連載講座

ミュオン科学

世界のミュオン施設

渡邊功雄[†]

理化学研究所・仁科加速器研究センター・岩崎先端中間子研究室
351-0198 埼玉県和光市広沢2-1

[†]nabedon@riken.jp

ミュオンビームを用いた研究が可能な箇所は世界で4か所である。英国のラザフォード=アップルトン研究所 (Rutherford-Appleton Laboratory: RAL), スイスのポール=シェラー研究所 (Paul Scherrer Institut: PSI), カナダの TRIUMF 研究所, そして日本の J-PARC ミュオン施設である。本稿では各施設を概観し, その特徴や有効な活用法に関しての情報を提供することを期する。

Key Words: myuon facilities, RAL, ISIS, RIKEN-RAL, PSI, TRIUMF, J-PARC

1. 世界のミュオン施設

素粒子ミュオンは, 物質科学研究や原子核研究, そして基礎的物理学研究など幅広い分野での活用が可能である。その中で, もっとも多く活用されているのが物質科学研究である。このミュオンを用いた物質科学研究手法のことを μ SR法という。この呼称は, ミュオンが物質中でどのように観測するかという違いによって, ミュオンスピン共鳴法とかミュオンスピン回転法と呼ぶこともある。これら全てを加味し, 概して μ SR法と呼ぶ¹⁻³⁾。3年に1回, この μ SRの国際会議が開催される。参加すればわかるのが, 老若男女合わせても200名程度に達するか達しないかの規模である。他の多くの研究分野に比べれば決して大きいとは言えない研究領域である。毎年のように新しい研究者や学生が育っているのも事実であるが, 理由はその実施場所にあるというのが筆者の思いである。世界をみても, ミュオンを活用した研究が可能なのは4か所しかない。図1に示すように, 英国のラザフォード=アップルトン研究所 (Rutherford-Appleton Laboratory: RAL), スイスのポール=シェラー研究所 (Paul Scherrer Institut:

PSI), カナダの TRIUMF 研究所, そして日本の J-PARC ミュオン施設である。これらの各ミュオン施設においては, 施設として, また測定装置としてそれぞれの特徴があり, 使い勝手も得意な研究領域も異なる。まず最も大きく異なる点はミュオンビームの時間構造である。これは各施設の加速器に依存する。RALとJ-PARCはシンクロトロンを使い, PSIとTRIUMFはサイクロトロンを使う。各ミュオン施設にはそれぞれの利点・欠点があり万能ではない。施設の特徴を把握せずして利用を期すると有効なデータを取得できないのみならず, わざわざ海外まで行く労力自体が無駄になることもある。ビーム形状のみならず, 各施設における測定条件等にも差があり, これらの差を理解したうえで自らの研究にもっとも有効な施設を選ぶことが重要である。本稿は, これらの判断に対して少しでも有用な情報を提供できることを期待する。以下, 各施設の特徴を概観するが, 文中で用いる施設の写真は, 断りのない限り各ミュオン施設のホームページからダウンロードさせていただいたものである^{4,5)}。

図1 世界のミュオン施設 (Color online)

図2 パルス状ミュオン (RAL, J-PARC) と直流状ミュオン (PSI, TRIUMF) の時間構造の差 (Color online)

2. パルス状ミュオン

図2上部にビーム構造のイメージを示す。シンクロトロンは同一一周回上で粒子加速を行い、一回の加速から一つの塊（パルス）としてのミュオンビームを得る。1パルスに含まれるミュオンの個数と、このパルス状ミュオンを1秒間に何回試料に照射するかで測定に利用できるビーム強度が決まる。例えば、RALの場合、幅約70ナノ秒の時間構造を持ったパルス中に数千個程度のミュオンを含み、そのパルスを50Hzで供給する。J-PARCは約100ナノ秒のパルスを40Hzで供給する。一つのパルスに数多くのミュオンが同時に含まれ、パルス内の各ミュオンの個々の識別が不可能になる。また、このパルス幅が測定上の時間制限を与え、パルス幅以下の時間領域で起きるような速い現象を

捉えることが不可能になるという欠点がある。例えば、RALにおけるミュオンビームのパルス幅が70ナノ秒なので、これ以下の時間での現象は測定ができない。しかしながら、パルスとパルスの間には何のビームも存在しないため、パルス飛来後、ミュオンがその 2.2μ 秒の寿命を使いつくすまで測定を継続できるという利点を持つ。このため、パルス状ミュオンは、比較的長い時間領域での現象を観測するのが得意であり、ミュオンの寿命の10倍に達する時間領域までの測定が可能になる。例えば、有機磁性体など小さい磁気モーメントを持つ物質や磁気相関の弱い物質などの測定にこれらの施設的特点が有効になる⁵⁾。

シンクロトロン加速器は同一一周回上に多数の加速粒子を閉じこめて加速するため、加速粒子間のクーロン反発力でビームの直径が大きくなる。このビーム径はそのままミュオンビーム径へと反映される。RALであればビームの直径は約40mmに達する。このような大きなビームを効果的に活用するために、パルス状ミュオンの利用時には表面積の広い試料など、比較的多めの試料準備が求められる。簡単に大量合成できる系であれば問題ないが、有機磁性体など極めて微量な結晶試料しか得られない系の測定は苦手である。筆者の経験からいえば、大体500円玉くらいの面積、または500mg以上の分量を準備できる試料であれば通常大きな困難もなく測定を実施できる。しかし、試料付近の設置条件を変え、試料に当たらないミュオンを試料後方へと逃がしてしまうようなセットアップ（フライパス装置の設置）にすることにより、小指の爪程度かそれ以下の試料サイズでの測定も、他の測定条件等に制限が出ることはあるが、実施可能な場合もある。筆者は、最低レコードで17mgの試料を用いての測定を実施したことはあるが、現実的には100mg程度の試料分量が下限とっていたほうがよい。

シンクロトロン加速器は、原理上パルス中に含まれるミュオン個数が青天井で増強できる

という利点を持つ。測定データの質や点数はミュオンビーム強度に強く依存するため、これらパルス施設においては大強度ミュオンを活用しつつ数多くのデータ点を高精度で測定することが可能になる。原子核実験などで高いデータ統計が必要な場合などパルス状ミュオンの方がより適切である場合が多い。当然ながら、ミュオンビーム強度は加速器のビーム強度（つまりは仕様と性能）で決まるために、必ずしも青天井を簡単に実現するというわけではない。現時点ではRALが加速器としては最大強度のミュオンビームを供給しているが、将来的にJ-PARCが整備されてくると、J-PARC ミュオン施設で世界最強のパルス状ミュオンビームが供給される予定である。

3. 直流状ミュオン

一方、サイクロトロンを用いているPSIやTRIUMFでは、イオン源から出てくる加速粒子を個別に順次渦巻き状に加速していく。このため、ミュオン粒子はある程度の時間間隔をもって個別に供給される。これを直流状ミュオンと呼ぶ。直流状とはいっても完全に連続的というわけではなく、各ミュオン粒子が一個一個ばらばらに4~8 μ 秒の間隔をもって測定試料へと飛来する（図2の下図）。ミュオンが個別に飛来するので、各個を識別することが可能になり、次のミュオンが飛来するまでの間、検出器系の時間分解能を極力引き上げて速い現象を測定することが可能になる。例えばPSIにおいて通常用いる検出器の時間分解能の設定は625ピコ秒になっており、これはRALの32倍の時間分解能である。また、要求によってはこれよりも高い時間分解能の設定が可能である。このため、直流状ミュオンビームは、大きい磁気モーメントを持つ物質や強い磁気相関を持つ物質等の研究に適している。その他、強い外部印可磁場中で極めて速いミュオンスピン回転を起こし、そのミュオン回転周波数や減衰率から、周囲とミュオンとの超微細相互作用を測定することなどは

直流状ミュオンビームが得意とするところである⁵⁾。

サイクロトロン加速器は加速粒子を個別に順次加速していくために、パルス状加速器に比べてビーム系が小さくなるという特徴を持つ。また、試料に当たらなかったミュオンから来る信号を個別に除去（VETO機能）することも可能になる。これらの特徴は試料の小型化を可能にする。先日のPSIにおける筆者の経験では、面積が4mm²程度しかない小型微結晶でも十分測定することが可能であった。これは直流状ミュオン施設の大きな利点であり、試料の合成量に関して技術的制約が強い場合には極めて有効である。

しかし、試料に停止したミュオンが長生きして信号を出す前に次のミュオンが飛来してしまうと、観測した信号がその前のミュオンから来た信号であるのか、それとも今飛来したミュオンの信号なのかの判別がつかなくなるため、全体の時間測定領域がミュオンの飛来間隔で制限されるという欠点もある。PSIなどでは大体6 μ 秒くらいまでの時間領域が有効な測定範囲といえる。検出器総数は一定であるので、時間分解能をより上げる測定は、当然ながら全体の測定時間領域が短くなる。また、サイクロトロン加速器でビーム強度を上げるということは加速粒子の時間間隔を狭めることに相当する。このため、全体のミュオン強度を上げづらい、つまりは測定時間が比較的長時間になることがあり、限られたマシンタイム内でどれだけの測定を展開するかというプランニングも重要になってくる。

4. Rutherford-Appleton Laboratory (英国)

RALはロンドンから北西に約100km、オックスフォードの南約10kmの郊外に位置する。ヨーロッパのハブの空港の一つ、ヒースロー空港からバスと電車を乗り継いで早くても2時間はかかる。以前はユーザーのための空港へ往復タクシーサービスがあったが、このご時世、

RAL近隣の駅から移動する英国人ユーザーだけのサービスとなってしまった。いかんせんタクシーで空港から移動すると片道約80ポンド（約10,400円）程度かかるので、年間の施設側負担もばかにならなかったことと思う。RALは、隣接する原子核・原子炉関係の研究施設であるHarwell研究所と、放射光研究所であるDIAMOND研究所とともにHarwell Research Complexを形成し、南イギリスの研究拠点としての地位を築きつつある。このため、近隣駅からのバスの便はかなりよくなっており、贅沢さえ言わなければ十分快適な滞在が行える。

RALにおいてはパルス状ミュオンが活用できる。この施設には筆者が所属する理化学研究所が1994年から管理・運用している理研RALミュオン施設もある。近年、理研とRALとの綿密な協力体制が作られつつあり、両ビームラインへのアクセスがより簡便なもの整備されつつある。海外渡航費のことを考えなければ使う側にとっての選択肢が極めて広がったといえる。RALにおける加速器施設とミュオン施設の全体像を図3に示す。同じ加速器を用い、ミュオンターゲットを挟んで片方にRAL側が管理するISISミュオン施設、もう片方に理研RALミュオン施設が設置されている。

まずは、ISISミュオンビームラインを紹介する。このビームラインでは、パルス状表面ミュオン（運動量27MeV/c）という μ SRにもっとも

多く活用されているビームが供給される。数年前にビームラインのアップグレード改修を行い、現時点では、ミュオン信号の計測強度においては世界一である。実験エリアはMuSR、EMU、HiFiの3つが稼働中である。図4にそれぞれの分光器の写真・イラストを示す。適切な試料温度を実現できる試料冷却装置（クライオスタット）を入れ替えることにより、最大効率での測定を可能にしている。クライオスタットは分光器上部からクレーンで設置する。これに合わせて作業用の足場（プラットフォーム）も合わせて設置されており、分光器の上からのアクセスが確保され作業もやりやすい。MuSRとEMUは基本的には同様なスペックをもった実験エリアである。共に温度領域は希釈冷凍機での最低到達温度（ ~ 50 mK）から室温までの測定が簡便に実施できる。一方でMuSRではオーブンを備え1,000°Cまでの測定を可能にする高温のセットアップや、磁石を90度回転させることによってビームラインに対して垂直方向に強い磁場も印可が可能であるというオプションがある。この磁場によってミュオンの軌道が曲がってしまうために、現状では最大印可磁場は600 Gと制限される。これらの実験条件に基づき、一般的な傾向ではあるが、MuSRは無機物等の強相関電子系における磁性状態や超伝導状態の研究に使われ、EMUは逆に有機系物質の電子状態の研究に使われるような傾向を持つ、という印象が筆者にはある。HiFiはRALのいわゆる『売り』ともいえる強磁場装置である。ミュオンの初期スピン偏極方向（ビームライン方向）に対して最大で5 Tの磁場を印可する。パルスミュオンとこの強磁場を兼ね備える施設は世界でもここ一か所であり、強磁場中におけるミュオンスピン緩和を測定する場合にはこの装置を用いることが必須である。更にHiFiには希釈冷凍機やレーザー照射装置、更には微小試料の測定をも可能にするフライパス装置の組み合わせが可能であり、より複雑かつ高度な測定が可能である。各装置に2名の職員（Instru-

図3 ラザフォード=アップルトン研究所（RAL）の加速器施設とミュオン施設（Color online）

図4 ISIS ミュオン施設で稼働する μ SR用分光器（左からMuSR, EMU, HiFi）（Color online）

mental Scientist) が配置されており、例え初めての活用としても、彼らにコンタクトをとって十分な相談を事前に行うことにより、だれでも安心して効率よく利用できるサポート体制になっている。

ミュオンターゲットに対してISISミュオン加速器の反対側に位置するのが理研RALミュオン施設である。直近の理研RALミュオン施設の全景を図5に示す。ISISミュオン施設と同じミュオンターゲットを用いているので、ビーム構造は一緒である。ARGUSとCHRONUSという2つの μ SR分光器が設置されており、日本人共同研究者を中心とした利用が行われている。これらの分光器はISISミュオン施設におけるEMUやMuSRと同様なスペックをもっているが、CHRONUSに関しては600本を超す検出器を備えており、大強度ミュオンや微小試料への対応が可能である。近年、インドネシアやマレーシアなどのアジア圏の共同研究者が増えてきており、アジアの研究者を中心とした国際的な利用が盛んになりつつある。理研RALミュオン施設がISISミュオン施設と大きく異なるところは、高運動量ミュオンを供給することができることである。高運動量ミュオンは物質中の貫通力が高い。最も多く物性研究に用いられている表面ミュオンは、物質表面から200マイクロメートル近傍で停止してしまうが、高

図5 直近の理研RALミュオン施設（Color online）

運動量ミュオンは、1cmの厚みを持つ銅板をも貫通する能力を持つ。例えば、厚い金属の壁を持つセル中にある試料までミュオンを届けることができるため、高圧 μ SR測定が可能になる。実際、等方的な圧力を印可できるヘリウムを用いたガス加圧 μ SR装置（最大圧力0.64 GPa）が設置されており、ISISミュオン施設にはない実験条件をカバーしている。更に、この高運動量ミュオンを用いてIC回路中へとミュオンを打ち込み、ICロジックの誤動作を見る効果の研究もなされている。地球上には空から大量に降り注ぐ高エネルギー宇宙線ミュオンが常に存在する。この宇宙線ミュオンがコンピューターの論理回路にどのような影響を及ぼすのかという地球上の全てのコンピューター機器に関与した研究としてとても重要視されだしている⁶⁾。ま

た、負の電荷を持つミュオン（物質科学研究には正の電荷を持つミュオンを多用する）の供給も可能である。この負のミュオンは μ SR物性研究には使いづらいものではあるが、一方では大変強力な武器ともなる。負ミュオンを物質中に打ち込むと、原子核に極めて近い軌道に捕らわれたのちによりエネルギーの低い軌道へと遷移しつつ最終的には原子核に吸収される。この軌道を遷移する際に軌道のエネルギー差にともなう固有X線を放出する（Muonic Xray）²⁾。どの原子核に捕らわれるかでこの固有X線のエネルギー値が変わる。各固有X線の強度を測定し比較することで物質中の各元素の存在比を解明するという非破壊分析に関する研究もおこなわれており、古代の物質など、英国に多く保有されている歴史的遺物の元素分析にも一役買う活用方法も注目されている⁷⁾。

理研RALミュオン施設はISISミュオン施設と並び主として μ SR物性研究に活用されているが、お互いの性能を補完することによってより新しいミュオン科学研究の開拓が行われつつある。理研RALへのアクセスも平成28年度中にISISのシステムに統合され、より簡便に実験提案が可能になるようなシステムを整えつつある。また、日本から遠い英国にあるという場所的なハンディをカバーするために、事前の打ち合わせに基づいて理研のスタッフが代わって測定を実施するメールオーダー測定も開始されており、理研職員と連携したより簡便なアクセスルートが整備されつつある。

5. PSI（スイス）

PSIは、チューリッヒから電車で30分くらいのBruggという小さな町の近くで、ドイツとの国境に近いVilligenという小さい村の端にある。夜にBruggからバスに乗りVilligenを抜けると、真っ暗闇の中にシンクロトロン放射光施設の灯りが浮かび上がる。ごたぶんに漏れずPSIも人里離れた場所である。その昔、ハプスブルク家の祖先となった貴族が、Bruggに最初の城

図6 アーレ川を挟むPSI-Ost(右)とPSI-West(左)。PSI-Westの中心付近にある大きい四角い建物が μ SR実施場所。下の丸い建物は放射光施設(Color online)

をたてるためにフランスから上ってきたというアーレ川を挟んで東と西にPSIの組織はある(図6)。東側は主に原子核関係、西側が物性関係である。アーレ川は流れがとても早い。深さも13mもあり、川がところどころ渦を巻いていることがわかる。落ちたらひとたまりもないことは明確だが、この橋を渡らないとPSIの東のセクションに隣接するレストランへは行けない。しかし、橋の手すり心が持ち低いことにはいつもやや不安を感じる。15年以上前にもなるが、歴史が好きでハプスブルク家にあこがれこの地を訪れた際、もうこんな辺鄙な場所へくることもなかろうと思って立ち去ったBrugg駅に、初めてPSIに行くためにまた降りた時はさすがに苦笑いを止めることができなかった。

PSIは直流状ミュオンビームを供給する。ミュオンビームのもととなるサイクロトロンは加速電流はかなり強力で、近年では2mAの電流強度を持つ。結果、ミュオンビームも強力になる。しかしながら、上述したように直流状ミュオンは使いやすいビーム強度に上限があるために、通常はビーム強度を落として測定を行っている。ビーム径が約10mmであるので、小さい試料を準備すれば十分である。筆者はよ

図7 PSIの6か所のミュオン実験エリア (Color on-line)

く酸化物試料を用いる。ペレット1つの直径が約7mmではあるが、このペレット一つで十分測定が成り立つ。もし数ミリ角の微結晶となっても、絞っていたミュオンビーム強度をあげて試料に止まるミュオン数を増やすことによって、通常試料と同じようなデータ強度を出すことができるのがPSIの強みである。先日の測定では直径7mmのペレットと2mm角の結晶を同じデータ精度で測定できた。

PSIにはRALより多い6つの実験エリアがある。図7を参照されたい。GPS, LTF, GPD, DOLLY, HAL9500そしてLMUである。全て同じシンクロトロン加速器からビームを得ているが、複数のミュオンターゲットを設置し、全てのエリアにビームが同時に供給される条件を整えている。つまり、6つの実験の同時進行が可能である。PSIの特徴は各実験エリアで活用できる実験条件を固定しているということである。RALなどは測定に応じてクライオスタットや試料条件を変えて対処するが、PSIでは求める測定条件によってエリアを選ぶ。GPSとDOLLYはほぼ同じ性能を持ち、表面ミュオンを利用する μ SR物性実験用エリアである。温度領域は大体1.5Kから室温まで。GPSでは室温以上の試料温度を得るオープンオプションが使える。入射ミュオンスピンの方向をビーム

ラインとは垂直方向に曲げることができるSpin Rotatorを備え、最大5 kGまでのミュオンスピン回転測定が実施できる。この装置は超伝導電子の波動関数の対称性や磁場侵入長の測定によく利用される。この2つの利用要求は高く、毎年12月と6月に募集される実験課題も競争の度合いがかなり厳しい。よくよく装置性能と試料条件、そして自分の測定したい現象を吟味して実験を企画する必要がある。DOLLYに供給されるビームは、時々素粒子実験に活用されることがある。このため、年によっては半年程度マシンタイムが μ SR用にアサインされないことがある。その年のPSI全体スケジュールを見て実験計画を練ることが推奨される。

LTFは希釈冷凍機を用いた超低温装置である。約20mKから2~3Kくらいまでをカバーできる。また、3.5Tの磁石も備えており、Spin Rotatorを活用すれば、この磁場までのミュオンスピン回転測定が可能になる。GPDは高運動量ミュオンを供給する。理研RALミュオン施設同様に、高圧 μ SR測定が可能である。10mmという細いビームの利点を生かし、小さい試料空間でより高圧条件を実現することができる。現在は最高圧で約1.5GPaまでは簡便に利用可能である。ただし、温度領域は2Kくらいから室温までになる。

HAL9500とLMUがPSIの最も特色ある実験エリアといえる。HAL9500は昨年稼働を開始したもっとも新しい施設で、その名の通り9.5Tの磁場を印加することができる。これは世界最強の高磁場ミュオン施設である。更に、希釈冷凍機を組み合わせるとLTFを上回る超低温下における強磁場実験環境を実現している。ただ、LTFと比べると到達最低温度がクライオスタットの構造上200mK程度とやや限られていることと、ビーム強度が他の実験エリアに比較して弱く、データの測定に時間がかかる。また、ビーム径が比較的大きいために多めに試料を準備する必要がある。試料サイズといっても、磁場を変化させることによるビームスポッ

トの形の変化をカバーする程度は必要であるが、パルスミュオンで求められるようなサイズにはならない。LMUも同様に世界唯一の実験実験装置である。ここでは超低速ミュオンビームが得られる。その名の通り、物質のごく表面近傍に停止してしまうような低運動量を持つミュオンビームが照射可能である。また、入射エネルギーを変化させることによって、物質表面から深さ方向の電子状態の探索が可能である。実際にはPSIミュオンスタッフとの注意深い事前検討とビームラインの調整が必要になるが、ざっとのところで表面から20~200nmの領域を大体10nm程度の分解能で深さ方向への探索が可能であると考えいい。表面ミュオンビームが物質表面から約200マイクロメートルのところの電子状態を探索することを考えると、極めて表面・界面の研究に有用であることがわかる。ただ、よく使われる表面ミュオンビームとはずいぶん使い勝手が異なってくる。表面ミュオンビームを強制的に一度減速させてから再加速する手法により、どうしてもビーム径が大きくなってしまいます。つまり、面積の大きい試料が必要になる。ビーム径はパルスミュオンと同じようなサイズになってくるので、試料サイズも同様に大きくなる。特に、大きい表面積をもつ薄膜試料などはいくつかの均質なバッチを組み合わせる測定を実施することが必要になる。また、その低速さゆえにあまり強い磁場が印可できない制限もある。強い磁場を印可すると、どの方向であれミュオンが磁場にトラップされ、最悪の場合試料まで届かない。全てに万能な測定装置はあるはずがないので、これもまた自らの研究に要求される測定内容を事前によく吟味していく必要がある。

PSIにおいても一装置に1名の研究者がついている。彼らとよくよく事前に打ち合わせを行うことによってスムーズな測定が可能になる。また、各実験エリアは基本的にはクライオスタットの交換を行わず、ほとんどの機器が固定された状況にあるため、実際の実験者が行う作

業は試料の交換を測定の実施だけ、というケースが多い。試料の交換もすでにマニュアル化されており、例えばPSIが初めての学生が参加したとしても1回か2回ほどの経験で大体の作業を行えるようになる。また、測定系もきわめてよく整備されており、自動測定も安定して稼働している。このため、極端なことをいえば、1人でPSIに行ったとしても十分な測定が可能である。測定のメニューさえ明確になれば、あとは自動測定に任せて自分は解析や他の作業ができるというところは、別の意味でのメリットともいえる。世界各地のミュオン施設を全て使い、自らも理研RALを管理運営している身ではあるが、筆者の個人的感想としては、実験の方針が明確であることが前提ではあるが、PSIがもっとも使いやすい施設になっているのではないかと感じている。ただ、PSIのポリシーということではあるのだが、外部からアクセスして測定の進み具合を確認できないとか、宿舎からデータのダウンロードができないなど、どうしても現場にいかなくては作業ができないという、ユーザーには優しくないのではないかという点がやや見受けられる。宿舎から実験現場まで1.5kmくらいある。徒歩で移動するにしても1日に数多く往復していると夜中にふくらはぎがつってしまうことが厳しいところである。

6. TRIUMF (カナダ)

筆者が主に活用しているミュオン施設は理研RAL, ISIS ミュオン施設そしてPSIである。TRIUMFも活用したことはあるが、すでにずいぶん昔の話になってしまった。この原稿を書くにあたってTRIUMFのホームページを眺めていると、当時使っていた分光器が廃棄されてしまったとか、特徴的なセットアップが最近とてもアップグレードされているとかのニュースをみて、時の流れを感じてしまった。最近の状況を知りたい読者は、TRIUMFに詳しいミュオン研究者の方々もしくはTRIUMFに直接問い合わせることをお勧めする。幸い、私のグループ

内や共同研究者によく TRIUMF を利用する方がいたので、昔の経験と彼らから得た情報をもとに本稿を書いていることをお許し願いたい。

TRIUMF は、カナダはバンクーバー市にあるカナダ・ブリティッシュコロンビア大学キャンパスの一角にある。バンクーバーは風光明媚な観光地であるとともに、滞在者にとってはとてもフレンドリーで食事もおいしいところである。TRIUMF は街の中心からやや離れているところは難点ではあるが、公共交通機関はよく整っているのですほどの不便は感じず、また、施設は静かな森をバックに建てられていた。周囲の自然の雰囲気は PSI に似たところがあると記憶している。周囲に何もなくてフラットな農地のみが広がる RAL とは対照的である。夜に測定を見にいったときに生まれて初めて生のアライグマなるものを見た。彼ら自身は結構荒くれらしいのであまりちょっかいを出さないほうが良いというが、自然を背景に研究ができるというのはまた新鮮な経験である。近年、周辺で大規模な都市開発が行われたらしく、森が少なくなるとともに Wesbrook Village という街が現れたらしい。次に私が参上したらきっと浦島太郎ではなかろうか。

図8に TRIUMF のミュオンビームラインの図を示す。この施設においても PSI 同様にミュオンターゲットを複数設置してうまくビームを振り分け、3つの実験エリアを稼働している。M9、M15と M20である。なぜ M の次の番号が飛び飛びになっているのかは未だに私にとっては不思議な点である。特に M9と M20は更に A と B の2つのラインに分割し、それぞれ交互にビームを用いることも可能であるが、M9B 高運動量ミュオンの発生装置の老朽化がひどく、現在は運用が停止されているとのことである。また、M20A は、整備がすすんではいるがまだコミッショニング段階で実際の実験には解放されていないとのこと。

各エリアの床面積はとても広く、作業に関して窮屈さは感じない。ただ、周囲を金網や

図8 TRIUMF ミュオンビームラインおよび実験エリアの概略図。ピンクで示されているのが加速器 (Color online)

コンクリートシールドで取り囲まれているので、研究を行うというよりも工場といった感がある。PSI もそうであるが、むき出しのコンクリートや実験装置、そしてビームライン磁石などが直に醸し出す雰囲気は誠に『ファクトリー』と呼ばれるにふさわしい。一方、RAL はその逆で、コンクリートシールドも塗装されてビームラインも見えず、多くの実験装置が作業用のプラットフォームの下に隠れているために、『ファクトリーというよりも大学的な雰囲気がある』と聞いたことがある。

他のミュオン施設同様に TRIUMF でも各実験エリアに特徴がある。M15と M20B のエリアは表面ミュオンビームを供給し μ SR 物性研究に活用できる。TRIUMF の施設運営のもっとも特徴ある点は、実験の内容と要求に沿って、クライオスタットのみならず分光器自体も入れ替えてしまうことである。例えば、M15は低バックグランド条件と Spin Rotator を利用した表面ミュオンを出し、多くのクライオスタットと分光器を設置できる条件を兼ね備えたもっとも利用要求の高いエリアである。さらに、要求自体によっては全ての分光器を撤去して μ SR 物性研究とは全くことなる装置を設置して原子核研究を行うこともできる、というとてもフレキシブルな運営体制を持つ。つまり、TRIUMF を活用したい場合には、まず自らの研究目的にあう

図9 NuTime概観 (Color online)

分光器を決めて前もって設置要求を出しておくことが求められる。 μ SR物性研究のために限ってもかなりの数の分光器があるので、利用を計画している方は是非TRIUMFのミュオンに関するホームページをご覧ください (<http://cmms.triumf.ca/>)。特に、どの分光器にどのようなクライオスタットを用いることができるかどうかという点は事前確認がとても重要である。希釈冷凍機など、分光器によっては受け付けられないクライオスタットもあるもようなので要注意である。

TRIUMFが誇る優れた分光器の一つがNu-Timeである (図9)。以前はHiTimeと言ったが、分光器磁石が近年アップグレードされて呼称が変わったもようである。何が特徴的かというと、その磁場強度である。現在は7Tの磁場印可が可能であり、この強磁場中でのミュオンスピン回転測定を要求する超伝導体などへの応用が多くなされてきている。PSIのHAL9500と合わせ幅広く強磁場活用の機会が増えており、ミュオンユーザーとしては素晴らしい研究環境が実現している。

7. J-PARC ミュオン施設 (日本)

J-PARC ミュオン施設も筆者はあまり活用した経験がなく日本人 μ SR研究者としては誠に申し訳ない限りである。共同研究者の実験に参加したいのであるが、理研RALでのマシンタイムと期間が重複することが多く、どうしてもタイミングが合わない。TRIUMF同様に、より詳細な情報は施設の方々やより利用経験が豊富な方に聞いたほうが直近の情報を得ることが可

図10 J-PARC ミュオン施設 (Color online)

能であると思う。また日本中間子科学会機関紙である『めそん』の各号に施設の現状が詳細に報告されている。『めそん』はバックナンバーが中間子科学会のホームページからも閲覧できるので (<http://www.jmeson.org/>) そちらも合わせて利用されることをお勧めする³⁾。

ご存じのように日本が誇る大型加速器施設J-PARCにおけるミュオン施設である。茨城県の東海村に設置され、他の施設に比べ、当然のことながら日本人研究者にとって最もアクセスが簡便な施設である。この施設はパルスミュオンを供給する。平成23年に起きた東日本大震災によってJ-PARC全体が大きく被害を受け、復旧に半年を要した。また、その後も度重なる予期しないトラブルに悩まされ、施設の整備状況が当初の設計よりもやや遅れ気味になっている。図10に、『めそん (35号)』から抜粋した図を示す。現在稼働中のミュオンビームラインはまだ1本である。Dラインと呼ばれている。ここでは表面ミュオン及び高運動量ミュオンの両方を供給することが可能である。一方、そのDラインの横にはUラインという世界初のパルス状超低速ミュオンビームラインが設置されている。このUラインにおいては、PSIよりも高い強度かつより絞られた超低速ミュオンビー

図11 J-PARC ミュオン施設のDラインにおける μ SR実験の様子 (Color online)

ムが得られる予定であり、実稼働後には幅広い応用展開が見込まれている。すでに建設は終了し、今春に初の超低速ミュオンを得ることに成功している⁵⁾。現在はビームラインの調整が進められており、今後の進展に期待がかかる。また、ビームラインをはさんで反対側には表面ミュオン利用に特化したSラインのコミッションが進行中である。すでに試験利用計画も立てられており、さほど遠くない時期にこのエリアも一般ユーザーの μ SRに公開されると思う。それが実現すれば、より多くの利用者が活用できることになり、研究の幅を広げることができるようになる。図11に共同研究者からいただいたDラインでの μ SR実験の様子を示す。カウンターが従来方式の光電子増倍管を用いた方法ではなく最新のアバランシュ型ダイオード型の検出方法が採用されており、今後のJ-PARCの整備にともなって増強されるミュオンビーム強度にも十分耐えうる仕様となっている。フルビームが得られた暁にはこれまでにない精度をもったデータを得ることが可能になり、また新しい研究展開があることが強く期待できる。世界最強度のミュオンビームが実現し、従来の施設では得られないような高精度測定を可能にするのみならず、新しいミュオンの活用スタイルも実現され、それを求めて世界中からミュオン研究者が集まってくる。日本にはそんな超低速パルスミュオンの未来が目の前にきている。

J-PARC ミュオン施設もどちらかというと『ファクトリー』的イメージがある。ただ、世

界のミュオン施設の中でもっとも新しい施設なので、いろいろなコンポーネントが新しくきれいだである。放射線管理区域に入り、施設にたどり着くまでに階段を含め結構歩かなくてはならないが、施設全体が大型なので致し方ないところである。ミュオン実験エリアがまだ一つしかないために、クライオスタットを用途に合わせて入れ替えて活用している。まだ磁場条件等の整備が過渡期ではあるが、ゼロ磁場に注目した測定であれば十分な強度をもったパルスミュオンの利用が可能である。

8. 最後 に

ここまで世界の各ミュオン施設を駆け足で概観してみた。いかんせん誌面上の制約があることに加えて、筆者が全ての施設を使いこなせているわけではないために全てを満足に記述できるものではない。知識と現状把握不足な点は何卒ご容赦申し上げたい。各施設ではどんな初心者でも暖かく迎え入れてくれてミュオンを楽しむことができる。使う側からすれば、まずは自分の研究に目を向け、何が必要なのか、どのような現象を明らかにしたいのか、という点に関する明確なビジョンさえあれば、どの施設をどのように活用することが最短かつ最も効果的な道筋であることは、施設のスタッフのみならずミュオン関係者の皆さんが示してくれる。確かに場所的に限られている研究施設であり、かつ場所によっては大金をはたいて日本から出かける必要もある。そのような条件下でも優れた成果が出せるような助けに少しでも本稿がなれることを期待する。

文 献

- 1) Kadono, R., Muon Spin Rotation (μ SR) Technique, *Radioisotopes*, **64**, 697–705 (2015)
- 2) 日本語の参考図書として、丸善出版・永嶺謙忠著「ミュオンの科学」、丸善出版「シリーズ物性物理の新展開・物性測定の進歩I」
- 3) 門野良典、ミュオンスピン回転法—謎の粒子ミュオンが拓く物質科学—、共立出版、文京

区 (2016)

- 4) 施設詳細は各ミュオン施設のホームページを参照のこと。
- 5) 中間子科学会機関雑誌「めそん」第30～35号・37号に、研究者による各施設の利用経験談を掲載。
- 6) Sierawski, B. D., Bhuva, B., Reed, R., Ishida, K., Tam, N., Hillier, A., Narasimham, B., Trinczek, M., Blackmore, E., Wen S. -J. and Wong, R., Bias dependence of muon-induced single event upsets in 28 nm static random access memories, Reliability Physics Symposium, 2014 IEEE International, pp.2B.2.1–2B.2.5, 1-5 June 2014, doi:10.1109/IRPS.2014.6860585
- 7) Hillier, A., Paul, D. M. K. and Ishida, K., Probing beneath the surface without a scratch—Bulk non-

destructive elemental analysis using negative muons, *Microchem. J.*, **125**, 203–207 (2016)

Abstract

Muon Science

Muon Facilities in the World

Isao WATANABE[†]: RIKEN Nishina Center, Advanced Meson Science Laboratory, 2–1 Hirosawa, Wako, Saitama Pref. 351–0198, Japan

There are four muon facilities in the world. They are: Rutherford-Appleton Laboratory (RAL) in the UK, Paul Scherrer Institut (PSI) in Switzerland, TRIUMF in Canada and J-PARC Muon Facility in Japan. This article is going to report characters, advantages and how to effectively use those muon facilities.