

SCMR による心臓 MRI 検査 (CMR) 標準化プロトコール

2013 update 2013 年 10 月

翻訳 石田正樹 監修 佐久間 肇

Christopher Kramer, MD, Jorg Barkhausen, MD, Scott Flamm, MD, Raymond Kim, MD, Eike Nagel, MD

背景

このプロトコールは、2008 年に Society for Cardiovascular Magnetic Resonance (SCMR)により作成された心臓 MRI 検査 (CMR) 標準化プロトコール¹の改訂版である。前回の CMR 標準化プロトコールが発表されてから、SCMR タスクフォースからレポート²、画像解析³、先天性心疾患⁴に関する文書が発表されており、今回の改定では、これらに関連した記載は割愛されている。今回、CMR 一般的技術のセクションは拡大されている。また、組織性状診断のプロトコールは多くの技術が発展途上であるためオプションとして扱われている。今後も CMR の進歩に伴って定期的にプロトコールの更新が行われる可能性がある。

一般的技術

磁場強度

1. CMR は異なる磁場強度で実施可能である。現在、大多数の検査では 1.5T 装置が使用されている。
2. 3T で CMR を行う場合、アーチファクトをさけるためにはシミングを注意深く行い RF パルスを調節することが必要である。
3. 3T では信号雑音比 (SNR) が向上するため、心筋パーフェュージョン MRI に有利である。さらに、3T では、タギングおよび 4D フローにも有利である可能性がある。
4. SSFP 法は、1.5T でしばしばシネ MRI に使用される方法であるが、3T ではダークバンディング・アーチファクト、フロー・アーチファクト、比吸収率 (SAR) 制限によるフリップ角選択の制限などの課題がある。
5. 1.5T で安全とされているデバイスは 3T で必ずしも安全とは言えない。高磁場 MRI での安全性についてはデバイスの個別情報を確認する必要がある。

薬剤負荷

1. ドブタミン：最大投与量 40 μ g/kg/min
2. アトロピン：0.25mg ずつ投与 (最大投与量 2mg)

3. アデノシン：140 μ g/kg/min（2-3分経過して心拍数が10bpm以上増加しない場合、または血圧が10mmHg以上低下しない場合には、施設内の基準に従って210 μ g/kg/minまで増量してもよい）
4. リガデノソン：0.4mg ボーラス投与

禁忌

ドブタミン

- 高度の高血圧症（ $\geq 220/120$ mmHg）
- 不安定狭心症
- 高度の大動脈弁狭窄症（大動脈弁最大圧格差 > 50 mmHg または大動脈弁口面積 < 1 cm²）
- コントロール不良の心房細動などの不整脈
- 閉塞性肥大型心筋症
- 心筋炎、心内膜炎、心膜炎
- コントロール不良のうっ血性心不全

アトロピン

- 閉塞隅角緑内障
- 重症筋無力症
- 閉塞性尿路疾患
- 閉塞性腸疾患

アデノシン、リガデノソン

- 2度・3度房室ブロックまたは洞機能不全
- 低血圧（ < 90 mmHg）
- 洞性徐脈（HR < 45 bpm）
- 薬剤吸入を要する活動性気管支喘息・気管支痙攣
- アデノシン、リガデノソンに対する過敏症の既往
- （副作用の頻度はアデノシンよりリガデノソンで少ないが半減期はアデノシンよりリガデノソンで長い）

患者準備

1. 負荷検査についての説明と同意を得る。
2. 検査の少なくとも12-24時間前から負荷の効果を抑制する可能性のある薬剤の服用や飲食を避ける。ドブタミン負荷の場合： β 遮断薬とニトロール。アデノシン、リガデノソン負荷の場合：カフェイン（コーヒー、紅茶、カフェインを含む飲料・食品；チョコレート、カフェインを含む薬など）、テオフィリン、ジピリダモール。

注）カフェインやニコチンの影響はアデノシンやリガデノソンの投与量を増加することで克服できることを支持するデータの蓄積が進んでいる。

3. 絶食は必須ではない。ただし、仰臥位で検査するため、悪心や嘔吐など負荷薬剤の副作用が問題となる可能性があり、状況に応じて絶食を考慮する。
4. 造影剤注入用とアデノシン負荷用に、左右の腕にそれぞれ1本ずつ、計2本の静脈ルートを確認する。造影剤は肘正中静脈から注入する事が望ましい。血圧計のカフ圧によって造影剤や負荷薬剤の注入が影響されないように注意する。リガデノソンを使用する場合、静脈ルートは1本でよい。

副作用

高用量ドブタミン負荷では胸痛や動悸が生じる可能性がある。以下のような重篤な副作用の出現率は低い。

- 心筋梗塞
- 心室細動
- 持続性心室頻拍

アデノシンおよびリガデノソン負荷では、顔面紅潮、胸痛、動悸、息切れが生じる可能性がある。以下のような重篤な副作用の出現率は低い。

- 一過性房室ブロック
- 一過性低血圧
- 洞性頻脈
- 気管支痙攣

負荷検査を安全に行うための必要事項

1. モニター装置（血圧計、心電図モニター、自覚症状を知らせるアラーム）
2. MR装置から患者を迅速に避難させる準備と訓練
3. 実施施設ごとの緊急患者蘇生ポリシー
4. 除細動器
5. 救急薬品
 - a. 手元に準備するもの： β 遮断薬（エスモロールあるいはメトプロロール）、ニトログリセリン、アミノフィリン
 - b. 救急カート内に準備するもの：フルセットの救急薬品（エピネフリン、 β 遮断薬、アトロピン、気管支拡張薬、抗不整脈薬など）
6. ドブタミン負荷MRIでは画像再構成直後に壁運動をオンラインでその場で評価する。

ガドリニウム投与モジュール／安全性

表1 ガドリニウム造影剤と生食フラッシュの投与量と注入速度

	造影剤投与量 (mmol/kg)	注入速度	生食	注入速度
パーフュージョンMRI	0.05-0.1	3-7mL/s	30mL	3-7mL/s
遅延造影MRI	0.1-0.2		20mL	
MRA(頚動脈、腎動脈、大動脈)	0.1-0.2	2-3mL/s	20mL	2-3mL/s
タイムリゾルブドMRA	0.05	3-5mL/s	30mL	3-5mL/s
末梢動脈MRA	0.2	First10mL@1.5mL/s, rest@0.4-0.8mL/s	20mL	0.4-0.8mL/s

注記：

1. 投与造影剤容積や速度は撮像時間に依存する：上記は標準的な撮像時間の場合に推奨される値である。
2. 1モル型のMR造影剤（訳注：Gadovist、日本未発売）の場合には注入速度は異なる。一般論として、上記の注入速度の1/2を用いる。
3. 緩和能の高い造影剤（Multihance, gadobenate dimeglumine など）の場合、投与量は少なくてもよい。
4. 本文書を通じて、「ガドリニウム」とはガドリニウムキレートを意味する。

安全性について

1. ステージ4または5の慢性腎障害（eGFR <30mL/min/1.73m²）の患者へのガドリニウム造影剤の使用は回避されるべきである。特に維持透析患者、急性腎不全患者、慢性肝障害患者では腎性全身性線維症（NSF）の懸念がある。
2. ガドリニウム造影剤の投与量は十分な画質を得られる範囲で最少にする。
3. NSFのリスクはガドリニウムキレートの種類にも依存する。腎機能障害のある患者へのガドリニウム使用は、施設内や地域での基準や国際ガイドラインに従って選択する。
4. 維持透析患者において、他の診断方法がなくガドリニウム造影検査が行われた場合、施設内や地域での基準、国際ガイドラインに従い、ガドリニウム造影検査後に透析が行われるべきである。

左室の形態と機能評価モジュール

1. スカウト像—体軸横断、冠状断、矢状断

2. 胸部全体をカバーする体軸横断（スライス厚 8-10mm）－SSFP 法又は高速スピネエコー法を使用する。
3. 左室短軸像を得るためのスカウト像－長軸方向の運動と血液の流入が描出される必要があるためシングルショット MRI よりシネ MRI が望ましい。
 - a. 垂直長軸像：体軸横断上で僧帽弁の中心と心尖部を結ぶスライス
 - b. 水平長軸像：垂直長軸像上で僧帽弁の中心と心尖部を結ぶスライス
4. SSFP 法は SNR が高く、血液と心筋のコントラストが高いためシネ MRI で使用される。
 - a. 3T では SSFP シネ MRI 画像はアーチファクトにより画質が低下するため、GRE 法の使用が考慮される。
 - b. バンディング・アーチファクトを減少・移動する方法－シミング、TR の短縮、RF 周波数の調節（周波数スカウト法が役立つ可能性がある）
5. SSFP 左室短軸像シネ MRI：僧帽弁から心尖部までを含む。撮影範囲に左室心筋側がすべて含まれるように最も心基部側の左室短軸像断面を拡張末期長軸像上で決定（房室接合部の左室心筋を含むスライス）して撮影する。
 - a. スライス厚 6-8mm、ギャップ 2-4mm、全体で 10mm
 - b. シネ MRI 各時相間の時間分解能 <45msec
 - c. 可能ならパラレルイメージング使用
6. SSFP 長軸像シネ MRI
 - a. 四腔長軸像：垂直長軸像上で、僧房弁の中心、三尖弁の中心および心尖を通り、かつ、心基部左室短軸像上で右室自由壁の角を通る断面。
 - b. 垂直長軸像：すでに得られた撮影断面から設定。
 - c. 左室流出路（LVOT）長軸像：心尖と僧房弁の中央を通り、LVOT の中心と大動脈弁を含む断面。
 - d. オプション－上記以外の長軸像断面を追加撮影してもよい

右室の形態と機能評価モジュール

1. 右室短軸像は左室短軸像と同様の方法で撮影可能である。右室容積計測に短軸像を使用する場合は、最も心基部側の断面が右室心筋をすべて含むスライスで撮影することが重要で、収縮末期に少なくとも 1 スライスの心基部断面で適切な分量の右房容積を取り除く必要がある。
2. 右室容積計測は体軸横断像を用いる。
3. 長軸像：右室垂直長軸像（三尖弁流入部に平行断面）と右室流出路（RVOT）長軸像（肺動脈弁を通る矢状断像またはオブリーク矢状断像）

心筋パーフュージョンモジュール

1. 左室の形態と機能評価モジュールと同じスカウト像
2. GRE-EPI ハイブリッド法、GRE 法、SSFP 法のいずれかによるサチュレーション・リカバリ（SR）MRI
3. 左室短軸像（1 心拍で少なくとも 3 スライス）

- a. 虚血の評価のために一心拍毎に画像収集を行う必要がある。
- b. スライス厚：8mm
- c. 可能であればパラレルイメージング使用
- d. 面内空間分解能 <3mm
- e. 時間分解能 <100-125ms、できるだけ短く設定
- f. 造影剤 0.05-0.1mmol/kg (3-7ml/sec) + 生食 30ml (3-7ml/sec) フラッシュ
- g. 造影剤注入後早期（造影剤が心筋に到達する前）から呼吸停止開始
- h. 造影剤が左室心筋を通過するまで 40-50 心拍の間に画像収集

遅延造影モジュール

1. パルスシーケンス
 - a. 呼吸停止が十分可能な患者では、SNR が十分であれば、2D インバージョン・リカバリ (IR) GRE 法、2D IR SSFP 法、PSIR 法、あるいは 3D 法で撮像する。
 - b. 不整脈がある患者や呼吸停止が困難な患者では、シングルショット SSFP 法で撮像する。
2. 造影剤注入後、少なくとも 10 分待つ（ガドリニウム造影剤投与量は表 1 参照）。注記：造影剤投与量が少ない場合には、血液（訳注：及び心筋細胞外液）の造影剤濃度が低く、十分な病変描出能が得られないため、待ち時間を 10 分より短くしてもよい。拡張期静止時間に撮像する。
3. シネ MRI と同じ撮像断面（左室短軸像、左室長軸像）
4. シネ MRI と同じスライス厚
5. 面内空間分解能 <1.4-1.8mm
6. 心電図上の R-R 間隔内の収集時間は 200msec、ただし頻脈の際にはそれ以下とする。
7. 正常心筋の信号強度がゼロとなるようにインバージョン時間 (TI) を設定する。または PSIR 法を使用する。その場合、TI の設定は頻回に調節する必要はない
8. 通常 2 心拍に 1 回画像収集するが、徐脈の場合には 1 心拍毎に変更する。また、頻脈や不整脈の場合には 3 心拍毎に設定する。

アデノシン/リガデノソン負荷パーフュージョン MRI

1. 左室の形態と機能評価モジュールー負荷パーフュージョン MRI と安静時パーフュージョン MRI の間に実施してもよい。
2. アデノシン負荷パーフュージョン MRI (140µg/kg/min 投与を少なくとも 3 分、オプションで 210µg/kg/min まで増加) オプションーアデノシン注入開始はガントリ外（撮影テーブル上）で行ってもよい。
 - a. 心筋パーフュージョンモジュール
 - b. アデノシン負荷の終了 1 分前に造影剤を注入する。
 - c. 造影剤が左室心筋を通過するまでの 40-50 心拍の間画像収集してからアデノシン負荷を止める。

- d. 心電図モニタリングと血圧計測を、ベースライン時、アデノシン負荷中、負荷終了後少なくとも2分間に行う。
- 3. 代替法：リガデノソン負荷パーフュージョン MRI (0.4mg ボーラス投与)
 - a. 心筋パーフュージョンモジュール
 - b. リガデノソン投与後約2分後にガドリニウム造影剤を注入する。
 - c. 造影剤が左室心筋を通過するまでの40-50心拍の間画像収集する。
 - d. 心電図モニタリングと血圧計測を、ベースライン時とリガデノソン注入後少なくとも6分間(2分毎に)行う。
- 4. 安静時パーフュージョン MRI
 - a. 負荷パーフュージョン MRI の造影剤がウォッシュアウトされるまで10分程度待つ。待ち時間を利用して負荷パーフュージョン MRI の評価や MRI の追加撮像(長軸像など)、弁疾患評価等を実施するとよい。
 - b. 負荷時と同量の造影剤を用いて安静時パーフュージョン MRI を撮像する。(注記：リガデノソンを使用した場合10分経過後でも心筋血流はベースラインにはもどらない可能性がある)
 - c. 負荷パーフュージョン MRI にて異常所見が見られない場合には、安静時パーフュージョンを省略してもよい。遅延造影 MRI を行うために、造影剤を投与総量が0.1-0.2mmol/kg となるように追加投与する。
- 5. 遅延造影モジュール
 - a. 安静時パーフュージョン MRI 後、少なくとも5分待ってから撮像する。
- 6. オプションー心筋血流定量解析
 - a. 造影剤濃度と信号強度の非直線性を補正するためにデュアルボーラス法の実施を考慮する。この方法は標準化された方法で希釈したプレボーラスの注入が必要である。
 - b. デュアルコントラスト・シークエンスの実施を考慮する。この方法を使用すると、造影剤の希釈や追加投与なしに造影剤濃度と信号強度の非直線性を補正することができる。ただし、特定の MRI 装置やソフトウェアが必要になる。
 - c. 造影剤投与前にプロトン強調画像の追加撮影を考慮する。この方法は定量解析時のベースライン補正に使用できる。ただし、特定の MRI 装置やソフトウェアが必要になる。

ドブタミン負荷 MRI

- 1. 左室の形態と機能評価モジュール
- 2. ドブタミン負荷
 - a. ドブタミンを10 μ g/kg/min から開始し、3分間ごとに10 μ g/kg/min ずつ、目標心拍数 $[85\% \times (220 - \text{age})]$ に達するまで増量する。
 - b. 心拍数増加が不十分の場合、アトロピンを少量ずつ追加する(1.2 負荷薬剤の項参照)。
 - c. ドブタミン投与量を増加する毎にシネ MRI (左室短軸像3断面、左室長軸像3断面)を撮像する。
 - d. 心電図モニタリングと血圧計測を、各ステージで行う。

- e. シネ画像は必ずその場で確認する。
- f. 心拍数の変化に応じて **SSFP** シネ MRI の時間分解能の設定を適宜変更する。
- g. 新たな壁運動異常や重篤な副作用がおきた場合、目標心拍数に達した場合、検査を終了する。

血流計測モジュール

1. 通常 **CMR** プロトコールと組み合わせて行われる。すでに撮像されている画像を参照して撮像断面を決定する。対象血管が2方向の断面で描出されているか、**MRA** がスキャナー上で再構成可能であればベストである（追加の **SSFP** シネ MRI、造影 **MRA**、ブラックブラッド **T2** 強調 MRI などが役に立つ）。
2. シークエンス：撮像断面に垂直な方向に血流エンコードされた位相コントラスト・シネ **GRE** 法が最もよく使用される。
3. 最適な結果を得るためには；
 - a. 対象血管が中央に位置するように撮影断面を合わせる。
 - b. 予想される血流方向に対して撮像断面が垂直になるように2方向の参照断面から撮像断面を設定する。
 - c. 撮像断面をマグネットのアイソセンターに合わせる。
4. 撮影パラメータ：スライス厚 **5-8mm**；撮影面内の空間分解能は少なくとも血管径の **1/10** 以下にする。**Venc** は予想される流速に合わせる。スキャンごとに位相差画像を参照して折り返しがないか確認する。もし折り返しが見られた場合は、**Venc** を、折り返しが無いように調節して再撮像する。流速スカウト (**Velocity scout**) が使用できれば最適な **Venc** の選択が容易になる。
5. 撮像フレーム数は **20-30** 程度あれば臨床ルーチン撮影には十分である。呼吸停止ができる範囲内で多心拍にわたって **k** 空間の分割を行ってもよい。ナビゲータエコーを用いた自由呼吸撮影も可能で時間分解能、空間分解能を上げることができる。
6. **TE** は可能な限り短く設定する（特に狭窄部位を撮影する場合）。

組織性状診断モジュール

組織性状診断の領域は急速に進歩しており、使用できるパルスシークエンスはメーカー・装置間でかなり異なっている。この領域ではまだ標準化が行われていないため、以下に列記するモジュールは単なる一般的ガイドラインにすぎない。正常値は各施設あるいは同じメーカー・装置およびパルスシークエンスを使用している施設間において決定する必要がある。

1. **T2** 強調画像（オプション）
 - a. ブラックブラッド **T2** 強調 **STIR**
 - i. ピットフォールー血流低下領域の高信号、動きのアーチファクトによる信号低下
 - b. ブライトブラッド **T2** 強調シークエンス
 - i. **T2-prep** シングルショット **SSFP** 法
 - ii. **TSE-SSFP** ハイブリッドシークエンスも可。

- iii. ピットフォールー心内膜縁で高信号が不明瞭になる。
- c. T2 マッピング (オプション)
 - i. 異なる T2-prep time を用いた T2-prep シングルショット SSFP 法
 - ii. モーション補正を必要に応じて行う
- 2. T1 マッピング (オプション)
 - a. Look Locker imaging (MOLLI または SHMOLLI や同様の他の手法)
 - i. 造影前と造影剤ボラス投与後 (2-4 時点) の撮影
 - ii. 造影剤持続注入も可

T2*モジュール

1. サラセミア患者などで心臓への鉄沈着を評価するために行われる。画像はシネ MRI に対応したスライスで撮像する。T2*マッピングを、心筋症の造影検査プロトコールの一部として行われる場合、T2*マッピング用の撮像は造影剤投与前に行う。
2. パルスシークエンス；1回呼吸停止 GRE マルチエコー法 (2ms から 18ms まで 6-9 エコー時間) 撮影。各エコーの繰り返し間隔は 2ms、R 波からの遅延時間は 0ms を使用。オプションー高度の心筋鉄沈着がある患者では、各エコーの繰り返し間隔が短いほうが T2*値をより正確に計測できる (1ms から 12ms まで 6-9 エコー時間。各エコーの繰り返し間隔は 1ms)。
3. 1枚の左室中央レベル短軸画像を撮影する。
4. スライス厚 8-10mm；面内空間分解能 <1.6-3.0mm
5. (オプション) 心電図同期なしで上記と同様の撮像法を用い、肝中央レベルの体軸横断像を1スライス撮像し肝への鉄沈着を評価する。心電図同期しないことによりエコー間隔が短く設定でき多くのエコー数が得られる。

疾患別プロトコール

虚血性心疾患

急性心筋梗塞

1. 左室の形態と機能評価モジュール
2. オプションー組織性状診断モジュール
3. オプションー心筋パーフュージョンモジュール (安静時のみ)。すでに責任冠動脈病変に対して再灌流療法が施行されている場合は負荷心筋パーフュージョン MRI を検討。
4. 微小循環閉塞 (MO) を診断するため、造影剤注入後 1-3 分以内に再度心筋パーフュージョン MRI の撮像を繰り返すか、早期ガドリニウム造影 MRI を撮像する。
5. 遅延造影モジュール

陳旧性心筋梗塞と心筋バイアビリティー

1. 左室の形態と機能評価モジュール

2. オプションー組織性状診断モジュール
3. オプションー低用量ドブタミン負荷 MRI。ドブタミン 10 μ g/kg/min を 5-10 分間投与し、局所心筋壁厚増加率の改善から心筋収縮能予備能を評価する。
4. オプションーアデノシン負荷・安静時パーフュージョン MRI あるいは高用量ドブタミン負荷シネ MRI（詳細は負荷プロトコルを参照）を行い、虚血の有無を診断する。
5. 遅延造影モジュール

MR 血管造影

末梢 MRA

1. 四肢末梢血管用コイルあるいはコイルを組み合わせて用いる。静脈圧迫用カフが利用できる場合には、大腿部を拡張期血圧以下で圧迫するとよい。
2. 低空間分解能で体軸横断面の血管スカウト像をタイムオブフライト MRA か SSFP 法で撮像する。
3. ガドリニウムイメージング
 - a. オプション 1ー腹部大動脈遠位レベルで体軸横断にてテストスキャンを行う。ガドリニウム造影剤 2cc と生食フラッシュ 20cc を注入して、造影剤注入開始から造影剤濃度が最高となるまでの時間を決定する。
 - b. オプション 2ー自動トリガー法を用いて自動的に撮像開始する。
4. 腹部大動脈の中央部レベルから両足まで冠状断面におけるテーブル移動造影 MRA を撮像する。
 - a. サブトラクションを行うために造影前と造影剤注入中の 2 回、3D 画像収集を行う。
 - b. 静脈のコンタミネーションを減少させるためにガドリニウム造影剤注入速度を 2 段階に変化させて注入し、その後生食でフラッシュする。
 - c. スライス厚 1-1.5mm、面内空間分解能 0.8-1.5mm
 - d. スライス枚数は通常 60-100 枚程度ー対象となる血管に合わせて調節する。
 - e. 腹部・骨盤～大腿の比較的太い動脈 MRA の空間分解能は比較的粗くてもよいが、下肢血管 MRA の空間分解能は 1mm 以下が望ましい。腹部・骨盤～大腿の血管の撮像には通常 15-20 秒で完了するが、下肢 MRA の血管の撮像には高空間分解能を得るために 60-90 秒間かかる場合もある。エリプティカルセントリック k 空間データ収集法は下肢の撮像に有利である。可能であれば下肢血管にはタイムリゾルブド法を用いることが望ましい。
 - f. パラレル収集が望ましい。（マルチチャンネルコイルが必要）

代替法：2 回注入法

1. 1 倍量のガドリニウム造影剤を投与して下腿～足のタイムリゾルブド造影 MRA を行う。
2. 次に 1 倍量のガドリニウム造影剤を再度投与して腹部～大腿の造影 MRA を撮像する。

代替法：非造影 MRA

一般的には 2 種類の方法が使用されている（その他の方法も存在する）。

1. “Fresh Blood Imaging (FBI 法)” ; 心電図同期 3D 高速スピンエコー法を、一つは収縮期、もう一つは拡張期に同期させて 2 種類撮像する。拡張期画像から収縮期画像を差分して、動脈信号のみの画像データを得る。この方法は撮影容積が大きい場合や z 方向の範囲が大きい場合に適している。
 - a. スライス厚 2mm、面内空間分解能 0.6-0.8mm
 - b. スライス枚数は通常 40 枚—対象となる血管に合わせて調節する。
 - c. パラレル収集が望ましい。(マルチチャンネルコイルが必要)
2. 3D IR SSFP 法 ; IR パルスで背景信号を抑制し、適当な TI を用いることで、IR パルス照射範囲外から撮影範囲内に流入する動脈血の流入を描出可能とすることで高い動脈信号が得られる。この方法は撮影容積が小さい場合に適している。
 - a. 撮像ボリューム 340x300x70mm、空間分解能 1.3x1.3x1.4mm
 - b. パラレル収集が望ましい。(マルチチャンネルコイルが必要)

胸部大動脈 MRA

1. スカウト画像、3 方向
2. ハーフフーリエ・シングルショット高速 SE または SSFP 体軸横断像 (一回呼吸停止・胸部全体)
3. 大動脈全体をカバーする T1 強調高速 SE 体軸横断像 (壁内血腫や大動脈解離の診断)
4. 大動脈に平行な傍矢状断の SSFP シネ画像。オプションで 3 ポイント位置決めを使用。
5. 弁疾患のプロトコールで大動脈弁を評価する。
6. 造影タイミング
 - a. オプション 1—腹部大動脈遠位レベルで体軸横断にてテストスキャンを行う。ガドリニウム造影剤 2cc 続いて生食 20cc を注入して、造影剤注入開始から造影剤濃度が最高となるまでの時間を決定する。
 - b. オプション 2—自動トリガー法を用いて自動的に撮像開始する。
 - c. オプション 3—タイミングシーケンスを用いない高速多時相 3D 収集
7. 3D 造影 MRA (造影剤 0.1-0.2mmol/kg) (オプションで心電図同期)
 - a. 空間分解能は少なくとも 1-1.5mm
 - b. 可能であればパラレル収集
 - c. 造影後少なくとも 2 回撮像
8. オプション—大動脈炎の診断では T2 強調 GRE 法または造影後 T1 強調 GRE 法を使用した体軸横断像を撮影する。
9. オプション—非造影 MRA。3.2.1 (末梢血管 MRA) 参照。

冠動脈奇形の MRA

1. 左室の形態と機能評価モジュール—左室壁運動異常の評価目的
 - a. RCA の静止時間を正確に決定するために、高時間分解能 (1 フェーズ 20ms 以下) で四腔長軸像を追加撮像する。
2. ナビゲータエコー自由呼吸 3D MRA

- a. 主肺動脈近位レベルから右房中央部レベルまでの範囲（必要あれば心臓全体）の体軸横断像。スライス厚：1-1.5mm、面内空間分解能：約 1.0mm
 - b. スライス枚数：通常 50-80 程度。または、対象とする血管が含まれるように調節。
 - c. トリガーディレイと撮像ウィンドウを高時間分解能四腔長軸像から決定する。
 - d. パラレル収集が望ましい。
 - e. ナビゲータは右横隔膜上に設定する。
 - f. オプションで血管を目立たせるため造影剤を用いてもよい。
3. オプション
- a. 画質不良の場合、ナビゲータ法が使用できない場合、ナビゲータ法の信号不良の場合には呼吸停止にて撮像する。
 - b. T2-prep 法が有用かもしれない。

肺静脈の MRI 評価—アブレーション前後

1. 左室の形態と機能評価モジュール
2. 肺静脈と左房全体を含む冠状断の呼吸停止 3D 造影 MRA—呼吸停止が可能な範囲でできるだけ前方までカバーする。
 - a. オプション—オブリーク像にして肺静脈が中心にくるようにすればスラブ厚、呼吸停止時間を減らすことができるが、左心房が含まれる範囲は少なくなる。
 - b. オプション—心電図同期収集。不整脈がある場合収縮期に同期させて収集（トリガーディレイなし）。
 - c. 2-3 回の 3D ボリューム撮影。サブトラクション用に造影前に 1 回撮影し、造影剤の初回循環時に 1 回、オプションで造影後にもう 1 回撮影する。
 - d. ガドリニウム造影剤（0.1-0.2mmol/kg）を 2-3mL/s で注入
 - e. スライス厚：1-2mm、面内空間分解能：1-1.5mm
 - f. スライス枚数：通常 60-80 程度、対象とする血管領域が含まれるように調節。
 - g. 可能であればパラレル収集
3. オプション—それぞれの肺静脈について位相コントラスト MRI による血流解析を行う。

MR 冠静脈造影

1. ナビゲータエコー自由呼吸 3D IR MRA
 - a. 主肺動脈近位レベルから右房中央部レベルまでの範囲（必要あれば心臓全体）の体軸横断像。スライス厚：1-1.5mm、面内空間分解能：約 1.0mm
 - b. スライス枚数：通常 50-80 程度。または、対象とする血管が含まれるように調節。
 - c. トリガーディレイと撮像ウィンドウは収縮末期（=冠静脈径が最大となる時相）、あるいは拡張中期にあわせる。1 心拍あたりの収集時間は 60-90msec とする。
 - d. パラレル収集が望ましい。
 - e. 脂肪抑制を行う。
 - f. ナビゲータは右横隔膜上に設定する。

- g. T2-prep は off にし、IR を on にする（TI はあらかじめ TI-scout や Look-Locker を撮影して決定する）。
- h. オプションー血管を目立たせるため造影剤を用いてもよい。

その他

非虚血性左室心筋症（心筋炎を含む）

1. 左室の形態と機能評価モジュール
2. オプションー組織性状診断モジュール
3. オプションー心筋炎の評価の場合のみ以下の通り

早期ガドリニウム造影比ーガドリニウム造影の前後で T1 強調画像を撮影し、骨格筋信号の変化に対する心筋信号の変化の比を算出する。

4. 遅延造影モジュール
5. オプションーアデノシン負荷・安静時心筋パーフュージョン MRI または高容量ドブタミン負荷シネ MRI（方法や禁忌については負荷プロトコールを参照すること）を行い、心筋虚血の有無を評価する（虚血性心疾患が心筋症に併存する場合があるため）。

肥大型心筋症

1. 左室の形態と機能評価モジュール
2. 左室流出路に乱流の有無や僧房弁前尖・腱索の収縮期前方運動の有無を SSFP シネ MRI の三腔断面像で評価し、それら認められた場合、位相コントラスト・シネ MRI で血流速度を計測する。
3. オプションー組織性状診断モジュール
4. オプションー負荷心筋パーフュージョンモジュール
5. 遅延造影モジュール

不整脈源性右室心筋症(ARVC)

1. 左室の形態と機能評価モジュール ースライス厚：5-6mm
2. 右室流出路を含み右室全体をカバーする SSFP 体軸横断像またはオブリーク体軸横断像シネ MRI。三尖弁の流入部を含んだ右室垂直長軸像が推奨される。
3. オプション
 - a. 体軸横断又はオブリーク体軸横断ブラックブラッド MRI（Double IR T1 強調高速スピネコー）
 - b. 脂肪抑制像を用いて、同じスライス面の撮影をくり返す。
 - c. 遅延造影モジュール、同じスライス面で撮像。右室心筋の信号強度がゼロとなるように TI を調節する。

弁疾患

1.5T や 3T の CMR は人工弁の患者にも安全に施行できる。心拍出によって弁にかかる圧力は、磁場による力より何倍も強い。

1. 左室の形態と機能評価モジュール

- a. 水平長軸像にて僧帽弁と三尖弁の解剖や乱流を観察する。
- b. LVOT 長軸像にて僧帽弁と大動脈弁を観察する。
- c. 垂直長軸像にて僧帽弁を観察する。
- d. 冠状断像にて大動脈弁を観察する。
- e. 必要があれば右室長軸像や RVOT 長軸像を追加撮像する。

2. 個別事項

- a. 精査する弁の弁輪が面内に含まれるスライス断面で **SSFP** シネ MRI を撮影し、弁の形態を評価する。撮像断面の角度と高さが最適になるように注意する。
- b. 注記—もし大動脈弁狭窄症の弁口面積測定を行おうとするなら、**AS** ジェットのラインを横断するような断面で大動脈弁開口レベルからすぐ下流側までの連続あるいは部分的に重複した高空間分解能シネ画像のスタックを撮像することが望ましい。面積測定は弁開口部の断面、あるいはジェットの断面が明瞭に描出されている場合に最も妥当と思われる。ただし、ジェットは斜めになったり分割したりすることがあり必ずしも常にうまくいくとは限らない。
- c. **GRE** 法あるいは **GRE/EPI** ハイブリッド法を用いると感度よく逆流が検出できる（定性的評価のみ）。
- d. 僧房弁逆流や三尖弁逆流では、血液流入の方向に一致し、弁尖の接合ラインを横断するような、上交連から下交連までを含む範囲の **5mm** 厚のシネ画像の連続スタックが望ましい。撮影断面は、僧房弁の場合は **LVOT** 長軸像で、三尖弁の場合は体軸横断像になりうる。上記のシネ画像のスタックでは、弁尖のテザリングや逸脱、前後僧房弁尖間の逆流の評価が可能となる。
- e. 計測する血流速度に合わせて **Venc** を調節する（折り返しが生じない範囲で出来るだけ低い **Venc** を用いる）。
- f. 高速のジェット血流の計測には **TE** 値をできるだけ低く設定する。

心膜疾患

1. 左室の形態と機能評価モジュール

2. T1 強調あるいは T2 強調ブラックブラッド高速スピネエコーMRI

- a. 2-3 スライスの左室長軸像と、3-4 スライスの左室短軸像で心膜の厚さを計測（正常 \leq 3mm）
- b. 心膜嚢胞が鑑別疾患となる場合には、腫瘍プロトコールを参照すること
3. オプション—心膜肥厚あれば、心膜と心外膜とのすべりと癒着の有無をみるために、T1 強調 **GRE** タギング・シネ MRI（2-3 スライスの左室長軸像と、1-2 スライスの左室短軸像）を撮像する
4. 心室運動と呼吸の相互依存関係を評価するために、自由呼吸下リアルタイム短軸画像を撮像する。

- a. 左室中央レベルでの左室短軸像が望ましい。
 - b. リアルタイムシネ MRI の時間分解能は 60ms 以下が望ましい。
 - c.
 - d. 患者に深呼吸を繰り返すように指示し撮影時間内に 2 サイクル以上の呼吸を行う。
 - e. 中隔の異常運動（拡張早期の中隔の平坦化、左室腔側への膨隆）が認められた場合は収縮性心膜炎が示唆される。
5. 遅延造影モジュール
- a. 脂肪抑制ありの撮影と脂肪抑制なしの撮影を行うと、心臓周囲の脂肪組織と心膜の炎症とを区別しやすい。

心臓および心臓周囲の腫瘍（血栓を含む）

1. 左室の形態と機能評価モジュール
2. T1 強調高速スピネコーMRI：腫瘍および周囲の構造を含むスライス（スライス枚数は腫瘍のサイズによる）
3. 脂肪抑制併用 T2 強調高速スピネコーMRI（オプションで脂肪抑制なし）－腫瘍および周囲の構造を含むスライス（同上）－詳細なシークエンスは、非虚血性心筋症を参照
4. 腫瘍を含むスライスで心筋パーフュージョン MRI
5. 再度脂肪抑制 T1 強調高速スピネコーMRI
6. オプション－造影後 SSFP シネ MRI
7. 遅延造影モジュール
 - a. 血栓の信号をゼロにするように TI を設定する（1.5T で 500-550ms 程度、3T で 850-900ms 程度）。腫瘍と血栓の鑑別に役立つ。腫瘍を取り囲むまたは腫瘍に関連する血栓を描出できる。
 - b. 繰り返し遅延造影 MRI を撮像すると血栓と血流の低下した腫瘍との鑑別に役立つ。

参考文献

1. Kramer CM, Barkhausen J, Flamm SD, Kim RJ, Nagel E; Society for Cardiovascular Magnetic Resonance; Board of Trustees Task Force on Standardized Protocols. Standardized cardiovascular magnetic resonance (CMR) protocols 2013 update. J Cardiovasc Magn Reson. 2013 Oct 8;15(1):91
2. Schulz-Menger J, Bluemke DA, Bremerich J, Flamm SD, Fogel MA, Friedrich MG, Kim RJ, von Knobelsdorff-Brenkenhoff F, Kramer CM, Pennell DJ, Plein S, Nagel E. Standardized image interpretation and post processing in cardiovascular magnetic resonance: Society for Cardiovascular Magnetic Resonance (SCMR) board of trustees task force on standardized post processing. J Cardiovasc Magn Reson. 2013 May 1;15:35.
3. Hundley WG, Bluemke D, Bogaert JG, Friedrich MG, Higgins CB, Lawson MA, McConnell MV, Raman SV, van Rossum AC, Flamm S, Kramer CM, Nagel E, Neubauer S. Society for Cardiovascular Magnetic Resonance guidelines for reporting

cardiovascular magnetic resonance examinations. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2009 Mar 3;11:5.

4. Fratz S, Chung T, Greil GF, Samyn MM, Taylor AM, Valsangiacomo Buechel ER, Yoo SJ, Powell AJ. Guidelines and protocols for cardiovascular magnetic resonance in children and adults with congenital heart disease: SCMR expert consensus group on congenital heart disease. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2013 Jun 13;15:51.