

WAZA-ARI:CT撮影における患者の被ばく線量評価システム

WAZA-ARI: A Dose Assessment System for Patients in CT scan

日本原子力研究開発機構¹、東京医療保健大学²、東海大学医学部附属大磯病院³、
東海大学医学部附属病院⁴、新別府病院⁵、大分県立看護科学大学⁶
佐藤 薫¹、高橋 史明¹、遠藤 章¹、小野 孝二²、長谷川隆幸³、
勝沼 泰⁴、吉武 貴康⁵、伴 信彦²、甲斐 倫明⁶

近年、医療現場では、病巣の有無の確認や治療方針の決定等のための有用な手段として、コンピューター断層（CT：Computed Tomography）撮影から得られる画像データが幅広く利用されている。一方、CT装置を用いた撮影では、例えば、胸部のレントゲン撮影と比較した場合、患者は頭から胴体にあたる広い範囲でX線の照射を受けるため、その被ばく線量が高くなることが知られており、撮影に伴って生じる患者の被ばく線量の適切な管理と低減に対する関心が高まっている。以上の背景から、日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）及び大分県立看護科学大学（以下、大分看護大）は共同研究によって、日本人体型を考慮したCT撮影における患者の被ばく線量を評価するためのシステム（WAZA-ARI）の試験運用版を開発し、医療機関が容易に利用できるよう、放射線医学総合研究所（以下、放医研）の協力の下、平成24年12月21日よりWeb上で試験運用を開始した。本稿では、WAZA-ARIの概要等について紹介する。

1. はじめに

CT装置は、患者の周囲を回転するX線管から放出されるX線を照射し、その透過分布から体内構造をコンピューターで再構成することによって、断層画像を出力する。この撮影時間は比較的短く、患者の臓器や組織の構造を詳細に表示させることができるため、医療現場では、病巣の有無の確認や治療方針の決定等のための有用な手段として利用される。特に、近年、より高解像度、短時間で患者を撮影することの可能なマルチスライスCT装置が開発されたことから、その利用回数が増加している¹⁾。

一方、CT装置を用いた撮影では、例えば、胸部のレントゲン撮影と比較した場合、頭部から胴体にあたる広い範囲でX線の照射を受けるため、患者の受ける被ばく線量は高くなることが知られており²⁻³⁾、医療診断全体に伴う被ばく線量に対するCT撮影の寄与は、大

きな割合を占めている。そのため、近年、CT撮影に伴う被ばくに対する関心が高まっており、国際原子力機関（IAEA：The International Atomic Energy Agency）は、過剰な被ばくを受けないように撮影条件等を設定するとともに、患者毎に被ばく線量を評価、管理する必要性を提唱している³⁾。加えて、我が国では、単位人口当たりのCT装置の台数は世界的に最も多く⁴⁾、撮影の件数もトップクラスと推測されている。

以上の背景により、欧米においてはCT撮影によって生じる患者の被ばく線量を評価するためのシステムとしてImPACT⁵⁾、CT-Expo⁶⁾などが開発されている。このうち、ImPACTは、英国旧放射線防護局（NRPB、現在：英国健康保健局HPA）の研究グループが開発したシステムであり、欧州だけでなく、日本国内においても幅広く利用されている。ImPACTでは、日本人と異なる欧米人の

体型・臓器質量データを反映した数学的に人体形状を表現するMIRD型ファントム⁷⁾を用いた計算解析に基づき、臓器線量データベースを構築して格納している。実際の線量計算では、格納したこれらのデータベースの中から撮影に用いるCT装置の機種に最も適合するデータが選択される。そのため、ImPACTを日本国内での線量評価に利用する場合、欧米人と日本人との間の体型差を考慮する必要があった。また、ImPACTが開発されて以降、被ばく線量計算及び人体モデリングに関する技術の進展があり、人体モデルとして医療画像データを基に、ボクセル (Voxel: Volume pixel) と呼ばれる小直方体の集合体によって、全身の臓器や組織の形状をより正確に再現したボクセルファントムをCT被ばく線量評価に適用する研究も進められていた⁸⁾。

一方、原子力機構では、日本人体型の放射線被ばく線量評価上の特性を明らかにする目的で、数体の成人男女のボクセルファントムを開発していた⁹⁻¹⁴⁾。これらの成人日本人男女のボクセルファントムは、内部被ばく^{11-13, 15-16)}や外部被ばく^{9-10, 17)}に対する線量解析を行うために利用されていた。

そこで、原子力機構及び大分看護大学は、共同研究「CT診断における患者線量評価法に関する研究」において、東海大学医学部付属病院や新別府病院などの診療放射線技師の協力を得て、日本人の体型特性を考慮した患者被ばく線量評価システム (WAZA-ARI)¹⁸⁻²²⁾の開発を進めた。また、開発したWAZA-ARIを医療機関が容易に利用できるよう、放医研の協力の下、平成24年12月21日よりWeb上で試験運用を開始した。本稿では、WAZA-ARIの概要について報告する。さらに同システムの機能を拡張して、平成26年度中に本格運用を開始する予定のWAZA-ARI version 2の開発経緯についても紹介する。

2. システムの特徴と利用方法

我々の開発したCT撮影における患者被ばく線量計算システムは、日本で開発したシステムであることを明確にするため、世界的に通用する日本語として、柔道の用語にちなんで”WAZA-ARI”と名付けた。WAZA-ARIは、CentOS 5.4をOSとし、Apache Tomcat 5をJava Servletとする環境下において、Webアプリケーションとして開発した¹⁸⁻¹⁹⁾。現在、WAZA-ARIは、放医研の公開サーバー上にインストールされており、試験運用中である。利用者は前述の公開サーバーのURL (http://waza-ari.nirs.go.jp/waza_ari/) にアクセスし、ログイン後、WAZA-ARIのインプット画面 (図1) において、CT装置、管電流、管電圧、撮影範囲等の撮影条件に加えて、体型、性、年齢等の患者条件を入力する。入力されたデータはネットワークを經由して公開サーバーに送られ、Java ServletがWAZA

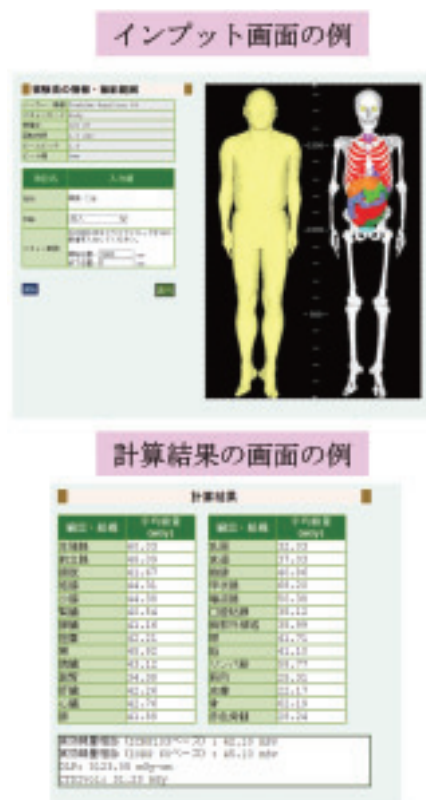


図1 WAZA-ARIにおけるインプット画面と計算結果画面の例

-ARIに格納されている臓器線量データベースの中から選択した、撮影条件に合致する適切なデータに基づいて臓器線量および実効線量を算出し、その結果を利用者のコンピューターに返す(図1)。

WAZA-ARIでは、Javaを利用したシステムとすることで、利用者がアクセスするためのプラットフォーム(コンピューター機種、OS等)に依存せず、Webブラウザだけでデータの入出力を行うことが可能である。これは、WAZA-ARIと同様にCT撮影による患者の被ばく線量を計算するImPACTやCT-Expoが、特定の商用ソフトウェアに依存しているのとは大きく異なる。従って、利用者はインターネットに接続することの可能な機器を所有していれば、インストールやメンテナンス等を行うことなくWAZA-ARIを利用できる。

3. 被ばく線量の計算のためのモデル構築

WAZA-ARIの開発に当たって、放射線輸送計算シミュレーションでCT撮影に伴う被ばく線量を解析し、その結果に基づき線量計算で用いるデータベースを構築した。本章では、計算シミュレーションで用いた各装置でのX線放出特性のモデル化、成人日本人の体型を考慮したボクセルファントム等について記す。

3.1. CT装置放出X線特性のモデル化

CT装置では、X線管から発生するX線は扇状であり、不要な被ばくを避けつつ、診断に適した画質の画像を得るため、体の中心部と周縁部でX線の強度を変えるbow-tieフィルタが導入されている。このbow-tieフィルタは、各装置によりその構造が異なるが、製造者の秘匿情報とされている。そこで、本研究においては、実際のCT装置を用いた実測試験を行い、その結果からX線のエネルギースペクトル、仮想的なbow-tieフィルタ構造を

推定した²⁰⁾。

実測試験では、最初にCT装置のガントリーの最下部にX線管を固定し、ガントリー下部に厚さの異なる銅板フィルタを置いた状態でX線照射を行い、ガントリー上部に設置した電離箱の線量値の変化を測定した。実測時に設定したX線管電圧の情報から、xcomp5rプログラム²³⁻²⁴⁾によりX線エネルギースペクトルをいくつか計算した。そのうち、銅厚の増加に応じた線量値の減少傾向が測定結果と最も近かったものを、測定点とX線管を結ぶ線上にある寝台中央のX線エネルギースペクトルとした。

続いて、寝台上にガラス線量計を数cmのインターバルで配置して、線量分布を実測した。その結果に基づき、bow-tieフィルタの材質をアルミニウムと仮定して、銅の厚さ変化に対する線量低減の傾向から推定したX線エネルギースペクトルを考慮して、寝台上の線量分布を与える仮想的なフィルタ構造を推定した。CT装置(4メーカー、7機種、2撮影モード)について、推定したX線エネルギースペクトル及び仮想的なbow-tieフィルタの構造に基づき、粒子・重イオン輸送計算コード(PHITS: Particle and Heavy Ion Transport code System)²⁵⁾のusrsors.fファイルで、各X線の放出エネルギー及び角度に応じて、bow-tieフィルタ中での減弱を決定する関数を定義し、寝台上でのX線の線量分布を再現する線源モデルを作成した。

3.2. 患者モデル

現在、WAZA-ARIでは、4才女児、平均的成人日本人男女のボクセルファントム(図2)を患者モデルとして用いて構築した臓器線量データベースを基にしたCT撮影時の被ばく線量評価が可能である。以下に、各々のボクセルファントムの概要について述べる。



図2 4才児(UFF4)、平均的成人日本人女性(JF-103)及び男性(JM-103)ボクセルファントム

3.2.1 成人患者モデル

原子力機構では、これまでに健康な成人日本人男女ボランティアに対する全身撮影により得られたCT画像データを基に、数体のボクセルファントムを開発している(表1)⁹⁻¹⁴⁾。今回、これらのボクセルファントムの内、CT撮影時の姿勢(臥位)を反映した最も高い解像度(ボクセルサイズ: $0.98 \times 0.98 \times 1 \text{ mm}^3$)を持つ男性(JM: Japanese Male phantom)^{11, 14)}及び女性(JF: Japanese Female phantom)^{12, 14)}のモデルを改良することにより、体型については成人日本人の平均値²⁶⁾にほぼ等しく、骨組織を除いた臓器・組織質量については平均値の $\pm 10\%$ の範囲になるように調整した男性

(JM-103)及び女性(JF-103)ファントムを新たに構築した²⁷⁾。JM-103及びJF-103ファントムにおいては、放射線感受性の高い赤色骨髄について、骨組織の解剖学的構造及び密度分布情報に基づいた合理的な体内分布^{14, 27)}になるようにモデル化されている。加えて、放射線防護に関係した現行法令の基礎となる国際放射線防護委員会(ICRP: The International Commission on Radiological Protection)の1990年基本勧告²⁸⁾の改訂版である2007年基本勧告²⁹⁾において、実効線量算定のために考慮すべき臓器・組織として新たに追加された口腔粘膜、胸郭外気道領域、前立腺、唾液腺、リンパ節のボクセルファントムを構築し、JM-103及びJF-103ファントムに組み込んだ。

3.2.2 小児患者モデル

未成年においては、人体モデルを作成するために用いる医用画像の入手が困難であり、日本人と欧米人との間で体型の差が小さい。そこで、フロリダ大学で開発された4才の女児ファントム(UFF4: University of Florida Female 4 years phantom)³⁰⁻³¹⁾を入手し、小児患者モデルとしてWAZA-ARIにおける線量評価に利用した。

表1 原子力機構が開発した成人日本人ボクセルファントム

ファントム	ボクセルサイズ(mm ³)	性	身長(cm)	体重(kg)	姿勢
Onago	0.98×0.98×10	女	161	57	臥位
JF	0.98×0.98×1	女	152	44	臥位
JF-103	0.98×0.98×1	女	155	52	臥位
Otoko	0.98×0.98×10	男	170	65	臥位
JM	0.98×0.98×1	男	171	65	臥位
JM2	0.98×0.98×1	男	171	65	立位
JM-103	0.98×0.98×1	男	171	65	臥位
日本人平均値	—	女	155	52	—
	—	男	170	64	—

4. 線量解析及びデータベース構築

JM-103、JF-103、UFF4の各患者モデルをPHITSに組み込んで、CT撮影に伴う被ばく線量を解析した。ここでは、前述の線源モデルを利用し、患者の横断面周囲の円周軌道上の任意の位置より、5 mmの照射幅を持つ扇状のX線を照射した(図3)。この線源を患者モデルの頭頂部から脚先へ向かって、頭脚軸上を5 mm毎に移動させた条件で線量解析を行った。この解析結果に基づき、CT装置のメーカー、機種、撮影モードに応じた患者モデル別の臓器線量データベース(XML形式ファイル)を整備し、WAZA-ARIのシステムに格納した。

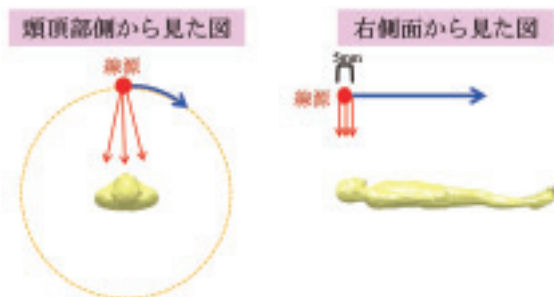


図3 患者モデルへのX線の照射体系

5. 患者の被ばく線量の計算例

図4は、GE製16列CT装置を利用してUFF4、JF-103、JM-103の頭頂部から膝までの範囲を管電流100mAs、管電圧120kVの条件で撮影した際の主な臓器・組織の吸収線量をWAZA-ARIで計算した結果を示す。本撮影条件のように、管電流が一定の条件下においては、甲状腺、肺、胃、結腸、赤色骨髄の吸収線量は、ファントムの体型が大きくなる程減少している。これは、体型の違いを決定する皮下軟組織の厚さが異なるため、人体に入射したCT装置放出X線が標的臓器に到達するまでに受ける遮蔽効果に変化することが原因である。このように、WAZA-ARIにおいては、患者の体型の差に基づいた臓器線量を正確に与えることが可能である。

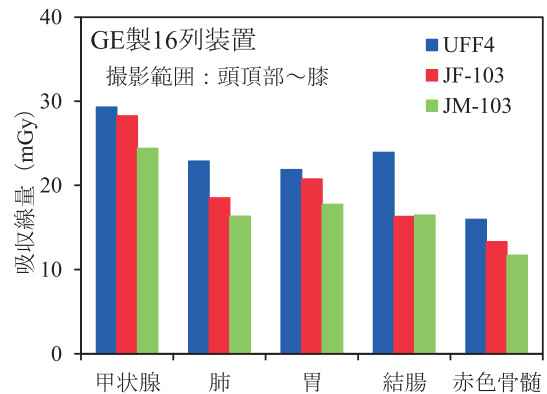


図4 WAZA-ARIを用いて計算した臓器線量の計算例

6. 今後の予定 (WAZA-ARI version 2の開発と公開)

試験運用中のWAZA-ARIでは、成人日本人の平均的体型、あるいは小児(4才)の体型の患者がCT撮影された際の被ばく線量を正確に評価することが可能である。平成24年12月の公開以降、WAZA-ARIホームページへの月当たりのアクセス数は概ね1,000件を超えており、平成26年9月末の時点でアクセス数は合計28,421件に達している(図5)。

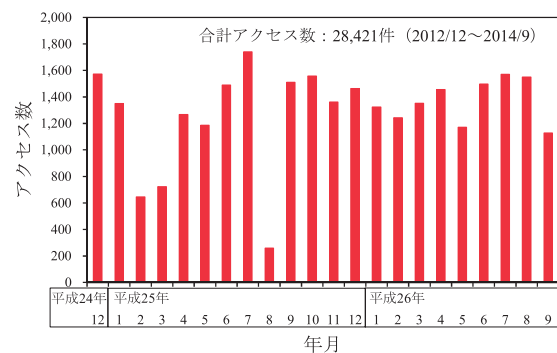


図5 WAZA-ARIホームページへの月別アクセス数

現在、WAZA-ARIの線量評価機能を拡張したWAZA-ARI version 2の開発を進めている。WAZA-ARI version 2においては、放射性感受性が高い幼児、小児などの若年齢層に対する被ばく線量評価機能が付与される予定である。また、成人患者として、従来の平均

的体型に加えて、痩せ形、小太り型、肥満型の体型を持つ成人に対する被ばく線量評価機能も追加する予定である。これらの線量評価機能が拡張されたWAZA-ARI version 2は、平成26年度中に本格運用版として放医研のサーバー上で公開する予定である。なお、WAZA-ARI version 2の本格運用に当たっては、利用者は事前にユーザー登録を行うことが必要となるが、計算した線量データをWAZA-ARI version 2を利用して放医研のサーバーにアップロードすることが可能となる。そのため、利用者は自身がアップロードした線量の統計分布情報を得ることができる。一方、サーバーでは各機関からの線量情報を蓄積することとなる。そのため、利用者は自身の登録した線量分布とWAZA-ARI version 2を利用した全機関線量分布の比較が可能となり、各機関でのCT撮影前の被ばく線量の予測による最適な撮影条件の設定等への活用が期待される。

謝辞

本研究は、日本学術振興会の科学研究費補助事業よりの助成（20591484）を受けて実施した。

参考文献

- 1) 西澤かな枝、松本雅紀、岩井一男、丸山隆司、CT検査件数及びCT検査による集団実効線量の推定、日本医学放射線学会雑誌、64、151-158、(2004)。
- 2) The United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation., United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2000 Report to general assembly - Annex D: Medical radiation exposures., United Nations (UN) (2000).
- 3) The International Atomic Energy Agency (IAEA), Available on: <http://rpop.iaea.org>.
- 4) OECD (2013), Health at a Glance 2013: OECD Indicators, OECD Publishing, http://dx.doi.org/10.1787/health_glance-2013-en
- 5) ImPACT., Available on <http://www.impactscan.org/ctditables.htm>.
- 6) G. Stamm, H. D. Nagel., CT-Expo — a novel program for dose evaluation in CT., *Rofo.*, 174, 1570-1576, (2002).
- 7) D. G. Jones, B. F. Wall., Organ doses from medical x-ray examinations calculated using Monte Carlo techniques., NRPB-R186, National Radiological Protection Board., Chilton, UK (1985).
- 8) H. Zaidi, X. G. Xu., Computational anthropomorphic models of the human anatomy: The path to realistic Monte Carlo modeling in radiological sciences., *Annu. Rev. Biomed. Eng.*, 9, 471 (2007).
- 9) K. Saito, A. Wittmann, S. Koga, Y. Ida, J. Kamei, J. Funabiki, M. Zankl., Construction of a computed tomographic phantom for a Japanese male adult and dose calculation system, *Radiat. Environ. Biophys.*, 40, 69-76, (2001).
- 10) K. Saito, S. Koga, Y. Ida, T. Kamei, J. Funabiki., Construction of a voxel phantom based on CT data for a Japanese female adult and its use for calculation of organ doses from external electrons., *Jpn. J. Health Phys.*, 43, 122-130, (2008).
- 11) K. Sato, H. Noguchi, Y. Emoto, S. Koga, K Saito., Japanese adult male voxel phantom constructed on the basis of CT-images., *Radiat. Protect. Dosim.*, 123, 337-344, (2007).

- 12) K. Sato, H. Noguchi, Y. Emoto, S. Koga, K. Saito., Development of a Japanese adult female voxel phantom., *J. Nucl. Sci. Tech.*, 46, 907-913, (2009).
- 13) K. Sato, H. Noguchi, A. Endo, Y. Emoto, S. Koga, K. Saito., Development of a voxel phantom of Japanese adult male in upright posture., *Radiat. Protect. Dosim.*, 127, 205-208, (2007).
- 14) K. Sato, F. Takahashi, D. Satoh, A. Endo., Development of adult Japanese voxel phantoms and their application to evaluation of radiation exposure doses, *JAEA-Data/Code 2010-009* (2010).
- 15) S. Kinase, M. Zankl, J. Kuwabara, K. Sato, H. Noguchi, J. Funabiki, K. Saito., Evaluation of specific absorbed fraction in voxel phantoms using Monte Carlo calculation, *Radiat. Prot. Dosim.*, 105, 557-563, (2003).
- 16) K. Sato, A. Endo., Analysis of effects of posture on organ doses by internal photon emitters using voxel phantoms, *Phys. Med. Biol.* 53, 4555-4572, (2008).
- 17) K. Sato, A. Endo, K. Saito., Dose conversion coefficients calculated using a series of adult Japanese voxel phantoms against external photon exposure, *JAEA-Data/Code 2008-016*, (2008).
- 18) N. Ban, F. Takahashi, K. Ono, T. Hasegawa, T. Yoshitake, Y. Katsunuma, K. Sato, A. Endo, M. Kai., WAZA-ARI: Computational dosimetry system for X-ray CT examination II: Development of web-based system., *Radiat. Protect. Dosim.*, 146, 244-247, (2011).
- 19) N. Ban, F. Takahashi, K. Sato, A. Endo, K. Ono, T. Hasegawa, T. Yoshitake, Y. Katsunuma, M. Kai., Development of a web-based CT dose calculator: WAZA-ARI., *Radiat. Protect. Dosim.*, 147, 333-337, (2011).
- 20) F. Takahashi, A. Endo, K. Sato, K. Ono, T. Yoshitake, T. Hasegawa, Y. Katsunuma, N. Ban, M. Kai., Effects of Human Model Configuration in Monte Carlo Calculations on Organ Doses from CT Examinations., *Prog. in Nucl. Sci. Technol.*, 2, 153-159, (2011).
- 21) F. Takahashi, A. Endo, K. Sato, K. Ono, T. Yoshitake, T. Hasegawa, Y. Katsunuma, N. Ban, M. Kai., WAZA-ARI: Computational Dosimetry System for X-ray CT Examinations. I. Radiation Transport Calculation for Organ and Tissue doses Evaluation Using JM Phantom., *Radiat. Prot. Dosim.*, 146, 241-243, (2011).
- 22) F. Takahashi, A. Endo, K. Sato, T. Hasegawa, Y. Katsunuma, K. Ono, T. Yoshitake, N. Ban, M. Kai., Analysis of Organ Doses from Computed Tomography (CT) Examination by the Radiation Transport Calculation to Develop the Dosimetry System, WAZA-ARI., *Prog. in Nucl. Sci. Technol.*, 1, 517-520, (2011).
- 23) R. Nowotny, A. Höfer., Ein Programm für die Berechnung von diagnostischen Röntgenspektren *Fortschr., Röntgenstr.*, 142, 685-689, (1985).
- 24) R. Birch, M. Marshall, G. M. Ardran., *Catalogue of spectral data for diagnostic X-rays. scientific report series.*, 30, HPA, London, (1979).
- 25) T. Sato, K. Niita, N. Matsuda, S. Hashimoto, Y. Iwamoto, S. Noda, T.

- Ogawa, H. Iwase, H. Nakashima, T. Fukahori, K. Okumura, T. Kai, S. Chiba, T. Furuta and L. Sihver, Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52, J. Nucl. Sci. Technol., 50, 913-923, (2013).
- 26) G. Tanaka, H. Kawamura., Anatomical and physiological characteristics for Asian reference man. Male and female of different ages, NIRS-M-115, (1996).
- 27) K. Sato, F. Takahashi, D. Satoh, A. Endo., Construction of average adult Japanese voxel phantoms for dose assessment., JAEA-Data/Code 2011-013, (2011).
- 28) The International Commission on Radiological Protection (ICRP)., 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Adopted by the Commission in November 1990., ICRP Publication 60, (1991).
- 29) The International Commission on Radiological Protection (ICRP)., The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection., Approved by the Commission in March 2007., ICRP Publication 103, (2007).
- 30) C. Lee, C. Lee., W. Bolch., Age-dependant organ and effective dose coefficients for external photons. a comparison of stylized and voxel-based paediatric phantoms., Phys. Med. Biol., 51, 4663-4688, (2006).
- 31) C. Lee, C. Lee, J. L. Williams, W. Bolch., Whole-body voxel phantoms of paediatric patients - UF series B., Phys. Med. Biol., 51, 4649-4661, (2006).