U.D.C. 621. 386. 22: [616-073. 753. 3: 53. 087. 9: 681. 322]

コンピュータ・トモグラフィ用X線管 X-ray Tubes for Computed Tomography

近年,診断用X線装置としてコンピュータ・トヨグラフィ(CT)装置が急速に普及 し、X線機器分野で20%以上のシェアを占めるに至っている。これに対応するX線 管としては、頭部CT用では連続定格の大きな固定陽極X線管を、全身CT用では 陽極蓄積熱容量の大きな回転陽極X線管の開発が必要である。

小田部宗倫*	Kotabe Munenori			
佐土徳行*	Sado Noriyuki			
立木 茂*	Tachiki Shigeru			
木津谷 稔**	Kitsuya Minoru			

この論文では、CT用X線管のシリーズとして、頭部用に4kWの強制油冷方式の 固定陽極X線管を、全身用に300kHU、短時間定格84kWの回転陽極X線管を国内他 社に先がけて製品化したので、これの設計の特長と性能について紹介する。

1 緒 言

コンピュータ処理によるX線断層撮影装置(Computed Tomography:以下, CTと略す)は, 英国EMI社が1972年に 頭部用製品を開発して以来, 脳神経外科の分野で高い評価を 受けている¹⁾。この装置では,頭蓋内部の軟部組織で数パー セントのX線吸収係数の差を描出できるので、従来のX線撮 影法では得られなかった有力な診断情報が定量的に得られる こと, 頭部のような高度の診断技術を必要とする部位に対し

値が得られる。走査の端でフレームは1度回転し,前記の並 進運動を再び繰り返す。フレームの運動は、1度ずつ回転が 180度に達するまで続く。1枚のスライス面について(256×180) の測定値が集められ、これらの情報は、X線源の強度とスラ イス面内で吸収されたX線量により、次の「吸収量」の形に 整えられる。

て, 無侵襲な検査ができるというメリットから, 高価格にも かかわらず、米国、欧州及び日本で急速に普及しつつある。

頭部用のX線管としては連続定格の大きい固定陽極X線管 が採用され、日立製作所も4kWのCT用X線管H7129を国内 他社に先がけて製品化した。

その後, 頭部用製品に続いて全身用製品が開発され, この 用途のX線管としては陽極蓄積熱容量の大きな回転陽極X線 管が採用されている。日立製作所も全身用のX線管として300 kHU^{*1)}の回転陽極X線管UJ-6FC-05Vを製品化し、シリーズ 化した。以下,両X線管の設計及び性能について説明する。

2 C T 装置の概要

CT装置は一種の断層撮影方法により,図1に示すように 一連のスライス面でのX線の吸収係数の差を検出して、コン ピュータ処理により画像を描くものである。

CT装置と従来のX線装置との差は次の点にある。

(1) 被写体のある断面だけしか撮像しない。

(2) X線ビーム走査により被写体から情報を集める。

(3) 被写体を通過したX線は放射線検出器により測定される。

(4) 断面の像はコンピュータにより再構成され表示される。 次に動作について簡単に説明する。

頭部CT用のX線ビーム走査機構を図2(a)に示す。コリメ ータを付けたX線管と検出器は、向かい合わせで同一フレー ムに固定されており、被写体(頭部)を透過したX線ビームを 検出器(シンチレータなど)により検出する。フレームは等速 度の並進運動により、被写体のスライス面でのX線ビーム走 査を行ない、1回の走査で256個(一例を示す)の透過線量測定

「吸収量」=log 入射X線量 透過X線量

この「吸収量」からスライス面内各部のX線吸収係数をコ ンピュータにより計算し、その結果がテレビジョンモニタで 視覚化される。

全身CT用のX線ビーム走査機構を図2(b)に示す。X線管 から扇状に放射されたX線ビームは、被写体透過後円弧状に 配置した検出器群(Xeガスを高圧で封入した電離箱など)によ り検出される。また、走査は回転して行ない、回転角は360度 であり、ほぼ1度ごとにパルス状にX線を放射し、検出器群 により同時に透過X線量を検出する。1枚のスライス面では (検出器の数×361)の測定値が得られ、この測定値を頭部CT 用の場合と同様にコンピュータで処理する。全身CT用の場 合,検出器群を使用することにより,走査は1回転だけで完 了するため、

走査時間が非常に短縮される。



※1) HUはHeat Unitの略で、熱エネルギーの単位である。 1 HU \Rightarrow 0.71 J ($\forall \perp - \mu$)

X線検出系 断層撮影方法の一例を示す。 × 1

* 日立製作所電子管事業部 ** 日立製作所茂原工場

374 日立評論 VOL. 61 No. 5(1979-5)



図2 X線ビーム走査機構 X線管,被写体及び検出器の相対的な位置関係,並びにX線管と検出器の動き を示したものである。

解像度を向上した製品である。以下,設計検討内容について

8 X線管に要求される仕様

頭部CT用では1スライスの走査時間が長いこと(例えば2 ~5分)から,長時間最大入力の大きな固定陽極X線管が要求 される。主な仕様項目に対する要求内容は、次に述べるとお りである。

(1) 最高使用管電圧:人体が被写体なので,120kV前後の電 圧で使用できること。

(2) 焦点寸法:寸法はできるだけ小さいこと。

(3) 長時間最大入力: 焦点寸法との関係で決まるが, できる だけ大きいこと。使用条件からみて3kW以上必要である。

説明する。

(1) 最高使用管電圧

定電圧回路150kVに設定し、120kV前後の電圧で異常なく 使用できるようにした。中性点接地方式を採用し、陰・陽極~ アース間の絶縁を容易にし、X線管の外形寸法を小形化した。

表! CT用X線管の主な仕様 設計仕様をまとめたものである。

頭部CT用及び全身CT用X線管の主要な

	6				
4) 機械的強度:並進及び回転運動の衝撃並びに振動に耐え		管装置			UJ-6FC-05V
、ここ。 次に全身CT用では1スライスの走査時間が短いこと(例え	形名	X 線管	H 7129	H 7129A	RJ-6FC-05A
は20秒以下)から、短時間最大人刀の大きな回転陽極X線管が 要求される。主な仕様項目に対する要求内容は、次に述べる とおりである。 (1) 短時間最大入力:走査時間を短くするため、できるだけ 大きいこと(焦点寸法と関係する)。 (2) 陽極蓄積熱容量:使用頻度を多くするため、できるだけ 大きいこと。 (3) 照射野* ²⁾ :X線管軸に直角な方向の照射野が大きくとれ、 X線量分布が均一であること。実用的には30度以上必要である。 (4) 機械的強度:回転運動時の衝撃、振動及び遠心応力に耐 えること。 (5) 最高使用管電圧、焦点寸法については頭部CT用の場合 と同じである。		途	頭部用	頭 部 用	全身用
		用 管 電 圧 <v)< td=""><td>150</td><td>150</td><td>150</td></v)<>	150	150	150
		(点寸法 mm)	12×2.5	12× 2	2 × 2
		三用規格	I50kV, 26mA連続 (4kW)	150kV, 21mA連続 (3.2kW)	50/60Hz, I50kV 500/545mA 0.1s I50/180Hz, I50k\ 770/840mA 0.1s
		亟蓄積熱量 HU)			300,000
		大蓄積熱量 HU)			I,500,000
4 頭部CT用X線管		オ フ 電 圧 ∀)			ー2,400 (150kVにて)
	<u> 씨 파</u> - + :+	全 長 (mm)	328	328	548
ス 「に頭部し」用 A 線官 H / 129 及び H / 129 A の主な設計仕 を示す。 H 7129 A は H 7129 に対し焦点長さ寸法を小さくし,	アルシリ法	最 大 径 (mm)	118	118	176
	冷	却	強制油冷(油流量 16 <i>l</i> /min以上)	強制油冷(油流量 16 <i>l</i> /min以上)	送風機による送風 冷却

(2) 焦点寸法

幅12mm,長さ2.5mmとした(H7129Aでは長さ2mm)。一般の X線管と異なり,幅寸法の大きな電子集束系を必要とするため,図3に示すように陰極のコイル状フィラメントの長さ方向をX線放射方向に対し直角に配置して,ターゲット上に幅寸法の大きな焦点を形成した。

(3) 長時間最大入力

4kWに設定した。固定陽極X線管の焦点面積と長時間最大 入力との関係は図4に示すようになっているので、4kWの入





図 5 頭部CT用X線管H7129の外観 固定陽極X線管で, 左側が陽極, 右側が陰極である。

力を確保するためには約75mm²以上の実焦点面積を必要とする。 焦点寸法としては、ターゲット角度を適当に選んでこの焦点 面積が確保できるように設計した。

長時間最大入力が大きくなると, 焦点寸法以外に陽極構造

図3 頭部用 H7129の構造図 製品の内部構造及び外形寸法を示す。



及び陽極の冷却設計が重要である。H7129の場合ターゲット 板の固定を図3に示すようにフード^{*3)}で抑える構造にして変 形防止を図るとともに,陽極の冷却としてはターゲットの裏 側部に絶縁油をジェットで吹き付ける方式を採用した。4kW の定格を確保するためには、ターゲットと油冷面間距離の短 縮と161/min以上の冷却油量の循環が必要であった。

4.2 性 能

図5にH7129の外観を示す。4kW球としては従来に比べ 20%程度小形になっている。

頭部CT用装置での標準の使用条件は, 1スライス当たり 定電圧120kV, 30mA(3.6kW)で, 走査時間は3分45秒又は 2分50秒になるので, この条件で700時間の負荷寿命試験を実 施した。その結果, 耐電圧その他の異常は認められず, 試験 中のX線強度も(100kV, 10mA, 80kV, 10mAで測定)図6に 示すようにほとんど変化がなかった。X線管の分解調査結果 でも, ターゲット表面の損傷はほとんど認められなかった。

図7にはH7129を使用した株式会社日立メディコ製頭部用 CT装置"CT-H"での臨床写真例を示す。頭部の断面を撮ったもので、右側頭葉に転移性脳腫瘍が認められる。

5 全身CT用X線管

5.1 設 計

全身CT用X線管UJ-6FC-05Vの主な設計仕様は,先の表1 に示すとおりである。以下,設計検討の内容について説明 する。

(1) 最高使用管電圧

頭部CT用と同様に150kVに設定した。X線管単体の外形

寸法は従来の200kHU管と同じにし,管容器の共用性をもた せた。 (2) 陽極蓄積熱容量とターゲット構造

図4 固定陽極X線管の焦点面積と長時間最大入力の関係 陽極 に入れられる限界負荷量とターゲット上に形成される実焦点の面積との関係を 示したものである。

※3) フードは、ターゲットからの二次電子がバルブに飛んで行かない ように取り付けられる二次電子しゃへい体である。

376 日立評論 VOL. 61 No. 5(1979-5)

重負荷繰返し使用に対処するため、従来管の200kHUに対 し、300kHUに設定した。ターゲットの構造は外径100mm、タ ングステンとモリブデンの貼り合わせ形とした。図8にター ゲット材料の熱容量と温度との関係を示す2)。同図をもとに、 材料の単位重量当たりの熱容量としてタングステンで300HU/g, モリブデンで530HU/gに設定し、ターゲットの設計に使用し ている。

(3) 焦点寸法及び管電流制御

焦点寸法は頭部CT用より小さ目をねらい,幅,長さとも 2mmに設定した。陰極構造としては、パルス負荷の制御がで きるようにグリッド電極を設け、三極管構造とした。





ターゲット材料の熱容量と温度との関係 ターゲット材料に × 8 蓄積される熱容量が、温度上昇により増加する状況を示す。



図 6 H7129の寿命試験中のX線強度の変化 120kV, 30mAの条件で の寿命試験中のX線強度の経時変化を示すもので、ほとんど変化は見られない。

図9 全身CT用X線管UJ-6FC-05Vの短時間最大入力 陽極に印加 できる短時間最大入力を,撮影時間との関係で示したものである。



(4) 短時間最大入力

図9に180Hz陽極駆動時の短時間最大入力を示す。0.1秒で の最大入力は84kWである。同図から、全身CT用の負荷とし ては20~40kWの範囲で使用が可能である。

(5) 照射野

放射窓の径寸法を大きくし,X線管軸に直角な方向の照射 野を40度以上にした。放射窓の前面に長方形の穴をあけた鉛 カバーを付け、余分なX線のしゃへいを行なった。

(6) 回転陽極系

ターゲット重量増による回転寿命の低下を防ぐため, 軸受 荷重が増加しないような構造設計を行なった。

5.2 性 能

図10にX線管単体(RJ-6FC-05A)の外観を示す。以下に UJ-6FC-05Vの主な性能について説明する。

図7 H7129を実装した頭部用CT装置での臨床写真例 H7129を 実装した株式会社日立メディコ製頭部用CT装置CT-Hでの頭部断層像を示す。 右側頭葉に脳腫瘍が認められる(資料提供:株式会社日立メディコ)。

(1) 陽極熱特性 図11に陽極冷却特性を示す。最大冷却率は200kHU管(900 HU/s)に比べ20%程度向上している。 (2) 負荷寿命 全身 C T 用の使用条件の一例を挙げると、1 スライスの負 荷は次に述べるようになっている。





図10 全身CT用X線管RJ-6FC-05Aの外観 X線管単体の外観を示す。

図12 UJ-6FC-05Vの寿命試験中のX線強度の変化 負荷印加によるターゲットの焦点軌道面の劣化を示しているが、10%以下で軽少である。

定電圧回路 120kV, 200mA 5ms 361パルス (走査時間7秒) この条件を考慮して負荷寿命試験としては, 定電圧回路 130kV, 180mA 2s(66,000HU)

(4) X 線 質

図14に120kVでの中心X線のアルミニウム・フィルタによる減弱特性を示す。アルミニウムによる半価層は約3.8mmである。

の条件で実施した。試験中のX線強度の減弱状況を図12に示 す。X線量減は初期の10%以下で、焦点軌道面の劣化は少ない。 (3) X線量分布

図13にX線管軸に直角な方向のX線量分布を示す。中心X線から20度の位置で96%強のX線強度を示している。



5.3 繰返し負荷の検討

全身CT用での使用条件の代表例は5.2の(2)に述べたように 1スライスの負荷は、

定電圧回路 120kV, 200mA 5ms 361パルス で、1スライスの入力(HU)は、

 $HU = 120 \times 200 \times 0.005 \times 361 \times 1.41 \doteq 61,000 (HU)$ $2 c a_{\circ}$

このため、繰返し負荷の最大値として1スライス当たり 70,000HUの入力を想定して、陽極加熱曲線を検討してみた。 図11の陽極冷却特性を用いて計算した例を図15に示す。負荷 間隔90秒と120秒で前記入力を繰返し印加した場合の陽極加熱 曲線を示してあるが、いずれの場合も10回以上の繰返しが可 能である。





378 日立評論 VOL. 61 No. 5 (1979-5)



図14 UJ-6FC-05VのX線減弱特性 中心X線のアルミニウム・フィル タによる減弱曲線を示す。

図16 UJ-6FC-05Vの繰返し負荷回数 負荷間隔をパラメータにして、 1スライス当たりの入力と最大負荷回数の関係を示したものである。



図15 UJ-6FC-05Vの負荷 時の陽極加熱曲線 陽極 に印加される負荷パターンの例 を示す。

更に、1スライス当たりの入力が70,000HU以下で変化した 場合につき、繰返しの負荷間隔を短くして行なったときに負 荷印加可能回数がどう変わるかを調べてみた。その結果を図16 に示す。同図によれば、負荷間隔15秒では陽極の冷却効果は ほとんど期待できないが、負荷間隔60秒では陽極の冷却効果 が大きく、1スライス当たりの入力が60,000HU以下の場合は 連続的に印加が可能となる。ただし、長時間にわたり負荷を 繰り返す場合には、X線管装置の熱特性により制限されるこ とがあるので、その冷却特性を考慮する必要がある。 (1) 頭部CT用X線管として、150kV、4kW、強制油冷方式の固定陽極X線管を開発し、実用性の確認を行なった。
(2) 全身CT用X線管として、300kHU、150kV、84kWの三極回転陽極X線管を開発し、実用性を確認した。

終わりに、このX線管の開発に当たり、終始御指導及び御協力をいただいた株式会社日立メディコの関係各位に対し深 く感謝の意を表わす次第である。

6 結 言

62

以上, コンピュータ・トモグラフィ用として新しく開発した X線管の設計及び性能について述べた。これらを要約すると,

参考文献

 G.N. Hounsfield : Brit. J. Radiol. 46, 1016(1973)
 W.Espe : Materials of High Vacuum Technology Vol. 1 Pergamon(1968)