特集　第50回日本小児放射線学会学術集会
シンポジウム「小児核医学検査－こんな時にこんな検査を」

2. 小児心臓核医学検査の適応と解釈

神山　浩[1,2]，唐澤賢祐[2]

日本大学医学部　医学教育企画・推進室[1]，同　小児科学系小児科学分野[2]

Indication and interpretation of pediatric cardiac nuclear medicine

Hiroshi Kamiyama[1,2], Kensuke Karasawa[2]

Division of Medical Education Planning and Development[1], Department of Pediatrics and Child Health[2], Nihon University School of Medicine

Abstract

Pediatric cardiac nuclear medicine including myocardial perfusion imaging (MPI) is valuable to detect coronary arterial lesions with Kawasaki disease and congenital coronary abnormalities that may cause myocardial ischemia and infarction in children. There are 3 required points for completing MPI as follows: (1) Suppression of body movement during acquisition, (2) reduction of liver accumulation by creating an interval of more than 30 minutes between administration and acquisition, keeping the Monzen position during acquisition, and consuming a fatty diet before acquisition, (3) reduction of intestinal accumulation by creating the intervals in the same manner as reduction of liver accumulation, and taking soda before acquisition.

Fatal heart failure with cardiomegaly and poor cardiac function can be caused by congenital coronary anomaly including anomalous origin of the left coronary artery from the pulmonary artery (ALCAPA) and dilated cardiomyopathy especially in infants. Rest MPI with technetium-99m is reasonable to make a diagnosis of ALCAPA which has specific findings such as decreased uptake around anterolateral left ventricular wall, although septal uptake is sufficiently maintained.

JSNM (Japanese Society of Nuclear Medicine) pediatric dosage card is available to decide radiopharmaceutical administered doses for reduction of radioactive exposure as well as achieving perfect imaging of pediatric nuclear medicine.

Keywords：**Coronary, Imaging, Ischemia**

はじめに

本稿では，2014年6月に開催された第50回日本小児放射線学会シンポジウムの「小児核医学検査～こんな時にこんな検査を～」で発表をした内容である，1.小児心臓核医学検査の施行頻度と概要，2.良好なイメージ作成のために，3.小児心臓核医学検査が有用な冠動脈疾患，について述べる．

小児心臓核医学検査の施行頻度と概要

小児核医学検査の施行頻度について，唐澤ら小児核医学検査ワーキンググループは2011年に14施設を対象にアンケート調査を実施している[1]．それによれば総検査数は3,884件で，最も頻度の高い小児核医学検査は41.5％の腎臓核医学検査である．脳神経14.4％，呼吸器12.9％がそれに続いている．小児心臓核医学検査は2.5％と施行

頻度は低い．同検査の施行頻度が低い理由として，小児心臓核医学検査の適応疾患がいずれも稀少であることが挙げられる．一方，心筋血流イメージング（以下MPI: Myocardial Perfusion Imagingと略す）では基本的に運動または薬物負荷が必要となるため，検査施行医師の時間的制約が大きい点が関与しているかもしれない．施行頻度をFig.1に示す．

小児心臓核医学で使用される核種をTable 1に示す．MPIは心筋虚血の判定のために小児でも重要な検査である．MPIで使用される核種の物理的半減期に注目すると，テクネチウム心筋血流製剤は約6時間，塩化タリウムは約73時間である．小泉らによる小児核医学検査適正施行のコンセンサスガイドライン[2]の第3部「小児核医学検査の対象疾患」によれば，塩化タリウムの小児への使用は推奨しないとの記載がある．歴史的に塩化タリウムは心筋虚血評価に功績[3]を残しているが，テクネチウム心筋血流製剤と比較して約8～10倍の被ばく線量があり，小児への塩化タリウムの使用は控えるべきである．

良好なイメージ作成のために

心臓は動的臓器であること，核種により生理学的特性が異なること，また他の小児核医学検査と同様に検査に非協力的な年齢層には，撮像を工夫しなければならない．ここでは小児心臓核医学検査で最も使用頻度の高いテクネチウム

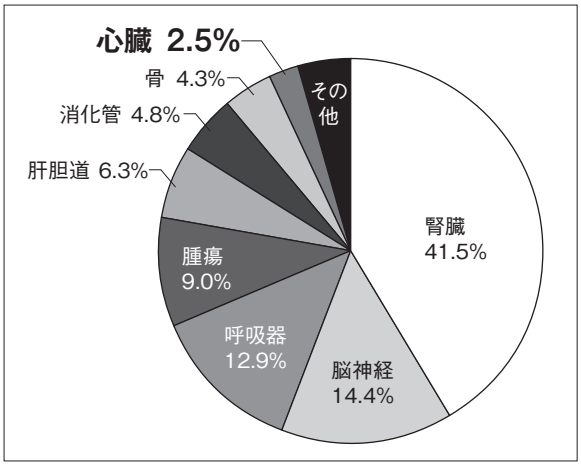


Fig.1
小児核医学検査の施行頻度
2011年に14施設を対象として小児核医学検査ワーキンググループにより施行されたアンケート結果である．総検査件数は3,884件で，最も施行頻度が高かった検査は腎臓核医学検査で41.5%，次いで脳神経が14.4%，呼吸器12.9%，腫瘍9.0%と続く．心臓核医学検査は2.5%と小児核医学検査では施行頻度が低い．
[文献1より引用改変]

Table 1　心臓核医学検査で使用される核種

一般名	分　布	物理的半減期
1. 心筋血流イメージング（MPI）		
Technetium-99m tetrofosmin	心筋，肝臓，肺	6.01時間
Technetium-99m MIBI	心筋，肝臓，肺	6.01時間
Thallium chloride-201（^{201}Tl）	腎臓，心筋，肝臓，脾臓	72.91時間
2. 心筋脂肪酸代謝イメージング		
^{123}I betamethyl-iodophenyl-pentadecanoic acid（^{123}IBMIPP）	心筋，肝臓，筋肉（脂肪酸代謝臓器）	13.27時間
3. 心臓交感神経機能イメージング		
^{123}I metaiodobendzylguanidine（^{123}I MIBG）	交感神経終末，カテコミン産生細胞	13.27時間
4. その他		
^{67}Ga citrate	腎臓，肝臓，骨，骨髄	3.261日
Fluorodeoxyglucose（^{18}F）	脳，心臓	109.8分

心筋血流製剤によるMPIで，Table 2に示す重要な3点について述べる．

参考までにテクネチウム心筋血流製剤によるアデノシン薬物負荷先行安静1日法の検査プロトコールをFig.2に示す[4]．

1．体動の抑制

良好なイメージ作成のために最も重要な点であり，体動を無視した撮像は評価に値しないイメージになる可能性がある．テクネチウム心筋血流製剤によるMPIでは，撮像条件によるが10数分から30分程度の撮像時間を要する．筆者の経験では6歳以下（小学生未満）では，撮像中に体動抑制に対する工夫をしなければ，良好なイメージ作成のための適切な撮像を施行できない．当科では幼児に対してDVDの視聴，母親（家族）や技師・医師による検査中の励ましを積極的に実施している．励ましと言っても特別な対応は不要で頭部や上肢を大きく動かさないことを指示し，患児の興味あるキャラクターや日常会話で十分である．その際，患児と家族に大きな体動がなければ撮像は可能であることを伝えることが重要であり，過度な医療者からの要求は逆効果になることがあり注意が必要である．MRIやCTと比較した場合，検査中に患児の傍らに付き添うことができる核医学検査の利点を生かし，当科では積極的に家族と担当医が撮像に同席するよう心掛けている．3歳以下の乳幼児ではこのような精神的サポートは無効なことが多く，薬物鎮静による撮像が必要になる．薬物鎮静は呼吸抑制のリスクがあり，3歳以下の年齢層に対して検査施行のリスクベネフィットを十分に考慮して検査計画を立てなければならない．

もう1つの強調点としては，検査終了時のプラナー画像の確認である．これにより体動が過度であると判断した場合には，積極的に再撮像を試みるべきである．その際，患児の検査への飽きを考慮して，再撮像合計時間の短縮を図るために，1ステップあたりの撮像時間を短くするなどが有用である．

Table 2　良好なイメージ作成のために
～テクネチウム心筋血流製剤による心筋血流イメージングで必要な事項～

1	体動の抑制 ⇨小児では絶対的必要事項
2	肝集積の干渉低減 ⇨Monzen肢位，脂肪食，撮像時間間隔
3	消化管集積の干渉低減 ⇨炭酸水，撮像時間間隔

2．肝集積の干渉低減

①十分な撮像時間間隔

核種投与から撮像までの時間を十分とることにより，核種の肝胆道からの洗い流しが促進され肝集積の干渉低減になる．しかし，小児心臓核医学検査以外のスケジュールの関係

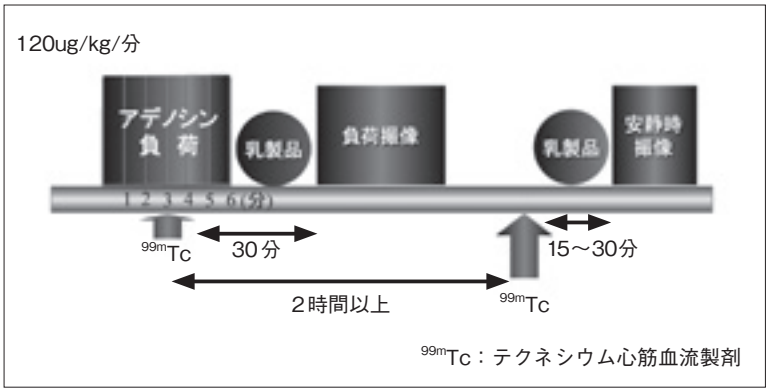


Fig.2　アデノシン薬物負荷先行安静1日法の検査プロトコール
テクネチウム心筋血流製剤の投与はアデノシン負荷後3分で実施する．核種投与から撮像までの時間を最低30分は空けること．負荷投与から最低2時間は空けて安静投与とする．核種投与と撮像までの間に乳製品の摂取を行う．
［文献4より引用改変］

で，臨床現場では十分な時間が確保できないことが多い．当科では核種投与から撮像までの時間を少なくとも30分空けるように努めている．

②Monzen肢位

撮像中に仰臥位で左手を挙げ右手を下げ，上体を右側に湾曲させるMonzen肢位[5]をとることで肝集積の干渉を低減できる．肝降下に対するMonzen肢位の有効性を**Fig.3**に示す．**Fig.3a, c**はともに両上肢挙上の体位であり，いずれも肝上縁は心下縁よりも高い位置にある．**Fig.3b**ではMonzen肢位により肝上縁は心下縁よりも降下している．一方，**Fig.3d**ではMonzen肢位を十分にとれていないので肝上縁の降下は不十分である．

③脂肪食の摂取

当科では通常午前中にMPIを施行しており，検査当日の朝は禁食としている．また，核種投与後に脂肪食摂取を行っている．禁食下で肝血流を停滞させ脂肪食摂取により肝血流の増加と胆汁排泄を促進し，肝胆道からの核種の洗い流しによる肝集積の干渉低減をすることが目的である．脂肪食としてはコロッケや卵のサンドウィッチ，ココアや牛乳などの飲料の摂取を指示している．

3. 消化管集積の干渉低減

①十分な撮像時間間隔

核種投与からの撮像時間を十分空けることにより，肝胆道からの洗い流しが促進されるだけでなく，消化管蠕動により心臓近傍に位置する消化管集積の干渉低減になる．

②炭酸水の摂取

撮像直前の炭酸水摂取により胃を膨満させることで消化管集積の干渉低減になる．炭酸水非摂取と摂取による比較を**Fig.4**に示す．炭酸水摂取下では胃が膨満することにより，心臓近傍の消化管集積が排除されている．小学校高学年以上では200～300ccの炭酸水摂取を勧めている．幼児では多量の摂取はできないが，3～4口の摂取であっても効果が現れることあり，非侵襲的で有効な手法である．

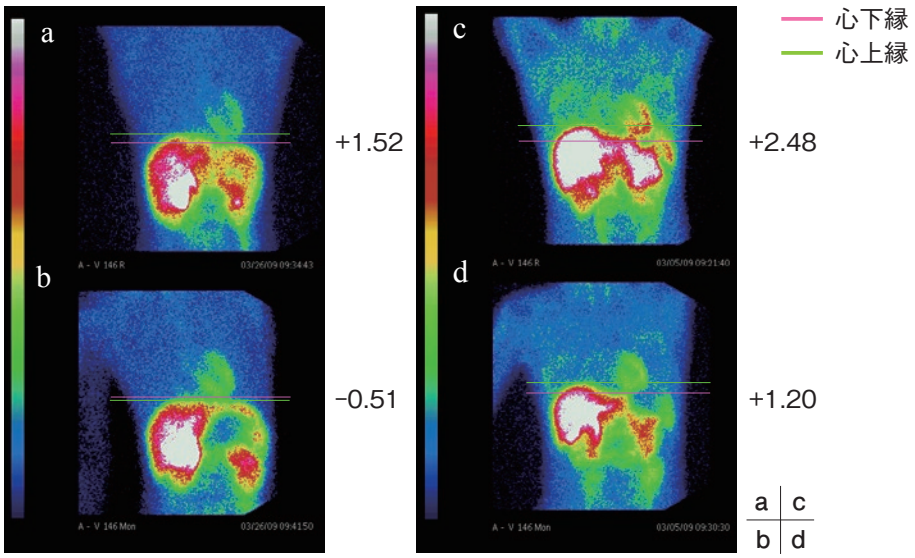
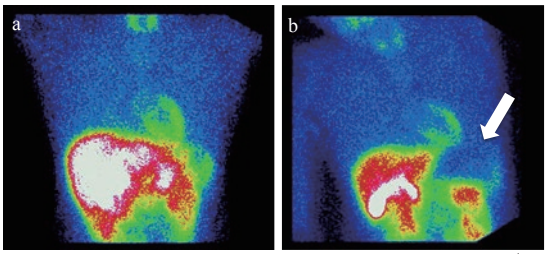


Fig.3　Monzen肢位による肝の降下
aとb，cとdは同一患者であり，aとcは両上肢挙上肢位である．bはMonzen肢位の画像であり，肝上縁は心下縁よりも降下している．一方，dではMonzen肢位が十分にとれていないので肝上縁の降下は不十分である．各画像の右側の数字は心下縁から上方に位置する肝上縁までの距離（cm）であり，負の数字は肝上縁が心下縁よりも低く位置していることを示す．



a | b

Fig.4 炭酸水摂取による消化管集積の干渉低減
a：炭酸水非摂取下では心臓近傍の消化管集積が著しい．
b：炭酸水摂取下では胃に相当する部位（矢印）の消化管集積は排除されており，消化管集積の干渉低減になる．

小児心臓核医学検査が有用な冠動脈疾患

1．代表的な小児冠動脈疾患

代表的な小児冠動脈疾患をTable 3に示す．後天性である川崎病冠動脈障害[6, 7]や先天性心疾患術後[8]の評価で小児心臓核医学検査は非常に有用である．先天性冠動脈奇形は稀な疾患群であるが，左冠動脈肺動脈起始症（以下ALCAPA：Anomalous origin of the left coronary artery from the pulmonary arteryと略す）や左冠動脈入口部閉塞では，診断後に速やかな心臓外科手術が必要であり，後述する乳児の心不全に遭遇した場合には常に鑑別すべき疾患群である．

Table 3　代表的な小児冠動脈疾患

先天性冠動脈奇形	左冠動脈肺動脈起始症 単冠動脈 冠動脈瘻
先天性心疾患	大血管転位症術前，術後 ファロー四徴症術前
後天性冠動脈異常	川崎病冠動脈障害 血管炎による冠動脈障害

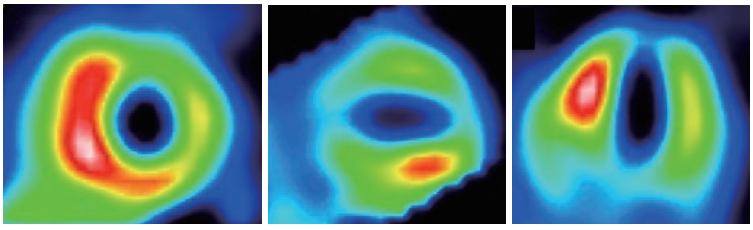
2．先天性冠動脈疾患と小児心臓核医学検査

①症例呈示

6か月の乳児．呼吸障害を主訴として受診した．初診時，胸部に陥没呼吸を認め，奔馬調律と心尖部に全収縮期雑音を聴取した．胸部単純レントゲンで心胸郭比0.62．心電図で異常Q波をaVL，胸部誘導V1～V5に認めた．心エコー検査で左室収縮能は著しく不良で，左冠動脈入口部は不明瞭であったが，左冠動脈が肺動脈から起始している確証も得られなかった．乳児の原因不明の重度心不全であり，先天性冠動脈奇形の鑑別のために心臓核医学検査の適応と考えた．経口鎮静薬を使用して，テクネチウム心筋血流製剤による安静MPIを施行した．左室前壁および側壁で核種の著明な取り込み低下を認めたが，中隔での取り込みは維持されておりALCAPAと確信した（Fig.5）．安静MPI施行1週間後に冠動脈移植術を施行し術後経過は良好である．

②ALCAPAの診断アプローチ

ALCAPAは乳児健康診査での心雑音，呼吸障害や哺乳不良などの心不全症状を伴い受診するケースが多い．重症心不全を伴っている状況では低侵襲的検査によって可能な限りの診断アプローチをするべきである．特に臨床像と一般検査所見が類似する拡張型心筋症との鑑別は非常に重要である（Table 4）．最重要



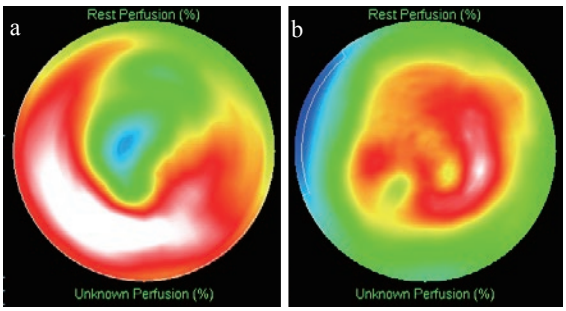
a | b | c

Fig.5 テクネチウム心筋血流製剤による安静MPI～ALCAPA症例～
テクネチウム心筋血流製剤による左室短軸中間部a，垂直像b，水平像cである．左室前壁および側壁で核種の取り込み低下を認めるが，中隔での取り込みは維持されている．

Table 4　左冠動脈肺動脈起始症と拡張型心筋症の鑑別

	左冠動脈肺動脈起始症	拡張型心筋症
臨床所見	心不全	心不全
胸部レントゲン所見	心拡大	心拡大
心エコー所見	左室拡大・収縮能低下 左冠動脈起始異常*	左室拡大・収縮能低下 正常冠動脈起始
安静MPI**所見 （Fig.6参照）	左室前側壁領域の取り込み低下	左室全領域の取り込み低下
治　療	外科的治療	内科的治療***

*左冠動脈起始を同定できないことも多い.
**MPI：心筋血流イメージング
***中長期的には心臓再同期療法や心臓移植の選択肢がある.



a | b

Fig.6 安静心筋血流イメージング所見による左冠動脈肺動脈起始症と拡張型心筋症の比較
ともに核種としてテクネチウム心筋血流製剤を用いている．左冠動脈肺動脈起始症（Fig.6-a）では心尖部から前側壁を中心に高度取り込み低下を認めるが，中隔領域の血流が維持されているのに対して，拡張型心筋症（Fig.6-b）では全領域の取り込み低下を認める.

事項としては，拡張型心筋症は正常冠動脈走行であり薬物による抗心不全療法が中心になるが，ALCAPAでは診断後速やかに冠動脈移植術による心臓手術が必要になる点である.

③ALCAPAの診断に対する安静MPIの推奨

テクネチウム心筋血流製剤を使用した安静MPIによるALCAPAと拡張型心筋症のポーラーマップ像をFig.6に示す．両疾患の核種取り込み低下領域の分布が明らかに異なることが一目瞭然である．すなわち，ALCAPAでは心尖部から前側壁を中心に高度取り込み低下を認めるのに対して，拡張型心筋症では全領域に取り込み低下を認める．特に中隔領域の血流が維持されていることがALCAPAに特徴的であり，これは右冠動脈からの側副循環が中隔領域に最も発達しているためで，右冠動脈から解剖学的に距離のある前側壁への側副循環の発達が不良なため生じる現象である．また，著者らは術前術後に行った核医学検査（塩化タリウムと^{123}I beta-methyl-p-iodophenyl pentadecanoic acidの2核種によるDual single photon emission computed tomography）で，ALCAPAでは前壁側壁の病変が特徴的であり，その有用性を報告している[9].

テクネチウム血流製剤による安静MPIで「中隔の取り込みが維持され，前側壁に取り込み低下を認める」場合には，積極的にALCAPAをはじめとする左冠動脈主幹部閉塞を疑う必要がある．本アプローチは安静時のみの検査で低侵襲であり，また，心エコー検査でしばしば左冠動脈起始を同定できないこともあり，乳児期の心拡大や原因不明の心不全に遭遇し左冠動脈主幹部閉塞を疑った時には，テクネチウム血流製剤による安静MPIの施行を推奨する.

④小児心臓核医学検査領域における「小児核医学検査適正施行のコンセンサスガイドライン」の利用

Table 5　テクネチウム心筋血流製剤の基本量と最小量

核　種	放射性医薬品	クラス	本委員会推奨値	
			基本量(MBq)	最小量(MBq)
^{99m}Tc	MIBI／テトロホスミン（安静／負荷心筋2日法・最大*）	B	63.0	80
	MIBI／テトロホスミン（負荷心筋1日法：1回目**）	B	28.0	80
	MIBI／テトロホスミン（負荷心筋1日法：2回目**）	B	84.0	160

*体重の重い患児では従来投与量より多い傾向になるので，この量を最大限として，より少量の投与を考慮．
**安静先行，負荷先行のいずれにも適用．2回目量は1回目量の2～3倍．

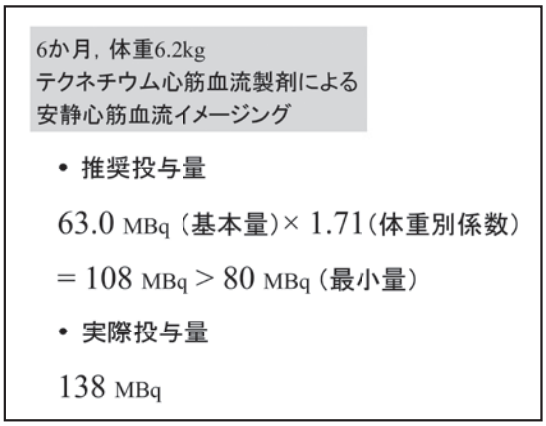


Fig.7「小児核医学検査適正施行のコンセンサスガイドライン」による投与の実際
安静心筋血流イメージングでのテクネチウム心筋血流製剤の投与経験である．安静時撮像1回のみの予定で，Table 5より基本量は63.0MBqになる．テクネチウム心筋血流製剤はクラスBに該当し，体重6.2kgに該当する係数1.71（Table 6の体重6kgの係数を使用）を乗じると108MBqになる．これはTable 5中の最小投与量80MBqよりも大きく，推奨投与量は108MBqになる．この値を参考にした実際投与量は138MBqであった．

本シンポジウムの基調講演で小泉潔先生より「小児核医学検査適正施行のコンセンサスガイドライン」[2]についての解説があった．2013年3月に第1部である「小児核医学検査の適正投与量」が公表されて以降，当科では本ガイドラインに準拠して核種投与を行っている．投与経験の実際を**Fig.7**に示す．テクネチウム心筋血流製剤による安静時撮像1回の

Table 6　クラス別，体重別係数

体重(kg)	クラス		
	A	B	C
3	1	1	1
4	1.12	1.14	1.33
6	1.47	1.71	2
8	1.71	2.14	3
10	1.94	2.71	3.67
12	2.18	3.14	4.67
14	2.35	3.57	5.67
16	2.53	4	6.33
18	2.71	4.43	7.33
20	2.88	4.86	8.33
22	3.06	5.29	9.33
24	3.18	5.71	10
26	3.35	6.14	11
28	3.47	6.43	12
30	3.65	6.86	13
32	3.77	7.29	14
34	3.88	7.72	15
36	4	8	16
38	4.18	8.43	17
40	4.29	8.86	18
42	4.41	9.14	19
44	4.53	9.57	20
46	4.65	10	21
48	4.77	10.29	22
50	4.88	10.71	23
52-54	5	11.29	24.67
56-58	5.24	12	26.67
60-62	5.47	12.71	28.67
64-66	5.65	13.43	31
68	5.77	14	32.33

みの予定で，Table 5より基本量は63.0MBqになる．Table 6より体重6.2kgに該当する係数1.71を乗じると108MBqになる．これは最小投与量80MBqよりも大きく，推奨投与量は108MBqになる．この値を参考にした実際投与量は138MBqであり，この投与量による画像はFig.5のALCAPA症例で，読影に十分な良好な画質が得られている．

おわりに

小児心臓核医学検査の施行頻度は低いが，低侵襲的心臓核医学検査が重症先天性心疾患の診断と治療方針を解き明かす鍵になることがあり，一般小児科医や放射線科医もそのアプローチの概要を知っておく必要がある．また，小児に対する被ばく低減と読影に適した画像作成のために，検査前に「小児核医学検査適正施行のコンセンサスガイドライン」による推奨投与量を確認した上での核種投与と「良好なイメージ作成のために」(Table 2) を考慮した撮像計画の実践が重要と考える．

謝　辞

本シンポジウムでの発表機会を与えていただいた会長の窪田昭男先生，座長の小泉 潔先生，内山眞幸先生に深謝致します．また，日本大学医学部附属板橋病院の循環器内科，放射線科，小児科諸先生，核医学検査室の放射線技師の方々の理解と援助に深謝いたします．

●文献

1) 唐澤賢祐，神山　浩，橋本禎介，小泉　潔：小児核医学検査の利用実態―小児核医学検査実施14施設のアンケート調査―．核医学 2013 ; 50 : 61-67.
2) Koizumi K, Masaki H, Matsuda H, et al : Japanese Society of Nuclear Medicine ; Optimization Committee for Pediatric Nuclear Medicine Studies : Japanese consensus guideline for pediatric nuclear medicine. Part 1 : Pediatric radiopharmaceutical administered doses (JSNM pediatric dosage card). Part 2 : Technical considerations for pediatric nuclear medicine imaging procedures. Ann Nucl Med 2014 ; 28 : 498-503.
3) Miyagawa M, Mochizuki T, Murase K, et al : Prognostic value of dipyridamole-thallium myocardial scintigraphy in patients with Kawasaki disease. Circulation 1998 ; 98 : 990-996.
4) 神山　浩：小児心臓核医学検査薬物負荷試験の実際～特集クローズアップ負荷試験の実際2013～．小児内科 2013 ; 45 : 1008-1011.
5) Monzen H, Hara M, Hirata M, et al : Exploring a technique for reducing the influence of scattered rays from surrounding organs to the heart during myocardial perfusion scintigraphy with technetium-99m sestamibi and technetium-99m tetrofosmin. Ann Nucl Med 2006 ; 20 : 705-710.
6) Kondo C : Myocardial perfusion imaging in pediatric cardiology. Ann Nucl Med 2004 ; 18 : 551-561.
7) 唐澤賢祐，鮎澤　衛，能登信孝，他：川崎病冠動脈狭窄性病変におけるTechnetium-99m Tetrofosmin心筋血流イメージングの至適撮像方法に関する検討．J Cardiol 1997 ; 30 : 331-339.
8) Hayes AM, Baker EJ, Kakadeker A, et al : Influence of anatomic correction for transposition of the great arteries on myocardial perfusion : radionuclide imaging with technetium-99m 2-methoxy isonitrile. J Am Coll Cardiol 1994 ; 24 : 769-777.
9) Kanamaru H, Karasawa K, Ichikawa R, et al : Dual myocardial scintigraphy mismatch in an infant with Bland-White-Garland sundrome. Int J Cardiol 2009 ; 135 : e1-3.