

# 情報通信審議会 情報通信技術分科会 技術戦略委員会（第31回）議事録

1 日時 令和4年1月28日（金） 15時01分～16時59分

2 場所 ウェブ開催

3 出席者

## ① 構成員

相田 仁（主査）、秋山 美紀、浅見 徹、飯塚 留美、石井 義則  
伊藤 伸器、今井 哲朗、江村 克己、大柴 小枝子、沖 理子、上條 由紀子  
川添 雄彦、児玉 俊介、小西 聡、中沢 淳一、増田 悦子、宮崎 早苗  
森田 俊彦

## ② オブザーバー

佐々木 雅英（NICT量子ICT協創センター長）  
島田 太郎（量子技術による新産業創出協議会実行委員長、東芝デジタルソリューションズ（株）取締役社長）  
村井 信哉（東芝デジタルソリューションズ（株）ICTソリューション事業部QKD事業推進室シニアフェロー）

## ③ 総務省

（国際戦略局）

田原 康生（国際戦略局長）  
山内 智生（官房審議官）  
新田 隆夫（技術政策課長）  
山口 典史（通信規格課長）  
山口 真吾（宇宙通信政策課長）  
清重 典宏（標準化戦略室長）  
小川 裕之（研究推進室長）

古川 易史（技術政策課 企画官）

影井 敬義（技術政策課 統括補佐）

（総合通信基盤局）

井出 真司（新世代移動通信システム推進室長）

#### 4 議題

（1）Beyond 5Gに向けた技術戦略の具体化について（宇宙ネットワーク、量子技術）

（2）その他

## 開 会

○相田主査　それでは、本日、皆様お忙しいところお集まりいただきまして、ありがとうございます。定刻になりましたので、ただいまから情報通信審議会技術戦略委員会の第31回会合を開催いたします。

本日の委員会もウェブ会議となりますので、事務局より、まず、その補足説明をお願いいたします。

○影井統括補佐　事務局、総務省技術政策課でございます。

まず、会議の円滑な進行のため、構成員及びオブザーバーの皆様におかれましては、御発言を希望される方は、ウインドー右下の挙手ボタンを押していただきまして、主査から指名がありましたら御発言ください。御発言の際には、お名前を冒頭に言及し、可能であればビデオをオンにしてください。御発言のとき以外は、マイクとビデオはミュートにしてください。音声の不調の際は、チャット機能も御利用ください。

ウェブ会議上に資料投影はいたしますが、表示が遅れることもございますので、事前に送付しております資料もお手元で併せて御覧ください。

なお、本日一般傍聴の方々については、ウェブ接続で、音声のみの傍聴となっております。

以上でございます。

○相田主査　ありがとうございました。

続きまして、本日の出欠等につきまして、事務局から御紹介をお願いいたします。

○影井統括補佐　まず、構成員の欠席でございますが、本日の委員会では、東京大学の森

川構成員、東京大学の島構成員、NHKの児玉構成員が所用のため欠席と伺っております。

次に、本日の委員会のオブザーバーにつきまして、NICT量子ICT協創センター長の佐々木雅英様、量子技術による新産業創出協議会実行委員長の島田太郎様、東芝デジタルソリューションズICTソリューション事業部QKD事業推進室シニアフェローの村井信哉様に御出席をいただいております。

以上でございます。

○相田主査 ありがとうございます。

続きまして、本日の配付資料の確認をお願いいたします。

○影井統括補佐 本日の配付資料といたしましては、議事次第に記載しておりますとおり、資料31-1から31-3の計3点でございます。

事務局からは以上でございます。

○相田主査 資料につきまして、よろしゅうございますでしょうか。

## 議 事

### (1) Beyond 5Gに向けた技術戦略の具体化について

#### (宇宙ネットワーク、量子技術)

○相田主査 それでは、議事に入りたいと思います。本日の議題は、現在画面に示されております議事次第でございますように、「Beyond 5Gに向けた技術戦略の具体化について(宇宙ネットワーク、量子技術)」です。

前回の委員会では、Beyond 5Gに向けた技術戦略の在り方について、前半の審議を総括した中間論点整理を行いました。委員会報告に向けた後半の審議では、前回の中間論点整理を踏まえて、より詳細な調査や論点の深掘り等を行って、技術戦略の具体化へつなげていきたいと考えております。

本日の委員会では、中間論点整理の論点にも上りました、Beyond 5Gネットワークアーキテクチャにおける非地上系ネットワーク、Non-Terrestrial Network、NTNといたしまして、特に宇宙ネットワークを取り上げ、あと、関連する先進技術における量子技術にフォーカスした議題を設定して審議を行います。

プレゼンテーションは宇宙ネットワーク関係で総務省の宇宙通信政策課から、量子技術関係ではNICTとの量子ICT協創センターと量子技術による新産業創出協議会のそれぞれから合わせて3件、プレゼンテーションをいただく予定としております。これら3件の資料説明は続けて行っていただき、質疑や意見交換は後でまとめて行いたいと思っております。

それでは、まず、総務省宇宙通信政策課、山口課長から宇宙ネットワークに関する技術戦略について御説明をお願いいたします。

○山口宇宙通信政策課長 総務省の山口でございます。お世話になっております。資料はこちらのほうで共有をしまして、説明をさせていただきたいと思っております。よろしくお願いたします。

私からはBeyond 5Gの実現に向けた宇宙ネットワークに関する技術戦略を説明させていただきたいと思っております。まず、説明内容ですけれども、1から4まで、これはファクトベースの話ですけれども、現在の状況がどうなっているのか、外国の政策はどうなっているのかということの説明させていただきます。後半の5と6が、今回の説明のボディーに当たる部分ですけれども、将来像はどうなるのか、どんな技術が重要になっていくのかと、まとめと論点という説明をさせていただきたいと思っております。いただいている時間25分で、資料が45枚ですので計算が合わないんですが、何とか飛ばして説明していきたいと思っております。

まず、衛星コンステに関してですけれども、これは最近よく話題に出るシステムでございます。宇宙ネットワークを考える上では欠かせないシステムについての御紹介を、まずしたいと思います。

衛星コンステですけれども、これは宇宙と言いますと、普通は静止衛星を思い浮かべるんですけれども、これは周回衛星でございます。複数の周回衛星を軌道上に打ち上げていて、隊列をさせてサービスを提供するというものでございます。地球をぐるぐる回りますので、通信サービス、それからリモートセンシングサービスを効率的に実現できるという特徴があります。あと、最近ですと防衛分野で使われ始めていまして、ミサイル防衛の探知に使われると期待がされているものです。

具体的なサービスですけれども、これは通信サービスでございます。恐らく皆さん、SpaceXのStarlinkの名前は聞いたことあると思っております。テスラのイーロン・マスクさんが進めている事業ですけれども、こういった周回衛星で、Starlinkの場

合は4万基を打ち上げるという計画ですけれども、それによって通信サービスをグローバルに提供するという計画になっています。現在のところ、約2,000基、既に上げが終わっていると聞いています。

それから、もう一つ、地球観測の例ですけれども、これは日本でも事業参入が一部ありまして、光学衛星、それからレーダー衛星を使って、タイムリーに地球の状況を観測するという事業参入が始まっています。

通信衛星ですけれども、既に衛星が打ち上げられているもの、それから事業構想の段階にあるものをまとめてみたものです。世界全体では、約二、三十の事業構想があるんですけれども、有名なところは先ほど申したStarlink、OneWeb、あとは、これはお聞きになったことがあると思いますけど、イリジウム、そういったものがあります。それから中国でも構想が動いていますし、日本の場合は、NTTとスカパーさんの宇宙コンピューティング・ネットワーク構想といったものがあります。

一応、歴史を振り返りたいと思うんですけれども、衛星コンステレーションは今になって始まったものではなくて、約20年前、イリジウム、テレデシック、スカイブリッジといった、必ずしも事業が成功したと言えないものもあるんですけれども、そういった構想は以前からありました。ということで、こういった通信インフラには自然独占的な部分があるんですけれども、果たして今回、Starlink等はどううまくいくのかどうかというのは1つ関心事項としてあるということになります。

それから、複数の衛星を打ち上げますので、最低、例えば1,000億円以上の投資が必要になります。Starlinkの場合は2兆円、3兆円の投資をするとうたっていますので、なかなかこれは新規参入するのが厳しいというところでもありますけれども、ただ、衛星コンステが宇宙ネットワークの肝となっていくしますので、日本として、どのようにこの事業を捉え、切り込んでいくのかということが重要なポイントになってくるという状況です。

中国の状況を御参考までにお知らせすると、昨年4月、国有企業が立ち上がりまして、1万3,000基の衛星を打ち上げるんだという会社が立ち上がっています。既にITUへの周波数のファイリングも始まっていて、中国もいよいよ乗り出してきているというところがあります。中国の場合は、ビジネスの提供というよりも、むしろ例えば周波数資源の確保、軌道の確保といった戦略で、大風呂敷を広げているかもしれないというところだと思います。

今後の宇宙ネットワークの技術トレンドを2つ御紹介したいと思いますけれども、1つは、光通信が宇宙空間でも使われるようになるというトレンドがございます。宇宙空間も周波数資源の枯渇が始まっていますので、高速大容量の光通信、レーザー通信、これを導入するという動きがありまして、実用化競争が世界中で動いているというところがございます。光通信のメリットはたくさんあります。一方、曇りの場合は使えないといったデメリットはあるんですけども、メリットのほうが上回るということで、世界的に市場も成長するでしょうという予測もあります。

もう一つの技術トレンドですけども、地上系の通信ネットワークで起きた技術革新が、これをプロットしてみますと、宇宙でも10年遅れ、20年遅れで起きているということが分かると思います。逆に言えば、地上で起きたことをよく理解していれば、これから起こる宇宙ネットワークの事業、技術を握ることができると言い換えることもできると思います。ということで、通信事業者さん、それから通信系のベンダーさんには、宇宙技術は難しいんですけども、ある意味、チャンスがあるのではないかと言えるのではないかと考えています。

各国の宇宙政策ですけども、時間がございませんので飛ばしていききたいと思いますけれども、トランプ政権のときには、国家宇宙政策というのがアメリカで発表されています。それから、EUのHORIZONですけども、昨年からの新しい7年間の計画が始まっています。宇宙関係は、デジタル、宇宙、それからインダストリアルという分野ですけども、2兆円の研究開発プログラムが始まっているという状況です。それから、イギリスは昨年の9月ですけども、独自の国家宇宙戦略を打ち出しています。ブレグジットがありましたので、イギリスなりに独自戦略を行くということなんですけれども、宇宙経済を構築して、宇宙国家として成長するのだということを提言しています。具体的には、宇宙通信やリモートセンシングといった分野を重点化すると述べています。

それから、中国ですけども、これは昨年からの始まった5か年戦略ですけども、宇宙の場合は、人工知能、量子、デバイスという並びで、航空宇宙技術をきちんと育てていくんだという国家戦略が打ち出されています。

それから、国内ですけども、宇宙ネットワーク事業の取組を紹介したいと思います。まず、これはNTTさんとスカパーさんの業務提携によるものです。昨年5月、宇宙統合コンピューティング・ネットワークということで、電波、あとは光も使いながら、場合によっては月面も含めて、こういった壮大なネットワーク構想が打ち上げられています。そ

れから、KDDIさんのほうですけれども、Space Xの回線を使いまして、基地局のバックホール回線で使うんだというところで契約が締結されているということが、昨年の9月に発表されています。それから、ソフトバンクさんは、ある意味、面白い展開をしているんですけれども、静止衛星のSkylo、それから低軌道衛星のOneWeb、それから成層圏のプラットフォーム、HAPSモバイルといったポートフォリオを描きながら、NTNを展開していくんだということを説明しています。

それから、楽天さんですけれども、外国のASTスペースモバイルと提携をしまして、これは約170基のコンステレーションですけれども、そこと提携をして、国内で魅力的なサービスを提供するんだということを発表しています。

総務省における取組ですけれども、2つあります。1つは、衛星コンステレーション向けに、衛星に搭載できる電波と光の通信装置を開発するんだということで、NICTの基金を使いまして、今年度から研究に着手をしています。それから、もう一つですけれども、今年度の補正予算、経済対策を使いまして、衛星コンステレーションの衛星と地上の間の光通信のリンクを確立するための光地上局、これらの整備をNICTで行う予定です。衛星コンステと言いますと、どうしても人工衛星のほうに皆さん、注目してしまうんですけれども、実はそうではなくて、重要なのは、衛星と同等以上に地上局、それから地上のネットワークにつなぎ込んでいくということが実は肝でございますので、そこをしっかりと企業の方に開発していただけるように、NICTでテストベッド設備を整備し、外部に開放していくということを今、狙っております。

これからが将来像についての説明になります。宇宙ネットワークの将来像を考えていきたいと思っておりますけれども、Beyond 5Gの中での宇宙の位置づけですけれども、ここの右下にあるとおり、地上系との接続とシームレスな接続というところで、まずは宇宙が位置づけられているという状況でございます。ある意味、地上系のネットワークの将来のポートフォリオを考えていく上では、NTNや宇宙は欠かせないということになり、既に先ほど説明したとおり、通信キャリアさんは既に取り組んでいますけれども、宇宙も欠かせないフィールドになりつつあると言えると思います。

将来像を考える上で、まず、ユーザーの企業さんがどう考えていらっしゃるかということですが、総務省で聞き取り調査をした結果がこのとおりでございます。結論から言いますと、地上のネットワークと宇宙のネットワークはシームレスにつながっていて、便利に使えるといいなという声が、例えば海運大手等々から声が上がっていますので、そ

こはニーズを踏まえて技術開発、またはサービス提供ということが必要なのかと思います。

それから、これは欧州の研究開発の例ですけれども、HORIZON EUROPEで、2017年から、彼らは既に研究開発を1ラウンド終えています。これは何かと言いますと、右下にありますけれども、地上ネットワーク系を得意としている企業、大学、それから宇宙ネットワーク、宇宙通信、宇宙システムを得意としている企業がフィフティー・フィフティーで大きな連携をしまして、例えば移動するプラットフォームへの高速5G伝送ですとか、そういったユースケースを念頭にデモシステムを作って研究開発をしたというところがございます。

これに関して我々は3点について気をつけなきゃいけないと思っていて、まず、1つは、こういった着想が既に5年前から欧州であるということで、日本は周回遅れという状況です。2つ目が、企業の垣根を越えた、これは巨大なオープンイノベーションですよ。彼らは、それをもう既に実現して進めているというところはすごいなと。3点目ですけれども、ここの左下にありますけれども、彼らの研究の出口の1つは標準化です。ETSI規格に持ち込むということも指向していますので、これは怖いなということで、日本としてもどうしようかということになるかと思えます。

将来のトレンドを考える上では、社会経済がどういうトレンドになるかということ踏まえて検討していくこととなります。人類の活動空間、それから移動するプラットフォームというのは、将来は働き方改革もありますけれども、地球上のあらゆる場所で活躍すると。場合によっては、海洋、宇宙、月面ということもあろうと思います。それから移動するプラットフォームをドローン、空飛ぶ車、それから月面車というのも出てきますので、こういった世界が出てくるんじゃないかと思えます。

こちらのほうで、2030年頃、約10年後のネットワークのユースケースを10個ほど考えてみましたので、ぜひここは御議論をいただきたいと思っています。それぞれ、説明をさせていただきたいと思っています。

まず、1つ目ですけれども、地上系ネットワークの拡張ということで、宇宙ネットワークが、通信インフラの未整備地域、山間、辺地、砂漠、海洋、鉱山があるかもしれません。そういったところに、物理的に拡張していくということが1つ、衛星ネットワークのユースケースとして使われると、今もそうですけれども、ということになるのではないかと思います。ここに、ユースケース実現に必要な技術例とありますけれども、この姿を実現する

ために必要な要素技術についても幾つか代表例を書いております。

それから、2番目です。移動するプラットフォームへの通信サービスということも、宇宙ネットワークの役割なのかと思っています。移動する様々な乗り物、プラットフォームが出てきます。これに対して、切れ目のない通信サービスを提供していきたいということになるかと思っていますので、例えばドローンですとか成層圏プラットフォーム、空飛ぶ車というものもあると思います。そういったことに対して、宇宙ネットワークが通信インフラを提供していくということが必要なかと思っています。空飛ぶ車、ドローンは、これは地上系のネットワークではなかなか基地局から電波が届かない可能性もありますので、宇宙ネットワークの出番というところです。

それから3番目です。宇宙クラウドサービスと書いています。宇宙空間もリモートセンシングのサービスによって、宇宙空間自体からビッグデータがたくさん出てくるという時代ですので、それをエッジ処理したいと。エッジAI、エッジクラウドで処理したいというニーズも出てくるかもしれません。そういったときに、衛星に積み込んだクラウド基盤がサービスを提供するという時代が来るかもしれません。それから、いずれは月面開発ということになりますので、一々月面の活動データを地球に降ろしてということは大変になってしまいますので、月面経済活動向けに、こういったクラウドサービス、インダストリクラウドになるかもしれません。それを提供していくということもありかと思えます。

それから、4番目、極域、海洋、宇宙への経済活動支援ということで、これは既に提供されているサービスを例示しましたがけれども、例えば氷山の追跡、トラッキングみたいなところで衛星というのは開発できるでしょうと思っています。

それから、5番目です。通信ネットワークの強靱化対策ということで、地上系のネットワークの冗長性確保、迂回ルートの確保とバックアップといったところで使えらと。それから、企業のBCP対策でも使えるんじゃないかということを出しています。

それから、6番目は量子暗号通信でございます。この後、量子のパートでプレゼンテーションがあるかと思えますけれども、衛星経由の量子鍵配送ということも必要になってきます。どうしても長距離の国際間の量子鍵配送においてファイバーでは限界がありますので、宇宙空間を通じて、量子鍵配送に取り組むということになるかと思えます。既に宇宙空間の量子鍵配送は注目されていまして、中国、英国、シンガポール、カナダ、イスラエルといった国々で、宇宙実証も視野に開発競争が進んでいるというところにな

ります。

それから、7ポツです。宇宙経由の低遅延ネットワークとあります。これは、そういう世界がもしかしたらあるかもということで掲げていますが、例えばレイテンシーを気にするサービスが幾つかあると思います。金融高速取引、遠隔の建設機械の操作、あとは、最近ですとネット対戦というのも低遅延を気にする人が多いです。光ファイバーの中を移動する光の速度と、宇宙空間を伝達する光の速度は、実は違って、光ファイバーのほうが遅いんです。ということで、例えば東京とワシントンDC間の通信をするといったときは、実は時間差が出てきて、衛星コンステレーションで通信をしたほうが、海底ケーブルよりも約10ミリセック早いと、ひとまず計算上のものですが、ありますので、10ミリセックが金融取引で効いてくるといったサービスに対しては、宇宙は使えるのではないかと考えています。

それから8番目、マルチキャスト通信ということでございます。これは以前から提唱されていて、なかなかサービスの実用化は難しいんですけども、衛星放送に代表されるように、宇宙のいいところはマルチキャストができるということになります。ですので、ソフトウェアですとかファームウェアみたいなものを一斉に配信すると。場合によっては、災害時の情報提供ということもありなのかということで、8番目に掲げています。

それから、9番目、次世代型メタバースの位置づけとありますけれども、今はメタバース、ある意味、流行り言葉になりつつありますけれども、バーチャル空間で人間が活躍したり、お仕事をしたり、コミュニケーションをしたりという時代になりつつあります。宇宙を使って、さらに次世代を目指せないかと思っていて、アバターロボットを使うと、さっき申し上げた極域とか宇宙とか月面とか海底とか、そういったところで自分の分身が活躍する時代が来るんじゃないかなと思っています。例えば月面でアバターロボットを使ってSDGsに関する国際会議を開くとか、そういった面白いこともメタバースも活用しながらできる時代になるんじゃないかと思っています。

それから、最後、究極のカーボンニュートラル通信の提供ができるんじゃないかということで、個人的には、これが一押しではあるんですけども、御存じのとおり、衛星というのは太陽パネルで発電して動いています。化石燃料を使わないんです。ロケットも再生可能な水素エネルギーで打ち上げたり、場合によっては、ロケット本体も再利用します。ということで、ある意味、究極のカーボンニュートラルな通信サービスを提供することができるということです。何か企業のイメージアップのために、特別な通信は宇宙経由

でということも場合によってはあるのかと思います。日本ですと、慶弔の電報サービスがありますけれども、何か特別なイベントで大切な人に対しては、こういったやり方でメッセージを伝えるということもありますので、宇宙経由のコミュニケーションというのは、ある意味、宇宙ネットワークの強みかもしれませんということを打ち出しています。

さて、まとめと論点に移りたいと思いますけれども、今、申し上げた宇宙ネットワークのユースケースをまとめますと、約10年以降、要するに2030年頃にはこういった将来像になるのではないかというマッピングができると思います。これを見ていただくと分かると思うんですけども、宇宙ネットワークの特徴は、どう進化するかということですけども、単に高速大容量になるというよりも個別のユーザーに対して、個別のソリューションを提供していくと。または、移動するプラットフォームに対してシームレスな通信を提供していくという、何か新しいパラダイムが通信サービスで開けてくるんじゃないかという予想が、こういった図からできます。先ほどStarlinkのような、単に通信の土管を目指すというよりも、むしろ高次元のソリューションやDXを提供していくというところで、宇宙ネットワークがBeyond 5G時代で活躍できるのではないかと思います。

そういった将来像を実現するために必要な基幹技術をプロットして見た図がこれです。幾つか重要な技術がありますけれども、2つ欠かせない技術として、ぜひ御議論いただきたいものがあります。1つは、ネットワーク全体が非常に複雑、階層化されます。なので、ネットワークの制御、それから運用、衛星コンステレーションが100基、1,000基出てきたら、人間の手で衛星運用することは無理です。ですので、こういったネットワーク制御運用技術というのが、まず必要になる。むしろ、これが根幹的な基幹技術になると思っています。

もう一つが、地上網、5G、それからBeyond 5G網とのシームレスな連携技術というのが必要になるということで、我が国としては、この2つの技術を育てていって、企業の方々がビジネス展開していくという世界をつくっていかなければならないのではないかと思います。

最後のページ、論点ということで掲げさせていただきたいと思います。まず、1点目ですけども、先ほど提示をさせていただいた、将来のユースケース、基盤技術についてはどう考えるか、ぜひ御議論いただきたいと思っています。それから、2ポツ目ですけども、シーズオリエンテッドではなくて、こういった将来像を見越しながら、国内外の利用

者ニーズを先取りしてマーケティングをしていく必要があると思います。こういったことに力を入れる必要があるんじゃないかと思っています。

それから、論点の3番目、その上で宇宙ネットワーク自体の技術革新、それから地上系と宇宙のネットワークのシームレス接続を実現するために、先ほど提示をした基幹技術の研究開発に重点的に取り組む必要があるのではないかと思っています。冒頭申し上げましたけれども、地上系のネットワークの技術革新に経験したことが、時間遅れで、時間差で宇宙にもたらされるという傾向がありますので、ここは通信を得意とされている方の出番だということです。

4番目です。さはさりながら、今後、必要となるイノベーションのフロンティアというのは、宇宙システムの開発、ネットワークエンジニアリング、それからビジネス創造が同時に求められる、これは難易度の高い複合領域ですので、これは企業単体、または旧来のレガシーなチームングでは開発はやり切れない、もはや不可能であると言えるのではないかと思っています。

最後、このためですけれども、我が国はオープンイノベーションの実現に、まずは真剣に向き合う必要があるのではないかと。異分野、それから海外との連携も積極的に模索しつつ、それから企業の組織内においては、事業部門間の垣根を取り払いつつ、どうしてもネットワーク人材というのは宇宙部門、枯渇しています。ですので、社内の貴重なネットワーク人材を宇宙部門にも手厚く配置するといった経営判断が強く期待されるのではないかと考えております。

私からの説明は以上になります。ありがとうございました。

○相田主査　　ありがとうございました。大変興味深いプレゼンテーションありがとうございました。いろいろ突っ込みどころはあるんじゃないかと思いますが、この後のプレゼンとも多少関係があるかと思いますが、一旦、次のプレゼンテーションに移りたいと思います。

○山口宇宙通信政策課長　　ありがとうございました。

○相田主査　　次は、続きまして、NICTとの佐々木オブザーバーから量子技術分野の動向と今後の課題について御説明をお願いいたします。

○佐々木オブザーバー　　NICT量子ICT協創センターの佐々木と申します。本日はこういった機会を頂戴しまして、誠にありがとうございます。次をお願いいたします。

まず最初に、量子技術の概要なんですけども、大きく3つの柱から成っています。1つ

は量子コンピューターで、これはサイバー空間の強力な計算エンジンになります。スパコンよりも短時間で、省電力で計算できるということから画期的な薬、材料の開発、金融市場のリスク予測、物流の最適化や渋滞解消、AIの処理能力の拡大といったことが期待されています。ただ、一方で、解読の脅威にもなっておりまして、これに対して量子暗号というのは、どんな計算機でも解読できない通信を実現するというので、サイバー空間の安全性強化に非常に重要な技術になっています。量子計測・センシング、これは高精度、高感度で計測、センシングを行うというもので、フィジカル空間に新たな情報をもたらす技術と期待されます。例えば医療診断の高精度化、火山活動や水流の監視等が期待されています。

次をお願いします。これは量子コンピューターの適用領域をまとめたもので、ほとんどあらゆる産業分野に大きな波及効果をもたらすと言われておりまして、ここに書いてある例は既に活用事例が生まれている例でございます。量子コンピューターには大きく2つのタイプがありまして、素因数分解等を実行できるゲート型の量子コンピューター、あと、組合せ、最適化問題を得意とする量子アニーリングマシンになります。どちらも今はクラウドサービスが既に始まっています。

次をお願いします。量子通信、暗号でございますが、これは盗聴やパッキングが理論上不可能な通信を実現するもので、例えば、様々な重要情報の安全な通信、また、これは秘密分散という技術を組み合わせると、安全なデータバックアップ保管ですとか、2次利用というのが可能になります。また、衛星通信に実装することによって、外交機密ですとか機微なセンシング情報をグローバルスケールでやり取りすることが可能になります。

次をお願いします。計測・センシングは様々なデバイスがありまして、固体センサーから原子集団の慣性センサー、光格子時計、量子もつれの光センサー等がございまして、2030年頃から生命科学、医療、姿勢制御、時空間ビジネス、全球即位システムや様々な計量標準で実用化が本格化すると予想されます。

次をお願いします。そういったことから諸外国の政府も研究開発、投資を大幅に拡充しながら拠点形成、人材育成等、長期的な戦略を今、展開しています。

具体的に通信分野で述べたいと思いますが、次のスライドです。スピード、規模で他国を圧倒し、今、先行しているのが中国になります。北京、上海に2,000キロにわたるネットワークを2018年に運用に入りまして、今でも内陸部にネットワークの拡張を行っておりまして、2025年頃には大陸規模のネットワークの構築というのを計画し

ています。また、2017年に衛星量子暗号を世界で初めて実証しています。アメリカのほうは、サイエンスファーストという方針で長期戦略を推進しておりまして、電力供給網向けの量子暗号ネットワークですとか、将来に向けた量子インターネットの構築の基礎研究等が行われています。また、衛星光通信ではアメリカは圧倒的な技術力を有しておりまして、間もなく衛星量子通信でも主導権を握ることはほぼ確実だと思います。欧州においても、通信事業者、衛星事業者の動きが活発化しておりまして、大型プロジェクトでインフラ構築が始まっています。

次をお願いします。我が国においては、昨年2月、国内で8つの拠点が発足しました。量子技術の全分野をカバーしまして、まずは優れた人材を結集すると。そして、産業界から積極的な投資を呼び込むということで各拠点、今、活動を始めたところでございます。

次、お願いします。NICTは量子セキュリティー拠点に指定されておりまして、今、このスライドでは基礎となる要素課題を2つ挙げてございます。1つ目が量子通信で、さらに2つのサブ課題がございます。1つは非常に高感度の検出器を使うことで、中継器がなくても長距離大容量の通信を実現するというもので、もう一つは、量子中継などの新プロトコルで将来、量子インターネット等を構築するための基礎研究です。量子暗号のほうは、どんな計算機でも解読できない暗号通信を実現する技術で、基本的には一対一の通信ですけども、トラステッドノードという局舎を介して鍵リレーすることでネットワーク化を行いまして、これが今、実用段階に入っています。

次をお願いします。ただ、現在の量子暗号、量子中継というのは、一対一の通信プロトコルで、機能も限定されています。一方、今インターネットで使われている公開鍵暗号は1対100万の規模で、電子証明や鍵交換等を実行できるわけです。あと、量子暗号、量子中継というのは盗聴を完全に見破ることができるんですが、逆に盗聴され続けると、今度は鍵や量子もつれを確立できないということがありまして、サービス停止攻撃への耐性がないという、ある意味、致命的な弱点を有しています。そういったことから量子のみでは、広域化、多地点のセキュリティーインフラ構築は不可能というのが事実でございます。したがって、実用上は量子の領域と古典の領域、これを組み合わせたネットワークの冗長化というのがどうしても必須になります。こういったアーキテクチャ自体、実はまだ未踏課題となっております。量子通信、量子暗号のほかに、情報理論や暗号技術、ネットワーク技術等を融合して、新たな技術体系の構築、これが重要であります。今後の学術創生と実用化の鍵を握っていると思います。これを我々セキュリティー拠点の理念に据

えて取り組んでいます。この図は様々の暗号技術を機能と性能という視点でマッピングしたものです。様々な技術がございますが、量子暗号を左下に、その一角を占めています。逆に言えば、この領域しか占めていないと。機能としては、鍵の交換と通信の秘匿化であります。一方、右端に情報セキュリティの要件、機密性、完全性、可用性、機能性と書いてございます。こういった4つの要件全部を満たすオールマイティーな暗号技術は実はございません。ここに書いたような技術を適材適所で組み合わせて、総合的にセキュリティを強化していくことが重要です。

次をお願いします。これは技術的に、安全性対利便性という軸で、もう1回プロットし直したものです。量子暗号、量子中継、究極的な安全性を保障できますけども、どうしても速度が伸びないということで、左端にマップされています。一方、右下に現代暗号がございますが、これはもう様々な端末で今、距離の制限なく使われております。ただ、その安全性というのは、今、量子コンピューターの登場で大きく脅かされています。真ん中にまた、重要な技術がございます。秘密分散、物理レイヤー暗号、セキュアネットワーク符号化、これは量子を直接使っていません。古典の理論なんですけど、安全性は計算料では脅かされないという新たな古典的な技術であります。実は、この領域と量子の領域を融合するというのは極めて重要で、さらに現代暗号と統合していく。これが我々が言う量子セキュリティという分野の改善でございます。

次、お願いします。大きな出口、2つ代表例を書いてございます。左、量子セキュアクラウド、これは将来にわたり、盗聴や改ざんを防ぎ、秘匿化したまま計算を実行するというもので、現在、内閣府、S I Pの下で社会実装が行われておりまして、ゲノムの分野、医療の分野、金融分野、政府系、実際の実証例が積み上げられております。右のほうは量子セキュア移動通信ネットワークというもので、宇宙から地上網まで網羅する大容量かつ安全な移動通信ネットワークを実現するというもので、コアになるのはレーザー光通信、空間全般の通信でございます。こういったものを構成するための基本特許をNICTから出願されていたものが今年度、成立しています。総務省の2つのプロジェクトで、これは推進しております。

次、お願いします。あと、将来的にグローバルなスケールで、量子暗号通信網を構築するための研究開発、総務省の下で2020年度から始まっており、東芝をプライムとして11の機関が連携して取り組んでいます。次世代の量子暗号技術、また、トラステッドノード及びそれを使った、先ほど言った周辺技術を使った高度分散化のリレー技術、また、

将来に向けての量子中継の技術、最終的には、これらを統合するネットワーク制御管理の技術ということで取り組んでおりまして、量子と重要集権分野の融合ということを目指しに今、進めています。

次、お願いします。これが日本独自の衛星量子暗号技術の開発で、今年度、立ち上がったもので、スカパー、J S A Tをプライムに、NICT、NEC、東芝で取り組んでいます。問題は、中国とかカナダ、英国、低軌道での実証というのを、これからまた続けていくわけですけど、我々が目指すのは、地上局から静止衛星、3万6,000キロをカバーできる秘匿通信の技術はあるのかということで、また、データ転送もきちんと行う、安全性と伝送効率のバランスを自在に設定できる日本独自の新たな方式でございます。名称、見通し通信QKD及び物理レイヤー暗号と言いまして、この4年間、厳格な機密管理の下で進めてきました。そして、今年度から競争優位を確認できているので、特許の申請と発表を開始したというもので、まず、基本特許は2つ今、出願が終えて、論文は間もなく発表されます。

次、お願いします。こういったことに基づいて今後の課題と戦略です。まず、量子セキュリティ分野を創出しながら、いずれは量子コンピューター、量子計測、センシング等の様々な量子技術の融合を図って、それを情報通信インフラに導入、統合して、量子技術に基づく新たなサービスを提供するインフラ構築、これがこれからのビジョンだと思っております。量子技術プラットフォームという名前と呼んでいます。

次、お願いします。大まかなレイヤー構造ですが、一番下の黄色いところ、光ネットワークと移動通信ネットワークでございます。上の緑の部分が、そのセキュリティを担保する現代暗号の基盤でございます。その上、今、都市圏で実用化が始まった量子暗号ネットワークで、右のほうに量子コンピューター、量子計測、センシングとありますが、量子コンピューターは今、クラウドサービスが始まっており、センシングでは光時計などがファイバーで、フィールド実証が始まりました。そうしますと、いずれ量子の情報、いわゆるqビットと呼ばれるものが、直接ネットワーク上でやり取りされる、いわゆる量子インターネットというような新たなパラダイムというのが今、見えてきています。最終的には、こういった量子技術を段階的に、衛星コンステレーション上にも実装するというので、グローバルスケールで高度な計算処理、計測、センシング、通信暗号の機能を提供する新たな基盤が登場するだろうと。これが量子技術プラットフォームの概要でございます。

次、お願いします。ロードマップでございしますが、2023年頃、まずは、関東圏でユーザー拠点に、量子暗号回線を伸長して、ベンダー、通信事業者による量子暗号サービスを提供するというのが目標で、現在、令和3年度補正予算でテストベッドの拡充等、準備を進めております。2025年頃、今度は関東圏から仙台圏、大阪圏等、都市間規模に量子暗号通信を拡張して、装置の量産化のフェーズに入りたいと思います。また、検出器等の戦略部品は国産生産体制を整備する、これも今、準備中でございます。そして、装置の評価、認証制度を確立する、これがルールメイキングで非常に重要です。同時に、様々な量子技術を集約した量子セキュアクラウドの実用化の時期と見ています。また、研究では量子中継のフィールド実証等、将来のネットワーク化に向けた布石をきちんと盤石にすると。そして、2030年頃には日本の量子暗号衛星も複数機打ち上げて、地上網との統合を図ると、この辺りが量子技術の本格普及期と見ています。

次、お願いします。そこに向けて現在、進めている取組ですが、量子セキュアクラウドの機能強化です。これまでは、右の超長期セキュリティーを保証する暗号基盤ということを注力してきました。量子暗号、秘密分散と、あと耐量子計算機一暗号の認証基盤、これを今、統合できたところです。いよいよ今年度から実際、コンピューティングの基盤として、量子・古典ハイブリッドソルバーというものの実装に着手しました。現在、最新のマシンとしては、GPUですとか、古典、量子のイージングマシン、小規模のゲート型の量子コンピューターとありますが、やはり得意、不得意があって、ユーザーからの問題に応じて最適な計算資源の配分を行う、いわゆるこれらのマシンを水平統合するコデザインの基盤というのが非常に重要です。こういったものを統合したものを量子・古典ハイブリッドソルバーと呼んでおまして、次のページをお願いします。

今年度、SIPで実際に取り組んでいる例です。フォトニック結晶レーザーのスマートデザインというもので、京都大学が開発しているフォトニック結晶レーザー、いろいろな構造最適化にスーパーコンピューターを使うんですが、1か月ぐらいかかる複雑な問題がございます。早稲田、慶応、フィックスターズが開発した、先ほどの量子・古典ハイブリッドソルバーというのを使いますと、1日で新しい最適解が出るというところまで実現できています。こういった最適解というのは、製造メーカーにとっては企業機密、いわゆる秘伝の書でありまして、超長期間安全にバックアップ保管が必要で、ここを現在暗号や量子暗号、秘密分散等の先ほどのデータ保管交換基盤、そこできちんと管理する、こういった今、機能検証を進めているところでございます。

次、お願いします。最終的には、量子セキュアクラウドのイメージですけども、様々なユーザードメインから出てきたデータを、下の茶色いデータ保管・交換基盤に送り込んで、ここできちんと流通させ、バックアップを行うというものです。また、秘匿計算の機能等によってデータの安全な2次利用を実現すると。そして、これからの様々な社会課題を解決するために、量子・古典ハイブリッドソルバーをフル稼働するわけですが、そういったものを迅速に必要なユーザーに届けつつ、出てきた貴重なデータは茶色いデータ保管・効果基盤で管理すると。重要なのはユーザーのアクセス管理になります。そこには量子コンピューターでも解読が困難な耐量子の公開鍵認証基盤を使って、きちんとアクセス制御を行っていくというものです。2025年頃の実用化を目指します。

次、お願いします。それに併せて重要になるのが、評価・検定・認証制度の整備でございます。量子暗号の調達にも国際規格、いわゆるコモンクライテリア準拠の認証が必要となります。ただ、まだ世界では、その実例はこの分野ではございません。今、まさに日本がその主導権を取りつつありまして、ヨーロッパのETSI、ISO/IEC、ジョイントテクニカルコミッティに膨大な寄書を提出して、今、日本仕様というもので、こういった体制をつくりつつあります。ですので、我が国の今後の戦略、一言で言いますと、コモンクライテリア認証を取得した量子暗号装置を世界に先駆けて市場投入するということかと思えます。

具体的な作業としては、セキュリティー要求仕様、プロテクションプロファイルというものの草案を作成しまして、これを認証機関に提出して、きちんと審査を経て、正式なPPを、まず成立させるということです。認証機関では、日本ではIPA、例えばドイツではBSI等がございます。あと、ベンダーは製造した装置を今度は評価機関に持ち込みまして、評価をやっていただくと。評価を行う機関は、ECSEC等の評価ラボという企業ですとか、先端の計測機器を備えるNICT、産総研というのが候補になると思えます。この評価結果を基に、IPA等の認証機関による認証が行われ、合格しますと、CC認証された量子暗号装置をユーザーが調達できるということになります。何とかこれを2025年頃までに確立しまして、ベンダーによる市場投入と量産化というところに進みたいということです。いろいろな政府機関、公的な機関、企業、あと量子ICTフォーラムのような専門集団との連携が重要です。何とか量子技術の分野で、日本がルールメイキングを主導した成功例をつくりまして、国際市場のシェア拡大につなげるということが大きい目標かと思えます。

次、お願いします。あとは、将来に向けた布石ですが、量子インターネットへの研究開発基盤の整備でございます。総務省のプロジェクトで着々と取り組んでおりますが、実用化された一方向型QKD、これについては、今度は耐環境性や速度の向上に取り組んでいます。測定支援中継型QKD、実はこれは次世代のもので、距離を倍々に増やしていけるような方式で、これも現在、取り組んでいます。3年後か4年後に敷設、都市圏の敷設環境でこういった様々なQKDを相互接続するというのが目標になります。量子中継についても、今、研究開発を進めておりまして、3年後にせめて構内の敷設環境で、システムとしての機能実施を行うのが目標です。量子中継は、実は量子コンピューター内部でプロセッサをつなぐインターコネクションの技術としても重要で、今はムーンショット等で取組が行われています。右からくるコンピューティングの流れと、真ん中の通信から来る流れ、こういったものを統合して、量子インターネットのアーキテクチャを構築していくというのが重要です。ですので、赤い線で囲んだ部分、ここが少し戦略的に推進するスキームとして、検討の時期に来ているだろうと思います。将来的には、下に書いてあるとおり、量子暗号の長距離化、また、光時計を利用して結ぶ革新的な時刻の基盤、また、分散型の量子コンピューティング等が期待されます。

次、お願いします。5年ごとに社会実装のイメージをまとめてみました。2025年頃、都市間規模の量子暗号ネットワークで、金融分野等での実用が始まると。量子コンピューターは古典回線の接続でクラウドサービスが浸透していくだろうと思います。また、低軌道・地上局間での衛星量子暗号の実証が始まる時期だと思います。量子中継は、まだ研究開発段階で、これはスタンドアロンでこの時期は書いています。

次、お願いします。30年頃になりますと、衛星コンステレーションが形成されまして、いよいよ地上網との統合が始まると思います。量子中継のほうは実証段階に来まして、量子暗号ネットワークとの相互接続ですとか、一部量子コンピューターの分散化といった実証が始まると予想します。

次、お願いします。40年頃には、今のインフラは7Gの時代だと思いますし、いよいよ量子の技術がグローバルスケールで社会に使われ始める時期で、この辺りが大きいパラダイムの変革で、この辺りのイメージというのは多分、想像の範囲外かもしれませんが、今はこういったビジョンを描いています。

次、お願いします。長期戦になりますので、これは人材育成が極めて重要で、NICTでは、昨年度よりNICT Quantum Campを開始しました。これは産学連携による実

実践的なプログラムの提供というのがポイントになっています。昨年度、大学院生を中心に30名が卒業しております。今年度は規模を拡大して50名の受講生と、あと、研究資金をもらって探索的な研究を行う5件が採択されて、まさに年度末に向けて、皆さん頑張っ取り組んでおられます。昨年度の修了生は、今年度のプログラムのアシスタントとして参加したり、NICTインターシップで先端的な研究開発に携わるなど、成果も少しずつ今、出ています。

次をお願いします。まとめになります。量子技術による情報通信インフラのアップデートが今、始まっておりまして、2025年頃から量子暗号等で量産化、低価格化が始まり、30年頃からコンピューティング、通信・暗号、計測・センシングを統合した形で本格普及期に入ると予想されます。同時に、量子技術と周辺技術の融合も進んで、新たな学際領域が生まれていくと期待しています。こういった最新の動向を量子ICTフォーラム等でも発信していますので、ぜひ関心があれば、御一考ください。また、NICT Quantum Campを、来年度もまた強化していきたいと思うので、ぜひ若い方々に紹介いただければと思います。

最後に次のページで謝辞を述べています。様々な研究資金をいただいて研究を進めており、また、様々な会議体での議論の結果も今回の資料に使わせていただきました。改めて御礼申し上げます。御清聴ありがとうございました。

○相田主査 ありがとうございました。

では、続きまして、量子技術による新産業創出協議会、島田オブザーバーから量子技術の推進に向けた協議会での活動等について、御紹介をお願いいたします。

○島田オブザーバー よろしくをお願いいたします。今から資料を共有させていただきます。御覧になれますでしょうか。

○相田主査 大丈夫です。

○島田オブザーバー ありがとうございます。東芝の島田と申します。どうぞよろしくをお願いいたします。量子産業協議会のQ-STARの実行委員長を務めさせていただいております。本日、Beyond 5G推進戦略の中での超安全、信頼性の量子暗号のところについて、その背景とか関わっている領域を含めて御説明させていただければと思います。

目次は、このような内容で御説明します。そもそも背景としまして、これは我々、DX 1.0、2.0と勝手に読んでいますが、1.0というのがサイバー・トゥ・サイバー、すなわちパソコンやスマホの情報がクラウドにつながることによってAPIで何でもつ

ながるようになったという時代であります。これはG A F Aの時代と我々は考えております。一方で、これから様々なもの、今までデータが取得できるとは思わなかったようなものからA P Iエコノミーが発展していった、フィジカルと言われるような部品、例えば、通常、今までデータが取れると思わなかったようなところからデータが出てくるといことが起こります。これがD X 2. 0と我々は捉えているわけでありまして。これは、ある意味、今現在においても、こういったフィジカルの領域をねちねちとやってきた日本の技術が生きる領域じゃないかとも思っております。

しかしながら、その次に、もう既に量子によるトランスフォーメーションというのが待っていると考えております。その一つが、量子インターネット時代の到来が次の5 0年後には起こるであろう。先ほど佐々木先生が、私よりももっと見事に御説明されておりますので、あまり深くは、中途半端な定義では申し上げませんが、いわゆる特定の技術的な知識がない人にとって、インターネットというのが量子インターネットと融合して表れてくるといことが、物すごく巨大な産業が生まれる可能性があるといことを感じられるように御説明しているといことになります。

さて、そもそも量子コンピューターといのは何がすごいのかといことなんですけれども、これはコンピューターだけを作っても全く意味ありませんで、膨大なデータと、それを運ぶ通信と、それを使って様々な最適化をするアプリケーションソフトウェアが組み合わさることによって、初めて量子産業といのが可能になると思っております。量子コンピューターの強みには2つありまして、とてつもなく巨大な空間を瞬間的に最適化できるのでありますけれども、その問題には、静的な問題と動的な問題が存在します。静的な問題といのは、例えば計算創薬や材料最適化組合せ等、一度答えが分かると答えが変わらないものになります。一方で、動的な問題といのは、常に新たな解が求められるような領域でありまして、金融や電力、果ては会話とか、こういったものも非常に、常に新たなものが生み出されることになるわけでありまして。これを行う上において、通信と膨大なデータへのアクセス、これが両立しなければ、量子コンピューターの強みを発揮することができないといことでもあります。

もう一つ、量子コンピューターが作られると、先ほど言いましたように、膨大な空間であつという間に最適化してしまいますので、暗号鍵が解読されてしまうとい問題があります。今現在、既に長期的に意味のあるようなデータ、例えば個人のゲノムですとか、もしくは、軍事的に重要な機密データ、こういったものを既に盗んで暗号解読ができるよ

うになるまで待っている人たちが存在していると言われております。

市場動向ですが、先ほど佐々木先生もありましたように、中国がとてつもない速度でこれを進めているということでもあります。中国のネットワークは、将来の量子インターネットの覇権を見据えて、陸上、衛星で着々と準備しておりまして、2022年には2つのサテライトと10個のグラウンドステーション、2030年には5個から8個のサテライトで100グラウンドステーションを用意すると言っております。

これに呼応するようにして、様々な国々が量子暗号通信や量子通信に取り組もうとしておりまして、韓国も通信大手3社が公共医療分野で量子暗号通信網を構築しようとしております。それに対して、国もかなりの支援をしているということでもあります。

米国であります、米国はどちらかというと、もともと量子暗号通信というよりは、これを数学的に難しい方法でとどめることのほうが重要ではないかという立場を強く取っていたのであります、これが量子テレポーテーション、すなわち量子通信にまで発展するという可能性に気がついて以来、物すごい勢いで、この研究開発を進めるようになっております。特にDOEを中心に、量子インターネットの研究開発を推進しておりまして、長距離のテストとか、こういったものを進めているところであります。

話は変わりますが、量子技術の投資状況であります。これは量子暗号通信だけでなく、量子コンピューターを含んでおります。日本も昨今は、国における研究開発費というのは積み上がってきたんですが、海外、米国においては、特に企業の実用化に向けた取組が非常に盛んになっておりまして、ここに比較をしておるんですけども、実にGoogleやIBM1社で、日本のプライベート企業の全体を超えるような金額を量子コンピューターの開発につき込んでいるという状況になっています。これは何が起こっているかということ、研究開発そのものではなくて、実際に巨大なものを作って、そこでいろいろな知見を得ようとしているということでもあります。確かに、今現在のIBMが作っているコンピューター自体は、それほど実用性がないかもしれません。しかしながら、これらを作り、試し、様々なことの知見を得るといって自体が極めて重要なポイントでありまして、個人的に、私は飛行機的设计を10年ぐらいやっていたんですけど、飛ばさないと全く、理論だけでは何もできなくなるということを実感しております。

こういうような状況を受けまして、世界中で量子の産業化、研究ではなくて実装を目指す、もしくは何らかのビジネスを得ようとするコンソーシアムが立ち上がってきております。2021年は、まさにそれらのコンソーシアムが世界中で立ち上がりまして、Qu

I Cと言われるEuropean Quantum Industry Consortium、それから、韓国の未来量子融合フォーラム、ドイツのQUTAC、それからUKQuantum、そして、日本のQ-STARと。しかしながら、米国は既に3年前に、これをQED-Cとして立ち上げておりまして、会員数は既に170を超えております。ちなみに、Q-STARは、現在、会員数が50を超えました。QED-CのSteering Committeeには3者のスタートアップが入っており、彼らの厚みと深さを感じるところであります。

さて、Q-STARであります。我々は、量子コンピューターは膨大なデータ、量子暗号通信、アプリケーションソフトウェアというところのスコープから出発したのですが、日本の強みであります、材料やデバイス、計測技術、量子マテリアル、量子バイオ、量子センサーといった幅広い範囲を取ることによって、サプライチェーンを生かした取組を行うべきであると考え、物すごく広いスコープを取っております。

協議会の会員は、今現在50社を数えておりまして、特別会員15社、法人会員11社、準法人会員7社、準法人会員というのは、主にベンチャー企業で、ベンチャー企業用に安い会費を用意しているわけでありまして。我々が一番最初に行いましたのは、レファレンスアーキテクチャモデル、QRAMIというのを作りました。これを簡単に御説明したいんですが、左側のラインが業界になります。すなわち材料、それから製造、インフラ、運輸、交通、金融サービスと、どんどんと業界の裾野が広がっていくと。それに対して、右側のラインはデバイス、モジュール、制御、インフラ、コンピューター、ソフトウェア、ネットワークとなっております。これを我々はハードウェアレイヤーと呼んでおりまして、すなわち小さいものから大きなものへどんどんとシステムが大きくなっていると。

それに対して、上の領域がアーキテクチャレイヤーと言われるものになります。これはハードウェアコンポーネントに対して、通信のプロトコルやデータモデル、それからビジネスファンクション、そしてビジネスモデル等まで出てまいります。研究開発の内容を量子イノベーション戦略というのが既に策定されておるんですが、そこに書かれている内容を量子レファレンスアーキテクチャにマッピングしますと、一番下のアセットレイヤーにべったりと張りつくこととなります。これはどういうことかということ、要するに、研究開発を中心に行っているということでありまして。実際に、世の中に実装していくのはハイブリッド技術が非常に重要で、今の技術とどのようにつないでいくのか、もしくは、技術との吸収層はどこに設けるのかということを考えていくことが非常に大切になります。これらはいわゆる実装技術と言われるものでありまして、必ずしも量子のことを知って

いる人でないとできないものではありません。この辺りの技術融合を、さらにビジネスモデル融合をしていくことによって、初めて量子産業というのが育っていくんだと思っております。

我々は、このQRAMIを活用しまして、部会を設けて、様々な部会で共通言語として利用して、今、我々は一体どこの話をしているのかというのを一瞬でみんなが理解できるようにするという標準プラットフォームとして使っております。

また、さらにこれを長期ロードマップとして使うこととしておりまして、例えば、2030年に、先ほど佐々木先生の話も出てきました、重要なマイルストーンである量子メモリーが出てきたときに、一体、上の層のどこに影響が出てくるのか、もしくは、上の層に影響が出ないようにするためには、どこに吸収層を設けるのかといった議論を、我々は今、進めている最中でありまして。

運営体制はこのようになっておりまして、運営委員、これは各社のCEOクラスが出ております。実行委員はCTOクラスが出ておりまして、政策提言、標準、テストベッド、研究開発、海外産業連携、長期ロードマップ策定といったワーキンググループと、先ほどのようなユースケースをつくる部会から成っております。

部会ではユースケースを中心に議論しておりまして、4つの部会があります。簡単に説明します。量子波動・量子確率論応用部会ではありますが、ここは異業種企業間の連携を前提とするユースケースで、特にディスクポートフォリオや金融系のユースケースを開発しております。量子重ね合わせ応用部会は、品質管理やテスト、網羅的、遺伝子検査、アンモニア合成等々、科学、もしくは材料に近いような領域におけるユースケースを開拓しております。もう一つ、最適化・組合せ問題に関する部会というのがありまして、これは量子コンピューターの特殊系であります、アニーリングマシンを使って、様々な社会課題解決のユースケースをつくっているという状況です。本会議に関連するところとしましては、量子暗号・量子通信部会というのが設けられておりまして、ここで様々なユースケースが検討されております。

その一部を御説明します。例えば量子暗号通信のユースケースとして、銀行間決済が有効だと思っております。今現在、銀行間の決済は専用線で結ばれているということもありますし、これらを行う際に様々な不便なことがあります。これを量子暗号通信を使って、一般回線で送れるようにすると、様々なシステムが容易になり、簡便になるのではないかとされておりまして。例えば、日銀と銀行間の決済等がこれに当たります。同様のことが

証券間、機関間取引にも考えられます。例えば、保振と証券会社の間、さらに証券会社から言われたのは警察庁とつなぎたいという話もあります。これも専用システムがしてしまっているところで、大切な点は、量子暗号通信そのもの単体で見ると、高価のように見えるんですが、これをシステム全体で見ますと、クラウド化の視野が入ってきまして、全体としてシステムコストが下がっていくということでもあります。

さらには、金融の量子セキュアクラウド、これは分散化させてデータをストアするという仕組みになります。同様のことが医療の情報基盤でもできると考えております。これはNICT様と非常に強調してやらしていただいております。さらに、セキュアACADAネットワークということも考えられます。これは電力の分散配信が盛んになる際に、これがハッキングされると非常に危険になると。SCADAというのは特殊なネットワークで、東京電力といったような電力会社は通常の通信網とは違う通信網を自分たちで持っている。そのネットワークをQKD化すると、一般的にいろいろなことのゼネラルソリューションであるPKIの仕組みよりも、むしろ安価になるという調査結果もあります。

それから、高セキュリティの通信サービスです。5Gなどの実験が、実はかなりの地域で行われております。5Gの特徴であるリアルタイム性を活用しようとする、例えば、自動車や交通機関の制限に使おうと。その際に、それが低遅延を利用したということでもありますけれども、その際に、母体になるような区間においての量子暗号通信を使うことによって、ハッキングが不可能な状態をつくらうということでもあります。これは、海外ではベライゾンやドイツテレコムが盛んにテストをしているところであります。

こういったことに加えて、海外連携の加速をしております。先ほど言いましたQUTACやQ-STAR、それからQED-C、QuICといったところとワークショップを既に実際、実施してございまして、彼らと共同で様々な活動を行おうとしております。今、彼らの活動の中で、既に具体的なアクションアイテムとして出ているのは、サプライヤーネットワークの情報交換を行おうということで、これは日本側からテンプレートを用意して、そこに情報を埋めてもらうという方法で情報交換を行おうとしております。

もう一つは、リーガルフレームワーク、法律的なあたりのフレームワークを詰めていくことでもあります。量子、様々な機関があるんですが、我々はあくまでもユースケースをたくさんつくって、それをテストベッドと連携することによって具体化していく。さらには、研究開発機関との連携、海外連携、標準化、それらを含めて政策提言を行っていきたいと考えています。

最後に、少しおかしな話をしたいと思うんですが、そもそもデータの世界がどうなっているのかということでもあります。よく我々は、従来のハイアラーキー型、階層型に物事を考えがちなんですが、実際にデータの接続というのは、こういうカオスのような状態になっております。これは、ロジカルなウェブのリンクのコネクションを可視化したものになります。カオスのように見えるんですけども、これを、例えばリンクの数を多いもの順に、皆さん専門家なので、よく御存じだと思いますけど、ハードウェア的に考えると、こうなっているわけじゃないんですけど、ロジカル的に考えるとこうなっている。これをリンクの多いもの順に並べると、実は中間ぐらいの数が多いという、平等なガウス分布にはならず、ベキ状の分布になります。これをスケールフリーネットワークと呼びます。すなわち、世の中のリンクはどうなっているかという、物すごくたくさんのリンクを持つほんの僅かのウェブサイトと、ほとんどリンクを持たない大多数で構成されているということでもあります。ちなみに、これは人間の友達の数でやっても同じになります。すなわち人間の行動そのものが反映されているというわけでもあります。

しかしながら、スケールフリーネットワークというのが完成しますと、おかしなことが起こりまして、パーコレーション現象、ある臨界点を超えると爆発するという現象が起こります。これは、最近パンデミック現象と個人的に呼んでいるんですが、ある一定まで感染率が高まると爆発するというのと同じです。これはすなわち人間の行動がスケールフリーになっているということそのままだと表していると思います。そして、これを利用したものが、いわゆるSNSなのであります。例えばフェイスブック、マーク・ザッカーバーグは「いいね」しか発明していない。インスタグラムなどはコンテンツもない非常に簡単なソフトウェアですが、みんなが勝手にフォローしたり、タグづけをすることによって、スケールフリーネットワークを自動的に作成しているわけでもあります。これらのものがいかにパワフルであるか、彼らが非常に巨大な企業価値をつくっていることから明らかであります。我々はネットワーク化するという際に、こういった自動的に増殖するような仕組みについて、よく考えなければならないんだと思います。2030年、量子鍵配信や量子暗号通信を組み合わせた量子コンピューター耐性を持つ量子セキュア通信が実用化されていると私は考えております。その上、量子セキュア通信の社会実装が進み、例えば県庁所在地のQSCネットワークが接続されているとか、主要な研究機関や大学は、Quantum Secure Communicationで接続されているとか、港湾、防衛、金融、電力の社会インフラが量子セキュアによって強固に取られ、オフィスや自宅でも量子セキュア通信が可

能になる。Beyond 5Gや6Gやコアネットなんかは端末まで、エンド・トゥ・エンドで量子セキュア通信に保護され、医療や自動運転などリアルタイム性が要求される遠隔制御にも量子セキュア通信が適用されているという形になるんじゃないかと思います。これらを利用するためにはAPIが標準化され、WRP、SFA、CAD、グループウェア、ビデオ会議とか、だから絶対に盗聴されないズームとかWebExと、こういったようなものが量子でセキュアされるという時代が来ると思います。

さらには、衛星QKDの技術開発が進み、静止衛星でのQKDの実証が開始され、量子インターネットの世界へと、だんだんと近づいていくと思っております。我々、2025年としては、首都圏全国都市を接続する量子暗号スーパーファイブを整備したいと考えておまして、太平洋側、機関50リンク、都市メッシュリンク60、全体で140ぐらいを整備できれば、ほぼこれができるのではないかと考えております。

政府への希望としては、こういった提言を政府主導によるインフラの統括的な整備や政府自体がアーリーアダプタとして作っていただいたり、テストベッドの整備、テストベッドの利用促進、税制の優遇等をお願いしたいと思っております。また、量子ベンチャーの育成にも、ぜひ貢献していただきたいと思っております。

ちなみに、最後に量子関連団体、先ほどのQED-CやQuIC、これをこういったネットワーク構造に表現してみました。これを先ほどのようなグラフにしますと、見事にスケールフリーになっております。人間はスケールフリーの行動から抜け出せないんだと思っております。

以上、御清聴ありがとうございました。

○相田主査　ありがとうございました。

それでは、ただいまの3件のプレゼンテーションを踏まえて意見交換を行いたいと思います。先ほどは宇宙関係と量子技術、それなり関係はあると申し上げたのとはやや反しますけれども、かなり毛色が違いますので、まずは前半、山口課長に御説明いただいた宇宙ネットワークについて、御質問、御意見ございましたら、お受けしたいと思います。

先ほど事務局からありましたように、私のソフトですと、下のほうに「ニコちゃんマーク」みたいなものがあって、それを押すと、上のところに「挙手」というのが出てきますので、それを押していただければ参加者のところで分かりますので、指名させていただければと思います。もしそれが難しいようでしたら、直接マイクをオンにして発言いただいても結構でございます。いかがでございましょうか。

それでは、浅見先生、お願いいたします。

○浅見構成員 低軌道衛星で使うというのはよく理解できたんですけども、月とかそういう、もっと深遠な宇宙空間との通信というのは、今回は考えられていないんでしょうか。

○相田主査 ほかにございますでしょうか。

では、取りあえず、山口課長、お願いできますでしょうか。

○山口宇宙通信政策課長 御質問ありがとうございます。考えております。実際、アメリカのアルテミス計画がありまして、月面、それから火星、深宇宙向けの活動をしていくんだということで、日本もそれにくっついていくという合意がなされています。となりますと、そちらの深宇宙向けの通信の土管をどうするんだということは、もう既に議論が始まっています、そこは衛星コンステレーションというよりも静止衛星と光通信と、もっと言うと、月面上での衛星コンステレーションという組合せになると思いますけれども、そちらも視野に入れて、技術開発を考えていかなければならないと考えています。

以上です。

○浅見構成員 ありがとうございます。

○相田主査 ほかにいかがでございましょうか。

私から1点、スライドで言いますと、33枚目になりますでしょうか。いろいろなものが地上系を追っかけていくとおっしゃっている中で、一番衛星にとって難しいのが放熱技術、冷却といってもいいかもしれませんが、放射でしか冷やすことができないということと、もう一つ、宇宙線対策だと思うんですけども、先ほどいろいろな、ほかのところでもありました、低遅延のサービスをやるというところでエッジコンピューティングというのは非常に重要な技術だと思うんですけども、衛星の上にコンピューティングを乗せるというのは、なかなか今、申しました放熱と宇宙線対策というので難しいんじゃないかという印象を私は持っているんですけど、何かブレイクスルーみたいなものがありますでしょうか。

○山口宇宙通信政策課長 ありがとうございます。今、写っているページのところかと思えます。NTT、スカパーさんの事業構想でも、宇宙クラウドのコンピューティング、構想があります。もしよろしければ、川添様からも一言あるとありがたいと思っているんですけども、おっしゃるとおり、これはとてもチャレンジングな技術だと思います。衛星の発電能力、それから耐放射線の関係で、そこまで高精度のCPU、それからメモリーが積めるのかということもあると思います。あとはコストの関係もありますので、リモー

トセンシング向けに、どこまで気の利いた便利なサービスが提供できるのかというのは、これからまさにフロンティアとして追求していく必要があるのかと思っています。

それから、先ほどの月面の関係もあると思います。月面向けにサービスを提供するときに、月面で水探査ですとか経済活動、自動運転、探査車を動かすときに、いちいち数秒間かかる地球にデータを降ろしていくよりかは、現地でエッジ処理していくというニーズは当然あると思いますので、そういったところを追求していく、まさに面白い分野かなと思っています。

○相田主査　だから、この辺の範囲内では、あくまで衛星で折り返して、地上にあるデータセンターでコンピューティングを行うということになっているという理解でよろしいでしょうか。

○山口宇宙通信政策課長　いや、地上のデータセンターもあれば、衛星搭載でできる部分は、エッジ処理してもいいんじゃないかという構想です。以上です。

○相田主査　ありがとうございます。

ほかに宇宙関係いかがでございましょうか。よろしゅうございますか。では、C I A J、石井様お願いいたします。

○石井構成員　C I A Jの石井でございます。大変興味深いお話ありがとうございました。もう既に商用ベースに入っているものであったり、あと今後、衛星の数が増えてくる中で、衛星そのものの制御のやり方、あるいは、高度に対するルールづくりとか、そういったことが、まず必要になっていくんじゃないかと思うんですが、その点と、あと、通信する以上、通信の標準化ということも今後、議論になってくるのかと思うんですけども、そういった国際間での標準化、あるいはルールづくりについての動きというのは、現在どのようなになっているのか、教えていただけますでしょうか。

○山口宇宙通信政策課長　ありがとうございます。まず、周波数に関しましては、御存じのとおり、I T Uでファイリングの制度がありますので、それにのっとっていくということになります。

今、政府の中で検討が進んでいまして、恐らくそろそろ公表になると思われましても、衛星の軌道の確保について、どうするんだと。今は早い者勝ちで衛星を飛ばして、何万機と、要は占有、物理的に占有した者勝ちになってしまっているんですけども、それでいいのかというルールメイキングに関しては、政府として情報発信していこうという方向性で今、検討を進んでいます。

それから、通信の標準化に関しては、当然、ITUもあれば、CCSDSと呼ばれる宇宙分野の標準化組織もありますので、当然、技術開発と表裏一体で標準化も進めていくという戦略になろうかと思えます。特に光通信の関係は、アメリカの国防総省もそうなんですけれども、勝手な方言な標準をつくるんじゃなくて、まずは、COTS品と言いますけれども、商用ベースのものを使おうと。規格がオープンになっているものから使っていこうという戦略で動いていますので、日本も同じように、まずは標準を使う、それから標準をつくっていくという形で動いていくことになろうかと思えます。

以上です。

○相田主査 よろしいでしょうか。

○石井構成員 ありがとうございます。

○相田主査 では、続きまして、江村構成員、お願いいたします。

○江村構成員 ありがとうございます。先ほど相田先生から宇宙線の話がありましたが、宇宙に関係する研究開発で、地上でやれるものがほとんどではあると思うのですが、宇宙ならではの問題や、衛星がないとできない部分は、なかなか個別に研究開発するというのが難しいと思っています。そういう意味での研究開発の進め方について、宇宙ならではの考えられているようなことがあるのかということをお伺いしたいと思いました。よろしくお願いいたします。

○山口宇宙通信政策課長 ありがとうございます。これはもう江村構成員が一番を得意とされているところだと思いますけれども、まずは、地上でエンジニアリングモデルをつくって、真空チャンバーに入れてというような設計製造試験をやるんですけども、ここは実機で軌道上実証をしないとモノが言えない世界でして、軌道上実証をして初めて穴ばこが分かる。また、長寿命化対策でノウハウが分かる。衛星運用について知見が得られるということになると思います。まずは、そういった宇宙ならではの開発のプロジェクトを考えていかなければならないというところだと思います。

それから、今までの宇宙開発は衛星を打ち上げて地上とつながる衛星通信の世界だったんですけども、これからは宇宙ネットワークの時代になりますので、宇宙に上げて、異なるベンダーの衛星同士をつなげて、初めてネットワークができるという新しい時代になると思いますので、そういったところを考慮して、プロジェクトというのは組んでいかないといけないと思われれます。

以上です。

○江村構成員　　ありがとうございました。

○相田主査　　ほかにかがでございましょうか。

それでは、一旦、テーマを移ることにいたしまして、続きまして、量子技術のほうにつきまして、佐々木様と島田様からのプレゼンテーションを踏まえて、御質問、御意見等ございましたら、また挙手をお願いできればと思います。

それでは、また、ATR、浅見様、お願いいたします。

○浅見構成員　　どうもありがとうございました。この辺り、あまり勉強していないので教えていただきたいんですけども、31-2の18ページですけども、量子技術プラットフォームのアーキテクチャを見ているんですけど、今のeコマースとかそういったことを考えると暗号も重要なんですけども、電子証明とかそういったもののほうが実際は重要なんじゃないかと思ひまして、現代暗号基盤の証明書、暗号鍵とかこれは書いてあるんですけども、そういったものが量子技術を適用することによって、どう安全になるのか、暗号通信は非常に分かりやすいんですけども、電子書面みたいなものが安全になるよといったものが、私のような素人にも分かるような形で書いてあるとありがたいと思ひました。

以上です。

○相田主査　　じゃあ、これは佐々木様のほうでよろしいでしょうか。

○佐々木オブザーバー　　御質問ありがとうございます。電子証明書、今、公開鍵認証、基盤PKIって一番重要なインフラで、これは特に私は、量子は要らないと思っています。量子暗号等は通信の機密性を保つ技術で、それそのものは証明機能を持ってなくて、電子証明書とかはデータの改ざんを防ぐというもので、データそのものが流出、機密がばれるというのは要件が違って、これは量子コンピューターで破れないということが期待される、耐量子公開鍵暗号というものに移行すれば、ほとんどしばらくはそれでいいと思います。量子暗号は、完全性ではなくて機密性というのを守る通信の暗号化とか、秘密分散と組み合わせた、データ保管の機密性を守るもので、機能が異なります。

それで、本人確認ですとかデータが不正に改ざんされていないということを証明するときには、データそのものじゃなくてフィンガープリントみたいな指紋がきちんと改竄されていないことを保障すればいいので、我々としては、そこはもう完全に、現代暗号基盤と、あと2025年頃から、それは耐量子公開鍵認証基盤に移行しますので、そこはきちんと遅れないようにすればよく、実は我々も相当な労力をかけて、耐量子のPKIとい

うことで、今、いろいろな実証を進めています。

ですので、セキュリティー要件、機密性なのか、完全性なのかによって使う技術が違うというところをきちんと意識して、今日は説明が少し舌足らずだったと思うんですけれども、また、今後の説明にはそういったこともきちんと強調したいと思います。ありがとうございます。

○浅見構成員 どうもありがとうございました。

○相田主査 では、続きまして、KDDI、小西様、お願いいたします。

○小西構成員 ありがとうございます。NICT、佐々木様と東芝、島田様、両方に関わる話かと思うんですが、量子の中継と、さっきの図でもいいんですけども、中継が必要かと思っていて、と言いますのは、ネットワーク、エンド・トゥ・エンドで考えたときには、量子中継というのはもう必要不可欠ですと。一方で、QKDに関しては、リンクでは、ちゃんと暗号の安全、安心の担保ができるけれども、中継に関してはトラステッドノードという形で、中継するノードのところをトラステッドな形にしないとイケませんよねという話があります。

そのプロジェクトを総務省さんで進められているというのが、佐々木様の資料の15ページに書いてあったと思いますけれども、トラステッドノードというのを、今、どのように実現しようとされているのか、どのように実現できそうなのかという話と、併せて、もし御存じであれば、中国なんかはもう既に、国土の中で、中国本土の中で量子のネットワークをやっているということなんですけど、トラステッドノードというのはどのように実現しようとしているのか、もし御存じであればお願いいたします。

○相田主査 それでは、まず、佐々木様のほう、お願いできますでしょうか。

○佐々木オブザーバー トラステッドノードは、実際的には、実用化の時には通信事業者の、ちゃんと厳格に管理された通信、局舎ですとか、政府系ユーザーであれば、例えば駐屯地とかという言葉ですけども、ちゃんと物理的な入退室の管理とかされている、そういう運用も含めて管理された、特別な場所というものを想定しています。

現在のテストベッド上では、NICTの実験室内で、厳重に入退室を管理されたようなところで、実際に運用はされています。それで、今度は銀行さんとか企業さんが使うときには、また、そういったノウハウを持っていらっしゃるユーザーさんがいて、そこをユーザーさんと通信事業者さんで管轄していくようなところかと想像して進めています。大体、トラステッドノードというのは数十キロ間隔で、政府系でも通信業者さんでも全国展開して

いて、そういったところに量子暗号装置を置くというのが、まず、最初のステップかと思  
います。

中国も大体同じようにやっていて、ただ、実際にトラステッドノードがどうなっている  
かというのは、あまり詳細は我々も把握できていません。ただ、量子暗号の分野では、I  
T U-Tにおいて、トラステッドノードというのはしばらくは重要な機能エレメントな  
ので、そこをどのようにルールとか要件を定義するかというのが、まさに今、標準化の場  
で議論され始めています。量子中継は、実は量子もつれの生成速度が非常に小さくて、本  
当にこれが実用的なスケール性を持っているかというのはよく検証する必要があって、  
アメリカもヨーロッパも過度に宣伝が先行する部分もあるんですが、どういうところで  
本当に使われるか、最初、通信なのか、あるいはV L B Iのような超長基線のセンサーと  
して使うのか、実はアメリカも非常に悩みながら、現状を探っている状況だと思います。  
ただ、米中の対立で、中国がやるならアメリカは絶対に負けないということで、量子イン  
ターネットみたいなのを、フラグを立ててやっているという面もあって、多分そういった  
ところから予想外にブレイクスルーが出てくるのかなと見ています。

島田社長も何か補足あれば、お願いします。

○島田オブザーバー ありがとうございます。佐々木先生がかなり正確に御説明してい  
ただいたので、私から申し上げるのは、まさにこの辺りの仕様をしっかりと詰めて、どこ  
までやればトラステッドと呼べるのかということ、今後の数年間かけてやる実証の中  
で固めていきたい。これらを固めることによって、金融機関には様々な機関の人たちが  
使えるようなレベルというのはどういうものであるのかということ定義していきたい  
と考えております。

以上です。

○小西構成員 ありがとうございます。トラステッドノードの中継技術も非常に大事  
な技術だということを私も感じておりまして、サポートしていきたいと思えます。

一方で、トラステッドノードの中に入ってくる装置というものが、どれだけトラステッ  
ドなのかということも通信事業者としては非常に気になっているところでございます。  
引き続き、いろいろと教えていただければと思います。ありがとうございました。

○相田主査 ほかにいかがでございましょうか。

じゃあ、また、江村構成員、お願いいたします。

○江村構成員 ありがとうございます。ほかにはないようなので、今の御質問にも少し関

係して、特に島田さんへの質問になるのかと思うのですが、非常にロードマップもちゃんと示されていて、このまま進めば良いとすごく思いました。一方で、量子はスケールの問題も含めて、トータル全て量子になるというわけではないと認識してしまっていて、そうすると、既存のものとの接続、あるいは、マイグレーションということが実用化という意味では非常に重要になると考えています。そちら側が、研究開発を超えているのかもしれないけど、その部分を一緒に考えていかないと、なかなか導入が難しくなるのではないかと思います。その辺の検討をどうされているのかということについて、質問させていただきたいと思います。よろしくお願いたします。

○相田主査　それでは、島田様、お願いできますでしょうか。

○島田オブザーバー　とても重要な御質問をいただきまして、ありがとうございます。

19ページ目を見ていただきたいんですが、まさに江村先生が言われたことを、我々はとても気にしております、そのためにレファレンスアーキテクチャモデルというのを用意していて、どういうところで接続をするのか、どこで吸収層を設けて既存技術と接続するのかという検討をかなり進めております。それをユースケースベースで考えて、やりたいことはこういうことだよねと。やりたいことをするとき、例えば、今後ロードマップを考えると、新たな変更が生まれてきますねと、こんな技術が出てくる予定になりますねと。そういった技術が出てきたとしても、今までどおり使い続けられるようにするためには、どこの段階で統一するのが一番良いのかというようなことを考えながら、順番にモジュラー型でシステムを入れ替えていって、ユーザー側はシステムが入れ替わったことを気づかないという方法で進めていきたいと考えております。

お答えになっていますでしょうか。

○江村構成員　ありがとうございます。すばらしい考え方だと思います。そのときに既存の装置がそれを受け止められるような構造に、前もって準備しておかないと、なかなか頭で考えたようにはリアルにはいかないと思います。今、トラステッドノードの設置場所の問題も話にありましたが実はプラクティカルに、非常にスケールさせて展開しようと思おうと問題が出てくる等そういうことが懸念されるのではないかと思います。まだ、ロードマップ的には時間があるので、ぜひそういうことも早めに取り組みれることが重要だと感じました。ありがとうございます。

○島田オブザーバー　ありがとうございます。もう御指摘は全くおっしゃるとおりで、ですので、例えば、機器間の総合接続とかというの、そういうレベルで吸収するのが本当

はいいのか、もう一つ上のレイヤーで吸収して、鍵配信のソフトウェアのレイヤーでそれを吸収するのとか、そのことだけに限ったことじゃないんですけども、どのレイヤーで吸収することによって、言われたようなシステム導入の際のコストが過大にならないのかということに気をつけて検討を進めていきたいと思います。ありがとうございます。

○江村構成員　ありがとうございます。ぜひよろしくをお願いします。

○佐々木オブザーバー　佐々木ですが、ちょっと補足させていただいてよろしいですか。

○相田主査　お願いいたします。

○佐々木オブザーバー　江村委員から非常に重要な指摘で、私のスライド13ページに、実は非常に重要な周辺技術でそこを書いているんですが、例えば、トラステッドノードといっても、それはアサンプションなので、実際には災害等でクラッシュする可能性があるわけです。そうなったときに、古典的に冗長化を行うことが必要で、そこが今はないんです。中国の業者も、ネットワークにも、アメリカのやつにも、ヨーロッパのやつにもないんです。我々がやっているのは、ここに書いたセキュアネットワーク符号化というので、ある確率でトラステッドノードがクラッシュしたときに、それは古典的なやり方で分散化というネットワーク冗長化を使ってやる方法、これを島田社長が言われたように、鍵管理のレイヤーとかアプリケーションのレイヤーにきちんと実装するというので、量子と古典のハイブリッドで、初めて可用性とかDDoS攻撃耐性、あるいはそういった障害耐性の高いものが出てきて、この古典の技術をきちんと整備しないと量子の技術は収納できないと思っています。

あとは、量子コンピューターを使うにしても、計算遅延があるとクラウドの中で何回も何回もジョブが行き交う中で、実は計算遅延が今、ボトルネックになっていて、B5Gとか遅延のないレジリエンスの高いネットワークがあつてこそ、初めて量子が生きるので、この融合こそが日本が勝つべきところで、あまり古典の周辺分野というのはアメリカも中国もヨーロッパも見えていないと思うので、まだ日本は機密管理でやっていますが、少しずつこれから様子を見ながら、我々も特許申請とかをやろうと思っています。非常に重要な点をありがとうございました。

○相田主査　それでは、続きまして、NTT、川添構成員、お願いいたします。

○川添構成員　川添ですけど、聞こえますでしょうか。

○相田主査　大丈夫です。

○川添構成員　いろいろ御説明、あるいは皆さんのすばらしい御指摘、コメントありがと

うございました。私からは、共通的に言えると思うのは、もはや冒頭にあった衛星の話もそうですし、量子の話もそうなんですけど、日本が世界の中で勝てるといったところを、きっちりその部分をつくることは、基本に戻るんですけど重要だと思いました。特に、例えば量子の話で言うと、今も議論ありましたが、例えば量子鍵配送でNSAが指摘した5つの課題なんかをきっちり解いていくという意味では、佐々木様が御説明していただいたような形を作っていく、量子セキュリティーという形で融合していくというところが本当に重要だと思います。その中で今、弊社で言うと、今、米国の時期暗号で格子暗号の技術が最終候補に残っていますけども、ああいうものも含めて、うまく合わせていくということが、最終的にはシステムとして、国際競争の中で勝てるものになっていくのかなと思っております。

それから、最初の衛星の話でも、まさに御説明していただいたとおり、これからは今までの宇宙、衛星の利用というのが、地上のある意味、補完であったり、あるいは中継というのがメインだったことに対して、中継以外の価値をつくっていくところが一番大きなテーマかなと思っています。中継以外の価値をつくる上でもここでも技術が必要で、光無線通信のLCTみたいな部分だけではなくて、宇宙に例えばデータセンターを作るといったときに、宇宙線耐力に耐え得るようなメモリーの技術とか、そういうところも含めて、まだまだやるべきところはたくさんあると思っていますので、それをぜひ国を挙げて進めることができたらいいんじゃないかと思っています。

以上です。

- 相田主査 ありがとうございます。ただいまの川添構成員からに関しまして、佐々木様、あるいは島田様のほうから何かコメントございますでしょうか。
- 佐々木オブザーバー 非常に重要なコメントありがとうございます。NSAとイギリスのGCHQから量子暗号はまだ普及させるなというコメントが出ていて、ある意味、正しいです。それが脆弱性のポイントになるんじゃないかと。アメリカは、もう軍で実際に暗号を使っていますので、50年、60年破れない暗号体系を持っているわけです。そこに、新たに量子暗号というのが入ってきたときにそこが危ないじゃないかと、当然ですよ。その対策として、日本が取れるのは唯一、私が述べた認証制度をいち早く確立して、どの国よりも早く、きちんとコモンクライテリア認証で、その基準を日本が決めて、これを通れば、実装安全性が今、一番高い装置を日本が供給できると。それをNSAとGCHQに示すことです。

それで、我々も格子暗号とか実際の認証基盤を、我々のテストベッドにおいても動いていますので、それは北米のベンチャーとがっちり組んで、NSAの潮流をリアルタイムでウオッチして進めています。ですので、きちんと日本が量子暗号の認証制度を立ち上げて、どこよりも早く認定マークを取って、それで耐量子暗号と統合させれば、私は量子セキュリティの分野で日本は勝てると思っています。ぜひ御協力をお願いしたいと思いますので、よろしく申し上げます。

○川添構成員　ありがとうございます。

○島田オブザーバー　島田からも一言。

○相田主査　お願いいたします。

○島田オブザーバー　ありがとうございます。川添さんおっしゃるとおりだと思います。NTT様のお持ちの技術と、エンド・トゥ・エンドで重ねることによって、初めてこれはシステムとして完成するんだと思っておりますので、ぜひ協力してやっていきたいと思っておりますし、それ以外にも様々なIOWNで言われている技術、これらが今の量産暗号通信の高速化にもかなり効果があると思っておりますので、様々な形で総合力を発揮して、日本が海外に勝てるように、ぜひ御一緒にやらせていただければと思っております。どうぞよろしくをお願いいたします。

○川添構成員　ありがとうございます。よろしく申し上げます。

○相田主査　では、続きまして、総務省、新田さん、お願いいたします。

○新田技術政策課長　事務局から佐々木様のプレゼンテーションの移行シナリオ、26ページあたりの関係でお伺いします。事務局としては、beyond 5Gネットワークの研究開発をこれから進めていく上で、Beyond 5Gネットワークと量子鍵配送ネットワーク、あるいは量子暗号通信、さらに、その先に量子中継、量子ネットワークの関係についてしっかり見極めたいと考えております。

本来、セキュアの通信を提供するためには、基本的に専用線で情報をやり取りすることが最もポピュラーかつセキュアな方法だと思いますが、島田様のプレゼンテーションでは、これを公衆網で実現することで、コストとしては非常に優位になってくるというお話もあり、そのとおりに感じましたが、今後、こういった2030年に量子鍵配送ネットワークが実現される際、Beyond 5Gネットワークと量子鍵配送ネットワークのレイヤーとの関係はどうか。具体的には、この図を見ると、PKIの伝送にはBeyond 5Gネットワークが使われ、QKDは基本的にはBeyond 5Gネットワークと

分離したQKDのネットワークのスライスで実現されると読めますが、その場合、Beyond 5Gネットワークに求められる技術的な条件などがどうなるのかということです。

それから、その先に、2030年が実証段階、2040年に実用段階と言われております量子ネットワークの関係で、2040年に量子もつれを実用レベルに持っていく上で、必要となる技術的なブレイクスルーのようなものがもしあれば、分かっている範囲で教えていただきたいと思います。よろしくお願いします。

○相田主査　それでは、島田様、お願いできますでしょうか。

○佐々木オブザーバー　佐々木のほうから先にいいですか。

○相田主査　どうぞ、お願いいたします。

○佐々木オブザーバー　B5Gという巨大なインフラで、これは量子ネットワークホワイトペーパーのほうで、上に少しずつ入っていくというのが、結構図のスペース的にはがばっと被るような形で書いていますが、やはりB5Gは地上ファイバー網の非常に太い新たなファイバーを使って地上の大容量通信と、モバイル端末で相当なトラフィックが流れるということで、今の量子暗号ネットワークは、地上は光ファイバーが基準になるので、低損失の新しい光ファイバーが通って、そこに低コスト化された量子暗号装置が順次入っていくというイメージだと思っています。

ただ、B5Gのほとんどのトラフィックというのは、パソコンとかスマホとか移動体の間の無線でやり取りされると思っています。そこは今のPKIからの鍵交換でちゃちゃっと鍵を交換するなり、あるいは、QKDからは鍵だけを供給して、それを使って、どうやって限られた数の鍵で、うまくトラフィックを安全にするかというところに研究開発のポイントがあって、非常にこれはまだ未開拓で、まさにこれからだと思います。

私が思っているのは、もう量子には僕はこだわってなくて、これからのB5Gを支える上で、ネットワークプロトコル自体を変えなきゃ駄目ですよ。単にエンド、エンドでやる、IPプロトコルだけでやろうと思うと多分スケールしなくて、1つのキーワードはネットワーク符号化というものだと思います。各ルーターが宛先を見て転送するだけではなくて、あるバッファ機能を持って、入ってきた複数のパケットをまとめて符号化処理を行って、また複数のルータに配信するというネットワーク符号化が恐らくこれから非常に重要になってきて、ネットワーク全体のトータルなスループットというものを、シャノンのネットワーク容量限界まで近づけていくというのがB5Gの非常に重要なところだと思っています。実は、そこをやると、量子鍵配送の鍵の消費もぐっと抑えられるとい

うことで、一体的なんです。なので、量子も古典もなく、次の時代のネットワークというのはどういう技術を集大成しなきゃならないかというところに、分野融合で取り組んでいくということが極めて重要だと思います。

あと、量子中継はメモリーが非常に狭帯域になっています。共振器を使わないと、ある原子の準位に共鳴できないとか、そういった原理的な問題があって、これをいかにエネルギー準位が高い固体中のアンサンブルとか、そういった量子メモリーをいかに広帯域にするかというのにほとんど尽きていまして、そこにいろいろな物理系、イオンを使ったりとか、固体中の不純物を使ったり、いろいろなものが研究されています。今の段階で、どれだと特定することは難しく、各要素デバイスが、光の300テラヘルツのような広帯域を処理できるようなメモリーとか個体素子が登場するかどうかにかかっています。今はまだどれがそうなるかは分からなくて、まだ10メガヘルツとか、その程度の帯域で細々とやっているというのが正直な技術の現状です。

以上になります。

○新田技術政策課長 非常にクリアなご回答ありがとうございました。

○相田主査 島田様のほうからは、何か追加で発言いただけることはありますか。

○島田オブザーバー 今、佐々木先生が言われたとおりなのでありますけれども、量子メモリーにおいては様々な方式が提案されておりまして、恐らく短期的には量子コンピューター同士をつなぐという方法で、通信方式そのものが通常の通信方式とは違って、単にメモリー内のエンタングルメントをつなぐというあたりが、恐らく最初に実用に近いところなのかなと思います。そうすると、データの転送量の方法が全く違いますので、重ね合わせによって大量のデータが瞬間的に転送されるというところから、徐々に量子コンピューターそのものの技術開発と符号を合わせて、よくなっていくと思います。ですので、かなり長い道のりかなと思っております。

以上です。

○相田主査 どうもありがとうございました。大変活発に御意見いただきまして、ありがとうございました。そろそろ予定していた時間になりましたので、もし追加で御質問、御意見のございます方は、事務局のほうまでメール等でお寄せいただければと思います。本日、プレゼンいただきました佐々木様と島田様、それから山口課長におかれましては、もし追加での質問等ございましたら、御対応いただければと思いますので、よろしく願いいたします。

## (2) その他

○相田主査　それでは、一応議題としては、その他ということで、今後の予定等につきまして、事務局から連絡事項があれば、お願いいたします。

○影井統括補佐　次回の委員会は2月10日、金曜日の開催を予定しております。詳細については、別途御連絡をいたします。

○相田主査　ありがとうございました。

　　以上で、事務局に御用意いただいた議事は全部終了したと思いますけれども、全体を通して、発言を希望される方がございましたら、またお示しいただければと思います。

　　それでは、A T R、浅見様お願いいたします。

○浅見構成員　素人で一応、理解とはこれで正しいのでしょうか。

　　いわゆる量子暗号通信の場合には、トラステッドノードというのがどうかということはとても重要だと。例えば、東京からロンドンまでつなごうとしたら、たくさんトラステッドノードが必要で、必ずしも親日的な国ばかり通過するわけじゃないと。そうすると、日本がコントロールできるトラステッドノードという衛星しかないでしょうと。だから、国内は地上系で、海外に出るときは衛星を使ってつなぐんだと、そういう技術ですよと解釈したんですが、よろしいでしょうか。

○佐々木オブザーバー　そのとおりでございます。

○浅見構成員　どうもありがとうございます。

○相田主査　ほかよろしゅうございますでしょうか。

　　それでは、どうも本当に今日は大変活発に御意見いただきまして、ありがとうございました。

　　以上をもちまして、第31回技術戦略委員会、閉会させていただきます。どうもありがとうございました。