

第6回 将来計画委員会 議事録

日時：2016年10月29日(土) 15:00 - 18:00

場所：東大素粒子センター

参加者

東大：谷口，南條，石塚，石野（雅），帯名，松本（以上、将来計画委員），小関，市川，寄田（高エネルギー委員）

Vidyo：石野（宏），大谷，北口，阪井（将来計画委員）

資料：

<http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/~mishino/dokuwiki/doku.php?id=hepfuture2016>

J-PARC加速器の現状と将来（小関）

<現状>

・J-PARC加速器は順調に運転を続けており、さらに1MWを超えるビーム強度を目指して増強を進めている。

・RCSのビーム強度は一時500kWに達したが、MLFの液体水銀ターゲットに冷却水の水漏れの問題が起こり、その後は200kW程度で運転を行っている。現在は新しい設計でターゲットの建設を進めており、来年の夏に入れ替え予定である。入れ替え後は再びビーム強度を上げて運転を行う。

Q: 水漏れの問題はビーム強度の増強と関係があるのか？

A: 関係がある。ビーム強度が500kWを超えたことにより、ターゲットに加わる衝撃が増して水漏れが発生したと考えられる。

・J-PARC加速器ではビーム損失による放射化を局所化するため、コリメータを設置している。MRではコリメータ領域および遅い取り出し直線部のビーム損失が特に大きい。

・MRはニュートリノビームラインへの速い取り出しでは425kWまでビーム強度が上がってきている。パルスあたりの陽子数では $2.2e14$ pppとなり、これは世界でも最も高い値である。

・パルスあたりの陽子数が増えると空間電荷効果による影響が大きくなるが、2バンチでの高強度試験では $3.4e13$ ppb（8バンチでは530kWに相当）までの加速・取り出しを確認できている。将来的には、さらに繰り返しを1.3秒周期まで上げて1MW以上までビーム強度を上げる計画である。

Q: 2バンチで行った高強度試験を8バンチに上げた場合に起こりうる問題はないか？

A: 基本的には問題ないと考えているが、入射キッカーの反射波で周回ビームが影響を受ける効果を補正する必要がある。補正用のキッカーはすでに準備されている。

・ハドロン実験施設への遅い取り出しについては、原理的にビーム損失が避けられないが、

42kWまでビーム強度を上げて運転を行っている。

<中期計画>

・RCSは1.5MWのビーム強度を目標とする。MLFの将来計画として、実験施設を新たに建設し、2つのターゲットステーションにビームを振り分けることを検討している。

・MRはもともとは50GeVまでエネルギーを上げて750kWを達成する設計であったが、運転に必要な電力や主電磁石の磁場分布の一様性を考慮し、30GeVのまま繰り返しを上げることによって750kW以上のビーム強度を目指す方針をとる。(50GeV運転に必要な磁場を作るためには、速い取り出しの運転パターンで30GeV運転と比較すると約4倍程度の電力を消費する)

Q: 50GeVのエネルギーが必要な物理はないのか？

A: 高いエネルギーが必要な物理も考えられるが、30GeVのまま繰り返しを速くすることによりビーム強度を上げる方が総合的には有利だという結論になった。

C: 基本的には実験から考えても30GeVで問題ない。

Q: 磁石の設計は当初から決まっていたのか？

A: 建設当初から変更はない。MRで50GeVのエネルギーを得るためには1.9Tの磁場が必要であり、磁極内での飽和の影響が避けられないことは理解されていた。

・中期計画として、繰り返しを約2倍(2.5秒から1.3秒)にするために電磁石電源を交換し、さらに短い時間でエネルギーを上げるために加速空洞の改良(入れ替え)を進める。

Q: 強度を上げた場合、放射化は問題にならないのか？

A: ビーム損失が増えることは避けられないため、コリメータの容量を増やす必要がある。さらに遅い取り出しの場合は局所的遮蔽が必要になるものと考えている。

・ハドロン実験では標的を入れ替える必要がある。80kWまで利用可能な標的の設計はできしており、2018年には入れ替える予定である。2021年までにはさらに強度上げたビームに対応する標的を開発し、100kW以上での運転を目指す。

Q: MLFやニュートリノでも標的が問題になると考えられるが、どの程度の強度まで耐えうるのか？

A: 1MWを超えると熱衝撃や放射線損傷の影響が大きくなり、金属材料の面でも難しくなる。SNSでも標的の問題が繰り返し起こっている。標的の高強度ビームに対する耐性は今後の開発において重要な課題のひとつである。知識を共有するため、RADIATEと呼ばれる国際共同研究も立ち上がり、J-PARCも今年から参加している。

Q: ビーム強度が1MWを超えると衝撃により標的に問題が生じるとのことだが、どの部分が問題になるのか？将来的にはどこまでビーム強度を上げられるのか？

A: どこまで上げられるのか具体的な予測を示すことは難しい。J-PARCやSNSでの問題の多くが構造体のつなぎ目の溶接箇所で行われており、一体構造にして溶接箇所を減らすような工夫が重要である。

・短時間で30GeVまで加速するため、30kV/mを超える新しい加速空洞への入れ替えを進め、2016年には9台すべての入れ替えを完了した。

Q: ILCで開発している30MV/mの加速空洞との違いは？

A: ILCは電子を加速するのに対し、J-PARCでは陽子を加速するので周波数特性が異なる。ま

た、陽子を加速する場合は加速に応じて周波数を変える必要がある。

Q: 加速勾配は従来に比べて50%増しなのに対して、加速器全体での加速電圧が倍近くになっているのはなぜか？

A: 図では読み取れないが、新しい加速空洞はインピーダンスが高くなっており、空洞が小型化されている。結果として加速ギャップを増やすことが出来るため、全体での加速電圧を大きくすることができる。

・一般にRFシステムは問題が発生した場合に復旧に時間がかかることが多いため、共同利用施設においては1台分程度の余裕を持って加速空洞を設置することが重要である。

・KEKの実施計画(PIP)では今後推進していくプロジェクトに優先順位をつけている。(1)HKに向けたJ-PARCの増強、(2)HL-LHC/ATLAS、(3)MLFミュオンH-lineとg-2/EDM実験、(4)ハドロン実験施設の拡張となっている。

・J-PARC増強については、2025年頃までに1.3MWを達成するための計画がたてられている。

・COMET Phase-IIについては、現在進行中のPhase-Iの結果を見た上で、改めて議論するという結論になった。

<長期計画>

・シミュレーションによるビーム損失の計算では、RCSは2MW運転まで到達できるポテンシャルがある。

・RCSとMRの間に8GeV booster

ringを建設することにより、小さいエミッタンスのビームをMRに入射してより多くの陽子を加速することができる。RCSが2MWまで到達すれば、MRで3MW以上の強度まで狙える。

・現在のMRに加えて遅い取り出し用のStretcher

ringを建設することにより、速い取り出しによるニュートリノ実験と遅い取り出しによるハドロン実験を並行して行うことができる。

Q: 消費電力を考えると難しいか？

A: Stretcher ringの磁石を超伝導にするなどのアイデアがある。

Q: トンネルは現在のMRのものを使えないのか？

A: その可能性も含めて検討しているが、限られたスペースでのメンテナンスの問題なども考慮する必要がある。

Q: MRの電磁石を超伝導にしてコストを削減する可能性は？

A: 加速にともなう周波数の変化が問題になるだろう。パターン運転ができるような超伝導電磁石の開発も進んでいるが、現在のような繰り返しの運転ですぐに実用化するのは難しいのではない。

・SuperKEKBの後の計画として、長基線ニュートリノ実験に高強度ニュートリノビームを供給するためのプロトンドライバーを建設するアイデアがある。

・国内の大型加速器では加速器の建設コストのおよそ半分程度がインフラ工事にかかっており、すでにあるトンネルを再利用できる利点は大きい。

・30MV/mを超える加速空洞を用いたリニアックで陽子を9GeVまで加速する。ピークカレント100mAを仮定すると、デューティー1%で9MWのビーム強度になる計算。

・新しいニュートリノビームラインを建設することにより、現在のMRを遅い取り出しのハドロン実験で占有できるという利点もある。

Q: 直線部分が短いのが難点か？

A: 直線部分はそれなりに長い。アークを利用してビームを取り出し、いくつかの実験で共有できるといった利点もある。

- ・原子核実験に用いるため、J-PARCで重イオンを加速するアイデアもある。

- ・フェルミ研究所でも高強度ニュートリノビームによる長基線ニュートリノ実験、ミューオン実験などの計画が進められており、国際競争が熾烈である。2MWを超える加速器の計画も検討されている。

Q: multi-MW加速器を実現するために特に重要な要素はなにか？

A: 2-3MWを超えるビーム強度を想定すると、シンクロトロンよりもリニアックを用いる方が現実的である。

C: 世界のハドロン加速器の図ではCADSのビーム強度が高い。

C: 図では中国で開発を進めているリニアックを用いた計画の設計値を示している。

C: 現在の答申ではsub-GeVスケールのhidden

particleを探索する固定標的実験（CERNでのSHiPなど）について触れていないが、こちらについても今回の更新では言及すべきではないか。ダークマターの問題とSUSY探索の現状を考慮し、世界的にもHidden

Sectorの探索が重要な研究テーマとして検討されている。

C: SHiPよりもエネルギーが低い領域ではT2Kの前置検出器でも探索が可能である。

C: 100TeVコライダーではWino,Higgsinoのようなカラーを持たないダークマター候補の探索を目的としてあげているが、電子陽電子衝突でも2-3TeVまでエネルギーを上げれば1TeV程度のHiggsinoなどの探索が可能である。電子陽電子加速器のエネルギーを上げるという方向性は難しいのか？

C: 距離伸ばして良いなら可能であるが、加速勾配を上げるためには長期的に技術開発を進める必要がある。ルミノシティの問題もある。

C: 技術的な問題を考慮すると、ハドロンコライダーから探索を進める方が現実的という結論になる。

C: 今の段階では難しいが、将来的にブレークスルーを起こすために必要な研究課題については言及しておくべきである。

C: 加速勾配を上げる可能性としては、材料の検討が考えられる。例として、MgB2（ニホウ化マグネシウム）は臨界磁場がニオブの倍程度であり、原理的には加速勾配の大幅な向上が起こりうる。

Kaon（南條）

- ・sクォークからdクォークへの反応は標準模型ではCKMにより強く制限されるため、Kaon崩

壊は新物理に対して強い感度を持つ ($O(100\text{TeV})$ まで探索可能)。

- ・間接的CP対称性の破れ (ϵ) の測定値は標準模型の予言と一致しており、新物理のエネルギースケールに対して強い制限 ($>100\text{TeV}$) を与えている。一方で、新物理がCP対称性の破れを抑制するような構造を持つ場合 (MFVなど) は、新物理が 1TeV 付近にある可能性も存在する。

- ・答申では新物理の可能性に言及する際に電弱エネルギースケールという表現を用いているが、現在では 1TeV 付近もしくはそれ以上のエネルギースケールでの議論になっているので、その点は今回の更新で見直すべきか。

- ・ $K_L \rightarrow \pi^0, \nu, \bar{\nu}$ はCP対称性を破る稀崩壊であり、標準模型により分岐比が高精度で予言されるため、CP対称性を破る新物理の探索に適している。標準模型による分岐比の予言値 $3e-11$ に対し、直接測定による上限が $3e-8$ 、閏節測定による上限が $2e-9$ と与えられている。

- ・ $K_L \rightarrow \pi^0 + \text{invisible}$ 崩壊探索により、質量の比較的軽い新粒子 (例として、 $g-2$ を説明する 400MeV 以下の Z' など) の検証も可能である。

Q: 軽い新粒子が存在した場合は π^0 の運動量から他のモデルとの違いが見えるのか?

A: 統計をためて π^0 の横運動量分布を観測することで識別可能である。 $\pi^0 + Z'$ (invisible)の場合は2体崩壊だが、 K_L の運動量が未知のため、 Z' の質量の情報は π^0 の横運動量分布に反映される。また $\pi^0, \nu, \bar{\nu}$ 崩壊とも異なる分布となる。

- ・KOTO実験は現在の $K_L \rightarrow \pi^0, \nu, \bar{\nu}$ 崩壊分岐比の上限を超えて測定を行い、標準模型の予言値まで探索を広げることを目的とする。

- ・2013年に取得したデータの解析結果をPTEPに投稿した。分岐比の上限は $4e-8$ と与えられている。

- ・2015年以降のデータ収集により、現在までに得られている上限値 ($2e-9$) を超える測定感度のデータをすでに取得している。

C: 測定感度のプロットにバックグラウンドを考慮した予測値を載せ、その上でバックグラウンドの低減による感度の向上について議論すべきではないか。

- ・将来的にはハドロン実験施設の拡張に合わせ、新しい検出器の開発・建設を進める(KOTO II)。次期計画では陽子ビームから5度の方向に生成された K_L を取り出し、標準模型の予言値で100事象を超える実験を行う。

Q: 中性子がバックグラウンドとして考えられるが、 K/n の比率は変わるのか?

A: K/n 比は5度と16度 (現行のKOTO実験) で大きく変わらない。ちなみに、 K 中間子崩壊の背景事象については、5度のほうが S/N (信号とバックグラウンドの比率)は改善する。理由は K の平均エネルギーが高くなり、主な背景事象となる $K_L \rightarrow \pi^0 + \pi^0$ 崩壊からのガンマ線のエネルギーも高くなり、検出しやすくなる為である。

- ・ハドロン実験施設の拡張後には、荷電 K 中間子の崩壊で生成されるミュオンの偏極を測定し、 T 対称性の破れを探索するTREK実験も計画されている。

- ・ハドロン実験施設の拡張は学術会議マスタープラン重点大型研究計画、文科省ロードマップ、KEK-PIPなどで幅広くサポートされ、さらに原子核ハドロンコミュニティからも強い支持を得ている。

- ・ CERNではSPSの400GeV陽子ビームを用いて荷電K中間子の稀崩壊を探索するNA62実験が行われており、Run2終了後に2018年までのデータを解析した結果が報告される見通しである。Run3期間中にはExoticsおよびLFV探索の実験が行われる。
- ・ 2026年からのRun4ではSPSを用いたK_Lの稀崩壊探索実験（KLEVER）が計画されている。
- ・ LHCbではK_Sの稀崩壊分岐比の測定による新物理探索が行われている。

- ・ 将来計画のアイデアとして、500MeV電子陽電子衝突によりs-channelでphi中間子を生成し、phi→K_L,K_S崩壊によるK_Lを使った実験を検討している。K_SをタグすることによりK_Lを選別し、pi⁰,nu,nuへの崩壊を探索する。

Q: J-PARCで荷電K中間子を使った実験の計画はないのか？

A: 今のところ計画されていない。

Q: ハドロン実験施設の拡張後のKOTO II実験により、感度の向上を目指す上で、バックグラウンドは問題にならないのか？

A: 中性子のバックグラウンドについては今後の検討課題であり、すでにコリメータのデザインなどの議論を進めている。

Q: KOTO実験が以前のE391a実験に比べて感度が向上しているが、検出器開発による影響が大きいのか？

A: 検出器の改良の一例としては、荷電粒子検出器の測定感度の向上とマテリアルの低減があげられる。E391a実験では中性子と検出器中の物質との反応で生成されたpi⁰によるバックグラウンドで測定感度が制限されていた。KOTO実験ではコリメータの改善などと合わせて、この中性子バックグラウンドを1/100以下に抑えていることを実証している。

Q: アメリカではKaonの実験計画は検討されているのか？

A: アメリカでは進行中の実験計画は存在しない。答申でもこの点は書き換える必要がある。