

# 核医学検査の実際

佐々木達也 北村秀秋 津田啓介 藤森弘貴 黒沢秀雄  
 花井耕造 栗原協子\* 佐藤敬\* 石橋章彦\*  
 小林一三\* 田仲隆\*\*

IRYO Vol. 63 No. 8 (511-516) 2009

キーワード RI, 半減期, SPECT, 心筋血流, 脂肪酸代謝, 交感神経機能

## 核医学の基礎知識

RIとはラジオアイソトープ (Radioisotope: 放射性同位元素) のことであり, 不安定な物質で放射線を放出して安定な物質に変わる核種をいう (図1). 核種とは, 原子核内の陽子数と質量数によって分類したものであり, 原子の種類を表したものである. 核種により放出される放射線のエネルギーは一定である. また, 放射能とは放射線を出す性質, 物質である. 放射能はベクレル (Bq) 単位で表され, これは1秒間に放出する放射線の数 (正確には壊変

数) である.

RIには半減期があり核種ごとに異なる<sup>1)2)</sup> (表1). 放射線を放出して安定な物質に変化するが, このように物質自身が持っている放射能が物理的に時間の経過とともに減衰し, 半分になるまでの時間を物理的半減期という (図2). 一方, RIが体内に存在する場合, 体内の放射能が代謝により減少する. この排泄により放射能が半分になるまでの時間を生物学的半減期という. また, 有効半減期とは, これら2種類を考慮した半減期である.

### 1. 核医学検査の特徴

核医学検査では, RIの静脈注射や経口投与などを行った後, 脳, 心臓, 骨などの臓器に集積したRIから放出されるγ線を専用のカメラで検出して画像を得ている. これは, 外部からX線を照射し人体を透過してきたX線を画像化するX線撮影とは大きく異なる (図3).

検査する部位によって使用する核種は異なり, 核種や核種に標識される化合物の性質により, 体内の

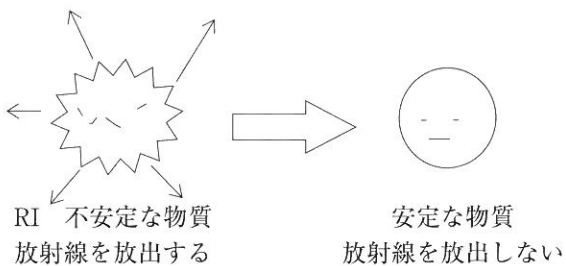


図1 放射性同位元素

国立がんセンター東病院 放射線部 \*国立国際医療センター戸山病院 放射線診療部

\*\*国立がんセンター中央病院 放射線診断部

別刷請求先: 佐々木達也 国立がんセンター東病院 放射線部 〒277-8577 千葉県柏市柏の葉6-5-1

(平成20年10月8日受付)

The Clinical Practice of RI Examination

Tatsuya Sasaki, Hideaki Kitamura, Keisuke Tsuda, Hiroataka Fujimori, Hideo Kurosawa, Kozo Hanai, Kyoko Kurihara\*, Takashi Sato\*, Akihiko Ishibashi\*, Kazumi Kobayashi\* and Takashi Tanaka\*\*, National Cancer Center Hospital East, \*International Medical Center of Japan, \*\*National Cancer Center

Key Words: RI, half life, SPECT, myocardial perfusion, fatty acid metabolism, sympathetic nerve function

表1 主なRI核種と物理学的半減期とエネルギー

核種	物理学的半減期	主なエネルギー
<sup>99m</sup> Tc	6.01h	141keV
<sup>201</sup> Tl	72.9h	72.9keV
<sup>67</sup> Ga	78.3h	93.3keV, 185keV, 300keV
<sup>123</sup> I	13.3h	159keV
<sup>131</sup> I	8.01d	364keV
<sup>111</sup> In	67.3h	173keV, 247keV

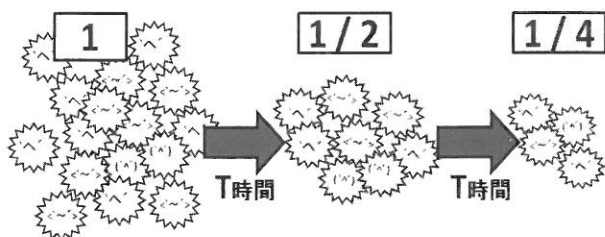


図2 RIの物理的半減期

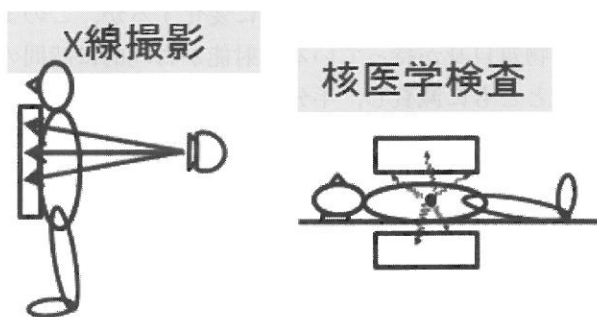


図3 検査の違い

集積場所が異なることを利用して、生体の機能をみる事ができる検査である。核種やその化合物により臓器に集まる時間や半減期が異なるため、投与後すぐに行う検査、時間をおいてから行う検査、数回撮影が必要となる検査がある。

## 2. 核医学検査装置

### 1) ガンマカメラ

ガンマカメラとは、体内に投与されたRIから放出される放射線(γ線)を体外で計測し画像化する装置であり、シンチレーションカメラともいわれる。体内から放出される放射線は、あらゆる方向に飛んでいくため、特定の方向からの放射線のみを検出器に入射させ、それ以外の放射線を遮断させる必要がある。この役目をするものがコリメータであり、どの方向からの放射線を遮断させるかにより種類が異

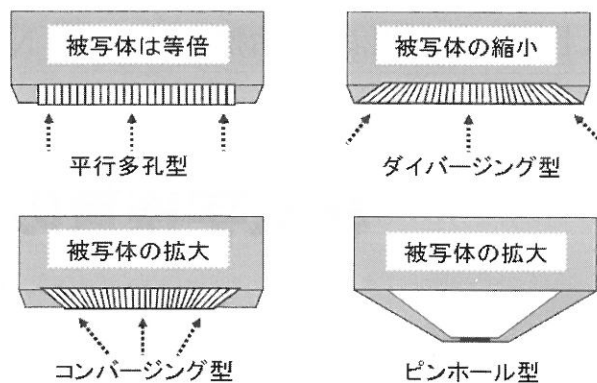


図4 コリメータの種類

なる<sup>3)</sup>(図4)。コリメータは放射線のエネルギーによっても交換しなければならない(表2)。図5に検出器の構造を示す。コリメータを通過してきた放射線が発光物質(シンチレータ)と衝突することにより、一瞬の発光(シンチレーション)をおこす。この発光は微弱なため光電子増倍管で増幅される。そして、この出力をデジタル変換し、位置演算回路、波高分析器等を通過し、元来微弱な放射線として検出されたものが画像として作成される。シンチレータはNaI(Tl)が多く使用されている。NaI(Tl)は潮解性があるため密封されている。また、温度変化に非常に弱く検査室内の温度管理は重要である。

RI検査をシンチと呼ぶことがある。シンチの本来の意味はシンチレーション(Scintillation:発光)であり、このシンチレーションによって作られた画像をシンチグラフィと呼んでいるためである。

表2 コリメータとエネルギー

使用コリメータと対応するエネルギー	
低エネルギー用コリメータ	160keV以下
中エネルギー用コリメータ	300keV以下
高エネルギー用コリメータ	450keV以下

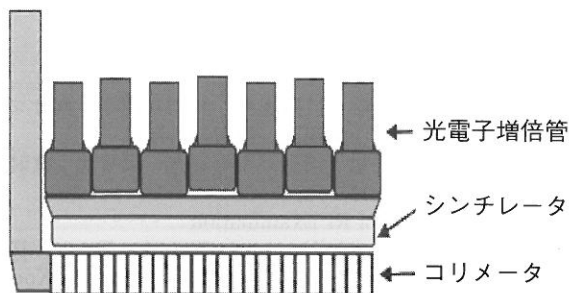


図5 検出器の構造

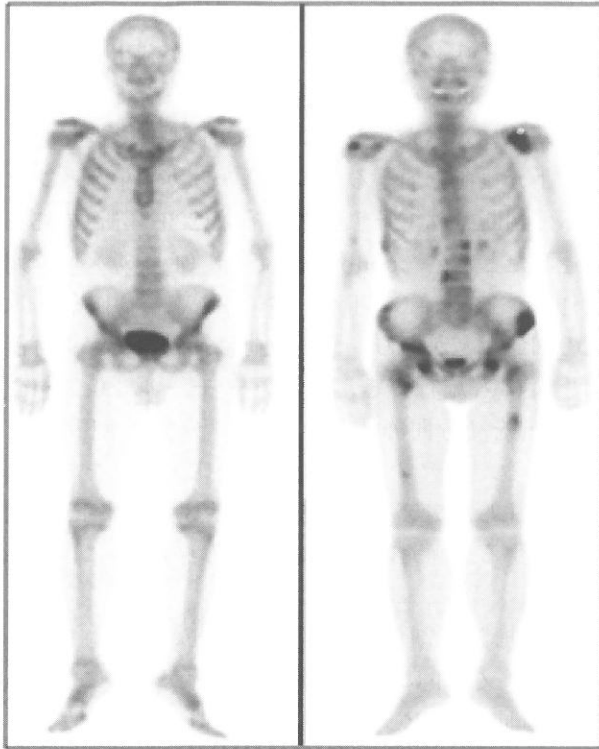
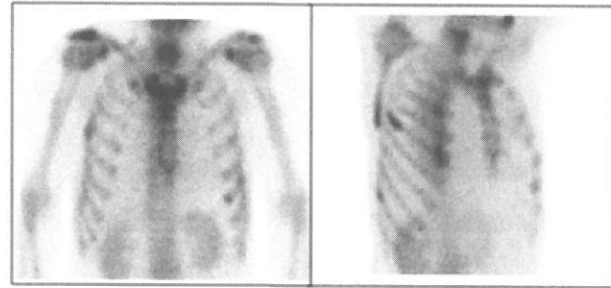


図6 全身骨シンチグラフィ  
左 異常集積が認められない症例  
右 多発の異常集積が認められた症例



正面像 斜位像  
図7 追加部分撮影が必要となった症例  
斜位像を加えることによって肋骨の病変が明瞭にみえる

診断などである<sup>3)4)</sup>。

### 1. 検査の基本原理と方法

核種は<sup>99m</sup>Tc-MDP, <sup>99m</sup>Tc-HMDP が使用され、投与量555-740MBqである。撮像開始時間は、投与後2-3時間以降が望ましいとされている。リン酸化合物の骨への集積機序は十分に解明されていないが、集積異常がみられる病変部には血流の増加があり、骨新生の盛んな部分に多く集まるものと考えられている<sup>5)6)</sup>。撮像は全身撮影が基本であり、必要に応じて重なりを避けるため、角度を変えて部分撮影を追加する(図7)。

### 2. 臨床例と検査ポイント

骨転移は骨髄中で増殖するため、骨の長軸方向に沿った形に集積されることが多い。骨折などは、骨折線と同じ方向に集積されることが多い。骨転移は病変の中央部が欠損になることがあり、ドーナツ型と呼んでいる。これは病巣中心が腫瘍細胞に置き換わり、中心部の骨代謝が低下するためである。骨転移は赤色骨髄の分布をする部位に多い。

骨転移は造骨型、溶骨型、混合型に分けられる。骨シンチの検査では、造骨型は異常集積として描出され、溶骨型では欠損像として認められる<sup>3)4)</sup>。

## 2) SPECT

SPECT (Single-photon emission computed tomography: 単光子放出核種による断層画像) とは、ガンマカメラが人体の周りを回転しながらデータを取得し、任意の断層画像を構成する装置、検査であり、心臓や脳の核医学検査に欠かせない存在となっている。

画像再構成法は、フーリエ変換法、重畳積分逆投影法等が利用されている。これらは基本的で簡便な計算が用いられているが、高速画像処理で可能となった最尤-期待値最大化法も実用化されている。

## 骨シンチグラフィ

骨シンチの検査目的の多くは転移性骨腫瘍の診断にある。治療前の病期診断、治療効果判定、経過観察がほとんどを占める。骨転移をおこしやすいがんは乳がん、肺がん、前立腺がんが挙げられ、骨に転移する時期もさまざまである。とくに乳がんでは、骨転移の発生頻度が低下せず、長期の経過観察が必要となる。前立腺がんにおける骨転移の発生は、治療後3年以内がほとんどである。転移性骨腫瘍の診断以外の検査目的は、原発性骨腫瘍の診断、骨折の

## 心臓核医学検査

心臓核医学検査では投与する薬の違いにより血流、代謝、交感神経機能等さまざまな心臓機能を画像化することができる。とくに血流検査は虚血性心疾患の診断や治療方針の決定に不可欠であり、運動あるいは薬剤負荷併用時の血流分布と比較することで、虚血と梗塞の区別ができる。さらに心電図同期収集により、心筋血流だけでなく左室駆出率、左室容積、

壁運動などの心機能解析も可能である。また薬に標識された RI のエネルギー差を利用し 2 種類の薬を投与、収集することで血流と代謝を同時に評価することができる。本稿では<sup>99m</sup>Tc 標識製剤を用いた負荷心筋血流検査、<sup>201</sup>TlCl, <sup>123</sup>I 標識製剤を用いた血流、脂肪酸代謝同時収集検査、<sup>123</sup>I 標識製剤を用いた交感神経機能検査について説明する。

### 1. 検査の基本原則

心筋血流評価には<sup>201</sup>TlCl, <sup>99m</sup>Tc-tetrofosmin (TF), <sup>99m</sup>Tc-sestamibi (MIBI), 脂肪酸代謝評価には<sup>123</sup>I-15- (p-iodophenyl) - 3- (R,S) -methyl-pentadecanoic acid (BMIPP), 交感神経機能評価には<sup>123</sup>I-metaiodobenzylguanidine (MIBG) が用いられる。それぞれの製剤の特徴を表 3 に示す。

#### 【血流評価】

<sup>201</sup>TlCl は<sup>99m</sup>Tc 標識製剤に比べ比較的正確に心筋血流量を反映するが、長い半減期、低いエネルギーにより投与量が制限される。<sup>99m</sup>Tc 標識製剤は半減期が短く大量投与でき画質が向上する。しかし心筋からの洗い出しは緩やかなため負荷試験を行う際は負荷時と安静時 2 回の投与が必要である。また肝・胆道系への集積が高くアーチファクトの原因になることもある。

心筋梗塞部位の診断は安静時のみでも可能であるが、虚血部位の検出には負荷試験が必要となる。負荷および安静時の画像とも欠損を示す時は梗塞、負荷時のみ欠損を示す時は虚血と診断される。負荷試験は運動または薬剤負荷が行われ、運動負荷はトレ

ッドミルやエルゴメーター、薬剤負荷は血管拡張剤であるジピリダモールやアデノシンが利用される。運動負荷ではあらかじめ静脈ラインを確保しておき、負荷基準に達したらラインより RI 製剤を投与しさらに 1 分負荷を加える。負荷基準はガイドラインに従って判断され①予想最大心拍数(220-年齢)の85%に達したとき、②double product (心拍数×収縮期血圧) >25000, ③ST 低下 >0.2mV, ④中等度以上の胸痛などがある。薬剤負荷は運動負荷が不可能な患者にも施行でき、ジピリダモールは0.14mg/kg/min を 4 分間静注しその 3-4 分後に RI 製剤を投与する。アデノシンは0.12mg/kg/min を 6 分間持続静注し、アデノシン静注開始 3 分後に RI 製剤を投与する。両薬剤とも気管支喘息の患者には禁忌である。

<sup>99m</sup>Tc 標識製剤は心電図同期 SPECT に適し、心機能計算ソフトにより左室機能解析が容易にできる。心電図同期 SPECT では 2 検出器を 76° に設定、RAO52° から 6° ステップで 18 方向、心電図 R-R 間隔を 16 分割し、1 方向 40beats で収集する。

#### 【脂肪酸代謝評価】

空腹時、健常心筋のエネルギー代謝の 80% は脂肪酸の β 酸化により行われる。<sup>123</sup>I-BMIPP は脂肪酸として心筋に取り込まれたあと β 酸化を受けにくく心筋内に長くとどまるため、その分布から脂肪酸代謝を評価できる。<sup>201</sup>TlCl と同時に投与すれば、標識 RI のエネルギー差を利用することで血流と脂肪酸代謝を同時に評価できる。

急性心筋梗塞における血行再建術後症例では、血流欠損部より広範な BMIPP 欠損像がみられる (代

表 3 心臓核医学検査に使用される RI 製剤

放射性医薬品	<sup>99m</sup> Tc-TF	<sup>201</sup> TlCl	<sup>123</sup> I-BMIPP	<sup>123</sup> I-MIBG
検査項目	心筋血流	心筋血流	心筋脂肪酸代謝	心筋交感神経機能
集積機序	冠血流に比例した受動拡散	心筋細胞膜の Na-K ポンプを介した能動輸送	脂肪酸として細胞内に取り込まれ、ミトコンドリア内で徐々に β 酸化	交感神経末端においてノルエピネフリン (NE) 同様に取り込まれる
投与量 [MBq]	740	74	111	111
前処置	投与まで禁食	検査終了まで禁食	禁食	禁食
特徴	心筋からの洗い出し緩やか	再分布現象あり	<sup>201</sup> Tl との同時収集が可能	肺、肝臓へも集積する

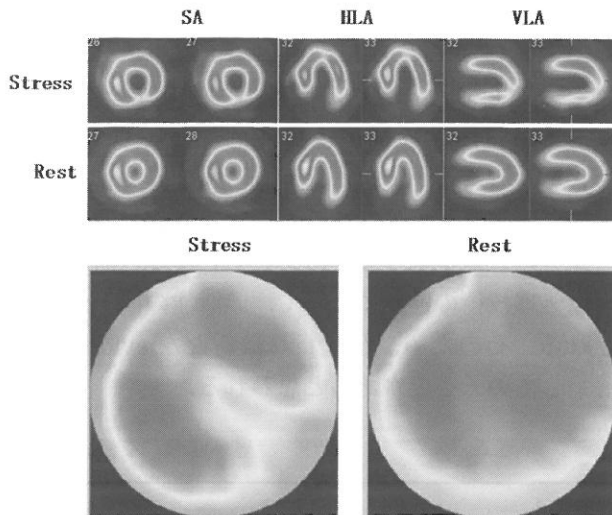


図8 虚血

負荷時像では前壁中隔に軽度、下側壁に中程度の集積低下があるが安静時にはみられない

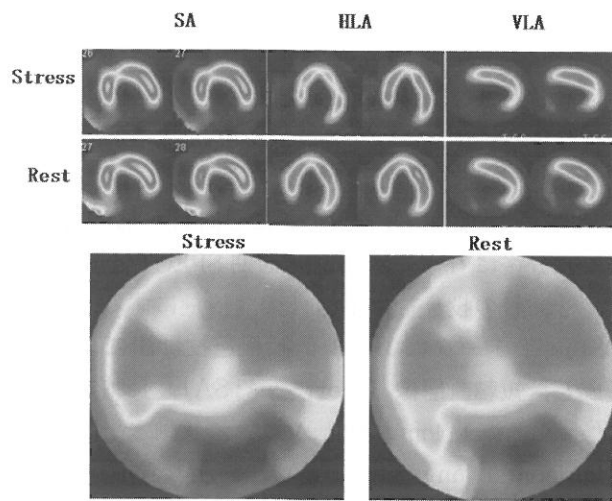


図9 梗塞

負荷時像、安静時像ともに心尖よりから基部までの下壁に高度の集積低下がある

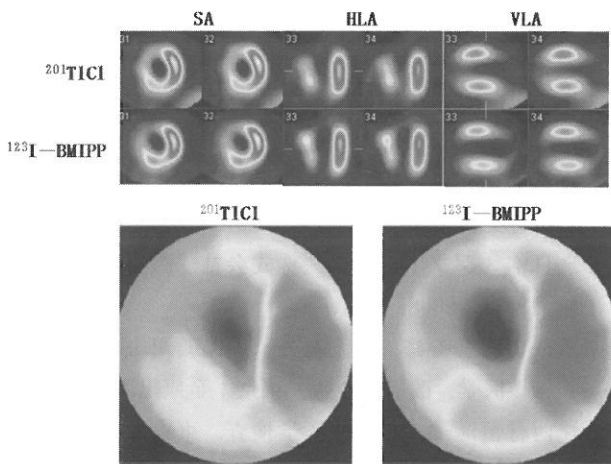


図10 PCI後ミスマッチ

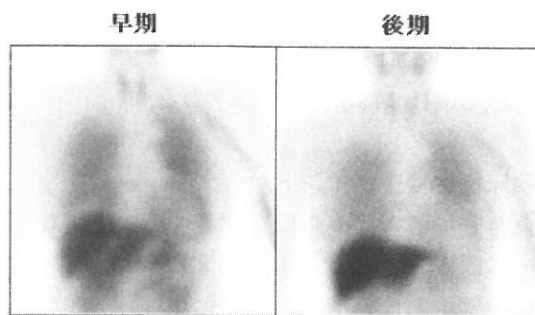
AMI (Seg 7-100%)にてPCI施行5日後、心尖部および前壁中隔に集積低下、ミスマッチあり

謝-血流ミスマッチ)。脂肪酸代謝の改善は血流改善よりも遅れるためにこのような現象がみられ、心筋 viability の評価に有用である。

【交感神経機能評価】

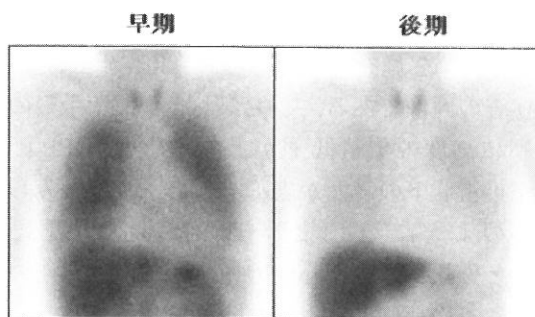
<sup>123</sup>I-MIBGは神経伝達物質であるノルエピネフリン (NE) 同様に交感神経末端に取り込まれる。虚血などにより交感神経機能が障害されると、集積低下や欠損像がみられる。

MIBGの心筋集積評価として心筋/縦隔摂取比 (heart/mediastinum ratio:H/M比)がある。これは縦隔をバックグラウンドとして心筋の集積の程度を評価する方法である。また心筋の早期像と後期



a. 正常

a. 早期像での心筋集積が後期像でも維持されている (H/M2.5)



b. 機能低下

b. 心筋の描出不良と洗い出し亢進 (H/M1.2, WR 51.8%)

図11 MIBG画像

像のカウントから洗い出し率 (washout rate: WR) が求められる。心不全患者ではH/M比の低下とWRの亢進がみられる。

## 2. 検査方法

### 【<sup>99m</sup>Tc-標識製剤負荷心筋血流検査】

運動負荷または薬剤負荷を行い、<sup>99m</sup>Tc 標識製剤を投与する。アーチファクトの原因になる肝・胆道系集積の消失を待ち、投与40分後より心電図同期 SPECT を撮像する。撮像後に2回目の投与を行い、40分後にもう一度心電図同期 SPECT を撮像する。2回目の投与量は1回目の3倍量にする。

SPECT データはフィルタ補正逆投影法により再構成し、短軸断層像 (short axis: SA), 長軸垂直断層像 (vertical long axis: VLA), 長軸水平断層像 (horizontal long axis: HLA), 極座標表示 (Bull's eye) を作成する。心電図同期データは心機能計測ソフトを用いて左室駆出率等を求める。

### 【<sup>201</sup>TlCl, <sup>123</sup>I-BMIPP 血流, 脂肪酸同時収集検査】

<sup>201</sup>TlCl, <sup>123</sup>I-BMIPP 投与30分後より SPECT を撮像し, SA, VLA, HLA, Bull's eye を作成する。

### 【<sup>123</sup>I-MIBG 交感神経機能検査】

<sup>123</sup>I-MIBG 投与15分後と3時間後に正面プラナー像を撮像し, H/M 比, WR を求める。

## 3. 臨床例と検査ポイント

負荷時安静時の血流画像を比較することで梗塞, 虚血の診断が容易にできる。図8に示した症例は負荷時に前壁中隔に軽度, 下側壁に中等度の集積低下があるが, 安静時はみられず虚血が疑われる。一方図9のように梗塞部位では負荷時安静時とも欠損像が認められる。

図10は急性心筋梗塞 (AMI) 発症後, 冠動脈形成術 (PCI) を施行した患者の<sup>201</sup>TlCl, <sup>123</sup>I-BMIPP 同時検査の画像である。心尖部および前壁中隔の広い範囲に高度の集積低下があり, <sup>123</sup>I-BMIPP 画像の方が集積低下の範囲が広く, ミスマッチがみられる。このように<sup>201</sup>TlCl と<sup>123</sup>I-BMIPP の画像を比較することで救済された心筋の同定ができ, PCI の効果判定や予後評価に有用である。

<sup>123</sup>I-MIBG は正常心筋以外に肺や肝臓にも集積し, 肺の洗い出しは早い。正常心筋では早期像から良好な集積があり後期像でも集積は維持される。異常所見としては早期, 後期像での高度な心筋集積の低下や WR の亢進がある (図11)。

## ● おわりに

X 線-CT に代表される画像を形態画像と呼ぶのに対し, 核医学の画像は機能画像と呼ばれ, 「働き」をみることが出来る。機能情報を得るには核医学検査が必要不可欠である。近年, 機能画像と形態画像を融合可能にする SPECT-CT 装置の開発や, 画像処理技術の進歩によって, 診断能の向上が期待される。そのため, われわれは新たな evidence を構築していく必要があると思われる。

### 【文献】

- 1) アイソトープ手帳, 10版, 東京: 日本アイソトープ協会 (発売 丸善); 2002.
- 2) 利波紀久, 中島憲一. アイソトープ診療ハンドブック. 東京: エルゼビア・ジャパン; 2006.
- 3) 高橋正治編. 図解診療放射線技術実践ガイド. 東京: 文光堂; 2002.
- 4) 小野 慈. 骨シンチによる骨転移診断. 東京: 南江堂; 2002.
- 5) 富士フィルム RI ファーマ株式会社. 放射性医薬品添付文書集; 2008.
- 6) 日本メジフィジックス株式会社. 医用医薬品添付文書集; 2008.
- 7) 久田欣一監修, 利波紀久, 久保敦司編著. 最新臨床核医学, 改訂第3版, 東京: 金原出版; 1999.
- 8) 西村恒彦編. 心臓核医学検査. 東京: メジカルビュー社; 2005.
- 9) 大西英雄, 松本政典, 増田一孝. 核医学検査技術学. 改訂2版, 東京: オーム社; 2008.
- 10) 渡辺克司. 放射性同位元素検査技術, 第5版, 東京: 南山堂; 2000.