

基礎連続講座

CT講座

## X線CT装置の機器工学(1)

## - X線の発生と検出 -

藤田保健衛生大学衛生学部 辻岡勝美

## 1. CT装置の構成

現在、世界に普及しているCT装置のほとんどが rotate/rotate動作を行う第三代装置である。Fig. 1にその基本的構成を示す。CT装置の基本的な動作は、X線制御、X線発生、X線検出、データ収集、画像再構成、画像表示に分けられる。X線発生装置やX線検出器はCT装置の心臓部といえるもので、X線を利用するCT装置ではこれらの性能が装置の基本的性能を決定する。X線発生装置やX線検出器の進歩がCT装置の進歩につながるといえる。今回、X線CT装置のX線発生からX線検出までを解説する。

## 2. X線発生装置

X線発生装置は高電圧装置とX線管に分けられる。現在のCT装置は連続回転方式が主流であり、高電圧装置で発生する電力はスリップリングを介してX線管に供給される。スリップリングの前段階に高電圧装置が置かれ、X線管が回転するものは高電圧型スリップリング、高電圧装置とX線管がともに回転するものを低電圧(大電流)型スリップリングと呼ぶ。開発当時は高電圧型スリップリングが存在したが、この場合、スリップリング全体を不活性ガスで充填してやる必要があった。最近では低電圧(大電流)型スリップリングが主流となっている。これは、高電圧装置に高周波インバータを採用することによる小型軽量化の効果によるものである。

## 2-1 X線高電圧装置

従来、CT用X線発生装置ではパルスX線が主流であった。そのころは50Hzあるいは60Hzの商用電源を単純に昇圧し整流する三相全波整流方式がほとんどであった。このような装置の問題点として、高電圧装置の大型化、高精度の制御が困難、等があった。また、パルスX線では1回転のスキャンで照射されるX線量が少なく、十分な画像ノイズを維持するためにはスキャン時間を長くするしかなく、最終的にスキャン時間を短縮することができなかった。このような問題から、

現在では高周波インバータ方式による連続X線が採用されている。

高周波インバータ装置の構成例として共振型インバータ方式をFig. 2に示す。共振型インバータ装置では商用電源をいったん整流し直流に変換したのち、インバータで数十kHzの周波数の交流に再度逆変換する。次にコンデンサとコイル(リアクタ)による共振回路がある。インバータ周波数を調整することにより共振回路に流れる電流は変化し、これが管電圧変化となる。変圧器による昇圧は周波数に依存し、高周波ほど装置を小型軽量化ができる。高周波インバータ装置の利点として小型軽量化、高精度制御が挙げられる。これにより、X線CT装置では高電圧装置をスリップリングの回転部に設置することが可能となり、低電圧(大電流)スリップリング方式が可能となった。高電圧スリップリング方式のような不活性ガスが不要となったのである。

X線CT用の高電圧発生装置に求められる性能を以下に挙げる。

- 1) 管電圧はリプルが十分に小さく、安定性、再現性が良好であること。
- 2) 管電圧波形の立ち上がり、立ち下がり時間が十分に短いこと。
- 3) 管電流の安定性、再現性がよいこと。
- 4) 管電流の立ち上がり、立ち下がり時間が十分に短いこと。
- 5) 大出力X線の発生に対応可能で、熱的に十分余裕のあること。

管電圧、管電流の安定性、再現性は計測機器の一面を有するCTとしては重要な要素である。また、データ収集時以外のX線照射を行わないために立ち上がり、立ち下がり時間の短縮は技術的に重要な問題となっている。さらに、最近ではスキャン中に管電流を調節し、被写体の形状が変化しても最終的な画像ノイズを一定にしようとする技術も開発され、管電流における立ち上がり、立ち下がり時間の短縮も重要となっている。

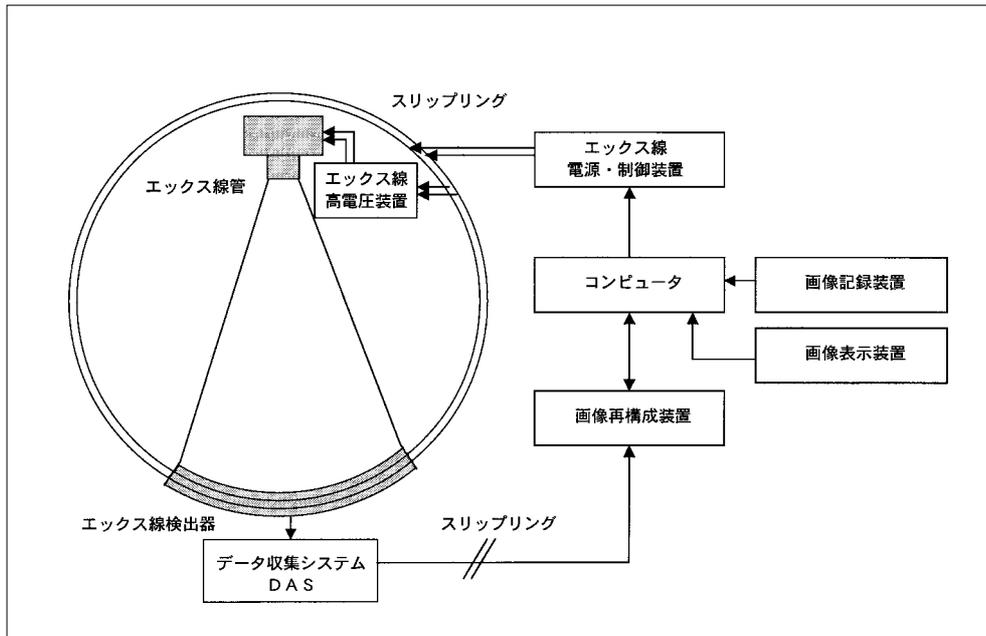


Fig. 1 CT装置の構成 .  
スリップリングを採用したrotate/rotate動作を行う第三代装置 .

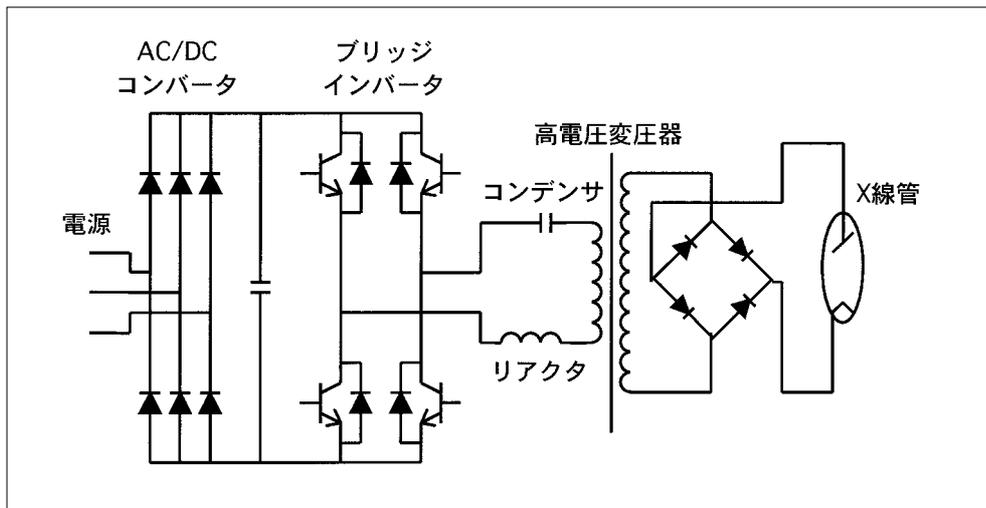


Fig. 2 共振型インバータ方式X線高電圧発生装置 .  
インバータ周波数により管電圧が調整される .

## 2-2 X線管

CT装置におけるX線管は一般のX線診断装置用X線管と本質的には同じではあるが、いくつかの点でCT用としての特徴を有している。ここに、X線CT用X線管に要求される条件を挙げる。

### 2-2-1 陽極熱容量

一般の診断用X線における撮影時間は長くても1秒未満であった。しかし、X線CTでは従来のノンヘリカルスキャンであっても被写体の周囲を1回転し、そのあいだ、X線照射が行わなければならない。ヘリカルスキャンでは数十回転の間、X線は照射し続けなければならない。また、X線診断用装置ではX線出力

がフィルム濃度に関与するが、CTではX線出力は画像再構成されたスライス画像のノイズに関与する。十分な画質を維持するためにはある程度のX線強度も必要となる。回転速度が速く、回転時間が短ければ大熱容量でなくてもよいかというそうでもない。スキャン時間が短くなればなるほど1回転で照射されるX線量は少なくなってしまうので最終的には画像ノイズが増大する結果となる。このため、高速スキャンであればあるほど大出力のX線が照射されるべきである。さらに、最近では薄いスライスによるHRCT (high resolution CT) や三次元CTなどが活用されるようになると、スライス厚が薄いぶんだけ画像ノイズが増大する。こ

のため、高速回転、薄いスライス厚ほどX線強度は大きくしなければならぬ。以上のことから、X線CT装置では必然的に大熱容量のX線管が必要とされる。ヘリカルスキャンが開発されるまでは1MHU以下のものが主体であった。これは、1回転ごとに照射、冷却が行われていたからである。ヘリカルスキャンが行われないので三次元表示や多数枚のHRCTも行われず薄いスライスを連続的に撮影するというも行われなかった。ヘリカルスキャンの開発により1回のスキャンで数十回転が連続して行われ、X線の照射時間も延長した。その結果、大きな陽極熱容量を有するX線管の需要が増大した。最近では6.5MHU、7.5MHUというX線管もCT用に開発されている。簡単にいえば「大線量を長時間出してもなかなか熱くならないX線管」である。

#### 2-2-2 冷却率

CT用のX線管において冷却率も重要な要素である。最近のCT検査、特にヘリカルスキャンやマルチスライスヘリカルスキャンでは造影剤注入における血流状況が時間をおってスキャンが行われる。従来のような単純と造影というようなものではなく、造影時相を数フェイズに分けて検査が行われる。1回のヘリカルスキャンで終了ということはなく、連続的にヘリカルスキャンが繰り返される。このような場合、熱せられたX線管陽極を素早く冷やす技術が必要となる。一般のX線診断用のX線管では冷却用のファンによる空冷であったが、CT用のX線管ではX線管を冷却用のオイルに浸し、そのオイルを循環冷却するようにしている。「熱くなくてもすぐ冷えるX線管」である。

#### 2-2-3 安定性

高電圧発生装置でも述べたが、X線管においても安定性、再現性は重要な性能の一つである。CT装置が単なるX線の強弱のみをとらえるものではなく、CT値を用いた計測装置ということを考えれば当然のことである。機械的な面からいえば、焦点位置の安定性も重要な要素の一つである。最近では0.5mmの薄いスライス厚が可能であり、その画質を維持するためにはX線焦点の位置の揺らぎの抑制は重大な要素となる。X線管が高速で回転しても、さらに、X線管の陽極が高温になってもX線焦点位置が変化しないことが重要である。

#### 2-2-4 耐遠心力

最近のCT装置では1回転0.5秒、さらには1回転0.4秒も開発されている。1回転1秒でX線管に加わる遠心力はおよそ2Gから3G、これが1回転0.5秒では9G、1回転0.4秒では13Gにもなる。このようにスキャン時間の短縮はX線管の機械的強度が重要な問題となる。X線管といえば陽極回転であるが、陽極の回転軸はスキャンの回転方向に直交しておかれる。遠心力に

耐えることを考えれば、陽極の回転軸をスキャン方向に沿っておくほうが耐遠心力は優れる。しかし、X線管におけるヒール効果から考えるとチャンネル方向に置いてX線強度が変化してしまう。結局、回転陽極のX線管軸をスキャン方向と直交しておかなくてはならない。あとは遠心力との勝負である。前項で述べたように、「陽極熱容量」「冷却率」「安定性」から考えると大型化が必要となる。しかし、「遠心力」を考えれば、むやみに重くすることもできない。しかし、スキャンの高速化に従いX線出力を上げなければ1回転中のX線量を維持できなくなり、画像ノイズは増大する。最近では、従来のX線管とはまったく異なった形状の「両持ち支持機構」のX線管が開発されている。

#### 2-2-5 小型軽量化

前項で述べたとおりCT用X線管は大熱容量、高冷却率が要求される。しかし、その反面、高耐遠心力も要求され小型軽量化の要求もある。X線管の小型軽量化がなされれば架台の設計も余裕を持って行える。

ここで、最近のX線管のトピックとして二つのX線管の紹介を行う。一つは従来の大容量X線管で6.5MHU、もう一つは新型のX線管（東芝MegaCool）7.5MHUである。Table 1におもな仕様の比較を示す。6.5MHUのもので十分な性能を有しているが、新型の優位性が理解できる。Fig. 3に新型X線管の構造を示す。

新型X線管の第一の特徴は「両持ち支持機構」である。従来型のX線管では片持ち支持機構であったが、両持ちにすることにより耐遠心力が向上する。第二の特徴は「陽極接地」の採用である。従来型のX線管ではX線管容器に対して±75kVという中点接地方式を採用していた。陽極接地方式により陽極とX線管容器とは同電位となり陽極をX線管陽極に近接させることができる。これにより放熱性能が向上し、X線管の冷却性能を挙げるができる。従来型のX線管と同程度のサイズ・重量で大熱容量、高冷却率が可能となり、高速スキャナが実用化された。

### 3. X線検出装置

X線CT装置においてX線検出装置はX線管と同様に最も重要な部分といえる。最近ではマルチスライス化が進んでおり、もっとも興味のある分野である。基本的にはX線を検出するX線検出器とデータ収集システム(data acquisition system: DAS)とに分けられる。

#### 3-1 X線検出器

X線検出器に要求される性能には次のものがある。

##### 3-1-1 検出効率

CT装置では高い検出効率のX線検出器が必要であ

Table 従来X線管と新型X線管の比較 .

項目	従来の大容量X線管	新型のX線管 (東芝MegaCool)
最大陽極熱容量	6,500kHU	7,500kHU
最大陽極冷却率	924 k HU/分	1,386kHU/分
最大出力	48 kW, 4秒連続	60kW, 20秒連続
ヘリカルスキャンでの 最大待ち時間 (120kV, 300mA, 30sec)	約7分休止で 繰り返し可能	約2分休止で 繰り返し可能
X線管本体重量	約68kg	約68kg

る。人体を透過したX線を検出器がどれだけ検出できるかでCT画像の画像ノイズが決定し、せっかくX線管で大線量が照射されても検出器の検出効率が低ければ被曝が増加するだけで画質の向上は図れない。検出効率は最近のスキャン時間の短縮にも重要な要素である。以前のCT装置ではキセノン電離箱が主流であったが、最近ではシンチレタとフォトダイオードによる固体検出器が主流である。

### 3-1-2 エネルギー特性

X線の検出器にはエネルギー特性が存在する。X線管から発生されるX線は連続的なエネルギーを有する。管電圧が同じであっても人体を透過した後のX線はX線の硬化(beamhardening)によりエネルギー変化が行う。CT用の検出器にはエネルギー変化に依存しない感度の検出器が必要とされる。

### 3-1-3 安定性

CT装置ではキャリブレーションが行われる。これは、検出器、データ収集系の時間的な変動成分を校正するものである。検出器の安定性がCT画像やCT値の信頼性を向上させることになる。

### 3-1-4 ダイナミックレンジ

CT装置では被写体がまったくない状態から最大50センチメートルの水に相当する等価までをカバーして透過X線の計測が行わなければならない。50センチメートルの水に相当する透過X線量は何も無い状態のおよそ1/10,000程度である。また、スライス厚を薄くすれば検出器に入射するX線量も減少する。さらに、管電圧、管電流を下げることによっても検出器に入射するX線量は減少する。このような変動要素も含めて、X線検出器のダイナミックレンジは $10^6$ :1(20ビット)以上が求められる。

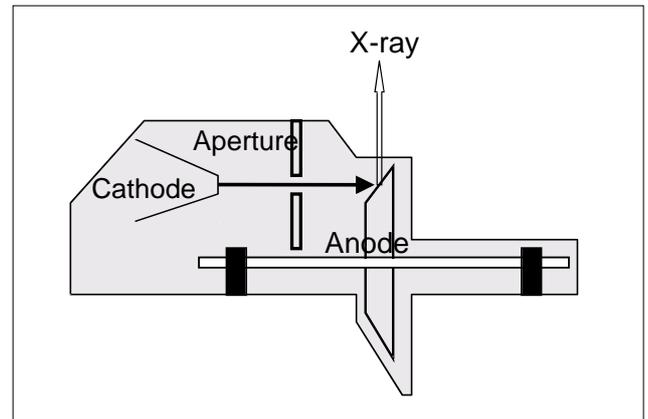


Fig. 3 新型X線管(東芝MegaCool)の構造。「両持ち支持機構」と「陽極接地」を有する7.5MHUのCT装置用X線管。

### 3-1-5 入力直線性

再構成された画像のCT値が信頼できる値であるためには、検出器に入射したX線の線量に対して出力される電気信号は直線性を持っている必要がある。

### 3-1-6 検出信号の立ち上がり、立ち下がり特性(パルス応答性)

最近のようにCTのスキャン時間が短縮されると検出器による検出信号のパルス特性が重要となる。ある投影方向のからのデータに対して高い検出効率を持つのは当然であるが、その次の投影方向では直前の投影データが残存しては再構成画像の空間分解能の劣化を招く。

### 3-1-7 構造

たとえ性能のよい検出器が存在したとしても、それがCT用の検出器として装着されなければ意味がない。その条件に、素子が小型に製作できる、素子間に特性のばらつきがない、素子間のクロストークがない、容易に製作できる、などがある。

最近ではマルチスライスCTの開発が進んでいるが、そこでも上記のような項目は重要である。さらに、マルチスライスCTでは隣接する検出器列との空間的な隔たり(セパレータ)が極めて薄くなるような制作上の工夫が必要となる。セパレータが厚くなることで人体への無用な被曝を増加させるだけでなく、画像間の連続性の欠落も招く。マルチスライスCT用の検出器には数種のアイデアがある。

## 3-2 データ収集システム

データ収集システム(data acquisition system)の役割は、検出器からの出力(電流信号)をコンピュータで処理できるようにアナログ信号からデジタル信号に変

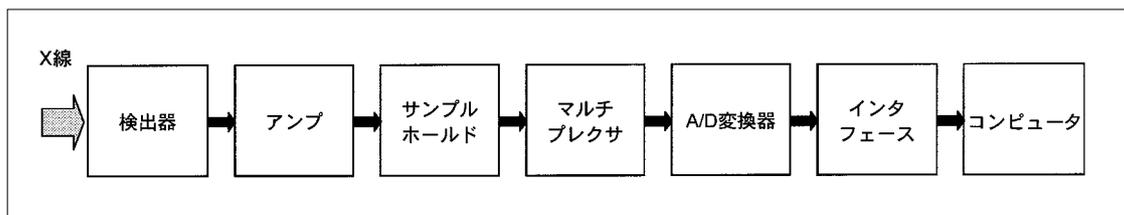


Fig. 4 データ収集システムのブロック図 .

換するものでDASとよばれる。DASの代表的なブロック図をFig. 4に示す。最近のマルチスライスCTではDASの数により1回転のスキャンで得られるCT画像数が決定する(検出器の構造だけでは決まらない)。4DASから8DAS, 16DAS, さらには256DASというマルチスライスCTでは検出器の開発とともに, DASの開発にも重点が置かれる。

### おわりに

今回, 連続CT講座のはじめとしてX線の発生から検出について述べた。CT装置は人体にX線を照射して断

層像を得るものであり, どんなにソフトが進歩してもハードのX線発生装置, X線検出装置の進歩がないかぎりCT装置全体の進歩はない。マルチスライスCTが登場してきた近年, これらの要素の重要さは広く再確認されている。そして, これらの進歩がCT装置における患者被曝の低減にも関連していることに気がつく。X線を利用しているCTであるがこそ, X線の発生と検出は最も重要な要素なのである。

次回は「X線CT装置の機器工学(2)- 画像再構成と画像表示 -」

### 参考文献

- 1) 岩井喜典, 斎藤雄督, 今里悠一: 医用画像診断装置 - CT, MRIを中心として - . コロナ社, 東京, (1991).
- 2) 瓜谷富三, 岡部哲夫: 医用放射線科学講座13 - 放射線機器工学 - . 医歯薬出版, 東京, (1998).
- 3) 辻岡勝美: CT自由自在 . メジカルビュー, 東京, (2001).
- 4) 青柳泰司, 安部真治, 小倉 泉, 他: 改訂放射線機器工学 (1) X線診断機器 . コロナ社, 東京, (2000).
- 5) 本田豊正: 超高速X線CT装置用大容量・高冷却X線管の開発 . メディカルビュー, Vol. 23, No. 4, (1999).