

# 通信装置のソフトエラー対策の ITU-T国際標準化とTTC標準



伝送網・電磁環境専門委員会 通信装置のソフトエラーに関する標準化Adhocリーダー (日本電信電話株) **岩下 秀徳**

## 1. はじめに

サービスの多様化、利便性の追求により、現代の社会基盤は、デジタルトランスフォーメーションが進んでいる。社会が便利になる一方で、原因の特定が困難な宇宙現象による電子機器のトラブルであるソフトエラーが増えている。ソフトエラーというのは、永久的にデバイスが故障してしまうハードエラーとは異なり、一時的な故障でデバイスの再起動やデータの上書きによって回復する故障のことである。ソフトエラーが通信装置に発生すると様々な故障モードを誘発し、通信サービスに影響を及ぼす可能性がある。通信装置では、このような故障も想定し通信サービスに影響を及ぼさないように設計するが、ソフトエラーを再現させることが困難であるため、開発段階で十分な検証をすることができなかった。

しかしながら、最近、一般企業が保有できる数メートル程度の小型加速器中性子源を用いて通信装置のソフトエラーを再現させ、効率的に通信装置のソフトエラーによる影響を測定することができるようになった<sup>[1]</sup>。本試験を実施することにより、事前にソフトエラーの影響を把握でき、改善を行った後に実運用ネットワークへ通信装置を導入することで、大幅な通信品質の向上をはかることが可能となる。

このような背景からソフトエラー対策に関する設計から評価、品質基準を定めることを目的に、2015年8月に一般社団法人情報通信技術委員会に通信装置のソフトエラー対策に関する標準化Adhoc (以下、SOET Adhoc:Soft error testing Adhoc)が開設<sup>[2]</sup>され、2015年10月のITU-T SG5会合において、通信装置のソフトエラー対策に関する検討プログラムの開始が承認され、SOET\_Adhoc委員各社が中心となり勧告草案の作成を行い、このたび勧告化が実現した。

この勧告では、ソフトエラー対策に関する設計方

法・試験方法・評価方法および品質評価基準が定義されており、求められる信頼性のレベルに応じたソフトエラー対策を可能にする指標が示されている。

ITU-Tで承認されたソフトエラー対策勧告は、5つの勧告本編と補足資料で構成されている。また、並行してTTC標準も進めており、既にITU-T K.124のTTC標準であるJT-K.124が制定されている。ソフトエラー対策勧告の全体像を図1に、勧告一覧を表1に、勧告化の経緯を表2に示す。

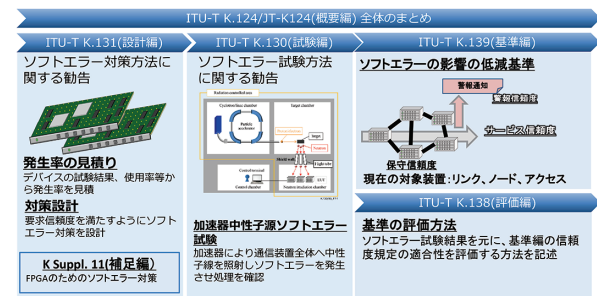


図1 ソフトエラー勧告の全体

表1 ソフトエラー勧告一覧

勧告番号	略称	活動年度
K.124 (JT-K.124)	概要編	Overview of particle radiation effects on telecommunication systems <sup>(3)</sup> (通信装置の粒子放射線影響の概要)
K.130	試験編	Soft error test method for telecommunication equipment <sup>(4)</sup> (通信装置のソフトエラー試験手法)
K.131	設計編	Design methodologies for telecommunication systems applying soft error measures <sup>(5)</sup> (通信装置のソフトエラー対策設計手法)
K Suppl.11	補足編	Supplement to K.soft_des - Soft error measures for FPGA <sup>(6)</sup> (K.131補足資料 - FPGAのためのソフトエラー対策)
K.139	基準編	Reliability requirement of particle radiation effect for telecommunication systems (通信装置の粒子放射線影響の信頼性要求基準)
K.138	評価編	Quality estimation methods and application guidelines for mitigation measures based on particle radiation tests (粒子放射線検査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)

表2 ソフトエラー対策標準化勧告の年表

2015年	2016年	2017年	2018年
▲8月 TTC SOET Adhoc開設 ▲10月 ITU-T SG5会合にて 検討プログラムの開始が承認	▲12月 ITU-T K.124承認		▲1月 ITU-T K.130, ITU-T K.131承認 ▲11月 ITU-T K.138, ITU-T K.139承認 ▲9月 JT-K124承認

本記事では、各勧告の概要について解説する。

## 2. ITU-T K.124/JT-K124 (概要編) 通信装置の粒子放射線影響の概要

本勧告には、ソフトエラーが発生するメカニズム、通信装置で発生するソフトエラーの影響と対策の概要、ソフトエラーに対する標準の必要性について述べている。ソフトエラーが発生する主な要因には、半導体デバイスに微量に含まれる放射性同位元素から生成される $\alpha$ 線と、宇宙線によって生成される中性子線がある。 $\alpha$ 線によるソフトエラーに対する影響は高純度材料(低 $\alpha$ 線樹脂等)を採用することによって低減することができる。

宇宙線によるソフトエラーは以下の要因で発生する。図2に示すように宇宙では太陽や超新星爆発によって、陽子を主体とした高エネルギー粒子が飛び交っている。この高エネルギー粒子が地球の大気に入ると、大気中の窒素原子核や酸素原子核と衝突し、核反応が起きる。この時、原子核内部にあった中性子が飛散する。大気中で発生した中性子の大部分は通常、半導体デバイスに突入しても透過し、何ら影響を与えないが、まれに半導体デバイスを構成するシリコン原子核と核反応を起こし、電荷を持った様々な粒子を発生させる。これが電気的なノイズとなり、一時的なエラーであるソフトエラーを発生させる。

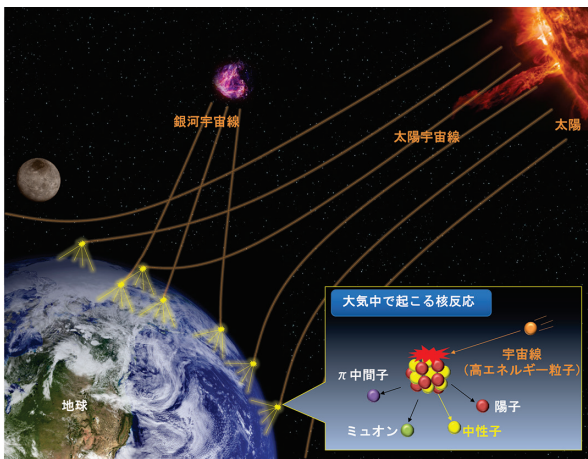


図2 宇宙線と大気中で起こる核反応

## 3. ITU-T K.130 (試験編) 通信装置のソフトエラー試験法

本勧告は、加速器中性子源を用いて通信装置のソフトエラーを発生させる方法と試験手順について述べている。図3に示すように、粒子加速器により加速された粒子(陽子/電子)をターゲット(鉛、タングステン、ベリリウム、リチウム等)に照射すると核反応が起き、中性子が発生する。この中性子を通信装置に照射することにより、自然界の数百万倍から数億倍の中性子を照射することができ、短時間でソフトエラーを再現させることができる。

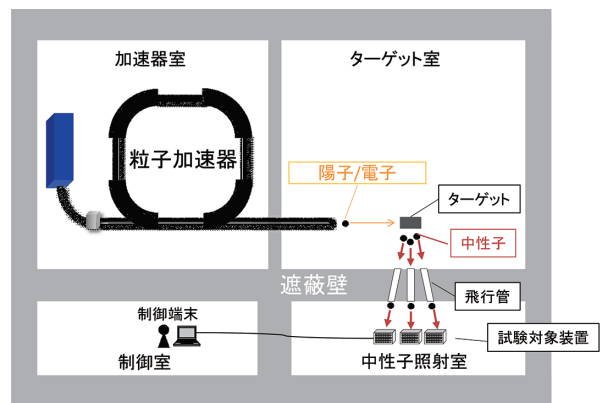


図3 粒子加速器を用いたソフトエラー試験

## 4. ITU-T K.131 (設計編) 通信装置のソフトエラー対策設計法、K Suppl.11 FPGAのためのソフトエラー対策 (K.131補足資料)

本勧告は、キャリア通信ネットワークを構成する通信装置に対するソフトエラー対策設計手法について述べている。はじめに、ソフトエラー対策の観点から対象となる通信装置の基本構成、ソフトエラーに対する信頼度規定定義と規定方法および信頼度規定に適合するためのソフトエラー対策の装置開発手順について述べている。また、特に対策が重要となるFPGAについてはK.131の補足資料としてK Suppl.11 FPGAのためのソフトエラー対策に、FPGAのソフトエラー発生率の傾向、ソフトエラーの影響の低減方法について詳細に述べている。

## 5. ITU-T K.139 (基準編) 通信装置の粒子放射線影響の信頼性要求基準

本勧告は、高信頼のネットワークを構築するために必要なソフトエラーに対する信頼性の基準について述べている。ここでは、基準の考え方について解説する。半導体デバイスの高集積化に伴い、通信装置では、旧

来から存在するハードエラーに比べてソフトエラーによる故障の割合が多くなってきている（図4）。

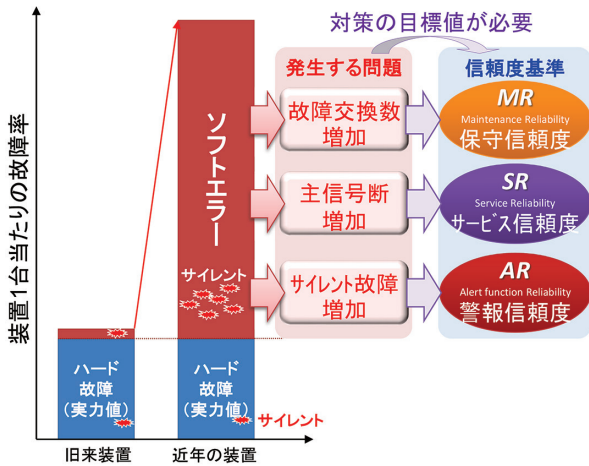


図4 通信装置のハードエラーとソフトエラーの割合と発生する問題

この原因は図5に示すようにLSI自体のハードエラーの故障率は微細化では変化せず一定であるのに対し、ソフトエラーは微細化で増加しているためである。

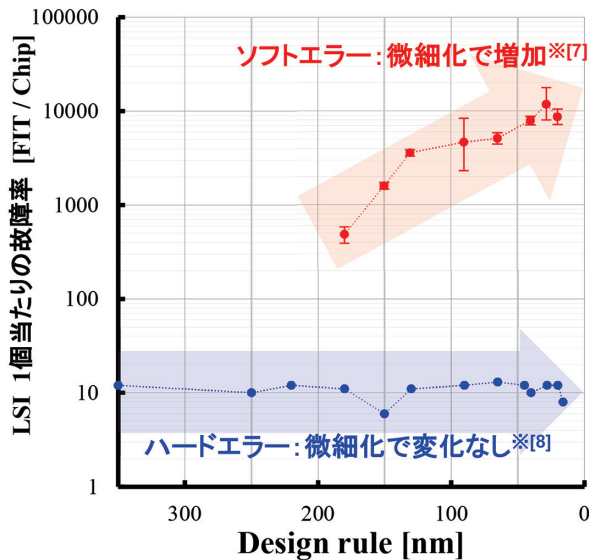


図5 LSIのハードエラーとソフトエラーの故障率

この様な傾向から、近年の通信装置ではソフトエラーの増加に伴い、故障交換数、主信号断数、サイレント故障が増加する傾向にある。しかしながら、ソフトエラー自体は物理故障ではないので、対策によって回復することができ、どこまで対策して低減するかの信頼度基準が必要となる。そこで、故障交換数、主信号断数、サイレント故障に対して、それぞれ保守信頼度、サービス信頼度、警報信頼度の3つの信頼度基準

を定義した。

保守信頼度、サービス信頼度は、従来から発生しているハードエラーを基準として、ソフトエラー起因の故障交換数、主信号断の発生率が統計誤差に収まる範囲をそれぞれの目標基準に設定した（図6）。

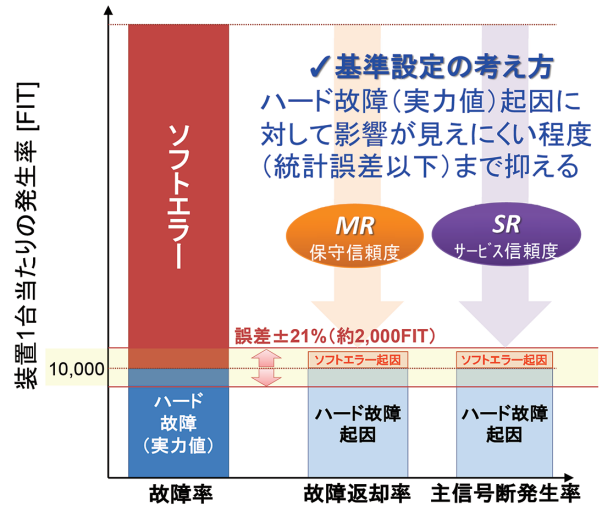


図6 保守信頼度とサービス信頼度の基準設定の考え方

ただし、ソフトエラーによってまれに誤動作を検出できないサイレント故障は発生が許容されないので、約1万年分相当の中性子線を照射してもサイレント故障が発生しないことを信頼性基準として、設定した（図7）。

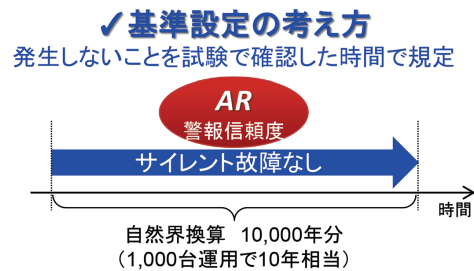


図7 警報信頼度の基準の考え方

この様に故障交換率、主信号断発生率の低減、サイレント故障を防ぐための3つの信頼度基準を定義し、クラスを設定した（図8）。これらの基準を満たすことで、大規模ネットワークを構築した場合の信頼性を確保できる。

信頼度基準	目的	基準値														
	✓ 故障交換率(遠隔保守作業を含む)を低減 	装置1台当たり保守作業が必要な頻度(FIT数)で規定 <table border="1"> <thead> <tr> <th>MR class</th> <th>事象発生率</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X</td> <td>キャリアとベンダで決定</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>&lt; 2,000 FIT</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>&lt; 10,000 FIT</td> </tr> </tbody> </table>	MR class	事象発生率	X	キャリアとベンダで決定	A	< 2,000 FIT	B	< 10,000 FIT						
MR class	事象発生率															
X	キャリアとベンダで決定															
A	< 2,000 FIT															
B	< 10,000 FIT															
	✓ 主信号断発生率を低減 	装置1台当たり主信号断時間と頻度(FIT数)で規定 <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">SR class</th> <th colspan="2">事象発生率</th> </tr> <tr> <th>(B) Momentary interruption (0.2~1.0秒の主信号断)</th> <th>(C) Continuous interruption (1.0秒以上の主信号断)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X</td> <td colspan="2">キャリアとベンダで決定</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>&lt; 2,000 FIT</td> <td>&lt; 200 FIT</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>&lt; 10,000 FIT</td> <td>&lt; 1,000 FIT</td> </tr> </tbody> </table>	SR class	事象発生率		(B) Momentary interruption (0.2~1.0秒の主信号断)	(C) Continuous interruption (1.0秒以上の主信号断)	X	キャリアとベンダで決定		A	< 2,000 FIT	< 200 FIT	B	< 10,000 FIT	< 1,000 FIT
SR class	事象発生率															
	(B) Momentary interruption (0.2~1.0秒の主信号断)	(C) Continuous interruption (1.0秒以上の主信号断)														
X	キャリアとベンダで決定															
A	< 2,000 FIT	< 200 FIT														
B	< 10,000 FIT	< 1,000 FIT														
	✓ サイレント故障を防ぐ 	自然界換算時間で装置1台当たりサイレント故障が発生しない時間で規定 <table border="1"> <thead> <tr> <th>AR class</th> <th>自然界換算時間</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X</td> <td>キャリアとベンダで決定</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>10,000 年相当</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>2,000 年相当</td> </tr> </tbody> </table>	AR class	自然界換算時間	X	キャリアとベンダで決定	A	10,000 年相当	B	2,000 年相当						
AR class	自然界換算時間															
X	キャリアとベンダで決定															
A	10,000 年相当															
B	2,000 年相当															

Class X: 特に高品質が要求される装置の特別規定  
 Class A: キャリアネットワーク品質  
 Class B: 特に品質が求められる装置/導入台数が少ない装置など

図8 3つの信頼度基準と基準値

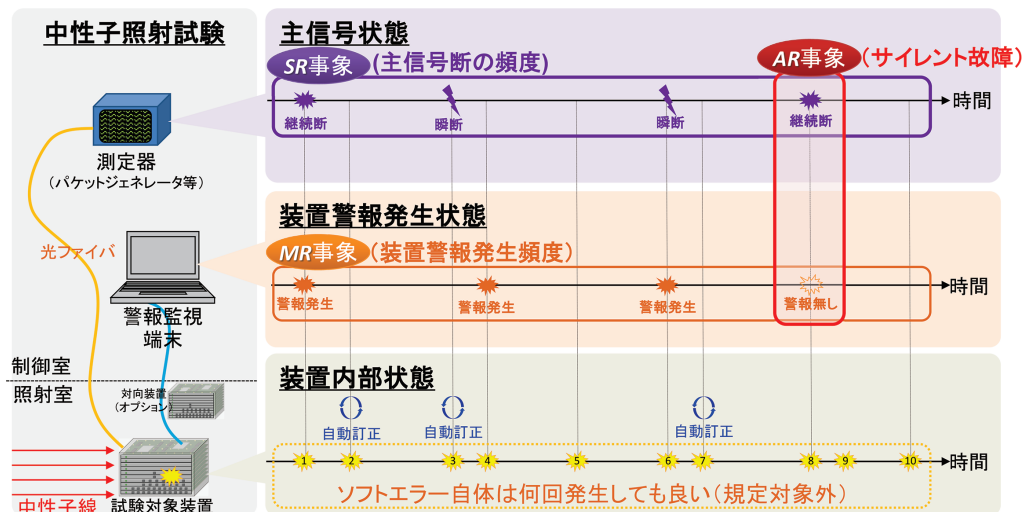


図9 評価方法の例

## 6. ITU-T K.138 (評価編) 粒子放射線検査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

本報告は、ITU-T K.130 (試験編)に記載の中性子照射試験で得た結果をもとに、ITU-T K.138 (評価編)に定義されている通信装置のソフトウェアに対する各信頼度規定が満たされているかを評価する方法について述べている。ITU-T K.130に記載されている試験では自然界の数百万倍から数億倍の強度で中性子を照射することで、短時間でソフトウェアを再現させることができる。評価の例を図9に示す。まず、中性子線を照射しソフトウェアを発生させる。測定器に

より主信号状態、警報監視端末により警報発生状態を確認し、発生した事象を『3つの信頼度基準』へ分類する。例えば、図中の1回目のソフトウェアでは装置警報が発生し、主信号が切れた状態である。この場合は、保守交換が必要と想定されるのでMRに該当する事象としてカウントする。また、主信号断も発生しましたので、SRに該当する事象とカウントする。次に2回目のソフトウェアは自動訂正が働き、装置警報もなく主信号影響もない状態であった。この場合は、どの信頼度にもカウントされないということになる。この様に、試験では主信号影響と、装置警報状態を確認する。そして例えば8回目のソフトウェアでは、装置

ITU-T 勧告番号	タイトル	TTC標準化 予定
K.124 (2016/12)	Overview of particle radiation effects on telecommunications systems (通信装置の粒子放射線効果の概要)	JT-K124 制定済み
K.131 (2018/01)	Design methodologies for telecommunication systems applying soft error measures (通信装置のソフトウェア対策設計手法)	JT-K131 2019年2月
K.130 (2018/01)	Soft error test method for telecommunication equipment (通信装置のソフトウェア試験手法)	JT-K130 2019年2月
K.138 (2018/11)	Quality estimation methods and application guidelines for mitigation measures based on particle radiation tests (粒子放射線検査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)	JT-K138 2019年5月
K.139 (2018/11)	Reliability requirement of particle radiation effect for telecommunication systems (通信装置の粒子放射線効果の信頼性要求基準)	JT-K139 2019年5月
K Suppl.11 (2018/09)	Supplement to K.131 - Soft error measures for FPGA (K.soft_des補足資料 - FPGAのためのソフトウェア対策)	TR-KSup.11 2019年2月

表3 TTC標準勧告化予定

警報が無い状態で、主信号断が継続しているので、これはサイレント故障に該当し、ARが1回とカウントできる。この様に各信頼度基準に該当する事象をカウントする。さらに、照射時間から換算した自然界稼働時間と発生頻度から基準値を満たすかどうか判定することができる。

## 7. 今後のTTC標準化予定と展望

本勧告については、今後TTC標準勧告として制定する予定である。予定を表3に示す。

この標準勧告によって、ソフトウェアによるトラブルをなくし、信頼性の高いネットワークを世界に提供できると考えている。また、この標準勧告を発展させることで、今後世界的に様々な電子機器で発生が想定されるソフトウェアに関する課題の解決にも貢献できると考えられる。

## 謝辞

本勧告草案作成において、活発な議論をいただいたTTC 通信装置のソフトウェアに関する標準化Adhoc委員の皆様へ感謝致します。

## 参考文献

- [1] <http://www.ntt.co.jp/news2016/1612/161219a.html>  
 [2] <http://www.ttc.or.jp/j/info/bosyu/20150804/>

- [3] <https://www.itu.int/rec/T-REC-K.124-201612-I>  
 [4] <https://www.itu.int/rec/T-REC-K.130-201801-I/en>  
 [5] <https://www.itu.int/rec/T-REC-K.131-201801-I/en>  
 [6] <https://www.itu.int/rec/T-REC-K.Sup11-201711-I>  
 [7] ITU-T Suppl.\_to-K.131  
<https://www.itu.int/rec/T-REC-K.Sup11-201711-I>  
 [8] Xilinx Device Reliability Report  
[https://www.xilinx.com/support/documentation/user\\_guides/ug116.pdf](https://www.xilinx.com/support/documentation/user_guides/ug116.pdf)