

調和ある多様性の創造



# QST

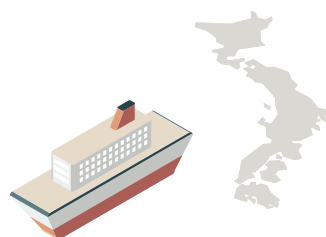
## NEWS LETTER



▶ Special feature.01

### ITER 計画が新たなステージへ

ついに始まった ITER 本体の建設  
/ 未来のエネルギーを支える QST の技術革新



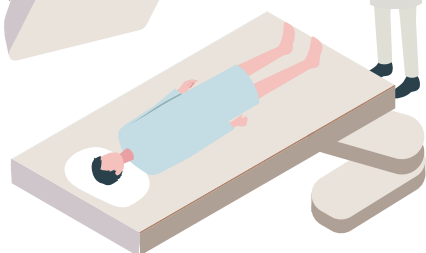
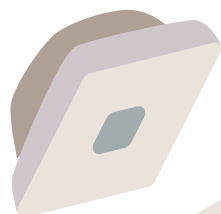
▶▶ Special feature.02

### がん死ゼロ健康長寿社会への道を切り拓く 量子メス開発の今と未来

第5世代重粒子線がん治療装置「量子メス」シンポジウムレポート  
/ 量子メス開発の最前線に迫る!

2021  
OCTOBER

NO. 18





## ▶ Special feature.01

# ITER 計画が 新たなステージへ

世界各極の英知と技術の詰まった機器が現地フランスに続々と輸送され、ついに始まった ITER(イーター)本体の建設。

2025年に予定されるプラズマ生成に向けて、いよいよ始まった、フランスでの ITER 本体の建設の様子と、日本が製作を担当する2つの機器にスポットを当ててお伝えします。



量子エネルギー部門  
ITER プロジェクト部 部長  
**井上 多加志**



INOUE  
TAKASHI

### 核融合実用化への道をつなぐ ITER

「ITER」はラテン語で「道」のこと。世界7極(日欧米露中韓印)が英知を結集するITERは、核融合反応から発電に必要なエネルギーを取り出せることを実証するための核融合実験炉の名称であり、ITERこそが、過去から未来へつなぐ核融合研究の長い道のりの現在地であり、最前線であるともいえます。

核融合は、燃料となる水素ガスをプラズマ状態にして核融合反応を引き起こしますが、ITERでは具体的な実証目標が2つあります。1つは、入力エネルギーに対し10倍の出力が得られるプラズマを400秒間維持すること。もう1つは、入力エネルギーに対し5倍の出力が得られるプラズマを1時間持続させることです。これらの目標の達成が、核融合研究が描く未来につながる道の扉を開いていきます。ITERの次の扉は、発電実証を目指す核融合「原型炉」建設。そして、最後の扉が、今世紀中葉の実現を目指す核融合エネルギー発電の実用化です。

### ついに炉心本体の組み立てフェーズに突入

これまで ITER 機構主導の下で参加各極が分担して機器を製作してきました。今はまさに、各機器の製作フェーズから本体組み立てフェーズへの転換期です。2025年に予定される、ITERでの初めてのプラズマ生成、通称「ファーストプラズマ」に必要な主要機器の多くが各極国内での製作を

終え、フランスの ITER 建設サイトへ続々と運び込まれ、ITER 機構が主体となって炉心本体の組み立てを開始しました。炉心にはプラズマを閉じ込めるために強力な磁場を発生させる「トロイダル磁場コイル(TF コイル)」が全18基組み込まれますが、日本で製作を担当する9基の内、完成した3基が ITER 建設サイトへ搬入されて組み立てが開始されており、さらに2基が ITER を目指して航海中です。

ITER に搬入した機器が設計通りに機能するかを確認するため、QSTは、フランスへ渡って組み立て支援や試験データ取得を行うスタッフと、日本に残り、現地から届くデータを解析して設計と突き合わせ、試験のバックアップなどを行うスタッフに分かれて作業を進めます。そして、これまでに行ってきた ITER 用機器の設計・製作や、ITERでの組み立て・性能試験などで得られる知見を蓄積し、ITERの次の段階である原型炉に向けた設計基盤を構築していきたいと考えています。

### 国際プロジェクトならではの苦労と醍醐味

世界7極で一丸となって進める ITER 計画で痛感したのは、言葉の違い以上に、考え方の違いによるコミュニケーションの難しさです。例えば、何かを製作するにあたり、日本は議論を基にまずモノを作ってみて、その中でわかる課題や問題点を積極的に改良して製作を進めようとしています。一方欧州は、設計段階で徹底的に議論して、製作の過程で課題が発生してもなかなか方針を変更せず、完成後に課題も含めた検証を行うおうとすることがあります。日本が実

際にモノを作って得た知見と欧州が徹底的に議論を尽くした設計が、同じ目標を向いていても時に進め方の議論としてぶつかるのです。言葉には表れないこうした考え方の違いから、議論がなかなか進まないこともあります。長いプロジェクトの中で、この違いをお互いに認識したうえで議論を進めることで、最終的にはお互いに納得し、より良い方法に辿り着こうという良い雰囲気が出ています。いかに大規模な国際プロジェクトといっても、突き詰めれば、お互いを理解し尊重しあう、人と人とのコミュニケーションの基本が何より重要なのです。

### 知識や経験を伝え、次世代の研究者を後押しする

ITER 計画がジュネーブで産声をあげた1986年、那珂研究所では臨界プラズマ試験装置「JT-60」の加熱実験が開始されました。私が研究者として那珂研究所に入ったのもこの年です。JT-60で得られた数多くの研究成果は ITER にも反映されていますが、35年前の運転開始を経験した人は少なくなってきました。これまで、JT-60の運転当時の話をすることは、年寄りが若い研究者を捕まえて「昔は良かった」と昔話をすることで躊躇してきました。しかし、ITERの組み立てが始まり、運転開始が現実味を帯びてきた今、その経験を昔話ではなく、知識やノウハウとして共有し役立てるときが来たのかもしれないと感じています。次世代の ITER 計画や核融合研究を担う研究者を後押し、ITERの先の核融合研究を担う世代を立ち上げていくためにも、私自身が得た知識や経験はできる限り彼らに伝えていきたいと思っています。

## Newsletter from France

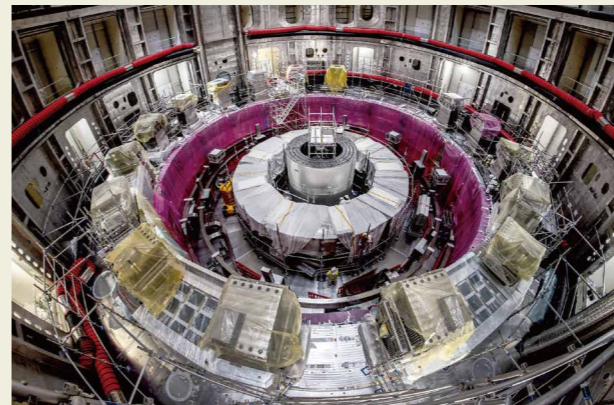


ITER プロジェクト部  
ITER 連携戦略グループ 上席研究員 グループリーダー  
**正木 圭**

フランスの ITER 建設サイトでは、ついに炉本体の組み立てが始まりました。私は、組み立てを支援したり、日本から到着する大型機器の受入れ検査などを行うために日々現場に通っています。

### ついに始まった炉心本体の組み立て

組み立て作業は、炉の中心部分のプラズマを発生させる「真空容器」周辺から始まっています。ドーナツ型の真空容器の外側にはプラズマを閉じ込める磁場を発生させる TF コイルが取り付けられますが、組み立ては40度ずつ、9セクターに分割して行い、現在はまさにその1セクター目の組み立てに取り掛かっています。真空容器は1セクター分でも高さ14m、幅8m、重量400t、取り付けのTFコイルはさらに大きく、高さ16.5m、幅9m、重さ330tと巨大です。そのため、真空容器とTFコイルは、別々につり上げた後で「やぐら」と呼ばれる組み立て専用の場所で一体化の作業を行います。組み立てたセクターは、360度のドーナツ形状に設置する「ピット」と呼ばれるエリアに順次、移動させ、9つのセクターすべてを溶接して一体化し、次の容器内側の機器取り付けへと移行します。



▶真空容器とTFコイルを一体化したセクターが設置される「ピット」。  
©ITER organization

### 巨大構造物の取り扱いに慎重に慎重を重ねる

日本の TF コイルが到着したマルセイユ港から建設サイトまでは高速道路でわずか1時間の距離ですが、巨大かつ精密なTFコイルは、輸送専用の大型トレーラーが通れるように拡幅した道路を夜間だけ走行し、10日間ほどをかけて慎重に輸送されました。

こうして運び込まれ、真空容器への取り付け作業の前に、垂直に立てた状態で仮置きされているTFコイルですが、実は、製作、輸送の過程では一度も起立させたことがありませんでした。設計上十分な強度があることは分かっていますが、330tの構造物の初めての引き起こし作業は、慎重に慎重を重ねました。引き起こすための専用器具に厳重に固定し、自重で歪みが発生していないかを特殊なカメラで測定しながら、24時間近くかけ、無事に垂直に立てることができました。

### 南フランス駐在記

赴任した昨年の9月は、フランスはちょうどコロナ禍によるロックダウン中で、家具類を揃えることができず、住宅や電気・ガス・水道の契約には慣れないフランス語が必要だったりと大変な思いをしました。4カ月ほど前にやっと行動制限が緩和されたため、先日初めて車で4時間ほどのところにある、湖のきれいなところへ家族で旅行することができました。



ITER を構成する機器はそれぞれが巨大な構造物なので、変形を抑えるサポート構造や固定の位置が重要ですが、ミリ単位の組み立て精度を実現するための厳密な位置計測が可能な状態の確保と、機器をサポートする構造や固定位置の調整の両立は、日本でのJT-60SA 組み立てでも非常に苦労した点です。その経験で得たノウハウを ITER の現場にも共有していきたいと思っています。



真空容器  
TF コイル

▶一体化のため  
「やぐら」に釣り上げられた真空容器とTFコイル  
©ITER organization

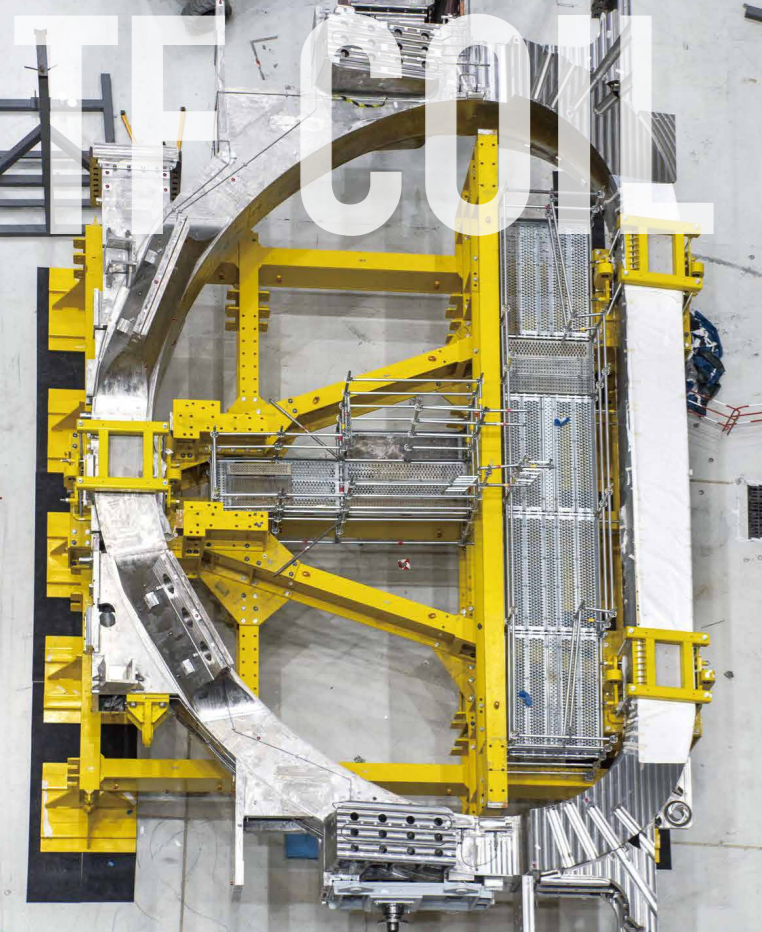
### 国や文化の壁を乗り越えワンチームで進められる作業

ITER での組み立ては機器ごとに参加極の枠を越えてチームが生まれ、細かく分担された分業体制で行われます。組み立て自体は ITER 機構が計画した手順書に沿って進行しますが、スムーズに作業できるよう、事前に注意点や段取りを確認するためのディスカッションが行われます。各極スタッフがワンチームとなり、同じ目標をもって取り組みますが、採用しようとする手法にそれぞれの考え方の違いが表れることも多く、ときには意見が衝突します。それは、私自身が「クオリティーファースト」を心掛けているように、他極のスタッフも同様に、より良い質の結果を得ることを優先させるために、自身の経験に基づく考えを持っているからです。それゆえに作業方針の擦り合わせには非常に苦労しますが、とにかく納得がいくまで話し合いを重ねることが解決の糸口になると考えています。

### 過去から未来につながる核融合研究の最前線に立つ

昨年9月に赴任する前は、28年間にわたり那珂研究所で核融合に携わってききましたが、ITER 建設サイトを実際に目にしたときは、想像をはるかに超えるスケールに圧倒されました。そして、長年にわたり研究されてきた核融合の ITER の組み立てフェーズに、いま自分が携わっているこの感覚は言葉で言い表すことができません。TF コイルが日本から到着したときは、「遠いところからよく来たなあ」と感慨深いものがありましたが、私も日本から遠く離れたこの地で、ITER 完成に向けて少しでも貢献できればと思っています。





©ITER organization

## トロイダル磁場コイル

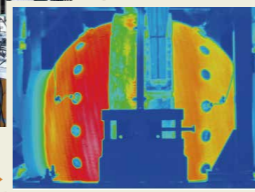
- ✓ **磁場でプラズマを高精度に保持して閉じ込める**  
 真空容器内に発生させた高温のプラズマを安定な状態で一定時間保持するには非常に強力な磁場が必要です。この磁場を作り出す装置がトロイダル磁場コイル (TF コイル) です。ITER では「D」字型の TF コイル 18 基をミカンの房が並ぶようにドーナツ状に並べ、プラズマを磁場で浮かせて閉じ込めます。
- ✓ **巨大さに対して必要な製作精度は 1 万分の 1 以下**  
 核融合は太陽の中心部で起きている反応ですが、地球上で人工的に核融合反応を起こすためには、1 億度以上に達するプラズマを作り出し、磁場で閉じ込める必要があります。そのために使用する TF コイルの磁場は最大 12 テスラ。この強さの磁場の中に工具のスパナを持って入れれば、12t (およそ象 2 頭分) の重さを引き寄せるほどの引力が発生します。一般的に超伝導コイルの導線にはニオブ・チタンという合金が用いられますが、TF コイルではより強い磁場を得るために、加工が難しいニオブ・スズという合金を使っています。高さ 16.5m、幅 9m という大きさは、ニオブ・スズ導線を使用した超伝導コイルでは世界最大です。TF コイルは 330t もある自重で歪みが生じ、周囲のわずかな温度の変化でも膨張や収縮が発生します。一方、製作精度は最も厳しい部分で基準寸法に対してわずか 0.4mm と、その巨大さに対して 1 万分の 1 以下という高い精度が要求されました。このため、加工時や計測時の環境温度によるミリ単位の伸び縮みを算定し、20°C に温度換算した場合に形状に対する要求精度が達成できるように調整するといった、息が詰まるような作業の連続でした。

GYROTRON  
 ITER で  
 求められる性能を  
 目指して

1,000 キロワットもの▶  
 パワーを受け止めるダイヤモンド窓



▲日本で行われている性能試験の様子  
 マイクロ波の出力を水温の変化で確認▶



ITER のジャイロトロン開発は、34 年の歳月をかけて完成まで辿り着きました。基礎研究や原理実証を一つ一つ手探りで積み重ねてこられた諸先輩方の研究成果や思いを引き継ぎ、絶え間なく研究を続けた成果がようやく実を結んだと感じています。核融合の研究者として、人類初の核融合実験炉である ITER 稼働のタイミングに立ち会えるだけでも幸運に思いますが、自分たちが開発したジャイロトロンがそのプラズマを着火すると思うと、なんだか月面に人類初の一步を踏み出した宇宙飛行士の気持ちが分かるような気がします。

### SPECIAL REPORT 02

ITER プロジェクト部  
 RF 加熱開発グループ 主幹研究員

池田 亮介  
 IKEDA RYOSUKE

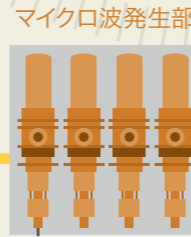


ついに見えてきた ITER 始動の時。  
 日本で製作を担当する機器のうちの 2 つについて、  
 製作過程や現在の状況、研究者たちの想いをお聞きました。

# 未来のエネルギーを支える

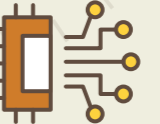


ITER 真空容器



マイクロ波発生部

## QST の技術革新

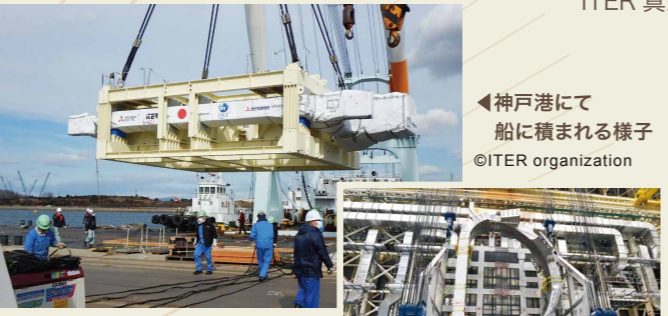


ついに見えてきた ITER 始動の時。  
 日本で製作を担当する機器のうちの 2 つについて、  
 製作過程や現在の状況、研究者たちの想いをお聞きました。

NAKAMOTO MIO  
 ITER プロジェクト部  
 超伝導磁石開発グループ 主幹技術員  
 中本 美緒  
 SPECIAL REPORT 01



私は、製作管理や品質管理で TF コイルの製作に携わってきました。ITER 機構の要求を具体的な仕様落とし込み、製作メーカーにその仕様を表す意味や意図も伝え、仕様通りに製作できているかを何度も確認して、完成まで辿り着くことができました。世界的な新型コロナウイルスの流行で、残念ながらフランスへ渡った TF コイルを自分の目で見ることはできていませんが、製作の過程で一度も立てたことがない TF コイルが直立した写真を見たときは、まるで我が子が初めて立った姿を見るようで、感無量でした。



建設サイトで立て起こされた▶  
 TF コイル  
 ©ITER organization

18 基の TF コイルの内、日本ではスペアを含む 9 基の製作を担当しています。その中の 5 基を三菱重工業(株)が、4 基を東芝エネルギーシステムズ(株)が製作を受け持ち、三菱重工業で 4 基、東芝エネルギーシステムズで 1 基が完成し、今は残り 4 基の製作が進められています。メーカーが違えば技術はもちろん、製造設備も異なるため、同じ機器を製作するとはいえ、製造上で生じる課題は同じではありません。それぞれのメーカーの工場に足を運んで、各製作段階で要求される仕様を満たしているかを検査、確認しながら最終的に同じ性能、形状を持つ TF コイルになるように製作を管理していきます。完成を迎えたコイルは、約 30 日かけて船でフランスへ渡ります。TF コイルは巨大ですが、精密機器です。日本から送り出す際は、日数を要する船での運搬の過程で、揺れによる損傷が起きないように梱包を行うだけでなく、海水や、陸上輸送時の雨による浸水を防ぎ、さらに湿度対策のシリカゲルを入れて何重にもビニールで巻くなど、万全の対策を講じます。これまでに 3 基の TF コイルが無事にフランスに到着しました。QST は、残る 4 基の製作だけでなく、フランスでの ITER 機構による組み立てにおけるサポートにも、製作を手がけるメーカーと共に取り組んでいます。

## ジャイロトロン

- ✓ **プラズマの着火から加熱、そして制御まで**  
 ITER では、核融合反応を起こすために、1 億度以上の高温で高圧力のプラズマを生成し、安定に維持する必要があります。このために、プラズマを着火、加熱し、プラズマ内部に発生する乱れの抑制までをマイクロ波で制御する機器が 24 機のジャイロトロンです。
- ✓ **ITER 参加各極がしのぎを削る**  
 ジャイロトロンは、その名に冠するようにジャイロ運動する電子のエネルギーを効率よくマイクロ波へと変換して放出する真空管装置です。ITER で使用するジャイロトロンは高さ 3m ほどの大きさで、1 機あたり 1,000 キロワットという強力なマイクロ波を発生させてプラズマを加熱します。これは一般的な電子レンジの出力である 0.5 キロワットの 2,000 倍の強さに相当します。ジャイロトロンは、ITER の活動が始まる 90 年頃でも 500 キロワット・100 ミリ秒とまだ研究途上でした。そのため ITER が求める「170 ギガヘルツ、1,000 キロワットのマイクロ波を安定して 1 時間出力する」という桁外れの性能を実現するために、マイクロ波を発生させる仕組みや装置の形状は、担当する各極それぞれのアプローチで研究開発が進められています。このため、ジャイロトロン開発は、国際協力で進む ITER プロジェクトにおいて、各極がしのぎを削りあう国際競争の色合いを持ちます。24 機の開発と製作は、日本とロシアが 8 機ずつ、欧州が 6 機、インドが 2 機を担当し、それぞれの考え方や技術で製作された機器が ITER で試験されることで、より核融合発電に適したジャイロトロンというものが見えてくるでしょう。



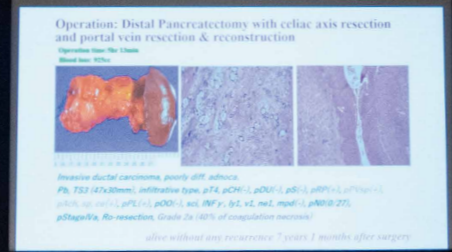




# がん死ゼロ健康長寿社会への道を切り拓く 量子メス開発の今と未来

QSTは、その前身となる旧放射線医学総合研究所において、世界初の重粒子線がん治療装置(HIMAC)を建設し、1994年の治療開始以来、27年以上にわたり重粒子線がん治療の研究と13,400人を超える患者の治療に取り組んできました。その成果を元に、治療法のさらなる高度化と普及を目指した次世代の重粒子線がん治療装置「量子メス」の研究開発に取り組んでいます。今回は、QSTが目指す「がん死ゼロ健康長寿社会」実現の中核を担う量子メスをテーマに、7月15日にオンライン主体で開催された量子メスシンポジウムの模様を、量子メス実現のカギを握る先端技術の開発に携わる研究者、医師の取り組みと合わせてご紹介します。

第5世代重粒子線がん治療装置(量子メス)シンポジウム  
QST 一量子科学技術による「がん死ゼロ健康長寿社会」の実現を目指して



## Quantum Scalpel Symposium

### report 01 第5世代重粒子線がん治療装置「量子メス」シンポジウム // ダイジェストレポート

#### 量子メスで重粒子線治療をもっと身近に

重粒子線治療は、他の治療法では困難な難治がんの治療にも効果を発揮し、がん以外の正常組織への障害が少ない特徴があり、一部の疾患では保険が適用されています。重粒子線治療施設は、現在国内に7施設あり、年間約3,700人の患者に治療が行われています。しかし、この数は、1年間に日本で新たにがんを患う人のわずか0.4%、世界に目を向ければ0.02%に過ぎず、重粒子線治療はまだ、誰もがどこでも受けることができる治療法になっていません。

「どうすれば、重粒子線治療をより多くのがん患者に届けることができるのか?」この課題に立ち向かうため、QSTの研究者、技術者、医師たちが一丸となって取り組んでいるのが次世代の重粒子線がん治療装置、「量子メス」の開発です。

重粒子線治療の普及において最大のネックとなっているのは、その巨大で高額な治療装置です。1993年に完成したHIMACはサッカーコートほど、2010年に改良された普及型装置でも設置にその1/3の面積が必要でした。これに対し、量子メスは、専用の建屋を新たに建てることなく、既存の病院建物内に設置可能なサイズ(10m×20m)まで装置を小型化することで、コストを抑え、より多くの病院で重粒子線によるがん治療ができるようになることを目指しています。

#### いよいよ社会実装に向けた開発フェーズに突入

QSTは、2016年12月、住友重機械工業、東芝、日立製作所、三菱電機の4社との間で「第5世代重粒子線がん治療装置(量子メス)の開発協力に関する包括協定」を締結し、これまで4年半にわたって量子メス実現に必要な装置の小型化や、治療効果をさらに高める照射に必要な要素技術の開発を進めてきました。そして、社会実装に向けて研究開発を進める段階へ移行していきとしています。

その新たなフェーズを迎える節目として、7月15日に、『量子科学技術による「がん死ゼロ健康長寿社会」の実現を目指して』と題したシンポジウムを開催しました。平野理事長は挨拶の中で、「手探りで始めた量子メスの研究開発が社会実装に向けた次の段階に移行するまでに発展したことに大きな喜びを感じる。」と述べ、今後も企業との強力な連携が不可欠であることを強調しました。シンポジウムでは、QSTの医師や研究者が、これまでQST病院で積み重ねてきた重粒子線がん治療の成果から見える課題や、量子メスを支える主要技術の開発の見通しについて紹介するとともに、重粒子線がん治療と量子メス開発の展望を示しました。また、外部の有識者によるパネル討論では、重粒子線がん治療を普及させるためになすべきことについて、経験も踏まえた具体的な突っ込んだ議論が交わされ、その普及に向けた重要なピースとなる量子メスの早期の開発への期待がさらに高まりました。



来賓の富岡勲衆議院議員(リモート参加)からは「研究と普及を並行して進められるようお手伝いしたい」、松尾泰樹文部科学審議官(当時)からは「省を越えて政府として普及を応援していきたい」と、量子メス開発を後押しするご挨拶を頂きました。



プロジェクト参画企業の住友重機械工業、東芝、日立製作所からもコメントが寄せられ、これまでの研究開発の成果と実用化に向けた意気込みが伝えられました。



重粒子線がん治療のさらなる普及に向けて、外部の有識者によるパネル討論会で活発な議論が交わされました。

### report 02 「重粒子線がん治療と量子メスへの期待」// パネル討論レポート

優れた治療実績を残す一方で、普及には課題を残す重粒子線がん治療をいかにして社会に広めるか? 各方面の有識者による白熱した討論の模様をお届けします。

門村: まず最初に、これまでの重粒子線治療との関わりや印象についてお聞かせください。

大野: 私はこれまで約27年間、放射線治療に携わってきました。QSTの前身の放医研で7年ほど重粒子線治療の研究を積んだ後、母校の群馬大学に戻り、これまでに約5,000名近い患者さんの治療を行ってきましたが、重粒子線治療の利点としては、大変副作用が少なく、治療効果が高く、かつ通院可能、かつ照射期間が短い、といった点に集約されるかと思っています。

宮崎: 私はずっと肝胆膵外科という領域で難治がんの治療をしてきました。重粒子線治療については、臨床医として照射後の治療を経験するなかで、その効果を実感しています。多様性を持つがんに対して、外科手術と重粒子線治療それぞれ強みと弱点がありますが、重粒子線治療が効果を発揮するがんというのが少しずつ分かってきました。

門村: お二人は臨床医のお立場で治療効果を実感されているということですが、眞島様は患者として、すい臓がんの治療経験があるとお聞きしました。

眞島: 私がすい臓がんのがん支援団体を始めた2006年は、すい臓がんの生存率はとても低く、非常に難治ながんでした。私自身が罹患したのはそれから数年後ですが、残念ながら重粒子線治療はまだ選択肢に挙がらず、外科手術と放射線治療を行いました。その後、支援団体の活動のなかで、より効果的な治療法を探るなかで巡り合ったのが重粒子線治療です。

佐野: 10年ほど前にAppleのCEOだったスティーブ・ジョブズがすい臓がんで亡くなったことが非常に記憶に残っていますが、手術に対して前向きではなかった彼が、もし粒子線治療を受けていたら、今の世界が変わるような大発明があったのかもしれないと思うと非常に残念です。ちなみに、私自身はがん治療等には今まで関与することはなかったのですが、JST未来社会創造事業のプログラマネージャーとして、量子メスにも関わるレーザー加速技術の開発をQSTと一緒にやらせていただいています。

門村: 先ほどの眞島様のお話を聞いて、まだ、多くの方にとっては重粒子線治療が身近な治療法になっていないのではないかと感じました。今後の普及に向けては、こういった取り組みが必要でしょうか?

宮崎: 私は、外科とコラボレーションをして、難治がんにおいて良い症例を蓄積することが普及につながると思います。これまですい臓がんの患者さんも多く診てきましたが、手術と重粒子線治療を組み合わせることで非常に良い効果が得られた例がいくつかありました。今後、量子メスができれば、さらに良い成績が期待できるのですから、臨床医が唸るような良いエビデンスを早く発信していくことが重要です。

大野: 私も、エビデンスをしっかりと出し、それを内科や外科、がん治療の専門家の先生方にもわかるように説明していくことが必要だと感じています。患者さんは内科や外科の先生の方で診断がついてから

我々のところにいらしゃいますが、担当医から「あなたの病状だったら重粒子線治療というのも選択肢になると思うんだけど」と一言あれば、患者さんにとってはありがたいですね。

眞島: あと、患者さんにとってみれば、保険適用されているかということも、選択肢に挙がるかどうかの分かれ際だと思います。そういった意味でもエビデンスをしっかりと出して、非常に有効な治療法であることを発信していくことが、保険収載につながるのかもしれない。

門村: 佐野様は、民間企業や産学連携での技術開発のご経験が豊富ですが、普及に向けてはどのあたりがポイントになるとお考えですか?

佐野: 人材育成というのも非常に重要かと思っています。例えば量子メスのような良い装置ができて、それを使う方、メンテナンスをする方が必要になるので、QSTがぜひ大学などと組んで人材育成にも取り組んでいただければと思っています。

大野: 人材の輩出という面では、大学が大事な役割を担います。重粒子線治療に限らず、放射線治療に対する医学教育というのはかなり大学によって偏りがあります。群馬大学の場合は、幸いなことに重粒子線治療装置もあるため十分に講義や実習を行っています。そうではない大学の学生は、その機会がないまま医師になることが多いかと思います。例えばQSTがそういった大学と組んで、放射線治療の研修を行うなどといった考えもあるかと思っています。

宮崎: 私は学生だけでなく、医療者に対する啓発も必要だと思います。専門外の医療者はもちろん、放射線治療に携わる医療者ですら、重粒子線に対する理解が不足しているように感じます。既に保険適用されている疾患もあるわけですから、せめて医療者は理解を深めないといけません。

門村: そうした啓発活動というのは、どこが主体となって行っていくべきなのでしょう?

眞島: 本日のシンポジウムで、日本量子医科学会という新しい学会をQSTが中心になって作られたとお聞きしましたが、例えば、そのような学会で啓発活動などをやられる機会があれば、ぜひ我々の患者団体も巻き込んでください。学会、臨床、研究者の先生方と一緒に取り組んでいくことが大事だと思っています。

門村: 組織の壁を超えて、大きなコミュニティのようなものを作っていくことが、情報を広く浸透させていくうえでは大切なかもしれませんね。

佐野: 研究を進めるにあたって、組織の壁というのが問題になることが多いのですが、量子メスの開発において、QSTが民間企業と協定を結んで進めてきたというのは非常に大きなチャレンジだったと思います。QSTは病院もあり、生命・医学の基礎研究もしていて、最先端の技術もあるということで、量子メスの開発をするうえではもってこいの組織だと思いますので、今後もそのポテンシャルを活かして研究開発を進めていただきたいと思います。

 <b>MODERATOR</b> 文部科学省 科学技術・ 学術政策研究所 客員研究官 <b>門村 幸夜</b>	 <b>PANELIST</b> 群馬大学 腫瘍放射線学教室 教授 <b>大野 達也</b>	 <b>PANELIST</b> 国際医療福祉大学 副学長 <b>宮崎 勝</b>	 <b>PANELIST</b> NPO 法人 バンキャンジャパン理事長 <b>眞島 喜幸</b>	 <b>PANELIST</b> JST 未来社会創造事業 プログラマネージャー <b>佐野 雄二</b>
---	---	--	--	--

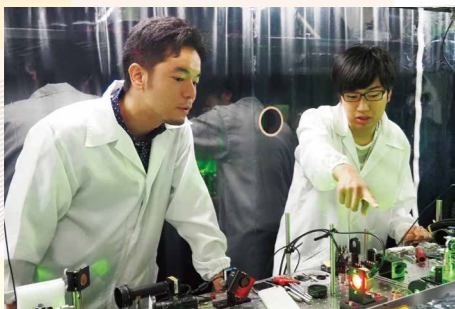


# 量子メス開発の最前線に迫る!

## 03 マルチイオン照射



## 01 レーザー加速入射器 フェムト秒(1000兆分の1秒)の現象を解明し レーザー加速技術を用いた新たな加速器の実現を目指す



**HATA MASAYASU  
KOJIMA SADAOKI**

関西光科学研究所  
光量子科学研究部 X線レーザー研究グループ  
**畑 昌育 主任研究員 小島 完興 研究員**

### 量子メス実現のカギを握る、加速器の小型化

重粒子線がん治療では光速の70%まで加速した炭素イオンをがん細胞に照射します。重粒子線治療装置は、炭素イオンを作り出して加速を始める「イオン入射器」と、そのイオンを治療に必要な速さまで加速する「シンクロトロン」で構成されます。私たちは、シンクロトロンが効率よく加速できる速度までの予備加速を担うイオン入射器を、レーザー加速技術を用いて小型化する開発に取り組んでいます。

一番新しい重粒子線がん治療装置で使われているイオン入射器は全長約10m、リング状のシンクロトロンは直径約20m。2つの加速器が大きなスペースを占めており、その小型化が量子メス実現のカギを握っています。量子メスの基本設計では、デッドスペースとなるシンクロトロン内側にイオン入射器を収め、専用建屋を作ることなく既存の病院施設への導入が可能なサイズにまで治療装置全体を小型化します。イオン入射器の小型化の目標は、別チームが開発している直径7mのシンクロトロンの内側に収めることです。

### 課題は加速するイオンの“速度”と“個数”の両立

炭素イオンのレーザー加速では、まず炭素で出来た薄い標的に非常に強力なレーザーを打ち込みます。すると炭素原子から電子が飛び出し、残った炭素原子は炭素イオンになります。電氣的にプラスの炭素イオンと電氣的にマイナスの飛び出した電子との間には強力な電界が生じ、炭素イオンが電子に引っ張られることで加速される、というのがレーザー加速の原理です。このときに生じる電界の強さは、重粒子線治療装置に用いられている通常の加速器のおよそ1,000倍に達し、そのため通常の加速器よりはるかに短い加速領域で同等の速度まで炭素イオンを加速することが出来ます。

短い加速領域で大きな速度を得られる一方で、現状のレーザー加速の研究成果では加速出来る炭素イオンの“個数”が少ないという課題もあります。炭素イオンの個数が少ないことは、患者さんの治療時間が延びることを意味します。レーザー照射では、照射面積を広げると標的裏面に発生する電界の強度が弱まり、イオンの速度は低下する一方、電界の面積が広がり、ある実験では加速するイオンの数が従来の40倍に増加するなど、個数を増やす有効なアプローチだとわかってきました。

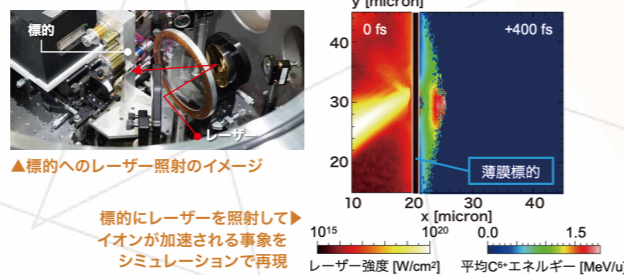
## 01 レーザー加速入射器

## 02 超伝導シンクロトロン

今後は、治療に必要なイオンの速さと個数を両立できる最適な照射のポイントを、実験を通して見極めていきます。

### 実験とシミュレーションの両輪で、計測困難な現象を紐解く

レーザー加速では、レーザーが標的に当たる、原子から電子が飛び出して原子がイオンとなる、生じた電界により電子に引き寄せられイオンが加速する、といった一連の過程が極短い時間に次々と進行します。理想的な加速を実現するためにはこれらをひとつひとつの過程に分けて解き明かさなければならず、そのためには「フェムト秒(1000兆分の1秒)」の時間分解が必要です。そこで私たちは、行った実験をスーパーコンピューターを使ったシミュレーションで再現し、現象を理論的に検証し、仮説を立てて実験にフィードバックする、という手法をとっています。実際の実験で条件を変えたとすると、正しく条件が変えられたことを検証するための計測も必要となりますが、シミュレーションであれば、さまざまな条件を正確に設定して検証できるので、実験を効率的に進められます。シミュレーションと実験のサイクルを、それぞれの専門家である私たち二人がタッグを組み、動力となって回っています。



量子メスプロジェクトは、レーザー加速技術の研究で得た知見を医療分野に応用し、社会の役に立てる初めての機会です。一方で、研究分野としては新しいため、加速後のイオンの制御など課題もあります。レーザー加速技術でイオン入射器をなんとか実現させたいという想いと同時に、緊張感やプレッシャーもありますが、私たちががん治療の未来を切り拓く量子メス実現の一翼を担うべく、一歩ずつ研究開発を進めています。

## 02 超伝導シンクロトロン 超伝導技術で大幅な小型化に挑む 次世代型シンクロトロンの開発



**MIZUSHIMA KOTA**  
量子医学研究所  
物理工学部  
先進粒子線治療システム  
開発グループ  
**水島 康太 主任研究員**

### わずか数秒で光速の70%にまで粒子を加速するシンクロトロン

重粒子線治療では加速した炭素イオンをがん組織に照射します。炭素イオンを治療に必要な速さまで加速する装置がシンクロトロンです。シンクロトロンは円筒状の管がリング状につながった構造で、その内部は真空です。炭素イオンは、円筒の外側に設置した電磁石により安定な周回軌道を保ちながら、からだの奥深くにあるがん細胞まで到達できる光速の70%まで、わずか数秒のうちに加速されます。

### 小型化実現の突破口となる超伝導電磁石の開発

シンクロトロンはリング内でイオンを周回させながら加速するので、限られた面積で効率よく加速できるものの、高速なイオンを得るには大きな軌道半径が必要です。一番新しい重粒子線がん治療装置のシンクロトロンは直径20m、1周60mほどあります。シンクロトロン的小型化には、加速したイオンを小さな軌道で曲げる高い磁場が不可欠ですが、高磁場を作るために電磁石に大電流を高密度で流すと、装置の耐熱温度を超える熱が発生してしまいます。この問題の解決には、極低温状態になると電気抵抗がゼロになり、電流を流して

も発熱しなくなる「超伝導」技術がカギを握ります。この超伝導の性質を利用して、発熱を抑えて強力な磁場を発生できる電磁石を開発し、シンクロトロンを直径7mまで小型化した装置が量子メスです。

量子メス用シンクロトロンの開発は、発熱を抑えられる超伝導電磁石の設計が終わり、実際に製作して試験する段階に入っています。量子メスのシンクロトロンに使用する超伝導電磁石は一台が3mほどですが、まずは40cmほどの小型モデルをつくり、設計上の問題がないかを確認しています。軽い負荷をかけた試験では、発熱につながるエネルギーの損失が、設計通りに抑えられていることが確認できたので、これから徐々に負荷を大きくし、より厳しい条件での試験を進めます。

### 社会への普及を視野に入れた設計が完了し、いよいよ実証実験へ

装置の開発では、医療現場からのニーズをもとに、必要となる性能を具体的な数値として決めていきますが、医療機器として社会に普及させることも視野に入れ、ただ性能や小型化を追求するだけでなく、コスト面や製造のしやすさなどを総合的に考える必要があります。そこが最も難しい部分です。超伝導シンクロトロンの設計・研究は、2014年からはじまり、2016年に始動した量子メスプロジェクトとして本格的に動き出しました。ようやく設計段階を終え、これからは実際にモノを作って検証を行っていく段階に移行していきませんが、設計時に設定した目標性能が達成できるかは、やはり実際に装置をつくって動かしてみないとわからない部分があります。来年2022年にはシンクロトロン自体の製造を開始し、2024年頃、完成する実機を使った性能検証を実施する予定ですが、設計ではわからなかった部分や様々な誤差の影響など、今後明らかになってくるものも多いので、開発の本番はまだこれからです。開発に携わる者として安心できるのは、医療の現場で量子メスでの治療が問題なく終わった、と確認できたその瞬間です。

## 03 マルチイオン照射 最先端のマルチイオン照射と免疫療法を組み合わせ 転移再発のないがん治療を目指す

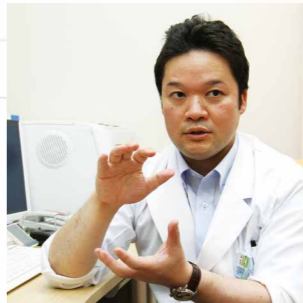
### より高い重粒子線治療効果を目指すマルチイオン照射

重粒子線によるがん治療では、加速した炭素イオンをがん細胞に照射しています。さらに高い治療効果を目指して進めているのが、炭素イオンを主に複数種のイオンを組み合わせる照射する「マルチイオン照射技術」の開発です。

粒子線治療では、水素イオンや炭素イオンを用いますが、質量が重いイオンほど、がん細胞へ与えるダメージは大きくなる一方、イオンを止める位置などの微妙な制御が難しくなるため、重粒子線治療では、治療効果と制御性のバランスが最も優れた炭素イオンを用いています。次世代の重粒子線治療装置「量子メス」では、照射技術を高度化し、がん組織の中心部には、炭素より与えるダメージが大きい酸素イオンを、一方でがん組織の周辺部には、近接する正常組織へのダメージを抑えながらも治療効果が得られるヘリウムイオンを、というように、同じがん組織でも位置に合わせて異なるイオンを照射することで、治療効果の向上と副作用の低減を目指します。マルチイオン照射を行うための装置は概ね完成していて、QST病院は、2021年度中から段階的に臨床試験を行う予定です。

### 放射線治療は体内でワクチンを作るようなもの

重粒子線治療は高い治療成績を収めてきましたが、医師として、それで満足しているわけではありません。がんの治療でつきまとう転移や再発があってもがんを治していきたい、という強い思いから、重粒子線治療と免疫療法を併用する治療の臨床研究を始めています。放射線治療でがん細胞を破壊すると、破壊されたがん細胞が元となって抗原が出るようになります。その抗原を樹状細胞が食べてがんの特徴をリンパ球に教えると、リンパ球はがん細胞を攻撃する免疫応答を起こします。つまり、放射線治療は、



**OKONOGI NORIYUKI**  
量子医学研究所  
重粒子線治療研究部  
骨盤部腫瘍臨床研究グループ  
**小此木 範之 医長**

がんワクチンを体内で作るようなものなのです。将来的には、免疫応答をより活発にする薬と組み合わせることで、遠隔転移自体さえも抑えていきたいと考えています。

### 患者に寄り添う重粒子線治療の普及に向けて

QST病院では2013年より、それまでは全摘出が当たり前であった早期乳がんを、重粒子線で治療する臨床試験を行っており、良好な手応えを感じています。これは、胸に傷をつけずに治したい、という患者さんの声が発端となった取り組みですが、重粒子線治療は、単に難治がんの治療が可能になるだけでなく、患者さんの気持ちに寄り添った治療を実現できる可能性がある、というのが現場に携わる医師としての実感です。ですが現実には、がん治療に携わる医師でさえ重粒子線治療を知らなかったり、正しく理解していないような状況です。5年後、10年後のがん治療を、患者さんに寄り添い、QOLの高いものとしていくためには、がん治療に携わる医師が重粒子線治療を治療の選択肢とすることがごく当たり前になるような教育の仕組みを作るなど、重粒子線治療の普及に医療界全体で歩みを進めることも重要だと思います。



# VARIOUS JOBS

## 研究を支える多様なお仕事

幅広い領域で研究開発を進めている QST。多様な研究開発を推進していくためには、研究活動だけでなく、それを支えるスタッフを含めた組織全体での取り組みが不可欠です。今回は、QST の情報システムや研究に必要な図書資料の管理などを担う「情報基盤部」の活動をご紹介します。

### ▶ Special Interview



情報基盤部システム 計画・科学情報課  
主幹技術員 大竹 淳



情報基盤部システム 計画・科学情報課  
主幹技術員 長屋 俊

#### 情報基盤の改革で コロナ禍をプラスの変化へ

私は基幹業務システムの企画・導入・開発・保守運用を担当しています。現在は、2020 年に策定した QST 情報基盤の改革「電子化に関する5年構想」に全力で取り組んでいます。

昨年のコロナ禍から生活も業務も大きく様変わりしました。紙文書の電子化やテレワークへの対応など新たな時代に相応しい研究開発法人であるために5年構想の着実な遂行が期待されています。

具体的な取り組みの1つとして、8月に Microsoft365 のライセンスを全職員に付与しました。6 月末に納品されたこの Microsoft365 ですが、通常なら全体設計とテスト運用に半年以上かかることを「一刻も早くこの価値を全職員に届けたい」という思いから2ヵ月弱で取りまとめ、全職員へのライセンス付与にこぎつけました。運用方針が定まっていない点も多く、利用者にご迷惑をおかけした点もありますが、活用事例や新たなアイデアなどたくさんの反響をいただき、迅速に提供できたことは良かったと思っています。

Microsoft365 は非常に有用なサービスです。QST 全体で Microsoft365 を使いこなすことができれば、QST はコロナ禍というマイナスを脱するだけでなく働き方改革というプラスへの躍進が実現できると信じています。多くの職員にぜひ活用してもらいたいと思います。

5年構想においては Microsoft365 導入も業務改革の端緒に過ぎません。今後はメールシステムの刷新、業務システムのクラウド化、ネットワーク構成の刷新等を順次進め、QST の職員に対して利便性と安全性を両立したより高度な研究業務基盤を提供していきたいと思っています。

#### 学術情報とメタデータをつなぐことが 科学技術の進展につながる

私は学術情報係という部署で、QST の中で生み出される学術情報について、QST の内と外とを「つなぐ」仕事をしています。「つなぐ」とは、大きく分けて2つあります。

一つ目が、量子科学技術に特化した QST 図書館として研究開発に必要な学術情報を入手し提供・所蔵すること、また、国内の他の研究機関・大学等からの資料利用要求に応えること、です。今では主流となったウェブ、それから紙メディアもどちらも活用できるよう努めています。

二つ目が、QST で日々生み出される論文や学会での口頭発表などの成果を機関リポジトリというデータベースを通して国内外に広く発信することです。論文のタイトル、掲載誌、巻号ページ数といったメタデータの確認をし、検索エンジン等と連携させ QST の成果を世界中に広く公開しています。

どちらの仕事も「学術情報の調査・入手・組織化」「入力データの確認・修正」といった、日々コツコツと小さな作業を長く積み重ねていくことで、いずれ大きな力を発揮する性質の仕事です。情報をアーカイブし、情報自体のメタデータを各種システムから検索可能な形にすることで、未来の利用者へ情報を届けるという大きな役割も果たしています。

オープンサイエンス・データという動きが広まる中、各種情報を「つなぐ」機能を強化していくことは、科学技術をより進展させると信じています。学術情報のメタデータをオープンにすることと同時に、データを利活用する仕組みが必要だろうと考え、各種ツールの実験的な開発も継続的に進めています。

# NEWS



## 理事長が新型コロナウイルス感染症に対して提言

平野理事長が、これまでの研究活動を基に、社会貢献活動の一環としてコロナ対策に関して政府への提言をまとめ、全国の学術経験者 34 人の賛同を得て、5月28日に総理大臣や関係大臣に送付しました。また全国の知事全員、経済団体、学術会議、国公私立大学などの協会、全国大学医学部長病院長会議などにも送付するとともに、関係連や経団連と密接な連携を図り政府や自治体に働きかけました。

### 提言書の概要

新型コロナウイルス感染症は、またたく間に世界に拡散した。世界は今、第二次世界大戦以降最大の危機に直面している。日本の医療、経済、文化、教育、社会を早急に再生しなければならない。そのための最優先事項は、希望する国民すべてにワクチン接種を可及的速やかに完了することである。さらに、有事に対応できる医療と社会の再構築が必要であり、政府、自治体、経済界、学術界や医療界が連携し、国民が一丸となり取り組む必要がある。ここに我々は3つの提言を行う。

- ▶ 提言1  
10 月末までに希望する国民全員にワクチン接種完了
- ▶ 提言2  
感染症危機事態に対応可能な医療体制・社会体制構築
- ▶ 提言3  
将来に備えた危機管理・研究基盤体制の構築

変異ウイルスの出現により高齢者のみならず若年者の重症化例が増えつつある。呼吸器疾患は一般に冬季に流行し易い。冬季までに、集団免疫を獲得して感染症に強い社会を構築するためにも65歳未満の人へのワクチン接種も高齢者への接種と並行して可及的速やかに開始する必要がある。

以上の観点から、提言1を最優先事項として提言するとともに、そのための具体案を提示する。すなわち、現在の「複線経路；政府から自治体、政府から自衛隊の2経路」を、複々線化し高速道路並みにスピードを上げることでより冬季に入る前に集団免疫を獲得する。

引き続き、関係者と連携して、コロナ対策に関する働きかけを行っていきます。

# PRESS RELEASE



## 素材から「銀」が剥がれない、効果長持ち！ 抗ウイルスグラフト材料の開発に成功

～マスクに付着したCOVID-19ウイルスの99.9%以上を1時間で不活～

高崎量子応用研究所プロジェクト「環境資源材料研究」保科宏行主幹研究員、瀬古典明プロジェクトリーダーは、株式会社 ERH テクノリサーチ、長崎大学と共同で、抗ウイルス効果が期待できる銀を、放射線グラフト重合により、マスクや洋服などの繊維素材に強固に結合させることで、付着した新型コロナウイルスの99.9%以上を接触後1時間以内に不活化できる繊維の開発に成功しました。

新型コロナウイルス感染拡大に伴い、防護服やマスクなど、ウイルスとの接触を防ぐ製品の需要が高まりました。これらの製品で、ウイルスが付着したときに短時間で高い抗ウイルス活性が得られる素材を用いることは、使う人の安心と安全の確保につながります。これを実現するためには、抗ウイルス機能を素材の表面に高密度に安定して持たせることが必要となります。

そこで、放射線グラフト重合という技術を使い、抗ウイルス効果が高い銀を不織布に固定化する技術を新たに開

発しました。この方法で銀固定化不織布を作り、フォーカス計数法という測定により抗ウイルス性能を調べたところ、付着した40,000個のCOVID-19ウイルスは、1時間後には検出限界以下まで減少し、99.9%以上がウイルスとして機能しない状態になっていること、すなわち、1時間の接触でほとんどのウイルスが不活化されたことが分かりました。また、銀固定不織布は、水中で24時間浸漬攪拌しても、銀が不織布から脱離することは一切なく、様々な使い方に応えられることが分かりました。さらに、今回開発した放射線グラフト重合技術による銀の固定法を、不織布だけでなく、ガーゼ素材やプラスチックにも適用できるようにしたこと、防護服やマスクだけでなく、家財や壁紙、フェイスシールドやアクリル製パーティションなど、様々な素材・形状の製品に幅広く展開することが可能となり、より安心・安全な生活の実現に役立つことが期待されます。



## ▶ Pick Up Technology

QSTの理念である「調和ある多様性の創造」。  
その思いが創りあげた未来を想像し、イラストにしてみました。  
そんな未来のテクノロジーを実現する為に研究を進めている  
QSTの技術の一部をご紹介します。



ロボットによる

### 全自動インフラ検査

未来のまちではロボットが全自動でトンネル、橋梁、コンクリート製の建物内部欠陥を検査してくれています。保守安全作業は自動化・無人化され、わたしたちの暮らしを安心・安全に支えてくれています。



### レーザーによるトンネルの覆工面の 遠隔・非接触・非破壊計測

トンネルなどの保守保全作業の点検は、専門技術者の目視確認や打音検査により行われ、多くの手間や時間がかかるだけでなく、作業中のつい落など危険性を伴います。このような課題を解決するために、(株)フォトラボは、QSTのレーザー技術を活用したコンクリート内部の診断技術の社会実装を進めています。



緑点：表面の振動を計測するレーザー  
白点：表面を振動させるレーザー



レーザーによる検査は、ハンマーの代わりにコンクリートを振動させる「振動励起レーザー」と、耳の代わりに発生した振動の違いを計測する「振動計測レーザー」を組み合わせて、打音検査を遠隔・デジタル化します。



QST 発のベンチャー「(株)フォトラボ」は、社会実装に向け、トンネル以外のインフラ構造物検査の試験を進めています。今後、人の手だけに頼らない、安全で確実な点検ロボットの実現が期待されます。

※ご寄附のお願い※  
QSTの活動を  
ご支援ください



### ▶お問い合わせ先▶▶▶

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 イノベーションセンター研究推進課

Tel : 043-206-3023(直通) Email : kifu@qst.go.jp

URL: <https://www.qst.go.jp/site/about-qst/1311.html>

(オンラインでもご寄付いただけます)

