

## 第三部

### 参考資料・補足資料

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



### 3-1 受託事業の実施体制と調査参加者リスト

本技術課題調査の実施体制と調査参加者リストを【表3-1】から【表3-10】に示す。

【表 3-1】光・量子ビーム科学連携推進室「次世代放射光施設に関する技術課題調査専門委員会」

【表 3-2】「A. ヒアリング調査」の業務主任と実務者

【表 3-3】「B. 技術的観点の総合調査」の業務主任と実務者

【表 3-4】「A. ヒアリング調査」外部アドバイザー

【表 3-5】「B. 技術的観点の総合調査」外部アドバイザー

【表 3-6】「A-1. 共通技術課題に関するヒアリング調査」対象者

【表 3-7】「A-2. 固有技術課題に関するヒアリング調査」対象者

【表 3-8】第一回ヒアリング会議出席者名簿

【表 3-9】第二回ヒアリング会議出席者名簿

【表 3-10】個別書面調査・対面調査を行ったアドバイザー・ヒアリング対象者名簿

【表 3-1】光・量子ビーム科学連携推進室「次世代放射光施設に関する技術課題調査専門委員会」

氏名	所属
伊藤 貞嘉	東北大学 理事（研究担当）
進藤 秀夫	東北大学 理事（産学連携担当）
村松 淳司	東北大学 多元物質科学研究所長（委員長）
高桑 雄二	東北大学 多元物質科学研究所 教授
上田 潔	東北大学 多元物質科学研究所 教授
河村 純一	東北大学 多元物質科学研究所 教授
高田 昌樹	東北大学 総長特別補佐（研究担当） 多元物質科学研究所 教授
酒見 泰寛	東北大学 総長特別補佐（企画担当） サイクロトロン・RI センター 教授
大滝 精一	東北大学 経済学研究科 教授
入野 修	福島大学 学長参与 / 福島大学名誉教授
深尾 彰	山形大学 学長代理、理事 （研究、評価、医療担当）
石川 哲也	理化学研究所 放射光科学総合研究センター長
小杉 信博	自然科学研究機構 分子科学研究所 UVSOR 施設長
辛 埴	東京大学 物性研究所 軌道放射物性研究施設 教授
小久見 善八	京都大学 工学研究科 教授 RISING 革新型蓄電池先端基礎科学ビームライン
岩澤 康裕	電気通信大学 燃料電池イノベーションセンター長 教授 先端触媒構造反応 リアルタイム XAFS 計測ビームライン
上村 みどり	帝人ファーマ株式会社 生物医学総合研究所 創薬化学研究所 上席研究員
金子 美智代	トヨタ自動車株式会社 材料技術開発部 材料技術開発部材料解析 室長
杉原 保則	日東電工株式会社 基幹技術センター
Roger Falcone	Advanced Light Source (USA), Director
Joël Mesot	Paul Scherrer Institute (Swiss), Director

【表 3-2】「A. ヒアリング調査」の業務主任と実務者

共通技術課題・固有技術課題ヒアリング調査		
	氏 名	所 属
業務主任	高桑 雄二	東北大学 多元物質科学研究所 教授
(A-1) 共通技術課題に関するヒアリング調査の実務者		
主査	河村 純一	東北大学 多元物質科学研究所 教授
実務者	百生 敦	東北大学 多元物質科学研究所 教授
実務者	木村 宏之	東北大学 多元物質科学研究所 教授
(A-2) 固有技術課題に関するヒアリング調査実務者		
主査	河村 純一	東北大学 多元物質科学研究所 教授
実務者	寺内 正己	東北大学 多元物質科学研究所 教授
実務者	北上 修	東北大学 多元物質科学研究所 教授
実務者	虻川 匡司	東北大学 多元物質科学研究所 准教授
実務者	杉山 和正	東北大学 金属材料研究所 教授

【表 3-3】「B. 技術的観点の総合調査」の業務主任と実務者

技術的観点の総合調査		
	氏 名	所 属
業務主任	上田 潔	東北大学 多元物質科学研究所 教授
技術的観点の総合調査の実務者		
主査	鈴木 茂	東北大学 多元物質科学研究所 教授
実務者	本間 格	東北大学 多元物質科学研究所 教授
実務者	雨澤 浩史	東北大学 多元物質科学研究所 教授
実務者	栗原 和枝	東北大学 多元物質科学研究所 教授
実務者	福山 博之	東北大学 多元物質科学研究所 教授
実務者	蟹江 澄志	東北大学 多元物質科学研究所 准教授

【表 3-4】「A. ヒアリング調査」外部アドバイザー

A-1. 共通技術課題に関する調査の外部アドバイザー	
氏名	所属
上垣外 修一	理化学研究所 仁科加速器研究センター 加速器研究基盤部長
佐々木 茂美	広島大学 放射光科学研究センター 教授
太田 俊明	立命館大学 SR センター・センター長
田中 良太郎	(公財) 高輝度光科学研究センター 常任理事
Ryutaro Nagaoka	Group Leader, Physique des Accélérateurs, SOEIL, France
山本 樹	高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光科学第一研究系 教授
A-2. 固有技術課題に関する調査の外部アドバイザー	
加藤 政博	自然科学研究機構 分子科学研究所 UVSOR 光源加速器開発研究部門 教授
小林 幸則	高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 加速器第七研究系 研究主幹
Toshiya Tanabe	Insertion Devices Group Leader, NSLS-II, USA
Hiroshi Nishimura	Accelerator Physics Group, Advanced Light Source, USA
水木 純一郎	関西学院大学 教授
山本 昇	高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 教授

【表 3-5】 「B. 技術的観点の総合調査」外部アドバイザー

「B. 技術的観点の総合調査」外部アドバイザー	
氏名	所属
上垣外修一	理化学研究所 仁科加速器研究センター 加速器研究基盤部長
佐々木茂美	広島大学 放射光科学研究センター 教授
太田俊明	立命館大学 SR センター・センター長
田中良太郎	(公財) 高輝度光科学研究センター 常任理事
Ryutaro Nagaoka	Group Leader, Physique des Accélérateurs, SOEIL, France
山本 樹	高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光科学第一研究系 教授
加藤政博	自然科学研究機構 分子科学研究所 UVSOR 光源加速器開発研究部門 教授
小林幸則	高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 加速器第七研究系 研究主幹
Toshiya Tanabe	Insertion Devices Group Leader, NSLS-II, USA
Hiroshi Nishimura	Accelerator Physics Group, Advanced Light Source, USA
水木純一郎	関西学院大学 教授
山本 昇	高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 教授
渡部貴宏	(公財) 高輝度光科学研究センター 加速器部門研究員

【表 3-6】 A-1. 共通技術課題に関するヒアリング調査対象者

A-1. 共通技術課題に関するヒアリング調査対象者	
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	
氏 名	所 属
後藤 俊治	(公財) 高輝度光科学研究センター 加速器部門長、光源光学系部門長
岡島 敏浩	佐賀県立九州シンクロトロン光研究センター
中村 典雄	高エネルギー加速器研究機構 加速器施設 7系教授
②射光施設の設計・建設等に関わる潜在的メーカー層	
池田 直昭	三菱重工業株式会社 機械・設備システムドメイン 主幹プロジェクト統括
佐藤 耕輔	株式会社東芝 電力システム社 原子力事業部 原子力開発設計部グループ長
林 和孝	三菱電機特機システム株式会社 加速器事業プロジェクト長
松原 雄二	住友重機械工業株式会社
③大学・産業界の研究者等の潜在的ユーザー層	
上村 みどり	帝人ファーマ株式会社 生物医学総合研究所 上席研究員
高尾 正敏	大阪大学リサーチ・アドミニストレーター (URA) シニア・リサーチマネージャー
西 敏夫	東京工業大学 特任教授/JST 開発主監
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	
小杉 信博	自然科学研究機構 分子科学研究所 UVSOR 施設長
田中 均	理化学研究所 放射光科学総合研究センター XFEL 研究開発部門長
浜 広幸	東北大学 電子光理学研究センター長



【表 3-7】 A-2. 固有技術課題に関するヒアリング調査対象者

A-2. 固有技術課題に関するヒアリング調査対象者	
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	
氏名	所属
足立 伸一	高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光科学第二研究系教授
田中 隆次	理化学研究所 放射光科学総合研究センター 光源物理チームリーダー
初井 宇記	理化学研究所 放射光科学総合研究センター データ処理系開発チームリーダー
②射光施設の設計・建設等に関わる潜在的メーカー層	
中村 豪志	日立造船株式会社 機械事業本部 電子制御ビジネスユニット電子システム部長
三田 正裕	NEOMAX エンジニアリング株式会社 主幹技師
尾形 敢一郎	NEC トーキン株式会社
③大学・産業界の研究者等の潜在的ユーザー層	
大野 英男 松倉 文禮	東北大学 電気通信研究所 教授（書面事前調査*） 東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 教授（ヒアリング会議*）
角田 克彦	株式会社ブリヂストン中央研究所 研究第1部フェロー（部長）
本間 穂高	新日鐵住金 技術開発本部
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	
平井 康晴	佐賀県立九州シンクロトロン光研究センター
Liu Yuen-Chung	Taiwan Photon Source (TPS)

\* 都合により、書面調査とヒアリング会議を分担

【表 3-8】 第一回ヒアリング会議出席者名簿

第一回ヒアリング会議	
	日 時：10月13日（火）13:00-17:00 場 所：東北大学東京分室 サピアタワー10階 会議室 A
出席者	
外部アドバイザー （共通技術課題）	上垣外 修一：理化学研究所 仁科加速器研究センター 加速器研究基盤部長 佐々木 茂美：広島大学 放射光科学研究センター 教授 太田 俊明：立命館大学 SR センター・センター長 山本 樹：高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光科学第一研究系 教授
共通技術課題 ヒアリング対象者	池田 直昭：三菱重工業株式会社 機械・設備シス 主幹プロジェクト統括 林 和孝：三菱電機特機システム株式会社 加速器事業プロジェクト長 高尾 正敏：大阪大学 URA シニア・リサーチマネージャー 西 敏夫：東京工業大学 特任教授 /JST 開発主監 田中 均：理化学研究所 放射光科学総合研究センター XFEL 研究開発部長
外部アドバイザー （固有技術課題）	加藤 政博：分子科学研究所 UVSOR 光源加速器開発研究部門 教授 Hiroshi Nishimura: Accelerator Physics Group, ALS, USA (TV 会議参加) 山本 昇：高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設
固有技術課題 ヒアリング対象者	田中 隆次：理化学研究所 (公財) 高輝度光科学研究センター 光源物理チームリーダー (TV 会議参加) 中村 豪志：日立造船機械事業本部 電子制御ビジュニ電子システム部長 松倉 文禮：東北大学 教授 角田 克彦：株式会社ブリヂストン中央研究所研究第 1 部フェロー (部長) 平井 康晴：佐賀県立九州シンクロトロン光研究センター副所長
業務主任	高桑 雄二：東北大学 多元物質科学研究所教授
実務者主査	河村 純一：東北大学 多元物質科学研究所教授
共通技術課題 実務者	木村 宏之：東北大学 多元物質科学研究所教授
固有技術課題 実務者	北上 修：東北大学 多元物質科学研究所教授 虻川 匡司：東北大学 多元物質科学研究所准教授

【表 3-9】 第二回ヒアリング会議出席者名簿

第二回ヒアリング会議	
	日 時：10月14日（火）13:00-17:00 場 所：東北大学東京分室 サピアタワー10階 会議室 A
出席者	
外部アドバイザー（共通技術課題）	上垣外 修一：理化学研究所 仁科加速器研究センター 加速器研究基盤部長 佐々木 茂美：広島大学 放射光科学研究センター 教授 太田 俊明：立命館大学 SR センター・センター長 山本 樹：高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光科学第一研究系 教授 田中 良太郎：（公財）高輝度光科学研究センター 理事 Ryutaro Nagaoka: Group Leader, Physique des Accélérateurs, SOEIL (TV 会議参加)
共通技術課題ヒアリング対象者	後藤 俊治：（公財）高輝度光科学研究センター 加速器部門長、光源光学系部門長 中村 典雄：高エネルギー加速器研究機構 加速器施設 7 系教授 佐藤 耕輔：東芝株式会社 電力システム社原子力開発設計部グループ長 上村 みどり：帝人ファーマ株式会社 生物医学総合研究所 上席研究員 小杉 信博：分子科学研究所 UVSOR 施設長 田中 均：理化学研究所 放射光科学総合研究センター XFEL 研究開発部長
外部アドバイザー（固有技術課題）	加藤 政博：分子科学研究所 UVSOR 光源加速器開発研究部門 教授
固有技術課題ヒアリング対象者	初井 宇記：理化学研究所 （公財）高輝度光科学研究センター データ処理系開発チームリーダー 三田 正裕：NEOMAX エンジニアリング株式会社 主幹技師（TV 会議参加） 本間 穂高：新日鐵住金 技術開発本部
業務主任	高桑 雄二：東北大学 多元物質科学研究所教授
実務者主査	河村 純一：東北大学 多元物質科学研究所教授
共通技術課題実務者	百生 敦：東北大学 多元物質科学研究所教授
固有技術課題実務者	寺内 正己：東北大学 多元物質科学研究所教授 杉山 和正：東北大学 金属材料研究所教授 虻川 匡司：東北大学 多元物質科学研究所准教授
オブザーバー	高田 昌樹：東北大学 多元物質科学研究所教授

【表 3-10】個別書面調査・対面調査を行ったアドバイザー・ヒアリング対象者名簿

個別書面調査を行ったアドバイザー・ヒアリング対象者	
外部アドバイザー （固有技術課題）	小林 幸則: 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 加速器第七研究系 研究主幹 Toshiya Tanabe: Insertion Devices Group Leader, NSLS-II, USA 水木 純一郎: 関西学院大学 教授
共通技術課題 ヒアリング対象者	岡島 敏浩: 佐賀県立九州シンクロトロン光研究センター 松原 雄二: 住友重機械工業株式会社 浜 広幸: 東北大学 電子光物理学研究センター長
固有技術課題 ヒアリング対象者	足立 伸一: 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光科学第二研究系 教授 尾形 敢一郎: NEC トーキン株式会社 Liu Yuen-Chung: Taiwan Photon Source (TPS)

個別対面調査を行ったアドバイザー・ヒアリング対象者	
外部アドバイザー （固有技術課題）	Toshiya Tanabe: Insertion Devices Group Leader, NSLS-II, USA （平成 27 年 11 月 26 日 10:00～12:00、於東北大学多元物質科学研究所）
共通技術課題 ヒアリング対象者	松原 雄二: 住友重機械工業株式会社 （平成 27 年 11 月 24 日 13:00～14:00、於住友重機械工業株式会社）

## 3-2 ヒアリング調査資料

### 3-2-1 ヒアリング事前調査回答票項目

ヒアリング調査を行うにあたり、ヒアリング対象者には書面での事前調査を行った。事前書面調査の目的は、ヒアリング対象者に本調査目的を理解してもらうことと、事業者側があらかじめ調査課題の傾向を知ることによって効率良く的確にヒアリングを進めるためである。書面調査項目は、事業者が外部アドバイザーの意見を取り入れて決定したものである。その調査内容は、資料 3-1 に示すように、共通技術課題について 11 項目、固有技術課題について 7 項目からなる。事前調査は、共通技術課題に対するヒアリング対象者と固有技術課題に対するヒアリング対象者を区別せずに、全対象者に同じ内容の調査に回答いただいた。

本調査におけるヒアリング調査の第一の目的は、次世代放射光施設の実現やコスト低減のために重要な技術課題を洗い出し、それらの解決策を探る事である。その目的に適うように調査項目を設定した。

共通技術課題課題に関しては、はじめに共通技術課題として 14 課題を示してそれについて 11 の設問を行った。問 1-1 では対象者の専門に関連する分野を伺った。問 1-2 では、14 課題の中から重要項目を順番に 3 つ選択いただいた。問 1-3 は、課題解決の実現が急がれるものと、猶予のあるものを選択いただいた。問 1-4 では、国家プロジェクトなどで推進すべき課題、問 1-5 では小さな研究グループや企業で推進すべき課題を選択いただいた。問 1-6 から問 1-8 では、3 つ選択いただいた重要項目に関して、重要と考える理由、実現するための方策、5 年後の実現の見込み、国際的な動向を記入していただいた。問 1-9 では、専門に関連した課題に関して、実現するための方策、5 年後の実現の見込み、国際的な動向を記入していただいた。問 1-10 では、建設コストおよび運転コストを低減するための方策、施設建設・運営に係る中長期的観点も含めた人的・物的コスト削減に資する技術開発及び関連するマネジメントシステムの改革などを記入いただいた。問 1-11 ではその他として追加意見を伺った。

固有技術課題に関しては、硬 X 線向き放射光施設に関する技術課題 3 つと軟 X 線向き放射光施設に関する技術課題 3 つの、合わせて 6 つの課題を設定して設問を行った。問 2-1 では、対象者が硬 X 線分野、軟 X 線分野のいずれに関連しているのかを訊ねた。問 2-2 では、6 課題それぞれを 5 段階で評価していただいた。問 2-3 では、課題について、現状と解決策、そして国際的な動向について記入いただいた。問 2-4 ではリストに挙げた以外の固有技術課題があるならば、それを挙げていただき、現状と解決策、そして国際的な動向について記入いただいた。問 2-5 は、課題の実現時期に関する設問であり、問 2-6 は国家プロジェクトとすべき課題を挙げていただいた。問 2-7 ではその他として追加意見を伺った。

技術課題調査ということで非常に多岐に渡った専門的な内容が多く、一人の専門家がすべての項目に答えることは難しい内容となったが、複数の様々な専門分野の方から回答を集めることで、全体として大変有意義な回答結果が得られた。次節 3-2-2 に回答のまとめを示

す。また、それぞれのヒアリング対象者から得られた回答結果のまとめは、それぞれのヒアリング対象者の意見書とともに3-2-3にまとめる。

メール（事前ヒアリング）調査内容：

放射光施設は、そのサイズや周回する荷電粒子のエネルギーに依存して、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」と呼ぶ。)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」と呼ぶ。)に分類することができます。その二種類に共通した技術課題と、それぞれ固有の技術課題についてお伺いいたします。

**1. 共通の技術課題について**

次世代放射光施設実現にあたって検討が必要な共通の技術課題を克服するための開発要素として以下のようなものをリストアップしました。このリストに漏れているものは、14)その他としてお考えください。

**共通の<開発要素>**

- 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：ライナック・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：磁石のアラインメントの精度向上、温度管理、磁場測定の高高度化
- 5) 真空系：真空チャンバーのア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 等を用いた高周波空洞の電源、高調波 (HOM)-free 高周波空洞の開発
- 7) アンジュレータ：短周期化と低ギャップによるビーム不安定性の抑制
- 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、コミッションを容易にするビーム診断系、ビームモニタおよびビーム調整手法
- 9) 加速器制御系：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：光源エネルギーに対する最適化
- 11) 利用系：計測のオートメーション化、計測システム共通化
- 12) 建物：付帯設備等の振動抑制、温度管理
- 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

1-1 リストにあげた共通課題中でご自身の専門分野に強く関連するものがありましたら、三つ程度まで番号を記入ください。その他の場合は、番号の右側に具体的にご記入ください。

( ) ( ) ( )

1-2 リストの中で、次世代放射光施設実現にとって重要と思われる開発要素を三つ選択して、その番号を重要と考える順番で記入ください。（その他の場合は、番号の右側に具体的に開発要素をご記入ください。その他を複数記入しても構いません。）

最重要（ ）、2番目（ ）、3番目（ ）

1-3 リストの中でできるだけ早い時期に実現すべきと考えられるものと、まだ5年以上は猶予があると考えられるものを選んでください。（複数回答可）

早く実現すべき要素（ ）

5年以上の猶予がある要素（ ）

1-4 開発要素の中で、国を挙げたプロジェクトなどで強く推進すべきであると思われるものがありましたら、その番号を記入ください。（複数回答可）

（ ）

1-5 開発要素の中で、小さな研究グループまたは個々の企業による開発研究に任せるのが妥当と思われるものがありましたら、その番号を記入ください。（複数回答可）

（ ）

1-6 1-2で**最重要**と考えた開発要素について、なぜ最重要なのかその「理由」を記述ください。また、その開発要素を実現するための方策、5年後の実現の見込み、国際的な動向についても、ご存知でしたらご記入ください。

理由[

具体的な方策[

5年後の見込み[

国際的な動向[

1-7 1-2で**2番目に重要**と考えた開発要素について、なぜ重要なのかその「理由」を記述ください。また、その開発要素を実現するための方策、5年後の実現の見込み、国際的な動向についても、ご存知でしたらご記入ください。

理由[



具体的な方策[

5年後の見込み[

国際的な動向[

**1-8** 1-2で**3番目に重要**と考えた開発要素について、なぜ重要なのかその「理由」を記述ください。また、その開発要素を実現するための方策、5年後の実現の見込み、国際的な動向についても、ご存知でしたらご記入ください。

理由[

具体的な方策[

5年後の見込み[

国際的な動向[

**1-9** 1-1であげられたご専門に関連した開発要素について、それらを実現するための方策、5年後の実現の見込み、国際的な動向について、ご記入ください。（複数回答可）

**1-10** 次世代放射光施設の実現に向けて、安定な施設性能を確保した上で、建設コストおよび運転コストを低減するための方策、例えば、ロボット・自動制御システムの導入、省エネ・低コストな設備・装置へのリプレイス等の、施設建設・運営に係る中長期的観点も含めた人的・物的コスト削減に資する技術開発及び関連するマネジメントシステムの改革などがありましたら、ご記入ください。

**1-11** その他 （上記以外で追加すべき意見がありましたら、ご記入下さい。）

## 2. 固有技術課題について

硬X線向き放射光施設、軟X線向き放射光施設のそれぞれに固有の技術課題として以下の調査項目をリストアップしました。

<調査項目>

①硬X線向き放射光施設

- 1) 超伝導磁石の利用の是非
  - 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
- 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
  - 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

2-1 ご自身の関連分野をご選択ください。

(硬X線、軟X線)

2-2 リストにあげた項目について、重要性を1～5の5段階で評価ください。(不明の場合は不明とご記入ください。)

①硬X線向き放射光施設

- 1) 超伝導磁石の利用の是非 ( )
- 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 ( )

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 ( )
- 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 ( )

2-3 ご存知の範囲で構いませんので、リストにあげた項目について、現状、解決策、国際的な動向などに関するご意見をご記入ください。

①硬X線向き放射光施設

- 1) 永久磁石を取り入れたガイド磁場の是非  
現状 [ ]  
解決策 [ ]  
国際的な動向 [ ]
- 2) 不安定性を抑制する高速フィードバック  
現状 [ ]

解決策 [

国際的な動向 [

3) 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

現状 [

解決策 [

国際的な動向 [

②軟X線向き放射光施設

4) ビーム入射機構と入射器の選択

現状 [

解決策 [

国際的な動向 [

5) 高周波加速空洞のコンパクト化

現状 [

解決策 [

国際的な動向 [

6) 高調波高周波空洞によるビーム寿命の確保

現状 [

解決策 [

国際的な動向 [

7) UV領域用長周期アンジュレータによるビームへの影響

現状 [

解決策 [

国際的な動向 [

2-4 リスト以外の項目で調査対象とすべき固有技術課題の項目がありましたら、記述ください。また、それについて現状、解決策、国際的な動向などに関するご意見をご記入ください。

固有技術課題 [

現状 [

解決策 [

国際的な動向 [

2-5 項目の中でできるだけ早い時期に解決すべきであると考えられるものと、まだ5年以上は猶予があると考えられるものをお選びください。(複数回答可)

早く実現すべき要素 ( )

5年以上の猶予がある要素 ( )

2-6 固有の技術課題項目の中で、国を挙げたプロジェクトなどで強く推進すべきであると思われるものがありましたら、その番号を記入ください。(複数回答可)

( )

2-7 その他(上記以外で追加すべき意見がありましたら、ご記入下さい。)

以上

### 3-2-2 事前調査のまとめ

書面による事前調査は、先に示したように 1. 共通技術課題についてと 2. 固有技術課題についてについてアンケート形式で行い、共通技術課題に関する調査対象者、固有技術課題に関する調査対象者の区別なく全員に全項目に関して回答していただく形式をとった。調査対象者 24 名から書面で回答をいただいた。書面調査結果の具体的な内容に関しては、ヒアリング対象者の意見書とともに 1-3 にまとめてある。ここでは主にそれらの結果の統計情報をまとめる。

#### 共通技術課題に関する書面調査

共通技術課題に関する書面調査では、14 課題を設定して、その中から重要と考えられるものを 3 つ選択して、それぞれについて重要と考える理由、解決のための方策、5 年後の見込みを記入いただいた。また、早期実現への期待、進めるにあたってのプロジェクトの規模を伺った。

【表 3-11】は、14 課題それぞれについて、調査対象者 24 名が各設問で挙げた頻度を示したものである。問 1-2 では、14 項目から、最重要、2 番目に重要、3 番目に重要なものをあげて頂いた。表の頻度をみると、10 名が 1) ラティス設計を最重要と挙げていることがわかる。また、6 名が 3) 電磁石系、3 名が 2) ビーム入射系を挙げている。この結果を、最重要を 3 点、2 番目を 2 点、3 番目を 1 点として合計したものを重要度のスコアとして示してある。この重要度のスコアによると、1) ラティス設計 30 点と 3) 電磁石系 26 点が特に高く、また 2) ビーム入射系も 13 点と 3 番目に高く、リング本体に関連する部分を重要と考える方が多い事がわかる。それ以外でも、4) アライメント系 11 点、5) 真空系 9 点、高周波加速系 8 点と、リング本体の性能に関わるものの重要度が高い。また、7) アンジュレータも 10 点であり、その高度化が期待されている事がわかる。以上に比べて、他の項目は、スコアは低いものの重要性がないわけではなく、分野によっては複数の方が重要性を指摘しているものもあった。

重要度スコアを分野別にまとめたものを【表 3-12】に示す。これをみると①、②、④のグループが、リング本体部分に関連する要素である 1)、2)、3) を重要と考えているのに対し、③のグループは、10) 光学系や 11) 利用系を重要としている事がわかる。14 の課題を設定して調査を行ったが、書面調査からも共通技術課題が多岐にわたっており、分野によっても様々である事がわかる。

問 1-3 では、14 項目の技術課題に関して早期実現が必要なもの、5 年程度の猶予があるものをあげて頂いた。その結果も表 3-1 にまとめてある。早期実現・解決が求められる課題として 15 名の方が 1) ラティス設計を、14 名の方が 3) 電磁石系を、11 名の方が 5) 真空系を挙げている。5) 真空系の技術課題の要請は、1) ラティス設計や 3) 電磁石のコンパクト化と密接に関連した課題であり、その早期実現が求められているものと思われる。そのほかにも 2) ビーム入射系、4) アライメント等、6) 高周波加速系など、リング建設に直接関わる課題が多く挙げられた。一方で 5 年程度の猶予があるものとしては、11) 利用系：計測のオートメ

ーション化や計測システム共通化が比較的多く挙げられたが、ほとんどの技術課題に関しては早期実現が求められていることが分かる。

問 1-4 と問 1-5 では、国家プロジェクトで進めるべき技術課題と、個企業や小規模なプロジェクトで進めるべき技術課題をあげて頂いた。その結果も表 3-1 にまとめたが、リング本体に関連するラティス設計、ビーム入射系、電磁石系が、国家プロジェクトで進めるべきであるというご意見が多かった。一方で、小規模なプロジェクトで進めるべき項目として 14 項目が満遍なく挙げられている。これは、それらの項目に含まれる特定の項目に関するものである場合が多かった。

以上、共通技術課題に関する事前書面調査からは、ラティス設計や入射器系、電磁石系などの加速リング本体に関する技術が重要課題であると考えられていることがわかったが、分野によってはその他の課題も重要視されている事がわかった。

### 固有技術課題に関する書面調査

固有技術課題に関する書面調査では、①硬 X 線向き放射光施設と②軟 X 線向き放射光施設についてそれぞれ 3 項目ずつ、合わせて 6 項目を設定して、それぞれについて重要性、現状、課題の解決策、国際的な動向等の記入を求めた。

【表 3-13】は、問 2-2、問 2-5、問 2-6 の設問で調査対象者に挙げられた 6 課題のそれぞれの頻度を示したものである。問 2-2 は、重要性を 5 段階で評価した結果である。こちらも 5 段階評価を点数化して合計した重要度スコアを示した。これをみると①硬 X 線向き放射光施設の課題として 1) 超電導磁石の利用の是非が 5 名の対象者から 5 (最重要) と評価されてスコア 51 点となっている。しかしながら、調査票の内容を判断すると超電導磁石の利用を進める必要性からの評価では無く、むしろ超電導磁石の利用には慎重になるべきであるという立場からの評価であった。3) 熱負荷対策もスコア 50 点と評価されているが、これに関しては、ヒアリングにおいて SPring-8 などの既存の技術の延長でカバーできるという意見があった。②軟 X 線向き放射光施設に関する課題 3 項目については、スコアに明確な差はなかったが、項目が専門的すぎて意味することが十分理解されなかったためもあると思われる。また、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に関しては、中規模の軟 X 線向き放射光施設には、UV 領域用長周期アンジュレータはそもそも必要無いという意見が多かった。UV 領域は、既存の小規模な放射光施設に任せればよいという意見であった。

【表 3-14】は、分野別のスコアであるが、分野別に明確な違いや特徴はなかった。

【表 3-11】 共通技術課題 14 項目の調査結果

共通の<開発要素>		頻度							
		問1-2				問1-3		問1-4、5	
		最重要	2番目	3番目	スコア*	早期実現	猶予5年	国プロジェクト	小規模
1)	レイシ設計：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	10	1	2	34	15	0	5	4
2)	ビーム入射系：ライナック・シンクロトロンを選択	3	2	0	13	8	1	5	3
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	6	4	0	26	14	1	6	2
4)	アライメント等：磁石のアラインメントの精度向上、温度管理、磁場測定の高度化	0	5	1	11	9	0	1	2
5)	真空系：真空チャンバーのア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	1	2	2	9	11	0	2	2
6)	高周波加速系：Solid state amplifier 等を用いた高周波空洞の電源、高調波（HOM）-free高周波空洞の開発	0	3	2	8	8	3	3	4
7)	アンジュレータ：短周期化と低ギャップによるビーム不安定性の抑制	1	2	3	10	6	1	1	3
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、コミッショニングを容易にするビーム診断系、ビームモニタおよびビーム調整手法	0	1	2	4	5	1	0	5
9)	加速器制御系：データベースおよび施設内ネットワークのあるべき姿	0	0	0	0	4	3	0	4
10)	光学系：光源エネルギーに対する最適化	0	1	3	5	4	2	1	1
11)	利用系：計測のオートメーション化、計測システム共通化	1	0	2	5	4	6	3	8
12)	建物：付帯設備等の振動抑制、温度管理	0	2	1	5	4	1	1	3
13)	冷却・受電・変電設備：高安定性と低コストの確保	0	1	2	4	4	1	1	2
14)	その他	1	1	2	7	2	0	1	1

\*スコア：最重要を3点、2番目を2点、3番目を1点として足し合わせたもの

【表 3-12】分野別の重要度スコア（共通技術課題）

共通の<開発要素>		グループ別スコア								総合スコア
		共通担当者				固有担当者				
		①	②	③	④	①	②	③	④	
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	3	7	0	4	9	5	6	0	34
2)	ビーム入射系：ライナック・シンクロトロンを選択	0	3	0	2	0	2	3	3	13
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	8	3	6	3	2	2	2	0	26
4)	アライメント等：磁石のアラインメントの精度向上、温度管理、磁場測定の高度化	0	2	2	2	4	1	0	0	11
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	3	0	0	3	0	1	0	2	9
6)	高周波加速系：Solid state amplifier 等を用いた高周波空洞の電源、高調波(HOM)-free高周波空洞の開発	0	5	0	2	0	1	0	0	8
7)	アンジュレータ：短周期化と低ギャップによるビーム不安定性の抑制	1	0	0	2	1	3	2	1	10
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、コミショニングを容易にするビーム診断系、ビームモニタおよびビーム調整手法	0	2	1	1	0	0	0	0	4
9)	加速器制御系：データベースおよび施設内ネットワークのあるべき姿	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10)	光学系：光源エネルギーに対する最適化	0	0	1	0	0	0	4	0	5
11)	利用系：計測のオートメーション化、計測システム共通化	1	0	3	0	0	0	1	0	5
12)	建物：付帯設備等の振動抑制、温度管理	0	0	2	2	1	0	0	0	5
13)	冷却・受電・変電設備：高安定性と低コストの確保	0	1	2	1	0	0	0	0	4
14)	その他	2	1	0	0	1	3	0	0	7



【表 3-13】 固有技術課題 6 項目の調査結果

固有技術課題調査項目		頻度								
		問2-2					問2-5		問2-6	
		5段階評価(5が最重要)					スコア	早期実現	猶予5年	国プロジェクト
		5点	4点	3点	2点	1点				
1)	超伝導磁石の利用の是非	6	1	5	1	0	51	5	1	2
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	2	2	5	0	0	33	3	0	0
3)	熱負荷対策	4	4	4	0	2	50	4	2	0
4)	高周波加速空洞の加速周波数の選択	1	1	3	2	0	22	2	0	1
5)	高調波高周波空洞によるビーム寿命の確保	2	5	2	0	1	37	1	0	1
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	2	1	3	0	2	25	3	0	2

\*スコア:5段階表示の点数(5,4,3,2,1)を合計したものの。

【表 3-14】 分野別のスコア（固有技術課題）

		グループ別スコア								スコア
		共有担当者				固有担当者				
		①	②	③	④	①	②	③	④	
1)	超伝導磁石の利用の是非	5	5	8	9	6	7	8	3	51
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	0	3	9	8	4	3	3	3	33
3)	熱負荷対策	7	3	9	8	7	8	4	4	50
4)	高周波加速空洞の加速周波数の選択	2	4	3	8	0	3	2	0	22
5)	高調波高周波空洞によるビーム寿命の確保	7	4	4	9	5	3	1	4	37
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	0	1	4	8	5	3	1	3	25

### 3-2-3 ヒアリング概要ペーパーと事前調査資料

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

①-1 後藤俊治（高輝度光科学研究センター 加速器部門長、光源・光学部門長）

専門分野：光学系、アンジュレータ、利用系

#### 概要

フォトン数を要求するあまり大蓄積電流化などで多大なエネルギーを消費する放射光施設は、時代の流れに逆行するものである。フロントエンド高熱負荷機器や高熱負荷光学素子の開発競争はある程度終焉を迎えているとみる。リングの極低エミッタンス化は、エネルギー資源のインプットを増やさずに、使えるコヒーレントなフォトンをどれだけ増やせるかが知恵の絞りどころであり、国際的にもこの土俵での勝負になるものと思われる。加速器、挿入光源から得られる性能を壊さずに、実験ステーションに輸送する高品位の光学系の選択が必須である。

#### ・高熱負荷機器，高熱負荷光学素子

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てこない（使いこなせないという意味でも）と推察する。したがって、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。これは高品質の放射光ビームの維持と輸送という点でも、施設の省エネルギー運転という意味でも重要な観点である。その上で、初段の高熱負荷光学素子に求められることは、例えば、光学素子そのものの品質の維持に加え、冷媒循環に伴う素子の振動を低減することである。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 nm 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。

#### ・X線光学系

高品位の全反射ミラー、多層膜ミラー、Multi-layer Laue Lens, Fresnel Zone Plate、屈折レンズなど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、場合によってさらに厳しいものになるものがある。ミラーでは表面形状誤差に対する要求が 1 nm 以下になってくる。要求に見合うように加工技術、形状計測技術などで技術革新は続いていくものとする。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想する。日本の技術力は高いが、どのように使うかという総合力で海外に負ける例も少なくない。単純に集光素子を用いて 10 nm 以下のビームをつくりだすだけでなく、もう少し大きな 100 nm~1  $\mu$ m 程度の大きさのコヒーレントな X 線ビームをつくり、結像光学系や回折イメージング等で、高分解能な X 線利用を推進することを考える必要がある。

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る。素子製作は海外メーカー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。また、挿入光源における偏光切り替えは、電子ビームを揺動させる欠点があり、フィードバックシステム等を駆使してもなお、完全にゼロにできていない。マシン側でいろいろな改善策を検討することに加え、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、電子ビームの安定な周回（すなわち高品質ビームの維持）のために重要な開発要素となるだろう。

## ヒアリング内容

### 1. 共通技術課題

#### 1-1 最重要項目：

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

理由：

MBA を前提とした 100 pmrad~1 nmrad の低エミッタンスリング実現のためには高精度の磁石システムの開発が必須である。特に加速器システム全体での低消費電力化に対して効果的な永久磁石を用いた磁石システムは、今後の施設運営に課せられる省エネルギー化にとって重要なアイテムである。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は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る道筋は見えておらず、完成後のインパクトの最も大きな開発要素と考える。

具体的な方策：

早急に放射光施設とメーカーによる共同研究開発を開始すべき段階にある。

5年後の見込み：

5年後の見込みに言及することはできないが、国内の技術を結集して、ぜひとも早期に実現させるべき要素であるというしかない。国内には NdFeB 系磁石をベースにした挿入光源の高い製造技術があり、実現を期待する。

国際的な動向：

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あり。

## 1-2 第2重要項目

真空系：

真空チャンバーのア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

理由：

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と判断した。MBA ラティスでは従来のような大口径の真空チャンバーを必要としなくなる反面で、小口径チャンバーにおける超高真空の維持、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、さらに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など、全体システムとの整合をとりつつ設計、製作する必要がある。

具体的な方策：

放射光施設とメーカーの共同研究開発を開始すべき段階にある。

5年後の見込み：

R&D を重ね、適切な材料選択、具体的な設計・製造方法が確立し、さらに量産による低コスト化が実現できるだろう。

国際的な動向：

詳しいことはフォローしていないが、最近立ちあがった/立ち上がりつつある施設 (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 などの動向を見ておく必要がある。

## 1-3 第3重要項目

アンジュレータ：

短周期化と低ギャップによるビーム不安定性の抑制

理由：

光学系とともに次世代放射光の高度利用を支える基盤の一つであり、低エミッタンス次世代放射光光源における挿入光源の最適化は重要な課題と位置付ける。SPring-8における特に軟X線対応のアンジュレータの場合、偏光制御をキッカー、移相器などを用い電子ビームの軌道を制御する方式を採用したが、そのためビームの軌道変動はゼロにできておらず、一部の利用に影響が出ている。今後の低エミッタンスリングでは、この問題は益々深刻になる。軟X線領域においても光学系による偏光制御も視野に入れるべきであろう。硬X線領域では、短周期化をベースに利用エネルギーと輝度の最適化を図るべきである。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合せて推進すべきと考える。また、非常に高いエネルギー領域も、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。光源戦略は、初期のマシンの性能を劣化させずに維持するために重要である。

具体的な方策：

NdFeB系など磁石材料、真空技術、RF技術、ギャップ制御機構等、各種R&Dを実施する。

5年後の見込み：

既存技術の最適化、改良レベルのものをベースとして、それに加えて、高磁場化、短周期化、機構/架台などの高性能化、コンパクト化された挿入光源が実用化されることを期待する。

#### 1-4 開発スケジュール

i. 早く実現すべき開発要素：

電磁石系、アライメント等、真空系、高周波加速系、アンジュレータ、ビーム診断・ビーム制御系

ii. 5年以上の猶予がある開発要素：

電磁石系、高周波加速系の一部

超伝導技術、固体素子技術は、別の既存技術で代替可能であり、建設当初からは必須なものでないと考ええる。逆に、最初から実機に導入するのはリスクが高い。ある程度R&Dを重ねたあとで、必要に応じて既存技術から置き換えるのでも遅くないと考ええる。

#### 1-5 開発組織について

i. 国を挙げたプロジェクトなどで強く推進すべき課題：

永久磁石をベースとした磁石システムの開発などは、これまでにほとんど実機での実績のないものであり、省電力化のメリットを生かすためにも十分な検討が必要であ

り、小規模な R&D から始まるにしても、量産を視野に入れ、想定されるリスクを回避していくには、支援が必要であろう。

その他

高い安定性を前提とした高出力・高速のパルス電源開発、低コスト化も視野に入れた高性能コンパクトアンジュレータの開発、RF 電源系の固体化

- ii. 小さな研究グループまたは個々の企業による開発研究に任せるのが妥当な課題：  
特になし。小さな研究グループまたは個々の企業が単独でやりきれる要素はなく、少なくとも放射光施設とメーカーの共同研究開発のスキームが必要と判断する。

#### 1-6 専門分野の開発要素について

##### ・高熱負荷機器，高熱負荷光学素子

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 を数倍も超える光源は出てこない（使いこなせないという意味でも）と推察する。したがって、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。これは高品質の放射光ビームの維持と輸送という点でも、施設の省エネルギー運転という意味でも重要な観点である。その上で、初段の高熱負荷光学素子に求められることは、例えば、光学素子そのものの品質の維持に加え、冷媒循環に伴う素子の振動を低減することである。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 nm 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。

##### ・X線光学系

高品位の全反射ミラー、多層膜ミラー、Multi-layer Laue Lens、Fresnel Zone Plate、屈折レンズなど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、場合によってさらに厳しいものになるものがある。ミラーでは表面形状誤差に対する要求が 1 nm 以下になってくる。要求に見合うように加工技術、形状計測技術などで技術革新は続いていくものと考えられる。単純に集光素子を用いて 10 nm 以下のビームをつくりだすだけでなく、もう少し大きな 100 nm~1  $\mu$ m 程度の大きさのコヒーレントなX線ビームをつくり、結像光学系や回折イメージング等で、高分解能なX線利用を推進することを考える必要がある。

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る。素子製作は海外メーカー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。また、挿入光源における偏光切り替えは、電子ビームを揺動させる欠点があり、フィードバックシステム等を駆使してもなお、完全にゼロにできていない。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、電子ビームの安定な周回（すなわち高品質ビームの維持）のために重要な開発要素となるだろう。

- ・5年後の見込み

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想する。

- ・国際的な動向

フォトン数を要求するあまり大蓄積電流化などで多大なエネルギーを消費する放射光施設は、時代の流れに逆行するものである。フロントエンド高熱負荷機器や高熱負荷光学素子の開発競争はある程度終焉を迎えているとみる。リングの極低エミッタンス化は、エネルギー資源のインプットを増やさずに、使えるコヒーレントなフォトン数をどれだけ増やせるかが知恵の絞りどころであり、国際的にもこの土俵での勝負になるものと思われる。加速器、挿入光源から得られる性能を壊さずに、実験ステーションに輸送する高品位の光学系の選択が必須である。

### 1-7 安定な施設性能を確保した上で、建設コストおよび運転コストを低減するための方策

設計・建設から施設運用まで、それに関わるスタッフは当然要求される能力や資質が変わっていくべきものであり、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良く考えておく必要がある。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所以で注意が必要である。

自前のスタッフのみならず、外部のリソースを有効活用して維持管理や更新が可能となるようなロボットや自動制御システムの導入が必須である。

## ①-2 岡島 敏浩（佐賀県立九州シンクロトロン光研究センター）

専門分野：利用系、建物、放射線遮へい、放射線管理

## 概要

次世代放射光光源（リング型）では、挿入光源と加速器の技術革新を最大限に取り入れ、高性能と省電力化と省資源化を両立し、高性能で低コストな光源を実現することを目標としていることは、これから新規に建設を行う光源には必要な特徴であると思います。これらの特徴に加えて、利用者側から見て優先順位の高い安定性の高い光源であることも新光源の特徴として考慮すべきことだと思います。以下に 3 点ほど意見を述べさせていただきます。

上垣外様の初日のメモに書かれている、電磁石の超伝導化については反対です。一つ目の理由は、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となります。また、当研究センターの実績では超伝導磁石は年に 1 回程度のクエンチングを起こしています。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くなります。二つ目の理由は、同時期に超電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懸念があります。このようなことから、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だと考えます。

先端的な放射光施設の建設は 10～20 年に一度あるかないかの大事業です。そして、先を見越した先端的な設備等の研究開発が行われます。一方で、国内の中小放射光施設は技術開発のリスクやコストを低減するために極力既存技術を利用するか一部を改良して利用することから、多くの技術が施設建設後、次第に陳腐化し競争力を維持することが厳しい状況です。そこで、次世代放射光光源を建設するにあたっては、中小放射光施設の研究者、技術員も一緒に開発や建設に係らせていただき、建設後は元の施設で新しい技術の展開を図れるような仕組みも考えていただければ、日本全体の放射光施設の競争力が陳腐化することなく、発展を続けていけると考えます。

3.11 の事故以来、国民の放射能、放射性物質、放射線に対する関心が高まっています。また、国による放射線発生装置により発生した放射化物の管理もより厳しくなっています。大型の施設の運営は、国民の理解があつてのことなので、放射線遮へいや放射化物の管理については計画段階で十分に考慮する必要があります。また、放射化物を発生させないような機器の設計や建設も初期段階から考える必要があるかと思えます。

## ヒアリング内容



## 1. 共通技術課題

### 1-1 最重要項目：

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

理由：

光源の中で電力の消費が最も大きく低コストを実現するためには必要。

具体的な方策：

永久磁石の利用が必須と考える。

5年後の見込み：

国際的な動向：

### 1-2 第2重要項目：

放射線遮へい、放射線管理

理由：

施設運営における国民の理解が必要である。

具体的な方策：

設計段階から放射線管理の方針を徹底する。

### 1-3 第3重要項目

利用系：

計測のオートメーション化、計測システム共通化

理由：

汎用的な実験と先端的で特殊な実験の両立が必要と考える。

具体的な方策：

汎用的な実験については手順のマニュアル化を図る。

### 1-4 開発スケジュール

i. 早く実現すべき開発要素：

全て、次世代光源の実現には早期実現が必要である。

ii. 5年以上の猶予がある開発要素：

1-5 開発組織について

i. 国を挙げたプロジェクトなどで強く推進すべき課題：

特になし

ii. 小さな研究グループまたは個々の企業による開発研究に任せるのが妥当な課題：

特になし

1-6 専門分野の開発要素について

1-7 安定な施設性能を確保した上で、建設コストおよび運転コストを低減するための方策

中小放射光施設の人材育成を考慮した国内放射光施設間との人的交流が必要である。

**2. 固有技術課題**

固有技術課題についてのコメント

超伝導磁石の利用の是非：

超伝導磁石の利用については勧めない。

高調波高周波空洞によるビーム寿命の確保：

Top up 運転が定着していることから、あまり重要とは思わない。

Top up 運転によるビーム振動の低減が解決すべき課題。

### ①-3 中村 典雄（高エネルギー加速器研究機構 7系教授）

専門分野：ラティス設計、ビームとアンジュレータ低ギャップなどの抵抗壁によって発生するウェーク場が引き起こす発熱とビーム不安定性の検討、軌道変動抑制と軌道安定化

#### 概要

##### 1) ラティス設計

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（Hybrid Multi-Bend Achromat）ラティスが考案・採用されたが、通常のマルチベンドラティスの光源リングに比べて六極電磁石磁場が小さく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などを全て改善することにつながるため、このようなラティスの設計・開発を進めていくべきである。

##### 2) 電磁石系

電磁石系では、縦方向や横方向に磁場勾配があるような機能結合型の偏向電磁石の開発が必要になるとともに、必要な四極・六極電磁石の磁場強度からボア径が小さくなるので電磁石のコンパクト化も課題になる。また、電磁石間のスペースも狭隘になる傾向にあり、排気系含む真空ダクトやビームラインとの干渉を考える必要がある。さらに、電磁石共通架台の設計やアライメントなどにも関連するため、電磁石の設計は比較的早期に固めて試作しておくべきである。省エネ化については、ESRF-II 計画で一部の偏向電磁石について永久磁石を使うことが検討されている一方で、ブラジルの Sirius 計画ではビームロスによる減磁の影響を心配して実機への利用が見送られた。永久磁石の使用を検討する上では、ビームロスの評価とそれによる電磁石減磁への影響（必要があればその対策）を十分に検討しておくべきである。

##### 3) 真空系

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などを極力抑えるためにも超高真空を実現する必要があるが、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が配置できるかどうかは早期に検討されるべき課題である。従来の方式だけで十分な真空度を得られない場合には、NEG coating された真空ダクトを開発・利用することが 1 つの解決策になる。Soleil では真空ダクト全体の 56 %が NEG coating されていて特に問題なく運転されており、MAX-IV と Sirius でもほぼリング全周に使用する予定である。日本でも KEK のコンパクト ERL の一部で使われている。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も起こりやすくなるので、アンジュレータ用真空ダクトのように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。例えば、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ェンバーが KEK-PF や SPring-8 で既に使われている。

#### 4) ビーム不安定性対策と軌道安定化

アンジュレータギャップや真空ダクト径の縮小に伴う抵抗性ビーム不安定性の成長率の増大は世界的に開発されてきたフィードバックキッカーシステムで対応可能と考える。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。軌道フィードバックシステムでは FPGA などを利用して高速化を図り、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。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である。

#### 5) ビーム入射系

トップアップ運転を利用するために、リングに常時入射可能な入射器が必要である。加えて、トップアップ入射時には蓄積ビームの変動が小さいことが望ましい。その観点では、パルス多重極電磁石を用いた入射方式を使うことが解決策の 1 つになりうる。パルス多重極電磁石は KEK の PF リングでパルス六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を検討している。

### ヒアリング内容

#### 1. 共通技術課題

##### 1-1 最重要項目：

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

理由：

設計されたラティスとオプティクス及びそのビームパラメータが電磁石系、真空系、高周波加速系など多くの要素の仕様及びエミッタンスや輝度などの光源性能を決めるためである。

具体的な方策：

マルチバンドセルに分散バンプを併用してクロマチシティを補正する六極電磁石の非線形磁場強度を極力弱めて低エミッタンスかつ広いビーム安定領域を実現する。また、KEK-B で考案・利用された方法であるが、セル内のペアとなる六極電磁石 (SF, SD) 間のベータatron位相差を  $\pi$  に近づけて六極電磁石によるキックを打ち消すことで非線形共鳴の影響を弱めてビーム安定領域をさらに広げる。偏向電磁石は分

散バンプでエミッタンスを増加させないために曲率半径を大きくし、なおかつ縦方向に磁場勾配を持たせる。それ以外の偏向電磁石では低エミッタンス化のために水平方向に磁場勾配を持たせる。これを HMBA (Hybrid Multi-Bend Achromat) ラティスと呼ぶ。

5年後の見込み：

実現可能である。

国際的な動向：

欧州の ESRF のアップグレード計画である ESRF-II において、上述した HMBA 方式が考案・採用されており、ESRF-II 計画も予算化された。この HMBA ラティスでは、同じ極低エミッタンス（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て広いビーム安定領域を確保できる。他の施設でもこの方式を基本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。

## 1-2 第2重要項目

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

理由：

極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に、HMBA 方式のように電磁石系では縦方向や横方向に磁場勾配がある偏向電磁石を利用することが主流になる。特に縦方向に磁場が変化する偏向電磁石についてはこれまであまり使用されたことがなく、早期に検討・開発しておく必要があると考える。省エネ化に関連して全てを電磁石にするか一部を永久磁石にするのかなども検討する必要がある。電磁石のコンパクト化では、真空ダクト（排気系含む）やビームラインとの干渉を考える必要がある。また、電磁石の共通架台の設計や電磁石のアライメントなどにも関連するために比較的早期に設計検討しておくことが求められる。

具体的な方策：

3 次元的な磁場計算に基づいて電磁石の設計を行い、試作機を製作して磁場測定などで性能を確認する。その結果とラティス設計で評価する電磁石に関する許容誤差などと比較検討して、設計にフィードバックする。架台についても構造解析に基づいて設計・試作を行う。試作機の性能評価を行って設計にフィードバックできると良い。

5年後の見込み：

実現可能である。

国際的な動向：

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 2 案が併記されていて、永久磁石を用いた偏向磁石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、その実機への利用は見送られたようだ。

### 1-3 第3重要項目

真空系：

真空チャンバーのア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

理由：

低エミッタンスリングでは強い 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、セル内の電磁石間のスペースも狭隘になる傾向にある。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などを極力抑えるためにも超高真空を実現する必要があるが、必要な真空機器や排気系が十分に配置できるかどうかは早期に検討されるべき課題である。従来の排気ポンプとアンテチェンバーなどを主に使う場合はスペースと電磁石系との干渉を考える必要がある。従来の方式だけでは十分な真空度を得ることが難しい場合には、NEG coating された真空ダクトを検討・開発することが必要になる。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も起こりやすくなるので、早期の設計検討と必要に応じた対策を講じる必要がある。

具体的な方策：

従来の排気ポンプとアンテチェンバーなどを使う方式の他に、真空機器や排気ポンプのスペースが限られる場合には NEG coating された真空ダクトを利用することが有効である。径の特に小さい真空ダクトについては凹凸を極力減らした上で、電気伝導度の良い材質を選ぶか内面に銅メッキなどを施すことで抵抗性 (抵抗壁) インピーダンスを抑える。必要があれば、一部は電磁石同様に試作して性能を確認する。

5年後の見込み：

実現可能である。

国際的な動向：

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している。また、Soleil でも全体の 56%が NEG coating されている。KEK でも CERN からライセンスを取得して、コンパクト ERL で超伝導空洞周辺の真空ダクトに NEG coating されたダクトを使用している。ESRF ではアンジュレータ真空ダクトなど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ェンバー方式を再利用するが、将来 NEG coating パイプを拡張できるように検討している。内面を銅メ

ッキしたステンレス製アンジュレータチェンバーは KEK-PF(U16) や SPring-8 (BL07LSU)などで既に使われている。

#### 1-4 開発スケジュール

i. 早く実現すべき開発要素：

ラティス設計、電磁石系、真空系

ii. 5年以上の猶予がある開発要素：

#### 1-5 開発組織について

i. 国を挙げたプロジェクトなどで強く推進すべき課題：

ii. 小さな研究グループまたは個々の企業による開発研究に任せるのが妥当な課題：  
全て

#### 1-6 専門分野の開発要素について

・アンジュレータ低ギャップなどの抵抗壁のウェーク場が起す発熱やビーム不安定性の検討

具体的な方策：

発熱については真空ダクトの内面の洞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。その上で、発熱量に応じた十分な冷却系を用意する。ビーム不安定性でも 100-200 ミクロン厚の銅シートや銅メッキを施して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を持つ高速のフィードバックキッカーを使用する。

5年後の見込み：

実現可能である。

国際的な動向：

真空封止アンジュレータの銅シートやフィードバックキッカーについては多くの施設で既に利用されている。例えば、KEK の PF リングでは減衰時間 0.1ms 程度までのフィードバックキッカーを実現できている。アンジュレータ用真空チェンバー内面の銅メッキについても KEK-PF や SPring-8 で既に利用されている。

・軌道安定化のための検討、軌道補正や軌道フィードバックの検討

具体的な方策：

共通架台を含む電磁石系の振動モードや振動応答等を構造解析や振動測定を通して調べて軌道変動への影響を評価する。その結果、必要な改良等があれば、設計や製作に反映させる。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、固有ベクトル法（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などの重要な場所をより重点的に安定化することができる。軌道フィードバックシステムでは FPGA などを利用して高速化を図り、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。

5年後の見込み：

実現可能である。

国際的な動向：

軌道フィードバックシステムではビーム位置モニタのデータ処理を含めて FPGA が使われてきている。軌道補正には SVD 法が多く施設で利用されている。ブラジルの LNSL では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を 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使用している。

#### 1-7 安定な施設性能を確保した上で、建設コストおよび運転コストを低減するための方策

特になし

## 2. 固有技術課題

### 軟X線向き放射光施設

#### 4) ビーム入射機構と入射器の選択

現状：

極低エミッタンスリングではビームの安定領域が狭くなり、入射によるロスや入射効率が問題になる。また、トップアップ運転が主流になっていて、常時入射可能であることや入射でのビーム変動が小さいことが求められる。ビームエネルギーが低いと相対的にビーム寿命が短いので頻繁な入射が必要になってくる。入射機構は通常のキッカーによるバンプを使用した入射方式の他に、最近ではパルス多重極電磁石を用いた入射方式も利用されている。入射器は特別な事情（例えば、既存のフルエネルギー入射可能なライナックがある場合）がなければ、コストなどの観点からシンクロトロンが主に利用されている。

解決策：

入射ロスや効率を上げるためには、リングのダイナミックアパーチャを大きくし、なおかつ入射点付近でのベータatron関数を大きくする。そのためのラティス設計が



重要である。トップアップ運転で入射時の蓄積ビームの変動やそれによるロスなどを抑えるためには、パルス多重極電磁石による入射方式を使うことが解決策の 1 つになりうる。高調波空洞を導入することでビーム寿命を伸ばして入射の負荷を減らす。入射器はトップアップ運転の仕様に対応できるように設計する。

国際的な動向：

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る。また、MAX-IV や Sirius でもパルス多重極電磁石の導入を検討している。

## 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

### ②-1 池田 直昭（三菱重工メカトロシステムズ(株)、機械・設備システムドメイン 主幹プロジェクト統括）

専門分野：ビーム入射系、真空系、高周波加速系

#### 概要

- (1) 最重要の開発要素はラティス設計であると考え。これは、次世代放射光施設の目指す方向性や利用分野等に直結する要素であり、これを決定することが他の全ての要素に影響を与えるためである。具体的な方策としては、放射光利用ユーザー、加速器ハード双方のコミュニティが一致協力して施設の目指す姿と諸外国の施設に対する差別化を明確にすべく、調査・協議を行たうえで早急に基本デザインを確定することが必要と考える。
- (2) 先行する海外の第三世代放射光施設（台湾 TPS、米国 NSLS-II、等）では、高輝度化を指向した大電流化のために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、冷凍機等の専用ユーティリティが必要となりコストや所要電力の増大につながるが、放射光ユーザーからのニーズもヒアリングした上で必要性について議論すべきと考える。
- (3) 真空系については、前述のラティス設計に依存する要素が大きい。真空チェンバー、磁石、排気ポート、ゲート弁、センサ類の配置やそれぞれの機器間の干渉およびアライメントやメンテナンスの容易さ等も勘案して設計を行う必要がある。従って、ラティス設計を早期に確定することが重要と考える。
- (4) 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、高精度な線形加速器と同等のシステムを採用することで放射光リングのチェ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を提案する。また、入射器に前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)への拡張も可能と考えられる。初期段階で将来的な施設の拡張性についても検討しておくことが望ましいと考える。
- (5) 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を提案する。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。これらの方式では、①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、②SPC 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、③SPC が土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できる。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ものとする。

## ヒアリング内容

### 1. 共通技術課題

#### 1-1 最重要項目：

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

理由：

放射光源の目指す方向性、利用分野等に直結する要素であり、これを決定することが他の全ての要素に影響を与えるため。

具体的な方策：

放射光利用、加速器ハード双方のコミュニティが一致協力して施設の目指す姿と諸外国の施設に対する差別化を明確にすべく調査・協議を行い、早急に基本デザインをオーソライズする。

5年後の見込み：

1年以内に立地場所を含めた施設の基本仕様を確定できれば5年以内には施設実現の可能性は高いと考える。

国際的な動向：

近年、台湾のTPS、米国のNSLS-II、が第三世代光源として稼働を始めている。低エミッタンス化実現には周長は大きくなる傾向あり。

#### 1-2 第2重要項目

高周波加速系：

Solid state amplifier 等を用いた高周波空洞の電源、高調波(HOM)-free 高周波空洞の開発

理由：

高輝度化を指向した大電流化のために先述のTPSやNSLS-IIでは、超伝導加速空洞を採用している。ユーザ側のニーズからも必要性が高いのではないかと考える。

具体的な方策：

放射光利用、加速器ハード双方のコミュニティが一致協力して施設の目指す姿と諸外国の施設に対する差別化を明確にすべく調査・協議を行い、早急に基本デザインをオーソライズする。

5年後の見込み：

1 年以内に立地場所を含めた施設の基本仕様を確定できれば 5 年以内には施設実現の可能性は高いと考える。

国際的な動向：

台湾 TPS、米国 NSLS-II、さらに韓国・PLS-II でも超伝導空洞が採用されている。

### 1-3 第3重要項目

冷却・受電・変電設備：高安定性と低コストの確保

理由：

通常、施設の総建設コストのうち建屋躯体とユーティリティのコストが半分以上を占め、装置本体に十分な予算が回らないという問題が多いと感じるため。

具体的な方策：

NdFeB 系など磁石材料、真空技術、RF 技術、ギャップ制御機構等、各種 R&D を実施する。

5年後の見込み：

1 年以内に立地場所を含めた施設の基本仕様を確定できれば 5 年以内には施設実現の可能性は高いと考える。

国際的な動向：

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ると聞いている。このような事例を調査し参考にしてはどうか。

### 1-4 開発スケジュール

i. 早く実現すべき開発要素：

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

ii. 5年以上の猶予がある開発要素：

加速器制御系：データベースおよび施設内ネットワークのあるべき姿

### 1-5 開発組織について

i. 国を挙げたプロジェクトなどで強く推進すべき課題：

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

ii. 小さな研究グループまたは個々の企業による開発研究に任せるのが妥当な課題：

ビーム入射系：ライナック・シンクロトロンを選択

#### 1-6 専門分野の開発要素について

- ・ビーム入射系、真空系、高周波加速系

具体的な方策：

入射器で高安定、高精度なビームを発生させることにより放射光リングのダクトをコンパクトにして磁石のコンパクト化と励磁電源の小型化等システム全体の最適化を実現する

5年後の見込み：

1年以内に立地場所を含めた施設の基本仕様を確定できれば5年以内には施設実現の可能性は高いと考える。

国際的な動向：

知る範囲では、入射器の高安定化・高精度化を含めてシステム検討を行っている例は無いと考える。

#### 1-7 安定な施設性能を確保した上で、建設コストおよび運転コストを低減するための方策

- ・施設の高稼働率を実現するためのバックアップ電源の整備

## ②-2 佐藤耕輔（東芝 電力システム社 原子力事業部 原子力開発設計部グループ長）

専門分野：電磁石系、高周波加速系、冷却・受電・変電設備

## 概要

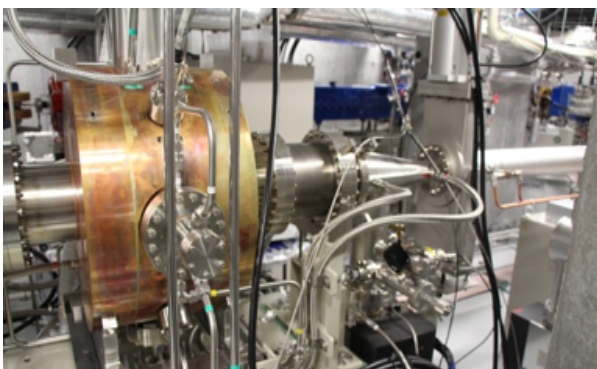
## 高周波加速系

次世代放射光光源で使用する高周波加速系については、1MW クラスの大電力高周波源と高効率かつ安定にビーム加速する高周波加速空洞で構成される必要がある。そのためには、日本の放射光施設で数多くの運転実績を持つ 500MHz 帯の高周波加速システムを採用することが好ましい。

高周波源としては定格連続出力 1.2MW (CW) のクライストロンが考えられる。このクライストロンは多くの加速器施設で安定に運転されている。

高周波加速空洞については、大電流の加速を行う場合、高次モード (HOM) によるビーム不安定性を考慮する必要がある。これについても 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。

一方、次世代放射光光源を実現させる上で重要なポイントとして、ビーム軸方向のスペースを考慮する必要がある。そのためにビームライン上に配置するすべての機器をコンパクト化することが必須であり、高周波加速空洞も例外ではない。



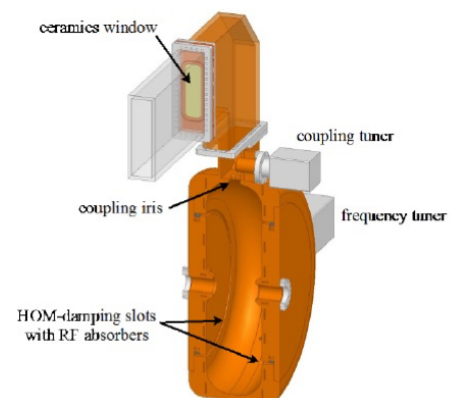
写真は、あいち SR にて使用されている高周波加速空洞である。

空洞本体よりビーム軸方向に突き出した部分で HOM を吸収する構造となっている。そのためスペースが必要となり、本空洞を直線部に複数台数設置することは

困難であると思われる。

この課題に対して、最近の研究では、共振モードに TM020 モードを採用したコンパクトな加速空洞が開発されている [1]。本空洞では右図に示す通り、HOM を空洞本体に設けた高周波吸収体を収納するスロットで減衰させるため、HOM 吸収のための専用スペースが不要な構造となっている。空洞長は 0.4m 以下、1 台当たりの加速電圧は最大 900kV のため、省スペースで高効率にビーム加速することが可能である。

現在、高周波吸収体の接合や空洞の加工、組立が行われており、今後、大電力試験による実証試験が行われる予定である。次世代放射光光源へ適用が期待される有用な技術である。



[1] H. Ego 他 第 11 回日本加速器学会年会プロシーディングス (2014) p. 237

## ヒアリング内容

### 1. 共通技術課題

#### 1-1 最重要項目：

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

理由：

コンパクト化により磁極の加工、組立精度が高く要求される。また、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が必要と考える。超伝導電磁石については小型冷凍機を採用する場合の長期安定運転に課題がある。

具体的な方策：

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。

5年後の見込み：

低損失半導体素子を採用した電源による省エネ

国際的な動向：

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あり。

#### 1-2 第2重要項目

アライメント等：

磁石のアラインメントの精度向上、温度管理、磁場測定の高度化

理由：

複数の電磁石を非常に高精度で設置する必要があり、温度変化、振動に対する対策も必要と考える。また大量の電磁石を高精度で磁場測定を行う測定装置自体の精度、磁場測定にかかる時間、コストを考慮する必要がある。

具体的な方策：

複数電磁石の一体設置による据付誤差の低減、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。

5年後の見込み：

ビームフィードバックによる自動補正

### 1-3 第3重要項目

高周波加速系：

Solid state amplifier 等を用いた高周波空洞の電源、高調波(HOM)-free 高周波空洞の開発

理由：

高周波原の省エネ化が必要であるが、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、コストの検討が必要と思われる。省スペースの HOM 減衰空洞については開発中であり試作、出力試験を行う必要がある。

具体的な方策：

空洞の試作および出力試験、高出力半導体増幅器の開発、クライストロンの省エネ化（エネルギー回収等）

### 1-4 開発スケジュール

2-1. 早く実現すべき開発要素：

ラティス設計、ビーム入射系、電磁石系、アライメント等、真空系、高周波加速系

ii. 5年以上の猶予がある開発要素：発要素：

### 1-5 開発組織について

i. 国を挙げたプロジェクトなどで強く推進すべき課題：

ビーム入射系、電磁石系、真空系、高周波加速系

ii. 小さな研究グループまたは個々の企業による開発研究に任せるのが妥当な課題：

ラティス設計、ビーム診断・ビーム制御系、加速器制御系、利用系、建物、

### 1-6 専門分野の開発要素について

電磁石系、高周波加速系、冷却・受電・変電設備

・具体的な方策

施設全体の省エネを考慮した受電電圧、ケーブル仕様の最適化。

1-7 安定な施設性能を確保した上で、建設コストおよび運転コストを低減するための方策



トラブル発生時の早期復旧やメンテナンス周期の最適化、故障の未然検知のため各機器の状態を細かくモニタしデータベース化することは有効と思われま

## ②-3 林 和孝（三菱電機特機システム株式会社）

専門分野：高周波加速系、ビーム診断・ビーム制御系、加速器制御系

## 概要

## 1. 共通の技術課題について

次世代放射光施設実現にあたって検討が必要な共通の技術課題を克服するための開発要素。

## (6) 高周波加速系：

高周波加速器は、周波数の選定、高周波デバイス出力の選定、高周波加速空洞の方式、これらによって、加速器の実現性（サイズ、性能、安定性、可用性、製造コスト、運転コスト）を左右します。次世代放射光施設としては、科学技術インフラとして、特に、可用性・運転コストが重要と考えます。

具体的な方策：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、高周波源です。WBG(ワイドバンドギャップ)半導体を適用する事で、可用性と運転コスト削減に加えて、小型化が実現可能と考えます。

## (1) ストレージリング(シンクロトロン)用の高出力 SSA

リングの大出力高周波源には、大電力クライストロンが使われています。クライストロンの品質向上の成果で、故障や不具合は減少し、寿命も長くなりました。しかし、クライストロン（高電圧電源）が故障すると、故障部品の交換と調整に伴う数日単位の運転停止期間と費用がかかります。定期メンテナンス期間も長く必要です。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徴を持ちます。リングに用いられている UHF 帯の CW クライストロンを、SSA に置換えて可用性向上を図ります。ヨーロッパの放射光施設では既に、SSA を開発し、実現性と信頼性を実証していますが、建設時のコスト高と低効率の弱点があります。今後、WBG 半導体（GaN 等）の高周波大出力素子開発が進展し、従来の LD-MOS と同等の出力(より高い周波数帯域まで)を高効率で実現可能となる事が期待されます。SSA の高効率化は、電力削減と排熱軽減から、初期コストと運転コストの低減を実現します。

5年後の見込み：WBG 半導体（GaN 等）の高周波大出力素子開発が重要です。今後5年間、官民で支持され、かつ、次世代放射光施設向けの SSA 等の市場を示せば、高出力 WBG 半導体素子の実用化が可能と考えます。並行して、高出力高効率の回路や多段合成回路等の要素技術開発を経て、SSA の試作と評価が行われれば、リングの大出力高周波源については、クライストロンと置き換えが始まると考えます。

国際的な動向：SOLEIL（仏）は、大出力 LDMOS と大電力合成回路で、352MHz、180kW CW 出力の SSA を開発（2009）しました。45kW の SSA tower を、4 合成で 180kW。ESRF でも、同様な 352MHz、150kW CW 出力の SSA を導入（2013）しています。500MHz 帯の SSA も、ESRF や PSI（Swiss Light Source 用 65kW の SSA を試作・評価した結果を報告（2015））で開発中です。大出力の SSA は、ヨーロッパが先行していますが、本格普及

には、低コストを実現する SSA 構成と高効率な運転制御が必要で、開発が精力的に進められています。

## (2) 入射線形加速器用の高周波源の半導体スイッチによるパルスモジュレータ

常伝導の線形加速器の高周波源は、高出力のパルスクライストロンが使用され、パルス SSA の代替は困難です。クライストロンモジュレータ（高電圧パルス電源）は、ライント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ます。近年の WBG 素子を利用したパワーエレクトロニクス素子の発展を適用し、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のパルスモジュレータを開発し、置換えて可用性向上を図ります。これによって、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ジッターが劇的に改善され、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と期待されます。

5年後の見込み：パワーエレクトロニクス化の潮流が、WBG 半導体スイッチ素子（SiC-IGBT）の高耐電圧化と低オン電流化を、さらに進展させると考えます。これら半導体スイッチを利用した、より小型で低損失な、ダイレクトスイッチ型パルスモジュレータ回路（MARX 回路、インダクション回路等の方式）が研究開発されると考えます。線形加速器用のクライストロンモジュレータは、従来のライントタイプ型（サイラトロンによるスイッチ）から、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（世界では既に変わりつつありますが）、さらに、小型化と低損失化が実現される事が期待できます。

国際的な動向：世界的に、ダイレクトスイッチ型パルスモジュレータが、多くの研究所で評価され、現在建設中の加速器（MAX-IV、NSLS-II 他）に導入されています。ScandiNova 社（スウェーデン）が、この市場で席巻しています。今後はさらに、小型で低損失なモジュレータが求められます。

## (8) ビーム診断・ビーム制御系

具体的な方策：高速で大規模な FPGA の利用とハードウェア規格化

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、研究的から運用へと取組みがされています。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ます。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事で、コスト低減と開発期間の短縮を図ります。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考えます。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考えます。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、冷却ファンなど、共通規格化された物が使えるようにします。冗長性構成、各ユニット監視制御、ホットスワップ等が対応で、汎用品として購入ができるため、メンテナンス性が高い事が特徴です。

5年後の見込み：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推定します。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）と、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）やタイミング調整技術の発展し、診断と制御技術が進展してゆくと考えます。

国際的な動向：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ます。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ます。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ます。DESY で毎年（2015 年 12 月に第 4 回）MTCA workshop が開催されています。

## ヒアリング内容

### 1. 共通技術課題

#### 1-1 最重要項目：

ビーム入射系：

ライナック・シンクロトロンを選択

理由：

次世代放射光施設の加速器システム構成が重要と考えます。目標が高いほど、加速器の構成の中でビーム入射器の重要性が増します。目指す加速器システム構成によって、必要な要素技術が変わってくるため、最重要としました。

具体的な方策：

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線形加速器を入射器とした、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と考えます。加速周波数は、線形加速器は SACLA で実績の C-band、蓄積リングは国内で主流の 500MHz 帯です。次世代放射光施設として、3 GeV 放射光リング、6 GeV 放射光リングのそれぞれで、TDR(Technical Design Report) が作られ、具体的な加速器システムが示されました。さらに小型化のために入射器には X-band 線形加速器の採用も議論されるところですが、高周波源の開発や信頼性確保が課題に加わります。建設コスト低減やコンパクト性を追求するなら、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です。この場合、次世代放射光施設と言うより、普及型放射光施設と言えると考えます。

5年後の見込み：

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、蓄積リングを用いない、ERL(エネルギー回収型線形加速器)の検討も必要と考えます。RF電力を回収するため、省エネルギーの点からも魅力的です。1.3GHz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での研究開発を進め、課題と対策が明確化し、TDR(Technical Design Report)で具体化すると予想します。

国際的な動向：

## 1-2 第2重要項目

高周波加速系：

Solid state amplifier 等を用いた高周波空洞の電源、高調波(HOM)-free 高周波空洞の開発

理由：

高周波加速系は、周波数の選定、高周波デバイス出力の選定、高周波加速空洞の方式、これらによって、加速器の実現性(性能、安定性、コスト)を左右するため重要と考えます。

具体的な方策：

C-band 線形加速器と 500MHz 帯蓄積リングの高周波加速系を前提に、次世代放射光施設に向けた開発要素は以下の3点と考えます。

- (1) 500MHz 帯高出力 SSA(Solid State Amplifier)による安定運転(停止リスク削減)
- (2) LLRF(低電力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
- (3) 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

内容：

(1) 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ますが、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、寿命も十分となりました。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ります。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徴を持ちます。高電圧回路が無くメンテナンス性も優れています。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す。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て解決を図ります。フランスの放射光施設 SOLEIL で先駆的な大電力 SSA(352 MHz、

180 kW)が開発され、実現性と信頼性が実証されています。コスト高・低効率の弱点を克服が開発の課題となります。

(2)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ます。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ります。このために、高速で大規模なFPGAとその監視制御を行うCPUが重要です。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します。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ェルフや、通信ハブ、電源、冷却ファンなど、共通規格化しています。冗長性構成とする事も出来るし、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るため、メンテナンス性が高い事が特徴です。

(3)パルスモジュレータ：常伝導の線形加速器の高周波源は、高出力のパルスクライストロンであり、当分パルスSSAに替わる事は無いでしょう。従来のパルスクライストロンの高電圧パルス電源(クライストロンモジュレータ)は、ラインタイプ型で、そこに使われている、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)に難が有り、また、維持メンテナンスも大変でした。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事が期待できます。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します。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、複数の方式が有ります。

5年後の見込み：

(1)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使って、SSAの試作と評価を行われる頃と推定。クライストロンの置き換えが始まると考えます。

(2)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物へ移行が進むと考えます。

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推定します。

(3)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事が期待できます。

国際的な動向：

- (1) SSA：大出力 LDMOS と大電力合成回路で、352MHz、180kW CW 出力の SSA を開発（2009）されました。45kW の SSA tower を、4 合成で 180kW。ESRF でも、同様な 352MHz、150kW CW 出力の SSA を導入（2013）しています。500MHz 帯の SSA も、ESRF や PSI で開発中です。PSI では、Swiss Light Source 用に、500MHz -65kW の SSA を開発し、試作・評価した結果を報告しています（2015）。大出力の SSA は、ヨーロッパが先行していますが、本格普及には、低コストな構成と高効率な運転制御が必要で、開発が精力的に進められています。
- (2) 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 規格が作成されました。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ます。
- (3) 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、独自の方式で席巻しています。

### 1-3 第3重要項目

加速器制御系：

データベースおよび施設内ネットワークのあるべき姿

理由：

低エミッタンス実現には、入射器から蓄積リングへと、上流より考えているためです。

### 1-4 開発スケジュール

i. 早く実現すべき開発要素：

ラティス設計、ビーム入射系、高周波加速系

ii. 5年以上の猶予がある開発要素：

無し

### 1-5 開発組織について

i. 国を挙げたプロジェクトなどで強く推進すべき課題：

ラティス設計、ビーム入射系

ii. 小さな研究グループまたは個々の企業による開発研究に任せるのが妥当な課題：

高周波加速系

#### 1-6 専門分野の開発要素について

- ・ 8) ビーム診断・ビーム制御系

具体的な方策：

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、高速のデジタル変換、高速・広帯域なデータ処理が必要となります。このために、LLRFと共通に、MTCA.4規格を利用して取り組む事が出来ます。（LLRFの項目と共通）

- ・ 5年後の見込み

(LLRFの項目と共通)

- ・ 国際的な動向

(LLRFの項目と共通)

#### 1-7 安定な施設性能を確保した上で、建設コストおよび運転コストを低減するための方策

(1) 科学技術のインフラとして放射光施設には運転コストの低減が重要と考えます。運転コスト低減は、電気代削減と維持コスト削減。

##### (2) 電気代削減

(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します。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が必要です。→SSAとLLRF組み合わせた高度な制御

##### (3) 維持コスト削減

(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  
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



## ②-4 松原 雄二 (住友重機械工業株式会社)

専門分野：電磁石、高周波加速系、その他

## 概要

共有技術課題では、低エミッタンス化を可能にするためのラティス設計がもっとも重要で有ると考える。またそれを実現するためにはビーム診断やビーム制御技術が重要であり、高速なフィードバックや、制度の高いビームモニタや調整方法が必要になる。

開発スケジュールにおいても、ラティス設計を最優先に技術課題を解決して実現していくべきである。また、専門分野のひとつである電磁石は、コンパクト化、省エネ化、永久磁石・超伝導電磁石の利用などの開発によって、放射光リングの性能や建設運用コストを大きく左右する技術要素である。酸化物超伝導磁石の利用も視野に入れた開発が必要であろう。

運用コストの面では、ロボットなどのハイテクによるコストカットも必用と思うが、地域住民をどうやって雇用するかなどの地域イノベーションが必要であると考えている。

固有技術課題においては硬X線向きの放射光施設において超伝導磁石の利用や熱負荷対策の課題が重要であり、現状の過冷却窒素システムの活用以外にも新たな方策が求められている。

加速器の高周波源のクライストロンも含め、加速器では海外の真空管にたよるケースが多いので、できる限り増幅器等は国内で半導体化を進めて、それを活用することで消費電力の低減を進めるべきである。

## ヒアリング内容

## 1. 共通技術課題

## 1-1 最重要項目：

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

理由：

基本的な概念のため

具体的な方策：

全項目の課題洗い出しが必要

5年後の見込み：

国際的な動向：

## 1-2 第2重要項目

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、コミッショニングを容易にするビーム診断系、ビームモニタおよびビーム調整手法

理由：

最重要項目としてあげたラティス設計の具体的な実現方法(基本を測定するもの)であるため

具体的な方策：

5年後の見込み：

国際的な動向：

#### 1-4 開発スケジュール

i.. 早く実現すべき開発要素：

ラティス設計、ビーム入射系、電磁石系、アライメント等、真空系、高周波加速系

ii. 5年以上の猶予がある開発要素：

無し

#### 1-5 開発組織について

i. 国を挙げたプロジェクトなどで強く推進すべき課題：

特に無し

ii. 小さな研究グループまたは個々の企業による開発研究に任せるのが妥当な課題：

特に無し

#### 1-6 専門分野の開発要素について

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

・具体的な方策

酸化物超電導磁石

#### 1-7 安定な施設性能を確保した上で、建設コストおよび運転コストを低減するための方策

ロボットなどのハイテクも必用と思うが、地域住民をどうやって雇用するかなどの地域イノベーションが必要。

## 2. 固有技術課題

2-1 固有技術課題に関して重要度を以下のように評価した。

①硬X線向き放射光施設

- 1) 超伝導磁石の利用の是非 (5)
- 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)
- 3) 熱負荷対策 (3)

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 (4)
- 5) 高調波高周波空洞によるビーム寿命の確保 (4)
- 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 (1)

2-2 固有技術課題の現状と解決策など

1) 超伝導磁石の利用の是非

現状：過冷却窒素システムの活用

3) 熱負荷対策

現状：過冷却窒素システムの活用

2-3 その他固有技術に追加すべき意見

加速器は海外の真空管に頼るケースが多いので、できる限り増幅器等は半導体化したものを利用する。

### ③大学・産業界等の研究者等の潜在的ユーザー層

#### ③-1 上村 みどり（帝人ファーマ株式会社）

専門分野：利用系

#### 概要

##### 1. 利用についての要望

日本の放射光施設がシャットダウンしている間、フェデックスを利用して海外の放射光施設を使って初めて分かったことは以下の二つ。

- ・二週間前でも、空いていれば、4時間単位で予約可能
- ・国際学会に招待講演するような方が、データ測定をしてくれるので、こちらのわがままな要望に十分に答えてくれる。

こちらの測定が、予約時間に終わらなければ、自分の研究のビームタイムを削って細かい点まで要望に対応してくださり、信頼できる研究員が現地にいるようである。けっして利用者の要望を軽視しない謙虚な研究者としての姿勢がみえる。

・リングサイズが小さいので、シャットダウンの期間は、3週間などと非常に短く、効率的な運営をしている。

・ユーザーの利用に際してのサービスという点においては、日本は大きく後れをとっている。ビームタイムの合計も6000時間から7000時間を確保し、電子密度の品質も非常によい。周辺のファシリティについても、最適化がなされているものとする。

・日本の放射光は、その昔、世界の名だたる研究者が使いに来た時代があった。最先端の特徴あるビームが出せる新しい放射光が建設でき、ほぼ通年利用可能で、サービスにおいても、ユーザーの要望に応えられ、リノベーションしつづける放射光ができるのであろうか？ここでしかできない研究ができるのであれば、海外のトップの研究者は、また利用し、科学の発展に貢献できると考える。

#### ヒアリング内容

##### 1. 共通技術課題

###### 1-1 最重要項目：

利用系：

計測のオートメーション化、計測システム共通化

理由：

世界に対して、利用面で圧倒的に遅れている。どういう人材をどのようにあてるのかや、メールインなど、世界の潮流にキャッチアップすべきであるこのままでは、差は、ひらくばかりであるので、BT も含めて世界標準にしてほしい。

具体的な方策：

①一年中測定できるメールインをお願いしたい。いままでは、夏季と冬季の国内放射光のシャットダウン時期を海外に送付していたが、あまりに安く、データの質もよいので一年中海外の BT をとるようになっていく。

②メールインで実際に測定する人材は、自分の研究に BT を自由に使い、受託による給与も上積みされるのでなければよい人材は、集まらないだろう。しかし、海外の例をみると国際学会に招待講演される人がデータをとってくれるので、質も高い。それだけの体制を組めるようにするのが大切。

5年後の見込み：

以前海外のメガファーマのクリスタログラフナーに聞いたが、一時間で SR に行ける距離でも、メールインを利用しているそうだ。委託できる場所はするという流れは産業界ではさらに進んでいくだろう。FEDEX も、ますます速くなり、国内で送付するのも、海外に送付するのも、時間的には、変わらなくなってくるであろう。安価で質のよいデータが取れることは、ますます大切になる。

国際的な動向：

海外は、2週間まえに、申し出ても、空いていれば即時対応してくれる。そういう利用体系が望ましい。海外でできるのに、できないので、硬直したなにかが妨げしているとしか考えられない。軽減税率と同じでやろうとしないからできないのであって、海外事例に学ばさらに使いやすいシステムができると思う。

## 1-2 第2重要項目

冷却・受電・変電設備：

高安定性と低コストの確保

理由：

以前海外の学会でなぜ日本の放射光は、あれほど成果占有料金が低いのかと言われた。すべても、コストフルなせいである。同じように暑い台湾でさえ、BT は確保されている。夏止まるのは、暑さのせいではない、電気代がかかるような設計そのものがバブリーであったためであると思う。

具体的な方策：

省エネかつ自然のエネルギーを取り入れた一年安定稼働可能な放射光であるべき。

国際的な動向：

世界もまだ太陽光などで動いているところはないであろうが、東北ということもあり、原発により生み出された電気を使わないということはさきがけてもよいのではないか？

### 1-3 第3重要項目

光学系：

光源エネルギーに対する最適化

理由：

文科省の次世代放射光 WG でも目からうろこであったのは、新しい放射光はそれぞれに独自の工夫があって、小型であっても高輝度を確保できるように工夫されていることが分かった。やはり、光源ももちろん大切であるが、周辺技術も含めた最適化が日本はよくないと思う。最適な環境に最適化すべきことである。

具体的な方策：

メーカーもユーザーも含めた三位一体の意見徴集のうえに、やればよいと思います。

### 1-4 開発スケジュール

i. 早く実現すべき開発要素：

冷却・受電・変電設備：高安定性と低コストの確保

ii. 5年以上の猶予がある開発要素：

無し

### 1-5 開発組織について

i. 国を挙げたプロジェクトなどで強く推進すべき課題：

利用系：計測のオートメーション化、計測システム共通化

ii. 小さな研究グループまたは個々の企業による開発研究に任せるのが妥当な課題：

ラティス設計、ビーム入射系、電磁石系、アライメント等、真空系、高周波加速系、アンジュレータ、ビーム診断・ビーム制御系、加速器制御系

### 1-6 専門分野の開発要素について

最優先で述べた通り。

1-7 安定な施設性能を確保した上で、建設コストおよび運転コストを低減するための方策

先に述べたとおり。

## 2. 固有技術課題

①硬X線向き放射光施設に関する以下の3課題

- 1) 超伝導磁石の利用の是非
- 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

は早期に実現すべき要素である。

## ③-2 高尾 正敏 (大阪大学未来戦略機構)

専門分野：多量子ビーム測定系、ポンプ&amp;プローブ

**概要**

ユーザーの立場として意見である。放射光を時間平均的に使用することは、今までどおり継続してある（構造解析）が、今後は、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・計測するなど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していくことが重要である。そのためには、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などが、分かっていることが、実験の精度に影響する。可能ならば、時間軸方向でのパルス幅がある程度可変になれば尚更有効である。

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解っているのが望ましい。またそれらのデータはバンクに保管されていて必要に応じて、ユーザーが自由に取り出せることが必要である。

**【異種光源の同時使用】**

ビームライン側では、放射光の波長が異なるものが、同時に一カ所に集められるとか、中性子は無理としても、他の電磁波光源（テラヘルツ領域・遠赤外、中赤外、近赤外、UV-VIS、真空紫外）との同時使用、あるいは、高分解能 NMR や ESR との同時使用などもチャレンジできるのが望ましい。実験室系でポピュラーな実験手段が、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。

**【利用実験室】**

実験室の仕様についても、例えば、他の電磁波光源を地下に置いて、その地下室へ、放射光を導入するなど、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。

**ヒアリング内容****1. 共通技術課題**

## 1-1 最重要項目：

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

理由：

永久磁石の経時変化、温度履歴、放射線損傷ほか

具体的な方策：

5年後の見込み：

国際的な動向：

## 1-2 第2重要項目

アライメント等：

磁石のアラインメントの精度向上、温度管理、磁場測定の高度化

理由：

具体的な方策：

5年後の見込み：

国際的な動向：

## 1-4 開発スケジュール

i. 早く実現すべき開発要素：

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

ii. 5年以上の猶予がある開発要素：

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

## 1-5 開発組織について

i. 国を挙げたプロジェクトなどで強く推進すべき課題：

無し

ii. 小さな研究グループまたは個々の企業による開発研究に任せるのが妥当な課題：

利用系：計測のオートメーション化、計測システム共通化

## 1-6 専門分野の開発要素について

特に無し

1-7 安定な施設性能を確保した上で、建設コストおよび運転コストを低減するための方策

特に無し

### ③-3 西 敏夫（東京工業大学）

専門分野：利用系、建物、ソフトマテリアルなどへの応用に関するハードウェア

#### 概要

##### 1. 全般について

- ・次世代放射光施設というからには、特徴が欲しい。例えば、高出力、高性能、コンパクト化、ビームの安定性、利用のしやすさなど。
- ・特に東北地方に建設するのであれば、徹底した地震対策が必要。2011年3月の東日本大地震の際、筆者は、東北大学原子分子材料科学高等研究機構（WPI-AIMR）の教授兼主任研究員であったが、研究室が被災し、精密機器が破損した。結局、研究室が復旧しまともなデータが得られるようになるのに1年間かかった。例えば、放射光施設の免震化など取り入れるべきである。
- ・特徴の一つとして、偏光やコヒーレント光がX線でも得られると新しい展開が期待できる。

##### 2. 利用者側として

- ・筆者の専門は、ソフトマテリアル（高分子、ゴム、ゲル、複合材料など）なのでそれに合ったハードウェアの充実を期待している。
- ・特に、実際の工程に即した解析（多軸延伸、混合、複合、大型サンプル等）、ウェット系での測定、実時間測定（反応系、圧縮せん断下、大変形、高速伸長下）への要望が強い。
- ・特に顕微測定（ビーム径が1ミクロン以下）が可能になるとメリットが大きい。

##### 3. その他

- ・次世代放射光施設が出来たとして、テーマに即した産官学交流（人事交流を含む）が盛んになることを望む。交流には当然国際交流を含む。
- ・放射光利用に関して、解析、測定方法などの国際標準化を推進してほしい。例えば、放射光を利用した知財が発生した場合、標準化していないと特許化も難しくなる。

#### ヒアリング内容

##### 1. 共通技術課題

###### 1-1 最重要項目：

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

理由：

出来るだけコンパクト化したほうが良い。

具体的な方策：

具体的なケースについて試算して決定。

5年後の見込み：

可能と思われる。

国際的な動向：

不明

## 1-2 第2重要項目

建物：

付帯設備等の振動抑制、温度管理

理由：

東北地方に設置するとすれば、十分な地震対策が必要。

具体的な方策：

免震システムの導入。

5年後の見込み：

可能。

国際的な動向：

放射光施設ではないが、原発(フランス、南アフリカ)などには導入されている。中国の新設原発も導入検討中。次世代核融合炉も導入予定。

## 1-3 第3重要項目

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、コミッショニングを容易にするビーム診断系、ビームモニタおよびビーム調整手法

理由：

放射光施設は時折休止すると聞いているので。

具体的な方策：

不明

5年後の見込み：

不明

国際的な動向：

不明

#### 1-4 開発スケジュール

i. 早く実現すべき開発要素：

電磁石系

ii. 5年以上の猶予がある開発要素：

冷却・受電・変電設備

#### 1-5 開発組織について

i. 国を挙げたプロジェクトなどで強く推進すべき課題：

建物:付帯設備等の振動抑制、温度管理

ii. 小さな研究グループまたは個々の企業による開発研究に任せるのが妥当な課題：

利用系:計測のオートメーション化、計測システム共通化

#### 1-6 専門分野の開発要素について

・ソフトマテリアルなどへの応用に関するハードウェア

ソフトマテリアルなどでは、実際の工程に即した解析やウェット系での測定、実時間測定への要望が強い。

・5年後の見込み

ケースバイケースで対応可能と思われる。

・国際的な動向

世界的にはそれほど例が無いので、ユニークさが出せる。

#### 1-7 安定な施設性能を確保した上で、建設コストおよび運転コストを低減するための方策

テーマに即したフレキシブルな他機関との人事交流。

## 2. 固有技術課題

調査すべき固有技術課題：

ソフトマテリアル向けの技術課題。実時間測定、ウェット系。

現状：不十分。

解決策：個別に試行錯誤か？

国際的な動向：あまり聞いていない。

早期に実現すべき要素：

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

猶予がある要素：

熱負荷対策

国家プロジェクトなどで推進すべき要素：

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

その他

ソフトマテリアルや高分子材料などのユーザーとしては、実際の工程(多軸延伸、混合、複合、ウェット系)や 使用時(反応系、圧縮せん断下、大変形など)での大型サンプルの実時間測定、解析 が要望されています。 これらの実学的研究が可能な放射光施設が実現すると良いでしょう。

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

④-1 小杉 信博（分子科学研究所）

専門分野：利用系

概要

ヒアリング時には、軟X線領域の次世代光源に関して、主に以下の意見を述べた。

1) 実験の自動化に関する意見

硬X線領域と違って、軟X線領域は以下のような問題があるため、自動化は困難である。

①真空での実験が基本になるため、実験試料をそのまま測定できる状態で移送することは困難である。

②ほとんどの軟X線分光の測定手法は表面敏感なため、固体試料の表面の汚れの除去処理（スパッタリング、熱処理、劈開など）のやり方によって測定結果が変わる。そのため、優れたビームラインサイエンティストがいたとしても、試料処理まで依頼するのは困難である。

③回折限界光利用の軟X線では顕微分光が中心になる。その場観察も重要になっている。すなわち、状態変化する試料の電子状態（軟X線スペクトル）の位置依存性を測定することになるので、試料についての深い知識がないと、現場で臨機応変に条件を変えて測定することができない。

2) VUV領域のアンジュレータに関する意見

以下のような理由で対応する必要は全くないと判断される。

①VUVアンジュレータを有するSOLEILは例外的であり、参考にはならない。SOLEILはフランスとして唯一の施設であり、SuperACOで活発だったVUVサイエンスをSOLEILでも引き継がないといけないという理由があった。台湾のTPSでも当初VUVアンジュレータの希望があったが、低エネルギーのTLSを使い続けることになったので、VUVアンジュレータの話は消えた。MAX IVでも3GeV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作るので、VUVサイエンスは小さな方でやることになっている。

②アメリカ東海岸のNSLS-IIでは低エネルギーリングは諦め、3GeV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が受け持つことになっている。日本でもVUV領域に強いUVSORやHiSORなどの低エネルギー施設がある以上、フランスとして唯一の施設であるSOLEILのように無理してVUVアンジュレーターを導入できるように、加速器の設計を見直す必要は全くない。

③VUV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。短波長な軟X線や硬X線に比べて集光も容易なため、輝度の点で次世代光源でなければできな

いサイエンスはない。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。

## ヒアリング内容

### 1. 共通技術課題

#### 1-1 最重要項目：

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

理由：

加速器の性能、規模などを決定づける事項であるため

具体的な方策：

比較的少規模のグループで複数の可能性を検討し、その結果を外部の有識者により比較検討する。

5年後の見込み：

次世代光源のラティス設計に関しては既にいくつかの有力な方向性は示されており、新奇性を求めず既存のアイデアの中から計画する施設に最適なものを選び、詳細設計を進めることで5年以内に十分に作業は終わらせるはずである。

国際的な動向：

次世代光源のラティス設計に関しては既に複数の方向性が示されており、既に建設が進められているものも多い。人材を送り込み、それらのコミッションの動向を子細に調査する必要がある。

#### 1-2 第2重要項目

建物：

付帯設備等の振動抑制、温度管理

理由：

最終的な光源性能、利用装置性能を決定づける要因となる可能性が高いため

具体的な方策：

第3世代光源の現状、問題点、対策を調査し、必要に応じて新しい基礎技術開発を進め、設計に取り入れる。国際的なワークショップの開催による情報交換や内外の施設の現地調査を行うべきである。

5年後の見込み：



第3世代光源やX線自由電子レーザーで用いられた技術を発展的に応用すれば5年後には必要な技術は確立できるものと思われる。

国際的な動向：

不明

### 1-3 第3重要項目

冷却・受電・変電設備：

高安定性と低コストの確保

理由：

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。

具体的な方策：

ビームエネルギー・周長など加速器の基本パラメータ、入射器の選択など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、電磁石系など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など、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。

5年後の見込み：

不明

国際的な動向：

不明

### 1-4 開発スケジュール

i. 早く実現すべき開発要素：

ラティス設計

ii. 5年以上の猶予がある開発要素：

利用系

### 1-5 開発組織について

i. 国を挙げたプロジェクトなどで強く推進すべき課題：

電磁石系、アライメント等、高周波加速系、利用系

ii. 小さな研究グループまたは個々の企業による開発研究に任せるのが妥当な課題：

ラティス設計

1-6 専門分野の開発要素について

特に無し

1-7 安定な施設性能を確保した上で、建設コストおよび運転コストを低減するための方策

特に無し

2. 固有技術課題

技術課題：

高調波高周波空洞によるビーム寿命の確保に関して

現状：

国内では UVSOR で定常的に利用されているが、海外も含め、定常的に利用されている例は多くないと思われる

解決策：

積極的に検討すべきであるが、主加速空洞の基本周波数の選択など、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。

国際的な動向：

不明

技術課題：

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に関して

現状：

特に APPLE-II 型など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。

解決策：

アンジュレータ側の磁気回路設計やシム調整などで低減できる可能性が示されているはずであり、これらの動向を調査する必要がある。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。

国際的な動向：

不明

調査対象とすべき固有技術課題：

超伝導加速空洞の利用

現状：

SOLEIL で利用されているはずである

解決策：

超伝導空洞利用のメリット・デメリットを調査すべきである

国際的な動向：

不明

早期に実現すべき要素：

超伝導磁石の利用の是非

国家プロジェクトなどで推進すべき要素：

超伝導磁石の利用の是非

## ④-2 田中 均 (理研 XFEL 研究開発部門/回折限界光源設計検討グループ)

専門分野：ラティス設計、電磁石系、真空系、ビーム入射系、アライメント等、ビーム診断・ビーム制御系

## 概要

(1) 次世代リング型光源の開発課題等に関して

次世代放射光施設として具備すべき要件は大きく分けて2つ。1つは、光源性能として「現第3世代高輝度リング光源」を凌駕する輝度を利用波長領域で達成することである。これから蓄積リングの目標電子ビームエミッタンスは数 nmrad~100pmrad となる。また、リング型次世代放射光光源は、対局にある線形加速器ベースの SASE 及び FEL 光源との比較において、低エミッタンス化により空間的にシャープとなった放射光を十分実験に利用できる光の安定性が決定的に重要である。もう1つの柱は、挿入光源並びに加速器技術の革新を取り込んだ、これまでに比べ高効率、省電力且つ省資源の光源システムの構築である。現状並びに今後の状況から、先端基盤施設といえども sustainability と整合する進化が求められる。性能の向上との両立を図る上で重要となる概念は全ての機器のコンパクト化、省電力化である。

上の境界条件の下で、第3世代放射光光源の規模を維持しつつ、リング型光源性能を飛躍的に向上させる為のキーポイントは一言で言えば、「コンパクト化」であり、以下に示す研究開発は光源の規模、即ち、蓄積電子ビームエネルギーの大小には依らない、共通の開発課題である。

(a) 電磁石系：小口径の永久磁石による高勾配コンパクト多極電磁石。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)

(b) アライメント等：マルチバンドに対応した磁石の精密アラインメントシステム。

(c) 真空系：小口径ステンレス真空チェンバーの製作技術開発、トンネル内でのベキングの廃止を可能にする超高真空システムの開発、全真空機器のコンパクト化。少しロングタームの課題としては、NEG-Coated チェンバーの性能と問題点把握、現実的利用の可能性検討。

(d) 高周波加速系：高調波(HOM)インピーダンスが低く抑制でき、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。

(e) アンジュレータ：蓄積リングで利用可能な高磁場精度を備えた短周期低ギャップ真空封止「コンパクトアンジュレータ」の開発。「コンパクトクライオアンジュレータ」の開発。

ラティス設計に関しては、基本的に計算機物理、シミュレーションの類である。これは機器の開発とは全く次元の異なる話であるにも関わらず、多くの人が混同している。ラティス設計では、ビーム物理に基づく設計思想が最も大事となり、これが理解できるか、自分の設計に取り込めるか否かは、ある意味、「物理が分かるか否か」のみで決まると言っても良い。特に、大きな問題とはなり得ない。

## (2) 超電導技術に関して

現時点での超電導技術採用は、以下の観点で見送るべきであると考える。

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。超伝導磁石に関しては、高温超伝導体を用いる事が可能であり、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) いずれにしろクライオスタットが必要であり、磁石の小型化と何処まで整合できるかが不透明である。

## (2) 技術開発体制に関して

(1) で述べたように、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ので、開発課題はエネルギーの大小には依らない。よって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。これは従来から進化した All Japan の概念である事を強調しておく。単純に全国からリソースを集める事に実質的なメリットは無い。なんでもかんでも人を集めて組織化しても無駄である。現在の第 3 世代光源の技術開発と運転経験が蓄積されている組織 SPring-8 を中心に進める以外、効率的な方法は見当たらない。

## ヒアリング内容

## 1. 共通技術課題

## 1-1 重要項目について

最重要項目：

真空系、電磁石系

第 2 重要項目：

ビーム入射系、アライメント等、高周波加速系、アンジュレータ

第 3 重要項目：

ラティス設計、ビーム診断・ビーム制御系

第 3 世代の放射光光源の電子ビームエミッタンスが 1~10 nmrad に縮退しているにはそれなりの理由があった。当時は、(1) 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、(2) 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事、(3) ラティスの設計が DBA もしくは TBA だったので、蓄積ビームの安定周回領域を広く取る事が

でき、真空チェンバー口径を大きくしておく事に意味があった、(4) 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事が重要であった。これらの理由から、真空チェンバーの電子ビーム室のクロスセクションは、概ね H70mm×V40mm 程度とならざるを得なかった。

挿入光源部のみ垂直方向にこれよりもかなり狭い垂直口径となる場合もあるが、これは局所的であり、またビームコミッショニング初期には導入を避ける事も可能であったのでこの事は本質的な事象ではない。

当時から、自然エミッタンスは偏向磁石の偏向角の 3 乗に依存する事は知られていた。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事は誰もが理解していた事実である。一方で、大口径真空チェンバーは、電磁石の最大磁場勾配 (4 極と 6 極) を厳しく制限するとともに、全ての機器の大きさを大きくする方向に働く事、また、偏向角が小さくなると線形クロマティシティ補正の 6 極電磁石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事が当時はできなかったことから、現実的な設計として、現在検討されているマルチベンドアクロマットを採用できなかった背景があった。

以上が第 3 世代の放射光光源の電子ビームエミッタンスが 1~10 nmrad に縮退している理由である。

SPring-8 の設計開始から 20 年以上が経過し、色々な技術革新や運転経験の蓄積がなされた。その結果として、現時点で次の世代に行く準備が整ったということが言える。大きな要因として以下が挙げられる。

- ・電子ビーム蓄積に大口径の真空チェンバーアパーチャがなくなった
- ・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
- ・真空チェンバー口径が小さくなったおかげで、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
- ・真空チェンバー口径が小さくなったおかげで、全ての機器を小型化できる余地が出てきた。
- ・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、従来の線形クロマティシティ補正用 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事で、解決できる目処が付いてきた。

ここで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事はあまり意味が無い。その理由は、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からである。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、そういう意味では、アメリカやヨーロッパと日本、それぞれの事情で異なってきて当たり前であろう。

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り、どのアプローチが正解かを定めるのは極めて困難である。

放射光リング光源というカテゴリーで考えれば一般的に以下の開発を進め、次世代光源建設へ進んでいくべきであろう。これらは、光源エネルギーの大小には依らないため、開発は一本化が可能である。

3) 電磁石系：小口径の永久磁石による高勾配コンパクト多極電磁石。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：マルチバンドに対応した磁石の精密アラインメントシステム

5) 真空系：小口径ステンレス真空チェンバーの製作技術開発、トンネル内でのベークの廃止を可能にする超高真空システムの開発、全真空機器のコンパクト化

6) 高周波加速系：高調波(HOM)インピーダンスが低く抑制でき、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

7) アンジュレータ：蓄積リングで利用可能な高磁場精度を備えた短周期/低ギャップ真空封止「コンパクトアンジュレータ」の開発

#### 1-4 開発スケジュール

i. 早く実現すべき開発要素：

ラティス設計、ビーム入射系、電磁石系、アライメント等、真空系、高周波加速系、アンジュレータ、ビーム診断・ビーム制御系

ii. 5年以上の猶予がある開発要素：

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化

<コメント>この理由は、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しても良いとの判断。

#### 1-5 開発組織について

基本的に開発はプロジェクトの主体となる研究機関がこれまでは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(確保が困難)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。そう言う意味では、ある程度一般性のある開発案件は国プロとして取り組んでいくのも良いかもしれない。加速器工学の分野で汎用性があり、今回の次世代放射光施設に向けた開発課題としては、

- (1) 永久磁石を用いた偏向磁石システム
- (2) 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)
- (3) 高精度・高効率・高速電源システム

(4) クライストロン、モジュレータ、サイラトロンの固体化

(5) 高精度アライメント技術

等が挙げられる。

#### 1-6 専門分野の開発要素について

1-1 で回答済み。

#### 1-7 安定な施設性能を確保した上で、建設コストおよび運転コストを低減するための方策

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 SX から X に渡る広大なスペクトル領域を十分カバーできない事は明白であろう。私達はその事をこの 20 年間で学んできた。故に、早期に先端 2 光源（以上）体制へ移行するべきと考えられる。

先ほど来述べてきたように、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ので、開発課題はエネルギーの大小には依らない。よって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。これは従来から進化した All Japan の概念である事を強調しておく。単純に全国からリソースを集める事に実質的なメリットは無い。なんでもかんでも人を集めて組織化しても無駄である。現在の第 3 世代光源の技術開発と運転経験が蓄積されている組織 SPring-8 を中心に進める以外、効率的な方法は見当たらない。

## 2. 固有技術課題

加速器コンポーネントは、原則共通技術であって、とりわけ固有技術に分類すべきものはない。ビームライン技術（分光器や真空窓、etc）は光のエネルギーにより採用する技術が異なってくる。検出器でも同様の事が言えるのではないか。



## ④-3 濱 広幸 (東北大学)

専門分野：ラティス設計、ビーム入射系、電磁石系、アライメント等、真空系、高周波加速系、アンジュレータ、ビーム診断・ビーム制御系、加速器制御系、光学系

## 概要

先端放射光利用における波長域タスクシェアリング

放射光の光子エネルギーは電子ビームのエネルギーの二乗に比例することを考慮して、世界各地域の放射光施設の波長領域を図1に示した。各国がそれぞれ波長領域を分担する複数の施設を保有しているわけでは

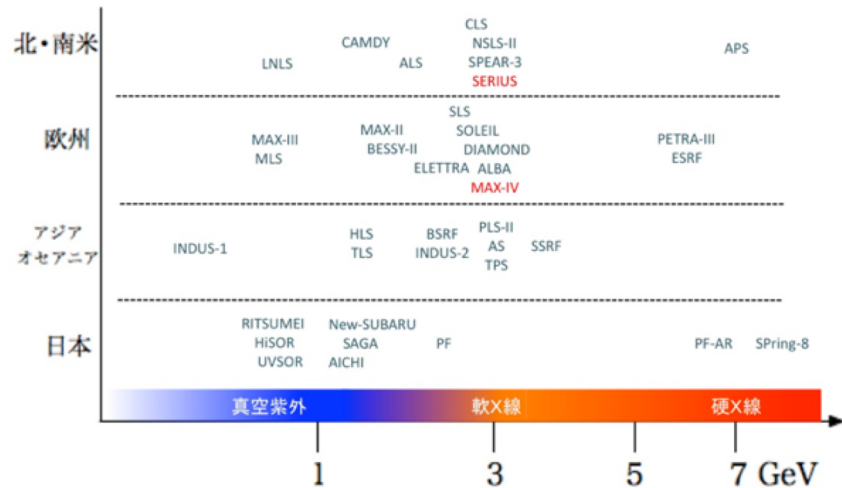


図1 世界各地域の放射光施設

ないので、一概に地域情勢を比較する事はできないが、日本は施設数こそ多いものの、波長領域に戦略的な考え方をもっていないことは一目瞭然であり、小規模な真空紫外域の施設が多いことは科学技術の成長戦略とは無縁で、「箱庭」的にいつでも使える施設が望ましいと考えられているように見受けられる。

もちろんこの事実は放射光が様々な研究開発に有益出る事の認識が高いことの裏付けでもあるが、科学技術研究分野がどこかに偏っていることもあり得るのではないだろうか。とりわけ軟X線領域施設としてPFが存在しているが、世界各国が保有するようになった3GeV領域の先端光源が本邦にないことが、近年は際立った特徴の一つになってきた。

PFは2.5GeVの光源であるので、SLSやSOLEILと同等の性能を持っていれば、世界に引けを取らない。PFは本邦の放射光施設の草分けでもあるが、やはり旧来の光源であることは否めず放射光輝度は高くない。これまでもPFは改造を重ね、光源性能の向上に務めてきており、現役の放射光施設として30年もの間活躍して来た。今後も世界の先端光源と並びうる光源輝度を確保して行く事が可能かどうかは、日本の放射光科学の将来を考える上で極めて重要な課題である。

最近になって3GeVの軟X線光源であるNSLS-II(米)とTPS(台湾)が稼働を始めた。この2つのリングは周長がそれぞれ800mと520mの比較的大型のリングであり、最終目標の電子ビームエミッタンスは0.6nmradおよび1.7nmradを目指す高輝度光源である。両者ともに旧来のDBA(Double Bends Achromat)と呼ぶラティス構造を採用してお

り、言ってみればコンベンショナルな設計である。NSLS-II は非常に強力なダンピングウイグラーを用いて強制的にビームエミッタンスを小さくする技術を導入しているが、この点は新奇性がある光源である。

これまでの第三世代光源と呼ばれるリングの殆どは DBA ラティス構造であった。ビームエミッタンスはエネルギーの二乗に比例し、概ね周長の三乗に反比例することを考慮して、規格化したエミッタンスの周長依存性をグラフ化すると、図 2 に示すようによく直線（青色線）に乗る事が分かる（但しセル数や直線部の長さ等のリングの個性でばらつきがある）。エネルギーが高い硬 X 線リングは周長が 1km 内外あるいはそれ以上と巨大であるが、これによってエミッタンスが他の低エネルギーリングと同等な大きさ（数 nrad）になっている。

現在立ち上げ中のスウェーデンの MAX-IV は 1 セルあたりの偏向磁石数が 7 であり、従来の DBA ラティス光源リングとは異なる特徴を有している。エミッタンスは 300 pmrad 程度を目標にしており、その他の既設施設のアップグレードでもセルあたり 4～6 偏向磁石を持つ MBA (Multi-bend Achromat) ラティス構造が考えられている。ビームエミッタンスは理論的に偏向磁石数の三乗に反比例することから、これらの計画は全て 1 nrad 以下の超低エミッタンスリングを目指すものである。

光源輝度は大雑把に言ってエミッタンスの二乗に反比例することから、3 GeV クラスリングの輝度は 1 keV 付近で  $10^{21}$  にも及ぶとされる。

このような MBA 構造はこれからの高輝度光源のトレンドになると思われ、図中の赤色線が示すように従来の光源により一桁小さいエミッタンス、即ち二桁高い輝度を得られると予想される。しかしながら容易に想像できるように多くの磁石を一セルに詰め込むために、難易度の高いビーム光学に加え、非常に緻密な機器設計が必要になり、ある意

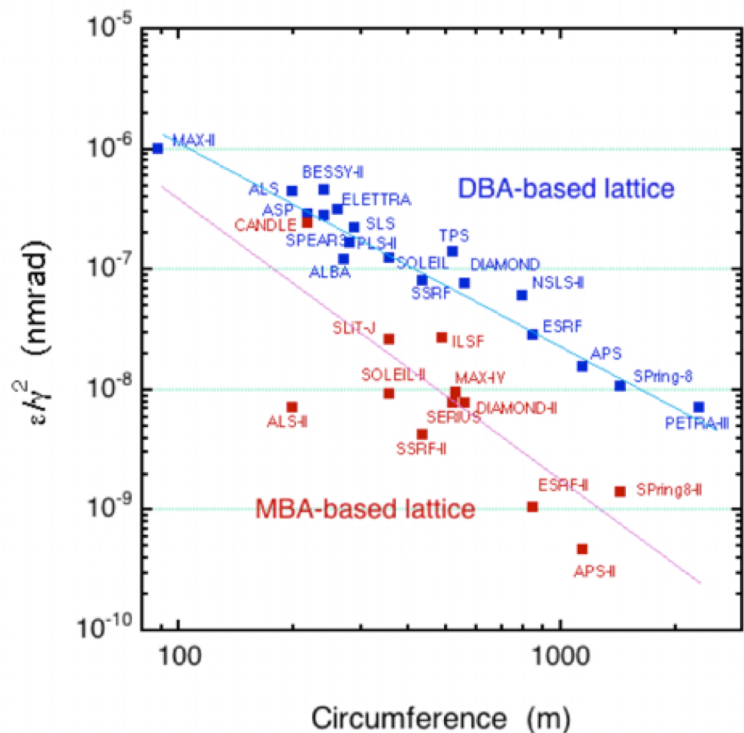


図 2 放射光源リングの周長に対する規格化したエミッタンス。青印はコンベンショナルな DBA ラティス構造を基本にした稼働しているリング。赤は建設中または計画中の MBA ラティス光源リング。計画中の CANDLE は DBA 構造。ALS-II と APS-II は swap-out 入射方式を採用しており、従来の蓄積リング光源とやや異なる。

味では極めてチャレンジングであり、とりわけ建設が終了した MAX-IV の 3 GeV リングが実際に機能するか否かは今後の注目の的である。

国内ではこのような MBA を採用した将来光源計画は、具体的には 3 GeV クラスの東北放射光施設 (SLiT-J) のみである。SLiT-J は 4 偏向磁石ラティス構造であり、周長は 350 m、エミッタンスは 0.9 nmrad を目標としている。仮に既存施設のアップグレードを考えると、もちろんそれは PF の 2.5 GeV リング以外は存在しないが、このリングは周長が約 190 m と、世界の第三世代光源に比べてかなり小さい。リング形状が楕円であるような個性はともかく、このサイズで如何にラティス構造を MBA 化しても、図中の赤線が示すように既存の SOLEIL や ALBA のエミッタンス程度にしかならず、次世代高輝度光源の性能に至らないことは明白である。また PF は偏向磁石を中心的な光源とする古典的な FODO ラティスであり、アンジュレータのための直線部を新たに設けるなどすると、ビームライン数を多く設ける事が難しい。

とどのつまり世界レベルに匹敵する高輝度軟 X 線光源を日本が保有するには、それは新設する以外あり得ない。SPring-8 のアップグレードにおいて、軟 X 線ビームラインを包括するという手もあるだろうが、硬 X 線に最適化したリングであるため、軟 X 線輝度は概ね二桁低くなる。図 1 に示すように光源リングは光子エネルギー領域を住み分けるべきであり（もしくは階層を構成してタスクシェアリングをすること）、今後の光源開発戦略の重要な因子の一つであることは疑いないのではないだろうか。

## ヒアリング内容

### 1. 共通技術課題

#### 1-1 重要項目：

次世代ということが何を指し示すか明確に理解できていないので、「従来の放射光施設を越える」ことで定義されるならば、すべてが開発要素になりうると思います。光源性能に焦点を当てれば、蓄積リングのエミッタンスが所謂第三世代光源という呼ばれる既存のリングから更に一桁小さくあるべきで、具体的には水平方向は 1nmrad 以下であり、また垂直方向エミッタンスは目標とする放射光の波長/エネルギー領域の回折限界以下であるのは当然です。X 線領域 (10keV あるいはそれ以上) では水平方向も回折限界まで至るのはかなり難しいと思われませんが 100pmrad が近未来の目標かと思えます。また低エミッタンス化によって得られる放射光の横方向コヒーレンスは重要であり、従来より高度な利用研究を開拓すると思われれます。100pmrad に近いエミッタンスが実現すれば 10keV 程度の X 線のコヒーレントフラクションは 10% 近くまでになるので、ほぼ完全なコヒーレントイメージングも実現可能です。

このような低エミッタンスリングの実現には、ラティス設計だけ成立していれば良い訳ではなくすべての加速器コンポーネントが現在から進化したものになるべきで

す。次世代光源のための加速器構成機器をどのようにデザインすべきか、という課題に多分一番重要な外的要因はコストと省エネルギーでしょう。加速器はそもそも巨額の経費を必要としますが、建設経費や運転経費はもはや野放しできない問題です。経済性は度外視して非常に巨大なリングをつくれば、構成機器もゆったりと設置できるので、従来技術でもほぼ問題ありません。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でかくする必要はなく、電磁石など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ります。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になります。またビーム入射スキームもかなり難しい事態になるケースがあり得ます。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ますから、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りません。したがって、開発要素の殆どが同時に高度化されなければ次世代光源は成立することは極めて困難です。

加速器周辺はもちろんですが、アンジュレータ技術の進化はこれまでの第三世代光源の牽引力であったと言えます。そしておそらく次世代光源でも同様であるでしょう。真空封じアンジュレータでは周期長が15mm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ます。冷却して磁場強度を高めるなどの磁石技術もかなり進展してきており、今後もアンジュレータの進化は止まないと思いますが、次世代光源リングはその技術の動向もきちんと把握して取り入れられ体制をもたなくてはなりません。

重要度は一つの技術課題で完結するものではないので、放射光源リングをシステムとしてその理念を考える必要があると思います。個人的に現在関心を持っているのは、スウェーデンのMAX-IVの3GeVリングです。エミッタンスの低減にマルチバンドが有効である事はリングデザイナーの誰もが知っていますが、これ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）、非常に興味深いものです。複数の電磁石を一体の鉄ブロックで構成するアイデアは彼らのオリジナルですが、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、あるいは我慢するか、というのはマシンをどう考えるかという理念が極めて重要な要素です。MAX-IVの300pnmというエミッタンスの数字が極めてセンセーショナルであるため、加速器の専門家よりもユーザー側へ与える印象が非常に強いような気がしています。しかし、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る必要があります。そのうえで、これは一つの選択肢である、ということを理解しなくてはならないと考えています。マルチバンド光源による低エミッタンスを実現するには、リングをでかくすれば良いのだ、という考えが一概に悪いとは言えません。

従って、本邦においてもどのような理念によって今後の光源戦略をとるか、をまず明確にしなくてはなりません。世界的な動向は、非常に小さな真空ダクトを用いて電磁石やその他の機器をコンパクトに作り上げるトレンドが今後の主流ではないかと思いますが、トップアップ運転によってビーム寿命制限がかなり緩くなっているため、

自由度は高まっています。将来的にはアンジュレータギャップも 3mm 程度が実現するでしょう。しかしビームが周回しうる力学的口径は強い非線形性で制限されますから、ラティス設計上で基本的な安定性確保をまず必要とします。MAX-IV ではかつては集団的な不安定性を抑制するために使われていた 8 極電磁石をガイド磁場のレギュラーメンバーにしていますが、これの是非はそれぞれで考えるべきであり、やはり理念からスタートした結論にいたるはずです。5年後の見込みというのは、現実的にはどのような新しいアイデアが産まれるか、ですべて変化すると思われれます。従って日本ではどのようなサイズでどのような波長でどのくらい明るい光源が必要か、という戦略をまず持つべきで、それによってこの設問の回答がはっきりするのではないかと思います。

日本では現在 SPring-8 が唯一の高輝度光源ですが、カバーする波長領域はかなり硬い X 線領域です。もちろん放射光ですから低エネルギー、極端には赤外領域の光も出てくる訳ですが、versatile 性を重要視すると最先端科学研究から脱落します。硬 X 線領域の光は多くの研究分野に非常に重要ですが、同程度に明るい軟 X 線は同じリングではカバーできません。軟 X 線に有利な 2~3GeV クラスの高輝度光源は国内に存在しませんが、世界各国で競うように建設されて来ています。SPring-8 があるから日本は大丈夫だ、という考えが結構広まっているのは正直言って驚きです。グローバル化時代ですから、アジアの一体感という見方では、中国にも韓国にも台湾にも 3GeV クラス高輝度光源があるから、日本の科学技術は大丈夫だ、という面白い考え方をする人はさすがに少数ではないかと思います。日本に軟 X 線高輝度光源が必要だ、という議論はすでに尽くされていますが、その実現のための理念はまだ形成できていない気がしています。とりわけ SPring-8 のアップグレードは単独で行われて本邦の光源戦のシナリオが完結するのかどうかについては、これは十分な議論が必要です。

#### 1-4 開発スケジュール

##### i. 早く実現すべき開発要素：

ラティス設計、ビーム入射系、電磁石系、アライメント等、真空系、高周波加速系、アンジュレータ、ビーム診断・ビーム制御系、加速器制御系、光学系

##### ii. 5年以上の猶予がある開発要素：

5年という区切りにどのような意味があるのか、少し分かりかねます。5年は温存して良い技術、ということでしょうか？ 科学技術ではそのようなものは存在しないのでは？

#### 1-5 開発組織について

##### i. 国を挙げたプロジェクトなどで強く推進すべき課題：

国をあげて、となると波及効果が広く、様々な分野が恩恵をうけるものであると考ええると、次世代光源そのものを実現する以外にはあり得ないような気がします。

ii. 小さな研究グループまたは個々の企業による開発研究に任せるのが妥当な課題：

様々な加速器技術の多くは専門チームで行う方が効率的であるとは思いますが、それらは互いに干渉して高度化されるものですから、統括者が必要です。とりわけ企業が行う場合は加速器のビームダイナミクスをあまりご存知でない方が多いので、優秀な統括者は必須です。

#### 1-6 専門分野の開発要素について

特に無し

#### 1-7 安定な施設性能を確保した上で、建設コストおよび運転コストを低減するための方策

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も最初から考えておかなければならないと思います。建設期には多くのマンパワーが必要でしょうが、民間に加速器技術を残す意味でも複数メーカーとのコラボレーションを丁寧に気づいておく必要があると思います。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となります。NSRRC（台湾）では専任技術者が9割もいて、非常に大変な状況であることを聞いています。海外ではあまりありませんが、日本独特なメーカー技術者との協力関係をうまく使うことを考えるのは重要ではないでしょうか。

## 2. 固有技術課題

どの光源にも共通する技術テーマであって、このように分類した意図がまったく分かりません。ビームラインのエンドステーションが波長依存する実験機器があつて硬X線と軟X線は異なる、ということは当然ですが、加速器技術では、ハドロン加速器と電子加速器は異なるビーム動力学と技術がある、ということがせいぜいではないでしょうか？

## 固有技術課題担当者

## 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

## ①-1 足立 伸一（高エネルギー加速器研究機構）

専門分野：光学系、利用系

## 概要

光学系：

光源エネルギーに応じた集光光学系等が有る程度実用化されており、今後引き続き開発を進めることで、十分に光源性能を活かした光学系の実現が可能と考える。低エミッタンス化による光学系の熱負荷増加への対応、振動対策についても同様であろう。

利用系：

計測のオートメーション化、計測システム共通化といった開発課題は、測定手法・分野に依存しているが、全体としては今後の IT 技術発展をうまく取り入れながら高効率化が図られるべきである。測定的高速化、ビッグデータ化に伴う情報処理機能の開発も重要であろう。

回答者の専門分野に関連して、蓄積リング光源のバンチ構造の利用は、軟・硬 X 線共通の技術課題である。低エミッタンスリングでは、電子バンチの進行方向への引き延ばし、1 バンチあたりの電荷量の抑制が想定されているが、これらの低エミッタンス性能実現からの要請は、バンチ構造の利用と相反する事項ではない。特に XFEL 光源と蓄積リング光源の相補的利用の観点からは、高輝度蓄積リング光源においても定常的にバンチ構造利用実験が可能であることが望ましく、バンチ・フィリングの選択やメカニカルチョッパーの開発等が検討課題である。

ルーチン測定可能な測定については、徹底的な自動化を図るべきである。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することができる。このようなケースでは、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思われる。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ことが期待される。

また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きた。ルーチン測定に持ち込めれば良いが、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考える。

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ことは言うまでもない。

## ヒアリング内容

### 1. 共通技術課題

#### 1-1 最重要項目：

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

理由：

蓄積リング光源の基本性能を決める要素であるから

具体的な方策：

不明

5年後の見込み：

不明

国際的な動向：

不明

#### 1-2 第2重要項目

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

理由：

最重要課題を実現する上で、電磁石系の新規設計・開発が不可欠であるから

具体的な方策：

不明

5年後の見込み：

不明

国際的な動向：

不明

#### 1-3 第3重要項目



建物：

付帯設備等の振動抑制、温度管理

理由：

1 マイクロメートル以下の放射光ビームを扱う上で、付帯設備等の振動抑制、温度管理が不可欠であるから

具体的な方策：

不明

5年後の見込み：

不明

国際的な動向：

不明

#### 1-4 開発スケジュール

i. 早く実現すべき開発要素：

ラティス設計、ビーム入射系、電磁石系、アライメント等、真空系、高周波加速系、ビーム診断・ビーム制御系、加速器制御系、建物

ii. 5年以上の猶予がある開発要素：

アンジュレータ、利用系

#### 1-5 開発組織について

i. 国を挙げたプロジェクトなどで強く推進すべき課題：

電磁石系、アンジュレータ、利用系

ii. 小さな研究グループまたは個々の企業による開発研究に任せるのが妥当な課題：

無し

#### 1-6 専門分野の開発要素について

光学系：

光源エネルギーに応じた集光光学系等が有る程度実用化されており、今後引き続き開発を進めることで、十分に光源性能を活かした光学系の実現が可能と考える。低エミッタンス化による光学系の熱負荷増加への対応、振動対策についても同様であろう。

利用系：

計測のオートメーション化、計測システム共通化といった開発課題は、測定手法・分野に依存しているが、全体としては今後の IT 技術発展をうまく取り入れながら高効率化が図られるべきである。測定的高速化、ビッグデータ化に伴う情報処理機能の開発も重要であろう。

回答者の専門分野に関連して、蓄積リング光源のバンチ構造の利用は、軟・硬 X 線共通の技術課題である。低エミッタンスリングでは、電子バンチの進行方向への引き延ばし、1 バンチあたりの電荷量の抑制が想定されているが、これらの低エミッタンス性能実現からの要請は、バンチ構造の利用と相反する事項ではない。特に XFEL 光源と蓄積リング光源の相補的利用の観点からは、高輝度蓄積リング光源においても定常的にバンチ構造利用実験が可能であることが望ましく、バンチ・フィリングの選択やメカニカルチョッパーの開発等が検討課題である。

- ・ 5 年後の見込み：不明
- ・ 国際的な動向：不明

## 1-7 安定な施設性能を確保した上で、建設コストおよび運転コストを低減するための方策

ルーチン測定可能な測定については、徹底的な自動化を図るべきである。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することができる。このようなケースでは、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思われる。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ことが期待される。

また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きた。ルーチン測定に持ち込めれば良いが、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考える。

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ことは言うまでもない。

## 2. 固有技術課題

固有技術課題として挙げてある項目について、私は専門的な知識を持ち合わせていませんので、意見を記入することができませんでした。ご了承ください。光源加速器

に関わる技術課題が挙げているように思いますが、硬X線ビームライン固有の技術課題についてはヒアリングの対象となっていないという理解です。

## ①-2 田中隆次（所属）

専門分野：アンジュレータ

## 概要

短周期アンジュレータ：

周期長 20mm 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していくことが必要である。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。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などが挙げられる。

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。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ることができるが、現状で達成されている性能・仕様や運転経費などを考慮すれば、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思われる。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。

長周期アンジュレータ：

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済みである。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、軸上パワー密度を大幅に軽減している。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なども提案されており、光源選択という意味では特に困難な課題は存在しない。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、(1) 光源点が異なる、(2) COD 変動を誘起しやすい、などの点において不利である。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である。

## ヒアリング内容

## 1. 共通技術課題

## 1-1 最重要項目：

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

理由：

次世代放射光施設とは、硬X線に至るまでの短波長領域において高コヒーレンスかつ高輝度な光の利用を可能にする光源施設であり、蓄積リングの低エミッタンス化（1オングストロームにおける回折限界光エミッタンスは約10 pmrad）は必須である。このためには、実用的な光源加速器としての束縛条件の下で、エミッタンスを飛躍的に改善する新たなラティスの設計が必要不可欠である。

具体的な方策：

偏向磁石分割数の増加、軌道方向に勾配を持つ偏向磁石の採用。

5年後の見込み：

100 pmrad程度のエミッタンスを有する蓄積リングの建設（もしくはコミッションング）が開始されると予測される。

国際的な動向：

蓄積リングのさらなる性能改善を目指して、複合的な機能を有する磁石の採用が検討されている。

## 1-2 第2重要項目

アライメント等：

磁石のアラインメントの精度向上、温度管理、磁場測定の高度化

理由：

一般的に、1-6で取り上げた新たなラティス設計に基づく蓄積リングにおける電子ビームの安定性は、各種磁石の設置精度に大きく依存する。このため、関連機器のアラインメントには、既存の第三世代放射光施設における許容値よりも一桁程度厳しい精度が要求される。

具体的な方策：

磁場中心の高精度な測定に基づくアラインメント精度の向上。

5年後の見込み：

不明

国際的な動向：

不明

### 1-3 第3重要項目

アンジュレータ：

短周期化と低ギャップによるビーム不安定性の抑制

理由：

蓄積リングのエミッタンスは電子エネルギーの2乗に比例するため、低エミッタンス化のためには、運転エネルギーを可能な限り低く設定することが重要である。これは省エネルギー化にも貢献する。一方、次世代放射光施設においても主力光源となるアンジュレータ光の波長は磁場周期長×(電子エネルギー)<sup>-2</sup>に比例するため、従来と同等の波長帯域を確保するには磁場周期長の短縮化が重要である。

具体的な方策：

クライオアンジュレータ（永久磁石の冷却による高性能化）

5年後の見込み：

クライオアンジュレータの実用化、さらには標準化

国際的な動向：

超伝導アンジュレータの開発

### 1-4 開発スケジュール

i. 早く実現すべき開発要素：

全て

ii. 5年以上の猶予がある開発要素：

無し

### 1-5 開発組織について

i. 国を挙げたプロジェクトなどで強く推進すべき課題：

無し

ii. 小さな研究グループまたは個々の企業による開発研究に任せるのが妥当な課題：

無し

### 1-6 専門分野の開発要素について

回答済み

1-7 安定な施設性能を確保した上で、建設コストおよび運転コストを低減するための方策

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。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すとともに、搬入・設置及びアラインメント作業を軽減化する。

2. 固有技術課題

固有技術課題の現状と解決策

- ・永久磁石を取り入れたガイド磁場の是非

現状：磁場調整機構や減磁への対策

解決策：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

国際的な動向：ESRF の高度化において永久磁石型偏向磁石が採用される予定

- ・UV 領域用長周期アンジュレータによるビームへの影響

現状：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

解決策：磁極形状による静的補正と、多極コイルによる動的補正

国際的な動向：上記補正がすでに各施設で試みられている

早期実現すべき固有技術課題

全て

### ①-3 初井 宇記（理化学研究所・放射光科学総合研究センター）

専門分野：利用系、画像検出器、広帯域データ取得システム

#### 概要

##### 1) 共通の技術課題について

画像検出器が、可能な限り早期に開発に着手すべき要素と考える。また国を挙げたプロジェクトで強く推進すべきであると考え。

##### 2) 画像検出器の技術動向

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大きい。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ことは疑いなく、今後も先端画像検出器への重要性が増大していく事は明白である。

このうち、国を挙げたプロジェクトで速やかに開発着手すべきものは、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線高速画像検出器である（Appendix 参照）。

##### 3) 画像検出器の国内状況と世界的動向

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も多数あるが、これらについては国内のユーザーはほとんど知らないか、知っていても入手が出来ない状況となっている。

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（以下 PSI）が開発した検出器群を PSI を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を進めている。

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例は実のところ多い。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がちで、施設・国全体から見たときのビームラインの基盤的競争力を蝕む結果となる。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想定される。



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ことが予想される。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てするだけでは、世界最先端の競争力を得られないことは明白である。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。

#### 4) 技術開発体制に関して

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。従って、多数の機関が参画することは現実的でない。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などとして参加させるなどの方法が最適である。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。

(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。このなかで、国内施設のなかから中核的な機関を1から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。

## APPENDIX

### A-1) 実現するための留意点

#### (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、多数の画素を欠陥無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。

#### (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

機能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。

#### A-2) 放射光用画像検出器の種別

本稿で画像検出器とは2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2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など)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。

#### A-3) 喫緊に開発すべき検出器

##### 硬X線高速画像検出器

国を挙げたプロジェクトとして喫緊に取り組む必要があるのは、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画像検出器である。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。

#### A-4) 重点的に開発すべき検出器

##### ・30 keV以上用検出器

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。

##### ・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り組みを進めるべきである。

#### A-5) 着実に開発すべき検出器

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。

## ヒアリング内容

### 1. 共通技術課題

#### 1-1 最重要項目：

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

理由：

次世代放射光施設の性能を決定づける項目のため

具体的な方策：

拠点研究機関のとりまとめによる国を挙げた取り組み

5年後の見込み：

解決

国際的な動向：

世界的に活発に研究され、その成果を活用した施設建設も進んでいる。

#### 1-2 第2重要項目

アライメント等：

磁石のアライメントの精度向上、温度管理、磁場測定の高度化

理由：

アライメント精度が光源性能、実現可能なラティスに対して大きな影響をあたえるため

具体的な方策：

拠点研究機関のとりまとめによる民間企業との連携も含む国を挙げた取り組み

5年後の見込み：

達成

国際的な動向：

アライメントは設置場所や施設のアップグレードか、新施設の建設課によって課題が異なり、それぞれに対応策が盛んに検討されている。

### 1-3 第3重要項目

#### 画像検出器

##### 理由：

画像検出器の性能が実験精度、可能な実験スキームを決定づけるため

##### 具体的な方策：

拠点研究機関のとりまとめによる民間企業との連携も含む国を挙げた取り組み

##### 5年後の見込み：

基盤技術の完成

##### 国際的な動向：

次世代放射光でのリーダーシップを目指す国はもれなく検出器の開発に力を入れている。

### 1-4 開発スケジュール

#### i. 早く実現すべき開発要素：

画像検出器

#### ii. 5年以上の猶予がある開発要素：

光学系：結晶光学系の安定化

### 1-5 開発組織について

#### i. 国を挙げたプロジェクトなどで強く推進すべき課題：

画像検出器

#### ii. 小さな研究グループまたは個々の企業による開発研究に任せるのが妥当な課題：

画像検出器

### 1-6 専門分野の開発要素について

1-3 で回答済み

### 1-7 安定な施設性能を確保した上で、建設コストおよび運転コストを低減するための方策

国内施設間の協力の枠組みの強化と役割の明確化

## 2. 固有技術課題

固有技術課題に関して重要度を以下のように評価した。

①硬X線向き放射光施設 5が一番重要として回答しました。

- 1) 超伝導磁石の利用の是非 (3)
- 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 (4)
- 3) 熱負荷対策 (5)

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 (不明)
- 5) 高調波高周波空洞によるビーム寿命の確保 (不明)
- 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 (不明)

## 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

### ②-1 中村 豪志（日立造船㈱）

専門分野：ビーム診断・ビーム制御系、電子銃、電子線照射器、小型高電圧電源、加速器制御系

#### 概要

1. 制御・情報系は加速器および放射光としての神経になるので機器のおまけ扱いはやめてもらいたい。
2. 利用系の人でも実験に専任できるよう、他放射光施設との取扱をなるべく共通化する。利用者が実験しやすいプラットフォームを提供する。
3. 制御・情報系は、新規で設計製作すると時間と費用が大きく掛かるので、既存技術およびプラットフォームを活用することが望ましい。ただし、将来性のないものなど旧態以前の技術の採用は検討すべきで、技術のトレンドも盛り込んだ計画が必要。
4. 少配線化を図り、メンテナンスの向上、工期の短縮、信頼性をあげる必要がある。
5. コストを低減するため汎用品の活用と実績のある機器を組み合わせる。

#### ヒアリング内容

##### 1. 共通技術課題

###### 1-1 最重要項目：

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

理由：

利用研究ニーズを満たす次世代高輝度光源特性を可能とする設計指針が必要

具体的な方策：

光源加速器の専門家によるプロジェクト化

5年後の見込み：

不明

国際的な動向：

不明

1-2 第2重要項目

ビーム入射系：

ライナック・シンクロトロンを選択

理由：

ラティス設計と連携して最適な入射器の設計

具体的な方策：

不明

5年後の見込み：

不明

国際的な動向：

不明

1-3 第3重要項目

高周波加速系：

Solid state amplifier 等を用いた高周波空洞の電源、高調波(HOM)-free 高周波空洞の開発

理由：

次世代光源仕様を満たす空洞、電源設計思想が重要

具体的な方策：

不明

5年後の見込み：

不明

国際的な動向：

不明

1-4 開発スケジュール

i. 早く実現すべき開発要素：

ラティス設計、電磁石系、真空系

ii. 5年以上の猶予がある開発要素：

光学系、利用系

1-5 開発組織について

i. 国を挙げたプロジェクトなどで強く推進すべき課題：

ラティス設計、ビーム入射系

ii. 小さな研究グループまたは個々の企業による開発研究に任せるのが妥当な課題：

高周波加速系、ビーム診断・ビーム制御系

## 1-6 専門分野の開発要素について

ビーム診断、電子銃

・具体的な方策

弊社は、放射光関連製品として、数十年以来、各種電子ビームモニタ（ビーム電流、プロファイル等）の製作をはじめ、Spring-8 殿向けの RF コンタクトゲートや、ビームラインの高速遮断バルブ等の特殊バルブ等および、真空、電源、温度などの制御機器の製作を行ってきました。また、電子加速器向けの電子銃製作の実績もあります。現在は、産業界のニーズを踏まえ、2013 年から真空封切り型の小型電子線発生器（125kV max.）とその高電圧電源の設計、製作、販売を開始しています。

弊社として、以下 3 点の技術が光源加速器に寄与できればと考えております。ひとつめは、5) のビーム診断システムです。低エミッタンス電子ビーム特性評価等のモニタシステムについて諸専門のご先生方ご指導の下、特殊製品の設計、製作を実現いたします。一方、ふたつめ、14) その他として、電子線照射器と高輝度光源を融合した分析システムの構築が可能です。現在産業界では、低エネルギー電子線（<300 kV）による表面プロセス（滅菌、重合、架橋等）に多様な潜在的ニーズがあります。そのプロセス解明は、適した電子線照射器と分析ツールが無く進展していません。高輝度光源と弊社小型電子線照射器の融合システムの構築は日本国発の分析技術として可能性を持っています。みつつめ、9) の制御システムにおいて、温度、電源、真空など各種制御装置を一品ものから 100 台規模で、放射光施設が必要とする仕様に合わせて生産することができます。研究者・ユーザーの方一緒となって、何をしたいというところから、どういったソフト、機器、システム構成が必かを考え、設計、製造、施工まで実現できます。

・5 年後の見込み：

これまで、各種電子ビームモニタ、特殊バルブ、電子銃、電子線発生器（照射装置）、高電圧電源、各種制御装置等に製品納入実績があり、次世代に必要な高精度の特殊製品、システムの開発、設計、改良が可能です。

・国際的な動向：

低エミッタンスビームの非破壊リアルタイムモニタリング技術等、そのフィードバックへの適用に向けて研究が進行していると思います。



### 1-7 安定な施設性能を確保した上で、建設コストおよび運転コストを低減するための方策

加速器制御系に関連して、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、拡張性が重要と考えられます。ソフトウェアは、製作時、運転時のコストに直結し、大規模放射光施設 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と考えられます。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洗い出すことが重要です。さらに、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はずですが、弊社は、SPring-8 で MADOCA の実績がありアップグレードした MADOCA2 計画にも取り組んでおり、次世代の放射光施設に適したソフトウェアの開発に寄与したいと考えています。

## 2. 固有技術課題

固有技術課題に関して重要度を以下のように評価した。

### ①硬 X線向き放射光施設

- |                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| 1) 超伝導磁石の利用の是非                   | ( 2 ) |
| 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 ) |
| 3) 熱負荷対策                         | ( 3 ) |

### 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                           | ( 3 ) |
| 5) 高調波高周波空洞によるビーム寿命の確保                        | ( 3 ) |
| 6) UV 領域用長周期アンジュレータによるビーム及び<br>ビームライン光学素子への影響 | ( 3 ) |

## ②-2 三田正裕 (NEOMAX エンジニアリング株式会社)

専門分野：電磁石系、アライメント等、アンジュレータ

## 概要

## 1) アンジュレータ本体に関わる意見

放射光を生成する最終装置はアンジュレータであり、放射光施設で常に最良のアンジュレータが必要であることは異論を挟む余地がない。特に電子エネルギー3 GeVの中規模施設における各種波長の要求、特に硬X線生成のニーズは高く、アンジュレータには常に短周期化、高磁場化かつ低位相エラー化の要求が強い。しかるに、それを実現した真空封止アンジュレータの基本設計は20年前に確立された技術に依る所が大きく、高精度磁場の設計、製造、測定各ステージで従来の手法が特性向上の限界となっている。

## 具体的な方策

[1] 磁石を冷却する事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

クライオアンジュレータが欧州を中心に実用段階に入りつつある。低温対応の磁石の開発製造を行っているのは日独の二社のみであり材料と用途の両輪開発が必須

[2] 断熱状態にある真空チャンバー内構造を極力シンプルにし、磁石ギャップ変更に伴う動的誤差をもたらす位相エラーを極小にする構造。

動的誤差を抑制するために磁場吸引力相殺手法がいくつか提案されている。そのひとつは非線形あるいは擬似非線形のバネシステムを用いる方法、もうひとつは反撥磁石列を導入し磁石ギャップ直近で吸引力相殺を行う方法である。前者は真空チャンバー内をシンプルにできるという特長があるが、後者では、真空封止アンジュレータ原理に由来する真空断熱環境では不可避の問題となる電子ビームや他装置由来による放射光照射の影響を精査する必要がある。これらの相殺手法のオリジナルの考え方はいずれも日本から発信されているだけに国内での開発推進が急がれる。

[3] リスク対策

アンジュレータの小型軽量化が必要と言う意見がヒアリング会議で出された。至極もつともな意見である。しかし、小型軽量化の為に単純に機能を減らすことは問題である。絶対的に必要な性能が損なわれる恐れがある。現在世界標準（基本設計）となっているSpring8型真空封止アンジュレータの形式は様々なリスク対策が実施されるとともに規格化・標準化可能な設計的機能を有している。たとえば、①耐震性の確保、②製造過程、装置移動時、超高真空対応の加熱排気時における不安定性回避、③真空チャンバー内磁石列の熱的安定性の確保、④ユーザーへのフェールセーフなどを考慮した設計が採用されている。また、各放射光施設で有している測定システムにも適合可能な設計となっている。開発するのであれば、現行型真空封止アンジュレータ同様、日本発の世界標準を目指すべきであり、リスク対策、インフラ適合性、クライオアンジュレータ

への対応も考慮しなければならない。しかし、そのためには高度かつ広い分野（磁石、真空、低温、機械構造など）にわたるエンジニアリング技術が必須となる。

#### [4]精密磁場測定方式の確立

磁石ギャップと磁場周期の小サイズ化により、精度の高い磁場測定が困難になってきている。その結果、アンジュレータパラメータの絶対値比較が難しくなり、各施設、メーカーの相対測定目合わせに陥っているので、国際標準になりうる精密磁場測定方式を確立する必要がある。

#### [5]その他

高磁場強度を求めて超電導アンジュレータの研究もされているが、放射光照射による熱入力等の実用条件を考慮すると永久磁石式に分があると思われる。

### 2) 高輝度・高品質放射光を得る為の電子ビーム品質

アンジュレータに入射する電子ビーム品質（エミッタンスとエネルギー拡がり）が放射光の品質を大きく左右する。つまり、アンジュレータ特性とアンジュレータに入射する電子ビーム品質とは良い放射光を得るための両輪である。

ラティス設計はリング型施設において良質の電子ビームを得る為に重要な要素である。エミッタンスを減少させるラティス設計が肝要となるが、それがために電子ビームのエネルギー拡がりをむやみに増大させてはならない。なお、エミッタンスとは異なり、このエネルギー拡がりはラティス設計によって低下させることはとても困難である。ただし、偏向磁石磁場を低く設定することにより、幾分の低下が期待される。なお、最近になって稼働状態に入ったBNLのNSLS-IIでは偏向磁石の磁場を低く設定することにより、 $5E-4$ の低エネルギー拡がりを実現している。

偏向磁石の永久磁石化も各所で検討されておりランニング電力の低減が期待される。

### 3) 軟X線及び硬X線施設の住み分け

軟X線及び硬X線両用を目的としている3GeVクラスの海外施設からのアンジュレータ仕様では、硬X線を得るために7～11次高調波を利用する必要があり、極限に近い磁場均一度（極低位相エラー）が要求されている。一方、軟X線では基本波（1次光）が利用されるケースが多いので、硬X線アンジュレータほどの精度は必要とされない。日本国内の施設全体としてのグランドデザインを設定し両施設の発生放射光種別を適所化する事で、最適なアンジュレータ設計が可能と考える。

## ヒアリング内容

### 1. 共通技術課題

#### 1-1 最重要項目：

アンジュレータ：

短周期化と低ギャップによるビーム不安定性の抑制

理由：

放射光を生成する最終機械はアンジュレータであり、放射光施設で常に最良のアンジュレータが必要であることは異論を挟む余地がないであろう。特に電子エネルギー3 GeVの中規模施設における各種波長の要求、特に硬X線生成のニーズは高く、アンジュレータには常に短周期化及び高磁場化の要求が強い。しかるに、それを実現した真空封止アンジュレータの基本設計は20年前に確立された技術に依る所が大きく、高精度磁場の設計、製造、測定各ステージで従来の手法が特性向上の限界となっている。

具体的な方策：

[1] 磁石を冷却する事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

[2] 断熱状態にある真空チャンバー内構造を極力シンプルにし、磁石ギャップ変更に伴う動的誤差をもたらす位相エラーを極小にする構造

[3] 国際標準になりうる精密磁場測定方式の確立

5年後の見込み：

開発の機会があれば[1][2][3]ともに実用域に達する事が可能

国際的な動向：

[1]クライオアンジュレータが欧州を中心に実用段階に入りつつある。[2]磁場吸引力相殺手法を用いて動的誤差を抑制する方法がいくつか提案されている。そのひとつとして磁石ギャップ直近での吸引力相殺が提案されているが、真空封止アンジュレータ原理に由来する真空断熱環境では不可避の問題となる電子ビームや他装置由来による放射光の影響が精査されていない。これらの技術のオリジナルの考え方は日本から発信されているだけに国内での開発推進が急がれる。[3]磁石ギャップと磁場周期の小サイズ化により、精度の高い磁場測定が困難になってきている。その結果、アンジュレータパラメータの絶対値比較が難しくなり、各施設、メーカーの相対測定目合わせに陥っている。[4]その他、高磁場強度を求めて超電導アンジュレータの研究もされているが、放射光照射による熱入力等の実用条件を考慮すると永久磁石式に分があると思われる。

## 1-2 第2重要項目

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

理由：

アンジュレータに入射する電子ビーム品質（エミッタンスとエネルギー拡がり）が放射光の品質を大きく左右する。つまり、アンジュレータ特性とアンジュレータに入射する電子ビーム品質とは良い放射光を得るための両輪である。ラティス設計はリング型施設において良質の電子ビームを得る為に重要な要素である。エミッタンスを減少させるラティス設計が肝要となるが、それがために電子ビームのエネルギー拡がりをむやみに増大させてはならない。なお、エミッタンスとは異なり、このエネルギー拡がりはラティス設計によって低下させることはとても困難である。ただし、偏向磁石磁場を低く設定することにより、幾分の低下が期待される。

具体的な方策：

加速器技術者のみでの議論でなく、放射光施設全体の目配りを行った設計が必要である。

5年後の見込み：

低エネルギー拡がりを保ちつつ回折限界エミッタンスを追求した放射光施設の実現。

国際的な動向：

MAX-IV にて7バンドアクロマートが採用されたのを皮切りに大型施設でも ESRF, Argonne の大規模改修でマルチバンドが採用される。しかし、それらの設計は水平エミッタンスを減少させることを志向しているが、エネルギー拡がりの低減に関しては記述がない。なお、最近になって稼働状態に入った BNL-NSLS2 では偏向磁石の磁場を低く設定することにより、 $5E^{-4}$  の低エネルギー拡がりを実現している。

### 1-3 第3重要項目

真空系：

真空チャンバーのア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

理由：

マルチバンド採用の場合、偏向磁石や4極、6極が軌道上に近接して配列されるため、真空ダクト同士をフランジ接続する隙間が無くなるばかりか、排気ポンプのポートも装備できなくなる。また、小径の真空ダクト採用が不可避となるので NEG 等の実効排気速度の高い分布排気のポンプ方式が必要となる。

具体的な方策：

不明

5年後の見込み：

不明

国際的な動向：

NEG コーティングを施した小径真空ダクトがトレンドとなっている。

#### 1-4 開発スケジュール

i. 早く実現すべき開発要素：

アンジュレータ、ラティス設計、アライメント等、真空系

ii. 5年以上の猶予がある開発要素：

ビーム入射系、利用系

#### 1-5 開発組織について

i. 国を挙げたプロジェクトなどで強く推進すべき課題：

電磁石系

ii. 小さな研究グループまたは個々の企業による開発研究に任せるのが妥当な課題：

真空系

#### 1-6 専門分野の開発要素について

電磁石系に関して

・具体的な方策

永久磁石を用いた「偏向磁石」により省電力化

5年後の見込み[永久磁石を用いた偏向磁石の実用開始。多少の電磁石併用もある。

国際的な動向[ESRF の改修で永久磁石式偏向磁石を採用予定。ブラジルの SIRIUS でも Super Bend として永久磁石式偏向磁石を検討中。

アンジュレータに関しては既に回答済み。

#### 1-7 安定な施設性能を確保した上で、建設コストおよび運転コストを低減するための方策

特に無し

## 2. 固有技術課題

・固有技術課題に関して重要度を以下のように評価した。

### ①硬X線向き放射光施設

1) 超伝導磁石の利用の是非

( 5 )

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

(不明)

- 3) 熱負荷対策 ( 5 )
- 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 (不明)
- 5) 高調波高周波空洞によるビーム寿命の確保 (不明)
- 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 (不明)

・固有技術課題に関する現状と解決策など  
永久磁石を取り入れたガイド磁場の是非  
現状：電磁石式が主流  
解決策：温度特性と微調整方式の改善により永久磁石を採用可能  
国際的な動向：ESRF の改修で永久磁石式偏向磁石を採用予定。ブラジルの SIRIUS で  
も Super Bend として永久磁石式偏向磁石を検討中。

・早期実現すべき課題  
超伝導磁石の利用の是非、熱負荷対策

### ②-3 尾形 敢一郎 (NEC トーキン)

専門分野：電磁石系、アライメント等、高精度電磁石（特に四極電磁石）の製作

#### 概要

高精度電磁石（特に四極電磁石）の製作が重要課題だと考えます。その理由は、リングでの高精度のビームを通すため、磁場を精度良く発生させる電磁石が必要と考えるためです。

そのためには、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）を良くする事、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）できる構造が必要と考えます。メーカーとして、引き続きこれらの製作精度、構造の検討を継続していきます。

現在、磁極の製作精度 $\pm 0.03$  mmは可能ですが、放射光の様に数多くの生産をした場合のコスト対策について検討の余地があります。今後の動向にもよりますが、5年後には現在より改善されているものと思われます。

海外の状況は完全に把握しておりませんが、日本の様な、電磁石の製作精度を追及するような動向は、あまりないように思われます。

もう一つの課題が永久磁石の利用と電磁石の省電力化であると考えます。放射光施設の運転コストに於いては、装置の電力が多くを占めます。特に電磁石は電気で磁場を発生させるため、その主となり、運転コストに影響を与える重要な要素となるため、電力を消費しない永久磁石の利用が求められています。

電磁石の代替とし永久磁石を用いることにはなりますが、磁場の自由度が少ないため電磁石は必ず必要となります。電磁石の省電力には、コイルを大きくして電力を下げる事が可能ですが、コンパクト化と相反しますので、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りますが、両方の問題を同時に解決する事は難しいかもしれません。各国においても、上記は難しい要素と思われる。

低エミッタンスリングで高精度のビームを通すため、精度良く製作した電磁石を精度良く設置する事が必要となり、アライメントの問題は重要です。

磁場を精度良く計測し、次に磁場中心と電磁石の設置基準の位置関係を精度良く測定し、そのデータを基にビームラインに設置する方法を考える必要があります。ただし、磁場、機械の計測、ビームラインへの設置共に一品毎に行う必要があるため、時間とコストが大きくなります。何かしらシステムチックに製作できる方法を考える必要があると思います。

現状では、上記の一品毎に計測が最良と考えます。5年後の製品製作に於ける時間とコストの対策は何らかの案は出ると思われますが、現状具体的な案はまだありません。



電磁石の設置は、国内外共に、機械精度で製作した位置決め基準をレーザーで計測し、設置する方式が主流と思われます。

## ヒアリング内容

### 1. 共通技術課題

#### 1-1 最重要項目：

高精度電磁石（特に四極電磁石）の製作

理由：

リングでの高精度のビームを通すため、磁場を精度良く発生させる電磁石が必要と考えるためです。

具体的な方策：

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）を良くする事、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）できる構造が必要と考えます。メーカーとして、引き続きこれらの製作精度、構造の検討を継続していきます。

5年後の見込み：

現在、磁極の製作精度 $\pm 0.03$  mmは可能ですが、放射光の様に数多くの生産をした場合のコスト対策について検討の余地があります。今後の動向にもよりますが、5年後には現在より改善されているものと思われます。

国際的な動向：

海外の状況は完全に把握しておりませんが、日本の様な、電磁石の製作精度を追及するような動向は、あまりないように思われます。

#### 1-2 第2重要項目

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

理由：

施設の運転コストに於いては、装置の電力が多くを占めます。特に電磁石は電気で磁場を発生させるため、その主となり、運転コストに影響を与える重要な要素となるためです。

具体的な方策：

電磁石の代替とし永久磁石が考えられますが、磁場の自由度が少ないため電磁石は必ず必要となります。電磁石の省電力には、コイルを大きくして電力を下げる事が可能ですが、コンパクト化と相反しますので、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ます。

5年後の見込み：

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りますが、両方の問題を同時に解決する事は難しいかもしれません。

国際的な動向：

各国においても、上記は難しい要素と思われます。

### 1-3 第3重要項目

アライメント等：

磁石のアライメントの精度向上、温度管理、磁場測定の高度化

理由：

1-1と同様に、リングでの高精度のビームを通すため、精度良く製作した電磁石を精度良く設置する事が必要と考えるためです。

具体的な方策：

磁場を精度良く計測し、次に磁場中心と電磁石の設置基準の位置関係を精度良く測定し、そのデータを基にビームラインに設置する方法を考えます。ただし、磁場、機械の計測、ビームラインへの設置共に一品毎に行う必要があるため、時間とコストが大きくなります。何かしらシステムチックに製作できる方法を考える必要があると思います。

5年後の見込み：

現状では、上記の一品毎に計測が最良と考えます。5年後の製品製作に於ける時間とコストの対策は何らかの案は出るとは思われますが、現状具体的な案はまだありません。

国際的な動向：

電磁石の設置は、国内外共に、機械精度で製作した位置決め基準をレーザーで計測し、設置する方式が主流と思われます。

### 1-4 開発スケジュール

i. 早く実現すべき開発要素：

ラティス設計、電磁石系、冷却・受電・変電設備

ii. 5年以上の猶予がある開発要素：

加速器制御系、利用系

1-5 開発組織について

i. 国を挙げたプロジェクトなどで強く推進すべき課題：

ラティス設計、ビーム入射系、冷却・受電・変電設備

ii. 小さな研究グループまたは個々の企業による開発研究に任せるのが妥当な課題：

ビーム診断・ビーム制御系、加速器制御系、利用系

1-6 専門分野の開発要素について

具体的な方策：

R & D機の製作により、確認ができれば良いと考えます。

5年後の見込み：

何らかの技術的な進展はあると思いますが、実際に製品を製作する機会が無いと想定だけとなる可能性もあると思います。

国際的な動向：

常温電磁石に関しては、革新的な開発要素はあまりなく、現技術のブラッシュアップを行っていくものと考えます。

1-7 安定な施設性能を確保した上で、建設コストおよび運転コストを低減するための方策

特に無し

2. 固有技術課題

弊社は電磁石の専門なので、硬X線、軟X線という分野では特に選択する余地はありません。

## ③ 大学・産業界等の研究者等の潜在的ユーザー層

## ③-1 松倉 文禮（東北大学）

専門分野：ラティス設計、アンジュレータ、利用系

## 概要

輝度を桁で向上し、周長は同程度に保ち、低資源、低コストの次世代放射光の実現には、スペースが最大のハードルであり機器のコンパクト化が課題であることが分かった。また、磁石を例にとると目標値として70~80 T/m、温度係数~0.1%/K以下といった個々の数値目標があることを知った。また、可変偏光クライオアンジュレータといったこれ迄にできていないものは次世代にはマストであろうと知った。

ユーザーとしては、高次の課題のクリアがやりたいことに繋がることは理解できる。しかし、やりたいことを放射光の技術課題に投影する作業は、放射光技術の専門家になりたいわけではないユーザーには難しく、放射光技術者とユーザーの対話には「翻訳」の必要性を感じた。事前アンケートに答える際も、よりヘビーな放射光ユーザーに意見を伺ったりしたが、質問事項がマニアック過ぎて良く分からないとのことだった。ニーズ調査結果と技術課題の対応が明確になっていると良かったように感じた。

## ヒアリング内容

## 1. 共通技術課題

## 1-1 最重要項目：

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

理由：

新規でリングを作る場合、常に世界最先端の性能を意識する必要がある。高品質なビームを得るためには低エミッタンス化が重要

具体的な方策：

低エミッタンス化は加速器の設計に大きく依存するので、早急に設計チームを形成し、検討を開始することが望まれる

5年後の見込み：

不明

国際的な動向：

1 nmrad 以下のエミッタンスを持つ放射光施設の運転・建設は既に始まっており、世界はもとよりアジア諸国と比しても日本は立ち後れている

#### 1-2 第2重要項目

アンジュレータ：

短周期化と低ギャップによるビーム不安定性の抑制

理由：

高輝度の放射光・省スペース化を図るために不可欠な技術、自由電子レーザー技術にも適用可能

具体的な方策：

設計チームの形成と検討の開始

5年後の見込み：

不明

国際的な動向：

不明

#### 1-3 第3重要項目

光学系：

光源エネルギーに対する最適化

理由：

世界最高級のリングや光源に見合う光学系がないと性能を最大限に利用できない

具体的な方策：

不明

5年後の見込み：

不明

国際的な動向：

不明

#### 1-4 開発スケジュール

i. 早く実現すべき開発要素：

ラティス設計、電磁石系、アライメント等、真空系

ii. 5年以上の猶予がある開発要素：

無し

1-5 開発組織について

i. 国を挙げたプロジェクトなどで強く推進すべき課題：

電磁石系、高周波加速系

ii. 小さな研究グループまたは個々の企業による開発研究に任せるのが妥当な課題：

利用系、建物、冷却・受電・変電設備

1-6 専門分野の開発要素について

項目：ラティス設計

具体的な方策：低エミッタンス化は加速器の設計に大きく依存するので、早急に設計チームを形成し、検討を開始することが望まれる

5年後の見込み：不明

国際的な動向：1 nmrad以下のエミッタンスを持つ放射光施設の運転・建設は既に始まっており、世界はもとよりアジア諸国から見ても日本は立ち後れている

1-7 安定な施設性能を確保した上で、建設コストおよび運転コストを低減するための方策

特に無し

③-2 角田 克彦（株式会社ブリヂストン、中央研究所研究第1部、フェロー）

専門分野：その他

**概要**

【ヒアリング調査に対する当社のスタンス】

当社は、放射光設備を活用させて頂きながら高分子の構造、物性解析に取り組んでおります。社内の技術領域も放射光設備ハード面に関する知見は多くないことから、ユーザーの視点で提言させて頂く。

【当日の意見交換内容】

1. 硬X線か軟X線か

- ・当社は主にゴム・エラストマーといった高分子複合体を取り扱っております。また、タイヤ等に用いるゴム材料は、カーボンブラックやシリカといった充填剤を配合されております。
- ・ゴム複合体の力学物性の本質理解のためには、このフィラーの空間配置とそのダイナミクスが重要であり、これまでも FSBL 産学連携体に参加させて頂き、SPring-8 にてこれらの解析に取り組んでおります。
- ・また、タイヤに多く用いられている天然ゴムは伸長結晶性を有し、それに伴う優れた力学物性を発現することから、伸長結晶性の解析にも精力的に取り組んで参りました。
- ・一方、高分子複合体を形成する材料の多くは軽元素で構成されており、これらの解析は軟X線が有効と考えております。これまで、軟X線を用いた解析は、あまり知見を有しておりませんので、今後軟X線を用いた解析には大変興味を持っております。
- ・硬X線と軟X線のどちらか、と言うよりも双方に対するニーズがありますことから、相補的に活用させて頂ければと考えます。特に、同時測定等のニーズもありますので、これに対応したハード設計を希望致します。

2. 測定に関する共通基盤化

- ・これは、ユーザーの立場から有用と考えます。但し、放射光を用いた実際の解析現場では、実際の測定対象、条件、知りたい情報などは、ユーザー毎に異なってくるものと考えます。そういった意味では、共通基盤は整備しつつ、各ユーザーの測定ニーズに柔軟に対応できる拡張性を持たせることが必要だと考えます。

3. ハッチの大きさ

- ・先にも述べたように、詳細な測定内容は、ユーザー毎に異なってくるものと考えます。場合によっては、特別な試験装置を持ち込んだ測定を行う場合も考えられますので、それらを許容できるハッチの大きさは確保して頂きたいところです。

## ヒアリング内容

### 1. 共通技術課題

#### 1-1 最重要項目：

ビーム入射系：

ライナック・シンクロトロンを選択

理由：

開発に莫大な費用と専用の施設が必要なため、施設の基本的な性能を決定する重要な要素と考えられるため

具体的な方策：

専門外のため具体案は提示できません

5年後の見込み：

専門外のため不明です

国際的な動向：

専門外のため不明です

#### 1-2 第2重要項目

光学系：

光源エネルギーに対する最適化

理由：

施設の性能を決める上で重要な要素と考えたため

具体的な方策：

専門外のため具体案は提示できません

5年後の見込み：

専門外のため不明です

国際的な動向：

専門外のため不明です

#### 1-3 第3重要項目

利用系：

計測のオートメーション化、計測システム共通化



理由：

施設の基本性能が高くて、施設を効率よく使用しデータを的確に解析できなければ有用な成果が得られないため

具体的な方策：

既存ビームラインの管理者やヘビーユーザーから少人数のワークグループを組織し、測定自動化や測定・解析インターフェイスの規格化とソフト開発を実施して頂く  
5年後の見込み：

今からスタートすれば十分実現可能と思います

国際的な動向：

専門外のため不明です

#### 1-4 開発スケジュール

i. 早く実現すべき開発要素：

利用系、ビーム入射系

ii. 5年以上の猶予がある開発要素：

建物

#### 1-5 開発組織について

i. 国を挙げたプロジェクトなどで強く推進すべき課題：

ビーム入射系

ii. 小さな研究グループまたは個々の企業による開発研究に任せるのが妥当な課題：

利用系

#### 1-6 専門分野の開発要素について

該当無し

#### 1-7 安定な施設性能を確保した上で、建設コストおよび運転コストを低減するための方策

ユーザー側のコスト削減という観点からは、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ます。また、測定系のシステムにトラブルは付き物ですが、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易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ます（ビームタイムのロス短縮、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考えられます。

## 2. 固有技術課題

固有技術課題に関して重要度を以下のように評価した。

### ①硬X線向き放射光施設

- |                                  |      |
|----------------------------------|------|
| 1) 超伝導磁石の利用の是非                   | (3)  |
| 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 | (不明) |
| 3) 熱負荷対策                         | (不明) |

### 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                          | (不明) |
| 5) 高調波高周波空洞によるビーム寿命の確保                       | (不明) |
| 6) UV領域用長周期アンジュレータによるビーム及び<br>ビームライン光学素子への影響 | (不明) |

固有技術課題の現状と解決策など

- 1) 永久磁石を取り入れたガイド磁場の是非

現状：

専門外のため不明

解決策：

専門外のため提示することが出来ません

国際的な動向：

専門外ですが、超電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があると考えます

開発スケジュール

早期に実現すべき課題：

超伝導磁石の利用の是非、高周波加速空洞の加速周波数の選択

猶予のある課題：

熱負荷対策

国家プロジェクトなどで行うべき課題

超伝導磁石の利用の是非、高周波加速空洞の加速周波数の選択

### ③-3 本間 穂高（新日鉄住金株式会社）

専門分野：利用系、解析技術

#### 概要

放射光の汎用利用が世界的に進んでおり、その一端を日本が担えている事は大変重要な事で、今後もそのポジションを維持していくべきである。その上で、低エミッション化と言うトレンドを踏まえ、高エネルギー化ばかりでなく、3 GeV レベルの軟X線設備に方針を構えられたことは、利用者のニーズを意識した大変良い方向といえる。従って、具体的な設備仕様を検討されるにあたっては、なぜ高性能軟X線を求めるユーザーが増えているのか、その背景を詳細に理解し、きめ細かく対応する事が肝要である。

まず硬X線への希求は、解析装置として、まずバルク透過性と時間分解能・その場現象解析を前提としたうえで、諸機能のアドオンである。ラボX線装置の高性能化と低価格化による汎用普及が進んでいる今日、単にビーム性能が高いだけでユーザーがその価値を認めることはない。欧米の放射光施設はその危機感を十分に認識したうえで解析装置としてのシステムアップを高度に設計し、サービス提供に努めている。すなわち、（ビーム系）（光学系）（試料系）（検出系）（解析・データ処理系）の一貫工程でパフォーマンスが評価される中で、現状のボトルネックがどこにあるかを十分に検討して頂きたい。また、トップ性能評価だけでなく、安定性評価をお願いしたい。

例えば超電導磁石は、設計上の最高性能は極めて期待されるものではあるが、安定性能ははなはだ疑問で、試作品としてトライする価値はあるかもしれないが、解析装置に組み込まれば、ユーザーは諸リスクを覚悟しなければいけない。また、他解析装置に対する放射光の優位性として求められる、バルク透過性、その場解析性能を高める上で現在最も立ち遅れているのは検出器系である。これの技術躍進がなければ、ビーム系の開発は性能発揮を評価されるに至らない。J-PARCなどが現在最も苦しみ、かつ最も力を入れている課題である。

軟X線施設開発について、ヒアリングで議論され、大きな懸念が示された高周波ノイズ等の諸課題は、ユーザーに問うべき質問ではない。ユーザーは、ノイズが許容範囲を超えたら使わないだけである。測定対象によってどの程度のノイズが許されるのかは、ユーザーの分野によって大きく異なるのであるから、設備設計サイドはユーザーとの対話をきめ細かく実施し、ニーズの俯瞰と体系整理をしっかりと行うべきである。最後に、今や放射光は世界的なニーズの高まりとともに施設数も多数に上がり、サービス競争が激化する事は想像に難くない。従って彼らは自分たちの特徴を上手に作り上げアピールしている。我が国のユーザーも積極的に海外進出している中、他施設との連携、役割分担を十分に見据えた上で、我が国の科学技術における求心力向上に努めて頂きたい。

（別の解析設備開発に関わる委員会でも、日本のユーザーからニーズが上がらなくても、後進国には潜在ユーザーが多数いるから大丈夫、という発言がなされ、啞然とした事があった。杞憂ながら、この様な議論に陥らない事を切望している。）

## ヒアリング内容

### 1. 共通技術課題

#### 1-1 最重要項目：

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

理由：

高強度微小ビーム放射光の安定供給に不可欠な開発要素。エネルギー分解能の向上が必要。材料開発において、元素の状態分析は最重要課題。

具体的な方策：

例えば、硬X線は SPring-8 に任せて、軟X線領域で世界最高を目指すことのできる光源の建築。敷地には余裕を持たせたいうえで、分光器の開発も推進するのも一考。

5年後の見込み：

EUなどと同等以上の軟X線を得る

国際的な動向：

EUなどをはじめとして、すでに軟X線領域の光では立ち遅れている。真っ向勝負できる状態にないとの印象を持っている。

#### 1-2 第2重要項目

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

理由：

放射光ユーザーとしてマシンタイムの確保には省エネルギー対策が不可欠だから。

具体的な方策：

不明

5年後の見込み：

不明

国際的な動向：

不明

#### 1-3 第3重要項目

光学系：

光源エネルギーに対する最適化

理由：

材料分析において、微細組織の観察はますます重要になっている。

具体的な方策：

集光技術の開発

5年後の見込み：

50-2keV で 0.1nm ビームの実現など

国際的な動向：不明

#### 1-4 開発スケジュール

i. 早く実現すべき開発要素：

ラティス設計、電磁石系、光学系、解析技術

ii. 5年以上の猶予がある開発要素：

ビーム診断・ビーム制御系、加速器制御系、利用系

#### 1-5 開発組織について

i. 国を挙げたプロジェクトなどで強く推進すべき課題：

ラティス設計、電磁石系、光学系、解析技術

ii. 小さな研究グループまたは個々の企業による開発研究に任せるのが妥当な課題：

利用系

#### 1-6 専門分野の開発要素について

項目：解析技術

具体的な方策：立場の異なる加速器／光源／利用技術開発者が三位一体の協力体制で取り組む事。具体的には例えば、各ビームラインでの、制御系、各センサのインターフェイスの共通化など。

5年後の見込み：

例えば、制御は SPEC で統一。

国際的な動向：

不明

項目：検出器

共通の開発要素に列記されていなかったが、検出器の開発もご検討いただきたい。理由は、その場分析に対する重要性が増しているためで、各画素読み出し時間の短い、2次元で分光分析できる検出器があるとうれしい。材料分野では、利用環境や、製造プロセス制御のための精緻なデータを欲している。せめて1 kHzでの測定は実現してほしい。2次元分光分析検出器は白色X線利用にも有効。現在の2次元検出器は画素が粗く、読み出し時間が遅い。

また具体的な方策として、集積型分光検出器の開発、高速読み出し技術などを、SPring-8、SACLAなどと共同で開発されてはどうか。

5年後には、10×10ミクロン程度、読み出し1msec、3M画素程度の検出器の開発。100×100ミクロン程度、読み出し1msec程度、1M画素程度の分光型検出機が完成していると喜ばしい。なお他国では2次元分光分析検出器をよく見かけるが、もちろんまだ使えるレベルではない。

## 1-7 安定な施設性能を確保した上で、建設コストおよび運転コストを低減するための方策

すでに、SPring-8や中部シンクロトロンで実現されているような、自動化、遠隔操作システムの標準化、消耗品の共通化は進めてほしい。

## 2. 固有技術課題

固有技術課題に関して重要度を以下のように評価した。

### ①硬X線向き放射光施設

- |                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| 1) 超伝導磁石の利用の是非                   | ( 5 ) |
| 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 ) |
| 3) 熱負荷対策                         | ( 4 ) |

### 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                          | ( 2 ) |
| 5) 高調波高周波空洞によるビーム寿命の確保                       | ( 1 ) |
| 6) UV領域用長周期アンジュレータによるビーム及び<br>ビームライン光学素子への影響 | ( 1 ) |

### 開発スケジュール

早期に実現すべき課題：

熱負荷対策、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

猶予のある課題：

無し

国家プロジェクトなどで行うべき課題

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

その他

放射光ユーザーの立場からは、放射光施設に関わる具体的な技術課題について、余り詳細なコメントは、本来であれば差し控えるべきではないかと考えている。性能としてあらわれるスペックレベルでのユーザー要望に対応するために必要な加速器／光源の開発に取り組んでいただき、さらには放射光を作る立場と放射光を利用する立場の間の協議を引き続き十分に取り計らう事で、技術課題解決に向けた取り組みの継続をお願いしたい。

## 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

### ④-1 平井 康晴（九州シンクロトロン光研究センター）

専門分野：その他

#### 概要

##### 1. 施設の利用に関する技術的な意見

（本記述はヒアリング当日に上垣外先生のご質問にお答えした内容です）

測定の自動化については、例えば既に試料の基本的な測定が行われており、その組成等を変化させた多量の試料を測定したい場合には自動測定は大変有効である。一方で、例えば、試料を雰囲気ガス中で加熱・冷却したり外場を印加しつつ測定するような in situ 測定は実験をカスタマイズする必要があるため自動測定は難しい場合が多い。むしろ所望の実験条件を作ることが重要になる。ただ、将来的にはそのような測定も自動で行えるようになれば効果は大きい。

##### 2. 施設の運営面からの意見

（本記述は1. への追記です）

###### ・費用

通常、放射光施設の毎年の運営費用（支出）は目安として建設費用の1割程度である。施設寿命が30年程度とすれば、その間の総運営費用は建設費用の約3倍となる。従って、建設費用の低減（簡素化、互換性など）は運営費用の低減に繋がり得るので重要である。

###### ・効果

運営費用の投入に対して大きな効果を得るためには、事業目的の明確化と周知、運営ルールの徹底、競争力維持・強化の具体策、施設維持補修の具体策などが必要である。もちろん投入資源が減れば効果も減る。

###### ・利用

利用者の観点から、既に稼働している施設の運営で重要なことは信頼性である。確実に目的とする実験が行えること（事前相談、利用支援など）、実験結果の解析に必要なアドバイスが得られること、継続して同様の実験が行えること、故障時に振替実験が保障されること等である。なお、解析サービスもリクエストに対応出来れば良いが場合によると思われる。例えば企業間の競争において自前で解析出来る企業とサービスの利用が必要な企業を比べると、すでに勝負は着いているのかもしれない（企業に限らないかもしれない）。

###### ・安全

安全はすべてに優先するのが原則である。実際には不安全を見過ごすことも多く、不断に注意を払うことが必要である。施設内では複数の利用機関の研究者が同時に実験し



ており、1 利用機関による安全上のトラブルが複数機関に及ぶ可能性が高く、施設職員の安全意識は勿論の事、利用機関の研究者の安全意識も喚起することが必要である。

## ヒアリング内容

### 1. 共通技術課題

固有技術課題担当のため回答無し

### 2. 固有技術課題

固有技術課題に関して重要度を以下のように評価した。

#### ①硬 X 線向き放射光施設

- 1) 超伝導磁石の利用の是非 (3)
- 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)
- 3) 熱負荷対策 (4)

#### 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 (不明)
- 5) 高調波高周波空洞によるビーム寿命の確保 (4)
- 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 (3)

固有技術課題の現状と解決策など

#### 1) 永久磁石を取り入れたガイド磁場の是非

現状：

アンジュレータ、マルチポーウウイグラ以外はほぼ電磁石

解決策：

永久磁石の低コスト化、減磁阻止、磁場均一性確保

国際的な動向：

昔からアイデア、試作はある

#### 2) 不安定性を抑制する高速フィードバック

現状：

SPring-8 等での FPGA による bunch-by-bunch フィードバック等

解決策：

不安定性そのものの抑制、

国際的な動向：

不明

3) 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

現状：

真空槽が BL サイドであれば、Be 窓による仕切り。真空槽が加速器側であれば、フロントエンドに NEG ポンプ等設置

解決策：

同上

国際的な動向：

同上

②軟 X 線向き放射光施設

4) ビーム入射機構と入射器の選択

現状：

ライナックまたはシンクロトロン、トップアップ入射が主流

解決策：

ライナックは FEL への利用可能。トップアップは蓄積ビームへの影響を最小限にする必要（多極磁石使用等）。

国際的な動向：

入射器は MAX IV ではライナック

5) 高周波加速空洞のコンパクト化

現状：

常伝導加速空洞

解決策：

例えば超伝導加速空洞

国際的な動向：

ILC 関連で超伝導加速技術を開発中（パルス、CW）

6) 高調波高周波空洞によるビーム寿命の確保

現状：

高調波吸収体によるバンチ結合型不安定性除去

解決策：

高調波領域で適当な抵抗率を持つ吸収体

国際的な動向：

同上

7) UV 領域用長周期アンジュレータによるビームへの影響

現状：

狭ギャップによる熱負荷増大、誘起場の影響増大

解決策：

磁石列上に低抵抗金属膜（板）の設置、配管形状のスムーズ化等

国際的な動向：

1GeV 前後の低エネルギーリングの利用等

調査対象とすべき課題

固有技術課題：

ナノビームによる照射損傷低減

現状：

まだ深刻でない？

解決策：

試料冷却、XFEL のような fs 照射による短時間測定？

国際的な動向：

不明

開発スケジュール

早期に実現すべき課題：

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

猶予のある課題：

超伝導磁石の利用の是非

国家プロジェクトなどで行うべき課題

高調波高周波空洞によるビーム寿命の確保

## ④-2 Prof. Liu, Yuen-Chung (TPS, Taiwan)

専門分野：真空系、アンジュレータ

## 概要

入射器としてライナックあるいはシンクロトロン of のいずれを選択するかは施設のトータルコストと大いに関連がある。ライナックの場合、将来、自由電子レーザー用加速器としても利用できるメリットがあるが、コストが高くなり、本来のリング型放射光に費やすべきコストを削減せざるを得なくなり、結果として高性能の放射光施設が実現できなくなるという問題点がある。

最大性能を有するリング型放射光を実現するためには、入射器コストをできるだけ低く抑える必要がある。したがって、安価なブースターシンクロトロンを入射器として採用することを強く推奨する。この方式の成功例は、スイス放射光 (SLS) と台湾放射光 (TPS) である。両者とも、ブースターを光源リングトンネル内に同居させることによって、大幅なコスト削減に成功している。もし、リング放射光建設後の将来計画として自由電子レーザーを展望しているならば、その可能性の余地を残しておくよう配慮しておけばよい (例えばスペースの確保)。もちろん、既に強力な入射器用加速器を保有している場合、本項のコメントは不用である。

リング型放射光施設において真空は根幹の技術である。この技術に求められる基本的な要素(精神)は、リング方式が飛躍的な進歩を遂げ、主排気方式がイオンポンプから NEG ポンプに代わった現在においても変わるところはない。もし、真空系に重要なトラブルがあれば、施設は数ヶ月以上の長期にわたるシャットダウンを余儀なくされ、施設が被る損害は甚大となる。したがって、その技術には徹底的なリスク回避の要素が不可欠である。また、アンジュレータは、加速器装置に挿入設置される唯一の非加速器装置である。そこを電子ビームが通過する限り、アンジュレータ真空とリング真空は運命共同体となる。したがって、アンジュレータに関わる研究者・技術者はリング加速器真空従事者と同様の能力と道徳性が必要とされる。特に、現在、世界標準となっている真空封止アンジュレータの場合は尚更である。この真空封止アンジュレータは日本において開発されたものである。開発当時、磁石列を真空内に設置できればその能力を飛躍的に高めることができるというメリットについては世界中のアンジュレータ従事者によく知られていた。しかしながら、成功したのは日本だけである。そして、その基本的な設計は世界の標準となった。その理由は、リング真空の素養を持った人物が開発を行ったからである。一見、危険なリスクが存在しそうであったが、リング真空と協調を保ちながら、電子ビームや放射光への対策を配慮しつつ超高真空が達成できるということが世界標準となった本質である。真空封止アンジュレータの技術はさらに進化させなければならないが、リング真空と運命共同体であるからには以上の基本的な精神は常に遵守されなければならない。

あらゆる放射光計画における共通の課題であるが、限られた予算の範囲内で最大限の性能を実現する工夫が要求される。それは施設全体あるいは個々の装置建設において合

理的な優先度を設けることである。前述したが、入射方式としてライナックを選ぶか、シンクロトロンを選ぶかは施設全体設計に関わる優先度設定であり、大幅のコスト削減が期待できるが、これは施設コンセプトの有り様に関わる案件であり、迅速な意志決定さえあれば後は容易に進んでいくものである。一方、個々の装置におけるコスト削減は、その装置に要求される性能を維持あるいは向上させるという条件では、とても難しい。これらの装置は、古くから蓄積されてきた技術体系のもとに成立しているものが殆どであるからである。つまり、コストカットのために取り去った仕組みが、大量生産した後、極めて重要であったことが判明した場合、施設にとって致命的な打撃を被ることになってしまうのである。一見、不用に思える仕組みは、その重要さが当たり前すぎて技術の継承から抜け落ちてしまうことが多い。これまで報告されている放射光施設およびその他の大規模施設における致命的ミスは、以上と同様の背景で起こっていることを胆に命ずべきである。したがって、個々の装置におけるコスト削減を成功させるためには、中途半端な技術を排除し、基本的な技術を有すると共にトラブルシューティング能力\*に優れた研究者・技術者が必須である。

\*トラブルシューティング能力：装置故障の原因を突き止める能力のことを言うが、この能力は装置開発の能力でもある。取り去った仕組みあるいは付け加えた仕組みがどのようなトラブルを引き起こすかを予見できる能力である。

## ヒアリング内容

### 1. 共通技術課題

#### 1-1 最重要項目：

ビーム入射系：ライナック・シンクロトロンの選択

理由：

入射器としてライナックあるいはシンクロトロンのいずれを選択するかは施設のトータルコストと大いに関連がある。ライナックの場合、将来、自由電子レーザー用加速器としても利用できるメリットがあるが、コストが高くなり、本来のリング型放射光に費やすべきコストを削減せざるを得なくなり、結果として高性能の放射光施設が実現できなくなるという問題点がある。

具体的な方策：

最大性能を有するリング型放射光を実現するためには、入射器コストをできるだけ低く抑える必要がある。したがって、安価なブースターシンクロトロンを入射器として採用することを強く推奨する。この方式の成功例は、スイス放射光(SLS)と台湾放射光(TPS)である。両者とも、ブースターを光源リングトンネル内に同居させることによって、大幅なコスト削減に成功している。もし、リング放射光建設後の将来計画として自由電子レーザーを展望しているならば、その可能性の余地を残しておくよう配慮

しておけばよい(例えばスペースの確保)。もちろん、既に強力な入射器用加速器を保有している場合、本項のコメントは不用である。

## 1-2 第2重要項目

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

理由：

リング型放射光施設において真空は根幹の技術である。この技術に求められる基本的な要素(精神)は、リング方式が飛躍的な進歩を遂げ、主排気方式がイオンポンプからNEGポンプに代わった現在においても変わるところはない。もし、真空系に重要なトラブルがあれば、施設は数ヶ月以上の長期にわたるシャットダウンを余儀なくされ、施設が被る損害は甚大となる。したがって、その技術には徹底的なリスク回避の要素が不可欠である。また、アンジュレータは、加速器装置に挿入設置される唯一の非加速器装置である。そこを電子ビームが通過する限り、アンジュレータ真空とリング真空は運命共同体となる。したがって、アンジュレータに関わる研究者・技術者はリング加速器真空従事者と同様の能力と道徳性が必要とされる。特に、現在、世界標準となっている真空封止アンジュレータの場合は尚更である。この真空封止アンジュレータは日本において開発されたものである。開発当時、磁石列を真空内に設置できればその能力を飛躍的に高めることができるというメリットについては世界中のアンジュレータ従事者によく知られていた。しかしながら、成功したのは日本だけである。そして、その基本的な設計は世界の標準となった。その理由は、リング真空の素養を持った人物が開発を行ったからである。一見、危険なリスクが存在しそうであったが、リング真空と協調を保ちながら、電子ビームや放射光への対策を配慮しつつ超高真空が達成できるということが世界標準となった本質である。真空封止アンジュレータの技術はさらに進化させなければならないが、リング真空と運命共同体であるからには以上の基本的な精神は常に遵守されなければならない。

## 1-4 開発スケジュール

i. 早く実現すべき開発要素：

特に無し

ii. 5年以上の猶予がある開発要素：

特に無し

1-5 開発組織について

i. 国を挙げたプロジェクトなどで強く推進すべき課題：

特に無し

ii. 小さな研究グループまたは個々の企業による開発研究に任せるのが妥当な課題：

特に無し

1-6 専門分野の開発要素について

特に無し

1-7 安定な施設性能を確保した上で、建設コストおよび運転コストを低減するための方策

あらゆる放射光計画における共通の課題であるが、限られた予算の範囲内で最大限の性能を実現する工夫が要求される。以上の工夫とは何か。それは施設全体あるいは個々の装置建設において合理的な優先度を設けることである。前述したが、入射方式としてライナックを選ぶか、シンクロトロンを選ぶかは施設全体設計に関わる優先度設定であり、大幅のコスト削減が期待できるが、これは施設コンセプトの有り様に関わる案件であり、迅速な意志決定さえあれば後は容易に進んでいくものである。一方、個々の装置におけるコスト削減は、その装置に要求される性能を維持あるいは向上させるという条件では、とても難しい。これらの装置は、古くから蓄積されてきた技術体系のもとに成立しているものが殆どであるからである。つまり、コストを構成するある仕組みが不用であるからという理由で取り去ってしまい、大量生産した後、その仕組みが極めて重要であったことが判明した場合、施設にとって致命的な打撃を被ることになってしまうのである。一見、不用に思える仕組みは、その重要さが当たり前すぎて技術の継承から抜け落ちてしまうことが多い。これまで報告されている放射光施設およびその他の大規模施設における致命的ミスは、以上と同様の背景で起こっていることを胆に命ずべきである。したがって、個々の装置におけるコスト削減を成功させるためには、中途半端な技術を排除し、基本的な技術を有すると共にトラブルシューティング能力\*に優れた研究者・技術者が必須である。

\*トラブルシューティング能力:装置故障の原因を突き止める能力のことを言うが、この能力は装置開発の能力でもある。取り去った仕組みあるいは付け加えた仕組みがどのようなトラブルを引き起こすかを予見できる能力である。

### 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

ヒアリング会議で議論されたトピックスについて、以下に簡単にリストアップする。

#### ヒアリング会議トピックス

「次世代」とは？

- ・必ずしも回折限界を意味しない。
- ・今存在しない放射光源。
- ・今あるものでも飛躍的ジャンプがあれば次世代と見なす。
- ・加速器本体だけでなく、総合的システムとして考える。
- ・個別の構成要素の最適化では済まない。
- ・全体の性能と仕様、コストと将来の拡張性をどう考えるか。
- ・作ろうとする光源のコンセプト（他との比較ではなく）を考えるのが必要。  
(例) 入射器システム、高調波空洞、真空システムと電磁石。

ラティス設計

- ・ ESRF-II タイプのラティスは低エミッタンスかつ入射がしやすい。
- ・ ESRF-II タイプが常に最適とは限らない。マルチバンチで十分かシングルバンチを重要視するかでラティス設計は変わってくる。リングの目的に応じて設計は変わる。
- ・ ラティス、真空、マグネットを全てトータルに統合的に考える必要がある。

電磁石の超伝導化

- ・ エネルギーの低いリングに超伝導電磁石を入れるメリットは発展を見込める：X線を簡単に出せる。
- ・ 直接冷却方式の超伝導磁石は安定である。コンパクト化と両立する可能性がある。数の問題は要検討。
- ・ K=10 程度を次世代の目標。
- ・ High-Tc の導入は長期的展望

永久磁石の利用

- ・ ESRF では永久磁石 (SmCo 系) が導入される予定である。
- ・ 放射線減磁を考えると SmCo 系が良いが、ネオジウム系でも適切な処理をすれば同等の保持力が得られるデータはある。研究を進める必要あり。

アライメント

- ・ 直線部のまとまった磁石を高精度で並べるのは現実的。
- ・ ベンドを含めるのは難しい。既存の考え方はない。



- ・MAX-IVを前例に設計はできないのではないかと。あまりにも特殊では？
- ・精度  $50\mu\text{m}$  であれば現在の技術の延長で可能である。 $10\mu\text{m}$  が必要になるとは思わない。
- ・アンジュレータのアライメントはSXの方が磁石の制御を含めて厳しい。  
ビームが細いのでアンジュレータの磁石を小さくして均一領域を小さくできる。周期長が小さいとギャップが狭くなり縦方向のアライメントが厳しくなる。
- ・固定磁場を制御するには機械的安定性が必要。あまり華奢にはできない。

## 真空

- ・小口径の真空一は必須。
- ・ESRFでは直線部の排気にNEGコートを使用。SOLEILではリングの半分ぐらいに使用。活性化はそれほど頻繁にやらずに済んでいる。無駄な活性化を防ぐためにバルブやベローズの配置を考える必要がある。
- ・アルミニウムとNEGポンプの組み合わせで、ダクトやケーブルの劣化が激しい。放射光による活性化の有無も含めて今後の調査が必要。
- ・日本ではc-ERLの超伝導空洞の両端でNEGを使っている。

## 高周波加速空洞

- ・コンパクト化では、高調波(HOM)の制御が問題になる。デザインや加工の高度化で数年程度で解決できそうである。

## 超伝導空洞

- ・導入する理由は存在する。
- ・トータルコストを考えるとどうか。

## アンジュレータ

- ・短周期化： $10\text{mm}$  まではOK。低コスト化・大量生産に向く構造仕様を決めるのが重要。
- ・数mmにする開発を行っている。水平方向の磁場の一様性が問題か(APPLEを除く)。
- ・クライオアンジュレータという方向性はある。
- ・超伝導アンジュレータは永久磁石に比べて今ひとつ。
- ・アンジュレータのコンパクト化とは、短周期化、狭ギャップ化、磁石の横幅の削減。  
ただし、地震や経時変化を間がると、軽量化、低コスト化に過ぎるのは疑問。据付時のイニシャルコストをかけることで、メンテナンスなどのランニングコストを抑えられる。

## ビーム診断

- ・光ビームモニタは現状でも不足はない。

- ・光ビームモニタが電子 BPM にとって変わるの難しい。

#### 制御

- ・設計前に共通化を図るべき。
- ・「ガラパゴス化」するのは、標準化へのモチベーション不足に依っている。日常業務に追われている。
- ・インフラ、安全系のインターロックは、最初から相互に参照できるようにすべき。データベースも共通化すべき。

#### 光学系

- ・フロントエンドの熱負荷は、省エネルギーを考える限り現状から増えることはないだろう。
- ・分光器など冷却系由来の素子の振動は現状の 1/10 を目標にすべき。
- ・ミラー光学系の精度は 1nm 以下の光学精度が必要。
- ・回折格子の技術を絶やさないように。
- ・アンジュレータによる電子ビーム側での偏光切り替えでは電子ビームに振動が生じる。多層膜などによる光学素子での偏向切り替え技術の開発。
- ・切り替え時に振動が起きにくいアンジュレータの開発。
- ・機械切り替え式は切り替えの高速化が難しいが今後も研究は必要。

#### 利用系の視点

- ・「共通化」と「一品のための使用」の相反。
- ・時間平均したのではなく、時分割が重要になる。
- ・次世代光源のパルス幅は。XFEL とどう住み分けるか。
- ・オートメーション化。優秀なオペレータ。高品質な解析結果。  
(オートメーション化は次世代ではなく現状の課題出るという意見も)
- ・シャットダウン期間をなるべく短くする。
- ・ナノビーム、顕微法との組み合わせによる不均一系の測定。様々な製品に対応出来るオペランド測定。
- ・迅速な測定と企業にとって直ぐに役に立つ解析結果。

#### インフラ

- ・PFI 方式。SPC。
- ・建物とマシンの建設費が競合した例もあり、重要な視点かもしれない。
- ・受電の方法によってはロスが大きくなる。

#### その他

- ・X線の検出器の性能が、放射光実験の精度や質を左右している。現状、外国製のもの

を購入しているが、自国開発も視野にいれて予算投入すべきである。自主開発なのか共同研究開発なのか購入で済ませるのか、線楽的なプランが必要である。

### 3-3 参考資料リスト

- 参考資料 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/>
- 参考資料 2. 文部科学省 次世代放射光施設に関するニーズ調査（平成 27 年 3 月）  
[http://www.mext.go.jp/a\\_menu/shinkou/ryoushi/detail/1357031.htm](http://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/ryoushi/detail/1357031.htm)
- 参考資料 3. 次世代放射光施設検討ワーキンググループ報告書（平成 27 年 4 月）  
[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/chousa/gijyutu/022/index.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/gijyutu/022/index.htm)
- 参考資料 4. SPRUC 放射光科学将来ビジョン白書（平成 25 年 6 月）
- 参考資料 5. PF-UA 白書  
「PF および日本の放射光科学の将来への提言」（平成 27 年 2 月）
- 参考資料 6. 学術会議 第 22 期 大型研究計画マスタープラン 2014 年  
計画番号 140 学術領域番号 26-1  
新しい時代の科学技術立国を支える放射光科学の高輝度光源計画」
- 参考資料 7. 極紫外・軟 X 線高輝度放射光施設計画に関する提言（2001 年 8 月 19 日）  
日本放射光学会将来計画特別委員会
- 参考資料 8. フォトンファクトリー次期光源検討委員会中間まとめ（2005 年 12 月）
- 参考資料 9. 次世代放射光源に関する考え方（平成 17 年 9 月 3 日）  
日本放射光学会
- 参考資料 10. 先端的リング型光源計画に関する報告書（平成 19 年 1 月 12 日）  
日本放射光学会
- 参考資料 11. 学術会議 第 21 期 大型研究計画マスタープラン 2010 年  
放射光科学の将来計画
- 参考資料 12. 放射光将来計画特別委員会中間まとめ（2012 年 5 月 23 日）  
日本放射光学会
- 参考資料 13. 「我が国の放射光科学研究施設に関する 21 世紀以降の検討経緯」  
日本放射光学会（2014 年 3 月 31 日）
- 参考資料 14. 内閣府「環境エネルギー技術革新計画における環境技術の開発・普及への道筋」  
<https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h26/html/hj14010302.html>
- 参考資料 15. 「熱電供給（コジェネ）推進室」 エネルギー庁（2012 年 9 月）
- 参考資料 16. 東北電力 CSR レポート 2015  
[http://www.tohoku-epco.co.jp/csrreport/pdf/now2015\\_tokushu\\_all.pdf](http://www.tohoku-epco.co.jp/csrreport/pdf/now2015_tokushu_all.pdf)
- 参考資料 17. （新）地域のエネルギーマネジメントによる低炭素社会構築事業：環境省  
<https://www.env.go.jp/guide/budget/h25/h25-gaiyo/038.pdf>