

## 《技術報告》

## 陽電子断層撮影装置 (CTI: PT931/04-12) の信頼性

四月朔日聖一\* 石井 慶造\*\* 伊藤 正敏\* 織原彦之丞\*

要旨〔目的〕PET 装置 (CTI 社 PT931/04-12) の信頼性をその管理・維持データから評価する。〔方法〕解像力と感度を指標として初期性能が維持されているかを調べた。過去 13 年におよぶ故障データを用い、装置各部の MTTF (mean time to failure) および MTBF (mean time between failures) から装置の信頼性を求めた。〔結果〕解像力は維持されていたが感度は当初の 72% に低下していた。検出器ブロック (DB) および DB 制御モジュール (BC) の故障が全故障の 83% を占めていた。DB と BC 単体の MTTF は 2,733 日と 3,314 日、検出器リングにおける MTBF は 38 日と 114 日であり、装置全体の MTBF は 23 日であった。DB と BC の故障には季節の依存性が見られ、湿度との関連が考えられた。〔まとめ〕本装置の信頼性は、DB と BC に強く依存しており、これら部品の品質の向上や動作環境最適化が装置の信頼性を高める。PET 装置の普及のためにはその信頼性を評価し示すことが役立つであろう。

(核医学 39: 155-160, 2002)

## I. はじめに

現在、わが国において陽電子断層撮影 (以下 PET) 装置を設置している施設数は 30 ほどであるが、PET には腫瘍検索等に優れた FDG による医療経済効果があり<sup>1-3)</sup>、さらに PET 診断の保険適用が実現すれば今後益々普及するものと考えられている<sup>4)</sup>。PET 装置の臨床応用にとって、装置自体の性能が診断や研究の目的に対応できることはもちろんであるが、その性能と機能を安定して維持する能力 (信頼性: reliability) も重要な要素である。したがって、PET 装置の性能に関する報告<sup>5-7)</sup>に加え、その信頼性に関する報告も必要である。

ここでは、東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンターの PET 装置における約 13 年間の維持・管理データよりその信頼性を求め報告する。

## II. 信頼性

信頼性とは“アイテムが与えられた条件で規定の期間中、要求された機能を果たすることができる性質”と定義されている<sup>8)</sup>。この信頼性を定量的に表す尺度として、信頼度  $R(t)$  がある。信頼度はある時刻に対象物が正常に動作する (故障しない) 確率であり、対象物の実際の故障数とその動作時間から (1) 式で推定することができる<sup>9)</sup>。

$$R(t) = 1 - \frac{i(t)}{n+1} \quad (1)$$

ここで、非修理系の場合  $i$  は  $i$  番目の故障が発生した  $t$  時刻までの総故障数、 $n$  は総試料数である。修理系の場合  $i$  は故障から故障までの時間間隔  $t$  内で起こる事象の総数、 $n$  は観測期間の総故障数である。一方、装置の故障確率に特定の分布関数を当てはめて信頼度を推定することも可能で

\* 東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター  
 \*\* 東北大学大学院工学研究科・量子エネルギー工学専攻  
 受付: 13 年 9 月 22 日  
 最終稿受付: 14 年 12 月 6 日  
 別刷請求先: 仙台市青葉区荒巻字青葉 (☎ 980-8578)  
 東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター測定器研究部  
 四月朔日 聖一

あり、この場合少ない試料数でも装置の信頼性を求めることができ有用である<sup>10)</sup>。電気・電子系の多くの装置や部品に適用される偶発故障型の故障分布である指数分布の場合<sup>9)</sup>、信頼度は(2)式で予測される。

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2)$$

ここで  $t$  は動作時間、 $\lambda$  は装置または部品の故障率である。指数分布において  $\lambda$  は、非修理系の部品では平均寿命 MTTF (mean time to failure) また修理系の装置では故障間隔の平均時間 MTBF (mean time between failures) より (3) 式で求められ、MTTF と MTBF は (4) 式で求められる。

$$\lambda = \frac{1}{\text{MTTF}} \text{ or } \frac{1}{\text{MTBF}} \quad (3)$$

$$\text{MTTF or MTBF} = \frac{\text{総動作時間}}{\text{総故障数}} \quad (4)$$

ただし、MTTF における総動作時間は、全試料の動作時間の和である。また、どの構成要素が故障しても装置故障に至る直列系の装置では、各要素の故障率を  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  とした場合、システム全体の信頼度  $R_S(t)$  は (5) 式で与えることができる。

$$R_S(t) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)t} \quad (5)$$

さらに、これらに装置の性能の劣化を考慮した因子を乗じたものが総合的な信頼度と仮定できる。

### III. 対象および方法

#### 1. 対象

ここでは、信頼性を求める対象を PET 装置 PT931/04-12 (CTI Inc., Knoxville, USA) とした。本装置の検出部は、64 個の検出器ブロック (Detector Block: DB) と 16 個の検出器ブロック制御モジュール (Bucket Controller: BC) から成っている。DB は  $4 \times 8$  に配列されたシンチレータを 4 本の光電子増倍管で受け分圧回路により入射  $\gamma$  線を電気信号に変換する。BC は DB の出力から  $\gamma$  線入射結晶位置と時間をデジタル信号化しホスト・

コンピュータへ転送する。

また、信頼性を求めるにあたり装置が維持すべき性能を解像力および感度とした。信頼性の尺度としては DB, BC, および制御・処理用コンピュータ等の MTTF, MTBF および信頼度とした。

#### 2. 方法

##### A) 解像力・感度

解像力は、<sup>18</sup>F 水溶液を入れた外形 1.5 mm、内径 1 mm の金属チューブを横断面視野中心から 0 cm, 10 cm, 20 cm の位置に置きスキャンし、得られた再構成画像の半値幅 (FWHM) より求めた。感度は、<sup>18</sup>F 水溶液を入れた内径 20 cm、長さ 20 cm のプール・ファントムをスキャンして得られた断層面における単位放射能 (1 kBq) あたりの同時計数率とし求めた。得られた解像力と感度は装置設置年の値と比較した。また、1989 年 11 月から 2000 年 12 月までの全 DB のエネルギー・ウィンドウ下限値 (LLD) の平均と PET 画像の画素値を放射能濃度へ変換するために求められる校正係数 (CF) の経年変化を調べた。

##### B) MTTF・MTBF および信頼度

MTTF・MTBF および  $R(t)$  を求めるにあたり、1987 年 10 月から 2000 年 9 月までに生じた故障のうち検査不能に至るものを対象とした。故障は DB, BC, コンピュータおよびその他の部分に分類し、各部での MTBF を (4) 式より求めた。さらに、DB と BC に関しては設置当初から使用した部品の故障データより MTTF を求め、(1) 式と (2) 式から得た信頼度を比較すると共に、月別での故障数を求めた。また、PET 装置全体の信頼度  $R_S(t)$  を (1) 式および (5) 式にて求め比較した。

#### 3. 結果

##### A) 解像力・感度

Table 1 に設置時と今回測定した解像力および感度を示す。解像力は設置年の値とほぼ同じであり、現在もその性能を維持していることが示された。一方、感度は設置時に比べシステム全体で 72% に低下していた。Fig. 1 に (a) LLD 値と (b) CF の経年変化を示す。共に緩やかに低下し、11 年間でその割合は約 20% であった。

**B) MTTF・MTBF および信頼度**

Table 2 に部位別の故障数, MTTF および MTBF を示す. 故障が最も多かったのは DB で 127 個, 次に BC の 42 個で, 両者で全体の 83% を占めていた. DB と BC の MTTF は各々 2,733 日と 3,314 日, また装置全体の MTBF は 23 日であった. Fig. 2 に (a) DB と (b) BC の信頼度分布を示す. 縦軸は信頼度, 横軸は使用開始から故障するまでの日数である. また, 点は実際の故障日と故障数から (1) 式で得られる  $R(t)$  を示し, 実線は Table 2 の MTTF と (2) 式から求めた  $R(t)$  を示す. 両者はよく一致しており, 両部品は指数分布型の寿命パターンを示すことがわかった. DB の MTTF は比較的大きな値を示すが, 検出器リングあたりの

総数は 64 個であり (5) 式より検出器リングの MTBF に換算すると 43 日と短時間で故障が発生することになる. この値は DB の全故障数と検出器リングの全動作時間から求めた MTBF の 38 日とほぼ一致した. 一方, 装置内に 16 個ある BC 全体の MTBF は MTTF から 207 日と予測されたが, 実際の値は 114 日と大きく異なった. Fig. 3 に PET 装置全体の信頼度分布を示す. 縦軸は信頼度, 横軸は故障発生から次の故障までの間隔である.  $R_s(t)$  は, 指数分布を仮定した  $R_s(t)$  よりも故障間隔 25 日以下では低く, それ以上では逆に少

**Table 1** Comparisons between initial and current spatial resolutions and sensitivity of PT931/04-12

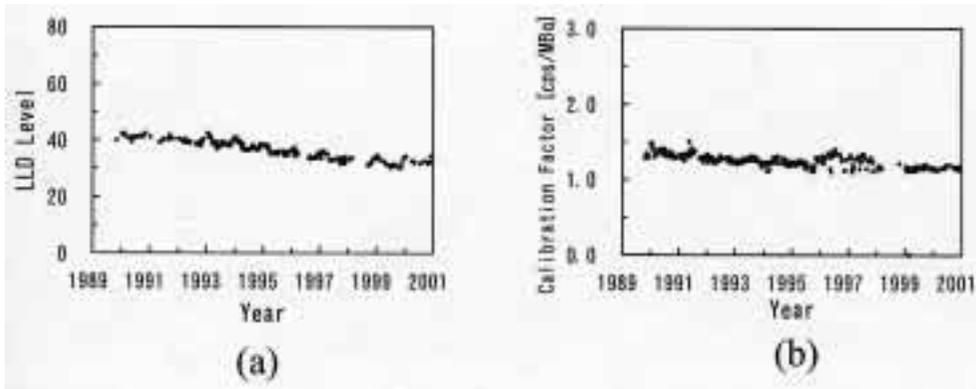
		Resolution (FWHM, mm)			Total sensitivity (cps/kBq/ml)
		Offset (cm)			
Direction		0	10	20	
		Initial	Radial	6.0	
	Tangential	6.0	6.4	7.1	
Current	Radial	5.0	6.9	9.3	1028
	Tangential	5.7	6.4	6.8	

**Table 2** MTTF and MTBF of PT931/04-12 at each part of system

Part	Number of failures	MTTF (days)	MTBF (days)
DB (single)	54*	2733	—
DB (ring)	127	—	38 (43**)
BC (single)	12*	3314	—
BC (ring)	42	—	114 (207**)
Computer	19	—	246
Others	16	—	292
System total	204	—	23

\* Repaired parts are not included

\*\* Estimated from MTTF



**Fig. 1** (a) Change in lower limit discriminator (LLD) level for 11 years. The vertical axis is arbitrary unit and LLD level which corresponds the photon energy of 250 keV. (b) Change in calibration factor (CF) for 11 year. CFs were obtained by scanning a uniform phantom that a radioactivity concentration was known. CF is the conversion coefficient that converts image pixel counts into radioactivity value, and it corresponds system efficiency.

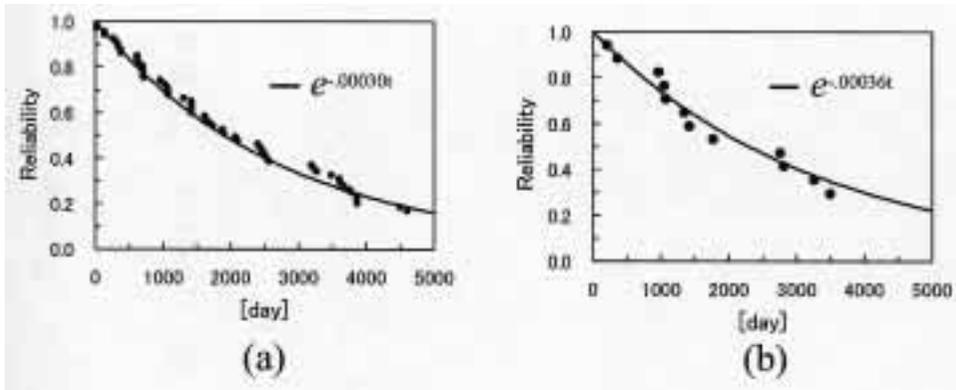


Fig. 2 Reliability of PT931 (a) DBs and (b) BCs. Closed circle presents  $R(t)$  obtained from equation (1) and solid line presents  $R(t)$  estimated from equation (2) with MTTF in Table 2.

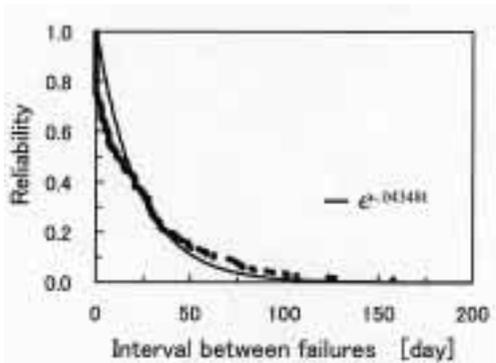


Fig. 3 Reliability of PT931 system. Closed circle presents  $R(t)$  obtained from equation (1) and solid line presents  $R(t)$  estimated from equation (2) with MTBF in Table 2.

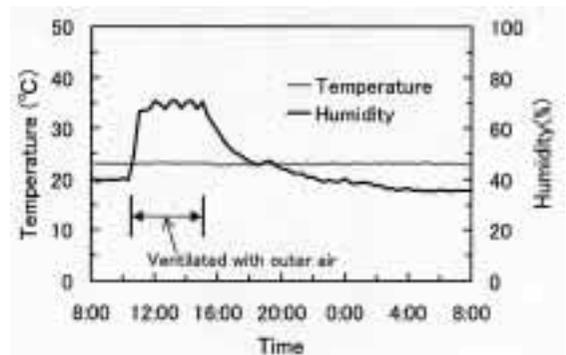


Fig. 5 Control of temperature and humidity in PT931/04-12 gantry room.

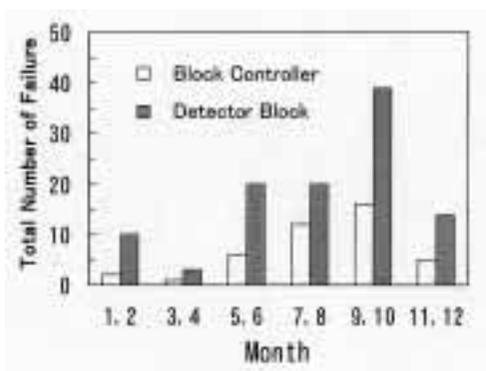


Fig. 4 Failure number of BC and DB as a function of month. Failures from Oct 1987 to Sep 2000 are summed in every two months.

し高くなっており、若干異なる分布を示した。

Fig. 4 に 1987 年 10 月から 2000 年 9 月までの DB と BC の故障数の年内変動を 2 か月単位で示す。DB, BC 共に 9, 10 月に故障が多く故障間隔が短くなっており、逆に 3, 4 月では故障が少なく故障間隔が長くなっていった。

Fig. 5 に PET ガントリー室内の 1 日の温湿度変化のグラフを示す。ガントリー室内の温度はほぼ一定であるが、湿度は 10 時 30 分から 15 時の間大きく上昇し一定ではなかった。この高湿度の時間帯は、放射線管理のため PET 検査中運転される給排気装置から外気が供給される時間と一致していた。

#### IV. 考 察

PT931/04-12 の感度は 13 年間で初期性能の 72% に低下していた。感度の時系列的減少はシンチレータと光電子増倍管の接合剤の劣化によるシンチレーション光の吸収や光電子増倍管自体の経年変化によるものと考えられる<sup>11)</sup>。本装置では検出器のゲインが減少しても自動的にエネルギー・ウィンドウを調整し感度が保たれるようになっているが、ゲイン低下に伴い装置感度を示す CF も減っており、ゲイン調整が十分でないと考えられる。一方、解像力は検出器ゲインが低下しているにもかかわらず、その値を維持していた。Casey らは、多結晶型検出器において  $\gamma$  線入射結晶の同定には約 120 個の光電子数で十分であり、またその数が 25% 低下しても正解率は約 9 割と予測している<sup>12)</sup>。前述の結果も CTI 社の検出器ブロックの検出位置決定方法が検出器の感度に強く依存しておらず優れていることを示している。本装置の信頼性では、解像力よりも感度の低下が問題であった。

本装置では検出器系の DB と BC が装置の信頼性において最も重要な要素であることが故障件数 (全故障数の 83%) から判明した。DB は指数分布型の信頼度を示し、その MTTF は約 7.5 年であったが、部品数が多いため検出器リングとしての信頼度は低くその MTBF は 38 日であった。BC についても同様に指数分布型寿命を示した。しかし BC の MTBF は、MTTF から予測された値よりも経験値の方が大幅に短かった。このことは、修理に用いた交換部品の信頼性が低いことを示す。もし故障時に交換した BC を再生品と仮定すると、修理個所以外の部品の動作時間は故障前の時間の延長となり信頼性が低下しこのような結果が生じると推測できる。本装置全体の信頼性を高める上で DB の寿命と BC の保守部品の信頼性を高めることが重要である。

DB と BC の年内での故障発生時期には偏りが見られた。DB 故障の多くは信号線と接地線間の抵抗値が無限大を示しており、分圧回路抵抗の断

線によるものと予想された。一般に抵抗器断線の原因として湿度による電解腐食が上げられ、Fig. 5 のような高湿度の外気の流入によるガントリ室内の湿度上昇は、DB や BC 故障を誘発すると考えられる。当地では冬季に比べ夏季に湿度が高いため Fig. 4 のような偏りを生じたと考えられ、湿度管理の重要性が確認される。また、Fig. 3 で示されたように装置全体の信頼度は指数分布と若干ずれを生じたが、もしこのような季節の偏りがなければ本装置全体の信頼性は指数分布に一致する。一方、DB や BC の MTTF が季節の偏りに影響されず指数分布によく一致して見えるのは、時間軸が年単位であるためであろう。

近年の PET 装置では軸方向視野の増加に伴い検出器系の部品数が多くなっており、高い信頼性が要求される。本装置に限らずこのような故障データの解析を行い、故障の原因の究明や改善を行うことが重要である。さらに、年間故障数を予測しその保守経費や、今回は記録が残されていないため検討できなかったが、故障修復までに要した時間から求められる稼働率を概算することは、高額な PET 装置の臨床検査コスト計算に有用である。しかし、単独の施設ではデータ収集に長い時間を必要とするので、多くの装置の保守記録を有する製造業者や修理業者が本研究結果のような情報を使用者にフィードバックさせることが望まれる。

#### V. ま と め

ここでは 10 年以上にわたる性能評価データおよび故障データをもとに、PT931 の部品の寿命、装置全体の故障発生頻度の推定により信頼性や故障発生に影響を及ぼす要因の評価を行った。装置全体の信頼度は指数分布型にほぼ一致し、その平均故障間隔は 23 日であった。この信頼度の主な要因は検出器ブロックによるものであった。したがって、検出器ブロック長寿命化が PET 維持費の減少にもつながり、今後 PET が臨床用として普及する大きな要因である。

謝辞：本稿を終えるにあたり，PET性能測定に際しご協力いただいた東北大学大学院工学研究科・岩田鎌助教授ならびに(株)日本環境調査研究所・石川洋一氏に深謝します。

### 文 献

- 1) 窪田和雄, 山田 進, 福田 寛, 斎藤泰紀, 谷田達男, 高橋寿太郎, 他: FDG-PETの肺癌診療に及ぼす医療経済効果について. 核医学 1997; 34: 329-335.
- 2) 小須田茂, 市原清志, 渡辺真澄, 小林英夫, 草野正一: 肺腫瘍(非小細胞癌)における胸部FDG-PETの医療経済効果に関する判断分析(第一報). 核医学 1998; 35: 395-403.
- 3) (社)日本アイソトープ協会医学・薬学部会サイクロトロン核医学利用専門委員会FDG-PETワーキンググループ: FDG-PET検査の臨床的有用性と医療経済効果に関する全国調査報告. *Radioisotopes* 2000; 49: v-xliii.
- 4) (社)日本アイソトープ協会医学・薬学部会全国核医学診療実態調査専門委員会: 第4回全国核医学診療実態調査報告. 核医学 1998; 35: 939-953.
- 5) Lewellen TK, Kohlmyer SG, Miyaoka RS, Kaplan MS, Stearns CW, Schubert SF: Investigation of the Performance of the General Electric ADVANCE Positron Emission Tomograph in 3D Mode. *IEEE Trans Nucl Sci* 1996; 43: 2199-2206.
- 6) Brix G, Zaers J, Adam LE, Bellemann ME, Ostertag H, Trojan H, et al: Performance Evaluation of a Whole-Body PET Scanner Using the NEMA Protocol. *J Nucl Med* 1997; 38: 1614-1623.
- 7) Fujiwara T, Watanuki S, Yamamoto S, Miyake M, Seo S, Itoh M, et al: Performance Evaluation of a Large Axial Field-of-view PET Scanner: SET-2400W. *Ann Nucl Med* 1997; 11: 307-313.
- 8) 日本規格協会編: 信頼性用語. JIS用語辞典 基本・一般編. (財)日本規格協会. 東京, 1984: 472-498.
- 9) 北川賢司: 故障分布. 信頼性工学入門. コロナ社, 東京, 1979: 39-75.
- 10) 塩見 弘, 関 哲朗, 編: 分布を仮定した信頼性データの解析. やさしい信頼性データ解析. 日科技連出版社, 東京, 1998: 57-92.
- 11) 浜松ホトニクス株式会社 編集委員会: 環境性と信頼性. 久米英治編, 光電子増倍管. 浜松ホトニクス株式会社, 静岡, 1993: 163-183.
- 12) Casey ME, Nutt R: A Multicrystal Two Dimensional BGO Detector System for Positron Emission Tomography. *IEEE Trans Nucl Sci* 1986; 33: 460-463.

## Summary

### Reliability of a Positron Emission Tomography System (CTI: PT931/04-12)

Shoichi WATANUKI\*, Keizo ISHII\*\*, Masatoshi ITOH\* and Hikonojyo ORIHARA\*\*

\*Cyclotron and Radioisotope Center, Tohoku University

\*\*Department of Quantum Science and Energy Engineering, Tohoku University

**[Purpose]** The maintenance data of a PET system (PT931/04-12 CTI Inc.) was analyzed to evaluate its reliability. **[Method]** We examined whether the initial performance for the system resolution and efficiency is kept. The reliability of the PET system was evaluated from the value of MTTF (mean time to failure) and MTBF (mean time between failures) for each part of the system obtained from the maintenance data for 13 years. **[Results]** The initial performance was kept for the resolution, but the efficiency decreased to 72% of the initial value. The 83% of the troubles of the system was for detector block (DB) and DB control module (BC). The MTTF of DB and BC were 2,733 and

3,314 days, and the MTBF of DB and BC per detector ring were 38 and 114 days. The MTBF of the system was 23 days. We found seasonal dependence for the number of troubles of DB and BC. This means that the trouble may be related the humidity. **[Conclusion]** The reliability of the PET system strongly depends on the MTBF of DB and BC. The improvement in quality of these parts and optimization of the environment in operation may increase the reliability of the PET system. For the popularization of PET, it is effective to evaluate the reliability of the system and to show it to the users.

**Key words:** PET, Reliability, MTTF, MTBF.