

第17回原子力委員会定例会議議事録

1. 日 時 令和8年4月22日（水） 14：00～15：10

2. 場 所 中央合同庁舎第8号館6階623会議室

3. 出席者 原子力委員会

上坂委員長、直井委員、吉橋委員、畑澤参与、岡嶋参与、小笠原参与

内閣府原子力政策担当室

恒藤審議官、井出参事官、中島参事官

量子科学技術研究開発機構

白井敏之量子医科学研究所所長、近藤公伯上席研究員

4. 議 題

（1）QSTの量子メスに係る取組について（QST 白井所長、近藤上席研究員）

（2）その他

5. 審議事項

（上坂委員長）時間になりましたので、令和8年第17回原子力委員会定例会議を開催いたします。

本日は畑澤参与、岡嶋参与、小笠原参与に御出席いただいております。なお、畑澤参与はオンライン出席であります。

本日の議題ですが、一つ目がQSTの量子メスに係る取組について、二つ目はその他であります。

それでは事務局から説明をお願いいたします。

（井出参事官）それでは一つ目の議題でございます。QSTの量子メスに係る取組について、量子科学技術研究開発機構量子医科学研究所所長白井様、上席研究員近藤様より御説明をいただきます。本件は原子力利用に関する基本的考え方の3の7、放射線ラジオアイソトープの利用の展開に主に関連するものです。

それでは、まず白井様から御説明をお願いいたします。

(白井所長) ありがとうございます。それでは最初に量子メス開発の現状について、Q S T 量子医科学研究所の白井より説明させていただきます。

私の方から超伝導技術を最初に説明し、後ほど近藤よりレーザーに関する技術を説明させていただきます。

まずその前に、我々が属しております量子医科学研究所の紹介をさせていただきますと、我々の研究所は、物理工学の研究者や薬学生物の研究者、そして医師といった多種多様な人材から成る研究所でございまして、こちらにありますように、加速器・R I 製造・イメージング技術、それから量子技術といった、主に工学技術を基盤とした医学研究、特に重粒子線治療やP E Tを始めとする医療機器、それから、がんや認知症などの医薬品、特に放射性医薬品の開発というものに携わっております。

本日は、この中で重粒子線がん治療装置、量子メスについて御紹介させていただきます。我々のこの重粒子線がん治療に関する取組は、もう30年ほど前の1994年から開始されておまして、当時、この非常に大きな「対がん10か年計画」の中で、非常に大きな重粒子線治療装置H I M A Cというものを建設して、こちらにおいて基礎研究並びに臨床研究を開始いたしました。その後、優れた臨床結果が得られたというところで、一般病院にも設置できるような装置というものの開発を2004年頃から開始いたしまして、H I M A Cに比べますと約3分の1、まだそれでも60メートルぐらいの大きさではあるのですが、そういった重粒子線装置に関する技術開発というものを当時行いました。

こちらの成果をもとに、この技術開発の成果は企業、特に国内の日本企業に技術移転されて、メーカー国内企業が国内にはQ S Tを含めて7施設を展開し、供給し、この7施設で重粒子線がん治療が始まったという経緯がございます。当初、1995年頃はQ S T病院一つでしたが、2000年頃からは他の病院が徐々に立ち上がってまいりまして、現在では7施設を含めて年間5,000人以上の患者さんが重粒子線治療を受けることができるようになっております。また、この7施設における臨床試験、それから様々な臨床研究の結果を受けまして、公的医療保険の適用というものも進んでまいりました。こちらにも一覧で示しておりますが、頭の方から体幹部の胸部、腹部、それから前立腺といったところまで、かなりの部分が現在は保険によって重粒子線治療を受けることができるようになっております。

一方で、右側にありますように、一部の疾患、症例が少なかったりするような疾患などでは、まだまだ臨床研究が進められておまして、そういったデータの蓄積によって将来的に保険収載されることを我々目指しているところでございます。

また、国内の7施設の展開、それから保険診療など、臨床実績の積み重ねを受けまして、海外においても、重粒子線治療の普及というのが、ここ数年非常に盛んになってまいりました。海外では、現在ヨーロッパとアジアを中心に24施設が稼働、建設しているところがございます。そのうちアジア地区を中心に15施設が日本製ということになっております。そういう意味で、日本メーカー、現在は東芝、それから日立ハイテクが主に供給されておりますが、日本製が非常に国際競争力を持っている分野ということが言えます。

また、海外の動向ですけれども、米国、韓国、台湾、UAEといったところに、その2社が重粒子線治療装置を供給している一方で、中国では中国製の重粒子線がん治療装置というものが開発されまして、中国の国内では非常に導入が強力に推進されているという状況でございます。

こういった国内並びに世界的な背景を受けまして、我々QSTは、量子メスの開発プロジェクトというものをQSTができました2016年より開始いたしました。こちらが目指すところは、様々な良い臨床成績を得ている重粒子線治療でございますが、やはり装置が現在世界で普及しているのが60メートルから70メートルという装置でございますので、まだまだそれ以上の普及が難しいというところで、超伝導技術やレーザー技術などを使いまして、一段と小型化した装置の開発を目指すというものでございます。それによって、国内並びに世界において更なる普及を目指すというのがこのプロジェクトの目標でございます。

小型化するための技術としては、主に二つを我々は開発をしております。一つは超伝導技術になります。これは重粒子線治療装置の主な加速器部分というものが磁石でできましたシンクロトロンですので、この磁石を超伝導技術によって小型化するというものでございます。また、この超伝導シンクロトロンにビームを入射するためには、やはり別の加速器が必要となりますので、それもまた現在10メートル以上、こちらに見えておりますが、このように10メートル以上の加速器が必要となっておりますので、それをレーザーによって小型化するというもののもう一つの大きな目標でございます。これによりまして、また治療室の小型化も同じような技術を使って実現しまして、全体としては20メートル、病院の建物の中に収まるような装置を開発するということを目指しております。

それで少し技術的なところにも触れますと、我々超伝導技術の開発に当たりましては、この量子メス用の超伝導磁石の開発に、ここ10年取り組んでまいりました。これを他の先端的加速器と比較いたしますと、現在ドイツにおいて開発が進んでおりますFAIR加速器と比べましても、こちら側がFAIR加速器の電磁石の仕様、こちら側が量子メスの電磁石仕

様でございますが、最大磁場が3.5テスラと、4.5テスラ、励磁速度が0.7テスラメートル毎秒と1テスラメートル毎秒、その他のパラメーター、磁場均一度なども含めまして、ほぼ同程度のスペックが求められております。かつ、我々は先端加速器ではありませんので、医療現場でオペレーター無しで技師が使うことが目標ですので、液体ヘリウムを使わずスイッチオンで使えるようなシステムを目指すということで、非常に高い目標を掲げて開発を行ってまいりました。

そのためには、超低損失の超伝導線材の開発やヘリウムフリーの伝熱パス、コイル形状の最適化といったものを我々QSTだけではなく他の研究機関、それからメーカーさんと一緒に開発を行ってまいりました。

そうした開発の成果として、2019年に超伝導の試作機を作成いたしました。こちらは東芝エネルギーシステムズさんと共同で製作したものでございまして、こちらによりまして長時間、これが1時間弱ですけれども、長時間の運転試験を行いまして、実際その安定性というものを検証したというデータでございます。こうした技術的なブレークスルーを踏まえて、2020年頃より実際の臨床機の製作と建設というものを我々は進めることといたしました。

これが現在進めております量子メスの実証機の全体でございます。先ほど説明させていただきましたHIMACが右側に見えているものでございまして、HIMACのシンクロトロンというのは直径40メートル、周長で130メートルという非常に大きなものでございます。今はこのHIMACで加速した炭素イオンを治療室に送りまして、年間1,000人の患者さんに治療を行っております。今回の我々はこちらに見えておりますけれども、数十分の1のサイズ、これが同じシンクロトロンですけれども、超伝導技術を使ったシンクロトロンを用いまして、同じエネルギーまで炭素を加速いたしまして、治療室に供給するということを準備しているところでございます。

もう少し細かく見ていきますと、炭素を中心に様々なイオンを生成するイオン源、それから予備加速を行います線形加速器、そして超伝導シンクロトロンといったもので、全体として10メートルの中に収めるといったものでございます。

ロードマップとしては、我々2016年から建屋、それから超伝導部分、レーザー部分について開発を行ってまいりまして、現在は2026年、ここでございますが、現在建物は竣工いたしました、装置の工事というものが今年度より始まることになっております。来年度中には我々、超伝導部分については医療機器承認を取りたいと考えておりまして、薬事承認

が取れば、臨床に実際に使っていくということを想定しております。そのような計画で進めております。我々としてはそういった計画で進めておりますし、ここで医療機器承認が取れました後には、メーカーさんの方でこのようなパッケージ、先ほどと同じ超伝導シンクロトロンを使った加速器と治療室を組み合わせまして、20メートルとまではいきませんが、まずは30メートル程度のサイズの重粒子線治療装置というものが市場に上市できるのではないかというふうに考えております。

まず、この部分までの発表をまとめさせていただきますと、重粒子線がん治療装置は体に優しいがん治療装置として認知が進んでおりまして、国内7施設稼働しているところでございます。臨床データの集積により、多くの部位で保険収載されておりますし、国内企業による輸出も既に開始されているところでございます。この重粒子線治療が誰もが受けられる治療となるために、病院内に設置できる装置、量子メスが必要でございますので、そのため我々、様々な量子科学技術を用いた小型化に取り組んでいるところでございます。こういった産学連携の技術開発と並行しまして、社会実装に向けましては2027年度中の医療機器承認というものをQST、それからメーカーの方で目指しております。

まず、前半の部分については以上でございます。

(井出参事官) では、引き続きよろしくお願いいたします。

(近藤上席研究員) それでは、近藤より第5世代の方は入射器の方が線形加速器ではなくて、レーザー加速という方法でやっていくことで、それについて報告させていただきます。

まず、今日お話しするのは、恐らく皆さんレーザー加速という物理現象、そんなにポピュラーではないと思いますので、それについて説明させていただきまして、それを加速装置にするための技術的課題、それを開発目標とともに示させていただきたいと思います。そして残った時間で、開発の現在の状況を紹介させていただき、まとめといたしまして、今後の取組をお話しさせていただきます。

まず、レーザーを使ってどうやってイオンを加速するかということなのですが、強力なレーザー光線を使ってイオンを加速するのですが、強いレーザーといっても色々ありまして、CWのレーザー、あるいは高出力のパルスレーザーといったものもございます。CWのレーザーと、右の図になりますけれども、パルスレーザーとで、右上のグラフとその下のグラフとで平均出力というものは変わらないのですが、パルスレーザーになれば、レーザーが光っている間だけエネルギーを出射しますので、ピーク出力というものがあるということになります。ですので、パルスレーザーの方がそれだけ応用が広がるということにな

るかと思われます。我々のところでは、これに対してパルス幅というものが極端に短い極短パルス高出力レーザーを使っております。パルス幅が非常に短いピコ秒とかフェムト秒というパルス幅になりますので、ピーク出力が通常のパルスレーザーに比べて100万倍とか1億倍強いレーザーということになります。

一番下の写真ですけれども、これは瞬間出力が1,000兆ワット、ペタワットのレーザーで、私が所属するQSTの関西研で稼動しているレーザーです。ただし、このレーザーは10秒間で1発という繰り返しになります。

ついでに、少しJ-KAREN-Pという名前の付いたレーザーについても御紹介させていただきますと、1,000兆ワットのレーザーですので、光学素子のダメージを避けるために直径が25センチあります。もう10年前になってしまいましたが、これを1.5ミクロンという非常に小さいエリアに集光することができるという技術を達成しました。こうすることで1.5ミクロンの限られた小さな1点で、それから、フェムト秒というほんの一瞬ですけれども、集光強度というものが10の22乗ワット・パー・スクエアセンチメートル(W/cm^2)、我々の業界は、この光の強度を示すのに(W/cm^2)という単位を使うのですけれども、こういった強度を達成いたしました。これを達成したときは世界一でした。ただし1年後ぐらいに韓国に1桁上の値を出されて世界一ではなくなります。ところでレーザーは光ですので電磁波です。従いまして光の強度が決まれば、光の電界の強さというものが試算でき、これを計算して10の22乗という強度に匹敵する電界の強さを計算いたしますと、これが280テラボルト・パー・メートル(TV/m)、およそ 3×10^{14} 乗ボルト・パー・メートル(V/m)というような強さになるということです。

ここからは、加速器の小型化というお話をさせていただきます。小型の加速器を実現したいということですので、大きさがリミットされていますから、加速電界というものを高くしてやる必要があります。一方で、加速電界をずっと永遠に高くできるかということ、そういうことはできません。通常の加速器ですと加速管には放電の限界があります。これが大体100メガボルト・パー・メートル(MV/m)、10の8乗 V/m で放電してしまう、すなわちプラズマ状態になってしまいます。ということは、プラズマ状態で荷電粒子を加速できないといけないということになります。ですが、通常のプラズマ状態だと荷電粒子は加速できません。ですが、ここに超高強度レーザーを照射してやる。理想的なのは、超高強度レーザーで直接イオンを加速できることなのですが、今のレーザー技術だとそこまでは到達できない。ですが、イオンではなく電子は質量が圧倒的に小さいので、現在のレーザー技術でも

十分強い光強度が発生でき、相対論効果によってレーザー進行方向に加速することができます。その結果強力な電荷分離状態という状態を作り上げることができます。このとき発生できる電界、すなわち加速電界、イオン加速の場合は、これが TV/m 、すなわち 10^{12} 乗 V/m をはるかに上回るような値にすることができます。要するに放電限界を超えて桁違いに大きな加速電界が発生できるということになります。

もう少し具体的にレーザーによるイオン加速の仕組みを説明させていただきますと、真空中にこのようなミクロンの厚さの薄膜をセットします。ここに超短パルス高強度レーザーを集光照射します。そうしますと、薄膜の表面にプラズマができる訳なのですが、照射強度が 10^{18} 乗 W/cm^2 を超えるあたりから、ここで発生した電子がレーザーの進行方向に一気に加速されます。そうしますと固体密度の 10 分の 1 程度の非常に高密度の電子流が流れ、通常の加速器では考えられないような高密度の電流が流れます。この電流が流れている間ですが、薄膜の裏面にシース電界と呼ばれる強力な電界が発生します。これが 10^{12} 乗 V/m という値よりもはるかに強い加速電界が発生することができます。ここに、加速したい原子をセットする、すなわちコーティングするなり何なりして置いておけば、まず原子がこの強力な電界でイオン化します。そうするとプラスに帯電しますので、イオンが裏面の法線方向に一気に加速されるという現象が起こります。強さが TV/m ありますので、 10^{12} 乗 V/m ありますので、加速距離がたとえ 1 ミクロン程度でも、核子当たりメガエレクトロンボルト (MeV) のイオンが発生できるということになります。ですので、このイオンを加速するためのレーザーを小型に作って、発生したイオンを使いたいところにコンパクトに届けることができれば、また、この現象を十分な繰り返しで発生させることができれば、コンパクトな新しいイオン加速器が実現できるというものであります。

ですが、解決しなければいけない技術課題というものがございます。

次に、この技術課題を要素技術ごとに紹介していきたいと思います。

まずレーザーであります。レーザーに関しましては左の方は理想的な場合ですけれども、強力な電荷分離ができますが、実際のレーザーは、右に示しますようにレーザーパルスに、メインのパルスに対して先行する光ノイズというものが存在します。このノイズに対するメインパルスのコントラスト比がたとえ 9 桁ぐらいあったとしても、先ほどの 10^{22} 乗 W/cm^2 の照射強度の場合には、ノイズだけで 10^{13} 乗 W/cm^2 で薄膜を照射してしまいます。我々の分野では、 13 乗もありますとプラズマが発生し、この膜が吹き飛んでしまうということが分かっていますので、要するに強力な電荷分離状態が作れないということに

なります。ですので、非常に高いコントラスト比が必要ということになります。一方で集光強度はプラズマ中の電子が十分に加速できる程度まで十分に高くしなければいけない。さらに、この現象を10ヘルツ(Hz)の繰り返しで小型のレーザーで実現できねばならないという課題がございます。

次にターゲットですけれども、我々の場合まずは薄膜の裏面に炭素膜を付けて、炭素を加速したいということなのですが、炭素をコーティングしたとしても、立ち所にその上に不純物層というものが形成されてしまいます。その中には必ず水素が含まれます。こういった状況で先ほどのように加速電界を発生したとしても、電荷質量比が一番高いのは陽子ですので、薄膜裏面にどんな原子を持ってきても陽子が加速されてしまいます。このことは我々の業界では常識になっており、陽子は加速するのは容易ですが、それ以外のイオンを効率よく加速するのは単純ではありません。どうすれば希望するイオンを効率よく加速できるかということは、すでに以前から分かっていることなのですが、例えばCWのレーザーを当てて、十分に加熱して不純物を飛ばしておいて加速電界を作れば、この場合ですと炭素が加速できるということになります。

ですが、シングルショットでこういったことができるということは分かっていたのですが、我々の場合は10Hz以上の繰り返しでこういったことを再現しなければいけません。また、純度の高い炭素が発生できるようにしなければいけません。また、炭素が発生させるということはいいのですけれども、こういったことをやりますと、薄膜に穴が開いてしまいます。穴の開いた成分はといいますと、デブリと呼ばれておりますが、周りに飛び散ります。これが10Hzで起こるということで、実は最終光学系というのは非常に我々にとっては高価なものですが、これに損傷を与えるような影響を及ぼします。従いまして、こういったものが影響しないようなメカニズムが必要だということになります。また、このようなレーザーで発生したイオンビームというのは電子を伴って発生します。電子を伴った高密度のイオンビームというのは、恐らく加速器の業界では扱ったことはないと思われます。つまり初めてのものを扱わなければいけない。また、十分な捕集効率で、これを後ろへ伝送していく必要があります。また、一度磁石などで曲げて電子を取り除いたとしても、依然としてイオンは非常に高密度であるということで、空間電荷効果というものをどの程度考慮しなければいけないか、こういった状態を扱うことは初めてのことです。また、レーザー加速では、発生できるイオン数が十分多く期待できないということで、量子メス入射器の場合は位相回転によるバンチ圧縮という技術を利用して、効率よくイオンを使えるようにしなければいけ

ないと考えております。

この計画図は、先ほど白井所長の方からも示させていただきましたけれども、我々のところでは第5世代ということで、これは未来社会創造事業という国プロと並行するような形で研究開発を進めております。初めから実証機建設ということで進めようとしたのですが、実際は最初の4年で試験機を開発し、次の3年間で原型機というものを建設しました。これを現在は高度化し、この原型機を使ってプルーフ・オブ・コンセプト（P o C）、概念実証することを目指しています。その概念に基づいて、最初は2年でということでしたが、これは困難ですので、4年ぐらい掛けて実証機を建設し、その後で実際の試験に入る、実証実験に入るということを考えております。このような計画で、4 MeV パー・核子の炭素を十分な数発生しシンクロトロンに入射できるということを概念実証するという目標で進めております。

次に開発の現状ですけれども、まず木津の関西研の大実験室の一つに、こういったイオン加速プラットフォームというものを建設し、レーザーはこの暗幕の中に入っており、ここから出てきたレーザーをこちらにありますイオン加速部でイオンを発生します。出てきたイオンビームを伝送させて、その特性を測ります。まず、レーザーですけれども、これは2023年の段階でこういった形が確立しておりまして、コントラスト比は11桁、それから集光強度は20乗あれば十分だということが分かっており、その強度の照射が可能になっております。すなわち現時点ではP o Cに十分なスペックのレーザーが開発できており、昨年に、これに関わる技術を論文発表しております。

次にターゲットですけれども、これは開発しているものの一例でテープ型のターゲットです。白い構造体が見えると思いますが、これはIHヒーターになっていまして、非接触でニッケルのテープを加熱して、加熱した後下方に送り出され、下方の適当なところに来た時にレーザーを照射しイオン加速をするというメカを作りました。真ん中の写真がトムソンパラボラ分光器というもので捉えた加熱しないときに捉えられた生データですけれども、御覧になったら分かりますが、プロトンが強く出ていて、カーボンも出ているのですけれども4価にとどまっています。一方、加熱をしますとプロトンの信号ははるかに抑えられて、カーボンは5価までイオン化し、最大加速エネルギーとして6.5 MeVまで加速できております。この結果に関しましては、23年の段階で論文化し、特許も出願しております。

デブリに関しましては、日本電気硝子さんの超薄板ガラスというものが使えるということが分かりました。これは折り畳み型の携帯電話に使われているガラスでして、曲げることができますので、これをロール状にすることができ、なおかつ品質が良いということで、この

ガラス、すなわちデブリシールドを通すと通さないかで集光レーザーのスポットは変わりませんし、イオンビームも発生できるということが分かっております。これは昨年、論文化と特許出願をしております。この装置はK a n a d e v i a さんに組み立てていただいております。

ビーム伝送のところなのですけれども、発生したイオンをQートリプレットで空間的に集光します。また、中央にありますR F キャビティ、これは位相回転空洞でして、これを使ってバンチ圧縮を行います。また設置したファラデイカップでイオンの数を数えます。右の図になりますけれども、位相回転空洞を最適化することで、イオンのバンチ幅が最短で140ピコセカンド以下まで圧縮できるということが実験的に証明されております。1.5MeVの陽子ですけれども、パルス幅が極めて短く、単位時間当たりのイオンの照射強度が極めて多いということで、通常の加速器で発生できるものよりも2桁上回るような強度で物を照射できるということが分かっております。この結果は論文発表すると同時に、昨年ですけれどもプレスリリースをさせていただいております。

それから、レーザーはどれぐらいのスペックが必要かということの評価ですけれども、これについては3次元のP I Cシミュレーションを実施して評価しております。炭素の薄膜に関しまして、色々なシミュレーションをやった結果をまとめたものを今年1月に論文発表いたしました。現段階での結論としていたしましては、炭素膜であるならばレーザーは3ジュール・パー・パルスあれば十分だろうということが分かってきております。

今後の取組というところなのですけれども、2026年で実験データに裏打ちされたP I Cシミュレーションによる開発可能なレーザーとターゲット、ビーム入射の設計ということ、これを示すことでP o Cというものを示したいと考えております。

最後のまとめになりますけれども、第5世代へ向けてレーザー加速入射器を開発するというのを今後も継続することを考えております。またレーザーですけれども、3ジュール・パー・パルスになりますと冷却の技術が必要になってまいります。このような技術を国産でやらなければいけないのではないかとということで、そのような取組をしていきたいと思っております。

また、先ほど申し上げましたけれども、発生できるイオンビームの短バンチ特性、また単位時間あたりの照射強度が極めて高いということで、これらの特性を生かしたような取組を今後進めていきたいと考えております。原子力材料の評価ですとか半導体検査、新物質合成、それから生命系での応用ではF L A S H効果の研究にも使えるのではないかとということで

様々な応用へも展開していきたいと思っております。

以上で私からの報告を終わります。

(上坂委員長) 白井様、近藤様、非常に夢のある、かつ最先端の技術を使われた粒子線治療装置の御説明をありがとうございました。

それでは、質疑させていただきます。3時10分までをめどとしまして行いたいと存じます。

それでは、直井委員からお願いします。

(直井委員) どうも白井様、近藤様、御説明ありがとうございます。

白井様が御説明いただきました2ページのところで、QSTの先端医療分野での研究開発について御説明いただきました。重粒子線を用いたがん治療、それから核医学治療、それから脳疾患の診断治療、それに医薬品開発も含めて、いずれも最先端をいく研究開発で世界をリードされており、大変すばらしい成果も上げられているということにまずは敬意を表したいというふうに思います。

それで今回の御説明では、がん治療に用いる重粒子線発生装置の開発について、病院の病室に設置可能な小型化を目指すということで、11ページのところで、これはHIMACの横にこういう建屋を造って、かなり小型化されているというのが一目瞭然に分かるという装置でございまして、すばらしいなと思ったのですけれども、また7ページで、日本のメーカーが世界の重粒子線発生装置の輸出もしているというような話ございました。それで、第4世代の11ページにございました先ほどのHIMACの横に書いてある装置の海外への輸出も含めて、今後装置の認証が進んだ後になるのでしょうか分かりませんが、海外への輸出も視野に入れているという理解でよろしかったか教えていただけますでしょうか。

(白井所長) ありがとうございます。

既にメーカーさんの方には、海外の病院等から少し問合せが来ているというふうにお聞きしておりまして、大型の治療室が三つも四つもあるようなところは引き続き現在の装置が入ると思うのですけれども、例えば治療室が一つ若しくは二つといった小型な重粒子線装置を入れたいという病院さんとしましては、こういった量子メスを是非導入したいということで、問合せが来ているというふう聞いております。ただ、やはりまだ医療機器承認が日本でも取れておりませんので、まずは実際の導入の細かい詳しい、実際の議論としてはその後というふうになるというふうにお聞きしているところでございます。

(直井委員) ありがとうございます。

それで8ページのところに、上の方の量子メスでは、大きさに言うと45×34メートルというような御説明ございましたけれども、今、世界で導入されているこの治療装置というのは大体これぐらいの装置若しくはこれよりも大きい装置というふうに考えてよろしかったでしょうか。

(白井所長) 今、世界で導入されておりますのは、8ページの上の図の左側にございます普及型と書いてある装置がございまして、こちらが今世界で導入されておまして、大体横幅が60から70メートルぐらいというところの装置が今、世界、別のスライドにございましたが、24か所で建設が進んでおるところでございます。

(直井委員) ありがとうございます。

それから、メーカーとしては日立とか東芝が日本では世界に向けて輸出をしているというようなお話だったのですけれども、対して中国もかなり開発を進めているというお話でしたが、中国の重粒子線発生装置も基本的には小型化を目指して開発を進めているのでしょうか。教えていただけますでしょうか。

(白井所長) 中国につきましては7枚目を御覧いただけますでしょうか。7枚目の左上の世界地図がございまして、こちらで黒字になっておりますが、中国近代物理研究所という原子核の研究所がございまして、こちらで精力的に技術開発が行われております。技術開発されたものは子会社の医療機器メーカーがございまして、その医療機器メーカーを通して現在、中国国内に販売、導入が進んでいるというところでございます。ただし、現在導入されておりますのは、近代物理研究所の上にあります武威ですとか、下にあります蘭州重イオン治療センターのようなものは、やはり今の日本と同じで70から80メートルというサイズのものが中国薬事を取って導入されているところでございます。ただし、非常に中国はこういう先端分野、医療機器分野に力を注いでおりますので、こういう放射線治療装置だけでなく、PET、MRIもそうなのですけれども、かなり国の資金が入って、この蘭州の研究所を中心に小型化開発というものを基礎開発としては進めているというところは、論文、学会等で発表されております。

(直井委員) どうもありがとうございます。

続きまして、近藤様のレーザー駆動イオン加速器に対する質問なのですけれども、第5世代で新しいレーザー加速という技術にチャレンジをされていて、様々な課題に対して成果を上げてこられている、非常にすばらしいなと思ったのですけれども、レーザーといいますと装置がかなり大型化するようなイメージがあったのですけれども、このレーザー加速の入射

器の開発をされたものは、10メートル×20メートルの第5世代のこの大きさの中に全てが入るというような理解でよろしかったでしょうか。

(近藤上席研究員)初めはそういう小型のレーザーが必要だという話もあったのですが、むしろこの開発を進めている中で、専門家からはリングの中にイオンを発生するところだけを持ってくるということで十分意義があるという話が出てまいりました。ただしレーザーのところは余り大型のものだと、別室に据え付けるとしても駄目ですので、そんな大きなものになるのは良くないと考えております。私たちが開発しているような、4メートル×2メートルの光学定盤に乗る程度のものならば、別の部屋に設置しても、レーザーは光ですので鏡で引き回して照射するということが大丈夫ということで開発を進めております。

(直井委員) どうもありがとうございました。私からは以上です。

(上坂委員長) 吉橋委員、お願いします。

(吉橋委員) 白井様、近藤様、量子メスに関して御説明ありがとうございます。

今日のお話は、粒子線治療ということでお聞きしておりました。粒子線治療は、ブラッグピークを腫瘍組織に照射して治療するというので、正常組織には非常に影響がなく治療ができるものですね。その中でも、今回お話しいただいた量子メスは、重粒子線治療のものであるのですが、重粒子線使うと陽子線よりもエネルギー付与が高く、陽子線では難しいようながんに対して有効だと思います。その一方で、これまで設備が大きくて普及が難しかった訳ですが、本日お話しいただいたように最新技術で小型化して、多くの方が重粒子線治療を受けられるようになると、とてもいいことだなと思いました。

また7ページ目にあるように、重粒子線治療装置が世界の施設において日本製が多いというのも大変期待できて、こういった小型化技術が更に進んで、世界に日本の技術が広がっていくととても素晴らしいなと思っております。

先ほど陽子線治療と重粒子線治療の違いといいますか、放射線治療は先ほど2ページ目でもQSTさんの方で様々な治療、最新の治療技術ということを研究されていると思いますが、こういった治療というのは、日進月歩で、6ページでお示しいただいているような症例というの、他の放射線治療であったりRIでも検討されているかと思います。その中で重粒子線治療、先ほどもブラッグピークをという話もさせていただきましたが、今後この量子メスが他の治療と差別化されていくときに、6ページ目の中の様々な症例の中でも結構ですし、量子メスが、これは一番であるということとか、今まではこういったところにアプローチできないけれども、量子メスだとアプローチできるのだというような、そういった治

療法だとか特徴があれば、まず教えていただけますでしょうか。

（白井所長）ありがとうございます。

量子メス、重粒子線治療に関しましては、その特徴は二つと言われております。一つは、やはり陽子やエックス線に比べますと重い粒子を使いますので、生物的な効果が強いということで、放射線に抵抗性のがんです。例えば、こちら今お示しいただきました6ページ目の公的保険の適用の中でございますと、頭蓋底や頭頸部や膵臓がんといった非常に放射線に抵抗性のがんといったものについては優位性が高いというふうに考えております。

また、それ以外の肺や肝臓、前立腺といったものにつきましては、生物学的な特性的なメリットというのはそれほど大きくはないと思っておりますが、もう一つの重粒子線の特徴は重いということで、体内で直進するという特徴がございます、散乱されずにです。そうしますと、周りにあります正常組織を避けやすいという特性がございますので、正常組織へのダメージ、副作用を下げられるということで、短期間で治療が終わるというメリットがございます。今、実際臨床上でも、陽子線やエックス線と比べますと重粒子線治療は平均治療日数が約半分になっております。これは働きながら治療を受けられる方ですね、今は70歳ぐらいまで働かれる方が多いですので、そういった方が仕事を続けながら治療に来ていただくと。副作用が小さいということもありまして、そういった働きながらのがん治療、健康長寿に貢献できる部分かと思っております。また医療経済的にも、治療期間が半分ということは、患者さんを逆に同じ装置で2倍治療できるというメリットがございますので、多くの患者さんにアプローチもできますし、医療経済上も成り立ちやすいということがございますので、一般的なコモンキャンサー、肺、肝臓、膵臓、前立腺といった部分では、そのような短期治療というものが一つの大きなメリットというふうに考えております。

（吉橋委員）大変よく分かりました。こういった重粒子線治療、まだ施設も限られていますし、まだ粒子線治療という言葉は多くの方は御存じかもしれないですけれども、陽子線治療と重粒子線治療は何が違うのか、といったところは知られていないと思いますので、是非アピールしていただくと、さらに開発が進んで普及にもつながるのではないかなと思いました。

それから、小型化をしていく過程について技術的なところを、教えていただきたいのですが、超伝導電磁石というどうしても冷却システムが必要だというイメージが非常にあって、でも今日のお話ですと、液体ヘリウムは使わずに、というような説明があったかと思えます。具体的にヘリウムを使わずに小型化できた、というあたりを教えていただけますでしょうか。

（白井所長）ありがとうございます。

現在の多くの超伝導磁石は、液体ヘリウムで冷やしまして、冷えた結果蒸発したヘリウムを低温冷却器で、もう一度液体ヘリウムに戻すという作業を行っております。それに対して量子メスの超伝導電磁石は、液体ヘリウムを使わずに、通常ガスに蒸発したヘリウムを液体に戻す冷却器を直接超伝導コイルと接続することによりまして、液体ヘリウムを使わずに超伝導コイルや線材を直接冷却するような技術を使っております。医療機器で言いますとMRIの中で、MRIは超伝導磁石と液体ヘリウムとそれをもう一度蒸発したものを液体に戻す冷却器が三つで成り立っているのですけれども、真ん中の液体ヘリウムを抜いてしまって、冷やすものと超伝導を直接つないだというふうに御理解いただければ幸いです。

(吉橋委員) ありがとうございます。

イメージとしては、やはりガスとか液体を循環させて冷やすようなイメージなのですが、直接つなげるというのは電氣的にペルチェ素子のようなイメージで思っています。

(白井所長) おっしゃるとおりです。ペルチェ素子ではマイナス数十度までしか冷えませんが、この方法で行いますと4ケルビンまで冷やせるというところで、ペルチェ素子の非常に高度化したものというふうに御理解いただければと思います。

(吉橋委員) 大変よく理解できました。ありがとうございます。

続いて近藤様にお聞きしたいのですが、ターゲット部分において少し理解できていなくて、薄膜に炭素膜を塗布したような形で行うということでした。先ほども御説明の中で、やはりエネルギーが強かったりすると破けてしまうとか、穴が開いてしまうというようなお話があったかなと思うのですが、高ピーク出力レーザーが当たったりとか、CWレーザーで熱負荷を与えてしまうと、薄膜のようなものってアブレーションとか、ターゲットのダメージみたいなのが起こるのではないのかなと思います。そうしますと今後、量子メスのイオン源として利用するときに、やはりターゲットがすぐに破けてしまう、つまり患者さん1人に対して毎回交換する必要があるのではないのでしょうか。その辺りターゲットの薄膜をそういったエネルギーに強いものを考えていくということ、今回ですとニッケルテープとかガラス薄膜というお話いただきましたけれども、そういった薄膜の部分について耐性を強くしていくのか、それともレーザー方の出力をそういったアブレーションが起こらないぎりぎりのところでプラズマを起こすというような、そういったパラメーターですか、そういったパラメーターサーベイをするのか。どのようにターゲットの開発を行うのでしょうか。

(近藤上席研究員) 御質問ありがとうございます。

まず、私の説明が不十分だったので申し訳ございませんでした。ターゲットのテープには

1 発ごとに穴が開きます。ですので、アブレーションどころか照射されたところが局所的に吹っ飛びます。ただ、フェムト秒という時間スケールでイオン加速が起こりますので、フェムト秒でレーザーが当たっている間はまだターゲットは固体密度をキープしたままになります。ですので、裏面というところに加速電界が発生して加速ができるということになります。従いまして実際に穴が開くのはイオン加速が終わってからのことです。

それから加熱に使っているのは、CWレーザーで加熱するという方法もありますけれども、我々のところではそういう方法も使うのですけれども、先ほどお見せしたように、IHヒーターで、非接触で、要は電子レンジみたいな形で加熱します。ニッケルは強磁性体ですので効率良く加熱ができます。ですので、加熱した状態では薄膜は破れません。ですがレーザーで1発打つと穴が開きます。穴が開いたときに問題になるのは、飛び散ったデブリというテープから飛散した成分でして、それがレーザーを集光しているミラーに影響を与えます。10 Hzで何発も打ちますので、その繰り返しでカーボンが飛んできますから、要するにカーボンコーティングされるようなことになり、ダメージを引き起こすことになります。このようなことが生じないようにガラスシールドというものを置けるようにしたというのが工夫ということになります。最初のうちはサランラップとか色々試しましたが、なかなか上手くいきませんでした。あるいは高価な薄いガラス板ならば可能なことは分かっておりましたが、高価なものですので大量に消費するとなりますと実用にできないというものでした。これに対してこの技術は実際に携帯電話に使われている技術ということで、現時点で大量生産まではいかないのかもしれませんが、将来的に可能になることが期待できると考えております。すなわち、そういった高価なものに比べればはるかに低価格でできることが期待される状況です。

それからショット数に関しましては、本日お示しさせていただいたテープタイプのものですと、十分に使えると試算してございます。ただ、テープタイプはまだ問題があるということが分かっておりまして、ディスク状のプレートに穴を開けておいて、薄膜を挟み込み、この穴を目掛けてレーザーを照射するディスクタイプも開発しております。ディスクを回してレーザー照射位置に次の穴が来るようなメカニズムで何とかできないかということを考えています。量子メスという目的には、それでも十分なショット数が得られるだろうと試算できておりまして、今、開発しているところです。

(吉橋委員) ターゲットに関しまして、非常によく理解できました。ありがとうございます。

もう一点ですけれども、色んなものでシールすると、レーザーの波長は関係するのでは

うか。

(近藤上席研究員) レーザーの波長は、レーザーのパルスエネルギーですとか、照射強度を十分に高めるためにパルス幅を短くできるというところで、チタンサファイアというレーザーを利用しております。これが今のところ、一番使いやすいと考えております。チタンサファイアレーザーの波長は800ナノメートルです。波長1ミクロンのものでも、あるいは紫外とかそういった波長のものでも構わないですが、現在は一番開発しやすい波長でやっているというのが答えになります。

(吉橋委員) 詳細な説明ありがとうございます。私からは以上になります。

(上坂委員長) それでは、参与からも御質問や御意見を伺います。まず、畑澤参与から御意見をいただければと思いますが、聞こえますでしょうか。

(畑澤参与) 聞こえております。いかがでしょうか。

(上坂委員長) 聞こえております。よろしくお願いします。

(畑澤参与) 量子メス開発の現状について、詳細な御報告をいただきまして大変ありがとうございました。QSTで世界に先駆けて開発を始め、知見を蓄積して、世界をリードする医療技術に育て上げたという点は大変誇らしく思いますし、高く評価いたします。特にこれまで治療成績が極めて不良でありました、肝細胞がん、膵臓がん、脳腫瘍の治療成績が目を見張るほど改善されてきているということを、医療に携わる人間として大変うれしく思っております。この技術がこれから普及していくことを期待しておりますけれども、技術的な点を幾つか教えていただければと思います。

まず第1点は、照射野の設定というところが治療成績の向上には重要なのではないかと思います。この照射野の設定は医学物理士の皆さんの協力で行われていると思いますし、また現状、CTやMRIをベースにした形態学的な画像情報を基にして照射野を物理的に設定していると思いますけれども、これに、例えばQSTで非常に高度に進化している他の画像診断、例えばPETであるとか、そういう機能情報を加味した照射野の設定というようなことはいかなるものなのでしょうか。画像診断のグループとの照射野の設定について、どのような共同研究が進んでいるか、それともそういう計画があるのか、その点を最初にお聞きしたいと思います。

(白井所長) ありがとうございます。

御指摘のとおり、重粒子線治療装置は先ほど申しましたように直進性が良く正確にターゲットを捉えられる反面、ターゲットの方が腫瘍の方が横にずれているというようなことがあ

りますと、やはりそのメリットが生かせないというところがございますので、画像診断装置との組合せというものは非常に重要になっております。世界的にも恐らく今後の研究の方向というのは、そのような画像診断との組合せというものが主流になっていくというふうに考えております。

一方で、Q S Tの中では、一つの流れとしましては、やはりコンベンショナルのエックス線技術、C Tそれからフラットパネルを一般照射、一般撮影というものを組み合わせました画像技術の研究を進めてまいりますし、また我々量医研は、P E T技術において世界のトップを走っておりますので、P E T技術を組み合わせまして、照射エリアをP E Tによって可視化して、日々の、ただし御指摘のようにP E Tは形態学情報ではなくて機能情報ですので、それだけではなかなかエリアを決めることは難しいのですが、毎日P E Tによって機能情報を得ることで、昨日と今日の差を見て、もしその差が大きいようであれば、形態学情報を同時に取ることで修正を図るというような組合せによる画像誘導照射というものの研究を進めているところです。

現在、その第一歩として、治療後のP E T撮影というものの臨床試験がおとしより始まっております、現在様々な患者さんについて、画像治療並びに画像データのセットについて現在集積を進めているところでございます。今後についてもこれは非常に重点的な分野と考えておりますので、量医研としても進めていきたいと考えております。

(畑澤参与) ありがとうございます。もう一点だけお聞かせください。

今後、多くの患者さんが量子メスの恩恵を受けるためには、やはり普及ということが非常に重要だと思います。その量子メスの開発、これは装置の小型化ということで技術開発が大変進んでいるということは今日のお話を聞いてよく分かりました。もう一つの観点は、やはり経済性といいますか、設置するときの費用をいかに軽減するか、それから運営を開始した後の維持費をどのように軽減するか、この辺りも重要な観点になるかと思っておりますけれども、技術開発の中で、そのような観点を考慮して進められているというふうに理解してよろしいのでしょうか。量子メスの開発自体がそういうことだとは思っておりますけれども、いかがでしょうか。

(白井所長) ありがとうございます。

御指摘のとおりでございます、コスト、医療経済的な観点は非常に重要なものと考えております。ただし、こういう量子メスはやはりある程度ハイテクと申しますか、高度な工学技術を使っておりますので、装置コストとして大きく最初のうちは下がらないというふうに

考えております。ただし、建物が大幅に小さくなりますので、建物コスト、それからその建物に合った維持費、空調や電力、特に超伝導になりますので電力量は1桁近く下がりますので、そういった維持費についてはできるだけ低減できるような工夫というものをしております。

一例を挙げさせていただきますと、冷凍機などは24時間365日4ケルビンを維持する訳なのですが、治療しているときと治療しないときでは当然、発熱量も変わってくる訳です。これまでは常に100%の能力で冷却をしていた訳なのですが、量子メスでは、負荷に合わせて冷却能力を変えることで電力量を下げるというようなアダプティブな装置をメーカーさんと一緒に開発いたしました。そういったことを含めまして、維持費の低減は重要なものと考えております。

一方で、我々、医療と工学が密接に協力している分野ですので、工学側だけで努力するのではなく、医療側も様々な臨床試験を通じまして治療の短期化を進めております。一例を申しますと、これまで前立腺は12回で12日間掛かって治療を行っていましたが、現在は4日間で治療を終えるということの臨床研究が既に保険診療ベースで進められているところでございます。そういたしますと、同じ装置ですと3倍の患者さんを治療できるということになりますので、別の意味からも医療経済上のメリットが出てくるというところで、工学的、それから医療の両面から、医療経済的に成り立つものにしていきたいというふうに考えているところでございます。

(畑澤参与) ありがとうございます。よく分かりました。

広い視点でこのシステムが社会実装される場面を考慮に入れながら開発が進んでいるということで、十分理解できました。特に難治性の悪性腫瘍、これまでの治療法では早期に発見しても5年生存率が芳しくない疾患がまだまだ残っておりますので、特にそういう疾患について治療成績が向上できれば、患者さんにとって非常に大きな恩恵になりますし、また医療人にとっても励みになると思います。引き続きどうぞよろしくお願いいたします。

畑澤の方は以上です。

(上坂委員長) それでは、岡嶋参与から御意見を頂ければと思います。

(岡嶋参与) お二方、どうも御説明ありがとうございました。

今日の御説明で目指すもの、小型化、そのためには本当にハイテクを利用して超伝導だとか、それからイオン入射というところでレーザー、こっちも画期的なことを利用されているということがよく分かりました。本当にありがとうございました。聞いていて、私、実

はわくわくしながら聞いていたのが正直な感想です。

それで、私から一つ質問は、この装置全体の例えば今の経済性だとかそういうようなことの御説明もあったのですけれども、治療という点で見たときに、御専門ではないと思うのですけれども、要は患部に当たって患者さんの被曝量というのを評価しないと、治療には使っていけないと思います。ということは、こういう装置を開発するのと並行して被曝の評価というのも大事な要素ではないかと思っております。今、被曝の評価というのはどれぐらいできているのかという現状だけでも教えていただければ、御存じの範囲で結構ですので、よろしくお願ひしたいと思ひます。

(白井所長) ありがとうございます。

被曝に関しましては、腫瘍部と腫瘍以外の全身の両面があるかと思ひております。腫瘍部それから腫瘍の周辺部分に関しましては、我々治療を行います、必ず患者さんの治療を始める前日までには、患者さんと同じ照射を非常に多数の電離箱を用ひまして、3次元的に測定を行つております。それによりまして、実際患者さんがどのような照射を受けるか、それによつてどの程度周りが被曝し腫瘍に線量が投入されるかということの評価を行つております。これは主に急性障害が起きないかどうかということの評価のために行つてゐるものでございます。

一方で、それを患者さんの腫瘍の周り5センチから10センチを離れますと、今度は重粒子線から来る中性子であつたり、炭素が壊れてできる陽子やヘリウムといったものが広く薄く患者さんを被曝するという効果がメインになつてまいります。こちらの方は急性障害ではなく、二次がんが懸念されるところでございますので、それについては現在の医療ガイドラインでは、必ず患者さんごとにそれを測りなさいというものではございませんが、我々典型的な患者さんをピックアップし、どの程度体が被曝するかというような計算や、若しくは中性子カウンターなどを使い、計測というものを進めてゐるところでございます。それによりまして、できるだけそれを減らせるような照射技術の開発というものを進めてゐるところです。また、医療側では、実際に炭素線治療を受けられた患者さんがどれぐらい二次がんになられるかと、再発と違う意味で二次がんになられるかというデータも収集をしております、我々QST病院では必ず患者さん亡くなられるまで、面談には来られなくても、郵便などでの調査を行つておりますので、そうした追跡調査を続けまして、二次がんの発生頻度というものを臨床並びに物理の両面から評価していきたいと、あと生物側でもマウスを使った長期間照射試験というものも行つております、そういったところで評価を研究とし

て続けていきたいというふうに考えております。

(岡嶋参与) ありがとうございます。

非常に幅広い分野からの総合的な治療法の検討というか研究に取り組まれていることが分かりました。どうもありがとうございました。

(上坂委員長) それでは、小笠原参与からも御意見を頂ければと思います。

(小笠原参与) どうも御説明ありがとうございました。

日本のメーカーが、世界のマーケットをリードするという分野がだんだん少なくなっている中で、今日御説明がありましたけれども、世界で24施設ですか、稼働建設中で15施設が日本製だということで、大変心強く伺っておりました。これだけ日本の製品の優秀さが世界的に認められていること、またそれを支えてこられた研究開発をしておられる皆様に対して、まずは高い敬意を表したいと思います。

他方、先ほど畑澤参与からも御質問ありましたけれども、やはり経済性というのは非常に重要なポイントで、かつ少子高齢化が進む一方において、今後、医療保険をいかに持続可能なものにしていくかということは重要な課題だと思います。経済面でも色々な工夫をされて、過大なコストにならないように努力しておられるということを高く評価したいと思いますが、ざっくり言って、どのぐらい掛かるのかということを教えていただければと思います。例えば5ページ目に、重粒子線治療件数の推移ということで、5,530件ということが2023年で示されていますが、7施設あるので、各施設も同じ件数の治療をなさっていると、1件当たり1年間に約790治療を行っておられるということだと思います。それぞれに入れておられる装置が大体どれくらい掛かって、何年ぐらい持つのかということで、ざっくり装置に係る、装置のみならず施設全体の土地の購入料とか色々とメンテナンスの費用とかもあろうかと思いますけれども、1件当たりの治療に、どのぐらいのコストが掛かるのかということを概念なりとも理解したいので、もしそういったものの情報があれば教えていただければと思います。

(白井所長) ありがとうございます。

装置の導入コストにつきましては、時代とともにということではありますが、大体建物それから装置含めまして150億円程度というふうに、ここ数年の急激なインフレの前は言われておりました。一方で、患者数につきましては実は7施設5,500人というふうになっておりますが、二極化が進んでおまして、1,000人を超える施設が幾つもある一方で、研究センターの数百人という施設もございまして、医療経済的にはQSTがそのボーダーの1,

000人ぐらいなんですけれども、民間施設ですと1,200人ですとかそういった患者さんを治療しているという状況でございます。重粒子線治療の技術料は現在160万円から二百数十万円、平均すると200万円前後でございますので、そういったところで算数がすぐできますように、年間二十数億円程度の技術料が入りますので、その半分ぐらいが維持費、その半分ぐらいは減価償却費ということになりまして、それから装置の使用年数は大体20年というふうに言われております。今、一番早くに入りましたQST病院は、先ほど量子メスは研究開発の側面で私が申しましたが、実際にはHIMACの老朽化のリプレースという面もございますので、我々が先頭を切って今更新をしているというところで、次、兵庫県や群馬大学といったところも、そういった議論が始まっているというところでございます。ですが、大体20年といたしますと、その中で減価償却が行われていくということで、今私が言った数字で言うと大体合っているような数字だと思うのですけれども、一方で、ここ数年のインフレは非常に大きな影響を持っておりまして、海外ではそれほどこの影響が日本ほどインフレが強くありませんので、引き続き医療経済としては成り立っているのですけれども、国内ではなかなか今厳しいところというところになっております。ですので、我々が量子メス開発を続けて行っておりますのは、海外へは輸出でございますが、国内はまずはリプレース、次の建設後20年後の更新をサポートするという面もございます。

(小笠原参与) 大変詳細な御説明ありがとうございました。

日本は世界に誇る国民皆保険制になっておりますので、経済面も非常に重要だと思います。大変明確なコスト意識を持って取り組んでおられるということに、また敬意を表したいと思います。また新しい技術ですので、今後これが普及していけば、規模の経済も伴ってコストも安くなっていく。世界マーケットのシェアも拡大していけば、規模の経済にも貢献していくと思いますので、是非そういった面で頑張っていただきたいと思います。どうもありがとうございました。

(上坂委員長) それでは、上坂から意見を述べさせていただきます。

まず、白井様の資料の7ページに国際展開があります。それで、QSTの量子科学研究所は、IAEAのRCA(Regional Cooperative Agreement)を通して、世界で重粒子線治療を広めて、かつ人材育成を先導されています。また、アジアの原子力協力フォーラム(FNCA)でも、アジアの若手の人材育成で貢献されています。その効果あって、このページにありますようなすばらしい国際展開がなされているのだなと認識しております。

今日、お話がなかったのですけれども、Q S Tでの人材育成。例えば海外の方がどのくらい来られているとか。国内の方の研修とかをやられているとか。それぞれを簡単に御説明いただけますか。

(白井所長) ありがとうございます。

人材育成に関しましては、内視鏡なども同じなのですが、先端医療機器はやはり人材育成の輸出というものとセットでございますので、我々も重視しているところでございます。特に国内につきましては、国内7施設が立ち上がる時には必ず医学物理士の方、それから医師の方がQ S T病院で研修を受けられるということを行ってまいりました。一方で海外の方はこれからなんですけれども、大体年間それほど多くはないのですが、コンスタントに1施設から2施設から3か月間から半年といった長期間、医師や物理の方が来訪されています。短期間ですともっと多く、年間で言いますと、20ぐらいの施設から様々な職種、看護や技師の方も含めまして、研修の方を受け入れているという状況でございます。

(上坂委員長) 分かりました。まさに重粒子線治療の世界の人材育成の拠点になっているということが分かりました。

それから、細かいことなのですが、超伝導電磁石の材料といいますか線材はどのようなタイプのものを使っているのでしょうか。冷凍機のお話はありましたけれども。

(白井所長) 線材としましては、ある程度商業利用に耐えるというところでニオブチタンを使っておりますが、今、ニオブチタンを使った超伝導モーターと電動飛行機など、ああいう技術ですとか核融合などと共通の社会的な技術を使わせていただいて、非常に高性能なニオブチタンの超伝導技術といったものを採用しております。

(上坂委員長) 分かりました。

今ちょうどテレビCMで、キャノンがヘリウムが要らないMRIを開発したと、言っておりますね。ですから、かなり似た要素技術かなと思いました。

それから、また小型量子メスの意義というのは、先ほど御説明ありましたように、大きな装置のリプレースの意味もあるということですよね。8ページにありますように。やはり重粒子線がん治療装置も先導したものはもう30年程度たっていますからですね。世界的にもリプレースの時期になり、それに小型のシステムということは非常にタイムリーかと思います。

それから、あと6ページですか、保険適用の話がございます。HIMACでの治療が開始された25年ほど前というのは、民間の保険のみの適用でして、ざっくり言えば300万程

度の治療費でありました。それがここにありますように、こんなに多種類のがん治療が公的な医療保険適用になっているということで、これは患者さんにとっては非常に有難いことなのかなと思います。一方、病院にとってはなかなか財政面的に厳しいものがあります。特にQSTの場合、治療の活動のみならず、研究開発もやられて、かつ人材育成もやられているということです。そういうことを考えますと、保険点数といいますか診療報酬、そういうものがもう少し見直されてもいいのかなと考える次第です。

月曜日になりますが、ここで、もちろんQSTは関わっていらっしゃるのですが、核医学の新しい専門部会第1回目を行いました。日経新聞にも報道されています。そこでは今後、現在ベータ線源としてヨウ素131とカルテチウム177が医薬品承認、保険適用されていますが、今後β線源としてCu64、それからα線源としてアスタチン211、アクチニウム225ですね。こういうものの保険が医薬品承認と保険適用が期待されるということで。そこでもこういう施設の運営のことの議論もされておりました。一部の施設ではかなりそこが厳しいという状況も伺っております。リプレースができるところはいいのですが、どこもそれほど余裕はないと思うのです。ですから、ここはなかなか難しいところで。患者さんのことを考えると公的保険適用が非常によろしいかと思うのです。研究開発もしながら人材育成もしながら治療活動をする組織としては、やはり財政の面も課題があるかなと思うのです。やはりオールジャパンで考えていくべきかなと。今日御説明がなかったけれども、海外は保険点数が相当高いのですよね。そういう面、今後どういうふうにお考えになっているかをお伺いして。

(白井所長) 海外のお話をいたしますと、保険点数は海外は中国や韓国などアジアでも日本の1.5倍から2倍ぐらいありますし、アメリカ、欧米は更にアジアの1.5倍から2倍というところで、この10年、20年で大きく差が付きました。だからこそ、こういう重粒子線治療装置が輸出される理由の一つであるのですけれども、一方で日本のいいところもございますので難しいところがございます。海外は導入が非常に盛んというのはもう一つ理由がございまして、点数だけではなくて、海外はコロナの頃にも話題になりましたが、病院の集約化が進んでおります。数が単に少ない訳ではなく、このタイプのがん若しくは疾患であればこの病院が強いので、そこに患者さんが集まると。同系統の病気を集約することで、非常に先端的な装置があれば、そこに入れば、それで多くの患者さんを治療できると。先ほど数百人と1,000人とかという話をいたしました、海外では実際には1,000人ではなくて1,500人が重粒子線施設では目標とされております。逆に患者さん、重粒子線の適用

になるようながんの患者さんがその病院にある程度集約されているというところで、そういう患者さんが待っているということになっております。

そういう意味で、日本はなかなか仕組みを変えることは難しいですので、やはり患者さんが集まるところにこういう量子メスのような施設ができ、そこでは先ほど言いましたが、治療の短期化も併せまして、多くの患者さんを集中的に治療することで、医療経済面が成り立つようになれば非常にいいのかなというふうに思うところがあります。

(上坂委員長) 分かりました。点数の比較のみならず、その背景にはそういうことで集約化とか、病院側、研究機関側の努力・合理化といいますか、最適化もあるということですね。よく分かりました。

それでは、近藤先生に質問。失礼しました。量子メスレーザーイオン源の方で、細かい話で、5ページのエネルギー密度です。韓国がトップデータを取ったというふうにおっしゃられましたけれども、差し支えなければ、どこの研究所か。

(近藤上席研究員) 光州です。

科学技術院G I S T (G w a n g j u I n s t i t u t e o f S c i e n c e a n d T e c h n o l o g y) と呼ばれております研究所です。

(上坂委員長) G I S Tですね、分かりました。

それから、このプロジェクトは、今、未来社会創造プログラムですか。今成果が出て、4年後を目途に実証段階ということでございます。今後の未来社会創造プログラムというのはどういう方向になっていくのでしょうか。

(近藤上席研究員) 説明させていただきましたが、未来社会創造事業そのものが今年度で終了ということなので、ここでP o Cを概念実証をして、その概念に基づいて実証機を作ろうというところになっております。ですので、これからそれに必要な予算の獲得といったところにつながるような努力を進めていきたいと思っております。

もう少し時間が掛かるかもしれないということも思っております、一つはやはり原子力材料に応用しようというような動きがございます。あるいはその他の応用にも、通常の加速器では簡単に作れないようなバンチ幅が短くて単に時間あたりの材料照射強度が強くてできるという魅力がございます。このような量子メス入射器開発とは違った応用で予算化しながら、もう少しゆっくりと開発を進めていくようになるのかもしれないと思っております。

(上坂委員長) まずは、量子メスを優先としての4年後の実用化を目指していただくのは、ま

ずとても重要かと思います。近藤様の資料の20ページにありますように、最近ピコ秒の非常に高強度かつ短パルスのイオンビーム、これ世界新記録だと思いますが、が出て論文も受理・公開されたということで。原子力の立場からいいますと、最後の24ページに原子力材料のことをおっしゃっていただいた。例えば原子炉の圧力容器の内側の中性子による照射脆化と。これが運転期間がどこまで大丈夫か。ということに関して一番重要なファクターであります。しかしながら、放射線によるこういう材料の中の損傷というのは、まさにフェムト、ピコ秒で始まる現象です。現状では実測・可視化されていないのですね。終わった後の結果でしか分からないということなので。この技術を使うと、どういうふうに壊れていくかとか、その壊れ方が強度によって違うか、放射線の種類によって違うかも見えると思うのですね。もうすぐそういう時代も来ると思うのです。

是非そういうことで、医療と原子力の組合せ。近藤先生にいいプランを考えていただきたいと思いますが、いかがでしょうか。

(近藤上席研究員)ありがとうございます。

上坂先生からも御指導いただきながら、具体的な予算獲得へ向けて努力をさせていただいております。実際にビームラインを設けて、短パルスのイオンがしっかり出せていることを計測で示しながら材料照射ができるのは、今のところQSTだけです。世界的にもQSTだけなので、レーザー加速で作り出した短バンチイオン源が、従来とは違った新たな応用として、いかに使えるかというところを見せることができれば、しかもそれが原子力の役に立つということならば、非常に大きいと、そのようにも考えております。今後とも御指導のほどよろしくお願いいたします。

(上坂委員長) 私も昨年に榊さんの論文が出た直後に、ヨーロッパのチェコのELIヨーロッパ・エクストリーム・レーザー・インフラストラクチャー研究所で、こういう結果が日本のQSTで出ましたということを報告したら、みんなびっくりしていました。

(近藤上席研究員)ありがとうございます。

(上坂委員長) まさにヨーロッパはレーザーの技術が高いのですけれども、その彼らもびっくりしていましたので、まさにこれ日本は最先端の技術だと思います。是非今後も研究開発を進めていただきたいと存じます。

それでは、白井様、近藤様、本日は説明どうもありがとうございました。

(量子科学技術研究開発機構) ありがとうございます。

(上坂委員長) 議題1は以上でございます。

それでは説明者、随行者におかれましては、大変恐縮ですけれども御退室の方、よろしくお願いいたします。

(説明者及び随行者 退室)

(上坂委員長) 次に、議題2について事務局から説明をお願いいたします。

(井出参事官) それでは、今後の会議予定について御案内いたします。

次回の定例会議につきましては、令和8年4月28日火曜日15時から、場所は中央合同庁舎8号館6階623会議室、議題については調整中であり、原子力委員会ホームページなどによりお知らせをいたします。以上です。

(上坂委員長) ありがとうございます。

その他委員から何か御発言ございますでしょうか。

御発言がないようですので、これで本日の委員会を終了いたします。お疲れさまでした。
ありがとうございます。

－了－