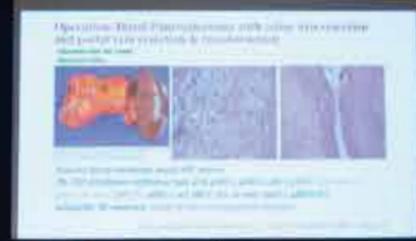




# がん死ゼロ健康長寿社会への道を切り拓く 量子メス開発の今と未来

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



▶ 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。

#### 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。

### 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かと思います。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っしゃいますが、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。

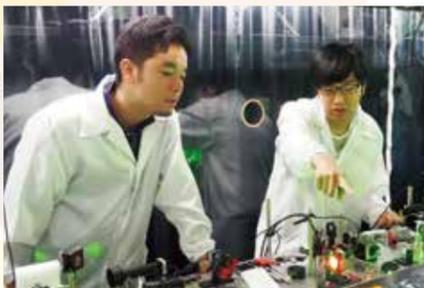
 <b>MODERATOR</b> 文部科学省 科学技術・ 学術政策研究所 客員研究官 <b>門村 幸夜</b>	 <b>PANELIST</b> 群馬大学 腫瘍放射線学教室 教授 <b>大野 達也</b>	 <b>PANELIST</b> 国際医療福祉大学 副学長 <b>宮崎 勝</b>	 <b>PANELIST</b> NPO 法人 バンキャンジャパン理事長 <b>眞島 喜幸</b>	 <b>PANELIST</b> JST 未来社会創造事業 プログラマネージャー <b>佐野 雄二</b>
---	---	--	--	--

# 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。電気的にプラスの炭素イオンと電気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。

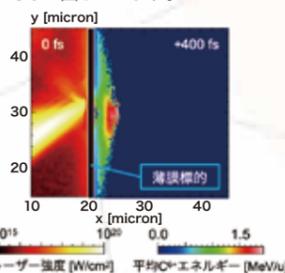
### 実験とシミュレーションの両輪で、計測困難な現象を紐解く

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々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、動力となって回しています。



▲標的へのレーザー照射のイメージ

標的にレーザーを照射してイオンが加速される事象をシミュレーションで再現



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、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年から始まり、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すが、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ため、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

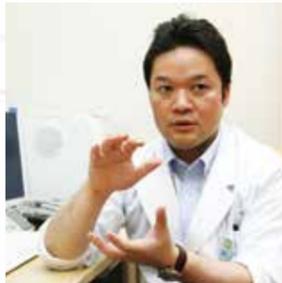
### より高い重粒子線治療効果を目指すマルチイオン照射

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。