

COMET Phase-I Cylindrical Drift Chamber

大阪大学大学院 理学研究科 物理学専攻 久野研究室

吉田 学立

hisataka@kuno-g.phys.sci.osaka-u.ac.jp

森津 学

moritsu@kuno-g.phys.sci.osaka-u.ac.jp

2016年(平成28年)11月16日

1 はじめに

COMET 実験は、J-PARC ハドロンホールにおいて、荷電レプトンフレーバー非保存過程であるミューオン-電子転換過程を世界最高感度で探索する実験である。ここ数年の間に、COMET 実験に関する物理学会での一般講演やシンポジウム講演、本誌・高エネルギーニュースでの記事なども増え、2018/2019年に予定されている実験開始を前に、急速にアクティビティが上がっているのをグループ内からも感じている。特に今春は、Phase-Iの主検出器である円筒型ドリフトチェンバー (Cylindrical Drift Chamber, 以下 CDC) 検出器が完成し、今夏には、J-PARC PACにおいて、COMET Phase-Iの Stage-2 Approval が得られるなど、2016年は、我々にとって大きな節目の年となった。

COMET 実験については、すでに多くのドキュメントが公開されており [1]、本誌においても、過去にいくつかの記事が掲載されているため [2, 3, 4]、物理や実験の紹介はそちらに譲るとして、本記事では、今春完成を迎えた CDC 検出器について述べる。

CDC 検出器の設計から動作試験中の現在に至るまで、大阪大学グループが主導で行なってきた。とは言え、我々はドリフトチェンバーに関して全くの素人であったため、多くの方々・研究機関の協力を得て、試行錯誤しながらもなんとか進めてきた、というのが実情である。本稿では、我々の苦勞の軌跡が御覧いただけるであろう。

2 COMET Phase-I CDC 検出器

CDC 検出器は、名前の通り、円筒型のドリフトチェンバーである。ミューオン原子から放出される電子の軌跡を捉え、運動量を測定する重要な検出器であり、COMET Phase-Iの心臓部と言える。放出電子の飛跡を効率よく捉えるため、形状はミューオン静止標的を取り囲む円筒型で、散乱の影響を抑制することができるガス検出器の

ドリフトチェンバーを採用した。ドリフトチェンバーは、素粒子実験において古くから使われてきた飛跡検出器であり、よく理解もされており、大型のものもこれまでに多数作られている。そのため、小規模な研究開発で、迅速に立ち上げが可能であり、競合実験である Mu2e 実験 (FNAL) に先んじて結果を出したい Phase-I に相応しい。

ミューオン-電子転換過程の信号は、単一運動量 (約 105 MeV/c) の電子として観測されるが、背景事象である原子核に束縛されたミューオンの Michel 崩壊からの電子のスペクトルが信号領域まで長いテールをもつため、十分に高い運動量分解能 (200 keV/c) が要求される。高運動量分解能を達成するため、検出器領域は可能な限り物質を減らし、散乱の影響を極小化しつつ、かつ電子の飛跡を高い確率で再構成するため、充分な検出効率が必要である。

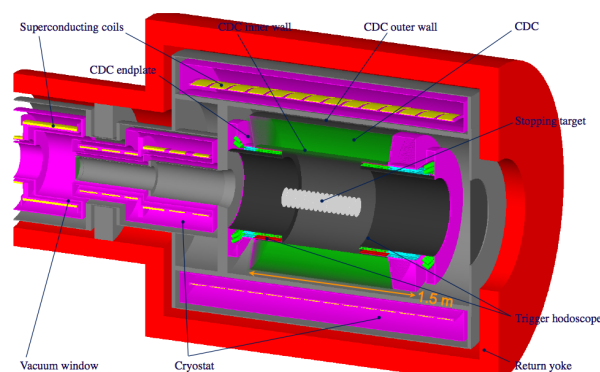


図 1: COMET CyDet 概略図。

CDC 検出器を含めた円筒型の検出器セクターを Cy-Det (Cylindrical Detector System) と呼ぶ (図 1)。中心部には、アルミニウム・ディスクのミューオン静止標的がミューオンビーム軸上に並んでおり、それを CDC 検出器が取り囲んでいる。電子とそれ以外の荷電粒子を識別するため、チェレンコフ光を捉えるアクリル層とシン

チレータ層の二層構造のトリガーホドスコープが内側にあり、CDC 検出器へのトリガー決定に使用する。CDC の外側には、磁場を形成する検出器ソレノイドがあり、その周りは、鉄製のリターンヨークで囲まれている。

3 CDC 検出器の設計

3.1 基本設計

設計のベースは、Belle II CDC(こちらは、Central Drift Chamber)[5]である。サイズ的にはスケールダウンとなるが、構造や材料を参考にさせていただいた。おおよそのデザインは、信号領域の運動量(約 105 MeV/c)、磁場の強さ(1 T)と位置分解能への要求などからおのずと決まる。外径が 1.7 m で内径は 1 m, 長さ 1.5 m の円筒型で、セルサイズは横幅 16.8 mm/高さ 16.0 mm である。4,986 本のセンスワイヤーと 14,562 本のフィールドワイヤーの計 19,548 本で、電子の飛跡を捉える。CDC の横運動量カットは、約 70 MeV/c であり、ミュオンの Michel 崩壊によって放出される電子のほとんどは CDC 検出器に到達しない。Belle II CDC と大きく異なるのは、全てのワイヤーがビーム軸に対して傾いたステレオワイヤーである点だ。この点は、KLOE 実験のドリフトチェンバー [6] を参考にし、ワイヤーをレイヤー毎に交互に傾けることで、ミュオンビーム軸方向の分解能が得られる。最終デザインに向けて、ドリフトチェンバーの大家である宇野彰二氏 (KEK) にアドバイスをいただきながら、慎重に議論を重ねて詳細設計を行った。ガス種やワイヤー直径、ステレオ角、内筒 CFRP の厚みなど、決めるべきパラメータは多岐にわたり、決定のためのシミュレーションと試作機による予備実験を繰り返し、設計値を詰めていった。

使用するガスは、3 種類のヘリウム混合ガスが候補として挙げられており、それぞれ下記の通りである。

- He:i-C₄H₁₀ (90:10) ; KLOE DC と同じ
- He:C₂H₆ (50:50) ; Belle / Belle II CDC と同じ
- He:CH₄ (80:20)

運動量を高精度で測定するには、電子の多重散乱の影響を減らすため、密度の小さいヘリウムをベースとして、クエンチャーとして有機ガスを加えるのが常套手段である。各ガス種によって、エネルギー損失、放射長、初期電子-イオン対生成数やドリフト速度などが異なり、一概にどれが良いか、という結論は出せない。また、ワイヤーは、高電圧を印加する金コーティングのタングステン製のセンスワイヤーと電場を成形するアルミニウム製のフィールドワイヤーの 2 種類があり、それぞれ直径によって、印加する電圧や多重散乱の効果などが変わっ

てくる。ガス検出器のシミュレーション計算ツールである **Garfield** を利用して、利用可能なワイヤーと各ガス種の組み合わせで、電子増幅率、電圧、電場等の見積もりを行なった。シミュレーション結果が正しいという保証も必要なので、最終的には、試作機の性能評価試験によって決定する運びとなった。

ドリフトチェンバーの信号読み出し回路としては、(これもまた Belle II グループにお世話になりっぱなしなのが) Belle II CDC 用に内田智久氏 (KEK) を中心に開発された RECBE ボード [7] の設計をほぼそのままに COMET CDC 用に転用した。本稿では詳細を省くが、信号処理を行うファームウェアは、COMET グループ内で独自に改良と新機能の開発をしており、性能評価や放射線耐性の評価試験を行なってきた。J-PARC という高放射線環境のため、放射線耐性を強化するための開発が現在も進行中である。実機用には、すでに 128 枚の RECBE ボードの大量生産と動作・評価試験が完了しており、使用可能な状況である。

3.2 CDC 試作機による性能評価

試作機は、通算 4 台製作し、性能評価を行なってきた。初号機は、ドリフトチェンバーの基本的な動作について理解するため、まずは初期のデザインに基づいて製作した。読み出し回路も実機とは異なり、市販の REPIC 製 64ch ボード (RPR-010) を使用し、放射線源や宇宙線を用いた試験を行なった (図 2)。

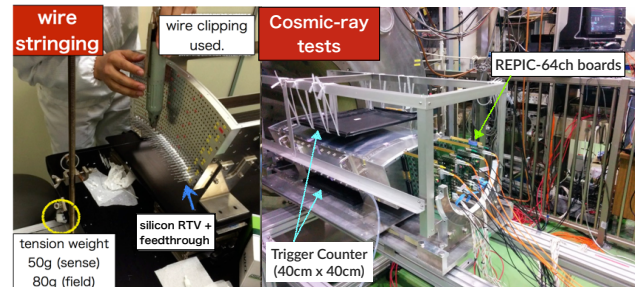


図 2: COMET CDC 試作初号機。

3 種類のガスを評価する、というのがこれまた簡単ではなく、マスフローコントローラやレギュレータなどの周辺機器もそれぞれのガスにたいして用意する必要があり、(実際には節約のため比例係数をかけて値を換算し兼用する場合もあった。) ガス自体も決して安いものではない。また、ガスを入れ替えるたびに、置換時間が長くなる。初号機から得られた結果としては、ガス検出器の基本的な取扱いを学ぶことができたこと、初のドリフトチェンバーでありながら、予測されていた性能がある程度得られたことが挙げられる。ちなみに、初号機は実機の約 30 分の 1 の大きさ (読み出し約 200ch) で、動

作試験用の試作機としては、大きかったことも後に判明した。

初号機での性能評価試験の結果をもとに設計が再検討され、セルの配置とステレオ角などを変更した。また、初号機のワイヤーは、Belle II CDC と同じく $\phi 30 \mu\text{m}$ のセンスワイヤーと $\phi 126 \mu\text{m}$ のフィールドワイヤーを使用していた。CDC 検出器内での多重散乱を抑えるために、更に細いワイヤー (それぞれ $\phi 25 \mu\text{m}/\phi 80 \mu\text{m}$) の使用が提案され、新たな試作機による再評価が必要となった。

式号機・参考機は、同時に製作され、それぞれセンスワイヤーが $\phi 25 \mu\text{m}$ と $\phi 30 \mu\text{m}$ である。2014 年の冬に東北大学電子光理学研究センターの電子ビームラインを用いて、これまた同時に性能評価を行なった。図 3 は、実際のセットアップである。初号機の反省を踏まえて小型化 (読み出し 27ch) し、また、業者に依頼したのは端板の穴加工のみで、ほぼ手作りの低コストかつ急ピッチでの製作となった。初の自設計のチェンバーのため、電磁シールドなどを用意しておらず、準備時間のほとんどの時間をノイズ落としに費やしてしまった。入射角度の依存性もみたいよね、という安易な発想で導入した回転機構のおかげで、信号の配線が長くなってしまい、ノイズ源となったことは誠に遺憾である。ビームタイムは、ガス置換の時間を考慮していただき、1 日置きに割り当ててもらったが、ガス置換中も解析ツールの開発に追われた。式号機・参考機から、実機と同じ RECBE での信号読み出しができるようになったが、様々な面で準備不足で、DAQ のオンラインモニターを現場でコーディングしたと記憶している。良い面と言えば、筆者も含めて、このビーム試験で大阪大学 (CDC) グループが大きく成長したと感じている。また、3 種類のガスそれぞれで、印加電圧依存性、読み出し回路の信号閾値の依存性、位置分解能や検出効率が得られた。

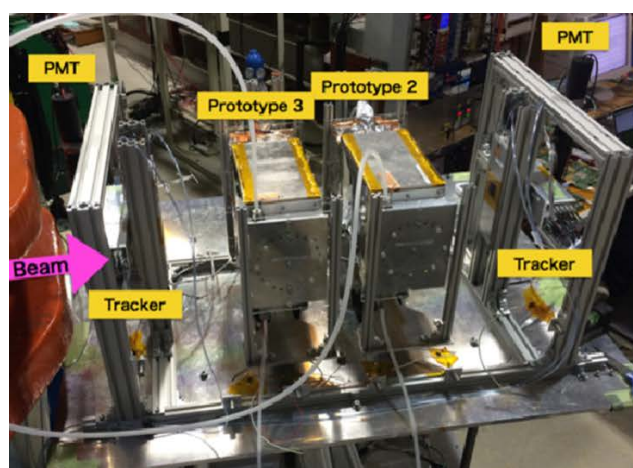


図 3: COMET CDC 試作式号機・参考機 ビーム試験セットアップ。

フィールドワイヤーの表面電場が 20 kV/cm を超えると、Malter 効果により、化学的な反応で炭素化合物などがワイヤー表面にできて放電が起りやすくなり、最終的には高電圧が印加できなくなることがある。ビーム試験により、 $\phi 80 \mu\text{m}$ フィールドワイヤーの表面電場を 20 kV/cm 以下になるよう印加電圧を下げると、十分な検出効率が得られないことが判明した。したがって、フィールドワイヤーは $\phi 126 \mu\text{m}$ となった。逆に、センスワイヤーは、 $\phi 25 \mu\text{m}$ と $\phi 30 \mu\text{m}$ のいずれも問題無いことがわかったため、多重散乱抑制への寄与は微少ながら、より細い $\phi 25 \mu\text{m}$ を選択した。

最後に、ガス種の選定、磁場中での性能評価や検出器応答のより深い理解のために、CDC 実機の縮小版として、試作四号機を製作した。大きさは実機の 60 分の 1 ほど (読み出し 87ch) で、実機と同じ読み出し回路及び配線方法を採用し、電磁シールドも備えている。四号機を用いて、放射線源と宇宙線による動作試験の後、LEPS グループの協力の下、電子ビームでの性能評価試験 (SPRING-8)、更に MRI 磁石で 1 T 磁場下での宇宙線試験 (KEK 低温センター) を行なった。

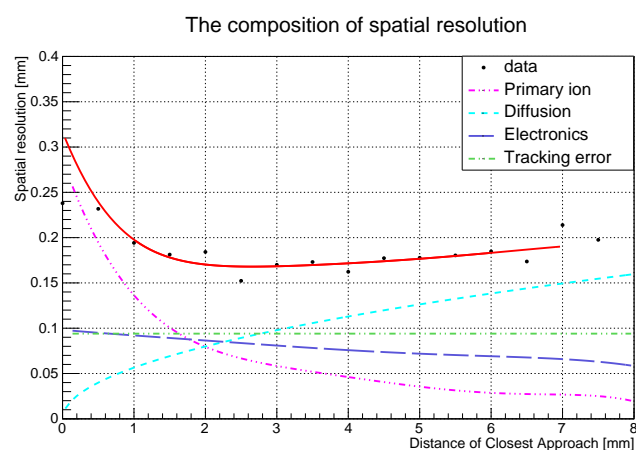


図 4: COMET CDC 試作四号機の位置分解能。横軸は飛跡とワイヤーの最短距離。ガス種は $\text{He:i-C}_4\text{H}_{10}$ (90:10)。印加電圧は 1830V。

得られた結果の一例を図 4 に示す。概ね $200(\sigma) \mu\text{m}$ 以下の位置分解能が得られており、運動量分解能 $200 \text{ keV}/c$ は十分に達成可能であることがわかった。また、Belle II CDC と同じ $\text{He:C}_2\text{H}_6$ (50:50) の場合でも、同程度の性能が得られている。したがって、特に問題が無い限り、初期設計の $\text{He:i-C}_4\text{H}_{10}$ (90:10) を使用する予定である。シミュレーション結果からも、運動量分解能への寄与の違いはあるものの、Phase-I で到達予定の物理感度 (分岐比 10^{-15} 程度) においては、その影響は、無視できるほど小さい (背景事象の混入率は同じ)。

3.3 最終設計

これらの試作機による性能評価及びシミュレーションからの結果を踏まえて、COMET CDC 検出器の最終設計が完成した。パラメータの決定は、建設と同時並行で行われており、ワイヤー径など後でも変更可能な部分は寸前まで変更の余地を残しておき、迅速な建設を目指した。外筒は、Belle II CDC と同じく CFRP(炭素強化繊維プラスチック)製で、5 mm の厚さで約 1.4 ton のワイヤー張力による荷重を支える。また、内筒の厚みは、ミューオン原子核捕獲から放出される陽子を吸収させる吸収層を含めて 1 mm を予定していた。しかし、スイスの PSI で行われた AlCap 実験 [8] の結果より、当初の想定よりも陽子放出率が小さいことがわかり、0.5 mm 厚の極薄 CFRP を用いることにした。陽子吸収層が不要になったことで、運動量分解能の向上が期待できる。

表 1: COMET CDC の主な設計値。

内筒	長さ	1495.5 mm
	半径	496.0~496.5 mm
	厚さ	0.5 mm
外筒	長さ	1577.3 mm
	半径	835.0~840.0 mm
	厚さ	5.0 mm
セル構成	幅	16.8 mm
	高さ	16.0 mm
	ステレオ角	64 ~ 75 mrad
センス層数	20 (ガード層 ×2 を含む)	
センスワイヤー	材質	Au plated W
	直径	25 μm
	本数	4986
	張力	50 g
フィールドワイヤー	材質	Al
	直径	126 μm
	本数	14562
	張力	80 g
ガス	混合	He:i-C ₄ H ₁₀ (90:10)
	体積	2084 L

表 1 に、主な設計値をまとめる。Belle II CDC と KLOE drift chamber の設計を踏襲し、COMET Phase-I の検出器に相応しい CDC 設計が出来たのではないだろうか。

4 建設

4.1 エンドプレート (端板) 製作

エンドプレートは、ワイヤーを保持するフィードスルーの位置を決める重要な部品である。約 2 万本のワイ

ヤーの張力に対して、変形を抑えるため、Belle II CDC に倣ってコンカルに段差を付けた構造で厚みは 10 mm である。コンカル構造のため、材料となる分厚い巨大なアルミニウムから削り出して強度を保つ。フィードスルー用の 19,548 個のキリ穴加工に加え、治具や接地用のタップ穴など、多数の加工が公差 $\pm 50 \mu\text{m}$ 以下の精度で要求されるため、高萩工場の門型マシニングセンタによる製作となった。(依頼した業者は、Belle II CDC と同じである。)

実機の製作前に、12 分の 1 の大きさとエンドプレートの試作を行い、加工精度の確認を行なった。製作後、各穴にピンゲージを立ててセンターリングでの位置測定に加え、三次元カメラを用いた位置・穴径の測定を行ったところ、公差以上のずれがある穴がいくつか見つかった。しかしながら、測定系のずれを考慮して補正を行い、再現性を検証したところ問題ないことがわかり、実機製作の工程へ移った。

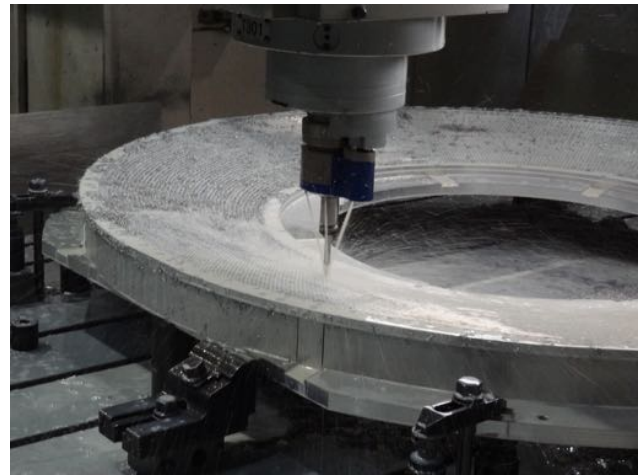


図 5: エンドプレートの製作工程。

図 5 は、エンドプレート上にフィードスルー用のキリ穴加工をしている写真である。Belle II CDC のエンドプレート製作では、この穴にバリが残ってしまうことがあり、後にフィードスルーを挿入する際にノリル樹脂部が損傷し、ガス漏れの原因になったと伺っていた。そのため、キリ穴加工後、リーマ加工前に面取りの工程を増やした。面取りは手作業のため時間と手間はかかったが、おかげでフィードスルー挿入時には全く問題が起らなかった。全加工完了後、スチーム洗浄し、エンドプレートが無事に完成した。

4.2 外筒製作・組立

外筒は、5 mm 厚の CFRP 樹脂製で、内側には電荷チャージアップを防ぐために 100 μm 厚のアルミフィルムが貼られている。直径 1.67 m、長さ 1.58 m で、縦にすると中に人が 5,6 人は立てるほどの大きさであるが、この巨大な筒を巨大な釜 (オートクレーブ) で一気に成

形する。成形完了後、工場に出向いて、エンドプレートと結合するためのアルミニウム製のリング状フランジ（以下、リング）との接着作業を行なった。接着は、エポキシ接着剤とアルミフィルムとリングを導通させる導通用の接着剤を使用した。いずれも宇宙航空産業などで使用されるアウトガスの少ないタイプの接着剤であり、ガス検出器には重要なポイントである。リングと一体化した外筒は、いよいよエンドプレートと連結させるわけだが、この時点では、リングに加工は一切されていない。

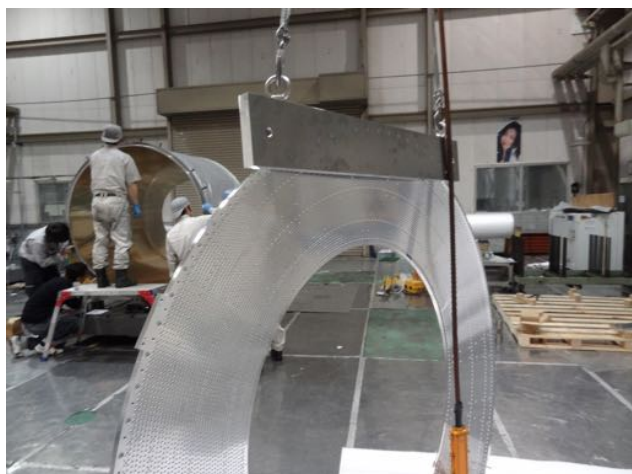


図 6: エンドプレートと外筒の組み立て作業の様子。

エンドプレートを製作した高萩の工場に外筒を輸送後、位置出しを行ってから、連結用のタップ穴などを加工し、ようやく外筒の上下左右が決まる。その後、仮組みでの位置測定を行い、エポキシ接着剤とボルトでの結合となる。エンドプレートは、片側約 40 kg で、クレーンを使って慎重に作業を行なった（図 6）。最後に再度、位置測定を行い、問題がないことを確認し、無事に組み立てが完了した。

5 ワイヤー張り

5.1 準備・CDC の輸送

ワイヤーチェンバーの一番の敵は、空気中の埃である。静電気などで簡単にワイヤー表面に付着し、放電や性能劣化の原因となる。幸いにも Belle II CDC グループのご厚意で、すでに使用していなかった KEK 富士実験棟 B4 のクリーンルームを借りることができ、その上、ワイヤー張り用の架台も使用して良いとのこと、有り難く使用させていただいた。Belle II CDC に比べると、COMET CDC は二回りほど小さいため、ワイヤー張り架台は、そのままでは使用できず、サイズ変更と治具の再製作などを行い、COMET CDC 用に改造した。

2015 年 3 月には、高萩から KEK への輸送を行い、クリーンルームへ搬入した。運良く天気にも恵まれ、年度末

ということでギリギリの日程の中、無事に搬入が完了しほっと胸を撫で下ろした。

クリーンルームへの搬入後は、ひたすらエンドプレートの清掃とラベル貼りである。約 2 万本のワイヤーの総張力は約 1.4 ton もあり、そのままワイヤーを張り進めると、徐々にエンドプレート間の距離が短くなり、最初に張ったワイヤーが緩んでしまう。これを防ぐため、36 本のステンレス棒とバネを使って、あらかじめ 1.4 ton の荷重をかけておく。エンドプレートの変形は、事前の構造計算の結果とほぼ同じ 1 mm 弱で、ワイヤー張りの進捗に合わせて、バネを緩めたり、ステンレス棒を取り除いてゆく。また、このエンドプレート間の変位をモニターするために、ダイヤルゲージを下側エンドプレートの 4 箇所（10 度 90 度 180 度 270 度）に取り付けてある。なぜ 0 度ではなく 10 度なのかは、0 度の位置に取り付ける際、筆者が力を入れすぎて固定用ネジをねじ切ってしまう、10 度の位置への変更を余儀なくされたせいであるが、どうかご内密に。ねじ切ったタップ穴は、捨て穴で他に用途はなく、全く問題無いのでご心配なく。

準備に続いて、いよいよワイヤーを張り始めるのだが、なんと、Belle II CDC のときに、ワイヤーを張った職人は全員退職しており、COMET CDC のワイヤー張りは、全員新人さんとのこと。ベテランの現場監督の指導の下、本番前にまずはワイヤー張りの練習から始まった。 $\phi 25 \mu\text{m}$ のセンスワイヤーは、扱いが非常に繊細な上、すぐに見失ってしまう。フィードスルーにワイヤーを通す作業だけで一苦勞で、地味なようで難しい作業ではあったが、徐々に慣れ、失敗の回数も減っていった。

5.2 ワイヤー張り

ワイヤー張りの手順は、Belle II CDC とほぼ同じであり、[5] に詳しく説明されている。しかしながら、Belle II CDC での 1 年以上の経験からノウハウが蓄積されており、問題点の多くが改善された。例えば、センスワイヤーは事前に巻き直しを行うことで絡まりにくくなったことや、細かい手順の改善やワイヤー張り後のチェック体制の強化が挙げられる。また、単純に大きさの問題で Belle II CDC に比べると、様々な面で作業性が格段に高かったとのことだ。（COMET CDC は、内径が大きいので内側からの作業性が素晴らしく良い。）図 7 は、約半分ほど張り進めた頃の CDC 内部の写真である。

ワイヤー張りは、業者に委託しているが、ワイヤー張力測定は、学生を含めわれわれ研究者の手で行なった。磁場と交流電源で測定したワイヤーの共振周波数を張力へ換算し、基準を満たさないものは、翌日の張り直しリストへ登録する。ワイヤーの両側に端子をつけて測定を行うため、1 日 2 人体制で半年間の長丁場のシフト組みに大変苦勞した。大阪大学はもちろん、COMET CDC

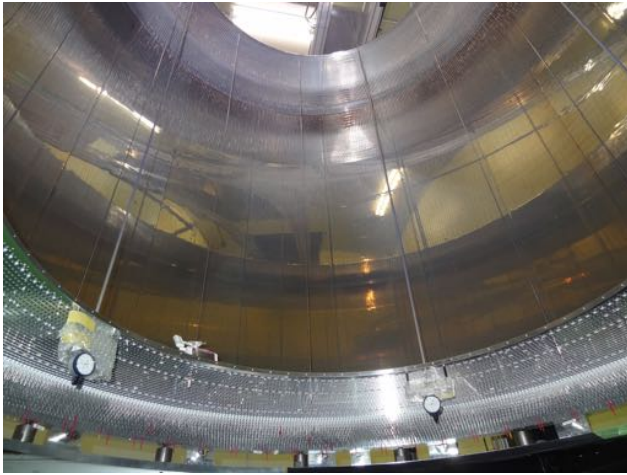


図 7: ワイヤー張り中の様子。

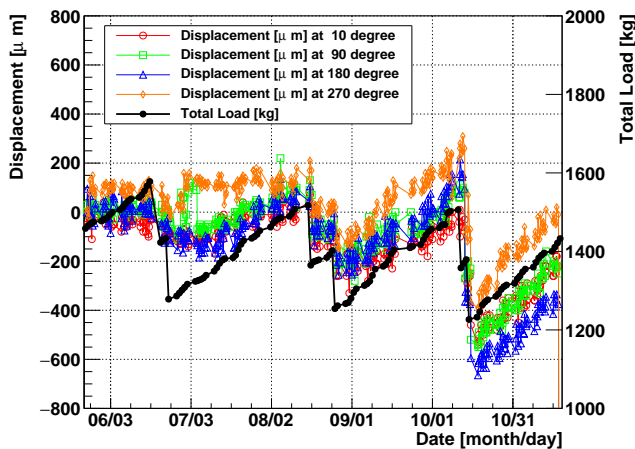


図 8: ワイヤー張り期間中のダイヤルゲージと総荷重の推移。

グループの九州大学と中国の IHEP から多数のシフト協力が得られ、なんとか張力測定を続けることができた。

図 8 は、4 箇所のダイヤルゲージによるエンドプレート間の距離の変位とテンションバーとワイヤーによる総荷重の推移を表している。ワイヤーによる荷重の増加とテンションバーの弛緩と除去による減少に連動して、距離が変動している。ワイヤー張り前に比べて、0.4 mm 程度のエンドプレートのたわみが発生しているが、許容範囲内の変位に収まった。

ワイヤー張りは、2015 年の 5 月に始まり、約半年後の 11 月 24 日に最後の 1 本を張り終えた。実働日数は 122 日で、平均して約 160 本/日と順調に張り進められた。最高記録としては、1 日あたり 322 本(フィールドワイヤーのみ)を達成し、Belle II CDC の記録(374 本)には及ばないが、新人だった作業員が立派な職人になったと言えるのではないだろうか。小さなトラブルはありつつも、ほぼ予定通りの進捗で無事に張り終えることができ、ほっと一息つきつつ、まだまだ先が長いことにすぐに気付かされた。

5.3 張力再測定とワイヤー張り直し

ワイヤー張りが完了した後は、すぐに再測定に取り掛かった。前述の通り、エンドプレート間の距離は総荷重に連動して変位しており、最終的なワイヤー張力を確認する必要がある。また、ワイヤー張力は、重力サグを計算するためにも必要で、シミュレーションや解析にも重要なインプットとなるため、全数の 19,548 本を再度測定した。

2015 年の 12 月から始めた再測定だが、これまでのシフト業務とは比べものにならないほどの重労働であった。ワイヤー張り中は、1 日のノルマはせいぜい 300 本だが、すでに全てのワイヤーは張られている。また、人的エラーバイアスを減らすため(旅費の節約も...)、3 人(筆者 2 人と学生 1 人)の少数精鋭で挑んだため、1 人あたりの負担はかなり過酷なものになった。

また、再測定中に思わぬミスも発覚した。張力計算に使用するワイヤー長のリストに古いものが使われており、最大で 8% ものずれが確認された。幸いにも、ずれは張力を過小評価する方向だったため(実際の張力はより高かった)、基準を外れるワイヤーはほとんど無かった。

累計 28 日かけて 19,548 本のワイヤーの再測定が完了した。1 日あたり平均 700 本測定し、最大値は 1200 本、我ながらよくがんばったと思う。残念ながら、約 70 本のワイヤーが基準を満たさず張り直しとなったが、張り直しは 1 週間で完了し、2016 年 4 月の再々測定で全てのワイヤーが問題なしと判断された。結局、再測定と張り直しを含めると、ワイヤー張りは約 1 年間かけて無事に完了した。

6 内筒インストール

ワイヤー張りの次は、内筒のインストールである。内筒も、外筒と同じく CFRP 製の筒だが、厚みが 10 分の 1 の 0.5 mm で強度が桁違いに弱いため、変形および変形によるアルミフィルムの剥離に注意が必要である。この薄さで直径 1 m という大きさは業者も経験がなく、実際、インストールした内筒はアルミフィルムの積層構造を工夫し、三度目の成形でようやく完成したものである。

内筒は自重で容易に変形するため、接着したリングを後で加工した外筒と同じ手法は使えず、加工済みのリングを特製の治具で位置合わせをしながら接着した。

インストールの準備として、CDC 内部の清掃やインストール治具を製作し、2016 年 6 月 10 日、ついに内筒をインストールした。エンドプレートと内筒が一番近いときには、隙間が 250 μm しかないため、クレーンとローラー付のサポート治具、ガイド糸で慎重に内筒を降ろしていき、最後は内筒リングをエンドプレートにボルトで固定した。インストール直後に、CDC 検出器の真

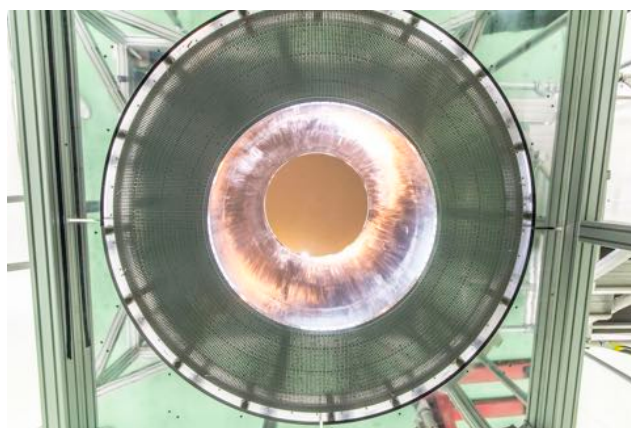


図 9: 内筒インストール後の CDC 検出器 (真下から)。

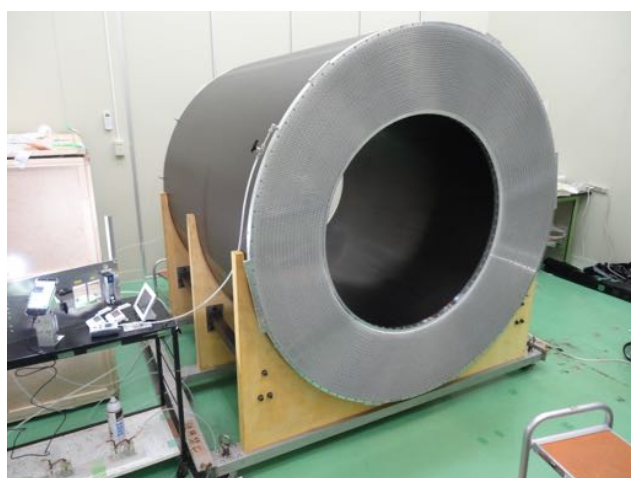


図 10: CDC リーク試験の様子。

下から撮った写真が図 9 である。

内筒のインストールをもって、CDC 検出器は一応の完成を迎えた。記念に建設の様子をまとめた動画を公開 [9] しているので、ご興味があれば是非ご覧いただきたい。

7 ガスリーク試験とガス置換

内筒のインストールを終えた後、2016年6月から CDC 内にガスを流してリーク試験を始めた (図 10)。CDC は構造体としては外筒、内筒と 2 枚のエンドプレートから成っており、ガス漏れが起り得る場所はそれらの接合部分および 39,096 箇所のフィードスルー部分である。フィードスルーは一本一本穴に通すときにノリ樹脂部分一周に渡って室温硬化 (RTV) ゴムを塗布しており、ピンの穴部分は液状接着剤を流し込んであるため、ガスはよく封じられていた。問題は構造体の接合部分である。CFRP 製の外筒と内筒はその両端部にアルミ製のリングをエポキシ系接着剤で固定し、そのリングとアルミ製のエンドプレートをボルト締めで接合している。接合部分とボルト部分はエポキシ系接着剤または RTV ゴム

で封じてあるものの、漏れを完全に封じ切ることが難しい。特に内筒はワイヤーの張力で歪んだエンドプレートに合わせて最後に接着するためどうしても隙間を生じることが避けられない。使用するガスが原子サイズの小さいヘリウムである点がさらに厄介である。ヘリウムリーク検出器でリーク箇所をひとつひとつ特定して RTV ゴムで埋めていく作業が地味に大変で時間のかかる工程であった。リーク量の測定は CDC 内にヘリウムガスを詰めて大気圧に対して微正圧状態で封じ切った後、時間経過にともなう内圧の減少を見ることで求める。当初は 300 cc/min 程度のリークがあったが現在は 50 cc/min 程度であり、ガス置換の流量 200 cc/min に対して低く抑えられている。

ガスリークを抑えられた後、He:i-C₄H₁₀ (90:10) の混合ガスでガス置換を始めた。ここでひとつ問題に直面することになる。CDC の内圧がある一定以上になると内筒が膨らんで変形を生じてしまうことがわかった。内筒は 0.5 mm 厚で直径 1 m、長さ 1.5 m の CFRP 製円筒で均一に力がかかっている分には強いが微妙な非一様性が生じると局所的に力がかかってしまい変形する。変形を生じずに耐えられる限界圧力は経験上 250 Pa であるので、内圧はこれ以下の範囲でコントロールしなければならない。さて、CDC のガス体積は 2084 l で、速くガス置換をするためにはできるだけ多い流量で流したいが、流量を増やすと内圧が上がってしまう。対策として、現在は排気ラインに水槽用のポンプを改造したものを付けることによって強制的に排気量を増やし内圧を抑えている。本実験では圧力フィードバック型の流量制御器を付けることで内圧を一定に保った運転をする予定である。

8 宇宙線試験と今後の展望

2016年8月から宇宙線を使った性能評価試験を始めた。当初遭遇した問題点としては、十分にガス置換をおこなったにも関わらずガスゲインが想定していたより異常に低かった。試作機では十分なガスゲインが得られていたので、実機に何か問題があるのではないかと懸念して様々な可能性を調査した。結果的には使っていたイソブタン用の流量計の較正がおかしく設定値の 2~3 倍も多く流れていたことにより、ガス混合比が He:i-C₄H₁₀ = 90 : 10 ではなく 75 : 25 程度にまで変わっていたことが原因であった。これは実際に水上置換法を用いて流量を実測したことで判明したわけであるが、機器の仕様を無闇に信じるのではなく、何事も実測して確かめるべしという実験の基本に立ち返ることの重要性を改めて痛感した。流量計を質量式流量制御器 (もちろん流量が正しいことを実測して確認した) に変えて改めて 90 : 10 のガス混合比で測定したところ、想定通りのガスゲインが得られ性能評価試験を開始することができた。

図 11 に典型的な宇宙線トラックによるイベントディスプレイを示す。試験は概ね順調に進んでおり、細かい問題点を修正しつつ詳細な解析が進行中である。今後

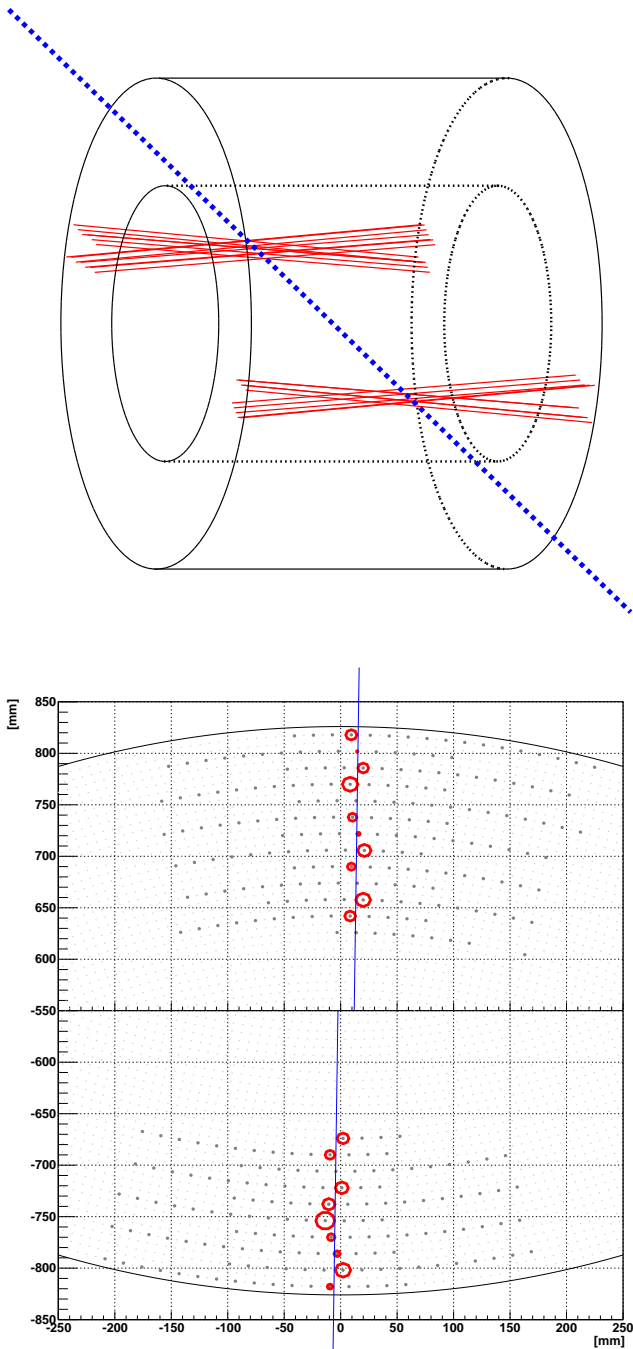


図 11: 宇宙線のイベントディスプレイ。青線は宇宙線トラックを示す。(上) 三次元表示で、赤線はヒットしたワイヤーを示す。(下) チェンバー中心面における平面表示。赤色の円の大きさはドリフト距離を表す。

は、解析ソフトウェアを整備して解析の最適化をおこない期待通りの性能が得られていることを確認する。また、現在試験は KEK つくばキャンパス富士実験棟にておこなっているが、最終的には本実験をおこなう J-PARC (東海村) に約 80 km の移送作業が残っている。まだまだやるべきことは尽きないが CDC 実機で最初の宇宙線

トラックが無事に観測できたことで、CDC の建設はひとつの節目を迎えた。

9 おわりに (謝辞)

ドリフトチェンバーは、よく理解されている検出器ではあるが、われわれにとっては、初めての挑戦であり、試行錯誤の連続であった。そんな中、COMET CDC 検出器の設計から建設・動作試験・性能評価など多岐にわたり、高エネルギー加速器研究機構の宇野彰二氏には、現在進行形で大変お世話になっている。特に、ワイヤー張りに関しては、富士実験棟 B4 のクリーンルームのみならず、ワイヤー張り架台等の施設・設備を無償でお貸しいただいた上、実際に使用するアルミワイヤーまでご提供いただいた。同じく、同機構の高力孝氏にも架台の組立時や設計に関して、大変お世話になった。COMET CDC 検出器が無事に完成に至ったのは、多くの方々の温かい協力のおかげだと(恥ずかしげもなく)自負している。この場を借りて、厚く御礼申し上げる。

また、本誌前号に掲載の秋山祐希さんのアウトリーチ活動に関する記事 [10] をきっかけに、COMET 実験のキャラクターの作成を依頼した。せっかくの機会なので、ここで(おそらく初)お披露目したい(図 12)。こちらは、Phase-I の姿で、いずれ Phase-II にドレスアップ(?) する予定である。乞うご期待。

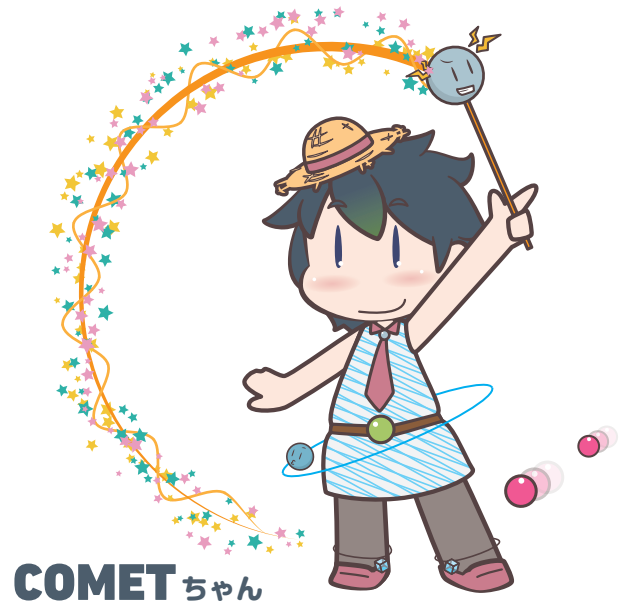


図 12: COMETちゃん by ひっぐすたん (higgstan.com)。

COMET Phase-I の主検出器である CDC 検出器が無事に完成を迎え、本実験へ向けた準備が着々と進行中である。建屋のインフラやビームライン、超伝導ソレノイドの建設なども併せて進行中であり、今夏の Stage-2 Approval を経て、COMET プロジェクトの加速度的な

発展をご期待いただければ甚だ幸いである。さいごに、コミュニティの皆様のご理解・ご協力・ご支援に大いに感謝して、おわりの言葉としたい。

参考文献

- [1] COMET 実験の公式ドキュメント, <http://comet.kek.jp/Documents.html>
- [2] 佐藤朗, 高エネルギーニュース, **26-1**, pp.16-31 (2007)
- [3] 西口創, 高エネルギーニュース, **31-3**, pp.219-227 (2012)
- [4] 深尾祥紀, 高エネルギーニュース, **34-1**, pp.29-36 (2015)
- [5] 谷口七重, 高エネルギーニュース, **32-4**, pp.241-246 (2014)
- [6] A. Ferrari, Nucl. Inst. Meth. A, **494**, pp.163-172, (2002).
- [7] T. Uchida *et al.*, 2012 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, pp. 694-698, (2012).
- [8] AlCap 実験のウェブサイト, <http://muon.npl.washington.edu/exp/AlCap/>
- [9] COMET CDC の完成記念動画, <http://www.youtube.com/watch?v=qvB-esbB2Qk>
- [10] ひっぐすたん (higgstan.com)/秋本祐希, 高エネルギーニュース, **35-2**, pp.119-122 (2016)