

3. 小児CT被ばくの現状と推奨条件

宮崎 治

国立成育医療センター放射線診療部

Current Status of Pediatric Multislice CT Focused on Radiation Dose Reduction

Osamu Miyazaki, M.D.

Department of Radiology, National Center for Child Health and Development

Abstract

The purpose of this review article is to discuss the current status of pediatric multislice CT (MSCT) in Japan. The evolution of the CT scanner has developed new means of diagnosis of pediatric disease, such as acute appendicitis and congenital heart disease (3-DCT angiography). Our survey suggested that optimization of pediatric MSCT has already been carried out by 90% of respondents, based on technician's experience or automatic exposure controller. However, the situation of dose control of pediatric CT seems to be somewhat different from the ICRP recommendation because of the low occupancy ratio of radiologist to CT unit in Japan. The age-based average mAs setting for Japanese abdominal CT seems to be almost the same as in the previously published US survey (2001). The last content of this article describes how we decided the weight-based parameter setting for our 8 data acquisition system MSCT.

Keywords : CT, Children, Survey

はじめに

2004年6月に長崎県長崎市で開催された第40回日本小児放射線学会シンポジウム「小児における医療被ばく—特に小児のCTについて—」に於いて筆者は「小児被ばくの現状と推奨条件」について講演した。当日の講演では、前半に本年初頭に行った全国小児CTアンケート調査の結果報告を、後半には筆者の所属する国立成育医療センターでのCT撮影条件設定の経緯と現在の条件設定を報告した。前半部分のアンケート調査については、現在学術誌(日本医学放射線学会誌)に投稿し査読中である。近年学術論文の二重投稿については厳重な注意が必要であり、この総説で使用する調査結果や数値はあくまでも未発表データとして扱

う。詳しい調査結果の報告は査読終了後の雑誌掲載を待つことになる。したがって本稿では学会当日の発表や現在投稿中の論文とは異なった内容となり、小児CT被ばくの現状を他の公表されている欧米や日本のデータと、われわれの調査結果の一部を比較する形で報告する。

I. 小児CT被ばくの現状

i) 進化するCTスキャナー

CTは1973年の英国における第一世代 translate-rotate方式EMI scanの商品化以降、第五世代の電子ビーム偏向性CT (IMATRON) を経て、1990年代の高速らせんCT、さらに多列検出器型CTの登場まで、絶えず進化を続けてきた¹⁾。

第一世代のCTは文献上のスキャン時間が300秒

とあり¹⁾、1スライスの撮影に5分を要する計算になる。乳幼児の頭部の撮影範囲が約10cmと仮定すると、1時間近くも撮影時間を要することになり、低学年の学童はおろか成人でも撮影ポジションを保つことは困難であったと推測する。

その後CTは管球とともに検出器も回転する第三世代、環状固定検出器の第四世代へと進化し、スキャン時間も1秒台まで短縮された¹⁾。さらに1990年に、X線管球への電源供給がスリッパリング方式の高速らせんCTが商品化された。これは電車のパンタグラフと同じで管球に対し電源供給していたケーブルから解放されたことにより、連続かつ高速の回転を可能にした¹⁾。さらに1998年以降開発された、現行最新型である多列検出器型CT (Multidetector CTまたはMultislice CT: 以下MSCTと略す) は、複数の検出器列を持つことで、撮影時間の短縮、広範囲の撮影、呼吸や体動の影響が少ない画質などが得られる利点を持つ。これらは臨床的なメリットであるとともに、CT室におけるスループットの向上や検査待ち期間の短縮、緊急検査への対応など、被検者への利益を提供してきた。現時点ではMSCTの性能にもよるが、スキャン時間は1秒以下、機種によっては0.5秒以下で撮影可能となった。

このようなCTの技術革新が小児画像診断にもたらしたものは、1) 虫垂炎や心大血管奇形といった、かつてはUSで診断していた疾患にもCT検査の適応となる疾患が拡大したこと、2) かつては血管撮影を行って、手術前に血管解剖を確認していた疾患や、MRIにて矢状断、冠状断の観察が必要であった疾患がCTの再構成画像に置き換えられるようになったこと、3) 短時間で検査が終了するようになり、検査のための鎮静が不要となるケースが増え、鎮静下でのCT検査の割合は18%から3.3%に激減したとの報告もある²⁾。

上記のような約30年間のCTの進化のプロセスは、スキャンの高速化、高画質化に重きが置かれ、我々は自動車やコンピューターその他の精密機器と同様に、メーカーに高速で高画質なCTスキャナーを作って売るよう要求し続けてきた³⁾。

その結果CTメーカーもユーザーの意向を反映し、現在もおおスキャン時間の高速化、MSCTの列数のさらなる増加など、ハイ・スペックを売り

文句としている。

残念ながらその開発の中で、小児患者を意識した低被ばくモードでのCT撮影技術について各メーカーがしのぎを削るような歴史はなく、一部の識者や科学者の間でのみCT被ばくについての報告がなされていた。

上記の経緯で、次項に述べる全世界的なCTの台数および検査件数の爆発的増加が生じた。

ii) 小児CT検査の実態；報告データからみた現状

国連放射線影響科学委員会 (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 以下UNSCEAR) が2000年に発表した膨大な報告書 (以下UNSCEAR 2000⁴⁾) によると、世界中には約34,000台のCTスキャナーが存在するとされている。また2000年のデータでは、11,000台のCTが日本に存在していると西澤らは報告している⁵⁾。

その本邦のCT台数の経時的な推移として1979年から89年の10年間で約7倍に、さらにその後の10年で2000年には1989年の約2倍になったと記載されており、1979年ころからみれば14倍になっている。これに伴い検査件数は1979年から89年の10年間で8.2倍に、その後の10年で2000年には1989年の約3.1倍になったと報告している⁵⁾ ので、1979年に比し約24倍の増加率と推測される。

一方小児のCT検査件数は西澤らの調査では0～14歳の小児のCT検査件数は114万件と推測している⁵⁾。われわれの行った小児CTアンケート調査から概算した小児CT件数は、全国で年間約122万件 (未発表データ) であった。

日米で小児CT検査を比較すると、成人を含めた全体の中での比率は日本 (3.1%)⁵⁾ のほうが米国 (11%)⁶⁾ に比し低い。検査件数は2000年⁷⁾ の報告では、年間全米で60万件の小児CTが行われると推定している。日本の推定件数114～122万件は、その約倍の数ということになる。以上のごとく日本と世界のCT台数と検査件数は現在増加の一途をたどっていると思われる。

iii) 小児CT撮影条件は軌道修正されたのか？

前述のごとく、80年代、90年代にCT機器の数の増加、CT検査件数が増加する一方、CT検査の

被ばく過多について、BrennerらのCT被ばくによるがん死リスク推定の論文⁷⁾が米国の一般紙USA TODAYに掲載された⁸⁾のがきっかけとなり、小児CT被ばくが全世界的な社会問題に発展した。

この2001年の論文を前後し1999年から現在まで約5年間に膨大な報告や公的機関の勧告、さまざまな論文や基礎的研究が発表され⁹⁻¹⁴⁾、多くの学会や研究会がこの話題を取り上げ、欧米を中心に速やかに小児CT被ばく低減に関する対処に取り組んだ。

USA TODAY以降のこれらの世界的な軌道修正の根底にある問題点は、1) CTは台数、検査数、検査中のスキャン回数などが増加の一途をたどっている事実、2) 過去に被検者の体格に見合った撮影条件設定が不十分で、被ばく過多で撮影をしてきた事実、3) 1)と2)を踏まえ患者の体格に見合った条件変更が必要であり、まず管電流を適正な数値に調節する必要がある、の3点に集約できるのではないと思われる¹⁰⁾。

上記の世界的な軌道修正の結果、小児CTの管電流設定は改善したのかを検証する必要があると思われる。これについて過去に数編の小児CTの撮影条件についての調査があり、以下に紹介しわれわれのアンケート結果を比較する。

Patersonら¹⁵⁾は1998年10月から1999年6月ま

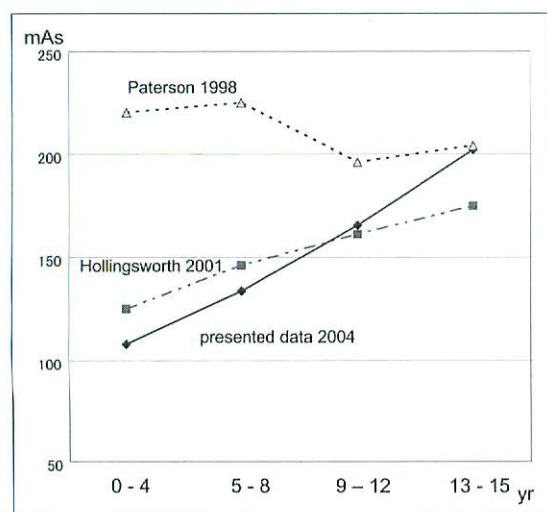


Fig.1 Comparison of tube current setting in pediatric abdominal CT present data vs published studies 1998 and 2001 in U.S.A

で、地域の病院から大学病院放射線科に、診断に関するコンサルトのあった小児ヘリカルCT 58件のフィルム上の撮影条件を記録し、年齢、体重などから撮影条件の適正化が行われているかを調査、報告している。彼らの報告では“小児に見合った撮影条件の変更はなされていなかった”と述べている。そのときの腹部の管電流設定の調査結果をFig.1に示す(オリジナルはmA表示だが便宜上1秒スキャンと仮定し、mAs表示に変換)。

Hollingsworthら¹⁶⁾は前述のPatersonの調査の2年後の2000年11月から2001年1月の3ヵ月間(奇しくもBrenner論文⁷⁾が掲載されたAJR Am J Roentgenol誌発行の1ヵ月前の調査)、米国小児放射線学会会員のいる施設のCT撮影状況の実態調査を行っている。彼らの報告では“年齢に見合った撮影条件の変更は行われている”と明記したうえで、9歳以下でも150mA以上で撮影している点と、20~25%の放射線科医の回答が、“固有のCT撮影条件を知らない”という点を特記している。Fig.1のPatersonの結果と比較し、同じ表に腹部の各年齢のmAs設定(上記同様オリジナルはmA表示だが便宜上1秒スキャンと仮定し、mAs表示に変換)を示す。

これらは同じAJR誌に掲載された論文であるが、1998年に一般病院を対象にした調査で、2001年のものは米国小児放射線科学会の会員の放射線科医の常駐する小児病院または大学病院の調査である。その母集団の違いの要素も大きいのではないかと推測される。

本邦における小児のCTに特定した撮影条件の調査は、調べ得た限り文献的には見当たらなかった。今回のわれわれの調査も上記のPatersonらのものに近い母集団で、中規模病院(100~499床)が過半数を占め、小児病院など特殊な施設はごくわずかなものである。その結果2004年の時点でMSCTを所有する病院では、小児の撮影条件を頭部では約9割、腹部では8.5割の施設で変更しているとの回答が寄せられた。また撮影条件、特にmAsの変更については、Paterson, Hollingsworthらとまったく同じ年齢設定で行ったが、結果的にはHollingsworthらの調査結果とほぼ同等であった(Fig.1)。

これは何を意味するのか? USA TODAY報道

以前の1998年、米国の地域病院では管電流は固定が主流であった。しかしその後のFDAの通達¹⁰⁾やALARA (as low as reasonably achievable) のコンセプト¹²⁾などの被ばく低減運動が世界中に波及し、海を隔てた2004年の日本で、一般病院の小児CTプロトコルが米国小児病院並みに患者線量管理されているとも評価できるし、むしろ欧米での放射線科医や医学物理士の強調した“管電流固定プロトコルからの脱出”キャンペーンとは無縁に、日本では診療放射線技師が自主的に線量をコントロールしてきた可能性もある。これについては後述、考察する。

問題点としては今回の調査はMSCTで4列を所有する病院が主流であったが、Hollingsworthらの報告はsingleまたは2列のヘリカルCTが主流であった点である。4列が主流であれば、本来はもっとmAsを低下可能ではないのかという疑問点が残った。またmAsのみでは実際の被ばくが多いのか、少ないのか比較ができない。やはりピッチやkV、その他の要素がパッケージとなったCTDI_{vol}やDLP (Dose Length Product) での評価が必須と思われた。

iv) 誰が小児CT検査の線量を管理するのか？

ICRP pub 87では、その要約の中に“放射線科医は、診療放射線技師と医学物理士の協力のもとに、線量管理の責任を持つ。診療放射線技師は、CT検査を最適化する訓練を受け、これに習熟しているべきである¹⁷⁾”と記載している。

ICRP勧告は放射線科医が不在でもCTが行われている国や地方の場合どのようにすべきかを明記していない。わが国は世界のCTの1/3～半分を所有している¹⁸⁾世界第一位のCT大国でありながら、ICRPの勧告に当てはまらない“例外的な”国なのだろうか？

今回のアンケート調査はMSCTのある病院に限った調査で、“CTのスキャン方法の指示は誰が行っていますか？”の問に対し、放射線科常勤医師が約40%、診療放射線技師が約30%という結果であった。今回のアンケート調査で回答を寄せていただいた医療施設の数から放射線科医の数を概算すると、全国で約4,400名の放射線科医がCTのスキャンの指示を行っている比率となる。日本医学放射線

学会のホームページ (<http://www.radiology.or.jp>) を参考にすると、平成16年2月28日の時点で日本医学放射線学会に登録している放射線科医の会員数は7,619名とのことであるので、上記の放射線科医の数はその58%、わが国の放射線科医の6割が全国津々浦々の医療施設においてCTのスキャン方法の指示・業務を行っている計算になる。また現時点で推定12,000から14,000台のCTがある^{18,19)}ので、CT1台に対する放射線科医の数は約0.6人であり、1人を割っている状況である。

ICRPの勧告を理想とし、すべてのCTの線量管理の責任を放射線科医が持つとすると、13,000人の放射線科医が必要となり、5,381人が不足となる。つまり現在の1.7倍の放射線科医がいないと成り立たないのである。

日本放射線技師会 (<http://www.jart.jp/index.html>) によれば、放射線技師は現在22,000人である。これは放射線科医の約3倍、CT1台に対し1.7人の比率である。

上記のようなマンパワーの違いがバックグラウンドにあるため、“どのような基準で撮影条件を変更していますか？”の質問に対し、“撮影技師の経験に基づき”が頭部CTで5割強、腹部CTで4割強と最多であり、最近のCT撮影技術革新である管電流自動調節 (Automatic exposure control 以下AEC) の使用 (約3割) をいまだ上回っている (Fig.2)。一方医学物理士については、筆者が在籍していた聖マリアンナ医科大学放射線医学教室には、優秀な医学物理士が大学病院内の同じ放射線科施設内に数名常勤し、日常の放射線診療に際し助言や協力が得られる。日本では聖マリアンナ医大病院のような恵まれた施設は稀であり、米国やヨーロッパのように放射線日常業務に医学物理士が介在する環境とは大きな隔たりがある。このようにICRPの勧告をそのまま日本に適用することは難しいと思われた。

v) アンケート調査結果のまとめと印象

放射線科医の不足と医学物理士の不足 (ほぼ不在に近い) を背景に、今回のアンケート調査結果から日本の現状をFig.2に要約した。“小児CTの撮影条件変更は9割近い施設で実施されており、スキャン方法は常勤放射線科医 (約40%) か撮影技

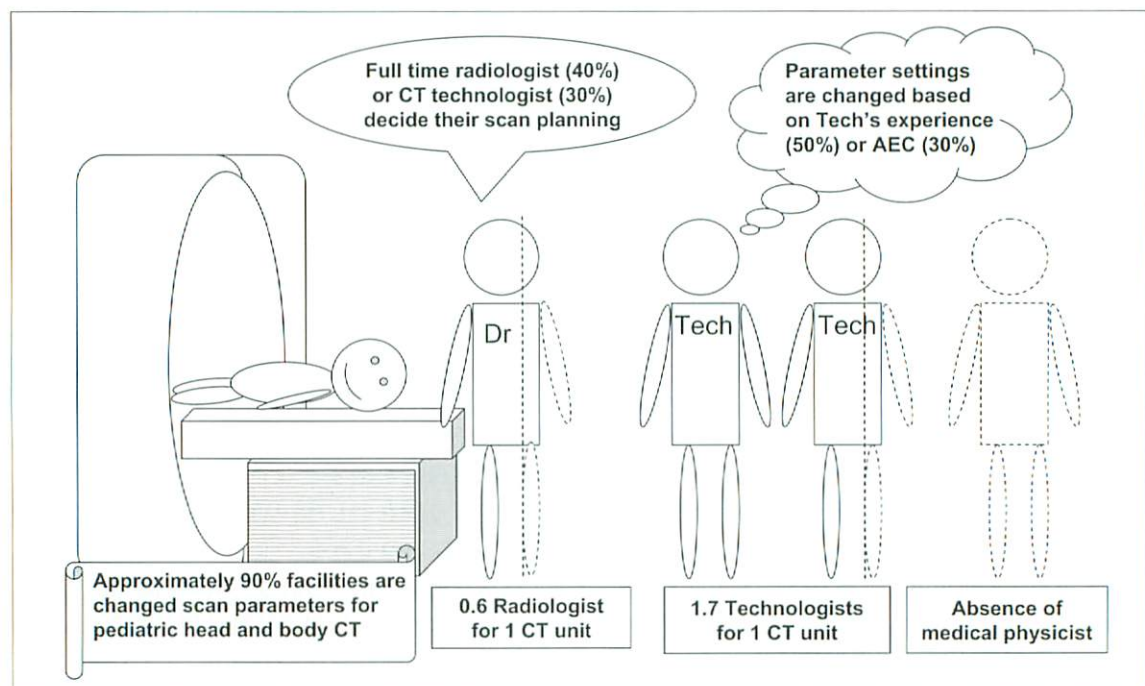


Fig.2 Summary of current status of pediatric CT in Japan, questionnaire 2004

Note low occupancy ratio of radiologist for 1 CT unit in Japan, it is less than one radiologist per one unit all over the country. Gross percentages of respondents in this figure represent the survey results of pediatric MSCT in Japan. AEC = automatic exposure controller

師(約30%)が決定し、撮影技師の経験(約50%)、またはAEC(約30%)を基準に行っている”ということになり、これらの結果が前出のFig.1に示す本邦の現状に帰結したと思われる。

筆者はこのアンケート結果に対し、予想外に良い結果であったと感じた。

Lancetに掲載され話題になった論文²⁰⁾では本邦は他の先進15カ国に比し、約3倍発がんリスク推定が高いと報告され、マスコミ報道²¹⁾もCT被ばくに関心を寄せたが、本邦では上記のように小児CT撮影が野放しではないという点は明確になった。

放射線技師と放射線科医、医学物理士の数に対するCTの台数には急激な変化はないと思われ、今後暫くは上記のような線量管理体制がわが国では続くことになると思われる。唯一変わる可能性があるのはAECの普及率が徐々に増加し²²⁾、ある時点で“技師の経験に基づき”の頻度を超える可能性はあると思われる。

アンケート結果から、現場にいる常勤放射線科医または診療放射線技師の両者が約70%の施設で

スキンの指示を出し、線量管理の役割を担っていることが明確になった。今後はこの両者に対する被ばく防護の啓発や卒後教育、最新技術の提供が重要であり、それが被ばく低減に結びつく唯一の方法と筆者は考える。

II. 小児CTの推奨条件

筆者の所属する国立成育医療センターがオープンした2002年当時、8列MSCTにおける小児の撮影条件は誰にも分からなかった。具体的には“画質、線量、被写体の体格の関係”がわからず、いかに線量を低下するべきか、どの程度下げたら画質は診断不能となるのかが分からなかった。

当時参考にした管電流の設定方法はDonnellyらの提唱したシングルヘリカルCTの体重ごとの撮影条件¹³⁾と、今回のシンポジウムで同席し、本誌に執筆されている東大の赤羽先生の体重に見合った管電流設定方法の式である(以下赤羽体重法)²³⁾。当時MSCTが普及し始めたが、多列検出器CTでの理想的な条件設定、特に小児についての報告は

ほとんど見られなかった。

CTの特性として画質(ノイズ)は体格に比例し増加する²⁴⁾のだが、我々はいかなる年齢のいかなる体格の患児が来ても常に同じ画質を得るための方法として、赤羽体重法で撮影した腹部CTにおいて体重と画質(肝実質のCT値の標準偏差;以下SD)、線量の関係を自験例から求めた。その結果SDを8に設定した場合(スライス厚5mm表示)の管電流設定は $y=0.04x^2+0.8x+24$ (y =理想とするmAs, x =患児の体重)という結論を得た。現在はこの式から求めた体重に対する理想的な管電流をAECに上限を設けた形でスキャンしている。またGE社のLightSpeedシリーズにはcolor code systemと呼ばれる小児用のフォーマットがある²⁵⁾。これは米国麻酔科学会で決められている体重ごとの色の識別方法をCTのコンソールにとりいれたアイデアで、患児は9つの体重区分に分類される。さらに我々はこれに前述の計算式で求めた管電流の条件を上限値に設定し、体重ごとにプリセットされた撮影条件で自動的に線量調節している²⁵⁾。

以上、簡単ではあるが筆者の施設での小児撮影条件の決定の経緯を紹介した。各施設のMSCTの機器性能が異なるため、また診断目的や理想とする画質が異なるため、MSCT時代の小児CTの推奨条件は決め難いと思われる。加えて今後もさらに普及すると見られるAECの構造、線量低下の方法がCTメーカー6社により異なっている²⁶⁾ことは、共通の撮影条件設定を決めにくい要素となるであろう。

おわりに

以上、小児CT被ばくの現状、特に進化するCTスキャナー、小児CT検査の増加の実態、小児CT撮影条件は軌道修正されたのか、誰が小児CT検査の線量を管理するのかにつき、過去の文献と今回調査を行ったアンケート結果を織り交ぜ解説した。その後小児CTの撮影条件につき、筆者らのセンターでの条件設定の経緯を解説した。本文中でも述べたが、日本は世界に名だたるCT大国であるがゆえに、安全かつ有益なCTの利用方法を考案し実践するべきである。さしあたり筆者は本邦における標準的な線量管理の目安となる診断参

考レベルdiagnostic reference levelを設定するべきであると考え²²⁾。

現在16列のMSCTから64列のMSCTへさらなる進化が進んでいる。しかし8列や4列でのデータ解析や撮影条件の吟味など消化し、解決した上で次のステップへ進むべきであると思われる。今後放射線科医、放射線技師、医学物理士、機器メーカーなど各方面でのさらなる研究成果の発表が期待される。

謝辞

項を終えるにあたり執筆に多大なる協力、助言をいただいた国立成育医療センター放射線診療部診療放射線技師の皆様、特に谷島義信主任、およびGE横河メディカルシステム株式会社CT技術部の堀内哲也氏に深謝いたします。

●文献

- 1) 辻岡勝美: I-4 X線CTの歴史. CT自由自在(第1版). 東京, メジカルビュー社, 2001, p52-53.
- 2) Papas JN, Donnelly LF, Frush DP: Marked reduction in the frequency of sedation of children using new multislice helical CT. *Radiology* 2000; 215: 897-899.
- 3) Rogers LF. From editor's notebook. Taking care of children: Check out the parameters used for helical CT. *AJR Am J Roentgenol* 2001; 176: 287.
- 4) United Nations: Sources and effects of ionizing radiation, volume I. Sources. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 2000 Report to the general assembly, with scientific annexes. New York, UN sales Publication, 2000, No. E.00.IX3.
- 5) 西澤かな枝, 松本雅紀, 岩井一男, 他: CT検査件数及びCT検査による集団実効線量の推定. *日本医放会誌* 2004; 64: 151-158.
- 6) Mettler FA, Wiest PW, Locken JA, et al: CT scanning: patterns of use and dose. *J Radiol Prot* 2000; 20: 353-359.
- 7) Brenner DJ, Elliston CD, Hall EJ, et al: Estimated risks of radiation induced fatal cancer from pediatric CT. *AJR Am J Roentgenol* 2001; 176: 289-296.
- 8) Donnelly LF: Lessons from history. *Pediatr Radiol* 2002; 32: 287-292.
- 9) ICRP: Managing patient dose in Computed

- Tomography, International Commission on Radiological Protection. Oxford, Pergamon Press, Publication 87, 2000.
- 10) Feigl DW : FDA Public Health Notification : Reducing Radiation risk from computed tomography for pediatric and small adult patients. *Pediatr Radiol* 2002 ; 32 : 314-316.
 - 11) European commission : European guidelines on quality criteria for computed tomography. European communities. Luxemburg, 1999, Report EUR 16262.
 - 12) Slovis TL, Hall ET, Huda W, et al : ALARA CONFERENCE Executive Summary. *Pediatr Radiol* 2002 ; 32 : 221.
 - 13) Donnelly LF, Emery KH, Brody AS, et al : Minimizing radiation dose for pediatric body applications for single-detector helical CT : Strategies at a large children's hospital. *AJR Am J Roentgenol* 2001 ; 176 : 303-306.
 - 14) Nagel HD, edited : Radiation exposure in computed tomography. 4th Revised and update edition 2002, CJB Publications Hamburg.
 - 15) Paterson A, Frush DP, Donnelly LF : Helical CT of the Body : Are settings adjusted for pediatric patients? *AJR Am J Roentgenol* 2001 ; 176 : 297-301.
 - 16) Hollingsworth C, Frush DP, Cross M, et al : Helical CT of the Body : A survey of techniques used for pediatric patients. *AJR Am J Roentgenol* 2003 ; 180 : 401-406.
 - 17) ICRP勧告翻訳検討委員会 : ICRP Publication 87 CTにおける患者線量の管理. 社団法人日本アイソトープ協会, 東京, 丸善株式会社, 2004.
 - 18) 西澤かな枝 : わが国のCT検査の実態と被ばく線量推定 緊急シンポジウム “診断用のX線がガンを増やす” との論文は真実か? 日本医放会誌 2004 ; 付録 64 : Supple 3-6.
 - 19) 村松禎久 : II 部 : 医療現場からX線CTの患者線量を考える 《特集》第19回「医療放射線の安全利用研究会」フォーラム テーマ : X線CTにおける患者線量の管理を考える—安心できるCT検査に向けて— ICRP Publ.87「CTにおける患者線量の管理」の概要. 医療放射線防護 NEWS LETTER 2004 ; 41 : 36-39.
 - 20) Gonzalez AB, Darby S : Risk of cancer from diagnostic X-ray : estimated for the UK and 14 other countries. *Lancet* 2004 ; 363 : 345-351.
 - 21) 中島久美子 : メディアの取り組み—果たすべき役割と専門家への期待—緊急シンポジウム “診断用のX線がガンを増やす” との論文は真実か? 日本医放会誌 2004 ; 付録 64 : Supple 22-25.
 - 22) 宮崎 治 : II 部 : 医療現場からX線CTの患者線量を考える 《特集》第19回「医療放射線の安全利用研究会」フォーラム テーマ : X線CTにおける患者線量の管理を考える—安心できるCT検査に向けて— 小児CT検査における子供の受ける線量から. 医療放射線防護 NEWS LETTER 2004 ; 41 : 40-44.
 - 23) 赤羽正章, 大友 邦 : CTの被ばくと撮影条件最適化—マルチスライスCTも含めて— 画像診断 2002 ; 22 : 318-327.
 - 24) Ende JF, Huda W, Pablo R, et al : Image mottle in abdominal CT. *Investigative radiol* 1999 ; 34 : 282-286.
 - 25) Fox SH, Toth T : Dose reduction on GE CT scanners. *Pediatr Radiol* 2002 ; 32 : 718-723.
 - 26) I 部 : X線CT装置メーカー側の現状と展望 《特集》第19回「医療放射線の安全利用研究会」フォーラム テーマ : X線CTにおける患者線量の管理を考える—安心できるCT検査に向けて— 医療放射線防護 NEWS LETTER 2004 ; 41 : 4-35.