

## 2019年-2020年期将来計画委員会報告書

青木 真由美 (金沢大), 石川 明正 (KEK, 幹事), 石塚 正基 (東京理科大),  
市川 温子 (京都大, 委員長), 伊部 昌宏 (東京大), 大谷 将士 (KEK),  
奥村 恭幸 (東京大), 川崎 真介 (KEK), 日下 暁人 (東京大), 阪井 寛志 (KEK),  
坂下 健 (KEK), 佐藤 政則 (KEK), 末原 大幹 (九州大), 谷口 七重 (KEK),  
中浜 優 (名古屋大, 幹事), 南條 創 (大阪大), 身内 賢太郎 (神戸大), 三部 勉 (KEK),  
寄田 浩平 (早稲田大)

2022年(令和4年)3月6日

## 目次

1	序文	3
2	「KEK ロードマップ 2021 策定へのインプット」アンケートのまとめ	3
3	高エネルギー物理学の将来像	5
3.1	勉強会	5
3.2	タウンホールミーティングでのパネルディスカッション	6
3.3	委員による高エネルギー物理学の展望	7
4	先端加速器開発と大学研究室との共同研究	15
4.1	イントロダクション	15
4.2	アンケート報告	16
4.3	タウンホールミーティングでのパネルディスカッション	16
4.4	まとめ	17
5	キャリアパス	18
5.1	任期付きポストの増加について	18
5.2	アンケート報告	19
5.3	海外の事例	19
5.4	タウンホールミーティングでのパネルディスカッション	20
5.5	委員会からの提言	20

## 1 序文

今期の将来計画委員会では、親委員会である高エネルギー委員会より将来計画の策定などの具体的なチャージは与えられず、長期的な観点や、あるいは中小規模実験を含めた将来の方向性を議論し活動することが求められた。そこで、長期的にどういう物理を本当にやりたいのか、そのために、何がリミットしていて何をブレイクしなければいけないのか、さらに可能であればブレイクの芽の候補を真剣に考えるため計 13 回にわたり高エネルギー研究者会議の会員に対してオープンな勉強会を開催した。コロナ禍ということからオンラインでの開催にせざるを得なかったが、かえって各回とも 200 名近い参加者を得て、活発な質疑がオンラインおよび Slack 上で繰り広げられた。3.3 節では、勉強会にもとづいた委員会としての展望を述べる。

加えて、コミュニティの意見分布を調査するために 3 回のアンケートを行った。1 回目は「KEK ロードマップ 2021 策定へのインプット」を主な目的として 2020 年 4 月に実施した。2021 年 6 月から 7 月に掛けて 2 回目および 3 回目のアンケートを行った。2 回目のアンケートでは若手のキャリアパス、特に任期付きポストについて、3 回目のアンケートでは加速器開発についての KEK と大学の間の共同研究について意見を募った。これらの結果については、本報告書の 2 章、4.2 節、5.2 節にまとめる。

最後に活動のまとめとして、タウンホールミーティングを 2021 年 10 月 16 日に行った。残念ながら、これもオンラインでの開催となったが 170 名を超える参加者のもと、

1. 高エネルギー物理の将来
2. 先端加速器開発と大学研究室との共同研究
3. キャリアパス、特に任期付きポストの増加

について議論した。

本報告書は、これらの活動にもとづいたまとめである。

なお本委員会の活動全般について

<https://agenda.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/indico/conferenceDisplay.py?confId=1689>

で資料を閲覧することができる。

## 2 「KEK ロードマップ 2021 策定へのインプット」アンケートのまとめ

「KEK ロードマップ 2021 策定へのインプット」を主な目的として、2020 年 4 月 2 日から 5 月 8 日の間に Web アンケート形式で実施した。質問内容は、分野の現状や将来を考える上で重要な以下の項目についてである。

- 基幹プロジェクト（J-PARC, SuperKEKB/Belle II, LHC/ATLAS, Hyper-K, ILC）につ

いての意見

- 自身の進めているプロジェクト
- 国内で新規に始めるべき実験
- 今後解決すべき重要な技術的課題
- KEK に期待する役割
- その他、将来計画についての意見

高エネルギー物理学研究者会議会員だけでなく、近隣分野の研究者も含めて、教授 19%、准教授・講師 26%、助教 20%、PD14%、学生 15% と、幅広い層から合計 100 名（約 8 万字）の回答が集まった。個別の回答内容の詳細については脚注<sup>\*1</sup>の URL に置かれている（パスワードは【hecforum:08204】を参照）。以下、簡単に各質問項目に関する調査結果を報告する。まず、複数の基幹大型プロジェクトを共存させ、新しい物理現象の探索を網羅的に推進できていることは世界的に見ても貴重であり、今後も着実に進めるべきという強いサポート意見が多くの研究者から得られた。一方で、個々のプロジェクトのビームタイムやパーソンパワーの不足が深刻になっているため、優先度の明確化、国内外の新しいリソースの開拓、共通技術の有効活用、大学等との人材交流を強く推進して欲しいという意見も多く寄せられた。特に ILC については、実現時期の不透明性や他プロジェクトとの共存の難しさを打開するためにも、コミュニティ全体との連携をさらに深める必要があることが指摘された。また、ILC が実現しない場合も想定し、分野の将来戦略の見直しもするべきという生産的な批判も数多く寄せられた。国内で新規に始めるべき実験提案に関しては、主に将来の基幹プロジェクトの基盤となる加速器技術開発と実用化研究の重要性、特に超伝導空洞、強磁場磁石、超冷  $\mu$  加速、レーザープラズマ加速等の技術をさらに発展させていくことへの期待が多かった。また、既存施設を（再）利用した小規模かつ低予算でできる実験の拡充（ビームダンプ実験や SuperKEKB の後継実験等）や、アクシオンや暗黒物質探索等の非加速器実験への積極的な拡大も望まれている。今後解決すべき重要な技術的課題としては、新しい加速技術の開拓、測定器の先端化（高速、軽量、高効率、高放射線耐性等）、量子技術・AI の利用による計算技術や電子回路の開発が挙げられる。また、多くの研究者がエネルギー・コスト削減、カーボンニュートラルの実現等の地球環境や安全に関する社会的情勢に応じた対応をより強化し、分野の垣根を超えた先端研究を行うことが重要であると考えていることがわかった。KEK に期待する役割については、現行プロジェクトの強力な推進、ILC 実現に向けた中核的役割、先端加速器開発、将来に向けた拡大戦略（非加速器実験の参入含む）、大学共同利用施設としてテストビームラインや放射線照射施設等の共有設備の充実、質の高いエンジニアの拡充、国際研究所としてのグローバルな研究支援の継続、人材交流や若手雇用の活性化等、多岐にわたっている。これらの要望は 2020 年 5 月 20 日に開催された KEK 素核研研究計画委員会にて「KEK ロードマップ 2021 策定へのインプット」として報告された。今回のアンケート結果は、コミュニティからの KEK へのインプットという当初目的を超えて、今後の高エネルギー物理学全体の将来の議論（例えば 2017 年将来計画委員会答申の改訂）

---

\*1 <https://agenda.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/indico/conferenceDisplay.py?confId=1464>

の際にも、積極的に活用できるものである。

## 3 高エネルギー物理学の将来像

### 3.1 勉強会

以下の勉強会を行った。

1. エネルギーフロンティア (2020年4月30日)
  - ハドロンエネルギーフロンティア 中浜 優 (名古屋大学)
  - レプトンエネルギーフロンティア 末原 大幹 (九州大学)
2. インテンシティフロンティア (2020年6月4日)
  - J-PARC 加速器 栗本 佳典 (KEK 加速器)
  - 加速器長基線ニュートリノ振動 坂下 健 (KEK 素核研)
  - K 稀崩壊 南條 創 (大阪大学)
3.  $B$  の物理とミュオンコライダー (2020年7月16日)
  - ルミノシティに限界はあるか? - SuperKEKB 加速器 - 大西 幸喜 (KEK 加速器)
  - $B$  の物理 石川 明正 (KEK 素核研)
  - ミュオンコライダーってどれくらい難しいの? 大谷 将士 (KEK 加速器)
4. 宇宙観測 (2020年9月30日)
  - 宇宙観測 (CMB) から素粒物理へのインプット 日下 暁人 (東京大学)
  - 宇宙観測 (CMB 以外) から素粒物理へのインプット 大栗 真宗 (東京大学)
5. 理論その1 (2020年11月9日)
  - 暗黒物質模型 伊部 昌宏 (東京大学宇宙線研究所)
  - Baryogenesis 永島 伸多郎 (東京大学宇宙線研究所)
6. EDM と中性子 (2020年12月7日)
  - EDM 理論 山中 長閑 (ケネソー州立大学)
  - EDM 実験 川崎 真介 (KEK 素核研)
  - 中性子基礎物理 北口 雅暁 (名古屋大学)
7. 加速器その1 (2021年1月27日)
  - FCChh など次世代ハドロンコライダー 中本 建志 (KEK 超伝導低温工学センター)
  - レーザープラズマ加速 細貝 知 (大阪大学産業科学研究所)
  - THz 加速、誘電体加速 吉田 光宏 (KEK 加速器)
8. 加速器その2 (2021年3月9日)
  - ILC などの次世代電子コライダー 道園 真一郎 (KEK 加速器)
  - 超伝導加速空洞の開発 - 高性能化への挑戦 - 梅森 健成 (KEK 加速器)
9. 理論その2 (2021年4月22日)

- Precision measurement で探る新物理 北原 鉄平 (名古屋大学)
10. ミューオン・タウ (2021 年 5 月 31 日)
- ミューオン 三部 勉 (KEK 素核研)
  - タウ 早坂 圭司 (新潟大学)
11. 陽子崩壊・ $0\nu\beta\beta$ ・暗黒物質 (2021 年 6 月 10 日)
- 陽子崩壊 石塚 正基 (東京理科大学)
  - $0\nu\beta\beta$  市川 温子 (東北大学)
  - 暗黒物質 身内 賢太郎 (神戸大学)
12. 理論その 3 (2021 年 7 月 8 日)
- Particle physics from string compactification: origin of flavor structure 小林 達夫 (北海道大学)
  - Recent Progress in the Swampland Program 野海 俊文 (神戸大学)
13. 測定器開発フロンティア (2021 年 8 月 28 日)
- 検出器開発フロンティア
    - 測定器開発室とテストビームの現状と展望 花垣和則 (KEK 素核研)
    - 光センサー・シンチレーター周辺の最新状況レビュー 横山 将志 (東京大学)
    - シリコン検出器周辺の最新状況レビュー 外川 学 (KEK 素核研)
    - MPGD/TPC 検出器周辺の最新状況レビュー 坂下 健 (KEK 素核研)
  - ASIC・エレクトロニクス開発フロンティア 岸下 徹一 (KEK 素核研)
  - 量子コンピューター・量子センサー 寺師 弘二 (東京大学素粒子物理国際研究センター)

### 3.2 タウンホールミーティングでのパネルディスカッション

実験分野から浅井祥仁氏 (東京大学)、後田裕氏 (KEK)、中家剛氏 (京都大学)、森俊則氏 (東京大学 ICEPP)、山中卓氏 (大阪大学)、市川温子氏 (東北大学)、理論分野から兼村晋哉氏 (大阪大学)、北野龍一郎氏 (KEK)、濱口幸一氏 (東京大学) をパネラーに迎え、パネルディスカッションを行った。経験豊富なパネラーによる率直な考えが紹介され、参加者には大いに刺激になり、将来の研究の方向性を考える良い機会となった。

1. 「新物理の次のエネルギースケールはどこか？」のテーマでは、理論分野からのパネラーを中心に議論が行われ、以下のような意見があげられた。
  - ヒッグス粒子が標準模型通りに確認されていることが近年の大きな進展であり、今後はヒッグス粒子の測定精度を向上すべきである。特にヒッグス自己相互作用の高精度測定に期待する。
  - 希望的観測では TeV スケールにあるが、 $10^{18}$  GeV まで何もない可能性もある。理由付けができるのは TeV スケールである。
  - TeV スケールにあると考える。アクシオンや大統一理論の探索に期待したい。(大統一

理論については、結合定数の統一よりももっと深い統一性が存在する可能性も指摘され、その場合は弦理論や余剰次元が実在する場合に陽子崩壊の寿命が短くなるといった意見もあげられた。)

- TeV スケールが第 1 候補だが、標準模型と弱く結合している MeV スケールの新粒子にも期待している。
  - 「TeV スケールとはどこまでを指すか？」という質問には、1 TeV から数 TeV の範囲に回答が集まった。
2. 「高エネルギー物理学の将来像」のテーマでは、実験分野のパネラーから以下のような意見があげられた。
- 標準模型や標準模型を超える物理 (BSM) に拘らず、時空や真空など大きな枠組みで考えることも必要である。素粒子の観点から重力についても考える時期である。
  - しっかりとした基幹計画を持ち、CERN とは独立に存在感を出して成果を出す必要がある。現実的には CERN に対抗して巨大円形加速器を目指すよりもレプトンリニアコライダーに可能性があると考えられる。
  - 多様な測定と新しい観測が重要と考える。例として、ニュートリノを含む多彩なフレーバー物理や稀崩壊 (陽子崩壊) 探索、宇宙観測から探る素粒子の研究などが挙げられる。大型プロジェクトと小型プロジェクトのバランスが大事である。
  - 次の物理がどのエネルギースケールにあるかを考えるよりも、実験でどこまで到達できるかを考えるべき。重要な物理を自分で理解し、それを探索できるプローブを見つけることが必要。人脈を作り、エキスパートの協力を得て実現していく。
  - いくつかのアノマリーはあるが、不確定な時代であり、ゼロから考え直す機会である。研究の種はあるので、自由な発想をし、アイデアを試せる若手研究者を育てる必要がある。
  - 量子エンタングルメントから生まれる時空や重力など、量子力学の原理から考えてみるのも面白い。トップダウンのアプローチで陽子崩壊、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の探索や、量子力学の検証などに興味がある。
  - 「どのような加速器が欲しいか？」という質問には、「ユーザーが使いやすく色々なアイデアを試せる加速器」、「ブレイクスルーの期待できる新しい加速器技術」などの意見が出された。

### 3.3 委員による高エネルギー物理学の展望

#### 3.3.1 背景

高エネルギー物理学は、既知の粒子の性質の精密測定により高いエネルギー物理の寄与を捉えるという手法と、エネルギーフロンティア加速器による新粒子の直接生成、検出という手法により発展してきた。現代の加速器エネルギーフロンティアである LHC において、これまでのところ標準

模型を超える新粒子は見つかっていない。しかし標準模型がいろいろな意味で不十分な理論であることは明らかであり、さらに高い衝突エネルギーの加速器の実現と、標準模型粒子の性質のさらなる精密測定が必要である。

フェルミオンとボソンとを入れ替える超対称性 (SUSY) を課した超対称性模型は、標準模型の不十分さのうち階層性問題や暗黒物質の問題を解決可能とする模型である。超対称性粒子は TeV スケール程度までにあると期待されていたが、現在のところそのような新粒子の発見には至っておらず、その兆候も観測されていない。さらにヒッグス粒子の質量が 125 GeV であることを踏まえると、超対称性が破れるスケールは電弱対称性が破れるスケールよりも遥かに高い可能性がある。よって両スケールの中に新たに“小さな階層性”があることを示唆する結果となっているが、超対称性模型は暗黒物質を内包しており、また SUSY を導入した大統一理論ではゲージ結合定数が統一されるなど、依然として魅力のある模型であり、エネルギーフロンティア実験をはじめ様々な実験における超対称性探索は重要である。

大統一理論では、標準理論のゲージ群を含むより大きなゲージ対称性を持つ構造に埋め込むことで、電弱相互作用と強い力の統一、クォークとレプトンの統一を実現している。大統一理論は、電荷の量子化や原子の中性性のような基本的な問いに自然な答えを与える一方で、バリオン数の破れ、すなわち陽子の崩壊を预言する。これまでの陽子崩壊探索実験による  $p \rightarrow e^+ + \pi^0$  モードの陽子寿命の下限  $10^{34}$  年は統一理論スケールの下限  $10^{15.5}$  GeV 程度に対応している。これは超対称標準模型において電磁力、弱い力、強い力の結合定数が収束するよう見えるエネルギースケール  $10^{16}$  GeV 程度に迫るものである。一方で、近年では超対称性に基づかない大統一模型や、多段階でゲージ対称性が破れる模型などの再考察が進められてきており、 $p \rightarrow e^+ + \pi^0$  以外の様々な崩壊モードの探索も重要となってきた。

超弦理論は重力相互作用を含むすべての相互作用、およびクォーク、レプトン、ヒッグス粒子の統一理論の有力候補であり、超弦理論から現実の 4 次元標準模型を導くことができるかどうか、さらには暗黒物質など標準模型を超える物理を説明できるかどうかは重要な問いである。その中において、フレーバー構造の起源はコンパクト空間にある可能性が考えられることから、フレーバーの精密実験はコンパクト化の方法を取捨選択するのに役立ち非常に重要なものである。一方で、整合性のある弦理論に組み込むことができない低エネルギー有効理論 (スワンプランド) もある。どのような低エネルギー有効理論が量子重力理論に由来するのか、その満たす条件はインフレーションや暗黒物質、ニュートリノなどの理解を深めることで調べられると期待されており、それらの実験や観測は弦理論の理解にとって非常に重要である。

### 3.3.2 加速器エネルギーフロンティア-新粒子、電弱真空構造-

現在の加速器エネルギーフロンティア実験は、ヒッグス粒子の精密測定、暗黒物質等を含む新物理に関わる粒子の直接探索、トップや W/Z などの重い粒子の精密測定などにより、TeV スケールの物理を探っている。現行の LHC およびそのアップグレードである High-Luminosity LHC (HL-LHC) の確実な遂行と、次世代計画である ILC 等の電子陽電子ヒッグスファクトリーを実現し、そこで得られた経験、知見をもとに、100 TeV 級のハドロンコライダー、TeV 級の電子陽電

子コライダーなどの次々世代の計画へとつなげていく展望である。

ハドロンコライダーでは最高エネルギーを活かし、TeV スケールの多彩な物理が研究展開されている。CERN の LHC プロジェクトは 2008 年から 2025 年まで稼動予定であり、現在建設中の HL-LHC プロジェクトは 2029 年から約 10 年間稼動予定で重心系エネルギー 14 TeV の陽子陽子衝突データを  $3000 \text{ fb}^{-1}$  の高統計データを取得予定である。立案中の次期将来計画としては、重心系エネルギーが 27 TeV の High-Energy LHC の他に、円周 100 km の新しいトンネル建設により実現する 100 TeV の Future Circular Collider がある。これらは大規模プロジェクトゆえに、研究戦略や優先度を組織的に議論実装しており、詳細情報は 2020 年の欧州戦略アップデートを参照されたい。

今後の物理主題としては、高輝度高統計データを活かして、未知なる位相空間や稀な事象を探索することで、電弱ヒッグス機構および真空構造の解明、ならびに標準理論を超える物理探索を展開する。HL-LHC では第 3 世代フェルミオンやゲージボソンでのヒッグス湯川結合の測定精度は 1 ~ 3 %、第 2 世代ミュー粒子では 4 % と期待され、質量起源や世代の謎を精査する。さらに、ヒッグス場の形状を特徴付けるヒッグス粒子自己結合定数は HL-LHC では精度およそ 50 %、トップクォーク質量は超高精度 (0.2-1.2 GeV) で測定可能となり、ヒッグス場構造や真空相転移の謎を精査する。新粒子の直接探索では、超対称性粒子探索 (特に電弱セクター)、新しい方向性であるダークセクターや微弱な相互作用をする新粒子探索、その他、多彩な新粒子探索 (複合ヒッグス粒子、レプトクォーク、新共鳴状態など) を行う。

次世代レプトンコライダーである重心系エネルギー 250 GeV 付近のヒッグスファクトリーは、低バックグラウンド、四元運動量保存という二つの大きな特徴により、ハドロンコライダーと相補的に TeV スケールの物理を探索する。ヒッグスと  $W/Z/b/c/g/\tau$  との結合定数の決定精度では HL-LHC 感度に比べて 5-10 倍程度高い感度を有する。またモデル非依存な断面積測定や崩壊幅の測定と合わせて、拡張ヒッグスセクターをもたらす多くの TeV 新物理の識別が可能となる。重心系エネルギー 500 GeV では、ヒッグス自己結合定数を 20-30%, 1 TeV では 10% 以下の精度で測定することが可能である。なお 500 GeV を越えるエネルギーを  $e^+e^-$  衝突で実現するには線形加速器が最適である。新物理直接探索においては、最も軽い新粒子の質量が縮退している場合等ハドロンコライダーでは難しい探索が可能である。また 350 GeV 付近へのアップグレードと threshold scan を用いればトップクォークの質量測定を 0.1 GeV 以下の精度で決定でき、 $W/Z$  等の電弱精密測定を通した 1 ~ 10 TeV の新物理探索が可能である。ヒッグスファクトリーの実現は世界の高エネルギー物理の最重要課題の一つである。

### 3.3.3 加速器インテンシティフロンティア その 1-フレーバーの物理-

$B, D, K$  メソンなど重いクォークを含むフレーバー精密実験では、小林・益川行列やフレーバー非保存過程、CP 対称性の破れ、レプトンフレーバー普遍性などの測定が行われ、そのなかでいくつかのアノマリーが報告されている。アノマリーは新物理の方向性を決めるため、今後の精密実験による検証は極めて重要である。

小林益川行列では、 $s \rightarrow d$  のクォーク遷移が強く抑制されている一方で、新物理では必ずしも

同様の抑制が効くとは限らず、その場合は  $s \rightarrow d$  遷移により 100 TeV を超える新物理の寄与も検出可能である。またクォークフレーバ遷移に現れる  $CP$  の破れを通して標準模型では説明できない  $CP$  対称性の破れを探索できる。K 中間子の稀崩壊  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  は、標準模型では分岐比が  $3 \times 10^{-11}$  と強く抑制され、かつ理論的な不定性が 2% 以下と小さいため、こういった新物理の寄与に敏感である。日本では J-PARC KOTO 実験がこの崩壊を探索中であり、 $O(10^{-11})$  の分岐比の感度を目指している。将来は、J-PARC のハドロン実験施設を拡張して KOTO step-2 実験を行うことを計画しており、標準模型での分岐比であれば  $O(10)$  事象を観測し、より高い感度で新物理の探索を目指す。海外では、 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  の分岐比を測定する CERN NA62 実験が進行中である。将来は CERN でも  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  を KOTO step-2 と同等の感度で探索する KLEVER 実験の計画がある。これらの実験では、より高い K 中間子ビームフラックスが必要であり、検出器開発と共に、加速器のビーム強度増強が重要である。J-PARC では、応答が速くかつ省電力な電磁石電源を導入中であり、ビームの高繰り返し化により、ビーム強度を上げる。強度増強には、安定でビーム損失の少ない加速器パラメータも重要であり、数値計算による探索が成果を挙げている。

$B$  中間子はツリーダイアグラムが  $|V_{cb}|$  で抑制されており、ループダイアグラムの寄与が他の中間子と比較し大きいため、ループの中に回る新粒子の寄与が大きく出やすい。また、第三世代の  $b$  クォークは重いため、新物理での  $t$  クォーク・ $b$  クォークパートナーや新たなヒッグス粒子に敏感であり、現象論の計算も比較的精密に行える。しかし、興味ある崩壊への分岐比は低いため膨大な数の  $B$  中間子が必要である。SuperKEKB/Belle II 実験は KEKB/Belle 実験の 50 倍のデータを取得する事により、新物理を探索する。 $B^0 - \bar{B}^0$  混合に現れる新物理を探索するには、ユニタリティ三角形の 3 つの辺と 3 つの角を全て精密に測定する必要があるが、Belle II 実験は世界で唯一 6 つの観測量を精密測定することができる。それらの測定から 1 ループの新物理であれば 200TeV まで、SUSY であれば 10TeV 程度まで制限をかけることが可能である。 $B \rightarrow X_s \gamma$  崩壊や  $B \rightarrow \tau \nu$  崩壊は新物理の荷電ヒッグス粒子に感度があり、荷電ヒッグスによる寄与の振幅の絶対値と位相が得られることから、宇宙の物質・反物質非対称性を解決するための情報を得ることができるかもしれない。電弱バリオジェネシスでは、サハロフの 3 条件を (1) 標準模型に存在する量子アノマリーによるバリオン数の破れ、(2) 新物理による  $CP$  の破れ、(3) 拡張ヒッグスセクターでの一次相転移による熱的非平衡により満たし、現在の物質・反物質非対称性を説明する。 $B$  中間子崩壊から第 2 条件と第 3 条件に関する知見を得られる可能性がある。現在、 $B$  中間子でレプトン普遍性の破れのアノマリーが 2 つの崩壊  $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$  と  $B \rightarrow K^{(*)} \ell \ell$  で測定されている。これらの崩壊は Belle II 実験では精密かつ系統誤差を十分小さく抑えた測定が可能であり、もし中心値が変わらなければ 2020 年代半ばにアノマリーを確立する事が可能である。そのためには SuperKEKB/Belle II の高度化を適切に行い、背景事象が少なく安定した運転を長期間行う事が必須である。

ミューオンやタウレプトンについては、荷電レプトンフレーバー保存則を破る稀崩壊過程 (cLFV) や双極子能率に新物理の効果が顕著にあらわれ得る。ミューオンの異常磁気能率 ( $g - 2$ ) については、2021 年にフェルミ国立研究所が新しい結果を発表し、標準理論の予想値よりも大きいとする先行実験の結果を確認した。これに対しては MeV 程度から TeV スケールにわたる新粒

子が寄与する様々な新物理模型が提案されている。今後はこの結果を実験・理論の双方で検証することが重要である。PSI の MEG II 実験は、ミューオン崩壊過程  $\mu \rightarrow e\gamma$  を先行実験より一桁高い感度で探索を行うことを目指して準備が進められており、エンジニアリングランが進行中である。J-PARC の COMET 実験はミューオン-電子転換過程を先行実験より 4 桁高い感度で探索する。現在建設が進行中で準備が進んでいる。J-PARC の  $g-2/EDM$  実験は、フェルミ国立研究所とは独立な手法でミューオン  $g-2$  の精密測定を行う唯一の実験である。これまでに設計が完了し、一部建設が進んでいる。SuperKEKB/Belle II ではタウレプトンの LFV 崩壊と電気双極子モーメント (EDM) を唯一探索出来る実験である。SuperKEKB/Belle II では KEKB/Belle より一桁程度高い感度で LFV と EDM の探索を行う。また、SuperKEKB で電子の偏極を検討し始め、これによりタウレプトンの  $g-2$  を精密に測定する事が可能になる。

$CPT$  定理のもとでは、 $CP$  対称性が破れているのであれば、時間反転対称性も破れる。素粒子が有限な EDM を持つ場合、時間反転対称性は破れている。測定された中性子の EDM の上限値から、QCD 真空構造に起因する  $CP$  対称性の破れが不自然に小さいことがわかっており未解決の問題であるが、このような QCD の真空構造に起因する  $CP$  対称性の破れがないとすると、標準模型による EDM の計算値は中性子の場合  $\sim 10^{-32}$  e cm、電子の場合は  $\sim 10^{-40}$  e cm 等、現在の実験では測定不可能なほど小さい。一方、SUSY やマルチヒッグス模型を仮定すると大きな EDM が導出される。中性子、電子、ミューオン、原子核、陽子等様々な系で探索されているが、これまでに有限の EDM が観測されたことは無い。次世代の中性子 EDM 実験は 2020 年代半ばに  $10^{-27}$  e cm の感度での測定を目指している。もしこの感度まで中性子 EDM が見つからなかった場合、 $CP$  位相が最大限に破れた SUSY を仮定すれば 50 TeV 程度までの制限をつけることが可能である。EDM は新物理の探索とその機構解明にとって強力なプローブである。

中性子は電荷を持たず、約 15 分という長い寿命を持つ。電氣的相互作用の影響を受けないため、それ以外の相互作用の精密検証に適したプローブでもある。ビッグバン元素合成、CKM 行列ユニタリティの検証に重要な中性子の寿命について、超冷中性子を用いたボトル法と中性子ビームを用いたビーム法とで測定値が有意に異なっている。相互検証が必要であり、J-PARC でビーム法による精度向上が行われている。複合核反応では  $CP$  対称性の破れが増幅される可能性があり、複合核の取り扱いを実験的・理論的に確かめる研究が進行中である。バリオン数の破れに感度のある中性子・反中性子振動実験や、重力の研究、ダークエネルギーなどの未知相互作用の探索にも中性子はいられている。

### 3.3.4 加速器インテンシティーフロンティア その 2-ニュートリノ混合-

非常に軽いニュートリノ質量は、非常に重い右巻きマヨラナニュートリノがシーソー模型を通して顕れている可能性がある。クォークセクターとは全く異なる混合行列も、同じ理由によるのかもしれない。ニュートリノ振動実験でレプトンセクターの混合行列の精度を高める、あるいはニュートリノの三つの質量の順序を決定することで、大統一理論の対称性やフレーバー対称性など高いエネルギースケールの情報を得ることが可能である。

ニュートリノ三世代混合によるレプトン  $CP$  対称性の破れの大きさは、混合行列の非対角成

分が大きいためにクォークの場合に比べて 2~3 桁大きい可能性がある。レプトジェネシスでは、ニュートリノがマヨラナ粒子であるという仮定のもとに、宇宙初期にニュートリノが  $CP$  対称性を破ることで、物質・反物質の非対称性を生成する。この場合の  $CP$  対称性の破れには重い右巻きニュートリノも含めて何種類かの複素位相が関与し得るが、ニュートリノ振動実験で観測できるレプトン  $CP$  対称性の破れだけでも、その大きさによっては宇宙の物質・反物質の非対称性を生じさせることが可能であるとされている。現在進行中の T2K 実験の結果は  $CP$  対称性が大きく破れていることを示唆しており、その場合は今後数年で破れを確定する可能性がある。建設が進められている次期加速器ニュートリノ振動実験（日本のハイパーカミオカンデ実験、米国の DUNE 実験）では、 $\delta_{CP}$  の広い領域にわたって  $CP$  対称性の破れを検証し、またその大きさの測定を行うことが可能である。このように混合行列の精密測定と  $CP$  対称性の破れの探索を進めるためには、さらなるビームの大強度化やニュートリノと原子核の反応の理解も重要である。

### 3.3.5 非加速器フロンティア-大統一、暗黒物質-

陽子崩壊探索は大統一理論を最も直接的に検証するプローブである。陽子崩壊の探索には超大型の検出器が必須であり、国際共同研究により長期的に準備を進める必要がある。現在、主要な崩壊モードである  $p \rightarrow e^+ + \pi^0$  と  $p \rightarrow \bar{\nu} + K^+$  に高い感度を持つハイパーカミオカンデの建設が進んでいる状況であり、次の将来計画はその結果を見ながら議論すべきである。ハイパーカミオカンデでは、10 年（20 年）の観測で  $p \rightarrow e^+ + \pi^0$  崩壊モードに対しては  $6 \times 10^{34}$  年（ $10^{35}$  年）、 $p \rightarrow \bar{\nu} + K^+$  崩壊モードに対しては  $2 \times 10^{34}$  年（ $3 \times 10^{34}$  年）までの範囲を探索可能である。海外の実験との比較では  $p \rightarrow e^+ + \pi^0$  崩壊モードについては、ハイパーカミオカンデの測定感度が DUNE に比べて一桁程度優れている。 $p \rightarrow \bar{\nu} + K^+$  崩壊モードについては、 $p \rightarrow e^+ + \pi^0$  崩壊モードに比べて差が小さいが、JUNO や DUNE に比べて、ハイパーカミオカンデが感度で上回る。

ニュートリノが中性であり、また有限だが他の素粒子よりも 6 桁以上小さな質量を持つことは、重い右巻きニュートリノなどの高いエネルギースケールの物理の存在を示唆している。その示唆が本当であるならば、宇宙における物質・反物質の非対称性の起源を説明するレプトジェネシスがより有力になる。この示唆を強固にする、あるいは反証するためにニュートリノなし二重ベータ崩壊探索 ( $0\nu\beta\beta$ ) を行いニュートリノのマヨラナ性を検証することが極めて重要である。現在、 $0\nu\beta\beta$  に有効なニュートリノ質量として KamLAND-Zen 実験により 165 meV という上限値が得られているが、マヨラナ性をほぼ否定するのに必要とされる感度は、ニュートリノの質量パターンが逆質量順序の場合で 15 meV 程度、標準質量順序の場合で 1 meV 程度である。ただし 15 meV の感度があれば、標準質量順序の位相空間の半分程度をカバーすることはできる。崩壊の寿命は、有効質量の 2 乗に反比例するため、15 meV に到達するためには、実験の感度を現状から 2 桁向上させる必要がある。まずは、これを目指した実験技術を確立するべきである。

宇宙暗黒物質は、宇宙観測から提示された現代の素粒子の大きな謎の一つである。その候補の一つである Weak-Interacting-Massive-Particle(WIMP) は、宇宙初期での生成以降、対消滅・フリーズアウトを経て現在の存在量を自然に説明可能なため、有力な候補として多くの探索実験が行われている。SUSY などで予言される「自然な」WIMP は LHC 実験などで制限が厳しくなってい

るが、質量領域を広げた探索は依然として重要である。直接探索実験では、地下環境などで低バックグラウンド検出器を用いて原子核反跳をプローブとする。これまで2相式液体キセノン検出器を用いた実験が直接探索をリードしており、数年でXENONnTやLZ実験によって核子との散乱断面積について $2 \times 10^{-48} \text{cm}^2$ までの探索が予定されている。その後、大質量化・低バックグラウンド化を推し進め、ニュートリノと原子核とのコヒーレント散乱がバックグラウンドになる「ニュートリノフロア」までの探索が目標となる。また、暗黒物質発見の強い証拠、発見後の正体解明のための強力な手段として、方向に感度を持つ探索も重要であり、検出器開発が進められている。

### 3.3.6 加速器技術フロンティア

将来の高エネルギー電子陽電子のHiggsファクトリーとして現在提案されているものはILC, CLIC, FCC-ee, CEPCである。2020欧州素粒子戦略アップデートにはILCとFCC-eeの2つの記載がある。日本におけるタイムリーなILCの実現はこの戦略に適合するものである。ILCの技術的課題のうち超伝導加速空洞については31.5MV/mの高加速勾配超伝導加速空洞の歩留まりを上げたうえでの量産化(後述)が課題であるが、それ以外にもナノビーム生成、また大強度の陽電子ビーム生成とその大強度ビームダンプの作成が課題となっている。これらの技術的課題を人材を育成しながら、早急にクリアにしていくことがILC実現には重要である。

超伝導加速空洞は空洞表面抵抗をほぼ0(高Q値化)にすることで、空洞ロスを抑えることが可能であり、常伝導加速器では実現できない高加速勾配で大電流のビームを高効率に加速することを可能としている。特に近年、その高Q値や高加速勾配の性能向上が世界的に進んでおり、ILCのみならず、X線FEL用の加速器(Euro-XFEL, LCLS-IIなど)や陽子、重イオン加速器(FRIB, PIP-IIなど)のNbベースの超伝導加速器を用いた大強度ビームの大型加速器の建設が積極的に行われている。このように大型加速器への超伝導加速空洞の製作継続があって、量産化の体制は確保されてきている。高Q値のR&Dとしては、10年前に比べ、窒素ドーピング、磁束排斥技術の向上、真空炉による温度最適化(Mid-Tベーキング)などの技術開発が進み、中領域の加速勾配(15~25 MV/m)で従来の3~5倍以上もの高Q値を実現している。さらに高加速勾配では窒素インフュージョン技術の他、新たにベーキングの温度を2段階にする2-stepベーキング技術により、40~45 MV/mの空洞性能を実現している。Nb以外の新たな超伝導材料を用いた空洞開発としては、Nb<sub>3</sub>Snの超伝導空洞の開発が行われている。このNb<sub>3</sub>Snの超伝導加速空洞が実現されれば、大型He冷凍機を用いない小型の加速器を実現することが可能である。さらに超伝導空洞内面に多層膜層を形成することで加速空洞の高加速勾配化の可能性も提案されている。具体的には、Nb<sub>3</sub>Snなどの高温超伝導材の膜厚をコントロールすることで、100 MV/mの高加速勾配の多層膜空洞の可能性も提案されている。高エネルギー実験にとって、大電流ビーム加速の実現は現在超伝導空洞でのみ実現できるものであり、これらの超伝導空洞の技術開発を継続するとともに、高Q値、高勾配のR&D、さらに将来を見据えたNb<sub>3</sub>Snなどの新たな材料を用いた加速空洞の開発を国内で継続することは将来の高エネルギー実験にとっても極めて重要である。ハドロンならびにレプトンコライダーによってさらに高いエネルギーでの現象を探求するために重要となるのが、高磁場を実現するための超伝導磁石と、超伝導空洞や誘電体およびレーザープラズマなどによる高い加速勾配を

実現する技術である。特に次世代ハドロンコライダー FCC-hh の実現には、LHC における NbTi 超伝導磁石で実現している 8T を超える 16T の磁場が必要である。その実現にむけて、より高い臨界磁場を持つ Nb<sub>3</sub>Sn を用いた超伝導磁石によって今の所、14T の磁場まで実現している。一方で、高磁場化により増大した電磁力の線材への影響も大きく、磁場精度や再現性を含めた構造設計の改良など 16T 達成に向けた研究開発が進められている。レーザープラズマ加速は、高強度超短レーザーパルスとプラズマの相互作用で励起される加速電場を応用するものであり、原理実証の基礎研究から高品質ビーム源開発のフェーズにシフトしつつある。このために要求される、安定な Ti:Sapphire レーザーの開発やプラズマの制御技術の確立が、精力的におこなわれているところである。また、誘電体加速に関しては、日本国内では分子研・理研・KEK の共同研究体制が確立しており、種々のレーザー開発が進められている。いずれの技術も、従来の常伝導・超伝導空洞方式を遙かに凌駕する超高電界加速を目指したものであり、国内での開発体制を維持することが重要である。

### 3.3.7 測定器技術フロンティア

高エネルギー実験のための測定器開発については、KEK に機構横断的な開発を推進し成果を創出するための測定器開発プラットフォームが設置され、光センサー・シンチレータを取り扱うプラットフォーム A、シリコン検出器を取り扱うプラットフォーム B、ガス検出器と TPC を取り扱うプラットフォーム C の三班で構成される。このプラットフォームをインターフェースとして PF-AR テストビームライン（建設が完了し、2022 年共用開始予定）や、共用テスト設備等の KEK のインフラを最大限活用する目的で活動を展開中である。コミュニティとしてこれらの基盤を活かした効率的な研究遂行が肝要であり、実験横断的な研究機会・知識共有を発展させていくことが測定器開発のフロンティアを開拓することにつながる。それぞれのプラットフォームに関連して以下のような先端研究が進む。

- プラットフォーム A 関連：MPPC はクロストーク・アフターパルス・ダークノイズ等の観点での性能改善が進み、また 10  $\mu\text{m}$  – 75  $\mu\text{m}$  までのピクセルピッチの MPPC が製品化され多くの基礎開発が収束している。大型チェレンコフ光・シンチレータ検出器（HK/JUNO など）にむけた高 QE の大口径 PMT についても安定した大量生産が可能となった。シンチレータについても CaI<sub>2</sub> シンチレータの大型化の研究、有機無機ペロブスカイト型化合物を用いた新規シンチレータ開発、ナノ粒子添加プラスチックシンチレータ等、発光量、応答速度、ノイズ等の観点から研究が進む。
- プラットフォーム B 関連：シリコンセンサーのタイプとして Hybrid（センサーと読み出し ASIC を別々に制作しボンディングするタイプの構造）と、Monolithic（一つの半導体基板の中に、センサー部と読み出し部を埋め込むタイプの構造）がある。Hybrid 型として Planer センサー（電極となる p+, n+ の半導体部がセンサー表面に設置されている従来型）と 3D センサー（検出器の中に柱上に p+, n+ の半導体部を設置してドリフト速度が改善する構造）のセンサーの研究が特に HL-LHC のための大量生産に向けて進む。特に放

射性耐性は高輝度実験において重要な観点であり、多くの研究エフォートが割かれている。Monolithic 型としては、CMOS センサーと SOI が研究されている。一方時間分解能を追求するための LGAD 開発も行われており 30 ps の時間分解能を達成している。

- プラットフォーム C 関連：アクティブターゲットとしての TPC の開発が活発で、暗黒物質探索実験、 $0\nu\beta\beta$  探索実験、ニュートリノ検出器、X 線、 $\gamma$  線検出器等で、液体貴ガス TPC、高圧ガス TPC の研究が進んでいる。多くのプロジェクトで基礎研究として小型 TPC での原理検証が進み大型化にむけた取り組みが重要となっている。ガス TPC を含めたガス検出器の増幅機構の性能向上に向けた Micro Pattern Gaseous Detector (MPGD) の素材開発も活発で、MPGD ガス検出器を活用した新しい実験への応用例もある。

ASIC・エレクトロニクス開発については、KEK E-sys が中心となって研究が展開されている。超微細プロセスの実現によるエレクトロニクスの発展は近年のトレンドであるが課題も多い。超微細化に伴い電源電圧の低下による消費電力の低減が期待される一方で、ゲート間距離の縮小に伴うオフリークの増加により消費電力が増大する効果もあり克服すべき課題も多い。データバンド幅についても、超微細化により多 I/O 化や高速化が期待されるが、実際は I/O パッドサイズで I/O 数が制限されたり、高速化もマイルドな効果にとどまる。このように半導体プロセスの微細化に関連し消費電力や、データバンド幅に関しての改善が期待されるが一方で課題も多く、その克服のために多くの研究が進む現状である。日本が関与する物理実験のためのフロントエンド ASIC 開発では、ストリップセンサー読み出しにおける time-walk の改善や液体アルゴンの低温環境での振る舞いをシミュレートする手法の開発等の先端的な研究課題がある。半導体技術の発展や、物理実験における新しい要求・トレンドを俯瞰し、国内で KEK E-sys を中心として先端的な研究開発環境が維持されることが望ましい。

新技術開拓として量子技術の素粒子実験での活用の研究も近年活発に行われている。ゲート式の量子コンピュータや量子アニーリングマシンが現在量子効果を用いた実機として使用可能で、実機を使った応用例として機械学習、事象再構成（飛跡検出）等に成功している。量子センサーとしては原子スピン、電子スピン、原子核スピン、超伝導電流、内部スピン（振動モード）、電荷固有値、フォノン、光等を用いたセンサーがありえて暗黒物質の探索や重力波の検出等への応用が検討・研究されている。黎明期である研究課題が多い中、高エネルギー実験の業界でも積極的に研究を拡大させている状況であり、今後の産業界との連携をとった発展が期待される新領域である。

## 4 先端加速器開発と大学研究室との共同研究

### 4.1 イントロダクション

2020 年に実施したアンケート「KEK ロードマップ 2021 策定へのインプット」において、先端加速器研究の重要性・期待に関する意見や、大学の素粒子実験研究室として KEK における加速器研究への参画に対する熱意を含む意見が寄せられた。この結果を受けて、本テーマに関して高エネルギー物理学研究者コミュニティと KEK 加速器それぞれを対象にしたアンケートを実施する

とともに、2021年10月16日に開催したタウンホールミーティングでパネルディスカッションを行った。

## 4.2 アンケート報告

はじめに高エネルギー物理学研究者コミュニティを対象としたアンケート結果(以下、高エネアンケート)について、次にKEK加速器施設職員を対象としたアンケート結果(以下、加速器アンケート)について簡単に述べる。アンケート結果の詳細に関しては脚注のURL<sup>\*2</sup>に置かれており、パスワードはhecforum:08833を参照されたい。

高エネアンケートは2021年6月29日から7月9日に行った。回答数75件から非公開希望を除いた60件のうちの93%(56件)が前向きなものであり、加速器技術開発への熱意を再確認できた。また、レーザー・プラズマ・誘電体加速などの次世代加速技術や超伝導加速空洞・電磁石技術が最も重要だと考えられている技術の上位を占めており、後で述べる加速器アンケート結果とある程度同じ傾向があった。

加速器アンケートは2021年6月23日から7月12日に行った。回答は全て大学の研究室と協同での加速器の技術開発に関して前向きなものであった。また、開発テーマに関しては次世代加速技術やコライダー高輝度化・陽子加速器の大強度化が上位を占め、高エネルギー物理学研究者を対象としたアンケート結果と同じ傾向が見えた。また、共同研究を開始する上で障害となっているものの中で研究室とのつながりが無い等の回答が2件あり、機会さえあれば共同研究が始まる可能性があることを発見できた意義は大きい。一方で、有効回答数26名に対してKEK加速器研究施設の職員数は約190名で回答率は決して高くないことは、本アンケート結果に対して留意すべき事であり、今回はご回答いただけなかった方々の考えを理解するために引き続き努力すべきだと考えている。

## 4.3 タウンホールミーティングでのパネルディスカッション

### 4.3.1 次世代(次々世代)加速器技術に必要な取り組み

次世代・次々世代の加速器技術について、中本建志氏(KEK共通基盤)、阪井寛志氏(KEK加速器)、吉田光宏氏(KEK加速器)を迎え、特に超伝導加速空洞・超伝導電磁石・プラズマ/誘電体加速を中心にレビューを行うと共に、国内コミュニティが今後強化すべき取り組みおよびその方策について以下のような議論を行った。

超伝導加速空洞については、現在ILCの基本設計で用いられている32 MV/mの加速勾配を持つNb空洞の改善として、空洞プロセスの改善による45 MV/m程度の次世代高加速勾配技術、100 MV/mを目指したNb<sub>3</sub>Sn多層薄膜などの次々世代技術がある。32 MV/mの空洞は技術的には確立しており、ILC建設に向け工業化と歩留まり改善を進めている。空洞プロセスの改善(次世代)は、Fermilab等で成果が出ているが、再現性に課題があり、国内でも検証を進めている。多層

---

<sup>\*2</sup> <https://agenda.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/indico/conferenceDisplay.py?confId=1813>

薄膜(次々世代)は日本発のアイデアで有望だが、Cavity 内面への膜形成・制御技術は困難でまだ時間がかかる。大学との共同研究にも有望なテーマで、興味を持っている大学と共同研究の可能性が議論された。超伝導磁石は、FCC の feasibility study の一部として、Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導磁石の開発が欧米ではかなりの予算を投下して集中的に進めている。国内は出遅れており、簡単に参入できる状況にない。Nb 磁石はトレーニングで磁場耐性をあげていくことができるが、Nb<sub>3</sub>Sn は不可逆な破壊を起こしてしまうことがあり、FCC で必要な 16-18T の磁石開発は困難に直面している。実用化まではまだ 20 年かかるとも言われる。一方、高温超伝導磁石は、素材の面で日本の企業が世界をリードする技術を持っており、欧米でも Nb<sub>3</sub>Sn に比べて本格的な開発は進んでいないため、競争力を持った開発が国内で可能と考えられる。FCC でも Nb<sub>3</sub>Sn 磁石と組み合わせて特に磁場の強い部分に使うなどの活用は考えられ、開発の意義がある。

プラズマ・誘電体加速にはエネルギー源としてレーザーまたはビーム、媒体としてプラズマと誘電体の組み合わせで 4 種類の加速方式が考えられる。いずれも THz で加速するため GHz 帯の空洞加速器よりはるかに高い加速勾配が出せる。とくにレーザープラズマ方式は加速勾配が高いが、繰り返しや電力効率の問題があり、エネルギーフロンティアの加速器にはハードルが高い。国内では誘電体加速に取り組んでおり、4 年くらいで原理実証を行う計画がある。

#### 4.3.2 素粒子物理の研究室と加速器グループとの共同研究-現状と将来-

大学の素粒子物理の研究室と、加速器グループとの共同研究について、岩崎昌子氏(大阪市立大学)、佐藤洋一氏(KEK 加速器)を迎え、パネルディスカッションを行った。岩崎氏は、AI を用いた加速器制御を例に、大学の研究室でも実施可能な取り組みを紹介した。学生によっては、KEK ではなく大学をベースにできる研究スタイルが魅力となることもあるという指摘があった。佐藤氏は、T2K 実験に関連する J-PARC のビームモニタやビーム制御の研究を例に、共同研究の進め方を紹介した。学生が加速器の現場で研究を進める際、大学のスタッフと加速器グループのスタッフの間のコミュニケーションと信頼関係が重要であるとの指摘があった。今後も継続して、大学と加速器グループの間のコミュニケーションの機会を増やすことが、共同研究の契機となるだろう。

## 4.4 まとめ

連携研究の強化という点に関してフォーカスしてまとめる。

アンケートや議論を通じて、高エネルギー物理を研究する実験系研究室と加速器研究の接続の強化を期待する声が一定数あると結論づけたい。どの程度の人的リソースを実質的に割けるのかについては不透明であることには留意すべきである。一方、すでに KEK には「特別共同利用研究員」という形で、国立、公立及び私立の大学の要請に応じ、各大学に在籍されている大学院学生を受け入れ、研究指導をする制度が確立していることも確認された。また、小関 KEK 加速器施設長から、連携研究に関して直接質問を頂いたらお答えできるという発言もいただいた。

当日の議論や Slack におけるフォローアップの議論では、連携研究課題となりうる様々な加速器研究の例も提示された。既存の加速器の制御・モニタリングや、開発における電磁解析や応力解析

の計算等は、大学の研究室での研究と親和性が高い。また、磁場測定やクエンチ測定、またその解析などについても、学生の研究課題としてのマッチングがよいものもある。具体的にどのような連携研究がありえるかを高エネルギー物理学研究者が知る機会となったのは今回の議論の成果である。ハードウェアを用いる実験室の現場での研究から、ソフトウェアを使ったリモート研究で大学でも遂行可能な研究課題まで、幅広い研究課題が推定されることが共有された。

今回の議論において連携研究のためには研究所のスタッフと大学のスタッフ間の信頼が重要であることが改めて認識され、またこれまでの共同研究の多くの事例で研究の種は連携研究者同士の日常的な議論の中で生まれていることが確認された。高エネルギー物理のコミュニティーと加速器のコミュニティーの日常的な接点が連携研究の発芽において重要である。

これらを踏まえて、高エネルギー物理のコミュニティーと加速器のコミュニティーの専門家を有する今期及び次期の将来計画委員会の活動のスピンオフとして有志を募る形で「窓口」の機能を時限付きで運用する試みを提案する。連携研究のための質問の受付や、今回のタウンホールミーティングのようにならぬ共同研究がありうるかを共有するような研究会等の実施を KEK 加速器施設と連携をとりながらすすめ、高エネルギー物理のコミュニティーと加速器のコミュニティーをつなぐ活動の強化につなげたい。

## 5 キャリアパス

分野の健全な発展には、優秀な若手が継続して参入することが重要である。しかし、近年、大学や公的研究機関（以下大学等とする）において任期無しポストが減っているという印象が広がり、若手にとって大学等の研究職は魅力の薄い職業になってしまっているのではないかという懸念がある。本委員会では、この問題に対して現状を客観的に把握するため各種資料の調査およびアンケートを行った。これらにもとづき、タウンホールミーティングでパネルディスカッションを行った。特にテニュアトラック制度の是非について重点的に議論した。テニュアトラック制度とは、任期付き（例えば5年）ポストで採用後、中間（例えば3年後）に審査を受け、認められると任期終了後にはテニュア（任期無し）ポストへ移行する制度である。アメリカの大学では一般的に用いられており、通常准教授で運用されている。採択率は大学によるが、テニュア枠を確保した上で審査を行うことが前提である。

### 5.1 任期付きポストの増加について

『大学教員の雇用状況に関する調査－学術研究懇談会（RU11）の大学群における教員の任期と雇用財源について－』<sup>\*3</sup>によると大学教員の数は、2007年から2013年にかけて約10%増えている。しかし、その内訳をみると任期付きポストが約50%増えて任期なしポストは約30%減っている。その後は、『研究大学における教員の雇用状況に関する調査』<sup>\*4</sup>によれば2019年までは教員数およ

---

\*3 <http://hdl.handle.net/11035/3082>

\*4 <https://doi.org/10.15108/rm305>

び任期付き・無しの内訳に大きな変化はない。ただし、任期なしポストの高齢化が顕著に進み、30代後半で6割程度、40台前半で4割程度が任期付きという状況である。

## 5.2 アンケート報告

キャリアパスについてのアンケートを hecforum:08759 にて告知して行った。アンケート実施期間は2021年6月28日から2021年7月9日で、161名からの回答を得た。回答者のうち半数以上が35歳以下であり、学生及び若手研究者のキャリアパスへの興味の高さがうかがえた。アンケート結果としては、キャリアを選択する際に重視する項目として、研究内容や研究環境に加えて任期の有無をあげる回答が多かった。また、任期付きポストが増加する一方で、任期無しポストが減少する現状に対する高い問題意識が確認された。この現状の改善案としてテニュアトラック制度を活用することについてはポジティブな意見が多数を占めたが、予算・財源・ポストの確保や審査の公平性等の問題点を指摘する意見もあった。また、キャリア講習やキャリアパスからこぼれた人へのケアの必要性を指摘する意見も出た。

本アンケートの結果は hecforum:08833 で報告した通り脚注の URL <sup>\*5</sup> に置かれている。パスワードは hecforum:08833 を参照されたい。

## 5.3 海外の事例

キャリアパスは、海外においても大変関心が高いテーマの一つである。アメリカとヨーロッパ(イギリス、ドイツ、フランス、スイス CERN)における、高エネルギー物理学分野での典型的なキャリア事例を紹介する。特に、PhD 学位取得後から任期無しポストを獲得するまでの期間、テニュアトラック制度の有無、および、日本で参考になる制度があるかどうか、の三点に焦点を当てる。基本的には、その国の伝統的な制度や社会構造、そして研究機関の財源出所および役割による部分も大きく、一概には言えない。

今回調べた範囲では、学位取得から任期無または相当する職を獲得するまでは通常3-10年前後であった。ヨーロッパでは、任期付きポストであっても、グループライダーとの信頼関係によって長期間(実質定年まで)雇用および研究を継続している場合も多い。また、PhD 学位が民間においても重視されるので、テニュア獲得がうまくいかなかった場合などに、民間就職をする場合も多い。

テニュアトラックおよびそれに類する制度は、アメリカの大学・研究機関において主流であり、テニュア採択率は研究機関や学部による。イギリスにおいても導入されており、テニュア採択率は比較的高く、優秀な人材の国内への早期定着を実現していると言える。

制度としては、以下が参考になる可能性がある。イギリスでは、毎年公募の若手向けフェロウシップ制度がある。受入機関に7年前後の複数年の給料を持参するのでマッチングが良く、キャリアの早い段階で将来的に任期無しポストを獲得できる可能性が高いことが見通せる。さらに、研究

---

<sup>\*5</sup> <https://agenda.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/indico/conferenceDisplay.py?confId=1799>

テーマが選択可能、かつ、独立支援があり高待遇である。ドイツの大学では、任期無しポストを獲得するまで通常大変時間がかかるので、毎年公募の卓越した若手向けのテニュアトラック（テニュアへの近道）のような制度がある。いずれも競争率が大変高いが、上位層が任期無しポストを獲得できずに分野から離れる事態を軽減できる。さらに、若手の時から裁量の範囲が広く、早期に独立できる可能性が高まる。フランスでは、CNRS 国立科学研究センターが国内各地に研究所を設置している。CNRS で雇用されている研究者は、制度上研究所および実験グループ間を異動可能である。ライフイベントなどの個人的事情および実験のフェーズに応じて、限りある人員の柔軟な配置が実現できる。

その他、各論はタウンホールミーティングでのスライドを参照されたい。

#### 5.4 タウンホールミーティングでのパネルディスカッション

タウンホールミーティングでは、以下のパネリストを迎えてパネルディスカッションを行った：浅井祥仁（東大）、齊藤直人（KEK）、横山将志（東大）、末原大幹（九大）、松岡広大（KEK）、廣瀬茂輝（筑波大）、市川温子（東北大）。司会は身内賢太郎（神戸大）が担当した。

まず市川より、テニュアトラック制度を活用して任期なしポストを実質的に増やす案が提案された。日本では、運営費交付金削減により任期無しポストが減少してしまっているが、さまざまな資金で任期付きポストを増やし、全体の人件費は減少していない。このような資金では任期無しの雇用は不可能ではあるが、数年後に定年退職や人事異動により任期無しポストが空くことを見越して、さまざまな資金でまずテニュアトラックとして教員を雇用し、その後審査を経て空いた任期無しポストへ移行する案である。現状のポストと年齢構成を元に大雑把なシミュレーションを行うと、採択率 90% を確保した上で 40 代後半に入る前に大多数がテニュアへ以降することができる。ただし、現状の資金のバランスでは 5 年後に任期なしではなくテニュアトラック准教授を経なければならぬケースもある。このような制度が十分に安定した身分と若手に認識されるためには、テニュア枠の確保、審査の透明性が重要であろう。

この提案について議論を行い、若手からは現状よりは良いというコメントが出された。各資金で任期付き教員を個別に雇用するのではなく、各資金の人件費を集約して国の制度として若手を安定に雇用し資金元のプロジェクトに出向するという提案も出された。卓越研究員事業が元々目指していたものに近い案である。

一方、マネジメントサイドからは、学問の流れが急速に変化する状況のもと、大学や研究所としては柔軟な人材配置が必要とされ、長期間の雇用となる任期なしポストあるいはそれに類するテニュアトラック制度を増やすことについて慎重にならざるを得ないという指摘がなされた。

#### 5.5 委員会からの提言

分野を発展させるためには、研究内容だけでなく研究環境も若手にとって魅力的でなければならない。2000 年代の任期無しポストの大幅な減少は、民間の職業に比べて大学等の研究職の魅力

大きく損なった。大学等のマネージメントが、学問分野の変革に柔軟に対応するために任期付きポストで対応するのは短期的視点としては有用に見えるが、長期的には人材の流失を招き、大学等の競争力を損なうと推測される。変革に対して柔軟に対応できる人材を安定に雇用するという視点で改革を目指していくべきである。大学等からの頭脳流失はすでに始まっており、若手のキャリアパスの不安定性を速やかに解決すべく若手、中堅、マネージメントレベルで、卓越研究員事業の改善、テニユアトラック制度のうまい運用などなどさまざまな方策に向けて待ったなしで動き出すべきである。