総 説

被ばく線量評価のためのファントム開発(2) 人体組織等価材の研究開発[†]

木名瀬 栄

独立行政法人 日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門
環境・放射線工学ユニット 放射線影響解析研究グループ
319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

Key Words : radiation dose estimation, phantom, tissue equivalent material, tissue substitute, formulation technique

1. はじめに

国際放射線単位及び測定委員会 (ICRU) において、放射線計測分野に用いる物理ファントムは、人体組織を模擬する組織等価材で作られた物体と呼称される¹⁾。したがって、物理ファントムの開発を行うには、人体組織等価材の研究開発が極めて重要になると考えられる。人体組織等価材の研究開発は、1906 年に Keinböck²⁾ が水を筋肉等価材として適用したのを最初に、軟組織、骨格、臓器などのさまざまな人体組織に着目して展開され、この 100 年の間、固体状、粉末状、液体状及びゲル状など、多様な材料が製作された。また、人体組織等価材は、放射線の人体組織との相互作用を考慮した模擬材料であるため、光子、電子、陽子、中性子、重イオンなどの放射線の種類やその適用エネルギー範囲に応じた研究開発が行われ、歴史的には、人体組織の元素組成と密度に等しい材料、人体組

織元素組成の電子密度と実効原子番号を等しくする材料、放射線の人体組織との相互作用を等しくする材料といった順に進展した。更に、人体組織等価材の開発理論や製造方法についても、等価材の原材料の混合のしやすさなどを考慮して、等価材の状態に対し有効な方法が提案された。こうした人体組織等価材の研究開発は、放射線計測上のニーズに応える形で着実に進歩し、近年では、放射線の人体組織との相互作用に関する最新のデータや新しい知見とする人体組成データに基づく、地球にやさしい原材料からなる組織等価材が開発されている。しかし、100 年にも及ぶ長い研究開発の歴史を持つ人体組織等価材ではあるが、光子用組織等価材からなる物理ファントムを中性子用と常に同等なものとして利用するなど、放射線計測分野における物理ファントムのエンドユーザの認識度は十分とはいえない現状のようである。そこで、本報告では、人体組織等価材を認識する一助として、放射線計測分野における人体組織等価材の要件を整理するとともに、我が国を含む世界諸国において、近年研究開発された固体系の人体組織等価材についてレビューし、今後の研究開発の展望を述べる。

なお、本報告において、人体組織等価材は、'equivalent', 'quasi-equivalent', 'substitute' の厳密な分類分けをしないこととする。

[†] Phantom Development for Radiation Dose Estimation (2). Development of Tissue Equivalent Materials.

Sakae KINASE : Radiation Effect Analysis Group, Division of Environment and Radiation Sciences, Nuclear Science and Engineering Directorate, Japan Atomic Energy Agency, 2-4, Shirane Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki Pref. 319-1195, Japan.

2. 人体組織等価材の要件

人体組織等価材は、ある一群の物理的特性に関して特定の人体組織を模擬するために利用される任意の材料と定義される。その物理的特性とは、一口にいて、放射線の人体組織との相互作用を定量的に示すデータのことである。したがって、人体組織等価材の物理的特性は、密度を除き、対象とする放射線によってそれぞれ固有なものとなる。光子、電子、陽子、中性子、重イオンに対して利用される人体組織等価材は、密度かつそれぞれ次の相互作用データを考慮して開発される。

- a. 光子質量減弱係数、質量エネルギー吸収係数
- b. 電子に対する質量阻止能及び質量角散乱能
- c. 陽子に対する質量阻止能
- d. 中性子断面積又はカーマ係数
- e. 重イオンに対する質量阻止能（質量衝突阻止能）

なお、各相互作用データは、米国国立標準技術研究所（NIST）のデータベース³⁾やICRU刊行物^{1),4)}などを参照した最新版を利用されることが望まれる。

また、放射線の人体組織との相互作用を明らかにするには、等価材が模擬する人体組織の組成や密度のデータを把握する必要がある。放射線防護などの目的により人体組織等価材を開発する場合には、国際放射線防護委員会(ICRP)^{5),6)}やICRUの刊行物⁴⁾に示された人体組織の組成や密度などのデータから、年齢群や性別などを考慮して適切なものを選択することになる。

一方、現実的な問題として、人体組織等価材の原材料の選択においては、原材料の化学的毒性が十分に低いこと、原材料の入手や取り扱いが容易なこと、原材料間の順応性がよいこと、多くの副資材を要さないことなどを検討しておく必要がある。これまでに開発された人体組織等価材の中には、優れた放射線特性を有する材

料であっても、現在入手が困難な原材料から製造されたもの、添加剤の溶出が問題となるブリード現象を生じるもの、一般使用が禁止されたフロンなどの副資材を必要とするものなどを理由として、物理ファントムの材料に適さないものがいくつかある。

3. 固体状人体組織等価材の現状

3.1 我が国における研究開発

我が国における固体状の人体組織等価材の開発は、およそ50年の歴史を有する。我が国で開発された人体組織等価材には、1959年に尾内と楠本⁷⁾によって開発されたMix Dp（筋肉に等価とする水）、1987年ごろに平岡ら⁸⁾によって開発されたエポキシ樹脂系のタフウォータ（筋肉に等価とする水）、タフラング（肺）、タフボーン（骨）、1988年までに城谷⁹⁾によって開発されたポリウレタン系のSZシリーズ（軟組織など）とL（肺）、エポキシ樹脂系のEZシリーズ（骨）などがあり、現在でも国内外において広く利用されている。いずれの組織等価材も、主に光子（電子）用として適用エネルギー範囲を指定して開発された。陽子や中性子に対する人体組織等価材についても、1993年までに平岡らによって検討された。

近年、光子、電子、中性子に対して新たな人体組織等価材が開発された。これらの開発のきっかけは、等価材の新たな使用目的が生じたことやこれまでの等価材の原材料確保が困難になったことによるものであった。2003年、放射線治療領域の分野において、藤崎ら¹⁰⁾がエポキシ樹脂系の光子・電子用人体組織等価材を開発した。この新しい等価材は、10 MVのX線や18 MeVの電子線などを対象にしたもので、タフウォータとほぼ同等の性能を有している。カーボンブラックによる黒い着色により、フィルムによる線量評価法において問題になるチェレンコフ光の影響を防止することができる。放射線防護の分野においては、2005年までに、木名瀬ら^{11),12)}がポリウレタン系やエポキシ樹脂系

の15種類の光子・電子用人体組織等価材（軟組織，筋肉，筋肉+10%脂肪，脳，皮膚，肝臓，腎臓，甲状腺，気管，喉頭，軟骨，肺，骨格，皮質骨，梁骨）を開発した。これらの等価材は，肺モニタ校正用ファントムの材料として，肺内に沈着したプルトニウムから放出されるLX線（平均17 keV程度）を対象とする。約17 keVの光子を対象に開発された組織等価材ではあるが，10 keVから10 MeVの光子エネルギー範囲においても，良好な放射線特性を有している。また，これらの人体組織等価材は，10 keVから10 MeVのエネルギー範囲の電子に対しても良好な放射線特性を有している。更に，肺等価材の開発においては，従前密度調整のために利用されたフロンの代わりに水を発泡剤として用いるなど，ポリウレタン系の新しい肺等価材の開発法を開発した。2001年から2005年にかけて，津田ら¹³⁾は，中性子用人体組織等価材として，ポリアセタールホモ，ナイロン12などの高分子樹脂から構成されるNAN-JAERI（軟組織），HAI-JAERI（肺），HONE-JAERI（骨）を開発した。これらの等価材は，数MeV以上の中性子に対して良好な放射線特性を有する。特に，2 MeV以上のエネルギーを有した中性子について，HONE-JAERIは，その吸収線量分布が10%以内で骨組織の分布と一致する。

3.2 諸外国における研究開発

諸外国における固体状の人体組織等価材の研究開発は，およそ90年の歴史を有する。1913年に，Christén¹⁴⁾が水等価材としてベークライトを用いたのをさがしにけにして，その後，ワックス，木，プラスチックなどさまざまな固体系の人体組織等価材やその開発方法が提案された。1958年には，現在でも中性子用人体組織等価材として広く利用されているA-150が，Shonkaら¹⁵⁾によって開発された（A-150は，1977年にSpokasら¹⁶⁾によって改良された）。光子・電子用人体組織等価材については，1974年にWhite¹⁷⁾が，それまでの経験的開発方法を一新

し，理論的開発方法を確立するとともに，エポキシ樹脂系の人体組織等価材を開発した。現在，我が国を含む世界諸国で行われている光子・電子用人体組織等価材の開発は，Whiteが確立したBasic Data Method（組織等価材と人体組織について，質量減弱係数，質量エネルギー吸収係数，電子に対する質量阻止能と質量角散乱能及び密度を互いに等しくする具体的方法）によるものである。

近年では，2000年にSpitzら¹⁸⁾が，ポリウレタン系の光子用筋肉等価材や梁骨等価材を開発した。これらの等価材は，膝ファントムの材料として，膝の骨内に沈着した²⁴¹Amから放出される γ 線（59.5 keV）を対象とする。2003年には，Bolchら¹⁹⁾が，小児放射線学のために，5種類のエポキシ樹脂系光子用人体組織等価材，STES-NB（新生児の軟組織），BTES-NB（新生児の骨），LTES（新生児及び幼児/成人の骨組織），STES（幼児/成人の軟組織），BTES（幼児/成人の骨）を開発した。これらの等価材は，対象となる組織に対して，適切な密度を有するとともに，10 keVから150 keVの光子エネルギー範囲において良好な放射線特性を有する。

4. 今後の研究への期待

現在の人体組織等価材の研究開発は，とすると，彷徨する時期に入っているのかもしれない。1970年代から1980年代にかけて，人体組織等価材の開発及び製造方法の研究は大きな進展があったのに対し，現在はその開発に必要な基礎的データの改訂にともなう修正を行う小康的状況なのかもしれない。一方，放射線計測分野におけるファントムの高度化が必要とされている現在，人体組織等価材に要求される品質条件はより厳しくなるため，たゆみない研究開発が必要であるのも事実である。近年の臨床分野に用いられている人工臓器など，バイオメディカル・エンジニアリングが大きな成果を上げていることを考慮すると，人体組織等価材の研究開発は，そうした分野との連携を図り向上させ

ることが重要になると考える。人体組織等価材から構成された人工臓器を開発できれば、人工臓器を身につけた患者などに対しても放射線治療や診断が容易に行えることになる。人体組織等価材の研究開発は、バイオメディカル・エンジニアリング、更にはティッシュ・エンジニアリングとの連携を図ることが必要なのかもしれない。

5. ま と め

人体組織等価材は、放射線防護や放射線医学など、さまざまな分野において利用されている。それぞれの分野において等価材を利用する際には、対象とする放射線の種類やエネルギーに応じたそれぞれの特性を留意することが重要である。人体組織等価材の研究開発は、過去 100 年間と同様に今後も進展し、バイオメディカル・エンジニアリングなどの分野と連携を図った学際的な分野になることを期待する。

文 献

- 1) ICRU Report 44 (1989)
- 2) Keinböck, R., *Arch. Roentgen Ray*, **11**, 17-20 (1906)
- 3) Berger, M. J. et al., National Institute of Standards and Technology Web Site (1999)
- 4) ICRU Report 46 (1992)
- 5) ICRP Publication 23 (1975)
- 6) ICRP Publication 89 (2002)
- 7) 尾内能夫, 楠本五郎, 日本医放会誌, **19**, 116-120 (1959)
- 8) 平岡 武, 他, 放射線治療システム研究, Suppl.4, 93-96 (1987)
- 9) Shirotani, T., *J. Nucl. Sci. Technol.*, **25**, 875-883 (1988)
- 10) 藤崎達也, 他, 日本医放会誌, **62**, 86-91 (2002)
- 11) Kinase, S. et al., *RADIOISOTOPES*, **52**, 277-284 (2003)
- 12) Kinase, S. et al., *Radiat. Prot. Dosim.*, **115**, 284-288 (2005)
- 13) Tsuda, S. et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, **40**, 1027-1031 (2003)
- 14) Christén, F. T., *Abstract in Arch. Roentgen Ray*, **18**, 280 (1913)
- 15) Shonka, F. R. et al., *Prog. Nucl. Energy Ser.*, **12**, 184-187 (1958)
- 16) Smathers, J. B. et al., *Med. Phys.*, **4**, 74-77 (1977)
- 17) White, D. R., *Phys., Med. Biol.*, **22**, 889-899 (1977)
- 18) Spitz, H. B. et al., *Radiat. Prot. Dosim.*, **89**, 275-282 (2000)
- 19) Jones, A. K. et al., *Med. Phys.*, **30**, 2072-2081 (2003)