Ⅱ Beyond Precision：高精度放射線治療のさらなる展開

3. 重粒子線治療のこれから

若月 優 量子科学技術研究開発機構QST病院

重粒子線治療の特徴

これまで放射線治療に用いられている重粒子線（重イオン）には，炭素イオンやネオンイオンなどがある。これらの粒子線は，加速器によって光速の約70％まで加速されると，高い透過力を有する電離放射線となる。体内に入射した重粒子線は，組織中で電離や励起を引き起こしながら減速し，その飛程終端付近でエネルギーを急激に放出して停止する。この際，ブラッグピーク（Bragg peak）と呼ばれる特徴的な線量分布を形成する（**図1**）。さらに，粒子のエネルギー幅を調整してブラッグピークを物理工学的に拡大することにより，腫瘍全体を覆う高い集中性を有する線量分布を形成し，がん治療に応用している。

重粒子線は，この優れた線量分布に加え，線エネルギー付与（linear energy transfer：LET。粒子が単位距離を通過する際に物質へ付与する平均エネルギー）を有する。高LET放射線である重粒子線は，飛跡に沿って高密度の電離を生じるため，DNA二重鎖切断を高率に誘発し，細胞致死効果がX線と比較して約2～3倍高い〔相対生物効果（relative biological effectiveness：RBE）＝2～3〕。また，X線などの低LET放射線に対して抵抗性を示す低酸素細胞を多く含む腫瘍に対しても高い効果を発揮する。

このように，重粒子線は優れた線量集中性と高い生物学的効果を兼ね備えた治療粒子であり，従来の放射線治療では十分な効果が得られなかった放射線抵抗性腫瘍に対しても，強力な治療効果を発揮することができる。また，腫瘍への線量集中により，周囲正常組織への線量を最小限に抑制できるため，病変臓器および周辺組織の形態・機能の温存が可能であり，患者のQOL向上にも寄与する。さらに，手術や化学療法，従来の放射線治療では根治が困難であった腫瘍に対しても，治癒が期待できる治療法として発展してきた。

現在，日本国内では，2026年9月時点で7施設の重粒子線治療施設が稼働している。世界全体では17施設が稼働しており，そのうち7施設が日本に所在していることから，日本は世界で最も重粒子線治療が普及している国の一つとなっている。

重粒子線治療は，当初は臨床試験として実施され，その後，2003年より先進医療として提供されてきた。長年にわたり臨床データが蓄積された結果，2016年に骨軟部腫瘍に対する重粒子線治療および小児腫瘍に対する陽子線治療が保険適用となった。これを皮切りに，2018年には頭頸部腫瘍および前立腺がん，2022年4月には大型肝細胞がん（長径4cm以上），肝内胆管がん，膵がん，大腸がん術後局所再発，子宮頸部腺癌，さらに，2024年6月には早期肺がん，子宮頸部扁平上皮癌および婦人科悪性黒色腫へと保険適用が拡大された。

現在，日本で実施される重粒子線治療の約8割以上が保険診療として行われており，全国7施設において年間約6000例の患者が治療を受けている。

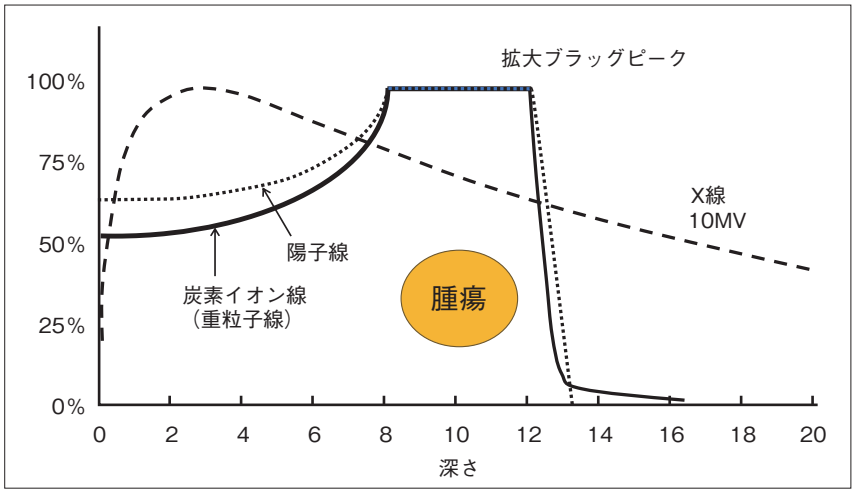


図1　炭素イオン線（重粒子線）のブラッグピーク

〈0913-8919/26/￥300/論文/JCOPY〉