

液体アルゴン飛跡検出器開発研究の現状

KEK 素粒子原子核研究所

丸山 和純 田中 雅士

takasumi.maruyama@kek.jp masahi.tanaka@kek.jp

2011 年 8 月 19 日

1 イントロダクション

1.1 T2K 実験現状

2011 年, T2K 実験が世界に先駆けて 2.5σ の有意性でミューニュートリノから電子ニュートリノへの振動の兆候を捉えた[1]ことは, 明るいニュースである。この T2K 実験からの結果については, 高エネルギーニュース今号の記事を参照されたい[1]。また, T2K 実験の詳細については過去の高エネルギーニュースにてシリーズで取り上げられているので[2], そちらを参照していただきたい。もちろんのことながら, これからこの有意性を上げていくことが, 国際競争的に大変重要であり, 著者も含めた T2K 実験共同研究者は東日本大震災からの復旧・復興に向けて現在最善の努力を尽くしている。

今回の稿は, このホットな電子ニュートリノへの振動の話の更に先の話である。ニュートリノ実験の将来計画の検出器の一つとして考えられている巨大液体アルゴン TPC とその研究開発の現状について説明する。第 1 章で概要に触れた後, 開発研究の現在までのコアである 250L プロトタイプを用いた粒子識別能力についてのビームテストについて述べる。

1.2 隠岐の島液体アルゴン TPC 設置計画

T2K 実験などの加速器長基線ニュートリノ振動実験でミューニュートリノから電子ニュートリノへの振動が存在するということは 振動をつかさどると考えられている MNS 行列の最後まで未知だった混合角 θ_{13} が 0 でなく有限であることを意味する[1,2]。さらにこれはレプトンセクターの CP 対称性の破れを測定する可能性が開けるということでもある。この CP 非対称性を探る次世代長基線加速器振動実験で, どのような基線の長さを取るか, またどのような検出器を使用するか, 日本だけでなく世界で議論されている[3,4]。日本でも, 隠岐の島に 100 キロトンクラスの液体アルゴン TPC 検出器を設置し, J-PARC ニュートリノビームの大強度化とともに, CP 対称性の破れに迫ってはどうかという提案を行っており[5], サイトスタディも並行して進んでいる[6]。J-PARC から隠岐の島までの距離は 658 km 程度で, この距離を使用することにより, ニュートリノ・反ニュート

リノの振動の差を見る前に, まずニュートリノランのエネルギースペクトルを測定することだけで CP 対称性パラメータについての考察を行えるというメリットがある。また, この計画では, 地下 200m 程度の深さに検出器を設置すれば, 核子崩壊の探索も遂行できる。

1.2.1 液体アルゴン TPC 検出器

液体アルゴンは沸点約 87 K, 密度 1.4 g/cm^3 の物質で, カロリメータなどにも使われている。また, 液体アルゴン TPC 検出器は, カルロ・ルビア氏によって提案されて以来, 着々と研究開発が進められ, 現在は総重量 600 トンの ICARUS 実験[7]が稼働中である。ICARUS 実験からは長基線加速器ニュートリノ振動や核子崩壊に関する物理結果が近いうちに公表されることが期待される。

液体アルゴン TPC 検出器の魅力はその泡箱並みの飛跡検出能力にある。泡箱並みの飛跡検出能力があれば, 次世代実験で重要になる電子の検出効率が高いことや背景事象である π^0 を伴うニュートリノ反応事象との区別がつきやすいことは想像に易い。また, チェレンコフ光が出にくい K や陽子などの重い粒子の飛跡検出も全く問題がない。さらに, 粒子識別も TPC の 1ch 毎のローカルなエネルギー損失を使用することにより強力なアルゴリズムを考えることができる。

一方, 検出器自体は稼働している 600 トンでの技術検証を含め, まだ 100 キロトン検出器建設には開発研究が必要な要素がある。特に液体アルゴンの純度については一般的に以下のようなことがいえる。不活性な液体アルゴン中では電離電子は非常に長い時間(10ms 以上)存在できるが, 酸素や水などの不純物が存在すると吸収される。不純物の濃度と電子の寿命は反比例関係にあることが理解されていて, 酸素に換算して 1ppb 相当の不純物がある場合の電子の寿命が約 $300 \mu\text{s}$ である。kV/cm 程度の電場をかけることにより, 電離電子は $\sim \text{m/ms}$ というゆっくりとした速度でドリフトする。これは大型の検出器を実現するためには純度を最大限よくする必要のあることを意味するとともに, 予想される到達純度から TPC のアノード・カソード間の距離をどのように最適化するかという問題に帰着する。

また、ICARUS は高価な検出器であり、そのコストの削減も研究開発の大きな目標になる。特に以下でも述べる通り、今までにない一体物での低温容器や気体での電子増幅読み出しを行う場合は、特に技術的な注意が必要である。

1.2.2 GLACIER 型液体アルゴン TPC[8]

GLACIER 型液体アルゴン TPC 検出器は、次世代の巨大液体アルゴン TPC 検出器の中でも最もシンプルな低温容器構造と最も少ないエレクトロニクスチャンネル数を持つことを目指している。このことで、大幅なコストの削減を可能とする。図 1 にその概念図を示す。

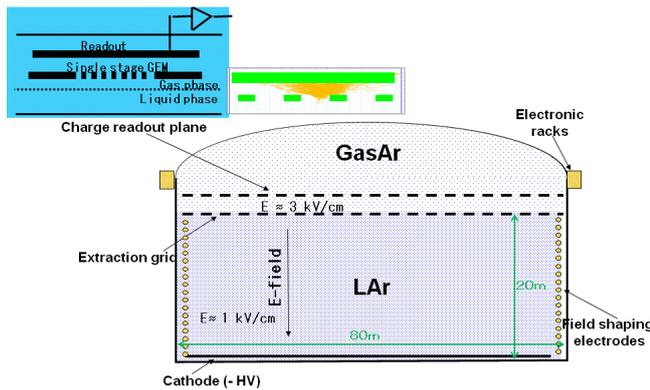


図 1 GLACIER 型巨大液体アルゴン TPC 検出器の概念図。

低温容器は、LNG 貯蔵タンクに使われているようなものを検討中であり、熱流入や熱勾配、またその低温保持方法について、注意が必要である。更に現在までの技術では、高純度液体アルゴンを得るために必ず使っていた予冷前の真空引きを構造上の問題から行なえないことにも留意が必要となる。最近、真空引きを行わなくても、ガス純度を目標値近くまで下げたテストが数件行われており[9,10]、更に液体純度についての実証が計画されている。

また、この検出器概念では、エレクトロニクスのチャンネル数を減らす代わりに、大型の厚型 Gas Electron Multiplier(GEM)を気体アルゴン相で用いて、電離電子を気体アルゴンまで取り出し、気相での電子増幅を行う。これを 2 相式の液体アルゴン TPC という。これに対して、今までのように液相のみを使う方法を 1 相式と呼ぶ。2 相式のセットアップには、液体アルゴン中のドリフトで減衰した電離電子数を回復することと、信号/ノイズ比をよくするという 2 つの目的がある。前者は、上記で述べたカソードとアノードの距離を長くできることを意味する。現在、 $1\text{m} \times 50\text{cm}$ くらいの大きさの GEM をテストで用いようとしており、このテストがうまくいけば最低でも $1\text{m} \times 1\text{m}$ 程度のセグメント GEM を使った検出器コンフィギュレーションが見えてくる。液体アルゴン TPC 検出器では、トラックで発生する電離電子について液体中では増幅が一切ないため、信号とノイズ比について十分な注意を要する。また、不純物による減衰については、上記に示したとおりである。

最後に、高電圧について触れておく。図 1 に示したとおり、20m もの距離にわたり電離電子をドリフトさせるためには、純度のみならず、高電圧にも注意が必要である。というのは、液体アルゴン TPC では再結合を減らすため、また、ドリフト速度をできるだけ大きくして不純物による減衰を減らすため、 $0.5 - 1\text{kV/cm}$ 程度の電場を印加する必要があるからである。GLACIER 検出器では、これだけの電場を形成するために、MV 級の高電圧を印加する方法を考える必要がある。現在、コッククロフト・ウォルトン形式の高電圧の可能性を考えているが、純粋な開発要素として、最も難しい部分の一つでもある。現在、数百段のコッククロフト型の高電圧を実装した国際実験 ArDM でのテスト[11]が行われており、その開発研究の進展が待たれる。日本でも 2012 年くらいを目途に 40 段から 100 段程度のコッククロフト・ウォルトンを用いて、 50kV 程度の高電圧を印加するためのシステムを開発中である。

1.3 研究開発について

日本では、高エネルギー加速器研究機構がスイスのチューリッヒ工科大学のアンドレ・ルビアグループと協力して、2008 年の夏から液体アルゴン TPC の開発研究を開始した。2009 年から早稲田大学、2010 年から岩手大学が参加している。最初は 10ℓ クラスのプロトタイプから開始した開発研究も、2 年間の開発の結果、2010 年の秋には 0.4 トンの液体アルゴン TPC プロトタイプ検出器を稼働させることができた。このプロトタイプを J-PARC ハドロンホール K1.1BR ビームラインに設置して荷電粒子ビームテストを行い、液体アルゴン TPC 検出器の歴史の中で、世界で最も多数の荷電 K と π に関するデータを取得した[12]。最近行われた J-PARC PAC 会議でもこの結果については触れられたが[13]、今回の稿では、主にこのビームテストの様子と結果について述べる。

2 J-PARC T32 実験

2010 年 1 月に行われた第 9 回 J-PARC PAC にて、巨大液体アルゴン TPC 検出器を使った長基線加速器ニュートリノ振動実験/核子崩壊探索実験の科学的なメリットを議論し、液体アルゴン TPC 検出器の開発研究を行うことを提案した P32[14]がエンドースされた。また、その一環として核子崩壊からの運動量に最適化した荷電 K 中間子や他の荷電粒子の認識能力を確認するためのビームテストを 250L プロトタイプを J-PARC K1.1BR に設置して行う T32 実験がリコメンドされた。

T32 実験は 2010 年 10 月までに実験の準備を終え、2010 年 10 月 24 日より 11 月 1 日の約 1 週間にわたってデータ取得を行った。

2.1 目的

T32 実験は、液体アルゴン TPC の性能を小型の検出器を用いて精密に評価し、将来の大型検出器の物理感度、特に荷電 K 中間子を含む核子崩壊に関する探索感度をより信頼できる精度で決定するためのデータ収集を目的とする。

一般に、液体アルゴン TPC 検出器は、核子崩壊からの荷電 K 粒子、特に $p \rightarrow K^+ \bar{\nu}$ 崩壊モードでの荷電 K 粒子を検出効率 95% 以上で検出することができ、かつ、高い効率で背景事象のリジェクション(大気ニュートリノ反応事象など、背景事象数 $< 0.1 \text{ events}/100 \text{ kt}/\text{yr}$) が可能であると考えられており[15]、この点が核子崩壊からの荷電 K の信号がチェレンコフ閾値以下で見ることができない水チェレンコフよりも優れた点であるとされている。しかし、残念ながら現在までに液体アルゴン TPC は宇宙線や加速器ニュートリノビームを用いた実験は行われているが、正体のよく理解された荷電粒子ビーム、特に荷電 K 粒子を照射した高統計データは取得されていなかった。そこで、J-PARC の K1.1BR ビームラインに 250 l プロトタイプ(有効体積約 170 kg ($40 \times 40 \times 80 \text{ cm}^3$))の液体アルゴン TPC 検出器を設置し K^+ 中間子、 π^+ 中間子、陽子、および陽電子の運動量を調節し TPC 検出器内部で停止させる実験を行い、このデータを用いて液体アルゴン検出器の粒子識別能力を検証する。

2.2 実験装置

前述したように、すべての液体アルゴン TPC について同様であるが、この実験についても成否を分ける大きなカギとなるのは高純度の液体アルゴンの達成である。今回の TPC 検出器のカソードからアノードまでの距離は 40 cm だが、これを約 500 μs かけてドリフトする計算になる。カソード付近の信号を十分な S/N で検出するためには 1 ppb 程度の純度の達成が必須条件となる。

2.2.1 低温容器

実験装置は大きく分けて、液体アルゴンを保持する低温容器、低温に保つための冷凍装置、純度を保つための純化装置、TPC 検出器本体およびその読み出し系からなる。

低温容器は MEG 実験で液体キセノンカロリメータのプロトタイプとして用いられたものを借用した[16]。図 2 に

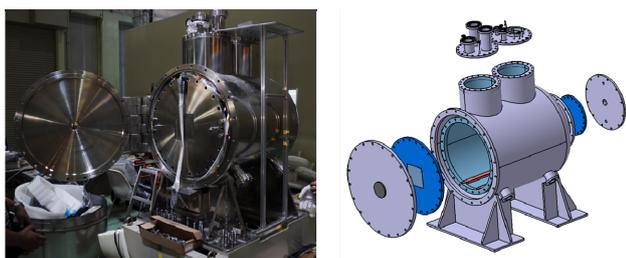


図2 MEG プロトタイプカロリメータ容器写真(左)および図面(右)。

示すステンレス製の真空断熱容器で内径 70 cm 長さ約 1 m の円筒を横置きにした構造となっている。前面後面の大型フランジからは検出器などの出し入れをおこなう。前面フランジにはビーム窓(物質厚約 $0.16 X_0$) が取り付けられており、ここからビーム粒子を入射する。上部の二つのポートには真空ポンプや冷凍・純化装置を取り付け、高電圧印加や信号読み出しなどに用いる。この容器の液体アルゴン温度における熱流入は約 30 W で、ほぼ同じサイズの低温容器を用いた ArgoNeut 実験では容器の熱流入が 200 W であったこと[17]と比較するといかに優れたものかがわかる。このような高性能の低温容器を借りて使用できたことは、われわれにとって僥倖であり MEG 実験の共同研究者の方々には深く感謝するものである。

2.2.2 冷凍・純化装置

図 3 に液体アルゴン冷凍・純化系の概略図を示す。冷凍装置としては Gifford-MacMahon(GM)冷凍機および液体窒素熱交換コイルの二系統を用意した。これら冷凍装置は容器のトップフランジに取り付け、温度をアルゴン沸点以下に保つことにより周辺アルゴンガスを液化して熱交換をおこなう。GM 冷凍機は住友重機製で液体アルゴン温度において $\sim 150 \text{ W}$ の冷凍能力を持つ。液体窒素コイルは外径 1 cm 肉厚 1 mm のステンレス管を螺旋に巻いたもので、コイルに液体アルゴンより温度の低い液体窒素を流すことにより周辺ガスアルゴンを液化する。

低温容器への自然熱流入($\sim 30 \text{ W}$)を補償するためには GM 冷凍機のみで十分であるが、冷凍機による保持を行うと容器外からのリークや容器内物質からのアウトガスによる不純物がまずガスアルゴン中に蓄積し冷凍機が液化することにより液体アルゴンの純度が急速に($\sim 3 \text{ ppb}/\text{day}$)悪化してしまう。これを防ぐためにガスアルゴン相の不純物を取り除くガス循環システムを採用した。ガスアルゴンをトッ

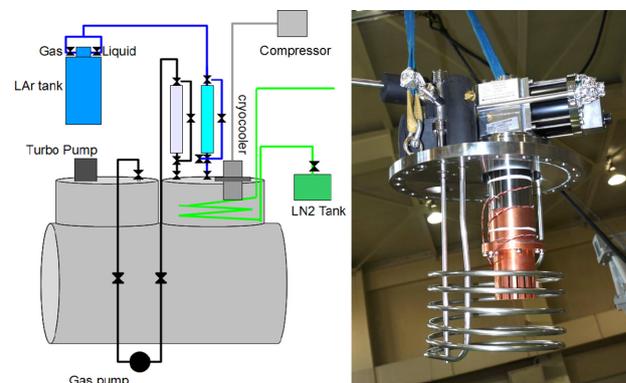


図3 冷凍・純化系の概略図(左):初期にアルゴンを充填する系(LAr tank)につながるラインで容器近くの直方体が液体アルゴン用脱酸素・水分フィルター、気体循環系(gas pump)を含む系、ここにも脱酸素・脱水フィルターがある、冷却系が見える。冷凍装置の写真(右):冷凍機のコールドヘッドと銅製の熱交換器、5 ターン分の液体窒素コイルを見ることができる。

フランジから引き出し、気体ポンプを用いて循環させ純化フィルター(SAES MicroTorr)を通して不純物を取り除いたのちに冷凍装置周辺に戻すことにより、液化されるアルゴンを高純度に保つ。このガス循環システムでは、低温のガスアルゴンを引き出しほぼ室温で容器内に戻すために、大きな熱流入($\sim 500\text{ W}$)が生じこれを補償する必要がある。液体窒素コイルは主にこのために用いられる。

2.2.3 検出器

図4に容器内の検出器配置を示す。直方体のTPC検出器を円筒容器中央に挿入し、容器下部にシンチレーション光読み出しのための光電子増倍管を設置する。TPC検出器(図5)は有感領域が $40 \times 40 \times 76\text{ cm}^3$ で厚さ 0.8 mm のガラスエポキシ(FR4)製のプリント基板を組み合わせて作られている。検出器下面のカソードに高電圧を印加し、電離電子を上方にドリフトさせ上面のアノードから電気信号として読み出す。側板内部には電極を 1 cm ピッチで取り付けて電極間を抵抗分割することにより一様な電場を形成する。アノード面より 1 cm 下にグリッドを配置し信号の時間分解能を高める。検出器の下に設置した光電子増倍管に光を透過させるためにカソード面はフレームにステンレスワイヤーを張ったものを用いた。アノード電極(図5左上)はビーム軸方向に 1 cm ピッチで76チャンネルに分割する。これにより、TPC検出器はアノードのチャンネルによりビーム軸方向の



図4 容器内に設置されたTPC検出器(左)、および容器下部に設置した2本の光電子増倍管(右)。

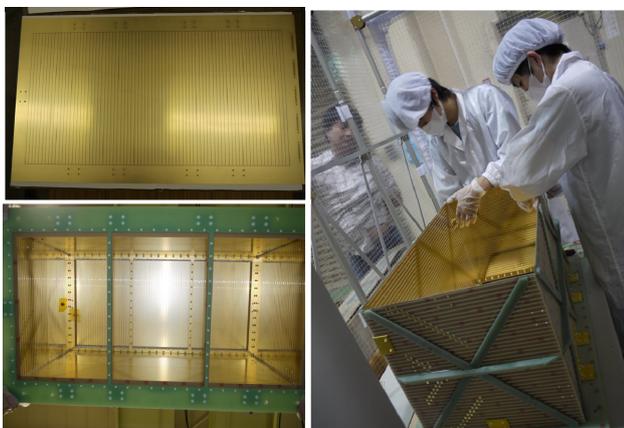


図5 TPC検出器の写真。信号読み出しアノード、 1 cm 幅のストリップが76ch並んでいる(左上)、組上げ中の検出器(右)、完成した検出器を下部より臨んだもの(左下)。カソード・アノードグリッドなどの構造も見える。

位置情報を、ドリフト時間により鉛直方向の位置情報を再構成する二次元TPCとして稼働する。ただしビーム進行方向に対して左右方向の位置については確定できない。

2.2.4 エレクトロニクス

TPC信号の読み出しにはCAENとスイスチューリッヒ工科大学の共同研究により開発されたCAEN SY2791を用いた(図6)。液体アルゴン中のドリフト速度は $\sim 1\text{ mm}/\mu\text{s}$ とガスに比べ遅く、 1 mm の位置分解能を出すために必要な時間分解能はたかだか μs となる。つまりGs/sクラスの高速度なFADCは不要である。その一方で液体アルゴンからの信号は数十fCと小さいためにノイズ対策が重要となる。SY2791はこれらの要求を満たすように液体アルゴンTPC用に設計されたエレクトロニクスで、カスタムサイズのクレートに電源と8枚のボードを収め、1枚のボードあたり16chの信号読み出し(クレート当たり256ch)が可能である。フロントパネルから入力した信号をプリアンプにより増幅したのち 2.5 Ms/s で常時デジタイズし、トリガーに同期してその前後の波形を読み出す構造となっている。光ファイバー接続により最大 80 Mbyte/s の読み出しが可能である。



図6 CAEN SY2791エレクトロニクス。

2.2.5 スローコントロール・安全

アルゴンガスは大気より重い気体である。J-PARCハドロンホールは地下 6 m にあることを考慮すると、万が一アルゴンガスが漏洩した場合には重篤な事態を引き起こしかねない。また安全確保は将来の地下大型実験においても大きな懸案事項の一つであり、短期間のビームテストでも一切手を抜かず万全の状態に持っていき高い意識をもって準備した。容器内圧が上昇した際に内部のアルゴンを安全に地上に逃がすために破裂板、安全弁、電磁弁の3系統の緊急用圧力解放装置を準備し、確実にアルゴンガスを地上に逃す。検出器近辺とホールの壁には酸素モニターを設置しハドロンホール内の警報システムと直結した。また、安全管理の資料を製作しホールユーザーに配布することにより、ユーザーへの周知につとめた。一方、この安全装置全体が大がかりなものになったために取り付けるフランジにかかる負担が大きくなり微少なリークの原因になった可能性もあり、これがのちに説明するテスト中の純度悪化につながった可能性もある。

容器の圧力，冷凍機ヘッドの温度コントロール，断熱層の真空度などのモニター，種々のバルブの開閉といったスローコントロールはKEYENCE社のPLCを用いておこなった。図7に示す手作り感のあふれるパネルだが，性能は素晴らしいもので，それまで多くの手間をかけて手動で行っていた諸々のコントロールがPLCにより自動化された時に，こんなに楽をしていいものなのだろうかと考えたことを覚えている。

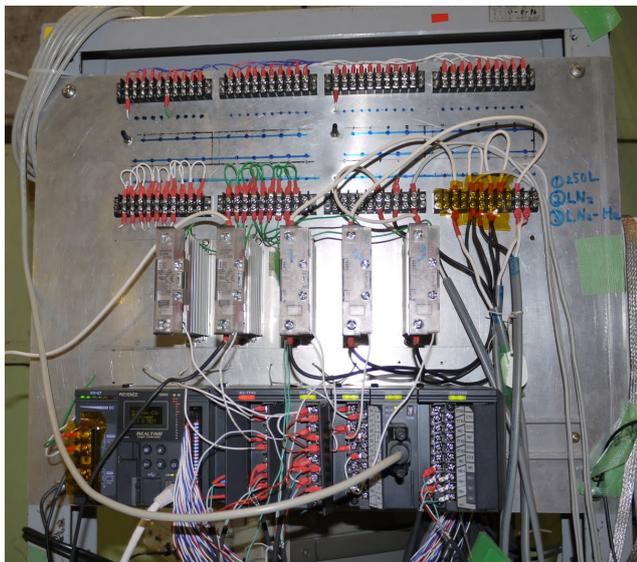


図7 PLCパネルの写真。

2.2.6 K1.1BR ビームライン

図8にK1.1BR ビームラインの図と写真を示す。K1.1BRは，標準運動量 $800\text{ MeV}/c$ で設計されたビームライン[18]で，D1とD2 マグネットおよびその直後のスリットで運動量を選別し，ESS およびその後のスリットで粒子を選別する。われわれのビームタイム中には， $800\text{ MeV}/c$ の運動量で最大で K/π 比 = $1/4$ を達成した(その後 TREK グループによるテストでは $K/\pi = 1/1$ を実現している)。図9に示すとおり，ビームライン下流にはフィッチチェレンコフカウンター，ガスチェレンコフカウンター，およびTOFを設置し，これを用いて K ， π ， e ， p の識別を行う。ビームライン最下流の検出器手前に K の運動量を $800\text{ MeV}/c$ から $600\text{ MeV}/c$ 程度まで減らして検出器内部で停止するように調整するためのディグレーダを配置した。ディグレーダには TOPAZ カロリメータの鉛ガラスおよび鉛板(厚さ 5 mm)を用いた。

2.3 実験経過

2.3.1 実験準備

2009年はじめに著者がMEG実験の見学のためにPSIを訪れた際に案内していただいたICEPPの岩本氏から，「この容器はMEGカロリメータのプロトタイプだが現在使っていない。」という話をうかがったが，当時KEKでは 10ℓ

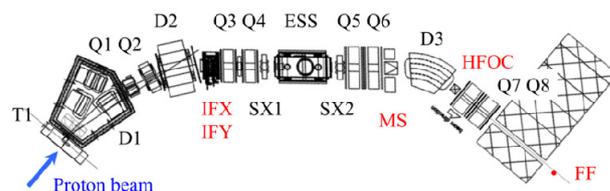
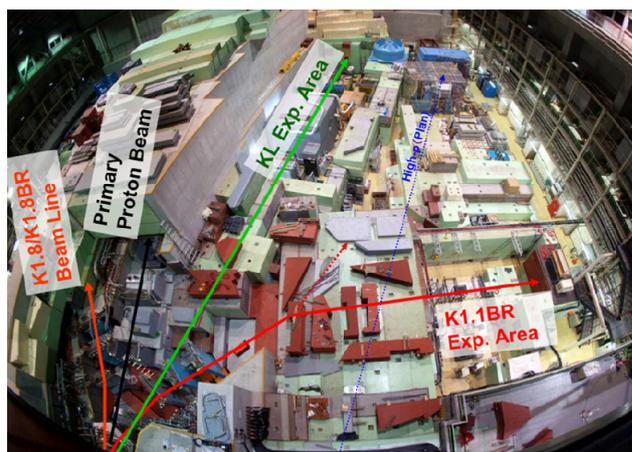


図8 J-PARC ハドロンホール全体写真(上)，および K1.1BR ビームライン構成図(下)。

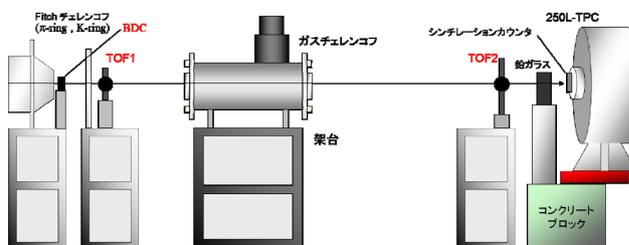


図9 ビームライン機器の写真(上)および構成図(下)。上流(左側)からフィッチチェレンコフ，ビームディファイニングカウンター，TOF1，ガスチェレンコフ，TOF2，ディグレーダ，T32 ビームディファイニングカウンター。

の小型セットアップを用いた試験でやっと最初のTPC信号の検出器の信号に成功したばかりの頃で，こんな大きな容器で実験をできるようになるのは相当先だろうと思ったことを覚えている。その後，夏ごろに 10ℓ セットアップでのテストを一通り終了し，次の実験を考え始めたころにKEKの春山氏からこの容器を借りる可能性について話を聞いたとき，容器を借りられるなら，ぜひ使って実験をやってみようということになり，2009年の9月にPSIよりKEKへ輸送した。実験の立ち上げ当初は，実動人員が少なかったこともあり実験遂行は難航した。たとえば高純度達成のために不可欠な容器の真空引きだが，ひと月以上容器を真空

引きし続けても、真空度が一向に改善しない。それどころか原因不明の大きなリークなどによりターボポンプが頻繁にトリップしてしまうという状況であった。散々悩んだあげく、容器内に入れられていたスペーサーが実はアクリルできていて、そこからのアウトガスが原因であったことが判明するなど、借りものであるからこそその予想外の事態もあった。容器真空の確立後は冷凍装置や純化装置の準備を進め、2010年1月には容器に50ℓの液体アルゴンを充填し10ppb程度の純度を達成した。

J-PARC PACにてビームテスト計画が承認されたのち、2011年の春からは、岩手大、早稲田大、チューリッヒ工科大学から常時数人がKEKに滞在する体制を整え、ガス循環装置、液体相で使用可能な純化フィルターの製作、TPC本体の製作、読み出しエレクトロニクスの準備などを急ピッチで進めた。冷凍装置および純化装置は6月には完成し容器に約300ℓの液体アルゴンを充填して数ppb程度の純度を確認した。9月にはフィールドケージに5cm×10cmのパッドを64チャンネル用意した読み出しアノードで宇宙線トラックを確認した[19]。

しかし、二次元読み出しアノード、および高電圧を印加するためのフィードスルーの開発が間に合わなかったために今回のビームテストは、バックアップとして製作した幅1cmの1次元読み出しアノードを液体アルゴンに浸して用い(1相式読み出し)、最大印加電圧約10kV(電場250V/cm)という制限でのテストとなった。残念ながら、これは液体アルゴンTPCの本来持つ粒子識別能力を完全に検証するには不十分であり、再度完全なセットアップでのテストを計画している。

2.3.2 ビームテスト本番

2010年の10月初め実験装置をKEKよりJ-PARCに搬入しK1.1BRビームライン最下流部に設置した。以後実験本番までに、加速器スタディやTREKクループによるビームチューニングに寄生しながら、ケーブル設営、容器の真空引きやガスアルゴン中での信号確認などの準備を進め本番に備えた。そしていよいよ10月24日の午前3時に液体アルゴンの充填を開始した。真空引きを停止し液体アルゴンタンクからガスアルゴンを取り出し容器に約2気圧まで充填する。次いで、GM冷凍機と液体窒素コイルを最大出力で駆動し容器の予冷をおこなう。また純度保持のためのガス循環も開始する。容器の温度低下に伴い圧力が低下すればその分のガスアルゴンを順次追加する。充填開始後2時間ほどで容器底部が液体アルゴン温度までさがり液体がたまり始める。物質からのアウトガスは一般的に温度が高いときに大きい。高純度達成のためには、高温時のアウトガスを抑え込みながらいかにして迅速に容器を低温に持っていかかが勝負となる。今回のテストの一週間という時間で

は、もし十分な初期純度を得られなかった場合にはそれを挽回することは不可能である。したがってこの最初の数時間は実験の成否を決めるもっとも重要な時間であったといえる。

この時間までは容器に送った気体アルゴンを冷凍装置により液化(~10ℓ/hour)していたが、容器が十分に冷えてくると液体アルゴンを直接容器に送り込むことができるようになり速い速度での充填(~50ℓ/hour)が可能になる。充填開始後7時間で液体は検出器下部のカソード面に到達する。この時点で光電子増倍管の信号を確認した。ここまではほぼ順調であったが、事前に較正しておいた液面計のケーブルを紛失したことにより液体アルゴンの充填量が正確に分からなくなるというトラブルに見舞われ作業は難航した。10月24日の午後10時ごろに使用した液体アルゴン量からはそろそろ液面がアノードに到達したはずだと判断していったん充填を終了し、TPC信号の検出を試みるがうまくいかない。もしかして純度が悪いのではという不安がよぎるが、最終的には液面はまだアノードに到達していないという結論に達し充填を再開する。翌10月25日0時46分に検出器アノード上部まで約400ℓの充填を確認し作業を完了した。図10に最初のビーム信号を示す。ほぼ24時間不眠不休の作業で、疲れ果てた充填作業のあと、このイベントディスプレイが端末の前に現れた時の感激はいまでも忘れられない。

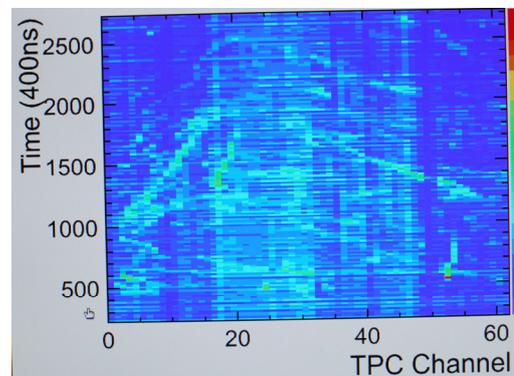


図10 最初のビームイベント(上)および、データ取得クルー集合写真(下)。前列左より、寄田浩平、Devis Lussi、永野潤二、Filippo Resnati、丸山和純、田中雅士、後列左より、内藤裕貴、岡本飛鳥、長坂優志、三谷貴志、岡本迅人。

2.3.3 データ収集

データ取得は10月25日より11月1日までの一週間にわたって行った。最初の数日はエレクトロニクスノイズ対策、検出器校正、ビームの広がり測定など基礎的なデータ取得を行い、その後目的である、 K 、 π 、陽子、陽電子の検出器内停止事象を収集した。データ取得計画の詳細は現場でシミュレーションを走らせながら詰めた。最終日11月1日の午前2時頃、ハドロンビームライン電磁石電源のトラブルによりビームが停止し、午前7時の終了予定より少し早い実験完了となった。約80kの K 停止事象および70kの π 停止事象に加え、陽子、陽電子などのデータを取得した。図11に典型的な約630MeV/cの $K \rightarrow \mu\nu$ 事象をしめす。横軸がTPCチャンネル(=ビーム軸方向位置)で縦軸がドリフト時間(鉛直方向位置)の二次元平面に $K \rightarrow \mu\nu$ 事象が再現されている。検出器前面より入射した K が約60cmの点で停止し、 $K \rightarrow \mu\nu$ 崩壊からの μ が角度をもって放出されているのがはっきりとわかる。

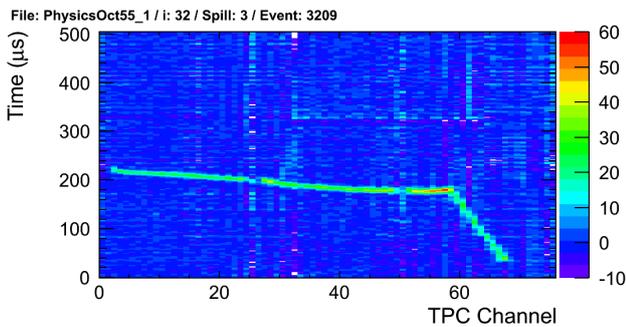


図11 典型的な $K \rightarrow \mu\nu$ 事象。

2.4 データ解析のハイライト

データ解析については現在進行中ではあるが、現状についていくつかをハイライト的に紹介していくことにする。

2.4.1 “Textbook Event”とその考察

図12はわれわれが“Textbook Event”と呼んでいる事象で、このイベントは陽電子トリガーで収集した800MeV/cデータであるが、トリガーされた陽電子($t = 250\mu\text{s}$ 付近)に加えて陽子(100 μs 付近)と π (400 μs 付近)が偶然オーバーラップしている。陽電子は明確な電磁シャワー、陽子は約15cmで停止し停止点付近では大きなエネルギーを落とす、 π はほぼMIPとして突き抜けるという、まるで教科書に載っていきそうな事象である。このイベント一つをみても液体アルゴンTPCの優れた粒子識別能力をうかがい知ることができる。

エレクトロニクスノイズについては、ビームラインの電磁石電源が一つの原因らしい(ノイズがビームラインの運動量 \propto 電磁石電流に大きく依存している)ことまではわかったのだが、ビームテスト中には時間の制限もあり満足のいく

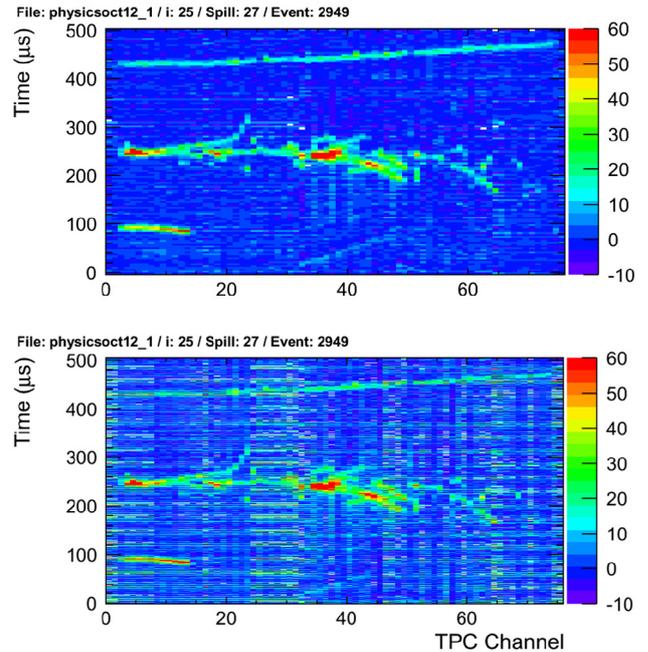


図12 “Textbook Event”。下はFFTによるノイズフィルターをかける前の生データ。

レベルまで落とすことができなかった。しかしノイズの周波数域が信号に比べて高かったために、FFT(フーリエ変換)フィルターにより80kHz以上の周波数成分をおとすことで容易にのぞくことができた。図12の下にFFTフィルター前の“Textbook Event”を示す。

データ解析に際して苦労した点にイベントのオーバーラップがある。液体アルゴン検出器はドリフト速度が遅いためカソードからアノードまでのドリフト時間である約500 μs の間に複数のビーム粒子が検出器に入射すると、そのうちのどれがトリガートラックであったかの判別が付けられなくなってしまふ。たとえば、先ほどの“Textbook Event”についても、陽子、陽電子、 π が同時に異なる位置に入射したのか、それとも同位置に異なる時間に入射したのかの判断はTPC情報のみではつけることができない。今回のデータ解析ではイベント中の入射粒子の数が1であることをオフラインで要求したために多くのイベントを捨ててしまうこととなった。つまり“Textbook Event”はわれわれの解析ではbad event扱いとなってしまふ。

この問題については、当然データ収集中に認識していて、オーバーラップが十分低くなるまでビームラインのスリットを絞って粒子数を減らす努力はしていた。しかし、J-PARCのハドロンビームラインの遅い取り出しは時間的に一様でなくスパイクを持った構造となっており(duty factorの問題)、このオーバーラップトラック数をなかなか減らすことができない。スリットを絞りすぎると、データ取得レートが低くなるうえに、 K/π 比が悪化してうまくデータを集められないなど、最適解をなかなか見出すことができなかった。次回のテストで改善が必要とされる点である。

2.4.2 液体アルゴン純度

液体アルゴン純度については、宇宙線データを用いて評価した。図 13 に示すように検出器内をアノードからカソードまで斜めに突き抜けたイベントをみるとドリフト距離の短いアノード付近の信号に比べてカソード付近の信号は明らかに減衰して半分ほどになっているのがわかる。この減衰の時定数 τ が液体アルゴン純度と反比例関係 ($\sigma(\text{ppb}) = 300 / \tau(\mu\text{s})$) にある。 τ を液体アルゴン充填からの時間の関数で表したものを右図に示す。充填開始後 60 時間に最初のデータを取得した際に最も高く約 $550\mu\text{s}$ (0.55 ppb), その後純度は徐々に悪化し実験終了時には約 $350\mu\text{s}$ (0.95 ppb) となっている。元の目標である 1 ppb の純度はギリギリ達成できたことになる。同様のセットアップを用いて KEK で試験を行った場合には、ガス循環純化システムの効果により純度は時間とともに向上していくのが見られたが、J-PARC においてはこれを再現することができなかった。安全装置回りなどで、つぶし切れていないリークが原因の可能性はある。

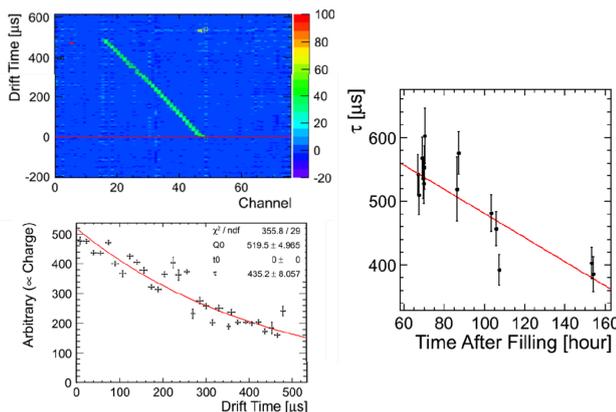


図 13 宇宙線による純度評価。(左上) 典型的な宇宙線トラック、(左下) ドリフト時間に対する信号の減衰。(右) 液体アルゴン充填からの時間に伴う純度の変化。

2.5 dE/dx 解析

dE/dx 解析については、検出器内をほぼ MIP として突き抜ける $800\text{ MeV}/c$ の π を用いて検出器の較正およびシミュレーションのチューニングを行い、低い dE/dx での検出器応答を十分理解したうえで、大きな dE/dx をもつ K と陽子の停止点近辺の振る舞いをデータとシミュレーションからの予想と比較するというのが大きな流れになる。

図 14 に、 $800\text{ MeV}/c$ の π の突き抜け事象についてデータと MC の比較を示す。左図が横軸に TPC のチャンネル、縦軸に検出器較正後の信号電荷分布を示したもので、右図が信号電荷分布をデータ(点)とシミュレーション(ヒストグラム)で比較したものである。信号電荷分布は典型的なランダム分布をとりデータと予想値でよく一致している。

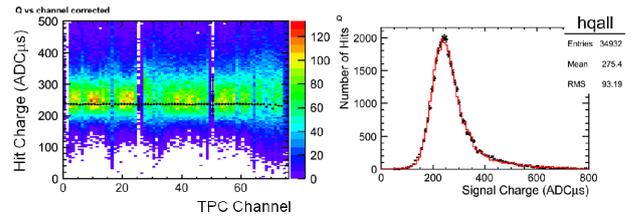


図 14 突き抜け π 事象を用いた検出器の較正。(左) チャンネルごとの信号電荷分布、(右) 信号電荷分布のデータと予想値の比較。

今回は詳しく説明していないが、シミュレーションがデータをよく再現できるようにチューニングできたのは、早稲田大、チューリッヒ工科大学の若い学生達による根気強い努力のたまものである。

2.5.1 陽子

“Textbook Event” からわかるように陽子の停止点は単純に信号のある最後のチャンネルで決定は容易である。まず停止点に相当する TPC チャンネルを決定して、ここから遡りながら信号電荷を計算する。図 15 に信号電荷のデータとシミュレーションの比較を示す。左上が停止点での電荷分布、その右が次のチャンネル、右下の図が停止点から 11cm となる。停止点付近を除いてはデータとシミュレーションがよく一致しているのがわかる。ただし停止点付近についてはまだ 10% 程度の不一致があり現在理解を進めている段階である。この時点で、突き抜け π (MIP) と陽子の dE/dx についてある程度 MC を使ったデータの理解ができたことを意味しており、今後の解析の指針について目途がたったといえる。

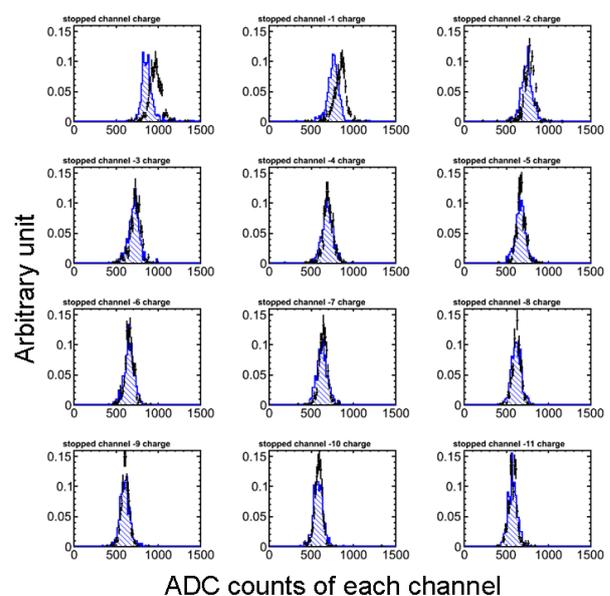


図 15 停止点(左上)および停止点から 11cm(右下)までの陽子の信号電荷分布。青がシミュレーション、黒がデータ。

2.5.2 K

K の停止点の決定は陽子ほど単純ではなく、一般にトラックのキックとして検出される。このトラッキングアルゴリズムの開発でも早稲田大の若い学生が活躍した。今回の解析では、トラックの直線からのずれを χ^2 が大きくなる点としてキックを探す方法 (χ^2 アルゴリズム) と Hough 変換により複数の直線を探しそれらの交点として停止点をさがす方法 (Hough アルゴリズム) の二本立てで行った。図 16 に例として Hough アルゴリズムにより再構成された K の典型的な事象を示す。この事象は ch 60 付近で $K \rightarrow \mu\nu$ に崩壊した事象の候補であるが、上図に示すとおり Hough 変換により 3 本の直線が認識され、そのうち 2 本がマルチプルスカッタリングにより曲がっていく K の飛跡、1 本が μ の飛跡に相当する。 K の崩壊点はこの直線の 3 つの交点 (上図の矢印) の一つとして正しく検出されている。下図をみると予想通り粒子の dE/dx が入射位置から停止点に向けて上昇していくのがはっきりとわかる。この信号電荷をデータと予想値で典型的な 1 イベントに対し比較したものを図 17 に示す。 K に対して予想されるとおりの電荷が各チャンネルで検出されているのがよく分かる。

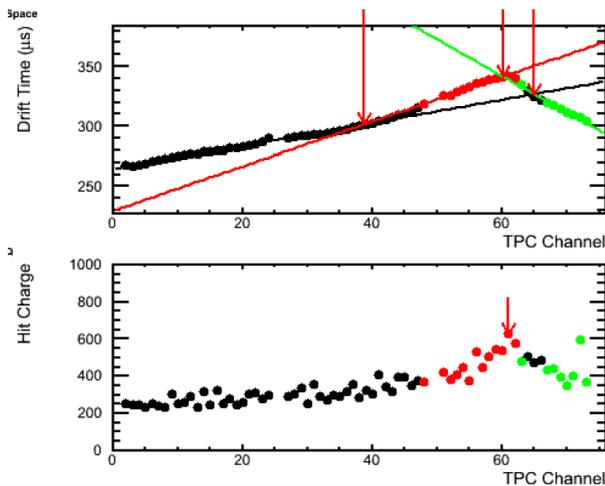


図 16 Hough アルゴリズムによる K 崩壊点再構成の例。上図では TPC 信号のヒットを表す点から Hough 変換により 3 本の直線を認識している。下図の信号電荷の分布をみると K の停止点が正しく認識されているのがわかる。

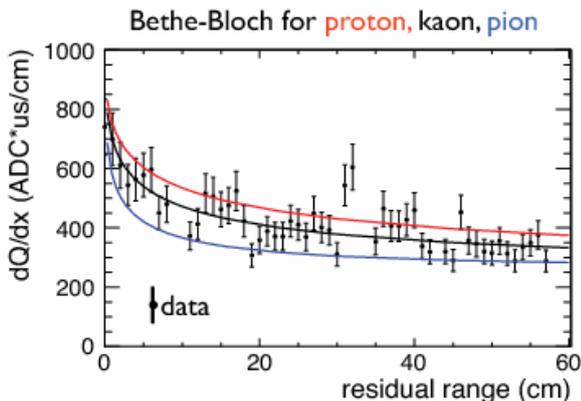


図 17 停止点からの距離を横軸にとった K の信号電荷 (典型的な 1 イベントについて)。ベテ・ブロッホの予想とよく合っている。

3 まとめと今後の計画

昨年 10 月の K1.1BR におけるビームテストにおいて、われわれは液体アルゴン TPC 検出器としては世界で初めて高統計の荷電粒子検出器内停止事象のデータを取得することに成功した。今回のビームテストは 1 次元読み出しと限られた電場という制限のために、液体アルゴン TPC の粒子識別能力の完全な検証については次のビームテストへお預けということになったが、現在進行中のデータ解析では、 K 飛跡の再構成の確立、シミュレーションのチューニングなど次につなげる成果が上げられたものと思う。

最後に今後の計画についてだが、再び荷電粒子ビームを使ったテストを行う計画で準備を進めている。MEG よりお借りした容器については、2011 年 1 月に返却したが、この容器をもとにいくつか改良点を加えた新しい容器を製作し現在 KEK にてテストを行っている (図 18)。また、純度劣化の問題を解決するために冷凍・純化装置に改良を加えている。2 次元読み出しアノードについては現在 CERN にてテストが進行中である。今年中にはこれらを完成させて、万全の態勢でテストに臨みたい。



図 18 テスト中の新容器 (左) および 2 次元読み出しアノード (右) の写真。

謝辞

TREK コラボレーションの方々には、J-PARC K1.1BR ビームラインに関する情報をいただき、またビームカウンターなどの装置の使用を許可していただきありがとうございます。特に KEK 今里純氏に感謝いたします。また、本文の中にも触れましたが、MEG 実験コラボレーションの方々にも低温容器を長期にわたって貸していただいたことは、感謝の念にたえません。(特に貸し出しの際、KEK 三原智氏に大変お世話になりました。) J-PARC ハドロングループには、ビームチューニングの際に助けいただきました。この場をお借りして感謝の意を表します。CERN RD51 グループとの議論を通しての支援にも、お礼を申し上げます。また、最後に KEK 素核研、測定器開発室、Swiss National Science Foundation, ETH Zurich の financial and technical support に感謝いたします。

参考文献

- [1] 奥村公宏, 亀田純, 中山祥英, 大谷将士, 中家剛, 高エネルギーニュース **30-2**, 83 (2011).
- [2] 高エネルギーニュース **28-2** 62, **28-2** 67, **28-4** 239, **28-4** 246, **28-4** 255, **29-1** 1, **29-1** 10, **29-2** 57.
- [3] たとえば, 日本では「NP08 会議」などで議論があった。
<http://nuclpart.kek.jp/NP08/presentations/neutrino/conferenceDisplay.py.html> に詳細。
- [4] たとえば, 欧州ではサイトと検出器のスタディを探る LAGUNA プログラムがある。例として Guido Alexander Nuijten, J. Phys. Conf. Ser. **308**, 012029 (2011) 参照。
- [5] A. Badertcher *et al.*, arXiv:0804.2111[hep-ph].
- [6] M. Yoshioka *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. **308**, 012028 (2011).
- [7] S. Amerio *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **527**, 329 (2004).
- [8] A. Rubbia *et al.*, arXiv:hep-ph/0402110 .
- [9] A. Curioni *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. **308**, 012024 (2011) arXiv:1009.4073 [physics.ins-det].
- [10] B. Rebel *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. **308**, 012023 (2011).
- [11] S. Horikawa *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. **308**, 012027 (2011) arXiv:1009.4908[physics.ins-det].
- [12] A. Araoka *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. **308**, 012008(2011) arXiv:1105.5818 [physics.ins-det].
- [13] A. Rubbia *et al.*, T32, presented at 12th J-PARC PAC.
<http://kds.kek.jp/getFile.py/access?contribId=11&sessionId=1&resId=0&materialId=slides&confId=7369> in details.
- [14] A. Badertcher *et al.*, P32, presented at 9th J-PARC PAC.
http://j-parc.jp/NuclPart/pac_1001/pdf/KEK_J-PARC-PAC2009-10.pdf
- [15] A. Bueno, *et al.*, JHEP **0704**, 041 (2007).
- [16] S.Mihara *et al.*, Nucl. Instrum, Meth. A **518** 45 (2004).
 三原智, 高エネルギーニュース **26-1**, 9 (2005).
- [17] Mitchell Soderberg, private communication.
- [18] TREK homepage, <http://trek.kek.jp/>
- [19] 田中雅士, 2010 年秋季日本物理学会学会発表
<http://kds.kek.jp/getFile.py/access?contribId=21&sessionId=18&resId=0&materialId=slides&confId=5746>