

KEK Proceedings 2015-12  
March 2016  
A/H/M/R/D

# 技術交流会・技術セミナー報告書

## Proceedings of the Meetings on the Technical Study and Technical seminar at KEK

KEK, Tsukuba, Japan

September 28, 2015

August 24, 2015

July 17, 2015

### 編集

東 憲男、豊田 晃弘、池戸 豊、岡田 雅之、近藤 良也、大越 隆夫

### Edited by

N. Higashi, A. Toyoda, Y. Ikeda, M. Okada, Y. Kondou, T. Oogoe



High Energy Accelerator Research Organization

**High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 2016**

KEK Reports are available from :

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
1-1 Oho, Tsukuba-shi,  
Ibaraki-ken, 305-0801  
JAPAN

Phone: +81-29-864-5137  
Fax: +81-29-864-4604  
E-mail: [irdpub@mail.kek.jp](mailto:irdpub@mail.kek.jp)  
Internet: <http://www.kek.jp>

## はじめに

技術部門連絡会議  
技術調整役 山野井 豊

以前に広島県呉市の高専に講師として行く機会があった。呉市と言えば瀬戸内海に面した臨海都市で、先の大戦では日本一の工廠である呉海軍工廠がおかげ「戦艦大和」などが建造された。そのためこの町には呉市海事歴史科学館（大和ミュージアム）があり、講義を済ませた後に訪れた。この戦艦大和は史上最大の戦艦として排水量 72,809 トン、最大射程 42km、口径 46cm (18 インチ砲)、砲身重量 165 トン、3 連装の砲塔重量 2,510 トンと世界最大最強を誇っていた。訪れる前から気になっていたのは、その長さ 20.7 m の砲身である。

砲身の穴は限りなく真っ直ぐでなければならない。以前、銅ブロックに直径 1/2 インチ、長さ 2 m 程の水路を穿く必要があった。水平に加工しようするとドリルの先端は下向きに曲がっていく。また穴周囲の肉厚が異なると薄い方に曲がってしまう性質がある。加工の勉強に行った工場が戦前、戦後を通して巨大な鉄の塊に砲身の穴を穿つ工場で、いかに真っ直ぐな長い穴を開けることが大変であるか聞かされていたのでそこに興味があった。

しかし、大和ミュージアムを訪れて感動したことはこの砲身の話だけではなかった。戦艦大和の設計者である平賀譲のノートの一部が展示してある。そのノートには当時の構造計算やスケッチが細かな字で記載されていた。とにかく計算や図がびっしり書かれており、実際に見たり、思いついたりしたことが漏らさず書かれている。

その時、「電子立国日本の自叙伝」(1991 年) という NHK のドキュメンタリー番組を想い出した。日本の大学、電機メーカーの技術者がアメリカのベル研や GE にトランジスターの製造技術を学びに行くのだが、もちろん企業秘密の関係で写真撮影は許されない。そのような中で見聞きしたこと、目の前にあるものをすべて（働いている女工さんの工具、配置、座り方まで）をノートに書いて日本に持ち帰るというシーンであった。

共通していることは見聞きすることをノートに記録するということである。人間は時間が経てば忘れる。書くという行為は記録すると同時に自分自身に忘れない記憶を作る作業でもある。書いたものを第三者が読み返せばその第三者に伝えることが出来る。

この技術交流会報告集も話したことを自分でもう一度整理する、聞き逃したことをきちんと確認する、当日参加できなかつた人にも伝えるという役割があると思う。だから面倒がらず、後で読んでも恥ずかしくないよう努めたい。

末筆となりましたが、交流会の企画を実行して頂いた交流会実行委員、協力して頂いた共通基盤研究施設の方々、またご来聴頂いた方々に感謝致します。

## 平成27年度 KEK技術交流会・技術セミナー報告書

### 技術交流会テーマ 「最近のトピックス」

●日時：平成 27 年 9 月 28 日

●場所：つくばキャンパス 4 号館セミナーホール

東 海キャンパス 1 号館 324 室 (TV 会議)

〈平成 27 年度採用新人紹介〉

13:00 ~ 13:10 大中 政弥 (素核研)、小玉 恒宏太 (加速器)

大山 隆弘 (共通基盤)、保住 弥紹 (共通基盤)

〈平成 26 年度採用新人業務紹介〉

13:10 ~ 13:25 西田 麻耶 (素核研)

13:15 ~ 13:40 三浦 一喜 (加速器)

〈技術交流会報告〉

13:40 ~ 14:00 「安全業務について (素核研安全グループの活動)」 田中 伸晃 (素核研)

14:00 ~ 14:20 「MLF 非結合型モデレータにおける遅延時間の補正」 大下 英敏 (物構研)

14:20 ~ 14:40 「QCS 移動架台の設計と据え付け」 山岡 広 (加速器)

### 技術セミナー 「欧州合同原子核研究所 (CERN) への日本人職員 (技術職) 派遣研修」

●日時：平成 27 年 8 月 24 日

●場所：つくばキャンパス 3 号館セミナーホール

東 海キャンパス 1 号館 247 室 (TV 会議)

13:30 ~ 15:00 川村 真人 (加速器)

●日時：平成 27 年 7 月 17 日

●場所：つくばキャンパス 3 号館セミナーホール

東 海キャンパス 1 号館 227 室 (TV 会議)

14:00 ~ 15:30 高瀬 亘 (共通基盤)

## 目 次

---

(1) 業務内容紹介 .....	1
西田 麻耶 (素核研)	
(2) J-PARC MR 主電磁石新電源用恒温ユニットの開発 .....	6
三浦 一喜 (加速器)	
(3) 素核研安全グループの活動 .....	10
田中 伸晃 (素核研)	
(4) MLF 非結合型モデレータにおける遅延時間の補正 .....	14
大下 英敏 (物構研)	
(5) QCS 移動架台の設計と据え付け .....	21
山岡 広 (加速器)	
(6) 平成 26 年度 CERN 派遣研修報告書 .....	26
(派遣先 BE Department / Radio Frequency、期間 2014.7 ~ 2015.6)	
川村 真人 (加速器)	
(7) 平成 26 年度 CERN 派遣研修報告書 .....	33
(派遣先 Operating System and Infrastructure Service、期間 2014.6 ~ 2015.5)	
高瀬 亘 (共通基盤)	



# 業務内容紹介

西田 麻耶<sup>#</sup>

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

## Abstract

KEK 素粒子原子核研究所に着任し、研修を経た後ニュートリノグループへと配属した。配属後 T2K 実験の標的関連の業務を行ってきた。ニュートリノビームラインのビーム大強度化に向けて装置の開発、改良に従事し、業務に必要なソフトウェアを習得し、また最新技術獲得のための視察をしてきた。今回その内容を紹介する。

## 1. はじめに

私は、2014 年 4 月に素粒子原子核研究所に採用され、メカニカルエンジニアリンググループでの研修を経て、2014 年 11 月からニュートリノグループに着任した。ニュートリノグループでは、T2K 実験の標的に関係する業務を従事している。現在、グラファイト標的の冷却系ヘリウムガス循環システムの改良と、ビーム大強度化に向けての電磁ホーンバスバーの開発・改良を行っている。今回、この 2 つの業務内容の報告、業務、研修を通して習得又は習得中の知識、ソフトウェアの紹介、また最新技術獲得のために行った視察内容について報告する。

## 2. T2K 実験標的系業務内容報告

T2K 実験とは、東海-神岡間長基線ニュートリノ振動実験である。大強度陽子加速器 J-PARC を使用して人工ニュートリノビームを生成し、岐阜県の神岡町にあるスーパーカミオカンデ検出器にビームを飛ばし、ニュートリノ振動を測定している。2013 年にミュオンニュートリノから電子ニュートリノへと変化する現象を世界で最初に発見し、現在は反ミュートリノからの振動を測定中である。

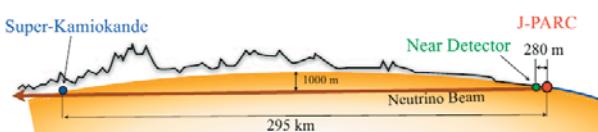


図 1 T2K 実験

### 2-1. グラファイト標的長寿命化のための冷却ヘリウムガス循環系改良

この業務内容について物理学会（第 70 回年次会、早稲田大学）で口頭発表を行った。又、HINT2015 (J-PARC) にてポスター発表をした。

#### (1) グラファイト標的長寿命化のためのヘリウムガス中酸素濃度制御の重要性

加速した陽子ビームをグラファイト標的に入射させることで、大強度ニュートリノビームを生成して

いる。標的は、直径 26 mm、長さ約 900 mm円柱体の等方性グラファイト (IG-430) である。図 2 に標的を示す。

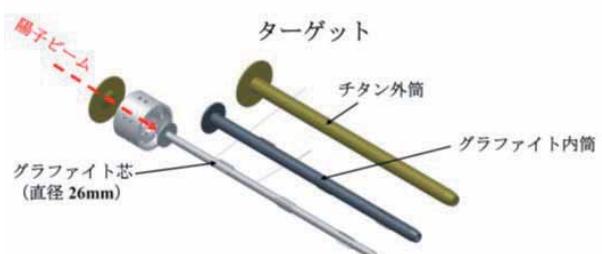


図 2 標的

標的となるグラファイトの上から、円筒状のグラファイトとチタン容器の順に覆う構造をしており、ヘリウムガスを流することで、ビーム運転時に標的を冷却し 400~700°C に維持している。あえて高温に維持して、放射化によるグラファイト標的のダメージを減らしている。標的の消耗はビーム運転時の炭素の酸化で起こり、ヘリウムガス中の酸素濃度が標的の寿命を決定している。ヘリウムガス中の酸素濃度は、100ppm 以下とすることで 5 年間安全率 2 以上を保つことができる。

標的はニュートリノビームを生成するのに必要不可欠である。グラファイト標的の交換に半年オーダーでの時間がかかるので実験をストップさせないためには標的の寿命を長くすることが不可欠である。

#### (2) 標的冷却用ヘリウムガス循環系の現状

標的冷却用ヘリウムガス中の不純ガスの濃度 ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ) はガスクロマトグラフィーによって定期的に測定を行っている。

図 3 はビーム運転時の不純ガス濃度の時間変化の測定結果である。

ビーム運転前には、酸素濃度は設計濃度 100ppm よりも十分に低い値であった。しかし、ビーム運転を開始すると  $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$  濃度は、運転前のものともとの酸素濃度から予測される値よりも、大きな値が測

<sup>#</sup>maya.nishida@kek.jp

定された。増加した CO と CO<sub>2</sub> 全てが炭素の酸化と仮定すると、43 日間で 0.05wt% の割合で標的は消耗していることとなる。

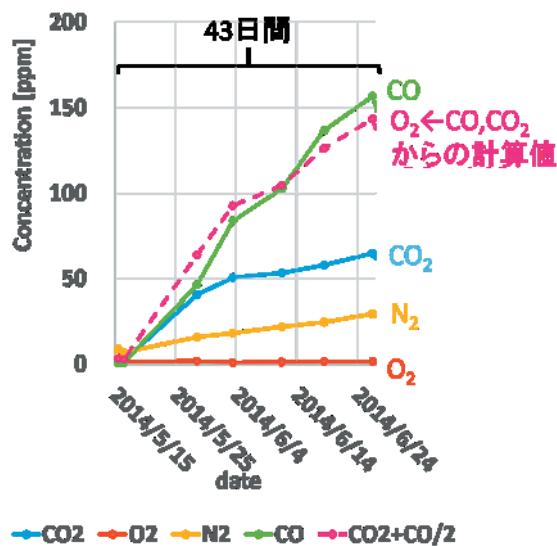


図3 標的冷却用ヘリウムガス中不純ガス濃度時間変化

CO, CO<sub>2</sub> 濃度上昇の原因としては、2つの可能性が考えられる。1つ目は、ビーム運転時標的が高温となるため、標的グラファイトに吸着されていた酸素がヘリウムガス中に離脱し、グラファイトと反応し、CO, CO<sub>2</sub> が発生したということ。2つ目は、測定していない H<sub>2</sub>O などの不純ガスに、陽子ビームが照射されたことによって発生したと考えられる。

標的のチタン容器は 0.3mm と厚さがとても薄いため、標的部分を真空引きすることができない。このためビーム運転時ヘリウムガスから酸素を取り除くことと、循環系内の H<sub>2</sub>O の濃度制御を行う必要となる。今回、酸素除去のため、フィルター装置を増設したので、以下に詳細を述べる。

### (3) 酸素ガス除去のためのフィルター装置の増設

ビーム運転時にも、酸素ガスを除去できるように、既設のバイパスラインにフィルター装置の増設を行った(図4)。

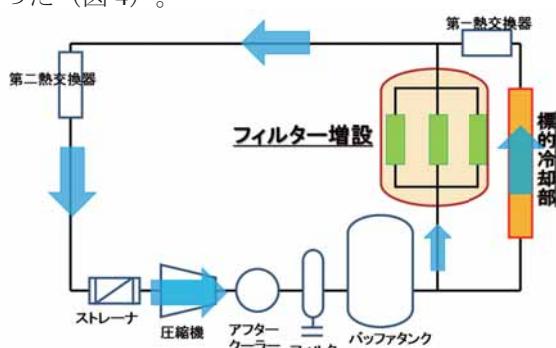


図4 標的冷却ヘリウムガス循環系  
フィルター本体のスーパークリーンガスフィル

ターは SCIENCE GLASS ECHNOLOGY 社のものを用いた。このフィルターはベースプレートに装着して使用するもので、脱着は工具を使わず、手で行うことができる。フィルターの仕様を表1に示す。ヘリウムガスは、フィルター装置のみには循環させることはできず、標的とフィルター同時に循環させて使用する。これは、ビーム運転時使用する冷却用ヘリウムガス循環系用のコンプレッサーでヘリウムガスを循環させるため、フィルター単独だと流せる最大流量よりも過剰な流量となるためである。



図5 左フィルター 右フィルターベースプレート

表1 スーパークリーンガスフィルター仕様

#### フィルター仕様

精製後ガス純度(%) > 99.9999%

= 1ppm

最大圧力	1.1 MPa
最大流速	0.52 m <sup>3</sup> /hour※
有効ガス	He, H <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , Ar
サイズ	25.8cm × Φ3.85cm
重さ	0.26kg
吸着容量	H <sub>2</sub> O 1.8g, O <sub>2</sub> 75ml, HC 7g(n-butane換算)

※99.9999%純度ガスの精製を保証できる  
最大流速は、0.14 m<sup>3</sup>/hour

また、フィルター周囲をヘリウムガス環境下に置くため、チャンバー内に設置した。チャンバーは、以下の条件を満たすよう設計した。製造、設置は第一鉄工株式会社が行った。

- ・ フィルター、チャンバー内それぞれヘリウムガス充填および真空引きができるよう配管を設けた。
- ・ チャンバーは使用圧力 0.3MPa、安全率 2 で設計した。窒素ガスを用いて圧力 0.3MPa で 30 分圧力保持し、耐圧・気密の確認をした。溶接個所は浸透探傷検査を行った。
- ・ チャンバーを開けずに外部から目視で流量とフィルターの交換時期を確認できるよう片方のフランジをアクリル製にした。JIS 規格 B8265 アクリルフランジの厚さを 40mm に設計した。
- ・ フィルターをベースプレートごと、チャンバー

外に取り出せるようにした。

- 流せる最大流量は、 $0.14\text{m}^3/\text{hour}$  である。これは、フィルターの仕様による。

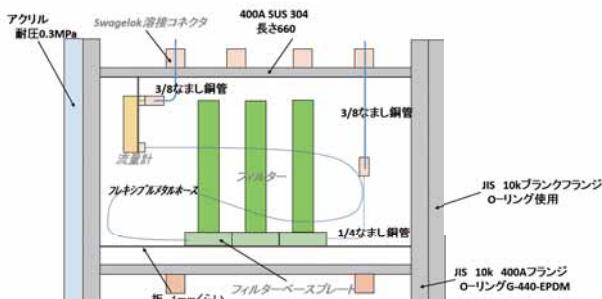


図 6 フィルター装置概念図

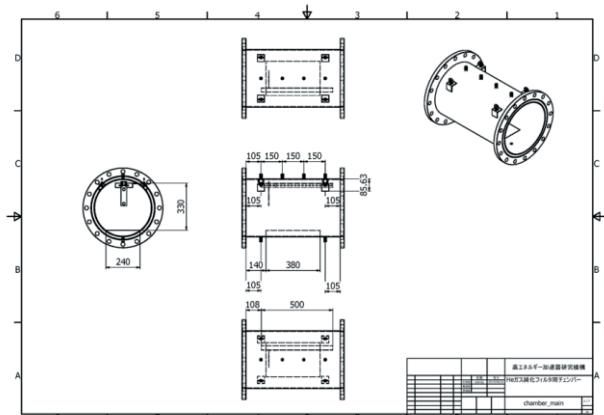


図7 チェンバー図面



図8 フィルター装置 正面



図9 フィルター装置内部

#### (4) フィルター装置の酸素除去能力測定試験

ビーム停止時に、フィルターと標的部にヘリウムガスを循環させて、酸素濃度変化を測定した。また、フィルターを使用せずに標的部のみにヘリウムガスを循環させた場合の酸素濃度変化も測定した。両者の濃度変化の差から、フィルターの酸素除去能力を見積もった。

結果を表 2 に示す。結果より 24 時間ヘリウムガスを循環させると、標的部のみで初期濃度の 71%、フィルターと標的部では 72~74%へと減少すると推定される。従って、フィルターを 24 時間使用すると初期酸素濃度の 1~3%の量の酸素を除去すると推定できる。

表2 フィルター酸素除去能力性能試験結果

日付	2014/10/28	2015/4/22～4/24	2015/1/8
循環経路	フィルター+標的	フィルター+標的	標的
初期濃度 [ppm]	32	15	10
循環後濃度 [ppm]	13	6	7
循環時間 [hour]	16.0	17.3	7
濃度変化 [ppm]	19	9	3
初期濃度 / 循環後濃度 [%]	41	42	66
標的の吸着酸素量 [ml]	31	14	5
フィルター吸着酸素量 [ml]	53	24	

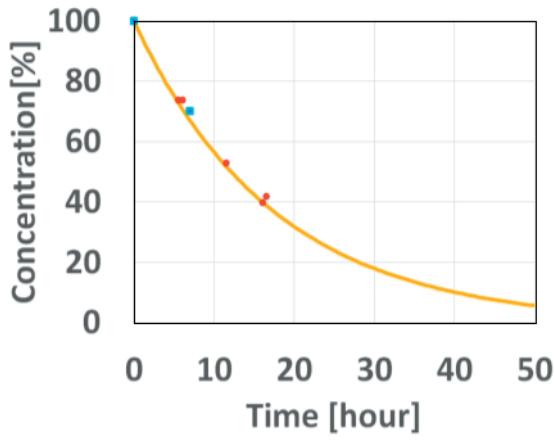


図 10 フィルター酸素除去能力評価試験結果

### (5) まとめ

T2K 実験において炭素標的長寿命化のために標的冷却用ヘリウムガス循環系にフィルター装置を導入した。ビーム停止時に、フィルター吸着能力を確認した。その結果、24 時間フィルターを使用するともとの酸素濃度の 1~3% の量の酸素を取り除くことができると推定できた。

将来的には、次に述べる改良を計画している。

- ・ フィルターの本数を増やすことで吸着能力を向上させる。
- ・ 標的と同程度の流量を流せるバイパスラインを増設し、フィルター装置だけにヘリウムガスを循環させることができるようとする。
- ・ O<sub>2</sub> の正確な量を測定するため、ヘリウムガス中の H<sub>2</sub>O 濃度を測定する。
- ・

### 2-2. ビーム大強度化に向けての電磁ホーンバスバーの開発改良

T2K 実験では、電磁ホーンという装置を用いてニュートリノビームを検出器（神岡）方向へと間接的に収束させている。電磁ホーンはスーパーカミオカンデを通過するニュートリノ粒子数がない状態に比べ約 10 倍に増やす非常に重要な役割を果たす収束装置である。

電磁ホーンは、二重円筒状導体であり、瞬間に 320kA の大電流を流すことによりトロイダル磁場を発生させている。この電流によって発生するジュール熱と二次粒子の衝突で発生する熱により電流端子（バスバー）温度は上昇する。現行バスバーはヘリウムガスを吹き流すことにより冷却している。今後 750kW 運転が行われる予定だが、流す電流のパルス時間間隔が短くなることと、衝突する二次粒子数が増えることによってバスバーの上昇温度は増大し、ヘリウムガス単体では冷却能力が不足する。そのためバスバー内部に摩擦攪拌接合により流路を作製し水を流す冷却方法の開発を検討している。

現在、300×500×12 mm のアルミニウム合金板に摩擦攪拌接合で流路を作製したテストピースに対して冷却能力を評価する測定を行う準備を進めている。

### 3. 習得又は習得中の知識、ソフトウェアの紹介

#### (1) ANSYS (FEM)

構造解析、磁場解析、伝熱解析の基礎知識の学習とともに、ANSYS での解析方法を習得中である。電磁ホーン水冷バスバーテストピースでの試験と同条件での解析を試みているところである。

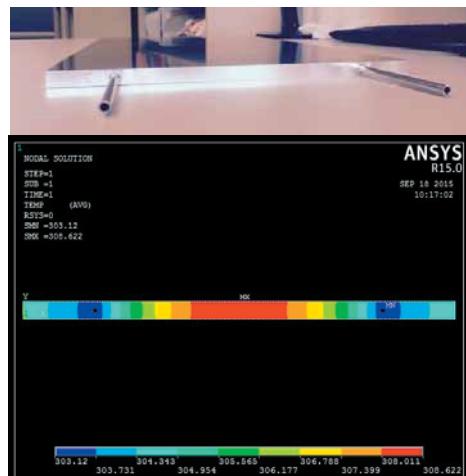


図 11 水冷バスバーテストピース（上）、ANSYS 解析（下）

#### (2) Inventor (3D CAD), AutoCAD (2D CAD)

フィルター装置のチェンバーの設計と ANSYS でのバスバーの磁場解析を行うために使用した。

#### (3) Geomagic Qualify、CAM2 Measure X

FARO Arm (3 次元位置検出器) の使用方法を勉強し、Belle II 実験 CDC のワイヤーによる端板の歪みや取り付けフレーム形状を 50 μm の精度で測ることができた。

### 4. 最新技術習得のための観察

最新技術習得のため、以下の観察を行った。

- ・ 摩擦攪拌接合の観察：千田精密工株式会社で第 2 第 3 電磁ホーンの検収
- ・ 他のニュートリノ実験装置観察：Fermilab にて LBNF、NO<sub>ν</sub>A 実験標的、NUMI 実験の電磁ホーンなどを観察した。
- ・ 常伝導磁石製造工程（ハドソン・ブループ）検収に同行）：NEC トーキン工場でコイルの巻き線作業や組み立て作業などを見学

### 5. まとめ

採用後、T2K 実験の標的関係の業務を行うことで、

構造設計や伝熱解析の知識、ソフトウェアの知識、経験を得ることができた。今後も技術の習得や経験を積んでいくことで、積極的に業務を行っていきたい。

# J-PARC MR 主電磁石新電源用恒温ユニットの開発

三浦一喜 <sup>#, A)</sup>, 佐川隆 <sup>B)</sup>, 栗本佳典 <sup>A)</sup>, 下川哲司 <sup>A)</sup>, 森田裕一 <sup>A)</sup>

A) 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

B) ユニバーサルエンジニアリング

## Abstract

現在、J-PARC では将来計画であるビームパワー増強のために、主リングの運転周期を 2.5 秒から約 1 秒へと早める高繰り返し化の実現が求められており、その計画の一部として主電磁石用新電源の開発が進められている。新電源開発過程において製作されたプロトタイプ電源制御盤では、A/D 変換部用恒温ユニットを除いた全てが KEK 製となっているが、恒温ユニットに関しては現行電源予備品を使用している状態であり、今後、KEK 製の電源制御装置を新電源に用いる際、現行電源予備品ではコスト面、調達性での不都合が懸念される。そこで懸念の解消、電源制御装置の全てを KEK 製とすることを目的として、恒温ユニットの開発を行った。本発表では、恒温ユニットの設計・製作および、性能評価試験結果を報告する。

## 1. はじめに

現在、J-PARC 50GeV 主リング(MR)で、ニュートリノ実験用の速い取り出しにおいてビーム大強度化達成のために、運転周期を 2.5 秒から 1 秒程度へと速めるアップグレードを計画中である。本アップグレード計画最大の目玉の一つが、高繰り返し対応の新主電磁石電源への置き換えである<sup>[1]</sup>。

新電源の制御装置では、複雑な制御に耐えうる柔軟性や再現性を満たすことを目的として、A/D 変換を介してのデジタル制御が採用された<sup>[2]</sup>。

新電源では電源出力のフィードバック制御に用いるため、電源から負荷(主電磁石)に向けての出力部にとりつけられた DCCT で読み取った出力電流値を  $1\Omega$  シャント抵抗で電圧値に変換、その電圧値を A/D 基板でデジタルデータに変換して、制御基板に送っている(Fig.1)。

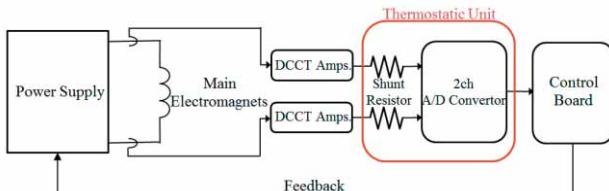


Figure 1: Overview of new power supply feedback loop

ビーム大強度化に向けて必須となる電磁石電流の高精度制御のためには、A/D 変換部における電流計測に ppm レベルでの安定度が必要である。この ppm レベルでの測定安定度実現には、A/D 変換部および、シャント抵抗の温度特性を考慮し、それぞれを一定温度に保つためのコントロールが重要となる。我々は A/D 変換基板、シャント抵抗のそれぞれにおいて、電磁石電流指令値に対して誤差 10 ppm 以内での制御を目標と定めて、恒温ユニットの開発を行った。

## 2. 恒温ユニット開発の必要性

恒温ユニットの検討を行った。

### ・市販品

性能に関しては十分であるが、小型の物でも現行に比べてサイズが大きく、非常に重量があるため、制御盤内への取り付け、特に想定している盤内側面への取り付けは不可である。

### ・現行恒温槽

サイズ、重量、性能共に現行での実績はあるが、現行電源の製作メーカー品であるため、恒温ユニット単体購入時には高コストとなり、また、そもそも別メーカー製となる新電源に対して単体購入が可能であるかといった調達性に難がある。

### ・自作恒温槽

価格に関しては、回路設計、筐体設計共に自身で行うため、他の二つに比べ大幅にコストの削減が可能である。また、サイズおよび重量については現行恒温槽と同程度としたうえで、現行恒温槽で不便であったメンテナンス性の改善などについて再設計することで、自由度の高い制御盤内配置が可能であるため、自作することを決定した。

以上を Table1 にまとめる。

Table1: Summary of cost comparison

	市販品	現行恒温槽	自作恒温槽
価格	約100万円～	150万円～	50万円程度(見込み)
大きさ	440*690*695 [mm <sup>3</sup> ]	190*240*200 [mm <sup>3</sup> ]	190*240*200 [mm <sup>3</sup> ]
重量	80kg～	12kg	12kg(見込み)

<sup>#</sup> kazuki.miura@kek.jp

### 3. 制御方式

恒温ユニットのコントローラは Fig. 2 に示したようにホイートストンブリッジと計装アンプを用いた検出部と、オペアンプを用いた PI 制御による制御部によってフィードバック制御を行うアナログ制御方式を採用した。

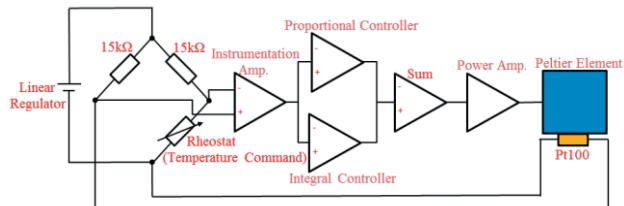


Figure 2: Control method.

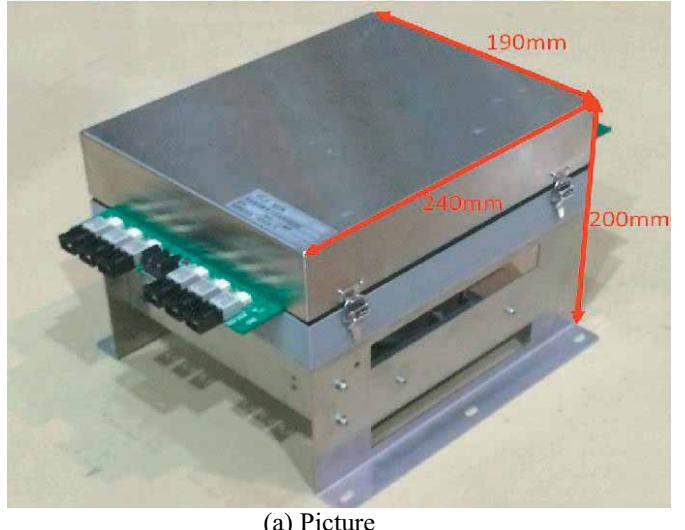
制御の流れは、まずコントロール対象の温度測定を恒温槽内に仕掛けた Pt100 により行い、その測定値と可変抵抗による設定値をホイートストンブリッジで比較する。PI 制御を介して終段のパワーアンプで電力増幅を実施し、ペルチェ素子に駆動電力を供給するというものである。

なお、本コントローラにおいてデジタル制御ではなくアナログ制御方式の温度コントローラを選択した理由は、デジタル制御の場合に発生してしまうノイズが、A/D 変換部に対して影響を与える可能性を懸念したためである。同じく温度コントローラ電源もスイッチングノイズを懸念し、スイッチング電源ではなく、リニアレギュレータを採用している。

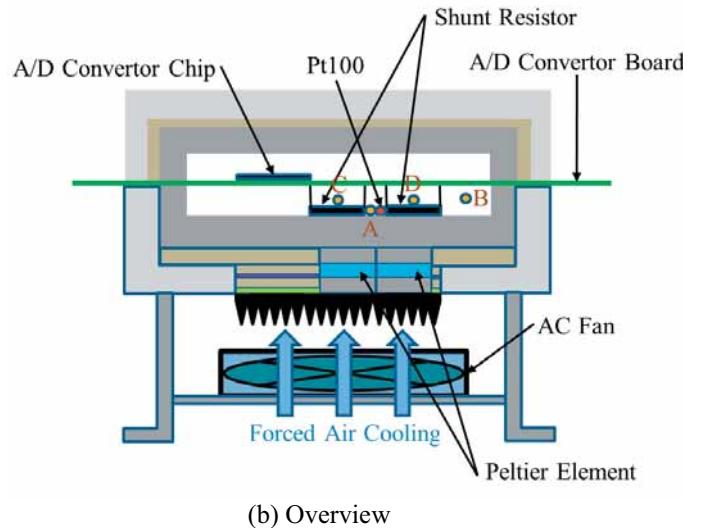
### 4. 恒温槽筐体製作

製作した恒温槽筐体外観写真を Fig. 3 (a) に示す。電源制御盤内に格納するため、A/D 基板およびシャント抵抗のみを格納するコンパクトサイズ(190 \* 240 \* 200 [mm<sup>3</sup>])の恒温槽となっている。構造は Fig. 3 (b) に示した通りである。A/D 基板は外部入出力の取り回しが容易となるよう、温度コントロール対象である A/D チップ部およびシャント抵抗のみを恒温槽内に収納する形とし、入出力端子のある基板端は恒温槽外に露出させる構造とした。断熱については fig. 3 (c) に拡大図を示すペルチェ素子取り付け部を重点的に対応した。ここは温度コントロール対象であるベースプレートと外乱となる外気、ヒートシンクが近接する箇所であるため、断熱構造は断熱材のみでは無く、風防、熱放射軽減のために断熱材間にアルミテープを挟んだ構造とし、ヒートシンクとの間に筐体との固定も兼ねて、弾性エポキシ接着剤を充填した。

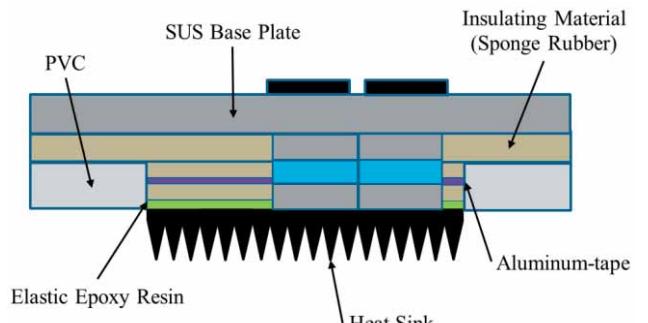
ペルチェ素子については、新電源運転時のシャント抵抗発熱量 1 W に対し、ペルチェ素子放熱側と吸熱側の  $\Delta T$  が 20 K の条件(放熱側 50 °C、吸熱側 30 °C を想定)において、供給電流 1.7 A で 10 W の吸熱量を有するものを選定した。



(a) Picture



(b) Overview



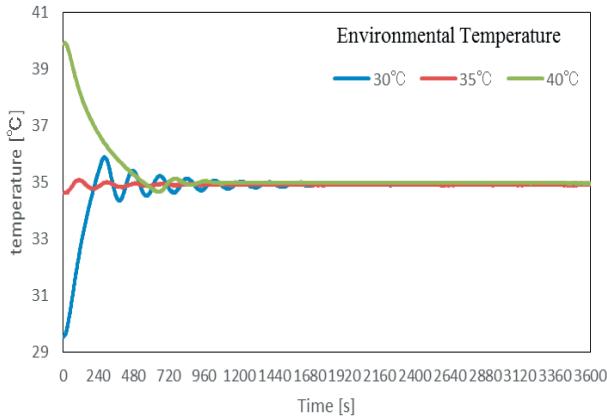
(c) Enlarged view of the peltier element

Figure 3: Structure of the thermostat.

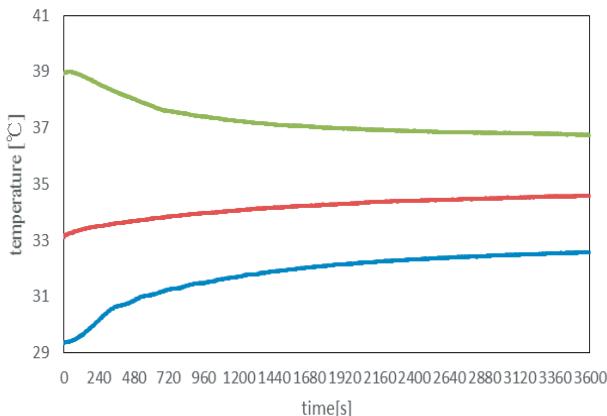
## 5. 本番模擬環境下での性能試験

大型恒温槽に本恒温ユニット一式(恒温槽および温度コントローラ)を格納し、温度コントローラの温度設定値を 35 °C に設定した。環境温度( $T_e$ )を 40 °C、35 °C、30 °C の 3 パターンに変更し、さらに本番環境模擬としてシャント抵抗に 1 V / 1 Hz の正弦波を入力した状況で、いずれの状態からでも設定値に温度を遷移、安定化させることの可否、安定精度を試験した。なお、40 °C は真夏最も過酷な状況下での J-PARC 電源棟温度の模擬でもある。

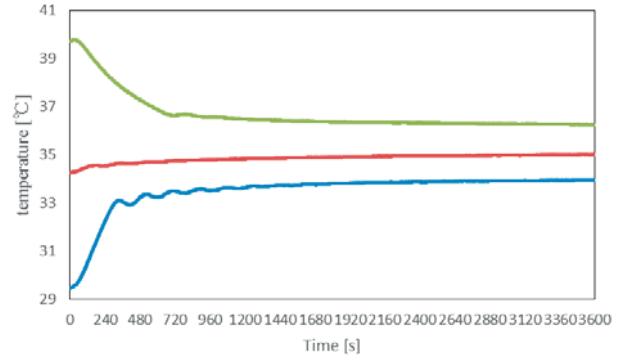
試験結果を、Pt100 取り付け部 (Fig. 3 (b) ポイント A)、恒温槽内 (Fig. 3 (b) ポイント B)、シャント抵抗#1 (Fig. 3 (b) ポイント C) および#2 (Fig. 3 (b) ポイント D) の計 4箇所における 1 時間での温度遷移を下記 Fig. 4 に示す。



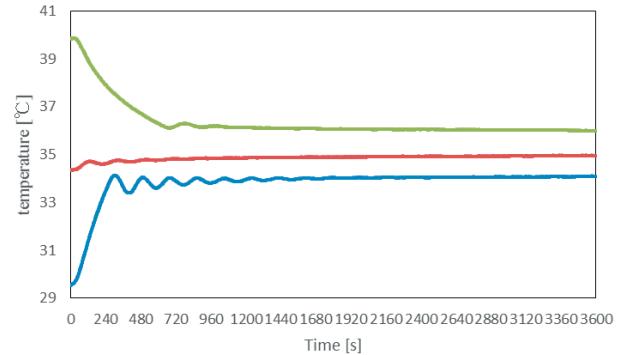
(a) Mouting position of the Pt100 (point A)



(b) Inside of the thermostat (point B)



(c) Shunt resistor #1 (point C)



(d) Shunt resistor #2 (point D)

Figure 4: Temperature transition.

Table2: Summary of Test Results

	Environmental temperature [°C] ( $T_e$ )	Stability Temperature [°C] ( $T_s$ )	$\Delta T$ [°C] ( $T_s - 35$ )	Target value of the temperature difference [°C] ( $T_t$ )
Mouting portion of the Pt100	30	34.93	-0.07	$\pm 2.5$
	35	34.91	-0.09	
	40	34.96	-0.04	
Internal of the thermostat	30	32.58	-2.42	$\pm 2.5$
	35	34.58	-0.42	
	40	36.75	1.75	
Shunt Resistor #1	30	33.94	-1.06	$\pm 2.0$
	35	34.98	-0.02	
	40	36.23	1.23	
Shunt Resistor #2	30	34.10	-0.90	$\pm 2.0$
	35	34.96	-0.04	
	40	35.98	0.98	

Table 2 として試験結果を要約する。Pt100 取り付け部ではいずれの環境温度( $T_e$ )でも、稼働開始から 1 時間後の安定温度( $T_s$ )は温度設定値 35 °C に対して、誤差 0.1 °C 以内に温度を安定化できており、温度コントローラのフィードバック制御は十分な精度で行えている。

そして、温度コントロール対象である恒温槽内温度は、いずれの環境温度( $T_e$ )でも設定値に対して誤差 2.5 °C 以内に安定している。これは A/D チップの温度特性 2.0 ppm/°C に対して、最高温度と最低温度の差が 10 ppm 以内となる目標温度差( $T_t$ )が ±2.5 °C 以内という性能目標を満たしている。同じくシャント抵抗#1, #2 も誤差 1.5 °C 以内に安定しており、温

度特性  $2.5 \text{ ppm}/\text{°C}$  に対して、目標温度差( $T_t$ )が  $\pm 2.0 \text{ °C}$  以内を満たしている。

また、温度設定値に遷移までに要する時間については、温度コントロール対象が大気であり、試験対象中で最も熱容量の大きい恒温槽内 (Fig. 3 (b) ポイント B) でも 1 時間以内には目標温度差( $T_t$ )内に安定している。実際の加速器ビーム運転時には、運転開始の 1 時間以上前から主電磁石電源を通電開始することとなっているため、安定所要時間が 1 時間以内であれば要求性能を満たしている。

以上より、温度設定値に対する制御精度、安定化所要時間において、本恒温ユニットは目標とする性能を満たしている。

## 6. まとめと今後

我々 J-PARC MR 主電磁石グループでは、将来計画であるニュートリノビームラインのビーム大強度化に向けて、主リング運転周期を 2.5 秒から 1 秒へと、高繰り返し化を実現可能な電磁石用新電源の開発を進めている。新電源の制御装置では、複雑な制御に耐えうる柔軟性や再現性を満たすことを目的として、A/D 変換を介してのデジタル制御が採用されており、出力電流読み出し用の  $1 \Omega$  シャント抵抗および、A/D 基板の温度コントロールが、電磁石電流の高精度制御のために必要となった。

そこで我々は、ppm レベルでの温度制御が可能な性能を有し、制御盤内に格納可能なコンパクトサイズの恒温槽を開発。3 パターンの環境温度を設定したうえで、本番運転環境を模擬した性能評価試験を実施し、要求性能を満たしていることを確認した。

今後の検討事項としては、過去の電源棟内温度測定結果においては、制御盤内温度は  $40^\circ\text{C}$  超を記録しているため、現状のままではパワー不足となる可能性があることが挙げられる。そこで温度コントローラの IC など使用素子やパワーアンプ部の見直しによる電力損失の低減を行い、現状より高効率、高出力化を目指す予定である。

## 参考文献

- [1] Y.Morita, et al., "Power Supply System of J-PARC Main Ring Main Magnets for High Repetition Rate Operation", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013.
- [2] Y.Kurimoto, et al., "Precise Current Control in Accelerator Magnets with a Digital Feedback System", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 61, p.546-552, February, 2014.

# 素核研安全グループの活動

田中伸晃<sup>#</sup>, 古川圭三, 荒岡修, 林浩平  
高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

## Abstract

平成26年3月の古川圭三教授着任とともに、素核研安全グループが発足し活動を開始した。私たちの任務は、機構が示した「安全最優先」の方針の具現化である。ここでは、巡回の実施、クレーン吊具点検、高湿度環境改善など、1年半の活動について報告する。

## 1. 安全グループ誕生の背景

### 1.1 安全重視の方針表明

平成25年5月23日、東海村のJ-PARCハドロン施設で、放射線漏れ事故が発生した。事故を受け、素核研でも安全管理体制の見直しが検討された。事故から3ヵ月後、平成25年8月に開催された素核研全体会議で、山内正則所長（当時）は、安全担当の教授公募を発表した。職員との対話の中で所長は、「かつて素核研に安全部門があったが、廃止された。今回の教授公募は、安全部門の復活である」と回答。素核研の安全対策の充実が、方針として示された。

### 1.2 過去における素核研の安全活動

平成17年まで実験が行われていた、PS実験室では、今里純教授（当時）を中心に、実験室、ビームチャンネル担当者らが共同し、安全活動が展開された（図1）。トристン実験などを進めた筑波、富士実験室においては、専門の安全部門があり、教授職がリーダーを務めた。実験室には、24時間体制で安全監視員が配置され、職員と共に安全を担ってきた。



図1：安全ミーティングの光景（平成15年）

それぞれの実験室では月に2回、安全ミーティングを開催し、実験室の状況掌握、問題点について話

し合い、安全な環境を維持する努力をしてきた。

災害時の訓練、教育に関しては、火災を想定した防災訓練や応急手当の実習などを実施した（図2）。加えて、実験室にて重量物運搬、電気、溶接作業などを行う業者向けの講習会も行ってきた。



図2：安全講習会の光景（平成4年）

### 1.3 安全部門削減の流れ

物理実験の安全に寄与してきた安全部門は、徐々に削減の流れとなり、安全担当の教授が退職した平成21年度に、実質廃止された。「研究者自ら、安全を担う体制」との方針転換により、予算、人員とも編成替えとなった。北カウンターホールをはじめとする旧PS施設は、研究拠点が東海村に移ることから、安全監視員の巡回コースからも、外された。

## 2. 新生・素核研安全グループ

### 2.1 グループ運営の特徴

表1：安全グループの構成

◎古川 圭三	教授、グループリーダー
○田中 伸晃	技師
○荒岡 修	シニアフェロー
○林 浩平	シニアフェロー、兼任
幅 淳二	安全担当副所長

<sup>#</sup>ntanaka@post.kek.jp

安全グループ復活当初は、古川教授（以下、リーダー）を含め、3名体制であった。現在、安全担当の幅副所長のもと、1名増の4名で構成されている。

素核研のトップである「所長直轄」であるのが、組織の特徴である。メンバー以外に、他グループからも支援を受けながら、運営している。

安全においては、大きくかつ強力な組織が一般的であるが、古川リーダーの方針は、「全員参加型安全管理体制の構築」を基本としている。言い換えれば、全員の安全意識を向上させ、自らで安全な実験環境を構築すること。特定の誰かでなく、一人一人がそうあることを、目指すものである。

## 2.2 研究現場の調査実施

有効な安全対策を講じるためには、現場を知ることが第一との認識のもと、素核研の研究活動調査を行った。

### ① ヒアリングの実施

素核研は研究テーマごとに、グループ編成されている。グループリーダーを訪れ、研究内容と、現場の状況について話を聞いた。古川リーダーが新任であるため、研究内容を知ることは、安全活動を展開する上で基礎となった。

### ② 素核研実験室の巡回

ヒアリング実施後、素核研の各施設の巡回を実施した。高所作業における問題点、転倒防止策の必要性、実験室内の整理などの課題が散見された。

### ③ 放射光施設の巡回（図3）

安全管理面において、先進事例といえる、放射光施設の巡回を実施した。床上配線は無く、通路にははつきりとした動線表示がされている。整理整頓も行き届き、一人一人の高い安全意識が伺えた。



図3：放射光施設

## 3. 活動報告（H26.3～H27.10）

安全の基本は現場を知り、人を知ることと考えている。そのため、日常的な現場巡回と、対話を心がけている。

次に、具体的な活動内容について、報告する。

### 3.1 安全監視員巡回の復活

平成26年6月より、北カウンターホール等、素

核研旧PS施設における、安全監視員の巡回を復活させた。これは、平成21年度の打ち切りから、5年ぶりである。現状人員の範囲内での任務となったため、北カウンターホールは1日1回。ニュートリノ施設は、休日のみの巡回とした。

北カウンターホールにおいては、実験終了後も、ハドロンビームライン関連の作業に使われており、重量物運搬等、危険を伴う作業も多く行われていた。巡回により、不安全行動に対する迅速な指摘、対応が可能となった（図4）。



図4：安全監視員の任務光景

巡回内容は報告書にまとめられ、安全グループの他、巡回範囲の担当職員へも、メールで毎日配信される仕組みである。今回の復活で、旧PS関係者へも配信されるようになった。

巡回復活により、危険の未然予防と早期発見。指摘に対する改善の迅速化など、効果が表れている。

### 3.2 全員参加型安全巡回の実施

誰かではなく、自らが考え、行動する「全員参加」の古川リーダーの理念を、素核研の現場で展開した代表事例である。巡回参加の対象は、つくばキャンパスで実験を行う教員、技術職員である。職員7～8人ごとに班とし、計10班を編成した。

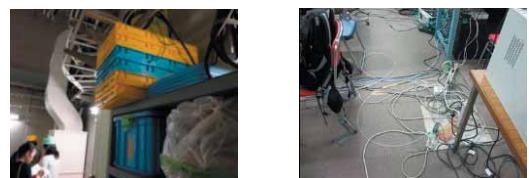


図5：素核研職員による安全巡回

巡回にあたり、以下の7項目からなるチェックシートを、古川リーダーが作成した。

- ・一般・整理整頓・通路
- ・クレーン災害防止
- ・墜落転落災害防止
- ・電気災害防止
- ・高压ガス
- ・化学薬品
- ・その他

平成26年の夏、初めての巡回を実施した。職員の安全意識が向上していたこともあり、各班の報告書には詳細な指摘があった。

### 3.3 クレーン吊具の定期点検

実験室は日常的に、クレーン作業が行われているが、吊具の点検はほとんど実施されていない状況であったため、安全グループで点検を実施している。平成26年6月の初めての点検では、痛んだワイヤー、布スリングがいくつか、見つかった。今後、半年に1回程度の点検を継続していく（図6）。



図6：吊具点検の作業

### 3.4 電気安全講習会の開催

平成27年2月10日、関東電気保安協会に講師を依頼し、電気安全講習会を開催した（図7）。

実習では、「短絡実験」、「絶縁抵抗測定」を通じて、ゴム手袋などの保安具や、測定機器の使い方を学んだ。



図7：電気安全講習会

内容は一般向けで、物足りなさを感じさせたかも知れないが、事故例の紹介を通じて「電気は便利な反面怖いもの」との基本を再認識する意義は、あったと思われる。

### 3.5 旧P.S.施設の安全管理体制見直し

北カウンターホールをはじめとする、旧P.S.施設は、ハドロンに所属する職員が東海勤務となった後

も、安全管理を継続してきた。このため、素核研として体制を見直し、平成27年5月につくば勤務者による安全管理体制が形成された。

施設管理者は、以下のように変更された。

1. 北カウンターホールと旧泡箱の管理  
ハドロンG職員 → 素核研つくば勤務職員
2. ニュートリノ施設の管理  
ハドロンG職員 → ニュートリノG職員

北カウンターホールでは、筑波実験室等で行っている「作業計画書」の提出が実施されることになり、実験室の状況が掌握出来る仕組みができた。

また、管理者を中心に職員数名からなる「北カウンターホール管理グループ」が作られ、毎月末に報告と実験室巡回を行い、安全維持へ努力している。

安全監視の充実を目的に、平成27年10月中旬から平日着任の富士実験室監視員を1名、増員した。

これにより、平日は1日3回だった安全巡回が5回となり、安全体制が更に充実した。日中は監視員が常駐するため、受付の空白も解消された。

旧P.S.施設の鍵は安全監視員廃止後、4号館事務室で保管してきたが監視員増員を受け、筑波、富士実験室で安全監視員による管理を復活させた。

さらに夜の巡回時に、実験室の消灯確認を実施し、省エネへ貢献している。また、実験業務の安全のため、研究者等から監視員に支援を求める声が出ているため、可能なことには応えている。これらから、研究者等への安全支援の効果があらわれている。

以上の見直しにより、これまで不明確であった管理体制が明確になった。新たな課題に対しては順次、見直しを行い、活動を継続していく。

### 3.6 C.S.（チェック・ソース）管理の見直し

旧P.S.施設におけるC.S.の管理は、平成21年度から、それまでの安全監視員による管理体制から、北カウンターホールで自主管理の形態となった。

今年度の旧P.S.施設の安全管理体制の変更に伴い、C.S.の管理を、筑波・富士に常駐する安全監視員による管理体制に復活させた。見直しにより、安全性が高まった（図8）。



図8：C.S.の移動（放射線センター監修）

### 3.7 ボンベ管理の改善

素核研実験室にある高圧ガスボンベの使用状況を調査した結果、多くの不要と思われるボンベが見つ



かり、これまでに 80 本を回収した。この作業により、安全性向上のみならず、新たな有効スペースを確保するなどのメリットがあった。

図 9 : ボンベの回収作業

## 4. 高湿度環境の改善

### 4.1 ハドロンホールの高湿度対策

東海村の J – P A R C 施設であるハドロン実験ホールは、平成 19 年に完成した。当初、毎年夏季にホール地下に結露が発生し、問題となっていた。著者が中心に、対策を実施した結果、平成 21 年を最後に、結露は発生しなくなった。



図 10 : ハドロンホール高湿度対策

実施したのは、除湿能力が一日あたり 200L の除湿機 3 台の設置である。メーカーのカタログによると、必要台数の 1/10 以下である。

湿度（相対湿度）は、100%から 50%以下に低下。

絶対湿度は、外気とほぼ一致する「 $18\text{g}/\text{m}^3$ 前後」から、 $13\text{g}/\text{m}^3$ 以下に低下した。

ハドロン事故が発生した平成 25 年以降、除湿機は 2 台になったがこれまで、結露発生の報告はない。

東海キャンパスでは他に、ハドロンホールに隣接するハドロン実験準備棟でも、面積比で小容量の空調機で、大きな除湿効果が現れた。

### 4.2 つくばキャンパスにおける高湿度対策

つくばでは、ハドロンホールとほぼ同じ規模の北カウンターホールで、対策を実施した。その方法は、かつて実験用に使っていた、計 48kw の空調機を

ホール内除湿に用いるものである。絶対湿度で比較すると、空調機導入前は、外気とほぼ一致する「 $18\text{g}/\text{m}^3$ 前後」を示していたが導入後、外気比で 3 ~ $3.5\text{g}/\text{m}^3$ 程度、低い湿度を示した。気温は、空調導入前と後でほとんど差はない。それでも多くの人が「北カウンターホールは涼しい」と答え、効果が現れている。

この他、旧 K2K ビームラインなどの高湿度対策を実施した。どれも結露に悩まされた空間であるが、平成 27 年夏季に行った対策で、高湿度は改善した。これらの報告は別の場で詳しく、行いたい。

### 4.3 今後の展望

これまでの高湿度対策から、次のことがわかった。

- ・室内の湿度は外気に大きく依存する
- ・湿度は均一分布する傾向である
- ・外気導入量の調整は有効な湿度対策
- ・小容量の空調で大きな除湿効果を発揮

高湿度対策は、実験環境の改善のみならず、人が滞在もしくは、物が存在する空間すべてに有効であると考える。小容量の空調で効果を発揮することから、省エネと設備費用の節約にも有効である。

これらの手法が複数個所で有効に働いたため、他の場面でも応用できると考える。高湿度に悩む環境改善をこれからも実施していく。

## 5. 安全グループのこれから

安全グループは古川リーダーのもと、「安全意識の向上・浸透」および「安全な実験室環境の整備・構築」を 2 大目標に掲げ、業務を遂行してきた。

平成 27 年 10 月 29 日には、安全グループ主導のもと、素核研担当による防災訓練が、筑波実験室で実施された。

グループの一年半の活動を通じ、「人を知り現場を知る」との基本姿勢を維持することを確認した。

安全は誰のためでもなく、自分のためである。人から苦しみを抜き去り、楽（安らぎ）を与えるという“抜苦与樂”こそ、安全の目指す方向であると考えている。

- ① たゆみない「対話とパトロール」
- ② 安全 G は憲兵に非ず さりとて便利屋に非ず
- ③ 人を結びつける努力 （分断は安全に反する）
- ④ “安全の実現”を第一に

相手を思う心が入っていない言葉は、相手の心に響かない。響かない言葉は何万と並べようと、單なる記号にしか過ぎない。

人同士が信頼を基調として結び付くとき、安全文化が血肉化し、実質化がなされると信じている。

### 参考文献

- [1] 古川圭三 “素核研研究活動報告 平成 27 年 4 月”
- [2] <http://www2.kek.jp/ipns/report/2015/04/anzen.pdf>

# MLF 非結合型モデレータにおける遅延時間の補正

大下 英敏<sup>#</sup>

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所

## Abstract

J-PARC MLF に高強度中性子全散乱装置 (NOVA) が建設されている。NOVA では全散乱法によるガラス、液体などの不規則系物質の構造解析がおこなわれている。本論文においては、NOVA の非結合型モデレータにおける遅延時間の補正について考察している。その結果、T0 信号の遅延時間とモデレータにおける遅延時間を補正することで、広い中性子波長領域において一定の検出器位置が得られることが示された。このことは、T0 信号の遅延時間とモデレータにおける遅延時間の補正が適切におこなわれたことを示している。

## 1. イントロダクション

茨城県東海村に建設された J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF)<sup>[1]</sup> は世界最高強度を誇るパルス中性子源施設である。MLF には 23 本の中性子ビームラインがあり、物質構造科学や生命科学分野の研究が強力に推進されている。現在、加速器で生成される陽子ビームの強度は 500 kW であり、2~3 年以内に最終的な目標値である 1 MW に到達することが期待されている。

MLF のようなパルス中性子源施設における中性子ビームは単一エネルギーのビームではないので、回折実験をおこなう上で Time Of Flight (TOF) 法<sup>[2]</sup> の適用が必要となる。TOF 法は中性子波長に依存した飛行時間の差を測定することで、中性子波長を弁別する手法である。詳細な構造解析のためには、ある TOF データの値に対する中性子波長が厳密に決定される必要があるので、パルス中性子源から放出される一定エネルギーの中性子が時間的に広く分布せず、限定された時間内だけに存在することが重要である。中性子波長を厳密に決定することができる、このような状態を中性子源のエネルギー分解能が高いと表現できる。MLF には結合型、非結合型、ポイズン型の 3 種類の中性子モデレータが導入され、研究目的に応じた使い分けがなされている。モデレータは高速中性子を減速させるための装置であり、MLF では、減速材として、液体水素を使用している。MLF の中性子ビームラインで得られる中性子強度とエネルギー分解能の間にはトレードオフの関係が存在し、結合型、非結合型、ポイズン型の順に高い中性子強度が得られる。一方で、エネルギー分解能はその逆となり、ポイズン型、非結合型、結合型の順に高いエネルギー分解能が得られる。

J-PARC の全散乱装置として、MLF の 21 番目のビームライン (BL21) に高強度中性子全散乱装置 (NOVA)<sup>[3]</sup> が建設されている。NOVA では全散乱法<sup>[4]</sup> によるガラス、液体などの不規則系物質の構造解析がおこなわれている。BL21 は非結合型モデレータのビームラインであり、高い中性子強度と高いエネルギー分解能を両立している。NOVA で期待される中性子強度は  $0.34 \times 10^8$  neutrons/s·cm<sup>2</sup>·MW<sup>[5]</sup> であり、特にサブ秒

スケールの短時間測定による「その場観察」において威力を発揮する。不規則系物質の測定においては、鋭いブラックピークは出現せず、散漫散乱による緩やかなピークだけがあらわれる。散漫散乱から物質構造に起因した情報だけを適切に抽出するため、試料の自己吸収や多重散乱など波長に依存する現象の補正を精度良くおこなうことが非常に重要である。このような波長に依存する現象の補正として、モデレータ内における遅延時間の補正が知られており、実際に他の全散乱装置においても実施されている<sup>[6]</sup>。本論文においては、NOVA の非結合型モデレータにおける遅延時間の補正について考察する。

MLF で測定される TOF データ  $t_{\text{obs}}(\lambda)$  は次のように書ける。

$$t_{\text{obs}}(\lambda) = t(\lambda) - t_{\text{offset}} + t_{\text{mod}}(\lambda)$$

ここで、 $t(\lambda)$  は波長  $\lambda$  の中性子がモデレータから放出された後、検出器まで一定波長で飛行する時間であり、 $t_{\text{offset}}$  は陽子ビームと水銀ターゲットの間の衝突タイミングをあらわす T0 信号の遅延時間である。 $t_{\text{offset}}$  は主に伝送ケーブルにおける遅延時間に相当し、一定値である。 $t_{\text{mod}}(\lambda)$  はモデレータ中の中性子の減速過程に関連する時間で、モデレータにおける遅延時間と呼ぶ。モデレータにおける遅延時間は、陽子と水銀の間の核破碎反応において生成した高速中性子がモデレータ中で減速され、波長  $\lambda$  の中性子としてモデレータ表面に到達するまでの時間である。 $t_{\text{mod}}(\lambda)$  は中性子波長に依存する。図 1 に MLF で測定される TOF データの概念図を示す。モデレータ中の減速過程は曲線であらわされ、一定波長で飛行する様子は直線であらわされる。直線の傾きは波長  $\lambda$  に反比例する。 $L_{\text{ideal}}$  はビーム原点 (beam origin) から検出器までの距離である。中性子の波長  $\lambda$  と  $t_{\text{obs}}(\lambda)$  および  $t(\lambda)$  で決まる距離はそれぞれ  $L_{\text{obs}}(\lambda)$ 、 $L'$  であらわされ、前者はビーム原点から検出器までの名目上の距離であり、後者はモデレータ表面から検出器までの距離である。なお、本研究においては、フェルミチョッパーによって单色化された中性子ビームのエネルギーを同定する方法で中性子の波長  $\lambda$  を決定している。

<sup>#</sup> hidetoshi.ohshita@kek.jp

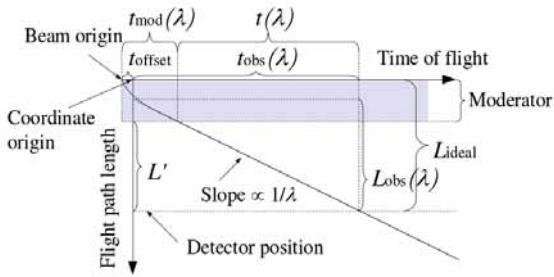


図 1 MLF で測定される TOF データの概念図

概念図から明らかなように、 $L_{\text{obs}}(\lambda)$  は  $L_{\text{ideal}}$  や  $L'$  と異なり一定ではないので、 $\lambda$  以外の波長に対して適切ではないことがわかる。したがって、波長に依存する現象の補正を精度良くおこなう必要がある全散乱法においては、 $L_{\text{obs}}(\lambda)$  の使用は避けなければならない。一方で、 $t_{\text{mod}}(\lambda)$  からビーム原点を推定することは難しいため、 $L_{\text{ideal}}$  を厳密に導出することは困難である。本研究においては、実測による  $t_{\text{offset}}$  とシミュレーションによる  $t_{\text{mod}}(\lambda)$  を用いて得られた  $L'$  の採用を検討した。 $L'$  の導出は次式に従う。

$$t(\lambda) = t_{\text{obs}}(\lambda) + t_{\text{offset}} - t_{\text{mod}}(\lambda)$$

$$L' [\text{m}] = 3956 \times 10^{-6} \times \frac{t(\lambda) [\mu\text{s}]}{\lambda [\text{\AA}]}$$

$t_{\text{offset}}$  と  $t_{\text{mod}}(\lambda)$  が適切に補正できれば、広い波長領域にわたって一定の  $L'$  が得られることが期待できる。この場合、TOF データから中性子波長を厳密に決定することができるので、先述の試料の自己吸収や多重散乱など波長に依存する現象の補正を精度良くおこなうことが可能となる。本論文においては、 $t_{\text{offset}}$  と  $t_{\text{mod}}(\lambda)$  の効果を検証するとともに、 $L_{\text{obs}}(\lambda)$  と  $L'$  の比較をおこない、その妥当性を評価した。

## 2. 非結合型モデレータの遅延時間

MLF の各ビームラインにおけるモデレータの遅延時間は中性子源グループによって既にシミュレーションされている。その結果はインターネット上に公開<sup>[7]</sup>されており、ダウンロードして自由に利用することができる。シミュレーションデータを利用する場合には、ビームバンチ構造の違いに注意しなければならない。図 2 に示すように、実際のビームバンチ構造は幅 0.185 μs、間隔 0.414 μs のダブルバンチ構造<sup>[8]</sup>であるので、シミュレーションで想定されているシングルバンチ構造から実際のビームバンチ構造を再現するような補正が必要である。本研究においては、実測された一定波長の TOF データの値がダブルバンチ構造の中心値に相当すると仮定し、シミュレーションによって得られた TOF データの値を +0.3 μs ずらすことによってビームバンチ構造の違いを補正した。

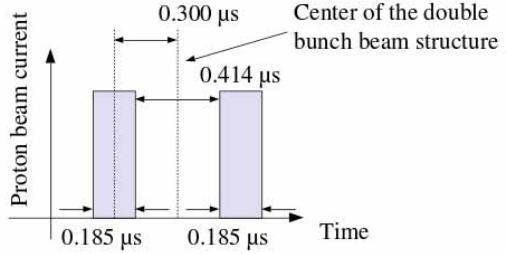


図 2 実際のビームバンチ構造の概念図

図 3 に NOVA の非結合型モデレータの表面から放出された中性子のパルスデータの典型例を示す。ダブルバンチ構造を再現する補正是していない。モデレータから放出された中性子のエネルギーは 25 meV (1.8 Å) であり、中性子強度の値とその誤差の値は提供されたデータを使用している。パルスデータは陽子ビームが MLF の水銀ターゲットに入射した瞬間をゼロとして、核破碎反応によって生成した高速中性子が減速してモデレータ表面に到達するまでの時間分布を示している。ガウス関数によるフィッティングで求めた時間分布のピーク値を代表値とすると、1.8 Å の熱中性子がモデレータ表面に到達するまでの時間は 13.7 μs であることがわかる。この時間がモデレータにおける遅延時間である。モデレータにおける遅延時間の誤差はガウス関数によるフィッティングエラーで与えられ、1.8 Å の熱中性子に対しては ±0.1 μs である。

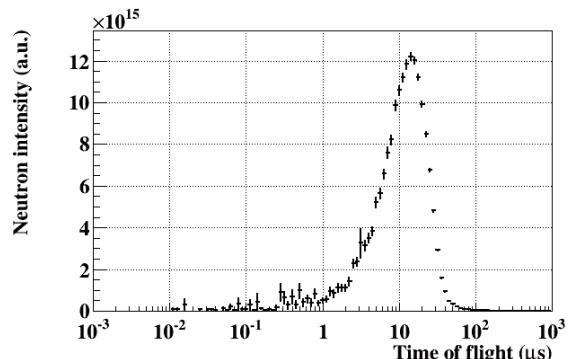


図 3 NOVA の非結合型モデレータの表面から放出された中性子のパルスデータの典型例

図 4 に NOVA の非結合型モデレータにおける遅延時間の中性子波長依存性を示す。2 種類のビームバンチ構造について示している。ダブルバンチ構造のグラフ (Double bunch beam) はシングルバンチ構造のグラフ (Single bunch beam) の各点を +0.3 μs ずらして作成した。したがって、ビームバンチ構造の違いは短波長領域で顕著であり、1 Å 付近までその影響が見られる。それぞれの実線は 8 次の多項式でフィッティングした結果であり、 $t_{\text{mod}}(\lambda)$  に相当する。

なお、フィッティング領域は NOVA の構造解析で必要な波長領域  $0.12 \text{ \AA} \sim 8.3 \text{ \AA}$  をカバーするため、 $0.1 \text{ \AA} \sim 10 \text{ \AA}$ とした。

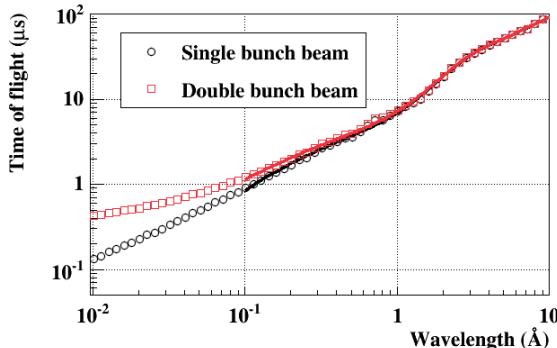


図 4 NOVA の非結合型モデレータにおける遅延時間の中性子波長依存性

### 3. 実験セットアップと方法

図 5 に NOVA の概念図を示す。NOVA は真空槽内部に設置された試料から散乱した中性子を測定することで中性子回折実験をおこなう。NOVA のビームラインは試料位置においてビームサイズが  $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  になるように設計されており、ビームライン上に複数のボロンカーバイト製の固定式スリットが挿入されている。NOVA の非結合型モデレータの表面から試料位置までの距離は  $15 \text{ m}$  として設計されている。NOVA の主要なコンポーネントとしては、コンクリート製の遮へい体内に設置された真空槽とその周辺に取り付けられた中性子検出器、さらに真空槽の上流側に設置された可動式の光学機器が挙げられる。また、NOVA には複数の試料環境機器が整備されており、試料環境を変化させた状態における構造解析が可能である。本研究においては室温測定用の自動試料交換機を設置した。NOVA の中性子検出器として、2 台の中性子ビームモニターと約 900 本のヘリウム 3 充填型 Position Sensitive Detector (PSD) が導入されている。NOVA の中性子ビームモニターは高頻度入射粒子特性に優れた Gas Electron Multiplier (GEM)<sup>[9]</sup> を用いた中性子二次元検出器<sup>[10]</sup>を使用し、入射中性子量と透過中性子量を測定している。入射中性子ビームモニターを nGEM1、透過中性子ビームモニターを nGEM2 と呼ぶ。後述するように、本研究において、中性子波長の同定はこれら 2 台の中性子ビームモニターを用いておこなう。ヘリウム 3 充填型 PSD (有効長 :  $800 \text{ mm}$ 、外径 :  $1/2 \text{ インチ}$ 、ヘリウム 3 ガス充填圧 :  $20 \text{ 気圧}$ ) はガス封入型の比例計数管の 1 つであり、試料から散乱した中性子を測定する。ヘリウム 3 充填型 PSD は小角方向から背面方向に至る 5 つの検出器バンクに分かれて設置され、広い立体角をカバーしている。NOVA の可動式の光学機器とし

て、四象限スリットと 3 種類のチョッパーが設置されている。四象限スリットは nGEM1 の前方に設置され、中性子ビームを整形する。ディスクチョッパーと T0 チョッパーはそれぞれ長波長領域と短波長領域のバックグラウンドとなる中性子を低減するために使用される。本研究においては、これらの光学機器の影響を排除するため、四象限スリットは全開状態、ディスクチョッパーと T0 チョッパーは停止状態として測定をおこなった。NOVA のフェルミチョッパー<sup>[11]</sup>はオプションとしての非弾性散乱実験をおこなうために整備されているが、本研究においては中性子ビームを単色化するために用いられた。NOVA のフェルミチョッパーは磁気浮上型のターボ分子ポンプをベースに開発され、 $100 \text{ Hz} \sim 600 \text{ Hz}$  の回転数で動作する。入射中性子を遮へいするため、ボロンエポキシ複合材のスリットが高速回転する機構を持つ。

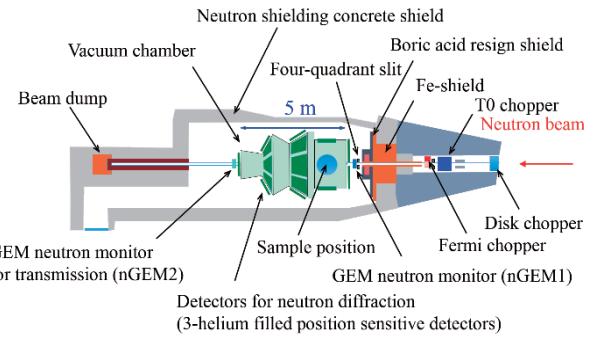


図 5 NOVA の概念図

NOVA の非結合型モデレータにおける遅延時間の補正について考察するため、次の手順に従いビーム原点から検出器までの名目上の距離  $L_{\text{obs}}(\lambda)$  とモデレータ表面から検出器までの距離  $L'$  の導出をおこなった。NOVA の構造解析で必要な波長領域と同等の波長領域にわたって  $L'$  が一定であれば、補正是適切であると判断した。

- (1) nGEM1 の前方に銀箔を設置し、銀の核共鳴吸収端測定を実施
- (2) nGEM1 と nGEM2 のそれぞれにおいて  $5.2 \text{ eV}$  の銀の核共鳴吸収端が出現する TOF 値の差から検出器の設置位置の差を導出
- (3) フェルミチョッパーを駆動し、中性子ビームを単色化
- (4) ヘリウム 3 充填型 PSD でデータ取得する可能性があるので、試料位置には棒状のバナジウム試料 (外径 :  $8.1 \text{ mm}\phi$ ) を設置
- (5) 単色化した中性子ビームに対する nGEM1 と nGEM2 の TOF 値の差と検出器の設置位置の差から単色化した中性子ビームの波長を同定
- (6)  $L_{\text{obs}}(\lambda)$  と  $L'$  を導出し、それぞれの波長依存性について確認

## 4. 実験結果

NOVA の非結合型モデレータにおける遅延時間を考察するための実験は 2014 年 11 月に実施された。この時の加速器ビームパワーは 300 kW であった。実験期間中、真空槽の真空度は 20 Pa 以下に保たれた。図 6 に nGEM1、nGEM2 で取得された NOVA のビームプロファイルを示す。いずれもビーム下流側から上流側を望む方向に対して得られた二次元イメージであり、試料無しの状態で測定された。

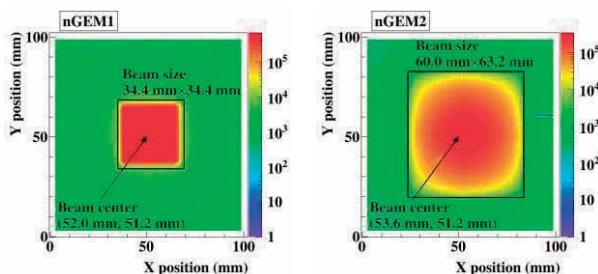


図 6 nGEM1、nGEM2 で取得された NOVA のビームプロファイル

nGEM1 の設置位置はボロンカーバイト製の固定式スリットの設置位置に近いので、一様性の良いイメージが得られている。nGEM2 で得られたイメージはビーム拡散の影響のため、ビームサイズは広がり、ビーム形状は円錐状となっている。これらの特徴は固定式スリットの設置位置を考慮した幾何学的条件で良く説明できることが確認されている<sup>[12]</sup>。また、同図にはビームサイズとビーム中心も併記され、黒色の実線で囲まれた領域がビームサイズに相当する。ビームサイズとビーム中心の導出は以前の研究<sup>[5]</sup>と同様の方法でおこなわれた。後述する銀の核共鳴吸収端測定の解析と単色化した中性子ビームによる測定の解析においては、それぞれのビームプロファイルのビーム照射領域に含まれるイベントだけを使用した。

nGEM1 と nGEM2 の設置位置の差 $\Delta L$ を導出するため、銀の核共鳴吸収端測定をおこなった。厚さ 0.1 mm の銀箔（純度 : 99.98%、製品番号 : AG-403322、Nilaco Co. Ltd.）を nGEM1 の前方に設置（図 7）して、銀の透過率を測定した。透過率  $Tr$  の導出は次式に従う。

$$Tr = \frac{I_{\text{with Ag foil}}}{I_{\text{without Ag foil}}}$$

ここで、 $I_{\text{with Ag foil}}$ 、 $I_{\text{without Ag foil}}$  は銀箔を設置した場合の中性子強度と設置していない場合の中性子強度で、それぞれ入射陽子数で規格化している。

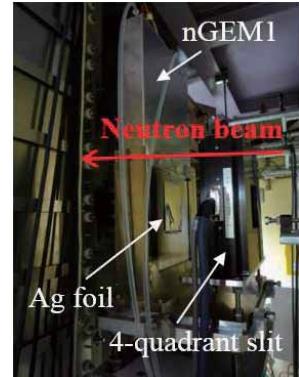


図 7 銀の核共鳴吸収端測定の実験風景

図 8 に nGEM1、nGEM2 で測定された銀の透過率を示す。5.2 eV の核共鳴吸収端についても併せて明示している。nGEM2 は nGEM1 に比べてビーム下流側に設置されているので、核共鳴吸収端があらわれるタイミングが遅れている。100 μs～350 μs の領域に、よりエネルギーの高い核共鳴吸収端が観察されているが、統計的な理由から $\Delta L$  の導出においては 5.2 eV の核共鳴吸収端の測定結果のみを採用した。

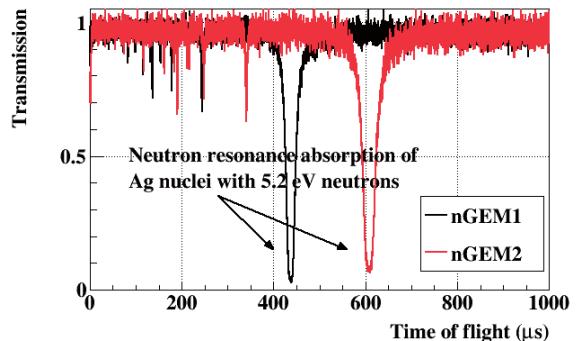


図 8 nGEM1、nGEM2 で測定された銀の透過率

5.2 eV の核共鳴吸収端があらわれる TOF 値は、 $Tr$  の逆数を 1 次関数とガウス関数の合成関数によるフィッティングで求めたピークの値とし、そのフィッティングエラーを TOF 値の誤差とした。したがって、nGEM1 と nGEM2 の設置位置の差 $\Delta L$  およびその誤差  $E_{\Delta L}$  は次式に従う。

$$\Delta L [\text{m}] = 3956 \times 10^{-6} \times \frac{\Delta t [\mu\text{s}]}{\lambda [\text{\AA}]}$$

$$E_{\Delta L} [\text{m}] = \frac{3956 \times 10^{-6}}{\lambda [\text{\AA}]} \times \sqrt{(E_{t1} [\mu\text{s}])^2 + (E_{t2} [\mu\text{s}])^2}$$

ここで、 $\lambda$  は 0.13 Å (=5.2 eV) の中性子波長であり、 $\Delta t$  は nGEM1 と nGEM2 において 5.2 eV の核共鳴吸収端があらわれる TOF 値の差、 $E_{t1}$  と  $E_{t2}$  はそれぞれ nGEM1 と nGEM2 において 5.2 eV の核共鳴吸収端があらわれる TOF 値の誤差である。解析の結果、 $\Delta L$  は 5.371 m ± 0.009 m と求められた。

ビーム原点から検出器までの名目上の距離  $L_{\text{obs}} (\lambda)$

とモデレータ表面から検出器までの距離  $L'$  を導出するため、フェルミチョッパーを動作させ、単色化した中性子ビームによる測定をおこなった。試料位置には、ヘリウム 3 充填型 PSD でデータ取得する可能性を考慮して、棒状のバナジウム試料を設置した。図 9 に単色化した中性子ビームによって nGEM1 と nGEM2 で測定された TOF 分布を示す。nGEM1 で測定された白色ビームの TOF 分布（緑色の実線）も併せて示す。フェルミチョッパーは高速回転するスリットが開いている時間だけ中性子ビームを通し、ビームを単色化することができるが、エネルギーの高い中性子を完全に遮へいすることが難しいので、1000  $\mu\text{s}$  より TOF の小さい領域で高エネルギー中性子によるバックグラウンドの分布が見られる。この時のフェルミチョッパーの回転数は 600 Hz であった。測定された TOF 分布にはそれぞれ 4 本のピークが観察できる。加速器の繰り返し周期 40 ms の間に、フェルミチョッパーのスリットは 24 回開くことになるが、5 回目以降は入射中性子のエネルギーが低いため、フェルミチョッパーを透過することができない。また、銀の核共鳴吸収端測定と同様に nGEM1 と nGEM2 の設置位置が異なるので、観察されるピーク位置がずれている。なお、200  $\mu\text{s}$ ～300  $\mu\text{s}$  の領域で観察される鋭いエッジはフェルミチョッパーの構造物であるタングステンによる核共鳴吸収端である。

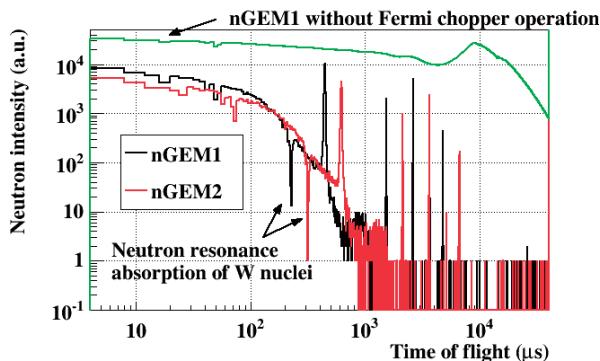


図 9 単色化した中性子ビームによって nGEM1 と nGEM2 で測定された TOF 分布

図 10 に示すように、観察されたピークの TOF 値はガウス関数によるフィッティングで求められ、その誤差はガウス関数によるフィッティングエラーで与えられたとした。青色の実線はフィッティング結果を示している。nGEM1 と nGEM2 のそれぞれで観察されたピークの TOF 値の差  $\Delta T$  と検出器の設置位置の差 5.371 m から単色化された中性子ビームの波長  $\lambda$  が同定された。なお、 $\Delta T$  とその誤差  $E_{\Delta T}$ 、単色化された中性子ビームの波長  $\lambda$  とその誤差  $E_{\lambda}$  の導出は次式に従う。

$$\Delta T = T_2 - T_1$$

$$E_{\Delta T} = \sqrt{E_{T1}^2 + E_{T2}^2}$$

ここで、 $T_1$ 、 $T_2$  はそれぞれ nGEM1 と nGEM2 で観察されたピークの TOF 値であり、その誤差は  $E_{T1}$  と  $E_{T2}$  である。

$$\lambda [\text{\AA}] = 3956 \times 10^{-6} \times \frac{\Delta T [\mu\text{s}]}{\Delta L [\text{m}]}$$

$$E_{\lambda} [\text{\AA}] = 3956 \times 10^{-6} \times \frac{1}{\sqrt{(\Delta L [\text{m}])^2 (E_{\Delta t} [\mu\text{s}])^2 + (\Delta T [\mu\text{s}])^2 / (\Delta L [\text{m}])^4}} (E_{\Delta L} [\text{m}])^2$$

ここで、 $\Delta L$  と  $E_{\Delta L}$  は既に導出されており、それぞれ 5.371 m と 0.009 m である。

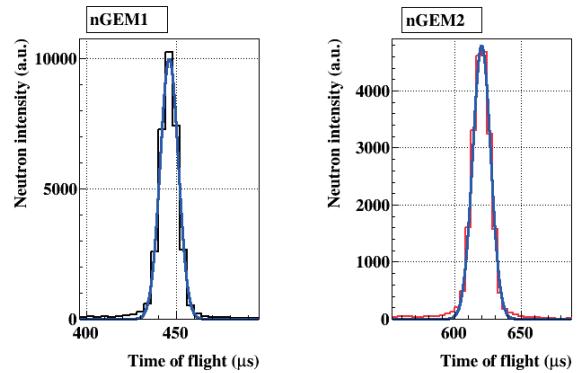


図 10 単色化した中性子ビームによって観察されたピークのフィッティング例

表 1 同定された中性子波長とフェルミチョッパーの動作条件

$\lambda [\text{\AA}]$	$E_{\lambda} [\text{\AA}]$	$\Delta T [\mu\text{s}]$	$E_{\Delta T} [\mu\text{s}]$	Rotation frequency [Hz]
0.128	0.000	173.9	0.1	600
0.282	0.001	382.7	0.1	400
0.437	0.001	593.7	0.1	600
0.746	0.001	1013.3	0.1	600
1.201	0.002	1642.5	0.5	400
1.365	0.002	1853.6	0.3	600
1.673	0.003	2271.7	0.1	400
2.596	0.004	3524.7	0.1	200
4.444	0.007	6033.6	0.2	100
8.154	0.014	11070.8	4.8	100

また、本実験においては NOVA の構造解析で必要な波長領域をカバーするため、フェルミチョッパーの回転数を落とし、より長波長領域の中性子ビームを単色化した。表 1 に単色化した中性子ビームによる測定で同定された中性子波長とフェルミチョッパーの動作条件をまとめた。最終的には、0.128  $\text{\AA}$ ～8.154  $\text{\AA}$  の中性子波長が同定された。

図 11 に nGEM1 の設置位置の波長依存性を示す。3 種類の測定時間 ( $t_{\text{obs}}(\lambda)$ 、 $t_{\text{obs}}(\lambda) + t_{\text{offset}}$ 、

$t_{\text{obs}}(\lambda) + t_{\text{offset}} - t_{\text{mod}}(\lambda)$  に対する検出器位置がプロットされている。これらは第 1 章で述べた表式に従い導出された。ここで、 $t_{\text{obs}}(\lambda)$  は単色化した中性子ビームによる測定で得られた TOF 値である。 $t_{\text{offset}}$  は TO 信号の遅延時間であり、実測の結果、3.60  $\mu\text{s}$  である。 $t_{\text{mod}}(\lambda)$  はモデレータにおける遅延時間であり、第 2 章で得られたダブルバンチ構造を想定したフィッティング結果を用いている。また、各測定点の中性子波長  $\lambda$  は単色化した中性子ビームによる測定で同定されている。

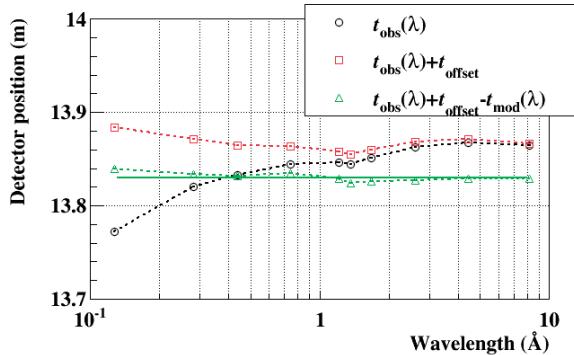


図 11 nGEM1 の設置位置の波長依存性

定性的な特徴として、 $t_{\text{obs}}(\lambda)$  から導出された検出器位置  $L_{\text{obs}}(\lambda)$  は波長が短くなるに従って値が小さくなっている。この傾向は  $t_{\text{offset}}$  の寄与によるもので、実際に  $t_{\text{obs}}(\lambda) + t_{\text{offset}}$  から導出された検出器位置  $L_{\text{with\_offset}}(\lambda)$  では解消されている。グラフの測定点の平均値と標準偏差を nGEM1 の設置位置とその誤差とすると、 $L_{\text{obs}}(\lambda)$  と  $L_{\text{with\_offset}}(\lambda)$  はそれぞれ 13.841 m  $\pm$  0.027 m と 13.866 m  $\pm$  0.008 m になる。広い波長領域にわたって nGEM1 の設置位置が一定である場合は、明らかに誤差が小さくなるので、 $t_{\text{offset}}$  や  $t_{\text{mod}}(\lambda)$  などの時間的な補正の妥当性を評価するための指標として、グラフの測定点の標準偏差を活用する。 $t_{\text{obs}}(\lambda) + t_{\text{offset}} - t_{\text{mod}}(\lambda)$  から導出された nGEM1 の設置位置  $L'$  は  $L_{\text{with\_offset}}(\lambda)$  に比べて全体が値の小さい方へシフトしている。そのシフト量は 3.6 cm であり非結合型モデレータの大きさを反映していると考えられる。また、 $L'$  は 13.830 m  $\pm$  0.004 m と求められ、グラフの測定点の標準偏差が改善するので、 $t_{\text{mod}}(\lambda)$  が妥当な補正であることがわかる。一方、 $t_{\text{offset}}$  と  $t_{\text{mod}}(\lambda)$  の効果を比較した場合、 $t_{\text{offset}}$  の補正の方が標準偏差の改善の度合いが大きいので、より効果的であることもわかる。なお、 $L'$  は理想的には波長に依存せず、グラフの測定点の平均値を示す緑色の実線と一致すべきであるので、 $L'$  を平均値に揃えるための係数（規格化係数  $k$ ）を導入する。規格化係数  $k$  は測定点を直線補完したライン（緑色の点線）上の点を平均値に揃えるための係数として定義され、図 12 に示すように 0.9992~1.0004 の範

囲に限られる非常に微小な補正をおこなう係数である。なお、図中の実線は規格化係数  $k$  を 1.4 Å を境界として 2 つの 8 次の多項式でフィットした結果である。また、モデレータにおける遅延時間  $t_{\text{mod}}(\lambda)$  に規格化係数  $k$  の効果を加えた  $T_{\text{mod}}(\lambda)$  を定義して、nGEM2 の設置位置を導出する際に使用した。 $T_{\text{mod}}(\lambda)$  は次式のようにあらわされる。

$$T_{\text{mod}}(\lambda) = (1 - k)(t_{\text{obs}}(\lambda) + t_{\text{offset}}) + k \times t_{\text{mod}}(\lambda)$$

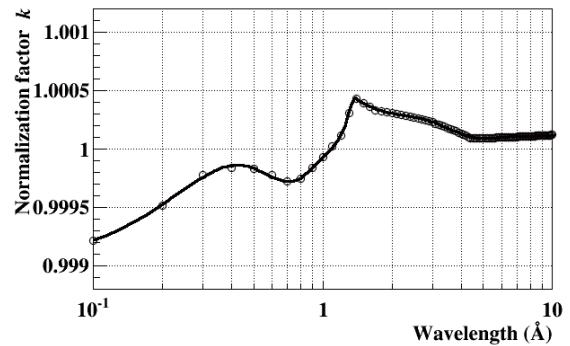


図 12  $L'$  の規格化係数

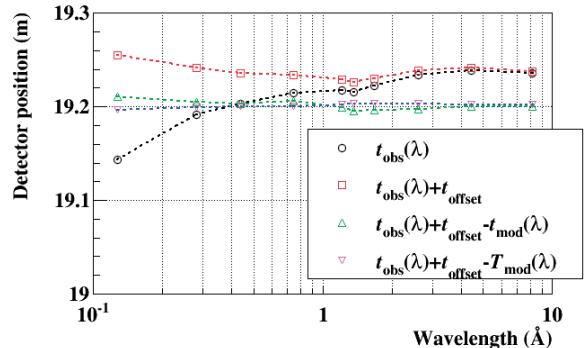


図 13 nGEM2 の設置位置の波長依存性

図 13 に nGEM2 の設置位置の波長依存性を示す。nGEM1 の場合と同様の 3 種類の測定時間に対する検出器位置に加えて、 $t_{\text{obs}}(\lambda) + t_{\text{offset}} - T_{\text{mod}}(\lambda)$  に対する検出器位置  $L_{\text{corrected}}(\lambda)$  がプロットされている。nGEM2 の  $L_{\text{obs}}(\lambda)$  と  $L_{\text{with\_offset}}(\lambda)$  と  $L'$  の定性的な特徴は nGEM1 と良く似ている。さらに、 $L_{\text{corrected}}(\lambda)$  は意図した通り広い波長領域にわたって、ほぼ一定を保っている。表 2 に 4 種類の測定時間に対する nGEM2 の設置位置を示す。nGEM1 で得られた結果と同様に、グラフの測定点の標準偏差は検出器位置を導出する際に考慮する測定時間の選び方に依存することがわかる。次の段階としては、本研究における補正方法をヘリウム 3 充填型 PSD の測定データに適用し、その有用性を確認することである。

表 2 4 種類の測定時間に対する nGEM2 の  
設置位置

$L_{\text{obs}}(\lambda)$	$L_{\text{with\_offset}}(\lambda)$	$\bar{L}$	$L_{\text{corrected}}(\lambda)$
19.212 m ±0.027 m	19.237 m ±0.008 m	19.201 m ±0.005 m	19.201 m ±0.002 m

## 5. まとめ

本論文において、NOVA の非結合型モデレータにおける遅延時間の補正について考察した。その結果、T0 信号の遅延時間とモデレータにおける遅延時間を補正することで、広い中性子波長領域において一定の検出器位置が得られることが示された。このことは、T0 信号の遅延時間とモデレータにおける遅延時間の補正が適切におこなわれたことを示している。

## 謝辞

本研究は高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所における中性子共同利用 S 型実験「全散乱法による水素化物の規則－不規則構造解析」（課題番号：2014S06、代表者：大友季哉（高エネルギー加速器研究機構））の下に実施されました。

## 参考文献

- [1] Y. Ikeda, Nucl. Instr. and Meth. A **600** (2009) 1.
- [2] A-J. Dianoux and G. Lander (Eds.), ILL Neutron Data Booklet. 2<sup>nd</sup> ed., OCP Science (2003).
- [3] T. Otomo, et al., KENS Report XVII 2009–2010, KEK Progress Report 2011–2 (2011) 28.
- [4] T. Egami and S. J. L. Billinge, Underneath the Bragg Peaks Structural Analysis of Complex Materials, Pergamon (2003).
- [5] H. Ohshita, et al., JPS Conf. Proc. **8** (2015) 036019.
- [6] K. Suzuki, et al., Nucl. Instr. and Meth. **147** (1977) 519.
- [7] M. Harada, “Calculation of high energy neutron spectra for 23 neutron beam lines at JSNS”, <<http://www.jc-jarc.jp/researcher/MatLife/en/instrumentation/ns3.html>>.
- [8] M. Harada, et al., Nucl. Instr. and Meth. A **597** (2008) 242.
- [9] F. Sauli, Nucl. Instr. and Meth. A **386** (1997) 531.
- [10] H. Ohshita, et al., MLF Annual Report 2012, KEK Progress Report 2013–4 (2013) 54.
- [11] S. Itoh, et al., Nucl. Instr. and Meth. A **661** (2012) 58.
- [12] H. Ohshita, et al., Nucl. Instr. and Meth. A **623** (2010) 126.

# QCS 用移動架台の設計と据え付け

山岡広<sup>#</sup>、大澤康伸、増澤美佳  
高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

## Abstract

本機構では KEKB 加速器の 40 倍のルミノシティを目標として SuperKEKB 計画が進行している。ビーム衝突点近傍では図 1 に示すように Belle 検出器を挟んで 2 台の QCS マグネット及び常伝導電磁石を支持するための QCS 用移動架台が設置される。2 台の内の 1 台、L 側の QCS 移動架台（図 1 中の左側）はすでに設置作業が終わっており、この設計では移動架台は約 20 トンの垂直方向荷重及び 7 トンの水平方向電磁力を支持すると共に、メンテナンスのためにレール上を精密に 3.35m 移動できる構造が要求された。又、L 側の移動架台を据え付けるにあたってはこの為の床改良工事もおこなわれた。

本報告ではこの L 側の QCS 移動架台の設計と据え付け、セルフレベリング工法を用いた床改良工事に関する報告及び各種試験結果について述べる事とする。

## 1. はじめに

本機構では、地下 11m に電子リングと陽電子リングから構成される周長 3km の衝突型加速器が設置されている。この加速器は KEKB 加速器と呼ばれ、現

在、更なる性能向上 (40 倍のルミノシティ向上) のために様々な改良工事がおこなわれている。この計画が SuperKEKB と呼ばれる<sup>[1]</sup>。ルミノシティ向上のためには、ビームのサイズを小さくすると共に運転電流を増加させる事が必要となる。ビームサイズを絞るための機器が衝突点近傍にある QCS マグネットと呼ばれる最終収束超伝導 4 極電磁石である。

QCS マグネットは図 1 に示すように、QCS サポートフレームと呼ばれる支持フレームに取り付けられ、

このフレームが QCS 用移動架台に支持される。また QCS サポートフレーム上には幾つかの常伝導電磁石が積載される。移動架台はこれらの重量を安定に支持しなければならない。実験時(定常時)には、Belle 検出器に差し込まれたような状態に配置されるが、メンテナンス時は Belle 検出器の外側に後退する必要があるため、移動機構を設ける事で前進／後退を可能にしなければならない。又、ビームサイズが 50nm と非常に小さいため、各部品間やレールで生じるガタを排除して振動レベルの小さい高剛性の構造をつくることが必要になる。

## 2. 移動架台の設計

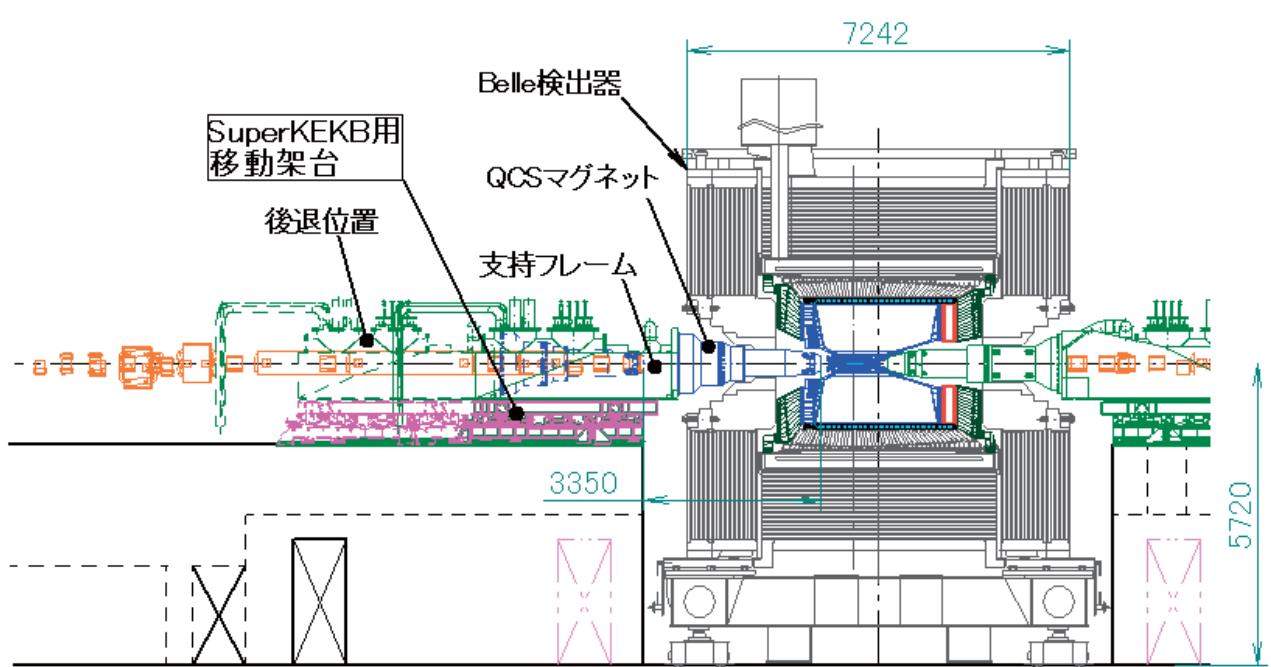


図 1 SuperKEKB 全体組み立て図

<sup>#</sup>yamaokah@post.kek.jp

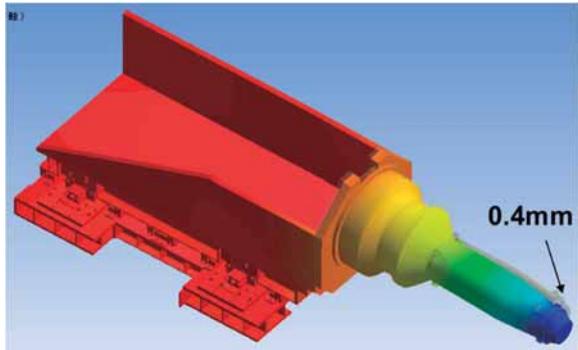


図2 垂直方向荷重のときの変形

前述の通り移動架台の設計方針として、

- ・積載される荷重に対して安定に支持できる事。
- ・メンテナンス時に移動架台が後退できること。
- ・移動時には高精度にうごくこと。
- ・ガタを省いた高剛性・低振動システムであること。
- ・微細な位置調整ができること。

という方針を設定した。L側移動架台の荷重条件として、

(垂直方向荷重)

- ・QCS マグネット重量 25000N
- ・QCS 支持フレーム自重 100000N
- ・常伝導電磁石重量 40000N  
(軸方向電磁力)
- ・内側方向 70000N
- ・外側方向 40000N

但し、同時に作用しない。

(水平方向地震力)

- ・0.3G

上記の荷重を考慮して各部品のサイズやボルトの選定をおこなった。この時に用いられた設計基準は「鋼構造設計基準」である。構造解析の一例を図2に示す。積載荷重及び自重を入力したときの垂直方向変位は QCS マグネット先端で約 0.4mm と計算された。応力は許容応力以下であった。

メンテナンス時の QCS マグネットの移動は与圧式のリニアガイドを用いる事にし、この事により高精

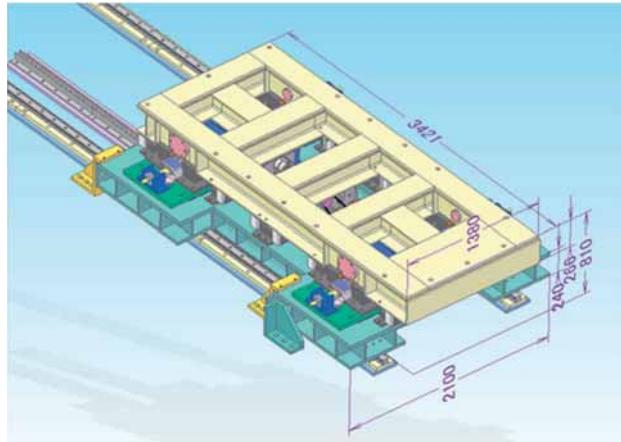


図3 SuperKEKB 用移動架台組立図

度の移動が可能となった。また電動／手動のどちらでも走行ができるようにし、電動による移動速度は 2m/min である。

構造物の定常状態でのガタを消去するために、移動架台は通常、床面に固定されているブラケットに頑丈に固定しておくと共に、支持架台を止めている床面自身も後述するセルフレベリング工法による超平坦度床を施工した。このことで、シムプレートを用いずにリニアガイドの敷設をおこなった。

移動架台の 3D 図を図3に示す。支持架台は H250 の H 鋼で組まれたフレームが上段と下段の 2 段構成になっていて、大きさは下部フレームが幅 2.5m、長さ 3.4m で上部フレームが 2m×3.4m ある。2 段のフレームの間に位置調整が可能な機構及びモーターが組み込まれている。そして移動架台はリニアガイドに取り付けられ、レール上を 3350mm 電動または手動で移動できる構造となっている。

### 3. コンクリート架橋床改造工事

移動架台を設置する床は図4に示すように KEKB では約 800mm の深さの溝があり、ここに移動架台が設置されていた。

QCS 用移動架台設置のためにはこの溝は不要なので鉄筋コンクリートで埋めることにし、さらにその

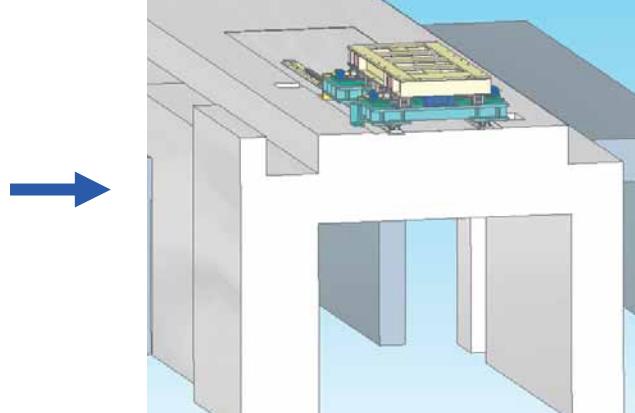


図4 コンクリート架橋改造図



図 5 セルフレベリング床施工工事

上面にセルフレベリング工法を用いた高平坦度床を施工する事にした<sup>[2]</sup>。通常コンクリート床面に機械等を設置する場合、土台となるコンクリート面では平坦度約数センチ程度であることから、機械面との間にシム等をいれて機械の平坦度をださなければならない。また、シムを入れる事によりどうしてもその間にすきまやガタが生まれてしまい、機械の振動特性に悪影響を生じさせることになる。しかし、セルフレベリング工法の場合、床面に特殊な樹脂をながすことによって平坦度を  $0.05\text{mm}/\text{m}$  以下に抑えた超平坦度平面をつくる事ができる事から、シム調整の手間を省略できると共に不要な隙間を排除することができる。

工事では特殊樹脂を厚さ約  $7\text{mm}$  流し込む事により、高平坦度のセルフレベリング床を製作しようとした。但し、そのためにはあらかじめある程度の平坦度 ( $<2\text{mm}$ ) がでていないと効果が無いので、その前段階として樹脂コンクリートと呼ばれるコンクリートを鉄筋コンクリート上に約  $20\text{mm}$  の厚さで施工した。そしてこの上に図 5 に示すようにセルフレベリング剤を施工した。

しかし、施工後平坦度を測定したところ後述するように平坦度が許容値を超えてしまい、このためこの床の上に再度セルフレベリング施工を実施した。再施工後は基準の平坦度をえることができた。

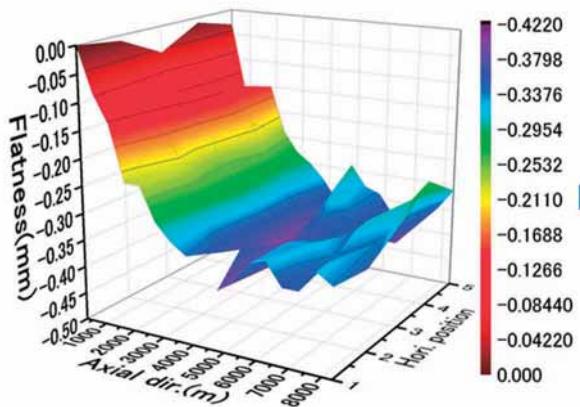


図 6 セルフレベリング施工後、平坦度測定結果

#### 4. 移動架台設置工事

セルフレベリング床完成後、まずは床上にリニアガイドを取り付けるための支持板を設置した。セルフレベリングの平坦度を損ねないように、板厚精度は  $\pm 50\mu\text{m}$  以下とした。また支持板を配置する際は支持板に座標基準点を設け、トータルステーションを用いて基準点に支持板を配置していった。

その後、リニアガイドの敷設をおこなった。リニアガイドは 2 本のレールを平行に敷設する事が重要である。この事に気をつけながら設置工事をおこない、約  $0.1\text{mm}$  以下の平行度をだした。

移動架台本体の設置作業では本体を予め工場で精密に組み立ててきた。このため実験室ではリニアガイド上に取り付けるだけですんだ。この後、モーターの繋ぎ込みをおこない完成した。

#### 5. 各種試験

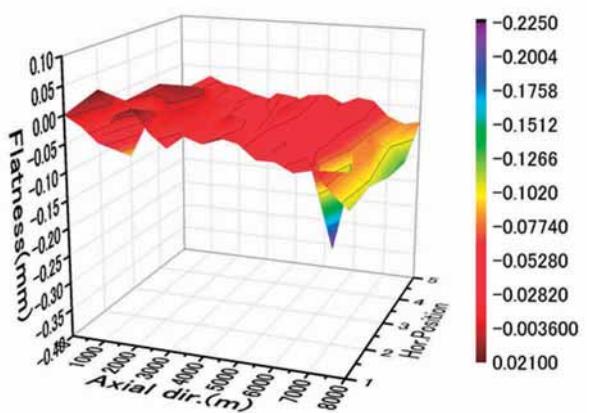
##### 5.1 セルフレベリング床平坦度測定

前述したようにセルフレベリング床施工は 2 度おこなわれた。平坦度の測定は 1 等水準レベル WILD-N3 とレーザートラッカーでおこなわれた。1 回目の測定結果と 2 回目の測定結果を図 6 に示す。このデータはレーザートラッカーで測定されたものである。1 回目の測定では長さ約  $4\text{ m}$  あたり平坦度が  $0.4\text{mm}$  と測定され、これは基準値  $0.05\text{mm}/\text{m}$  に対して  $0.1\text{mm}/\text{m}$  となってしまった。この原因は下地の樹脂コンクリートの平坦度が基準値 ( $<2\text{mm}$ ) より大きかったためではないかと思われる。

このため 2 回目施工では 1 回目のセルフレベリング床の上に再度セルフレベリング剤を施工する事によりおこなわれた。この結果、下地の平坦度が元々よかつたこともあり、平坦度は約  $\pm 0.1\text{mm}$  ( $0.025\text{mm}/\text{m}$ ) 程度に抑える事ができた。

##### 5.2 コンクリート架橋のモーダル試験

モーダル試験とは構造物を加振することで対象の構造物の固有振動数やそれぞれのモードシェイプを実験的に求める試験である。図 4 に示すように架橋



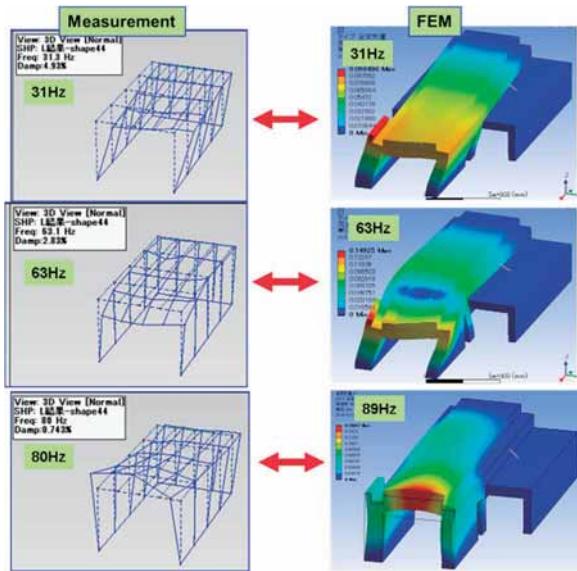


図 7 コンクリート架橋モーダル試験結果

部上部の溝を鉄筋コンクリートで埋めたことと架橋部側面の開口部を塞いだことからモーダル試験を実施して振動特性を把握する事にした。

一般的なモーダル試験の試験手法としては、ハンマーを用いてインパルス加振し、そのときの応答を加速度センサーで測定し固有振動数とモードシェイプを求める。しかし、今回は対象物が大きすぎてハンマー加振できない事から別の手法「Operational Modal Analysis」を用いておこなうこととした。

この手法は加振ハンマーを用いるのではなく、高精度のサーボ式加速度計を用いる。任意の点1点を入力側加速度として床面の振動を測定し、他の場所での振動を応答加速度として測定する。この（応答／入力）の関係から固有値とモードシェイプを求めた。つまり加振源はコンクリート架橋の常時微振動である。また、FEMで固有値解析を実施し、測定値と計算値を比較した。

試験結果を図7に示す。1次モードは水平方向の横揺れで31Hzと測定された。2次モードは水平方向

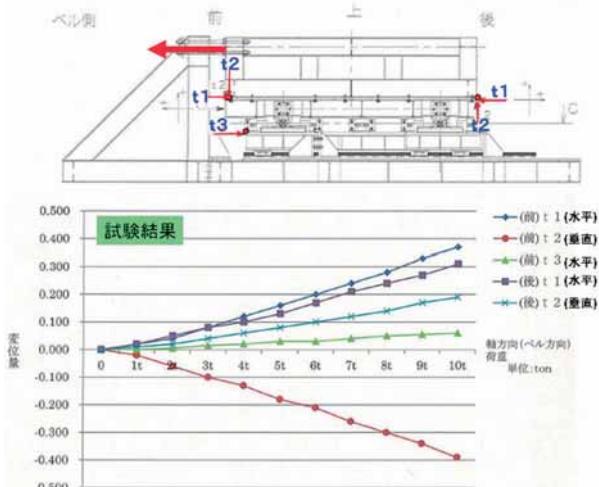


図 8 移動架台荷重を負荷試験結果

の曲げモードで63Hz、3次モードは89Hzの縦方向と測定された。FEMの結果と比べてみるとほぼ一致した結果が得られた。3次モードでも結果が測定値で低いのは実際の剛性が計算より低いためと思われる。

### 5.3 荷重重負荷試験

工場における仮組みの際、最大10トンの荷重を負荷し、移動架台に問題が起きないか試験した。

移動架台の上部フレームの前部と後部にそれぞれ水平方向と垂直方向にダイアルゲージを取り付け、更に下部フレームの前方側にも取り付けた。この状態で移動架台に1トン毎に荷重を負荷していくそのときの荷重と変位の関係を測定した。また、各荷重負荷状態のとき、各部に異常な変形や曲げが無いかチェックした。

試験結果を図8に示す。グラフを見ると負荷荷重に対して変位がほぼ直線的に増加しているので、永久変形は生じていないようと考えられる。又、低荷重時でも急激な変位の増加が無い事から初期ガタは非常に小さいと考えられる。

最終的に約10トンの荷重をかけたときの変位は0.38mm程度で実際の軸方向電磁力7トンがかかったときは0.23mm程度と測定された。

### 5.4 移動架台の固有振動数測定

移動架台の据え付けが完了した後、架台の固有振動数測定と高感度振動計を用いた振動測定がおこなわれた。

この測定では対象物の大きさを考えて、加振ハンマーと3方向にとりつけた加速度計を用いた。

入力として任意の1点をハンマリングし、3方向の加速度センサーを応答側として各部を測定していった。

固有値の測定結果を図9に示す。1次モードは測定値では117Hzで計算では170Hzである。モードとしては上部フレームの水平方向の曲げであった。2

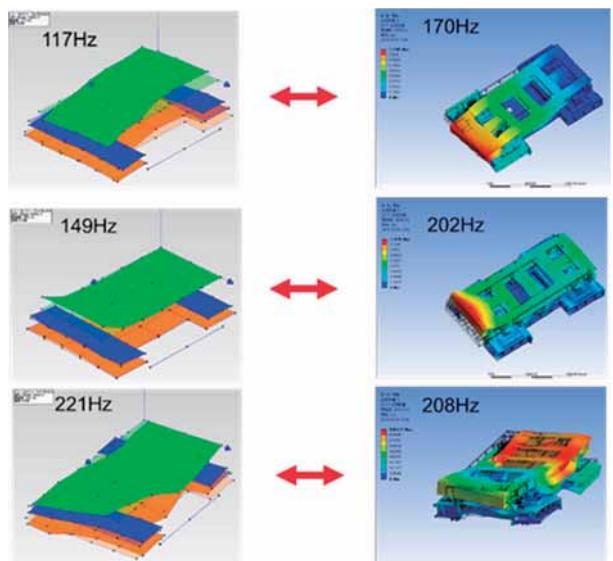


図 9 移動架台モーダル試験結果



図 10 SuperKEKB 用移動架台完成図

次モードでは上部フレームの縦モードで測定値が 149Hz、計算値が 202Hz である。3 次モードでは測定値と計算値はそれぞれ 221Hz と 208Hz 測定された。双方を比べてみると測定値が若干低く計測されたが、これは計算では上部フレームと下部フレームとの間にあるサポート部材が完全に固定されていなかっためと考えられる。

## 6. まとめ

QCS 用移動架台は QCS マグネット及び常伝導電磁石を支持するために製作された。設計にあたっては機械的強度を満足させると共に高精度・高剛性が要求された。このため、リニアガイドを用いた移動システムとセルフレベリング工法を用いた高平坦度床を採用した。平坦度については 1 等レベルとレーザートラッカーで測定され、約 0.1mm 程度の平坦度である事が確認された。また、コンクリート架橋の特性についても測定され、計算での想定とよく一致している事がわかった。移動架台の剛性について実際に荷重を負荷した試験がおこなわれ、特に問題がない事が確認された。

以上の事から図 10 に示すように QCS 用移動架台は設計通りに製作・据え付けがおこなわれたといえる。

## 参考文献

- [1] H. Koiso, K. Akai and K. Oide, "Design Progress and Construction Status of SuperKEKB", TUPPR006, Proceedings of IPAC12, New Orleans, USA, May 20-25, 2012.
- [2] H. Kimura, et al., "Evaluation of High Precision Flat Floor Surface by Epoxy Resin", WEPS134, Proceedings of the 9<sup>th</sup> Accelerator Meeting in Japan, Osaka, Aug. 8-11, 2

# 平成 26 年度 CERN への技術職員 派遣研修報告書

川村 真人<sup>#</sup>  
高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

## Abstract

2014 年度技術職員 CERN 研修について報告する。クライストロンのテスト、CCDTL 空洞のコンディショニング等滞在中行った業務内容についての他、主に作業をした SM18 等の施設について、現地で受けた新人職員向けの研修等について、CERN と KEK の職場環境の違い等についても述べる。

## 1. はじめに

本稿は、平成 26 年度(2014 年度)の欧州合同原子核研究機関(CERN)への日本人職員(技術職)派遣研修についての報告である。

### 1.1 CERN での所属と身分について

本派遣研修への応募を具体的に進めるべく、平成 25 年 8 月上旬に寺島昭男 技術調整役(当時)に伺ったところ、「基本的に CERN 側受入れ先との予備折衝を応募者により実施し、充分に受入れの可能性が高いことが条件とされている。」との返事を頂いた。

CERN との予備折衝について内藤富士雄 加速器第二研究系主幹に相談し(註：当時は加速器第二研究系、東海キャンパス所属、J-PARC センター構成員だった)、内藤主幹から J-PARC Accelerator Technical Advisory Committee メンバーの Roland Garoby 氏 (CERN Beams (BE) Department の Deputy Department Head (当時)) に連絡頂いた。その際、私の方から本派遣研修応募用の個人調書の記入事項(学歴、資格(語学など)、略歴等)の他、得意分野／得意な事、希望する研修テーマ等の情報を内藤主幹に伝えた。

Garoby 氏からは同年 9 月上旬までに返事を頂き、BE Department, Radio Frequency (RF) Group (略して BE / RF) で受入れて頂ける、との事だった。Garoby 氏からの要請もあり、BE / RF の Modulators and Klystrons(MK)Section の Section Leader である Olivier Brunner 氏と早速 e-mail のやり取りをした(Brunner 氏は、研修期間中、私の Supervisor を担当された)。

平成 26 年 6 月に CERN Human Resources Department から Air Mail で送られた Contact of Association によると私の Category は Trainee だった(日本で言う「非常勤職員」の 1 つ)。

CERN には、2014, 15 年度 8 つの Department があり(CERN Website<sup>[1]</sup>より)。2016 年度は 10 個の Department となる)、BE Department の mandate は、「CERN の全加速器において、beam の発生・加

速・診断・特性最適化に責任を持つ各 Group を主導する」<sup>[2]</sup>である。平成 26 年 12 月に行われた BE Department Annual Meeting における、Department Head の Paul Collier 氏の報告によると、当時の BE Department の現員は 702 名、うち Staff Member (日本で言う「常勤職員」に該当するとみられる) は 53% に当たる 369 名だった。

BE Department は 6 つの Group で構成され、その 1 つが RF Group (Group Leader は Erk Jensen 氏) である<sup>[3][4]</sup>。CERN は毎月のように人員の変動があり、RF Group では名簿<sup>[5]</sup>が毎月更新された。ちなみに 2014 年 7 月は現員が 155 名(うち Staff Member が 55% の 86 名)、2015 年 6 月は現員が 151 名(うち Staff Member が 58% の 88 名) だった。RF Group は更に 8 つの Section(MK Section、等) で構成される。

Trainee という身分の詳細は CERN の Website<sup>[6]</sup>を参照されたい。また、募集要項にある Unpaid associate という身分は Project associate の 1 つとされているようである。

### 1.2 研修期間について

研修期間は平成 26 年 7 月 1 日から平成 27 年 6 月 26 日までだった。

研修開始日は CERN から各月の 1 日とするよう要請があった。私は J-PARC 加速器の運転中はなるべく日本にいる事、また国際会議の LINAC14 が平成 26 年 8 月 31 日から 9 月 5 日まで Geneva にて開催され、その会議でポスター発表をする予定で準備期間などが必要だった事、更に 8 月は CERN の方々の多くが休暇をとるのが予想された事、等を考慮して平成 26 年 7 月 1 日とした。

研修終了日は、不測の事態で日本への帰国が遅れる恐れもあったため、平成 27 年 6 月の最終金曜日に当たる 26 日とした。

## 2. CERN における研修／仕事

この第 2 章では CERN で行なった、BE Department の mandate に係わると思われる研修／仕事について報告する。その他の研修 (newcomer の為の研修、英語研修等) については第 4 章で報告する。

<sup>#</sup> masato.kawamura@kek.jp

## 2.1 CERN 加速器について

CERN には陽子、反陽子、電子、重イオンなどの加速器がある<sup>[7]</sup>が、以下の報告に係わる加速器に限定して概要を述べる。

### (1) LHCまでの proton 加速器群と将来計画

CERN にて現時点で運転されている、LHCまでの陽子加速器は以下の通りである(略称(名称)、加速器のタイプ、出力エネルギー)。

- LINAC2、リニアック、50MeV
- PSB (Proton Synchrotron Booster) 、リング、1.4GeV
- PS (Proton Synchrotron) 、リング、26GeV
- SPS (Super Proton Synchrotron) 、リング、450GeV
- LHC (Large Hadron Collider) 、リング、衝突エネルギー設計値 14TeV (7TeV の陽子同士を逆方向から衝突させる (7TeV+7TeV))

LHC は平成 24 年 7 月 Higgs 粒子発見発表を経て、衝突エネルギー 8TeV (4TeV+4TeV) で平成 25 年 2 月まで運転された<sup>[8]</sup>。その後 2 年以上にわたる Shutdown 中に超伝導電磁石の繋ぎ目に設置されている大電流 (13kA) 容量の Busbar 継手 (全数 10,170) の改修などが行われた<sup>[9]</sup>。これらの改修の後、平成 27 年 4 月に運転が再開されて同月中に 6.5TeV 加速に成功し<sup>[9]</sup>、6 月に衝突エネルギー 13TeV(6.5TeV+6.5TeV)での実験が開始された<sup>[10]</sup>。

一方、LHC の前段加速器のうち LINAC2・PSB・PS は、1959 年 (PS) や 1970 年代 (LINAC2、PSB) から運転されている。そのため加速するビーム輝度の制限、メインテナンスの困難 (部品・man power)、更にこれらの加速器が過去に単独運転されていたため LHC の前段加速器として運転する場合ビーム輸送系が最適化されていない事などの問題がある<sup>[11]</sup>。

CERN ではこれら LINAC2・PSB・PS に代わり、LINAC4 (出力エネルギー 160MeV)<sup>[12][13][14]</sup>・SPL (Superconducting Proton Linac、4~5GeV)<sup>[14]</sup>・PS2 (50GeV)<sup>[14]</sup>の建設が計画されている。これら新規加速器は LHC の入射器として運転されるのみならず、特に LINAC4・SPL は ISOLDE (The Isotope mass separator on-line facility)<sup>[15]</sup>・RIB (Radioactive ion beam facility)・Neutrino factory・EURISOL (European ISOL) 等の各実験施設に陽子ビームを供給する事が計画されている<sup>[14]</sup>。LINAC4 については平成 31 年から 32 年までの Shutdown 中に PSB に接続される予定である<sup>[12]</sup>。

### (2) CLIC

CERN では常伝導の電子陽電子リニアコライダーが 1986 年に提案され、現在は重心エネルギー 3TeV (1.5TeV の電子と陽電子を衝突させる) の CLIC (The Compact Linear collider) の建設が計画されている<sup>[16]</sup>。

## 2.2 CERN における仕事／研修

私の CERN における仕事／研修は次の通りである。

- 352MHz – 2.8MW クライストロン (Klystron) 試験
- 704MHz – 2.8MW クライストロン試験
- CCDTL (Cell-coupled drift tube linac) 空洞コンディショニング (352MHz – 1.3MW クライストロン、50Hz モデュレータ (Modulator) 運転)
- CLIC 用 クライストロン試験準備

このうち 352MHz クライストロン、CCDTL 空洞は LINAC4 用機器、704MHz クライストロン、50Hz モデュレータは SPL 用機器である。

(モデルレータという用語は KEK では殆ど用いらぬ、「クライストロン電源」、「クライストロン用パルス電源」、「大電力パルス変調器」等と呼ばれる。上述の通り CERN では Modulator が Section の名称にもなっているので、以下そのまま使用する。)

### (1) クライストロン試験

352MHz – 2.8MW クライストロン (CPI 社 (米国) 製 VKP-8352B) の外形を図 1(a)、704MHz クライストロン (Thales 社 (フランス) 製 TH-2182) の外形を図 1(b) に示す。電子銃からコレクタまでが水平方向に配置されている (J-PARC リニアック 324MHz クライストロンと同じ)。各 クライストロン の仕様は以下の通り(なお、LINAC4 用 352MHz – 2.8MW クライストロンは Thales 製 TH-2179 も使用されており、同一の仕様となっている)。

- 352MHz – 2.8MW クライストロン。周波数 352.2MHz、高圧パルス幅 1.6ms、RF パルス幅 1.3ms、出力導波管 WR-2300、架台を含んだ最大サイズ 5500mm×1000mm。出力窓中心までの高さ 1600~1700mm
- 704MHz – 1.62MW クライストロン。周波数 704.4MHz、高圧パルス幅 1.7ms、RF パルス幅 1.7ms、出力導波管 WR-1150、架台を含んだ最大サイズ 4200mm×1000mm。出力窓中心までの高さ 1500~1600m

LINAC4 および SPL 用 クライストロン 電子銃部 絶縁油タンク (HV タンク) は CERN 仕様の独自のもの (図 2) である。

クライストロン試験で使用した モデュレータ は LINAC4 で 使用するものと同一であり、その仕様は以下の通りである。

- AC 入力、電圧三相 400V、周波数 50Hz
- パルス出力、最大電圧 110kV、最大電流 50A、最大パルス幅 1.8ms、繰返し 2Hz.
- サイズ 2900mm×1100mm×2465mm
- 冷却方式：空冷
- パルス発生素子：不明(図面の素子記号によるトライアックか?)
- 製造は JEMA というベルギーの会社



(a) 352MHz クライストロン(VKP - 8352B)



(b) 704MHz クライストロン( TH - 2182 )

図 1 : CERN で試験を行ったクライストロン



(a) タンク外形



(b) タンク内部

図 2 : CERN 仕様のクライストロンタンク

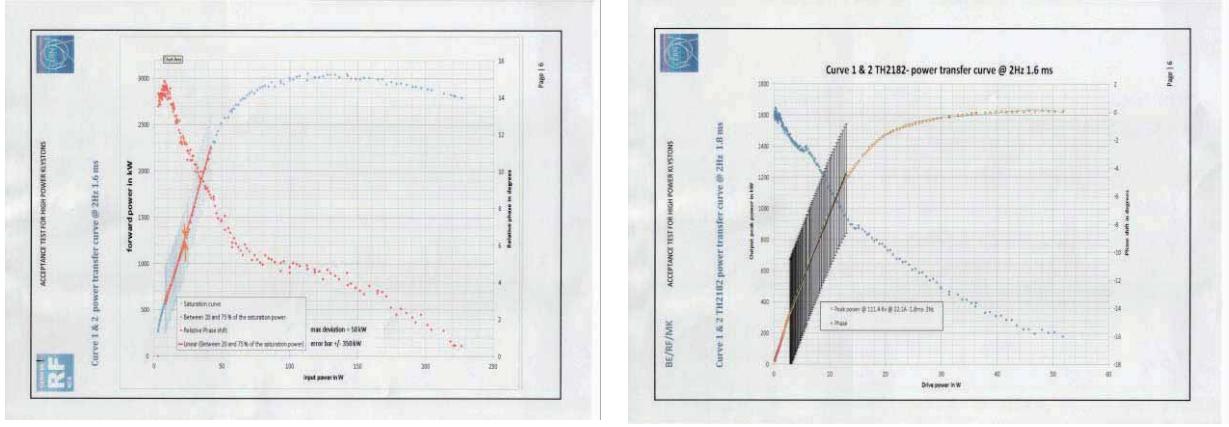


(a) モデュレータ表面



(b) モデュレータ裏面

図 3 : LINAC4 モデュレータ



(a) 352MHz クライストロン

(b) 704MHz クライストロン

図4 : LINAC4、SPL用クライストロン入出力特性

モデュレータの外形図を図3に示す。

クライストロン試験結果のうち、特に入出力特性を図4に示す。各データの取得はLabVIEWを用いて行われた。エラーバーは入出力特性の未飽和部の線形性が88%以下となっている事を示している。

これらの試験はBldg.112で行った。

#### (2) CCDTL 空洞コンディショニング

LINAC4のような高エネルギーの陽子リニアックの場合、加速効率を良い状態に保つため、エネルギーの増加とともに加速空洞を変更していくのが通例となっている。J-PARC 400MeV リニアックの場合は RFQ (Radio-frequency quadrupole、50keV ~ 3MeV) 、DTL (Drift tube linac、3~50MeV) 、SDTL (Separated Drift tube linac、50~190.8MeV) 、ACS (Annular coupled structure、190.8~400MeV) と変更されている。

CERN LINAC4はRFQ (45keV~3MeV) 、DTL (3~50MeV) 、CCDTL (50~102MeV) 、PIMS (PI-Mode Structure、102~160MeV) で構成される<sup>[14]</sup>。このうちCCDTL空洞はBINP (Budker Institute of nuclear physics) 、VNIITF というロシアの研究所で製作される。

LINAC4で使用される352MHz クライストロンは、LEP (Large Electron-Positron collider、1989~2000年に運転された最大衝突エネルギー209GeV の電子陽電子コライダー。LHC は LEP のトンネルをそのまま再利用している)<sup>[17]</sup>で使用されたCW (Continuous Wave、連続波) クライストロンを、パルス運転用に改修した 1.3MW クライストロンと、前節で述べた 2.8MW クライストロンとを併用して用いる。CCDTL 空洞は必要なRF電力が最大 1MW なので、1.3MW クライストロンを用いて運転される<sup>[14]</sup>。

CCDTL 空洞コンディショニングは SM18 (“SM”は Superconducting Magnet の略とみられ、“18”は LHC リング上の位置を示す Point1.8 に依ると思われる)<sup>[18]</sup>と呼ばれる Bldg. 2173 で行った。

SM18 は超伝導の組立・試験に必要な冷凍機やクリーンルーム・コンクリートシールドなどが備わっており、モデュレータは SPL 用の 50Hz 仕様の物を用いた。モデュレータの仕様は以下の通り。

- AC 入力、電圧三相 230V、周波数 50Hz。
- パルス出力、最大電圧 5.5kV、最大電流 550A、最大パルス幅 2.80ms(20Hz 運転時)、1.12ms(50Hz 運転時)
- モデュレータ出力電圧をパルスランプで 22 倍に昇圧してクライストロンに供給
- モデュレータのサイズ 2800mm × 1600mm × 2200mm、パルスランプのサイズ 1320mm × 820mm × 1180mm
- モデュレータ冷却方式：水冷
- パルス発生素子：IGCT
- 製造は Ampegeon というドイツの会社

テストスタンドの概観を図5(a)、50Hz モデュレータの外形を図5(b)に示す。

CCDTL コンディショニングは最終的に 1MW(定格値)、RF パルス幅 640μs、繰返し 20Hz まで行った。

#### (3) CLIC クライストロン試験準備

CLIC の主リニアック(6.14GeV~1.5TeV)に供給する RF 電力は、電子・陽電子を加速する空洞に平行に設置される減速器(Decelerator)を進むドライブビームの電子から発生する RF を用いる。このドライブビームの加速(~2.38GeV)には 1GHz のマルチビーム・クライストロンが用いられる<sup>[16]</sup>。

マルチビーム・クライストロンが CERN に納品され試験が行われるのは 2016 年(平成 28 年)4 月以降の予定である。私は平成 26 年 6 月末まで J-PARC リニアックで仕事をしており、972MHz クライストロンの試験を行っていた。1GHz と 972MHz は周波数が近く、導波管は同じ WR-975 を使用するので、e-mail で J-PARC の人達と連絡を取り、J-PARC リニアックの地上部導波管系の図面等を提供した。



(a) クライストロン、モデュレータ等



(b) SPL 用 50Hz モデュレータ

図5：SM18におけるテストスタンド概観

### 3. SM18 施設の紹介

ここでは上記に述べなかった SM18 施設について紹介する。

SM18 には LHC 超伝導 RF のテストスタンドがある。LHC クライストロンは Thales 製 TH2167、周波数 408MHz、CW で最大出力 330kW である。垂直方向に設置され、下がコレクタ、上が電子銃で、KEK では PF リングのクライストロンと同じ構成となっている。出力導波管は WR2300 の扁平型（通常は縦横の長さの比が 1:2 であるのに対し、扁平型は縦の長さが半分で 1:4 となっている）。導波管はコンクリートシールド内まで繋がっており、シールド内で導波管型 RF スイッチを切り替えて超伝導空洞に RF 電力を供給する。

クライストロン用高圧電源は屋外に高圧機器、屋内に電圧調整器 (AVR)、モデュレータ等がある。高圧機器は AC18kV を供給して AC1kV 2 回路に変換するトランス、DC52kV 2 回路に変換するトランスなどを経て最大 DC100kV がモデュレータに供給される（ここで LHC クライストロン用のモデュレータは電子管（Thales 製 TH5186）を備え、クライストロン・アノード電圧を調整してクライストロン RF 出力を制御するものである（パルス電源ではない））。

LHC 超伝導空洞性能確認のための試験運転は平成 27 年 5 月から準備が始まられ、同 6 月時点では試験の待機状態であった。

超伝導空洞の縦測定設備では SPL 用空洞の小電力試験が行われている。

LHC 空洞、SPL 空洞以外に、SM18 施設では HIE ISOLDE (High-Intensity-energy ISOLDE)<sup>[19]</sup>用の低エネルギー用超伝導空洞の作業が行われている（高エネルギー用のダンベル型と異なり、低エネルギー用は同軸管型となっている）。超伝導空洞の 1 号機が平成 27 年 4 月末に完成し、5 月初めに ISOLDE 施設に搬入された<sup>[20]</sup>。

CERN には多くの見学者が来訪し、SM18 は一角に展示スペースが設けてあるので、毎日のように見学者が来る。私も、

- 平成 27 年 2 月 11 日 友玉園セラミックス 加藤貴士社長
- 同年 3 月 2 日 根本光宏(前)管理局長、片田晋 財務部長、渡邊都子氏(当時管理局施設部 施設企画課資産マネジメント室管財係主任、平成 27~28 年度 CERN 派遣者)
- 同年 3 月 17 日 茨城工業高等専門学校の生徒の方々

の見学対応をした。

### 4. CERN で受講したその他の研修等

#### 4.1 Newcomer の為の研修

CERN の Safety Information Registration (SIR) の Website からオンライン講習を受講し、確認テストを受けた。

Supervisor から要求された科目は “Computer Security”、“CERN Safety Introduction”、“Electrical Safety – Awareness”、“Radiation Protection – Supervised Area” だった。

放射線作業に従事するため、Medical Service にて血液検査等を受診した。Dosimeter を受け取り、月初めに CERN 内の測定器に差し込んでデータをオンラインで送信した。

電気機器取扱のため、3 日間の講習を受講した。講義は全て英語で行われ、1、2 日目は朝から夕まで講義（テキスト使用）、3 日目は午前講義、昼前確認テスト、午後施設見学（見学場所は SM18）というスケジュールだった。終了後、修了証書を受け取り、電気機器の一部作業を行う資格を得た。

LHC Point4（クライストロン等の高周波機器が設置されている、機器はビームラインと同じ地下 170m の地点にある）に入域するため、Safety Mask

(非常に装着するため滞在中は常時携帯する)の講習を受けた。受講前にヘルメット、ヘッドライト、安全靴が支給された。講習時間は 1 時間半で、講義、実地訓練(火災発生で発煙したことを想定してマスクを素早く、正確に装着する)が行われた。

その他、LHC Point4 入域までに Biometry (眼の虹彩) を登録した。

#### 4.2 英語研修

英語、またはフランス語の training を希望すれば受講可能との事なので、2 期にわたって英語の研修を受講した。

##### (1) 平成 26 年 9 月末から 12 月初めまで

火曜、木曜の朝 2 時間半ずつ、全 24 回。費用 840 スイスフランが Beams Department から Human Resources Department へ支払われた。

研修は PALORES という会社に委託された。面接 (Speaking & Listening)、筆記試験(設問テーマに沿った Writing、時間設定は自由)によってレベルチェックが行われ、結果 全 9 レベル中 下から 4 番目 (Level 4) のクラスに入った。

テキストは講師作成によるプリントが使用された。講義は文法の lesson を中心に、講師と受講生、受講生同志の質疑応答を織り交ぜて行われた。

最終テストは筆記試験(文法、作文)と面接(講師 2 名の前で受講者 2 名が課題に沿った質疑応答を行う)が行われた。

この期間の講習で今後の参考となったものを挙げておく。

- ネット辞書(英英辞書)では Macmillan の Website<sup>[21]</sup>が、記述が簡潔で良い
- 日本語、英語以外の言葉を含むネット辞書については、LEXILOGOS<sup>[22]</sup>を紹介された
- BBC(British Broadcasting Corporation、英国放送協会)の Learning English のページには、英語ニュースの他、レベルに合わせたメニューが用意されている<sup>[23]</sup>

##### (2) 平成 27 年 2 月初めから 4 月初めまで

火曜、木曜の朝 2 時間ずつ、全 20 回。費用 570 スイスフランが Beams Department から Human Resources Department へ支払われた。

研修は Supercomm という会社に委託された。面接 (Speaking & Listening)、筆記試験(Web 上の指定された Site で課題に沿った Writing、時間制限あり)によってレベルチェックが行われ、結果、ヨーロッパ言語共通参照枠(CEFR)<sup>[24]</sup>の“A2”と判定された。

使用テキストは “In Company 3.0 Elementary Level Student's Book Pack” (ISBN 978-0-230-45500-9)、文法自習用のサブテキストは “Essential Grammar in Use with Answers and CD-ROM Pack 3rd Edition” (ISBN 978-0-521-67543-7) だった。他に指定 Website のオンライントレーニングの課題が出され、受講時間が評価対象となった。

講義は基本的にテキストに沿って行われ、時々講

師と受講者・受講者同士の質疑応答があった。他に YouTube 上の英語講座を学習した。

最終テストは筆記試験(文法、作文)と面接(講師と受講者 1 対 1 で、課題に沿った質疑応答)を行った。

#### 4.3 その他

1.2 節に触れた通り、国際会議 LINAC14 でポスター発表<sup>[25]</sup>を行った。CERN 内でのポスター作製について ATLAS グループの方々に教えて頂いた。

### 5. CERN と KEK の違い

去る平成 27 年 8 月 24 日に行った口頭の帰朝報告に先立ち、「CERN と KEK の違い」について報告して欲しい、との要望があった。当日準備した内容と、質問に応答した事を以下に記載する。

- PS、SPS が電子シンクロトロンとして運転された過去がある<sup>[17]</sup>(人によっては職場を変える要因になる)
- CERN は国際条約によって役割を基礎科学に限定している。そのため医療用加速器、放射光利用の施設は無い<sup>[26]</sup>
- CERN では与えられた休暇は全て消化するよう言われる(特定の仕事が滞る場合がありそうだが、容認されている様子)
- CERN では各人の役割分担が KEK よりキッチリ分かれているように見える(複数の機器が集まっているシステム内で所掌の分担が分かれている、たとえば Beams Department. と Engineering Department の所掌など)。短期滞在で仕事をする人には分かりにくく、不便な面がある
- CERN の技術者と KEK の技術者との比較について、具体的に誰と誰を比べるべきか、1 年しか滞在しなかった私には正確に述べることは難しい。しかし CERN の常勤の技術者と自分を比べると、CERN の場合色々な言葉を話す人が集まっているので、実際に 3 か国語を話している人は結構いた。また BE Department の場合 4 割以上の人達が短期雇用なので、共同で仕事をする場合は人が代わる度に説明をする必要があると想像される
- ある程度長時間が必要なコンディショニング等の場合、CERN では Remote 運転を用い、居室などで操作する傾向がある(Meyrin サイト内、Meyrin-SM18 間など)
- 私の居室のあった Bldg.252 では盗難が何度か発生した様子で、夜中の建物への出入りを希望する人は ID カードの登録が必要になった(防犯については CERN が KEK に近づいた?)
- CERN の食堂は土、日を含め 7 時頃から 22 時頃まで開いており、何らかの食事が出来、便利である。但しメニューは平日昼間が多いが、朝、夕、土日などは少なくなる。また CERN 内外を含め、24 時間営業のコンビニ、道路上の飲料用自販機などは一切無し

## 謝辞

本研修の準備の際にお力添え頂いた加速器第二研究系内藤富士雄主幹、滞在時に生活全般を含めご指導・ご協力を頂いた山本明リニアコライダー計画推進室長、出発前から滞在時に至るまで種々のご教示・ご協力を頂いた KEK 事務職員の吉田健一様(国際企画課国際企画第一係)、同年度で 1 カ月前に研修を開始され情報交換頂いた高瀬亘様(計算科学センター)、近藤敬比古名誉教授をはじめ ATLAS グループの皆様、日本での各種手続き等でご尽力頂いた KEK の皆様に感謝致します。

また、小関忠 J-PARC 副センター長兼 KEK 加速器第一研究系主幹、長谷川和男加速器ディビジョン長をはじめ、私の CERN 研修をご理解頂いた J-PARC の皆様に感謝致します。

最後に CERN Staff の皆様、特に Roland Galoby 博士、Olivier Brunner 博士、その他仕事や事務手続き等でご教示頂いた皆様、英語研修等の講師の方々、一緒に研修を受講した皆様、その他多くの皆様に感謝致します。

## 参考文献・Website

- [1] <http://home.cern/about/structure-cern>
- [2] <https://espace.cern.ch/be-dep/Mandate.aspx>
- [3] <https://espace.cern.ch/be-dep/BEDepartmentalDocuments/BE/Structure.pdf>
- [4] <https://espace.cern.ch/be-dep/RF/default.aspx>
- [5] <https://espace.cern.ch/be-dep/RF/Shared%20Documents/Group%20Structure%20December%202015.pdf> (2015 年 12 月名簿)
- [6] <http://newcomersguide.web.cern.ch/categories-members-personnel>
- [7] <http://home.cern/about/accelerators-topics>
- [8] <http://home.cern/about/updates/2013/02/first-three-year-lhc-running-period-reaches-conclusion>
- [9] P. Collier, IPAC15, MOXGB3
  - <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2015/papers/moxgb3.pdf>
  - [http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2015/talks/moxgb3\\_talk.pdf](http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2015/talks/moxgb3_talk.pdf)
- [10] <http://home.cern/about/updates/2015/06/lhc-experiments-back-business-record-energy>
- [11] LINAC4 建屋内の掲示パネルより
- [12] <http://home.cern/about/accelerators/linear-accelerator-4>
- [13] “LINAC4 Technical Design Report”, CERN-AB-2006-084 ABP/RF
  - <http://cds.cern.ch/record/1004186/files/ab-2006-084.pdf>
- [14] “Conceptual Design of the Low-Power and High-Power SPL”, CERN-2014-007
  - <http://cds.cern.ch/record/1969922/files/CERN-2014-007-SPL.pdf>
- [15] <http://isolde.web.cern.ch/>
- [16] “A multi-TeV Linear Collider based on CLIC technology, CLIC Conceptual Design Report”, KEK Report 2012-1
- [17] <http://home.cern/about/accelerators/large-electron-positron-collider>
  - “LEP Design Report Vol.I”, CERN-LEP/TH/83-29 ,  
<http://cds.cern.ch/record/98881/files/cm-p00047695.pdf>
  - “LEP Design Report Vol.II”, CERN-LEP/84-01  
<http://cds.cern.ch/record/102083/files/cm-p00047694.pdf>
  - “LEP Design Report Vol.III”, CERN-AC/96-01(LEP2)  
<http://cds.cern.ch/record/314187/files/cm-p00047696.pdf>
- [18] <https://espace.cern.ch/te-dep-msc-tf/SitePages/Home.aspx>
- [19] <http://hie-isolde.web.cern.ch/hie-isolde/>
- [20] <http://home.cern/about/updates/2015/05/milestone-towards-higher-energy-nuclear-physics-facility>
  - <http://home.cern/about/updates/2015/11/upgraded-nuclear-physics-facility-starts>
- [21] <http://www.macmillandictionary.com/>
- [22] <http://www.lexilogos.com/english/index.htm>
- [23] <http://www.bbc.co.uk/learningenglish>
- [24] [https://www.britishcouncil.jp/sites/default/files/jiao\\_cai\\_n\\_onan\\_yi\\_du\\_tocefrying\\_yu\\_li\\_jian\\_ding\\_shi\\_yan\\_0.pdf](https://www.britishcouncil.jp/sites/default/files/jiao_cai_n_onan_yi_du_tocefrying_yu_li_jian_ding_shi_yan_0.pdf)
- [25] M. Kawamura et al., LINAC14, TUPP070.
  - <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/LINAC2014/papers/tupp070.pdf>
  - [http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/LINAC2014/posters/tupp070\\_poster.pdf](http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/LINAC2014/posters/tupp070_poster.pdf)
- [26] 村山齊 編著「宇宙を創る実験」(集英社新書、ISBN 978-4-08-720768-2)、第三部第九章、pp.168-169.

# 平成 26 年度 CERN 派遣研修報告書

高瀬 亘<sup>#</sup>

高エネルギー加速器研究機構 共通基盤研究施設

## Abstract

平成 26 年度 CERN への日本人職員（技術職）派遣研修のもと、平成 26 年 6 月 1 日から一年間 CERN に駐在した。IT 部署 OIS グループ CV セクションで提供する OpenStack を利用したプライベートクラウドサービスは、5000 台の物理サーバ上に、12000 台の仮想マシンが稼働している大規模なサービスであり、計算機資源利用状況、サービス稼働状況を容易に確認するための枠組みが必要であった。本研修では、CV セクションにて、OpenStack のデータベースから計算機資源の利用状況を取得して表示する openstack-db-reporter, openstack-db-logger の開発、資源情報閲覧の際のアクセス制御を行う ElasticSearch プラグインの開発、クラウドサービス稼働状況確認のためのベンチマークツール Rally のデプロイを行い、プライベートクラウドサービスのモニタリングパートの改善に貢献した。本研修の経験を、KEK でのクラウドサービス提供に活かしていく。

## 1. はじめに

欧州原子核研究機構（CERN）の大型ハドロン衝突型加速器（LHC）で行われている 4 実験では、CERN を中心に開発した WLCG（Worldwide LHC Computing Grid）と呼ばれるグリッドコンピューティングの枠組みを利用し、世界各地の研究施設で計算機資源を分担してデータの解析を行っている。CERN の IT 部署 OIS（Operating System and Infrastructure Service）グループ CV（Cloud and Virtualization）セクションでは、CERN 内向けのプライベートクラウドサービスを提供している。本サービスにより、利用者はネットワークを通して、自身の望むデータ解析環境をオンデマンドで得ることができる。グリッドコンピューティングにおいて、多様化するデータ解析環境のニーズに応えるため、クラウドサービスとの融合を目指した研究開発が進められている。

高エネルギー加速器研究機構（KEK）では、SuperKEKB や国際リニアコライダーにおけるデータ解析のために、世界的に分散した計算センターが協調して処理を行うための環境整備が急務とされており、グリッドコンピューティングサービスの運用・開発を行っている。加えて、プライベートクラウドサービスの導入を計画しており、本研修を通して、CERN のクラウドサービスの運用手法及び開発の技術を磨き KEK でのサービス展開へ活かしたいと考え応募にいたった。

## 2. 研修開始前後のタイムライン

表 1 に研修開始前後のタイムラインを示す。2013 年 11 月に研修への募集に応募し、翌年 1 月末に研修候補者として決定した。その後、CERN 側の受け入れ先のスーパバイザと連絡を取り合い研修開始日

や研修内容を議論し、2 月下旬に KEK 国際企画課から CERN へ Nomination letter が送付された。研修開始日を 6 月 1 日として CERN 側に伝えてはいたが、CERN 側からの返答に時間がかかり、正式な研修受け入れ通知である Confirmation letter が届いたのは 5 月上旬であった。

表 1：研修開始前後のタイムライン

年月日	出来事
2013/11/15	研修応募書類提出
2013/12/11	書類選考結果通知
2014/01/09	面接
2014/01/24	候補者として決定
2014/02/下旬	KEK 国際企画課から CERN へ Nomination letter の送付
2014/05/08	CERN から KEK 国際企画課へ Confirmation letter の送付
2014/05/14	CERN Human Resource (HR) 部署へ Registration form の送付
2014/05/21	CERN HR 部署から Contract of association コピーを受領
2014/06/01	Trainee として研修開始
2014/06/30	スイスカード取得
2014/07/18	フレンチビザ取得
2014/08/26	フレンチカード取得

CERN はスイスとフランスの国境にまたがって位置しており、研修の際の居住地はどちらかの国を選ぶことができる。アパートは、CERN のハウジングサービスや CERN Market と呼ばれる Web サービス

<sup>#</sup> wataru.takase@kek.jp

で検索することができる。スイス側は公共交通機関が充実しているが、物件が少なく、物価も高い。一方フランス側はスイスに比べて物件も多く、物価も安いため、フランス側に住む事にした。フランス側に住む場合は予め在日フランス大使館にてフレンチビザを取得しておくとフランスでの生活を円滑に開始することができる。しかしながら、フレンチビザの申請から取得まで三週間程度時間を要する。Confirmation letter の到着が 5 月上旬であり研修開始日まで時間に余裕が無かったため、日本でのフレンチビザ取得は諦めた。研修開始後、まずはスイスの滞在許可証であるスイスカードを取得し、スイスカードを使用してフレンチビザを申請した。最終的に 8 月下旬にフランスの滞在許可証であるフレンチカードを取得することができた。

### 3. グリッドとクラウドの関係

クラウドサービス提供セクションでの業務報告に先立ち、グリッドサービスとクラウドサービスの関係について説明する。グリッドサービスとは、図 1 のように各組織の計算資源をネットワークで接続して仮想組織を構成し、利用者に一つの大きな計算機のように見せるサービスである。仮想組織にデータ解析用ジョブが投入されると、その裏で各組織の提供する計算資源にジョブが割り当てる。ジョブ実行後、解析結果が利用者へと返る。

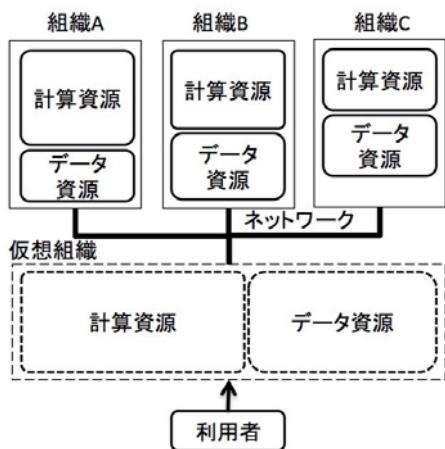


図1：グリッドサービス

一方、クラウドサービスは、1 台の物理サーバ上に複数の仮想マシンを動作させることを可能とする仮想化技術を利用し、1) 計算資源の需要に応じて仮想マシンを起動し必要な資源を動的に供給できる、2) 利用者ごと・実験グループごとに特殊なデータ解析環境（オペレーティングシステム、解析用ソフトウェア等）を用意できる、3) ハードウェアの管理コストを削減できる利点がある。利用手順として、利用者は、データ解析マシンの雛形をクラウド上に登録する。次に、解析の際は必要な計算資源をネットワーク越しに要求すると、雛形をもとに必要なデータ解析環境が動的に用意される（図 2）。

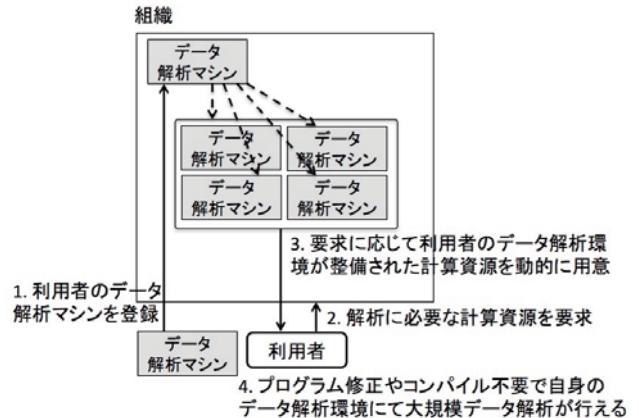


図2：クラウドサービス

グリッドによる大規模データ解析では、自身のデータ解析環境はそのまま利用できず、グリッドを形成する各組織の環境に応じてプログラム修正や再コンパイルが必要となる。これに対して、クラウドでは利用者の解析環境をそのまま大規模データ解析に利用できる長所がある。現在、グリッドとクラウドを融合させたサービスとして、グリッド上の仮想組織に投入されたデータ解析ジョブに割り当てる計算資源を、クラウド上で動的に用意する研究が進められている<sup>[1]</sup>。

### 4. CERN プライベートクラウドサービス

CERN は、メイラン（スイス・ジュネーブ）と ウィグナー（ハンガリー・ブタペスト）にデータセンターを持ち、CV セクションのプライベートクラウドサービスは、これら二つのデータセンターの提供する計算資源を利用している。両データセンターの計算資源量を表 2 に示す。ウィグナーデータセンターは 2013 年に運用を開始した新しいデータセンターであり、2015 年現在も計算資源の追加投入が継続的に行われている。両データセンターは 100GbE のネットワークケーブル 2 本で接続されており、ウィグナーデータセンターにおける、ハードウェア設置以降の操作はメイランデータセンターからネットワーク越しに行う。

表 2 : CERN データセンターの資源量（2015 年 6 月現在）

	メイラン	ウィグナー
サーバ数	11,000	2,700
CPU コア数	110,000	43,000
メモリ容量 (TB)	420	170
ディスク容量 (PB)	120	70

プライベートクラウドサービスを提供する CV セクションには 15 名が所属しており、毎朝、前日の仕事内容及び当日の仕事予定を簡単に報告し合う。

また、毎週月曜には、先週の仕事内容及び今週の仕事予定の詳細を報告し合う。これにより、セクション内の各自の業務内容を把握できるほか、作業が行き詰まっている際の相談や、クラウドに関してセクション内のメンバーが個々に収集した最新のトピックを共有できるメリットがある。

プライベートクラウドサービスを実現するためのソフトウェアとしてオープンソースの OpenStack<sup>[2]</sup>を使用しており、2013年7月からプロダクションサービスを開始している。OpenStackでは、利用者にテナントと呼ばれるスペースを提供する。利用者は、与えられたテナント内の利用可能な資源の範囲で、自由にインスタンス（仮想マシン）の作成・削除等が行える。サービス対象は、バッチサービスグループ、実験グループ、ITインフラストラクチャサービスグループ、個人利用者である。CVセクションは、OpenStackのテナントを利用者に提供するのみであり、後のテナントの使い方は利用者及びグループ次第である。2015年6月現在、利用者は約1800名、使用している物理サーバは約5000台、物理サーバ上のインスタンス数は約12000である。物理サーバは定期的にデータセンターに追加され、今後もインスタンス数は増加していく。

OpenStackはクラウドを構築するためのサービスをコンポーネントと呼ばれる単位に分けて提供しており、管理者は自身の実現したいサービスに応じて必要なコンポーネントを選択し、組み合わせてクラウド環境を構築する。表3は、CVセクションで利用しているOpenStackのコンポーネントの一覧である。これに加えて、定義したシステム構成をもとにインスタンスを自動的に配置してシステムを構築するOrchestration（オーケストレーション）コンポーネント、ネットワークを仮想化するNetworkingコンポーネントについてプロダクション利用のための調査が進められている。

表3: CVセクションの利用するOpenStackコンポーネント（2015年6月現在）

コンポーネント	機能
Dashboard	Webインターフェース
Identity	利用者管理
Compute	インスタンス管理
Block storage	インスタンス用ストレージ管理
Image service	インスタンスの雛形管理
Telemetry	インスタンスの課金情報管理

CVセクションでは、これら各コンポーネントの管理・改善開発・新技術調査のほか、クラウドサービス各種オペレーションのワークフローの自動化、Windows仮想化技術サポート、旧仮想化サービスからOpenStackへのインスタンス移行、モニタリング

環境整備・開発を業務として行っている。

## 5. CVセクションにおける自身の貢献

研修では、CVセクションにおいてモニタリング関連ツールの改善・開発を主として行った。これにより、1) クラウド資源の利用状況を容易に確認する、2) 将来のクラウド資源の計画・予測を容易にする、3) クラウドサービスが正常稼働している事を定常的に確認することができるようになった。以下に詳細を示す。

### 5.1 クラウド資源使用量収集ツールの開発

OpenStackでは、クラウドサービスに関する情報はコンポーネントごとに分かれた複数のデータベースに保存される。これらデータベースへアクセスしてクラウド資源の使用状況を容易に確認するための二つのツールopenstack-db-reporter及びopenstack-db-loggerを開発した。openstack-db-reporterは、ターミナル上にてコマンドラインで実行するツールであり、実行するとセル（意味のある物理サーバの集まり）単位、ドメイン（実験グループ等の分類）単位、テナント単位のCPUコア・メモリ・ディスク使用状況のほか、ボリューム使用状況、利用者数、テナント数、イメージ数等を表形式で出力する（図3）。

Cell	Active Nodes	Nodes	Cores			RAM(GB)		
			Used	Quota	Used%	Used	Quota	Use
cell_crit_project_001	69	96	1101	2208	49	2383	4359	5
cell_crit_project_002	109	156	2693	3408	77	5543	13773	4
cell_wig_shared_001	38	38	888	1216	73	1813	2386	7
cell_wig_shared_002	31	31	404	992	40	861	1944	4
cell_gva_shared_001	788	875	19225	28544	93	41037	42662	9
cell_05	4	8	1	64	1	12	94	1
cell_wig_project_005	189	191	6018	6648	99	11371	11854	9
cell_wig_project_004	206	212	1367	6592	28	3091	12921	2
cell_wig_project_007	184	184	15	5888	0	38	11528	0
cell_wig_project_006	216	217	16	6912	0	32	13518	0
cell_wig_project_001	459	472	14344	14688	97	27358	28849	9
cell_wig_project_003	497	503	4034	4084	07	11410	11750	0

図3: openstack-db-reporterの出力例

一方、openstack-db-loggerは10分間隔で自動実行され、資源使用量を収集する。CVセクションでは、クラウドに関する様々なデータ可視化のために、Flume<sup>[3]</sup>、ElasticSearch<sup>[4]</sup>、Kibana<sup>[5]</sup>の三つのツールを使用している（図4）。

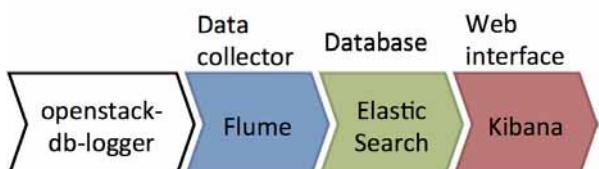


図4: Flume、ElasticSearch、Kibanaを利用してデータ可視化の枠組み

Flumeが各所から送信されてくるデータを集約し、データベースであるElasticSearchへ保存する。KibanaはWebインターフェースであり、利用者からの要求を受けてElasticSearchから必要なデータを取得し可視化する。openstack-db-loggerも、この可視化の枠組みを利用するため、収集データをFlumeの受信可能なデータ形式であるJSON（JavaScript

Object Notation) 形式に変換して Flume へ送信している。また、Kibana 上にて、ElasticSearch から必要な情報を取得して可視化するための各種ダッシュボードを作成した。図 5 に示すように Kibana 上にて、10 分ごとに収集された時系列のクラウド資源使用量の様子をヒストグラムで容易に確認できるようになり、資源使用量の傾向を把握し将来の資源調達計画に役立てることができるようになった。

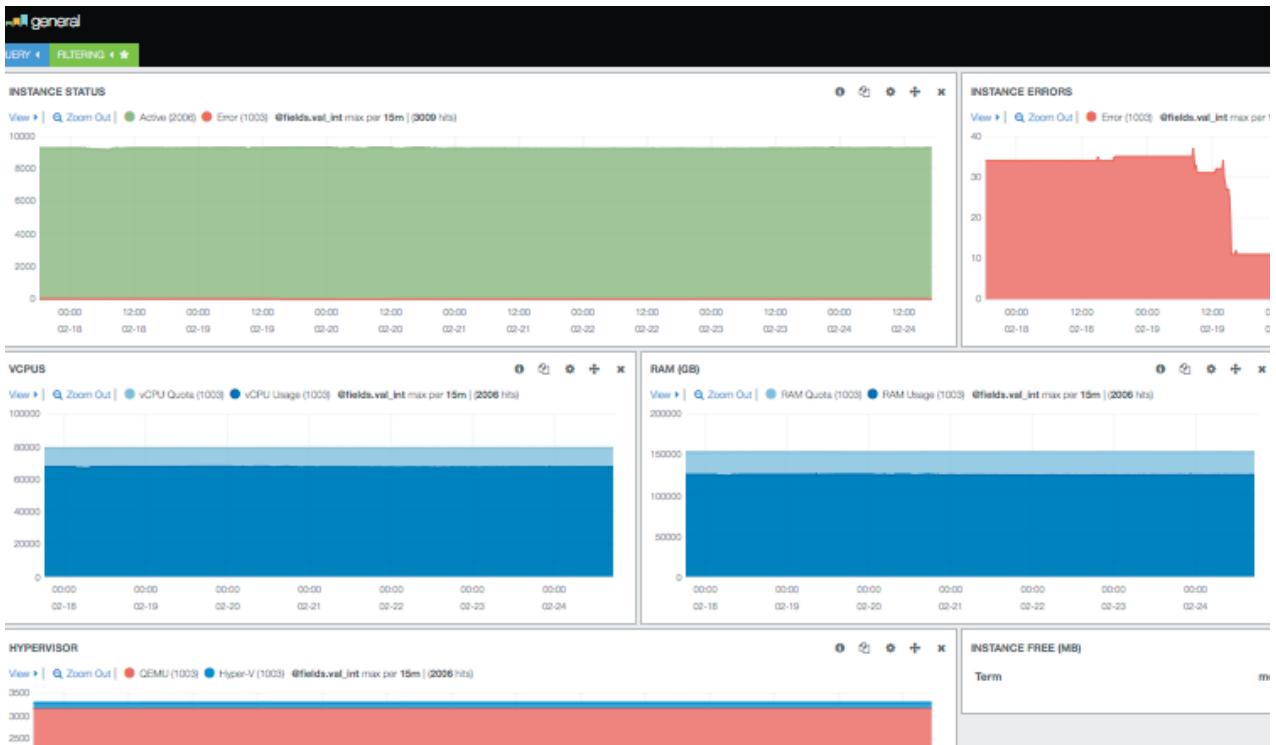


図5：Kibanaによるopenstack-db-loggerの出力情報の可視化：例えば上段は、アクティブなインスタンス数（緑）とエラー状態のインスタンス数（赤）の時系列の変化を表しており、中段はCPUコア数やメモリの計算資源量（薄い青）とその使用量（濃い青）を表している

## 5.2 クラウド資源使用量閲覧ページの利用者への公開

前項の openstack-db-logger はテナントごとの資源使用量も収集している。そこで、このテナントごとの情報を利用者に公開することを考えた。まず、kibana-dashboard-generator を開発した。このツールは OpenStack の利用者管理サービスにアクセスして、OpenStack 上のテナントの一覧を取得し、テナントごとに Kibana 用のダッシュボードを自動的に生成する。作成された各ダッシュボード上では、テナントごとのインスタンスの状態、CPU コア・メモリ・ボリューム等の時系列の使用状況を確認することができる。しかしながら、このダッシュボードを利用者に公開するためには問題があった。Web インターフェース Kibana とデータベース ElasticSearch は利用者ごとのアクセス制御機能を持たないため、Kibana にアクセスできる全利用者は ElasticSearch 内の全情報を自由に閲覧できてしまう。公開のためには、利

また、開発した両ツールとも OpenStack のデータベースにアクセスして情報を取得する部分は共通である。そこで、それぞれのツールでデータベースにアクセスする機能を実装するのではなく、OpenStack へのデータベースアクセス機能を専門に提供する openstack-db-common と呼ぶモジュールを開発し、両ツールはこのモジュールを利用してデータベースから情報を取得できるようにした。

用者は自身の属しているテナントの情報しか閲覧できないよう、利用者ごとに閲覧を制限する機能が必要であった。そこで、これを実現するため ElasticSearch 用のプラグインを開発した。

図 6 に、開発したプラグインによるアクセス制御の流れを示す。まず、Kibana の Web ページは CERN のシングルサインオン認証 (SSO : 一度の認証のみで複数のサービスにアクセスできる認証方法) に通った利用者しか閲覧できないようになっている。しかし、このままでは、SSO 認証に通った利用者は他者の情報も閲覧できてしまう。SSO 認証後、利用者は Kibana 上にて、ElasticSearch から情報を取得するためのクエリを投入する。Kibana はクエリを JSON 形式に変換して ElasticSearch に渡す。開発したプラグインを介さない場合、ElasticSearch は Kibana からのクエリを受け取り、データベースからクエリに合致するデータを Kibana に返す。開発したプラグインは Kibana と ElasticSearch の間に入り、Kibana からのクエリを一旦受け取る。プラグインは

SSO から利用者 ID を取得し、予め用意しておいたマッピングファイルを参照して、利用者 ID から利用者の属するテナント ID を取得する。その後 Kibana から受け取ったクエリに、テナント ID を限定して検索するクエリを追加し ElasticSearch に渡す。この追加クエリにより、ElasticSearch は利用者の属するテナントに関連した情報のみを返すようになる。本プラグインはプロダクションサービスに採用され、利用者は自身の属するテナントのクラウド資源使用状況を Web 上から閲覧できるようになった。

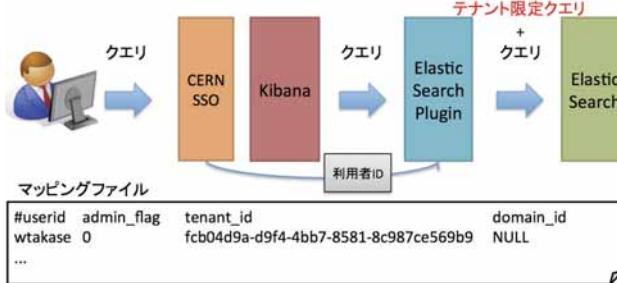


図 6：開発したプラグインによるアクセス制御

### 5.3 ベンチマークツール Rally のデプロイ

Rally は OpenStack 用のベンチマークツールである。OpenStack の各コンポーネントに対して利用者の追加・削除、インスタンスの起動・削除・一覧の取得、ボリュームの作成等の様々な要求を出してその実行時間や成功率を計測することができ、現在 100 以上のベンチマークシナリオを提供している。

CV セクションでは、この Rally をベンチマーク目的ではなく、クラウドサービスの各機能が正常稼働している事を確認するために利用することを考えた。定期的に Rally の提供する各種ベンチマークシナリオを実行し、OpenStack の各コンポーネントの提供するサービスの稼働状況を確認する。ここでも、Flume、ElasticSearch、Kibana の枠組みを利用してテスト結果を可視化する。Rally はテスト結果を HTML (HyperText Markup Language) もしくは、XML (Extensible Markup Language) 形式にしか出力できないため、これを拡張しテスト結果を JSON 形式で Flume へ送信できるようにした。また、Kibana 上でテスト結果を可視化するためのダッシュボードを作成した。図 7 に示すように、定期的に実行される Rally ベンチマークシナリオの成功率を赤・黄・

緑のヒートマップで表示することで、各サービスの稼働状況を容易に確認できるようにした。

Rally をデプロイするにあたり、Rally 本体にいくつかの改良を加えた。Rally は、ベンチマークを実行する際 OpenStack の管理者用アカウントを使用する。しかしながら、CV セクションで Rally を利用する場合、セキュリティの面から管理者アカウントの使用は避けたい。そこで Rally を改良し一般利用者アカウントを使用してベンチマークを行えるようにした。さらに、ベンチマーク後のリソースクリーンナップ手法を改善し、Rally がベンチマーク用に生成したリソースのみを削除するようにした。これにより意図しないリソースの削除を防ぐことができる。また、クラウドサービス稼働確認のために不足していたベンチマークシナリオをいくつか追加した。これらの Rally への改良は開発元へも提案し、一部は自身の改良したソースコードが開発元に統合された。今後も Rally 開発元への貢献は継続していく。

## 6. まとめ

一年間、CERN の IT 部署 OIS グループ CV セクションにて Trainee として技術の研鑽を積んできた。プライベートクラウドサービスを提供しているこのセクションにおいて、主にモニタリング関連ツールの改善開発を行い、サービスの改善に貢献した。最先端の大規模クラウドサービスを運用・開発している CERN での研修経験を、KEK でのクラウドサービス提供に活かしていく。また、本研修で培った CERN の技術者・研究者とのつながりを今後とも大事にしていきたい。

最後に、本研修について支援していただいた CERN の Ian Bird 氏、Tim Bell 氏、Jan Van Eldik 氏、IT-OIS-CV セクションの方々、山本明氏、吉田健一氏、CERN 駐在の KEK ATLAS グループの方々、KEK 国際企画課の方々、計算科学センターの方々に感謝する。

## 参考文献

- [1] S.Panitkin et al, ATLAS Cloud R&D, Journal of Physics: Conference Series 513 (2014) 060237, 2014
- [2] OpenStack, <https://www.openstack.org/>
- [3] Apache Flume, <https://flume.apache.org/>
- [4] ElasticSearch, <https://www.elastic.co/products/elasticsearch>
- [5] Kibana, <https://www.elastic.co/products/kibana>

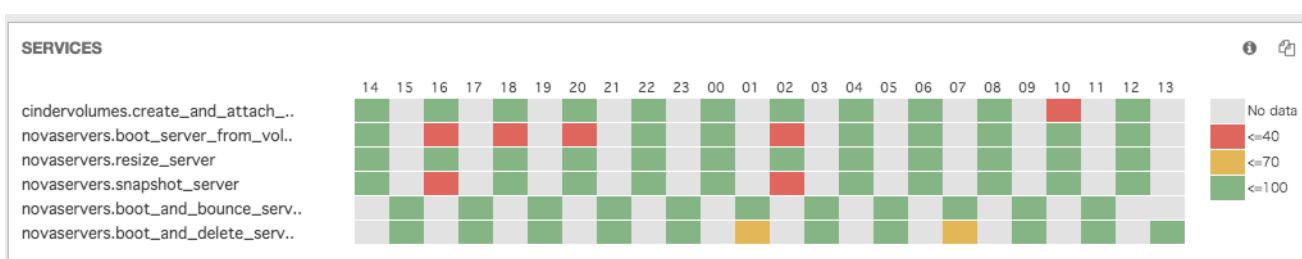


図 7：Kibana によるクラウドサービス稼働状況の可視化：サービスが正常稼働していれば緑に、異常がある場合は黄もしくは赤で表示される



## 編集後記

技術交流会では、「最近のトピックス」と題して発表者を素核研・物構研・加速器の各所属先から前述の3名の方々に発表を依頼しました。発表後の報告集出版日程を考慮して9月に開催し、参加者数は44名でした。この数字は全技術職員の4割に満たないですが、業務を抜けられない技術職員もいると思われますので、参加する機会を増やす等の工夫も必要かと思います。今後も、各技術職員の他部署の業務について知る良い機会を利用して積極的な参加を期待しています。

先の業務報告の前に、平成27年度採用の新人4名による自己紹介を行い、引続いて平成26年度採用の新人2名による業務紹介を企画しました。昨年度採用から発表までの短い期間の中で、各所属部署の先輩技術職員等から指導を受けつつ、協力して業務を遂行している様子がうかがえました。

CERN派遣研修の帰朝報告では、2名の技術職員の派遣期間が異なり帰国時期が6月末と7月末に合わせて、技術セミナーを7月と8月の2回に分けて開催しました。第1回目の参加者数は30名となり、第2回目の参加者数は33名でした。少しでも参加する機会を増やす事が、CERN派遣研修への応募に繋げていければと考えています。参加者の中には機会があればCERN派遣研修に行く事を希望している技術職員が存在していると思います。

技術部門連絡会議ではCERN派遣研修への技術職員からの積極的な参加を期待しています。しかし、応募者が無い年度も見受けられます。上記の対策の1つとして、何らかの理由で応募までに至らなかったケース等を把握する機会を設ける事を当委員会でも検討しています。

結びとして、お忙しい中、発表および報告集原稿の執筆を快く引き受けて頂いた7名の発表者の方々、技術交流会および技術セミナーへの参加して頂いた各研究所、各研究施設並びに管理局の方々に感謝を申し上げます。

平成27年度技術交流会・技術セミナー実行委員会  
東 憲男  
豊田 晃弘  
池戸 豊  
岡田 雅之  
近藤 良也  
大越 隆夫



リサイクル適性(A)  
この印刷物は、印刷用の紙へ  
リサイクルできます。