

## 素粒子原子核研究所メカニカルエンジニアリング・グループ

### 【グループ紹介】

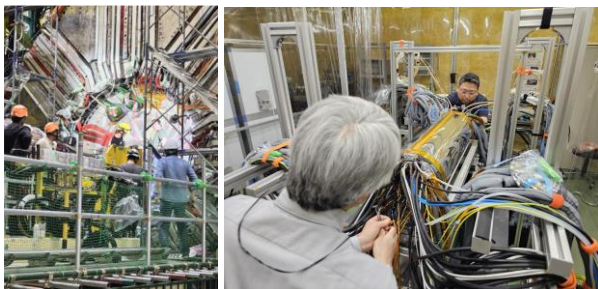
素粒子原子核研究所には様々な実験グループがあり、それぞれの研究に必要な検出器・移動架台のような機構さらにはそれらを設計する段階で足りない情報を実験的手法で知るためのテスト用装置等と様々な構造物を設計するためのグループである。また研究者からの要請は技術的に難しいものが多く、例えば物理実験に於いて特に必要とされる条件は高精度・低物質量・高剛性・耐放射線性であるが、特に高剛性と低物質量のように相反する条件を満たすための工夫が相当に求められる。そのために構造に関する技術は勿論、材料、真空、低温、回路、測定、熱（冷却）など幅広い知識を用いて設計・組立、ときには加工まで行っている。その他にもクレーン操作など実験をサポートする技術も必要である。現在は 機構の重要プロジェクトの一つである Belle II（ベルツ） 実験や CMB グループ、また本格稼働を始めた J-PARC においても多彩な業務を行っている。

（人員：技術職員 4 名+再雇用職員 1 名）

## 【つくばキャンパス】

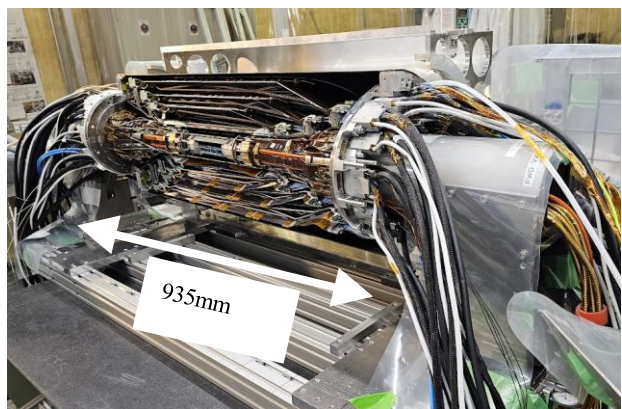
### Belle II 崩壊点検出器 (VXD)

崩壊点検出器 (VXD) は衝突点ビームパイプ及びその周りを円周状に取り囲むピクセル検出器 (PXD) 2 層、シリコンバーテックス検出器 (SVD) 4 層の合計 6 層の検出器から構成されており、10 カ国以上が集う国際研究グループとして開発を進めてきた。崩壊点検出器は 2018 年に最後の検出器としてインストールされたが PXD においては崩壊点を特定する短冊状のセンサー部が予定数装着できなかったことから VXD のアンインストール・検出器の分解・センサーの増設・ビームパイプの交換、ノイズを防ぐためのシールド増設、再組立・再インストールが予定されていた。この中でも分解・組立には狭い空間での細かな工程が多数有り、かつ非常に高価なセンサーに傷等を与えないように安全に配慮した膨大な手順書を作成し、約 2 年間はその作成とプロトタイプを用いた確認を行ってきた。2013/4 月にはよいよ Belle II 検出器より VXD のアンインストール作業が始まり、クリーンルームへの移送、



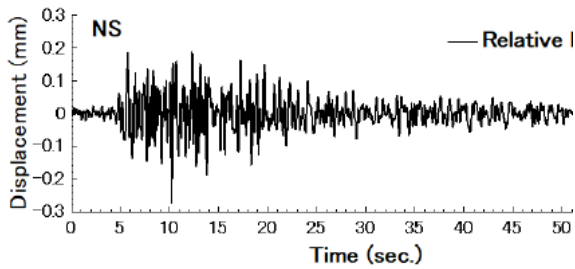
分解を危なげなく行う事ができた。

さらにセンサーの追加/ビームパイプの交換を行い、VXD の組立及び全体のシステムテストと順調にスケジュールを消化し 7 月末に Belle II 検出器への再インストールが行われたれ、現在は配線配管作業、検出器が正常かどうかテストを行っている。



### Belle 検出器/地震による相対変位の測定

Belle 検出器を構成している重要な要素の一つとして中心磁場 1.5 テスラを発生する超電導電磁石がある。また検出器の両端には超電導四極収束電磁石 (QCS) があり、高ルミノシティ化に貢献している。以前地震により磁場が乱されたことにより起電力が発生し QCS の電源遮断が発生した。そこで応答スペクトル解析をおこない、どの位の変位があったのか解析をおこなった。解析結果は Belle 検出器は地震により変位するが、QCS はほとんど動かないという事がわかった。このことから検出器と QCS の間には相対変位があるということが認識され、ビームパイプに接続されているベローズや Belle 検出器内の測定器間での干渉が起きることが懸念された。このため Belle 検出器及び床面に加速度計を設置し、実際に地震による相対変位を測定することになった。高精度加速度計を Belle 検出器上部に 3 方向設置し床面にも 3 方向設置してトリガーをかけて地震が起きたときの加速度を測定し変位に変換した。測定結果の一例を示す。このデータは筑波地方で震度 3 の地震が発生したときの Belle 検出器の相対変位である。値は 0.2mm 程度で小さい値であるが、震度に対して地震変位は指数関数的に増大するので決して無視出来る値ではない。測定は今後も続ける予定である。



震度3発生時に於ける Belle 検出器の相対変位

### Belle 検出器のための放射線遮蔽体の増強

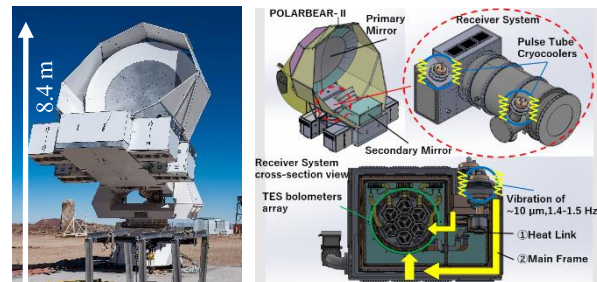
実験時に発生するバックグラウンドの影響を減らすために衝突点近傍では放射線遮蔽体が可能な限り設置されている。一つはビームライン上に設置されているコンクリート放射線遮蔽体であり、もう一つは Belle 検出器の端面に取付けられているポリエチレン製の遮蔽体である。しかし、バックグラウンド低減には未だ不十分で、しばしば機器トラブルを引き起こした。そこで更なるバックグラウンド低減のために放射線遮蔽の増強をおこなった。一つはビームライン上にある既存のコンクリート遮蔽体の内側に更に機器と干渉しないようにコンクリート製の遮蔽体を追加した。3Dcad により詳細に検討すると共に発泡スチロール製の模型を製作し実際に取付けてみる事で干渉チェックをおこなった。完成した新規コンクリート遮蔽体の写真を示す。また Belle 検出器端面の内側にもポリエチレンを追加した。また新たに放射線遮蔽体を追加する場所として Belle 検出器両端に設置されている超電導四極収束電磁石 (QCS) の表面にポリエチレン製のシールドを取付ける事である。しかし QCS 表面には数種類のケーブルや配管が取付けられており、それらとの干渉を回避するために 3Dcad による検討や実際に模型を設置して検討が行われている。



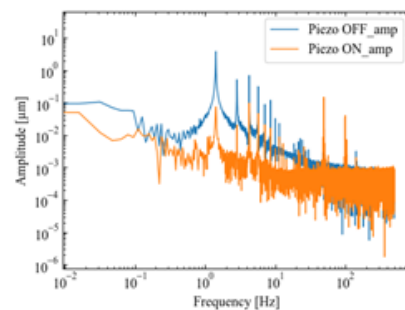
### 宇宙マイクロ波背景放射観測実験 (CMB)

CMB グループは地上で観測を行う GroundBIRD、POLARBEAR、衛星を使用して観測を行う LiteBIRD と3つのグループの総称で、ここでは POLARBEAR 検出器におけるアクティブ除振装置についての報告を行う。POLARBEAR は熱による揺らぎが少なく空気も乾燥して観測に適しているチリ/アタカマ高原 (高度 5,000m) で観測を行う。POLARBEAR 観測装置は電波望遠鏡 (主鏡 3.5m 副鏡 1.3m) にセットされ、観測部の構造及び形状は一眼レフカメラの様であり、原理も同様である。大きさはレンズ部が  $\phi 800 \times 1635\text{mm}$ 、センサー部が  $1200 \times 900 \times 500\text{mm}$  である。観測装置は 2018 年度の冬に現地 に設置され観測も始めているが、その後も観測精度を上げる

ための改良は続いており、メカグループが引き続き技術的に支えている。現在は観測中の低周波ノイズの軽減を目標として、アクティブ除振装置の設計開発を行っている。ノイズの主要な原因の一つとして考えられるのは、装置を冷却するために組み込まれているパルスチューブ冷凍機が挙げられ、冷凍機の取り付け部分でアクティブに除振する方法を検討し基礎実験を行っている。KEK では同様の冷凍機が組み込まれたクライオスタットが有る事からこのクライオスタットで振動の計測及び各種試験を行っている。まずは振動の詳細を計測してみると  $10 \mu\text{m} \cdot 1.4 \sim 1.5\text{Hz}$  の振動であることが分かり、



piezo素子を利用して実際の振動にマイナスの打ち消し合うような振動を与えて除振を行う基本設計を提言した。それを基に実際に piezo素子を使用し除振のテストシステムを構築、手動ではあるがテストを行ったところ 1 軸方向 (鉛直) のみでは有るが振動は 1/10 に低減された。実際は鉛直方向に限らず全方向での除振を行う必要があり、冷却状況による振幅や周波数のずれに対応できるフィードバック制御を行う



ことが課題となり、開発を続けている。冷凍機の低周波振動は様々な望遠鏡や重力波実験の分野でも問題となっているため、今後は他の分野

への応用も期待されている。

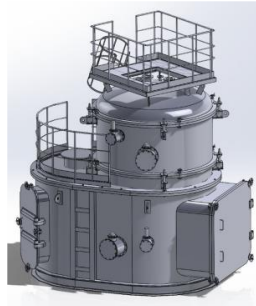
### QUP CATR 駆動機構

「宇宙はどのように始まったのか」という謎を明らかにしようとする実験が QUP グループの進める LiteBIRD 計画である。ここで紹介するのは宇宙を模した環境で種々のテストを行う Space chamber (圧力容器) 内で行う R&D に必要な「CATR 駆動装置」の開発経過である。本計画では、広視野のミリ波偏光望遠鏡を搭載した衛星を打ち上げ、宇宙空間から宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測を行おうとしている。この衛星には観測用望遠鏡が複数搭載され、その一つである LFT (以下 Low Frequency Telescope) については、KEK 内での開発・

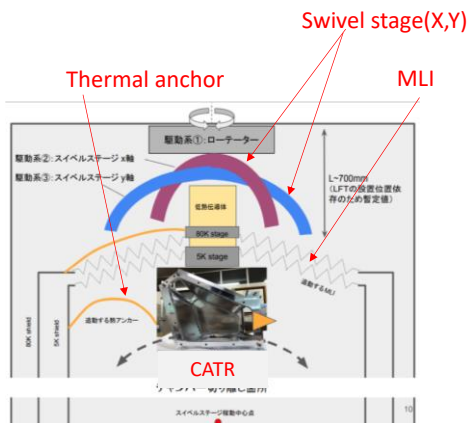
校正が決まっている。これに伴い LFT の感度校正やその他検出器の試験を行うのが、宇宙環境を再現する Space Chamber で、現在設計が進んでいる。Space Chamber は大きさ約 6m x 4.5m、容器内は衛星の宇宙空間と同じ環境温度 5K、かつ高真空から構成される。当該容器の下部に LFT を設置し、上部から吊下げられた CATR (Compact Antenna Test Range) と呼ばれる人工光源を、現在開発中の駆動装置で動かしながら、LFT の感度校正を行う。CATR は重量約 200kg で 1m<sup>3</sup> 程度の直方体である。

CATR 駆動装置は SC 上部フランジから CFRP 製の主軸を介して吊下げられる。主軸の下には Swivel stage を直交するように 2 段重ね、ブラケット及び軸を介して CATR を吊下げる構造となる。

この CATR 駆動装置は鉛直軸回りに ±91° の回転範囲を持ち、Swivel stage は各段が ±45° の範囲を 1200R の曲率をもって運動することが求められる。また



CATR は SC 内部の輻射シールド (MLI) を貫くように設置される為、CATR に追動する MLI の設置が必要となる。本装



置は実験装置の構造上、CATR を片持ち支持とし、また、SC 内の限られた空間に収めるために、非常に高剛性でコンパクトな設計が必要不可欠であり、μm オーダでの動作精度が求められている。他にも厳しい条件が重なっているが、現在は、構造解析ソフト ANSYS を用いた構造解析を行いながら、躯体の変形を小さく抑える設計条件を探っている。

## 【東海キャンパス】

### J-PARC COMET 実験

COMET 実験は J-PARC で作られた陽子ビームを π 中間子生成標的に当て発生した π 中間子を電磁石により輸送。その過程で π 中間子がミュオンに変化、さらに稀に起こる「ミュオンが電子に転換する過程 (μ-e 転換) を観測し、発生確率を知ることで標準理論を超える新しい物理を模索する実験である。メカグループでは、実験に必要な π 中間子生成

標的周りのシールド及びシールド挿入架台。最下流に位置する電子線検出器本体及び冷却システムの設計製作に携わっている。検出器本体の設計・組立に関しては前回の報告で述べているので今回は構造体の組立後に関して記載する。検出器は組立しただけでは稼働させることは出来ない。実際には信号処理系の組込み、さらには各種信号処理用エレクトロニクスからの発熱を冷却するための冷却システムも組み込んで始めて検出器として動作させることが出来る。ただ COMET 実験はビームの出力を段階的に上げていくので 2022 年度末には低出力カビームの Phase-α、その後数年かけて Phase1, 2 と続いていくこ



とになっている。今回行う Phase-α では冷却システムを担当していた技術職員が年度途中で長期海外研修に派遣されたこと、また低出力かつレートの低いビームでもある事から、Phase-α では冷却システムは組み込まず、検出器及びエレクトロニクスのみでのテストを目的としたシステムで行う事になった。そのためエレクトロニクスを組み込むための治具類のみを設計し、2022/1 月にそれらを組み込んだ検出器が完成し、並行



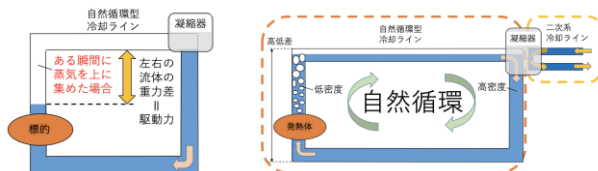
して進めていたビームライン軸に設置するための位置調整架台も組立を行いビームラインに無事設置を行い Phase-α 実験を行う事が出来た。

## 【その他】

冷却水の相変化を用いた革新的な自然循環型標的冷却システムの開発

メカグループでは通常の業務の他に、亀井氏を中心に科研費による研究も行っているので紹介を行う。

素粒子実験では実験に必要な二次粒子を加速器内で生成したビームを標的に照射して生成することがある。その場合、実験の精度を上げるためには多量の二次粒子を生成して観測することで解像度を高める必要がある。このような需要により標的への照射エネルギーは近年益々高まっており、水冷により積極的に標的を冷却する手法が主流である。しかし、水冷手法では冷却設備の多重化が求められるため、ポンプを複数台用意し、各種センサーを備えた堅牢な冷却水循環システムが必要となる。このような課題を克服するための新たな標的冷却手法として、冷却ループ内で相変化（沸騰・凝縮）を引き起こすことで、ビーム発熱自体が冷却水を循環させる駆動力を生み出す構成とすることにより、冷却ループ内にポンプ等循環システムが不要となることに加えて、熱伝達率が水冷に比べて一桁高い沸騰伝熱を利用できる、ビーム発熱による自然循環型標的冷却システムの開発を開始した。



上左図は発生蒸気により駆動力が生まれる概念を、上右図は自然循環型標的冷却システムの試験装置を示す。当初の予定では複数の試験装置の製作を予定していたが、試験装置の構造を工夫することにより、各種試験を単一の試験装置で実施可能となる試験装置を設計・製作した。またビーム標的を模擬した円柱型ヒータを製作し、試験装置（左写真）の試運転を実施し本冷却システムにより目標のキロワットオーダーのビーム発熱量を除熱可能であることを確認した。

なお、この研究は“第20回加速器学会年会賞（口頭発表部門）”を受賞しました。