

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構

放射光マルチビーム実験施設計画

Photon Factory Hybrid Light Source (PF-HLS)

Conceptual Design Report (CDR) ver. 1.3

目次

1. PF-HLS の概要	1
2. サイエンス	6
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	6
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	8
2-3. 反応場と反応種の選択的可視化による物質機能探究の深化	10
2-4. 電極触媒の反応機構解析のための軟・硬 X 線のリアルタイム観察の融合	12
2-5. 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	14
2-6. 地球深部マグマ研究を切り拓く超高温高圧下その場物性・構造測定との融合	16
2-7. 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	18
2-8. 生物の階層ギャップを埋める統合的構造研究:ミクロ・マクロ観察の融合	20
2-9. 高空間分解能×広視野イメージングによる触媒の不均一反応研究の創成	22
2-10. 時空間スケールを統合した光化学反応研究の創成	24
2-11. X 線誘起相転移研究の創成	26
2-12. 放射光・低速陽電子マルチビーム融合で挑む次世代表面ナノサイエンス	28
3. ビームライン	30
3-1. SR シングルビーム	30
3-2. SR + SR マルチビーム	33
3-3. SR + SP マルチビーム	36
4. 光源加速器	38
4-1. 概要	38
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	40
4-3. 電子ビーム入射	53
4-4. 高周波加速システム	58
4-5. SP ビームタイミング	63
4-6. 真空システム、基幹チャンネル	65
4-7. ビーム診断・ビーム制御システム、加速器制御システム	68
4-8. 挿入光源	72
4-9. 超伝導線形加速器	76

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、“Diversity Frontier”を掲げて PF-HLS プロジェクトを推進し、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）。

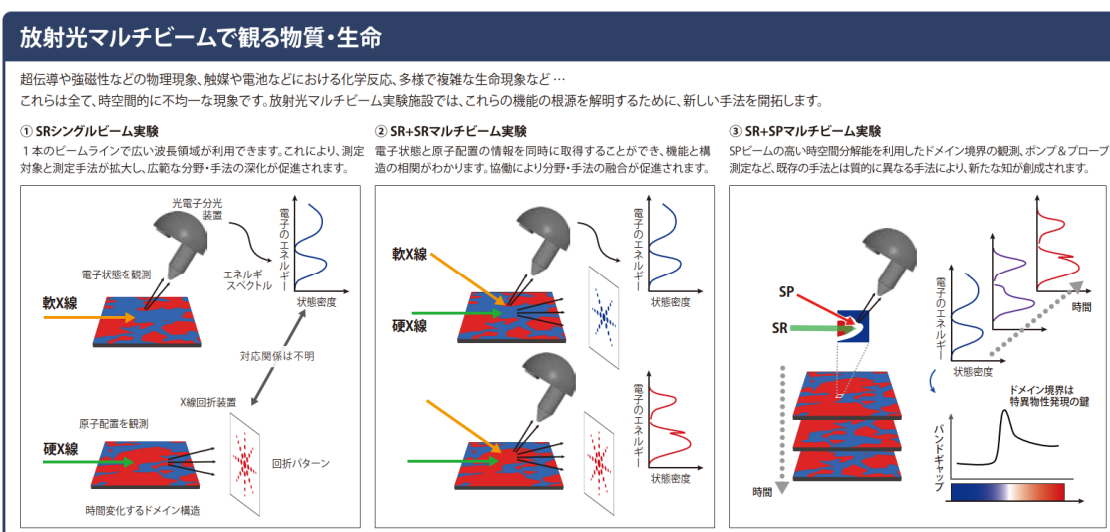


図 1-1: PF-HLS のコンセプト。

国内外の状況

日本には、国によって整備された X 線域までの利用が可能な光源として、PF と PF-AR の学術施設（教育職スタッフが運営）、および、SPring-8 と NanoTerasu の共用施設（研究職スタッフが運営）がある。新技術の開発と若手人材の育成を掲げて開発研究を重視する学術施設と利用研究の成果創出を掲げて安定した測定環境を提供する共用施設の役割は相補的である。NanoTerasu は、SX に重点を置く施設として 2024 年に共用が開始された。SPring-8 は、HX に重点を置く施設として 1997 年に共用が開始され、現在、世界最高水準の低エミッタンスを実現する光源として、SPring-8 II へのアップグレードが計画されている。

世界の最先端の放射光施設の状況を表 1-1 に示す。欧米の他、アジアや中東など、世界中で新規の建設やアップグレードが計画・実施されている。放射光施設の性能の指標として、しばしば、エミッタンスが用いられる。“Diversity Frontier”を掲げる PF-HLS プロジェクトでは、十分なエミッタンス性能を確保しながら、世界に類を見ない『放射光マルチビーム実験施設』を実現することで、放射光科学の新手法・新分野を開拓し、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。NanoTerasu と SPring-8 II が共用施設であるのに対して、PF-HLS は PF・PF-AR の後継機となる学術施設であり、KEK にとどまらず、VUV/SX 域の学術施設（UVSOR・HiSOR・ISSP-SOR）と一体となって、検討・推進されている。

表 1-1: 最先端の放射光施設

施設名	国	電子エネルギー (GeV)	周長 (m)	エミッタンス (nm rad)	運転開始 (予定)
PF-HLS	Japan	5.0 / 2.5	750	0.83 / 0.21	
NanoTerasu	Japan	3.0	349	0.93	2024
SPring-8 II	Japan	6.0	1436	0.05	2029
APS-U	USA	6.0	1104	0.067	2024
HEPS	China	6.0	1360	0.06	2025
PETRA-IV	Germany	6.0	2300	0.02	2027
Diamond-II	UK	3.5	561	0.12	2029
ILSF	Iran	3.0	528	0.28	
SPS-II	Thailand	3.0	328	0.97	2029
ALBA-II	Spain	3.0	269	0.18	2032
CANDLE	Armenia	3.0	269	0.435	
SOLEIL-U	France	2.75	354	0.08	2028
SLS-II	Switzerland	2.7	288	0.158	2026
BESSY-III	Germany	2.5	350	0.1	2035
ELETTRA2.0	Italy	2.4	259	0.212	2027
HALF	China	2.2	480	0.0863	2028
ALS-U	USA	2.0	197	0.085	2026

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。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じて 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 などが協力する。2024 年度からは、ISSP-SOR が放射光学術基盤ネットワークに加わった。今後、これらの施設や団体の参画の形態を検討するとともに、参画する国内外の機関を拡大するための活動を行う。

利用制度

多様性と自由度の高い PF-HLS 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。

大学共同利用機関法人が実施主体であるので、日本の持続的発展の根幹をなす大学生・大学院生の教育への貢献が特に重要である。したがって、研究と教育の両方の観点において、PF-HLS の多様性と自由度を十分に活かせる利用制度が必要である。約 40 名の委員の 3/4 近くが KEK 外部の大学教員等で構成される放射光共同利用実験審査委員会 (PF-PAC) での議論を経て、多様性と自由度を担保した上で、シンプルな利用制度を構築する。具体的には、PF に建設中の開発研究多機能ビームライン (BL-11A,-11B) の利用を想定して準備中の RD 型 (開発研究型) 課題や大学教員と PF スタッフが博士課程学生を共同指導する T 型 (大学院生奨励型) 課題の拡張を検討する。さらに、日本全国の大学・大学院教育へ貢献する仕組みとして、PF スタッフ (教員) が PF-HLS を利用した講義と実習を実施して各大学が単位認定する制度などを検討する。

PF-HLS プロジェクトは、VUV/SX 域の学術施設 (UVSOR・HiSOR・ISSP-SOR) と一体となって、検討・推進されている。したがって、これらの施設を含む KEK 外部の研究機関が整備するビームラインに関する制度の検討が必要である。また、PF・PF-AR の約 2 割の実験ステーションの運営を PF-UA のユーザーグループ (UG) が担当している。UG 運営ステーション制度の強化、PF と UG の共同運営ステーション制度の新設などを検討する。

年次計画・建設候補地

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。

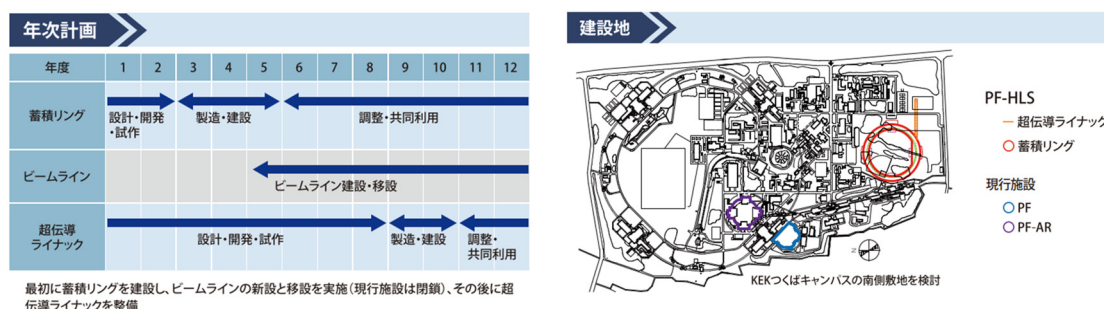


図 1-2: PF-HLS の年次計画 (左) と建設候補地 (右)

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、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[1]と超伝導ライナック[2]で構成される。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。

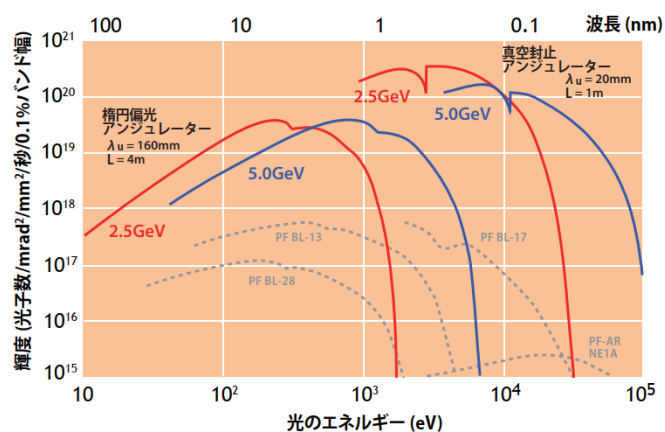


図 1-3: PF-HLS のエネルギースペクトル例

[1] T. Sato *et al.*, *J. Synchrotron Rad.* **32** (2025).

[2] 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。

これまでの放射光を用いた磁性薄膜の研究において、EXAFS(Extended X-ray Absorption Fine Structure)を用いた構造分析と、XMCD(X-ray Magnetic Circular Dichroism)やXMLD(X-ray Magnetic Linear Dichroism)を用いた磁気状態分析が、極めて有効なことが示されてきた。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ひずみなど、特異な磁性の発現に直結する構造情報が得られる。XMCD(円偏光利用)、XMLD(直線偏光利用)は、やはり元素選択性を有し、磁性薄膜を構成する個々の元素がどのような化学状態(価数など)にあり、どのような磁気モーメントを持つかを、その異方性も含めて決定できる。特に、磁気異方性に直接関与する、軌道磁気モーメントやダイポール磁気モーメントと呼ばれるものを決定できるのが大きな利点である。なお、構造分析の手法としては他に、X線回折やCTR(Crystal Truncation Rod)散乱も有効である。

従来、EXAFS等を用いた構造解析とXMCDやXMLDを用いた磁気状態解析は、異なるビームラインで行われてきた。これは、例えば典型的な磁性元素である3d遷移金属の場合、K吸収端(EXAFS測定に利用)が4～10 keV程度の硬X線領域にあるのに対し、L吸収端(XMCD、XMLD測定に利用)は400～1000 eV程度の軟X線領域にあるためである。EXAFS測定は原理的にはL吸収端でも行えるが、3d遷移金属の場合には L_3 吸収端と L_2 吸収端が10–20 eV程度しか離れていないため、それぞれの吸収端からのEXAFSシグナルが重なってしまい、解析は極めて困難である。一方、XMCDやXMLDは磁性を担う3d軌道への遷移を観測することが重要であり、L吸収端での測定に大きな意味がある。

上述の通り磁性薄膜の磁気状態は、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、異なるビームラインで実験を行った場合、本当に同じ試料に対して構造と磁気状態を観測しているのかという疑問が常につきまとう。特に、磁性薄膜研究の初期段階においては、薄膜を成長させてその場で観察を行う、いわゆる「その場観察」が有効だが、異なるビームラインでその都度試料を作り直していたのでは、効率が悪いのはもちろん、試料の同一性に対する不安をぬぐいきれない。

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 48 mm の APPLE-II 型アンジュレータ(4-7 章)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。磁性薄膜の主要な構成元素である 3d 遷移金属の K 吸収端は上述の通り 4 ~ 10 keV、5d 遷移金属の L 吸収端は 10 ~ 14 keV 程度の間にあり、これらの吸収端を利用して EXAFS 測定(直線偏光利用)を行うことができる。なお、やはり磁性薄膜の構成元素としてよく用いられる 4d 遷移金属については、L 吸収端が 2 ~ 4 keV 程度の間にあるが、3d 遷移金属ほどではないにせよ L_3 吸収端と L_2 吸収端が近いため、EXAFS の解析の難易度が高くなってしまう。したがって、例えば周期長 20 mm のアンジュレータ(直線偏光)を併設し、K 吸収端(18 ~ 27 keV 程度)を利用できればより有効である(図 2-1-1)。また、周期長 20 mm のアンジュレータは、5d 遷移金属の L 吸収端においても、周期長 48 mm の APPLE-II 型アンジュレータより高い輝度を実現でき、これらの元素の EXAFS 測定に有効である。

一方、XMCD(円偏光利用)、XMLD(直線偏光利用)については、磁性を担う軌道を直接観察するために、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。また、5d 遷移金属に対しては、M 吸収端(2 ~ 3 keV 付近)の利用が有効である。図 2-1-1 に示す通り、周期長 48 mm の APPLE-II 型アンジュレータを電子エネルギー 2.5 GeV と 5.0 GeV で利用することによって、これらの吸収端の全てにおいて、円偏光はもちろん垂直・水平直線偏光を自在に利用できる、磁気状態の観察において理想的なビームラインとなる。XMCD、XMLD の測定にはしばしば、試料に強い磁場を印加するための超伝導電磁石が必要となり、さらに磁気異方性を詳しく研究するには、磁場方向を自在に変えられるベクトル型電磁石が有効である。このような高度な装置を複数のビームラインに整備することは容易ではないため、一つのビームラインで全ての元素に対する測定が行えるのは、大きな利点となる。

以上のように、磁性薄膜を構成するほぼ全ての元素に対して、全く同一の試料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。

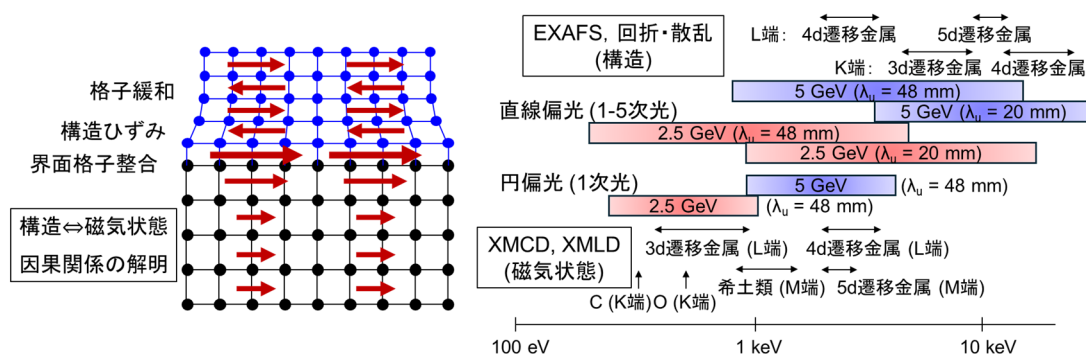


図 2-1-1: [左] 磁性薄膜における構造と磁性の模式図。基板に対して格子定数が異なる薄膜を成長させることにより、界面における格子整合/不整合や薄膜成長に伴う構造歪み等が生じ、特異な磁性の発現につながると考えられている。[右] 周期長 48 mm の APPLE-II 型アンジュレータおよび周期長 20 mm の真空封止型アンジュレータがカバーするエネルギーと対象元素、測定手法の関係

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、その構造に興味を持たれる。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、様々な元素を包摂す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（図 1-3）。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。

アルミノケイ酸塩液体の構造測定を一例として挙げる。アルミノケイ酸塩ガラスは、光ファイバー、薄いディスプレイガラス、フォトマスク基板など、強度が必要とされる場合に用いられる重要な素材である。さらに、（完全あるいは一部）結晶化したガラスセラミクスも良好な光学特性と機械特性を兼ね備えた材料として注目される。Al₂O₃ の割合が多いほど、弾性率・硬度が上昇する一方、ガラス形成能は低下する。弾性率・硬度の増加といった機能の向上や、完全ガラスの作成を妨げる（あるいは機能的なガラスセラミクスを実現する）相分離挙動は、特にアルミノケイ酸塩中の Al の配位状態と関連があると考えられているが、ほとんどすべての研究が急冷回収物の観察に基づいており、液体およびその冷却過程での構造情報は極めて限られている。しかし、ガラスの一般的な製造方法が液体の急冷であること、また急冷回収物は、冷却速度によって構造が変化することなどを考えれば、

液体およびその冷却過程のその場観察は、機能の向上に重要な役割を果たす。

ガラスや液体の構造決定にあたり基本とされる高波数領域までの散乱測定（全散乱測定）からは、構造因子が求まり、それをフーリエ変換することで二体分布関数が得られるが、これは各原子の周囲の原子分布の一次元の平均であり、特に多数の元素を含む物質の二体分布関数のみからガラスや液体の三次元構造を再現することは容易ではない。よって、X線とは散乱因子の異なる中性子散乱や、特定の原子の吸収端の前後での異常散乱などを組み合わせて各元素の二体分布関数を分離し、かつ、分子動力学計算に基づいた RMC（Reverse Monte Carlo）法によって実空間での三次元原子分布を再現して、構造が議論されるのが主流となっている。ガラスや液体の物性や特性は、全散乱測定が主にターゲットとする原子間距離程度の構造に加え、構成元素の電子状態（配位環境）や nm スケール以上の不均質（相分離）構造にも大きく依存しており、これらの情報を統合した構造の理解が今後進むことが期待される。例えば、アルミノケイ酸塩液体については、小角・高角同時測定により、相分離と Al の配位数の関係などが議論されている[1]。特に NMR や電子顕微鏡での観察の難易度が高い液体について、XANES 測定や小角散乱測定の情報を加えることで、より詳細な構造情報が得られ、アルミノケイ酸塩のガラス形成メカニズムを明らかにできると期待される。

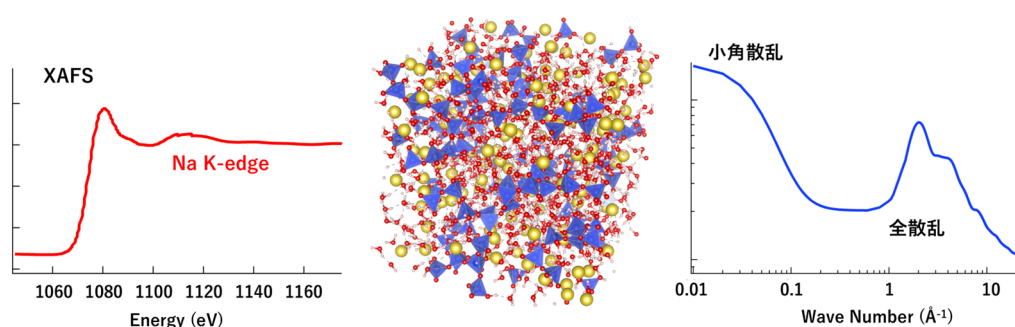


図 2-2-1: 元素選択的測定と広波数領域散乱測定の同時測定による、液体・ガラスの構造研究の例。液体やガラスは様々な元素を取り込むことができる。各元素の電子・配位状態は機能の発現に重要な役割を果たすとともに、様々なスケールの構造と関係している。

[1] S. K. Wilke *et al.*, *J. Am. Ceram. Soc.* **106**, 2820 (2023).

2-3. 反応場と反応種の選択的可視化による物質機能探究の深化

高付加価値の材料開発において重要なポイントのひとつは、その機能（付加価値）が何によって発現し、劣化するのかを明らかにすることである。一般的に材料は複数の元素から構成されており、それらが形成する様々な時間・空間の階層構造が互いに複雑に相関することで機能を発現する。また、なんらかの要因によりそれら階層構造の相関が断たれたときに機能は低下し、劣化に転じる。したがって、材料開発において、機能発現のメカニズムを明らかにするためには、試料全体にわたる時空間の平均描像を観察するだけでは本質に迫ることができず、時空間の階層構造ごとのスケールに応じた観察をすることが極めて重要である。X線吸収分光法（XAFS）は吸収端エネルギー近傍のX線吸収スペクトルであり、材料（試料）中の特定の元素の情報のみを選択的に得られる手法である。多くの元素が共存する材料の中から、鍵となる元素の情報のみを抽出できることから、広く材料開発研究に用いられている。さらに、機能発現メカニズム解明を目的としてXAFSを用いた様々な材料のその場観察（in situ）計測が行われている。例えば、不均一担持触媒については、触媒が動作（機能）している環境下において、触媒活性金属の電子状態や局所構造を明らかにする研究が盛んに行われている。しかし、それらは試料全体の平均情報であると同時に、単一の活性種（元素）の情報のみである場合が多い。

触媒反応を構成する要素は大きくは反応種、触媒、反応生成物に分けられるが、反応種は解離などにより細分化され、また触媒も担体と活性種などに分けられ得る。また、触媒反応に関連する全ての元素、化学種が必ずしも働いているわけでもない。例えば、不均一触媒や電池における電極反応の場合、場所によって反応の進行速度が異なることが明らかになっている。図2-3-1はリチウムイオン電池を充電した際の、正極材料中の鉄の価数変化を示したものである[1]。鉄の状態を、ある一次元方向に空間分解しつつ時分割計測した結果、試料の場所によって反応開始時間もその後の進行の度合いも異なることが分かる。このように、真に機能発現プロセスを理解するためには、機能している場所での各元素の素反応をその階層構造ごとに理解する必要がある。

もう一例として、アンモニア合成のための新規触媒を挙げる。アンモニア合成反応は窒素ガス、水素ガスを原料として、担体上に高分散された活性金属種（ルテニウム）の表面

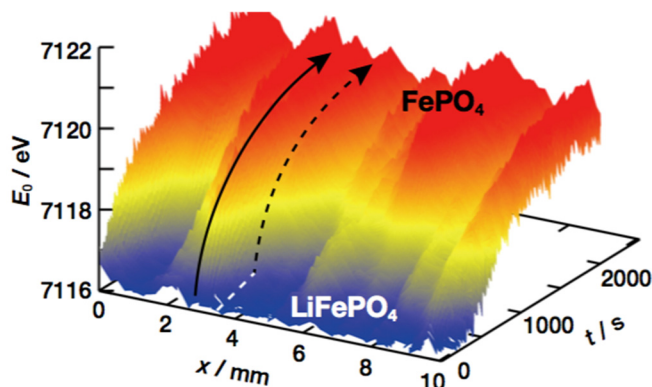


図 2-3-1: 時空間分解 XAFS 計測によって得られた充電過程における LiFePO_4 カソード中の鉄の電子状態[1]。場所によって反応開始時間や、その後の反応の進行度合いが全く異なることが分

上でアンモニアが生成されると考えられてきた。北野らによって開発されたアンモニア合成触媒はルテニウムを CaCN_2 担体上に高分散させたものであり[2]、担体から活性金属種への電子供与が高活性の鍵であるとされている (図 2-3-2)。このような触媒の活性を真に明らかにするためには、触媒活性種であるルテニウムの情報を得ることはもとより、原料となる窒素、水素と反応生成物であるアンモニア、担体である CaCN_2 の全ての反応中の振る舞いを観察することが極めて重要である。このためには、アンモニア合成反応中に、窒素 (K 吸収端エネルギー: 410 eV)、カルシウム (4039 eV)、ルテニウム (22117 eV) の状態をその場観察することが必要であり、軟 X 線領域である窒素の吸収端から硬 X 線の中でも高エネルギー領域となるルテニウムの吸収端の両方を利用できる光源が不可欠となる。しかし、XAFS は元素選択的な計測が可能である一方で、単一の X 線で複数の元素を同時に観察することは難しい。さらに、上述のとおり、不均一触媒においては全ての金属種が活性とは限らないため、ある特定の一粒子にターゲットを絞り、その粒子に関わる各元素の XAFS 測定が必須となる。一粒子に X 線を照射する必要があることから、サブミクロンオーダーの微小ビームを作ることが可能な低エミッタンスも必要となる。

PF-HLS は、軟 X 線から高エネルギー硬 X 線までの広波長域にわたる高輝度光を供給し、同一位置の試料に軟 X 線と硬 X 線を同軸に照射することを可能にする。この光源を利用すれば、材料中の働いている粒子、働いていない粒子それぞれについて、反応に関与する各元素の素反応を観察し、真の機能発現メカニズム解明に迫ることができると期待される。広波長域 X 線の利用は、「軟 X 線と硬 X 線」「表面とバルク」「軽元素と重元素」といった材料科学の水平軸と垂直軸の両方を自在に探查できることを意味する。「材料は構造・元素・時間・空間の相関で機能する」——この真理を解き明かすためには、要素技術の積み重ねだけではなく、“相関”という次元に踏み込むことのできる観察手段の革新が不可欠である。PF-HLS は、材料科学への“新しい研究基盤”を提供し、産業界にも革新をもたらすと期待される。

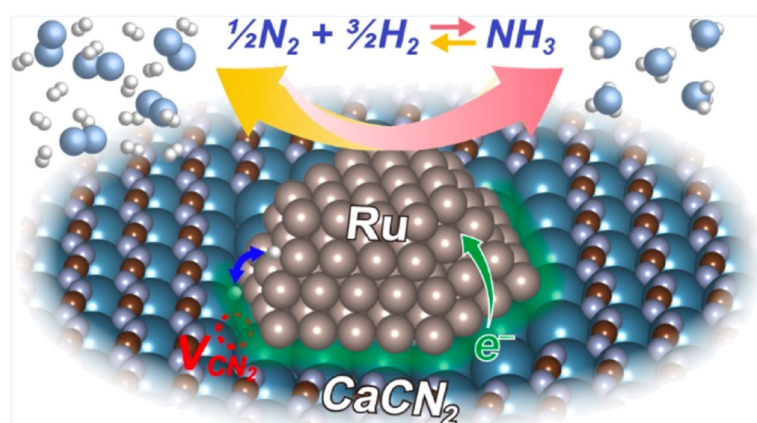


図 2-3-2: CaCN_2 にルテニウムを担持したアンモニア合成触媒の触媒反応の概念図[2]。活性金属種一粒子にターゲットを絞り、触媒反応進行中における反応ガス、活性種、反応生成物、担体の全てを XAFS 観察することで、各素反応の相関を明らかにする。

[1] M. Katayama, et al., *J. Synchrotron Rad.* **22**(5), 1227 (2015).

[2] K. Kishida, et al., *ACS Appl. Energy Mater.* **3**, 6573 (2020).

2-4. 電極触媒の反応機構解析のための軟・硬 X 線のリアルタイム観察の融合

電極触媒による水の水素と酸素への電気分解は、生成された水素をエネルギー源として利用できることから、環境負荷の低い次世代エネルギー技術として期待が高い[1]（図 2-4-1）。水分解用電極触媒は、酸素発生電極のアノード材料と水素発生電極のカソード材料を組み合わせるデバイスとして用いられるが、酸素発生電極は水素発生電極に比べ性能が低いことがボトルネックとなっており、システム全体の性能向上のためには、酸素発生電極の性能向上が必須である。電極上での酸素発生反応は 4 電子移動の水の酸化反応であることが知られているが[2]、この反応過程には未だ不明な点が多い。電極触媒による水分解反応は固液界面における反応であり、電極の性能向上には、固液界面で生成する化学種とその反応がどのように触媒活性に影響を与えるかを明らかにする必要がある。

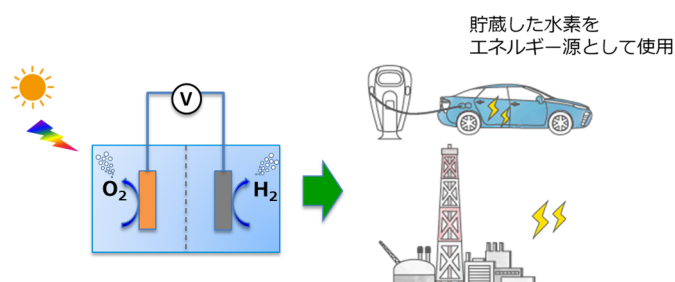


図 2-4-1: 水電解により製造した水素の利用

PF では、これまでに軟 X 線吸収分光法を用いて固液界面の電極反応をリアルタイムでその場観察する方法を開発し、反応中に生じる中間体の観察に適用してきた[3-5]。一方で、硬 X 線吸収分光法により、電極触媒側の反応中の化学状態・電子状態変化についてのその場観察も行ってきた。しかし、電極触媒の状態は、電極の電位の変化に伴い経時変化し、繰り返し測定では同一の状態を再現できないことから、反応中に起きていることを正しく理解するには、同時に軟 X 線と硬 X 線吸収分光法の測定を行い、全く同じ状態を観察することが不可欠である（図 2-4-2）。

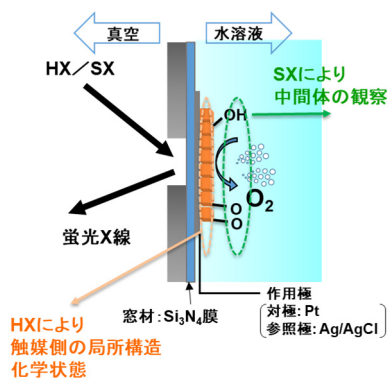


図 2-4-2: 軟 X 線(SX)および硬 X 線(HX)吸収の同時測定による電極触媒の固液界面の観察

PF-HLS において、2.5 GeV で 2 台のアンジュレータを用いれば、軟 X 線と硬 X 線の同時利用が可能になり、軟 X 線・硬 X 線の同時吸収分光法測定が実現できる。軟 X 線、硬 X 線吸収分光の同時測定により、電極触媒表面に生じる溶液側の中間体の情報と、電極触媒自体の表面近傍の反応による変化についての知見を同時に得ることができ、電極触媒表面の変化がどのように反応に寄与しているかについて、詳細な解析ができると期待される。さらに、電極触媒表面は、ナノ粒子等を担持しているため数 10 nm オーダーの不均一性を有するが（図 2-4-3 参照）、粒子の形状のほか表出している面方位によっても反応性が異なり、それらの違いが固液界面での触媒活性にどのような影響を与えるかについても明らかにする必要がある。このような局所的な反応の差異に着目し、コヒーレンスを利用したイメージングなどの手法を用いて位置分解しながら、それぞれの部分での反応を軟 X 線、硬 X 線吸収分光で同時に追跡し（図 2-4-4）、表面の原子レベルでの構造（面方位、粒径等）が固液界面での触媒活性にどのような影響を与えるかを調べ、電極触媒の反応機構を明らかにすることで、水電解デバイスの革新的な性能向上に繋げたい。

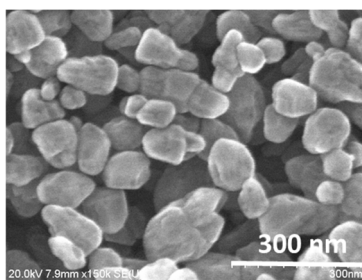


図 2-4-3: 水電解用光触媒作用を有する ZnO ナノ粒子の走査型電子顕微鏡（SEM）像

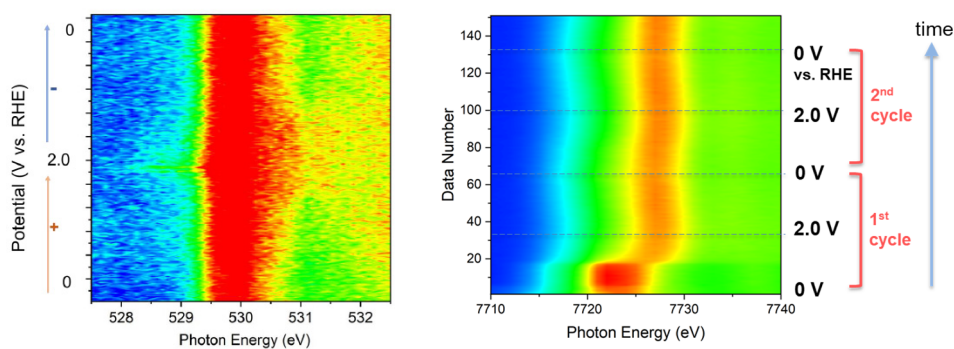


図 2-4-4: Co 酸化物を担持した触媒電極近傍の固液界面の X 線吸収分光スペクトル。(a)軟 X 線で観察した酸素 K 吸収端および(b)硬 X 線を用いて観察した Co K 吸収端。電位の変化により電極表面近傍の酸素種や Co の化学状態の変化がその場観察できる。

- [1] Hydrogen on the rise, *Nat. Energy* **1**, 16127 (2016).
- [2] N. Yatom *et al.*, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **19**, 17278 (2017).
- [3] K. Sakata, K. Amemiya, *Chem. Lett.* **50**, 1710 (2021).
- [4] K. Sakata, K. Amemiya, *Electrochem. Commun.* **157**, 107627 (2023).
- [5] K. Sakata, K. Amemiya, *Electrochem. Commun.* **165**, 107771 (2024).

2-5. 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

ソフトマテリアルとは、高分子や液晶、コロイド、生体材料などといった金属・無機物の硬い物質と比較して力学的に柔らかな性質を持つ物質を意味する。多くのソフトマテリアルは $\text{nm} \sim \mu\text{m}$ の広い空間スケールで階層構造を形成する。例えば、ビニール袋の主成分であるポリエチレンに代表される結晶性ポリマーでは、原子・分子サイズの $\text{\AA}$ オーダーの結晶構造があり、その結晶が集まって nm オーダーの結晶-非晶交互ラメラ構造を形成する。さらに、結晶核を中心にしてラメラ構造が樹状に伸びた μm オーダーの球晶構造を形成し、空間的に非常に広い階層構造を形成する(図 2-5-1)。これらの各階層が空間・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正しく理解し、性能を向上させるために重要である。

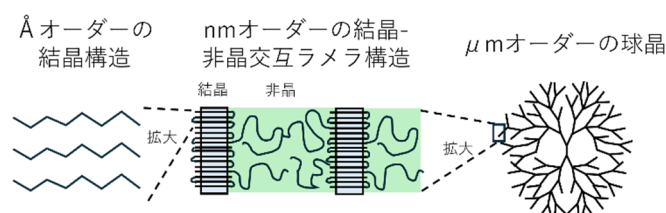


図 2-5-1: 典型的なソフトマテリアルであるポリエチレンの階層構造の模式図。原子・分子サイズの $\text{\AA}$ オーダーの結晶構造、 nm オーダーの結晶-非晶交互ラメラ構造、ラメラ構造が樹状に伸びた μm オーダーの球晶構造があり、広い空間で階層構造を形成する。

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。また、 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、 $\text{nm} \sim \mu\text{m}$ の広い空間スケールの構造評価が実施できる、階層的な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。

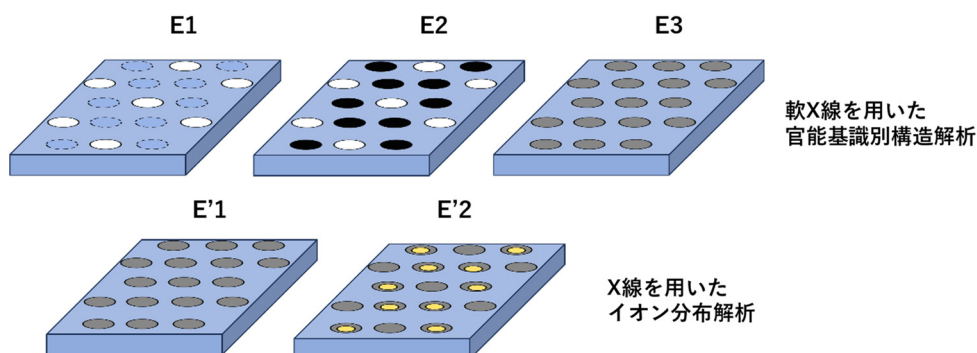


図 2-5-2: 官能基識別・イオン分布解析が可能なマルチビーム小角 X 線散乱測定の実例。海島構造を持つソフトマテリアルについて、X 線エネルギー E1 ではある官能基を有する島構造(白)が観察でき、E2 では官能基成分の異なる 2 つの島構造を識別できる。E3 では島の種類が見分けられない。また、X 線エネルギー E'1 を用いるとイオン分布を見分けられないが、E'2 では見分けることができる。これらの組み合わせにより異種官能基とイオンの nm スケールの空間分布を同時に知ることができる。

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 2 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を有するイオンの空間分布を同時に知ることができる(図 2-5-2)。高角 X 線散乱法(WAXS)を同時に測定すれば、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・導電中などにオペランド観察を行うことで、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。

一例として、ナフィオンに代表される固体高分子電解質膜の構造と機能の相関解明を挙げる。固体高分子電解質膜は地球環境にやさしい燃料電池として利用されており、その構造と電池機能に相関があることは古くから知られているが、現在でも未解明な部分が多い。特にプロトンを運ぶスルホン酸基は電池機能に直接関与しているが、ナフィオンが形成する nm オーダーのマイクロ構造内での空間分布(図 2-5-3)を特定することは、従来の手法では困難である。PF-HLS の 2 ビーム同時利用により、硬 X 線を使用した SAXS によりマイクロ構造の評価を行うとともに、スルホン酸基の硫黄をターゲットにしたテnder X 線 ASAXS によりマイクロ構造内でのスルホン酸基の分布状況を知ることができると期待される。さらに、実際の電池として機能を発現した状態でオペランド観察を行い、プロトン伝導を直接司るスルホン酸基の化学状態変化とマイクロ構造内での分布変化を同時観察することで、電池としての機能と構造の関連が明らかになると期待される。

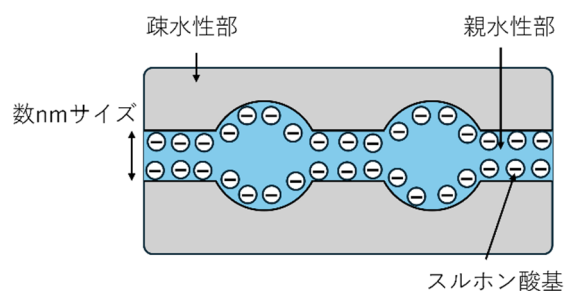


図 2-5-3: 固体高分子電解質膜ナフィオンのマイクロ構造。疎水性部分のマトリックス内に数 nm サイズの親水性部分存在し、その内部にプロトン（H⁺）を運ぶスルホン酸基が含まれる。

2-6. 地球深部マグマ研究を切り拓く超高温高压下その場物性・構造測定との融合

海洋プレートの沈み込みによって地球内部にもたらされる水は、マントルを構成する岩石の融点を下げ、マグマを発生させる。このようにして発生したマグマは、周囲の物質より軽いため上昇し、火山噴火などの火成活動を引き起こす。マグマの振る舞いとして、このような地表付近の火成活動は広く知られているが、マグマの重要性はこれに限ったことではない。一般にマグマは周囲の鉱物より低密度となるが、マグマの高い圧縮率、高い鉄の溶解度、高配位数化などにより、地球内部の高压力下では固液の密度逆転が生じ、地球深部に停滞しうる[1]。この密度逆転現象は、地球形成時の分化プロセスの理解や地球深部で観測されている地震波低速度異常の原因究明といった、地球深部研究を進める上で極めて重要である。密度逆転現象の理解には、マグマの高压力下での密度測定が最も直接的なアプローチとなるが、岩石を融解させるほどの高温発生 ($> \sim 2000$ K) が必要であるため、室温で測定可能なマグマのアナログ物質であるガラスを用いた研究に基づいて議論が進められてきた。液体（マグマ）やガラスといった非晶質は結晶のような長距離構造を持たないが、原子間の相互作用により、原子近傍では短距離構造を有する。マグマを構成するケイ酸塩は、 SiO_4 四面体に代表される短距離秩序を持ち、さらに SiO_4 四面体同士の結合による中距離構造を形成することもある。このような短～中距離の構造（局所構造）は、圧力を負荷することで変化し、それに伴い、密度をはじめとする非晶質の物性も変化する。

地球深部研究を遂行する上で大きな問題の一つは、構成している実際の物質の組成が不明であるということである。つまり、組成の推定自体も重要な研究テーマの一つになっている。そのため、実際には複雑な組成だと思われる地球深部物質に対して、近似されたいくつかの候補組成について実験データを取得し、場合によっては数値モデリングを経て、地震波観測結果と比較することで、地球深部での現象について議論することになる。このような状況下で、地球深部での密度逆転現象の理解を進めていくためには、特定の組成の密度を測定するだけでなく、物性の根源たる局所構造も併せて取得し、密度の圧力変化を構造の圧力変化と紐づけて理解することが重要である。このような知見を蓄積することによって、様々な組成モデルに対応することが可能になる。

非晶質の局所構造の情報は、高波数までの散乱データを取得することで得られ（全散乱測定）、一般的には高エネルギー（ ~ 100 keV）を利用した測定になる。高压下での非晶質の密度測定については、X 線吸収量から密度を求める吸収法が一般的であるが、地球深部条件である 100 万気圧以上の超高压下の試料に対しては、十分な精度を出せない懸念がある。一方で、結像型 X 線顕微鏡を用いたラミノグラフィ測定による三次元イメージングから試料の形状を高空間分解能で観察し、体積（密度）を求める手法は、超高压条件での密度の圧力変化に対しても十分な精度を出せる期待があり、有効な手法となる。高压発生装置ダイヤモンド・アンビル・セル（DAC）内の試料のラミノグラフィ測定には 10 keV 付近のエネルギーが適している。

ガラスを用いるからこそ得られる知見も多く、ガラス研究の重要度が高いことは言うまでもないが、今後、地球深部マグマの理解をさらに深化させるには、マグマそのものの高压研究を推進していく必要があることに議論の余地はない。室温での構造緩和時間が長い

ガラスでは、異なる時期、異なるビームラインにて構造と密度を別々に測定しても、同条件での測定とみなして比較することに大きな問題はないかもしれない。一方で、地球深部のマグマそのものの性質を調べるには、100 万気圧以上、数千度という超高温高压条件を発生させる必要がある（図 2-6-1）。DAC とレーザー加熱システムを用いることで超高温高压条件を発生可能だが[2]、試料室内部の温度勾配による試料の変形や試料室自体の熱変形による圧力の変化、また、それに伴う温度の不安定性などにより、長時間（～数時間）安定して超高温高压を維持するのは非常に困難である。また、試料室の静水圧性や圧力・温度勾配などの試料環境を再現することも容易ではなく、精度よく繰り返して同じ超高温高压環境を発生させることはほぼ不可能に近い。レーザー加熱式 DAC は静的圧縮で超高温高压を発生可能な唯一の方法ではあるが、このような解決し難い技術的な問題も内包している。そのため、ガラスとは異なりマグマに関しては、構造と密度（物性）の比較に用いるデータが“近い”温度圧力条件のデータにならざるを得ないため、必然的に議論の誤差が大きくなってしまう。誤差を極限まで小さくするためには、“等しい”温度圧力条件のデータ群を用い、構造と物性を真に融合させる必要がある。そのためには、事実上、一期一会となってしまう発生させた高温高压環境下のマグマに対して、短時間で構造測定と密度測定を行う必要があり、これを達成させるために、同一ビームラインでのマルチプローブ同時測定が必須になってくる。

PF-HLS では、真空封止型アンジュレータを光源とすることで、数 keV～100 keV の波長を高輝度で利用することができ、この挿入光源をタンデムに配置することで 2 ビーム同時利用が可能となる。2 ビームを全散乱測定と三次元イメージングにそれぞれ用いることで、同一条件が保証された状態でマグマの局所構造と密度の情報を同時に取得する。これにより、これまで不可能であったマグマの構造と密度の真の融合を達成し、地球深部マグマの研究を飛躍的に深化させる。PF-HLS は、地球深部マグマ研究の先導となることが期待される。

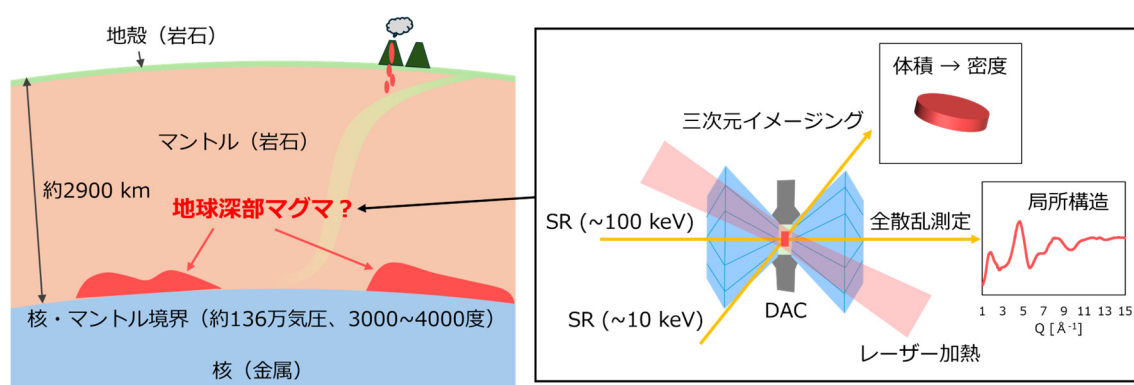


図 2-6-1: [左] 地球内部の深部マグマ。[右] マグマの超高温高压下全散乱（局所構造）と 3 次元イメージング（密度）同時測定の模式図。

[1] T. Sakamaki *et al.*, *Nature* **439**, 192-194 (2006).

[2] S. Tateno *et al.*, *Science* **330**, 359-361 (2010).

2-7. 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大療法として知られている。放射線治療は、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、周辺の正常細胞にできるだけダメージを与えないようにすることが重要である。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。超高線量率で細胞の生存率が通常の線量率と比べて高くなる（＝障害が軽減される）現象は1960年代にすでに報告されていたが、2010年代になって、腫瘍組織と正常組織との応答が異なることや、加速器技術の進歩によって高線量率照射が可能になったことにより、放射線治療法として再注目されるようになった[1]。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れば正常細胞のDNA損傷が抑制されるのに対し、腫瘍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。

放射線の生物作用は、図2-7-1に示すように短い時間から年に至る長い時間まで、広い時間スケールで生じる反応である。FLASHの場合、物理的過程（ $10^{-18} \sim 10^{-15}$ 秒）で起こるエネルギー付与の密度が極端に高く、それがラジカル生成やラジカル同士の再結合と言った化学的過程（ $10^{-12} \sim 1$ 秒）に強く影響を及ぼすために、最終的な生物作用の違いが生じると考えられる。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、放射線作用の初期過程（物理的過程）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。しかし、これまでは比較的長い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検出する研究が中心であり、ラジカル反応などの、より短い時間スケールで起こる反応過程の研究は遅れているのが現状である。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した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

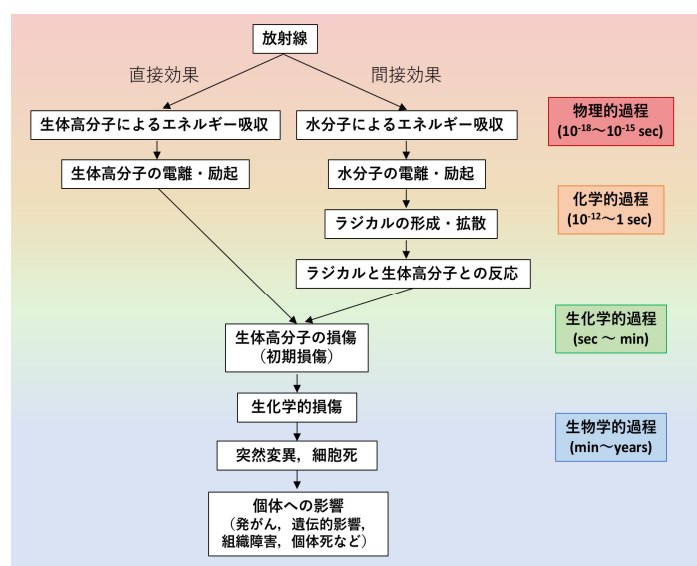


図 2-7-1: 放射線生物作用発現の時間的経過

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、放射線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、DNA や修復タンパク質などの生体高分子の構造変化や、それによる細胞、組織の変化など、より遅い時間スケールの生物学

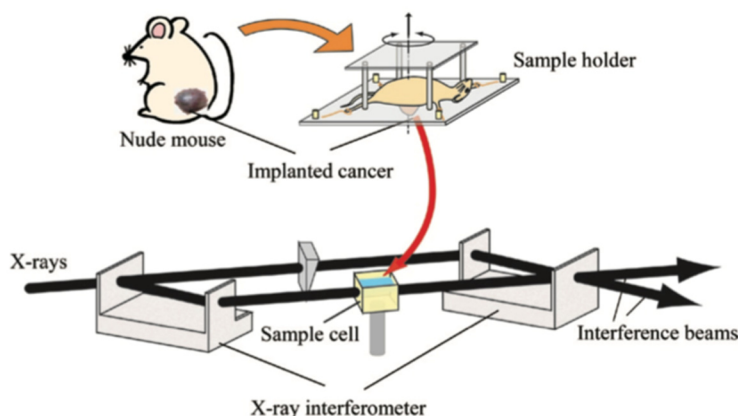


図 2-7-2: 分離型 X 線干渉計によるマウス腫瘍の継続的観察

的応答を動的に捉える研究への展開も期待できる。図 2-7-2 は、PF BL-14C に設置されている分離型 X 線干渉計を用いて、マウスの腫瘍を生きたまま継続的に観測する実験配置である[2]。世界で唯一の垂直ウィグラーからの垂直偏光（縦長）放射光を用いて、光学素子が水平に配置されることが特徴的であり、重力による干渉計の変形などが無いため、極めて高い密度分解能が実現できる。空間分解能は薄歯のシリコン結晶の導入により数 μm 程度に向上することが見込まれており、腫瘍組織のような軟部組織の詳細観察が可能になる。PF-HLS では、組織内の細胞の移動や、がん細胞への酸素供給に重要な役割を果たす血管新生など、時空間を制御した放射光照射により生じる詳細な生物応答を捉えることができると期待される。

その他の手法も含めて、放射光照射技術および生物試料環境に関する技術と放射光測定技術の融合によって実現する放射線生物作用機構に関する研究の展望を図 2-7-3 にまとめた。2.5/5.0 GeV 切り替えにより可能になる高エネルギー 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、さらには実際の臨床応用も期待できる。

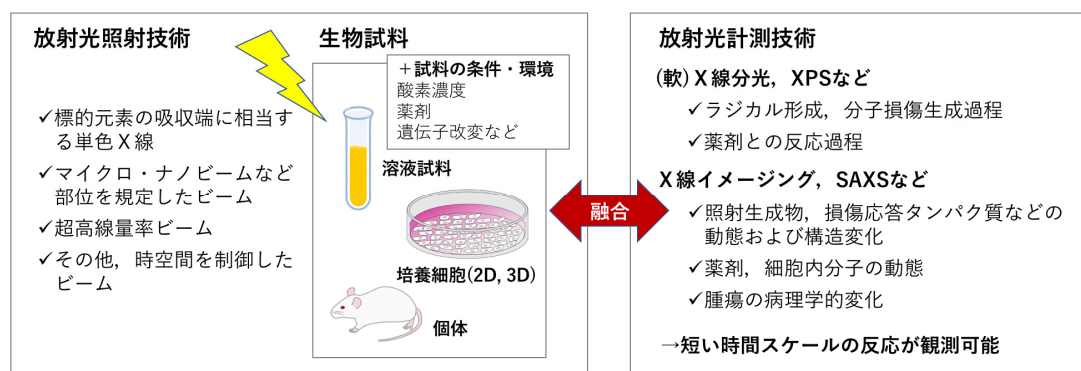


図 2-7-3: 放射光照射技術・生物試料環境に関する技術と放射光計測技術の融合。より短い時間スケールの反応を観測することにより、放射線治療の高度化に資する放射線生物作用機構の解明を目指す。

[1] V. Favaudon *et al.*, *Sci. Transl. Med.* **6**, 245ra93 (2014).

[2] A. Yoneyama *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, 1864 (2006).

2-8. 生物の階層ギャップを埋める統合的構造研究: ミクロ・マクロ観察の融合

生物は原子・分子から個体のレベルまで、構成する要素により幅広いスケールでの階層構造を持つ。最小の構造としてはタンパク質、核酸などの生体高分子がある。生物の基本単位である細胞は内部に生体高分子の他、様々な構造体（細胞小器官）をもち、生命活動を支えている。高等生物では細胞が集合し組織や器官・臓器を形成することで、より複雑で高度な機能を実現している。このように、生物をミクロからマクロにわたる様々なスケールでの階層構造としてとらえることで、複雑な生命現象を段階的に理解することができる。そして、それぞれの階層における構造を観察しその仕組みを明らかにするとともに、階層間の関係性を考慮した網羅的・系統的な研究が求められる。これらの知見は生物学だけでなく、医学、薬学、環境学、栄養学など、様々な分野における技術開発にもつながる。

図 2-8-1 に生物の各階層とそのスケールに対応する主な観察手法を示す。生体高分子については、クライオ電子顕微鏡による単粒子解析と相補的に、引き続き X 線結晶解析が主要な役割を果たしていくと考えられ、PF-HLS の高輝度光は測定の高速度・高精度化を更に推進する。より大きなサブミクロンスケールの局所構造についても、高輝度光による SAXS 測定の効率化や時分割測定の時間分解能の向上が見込まれる。マクロスケールの生体組織や臓器の観察には、PF-HLS の 5.0 GeV 運転で利用できる 100 keV 付近の高輝度硬 X 線が有用であり、高い透過能を生かして内部の構造を CT などの手法を用いて非破壊かつ高精細に可視化することができる。さらに、垂直型ウィグラー[1]を設置すれば、垂直方向に偏光した大面積の高強度硬 X 線も利用でき、PF で開発された水平光学系を用いた分離型干渉計[2]による位相イメージングも可能になる。生体組織や臓器（オルガノイドを含む）など、軽元素のみで構成されるコントラストのつきにくい対象物を、これまでよりも大視野・高密度分解能で効率的に観察することができると期待される。

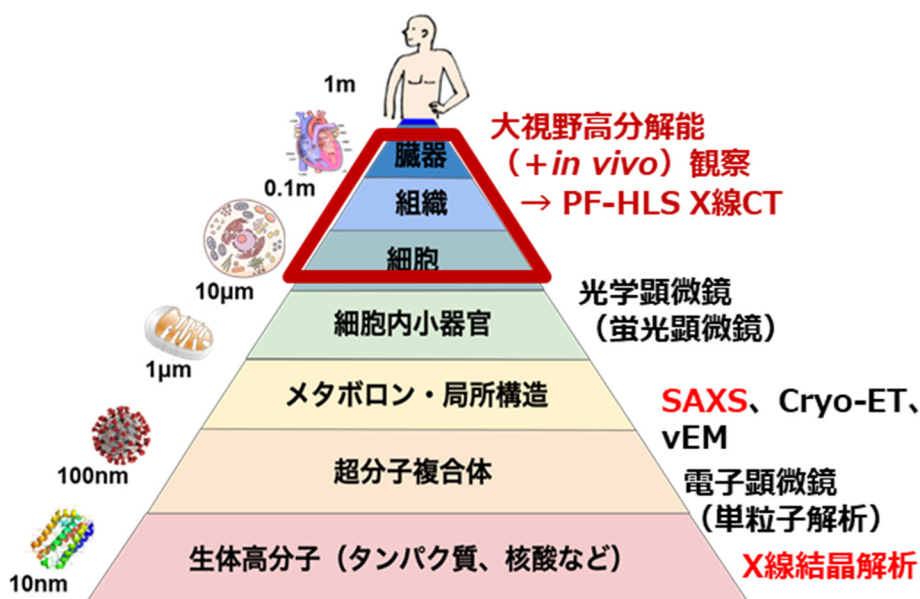


図 2-8-1: 様々なスケールでの生体構造およびその観察に適した観察手法。PF-HLS で可能な高輝度硬 X 線により、より大きな細胞、組織の高精細イメージングが可能となる。

さらに、PF-HLS の特徴の一つである 2 ビーム同時照射は、生体機能のより直接的な観察を可能にする。図 2-8-2 は、ヨウ素を血管造影剤として加えて測定したラットの肺の X 線像と、それに気管支構造を重ね合わせた像である[3]。気管支造影剤としてキセノンを加え、二つの造影剤の吸収端に対応するエネルギーの大面积の SR ビームを同時に照射すれば、生きたままの肺の中で起こる血管と気管の構造変化を同時に観察できる。様々な条件下でのイメージングから、肺の発達や病理の解明、そして再生医療に向けた有用な情報が得られると期待される。

生物は幅広い階層構造を持つため、X 線による観察が適さず他のプローブを用いるべき場合も多々ある。例えば、細胞内をナノメートルスケールで可視化するためには切片化した試料のクライオ電子線トモグラフィー観察が有用である。より大きいスケールでは固定細胞や生細胞への蛍光顕微鏡観察により、生命現象をリアルタイムで追跡できる。さらに詳細な生命現象の実像を得るには、オミックス解析のような網羅的な分子レベルの情報を組み合わせる必要もある。PF-HLS からのアウトプットを最大限に生かすためには、このような複合的な手法を扱うことができる研究組織も必須である。

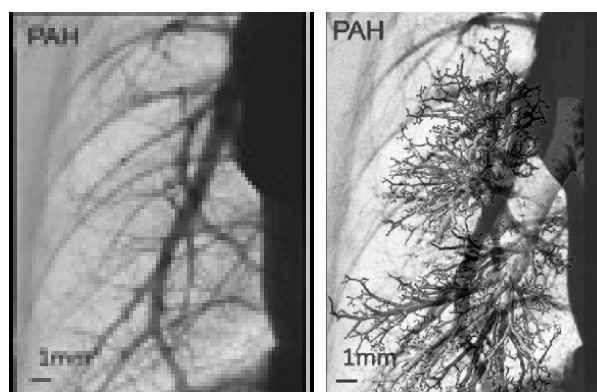


図 2-8-2: ラットの肺の像。左) 血管造影剤であるヨウ素の吸収端エネルギーで撮影した X 線像。血管が明瞭に観察できる。右) 左図に気管支構造を重ねた図。2 ビーム同時照射により、気管支造影剤であるキセノンの吸収端とヨウ素吸収端での同時撮像が可能となった場合、このような血管と気管の同時観察が可能になると期待される。

[1] H. Saito *et al.*, *J. Synchrotron Rad.* **32**, 934-941 (2025).

[2] A. Yoneyama *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, 1864 (2006).

[3] 松下昌之助, PF 研究会「放射光 2 ビーム利用と広波長域実験が切り拓く学術フロンティア」(2024).

2-9. 高空間分解能×広視野イメージングによる触媒の不均一反応研究の創成

触媒は工業製品をはじめとして身の回りで利用されており、日常生活に必須の材料である。循環型社会の観点からも、高活性・高選択性な触媒の開発は大きな寄与が期待される。触媒開発においては、マテリアルズインフォマティクスに代表されるような試作による材料探索と、触媒の反応メカニズムを明らかにすることで触媒設計を模索する方法が近年の主流である。不均一触媒の観察に目を向けると、触媒反応が起こる表面の観察手法の発展が触媒のキャラクタリゼーションに大きく貢献している。例えば、走査トンネル顕微鏡では、単結晶担体上の触媒ナノ粒子の分布や、吸着種を観察することができる。しかしながら、触媒の反応メカニズムの検討においては、反応前後の触媒を観察するだけでは不十分であり、実際の動作中における触媒反応の素過程（不均一触媒への反応物の吸着、拡散、反応、脱離）をオペランド観察することが重要である（図 2-9-1）。原子レベルでの表面観察手法の多くは超高真空を必要とし、反応ガス存在中の触媒を捉えるためには反応セルの準備などの多大な労力を要するのが現状である。

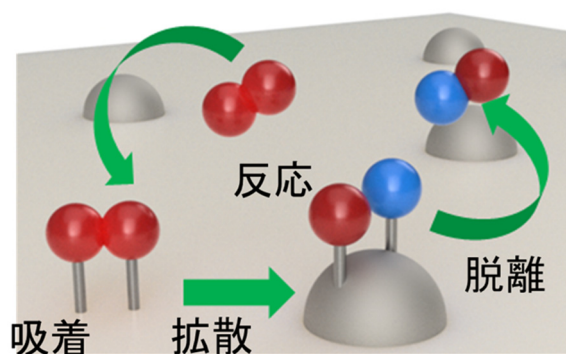


図 2-9-1: 不均一触媒の反応における素過程の概念図。

溶液や反応ガス共存下で触媒の観察を行うオペランド測定では、放射光 X 線はその高い透過性により、動作中における触媒の電子状態や構造についての情報を比較的容易に得られるツールとして用いられる。計測技術の高度化に伴い、触媒反応下における時間変化や空間不均一が明らかになってきた。例えば、第 4 世代放射光の高いコヒーレンスを利用したブラッグコヒーレント回折イメージングにより、触媒 1 粒子の変化についてまで高空間分解能測定が可能となっている[1,2]。しかしながら、1 粒子からその周辺環境までの広い空間スケールをシームレスに測定することは難しく、触媒反応メカニズムのマルチスケールな観察は実現していない。そのため、反応中に 1 粒子で生じた変化は近接粒子の影響を受けているのか？温度分布やガスの流路などは活性粒子の分布とどのように相関しているのか？「高分散」とはどのような粒子の分布であり、どのような位置関係が触媒活性に重要であるのか？といった、未解決の疑問が多く存在している。当然ながら、時間・空間の不均一を広いスケールでシームレスに可視化することは触媒分野にとどまる課題ではない。これを実現するには、2 つの X 線プローブで同時に異なるスケールの実験を行うことが有効である。つまり、観察可能なスケールが異なる 2 つの手法で同時測定を行うことで、不

均一な試料であってもシームレスな観察を行うことができる。

PF-HLS では、高輝度 SR ビームに加えて、高いコヒーレンスを有する SP ビームが同時に利用できる。よって、反応ガス共存下で反応中の触媒 1 粒子を、SP ビームを用いたブラッグ回折イメージングにより測定すると同時に、SR ビームを用いて SP ビームで観察している反応中の触媒粒子周辺の環境を 100 nm オーダーの領域で観察することが可能になる（図 2-9-2）。例えば、XAFS イメージングを用いれば、反応粒子の歪みと粒子周辺の化学状態の相関の情報などが得られると期待される。SP ビームによる高空間分解能の 1 粒子観察と、SR ビームによる広視野観察を同時に行うことで、触媒反応における不均一を可視化し、空間的にシームレスな触媒反応メカニズムの記述を目指す。

触媒粒子の凹凸を含めた形状、その周辺粒子の分布や化学状態などの触媒の不均質さが、触媒活性にどのように影響するかを理解するには、トポロジカルデータ解析が有効である。「かたち」に注目した数学の分野であるトポロジーを用いて、例えば、注目する触媒一粒子と周辺粒子の位置関係を定量化すれば、注目粒子の特定の面での活性と周辺粒子との位置関係の相関などを定量的に議論できる。機械学習のようなブラックボックスの解析ではなく、実空間における「かたち」を確認できることから、人間の直感に近い解析と考察が可能である。PF-HLS における高空間分解能×広視野イメージング、そしてトポロジカルデータ解析の融合によって、不均一を可視化した新しい触媒反応化学の創成を目指す。

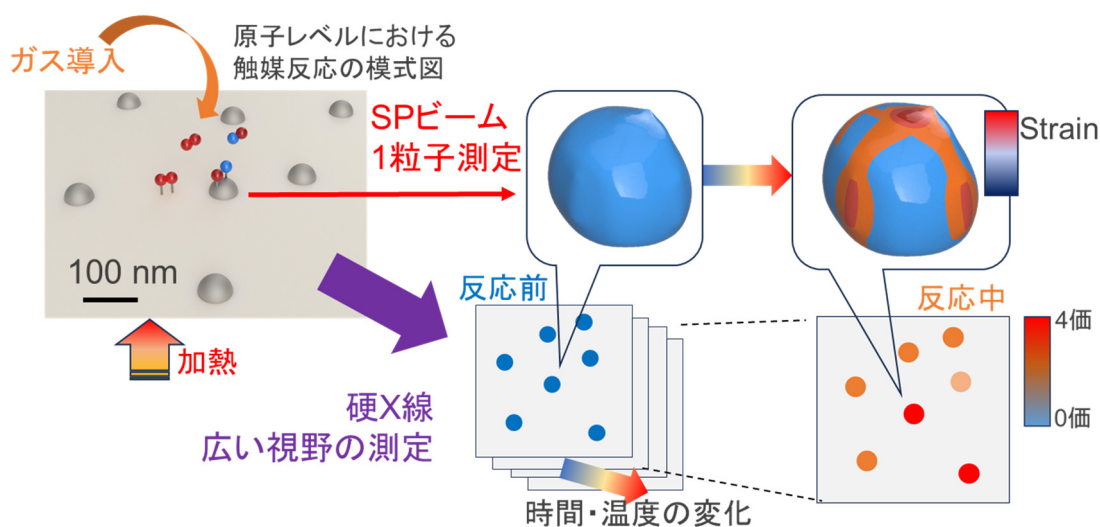


図 2-9-2: PF-HLS における提案手法の概略図。高いコヒーレンスを持つ SP ビームを用いたブラッグ回折イメージングで触媒 1 粒子を観察しつつ、高輝度な放射光 X 線で対象の粒子周辺を測定する。空間的にマルチスケールな観察を可能とすることで、1 粒子における変化と周辺環境の相関を得て、真の触媒反応メカニズムの記述を目指す。

- [1] A. Björling *et al.* *J. Synchrotron Rad.* **26**, 1830 (2019).
- [2] M. Abuin *et al.* *ACS Appl. Nano Mater.* **2**, 4818 (2019).

2-10. 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 $\sim$ 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。

従来の光化学反応の研究において盛んに行われてきたのが、pump & probe 測定法による光励起状態やその緩和過程の観察である。蓄積リング型の放射光を用いた 10 ps $\sim$ 1 μs オーダーの時間分解測定と、XFEL を用いた 10 fs $\sim$ 1 ps オーダーの時間分解測定を組み合わせることで、光励起・緩和過程の理解は大きく進展してきた。しかし、こうした研究において、光励起がその先に起こる化学反応にどのようなにつながっていくのかを直接的に観察した例はほとんどない。その理由の一つとして、上述の通り化学反応が不均一に進行することが挙げられる。仮に光励起が広い範囲において均一に起こったとしても、光励起が起こった場所のうちの一部しか化学反応まで進まないことは容易に想像できる。光材料の中でも、例えば太陽電池のような空間的によく制御されたものであれば、空間分解能をもった測定を行うことによって、どこで光励起が起こって、電荷のキャリアがどのように移動するか、といった様子を観察することは可能であろう。しかし触媒の表面のように、不均一さを正確にデザインすることが困難だったり、さらにはその不均一さが時々刻々と変化していったりする場合において、光励起と化学反応とを空間的にリンクさせることは極めて挑戦的な課題である。

表面における不均一な化学反応のリアルタイム観察は、蓄積リングからの放射光(実質的には連続光)を試料に照射し、光電子顕微鏡のような結像型の装置を用いて時空間分解することで行われてきた。化学種や電子状態の空間分布が時々刻々と変化する表面においては、ビームを絞って特定の位置を時間分解観察するよりも、ある視野を一度に観察できる結像型の手法を用いる方が有効である。表面の観察は比較的時間がかかるため、多くの場合時間分解能はせいぜい s のオーダーだが、化学反応の素過程を観測するのではなく、化学種や電子状態の空間分布の変化を追跡するものなので、s あるいは ms の時間分解能に大きな意味がある。ただし、この観察手法を光化学反応に適用した場合、そのままでは光励起・緩和過程の時間スケールよりはるかに遅いため、観察できるのは光励起によって引き起こされる化学反応の部分がほとんどになる。一方、結像型の手法を pump & probe 法と組み合わせる場合には、光励起・緩和過程を時空間分解観察することができるが、引き続いて起こる化学反応に関する情報を得ることは難しくなる。

PF-HLS では、SR ビームと SP ビームの同時利用によって、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はじめて、SP ビームで観察している光励起・緩和過程が、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できる。

図 2-10-1 に観察の例を示す。表面に円形ドメインが形成され、その内部、外部、境界部にそれぞれ異なる化学種が存在する場合を考える。SR ビームを用いたイメージングによって、それぞれの瞬間(ms ~ s スケール)のドメイン分布がわかるので、集光された SP ビームがどのドメインに照射されているかを決定することができる。原理的には、つねに同じ部分(例えば青色で示したドメイン境界部分)に SP ビームを照射し続ける(追尾する)ことも可能だが、現実的には、SP ビームの照射位置は固定とし、ms ~ s ごとのそれぞれの時間帯に pump & probe 法によって得られた光励起・緩和過程の時間分解データが、どのドメインに対応するかを見分ける方が技術的難易度は低いと考えられる。ドメイン分布は時々刻々と変化しており、同じ位置に SP ビームを照射し続けていても、ドメイン内部、境界、外部が一定の周期で SP ビームの位置にやって来るので、それぞれの時間帯のデータを別々にまとめることで、ドメインごとの pump & probe 測定が実現できる。

以上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。

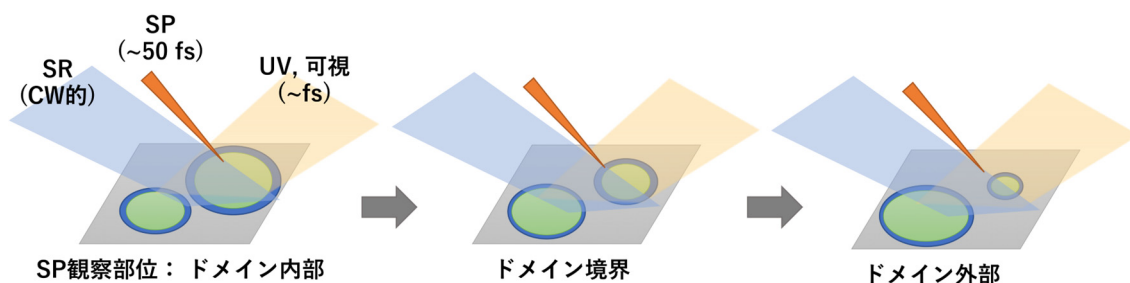


図 2-10-1: SP ビームと SR ビームの同時利用による時空間スケールを統合した光化学反応観察の模式図。UV または可視光(全体に照射)によって励起した光化学反応を、SP ビーム(超高速局所プローブ)と SR ビーム(広域プローブ)で同時に観測する。励起・緩和過程はドメインの内部、境界、外部で異なることが予想され、ドメインの動きによって SP ビームの観測部位が時々刻々と変化する。SR ビームは化学状態の空間分布を追跡する。

2-11. 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、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から、学問的に重要なテーマである。なかでも、光誘起相転移は、物質に光を照射することで状態を変化させることができ、今日の電子デバイスで主に用いられている、電場・電流・磁場などで行う相制御に比べ、高速・省エネルギーで望む状態を作りだすことができるため、応用面からも期待されている。

強相関電子系や分子集合体などの凝縮系においては、原子や分子、イオンなど、構成要素そのものがもつ電子状態に加えて、それらが集合することではじめて物性が発現することが多い。すなわち、電気伝導性、磁性、誘電性などの多彩な物性の背後には、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る。相転移現象においても同様であり、状態の遷移にともなう構造の秩序状態の変化の観測は相転移を理解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、従来知られているフォトクロミズムのような1分子の状態変化とは異なり、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として、光ドミノ効果とよばれる過程も知られている。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X線レーザーをプローブ光として用いる pump & probe 実験が多数展開されている他、放射光をポンプ光とする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、特定の軌道を選択的に励起できるという利点があるが、励起と観測に同じ光を用いるため測定が容易ではなく、放射光の照射前後で変化が起ころうことは分かるものの、詳細を調べることができないことも多い。

PF-HLS では、相転移を誘起する SP 光とプローブに用いる SR 光の、性質の異なる2つの放射光を同時に照射することができるため、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。ポンプ光として放射光を使うことで、波長可変性を活用した元素選択的な励起や、PF において実証されている角運動量をもつ光渦[1]を用いたスキルミオンなどの特徴的な相の形成が期待できる。

これまでに PF で観測された X 線誘起相転移現象のうち、構造変化が比較的遅く、詳細が調べられている系として、電子ドーピングされた二酸化バナジウム($V_{1-x}W_xO_2$) [2]や、鉄がドーピングされた層状ペロブスカイト $La_{0.5}Sr_{1.5}Mn_{1-x}Fe_xO_4$ [3]などがある。これらの系では X 線照射によりブラッグピークが徐々に変化し、結晶中で構造の変調が生じるとともに、前者は金属から絶縁体へ、後者は軌道秩序状態と強磁性状態の間を変化することが知られている。特に前者では、1光子により 80000 サイトの変化という桁違いに大きな光ドミノ効果が観測されている。X 線誘起相転移において、相変化が生じるために必要なフォトンフラックスは系により異なるが、上に挙げた X 線誘起相転移は、いずれも $10^{11} \sim 10^{15} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

のフォトンフラックスの照射によって起こることがわかっている。PF-HLS の SP 光を nm サイズに集光し、この程度のフォトンフラックスが得られれば、十分に光誘起相を形成できると期待される。

一般的に、光励起による電子状態の変化は高速に起こるが、それに続く過程である構造変化および相転移の伝播は比較的ゆっくりと進行することが知られている。例えば、上述の光ドミノ効果が観測される例としてよく知られている TTF-CA では、分子の価数変化という電子状態の変化が 200 fs 程度で起こるのに対して、常誘電状態から強誘電体への構造変化には 100 ~ 500 ps 程度の時間を要する[4]。これは、蓄積リングからの放射光に適した時間スケールであり、PF-HLS の SR 光で十分に観察できる。nm ~ μm サイズに集光した SR 光を用いれば、X 線により励起された起点から進展する構造変調の詳細および空間的な発展が観測できる。また、2 次元検出器を用いて広い空間を高速に測定すれば、時間発展を追うことも可能となり、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も明らかにできると期待される。現在 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あるいはマルチスケール軟 X 線顕微鏡などを応用していきたい。

X 線誘起相転移研究を通じて、相転移現象の新たな知見を得るとともに、相転移の学理の構築を目的とする。光励起による物質の状態変化は、温度では到達できない領域への励起も可能であるため、研究過程において新たな相転移現象の発見も期待できる。PF-HLS ならではの利用研究として、2 ビーム同時利用による X 線誘起相転移研究の創成を目指す。

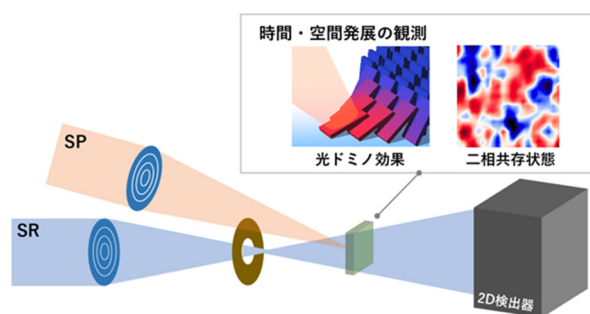


図 2-11-1: SP ビームにより形成された光誘起相の時間・空間発展過程を、SR ビームを用いた X 線顕微鏡によって観察する例。1 光子による多数の分子の変化（光ドミノ効果）や、巨大な外場応答の起源と予測されている二相共存状態などの観測を目指す。

- [1] Y. Ishii *et al.*, *Phys. Rev. Applied* **14**, 064069 (2020).
- [2] K. Shibuya *et al.*, *Phys. Rev. B* **84**, 165108 (2011).
- [3] Y. Yamaki *et al.*, *Phys. Rev. B* **91**, 100403(R) (2015).
- [4] E. Collet *et al.*, *Science* **300**, 612~615 (2003).

2-12. 放射光・低速陽電子マルチビーム融合で挑む次世代表面ナノサイエンス

表面は、物質上で2次元方向の広がりをもつために、その電子状態も2次元的な振る舞いを強く示すことがある。そこに原子の並びの再配列や、表面垂直方向の非対称なポテンシャル勾配の効果などが加わると、バルクでは見られない様々な物性が発現する。表面における超伝導・巨大磁気抵抗・異常ホール効果・トポロジカル状態・スピン依存伝導などの物理現象が知られており、既にデバイスとして実用化されているものもある。こうした新量子機能の発見や革新的材料の創成を目指すには、その起源となる表面の電子状態・化学状態・磁気状態などの理解を深く追求することに加えて、同時に、最表面から3~4原子層の極めて浅い領域に配列している原子の種類と位置座標の情報を正しく知ることが重要である。

原子位置座標の精密決定には回折法が有効であるが、一般にX線・中性子線・電子線などによる回折は、プローブが表面よりも深くに入りすぎたり、多重散乱の理論的な扱いが複雑になりすぎたりして、しばしば正確な表面構造の決定が困難になる。低速陽電子による回折は、表面感度の高さと散乱過程の単純さによってこの課題が解消されており、最表面およびその直下の構造決定に最適のプローブとなる。表面原子配列の解明は、機能特性の解明と並んで物性研究の2本柱であり、ここに新たに陽電子回折が登場したことで、それら両面からのアプローチをより現実的かつ実用的に展開できる。

一方で、革新的材料研究の初期段階において、対象となる物質は必ずしも均一な単結晶とは限らない。多結晶、粉体、劈開面、積層構造、ナノワイヤ、エッジ構造、さらには電極が作り込まれたデバイス動作環境下など、それらは表面に不均一に分布していたり、一部にのみ存在していたりする。結果的に、新たな機能を示すのはミクロなサイズの微小な領域（ドメイン）のみという場合も多い。こうした微小ドメインを対象とした研究を進めるには、具体的には、(1)放射光などの探索プローブでそのドメインを見つけ、(2)別の放射光や低速陽電子による計測プローブでも当該ドメインを特定して情報を引き出す、という2ステップを踏む必要がある。この際、表面は様々な励起現象や汚染などによっても時間変化し得るので、ドメインを特定したその場で、迅速かつ正確に、複数のプローブで実験を行うことが求められる。

そこでPF-HLSでは、放射光と低速陽電子による異種マルチビーム実験を、表面の同一微小ドメインに対して行うための世界初のビームライン装置を立ち上げる。**図 2-12-1[左]**に装置の概念図を示した。ここでは一つの実験チェンバ内で放射光と低速陽電子のビームを同じ試料表面に照射し、光電子と陽電子の計測を同じ検出器で行うことで、同一微小ドメイン上の正確なマルチビーム/プローブ実験を実現する。それに類似した装置として、低速陽電子ではなく、電子ビームを利用した「分光型光電子・低エネルギー電子顕微鏡 (spectroscopic photoemission and low-energy electron microscope, SPELEEM)」が複数の先進放射光施設で稼働している。ここではSPELEEM装置の光学系を応用し、電子に代えて低速陽電子ビームを導入すれば良い。

このビームラインで実現される実験の例を**図 2-12-1[右]**に示した。PF-HLSの2ビーム利用により、ビーム径が2~3桁異なる2種類の放射光プローブを用いれば、光電子顕微

鏡 (photoelectron emission microscopy, PEEM) 実験によって、sub mm から sub μm オーダー領域に至る試料表面の広範囲かつ高空間分解能の実空間観測が可能になる。この広範囲・高分解能観測を活用した表面探索で興味深い微小ドメインを特定する。続いて、PEEM に使用した検出光学系をそのまま使い、検出範囲を完全に一致させたまま、同一ドメインに対する角度分解光電子分光 (angle-resolved photoemission spectroscopy, ARPES)、X 線光電子分光 (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS)、そして低速陽電子回折 (low-energy positron diffraction, LEPD) 実験を実施する (図 2-12-1)。これらにより、光電子による実空間のモフォロジ情報や、エネルギーバンドやケミカルシフトなど電子状態の情報に加えて、低速陽電子による表面 3~4 原子層の精密な原子位置座標の情報を、同一ドメイン上の確実に同じ場所で一挙に取得できる。

微小ドメインに対する LEPD 実験には、高強度かつビーム径が sub μm サイズの平行ビームが必要となる。これは PF-HLS リングへの入射加速器を活用した高強度低速陽電子ビームの生成と、多段式の低速陽電子ビーム輝度増強システムの組み合わせによって実現する。そのための要素技術は、低速陽電子実験施設 (slow-positron facility, SPF) と KEK の関連施設で開発が進められている。これらを達成し、次世代表面ナノサイエンスを展開できるのは、世界でも、放射光・低速陽電子・加速器・ハイパワー標的の技術を現時点で高いレベルで保有している KEK つくばキャンパスだけである。その力を結集して、いち早く放射光・低速陽電子マルチビームを融合した顕微 (PEEM)・分光 (ARPES、XPS)・回折 (LEPD) 実験ステーションを実現し、我が国発の装置による多種多様な革新的材料研究を推進する。こうして表面の特異な物理現象の解明を追求することで、次世代電子デバイスや先進触媒材料の研究開発を大きく加速する。

加えて、高強度低速陽電子ビームが実現されれば、電子と陽電子の束縛状態であるポジトロニウムの精密分光実験も展開できる。最近、SPF でポジトロニウムのレーザー冷却が成功し[1]、精密分光実験への革新的な第一歩が踏み出されたことで、物理学の基礎理論の検証に対する貢献も大きく期待されている。

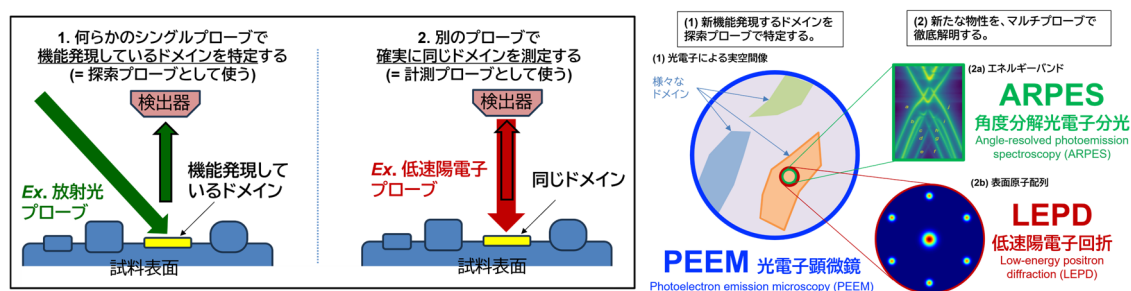


図 2-12-1: 放射光・低速陽電子マルチビーム融合実験の概念図。[左] 放射光・低速陽電子マルチビーム/プローブ実験装置。[右] その実験例。(1)探索プローブで興味深いドメインを見つけ、(2)そのドメインの確実に同じ場所を測定できる計測プローブで新たな物性を解明する。

[1] K. Shu *et al.*, *Nature* **633**, 793-797 (2024).

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高くなるため、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、70 eV でも 3 次光まではほぼ完全に抑えられるため、35 ~ 70 eV 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。

広波長域軟X線ビームライン BL-12A

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、2024年4月に建設が完了した。BL-12Aはエネルギー選択式光源に向けたビームラインの要素技術開発と、広波長域の光源利用のR&Dを目的として、50 eV ~ 5 keVを同一の試料位置で利用することができる設計となっている。国際的にもテンダーX線領域(2 ~ 5 keV)が利用可能なビームラインはまだ数少なく、EUV領域までを包括した広いエネルギー領域は、非常に特徴的である。BL-12Aはこの広波長域を活用した多種多様なサイエンスの新領域を開拓していくことで、現在建設中のBL-11A/Bと共に、新放射光源計画の礎を担っていくことが期待されている。

BL-12Aは1つのポートに対して、初段と最終段のミラーの脱挿入により、回折格子分光器(Sパス)と二結晶分光器(Tパス)を選択的に利用することで、50 eV ~ 5 keVの光を、同一位置に集光する(図3-1-1)。エンド部は基本的にフリーポートとして、ユーザー持ち込みの測定装置を接続することで運用するが、常設のX線反射率計も利用可能である。

現在、Sパスのコミッショニングを実施中である。2024年8月にTパス用ミラー(M0T)のインストールを行い、以後、ビームラインのR&Dを開始する予定である。具体的には、SパスとTパス切り替え時の光軸およびフォーカス位置の一致精度と再現性、パス切り替え時の光学系の安定性の評価、高度化計画で提案された、Sパスの光学素子類の炭素汚染

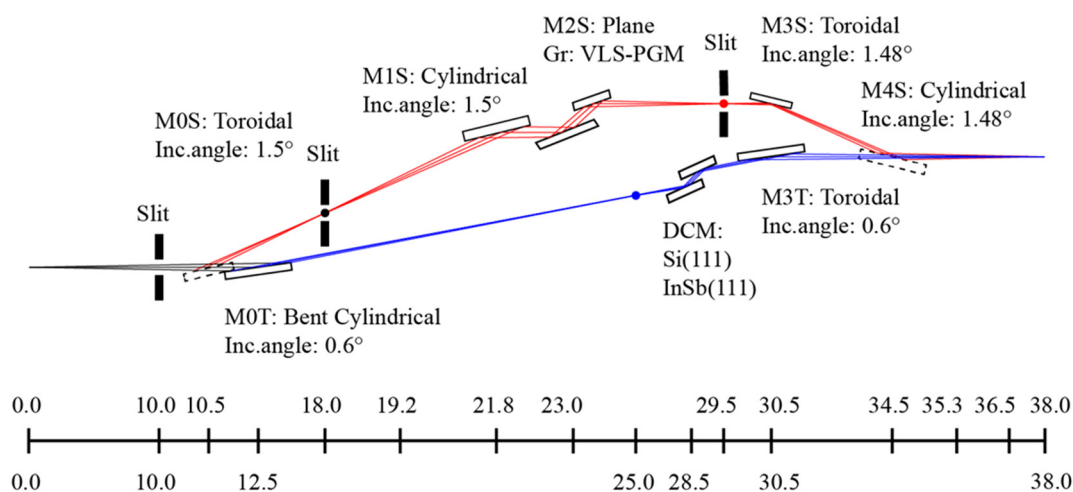


図 3-1-1: 広波長域軟X線ビームライン BL-12A のレイアウト図 (側面図)

の除去を実践する。そして広波長域利用研究に向けた R&D として、結像型透過 X 線顕微鏡と、新設計となる XAFS チャンバーからなる統合的分析環境を構築することで、利用研究の先鋭化を推進する。PF-HLS における広波長域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についても、BL-12A での R&D を通じて詳細を検討する。

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

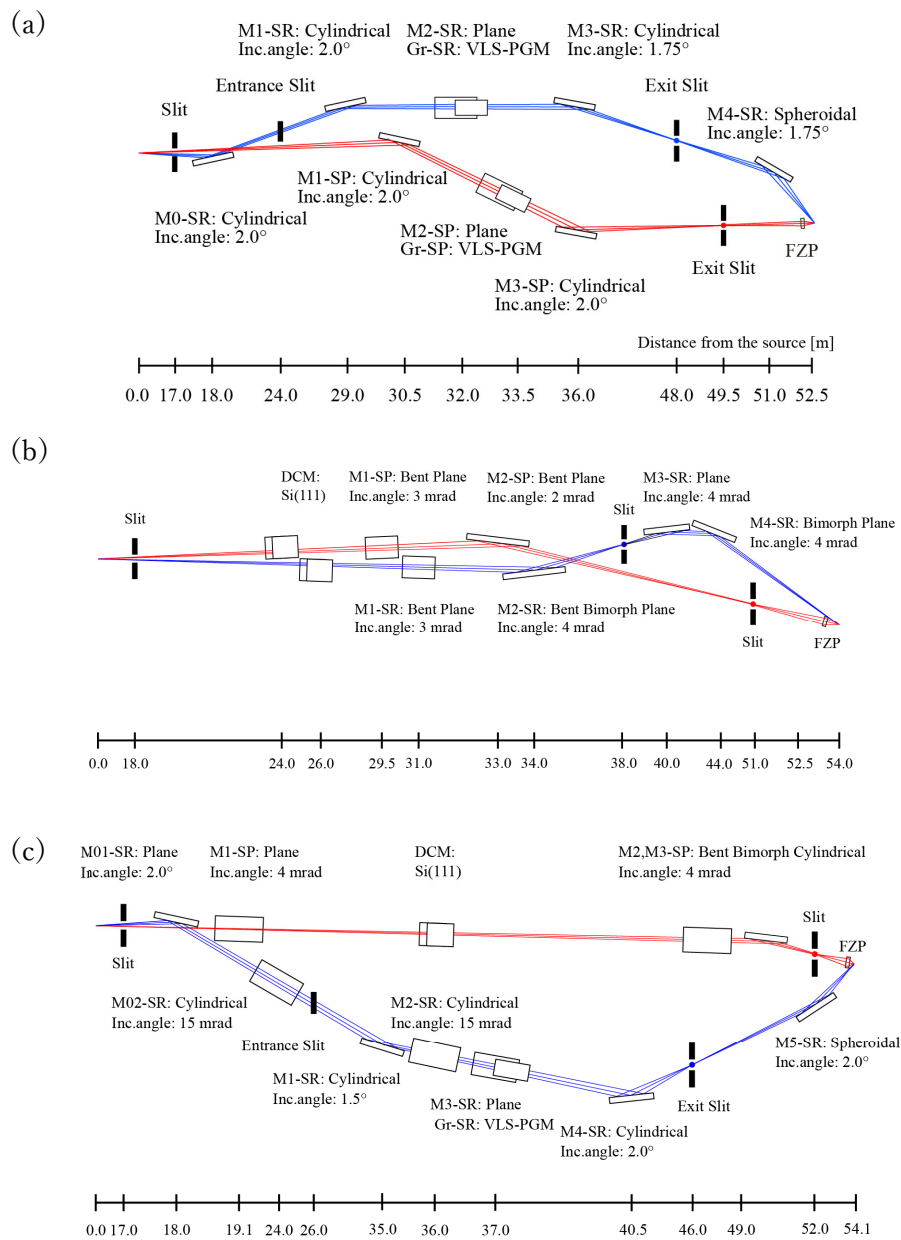


図 3-2-1: 2 ビーム同時利用ビームライン光学系の例（平面図）。
(a)軟 X 線-軟 X 線、(b)硬 X 線-硬 X 線、(c)軟 X 線-硬 X 線

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。

開発研究多機能ビームライン BL-11

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を行うため、開発研究多機能ビームライン PF BL-11A,-11B の建設を進めている。BL-11A,-11B は、同じ偏向電磁石を光源とした硬 X 線 (HX) と軟 X 線 (SX) のブランチであるが、最下流で再び交わって同時利用できるように設計されている (**図 3-2-2**)。2023 年に本格的な建設を開始し、2024 年 6 月現在、基幹部から実験ホール内メインハッチまでの建設が完了している。ビームラインの完成は 2025 年を見込んでいるが、建設の進捗に合わせて順次各種の開発に利用していく。

BL-11A, -11B のメインハッチでは、偏向電磁石からの無加工の白色ビームを利用することができる。白色ビームは、PF-HLS で想定されている 1 mrad の方位差を模擬するのに十分な水平取込みを確保している。光源との間に光学素子がないため、白色 BPM の開発にも適しており、アンジュレータ光源ビームラインへの適用を目指した波長分解白色 BPM の試験などを予定している。また、斜入射光学系や真空排気の基盤技術開発にも活用する。2 ビーム利用ビームラインの SX ブランチでは、ビームを分離して再度合流させる都合上、必然的にミラーの数が多くなる (**図 3-2-2**)。このため、ミラーの安定制御や表面劣化の影響がビーム性能に表れやすい。反射面への炭素汚染や光電子を介した放熱による熱ドリフトを防止する方策や、振動抑制のための非蒸発型ゲッター (NEG) ポンプ技術の開発を進めている。その他、基幹部の基盤技術開発として、取込みマスクやシャッターブロック、スリットの上流面に NEG 蒸着を施す試験を行った。ガス放出を抑制することに

よって、光焼き出しに要する時間を大幅に削減することができている。

今後は、下流部の建設に合わせて、段階的に各種分光器や2ビーム利用実験技術の開発を行っていく。特に、2ビーム利用に当たっては、同位置集光のための単色BPMや精密光学系調整、近接ビームの干渉の効率的な抑制、真空への要求度の異なるSX/HXビーム合流のための真空区間の適切な切り分けなど、開発項目は多い。試料より下流においても、検出側に互いのビームが混入する可能性があり、シグナルの分離や検出器の放射線防護が課題となる。PF-UA、UVSOR、HiSOR、ISSP-SORと協力して、検討会や研究会などを定期的に開催し、様々な検討と共同開発プロジェクトを進める。

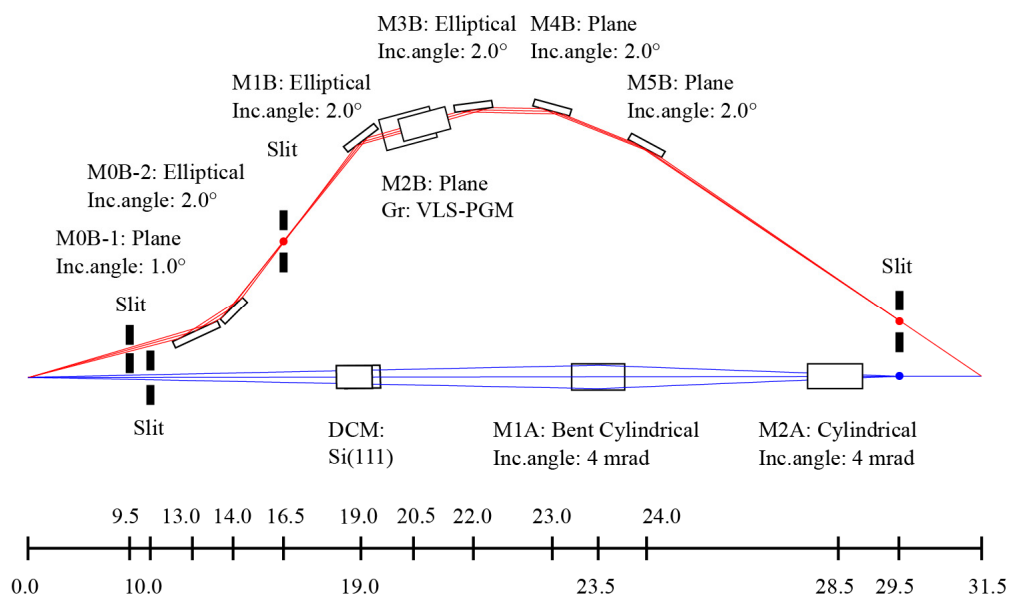


図 3-2-2: 開発研究多機能ビームライン BL-11 のレイアウト図 (平面図)

[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 バンチ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 $1 \text{ nC} \times 6000$ (マイクロバンチ) $\times 10 \text{ Hz}$ (マクロバンチ) が入射される。1 nC 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。要求を満た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経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。

SP ビームが蓄積リングへ入射されるタイミングは、レーザー光パルス列に変換された基準信号を[8]、バンチ到着時間モニタ (BAM) として機能する電気光学変調 (EOM) 素子に通して、それらの干渉として計測する[9]。これにより、マクロバンチごとに時間基準信号であるレーザーパルスに対する位相差として記録される。この位相差情報を測定データの解析に利用するため、マクロバンチを同定するための ID を付した位相差情報をビームライン側に配信する手順と仕組みを整える。

より直接的な SP ビームタイミングモニタの開発は一つの課題である。加速器を高精度で同期するためには、上述のようにレーザーパルス列による基準信号が利用される。SP ビームが照射されることにより光学レーザーに対して位相変調を起こす物質を利用できるのであれば、BAM で利用する方式と同様に、基準信号レーザーパルスに対する位相差を計測することができる。より直接的なタイミングモニタの候補として、SP ビームにより高速な応答が期待できる物質の探索を進め、開発実証試験を行っておく必要がある。

- [1] 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. Brzezinskaya *et al.*, *J. Synchrotron Rad.* **20**, 522 (2013).
- [7] S. Roling and H. Zacharias, “Split-and-Delay Units for Soft and Hard X-Rays”, in E. J. Jaeschke *et al.* (eds.), *Synchrotron Light Sources and Free-Electron Lasers* (Springer Nature 2020).
- [8] S. Pfeiffer *et al.*, *Proc. IPAC2012*, MOOAA03.
- [9] F. Loehl, *Proc. BIW10*, MOFNB01; M.K. Czwalińska *et al.*, *Proc. IBIC2013*, WEPC31.

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）のフォトンを提供するためには 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 750 m 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。

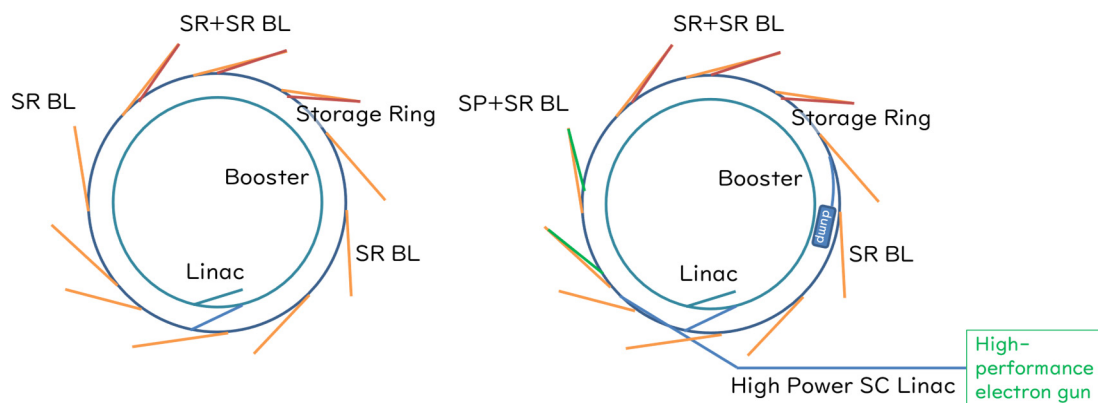


図 4-1-1: 光源加速器の概念図。最初にリング部分を整備し（左）、その後超伝導線形加速器を建設する（右）。最初の段階ではブースターリングによる入射を想定している。

表 4-1-1：主要パラメーター一覧

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
モーメントムコンパクション因子	3.24×10^{-5}	
ベータトロンチューン, vx/vy	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	7.417×10^{-4}	1.48×10^{-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 *

* 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。
- ・ 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 10 m 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、四極電磁石および六極電磁石について、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。四極磁場係数を約 55 T/m、六極磁場係数を約 6500 T/m² 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。ノーマルセルで 5.0 GeV の場合に 0.7 T を目安とした。

ESRF-EBS や MAX IV など採用されている極低エミッタンスの MBA/HMBA ラティスは、オプティクスの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。セルをアイソクロナスにするために、ノーマルセルの分散バンプ部分の四極電磁石を機能結合型逆偏向電

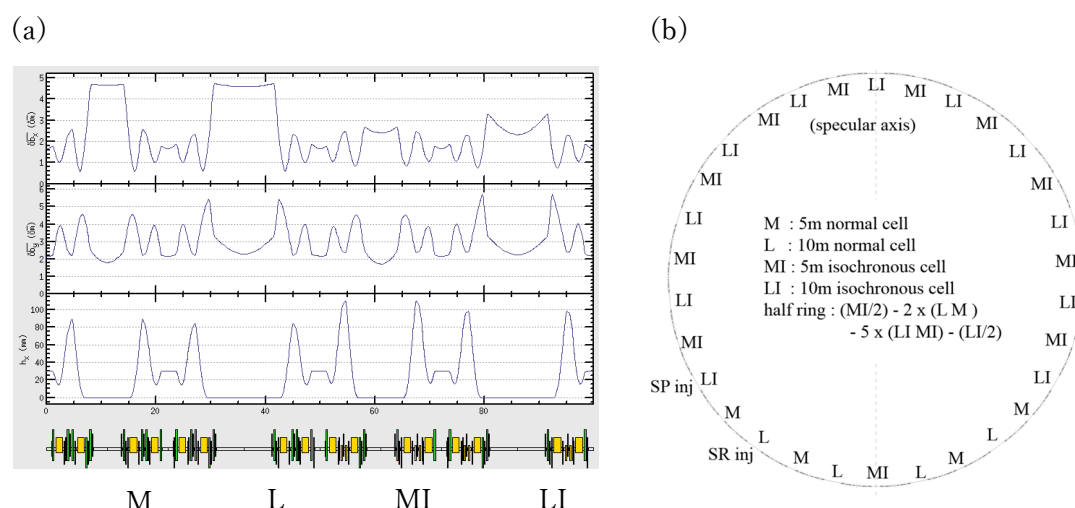


図 4-2-1: リングのラティスとオプティクス (a) 基本となる 4 種のセルのオプティクス、(b) リング 1 周のセル配置。ビームは時計回りに周回。M は 5 m 直線部を含むノーマルセル、L は直線部 10 m のノーマルセル、MI は直線部 5 m のアイソクロナスセル、LI は直線部 10 m のアイソクロナスセル。各セルには 2 m の色消しでない短直線部が含まれる。

磁石に変更する。直線部を 10 m 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四極電磁石を 2 台とも変更する必要がある。リングは 5 m 直線部を含むノーマルセル、10 m 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 2 m 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。

ビーム安定領域拡張のための六極磁場最適化結果

電子ビームをリングの中で安定に周回させるためには電子ビームの線形クロマチシティを補正する必要がある、そのために六極磁場が使用される。しかし六極磁場は同時に非線形共鳴や振幅依存チューンシフトなどの現象を誘起し、位相空間をビームの存在する安定領域とビームの存在できない不安定領域とに分ける。ビームの安定領域が狭いとビーム入射などに悪影響を与え、ユーザー運転に支障をきたすことになる。今回、色収差・非線形共鳴・振幅依存チューンシフト・非線形分散関数などの解析式を連立的に解くことにより、ビーム安定領域の拡張を行った[3]。ビーム安定領域の拡張結果を以下に示す。

まずリング電磁石に標準偏差 50 μm 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 $\pm 1\sigma$ までの乱数として入れ、100 通りの種に対して計算した閉軌道歪み(Closed Orbit Distortion, COD)補正後の安定領域の広さを図 4-2-2 に示す。KEK で開発された加速器設計用コード SAD [4]を使用した。従来型のキッカーセプトラムを用いた入射のためには、リング入射点で 5 mm の安定領域が必要となる。入射に必要な 5 mm の安定領域が確保されていることが分かる。

次に SAD で求めた振幅依存チューンを図 4-2-3 に示す。x 方向と y 方向の振幅依存チューンに関してはほぼフラットとなった。運動量方向について、横軸の $\Delta p/p$ は運動量偏差を意味している。今回、線形クロマチシティを、x 方向と y 方向それぞれ 2 と 3 に補正したので、 $\Delta p/p=0$ 近傍ではそれに相当する分、チューンが傾きを持っている。 $\Delta p/p$ の大きいところでチューンが曲がっているのは非線形クロマチシティによるものである。

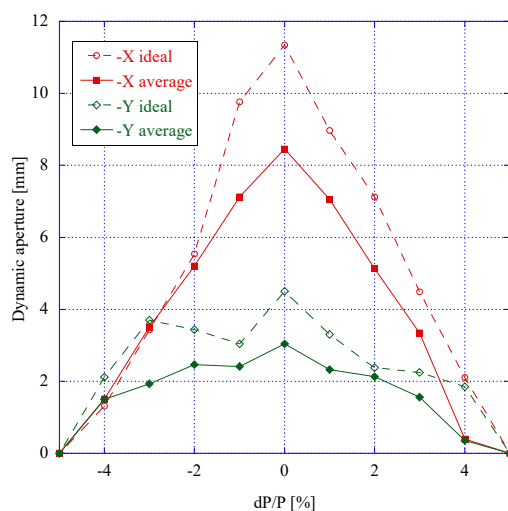


図 4-2-2: SR 入射点におけるダイナミックアパーチャー

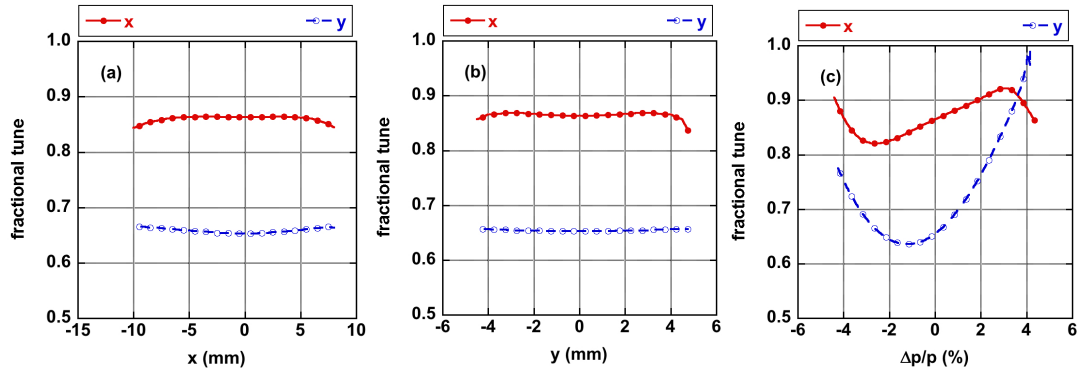


図 4-2-3: (a) x 方向、(b) y 方向および(c)運動量方向の振幅依存チューン

On-momentum 粒子の安定領域を調べるために、SPRing-8 で開発されたシミュレーションコード CETRA[5]を用いて frequency map 解析を行った。X-Y 空間での解析結果を図 4-2-4 (a)に、チューンダイアグラム上でのチューン分布を(b)に示す。色の違いは拡散係数の大きさを表し、青色に近いほど安定、赤色に近いほど不安定な領域であり、白色はビームが存在できない場所である。図 4-2-4 (a)を見ると入射に必要な点(x, y) = (-5 mm, 0 mm)から(0 mm, 0 mm)にかけて不安定な領域は見られず、また図 4-2-4 (b)のチューン分布も危険な非線形共鳴線から離れて存在しているので、摂動が働いた場合においても入射に必要な安定領域は確保されるものと思われる。次に off-momentum 粒子の安定領域を調べるために、APS で開発されたコード ELEGNT[6]を用いて local momentum acceptance (LMA)の計算を行った。LMA から求めた平均値の RF 電圧依存性を図 4-2-5 に示す。RF 電圧が低い領域ではシンクロトン振動が支配的で、RF 電圧を高くすると bucket height が大きくなると共に LMA の平均値も大きくなるが、RF 電圧が十分に高い領域では六極磁場によるベータatron振動の不安定領域が支配的となり RF 電圧によらず LMA の平均値は飽和する。飽和した場合の例として、2.5 GeV で RF 電圧を 1.6 MV に設定した時の LMA を図 4-2-6(a)に、5.0 GeV で 7 MV の場合を(b)に示す。

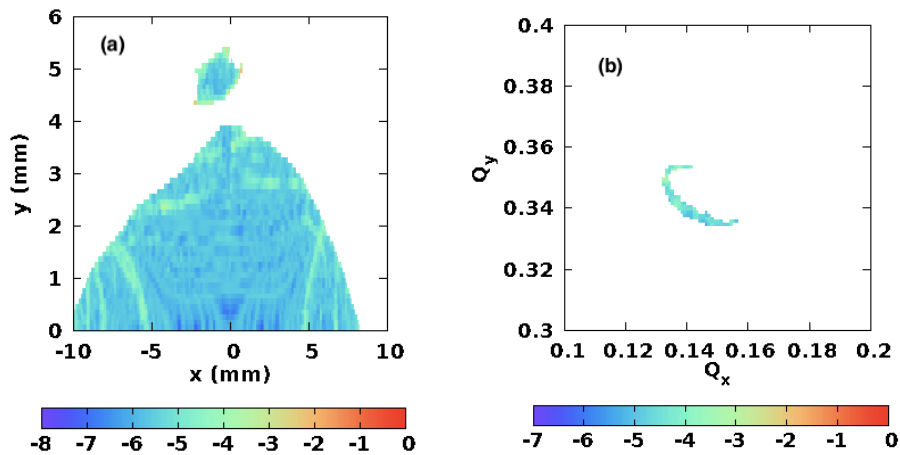


図 4-2-4 (a) x-y 空間および(b)チューンダイアグラムでの frequency map 解析結果

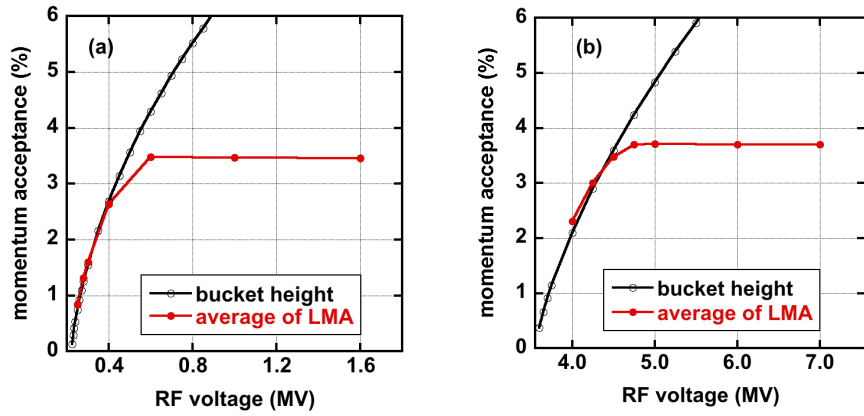


図 4-2-5: RF 電圧に対する(a)2.5 GeV (b)5.0 GeV における LMA 平均値

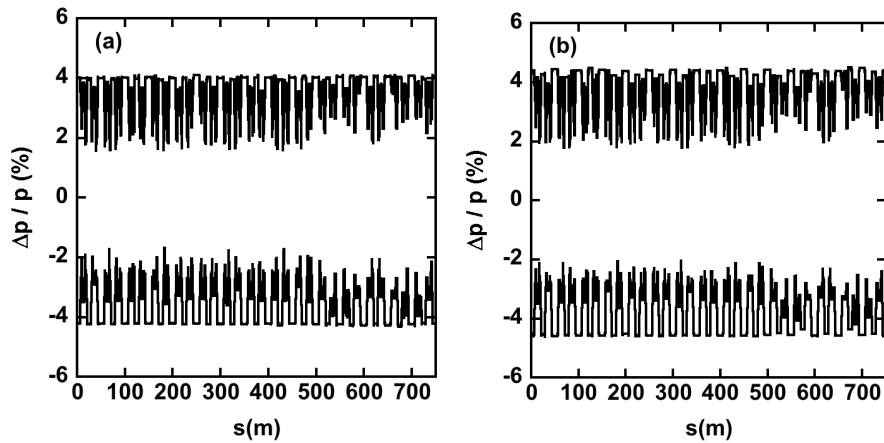


図 4-2-6: (a) 2.5 GeV の時に RF 電圧を 1.6 MV に設定した場合と
(b)5 GeV の時に RF 電圧を 7 MV に設定した場合の LMA

ビーム内散乱の影響と Touschek 寿命

エミッタンスが小さい加速器ではバンチ内の電子数が増えるとビーム内散乱 (intra-beam scattering, IBS) によるエミッタンスの増大や Touschek scattering によるビーム寿命の減少が顕著となってくる。そこで IBS については参考文献[7]を、Touschek ビーム寿命については参考文献[8]を参照して計算を行った。また 2.5 GeV において IBS の効果を緩和するために、高調波空洞によるバンチ伸長の効果[9, 10]を考慮に入れた計算も行った。IBS の影響について、x 方向エミッタンス、運動量広がり及びバンチ長に関する計算結果をそれぞれ図 4-2-7、図 4-2-8 及び図 4-2-9 に示す。5.0 GeV の時には IBS の影響は小さいが、2.5 GeV の時にはバンチ電荷の増大に伴い IBS の効果が顕著になる。更に、RF 電圧を高くするとバンチ長が短くなるため IBS の効果が増強される。高調波空洞を導入しバンチ長を伸ばすことにより IBS の効果が緩和されることが予想される結果を得た。

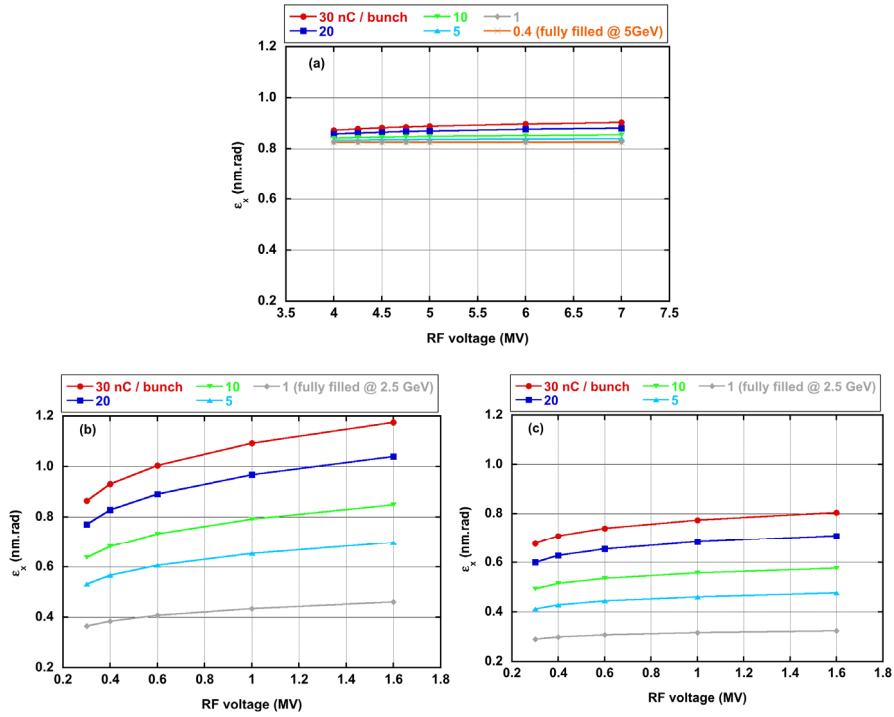


図 4-2-7: (a) 5.0 GeV の場合、(b) 2.5 GeV で高調波空洞が無い場合、及び(c) 2.5 GeV で高調波空洞を考慮した場合の、IBS を考慮した x 方向エミッタンス。エミッタンスカップリング 1%を仮定している。1250 バケットフルフィルのとき 0.4 nC で 200 mA (5.0 GeV の設計蓄積電流値)、1 nC で 500 mA (2.5 GeV の場合) となる。

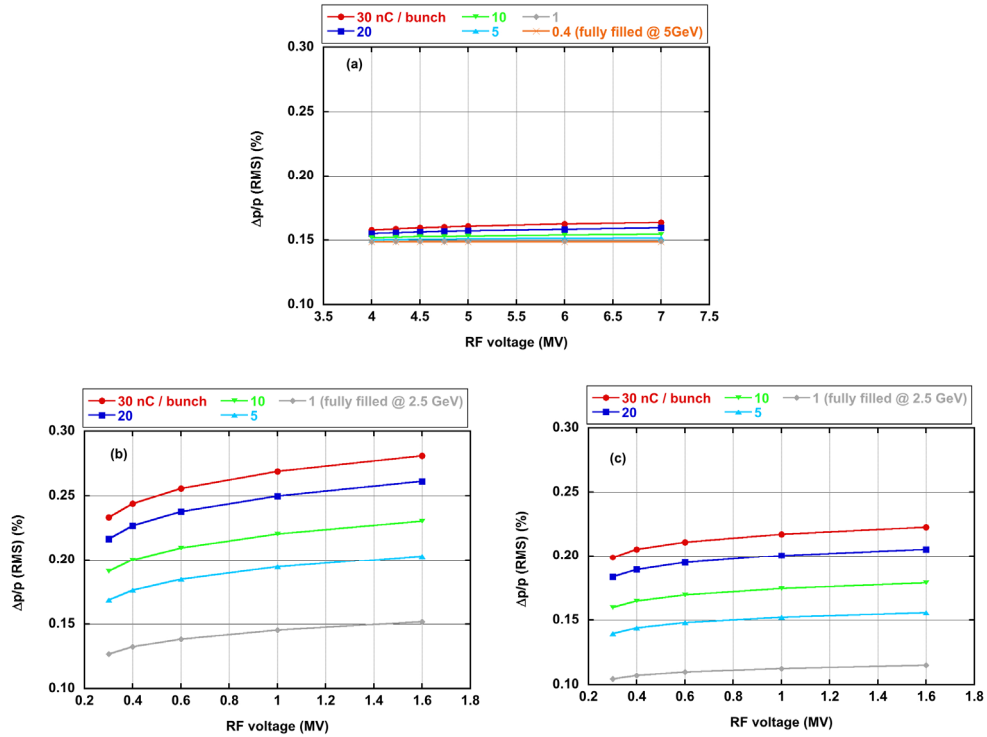


図 4-2-8: (a) 5.0 GeV の場合、(b) 2.5 GeV で高調波空洞が無い場合、及び(c) 2.5 GeV で高調波空洞を考慮した場合の、IBS を考慮した運動量広がり (RMS 値)

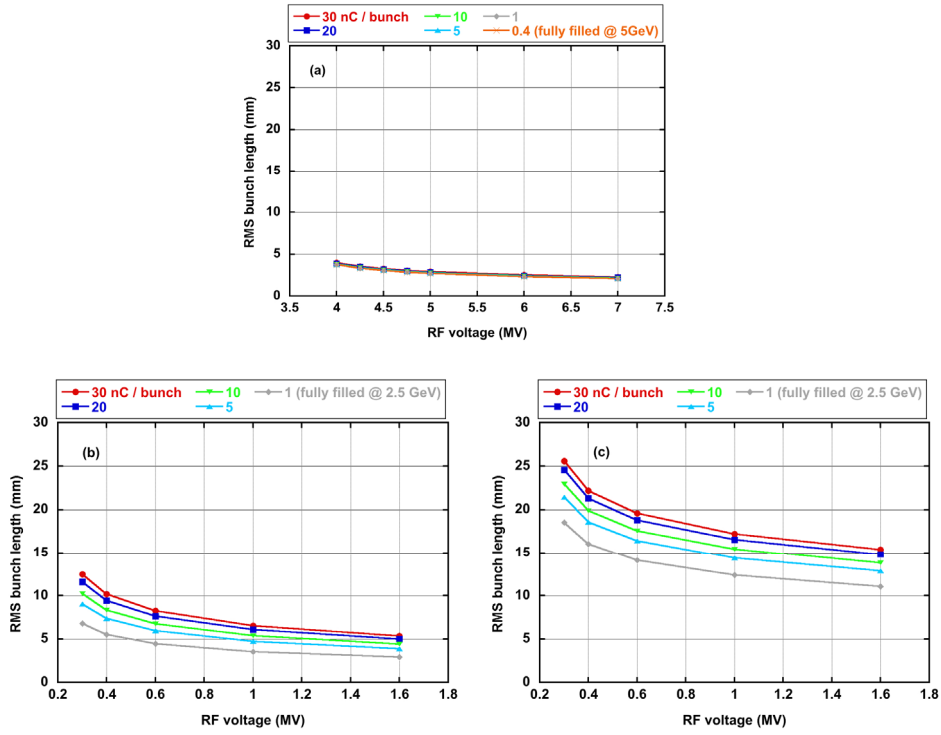


図 4-2-9: (a) 5.0 GeV の場合、(b) 2.5 GeV で高調波空洞が無い場合、及び (c) 2.5 GeV で高調波空洞を考慮した場合の、IBS を考慮したバンチ長 (RMS 値)

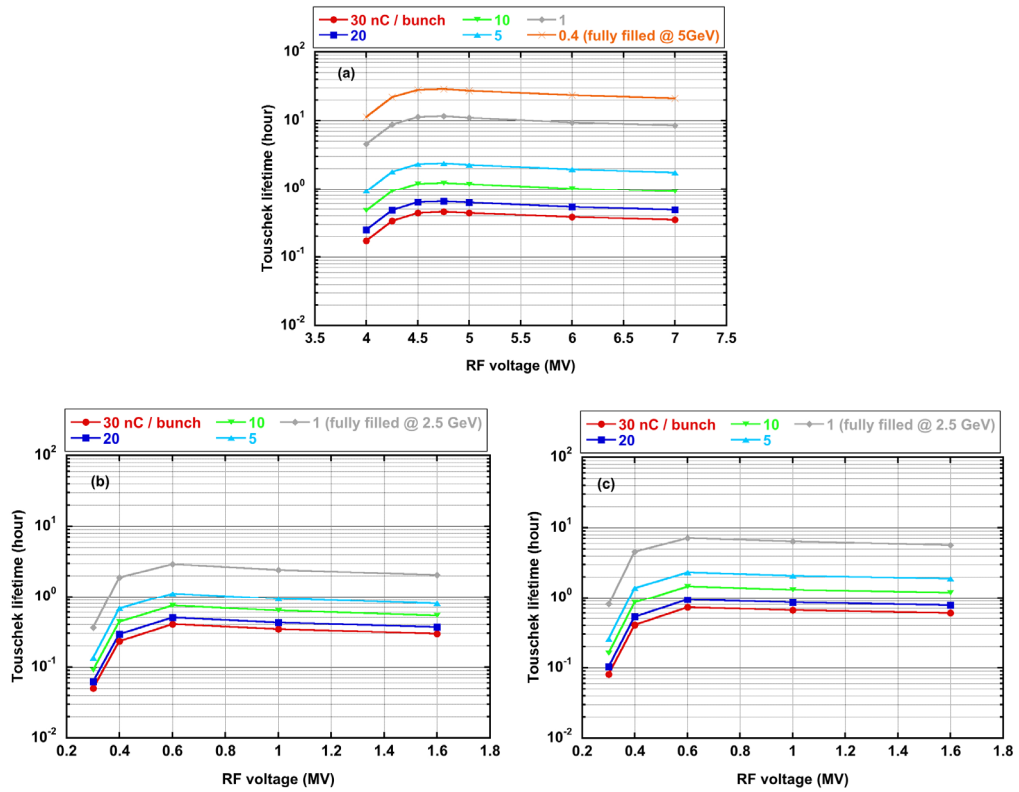


図 4-2-10: (a) 5.0 GeV の場合、(b) 2.5 GeV で高調波空洞が無い場合、及び (c) 2.5 GeV で高調波空洞を考慮した場合の、IBS を考慮した Touschek ビーム寿命

IBS がエミッタンスなどに与える影響、及び LMA を用いて計算した Touschek ビーム寿命の結果を図 4-2-10 に示す。RF 電圧が低い領域では RF 電圧を高くするに従い LMA が大きくなるのでビーム寿命が長くなるが、RF 電圧が高い領域ではビーム寿命が短くなる。これは RF 電圧の高い領域では LMA が飽和すること、及びバンチ長がより縮小されることが原因と思われる。今回、シングルバンチとして 30 nC/bunch までのバンチ電荷について IBS と Touschek ビーム寿命の計算を行ったが、ビーム不安定性の解析によりバンチ電荷がこれらの値より制限される。

SP ビームのバンチ伸長

図 4-2-11 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 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。今後、架台の設置誤差や BPM の読み取り誤差などの現実的な誤差をシミュレーションコードに取り入れて、最初にビームを蓄積するところからビーム蓄積後に光源性能を改善するところまでの一連の加速器調整を模擬した軌道計算を行う予定である。

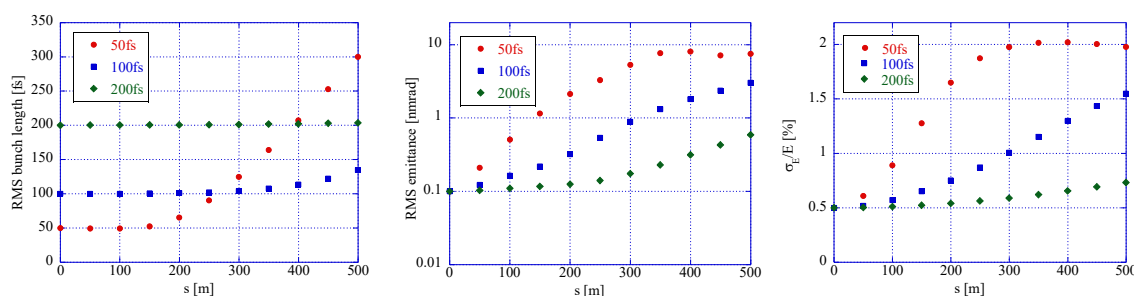


図 4-2-11: リングのアイソクロナスセルの中心軌道上を通過する SP ビームのパラメータ変化

NEG コーティングによるインピーダンスとその影響

PF-HLS リングでは NEG コーティングの利用が検討されている。NEG はパイプ金属よりも電気伝導率がかなり低いため、インピーダンスとその影響を予め評価しておく必要がある。ここでは、垂直(半)口径 $b = 4$ mm を持つアルミニウム製(電気伝導度: $\sigma_2 = 3.5 \times 10^7$ S/m)の挿入光源 (ID) ダクトを考え、2 層を持つ円形真空パイプのインピーダンスを求める解析式[11]を用いてインピーダンスを計算してその影響を調べた。NEG の電気伝導度は $\sigma_1 = 5 \times 10^5$ S/m とした。

図 4-2-12(a)(b)は、計算された縦方向インピーダンスの実部と虚部(対数表示のために負値になる高周波部分は除く)で、NEG コーティング厚 $d_{\text{NEG}} = 0, 0.3, 0.5, 1 \mu\text{m}$ の 4 つの場合について計算した。図からわかるように、インピーダンスは実部も虚部も NEG の厚

みが厚いほどより低い周波数から盛り上がってピークを持つ。また、実部と比べて虚部の方が盛り上がりはより低周波数から始まる。

PF-HLS リングでは、エネルギーを 2.5 GeV と 5 GeV で切り替え可能で、特に 2.5 GeV ではリングに蓄積されている電子バンチ (SR ビーム) からの放射光だけでなく、超伝導リニアックからのバンチ (SP ビーム) が発生する極短放射光パルスの同時利用を行う。また、SR ビームでは通常のマルチバンチ (MB) モードだけでなく、孤立バンチとマルチバンチを同時利用するハイブリッド (HB) モードでの運転も要求されている。以下に運転モードとそれらのパラメータの 1 例を示す。

- MB モード：500 mA (0.4 mA × 1250 バンチ)
- HB モード：500 mA (12 mA + 0.6 mA × 813 バンチ)
- SP ビーム：0.1 mA (バンチ長 50 fs, バンチ電荷 1 nC)

図 4-2-13 は、図 4-2-12(a) の縦方向インピーダンスの実部から求めた単位長さあたりのビームの発熱パワーを d_{NEG} の関数として計算した結果である。図からわかるように、自然バンチ長 ($\sigma_t = 4.72$ ps) を仮定した場合には MB モードでも 50 W 程度の発熱パワーが ID

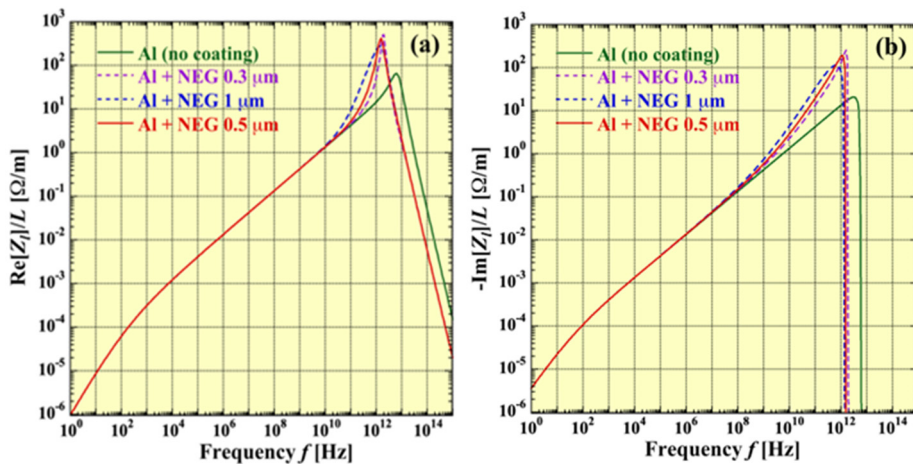


図 4-2-12: NEG コーティング厚 0, 0.3, 0.5 and 1 μm に対して計算された ID ダクトの縦方向インピーダンスの(a)実部と(b)虚部。

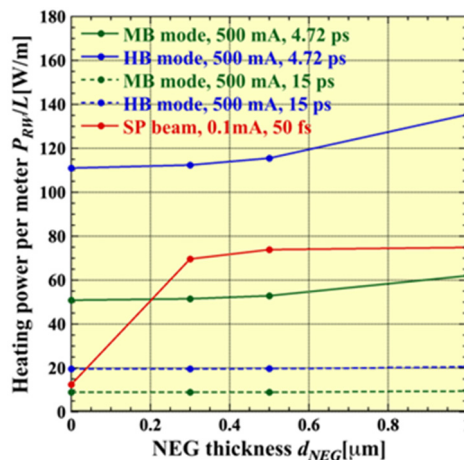


図 4-2-13: ID ダクトの単位長さあたりの発熱パワーの NEG コーティング厚依存性。MB モード、HB モード、SP ビームに対して計算されている。

ダクトに発生する。さらに、HB モードでは孤立バンチの電荷が大きいために発熱パワーが 100 W を超える。ID ダクトは適切に水冷される必要がある。ただし、どちらのモードでも $d_{\text{NEG}} = 0 \sim 0.5 \mu\text{m}$ でほとんど発熱パワーに変化はない。バンチ長が 15 ps 程度にまで広がった場合は、MB モードと HB モードの発熱パワーはそれぞれ 10 W と 20 W と大幅に軽減される。他方、SP ビームについては $0.3 \mu\text{m}$ のコーティング厚でも 70 W まで発熱パワーが上昇し、コーティングなしの 12.5 W から大幅な増加が見られた。これは、バンチ長が非常に短いために、 $0.3 \mu\text{m}$ という薄いコーティングでもインピーダンスの高周波成分の盛り上がりの影響を受けてしまうためである。

図 4-2-14 (a)(b) は、ID ダクトの横方向インピーダンスの実部と虚部で、縦方向インピーダンスと同じく $d_{\text{NEG}} = 0, 0.3, 0.5, 1 \mu\text{m}$ の場合について計算した。横方向インピーダンスも d_{NEG} が大きいほどより低い周波数から高周波成分が盛り上がる。また、実部と比べて虚部はより低周波数から NEG コーティングによる盛り上がりが始まる。

横方向インピーダンスによるビーム不安定性への影響を表すパラメータとして、キックファクターがある。図 4-2-15 は、図 4-2-14(b) の横方向インピーダンスの虚部から求めた単位長さ当たりの垂直方向キックファクターを d_{NEG} の関数として計算している。ただし、

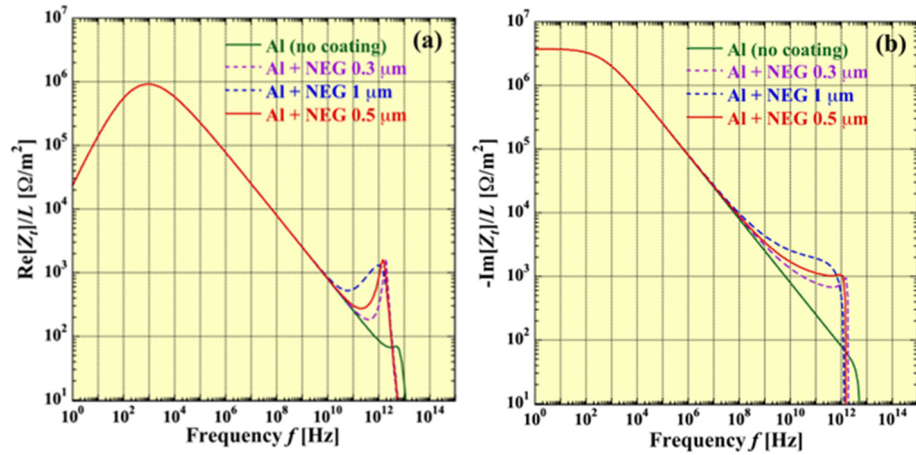


図 4-2-14: NEG コーティング厚 0, 0.3, 0.5 and $1 \mu\text{m}$ に対して計算された ID ダクトの横方向インピーダンスの(a)実部と(b)虚部。

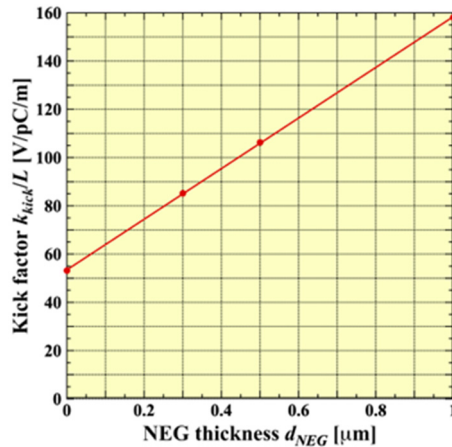


図 4-2-15: ID ダクトによるキックファクターの NEG コーティング厚依存性

バンチ長を自然バンチ長 ($\sigma_t = 4.72$ ps) とした。キックファクターはコーティングなし ($d_{\text{NEG}} = 0$ μm) でも約 53 V/pC/m で、 d_{NEG} とともに直線的に増加して、 $d_{\text{NEG}} = 0.5$ μm では 100 V/pC を超える。コヒーレントベータatronチューンシフトは Transverse Mode Coupling Instability (TMCI) の起こりやすさの指標になる値で、キックファクターに比例し、バンチ電荷 (バンチ電流と周回周波数)、ダクトの長さ、ベータatron関数にも依存する。ここでは、ID ダクトの全長は中長直線部の総計である $L = 225$ m とし、垂直方向のベータatron関数は全ての長直線部の平均である $\beta_y = 5.22$ m とすると、2.5 GeV・バンチ電流 0.4 mA (1 nC) で垂直方向のコヒーレントベータatronチューンシフト $\Delta\nu_y$ は、NEG コーティングなしの場合で ~ 0.0002 、 $d_{\text{NEG}} = 0.5$ μm では ~ 0.0004 、 $d_{\text{NEG}} = 1$ μm で 0.00059 となる。横方向の TMCI の電流閾値 $I_{\text{th,TMCI}}$ は、 $\Delta\nu_y$ が PF-HLS リングのシンクロtronチューン $\nu_s = 0.00202$ に等しいとして評価すると、NEG コーティングなしで $I_{\text{th,TMCI}} = 0.4$ mA、 $d_{\text{NEG}} = 0.5$ μm ではその半分の 0.2 mA、 $d_{\text{NEG}} = 1$ μm では 0.135 mA となる。

ビーム不安定性の解析とリング設計最適化

ビーム不安定性の解析には、(1)真空チャンバーをはじめとする、リング内に設置される様々な真空機器のインピーダンスを定量化し、(2)それらインピーダンスと周回ビームの相互作用を適切に評価する必要がある。また、得られた結果が要求性能 (蓄積電流値やバンチ電荷) を満たすよう、機器設計やラティス設計にフィードバックする。

電子がリング内を周回する時、ダクトとの相互作用によって電磁場 (ウェーク場) をその後方に発生させるが、このウェーク場をフーリエ変換したものをインピーダンスと呼ぶ。このインピーダンスによって起こるビーム不安定性がほとんどのリングで蓄積電流の最大値を決めている。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。どちらもアパーチャが小さいと一般的に大きくなる。このビーム不安定性を抑え、求められる蓄積電流値を実現する必要があるが、PF-HLS リングの場合、(1)モーメントコンパクション因子が通常リングよりも約 1 桁小さく、シンクロtronチューンが小さいこと、(2)エネルギー切り替えのために電磁石の最大磁場を高エネルギー (5.0 GeV) に合わせており低エネルギー (2.5 GeV) での放射減衰率が小さいこと、(3)アパーチャの狭い挿入光源用直線部が長いこと、(4)電荷の大きい孤立バンチを加えた運転が求められていること、などビーム不安定性が発生しやすい条件や環境を有している。従って、通常の光源リングに比べてビーム不安定性の評価とその対策がより重要になる。

インピーダンスモデル

現段階ではインピーダンス源となるダクト等の詳細な設計が決定していないため、ビーム不安定性を評価するために抵抗性インピーダンスのみの仮のインピーダンスモデルを設定する。NEG コーティングの効果は考慮しない。抵抗性インピーダンスでは、挿入光源部分のダクト (ID ダクト) として、アルミ製 (電気抵抗率: 2.86×10^{-8} Ωm) で口径 24 mm の円筒形、マグネット部分のダクトとしては銅製 (電気抵抗率: 1.69×10^{-8} Ωm) の口径

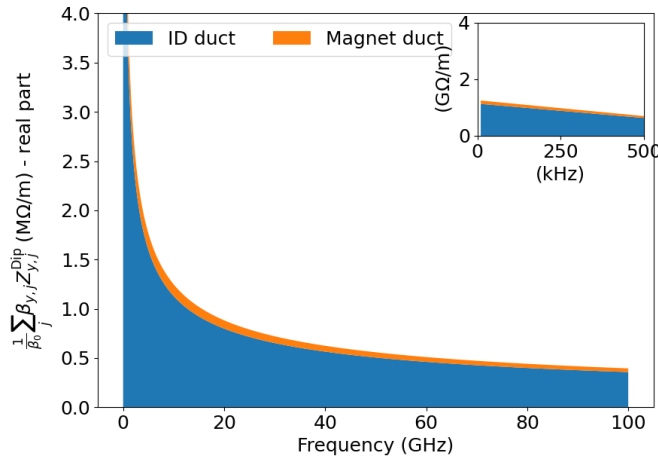


図 4-2-16：リング全体での実効ダイポールインピーダンスの実部

24 mm 円筒形を仮定する。ID ダクトの全長は全ての中長直線部の総計である 225 m とし、平均の垂直方向のベータatron関数は $\beta_y = 6.4$ m である。マグネット部分の全長は 525 m とし、ベータatron関数は $\beta_y = 10.0$ m である。図 4-2-16 に仮定した条件で求められるリング全体での実効ダイポールインピーダンスの実部を示す。抵抗性インピーダンスはアーチャの 3 乗に反比例するため、本モデルにおいては実効インピーダンスの大部分は ID ダクトが占めることになる。実際にはこれら抵抗性インピーダンスに加え 4 極成分、ビーム位置モニタ、ベローズ、空洞など各機器の幾何学的インピーダンスを考慮する必要がある。

マルチバンチビーム不安定性

本リングで蓄積電流 500 mA を実現するには、バンチ当たり 0.4 mA 以上の電流が必要である。図 4-2-16 のモデルを用い、シングルバンチ 0.4 mA 時の TMCI の最大成長率をバンチ長 5 ps（自然バンチ長）と 15 ps の場合についてクロマティシティの関数として図 4-2-17 に示す。成長率（Growth rate）の計算には DELPHI[12]（Vlasov solver）を用いた。不安定性の成長率はクロマティシティを増やすことで下げることができるが、自然バンチ長（5 ps）の場合には+10 まで増やしても放射減衰を上回る。これに対しバンチ長を 15 ps に伸張できれば、+3 より大きくすることで放射減衰率を下回ることが期待できる。最大の成長率を有する不安定性のモードは、バンチ長 15 ps、クロマティシティ+3 の場合、Azimuthal モードが 16、Radial モードが 15 である。

電流 0.4 mA のバンチを PF-HLS の全バンチ（1250）に並べた場合のマルチバンチに対するバンチ結合型ビーム不安定性の最大成長率を図 4-2-18 に示す。シングルバンチ 0.4 mA ではバンチ長を 15 ps、クロマティシティ+3 で成長率が放射減衰率を下回ることに対し、マルチバンチではバンチ長を 25 ps、クロマティシティを+3 まで上げてようやく成長率が放射減衰率を下回る。この条件での最大の成長率を有する不安定性モードは、Azimuthal モードが 19、Radial モードが 20 である。バンチ長 25 ps は 1.5 GHz の高調波空洞を用いてバンチ伸張を行う場合のほぼ限界値であり、これ以上のバンチ伸張は原理的には困難である。

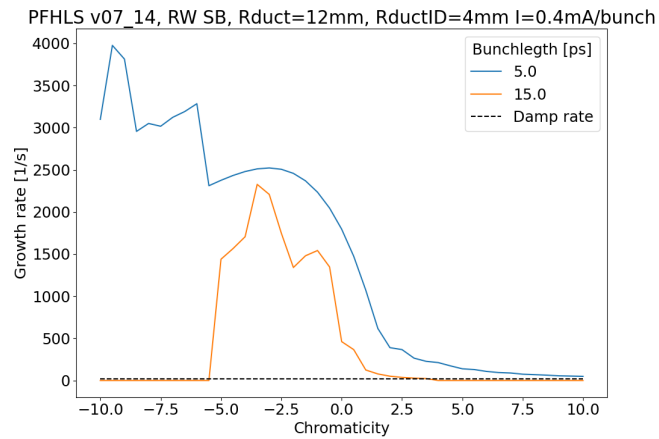


図 4-2-17: シングルバンチ 0.4 mA のクロマティシティに対する不安定性成長率

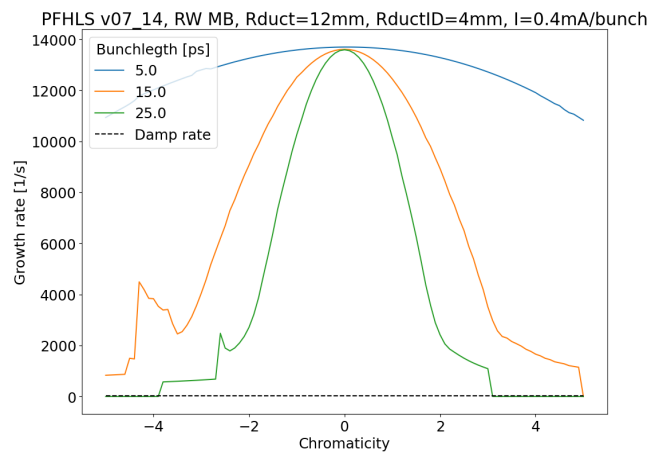


図 4-2-18: マルチバンチ(0.4 mA x 1250 バンチ)のクロマティシティに対する不安定性成長率

シングルバンチのビーム不安定性

シングルバンチについて 4.0、8.0、12 mA（それぞれ 10、20、30 nC に対応）とした場合の TMCI の最大成長率を、バンチ長 15 ps の場合についてクロマティシティの関数として図 4-2-19 に示す。クロマティシティを +4.5 まで上げることができれば、12 mA の実現が期待できる。また、この条件での最大の成長率を有する不安定性モードは、Azimuthal モードが 21、Radial モードが 20 である。図 4-2-20 はバンチ長を 25 ps に伸張した場合の TMCI 成長率であり、クロマティシティを +3 まで上げることで 12 mA の実現が期待できる。ただし、実際には、機器の発熱の影響やマイクロウェーブ不安定性など、より詳細な検討が必要である。

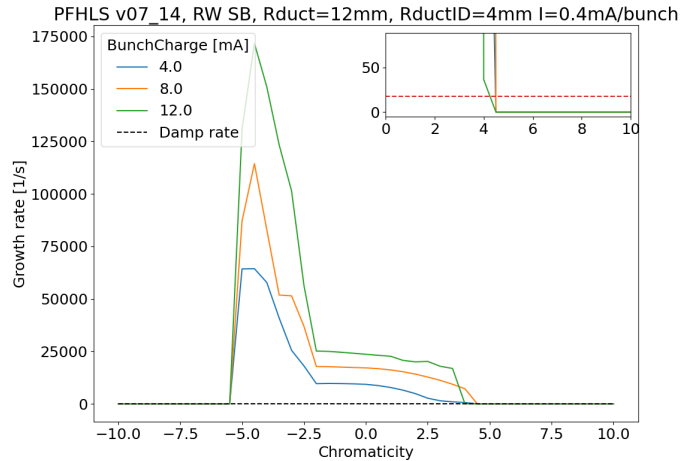


図 4-2-19: シングルバンチ(バンチ長 15 ps)のクロマティシティに対する不安定性成長率

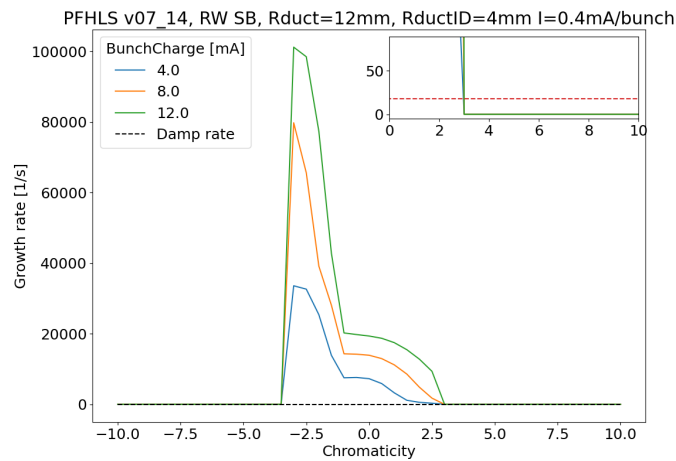


図 4-2-20: シングルバンチ(バンチ長 25 ps)のクロマティシティに対する不安定性成長率

- [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] K.Oide and H.Koiso, *Phys.Rev. E* **49**, 4474 (1994).
- [5] J. Schimizu, *et al.*, *Proc. of 13th Symp. on Accel. Sci. and Tech.*, Osaka, Japan, pp.80-82 (2001).
- [6] M. Borland, APS LS-287, September 2000.
- [7] K. L. F. Bane, *PRSTAB* **5**, 084403 (2002).
- [8] 中村典雄、“ビーム寿命”、OHO’91.
- [9] 山口孝明、“次世代放射光源のための 1.5 GHz TM020 型高調波空洞の開発研究”、総研大博士論文 (2023).
- [10] A.Hofmann and S.Myers, “Beam dynamics in double RF system”, CERN ISR-TH-RF/80-26.
- [11] 中村典雄、第 21 回日本加速器学会年会プロシーディングス、 pp.804-808 (2024).
- [12] DELPHI, https://abpcomputing.web.cern.ch/codes/codes_pages/DELPHI/

4-3. 電子ビーム入射

電子蓄積リングへの電子ビーム入射には、2つの入射方法を採用する。4台のバンパ電磁石によるバンパ軌道を利用するバンパ軌道入射方式と、パルス八極電磁石1台による八極磁場を利用するパルス多極入射方式である。パルス多極入射は、KEK-PFが世界に先駆け先駆的な開発を進めた入射方式である。いずれも off-axis 入射方式によりトップアップ入射に対応する。次世代光源では、トップアップ入射の精密化が求められており、トップアップ入射時に光源である蓄積電子ビーム軌道の水平振動は抑制され、放射光の光軸変動が究極的にはゼロとなるのが理想である。バンパ軌道入射では、蓄積ビーム軌道をバンパ軌道による入射ビーム軌道に近接させるため、バンパ軌道の精密な閉軌道化が求められる。パルス多極入射では、蓄積電子ビーム軌道を多極極磁場中心の完全なゼロ磁場領域に正確に通すことが求められる。いずれの入射方式においても、入射電子ビームには磁場作用を与えるも、光源である蓄積電子ビームには与えないことで、輝度の低下及び光軸の変動がない「透明トップアップ入射」を実現する。

2つの入射方式は、通常の運用では使い分けられる。電子ビームの蓄積モードでは蓄積時間を優先し、捕獲電子量の高いバンパ軌道入射が用いられる。トップアップ入射モードでは比較して捕獲電子量が少なくとも成立するパルス多極入射が用いられる。使い分けることで電力的な高い運用効率を得るとともに、いずれかの入射システムが故障した時には切り替えによって入射の継続を可能とするダウンタイムレスな相補システムとして機能する。これら入射システムを補完するシステムとして、抑制しきれない入射時水平振動または垂直振動をフィードフォワードで低減させる水平・垂直カウンターキッカーシステムも同時に配備する。

蓄積リング入射電磁石

バンパ軌道入射システム及びカウンターキッカーシステムは蓄積リング長直線部の 10 m 入射部セルに配備され、パルス多極入射システムは入射部セル下流の位相が最適化された直線部に配備される。バンパ軌道内には off-axis を通過する電子ビームの非線形磁場の効果をなくするため六極以上の電磁石は配置されない。図 4-3-1 に入射部セルにおけるバンパ電磁石の配置及び入射ビーム輸送路側の電磁石の配置を示す。

入射ビーム輸送路側の入射点には、入射ビーム軌道が蓄積リング軌道と平行になるように 1 m のパルスセプタム電磁石が 1 台、1.5 m の DC セプタム電磁石の 2 台が入射システムとして配置される。蓄積リングの 5 mm の狭小なダイナミックアパーチャーへの入射を



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

実現するために、パルスセプトム電磁石システムには電磁石ギャップ内に真空ダクトを持たない真空封止セプトム電磁石を採用する。蓄積リング真空ダクトと入射ビーム輸送路は空間的に蓄積リング真空薄肉 SUS ダクト壁、磁気シールドと銅製セプトム壁のみが隔壁となる構造を採用する。蓄積リング側のバンパ軌道を生成するバンパ電磁石には、4 台間の磁場の相似性の高いパルス電磁石を採用する。また、パルス多極入射システム、水平・垂直カウンターキッカーシステムとして、高速性のあるパルス電磁石をそれぞれ 1 台及び 2 台設置する。バンパ電磁石の電源は、高い相似性の実現、精密な閉軌道化のための調整自由度の向上、電源規模の最小化を目指し、4 台ともそれぞれ独立とする。なお、バンパ電磁石電源の他、パルスセプトム電磁石電源、パルス多極入射システム、カウンターキッカーシステムなどのパルス電源群には、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 の低ジッター、0.1%以下の高安定度の出力を実現すると同時に、省スペース、省エネ効果を追求し裕度のある設計で入射システムの恒久的な安定した運用を行う。その上で、カウンターキッカーシステムには、1 MHz の高繰り返し出力を適時切り替える半導体パルス電源を接続し、必要に応じてターンバイターンでの軌道制御を行う。

入射部ビームパラメータ

図 4-3-2 に入射点での入射ビーム軌道と蓄積ビーム軌道の配置を示す。バンパ軌道の生成により、入射ビームと蓄積ビームの入射点での相対距離は、それぞれのビーム中心で、蓄積軌道の位置からの距離 7.5 mm から 3.5 mm へと縮小する。蓄積リング側の水平ベータ関数は 21 m である。蓄積電子ビームのダイナミックアパーチャー片側 5 mm の領域に 5σ 相当のビームサイズの入射ビームが包含される。このビーム軌道配置により入射ビームの初期コヒーレント振動は 3.5 mm 以下に抑制される。蓄積ビームダクトの内径は $\phi 25$ mm であり、内半径 12.5 mm のダクトアパーチャーには蓄積ビーム軌道から入射ビーム全体が全て内包される。

入射ビーム軌道と蓄積電子ビームのバンパ軌道は、セプトム壁を含む輸送路との隔壁 1 mm で隔てられているが、バンパ軌道の高さ位置での蓄積ビームは蓄積ビームサイズを $5\sigma = 0.66$ mm とした場合、蓄積電子ビームと隔壁との間には 0.34 mm のクリアランスが

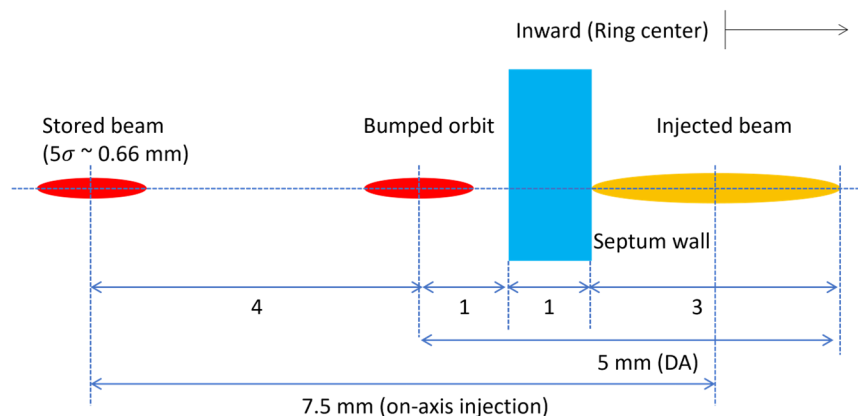


図 4-3-2: 入射点におけるビーム軌道配置

ある。入射ビームサイズは、蓄積電子ビームのダイナミックアパーチャーに包含させるビームサイズであるように、入射点での水平エミッタンスは $\varepsilon = 4.3 \text{ nmrad}$ とする。ビームサイズにして $5\sigma = 1.5 \text{ mm}$ ダイナミックアパーチャーの入射ビーム輸送路側の水平ベータ関数は 10 m 、水平ディスパージョン関数はゼロである。ビームコミッショニング時の on-axis 入射の際にはバンパ高さは 7.5 mm まで上げられ、入射ビームは蓄積軌道へ直接入射ができる。

超伝導ライナックからのショートパルス電子ビームと蓄積電子ビームの同時利用のために、現行案ではショートパルス電子ビームの入射システムと蓄積ビーム入射システムは別々にし、いずれも直線部 10 m の入射点が用意される。ショートパルス電子ビームの入射システムの構成は、蓄積ビーム入射用のセプタム電磁石システム、バンパ電磁石システムと同様の構成である。蓄積電子ビーム軌道に擾乱を与えない「透明入射」が同様に求められ、 $600 \mu\text{s}$ の 10 Hz 間隔のバンチトレインで輸送されるショートパルスビームの入射のために、ロングパルスで動作するパターン電流駆動のセプタム電磁石とバンパ電磁石が必要となる。ショートパルスビームを大振幅振動軌道の off-axis で入射する際にはバンパ軌道高さをゼロとし、on-axis 入射の際にはバンパ軌道を 7.5 mm まで立ち上げる。バンパ軌道高さを調整することでショートパルス電子ビームの振動軌道を任意に決定する。また、これらの機能を統合したパターン電流で動作する 1 台の多極電磁石の利用や、リングの対称性の確保やビームラインスペースの更なる確保のために、これら別々の入射点を一つに統合する技術的な検討を進めている。ショートパルス入射ビーム、蓄積用トップアップ入射ビーム、蓄積ビームが軌道上に混在する条件下で蓄積電子ビーム軌道の擾乱を抑制するバンチバイバンチカウンターキッカーの利用を検討している。

ビーム入射器

入射ビームを生成するビーム入射器は、線長 35 m の常伝導線形加速器（常伝導ライナック：NC-Linac: NCL）と蓄積リングと同じ加速器トンネル内の床上に設置される周長 720 m のブースターリング（Booster ring: BR）より構成される。また、NCL と BR の接続となるビーム輸送路（NCBT）、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。全て同一レベルで建設される。図 4-1-1 に構成要素のレイアウトが示されている。また、ショートパルスビームを生み出す超伝導線形加速器（超伝導ライナック: SC-Linac: SCL）は、蓄積リング加速器トンネルの外縁の地下に建設される。蓄積リングへはリング下を通る輸送路（SCBT）で接続する。

それぞれの入射器は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、4 点の鍵となる設計要素が考慮される。(A) 蓄積リングの狭小ダイナミックアパーチャーにビームを入射するための低エミッタンス入射ビームの生成と輸送（低エミッタンス電子ビーム生成）。(B) 蓄積リングにおける大電荷孤立バンチを有するバンチフィリングモードに対応し、許容される時間内に電子ビームの蓄積を完了させ、蓄積電流値を一定に保つ入射（多用な放射光パターンの安定供給）。(C) 蓄積リングのエネルギーモードに対応し、入射ビームエネルギーを 2.5 GeV 、 5.0 GeV のいずれにも対応させる入射（エネ

ルギー可変電子ビームの入射)。(D) NCL による入射とハイブリッドリングモードでの SCL を使った蓄積リングへのショートパルス電子ビームの入射の共立 (ショートパルス電子ビーム入射)。

NCL は電子銃で生成された電子ビームを線型加速により 250 MeV まで加速する。入射ビームのピーク電荷量は 1 nC である。電子ビームの最大繰り返し加速周波数は 50 Hz である。NCL 最終端での規格化ビームエミッタンスは 5 μmrad で、BR のビームダイナミックアパーチャーに包含される。250 MeV まで加速された電子ビームは輸送路 NCBT を通り、BR の短直線部の入射部 (入射セル長 4 m) に 1 台のキッカーで on-axis 入射により入射する。NCBT は水平偏向電磁石と四極電磁石のみで構成される輸送路である。

BR のフィリングモードは入射ビームエネルギーが低エネルギーの 250 MeV であるため高いビーム安定性を得るシングルバンチフィリングである。250 MeV で入射された入射ビームを、蓄積リングの運転エネルギーモードに応じたエネルギー、つまり 2.5 GeV と 5.0 GeV のいずれかのエネルギーまで加速する。BR の加速器機器構成要素である電磁石電源、高周波加速空洞 (加速周波数 500.1 MHz) は、それぞれのエネルギーに対応した安定した出力性能を補償する。トップエネルギーまで加速された電子ビームは、BR の短直線部の出射部 (出射セル長 4 m) に配置する 2 台のキッカーで輸送路 BSBT へ向けて出射される。BR の外周の 5 m 外に位置する蓄積リングまでの輸送路長はおよそ 30 m である。BSBT は水平偏向電磁石と四極電磁石で構成される。BR の入出射部はノーマルセルを介し隣接する短直線部に配置し、建屋構造を単純化する (図 4-3-3 に示す)。

BR からのトップエネルギー電子ビームの最大繰り返し出射数は 1 Hz である。蓄積リングでの電子ビームフィリングパターンのマルチフィリング、大電荷孤立バンチとバンチトレイン構造を組み合わせたハイブリッドフィリングのいずれでも、トータル電流値 500 mA を 0.1% の電流変動幅で維持する。BR のオプティクスは、低エミッタンスビームを生成するために最適化した複合機能型偏向電磁石を採用した 60 セルの FODO 低エミッタンスラティスである。エネルギーランプアップされた電子ビームを 4.3 nmrad の水平エミッタンスで蓄積リングへ入射する。さらに、低エミッタンス補償のために BSBT においてはビーム形状の整形のために水平スリットを整備する。また、蓄積リング入射点においてセプタム壁に入射ビーム中心を最近接させるために、水平と垂直エミッタンスを入射点で逆転させるエミッタンスエクスチェンジが適時可能な輸送路のオプティクスを導入する。

SCL は蓄積リングの外周側の外縁に建設される。SCL の終端はショートパルスビーム用

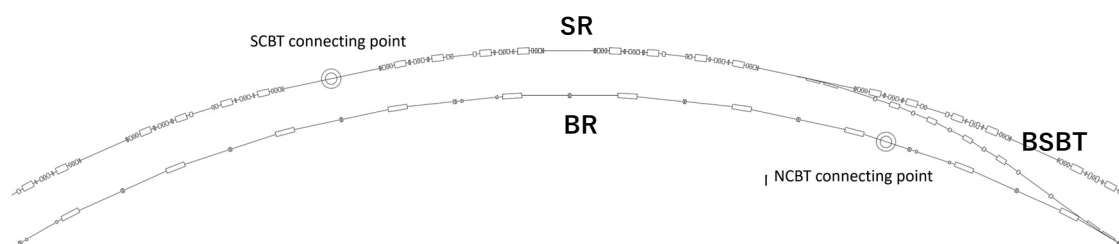


図 4-3-3: ブースターリングと蓄積リング及び BSBT の接合の一例
(NCBT、SCBT は除かれている)

入射点へ蓄積リング内周側より合流させる案と、蓄積電子ビーム入射点と統一し BSBT 輸送路に合流させる案を検討している。ショートパルス電子ビームの輸送と、蓄積リング内のショートパルス電子ビームの $2/3$ 周回用アイソクロナス電磁石光学と整合をとるために、SCBT もアイソクロナス電磁石光学を採用する。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 $2/3$ 周回後に地下に設置されたダンプ点で廃棄される。

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

ビームライン側で 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・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

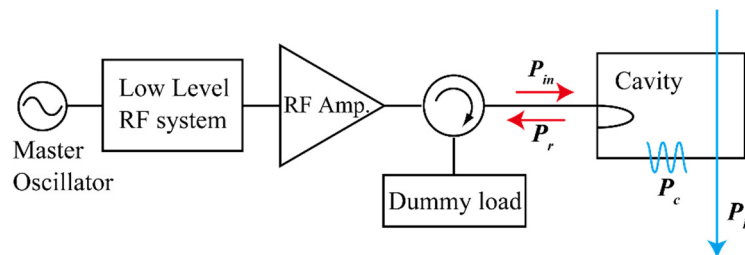


図 4-4-1: 高周波システムの基本構成

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 等を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 $0.02\text{--}0.05^\circ$ 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。

主加速空洞

(2)で述べたように、主加速空洞としては寄生モードインピーダンスの小さいものを選択することが望ましい。現在の候補は、SuperKEKB 加速器の陽電子ダンピングリングで運用されている主加速空洞 (以降、SKEKB DR 空洞) [1,2] と KEKB で開発された超伝導加速空洞 (以降、KEKB SC 空洞[3]) である。

SKEKB DR 空洞は、KEKB 加速器で運用されている ARES 常伝導加速空洞[4]をベースとして設計された空洞であり、その高周波構造には KEKB での運用期間も含め長い安定運転の実績がある。SKEKB DR 空洞の主要なパラメータを表 4-4-1 に示す。SKEKB DR 空

洞は主加速モード（TM010 モード）より高次の寄生モード（HOM; Higher Order Mode）減衰を目的として、ARES 空洞と同じく SiC を高周波吸収体として備えた HOM 導波管と溝付ビームパイプが採用されている。これら減衰機構により、HOM のビームとの結合インピーダンスは効果的に減衰される（表 4-4-1）。HOM 導波管及び溝付きビームパイプに装填される高周波吸収体（SiC タイル）は、パイプ当たり 4 kW を越える吸収能力を持つ [5]。

KEKB SC 空洞についても KEBB 加速器及び SKEKB 加速器にて運用されており、長い安定運転の実績がある。ただし、超伝導技術を導入する必要があるため、液体ヘリウムを用いた 4 K の冷凍設備の導入と保守、蓄積リング真空チャンバーの清浄度の厳密な管理、定期的な超伝導表面の維持管理（空洞エージングの実施や洗浄）など運用については別途検討課題が存在する。

PF-HLS 蓄積リングの 5.0 GeV 運転時の主加速電圧は 6.5 MV を想定しており（表 4-1-1）、主空洞として必要な SKEKB DR 空洞の台数は 9、KEKB SC 空洞の台数は 4 となる。2.5 GeV 運転で 500 mA を蓄積した場合に見積もられる最大のバンチ結合型不安定性成長率（各 HOM の干渉を考慮しない場合）は、SKEKB DR: 縦方向 45.5 s^{-1} , H 方向 940.5 s^{-1} , V 方向 56.8 s^{-1} 、KEKB SC: 縦方向 2.9 s^{-1} , H 方向 42.8 s^{-1} , V 方向 10.8 s^{-1} となる。一方、放射減衰率は、縦方向 14.8 s^{-1} , H 方向 38.6 s^{-1} , V 方向 17.8 s^{-1} である（表 4-1-1）。

これら候補として考えられる空洞を PF-HLS 蓄積リングに導入するには、加速モードの共振周波数を 508 MHz から 500.0 MHz に変更する必要がある。変更においては空洞本体の径を調整し、その他の HOM 減衰構造については微調整のみで基本的には現設計を踏襲する。従って、加速性能や寄生モード減衰性能への影響はほぼ無いと考えている。

主高周波システムのパラメータを表 4-4-2 に示す。ただし、大電力 RF の RF 源からの伝送損失、超伝導空洞を用いた場合の冷凍機電力は含まれていない。冷凍機電力については、空洞の静的・動的損失と冷凍機効率によって決まるが、4 K での静的・動的損失として少し余裕を見て 100 W と見積もると、トータルの電力としては空洞 1 台当たり 100 kW 程度と見積もられる [6]。

表 4-4-1：主空洞候補の各パラメータ [1,3]

空洞	SKEKB DR	KEKB SC
共振周波数 [MHz]	508.887	508.6
R/Q[Ω]	150	93
無負荷 Q 値	30000	1×10^9
定格電圧 [MV]	0.7	1.6
5 m 直線部への設置可能台数 [台]	3	2
主要な縦方向の結合インピーダンス [Ω]	~ 930 at 0.76 GHz ~ 590 at 2.8 GHz ~ 380 at 8.0 GHz	~ 350 at 1.02 GHz ~ 304 at 1.03 GHz ~ 104 at 1.08 GHz
横方向の最大結合インピーダンス [kΩ/m]	H: ~ 125 at 1 GHz V: ~ 30 at 0.75 GHz	~ 12.3 at 0.688 GHz ~ 10.7 at 0.705 GHz

表 4-4-2：主高周波システムパラメータ一覧

空洞	SKEKB DR		KEKB SC	
ビームエネルギー [GeV]	2.5	5.0	2.5	5.0
蓄積電流 [mA]	500	200	500	200
一周当たりの放射損失 [MeV/turn]	0.612*	5.077	0.612*	5.077
偏向電磁石	0.222	3.557	0.222	3.557
挿入光源	0.320	1.520	0.320	1.520
RF 電圧 [MV]	1.6	6.5	1.6	6.5
空洞数	3	9	1	4
RF 電力[kW]	499	2,065	333**	1039**
ビーム負荷電力[kW]	306	1,015	306	1,015
壁消費電力[kW]	190	1,043	0.03	0.114
空洞反射電力[kW]	3.7	6.1	0.5	23.4

*高調波空洞のロス 0.07 MeV/turn を含む。

**冷凍機分の電力が別途必要、100 kW/空洞

高調波空洞

4-2 節にあるように、2.5 GeV 運転にて 500 mA の安定なビーム蓄積及び 30 nC の孤立バンチ運転を達成するためには、少なくとも 3 倍以上にバンチを伸張することが必要である。このため、高調波空洞を用いたバンチ伸張システムを導入する。本節ではバンチ伸張システムの設計指針について述べる。

高調波次数は、低いとより高いバンチ伸張率が期待できるが、ビーム安定領域への負の影響と主加速空洞に対する電力負荷が大きくなる。逆に高いと製作精度の面から空洞開発が難しく、バンチフィリングなどのビーム負荷変動[7]にも敏感となる。このため、本加速器では基準 RF 周波数 500 MHz の 3 次となる 1.5 GHz が適切だと考えられる。この場合、空洞の種類（高周波パラメータ）に関わらず最大のバンチ伸張率は約 6 倍となり、主加速電圧 1.6 MV に対し必要な高調波加速電圧は 498 kV（主 RF 電圧との比で 0.311）となる。また、バンチ伸張率 3 倍を得るのに必要な加速電圧は 452 kV（主 RF 電圧との比で 0.282）となる。

高調波空洞の選択において本蓄積リングでポイントと成り得るのは、リング周回周波数である。高調波空洞の共振周波数はリング RF 周波数の高調波次数倍（3 次高調波で 1.5 GHz）付近に調整されることになるが、バンチ伸張を行う場合は RF ポテンシャルを平坦にする目的で少し高め（プラス方向に）に離調される。これは、ビーム運動の観点からはバンチ結合型ビーム不安定性の 0 および+1 振動モードの安定性を損なう方向に働く。特に空洞のバンド幅が周回周波数に近いと、これらの振動モードの安定性への影響が大きくなる。バンド幅は負荷 Q 値に反比例するため、これは負荷 Q 値が一定の値より小さい空洞は不利であることを意味する。さらに、「(3) 多様な運転モードに対応可能なバンチ伸長システム」という観点からは、空洞全体としての R/Q を小さくすることが重要である。

[7,8]。これは、バンチフィルパターンに応じた遷移的なビーム負荷変動は R/Q に伴い増加し、且つこの影響は周波数の高い空洞程大きくなるからである。

以上、2つの理由から、高調波空洞としては Q 値の高い空洞を最小限の台数で用いることが望ましい。本蓄積リングの周回周波数は 400 kHz であり、一般的な常伝導空洞を採用した場合には 3 dB バンド幅が 50 kHz (負荷 Q 値で約 3 万) となりオーダー的に無視できず、バンチ結合型ビーム不安定性の+1 振動モードが高調波空洞の運用可能周波数を大きく制限すること、これにより必要とされるバンチ伸張率の達成は困難なことが示唆されている[9]。一方、超伝導空洞を採用した場合には 3 dB バンド幅は 1.5 kHz (1×10^6) と十分に小さくバンチ結合型ビーム不安定性を引き起こさないであろうこと、 R/Q としても常伝導空洞と比べ 8 割程度に低くできることが期待できる。このことから、本蓄積リングにおける高調波空洞は超伝導空洞を採用することが望ましいと考えられる。

- [1] SuperKEKB Design Report, 12. Damping Ring, Oct. 2020: https://www-linac.kek.jp/linac-com/report/skb-tdr/12_DR_Reviced2020_10_20.pdf.
- [2] T. Abe *et al.*, Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, TUPS131 (2011).
- [3] T. Furuya *et al.*, Proceedings of the 1995 workshop on RF Superconductivity (SRF95), Gif-sur-Yvette, France, SRF95F35 (1995).
- [4] T. Kageyama *et al.*, Proceedings of the 1st Asian Particle Accelerator Conference (APAC 98), Tsukuba, Japan, 1998 (KEK Preprint No. 98-4).
- [5] T. Abe, the 16th KEKB Accelerator Review Committee, February 07-09, 2011: <http://www-kekb.kek.jp/MAC/2011>.
- [6] M. Nishiwaki, K. Nakanishi and T. Okada, Private communication.
- [7] N. Yamamoto, *Phys. Rev. Accel. Beams* **21**, 012001 (2018).
- [8] J. M. Byrd *et al.*, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **5**, 092001 (2002).
- [9] N. Yamamoto *et al.*, PASJ2024, WEP084, Yamagata (2024)

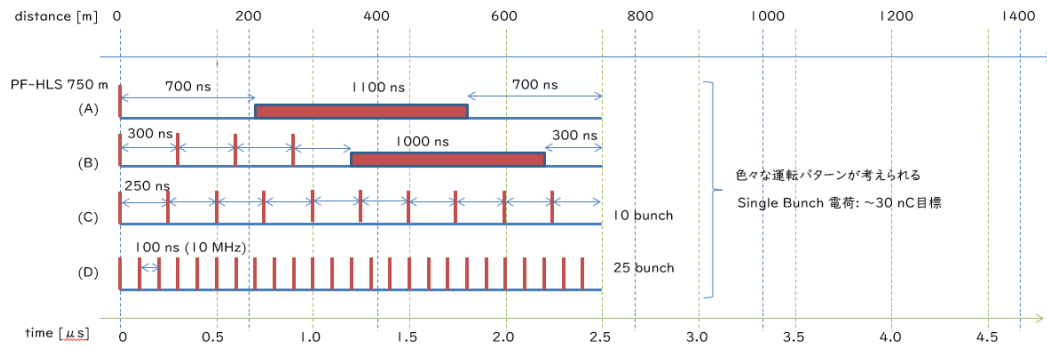
4-5. SP ビームタイミング

ここでは PF-HLS における蓄積リングからの光 (SR ビーム) と、超伝導ライナックからくる短パルスビーム (SP ビーム) とのタイミングに関するコンセプトを記述する。ビームラインユーザー側からみた場合、例えばポンプ/プローブ実験だけを想定しても多種多様な要請がある。実験ステーションにおいて SP ビームのタイミングが自由に調整できることが望ましいが、蓄積リングの円周方向に沿って複数存在するビームラインのタイミングを個別に調整することは困難である。そこで、SP ビームのマクロバンチのタイミングを各ビームラインからの要請に応じて変更する方式を想定している。

図 4-5-1(a)に蓄積リング (SR ビーム) で想定されるタイミングを示す。実験からの要請により、いくつかの運転パターンが考えられるが、簡単のため、もっとも単純な図中の D に示すように 100 ns (Ring 500 MHz に対して 50 bucket 間隔) おきに均等にバンチ蓄積することを考える。SP ビームのマクロバンチ繰り返しも 100 ns (Linac 1.3 GHz に対して 130 bucket 間隔)としたときの時間構造を図 4-5-1(b)に示す。例えば、上流から SP ビームライン用の BL1、BL2、BL3、…があるとしたとき、BL1 用にタイミングを合わせた場合には、BL2、BL3 では適切なタイミングにはならない。また、BL1 と BL2 との間でタイミングを調整することも困難である。そこで、マクロバンチごとにビームラインからの要請に応じてタイミングを切り替える (図中の Δt_1 , Δt_2 , Δt_3 , …)。マクロバンチは 10 Hz (100 ms) ごとであるため、この時間間隔でタイミングを調整することは可能である。他のビームラインに最適化されたビームは測定器側でマスクするのが簡単である。

SP ビームと SR ビームの同期精度を確保し、信頼におけるタイミング精度で各ビームラインに配分することは SP・SR 2 ビーム利用実験に必要不可欠であり、周辺の温度・湿度変化など各種外乱に強いシステムを構築する。

(a)



(b)

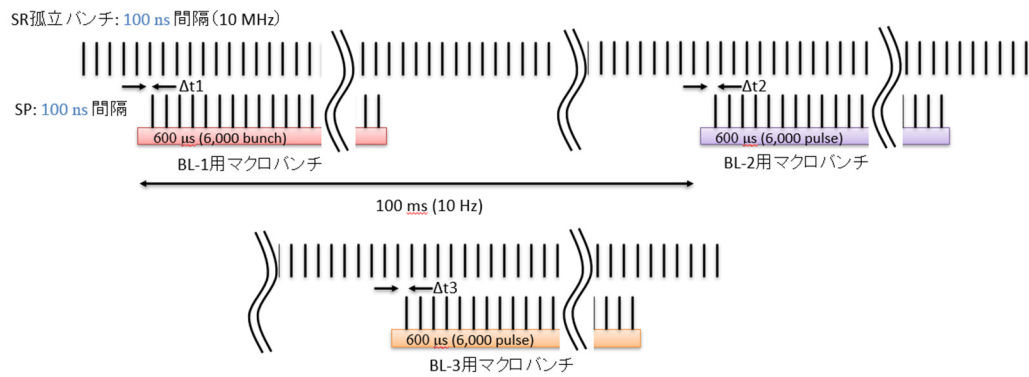


図 4-5-1: (a) 蓄積リング (SR) において大バンチ電荷を蓄積する場合のビームタイミング例。実際の運用にあたってはユーザー要請に応じて様々な運転パターンが考えられる。(b) SP ビームのタイミング例。各ビームラインに対応したビームをマクロバンチごとに切り替える。

4-6. 真空システム、基幹チャンネル

真空システム

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、運転中に 10^{-7} Pa 以下の超高真空を実現させることが設計の基本方針である。その上で、PF-HLS 真空システムには、(1) 2.5/5.0 GeV エネルギー可変式、(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、(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。

可変エネルギー対応で考慮すべきことは、2.5 GeV では、ガス散乱やインピーダンスの影響が顕著になることであり、より低い圧力や抵抗性インピーダンスを目指す必要がある。また、5.0 GeV では放射光のパワーと光子エネルギーが高くなり、熱負荷吸収や遮蔽に対する要求が高くなる。ビームダクトの設計においては、5.0 GeV での高い放射光負荷へ対応するため、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で、ダクト材質は熱伝導率が優れている無酸素銅が有力候補となる。

5.0 GeV での放射光負荷を調べるために、円形ダクト（内直径 24 mm）とアンテチェンバ付きの円形ダクト（内直径 24 mm）での放射光のパワー分布を Synrad+ [1]を用いて計算した。アンテチェンバは PF-HLS がベースにしたラティスを持つ NanoTerasu のダクトを参考にした [2]。ノーマルセルのベンディングダクトとその下流の 4 極ダクトでの放射光パワー分布を図 4-6-1 に示す。円形ダクトではベンディング磁石から生成される放射光はベンディングダクトに集中して照射され、放射光のパワー密度の最高値が 55 W/cm^2 になる。一方、アンテチェンバ付きのダクトでは、ベンディング磁石からの放射光が下流にある 4 極ダクトに照射される。照射場所が光源から離れることで放射光のパワー密度が 24 W/cm^2 に下がりつつ、放射光の分布も均一になる。

排気システムには 200 L/s のスパッタイオンポンプ（SIP）と非蒸発型ゲッター（NEG）コーティングの連携を検討している。NEG コーティングとは、ゲッター材をダクトの内壁に成膜することで、従来のガス源であるダクト内壁をポンプに変える技術である。ゲッター材には 180°C 程度の比較的低温で再活性化できる TiZrV 合金[3]が一つの候補である。

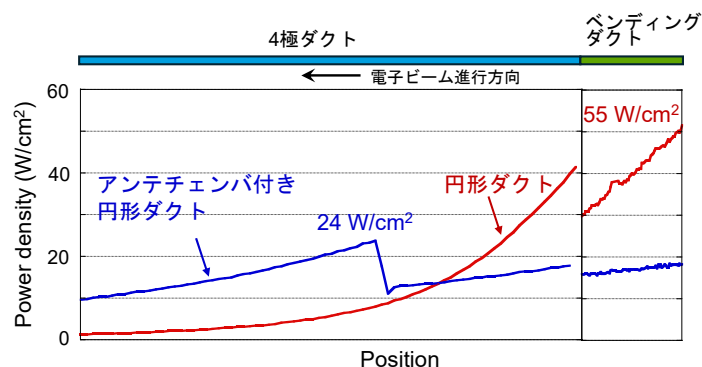


図 4-6-1: 円形ダクトとアンテチェンバ付き円形ダクトでの放射光の分布。

（注：Synrad+において、ベンディングダクトの角度変化連続的に設定できないため、4 極ダクトとのつなぎ目にパワー密度の段差ができる。）

NEG コーティングは排気コンダクタンスが制限される場所の真空改善に有効であり、また PSD を下げることができる。そのため、これまでも MAX IV、SIRIUS、SLS2.0 といった光源加速器の全周にわたる真空ダクトに導入されており、また計画中の PETRA IV の真空ダクトにも導入される予定である [4, 5]。

PF-HLS のベンディングダクトと 4 極ダクトでの圧力分布を Molflow+[1]で計算した (図 4-6-2)。SIP は各ダクトの端に設置し、ダクトはアンテチェンパ付き円形ダクト (内直径 24 mm) とした。電子ビームのエネルギーは 5.0 GeV で、電流値は 200 mA である。メインのアウトガス源は、真空ダクトや放射光アブソーバーへの放射光照射による PSD である。PF の真空グループは長年にわたって NEG コーティングの研究を行っており、計算に必要な PSD 係数 (molecules/photon)、NEG 膜の吸着確率には本グループの測定結果を用いた [6, 7]。SIP のみの排気システムでは、圧力がコミッショニング初期 (積分電流値 1 Ah) で $\sim 10^{-3}$ Pa、後期 (積分電流値 10000 Ah) でも $\sim 10^{-6}$ Pa と高く、目標の圧力 ($< 10^{-7}$ Pa) に到達できない。それに対して、NEG コーティングを導入すると、NEG 膜の吸着確率が 0.01 の時、コミッショニング初期で 10^{-6} Pa、後期には 10^{-8} Pa に到達する。NEG 膜の飽和、劣化を考慮し、NEG 膜の吸着確率を 0.001 と低く設定しても、コミッショニング後期には 10^{-7} Pa に到達する。NEG 膜の分散的な排気と低い PSD が到達圧力を下げることにより有効であることが分かる。

TiZrV 膜の抵抗率は $200 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ 以上と大きく (Cu の抵抗率 $1.6 \mu\Omega\cdot\text{cm}$)、ダクト内面に成膜すると、抵抗性インピーダンスによって電子ビームが不安定になる恐れがある (4-2 節参照)。特に PF-HLS では超低エミッタンスで短パルスのバンチを回すので、ビームエミッタンスの増加が予想される。PF の真空グループでは密な Pd 膜と Ag 膜を開発し、PSD 係数が TiZrV 膜より低いことを発見した [8, 9]。また、これらの膜の抵抗率は TiZrV に比べ 1 桁以上も低い。そのため、抵抗性インピーダンスの影響が大きいと予測される挿入光源の細いダクト (高さ 8 mm) には、Pd か Ag 膜が有力な候補である。

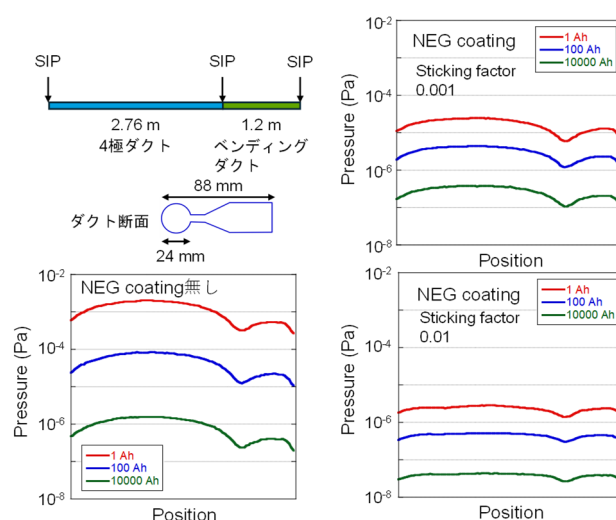


図 4-6-2: NEG コーティング無しと、NEG コーティングを導入した 4 極ダクトとベンディングダクトでの圧力分布

基幹チャンネル

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にも必要となる。

- [1] SYNRAD+ and MOLFLOW+ are Monte Carlo codes developed at CERN by R. Kersevan and M. Ady. website: cern.ch/molflow.
- [2] ナノテラス CDR.
- [3] C. Benvenuti *et al.*, *Vacuum* **53**, 219-225 (1999).
- [4] PETRA IV CDR.
- [5] SOLEIL CDR.
- [6] X.G. Jin, T. Uchiyama, Y. Tanimoto, T. Honda, *J. Vac. Sci. Technol.* **B39**, 064202 (2021).
- [7] X.G. Jin, Y. Tanimoto, T. Uchiyama, M. Okano, *Vacuum* **192**, 110445 (2021).
- [8] X.G. Jin, Y. Tanimoto, T. Uchiyama, T. Honda, *Vacuum* **207**, 111671 (2023).
- [9] X.G. Jin, Y. Tanimoto, T. Uchiyama, T. Honda, *Vacuum* **215**, 112370 (2023).

4-7. 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

蓄積リングにおけるビーム軌道測定には、4 つのボタン型電極を備えたビーム位置モニター (BPM) を使用する。1 セルあたり 10 台程度の BPM を設置し、SR ビーム軌道の基準軌道からのずれや SP ビーム軌道のシングルショット計測に利用する。後述する Bunch-by-Bunch フィードバックシステムやフィリングパターン制御システムへの利用に備え、多目的用途の BPM も数台確保する。BPM の信号処理には、PF リングのアップグレード用に開発した μ TCA.4 ベースの回路を BPM と同数設置して使用する。この回路は、ビームの信号成分を抽出してその信号レベルを調節するためのアナログフロントエンド回路と、高速の Analog to Digital Convertor (ADC) と Field Programmable Gate Array (FPGA) を備えた高速デジタイザ兼信号処理回路から構成されており、1.6 MSPS の Turn-by-Turn データ、10 KSPS の Fast Acquisition データ、10 SPS の Slow Acquisition データという 3 つの異なる帯域幅で処理されたビーム位置データを同時に出力することができる。

蓄積リングの短直線部に配置された 3 極ウィグラーを光源とするビームラインのうち、最低 1 本をビーム診断専用のビームラインと位置付け、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。SR 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、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する。ただし、一般的な可視光ストリークカメラの時間分解能は FWHM で 1 ps 程度であることから、50–100 fs オーダーのバンチ長を持つ SP ビームに対しては、別途設ける入射ビーム診断ラインにおいて偏向空洞や電気光学結晶を用いた測定方法を検討している。セベラルバンチモードやハイブリッドモードにおける孤立バンチのバンチ純度は、X 線成分と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。これらの他、ビームプロファイルの常時監視やビームサイズ測定に有用な可視光プロファイルモニターや、バンチごとのプロファイル測定を可能にする高速ゲートカメラ等の設置を予定している。

その他のユーザー向けビームラインの基幹部には、4 枚のタングステンブレードを備えた白色光位置モニター (XBPM) を設置し、光軸の精密調整や時間変動測定その他、2 ビーム同時利用実験におけるビーム位置制御に利用する。将来的には、後述する SR ビームの高速軌道フィードバックへの利用も検討する。SR ビームの蓄積電流測定には、直流ビーム電流トランス (DCCT) を使用する。DCCT で得られる蓄積電流の情報は、ビームの入射効率や寿命の計算にも利用される。DCCT はセラミックブレイクを備えた専用のビームダ

クトを必要とするが、ダクト径が小さくバンチ長も短い PF-HLS では比較的大きなインピーダンス源となり得るため、その構造は電磁界シミュレータを用いて慎重に設計する必要がある。ビームの損失量や損失分布の測定は、半導体検出器を用いたエリアモニターや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ーを各所に分散配置することで行う。リングのベータatronチューンは、スペクトラムアナライザとストリップライン型キッカーを用いた従来の方法に加え、上述した BPM 回路で得られる Turn-by-Turn データのフーリエ解析や、後述する Bunch-by-Bunch フィードバックの結果として得られるビームスペクトルを利用して測定する。

SP ビーム診断

PF-HLS の蓄積リングには、SR ビームと SP ビームが共存する区間がある。両者のバンチカレントには 10 倍以上の差があるため、同じ RF バケットに入ったこれらを分離して診断するのは非常に難しい。ほぼ中心軌道を周回する SR ビームに対して、SP ビームはその周りを大振幅で振動しながら通過するため、SR ビームからの光をマスクすれば上記の高速ゲートカメラを使って SP ビームだけのプロファイルを観測することも可能と思われるが、観測点は診断用ビームラインの 1・2 ヶ所に限られてしまう。したがって、これらのビームを分けて診断するには、両者が時間的あるいは空間的に分かれた部分を利用するのが基本となる。入射器と蓄積リングを繋ぐビーム輸送ライン (BT) やリングからビームダンプまでのダンプラインは、SP ビームしか通過しないセクションであるため、ここにスクリーンモニターや高感度 BPM、積分電流トランス等を設置すれば、SP ビームのパラメータを高精度で測定できる。蓄積リング内で測定する場合は、SR ビームのバンチギャップに入っている、あるいは意図的に入れた SP ビームからの信号にゲートをかけて取り出す方法が考えられる。SP ビームのコミッショニング時のみに使用を限定し、リングの数ヶ所に RF シールド付きのスクリーンモニターを設置するのも有用であろう。ダンプラインから BT 間のノーマルセルは SR ビームしか通過しないため、このセクションで得られる SR ビームからの信号と BT で得られる SP ビームからの信号の位相差を検出すれば、2 ビーム間のタイミング差を測定できる。また、両者は繰り返し周波数やバンチ長に大きな差があるため、周波数領域で見ると比較的容易に分離できる。この特性を利用した診断手法も検討中である。

ビーム制御

横方向のビームサイズがミクロンオーダーに達する PF-HLS では、少なくともその 1/10 にあたるサブミクロンオーダーの軌道安定度が求められる。SR ビームの軌道変動の要因としては、主に日照による建屋の歪みや近隣の交通による地盤の固有振動、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、電磁石電源の出力リップル、挿入光源のギャップやモードの変更、入射バンプの不完全性で生じる入射振動、ビーム不安定性等が挙げられるが、これらの要因に依らず 100 Hz 以下の軌道変動については上記の BPM 回路を利用した高速軌道フィードバック (FOFB) システムにより抑制する。この

FOFB システムは、高速のデータリンクで互いに接続された BPM 回路とフィードバック演算装置、および高速補正電磁石群で構成される。各 BPM 回路から出力される 10 kHz レートのビーム位置データを 1 台のフィードバック演算装置に収集し、基準軌道への補正に必要な各補正電磁石の設定値を同レートで算出する。FOFB 用の補正電磁石は BPM と同数程度用意し、高速デジタル制御が可能な低リップルのバイポーラ電源により駆動する。100 Hz に及ぶフィードバック帯域を実現するためには、渦電流による磁場遮蔽効果を軽減するため補正電磁石を薄いステンレス製のベローズ等の場所に設置するといった配慮も必要である。

ビーム不安定性に起因する 10 kHz 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 (BxB FB) システムにより抑制する。特に放射減衰が効きにくい 2.5 GeV 運転時には、低い蓄積電流値からビーム不安定性の発生が予測されているため、定格電流値での安定な運転を実現するには必要不可欠なシステムである。また、トップアップ入射の度にビーム不安定性と同じ周波数で発生する入射振動をいち早く減衰させる効果も期待できる。この BxB FB システムは、バンチ振動を検出するアナログフロントエンド回路とフィードバック演算やタイミング調整を行うデジタル信号処理回路、その結果を増幅してバンチごとにビームを蹴るための広帯域高周波アンプ・高速キッカーから構成される。バンチ振動の検出には FOFB に使用しない BPM のうちの 1 台を使用し、デジタル信号処理回路には PF をはじめ多くの蓄積リングで実績のある市販の専用処理回路を利用する。高速キッカーは、横方向にはストリップライン型、進行方向には空洞型のキッカーを開発して使用する。キッカーの長さやアンプの出力電力には制限があるため、必要な振動減衰率によっては複数のキッカーをタンデムに設置して対応する。

バンチ制御

SR ビームの時間構造は蓄積リングのフィリングパターンに依存して決まるが、バンチカレントの差を無くしてフィリングパターンを平滑化し、逆にバンチカレントに差があるパターンを生成・維持するためには、現在のバンチカレントの情報を基に次の入射バケットを選択するフィリングパターン制御システムが必要である。システムの概要としては、まず BPM4 電極の和信号を高速のオシロスコープ等へ入力し、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のアドレスを選出する。そのアドレスを次の入射バケットとして入射器のタイミング制御システム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の生成・維持が可能となる。

セベラルバンチモードやハイブリッドモードにおける孤立バンチのバンチ純度は、Touschek 効果で RF バケットを飛び出した電子が後続の数バケットにわたって確率的に捕獲されることで時間の経過とともに悪化する。また、入射器の電子銃が DC 的な暗電流を出している場合も所定外のバケットに電子が入射され、バンチ純度の悪化に繋がる。入射直後の高いバンチ純度を維持するためには、これらの電子が RF バケットに捕獲される前に除去するバンチ純化システムが必要である。バンチ純化には、選択式 RF ノックアウト

ト (RF-KO) 法を用いる。すなわち、孤立バンチの周回に同期して AM 変調をかけた RF-KO 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不純バンチの生成を防ぐ。このバンチ純化システムは、SR ビームを安全に廃棄する目的にも利用可能である。

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 μ TCA.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。

マスターオシレータからの RF 基準信号や入射ビームトリガーといったタイミング信号の分配には、KEK の LINAC 他で十分な使用実績のある Event Generator/Receiver を採用する。このシステムは 255 パターンの任意イベントを 1 本の光ファイバーで送信できるなど非常に多機能であるが、その一方で高精度のタイミング信号を低ジッターで伝送するには適していない。そこで、1 ps 以下の時間ジッターを求められる部分には、別途高精度・低ジッターの分周器を開発して使用する。PF-HLS の 2 ビーム同時利用実験では、SR ビームと SP ビーム間のタイミング差をマクロバンチごとに切り替えて運転する予定になっているが、その際 SP ビームに求められる時間ジッターは数 fs である。これらの信号伝送には温度安定化光ファイバーを使用し、その経路は可能な限り断熱・温度安定化を施す。

4-8. 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ることで、10 eV から 100 keV までの広波長域の高輝度光を生成する (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。単一エネルギーの蓄積リングでは、サイエンスの展開に必要な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、電子エネルギーの切り替えによるスペクトル間の連続性と、電子エネルギーの切り替えに伴う波長範囲シフトにおける利用波長範囲の保持を同時に実現するとともに、電子ビーム品質への影響の抑制と 5.0 GeV 運転時の放射パワーの抑制を図りつつ、実験に必要な光を生成可能な挿入光源パラメータを選択した。

アンジュレータ

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 リングで運用中の真空封止型アンジュレータと同じ 4 mm を想定している。PF リングで運用中の周期長 12 mm から 17.6 mm の 4 台の真空封止型アンジュレータを、PF-HLS において最小 gap 4 mm として用いる場合、5.0 GeV 運転時には光子エネルギー 20 keV 付近の光が利用できない。1 次光と 3 次光のスペクトルを繋いで連続的に波長を利用できるよう、周期長 20 mm を標準とする。15 次光までの利用を想定する場合、電子ビームのエネルギー広がりやアンジュレータ磁場の位相エラーによる高次光の輝度低下について検討する必要がある。二つのうちアンジュレータのみの性能を反映する位相エラーを 2.5 度とした場合の輝度スペクトルを図 4-8-1 (および図 1-3) に示す。この輝度スペクトルは全長 1 m の場合であり、磁石列長を伸ばすことでさらに高い輝度が得られる。また、位相エラーを変化させた際の輝度スペクトルの変化を図 4-8-2 に示す。位相エラーの増大とともに高次光の輝度低下も大きくなるが、2.5 度では十分抑制されているため、位相エラーの目標値は 2.5 度とする。

VUV-SX 光源としては、可変偏光アンジュレータを基軸とし、短波長域利用には APPLE-II 型を、長波長域利用には 6 列型を採用する。PF では、APPLE-II 型・周期長 56 mm のアンジュレータ U#16-1 および U#16-2 を最小 gap 21 mm で運用している。PF-HLS では最小 gap 12 mm で運用できるため、周期長を 48 mm にしてもスペクトルの連続性は保たれ、利用可能な波長範囲を短波長側に広げることができる (図 4-8-3(a,b))。同様に、PF の U#02-2 および U#28 と同じ周期長 160 mm の 6 列型を PF-HLS で運用すれば、10 eV ~ 5 keV の範囲の楕円偏光 ($K_x/K_y=1/2$) (図 4-8-4(a) および図 1-3) と約 10 eV ~ 1 keV の円偏光 (図 4-8-4(b)) が生成できる。APPLE-II 型と 6 列型の輝度スペクトルは、10 m の直線部にタンデムに挿入することを想定し、全長をいずれも 4 m として計算した。

ウィグラー

PF-HLS では、運転コスト低減と真空熱負荷軽減のため、磁場強度の低い偏向電磁石を採用し、円軌道放射は利用しない。白色光源としては、短直線部に設置する比較的短い多極ウィグラー (MPW) や3極ウィグラー (3PW) を用いる。

現在 PF リングで供与されている垂直偏光白色光は、光学素子を水平に展開できる利点があり、PF-HLS でも供与が望まれる (2-3 章参照)。PF-HLS では、水平偏光、垂直偏光それぞれの Out-Vacuum 型 MPW と真空封止型 MPW を用いる計画である。水平偏光 MPW では Hybrid 型の磁気回路を採用し、垂直偏光 MPW では APPLLE-II 型の水平磁場モードを採用する。真空封止型 MPW はともに Gap は 4mm 固定である。より高エネルギー領域の光源として、周期長 80 mm の超伝導垂直偏光 MPW (V-SC-MPW) も検討している。水平偏光型の同種の装置は他施設に存在するが、垂直偏光型の装置は存在しない。垂直偏光型では、磁石列を水平方向に対向させて配置させる必要があるが、電子ビーム入射を考慮するとギャップは 40 mm 程度が望まれる。その場合、3 T のピーク磁場を生成するのは容易では無く、これを実現するための R&D を実施している。

以下に、検討中の挿入光源のパラメータとスペクトルの典型例を示す。今後、ビームラインで必要とされる性能に合わせて、全長や周期長をはじめとする詳細な設計を行う。

表 4-8-1: アンジュレータのパラメータ

放射光領域	挿入光源タイプ	周期長	K 値	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)	48 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 4-8-2: ウィグラーのパラメータ

挿入光源	タイプ	周期長	偏光	磁気回路	最小 gap	全長	最大磁場	軌道振幅 @2.5 GeV
MPW	Out-Vacuum 型	120 mm	H	Hybrid 型	12 mm	~0.6 m	1.8 T	~80 μ m
		120 mm	V	APPLLE-II 型	12 mm	~0.6 m	1.2 T	~50 μ m
	真空封止型	60 mm	H	Hybrid 型	4 mm	~0.6 m	2 T	~20 μ m
		60~120 mm	V	APPLLE-II 型	4 mm	~0.6 m	<2 T	<50 μ m
	超伝導	80 mm	V		40 mm	~0.6 m	~3 T	~60 μ m
3PW	Out-Vacuum 型	150 mm	H	Pure 型	<20 mm	<0.3 m	~1 T	~100 μ m

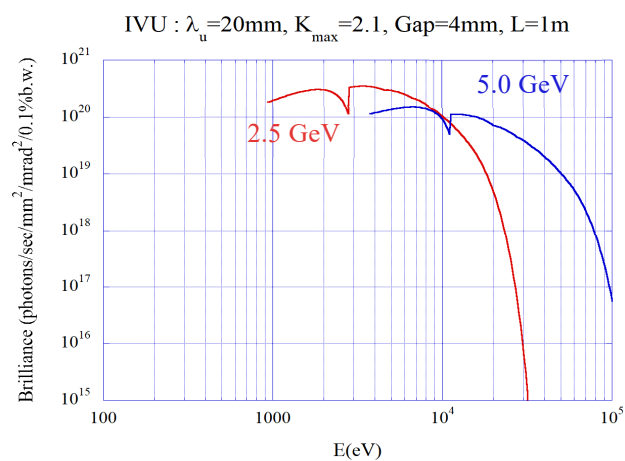


図 4-8-1: X 線光源のスペクトル例 (赤 2.5 GeV, 青 5.0 GeV 以下同様)

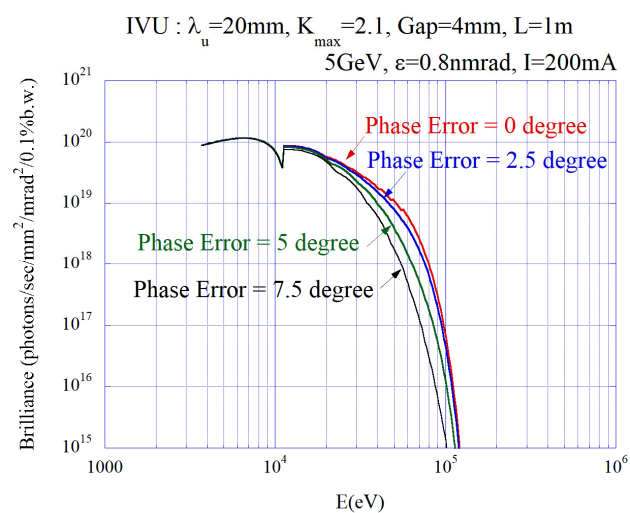


図 4-8-2: X 線光源のアンジュレータ磁場の位相エラーによるスペクトル変化 (5.0 GeV)

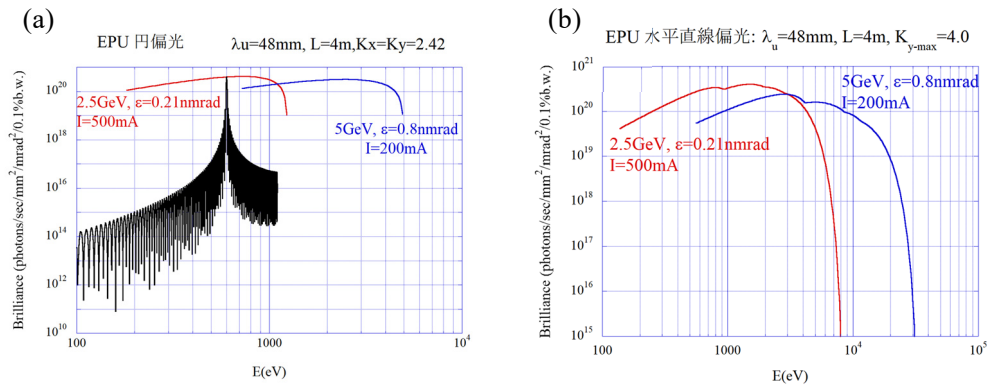


図 4-8-3 : VUV/SX 光源 1 APPLE-II 型可変偏光アンジュレータのスペクトル例
(a) 円偏光モード (b) 直線偏光モード

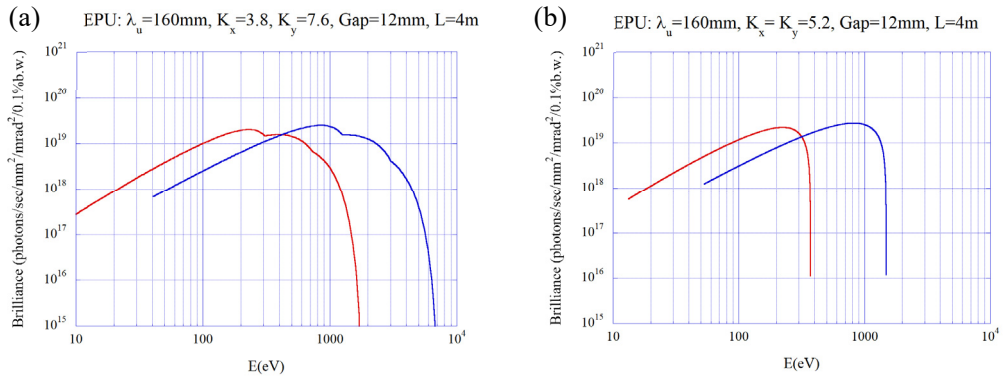


図 4-8-4: VUV/SX 光源 2 6 列型可変偏光アンジュレータのスペクトル例
(a) 楕円偏光モード ($B_x/B_y = 1/2$) (b) 円偏光モード ($B_x/B_y = 1$)

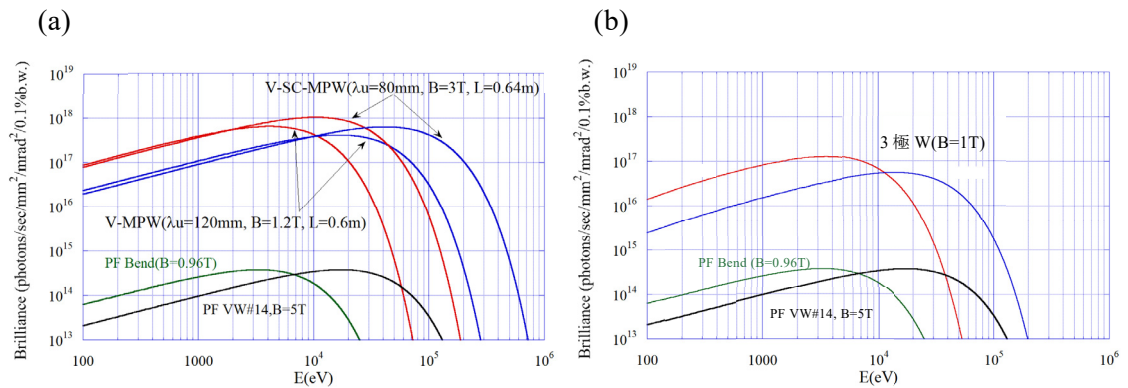


図 4-8-5: (a) MPW と (b) 3PW のスペクトル例 (PF-Bend、VW#14 との比較)

4-9. 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 4-9-1 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ているが、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。

次に建物サイズの見積りをする。ILC においてターゲットとしている加速電圧は 31.5 MV/m であり、KEK の STF 施設においても 33 MV/m の実績を達成している[2]。ここでは安全をみて 30 MV/m で試算すると、この加速電圧で 1 つのクライオモジュール内に 8 台の空洞を格納する場合には 1 モジュールあたり約 252 MeV の加速エネルギーが期待できる。また、1 モジュール当たりの長さは HOM ダンパまで含めると 20 m をみておくのが安全と考えている（ILC に向けた技術革新により、これらの見積りより短くなることを期待している）。一方で、超伝導線形加速器を FEL 光源として活用する場合には、オフクレスト加速を行うことでバンチ時間方向にエネルギー差をつけ、シケインをつかってバンチ長を圧縮することが必要になること、安定して放射光ユーザー実験を行うには予備の加速モジュールまで想定して運転することが望ましいこと、電子銃やキャプチャー空洞などの入射部も必要となることなど、これら全てをあわせて建物全体では 300 m 程度になると考えている。

表 4-9-1: ロングパルス超伝導ライナックのパラメータ

	Value
電子ビームのパラメータ	
エネルギー [GeV]	2.5
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	80
クライオモジュール数	10
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

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

[2] 山本康史他, 加速器 **18**(3), 143-150 (2021).

Photon Factory (2025 年 7 月発行)
E-mail: photon.factory@kek.jp
<https://www2.kek.jp/imss/pf/pf-hls/>