

回転陽極X線管の使用状況と信頼性

Analysis of field data on X-ray tube housing assembly

システマチックなフィールド情報の収集により、回転陽極X線管の使用状況の概要を把握することができた。また、回転陽極X線管の稼動実績について調べた結果、撮影回数20,000回における平均故障率は、 $0.4 \times 10^{-6} \sim 3.5 \times 1.0^{-6}$ であることが分かった。

回転陽極線管U-6Mは、バルブ電撃対策により故障率を約 $\frac{1}{2}$ に低減させることができた。同じくUH-6Gは、アノード封止部の対策により故障率を従来品の $\frac{1}{3}$ 以下に低減できたと推定する。

内海 宏* Uchiumi Hiroshi
小田部宗倫** Kotabe Munenori
木津谷 稔* Kitsuya Minoru

1 緒 言

近年、X線による診断領域の拡大やX線診断技術の著しい進歩により、回転陽極X線管の使用条件も多様化してきている。このため機能の限界に近い条件で使用されるようになり、回転陽極X線管全般の信頼性について再評価すべき段階にきている。とりわけ透視、撮影を併用し高頻度で繰返し撮影を行なう胃部集団検診用X線管や、連続撮影を繰り返す循環器診断用X線管は高い信頼性が要求される。またX線管は一般の電子管に比べ高電圧で使用され、しかもその使用条件は、撮影の部位や被写体の厚さなどにより管電圧、管電流及びばく射時間がX線管の許容負荷の範囲内で任意に組合せ選択ができるので、使用条件の組合せ範囲が広い。これらの問題を克服して、かつ診断用X線管として要求される信頼性を満足させなければならない。

このような状況のなかで、日立X線管は製作技術の向上や特性改善の努力により信頼性も相当向上したと考えているが、

システマチックな使用状況の調査や稼動実績の解析は行なわれていなかった。

そのため今回、株式会社日立メディコの協力を得て、日立製作所製品の主要回転陽極X線管の使用状況の実態及び稼動実績の調査と解析を行なった。本報告では定格管電圧125kVp以上の回転陽極X線管のうちU-6M、UH-6G及びUG-5Mの使用状況、実装時の累積故障率、故障内容、改良効果などの解析結果について述べる。

2 データの集積と調査方法

2.1 調査対象管種の概要

昭和47～48年の24箇月間に顧客に納入した回転陽極X線管のうち、主要生産管種である定格管電圧125kVp以上のX線管について調査した。調査対象管種の概要を表1に示す。

表1 調査対象X線管の概要 調査対象管種の主要定格を示したものである。

形 式	最 高 使 用 電 圧 (kVp)	実 効 点 焦 (mm)	最 大 使 用 規 格 例			熱特性 陽極蓄積 熱容量 (HU)	フィラメント加熱		寸 法		重 量 (kg)	備 考	
			透 視 (HU/s)		撮 影 (mA) (最大使 用電圧 t=0.1s)		最大電圧 (V)	最大電流 (A)	全 長 (mm)	最 大 径 (mm)			
			送風機 なし	送風機 付き									
U-5M53P	125	1.0	210	340	130	65,000	10.5	5.2	460	152.4	18	標準形	
		1.5			205		10.5	5.2					
U-5M55P	"	1.0	"	"	130	"	10.5	5.2	"	"	"		標準形高電圧装置用
		2.0			290		14.0	5.5					
U-6M53P	150	1.0	"	"	105	"	10.5	5.2	"	"	"	大形高電圧装置用	
		1.5			190		10.5	5.2					
U-6M55P	"	1.0	"	"	105	"	10.5	5.2	"	"	"		特大形高電圧装置用 高速回転形
		2.0			245		14.0	5.5					
U-6H53M	"	1.0	250	500	130	135,000	10.0	5.2	475	172	19.7	グリッド制御標準形	
		1.5			200		14.0	5.5					
U-6H55M	"	1.0	"	"	130	"	10.6	5.2	"	"	"		
		2.0			270		16.0	5.5					
UH-6G53N	"	1.0	300	"	275	200,000	12.0	5.5	490	"	21		
		1.5			420		14.5	5.5					
UH-6G55N	"	1.0	"	"	275	"	12.0	5.5	"	"	"		
		2.0			420		16.0	5.5					
UG-5M01P	125	1.0	210	340	150	65,000	16.0	8.0	460	152.4	18		
UG-5M03P	"	1.5	"	"	235	"	16.0	8.0	"	"	"		

* 日立製作所茂原工場 ** 日立製作所電子管事業部

2.2 調査方法

回転陽極X線管の使用状況を的確に把握するため、表2に示すX線管装置使用状況調査票を作成し、該当の項目について使用条件を調査した。稼動実績の情報は、X線管が故障を生じたとき工場に送付されてくる製品連絡票に記載してある使用情報、故障発生時の情報、及び工場の返品取調べ書により調べた。

3 調査結果

3.1 回転陽極X線管の使用状況

3.1.1 用途別分類

用途別に分類した使用状況を図1に示す。胃腸用用途はできるだけ鮮鋭な写真をとる必要があるため、小さな焦点が要求される。このため、1mm/1.5mm焦点のU-5M53P、U-6M53P

表2 X線管装置使用状況調査票 X線管装置の使用状況を調べるための調査票の概要を示したものである。
(I)

ハウベ形名		使用開始年月日	年 月 日
製品番号		制御卓子形名	
顧客名		透視台形名	
納入年月日	年 月 日	X線TV形名	

(II)

撮影部位	透 視				普 通 撮 影 又 は 速 写 (適時撮影)					診断所要時間 (分/人)	使用頻度 (人/週)	
	使用 焦点	管電圧 (kVp)	管電流 (mA)	時 間 (分/人)	使用用 焦 点	管電圧 (kVp)	管電流 (mA)	mAS又 は時間 (s)	枚/人			
連 続 撮 影 又 は シ ネ					第 1 ス テ ッ プ		第 2 ス テ ッ プ		第 3 ス テ ッ プ		診断所要時間 (分/人)	使用頻度 (人/週)
撮影部位	使用 焦点	管電圧 (kVp)	管電流 (mA)	時 間 (s)	枚/s	枚 数	枚/s	枚 数	枚/s	枚 数		
X線装置使用時間												
ハウベについての要望事項、連絡事項												

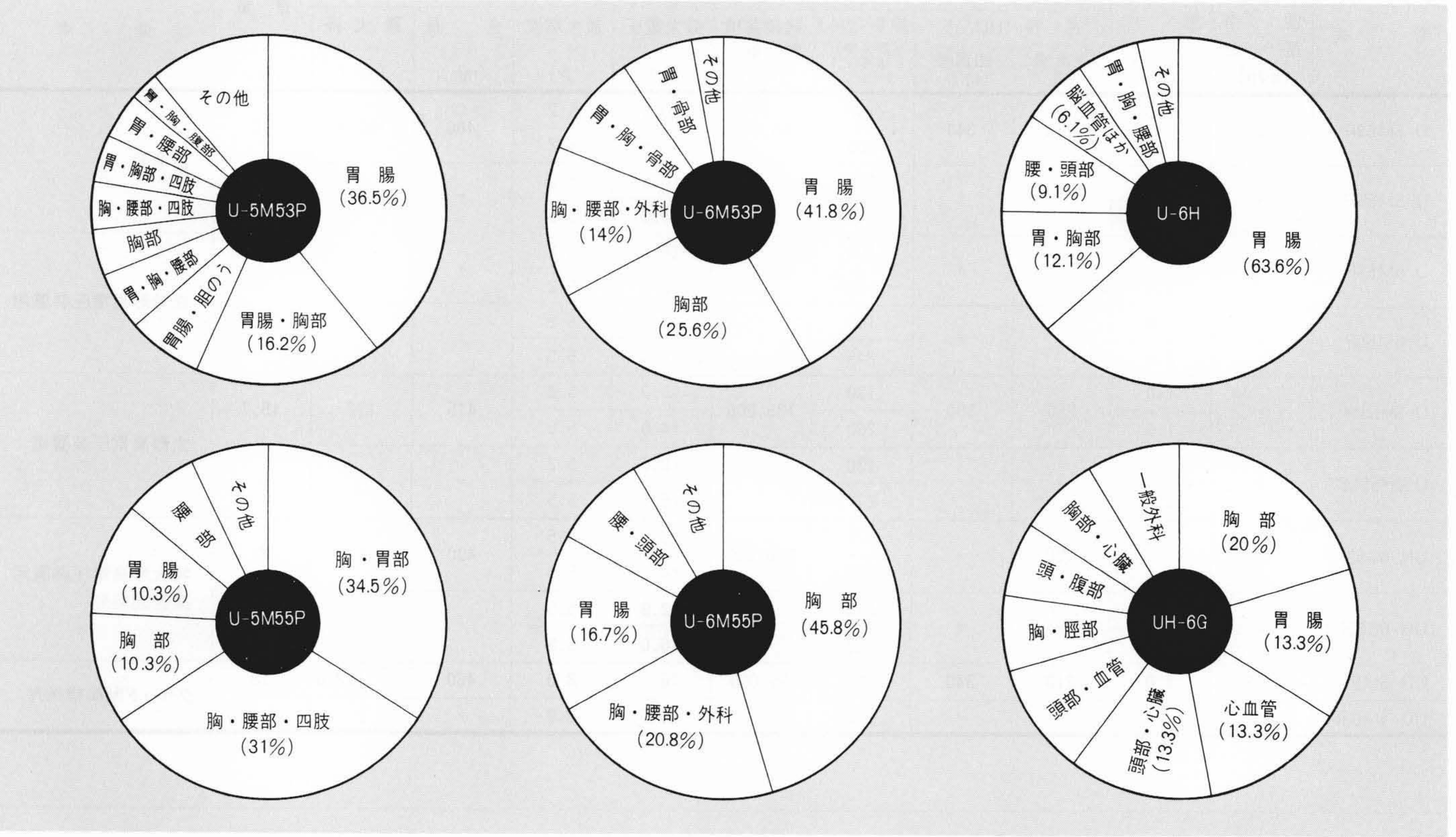


図1 各種回転陽極X線管の用途別分類 各種回転陽極X線管の撮影部位別の使用比率を示したものである。

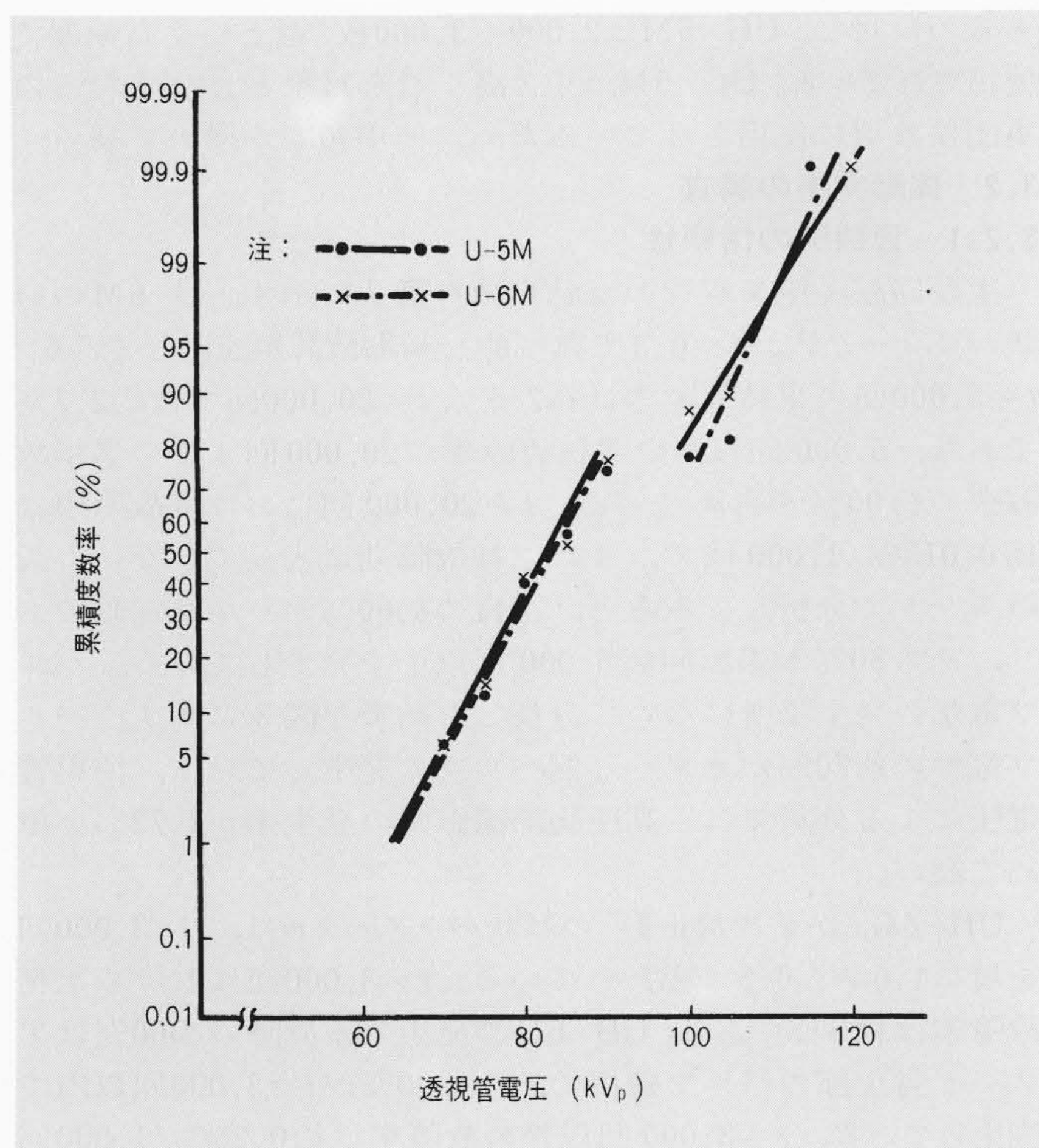


図2 最高透視管電圧分布 U-4M, U-5M及びU-6Mについて透視時の管電圧分布を示したものである。

及びU-6H53Mが主に使われている。これに対し胸部撮影用は管電圧、管電流の組合せが多様であり、瞬間的に大きな負荷に耐え得るものが要求される。したがって、1mm/2mm焦点のU-5M55P, U-6M55P及びU-6H55Mが主に使われている。心血管、脳血管などの血管撮影は、血流に応じて連続的に3～6枚/sという高速撮影を行なうため熱容量が大きく、しかも大電流を流せるUH-6Gが主に使われている。

3.1.2 最高使用管電圧

(1) 透視管電圧の分布

X線による病巣の診断を正確かつ効果的に行なうため、造影検査では透視及び撮影が併用される。図2に最高透視管電圧の分布を示す。U-5M, U-6Mの透視管電圧は80kVpと110kVpの二つのグループに分かれている。透視管電圧が70～90kVpに集中しているのは、X線テレビジョン装置¹⁾に使用しているイメージインテンシファイアが80～90kVpで最高の感度を持つことによる。また、U-5MとU-6Mで透視管電圧の分布にほとんど差が認められないのは、透視による被ばく線量をできるだけ低く抑えるため、透視管電圧の調整範囲が最高120kVpに設定してあるためである。

(2) 撮影管電圧の分布

撮影部位別の使用管電圧分布例を図3, 4に示す。胃部撮影は80～120kVpで使用されているが、胸部撮影は60～100kVpの常圧撮影と120～150kVpの高圧撮影^{2), 3)}の二つのグループに分布している。U-8M55Pでは、胸部用途のうち約50%が高

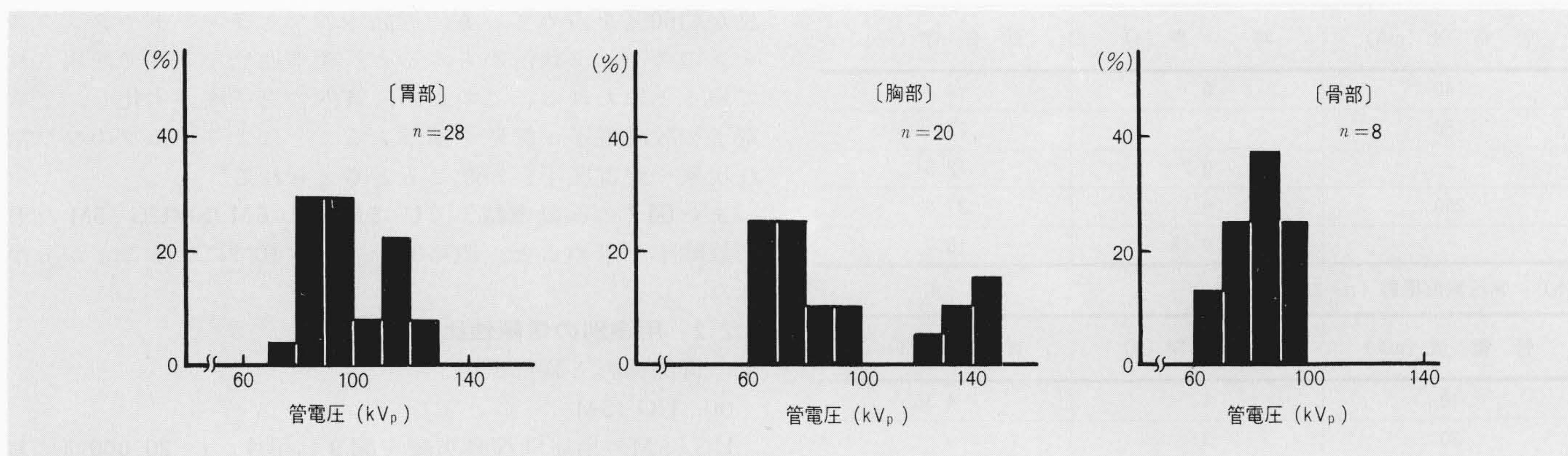


図3 U-6M53P用途別最高使用管電圧 U-6M53Pの撮影部位別の使用管電圧分布を示したものである。胸部撮影は常圧撮影と高圧撮影に分かれている。

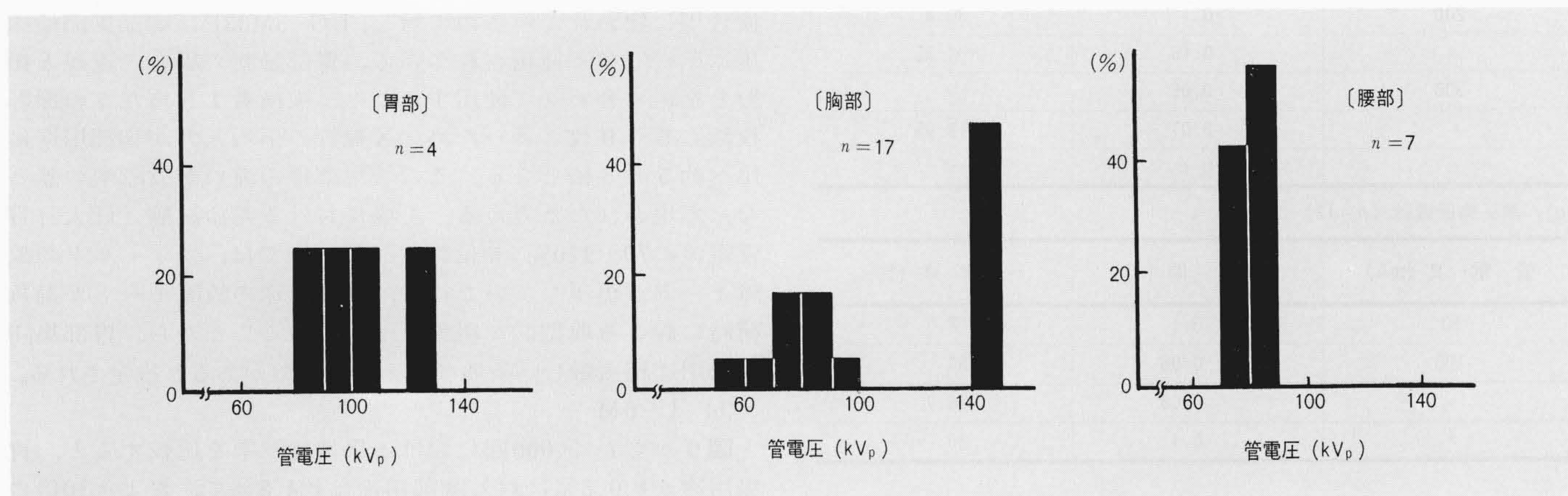


図4 U-6M55P用途別最高使用管電圧 U-6M55Pの撮影部位別使用管電圧の分布を示すものである。高圧胸部に使用される率が高い。

圧胸部用で使用されている。従来、胸部撮影は常圧撮影が主流をなしてきたが、近年高压胸部用途が増加の傾向にある。これは管電圧が高くなるに従って負荷時間を短くできること、線質が硬くなるため骨組織のコントラストが低下し、肋骨の陰影が透過されるため診断領域が広くなるという診断技術の進歩によるものである。今後散乱X線の除去装置の改良と相まって、高压胸部用途の使用比率は更に増加するものと思われる。

3.1.3 撮影時の管電流の分布

用途別の撮影管電流の分布を表3に示し、胃腸撮影の管電流分布を図5に示す。透視と撮影を組合せ使用したり繰返し撮影をする場合には、使用管電流は最大許容管電流の70%以下で使用することを推奨しているが、1mm焦点のX線管装置では約80%相当数がこの推奨値を超えた条件で使用されている。

3.1.4 平均入力分布

用途別の平均入力分布例を図6に示す。胸部撮影の平均入力が50HU/s*1)以下であるのに対し、胃腸用は透視と撮影を組み合わせ使用すること、被検者1人当たりの撮影枚数が5～15枚と多いため100～270HU/sに分布している。

3.1.5 使用頻度

U-5M、U-6M、UH-6Gの使用頻度がほぼ500枚/週以下で

表3 U-6M用途別管電流分布 胃部、常圧胸部及び高压胸部撮影時の管電流並びにばく射時間について表わしたものである。

(a) 胃部撮影 (n=24)

管電流 (mA)	時間 (s)	百分率 (%)
140	0.1	4.3
150	"	29
"	0.2	12.5
200	0.1	37.5
"	0.15	16.7

(b) 常圧胸部撮影 (n=23)

管電流 (mA)	時間 (s)	百分率 (%)
10	1	4.35
20	3	"
50	1	8.7
"	1.5	"
100	0.3	4.35
"	0.4	"
200	0.1	30.4
"	0.15	4.35
300	0.06	"
"	0.07	13.05
"	0.1	"

(c) 高压胸部撮影 (n=12)

管電流 (mA)	時間 (s)	百分率 (%)
50	0.1	8.3
100	0.06	50
"	0.08	16.7
"	0.1	25

(※1) HU(Heat Unit)=kVp×mA×s÷0.71J (単相全波の場合)

あるのに対し、UG-5Mは2,000～3,000枚/週という高頻度で使用されている。UG-5Mは中・高年層を対象とした成人病の集団検診用に使用されているため、使用頻度が極めて高い。

3.2 稼働実績の調査

3.2.1 管種別の信頼性

主要回転陽極X線管の稼働実績を図7に示す。U-6Mの形状パラメータ4)はm=0.3で典型的な初期故障形を示している。t=5,000回の累積故障率は約2.5%、t=20,000回では約2.7%であり、5,000回以内の累積故障率が20,000回までの累積故障率の約90%を占めている。t=20,000回における故障率は約0.015%/1,000回で、まだ摩耗故障期に入っていない。故障モードで分析してみると、不良の約60%がバルブ電撃であり、その80%が撮影回数5,000回以下で発生している。バルブ電撃の発生場所について分析した結果を図8に示す。バルブ電撃の約70%がカソード側バルブで発生している。使用管電圧による分析では、高压胸部撮影時の発生率が約73%と極めて高い。

UH-6G(ガラス封止形)の形状パラメータmは、t=3,000回を境に1.0から0.3に変わっている。t=3,000回における累積故障率は約8%である。UH-6Gで発生する故障の約60%はアノード封止部のバルブ破損で、うち90%がt=3,000回以内で発生している。t=3,000回以後の故障率は約0.25%/1,000回であり、t=3,000回以下で発生する不良率の約1/6となっている。

UG-5M01Pはm=1.0で故障率一定形である。t=20,000回における累積故障率は約6.0%で、故障モード別では耐電圧不良が約60%を占めている。返品球のフィラメントやタングステンのスパッタ状況からみると、相当過酷な条件で使用されていると思われる。このため、管内の真空度が劣化し、二次電子や散乱電子が管壁を衝撃することによりバルブのひび割れ現象や耐電圧不良が起これと考えられる。

また図7の稼働実績よりU-5M、U-6M及びUG-5Mの平均故障率を求めると、概略0.4～3.5×10⁻⁶になることが分かった。

3.2.2 用途別の信頼性比較

(1) 胃部撮影と胸部撮影

(a) UG-5M

UG-5Mの用途別稼働実績を図9に示す。t=20,000回における累積故障率を比較すると、UG-5M01Pは約6.0%、UG-5M03Pは約2.0%であり、UG-5M01Pの累積故障率は3倍の高率を示している。UG-5M01PとUG-5M03Pは、焦点寸法が異なる以外全く同じ製作仕様であるが、UG-5M01Pが胃部集団検診用に使われているのに対し、UG-5M03Pは胸部集団検診用に比較的多く使用されている。胃部診断の場合、透視と撮影とを組み合わせ使用すること、被検者1人当たりの撮影枚数も5～9枚と多いため、X線管の平均入力が胸部用途に比べ約5～8倍となる。この使用条件の違いが故障率の差となって現われたと考える。工場における寿命試験(最大許容管電流の70～110%)や信頼性評価試験では、フィールドの故障モードが再現していないが、返品管球の故障モードが過負荷時に起こる典型的な現象を示していることから、胃部集団検診用は相当厳しい条件で使われるものと推定される。

(b) U-6M

図9からt=5,000回における累積故障率を比較すると、胃腸用途が約0.5%に対し胸部用途は約4.8%で、およそ10倍の値を示している。U-6Mは主に一般病院、又は医院で使用されており、胃腸用途の場合でも時間当たりの撮影頻度はUG-5M

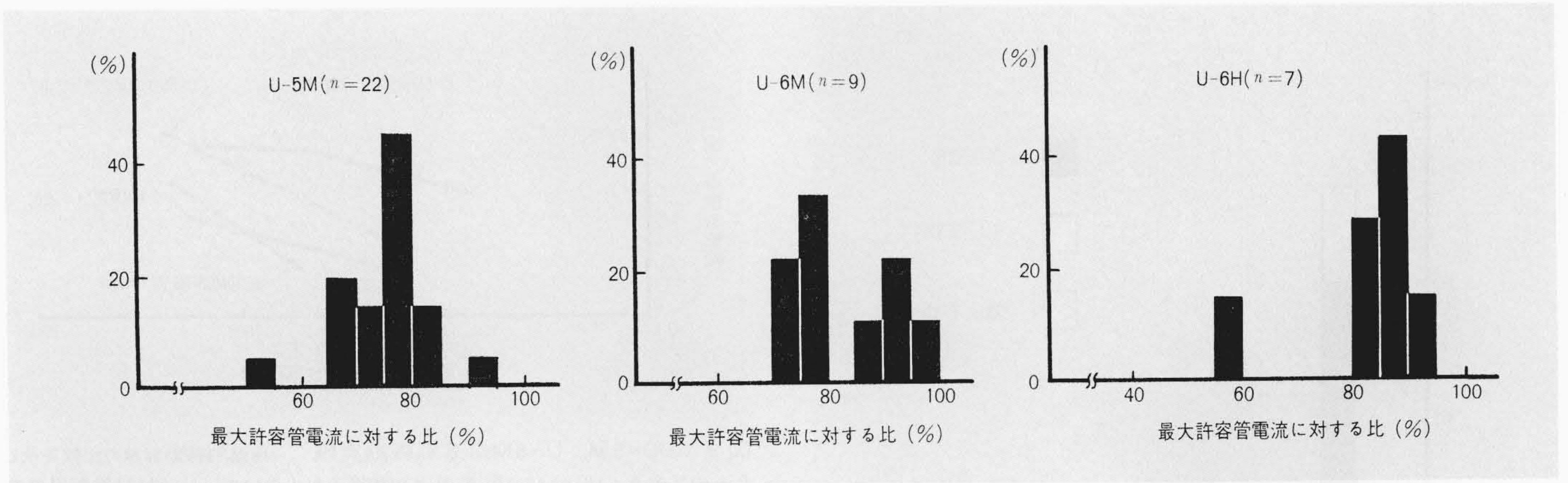


図5 胃部撮影使用時の管電流分布(1mm焦点) 胃部撮影時の管電流を最大許容管電流に対する比で表わしたものである。

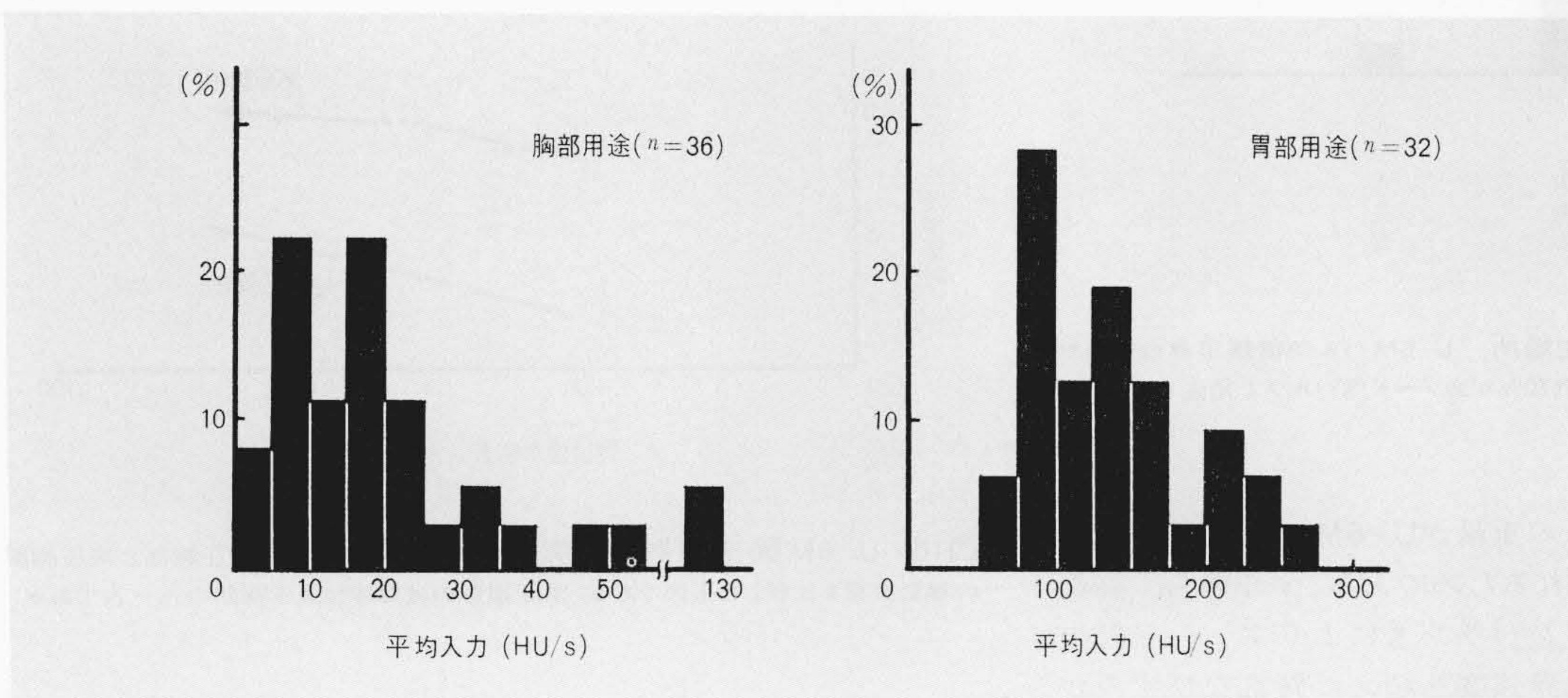


図6 U-6M用途別平均入力 胃部撮影時、胸部撮影時の平均入力分布を表わしたものである。

の $\frac{1}{3}$ 以下である。したがって、負荷的には最大定格に対し裕度のある条件で使われている。これに対して胸部用途は、高圧胸部撮影の普及により使用管電圧が120~150kVpと最大定格管電圧に近い条件で使われるため、X線管の耐電圧品質裕度が少ないことやサージによる異常電圧が誘因となって、バルブ電撃不良を生じていると推定する。このように管種により使用の状況も異なるため、U-6MとUG-5Mでは用途別の信頼性比較で相反する結果が生じたと考える。

(2) 常圧撮影と高圧撮影の比較

U-6M胸部用途における常圧撮影と高圧撮影の稼動実績を図10に示す。 $t=3,000$ 回における累積故障率は、常圧撮影が約0.45%に対し、高圧撮影は約6.8%で、およそ15倍の高率を示している。高圧撮影使用で発生する故障の約85%はバルブ電撃によるものである。

3.2.3 対策効果の評価

(1) U-6Mバルブ電撃不良対策

図8から明らかなように、バルブ電撃不良の約70%がカソード側のバルブ支持部で発生しており、しかも高圧胸部撮影時の発生が約73%と極めて高い。バルブ電撃の故障メカニズムについて調べた結果、カソード側バルブ支持部のゴム部品から析出するスラッジが誘因になっていることが分かった。対策の一環として、ゴム部品を削除しエポキシ支持リングで固定する方式に変更した。従来品と対策品の稼動実績を図11に示す。 $t=5,000$ 回におけるカソード側バルブ電撃の累積故

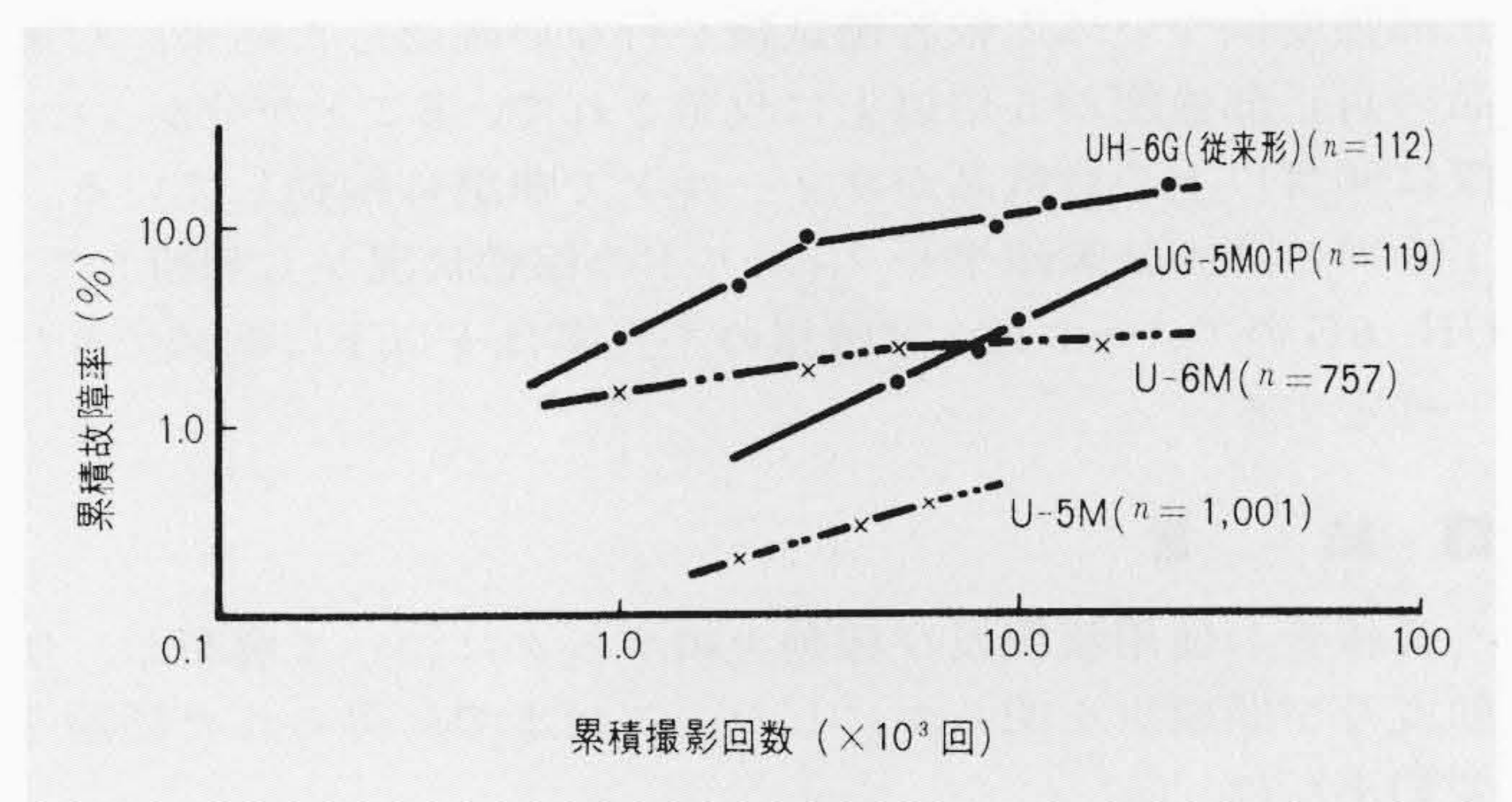


図7 回転陽極X線管の稼動実績 調査対象管の累積故障率をワイブル確率紙で表わしたものである。

障率は、従来品が約2.5%に対して対策品は約1.2%で不良率をおよそ $\frac{1}{2}$ に低減することができた。しかし、U-6Mを高圧胸部撮影用として使う比率が増加していること、顧客のニーズが変わってきていることから、いっそうの改善が必要と考える。

(2) UH-6Gアノード封止部破損対策

UH-6Gは昭和46年に循環器用途を主目的として開発した特大容量のX線管であるが、製品化初期の段階で多くのアノード封止部破損不良が発生した。原因はターゲットの熱容量を

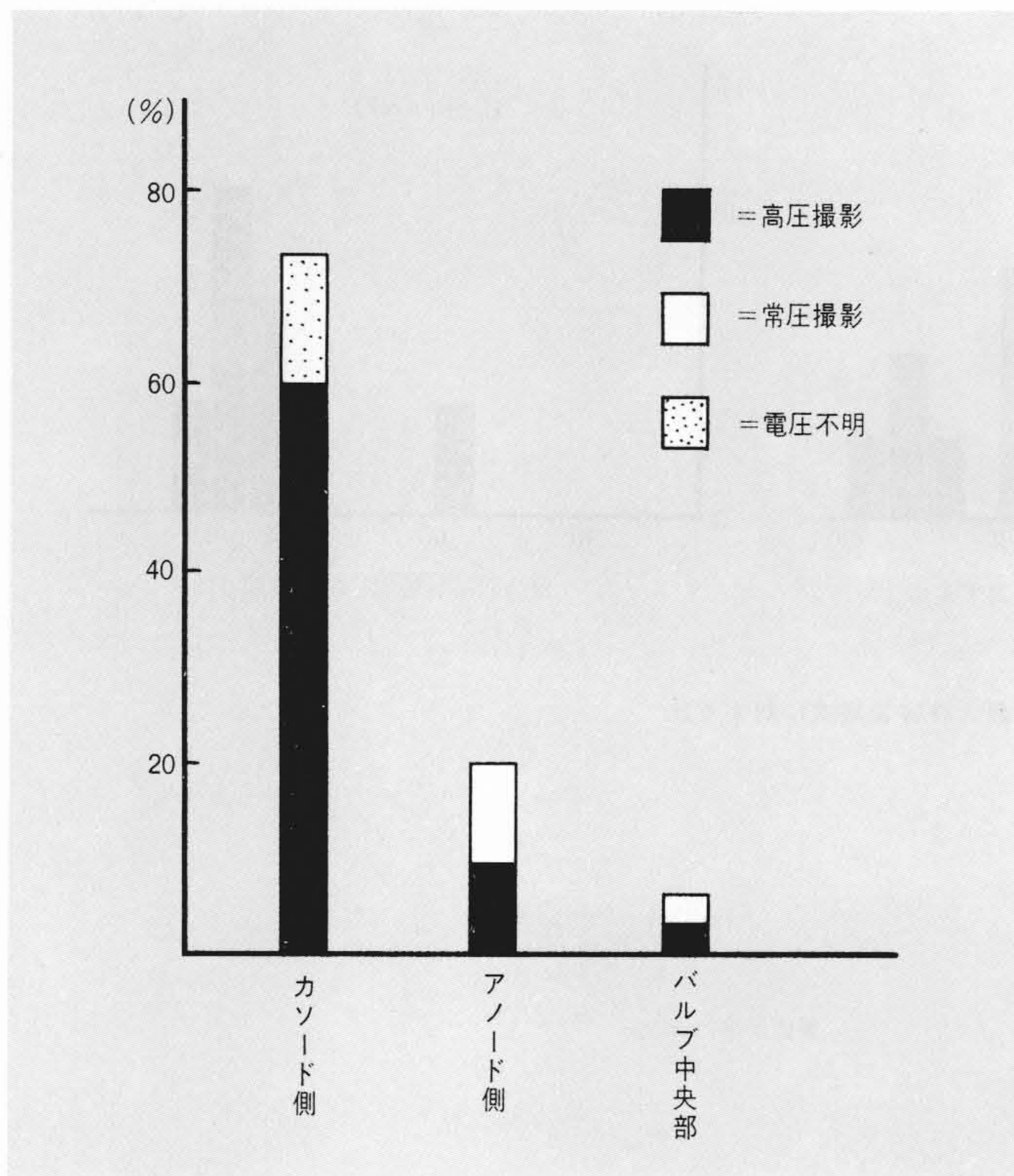


図8 U-6Mバルブ電撃不良発生場所 U-6Mバルブ電撃不良の発生状況を表わしたものである。電撃不良の約70%がカソード側バルブで発生している。

大きくするため、ターゲットの重量がU-6Mに比較し約2倍で、しかも高速回転で使用されるためである。すなわち、高頻度繰返し撮影で生ずる回転アンバランスによりアノード部のガラス封止部分にガラスの限界強度を超えた異常なひずみがかかるためであり、このため48年10月よりアノード封止部の強度を強化した金属封止構造に変更した。従来形と対策形の封止部強度について比較評価試験を行ない確認した結果、対策品の封止部強度が5倍以上に改善されていることが分かった。既に50台以上の対策品がフィールドで順調に稼動している。工場内の評価試験結果やフィールドの稼動状況から判断して、UH-6Gのアノード封止部破損の不良率は $\frac{1}{3}$ 以下に低減できたと推定する。

4 結 言

X線管の使用状況及び稼動実績データについて解析し、信頼度及び問題点を明らかにした。これまでに得られた結論を要約すれば、

- (1) 主要X線管の使用状況の概要を把握することができた。
 - (a) 胃腸用途の使用管電圧は80~120kVpであるが、胸部用途は60~100kVpの常圧撮影と120~150kVpの高圧撮影とがある。
 - (b) 高圧胸部撮影用の顧客ニーズが増えている。U-6M55Pでは、胸部用途の50%が高圧胸部撮影である。
 - (c) 1mm焦点X線管は胃腸撮影の場合、最大許容管電流の70~100%で使用している。
- (2) 主要X線管の累積故障率、故障モード、信頼度について把握することができた。また、X線管の平均故障率は、およそ $0.4 \sim 3.5 \times 10^{-6}$ であることが分かった。
- (3) U-6M, UH-6Gについて不良低減対策の効果を定量的に評価した。U-6Mは不良率が約 $\frac{1}{2}$ に、UH-6Gは不良率が約

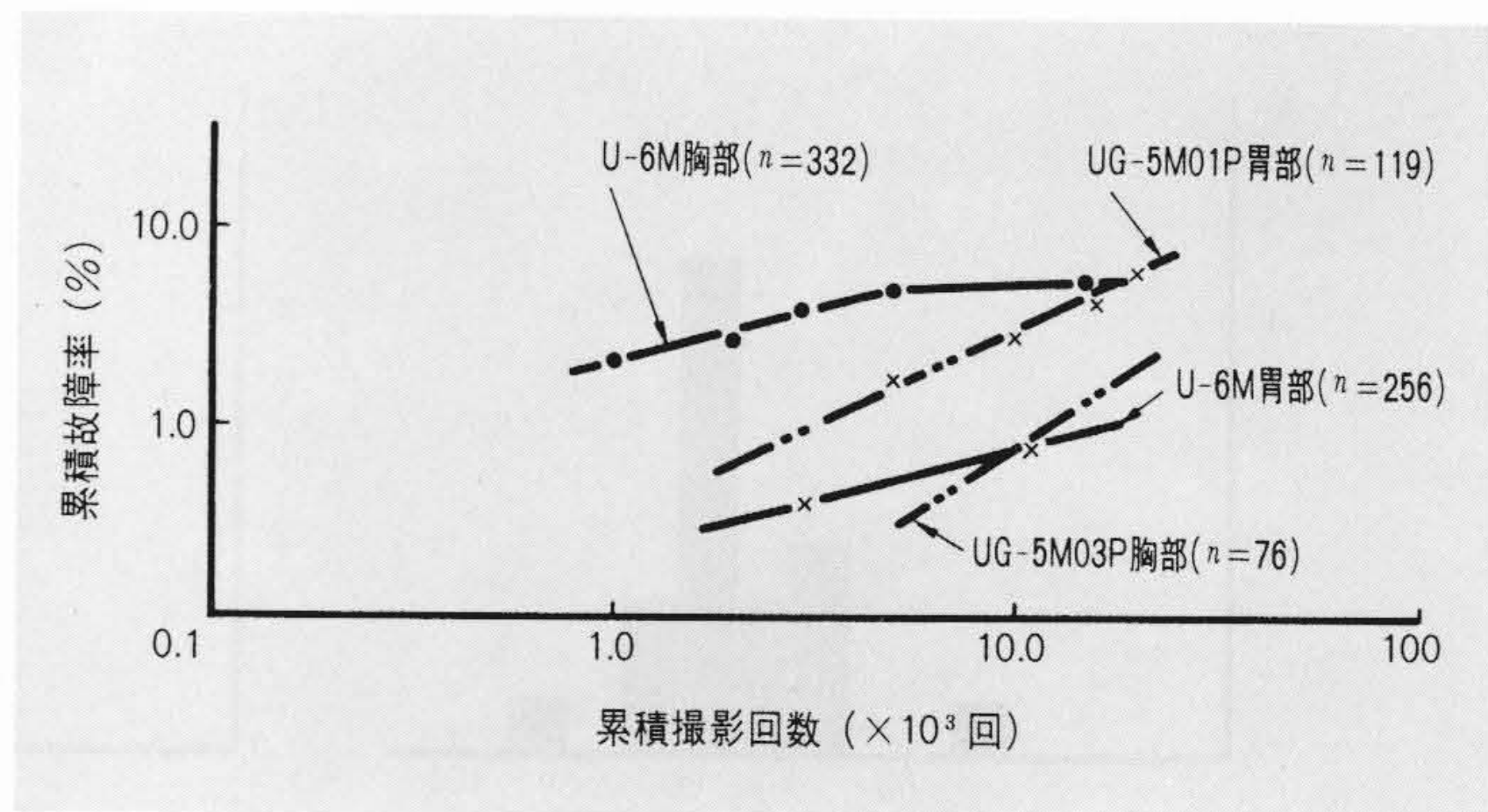


図9 UG-5M, U-6M用途別稼動実績 用途別稼動実績の比較を示したものである。UG-5Mは胸部用途の故障率が小さいが、U-6Mは胃部用途の故障率が小さい。

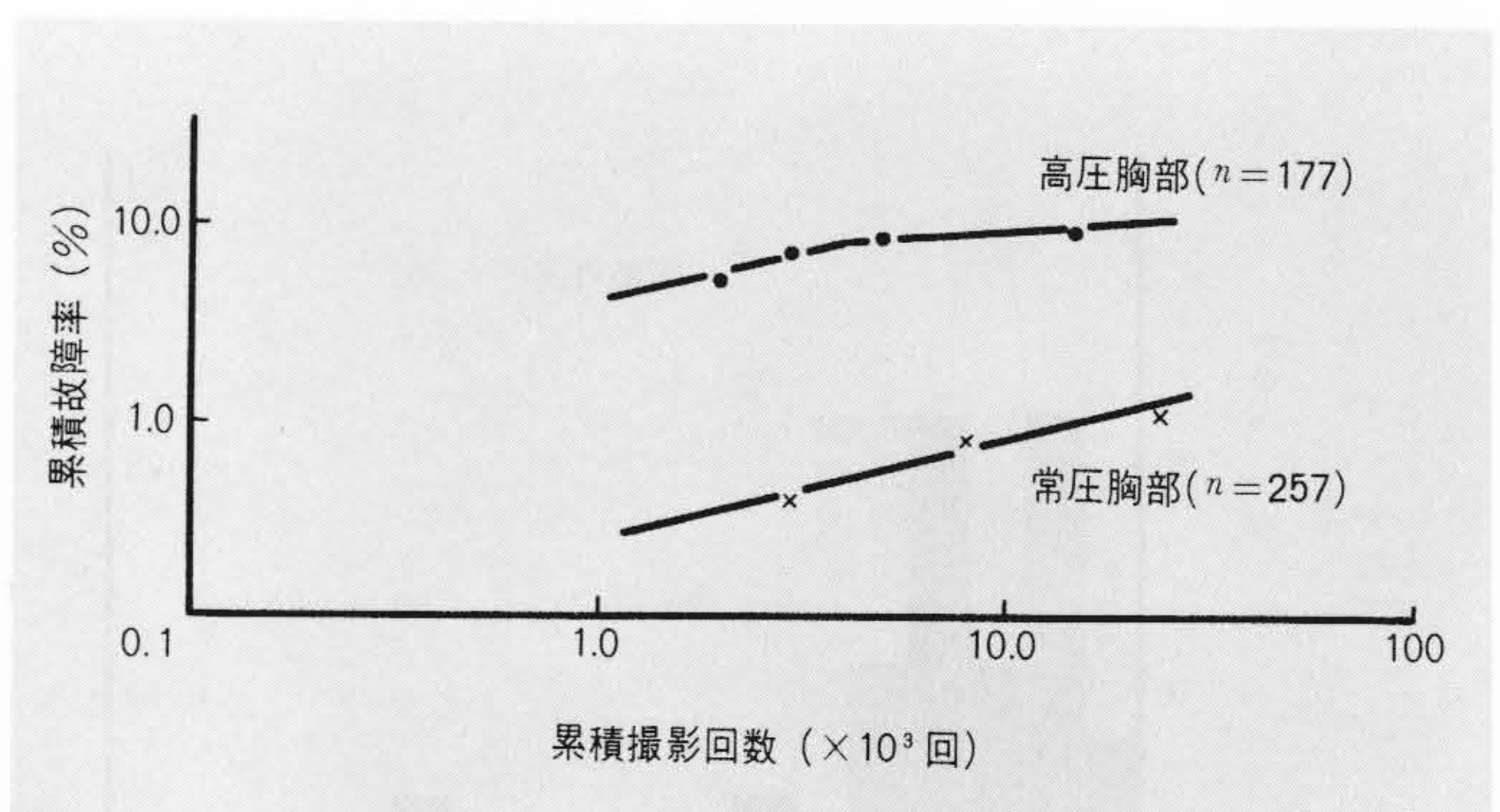


図10 U-6M胸部撮影稼動実績 U-6Mについて常圧胸部と高圧胸部の稼動実績を比較したものである。常圧撮影の故障率は高圧胸部の $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{15}$ である。

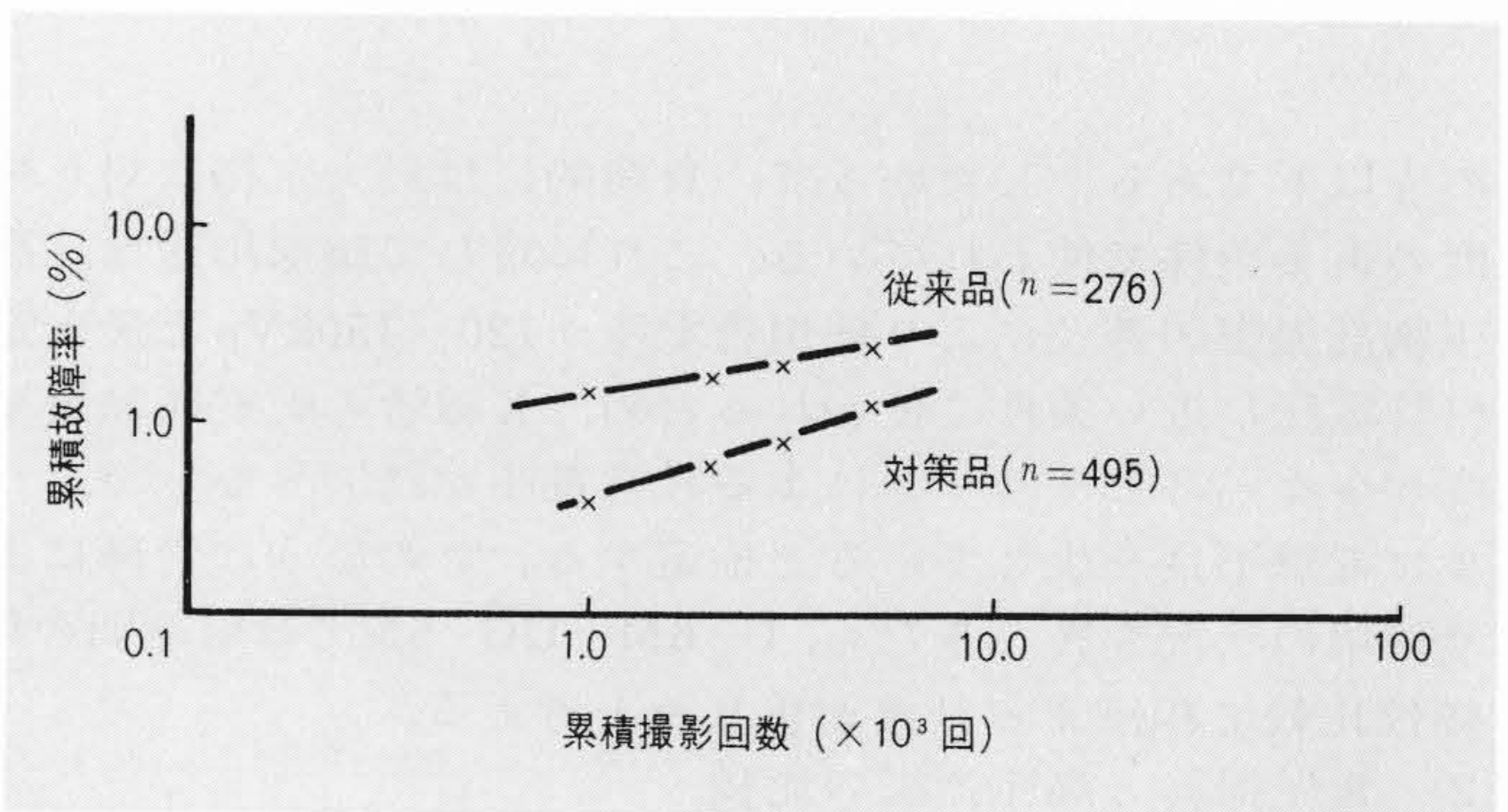


図11 U-6Mバルブ電撃対策品の稼動実績 U-6Mバルブ電撃対策品とゴムシート品(従来品)の稼動実績を表わしたものである。故障率が約 $\frac{1}{2}$ に低減している。

$\frac{1}{3}$ 以下に低減し、対策の効果が現われている。

終わりに、本調査に関しデータ収集など、種々協力いただいた株式会社日立メディコの関係各位に対し深謝する次第である。

参考文献

- 1) 江副ほか：「X線撮影技術」, p. 314 (昭-48 南山堂)
- 2) 柳瀬ほか：「レントゲンの扱い方」, p. 302 (昭-47 裳華堂)
- 3) 山下：「診療放射線の実際」, p. 47 (昭-49 医歯薬出版)
- 4) 日科技連編：「信頼性データの解析」, p. 21 (昭-45 日科技連)