

文部科学省

平成 27 年度科学技術試験研究委託事業

「次世代放射光施設に係る技術課題調査」

報告書

平成 28 年 3 月

東北大学

本報告書は、文部科学省の平成 27 年度科学技術試験研究委託費による委託業務として、国立大学法人東北大学が実施した「次世代放射光施設に係る技術課題調査」の成果をとりまとめたものです。

したがって、本報告書の著作権は文部科学省に帰属しており、本報告書の全部又は一部の無断複製等の行為は、法律で認められたときを除き著作権の侵害にあたるので、これらの利用行為を行うときは文部科学省の承認手続きが必要です。

目次

第一部

A. ヒアリング調査報告書

1-1. はじめに.....	1
1-2. 調査の実施体制と進め方.....	3
1-2-1. 調査の実施体制.....	3
1-2-2. 調査の進め方.....	3
【表 1-1】 【表 1-2】	7
1-3. 「A. ヒアリング調査」調査結果.....	9
1-3-1. 共通技術課題調査.....	9
(1) 既存の放射光施設の運営・設置に関して専門的な知見を有する者.....	9
(2) 放射光施設に係る設計・建設等に関わる潜在的メーカー層.....	15
(3) 大学・産業界等の研究者等の潜在的ユーザー層.....	22
(4) 国際動向を把握している海外施設の責任者、若しくは海外施設の 諮問委員会経験者.....	24
1-3-2. 固有技術課題調査.....	29
(1) 既存の放射光施設の運営・設置に関して専門的な知見を有する者.....	29
(2) 放射光施設に係る設計・建設等に関わる潜在的メーカー層.....	35
(3) 大学・産業界等の研究者等の潜在的ユーザー層.....	36
(4) 国際動向を把握している海外施設の責任者、若しくは海外施設の 諮問委員会経験者.....	37
【表 1-3】 【表 1-4】	39
1-4. 整備・運用コスト低減に資する方策.....	44
1-4-1. 整備に関するもの.....	44
1-4-2. 運用に関するもの.....	49
【表 1-5】	53
1-5. まとめと分析.....	55
1-5-1. 技術課題に関するヒアリング調査結果のまとめと分析.....	55
1-5-2. 整備・運用コスト低減に資する方策に関するまとめと分析.....	62

第二部

B. 技術的観点の総合調査報告書

2-1. 総合調査はじめに.....	65
2-2. 放射光施設整備の現状と課題.....	66
2-2-1 放射光施設整備の経緯.....	66
2-2-2 我が国の施設整備の現状と課題.....	67
2-2-3 海外の施設整備の動向.....	69
2-2-4 「A. 技術課題ヒアリング調査」の分析と考慮すべき要素技術課題.....	69
2-3. 加速器コスト低減の経緯と信頼性.....	79
2-3-1 加速器施設建設における基本的考え方.....	79
2-3-2 SPring-8 以降の建設コストの効率化の経緯.....	79
【表 2-1】 【表 2-2】	
2-3-3 SPring-8 の建設コスト単価と運営経費.....	83
【表 2-3】	
2-3-4 X線自由電子レーザーSACLA の設計指針.....	86
2-3-5 SACLA 建設・運転経費.....	87
【表 2-4】	
2-3-6 加速器コスト低減の経緯から考慮すべきこと.....	88
2-4. 整備シナリオの設定.....	89
2-4-1 シナリオ設定の観点.....	89
2-4-2 観点に基づくシナリオの設定.....	89
【表 2-5】 【表 2-6】 【表 2-7】 【表 2-8】 【表 2-9】 【表 2-10】 【表 2-11】	
【表 2-12】 【表 2-13】 【表 2-14】 【表 2-15】	
2-5. 各施設の整備シナリオの検討.....	105
2-5-1 各施設の整備シナリオの考え方.....	105
2-5-2 「硬X線向き施設」アップグレードのシナリオ.....	105
【表 2-16】 【表 2-17】 【表 2-18】 【表 2-19】	
2-5-3 「軟X線向き施設」新規整備のシナリオ.....	110
【表 2-20】 【表 2-21】 【表 2-22】 【表 2-23】 【表 2-24】 【表 2-25】	
【表 2-26】 【表 2-27】 【表 2-28】	
2-6. 施設整備のシナリオとそのメリット・デメリット.....	122

2-6-1 施設整備シナリオの策定.....	122
【表 2-29】	
2-6-2 施設整備シナリオの検討.....	124
【表 2-30】	
2-6-3 国内放射光施設を融合した分散型プラットフォームの検討.....	127
2-7. まとめ.....	129

第三部
参考資料・補足資料

3-1 受託事業の実施体制と調査参加者リスト.....	133
【表 3-1】 【表 3-2】 【表 3-3】 【表 3-4】 【表 3-5】 【表 3-6】 【表 3-7】	
【表 3-8】 【表 3-9】 【表 3-10】	
3-2 ヒアリング調査資料.....	143
3-2-1 ヒアリング事前調査回答票項目.....	143
3-2-2 事前調査のまとめ.....	151
【表 3-11】 【表 3-12】 【表 3-13】 【表 3-14】	
3-2-3 ヒアリング概要ペーパーと事前調査資料.....	156
共通技術課題担当者	
① 既存の放射光施設の運営・設置に関して専門的な知見を有する者.....	156
② 放射光施設に係る設計・建設等に関わる潜在的メーカー層.....	172
③ 大学・産業界等の研究者等の潜在的ユーザー層.....	190
④ 国際動向を把握している海外施設の責任者、若しくは海外施設の諮問委員会経験者.....	201
固有技術担当者	
① 既存の放射光施設の運営・設置に関して専門的な知見を有する者.....	217
② 放射光施設に係る設計・建設等に関わる潜在的メーカー層.....	232
③ 大学・産業界等の研究者等の潜在的ユーザー層.....	246
④ 国際動向を把握している海外施設の責任者、若しくは海外施設の諮問委員会経験者.....	258
3-2-4 ヒアリング調査の要点とヒアリング会議トピックス.....	266
3-3 参考資料リスト.....	270

第一部

A. ヒアリング調査報告書

文部科学省
平成 27 年度科学技術試験研究委託事業
次世代放射光施設に係る技術課題調査
報告書

1-1. はじめに

わが国を取り巻く経済環境が中長期的に厳しさを増し、科学技術イノベーション面でも国際競争力が低下し、わが国産業の存在感が揺らいでいるとの懸念が高まっている。その状況を打破するために2013年から「科学技術イノベーション総合戦略」※1が毎年策定されている。その総合戦略は、世界が今や「‘知’の大競争時代」に入っていることを強く認識し、「世界で最もイノベーションに適した国」を創り上げるための取組を推進することを目的としている。

このように科学技術創造立国を目指すわが国において、放射光施設は、学術研究のみならず産業技術開発を支え国際競争力を高める重要な研究・技術開発の基盤施設となっている。このことは、わが国における産業応用の成果が基となり、国際的な共通認識となっている。それを裏付けているのが、世界中で相次いで進められている、放射光施設の新規建設やアップグレード計画の提案である。2015年の時点で、世界の22の国と地域が保有する放射光施設の数51にのぼる。そのうち、わが国は9施設（SACLAを除く）を有し、施設の数では日本の3.8倍のGDPを持つ米国と肩を並べている。しかし、1997年のSPring-8の供用開始以来、その光源性能を上回るリング型光源の整備、アップグレードは行われていない。2014年までは、SPring-8が電子ビームのエミッタンス（2.4 nrad）と精度の高いトップアップ運転によるビームの安定性において、世界一位の座を保ってきた。そして、SPring-8の安定な光源性能と、国際的なインパクトを与えた超平滑ミラー光学素子の開発成功が、様々な応用分野における放射光ナノ・アプリケーションの扉を開いた。海外では、これらの技術開発と、短周期アンジュレータの導入と電子ビームの低エネルギー化によるエミッタンスの低減効果を融合し、低エミッタンス電子ビームを有する中型高輝度放射光施設の建設ラッシュが起きた。2015年、2016年には相次いで、米国のNSLS-II（1.5 nrad）、台湾のTPS（1.6 nrad）の利用が始まっている。両施設とも、産業活用を重要な活用戦略のひとつとして掲げており、その後続くMAX-IV（スウェーデン）、SIRIUS（ブラジル）の整備は、加速器技術として挑戦的な側面が大きいと言われてはいるが、さらに、わが国の科学技術イノベーション競争力への脅威となると考えられる。

文部科学省「次世代放射光施設検討ワーキンググループ（以下「施設検討ワーキング」※2という）」報告書（平成27年4月）にも述べられているように、科学技術イノベーション立国を目指すわが国において、次世代の放射光施設の利用環境を整備し、その積極的な利活用を促進することは、わが国が引き続き世界の学術・産業界をリードし、国際的な競争優位性を維持していく上で、まさに喫緊の課題となっている。

平成 26 年度に行われた文部科学省委託調査「次世代放射光施設に関するニーズ調査」（以下「ニーズ調査」※3という。）においても、わが国の整備の遅れが指摘され、次世代放射光施設整備への強い要望が学術界と産業界の両方にあることが報告されている。

「ニーズ調査」では、次世代放射光施設に求められる性能に関し、様々な研究開発分野に共通あるいは固有のニーズについての調査が行われたが、光源の波長領域の観点からは、硬X線における観察測定に向けた性能を有する放射光施設（以下「硬X線向き放射光施設」※4という。）、及び軟X線における観察・測定に向けた性能を有する放射光施設（以下「軟X線向き放射光施設」※5という。）の両方において、高い潜在的ニーズ並びに期待が寄せられていることが報告さ

れている。しかしながら、わが国の放射光施設の整備状況は、それに応えるものとはなっていない。

本調査報告は、この「ニーズ調査」の結果を踏まえ、将来の次世代放射光施設構想の具体化にあたって検討の必要な技術的観点に関する調査を行った結果をまとめたものであり、第一部「ヒアリング調査」と第二部「技術的観点の総合調査」、及び調査資料をまとめた第三部「補足資料・参考資料」の三部構成となっている。第一部の「ヒアリング調査」では、これまでの「ニーズ調査」や「施設検討ワーキング」の結果を踏まえ、将来の次世代放射光施設構想の具体化にあたって検討の必要な技術的観点について調査結果をまとめることを目的としている。具体的には、硬X線向き放射光施設及び軟X線向き放射光施設に共通の開発要素及び各々に固有の開発要素を明らかにした上で、次世代放射光施設構想の具体化に向けて特に考慮すべき近年の技術動向やその実装に係る技術的フィージビリティ、建設・運用コストへの寄与、国際動向の観点について包括的な調査を行う。第二部の「技術的観点の総合調査」では、第一部で得られた次世代放射光施設についての具体的な技術課題を総合的に分析し、施設整備に向けた複数の具体的なシナリオを、タイムラインを示しながら検討する。その際に、「ニーズ調査」で強く示された、放射光施設の「科学技術・産業イノベーション創出に必須の社会インフラ」としての位置づけを考え、「コスト低減」の観点は言うまでもないが、「施設検討ワーキング」で提案された「分散型プラットフォームとしての考え方」、さらに「災害等に対するリスクヘッジ」の観点も考慮する。それらを総合的に判断した調査報告として、放射光施設整備の最適なシナリオに係る観点を整理しようとするものである。第三部には、第一部、第二部で使用した参考資料と補足資料をまとめた。

※1 内閣府 科学技術イノベーション総合戦略

<http://www8.cao.go.jp/cstp/sogosenryaku/>

※2 文部科学省 次世代放射光施設検討ワーキンググループ

http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/gijyutu/022/index.htm

※3 文部科学省 次世代放射光施設に関するニーズ調査

http://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/ryoushi/detail/1357031.htm

※4 ビームエネルギー6 GeV 程度の硬X線向き高輝度放射光施設

※5 ビームエネルギー3 GeV 程度の軟X線向き高輝度放射光施設

1-2. 調査の実施体制と進め方

1-2-1. 調査の実施体制

本技術課題調査を東北大学で受託するにあたり、東北大学の光・量子ビーム科学連携推進室に設置された「次世代放射光施設に係る技術課題等調査専門委員会」（以下「専門委員会」という。）が担当した。【表3-1】に示すように専門委員会は計21名の委員で構成され、多元物質科学研究所（以下「多元研」という。）所長の村松淳司教授が委員長を務めている。東北大学の受託事業体制は、契約権者は多元研所長の村松淳司教授、業務責任者は専門委員会委員長の村松淳司教授、「A. ヒアリング調査」を行う業務主任として高桑雄二教授（多元研）、「B. 技術課題総合調査」を行う業務主任として上田潔教授（多元研）が担当した。

「A. ヒアリング調査」は、硬X線向き放射光施設と軟X線向き放射光施設の両方に共通の技術課題に関する調査（「A-1. 共通技術課題に関する調査」）と、それぞれに固有の技術課題調査（「A-2. 固有技術課題に関する調査」）に分けて行われた。【表3-2】に示すように高桑雄二業務主任のもとで「A-1. 共通技術課題に関する調査」を行う実施者として、河村純一教授（多元研）が主査となり、複数の放射光施設向き及び研究室向きのイメージング装置の開発を施設の光源の専門家や企業と展開している百生敦教授（多元研）と、数々の放射光施設、中性子施設での計測装置開発を行ってきた木村宏之教授（多元研）の3名があたった。「A-2. 固有技術課題に関する調査」も、河村純一教授（多元研）が主査としてあたり、電子顕微鏡とそれと組み合わせた軟X線分光の装置開発の専門家である寺内正己教授（多元研）、電子線回折装置の開発を行っている虻川匡司准教授（多元研）をはじめ、複数の放射光施設の経験を有する材料分野の杉山和正教授（金属材料研究所）、北上修教授（多元研）の5名が担当した。

一方、上田潔業務主任のもとで「B. 技術課題総合調査」を遂行する実施者として、【表3-3】に示してある通り、総合的な見地での調査を遂行するため鈴木茂教授（多元研 副所長）が主査となり、本間格教授（多元研）、雨澤浩史教授（多元研）、栗原和枝教授（多元研）、福山博之教授（多元研）、蟹江澄志准教授（多元研）の6名が担当した。「B. 技術課題総合調査」に関しては報告書第二部に記載する。

1-2-2. 調査の進め方

本技術課題調査は、はじめに次世代放射光施設に係る技術課題のヒアリング調査「A. ヒアリング調査」が行われ、その結果を受けて総合調査「B. 技術課題総合調査」が行われた。調査全体の流れを【図 1-1】にフロー図として示す。調査は、硬X線向き放射光施設と軟X線向き放射光施設に共通した技術課題と、それぞれ固有の技術課題に関して行われた。

1-2-2-1. ヒアリング調査の進め方

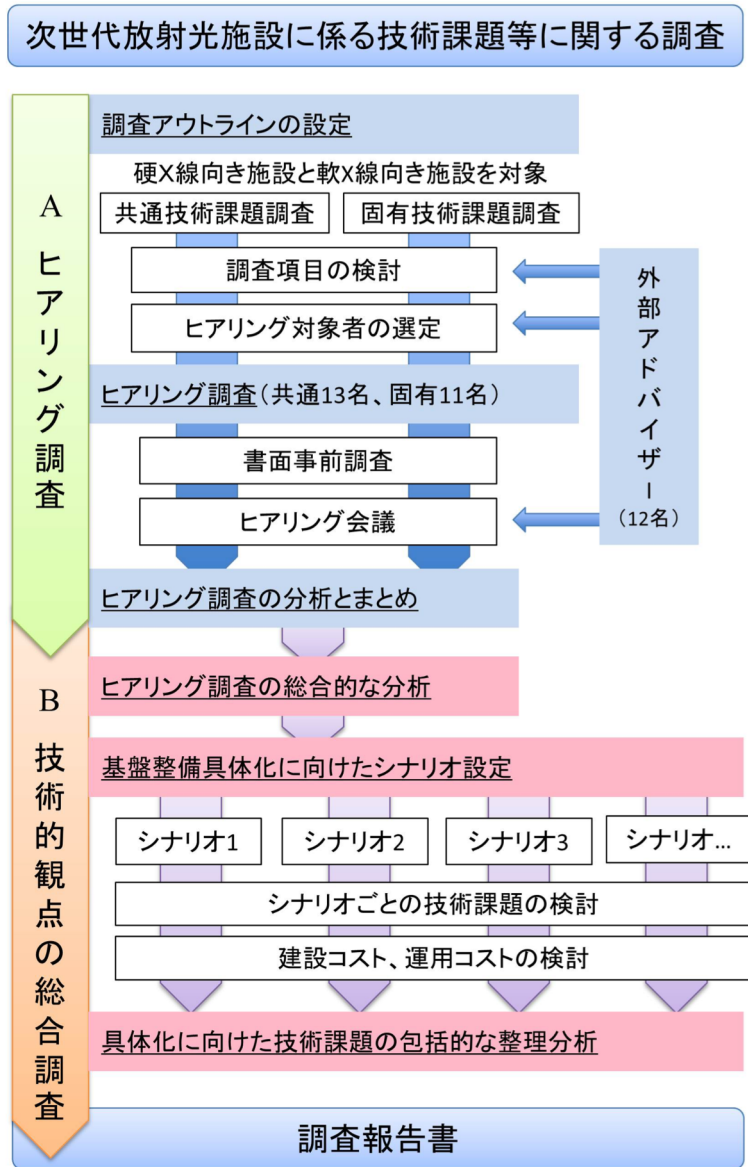
ヒアリング調査は、「外部アドバイザーの選定」、「ヒアリングに付する技術課題項目の設定」、「ヒアリング対象者の選定」、「技術課題ヒアリング書面調査（事前調査）の実施」、「ヒアリング会議の開催」、「意見書・ヒアリング概要ペーパーの回収」の順に進めた。

・外部アドバイザーの選定

「A. ヒアリング調査」を実施するに当たり、実施者の専門性を補い、調査内容の妥当性、独創性を高め、普遍性、公平性を確保するため、「A-1. 共通技術課題に関する調査」及び「A-2. 固有技術課題に関する調査」のそれぞれに外部の専門家を、実施者の外部アドバイザーとして選定した。【表 3-4】に示すように「A-1. 共通技術課題に関する調査」及び「A-2. 固有技術課題に関する調査」のそれぞれに6名ずつ、計12名のアドバイザーを選定した。いずれのアドバイザーも、既存の加速器施設、放射光施設または、それに関連した施設での豊富な経験を有する専門家である。アドバイザーの方には、本調査項目の検討や、ヒアリング対象者の選定で助言いただいた。また、ヒアリング会議にも出席いただいて、様々な技術課題に関してコメントをいただいた。

・ヒアリングに付する技術課題項目の設定

ヒアリング調査では、はじめに外部アドバイザーの助言を受けて調査技術項目の検討を行い、「A-1. 共通技術課題に関する調査」の調査項目として、【表 1-1】に示す14項目を設定した。また「A-2. 固有技術課題に関する調査」の調査項目として、硬X線向き施設に関する項目を3項目、軟X線向き施設に関する項目を3項目の合計6項目を設定した（【表 1-2】）。



【図 1-1】 次世代放射光調査のフロー図。

・ヒアリング対象者の選定

次にそのヒアリング調査項目を受けてヒアリング対象者の選定を行った。ヒアリング対象者は、共有技術課題に関するヒアリング調査と、固有技術課題のヒアリング調査に関して、それぞれ以下の(1)から(4)の 카테고リーに属する者を複数選定した。

- (1) 既存の放射光施設の運営・設置に関する専門的な知見を有する者
- (2) 放射光施設の設計・建設等に関わる潜在的メーカー層
- (3) 大学・産業界の研究者等の潜在的ユーザー層
- (4) 国際的動向を把握している、海外施設の責任者、若しくは海外施設の諮問委員経験者

以上の4つのカテゴリーに対して選定した共有技術課題に関するヒアリング調査の対象者13名を【表 3-6】に示す。同様に固有技術課題に関するヒアリング調査の対象者11名を【表 3-7】に示す。

・技術課題ヒアリング書面調査（事前調査）の実施

ヒアリングに先立ち、各ヒアリング対象者には設定したヒアリング調査項目に関する回答票（技術課題ヒアリング書面調査回答票）による書面調査を行った。調査回答票は外部アドバイザーの助言をもとに作成した。回収した回答票は、ヒアリング会議の資料として用いた。事前調査の項目内容と、分析結果及び、それぞれの対象者の回答のまとめは本調査報告書第三部にまとめられている。

・ヒアリング会議の開催

ヒアリング対象者、外部アドバイザー、調査実務者等を参加者としたヒアリング会議を開催した。ヒアリングは、第一回10月13日と第二回10月14日の二回に分けて、東北大学の東京分室において開催した。第一回のヒアリング会議の出席者リストと、第二回の出席者リストを、それぞれ【表 3-8】と【表 3-9】に示す。なお、ヒアリング会議はできるだけ多くのヒアリング対象者、外部アドバイザーが出席できるように二回に分けて開催したが、都合により出席もTV会議での参加も叶わなかったヒアリング対象者、外部アドバイザーについては、追加書面調査を別途実施するとともに、必要に応じて追加対面調査を実施することで対応した（【表 3-10】）。ヒアリング会議の進行は、技術課題ヒアリング調査回答票をもとに、参加者の間で意見交換を行う形式を採用した。

・意見書・ヒアリング概要ペーパーの回収

ヒアリング会議後、ヒアリング対象者には、事前調査とヒアリング会議での議論を踏まえた上で、意見書・ヒアリング概要ペーパーを提出いただいた。これらも事前調査のまとめと共に報告書第三部にまとめている。

以上のように行われたA. ヒアリング調査を取りまとめたものが本報告書第一部である。

1-2-2-2. 技術的観点の総合調査

B. 技術的観点の総合調査では、A. ヒアリング調査で得られた技術課題を総合的に分析し、次世代の放射光施設を実現する場合の具体的なシナリオを選定した。シナリオは、ヒアリング調査で明らかになった技術課題を解決した場合とそうでない場合等を含めて複数設定し、シナリオごとに、建設コストや運用コストの検討を行い、それぞれのシナリオごとの完成形的具体像を得た。そして、それらを建設・運用コストや科学・産業へ与えるインパクト等を含めて包括的に整理分析を行った。B. 技術的観点の総合調査に関する内容や分析結果は、報告書の第二部にまとめる。

【表 1-1】 共通技術課題に関する調査項目

共通技術課題に関する調査項目		
	調査項目	内容
1)	ラティス設計	低エミッタンス化、ビーム安定領域の確保、ビーム入射方式、ビーム寿命
2)	ビーム入射系	線型加速器・シンクロトロンを選択
3)	電磁石系	コンパクト化、省エネ化、永久磁石・超伝導電磁石の利用、冷却技術
4)	アライメント等	磁石のアライメント精度の向上、温度管理、磁場測定の高精度化
5)	真空系	真空チャンバーのアパーチャーの縮小化に伴う真空機器のコンパクト化、これによるブロードバンドインピーダンスの増大に対する対策、ビームに誘発されたチャンバーの発熱 (beam-induced heating) の検討、NEG coating 等の超高真空技術の導入に関する検討
6)	高周波加速系	Solid state amplifier 等を用いた空洞励振用電源の開発、高調波 (HOM) -free 高周波空洞の開発
7)	アンジュレータ	短周期化とギャップの狭小化によるビーム不安定性抑制装置の開発
8)	ビーム診断・ビーム制御系	不安定性を抑制する高速フィードバックシステム、コミッショニングを容易にするビーム診断系、ビームモニターおよびビーム調整法の開発
9)	加速器制御系	測定の高精度化、高速大容量化への対応、省力化、自動化へ対応したデータベースおよび施設内ネットワークのあるべき姿データベースおよび施設内ネットワークのあるべき姿
10)	光学系	放射光パワーに対する最適化
11)	利用系	計測システムの自動化と共通化、計測の高速・高精度化
12)	建物	付帯設備等の振動抑制、温度管理、省エネ化技術
13)	冷却・受電・変電設備	高安定性と低コストの確保
14)	その他	

【表 1-2】固有技術課題に関する調査項目

固有技術課題に関する調査項目	
硬X線向き放射光施設の課題	
	調査項目
1)	超伝導磁石（永久磁石）の利用の是非
2)	高排気速度を持つ真空槽とフロントエンドチャンネルの取り合い
3)	熱負荷対策
軟X線向き放射光施設の課題	
	調査項目
4)	高周波加速空洞の加速周波数の選択
5)	高調波高周波空洞によるビーム寿命の確保
6)	UV 領域用長周期ヘリカルアンジュレータ等のビーム及びビームライン光学素子への影響

1-3. ヒアリング調査結果

1-3-1. 共通技術課題ヒアリング調査結果

以下では、【表 1-1】に挙げられた調査項目についてのヒアリングによって明らかになった技術課題、およびそれに関連する参考コメント等を、(1) 既存の放射光施設の運営・設置に関して専門的な知見を有する者、(2) 放射光施設に係る設計・建設等に関わる潜在的メーカー層、(3) 大学・産業界等の研究者等の潜在的ユーザー、(4) 国際動向を把握している海外施設の責任者、若しくは海外施設の諮問委員会経験者の 4 つのカテゴリーに分けてまとめる。共通技術課題に関するヒアリング調査結果の要点を【表 1-3】にまとめる。なお、以下には、コメントがあった調査項目のみ記載してある。

(1) 既存の放射光施設の運営・設置に関して専門的な知見を有する者

1) ラティス設計

技術課題： 広いビーム安定領域の確保

広いビーム安定領域（ダイナミックアパーチャー）を確保する技術の開発が課題として挙げられた。MBA（Multi-Bend Achromat）を採用することで、蓄積リングを大きくすることなく低エミッタンス化が実現できるが、ダイナミックアパーチャーが小さく、入射が困難という問題があった。その解決策として、複数の特殊磁石を組み合わせた HMBA（Hybrid Multi-Bend Achromat）、その改良型の開発が鍵になるとみられている。例えば、欧州放射光施設 ESRF のアップグレード計画（ESRF-II）において、HMBA ラティスが考案・採用され、予算化された。同じマルチベンドラティスの極低エミッタンス（約 0.5 nm 以下）を持つ光源リングに比べて相対的に 6 極電磁石磁場を弱くし、広いビーム安定領域を確保できるために、他の施設でもこの方式を参考にしてアップグレード計画や新規計画の設計を始めている。広いビーム安定領域の確保は、ビーム寿命、ビームロス、入射やアライメントの許容誤差等を全て改善することにつながり、これらの技術の 5 年以内の実現は十分に可能であろうとの見解が得られた。

2) ビーム入射系

技術課題： 低エミッタンスビームの高精度入射

トップアップ運転が主流となっている現在、蓄積ビームの安定性の確保は必須であるが、次世代の低エミッタンスリングに対しては、低エミッタンスビームの高精度入射、すなわち、トップアップ入射時に蓄積ビームの変動が小さい、常時入射可能な入射器の開発が技術課題として挙げ

られた。蓄積リング側のダイナミックアパーチャーを大きくする等の回避方法も探る必要があるが、入射機構側の技術開発も重要という意見があった。

なお、入射器としては、ライナック（線形加速器）、シンクロトロンの中の二つの選択肢がある。技術的には、どちらを選択する解もあり得るが、整備コストを考えると、既存のフルエネルギー入射可能なライナックを利用する等の特別な場合を除けば、シンクロトロンが有利、トップアップ運転時の運転コストを考えるとライナックが有利とみられている。

また、蓄積リングへの入射機構については、キッカーによるバンプを使用した入射方式が従来は使われてきたが、現在の技術で対応できると考えられている。蓄積ビームの振動を非常に小さく抑えることができる入射方式として、パルス多重極電磁石を用いた入射方式があり、次世代の低エミッタンスリングにも有効であると考えられている。パルス多重極電磁石は KEK の PF リングでパルス 6 極電磁石が使われていて、MAX-IV や SIRIUS でもパルス多重極電磁石の導入が検討されている。

3) 電磁石系

技術課題：磁石システムの高精度化

技術課題：一部に永久磁石を利用した磁石システムの開発

次世代の低エミッタンスのラティスやオプティクスを実現するための技術課題の一つとして、磁石システムの高精度化が挙げられた。HMBA 方式、およびその改良型等によって、短い周長の蓄積リングで $100 \text{ pm}\cdot\text{rad} \sim 1 \text{ nm}\cdot\text{rad}$ の低エミッタンスを実現するには、磁石システムの高精度化が前提となる。HMBA 方式等においては、縦方向（ビームの進行方向）・横方向に磁場勾配がある機能結合型磁石システムが必要になるが、特に偏向電磁石による縦方向の磁場勾配の制御についてはあまり実績がなく、早期に検討・開発に着手する必要があるとの指摘があった。

省エネ化の観点から、すべて電磁石とせず、一部を永久磁石にするという解もありうる。電磁石系は加速器システム全体での電力消費の最も大きな割合を占めることから、永久磁石を用いた磁石システムの導入は、低消費電力化の実現に大きく寄与すると期待されており、今後の施設運営に課せられる省エネルギー化に革新をもたらす重要な技術課題であると考えられている。しかしながら、実機の加速器システムに永久磁石をベースとした偏向電磁石や、さらに複雑な多極の磁石を採用した例はなく、単品での R&D による基本性能の確保から、最終的な量産化に至っていない。現時点では、永久磁石の採用は実績がなくさらなる研究・開発が不可欠である。しかし、省電力化のメリットがあるため、一部に永久磁石を利用した磁石システムについて、量産を視野に入れた研究開発を、ESRF や SIRIUS の動向をみながら進めていく必要があり、5 年以内には実現可能であるとみられている。

海外の施設においては、例えば ESRF-II 計画では既に HMBA ラティスの電磁石系を含む設計報告書が作成されている。一部の偏向電磁石については永久磁石が主なものと完全な電磁石との二案が併記されており、永久磁石を用いた偏向磁石については、プロトタイプが製作されている。一方、ブラジルの SIRIUS 計画でも永久磁石を用いた偏向磁石のプロトタイプが製作されたが、ビー

ムロスによる減磁の影響が懸念され、実機での使用は見送られた。次期計画において採用を計画している ESRF の動向は特に注視する必要があるとの指摘があった。

一方、電磁石の超伝導化については、強磁場によって、低エネルギーの蓄積リングで硬 X 線領域をカバーできるといったメリットを主張する意見があるが、その一方で、運営の観点からクエンチングによる光源利用ストップのリスクの高さが指摘され、反対意見もみられた。加えて、日本の事情として、リニア新幹線の建設に伴うコスト増大の問題や、液体ヘリウムの安定供給が困難であること等が懸念されるとの見方もあった。

5) 真空系

技術課題：小口径真空チャンバーの超高真空排気技術の確立

低エミッタンスを実現する MBA ラティスでは、強い 4 極磁場や 6 極磁場が必要でビームパイプの径は小さくなり、従来のような大口径の真空チャンバーは必要なくなるが、一方で、小口径チャンバーに対しては、超高真空排気技術を確立することが技術課題として挙げられた。具体的には、超高真空の維持、機械的強度の維持、ステンレスならば溶接に伴う残留磁場の消磁等がある。なお、セル内の電磁石間のスペースも狭隘になるため、光取り出しのための磁石システムとの空間的取り合いや、光源近傍での余計な放射光を受け止めるアブソーバの設計等も必要となり、システム全体としての整合のとれた設計が検討課題であることが指摘された。

超高真空化は、短いビーム寿命、アンジュレータでのビームロス、イオントラッピングによるビーム不安定性等を極力抑えるために不可欠である。しかしながら、小さなパイプ径と狭隘な電磁石間スペースに対して十分な真空機器を配置する必要がある。真空機器のスペースが限られ、従来の方式で十分な超高真空が実現できない場合には、NEG coating された真空ダクトを開発・利用することが一つの解決策となるとみられている。また、真空ダクトの径が小さくなると、凹凸や抵抗性の発熱が大きくなりビーム不安定性が起りやすくなるため、アンジュレータ用真空ダクトのような特に狭いダクトでは、内面に電気伝導度の高い材質を使用することが望ましいと考えられている。例えば、KEK-PF (U16) や SPring-8 (BL07LSU) においては、内面に銅メッキを施したステンレス製アンジュレータ用真空チャンバーが既に使われているが、小口径チャンバーに対しても、この技術が応用できると期待されている。

上記の技術課題は、放射光施設とメーカーの共同研究開発を開始できる段階にあるとの指摘があった。R&D を重ねることにより、適切な材料選択、具体的な設計・製造方法を確立し、さらに量産による低コスト化を実現する必要がある、5 年以内の実現は可能であるとみられている。

国際的な動向については、先行する新設放射光施設 (NSLS-II、TPS、MAX-IV) の状況、これからアップグレードを計画している ESRF、APS 等の動向は注視すべきであるとの指摘があった。真空ダクトへの NEG coating については MAX-IV と SIRIUS でほぼリング全周に採用される予定となっている。SOLEIL では真空ダクト全体の 56%が NEG coating されており、運転において問題等は報告されていない。日本では、KEK の c-ERL の超伝導空洞周辺の真空ダクトに、CERN からライセンスを取得して使われている実績がある。ESRF ではアンジュレータ真空ダクト等一部で採用され

てきた（全体の 11%）。ESRF-II 計画では従来のアンテチャンバ方式を再利用するが、将来 NEG coating パイプを拡張することが検討されている。

7) アンジュレータ

技術課題：偏光可変型アンジュレータによる軌道変動問題の解決

技術課題：短周期（狭ギャップ）アンジュレータにおけるビーム安定技術の開発

技術課題：アンジュレータ磁石の強力化

SPring-8 では、軟 X 線用アンジュレータの偏光制御に、電子ビームの軌道をキッカー、移相器等を用いて制御する方式が採用されたが、それによるビームの軌道変動が、一部のエンドステーションにも影響する課題として残されたままである。この課題は、今後の低エミッタンス化により益々深刻となると予想され、解決すべき技術課題として挙げられた。軟 X 線領域においても、硬 X 線領域と同様に、光学系による偏光制御の可能性を探るべきであるとの指摘があった。

一方で、硬 X 線領域では、短周期化（狭ギャップ化）をベースにして、利用エネルギーと輝度の最適化を図るべき、との指摘があった。その際、アンジュレータの低ギャップによる抵抗壁のウェーク場が起こす発熱やビーム不安定性の問題が解決すべき技術課題となる。発熱については真空ダクトの内面の銅メッキや真空封止アンジュレータ磁石列の銅シートカバーによって抵抗を下げることににより現状では解決できると考えられている。また、ビーム不安定性の問題は、100～200 μm 厚の銅シートや銅メッキを施すことで、振動成長時間を長くした上で、その成長時間よりも短い減衰時間の高速フィードバックキッカーを使用する等の方法で解決可能と考えられている。

なお、磁場強度の向上は、パラメータの最適化の自由度を上げるが、開発においては、磁石そのものの高磁場材料探索とクライオアンジュレータによる高磁場化を併せて推進すべきとの意見があった。また、非常に高いエネルギー領域は、ウィグラーとするか短周期アンジュレータを選択するか、利用の動向と合せて検討すべき課題であることが指摘された。

既存技術の最適化と改良をベースとして、高磁場化、短周期化、機構/架台等の高性能化、コンパクト化された挿入光源の実用化は、5 年以内の実現は可能であるとみられている。

8) ビーム診断・ビーム制御系

技術課題：安定なビーム周回を可能にする高速・精密ビーム診断技術の開発

技術課題：安定なビーム周回を可能にする高速・精密ビーム制御技術の開発

軌道の安定化については、振動や変形による軌道変動への影響を考慮して電磁石の架台を設計・開発する必要があるが、同時に軌道フィードバックシステムでは、高速化を図り、広い周波数帯域でのビーム軌道の高い安定性を確保する、高速かつ精密なビーム診断および制御技術の開発が技術課題として挙げられた。アンジュレータギャップや真空ダクト径の縮小に伴い増大する抵抗

性ビーム不安定性は、ますます加速されているが、国際協力により開発されてきた FPGA 等によるフィードバックキッカーシステムで対応が可能であるとみられている。さらに、軌道フィードバックに有効な軌道補正方法と必要な補正電磁石やビーム位置モニタの配置や数をラティス設計と並行してなるべく早期に検討しておくべきとのコメントがあった。

軌道フィードバックシステムについては、ビーム位置モニタのデータ処理を含め、FPGA を用いることが国際的な主流となっている。軌道補正には固有ベクトル法 (SVD 法) が多くの施設で利用されている。ブラジルの LNS では、SIRIUS 計画のためのテストベンチとなる軌道フィードバックシステムにおいて、光源点での軌道をより重点的に安定化する条件付き固有ベクトル法が採用されている。

具体的な方策として、共通架台を含む電磁石系の振動モードや振動応答等を、振動測定や構造解析により調査し、軌道変動への影響の大きさを評価し、その結果、必要な改良等があれば、設計や製作に反映する。また、軌道安定化に必要なビーム位置モニタと補正電磁石の配置や数を検討する。スペースが十分ではなく補正電磁石の数が限られる場合は、少ない補正電磁石でも有効に光源点での安定化を可能にする軌道補正方法を軌道フィードバックに採用する。例えば、SVD 法に条件を課すことで全体的な軌道を抑えながらも光源点等の重要な場所をより重点的に安定化する、などの意見があった。

10) 光学系

技術課題：光学機器、光学素子の高熱負荷に対する性能の維持

技術課題：光学素子の冷却に伴う振動の低減

技術課題：10 nm 以下の空間分解能を実現する光学素子の開発

高品質の放射光ビームを維持したまま輸送するための光学素子の開発が技術的課題として挙げられた。高熱負荷機器、高熱負荷光学素子が直面する課題は、今後の動向として、放射パワーやパワー密度が現在の SPring-8 (最大 40 kW 程度) を数倍も超える光源は出現しないと予想されるため、挿入光源からの放射パワーを最初に受けるフロントエンド機器や、光学素子は、現在の最大パワー程度で推移させる戦略をとるべきである、との意見があった。

初段の光学素子の高熱負荷に対する品質の維持に加え、冷媒循環に伴う素子の振動を低減することも課題として挙げられた。特に数十メートルのビームラインにおける反射光学系の角度振動は特に影響が大きく、極低エミッタンスのリングの特に縦方向のビームクオリティの維持には、振動レベルを現状の 1/10 の 100 nrad 以下にする必要がある。振動やドリフトを低減させる様々な方策は、メカニカルエンジニアリングとして重要な開発課題である、との指摘があった。

低エミッタンスビームをフル活用するための X 線集光・結像光学系の開発も喫緊の技術課題として挙げられた。高品位の全反射ミラー、多層膜ミラー、Multi-layer Laue Lens、Fresnel Zone Plate、屈折レンズ等多様な光学素子が開発され、多くのものが実用化されている。コヒーレント X 線の利用に際して、これら光学素子に求められる要件は、低エミッタンス化によって、さらに厳しいスペックが要求されるようになるものがある。集光ミラーでは表面形状誤差に対する要求

が集光サイズ 1 nm 以下の時代に突入する。高精度な各種光学素子の開発は国内外で積極的に進められており、現在アイデアレベルや試作レベルのものから、5 年後にはいくつかの新たな光学素子が実用になっていると予測されている。

なお、軟 X 線利用においては結晶分光でなく、回折格子による分光器が依然として重要な位置を占めている。素子製作は海外メーカーに依存のところがあるが、分解能 10,000 以上の素子を継続的に確保し、利用するためには、高品質の回折格子の入手チャンネルを確保し続けることが肝要である、とのコメントもあった。

高精度な各種光学素子の開発は国内外で積極的に進められており、現在のアイデアレベルや試作レベルのものから、5 年後にはいくつかの新たな光学素子が実用になっている、と予想されている。

11) 利用系

技術課題：計測のオートメーション化・共通化

次世代放射光施設をフル活用するためには、計測のオートメーション化、計測システム共通化が技術課題として重要であることが挙げられた。特に、汎用的な実験と先端的で特殊な実験の両立が、体系化されることが効率的な施設利用の観点から必要と考えられている。汎用的な実験については手順のマニュアル化が求められている。

14) その他

技術課題ではないが、放射線遮へい、放射線管理について、設計段階から放射線管理の方針を徹底する必要があるとの指摘があった。建設時の壁の厚さについては十分に安全係数を見込んで、初期投資を行っておくべき検討課題であり、このことは、施設運営における国民の理解を得る上でも、重要である、という意見があった。

(2) 放射光施設に係る設計・建設等に関わる潜在的メーカー層

1) ラティス設計

具体的な技術課題は挙げられなかったが、次のような参考コメントがあった。

ラティス設計を中核の検討課題に設定し、関連する技術課題に展開していくべきである。

2) ビーム入射系

具体的な技術課題は挙げられなかったが、次のような参考コメントがあった。

入射器には、日本独自の差別化技術として SACLA で確立された高安定、高精度なライナックと同等のシステムがある。これを採用することで放射光リングのチャンバーをコンパクト化し、さらに磁石やその励磁電源の小型化等を実現して施設全体の小型化、低コスト化を指向することが可能である。また、入射器に上述の加速器を採用すれば、下流側にアンジュレータを追設することで将来的に自由電子レーザー（FEL）への拡張も可能である。初期段階で将来的な施設の拡張性についても検討することは、施設のアップグレードを長中期的に考える上で重要である。したがって、次世代放射光施設として最も性能・コスト・信頼性のバランスが取れた加速器構成は、低エミッタンス電子銃とライナックを入射器とした、低エミッタンスを実現するラティス構造を持つ蓄積リングである。

加速周波数は、ライナックは SACLA で実績の C-band、蓄積リングは国内で主流の 500 MHz 帯である。さらに小型化のために入射器には X-band ライナックの採用も議論されるところであるが、高周波源の開発や信頼性確保が課題に加わる。蓄積リングの入射器にシンクロトロンを採用することもあり得るが、運転経費、および将来拡張性の点からライナックに及ばない。

長期的には、次世代放射光施設として、より一層の低エミッタンス化を狙い、ライナックベースの超低エミッタンス電子ビームを直接利用できる ERL（エネルギー回収型ライナック）の検討も引き続き必要である。また、加速電子のエネルギーを RF 電力として回収するため、環境負荷が少なく、省エネルギーの観点からも魅力的である。1.3 GHz の超伝導加速空洞や大電流低エミッタンス電子銃等、試験加速器 compact-ERL での研究開発により、課題と対策が明確化されれば、研究開発による長期的な位置づけが具体化されるものと期待される。

3) 電磁石系

技術課題：磁石システムの高精度化

技術課題：長期メンテナンスフリー運転可能な超伝導電磁石の開発

技術課題として、強磁場・コンパクト化に向けて、磁極の加工、組立の高精度化が挙げられた。同時に、量産時にその精度を保ち、製作誤差を低減させる製造技術の開発も必要となる。よって、電磁石試作による加工・組立精度の検証、メーカーと密に連携した品質管理と製造技術の底上げを図らなければいけないことが指摘された。さらには、低損失半導体素子を採用した電源による省エネも検討に値する。国際的な動向として、次期計画において採用を計画している ESRF の動向を注視する必要がある、等のコメントがあった。

なお現在、超伝導電磁石については完全安定化された導体を用いて長期安定運転が実現されているが、今後 MRI のようなメンテナンスフリーな運転を可能とする装置の開発が技術課題として挙げられた。

4) アライメント等

技術課題：多数の磁石の高精度設置技術の確立

磁石の精密な位置合わせ・振動制御が技術課題として挙げられた。低エミッタンスリングでは、多数の電磁石を非常に高精度で設置する必要がある。磁場測定にかかる時間を短縮し、コストを抑える方策として、複数電磁石の一体設置による据付誤差許容値の緩和の低減、遠隔微調整機構を備えた架台、高精度磁場測定装置の試作と測定自動化の検討などが挙げられた。

6) 高周波加速系

技術課題：高調波 (HOM) 抑制型コンパクト高周波空洞の実用化

技術課題：高安定運転・省エネ・省スペースのための高出力半導体電源等の開発

高調波 (HOM) 抑制型のコンパクトな高周波空洞の実用化が技術課題として挙げられた。大電流ビームの加速を行う際、HOM によるビーム不安定性が生じることが知られているが、HOM を効率よく吸収し、安定に加速を行える高周波加速空洞が開発され、国内外の放射光施設で採用されている。しかしながら、従来のタイプは、HOM を吸収する部分がビーム軸方向に突き出た構造であった。したがって、蓄積リングのコンパクト化に対する障害となっていた。

最近、共振モードに TM020 を採用したコンパクトな HOM 抑制型加速空洞が開発されている。この空洞では、高周波吸収のための専用スペースがビーム軸上に不要であるため、省スペースで効率的にビームを加速することが可能である。現在、高周波吸収体の接合、空洞の加工、組立等が行われており、今後、大電力による実証試験が行われる見込みである。

なお、超伝導加速空洞については、放射光ユーザーと必要性を議論するべき、との意見があった。先行する海外の第三世代放射光施設 (上海 SSRF、カナダ CLS、英国 DIAMOND、台湾 TPS、米国 NSLS-II、ブラジル SIRIUS 等) では、高輝度化を指向した大電流化のために、500 MHz の超伝導空洞を採用している例が多い。超伝導空洞を採用すると、電気代が約 1/3 となると言われているが、冷凍機等の専用ユーティリティと保守人員が必要となり、コストや所要電力および人件費の増大につながる。定期的なもの、不定期なものいずれにおいても、メンテナンスのデッドタイムが 1 週間を超え、それに人件費も伴う。スウェーデン MAX-IV は 100MHz の常伝導を採用している。

高周波加速系の電源等の、半導体素子化も技術課題に挙げられた。以下のように、電源の半導体素子化等は、安定運転、省エネ、省スペースに寄与すると期待されている。

例として、C-band ライナックと 500 MHz 帯蓄積リングの高周波加速系を考えると、次世代放射光施設に向けた半導体素子の開発要素は以下の三点と考えられている。

(ア) 500 MHz 帯高出力 SSA (Solid State Amplifier) による安定運転 (停止リスク削減)

- (イ) LLRF (Low Level RF: 低レベル高周波) 制御システムのプラットフォーム標準化と高度化
- (ウ) C-band 高周波源 (クライストロン) の高電圧パルスモジュレータの安定化

高周波加速装置の可用性を高め、運転コストを下げるために最も影響するのが、高周波源である。WBG (ワイドバンドギャップ) 半導体を適用することで、可用性と運転コスト削減に加えて、小型化が実現可能である。以下のような具体的な課題が挙げられた。

- (ア) SSA: 大出力高周波機器には、大電力クライストロンが使われているが、クライストロンの品質と信頼性向上の努力が長年行われてきたおかげで、故障や不具合は大きく減少し、寿命も十分長くなった。しかし、クライストロンや高電圧電源が、ひとたび故障すると、放射光施設の運転停止、故障部品の交換に数日単位の期間と高額な費用がかかる。高出力半導体を多段合成した SSA は、長寿命に加えて、素子の故障がシステムを止めない特長を持つ。高電圧回路がなくメンテナンス性も優れている。次世代放射光施設では、高輝度・高安定での連続運転が求められ、大出力高周波機器の高精度制御・高効率・信頼性実現が重要な課題である。従来使用していたクライストロンを、SSA と高度な制御システムに置換えることで、その課題解決が可能となる。フランスの放射光施設 SOLEIL では、先駆的な大電力 SSA が開発され、実現性と信頼性が実証されている。課題としては、コスト高・低効率、多段モジュールシステムに固有な連鎖故障回避技術の確立等が挙げられる。

- (イ) LLRF: 高周波加速器で、高精度制御・高安定運転を行う、LLRF では、デジタル化が進んでいる。モニタする RF 信号は、ノイズの少ないアナログ回路から、出来るだけ上流で高速のデジタル変換し、高速・広帯域なデジタル・データ処理を行うようになる。このため、高速で大規模な FPGA とその監視制御を行う CPU の開発が必要となる。特に、デジタル部のハードウェアは情報通信の規格 xTCA から派生した、MTCA.4 規格をプラットフォームとした制御ボードで共通化し、用途に合わせた高速ロジックは FPGA に作り込み、ソフトウェアで監視制御する。情報通信の規格 xTCA では、広帯域高速シリアル通信をバックプレーンにもつシエルフや、通信ハブ、電源、冷却ファン等、共通規格化している。冗長性構成とすることも可能であり、各ユニットを監視制御したり、ホットスワップ対応で、汎用品として購入ができたりするため、メンテナンス性が高いことが大きな特長となる。

- (ウ) パルスモジュレータ: 常伝導のライナックの高周波源は、高出力のパルスクライストロンが使用され、パルス SSA の代替は困難である。当分パルス SSA に替わることはないと考えられる。クライストロンモジュレータ (高電圧パルス電源) は、ラインタイプ型が従来から使われており、サイラトロンスイッチの安定動作 (電圧変動、タイミング変動他) が難しく、また、故障が多く、可用性を阻害する大きな要因となっている。近年のパワーエレクトロニクス素子や回路の発展を適用によって、多段の半導体スイッチを利用したダイレクトスイッチ型パルス電源が使われるようになると、高出力のパルスクライストロンへ印加されるパルス高電圧の安定性やパルスタイミングジッターが劇的に改善されることが期待できる。ビームの安定性に大

きく寄与するとともに、メンテナンス性も向上する。ダイレクトスイッチ型パルス電源も、MARX 回路やインダクション回路（ScandiNova 社の方式）等、複数の方式が候補として存在する。

5年後の見込みは、以下のように考えられている。

- (ア) SSA: 高出力半導体素子回路、多段合成回路等の要素技術開発が終わり、次世代放射光施設に向けた開発費用を使って、SSA の試作と評価が行われる。その結果、クライストロンの置き換えが始まる。
- (イ) LLRF: 高速な制御を行う機器（制御ボード類）のプラットフォームは、従来のバス系の物から、高速シリアル通信のハブ接続系のものへ移行が進む。MTCA.4 規格は、加速器コミュニティの支持を得て普及が進む。
- (ウ) パルスモジュレータ: クライストロンモジュレータは、従来のラインタイプ型（サイラトロンによるスイッチ）から、半導体スイッチを利用したダイレクトスイッチ型パルス電源に変わり、高出力のパルスクライストロンへ印加されるパルス高電圧の安定性やパルスタイミングジッターが劇的に改善されることが期待できる。

国際的な動向は以下のように整理される。

- (ア) SSA: 大出力 LDMOS と大電力合成回路で、352 MHz、180 kW CW 出力の SSA が開発（2009）された。45 kW の SSA tower を、4 合成で 180kW。ESRF でも、同様な 352 MHz、150 kW CW 出力の SSA を導入（2013）している。500 MHz 帯の SSR も、ESRF や PSI で開発中である。PSI では、Swiss Light Source 用に、500 MHz-65 kW の SSA を開発し、試作・評価した結果を報告した（2015）。大出力の SSA は、ヨーロッパが先行しているが、本格普及には、低コストで高効率な構成と運転制御が必要で、開発が精力的に進められている。
- (イ) LLRF: DESY を中心に、情報通信の規格 xTCA から、加速器や物理実験の監視制御用に MTCA.4 規格が作成された。MTCA.4 規格による機器のベンダーも増えつつあり、ヨーロッパだけでなく、米国、アジア（日本も含む）の加速器での使用検討事例が増えてきている。
- (ウ) パルスモジュレータ: 大電力パルスクライストロンのモジュレータは、ScandiNova 社が、独自の方式で席卷しているのが現状である。

8) ビーム診断・ビーム制御系

技術課題: 安定なビーム周回を可能にする高速・精密ビーム診断技術の開発

技術課題：安定なビーム周回を可能にする高速・精密ビーム制御技術の開発

技術的課題として、安定なビーム周回を可能にするための、高速かつ高精度なビーム診断および制御技術の開発が挙げられた。ビーム診断、ビーム制御系には、ノイズの少ないアナログ回路、高速の FPGA を使うデジタル変換、高速・広帯域なデータ処理が必要で、実用化へ向けた取り組みがされている。一方、加速空洞や高周波源の高周波制御（LLRF: Low Level RF）では、高速で大規模な FPGA とその監視制御を行う CPU を利用した高速・広帯域なデジタル・データ処理が実用化されている。デジタル部のハードウェアは、LLRF とビーム診断・ビーム制御系で、共通化と規格化を行うことで、コスト低減と開発期間の短縮を図ることができると予想されている。加速器制御のみならず、利用者の検出器信号の取り込みや処理の共有化も重要であるとの意見があった。そのため、高速な制御を行う機器（制御ボード類）のプラットフォームは、従来の（VME 等の）バス系の物から、高速シリアル通信のハブ接続系の物へ移行が進むと予想されている。情報通信の規格 xTCA から派生した、MTCA.4 規格をプラットフォームとした制御ボードを採用し、広帯域高速シリアル通信をバックプレーンにもつシェルフや、通信ハブ、電源、冷却ファン等、共通規格化されたものが使えるようにする必要があるとみられている。冗長性構成、各ユニット監視制御、ホットスワップ等に対応でき、汎用品として購入ができるため、メンテナンス性が高いことが特長である。

5 年後には、この MTCA.4 規格は、加速器コミュニティの支持を得て普及が進むと予想されている。FPGA や CPU の発展によって、より多くのデータ収集（波形データや画像データ）、データ通信の高速化と広帯域化、分散処理技術（波形処理、画像処理）、タイミング調整技術が発展し、診断と制御技術が進展してゆくと期待されている。

国際的な動向としては、Instrumentation Technologies 社（スロベニア）のビーム位置測定装置が、放射光施設で多用されている。一方、DESY を中心に、情報通信の規格 xTCA から、次世代の加速器や物理実験の監視制御用に MTCA.4 規格が作成され、ハードウェア共有化も進められている。MTCA.4 規格による機器のベンダーも増えつつあり、ヨーロッパのみならず、米国、アジア（日本も含む）の加速器での使用検討事例が増えてきている。DESY で毎年（2015 年 12 月に第四回）MTCA workshop が開催されており、フォローアップが必要、との見解が得られた。

9) 加速器制御系

技術課題：安定して使いやすい制御系の開発

放射光施設を運転・制御するソフトウェアについて、放射光施設のような大きな施設で、ネットワークを構築し、逐次データをデータベースに収集し、運転するためには、ソフトウェアの使い勝手、安定性、拡張性が技術課題であるとの見解が得られた。ソフトウェアは、製作時、運転時のコストに直結し、大型放射光施設 SPring-8 で実績のある MADOCA のようなフレームワークを採用することが必須になるとみられている。プログラマはもちろんのこと、ユーザー、オペレー

タから、現行の制御ソフトの改善点を洗い出すことが重要であり、加速器や科学技術の進歩によって、ソフトに要求される仕様も、大容量データ、高速化等となってくると予想されている。

11) 利用系

技術課題：計測のオートメーション化・共通化

技術課題として、ロボットなどのハイテクの導入が挙げられた。

12) 建物

技術課題：建物の振動対策

地盤の防振は必須の課題であるという見解が得られた。例えば、NSLS-II の場合は、建設前に立地の振動について 2 Hz 以上の周波数帯についてのみ地盤の振動の状況を確認した。しかし、建設後に、0.5 Hz～4 Hz の周波数帯を調査したところ、大きなノイズが存在することが明らかになったことが知られている。しかも、敷地内の他の場所で、その周波数帯で振動の少ない建設可能な立地が存在することもわかり、問題となっている。さらに、比較のため SPring-8 で、同じ周波数帯の振動が調べられたが、振動ノイズがほとんどないことも分かり、建設コスト（730 M\$から Contingency を含め 900 M\$にのぼった建設費）に見合う性能を發揮できるかどうかについては議論がある。

現在の技術では、地盤の振動を調査し、振動の少ない立地を選ぶか、振動対策が必要な場合は、コストはかかるが、人工岩盤等の設置を講じることが、低エミッタンス光源の性能を發揮するために必須であるとみられている。

13) 冷却・受電・変電設備

技術課題：先端環境技術の導入による電力コストの削減

技術課題：高周波電力効率の改善、維持コスト削減のための高出力半導体高周波電源等の開発

先端環境技術の導入による電力コストの削減、および電力・維持コスト削減のための高出力半導体高周波電源等の開発が課題として挙げられた。欧州を中心に Green Accelerator と呼ばれる環境配慮型加速器の検討が進められている。クライストロンの排熱を有効利用している例があり、その有効性について調査が必要であるという意見があった。

運転コスト低減には、電気代削減と維持コスト削減がある。

電気代削減の方策として以下のものが挙げられた。

- (ア) エネルギー地産地消：施設サイトの特徴（施設の立地や面積、環境や気候）に合わせたエネルギー生産設備を併設する。例えば、太陽光発電に、放熱源の利用も合わせ、施設全体のエネルギー管理システムを導入する。
- (イ) 省エネルギー加速器：電力消費の多くは高周波電力に関係する。高周波電力効率の改善、高周波電力損失の改善のための、デバイスや機器の開発と製品化を行う。例として、SSA と LLRF を組み合わせた高度な制御システムが考えられる。

維持コスト削減には以下の方策が挙げられた。

- (ア) 長寿命デバイス：Tube（管球）から半導体へ
- (イ) 致命傷を避ける：1つの大電力デバイスから多数合成の電力デバイスへ
- (ウ) 1つの高耐電圧デバイスから多段合成の耐電圧デバイスへ

(3) 大学・産業界等の研究者等の潜在的ユーザー層

11) 利用系

技術課題：計測のオートメーション化・共通化

海外の施設に比べて、オートメーション化や計測サービスの利用面で遅れを取っているという意見があった。人材配置の最適化を行って、メールイン等、世界の潮流をキャッチアップすべきであり、このままでは、海外との差は、ますます開き、産業界のユーザーは、海外へ流れる恐れがある、等のコメントがあった。

具体的に次の方策が挙げられた。

- (ア) 一年中測定できるメールインの整備。夏季と冬季の国内放射光のシャットダウン時期に、海外に試料を送付していたが、非常に安価で、データの質もよいため、年間を通して海外施設を利用するようになってきているという例もあり、早急な整備が必要である。
- (イ) メールインを運営する有能な人材の育成、確保。体制整備には、学術的な質の高さも求められる。

5年後は、ますます、この状況は進み、産業界の国内ユーザー離れが深刻化すると予想され、海外でうまく機能している体制が、日本で実現しない阻害要因を、取り除くことが急務である、との見解が得られた。

また、次世代放射光施設の利用に関して、以下の要望、コメント等も挙げられた。

- (ア) ポンプ&プローブのような電子状態、振動状態の励起と励起状態を別の波長の電磁波や量子ビームで観測・計測する等の方法が、物理計測だけでなく、物理化学、有機合成化学、および触媒化学の分野でも、当該分野の非専門家でも容易に使用可能にしていくことが必要。
- (イ) 施設・装置側としては、リング中の電子バンチの質が問われる。各バンチの強度、時間軸方向のパルス幅、実空間での進行方向、水平、垂直方向のバンチの形状等が分かっていることが、実験の精度の向上につながる。時間軸方向のパルス幅がある程度可変になれば尚更有效である。
- (ウ) ビームラインとしては、シングルバンチでの取り出しのための、ジッターが少ない回転スリットや、バンチ毎の放射光パルス素性が分かっているのが要望される。またそれらのデータはバンクに保管されていて、ユーザーが自由に取り出せることが必要である。
- (エ) マルチプローブや多波長の放射光実験が同時に行えるような、新しい計測技術の開発が望まれる。実験室系で多用される他の実験手段が、放射光と連携できると、物性測定幅がひろがり、新たなサイエンスを探求可能になる。

(オ) プロセスエンジニアリング等の出口志向の研究開発が可能になる計測技術、エンドステーションデザインの検討が必要であり、そのことが、放射光施設を産官学のイノベーションの中核にすることができる。その際に必要なこととして、成果の特許化を容易にするための計測の国際標準化の推進がある。

12) 建物

具体的な技術課題は挙げられなかったが、次のような参考コメントがあった。

実験室の仕様について、マルチプローブ実験に対応できる付帯設備が必要となる。例えば、他の電磁波光源を地下に置いて、その地下室へ放射光を導入する等、既存建物デザインに捕らわれない、土木、建築工事を伴うものへの配慮も必要である、といったコメントがあった。

原発（フランス、南アフリカ）、中国の新設原発、次世代核融合炉などで採用された免震システムを例に、十分な地震対策が必要との意見もあったが、免震システムは、むしろ、施設が揺れながら振動を回避するものであり、放射光の振動対策とは意を異にするものである、との見解もあった。

13) 冷却・受電・変電設備

技術課題：先端環境技術の導入による電力コストの削減

太陽光発電等自然エネルギーを利用した新しい試みによる省エネ対策が技術課題として挙げられた。

その他)

技術課題：高速読み出し可能な二次元分光分析検出器の開発

エンドステーションでの光エネルギー分解能の向上と、10 nm 集光ビームを実現するための光学素子の開発が技術課題として挙げられた。各画素読み出し時間の短い、二次元で分光分析できる検出器の開発が必要とみられており、海外では開発が行なわれているが、実用化レベルではない。高速読み出し技術等を、SPring-8、SACLA 等と共同で開発すべきであるという意見があった。

(4) 国際動向を把握している海外施設の責任者、若しくは海外施設の諮問委員会経験者

1) ラティス設計

技術課題：低エミッタンスビームを実現する蓄積リングのコンパクト化

低エミッタンスリングを実現する蓄積リングのコンパクト化が技術課題として挙げられた。スウェーデン MAX-IV の 3 GeV リングでは、マルチバンドをどのようにコンパクトにしてリングを成立させるか（ハードのみならずビームダイナミクスも含めて）非常にユニークな取組が行われている。複数の電磁石を一体の鉄ブロックで構成するというオリジナルのアイデアでは、それによる他の構成機器への悪影響をどのようにクリアするか、あるいは許容するか、等が重要な検討課題となる。MAX-IV の 300 pmrad というエミッタンスは極めてセンセーショナルであるが、一体化マルチバンド磁石が犠牲にしているものを明確に知った上で、選択肢の一つとして理解する必要がある、等の意見があった。

3) 電磁石系

技術課題：磁石システムの高精度化

技術課題：磁石システムのコンパクト化

小口径の永久磁石による高勾配コンパクト多極電磁石システムの開発が必要。早期に実現可能な技術としては永久磁石を用いた偏向磁石が挙げられる（ESRF、SPring-8 で開発中）。

4) アライメント等

技術課題：多数の磁石の高精度設置技術の確立

マルチバンドに対応した磁石の精密アライメント技術が課題として挙げられた。

5) 真空系

技術課題：小口径真空チャンバーの超高真空排気技術の確立

小口径真空チャンバーの超高真空排気技術の確立が技術課題として挙げられた。第三世代の放射光光源の蓄積リングの真空チャンバーの電子ビーム室のクロスセクションが、概ね H70 mm×V40 mm 程度となっていた理由は、以下の通りである。

- (ア) 入射器からの入射ビームのエミッタンスが蓄積リングのエミッタンスに比べ格段に大きかった。
- (イ) 電子ビーム蓄積リングの運転経験が現在に比べ乏しく、設計尤度を大きく取らざるを得なかった。
- (ウ) ラティスの設計が DBA もしくは TBA (Triple Bend Achromat) だったので、蓄積ビームの安定周回領域を広く取ることができ、真空チャンバー口径を大きくしておくことに意味があった。
- (エ) Top-up 入射が普及していなかったため、ある程度長いビーム寿命を得ることが重要であった。

一方、自然エミッタンスは偏向磁石の偏向角の三乗に依存する。よってマルチベンド化すれば、偏向角が小さくでき、自然エミッタンスが劇的に低減できる。しかしながら、第三世代放射光光源で用いられている大口径の真空チャンバーでマルチベンドを実現しようとする、電磁石の最大磁場勾配 (4 極と 6 極) が厳しく制限されるとともに、全ての機器の大きさを大きくする必要がある。また、偏向角が小さくなると線形クロマチシティ補正の 6 極電磁石の強さが飛躍的に大きくなり、蓄積ビームの安定周回領域を確保することができない。その結果、現実的な設計として、MBA を採用できなかった。以上の理由により、第三世代の放射光光源の電子ビームエミッタンスは 1~10 nmrad に止まってきた。

SPring-8 の設計開始から 20 年以上が経過し、技術開発が進んだ結果、以下のように状況が変化し、マルチベンド化が可能になってきた。

- (ア) 電子ビーム蓄積に大口径の真空チャンバーがなくなってきた。
- (イ) Top-up 入射が確立し、長いビーム寿命への要請の重要度が低下した。
- (ウ) 真空チャンバーが大口径である必要がなくなったおかげで、今までより格段に強い 4 極、6 極磁石の使用が可能になった。
- (エ) 真空チャンバーが大口径である必要がなくなったおかげで、全ての機器を小型化できる余地が出てきた
- (オ) 小さな偏向角が原因で生じる蓄積ビームの安定領域の狭さは、従来の線形クロマチシティ補正用 6 極磁石の非線形性に起因していたが、衝突リングで採用されている「位相整合を利用して 6 極磁石の非線形性を抑制する」スキームを導入することで、解決できる目処が付いてきた。

次世代放射光リングに向けては、小口径真空チャンバーの超高真空排気技術が一つの重要な技術課題であると考えられる。次世代放射光リングへ向けて早急に解決すべき課題として、以下のものが挙げられた。

- (ア) 真空チャンバーのアーチャーの縮小化に伴う全真空機器のコンパクト化
- (イ) ブロードバンドインピーダンスの増大に対する対策

- (ウ) ビームに誘発されたチャンバーの発熱 (beam-induced heating) の検討
- (エ) NEG coating 等の超高真空技術の導入に関する検討
- (オ) 小口径ステンレス真空チャンバーの製作技術開発
- (カ) トンネル内でのベーキングの廃止を可能にする超高真空システムの開発

6) 高周波加速系

技術課題：高調波 (HOM) 抑制型コンパクト高周波空洞の開発

技術課題：高安定運転・省エネ・省スペースのための高出力半導体素子の開発

高周波加速系に関する技術課題として以下のものが挙げられた。

- (ア) 高調波 (HOM) が低く抑制でき、その上でスペース効率の高い新型コンパクト高周波空洞の開発
- (イ) 高周波加速系の中のクライストロン、モジュレータ、サイラトロン等のハイパワー機器の固体素子化。ただし、固体化しなくとも性能の確保は可能である。運転の信頼性並びに電力効率向上等は、建設後の高度化で対応可能である。

一方で、超伝導技術の採用は、以下の点で現時点では見送るべきであるという意見が得られた。超伝導空洞技術は、未だに 2.2 K の液体 He の超流動状態を用いている。これは現状のニオブを用いる空洞製作技術が律速している。このため、超伝導空洞技術を CW のリング型光源に入れてもエネルギー消費を低減できないと考えられている。超伝導磁石に関しては、高温超伝導体を用いることが可能であり、He を用いない小型の冷凍機で対応が可能かも知れないが、(i) 冷凍機の維持管理の問題、(ii) クライオスタットと磁石の小型化とが何処まで整合できるかが未知数であるとみられている。

7) アンジュレータ

技術課題：短周期 (狭ギャップ) アンジュレータにおけるビーム安定技術の開発

短周期 (狭ギャップ) アンジュレータにおけるビーム安定技術の開発が技術課題として挙げられた。真空封止アンジュレータでは周期長が 15 mm 程度まで短周期化され、低エネルギーでもカバーできる X 線エネルギー領域が広がっている。冷却して磁場強度を高める等の磁石技術も進歩し、今後もアンジュレータの進化は続くと考えられている。次世代光源リングにおいては、このリングで利用可能な高磁場精度を備えた短周期 (狭ギャップ) 真空封止アンジュレータの開発が不可欠であり、最新技術の動向を把握し、取り入れられる体制のもとで、開発を進めていく必要があるという意見が得られた。

VUV アンジュレータについての意見も得られた。国内には UVSOR や HiSOR 等の低エネルギー施設が既にあるため、SOLEIL のように無理をして VUV アンジュレータを導入できるように加速器の設計を行う必要はない、という意見があった。SOLEIL で VUV アンジュレータが導入されたのは、フランスの VUV サイエンスを SOLEIL で引き継がないといけないという SOLEIL が例外的に有する国内事情によるものであるといわれている。台湾の TPS でも当初 VUV アンジュレータの希望があったが、低エネルギーリングの TLS を使い続けることになり、VUV アンジュレータの設置は行わないことになった。MAX-IV でも 3 GeV の主リング以外に低エネルギーの小さなリングを同時に建設し、VUV サイエンスは分離されている。米国においては、アメリカ東海岸の NSLS-II では低エネルギーリングは諦められ、3 GeV リングのみになったため、VUV 領域や赤外領域は低エネルギーリングの西海岸の ALS が受け持っている。

一方で、VUV 領域のサイエンスは放射光に限らず、レーザー光源の利用も進んでいる。短波長である軟 X 線や硬 X 線に比べて集光が容易であるため、輝度の点で次世代光源でなければできないサイエンスはなく、次世代光源は集光が難しい軟 X 線や硬 X 線で利用して初めて意味を持つという意見が得られた。

8) ビーム診断・ビーム制御系

技術課題：安定なビーム周回を可能にする高速・精密ビーム診断技術の開発

技術課題：安定なビーム周回を可能にする高速・精密ビーム制御技術の開発

安定なビーム周回を可能にする高速・精密ビーム診断技術、および制御技術の開発が技術課題として挙げられた。不安定性を抑制する高速フィードバック、コミッショニングを容易にするビーム診断系、ビームモニターおよびビーム調整手法の開発が必要であるというコメントが得られた。

9) 加速器制御系

技術課題：安定して使いやすい制御系

安定して使いやすい制御系が技術課題として挙げられた。データベースおよび施設内ネットワークのあるべき姿の検討が必要である。

13) 冷却・受電・変電設備

技術課題：先端環境技術の導入による電力コストの削減

先端環境技術の導入による電力コストの削減が課題として挙げられた。省エネルギー化による運転コストの低減は長期的な運用に向けて経済的に重要であるのみならず社会的な要請でもある

ため、ビームエネルギー・周長等加速器の基本パラメータ、入射器の選択等の施設の基本設計において省エネルギー化を重視するとともに、電磁石系等のハードウェア設計における省エネルギー化、廃熱利用、自家発電設備や蓄電設備の利用による電力の低コスト化等、民間企業の経験も積極的に取り入れて、幅広い視点で検討するべきであるという意見が得られた。

14) その他

具体的な技術課題ではないが、次のような参考コメントがあった。

(ア) 先端複数光源体制への移行が必要

日本では現状 SPring-8 が唯一の先端放射光光源である。しかし、1 施設体制では軟 X 線向き施設から硬 X 線向き施設に渡る広大なスペクトル領域を同じ先端性でカバーできない。ゆえに、早期に先端複数光源体制へ移行するべきである。

(イ) 総合的な開発計画を議論することが必要

システム設計はユニークではなく、同じ設計性能実現へのアプローチは多数存在するため、個別の加速器コンポーネントの具体的な開発計画を議論することはあまり意味がない。具体的設計は、境界条件と目的関数の重み付けで決まってくるのであり、アメリカやヨーロッパと日本では、それぞれの事情で異なってくる。例えば、SASE-XFEL のシステム設計が、日本 (SACLA) とヨーロッパ (E-XFEL) とアメリカ (LCLS と LCLS-II) で三者三様であるのは、設計思想の違いを反映した結果である。どのアプローチが正解かを見極めるのは困難である。

1-3-2. 固有技術課題ヒアリング調査結果

以下では、【表 1-1】に①硬 X 線向き放射光施設、②軟 X 線向き放射光施設それぞれについて挙げられた調査項目について、ヒアリングによって明らかになった技術課題、およびそれに関連する参考コメント等を、(1) 既存の放射光施設の運営・設置に関して専門的な知見を有する者、(2) 放射光施設に係る設計・建設等に関わる潜在的メーカー層、(3) 大学・産業界等の研究者等の潜在的ユーザー層、(4) 国際動向を把握している海外施設の責任者、若しくは海外施設の諮問委員会経験者の 4 つのカテゴリーに分けてまとめる。固有技術課題に関するヒアリング調査結果の要点を【表 1-4】にまとめる。なお、以下には、コメントがあった調査項目のみ記載してある。

(1) 既存の放射光施設の運営・設置に関して専門的な知見を有する者

①硬 X 線向き放射光施設

1) 超伝導磁石（永久磁石）の利用の是非

技術課題：永久磁石の磁場制御

技術課題：永久磁石の経時変化対策

永久磁石を取り入れたガイド磁場の是非について、磁場調整機構の開発と減磁への対策が技術課題として挙げられた。解決策として、磁束シャントによる調整機構やサマリウムコバルト磁石の採用が提案された。

一方で、超伝導磁石の利用の是非については、具体的な技術課題は挙げられなかったが、施設の運営を考える立場からは、時期尚早と言う考え方が支配的であるというコメントが得られた。その理由の一つは、1 台の超伝導磁石のクエンチングにより、光源にぶら下がっている全部のビームラインの利用が超伝導磁石の復旧までできないことである。実績として、超伝導磁石は年に一回程度のクエンチングを起こしており、新光源に採用される超伝導磁石の台数が増えれば増えるほど、クエンチングで利用がストップする確率が大きくなることから、安定性の高い光源とは言えないとみられている。二つ目の理由として、同時期に超伝導線材や液体ヘリウムを大量に消費する中央リニア新幹線の建設が始まっており、これに伴うコストの増大や中央リニア新幹線よりも消費量の少ない放射光施設に対して液体ヘリウムが安定的な供給が困難となることが懸念されている。よって、超伝導技術を使う機器は、利用における技術的革新を導く必要最小限にとどめるべきであろうとの意見があった。

②軟 X 線向き放射光施設

6) UV 領域用長周期アンジュレータによるビーム及びビームライン光学素子への影響

技術課題：APPLE 型デバイスの動的多極磁場誘起によるビーム変動の補正

APPLE 型アンジュレータの動的多極磁場誘起によるビーム変動の補正が技術課題として挙げられた。APPLE 型デバイスの動的多極磁場誘起によるビームへの影響が懸案されている。磁極形状による静的補正と、多極コイルによる動的補正により解決可能と考えられている。国際的な動向として、補正がすでに各施設で試みられている。

なお、【表 1-2】に挙げられた固有技術課題に加えて、①硬 X 線向き放射光施設、②軟 X 線向き放射光施設の特性を活かす技術課題として、以下の A) 画像検出器、B) アンジュレータが重要であると提起され、次のようなコメントが得られた。

A) 画像検出器

技術課題（①硬 X 線向き放射光施設）：4-30 keV 用硬 X 線高速画像検出器の開発

4-30 keV 用硬 X 線高速画像検出器の開発が技術課題である。近年の放射光ビームラインでは、XFEL、リング型放射光源、硬 X 線、軟 X 線を問わず、画像検出器の利用が一般的となっている。背景として、半導体画像検出器の技術的發展により、高品質なデータ取得が可能となったことが挙げられる。特に硬 X 線ビームラインでは、画像検出器の導入如何にビームラインの競争力が大きく左右される状況になっている。半導体画像検出器の性能向上は、集積回路技術の進歩と同期して加速している。このことから画像検出器がトータルの実験精度・効率、実施可能な実験スキームに大きな影響を与えるとみられている。今後も先端画像検出器への需要が増大していく。このうち、4-30 keV までの領域をカバーするシリコンをセンサとする硬 X 線高速画像検出器は、速やかに開発に着手すべきであるとの意見があった。

日本国内で導入されている画像検出器は、例外的事例を除いて商用化された検出器がほとんどである。欧米では研究所の連携によって開発された画像検出器が多数あるが、国内での認知度が低く、入手も容易ではない。

日本国内で導入されている半導体画像検出器のほとんどは、スイスの Paul Scherrer Institute (PSI) が開発した検出器群を PSI からスピンアウトしたベンチャー企業が商品化した製品である。イギリス・ラザフォード研究所、ドイツ DESY や Soleil、アメリカ SLAC 国立研究所もベンチャー企業を育成しつつ、開発した技術を商用化によって普及を図る方向で開発が進められている。

国内のビームライン高度化計画では、海外の検出器の導入が中核に据えられている事例が多く見られる。しかし、海外（主にヨーロッパ）の主要放射光施設で開発された技術を商用化したものであるため、既に海外で利用成果が上がっている測定方法を導入する形となり、ビームラインの国際的な基盤的競争力の低下を招いているとみられている。また、研究機関で開発された検出器の性能を抑制したものが商用となっている例もある。更に今後は検出器の開発サイクルが短く

なると想定される。近い将来、より短期間、具体的には導入後 3 年程度で陳腐化するという事態もありうるという意見もあった。

画像検出器には多額の導入費用が必要となるため、国全体で見たときに無視できない投資が行われていることになる。今後はこの費用が増大していくと予想されている。現在のようにビームライン建設時に商用検出器の導入費用をその都度手当するだけでは、世界最先端の競争力を得られないことが予想され、国レベルの戦略を議論し施設間でその戦略を共有しつつ、バランスのとれた形で検出器開発を実施することが喫緊の課題であるという意見が得られた。

画像検出器開発においては、(A) センサおよび半導体集積回路開発、電子機器モジュール開発、(B) システム構築、(C) ソフトウェア開発、(D) 実験目的に合わせた最適化、(E) ビームライン機器との連携を含むインテグレーションの 5 つの開発分野が存在する。

(A)、(B)については、民間企業の有する秘密の保持や各機関の知的財産の管理も行う必要があるため、多数の機関が参画することは現実的でないと思われる。拠点研究機関の開発チームに他機関の研究者を客員研究員等として参加させる等の方法が最適であり、拠点研究機関は、画像検出器の開発とその供用の経験を有する機関を選定するのが妥当であると考えられている。

(C)、(D)、(E)については、開発成果を速やかかつ効率的に波及させるため、およびニーズの開発計画への迅速なフィードバックを実現するため、連携組織を国内外横断的に設立すべきであるとの意見が得られた。国内施設のなかから中核的な機関を 1~2 選定し、国内の開発力の層の厚みを増す施策とすべきであるとの意見もあった。

さらに留意点として、次のコメントがあった。

ア) 生産技術

画像検出器は、一つの検出システムに 10-100 万以上の画素を持つ。従って、原理的な検出方式の研究だけでは実用に耐える検出器の実現は到底不可能で、多数の画素を欠陥なく製造する生産技術までも含めた総合的な開発マネジメントが必要である。実際産業界の電子機器開発において、技術開発の中核に生産技術が位置することからも、この重要性は明らかであろう。しかるに、これまでの国内の開発実施例では、生産技術の重要性に対する認識が開発リーダー/施設マネジメント層に欠落しているため、試作品の開発に成功するものの実用検出器の製造に至らない例がしばしば見られる。放射光分野の研究者には、これら生産技術に明るい人材はいないので、開発チーム編成時や開発の評価時に生産技術の考慮が必要である。

イ) 周辺分野と人材確保

アメリカ・ヨーロッパでは、素粒子物理実験用の半導体画像検出器コミュニティが人材供給源として有効に機能している。一方、日本の素粒子物理学実験分野のうち、半導体画像検出器分野のコミュニティは残念ながら小さい。従って、素粒子物理学分野との有機的な連携を進めつつも、放射光分野としての自律的な人材戦略が必要である。拠点研究機関をハブとし大学、国内施設を含めた有機的な連携網を作ることが重要である。

幸い、民生用の半導体画像センサに関しては日本の競争力は高い。工学系の大学・研究機関および産業界の参画を積極的に進めるべきである。

ウ) 放射光用画像検出器の種別

本稿で画像検出器とは二次元画像取得が可能な検出器を指す。10 kHz を超える高速読みだしは 1 次元検出器が、光子エネルギー分解能を有する検出器は数 10 個の素子を備えた検出器が利用されている。これら検出器群も今後は二次元化されていくと考えられ、先端画像検出器の導入がより多くの分野で共通の課題となっていくと考えられる。

X線波長で大別すると、おおよそ 4-30 keV 程度まではシリコンをセンサとする技術で対応できる。このうち、4 keV 以下とそれ以上で必要となる技術に差がある。30 keV のエネルギー領域では、重元素を含む半導体 (CdTe 等) は比較的大きな画素が必要な散乱実験に、シンチレーターを用いる間接検出型は高空間分解能が必要な実空間撮像用途に適していると考えられている。これ以外に高光子エネルギー分解能を持つ超伝導検出器もある。

エ) 喫緊に開発すべき検出器

4-30 keV までの領域をカバーするシリコンをセンサとする硬 X線用高速画像検出器の開発は喫緊に取り組むべき課題であるという意見があった。現在は光子計数型が用いられているが、検出器の飽和を避けるために X線ビームを弱くして測定している事例も多い。今後、光源が高度化されると多くの実験で光子計数型では対応できなくなることが確実と想定される。一方、積分型の検出器は高フレームレート動作により飽和を原理的に回避できる。今後の光源高度化にも見据え、積分型でノイズフリーの硬 X線高速画像検出器を喫緊に実施する必要がある。

オ) 重点的に開発すべき検出器

・ 硬 X線用検出器 (30 keV 以上)

30 keV 以上の光子エネルギーについては硬 X線放射光施設で特に課題となるので、硬 X線放射光施設の開発プロジェクトとして進めるべきである。

・ 軟 X線用検出器 (4 keV 以下)

民生用 CMOS センサの技術が援用できる。しかるべき民間企業と、国内外の施設の連携の枠組みで取組を進めるべきである。

カ) 長期的に開発が必要な検出器

超伝導検出器については潜在的可能性が高いが、課題も多い。緊急性は高くないが、長期的な取り組み方を検討すべきである。他の分野でも注目されている技術であるので、内外の研究機関と連携して着実な開発を図るのが妥当と考える。

B) アンジュレータ

技術課題：短周期（狭ギャップ）アンジュレータにおけるビーム安定技術の開発

技術課題：アンジュレータ磁石の強力化

技術課題（②軟X線向き放射光施設）：偏光可変型アンジュレータによる軌道変動問題の解決

技術課題（②軟X線向き放射光施設）：軟X線移相子の実用化

(ア) 短周期アンジュレータ

短周期アンジュレータについては、狭ギャップ化に対応可能な位置安定性の確保が技術課題として挙げられた。周期長 20 mm 以下の実用的アンジュレータを製作する技術はすでに SACLA/SPring-8 や KEK-PF で実現されている。次の段階として、次世代放射光施設に適した形へ標準化並びに低コスト化し、大量生産に適した構造や製作プロセスへと改良されていくとみられている。例えば、次世代放射光施設では入射ビームの振幅が小さく、GFR (Good Field Region) の許容値を緩和できると考えられている。この場合、磁石の磁極幅を狭くすることで磁石吸引力を大幅に軽減することが可能となり、これはアンジュレータの性能に直結する位相誤差のギャップ依存性の軽減につながる。一方で、次世代放射光施設では光ビームサイズが小さいため、その位置安定性の確保が重要な課題であり、このためには、アンジュレータのギャップ開閉に伴う磁場積分変動によって生ずる COD を補正するための精度の向上が必須となるとみられている。例えば、補正電磁石電源の分解能向上や、アンジュレータ磁場積分補正手法の高度化等が要素技術として挙げられた。

一方、周期長が 10mm 以下のアンジュレータは、実用光源という意味において、未だ実現されていない。今後これを実用化するためには、低ギャップ運転を可能にするための対策や、磁石自体の高性能化が必要であると考えられている。クライオアンジュレータ、即ち永久磁石の冷却による高性能化はその一つの方向性であり、今後、さらなる普及が見込まれている。別の方向性としては、APS が推進している超伝導アンジュレータを挙げられたが、現状で達成されている性能・仕様や運転経費等を考慮すると、当分の間はクライオアンジュレータを含めた永久磁石型アンジュレータに利があるとみられている。ただし、クライオアンジュレータでは冷却系にコストがかかるので、例えば分光器の冷却系と一体化する形で、施設のインフラとして整備すべきであるという意見があった。

(イ) 長周期アンジュレータ

技術課題として、偏光可変型アンジュレータによる軌道変動問題の解決が挙げられた。高い偏向定数の適用に伴う、光学系に加わる熱負荷の問題はすでに解決されている。例えば SPring-8 では円偏光をヘリカルアンジュレータ、直線偏光を 8 の字アンジュレータで供給することで、軸上パワー密度が大幅に軽減されている。さらに最近ではこれらの切り替えを可能にする新型のアンジュレータ等も提案されており、光源選択という意味では特に困難な課題は存在しないとみられている。今後は、高速の偏光切替をどのように実現するかが課題となる。例えば、現在 SPring-8 や KEK-PF で実現されているキッカー磁石による高速円偏光切替手法は、(i) 光源点が異なる、

(ii) COD 変動を誘起しやすい、等の点において不利であるとみられている。これらを克服するための手段や、あるいは抜本的に異なる手法の開発が今後の課題とみられている。

一方で、軟X線移相子の実用化も技術課題として挙げられた。アンジュレータによる偏光切替ではなく、硬X線領域におけるダイヤモンド結晶の移相子のように、軟X線においても多層膜を用いた移相子の実用化が、高品質ビーム維持の観点から、今後重要になるであろう、という意見があった。

(2) 放射光施設に係る設計・建設等に関わる潜在的メーカー層

①硬X線向き放射光施設

1) 超伝導磁石（永久磁石）の利用の是非

技術課題： アンジュレータ永久磁石の強力化（クライオアンジュレータの実用開発）

アンジュレータの永久磁石の強力化が技術課題として挙げられた。放射光照射による熱入力等の実用条件を考慮すると、超伝導アンジュレータよりも、永久磁石方式に分がある。磁石を冷却することにより磁場強度を増大させる低温（クライオ）アンジュレータの実用開発が必要である、という意見が得られた。

②軟X線向き放射光施設

4) 高周波加速空洞の加速周波数の選択

具体的な技術課題は挙げられなかったが、国内の放射光システムで多くの運転実績を持つ 500 MHz 帯の高周波加速システム採用が好ましいという意見があった。

その他)

技術課題： アンジュレータの高次高調波利用のための磁場の超均一制御

軟X線向き施設でも硬X線生成が要望されており、それに応えるためのアンジュレータの開発が技術課題として挙げられた。硬X線発生アンジュレータは7次から11次高調波を利用する必要があり、極限に近い磁場均一度が必要になるとみられている。

(3) 大学・産業界等の研究者等の潜在的ユーザー層

①硬X線向き放射光施設

1) 超伝導磁石（永久磁石）の利用の是非

技術課題：永久磁石の経時変化対策

永久磁石の経時変化（温度履歴、放射線損傷等）の問題の解決が技術課題として挙げられた。一方で、超伝導磁石は将来的なヘリウム供給リスクを十分に検討する必要がある、超伝導磁石の開発・実用化は早期に検討・実現すべきであるとの意見があった。

3) 熱負荷対策

具体的な技術課題は挙げられなかったが、早期に解決すべき問題である、という意見があった。

②軟X線向き放射光施設

4) 高周波加速空洞の加速周波数の選択

具体的な技術課題は挙げられなかったが、早期に検討すべき問題であるとの意見があった。

5) UV 領域用長周期アンジュレータによるビーム及びビームライン光学素子への影響

具体的な技術課題は挙げられなかったが、早期に検討すべき問題であるとの意見があった。

(4) 国際動向を把握している海外施設の責任者、若しくは海外施設の諮問委員会経験者

①硬X線向き放射光施設

1) 超伝導磁石（永久磁石）の利用の是非

技術課題：永久磁石の低コスト化

技術課題：永久磁石の経時変化対策

技術課題：永久磁石の磁場制御

永久磁石の低コスト化、減磁対策、磁場均一性確保が技術課題として挙げられた。超伝導磁石の利用は、十分に時間をかけて解決すべき課題であるとみられている。

3) 熱負荷対策

技術課題：小口径チャンバーのビームによる発熱対策

小口径チャンバーではビームによる発熱対策が課題として挙げられた。

②軟X線向き放射光施設

4) 高周波加速空洞の加速周波数の選択

具体的な技術課題は挙げられなかったが、早期に検討すべき課題であるとの意見があった。

5) 高調波高周波空洞によるビーム寿命の確保

具体的な技術課題は挙げられなかったが、次のような参考コメントがあった。

国内では UVSOR で高調波高周波空洞が定常的に利用されている。海外も含め、定常的に利用されている例は多くないが、積極的に検討すべきであり、主加速空洞の基本周波数の選択等、高周波加速系全体の設計の中で検討を進めるのがよい。可能であれば既存の施設に導入し試験的に運用してみるのがよい。

6) UV 領域用長周期アンジュレータによるビーム及びビームライン光学素子への影響

技術課題：APPLE 型デバイスの動的多極磁場誘起によるビーム変動の補正

APPLE 型デバイスの動的多極磁場誘起によるビーム変動の補正が課題として挙げられた。特に APPLE-II 型等可変偏光型アンジュレータで大きな影響があることが知られている。アンジュレータ側の磁気回路設計やシム調整等で低減できる可能性が示されており、これらの動向を調査する必要がある。

また、高エネルギーリングで無理に長波長光を発生することは避けるべきである。UV 領域は低エネルギーリング（ $\sim 1\text{GeV}$ ）を使用すべきであるという意見も得られた。

【表 1-3】 カテゴリー別にまとめた共通技術課題（および参考コメント）の要点（1 ページ/3 ページ）

	(1) 既存施設	(2) 潜在メーカー	(3) 潜在ユーザー	(4) 国際動向
1) ラティス設計	<ul style="list-style-type: none"> ・ 広いビーム安定領域の確保 [補足] <ul style="list-style-type: none"> ・ HMBA（Hybrid Multi-Bend Achromat）、あるいはその改良型の開発が必要。 	[参考コメント] ラティス設計を中核の課題に設定すべき。		<ul style="list-style-type: none"> ・ 低エミッタンスビームを実現する蓄積リングのコンパクト化
2) ビーム入射系	<ul style="list-style-type: none"> ・ 低エミッタンスビームの高精度入射 [補足] <ul style="list-style-type: none"> ・ トップアップ運転時に蓄積ビームの変動が小さい、常時入射可能な入射器が必要。 	[参考コメント] <ul style="list-style-type: none"> ・ SACLA で確立された高安定・高精度ライナック技術の活用が望まれる。 		
3) 電磁石系	<ul style="list-style-type: none"> ・ 磁石システムの高精度化 ・ 一部に永久磁石を利用した磁石システムの開発 [参考コメント] <ul style="list-style-type: none"> ・ 永久磁石の採用は実績が不十分で時期尚早。 ・ 超伝導化はリスク大。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 磁石システムの高精度化 ・ 磁石システムのコンパクト化 ・ 長期メンテナンスフリー運転可能な超伝導磁石の開発 		<ul style="list-style-type: none"> ・ 磁石システムの高精度化 ・ 磁石システムのコンパクト化
4) アライメント系		<ul style="list-style-type: none"> ・ 多数の磁石の高精度設置技術の確立 		<ul style="list-style-type: none"> ・ 磁石の精密な位置合わせ
5) 真空系	<ul style="list-style-type: none"> ・ 小口径チャンバーの超高真空排気技術の確立 			<ul style="list-style-type: none"> ・ 小口径チャンバーの超高真空排気技術の確立

【表 1-3】 カテゴリー別にまとめた共通技術課題（および参考コメント）の要点（2 ページ/3 ページ）

	(1) 既存施設	(2) 潜在メーカー	(3) 潜在ユーザー	(4) 国際動向
6) 高周波加速系		<ul style="list-style-type: none"> ・高調波（HOM）抑制型コンパクト高周波空洞の実用化 ・高安定運転・省エネ・省スペースのための高出力半導体素子の開発 		<ul style="list-style-type: none"> ・高調波（HOM）抑制型コンパクト高周波空洞の開発 ・高安定運転のための高出力半導体素子の開発
7) アンジュレータ	<ul style="list-style-type: none"> ・偏光可変型アンジュレータによる軌道変動問題の解決 ・短周期（狭ギャップ）アンジュレータにおけるビーム安定技術の開発 ・アンジュレータ磁石の強化 			<ul style="list-style-type: none"> ・短周期（狭ギャップ）アンジュレータにおけるビーム安定技術の開発
8) ビーム診断・ビーム制御系	<ul style="list-style-type: none"> ・安定なビーム周回を可能にする高速・精密ビーム診断技術の開発 ・安定なビーム周回を可能にする高速・精密ビーム制御技術の開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・安定なビーム周回を可能にする高速・精密ビーム診断技術の開発 ・安定なビーム周回を可能にする高速・精密ビーム制御技術の開発 		<ul style="list-style-type: none"> ・安定なビーム周回を可能にする高速・精密ビーム診断技術の開発 ・安定なビーム周回を可能にする高速・精密ビーム制御技術の開発
9) 加速器制御系		<ul style="list-style-type: none"> ・安定して使いやすい制御系開発 		<ul style="list-style-type: none"> ・安定して使いやすい制御系開発
10) 光学系	<ul style="list-style-type: none"> ・光学素子の高熱負荷に対する性能の維持 ・光学素子の冷却に伴う振動の低減 ・10 nm 以下の空間分解能を実現する光学素子の開発 			
11) 利用系	<ul style="list-style-type: none"> ・計測のオートメーション化・共通化 	<ul style="list-style-type: none"> ・計測のオートメーション化 	<ul style="list-style-type: none"> ・計測のオートメーション化・共通化 	

【表 1-3】 カテゴリー別にまとめた共通技術課題（および参考コメント）の要点（3 ページ/3 ページ）

	(1) 既存施設	(2) 潜在メーカー	(3) 潜在ユーザー	(4) 国際動向
12) 建物		<ul style="list-style-type: none"> ・ 建物の振動対策 <p>[参考コメント]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 地盤の振動を調査し、振動の少ない立地を選ぶか、コストはかかるが、人工岩盤などを設置すべき。 	<p>[参考コメント]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ マルチプローブ実験に対応できる付帯設備が必要。 	
13) 冷却・受電・変電施設		<ul style="list-style-type: none"> ・ 先端環境技術の導入による電力コストの削減 ・ 高周波電力効率の改善、維持コスト削減のための高出力半導体高周波電源等の開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 先端環境技術の導入による電力コストの削減 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 先端環境技術の導入による電力コストの削減
14) その他	<p>[参考コメント]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 設計段階からの放射線管理方針の徹底が検討課題。 		<ul style="list-style-type: none"> ・ 高速読み出し可能な二次元分光分析検出器の開発 <p>[参考コメント]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 実験室系で多用されている実験手段との融合が必要。 ・ 出口志向の計測技術、エンドステーションデザインの検討が必要。 	<p>[参考コメント]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 早期に先端 2 光源（以上）体制へ移行するべき。 ・ 総合的な開発計画を議論するべき。

【表 1-4】 カテゴリー別にまとめた固有技術課題（および参考コメント）の要点（1 ページ/2 ページ）

硬X線向き施設	(1) 既存施設	(2) 潜在メーカー	(3) 潜在ユーザー	(4) 国際動向
1) 超伝導磁石（永久磁石）の利用の是非	<ul style="list-style-type: none"> ・永久磁石の磁場制御 ・永久磁石の経時変化対策 <p>[参考コメント]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・超伝導技術を使う機器は、必要最小限にとどめるべき。 	<ul style="list-style-type: none"> ・アンジュレータ永久磁石の強化（クライオアンジュレータの実用開発） <p>[参考コメント]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・熱負荷等実用条件を考慮すると超伝導アンジュレータよりも永久磁石方式に分がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・永久磁石の経時変化対策 <p>[参考コメント]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・超伝導磁石は、将来的なヘリウムの供給リスクを十分に検討する必要あり。 	<ul style="list-style-type: none"> ・永久磁石の低コスト化 ・永久磁石の経時変化対策 ・永久磁石の磁場制御 <p>[参考コメント]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・超伝導は十分に時間をかけて解決すべき課題である。
2) 高排気速度を持つ真空槽とフロントエンドチャンネルの取り合い				<p>[参考コメント]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・加速器側の真空槽ではフロントエンドに NEG ポンプを設置するべき。 ・早期に実現すべき課題。
3) 熱負荷対策				<ul style="list-style-type: none"> ・小口径チャンバーのビームによる発熱対策
硬X線向き施設 その他	<ul style="list-style-type: none"> ・4-30 keV の領域をカバーする硬X線高速画像検出器の開発 ・短周期（狭ギャップ）アンジュレータにおけるビーム安定技術の開発 ・アンジュレータ磁石の強化 			

【表 1-4】 カテゴリー別にまとめた固有技術課題（および参考コメント）の要点（2 ページ/2 ページ）

軟X線向き施設	(1) 既存施設	(2) 潜在メーカー	(3) 潜在ユーザー	(4) 国際動向
4) 高周波加速空洞の加速周波数の選択		[参考コメント] ・国内の放射光システムで多くの運転実績を持つ 500 MHz 帯の高周波加速システム採用が好ましい	[参考コメント] ・早期に検討すべき	
5) 高調波高周波空洞によるビーム寿命の確保				[参考コメント] ・UVSOR で定常的に利用されているが利用例は多くない。 ・基本周波数選択等高周波加速器全体の設計の中で検討すべき。
6) UV 領域用長周期アンジュレータによるビーム及びビームライン光学素子への影響	・APPLE 型デバイスの動的多極磁場誘起によるビーム変動の補正技術			・APPLE 型デバイスの動的多極磁場誘起によるビーム変動の補正技術 [参考コメント] ・UV 領域は低エネルギーリング（～1 GeV）を使用すべき。
軟X線向き施設 その他	・偏光可変型アンジュレータによる軌道変動問題の解決 ・軟X線移相子の実用化 ・短周期（狭ギャップ）アンジュレータにおけるビーム安定技術の開発 ・アンジュレータ磁石の強化	アンジュレータの高次高調波利用のための磁場の超均一制御	・10 nm 以下の空間分解能を実現する光学素子の開発	

1-4. 整備・運用コスト低減に資する方策

本調査では、コスト低減に関する意見も散見された。施設の整備・運用コスト低減の方策について検討することは、第二部において施設整備に向けた具体的なシナリオを議論する上で有益である。以下では、本調査で得られた、整備・運用コスト低減に資する方策を、1-4-1. 整備に関するもの、1-4-2. 運用に関するものに整理し、さらにそれぞれを人的コスト、物的コストに分けてまとめる。また【表 1-5】に、各コストを低減する方策についてまとめる。

1-4-1. 整備に関するもの

1-4-1-1. 人的コスト

- ・長期的な人材確保戦略 [(1) 既存施設]
- ・人材育成プログラムの構築、民間企業との交流 [(4) 国際動向]

人的コスト低減の方策として、建設時に、後の余剰となるスタッフを抱えないための戦略の検討、設計・建設、施設運用のフェーズ毎の適正な質と量を確保するための戦略の検討、メーカーと放射光施設間の人材環流促進のスキームの構築等が挙げられた。設計・建設から施設運用まで、それに関わるスタッフは要求される能力や資質が変わっていくものであり、運用時に設計・建設、研究開発スタッフを過剰に擁するのは維持コストの増大につながる。フェーズ毎にメーカーや放射光施設間でのスタッフの行き来をよく検討する必要がある等の意見があった。

専任スタッフを一度に増やすと、将来に多くの問題を抱えることになる例として、NSRRC（台湾）においては、専任技術者が 9 割を占めていて、人件費の問題が発生していることが知られている。海外ではあまりないが、日本独特のメーカー技術者との協力関係をうまく利用することが重要との意見もあった。

複数のメーカーに加速器技術を残すスキームを技術協力の形に落とし込む戦略の検討、建設時を利用した加速器や光源関連技術を継承する効率的な人材育成プログラムの構築といった方策も挙げられた。加速器や光源関連技術を将来にきちんと継承できる人材育成を最初から考えておかなければならない。建設期には多くのマンパワーが必要だが、民間に加速器技術を残す意味で複数メーカーとのコラボレーションを熟慮の上構築しておく必要がある等の意見があった。

- ・開発拠点の集中化 [(4) 国際動向]

人的コスト低減の方策として、開発拠点の集中化が挙げられた。光源開発の方向性は現時点ではマルチバンド化に定まっているとみられており、開発課題はエネルギーの大小には依らないため、開発体制は開発リソースを有する 1 拠点で行い、その成果を全国で共有する体制を取るのが効率的であるという意見があった。

これまでは、開発はプロジェクトの主体となる研究機関が個別に実施してきた。昨今、加速器分野の人的リソースがかなり小さく確保が難しくなっていることもあり、研究開発成果を分野全体で共有していくことの重要性が高まっている。よって、一般性のある開発案件は国家的課題として取り組んでいくことも視野に入れて検討する必要があるという意見もあった。

加速器工学の分野で汎用性があり、次世代放射光施設に向けた開発課題としては、

- (ア) 永久磁石を用いた偏向磁石システムの開発
- (イ) 高精度小振幅のビーム入射（出射）システム（入射器＋入射方式等）の開発
- (ウ) 高精度・高効率・高速電源システムの開発
- (エ) クライストロン、モジュレータ、サイラトロンの固体化
- (オ) 高精度アライメント技術の開発

等が挙げられた。

1-4-1-2. 物的コスト（建設コスト）

1) ラティス設計

・蓄積リングのコンパクト化 [(4) 国際動向]

整備コスト削減の方策として、蓄積リングのコンパクト化が挙げられた。加速器は巨額の経費を必要とするが、経済性を度外視して非常に巨大なリングをつくれば、構成機器もゆつたりと設置できるため、従来技術でもほぼ問題なく、低エミッタンス化が実現できるとみられている。しかし、低エミッタンスリングであれば不必要にビームパイプを大きくする必要はなく、電磁石等もコンパクトになるため、コストや消費電力の削減に繋がる。しかし、コンパクトネスを追求することは、例えば真空槽の排気速度が大きくとれなくなるために、綿密に考えた設計が不可欠となる。またビーム入射スキームもかなり難しくなるケースが出てくる。またビームの安定周回のために非常に高度な磁場精度が要求され、電磁石の製造スキルやアライメント技術が一段と進化しなくてはならない。したがって、開発要素のほとんどが、個別ではなく、同時に高度化されなければならないという意見があった。

2) ビーム入射系

・入射器としてシンクロトロンを選択 [(2) 潜在メーカー]

整備コスト低減の方策として、入射器にシンクロトロンを選択するという見解があった。建設コスト低減やコンパクト性を追求するならば、蓄積リングの入射器にシンクロトロンを採用する方が有利とみられている。しかしながら、運転経費、および将来の拡張性の観点からはライナックに及ばないとみられている [1-3-1 (2)の2) 参照]。

3) 電磁石系

・磁石システムのコンパクト化 [(1) 既存施設]

整備コスト低減の方策として、磁石システムのコンパクト化が挙げられた。磁石システムの高精度化と合わせて技術課題となっている [1-3-1 (1)の3) 参照]。

・電磁石の量産化 [(2) 潜在メーカー]

整備コスト低減の方策として、電磁石の量産化が挙げられた。リングでの高精度のビームを通すため、磁場を精度よく制御できる電磁石（特に四重極電磁石）が必要とみられている。磁場を発生させる磁極の製作精度、磁極同士の相対的な位置精度（組立後）をよくすること、また、多

極電磁石は真空ダクトを挿入するために、分割、再組立の工程があり、その前後での精度を確保（再現性）できる構造を検討することが必要とみられている。現在、磁極の製作精度 ± 0.03 mmは可能であるが、放射光のように数多くの生産を必要とする場合には、量産化による製作コスト削減が可能であるとみられている。

4) アライメント等

- ・複数電磁石の一体設置・自動補正 [(2) 潜在メーカー]

整備コスト削減の方策として、複数電磁石の一体設置・自動補正が挙げられた。複数電磁石の一体設置による据付誤差許容値の緩和の低減、遠隔微調整機構を備えた架台、高精度磁場測定装置の試作と測定自動化といった方策がありうる。[1-3-1 (2)の4) 参照]。

5) 真空系

- ・真空チャンバーの小口径化と量産化 [(1) 既存施設]

整備コスト削減の方策として、真空チャンバーの小口径化と量産化が挙げられた。真空系は、加速器の磁石システムと一体で組みあがるコンポーネントとして重要であり、小口径真空チャンバーの超高真空排気技術の確立が技術的課題として挙げられたが、コンパクト化に伴い、整備コストの低減が期待されている。また、適切な材料の選択、具体的な設計・製造方法が確立すれば、量産による低コスト化が実現するとみられている [1-3-1 (1)の5) 参照]。

6) 高周波加速系

- ・高調波 (HOM) 抑制型コンパクト高周波空洞の開発・実用化 [(2) 潜在メーカー、(4) 国際動向]

整備コスト低減の方策として、高調波 (HOM) が低く抑制でき、その上でスペース効率の高い新型コンパクト高周波空洞の開発による省スペース化が挙げられた。

7) アンジュレータ

- ・アンジュレータの軽量化・コンパクト化 [(1) 既存施設、(4) 国際動向]

整備コスト削減の方策として、アンジュレータの基本構造や必要機能の見直しによる軽量・コンパクト化が挙げられた。これにより、アンジュレータの製造に必要なコストや期間の大幅な削

減を目指せるとともに、搬入・設置及びアラインメント作業が軽減化できるとみられている [1-3-1 (1)の7)参照]。

9) 加速器制御系

- ・加速器制御系のソフトウェアの改善 [(2) 潜在メーカー]

加速器制御系のソフトウェアの改善が、整備コスト削減の方策として挙げられた。ソフトウェアの改善は、製作時、運転時のコストに直結するとみられている [1-3-1 (2)の9) 参照]。

1-4-2. 運用に関するもの

1-4-2-1. 人的コスト

- ・計測のオートメーション化 [(1) 既存施設、(2) 潜在メーカー、(3) 潜在ユーザー]
- ・課題審査省略によるスループット向上 [(1) 既存施設]

人的コスト削減の方策として、ルーチン測定可能な測定のルーチン化と徹底的な自動化が挙げられた。たとえば、一般的なタンパク質結晶構造解析の測定では、一連の作業において人間の判断が介在するステップをほぼすべて省略できるようになっている。課題内容の善し悪しを判断して課題選定する時間と手間を省き、ルーチン課題として一括自動測定に回した方が、成果のスループットがより向上するという意見があった。同様なケースは、XAFS、X線小角散乱等のルーチン測定においても想定される。ルーチン測定では、学術利用、産業利用の区別なく一律課金を行うことにより、ルーチン測定のための維持費・人件費を確保して、自立的な運営が可能となると期待される。

新しいユーザーによる試験的利用は、新規ユーザー層を開拓するために極めて重要な取組である一方で、人的コストから見ると施設スタッフの重い負担となっている。ルーチン測定に持ち込めればよいが、必ずしもそうならないことが多い。この点についても、より効率的な仕組みを導入することが望ましいとみられている。

一方で、上記の利用とは相容れない、高いインパクトの成果を求める測定では、タンパク質結晶構造解析であっても、十分なビームタイムとスタッフによるサポートが必須であるとみられている。

- ・施設間マネジメント [(1) 既存施設]

人的コスト削減の方策として、施設間マネジメントが挙げられた。国内施設間の協力の枠組みの強化と役割の明確化が具体的な方策として提案された。

- ・PFI方式やDBO方式等による民間活力の利用 [(2) 潜在ユーザー]

総合的な人的コスト削減の方策として、総合的なコストダウンのために施設の設計、建設、維持、運営等全般に民間活力を利用する方式の検討が挙げられた。具体例としては、PFI（プライベート・ファイナンス・イニシアティブ）方式やDBO（デザイン・ビルド・オペレート）方式があり、いずれも民間がSPC（特別目的会社）を設立してすべての事業を行う方法がある。これらの方式では、(i) 設計・建設段階での対外窓口がSPCに一本化され事業体制のスリム化が可能、(ii) SPCが維持、運営段階の効率化を初期から計画して設計、建設を行うことが可能、(iii) SPCが土建工事と加速器施設を一括発注することで効率化により工程短縮とコストダウンが可能、という

メリットが期待される。さらに維持、運営段階では、民間が持つ経営ノウハウを活用して自由度の高い運営方法の提案が期待できると考えられている。

1-4-2-2. 物的コスト

2) ビーム入射系

・入射器としてライナックの選択 [(1) 既存施設、(2) 潜在メーカー]

運転コスト削減の方策として、入射器にライナックを選択するという意見があった。入射器として、ライナック、シンクロトロン of いずれを選択するかという議論があるが、その背景には、X線自由電子レーザー施設の登場とそれに伴うライナックの技術革新がある。しかし、これまで次々と新設整備されてきた、高輝度中型放射光施設においては、全てブースター・シンクロトロンが採用されている。現在コミッショニングを行っている MAX-IV がライナックを採用した最初の施設となる(ニーズ調査参照)。建設コストとコンパクト性ではシンクロトロンが優位であるとみられているが、将来のアップグレード、ランニングコストまで見たトータルコストの観点からは、MAX-IV のようにライナックを採用する方に軍配が上がる。MAX-IV の動向を注視する必要がある(1-3-1 (2)の2) 参照)。

3) 電磁石系

・コンパクト化とバランスの取れた電磁石システムの採用 [(2) 潜在メーカー]

・電磁石への永久磁石の採用 [(4) 国際動向]

運転コスト低減の方策として、電磁石のコイルを大きくして電力を下げる案があるが、これはコンパクト化と相反する課題である。施設の運転コストにおいては、装置の電力が多くを占める。特に電磁石は運転コストを増大させる主な要素の一つである。電磁石の代替として永久磁石が考えられるが、磁場の自由度が少ないため電磁石は必ず必要となる。電磁石の省電力には、コイルを大きくして電力を下げるのが可能だが、コンパクト化と相反するので、省電力とコンパクト化のバランスを取ることが大事と思われる。電磁石においては省電力、コンパクト化のどちらかを優先すればクリア可能となるが、両方の問題を同時に解決することは難しいとみられている。

運転コスト削減の方策として、永久磁石の採用が挙げられた。現状は、アンジュレータ、マルチポールウィグラー以外はほぼ電磁石であるが、永久磁石を取り入れたガイド磁場というアイデアは以前から知られていて、試作も行われている。しかしながら、永久磁石の低コスト化が課題である。また技術的には、磁石の経時変化対策、磁場制御が解決すべき課題として挙げられている[表 1-4 の 1]参照]。

6) 高周波加速系

- ・半導体素子の使用による省エネ化・高安定運転化 [(2) 潜在メーカー、(4) 国際動向]
- ・長寿命デバイス使用による維持コスト削減 [(2) 潜在メーカー]

運転コスト削減の方策として、半導体素子の使用による省エネ化・高安定運転化が挙げられた。運転に伴う消費電力のうち大きな割合を占めているものの一つに、高周波源電力がある。WBG（ワイドバンドギャップ）半導体を適用することで、可用性と運転コスト削減に加えて、小型化が実現可能であるとみられている。MW クラスの電力を半導体増幅器で供給することは、増幅器の高出力化を進めるほかに構成、整備コストの検討も必要と考えられている。

大出力高周波機器には、大電力クライストロンが使われてきたが、クライストロンの品質と信頼性向上の努力が長年行われてきたおかげで、故障や不具合は大きく減少し、寿命も十分長くなった。しかしながら、クライストロンや高電圧電源が、ひとたび故障すると、放射光施設の運転停止、故障部品の交換に数日単位の期間と高額な費用がかかる。高出力半導体を多段合成した SSA（Solid State Amplifier）は、長寿命に加えて、素子の故障がシステムを止めない特長を持つ。高電圧回路がなくメンテナンス性も優れている。次世代放射光施設では、高輝度・高安定での連続運転が求められ、大出力高周波機器の高精度制御・高効率・信頼性実現が技術課題となっている。従来使用していたクライストロンを、SSA と高度な制御システムに置換えることで、その課題解決が可能となるとみられている。課題としては、コスト高・低効率、多段モジュールシステムに固有な連鎖故障回避技術の確立等が挙げられている [1-3-1 (2) の 6)、1-3-1 (4) の 6) 参照]。

- ・高周波加速系への超伝導空洞の採用 [(2) 潜在メーカー]

運転コストを低減する方策として、高周波加速系に超伝導空洞を採用する案もありうるが、メンテナンス費用の増大について考慮すべきという意見があった。超伝導空洞を採用すると、電気代が約 1/3 となるといわれているが、冷凍機等の専用ユーティリティと保守人員が必要となり、コストや所要電力および人件費の増大につながるとみられている。定期的なもの、不定期なものいずれにおいてもメンテナンスのデッドタイムが1週間を超え、さらに人件費も伴う。

9) 加速器制御系

- ・安定して使いやすい加速器制御系の開発 [(2) 潜在メーカー]

安定して使いやすい加速器制御系の開発が、運転コスト削減の方策としても挙げられた。放射光施設を運転・制御するソフトウェアの使い勝手、安定性、拡張性が重要であり、製作時、運転時のコストに直結するとの見解があった [1-3-1 (2) の 9) 参照]。

11) 利用系

- ・計測のオートメーション化・共通化 [(1) 既存施設、(2) 潜在メーカー、(3) 潜在ユーザー]
- ・測定系トラブルに対応しやすいシステム設計 [(3) 潜在ユーザー]

効率的な施設利用のための、計測のオートメーション化、計測システム共通化（各施設共通インターフェイスによる効率化）が運用コスト低減の方策として挙げられた。特に、汎用的な実験と先端的で特殊な実験の両立が体系化されることが、効率的な施設利用の観点から必要との意見があった [1-3-1 (1) の 11) 参照]。

汎用的な測定におけるオートサンプラーの導入は一定の効果があると考えられている。また、測定系のシステムではトラブルは発生するものであるが、ユーザー自身で簡単に復旧できるようなメンテナンスしやすいシステム設計がなされていれば、これも相当に効果が期待できるという意見もあった（ビームタイムロス縮小、管理者の負担軽減）。更に各ビームラインのシステムが、各施設で共通のインターフェイスで構築されていれば、効率化が一層進むとの意見もあった。

13) 冷却・受電・変電設備

- ・先端環境技術の導入 [(2) 潜在メーカー、(3) 潜在ユーザー、(4) 国際動向]

運転コスト削減の方策として、先端環境技術の導入が挙げられた。

欧州を中心に Green Accelerator と呼ばれる環境配慮型加速器の検討が進んでいる。クライストロンの排熱を有効利用している例があり、その有効性について調査が必要であるという意見があった [1-3-1 (2) 13) 参照]。

エネルギーの地産地消という意見もあった。施設サイトの特徴（施設の立地や面積、環境や気候）に合わせたエネルギー生産設備を併設する。例えば、太陽光発電に、放熱源の利用も合わせ、施設全体のエネルギー管理システムを導入する [1-3-1 (2) 13) 参照]。

省エネルギー化による運転コストの低減は長期的な運用に向けて経済的に重要であるのみならず社会的な要請でもある。ビームエネルギー・周長等加速器の基本パラメータ、入射器の選択等の施設の基本設計において省エネルギー化を重視するとともに、電磁石系等のハードウェア設計における省エネルギー化、廃熱利用、自家発電設備や蓄電設備の利用による電力の低コスト化等、民間企業の経験も積極的に取り入れて、幅広い視点で検討すべきである [1-3-1 (4) 13) 参照]

【表 1-5】 コスト低減のための方策 (1 ページ/2 ページ)

		コスト低減のための方策
整備コスト 低減	人的コスト	<ul style="list-style-type: none"> ・ 長期的な人材確保戦略 [(1) 既存施設] ・ 人材育成プログラムの構築、民間企業との交流 [(4) 国際動向] ・ 開発拠点の集中化 [(4) 国際動向] ※ただし成果は全国で共有 ・ PFI (プライベート・ファイナンス・イニシアティブ) 方式や DBO (デザイン・ビルド・オペレート) 方式等による民間活力の利用 [(2) 潜在ユーザー]
	物的コスト	<ul style="list-style-type: none"> ・ 蓄積リングのコンパクト化 [(4) 国際動向] ・ 入射器としてシンクロトロンを選択 [(1) 既存施設] ※ただし、運転コストはライナックが低い。 ・ 磁石システムのコンパクト化 [(1) 既存施設、(4) 国際動向] ・ 電磁石の量産化 [(2) 既存メーカー] ・ 複数電磁石の一体設置・自動補正 [(2) 潜在ユーザー] ・ 真空チャンバーの小口径化と量産化 [(1) 既存施設] ・ 高調波 (HOM) 抑制型高周波空洞の開発・実用化 [(2) 潜在メーカー、(4) 国際動向] ・ アンジュレータの軽量化・コンパクト化 [(1) 既存施設、(4) 国際動向] ・ 総合的なコストダウンのための PFI や DBO 方式による民間活力の利用 [(2) 潜在ユーザー] ・ 加速器制御系のソフトウェアの改善 [(2) 潜在ユーザー]

【表 1-5】 コスト低減のための方策 (2 ページ/2 ページ)

		コスト低減のための方策
運用コスト 低減	人的コスト	<ul style="list-style-type: none"> ・施設間マネジメント [(1) 既存施設] ・計測のオートメーション化 [(1) 既存施設、(2) 潜在メーカー、(3) 潜在ユーザー] ・課題審査省略によるスループット向上 [(1) 既存施設]
	物的コスト	<ul style="list-style-type: none"> ・入射器としてライナックを選択 [(1) 既存施設、(2) 潜在メーカー] ※ただし、整備コストはシンクロトロンが低い。 ・コンパクト化とバランスの取れた電磁石システムの採用 [(2) 潜在メーカー] ・電磁石系への永久磁石の採用 [(4) 国際動向] ※現時点では、製造コストが高いことが課題。 ・半導体素子の使用による省エネ化、高安定運転化 [(2) 潜在メーカー、(4) 国際動向] ・長寿命デバイス使用による維持コスト削減 [(2) 潜在メーカー] ・高周波加速系への超伝導空洞の採用 [(2) 潜在メーカー] ※ただし、メンテナンス費、維持費、保守のための人件費大。 ・計測のオートメーション化・共通化 [(1) 既存施設、(2) 潜在メーカー、(3) 潜在ユーザー] ・測定系トラブルに対応しやすいシステム設計 [(3) 潜在ユーザー] ・先端環境技術の導入 [(2) 潜在メーカー、(3) 潜在ユーザー、(4) 国際動向]

1-5. まとめと分析

1-5-1 技術課題に関するヒアリング調査結果のまとめと分析

本調査を通して、【表 1-3】、【表 1-4】にまとめたような様々な技術課題が浮かび上がった。硬X線向き放射光施設と、軟X線向き放射光に共通する技術課題としては以下が挙げられた。

【共通技術課題】

1) ラティス設計

技術課題 1: 低エミッタンスビームを実現する蓄積リングのコンパクト化

技術課題 2: 広いビーム安定領域の確保

2) ビーム入射系

技術課題 3: 低エミッタンスビームの高精度入射

3) 電磁石系

技術課題 4: 磁石システムの高精度化

技術課題 5: 磁石システムのコンパクト化

技術課題 6: 一部に永久磁石を利用した磁石システムの開発

技術課題 7: 長期メンテナンスフリー運転可能な超伝導磁石の開発

4) アライメント系

技術課題 8: 多数の磁石の高精度設置技術の確立

5) 真空系

技術課題 9: 小口径チャンバーの超高真空排気技術の確立

6) 高周波加速系

技術課題 10: 高調波 (HOM) 抑制型コンパクト高周波空洞の開発・実用化

技術課題 11: 高安定運転・省エネ・省スペースのための高出力半導体素子の開発

7) アンジュレータ

技術課題 12: 偏光可変型アンジュレータによる軌道変動問題の解決

技術課題 13: 短周期（狭ギャップ）アンジュレータにおけるビーム安定技術の開発

8) ビーム診断・ビーム制御系

技術課題 14: 安定なビーム周回を可能にする高速・精密ビーム診断技術の開発

技術課題 15: 安定なビーム周回を可能にする高速・精密ビーム制御技術の開発

9) 加速器制御系

技術課題 16: 安定して使いやすい制御系の開発

10) 光学系

技術課題 17: 光学素子の高熱負荷に対する性能の維持

技術課題 18: 光学素子の冷却に伴う振動の低減

技術課題 19: 10 nm 以下の空間分解能を実現する光学素子の開発

11) 利用系

技術課題 20: 計測のオートメーション化・共通化

12) 建物

技術課題 21: 建物の振動対策

13) 冷却・受電・変電施設

技術課題 22: 先端環境技術の導入による電力コストの削減

14) その他

技術課題 23: 高速読み出し可能な二次元分光分析検出器の開発

また、硬 X 線向き放射光施設と、軟 X 線向き放射光施設に固有の技術課題については、外部アドバイザーの助言による項目検討、ヒアリングを経て、以下の技術課題が挙げられた。

【固有技術課題】

①硬X線向き施設

1) 超伝導磁石（永久磁石）の利用の是非

技術課題 24: 永久磁石の磁場制御

技術課題 25: 永久磁石の経時変化対策

技術課題 26: アンジュレータ永久磁石の強力化

3) 熱負荷対策

技術課題 27: 小口径チャンバーのビームによる発熱対策

その他)

技術課題 28: 硬X線高速画像検出器の開発

②軟X線向き施設

6) UV 領域用長周期アンジュレータによるビーム及びビームライン光学素子への影響

技術課題 29: APPLE 型デバイスの動的多極磁場誘起によるビーム変動の補正

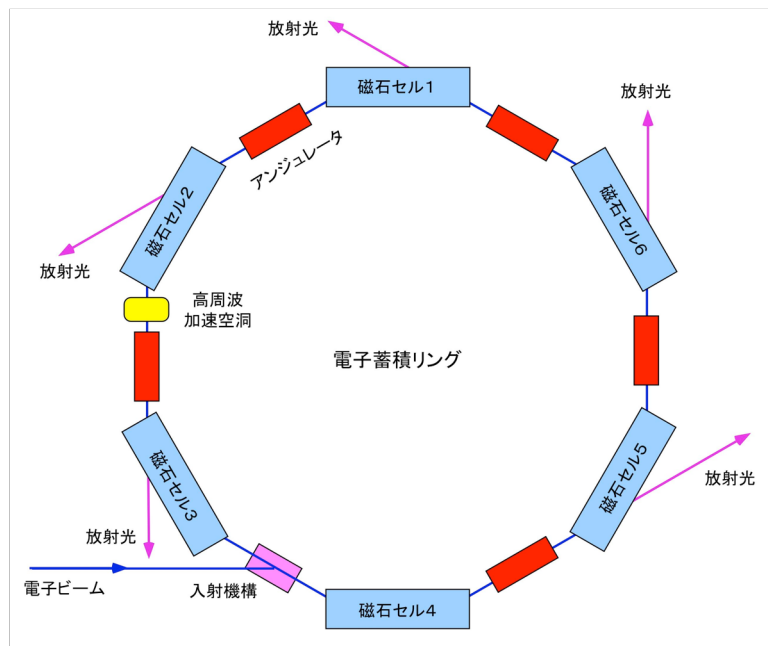
その他)

技術課題 30: アンジュレータの高次高調波利用のための磁場の超均一制御

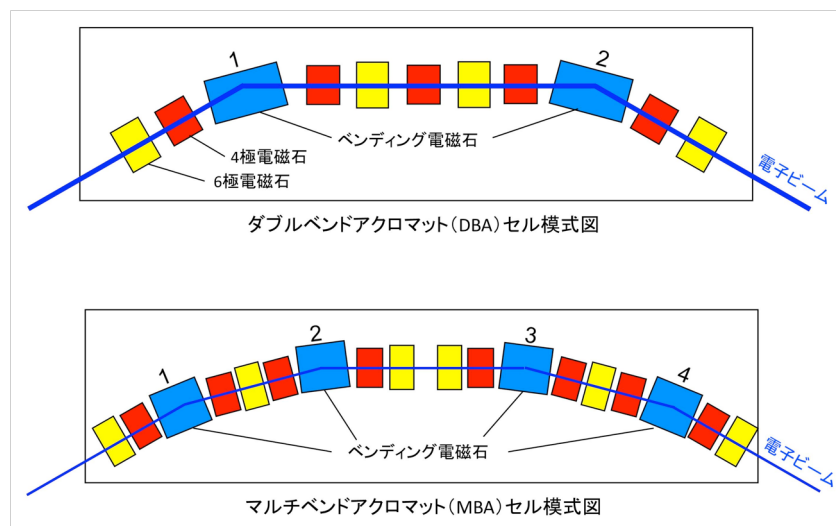
技術課題 31: 軟X線移相子の実用化

技術課題のヒアリング調査を通して個々には様々な技術課題が挙げられ議論されたが、それらが放射光施設を構築する上でお互いに深く関連していることが調査により浮かび上がった。昨年度の「ニーズ調査」でも明らかな様に、次世代が目指すのはリングを周回する電子ビームの低エミッタンス化であり、それによるさらなる高輝度X線ビームの実現である。すなわち低エミッタンス化を実現するための技術、低エミッタンス化がもたらす技術的要請や、メリット、デメリットを総合的に考えることが重要である。

事前調査においては、技術課題の調査項目の 1) ラティス設計が最重要と考える意見が多かった（第三部【表 3-2】参照）が、それは低エミッタンスを低コストで実現するためのキーテクノロジーであるからである。【図 1-2】に放射光リングの模式図を示すが、いわゆる電子蓄積リングである放射光リングでは、電子ビームを曲げるための磁石を多数配置することで電子ビームをリング状に周回させている。その磁石配列がラティスであり、一般的にセルと呼ばれる基本的な磁石配列が周期的に繰り返されたものになっている。周回させるためのエネルギーは途中に配置された高周波加速空洞で補充される。そしてセルとセルの間の直線部にアンジュレータ等を配置することで高輝度の放射光を発生させる。低エミッタンスリングとは、この電子ビームを非常に細くそして平行性を高くして周回させることに他ならない。低エミッタンスを実現するためには、電子を曲げる時に一度に大きく曲げるのではなく、少しずつ多数回で曲げる様にリングを設計すれば良いとされる。それをこれまでのラティス構造で実現しようとする、非常に多数のセルが必要で、しかも周長の長いコストフルな大型施設が必要になる。【図 1-3】に今回の調査で重要課題として多く挙げられたラティスのセル構造の模式図を示す。上がこれまでの放射光施設で一般的な Double Bend Achromat (DBA) と呼ばれるセル構造である。「ニーズ調査」報告書の表 1-26 にまとめられている様に、既存のほとんどの中規模放射光施設が採用している方式である。この DBA セルを採用した場合、得られるエミッタンスは周長によって決まってしまうことが「ニーズ調査」報告書の【図 1-6】に示されている（【図 1-4】として転載）。この横軸が周長の図にお



【図 1-2】 放射光リングの模式図。

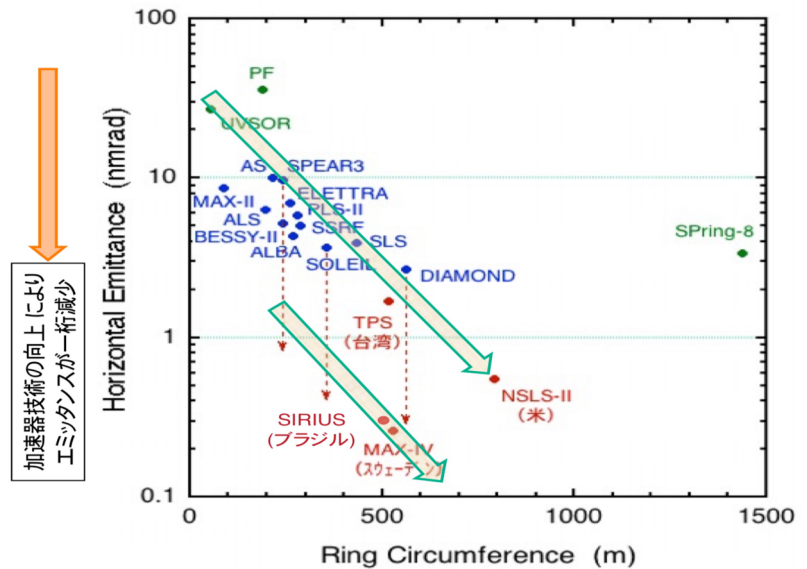


【図 1-3】 ラティスを構成するセル構造の比較。
上 DBA、下 MBA。

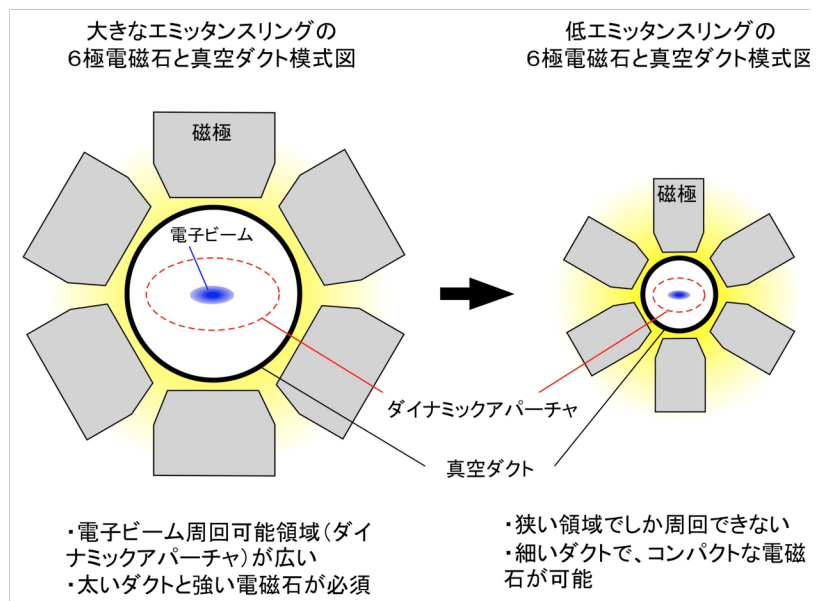
この横軸が周長の図にお

いて DBA セルを用いた 3 GeV 付近のリングは SLS から NSLS-II にかけて上側の右下がりの矢印に乗っていることがわかる。縦軸はエミッタンスであるが、次世代の一つの目安となる 1 nmrad を 3 GeV の DBA セルを使用したラティスで実現するためには、周長 700 m 以上の大型リングが必要であることは明らかである。それを解決する技術として本調査で挙げられた技術が Multi Bend Acromat (MBA) セルを使用するラティス構造である [1-3-1 (1) の 1)、技術課題 1]。DBA では一つのセルにベンディング磁石を二つ配置し、二回で曲げていたものを、MBA セルではベンディングマグネットをより多く配置し、一つあたりの曲げる角度を小さくしてエミッタンスを低くできる。【図 1-3】の下側には MBA の例として 4 ベンドアクロマット構造を示した。【図 1-4】に計画中のブラジルの SIRIUS やスウェーデンの MAX-IV が表示されているが、MBA セルを使用したラティスの採用により、同じリングサイズでも、従来の DBA セルのものよりも約一桁低いエミッタンスが期待できることがわかる。また、フランスの SOLEIL や英国の DIAMOND では、より低エミッタンス化を目指して MBA セルへのアップグレードが計画されている。

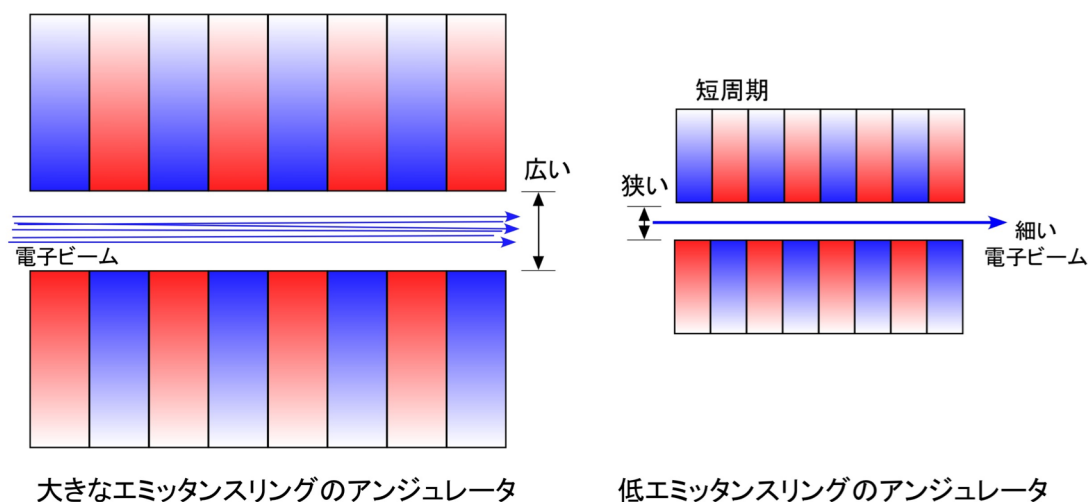
また、低エミッタンスビームの入射と周回は、新たな技術課題を生み出している。高品質なビームの入射には、X線自由電子レーザー-SACLA の開発で培った技術により、コストが低下し入射ビームの質（エミッタンス）も向上した線型加速器が有利とされている [技術課題 3、1-3-1 (2) の 2)]。また、低エミッタンス電子ビームを周回させる真空ダクトの小口径化も様々な課題を引き起こすと予想される [技術課題 9]。【図 1-5】



【図 1-4】 海外の中型放射光施設のエミッタンスと蓄積リング周長の関係（2014 年 12 月現在；NSLS-II はは 2015 年 2 月から稼働） [「ニーズ調査」図 1-6]。



【図 1-5】 低エミッタンスビームにより可能になる小口径真空ダクトとそのメリット。



【図 1-6】 低エミッタンスビームにより可能になるアンジュレータの狭ギャップ化。

は低エミッタンス化によって真空ダクトが小口径化できることを模式的に示した図である。加速器では、ビームが安定して周回できる領域のことをダイナミックアパーチャーと呼ぶ。MBA セルを使用する低エミッタンスリングでは、一般にダイナミックアパーチャーが狭く、非常に高度にビーム位置を制御する必要がある。逆に言えば、低エミッタンスビームに対しては、制御は難しいが、真空ダクトの小口径が可能になる。ダクトの小口径化は様々なコンポーネントのコンパクト化を可能にする非常に重要な技術要素であることが調査で示された [1-3-1 (2) の 2)、1-3-1 (4) の 1)、5)]。例えば、【図 1-5】は 6 極電磁石部の断面を示しているが、真空ダクトの口径が小さくなることで磁極を電子ビームにより近づけることができるためより強い磁場をかけることができる。同じ磁場なら、より小型の電磁石で可能になり、コンパクトな電磁石の開発そのものが新たな技術課題となる [技術課題 5]。同様のことは、アンジュレータにも生じる [1-4-3 (1) の B)]。ビームの軌道が精度よく一定にコントロールされていれば、【図 1-6】に示すようにより狭いギャップのアンジュレータでもビームを精度よく通すことが可能になる。狭ギャップ化により、同じ磁石材料でもアンジュレータのギャップ間の磁場を強くすることが可能になり、また、磁石の周期をより短くすることでより高エネルギーの X 線を発生することが可能になる。さらに、横方向の軌道のマージンも小さくなるためアンジュレータの磁石の幅（【図 1-6】紙面に垂直方向）を小さくすることが可能で、それにより磁極間に発生する引力の低減が可能になりメカニカルな構造のコストダウンが期待されている。

以上のように低エミッタンスビームが実現すれば、輝度だけではなく磁石等の加速器のコンポーネントにとってコンパクト化が可能になるというメリットがある。それに伴って、様々なコンポーネントをコンパクト化するという方向性が生まれる [関連する技術課題: 5、9、10、11、13、27]。一方で、低エミッタンスビームを安定して周回させるための技術的な課題は少なくない。例えば、ラティスを構成する電磁石の磁極には非常に高い精度での加工が求められる [技術課題 4]。高精度アライメント [技術課題 8] や振動の問題 [技術課題 21] も重要である。また、アンジュレータによるビーム不安定性の抑制も問題である [技術課題 13]。なによりも、ビーム不安定性を制御するための高速なフィードバック系が求められており、それを実現するためには高精

度のビーム位置モニタが必要である〔技術課題 14、技術課題 15〕。入射器にも、狭いダイナミックアパーチャーにビームを入射するために、非常に高い精度が求められる〔技術課題 3〕。一方で、Hybrid Multi Bend Acromat (HMBA) を採用して、ダイナミックアパーチャーを広くするという流れもある〔技術課題 2〕。また、リング全体を管理するシステムや、建屋等も、ビーム安定性や運転制御を行い易いものでなければならない〔技術課題 16〕。様々なコンポーネントのコンパクト化につながる真空ダクトの小口径化は、一方で真空排気が難しくなるという問題も抱えている〔技術課題 9〕。このためには、非常に綿密な真空排気系やバルブシステムを構築する必要がある。また、非蒸発ゲッター材 (NEG) を内面にコートした真空ダクトの利用も考える必要もある。また、小口径ダクトや狭ギャップアンジュレータでは、ビームによる熱負荷の問題を考えなければならない〔技術課題 13、技術課題 27〕。

また、加速器のラティスやアンジュレータへの超伝導磁石の利用についての議論もあったが、これについてはメンテナンスコスト等も含めて今後も研究を進めるべき課題とされた〔技術課題 7、1-3-1 (1)の3)、【表 1-4】の1)〕。

光源から下流側では、X線を 10 nm 以下に集光するための超平滑X線ミラーのさらなる高度化や〔技術課題 19〕、光学素子の高熱負荷に対する性能の維持〔技術課題 17〕、光学素子の冷却に伴う振動の低減〔技術課題 18〕、偏光切替アンジュレータによるビーム変動問題の解決〔技術課題 12、技術課題 29〕、現在は国外の製品に頼るところが大きい二次元X線検出器の独自開発等が重要課題とみられる〔技術課題 23、技術課題 28〕。軟X線領域の偏光切替については、アンジュレータにおけるビーム変動の問題を回避する方策の一つとして、軟X線領域で高効率の移相子の開発を進めるという方向性もあるかもしれない〔技術課題 31〕。また、蓄積ビームのエネルギーが低くても、アンジュレータからの高エネルギーX線を利用したい、という要望に応える技術も今後必要になってくると考えられる〔技術課題 30〕。

さらに、発生した高輝度のX線を有効に利用できるように、夏季も含めたユーザータイムの十分な確保や、測定のオートメーション化も課題である〔技術課題 20〕。

以上の様に次世代低エミッタンス放射光リングの実現のためには、密接に関連しあった様々な問題・課題が存在することが明らかになった。一方で、それらは放置されているわけではなく、低エミッタンスを実現するために様々な技術が開発され、実用化の手前にあることが本調査で明らかになった。この様な技術をうまく利用することで、できるだけコストを抑えたシナリオで次世代の低エミッタンスリングの新設や、低エミッタンスへのアップグレードが可能であると考えられる。

1-5-2 整備・運用コスト低減に資する方策に関するまとめと分析

本調査では、整備・運用コストを低減する方策も多数あげられた（【表 1-5】参照）。【表 1-5】の内容をさらに整理して列記すると、以下ようになる。

【整備コスト低減に資する方策】

①人的コスト低減に資する方策

- ・長期的な人材確保戦略
- ・人材育成プログラムの構築、民間企業との交流
- ・開発拠点の集中化（※ただし成果は全国で共有）
- ・PFI 方式や DBO 方式等による民間活力の利用

②物的コスト低減に資する方策

- ・蓄積リングのコンパクト化
- ・入射器としてシンクロトロンを選択（※ただし、運転コストはライナックが低い）
- ・磁石システムのコンパクト化
- ・電磁石の量産化
- ・複数電磁石の一体設置・自動補正
- ・真空チャンバーの小口径化と量産化
- ・高調波（HOM）抑制型高周波空洞の開発・実用化
- ・アンジュレータの軽量化・コンパクト化

【運用コスト低減に資する方策】

①人的コスト低減に資する方策

- ・施設間マネジメント
- ・計測のオートメーション化
- ・課題審査省略によるスループット向上

②物的コスト低減に資する方策

- ・入射器としてライナックを選択（※ただし、整備コストはシンクロトロンが低い）
- ・コンパクト化とバランスの取れた電磁石システムの採用
- ・電磁石系への永久磁石の採用（※現時点では、製造コストが高いことが課題）
- ・半導体素子の使用による省エネ化、高安定運転化
- ・長寿命デバイス使用による維持コスト削減

- ・高周波加速系への超伝導空洞の採用（※ただし、メンテナンス費、維持費、人件費大）
- ・計測のオートメーション化・共通化
- ・測定系トラブルに対応しやすいシステム設計
- ・先端環境技術の導入

整備に係るコストのうち、人的コストについては、わが国の技術を継承しつつ、一方で人件費を低減するような、長期的な視点に立った人材確保、人材育成スキームの構築が重要であるとみられている。さらに、コスト削減のための方策として、開発拠点を一拠点で行う一方で、成果は国内で共有する等のアイディアもあった。

施設の建設コストに関するコメントも多く挙げられた。複数電磁石の一体化、および組立時の自動遠隔操作等アライメント効率の向上や、加速器制御系のソフトウェアの改善といった課題が挙げられた一方で、一部については、建設コストだけでなく、運転コストや信頼性も含めて総合的に判断することが重要であることが分かった。例えば入射器については、建設コストはシンクロトロンの方がやや有利であるが、運転コストについては、加速に要する時間が極めて短いライナックの方が圧倒的に優れているとみられている。真空チャンバー、電磁石、アンジュレータ等のコンパクト化も建設コスト低減につながる。しかしながら、電流密度の増大により、温度の安定性の確保が一般に困難になる。したがって、信頼性を優先するならば、電磁石を大きくして、電流密度を下げるという設計に帰着する。電流密度を下げることは、運転時の電力コストの低減にもつながる。一方で永久磁石については、製造コストが高いことが問題であるが、運転コストの低減に大きく寄与すると期待される〔技術課題 6〕。しかしながら、現状では十分な実績がなく、磁場の制御技術〔技術課題 24〕や経時変化対策の具体的な方法〔技術課題 25〕が確立されて、将来的に高い信頼性が確保できるかどうかは鍵になるであろう。

運用コストに注目すると、人的コストについては、整備時と同様、長期的な戦略が重要であるという認識で一致している。企業や他機関間との人材交流、適材適所の人員配置等が具体的な方策となりうる。運転コストについては、上述のライナックの使用等に加えて、高出力半導体素子を用いた高周波源（SSA（Solid State Amplifier））の導入、自然エネルギー等の導入による省エネ化等がありうる〔技術課題 11〕。しかしながら、高周波源については、従来から用いられているクライストロンも高信頼性、寿命の点で実績があり、半導体素子の整備コストやトータルの電力を吟味して、総合的に判断する必要があるだろう。また、自然エネルギーの導入についても〔技術課題 13〕、人件費やメンテナンス費等も考慮に入れ、かつ他機関の実績をみつつ慎重に検討する必要がある。同様のことは超伝導空洞の導入についてもいえることである。

運用コストについては、人的コストと運転コストの両方に関係するものとして、オートサンプラーの導入等ルーチン測定の徹底的な自動化等による効率化、各施設共通インターフェイスの導入等の提案もあった〔技術課題 20〕。このようなロボットや IT 技術等を駆使した施設の運営体制の整備は、国際競争力維持のために急務であるとみられている。トラブル発生時の復旧体制等、トラブルによる損失をいかに効率よく抑えるかについても、今後の検討課題である。