

SLS, MAX IV 視察記

加速器第七研究系 原田健太郎

現在 KEK では、最先端の 3 GeV 蓄積リング型光源計画 (KEK 放射光計画) を推進することが決まっている。決定までの間には、PF 将来計画検討委員会による議論と物構研運営会議に対する報告書の提出と運営会議の承認、研究推進会議による ERL から 3 GeV リングへのロードマップの書き換え、PIP (Project Implementation Plan) 国際評価委員会 (5/21-22) による KEK 放射光計画に関する評価が行われた。その、PIP 国際評価委員会に先立ち、5/8-11 に山内正則機構長、野村昌治理事によるヨーロッパの最先端放射光施設、SLS, MAX IV の視察が行われ、村上洋一 PF 施設長、放射光科学第一研究系の船守展正教授と原田が同行した。ここでは、その視察についての報告を行う。

2001 年にユーザー運転を開始した SLS (Swiss Light Source) は、世界初の「新」第 3 世代光源と言われている。真空封止短周期挿入光源を利用することで、電子ビームのエネルギーの割に高いエネルギーの X 線まで高輝度に発生させることができるようになった点で「新」という。SLS では、2.4 GeV で 10 keV 程度までアンジュレータ光が利用可能であるが、真空封止なしなら、1 keV がギリギリである。真空封止アンジュレータの特徴は磁極列間のギャップを数 mm まで閉じて運転することであり、その状態で長時間の安定な運転、トップアップ入射を行うには、高度なビーム安定性と制御が必要となる。建物の設計から同じトンネルに配置したブースターリングに至るまで、考え抜かれたデザインは未だに様々な施設が手本としている。周長は約 290 m、電子ビームのエミッタンスは水平 5.5 nmrad、垂直 3 pmrad である。オプティクス、電磁石誤差の補正など、高度に設計、調整されている。加速器は 3 回対称で、TBA (Triple Bend Achromat) 12 セル、直線部も 12 本だが内 1 本が入射、2 本が RF で使われており、残り 9 カ所に挿入光源が設置されている。その内の 1 箇所は 3 倍波空洞と短い挿入光源が共有している。

PSI (ポール・シェラー研究所) はスイスにおける KEK のような複合加速器研究施設で、SLS の他に、中性子源やミュオン源としても使われている 590 MeV、1.3 MW の陽子加速器が存在し、同じ制御室から制御されている。また、Swiss FEL という、エネルギー 5.8 GeV で約 10 keV の X 線まで利用可能な常電導自由電子レーザーの建設がほぼ完了段階である。視察時には、SLS 施設長の Gabriel Aeppli 氏による SLS 全体の紹介、加速器部門の Andreas Streun 氏による SLS アップグレード計画の紹介が行われ、SLS 実験ホール見学の後、機構長は PSI で行われている日本との共同研究 MEG ($\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊) 実験を引き続き視察し、他の

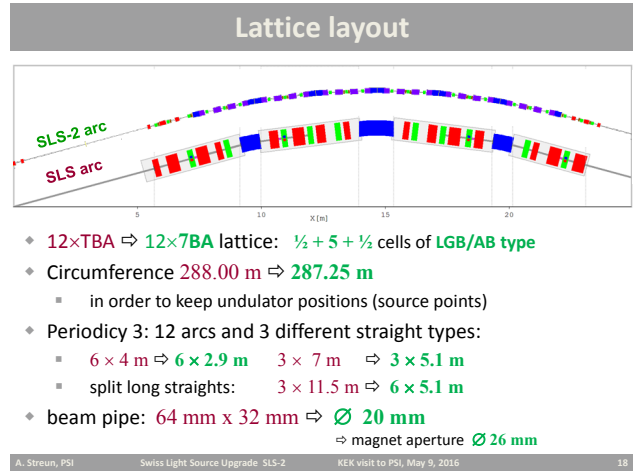


図 1 SLS アップグレードに関する Streun 氏の資料の抜粋。3 次高調波空洞ありで約 150 pmrad、逆バンドを含めた偏向電磁石の曲げ角は合計 585° である。

メンバーは Swiss FEL の広報施設を見学した。

SLS アップグレード計画は逆バンドを積極的に導入したオプティクス最適化とダンピング効果で、既存の SLS の置き換えながら、自然エミッタンス 137 pmrad を実現する計画である (IPAC2016 等でも発表されているので資料は web 検索でも手に入る)。Streun 氏によるとハードウェア的にまだ詰められていないとのことだが、2.4 GeV とはいえ、我々の KEK 放射光計画の半分の周長で 100 pmrad 台のエミッタンスというのは大いに驚かされた (エネルギー 3 GeV に換算すると 200 pmrad、ただし、挿入光源は 9 カ所で、直線部の長さは現状より短くなる)。

さて、山内機構長と野村理事は 5/8 成田発、現地同日午後後にコペンハーゲン着、乗り継いで午後 8 時頃にチューリッヒ着の予定であったが、乗り継ぎの飛行機が遅れ、午後 10 時くらいになってしまったとのことであった。村上さん、船守さんと原田は飛行機代 (1 日早いだけで値段が 2/3 になった) の為に、5/7 成田発チューリッヒ着の飛行機を利用した。PSI はチューリッヒから電車で 20 分程度のフリリゲンという場所にある。PSI で全員合流し、5/9 朝 9 時から午後 2 時まで PSI に滞在、その後、午後 5 時の飛行機でコペンハーゲンへ向かった。翌 5/10 朝に海底トンネルと橋でスウェーデンに渡り、MAX IV へと向かった。機構長と理事は 5/10 の内にコペンハーゲンから帰国、村上さんと原田は翌 5/11 にコペンハーゲンからチューリッヒ経由で帰国、船守さんは高圧関係の研究で有名なパイロイトと DESY の阪井さん (KEK から 1 年出張中、元加速器七系、一緒に将来計画検討を行ってきた仲である) を訪ねた後、デュッセルドルフ経由で帰国した。機構長と理事のスケジュールを計算してみると、研究所滞在 9 時間に対し飛行機 25 時間 45 分、村上施設長と原田は 12 時間 /27 時

間 45 分となり、ほとんど飛行機に乗りに行ったようなものだと言えなくもない。

MAX IV は世界初の第 4 世代蓄積リング型放射光源であり、現在コミッション中である。3 GeV の LINAC, 1.5 GeV リング, 3 GeV リングからなり、3 GeV リングは周長 528 m, 7BA (Seven Bend Achromat) で直線部 20 本, 自然エミッタンス 328 pmrad である。電子銃はリングの積み上げ時には熱電子銃だが、フォトカソード RF 電子銃 (光陰極高周波電子銃) もあり、LINAC 端の挿入光源で 100 fs の短パルス光を発生させて実験を行うビームラインもある。ゆくゆくは挿入光源を増強し、レーザー発振させる計画とのこと。現状の自発放射のみの段階では光子数は FEL に比べれば桁違いに少ないのだが、バンチスライスをやっていた頃に比べると十分多いのだとか。

視察では、MAX IV 研究所長の Christoph Quitmann 氏による研究所紹介の後、振動対策ワーキンググループのリーダーで副技師長の Brian Norsk Jensen 氏から地盤安定化や振動対策に関して講演して頂いた。施設見学は加速器部門長の Pedro Fernandes Tavares 氏と Jensen 氏に案内して頂いた。サイエンスについては利用部門長の Jesper N. Andersen 氏にお話をお伺いした。

Jensen 氏によると、MAX IV では当初、床を 70 cm 厚のコンクリートで考えていたが、それを 30 cm に減らし、代わりに 4 m 深く掘って、掘った土に石灰を混ぜて固化させる Lime stabilized soil という手法をとった。40 cm のコンクリートよりも 4 m の LIME 安定化土壌の方が値段は半額以下で、安定性 (曲がりにくさ) はずっと優れており、工法としても特殊なものではなく、空港や道路の建設でも広く使われている手法 (日本でも行われている)。MAX IV の地盤震動源は主に近くを通る高速道路で、3 ~ 18 Hz 付近に振動のピークがあるが、施設全体を堅い巨大な船のように作ることで、短波長、高周波数の波では揺れない、つまり、局所的に振動しない様になっている。全体を揺らす長波長、低周波では、施設全体が一体として揺れるので、



図 3 MAX IV のプロトタイプ電磁石の視察中の機構長、理事と施設長。Quitmann 氏には、我々は "Synchrotron Radiation Junkies" なのだ、君たちもそうだろう、がんばれ！と励まして頂いた。



図 4 スプリングを挟んだ冷却水ポンプの設置。台車に乗ったスクロールポンプなども含め、機械振動を引き起こすもの全てにスプリングが挟んであった。

Civil Engineering

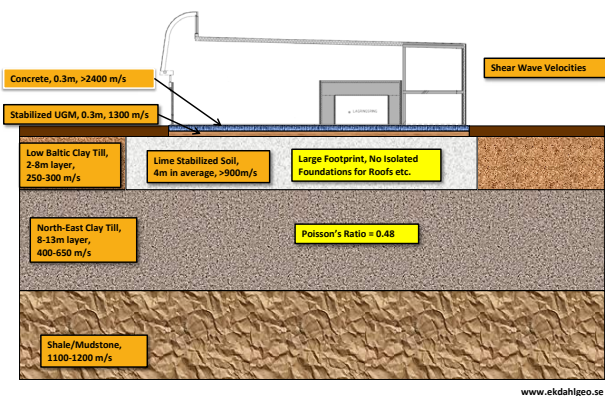


図 2 MAX IV の地盤に関する Jensen 氏の資料の抜粋。30 cm コンクリートに下に 4 m 分、土壌を石灰安定化してある。固い地盤は約 30 m 下だが、杭打ちはなし。

実験に影響しない。きちんと対策すれば、地盤振動はどこでも大きな問題にはならないだろうとのことであった。内部の震動源もきちんと対策されており、真空ポンプや冷却水ポンプ、チラーなど機械振動の原因となるものの下には必ずスプリングが設置されている。スプリングはわずか数百円で、効果は大きいとのこと。電磁石は架台とセットで数台分が一体の鉄から作られており、架台は石である。電磁石は想像よりもコンパクトにまとめられていた。

偏向電磁石ビームラインはなし、建屋にクレーンもなし、加速器シールドも解体できず、天井も開かない。床はすべて磨き上げられて段差がなく、重量物はエアパレットで運搬される。20 セルからなるが、各セルごとに建屋内側に搬入口が 1 カ所、トンネル上部に電源室がある。磁石や挿入光源はその 20 カ所の搬入口を使って設置された。真空

は NEG ポンプを採用，現場での再活性化はなし，ダクトは容易に曲がるほど細く薄い丸管……建物のコンセプトから加速器本体に至るまで，切り捨てられる部分をばっさり諦めることで，割り切ったシンプルな設計になっている。現在までに 120mA までの蓄積に成功，ビームライン焼き出しの都合で蓄積電流値を決めているそうである。

リング RF は 100 MHz で 3 倍波空洞が 300 MHz である (IPAC 等の情報では，100 MHz の空洞は高調波減衰型ではないので，120 mA ではビーム不安定性が発生しており，フィードバックの立ち上げなど解決を急いでいるとのこと)。屋上は緑化されており，雨水もいったん貯めてからゆっくり排水，加速器の廃熱はヒートポンプを通して付近施設の空調等に利用されているとのこと。新しい施設全体が居室部分も含めて明るく美しくスタイリッシュで，何を見てもどこへ行っても溜息しか出なかった。我々もそのような施設を目指したい。

KEK 放射光計画は KEK 全体として推進することが決まり，利用側を含めた CDR を 10 月までに完成させることが目標となっている。光源設計については，来年 3 月に予定されている Machine Advisory Committee (委員長は APS の Michel Borland 氏の予定) に向けて具体的な詳細検討が進められており，MAC 後には TDR (Technical Design Report) にまとめられる予定である。なお，原田は飛行機が非常に苦手な人で，やせるほど怖かった (普通の人にとっては別になんてことないのだが) ……。

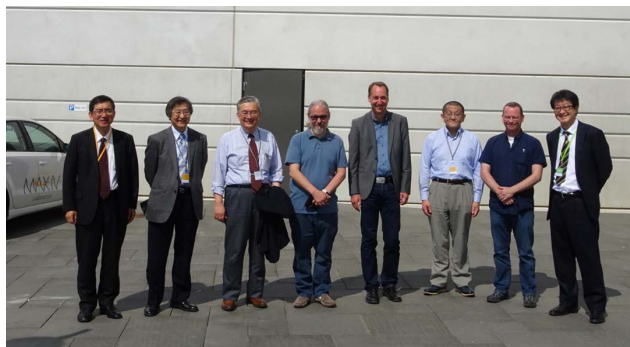


図 5 MAX IV での集合写真。左から，村上洋一施設長，野村昌治理事，山内正則機構長，Pedro Fernandes Tavares 加速器部門長，Christoph Quitmann 所長，筆者，Brian Norsk Jensen 副技師長，船守展正教授。

PF ユーザーから多数受賞 文部科学大臣表彰

物構研トピックス
2016 年 5 月 11 日

平成 28 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰が 4 月 20 日，文部科学省にて行われました。今年もフォトンファクトリー (PF) のユーザーから以下の方が PF 利用の成果により受賞されました。この賞は科学技術に関する研究開発，理解増進等において顕著な成果を取めた者について，その功績を讃えることにより，科学技術に携わる者の意欲の向上を図り，我が国の科学技術水準の向上に寄与することを目的に定められたものです。



文部科学大臣表彰の様子 (写真提供：文部科学省)

科学技術賞

・森 初果 (東京大学 物性研究所 教授)

電子とプロトンが関連した機能性有機物質の開発と物性研究過去の関連記事：

2014.8.26 プレスリリース電気伝導性と磁性が切り替わる純有機物質の開発

2013.1.9 プレスリリース金属状態を示す純有機単成分導体の発見

若手科学者賞

・中山 耕輔 (東北大学大学院理学研究科 助教)

鉄系高温超伝導体バルク及び原子層薄膜の電子構造の研究過去の関連記事：2015.11.5 トピックス PF ユーザーら，物理学会若手奨励賞を受賞

・橋口 隆生 (九州大学大学院医学研究院 准教授)

RNA ウイルスの細胞侵入と抗体による中和に関する研究過去の関連記事：2015.3.20 トピックス マールブルグウイルス・エボラウイルスの感染を阻害するメカニズムを解明

・山崎 優一 (東北大学 多元物質科学研究所 助教)

多重計測電子分光による電子波動関数の立体形状の研究過去の関連記事：2013.3.29 トピックス 山崎優一氏，日本物理学会若手奨励賞を受賞

高木秀彰氏、繊維学会奨励賞を受賞

物構研トピックス
2016年6月16日

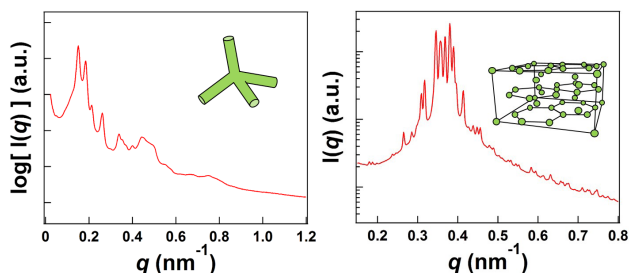
KEK 物質構造科学研究所の高木秀彰研究員が、第2回（平成27年度）繊維学会奨励賞を受賞しました。この賞は、繊維科学もしくは繊維技術全般について優秀な研究を行い、今後も継続して活躍が期待できる新進気鋭の研究者に授与されるものです。



授賞式の様子。左から、繊維学会会長 鞠谷雄士氏（東京工業大学大学院理工学研究科教授）、高木秀彰氏（KEK 物質構造科学研究所研究員）。

受賞対象となった研究は「放射光X線小角散乱法によるブロック共重合体/ホモポリマーブレンドが形成する新種マイクロ相分離構造に関する研究」です。高木氏は、種類の異なる高分子鎖の末端同士が結合したブロック共重合体と呼ばれる高分子化合物が作るマイクロな構造について、フォトンファクトリーの放射光X線小角散乱法（SAXS）を用いて研究しています。ブロック共重合体は、ナノメートルオーダーの非常に規則正しい構造を形成することが知られています。ブロック共重合体にホモポリマーを混合したときに形成する構造を高空間分解能 SAXS で詳細に調べることにより、ダブルダイヤモンド型のネットワーク構造（図1）や、準結晶の近似結晶として知られている σ 相（図2）などの複雑な構造を形成することを発見しました。

ブロック共重合体による新材料は、従来の塊状の材料から切り出して加工する方法と比較して、非常に簡易な方法でナノメートルオーダーの微細な構造を形成できるため、次世代のリソグラフィや先端的なナノテク材料への応用が期待されています。こうした発見や測定手法は、従来の繊維高分子材料科学にとらわれない独創的な研究であるとして高く評価されました。これらは現在 PF の BL15A2 で利用が可能となっています。



(左) 図1 ダブルダイヤモンド型の構造の SAXS プロファイル。10 nm 程度のダブルダイヤモンド型のネットワーク構造が存在することを実証した。
(右) 図2 σ 相の SAXS プロファイル。半径 7 nm の球が集まって複雑な格子を形成することが分かった。

PF トピックス一覧（5月～7月）

KEK では 2002 年より「トピックス」、「ハイライト」、「プレスリリース」と題して最新の研究成果やプレスリリースなどを紹介していますが、PF のホームページ (<http://pfwww.kek.jp/indexj.html>) でも、それらの中から、または PF 独自に記事を作成して掲載しています。各トピックスの詳細は「これまでのトピックス」(<http://pfwww.kek.jp/topics/index.html>) をご覧下さい。

2016年5月～7月に紹介されたPFトピックス一覧

- 5.11 【物構研トピックス】PF ユーザーから多数受賞 文部科学大臣表彰
- 5.23 【トピックス】TYL スクール理系女子キャンプ 2016 開催
- 5.24 【ハイライト】髪本来のハリコシを
- 5.31 【プレスリリース】光センサータンパク質の構造を原子レベルで解明 - 神経細胞内の情報伝達物質を光で操作し、軸索の成長促進に成功；再生医療や新薬開発への貢献を期待 -
- 6.1 【トピックス】G7 茨城・つくば科学技術大臣会合特別展に出展
- 6.3 【プレスリリース】太陽光による水分解を高効率化するナノコンポジット結晶を開発
- 6.16 【物構研トピックス】高木秀彰氏、繊維学会奨励賞を受賞
- 6.17 【物構研トピックス】分子進化の新たな解析法を発見
- 6.20 【物構研トピックス】精子と卵子を認識するタンパク質の構造を解明
- 6.30 【物構研トピックス】化学と数学でひもとくベルト状分子の構造
- 6.30 【プレスリリース】永久磁石材料の内部磁気構造を定量評価する手法を開発
- 7.13 【トピックス】物構研の北村未歩氏、PF ユーザーの丹治裕美氏、ロレアル-ユネスコ女性科学者 日本奨励賞を受賞
- 7.19 【トピックス】PF で実験を行った福島成蹊高校が「日本水大賞文部科学大臣賞」を受賞