

## JT-K138

# 粒子放射線試験に基づく対策のための品質 推定方法とアプリケーションガイドライン

Quality estimation methods and application  
guidelines for mitigation measures based on  
particle radiation tests

第2版

2022年5月19日制定

一般社団法人

情報通信技術委員会

THE TELECOMMUNICATION TECHNOLOGY COMMITTEE

本書は、一般社団法人情報通信技術委員会が著作権を保有しています。  
内容の一部又は全部を一般社団法人情報通信技術委員会の許諾を得ることなく複製、転載、改変、転用及びネットワーク上での送信、配布を行うことを禁止します。

## 目 次

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| <参考> .....                          | 4  |
| 要約.....                             | 5  |
| キーワード.....                          | 5  |
| まえがき.....                           | 5  |
| 1. 適用.....                          | 6  |
| 2. 引用規格.....                        | 6  |
| 3. 定義.....                          | 6  |
| 3.1 他で定義されている用語.....                | 6  |
| 3.2 本標準で定義する用語.....                 | 6  |
| 4. 略語と頭字語.....                      | 7  |
| 5. 慣例.....                          | 8  |
| 6. ソフトエラー信頼度評価法の概要 .....            | 8  |
| 6.1 警報機能信頼度(AR)基準評価法の概要 .....       | 8  |
| 6.2 サービス信頼度(SR)基準評価法の概要.....        | 8  |
| 6.3 保守信頼度(MR)基準評価法の概要 .....         | 8  |
| 7. 信頼度基準適合性評価における前提条件.....          | 9  |
| 7.1 EUTの標準実装構成 .....                | 9  |
| 7.2 中性子照射試験における加速係数 .....           | 9  |
| 7.3 中性子照射試験における試験時間と自然界換算時間の関係..... | 9  |
| 8. 信頼度基準適合性の評価手法 .....              | 10 |
| 8.1 目標とする信頼度クラスの設定 .....            | 10 |
| 8.2 目標信頼度適合のための中性子照射試験結果の検討.....    | 10 |
| 8.3 各基準の信頼度評価方法.....                | 12 |
| 9. 目標信頼度基準に適合しない場合の追加対策.....        | 13 |
| 10. AR, SR, MRに分類できない事象.....        | 14 |
| 付属資料A：加速器施設の加速係数 .....              | 15 |
| 参考文献.....                           | 17 |

## <参考>

### 1. 国際勧告との関連

本標準は、2022年1月にITU-Tにて承認されたITU-T勧告K.138に準拠したものである。

### 2. 上記国際勧告等との相違点

なし

### 3. 改版の履歴

| 版数  | 発行日        | 改版内容                          |
|-----|------------|-------------------------------|
| 第1版 | 2019年5月23日 | 制定 (ITU-T K.138 (11/2018) 準拠) |
| 第2版 | 2022年5月19日 | 制定 (ITU-T K.138 (1/2022) 準拠)  |

### 4. 工業所有権

本標準に関わる「工業所有権等の実施の権利に係る確認書」の提出状況は、TTCホームページでご覧になれます。

### 5. その他

なし

## 要約

本標準ではソフトウェア影響の重大性を考慮した中性子照射試験の結果に基づく信頼度評価法について述べる。自然界におけるソフトウェア発生率は、中性子照射中に発生するソフトウェア数から算出できる。クライアント信号や制御システムに影響するような通信装置に対し重大な影響を及ぼすソフトウェアについては試験中に生成されるエラー履歴から分析する。

装置が目標品質より低い場合には追加対策を適用する必要がある。本標準では、ソフトウェア試験結果を考慮した対策の適用に関するガイドラインについても述べる。

## キーワード

ソフトウェア、中性子、照射試験

## まえがき

大容量、高性能、高品質が要求されるキャリア通信ネットワークを構成する通信装置において、高集積化・微細化された半導体デバイスの利用は必須である。しかし、このような半導体デバイスでは、ソフトウェアの発生自体を防ぐことはコスト等の問題から現実的ではない。そのため、デバイスおよび装置設計時にソフトウェアが装置の動作に及ぼす影響を低減するソフトウェア対策を実装する必要がある。本標準は、JT-K130に記載されている中性子照射試験の結果から、装置がJT-K139記載の各種信頼度基準を満たしているかを評価する方法をまとめたものである。

## 1. 適用

本標準は、装置が JT-K139 に記載の各種信頼度基準を満たしているかを評価するために、JT-K130 に記載の中性子照射試験を実施した結果の適用法を提供するものである。

## 2. 引用規格

[ITU-T Y.3014] Recommendation ITU-T Y.3014 (2/2016), *Resource control and management function for virtual networks for carriers (vRCMF)*

[JT-K124]TTC標準 JT-K124 (11/2018), *通信装置の粒子放射線影響の概要*

[JT-K130]TTC標準 JT-K130 (2/2019), *通信装置の中性子照射試験法*

[JT-K131]TTC標準 JT-K131 (2/2019), *通信装置のソフトウェア対策設計法*

[JT-K139]TTC標準 JT-K139 (5/2019), *通信装置の粒子放射線影響の信頼度基準*

## 3. 定義

本標準では、以下の用語を定義する。

### 3.1 他で定義されている用語

#### 3.1.1 キャリア : Carrier

物理的なネットワーク設備を所有し、その設備を使ってカスタマにサービスを提供するインフラ供給者。仮想ネットワーク供給者はキャリアのカスタマである。[ITU-T Y.3014]

### 3.2 本標準で定義する用語

#### 3.2.1 FIT : failure in time

稼働  $10^9$  時間中に発生する故障数の期待値を示す単位

#### 3.2.2 ソフトエラー : soft error

半導体デバイス内のデータの 1 または複数ビットが反転する現象。半導体デバイス自体の損傷ではない。

#### 3.2.3 物理欠陥故障 : physical fault failure

物理的にデバイスが劣化して誤動作する現象

#### 3.2.4 ソフトエラー故障 : soft error failure

ソフトエラー起因のハードウェア故障

#### 3.2.5 ソフトエラー故障発生率 : soft error failure rate

デバイス内のソフトエラーに起因した装置故障の単位時間当たり発生数

### 3.2.6 パッケージ：circuit pack

ユニットに挿入され、保守者が容易に交換可能な回路基板

### 3.2.7 警報機能信頼度：alert function reliability

設備運用の観点からの信頼度

### 3.2.8 AR 故障：AR failure

警報機能信頼度に関する故障

### 3.2.9 サービス信頼度：service reliability

サービス提供の観点からの信頼度

### 3.2.10 SR 故障：SR failure

サービス信頼度に関する故障

### 3.2.11 保守信頼度：maintenance reliability

設備保守の観点からの信頼度

### 3.2.12 MR 故障：MR failure

保守信頼度の関係する故障

### 3.2.13 サイレント故障：silent failure

クライアント信号影響があるにもかかわらずネットワーク保守装置や保守要員への警報が発せられない故障

## 4. 略語と頭字語

本標準では次の略語を使用する。

|      |                             |             |
|------|-----------------------------|-------------|
| 1RU  | one Rack Unit               | 1 ラックユニット   |
| ASER | Accelerated Soft Error Rate | 対向装置        |
| AR   | Alert Function Reliability  | 警報機能信頼度     |
| CL   | Confidence Level            | 信頼水準        |
| EUT  | Equipment Under Test        | 試験対象装置      |
| FIT  | Failure in Time             |             |
| LSI  | Large Scale Integration     | 大規模集積回路     |
| MR   | Maintenance Reliability     | 保守信頼度       |
| SER  | Soft Error Rate             | ソフトウェア発生率   |
| SEFR | Soft Error Failure Rate     | ソフトウェア故障発生率 |
| SEU  | Single-Event Upset          |             |

|       |   |               |
|-------|---|---------------|
| SR    | Service Reliability                                       | サービス信頼度       |
| SR(M) | Service Reliability in relation to momentary interruption | サービス信頼度（瞬断）   |
| SR(P) | Service Reliability in relation to prolonged interruption | サービス信頼度（継続断）  |
| TSER  | Terrestrial Soft Error Rate                               | 自然界のソフトウェア発生率 |

## 5. 慣例

なし

## 6. ソフトエラー信頼度評価法の概要

本標準は、JT-K130 記載の中性子照射試験結果に基づいて、装置が JT-K139 記載の各種信頼度基準を満たしているかを評価するための手法を提供するものである。

JT-K139 の 7 章で定義されている通り、下記の 3 種類の信頼度基準がある。

1. 設備運用の観点からの警報機能信頼度(AR)基準
2. サービス提供の観点からのサービス信頼度(SR)基準
3. 設備保守の観点からの保守信頼度(MR)基準

中性子照射試験で得た照射時間および各種信頼度基準に該当するソフトウェア故障件数に基づき、JT-K139 の 8 章記載の目標とする信頼度種別およびクラスへの適合性を評価する。それぞれの信頼度基準の評価法の概要を 6.1 節～6.3 節で述べる。

なお、本標準では通信装置の信頼度評価の目的・手法を記述しており、デバイスベンダが提供する大規模集積回路（LSI）の信頼度の FIT 評価とは異なる。

### 6.1 警報機能信頼度(AR)基準評価法の概要

JT-K139 の 9.1 節で定義されている通り、警報信頼度基準は、中性子照射試験中にソフトウェアによるサイレント故障の発生がないことを確認した時間を規定している。サイレント故障は、JT-K131 の 9.7 節で定義している通り、故障によってクライアント信号に無視できない影響があっても、キャリアネットワークのオペレーションシステムまたは保守担当者に故障が報告されないものである。サイレント故障が JT-K139 の表 9.1 に定義されている期間に発生しなければ、試験対象装置（EUT）は適用する AR の信頼度クラスに適合していると評価する。評価方法の詳細は 8.3.1 項で述べる。

### 6.2 サービス信頼度(SR)基準評価法の概要

JT-K139 の 9.2 節で定義されている通り、サービス信頼度基準は、対象装置がネットワーク内においてクライアント信号断を引き起こすソフトウェアの発生頻度および発生時のクライアント信号断継続時間により規定されている。中性子照射試験中の SR に該当する故障の発生回数から、自然界におけるソフトウェア故障発生率（SEFR）によって示される信頼度レベルを算出する。統計誤差を考慮した SEFR に基づき JT-K139 の表 9.2 に従って、適用する SR の信頼度クラスを分類する。評価方法の詳細は 8.3.2 項で述べる。

### 6.3 保守信頼度(MR)基準評価法の概要

JT-K139 の 9.3 節で定義されている通り、保守信頼度基準はソフトウェアからの設備復旧のために保守者作業を伴う頻度により規定されている。自然界の SEFR は、中性子照射試験中の MR に該当する故障の発生回



数から算出する。JT-K139 の表 9.3 に定義されている MR の適用信頼度クラスへの適合性は、自然界の SEFR と統計誤差を考慮した試験データで評価した SEFR を比較することで確認する。評価方法の詳細は 8.3.3 項で述べる。

## 7. 信頼度基準適合性評価における前提条件

### 7.1 EUT の標準実装構成

各種信頼度基準は、JT-K139 の 9 章に示すようにキャリアネットワーク適用時の標準実装構成の装置に対して定められている。標準実装構成として下記を推奨する。

EUT は一般的に 1 ユニット構成である。EUT には、制御用パッケージのように共通的に使用されるパッケージは全種類実装する。さらに、装置機能・容量に応じて搭載されるパッケージは、実装可能なエリアの 50% 以上に実装する。

また、1 RU 装置の場合には、冗長構成等を考慮した最小台数をセットとした構成とする。

### 7.2 中性子照射試験における加速係数

中性子照射試験で得たソフトウェア発生率 (SER) を、自然界におけるソフトウェア発生率に換算するためには、照射試験設備の SER と自然界における SER の比率を示す係数である加速係数  $F_A$  が必要となる。加速係数  $F_A$  は自然界のソフトウェア発生率 (TSER) と中性子照射試験におけるソフトウェア発生率 (ASER) を用いて式 7.1 として定義できる。

$$F_A = \frac{ASER}{TSER} \quad (7.1)$$

加速係数は加速器施設毎に異なり、照射試験の目的に応じて調整可能である。付属資料 A に最大加速係数を含む加速器施設の情報を示す。加速係数は、試験条件、ターゲットに流れる加速粒子の電流 (I)、ターゲットと EUT の距離 (D) から算出される。

### 7.3 中性子照射試験における試験時間と自然界換算時間の関係

中性子照射試験の総照射時間 ( $T_i$ ) は、総試験時間から装置の復旧処理に必要な照射停止時間を差し引いた時間である。自然界換算時間 ( $T_R$ ) は、総照射時間 ( $T_i$ ) に対して加速係数 ( $F_A$ ) を掛けた時間となる。総照射時間 ( $T_i$ ) と自然界換算時間 ( $T_R$ ) の関係を図 7.1 に示す

自然界換算時間  $T_R$  : 自然界環境での稼働時間

総照射時間  $T_i$  : 中性子を照射している時間

照射停止時間 : EUT のソフトウェア故障からの復旧処理のため、中性子の照射を停止している時間

総試験時間 : 総照射時間と照射停止時間の合計時間。試験を実施するために確保すべき時間。

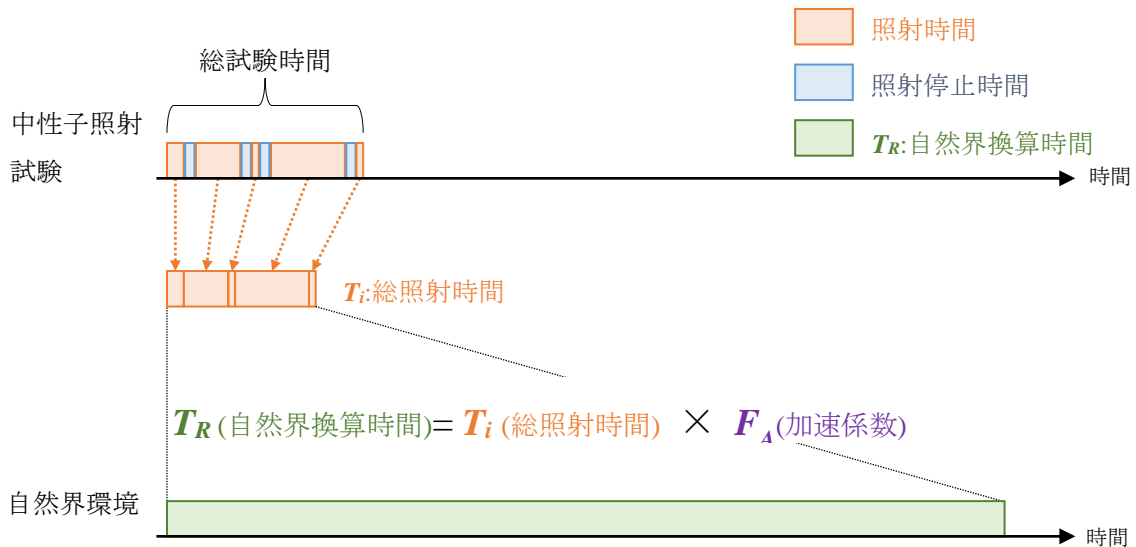


図 7.1 総照射時間 ( $T_i$ ) と自然界換算時間 ( $T_R$ ) の関係

## 8. 信頼度基準適合性の評価手法

### 8.1 目標とする信頼度クラスの設定

JT-K139 を参考に各信頼度クラス適用条件や特徴を考慮して AR, SR, MR について目標信頼度クラスを設定する。

### 8.2 目標信頼度適合のための中性子照射試験結果の検討

JT-K130 で定義されている中性子照射試験結果を評価する際、発生した事象について、下記の観点に従って AR 故障、SR 故障、MR 故障へ分類し、各事象の数をカウントする。

#### a. AR に関連する故障事象 (信号断時の警報無)

クライアント信号断であるにもかかわらず装置が警報を発出しなかった場合は、AR に関連する警報機能故障 (AR 故障と記す) に分類し、その発生回数を  $N_{AR}$  と定義する。AR 故障としてカウントすべき事象の基準の詳細は JT-K131 の 9.7 節に示す。

#### b. SR に関連する故障事象 (クライアント信号断)

中性子照射試験中に 0.2 秒以上のクライアント信号断が発生した場合は、SR に関連するサービス故障 (SR 故障と記す) に分類する。さらに断時間が 0.2 秒～1 秒の場合は SR(M)故障に分類し、その発生回数を  $N_{SR(M)}$  と定義する。断時間が 1 秒超の場合は SR(P)故障に分類し、その発生回数を  $N_{SR(P)}$  と定義する。断時間が 0.2 秒未満の場合は SR 故障としてカウントする必要はない。

SR 評価のために、クライアント信号導通に用いる測定器出力トラヒックについては、[JT-K130]に「パケット装置の場合、最小パケット長から最大パケット長までのパケットを含む」とあるように、固定長パケットでなく可変長パケットを使用する。

その際に、SR(M)のように 1 秒以下の瞬断時間の測定は難しいことから、測定器出力トラヒックの平均

パケット長とパケットロス数から断時間を判定する。SR(M)は、0.2 秒以上の瞬断を規定しているが、図 8.1 のように 1 秒以内に 0.1 秒×3 回と 0.3 秒の瞬断は切り分け困難でありかつ影響度は同一と考えられるため、これも SR(M) 1 回相当とみなす。

一方、SR(P)のように 1 秒以上の継続断については、測定器のログ等からタイムスタンプにより判定する。図 8.2 のように、個々の瞬断時間は 1 秒以下であるが、タイムスタンプにより一定間隔で繰り返されていることが確認できる場合には、専用線などの特定カスタマ回線が継続して切断されている可能性があるため、1 秒以上断の SR(P)1 回相当とみなす。

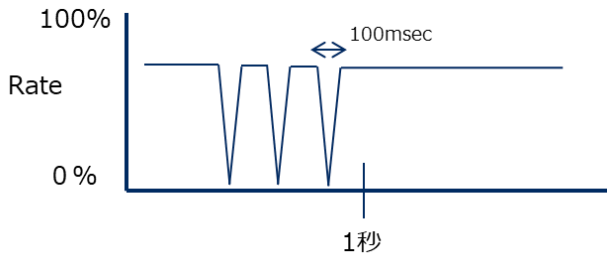


図 8.1 SR (M) に含まれる瞬断例

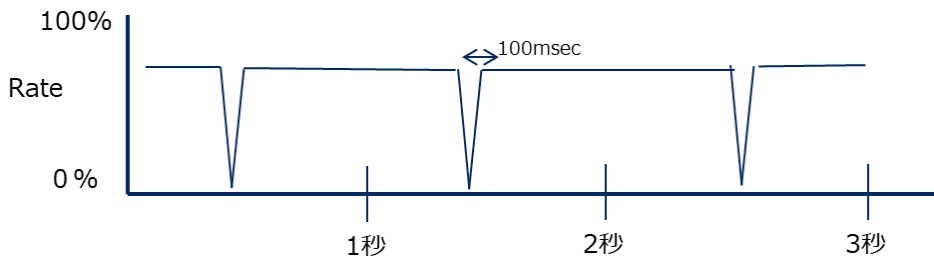


図 8.2 SR(P)に含まれる瞬断例

c. MR に関連する故障事象 (回復作業要求)

自律復旧せずに保守者介入で復旧を行った場合は、MR に関連する保守故障 (MR 故障と記す) に分類し、その発生回数を  $N_{MR}$  と定義する。装置が自律的にソフトウェア故障から回復した場合は、MR 故障には分類されない。

表 8.2.1 に AR,SR,MR に関連する各種故障例を示す。

表 8.2.1 各種発生事象の分類例

| 項番 | a. クライアント信号断時間 | b. 復旧手段           | c. 警報通知の有無 | 関連信頼度種別                           |                                 |   |   |
|----|----------------|-------------------|------------|-----------------------------------|---------------------------------|---|---|
|    |                |                   |            | SR                                |                                 | M | A |
|    |                |                   |            | SR(M):瞬断<br>(0.2~1.0 秒のクライアント信号断) | SR(P):継続断<br>(1.0 秒超のクライアント信号断) |   |   |
| 1  | 0              | 保守者リセット<br>(現地操作) | 有          |                                   |                                 | ✓ |   |
| 2  | 10 sec         | 自律復旧              | 有          |                                   | ✓                               |   |   |
| 3  | 15 sec         | 自律復旧              | 有          |                                   | ✓                               |   |   |
| 4  | 300 sec        | 保守者リセット<br>(現地操作) | 無          |                                   | ✓                               | ✓ | ✓ |
| 5  | 0              | 保守者リセット<br>(遠隔制御) | 有          |                                   |                                 | ✓ |   |

|       |          |                   |   |   |             |             |                   |
|-------|----------|-------------------|---|---|-------------|-------------|-------------------|
| 6     | 0.2 sec  | 自律復旧              | 有 | ✓ |             |             |                   |
| 7     | 0.5 sec  | 保守者リセット<br>(現地操作) | 有 | ✓ |             | ✓           |                   |
| 8     | 0.05 sec | 自律復旧              | 有 |   |             |             |                   |
| 9     | 0.08 sec | 保守者リセット<br>(現地操作) | 有 |   |             | ✓           |                   |
| ⋮     |          |                   |   |   |             |             |                   |
| ⋮     |          |                   |   |   |             |             |                   |
| ⋮     |          |                   |   |   |             |             |                   |
| ⋮     |          |                   |   |   |             |             |                   |
| 総発生回数 |          |                   |   |   | $N_{SR(M)}$ | $N_{SR(P)}$ | $N_{MR}$ $N_{AR}$ |

たとえば、表 8.2.1 の項番 1 はクライアント信号断は発生せず、その復旧は保守者によるパッケージリセットにより実行されている。この場合、クライアント信号断は発生していないので SR(M)故障、および SR(P)故障には該当せず、MR 故障に分類される。

このようにして各事象に対して SR(M)故障、SR(P)故障、MR 故障、および AR 故障への分類を行い、各故障の発生回数  $N_{SR(M)}$ 、 $N_{SR(P)}$ 、 $N_{MR}$ 、および  $N_{AR}$  を算出する。

### 8.3 各基準の信頼度評価方法

JT-K139 の信頼度基準は、自然界におけるソフトエラー故障発生率 SEFR で定義されているため、はじめに総照射時間  $T_i$  および加速係数  $F_A$  から自然界換算時間  $T_R$  を算出する。

$$T_R = F_A \times T_i \quad (8.1)$$

次に、自然界換算時間  $T_R$  と等価な時間の中性子照射試験中に発生した事象に対して 8.3.1～8.3.3 項に従い、各信頼度基準への適合性を評価する。

#### 8.3.1 警報機能信頼度 (AR) 基準適合性の評価方法

基準の  $T_R$  時間から算出される  $T_i$  時間の中性子照射試験中に、AR 故障 (サイレント故障) の発生がなかった場合に、その EUT は AR 基準に適合と評価する。

そのため、 $T_i$  時間よりも短い時間で 1 度でも AR 基準に該当する事象が発生してしまうと AR 基準へは適合しないことになる。また、AR 基準に該当する事象が発生した場合は、クライアントや保守者へ大きな影響を及ぼすことから、原因を究明し対策を施すことを推奨する。

ただし、同時に複数部位でソフトエラーが発生 (二重故障相当事象) したことが EUT のログ等から推定することができる場合には、自然界ではこのような事象は極めて稀であるため AR 故障から除外しても構わない。

#### 8.3.2 サービス信頼度 (SR) 基準適合性の評価方法

式 8.1 で得た自然界換算時間  $T_R$ [h] と  $N_{SR(M)}$ 、 $N_{SR(P)}$  から SR 故障発生率  $Q_{SR(M)}$ [FIT] と  $Q_{SR(P)}$ [FIT] をそれぞれ算出することができる。

ここでは  $Q_{SR(M)}$ [FIT] と  $Q_{SR(P)}$ [FIT] は信頼水準 (CL) 68% で算出する。したがって、故障数の信頼区間の上限値を  $N_{SR(M)} + \sqrt{N_{SR(M)}}$ 、 $N_{SR(P)} + \sqrt{N_{SR(P)}}$  とし、故障率を式 8.2、式 8.3 から算出する。

$$Q_{SR(M)}[FIT] = \frac{N_{SR(M)} + \sqrt{N_{SR(M)}}}{T_R[h]} \times 10^9 \quad (8.2)$$

$$Q_{SR(P)}[FIT] = \frac{N_{SR(P)} + \sqrt{N_{SR(P)}}}{T_R[h]} \times 10^9 \quad (8.3)$$

$Q_{SR(M)}[FIT]$ と $Q_{SR(P)}[FIT]$ の両者が目標とする信頼度クラスの基準値を下回っていれば、その EUT は信頼度基準に適合と評価する。

中性子照射試験の自然界換算時間  $T_R$  は 2,000 年以上を推奨する。事象発生回数が少なく、統計誤差が大きい場合は適宜照射時間を増やしても構わない。

なお、照射時間中に SR 故障が発生しなかった場合の  $Q_{SR(M)}[FIT]$ と $Q_{SR(P)}[FIT]$ は  $CL$  を用いて式 8.4、式 8.5 で算出できる。

$$Q_{SR(M)}[FIT] = \frac{-\ln(1-CL)}{T_R[h]} \times 10^9 \quad (8.4)$$

$$Q_{SR(P)}[FIT] = \frac{-\ln(1-CL)}{T_R[h]} \times 10^9 \quad (8.5)$$

例えば  $T_R=17,520,000[h]$  (2,000 年) で一度も SR(P)故障が発生しなかった場合は、 $CL68\%$ で  $Q_{SR(P)}$ が 65[FIT] 以下であると算出できる。

### 8.3.3 保守信頼度 (MR) 基準適合性の評価方法

式 8.1 で得た  $T_R[h]$ と  $N_{MR}$  から MR 故障発生率  $Q_{MR}[FIT]$ を算出することができる。

ここでは  $Q_{MR}[FIT]$ は信頼水準 ( $CL$ )  $68\%$ で算出する。したがって、故障数の信頼区間の上限値を  $N_{MR} \pm \sqrt{N_{MR}}$  とし、故障率を式 8.6 から算出する。

$$Q_{MR}[FIT] = \frac{N_{MR} + \sqrt{N_{MR}}}{T_R[h]} \times 10^9 \quad (8.6)$$

式 8.6 より算出した  $Q_{MR}[FIT]$ が目標とする信頼度クラスの基準値を下回っていれば、その EUT は信頼度基準に適合と評価する。

中性子照射試験の自然界換算時間  $T_R$  は 2,000 年以上を推奨する。事象発生回数が少なく、統計誤差が大きい場合は適宜照射時間を増やしても構わない。

なお、照射時間中に MR 故障が発生しなかった場合の  $Q_{MR}[FIT]$ は信頼度  $CL$  を用いて式 8.7 で算出できる。

$$Q_{MR}[FIT] = \frac{-\ln(1-CL)}{T_R[h]} \times 10^9 \quad (8.7)$$

式 8.5 より、例えば  $T_R=17,520,000[h]$  (2,000 年) で一度も MR 故障が発生しなかった場合は、 $CL68\%$ で  $Q_{MR}$  が 65[FIT]以下であると算出できる。

## 9. 目標信頼度基準に適合しない場合の追加対策

目標とする信頼度水準を達成できなかった場合は、目標に到達できなかった信頼度基準に関連するソフトエ

ラー対策を行う必要がある。対策の詳細は JT-K131 を参照。

## 10. AR, SR, MR に分類できない事象

加速試験中に AR, SR, MR に直接影響しない想定外事象（詳細は JT-K131 の 10 章参照）が発生する可能性がある。これらは、装置設計時には想定していなかった事象で、運用環境においてより深刻な事象のトリガとなる可能性がある。

したがって、直接的に信頼度影響がない場合でも中性子照射試験で下記の事象が発生した場合には適宜対策を行うことを推奨する。

- a. 保守者への注意喚起が必要な故障であるが、クライアント信号断を伴わないために警報が未発出
  - ・警報は発生していないが、パッケージの起動が完了しない
  - ・警報は発生していないが、装置制御ができない
- b. 保守者への通知が不要なメッセージの誤発出
  - ・クライアント信号に影響しないソフトウェア対策が自動で実行され、保守者による復旧作業が不要であるにもかかわらず、保守者へ復旧作業を促す通知メッセージを誤発出
- c. 故障解析が困難
  - ・不揮発性メモリへの故障事象に関するログ未収集
  - ・ログは取得しているが、ログ内容からソフトウェア有無を判別できない

## 付属資料 A：加速器施設の加速係数

### A.1 ソフトエラー試験における加速係数

本標準では、式 7.1 で定義した通り、加速係数は自然界における中性子によるソフトエラー発生率と中性子照射施設におけるソフトエラー発生率の比である。ソフトエラー数は、単純に中性子数には比例しない。中性子数当たりのソフトエラー数は中性子エネルギーに依存する。したがって、照射されるエネルギー毎の中性子数と中性子エネルギー毎のソフトエラー発生率を考慮する必要がある。

そのため、ソフトエラー発生率は、 $\Phi(E)$ （エネルギーE の中性子数）と  $\sigma(E)$ （エネルギーE の中性子のソフトエラー発生率）を用いて式 A.1 で評価することができる。

$$SER = \int_0^{\infty} \Phi(E) \times \sigma(E) dE \quad (A.1)$$

なお、中性子エネルギー毎のソフトエラー発生率  $\sigma(E)$  は SEU クロスセクションと定義されており、図 A.1 に示すようにデバイス毎に異なるが、主に中性子と Si 原子核の核反応のクロスセクションで決められる。

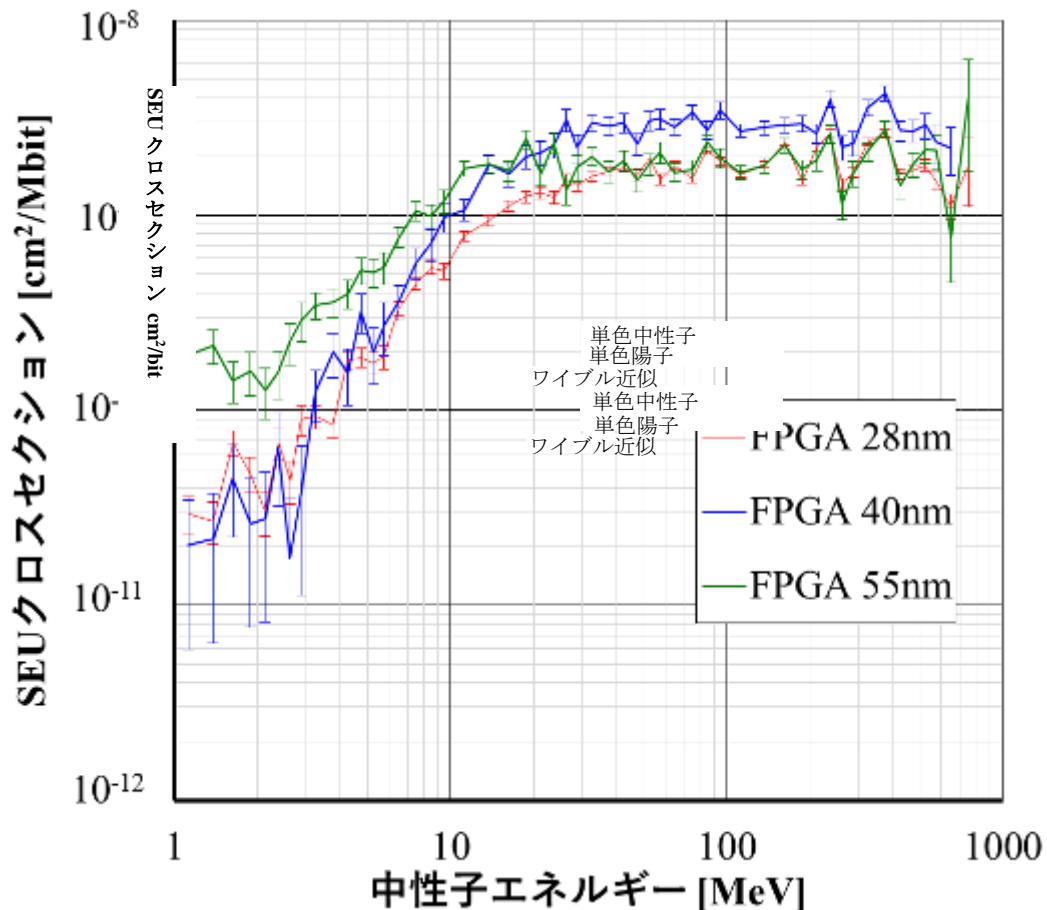


図 A.1 FPGA における中性子エネルギー毎の SEU クロスセクション測定結果[b-IEEE]

加速係数  $F_A$  は自然界におけるエネルギー毎の中性子数  $\Phi_T(E)$  (JT-K124 図 6.3 参照) と加速器施設におけるエネルギー毎の中性子  $\Phi_A(E)$  (JT-K130 図 7.4 参照) を用いて式 A.2 で表すことができる。

$$F_A = \frac{ASER}{TSER} = \frac{\int_0^{\infty} \Phi_A(E) \times \sigma(E) dE}{\int_0^{\infty} \Phi_T(E) \times \sigma(E) dE} \quad (A.2)$$

ここで、 $\Phi_A(E)$ と $\Phi_T(E)$ が、ほぼ同等のスペクトル形状である場合は、 $\Phi_T(E)$ は $F \Phi_T(E)$ となり、式 A.2 は式 A.3 と書き換えられる。

$$F_A = \frac{ASER}{TSER} = \frac{\int_0^{\infty} F \Phi_T(E) \times \sigma(E) dE}{\int_0^{\infty} \Phi_T(E) \times \sigma(E) dE} = F \quad (A.3)$$

この場合、加速係数  $F_A$  は  $\sigma(E)$  に依存しなくなる。

しかしながら、数 10MeV 程度の比較的低エネルギー加速器の場合、 $\Phi_A(E)$ と $\Phi_T(E)$ のスペクトル形状は互いに大きく異なる。また、ソフトエラー発生率  $\sigma(E)$  もデバイスの種類に依存する。そのため、スペクトラム形状依存性と半導体デバイス種別を考慮して各加速器施設の加速係数を評価する必要がある。

表 A.1 に、実験的に評価したデバイス毎の加速係数から求めた加速器施設の代表的な加速係数を示す。

## A.2 各加速器施設の代表的加速係数

表 A.1 に各加速器施設の代表的加速係数を示す。これらの加速係数は、自然界とほぼ同等の中性子エネルギースペクトルで照射できる米国ロスアラモスの WNR にて測定し得られた各種デバイスの TSER と、各加速器施設のデバイス毎のソフトエラー発生率 ASER の照射試験結果から、算出したものである。なお TSER は、10MeV 以上の自然界と WNR の中性子数の比により算出した。また、代表的な加速係数は、加速係数の最小値を採用した。最小値の場合、算出される自然界におけるソフトエラー発生率が大きくなる傾向になるため、最小値で得た数値がクラス規定値を下回っていれば、確実にその信頼度クラスを満たしていると判定できる。

表 A.1 各加速器施設の代表的加速係数

| 加速器施設               | 加速粒子<br>(加速エネルギー)       | 代表的な最大加速係数 $F_{Amax}$   |
|---------------------|-------------------------|---|
| ICE House at LANSCE | Proton<br>(800MeV)      | JESD89A に従って計算  |
| TRIUMF              | Proton<br>(500MeV)      |   |
| RCNP                | Proton<br>(400MeV)      |   |
| GELINA              | Electron<br>(70-140MeV) | $1.3 \times 10^6$<br>( $I_{max}^{*1}=40 \mu A, D_R^{*2}=7750mm$ ) |
| SHI-ATEX            | Proton<br>(18MeV)       | $1.3 \times 10^9$<br>( $I_{max}=20 \mu A, D_R=1000mm$ )           |

※1  $I_{max}$  : 最大電流 加速係数は電流値に比例する。電流値は加速器を制御することで調整できる。例えば、

SHI-ATEX において  $I=10 \mu A$  で照射する場合は、加速係数は  $0.65 \times 10^9$  ( $F_A = \frac{I}{I_{max}} \times F_{Amax}$ ).となる。

※2  $D$ : 中性子源からの距離 JT-K130 7.7 節を参照。例えば、SHI-ATEX において  $D=2000mm$  で照射する場

合は、加速係数は  $3.25 \times 10^8$  ( $F_A = \frac{D_R^2}{D^2} \times F_{Amax}$ ).となる。



## 参考文献

[b-IEEE] Iwashita, Funatsu, et al., (2020), Energy-Resolved Soft-Error Rate Measurements for 1-800MeV Neutrons by the Time-of-Flight technique at LANSCE. IEEE Transactions on Nuclear Science, 67(11), 2363-2369.