

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構



Photon Factory Hybrid Light Source (PF-HLS)

Conceptual Design Report (CDR) ver. 1

# 目次

1. PF-HLS の概要	1
2. サイエンス	4
2-1.元素選択的な構造・磁気状態分析による磁性薄膜研究の深化	4
2-2.広波数領域散乱・電子状態観察による液体・ガラス構造研究の深化	5
2-3.放射線治療の高度化を目指す放射光照射技術と放射光計測技術の融合	6
2-4.ソフトマテリアルの構造と機能の相関研究に向けた計測手法の融合	7
2-5.時空間スケールを統合した光化学反応研究の創成	8
2-6. X 線誘起相転移研究の創成	9
3. ビームライン	10
3-1. SR シングルビーム	10
3-2. SR+SR マルチビーム	12
3-3. SR+SP マルチビーム	14
4. 光源加速器	16
4-1. 概要	16
4-2.蓄積リングのラティス、オプティクス、ビームダイナミクス	18
4-3. 入射システム	21
4-4. 高周波加速システム	23
4-5. 真空システム、基幹チャンネル	25
4-6.ビーム診断・ビーム制御システム、加速器制御システム	27
4-7. 挿入光源	29
4-8. 超伝導線形加速器	31

## 1. PF-HLS の概要

ミッションとコンセプト

世界に開かれた研究機関として加速器科学の発展に貢献するべく定められた KEK の基本理念と放射光大国として多数の放射光施設が稼働している日本における大学共同利用の 役割に鑑み、Photon Factory (PF) は、

① 開発研究を通して世界の放射光科学を先導する新技術と若手人材を供給する。

② 先端基盤施設として物質と生命に関わる多様な利用研究を推進する。

をミッションとして掲げている。1982 年に誕生した PF が、引き続き、これらのミッショ ンを遂行し、社会に貢献し続けるために提案するのが、PF Hybrid Light Source (PF-HLS) である。KEK は、PF-HLS 計画を推進し、次の 100 年の物質・生命科学を日本が先導する ことを目指す。

PF-HLS のコンセプトは、放射光のあらゆる性能を統合的に活用し、研究分野・手法の 「深化」「融合」「創成」を進めることで、科学目標「物質・生命の機能の根源の解明」を 可能にする『放射光マルチビーム実験施設』である。学術研究のフロンティアを開拓する 大学共同利用では、個々人の自由で豊かな発想に基づく科学探究が重要である。そのため、 PF-HLS は、ハード(光源加速器やビームライン)とソフト(施設運営)の両面において、 多様性と自由度を格段に向上させた施設として構想されている。PF-HLS は、エネルギー 選択式の蓄積リングと超伝導ライナックで構成されるハイブリッド光源を擁する。これま では、複数の放射光施設で真空紫外(VUV)・軟X(SX)・硬X(HX)線にわたる広い波 長領域を分担してきたが、2.5/5.0 GeV 選択式蓄積リングから供給される Storage ビーム

(SR ビーム)は、VUV・SX・HX の大部分を一つの光源でカバーする。さらに、超伝導ラ イナックは、蓄積リングでは到達できないフェムト秒パルス幅の Single Pass ビーム(SP ビーム)を供給する。PF-HLS では、SR シングルビーム実験、SR+SR マルチビーム実験、 SR+SP マルチビーム実験を 40~50 本のビームラインで展開する (図 1-1)。



図 1-1: PF-HLS のコンセプト。

#### 実施運営体制

PF-HLS プロジェクトは、大学共同利用機関法人 KEK を実施主体として推進される。 現在稼働中の蓄積リング (PF・PF-AR) の後継機として位置づけられるものであり、KEK 国際諮問委員会からの助言を受けて策定された KEK ロードマップ 2021 および KEK 研究 実施計画 2022 に記載されている新放射光源施設を具体化させたものである。KEK 内部で は、物質構造科学研究所と加速器研究施設が実施運営の中核となる。KEK 外部からは、日 本放射光学会の要請に応えて 2019 年に結成された放射光学術基盤ネットワークを構成す る UVSOR と HiSOR、ユーザー団体である PF-UA などの協力が得られる。今後、それら の施設や団体の参画の形態を検討するとともに、新しく参画する国内外の機関を拡大する ための活動を行う。

多様性と自由度の高い施設は、試行錯誤を伴う萌芽的な実験、開発要素の強い独創的な 実験、長いスパンの実験などを許容する。これにより、研究のフロンティアが開拓される とともに、研究人材の育成にも大きく貢献する。世界に類を見ない新しいタイプの施設の 建設とその後の高度化に参加することは、施設人材の育成にも大きく貢献する。PF-HLS の多様性と自由度を十分に活用するためには、それに相応しい利用制度を整備することも 必須である。半数以上が KEK 外部の委員で構成される PF-PAC での議論を経て、多様性 と自由度を担保し、かつシンプルな利用制度を構築する。

現時点での年次計画と建設地の理想案を図 1-2 に示す。また、数値目標として、現行施設(PF・PF-AR)との比較で「50~100%増となる利用者の受け入れ」と「運転時間の 10% 増と電力消費の 25~35%減の両立」を目指す。



図 1-2: PF-HLS の年次計画 (左)と建設候補地 (右)。

PF-HLS で展開されるサイエンスの例、必要なビームライン技術、そして光源加速器について、それぞれ、第2章、第3章、第4章に記述する。以下、それらの内容を簡単に紹介する。

サイエンス (2章)

科学目標の「物質・生命の機能の根源の解明」に向けて、研究分野・手法の「深化」「融合」「創成」により可能になるサイエンスケースを紹介する。PF-HLS では、2.5/5.0 GeV

選択式により1本のビームラインで広い波長領域が利用できるようになる。この特長を活 かして、SR シングルビーム実験では、広範な分野・手法の「深化」が促進される。また、 SR+SR マルチビーム実験では、異なる分野・手法が協働することで、それらの間の「融 合」が促進される。さらに、SR+SP マルチビーム実験では、SP ビームの高い時間空間分 解能を活かして、これまでにない分野・手法が「創成」される。

#### ビームライン (3章)

SR シングルビーム実験に関するビームライン技術として、広波長域に対応するための 光学素子の切り替えと高次光除去について説明する。SR+SR マルチビーム実験について は、2 ビームの同時照射に必要な位置制御に関する技術について説明する。SR+SP マルチ ビーム実験については、SP ビームの高い時空間分解能を生かすために必要な光路長およ び測定器の時間特性の高精度制御について説明する。PF に建設中の広波長域軟X線ビー ムライン BL-12A と開発研究多機能ビームライン BL-11A,-11B などで、技術開発および 実証実験を進める。

## 光源加速器(4章)

光源加速器は、2.5/5.0 GeV 選択式蓄積リングと超伝導ライナックで構成される[1]。本 CDR では、早期の建設を目指す蓄積リングを中心に説明する(図 1-2)。蓄積リングは、 多数の 10 m と 5 m の直線部をもつ設計としており、複数台の挿入光源を同一の直線部に 配置することが可能である。原理的には 1 本のビームラインで 10 eV から 100 keV までの 広波長域に対応させることも可能である(図 1-3)。2.5/5.0 GeV のような大きな切り替え は世界的にも例がなく、PF・PF-AR でのマシンスタディも含め、技術開発および実証実験 を進める。



図 1-3: PF-HLS のエネルギースペクトル例。

[1] K. Harada et al., J. Synchrotron Rad. 29, 118 (2022).

## 2. サイエンス

#### 2-1. 元素選択的な構造・磁気状態分析による磁性薄膜研究の深化

磁性薄膜は、垂直磁気異方性など特異な磁気状態を示すことが知られており、さらに、 非磁性体も含めた異なる薄膜を適切に積層することで、巨大磁気抵抗効果や交換バイアス 効果など、いわゆるスピントロニクス技術として応用されている興味深い現象を示す。こ れらの特異な現象の起源の一つとして、nm スケールの薄膜に特有の、バルクとは異なる 原子配列(構造)があることは論を待たない。薄膜の構造と磁性は様々な手法で研究され ているが、薄膜が示す磁性は、ほんのわずかな構造や化学状態の違いによって大きく変化 するため、確実に同じ試料に対して、構造と磁気状態の両方を観察することが極めて重要 である。磁性薄膜は多くの元素から成り立っており、その磁性の理解のためには、それぞ れの元素の磁気モーメントを元素選択的に観察することが必須である。

PF-HLS では、2.5 GeV と 5.0 GeV の切り替えによって、一つのビームライン、測定装置において幅広いエネルギー領域の X 線が利用できるため、全く同じ試料に対して、構造 と磁気状態を観察することができる。例として周期長 56 mm の APPLE-II 型アンジュレー タでカバーできるエネルギー範囲と測定手法を図 2-1-1 に示す。EXAFS(直線偏光利用) は、元素選択性と偏光依存性によって、積層されたそれぞれの薄膜(構成元素が異なる) について、膜の垂直方向と面内方向を分離して結合距離などを決定でき、界面における格 子整合/不整合や、そこから生じる構造の歪など、特異な磁性の発現に直結する構造情報 が得られる。磁性薄膜の主要な構成元素である 3d 遷移金属の K 吸収端、4d、5d 遷移金属 の L 吸収端は 2~12 keV 程度の間にあり、これらの吸収端を利用して EXAFS 測定を行う ことができる。一方、磁気状態の分析には、やはり元素選択性を持つ XMCD(円偏光利用)、 XMLD(直線偏光利用)が極めて有効である。磁性を担う軌道を直接観察するためには、 3d、 4d 遷移金属の L 吸収端、希土類元素の M 吸収端が適しており、これらは数 100 eV から 4 keV の範囲にある。5d 遷移金属に対しても、M 吸収端(2~3 keV 付近)が利用で きる。このように、磁性薄膜を構成するほぼ全ての元素に対して、構造と磁気状態を観察 することによって、特異な磁性の起源を明らかにし、磁性薄膜研究を飛躍的に深化させる。



図 2-1-1: [左] 磁性薄膜における構造と磁性の模式図。基板に対して格子定数が異なる薄膜を成長さ せることにより、界面における格子整合/不整合や薄膜成長に伴う構造歪み等が生じ、特異な磁性の発 現につながると考えられている。[右] 周期長 56 mm の APPLE-II 型アンジュレータがカバーするエ ネルギーと対象元素、測定手法の関係。

#### 2-2. 広波数領域散乱・電子状態観察による液体・ガラス構造研究の深化

液体やガラスの性質は構造と深く関連している。地球科学的には、様々な不適合元素(結 晶に入り込みにくい元素)を包摂するケイ酸塩マグマあるいは水流体の性質を理解するた めに、材料科学的には、様々な元素の添加による機能性ガラス、(完全あるいは一部)結晶 化したガラスセラミクス、金属ガラスなど、極めて幅広い組成に関して、その構造に興味 が持たれる。液体やガラスは、無秩序で構造をもたないと思われがちだが、原子間の相互 作用により、ある原子周りの短距離構造(ユニットの構造)をもち、さらにユニット同士 の結合が織りなす中距離構造を示すことも多い。これらの比較的短いスケールの構造は、 散乱情報を高波数領域まで得ることで明らかにされる。一方、交ざり合わない組成が混合 する、あるいは不混和領域に至り一部が結晶化するような場合などには、界面エネルギー などを反映した不均一構造が現れ、これは一般的に低波数・小角領域の散乱情報として観 察される。さらに、様々な元素を包摂しうるという液体やガラスの特性を考えると、注目 元素の電子・構造情報が抽出できる XAFS や異常(共鳴) 散乱といった元素選択的な測定 を組み合わせることで、より詳細な構造決定が期待できる。しかし、融点が高い、蒸発に より組成が不安定、比較的長い時間をかけて構造緩和が起こるなど、試料の状態の再現が 必ずしも容易でないことがある。そのような場合、同一の条件が保証される、同じビーム ラインでの測定が望まれる。

PF-HLS では、真空封止アンジュレータを用いることにより、5.0 GeV では 4~100 keV の X 線が得られ、これまで行われてきた小角散乱・全散乱測定が可能であることに加え、 2.5 GeV に切り替えることにより、1~4 keV の X 線が利用可能になる。この領域には、Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, Ar, K, Ca といった、地表での元素存在度が高く、地球科学的・材料科 学的に重要な元素の K 吸収端が存在する。これらのありふれた元素についてでさえ、液体 やガラス中での配位数や価数は必ずしも自明ではなく、電子状態・構造と、粘性・ガラス 化温度・強度などのマクロな性質との関連は今後解明されるべき課題である。さらに、4d 遷移金属の L 吸収端、希土類元素の M 吸収端も存在し、マグマと結晶の間の構造と不適 合元素分配の関係、ガラスで機能を発現する元素の電子状態と構造の関連なども観察でき る可能性があり、広波数領域散乱・電子状態観察は液体・ガラス構造研究を飛躍的に深化 させると期待される。



図 2-2-1: 元素選択的測定と広波数領域散乱測定の同時測定による液体・ガラスの構造研究の例。液体 やガラスは様々な元素を取り込むことができる。各元素の電子・配位状態は機能の発現に重要な役割 を果たすとともに、様々なスケールの構造と関係している。

## 2-3. 放射線治療の高度化を目指す放射光照射技術と放射光計測技術の融合

放射線治療は、手術、抗がん剤とともに、古くからがんの3大療法の一つとして知られ ている。放射線治療では、放射線のエネルギーによってがん細胞を死滅させるだけでなく、 周辺の正常細胞に可能な限り損傷を与えないことが重要である。そのため、腫瘍の部分に 線量を集中させたり、がんと正常細胞の生物学的性質の違いを利用したり、さらにそれら を組み合わせた多くの放射線治療が提案され、実用化されてきた。例えば、超高線量率照 射(FLASH radiotherapy)は、通常の放射線治療の1000倍以上の高い線量率で短時間照 射すると、腫瘍の応答(治療効果)は通常の線量率とほとんど変わらないのに対し、正常 組織の障害は軽減されるという治療方法で、注目を集めている。この治療方法の原理とし て、高線量率照射により高密度のラジカルが発生して酸素の枯渇が起こることで正常細胞 の DNA 損傷が抑制されるのに対し、腫瘍ではもともと酸素が欠乏しているため影響が少 ないという説が有力であるが、放射線化学的メカニズムの研究は進んでいない。

放射光は、吸収端を利用した元素選択的な照射や、マイクロビームを利用した部位特異 的な照射など、放射線生物作用の初期過程を制御できる優れた光源であり、放射線治療の 高度化に資する様々な知見を生み出している。これまでは、主に照射後数 10 分から数 10 日程度の時間スケールで起こる反応を、生化学的・細胞生物学的手法で観察する研究が中 心であった。しかし、FLASH の例でもわかるように、放射線のエネルギー付与からラジカ ル生成、生体分子損傷の生成といった、より短い時間スケールで起こる反応が、最終的な 生物作用に大きく影響することは明らかである。研究が遅れているこの短い時間スケール の反応は、不均一系である細胞や組織に対して時空間的に不均一に起こる現象であり、放 射光をプローブとする計測技術の得意分野でもある。

PF-HLS では、これまでに培ってきた放射光照射技術や生物試料環境に関する技術を放 射光計測技術と融合させることによって、照射とそれに引き続き生じる放射線化学反応の 観察を同時に行うことが可能になる。さらに、2.5/5.0 GeV 切り替えによる高エネルギー X線の利用により、実験動物や厚みのある 3D 培養系などを試料とする実際の放射線治療 条件に近い系での研究への展開も期待できる。



図 2-3-1: 放射光照射技術・生物試料環境に関する技術と放射光計測技術の融合。より短い時間スケー ルの反応を観測することにより、放射線治療の高度化に資する放射線生物作用機構の解明を目指す。

#### 2-4. ソフトマテリアルの構造と機能の相関研究に向けた計測手法の融合

プラスチックに代表されるソフトマテリアルは、nm~µmの広い空間スケールで階層構造を形成し、各階層が空間・時間的に複雑に相互作用することで、最終的な系全体の物性や機能が決まる。この不均一な時空間階層構造の形成メカニズムを解明することは、ソフトマテリアルの機能を向上させるため重要である。

ソフトマテリアルは炭素や窒素、酸素などの軽元素から構成され、特に炭素は分子骨格 や官能基に含まれるため重要である。さらに Na、Mg、K、Ca といったイオンは機能や物 性に強い影響を与える。小角 X 線散乱法(SAXS)は、nm ~ µmの広い空間スケールの構 造評価が可能な階層的高次構造解析に適した手法であるが、各成分の空間分布を区別して 得ることは難しい。しかし、元素の異常分散効果を利用した小角散乱法(ASAXS)であれ ば、これらの元素の空間分布、結合環境、機能性原子団、配向性などの評価が可能である。 例えば、炭素をターゲットにした ASAXS では、炭素の化学シフトを上手く利用して、官 能基や異種分子骨格の分布状況を識別することができる。

PF-HLS では二つのビームが同時に利用できるため、従来では難しかった複数の手法に よる同時測定が可能となる。例えば、軟 X 線と数 keV の X 線の ASAXS を用いれば、炭素 の異種官能基と機能や物性を支配するイオンの空間分布を同時に知ることができる。また、 高角 X 線散乱法(WAXS)の測定を同時に行えば、試料の結晶性やサブ nm スケールでの 配向性などの情報も得られる。SAXS/WAXS 同時測定による階層構造評価に加え、X 線吸 収分光法を複合して、変形中のオペランド観察などを行えば、構造と機能の動的変化を追 跡することも可能となる。2 ビーム利用によって、ソフトマテリアルが持つ複雑な階層構 造と機能の相関の解明が期待される。



図 2-4-1: 官能基識別・イオン分布解析が可能なマルチビーム小角 X 線散乱測定の例。海島構造を持つ ソフトマテリアルについて、X 線エネルギーE1 ではある官能基を有する島構造(白)が観察でき、E2 では官能基成分の異なる二つの島構造を識別できる。E3 では島の種類が見分けられない。また、X 線 エネルギーE'1 を用いるとイオン分布を見分けられないが、E'2 では見分けることができる。これらの 組み合わせにより異種官能基とイオンの空間分布を同時に知ることができる。

## 2-5. 時空間スケールを統合した光化学反応研究の創成

光によって起こる化学反応(光化学反応)では、通常の条件では起こりえない反応を実 現することができる。その機構を理解することは、科学的な興味はもちろん、水から水素 と酸素を発生する光触媒など、太陽エネルギーの利用という実用的な観点からも喫緊の課 題である。光化学反応は、光照射による電子励起と正孔の生成に始まり、電子と正孔の移 動、活性種の生成などのプロセスを経て、空間分布の変化を伴う化学反応の進行につながっ ていく。これらのプロセスは、fs から s にわたる広い時間スケールと、原子レベルから μm にわたる広い空間スケールにおいて展開される。光励起は通常、原子スケールで局所的に 起こるが、化学反応においてはしばしば、異なる化学種が nm ~ μm スケールのドメイン を形成し、そのドメインが拡大・縮小したり、移動したりすることによって反応が進行し ていく。特に、ドメインの境界における反応は、化学反応全体の鍵を握ることが多い。

PF-HLS では、光励起によってどのような電子状態を経てどのような活性種が生成し、 それがどのような空間的な移動を経て反応に至るのかといった、時空間スケールを統合し た光化学反応研究を創成することを目指す。特に重要なのは、時間スケール fs ~ ps、空間 スケール nm における光励起・緩和過程と、時間スケール µs ~ s、空間スケール nm ~ µm における元素・化学状態の空間分布(ドメイン)の変化を同時に観察し、これらがどのよ うにつながって光励起から化学反応に至るのかを明らかにすることである。このために、 SR ビームを用いた時間分解能 ms ~ s、空間分解能 nm ~ µm 程度の広域イメージング(吸 収端を利用したコヒーレントイメージング、光電子や蛍光X線の結像型イメージング(吸 収端を利用したコヒーレントイメージング、光電子や蛍光X線の結像型イメージングなど) で、反応中に時々刻々と変化するドメインの空間分布を追跡すると同時に、10 nm 程度に 集光した SP ビームを用いて、光励起・緩和過程を fs ~ ps スケールで pump & probe 測定 する(XAS、光電子分光など)。これらを同時に測定することで初めて、SP ビームで観察 している光励起・緩和過程が、どのドメインのどの部分(内部、外部、境界など)で起き ているかを区別することが可能になる。このようなドメインを分離した時空間分解観察に よって、光励起から化学反応に至る一連のプロセスを、広い時空間スケールにまたがって 統合的に理解する、新たな光化学反応研究を創成する。



図 2-5-1: SP ビームと SR ビームの同時利用による時空間スケールを統合した光化学反応観察の模式 図。UV または可視光(全体に照射)によって励起した光化学反応を、SP ビーム(超高速局所プロー ブ)と SR ビーム(広域プローブ)で同時に観測する。励起・緩和過程はドメインの内部、境界、外 部で異なることが予想され、ドメインの動きによって SP ビームの観測部位が時々刻々と変化する。 SR ビームは化学状態の空間分布を追跡する。

## 2-6. X線誘起相転移研究の創成

物質における相転移現象は、物性や構造の変化を伴うことから、応用面はもとより、外 場によりどのような状態を安定相として形成するのか、という物理現象に関しての根源的 な問いへの興味から、学問的にも重要なテーマである。

強相関電子系や分子集合体などの凝縮系において、電気伝導性、磁性、誘電性などの多 彩な物性が発現する背後には、これらの系におけるスピン、軌道、電荷と強く結合した格 子の自由度があり、これらの秩序状態の測定は物性の発現機構を解明する上で不可欠であ る。このような系における光誘起相転移では、光励起された分子や原子、イオンを起点と し、物質中で光誘起相が広がっていくモデルが提唱されており、1 光子により数百サイト の相変化を引き起こす現象も知られている。また、複数の自由度が複雑に絡みあう系でし ばしば顕れる巨大な外場応答は、相転移近傍における2相共存状態と密接に関わりがある ともいわれ、相共存やその時間・空間発展が注目されている。このような観点から、外場 による相制御下での測定も数多く行われ、レーザー光をポンプ光として、放射光や自由電 子レーザーによる X 線をプローブ光として用いる pump & probe 実験が展開されている 他、放射光誘起の構造相転移も少なくない例が知られている。放射光は幅広いエネルギー 範囲をカバーし、元素選択的に特定の軌道を励起できるという利点がある。相転移を誘起 するポンプ光とプローブ光の二つの放射光を同時に照射可能な PF-HLS では、相転移挙動 の時間・空間発展の観察において、これまでにない実験が可能である。

PF-HLSでは、SP光をnmサイズに集光し、これによって形成された起点からの相転移 の空間的な発展の様子を、SR光により、nm~µmスケールで観察可能である。同時に時 分割測定を行うことで、光誘起相転移におけるメゾスコピックなドメイン形成過程と伝播 過程を明らかにできる。観察手法としては、PFでも精力的に開発が進められているコヒー レントイメージングやマルチスケール軟X線顕微鏡などを応用する。PFにおいて実証さ れている角運動量をもつ光渦を用いたスキルミオンなどの特徴的な相の形成過程と伝搬過 程の観察の他、放射光による元素・軌道選択的な励起により、新しい種類の相転移も発見 できるかもしれない。2ビーム利用による、新たなX線誘起相転移研究の創成を目指す。



図 2-6-1: SP ビームにより形成された光誘起相の時間・空間発展過程を、SR ビームを用いた X線顕微 鏡によって観察する例。1 光子による多数の分子の変化(光ドミノ効果)や、巨大な外場応答の起源と 予測されている二相共存状態などの観測を目指す。

## 3. ビームライン

#### 3-1. SR シングルビーム

PF-HLS では、2.5/5.0 GeV 選択式により1本のビームラインで広い波長領域の高輝度 光(SR ビーム)が利用できるようになる。ここでは、広波長域利用のためのビームライン 技術について述べる。

ビームライン光学系の構成は、各波長域における従来の構成と同様であるが、同じ光学 パスで広い波長範囲をカバーするためには、複数の光学素子の切り替えと高次光除去が鍵 となる。回折格子分光器であれば複数の回折格子、二結晶分光器であれば複数の結晶を切 り替えることによって広い波長域をカバーし、適切なミラーやバンドパスフィルターを利 用することにより高次光を除去する。さらに、軟X線領域から硬X線領域まで利用する場 合には、回折格子分光器と二結晶分光器を切り替えて利用する。

広い波長範囲をカバーする回折格子分光器の例として、PF BL-19A/B のデザインを紹介する[1]。BL-19 A/B は、軟X線領域の可変偏光アンジュレータを光源として、90 eV~2 keV の利用が可能な高輝度ビームラインである。不等間隔平面回折格子を用いた分光器 (VLS-PGM) が備えられ、可変偏角とすることで1 種類の回折格子でも広い波長範囲を カバーするが、さらに 600 l/mm と 1200 l/mm の2 種類の回折格子を利用できる。600 l/mm は 75~1000 eV、1200 l/mm は 150~2000 eV を利用できるように設計されており、650 eV 付近で切り替えて利用される。高次光除去については、Cr、Ni、Au をストライプ 状に蒸着した多色ミラーを振り分けミラーに採用し、Cr で 500 eV 以上、Ni で 800 eV 以上の高次光の約半分程度を除去し、800 eV 以上では Au を利用している。

PF-HLS では、高輝度設計により小さいビームが利用できるため、溝深さをステップ的 あるいは連続的に変えて回折効率を制御した多層膜回折格子を利用して高エネルギーまで カバーする計画である。適切に設計された回折格子分光器では、2次光以上は回折効率が 下がるため、1枚のミラーでもある程度の高次光抑制が期待されるが、より高度な除去が 必要とされる場合には、ダブルミラーやトリプルミラーを用いる。高次光抑制用のダブル ミラーの例として、PF BL-12A の高次光除去ミラーを挙げる。本ミラーは、旧 BL-11A で 使用されていた 2 枚組の Si 製平面ミラーで、後置集光ミラー(M3S)と集光点の間に配置 される。表面の半分に Ni が蒸着されているので、ミラーを並進させることにより"ミラー 抜き"、"Si ミラー"、"Ni ミラー"の3通りが選択できる。入射角も 1.5 度から 10 度まで変 更でき、適切に高次光を除去できる設計となっている[2]。300 eV 程度以下のエネルギー が低い領域では、ミラーによる高次光除去が困難になるため、バンドパスフィルターを利 用する。例えば、0.5 μm 厚の Al フィルターを用いれば、70eV でも 3 次光まではほぼ完全 に抑えられるため、35~70eV が利用可能である。140~170 eV では 0.2 μm 厚 Au フィル ター、200~280 eV では 2 μm 厚 C フィルターを利用する。

二結晶分光器でも、2種類の分光結晶を切り替えることで広いエネルギー範囲をカバーできる。例えば、Si(111)とSi(220)を20 keV 周辺で切り替えれば、2.1~70 keV 程度をカ

バーでき、より高エネルギーを用いる場合には Si(311)等を利用する。硬 X 線の高次光除 去にもミラーの表面蒸着が効果的であり、非蒸着の Si表面とストライプ状に蒸着した Rh、 Pt から適切に選択すれば、上記のエネルギー範囲の高次光を十分減衰させることができる。 PF-HLS の高い輝度を考えれば、広波長領域の利用を見据えて視射角を 2 mrad 程度と設 定しても、実用的なサイズのミラーを実現できる。より高度に除去が必要な場合には、ダ ブルミラー等を用いる。

軟 X 線領域から硬 X 線領域にまたがる波長領域を利用するビームラインの例として、 PF BL-12A を挙げる。BL-12A は、旧 BL-11A, 11C, 11D の機能を有したビームラインと して設計され、2023 年度中に建設を完了する予定である。初段ミラーを切り替えることで 回折格子分光器と二結晶分光器を選択し、最終段ミラーを出し入れすることで、50 eV か ら 5 keV の広波長域ビームを同一試料位置に照射する設計である (図 3-1-1)。PF-HLS で は高輝度なビームが利用できるので、より簡便にビームの振り分けが可能になると期待さ れる。今後、ビームライン光学系の設計、放射線や熱負荷の見積りと防御方法や対策など、 詳細を検討する。また、BL-12A を利用して、回折格子と二結晶分光器の切り替え機構の テストや高次光除去性能の評価など、広波長域利用の実証実験を進める。



図 3-1-1: 広波長域軟 X 線ビームライン BL-12A のレイアウト図(側面図)。

#### 3-2. SR+SR マルチビーム

PF-HLS では、蓄積リングの直線部に複数台の挿入光源を配置することで、1 本のビー ムラインで複数の高輝度光 (SR ビーム)が利用できるようになる。ここでは2 ビーム同時 利用のためのビームライン技術について述べる。

図 3-2-1(a)は、軟 X 線領域の 2 ビーム利用を想定した、いずれも回折格子分光器を利用 した斜入射光学系である。タンデム配置の挿入光源から、 2 ビームが 1 mrad の方位差を もって出射され、試料位置でそれぞれ 10 µm と 50 nm 程度に集光される。2 ビームの同時 利用には集光位置の調整が重要である。図 3-2-1(a)では低集光ビームの集光位置に対して、 高集光ビームの集光位置を M3-SP ミラーの出射角で粗調整した上で、FZP により微調整



を行う。意図しない2ビームの相対的な位置変動を防止するため、二つの出射スリットと M4-SR ミラー、FZP を単一の堅牢な架台に載せる。図 3-2-1(b)は、硬 X 線領域の2ビー ム利用を想定した、二つの二結晶分光器を利用する光学系である。図 3-2-1(a)の例と比較 して、2ビームの近接条件がより厳しくなるが、分光器を互い違いに配置する、水平ミラー を正対配置にするなどにより実現する。試料位置での集光ビームの相対制御についても、 より厳しい条件になるため、最終光学素子の形状や配置を綿密に設計する必要がある。図 3-2-1(c)は、軟 X 線領域と硬 X 線領域の2ビーム利用を想定し、軟 X 線ビームの角度をつ けて硬 X 線ビーム位置に合わせる光学系となっている。

2ビーム同時利用実験においては、上述の通り、2ビームの位置制御が非常に重要にな る。安定に位置を制御するためには、ビーム位置の検出と調整、および、光源や光学系の 安定化が必須である。光源でのビーム位置調整に利用される白色ビーム位置モニタ(BPM) と試料位置でのビーム位置調整に利用される単色 BPM を適切に配置し、必要に応じて ビーム位置フィードバックシステムを実装することでビーム位置制御を行う。また、光学 系を安定化させるため、静的な真空ポンプの採用、堅牢な光学架台の採用、光学素子の熱 的安定化、ハッチ内空調の安定化などを行う。さらに白色2ビーム位置計測システムを用 いた光源フィードバックによるビーム位置制御、試料位置での2ビームの干渉抑制と集光 ビームの制御などを試験し、光学系や実験装置の安定化についても設計や検討を進める。

建設中の開発研究多機能ビームライン PF BL-11A,-11B は、偏向電磁石光源ではあるが、 軟 X 線と硬 X 線の同時利用ができるように設計されている。このビームラインも用いて、 ビーム位置制御機構の設計や開発、および、2 ビーム同時利用の実証実験を進める(図 3-2-2)。現在、PF-UA、UVSOR および HiSOR と協力して、検討会や研究会などを定期的 に開催し、様々な検討を進めている。



[1] https://www2.kek.jp/imss/pf/eng/apparatus/bl/bl19ab.html.

[2] Y. Kitajima et al., J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 101-103, 927 (1999).

#### 3-3. SR+ SP マルチビーム

PF-HLSでは、蓄積リングからの高輝度光(SRビーム)に加え、超伝導ライナックからの極短パルス光(SPビーム)利用できるようになる。ここでは SP と SR の 2 ビーム同時利用のためのビームライン技術について述べる。

SP ビームの高い時空間分解能を利用した質的に異なる実験を展開するため、ビームラ インにおける光路長・照射位置・試料位置について、高精度な時空間制御が要求される。 SP ビームのパルス幅は 50~400 fs である。基準信号に対して数 fs のジッターまで制御さ れた SP ビームが得られる。SP ビームの短パルス性を活用するため、ビームライン・測定 器の時間特性について、ジッター・ドリフト・ズレが 10 fs 以内となるように制御する。こ れは光の経路に換算して 3 µm 以内である。また、タイミング情報を活用するビームライ ンでは、試料位置についても、特に光の進行方向について、µm 精度での再現性を容易に 得られる必要がある。

SPとSRの2種のバンチを完全に同期させるため、専用の250バンチモード運転を導入する。つまり、ハーモニクス数1250のうち50バケット毎に一つのバンチを占有したSRビームの運転モードを採用することにより、完全に同期したSPバンチが得られる。超伝導ライナックからは、最大1nC×6000(ミクロバンチ)×10Hz(マクロバンチ)が入射される。1nCバンチは大電荷であるが、それでもFELとは異なり、数パルスでスペクトル・回折パターンを得るには不十分である。したがって、効率的に信号を積算できる手法を利用する必要がある。例えば、分光利用では、白色光を試料に照射し、透過吸収光を分光して記録する分散XAFS型の計測[1]を行う。一方、回折・散乱利用では、単色化した光を照射し、回折・散乱されたX線の2次元イメージ[2]を記録する一般的な手法を用いる。

SP ビームをプローブ光とした超高速時間分解実験(例えば、サイエンス 2-5) や SP と SR の 2 ビームを用いた pump & probe スキームによる実験(例えば、サイエンス 2-6) を 実現するためには、SP ビームが試料に届くタイミングを記録することが重要である。この タイミングのモニタは 2 段階で行う。粗調整用としては、ピコ秒ストリークカメラあるい は高速フォトダイオード+高速ロックインアンプを準備し、10 ps オーダーでのモニタを実 現する。要求を満した時間分解能を有する可視・近赤外レーザー用の装置は市販されてお り、放射光に適合させる改造・改良を行う。次に、10~100 fs オーダーでのタイミングを調 整するため、レーザーにより励起される高速光誘起現象を利用したモニタ法を確立する。 最新のレーザー同期技術では、RF に対して 30 fs 以下のジッターで同期が実現されている [3]。したがって、十分に高速な光誘起現象(例えば、[4]) を SP および SR ビームでモニ タすることにより、タイミングをレーザー発振の位相に記録できる。

分光したビームを、基準に対するタイミングを変えずに利用するためには、分光器の駆動に伴う光路長の変化を補償する必要がある。FEL 用の二結晶分光器では、分光器駆動による光路長の変化が時間分解実験に影響することが示されており、その影響を取り除くための光路長補正機構が実現されている[5]。PF-HLSのパルス特性を活用した分光測定についても、分光器内に光学素子間の距離を計測するための高精度測量用レーザーを配置し、

変化した光路長を補正する機構を備えたビームラインを整備する。回折格子分光器では、 回折格子上での分散方向のビームサイズに依存して、パルス長の伸長が起きる可能性が報 告されている[6]。必要に応じて伸長を抑制する分光器の開発を行う。1 パルスあたりの光 量と分解能のバランスも検討する必要がある。

SP と SR の 2 ビームの時間差は SP バンチの入射により高精度に制御される。一方で、 ビームライン毎の光学経路長には違いがあり、実験条件や実験環境によって時間差に変化 が現れる可能性もある。このため、ビームラインには光学径路長を変化させる機構を備え る必要がある。これは、4 つの光学素子を用いて、光学的シケインを構成することで実現 できる [7]。波長、パルス幅、単色光か準白色光かなど、制御する光の性質に応じた開発を 行う。光路長を変化させた際に、集光特性を変化させない機構の開発も重要である。

- M. Katayama *et al.*, J. Synchrotron Rad. 22, 1227 (2015); B. Abraham *et al.*, J. Synchrotron Rad. 26, 629 (2019).
- [2] T. Donath et al., J. Synchrotron Rad. 30, 723 (2023).
- [3] H. Enquist et al., J. Synchrotron Rad. 25, 570 (2018).
- [4] A.M. Lindenberg et al., Science **308**, 392 (2005); A.L. Cavalieri et al., Phys. Rev. Lett. **94**, 114801 (2005).
- [5] Y. Kim et al., J. Synchrotron Rad. 29, 194 (2022).
- [6] M. Brzhezinskaya et al., J. Synchrotron Rad. 20, 522 (2013).
- [7] S. Roling and H. Zachaias, "Split-and-Delay Units for Soft and Hard X-Rays", in E. J. Jaeschke et al. (eds.), Synchrotron Light Sources and Free-Electron Lasers (Spinger Nature 2020).

# 4. 光源加速器

#### 4-1. 概要

世界的な光源加速器の開発研究においては、いわゆる新第3世代と呼ばれる低エミッタ ンス光源の流れを受けて、極低エミッタンス・回折限界光源である第4世代光源を目指す 動きが多い。一方で、我々は幅広いユーザーのサイエンスを実現する手段として光源のエ ミッタンスを唯一の指標とせず、高い水準で先端性と汎用性を共存させる光源を提案する。 新第3世代性能を超える蓄積電子バンチ(ストレージモード:SR Beam)と 2.5/5.0 GeV 選択式による幅広い波長域の放射光利用を実現することでサイエンスの深化を促進し、 SR+SR の 2 ビーム利用によって融合を、最後に超伝導ライナックからの高性能電子バン チ利用(シングルパスモード:SP Beam)によって創成を狙う戦略である。カーボンニュー トラル・グリーントランスフォーメーションは世界的な重要課題であり、光源加速器の建 設・運転コスト削減への開発研究は不可欠である。PF-HLS では、現在の PF および PF-AR の運転経費の合算から 25~30%の削減が見込まれる。なお、光源加速器の章で記載す る各種パラメータはあくまでも暫定値であり、今後の開発研究によって、随時更新してい くものである。

全体デザインの設計指針は以下の通りである:1)高エネルギー(~100 keV 領域)のフォ トンを供給するためには 5.0 GeV の加速器が妥当であり、2)低~中エネルギー領域(VUV ~SX 領域)には 2.5 GeV の加速器が望ましい。3)放射光の強度を考慮して偏向電磁石で はなく挿入光源(Insertion Device, ID)からの光を基本とし、必要な直線部を配置する。 4) エミッタンスとして 5.0 GeV で 1 nmrad を目安とする。

運転時の消費電力を削減するには偏向電磁石の磁場をできるだけ弱くすることが望ま しい。建設場所としては日本全体の放射光施設の分布を考えて KEK つくば地区が妥当で あり、キャンパス内に無理なく建設可能であることも必須である。これらの条件より周長 約750mを選定した。最初に蓄積リング部分を建設してユーザー運転を開始した後、高性 能の超伝導ライナックを建設する計画である(図4-1-1)。前者では常伝導の小型線形加速 器とブースターリングによる入射とする。表4-1-1に全体のパラメータ表を示す。



図 4-1-1: 光源加速器の概念図。最初にリング部分を整備し(左)、その後超伝導線形加速器を建設 する(右)。最初の段階ではブースターリングによる入射を想定している。

パラメータ	Value			
エネルギー [GeV]	2.5	5.0		
周長 [m]	749.5			
ラティス	Double DDBA/8BA (modified)			
ノーマルセル数	4			
アイソクロナスセル数	11			
RF 電圧 [MV]	1.6	6.5		
RF バケット高さ [%]	8.93	7.76		
一周当たりの放射損失 [MeV/turn]	0.222	3.557		
モーメンタムコンパクション因子	$3.24 \times 10^{-5}$			
ベータトロンチューン, v <sub>x</sub> /v <sub>y</sub>	47.865/16.655			
減衰時間, x/y/z [ms]	25.9/56.2/67.5	3.24/7.03/8.44		
蓄積電流 [mA]	500	200		
自然エミッタンス[nmrad]	0.208	0.832		
エネルギー拡がり	$7.417 \times 10^{-4}$	$1.48 \times 10^{-3}$		
自然バンチ長	4.72 ps (1.4 mm)	7.21 ps (2.2 mm)		
タウシェック寿命[h]	1.25 *	21 *		

表 4-1-1: 主要パラメーター覧

\* Coupling 1%, full bucket (1250)

#### 4-2. 蓄積リングのラティス、オプティクス、ビームダイナミクス

PF-HLS の 2.5/5.0 GeV 選択式蓄積リングを、概要で述べた指針に下記の条件を加えて 設計した。

- ・SP ビームが通過する領域を、バンチ伸長抑止のためにアイソクロナスとする。
- ・VSX 領域で放射光2ビーム利用実験を行うために、数mの挿入光源を2台と軌道スイッ チングシステムを設置可能な、長さ10mの長直線部をリング全周にわたって多数設置 する。
- ・孤立大電荷バンチを蓄積するために、極端に小さな電磁石ボア径を採用しない。真空ダクトは必ずしも円形ではないが、円形換算した電磁石の最小ボア直径を、現在のSOLEILを参考に30 mmとする。ここから、4 極電磁石および6 極電磁石について、電力効率からそれほど飽和しない領域で利用するとした場合の磁場勾配上限値が決まる。4 極磁場係数を約 55 T/m、6 極磁場係数を約 6500 T/m<sup>2</sup>を上限値とした。
- ・放射光による真空熱負荷を軽減するため、偏向電磁石の強さを弱くする。5.0 GeV で 0.7 Tを目安とした。

ESRF-EBS や MAX IV などで採用されている極低エミッタンスの MBA/HMBA ラティ スは、オプティクス的に電磁石を長くすることが難しいため、磁場勾配の制限から採用す ることができない。エミッタンスの目標から、仮にセル数を増やしたとしても、第3世代 的な単なる DBA や TBA では性能不足である。ハイブリッド光源(ハイブリッドリング) を提案した論文[1]では、NanoTerasu のラティス[2]をベースに検討を進めたラティスを 示したが、このラティスは上述の設計条件を満たす解として最適である。PF-HLS のラティ スは、論文で示したラティスから、周長を 350 m から 750 m に伸ばし、セル数を 16 セル から 30 セルまで増やし、1 セルおきに直線部の長さを 10 m まで伸ばす。セルをアイソク



図 4-2-1: リングのラティスとオプティクス。(a) 基本となる 4 種のセルのオプティクス、(b)リン グ1 周のセル配置。M は5 m 直線部を含むノーマルセル、L は直線部 10 m のノーマルセル、MI は直線部5 m のアイソクロナスセル、LI は直線部 10 m のアイソクロナスセル。各セルには2 m の色消しでない短直線部が含まれる。

ロナスにするために、ノーマルセ ルの分散バンプ部分の4極電磁石 を機能結合型逆偏向電磁石に変更 する。直線部を10mとすると、エ ミッタンス増大を防ぐためには分 散バンプ部分にある4極電磁石を 2台とも変更する必要がある。リン グは5m直線部を含むノーマルセ ル、10m直線部のノーマルセル、 それぞれをアイソクロナス化した セル、の4通りのセルの組み合わ



図 4-2-2: SR 入射点におけるダイナミックアパーチャ。

せとなる。全てのセルには2箇所の分散バンプ部分と、その間に色消しでない2mの短直 線部が含まれる。リングのラティスとオプティクスを図 4-2-1 に示す。

従来型のキッカーセプタムを用いた入射のためには、リング入射点で5mmの安定領域 が必要となる。共鳴と振幅依存チューンシフトの項を解析的に補正する方法[3]で6極磁 場係数を最適化した。リング電磁石に標準偏差50µmの据付誤差、0.05%の磁場誤差、0.1 mradのXYカップリング方向の回転誤差を±1σまでの乱数として入れ、100通りの種に 対して計算したCOD補正後の安定領域の広さを図4-2-2に示す。入射に必要な5mmの 安定領域が確保されていることが分かる。

図 4-2-3 に、アイソクロナス部分を通過する SP ビームに対するバンチ伸長とエミッタ ンス増大に関する ELEGANT[4]によるシミュレーション結果を示す。SP ビームの初期パ ラメータとして、エミッタンス 0.1 nmrad、電荷 1 nC、エネルギー拡がり 0.5%とし、バ ンチ長は 50 fs、100 fs、200 fs の 3 通りについて 10 m の長直線部中央の値を示す。初期 バンチ長を 200 fs にすると、CSR によるエミッタンス増大やバンチ伸長がほぼ抑制でき ることが分かる。

ビーム不安定性やビームパラメータの変化を引き起こすインピーダンスには、ダクトの 材質等で決まる抵抗性インピーダンスとダクトの凹凸構造による幾何学的インピーダンス がある。特に、後者の正確な評価には各リング要素の設計が必要である。適当な抵抗性イ ンピーダンスのみの仮定(例えば、IDダクト:アルミ製、垂直口径8 mm、全長 180 m) の下、500 mA(0.4 mA×1250 バンチ)のマルチバンチに対してバンチ結合型ビーム不安 定性の最大成長率を見積もるとおよそ 10000 s<sup>-1</sup>になるので、10000 s<sup>-1</sup>以上の減衰率を持



図 4-2-3:リングのアイソクロナスセルの中心軌道上を通過する SP ビームのパラメータ変化。

つフィードバックシステムが最終的に必要になる可能性がある。また、モーメンタムコン パクション因子が非常に小さいので、クロマティシティによるビームスペクトルの変化が 急で、小さな正値で高次モードの不安定性を誘起する可能性もある。シングルバンチの垂 直方向モードカップリング不安定性の電流閾値はインピーダンスの減少やシンクロトロン チューンの増加で向上すると考えられるが、2.5/5.0 GeV 選択式であるため、モーメンタ ムコンパクション因子、放射損失、RF 電圧などを上げるという後者の対策(シンクロトロ ンチューン増加)は他施設の光源と比べて簡単ではない。前者のインピーダンス減少には ダクトアパーチャの拡大が有効であるが、アンジュレータや電磁石の垂直ギャップを広げ られるかが課題になる。インピーダンスによるビームパラメータの変化と電流閾値の評価 もシミュレーションや理論的な解析方法によって行っていく。クロマティシティやフィー ドバックの効果についてもその中に含める必要がある。

- [1] K. Harada et al., J. Synchrotron Rad. 29, 118 (2022).
- [2] N. Nishimori et al., Proc. of IPAC2019, 1478 (2019).
- [3] Y. Shimosaki, Proc. of PASJ2015, 468 (2015).
- [4] M. Borland, APS LS-287, September 2000.

## 4-3. 入射システム

電子蓄積リングへの電子ビーム入射においては、蓄積リングの狭小なダイナミックア パーチャ(5 mm)への入射を実現することが必須要件であることの他、輝度の低下および 光軸の変動がユーザーにとって実感されない「透明トップアップ入射」を実現することを 目指している。パルス多極磁石1台のみで入射を実現する方式はPFが世界に先駆けて開 発してきたものであり、蓄積ビームへの影響が小さいという利点がある。一方で、従来か らある4台のバンプ電磁石による方式は入射効率の実績と安定性・確実性の面で有利であ るため、現時点では両方のシステムを採用する構成とした。図4-3-1(上)に入射部セルに おけるバンプ電磁石の配置と入射ビーム輸送路側の電磁石の配置を示す。ビームラインと の干渉を避けるためリング内側入射としている。4台のパルスマグネットを使うシステム では磁場の相似性が高いことが必須であるため、それぞれ独立した電源を接続する独立型 を採用する。パルスセプタム電磁石電源、パルス多極入射システム、カウンターキッカー システムのパルス電源群は全て半導体スイッチを搭載する。半導体スイッチの導入により、 数10 ps の低時間ジッター、0.1%以下の高安定度の出力を実現する。1 MHz 高繰り返し出 力可能な半導体パルス電源も開発中であり、バンチ軌道制御に活用する。

図 4-3-1(下)は 5.0 GeV 運転時の入射ビーム位置である。蓄積リング側の水平ベータ 関数は 21 m、蓄積電子ビームのダイナミックアパーチャ片側 5 mm の領域に入射ビーム が包含される設計である。バンプ高さは通常 4 mm であるが、ビームコミッショニング時 の on-axis 入射を想定して 7.5 mm まで上げることを可能とする設計である。

蓄積リングで要請される放射光供給の運転モードに対応するために、ビーム入射器には 下記の4点の鍵となる設計要素が挙げられる。1)低エミッタンス入射ビームの生成と輸 送、2)大電荷孤立バンチをはじめとする多様なバンチフィルパターンの実現、3)2.5/5.0 GeVに対応したエネルギー可変電子ビームの入射、4)常伝導線形加速器(NC-Linac: NCL) による入射と超伝導線形加速器(SC-Linac: SCL)を使ったショートパルス電子ビーム入 射の実現。これら4点を実現するための設計を実施した。



図 4-3-1: 蓄積リング入射部における入射システム機器構成(上)と入射点におけるビーム位置(下)。

ビーム入射器は、全長約 35 m の NCL と、周長 720 m のブースターリング (Booster ring: BR) より構成する。また、NCL と BR の接続となるビーム輸送路 (NCBBT)、BR と 蓄積リング (Storage ring: SR) を結ぶビーム輸送路 (BSBT) もビーム入射器の構成要素 である。SCL を建設する際の構成も含めた全体の位置関係は図 4-1-1 右に示した通りであ る。BR および BSBT の接合の一例を図 4-3-2 に示す。

NCL のエネルギーは高い方がビーム不安定を避けることが出来る点で有利である一方、 建設・運用コストの面からは低い方が望ましい。また、最終到達エネルギーである 5.0 GeV までの比率(ランプアップスケール)が大きくなると電源をはじめとするハードウェア設 計が困難になることや、運用面での困難が想定される。そこで、NCL のエネルギーは 250 MeV、電荷量は1 nC、最大繰り返し 50 Hz として設計している。規格化ビームエミッタ ンスは 5 µmrad である。ブースターリングは、機能複合型偏向電磁石を採用した 60 セル の FODO ラティスで構成する。建物の建設コストを考慮してブースターと蓄積リングは 同じトンネル内に設置する設計としている。

SCL は地下トンネルに設置することが想定されている。蓄積リングへの輸送路(SCSBT) もアイソクロナス化し、蓄積リングに入射された SCL からの入射ビームは、蓄積リングを 周回せずに 2/3 周回後に蓄積リング内周側にけり出され、地下に設置されたダンプ点に廃 棄される (図 4-1-1 に dump で示す)。蓄積ビーム入射点および輸送路とショートパルス ビーム入射点および輸送路をそれぞれ独立に建設することで、NCL と SCL のいずれの運 用期間でも運用が共立可能である。



図 4-3-2: ブースターリングと蓄積リングを接続するビーム輸送路の一例。 NCBBT、SCSBT は省略してある。

#### 4-4. 高周波加速システム

高周波(RF)加速システムでは、加速空洞内に RF 電圧を励振してビームの縦方向運動 の集束を行うと共に、ビームが放射するエネルギーを高周波電力により供給する。システ ムの基本構成を図 4-4-1 に示す。マスターオシレータで発生する基準信号をローレベル RF 系(低電力高周波制御系)に入力し、大電力に増幅する前段階の RF 信号を作る。ローレ ベル RF 系では、加速電圧を一定に保つフィードバック制御や RF 機器の制御、異常時の 保護などが行われる。次に、小電力の RF 信号を高周波増幅器で 100 kW レベルまで増幅 し、伝送系を通して加速空洞に導き、RF 電圧を励振させる。高周波増幅器としては半導体 アンプまたはクライストロンを用いる予定である。高周波増幅器と加速空洞の間にはサー キュレータとダミーロードを配置し、空洞からの反射電力を分離・吸収し、高周波増幅器 を保護する。

PF-HLS の特徴である SR+SP マルチビーム運転と 2.5/5.0 GeV エネルギー切り替え運転を実現するために、RF システムとしては以下の項目が必要とされる。

1) SP ビームとの同期を前提とする SR 周波数選択と基準信号システム

2) 2.5/5.0 GeV の両エネルギーでビーム安定周回を可能とする RF システム

また、SR ビームを生成する蓄積リングでは大電荷を有する孤立バンチ周回や数百 pmrad のエミッタンスを持つビームの周回を予定している。このため、特にバンチ内散乱の影響 が大きい低エネルギー(2.5 GeV)では、以下も必要となる。

3) 多様な運転モードに対応可能なバンチ伸長システム

ここでは、3 項目について PF の現状を交えて説明し、今後の詳細設計に向けた基本的 な方針を述べる。

1) SP ビームとの同期を前提とする SR 周波数選択と基準信号システム

ビームラン側で SR ビームと SP ビームを受けることを考える。SR ビームは蓄積リング の RF 周波数とリングのハーモニクスに応じた間隔で到達、SP ビームは超伝導ライナック RF 周波数に応じた間隔の整数倍で約 0.6 ms 間(マクロパルス)連続して到達する。これ ら両ビームは、蓄積リングの RF 周波数とハーモニクス、超伝導ライナックの RF 周波数 を適切に選ぶことで同期可能となる。

RF 基準周波数の選択について、超伝導ライナックについてはリニアコライダー開発で 培われてきた技術を最大限利用することを想定し、共振周波数を 1.300 GHz とする。PF・



図 4-4-1: 高周波システムの基本構成。

PF-ARの RF 周波数は 500 MHz 帯(それぞれ 500.1 MHz と 508.6 MHz)であり、これ らの資源を有効活用できることが望ましい。以上から、蓄積リングの RF 周波数を 500.0 MHz と定める。この場合、蓄積リングのハーモニクスが 1250 であることを考慮すると、 SP ビームの繰り返しを 2, 4, 10, 20, 50, 100 MHz 等に選ぶことでマクロパルスに亘っての 同期が可能となる。ここで、4 MHz の例は蓄積リングに SR ビームを 125 バケット(250 ns)間隔で 1 周に 10 バンチ蓄積する運転モード(セベラル孤立バンチ)である。

現行技術を用いてデジタルフィードバックシステムを構築した場合、500 MHz RF シス テムでの位相安定性は 0.02~0.05<sup>°</sup> が実績として達成されており、この場合 SR ビームの 時間ジッターとしては 100~300 fs となる見込みである。なお、RF 周波数が 0.1 Hz シフ トすると、マクロパルスの 0.5 ms にあたる時刻において SP ビームと SR ビームの間に 100 fs の時間差が生じることになる。

2) 2.5/5.0 GeV の両エネルギーでビーム安定周回を可能とする RF システム

2.5/5.0 GeV の両エネルギーに対応する RF システムを構築するには、5.0 GeV 運転に 必要とされる RF 電圧を複数の RF 空洞で励振し、2.5 GeV 運転では必要の無い RF 空洞に ついて主加速モードの共振周波数をずらし(デチューン)待機状態にする方法が考えられ る。ただし、寄生モード(主加速モード以外の共振モード)のインピーダンスについては、 2.5 GeV 運転においても全空洞分がバンチ結合型ビーム不安定性発生に寄与するため注意 が必要となる。この対策としては幾つか案があるが、まずは寄生モードインピーダンスの 小さい減衰型空洞を導入するとともに複数の異なる高周波設計を採用し、寄生モードの共 振周波数を分散化(不安定性の源は増えるが不安定性成長率は低く制御する)することを 検討している。

省電力の観点からは、RF システム全体としての出力電力の大幅な変動、エネルギー切り 替え時のスムーズなモード変更、メンテナンス性という一見相反する事象について、バラ ンスをとった技術選択を行う。

3) 多様な運転モードに対応可能なバンチ伸長システム

通常運転に適したユニフォームフィリング、時間分解測定に適した数バンチ対称フィリ ング(セベラル孤立バンチ)に加え、ハイブリッドフィリングなど多様な運転モードにお いても十分な性能を有するバンチ伸張システムを導入する。

具体的には、ビーム負荷変動に強い高調波空洞を採用し、アクティブな空洞電圧補償シ ステムを専用のローレベル RF 制御システムと電圧補償空洞を用いて実装する。

#### 4-5. 真空システム、基幹チャンネル

一般に光源加速器の真空システムでは、十分に長い電子ビーム寿命を確保するために、 様々な制約の下で高い実効排気速度と低い光刺激脱離(PSD)ガス放出速度を追求し、 10<sup>-8</sup> Pa 程度の超高真空を実現させることが設計の基本方針である。ビームダクトには、放 射光熱負荷の吸収(高い熱伝導度、高耐久性)、低インピーダンス(高い電気伝導度、断面 形状の連続性)、静磁場に対する透明性(非磁性)、パルス磁場に対する透明性(低い電気 伝導度)、放射線遮蔽性能(高い質量吸収係数)、高い加工性(溶接、成形、精度)などの 諸特性を有することが求められる[1]。

その上で、PF-HLS 真空システムには、1) 2.5/5.0 GeV 選択式、2) 大電荷孤立バンチや 短バンチ長の SP ビーム、3) 低エミッタンス化による小口径ダクト (30mm 以下)、4) ハ イブリッド放射光路、5) 超伝導空洞におけるパーティクルフリー (超清浄真空)、などの 要請が加わることになる。

可変エネルギー対応で考慮すべき項目は、2.5 GeV でのビーム不安定性、短いバンチ長、 短いタウシェック寿命、5.0 GeV での高い放射光パワーと光子エネルギーである。2.5 GeV ではインピーダンスの影響がより顕著になることに加えて、ガス散乱やイオンの影響を低 減させるためにより低い圧力で運転することが求められ、5.0 GeV では放射光に対する高 い熱負荷吸収や高い遮蔽性能が求められる。

ビームダクトの設計では、5.0 GeV での高い放射光負荷へ対応させる必要があるため、 電子ビーム路と放射光路を分離できるアンテチェンバ方式が有力候補となる。ダクト材質 は、上記すべての要請や物理特性を勘案すると、無酸素銅が有力候補となる。

光源真空システムの運転において、コミッショニング中の光焼出し運転で如何に早く設 計圧力に到達できるかが重要な性能指標となる。この真空の立ち上がり予測は、Synrad と Molflow の 3 次元モンテカルロシミュレーション[2]で行い、PF BL-21 で測定した各種真 空ダクトの PSD データを活用させる (図 4-5-1)。低い PSD 特性と高い実効排気速度を有 する内面コーティングとしては、これまで開発研究を進めてきた非蒸発型ゲッター (NEG) コーティングが最有力候補である[3]。

蓄積リングの真空システムから放射光ビームラインに直結する部分は、基幹チャンネル あるいはフロントエンド部と呼ばれている。この部分は偏向電磁石や挿入光源など、様々 な光源から発生する指向性が極めて高い放射光を適切に処理することが求められ、狭小領



図 4-5-1: Synrad と Molflow を組み合わせたアンテチャンバコーティングのシミュレーション例。

域に集中する熱負荷を水冷銅ブロックからなる Photon Shutter で受け止めることで下流 での真空事故を防止する役割を担う。基本的には熱負荷の高い 5.0 GeV 運転にあわせて設 計する方針で 2.5 GeV 運転に対応可能である。

基幹チャンネルの数カ所には水冷マスクを設置してビームライン側が必要とするサイ ズに放射光を切り出して提供するほか、基幹チャンネルの最下流部には Safety Shutter と 呼ばれるタングステンを主成分とするヘビイメタル・ブロックもしくはステンレス・ブロッ クを超高真空中で上下する機構を持つ放射線遮蔽シャッターを設ける。また、ビームライ ン下流側での真空悪化の際には、光源加速器まで真空悪化の影響が及ばぬようにゲートバ ルブを速やかに遮断する機構を設けることで加速器の安定的な運転を可能とする。これら 機器保護システム(Machine Protection System: MPS)は、別途設置する人間保護の安全シ ステム(Personnel Protection System: PPS)とは基本的に独立して動作するものであるが、 両者の情報を適切に連携することも必要となる。

[1] 谷本育律, 先端光源加速器の真空技術, OHO'15 テキスト.

[2] R. Kersevan and M. Ady, Synrad & Molflow Development, https://cern.ch/molflow.

[3] 例えば、X.G. Jin, Y. Tanimoto, T. Uchiyama. T. Honda, *Vacuum* 207, 111671 (2023).

#### 4-6. ビーム診断・ビーム制御システム、加速器制御システム

PF-HLS が持つ優れた性能を十分に引き出し、放射光源として安定な運転を実現するためには、蓄積ビームの様々なパラメータを精密に測定し得るビーム診断系と、ビーム軌道を安定化し、任意のフィリングパターンを維持するためのビーム制御系が不可欠である。 また、加速器を構成する機器を遠隔で制御・監視する加速器制御系も PF-HLS を支える重要な要素の一つである。本節では、PF-HLS のビーム診断・ビーム制御、および、加速器制御に必要な機器について述べる。

#### ビーム診断

蓄積ビームの軌道測定には、4 つのボタン型電極を備えたビーム位置モニタ(BPM)を 使用する。後述する高速軌道フィードバック用の BPM に加えて、多目的用途の BPM を 20 台程度設置する。BPM の信号処理には、PF リング用に開発した μTCA.4 ベースの回 路を増設して使用する。リングの蓄積電流は、セラミックブレーク付きの専用ビームダク トに市販の直流ビーム電流トランス(DCCT)を組み込んで測定する。蓄積ビームの損失 量や損失分布の測定は、シンチレータとフォトセンサを組み合わせたビームロスモニタを リングに分散配置することで行う。リングの偏向電磁石や多極ウィグラーを光源とする ビーム診断専用のビームラインを設け、そこに放射光のX線成分や可視光成分を利用した 放射光モニタを設置する。蓄積ビームのエミッタンスやエネルギー拡がりの評価に必要な ビームサイズは、X線ピンホールカメラや可視光干渉計を用いて測定する。バンチ長の測 定には、数 ps 以上の SR ビームに対してはシンクロスキャン方式の可視光ストリークカメ ラを利用できるが、50 fs からサブ ps オーダーの SP ビームに対しては偏向空洞や電気光 学(EO)結晶を用いた測定方法を検討している。シングルバンチモードやハイブリッド モードにおけるバンチ純度は、アバランシェフォトダイオードを用いた時間相関単一光子 計数法で測定する。アンジュレータを光源とするユーザー向けビームラインには4枚のタ ングステンブレードを備えた光位置モニタ(XBPM)を設置し、光軸の精密調整や時間変 動の測定に利用する。リングのベータトロンチューンは、蓄積ビームを励振するためのス トリップライン型キッカーと上記の BPM 信号を利用して測定する。その他 SR ビームと SP ビームが共存する PF-HLS に特化したビーム診断手法としては、各ビームの繰り返し 周波数やバンチ長の差を利用したビーム位置計測や RF シールド付きスクリーンモニタに よる SP ビームのプロファイル計測等を検討している。

ビーム制御

主に加速器室内の空調や冷却水、真空ポンプ等で生じる電磁石架台の機械振動や電磁石 電源の出力リップルに起因する 10 ms より長い周期の軌道変動は、上記の BPM 信号処理 回路から出力される 10 kHz レートのビーム位置データを利用した高速軌道フィードバッ クにより抑制する。ビーム不安定性や入射振動に起因する数 µs オーダーの速い軌道変動 については、バンチごとに振動を検出して、それをターンごとに減衰させることが可能な Bunch-by-Bunch フィードバックにより抑制する。フィードバックのデジタル信号処理に は、PF でも実績のある市販の専用回路を使用する。バンチごとにビームを蹴るための高速 キッカーには、横方向はストリップライン型、進行方向は空洞型のキッカーを開発して使 用する。リングのフィリングパターンは、BPM 信号を高速のオシロスコープ等に入力する ことで測定し、得られたリング1周分の波形データからバンチカレントが目標のパターン と比べて最も小さいバンチを選出する。そのバンチアドレスをトップアップ入射の時間間 隔より短い周期で入射器へフィードバックすることにより、任意のフィリングパターンを 生成・維持することが可能となる。バンチ純度は、孤立バンチ後方の数 10 バケットを常時 純化することで 10<sup>-6</sup>以下に維持する。純化は孤立バンチの周回に同期してゲートをかけた RF ノックアウト信号を広帯域の高周波アンプで増幅し、専用のストリップライン型キッ カーに印加することで行う。

#### 加速器制御

加速器制御のソフトウェア群としては、PF をはじめ多くの加速器施設で実績のある Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS) を採用する。EPICS はネッ トワーク分散型の制御フレームワークであり、ネットワークに接続された多種多様な機器 を Channel Access と呼ばれる共通のプロトコルで制御できる。一方、ビームライン側の機 器制御は PF で開発された Simple Transmission and Retrieval System (STARS) で行い、 EPICS と STARS との間は Gateway を介して互いに制御可能な構成とする。制御ハード ウェアは Programmable Logic Controller (PLC)を基本とし、特に高速な制御が必要な場 合には上記 BPM の信号処理回路でも開発経験のある µTCA.4 規格の制御ボードを採用す るのが妥当である。制御ネットワークには整備時期にあわせて最適な技術・製品を選択す る方針とし、最低でも基幹部 10 Gbps 以上、エッジ部 1 Gbps 以上となるであろう。セキュ リティ確保が非常に重要なトピックスであり、他のネットワークとの間には適切な Firewall や Gateway 機器を設置し、安全かつ利便性の高いネットワーク間通信を実現する。 加速器の運転パラメータをはじめとする各種データの自動保存と取り出しには、Archiver Appliance (AA)を使用する予定である。現在では Grafana との連携により Web ブラウザ で容易にデータを取り出し、表示・解析することが可能となっている。

#### 4-7. 挿入光源

PF-HLS では、蓄積エネルギーを 2.5 GeV と 5.0 GeV に切り替えて運転することで、1 台の挿入光源から広い波長領域の放射光を利用することを重要な目標とする。1本の直線 部に挿入光源をタンデムに配置すれば、10 eV から 100 keV までの広波長域の高輝度ビー ムに対応することも可能である(図 1-3)。2.5 GeV と 5.0 GeV のような大きなエネルギー 切り替えによる挿入光源の利用は世界的にも前例がないため、その設計コンセプトは従来 の高輝度リング用挿入光源の設計とは異なるものとなる。単一エネルギーの蓄積リングで は、決められた挿入光源用直線部を最大限に生かして必要となる波長範囲および偏光条件 の下で最も輝度が高くなるように挿入光源のパラメータを最適化する。これに対して PF-HLS では、電子エネルギーを切り替える際に放射波長範囲に切れ目が出ないようにしつつ、 5.0 GeV 運転時の挿入光源の放射パワーを十分に抑制するようにパラメータを調整する必 要がある。以上を勘案して PF-HLS で想定される挿入光源パラメータを検討した。

X線光源としては、周期長 20 mm の真空封止型アンジュレータを採用し、15 次光まで 利用することで 1~100 keV までの広い波長範囲の利用を目指す。最小ギャップは PF リン グの短周期アンジュレータと同じ 4 mm を仮定している。VUV-SX 光源としては、可変偏 光アンジュレータを基軸とし、利用波長域によって PF リングで実績のある APPLE-II 型 と 6 列型を使い分ける。また、PF-HLS では偏向電磁石からの円軌道放射は利用せず、短 直線部に比較的短い多極ウィグラー (MPW) や 3 極ウィグラーを配置して放射光利用を行 う方針である。リングのエネルギーを大幅に切り替えて使うことで、非常に強い磁場を用 いなくとも高エネルギー域の光源として利用することが十分可能となる。以下に、現在検 討中の挿入光源パラメータとそのスペクトルの例を示す。

放射光領域	挿入光源タイプ	周期長	K值	最小 gap	全長	波長範囲
X 線	真空封止型	20 mm	2.1	4 mm	1~4 m	1~100 keV
VUV-SX 線	EPU(APPLE-II型)	56 mm	4	12 mm	<5 m	200 eV~15 keV
VUV-SX 線	EPU(6 列型)	160 mm	7.6	12 mm	<5 m	10 eV~5 keV

表 4-7-1: アンジュレータのパラメータ

表 4-7-2: MPW	と3極ウィグラー	のパラメータ
--------------	----------	--------

挿入光源	タイプ	周期長	偏光	最小 gap	全長	最大磁場	軌道振幅 @2.5 GeV
MPW	OutVaccum 型	120 mm	V/H	12 mm	~0.5 m	>1 T	$\sim \! 50 \ \mu m$
	真空封止型	120 mm	V/H	4 mm	~0.5 m	<2 T	~100 µm
	超伝導	80 mm	V	40 mm	~0.5 m	~3 T	~60 µm
3極W	OutVaccum 型	150 mm	Н	<20 mm	<0.3 m	~1 T	$\sim \! 100 \ \mu m$
	超伝導	350 mm	V	50 mm	<0.3 m	5 T	5 mm



#### 4-8. 超伝導線形加速器

PF-HLS で光源の一つとして用いる超伝導ライナックについて述べる。機器の配置概要 は図 4-1-1 に示した通りである。PF-HLS では、2.5 GeV の超伝導ライナックを建設する。

(当初計画としては、5.0 GeV は蓄積リングのみとしている。)表 4-8-1 に論文[1]に記載 の超伝導ライナックのパラメータを示す。これは 3.0 GeV での設計であり、PF-HLS では 2.5 GeV という違いはあるものの、おおよその規模は同じである。ただし、マクロパルス 内のバンチ繰り返し周波数を 18 MHz から 10 MHz に変更している。

基本的に International Linear Collider (ILC)のスペックをベースにして検討したが、PF-HLS での要求性能と異なる部分がある。例えば、電流パターン・電荷量の違いから、入射 部(電子銃およびレーザー)の開発が必要である。平均電流・マクロパルス内の電荷量の 違いから、空洞に電力を投入するためのパワーカップラも開発が必要な項目として挙げら れる。最終段でのビームダンプ性能も異なるため、専用の設計が必要となる。これらにつ いては、継続的に開発研究を進めたい。

	Value
電子ビームのパラメータ	
エネルギー [GeV]	3
平均電流 [mA]	0.1
バンチ電荷 [nC]	1
規格化エミッタンス [mm·mrad]	0.6
自然エミッタンス [nmrad]	0.1
バンチ長 [fs]	50
エネルギー拡がり[%]	0.5
加速器のパラメータ	
RF 周波数 [GHz]	1.3
加速勾配 [MV/m]	30
9 セル加速空洞数	96
クライオモジュール数	12
マクロパルス繰り返し周波数 [Hz]	10
RF マクロパルス幅 [ms]	1
マクロパルス内のフラットトップ幅 [ms]	0.6
マクロパルスあたりのバンチ数	10000
マクロパルス内のバンチ繰り返し周波数 [MHz]	18
クライオモジュールあたりの RF 熱負荷 (2K) [W/module]	8
クライオモジュー ルあたりの静的熱負荷 (2K) [W/module]	8
必要な冷凍機容量 (2K) [W]	200

表 4-8-1: 長パルス超伝導ライナックのパラメータ

[1] K. Harada et al., J. Synchrotron Rad. 29, 118 (2022).

Photon Factory (2024年1月発行) E-mail: photon.factory@kek.jp https://www2.kek.jp/imss/pf/pf-hls/