臨床技術

論文受付
2013 年 12 月 9 日

論文受理
2014 年 10 月 27 日

Code No. 751

信頼性解析を用いた医療用リニアックの故障分析

座喜味健¹ 渡邊裕之² 石田秀樹² 武 俊夫¹ 加藤光好¹
岩井譜憲² 新田 勝¹ 加藤京一² 中澤靖夫²

¹ 昭和大学横浜市北部病院放射線室

² 昭和大学大学院保健医療学研究科

緒 言

2007 年, 医療を受ける者の利益の保護および良質かつ適切な医療を効率的に提供する体制の確保を図ることを目的とし, 医療法の一部が改正された¹⁾. そのような社会の趨勢を鑑みると, 放射線治療の分野においても患者の利益と医療の質に直接影響を与える装置管理がますます重要視されていると考えるべきである. とりわけ故障による治療の中断や精度の低下は良質な医療の提供を損ないかねない²⁾. また, リニアックについて重要な点は精度管理であり, この状態を長期間維持することである. 近年, 強度変調放射線治療(intensity modulated radiation therapy: IMRT)や画像誘導放射線治療(image guided radiation therapy: IGRT)を中心

とした高精度放射線治療が実現できたのもそのような精度管理が礎となつてのことである.

放射線治療における欧州のガイドライン³⁾によると, リニアックの使用年数上限は 10~12 年とされている. これは週 40 時間使用した場合の上限であり, 週 50 時間使用する場合には上限は 15% 短縮(約 10 年)される. 更に週 60 時間の場合には 25% 短縮(9 年)するとされている^{3, 4)}. その保守管理については, いくつかの報告^{5~7)} がなされているが信頼性工学に基づいた部品の寿命による故障予測を行ったものは少ない.

当院で稼動しているリニアックの年度別運転状況から, 故障回数と故障件数との関係, および故障によって照射中止に到った部品の挙げ, ワイブル解析, 指数

Failure Analysis of Medical Linear Accelerator with Reliability Analyses

Ken Zakimi,^{1*} Hiroyuki Watanabe,² Hideki Ishida,² Toshio Take,¹ Mitsuyoshi Kato,¹
Tsugunori Iwai,² Masaru Nitta,¹ Kyouichi Kato,² and Yasuo Nakazawa²

¹ Department of Radiological Technology, Showa University Northern Yokohama Hospital

² Graduate School of Nursing and Rehabilitation Science, Showa University

Received December 9, 2013; Revision accepted October 27, 2014

Code No. 751

Summary

We analyzed a number of cases about the Linac troubles in our hospital and have examined the effect of preventive maintenance with Weibull analysis and exponential distribution from April 2001 to March 2012. The total failure by irradiation disabled was 1,192. (1) Medical linear accelerator (MLC) system was 24.0%, (2) radiation dosimetry system 13.1%, and the (3) cooling-water system was 26.5%. It accounts for 63.6% of the total number of failures. Each parameter value m , which means the shape parameter, and the failure period expectancy of parts μ were (1) 1.21, 1.46 / 3.9, 3.8 years. 3.7, 3.6 years. (2) 2.84, 1.59 / 6.6, 4.3 years. 6.7, 5.9 years. (3) 5.12, 4.16 / 6.1, 8.5 years. 6.1, 8.5 years. Each shape parameter was $m > 1$. It is believed that they are in the worn-out failure period. To prevent failure, MLC performance should be overhauled once every 3 years and a cooling unit should be overhauled once every 7 years. Preventive maintenance is useful in assessing the failure of radiation therapy equipment. In a radiation dosimetry part, you can make a preemptive move before the failure by changing the monitor's dosimeter board with a new part from the repairs stockpiled every 6 months for maintenance.

Key words: linear accelerator, pattern of failure, Weibull analysis, exponential distribution

*Proceeding author

分布を用いて解析を行った。これらは主に工業分野で部品の故障(寿命)予測に用いられる方法で、故障率が一定あるいは不明な場合はワイブル解析、故障率が一定または一定と見なせる場合、指数分布での評価が可能である。清水⁸⁾らの報告によると、ワイブル解析と指数分布など他法との比較検討を推奨している。本研究では、この二つの信頼性解析法から推定故障期間を求め、遅滞なく放射線治療が実施できるよう、予防保全の有用性について検討したので報告する。

1. 信頼性解析理論

機器故障のパターンを分類し、寿命特性を分析するには、ワイブル分布を主体としてワイブル解析が用いられる。時点 t における確率密度関数 $F(t)$ は、 m によって形状が変わるため m は形状パラメータと呼ばれる。これは分布関数を微分したもので、 $m < 1$ のとき故障数は初期に集中する。 $m = 1$ で故障率は一定。 $m > 1$ のときには故障数はある時間で極大値を持つ。 α は故障の尺度を決めるもので、尺度パラメータと呼ばれる。特に m と故障率の関係は重要で、 t における故障率は、ハザード関数(故障率関数) $\lambda(t)$ で定義され、式(1)で表される⁹⁾。

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} = \frac{m}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{m-1} = \frac{mt^{m-1}}{\alpha}, \quad t \geq 0 \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、 $m < 1$ のとき Fig. 1a に示す故障率曲線における初期故障期で、設計の不具合が含まれているため、稼働から初期に故障率が高く、次第に減少する型である。予防保全を行ってもあまり効果がなく故障が発生してからの事後保全となる。 $m = 1$ であれば一定で、偶発的な故障が原因で使用不可となる。 $m > 1$ のときには時間の経過に伴って故障率が増加する磨耗故障期となる。通常、故障した時点で寿命となるのではなく、修理をして使用し続けるため解析上、機器は修理系という。非修理系と修理系は、同じ解析手法をとるが、得られる結果は信頼度と平均故障寿命(mean time to failure: MTTF)および故障率と平均故障間隔(mean time between failure: MTBF)である。したがって、 m を推定することによって、故障の状態、更に推定故障期間 μ が得られることから予防保全が可能となる¹⁰⁾。

$$\text{推定故障期間 } \mu = \text{MTBF(MTTF)} = \alpha \times \Gamma\left(\frac{1}{m} + 1\right) \quad \cdots \cdots (2)$$

ここに Γ はガンマ関数という。これらのパラメータを任意の時点で求められるのがワイブル解析である。また、機器は多くの部品と接しており、故障を修理することで再び使用できる。この故障率のパターン

Fig. 1 The Bathtub curve.

- (a) Failure rate curve of Weibull distribution
(b) Bathtub curve

(各故障期間と m との関係)を Fig. 1b に示す。この曲線は西洋の浴槽のような形となることからバスタブ曲線と呼ばれる¹¹⁾。

2. 使用機器および方法

2-1 年度別運転状況

当院で稼働しているリニアック装置(MEVATRON KD2 PRIMUS, SIMENS 社製)について、2001年から2012年までの12年間の運転状況を始業終業点検表、修理報告書から調査し、以下に示す7項目を求めた。稼働時間は動作可能な時間と定義し、フィラメントタイムから算出した。フィラメントタイムは、装置に電源が供給されている時間とした。

(1) ダウンタイム(down time: DT)

DTは、通常業務時間内でシステムが故障によって停止した時間から運転可能となるまでの時間を定義とし、保守点検やビーム調整の時間は除外した。

(2) 稼働率

$$\text{稼働率} = (\text{稼働時間} / \text{稼働時間} + \text{DT}) \times 100(\%) \quad \cdots \cdots (3)$$

(3) 平均故障間隔(MTBF)

$$\text{MTBF} = (1 \text{ 年間の総稼働時間} / 1 \text{ 年間の総故障回数})$$

$$\cdots \cdots (4)$$

(4) 平均修復時間(mean time to recovery: MTTR)

Fig. 2 Unit configuration block diagram of Linac.

MTTR=(1年間のDT/1年間の総故障回数) …… (5)

(5)故障率

故障率=(1/MTBF)×100(%) …… (6)

(6)中止率

中止率=(1年間の中止件数/1年間の照射件数)×100(%)
…… (7)

(7)故障率曲線

故障率曲線は、機器の時間経過 t に伴う故障率の変化を表したものである。

故障率曲線=1/(累積稼動時間/累積故障回数)×100(%)
…… (8)

故障の定義として捉えた内容については、ネジの脱落を含めた部品の交換および修理や、予防保全を目的とした交換含めたもので、メーカー作業員による報告書を基にした。

2-2 故障内容の系統別分類

リニアックの構成部品は多岐にわたるため、故障内容を Fig. 2 に示す構成ユニット別に以下の 10 系統に分類した⁵⁾。

(1)支持装置系

支持装置部は、回転架台(ガントリ)、回転駆動機構等から構成される。ガントリ回転角のポテンション、エンコーダが主な交換部品であった。

(2)Multileaf collimator 系(MLC 系)

患者の体内における病巣部の形状に合わせて放射線

の照射範囲を設定するものである。モータ、リーフのほかに往復駆動するリーフの位置を検出するセンサと制御系基板が主な交換部品であった。

(3)パルス系

パルス変調部、パルス電源、セラミックスイッチ、インジェクタ等が構成部品として挙げられるが、主な交換部品はセラミックスイッチ、インジェクタであった。

(4)線量測定系

照射線量を正確に測定するために MU 値、線量率、対称性、平坦性を管理している。インターロックから照射中止となり、その対応策として要交換となった構成部品は、モニタ線量計基板、および線量計の電子装置を構成するための主要な電子回路基板であるマザーボードであった。

(5)加速管系

電子を加速する主要な部分で、加速管、電子銃、真空装置等から構成される。主な交換部品は、ターゲット、加速管であった。

(6)冷却水系

冷却水による加速管の温度制御および各発熱部の冷却装置で主な交換部品は、循環冷却水ホース、ウォーターフロースイッチであった。

(7)ネットワーク系

治療計画装置からのデータをリニアック装置に転送、制御を行うローカルエリアネットワーク治療情報システムで、主な構成部品は、治療ワークステーション、サーバである。

Table 1 Driving situation in consecutive years

Year	Number of failure	DT (hr)	Occupancy rate (%)	MTBF (hr)	Failure rate (%)	MTTR (hr)	Number of irradiation	Number of disabled	Discontinuance rate (%)
2001	54	226.5	93.5	60.1	1.7	4.2	6450	77	1.2
2002	74	286.5	92.3	46.3	2.2	3.9	10754	58	0.5
2003	65	124.5	96.1	47.4	2.1	1.9	11099	59	0.5
2004	48	73.5	97.6	62.0	1.6	1.5	12155	117	1.0
2005	49	70.5	97.8	63.0	1.6	1.4	12829	62	0.5
2006	42	62.0	98.0	71.7	1.4	1.5	13418	122	0.9
2007	54	81.3	97.4	57.1	1.8	1.5	13547	151	1.1
2008	54	47.0	98.5	56.1	1.8	0.9	13422	188	1.4
2009	21	8.5	99.7	133.2	0.8	0.4	12053	171	1.4
2010	37	10.5	99.6	78.8	1.3	0.3	11796	39	0.3
2011	26	10.5	99.7	134.2	0.7	0.4	12820	95	0.7
2012	25	9.5	99.7	142.8	0.7	0.4	12167	53	0.4
Total	549	1010.8					142510	1192	
Median		66.3		62.5		1.5			
Average	45.8		97.5	79.4	1.5		11876	99.3	0.8

(8)制御器系

治療に必要な操作器コンソールおよび運転を制御するための各種回路で、主な交換部品は、ガントリ回転駆動機構を司るヘッドドライバであった。

(9)寝台部

患者を乗せて治療するための寝台であり、寝台動作装置および周辺機器で、交換を要した主な部品は、寝台パネルシート、操作スイッチパネルであった。

(10)その他

主な交換部品は、監視用モニタ、監視用カメラであった。

2-3 ワイブル解析による検討

今回われわれは、前項 1-2 で分類した中から故障によって、照射中止の割合が多くなった構成部品の故障時期、故障回数を故障修理記録から調査し、ワイブル解析メジアンランク法によって部品の故障期間予測を行った。このワイブル解析には順序統計量として扱った n 個中の i 番目のデータ t_i そのものが従う分布からメジアンや平均の推定値を用いたものであり、各々メジアンランク法、平均ランク法と呼ばれる。標本数 n が小さい場合はメジアンランク法、標本数 $n > 20$ の場合には、

平均ランク法 $= i/(n+1)$ (9)

が適用される。実用上はメジアンランクの平易な近似式

メジアンランク法 $= (i - 0.3)/(n + 0.4)$ (10)

が多く用いられる。

また、形状パラメータ m 値については、信頼性解析

ソフト computer aided reliability engineering (CARE) を用い算出した¹²⁾。推定故障期間(年)は、故障によって照射中止となった経過時間(日)から年 365 日で除算した。

推定故障期間(年) = 経過時間(日)/365(日) (11)

2-4 指数分布を用いた検討

故障までの平均時間である MTTF は、信頼性工学の分野では部品の寿命として扱われる。この MTTF はワイブル解析の推定故障期間 μ に相当する。

故障率が一定または一定と見なせる場合である期間を過ぎた場合、指数分布を用いて故障率、MTTF を推定し、任意の時間における信頼度や不信頼度(故障確率)を求めることができる¹¹⁾。任意の点における故障率 λ は、

$$\lambda = \frac{\text{故障数}}{\text{総動作時間}} \quad \text{..... (12)}$$

として表され、部品の平均故障寿命を表す MTTF は、

$$\text{MTTF} = \frac{1}{\lambda} \quad \text{..... (13)}$$

によって得られる。任意の時間における信頼度 $R(t)$ は、

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad \text{..... (14)}$$

で得られ、部品の信頼性を具体的な数値で把握することができる。

3. 結 果

3-1 年度別運転状況

当院のリニアックが 2001 年に稼動してから 12 年間の年度別運転状況を Table 1 に示す。総故障件数は

Table 2 Consequence of annual comparison between Weibull analysis and exponential distribution

System	Parts	Weibull analysis		Exponential distribution		
		<i>m</i> Values	Annualize (year)	MTTF (hr)	Annualize (year)	Failure probability (%)
MLC	Sensor	1.21	3.9	32,336	3.7	62.7
	Control system substrate	1.46	3.8	31,396	3.6	63.8
Radiation dosimetry	Dosimeter substrate	2.84	6.6	58,427	6.7	60.9
	Mother boards	1.59	4.3	51,496	5.9	65.6
Cooling water	Circulating water hose	5.12	6.1	53,548	6.1	69.7
	Water flow switch	4.16	8.5	74,303	8.5	57.7

The annualize average, *MLC, **Radiation dosimetry, ***Cooling water

Table 3 The number of failure by year-on-year

The year	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Total
Support equipment system	12	12	13	8	12	12	16	20	7	13	10	7	142
MLC system	4	8	11	15	5	4	8	7	5	1	3	3	74
Pulse system	15	24	12	10	12	4	8	8	1	4	7	4	109
Radiation dosimetry system	8	11	15	9	10	5	14	5	3	5	2	4	91
Acceleration system	6	8	1	0	2	1	1	0	0	2	0	1	22
Cooling-water system	1	4	2	1	1	6	2	2	1	8	3	3	34
Network system	2	0	8	0	0	1	0	1	0	0	0	0	12
Control machine system	3	3	1	1	5	1	1	0	1	1	1	3	21
Bed system	0	2	0	3	2	5	3	11	3	3	0	0	32
Others	3	2	2	1	0	3	1	0	0	0	0	0	12
Total	54	74	65	48	49	42	54	54	21	37	26	25	549

549 回で、DT の中央値は 66.3 時間であった。12 年間における稼働率は式 (3) より 92.3~99.7%であった。この平均は 97.5%と加藤⁷⁾らの報告による 97.9%と比較しても同程度であった。MTBF の中央値は 62.5 時間、MTTR は 4.2 時間から 0.4 時間へと減少した。平均故障率は 1.5%，故障によって照射中止となった件数は 1192 件で、それによる平均中止率は 0.8%であった。また、Fig. 3 から故障率曲線から求めた結果からは、バスタブ曲線は得られなかった。Table 4 から、MLC 系は 3 年以上の使用で照射中止となることが多く、冷却水系では、稼働から 6 年以上の故障で照射中止となる傾向がある。

3-2 故障内容の系統別分類

Fig. 4a, b から、総故障件数に対する系統別分類は、支持装置系で 25.9%，MLC 系で 13.5%，パルス系で 19.9%，線量測定系で 16.6%，加速管系で 4.0%，冷却水系で 6.2%，ネットワーク系で 2.2%，制御器系で

3.8%，寝台系で 5.8%，その他 2.2%であった。冷却水系が 6.2%と少ないのは、木村⁶⁾らの報告と同様であったが、故障によって照射中止となったのは、MLC 系 24.0%，線量測定系 13.1%，冷却水系で 26.5%と全体の 63.6%が照射中止となる割合を占めたことからこの 3 系統に着目し、ワイブル解析および指数分布による評価を行った。

3-3 ワイブル解析による結果

方法 2-2 で分類した中から照射中止の割合が多く交換となった部品をワイブル解析メジアンランク法で求めた。Fig. 5 に示した MLC 系では (a) はセンサ、(b) を制御系基板とした。同様に Fig. 6 に示した線量測定系では、(a) はモニタ線量計基板、(b) をマザーボードとした。Fig. 7 に示した冷却水系は、(a) は循環冷却水ホース、(b) はウォーターフロースイッチである。また、得られた形状パラメータ *m* 値と推定故障期間の計算結果を Table 2 に示す。

Fig. 3 Failure rate curve.

Fig. 4 Classification by a systematic fashion.

(a) Total number of failure for classification by a systematic fashion

(b) Percentage of the value of aborting irradiation by failure

a | b

(1) MLC 系

故障型を表す形状パラメータ m 値は、センサで 1.21, 制御系基板で 1.46 と $m > 1$ であった。また、推定故障期間は、故障によって照射中止となった経過時間から年数に換算したもので、式(11)からセンサで 3.9 年、制御系基板で 3.8 年と算出された。

(2) 線量測定系

モニタ線量計基板の m 値が 2.84, マザーボードが 1.59, 推定故障期間は、式(11)からそれぞれ 6.6 年、4.3 年と算出された。

(3) 冷却水系

冷却水系では、循環冷却水ホースの m 値が 5.12, ウォーターフローズスイッチで 4.16, 推定故障期間は、式(11)からそれぞれ 6.1 年、8.5 年と算出された。

3-4 指数分布による結果

部品の信頼性を具体的な数値で表す指数分布を用いて、MTTF, 推定故障期間, 故障確率を求めた結果を Table 2 に示す。

(1) MLC 系

指数分布による MTTF は、センサで 32,336 時間、制御系基板で 31,396 時間であった。これを年換算にするとそれぞれ 3.7 年、3.6 年となり、ワイブル解析で算出された推定故障期間とほぼ一致した。また平均換算年 3.6 年後に起こる故障確率は 62.7%, 63.8% と計算された。

(2) 線量測定系

線量測定系における MTTF は、モニタ線量計基板で 58,427 時間、マザーボードで 51,496 時間であった。こ

Fig. 5 Weibull analysis of MLC system.

(a) Sensor

(b) Control system substrate

Fig. 6 Weibull analysis of radiation dosimetry system.

(a) Dosimeter substrate

(b) Motherboards

Fig. 7 Weibull analysis of cooling-water system.
(a) Circulating cooling-water hose
(b) Water flow switch

れを年換算にするとそれぞれ 6.7 年, 5.9 年となり, マザーボードの値がワイブル解析で算出された推定故障期間と一致しなかった。また, 平均換算年 6.3 年後に起こる故障確率は 60.9%, 65.6%と計算された。

(3) 冷却水系

冷却水系における MTTF は, 循環冷却水ホースで 53,548 時間, ウォーターフロースイッチで 74,303 時間であった。これを年換算にするとそれぞれ 6.1 年, 8.5 年となり, ワイブル解析で算出された推定故障期間と一致した。また, 平均換算年 7.3 年後に起こる故障確率は 69.7%, 57.7%と計算された。

4. 考 察

12 年間における総故障回数は 549 回で, 平均 45.8 回となるが, 稼働から 2 年目, 3 年目での故障回数は, それぞれ 74 回, 65 回と多く発生したことから, 初期故障期間と推測される。DT は, 中央値で算出した結果, 66.3 時間であったが, 稼働から 2 年目では 286.5 時間, 以降多少の増減はあるが 10 年目では 10.5 時間と概ね順調に減少した。Table 3, 4 から, 初期故障と思われる 2001 年, 2002 年において, 初期故障の基板交換, 加速管等の特殊管球の交換もあったため, DT

や MTTR が大きくなったと考えられる。この対策として基板等の交換頻度の高かった部品に対して 2003 年から備蓄をし始めた結果, DT や MTTR が減少したと考えられる (Table 1)。平均稼働率は 97.5%を維持しており, 安定稼働を保っている⁷⁾。MTTR は, 値が小さいほど, 復旧までの時間が短く保全性が高いシステムを表すが, 4.2 時間から 0.4 時間へと減少しており, 交換部品の備蓄とともに全体としての保全性は高くなってきていると考えられる。MTBF は, 値が大きいほど, 故障間隔が長く安定したシステムを表すが, Table 1 からその平均は 79.4 時間であった。稼働から 9 年目の 2009 年に 133.2 時間, 翌年に 78.8 時間と減少するが, 11 年目に 134.2 時間, 12 年目に 142.8 時間と年数が経つにつれ安定していることになる。

Table 1, 4 から, 故障によって照射中止となった総件数は 1192 件で, 平均 99.3 件となる。しかし, 故障による照射中止が稼働後 6 年目の 2006 年で 122 件, 7 年目で 151 件, 8 年目で 188 件, 9 年目で 171 件となった。これは 6, 7 年目に冷却水系による故障が多発したためで, 主に冷却ホースの経年劣化や, 故障時に併発した水量の検出や減水に使用されるウォーターフロースイッチの不具合が主な原因であった。更に,

Table 4 The number of disabled by year-on-year

The year	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Total
Support equipment system	7	0	0	0	0	0	0	63	8	0	37	0	115
MLC system	5	0	0	117	0	0	35	47	68	0	14	0	286
Pulse system	0	56	1	0	13	36	3	0	0	0	0	8	117
Radiation dosimetry system	34	0	0	0	35	0	24	1	44	1	0	17	156
Acceleration system	30	2	0	0	14	0	1	0	0	19	0	0	66
Cooling-water system	0	0	0	0	0	61	48	66	50	19	44	28	316
Network system	1	0	58	0	0	0	0	11	0	0	0	0	70
Control machine system	0	0	0	0	0	0	40	0	0	0	0	0	40
Bed system	0	0	0	0	0	25	0	0	1	0	0	0	26
Others	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	77	58	59	117	62	122	151	188	171	39	95	53	1192

2008 年, 2009 年には冷却水系と MLC 系の故障が併発したことも要因と考えられる。

また, 2004 年では MLC 系のみの照射中止が 117 件であったが, 翌 2005 年に MLC のオーバーホールを行った結果, 照射中止に至った件数はなく, 他の故障による照射中止で 62 件を占めた。当院では 2005 年, 2009 年, 2012 年と 3 回の MLC のオーバーホールを行っているが, 2005 年から 4 年後に行った 2009 年のオーバーホールのときに比べ, 2009 年から 3 年後の 2012 年に行ったオーバーホールでは, 故障による照射中止が少なく安定稼働となった一因と考えられる。

ワイブル解析は 100%故障が前提の解析であるため, データの信頼性について考慮しなければならない。一般的な機器は耐用年数を考慮した構造となっており, 標準耐用年数は排水処理施設で使用される掻寄機で 15 年¹⁰⁾の報告があるが, 医療機器, とりわけ医療用リニアックについては 7 年⁹⁾での装置更新が望ましいとされている。また, 清水⁸⁾らの報告によると, 機器の故障解析は, ワイブル解析と指数分布など他法との比較検討を推奨している。故障率が一定あるいは不明な場合はワイブル解析, 一定または一定と見なせる場合, 指数分布での評価が可能であることからこの両方を用いて比較した結果を以下に示す。

ワイブル解析による結果から, 当院で MLC 系が磨耗故障期間 ($m=1.21, 1.46$) と見なされた理由として, 使用期間中に MLC のオーバーホールを行ったためであると推測される。モニタ線量計基板故障についての形状パラメータ m 値は, $m=2.84$ で, $m>1$ が確認でき, 磨耗故障期間と推測される。ワイブル解析によるモニタ線量計基板の推定故障期間が 6.6 年, 指数分布による計算結果 6.7 年とほぼ一致したが, Table 2 に示す指数分布結果から, 二つの部品の平均換算から 6.3 年以上の使用では, 故障を起こす確率が 63.3%となる。保

全を含めた交換回数が 27 回であったことから, 12 年間の使用では単純計算で年間 2.25 回の交換が必要となるモニタ線量計基板は, 予防保全を目的とするためにも年 4 回行われる保守点検の内, 半年ごとの交換で故障が予防できると考えられる。また, ワイブル解析によるマザーボードの推定故障期間が 4.3 年, 指数分布による計算結果 5.9 年と一致しなかったのは, 経時的な故障ではなく一時期に集中したことや, 基板の改良によって性能が向上したためと考えられる。

Fig. 4a, b から, 冷却水系で, 故障割合が 6.2%と少ないにもかかわらず, 照射中止割合が 26.5%と大きくなったのは, 循環冷却水ホースやウォーターフローズイッチ等の劣化故障による影響が大きいと考えられる。Table 2 に示すワイブル解析による循環冷却水ホースの推定故障期間が 6.1 年, ウォーターフローズイッチの推定平均寿命が 8.5 年, 指数分布による結果が循環冷却水ホースで 6.1 年, ウォーターフローズイッチが 8.5 年と算出され一致した。MLC 系もワイブル解析による推定故障期間と指数分布による計算結果がほぼ一致したことから多角的な視野から検討することの有用性を表している。

Table 2 に示す指数分布 2 つの部品の平均換算から, MLC 系で 3.6 年以上の使用では故障を起こす確率が 63.3%となることや, 冷却水系では 7.3 年以上の使用は故障を起こす確率が 63.7%となる。今回のワイブル解析による推定故障期間と指数分布との結果から, 安定した装置稼働のためにも欧州のガイドライン³⁾等に基づきリニアックの過度な使用は避けるべきである。したがって, MLC のオーバーホール, また, 冷却水循環ホース等の交換時期を定めることで, 予防保全となり, 安定稼働となることが示唆される。

5. 結 語

2001 年から稼動している当院，リニアック装置の故障から照射中止に至った部品を推定し，ワイブル解析および指数分布を用いて推定故障期間，故障確率の算

出をした．故障によって照射中止となる割合が大きい MLC は 3 年，冷却水系は 7 年を目途に部品交換を含めたオーバーホールを行うことで，故障の予防が期待でき，予防保全は有用であるといえる．

参考文献

- 1) 第 5 次医療法改正．医政発第 0330010 号．平成 19 年 3 月 30 日．
- 2) 渡邊裕之，馳澤憲二，座間佳男，他．リニアックの故障とその照射への影響について．日放腫会誌報分集 2008; 20: P-C107.
- 3) Scottish Executive Health Department. Report of the Radiotherapy Activity Planning Group. Radiotherapy activity planning for Scotland 2011-2015. Healthier Scotland Scottish executive, 2005: 45-46.
- 4) がん臨床研究事業 石倉班．がん医療の均てん化に資する放射線治療の推進及び品質管理に関わる研究．H 22 -がん臨床-一般-001.
- 5) 青山英樹，稲村圭司，田原誠司，他．直線加速器における故障の統計分析－MEVATRON77 DX67 に関する 10 年間の統計分析－．日放腫会誌 2003; 15: 219-226.
- 6) 木村千明．I. 高エネルギー放射線治療装置の保守管理（保守管理記録を基にした信頼）．日放技学誌 1979; 34(5): 590-600.
- 7) 加藤清貴，佐藤和久，中村克己，他．医療用リニアック（LMR-15A）の故障分析．日放技学誌 1994; 50(5): 630-636.
- 8) 清水貴宏．ワイブル解析を用いた信頼性寿命予測への提案－サンプルサイズの影響が小さい高精度予測方法－．信頼性データ解析研究会報告．信頼性データ解析シンポジウム．日本科学技研修所，東京，2010: 1-24.
- 9) 石田秀樹，生井澤寛，大成逸夫，他．放射線機器のモダリティ別故障解析による最適な装置更新時期の検討．放送大学大学院，自然環境科学プログラム修士論文 2011: 5-35.
- 10) 中根 進．下水処理場プラント機器の信頼性解析事例－機器の累積ハザード解析－．下水道協会誌論文集 2006; 43(522): 95-102.
- 11) 榊原 哲．よくわかる最新信頼性手法の基本．集和システム，東京，2009: 14-152.
- 12) 益田昭彦，石田 勉，横川慎二，他．信頼性データ解析．日本科学技術連盟，東京，2009: 68-122.

問合せ先

〒 224-8503 横浜市都筑区茅ヶ崎中央 35-1
昭和大学横浜市北部病院放射線部 座喜味健