

「平成 27 年度粒子線がん治療等に関する施設研究会」第 2 回研究会

「平成 27 年度第 2 回施設研究会」は、平成 28 年 2 月 5 日（金）フクラシア東京ステーション（東京都千代田区）にて講演会として開催し、建設、設計、装置メーカー等から 45 名の参加がありました。

当日は、はじめに当研究会主査の河内清光氏から挨拶があった後、株式会社日立製作所 ヘルスケア社 放射線治療システム事業部 粒子線治療ソリューション部 主任技師 藤崎雄滋郎氏より「米国における日立の粒子線治療施設普及状況」について、また、筑波大学 医学医療系 生命医科学域（陽子線医学利用研究センター）准教授 熊田博明氏より「加速器 BNCT の普及状況」について講義がありました。



講師 藤崎雄滋郎 氏
株式会社日立製作所 ヘルスケア社
放射線治療システム事業部
粒子線治療ソリューション部
主任技師



講師 熊田博明 氏
筑波大学 医学医療系
生命医科学域（陽子線医学利用研究センター）
准教授

「米国における日立の粒子線治療施設普及状況」の講義では、日立製作所の米国での案件や現在の米国での粒子線市場の概況について説明がありました。米国では年間 160 万人ががんと診断され、そのうちの 60%が放射線治療の対象となります。その 1/3 に粒子線治療が適用できるとすると、まだかなりの数の粒子線施設が必要であるという試算があります。さらに、2015 年末時点で 20 施設（粒子線治療機器メーカー別にみると日立 3、IBA11、Varian1、Mevion2、その

他3)の粒子線治療施設が治療を行っており、その全てが陽子線治療施設であります。一方で現在建設中や計画中のものも15施設(日立3→5、IBA11→13、Varian1→6、Mevion2→8、その他3)あり、そのうちIBAとMevionは1治療施設モデルを採用しており、約半数を占める8施設が治療室が1室だけの小規模施設になってきています。現在、重粒子線治療施設は米国にはありませんが、NCIがフィジビリティスタディの助成金(100万US\$)をつけるなど、徐々に米国でも重粒子線治療施設導入にむけた動きがでてきています。米国では、オバマケアにより2012年12月31日よりMedical Deviceに対して2.3%の税金が課せられることとなりました。また、病院の資金調達方法は、①自己資金(寄付の盛んな国)、②ベンダーファイナンス(機器の売買とセットで提案。IBAが2000年代に提案し受注を伸ばした)、③デベロッパーによる資金調達(初期費用で病院の財務と切り離せるメリット。破綻するケース散見)があることも特徴です。

そのような米国市場のなかでの日立の取り組みが紹介されました。日立の施設は5施設あり、いずれも米国のがん治療で高い評価を受けている病院ばかりです。北海道大学との共同開発による技術がこれらのいくつかの病院にも採用されています。また、日立が納めた施設は3施設が既に治療を開始しており、1施設は試運転の最終段階、もう1施設は製造過程となっています。米国での据付工事では、現地サブコンと良好な関係を築き据付工事をスケジュール通りにこなしています。

MD Anderson Cancer Centerは、ガントリー治療室が3室と固定照射室があり、年間800人以上の患者を治療しています。ガントリー治療室の1室はスポットスキヤニング照射の治療室で、30~40人/日の治療を行っています。ミネソタ州ロチェスターとアリゾナ州スコッツデールの施設では、4ガントリー治療室と1固定室で、全室スキヤニング照射、190度回転ガントリー(部屋の圧迫感が少ない)を採用しています。テネシー州の小児専用病院では、2015年12月より治療開始しました。撮像システムには天井吊り下げ式のCone Beam CTを採用しています。John Hopkins Medicineとは、2015年6月に陽子線施設および運転保守契約を締結しました。北海道大学と共同開発された動体追跡による陽子線照射技術が導入予定であります。

日立は、日米の既存顧客とのユーザーミーティングを開催するなどして、粒子線治療装置を導入した顧客との関係性をさらに強くし、さらなるがん治療技術の発展のため、ユーザーとの協創へ向けた取り組みを行っていることが紹介されました。

「加速器 BNCT の普及状況」についての講義では、まずBNCTの機序、アドバンテージおよび日本国内2カ所の原子炉ベース施設について説明がありました。BNCTは、細胞レベルで重粒子線治療が出来る、1回(約30分)の照射で完了、治療効果を事前判断、難治がんに対する強力な新治療法である等の強みがあります。京都大学原子炉実験所では、研究用原子炉KURにおいて、これまでに悪性脳腫瘍、頭頸部がん、肺がん、肝がん等に約300症例のBNCTが実施されました。日本原子力研究開発機構の研究用原子炉JRR-4では1999年10月から治療が開始され、悪性脳腫瘍、頭頸部がん等に100症例余りの治療が実施されました。筑波大学の脳神経外科グループが原子炉JRR-4で実施した臨床研究症例では、悪性脳腫瘍の場合BNCTを実施することにより生存率:1年:91.6%、2年:57.1%という結果が出ています。

しかしながら、医療として実用化させるには、原子炉を用いない病院内設置が可能な小型加速器中性子源を利用することが必要であります。加速器により中性子を発生させるには、陽子線加速器(サイクロトロンorリニアック)により陽子を光速の10%程度に加速し、中性子発生標的であるベリリウムorリチウムに照射し、高速中性子(光速の数%)を発生させた後、中性子減速調整装置により熱外中性子(秒速数百km)となったものを利用します。

IMAGINE THE FUTURE		ベリリウム v.s. リチウム、サイクロトロン v.s. リニアック			MPMRC
	標的材	陽子エネルギー	メリット	デメリット、開発課題	採用機関
①	リチウム(個体)	2.5 MeV	2.5MeV近傍の共鳴反応を利用して効率的に中性子を発生できる。発生する中性子エネルギーが比較的的低く、モデレータを小さくできる。	・融点が低く大熱量入射に耐えられない ・半減期約53日のBe-7とトリウムを発生するため放射化と被曝対策が必要	国立がん研究センター、名古屋大学(P II)
②	リチウム(液体)		上記メリットに加えて、リチウムが融解する問題が生じない。	上記放射化の問題に加えて、液体金属を病院内で扱う危険性→標的冷却水や消防用散水との接触を要回避	大阪大学、東工大、イスラエル
③	ベリリウム	高エネルギー(13MeV以上)	・標的材の融点が高く安定している。 ・1mA程度でも十分な中性子を発生	・高エネルギー中性子を発生 ・これに起因し装置が放射化し、患者及び医療従事者の被ばく対策が必要	住友重機製方式 ・京都大学、 ・福島南東北病院
④		低エネルギー(13MeV以下)	・標的材の融点が高く安定している。 ・Beと装置が放射化せず被曝回避 ・低放射化により高メンテナンス性	・加速器の大電流化(3mA以上)が必要 ・Beへの大熱量入射に対する冷却技術 ・Beのプリスタリング破損対策	筑波大学、 イタリアINFN、 名古屋大学(P I)

加速器形式	陽子エネルギー増加	大電流化
サイクロトロン	○ 容易に陽子のエネルギーを増加させることが可能。装置のサイズもコンパクトにできる。	× 原理的に大電流化が困難。 住友重機製サイクロトロンは現状1mA。最大で試験的に2mAまで増強。
直線型加速器(リニアック)	△ エネルギーを増加させるほど、加速器のサイズ(長さ)が大きくなる。これに応じてコストも製造増加する。	◎ 大電流化が可能。 筑波大学装置は最大10mA、がんセンターは20mA、名古屋大学は15mA。

地域、機関	加速器形式 (状況)	標的材、利用反応	陽子エネルギー (MeV)	陽子ビームカレント (mA)	
Budker Institute (ロシア)	Vacuum insulated Tandem (Ready)	Solid ${}^7\text{Li}(p, n)$	2	2	
iPPE-Obninsk (ロシア)	Cascade generator KG- 2.5 (Ready)	Solid ${}^7\text{Li}(p, n)$	2.3	3	
バーミンガム大学 (英国)	Dynamitron (Ready)	Solid ${}^7\text{Li}(p, n)$	2.8	1	
Soreq (イスラエル)	RFQ-DTL (Ready)	Liquid ${}^7\text{Li}(p, n)$	4	1	
INFN (イタリア・バヴィア)	RFQ	Be(p, n)	4-5	30	
CNEA Buenos Aires (アルゼンチン)	Single ended Tandem Electrostatic Quadrupole (TESQ)	Be(d, n)	1.4	30	
		Solid ${}^7\text{Li}(p, n)$	2.5	30	
日本	京都大学原子炉実験所	サイクロトロン (臨床治験)	30	1	
	筑波大学	リニアック・RFQ-DTL (コミッショニング)	8	10	
	国立がん研究センター	リニアック・RFQ (コミッショニング)	個体 ${}^7\text{Li}(p, n)$	2.5	20
	福島総合南東北病院	サイクロトロン (特性測定)	Be(p, n)	30	1
	大阪大学	リニアック (標的技術の開発段階)	液体 ${}^7\text{Li}(p, n)$	~2.5	-
	名古屋大学	ダイナミトロン (加速器の整備段階)	個体 ${}^7\text{Li}(p, n)$	~2.5	15
	計画段階：沖縄科学技術大学院大学 (沖縄)、大阪医科大学 (大阪)、江戸川病院 (東京)				

次に、日本の商用型加速器ベース BNCT 治療施設の開発状況について説明がありました。京都大学原子炉実験所、総合南東北病院（郡山）BNCT センターではいずれも住友重機械工業社製のサイクロトロン 1mA×30MeV でベリリウムを使って中性子を発生させています。2016 年初頭から頭頸部と再発の脳腫瘍に対してフェーズ 2 の治験が始まると思われます。国立がん研究センターは、固体のリチウムを使って 2.5MeV、20mA という大電流の陽子を加速して中性子を発生させており、筑波大学では 8MeV 最大 10mA でベリリウムを使う方式を採用しています。この 2 つの施設は、国の AMED という機関で予算を獲得し、悪性の皮膚がんに対し共同のプロトコルで臨床研究を行うプロジェクトを新たにスタートさせる予定です。それぞれの材料や加速器の特性および国内外の開発状況の詳細は、表を参照して下さい。

筑波大学の装置は、大強度専用陽子線加速器リニアック（8MeV の RFQ+DTL 形式リニアック）により、標的のブリスタリング破損を回避するため 3 層構造標的(0.5mm のベリリウム、パラジウム、銅性ヒートシンク) を用いており、低放射化技術を採用し、大強度中性子を発生させることが出来ます。昨年 10 月に治療施設一式が組み上がり、コミッショニングを開始し、11 月には中性子ビーム発生、現在は出力上昇中であります。

この他、治療計画システム、位置あわせ技術、中性子計測、血中ホウ素濃度の測定等の周辺技術の現状などの説明がありました。まとめとして、今後加速器中性子源の実用化（薬事登録）をはかり、数年内に先進医療として承認を受け、国内外へ広く普及が進むことを目指すとの説明がありました。



講義風景