

入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 古川 和朗

運転概要

今年度は4月1日に入射器を立ち上げ、入射器後半部分で仮電子銃(GU_31)を使用してPF・PF-AR入射運転を継続しながら、前半部分では多数の開発作業が行われた。RF電子銃(GR_A1)に用いるイッテルビウム媒質ファイバー・レーザー発振器、ファイバー及びディスクによる多段のレーザー増幅・光学系、長寿命・高量子効率のイリジウム・セリウム光陰極、マイクロ波源の開発調整などの他、陽電子生成部及びダンピング・リング接続部のビームライン構築作業、アライメント作業の継続と測定データ解析、カンタル同軸負荷の大電力試験や陽電子捕獲に用いられるフラックス・コンセントレータの大電力試験などが並行して行われた。

6月28日には夏のシャットダウン前のPF・PF-AR入射が順調に終了した。その後、7月1日までの週末3日間、開発を目的とした入射器単独運転が行われた。今回はこの3日間に、低速陽電子施設においても実験装置の開発を目的としたビーム運転が行われた。秋からの運転は9月末に始まるが、PF・PF-AR入射を継続しながらのSuperKEKBに向けた小電流コミショニングと位置づけている。

SuperKEKBに向けた建設

入射器の前半部分においては、低エミッタンス・大電流RF電子銃の開発や大電流陽電子生成装置の建設を始めたとして、建設・開発が進んでいる。A1部に建設中の電子銃は、多段の大電力レーザーの安定化を進めながら、秋には新しい加速空洞への交換を予定している。採用する擬似進行波型空洞(QTWSC)はこれまで利用してきたDAW型空洞に比べ、さらに加速電界や収束力に優れ、空間電荷効果の

影響が大きい大電流加速においては有利となる。さらに電子銃の直後には診断ラインも新設される。

SuperKEKB計画においては、究極のルミノシティを目指して、蓄積電流を倍増させるとともに、採用されるナノビーム方式によって10分程度まで短くなってしまいうビーム寿命に対応するために、陽電子ビーム強度増強が必須となる。陽電子捕獲効率を向上させるために、これまでの磁場強度2 Teslaの空芯型パルスコイルに代わる、4 Tesla級のフラックス・コンセントレータ型パルスソレノイド(FC)の開発を進めている。入射器で使用されているクライストロン・モジュレータ電源を改造した試験用パルス電源を用いて、試作FC1,2号機の磁場分布測定や大電流通電試験が進んでいる(図1)。実用運転時に想定される最大電流値12 kAに対して、想定波形で6 kAまで到達しており、また、波形は最適ではないが別電源を用いて、13 kAまでの試験も行うことができ、放電の無い運転が確認された。

秋のコミショニングに向けた加速管再配置の作業計画の立案もほぼまとまり、旧架台撤去、改造、新規架台製造や、アライメント作業やその評価が進んでいる(図2,3,4)。後にも記述する長基線レーザーと光検出器によるアライメント装置は、480 mの下流部に引き続き、上流120 m部分の設置も終了し、距離が小さいこともあり、約20 μmの精度を達成している。加速管や収束電磁石のアライメントについては、低エミッタンス・ビーム生成輸送のシミュレーションから、短距離では0.1 mm、長距離では0.3 mmの精度が要請されているが、複数の測定方法の解釈がまだ確定しておらず、さらに連続測定を継続しているところである。特に、外気温に関連した建物の歪みの測定情報が出ており、懸念されている。架台設置の作業量も予想以上であ

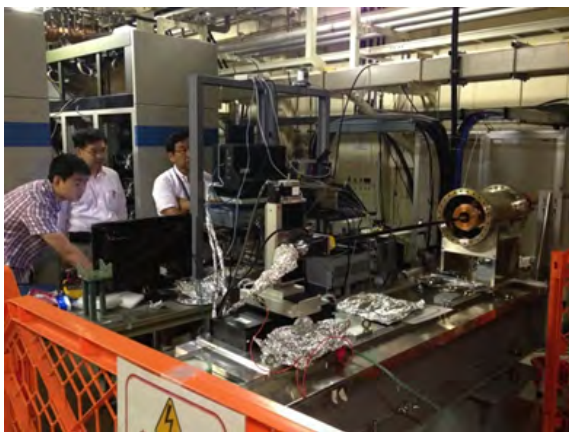


図1 フラックス・コンセントレータの大電力試験と磁場測定。



図2 陽電子生成部再構築のために撤去・移動された加速管架台(左側)。



図3 旧陽電子生成部が撤去され、新規改造架台の運びこみを待つ第1セクタ後半部。

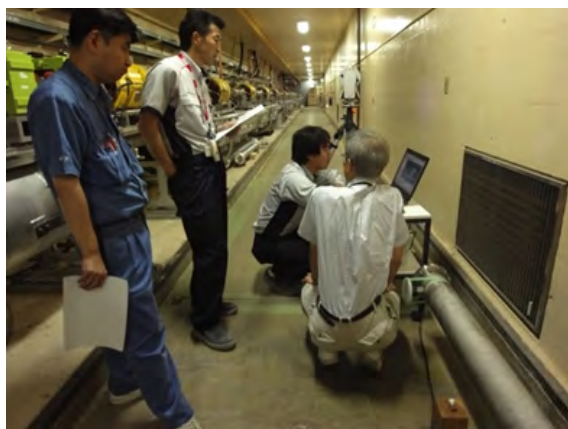


図4 複数の方法でアライメント測定が進む。

り、作業の進捗確認を継続的に行なっている。

来年の夏には、入射器後半部分の再構築も行われるため、その詳細設計の確認が進められている。特に、近いうちにパルス四重極磁石の配置を決定し、プロトタイプ磁石の試験の結果を見ながら、発注を進める予定である。

計算機制御に使用するネットワークの更新は既に行われたが、計算機やデータ・ストレージの更新計画も進められており、秋の小電流コミッションでの使用形態を確認しながら、来年の本格的なコミッションに向けて、調達を進める予定である。

長基線レーザーによるアライメント

上記のように SuperKEKB 入射においては、低エミッタンスの電子・陽電子を入射することはルミノシティを向上させるリングと衝突点設計を満足させるために重要である。しかし、エミッタンスを増大させずに、長距離（電子は 600 m、陽電子はダンピング・リング出射後 240 m）の加速を行うことは容易ではない。入射器は大きく分けて 120 m の前半部分（A, B セクタ）と 480 m の後半部分（C-5 セクタ）の 2 つの直線部分に分かれているが、それぞれ精度よく加速装置を配置する必要がある。いくつかのシ



図5 開発されたレーザー光学系（C-5 セクタ用）。レーザー（He-Ne: 10 mW）は光学系（大気）で全幅約 1 mm から約 40 mm に拡大された後、手前から後方へ伝送し光軸管（真空）に入る。

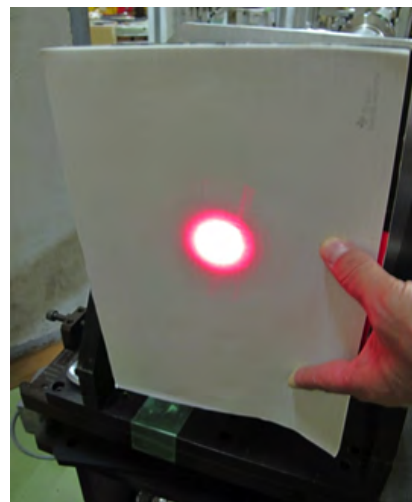


図6 入射器終端レーザー光形状。レーザー源から 480 m の距離において全幅で 40 mm 程度。

ミュレーションの結果、局所的には 0.1 mm、広域的には 0.3 mm の精度で加速装置を設置する必要があることがわかっている。他の加速器などでの開発を利用したい所ではあるが、入射器のトンネルの幅が狭く三角測量の精度が出にくいなど、いろいろな制約がある。

震災以降、装置の架台が震災で大きな被害を受けたこともあり、その修復を行いながら、主に 2 つの方法を併用したアライメントシステムを構築してきた。数十メートルの範囲の局所的な測定には他の加速器でも実績のあるレーザー・トラッカを用い、広域・長距離部分は入射器で過去にも採用された長基線レーザーと光検出器を用いたアライメントシステムを用いることとした。

120 m の A, B セクタと 480 m の C-5 セクタについて、それぞれ的一端にピコモータ・ステージによる高精度角度調整機構を付けたレーザー・システム置き（図 5）、レーザーを回折限界の条件で専用の真空ダクトの中を導き、さら

に他端で光センサにより自動観測を行う(図6,7)。何らかのレーザー角度の変動があれば、出射角度を自動調整することにより高安定化させることとした。レーザーの出射角度を $\pm 0.2 \mu\text{rad}$ (マイクロラジアン)の範囲内に帰還制御し、A,Bセクタを $\pm 20 \mu\text{m}$ 以下、C-5セクタを $\pm 60 \mu\text{m}$ 以下という高精度でアライメントすることを可能にした。このような長距離の適用は世界でも初めてのことと思われる。

この高安定化された長基線レーザーと各加速装置架台に取り付けられた光位置センサを用いれば、長基線に沿った加速装置のアライメントが可能になる。

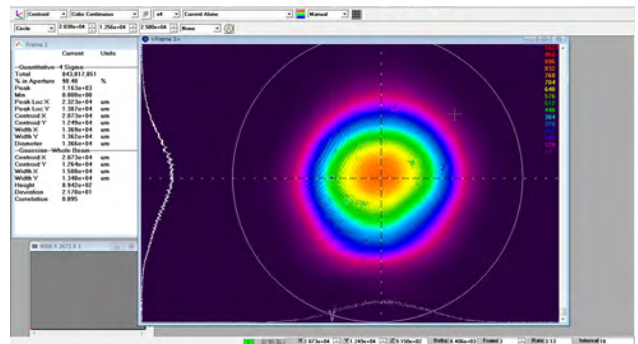


図7 入射器 A, B セクタ終端で得られたレーザー形状。全幅で15 mm 程度。

光源の現状

光源リングの運転状況

今年度前期の運転は、PF-AR 直接入射路工事に係わる停電により、PF-AR で4シフトの運転中断があったものの、PFリング、PF-AR ともに全体的に概ね順調に行われた。図1に、6月10日から6月28日までの蓄積電流値の推移を示す。PFリングは、6月入っても順調に運転が行われていたが、残念ながら運転停止の1日前6月27日未明にビームダンプが発生した。RF#4の高圧電源がOFFになったことによるビームダンプであった。IGBTの点検を

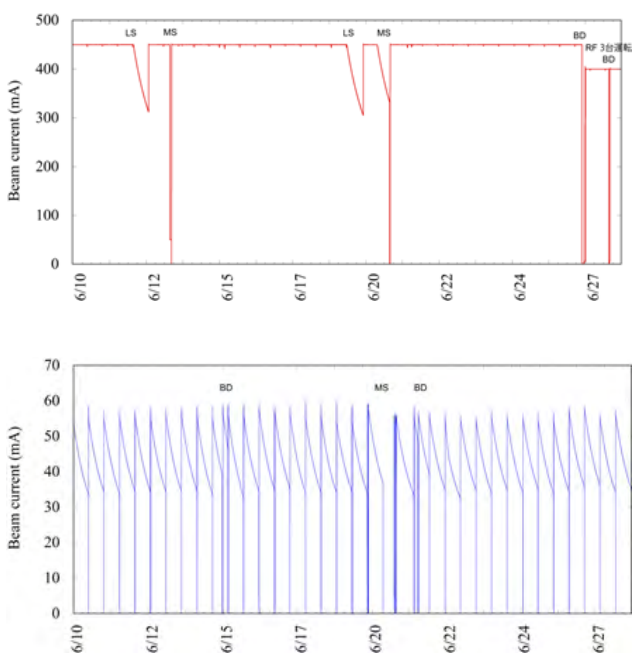


図1 PFリング(上)とPF-AR(下)の蓄積電流値の推移。BDはビームダンプ、MSはマシン調整、LSは入射器調整を示す。

加速器第七研究系研究主幹 小林 幸則

行ない異常がないことを確認したが、重故障のインターロックであることから、慎重に対応することとしてRF#4を運転から切り離し、3台運転で行うことにした。その日23時にもビームダンプが発生したが、これはRFセクションで真空が一時的に悪化したためであった。PF-ARも、6月に入って2回ビームダンプが発生した。6月15日のダンプは、AR東クライストロンのイオンポンプの放電電流がはね、保護のインターロックが働いて、クライストロンがダウンしたことによる。6月21日は、AR西の空洞の反射により発生したビームダンプであった。その他細かなトラブルもあったが、両リングともに、無事6月28日9:00に運転を停止して、夏の停止期間に入った。

夏の停止期間中の作業

今夏のPFリングにおける大きな作業の一つは、新ビー



図2 新ビームラインBL-15のアンジュレータの設置前(左上)と設置後(左下)と基幹チャンネルの設置前(右上)と設置後(左下)。



図3 富士実験棟前からAR南実験棟の方角を撮った光景。6月10日から直接入射路下流部から杭打ちが開始された。

ムライン BL-15 に関連する作業である。図2左図は、新しく真空封止型短周期アンジュレータが設置される B14-B15 間の短直線部の場所である。アンジュレータの磁場調整、真空調整が終了し、7月23日に所定の場所に設置、真空ダクトの接続を行った。また、リング壁内ビームライン基幹チャンネルの作業も同時に進められ、ビームシャッター、アップソーバー、マスク等ほとんどのコンポーネントを設置した(図2右図)。PF-ARでは、この夏にリングの4極電磁石電源15台の更新が行われる。7月中旬に既設電源の撤去が行われ、8月上旬に新電源15台が設置される予定である。

PF-AR 直接入射路トンネル建設関連

前号でも報告したように、6月10日よりPF-AR直接入射路トンネル建設工事が開始された。図3は、富士実験棟前からAR南実験棟の方角を撮った光景である。工事に伴って、PF地区へのアクセス道路(上流部)と富士実験室に通ずるKEKB周回道路(下流部)の通行止めが交互に発生する。通行止めの際は指示に従って迂回道路の使用をお願いする。前期運転は、上流部の通行止めは避けるよう工程を調整したが、後期運転では工事の都合上時々の通行止めは避けられない状況である。PFユーザの皆様、関係者の皆様には不便をおかけすることになりますが、御協力をよろしく願いたい。

放射光科学第一、第二研究系の現状

放射光科学第二研究系研究主幹 足立伸一

運転関係

PFおよびPF-ARの2013年度第1期(4月～6月)の運転が6月28日9時に無事終了しました。この間、5月23日にJ-PARCハドロン実験施設における事故が発生し、つくばキャンパスにおいても安全への取り組み強化や緊急時マニュアル確認などを重点的に行いました(後述)。

今年度の第2期については、SuperKEKBおよびPF-AR直接入射路関連工事のため、例年に比べて利用実験の開始が少々遅くなります。すでにWEB等でお知らせしておりますが、PFは10月21日、PF-ARは10月22日からそれぞれユーザー運転を開始し、12月20日に終了する予定です。また上記の夏期工事に伴う放射線変更申請の進捗状況によっては、10月のユーザー運転開始時期が予定より多少遅れる可能性もあり、現在進捗状況を随時確認しているところです。また第3期の暫定的な利用運転スケジュールとして、2014年1月中旬から2月下旬までの約1か月強を予定していますが、昨年度と同様、電力使用量と電気料金の推移を勘案しつつ、10月下旬にはビームタイムを確

定する予定です。

ここ数年のPFプロジェクト経費の削減に加えて、震災後の電気料金値上げの影響のため、今年度もユーザー運転時間を4000時間確保することが極めて難しい状況となっています。来年度の概算要求の中でPFプロジェクト経費の増額に向けた努力を行っておりますが、予算当局の説得のためには、ユーザーコミュニティからの総意を要望として取りまとめ、予算当局に訴えるとともに、PFを利用した研究成果を広く社会にアピールすることが極めて重要となります。ご協力をよろしくお願いいたします。

J-PARC 事故と安全意識の向上

すでに報道等でご存知のことと思いますが、5月23日に、KEKが日本原子力研究開発機構(JAEA)と共同で運営している大強度陽子加速器施設J-PARCのハドロン実験施設において、陽子ビーム取り出し装置の誤作動により、ビームが想定を超えた短時間に集中してターゲットに照射されるという事故が発生しました。その結果、放射性物質がビ

ーム取り出し装置から施設内に漏えいし、さらに、事故後に建物外壁の排風ファン稼働という措置を行ったため、放射性物質が施設外にも漏えいしました。また同施設内で作業中であった研究者等が内部被曝を受けたことが明らかになりました。

この事故を受けて、現在、つくばキャンパスにおいても安全への取り組み強化や緊急時マニュアル確認などについて重点的な取り組みを行っています。特に放射光科学第一、第二研究系では、PF および PF-AR 実験ホール内での事故等を未然に防ぐために、安全意識の向上や運転当番業務の強化などに取り組んでいるところです。放射光の光源加速器では、電子ビームの照射により放射性物質が発生するような事態は想定されませんが、ビームダンプやビームロスによって一時的に実験ホール内の特定の場所で放射線量が上昇することは想定されます。そのような場合には、放射線管理担当者が中心となって立ち入り禁止などの緊急措置を講じますので、ユーザーの皆様にはスタッフの指示に従って行動していただくようお願いいたします。また放射線量の上昇以外にも、火災や地震など、緊急時の対応が必要となる様々な事態が想定されます。これらの事態に対して、日頃から身の回りのリスクを理解し、緊急時への対応方法を確認しておくことが重要だと思います。特に実験ホール内では、漏電、加熱昇温装置の動作異常、液体窒素汲み出し時の酸素濃度低下など、大きな事故や火災につながりかねない「ヒヤリ・ハット」の事例が度々報告されています。これまで行ってきた共同利用実験をこれからも継続して行うためには、まず安全の確保が最重要な事項であることを、PF スタッフとともにユーザーの皆様にもぜひ再確認していただきますよう、改めてお願いいたします。

夏期作業

現在 PF および PF-AR は、約 3 か月間の夏期停止期間中に入っています。この期間中に大規模な建設工事がいくつか予定されており、その主な作業場所は PF の BL-15、BL-2、BL-6C、BL-10C、BL-13、BL-20B になります。

BL-15 は、短直線部に設置されるショートギャップ短周期アンジュレータを光源とする X 線ビームラインで、小角散乱と XAFS の実験ハッチがタンデムに設置されます。第 1 期のユーザー運転期間中にはすでに更地になっていたので、多くのユーザーの方が建設現場をご覧になっているのではないかと思います。現在は測量・ライン引き作業が終了し、引き続いて、ハッチ設置、光学系コンポーネント設置、ケーブル配線、ベーキング、インターロック設置等の作業が進行してゆきます。同時に PF リング内では短周期アンジュレータの設置が行われています。BL-2 は、長直線部に設置されたアンジュレータを光源とする軟 X 線ビームラインで、主に光電子分光ビームラインとして整備を進めています。こちらも第 1 期のユーザー運転期間中にはすでに更地になっていましたが、現在はケーブルラック等が設置され、光学系コンポーネント設置が進むとともに、徐々にビームラインの姿を現しつつあります。またこれ以

外の上記ビームライン・ステーションでは、主に光学系コンポーネントの変更や実験ハッチの増改築、新規実験装置の設置などの作業が予定されています。

PF-AR 直接入射路工事

PF-AR 関係では、入射器から PF-AR への直接入射路の建設工事が進んでおり、ユーザーの皆様には PF へのアクセス道路の通行規制等で大変ご迷惑をおかけしています。この PF-AR 直接入射路は、文字通り入射器から PF-AR への 6.5 GeV 直接入射を実現するための工事です。従来の PF-AR 入射路では PF-AR に一旦 3 GeV で入射してから 6.5 GeV に加速しているため、どうしても PF の連続入射を停止して PF-AR に 1 日 2 回入射するという運用になっていますが、この PF-AR 直接入射路が完成した際には、PF の連続入射を停止することなく、PF-AR への入射が可能になる予定です。また将来 SuperKEKB の運転が開始した際にも、SuperKEKB への入射を妨げることなく、PF および PF-AR への入射が実現します。このような複数リング同時入射を実現するためには、入射器側の高度なマシンスタディーが必要となるため、特に来年度には入射器のマシンスタディーを優先的に行えるよう予定を検討しています。今年度は入射路を設置するためのトンネル工事が年度末まで続くため、PF および PF-AR へのアクセス道路の一部が長期にわたって通行止めになります。今年度工事期間中のある時期には、いつもお使いいただいている PF 前のヘアピン道路が全面通行止めになり、富士実験棟側に遠回りして PF の裏側にアクセスしていただくこととなります。工事に伴う交通規制の情報は、PF ホームページにて随時更新しておりますので、来所の際にはぜひ事前にご確認ください。

人事関係

これまで PF におけるロボティクス導入の牽引役として、主に構造生物学研究センターの自動結晶化装置や構造生物学ビームラインの結晶自動交換ロボットの開発を担当されてきた研究機関講師の平木雅彦さんが、6 月 16 日付で共通基盤研究施設の機械工学センターに准教授として異動されました。今後、平木さんの守備範囲は、放射光だけでなく KEK 全体へと拡大することになりますが、放射光実験におけるロボティクスの導入にも引き続きご協力いただけることを願っています。

KEK-北大連携に関わる共同研究研究員の上村洋平さんが、分子科学研究所の助教として転出されました。また特別共同利用研究員として、新たに広島大学の菅 大暉さん、東京大学の石上啓介さんが PF の所属メンバーとして加わりました。

はじめに

5月から7月の間に、cERLの現場では入射部のビーム運転が開始され、無事に放射線の施設検査を合格し、数々の電子ビーム調整を含めたマシンスタディが行われました。これらの地道な開発研究は、必ず、実機の3 GeV-ERLに結びついていくものです。現場の加速器研究者はそのような高い使命感を以て開発研究を進めています。今後、流動的な状況に入って行くことが予想されますが、ユーザーの皆様から一丸となって開発を進めようとしているメンバーに、その開発を続行する勇気と力を与えて頂ければと思います。

cERLの運転、そしてまた建設へ

cERLでは、冒頭に述べましたように5月23日の放射線施設検査に無事に合格し (<http://imss.kek.jp/news/2013/topics/0529cERL/index.html>)、その試験運転を6月末まで行いました。試験運転では、各部のより詳細な性能テスト(電子銃、励起レーザー、入射部空洞、RF源、バンチャー空洞)や、バンチ電荷を増大したときの電子ビームのエミッタンス測定等のマシンスタディを行い、8月に行われた加速器学会でそれらの成果報告を行っています。それらの成果を記載することは困難ですが、当面のコミッショニング目標としている10 mA電流相当に対応するバンチ電荷(7.7 pC/バンチ)で電子ビームのエミッタンス1 μmrad 以下の値(具体的には0.6 μmrad)を6月最終週に調整(確認)できたことを記しておきたいと思います。

7月に入り、周回部の建設作業が早速開始されています。入射部運転のために電子ビーム評価ビームラインに導いていた交差部のダクトや、昨年12月に行った主加速部超伝導空洞の上下流に設置されていたシールドブロックは早々に取り除かれ(図1)、周回部の真空ダクト、電磁石を設



図1 7月からの作業で交差部のダクトが早々に取り外された現場。



図2 8月からの作業で設置を待つマグネットの架台(上)と真空ダクトの部品(下)。

置するための現場測量とケガキ作業が現在行なっています。8月にはマグネット設置のためのベースプレートのアライメントと設置を行い、一般公開前にマグネットを設置する予定です。そして、9月中旬から10月中旬の期間に、マグネットに真空ダクト、モニター等の設置作業及びベーキングを行い、その後、ビームダンプ、放射線シールド、インターロック作業を行い11月中旬には自主検査を含めて周回部建設作業を完了するスケジュールですめています。図2はそれぞれ設置を待つマグネットの架台と真空ダクト関係部品です。

また、コンパクトERLを用いた利用研究に関して、2011年度からJAEAとの協力のもと進めてきている「レーザーコンプトン散乱 γ 線源利用核共鳴蛍光非破壊測定実証試験」のレーザー逆コンプトン散乱ビームラインがいよいよ来年度建設されるにあたり、その安全システムの構築に向けてのキックオフミーティングを開始しました。また、このプロジェクトは来年度までの予算措置でしたが、その

後の利用研究の展開として、レーザー逆コンプトン散乱X線線をベースにした「小型加速器による小型高輝度X線源とイメージング基礎技術開発」プロジェクトがKEKの浦川順治氏によって、またコヒーレントTHzビームラインをベースにした「レーザー・放射光融合による光エネルギー変換機構の解明」プロジェクトがKEKの足立伸一氏によって、それぞれ文科省の「光・量子連携研究開発プログラム」として採択されました。2013年8月から2017年度までの5カ年プロジェクトであり、確実にcERLを立ち上げて、これらの利用研究が確実に成果を生み出せるようにcERLの性能向上に努めていく所存です。

ERL計画の対内外の活動

6月1日の日本放射光学会主催の「放射光光源将来計画討論会」では、3月末に提出された放射光科学のマスタープランやKEKロードマップの議論を踏まえて、村上施設長から「KEKは高輝度3 GeV蓄積リング型光源の実現に、オールジャパンの体制の中で、先導的な役割を果たすことと、ERLの加速器技術開発を継続的に行う」旨の表明は冒頭にありました。一方、私からは、3 GeV-ERL計画は「回折限界放射光の実現に向けてR&Dを継続し、2017年度末に詳細設計に匹敵するテクニカルデザインレポート(TDR)をまとめ、その技術レベルを確立すること」を報告しました。その報告に対して、「長年に渡り、実現時期が遅れてきていること、技術レベルに関してどこまで確実にできることなのか正しく発信すべき」等のご批判を頂きました。そのご批判に少しでも答えるべく、6月10日のERL計画推進委員会 (http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/suishin/7th_suishinindex.html) で、ERLの開発現状そして今後の方針とスケジュールに関して議論の場を持ちました(図3)。アジェンダの概要は以下の通りです。関係スライドは上記のURLのサイトを参照下さい。

- (1) 機構長挨拶
- (2) cERLの進捗状況報告
- (3) 2014年度からのR&D項目と利用研究
- (4) 放射光施設の最近の展開
- (5) 総合討論



図3 6月10日に行われたERL計画推進委員会での議論の様子。

初めに、(1) 鈴木機構長から、J-PARCの事故の経緯とその背後にある安全に関する心構えに関して総点検を機構長のリーダーシップで行っている旨の報告と、KEKロードマップを作成していくプロセスにおいて最近の放射光コミュニティの動向とERL計画の位置付けに関するコメントを頂きました。(2) cERLの進捗状況報告は、坂中、西森、加古、古屋、中村各位からそれぞれ全体状況とコミッションング、高輝度電子銃、入射部超伝導空洞、主加速部超伝導空洞、周回部に関して現状と今後の展開の説明を頂いた。(3) 2014年度からのR&D項目と利用研究では、河田、羽島、足立各位から、全体計画、レーザー逆コンプトン散乱ビームライン、THz・CSRビームラインに関して今後の整備計画が提案されました。全体計画として、cERLの運転を行いながら、実機に必要な開発項目である、高輝度電子銃の大電流化(100 mA目標)、及び4連超伝導空洞クライオモジュール試作によるフィールドエミッションフリー化の目処を立てると同時に、両者をcERLに導入し利用研究の高度化に使用し、2017年度末に3 GeV-ERLの技術要素を固め、TDRを作成すると言うものです。(4) 放射光施設の最近の展開は、村上放射光科学施設長から、最近の放射光科学のマスタープラン、KEKロードマップにおけるコミュニティからの意見を受けて、「1) KEKはコミュニティが要望する3 eV高輝度蓄積リング計画の実現に向けて、All Japan体制の中で先導的な役割を果たす。2) KEKは、ERLの加速器技術開発を継続的に行う。」と言うメッセージが示されました。総合討論では、「5 GeV-ERL計画から3 GeV-ERL計画に3年前に変更されたが、その経緯と理由に関して再度吟味をすべき」とか、「SPRING-8II計画と、ERL計画はマスタープランでは、同じ回折限界光と言うまとめとなっているが、質的に違うところがあり、その部分を利用研究を含めて検討すべき」との貴重なコメントを頂きました。そして、ERLに関する今後の進め方に関して一定の理解をいただけたことは今後の開発に向けて勇気を頂いた次第です。