

KEK 放射光計画における建物・設備の検討状況

STUDY SITUATION ON BUILDINGS AND FACILITIES OF KEK-LS PROJECT

芳賀開一#, 中村典雄, 多田野幹人, 小山篤, 豊島章雄, 松岡亜衣, 五十嵐教之

Kaiichi Haga #, Norio Nakamura, Mikito Tadano, Atsushi Koyama, Akio Toyoshima, Ai Matsuoka, Noriyuki Igarashi
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

KEK-Light Source (KEK-LS) is a future project of Photon Factory (PF) which is aimed at constructing a cutting-edge synchrotron radiation facility with 3 GeV storage ring. In the conceptual design report (CDR), first draft of buildings and various facilities are proposed, and we report some study situation in progress.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)・放射光科学研究所施設(フォトンファクトリー、PF)は、1982年の運転開始以来長年にわたり日本における中心的な放射光施設の一つとして、放射光共同利用実験を行なってきた。現在KEKにおいてはPFの将来計画として、PFリングとPF-ARリングの後継となる3GeVクラスの世界最先端蓄積リング型高輝度光源施設(「KEK放射光」、KEK-LS)の実現を掲げ、その具体化の第一歩として昨年概念設計書(Conceptual Design Report、CDR)を発表し、更に本年5月には加筆・修正版(CDR1.1)が公開されている。[1]

リングの詳細やビームラインの配置、入射器などまだ完全には定まっていない点も多いが、建物や設備についても様々な検討が開始されている。これら建物・設備の検討は、KEK-LSの持つ性能を十分に発揮させるために不可欠であり、建物の変形や振動に対する安定性や冷却水・空調温度の安定度を確保する上でも重要である。本稿では、KEK-LSの建物・設備の検討の状況について報告する。

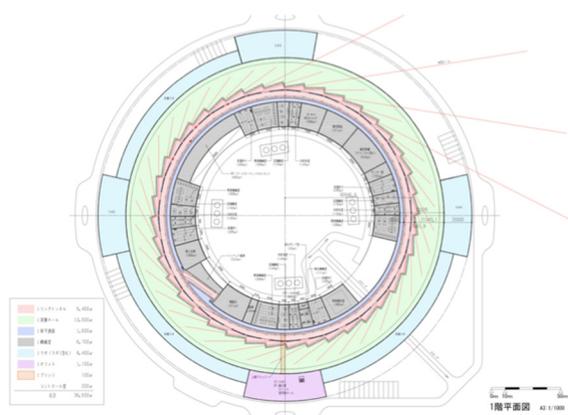


Figure 1: Plan view of the KEK-LS buildings.

2. 建物の構成・配置

現在考えられている建物の配置・構成の案を図1に示す。図1はその平面図で、光源棟(リングトンネル+実験

ホール)・機械棟・保守通路・オフィス・外周ラボなどで構成される。

光源棟は周長約570mの光源リング、入射器(ライナック+シンクロトロン)及び多数の放射光ビームラインが設置される実験ホールを含んでいる。図2に建物の断面図を示す。この断面図では、リングトンネル側壁は1m厚を、床のコンクリート厚は躯体1m厚+増し打ちコンクリート40cm厚を、ビームラインの床は60cm厚+増し打ちコンクリート30cm厚をそれぞれ想定して描いているが、今後の放射線遮蔽計算や振動解析の検討結果やコストパフォーマンス等を踏まえて決定することになる。光源棟の床は、地下30-50mに存在するN値(標準貫入試験値)50以上の硬い層に直接打たれた多数の杭(パイル)によって支持される。実験ホールの床はマットスラブ構造を採用し、床のコンクリートを厚くすることで床の剛性を強化する。光源棟は直径200mを越える大規模構造であるが、リングトンネルと実験ホールとは一体構造とする。ただし、図2に示されているように、日照・外気温の変化・風雨などによる変形や外からの振動を極力遮断するために、このリングトンネルと実験ホールの床は、建物の屋根及び側壁とは構造的に切り離されている。同様に実験ホール外周部も、リングやビームライン部と切り離されており、人の移動や物の運搬に使用される。リングトンネルの内側には保守通路を設け、光源リング及び入射器用機器類の制御用ラックなどを設置する。

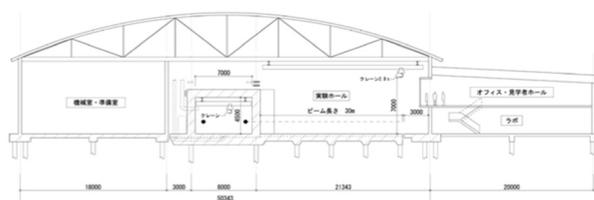


Figure 2: Cross-sectional view of the KEK-LS.

図2にはまた実験ホールとリング内の2台のクレーンが示されているが、これらのクレーンを1台の共用クレーンで兼ね、リングトンネルの天井を機器の搬入のために取り外しができるようにする案も考えられている。更に機器類の搬入のために、光源棟の内側と外側を結ぶトンネルが設けられ、機器を搭載した車両が光源棟内側にアクセスできるようになっている。

kaiichi haga@kek.jp

機械棟は、加速器用電磁石及び高周波加速用電源や冷却水などのユーティリティ設備を収納するとともに、大型装置の組立て・性能評価・磁場測定などにも使用する。オフィスとラボは、施設の管理業務や共同利用の運営、試料作成や実験装置の組立てなど放射光実験の準備・実験機器の開発や保守作業などを行うと共に、職員の一部や協力研究者等の居室も提供する。

現段階では、KEK 放射光施設の建設場所は確定していないが、つくばキャンパス南側の敷地が候補の 1 つになる。入射器としては、専用のライナック+シンクロトロンが有力な案になるが、この敷地では既存電子リニアックを入射器として利用することも可能である。

3. 電気・機械設備の概要

3.1 電気設備

電気設備として考慮するものには、特別高圧変電設備・高圧変電設備・装置幹線設備・実験用分電盤設備・建物幹線設備・動力設備・照明・コンセント設備・通信設備・防災設備など多様なものがある。これらの設備の設計にあたっては加速器の運転並びに放射光利用実験に適したシステムである事はもちろん、運転コストや環境性にも配慮している。

現在想定されている KEK 放射光敷地の近くには、図 3(a)に示すように既存の特別高圧変電設備 (PS 変電所) があり、現在はその一部しか使用されておらず、この場所の有効利用が考えられる。ただし KEK 放射光用の特別高圧変電設備を PS 変電所内に設置する場合、KEK 放射光敷地内の高圧変電所まで多数の 6.6kV ケーブルを敷設する必要がある。一方、KEK 放射光敷地内に特別高圧変電設備を新たに設置する場合には、メンテナンス場所は増えるが、PS 変電所から KEK 放射光敷地内まで 66kV ケーブルのみを敷設すればよく、経済的には有利になる。特別高圧変電設備の設置場所に関しては、既存変電所の状況や設備の監視体制なども踏まえて決定することになる。特別高圧変電システムは実験系と施設系との 2 系統に分離するが、メンテナンスや事故時の対応を考慮すると冗長化出来る事が望ましい。

高圧変電設備は建物内側の 4 ヶ所に設けられた機械室内に設置され、加速器系・実験系共にその当該部分へ電力を供給する。加速器系では各 4 ヶ所に電磁石用トランスと真空・モニタ制御・挿入光源・基幹チャンネル用のトランスが配置される他、各 1 ヶ所に RF 用トランスと入射器用トランスが設置される。実験系では、空調機・クレーン・照明・コンセントや研究室用のトランスが設置される。装置への供給電圧としては、三相 400V と 200V、単相 200V と 100V があり、加速器各グループ及びビームライン・実験室からの使用希望電力量の総和は立ち上げ時想定で約 10MW と見積られたが、マージンや重複する部分もあり、今後精査した上で必要にして充分な容量を決定する必要がある。

その他に必要な電気設備としては、電源関係では防災・保守電源用の発電機と電力監視設備が、建物付帯設備としては実験盤・通信設備・接地設備・火災報知設備や外灯などが、さらに安全関連設備としては、放射線管理設備・入退室管理設備などがある。

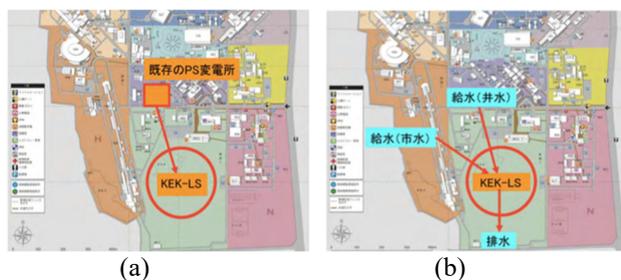


Figure 3: Location of (a) the high voltage substation and (b) water supply and drainage.

3.2 機械設備

KEK 放射光は、その性能を十二分に発揮するために高度に安定した運転を目指しており、そのため空調設備および冷却水設備にも高い安定度が求められている。

空調システムや冷却水システムへの冷熱源としては、安定度の高いインバーターターボ冷凍機を主体とし、また冬期の暖房や除湿のための温熱源としてはヒートポンプチャラーを使用する。これらの熱源系統は、リングを 4 つのゾーンに分けて分担するが、共通配管にて接続しメンテナンス時などの相互バックアップが可能なシステムとする。加速器トンネルの空調システムは熱源と同様に 4 つのゾーンに分けられている。トンネル内の設定温度はトンネル各部で異なっても良いが、安定である事が重要で、温度安定度を $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以下に保つために、トンネル上部から吸気してトンネル床下から吹き出す方式が提案されている。実験ホールの空調については温度安定度の要求が $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以下でありこれも空調機方式とし、床面付近で吸気して天井近くのソックダクトから静かに層流として吹き出す方式が検討されている。またビームラインからの可燃性ガス・支燃性ガスとロータリーポンプ排気のために 3 系統の排気ダクトも整備する。

冷却水システムは、運転モードや安定度に応じていくつかの系統に分けられる。温度安定度はおおむね $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以下であるが、加速器 RF 系など安定度の条件の厳しい系統には別途チャラーシステムを設置するなどの対策が想定されている。

給水についてはつくばキャンパス内に既存の、井水と市水を本施設まで引き込む計画である。井水は PS 変電所南側通り近くを走る共同溝の配管から、市水については PF エネルギーセンターから入射器棟への配管を分岐して使用することが可能である。1 日の使用水量は概ね 1000m³程度と推定される。また、施設からの排水はこれも既存の排水設備を利用する。放射線管理区域からの排水は貯留しチェックした上で一般排水に放流する。図 3(b)に給排水施設位置の概念図を示す。

4. KEK つくばサイトでの振動測定

高輝度光源においては、光源の高い輝度や小さなビームサイズを有効に利用するために、ビーム位置の高い安定度が要求される。本リング内での最小の電子ビームサイズは約 $3\mu\text{m}$ (垂直方向)であるので、ビーム位置の安定度の要件としてその 10%である $0.3\mu\text{m}$ 以内にビーム変動を抑えることが 1 つの目安となる。水平方向については最小でも $10\mu\text{m}$ 以上なので $1\mu\text{m}$ 程度で十分である。ここでは、以前行われたつくばキャンパス内の建物の床振動測定の結果を示し、地盤の常時微動によるビーム変動への影響について述べる。

まずは、図4と図5につくばキャンパス地下にある KEK-B の 2 カ所の電源棟 D3・D9 における垂直方向の振動測定の結果を、SPring-8 の地上 2 カ所での結果と比較して示す[2]。それぞれ 2002 年 12 月と 2003 年 6 月の運転停止期間中にサーボ型振動計(東京測振 VSE355G2)によって測定された。図4は振動のパワースペクトルで、図6は振動の累積変位である。図4からわかるように 2 つのピークが見られる。1 つは 3Hz 付近にある交通振動などの人工的な雑音(cultural noise)を原因とする関東ローム層の固有振動ピークで、もう 1 つは 0.2-0.3Hz 付近にある波浪を源とする深い地層での固有振動ピークである。ただし、後者は数百メートル以上に渡りほぼ同じ位相を持つコヒーレント振動であることから、本施設への影響はほとんどない。他方前者は、施設内の場所によって位相が異なるインコヒーレントな振動成分を多く含んでいると考えられる。図からもわかるように人工的な振動源が原因なので昼間の方が夜間よりも大きくなる。また交通振動の影響のために大通りに近い D3 が D9 よりも振動がやや大きい。SPring-8 との比較では、KEK-B では 0.1-50 Hz の帯域で振動の盛り上がりが見られる一方、0.1Hz 以下では大きな差はないことがわかる。図5を見ると、KEK-B での振動の累積変位は昼夜の差こそあるものの、1-50Hz のインコヒーレント振動で $0.1\mu\text{m}$ 前後であることがわかる。

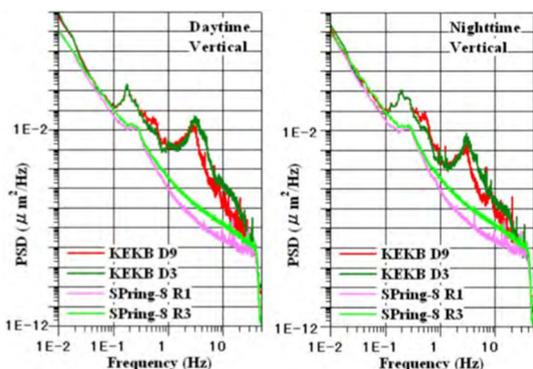


Figure 4: Power spectrum of floor vibration at KEKB and SPring-8 sites.

図6には、同じく KEK つくばキャンパスにある ERL 開発棟の床面で 2013 年 3 月に測定された 3 方向の振動のパワースペクトルとその累積変位を示す。小型サーボ型振動計(東京測振 VSE-15D)で測定された。ここでも波浪を起源とする 0.4Hz 付近のコヒーレント振動のピーク

と人工的な振動源による 3Hz 付近の振動ピークが見られる。測定時期やキャンパス内での場所の違いはあるが、振動スペクトルの強度も非常に近いこともわかる。1-100Hz の振動成分を積分した累積変位はおよそ $0.1\mu\text{m}$ 前後であり、KEK-B での垂直方向での累積変位の測定結果とおよそ一致している。

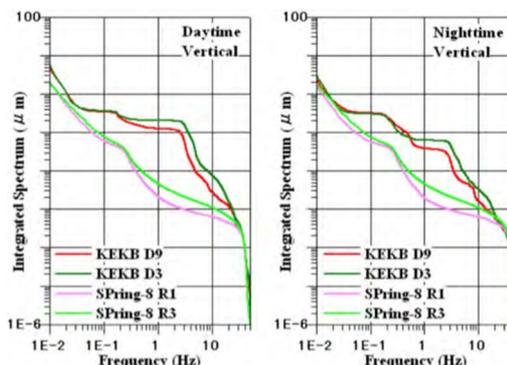


Figure 5: Integrated spectrum of floor vibration at KEKB and SPring-8 sites.

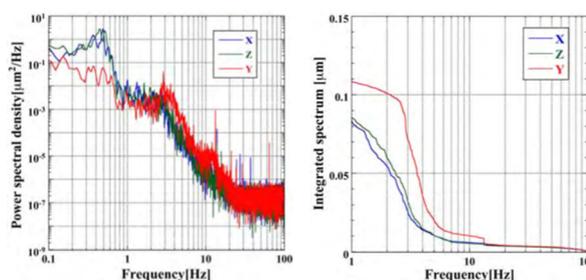


Figure 6: Power spectrum and integrated spectrum at compact ERL site.

以上の振動測定の結果から、KEK つくばキャンパス内での建物床振動は、時間帯での多少の差はあるが、1Hz 以上の累積変位において水平・垂直方向共に $0.1\mu\text{m}$ 程度であることがわかる。これは、 $0.3\mu\text{m}$ 以内というビーム位置の安定度の目安を十分に満足している。振動の波長がビームライン光学系の長さや、リングのベータatron振動の波長よりも大きければ、1Hz 以上の振動成分でもその影響は実質的に小さくなる。1Hz 以上の振動成分の内、どれだけの割合がリングやビームラインに実効的に有害な振動成分であるかを今後調べていく必要がある。また建物の設計方法によって地盤からの振動を減衰させることも検討してゆく。一方床振動は、リング電磁石あるいはビームライン機器の架台の共振によって増幅するので、その設計・製作には注意が必要である。ERL 開発棟に建設されたコンパクト ERL(cERL)では構造解析を通して、共振周波数が高く振動の増幅度が小さい弧部共通架台を開発した[3]。また、PF の放射光ビームラインの一部でも剛性の高い御影石をベースとした架台が採用され、振動の減少に貢献した[4]。このような架台の検討を行うことで建物床振動の架台による増幅率を 1 に近づけることができる。

一方架台の振動増幅がなくても、リング床の振動は電磁石振動を通して主に 4 極磁場の変動によって電子

ビーム軌道を揺らし、その軌道変動の大きさは電磁石振動の大きさに対して増幅される。この軌道変動は高速高精度の軌道フィードバックシステムを用いて $0.3\mu\text{m}$ 以内に抑える予定である。1Hz 以下の振動成分については既に述べたように施設全体に渡って位相が揃ったコヒーレント振動が主であるので、ビーム変動への影響はほとんどない。さらに低い周波数成分($< 0.1\text{ Hz}$)は、コヒーレント振動の他に地盤の長期的な変動[5]によるものが考えられるが、フィードバックなどの軌道補正や定期的なアライメントの実施などで対応してゆく。この他、建物内の機械的振動や建物近傍での交通振動など、地盤の常時微動以外の振動や変形に対する評価・対策も、建物や光源・ビームラインの詳細設計と並行して今後進める予定である。

5. 光源棟の基礎構造と床構造の検討

光源棟建屋の基礎構造においては杭基礎と地盤改良による基礎を、床構造においては床梁構造とマットスラブ構造を比較検討する。

5.1 基礎構造の検討

図7に示す KEK つくばキャンパス内のボーリングデータを見ると、当該敷地の地盤層序は表層 12~13m 程度の埋土層の下に N 値の高い成田層砂層(Ds2 層)が出現するがその層厚は 5m 程度であり、その下には N 値の低い成田層粘性土層(Dc2 層)が 20m 程度堆積する。N 値が 50 程度で安定した下総層群下部礫質土(Dg 層)は、地表から 35m 程度より下部で出現する。このようなつくばキャンパスの地盤構成をもとにした 2 つの基礎構造に関する検討結果をそれぞれ以下に示す。

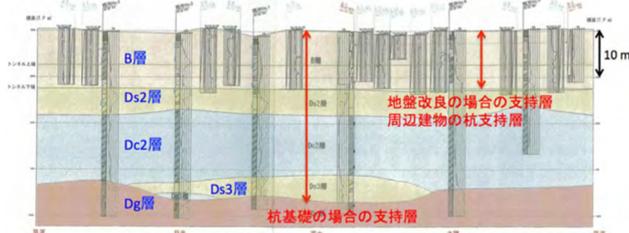


Figure 7: The geological section and the underground structure at KEK Tsukuba site.

(1) 杭基礎: 比較的軽量の建築物であれば Ds2 層を支持層とすることが可能であるが、Ds2 層は地震により微小ながら沈下すると言われている。一方安定した N 値が発現する Dg 層を支持層とすれば、比較的安定した性状が得られると思われるが、杭長が長くなることにより、杭の変形分は相対的に大きくなる。杭基礎の場合一般的に、杭先端位置に集中的に荷重が掛かるため、直接基礎に比べて支持地盤の変形が大きくなる傾向にある。岩盤のような支持層であれば変形しないと言えるが、Dg 層は岩盤とは言えないため、支持層といえども若干の変形は生じるものと思われる。SACLA の計測結果では、経年の沈下は杭長(=盛土厚)に比例する傾向にある[6]。ただし、つくばの地盤構成は概ねフラットであることから、

杭長がほぼ同一であれば、建物の沈下量もほぼ一様であると予想される。

(2) 地盤改良: Ds2 層を支持層とし、表層である埋土層を地盤改良する案においては、杭基礎と異なり、面として建物を支持することで、深さ方向に荷重の広がりを考慮することができ、地盤改良の剛性は杭基礎よりも大きいと言え、沈下しにくいと言える。ただし、地震時に Ds2 層が微小ながら沈下した場合には抵抗できない。

同一の支持力度を確保する前提で算出すると、杭基礎よりも地盤改良のコストが高くなるけれども、地盤改良の方が鉛直剛性が高まることや、マットスラブも点支持から面で支持され、マットスラブの剛性も相対的に高まるなどのメリットもある。従って、(支持層一の選定も含めた)杭基礎の方式と、地盤改良の方式との選択にあたっては、加速器トンネル・実験ホール・積載荷重や床変形に対する要求性能や、地盤調査の結果を踏まえた上で、コスト面も考慮して、比較検討の上決定する必要がある。

5.2 床構造の検討

実験ホールの床構造としては、床梁構造とする場合と、マットスラブ構造とする場合の 2 つのケースが考えられる。外部からの交通振動や、重機・クレーン等による振動に対しては、床の重量効果による抵抗がもっとも有効であるため、床構造の重量を「かせぐ」ことが可能なマットスラブ構造の方が振動に対して有効である。更に型枠がほとんど不要なマットスラブ構造の方がコストの面でも合理的であり、海外の放射光施設の事例を見てもいずれもマットスラブ構造である。従って、本計画の光源棟の床構造としては、マットスラブ構造が妥当であると判断する。マットスラブ厚については、基礎の方式や上部積載荷重、振動に対する要求性能及びコストなどを総合的に勘案して設計段階で検討を行う必要がある。

5.3 床スラブ下のボイドの有効性の検討

杭基礎を採用している DIAMOND や SOLEIL ではコンクリート床のマットスラブと地盤の間に 50mm のボイド(空洞)を設けている[7]。DIAMOND でマットスラブ下に 50mm のボイドを設けている理由は、地下水変動が大きい(年間 10m オーダーで変動)ことに起因する地盤の膨張・収縮に対する配慮からである[8]。従って、本計画で床のマットスラブ下にボイドを設ける必要があるかどうかは、地下水変動が大きいかどうか依存する。そのため、今後実施する地盤調査において地下水変動を観測することが望ましい。

なお、つくば市北郷の国土地理院構内での観測記録より、深度 40~200m の帯水層の季節変動に伴うと考えられる地盤変動がある、との報告がある[9]。したがって、計画地付近においても地下水変動及びそれに伴う地盤変動の観測を行って、ボイド施工の必要性を、その工法も含めて検討する必要がある。

5.4 床構造と上部建屋基礎部との分離・一体化の検討

海外の主な放射光施設では、全ての施設において、加速器トンネル部(SR)・実験ホール(EH)と、周辺施設に関しては分離して建設されている。周辺施設には SR・EH を覆う上部架構(鉄骨造)が含まれるが、ここからの振

動やクレーンの振動を SR・EH に伝達させないためにも、SR・EH と周辺施設は分離されるのが一般的となっている。また、SR・EH と周辺施設を分離することにより、それぞれの基礎形式を用途・要求性能に応じて変えることも可能である。

次に、SR・EH と周辺施設の基礎構造は分離することを前提にした SR と EH 部の躯体の分離方法について 3 つのケースを検討した結果を示す。

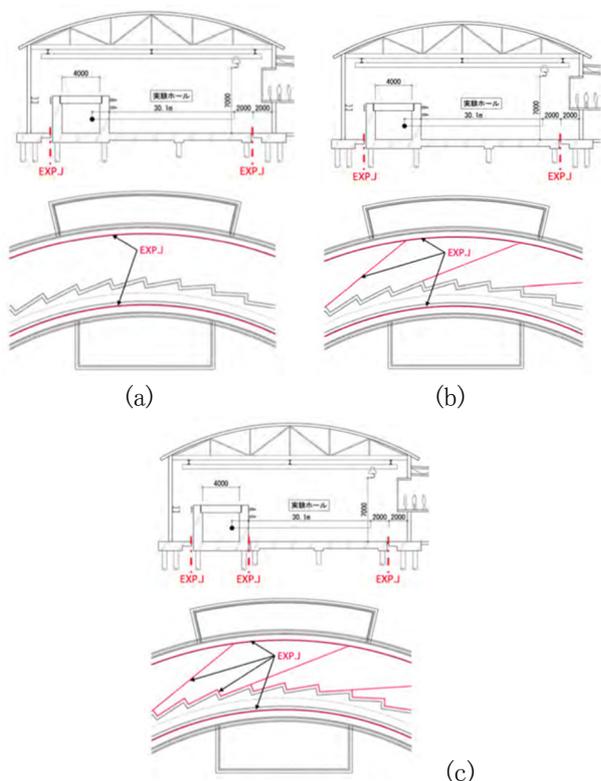


Figure 8: Three plans for the separation between ring tunnel floor and experimental hall floor.

- (1) SR・EH を全面一体とした場合：この案では、図 8a のように SR・EH 部間には全くエキスパンションジョイント(以下 EXP.J)を設けずに一体としている。この場合には、沈下等に対して SR・EH 一体として挙動するので、内部・外部の振動に対して大きな重量で抵抗することが可能である。
但し、周長約 600m の巨大な躯体を一体とするため、コンクリートの乾燥収縮によるひび割れが発生しやすく、特に壁が多く拘束効果の高い SR 部に比して、相対的に剛性の低い EH 部にひび割れが集中しやすい。ひび割れを均質に設けるため、誘発目地の設置などの配慮が必要となる。また、コンクリート打設時にコンストラクション・ジョイント(後打部分)を設ける必要があるなど、工期に対して制約が生じる。
- (2) SR・EH を一体とするが、EH 内には EXP.J を設ける場合：この案は図 8b に示すように、(1)に加えて、ひび割れが発生しやすい EH 内の円周方向に一

定ピッチで EXP.J を設ける案である。SR・EH を一体としているため、沈下等に対して一体として挙動することは(1)と同様である。EH 部は外部からの振動に対して、(1)に比べて重量効果は低減するが、内部からの振動に対しては、EXP.J よりも外側の振動は伝達されにくい利点がある。さらに、円周方向の収縮に対しては、EXP.J を設けることでひび割れが発生しにくい一方、放射方向は長さが短いため、EXP.J を設けなくても乾燥収縮に対しては大きな問題は生じないと考えられる。

- (3) SR と EH を分離して EXP.J を設ける場合：この案では図 8c に示すように、(2)に加えて SR と EH の境界部に EXP.J を設ける案である。SR と EH を分離することにより、振動・沈下に対して最も繊細な SR 部を、外的要因から隔離することができる。また SR と EH で、振動・沈下に対する要求性能が異なることが想定されるが、それぞれの部位に応じた設計をすることも可能である。特に地盤条件が良いとは言えないつくばキャンパスにおいて、SR 部の沈下に対して集中的に沈下対策することが可能になる。さらに放射方向の乾燥収縮についても、EH 部の収縮による影響を SR 部に伝えないようにすることが可能である。EXP.J 部に、スリップバーを用いた構造とすることで、沈下差に対してずれを許容しない設計とすることもできる。

以上3案の中から、各部要求性能を考慮して3案を再度比較検討した上で、詳細設計段階では総合的な見地に立って決定する必要がある。

6. まとめ

KEK放射光計画における建物・設備に関する検討の状況について報告した。現在CDRにおいて示されている案に基づいて、高輝度光源施設としての性能を最大限に発揮させるための、様々な課題が検討されている。建物の基礎構造の選択、振動対策、冷却水や空調設備の安定化など、今後、更なる調査等を実施して最良の案を決定して行く必要がある。

参考文献

- [1] <http://www2.kek.jp/imss/notice/2017/05/kekls-cdr11.html>
- [2] Y. Nakayama *et al.*, Proc. Of EPAC2004, Lucerne, Switzerland, pp.1711-1713(2004).
- [3] 石井篤,「CERL 弧部共通電磁石架台の構造解析」, 2014-8, March 2015.
- [4] Photon Factory Activity Report 2014, 32, pp.92-93(2014).
- [5] V. Shiltsev, “Space-Time Ground Diffusion: The ATL Law for Accelerators”, DESY-MPY, Germany.
- [6] H. Kimura *et al.*, Proc. of IWAA2014, IHEP, China (2014).
- [7] D. Martin, Proc. of IWAA2012, Fermilab, USA (2012).
- [8] J. Kay *et al.*, Proc. of MEDSI 2008, CLS, Canada (2008); J. Kay *et al.*, Proc. of IPAC2011, San Sebastian, Spain, pp.562-564 (2011).
- [9] 飛田幹男他, 測地学会誌, 第 50 巻, 第 1 号, 27-37 頁(2004).