成される外部資金管理委員会に提案し承認されている。さらに、提案された予算及びその執行は、外部監査委員会により精査されている。
- ・ 加速器運転・維持経費については、国際的合意(IUPAPガイドライン)に基づきホストである機構が負担することとなっている。

#### (6) 幅広い研究者が参画できる運用体制の状況

- ・ Belle II 実験では、オープンな運営を心がけており、IB によって承認されれば、Belle IIに興味を持つ研究者は世界のどこからでも参加できる。特に、若手研究者を積極的に測定器や物理解析に関する活動グループのコーディネータやグループリーダーに抜擢し、責任をもって活躍できるような環境が整えられている。

#### (7) プロジェクト推進に当たっての課題

- ・ 目標性能を達成するため、調整・開発研究を継続的に行う必要がある。
- ・ 加速器・測定器を長期安定に運転させ、競争のある中、物理学的成果を上げていく必要がある。
- ・ 予期せぬ故障や放射線による損傷、老朽化に備え、予備機の準備を行っておくことが望ましい。



## 4. 計画の進捗評価と今後の留意点

### (1) 計画の進捗状況を踏まえた評価

CERN の LHC による 13TeV 実験では新粒子の兆候が得られなかったことを受け、相補的かつ競争関係にある Belle II 測定器への国際的な求心力が高まっている。そのような中、Belle II コラボレーションを組織して国際的な運営体制を確立し、その上で加速器の高度化も順調に遂行され、当初計画どおり 2018 年度内にフェーズ 3 運転へ移行する目途を得られていることは評価できる。また、電気料金の高騰による運用経費の増額をはじめとする厳しい財政環境に対しては、電力会社の選定に競争入札を導入すること、運転時間を年間 9 か月から 8 か月に短縮すること、異なる機器間の補用品を共通化することなどに加え、海外分担として、Belle II 建設の約 5 割、測定器運転の約 4 割、計算機運転の約 8 割の拠出を得るに至っており、機構長のリーダーシップの下、機構としては、可能な限り努力していると評価できる。

運営に当たっては、Belle II コラボレーションが組織され、国内外連携機関の代表者からなる参加機関代表者会議において意思決定が行われているほか、財政委員会においては予算案の検討から執行の監視までを行う体制になっているなど、国内外に開かれた体制が整備されていると評価できる。

学術的には、先行する LHCb が高度化のために休止中 であるところ、Belle II において宇宙初期の探索に重要な現象を多数再現し、従来の素粒子物理標準理論を内包する新理論体系の構築への貢献や、それに基づく周辺分野への波及効果などが期待される。既に標準理論からのずれを示唆するような実験結果が得られていることも特筆に値する。こうした成果を着実に上げることによって国際的な求心力がますます高まるものと期待される。

社会的には、特に加速器という精密装置を構成する様々な要素の精度向上や新しい工学的な技術開発などを通じ、例えば、アスファルトの長寿命化や核医学検査薬製剤の開発など、産業界への転換も図られつつある。また、Belle II 初衝突実験の様子インターネット生中継やクラウドファンディングの導入など、社会とのつながりの形成も積極的に行われており、宇宙創成の謎に迫る本プロジェクトの意義と魅力が広く国民の支持につながることが期待される。

以上を総合的に勘案すると、本プロジェクトは概ね順調に進捗していると評価できる。

### (2) 今後の事業の推進に当たっての留意点

#### ① プロジェクト推進によるアウトカムの明確化について

本プロジェクトは Belle II のビーム衝突性能を従来の 40 倍に増強し、従来に比べて数十倍の物理実験データを蓄積することにより、新たな物理法則の発見等を目指すものとして科学的意義は明確である。他方、実験開始以降の進捗状況や達成度を測る指標としては、年次計画上最終年度までに想定される物理実験データの蓄積量というアウトプットのみならず、例えば、大統一理論や現在宇宙論に対し、そのデータ量によって Belle II が果たし得る科学的貢献とどのように関係するかなど、アウトカムとしての達成目標を明確にすることが求められる。このことは、国民や社会からの支持を得る上でも必要である。

## ②国際連携機関との情報共有と協議の徹底について（国際的なプロジェクトとしてのマネジメントの強化）

今後、本格運転期に入り、機構は国際的な約束に基づく計画の履行がより厳格に求められることとなる。他方、厳しい財政環境を踏まえた実験時間の短縮など、ホスト機関として予見される事態について、国際連携機関との事前の情報共有や対応協議を図るなど、国際的なプロジェクトとしてのマネジメントの強化が求められる。このことは、各国の日本に対する信頼の確保に寄与するばかりでなく、約束の不履行に伴う訴訟等のリスクを未然に低減する上でも必要である。

## ③安定的な運転時間の確保について

達成すべき科学目標に対して必要な実験時間を確保するためには、実験時間の縮減を前提とせず、かつ国からの予算措置のみによらない財政の多様化の検討が求められる。例えば、国際的な Belle II コラボレーションにおいて、国際的合意（IUPAP/ICFA ガイドライン）を踏まえつつ、従来費用分担方針によらない新たな方針を設けた上、更なる国際連携機関の参画を得るなど、従来にない財源の確保や所要経費の抑制に係る方策の検討も必要である。また、国内連携機関の分室を誘致した上でクロスアポイントメント制度を利用した柔軟な人材の受入れを図るなど、多様な常駐人材の確保を進めることにより、運転の安定性向上につながることも考えられる。さらに、本プロジェクトが産業界との連携によって成立していることをより一層発信することが求められる。例えば、共同開発した技術やそのスピノフの具体例を、企業名を明示して発信することや、Belle II を取り上げた企業広告を奨励することなどを通じ、企業の力を借りて Belle II、ひいては機構の社会における認知度を高め、その更なる協力を得ていくことが望まれる。このような視点は、本計画の推進を通じ、大学や産業界など当該分野の人材の育成・確保を促進するものであり、研究者コミュニティの発展を担う大学共同利用機関としての機能を高めることにつながるものである。

## ④高エネルギー加速器研究機構における国際対応能力の更なる向上について

国際連携機関をはじめ、海外から多数の外国人研究者を受け入れて推進する国際プロジェクトであり、機構においては、国際的研究拠点として、研究者の受け入れをより柔軟に行う研究環境の整備が望まれる。研究者のみならず、技術職員や事務職員が円滑に外国人研究者とコミュニケーションをとれるよう、業務での英語使用の取組を進めるなど、機構法人における国際対応能力の向上を図る取組が求められる。日本人技術者等の高い技術力がより効果的に発揮されるばかりでなく、そのキャリアパス形成等の観点からも重要である。

## ⑤若手研究者の育成（キャリアパス）について

若手研究者の育成は、特に当該分野において、このような大型のプロジェクトの推進を通じて行われている。このため、今後の推進に当たっては、若手研究者がより大きな責任

を伴う業務に携わり、論文を執筆し、自身の国際的認知度を高められるよう、機構において研究グループと協働して組織的に若手研究者の教育面を支えることが求められる。また、熟達した研究者及び技術者の知識及び技術が、次代を担う若手研究者に確実かつ円滑に継承されるよう、教員、職員の適切な人事にも配慮することが求められる。このことは、若手研究者のキャリアパス形成のみならず、このような大型のプロジェクトの継続性や当該分野の将来性を担保するものと意識して対応すべきである。

なお、本プロジェクトの年次計画については、先般実施機関から申出のあった変更の内容を踏まえつつ、本評価の内容及び我が国の厳しい財政環境を勘案し、本作業部会において審議の上、決定した。また、年次計画上、科学目標 3. 「B 中間子などの精密測定による新しい物理法則の発見・解明」の開始時期である 2019 年度に設定された進捗評価については、今回、Belle II 測定器の本格観測に向けた準備状況等を確認していることから、本評価結果をもってこれに代え、不要と判断した。

## 備考（用語解説等）

### ○ KEK・Bファクトリー（KEKB）

加速器は、電子や陽子などの粒子を光速近くまで加速する装置。電子・陽電子衝突型加速器は、電子と陽電子を逆向きに加速して衝突させ、効率的に素粒子反応を起こす。2010年まで運転したKEKBが達成した衝突性能（ルミノシティ）は、現在でも電子・陽電子衝突型加速器として世界最高記録である。

### ○ B中間子

中間子は1つのクォークと1つの反クォークから構成される粒子。B中間子は反ボトムクォークとアップクォークまたはダウンクォークの組合せから構成される中間子。B中間子は崩壊の過程で大きなCP対称性の破れを示すことが知られている。

### ○ CP非対称性

反粒子の振る舞いは、電荷の符号と空間座標を反転させた粒子の振る舞いと基本的には同じであるが、それらの振る舞いが異なる場合、CP対称性の破れがあると呼ぶ。宇宙から反物質が消えた理由を解明する手がかりとなる。小林・益川理論はクォークと反クォークの振る舞いの違いを標準理論の枠組み内で説明する理論。標準理論を超える新しい物理法則の多くが新たなCP対称性の破れを引き起こす。

### ○ 低エミッタンス陽電子入射システム（ダンピングリング）

リングを周回する電子や陽電子が放射光を放出してエネルギーや運動量を失っていく性質を利用して、ビームの空間的広がりを小さくすることを目的としたリング型加速器。これまでは入射器で生成された陽電子ビームをそのままKEKB陽電子リングに入射していたが、新設したダンピングリングでビームの広がりを極限まで絞って高品質化してから入射することで、SuperKEKBへの入射効率を飛躍的に改善し、衝突性能を向上させることが可能となる。

### ○ 標準理論

素粒子とその反応を記述する理論であり、様々な実験的検証を経て構築された。基本的な構成要素は、物質を構成する3世代（6種類）のクォークとレプトン、力を媒介する4種類のゲージ粒子、さらに素粒子に質量（重さ）を与えるヒッグス粒子である。

### ○ 反物質が消え去った謎

反物質とは、反粒子により構成される物質であり、多くの粒子には対応する反粒子が存在する。例として、陽子の反粒子は反陽子、電子の反粒子は陽電子である。粒子とその反粒子が出会うと両者は消滅してエネルギーだけが残り（対消滅）、他方、エネルギー

一からは粒子と反粒子が生成される（対生成）。本計画においては、世界最高性能の電子・陽電子衝突型加速器を用いて、なぜ、宇宙から反物質が消え、物質のみが存在しているのかという謎を検証する。

#### ○ 大統一理論

素粒子間に働く力で現在知られているものは、重力、強い力、弱い力、電磁力の4種類である。このうち、電磁力と弱い力は高エネルギーでは区別がなく、統一された一つの力（電弱力）で記述されることが分かっている。さらに高いエネルギーでは、電弱力と強い力も統一的に記述され、クォークとレプトンを同等に記述できると考えられ、この理論を大統一理論と呼ぶ。素粒子物理学の大きな目標の一つとなっている。

#### ○ 宇宙暗黒物質

宇宙の物質やエネルギーのうち、通常の物質はわずか4%に過ぎず、残りは見えない物質やエネルギーであると考えられている。このうち光や他の物質とほとんど反応しないために観測できない物質を暗黒物質という。宇宙の全エネルギーの23%は暗黒物質が担っているとされる。

#### ○ 低エミッタンス

ビームの広がりを表す指標。光の場合、完全な平行光線はレンズで一点に絞ることができるのと同様、エミッタンスが低い（広がりが小さい）ビームは衝突点で小さく絞ることができる。高ルミノシティを達成するためにはビームを低エミッタンスにすることが必要である。

#### ○ 電子雲

リングを周回するビームから放出される放射光がビームパイプに当たると、表面から電子（光電子）が飛び出し、それがさらに別の場所に当たると、二次電子が発生する。陽電子ビームや陽子ビームなど、プラスの電荷をもつビームの場合には、これらの電子がビームの周囲に電氣的に引き寄せられ、集団を形成する。これが「電子雲」である。電子雲の密度が高いと、ビームの不安定やビームサイズの増大を引き起こす。

#### ○ RF 電子銃

低エミッタンスのビームを電子リングで蓄積するために必要な、低エミッタンスの電子源を生成するための装置。従来の熱電子銃と比較して格段に低いエミッタンスの電子ビームが得られる。

#### ○ アライメント

加速器のビームを設計軌道に保ち、かつビームの広がりを小さく維持するために、加速器を構成する電磁石や加速空洞などの装置は、加速器の設計に基づいた正確な位置に配置される必要がある。そのため、これらの装置の設置時には、精密測量技術等を用い

て正確に据付けを行う。また据付け後も、地下水位の変化や地震の影響などにより地盤が変動するため、運転停止期間などに各機器の位置を精密に確認・修正することも必要である。このように、機器の精密な配置、またそのための作業をアライメントという。

#### ○ BEAST 実験

Belle II 測定器の受けるビームバックグラウンドの程度によっては、測定器を損傷してしまう恐れがあるため、バックグラウンド量を測定するための測定器 (BEAST II) を用い測定実験 (BEAST 実験) を行った。

なお、同様に、Phase 2 運転中も、Belle II の VXD 検出器の代わりに、VXD 領域にバックグラウンド測定器 (と VXD センサーの一部) を設置し測定実験を行っている。

#### ○ VXD

Belle II 測定器の中心部、ビーム衝突点に最も近い位置に設置される、B 中間子などの崩壊点位置を精密に測定するための半導体検出器。ビームパイプのすぐ外側に取り付けられた 2 層のピクセル検出器 (PXD) と 4 層のシリコンストリップ検出器 (SVD) からなる。

#### ○ IUPAP ガイドライン

IUPAP (International Union of Pure and Applied Physics、国際純粋応用物理学連合) は、1922 年に設立された、世界各国の物理学会や学術アカデミーから構成される国際的な連合組織で、物理学の発展及び同分野での国際協力を目的とする。

IUPAP ガイドラインは、1996 年に採択されたガイドラインで、ICFA ガイドラインを物理学の全分野に拡大したもの。

#### ○ ICFA ガイドライン

ICFA (International Committee for Future Accelerators、国際将来加速器委員会) は 1976 年に設立された、IUPAP のワーキンググループであり、高エネルギー加速器の建設・利用における国際協力や国際協力による超大型加速器の建設に関する諸課題についての検討などを行うことを目的とする。

1980 年に採択された大型加速器の国際共同利用に関するガイドラインであり、ホストする研究所側は加速器やビームラインの運転経費を実験チームには要求しない、とされている。2011 年に運転経費の分担に関して改正され、特に大型国際施設に関しては、そのプロジェクトが認可される前に当事者間で運転経費の分担方法に合意をとる必要があり、その場合でも実験グループに対しては開かれた施設利用を行うとされている。

## 科学技術・学術審議会 学術分科会 研究環境基盤部会

### 学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会 委員等名簿

#### 学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会委員

##### (委員)

栗原和枝 東北大学未来科学技術共同研究センター教授

##### (臨時委員)

伊藤早苗 九州大学名誉教授、九州大学極限プラズマ研究連携センター顧問  
中部大学客員教授

井本敬二 自然科学研究機構理事・副機構長、生理学研究所長

大島まり 東京大学大学院情報学環教授、東京大学生産技術研究所教授

川合知二 大阪大学産業科学研究所特任教授

小林良彰 慶應義塾大学法学部教授、慶應義塾大学社会科学データ・アーカイヴセンター（SU）センター長

鈴木洋一郎 東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構特任教授

原田慶恵 大阪大学蛋白質研究所教授

横山広美 東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構教授

##### (専門委員)

※田村裕和 東北大学大学院理学研究科教授

新野宏 東京大学大気海洋研究所客員教授

松岡彩子 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所准教授

観山正見 広島大学特任教授

安浦寛人 九州大学理事・副学長

#### アドバイザー

相原博昭 東京大学大学執行役・副学長

中野貴志 大阪大学核物理研究センター長

(敬称略、五十音順)

※ 田村委員は、「B ファクトリー加速器の高度化による新しい物理法則の探求」の利害関係者であるため、評価には参加していない。