

## 談話室

## CERN 滞在記

谷本 育律\*

## My Stay at CERN

Yasunori TANIMOTO \*

## 1. はじめに

2010年11月から2011年8月までの10か月間、ジュネーブ郊外の欧州原子核研究機構（CERN）に長期滞在する機会を得た。総合研究大学院大学の若手教員海外派遣事業に申請し、採択していただいたお陰である。

滞在先の第一希望はCERNの真空グループであったので、グループリーダーのJosé Miguel Jimenez氏にメールで受入れをお願いしたところ、その翌日に快諾のメッセージと招待状をいただいた。Miguelは日本とのコラボレーションに対してとても好意的な考えを持っており、これまでの日本人研究者がCERN真空グループに与えてきた影響の大きさや、当時ちょうどJ-PARC RCS真空グループの神谷潤一郎さんが滞在されていて良い研究成果を上げていたことも、私の受入れを快諾してくれた理由になっていたと思う。

## 2. NEG コーティング

CERN 滞在の目的は、Non-Evaporable Getter (NEG) コーティングと呼ばれる真空技術について学ぶことであった。NEG コーティングとは、本来ガス放出源である真空ダクト内壁を真空ポンプに変える画期的な技術である。1990年代後期にCERNがLarge Hadron Collider (LHC) の真空システムに向けて開発を開始し、実際にLHCの直線部約6 kmのダクトにはこのNEGコーティングが施されている（写真1）。その後、ESRFやSOLEIL、MAX-labなどの多くの加速器施設でも採用され、また、基礎研究が幾つかの研究所や大学で進められている。細長くて排気ポートを設置することが困難なビームダクトに対して効果的な真空ポンプとなるが、日本の加速器で本格的に採用された例はない。今後の加速器真空システムの設計においてNEGコー

ティングは有力な候補となると考え、その開発元のCERN真空グループを在外研究先に選んだ。

真空ダクトへのNEGコーティングは通常、DCマグネトロンスパッタリングによって行われる。コーティングするNEG材（Ti-Zr-V）の厚さは1  $\mu\text{m}$ 程度である（写真2, 3）。NEGコーティングが施された真空ダクトは、ダクト内面をたたく残留ガス分子を化学吸着（ゲッター）作用により排気する。このため、希ガスやメタンなどの不活性ガスは排気されない。活性な表面が飽和してくると排気作用が低下するが、180～200℃程度まで昇温する、すなわちダクトをベーキングすることによって再活性化される。従来型のNEGポンプは450℃程度の活性化温度が必要であったが、NEG材の組成を最適化することにより、アルミ合金や無酸素銅などの高温に弱いダクトに対してもコーティングを可能にした。LHCの直線部ダクトは、軟化温度

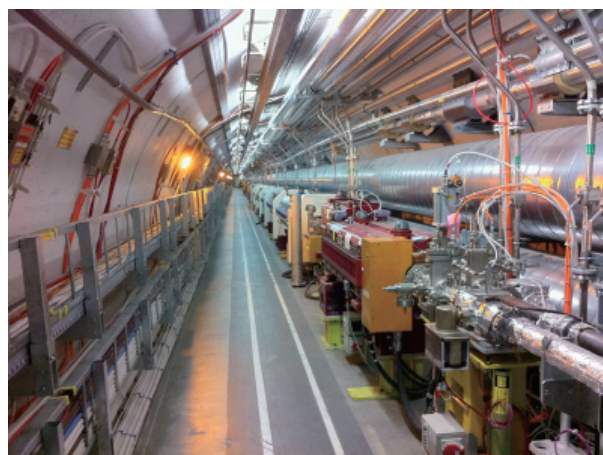


写真1 LHCトンネル内の写真。右手前2本の銅製ビームダクト内面にNEGコーティングが施されている。

\* 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 加速器第七研究系（E-mail: yasunori.tanimoto@kek.jp）



写真2 Ti-Zr-Vのツイストカソード。各ワイヤは直径3mmだが、ビームダクトによっては直径1mmのものも使う。



写真3 NEGコーティングされた銅製ビームダクト。

を高めるため低量のAgを添加した無酸素銅である。

NEGコーティングは排気性能以外の利点も有する。例えば、活性化後の表面の2次電子放出係数(Secondary Electron Yield; SEY)は1.1程度まで下がることが知られており、陽子や陽電子の正電荷ビームを蓄積する加速器でしばしば問題となる電子雲の形成を抑制することができる。

NEGコーティング技術は開発元のCERNがパテントを所有しており、ESRFやGSIなどの研究所のほか、サエスゲッターズ社もライセンスを取得している。研究目的であれば、安価なアカデミックライセンスもあるとのことである。余談であるが、1990年代頃までCERNは開発した技術に対してパテントを取得していなかったそうである。過去にもCERNが高性能な真空ポンプを開発し、あるメーカーからそれを製品として販売したいとの申し出があったが、当時はライセンス料を受け取るシステムがなかった。NEGコーティングはCERNの技術移転システムが役立った良い例とのことである。

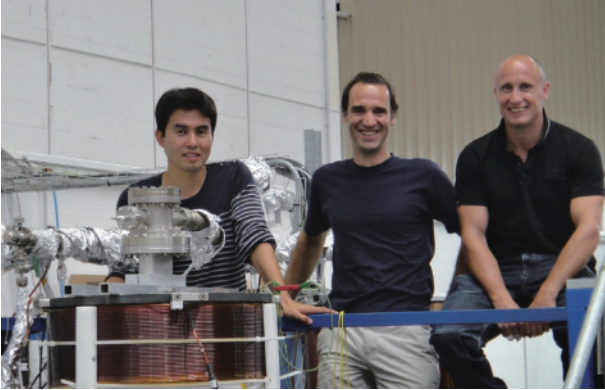
NEGコーティングはすでに実用化された技術であるが、更なる性能向上も求められている。具体的には、わざと粗くした表面にコーティングすることによってさらに低いSEYと高い排気速度を兼ね備える表面の開発や、ゲッター材の組成をより最適化するなどして150℃でも活性化可能な表面の開発を行いたいとのことであった。

### 3. CERNの研究環境

私の配属された真空グループは、CERNの組織としては「Technology (TE) Department」に属し、正式には「Vacuum, Surfaces and Coatings (VSC) Group」という名称で、CERNの様々な加速器の真空システムや表面科学に関する研究開発などを行っている。VSCグループはさらに5つのセクションに分かれ、コーティングに関する研究や業務は、そのうちの1つの「Surfaces, Chemistry and Coatings (SCC) Section」が担当している。各セクションのスタッフ数は10～15人程度であるが、フェローや学生、私のようなアソシエイトまで含めると、VSCグループ全体で100人程度に及ぶ。

このような大所帯を、リーダーのMiguelとサブリーダーのPaolo Chiggiato氏が強いリーダーシップでうまくまとめ、グループとして多くの成果を上げている。Miguelは節目節目でメンバの貢献を賞賛し、労をねぎらい、エンカレッジをしていた。Paoloは隔週で開かれる真空セミナーの取りまとめを行い、スタッフの研究進捗状況の報告やビジター研究者の研究紹介、真空メーカーからの製品紹介などがなされていた。セミナーには常に40～50人が出席して、活発な議論が交わされていた。グループがうまくまとまっているのは、このような頻繁なディスカッションや成果発表で、情報交換を密にしながら研究方針を決めていることも大きいように感じた。

滞在期間中、コーティングに関して全くの素人の私に基礎から教えてくれたのは、ポルトガル人研究者Pedro Costa Pinto氏であった。Pedroはコーティングに関して豊富な経験と幅広い知識を有し、それらを惜しみなく伝授してくれた。1つ質問すれば関連する5つを答えてくれるような感じであった。話が脱線して長くなることも多く、Pedroの奥さんからの「帰ってこいコール」で終わることもしばしばあった。Pedroのチームには、イギリス人フェローのPaul Victor Edwards氏、イタリア人技術者のLuigi Leggiero氏がいて、互いを敬いながらチームが一丸となって研究を進めているという雰囲気があった(写真4, 5)。



**写真4** コーティング装置の前で。左から筆者、Pedro, Paul.



**写真5** 作業中の Luigi. 見た目はちょいわるおやじ風だが、とても謙虚で優しい。

実のところ、最近の Pedro の研究テーマは、NEG コーティングではなくカーボンコーティングであった。将来 LHC のビーム強度を増強する際に、その入射器である Super Proton Synchrotron (SPS) での電子雲形成がネックとなるが、SPS は現場ベークンができないため NEG コーティングは採用できない。そこで、低 SEY の点で有望なカーボンコーティングに着目し、SPS の長尺偏向部ダクトに現場でコーティングを施すための技術を確認しようとしていた(写真6)。コーティング自体はもちろん地上の専用装置で行ってから現場に設置する方が楽であるが、偏向電磁石を割るには磁極の溶接作業が必要であり(しかも放射化している)、コストも周長約 7 km のリング全体で約 13 億円かかるそうである。一方、コーティングを現場でできれば、3 億円程度で済む。現場コーティング技術の確立自体、非常に困難な課題であるが、0.8 という非常に低い SEY (要求は 1.3 程度)を実現するための基礎研究も精力的に行っていた。特にコーティング時のプラズマガス中の不純物である水素や一酸化炭素の分圧が SEY



**写真6** SPS トンネル内の写真。赤い偏向電磁石内ビームダクトへのカーボンコーティングを目指す。

と強く関係していることを発見し、私はそれらを精度良く測定するシステムの構築を任されたりもした。

NEG やカーボンのコーティングを行う実験室は、1970 年代初頭に建設された世界初のハドロンコライダー Intersecting Storage Ring (ISR) で使用されていた実験建屋である。そこで実際に、LHC 直線部 6 km 分 1100 ユニットのビームダクトに対して NEG コーティングを施したとのことである。ISR のトンネルがコーティング済み予備ダクトの保管庫としても使用されていた。

実験室には 3 台のコーティング装置があり、それらをフル稼働させてコーティングを行っていた。順調にいけば 1 セット 4 日程度で進む。週末もベークンに充てるなどして、時間を有効に利用する。作業はほぼルーチン化されていて、ダクトのセットアップ、コーティング装置にセットして真空引きとベークン、その後、半日程度でコーティングを行い、装置から取り出して解体と保管、という流れで行う。ネックとなるのはダクトをコーティング装置のソレノイドコイルに出し入れする工程で(写真7)、この作業はプロのクレーン技士にお願いしなければならない。数人の技士が来て、玉掛けからすべて行ってくれるのだが、前日までに web で予約する必要があるし、ダクトの準備中に不具合が見つかったとさらに 1 日延期となることもある。

ダクトの準備前や解体後に真空部品の洗浄が必要になれば、「Chemistry」と呼ばれる部門に脱脂や化学洗浄を依頼する。その作業はたいいてい数日以内に完了する。また、コーティング表面の組成や膜厚、SEY 測定などの表面分析では、それぞれ専門の測定部門にサンプルを渡せば、こちらも数日中に結果を送ってくれる。こういう細かい専門部署が充実しているところが、大



写真7 クレーンで移動中のコーティング用ダクト。

規模研究所 CERN の良いところである。また、実験中に残留ガス分析計のセンサや真空ポンプのコントローラが故障したときも、それぞれ VSC グループ内のエキスパートが来てすぐに直してくれたりもした。

SCC セクションの仕事は、コーティングに関する基礎研究以外にも、依頼されて NEG コーティングを行う業務があった。LHC の改造で使用する真空ダクトや、CERN 内の実験グループが使う真空ダクトが何度か持ち込まれてきた。現場作業は忙しかったが、おかげで NEG コーティング手法の習得には役立ったと思う。

NEG コーティングの真空特性評価方法について学ぶことも、CERN 滞在の目的の一つであった。排気速度は、ポンプが長細いダクト内面に分布しているため、従来の手法ではうまく測定できない。圧力の実測データとモンテカルロでの分子の挙動計算から吸着確率を求めるという方法で行う。

昼間の就業時間のほとんどは、現場作業のため実験建屋で過ごしていた。夏は冷房がないので搬入用シャッタを全開にして暑さをしのいでいたが、日本のような蒸し暑さを感じるほどではなかった。シャッタを開けると天井を鳥が飛び交うこともあったし、建屋の周辺にはなぜか羊が放牧されていて、カウベルの音に癒されたりもした。あるとき消防車のサイレンが近くで鳴っていたので見に行くと、CERN の消防隊員が羊飼いをしていたこともあった (写真8)。

#### 4. LHC について

おそらく皆さんにとってはより関心の高い LHC の状況についても、少し触れておこうと思う。私が CERN に着任した 2010 年 11 月は、大量ヘリウム漏洩事故後



写真8 CERN で飼われている羊たち。

の運転再開からちょうど 1 年が経過したときであった。2010 年は初めて順調に 1 年間運転が継続できた年となり、加速器の性能が急速に向上していた時期であった。陽子ビームのエネルギーは 3.5 TeV, その時点で達成されていたピークルミノシティは  $2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  で設計値の 50 分の 1 程度であった。

ビームの強度は電子雲の影響で制限されていて、バンチ数を増やすためにバンチ間隔を詰めていくと、電子刺激脱離によるビームダクト内の圧力上昇が観測されていた。特に超伝導アーク部と常伝導直線部のトランジション部分で多く発生し、その部分のビームダクトにソレノイドを巻いて抑制していた。

LHC では 1 年の運転のうち最後の 1 か月間は重イオン ( $\text{Pb}^{82+}$ ) ビームの衝突実験を行っている。ちょうど着任して間もない頃、287 ( $=3.5 \times 82$ ) TeV の最高エネルギーでの衝突実験に初めて成功し、ジェットクエンチングという現象も観測された、というニュースがテレビでも一般向けに報道されていた。

年が明けて、1 月の重要な会議で、2011 年と 2012 年も 3.5 TeV/beam のまま運転を継続し、その後約 2 年かけて 7 TeV/beam を可能にするための改造を行うことが決定された。2011 年の運転では、真空ダクトのコンディショニングが順調に進んだことなどでバンチ数を急速に増やすことができ、最終的なピークルミノシティは  $3.7 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  にまで達した。積分ルミノシティも、ATLAS や CMS などの測定器が当面の目標としていた  $1 \text{ fb}^{-1}$  を優に超える  $5 \text{ fb}^{-1}$  以上が達成された。その結果、「確実とは言えないものの Higgs 粒子の徴候を示すイベントが幾つか得られた」というニュースが 12 月に流れたのも記憶に新しい。

順調に性能を上げてきている LHC であるが、ときどき運転中に突然のビームロスやビームダンプが発生

して問題となっている。原因はビームダクト内の微小粒子（ダスト）が陽子ビームに近づいて散乱を引き起こすためと考えられており、特に MKI と呼ばれる入射キッカー電磁石付近でしばしばビームロスが観測されるとのことであった。電子や反陽子のような負電荷のビームを蓄積するリングでダストトラッピングと呼ばれる現象が起こることはよく知られているが、正電荷のビームでダストが問題になることは珍しい。CERN にはダストトラッピングの専門家でもある Frank Zimmermann 氏がおり、定期的に対策会議を招集し、この問題に真剣に取り組んでいた。たまたま私もダストトラッピングの研究を行っていたことがあり、KEK で行った対策や実験の報告をさせていただいた。彼らはこの現象を UFO (Unidentified Falling Object) イベントと名付けていた。また、1980 年代初頭、まだダストトラッピングが知られていなかった頃、やはり CERN の Antiproton Accumulator (AA) でダストによる突然のビームエミッタンス増加が観測されていたことがあり、その奇妙な現象を AA ゴーストと呼んでいたこともあった。すぐにそういう愛称を付けて呼ぶあたりが彼らしい。

ところで、地下約 100 m のトンネル内に建設されている LHC で現場作業をするための入域資格を得るのはあまり容易ではない。web で受けられる基本的な一般安全講習に加え、放射線、電気、磁気の特別安全講習、biocell (酸素マスク) の訓練講習に参加する。個人線量計を取得し、映画「天使と悪魔」にもあるように個人認証システムに虹彩の登録をする。そして、入域したい場所を web で申請し、上司の承認を得て、初めて入域が可能になる。SPS は LHC よりも残留放射線量が高いようで、ドーズ表示の付いたアクティブ線量計も必要となる。これだけ苦労したにも拘わらず、結局入域できたのは LHC と SPS それぞれ 1 回だけであった。ATLAS 測定器には日本から VIP が来られたときに付いていって見学させていただいた。

ATLAS をはじめ、CERN での実験に参加している日本人研究者はおそらく常時何十人というが、当時加速器側の人間で長期滞在していたのは私だけであった。そのため、知識が乏しいにも拘わらず、見学案内で加速器の説明を任されることが何度あった。CERN にはトンネル内に入域できなくても、実際に LHC で使われているコンポーネントを展示している建物 (SM18) があり、そこで LHC の誇る超伝導電磁石や超伝導加速空洞に触れることができる。電子雲の抑制を予め考慮して、超伝導偏向電磁石用ビームダクトの内壁に施した細かい溝構造にも、実際に触れて理解していただ

いた。また、加速器の集中制御室 (CERN Control Center; CCC) への案内も任せられ、そこでは決まって、「圧迫感のないレイアウトや間接照明を採用し、壁一面のガラス窓からジュラ山を望めるようにして、長時間のシフトでもストレスが溜まらないように配慮されている」という説明をした。

## 5. フランス / スイスでの生活

CERN はスイスとフランスとの国境をまたいで設置されているので、長期滞在する場合、まずどちらの国に住むかを決める必要がある。私の場合は、諸先輩のアドバイスに基づいて、物価の安さからフランスを選択した。アパートは、Saint Genis Pouilly という小さな町の、CERN のフランス側ゲートまで歩いて 5 分というとても便利な場所に借りることができた。J-PARC の神谷さんとほとんど入れ替わりになるので、大家さんをお願いして同じ部屋を取っておいいただいた。本来 1 年以上の契約が必要であるが、特別に 10 か月の契約でも OK してくれた。この大家さんはとても優しい方で、電化製品の使い方を教えてくれたり（取説がフランス語なので）、アパートの修繕をこまめにしてくれたりした。出て行くときには、日本から後任が来るのであれば優先的に貸してもいいと言ってくれたりもした。

通勤途中には牧場があって、のどかに草を食む牛たちにいつも癒された (写真 9)。町の西側にはジュラ山が迫り、東側にはジュネーブの屋根のサレーブ山や、遠くにアルプスとモンブランを望むことができた。特に、冬の朝にアルプスから登る日の出や、夕方赤く染まるモンブランがお気に入りの風景であった (写真 10)。

フランスに着いてすぐに 11 月としては異例の大雪が積もり、先が思いやられたが、年が明けてからは比較的暖冬で過ごしやすかった。着任して間もない頃、ATLAS の近藤敬比古先生と食事をする機会があり、ジュネーブ日本人倶楽部 (JCG) の企画するスキーツ



写真 9 通勤途中に出会う牛たち。



写真 10 アパートから見るモンブラン. 手前は CERN.



写真 11 著名な登山家加藤滝男さんと. 後ろの雪山は左からアイガー, メンヒ, ユングフラウ.

アーに参加するので一緒にどうかと誘っていただいた。当時はまだ車を持っていなかったで、スキーショップやツアーの集合場所までの送迎でもお世話になった。アパートが通勤に便利な場所なので、当初は車なしの生活を考えていたが、CERN マーケットという web 掲示板での個人売買で簡単に入手できることが分かり、そこで 9 年落ちのブジョーを買った。おかげで行動範囲が広がったし、8 月の帰国前には同じく CERN マーケットですぐに買い手も見つかった。

3 月末に夏時間へ移行した辺りからすっかり春らしくなり、ジュラ山へハイキングに行ったり、近郊の町へドライブに出かけたりした。近くの Ferney Voltaire という町では土曜の朝にマルシェが開かれ、地元の新鮮な食材やチーズを買ったりした。ジュネーブ近郊にも魅力的な町が多く、古城やチーズで有名なグリュイエール、レマン湖畔のローザンヌや世界遺産にもなっているワイン畑、フランスの古い町並みが美しいイボアールなどに日帰りで出かけた。

夏には、また近藤先生より、JCG には山の会というものあってサレーブ山のハイキングを企画しているので一緒に行こうと誘っていただいた。その JCG 山の会でガイドを務めている方が有名な登山家の加藤滝男さ



写真 12 アルプスのハイキングで出会ったブクタン.

んという方で、何度かスイスアルプスの山々を案内していただいた (写真 11)。おかげでアルプスの自然に魅せられ、週末は妻や友人とともにハイキングに出かけた。スイスは高山鉄道が充実しているので、3000 m 級の山々でのハイキングを気軽に楽しむことができる。抜けるような青い空と雪で覆われた山々のコントラストが美しく、エーデルワイスなどの野生植物を見つけたり、マーモットやブクタンという野生動物に出会えたりする楽しみもあった (写真 12)。

## 6. おわりに

改めて振り返ってみると、公私にわたって多くの貴重な経験をさせてもらったとつくづく感じた。10 か月は本当にあっという間であったが、CERN という恵まれた研究環境で日頃の加速器運転業務から離れて新しい研究に集中できる環境に身を置けたことが何よりも贅沢であったように思う。その分、加速器第七系のスタッフには不在中の仕事を引き受けていただき、特に今回は震災で被害を受けた加速器の復旧という大変な仕事もあり、この場を借りて改めてお礼申し上げます。震災に関しては、CERN の多くの方々からお見舞いや励ましの言葉をいただいた。すれ違う度に「Any news from Japan?」と心配してくれるので、常に友人やネットから最新の情報を得るようにしていた。Rolf Heuer 所長からは CERN の職員全員に向けて、日本の大惨事を深く心配していること、義援金の募集をしていることについてのメールも配信された。

CERN 滞在では多くの方々にお世話になり、通常の出張では決して得られないような人との繋がりも得ることができた。今後の研究生活において、学んで得た知識や見聞はもちろん、人との交流も大切にしていきたい。