

## 第二部

### B. 技術的観点の総合調査

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



## 2-1. 総合調査はじめに

報告書第一部でも述べたように、平成 26 年度にまとめられた「次世代放射光施設検討ワーキンググループ」報告書（以下「施設検討ワーキング報告書」という。）、及び「次世代放射光施設に関するニーズ調査」（以下「ニーズ調査」という。）では、我が国の硬 X 線領域の高輝度光源性能のさらなる高度化と、海外との性能差が広がる一方の軟 X 線領域の施設整備の必要性が指摘されている。加えて、産学の旺盛な需要に応えるためには、双方の光のエネルギー領域にわたり、高エネルギー光科学の研究レベルを世界レベルに引き上げることが急務であることが示された。このような我が国の放射光施設整備の閉塞的状况を解消するためには、SPring-8 を性能面で凌駕する硬 X 線向きの放射光施設と、3 GeV クラス軟 X 線向きリングの施設の整備が必要不可欠である。その双方の施設の整備が、硬 X 線領域と軟 X 線領域をオーバーラップし切れ目のないエネルギー領域をカバーする高輝度の光を供給することで、世界トップを目指す我が国のサイエンスコミュニティと産業界を持続的に支援する事が可能となる。

総合調査では、第一部のヒアリング調査で挙げられた技術課題を基に、次世代放射光施設整備を具現化する複数のシナリオを設定し、それらの科学技術的観点と開発・運営に係わるコストパフォーマンスの観点から検討することが目的である。シナリオを方向付ける重要な要素は、第一部で明らかになった次世代放射光施設整備のための要素技術の課題と、ニーズ調査で明らかにされた学術・産業界が求めるニーズを実現するための課題である。シナリオは、それら課題を時間軸、コスト、運営の観点から整理することで、施設整備に関してできるだけ具体的なものになるように努めた。

加えて、ニーズ調査で明らかにされた、大型の硬 X 線向き放射光施設と中型の軟 X 線向き放射光施設を分散整備しながら相補的に運営する最近の国際的なトレンド、及び、施設検討ワーキング報告書で提案された、分散した国内放射光施設群を協働的に運用する分散型プラットフォームの考え方を考慮に入れたシナリオの検討も行った。

以上を踏まえて、次世代放射光施設構想の具現化に向けた複数の可能なシナリオを設定し、各シナリオにおける技術的観点からの課題について包括的な整理・分析を行った。

技術的観点の総合調査は、施設整備とその後の運用の観点からの検討が必要となる。そのため、加速器、放射光施設の責任者、放射光施設において大型プロジェクトを遂行する代表者、海外の放射光施設の責任者などの適任者を外部アドバイザーとして選定し、設定するシナリオの実効性について意見交換を行い、次世代放射光施設構想の具体化に向けたシナリオを中長期的な観点から包括的に整理・分析した。選定した外部アドバイザーのリストを第三部の【表 3-10】に示す。

なお、本調査で見積もられた施設の整備経費などに関しては、概算値であり今後の詳細検討により増減の可能性のあることを記しておく。

## 2-2. 放射光施設整備の現状と課題

### 2-2-1. 放射光施設整備の経緯

我が国の硬X線向き高輝度放射光施設は、1997年に運用が開始された SPring-8 が唯一のものである。SPring-8 は 2004 年に、3.6 nmrad から 2.4 nmrad への低エミッタンス化への改良とトップアップ運転の技術を確立したことにより、長年にわたって、硬X線ビームでは世界最高性能の競争力を維持してきた。しかし、建設から 20 年近く経ち、低エミッタンス化から 10 年の経過により、国際的な競争力の維持が難しくなっている。したがって、さらなる低エミッタンス化による回折限界リングを目指したアップグレード計画が検討されている。ただし、その際には、少なくとも 1 年程度の休止が想定されており、我が国における先端光源の利用が 1 年間のブラックアウトを迎えることが現実味を帯びている。また、3 GeV クラスの先端的な高輝度の軟X線向き施設の整備が行われなかったため、本来硬X線向きの施設であるべき SPring-8 を、軟X線領域の利用研究においても活用してきた。そのため、軟X線領域の先端利用研究の遅れを招いており、例えばスピントロニクス分野、強相関電子分野においては利用研究の海外流出を招いた。加えて、硬X線領域の利用時間が軟X線領域の利用研究に使われ、我が国における放射光の利用市場の量的・質的变化への対応の阻害要因になりつつある。硬X線放射光施設に関しては、利用の需要に即応できるように利用時間を増やしつつ、競争力の維持、高度化が求められている。

一方、軟X線向き放射光施設に関しては、我が国に電子ビームエミッタンス 10 nmrad 以下の高輝度施設は皆無である。そのため、早くから極紫外・軟X線向きの高輝度放射光施設の必要性が叫ばれ、その具体的な計画も複数提案されてきたのも事実である。それらについては、例えば日本放射光学会の「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）に詳しい。しかしながら、2004年に国立大学が法人化されたこともあり、大学が高輝度光源を独力で建設し維持することは財政的に困難となり、また他機関や企業などの協力を得る見通しが立たなかったなどの経緯から、計画は断念されることになった。

その後、放射光学会に設置された次世代光源検討特別委員会（委員長：雨宮慶幸、2005年）において、次世代光源計画についての基本的な考え方の検討が行われて、二つの方向性が示された。それが、1) 究極を目指す光源計画としてX線自由電子レーザーの実現、2) 先端的基盤設備としての光源計画としての新しいリング型光源の建設であった。この提言に基づき、放射光学会に先端的リング型光源計画特別委員会（委員長：雨宮慶幸、2005～2006年）が設置されて先端的リング型光源計画に関して学会としての考え方が示された（「先端的リング型光源計画に関する報告書」2007年1月12日）。その報告書は、先端性を有するリング型光源として最有力な候補はエネルギー回収型ライナック (ERL) であることが示されている。ERL は非常に先鋭的なX線を得るための最先端のリ

ング計画ではあるが、一般的なユーザーが共同利用で利用できるようになるには、今後もさらなる長期的な研究開発が必要とされている。

参考資料：

「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、2014/3/31

## 2-2-2. 我が国の施設整備の現状と課題

施設検討ワーキング報告書とニーズ調査報告書に基づき、我が国の施設整備の現状と課題を整理すると以下ようになる。

### 硬 X 線向き高輝度施設の老朽化と限界

我が国の硬 X 線向きの高輝度放射光施設は、建設から 20 年近く経過した SPring-8 が唯一である。既存ラティスでの低エミッタンス化は、ビームエネルギー 8 GeV を維持した場合、現状の 2.4 nrad が限界である。サブ nrad への低エミッタンス化に向けた、ラティスの見直しによるアップグレードが緊急の課題とされている。

### 軟 X 線向き高輝度施設の欠落

国内に軟 X 線向きでエミッタンス 10 nrad 以下の施設が存在しないことは、ナノレベルで、軽元素の分析を必要とする有機 EL 業界やソフトマター産業、そして、遷移金属元素のスピン状態の可視化を必要とする磁石材料、スピントロニクス分野などの省エネルギー産業など、我が国にとって重要な先端材料科学、デバイス産業における国際競争力の低下を招きかねない。加えて、既存施設では、アップグレードによる低エミッタンス施設へ転換は、蓄積リングのサイズの観点から困難である。よって、世界と競争できる低エミッタンスリングの新規整備が緊急の課題である。

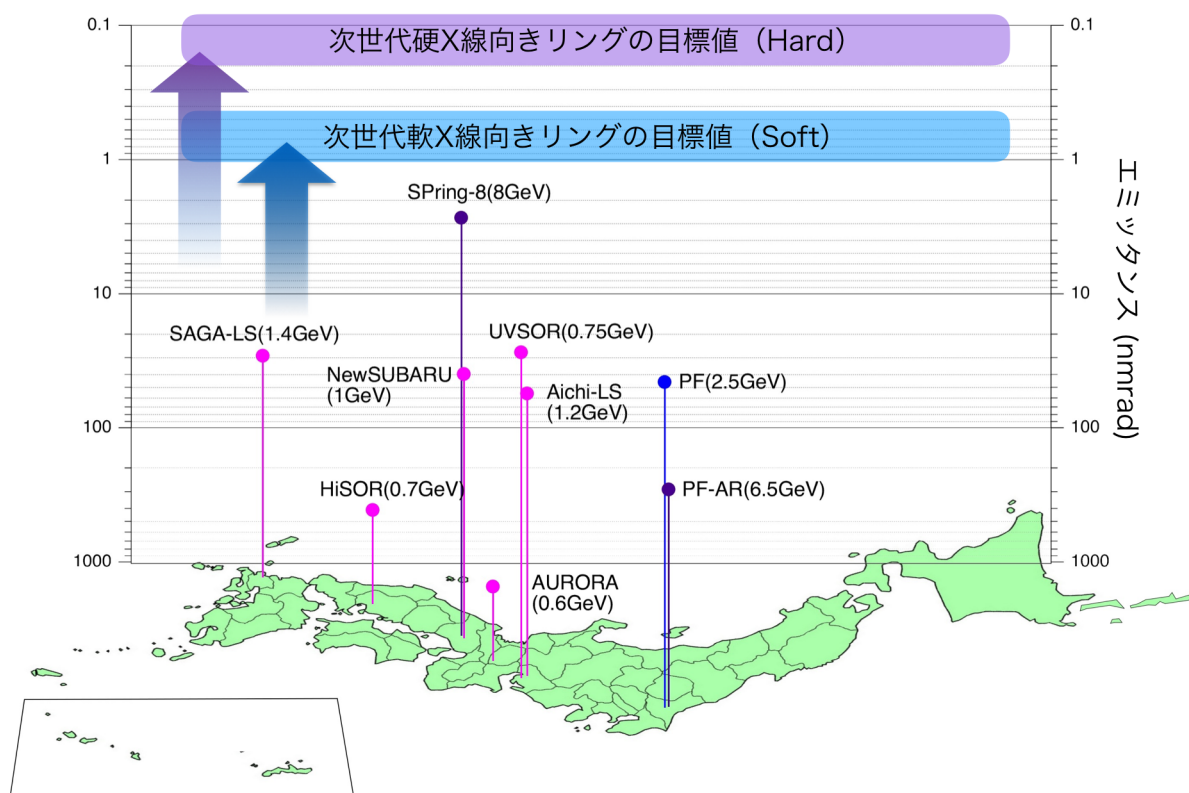
### 分散型放射光プラットフォームの必要性

施設検討ワーキング報告書では、国内の放射光施設を相補的に運用する「分散型放射光プラットフォーム」の考え方が次世代への課題として示されている。国内の既存放射光施設の分布とそのエミッタンスを【図 2-1】にまとめる。これら既存施設群に、X 線自由電子レーザー-SACLA、整備が期待される次世代の硬 X 線向き施設と軟 X 線向き施設を加えて、施設性能を縦軸として階層的に整理した上で、一つの放射光プラットフォームとして戦略的に運用していくことが課題とされている。要求される先鋭的な性能を一つの施設で全て備えることは、技術的・物理的制約などから現実的ではないことに加えて、研究リソースの戦略的観点からも必ずしも最適なオプションとは言えず、むしろ個々の施設の特色を際立たせた上で、複数施設間で光源性能・施設運営に関しての効果的なア

ライアンス形成をにつなげていくことにより戦略的な放射光利用が可能になるとされている。

その際に、物質の構造解析などの主に硬X線向き光源を利用する研究と、物質中の電子状態や材料物性などの主に軟X線向き光源を利用する研究とを科学的・政策的観点から区別した上で、国内の放射光施設群を戦略的に階層的に整理した分散型放射光プラットフォームを形成することで、国全体として幅広い波長領域・利用者層・利用形態をカバーすることが可能になる。

本調査の重要テーマでもある次世代硬X線向き光源と次世代軟X線向き光源の関係は、欧州における ESRF と SOLEIL、あるいは米国における APS と NSLS-II のように、上下関係ではなく、互いの役割分担を明確にし、さらに有機的に連携させた強固な科学技術基盤とすべきとされている。一方で、既存施設と次世代先端光源の階層関係は、計測におけるホームドクター、総合病院、大学病院の関係に例えることができる。最先端の性能を持たない既存施設においても、分散型プラットフォームの一員として、汎用ユーザーの受け皿、より高度な研究へのエントランス、そしてユーザーやスタッフの教育的観点から、その重要性が明確になる。



【図 2-1】 国内の既存放射光施設の分布とエミッタンス

参考情報：次世代放射光施設検討ワーキンググループ報告書  
 SPRUC 放射光科学将来ビジョン 白書  
 次世代放射光施設 ニーズ調査報告書

### 2-2-3. 海外の施設整備の動向

ビームエネルギーの大きな硬X線向き施設では、新規整備よりも既存大型リングのアップグレードによる低エミッタンスリングの設備が主流となっている。例えば、ヨーロッパの ESRF (6 GeV, 4 nrad) や、アメリカの APS (7 GeV, 2.4 nrad) は、それぞれマルチバンド・アクロマット(MBA)化によるサブ nrad リングへのアップグレードが計画されている。また、低エミッタンス電子蓄積リングへ改造されたドイツの PETRA-III (6 GeV, 1 nrad, 周長 2,304m) は、老朽化した大型加速器のアップグレードによる再生の成功例である。このままの状態では、我が国の硬X線向き施設は、すぐに競争力の維持が難しくなる状況である。

軟X線向き施設では、2000年以降だけでも、スイスの SLS(2.4 GeV, 2000年)、米国の SPEAR-3(3 GeV, 2004年)、フランスの SOLEIL (2.8 GeV, 2006年)、英国の DIAMOND(3 GeV, 2006年)、オーストラリアの Aus-SR(3 GeV, 2006年)、中国の SSRF(3.4 GeV, 2008年)、スペインの ALBA(3 GeV, 2011年)、韓国の PLS-II(3 GeV, 2012年)、米国の NSLS-II(3 GeV, 2015)、台湾の TPS (3 GeV, 2016年) などの、エミッタンス 10 nrad 以下の軟X線向き高輝度放射光施設が次々と建設されている。以上のものは、これまで主流であったダブルバンド・アクロマット(DBA)ラティスによるリングであるが、MBAラティスを使用するものとして、スウェーデンではエミッタンス 0.3 nrad 程度の MAX-IV (3 GeV) が建設中であり、DIAMOND と、SOLEIL では MBA ラティスによるサブ nrad リングへのアップグレードが計画されている。すでに軟X線領域の利用研究では、国内の放射光施設は国際競争力を失っており、学術・産業の両面において有望なユーザーの海外施設への流出が懸念される。

以上のように、海外の動向と比べて我が国の現状は、硬X線向き施設の競争力維持が危ぶまれ、軟X線向き高輝度放射光施設が欠如した状況にある。

### 2-2-4. 「A. 技術課題ヒアリング調査」の分析と考慮すべき要素技術課題

ヒアリング調査では、ラティス系、ビーム入射系、電磁石系など共通技術課題と硬X線向き施設と軟X線向き施設の固有技術課題に関して、4つの分野の専門家に対して調査が行われた。共通技術課題に関しては【表 1-1】に示した 14 項目に関して、固有技術課題に関しては【表 1-2】に示した 6 項目およびその他に関して技術課題のヒアリング調査が行われた。その結果は、1-5章にまとめられている通りである。それぞれの項目ごとの課題は、共通技術課題については第一部の【表 1-3】に、固有技術課題に関しては【表 1-4】にまとめられている。また、1-5-2 節には、ヒアリングであげられた 31 の技術課題が付番されリストアップされている。ここでは、第一部で付番された 31 の技術課題を分析し、それらを次世代放射光施設整備の基本的なシナリオに欠かせない「基本となる課題」、シナリオでその選択を考慮すべき「コストに関わる課題」、今後の研究開発

次第で検討する「将来検討課題」、施設の「性能向上につながる課題」、そして運用やユーザーの「利便性に関連する課題」に分類した。また、各課題について考え得る対策を併記する。

## 【共通技術課題で考慮すべき課題】

### 1) ラティス設計

#### 技術課題 1: 低エミッタンスビームを実現する蓄積リングのコンパクト化

対策：MBA セル採用

分類：基本課題

ラティス設計は、低エミッタンスビームを実現するための要である。これまでの既存放射光施設では、DBA セルが採用されてきたが、ヒアリングでは1つ1つのセル当たりにより多くの磁石を配置する MBA セルの採用が有効とされた。同じ周長を考えた場合、MBA セルの採用で、DBA セルのリングよりも一桁程度エミッタンスを低くできるため、コンパクト（低コスト）で低エミッタンスが実現できる。次世代放射光施設整備に欠かせない基本課題に分類される。

#### 技術課題 2: 広いビーム安定領域の確保

対策：精密なシミュレーションによるラティス設計、コンパクト磁石の開発、アライメント技術の開発

分類：基本課題

MBA セルは、電子ビームを強い4極磁石レンズで収束し、強い6極電磁石で色収差の補正が行われる。その結果、ビームが周回可能な動的安定領域（ダイナミックアパーチャ）が狭くなる。したがって、十分なダイナミックアパーチャを確保できるようにラティスを設計する必要がある。また MBA ではより多くの磁石を配置するため、強磁場の発生できる精度の高いコンパクトな磁石を開発し、正確にアライメントする必要がある。基本課題である。

### 2) ビーム入射系

#### 技術課題 3: 低エミッタンスビームの高精度入射

対策：高安定で高精度な線型加速器の採用

分類：基本課題

狭いダイナミックアパーチャに入射できるように、低エミッタンスの入射ビームが必要になる。また、トップアップ運転時に蓄積ビームの変動が小さく、常時入射可能な入射器が必要である。SACLA の建設で確立された高安定、高精度な線型加速器技術が活用できる。基本課題である。



### 3) 電磁石系

#### 技術課題 4: 磁石システムの高精度化

#### 技術課題 5: 磁石システムのコンパクト化

対策：磁極材料の検討、加工精度向上、研究開発

分類：基本課題

MBA セルを実現するために、高精度でコンパクト、かつ、強磁場の磁石を開発することが課題である。いずれも基本課題である。

#### 技術課題 6: 一部に永久磁石を利用した磁石システムの開発

対策：永久磁石材料の検討、経時変化や温度履歴や放射線損傷の理解と対策

分類：コストに関わる課題

電磁石の消費電力は、運転コストの大きな割合を占めるため、電力の必要ない永久磁石を利用した磁石システムの実用化はコスト削減につながる課題である。

#### 技術課題 7: 長期メンテナンスフリー運転可能な超伝導磁石の開発

対策：安定運転のための技術開発

分類：将来検討課題

電磁石の消費電力は低減されるが、超伝導を維持するための液体 He のコストと、長期間安定運転の難しさから、今後の研究開発を待って検討すべき課題である。

### 4) アライメント系

#### 技術課題 8: 多数の磁石の高精度設置技術の確立

対策：複数磁石の一体設置の検討、温度変化・振動対策を考えた架台の採用、精密アライメント可能な架台の開発、高精度磁場測定技術の開発、ビームフィードバックによる自動補正

分類：基本課題

MBA では、多数のコンパクトな磁石を精密に位置合わせする必要がある。また、冷却水の温度変化、振動を抑制できる精密な架台の開発も重要であり、基本課題である。

### 5) 真空系

#### 技術課題 9: 小口径チャンバーの超高真空排気技術の確立

対策：真空機器のコンパクト化、ベーキングのいらぬ超高真空システムの開発、NEGコーティングチャンバーの採用

分類：基本課題

コンパクト化の鍵となる真空チャンバーの小口径化に伴い困難になることが予想される超高真空排気システムは、基本課題である。

## 6) 高周波加速系

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

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

対策: 新型コンパクト高周波加速空洞の研究開発、半導体素子による高周波電源の研究開発と実用化

分類: コストに関わる課題

消費電力の大きい高周波発生器の電力低減や、高安定運転・省スペースを目指して、高調波を抑制したコンパクト加速空洞の開発と、高出力半導体素子による高周波電源を開発することは、コストに関わる課題である。

## 7) アンジュレータ

**技術課題 12: 偏光可変型アンジュレータによる軌道変動問題の解決**

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

対策: 高速なビーム診断とフィードバック制御

分類: 基本課題

アンジュレータの短周期化と狭ギャップ化によるビーム不安定性や、偏光可変型アンジュレータが引き起こす軌道変動対策は基本課題である。

## 8) ビーム診断・ビーム制御系

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

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

対策: 精密なビーム診断と高速フィードバック制御、ビームモニターと補正電磁石の配置の検討

分類: 基本課題

ダイナミックアパーチャの狭い MBA ラティスで、挿入光源の変動にも対応できる安定なビーム周回を可能にするためのビーム診断と制御は基本課題である。

## 9) 加速器制御系

**技術課題 16: 安定して使いやすい制御系の開発**

対策: 施設運転制御ソフトウェアの開発

分類: 利便性に関する課題

安定して使いやすい制御系を開発し採用することで安定な運転を実現することは利便性に関する課題である。

## 10) 光学系

### 技術課題 17: 光学素子の高熱負荷に対する性能の維持

対策：現状技術の高度化、新たな熱負荷対策法の開発

分類：基本課題

### 技術課題 18: 光学素子の冷却に伴う振動の低減

対策：現状技術の高度化

分類：基本課題

### 技術課題 19: 10 nm 以下の空間分解能を実現する光学素子の開発

対策：超平滑ミラーの開発、光学素子の高度化

分類：性能向上につながる課題

高輝度ビームを受ける光学素子の熱負荷対策と振動対策は基本課題である。10 nm 以下の分解能を実現する集光、結像光学系の実現は、施設の性能向上につながる課題である。

## 11) 利用系

### 技術課題 20: 計測のオートメーション化・共通化

対策：計測システムの共通化とオートサンプラーによる自動化、メールインサービス、カスタマイズ可能なエンドステーションの併設

分類：利便性に関連する課題

計測のオートメーション化・共通化を計ることはユーザーの利便性を向上する課題である。

## 12) 建物

### 技術課題 21: 建物の振動対策

対策：振動の少ない地盤に建設、人工岩盤などによる振動対策

分類：基本課題

低エミッタンスビームを安定して周回させるため、ナノメートル分解能での観測を可能にするための施設建物の振動対策は基本課題である。

### 13) 冷却・受電・変電設備

#### 技術課題 22: 先端環境技術の導入による電力コストの低減

対策：先端環境技術を採用してエネルギーコストを低減する

分類：コストに関わる課題

太陽光発電や排熱利用、LED 照明、エネルギーマネジメントシステムなどの活用は、運用コストに関わる課題である。

### 14) その他

#### 技術課題 23: 高速読み出し可能な二次元分光分析検出器の開発

対策：研究開発に戦略的に人材・資金を投入する

分類：性能向上につながる課題

X線の二次元分光検出器の実現は、放射光の性能を最大限に引き出し有効に利用するために重要な技術課題である。性能向上につながる課題である。

### 【固有技術課題で考慮すべき課題】

#### 硬X線向き施設

##### 1) 超伝導磁石/永久磁石の利用の是非

#### 技術課題 24: 永久磁石の磁場制御

#### 技術課題 25: 永久磁石の経時変化対策

対策：永久磁石材料の検討、経時変化や温度履歴や放射線損傷の理解とその対策

分類：コストに関わる課題

セルを構成する電磁石の永久磁石化については、電力削減効果が期待できるためコストに関わる課題である。

#### 技術課題 26: アンジュレータ永久磁石の強力化

対策：永久磁石材料の研究開発

分類：性能向上につながる課題

アンジュレータ永久磁石の強力化は、X線のエネルギーや強度などの性能向上につながる課題である。

超伝導磁石の利用は技術課題 7 と同様に将来的には検討が必要になる課題である。

##### 2) 高排気速度を持つ真空槽とフロントエンドの取り合い

フロントエンド部分の光取り出しのための磁石システムと真空槽との空間の取り合いは重要な課題であるが、技術課題 9 に含まれる。

### 3) 熱負荷対策

#### 技術課題 27: 小口径チャンバーのビームによる発熱対策

対策: 現状技術の高度化、新たな熱負荷対策法の開発

分類: 基本課題

高輝度 X 線による光学系の熱負荷対策 (技術課題 16) に加えて、小口径チャンバーや狭ギャップアンジュレータの熱負荷対策も基本課題である。

#### \* ) 硬 X 線向きその他

#### 技術課題 28: 硬 X 線高速画像検出器の開発

対策: 国内複数施設による戦略的な共同開発

分類: 性能向上につながる課題

大強度 X 線に対応できる、大面積、高速、ノイズフリー X 線画像検出器の開発は、放射光の性能を最大限に引き出し有効に利用するために重要である。性能向上につながる課題である。

### 軟 X 線向き施設

#### 4) 高周波加速空洞の加速周波数の選択

国内放射光で実績のある 500 MHz 帯の採用が望ましいとされたが、それぞれの加速器の特性に合わせて最適な加速周波数を選択するべきであるとされた。課題 10 と 11 に関連する。

#### 5) 高調波高周波加速空洞によるビーム寿命の確保

高調波加速空洞を導入することでビーム寿命を延ばして入射器の負担や電力を低減することが課題とされたが、top-up 技術でカバーできる課題であるとされた。

#### 6) UV 領域用長周期アンジュレータ等のビーム及びビームライン光学素子への影響

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

対策: 補正電磁石の配置、ビーム制御系の高度化、UV 領域は小型施設に任せる

分類: 基本課題

UV 領域の長周期ヘリカルアンジュレータ等は、偏光切り替え時のビーム軌道への影響を小さくすることが課題であるとされた。ただし、UV 領域の光は 1 GeV 程度の低エネルギー

ギ어링に任せるべきという意見が多数であり、本調査シナリオでは特に考慮しないこととする。

**\*) 軟X線向きその他**

**技術課題 30: アンジュレータの高次高調波利用のための磁場の超均一制御**

対策: 磁極材料の検討、加工精度向上、研究開発

分類: 性能向上につながる課題

**技術課題 31: 軟X線移相子の実用化**

対策: 様々な物質、手法の検討、研究開発

分類: 性能向上につながる課題

軟X線向きの低い電子ビームエネルギーリングにおいて高輝度の硬X線を発生するために、高次高調波の強いアンジュレータを実現することは性能向上につながる課題である。また、軟X線の偏光切り替えを挿入光源ではなく光学素子で実現するための移相子の開発も、性能向上につながる課題である。

以上のように、ヒアリング調査で挙げられた 31 課題の分析整理を行った。基本的なシナリオに欠かせない基本課題としては以下の 16 課題が分類された。

**基本課題**

技術課題 1: 低エミッタンスビームを実現する蓄積リングのコンパクト化

技術課題 2: 広いビーム安定領域の確保

技術課題 3: 低エミッタンスビームの高精度入射

技術課題 4: 磁石システムの高精度化

技術課題 5: 磁石システムのコンパクト化

技術課題 8: 多数の磁石の高精度設置技術の確立

技術課題 9: 小口径チャンバーの超高真空排気技術の確立

技術課題 12: 偏光可変型アンジュレータによる軌道変動問題の解決

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

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

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

技術課題 17: 光学素子の高熱負荷に対する性能の維持

技術課題 18: 光学素子の冷却に伴う振動の低減

技術課題 21: 建物の振動対策

技術課題 27: 小口径チャンバーのビームによる発熱対策

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

以上の 16 の基本課題は、次世代の低エミッタンスリングの実現に欠かせない技術に関するものであるが、これまでも課題とされてきたものであり、加速器や放射光施設の発

展に伴って研究開発が行われて高まる要求が克服されてきた課題でもある。これらは、次世代放射光施設の基本性能を実現するために必須であり、これまで開発・利用されてきた技術の高度化等によって、対応しなければならない課題である。したがって、明示はしないが、本調査で扱う整備シナリオには、これら基本課題の対策が含まれる。

選択可能なコストに関わる課題としては、以下の6課題が選択された。

#### コストに関わる課題

技術課題 6: 一部に永久磁石を利用した磁石システムの開発

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

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

技術課題 22: 先端環境技術の導入による電力コストの低減

技術課題 24: 永久磁石の磁場制御

技術課題 25: 永久磁石の経時変化対策

以上6課題は、現状の施設整備に必須ではないが、それを備えることによってコストの低減が期待される課題である。したがって、シナリオで考慮すべき重要な課題である。

今後の研究開発次第で検討する検討課題として、以下の1課題が分類された。

#### 将来検討課題

技術課題 7: 長期メンテナンスフリー運転可能な超伝導磁石の開発

将来的には、性能向上、電力コスト低減につながる重要な課題であるが、導入の検討は時期尚早であり、さらなる研究開発が待たれる。

利便性に関する課題には、以下の2課題が分類された。

#### 利便性に関する課題

技術課題 16: 安定して使いやすい制御系の開発

技術課題 20: 計測のオートメーション化・共通化

この2課題は、運転やユーザーの利便性に関連する課題であり、施設運営コストや生産性に関わる課題である。

性能向上につながる課題として、以下の6課題が選択された。

#### 性能向上につながる課題

技術課題 19: 10 nm 以下の空間分解能を実現する光学素子の開発

技術課題 23: 高速読み出し可能な二次元分光分析検出器の開発

技術課題 26: アンジュレータ永久磁石の強力化

技術課題 28: 硬X線高速画像検出器の開発

技術課題 30: アンジュレータの高次高調波利用のための磁場の超均一制御

技術課題 31: 軟X線移相子の実用化

これらは、ユーザーの要望に直結し、X線のエネルギーや輝度を高めたり、ビームライン、エンドステーションの分析能力を向上させたりする課題である。次世代放射光施設整備という観点ではシナリオに直接的には関係しないが、10 nm 以下のビーム実現など、次世代放射光施設の魅力を高める重要な課題であり、コストを掛けて解決していくべき課題である。

以上の 31 技術課題を念頭におきながら、施設整備のシナリオの検討を行った。



## 2-3. 加速器コスト低減の経緯と信頼性

前節で「A. ヒアリング調査」をもとに、次世代放射光施設整備のシナリオで考慮すべき課題を検討した。しかしながら、調査結果は主に現状または将来の技術課題に関するものが多く、施設整備のシナリオを考える上では、これまでの長年の加速器施設建設の経緯を知る必要がある。また、「A. ヒアリング調査」や「ニーズ調査」でも述べられているように、ユーザー利用時間の拡大が求められており、施設の安定的な運転のために高い信頼性が求められている。この章では、我が国の加速器建設の経緯、特に SPring-8 の建設と X線自由電子レーザー-SACLA の建設におけるコスト削減経緯を、信頼性という観点も踏まえて調査した結果をまとめる。

### 2-3-1 加速器施設建設における基本的考え方

最先端の学術利用に関わる加速器建設では、適切な建設コストで必要なビーム性能を実現するために、新規技術の開発と確立した技術を有効に活用しつつ進められてきた。また、宇宙開発とは異なり、地球上に施設があることから完成後の手直しやアップグレードが比較的容易にできることから、機器設計において余裕度は大きくとらないことが一般的である。ただし加速器、建屋・設備間での情報共有の不足や、機器設計製作における専門分野化が進んだことで余裕度を多重に設定することで、一般的に過大になる傾向がある。

しかし、近年、放射光分野の加速器では、利用が当初の学術利用から産業利用の役割が増すにつれて、利用も通年運転をベースにした利用に中断のない安定な放射光の供給が求められるようになってきている。そのため、先端的放射光施設の建設では、**高性能**と**高信頼性**との両方の特性を適切な経費で確実に実現することが必須となってきている。

### 2-3-2 SPring-8 以降の建設コストの効率化の経緯

#### 1) SPring-8 建設前

我が国における GeV クラスの電子貯蔵型シンクロトロン建設は、KEK で 1982 年に完成した放射光施設 PF (2.5 GeV、周長 187 m、エミッタンス 300 nm·rad) に始まり、1986 年には周長 3 km、加速エネルギー 32 GeV、エミッタンスが水平約 100 nmrad、垂直約 3 nmrad の素粒子物理実験用のトリスタンに引き継がれた。これらの建設では、電磁石、高周波、真空機器等の主要機器について R&D が実施され、その成果を基に仕様書が作られ製作された。開発された要素技術は、高精度積層型電磁石、大電力高周波発生装置 (1.2 MW クライストロン)、ビーム不安定性抑制型高周波加速空洞、押し出し成型による超高真空用アルミ製真空チャンバー及び排気ポンプシステム、高精度ビーム位置検出装置、16 ビット精度対応の高精度電磁石電源等多岐に渡り、これらの技術はその後の加速器建設

においてビーム性能の向上と製作コストの低減に不可欠な基盤技術となっている。

## 2) SPring-8 の建設

高エネルギー実験用加速器施設建設の経験とノウハウ、及び SPring-8 での各種 R&D の成果をもとに、SPring-8 施設が設計され建設が行われた。SPring-8 の主要諸元を【表 2-1】に示す。建設の総予算は 1,089 億円で、その内 1,000 億が施設建設費、残り 89 億円が利用推進のための R&D 予算であった。【表 2-2】に施設建設費の実行ベースでの内訳を示す(ただし R&D 89 億円は除く)。

## 3) 世界最高性能の放射光の実現と建設費の合理的な圧縮

【表 2-2】に示した SPring-8 の建設費は、当初のプロジェクト開始後に、さらに、建設予算の見直しを実施して経費の圧縮を行った結果である。建設経費を圧縮するために下記のような視点で見直しが行われた。

### ①必要な性能と機能の整理

必要な性能と機能を整理することで、無駄な機能を省き、必要な性能を実現するための最先端加速器技術の導入を促し、機器のコンパクト化が進められた。

### ②建屋と加速器施設の統合的設計

統合的に設計することで無駄を省き、建設費の圧縮につなげた。

その結果、ビーム性能の最適化とコスト削減につながった主な設計見直し点を以下にまとめる。

まず、最先端の技術を集約し世界最高性能の放射光実現につながったものとして

- ・高次モード抑制型空洞の開発で安定な大電流 (100 mA) 電子ビームを実現し、付加的なビーム不安定性抑制装置の設置を削除した。
- ・新規電磁石据え付け方法 (2 段階アライメント法) の開発で、サブミクロンレベルでの電子ビーム軌道の安定化と電磁石アライメント作業の大幅な省力化を実現した。
- ・新規開発されたクライストロン (80 MW) の導入で線型加速器をコンパクト化した。
- ・真空封止型挿入光源の導入で高輝度硬 X 線ビームを実現した。

などが挙げられる。

電磁石の 2 段階アライメント法は、収束用及び色収差を補正する多極電磁石の設置誤差の許容値を大幅に緩和したことから、電磁石の製作コストの低減、収束強度がさらに強い電磁石の導入が不可欠な次世代超低エミッタンスリングの実現と建設費の低減等に大きく貢献する重要な技術である。

線型加速器では、クライストロンのピークパワーを従来の 28 MW から 80 MW に増強したことで、高周波発生モジュールの数が 26 セットから 13 セットに半減させることが可能になり、建設コストの削減と部品数の低減で線型加速器の信頼性の向上と維持費の削

減が実現された。

真空封止型挿入光源では、真空チャンバー内に永久磁石を設置したことで磁石間隙長が短くでき、周期数を大幅に増加させたことで輝度が向上。また、短周期化と磁石システム支持機構の技術開発の進展で、さらなる高輝度・硬X線化と製作コストの低減が実現された。

蓄積リングでの省エネルギー設計についても検討が行われた。KEKのTRISTANでの経験から、貯蔵型加速器では常時定格値に近い状態で年間数千時間の運転が行われる。そのため消費電力の経費が総運転経費に占める割合が高く、電力経費が年間の利用運転時間を制約することから、より長い利用時間を確保するために蓄積リングの電磁石等主要機器の省エネ設計が実施された。主な省エネ設計機器と設備の概要を以下にまとめる。電磁石などの製造価格に占める材料費の割合は多くても30%程度であるため、省エネ設計は、材料費アップによる製作コストの上昇分と10年間程度の使用電力(機器での消費電力+冷却水等の設備での消費電力)の削減費用を考慮して実施された。

- ・電磁石励磁コイルの電流密度を3から4 A/mm<sup>2</sup>以下とし運転時の消費電力を3から4 MW程度に抑制
- ・高効率高周波空洞と低損失高周波輸送系の導入で消費電力を4か所の高周波ステーションで、運転時4 MW程度に抑制
- ・断熱特性の高い建屋設計で、空調設備容量の低減と運転経費を削減
- ・実験ホール内で温度を一定に保つ空間を、効率的に温度制御することで空調設備容量を低減し運転経費を削減

これら技術は次世代高輝度中型放射光施設での省エネ化に大きく貢献すると考えられる。

また、安定な電子ビーム軌道を最小限の経費で実現するために、固い地盤に加速器施設を建設することで振動の主たる要因を除去した。その上でサイト内での冷却水ポンプ、電源トランス等振動源に除振機構を設置し、かつ建屋内の室温及び冷却水温度の安定化を図ることで、マイクロレベルの電子ビーム軌道の安定性を実現している。建設段階での適切な対策は、放射光のナノメートルレベルでの利用技術の高度化経費の削減にも有効である。

以上、SPring-8建設時の世界最高性能の放射光の実現と建設費の合理的な圧縮について述べたが、建設終了後に課題点も残された。それは、プロジェクト建設の経験が全体的に不足していたこともあり、加速器、ビームライン、建屋及び受電・冷却・空調機器系との情報の共有が十分ではなく、建屋寸法や機器設計における安全係数等の最適化が必ずしも行われていなかったことである。情報の共有を進めることでより効率的な設計、建設が可能になるものと思われる。

【表 2-1】 SPring-8 主要諸元

| 項目          |         | 内容                             |                        |
|-------------|---------|--------------------------------|------------------------|
| 蓄積リング       | 加速エネルギー | 8 GeV                          |                        |
|             | 周長      | 1,436 m                        |                        |
|             | エミッタンス  | 7 nrad (水平)                    |                        |
|             | セル数     | 48                             |                        |
|             | 建屋面積    | 約 70,000 m <sup>2</sup>        |                        |
| 入射器         | 線型加速器   | エネルギー                          | 1 GeV                  |
|             |         | 面積                             | 約 4,000 m <sup>2</sup> |
|             | シンクロトロン | エネルギー                          | 8 GeV                  |
|             |         | 面積                             | 約 2,000 m <sup>2</sup> |
| 研究棟等        | 建屋面積    | 約 11,000 m <sup>2</sup>        |                        |
| 共通施設        | 建屋面積    | 約 17,000 m <sup>2</sup>        |                        |
| ユーティリティシステム |         | 受電設備、装置冷却系、空調システム、給排水、ガス、道路、外構 |                        |

【表 2-2】 SPring-8 施設建設費内訳

| 項目            |         | 経費       |        |
|---------------|---------|----------|--------|
| 蓄積リング         |         | 275 億円   |        |
| 入射器           | 線型加速器   | 65 億円    | 165 億円 |
|               | シンクロトロン | 100 億円   |        |
| ビームライン (10 本) |         | 70 億円    |        |
| 建屋・設備         | 蓄積リング棟  | 290 億円   |        |
|               | 入射器系    | 200 億円   |        |
| 総予算           |         | 1,000 億円 |        |

### 2-3-3. SPring-8 の建設コスト単価と運営経費

#### 1. 蓄積リング

蓄積リングの建設費は、加速器系 275 億円、建屋系 290 億円、特高第一受変電設備等インフラ経費 43 億円（入射器側予算で手当）で、計 608 億円となる。【表 2-3】にまとめたように、これらから加速エネルギー当たり（GeV 当たり）の建設単価を計算すると 76 億円/GeV、周長 1,436m で規格化した単価は約 0.42 億円/m、基本磁石配列のセル数で規格化した場合は 12.7 億円/セルとなる。

蓄積リングの消費電力は、定常運転時で 19 MW 程度であるが、それに対し受電設備の容量は 60 MW と 3 倍となっており、建設時に機器の余裕率の考えを明確にしておくことが設備容量の削減、運用コスト低減に重要であることがわかる。例えば、機器側で 1.3 倍、設備側で 1.3 倍の余裕率を考えるとこれだけで 1.7 倍となる。これと同じことは、冷却水の必要量についても言え、設計で想定した流量が過大であったため、現状はバイパス弁で所定の圧力に絞って調整が行なわれている。冷却系は一度設計すると運転条件を変更することが難しく、大型ポンプを不必要に稼働させることになる。そのため、振動の誘起や消費電力の増大を招くことから流量見積の適正化が重要となる。また、電磁石の省エネ化で、冷却水突出圧の低減（10 kgf/cm<sup>2</sup> から 5kgf/cm<sup>2</sup> へ）が可能であり、冷却水ポンプのインバータ化で消費電力の節減が一般的に可能である。

#### 2. 入射器システム

SPring-8 の入射器は 1 GeV 線型加速器と 8 GeV シンクロトロンで構成され、線型加速器の建設費用は、【表 2-3】に示したように加速器本体関係（含む全系制御、放射線安全）が 65 億円、建屋が 22 億円、受電関係（線型加速器の部分のみを抜き出す）が約 11 億円、計 98 億円で、加速エネルギー当たりの単価は 98 億円/GeV となる。一方、シンクロトロンは加速器系 100 億円、建屋系（含む SSBT, 受電設備）43 億円、受電系約 24 億円の計 167 億円で、加速エネルギー当たりの単価は約 24 億/GeV となる。また、線型加速器とシンクロトロンを入射器システムとして統合した場合の加速エネルギー当たりの単価は約 33 億円/GeV となる。

SPring-8 の建設時は、線型加速器の建設コストを加速エネルギー当たりで比較すると、シンクロトロンのコストの 4 倍強となる。この選択は、建設当時の電磁石の製作精度、電磁石電源の電流値設定精度及びビーム不安定性を抑制する手法が未開発であった事情により、必要な電子ビーム強度を蓄積リングに安定に入射するためには、シンクロトロンへの入射エネルギーを 1 GeV 程度にすることが不可欠であったことによる。しかし、建設から 20 年間における加速器科学・技術の進展で、入射エネルギーを数 100 MeV まで下げることが現在では可能となっている。更に、後でも報告するが線型加速器の建設コストも以前に比べ大幅に低減されてきていることから、目的に合った入射器システムを適切に選択することが重要となる。

### 3. 入射器の運転経費について

#### 1) 消費電力について

入射器を 1 Hz で連続運転した場合、消費電力はシンクロトロンで 4.5 MW、線型加速器で 0.6 MW、入射器熱源棟機器で 0.7 MW の計 6 MW 弱となる。しかし、SPring-8 では電子ビームのエネルギーが 8 GeV と高く、真空度が数 10 ナノパスカルと良いこと、及び空間電荷効果等の電子ビームへの影響が小さいことから、ビーム寿命が数 10 時間と長い。そのため、光学機器を熱平衡状態で利用する事で測定の高精度化が実現する top-up 運転で、蓄積電流値の変動幅を 0.01 %に抑えるには、数十秒間隔の top-up 入射が良い。この時の平均消費電力は、数 100 kW と連続運転に比べると一桁ほど小さいが、ビーム寿命の短縮とともに top-up 入射の頻度が増すため消費電力は急激に増加する。ビームの安定性とビーム寿命は、消費電力に直結する。

#### 2) 入射器としての機能と保守維持について

入射器が SPring-8 のように型式の異なる線型加速器とシンクロトロンのカスケード型加速器の場合、それぞれに固有な主要な機器を予備品として持たなければならないため保守維持費がかさむ。また、シンクロトロンが故障した場合、top-up の長期間中断や運転の停止に繋がる。特に top-up の中断は、高精度測定に不可欠な光学素子の熱平衡状態を崩すことから、実質上利用率の低下と実験精度の悪化を招くことになる。

SPring-8 における 2014 年度の総運転時間に占める top-up 中断の割合は、適切な保守維持活動が行われている結果 1 %程度と低い水準にある。また中断時間の平均値も 14 分程度とビーム寿命（10～20 時間）に比べて短いことから、放射光の強度減少も数%程度と小さく、放射光の高度利用に大きな影響を及ぼしてはいない。

中断の原因は、シンクロトロンに起因するものが 6 割、線型加速器と制御に起因するものが 1 割強で、建設から 20 年経ち機器の寿命に関するものが多くなっている。予防交換の考え方が故障頻度の低減には重要になってくる。

複数の同様な加速ユニットで構成される線型加速器は、故障時のバックアップユニットを用意することで、高輝度放射光施設の入射器としての重要な性能である top-up 入射の中断を最小限に留めることが可能であり、より信頼性の高い入射器といえる。

【表 2-3】 SPring-8 加速器本体の建設コスト

| 項目           |           | 経費               |           |
|--------------|-----------|------------------|-----------|
| 加速器全体（実行ベース） |           | 873 億円           |           |
| 内            | 蓄積リング予算   | 608 億円           |           |
|              | エネルギー単価   | 76 億円/GeV        |           |
|              | 周長単価      | 0.42 億円/m        |           |
|              | セル単価      | 12.7 億円/セル       |           |
|              | 入射器システム予算 | 265 億円           |           |
|              | 加速エネルギー単価 | 33 億円/GeV        |           |
| 訳            | 入射器内訳     | 1GeV 線型加速器予算     | 98 億円     |
|              |           | 線型加速器エネルギー単価     | 98 億円/GeV |
|              |           | 1→8GeV シンクロトロン予算 | 167 億円    |
|              |           | シンクロトロンエネルギー単価   | 24 億円/GeV |

## 2-3-4. X線自由電子レーザー-SACLA の設計指針

X線自由電子レーザー-SACLA の建設では、SCSS(SPring-8 Compact SASE Source)先行機での開発と SPring-8 での経験を踏まえ、合理的に目標性能を実現することを指針として、機器・建屋設計の最適化が実施された。設計において留意された点を以下に示す。

1) 加速器及びビームラインを統合的に設計・製作することで、施設全体のコンパクト化と省エネルギー化を実現

- ・高加速電界強度 (約 39 MV/m) の C-band 加速管の開発で、線型加速器の長さを、従来型の S-band 加速管システムの半分程度に短縮した。
- ・高効率でコンパクトな高電圧充電器の開発で省スペース、省エネを実現した。
- ・油冷式モジュレータの開発で、単位加速システムのコンパクト化を実現、利便性の高い作業空間を確保することで、機器の組み立てや調整等経費を削減した。

2) 認可予算内での SACLA の実現

実現すべき性能を機器開発の進捗を考慮しつつ、加速器系と建屋系を統合的に設計することで建設経費を圧縮。

- ・加速電界強度の進展を考慮し C-band 加速管ユニット数を 72 から 64 に削減した。更に収束電磁石を空冷化することでトンネル内の冷却水設備を設けないことで機器製作費と建屋の建設・設備費を低減した。
- ・ユニット数の削減で加速器棟の長さを 450 m から 400 m に短縮した。結果として SPring-8 への電子ビーム輸送路が最適化され建屋建設費が低減された。
- ・加速器トンネル内の空調設備を科学技術的観点から削除し建設費を低減した。
- ・電気・冷却水の設備容量を適正化した。(余裕度を定格値の 1.2 から 1.3 倍程度で製作)
- ・合理的なビーム損失仮定に基づいて放射線遮蔽壁の厚さを決定した。

自由電子レーザーを安定的に発振させるためには、トンネル内の環境温度を 0.01 度以内に抑えることが必須であった。しかし、現状の空調技術では全長 400m のトンネル内でこの性能を実現することは技術的に困難である。そこで、温度が一定に保たれた加速器棟内に設置される厚さ 2 m のコンクリート製遮蔽トンネルの熱特性を活用することで温度変動の小さな環境を実現し、その上で、時間的にゆっくりした変動による電子ビーム軌道の変化は、高精度電子ビーム制御システムで安定化する方式が採用された。これにより、空調設備機器と関連配管、及び電磁石等への冷却水系設備が不要となり、トンネルの断面形状のコンパクト化で建設費が低減されている。

先行機 SCSS での放射線線量データとビーム損失の計算機シミュレーションに基づいてシールド壁の厚さを 8 GeV で 2 m にし、建設コストが圧縮されている。SPring-8 の線型加速器では、シールド壁の厚さは、ビームの損失過程がよく理解されていなかったこと



もあり、加速エネルギーが 1.2 GeV で 4 m とビーム強度の違い（約 10 倍以内、コンクリートで 20cm の差）を考慮してもかなり安全サイドで過剰な厚さになっていることがわかる。

## 2-3-5 SACLA 建設・運転経費

### 1. 建設予算について

SACLA の建設費を【表 2-4】に示す。このうち SPring-8 の線型加速器（建設費 98 億円）と比較し得る加速器系予算は、線型加速器 156 億円と、安全・機器制御・据付の 16 億円、加速器棟 54 億円を合計した 226 億円である。加速エネルギーあたりの単価は、 $226 \text{ 億円} / 8 \text{ GeV} = 28.2 \text{ (億円/GeV)}$  であり、SPring-8 の建設から約 20 年間での加速器技術の進展で線型加速器の建設コストはエネルギーあたりの単価ベースで 3 分の 1 に低減したことがわかる。さらに、用途を放射光電子蓄積リング入射器として最適化することで、建設コストの削減が可能である。

### 2. 運転経費について

線型加速器は、多数の同一加速ユニットで構成されているため、システムの大きさの割には必要とする予備品の種類と量が限られており、保守維持費は比較的少ない。また、加速管ユニットを 1 ないし 2 ユニットスタンバイさせておくことで、故障時の復旧時間が短縮でき、利用時間の利便性が向上する。SACLA 施設全体の消費電力は、電子ビームの加速がパルス的に行われるため、8 GeV で繰り返し 60 Hz の定格運転時で 7 MW 弱、1 Hz 運転では 2 MW 以下と低く抑えられる。

これらの特長から、線型加速器は、高輝度放射光リングの top-up 運転用入射器として、利用時間の中断の少ないという高い信頼性を持ち、運転経費の削減の点からも最適なシステムとすることができる。一方、SPring-8 のような線型加速器とシンクロトロンで構成された入射器では、top-up 中にシンクロトロンが故障した場合、復旧に数 10 分以上かかるため、熱平衡状態を維持することができない。また、1 Hz の運転時の消費電力は 5 MW と線型加速器システムでの 2 MW に比べて大きく省エネ特性でも劣る。

【表 2-4】 SACLA 建設費

| 項目  |            | 内容     |
|-----|------------|--------|
| 装置系 | 加速器        | 156 億円 |
|     | 電子ビーム輸送系   | 8 億円   |
|     | ビームライン・測定器 | 48 億円  |
|     | 安全・機器制御・据付 | 16 億円  |
| 建物  | 加速器棟       | 54 億円  |
|     | 電子ビーム輸送系建屋 | 10 億円  |
|     | 光源棟        | 29 億円  |
|     | 実験研究棟      | 18 億円  |
| 合計  |            | 339 億円 |

### 2-3-6 加速器コスト低減の経緯から考慮すべきこと

本章では、SPring-8 建設から SACLA 建設までの加速器の性能向上やコスト低減に関わった設計や技術の調査を行った。「A. ヒアリング調査」で挙げられなかったコスト低減要素が幾つかあった。一つは、SACLA 実現に大きな役割を果たした C-band 加速管の開発である。これにより、線型加速器の長さは、従来の S-band 加速管システムの半分程度に短縮されて、加速エネルギーあたりの単価が  $1/3$  以下になっている。もう一つは、放射線遮蔽壁の厚さの合理的な見積もりである。過剰な安全係数の合理的な見直しにより建物のコストの低減が可能になる。

さらに本章では、加速器コスト低減の経緯で重要視しなければならない観点として、施設やそれを構成するコンポーネントの信頼性に注目した。例えば、入射器においては、シンクロトロンよりも、線型加速器の方が故障時のメンテナンスが容易で施設の運転へのダメージが小さく、信頼性が高い。同様のことは、電磁石や高周波加速系などについても言うことができ、性能や省エネよりも、信頼度を考えたコンポーネントの選択や設計も必要になると思われる。信頼度向上は、維持費の低減につながるため、既存の技術を使うことがベストの選択である場合もあるであろう。また、電力や冷却水の余裕度は、施設運転の信頼性とコストの観点から適切に設定する必要がある。

また、施設の整備・運転において信頼性と共に安全も重要な因子である。例えば、永久磁石の利用は省電力に有効な技術であるが、パーマネントで強力な磁場があるため、据付やメンテナンス時の作業の安全を確保することが重要になる。

本調査のシナリオの設定においては前章の「A. ヒアリング調査」からリストアップされた課題に加えて、以上の信頼性と安全の観点も踏まえて施設整備シナリオの検討を行う。

## 2-4. 整備シナリオの設定

### 2-4-1 シナリオ設定の観点

本調査では、次世代放射光施設を硬X線向き放射光施設と軟X線向き放射光施設に分けて考えて、その二種類の施設の整備に関するシナリオを検討する。それぞれの施設整備に関し、新規整備と既存施設のアップグレードの両方を検討し、さらに二つの整備のタイミングがコストやユーザーの研究活動に与える効果なども検討する。

シナリオ設定における本調査の観点は、以下の a. ～g. である。

- a. 施設性能（硬X線向き放射光施設又は軟X線向き放射光施設の別を含む。）
- b. 施設の運用開始時点で最低限備えておくことが必要なコンポーネント
- c. 整備当初から将来のアップグレード計画を見越して設計すべきコンポーネント
- d. 設計・建設その他の施設整備に係るタイム・スケジュール
- e. 施設整備の各工程に係る必要経費
- f. その他の研究開発や運営・マネジメントに関するリソース
- g. 建設・運営における経費低減

本章では、以上の観点に従って順を追って整備シナリオの設定を進める。

### 2-4-2 観点に基づくシナリオの設定

#### a. 施設性能（硬X線向き又は軟X線向き放射光施設の別を含む）

##### 硬X線向き施設性能

「ニーズ調査」によると、硬X線向き放射光施設では、主に先端構造解析などに必要な高輝度X線（5keV-100keV の範囲で  $10^{20}$ - $10^{22}$  photons/s/mrad<sup>2</sup> /mm<sup>2</sup>/0.1%bw 程度の輝度）が求められている（【表 2-5】参照）。ただし、本調査では 2-2-2 節で述べた他施設との分散型放射光プラットフォームの構築を考慮し、10 keV 以下は軟X線向き放射光施設に任せることで、10 keV-100keV の範囲を硬X線向き放射光施設の光源性能と想定する。軟X線領域の発生を考慮しない設計にすることで、高輝度硬X線の発生が技術的にもコスト的にも無理無く実現できる。

想定した高輝度の硬X線を発生させるためには、電子ビームエネルギー6 GeV 程度の大型の電子蓄積型のシンクロトロン放射光リングが適している。ビームエネルギーが SPring-8 の 8 GeV から低減されているのは、アンジュレータの短周期化等によって低いビームエネルギーで高エネルギーX線の発生が可能になったためであり、低ビームエネルギーは運用コスト的にも有利である。また、要求される高いX線輝度を実現するためには電子蓄積リングを周回する電子ビームの低エミッタンス化が重要となる。「ニーズ調査」、「A. 技術課題ヒアリング調査」及び世界的な動向も鑑み、硬X線向き放射光施設ではサブ nmrad 程度のエミッタンスを想定する。

## 軟X線向き施設性能

「ニーズ調査」では、軟X線向き放射光施設に対し、主に先端分光に必要な高輝度の極端紫外光から軟X線（20eV-1keV付近で $10^{18}$  photons/s/mrad<sup>2</sup>/mm<sup>2</sup>/ 0.1%bw以上、1keV-20keVで $10^{20}$  photons/s/mrad<sup>2</sup>/mm<sup>2</sup>/0.1%bw以上の輝度）が求められている。こちらも同様に分散型放射光プラットフォームの構築を考慮し、50 eV以下は国内に複数ある小型の放射光施設やレーザー機器の利用を考えることにして、本調査で対象とする軟X線向き放射光施設のエネルギー範囲を50 eVから20 keVと想定した。50 eVは国内の小型放射光施設 UVSOR のピークエネルギーに対応し、それ以下は小型リングで十分カバーできる。

「A. 技術課題ヒアリング調査」でも、極端紫外領域は国内の他の小型リングに任せるべきという意見が多く挙げられている。このようにX線のエネルギー範囲をそのリングが得意な領域に限定することで、挿入光源などによる負担を軽減して低エミッタンスが無理なく可能になる。想定した高輝度X線を実現するためには、電子ビームのエネルギー3 GeV程度の中型の放射光リングが適している。また、軟X線向き放射光施設では1 nrad程度のエミッタンスを想定する。

## 共通の施設性能

低エミッタンスに基づいた光源性能を低コストで実現するためには、施設の安定性、省エネ環境技術を備えるべきであろう。【表 2-6】に示したように、低エミッタンスリングでは、振動が少ない静粛で安定な建屋が求められるため、立地場所によっては、コストをかけて人工岩盤などを用いる必要が生じる。

施設の省エネルギー設計は運用コストの低減につながるため、各コンポーネントの省エネ設計や革新技術導入（永久磁石、超伝導技術など）によるコスト低減、コジェネ発電や、メガソーラなどの先端環境エネルギー技術を備えることも考慮すべきである。

【表 2-5】 固有の施設性能（光源）

|  | 硬 X 線向き施設         | 軟 X 線向き施設  |
|--|-------------------|--|
| X 線エネルギー   | 10 keV-100 keV    | 50 eV-20 keV   |
| 輝度<br>(photons/s/mrad <sup>2</sup> /mm <sup>2</sup> /0.1%bw) | >10 <sup>20</sup> | >10 <sup>18</sup> @(<1 keV)<br>>10 <sup>20</sup> @(>1 keV) |
| 電子ビームエネルギー   | 6 GeV             | 3 GeV  |
| 電子ビームエミッタンス  | サブ nrad           | 1 nrad   |

【表 2-6】 共通の施設性能（建物、省エネ）

|          | 性能             | 施策  |
|----------|----------------|---|
| 建物の安定性   | 振動静粛性          | 安定な地盤上への建設、<br>人工岩盤の設置  |
| 省エネ設計・技術 | 先端環境エネルギー技術活用  | コジェネ発電、<br>メガソーラ  |
|          | 革新技术導入によるコスト低減 | 超伝導技術の導入、高周波加速<br>空洞の改良・コンパクト化、低<br>損失半導体素子による省エネ、<br>永久磁石の利用 |

b. 施設の運用開始時点で最低限備えておくことが必要なコンポーネント

施設の運用開始時点で最低限備えておくことが必要なコンポーネントは以下のようなものである。

蓄積リング関連のコンポーネント

施設の心臓部である電子蓄積リング関連のコンポーネントを【表 2-7】に示す。蓄積リングコンポーネント、蓄積リングに電子を入射する入射器コンポーネント、電子蓄積リングの直線部に配置されて X 線を発生する挿入光源コンポーネントからなる。入射器については線型加速器と、ブースターシンクロトロン of のいずれかを選択することになるが、第一部【表 1-5】で示した様に前者は運用コストが低く、ブースターシンクロトロンは初期整備コストが低い。

ビームラインコンポーネント

【表 2-8】にビームライン関連のコンポーネントを示す。挿入光源で発生した光をビー

ムラインへ導くためのフロントエンドのコンポーネントと、さらに下流側の分光器などのエンドステーションコンポーネントからなる。

### その他施設運営に必要なコンポーネント

施設には【表 2-9】に示したように、リングを運転するための電源系、冷却水系が必須である。また、蓄積リングを設置する床の静粛性が求められ、施設内の温度などの環境をコントロールするための機器、施設の状態を随時モニターするためシステムや、通信ネットワークなど基本的なユーティリティも最低限必要なコンポーネントである。いずれも第一部の調査項目（【表 1-1】、【表 1-2】）に関連し、【表 1-3】、【表 1-4】に挙げられた技術課題を実現するために必要なコンポーネントである。

以上の【表 2-7】【表 2-8】【表 2-9】に挙げたコンポーネントは、シナリオで設定される施設に必須の項目であり、これらコンポーネントの技術課題と整備・運用コストを念頭において調査を進めることになる。

【表 2-7】 蓄積リング関連のコンポーネント

|       | カテゴリー           | コンポーネント        |
|-------|-----------------|----------------|
| 蓄積リング | ラティス系           | 偏向電磁石（永久磁石）    |
|       |                 | 多極電磁石          |
|       | 高周波加速系          | 高周波加速空洞        |
|       |                 | 高周波発生器         |
|       | 真空系             | 蓄積リングダクト       |
|       |                 | 真空ポンプ          |
|       | 建物              | 蓄積リングトンネル      |
|       |                 | 放射線遮蔽壁         |
| 入射器   | 線型加速器の場合        | 電子銃            |
|       |                 | c-band 加速器ユニット |
|       | ブースターシンクロトロンの場合 | 電子銃            |
|       |                 | 前段入射器          |
|       |                 | ブースターリング       |
| 光源    | 挿入光源            | アンジュレータ        |
|       |                 | 多極ウィングラ        |

【表 2-8】 ビームライン関連のコンポーネント

|           | カテゴリー      | コンポーネント                     |
|-----------|------------|-----------------------------|
| フロントエンド   | バルブ、シャッター系 | ビームシャッター（アブソーバー）            |
|           |            | 真空遮断バルブ                     |
|           |            | 放射線シャッター                    |
|           | マスク、スリット系  | バンディング光マスク                  |
|           |            | スリット                        |
|           |            | 硬X線用ベリリウム窓                  |
|           | ビームモニタ系    | 光位置モニタ                      |
|           |            | 光ビーム診断システム                  |
|           | 制御系        | インターロック制御<br>(エンドステーションも含む) |
| エンドステーション | 光学系        | 前置ミラー／収束ミラー                 |
|           |            | 回折格子／分光結晶                   |
|           |            | 分光器マウント                     |
|           | 測定系        | 試料チャンバー／マウント                |
|           |            | 検出器                         |
|           |            | 計測システム                      |

【表 2-9】 その他施設運営に必要なコンポーネント

|       | カテゴリー   | コンポーネント       |
|-------|---------|---------------|
| 動力、水  | 電源      | 受電システム        |
|       |         | 電気配線          |
|       | 水       | 循環冷却水システム     |
|       |         | 冷却水配管         |
|       | 圧縮空気／排気 | 圧縮空気システム      |
|       |         | 排気回収システム      |
| 環境／運営 | 建物      | 静粛な地盤／床       |
|       |         | 余裕のあるスペース     |
|       | 温度／換気   | 屋内温度調整システム    |
|       |         | 換気システム        |
|       |         | 分光器マウント       |
|       | ネットワーク  | 施設内ネットワークシステム |
|       |         | 施設モニタ／運転システム  |
|       |         | 安全管理システム      |

c. 整備当初から将来のアップグレード計画を見越して設計すべきコンポーネント

ここでは、整備時における将来のアップグレードを見越した設計について議論する。アップグレードに関しては、光源性能を上げるための 1)ラティス構造のアップグレードを検討し、それを可能にするための、2)アップグレードに備えた建物設計、3)省エネ関連のアップグレード、及び、4)自由電子レーザー併設アップグレードに関して検討を行う。

ラティス構造のアップグレードへの対応

将来のアップグレード計画として、さらなる低エミッタンス化を進めた回折限界リング、コヒーレントX線リングの実現が予想される。それを現在の技術の延長で実現するためには、ラティス構造に更に高度なマルチバンド・アクロマツ構造の採用が想定される。現段階で見越した設計にすると、一つのセルに更に多くの電磁石を配置するスペースをリザーブする必要があり、セル長の余裕を大きくとり、周長の長い大型リングを設計しなければならない。したがって、大幅にコストがアップしてしまうことが予想される。一方で、今後の技術革新や進歩により電磁石などのリングコンポーネント



は、より強力でコンパクトになって行くと予想できる。コンパクト化が進めば、現状技術でコンパクトに設計したラティス構造でも、将来的にはスペースに余裕が生じ、高度なマルチバンド・アクロマツト構造も可能になると考えられる。また、極短周期アンジュレータが実用化されれば、電子ビームエネルギーを下げることで低エミッタンス化が可能になる。したがって、将来のアップグレードのためにコンパクトなリング計画を見直して、大きなリングを設計する必要はないと考えられる。

### アップグレードに備えた建物設計

将来、電磁石のコンパクト化などにより更なる低エミッタンス化を行うにあたり、施設の安定性（振動の静粛性）が重要となることが予想される。したがって、施設の建築にあたっては、安定な岩盤上などの立地を十分検討して、建物に関しては安定性や静粛性に関して十分な余裕を持った設計にすることが重要となる。

また、将来の低エミッタンス化、高輝度化を見据えた場合、放射線防護・遮蔽に関して余裕を見越した設計が必要である。これまで蓄積リングトンネルはビーム取り出し口ごとにギザギザの形状を持つラチェット型が採用されてきたが、サーキュラー・シールド・ウォール型（CSWT）も検討の余地がある。CSWT 型では、ビーム前方方向の線量率が従来のラチェット型よりも低く抑えられるとされており、ビームロス時の横方向の線量率を外側隔壁の厚さを増すことなく、距離を離すだけで低く抑えることができると言われている。また、アップグレード時のビーム取り出し口の変更が容易であり、ラチェット型よりもコンクリート量が少ないので建設費軽減にもつながるとされる。しかしながら、フロントエンド機器の配置場所などを考えると一長一短であるため、CSWT 型の採用には慎重な検討が必要である。

### 省エネ関連のアップグレードへの対応

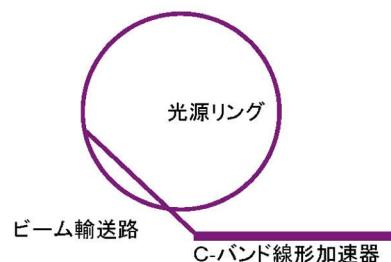
低エミッタンス化のためのアップグレードとともに、省エネ技術の積極的な導入を目指したアップグレードも考慮する必要がある。特に電磁石に関しては、コンパクト化と同時に、永久磁石の利用による大幅な省電力化が期待されている。そのような技術を随時取り入れてアップグレードしていくためには、長期間のリング休止を行うことなく、磁石の入れ替えができることが望ましい。したがって、蓄積リングトンネルは入れ替え作業が行い易いように余裕をもった設計が望ましい。

また、高周波加速系も将来アップグレードが期待されるコンポーネントである。ヒアリング調査で明らかになったように、高周波インピーダンスが低く、かつ、スペース効率の高い新型コンパクト高周波空洞、固体素子による高周波発生、超伝導加速空洞など、様々な技術が期待されている。これらの中であらかじめ設計に取り入れなければならないものとしては、超伝導用の寒剤供給システムが考えられる。エンドステーションでの実験に必須である寒剤供給システムと合わせた総合的な整備が必要と思われる。

## 別案-A



## 別案-B



| 建設費（概算）       |       |                         |       |
|---------------|-------|-------------------------|-------|
| 150MeV 前段入射器  | 15 億円 | Cバンドライナック<br>(高周波電子銃使用) | 59 億円 |
| 3GeV ブースターリング | 40 億円 | ビーム輸送路                  | 5 億円  |
| ビーム輸送路        | 3 億円  |                         |       |
| 計             | 55 億円 | 計                       | 64 億円 |

| 電力使用量および料金（概算）     | A            | B         |
|--------------------|--------------|-----------|
| 0.1Hz トップアップ定常運転   | 2,400 kW     | 261 kW    |
| 年間消費電力（6,000 時間運転） | 14,400 MWh   | 1,566 MWh |
| 電力料金（15 円/kWh）     | 2 億 1,600 万円 | 2,349 万円  |

【図 2-2】 入射器の比較

### 自由電子レーザー併設アップグレードへの対応

アップグレード計画の一つの選択肢として、自由電子レーザーの併設があげられる。電子蓄積リングの入射器として、【図 2-2】に示すように A) ブースターシンクロトロン、B) 線型加速器との選択肢があるが、将来の自由電子レーザー併設のアップグレード計画を考慮するならば、建設当初から線型加速器による入射の選択が考えられる。また、将来、電子蓄積リングのさらなる低エミッタンス化が行われた場合、ダイナミックアパーチャ（ビーム安定領域）がより狭くなり、高い精度での入射が求められることが予想される。その場合でも、低エミッタンスビームを高い精度で入射できる線型加速器の方が対応能力は高い。また、線型加速器は加速器技術の進歩による将来の新しい加速方式にも適応性が高い。線形加速器は消費電力が小さいため、初期コスト超過分は、約 5 年で補うことができると試算される。

### d. 設計・建設その他の設備整備に係るタイムスケジュール

ここまで、a, b, c の観点で硬 X 線向き施設と軟 X 線向き施設の施設性能やコンポーネントを検討してきた。それぞれの施設の新規整備とアップグレードに関してタイムスケジュールを検討する。

#### 硬 X 線向き施設新設

新規整備期間として 5 年が想定される。基本設計を着工前にまとめて、最初の 3 年で建屋建設を行う。並行して、詳細設計と装置の製作を進める。建屋の完成後の 4 年目は、加速器機器の据付などを行う。4 年目の後半は、加速器の据付を終えて、電子ビーム

を入射して調整を行う。5年目は、加速器調整と並行して、挿入光源やビームラインの整備を進め、5年目の後半に完成を予定する。6年目の初めから利用を開始する。

### 硬X線向き施設アップグレード

既存施設のアップグレードにかかる期間は5年が想定される。アップグレードのスケジュールを【表2-10】にまとめる。基本設計を着工前から始めて、初年度は詳細設計を進めるとともに、磁石などのコンポーネントの開発・製作を進める。加速器コンポーネント機器の製作は、既存施設のシャットダウンが予定される3年度目まで行う。4年度目は、既存施設をシャットダウンして、加速器コンポーネントの入れ替えを行う。シャットダウン期間で加速器部分を完成させ、5年度目は真空焼き出し、加速器・ビームラインのコミッショニングを行う。5年度中にそれら作業を完了させ、試験的な利用を5年度中から開始し、6年度目から本格利用を開始する。

【表2-10】硬X線向き施設アップグレードスケジュール

| 施設項目                | 前年度 | 初年度 | 2年度目 | 3年度目 | 4年度目 | 5年度目 | 6年度目以降 |
|---------------------|-----|-----|------|------|------|------|--------|
| 詳細設計                |     | →   |      |      |      |      |        |
| 機器製作                |     | →   |      |      |      |      |        |
| 据付け等                |     |     |      |      | →    |      |        |
| 真空焼出+加速器・BLコミッショニング |     |     |      |      |      | →    |        |
| 利用開始                |     |     |      |      | ←    |      | →      |

\*試験的な利用を5年度内から開始予定

シャットダウン

### 軟X線向き施設新設

新設にかかる整備期間は3年が想定される。新設のスケジュールを【表2-11】にまとめる。基本設計を着工前にまとめて、早期に着工し、詳細設計は工事を行いながら進める。建屋などの整備は、2年目の中頃に完了させる。加速器コンポーネント機器などは、初年度から製作に取りかかり、建屋完成後、速やかに据付等を行う。また、挿入光源やビームラインの整備も進め、3年目の中頃までに、加速器の組み立てを完了し、エージング、ビーム調整などを行い、3年目の終わりまでに完成となる。4年目の初めから利用を開始する。

【表 2-11】 軟 X 線向き施設建設スケジュール

| 施設項目        | 前年度 | 初年度 | 2年目 | 3年目 | 4年目以降 |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-------|
| 詳細設計        | →   |     |     |     |       |
| 建屋および電気等設備  |     | →   |     |     |       |
| 機器製作、据付け等   |     | →   |     |     |       |
| エージング+ビーム調整 |     |     |     | →   |       |
| 利用開始        |     |     |     |     | →     |

### 軟 X 線向き施設アップグレード

既存施設のアップグレードにかかる期間は3年が想定される。最後の1年間は、既存施設を停止して、蓄積リングコンポーネンツなどの入れ替え、入射・蓄積試験を行う。ただし、国内にアップグレードによって十分な高輝度化が行えるような周長 300 から 500 m の既存施設はない。また、SPring-8 の 3 GeV リングへのアップグレードは可能であるが、国内の硬 X 線利用研究の需要が満たせなくなるため現実的ではない。既存施設のアップグレードによる軟 X 線向き施設の整備は、現状で選択肢とはならない。

## e. 施設整備の各工程に係る必要経費

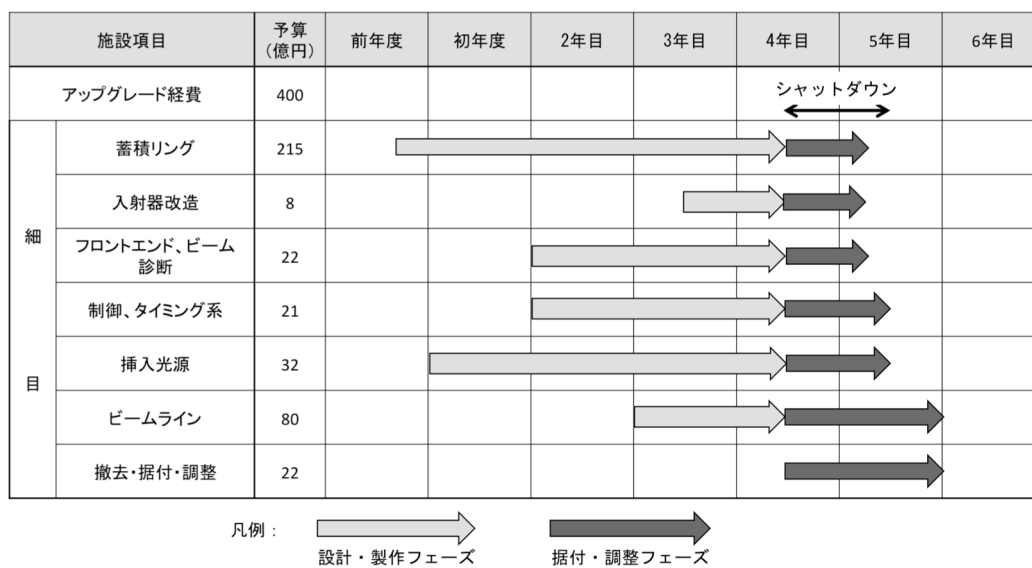
### 硬 X 線向き施設新設

要望される硬 X 線向きの高輝度リングの性能は、6 GeV 程度の電子エネルギーでサブ nmrad の低エミッタンスのものである。これを実現するためには、SPring-8 と同規模の周長の MBA ラティスによるリングの新設になると考えられる。したがって、建設費は、線型加速器による入射器を含めて、SPring-8 の建設費と同程度の約 900 億円と見積もられる。アップグレードに比べてユーザーからの要望もなく、コスト的にも現実的ではないため、経費の詳細は検討しないこととする。

### 硬 X 線向き施設アップグレード

既存の硬 X 線向きの高輝度リング (SPring-8) では、電子エネルギーを 6 GeV に下げてサブ nmrad の低エミッタンスを実現するアップグレードが検討されている。それを参考にアップグレードでの各工程での必要経費を【表 2-12】にまとめる。新設に比べると建物や設備の経費が最小限で済み、入射器も既存のものが使えるために経費の総額は約 400 億円と見積もられる。

【表 2-12】硬 X 線向き施設工程に係る経費（概算）

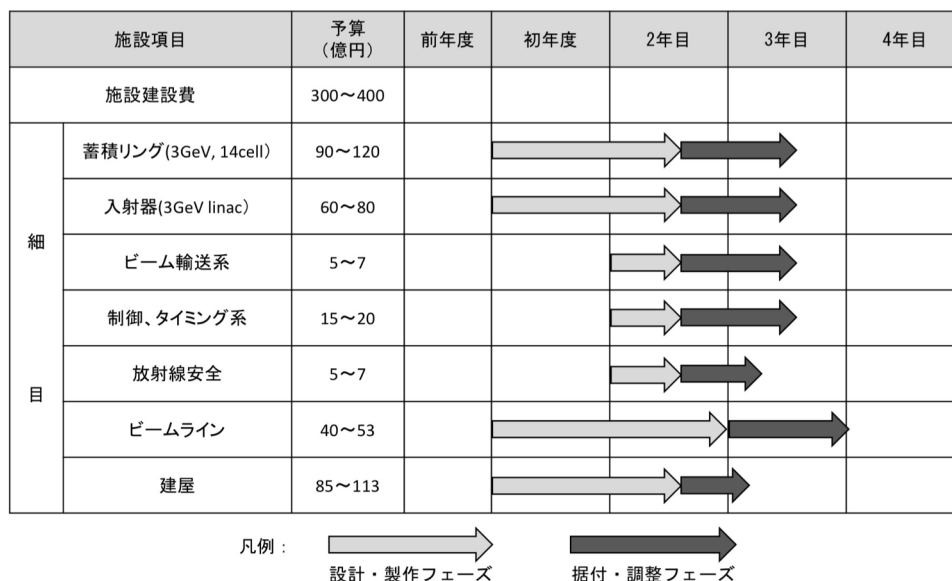


\* 必要経費は概算値であり、詳細検討により増減があり得る。

### 軟 X 線向き施設新設

要望される硬 X 線向きの高輝度リングの性能は、3 GeV 程度の電子エネルギーで 1 nmrad 程度のエミッタンスを持つものである。この仕様を、マルチバンド・アクロマツラティスを用いた周長 350 m 程度のリングで実現した場合の各工程の経費の概算を【表 2-13】にまとめる。様々な要因により経費は増減が予想されるため、概算には幅をもたせてある。建屋が 85～113 億円、蓄積リングが 90～120 億円、線型加速器による入射器

【表 2-13】軟 X 線向き施設工程に係る経費（概算）



\* 必要経費は概算値であり、詳細検討により増減があり得る。また、特高変電、地盤改良、研究交流棟、食堂などの付帯設備に係る費用は含まない。

が60～80億円などとなっており、経費は概算で約300～400億円程度と見積もられる。

#### **軟X線向き施設アップグレード**

前述のように、既存施設にアップグレードに適するものはない。よって、アップグレードによる軟X線向き施設の整備は、選択肢として考えない。

### **f. その他の研究開発や運営・マネジメントに関するリソース**

#### **分散プラットフォームの構築**

施設検討ワーキング報告書にもあるように、国内の各地に分散した複数の放射光施設のそれぞれの役割分担を明確にしつつ、有機的に連携した分散プラットフォームを形成することで、効率的な運営と科学的なアクティビティの向上が可能になる。

#### **リモートメンテナンスの導入**

分散型放射光プラットフォームでは、運用の効率化のため、リモートでのメンテナンスも検討課題の一つである。

#### **研究開発部門の設置**

スイスのSLSを運営するPSIで開発された2次元X線検出器が世界中の放射光施設を席巻していることからわかるように、高性能のX線検出器の開発が放射光研究の優劣を左右するようになってきていることが、第一部の1-3-2個別技術課題ヒアリング調査結果で述べられている。また、低エミッタンスビームが実現できても、多くのユーザーが要望するナノメートルサイズの集光や解像度は、今後の光学系や検出器の研究開発で実現して行かなければならない課題である。また、省電力の鍵となる永久磁石の活用には、1-3-2で述べられている様に放射線照射による減磁効果の研究などが欠かせない。これらを実現しユーザーにとって魅力的な施設であり続けるためには、光学系、検出器、磁石などの研究開発を、外部に任せるだけではなく、施設内や放射光プラットフォーム内に研究開発部門を設置して、責任を持って行うことも重要である。

### **g. 建設・運営における経費低減**

新設やアップグレード整備における建設経費や完成後の運営経費の低減にかかわる項目を検討する。運営経費としては、放射光施設の運転経費の大部分を占める電力と人件費について考慮する。

#### **集中調達と共通化によるコスト低減**

硬X線向き施設と軟X線施設の整備を同時あるいは連続的に行うことができれば、一定期間にわたる集中調達とコンポーネントの共通化によるコストの低減が可能である。

## 初期投資と運営経費のバランス

電力消費の主要部分を占める電磁石や、高周波系などは、材料費などで初期投資が高くても、省エネルギー効果の高いものを選択したほうが長期間でのトータルコストは低減する。初期投資の増分を運用コストの低減で回収できるようなコンポーネントは積極的採用を考える。

## 環境エネルギー技術革新計画による先端環境技術の採用について

国際的な低炭素社会の実現とともに、エネルギーの安全保障、環境と経済の両立、開発途上国への貢献の実現を目指し、2008年5月に総合科学技術会議で環境エネルギー技術革新計画が決定・意見具申されている（2013年9月に改定されている）。そこに示された「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」より環境エネルギー技術として下記技術を検討する。

1. 太陽光発電
2. 高効率エネルギー(コジェネ)：廃熱利用併用
3. エネルギーマネジメント
4. 省エネビル：LED照明

### 1. 太陽光発電

#### 1) 一般的な発電コスト

現在の電気料金は、特別高圧電力基本料金が1kWあたり約1,700円であり、従量料金が1kWhあたり年平均で約15円である（国内電力会社概算値）。それに対し、太陽光発電コストは、1kWhあたり20円程度である。これは、太陽光発電装置の初期整備コストが現状で1kWあたり40万円程度であり、そのコストを1kWパネルの平均年間の発電量1,000kWhと耐用年数の20年で割ったものである。将来的には、太陽光発電装置のコストは、1kWあたり28万円程度まで下がると予想されており、将来の太陽光発電コストは14円/kWh程度になると予想されている（「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」より）。したがって、導入時には発電コストは、1kWhあたりの電気料金と拮抗または下回ることが予想される。また、COP21によるCO<sub>2</sub>削減効果を合わせて評価すれば、導入には十分なメリットがある。

#### 2) 導入発電量の検討

導入発電量としては、建物の予測昼間最低電力を超えず、全て建物消費することで売電に必要な施設費を抑制する。したがって、中型の軟X線向き施設では1.0MW程度、大型の硬X線向き施設ではその4倍の4.0MW程度が想定される。

#### 3) 導入効果の検討

太陽光は、晴天の日中のみ定格の発電が行われるために、1kWのパネルの平均発電量は年1,000kWh程度である。耐用年数の20年の間に、15円/kWhの電気料金に換算し

て、約30万円の電気料金低減が期待できる。初期整備コストが、1kWあたり28万円まで下がったとすると、1kWのパネルあたり2万円の経費低減効果が期待できる。また、CO<sub>2</sub>削減効果は太陽光発電1kWhあたり-0.571kg/kWhとされており、1kWのパネルあたり年間に-0.571トンのCO<sub>2</sub>削減効果がある。【表2-14】に太陽光発電のコストとCO<sub>2</sub>削減量をまとめる。

【表2-14】太陽光発電のコストとCO<sub>2</sub>削減効果（概算）

|       | パネル価格                | 年間発電量                     | 単価                                 | 年低減量                     |
|-------|----------------------|---------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| 太陽光発電 | 40万円/kW<br>(28万円/kW) | 1,000 kWh/年<br>(1 kW パネル) | 電気料金低減<br>-15円/kWh                 | -15,000円/年<br>(1 kW パネル) |
|       |                      |                           | CO <sub>2</sub> 削減<br>-0.571kg/kWh | -0.571トン/年<br>(1 kW パネル) |

## 2. 高効率エネルギー(コジェネ)：廃熱利用併用

### 1) 一般的な発電コスト

コジェネ発電では、廃熱利用によりコストが左右されるが、本調査では、発電量に対し発熱量(放射光装置冷却及び建物暖房で利用)を全て使い切る量で想定する。この場合、コジェネ発電コストは、廃熱利用を含めて、約10円/kWhである(「熱電併給(コジェネ)推進室」エネルギー庁2012年9月より)。前述したように現在の従量電気料金は、約15円/kWhであるため、初期整備費を除いた発電コストは、電気料金を十分下回っている。

### 2) 導入発電量の検討

導入発電量としては、建物の予測昼間最低電力を超えず、常時定格での発電を行うことで、基本料金も含めてコストを抑制する。

### 3) 導入効果の検討

コジェネ発電の初期設備コストは、軟X線向き施設で、1.0MW規模の石油コジェネ装置一式で130百万円と廃熱利用装置34百万円(通常冷暖房装置との差額)と見積もられる。硬X線施設では、その4倍と想定される。コジェネ発電は、定格で24hの発電が可能であり、発電量は軟X線向き施設で定格1.0MWで年間8,500h(メンテナンス260h)の発電で1年あたり8,500MW/h、硬X線向き施設ではその4倍と想定する。この発電量は、年間使用電力量の約40%に対応する。

これによる経費低減効果は、まず、契約容量の減少による基本料金の低減がある。【表2-15】に軟X線向き施設でのシミュレーションを示すが、基本契約が、コジェネ活用により1.0MW低減できる。標準的な基本料金1,700円/kW/月で見積もると、年間で-20.4百万円の低減効果になる。また、総発電量8,500MW/hは、10円/kWhのコストで発電されるため、その差額による低減効果は年額で-42.5百万円となる。したがって、トータル



での低減効果は 1 年あたり-62.9 百万円と見積もられる。低減効果は、総電力料金の約 16%に及び、初期整備コスト 164 百万円は、3 年程度で回収できる。硬 X線向き施設においても同様のシミュレーションができる。

一方、施設の安定性と信頼性も導入に関する重要なファクターであるため、故障時やメンテナンスに備えて、予備機の整備や維持管理費用が必要になると考えられる。また、発電コストが燃料費の変動に依存することもリスクになり得る。そのため、導入にあたっては、これらのリスクを十分考慮し、例えば後述する地域のエネルギーマネジメントシステムに組み込む事によって、なるべくコストのかからない方法で安定運用を実現することが重要である。

【表 2-15】 軟 X線向き施設コジェネ発電の初期コストと経費低減効果（概算）

|  | 項目              | 金額          | 合計          |
|--|-----------------|-------------|-------------|
| 初期整備コスト  | 1.0 MW 石油コジェネ装置 | 130 百万円     | 164 百万円     |
|  | 廃熱利用装置          | 34 百万円 (差額) |             |
| 年間の電気料金の低減   | 基本料金 (-1.0 MW)  | -20.4 百万円/年 | -62.9 百万円/年 |
|  | 従量× (-5 円/kWh)  | -42.5 百万円/年 |             |
| 年間発電量 8,500 MWh、発電コスト 10 円/kWh で計算 (定格 1.0 MW、年間発電時間 8,500 時間) |                 |             |             |

### 3. エネルギーマネジメント

#### 1) エネルギーマネジメントシステム

エネルギーマネジメントシステムは、住宅向けの HEMS (Home Energy Management System)、商用ビル向けの BEMS (Building Energy Management System)、工場向けの FEMS (Factory Energy Management System)、そしてそれらをクラスター化した地域全体向けの CEMS (Community Energy Management System) に分類される。このうち放射光施設では、FEMS の導入と、地域全体のエネルギーマネジメントシステム CEMS への組み込みによる地域全体でのエネルギー消費低減効果を想定する。

#### 2) 想定導入効果

FEMS では、遠隔操作可能なスマート配電盤の導入、配電盤ごとの電力消費量のモニタ、ピーク電力の調整、コジェネ発電や太陽光発電の管理、温湿度管理と空調機の制御を行うスマート空調、照度の監視と照明のオン・オフ管理を行うスマートライティングなどを導入して、監視ときめ細かな制御により無駄なエネルギー消費を削減する。FEMS の導入と、さらに地域全体の CEMS に組み入れることで 2020 年において 15%~20%の消費電力低減が想定されている (資料-6 より)。本調査では、主に FEMS を主体としたエネルギーマネジメントシステム導入による現段階での消費電力低減を 5%と想定する。CEMS

に関しては、地域の状況を考慮しながら、積極的に導入していくことが考えられる。

### 3) 導入効果の検討

FEMS の導入にあたっては、スマート配電盤、スマート空調、スマートライティング（LED 照明に関しては次項）、コジェネ発電などもふくめそれらを一括管理するマネジメントシステムの導入が必要である。それらの初期整備コストを軟X線向き施設で 200 百万円（差額増加分）、硬X線向き施設で 800 百万円（差額増加分）と見積もる。これにより年間電力使用量の 5%が低減できると想定される。例えば、軟X線向き施設の電力を 20GWh/年程度とすると、低減電力は、約-1 GWh/年であり、電気料金の低減は-15 百万円/年となる。したがって、初期整備コストは 14 年で回収可能である。将来的に地域全体の CEMS に組み込むことでさらなる経費低減が見込まれる。

資料 - 6 （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>

## 4. 省エネルギービル：LED 照明

### 1) LED 照明

省エネルギービル、照明の管理に関しては前項のエネルギーマネジメントシステムに含まれるが、水銀灯などによる標準照明、蛍光灯、LED 電球の選択は、初期コストと消費電力の面から重要であるためにエネルギーマネジメントと分けて個別に検討する。

### 2) 想定導入効果

従来照明に比較して LED 照明による電力低減量は 65%程度と見積もられる。また、更に個別の人感センサーなどにより、建物内の自動節電対策を追加することで、電力低減量 85%が想定される。

### 3) 導入効果の検討

LED 導入による追加コストは、1m<sup>2</sup>あたり 3,000 円程度である。施設の総床面積は軟X線向き施設が 15,000 m<sup>2</sup>（硬X線向き施設が 60,000 m<sup>2</sup>）と想定すると、初期追加コストは、45 百万円（180 百万円）と見積もられる。施設内の標準照明電力として一般照明の 15 W/m<sup>2</sup>を想定すると、標準照明では施設全体で年間 2.0 GWh（7.9 GWh）の電力が必要である。LED 照明により想定される 85%削減分の電力は、年間 1.7 GWh（6.7 GWh）にのぼり、全消費電力のほぼ 8%の低減に相当する。低減されるコストは、電気料金を 15 円/kWh として、-25 百万円（-100 百万円）となる。また、LED の導入は 65%のベース電力低減になるため、その分の基本料金の低減も期待できる。基本料金 1,700 円/kW/月とすると、年間で-3.0 百万円（-12 百万円）となり、従量分と合わせてトータルで、-28 百万円/年（-112 百万円/年）の経費低減効果が見込まれる。

## 2-5. 各施設の整備シナリオの検討

### 2-5-1 各施設の整備シナリオの考え方

ヒアリング調査と、ここまでの技術課題調査をもとに、硬X線向き施設と軟X線向き施設の、それぞれの整備シナリオを個別に検討する。本調査では、それぞれ以下のようなシナリオを想定する。

#### 1. 硬X線向き施設：既存施設アップグレードの検討

国内に硬X線向き高輝度リング（SPring-8）が稼動状態であるため、研究ニーズ的にも経済的にも新規建設の必要性は少ない一方で、国内の硬X線向き高輝度リングは建設から20年経過し、国際的には最高レベルの性能を維持できなくなっているのは前述のとおりである。一年程度の停止期間を設けて最新の技術でアップグレード（高輝度化、6 GeV程度へのビームの低エネルギー化）を行うことが国際的競争力を高めるために必要である。したがって本調査では、硬X線向き高輝度リングに関しては**既存施設アップグレード**を主な検討対象とする。

既存施設（SPring-8）のアップグレードは、2-3-1のe.に示したように、400億円程度を想定する。また、建設期間は、アップグレードでは休止期間1年を含み5年が想定される。

#### 2. 軟X線向き施設：新規整備の検討

「ニーズ調査」などで明らかになったように、軟X線向きの高輝度放射光リングとして、ビームエネルギー3 GeV、周長約350 m、エミッタンス1 nmradクラスの施設が望まれている。2-4-1節d.で述べた様に、残念ながら国内に合理的にアップグレード可能な既存施設は存在しない。したがって、軟X線領域をカバーできる3 GeV程度の中規模高輝度リングの新規整備が必要と考える。本調査では、軟X線向き高輝度リングに関しては主に**新規整備**を検討対象とする。

軟X線向き高輝度リングを新設する場合の建設コストは、2-3-1節e.に示したようにリングの規模から概算で約300～400億円程度と見積もられ、建設期間は3年を想定する。

### 2-5-2 「硬X線向き施設」アップグレードのシナリオ

#### 1. アップグレードの概要

国内唯一の硬X線向き施設であるSPring-8は、磁石配列の一部変更やビームオプティクスの低エミッタンス化により、約16年の年月と数10億の予算をかけ建設当初の7 nmradから2.4 nmradまで電子ビームの高度化が行われてきた。しかしながら、ESRFやAPSといった海外の施設では、サブnmradのエミッタンスを持つ回折限界リングを目指したアップグレード計画が進められており、国内の硬X線向き施設のアップグレード

も、サブ nmrad が目標となる。

サブ nmrad 実現のためには、ラティスを構成するセル磁石配列の大幅な見直しが必要である。具体的には、これまでの DBA セルから、MBA セルへの変更が考えられている。したがって、加速器の磁石部分とビームが周回する真空ダクトに関しては、ほぼ新規入れ替えとなる。また、アンジュレータなどの挿入光源も、低エミッタンスビームに対応したものに入れ替えが必要である。その他の部分に関しては、再利用や改良を考える。既存ビームラインに関しては、基本的には改造で対応するが、低エミッタンスビームを利用した最先端ビームラインも幾つか新設する。

## 2. SPring-8 建設当時の技術でのアップグレード経費の見積もり

SPring-8 当時の技術で同じ周長でサブ nmrad の低エミッタンスへアップグレードすることは不可能である。大幅に周長を長くする必要があり、経費は当時の新規整備を超えると考えられる。

## 3. 現在の技術でのアップグレード経費と運転経費

アップグレードの予算は、蓄積リング系、制御・タイミング系、入射器系、ビームライン系に分けて考える。蓄積リング系の予算は、約 280 億円と見積もられ、内訳には、ラティスの総入れ替えのために新設する磁石と架台の予算、新設になる真空ダクトや真空チャンバー、真空ポンプ、真空バルブなどの予算、高周波系の改良に必要とされる予算、熱負荷対策などのフロントエンド部分の予算、挿入光源の予算が計上されている。制御・タイミング系は、ビーム診断システム、タイミング系、加速器の制御系で合計 32 億円を見積もる。既存入射器を使用する入射系の整備に 8 億円を見積もり、ビームライン系では、既存ビームラインの改造費、及び新設ビームライン経費として 80 億円と見積もる。以上、総計して硬 X 線放射光施設のアップグレード経費は 400 億円程度と見積もられる。

次にアップグレード後の運転経費の中で大きな割合を占める電力料金について検討する。まず、現在の硬 X 線向き光源加速器部 (SPring-8) の受電設備の容量は 60MW であり、消費電力は定常運転で 19 MW 程度である。硬 X 線向き施設のアップグレードでは、6 GeV への変更、有効口径の低減によるコンパクトな電磁石の採用などによって、40 % 程度の電力削減が想定されている。ここでは、【表 2-16】に示すようにアップグレード後の消費電力を放射光使用時 12 MW とし、受電容量を 16 MW と想定する。この値から、電力量使用量は約 83.6 GWh/年と見積もられる。この値は、後述する軟 X 線向き光源加速器の約 4 倍の値である。年間の電力料金は、【表 2-17】のように約 15.0 億円と見積もられる。

【表 2-16】硬 X 線向き放射光施設の仕様と電力

| 項目              | 施設の仕様と電力  |                     |          |
|-----------------|---|---------------------|----------|
| 蓄積リング           | ビームエネルギー：6 GeV， 周長： 1,436 m                       |                     |          |
| 建物              | 面積 約 70,000 m <sup>2</sup>                        |                     |          |
| 年間稼働時間          | 8,760 h (365 day×24 h) (放射光使用 6,000h, 不使用 2,760h) |                     |          |
| 使用電力<br>(概算)    | 放射光使用時  | 平均 12 MW, 6000h/年   | 最大 16 MW |
|                 | 不使用時  | 平均 4.2 MW, 2,760h/年 |          |
| 年間電力使用量<br>(概算) | 約 83.6 GWh/年 (1.19 MWh/m <sup>2</sup> /年)         |                     |          |

【表 2-17】施設の予想電力料金 (\*単価は、国内電力会社概算値を使用)

| 項目                     | 単価           | 数量           | 電力料金                      |
|------------------------|--------------|--------------|---------------------------|
| 基本料金                   | 1,700 円/kW/月 | 12 MW 契約     | 20.4 百万円/月<br>(2.45 億円/年) |
| 従量                     | 15 円/kWh     | 約 83.6 GWh/年 | 約 12.5 億円/年               |
| 硬 X 向き施設の年間電力料金合計 (概算) |              |              | 約 15.0 億円/年               |

#### 4. 本調査での技術課題を取り入れた場合の建設経費と運用経費

前項では、現状の技術でのアップグレード経費が約 400 億円、年間の電力料金を約 15.0 億円と見積もった。これに本調査で選択可能なコストに関わる技術課題とされたものを取り入れてシナリオを検討する。検討結果は【表 2-18】にまとめる。

##### 永久磁石を利用した磁石システムの採用

電磁石の消費電力は、全電力の 15%程度の 12.5 GWh/年と見積もられる。電磁石の内 で永久磁石への交換が考えられているのは主にベンディングマグネットで消費電力は全電力の 3%強と想定される。したがって、永久磁石利用による電力コスト低減効果は、年間 2.5 GWh で年間 0.4 億円弱と見積もられる。永久磁石導入による初期コストの増加 (電磁石との差額) は、電源やケーブルが削減できることを考慮するとほとんどないと考えられる。ただし、導入までには R&D 経費が別途必要になる。

永久磁石システムの電力低減効果に注目したが、むしろ、超低エミッタンス用磁石配列に要求される強い磁場とコンパクトネスを実現するための技術として期待されている。電磁石のようにコイルや配線、電源が必要ないことが有利な点であるが、磁石特

性、磁場の長期安定性、磁場調整機能、据え付け及び運用上の安全の確保など、実用化には、まだまだ時間が必要である。

### 高周波発生器の消費電力低減、新しいコンパクト高周波空洞の採用

高周波系の消費電力は、全電力の20%程度の約17 GWhと見積もられる。クライストロンから半導体素子を使った電源に置き換えることで10%、さらに新しいコンパクト高周波空洞を開発採用することで10%、合わせて20%の電力低減を想定する。したがってトータルでは、年間3.4 GWhで年間0.51億円程度のコスト低減が期待できる。初期コストを見積もることは難しいが、ここでは現状のものからのコスト増はほとんどないと考えられる。ただし、導入までにはR&D経費が別途必要になる。

半導体素子への置き換えは、現状では伝送損失や電源での損失を考慮すると必ずしもトータルでの電力低減にはつながらない。それらも含めた電力低減に向けたR&Dが必要である。

超伝導空洞を用いると壁損失がゼロになるため空洞での電力損失は50%程度低減できるが、一方で寒剤システムの初期投資と運用電力、及び維持管理費が必要になり、経費低減のメリットはなく、安定運用という信頼性の面からもリスクを高める要因となる。

### 先端環境技術による電力コストの低減

前節で検討した環境技術を12 MW契約年間使用電力83.6 GWhとして電力コストを見積もる。太陽光発電とコジェネ発電は、4 MWの発電規模で見積もる。太陽光発電に関しては、初期コストの回収に耐用年数の20年に近い年月がかかるが、CO<sub>2</sub>削減効果というメリットも考慮すべきであろう。コジェネ発電によるコスト低減は、約251百万円/年程度であり、初期コストを3年程度で回収できることがわかる。FEMSは、約60百万円/年の低減で約14年で回収でき、LED照明は約112百万円/年の低減で初期コストの差額分を2年で回収可能である。

### 利便性向上によるコスト低減

安定して使いやすい制御系を実現するために、制御システムと制御ソフトウェアを導入する。導入コスト1億円程度と想定するが、これにより効率的な運転が可能になり、運転のための人件費を2名分程度低減できると考えている。

以上のように、本調査で選択可能なコストに関わる技術課題とされたものを取り入れた場合、【表2-18】に示したように、総計では初期整備コストが2,856百万円増加するが、運用コストの低減が-584百万円/年となり、全体では約5年で回収可能である。

【表 2-18】本調査結果に基づくコスト低減効果（概算）

| 項目       |        | 初期整備コスト    | 削減量                             | 低減コスト      | 回収年  |
|----------|--------|------------|---------------------------------|------------|------|
| 永久磁石の利用  |        | 0 (R&D 別途) | -13,400 MWh/年                   | -40 百万円/年  | -    |
| 高周波系     |        | 0 (R&D 別途) | -27,000 MWh/年                   | -51 百万円/年  | -    |
| 環境<br>技術 | 太陽光発電  | 1,120 百万円  | -4,000 MWh/年                    | -60 百万円/年  | 19 年 |
|          | コジェネ発電 | 656 百万円    | -34,000 MWh/年<br>(コスト 10 円/kWh) | -251 百万円/年 | 3 年  |
|          | FEMS   | 800 百万円    | -4,040 MWh/年                    | -60 百万円/年  | 14 年 |
|          | LED 照明 | 180 百万円    | -6,700 MWh/年                    | -112 百万円/年 | 2 年  |
|          | 合計     | 2,756 百万円  | -48,704 MWh/年                   | -483 百万円/年 | 6 年  |
| 運転制御ソフト  |        | 100 百万円    | -2 人/年                          | -10 百万円/年  | 10 年 |
| 総計       |        | 2,856 百万円  | -                               | -584 百万円/年 | 5 年  |

#### 5. SPring-8 当時の技術、現在、本技術課題調査による建設経費と運用経費の比較

以上の硬X線向き施設整備のシナリオによる建設・運用コストの比較結果を【表 2-19】にまとめる。運用コストは、現状アップグレード案において建設費 400 億円の 8%程度の 36 億円と想定し、それを電力料金と人件費 15 億円や維持管理費を含むその他に分けて考える。現状の技術によるものに比べて、本調査結果を反映したものは、初期コストが約 29 億円増加するが、毎年の運用経費が約 5.8 億円低減されるので、ほぼ 5 年で回収できることがわかる。

【表 2-19】硬X線向き施設のコストの比較（概算）

| 項目               |      | SPring-8 当時 | 現状（基準） | 本調査  |
|------------------|------|-------------|--------|------|
| 建設費（億円）          |      | >900        | 400    | 429  |
| 運用コスト<br>（億円/年）  | 電力料金 | 15.0        | 15.0   | 9.26 |
|                  | その他  | 21          | 21     | 20.9 |
| 建設費+5年運用コスト（億円）  |      | >1,080      | 580    | 580  |
| 建設費+10年運用コスト（億円） |      | >1,260      | 760    | 731  |

## 2-5-3 「軟X線向き施設」新規整備のシナリオ

### 1. SPring-8 建設当時の技術による見積もり

SPring-8 のエミッタンスは、建設当初の 7 nmrad から 2.4 nmrad まで約 16 年の年月をかけ電子ビームの高度化が行われてきた。この期間の加速器科学・技術の進展で、エミッタンスが 1 nmrad を切るコンパクトな 3 GeV 中型高輝度光源が可能になってきた。この加速器科学・技術の進展で、3 GeV、1 nmrad の光源が、SPring-8 の建設当時と今日でどのように進化したかを比較するために、SPring-8 建設時の旧技術でのシミュレーションを行う。

光源のエミッタンスは、同様なラティスを用いた場合、電子ビームのエネルギーの二乗を偏向電磁石の数の三乗で割った値に比例する。この加速器物理の基本則によれば、SPring-8 の 7 nmrad の当初エミッタンスを、同じ DBA 磁石配列を用いて 3 GeV、～1 nmrad を実現させるためには 44 セル (88 台の偏向電磁石)、周長にして約 1300 m の大型リングが必要となる。建設費の見積もりは以下のように行った。結果は【表 2-23】にまとめる。

#### 1. 電磁石：

セル数が 48 から 44 に下がったことで電磁石の台数は 90% に低減され、さらにエネルギーが 3 GeV に下がったことで素材費と加工・組み立て費用が低減することを考慮する。電磁石の製造経費は、SPring-8 の 55 億円から、37 億円と評価した。

また電磁石の電源も台数が 90% に低減され、電源容量が 1/4 程度になることを考慮し、1 台当たりの製作費は 8 GeV の 50% として算出し、SPring-8 の 9.9 億円から、約 5 億円と評価した。

#### 2. 真空系：

周長が 1,436 m から 1,300 m に短縮した割合と断面形状が縮小したことを考慮して算出し、SPring-8 の 110 億から、77 億円と評価した。

#### 3. 高周波系：

放射損失が減るため、加速空洞数を 32 台から 2 台に低減して算出し、SPring-8 の 40 億円から、3 億円と評価した。

#### 4. 制御、ビーム診断、放射線安全：

セル数の低減の割合 (44/48) で算出し、SPring-8 の 62.5 億から、57.3 億円と評価した。

#### 5. 建物：



収納部のコンクリート厚は、8 GeV で 100 mA と 3 GeV, 400 mA はビームパワー的にはほぼ同水準であるため、収納部コンクリート厚は同程度とした。周長の短縮とマシン系受変電・冷却水系の容量低減をもとに算出し、建屋は、SPring-8 の 250 億から、225 億円と評価し、受変電・冷却水は、SPring-8 の 40 億から、15 億円と評価した。

## 6. 入射器系

線型加速器は SPring-8 と同様な 1 GeV 線型加速器を想定する。建設費は、SPring-8 の 87 億と同じとする。シンクロトロンは、高周波系 (RF) を除き、エネルギー低減の割合で機器数と周長を低減し、SPring-8 の約 100 億から、37.5 億円と評価し、高周波系は必要な加速電圧が 8 GeV の 10% 以下に低減することを考慮し、SPring-8 の約 20 億から、4 億円と評価した。合計で、入射器系は SPring-8 の約 207 億から、128.5 億円と評価した。

## 7. 特高受電関係

第一、第二特高合わせて 96 MW の設備容量を、空調系設備 (26 MW) を除き加速器系の設備容量を 8 GeV から 3 GeV 対応に変更した。蓄積リング加速器系 20 MW×2 セットを 5 MW×1 セットにし、入射器系は線型加速器 5 MW を 2 MW に、シンクロトロンは 25 MW を 10 MW に変更した。これにより、定格 96 MW から 43 MW になり、建設費は、SPring-8 の 73 億円から、約 36 億円と評価した。

8. 給水棟、排水処理施設、道路外構等は、SPring-8 とほぼ同じ施設規模として、31 億円と評価した。

以上をまとめると、【表 2-20】に示したように、SPring-8 建設時の加速器科学・技術の水準で、3 GeV, 1 nrad, 400 mA の加速器システムの建設に要する費用は、概算値で 615 億円となる。ただしビームライン建設費は除く。

【表 2-20】 SPring-8 当時の技術による軟 X 線向き施設構成と経費見積（概算）

|             | SPring-8 | 旧技術軟 X 線向き施設 |
|-------------|----------|--------------|
| ラティス        | DBA      | DBA          |
| セル数         | 48       | 44           |
| 周長          | 1,436 m  | 1,300 m      |
| 電磁石         | 55 億円    | 37 億円        |
| 電磁石電源       | 9.9 億円   | 5 億円         |
| 真空系         | 110 億円   | 77 億円        |
| 高周波系        | 40 億円    | 3 億円         |
| 制御ビーム診断、安全系 | 62.5 億円  | 57.3 億円      |
| 建屋          | 250 億円   | 225 億円       |
| 受電・冷却水      | 40 億円    | 15 億円        |
| 入射器         | 207 億円   | 128.5 億円     |
| 特高受電関係      | 73 億円    | 36 億円        |
| 給排水、道路外構    | 31 億円    | 31 億円        |
| 合計（概算）      | 878.4 億円 | 614.8 億円     |

## 2. 現状の技術での軟 X 線向き施設の構成

SPring-8 建設当時の技術で、3 GeV 軟 X 線向き高輝度放射光施設を実現するためには、周長 1,300 m の SPring-8 に匹敵する大型の電子蓄積リングが必要で、建設費も 600 億円を超えることが示された。SPring-8 の建設後、技術の進歩とともに、磁石配列の一部変更やビームオプティックの低エミッタンス化により、そのエミッタンスは建設当初の 7 nrad から 2.4 nrad まで高度化が行われてきた。「A. 技術課題ヒアリング調査」でも明らかになってきたように、これまでの加速器科学・技術の進展で、コンパクトな 3 GeV 中型高輝度光源で 1 nrad のエミッタンスが可能になってきた。SPring-8 と SACLA での経験と、その間の加速器科学・技術の進展を生かし、合理的な建設費で最先端放射光ビームの実現をめざし「軟 X 線向き施設」を設計することが可能になっている。

特に、ヒアリング調査でも示されたように、海外の建設・計画中の施設で採用が予定されているマルチバンド・アクロマットラティスの採用がコンパクト化のキーテクノロジーである。本調査では、現状技術で実現できる 3 GeV, 1 nrad のリングとして、マ

ルチベンド・アクロマットの種類である4ベンド・アクロマット磁石配列を16セル配置した、周長350 mのコンパクトなリングを検討する。この技術により、周長はSPring-8建設当時の技術でのものの1/3以下にコンパクト化され、施設の建設コストも半以下になると予想される。このコンパクトな3 GeV 中型高輝度光源をベースにして、軟X線向き高輝度放射光施設建設コストの見積もりを行う。

【表2-21】に想定する軟X線向き3 GeV次世代高輝度放射光施設の加速器部分の構成と性能を示す。これまで一般的に使用されてきたダブルベンド・アクロマット磁石配列セルではなく、4ベンド・アクロマット磁石配列セルを用いることで短い周長で低エミッタンスを実現するものである。

設計における主な留意点は以下ようになる。

1) 入射器として線型加速器を採用

線型加速器の大幅なコスト低減と性能の向上、及び将来性を考慮して、入射器には線型加速器が採用されている。また、SACLAの建設のために開発されたC-band線型加速器を放射光用に最適化する事で入射器の建設経費をさらに低減してある。(これについては後ほどコスト低減効果を吟味する。)また、線型加速器からの低エミッタンス電子ビームを蓄積リングへ入射することで、蓄積リング機器のコンパクト化と建屋形状の最適化により建設費を低減する。

2) マルチベンド・アクロマット磁石配列の採用

計算機による電子軌道シミュレーションの高精度化により、蓄積リングで4ベンド・アクロマット磁石配列を設計し、1 nradを切る低電子ビームエミッタンスを実現する。

3) 高性能コンパクト電磁石の採用

小口径で高強度な収束電磁石を導入し、蓄積リングのコンパクト化と低エミッタンス電子ビームを実現する。

4) 高輝度X線の発生

$10^{21}$ 光子レベルの高輝度軟X線を真空封止型短周期アンジュレータ(周期長32mmから12mm)と電子ビームの低エミッタンス化及びビーム電流の大強度化(400 mA)で実現する。また、多極ウィグラの導入で、100keV程度までの硬X線の発生を実現する。

5) 高信頼機器の導入で安定なtop-up入射と常時利用運転を実現する。

6) 運転の自動化と省エネ化で運転経費を圧縮する。

7) 加速器と建屋系設備の統合的設計で建設・設備コストを圧縮する。

【表 2-21】 軟X線向き次世代高輝度放射光施設諸元

| 電子蓄積リング       |                                      |
|---------------|--------------------------------------|
| 電子ビームの蓄積エネルギー | 3 GeV                                |
| 周長            | 350 m                                |
| ラティス構造        | 4 ベンド・アクロマットセル                       |
| セル数           | 16                                   |
| 電子ビームのエミッタンス  | 水平方向：1.0 nmrad 程度<br>垂直方向：0.01 nmrad |
| 直線部の数         | 5.4 m 普通直線部：16<br>1.6 m 短直線部：16      |
| 線型加速器（入射器）    |                                      |
| 加速エネルギー       | 3 GeV                                |
| エミッタンス        | 0.2 nmrad                            |
| バンチ電流値        | 1 nA                                 |
| 繰返し           | 1 Hz（定格 25Hz）                        |

### 3. 現状の技術での軟X線向き施設の建設経費と運用経費

現状の技術での軟X線向き 3 GeV リングの建設予算（概算額）は、SPring-8、SACLA 等の加速器製作の実績を基に約 300～400 億円程度と見積もられる。【表 2-22】にその内訳を示すが、蓄積リング機器 90～120 億円、入射器系 65～87 億円、制御・タイミング 15～20 億円、放射線安全 5～7 億円、ビームライン 40～53 億円、建屋・付帯設備 85～113 億円である。

加速器部分の建設費の各種単価を、SPring-8 と SACLA の建設コストと比較したものを【表 2-23】に示す。【表 2-22】から加速器関連の予算を抜き出すと、蓄積リング系が制御タイミングと建屋部分を含めて 170～226 億円、入射器系が建屋部分を含めて 83～111 億円の合計 253～337 億円となる。軟X線向き 3 GeV リングの加速エネルギー当たりのコストは、蓄積リング系と入射器系で、それぞれ 56.7～75.3 億円/GeV、27.6～37.0 億円/GeV となる。また、蓄積リングを周長とセル数当たりの単価を計算すると、それぞれ 0.49～0.65 億円/m、10.6～14.1 億円/セルとなる。

蓄積リング系を比較すると、軟X線向き 3 GeV リングは、SPring-8 より加速エネルギー当たりの単価が 74～99%に、セル当たりの単価が 83～111%となっている。硬X線領域での高輝度放射光光源では、加速器物理の点から、8 GeV で 7 nmrad の低エミッ

タンス電子ビームの実現には多数のセル数の導入が不可欠であったため、蓄積リングが大型化しエネルギー当たりの単価が高くなっている。一方、軟X線領域で最適化された軟X線向き 3 GeV リングでは、1 nrad の低エミッタンス電子ビームを得るためのセル数が 16 と少なく周長が短いこと、及び低エミッタンス化にともなってセル当たりの電磁石の数が SPring-8 の 19 台から 34 台に増えたにも関わらず、機器のコンパクト化技術の進展で機器の製作費（予想額）と建屋建設費が低減したことでエネルギー当たりの単価が下がっている。

入射器部分では、SPring-8 の建設当時、線型加速器の加速エネルギー当たりの単価がシンクロトロンに比べて 4 倍と高価であったため、1 GeV 線型加速器と 8 GeV シンクロトロンで入射器を構成することで建設予算が圧縮された。しかし、SACLA で開発された C-band 型線型加速器システムの加速エネルギー当たりの単価は、SPring-8 の入射器システムから 86 % に下がっている。さらに、線型加速器のみで比較すると、その単価は 30% 以下に大幅なコストダウンが実現していることがわかる。軟X線向き 3 GeV リングでは、この技術の進展を受け、SACLA で開発された線型加速器を入射器として最適化して導入することを想定する。その結果、線型加速器のエネルギー単価は SPring-8 の時の約 28~38% になり、入射器全体の建設費エネルギー単価は SPring-8 の 84~112% とほぼ同等になることが予想される。また、線型加速器のみを入射器として使用することで、シンクロトロンによる入射よりも運転経費の低減が可能になる。C-band 型線型加速器を使用せずに、3 GeV の S-band 型線型加速器を使用した場合は、建設経費は入射器だけで約 300 億円となる。シンクロトロンを選択した場合は、その建設コストは、エネルギー単価から計算して最小で約 75 億円程度と見積もられ、C-band 型線型加速器のコストの 90% 程度になると考えられる。

想定する軟X線向き放射光施設の電力使用量の見積もりを【表 2-24】に示す。周長約 350 m、建物は 180 m×180 m 程度のリング状で建物面積 15,000m<sup>2</sup> を想定する。放射光使用時と不使用時の平均消費電力は、それぞれ 3.2 MW と 1.0 MW とされている。この値は、すでに省エネ化された電磁石の利用などが想定されたものである。年間の稼働日数を 365 日、稼働時間 8,760 時間とし、稼働時間のうち放射光使用 6,000 時間、不使用 2,760 時間とすると、年間電力使用量は 22.0 GWh となる。この値から見積もった電気使用料金を【表 2-25】に示す。表の通りに、運用電力コストは概算で年間 3.9 億円程度と見積もられる。

【表 2-22】軟X線向き高輝度放射光施設の建設経費（概算）

| 項目                       |        | 経費（単位億円） |
|--------------------------|--------|----------|
| 蓄積リング機器<br>（計 90～120 億円） | 磁石・架台  | 47～63    |
|                          | 真空系    | 24～32    |
|                          | 高周波    | 9～12     |
|                          | ビーム診断  | 10～13    |
| 制御・タイミング                 |        | 15～20    |
| 放射線安全                    |        | 5～7      |
| 入射系<br>（計 65～87 億円）      | 入射器    | 60～80    |
|                          | ビーム輸送  | 5～7      |
| 建屋付帯設備<br>（計 85～113 億円）  | 蓄積リング部 | 65～86    |
|                          | 入射器部   | 18～24    |
|                          | その他    | 2～3      |
| ビームライン                   |        | 40～53    |
| 合計                       |        | 300～400  |

\* 経費は概算値であり、詳細検討により増減があり得る。また、特高変電、地盤改良、研究交流棟、食堂などの付帯設備に係る費用は含まない。

【表 2-23】 加速器建設費の各種単価の比較（概算）

|              |                             | SPring-8  | SACLA  | 軟X線向き<br>3 GeV リング |
|--------------|-----------------------------|-----------|--------|--------------------|
| 加速器全体（実行ベース） |                             | 873 億円    | 226 億円 | 253～337 億円         |
| 内            | 蓄積リング系予算                    | 608 億円    | —      | 170～226 億円         |
|              | エネルギー単価（億円/GeV）             | 76        | —      | 56.7～75.3          |
|              | 周長単価（億円/m）                  | 0.42      | —      | 0.49～0.65          |
|              | セル単価（億円/セル数）                | 12.7      | —      | 10.6～14.1          |
| 訳            | 入射器系予算                      | 98+167 億円 | 226 億円 | 83～111 億円          |
|              | 加速エネルギー単価<br>（億円/GeV）       | 33        | 28.2   | 27.6～37.0          |
|              | 加速エネルギー単価<br>線型加速器分（億円/GeV） | 98        | 28.2   | 27.6～37.0          |

【表 2-24】 軟X線向き施設の電力使用量（概算）

| 項目      | 施設の仕様と電力  |                     |           |
|---------|---|---------------------|-----------|
| 蓄積リング   | ビームエネルギー：3 GeV, 周長：約 350 m                        |                     |           |
| 建物      | 180 m×180 m、面積 15,000 m <sup>2</sup>              |                     |           |
| 年間稼働時間  | 8,760 h (365 day×24 h) (放射光使用 6,000h, 不使用 2,760h) |                     |           |
| 使用電力    | 放射光使用時  | 平均 3.2 MW, 6,000h/年 | 最大 4.0 MW |
|         | 不使用時  | 平均 1.0 MW, 2,760h/年 |           |
| 年間電力使用量 | 22.0 GWh/年 (1.47 MWh/m <sup>2</sup> /年)           |                     |           |

【表 2-25】 軟X線向き施設の予想電力料金（\*単価は、国内電力会社概算値を使用）

| 項目              | 単価           | 数量         | 電力料金                     |
|-----------------|--------------|------------|--------------------------|
| 基本料金            | 1,700 円/kW/月 | 3.0 MW 契約  | 5.1 百万円/月<br>(0.61 億円/年) |
| 従量              | 15 円/kWh     | 22.0 GWh/年 | 3.3 億円/年                 |
| 軟X向き施設の年間電力料金合計 |              |            | 3.9 億円/年                 |

#### 4. 本調査での技術課題を取り入れた場合の建設経費と運用経費

前項では、現状の技術での新規整備経費を約 300～400 億円程度、年間の電力料金を約 3.9 億円と見積もった。これに本調査でオプションとして考慮すべき技術課題をコストの面から検討する。検討結果は【表 2-26】にまとめる。

##### 永久磁石を利用した磁石システムの採用

電磁石の消費電力は、全電力の 15%程度 の 3.3 GWh/年と見積もられる。電磁石の中で永久磁石への交換が考えられているのは主にベンディングマグネットで消費電力は全電力の 3%強と想定される。したがって、永久磁石利用による電力コスト低減効果は、年間 0.66 GWh で年間約 0.1 億円と見積もられる。永久磁石導入による初期コストの増加（電磁石との差額）は、電源やケーブルが削減できることを考慮するとほとんどないと考えられる。ただし、導入までには R&D 経費が別途必要になる。

##### 高周波発生器の消費電力低減、新しいコンパクト高周波空洞の採用

高周波系の消費電力は、全電力の 50%程度 の約 11 GWh と見積もられる。クライストロンから半導体素子を使った電源に置き換えることで 10%、さらに新しいコンパクト高周波空洞を開発採用することで 10%、合わせて 20%の電力低減を想定する。したがってトータルでは、年間 2.2 GWh で年間 0.33 億円程度のコスト低減が期待できる。初期コストを見積もることは難しいが、ここでは現状のものからのコスト増はほとんどないと考える。ただし、導入までには R&D 経費が別途必要になる。

先に硬 X線向き施設のところでも述べたように、半導体素子への置き換えや、コンパクト空洞の採用で消費電力を低減するためには、まだまだ R&D が必要である。

##### 先端環境技術による電力コストの低減

前節で検討した環境技術を 3 MW 契約年間使用電力 22.0 GWh を基準として電力コスト低減を見積もる。まず、太陽光発電とコジェネ発電は、1.0 MW で見積もった。太陽光発電に関しては、初期コストの回収に耐用年数の 20 年に近い年月がかかるが、CO<sub>2</sub>削減効果というメリットも考慮すべきであろう。コジェネ発電によるコスト低減は、約 63 百万円/年程度であり、初期コストを 3 年程度で回収できることがわかる。FEMS は、約 16.5 百万円/年の低減で約 13 年で回収でき、LED 照明は約 28 百万円/年で 2 年で回収可能である。

##### 利便性向上によるコスト低減

安定して使いやすい制御系を実現するために、制御ソフトウェアを導入する。初期コスト 100 百万円とするが、これにより効率的な運転が可能になり、運転のための人件費を 2 名分程度低減できると想定する。



【表 2-26】本調査結果の基づく軟X線向き施設のコスト低減効果

| 項目      | 初期整備コスト    | 削減量        | 低減コスト                          | 回収年          |      |
|---------|------------|------------|--------------------------------|--------------|------|
| 永久磁石の利用 | 0 (R&D 別途) | 0.66 GWh/年 | 約-10 百万円/年                     | -            |      |
| 高周波系    | 0 (R&D 別途) | 2.2 GWh/年  | 約-33 百万円/年                     | -            |      |
| 環境技術    | 太陽光発電      | 280 百万円    | -1,000 MWh/年                   | -15 百万円/年    | 19 年 |
|         | コジェネ発電     | 164 百万円    | -8,500 MWh/年<br>(コスト 10 円/kWh) | -63 百万円/年    | 3 年  |
|         | FEMS       | 200 百万円    | -1,100 MWh/年                   | -16.5 百万円/年  | 13 年 |
|         | LED 照明     | 45 百万円     | -1,700 MWh/年                   | -28 百万円/年    | 2 年  |
|         | 合計         | 689 百万円    | -12,300 MWh/年                  | -122.5 百万円/年 | 6 年  |
| 運転制御ソフト | 100 百万円    | -2 人/年     | -10 百万円/年                      | 10 年         |      |
| 総計      | 789 百万円    | -          | -175.5 百万円/年                   | 5 年          |      |

#### 5. SPring-8 建設当時、現在、本技術課題調査による建設経費と運用経費の比較

以上の軟X線向き施設整備のシナリオによる建設・運用コストの比較結果を【表 2-27】にまとめる。運用コストは、SPring-8 当時の技術による案と現状技術による案においては建設費の 8%程度、それぞれ 49 億円と 24 億円と想定し、それを電力料金と人件費や維持管理費を含むその他に分けて考える。現状の技術によるものに比べて、本調査結果を反映したものは、初期コストが約 8 億円増加するが、毎年の運用経費が約 1.7 億円低減されるので、ほぼ 5 年で回収できることがわかる。

【表 2-27】軟X線向き施設のコストの比較（概算）

| 項目               | SPring-8 当時 | 現状      | 本調査     |
|------------------|-------------|---------|---------|
| 建設費（億円）          | 614.8       | 300～400 | 308～408 |
| 運用コスト<br>（億円/年）  | 電力料金        | 12      | 3.9     |
|                  | その他         | 37      | 20.1    |
| 建設費+5年運用コスト（億円）  | 859.8       | 420～520 | 419～519 |
| 建設費+10年運用コスト（億円） | 1104.8      | 540～640 | 531～631 |

\* 必要経費は概算値であり、詳細検討により増減があり得る。また、特高変電、地盤改良、研究交流棟、食堂などの付帯設備に係る費用は含まない。

## 6. 世界の軟X線向き放射光施設との比較

加速器の構成や当初予算内でのビームラインの数、及び発注の形態や人件費、及び為替レート等に曖昧なところは残るが、世界の 3 GeV 中型高輝度放射光施設での建設費（一般的公表されている建屋等を含む総額）をもとに、前述した各種単価及び輝度当たり単価相対値（総額に輝度に反比例するエミッタンスを乗じた値であり、輝度単価に比例する）を比較したものが【表 2-28】である。表では「次世代 3 GeV リング」を、米国の NSLS-II、台湾の TPS、英国の DIAMOND、オーストラリアの Aus-SR と比較してある。

「次世代 3 GeV リング」は、周長当たり、及びセル当たりの単価では世界の施設とほぼ同一の水準にある。台湾の最新鋭高輝度施設である TPS は、周長当たり、セル数当たりの単価のいずれもが「次世代 3 GeV リング」より低く抑えられている。これは TPS の建設が、研究施設内での機器の内作と既存サイト内に建設することで電気等設備機器の共有化が図られた結果、建設費が抑制されているものと思われる。また、セル当たりの単価で Aus-SR がやや低いが、これは短い周長でより小さなエミッタンスを実現するためセル数を増やした結果である。

「次世代 3 GeV リング」でのエミッタンスは、他の施設に比べてセル数と周長が小さい割に 1.0 nmrad と小さい。そのため輝度当たり単価相対値は、完成間もない最新鋭の中型高輝度リングの NSLS-II や TPS の 80 %以下と低い値になり、コストパフォーマンスが高い施設設計とすることができる。

このように、蓄積リングにおけるマルチバンド・アクロマツト磁石配列の採用と機器のコンパクト化、及び入射器システムの最適化等に、我が国の最先端加速器科学・技術を駆使する事で、世界最高水準の低エミッタンスリングを低いコストで実現することが可能である。

【表 2-28】世界の高輝度軟X線向き放射光施設の建設コスト（概算）

|                               |                | 次世代<br>軟X線向き          | NSLS-II<br>(米国)<br>(2015)                | TPS<br>(台湾)<br>(2015)                  | DIAMOND<br>(英国)<br>(2006)             | Aus-SR<br>(豪州)<br>(2007)               |
|-------------------------------|----------------|-----------------------|--|--|---------------------------------------|--|
| 建設費<br>(現地通貨)<br>[含まれるビームライン] |                | 308~408<br>億円<br>[7本] | 1,003億円<br>(\$912M) <sup>1</sup><br>[6本] | 246億円<br>(\$224M) <sup>2</sup><br>[0本] | 579億円<br>(£263M) <sup>3</sup><br>[7本] | 243億円<br>(\$221M) <sup>4</sup><br>[0本] |
| エネルギー単価<br>(億円/GeV)           |                | 103~136               | 334                                      | 82                                     | 193                                   | 81                                     |
| 周長単価 (億円/m)                   |                | 0.88~1.17             | 1.82                                     | 0.47                                   | 1.03                                  | 1.13                                   |
| セル単価 (億円/セル数)                 |                | 19.3~25.5             | 33.4                                     | 10.3                                   | 24.1                                  | 17.4                                   |
| 輝度あたり単価<br>(nmrad・億円)         |                | 308~408               | 552                                      | 394                                    | 1563                                  | 2430                                   |
| 諸<br>元                        | エネルギー (GeV)    | 3                     | 3  | 3                                      | 3                                     | 3                                      |
|                               | 周長 (m)         | 350                   | 550                                      | 518                                    | 561                                   | 216                                    |
|                               | セル数            | 16                    | 30                                       | 24                                     | 24                                    | 14                                     |
|                               | エミッタンス (nmrad) | 1.0                   | 0.55                                     | 1.6                                    | 2.7                                   | 10                                     |

1) National Synchrotron Light Source II Project Lessons Learned, Aug. 2015 (Brookhaven National Laboratory)より.

2)報道記事、“Taiwan Photon Source expected to boost nanotech research”. Want China Times. 26 January 2015 より.

3) NEDO 海外レポート No.1076、関連詳細資料 3-1 (英語資料”About Diamond What is Diamond Light Source?”の翻訳)より.

4) Australian Synchrotron ホームページ (<http://www.synchrotron.org.au/about-us/history>)より.

\*US\$1=110円(2007年、2015年)、£1=220円(2006年)として計算。

## 2-6. 施設整備のシナリオとそのメリット・デメリット

### 2-6-1 施設整備シナリオの策定

先に、硬X線向きの既存施設アップグレードと、軟X線向き施設の新規整備のそれぞれのシナリオを検討した。この章では、今後の我が国の放射光利用科学の将来を見越して、硬X線向き施設整備と軟X線向き施設整備の組合せのシナリオを検討する。本調査では、以下の5種類のシナリオの検討と評価を行う。

シナリオ1：硬X線向き施設アップグレードのみ行う

シナリオ2：軟X線向き施設の新規整備のみ行う

シナリオ3：硬X線向きリングアップグレード後に軟X線向きリングを整備

シナリオ4：軟X線向きリング整備後に硬X線向きリングをアップグレード

シナリオ5：軟X線向きリング整備を先行し、時期を重ねて硬X線向きリングをアップグレード

5つのシナリオの工程表を【表 2-29】にまとめる。グレーの矢印が整備に係るもので紫の矢印が硬X線施設が利用できる期間（細いものが既存施設によるもの、太いものがアップグレード後）、青の矢印が軟X線向き施設が利用できる期間を示している。グレーの領域は、光が利用できない期間を示しており、黄色の領域は、整備により、硬X線向き施設と軟X線向き施設の両方の高輝度X線が利用できる期間を示す。

【表 2-29】 5 つのシナリオの工程表

|        |          | 初年度        | 2年目 | 3年目 | 4年目     | 5年目     | 6年目        | 7年目 | 8年目 | 9年目 |
|--------|----------|------------|-----|-----|---------|---------|------------|-----|-----|-----|
| シナリオ 1 | 硬X線 UG   | 設計         | 製作  |     | 据付, 調整  |         | 運用         |     |     |     |
|        | 軟X線 整備無し |            |     |     | シャットダウン |         |            |     |     |     |
| シナリオ 2 | 硬X線 現状維持 |            |     |     |         |         |            |     |     |     |
|        | 軟X線 新規整備 | 設計, 建屋, 製作 | 調整  |     | 運用      |         |            |     |     |     |
| シナリオ 3 | 硬X線 UG   | 設計         | 製作  |     | 据付, 調整  |         | 運用         |     |     |     |
|        | 軟X線 新規整備 |            |     |     | シャットダウン |         | 設計, 建屋, 製作 | 調整  | 運用  |     |
| シナリオ 4 | 硬X線 UG   |            |     |     | 設計      | 製作      | 据付, 調整     |     | 運用  |     |
|        | 軟X線 新規整備 | 設計, 建屋, 製作 | 調整  |     | 運用      |         | シャットダウン    |     |     |     |
| シナリオ 5 | 硬X線 UG   |            | 設計  | 製作  |         | 据付, 調整  | 運用         |     |     |     |
|        | 軟X線 新規整備 | 設計, 建屋, 製作 | 調整  |     | 運用      | シャットダウン |            |     |     |     |

## 2-6-2 施設整備シナリオの検討

以下にそれぞれのシナリオについて検討の詳細を示す。5つのシナリオの検討結果のまとめを【表 2-30】に示す。軟X線施設の建設費は【表 2-27】に示した約 308～408 億円を使用した。

### シナリオ 1 :

#### 硬X線向き施設アップグレードのみ行う

このシナリオの詳細は、2-5 章で詳細に述べた通りであり、アップグレードの経費は 429 億円と見積もられている。硬X線向きの高いビームエネルギーの蓄積リングのアップグレードは、利用ユーザーのための硬X線の高度化が主な目的となる。整備スケジュールは【表 2-29】に示した通り、5年程度が見込まれており、最後の1年程度は既存施設のシャットダウンが必要になる。国内の硬X線向きリング SPring-8 の世界的競争力が回復し、しばらくは競争力維持が可能になる。既存施設のアップグレードなので投資効率も良い。

デメリットとしては、

- ・軟X線領域のニーズに応えることも要求され、硬X線向き施設としての高度化が不十分になる恐れがある。

- ・1年の高輝度放射光のブラックアウトを招く。

などが挙げられて、ユーザーの研究の遅れが懸念されるシナリオとなる。

### シナリオ 2 :

#### 軟X線向き施設の新規整備のみ行う

2-5 章で検討したようにこの場合の整備の経費は約 308～408 億円である。整備スケジュールは【表 2-29】に示した通り、整備期間は3年程度が見込まれている。「ニーズ調査」からもわかるように軟X線領域の高輝度放射光の要望は大きく、利用者のニーズに応えることができる。軟X線領域の光源の先端性能は一時的に海外と対等になる。

デメリットとしては、

- ・硬X線向き施設の高度化が行われなため、国内の硬X線利用研究の世界的競争力が失われる。

- ・軟X線向き1施設だけでは、さらなる低エミッタンス化を追求する光源開発で海外に遅れをとる。

- ・X線自由電子レーザーの光源性能との協奏的活用の機会を失う。

- ・他の高輝度放射光施設が整備されないため、相補的で協働関係な研究ネットワークが構築されない。

などが挙げられる。

### シナリオ3：

#### 硬X線向きリングアップグレード後に軟X線向きリングを整備

【表 2-29】に示されているように、硬X線向きリングのアップグレードを先行する場合、はじめの5年間のアップグレード時はシナリオ1とほぼ同じメリット、デメリットが考えられる。また、後半の軟X線リングの新設では、アップグレードで培った技術や、磁石などのコンポーネントを活用することで、軟X線の光源性能の先端性を確保しつつ、調達の共通化である程度コストダウンを図ることが可能になると考えられる。また、建設に係る人員を二つの整備に効率的に配置することで人件費を低減できる可能性があり、異なる装置建設を連続的に進めることによって、幅広い経験と知識を持った人材育成に寄与すると思われる。

前半の硬X線向きリングのアップグレードでは、コンポーネントはほぼ新規開発になると考えられるので、特に大きなコスト低減はないと思われる。後半の軟X線向きリング整備では、アップグレードで培った技術を活用したコンポーネントのコスト低減、磁石などのコンポーネントの量産効果によるコスト低減、そして設計や建設にかかる人材の効率化を加味して、建設費の低減を3%と想定する。したがって、建設費は約308～408億円から約299～396億円となる。

このシナリオでは、硬X線向きリングアップグレード期には、国内で高輝度放射光のX線が全く使用できない状況が1年程度続くため、ユーザーにとっては研究が止まってしまう可能性がある。また、ユーザーから早期整備が望まれている先端軟X線施設の利用開始までに8年以上待つ必要があり、その間軟X線利用研究が全く進まず、また完成した時には施設性能が陳腐化している可能性がある。

### シナリオ4：

#### 軟X線向きリング整備後に硬X線向きリングをアップグレード

軟X線向きリングを先行して整備し、完成後に硬X線向きリングアップグレードを行う。【表 2-29】に示したように、初めの3年間のアップグレード時はシナリオ1とほぼ同じメリット、デメリットが考えられる。このシナリオでは、後半の硬X線向き施設のアップグレード時には、軟X線向き施設が稼働しているので、国内で高輝度放射光のX線が使用できない期間を設けないシナリオになる。軟X線向きリングでも現状のSPring-8に準じる輝度の硬X線が利用できるため、ユーザーの不便を最低限に止め、国内における研究や分析に深刻な遅れは生じない。

この場合、磁石などのコンポーネントを共通にすることで、硬X線、軟X線の双方の光源性能の先端性を確保しつつ、調達の共通化である程度コストダウンを図ることが可能になる。また、建設に係る人件費も工夫により低減できる可能性があり、異なる装置建設を同時期に進めることによって、幅広い経験と知識を持った人材育成に寄与すると思われる。また、二つの施設間の階層化されたアライアンスが既存の施設を含めるかたちで構築可能となるなどのメリットがある。

軟X線向きリング整備時に、後半の硬X線向きリングアップグレードのコンポーネントへの流用を見越した設計を行うことで全体としてのコスト低減、磁石などのコンポーネントの量産効果によるコスト低減、そして設計や建設にかかる人材の効率化を加味して、アップグレード経費の低減を3%と想定する。したがって、アップグレード経費は429億円から約13億円低減して416億円となる。

#### シナリオ5：

##### 軟X線向きリング整備を先行し、時期を重ねて硬X線向きリングをアップグレード

【表2-29】に示したように、シナリオ5では、軟X線向き施設の整備を先行して着工して、1年程度遅れて、硬X線向き施設のアップグレードに取り掛かる。新設とアップグレードとを時期を調整しながら整備することで、コンポーネント調達や技術の共通化を図りながら、国内で高輝度放射光のX線が使用できない期間を設けないシナリオである。軟X線向きリングの完成後に硬X線リングが休止になるように整備を行うことで研究の継続性が確保される。

他のシナリオに比較して、先端軟X線光源の整備と硬X線光源の両方の高度化が最も早く実現するシナリオである。

この場合、磁石などのコンポーネントを共通にすることで、調達の共通化である程度コストダウンを図ることが可能になる。また、建設に係る人件費も工夫により低減できる可能性があり、異なる装置建設を同時期に進めることによって、幅広い経験と知識を持った人材育成に寄与すると思われる。また、二つの施設間の階層化されたアライアンスが既存の施設を含めるかたちで構築可能となるなどのメリットがある。

ただし、他のシナリオに比べて整備時期が重なるために、資材不足、人材不足などが危惧される。そのため資材不足、人材不足などが起こらないように、二つの施設の整備工程を綿密に調整する必要がある。これを達成するという条件の下で、本シナリオのコスト削減効果は少なくとも本調査時点ではシナリオ4相当と想定するのが妥当と考える。したがって、アップグレード経費は429億円から約13億円低減して416億円となる。



【表 2-30】シナリオの比較

|        | 先         | 後         | 整備費<br>(億円) | コスト低減<br>要素                        | メリット   | デメリット  |
|--------|-----------|-----------|-------------|------------------------------------|--|--|
| シナリオ 1 | 硬 X<br>UG | -         | 429         | 追加の低減要素は特にない                       | ○新設よりコストパフォーマンスが高い<br>○硬 X 線の高度化<br>△加速器関連技術の進展が期待                                       | × 1 年間の高輝度 X 線のブラックアウト<br>× 軟 X 線先端光源の欠如<br>× 軟 X 線をカバーするために硬 X 線を妥協                           |
| シナリオ 2 | 軟 X<br>新規 | -         | 308<br>~408 | 追加の低減要素は特にない                       | △整備の経費は硬 X 線整備より安い<br>○海外と対等な軟 X 線先端性能   | × 硬 X 線の競争力低下<br>× 硬 X 線利用マシンタイム逼迫<br>× 競争力のあるリングが 1 施設のみでは海外に遅れる<br>× 施設間の相補的な協働ができない         |
| シナリオ 3 | 硬 X<br>UG | 軟 X<br>新規 | 728<br>~825 | ○先行施設の技術流用<br>△調達の共通化<br>○人員の効率的配置 | ○連続的整備によるコスト低減<br>○硬 X 線の高度化<br>△海外と対等な軟 X 線先端性能<br>○施設間アライアンス                           | × 1 年間の高輝度 X 線のブラックアウト<br>× 先端軟 X 線の利用開始の先送り<br>× 5 年以上軟 X 線分野で世界に後れる<br>× 軟 X 線光源は完成時に陳腐化のおそれ |
| シナリオ 4 | 軟 X<br>新規 | 硬 X<br>UG | 724<br>~824 | ○先行施設の技術流用<br>△調達の共通化<br>○人員の効率的配置 | ○高輝度 X 線のブラックアウトが生じない<br>○連続的整備によるコスト低減<br>○海外と対等な軟 X 線先端性能<br>△硬 X 線の高度化<br>○施設間アライアンス  | △硬 X 線の高度化が遅れる   |
| シナリオ 5 | 軟 X<br>新規 | 硬 X<br>UG | 724<br>~824 | ○技術の共用<br>○調達の共通化<br>△人員の効率的配置     | ○高輝度 X 線のブラックアウトが生じない<br>○調達の共通化によるコスト低減<br>○海外と対等な軟 X 線先端性能<br>○硬 X 線の高度化<br>○施設間アライアンス | △進行状況によっては資材不足、人材不足  |

\* 整備費は概算値であり、詳細検討により増減があり得る。また、軟 X 線向き施設整備費には特高変電、地盤改良、研究交流棟、食堂などの付帯設備に係る費用は含まない。

### 2-6-3 国内放射光施設を融合した分散型プラットフォームの検討

2-2-2 節で示した様に、多くの国内の放射光施設を相補的に運用する「分散型放射光プラットフォーム」の考え方が次世代への課題として示されている。前節で示したシナリオでも、硬X線向き光源と、軟X線向き光源の両方の整備を行う場合、あらかじめ分散型放射光プラットフォームに組み込んで整備を行うことで運営や研究リソースの効率化が期待できる。

例えば、ユーザーサポートを設計する部門や研究開発部門を有機的に統合してそれぞれ効率的にテーマを分散して運用や開発を行えば、その経費を低減することも可能になる。ユーザーサポートと研開発部門のリソースと人材を、二つの施設で共有し分担することで二つの施設を合わせた初期整備費と運用費の低減が期待できる。

さらに、こうした放射光プラットフォームを中核とし、中性子ビームやレーザーなどの多彩な量子ビームをも相補的に利用することで、新たな科学技術・産業フロンティアの開拓に貢献する我が国の量子科学技術基盤を形成することが次世代科学技術戦略の課題でもある。

## 2-7 まとめ

本研究委託事業「次世代放射光施設に係る技術課題調査」は、平成 26 年度にまとめられた文部科学省「次世代放射光施設検討ワーキンググループ」報告書と文部科学省委託調査「次世代放射光施設に関するニーズ調査」の結果を踏まえ、高輝度の低エミッタンスリングが強く求められている次世代放射光施設構想の具体化にあたって検討が必要な技術的観点に関する調査を行ったものである。本調査は、第一部にまとめられたヒアリング調査と、それを踏まえて行った総合調査からなる。

第一部ヒアリング調査は、硬 X 線向き放射光施設と軟 X 線向き施設に関して行われ、それらに共通の技術課題と、それぞれに固有の技術課題として調査が行われた。複数の外部の専門家が外部アドバイザーに選定され、調査の内容と調査対象者の選定に関してアドバイスが行われた。ヒアリング調査対象者は、4 種類のカテゴリーからそれぞれの専門家が選定された。ヒアリング調査は、はじめに書面による事前調査が行われ、その結果を基にヒアリング会議および、個別ヒアリングなどが行われた。ヒアリングの事前調査結果、ヒアリング会議後に対象者に提出いただいた意見書・ヒアリング概要ペーパーは第三部に綴じられている。

ヒアリング調査では、様々な分野に関連している多数の調査対象者より、様々な技術課題が挙げられた。それらは第一部の 1-6 章で分析されて、重要とされたものが第一部の【表 1-3】と【表 1-4】に、コストに関するものが【表 1-5】にまとめられた。第一部のヒアリング調査により、次世代の低エミッタンス高輝度放射光リングを実現するためには、密接に関連し合った様々な技術課題が存在することが明らかになった。また、それら技術課題を解決するために研究開発が進められていることも示された。

第二部の総合調査では、第一部のヒアリング調査を踏まえ、加えて、これまでの放射光整備の経緯やユーザー視線の要望も総合的に分析することで、次世代放射光施設の整備に期待されている要素技術とその課題の総合的な調査を行ったものである。

報告書の第一部にまとめられたように、次世代放射光施設に要求される低エミッタンスビームは、マルチバンド・アクロマット方式と呼ばれる新しい磁石配列を用いることで、これまでよりもコンパクトな電子蓄積リングを用いて合理的なコストの範囲で実現可能であることが示された。その低エミッタンス電子蓄積リング実現のためには、お互いに関連しあった要素技術課題が多数存在し、それらを総合的に課題解決していくことが求められる。例えば、電磁石の製作精度や据付精度、熱負荷対策などの課題は、現在の技術の高度化や新しい技術の開発で対応して行く必要がある。

本総合調査では、はじめに 2-2 章で示したように、我が国の放射光施設の現状と課題を洗い出し、ヒアリングで得られた要素技術課題を低エミッタンスリング実現に必須な課題と、コストの削減などのために実現を目指すべき課題、ユーザーのニーズに直結するエンドステーションの性能を高めるための課題、そしてユーザーの利便性を向上するための課題に分類整理した。さらに、ユーザーのニーズに応える課題の整理も行った。また、2-3 章では、

SPring-8 の建設から、X線自由電子レーザー-SACLA の建設までの経緯と、それぞれの経費を分析することで、ヒアリング調査では欠けていた加速器技術進展の時間軸の視点を追加した。

2-4 章では、整備シナリオの設定の観点とされた、施設性能、施設の運用開始時に最低限備えておくことが必要なコンポーネント、整備当初から将来のアップグレード計画を見越して設計すべきコンポーネント、設計・建設その他の施設整備に係るタイムスケジュール、施設整備の各工程に係る必要経費、その他の研究開発や運営・マネジメントに関するリソース、建設・運営における経費低減の7つの観点から、シナリオに取り入れるべき項目が検討された。

以上の分析に基づき、2-5 章では、硬X線向き放射光施設に関しては既存大型施設のアップグレードを選択肢と考え、軟X線向き放射光施設に関しては中型施設の新設が選択肢として想定された。それぞれについて個別に整備した場合のシナリオを、約20年前のSPring-8建設当時の技術による整備、現在の技術での整備、本調査で明らかになった次世代の技術課題を解決して取り入れた場合の整備について比較検討が行われた。それぞれのシナリオ、場合について、整備コスト、電気料金などの運用コストが検討され、運用から5年経過までの総コスト、10年までの総コストが硬X線向き施設に関しては【表 2-19】に、軟X線向き施設【表 2-27】にまとめられている。

2-6 章では、それぞれの施設を個別に整備したシナリオから、一步踏み込んで、それらを整備しなかった場合、それらを同時、または続けて整備した場合のシナリオが検討された。コンポーネントの共通化によるコスト低減と、リソース不足、人材不足によるコスト増加などの考慮が行われた。最後に、各地に分散して整備されている国内の放射光施設群の次世代の研究運営形態として、分散型放射光プラットフォームのシナリオも検討された。【図 2-2】に示したように、国内に分散している硬X線向きの大型施設、軟X線向きの中型施設、そして小型施設からなる放射光施設群を、先端性や汎用性、学術用途、企業用途などで階層的に整理し、研究・運営に関してアライアンスを形成することで、国全体として幅広い波長領域・利用者層・利用形態をカバーすることが可能になる。一つの施設に多くのことを負担させるのではなく、個々の施設の特色を際立たせた上で、複数施設間で光源性能・施設運営に関する効果的なアライアンス形成をにつなげていくことにより戦略的な放射光利用が可能になると考えられる。

以上のように、ユーザーのニーズを満たす世界最高の高輝度X線を発生する次世代放射光施設構想を具現化するために、第一部では技術課題のヒアリング調査が行われて、第二部では技術課題の総合的な調査が行われた。本総合調査結果は、硬X線向き施設においても軟X線向きリングにおいても、要求される高輝度X線を発生するための施設を合理的なコストで整備できることが示されている。ただし、現状で想定される技術を使用した施設では数年後には施設性能が陳腐化してしまうことが危惧される。整備無くしては、技術の継承や高度化もままならないため、放射光を利用した研究で世界的な競争力を回復・維持するためにも、硬X線向き施設と軟X線向き施設の早急な整備が待たれる。

また、ユーザーの真のニーズは放射光施設が整備されることではなく、それによりナノ領域解析、短時間測定、オペランド解析、高分解能測定、多変数測定解析、高スループット測定解析などが提供されることである。そのためには、施設の整備と共に、光学系やエンドステーション部分の R&D に投資していくことも重要である。