

Hej¹ from Sweden MAX IV

徳島 高

Takashi Tokushima

(MAX IV Laboratory, Lund university)

MAX IV について書いてほしいという要望とともにニュースレターの記事の執筆のご依頼をいただいたのですが、2018年の夏に着任したばかりで、私が所属している高分解能軟X線発光 (XES, RIXS)のビームライン Veritas もまだ調整中であるため、残念ながらご紹介できるような実験の話はありません。そこで、今後 MAX IV に実験に来られる方やスウェーデンに来訪される方のための情報提供になればと思い、MAX IV の概要や Lund での生活などについてご紹介いたします。

One, two, three, four!

MAX IV はスウェーデンの南部の都市 Lund にある放射光施設で、面積 50,000m² の敷地に、線形加速器とそこから電子ビームが入射される大小2つの放射光用蓄積リングが数珠つなぎに設置されている面白い形状になっている施設で (Fig.1 参照)、それぞれ周長 528m の加速エネルギー3GeV のリングと周長 96m の加速エネルギー1.5GeV のリングである。3GeV リングは 200 eV-35 keV の軟X線から硬X線側の領域を、1.5GeV の小リングは 5-500 eV の真空紫外から軟X線をカバーするように設計されていて、設置可能ビームラインの総数は2つのリング合わせて最大 26-28 である。線形加速器の先には、短パルス光実験のための光源 FemtoMAX があり、将来的には、自由電子レーザーへの拡張の計画がある。

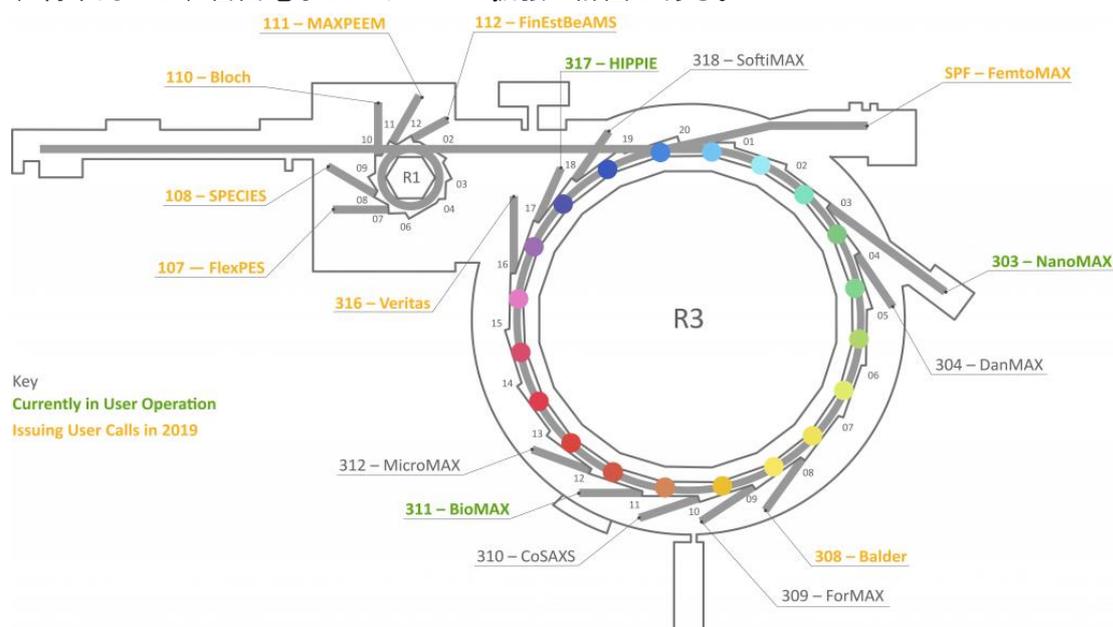


Fig.1 A beamline map of MAX IV (Taken from the website of MAX IV ²)

施設のリングの大きさについて、こちらではローマにある闘技場コロッセウムと比較して大きさを説明している。日本人にはなじみがないがコロッセウムは楕円形で短径 156m、長径 188m なので、円形の MAX IV と単純比較できないが 3GeV の大リングの大きさは大体同じような大きさである（もちろん高さは低い）。ちなみに、施設への訪問された方から「MAX IV の 1.5GeV リングは以前にあったリングを移設したものなのか？」と聞かれることがあるが、実はそうではなくて、新しく作られたものである。ただしビームラインについては、いくつかは以前のリングから移設されているが、すべてのビームラインが移設されたものであるわけではない。ちなみに、MAX IV の 1.5GeV リングとまったく同じものがポーランドにある SOLARIS という放射光施設のリングで使用されている。これは、設計を同じにしてあとから作られたのではなく、MAX IV のパーツを製作する際に、リング二つ分のパーツを作りそれが使用されたということで、この二つのリングは双子の関係にある。

MAX IV は、1980 年代に始まった Lund 大学の加速器の学内プロジェクトをその起源とする放射光リングである。最初のリング MAX I から MAX II、MAX III の次に作られたリングなので 4 番目ということで MAX IV という名前になっている。ちなみに MAX が何を省略した略称であるかについては、公式ウェブサイトにも MAX の意味は載っていなかった（少なくとも筆者の探してみた限りでは）、探し出すのに苦労したが、文献によると「Microtron Accelerator for X-ray」の略³でおそらくもとの加速器のプロジェクトの際の名称のようである。現在では「MAX」そのものが放射光施設の愛称として定着していて、ビームラインの名前にも、SofiMAX、NanoMAX、BioMAX など「MAX」が入っているものが多数存在する。ちなみに、MAX I~III（現在はすでに解体されていて、一部が MAX IV の実験ホールに展示されている）があった研究所の正式名称は MAX Laboratory で、現在の立地に移動したあとは MAX IV Laboratory が正式名称である。

MAX IV に隣接した用地には中性子の施設である ESS (European Spallation Source)⁴ が建設中で私の記憶が正しければあと 2 年ほど建設に要するとのことである。ESS は欧州の国際共同プロジェクトであり、スウェーデン国内の予算で建設、運営されている MAX IV とはプロジェクトの形態の違いはあるが、中性子と放射光の相乗効果を期待して、双方を利用した研究をすすめる「Science Village」⁵ の建設が、この 2 つの施設を中核として計画されている。

Ultra low emittance ring, MAX IV

さて、MAX IV の特徴は、蓄積リングが超低エミッタンスの電子ビームの蓄積が可能であることだろう。私は軟 X 線分光が専門で、言うまでもなく加速器は素人なので、その概略のみを紹介することにする。

MBA(Multi Bend Achromat)と呼ばれている、超低エミッタンスリングを実現した電磁石の配置コンセプトは、Lund 大学の Mikael Eriksson が、開発を進めてきたものである^{3,6}。電子ビームのエミッタンスは蓄積リングの構成要素である Dipole 電磁石の数を増やすと小さくなるということが知られていて、これを利用してエミッタンスを小さくし放射光の光源を高輝度にするため、加速器の電磁石を小型化するなどの要素技術の開発が行われた。実際、MAX III は、通常は物理的な制約から実現困難な上記コンセプトを、電磁石を小型化することで実現できるこ

とを実証するために作られたリングである。この電磁石の小型化は、機械加工で製作した一体型の電磁石の継鉄（ヨーク）を使用して、一体のブロック上に複数の電磁石を構成することで実現されている。Fig.2 に示した、MAX II, III, IV ビームダクトと電磁石の形状を見ると、MAX II は従来の電磁石と同じ形状だが、MAX III, IV では切削加工のパーツが導入されていて、MAX IV では非常にコンパクトになったことがお分かりいただけるだろう。この電磁石の継鉄の加工自体は、特殊なものではなく一般的な数値制御の切削加工で作られたものであるが、もちろん複数のコンポーネントを個別にアライメントするよりはるかに高い位置精度を実現できる。また、このような小型化は低コストでのリングの建設も可能にした。⁶

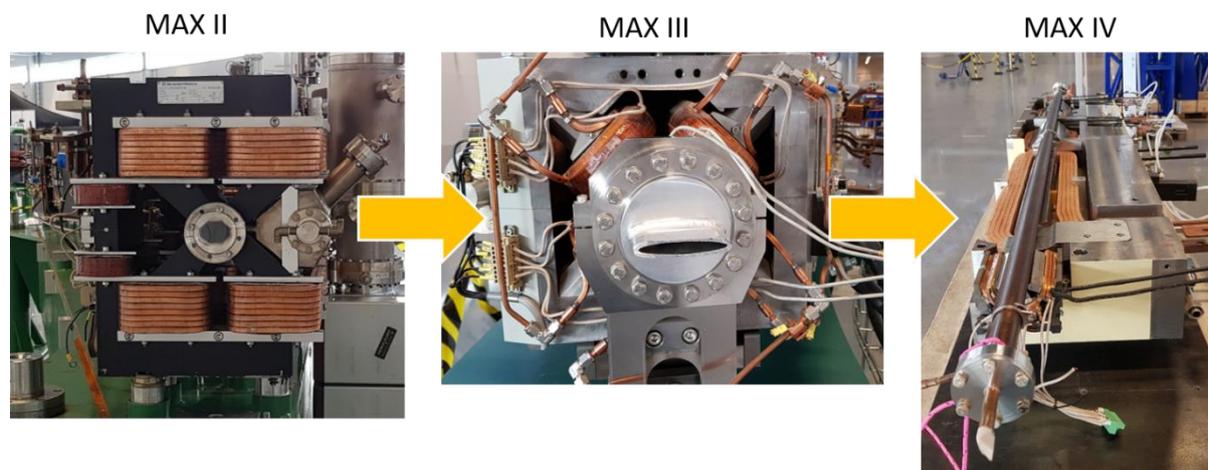


Fig.2 Photos of beam ducts for MAX II, III and IV displayed in experimental hall of MAX IV
(taken by author)

このリングの電磁石の小型化については、見学者向けに説明で、昔の放射光施設を固定電話とすると、MAX IV は携帯電話と言えるほどリングの構成機器の小型化に成功し多と説明しているのを耳にしたが、これは非常にわかりやすい比喻である。確かに、Fig.3 に示した MAXIV の 3GeV ストレージリングの格納容器のなかの写真（筆者が 2018 年の夏ごろに Franz Hennies 氏と一緒に見学者に同行したときに撮影したもの）を見ると電磁石やその配線に至るまでがコンパクトにまとめられているのがお分かりいただけるだろう。



Fig. 3 A photo of the inside of storage ring tunnel of 3GeV ring (taken by author)

さて、一体で切削加工されたパーツを用いることによって電磁石の高精度、小型化が可能になったが、当然それに伴って電子ビームを通しているダクトの内径も細くなっている。これは真空排気の観点からは、真空の維持が大変になるということを意味していて、この問題を解決するため MAX IV ではビームのダクトの内面を NEG（非蒸発型ゲッター）コーティングすることで、ダクトそのものをゲッターポンプにすることで真空を維持するような設計を採用している。この設計は非常に効果的に働いているとのことだが、MAX IV では、どうやら立ち上げの初期にフッ素を含むオイルによる NEG の吸着能低下のトラブルがあったようで、現在でも、ビームラインを含め使用する真空ポンプの選定時にはフッ素化合物を含むガスがポンプの真空側に出ないことを真空を担当するチームが実機を用いて確認してから採用するようになっている。

ビームの低エミッタンス化により施設全体の振動も、それ相応の対策をしなければいけなくなる。MAX IV では非常に太い冷却水の配管を目にすることがあるが、これは配管の直径を大きくすることで送水管内の流速を下げて内部での乱流を抑制することで冷却水の脈動を抑えているためにそのようになっているとのことである。冷却水の流速は最大でも 1 m/sec 以下になるように設計されているとのこと。また、MAX IV では装置の振動に対しても対策を行っている。たとえば防振のためのスプリングを備えていない粗引の真空ポンプを地面に置くのはご法度であり、そのようなポンプについては振動を床面に伝えないようにスプリングでポンプを支えるようになっている台の上に置いたり、同種の構造を備えたキャビネット内や、ビームラインから離れた場所に部屋を作ってそこに配置するようになっている。

高分解能発光分光ビームライン Veritas

最後にすこしだけ、私が所属しているビームラインの紹介をさせていただこう。Veritas は MAX IV の 3GeV リングに設置された軟 X 線ビームラインで、ビームライン分光器は Collimated Plane Grating Monochromator (cPGM)、使用可能エネルギー範囲は 275-1500 eV、末端装置に

おけるビームのスポットサイズ（設計値）は $1 \times 5 \mu\text{m}^2$ である。ビームライン分光器のスペック的には「普通の分光器」である。このビームラインの特徴は末端実験装置の旋回できる巨大な発光分光器だろう。この分光器は反射型回折格子を用いたローランド型分光器で、高分解能を実現するために約 10m の全長があり、水平面内に 120 度角度を回すことができる（ただし、発光分光器は現在建設中）。Fig. 4 に発光分光器の写真を示したが、大きすぎて、全体をきれいに写真に収めることができなかった。このビームラインは、2018 年の末の段階では、ようやく固体試料の試料電流での測定が可能になったところで、まだまだ立ち上げ段階であるが、現在、立ち上げに協力して頂けるパワーユーザーを募集中である⁷。

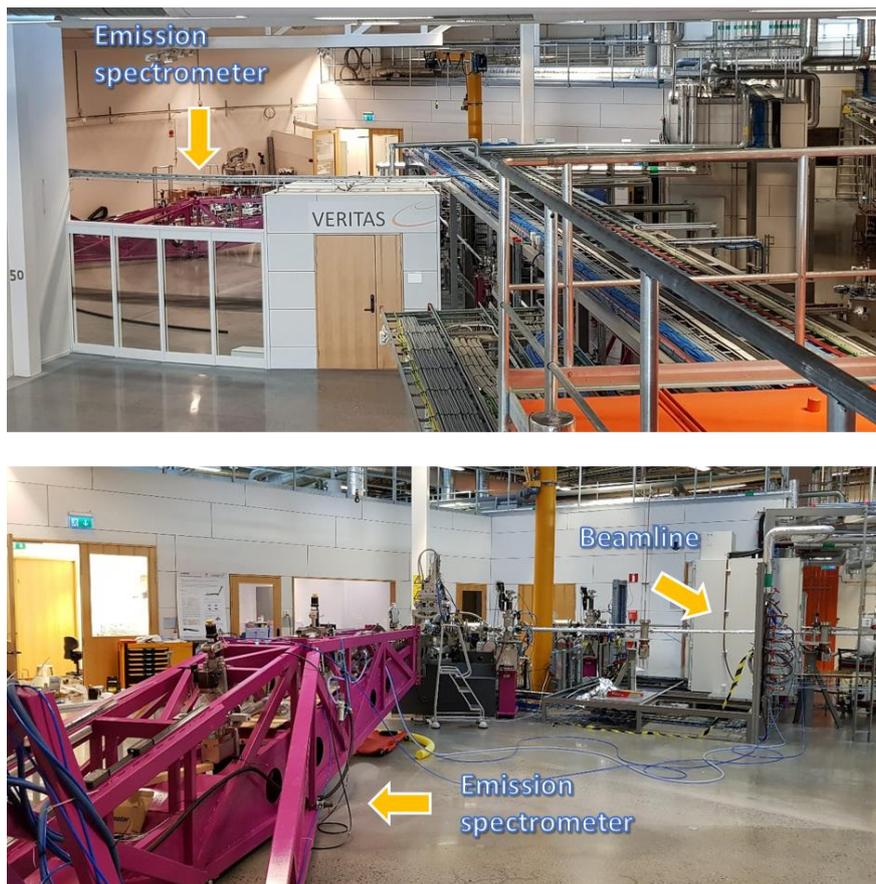


Fig. 4 Photos of the Veritas beamline and its emission spectrometer (taken by author)

Lund, Sweden

さて、MAX IVに関するネタが尽きてきたので、ここで MAX IV のある町 Lund (Lund) について紹介しよう。Lund は、人口 9 万人ほどの大学が中心になっている都市で、マルメ (Malmö) というスウェーデンで 3 番目に大きい都市のとなりにある。とはいっても、マルメですら人口は 31 万程度なので日本の都市では地方の中核都市程度の大きさである。日本人にはスウェーデンは寒いというイメージがあるが、ここは意外に寒くないところである。いや、正確には寒いことは寒いのだが、予想よりは寒くない。Lund は風が強いのだが、それでも、湿度が低いことが関係しているのか、以前に住んだことのある仙台のほうがよっぽど寒いのではないかという気がする。ただし、2018 年は夏からすでに異常に温度が高かったということらしく、今年

は暖冬なので寒くないのかもしれないが。

ルンドに最も近い国際空港は、なんと隣国のデンマークにあるコペンハーゲン空港である。ただし、隣国とはいっても Øresund link という名称の鉄道と自動車道のための橋で繋がっているため、ルンドの中央駅(Lund C)から 40 分ぐらい電車に乗ればコペンハーゲンの空港になってしまうので隣国という感じはしない。したがって、ルンド来訪の際には間違ってもストックホルム行き飛行機に乗ってはいけない。ストックホルムからルンドまでは、スウェーデン国鉄の高速列車 X2000 でも 4 時間以上かかるのだから。

ここでスウェーデンとデンマークの国境がどうなっているのか、ちょっと紹介しよう。スウェーデンもデンマークもシェンゲン協定加盟国なので、本来は入国時にパスポートの提示を求められることはないはずなのだが、近年の難民問題等の影響で国境の監視が厳しくなったのか、鉄道についてはスウェーデンに入って最初の駅 (Hyllie) でパスポートの確認をしていることが多い。私はすっかり油断していて、あたふたしてパスポートがすぐに見つからず、確認しに来た係官に笑われたことがあるので、賢明なる読者の皆様におかれましては、ルンドに来られる際は、油断せず、橋を渡った後のパスポートのチェックのために、しばらくはすぐに取り出せるところにパスポートを入れたままにしておくことをお勧めいたします。ちなみに、スウェーデンからデンマークに移動する際には、パスポートのチェックはない。

Cash free, pay by Swish

ルンドに来てまず驚いたことは現金が使えないことである。バスは、チャージ式のバスカードかクレジットカードだけで、現金は受け付けないし、レストランにも「Cash free」つまり「現金お断り」のお店が多数ある。スーパーは現金も使えるが、セルフサービスのレジは、現金が使えないもののほうが多い。なんと、銀行にも現金がないなんてこともある。自分が利用している銀行では、現金を取り扱うことができるのは限られた支店だけで、口座開設時に「この支店には現金はないので、もし現金が必要だったら、一ブロックほど先にある（ほかの大手銀行の）Cash machine を使ってね」と言われたほどである。

このような状況になっている理由は、スウェーデンの政府が電子商取引による商業振興策の一貫として、クレジットカード等の電子決済時の手数料等を現金販売時の価格とは別途請求することを禁じているからである。また、「現金お断り」にすることも法的に許容されていることである。したがって、手数料については、誰も手数料を払っていないということではなく、そもそもの表示価格に含まれているということで、利用者からみれば電子決済を使わなくては、損した気分になる状態を意図的に作り出している。もちろん、現金を扱わないことは事業者側にも紛失、盗難などのトラブルを防いだり、支払いがスムーズになるなど多くのメリットがある。したがって、ルンドに限らずスウェーデンでは、お菓子 1 つでも、欧州に多い有料の公衆トイレでも電子決済が使えるところはそれで払ったほうがいろいろと楽という状況になっている。露天市場などの小規模な決済のためには、スマートフォンを利用して電話番号や QR コードを使って、銀行口座間で送金をする Swish (スウィッシュ) と呼ばれる決済システムもある。この 2012 年にサービスが開始されたシステムは、非常に便利で利用料金もかからないので、友人にお金を返したり、ちょっとした集まりでお金を集める必要がある時に簡単に使え

る（ただし、このシステムは、スウェーデンの個人識別番号と銀行口座を持っていないと使えないので、長期滞在している場合しか使えない）。

唯一現金が必要となるのが、コインしか受け付けない古い公衆トイレ（あまり見かけないが）と、イベント等の出店、露天の市場(マーケット)の一部のお店だけである。イベント等の出店で Swish もだめで、現金しか受け付けない店があるのは、脱税のためと言う説もあるが、兎にも角にも現金は町中からほぼ消え去ったのである。まあ、スウェーデン政府が意図したところではないのかもしれないが、銀行に行っても現金がないので銀行強盗も激減したということである。

そんなわけで、現在、私の財布にはクレジットカードと、この前ドイツに行ったときに引き出したユーロ札が入っているだけで、スウェーデンの現金は入っていない、MAX IV をご訪問される皆様は現金は忘れても構わないがクレジットカードだけはお忘れなきように。

Coffee is free at MAX IV, but no cafeteria in MAX IV

MAX IV のコーヒーマシンは無料である。スウェーデンはコーヒー好きの国なので、休憩スペースには焙煎した豆を挽いてコーヒーを入れるタイプのコーヒーマシンが設置され、コーヒーを飲みながら話をするのがスウェーデンのスタイルである（Fika と呼ばれているコーヒー休憩である）。非常によくコーヒーを飲むため、コーヒー豆の回転が速く、よく豆を補充しているのを見かける。そのため、鮮度は比較的良いようで、日本では某チェーン店のコーヒーショップのコーヒーは頭痛がするので飲めない私でも、きちんと飲めるコーヒーが出てくるので優秀だと思われる。したがって、お茶のたぐいは若干肩身が狭いが、MAX IV はスウェーデン以外から来た人も多いためか、お茶を飲むことも多くなってきたようで、比較的多くの種類のお茶が置いてあって、緑茶もあるというホスタビリティの良さである（緑茶があるのは、日本人が来たからなのかどうかは聞いてないので不明である）。

実は、MAX IV には、カフェテリア、食堂の類はない。ここで働いている人のかなりの割合が、自分で昼ご飯を作ったり買ってきたりしている。それ以外にご飯を食べれるところはバスで1駅、歩いて10分ぐらいのところにある SONY のビルの中の食堂ぐらいである。現在のところ（たぶんこれからも）MAX IV の施設内にレストランはないのでユーザーが来たらどうしようかと悩んでいる今日この頃である。

おわりに

MAX IV の見学は、研究所に所属している誰かと一緒であれば、いつでも可能なので、近所に来られた方は、連絡をいただければ対応することは可能である。2019年1月の時点では、MAX IV に常駐している日本人は私とポスドクの橋本由介君の2名だけなので、日本から見学者が来れば呼びがかかる可能性が高い。ひょっとしたら読者の皆様にも、お会いする機会があるかもしれない。それでは、Hej då⁸。

References

1. 「Hej」はスウェーデン語の「Hello」。発音は「ヘイ」。英語のイメージから、フレンドリーな挨拶か西部劇のセリフのように感じてしまうが、スウェーデン語では普通の「こんにちは」なので、通常のあいさつはすべて「ヘイ」で問題ないようである。
2. *MAX IV/ Accelerators & beamlines*. Available from <https://www.maxiv.lu.se/accelerators-beamlines/beamlines/>.
3. O. Hallonsten and O. Christensson, *An ex post impact study of MAX-lab*. 2017, Lund: Lund University School of Economics and Management.
4. *The European Spallation Source*. Available from <https://europenspallationsource.se/>.
5. *Science Village Scandinavia*. Available from <https://sciencevillage.com/en/>.
6. M. Eriksson, *The multi-bend achromat storage rings*. 2016. **1741**(1): p. 020001.
7. *MAX IV/ Users / Open Calls*. Available from <https://www.maxiv.lu.se/users/open-calls/>.
8. 「Hej då」は、スウェーデン語の「Goodbye」、発音は、「ヘイドー」。