

## 話題

## SuperKEKB 加速器トンネル内無線 LAN システムの導入

岩崎 昌子\*<sup>1</sup>・佐藤 政則\*<sup>2</sup>

## Installation of Wireless LAN System into the SuperKEKB Accelerator Tunnel

Masako IWASAKI \*<sup>1</sup> and Masanori SATOH \*<sup>2</sup>

## Abstract

We have installed a wireless LAN system of the accelerator control network into the accelerator tunnel for SuperKEKB, which is the upgrade plan of the KEKB B-factory project. The wireless LAN system is used for the construction and maintenance of the accelerator components. The leaky coaxial cable (LCX) antennas are installed into the arc sections of SuperKEKB tunnel, and the collinear antennas are installed into the straight sections and the injector Linac. We have selected the LCX and collinear antennas with good radiation hardness of more than 1 MGy. After the installation, we evaluated the wireless LAN system and obtained the good network speed performance in the whole tunnel area.

## 1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構では、電子・陽電子衝突型加速器 KEKB の高輝度化計画として、SuperKEKB の建設を進めている<sup>1)</sup>。SuperKEKB では、KEKB に比べて蓄積電流値を 2 倍にし、かつ衝突点でのビームサイズを 20 分の 1 に絞ることにより、KEKB よりも 40 倍高いミノシティーの実現を目指している。

我々は、周長 3 km の SuperKEKB 円形加速器トンネル（以下、主リングトンネル）、および入射器トンネル全域にわたり、加速器建設および加速器メンテナンス時にトンネル内で使用するための、加速器制御ネットワーク用無線 LAN システムを構築した。本稿では、この SuperKEKB 用加速器トンネル内無線 LAN システムの構築およびその性能について報告する。

## 2. 主リングトンネル内無線 LAN システムの設計

図 1 に、SuperKEKB の全体図を示す。主リングは、周長 3 km の円形加速器であり、4 つの直線部および 4 つのアーチ部から構成される。直線

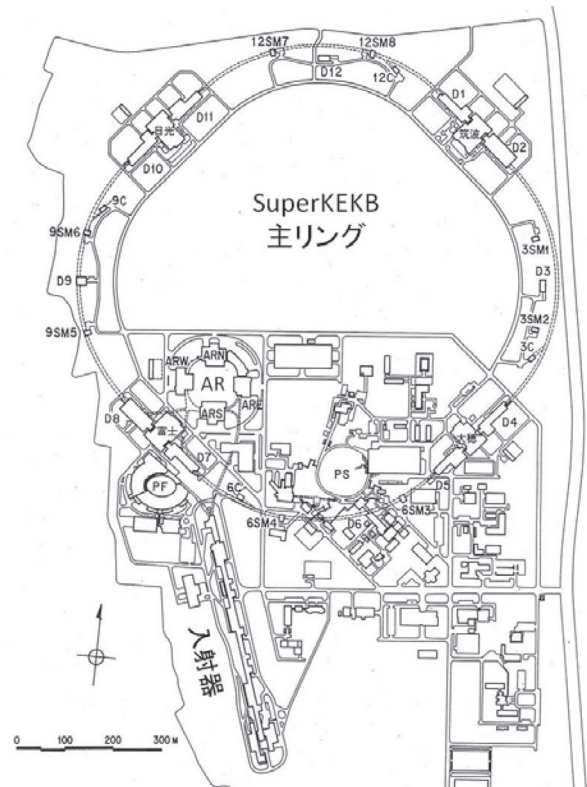


図 1 SuperKEKB 加速器全体図

\*<sup>1</sup> 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 KEK, High Energy Accelerator Research Organization (E-mail: masako.iwasaki@kek.jp)

\*<sup>2</sup> 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 KEK, High Energy Accelerator Research Organization (E-mail: masanori.satoh@kek.jp)

部の長さは1箇所あたり250 m、アーク部の長さは1箇所あたり500 mである。

KEKBでは、4箇所の直線部にそれぞれ2箇所ずつ無線LANのアクセスポイントおよびアンテナを設置し、直線部のみで制御ネットワーク用無線LANシステムを運用してきた。今回は、SuperKEKB建設を機に、アーク部を含めた主リングトンネル全域に新たな無線LANシステムを導入した。

ここで、アーク部は直線部と比較して、

- トンネルの壁が曲がるため、電波の到達距離が短い
- 放射光による放射線レベルが高い
- 電源供給設備が少なく、電源供給が容易ではない

という問題があり、通常の無線LAN用のアンテナを設置することは困難である。したがって、アーク部用には漏洩同軸ケーブル(Leaky Coaxial cable, LCX)アンテナの導入を検討した。

ここで、LCXは、同軸ケーブルの外部導体にスロットと呼ばれる細長い孔を周期的に設けたもので、ケーブルの内部を伝播する電波の一部を外部に輻射させるようになっている。図2に、代表的なLCXの構造を示す。電波を送受信するアンテナと信号を伝送するケーブルを兼ねている。線状アンテナであるため、ケーブルに沿って、均一な電波強度を形成させることができる。トンネル内にLCXを設置し、電波を輻射させることで、無線LAN構築をおこなう方針を検討した。

### 2.1 LCX アンテナ通信試験

LCXアンテナについて検討するために、2012年春、主リングトンネル内へ試験用のLCXアンテナを1本設置し、試験運用をおこなった。試験

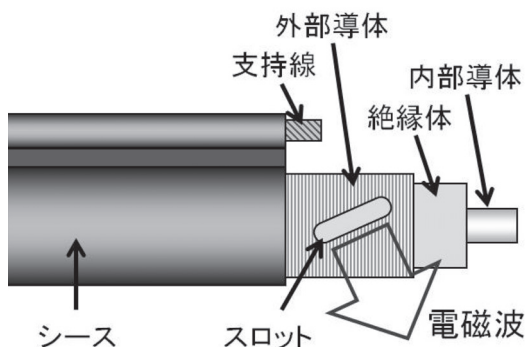


図2 LCX (漏洩同軸ケーブル) の構造

用LCXアンテナの電気特性および長さは以下の通りである：

- 結合損失(アンテナ利得) 70 dB
- 伝送損失 7.1 dB/100 m
- 20D型, 200 m

また、LCXアンテナを用いた通信試験として、2012年10月、主リングトンネル内において、試験用LCXアンテナに2種類のアクセスポイント(AまたはB)を接続して、ネットワーク実効伝送速度(平均速度)を測定した。ここで、アクセスポイントAは、本アンテナ試験をおこなった時点で、20D型LCXケーブルとの組み合わせにおいて技術適合証明を受けている機種である。また、アクセスポイントBは、トンネル内へ無線LANシステムをインストールする時期までに、20D型LCXケーブルとの組み合わせにおいて技術適合証明を受けることが見込まれる機種である。

最初に、LCXケーブルからの電波受信レベルを測定し、設計値および測定値との比較をおこなった。表1に、LCXに接続されているアクセスポイント(アクセスポイントA)の位置を基準として、そこからLCXケーブルに沿って測定された受信レベルおよび設計値との比較結果を示す。LCXケーブルの電気特性から計算される値と実際の電波受信レベルがほぼ合致しており、測定データは妥当な値であると判断できる。

次に、アクセスポイントAおよびBを用いてネットワーク実効速度を測定した。KEKBの制御システムにはEPICS<sup>2)</sup>が使用されており、EPICSがUDPを用いた通信をおこなうため、加速器運転中は大量のUDPブロードキャストが制御ネットワーク内に流れる。また、PF-AR加速器の制御ネットワークはKEKB制御ネットワークと同一であるため、PF-AR加速器運転時は、加速器運転によるUDPブロードキャストがKEKB制御ネットワークに発生する。

本通信試験はPF-AR加速器運転時に実施して

表1 LCXケーブル電波受信レベル測定結果

アクセスポイントからの距離(m)	0	100	150	200
受信レベル(dBm)	-68	-75	-77	-81
設計値(dBm)	-70	-77	-81	-85

おり、無線 LAN システムを制御ネットワークに接続した状態で、一定時間あたりの無線 LAN のパケット量を測定したところ、UDP ブロードキャストが全通信量の約 90% を占めていた。加速器運転による UDP ブロードキャストの影響を見積もるため、制御ネットワークに接続した状態および接続していない状態 (local network) において、ネットワーク速度の比較をおこなった。

図 3 に、アクセスポイント A に対するネットワーク実効速度測定結果を示す。横軸は、アクセスポイントからの距離を示し、50 m ごとに、LCX ケーブルから約 2 m 離れた場所でネットワーク速度を測定した。縦軸はネットワーク速度 (Mbps) を示す。制御ネットワークに接続した場合 (灰色) は、ネットワーク速度が 10 ~ 30 kbps となり、制御ネットワークに接続していない場合 (黒色) に比べて、UDP ブロードキャストによる影響で、極端に性能が低減していることが見て取れる。さらに、制御ネットワークに接続していない場合においても、本電気特性を持つ LCX ケーブルを使用する場合、10 Mbps 以上の安定したネットワーク速度を得るためには、LCX ケーブルの長さを 150 m 程度以下に制限する必要があるという知見が得られた。

図 4 に、アクセスポイント B に対するネットワーク実効速度測定結果を示す。横軸は、アクセスポイントからの距離を示し、50 m ごとにネットワーク速度の測定をおこなった。縦軸はネットワーク速度 (Mbps) を示す。制御ネットワークに接続した場合 (灰色) は、制御ネットワークに接続していない場合 (黒色) に比べて、若干性能

の低減が見られるもののその差は 10 ~ 20% 程度であった。これらの測定結果より、アクセスポイント B は、UDP ブロードキャストが多い環境下においてもネットワーク速度の性能劣化が少ないことがわかった。

制御ネットワークに接続していない場合のネットワーク速度は、アクセスポイント A および B では有意な差は見られなかった。さらに、当該電気特性を持つ LCX ケーブルを使用した場合、10 Mbps 以上の安定したネットワーク速度を得るためには、LCX ケーブルの長さを 150 m 程度以下に制限する必要があることが見て取れる。

また、20D 型 LCX ケーブルとして、結合損失 65 dB および伝送損失 9 dB/100 m の電気特性を持つ製品がある。そこで、机上計算をおこなった結果、LCX ケーブル長 170 m 以下においては、結合損失 65 dB かつ伝送損失 9 dB/100 m の LCX ケーブルを用いたほうが、結合損失 70 dB かつ伝送損失 7.1 dB/100 m の LCX ケーブルよりも、ネットワーク速度が高くなるという計算結果が得られた。

以上の評価結果から、SuperKEKB 用 LCX ケーブルアンテナおよびアクセスポイントとして、以下のものを選定した：

- アクセスポイント B
- 20D 型 LCX ケーブル 125 m
- 結合損失 65 dB, 伝送損失 9 dB/100 m

さらに、SuperKEKB での放射線レベルを考慮して、1 MGy 以上の耐放射線性シース素材を選定した。

ここで、設計値によると、今回選定した LCX

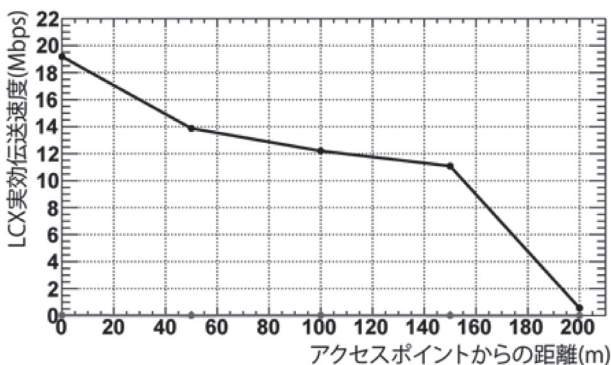


図 3 LCX 実効伝送速度測定結果 (アクセスポイント A)。制御ネットワークに接続した場合 (灰色) および接続していない場合 (黒色)。

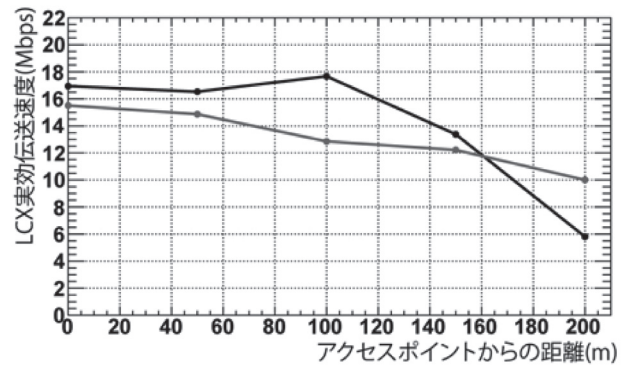


図 4 LCX 実効伝送速度測定結果 (アクセスポイント B)。制御ネットワークに接続した場合 (灰色) および接続していない場合 (黒色)。

ケーブルを用いた場合、ケーブル長 125 m の位置におけるネットワーク伝送速度は、ネットワーク通信試験で使用した LCX ケーブルで 90 m の位置でのネットワーク伝送速度に相当することが予想される。したがって、図 4 の結果から、制御ネットワークに接続しない場合、アクセスポイントから 125 m 離れたケーブルの末端の位置で、約 18 Mbps のネットワーク速度が得られることが期待される。

## 2.2 コリニアアンテナ通信試験

4 箇所直線部に設置するアンテナとして、1 MGy 以上の耐放射線素材の中から電波強度が強い (6 dBi) コリニアアンテナを選定し、ネットワーク実効伝送速度を測定した。

図 5 に、コリニアアンテナのネットワーク実効速度測定結果を示す。アクセスポイント B に 10 m アンテナ延長ケーブルを接続し、富士直線部端部で床面から 3 m の高さの位置にコリニアアンテナを設置した。コリニアアンテナ設置位置から 50 m 以内の範囲では、およそ 15 Mbps 以上の速度が得られた。

上記の結果から、加速器直線部 1 箇所あたり (250 m)、4 本のコリニアアンテナを配置することに決定した。ここで、加速器直線部は中央の実験ホールをはさんで L 側と R 側に分かれているため、L/R 側それぞれにコリニアアンテナ 2 本ずつを配置することとした。

## 3. 主リングトンネル内無線 LAN システムの構築

### 3.1 無線 LAN システムの構成

2013 年春、ネットワーク速度試験の結果より

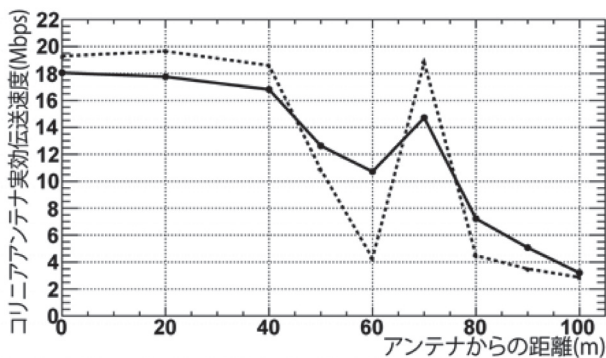


図 5 コリニアアンテナ実効速度試験結果 (アクセスポイント B). 実線は uplink, 破線は downlink を示す。

選定した、アクセスポイント B, 結合損失 65 dB かつ伝送損失 9 dB/100 m の 20D 型 LCX アンテナ, および高強度コリニアアンテナを、主リングトンネル内に設置した。加速器直線部 4 箇所 (合計約 1000 m) に計 16 本のコリニアアンテナを設置し、アーク部には、125 m の LCX アンテナを計 16 本 (合計約 2000 m) 導入した。これら LCX アンテナおよびコリニアアンテナのトンネル内設置場所を図 6 に示す (筑波-日光間)。

また、図 7 に、トンネル内アーク部に設置された LCX アンテナ, 図 8 に、トンネル内直線部へ設置したコリニアアンテナの写真を示す。

トンネル内の放射線レベルを考慮して、トンネル内無線 LAN 機器は全て鉛箱に收容し、耐放射線性資材で固定した。アーク部のアクセスポイント

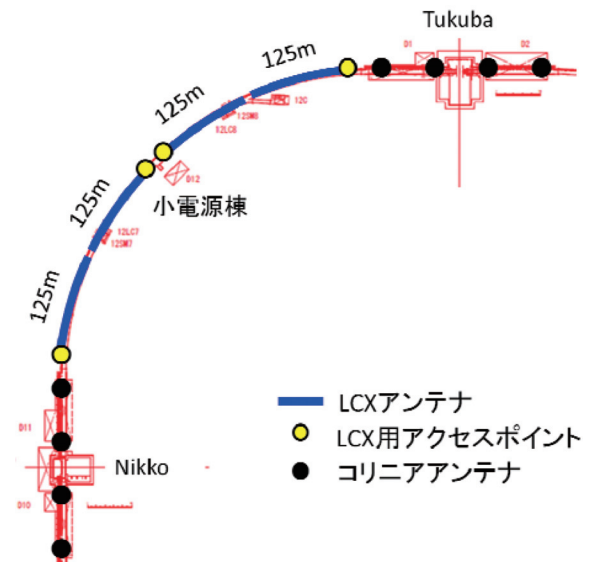


図 6 主リングトンネル内における無線機器設置位置

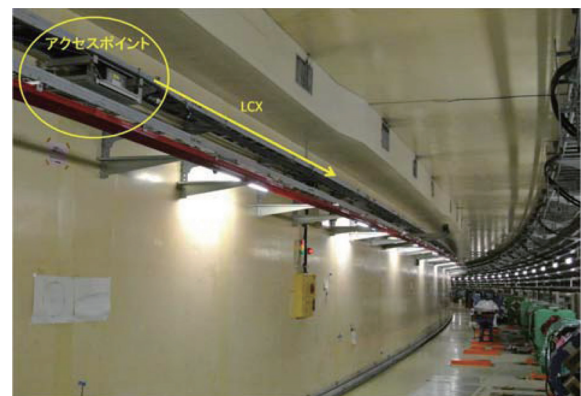


図 7 主リングトンネルアーク部に設置した LCX アンテナ

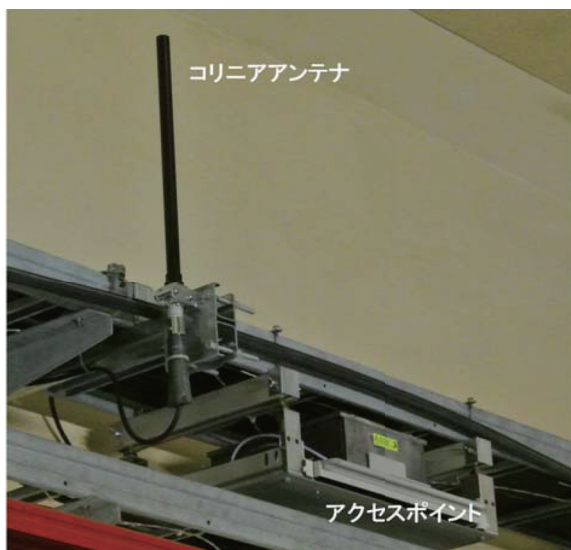


図8 主リングトンネル直線部に設置されたコリニアアンテナ

トへの給電は、アーク部中点に位置する場所の、地上部電源棟からトンネル内へネットワーク配線をおこない、電源棟に設置した給電装置 (PoE モデム) からネットワークケーブル経由でおこなった。電源棟からトンネル内アクセスポイントまでの距離は、60 ~ 70 m 程度である。

ここで、富士と大穂間にある電源棟の位置は、アーク部の中点よりも 50 m ほど大穂側に設置されているため、電源棟からトンネル内アクセスポイントまでの距離が 100 m を超えてしまう。ネットワークケーブルによる給電可能なケーブル長は最大 100 m に制限されているため、富士-大穂間に位置する電源棟からアーク部中点に位置するアクセスポイントへ、直接給電をおこなうことができない。したがって、富士-大穂間の電源棟には PoE モデムの親機を設置し、トンネル内にはネットワーク給電が可能な PoE モデムの子機を設置した。これにより、PoE 子機モデムからトンネル内のアクセスポイントへの給電が可能となった。

### 3.2 主リングトンネル内無線 LAN 性能試験

主リングトンネル内全域において、10 m ごとに無線 LAN システムの速度測定をおこなった。図9に、主リングトンネルのうち、筑波から大穂へかけてのアーク部 (約 500 m) における測定結果を示す。横軸は、筑波地区からの距離を示している。筑波地区では他の無線 LAN システムとの電波干渉により、無線 LAN の速度性能の劣化がみられるが、その他の区間では、約 18 Mbps の

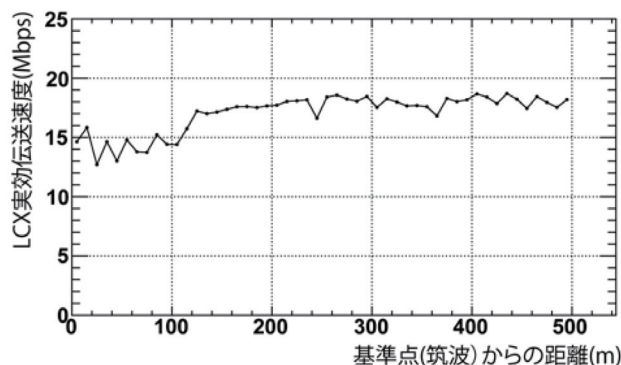


図9 主リングトンネル内における無線 LAN の速度測定結果 (筑波および大穂間)

ネットワーク速度が得られた。

## 4. 入射器トンネル内無線 LAN システムの構築

### 4.1 無線 LAN システムの導入

入射器クライストロンギャラリー部においては、2007 年春に Aruba 社製無線 LAN システムを導入した。入射器トンネル内については、毎年 2 ヶ月間の夏期メンテナンス中のみ、安価な無線 LAN アクセスポイントを設置し、運用してきた。入射器運転中は、トンネル内の放射線レベルが高いため、アクセスポイントを鉛箱に収容した状態であっても長期間の運用は困難である。このため、トンネル内に設置したアクセスポイントは、秋の入射器運転再開前に毎回撤去してきた。したがって、二週間に一度の定期メンテナンス時および突発的な入域作業時においては、トンネル内無線 LAN を迅速に利用できない状況であった。

2011 年 3 月の東日本大震災後、機器の復旧および SuperKEKB 計画に向けた入射器ビームライン建設作業のため、トンネル内無線 LAN の常時使用に対する要望が高まってきた。主リングトンネル内全域に無線 LAN システムを構築する機会にともない、入射器トンネル内にも同様なシステムを導入することとした。

入射器は、100 m および 500 m の直線部が 180 度偏向アーク部で接続された構成となっている。大電力クライストロン 8 台および加速管 32 本から構成される部位はセクターと呼ばれ、入射器全体は 8 つのセクターおよびアーク部から構成されている。また、1 つのセクターは、全長約 80 m である。

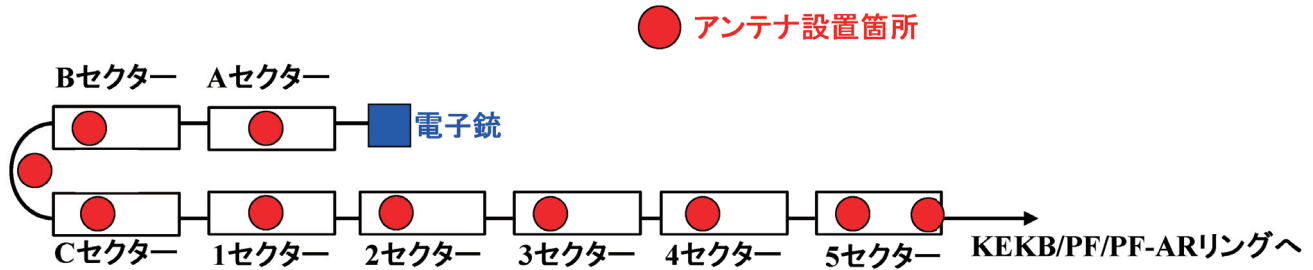


図 10 入射器トンネル内におけるコリニアアンテナ設置位置

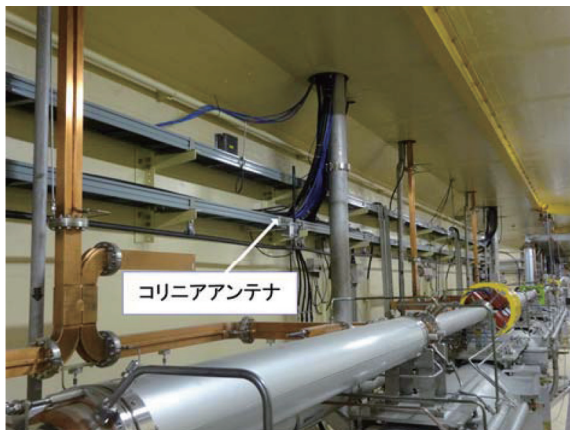


図 11 入射器トンネル内に設置したコリニアアンテナ

当初、主リングトンネル内アーク部に設置した LCX ケーブルの採用を検討したが、ケーブルラック手前に導波管および真空マニホールド配管などが設置されており、ケーブル敷設作業の困難が予想されることから、主リングトンネル内直線部に採用したものと同型の高強度コリニアアンテナを採用することとした。入射器の全長約 600 m にわたり、20 Mbps 程度の通信帯域を確保することを目標とし、アクセスポイントの設置場所は 10 箇所決定した。図 10 に、コリニアアンテナの設置場所を示す。また、図 11 にトンネル内に設置したコリニアアンテナの写真を示す。コリニアアンテナは、ケーブルラック脇に専用治具を用いて固定している。本固定治具は脱着が容易であり、ビームライン工事などでアンテナ取り外しの要請がある場合においても、迅速な対応が可能である。

強い放射線環境下であるトンネル内にはコリニアアンテナのみを設置し、アクセスポイントは地上部であるクライストロンギャラリー部に設置した。クライストロンギャラリー部には、セクター

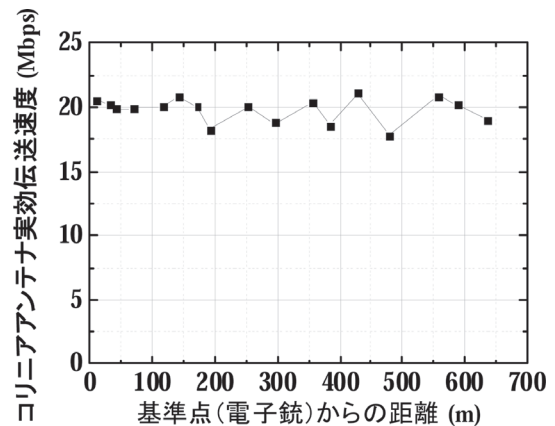


図 12 入射器トンネル内における無線 LAN の速度測定結果

ごとに 2 箇所のビーム位置モニタ用データ収集ステーションを設けている。アクセスポイントは、このデータ収集ステーション内に設置している。

#### 4.2 入射器トンネル内無線 LAN 性能試験

入射器トンネル内全域において、約 40 m ごとに無線 LAN システムの通信速度試験をおこなった。測定結果を図 12 に示す。横軸は、入射器最上流にある電子銃から測定箇所までの距離を表している。本測定結果から、入射器全域において約 20 Mbps のネットワーク速度が得られたことが見て取れる。これは、主リングトンネル内での測定結果と同等以上であり、運用上十分な性能であると考えている。

現在、入射器クライストロンギャラリー部において使用中である Aruba 社製無線 LAN コントローラおよびアクセスポイントは、メーカーによるサポートが 2016 年に終了する。このため、クライストロンギャラリー部の無線 LAN システムについても、トンネル内と同型品のコリニアアンテナへ順次置き換える予定である。

## 5. 運用および管理

本無線 LAN システムの運用においては、MAC アドレスによる接続制限をおこなっている。ネットワーク接続機器の申請および管理作業を簡便化するため、php および python スクリプトを用いた Web アプリケーションを開発した。新たな機器を制御用無線 LAN システムへ接続する場合、利用者は Web ページを用いた申請をおこなう。本申請情報には、接続対象機器の MAC アドレスや申請者情報などが含まれている。新規の利用申請が発生した場合、管理者にはメールで通知される。その後、管理者が Web 管理画面上において申請情報の確認および承認作業をおこなう。また、過去の申請において登録された MAC アドレスについても、不要となった際の登録削除が同一の Web 管理画面から可能である。このように、独自の Web アプリケーションを導入することにより、運用および管理の効率化を図っている。また、システムのセキュリティ性を考慮して、暗号化方式には WPA2 を採用している。

## 6. ま と め

SuperKEKB 建設および保守の効率化を目指し、周長 3 km の加速器トンネル内全域にわたり、SuperKEKB 制御ネットワーク用無線 LAN システムを構築した。加速器直線部には高強度コリニアアンテナを、また、アーク部には LCX アンテナを導入した。今回導入したアンテナは、

SuperKEKB での放射線レベルを考慮して、1 MGy 以上の耐放射線性を有するものである。

本無線 LAN 構築においては、主リングトンネルおよび入射器トンネルに加えて、主リング電源棟と PF-AR 加速器トンネルへ同様の無線 LAN システムを導入し、合計で 70 箇所アンテナを設置した。これらのアクセスポイントは、1 台のアクセスポイントコントローラーによって管理が可能である。

今回設置したトンネル内無線 LAN システムの通信速度測定をおこない、トンネル内全域において、約 20 Mbps のネットワーク速度が得られた。本システムの導入により、SuperKEKB の建設および保守作業の利便性が格段に向上するものと考えられる。

## 謝 辞

SuperKEKB 制御ネットワーク用無線 LAN の検討にご協力頂いた、KEKB および入射器制御グループの皆様には感謝を申し上げます。また、導入および運用にご協力頂いた、三菱電気システムサービスの皆様には感謝致します。

## 参考文献

- 1) K. Akai et al., "Design Progress and Construction Status of SuperKEKB", Proc. of IPAC12, New Orleans, Louisiana, USA, May 20-25, pp.1822-1824 (2012).
- 2) <http://www.aps.anl.gov/epics>