

KEK スーパー-B ファクトリー計画

① 計画の概要

これまでに学術大型研究計画として支援を受け建設し、2018 年よりビーム衝突運転を開始したスーパーKEKB 加速器とベル2測定器(図1)を用いた国際連携事業を推進し、加速器及び測定器の能力を設計値に向け高めつつ、データを蓄積し、解析し、素粒子物理学・ハドロン物理学分野における研究成果を上げる。

加速器の衝突性能を高めるために、世界で初めて実用化したナノビーム衝突方式の特長を活かして衝突点でのビームの絞り込みを強くするとともにビーム電流を高めるなどの加速器の運転・調整を継続的に行う。また、長期間加速器を安定に運転するために、各種の装置を適切に維持・保守するとともに、改良や増強並びに研究開発を進める。

測定器の能力を十分に発揮するためには、所定の調整・較正作業をする他に、ビームに起因するバックグラウンドを制御するために、高度なモニターとフィードバックを用意し、放射線を防ぐ必要がある。また、長期間放射線を受けることで劣化してしまうセンサーや電子回路を最先端のものに置き換え、さらなる性能向上を図る。ベル時代の倍の効率で事象を完全再構成するなど、物理感度向上のための解析手法の改良を継続する。

期待される物理成果としては、前身のベル実験の50倍以上の衝突事象データから、素粒子標準理論を超える新物理現象を確認し、新物理理論の枠組み及びパラメータを同定することを目標とし、新しい粒子・反粒子対称性の破れの仕組みの研究や、荷電レプトンフレーバーの破れの研究、荷電レプトン普遍性の破れの研究などを行う。また、ベル実験により発見された一連の新複合粒子の研究を更に進める。軽い暗黒物質の探索も可能である。

② 学術的な意義

素粒子標準理論は宇宙の様々な謎を説明するためには不十分であり、標準理論を内包する新しい物理理論が必要である。新物理理論に伴う新素粒子をLHC実験で探索したもの、おおよそ1TeV程度の質量領域で発見されていない。これまで超対称性理論が新物理理論として本命視されてきた理由の一つである、「自然さ」という基盤が弱まり、本命が不在の混沌とした状況になっている。このような状況でスーパーKEKB/ベル2が目指す新物理の間接探索が非常に重要となる。間接探索とは、新素粒子の存在が観測量に与える量子力学的な影響を測定することで、新物理を探索・研究する手法である。ビーム衝突エネルギーは変わらず、データ量を増やすことで、より微小な影響に感度を持ちうるので、新素粒子の質量が高く直接探索で簡単に見つからない、現状のような場合にも新物理の発見が期待できる。強力な実験的インプットを与え、混沌とした理論の中から新物理理論を同定する、あるいは大幅に候補・パラメータ空間を絞り込むことが可能であり、実験的知見によって素粒子物理学の次の方向性を決めるという、ノーベル賞級の研究成果を得ることが期待されている。また、ベル実験で発見された一連の新しい複合粒子の特性を測定し、クォーク・グルーオンによるハドロン構成機序を解き明かすことで、強結合理論の計算方法の飛躍的な進展も期待されるなど、幅広い物理分野において意義が高い。

スーパーKEKBの衝突性能を高めること自体にも、大いなる学術的価値がある。いわゆる「砂時計効果」による衝突点の絞り込みの限界を「ナノビーム衝突方式」により突破し、今後未踏の領域にまで衝突性能を高めることで、今後の加速器科学と素粒子物理学研究の可能性を大いに広げることができる。

③ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

標準理論を超える物理の探索は素粒子物理学の最優先の課題であり、多くの実験がそれを目指している。それらは新物理を多角的に検証する上で相補的な役割を果たす一方で、最初に新物理の証拠を明確にするという意味で競争関係にある。本計画の最大のライバル実験としてLHCb実験が挙げられる。LHCb実験は、LHC加速器による陽子陽子衝突により生成されるbクォークなどの崩壊を観測し新物理を探索するという実験で、物理のターゲットが非常に近い。陽子陽子衝突からは大量のbクォークが生成され、しかも実験はすでに開始されている。いくつかの新物理の示唆を得ているが、まだ確認はされていない。高度化のために2019年から2年間のシャットダウンに入ったところであり、その間にベル2が追いつく必要がある。競争関係の中でベル2、LHCb双方に得意分野があり、その両者は相補的であるともいえる。特に、ベル2は、ニュートリノ、中性K中間子など検出の難しい粒子を反応の終状態に含むような現象の測定も可能である。このように、競争・共同しながらの多角的な観測により、新物理の理解を進めようとしている。

④ 実施機関と実施体制

加速器はKEKが一元的に責任を持つ。世界の加速器科学の識者を集めた国際諮問委員会(ARC)が進捗や方針を評価する。

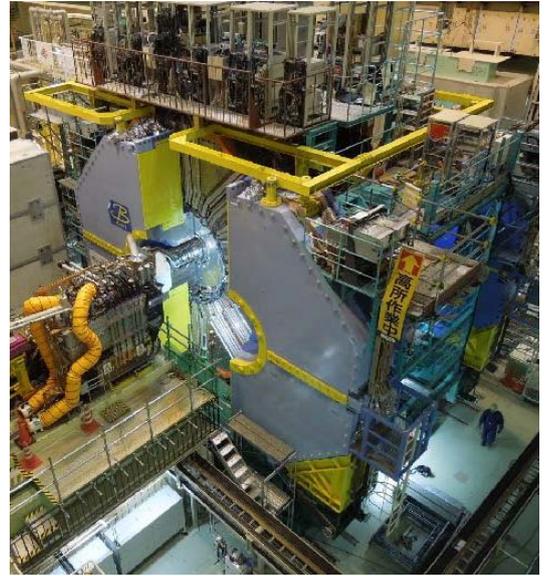


図1 スーパーKEKB 衝突点とベル2測定器

ベル2には、2019年6月現在115の機関が参加する。参加機関の代表が集まる参加機関会議(IB)が決定機関であり、必要な場合投票によって議決を行う。ベル2全体の代表者はメンバーの投票によって選ばれ、プロジェクトマネージャ、財務担当とともにコラボレーションのマネジメントを行う。マネジメントの諮問組織として執行委員会(EB)があり、舵取りに関する議論・相談を行う。マネジメントの下、6名のコーディネータが、それぞれ、測定器、実験、データ処理、ソフトウェア、計算機、物理解析を担当し牽引する。また、財務会議(FB)が国際分担する測定器運転資金の予算立案と決算を行い、計算機運営グループ(CSG)は計算機資源の必要量を見積もり、分担し、実際の貢献を確認する。これらの国際分担のやり方については、コラボレーション内で合意され、各国の財務機関にも承認されている。その他、IBの下には、各種の委員会が置かれ、国際会議登壇者、論文著者、運転シフトと維持業務、広報、多様性について管轄する。KEKは国際諮問委員会(BPAC)を招請し、専門的知見を持った外部有識者がベル2の進捗、計画、決定などについて審議し助言する体制を整えている。

加速器、測定器間では、現場レベルの日常的な数々のミーティングを共同で行うことで情報共有し、意思統一を図っている。マネジメントレベルでは、年2回程度開催されるBファクトリー計画推進委員会に、KEKの管理局、所、施設からの代表者および日本の大学からの委員が集まり、KEK全体としての調整を行うほか、Bファクトリー推進室会議が、毎週～隔週程度招集され、日々の議論と調整を行う。

⑤ 所要経費

総経費 768 億円

運営費：年間 80 億円× 9 年間=720 億円

(年額の内訳)

- 加速器及び測定器の維持、保守、改良 26 億円
- 施設維持、放射線安全、計算機使用料等 10 億円
- 光熱費等 44 億円

建設費 (詳細を後述)：合計 48 億円

(内訳)

- 高周波システム増強 (2021-23) 30 億円
- 入射器の大電流超低エミッタンス化 (2021-23) 8 億円
- ベル2 センサーの更新 (2021-23) 10 億円

測定器やその他の機器を損傷するリスクを最小限に抑え、徐々にビーム電流を高めつつ加速器の調整を行う過程に数年間を要する。その間の運転コストを抑えるため、高周波システムは完全形にしておらず、2023年までに準備し増強する予定である。それに合わせ、入射器の大電流超低エミッタンス化も行う。また、ビーム電流増大に伴って増える放射線の影響で性能を発揮できなくなるベル2の読み出し電子回路やエンドキャップカロリメータを同時期に更新する。外国からは測定器運転資金、計算機資源の他に、センサー更新のための費用約10億円が期待されている。

⑥ 年次計画

本格的な物理実験を開始する2019年以降、年間8ヶ月程度の運転を最低9年間は継続する(図2)。毎年夏季等の運転停止期間には、長期運転のために必要な機器の保守作業や定期検査等を適切に行う。終了時期においても、運転期間・運転経費は電気代等の変化を除きおよそ一定である。ビーム電流やエミッタンスの設計値に到達できるようにするための改変、それに対応する測定器の改変(2023年ごろ)に向けて準備を行う。本計画が成功裏に完了した暁には、ナノビーム衝突方式による衝突性能向上が確立し、衝突型加速器の性能にブレイクスルーがもたらされている。同時に、性能の向上を妨げる要因も明らかになり、それを根本的に解決することでさらなる高みを目指す道筋が見えるものと考えられる。本計画を通じ、そうした技術とアイデアを持つ若い人材が多数育成されるので、次の計画と雇用の受け皿を用意することで、技術を伝承しながらそれを磨いていくことが可能である。物理成果についても、本計画終了時までにはたくさんのことが明らかにされると期待できるが、明らかになることで見えてくる次に解明すべき謎に迫るために、どのような実験をすべきかが判明するものと期待される。このように、本計画から得られる新しい知見を含めることで、日本の素粒子物理学の将来計画の選択肢を増やすことが可能となる。

⑦ 社会的価値

本研究は素粒子物理学という基礎科学を推進するものであるから、未来の人類の生活には不可欠になっている技術の根幹をなす原理を解明するものであるかもしれないが、得られた物理成果が現在の経済的・産業的価値を直接生み出すものではない。一方で、本計画に必要とされる装置・機器は、高度な仕様を満たさねばならず、その製造には挑戦的な技術開発が求められる。請け負った企業と研究者が共同で開発にあたり、製造を可能にする段階で、技術的発展が促される。請け負った企業がその技術を応用して別の製品を開発することにより、社会へ産業的価値を還元している。また、ベル2のような国際連携事業をホストすることにより、若手研究者が重要な役割を担って活躍し、国際感覚を身につけた研究者を数多く育成できる。素粒子物理学のような基礎科学の研究に対して、かねてより日本国民は敬意を払ってくれており、その知的価値を評価する土壌を持っている。今後もその風土を大切に、広く研究成果と知的価値を共有し、交流を続けていく。

⑧ 本計画に関する連絡先

岡田 安弘 (大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構)

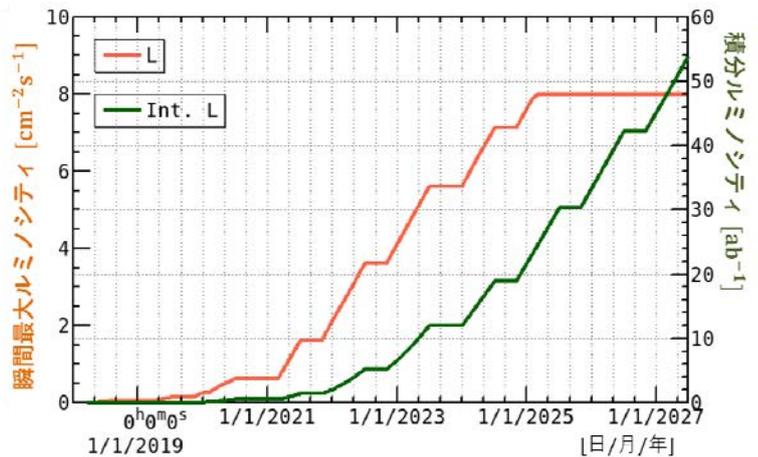


図2 期待する性能向上 (橙) とデータ蓄積 (緑)