

心臓画像診断の進歩：MRIを中心に

石田 七香*

はじめに

心臓領域のMRIは最近急速な進歩を遂げている。遅延造影MRIは心筋梗塞患者のバイアビリティー診断、虚血性心疾患患者のリスク層別化、心不全の病態把握、心筋症の診断に有用である。負荷心筋パーフュージョンMRIは負荷心筋SPECTと同等以上の虚血診断能を有し、虚血性心疾患患者の予後予測にも有用性が示されている。また、whole heart coronary MRAを用いると、放射線被曝なく冠動脈狭窄の評価を行うことができる。本稿では、心臓MRIと冠動脈MRAの進歩について解説する。

冠動脈MRAの進歩

冠動脈MRAは造影剤投与が不要で放射線被曝を伴わず、冠動脈壁に高度石灰化があっても狭窄診断が妨げられないなどの利点を持つ。従来の5チャンネル心臓コイルによるwhole heart 3D coronary MRAの診断能は16列マルチスライスCTとほぼ同等と報告されている。しかし、冠動脈MRAの三次元画像データ収集速度は64列マルチスライスCTの数十分の一と遅く、高解像の冠動脈MRAを呼吸停止時間内に撮影することは困難であるため、心電図同期と呼吸同期を併用した呼吸同期MRAが用いられており、数年前からwhole heart coronary MRAと呼ばれる方法が広く用いられるようになった。131症例を対象とした検討では、whole heart coronary MRAの検査成功率は86%、冠動脈狭窄検出感度は82%、特異度は90%、正診率は87%となっている¹⁾。冠動脈MRAは、冠動脈高度石灰化症例、腎不全症例、放射線被曝による発癌リスクが高い若年者における川崎病の冠動脈

瘤や冠動脈奇形の診断に適している。

従来の冠動脈MRAは、撮影時間が10分以上と長く、呼吸パターンが不規則な症例では呼吸同期検査が成功しない場合があるなどの問題があった。心臓用の32チャンネルコイルを用いると、従来の心臓用5チャンネルコイルと比較して撮影時間は1/2～1/3に短縮され、それに伴って呼吸同期検査の成功率が向上し、より鮮明な冠動脈像が得られている(図1)。今後32チャンネル心臓コイルが製品として普及すれば、冠動脈MRAのルーチン利用は大幅に拡大すると思われる。

また、3テスラMR装置によるwhole heart coronary MRAでは、1.5テスラ装置と比較してS/N比が向上し、高い空間解像度の冠動脈MRAを得ることができる²⁾。3テスラwhole heart coronary MRAでは、造影剤を使用する必要があるが、1.5テスラのwhole heart coronary MRAでは画質が不十分となることの多い左冠動脈回旋枝や冠動脈の遠位部や分枝などの径の細い血管も明瞭に描出される。

負荷心筋パーフュージョンMRIによる心筋虚血評価

狭心症患者における冠動脈狭窄に対するPCIの目的は、狭窄によって生じる心筋虚血を解消することにあるが、冠動脈造影や冠動脈CTによる形態的な狭窄度は血流に対する機能的な狭窄度とは必ずしも一致しない。PCIを行って予後改善を得るためには、心筋虚血の有無と虚血領域の範囲を診断することが重要である³⁾。

負荷心筋パーフュージョンMRIは、ジピリダモールやATPによる薬物負荷中にガドリニウム造影剤をボラス静注し、造影剤の心筋ファーストパスの動態から冠動脈狭窄による心筋血流予備能低下を描出する診断法である。2006年にJACCに掲

*三重大学医学部附属病院画像診断科

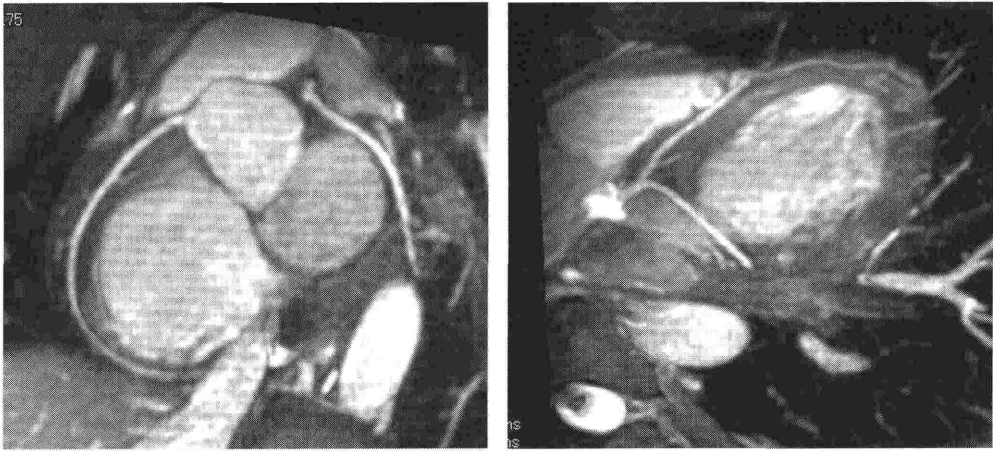


図1 心臓用 32 チャンネルコイルを用いた whole heart coronary MRA 撮像時間数分で、冠動脈が鮮明に描出されている。

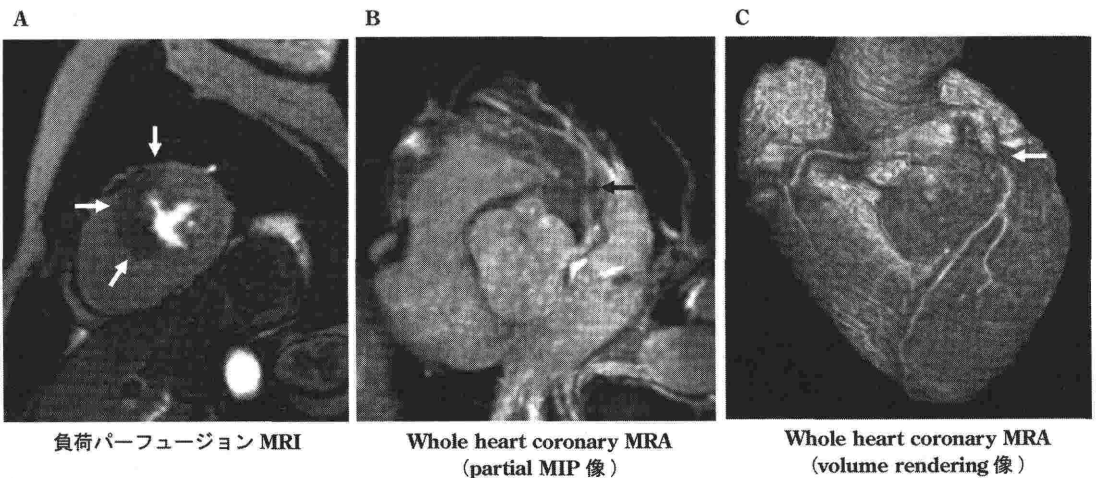


図2 左冠動脈前下行枝 (LAD) に 90% 狭窄を有する狭心症例の (A) 負荷パーフュージョン MRI, (B) Whole heart coronary MRA の partial MIP 像, および (C) volume rendering 像

(A) ボーラス投与した MR 造影剤が心筋を通過する際に、前壁中隔に明瞭な血流低下による低信号を認める。(B) (C) LAD 近位部に高度狭窄を認める。心臓 MRI を用いると、一回の検査で冠動脈狭窄と心筋虚血の情報が得られる。

載された「妥当性基準」によると、負荷パーフュージョン MRI は負荷心電図にて虚血の有無がはっきりしない場合、また冠動脈造影や冠動脈 CT において形態的狭窄が認められた患者における虚血の有無の判定に有用性が高い(図2)⁴⁾。負荷心筋パーフュージョン MRI は空間分解能が高いため、従来 SPECT で診断困難であった心内膜下虚血や冠動脈多枝病変におけるびまん性内膜下虚血も明瞭に描出される。当施設では約 5 年前に、負荷心筋パーフュージョン MRI が負荷心筋 SPECT よりも優れた冠動脈有意狭窄病変診断能を示し、多枝病変

の診断に優れていることを報告した(図3)⁵⁾が、最近報告されたヨーロッパ中心の多施設共同研究において、同様の結果が示されている⁶⁾。

最近では、安静時・負荷時心筋パーフュージョン MRI を定量的に解析して、局所心筋血流の絶対値 (ml/min/g) の分布を解析表示できるソフトウェアが開発され、冠動脈狭窄による心筋虚血の有無と治療効果を正確かつ客観的に評価できるだけでなく、SPECT では診断困難な冠動脈のびまん性動脈硬化や心筋微小循環障害の診断も可能となる。

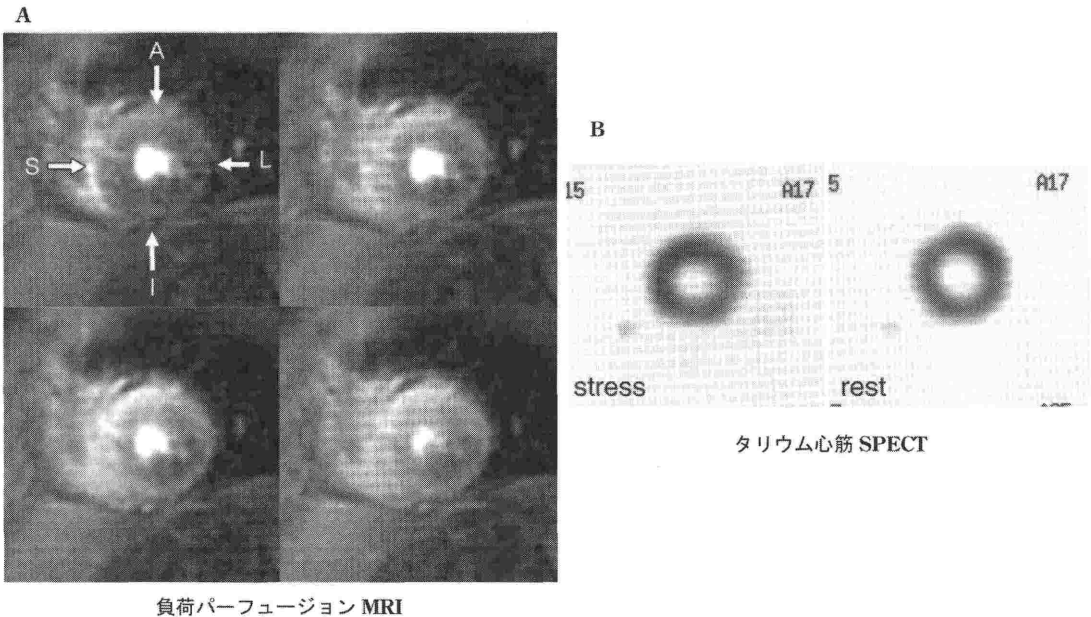


図3 冠動脈三枝病変症例の(A)負荷パーフュージョンMRI, (B)負荷および安静時タリウム心筋SPECT
 (A)ボラス投与したMR造影剤が心筋を通過する際に, 左室内膜側優位に全周性に虚血を認める.
 (B)タリウム心筋SPECTでは虚血を指摘できない。(文献5より抜粋)

遅延造影MRIによる心筋梗塞や線維化の診断

遅延造影MRIは現在最も正確な心筋梗塞の画像診断法である。遅延造影MRIの特長は、造影領域が急性期から慢性期に至るまで病理学的梗塞領域とよく一致し、空間分解能が高いため核医学では評価できなかった右室梗塞⁷⁾や内膜下梗塞⁸⁾も明瞭に診断できることである。遅延造影MRIの有用性は、心筋梗塞患者の心筋バイアビリティ評価の領域で確立されており、慢性期心筋梗塞の場合では、壊死心筋が左室壁厚の50%を超えたり、生存心筋厚が4mm以下になると、血行再建術を行っても局所心筋収縮機能の改善を期待できない^{9,10)}。また、Lundらは、急性心筋梗塞患者を対象とした検討で、遅延造影MRIにて梗塞領域が左室心筋の24%以上に及ぶ場合、将来的に左室形態が維持できず、リモデリングの指標となると報告している¹¹⁾。

また、遅延造影MRIは心不全の病態把握にも役立つ。心不全症例で、内膜下の遅延造影がみられる場合には虚血性心筋症と診断できる(図4)。一方、遅延造影のない場合か、心筋中層にみられる場合(mid-wall fibrosis, 図5)には、拡張型心筋症が疑われる¹²⁾。さらに、mid-wall fibrosisを伴う拡張型心

筋症は、遅延造影のない拡張型心筋症と比較して予後不良であることが報告されており、遅延造影MRIは拡張型心筋症の予後予測にも有用性が示されている¹³⁾。

さらに、肥大型心筋症(図6)¹⁴⁾やサルコイドーシス(図7)¹⁵⁾、アミロイドーシス(図8)¹⁶⁾などの心筋疾患では、特徴的な遅延造影の分布を呈し、診断に有用である。

急性心筋梗塞患者における心臓MRIの有用性

急性心筋梗塞患者では多くの場合冠動脈ステントが留置されているが、冠動脈ステント挿入直後から3テスラMR検査を行っても安全性に問題ないとAHAのガイドラインも発表されている¹⁷⁾。

心筋梗塞急性期に閉塞冠動脈に対してPCIが実施された場合、冠動脈閉塞は回復しても心筋への血流回復が十分に得られない場合がある(no reflow phenomenon)。急性心筋梗塞後に心筋組織の毛細血管が破綻して心筋組織への血流が失われた状態はmicrovascular obstruction(MO)と呼ばれる。MOの領域は、安静時心筋パーフュージョンMRIでは欠損像として、遅延造影MRIでは梗塞心筋の中心部の造影不良の低信号の領域として認められる(図



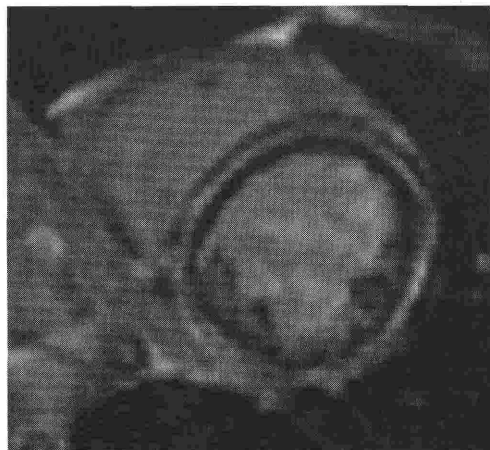
遅延造影 MRI 左室短軸像



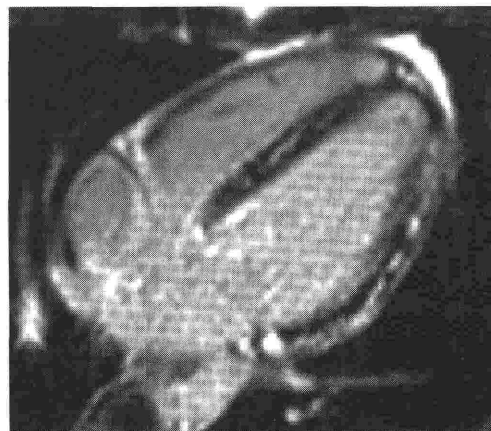
遅延造影 MRI 四腔断像

図4 心不全症例における遅延造影 MRI

左室内膜側優位に遅延造影を認めることから、虚血性心筋症が疑われる。



遅延造影 MRI 左室短軸像



遅延造影 MRI 四腔断像

図5 心不全症例における遅延造影 MRI

左室心筋中層に遅延造影を認めることから、線維化を伴う拡張型心筋症が疑われ、予後不良が示唆される。

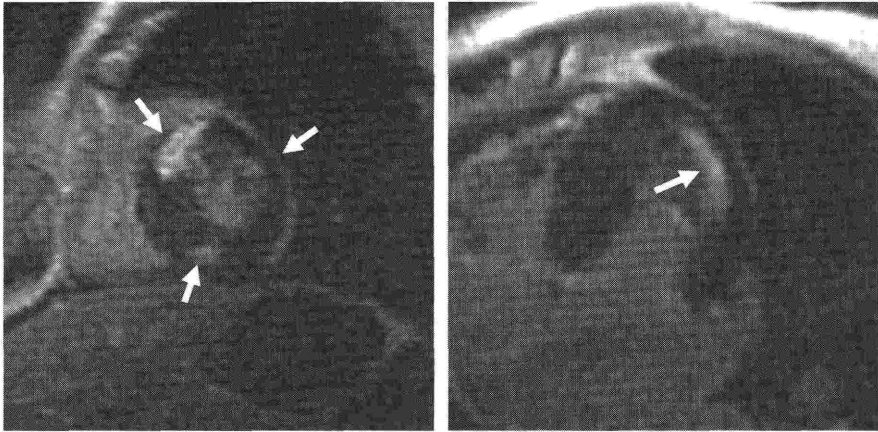
9). 貫壁性梗塞に MO が認められた場合、その領域の機能的予後は不良である¹⁸⁾。

また、発症後 4~6 週間までの急性心筋梗塞の T2 強調画像では、心筋浮腫を反映して梗塞領域より広範囲に高信号を認める。急性心筋梗塞の MRI 診断では、T2 強調画像・遅延造影 MRI・心筋パーフュージョン MRI を組み合わせて評価することにより、従来の画像診断では評価困難であった stunned myocardium・内膜下梗塞・貫壁性梗塞・MO といった心筋組織性状を明瞭に区別して評価でき、機能的予後を的確に予測できる。

心臓 MRI による予後評価

最近、予後評価における心臓 MRI の有用性に関する報告が多くの施設から行われている。遅延造影 MRI の有用性に関しては、Kwong らは臨床的に心筋梗塞と診断されていない虚血性心疾患疑い症例に遅延造影 MRI を行って予後を追跡したところ、遅延造影 MRI における梗塞の有無は将来の心臓死や重大な心事故の発生と密接な相関を有し、患者の予後予測とリスク層別化に役立つと報告している¹⁹⁾。

負荷心筋パーフュージョン MRI に関しても、胸

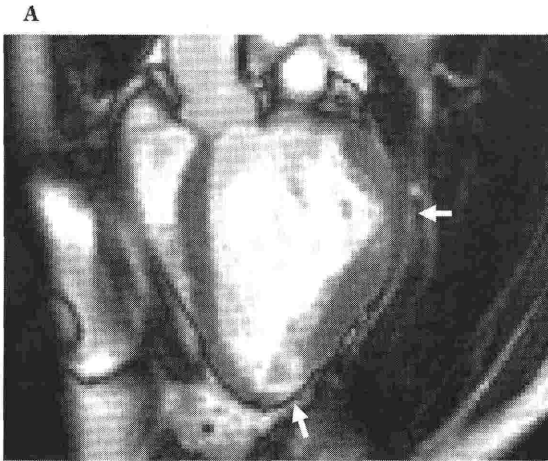


遅延造影 MRI 左室短軸像

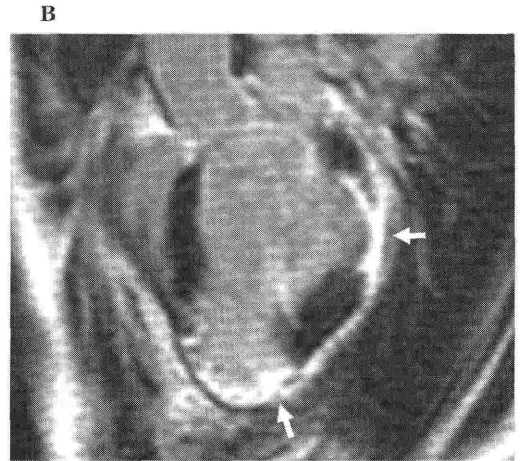
遅延造影 MRI 四腔断像

図6 肥大型心筋症患者における遅延造影 MRI

右室と心室中隔の接合部や前側壁の心筋中層に遅延造影を認め(矢印), 心筋線維化が疑われる.



シネ MRI 三腔長軸像



遅延造影 MRI 三腔長軸像

図7 サルコイドーシス患者における(A)シネ MRI および(B)遅延造影 MRI

壁菲薄化した心尖部と側壁に遅延造影を認め(矢印), 線維化や壊死などの心筋障害を反映していると思われる.

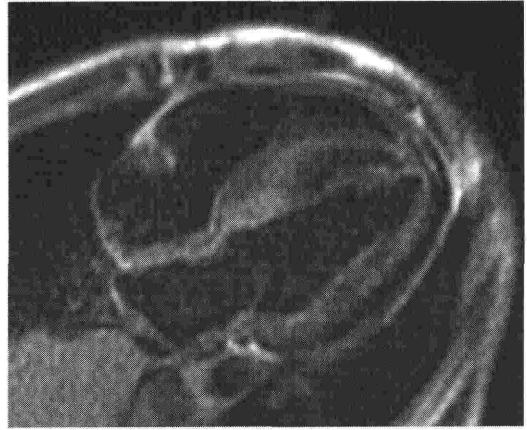
痛にて救急外来を受診した患者や²⁰⁾や、虚血性心疾患疑い症例²¹⁾の予後予測における有用性が報告されており、負荷検査において虚血が認められなければ予後は良好と判断できる。Jahnke は、負荷検査にて虚血の見られる症例では主要心事故発生率が高く、一方虚血を認めない症例の3年生存率は99%であったと述べている²¹⁾。また、Bodiらは胸痛のある患者、虚血性心疾患患者、および虚血性心疾患疑い患者を対象としてジピリダモール負荷心臓検査を行い、壁運動異常、心筋血流異常、遅延造影の有無、それぞれが予後に関連する因子であると報告している²²⁾。

おわりに

心臓 MRI は冠動脈 MRA による冠動脈狭窄の診断、負荷パーフュージョン MRI による心筋虚血の診断、遅延造影 MRI による心筋梗塞と線維化の診断等、心臓の機能と形態を総合的に評価できる。また、空間分解能が高く、内膜下虚血や内膜下梗塞を診断できることも大きな特徴であり、最近の多施設共同研究では、特に多枝病変において負荷心筋パーフュージョン MRI が負荷心筋 SPECT と同等以上の虚血診断能を有することが示されている。さらに予後評価における心臓 MRI の有用性が



遅延造影 MRI 左室短軸像



遅延造影 MRI 四腔断像

図8 アミロイドーシス患者における遅延造影 MRI

肥厚した左室や右室の心内膜下に異常造影領域が認められ、心房中隔にも遅延造影が疑われる。広汎な心内膜下の遅延造影はアミロイド沈着による間質拡大を反映しており、アミロイドーシスに特徴的である。

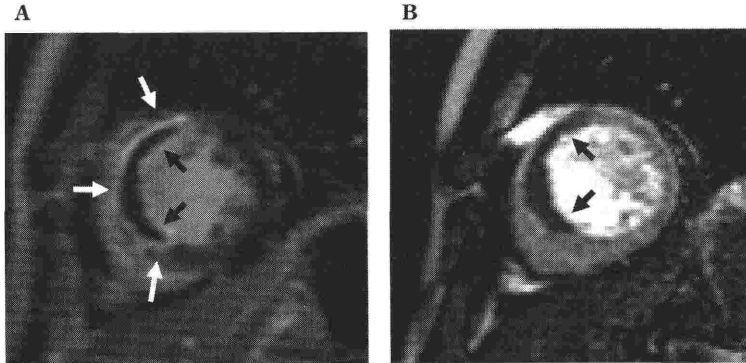


図9 PCI 後に no reflow 現象が認められた症例の発症 6 日目の (A) 遅延造影 MRI, (B) 安静時パーフュージョン MRI

(A) 前壁中隔の貫壁性梗塞の周辺部には遅延造影が認められるが(白矢印)、梗塞中央部では microvascular obstruction のため造影剤が到達できず遅延造影が認められない(黒矢印)。

(B) microvascular obstruction の領域は、安静時パーフュージョン MRI にて造影欠損域としてみられる(黒矢印)。

虚血性心疾患や心筋症等の幅広い分野において報告されている。心臓 MRI が循環器疾患の診療に広く利用され、予後改善に貢献できるよう、期待している。

文 献

- 1) Sakuma H, Ichikawa Y, Chino S, et al: Detection of coronary artery stenosis with whole-heart coronary magnetic resonance angiography. J Am Coll Cardiol 2006; 48: 1946-50.
- 2) Gharib AM, Ho VB, Rosing DR, et al: Coronary artery anomalies and variants: technical feasibility of assessment with coronary MR angiography at 3 T. Radiology 2008; 247: 220-7.
- 3) Hachamovitch R, Have SW, Friedman JD, et al: Comparison of the short-term survival benefit associated with revascularization compared with medical therapy in patients with no prior coronary artery disease undergoing stress myocardial perfusion single photon emission computed tomography. Circulation 2003; 107: 2900-7.
- 4) ACCF/ACR/SCCT/SCMR/ASNC/NASCI/SCAI/SIR 2006 appropriateness criteria for cardiac computed tomography and cardiac magnetic resonance imaging: a report of the American College of Cardiology Foundation Quality Strategic Directions Committee Appropriateness Criteria Working Group, American College of Radiology, Society of Cardiovascular Computed Tomography, Society for Cardiovascular Magnetic Resonance, American

- Society of Nuclear Cardiology, North American Society for Cardiac Imaging, Society for Cardiovascular Angiography and Interventions, and Society of Interventional Radiology. *J Am Coll Cardiol* 2006; 48: 1475-97.
- 5) Ishida N, Sakuma H, Motoyasu M, et al: Noninfarcted myocardium: correlation between dynamic first-pass contrast-enhanced myocardial MR imaging and quantitative coronary angiography. *Radiology* 2003; 229: 209-16.
 - 6) Schwitter J, Wacker CM, van Rossum AC, et al: MR-IMPACT: comparison of perfusion-cardiac magnetic resonance with single-photon emission computed tomography for the detection of coronary artery disease in a multicentre, multivendor, randomized trial. *Eur Heart J* 2008; 29: 480-9.
 - 7) Larose E, Ganz P, Reynolds HG, et al: Right ventricular dysfunction assessed by cardiovascular magnetic resonance imaging predicts poor prognosis late after myocardial infarction. *J Am Coll Cardiol* 2007; 49: 855-62.
 - 8) Wagner A, Mahrholdt H, Holly TA, et al: Contrast-enhanced MRI and routine single photon emission computed tomography (SPECT) perfusion imaging for detecting of subendocardial myocardial infarcts: an imaging study. *Lancet* 2003; 361: 374-9.
 - 9) Kim RJ, Fieno DS, Parrish TB, et al: Relationship of MRI delayed contrast enhancement to irreversible injury, infarct age, and contractile function. *Circulation* 1999; 100: 1992-2002.
 - 10) Ichikawa Y, Sakuma H, Suzawa N, et al: Late gadolinium enhanced MR imaging in acute and chronic myocardial infarction: Improved prediction of regional myocardial contraction in the chronic state by measuring thickness of non-enhanced myocardium. *J Am Coll Cardiol* 2005; 45: 901-9.
 - 11) Lund GK, Stork A, Muellerleile K, et al: Prediction of left ventricular remodeling and analysis of infarct resorption in patients with reperfusion myocardial infarcts by using contrast-enhanced MR imaging. *Radiology* 2007; 245: 95-102.
 - 12) McCrohon JA, Moon JC, Prasad SK: Differentiation of heart failure related to dilated cardiomyopathy and coronary artery disease using gadolinium-enhanced cardiovascular magnetic resonance. *Circulation* 2003; 108: 54-9.
 - 13) Assomull RG, Prasad SK, Lyne J, et al: Cardiovascular magnetic resonance, fibrosis, and prognosis in dilated cardiomyopathy. *J Am Coll Cardiol* 2006; 48: 1977-85.
 - 14) Moon JC, Reed E, Sheppard MN, et al: The histologic basis of late gadolinium enhancement cardiovascular magnetic resonance in hypertrophic cardiomyopathy. *J Am Coll Cardiol* 2004; 43: 2260-4.
 - 15) Serra JJ, Monte GU, Mello ES, et al: Images in cardiovascular medicine. Cardiac sarcoidosis evaluated by delayed-enhanced magnetic resonance imaging. *Circulation* 2003; 107: e188-9.
 - 16) Maceira AM, et al: Cardiovascular magnetic resonance in cardiac amyloidosis. *Circulation* 2005; 111: 186-93.
 - 17) Levine GN, Gomes AS, Arai AE, et al: Safety of magnetic resonance imaging in patients with cardiovascular devices: an American Heart Association scientific statement from the Committee on Diagnostic and Interventional Cardiac Catheterization, Council on Clinical Cardiology, and the Council on Cardiovascular Radiology and Intervention: endorsed by the American College of Cardiology Foundation, the North American Society for Cardiac Imaging, and the Society for Cardiovascular Magnetic Resonance. *Circulation* 2007; 116: 2878-91.
 - 18) Wu KC, Lima JA: Noninvasive imaging of myocardial viability. Current techniques and future developments. *Circ Res* 2003; 93: 1146-58.
 - 19) Kwong RY, Chan AK, Brown KA, et al: Impact of unrecognized myocardial scar detected by cardiac magnetic resonance imaging on event-free survival in patients presenting with signs or symptoms of coronary artery disease. *Circulation* 2006; 113: 2733-43.
 - 20) Ingkanisorn WP, Kwong RY, Bohme NS, et al: Prognosis of negative adenosine stress magnetic resonance in patients presenting to an emergency department with chest pain. *J Am Coll Cardiol* 2006; 47: 1427-32.
 - 21) Jahnke C, Nagel E, Gebker R, et al: Prognostic value of cardiac magnetic resonance stress tests: adenosine stress perfusion and dobutamine stress wall motion imaging. *Circulation* 2007; 115: 1769-76.
 - 22) Bodi V, Sanchis J, Lopez-Lereu MP, et al: Prognostic value of dipyridamole stress cardiovascular magnetic resonance imaging in patients with known or suspected coronary artery disease. *J Am Coll Cardiol* 2007; 50: 1174-9.