

入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 古川和朗
(2021 年 10 月 31 日付け)

概要

夏の作業が7月7日から9月16日までの停止期間に行われ、通常の保守作業と並行して、先に報告したようにRF電子銃、パルス電磁石、マイクロ波中電力分配系、電子陽電子分離位置モニタ、劣化導波管、劣化スクリーンモニタ、などに改善作業が行われた。9月17日からRF電子銃を中心として大電力マイクロ波装置のコンディショニングを開始し、24日から入射器全系を立ち上げ、先に立ち上がるPF向けの調整を含めビーム確認は順調に進んだ。立ち上げ時期のSuperKEKBのリング内の作業のためにビーム輸送路の調整が進まなかったのは残念であった。春には手違いから状況を悪化させてしまったRF電子銃の状態について、さまざまな安定化対策が行われたが、特に第2レーザーに導入した回折光学素子が有効となっている。パルス補正電磁石7台を増設し、分散関数の残余低減や航跡場効果によるエミッタンス増大を抑制しやすくなる。また中電力用サブブースタ・クライストロンの複数の半導体増幅器への置き換えを、今年度は第2セクタで進めて、信頼性を向上させている。このような調整を踏まえ、14日からは放射光入射が滞り無く開始された。

SuperKEKB 向けの電子はバンチ当たり 2 nC、陽電子は 3 nC を基本に、少なくとも 1 バンチ入射においては夏の保守期間以前より電荷量、エミッタンスとも良好な入射が期待できる。今期中には通常のアップシロン中間子 T (4S) よりも高い 10.75 GeV を中心としたエネルギーでの衝突も予定されており、立ち上げ期間中のエネルギー変更手順の確認も進められている。SuperKEKB 加速器評価委員会などから提案された SuperKEKB 国際タスクフォースの入射器サブグループを作成し、参加者を募っているところである。このサブグループにおいては来年度から予定されている入射器の更新について議論を行うことが期待される。

2 年前に入射器棟の南端に隣接する加速管組立室において火災が発生し、関係者の献身的な回復作業により、入射器本体は 3 週間で運転を再開し、その年の夏の保守期間において本格復旧が達成された。しかし、火災発生源となった X バンド技術開発設備 Nextef については、被害が大きく復旧作業が続けられてきた。その結果 10 月 7 日に、自動消火装置を含む安全設備の慎重な試験の後、2 年半ぶりに高電圧の印加が行われ、実験の再開が可能となった。

SuperKEKB 高度化に向けた入射器の改善作業の検討

KEK 電子陽電子入射器は、SuperKEKB 素粒子衝突実験と PF リング及び PF-AR での放射光科学実験の両分野を支

えるために、2019 年から 4 リング同時トップアップ入射を開始し、トップアップ入射開始前後を比較すると 237% という比率で SuperKEKB 衝突実験の効率を向上させることに成功した。SuperKEKB 蓄積リングの特に陽電子リングのビーム寿命が短く、2021 年には 10 分を割るような条件で実験を続けており、この同時トップアップ入射機構は不可欠である。この入射機構を基礎として、入射器は徐々に入射性能を高めており、SuperKEKB の衝突性能の世界記録の達成にも貢献している。

蓄積衝突リングにおいては、衝突性能の向上のためにビームビーム効果が増大するとともに力学口径が小さくなり、ビーム寿命が当初の設計値よりも大幅に小さくなることがわかって来た。ビーム寿命の減少に対抗するために、蓄積ビームの力学口径を広げる努力とともに、入射ビームの大電流化の実現が急がれることになった。単純に入射バンチあたりの電荷を増大させれば、航跡場効果により入射ビームのエミッタンスが急激に悪化し、蓄積リングの入射物理口径を超えてしまうため、並行して低エミッタンス化を進める必要がある。このような蓄積リングにおける衝突性能向上の進展に合わせて、入射器の性能向上を計画しており、装置の改造・増設を含めた計画の概要について述べてみたい。

KEK 複合加速器群における入射器

PF リングと PF-AR の 2 つの放射光実験施設への電子入射を維持しながら、SuperKEKB に向けての入射を実現するために、入射器の改造を 2011 年から続けてきた。低エミッタンス大電流電子ビームの実現のために、擬似進行波型軸外結合空洞、イリジウム・セリウム合金光陰極、及び大出力個体レーザーを組み合わせ用いた RF 電子銃を開発し、その安定化を進めている。電子銃近傍での電流値としてはバンチあたり 5 nC も実現しているが、下流でエミッタンスが悪化するため入射ビームとしては現在のところバンチあたり 2 nC が最大である。大電流陽電子ビームについては、熱電子銃で発生させた大電流電子ビームをタンダステン標的に照射し、対生成により発生した陽電子をフラックスコンセントレータの約 5 T のパルス高磁場と 0.5 T のソレノイド磁場で捕獲し、大口径 S バンド加速管で減速バンチングした上でダンピングリングまで加速する。当初フラックスコンセントレータの 0.2 mm 間隙での放電が発生し心配されたが、材質として無酸素銅に変えて銅ニッケル合金を採用することによって問題を解決し、さらに加速管の高周波終端器の改善により電流を増強しよう

表1 入射器に要求されるビーム

Beam	Positron	Electron	
Beam energy	4.0	7.007	GeV
Normalized emittance $\gamma\epsilon_{x/y}$	100/15	40/20	μm
Energy spread	0.16	0.07	%
Bunch charge	4	4	nC
No. of bunches/pulse	2	2	
Repetition rate		50	Hz

としている。

SuperKEKB 入射の要求仕様を表1に示す。生成された電子陽電子ビームの特性、特にエミッタンスとエネルギー拡がり、縦方向横方向の航跡場効果やコヒーレント放射光によって悪化させずに蓄積リングまで導いて入射させるためには、バンチあたりの電荷の大きさにより工夫が必要となる。既に低い電荷においても悪化現象は生じており、これまでの研究成果を適用して影響を最小限に抑える必要がある。放射光科学実験を継続しながら SuperKEKB 向けの入射ビームを改善することは容易ではないが、同時入射機構を最大限活用することによって、放射光実験への影響を与えずに運転中にビーム開発を行うことも可能となる。

低エミッタンス保持

先に述べたように、大電流のビームの低エミッタンスビームを長距離導くためには、エミッタンスを悪化させる要因を取り除いておく必要がある。ビームが加速管の中心を通過しなかった場合の航跡場による横方向エミッタンス悪化が評価されており、加速管のアライメントの誤差を短距離区間では 0.1 mm に、長区間では 0.3 mm に抑える必要がある。東日本大震災によって 1 cm 以上アライメントがずれてしまった後、精力的に測定と補正が行われ、現在では、アライメントは改善されてきた。下流区間ではエネルギー差を補正する必要からパルス電磁石の設置が進んでいるので、4 リング同時トップアップ入射時のビーム軌道も比較的整っているが、特に上流部では加速管の中心から 1 mm 以上の軌道のずれがあり、パルス電磁石の増設による改善が必要と考えられる。

ビーム軌道の悪化の一つの要因としては、建物の歪みが疑われている。入射器の建物はエクспанション・ジョイントで接合された 8 つの区域から構成されているが、年間を通した測量により、ジョイント部で年間 1-2 mm の主に垂直方向の位置偏差が観測されている。

また、ビーム光学関数の誤差により、思わぬ位置で分散関数が大きくなってしまい、加速によりエミッタンスの増大を招く場合がある。特に、180 度アーク部、入射器・ダンピングリング接合部、エネルギー圧縮システムなどで誤差をできるだけ抑制し、エミッタンスの悪化を防ぐ努力が続けている。

ビーム輸送路では、航跡場効果が無視できるのでエミッタンス増大が小さいと期待されていたが、現在のところ大

きく増大してしまっている。陽電子輸送路では、KEKB での入射エネルギーの 3.5 GeV から SuperKEKB の 4 GeV へ変更になったために、偏向電磁石の間隙を狭めることによって磁場の増強が行われた。この際に上下対称に修正できなかったために、発生した 6 極成分がエミッタンスを悪化させていることがわかり、ビームの観測結果を用いて、永久磁石による補正が行われている。

電子輸送路では偏向電磁石の修正は行われていないが、エミッタンスの悪化が大きい。エミッタンス測定上の障害により、ビームサイズが正しく測定できていなかったことがわかり一部は説明がついたが、未だ大きな食い違いが解明されていない。期待しない R56 の値によりビームバンチが圧縮され、コヒーレント放射光 (CSR) によるビーム不安定が引き起こされているとの指摘もあるが、暫定的な実験では確認できておらず、検討が続けている。蓄積リングの入射効率も低く、エミッタンスの悪化だけでは説明が付かないと思われ、入射点においても何か解明できていないことがあると考えられている。

さらに、1 パルス内 2 バンチの運転においても、96 ns 離れた 2 バンチ目の入射効率が悪く、この解明も急がれる。1 バンチ目の作る航跡場の影響が観測されており、両バンチの軌道差を抑える方策も必要となる。上流の適当な場所でマイクロ波のタイミングを調整し、エネルギー差を積極的に付けることで軌道を揃え、入射器終端での両バンチの均質化を図ってはいるが、この方策だけでは安定な運転は困難と思われる。

現在のところ衝突調整が続いており要求ビーム電流が仕様値の半分程度であるために、これらの課題は致命的にはなっておらず、衝突実験データ取得に時間を割くことが優先されているが、遠くない将来解決が必要である。

パルス電磁石

入射器内の下流部分においては、4 つの蓄積リング加速器の入射エネルギーが、2.5 GeV から 7 GeV と大きく異なり、ビーム光学整合を取るためには異なるビーム収束力が必要となるため、パルス四重極電磁石の運用が重要となる。ちなみに KEBK 計画時には蓄積リングの入射条件が厳しくなかったために、入射器内では曖昧な光学条件でビーム輸送を行い、各蓄積リングへのビーム輸送路に別れてから光学整合を確立し直していた。しかし、SuperKEKB の入射光学条件の精度要求が高く、さらに航跡場の影響も避けなければならない、KEKB 時と同じ戦略を取ることはできない。

SuperKEKB 運転開始時には、バンチあたりの電荷が少なかったため、まずは下流部のビームサイズの小さい領域で、ボア径が小さい、つまりインダクタンスの小さく設計できるパルス四重極電磁石を 30 台ほど、軌道補正を行うパルス補正電磁石を 40 台ほど設置した。しかし、電流が徐々に大きくなるに従い、エネルギー差の小さい上流部においてもビーム整合やビーム軌道の精度を上げる必要があり、パルス電磁石の増設を進めている (図1)。ビーム光学整合の精度が高くないと、ビーム分散関数の設計値から



図1 入射器に設置されたパルス電磁石

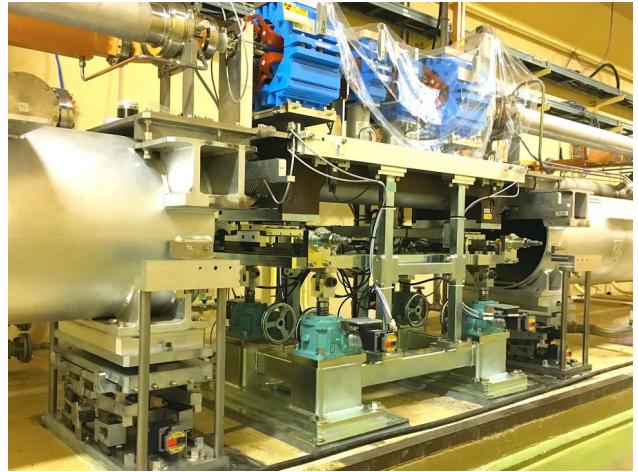


図2 入射器向けに開発された架台駆動機構

差異によって、予想以上のビームエミッタンスと軌道への影響が現れることある。上流部においてはビームサイズが大きいため、ボア径が大きくインダクタンスも大きな電磁石に対応する電源が開発された。

当面の設計目標の4 nCのビームについて、エミッタンスを悪化させないためには、100 μm 以下の精度でビーム軌道を制御する必要がある。さまざまな機器の安定性から軌道の変動が観測されており、パルス電磁石の増設によりビームの安定化が計画されている。

高速補正電磁石

パルス電磁石は20 ms 間隔の入射器のビームパルス毎に異なる磁場を発生し、ビームの光学整合や軌道を制御するために用いられる。そのため、パルス幅約1 msの磁場を発生する（四重極電磁石については、電力の80%がパルス毎に回収されている）。一方、1パルス2パンチの加速運転において、2パンチ目の軌道を制御するためには、さらに高速のキッカー補正電磁石が必要となる。そこで、PF入射用に開発された技術の協力をいただき、セラミクス埋め込み電極を用いるキッカー電磁石とパルス電源の開発を始めている。96 ns 間隔の2パンチを区別して補正するために、100 ns 程度の立ち上がりを期待している。

架台駆動機構

先に述べたように、エクспанション・ジョイントでの年間2 mmに及ぶ装置の偏差は影響が大きいと考えられ、電磁石による軌道補正を施しても、影響が残るかもしれない。そこで、加速管と収束電磁石の架台を1 μm 精度で5軸を遠隔操作する駆動架台を内製して用意している（図2）。今後、必要性を見極めながら設置を進める予定である。

このようにKEKの電子陽電子入射器は、今後も複数装置の更新を行いながら、素粒子物理と放射光科学の両分野の実験を支えていく予定である。

光源リングの運転状況

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 に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、ビーム入射路に垂直ステアリング電磁石 2 台を追加した。また、入射路のプロファイルモニターのカメラをアナログカメラからデジタルカメラに全数交換した。リングでは冷却水量低下の課題があった入射点に設置している K2 アブソーバーを交換した。今年度大気暴露した区間は、K2 アブソーバーを含む入射点近傍の短い区間だった。PF-AR においては、次節で詳述するが、南実験棟に展開するテストビームライン建設に関する約 3 ヶ月間に渡る大がかりな作業が実施された。

図 1 に、PF リングにおける立ち上げ日 10 月 14 日 9:00 ～ 10 月 24 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 19 日 9:00 からの光軸確認後ユーザー運転が開始された。ユーザー運転は順調に進み、10 月 24 日 9:00 までビームダンプは一度も発生していない。また、K2 アブソーバーの冷却水量低下も起こっていない。

PF リングの立ち上げ後の真空光焼きだし状況を図 2 に示す。夏期停止期間中に入射点付近の短区間を大気暴露したが、光焼出しによる真空度回復は順調で、10 月 19 日

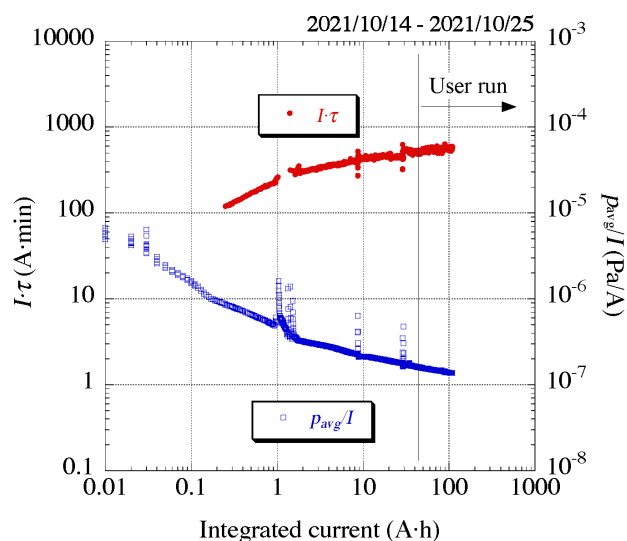


図 2 PF リングにおける光焼きだし状況として、10 月 14 日から 10 月 25 日までの積分電流値に対する電流値とビーム寿命の積 ($I \cdot \tau$) と電流値当たりのリング平均真空度 (P_{avg}/I) を示す。

のユーザー運転開始までに、規格化圧力 P_{avg}/I はおよそ 1.6×10^{-7} Pa/A に到達し、ビーム電流値と寿命の積 ($I \cdot \tau$) も 500 A·min を超えた。

PF-AR は、10 月 25 日 9:00 から立ち上げ作業が開始された。

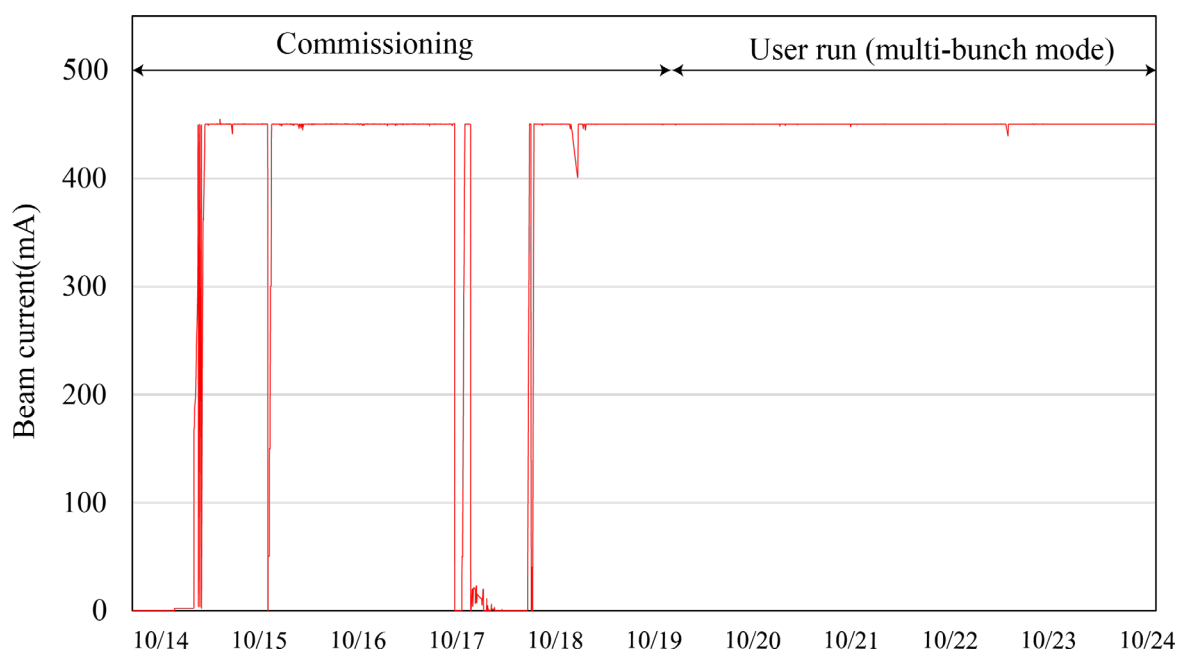


図 1 PF リングの立ち上げ日 10 月 14 日 9:00 ～ 10 月 24 日 9:00 までの蓄積電流値の推移を示す。

PF-AR における測定器開発テストビームラインについて

(1) 概要

PF-AR では、GeV オーダーの素粒子物理実験用測定器開発のためのテストビームライン（測定器開発テストビームライン：仮称）建設計画を先端加速器推進部・測定器開発室と協同で進めている。測定器開発室を主とした計画の発足は 2014 年に遡ることになるが、2020 年度の予算化を皮切りに大きく計画が進み、2021 年度夏の停止期間中に各種装置の設置作業が実施された。2020 年度に設計検討、工事計画の立案、機器調達・製作を完了させており、2021 年度秋以降のビーム生成試験を目標に計画が進んでいる。PF-AR では放射光実験運転時間が 2016 年以前に比較し半減している。PF-AR の放射光以外の 2 次利用の計画は放射光実験との共存が図られれば、PF-AR の利用価値が高まり運転の継続性の確保につながると放射光利用側からも期待がされている。建設場所は PF-AR で唯一残っていたビームライン新設可能スペースである南実験エリアである（図 3）。

照射実験に使用する GeV オーダーの電子ビームを生成する手順は、PF-AR に蓄積している電子ビームの裾（ハロー部）とワイヤーターゲット（WT）との制動放射を使ってガンマ線を生成し、それを銅コンバーターに当て電子陽電子対生成した後、単純な測定器開発テストビームラインの光学系輸送路と偏向電磁石により単色電子ビームを得るというものである。WT に、0.1φ カーボンファイバーを想定すればビーム中心から 5.4σ の位置に WT を置くと、 10^9 個/s の電子ビームが衝突し、蓄積電子ビームエネルギー（5 GeV）を cut-off とするエネルギー広がり光子の発生が得られる。WT 位置はターゲットとの衝突で失われる電子損失が $\tau=20$ h の電子寿命時の損失と同等となるように設定される。銅コンバーターの厚みを 16 mm とすると 1 GeV/c の電子ビームへの最大変換率はおよそ 14% となる。WT システムは PF-AR リング南直線部アーク部短直線下流の 4 極電磁石の直上流に設置され、コンバーターはさらにその下流偏向電磁石の真空ダクトを新造し設置される。

WT とコンバーターを本計画の設計の基軸とし、①測定

器開発室によるコンバーターより下流の測定器開発テストビームラインの光学系の最適化と②加速器第 6 研究系による放射光ユーザーとの共存のためのリング側課題の検討（WT とコンバーターの設計を含む）と測定器開発テストビームライン建設の 2 つに分担を切り分け、効率的に計画を進めた。建設後 WT からコンバーターまではリング付随の設備とし加速器の管理下に置かれるが、測定器開発テストビームラインから下流全体のシステムは加速器が建設を行った後、測定器開発室側へ管理を引き継いでもらうことで合意している。これは放射光ビームライン（BL）と加速器との切り分けに近い管理方法であり、測定器開発テストビームラインも AR 放射光 BL の 1 つであるような体制とする。測定器開発室側が担う、WT の材質によるガンマ線生成率、コンバーター変換率の算出、コンバーターから測定器開発テストビームライン輸送路の光学系電磁石配置の最適化に基づき、加速器側は備えるべき要素の設計と肉付けを進め、電磁石、真空、RF、モニター、安全の各グループの横断的な協力で設計の具体化に取り組んだ。

真空機器としては、冷却機構及び放射光アブソーバーも含むコンバーターを備えた新たな偏向電磁石ダクトの設計、ワイヤー駆動システムの設計、熱解析で判明したターゲット材の放射光照射による発熱に対応するためのワイヤー選定（熱伝導と取り扱いやすさの観点から）と除熱設計、WT 挿入治具の蓄積ビームによる電界集中を緩和するためのインピーダンス解析と設計が真空グループ、RF グループとの連携で進められた。真空機器についての詳細は後述する。加速器運転の観点からはビームハロー以上の電子ビームコアの損失を抑制するように Top-Up 運転時の蓄積ビーム振動スキームの確立スタディー、入射ビームの WT での損失の見積もりが早い段階から電磁石グループにより計画的に進められた。電磁石機器としては、測定器開発テストビームラインの電磁石群（偏向電磁石 1 台（水冷）、4 極電磁石 7 台（空冷）：ちなみにこれら電磁石は全て KEK-BT の再利用）、垂直補正電磁石 2 台（PF-BT の再利用）これらの設置アライメント、架台製作、ケーブル・冷却水配管付帯設備の整備、電源室の整備、四極・補正電

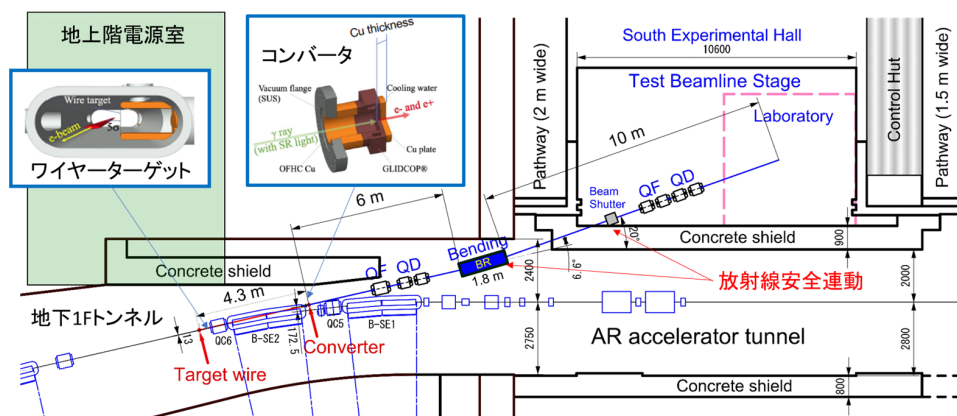


図 3 PF-AR における測定器開発テストビームライン全体像俯瞰図

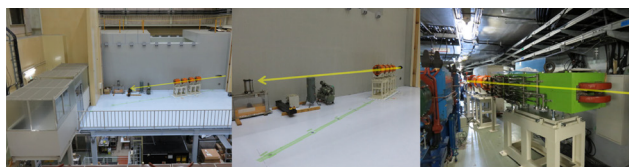


図4 測定器開発テストビームライン電磁石設置状況（粗アライメント後，8/30 の状況）

磁石電源調達，リサイクル偏向電磁石電源整備，電流値精密計測用 DCCT システム，電源制御システム（プログラム整備は素核研究所掌），電磁石機器保護連動インターロック及び測定器開発テストビームラインでの放射線管理上の条件破綻時の安全ベンド（単色電子ビームとする偏向電磁石）の停止・加速器ビームダンプの安全連動システムの設計整備が工事に向け電磁石グループにより進められた。加速器運転に際しては，WT で生じる電子ビームロスの管理も疎かにできないため，ビームロスモニターがモニターグループにより整備された。これらの準備が整いすべてをインストールする建設工事が7月上旬より開始され，停止期間3カ月中に完了した。測定器開発室の照射実験室の設置される南棟中2階となるステージは今年3月に完了しており，電磁石電源室の整備は加速器運転期間中の6月の早くに始められ工期の短縮を図った。工事開始直後には，測定器開発テストビームラインが加速器リング外側に位置するため，測定器開発テストビームラインの電磁石搬入路確保，また WT システム挿入，偏向電磁石ダクトのコンバーター付随ダクトへの入れ替えのため，アーク部上下流では加速器既設リングの解体作業が行われた（図4）。電磁石付帯ケーブル敷設作業，WT，コンバーターシステムの配管及び制御構築，真空粗排気，測定器開発テストビームライン電磁石群の精密アライメント，総合動作試験，放射線検査すべて運転開始前まで完了した。

(2) 真空機器について

真空チェンバー内でガンマ線を発生させるワイヤーターゲット（WT）には同時に放射光も照射され，ターゲットの温度の上昇がみこまれる。また，発生したガンマ線を通すように切り欠きを設けたクロッチアブソーバーやガンマ線を電子-陽電子対に変換するコンバーターにもそれぞれ放射光が照射される。有限要素法解析ソフトウェア ANSYS（ANSYS 社製）を用いて，ガンマ線を発生させるターゲット，銅合金製アブソーバー，銅合金製コンバーターへの放射光照射と冷却機構による温度分布をシミュレーションした。

(2.1) ワイヤーターゲット（WT）

蓄積リングを周回している電子ビームの裾（ハロー部）に WT を配置し，制動放射によりガンマ線を発生させる。このとき WT には同時に放射光が照射され加熱されるため，放射光の吸収率が小さな原子量の小さい物質が有利である。一方，原子量の大きな物質ほど制動放射によるガン

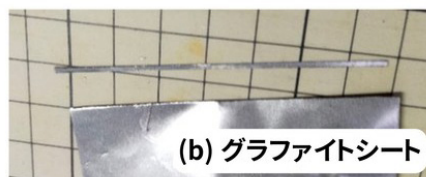
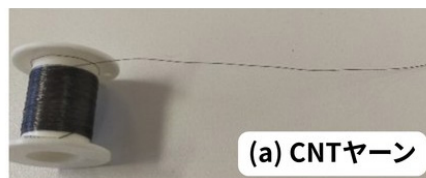


図5 ターゲットに選定した純炭素マテリアル

マ線の発生確率が増す。真空中でガス放出が小さく，化学的に安定で，物理的に適切な強度をもつことも当然要求される。以上を勘案し，ターゲット物質として炭素を選定した。炭素には黒鉛，炭素繊維，ダイヤモンドなど様々なマテリアルが存在する。また，実際に設置するにあたり，強度および屈曲性も必要であり，さらに不純物がなく炭素のみで構成されている必要がある。計画当初は一般的な炭素繊維が想定されていたが，取り回しが困難な点が多く，探索の結果，CNT ヤーン（カーボンナノチューブ紡糸）及びグラファイトシートを用いることとした。CNT ヤーン（村田機械製）は，基板上にサブミリ単位の長さで成長させた CNT を，分子間力で紡いで糸状にしたマテリアルである（図5(a)）。一般的な「糸」と同様に，結んだり編んだりできるほど屈曲性が高く，また機械的な強度も有する。熱伝導率も鉄と同等の値を持つ。糸状に加工されるにあたり，原材料を固定するための樹脂や芯材などの他素材が一切使用されておらず（バインダレス），炭素の純度は99%以上である。本計画では現行の紡績装置の上限に近い，太さ0.1mmのものを使用した。グラファイトシート（カネカ製「グラフィニティ」）は，グラフェン（1原子の厚さの sp^2 結合炭素原子のシート状物質）を積層して作製された，シート状のマテリアルである（図5(b)）。こちらも機械的な強度に優れると同時に，1万回以上の折り曲げテストをクリアしている。さらに，面内の熱伝導率が，1500 W/(m・K) とグラファイトの上限に近い値であり，放熱の面で有利と言える。一方，面直方向の熱伝導率は5 W/(m・K) と非常に小さく，熱伝導においても異方的な性質を示す。こちらも炭素の純度は99%以上である。今回，厚さ0.04mmのシートを1mm幅程度でカットしたものを，二つ目のターゲットマテリアルとして選定した。これらは本計画で新規に製作され，加速器リングに設置されたターゲット挿入機構に装着されており，試運転を待たばかりである。今回，これらの WT について，銅製の取り付け治具に装着した状態で伝熱解析し，温度分布を見積もった（図6）。CNT ヤーンについては，最高温度は285℃となり，CNT の分解および昇華温度に比べて十分低い。グラファイトシートについては，シートをビーム進行方向（≒放射光照射方向）と平行に配置したため，放射光が照射される

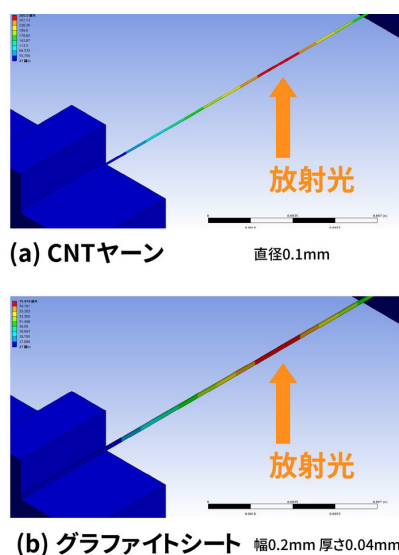


図6 カーボンターゲットの温度分布。(a) CNT ヤーン (b) グラファイトシート。

面積が小さく、また面内の高い熱伝導率を反映して温度は低いものと計算され、最高 35℃ となった。非常に低い値であるが、あくまで数値計算結果であるため、実際の運転時に十分な注意が必要であることに変わりはない。

(2.2) クロッチアブソーバー

偏向電磁石内のチェンバー (B チェンバー) の内部には、強力な放射光からチェンバーやベローズ部分を守る、アルミナ分散銅製のクロッチアブソーバーが装着されている。今回、ターゲット部で発生したガンマ線を通過させるために、切り欠きが設けられたものに交換される。この切り欠き部は当然放射光も通過させる。照射される放射光の強度分布を見積もり、ANSYS 伝熱解析により計算した温度分布を図7に示す。アブソーバー内部の冷却水による熱伝達係数 (冷却能力) は、最も一般的な Dittus-Boelter の式を用いて見積もった。計算された最高温度は 319℃ であり、これは交換前の切り欠きのないアブソーバーと同様、十分冷却できているものと見積もられる。

(2.3) コンバーター部

最後に、ターゲット部で発生し、クロッチアブソーバー

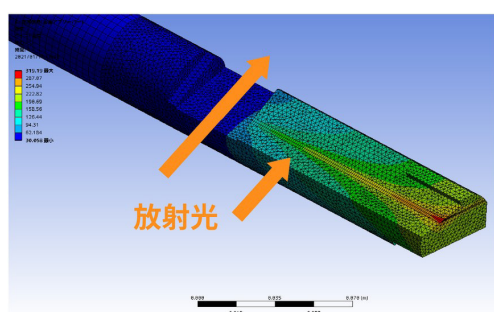


図7 クロッチアブソーバーの温度分布

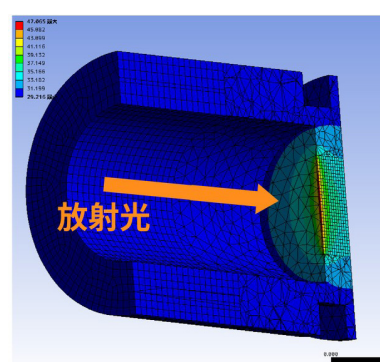


図8 コンバーターの温度分布

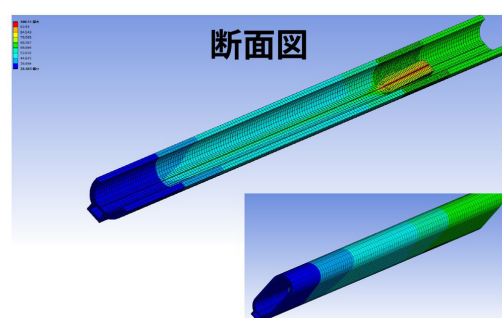


図9 典型的な Q ダクトにおける温度分布

部を通過したガンマ線を、電子 - 陽電子対に変換するコンバーター部について述べる。コンバーターにて発生し、大気中に放出された電子と陽電子は、電子輸送系にて電子または陽電子のみが測定ビームラインへと導かれる。材質はアルミナ分散銅である。クロッチアブソーバー部の切り欠きをガンマ線とともに通過した放射光により加熱されるが、その入射パワー分布に基づいた計算結果を図8に示す。外側の凹部分は冷却水路の壁面である。最高値は 47℃ であり、この設計で十分な冷却が行われていると考えられる。これら今回の計画で新規に製作されたコンポーネントに加え、旧来の偏向電磁石や4極電磁石用の真空ダクトの冷却と温度分布についての解析も進めている (図9)。これらの標準ダクトは過去の設計を踏襲した形で設計・製造され、現在も問題なく運転に供されているが、系統的なシミュレーションでの温度分布の見積もりはいままでなされていなかった。現時点の計算結果では、各部が十分冷却されており、従来の設計の妥当さが示されたといえる。

加速器第6研究系内の人の動きについて

光源第2グループの山本尚人助教が、10月1日付けで准教授に昇任されました。山本さんには、引き続き PF リングおよび PF-AR の高周波加速システムの保守・維持・管理ならびに開発研究を中心に業務を担当していただくとともに、次期放射光源施設計画において中核的な役割を担っていただきたいと思っております。

前号の放射光実験施設の現状の原稿で予告した通り、本号では「3次元X線ズーム顕微鏡の開発」について紹介します。

「3次元X線ズーム顕微鏡の開発」 (プロジェクト責任者：平野馨一)

現在、基盤技術部門X線光学チームが中心となって3次元X線ズーム顕微鏡の開発が進められています。従来のX線イメージング・顕微鏡では主として固定倍率の光学系が用いられてきたため、試料内の関心領域を最適の倍率で観察するのが容易ではないという問題がありました。本プロジェクトでは光学系にズーム（可変倍率）機能を組み込むことでこの問題の解決を図ることを目指しています。

本プロジェクトは2019年9月頃から本格的に活動を開始しました。1）大視野X線イメージング班、2）X線結像顕微鏡班、3）画像処理・解析班、4）X線光学素子班、という四班体制で相互に連携しつつ進めています。ここでは各班の状況について報告します。

1）大視野X線イメージング班

Photon Factory では高フラックスX線を用いた大視野イメージングが盛んに行われてきました。特に、1990年代以降、X線の位相情報を利用して像を得る位相コントラストイメージングが飛躍的に発展しました。さらに最近では、極小角散乱（USAXS）コントラストイメージングが普及しつつあり、X線イメージングの世界にマルチコントラスト化の潮流が生じつつあります。

X線マルチコントラストイメージングにはいくつかの方法がありますが、この班ではアナライザー結晶を用いる方

法（Analyzer-Based Imaging, 略称 ABI）に着目しました。ABIには、光学系が比較的単純であること、広範な試料に適用可能であること、といった利点があり、放射光で広く利用されています。この班では、アナライザーに回転傾斜配置の非対称結晶を導入することにより、ズーム機能を実現することに挑んでいます。

BL-14Bで行ったX線ズームABIの検証実験の結果の一例を図1に示します。試料として、直径約3mmのプラスチックチューブに繊維を詰めたものを使用しました。x1とx6の二つの倍率で、試料の吸収像・位相像・USAXS像の断層像が得られました。現在、光学系のさらなる高性能・簡略化に向けた取り組みを進めています。

2）X線結像顕微鏡班

X線顕微鏡は高輝度放射光X線源の最も重要な利用法の一つです。すでに、様々な光学系や撮像手法が開発されていますが、この班ではフレネルゾーンプレート（FZP）を用いたX線結像顕微鏡にズーム機能をもたせることに取り組んでいます。

FZPを用いたX線ズーム結像顕微鏡の最も単純な光学系は、FZPを一枚だけ使うタイプの光学系です。FZPの後焦点面にナイフエッジ等のフィルターを置くことにより、試料の吸収像だけでなく、位相像や屈折像も得ることができます。しかし、倍率を変化させるためには、試料～FZP間の距離と、FZP～カメラ間の距離を調節することが必要です。また、高い倍率を得るには長いカメラ距離が必要です。これらの問題を解決するため、FZPを二枚組み合わせた二レンズ光学系の開発を進めています。この二レンズ光学系も、単レンズ光学系と同様、FZPの後焦点面にフ

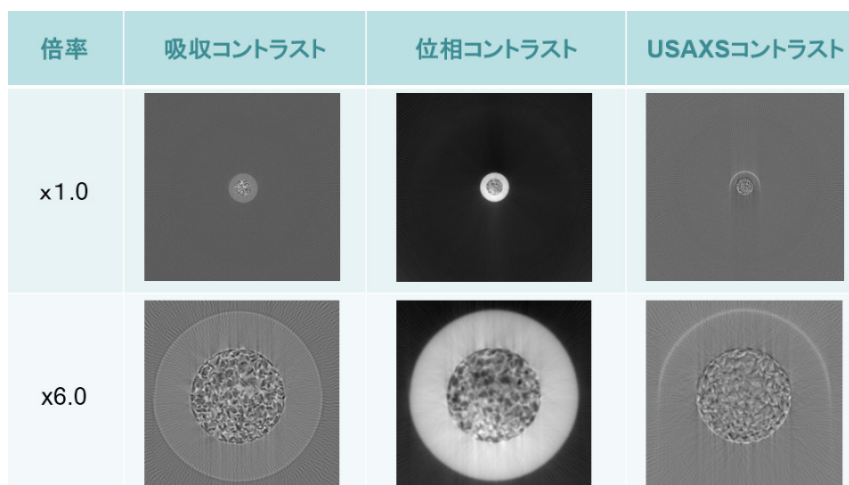


図1 X線ズームABIによるマルチコントラスト断層像。試料は直径約3mmのプラスチックチューブ。

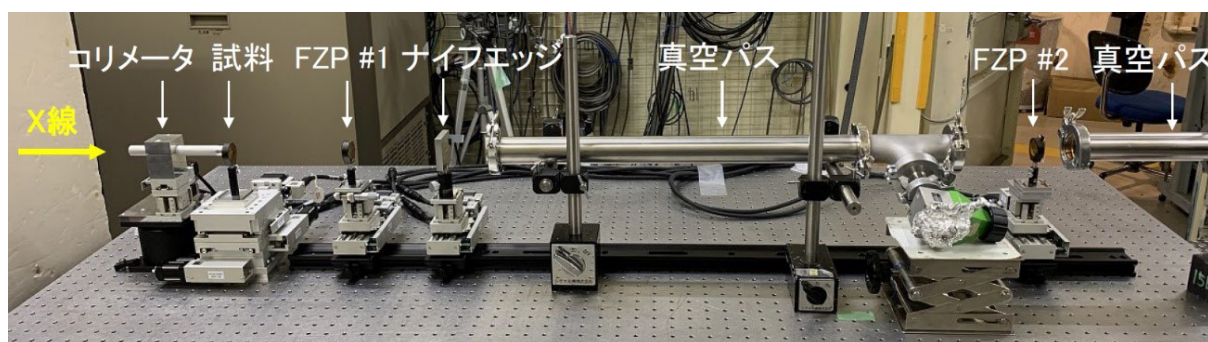


図2 AR-NE1Aに設置されたX線ズームング結像顕微鏡の写真。定盤のサイズは1200 mm×1800 mm。カメラはFZP#2の下流(写真外)に設置されている。

フィルターを置くことにより、試料の吸収像・位相像・屈折像を得ることができます。

例として、AR-NE1Aに設置した二レンズ光学系の写真を図2に示します。光学系には、ビームラインの二結晶分光器で単色化されたX線が入射します。光学系は上流から(図2の左側から)、コリメーター、試料、FZP#1、ナイフエッジ、FZP#2、カメラという順番で並んでいます。検証実験もすでに何回か行われており、10 keVで30～300倍の拡大像を得ることに成功しており、40 nm ピッチの Line & Space パターンを解像できています。また、生体試料などの観察や、X線回折法への応用等も行われつつあります。

3) 画像処理・解析班

X線イメージングの大きな特徴の一つは、物質内部を非破壊で観察できることです。この特徴を最大限に活用する道を拓いたのが、1972年にハウズフィールドによって開発されたコンピュータ断層撮影法(computed tomography, 略称CT)です。現在、X線CTは理学・工学・医学・薬学・考古学等の非常に多岐にわたる分野で活躍しています。

X線CTは非常に強力な手法ですが、試料全体がカメラの視野に収まっていなければならない、という制約があります。そのため、X線イメージングにズーム機能を組み込む時、この制約によって可変倍率域が狭まってしまうという大きな問題に直面することになります。そこで、この問題の解決を図るために、この班では従来のCTのアルゴリズムの改良・拡張を図ることに取り組んでいます。すでに、CTの基本的なプログラムは完成しており、さらなる改良・開発(インターナルCT, ラミノグラフィー, トモシンセシス等)を進めています。

また、X線CTのプログラム開発の他にも、X線結像顕微鏡で位相像を得るための新しいアルゴリズムの開発にも取り組んでいます。

4) X線光学素子班

放射光X線イメージングでは、様々な光学素子が像形成に関わっています。そこで、この班ではX線イメージングに関わる光学素子の開発・改良・評価に取り組んでいます。

その一例として、Be窓の評価が挙げられます(PF NEWS Vol. 38 No. 1 MAY 2020 p31-32 参照)。Be窓によるスペckルはSPRING-8では初期の頃から問題になっており、研磨Be窓の導入がなされてきましたが、「PFのような低コヒーレンスなX線源では問題にならない」とこれまで長く考えられてきました。しかし、BL-20Bで低エネルギー(5～6 keV)のX線を用いて結像顕微鏡の実験を行ったところ、かなり強烈なスペckルが観測され、これまでの常識が覆されることになりました。低エネルギーのX線を用いてイメージング実験を行う際は、PFでも研磨Be窓の導入を検討する必要があります。

本プロジェクトで開発した実験装置や要素技術は、順次、公開していく予定です。本プロジェクトに興味・関心がある方がおられましたら、プロジェクト責任者まで、ご連絡ください。

運転・共同利用関係

2021年度第2期ですが、PFは10月14日に、PF-ARは10月25日に、それぞれ運転を開始しました。PFのハイブリッドモードは11月26日から12月23日を予定しています。PF-ARは5 GeVで運転を開始して、11月18日から12月7日まで6.5 GeVで運転を行います。第3期ですが、PFは1月31日から3月24日まで、PF-ARは2月7日から3月7日までの運転とすることが決まりました。現在、運転モードについての調整を行っています。

PF-PACの全体会議が9月29日にWeb会議方式で開催され、建設の進む測定器開発テストビームライン(AR-SE2A)の課題審査、その他が協議されました。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。10月1日付けで、実験施設長秘書として石川裕子さんが着任しました。また、10月31日付けで、PF-UA事務局などを担当された林陽子さんが任期満了により退職されました。新しい職場は筑波大学とのことです。

はじめに

放射光科学第一研究系（表面科学研究部門，固体物理学研究部門）では，放射光を始めとする量子ビームを駆使して先端的な研究を行っています。今回はその一部として，現在実施中の PF の S 型課題のうち，放射光科学第一研究系のメンバーが深く関わっているものを紹介します。もちろん，これらの他にも，G 型課題や優先施設利用などの PF 利用課題や理論計算を含めて様々な研究を行っていますので，今後，順次紹介していく予定です。

2019S2-003: 軟 X 線深さ分解 XAFS/XMCD 法によるスピントロニクス材料研究の夜明け

表面科学研究部門の雨宮が実験責任者です。軟 X 線領域の深さ分解 XAFS/XMCD 法は，雨宮や群馬大学の鈴木真粧子さん（物構研客員准教授）が PF において世界に先駆けて開発してきた手法で，磁性薄膜の化学状態，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，世界的に見てもユニークなものです。これまで，この手法を様々な磁性薄膜に応用し，磁気的性質の鍵を握る界面の観察への有効性を示すとともに，手法の高度化，測定・解析の効率化を進めてきました。この S2 型課題は，磁性薄膜を用いたスピントロニクス材料の開発において革新的な成果をあげている研究者を結集し，深さ分解 XAFS/XMCD の応用を飛躍的に進めることによって，世界を先導する研究成果を PF から創出することを目的としています。スピントロニクス材料の機能発現においては，磁性薄膜の界面の状態が決定的な役割を果たしており，まさに深さ分解 XAFS/XMCD が威力を発揮する分野と言えます。さらに，最近開発に成功した磁場・電場中での深さ分解 XAFS/XMCD 法を駆使したオペランド測定を用いて，磁性薄膜の界面をより動作中に近い状態で観察することによって，次世代スピントロニクス材料の開発につなげることを目指しています。

2020S2-001: 有機エレクトロニクス材料開発のための構造物性

固体物理学研究部門の熊井玲児さんが実験責任者です。有機分子集合体の物性は，分子そのものがもつ性質に加えて，分子間の相互作用によって大きく変化します。有機分子集合体は，それらが示す多彩な物性から，学術的な観点のみならず，近年では応用面でも注目されています。一方で，その集合様式の予測が容易ではないため，新規材料の探索における分子設計には大きな困難が伴います。この S2 型課題では，新規材料探索のために，データ科学，計算科学と実験科学を融合させ，理論的に得られた構造・機能予測をもとに合成された材料の構造決定を行い，試料作

製および新たな分子設計へフィードバックします。また，得られた構造的知見を迅速にデータ科学・計算科学へフィードバックする体制を構築することを目指しています。このサイクルを効率よくすすめることで，新規有機エレクトロニクス材料の探索が加速することが期待されます。

2021S2-004: トポロジカル磁性体における位相欠陥と拡張多極子の動的構造可視化

物質・材料研究機構の山崎裕一さん（物構研客員准教授）が実験責任者で，固体物理学研究部門の中尾裕則さんと協力して実施しています。物質中の磁性と電気特性の結合は多彩な創発物性を生み出し，デバイス材料への応用が期待される機能の宝庫です。トポロジカル磁性体では実空間や運動量空間においてトポロジカル数で定義されるスピントクチャーが多彩な電磁応答を生み出すことが知られています。この S2 型課題では，トポロジカル磁性体における創発物性を微視的な観点から解明することを目指しています。特に，高輝度な放射光軟 X 線のコヒーレント特性，可変偏光特性，エネルギー可変性といった特性を最大限活用し，トポロジカル磁性体に内在する位相（トポロジカル）欠陥や拡張多極子の動的構造可視化を通じて創発物性との相関に迫ります。具体的には，磁気スキルミオン運動の電流，光，熱流による制御・応答のオペランド計測，異常ホール効果（トポロジカルホール効果）における異方的磁気双極子項の役割，磁気スキルミオン格子の位相欠陥から発生する光渦検波と非平衡状態ダイナミクスの解明，磁性トポロジカル絶縁体やワイル磁性体のエッジやドメイン壁の電子状態観測などを行います。X 線が光として有している特性を極限まで活用し，放射光でしか明らかにできない創発物性の未踏測定領域や新しい物性の解明を目指す課題です。

2021PF-S003: 軟 X 領域のコヒーレンスを利用したイメージング手法の技術開発

最後に，PF-PAC の課題ではありませんが，今年度新設された PF-S 課題（PF スタッフが申請でき，PF としての重点研究の推進を目的とするもの）の一つとして採択された課題を紹介します。実験責任者は中尾さんです。軟 X 線領域のコヒーレンスを利用したイメージング手法は，まだまだ未開拓で，様々な可能性を秘めている測定手法です。この PF-S 課題では，これまでに PF において実証してきたコヒーレント軟 X 線回折イメージング，マルチスケール軟 X 線回折顕微鏡，軟 X 線ホログラフィといった手法に加え，結像型軟 X 線顕微鏡・トポロジカルナンバーイメージングなど，まだ試していない測定手法も含めた先端的な手法開発を推進し，PF らしい，「測定してみて初めて明らか

になるような発見」を目指しています。様々な測定手法を利用してすることにより、観測対象にマッチした測定手法を明らかにすることができ、その後の利用展開に向けた重要な指針を得ることが可能になります。