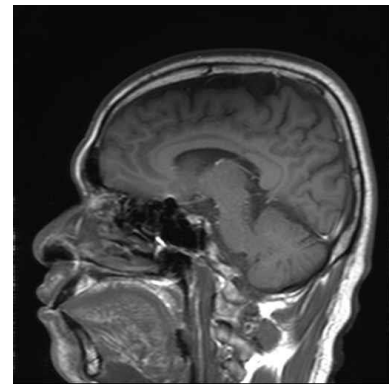


筑波大学
University of Tsukuba



My brain

MRI装置の仕組みと 計測の概要

筑波大学数理物質系

理工学域 巨瀬 勝美

Ultra-high field MRI Workshop at Todai-Kashiwa (2013-11-15)

講演の内容

1. はじめに
2. MRI装置の構成
3. MRIシステムの立ち上げ
 - 磁石のインストールから撮像まで
4. MR microscopy画像
5. むすび

MRIとは？



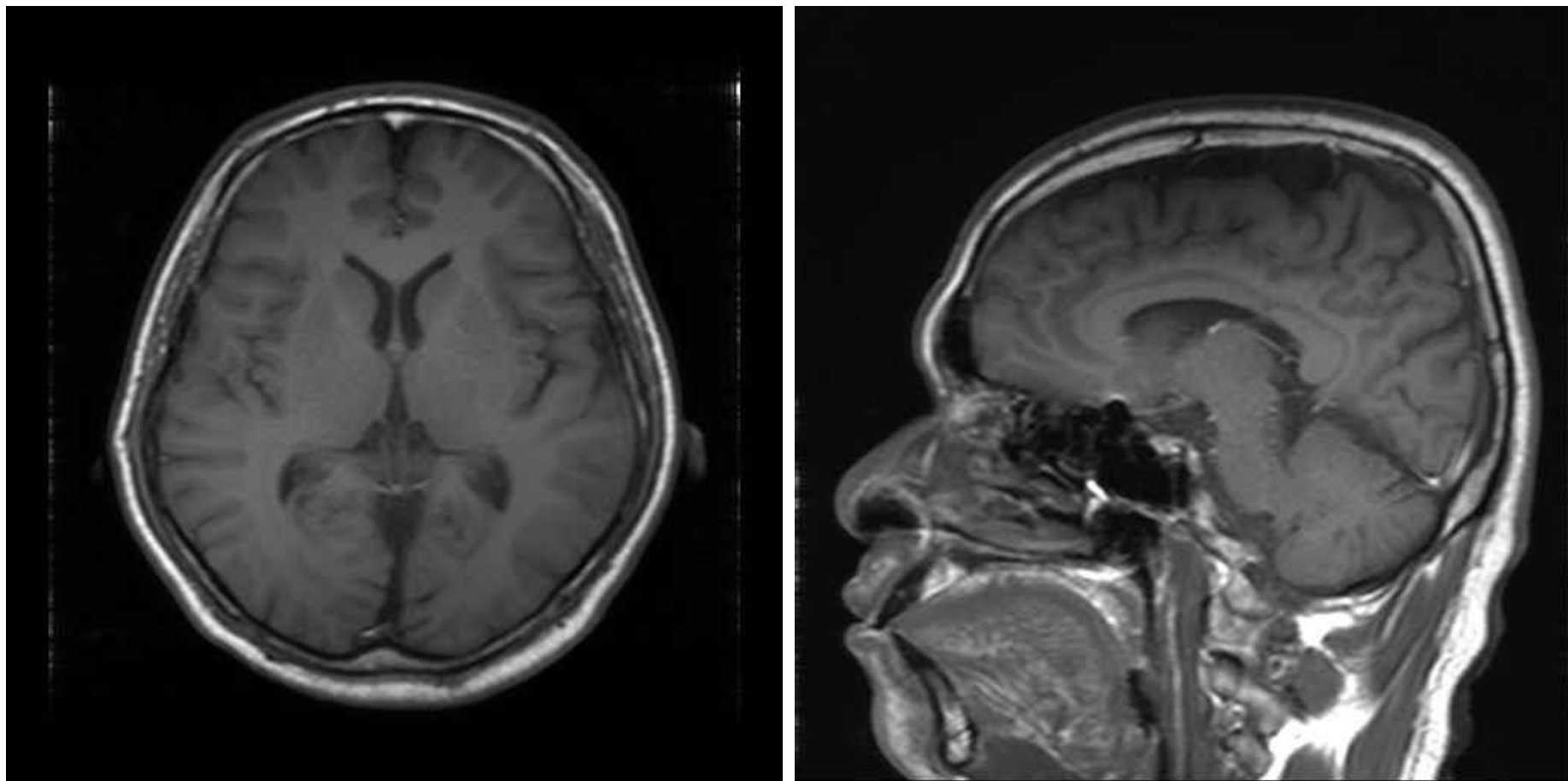
超伝導磁石を用いたMRI(東芝MS)



永久磁石を用いたMRI(日立メディコ)

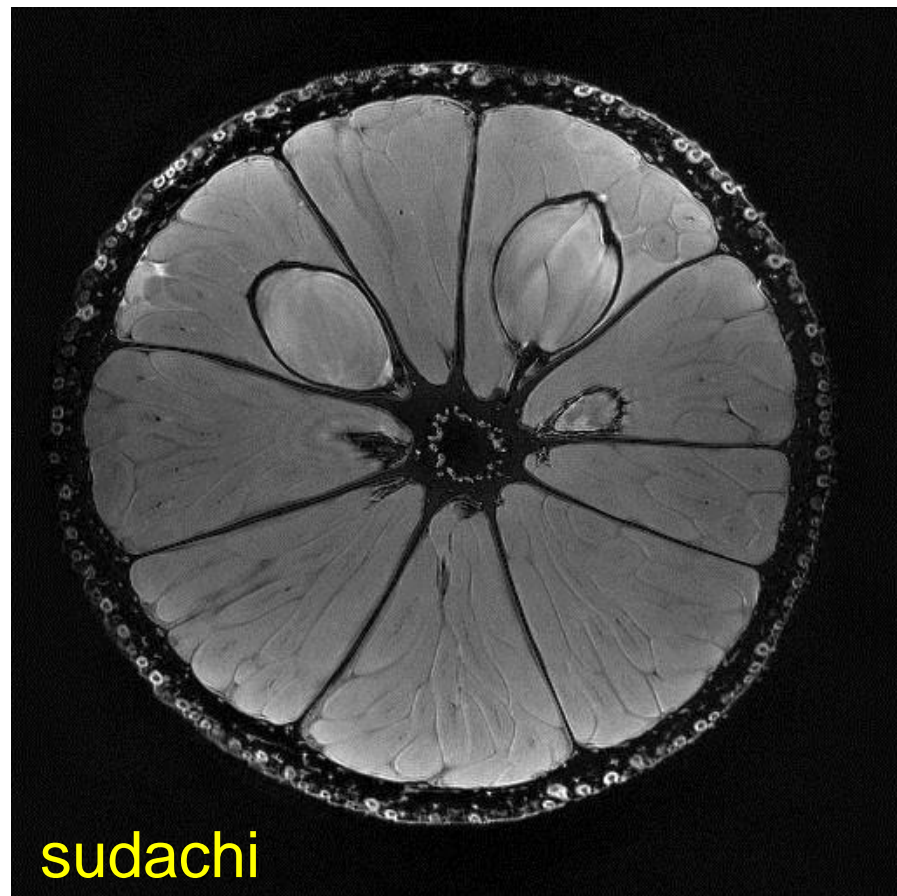
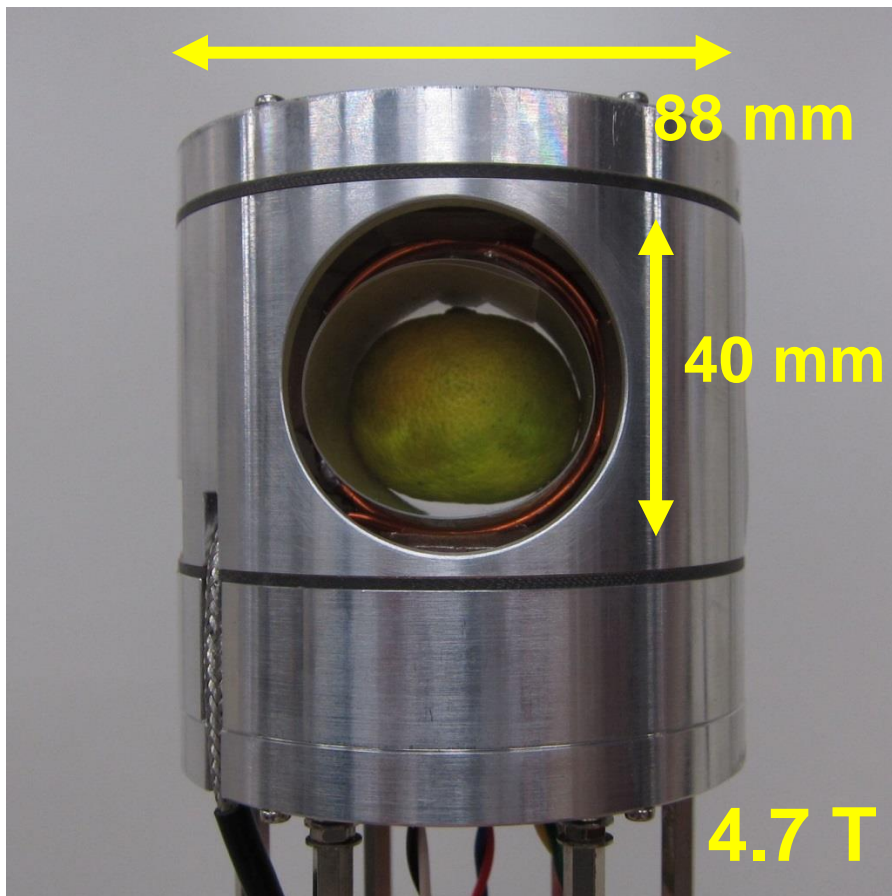
磁気共鳴イメージング (Magnetic Resonance Imaging) の略. 装置自身もMRIと呼ぶ. **水**や**脂肪**に含まれる**水素原子核**の分布を, **NMR**現象を利用して画像化する装置. 国内で約**6,000台**が普及している.

典型的MR画像(1): 人体用MRI



T1W images, transverse and sagittal section at **3T**

典型的MR画像(2) : MR microscope



3DSE, TR = 800ms, TE = 20ms, NEX = 1, FOV = (40.96mm)³,
Matrix = 512 × 512 × 128, Voxel size = 80μm × 80 μm × 320 μm

MRIの特徴

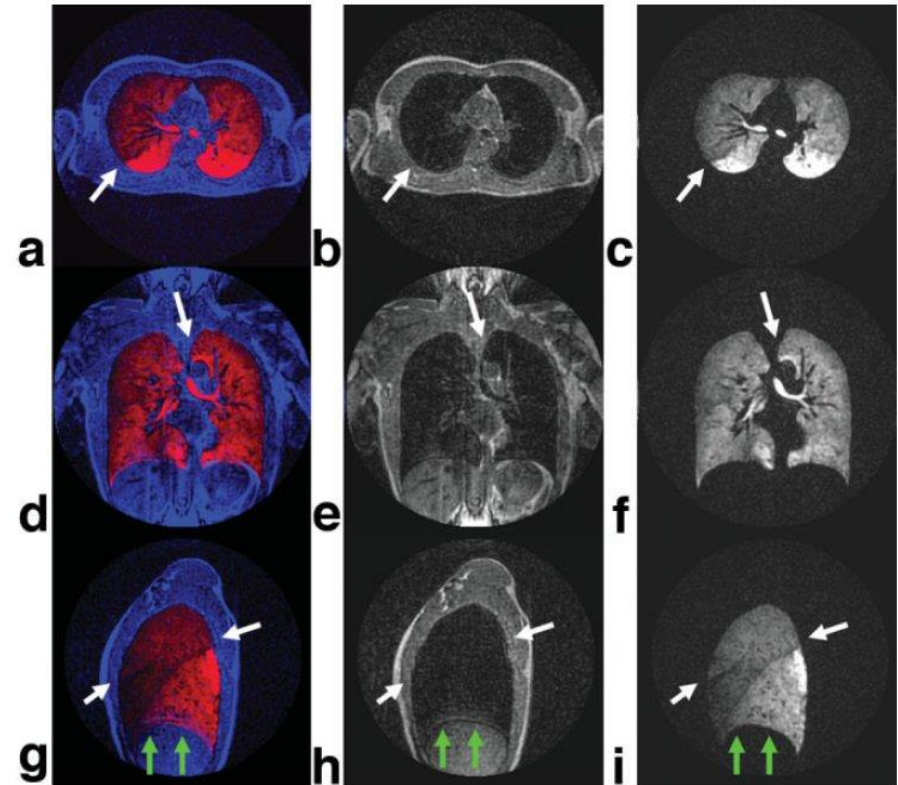
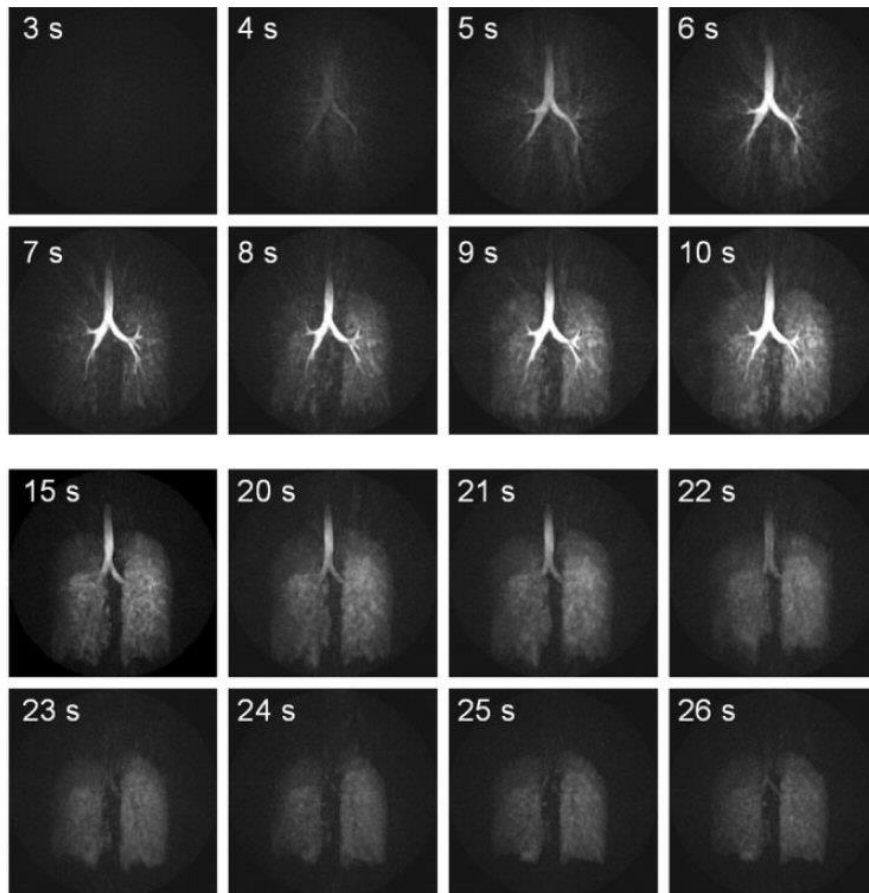
1. **放射線被曝がなく安全に**人体内部の構造を描出できる。**高周波磁場と変動磁場に規制**。吸引事故はある
2. **軟部組織の画像コントラスト**に優れ、頭部、脊髄、関節など骨に囲まれた部位では最優先の手法
3. **分子のマクロ・ミクロな運動**に関する情報により、体内組織の物理的・化学的情報を描出できる：血管や体液の分布や**流れ**、**分子拡散**の可視化
4. **脳機能計測**：血液の局所的な磁化率の時間的変化を観測。神経科学における革命的手法

MRIで使われる原子核種

核種	スピン量子数	共鳴周波数(MHz/T)	天然存在比(%)
^1H	1/2	42.6	99.985
^{19}F	1/2	40.1	100
→ ^3He	1/2	32.4	-
^{31}P	1/2	17.2	100
^{129}Xe	1/2	11.8	26.44
→ ^{23}Na	3/2	11.3	100
→ ^{13}C	1/2	10.7	1.108
^2H	1	6.54	0.015
→ ^{17}O	5/2	5.77	0.037

実用的なレベルでイメージングに使用されるのは ^1H のみ

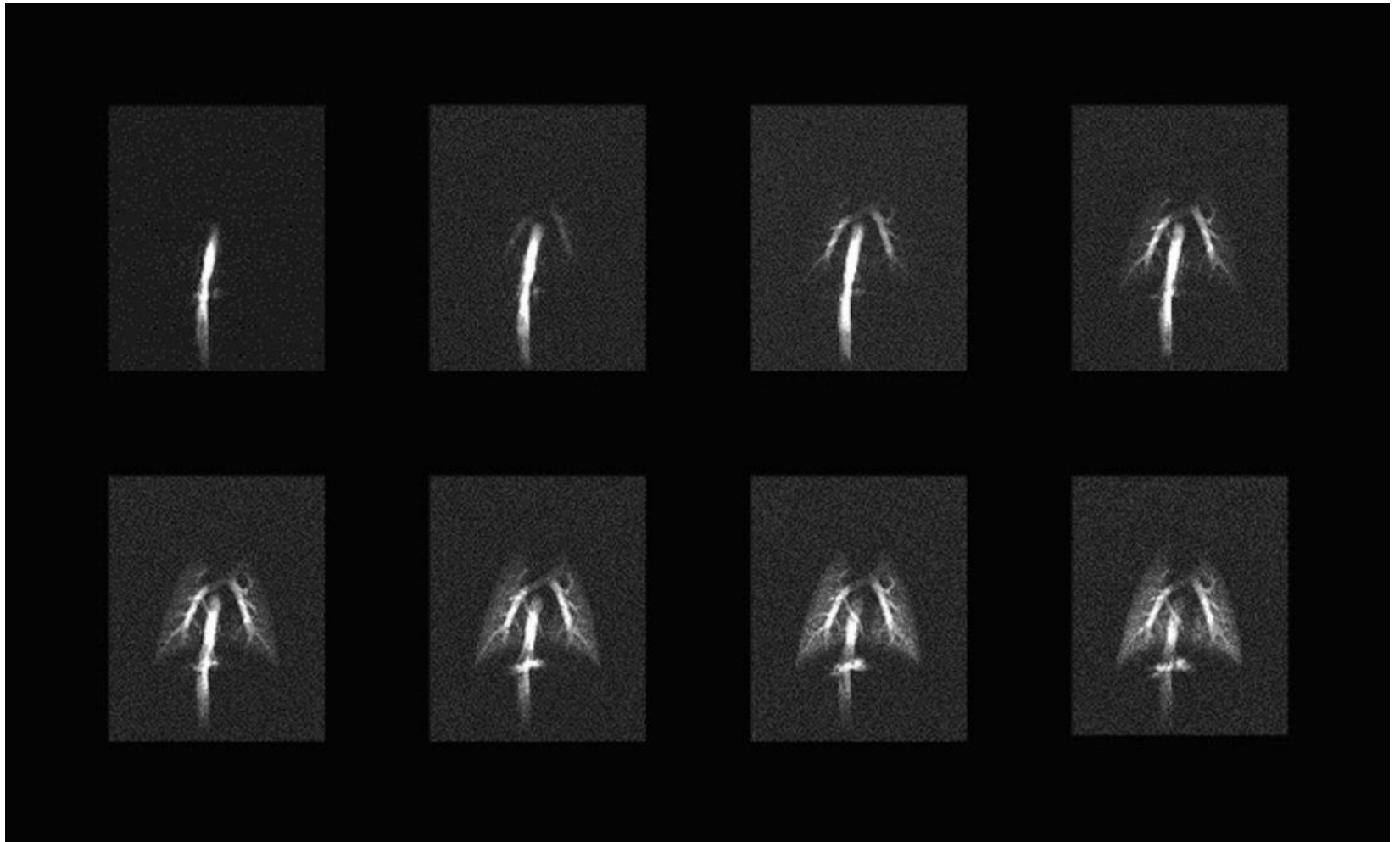
hyperpolarized ^3He のMR画像



^1H 画像と ^3He の合成画像(左)

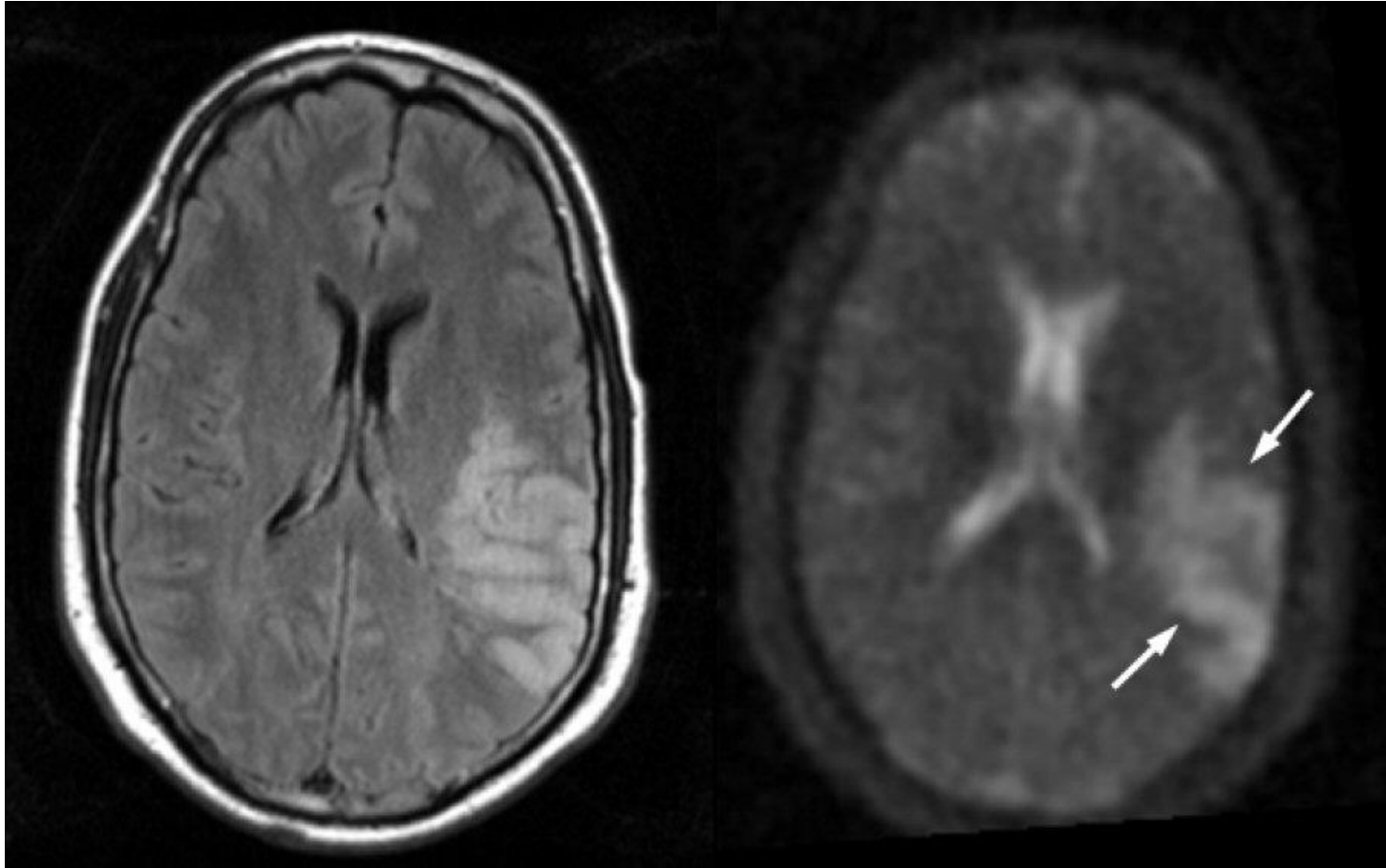
超偏極 ^3He ガス吸入における時間分解最大値投影(MIP)像. 1~9秒までは吸入期. 10~21秒は呼吸停止期. 22~25秒は呼気期.
J. H. Holmes et al. Magn. Reson. Med. 59:1062-1071(2008).

hyperpolarized ^{13}C のMR画像



大腿静脈より1ml/sで静注後に1秒毎に撮像 (Yorkshire pig).
M. Ishii et al. Magn. Reson. Med. 57:459-463 (2007).

^{23}Na (NA=100%) のMR画像

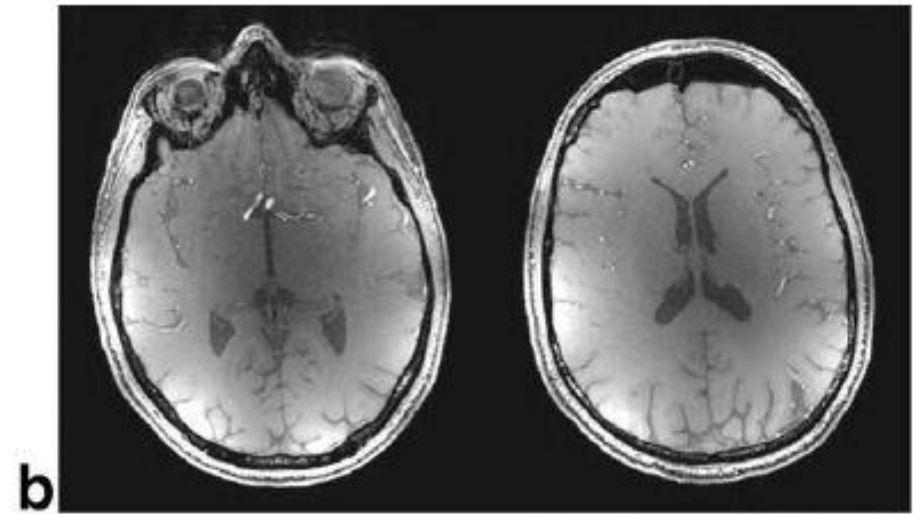
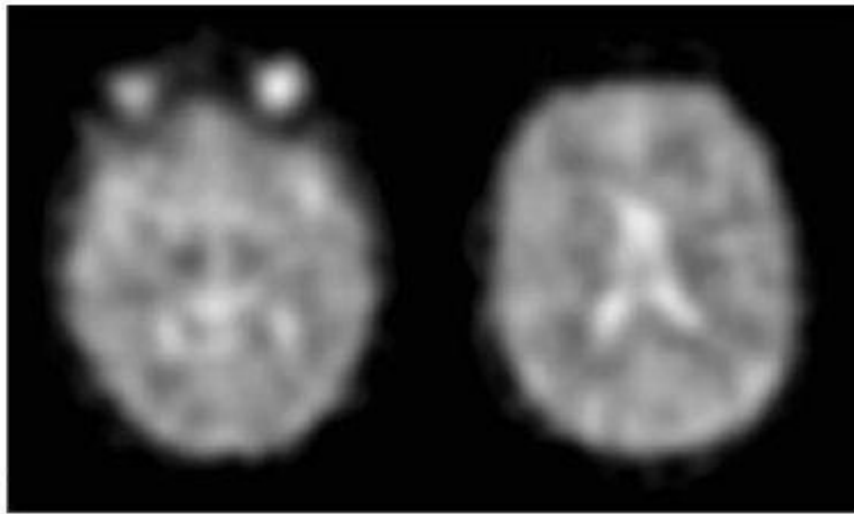


1.5Tにおける ^1H -FLAIR像 4.7Tにおける ^{23}Na 像(発作24時間後)
R. Bammer, ISMRM2008 weekend course

^{17}O (NA=0.037%) のMR画像

^{17}O

^1H



7 TにおけるNatural abundanceの ^{17}O 像(左)と ^1H (右)
共鳴周波数は40.8MHzと300MHz

Hoffmann et al. MRM, 2011.

生体内存在量と天然存在比の両方が大きくないと実用的でない！

講演の内容

1. はじめに

2. MRI装置の構成

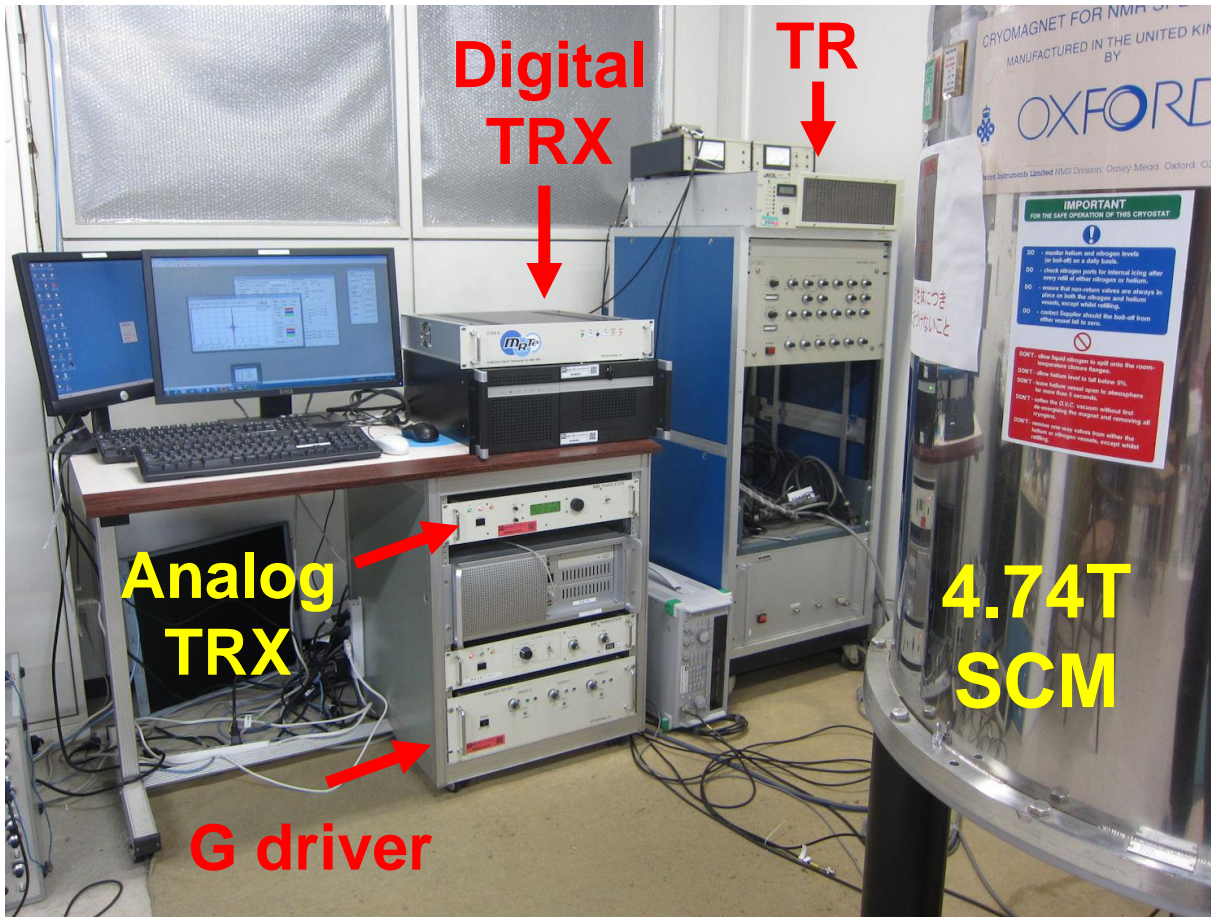
3. MRIシステムの立ち上げ

—磁石のインストールから撮像まで

4. MR microscopy画像

5. むすび

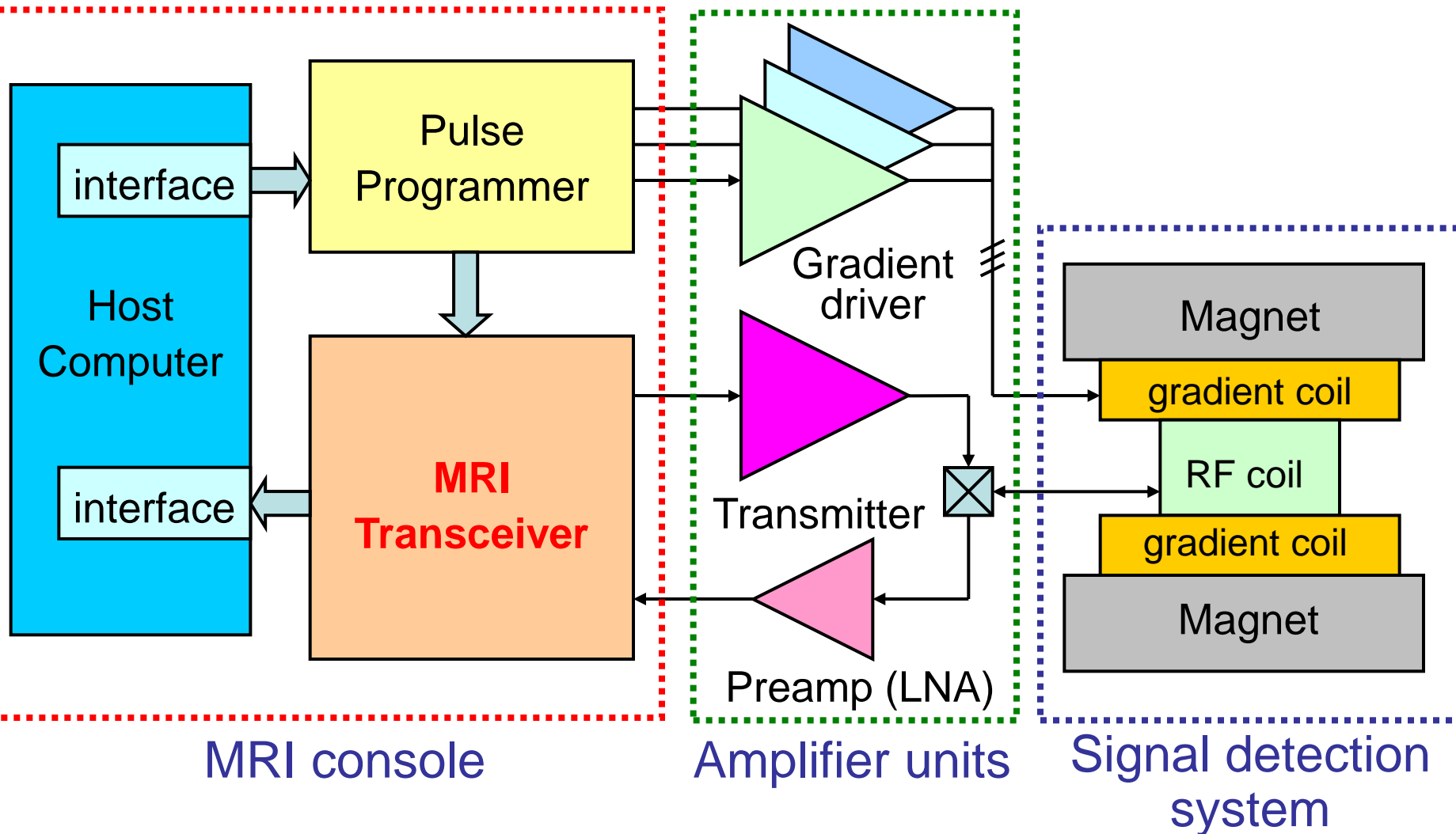
MRI装置の構成(アナログ & デジタル)



Kumquat in a solenoid coil probe

アナログとデジタルの両トランシーバーを用いたMRIシステム。システム移行中に撮られた珍しいシステム構成

MRI装置の構成(ブロック図)



MRIは、**信号検出系**(磁場系)と**計測制御系**(電気系)に分けられる

MRI装置の構成

信号検出系(マグネトニクス?)

静磁場発生磁石(超伝導磁石, 永久磁石)

勾配磁場コイル(円筒形, 平板型, シールド(y/n))

RFコイル(円筒形, サーフェスコイル, アレイコイル)

計測制御系(エレクトロニクス)

計算機(ミニコン→Workstation→PC→Tablet)

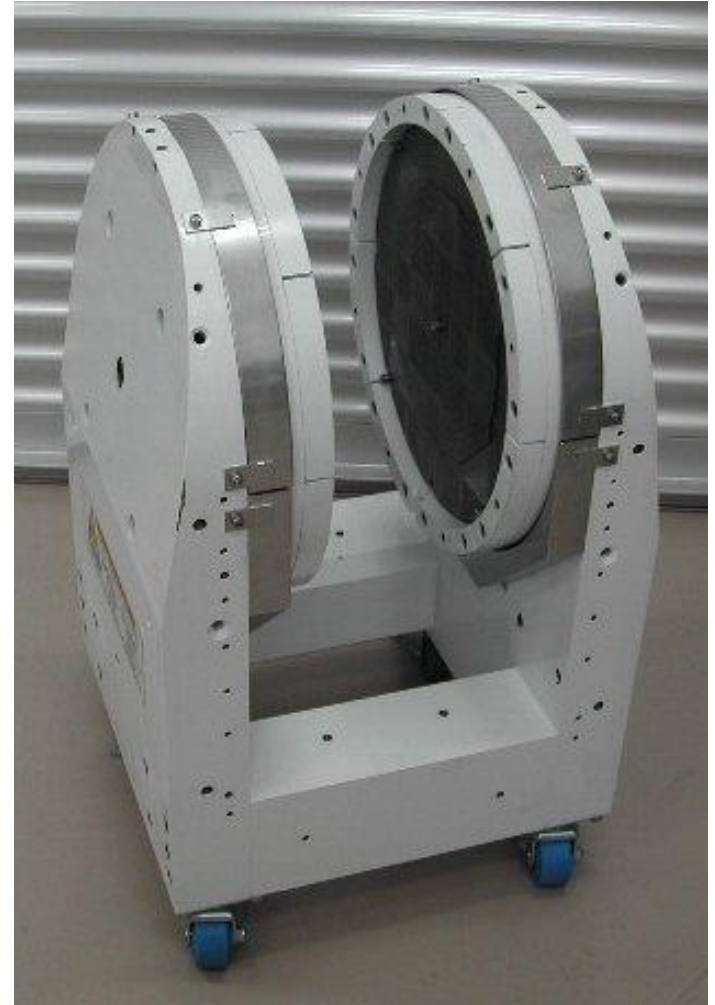
RFトランシーバー(アナログ→デジタル)

パルスプログラマ(MPU, DSP, FPGA, PC)

トランスミッター(1W~50kW)

グラジエント電源($\pm 10A \sim \pm 500A$, リニア→PWM)

MRI装置の構成:磁石



超伝導磁石 (9.4T)

>>>

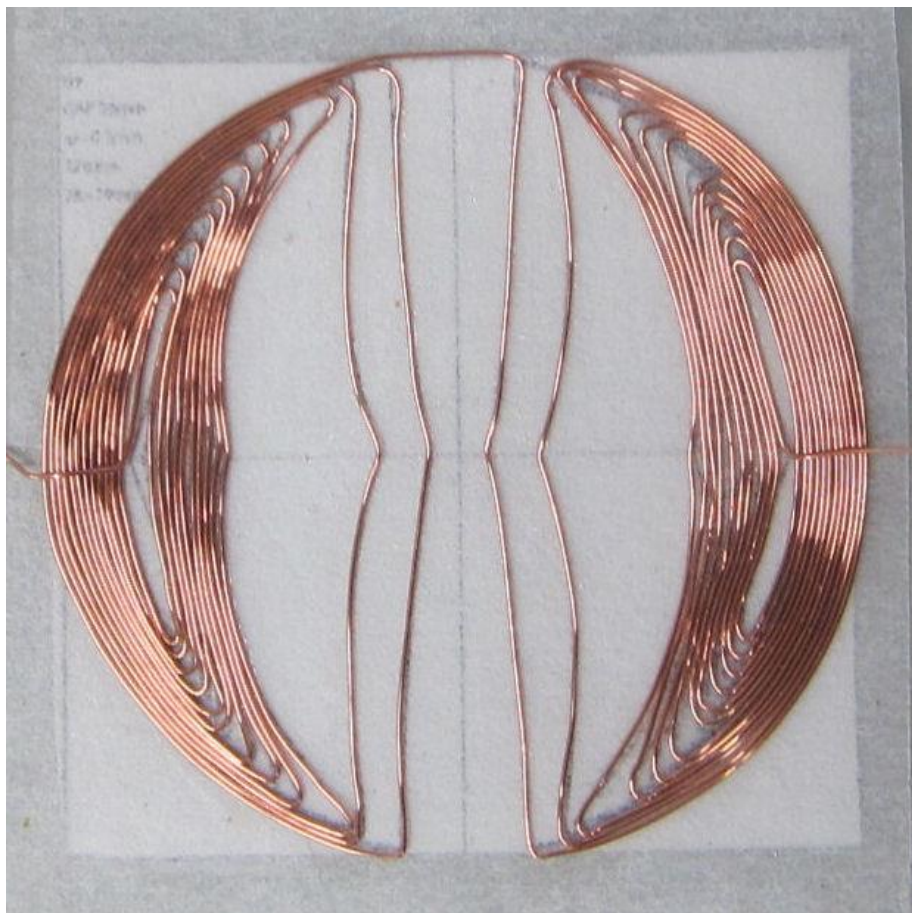
永久磁石 (0.2T)

MRI装置の構成: 永久磁石の利点!

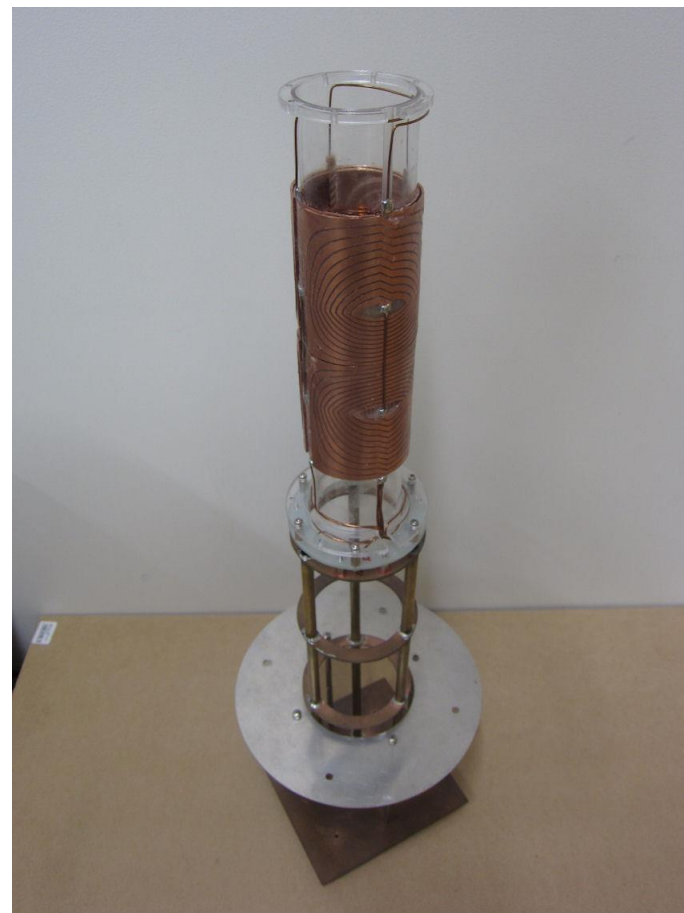


永久磁石の屋外への設置例 (portability & openness)

MRI装置の構成：勾配磁場コイル

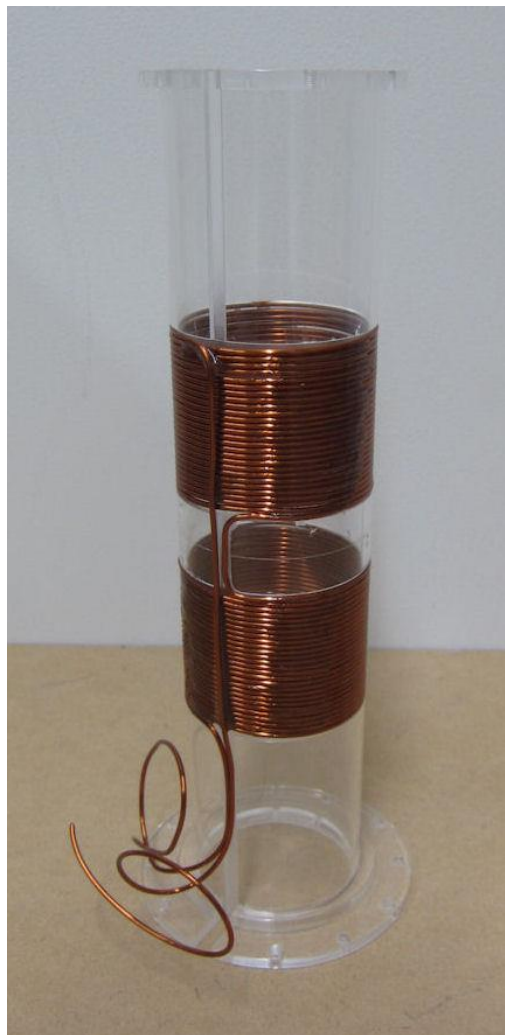


平板型勾配磁場コイル



円筒形勾配磁場コイル

MRI装置の構成：勾配磁場コイル



Gz

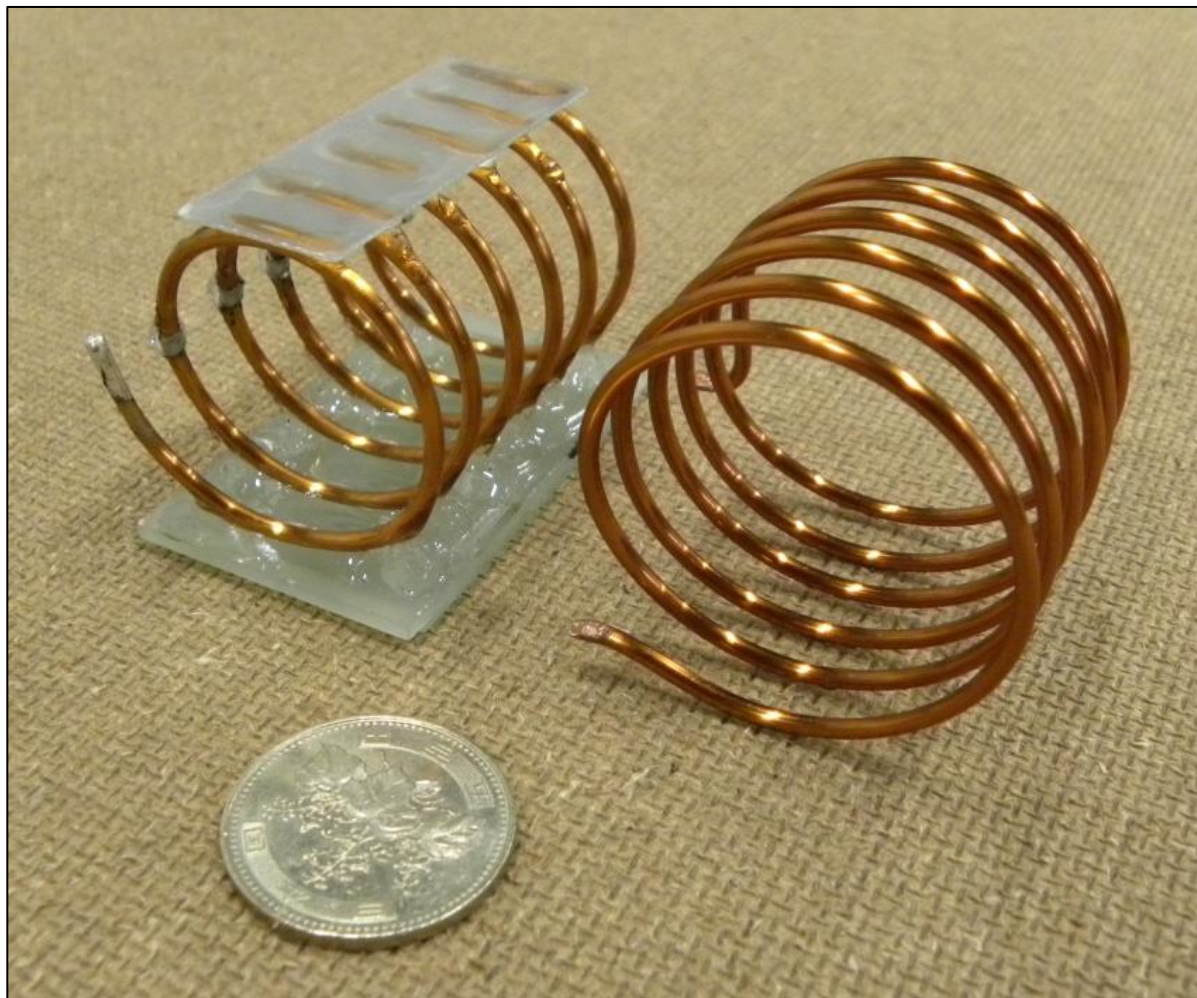


Gy



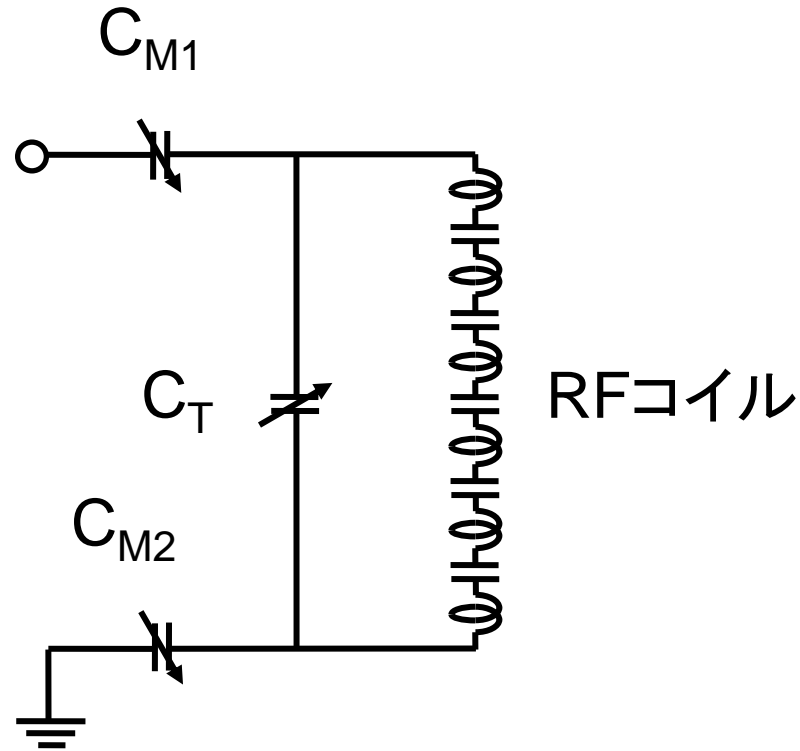
Gx

MRI装置の構成:RFコイル



キャパシタを用いた分割により, 自己共振周波数を低下

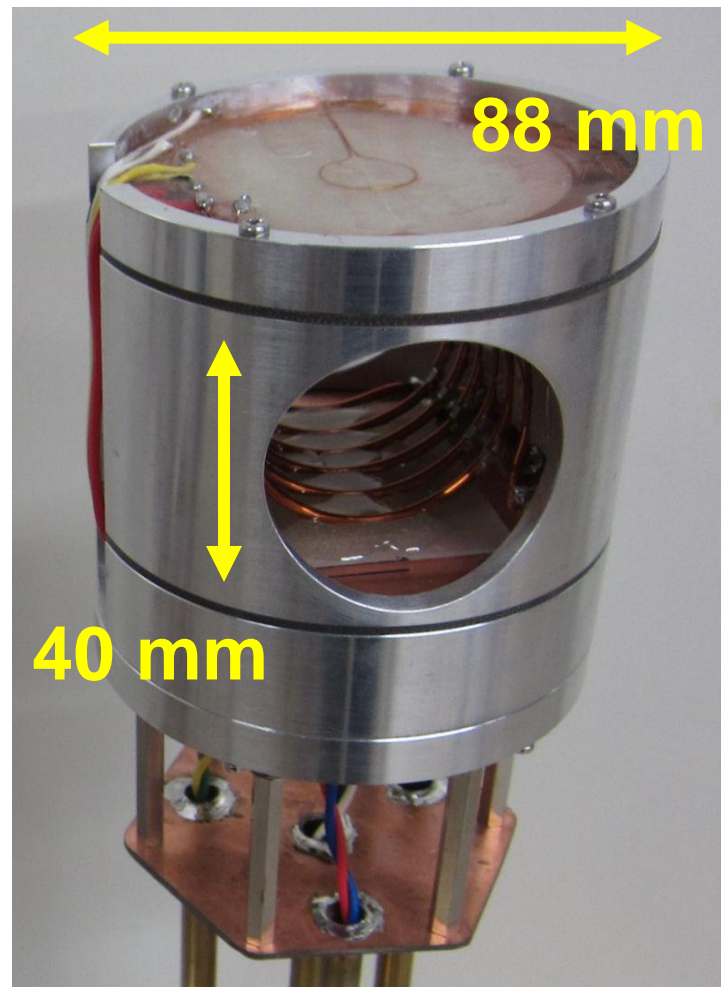
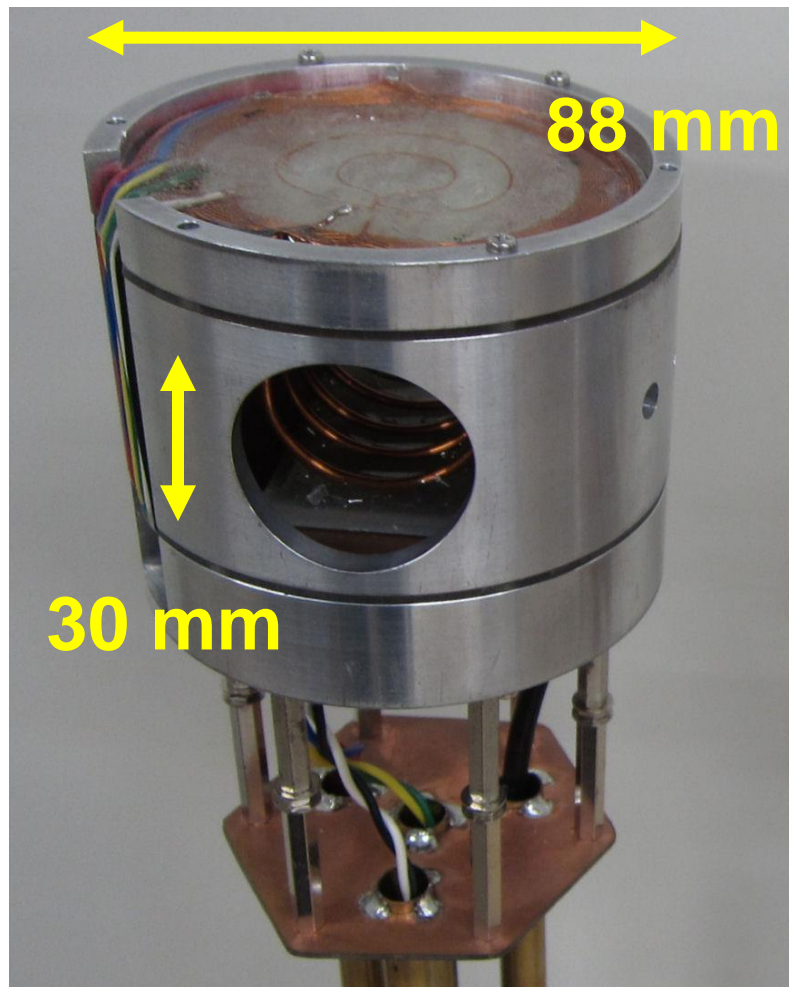
MRI装置の構成: RFコイル



LC並列共振RFタンク回路

キャパシタを用いた分割により, 自己共振周波数を低下

MRI装置の構成: 勾配磁場プローブ



ソレノイドRFコイルを用いた勾配磁場プローブ(堀賀他)

MRI装置の構成: 計算機



Minicomputer



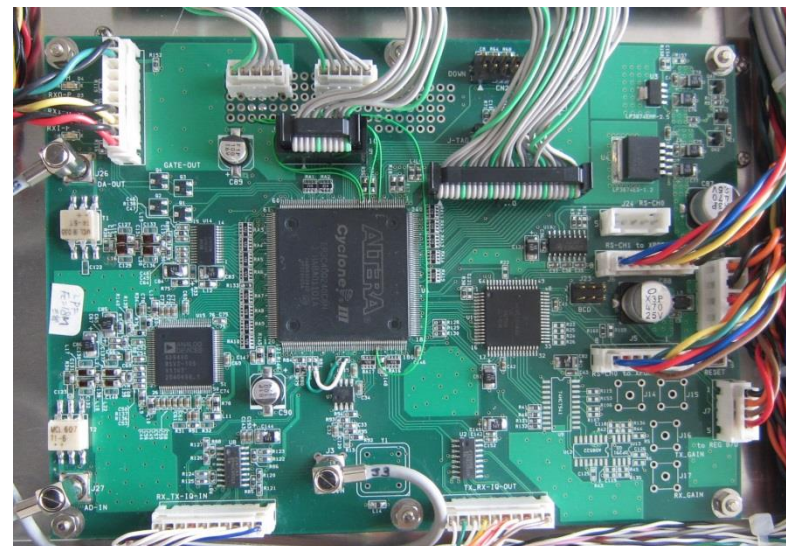
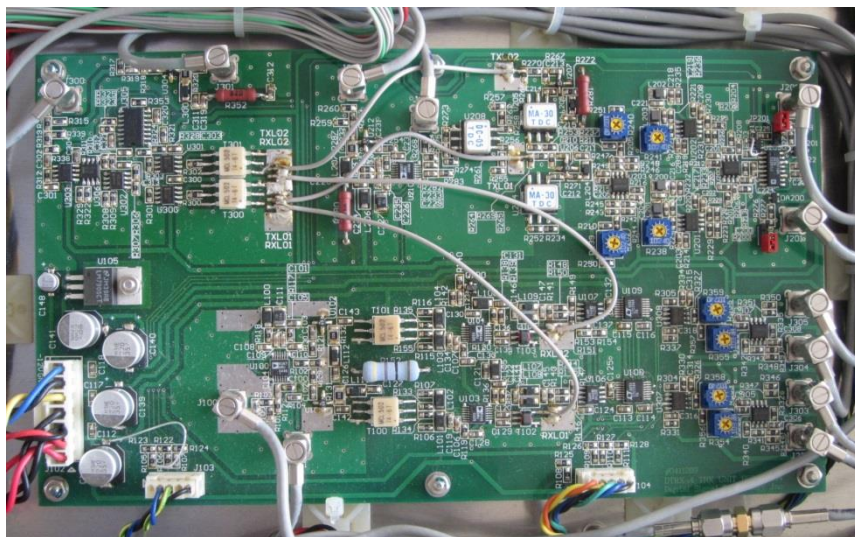
Workstation



High-performance PC

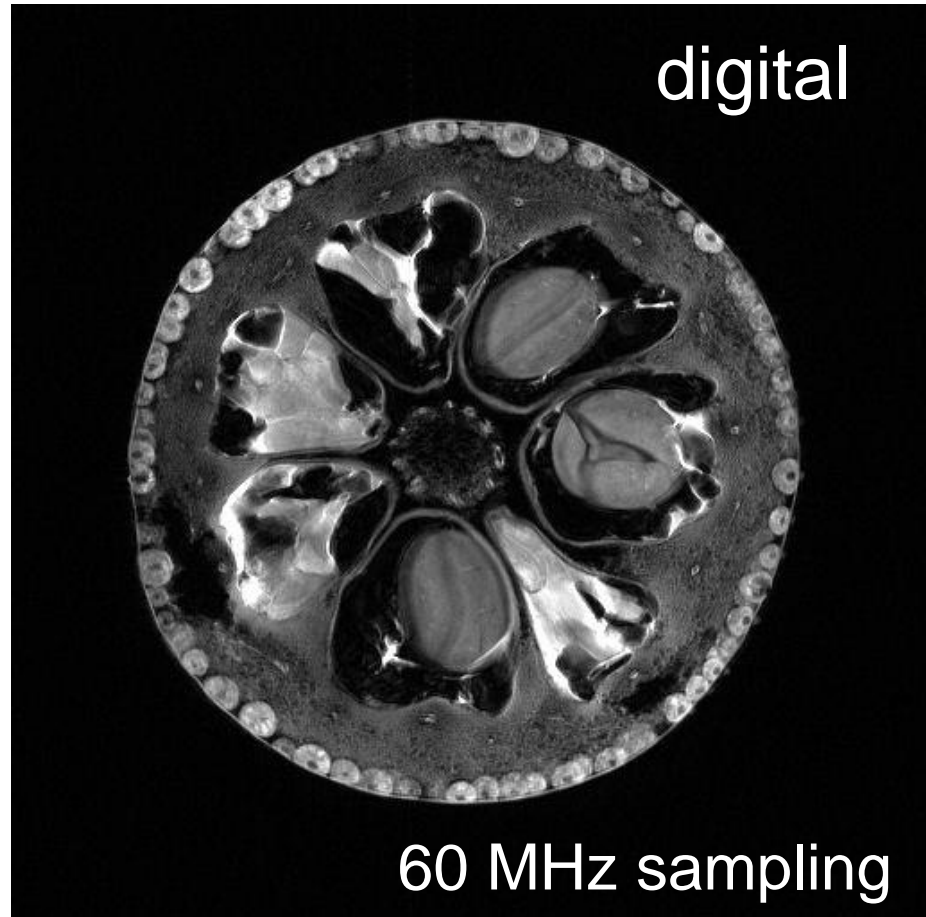
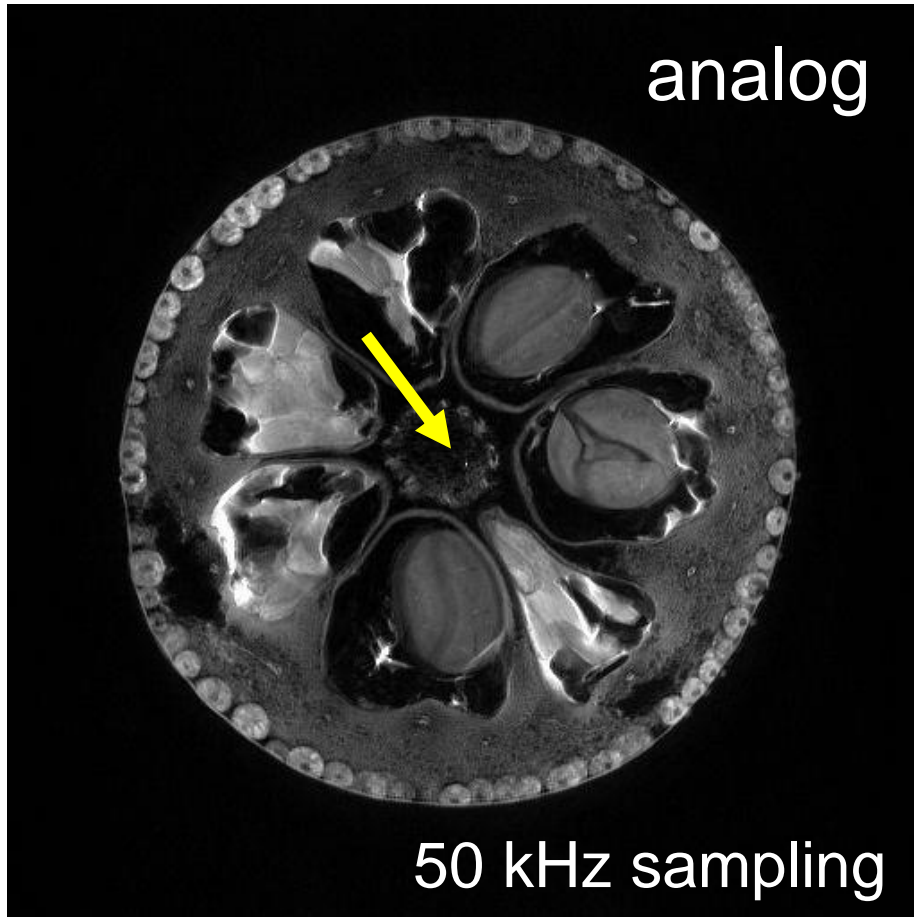
歴史的に主役は交代してきた。次はTablet?

MRI装置の構成: トランシーバー



Analog → → → → → → → → Digital

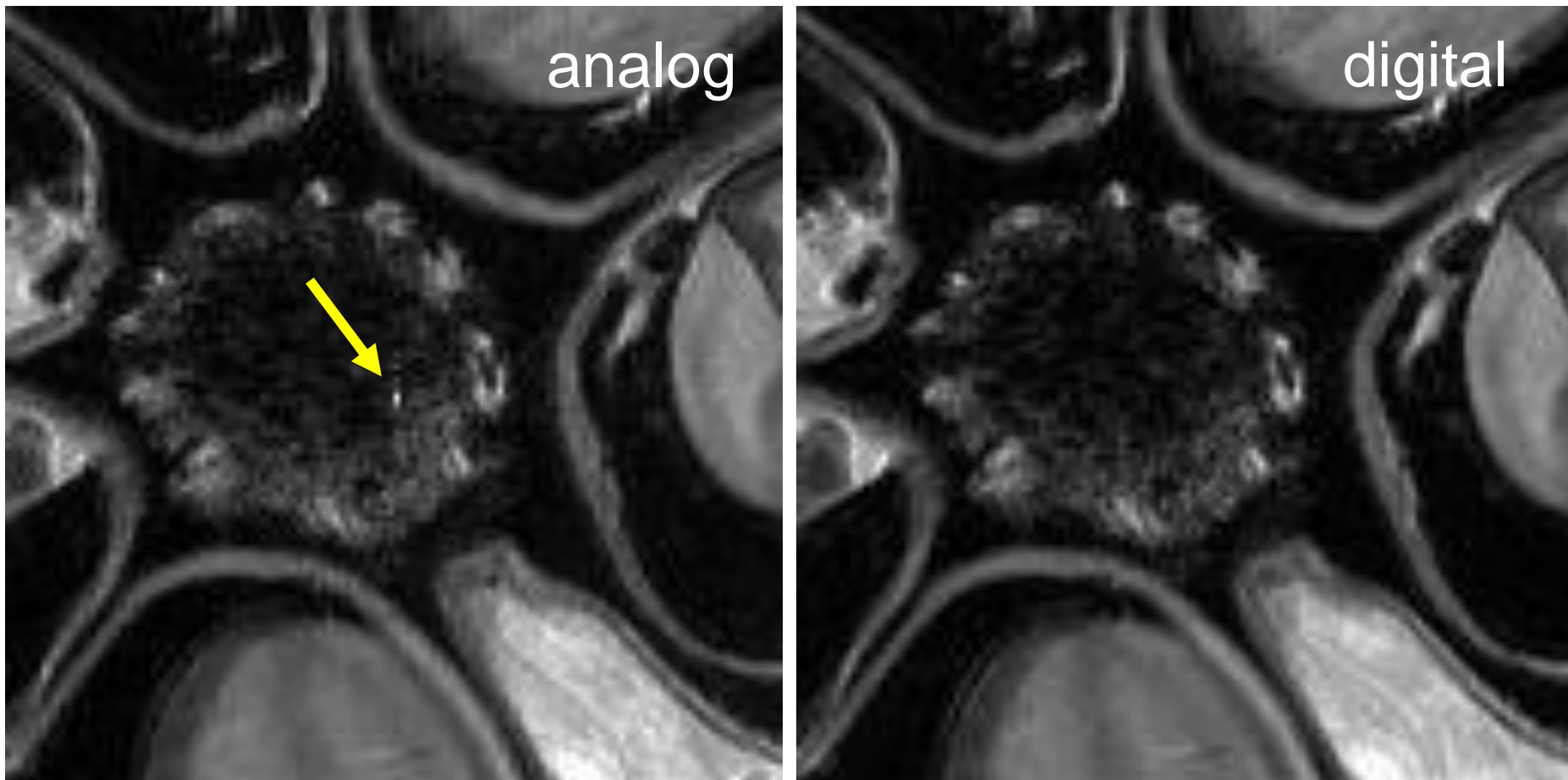
アナログとデジタルの違い : DC noise?



どちらのトランシーバーでも、同様のimage qualityが得られた

Cross sectional images acquired with the analog and the digital transceivers using a 3DSE sequence with TR/TE = 800ms/20ms, FOV = (40.96 mm)³, image matrix: 512² x 64, NEX = 1

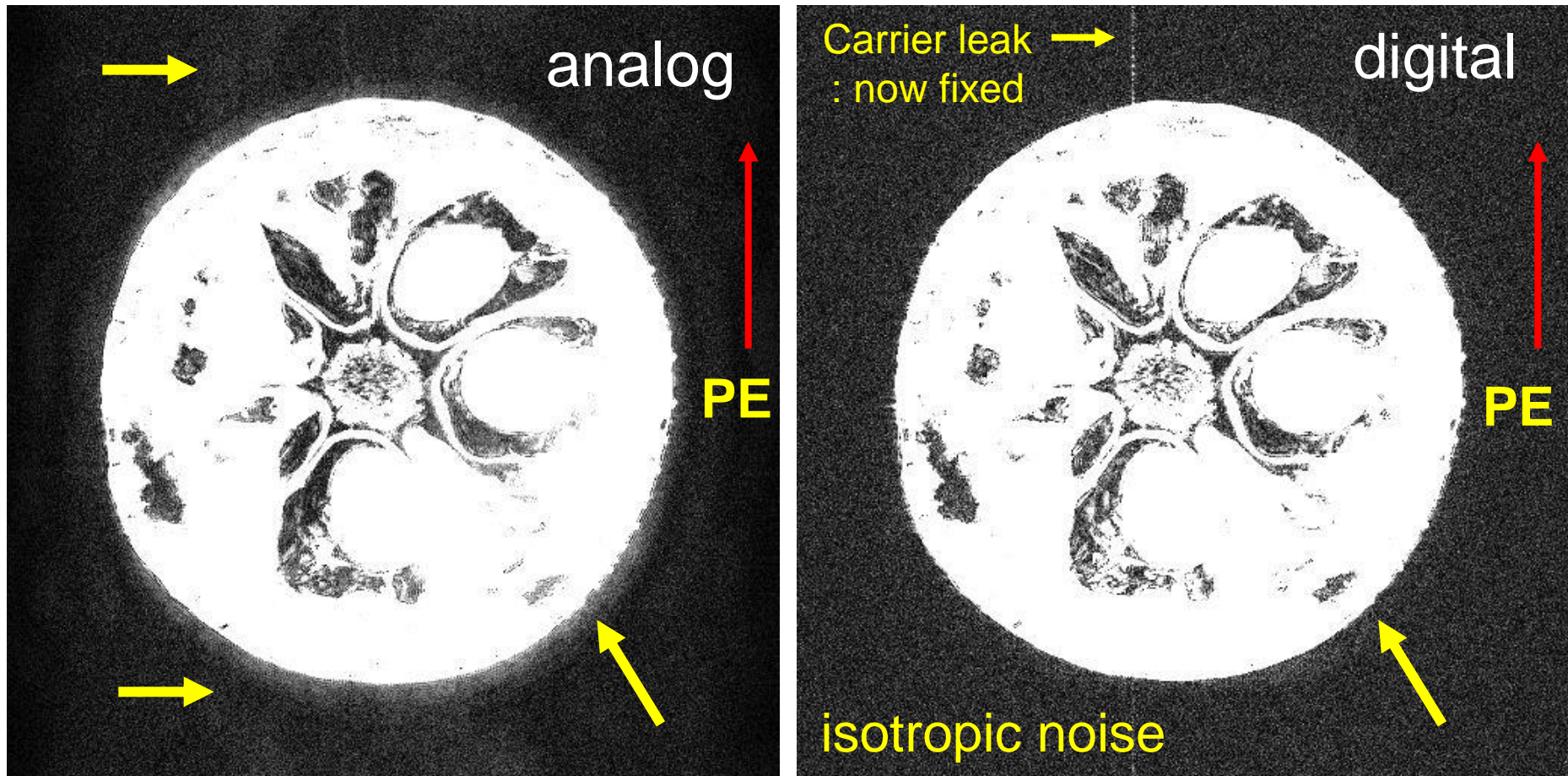
アナログとデジタルの違い : DC noise?



アナログトランシーバーでは、**DCオフセットによる輝点**が見られた

Cross sectional images acquired with the analog and the digital transceivers using a 3DSE sequence with TR/TE = 800ms/20ms, FOV = (40.96 mm)³, **image matrix: 512² x 64, NEX = 1**

アナログとデジタルの違い：位相安定性？



デジタルトランシーバーでは、**均一なバックグラウンドノイズ**が観測された。いっぽう、アナログトランシーバーでは、**アナログ回路の非線形性や位相の不安定性**に起因すると思われる**ゴースト状のアーチファクト**が観察された。

MRI装置の構成: パルスプログラマ

1. Microprocessor



2. DSP (digital signal processor)



3. FPGA (field programmable gate array)



4. PC with a large buffer memory



PCを用いたものは柔軟性に富み開発時間も短い(Patented)

講演の内容

1. はじめに
2. MRI装置の構成
3. MRIシステムの立ち上げ
 - 磁石のインストールから撮像まで
4. MR microscopy画像
5. むすび

MRI装置(9.4T)の立ち上げ



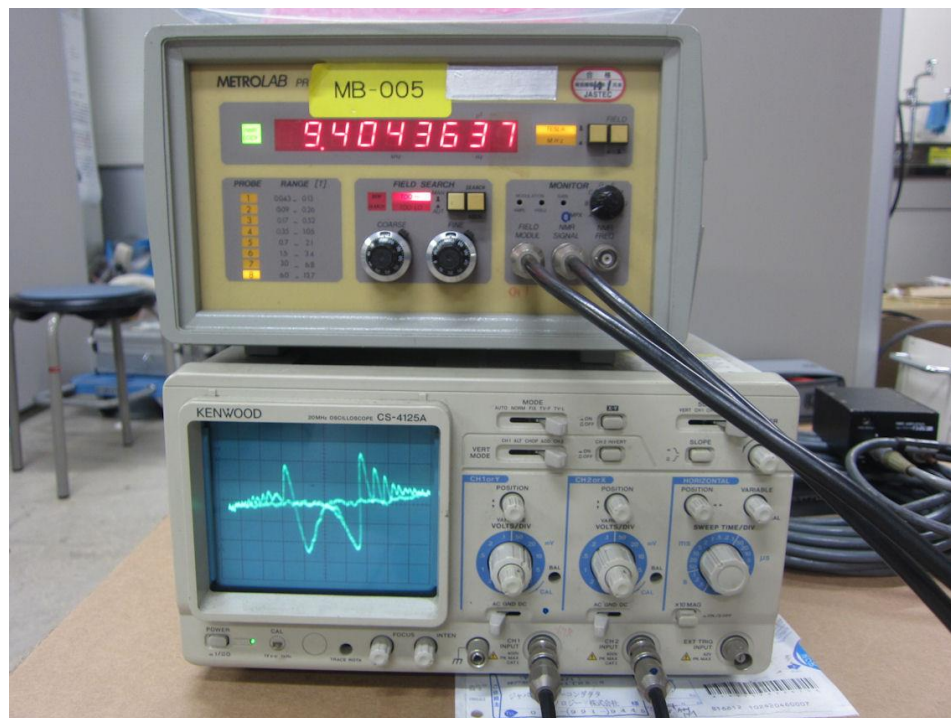
冷えた状態で出荷された(cold shipping)超伝導磁石(2013-9-24)

MRI装置(9.4T)の立ち上げ



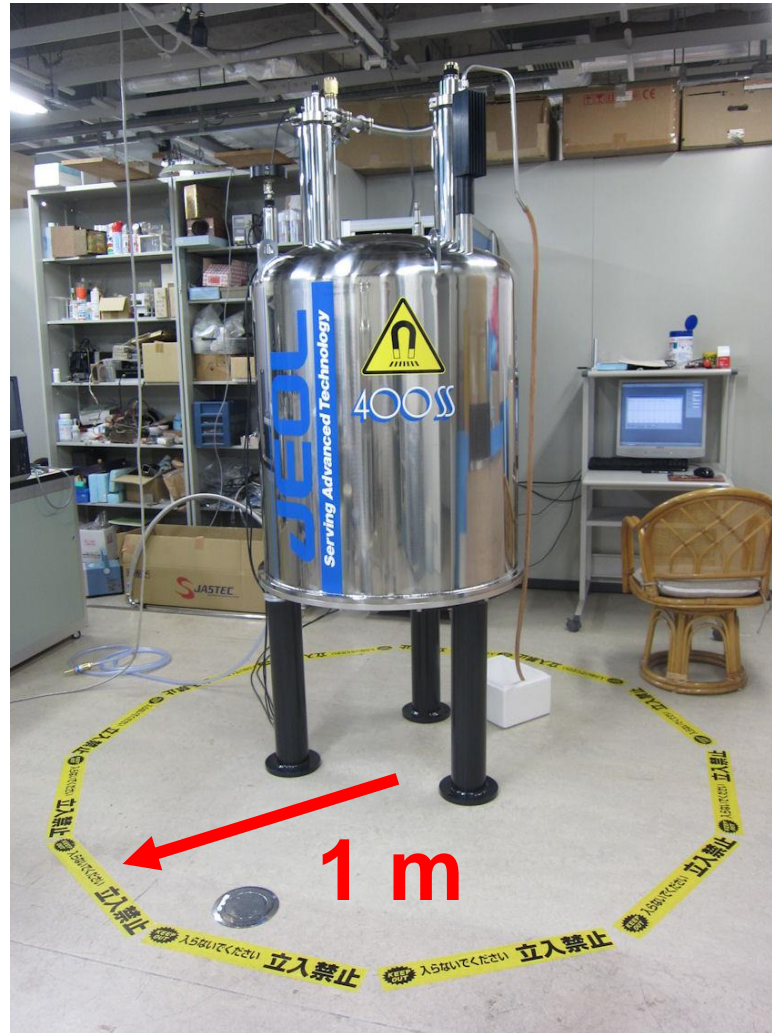
設置作業：門柱でリフトアップして脚を取り付ける

MRI装置(9.4T)の立ち上げ



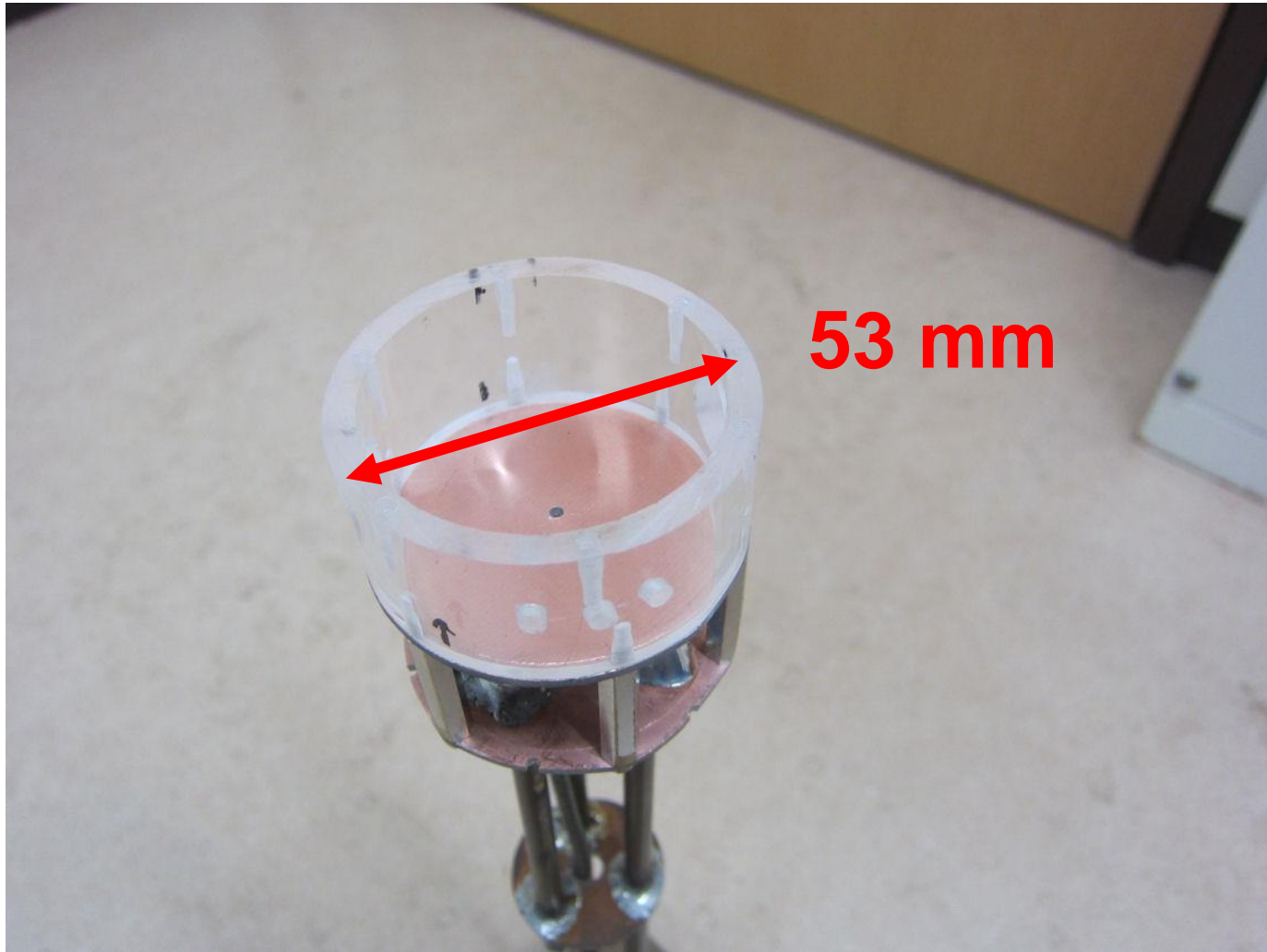
液体窒素と液体ヘリウムの補給. その後, 励磁. 9.40433637T

MRI装置(9.4T)の立ち上げ



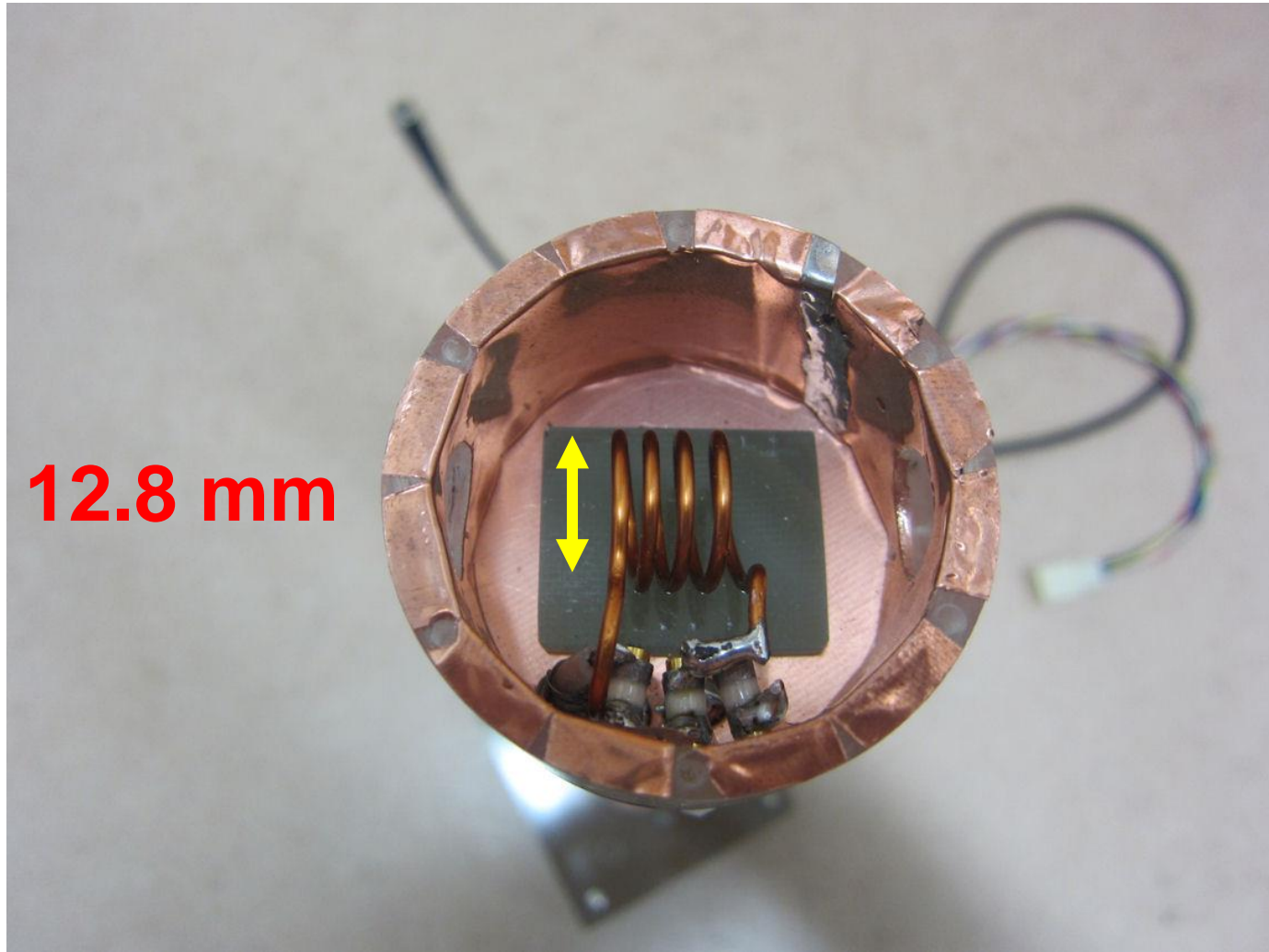
磁石のインストール終了. 5ガウスラインは, 半径約1m(要注意!)

MRI装置 (9.4T) の立ち上げ



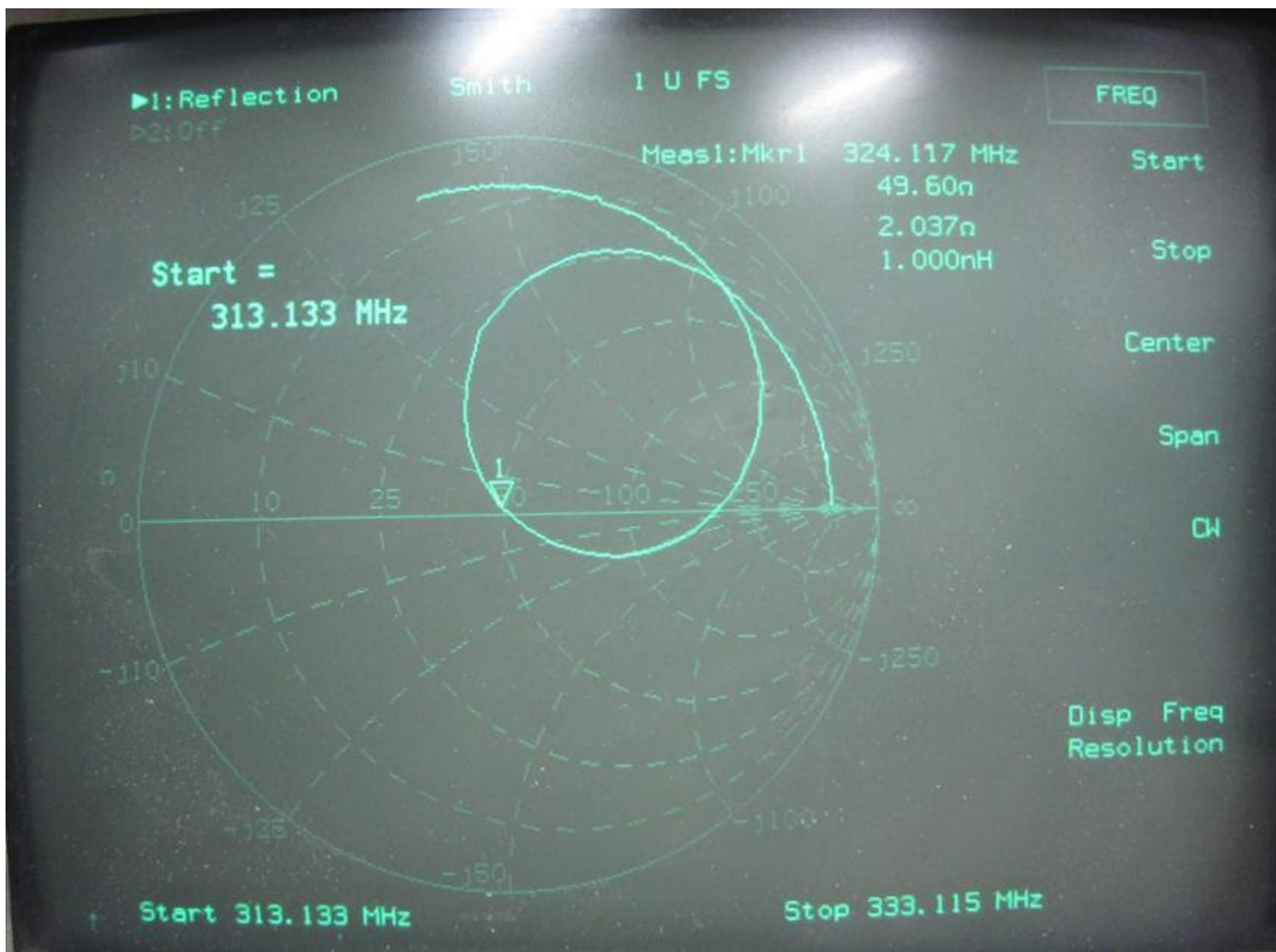
MR microscopy用グラジエントコイルプローブ (平板型Gコイル)

MRI装置 (9.4T) の立ち上げ



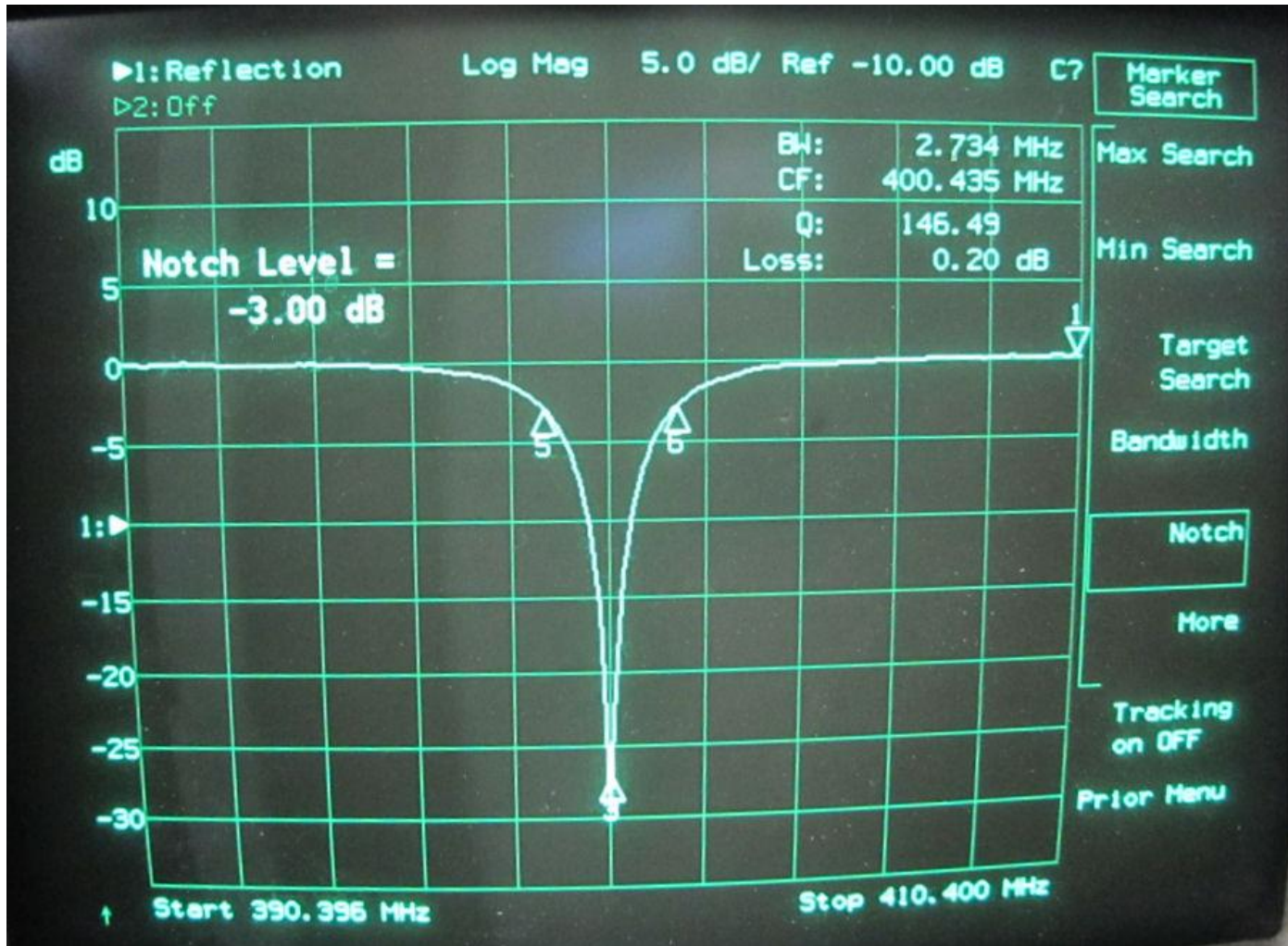
内径12.8mm, 4ターンソレノイド. 線径1.5mm(キャパシタで2分割)

MRI装置(9.4T)の立ち上げ



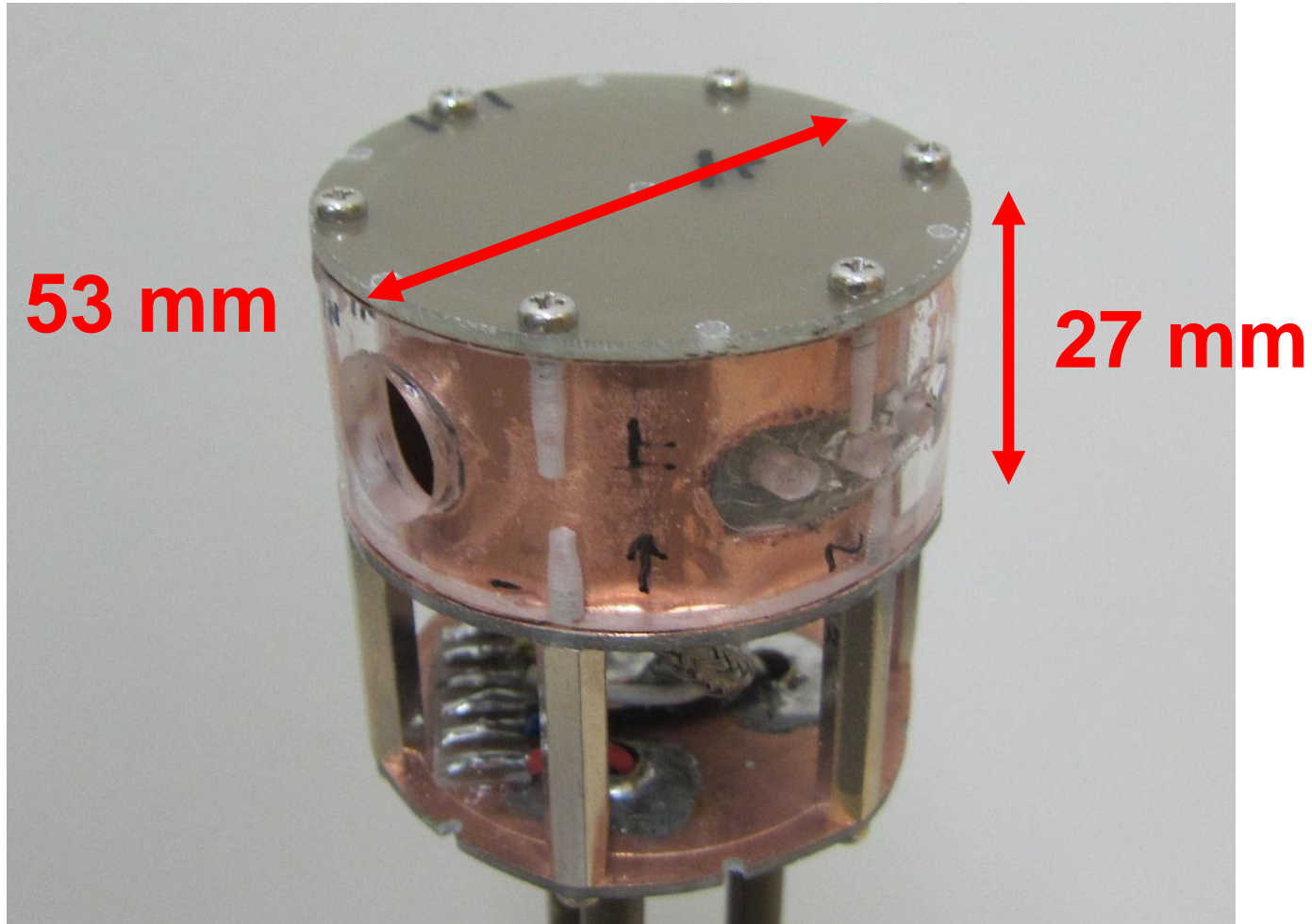
分割なしのとき, 324MHzで50Ωマッチング → 400MHzへC分割

MRI装置(9.4T)の立ち上げ



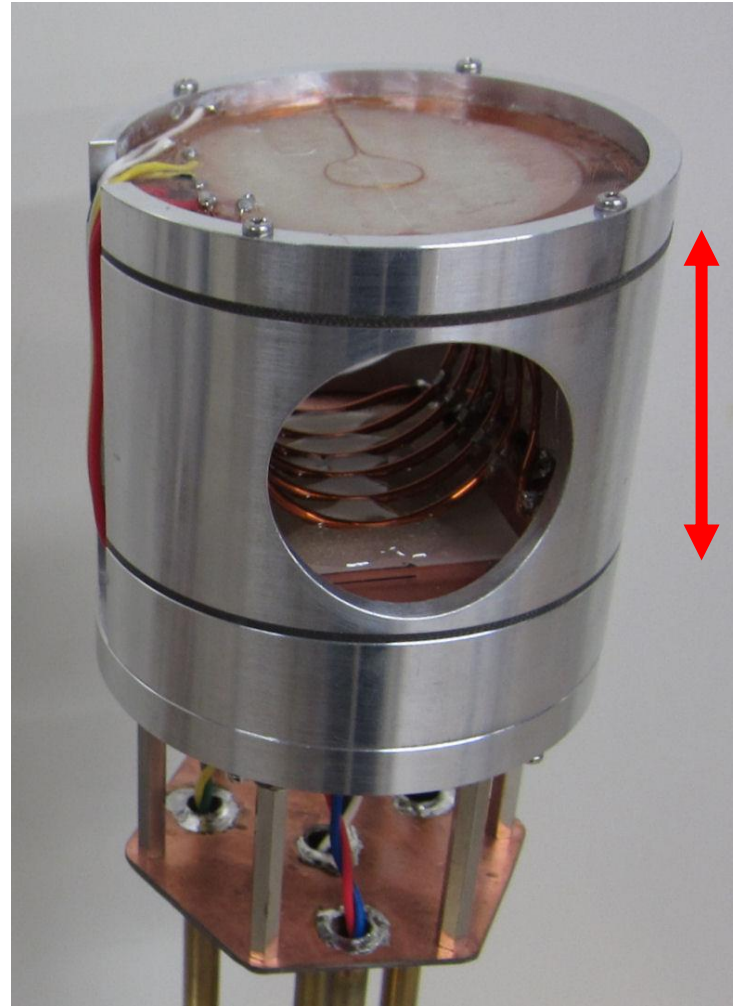
15pFチップキャパシタで2分割により400MHzでマッチング

MRI装置(9.4T)の立ち上げ



グラジエントコイル装着前のプローブ(直径53mm)

MRI装置 (9.4T) の立ち上げ

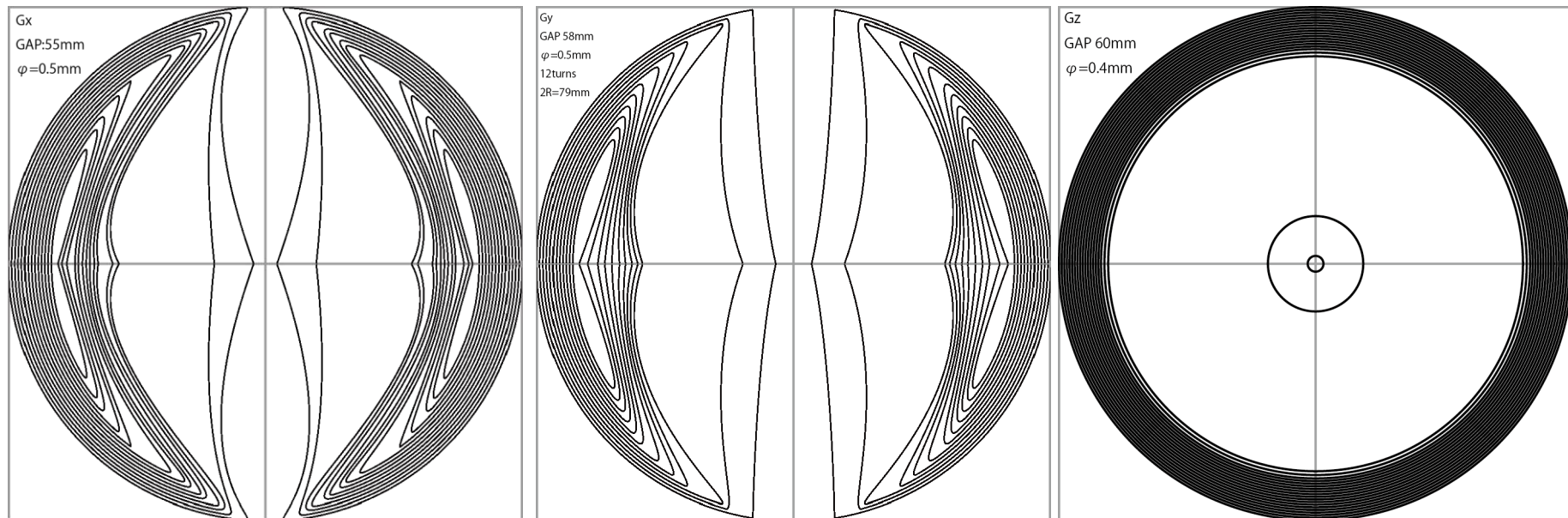


54 mm

石澤君設計
堀賀君製作

開口径40mmの平板型グラジエントコイルプローブ → 1/2へ

MRI装置(9.4T)の立ち上げ

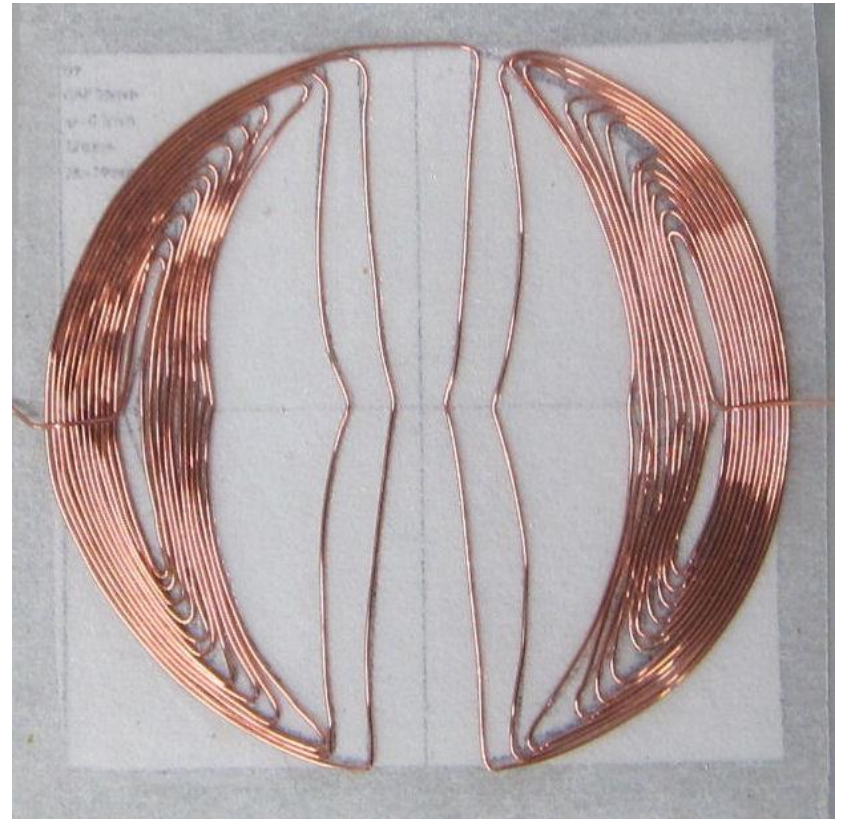
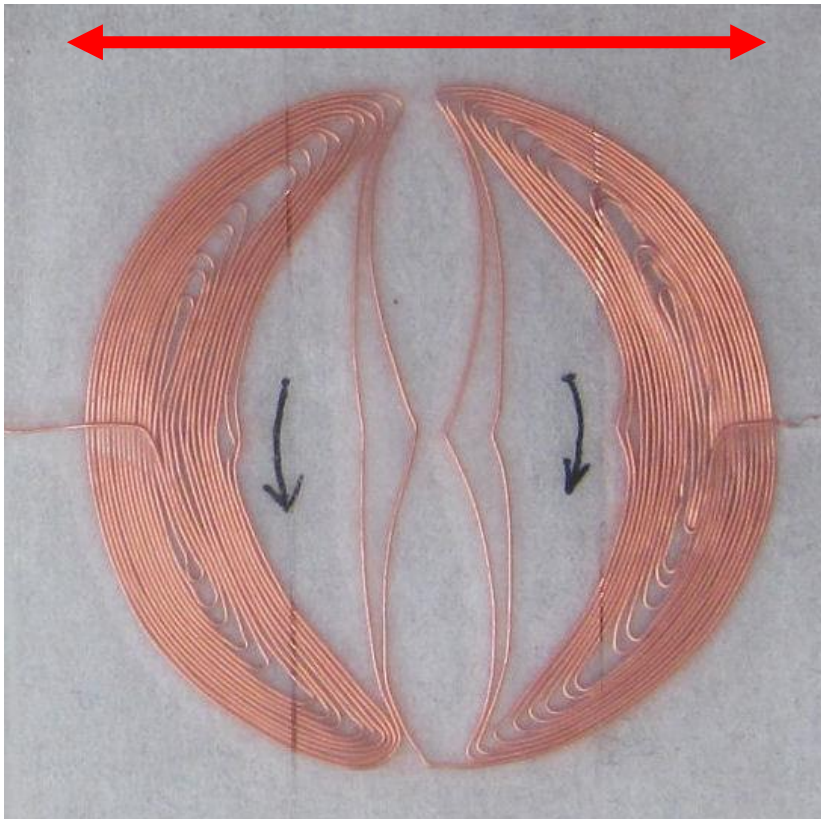


	ROI target	不均一性 [%]	1層の効率 [G/cm/A]	コイル間ギャップ [mm]	巻線径 [mm]	電流面径 [mm]	1層の巻き数
Gx	40 mm 球	25.7	0.35	55	0.5	79	14
Gy		29	0.28	58			12
Gz		9.8	0.8	60	0.4	21	

ギャップ54mmのワイドボア用に設計されたGコイル (by Ishizawa)

MRI装置(9.4T)の立ち上げ

38 mm

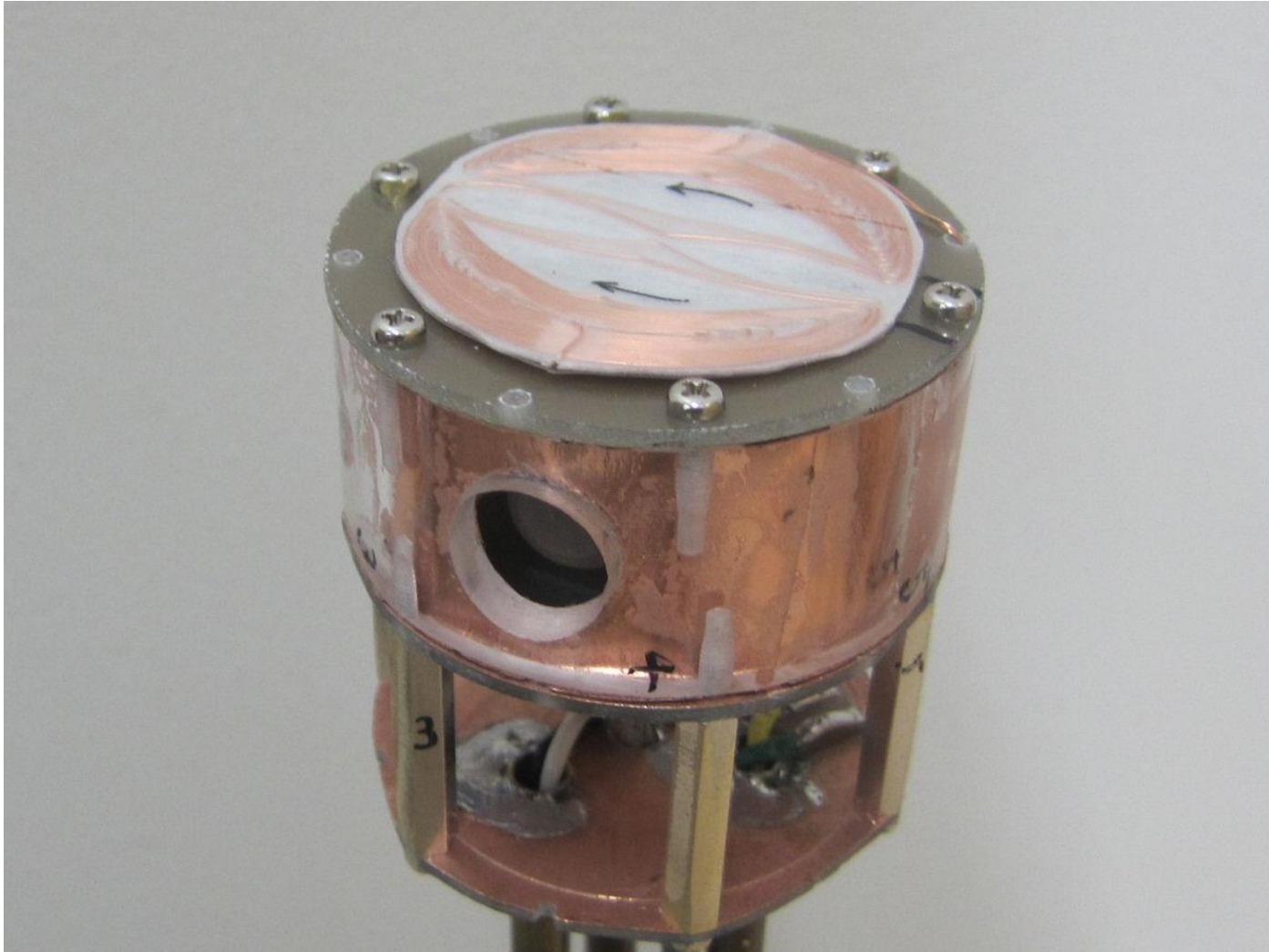


Gxコイル(両面)

Gyコイル(両面)

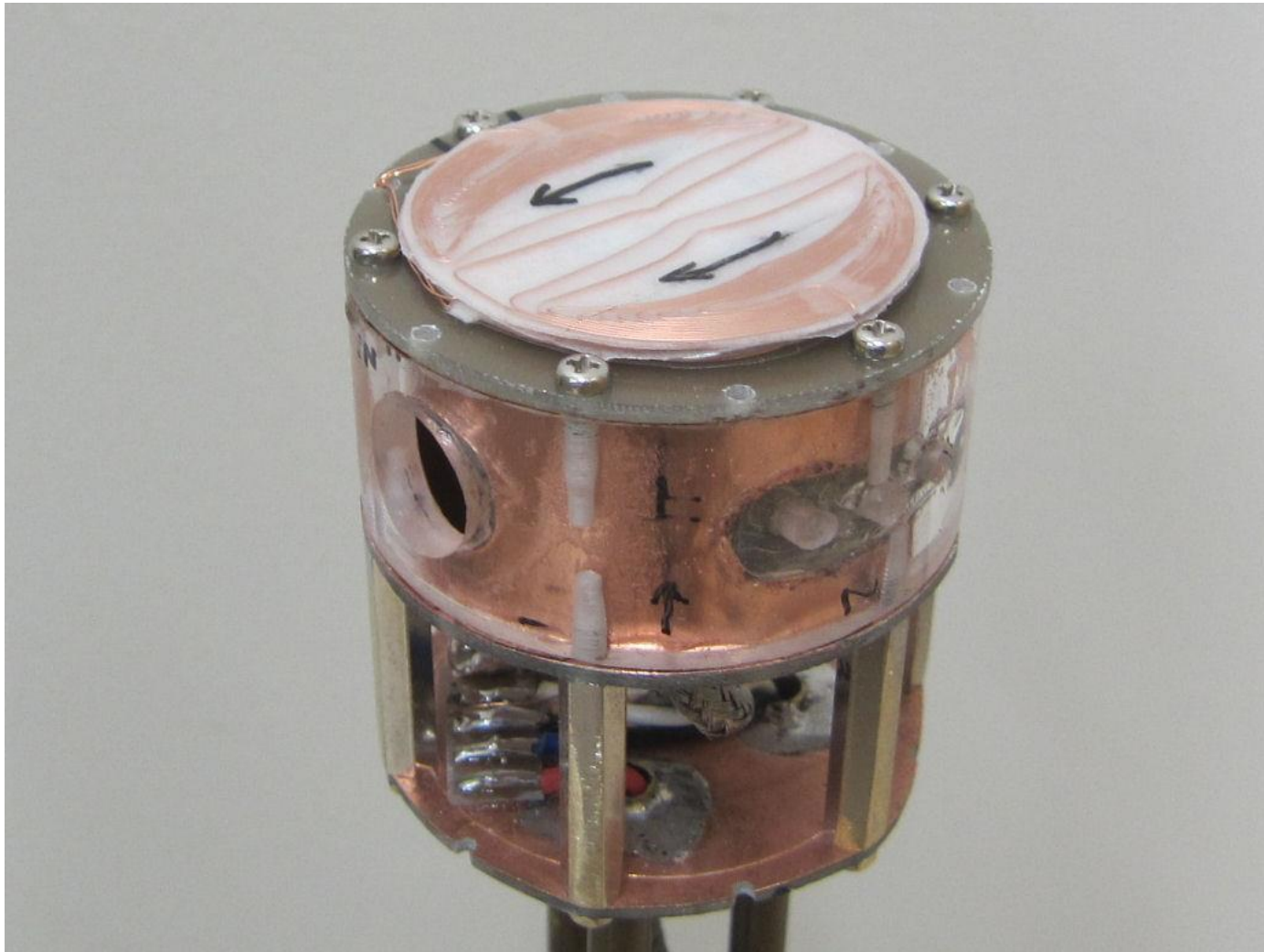
直径0.26mmのフォルマル被覆銅線で作成

MRI装置(9.4T)の立ち上げ



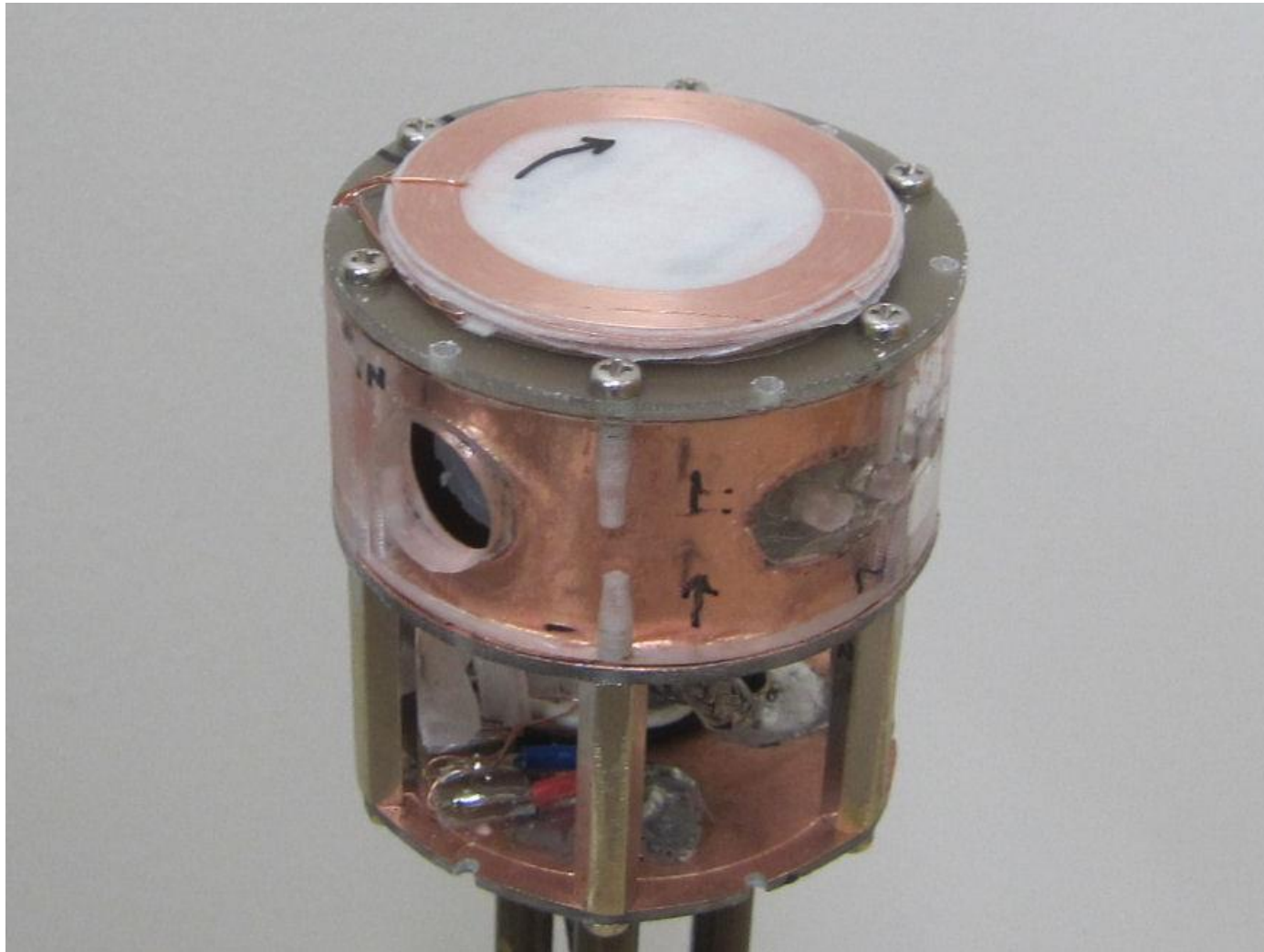
Gxの実装状態. 勾配磁場の電流効率は2.8G/cm/A. $R=3.1\Omega$

MRI装置(9.4T)の立ち上げ



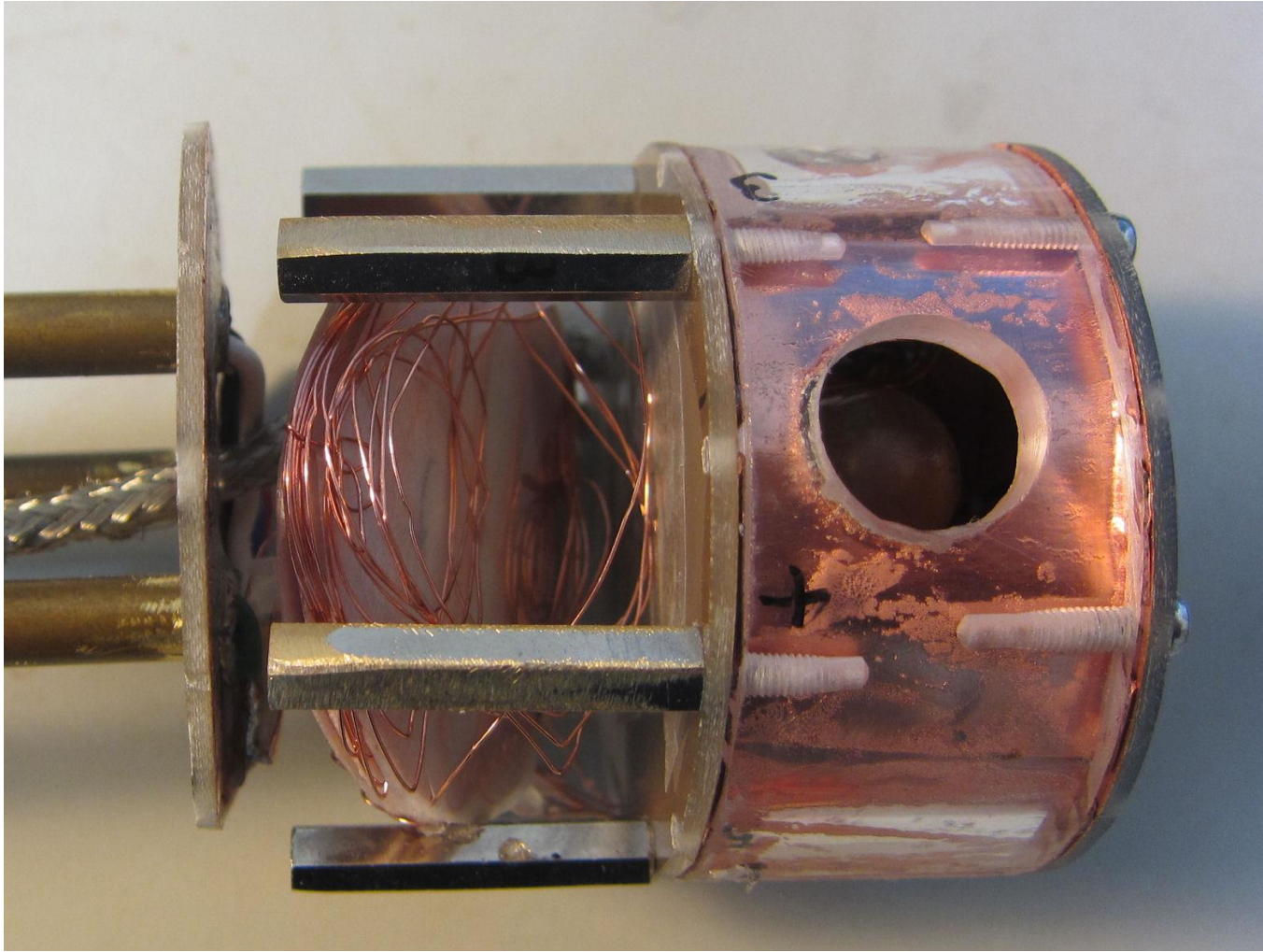
Gyの実装状態. 勾配磁場の電流効率は2.2 G/cm/A. $R=2.6\Omega$

MRI装置(9.4T)の立ち上げ



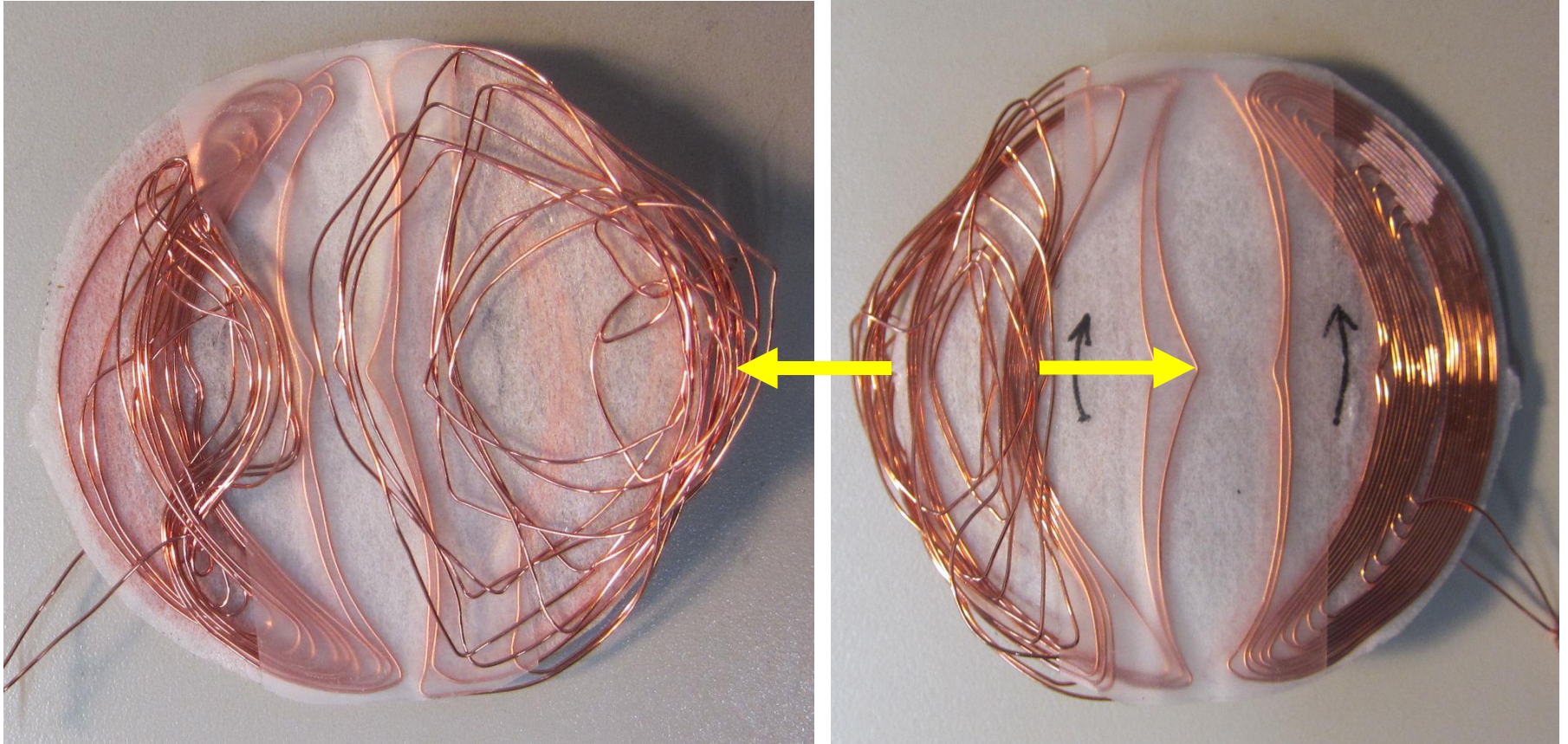
Gzの実装状態. 勾配磁場の電流効率は4.2G/cm/A. $R=1.3\Omega$

MRI装置(9.4T)の立ち上げ



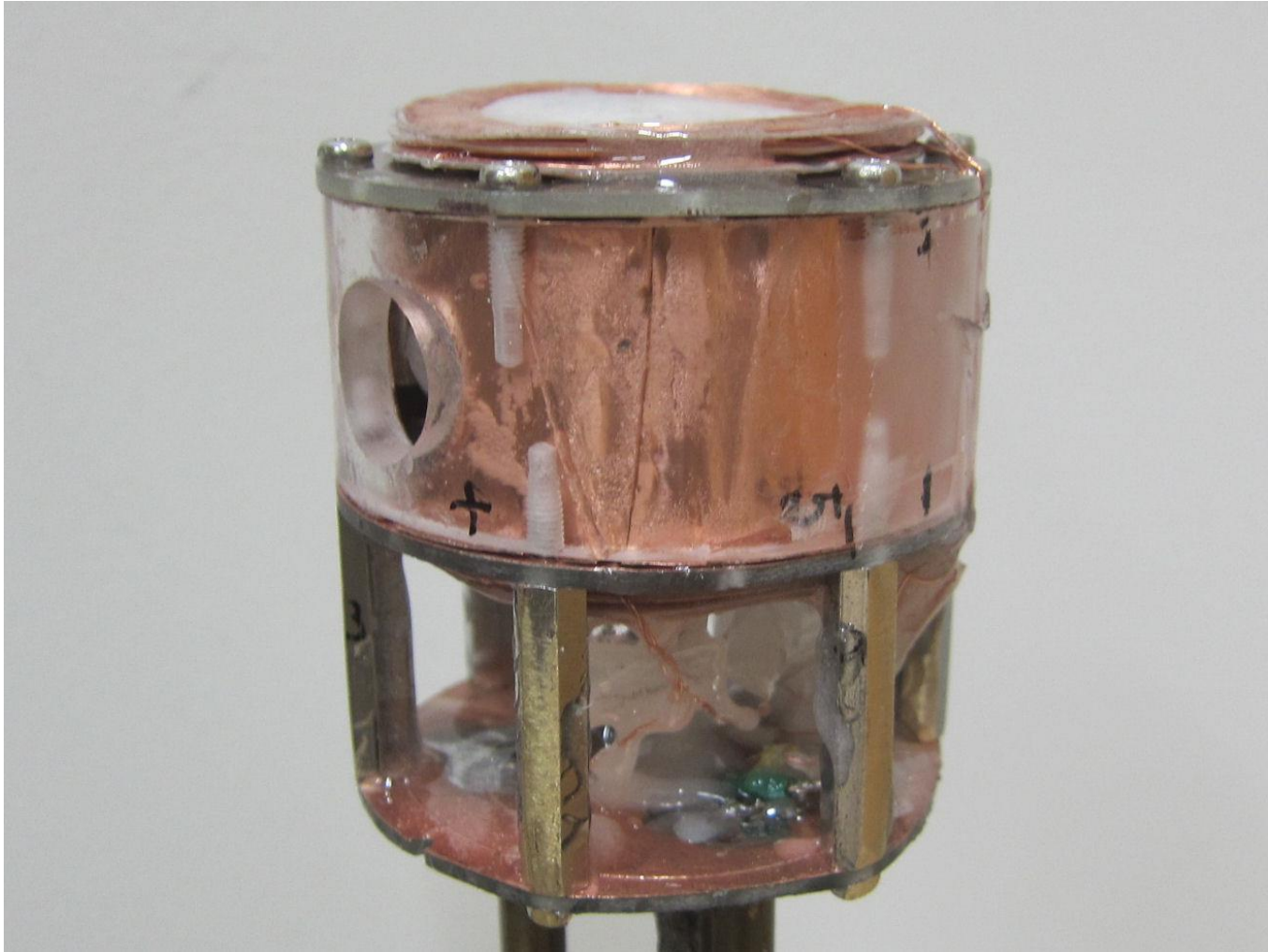
仮止めの状態で使用中に、グラジエントコイルが破壊

MRI装置(9.4T)の立ち上げ



破壊されたGxコイル. 3Aで, 1cmあたり30gw程度の力を受ける.

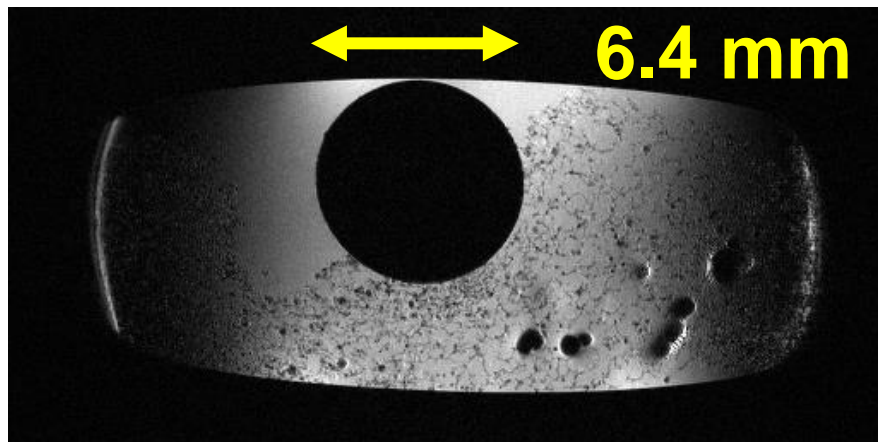
MRI装置(9.4T)の立ち上げ



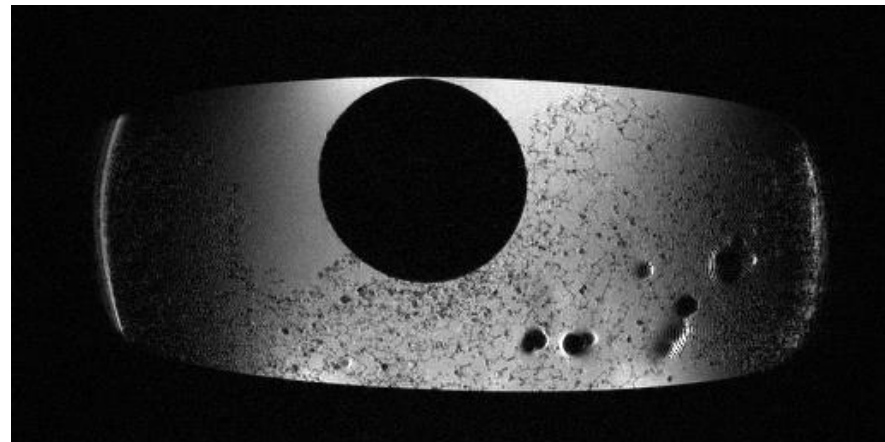
Gコイルとリード線部分を，エポキシ系樹脂で固めて完成！

MRI装置(9.4T)の立ち上げ

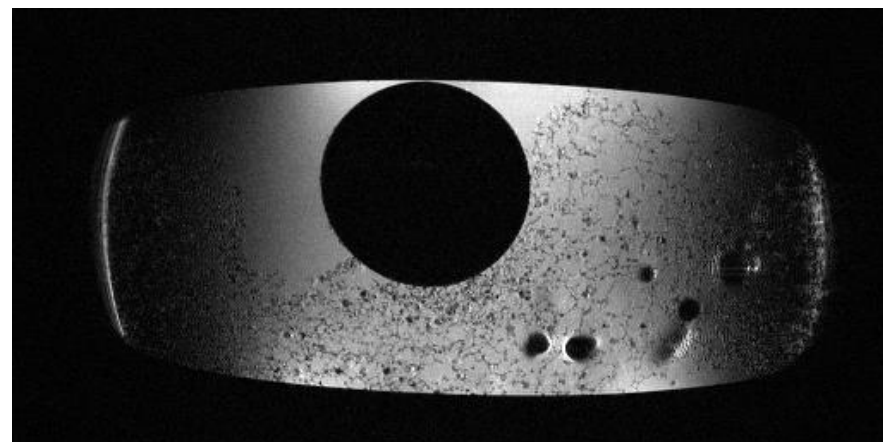
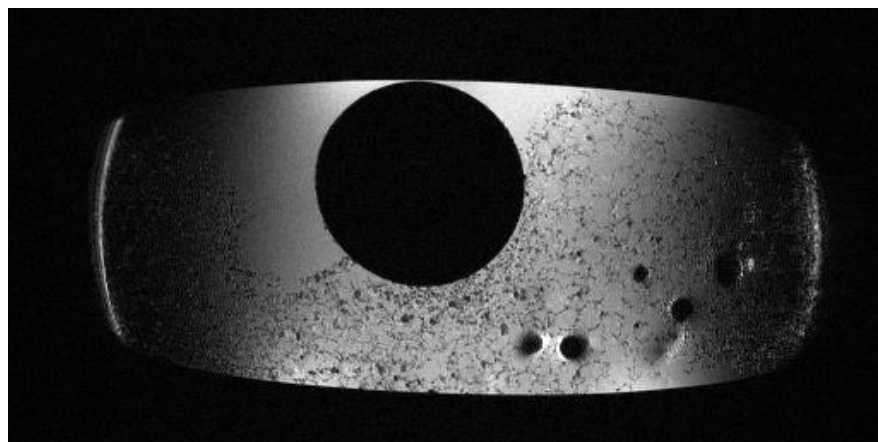
12.8 mm



6.4 mm



25.6 mm



ファントム撮像. TR/TE=200ms/20ms, 50 μ m立方.

MRI装置(9.4T)の立ち上げ



このセクションのまとめ

超伝導磁石とMRIコンソールを導入し、勾配磁場プローブを製作すれば、高性能のMR microscopeが完成する。

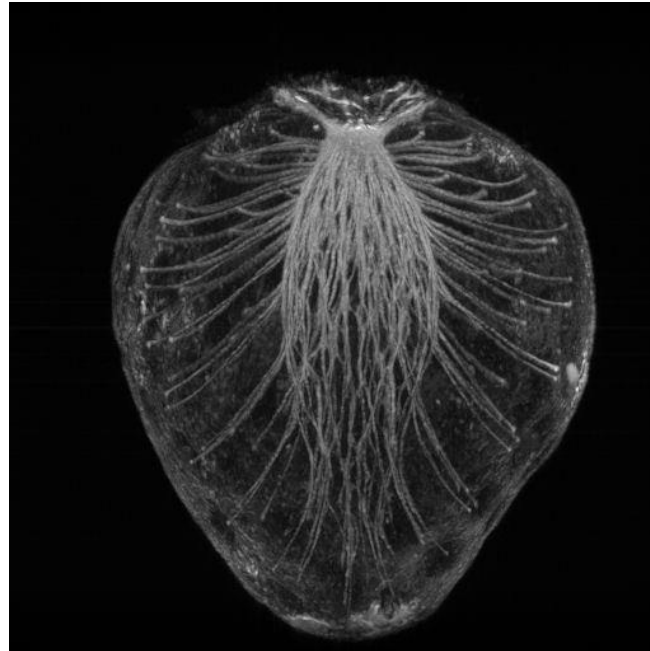
講演の内容

1. はじめに
2. MRI装置の構成
3. MRIシステムの立ち上げ
—磁石のインストールから撮像まで
4. MR microscopy画像
5. むすび

4.7Tにおけるイチゴの撮像 (256³撮像)



MIP



とちのおとめ

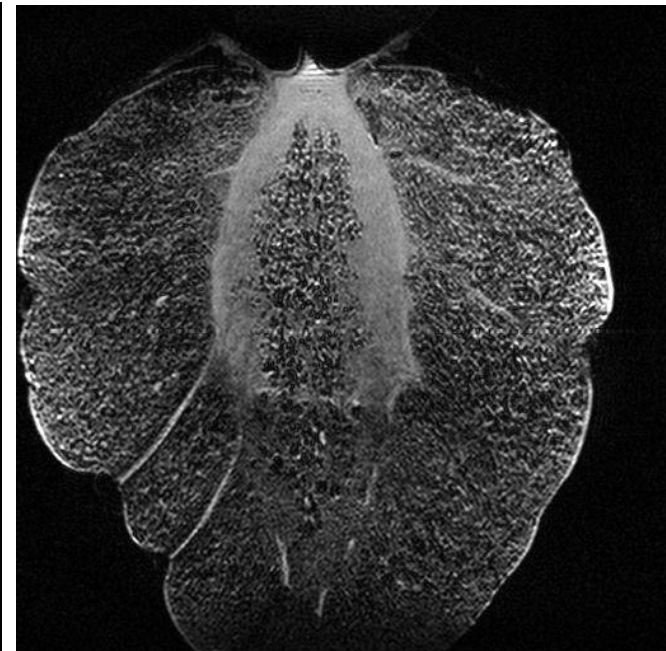
TR/TE=200ms/3.5ms

3DGRE, 256³

(125 μ m)³, 1NEX

維管束構造の可視化

Cross section



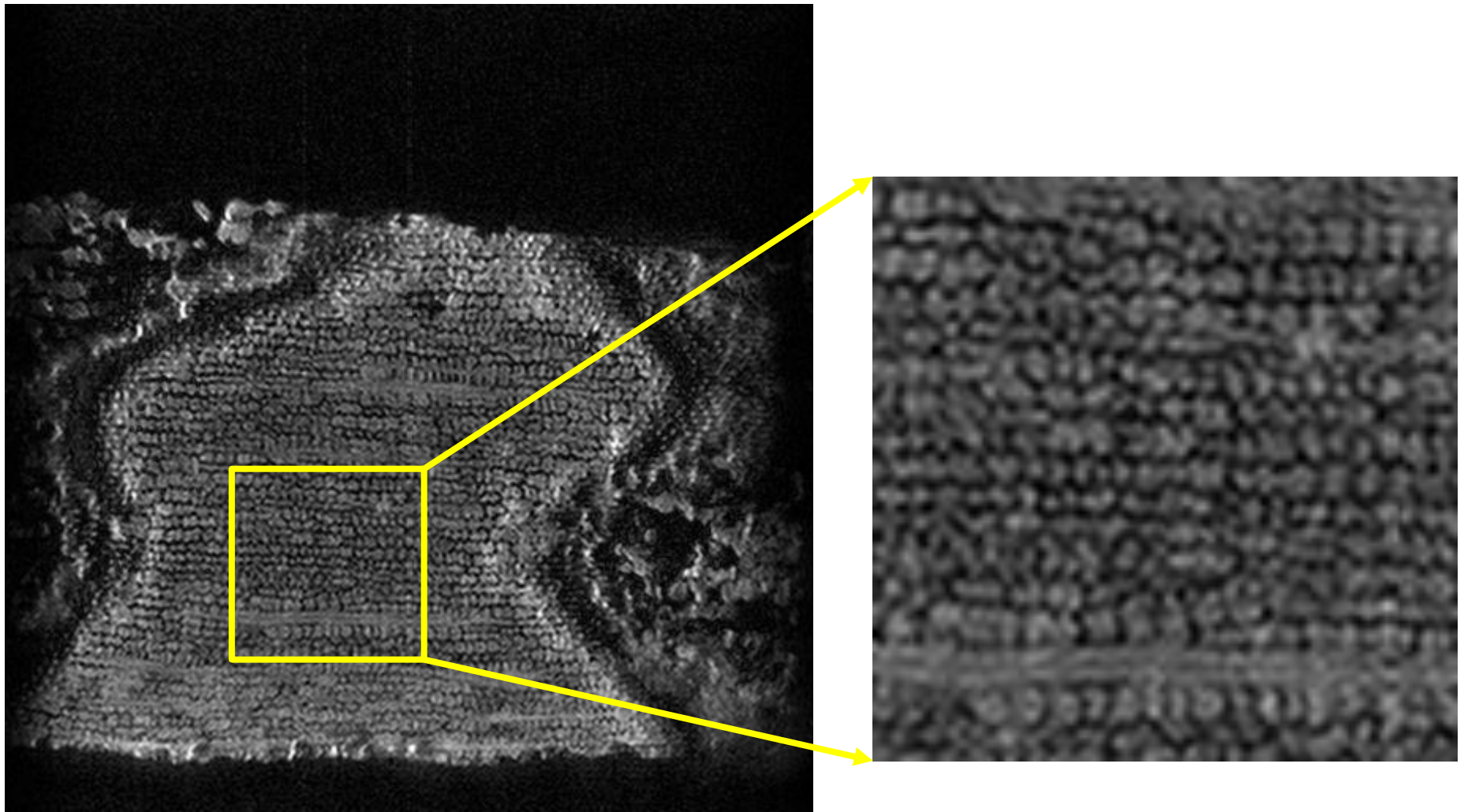
TR/TE=600ms/12ms

3DSE, 256³

(100 μ m)³, 1NEX

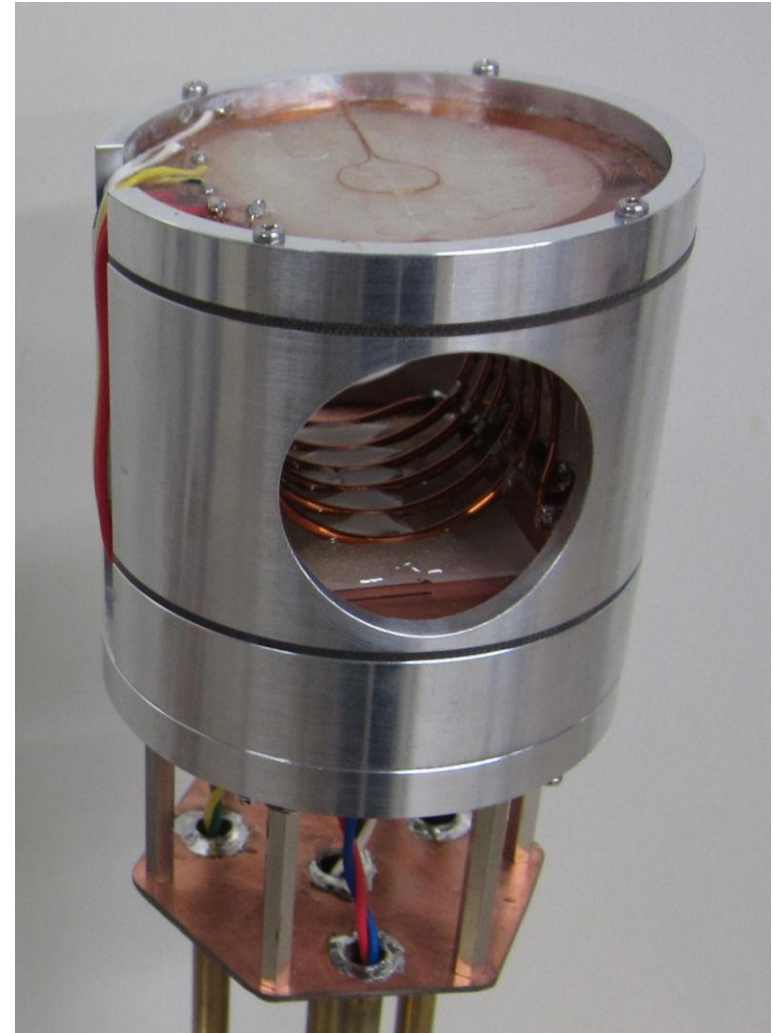
Porous structure

4.7Tにおけるタマネギの撮像 (256^3 撮像)



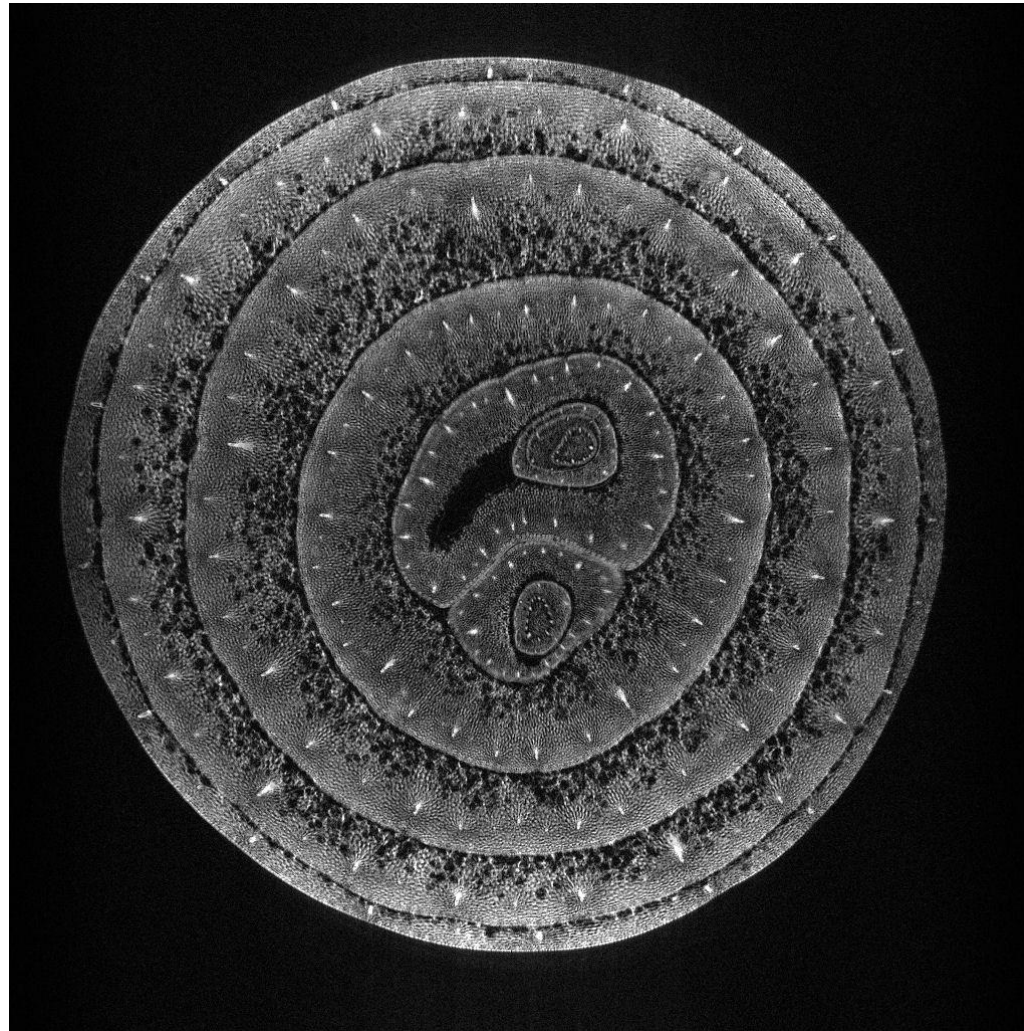
$256 \times 256 \times 256$ pixels, $(50 \mu\text{m})^3$ voxel, $(12.56 \text{ mm})^3$ FOV

4.7Tにおけるペコロスの撮像(1024²×64撮像)



内径40mmのプローブを使用

4.7Tにおけるペコロスの撮像 (1024²×64撮像)



40.96 mm

1024 × 1024 × 64 pixels (40.96 mm² FOV), TR=800ms, TE=32ms

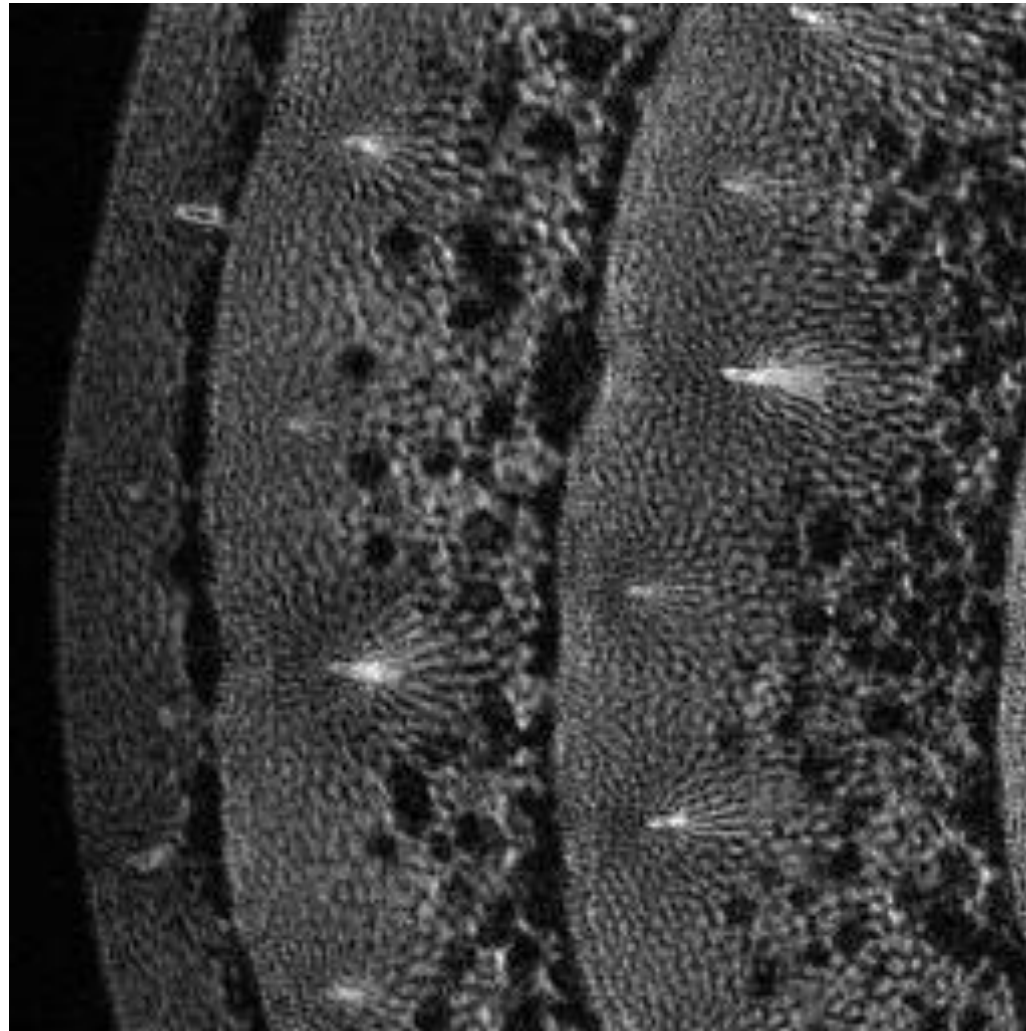
4.7Tにおけるペコロスの撮像 (1024²×64撮像)



20.48 mm

1024 × 1024 × 64 pixels (40.96 mm² FOV), TR=800ms, TE=32ms

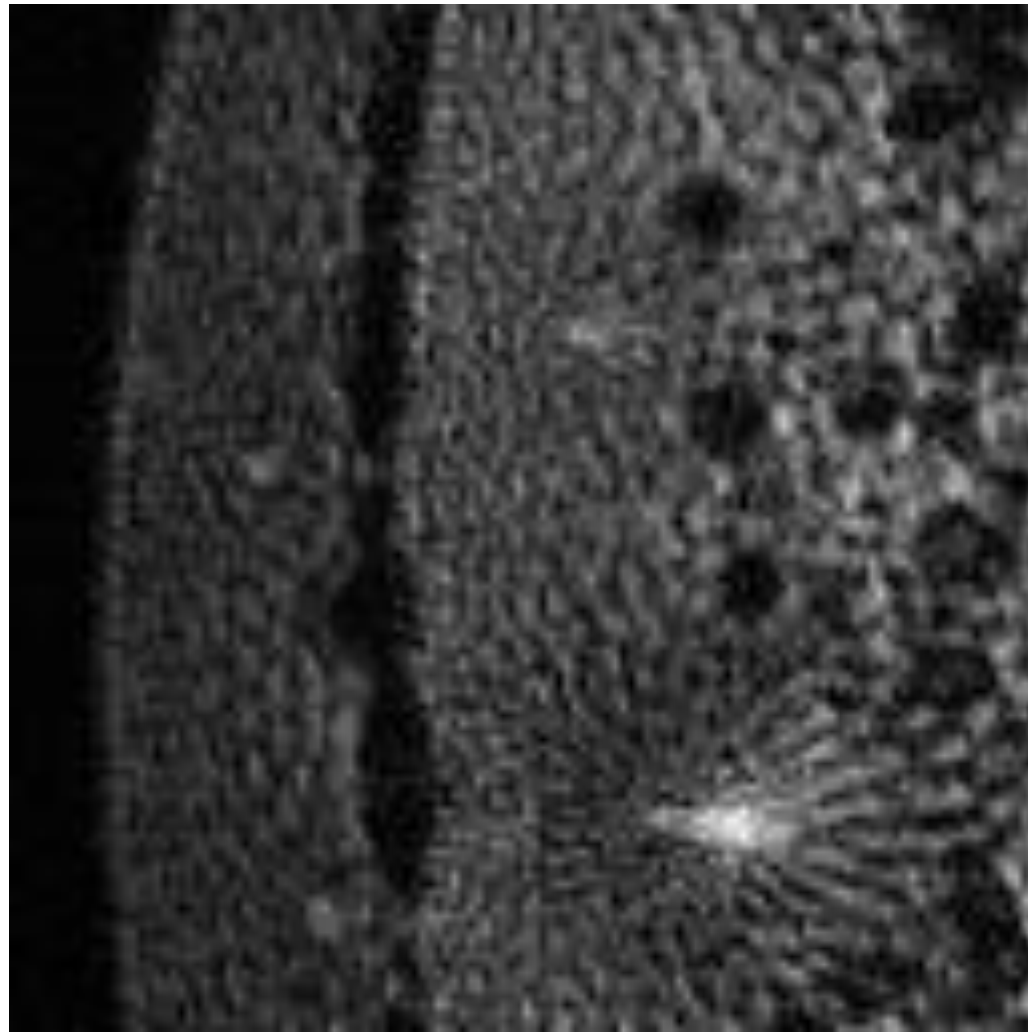
4.7Tにおけるペコロスの撮像 (1024²×64撮像)



10.24 mm

1024 × 1024 × 64 pixels (40.96 mm² FOV), TR=800ms, TE=32ms

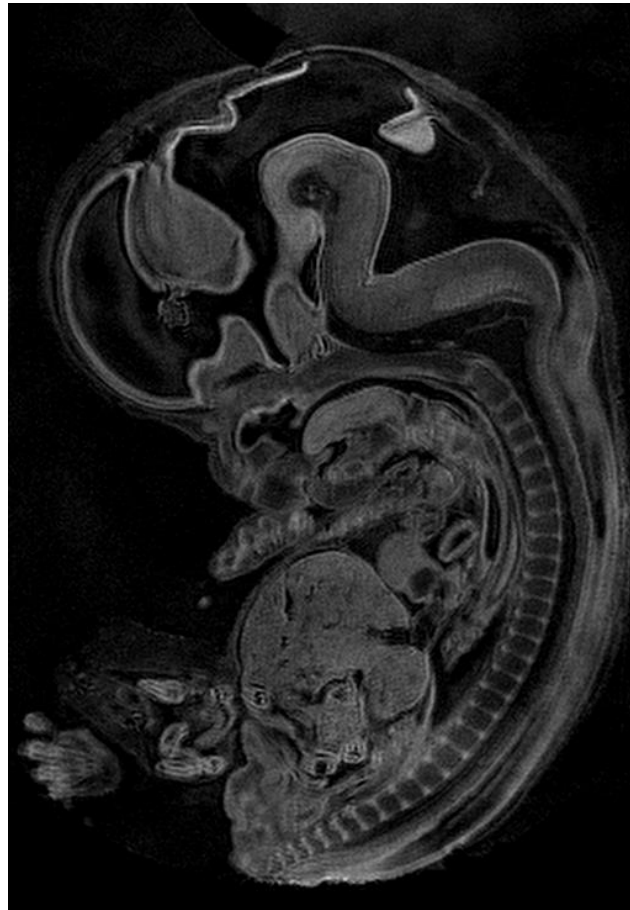
4.7Tにおけるペコロスの撮像(1024²×64撮像)



5.12 mm

1024 × 1024 × 64 pixels (40.96 mm² FOV), TR=800ms, TE=32ms

3D High Resolution Imaging at 9.4T



化学固定ヒト胚子標本CS22(京都大学先天異常標本解析センター)

TR/TE=100ms/5ms, 3DGE, $256 \times 256 \times 512$, $(60\mu\text{m})^3$, 12NEX

講演の内容

1. はじめに
2. MRI装置の構成
3. MRIシステムの立ち上げ
—磁石のインストールから撮像まで
4. MR microscopy画像
5. むすび

むすび

1. MRI装置の構成に関して、実例を中心とした紹介を行った.
2. 9.4Tの超伝導磁石を用いたMR microscopyの構築のプロセスを紹介した.
3. 4.7Tの超伝導磁石を用いたMR microscopy画像の紹介を行った.

Special Thanks to MRLab & MRTechnology

