皆さんは、〈PF-UA 会長からのお知らせ〉のチラシをご 覧になったでしょうか? PF 研究会「開発研究多機能ビー ムラインの建設と利用」の開催にあたって、2 ビーム利用 サイエンスのアイディアを募集する内容で、PF 研究棟か ら実験ホールに向かう1 階廊下にある PF-UA の掲示板に 貼られています。PF 研究会の準備の相談の際に、「会長か ら各ユーザーグループに検討の依頼をするけれども、義務 としてではなく、アイディアを実現できるビームラインを 建設できる好機ととらえて、ワクワクした気持ちで検討し てほしい」とおっしゃっていましたが、熱意に満ちたチラ シを共同利用実験の合間に作成・掲示してくださいました。

前回の『施設だより』(2022 年 5 月号) では, KEK の新 プロジェクトの提案に対する KEK 国際諮問委員会の答申 を紹介しましたが, 答申を受けて 6 月 24 日に KEK 研究 実施計画(KEK-PIP) 2022 が策定されました。新プロジ ェクトは, Category I (A Project to Be Implemented by KEK) と Category II (Projects to Make New Budget Requests) に分 類され, 新放射光源施設に向けた開発研究の提案が唯一, Category I に選定されています。

R&D for New Light Source Facility

This R&D should be conducted as a high-priority program at KEK. Technology development and preparation for construction will be carried out in the six years of this PIP, and it is expected that actual construction will be realized in the next PIP period. (KEK-PIP2022 より抜粋)

現在,新放射光源施設の計画を各所に説明するための資料を作成していますが,最も強調すべき点は,研究者の探求心を駆り立てるハードウエアの必要性・重要性であると考えています。放射光科学の黎明期である1980年代には,実験室のX線源に比べて数桁も輝度が高く波長選択の可能な放射光を手に入れること,それ自体が大いに研究者の探求心を刺激して,スタッフとユーザーの区別もなく,ビームラインの建設と利用が進められたと聞いています。結果として,フォトンファクトリーは世界屈指の開発研究の場となり,技術の開発のみならず,人材の育成,成果の創出など,あらゆる面で世界を先導して,国内外の第二世代・第三世代放射光源の建設ラッシュに大きく貢献しました。

新放射光源施設の有力な候補として検討を進めているの が、ハイブリッドリングです。世界に先駆けて推進する放 射光マルチビーム利用では、異なる空間スケール・時間ス ケール・波長特性をもつ複数ビームを組み合わせた独創的 な実験が可能であり、放射光科学を質的に転換する大きな 可能性を有しています。ハイブリッドリングでは、主に2 プローブ測定とポンプ&プローブ測定が想定されていま す。2プローブ測定では、同時に2種類の手法による計測 や2元素に着目した計測を行うことにより、物質中で起こ る2つの現象の相関を知ることができます。また,時空間 構造の異なる2ビームを使い分けることで,異なる時空間 スケールの現象の同時計測が可能になります。ポンプ&プ ローブ測定では,放射光のビーム特性を活かした励起を行 うことで,過渡的な反応や光で誘起される相転移などの解 明・制御に繋がる計測が可能になります。

研究者の探求心を駆り立てるハイブリッドリングが実現 すれば、世界の放射光科学にマルチビームという新しい潮 流を生みだし、日本の研究力の復活に大きく貢献できると 考えています。2019 年の放射光実験施設の再組織化の際 に開催した記念講演会 PF REBORN 2019 では、放射光科 学の第二黎明期という言葉を象徴的に用いましたが、それ が具体化してきていることになります。複数ビームを組み 合わせたビームラインの建設と利用は、既存設備を有効に 活用することで進められる連携よりも効果的に分野・手法 の融合を促進して、新分野・新手法を創成するものと期待 されます。ハイブリッドリングは放射光マルチビームによ る新分野・新手法の開発研究の場となり、放射光科学の新 時代を開拓することでしょう。

開発研究多機能ビームラインは、ハイブリッドリングの 実現に向けた開発研究の場として PF に建設されます。こ のビームラインでの測定は、ハイブリッドリングでの測定 に比べると大きく制限されますが、それでも、これまでに ないサイエンスが展開されるに違いありません。状況次第 では、2 ビーム利用サイエンスを推進するためのビームラ インを、PF もしくは PF-AR に、このビームラインの他に も追加で建設することを検討します。

冒頭で紹介した PF-UA 会長の発言に戻りたいと思いま す。新放射光源施設の計画の推進は放射光実験施設長とし ての責務です。しかしながら,自分自身が探求心を駆り立 てられ,是非とも実現させたいと思うからこそ,とても楽 しく取り組むことができているわけです。施設内部での検 討を進めるにあたっては,KEK における計画の位置づけ が確固たるものになるのに合わせ,直接的に関与するスタ ッフの範囲を拡げました。それにより,2ビーム利用サイ エンスの議論は当初の想像を超えてきています。ユーザー の皆さんにも,是非この機会に,どのような挑戦が可能に なるか検討してもらえたらと思っています。

日本学術会議が3年毎に募集してきた「学術の大型研究 計画に関するマスタープラン」は終了となり、代わって「学 術の中長期研究戦略」の募集が行われています。この募集 には、マルチビームをキーワードとして含む量子ビーム科 学のビジョンと新放射光源施設を中心とした施設計画を、 KEK-PIP 2022を踏まえ、機構長から提案する準備を進め ています。PFの施設計画が KEK から日本学術会議に提案 されれば初めてのことであり、これも計画の実現に向けた 重要な一歩になると考えています。

入射器の現状

運転状況

PFリング, PF-ARのトップアップビーム入射によるユ ーザー運転に関して, PF-ARは7月1日に運転終了, PF リングは7月8日に運転を終了した。SuperKEKBは電力 制限のため,6月22日にメインリングの運転を停止した。 7月8日から入射器スタディと機器データ取りを行い,7 月12日に入射器の運転を終えた。7月12日より9月15 日まで夏期保守期間となり,定例の機器メンテナンスと一 部機器のアップグレードを行なった。9月16日より入射 器の運転を開始,現在はPFリングとPF-ARへのビーム入 射に向けた調整運転を行なっている。SuperKEKBは長期 改修期間(LS1)に入り,来年の秋まで運転を行わない。

加速電界増強ユニット

加速管アップグレード計画の一つであるビームエネルギ ー増強ユニットの構築として、AC_44 ユニットを図1の 加速管4本駆動システムから加速管2本駆動システムに改 造した。このユニットには新型Sバンド加速管が昨年設 置されており、今回の改造によって従来の2倍のRFパワ ーとなる80 MW 駆動が可能となり、約1.4倍の加速電圧 増強となる。そのため、クライストロンとパルス圧縮器の 増設と導波管立体回路の改造を行なった。新設のパルス圧



図1 AC_44 ユニット増強改造

加速器第五研究系研究主幹 惠郷博文 (2022 年 10 月 3 日付け)

縮器は、従来の SLED タイプではなく、新たに開発を進め てきた新基軸の球形空洞型パルス圧縮器(Spherical-Cavitytype Pulse Compressor: SCPC)である(関連記事 PF ニュー ス 40-1 号)。量産型実機初号器であり、事前に高電力コ ンディショニングを行なって動作確認をした圧縮器であ る。SCPC は図 2 に示すように SLED とは大幅に異なる構 造を持つ。SLED は 2 つの共振空洞を要するのに対して、 SCPC は 1 つの球型共振空洞から成り、この球形空洞は高 い無負荷 Q 値を持つ TE₁₁₂ モードで共振する。表 1 に高 周波性能を示す。運転条件を考慮して高周波特性は KEK-SLED と同じ値になるように設計している。SLED では 2





図2 パルス圧縮器新旧比較(上:現行 SLED 下:新型 SCPC)

表1 SCPC 高周波特性

周波数 [MHz]	2856
無負荷 Q	100,000
ß	6.4
ピークパワー圧縮率	6.2
空洞共振モード	Spherical TE ₁₁₂

空洞への RF パワー振り分けに 3 dB ハイブリッドを用い るが,SCPC は 3 ポート導波管偏極器で球形空洞に RF パ ワーを供給する。入口の矩形 TE₁₁ モード高周波は円偏向 TE₁₁ モードに変換されて球形空洞内に回転する TE₁₁₂ モー ドを励起する。この回転状態は,偏向面が直交し,位相が 90°異なる 2 つの TE₁₁₂ モードの縮退状態の励起と見なす ことができ,あたかも 2 空洞あるかのような動作をする。 改造を行った AC_44 ユニットは高電力試運転と周波数調 整を行なって,今後ビーム運転へ供与していく。

ビーム研究

入射器には J-arc と呼ばれている半円(180° 偏向アー ク)のビームトランスポート部がある(図3)。これは, KEKB 計画用入射器としてエネルギーを 8 GeV に増強す る際,必要量の増設加速管を収容する A, B, C セクター 建設に伴って設けられたものである。この J-arc は, A, B セクターで生成された 1.5 GeV 電子ビームの質を低下させ ないように Achromatic (横方向エミッタンス保存: R₁₆=0, R₂₆=0) かつ Isochronous (ビームのバンチ長保存: R₅₆=0) の条件を満たすように建設された。しかし、SuperKEKB では,加速管のウェイク場による横方向エミッタンスの 劣化を防ぐため、バンチ長を4psまで短くする。そのた め、J-arc の Isochronous 状態を破り、B セクターの加速管 を用いてバンチ内エネルギー広がりを大きくし, 且つ, R₅₆=0.3 m としてバンチ長圧縮運転を行なっている。最近 の SuperKEKB へのビーム入射状況解析から,入射路 (Beam transport, BT) で観測されるビームエミッタンス劣化は, J-arc 内バンチ長圧 縮時の Coherent synchrotron radiation (CSR)発生が原因である可能性が示唆されている。CSR 効果は R₅₆ 設定値にも依存するので、シミュレーション解 析とビームスタディを進めながらビーム入射に最適なバン チ長圧縮条件と運転パラメータを求めていく。参考として 入射器スタディで R₅₆の値を 0.3 m から 0 m に変更した時 の規格化エミッタンスの変化を図4に示す。この変更によ り HER ビームのエミッタンスが変化し、PF リングへのビ ームエミッタンスは改善される様子がわかる。





図 4 HER-BT と PF-BT におけるビーム規格化エミッタンスの比較(PF-BT データ提供:下崎義人氏) 赤矢印:J-arc R₅₆変更(0.3 m→0 m)

光源リング運転状況

今年度も夏期の停止期間中に,各種装置の定期的な点 検保守を行ないながら, PF リングおよび PF-AR 両リング において改造作業を行った。PF リングにおいては,BL-12 基幹チャンネルの改造を実施するとともに,リング側のク ロッチアブソーバーを交換した。また,入射路のプロファ イルモニターの蛍光板をアルミナ蛍光板(デマルケスト) から YAG 蛍光板に全数交換した。PF-AR においては,5 GeV 運転時にも連続入射によるトップアップ運転(「本」 トップアップ運転)ができるように,入射路の改造作業を 実施した(次節で詳細を記述する)。

図1に, PF リングにおける立ち上げ日 10 月 4 日 9:00 ~ 10 月 25 日 9:00 までの蓄積電流値の推移を示す。立ち 上げ調整は,順調に行われた。リングの真空度を確認しな がら,徐々に電流値を上げていき,初日に 450 mA に到達 し,真空光焼きだしとなった。2 日目以降の調整も順調で, 予定されていたスケジュール通り,10 月 7 日 9:00 からの 光軸確認後ユーザー運転が開始された。

しばらく安定な運転が実施されていたが,10月16日 9:00~9:18に軌道フィードバック用補正電磁石電源の電流 値が最大電流値に近づいたため、チャンネルを閉じユーザ ー運転を中断して、リセット作業を実施した。

10月19日11:02に、軌道フィードバック用補正電磁石

設定値過大エラーが発生し、一時的に停止した。しかし、 軌道が大きく変動している様子はなかったため、12:00ま で待ってからユーザー運転を中断して復旧作業を行った。 作業は、チャンネル閉→フィードバック OFF → COD 補正 →フィードバック ON という手順をふみ、問題なく復旧し たことからユーザー運転を再開した。このトラブルはめっ たに発生しないトラブルで原因は不明だが、ビーム位置モ ニター(BPM)の読み値に一瞬異常な値が入ってしまっ たためと推測される。現時点まで様子を見ている状況であ るが、再発はしていない。

10月20日0:46に入射路偏向電磁石電源(BTBM)の制 御に使用している CAMAC のレジスタが故障し,BTBM が突然オフとなった。トップアップモードであったため, インターロックが動作してチャンネル閉となった。原因は 制御に使用している CAMAC モジュールのレジスタが故 障したためであった。そこで BTBM 電源を現場で立ち上 げ直して,ビーム入射を開始し,2:01 にユーザー運転を再 開した。10月27日のマシン調整日に故障した CAMAC モ ジュールの交換作業を行う予定である。

10月21日1:37から30分程度,5:47から10分程度,垂 直方向のビーム不安定性が発生し,垂直方向のビームサイ ズが通常の2~3倍になっていた。しかしながら,しばら くして自然にビーム不安定性は収まった。後日原因調査を



行ったところ、U#15のギャップが 4.3 mm の時に同期して, 不安定性が発生していたようであるが, ギャップに同期し ていたのはこの時のみであった。これ以前や以後にギャッ プを 4.3 mm にしていた時もあったが, 必ずビーム不安定 性が発生しているわけではないようである。現時点では原 因は不明であるが,引き続き注意して観測を行っていく。

10月21日12:32にチャンネルダンプが発生した。トレ ンチにおいて BL-5のレギュレータ圧空漏れがあったが, ユーザー側からの希望もあり,昼休みに圧空の一次側を止 めて対処を行おうとした。しかしながら,MBSが閉まっ た際にレギュレータ内に残っていた圧力が足らず,バルブ が規定時間内に閉まりきらなかった。そのため,インター ロックが動作してビームダンプとなってしまった。最初か ら BL-5 だけチャンネルを閉じて作業を行っていればビー ムダンプを防げたトラブルであることから,今後はそのよ うに対処することとした。

10月22日以降,1シフトに1~2回の頻度で100μmを 超えるような比較的大きな水平方向の軌道変動が起きはじ めた。未だに原因不明の変動であるが,継続して調査を行っている。

図 2 に, PF-AR における立ち上げ日 10 月 12 日 9:00 ~ 10 月 25 日 9:00 までの蓄積電流値の推移を示す。10 月 12 日に 5 GeV で立ち上げを行った。9:00 からパトロー ル, 9:50 から入射に関わる総合動作試験 1 項目を実施し, 10:00 ごろよりビーム調整を開始した。PF-AR も立ち上げ 調整は順調に実施され, 10 月 17 日 9:00 からの光軸確認後 にユーザー運転が開始された。

10月20日8:36に, 偏向電磁石 B_SE02の流量インター

ロックが動作して,ビームダンプとなった。リングトンネ ル内に入域し確認したが特に異常はなかった。インターロ ックはリセットが効いたことから,誤動作と判断し,再立 ち上げを行ってユーザー運転を再開した。

5 GeV エネルギートップアップ運転実現へ向けた改造計画

PF-AR でのフルエネルギートップアップの運用は、 Linac からリングへの電子輸送路である直接入射路の完成 をもって 2017 年に開始された。この直接入射路はビーム エネルギー 6.5 GeV の単一エネルギービームの輸送に最 適化されている。2018年以降年々削減されてきた運転経 費に対応するため、5 GeV にビームエネルギーを下げた 運転モードの確立が加速器側へ要請された。2018年から 5 GeV 運転モードが試行され、2019 年には 5 GeV 運転モ ードと 6.5 GeV 運転モードとを、およそ半分ずつの期間で 実施することとなった。しかし、直接入射路は5 GeV 運 転期間中は、PF リングとのビームを打ち分けて共有する 「本」トップアップ入射ができないという状態になる。そ こで、新たに考案した「疑似」トップアップ入射による蓄 積電流値の維持が行われている。疑似トップアップ運転と は、PFリング、PF-ARに対して2分30秒と1分30秒の それぞれのオンデマンド入射の時間猶予を与えて、その時 間内は固定のリングへの入射を継続するものである。これ により各リングでの蓄積電流値は 0.4 mA 以下の変動幅で 維持することが可能となる。この時間猶予は、PF リング と PF-AR へのビーム振り分けの共通パルスベンド (PB) および PF 輸送路 (PF-BT) と AR の輸送路 (AR-BT) が 交叉する共通 DC ベンド (BPFS) の偏向角切り替えと





図3 Linac 第3スイッチヤード内の PF-AR および PF 電子ビーム輸送路

Linac でのエネルギー補正フィードバックに要する時間と なっている。図3に複雑に輸送路が交叉するLinac 第3ス イッチヤード (SY)の PF-BT 及び AR-BT の配置図を示す。 直接入射路建設時に狭小な空間条件で輸送路を交叉させな がら配置する必要があったことから、単一エネルギー輸送 の条件となっている。

疑似トップアップ運転によって, 蓄積電流値が放射光供 給に問題とならない程度に維持はできるが、実際にはいく つかの問題が露呈している。1つ目は, 5 GeV エネルギー 運転では、疑似トップアップ運転でも蓄積電流値の損失の 補充が間に合う十分なビーム寿命の運転モードが PF リン グ側に求められるため、PF-ARが5 GeV エネルギー運転 の時には PF リングではマルチフィリングモードでの運転 の必要があり, 運転モードに対するスケジュール管理に足 枷があることである。2つ目は、PF-AR 側で常時連続にビ ーム入射が必要となる運転立ち上げ調整期間,マシンスタ ディ期間は PF リング側では通常のユーザー運転モードで あるため、トップアップ運転ができないことから、4時間 ごとの定時入射による蓄積モード(蓄積電流値がビーム寿 命通り減少していくモード)での運転が必要となる。した がって, 放射光ユーザーにとっては貴重な放射光実験時 間中に継続した定量の放射光供給を受けられないという 問題である。3つ目は、これが最も大きな問題であるが、 PF-AR の多角利用の測定器開発テストビームライン計画. そして高度化利用の低エミッタンス計画のいずれもが、原 理上ビーム寿命が短くなる運転計画であるため、5 GeVエ ネルギー運転においても本トップアップ運転が計画の成立 条件として必須なことである。これらの問題は、5 GeV ビ ームエネルギー導入計画の要請があった当初より判明して いた内容であり、2019年の5 GeV ビームエネルギー運用 計画の立案と並行して、本トップアップ運転実現へ向けた 輸送路改造計画立案の作業部会が立ち上げられ検討が開始 されていた。

2019 年から 2020 年にかけて,輸送路改造案を 2 つの案 にまとめた。第1案は,費用はかかるが改造範囲が限定的 さらに運用が容易で,ボトルネックのエネルギー(偏向角) が固定となっている共通 DC ベンドをパルスベンド,また

はその DC ベンドをはさみパルスキッカーでサンドイッ チする方法を採用する。これにより、5 GeV へとビームエ ネルギーが低下し生まれる余剰角分を、PF リングおよび PF-AR ヘバンチ毎に打ち分ける案である。第2案は,費 用を抑制し,割安な機器の組み合わせで進める方法である。 やはりボトルネックの共通 DC ベンドを中心に、6.5 GeV 時には運用せずに、5 GeV 時にのみ DC 的に余剰角を補正 する偏向電磁石をいずれかの輸送路に導入する。さらに, 余剰角で生まれる軌道のふくらみを、真空ダクトの拡幅改 造で吸収しながら軌道が大きくふくらまない位置で補正を かけていく案である。これらの検討案について十分な議論 を行い、最終的にビームエネルギーが低く余剰角を補正し やすい PF ビーム輸送路に導入し,3台の補正偏向電磁石 と拡幅ダクトを用いた余剰角補正を用いる案を採用するこ ととした。PF-AR の5 GeV 対応に向けた改造であるにも かかわらず、PF リング用輸送路の改造となるためやや複 雑であるが、改造後の運転調整において、PFとPF-ARの 輸送路いずれにおいても、同時に本トップアップのための 余剰角補正量を最小限に抑える輸送光学系の調整が行われ ることとなる。共通パルスベンドに対しては、肩乗せ法と いう PF-AR 用 5 GeV のビームをバンチ毎に打ち分けるた めの運用方法が考案された。共通パルスベンドの出力励磁 波形は正弦半波波形であるので,通常の 6.5 GeV であるな らばその頂点の最大出力点でビームをパルス的に偏向すれ ばよい。しかしながら、バンチ毎にショットバイショット で3000 A 近くの出力電流のビームエネルギー毎に制御す ることは困難であるため、ミリ秒オーダーで制御が可能な デジタルタイミングシステムを利用することで、ビームと 出力電流とのタイミングをわずかにずらし、正規の頂点の タイミングからエネルギー減少分の波高となる波形の立ち 上がり部分のタイミングに合わせ仮想的に波高を変えたよ うに見せる方法をとる。これにより、無理なく 6.5 GeV と 異なるビームエネルギーでも対応が可能で、その方法によ る誤差は電流ピーク点での安定度10-3のレベルと同等で ある。

2021年に本改造計画の具体化へ向けた予算化が進み, 2022年度夏の長期加速器停止期間での改造工事に向けた



図4 Linac 第3スイッチヤード機器再配置と余剰角補正偏向電磁石の追加



図5 拡幅真空ダクトの設計と余剰角補正偏向電磁石の設計

工程の検討,機器配置設計,機器の設計,製作,調達が進 められた。改造による機器配置を図4に示す。BPFS下流 より真空ダクトの拡幅をするため拡幅ダクトに入れ替えら れる。PF-ARビームダクトとの干渉を避けるために余剰 角補正用偏向電磁石は小型にする必要がある。狭小ギャッ プにすることで強い偏向角を可能にし,それにともない拡 幅ダクトは扁平に製作される(図5)。そのダクト拡幅範 囲のBPFS直下流より3台の偏向電磁石(HD1D,HD1A, HD1B)を置くため,既設の機器はすべてが撤去,下流側 へ移設される設計となっている。2021年度内に,水冷偏 向電磁石,電磁石電源,電源格納ラック,電磁石付帯設備 (冷却配管,ケーブル,電力盤),真空ダクト群,電磁石架台, 機器移設用架台群の調達を行ない,2022年度夏期停止期 間中に改造・設置作業を完了した。10月4日より開始された第2期の運転期間中にPF-ARが5GeVモードでも「本」 トップアップ運転が実現するようコミッショニングを行う 予定となっている。

放射光実験施設の現状

前号の『放射光実験施設の現状』でご紹介した PF 研究 会「開発研究多機能ビームラインの建設と利用」ですが, 二回の会期に分けて開催することとして、主に施設側から のビームラインの検討状況を説明する第1回を11月6日 にオンラインで開催しました。主に利用者側からのサイエ ンスの提案を受ける第2回は、2023年1月5日~6日の2 日間の予定で, KEK つくばキャンパス・小林ホールとオ ンラインのハイブリッドで開催する予定です。第1回は日 曜日の開催でしたが、200名を超える参加登録があり、10 時 15 分の開始から予定時刻を超えた 16 時 30 分の終了ま で,常時140名ぐらいの接続がありました。PFだけでなく, UVSORやHiSORからの発表やPF-UAからの発表もあり、 活発な議論が行われました。技術面において2ビーム利用 は簡単ではありませんが,皆さんとの意見交換を通じて, その将来性について更に自信を深めることができました。 本号の『施設だより』でも述べましたが、2 ビーム利用に よってどのような挑戦が可能になるか、是非この機会に考 えていただき、第2回にご参加ください。

夏期の運転停止期間に予定していた BL-12 基幹部と BL-12C の改造工事については,無事に完了しました。BL-12C は,BL-13 側に 5.5 mrad 移設され,第 2 期運転開始時 の 1 週間の立ち上げ期間を経て,共同利用実験を再開し ています。前号で,開発研究多機能ビームライン(新 BL-11A,-11B)と広波長域軟X線ビームライン(仮称;新 BL-12A)の構成や仕様,工事の様子を担当者に協力してもら って紹介していきたいと述べましたが,先行して整備する 新 BL-12A の仕様が確定して本格的な工事が進んでいると 想定される 2023 年 5 月号からとさせていただきたいと思 います。

PF研究棟の1階廊下に3台のモニタを設置しました。 実験施設として推進している PF-S 課題や PF-PAC の S 型 課題(特別)などのポスターを掲示して,その成果や状況 をお知らせすることが主目的ですが, PF や PF-UA からの お知らせにも利用します。現在, PF 研究会と PF-UA 論文 賞の案内を掲示しています。また,共同利用係の協力によ り,リモート会議等に使える個室を整備しました。7 部屋 あり,Web から予約して利用することが可能です。有効 にご活用ください。

運転・共同利用関係

2022 年 度 第 2 期 の 運 転 で す が, PF は 10 月 4 日 に, PF-AR は 10 月 12 日に 開始しました。PF のハイブリッ ドモードは 12 月 2 日から 12 月 26 日を予定しています。 PF-AR は 5 GeV で運転を開始して,11 月 11 日から 12 月 5 日まで 6.5 GeV で運転を行います。第 3 期の運転ですが, 残念ながら,見通しが立っていない状況に変化はありませ

放射光実験施設長 船守展正 (2022 年 11 月 7 日付け)

ん。また,今年度だけでなく,来年度以降の運転について も,厳しい状況が継続する可能性が高いことを想定しなけ ればならないと考えています。長期的な視点に立って,最 低限の年間運転時間を確保し,それを有効に活用していた だくことを考えたいと思います。ご協力をよろしくお願い いたします。

PF-PAC の全体会議が9月7日に Web 会議方式で開催され、一定の条件の下、G 型課題(一般)への博士後期課程 学生の申請を認めることを決定しました。これにともなって、T 型課題(大学院生奨励)については、本来の趣旨に 立ち返り、申請資格を明確化しました。その他、レフェリ ーによる総合評価廃止の影響などについて協議されまし た。詳細については、本誌記事をご参照ください。

人事異動

最後に,放射光実験施設に関する人事異動を報告します。 9月1日付で,亀沢知夏さんが測定装置部門,X線光学・ イメージンググループの特別助教に着任しました。総合研 究大学院大学出身で博士研究員からの異動ですが,大学院 生時代から,東北大学やマサチューセッツ総合病院(ハー バード大学関連の病院)に長期滞在するなど,外部での研 究活動の経験も豊富です。また,11月1日付で,加世田 薫さんが PF 事務室に着任しました。英語対応なども担当 してもらいます。

はじめに

放射光科学第一,第二研究系は,放射光を始めとする量 子ビームを駆使して,先端的な物質・生命研究を行うこと を主なミッションとしています。今回は,それらの研究の うち,表面科学研究部門のメンバーが中心になって実施し ているものをいくつか紹介します。放射光科学第一研究系 のもう一つの研究部門である固体物理学研究部門について は,2023年度第1号で紹介する予定です。

深さ分解 XAS/XMCD による磁性薄膜の表面・界面の観察

PFにおいて開発した軟X線領域の深さ分解XAS(XAFS) /XMCD 法は、X線吸収強度に比例して放出される Auger 電子や蛍光X線を角度分解して検出することによって、薄 膜等の表面付近の化学状態、磁気状態の深さ方向の分布 を, ナノメートルを切る深さ分解能で元素選択的に観察 できる強力な手法です。特に最近、従来の電子収量法に 加えて蛍光収量法を導入し,磁場・電場中での深さ分解 XAS/XMCD 法を実現したことにより [M. Sakamaki and K. Amemiya, Rev. Sci. Instrum. 88, 083901 (2017), K. Amemiya and K. Sakata, Phys. Rev. B 106, 134424 (2022)], いわゆるス ピントロニクス材料の研究者を巻き込んだ研究が大きく 広がっています。最近の研究例としては、グラフェンと FePd 合金の界面における磁気異方性の観察 [H. Naganuma et al., ACS Nano 16, 4139 (2022), https://www.kek.jp/wpcontent/uploads/2022/03/pr20220302.pdf] や, MgO と Fe の界 面における電子・磁気状態の観察 [S. Sakamoto et al, ACS Appl. Electron. Mater. 4, 1794 (2022)] などが挙げられます。

蛍光収量波長分散型 XAS による化学反応のリアルタイム 観察

位置によって波長(エネルギー)が連続的に変化する (波長分散した)軟X線を照射し、放出される Auger 電子 や蛍光X線を位置分解して検出することで、分光器を掃引 することなくスペクトルを得る「波長分散 XAS 法」を用 いた研究で、やはり PF において開発した手法です。これ も当初は電子収量法を用いており,様々な表面化学反応の リアルタイム観察を行ってきましたが、つい最近、蛍光収 量法による測定手法を開発し [K. Amemiya et al., Rev. Sci. Instrum. 91, 093104 (2020)], 測定環境が大きく広がりまし た(特に反応ガスの圧力の増加や固液界面への適用)。固 液界面の観察においては、電極を Si₃N₄ 薄膜上に成膜して 真空と液体との隔壁とし,裏面から軟X線の照射と蛍光X 線の検出を行うことによって、溶液側は通常の電気化学測 定と同じセットアップで実験を行うことができます。これ を用いて、水の電気分解中の電極表面の様子を、電位を掃 引しながらリアルタイムで観察することに成功しました [K. Sakata and K. Amemiya, Chem. Lett. **50**, 1710 (2021)]。ま た,波長分散 XAS 法と深さ分解 XAS 法を同時に実現す ることで(二次元検出器の一方が入射X線エネルギー,も う一方が蛍光X線の出射角に対応),金属の表面から内部 へと酸化反応が進行する様子をリアルタイムで観察しま した [K. Sakata and K. Amemiya, J. Phys. Chem. Lett. **13**, 9573 (2022).]。

X線励起可視発光 XAS による電池材料等のオペランド観察

X線の照射によって可視光が発生する現象(X線励起可 視発光; XEOL)を利用して、比較的厚い(と言っても数 10 nm~1 µm程度ですが)電極等に覆われた試料に対して、 軟X線領域のXASをオペランド観察する方法を開発し, 電池材料等に応用しています [R. Shimizu, et al., Phys. Rev. Research 2, 033467 (2020), K. Nishio et al., ACS Appl. Energy Mater. 3, 6416 (2020), K. Wang et al., Cryst. Growth Des. 22, 1116 (2022)]。通常の電子収量法による XAS 測定では表面 付近の数 nm しか測定できない一方, 蛍光収量法では深い ところの情報も含むものの,入射X線が深いところに到達 するまでに減衰してしまう上に、検出すべき蛍光X線も減 衰するので、表面側からのシグナルの方が圧倒的に多くな ってしまいます。また、測定対象元素の濃度が高く、かつ 厚い膜の場合には、いわゆる自己吸収効果も深刻です。こ れに対し XEOL-XAS では, 基板からの XEOL シグナル (可 視光なので減衰は小さい)を、試料を透過した軟X線強度 のモニターとして利用することで、透過法 XAS に相当す るデータが得られ、膜全体のバルク情報を得ることができ ます。これによって、試料の深い部分の観察が可能になる とともに、電子収量法等と組み合わせることで、表面と バルクを区別することもできます。現在はさらに、XEOL-XAS を波長分散した軟X線と組み合わせた、リアルタイ ム観察法の開発を進めています。この手法を用いることで, 例えば、薄膜積層電池デバイスの充放電過程における電子 状態変化をオペランド測定することができます。

マルチプローブ・マルチモーダル表面・界面分析

表面科学研究部門では、放射光だけではなく他の量子ビームによる測定も組み合わせた、マルチプローブ・マルチ モーダル表面・界面分析を推進しています。例えば最近、 集光した円偏光軟X線をピンホールで切り出し、そこから の発散光を試料に照射して反射光を二次元検出器上に投影 させる、反射率イメージングXAS/XMCD 法を開発しまし たが [M. Suzuki-Sakamaki and K. Amemiya, Rev. Sci. Instrum. 92, 123702 (2021)]、これを偏極中性子反射率法と組み合わ せることで、三次元的な磁気情報を得る試みを進めていま す。軟X線反射率イメージングのデータは面内方向に加え



図 1 開発した装置の写真 (a) 蛍光収量深さ分解 XAS/XMCD (b) 蛍光収量波長分散型 XAS (c) X線励起可視発光 XAS (d) 試料搬送ベッセル

て深さ方向の情報も含むのですが,吸収端近傍における反 射率は,情報(パラメータ)が多すぎて解析が困難なので 磁気モーメントの深さ分布を面内方向に平均化した情報が 得られる中性子反射率の結果と組み合わせることで,より 信頼性の高い三次元情報を抽出することを目指していま す。また,様々な量子ビーム・測定手法の間で,真空を保 ったままで試料を移送できる,「量子ビーム横断試料搬送 システム」については,いろいろな機会に紹介しています が,これまでに,光電子分光,軟X線XAS/XMCD,偏極 中性子反射率,低速陽電子回折(LEPD)の間での共通化 を実現しており,今後,ミュオンスピン緩和(μSR),X線 CTR 散乱などへの拡張を目指していきます。

人事異動

放射光科学第一,第二研究系に関連する人事異動を報告 します。10/1 に,構造生物学研究部門の特任准教授(クロ スアポイントメント)として安達成彦さん,特任助教とし て千田美紀さん(7/1 より研究員として在籍),そして研究 員として稲葉理美さんが着任されました。また,10/16 に 固体物理学研究部門の研究員として山浦淳一さんが着任されました。それぞれの立場での活躍を期待しています。