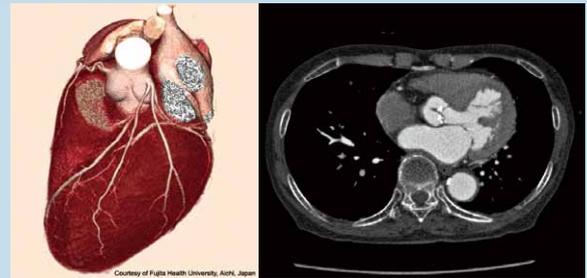




進化する 画像診断装置

日本で開発された4次元X線CT装置

近年、医療の現場で使用される画像診断装置はめざましい進歩を遂げている。動態診断をも可能とする4次元X線CT装置や、分子、細胞レベルに及ぶ豊富な情報が得られる高磁場MRI装置など、新しい装置の登場によって、従来は困難であった診断や検査が可能になりつつある。最新の画像診断装置の概要と、それを支える技術について紹介する。



4次元X線CT装置で撮影した臓器の立体画像(左)と従来のX線CT装置で撮影した断面画像(右)。時間変化を画像化し、臓器の動きも捉えることができる。

(資料提供:東芝メディカルシステムズ(株))

世界が驚いた4次元X線CT装置の登場

2007年、RSNA(北米放射線学会)に発表された日本製のX線CT装置は世界の医療関係者に大きな衝撃を与えた。その頃のX線CT装置の撮影範囲は1回転で32mm程度が最高であったが、開発された装置の撮影範囲は1回転で160mmに及び、心臓や脳全体を撮影することができた。その撮影時間は0.35秒と高速で、従来の最上位機種に比べ、例えば心臓の撮影なら撮影時間は約1/20、被曝量は約1/4、造影剤の使用量は1/2程度に軽減された。また、この高速スキャンを連続で行うことで、臓器の動態をも観察することができる。例えば血流速度の速い脳の血流動態を観察できたり、動脈と静脈を分離して捉えることも可能だ。関節の動きや自然呼吸下での肺の動き、食べ物を飲み込む時の嚥下運動など、従来は不可能とされてきた動態診断を行えるのが特長である。世界初となる4次元X線CT装置は、当時の技術レベルをはるかに超えたもので、日本の技術力を世界

に知らしめることとなった。

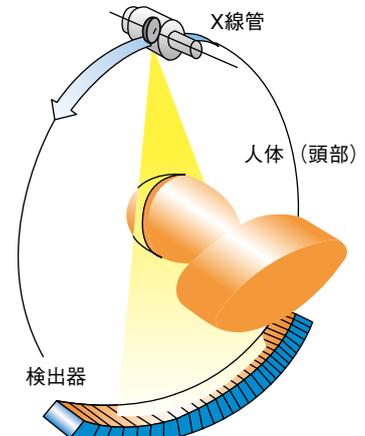
病院における主な画像診断装置には、X線CT(コンピュータ断層撮影)装置、MRI(磁気共鳴イメージング)装置、超音波診断装置等があるが、なかでも代表的な画像診断装置であるX線CT装置はX線を照射してその吸収率の差によって白黒の濃淡をつけて断層画像を撮影する装置である。かつては単に横断面の2次元画像を撮影するだけにとどまっていたが、現在では装置が身体のまわりを1回転し複数の画像を撮影し、それをコンピュータ処理して3次元再構成することが可能となっている。さらには4次元の動態観察も可能とする装置が登場し、注目が集まっている。

日本で開発された4次元X線CT装置は、検出器の「列」の数が圧倒的に多いことが特徴である(図1)。X線CT装置は、X線を照射するX線管球に対向して検出器が設置される仕組みとなっている(図2、4)。検出器1列で1回転の撮影により約0.5mmの範囲を撮影することができる。1997年に東芝メディカルシステ

■ 検出器多列化の進展 (図1)



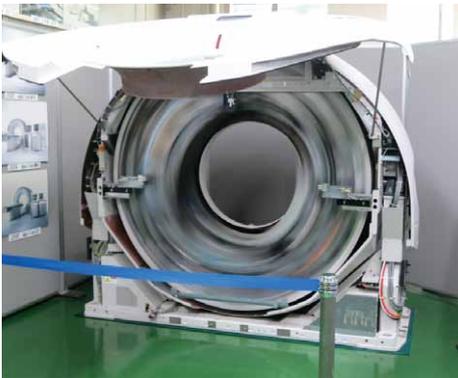
■ X線CT装置の仕組み (図2)



検出器は1列で約0.5mmの範囲を撮影できる。1990年代後半、X線CT装置の主流は4列の検出器で、撮影範囲は2mmあった。その頃に日本は「1回転1臓器」をめざし、撮影範囲128mm、256列の装置開発をスタートした。

(資料提供:東芝メディカルシステムズ(株))

■ X線CT装置内部の回転の様子 (図3)



■ 従来型と新型の比較 (図4)

従来型X線CT装置

ベッドを動かしながら、時間をかけて撮る。撮影時は呼吸を止めて動いてはいけない。撮影時間が長くなると放射線による被曝量が増える。

開発された4次元X線CT装置

1回転で心臓全体を撮影できる。ベッドを動かす必要はなし。従来の最上位機種に比べ、例えば心臓の撮影なら撮影時間は約1/20、被曝量は約1/4、造影剤の使用量は1/2程度に軽減される。

ムズ(株)で始まった開発は、構想段階から「1回転で1臓器の撮影ができること」を目標に掲げていた。これを実現するには256列の検出器を開発する必要がある。当時のX線CT装置の主流が4列であった頃に、256列は常識を超える挑戦であった。翌年にはNEDOプロジェクト「高速コンビーム3次元X線CTの開発」として研究は本格化し、その後さらにNEDO助成事業「リアルタイム4Dイメージングシステムの開発」によって開発は進み、2002年には256列の装置開発に成功した。しかしこの装置で、心臓や脳は撮影できるものの、呼吸による上下動で心臓の一部が切れてしまったり、体格の大きい外国人の場合は小脳の一部が入りきらなかったりした。そこで心臓や脳全体の撮影ができる320列のX線CT装置の開発が進められ、2007年に製品として発表された。

撮影時間は0.35秒で、最新機種ではさらに0.275秒に短縮された。1回転0.275秒で回転するため、総重量約800kgにおよぶ回転部の部品は、45Gの遠心力による加速度が発生する(図3)。このため装置内の各部品の補強には鉄鋼材料が使用され、安全性の確保や位置精度の担保に役立っている。

同製品は米国や欧米、中国、日本等、世界でつぎつぎと採用されており、1200台以上納入されている(2017年1月現在)。革新

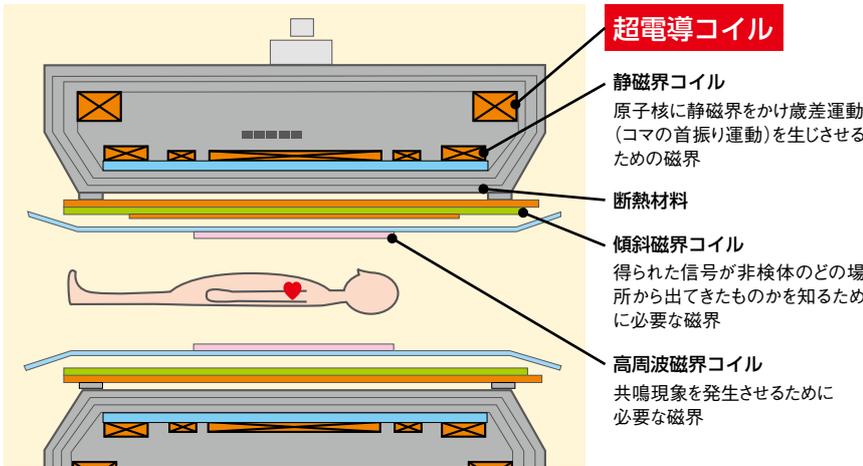
的な製品を先行投入し、臨床での研究実績を積んだことが、普及拡大に繋がった。これまで日本メーカはX線CT装置で世界第4位のシェアであったが、同製品を契機に1位を僅差で追いつける位置にまで、勢いを増している。現在、X線CT装置は上位3社で世界の80%のシェアを占めており、3社は数%の差で競い合っている。

より鮮明な画像を求めたMRI装置の開発

一方、X線CT装置に並び画像診断に広く利用されているのがMRI装置である(図5)。MRI装置は強磁場のなかで、原子核が特定の周波数の電波のみを吸収する核磁気共鳴現象を利用する。放射線被曝がないため、広く臨床診断に用いられ、X線CT装置が濃度に依存した画像が得られるのに対し、MRI装置では濃度はもちろんのこと、固さや水っぽさ、温度、phなどの多彩な情報が得られる。

一般に磁場強度が大きくなると、得られる信号が強くなることで信号雑音比が上昇し、短時間に高精細な画像が得られる。そのため、MRI装置の磁場強度の増大に多くの努力がなされてきた。臨床用は1.5T(テスラ)装置が主流であったが、2003年に3T

■MRI装置の構造(図5)



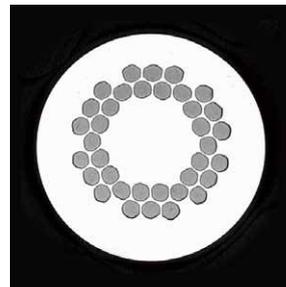
■MRI装置の高磁場化による鮮明な画像(図6)



■MRI装置用7T超電導マグネット(図7)



■Nb-Ti線材の断面図(図8)



(資料提供: (株) 神戸製鋼所)

装置が薬事認可されてから(全身用装置は2005年に認可)、一般臨床病院にも導入されるようになってきている。1.5T装置に比べ3T装置では明らかな画質の向上が認められ(図6)、高分解能画像が臨床において短時間で容易に得られるようになってきている。最近ではさらに7T装置が研究用や動物用に導入されており(図7)、今後、脳の動きなどを鮮明に画像化するには10Tクラスの超高磁場MRI装置の導入が必要と考えられている。

MRI装置の高磁場化には強力な磁場を生み出す超電導マグネットが不可欠である。これには超電導線材の開発が重要な役割を果たす。MRI装置の超電導マグネットには主にNb-Ti線材が使用されている(図8)。Nb-Ti線材は、Nb-Ti合金をCu棒中心に挿入し、これを押出後に伸線し、六角棒に成形したものを多数束ねて銅管に挿入し、再び押出して伸線し、最後に電磁氣的にフィラメント間の結合を断ち切るためねじり加工し、製造されている。

超電導現象は液体ヘリウムの沸点温度である-269℃において発現するため、超電導マグネットは液体ヘリウムに浸漬して用いられるが、将来的に、臨界温度が高いBi系やY系の線材をMRI装置に適用できれば、運転に必要な冷却温度を現状よりも高くでき、液体ヘリウムを用いなくてもよい状況が実現できる。このようなことから、高温超電導コイルを搭載したMRI装置の研究も進められており、その成果が期待されている(図9)。

広く臨床に活用されるために

最近、臨床診断用に用いられているMRI装置へのニーズは変化してきており、患者への負担を軽減するために、患者が入る空間を短くする短尺化や大きくする大口径化、騒音を低減する静音化等が求められている。

短尺化については、患者が入る空間がトンネル状になっているため閉塞感を感じやすく、子供や閉所恐怖症の人には精神的な負担が大きかった。そこで閉塞感を緩和するために、装置の長さを短くしたり、オープン型MRI装置も開発されている。

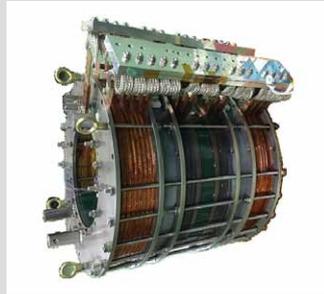
短尺化を図るには超電導マグネットの新たな設計が必要となる。超電導マグネットは比較的大きな空間において高均一な磁場を発生する必要があり、マグネットの軸長を短くすることは難易度が高い。そのためコイルを3層以上(主コイルを2層以上、遮蔽コイルを1層)にする多層構造が提案されており、従来マグネットは1.5m程度の長さがあったが、多層化により900mmに短尺化できることが確認されている(図10)。

また超電導体中に抵抗ゼロで流すことができる最大の電流値を臨界電流というが、超電導線材の臨界電流密度(Jc)を向上させると、線材使用量が減り、マグネットの小型化を図ることができ

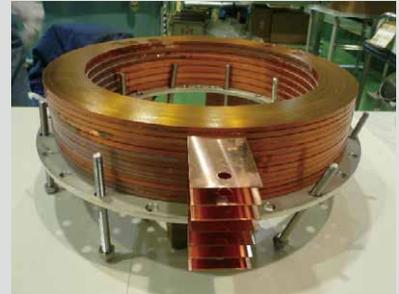
Y系超電導コイルを搭載したMRI装置で世界初3Tでの撮像に成功(図9)

三菱電機、京都大学、東北大学は、経済産業省および国立研究開発法人日本医療研究開発機構(AMED)のプロジェクトにて、Y系超電導コイルをミニMRI装置に搭載し、世界初となる3Tでのマウス胎児の撮像に成功した。高温超電導コイルを使用するため液体ヘリウムは不要となる。

■高温超電導コイル



■高温超電導コイル組み立ての様子



巻き線精度を向上することで、磁界強度の均一性を実現した。

(資料提供:三菱電機(株))

る。線材使用量の低減はコストダウンにも繋がる。Nb-Ti線材は特に α -Ti粒子の析出相が有効なピン止め効果を発揮し、 J_c 向上に繋がるため、析出制御が積極的に行われている。

一方、大口径化については、従来は患者が入る空間が直径60cm程度であったが、最近では患者の体格が大きい海外での使用も考え70cm程度に拡大している。超電導マグネットと患者が入る常温空間の間には断熱材料や傾斜磁界コイル、高周波磁界コイル等が入るため、超電導マグネットの内径は100cm程度必要となり、マグネットの大口径化が進められている。

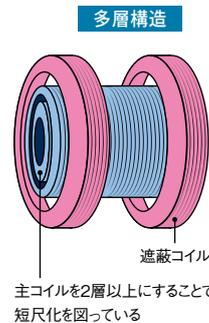
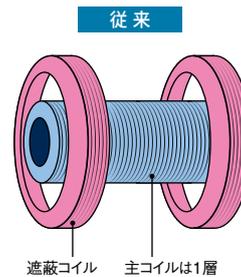
静音化については、MRI装置は高磁場中で大電流を高速でオン、オフするため、電磁力が急激に変化して大きな騒音が発生する。この騒音の発生源である傾斜磁界コイルを真空封入したり、撮像方法の工夫により電流波形の変動を抑えることで、大幅な騒音の低減が図られている。

さらに、高額なMRI装置のコストダウンやランニングコストの低減も大きなニーズとなっている。超電導マグネットの冷却に用いられる液体ヘリウムは有限な地下資源であり、近年その需給がひっ迫している。ヘリウム消費量を低減するため、極低温小型冷凍機をマグネットに搭載し液体ヘリウムの蒸発をなくすゼロボイルオフ方式がMRI装置に一般的に採用されている。液体ヘリウムの蒸発潜熱は非常に小さく、微量な入熱でも蒸発することから、ヘリウム槽への熱侵入を減らす必要がある。蒸発したヘリウムはヘリウム槽の上部に設置した冷凍機によって冷却され、ここで再液化される。結果として冷凍機が稼働している限りゼロボイルオフを維持できる(図11)。

また、MRI装置より繊細な測定を行うNMR(nuclear magnetic resonance)装置では冷凍機の振動が信号に影響を及ぼすため、この方式の採用は見送られてきたが、このほど、ゼロボイルオフ型NMRが開発された(図12)。さらには液体ヘリウムそのものを使用しない無冷媒型超電導磁石の研究開発も進められている。

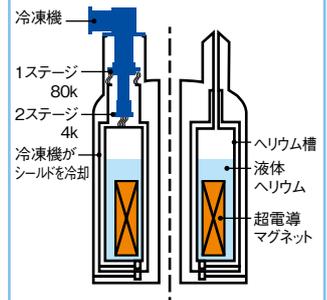
日本は人口あたりのX線CT装置とMRI装置の設置数が、世界で最も多い国である。画像診断装置は診断にとどまらず、治療計画や術後評価にも利用され始めている。さらに高精細な画像診断

■超電導マグネットの短尺化を図る多層構造(図10)



■ゼロボイルオフ型超電導マグネット

概念図(図11)



■NMRマグネット(図12)



(資料提供:(株)神戸製鋼所)

装置を求めるニーズも高く、開発には臨床の現場で活躍する医師も参画し、臨床での評価が装置開発に活かされている。現在、例えば心臓の血管の詰まりをX線CT装置で捉えることができて、その詰まりが直径3mmの血管の中の何%程度まで詰まっているかは、今の装置では正確に判断できない。そのためより細部にわたって撮影できる装置が開発できれば、予防診断に役立てることができる。高齢化による疾病件数の増加が見込まれる我が国において、その果たす役割は重要度を増し、今後の進化が大いに期待される。

- 取材協力 東芝メディカルシステムズ(株)、(株)神戸製鋼所
- 文 藤井 美穂