

通信装置のソフトウェア対策のITU-T国際標準化

日本電信電話株式会社 ネットワークサービスシステム研究所 研究主任

いわした ひでのり
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ウェアが増えている。ソフトウェアというのは、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。ソフトウェア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、ソフトウェア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ウェアを再現させ、効率的に通信装置のソフトウェアによる影響を測定することができるようになった^[1]。本試験を実施することにより、事前にソフトウェアの影響を把握でき、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、ソフトウェア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ウェア対策に関する標準化Adhoc（以下、SOET Adhoc: Soft error testing Adhoc）が開設^[2]され、2015年10月のITU-T SG5 会合において、通信装置のソフトウェア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、ソフトウェア対策に関する設計方法・試験方法・評価方法及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ウェア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ウェア対策勧告は、5つの勧告本編と補足資料で構成されている。ソフトウェア対策勧告の全体像を図1に、勧告一覧を表1に示す。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	タイトル
K.124	概要編	Overview of particle radiation effects on telecommunications systems ^[3] (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 ^[4] (通信装置のソフトウェア試験手法)
K.131	設計編	Design methodologies for telecommunication systems applying soft error measures ^[5] (通信装置のソフトウェア対策設計手法)
K Suppl.11	補足編	Supplement to K.soft_des - Soft error measures for FPGA ^[6] (K.131補足資料—FPGAのためのソフトウェア対策)
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		▲12月 K.124承認	▲1月 K.130, K.131承認
▲10月 ITU-T SG5会合にて 検討プログラムの開始が承認			▲11月 K.138, K.139承認

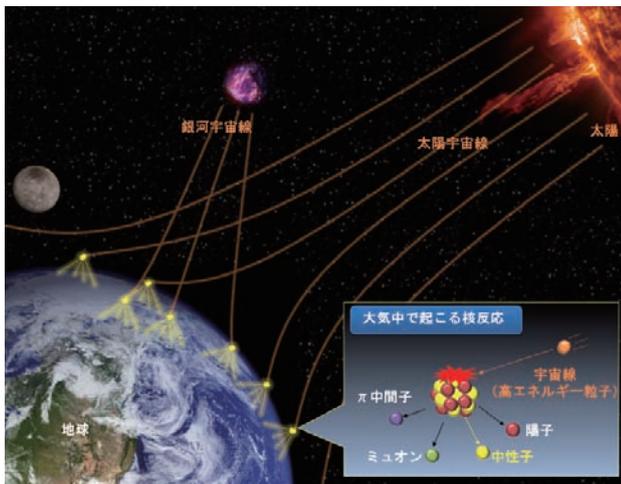
本稿では、各勧告の概要について解説する。

2. K.124 (概要編) 通信装置の粒子放射線影響の概要

本勧告には、ソフトウェアが発生するメカニズム、通信装置で発生するソフトウェアの影響と対策の概要、ソフトウェア

に対する標準の必要性について述べている。ソフトウェア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 α 線と、宇宙線によって生成される中性子線がある。 α 線によるソフトウェアに対する影響は高純度材料（低 α 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。

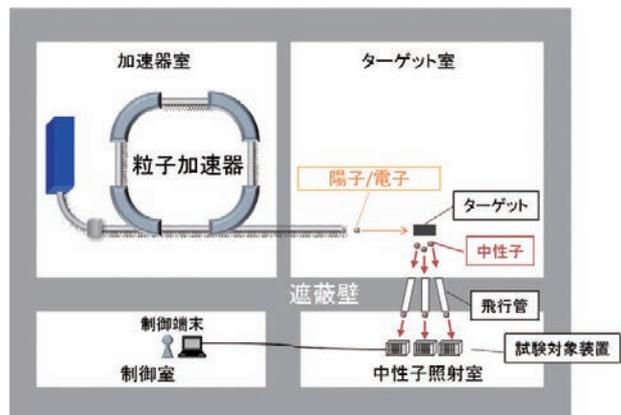
宇宙線によるソフトウェアは以下の要因で発生する。図2に示すように宇宙では太陽や超新星爆発によって、陽子を主体とした高エネルギー粒子が飛び交っている。この高エネルギー粒子が地球の大気に入ると、大気中の窒素原子核や酸素原子核と衝突し、核反応が起きる。この時、原子核内部にあった中性子が飛散する。大気中で発生した中性子の大部分は通常、半導体デバイスに突入しても透過し、何ら影響を与えないが、まれに半導体デバイスを構成するシリコン原子核と核反応を起こし、電荷を持った様々な粒子を発生させる。これが電気的なノイズとなり、一時的なエラーであるソフトウェアを発生させる。



■図2. 宇宙線と大気中で起こる核反応

3. K.130 (試験編) 通信装置のソフトウェア試験法

本勧告は、加速器中性子源を用いて通信装置のソフトウェア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、タンゲステン、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、短時間でソフトウェア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ウェア試験

4. K.131 (設計編) 通信装置のソフトウェア対策設計法、K Suppl.11 FPGAのためのソフトウェア対策 (K.131 補足資料)

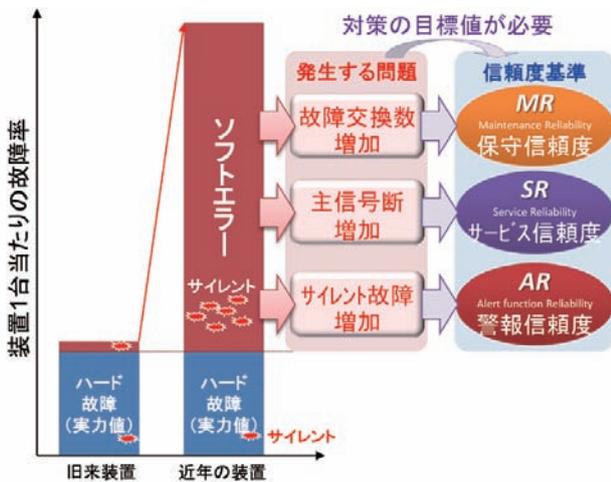
本勧告は、キャリア通信ネットワークを構成する通信装置に対するソフトウェア対策設計手法について述べている。はじめに、ソフトウェア対策の観点から対象となる通信装置の基本構成、ソフトウェアに対する信頼度規定定義と規定方法及び信頼度規定に適合するためのソフトウェア対策の装置開発手順について述べている。また、特に対策が重要となるFPGAについてはK.131の補足資料としてK Suppl.11 FPGAのためのソフトウェア対策に、FPGAのソフトウェア発生率の傾向、ソフトウェアの影響の低減方法について詳細に述べている。

5. 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

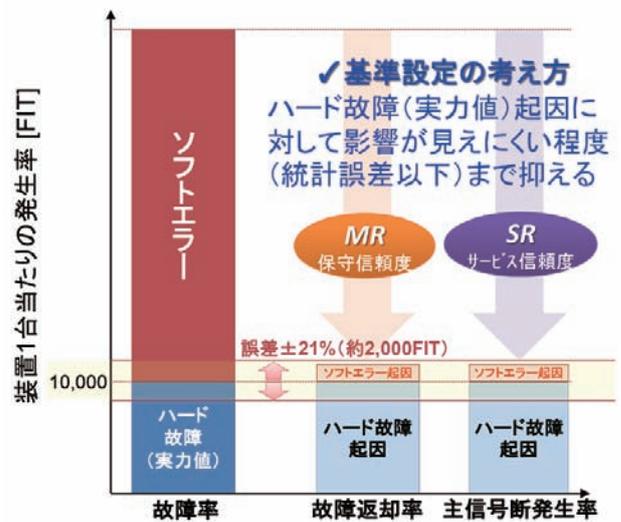
本勧告は、高信頼のネットワークを構築するために必要なソフトウェアに対する信頼性の基準について述べている。ここでは、基準の考え方について解説する。半導体デバイスの高集積化に伴い、通信装置では、旧来から存在するハードエラーに比べてソフトウェアによる故障の割合が多くなってきている（図4）。

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、ソフトウェアは微細化で増加しているためである。

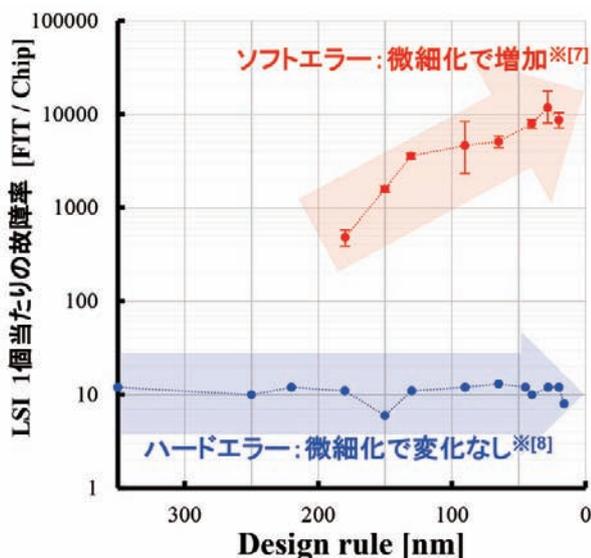
このような傾向から、近年の通信装置ではソフトウェアの増加に伴い、故障交換数、主信号断数、サイレント故障が増加する傾向にある。しかしながら、ソフトウェア自体は物理故障ではないので、対策によって回復することができ、どこ



■ 図4. 通信装置のハードエラーとソフトウェアの割合と発生する問題



■ 図6. 保守信頼度とサービス信頼度の基準設定の考え方



■ 図5. LSIのハードエラーとソフトウェアの故障率

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、ソフトウェア起因の故障交換数、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)。

ただし、ソフトウェア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)。

このように故障交換率、主信号断発生率の低減、サイレン

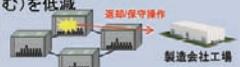


■ 図7. 警報信頼度の基準の考え方

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。

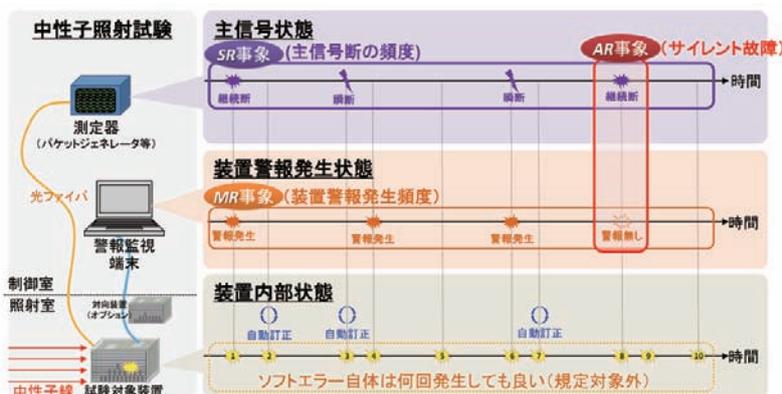
6. K.138 (評価編) 粒子放射線検査に基づく対策のための品質推定方法とアプリケーションガイドライン

本勧告は、K.130 (試験編) に記載の中性子照射試験で得た結果を基に、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。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。

信頼度基準	目的	基準値															
 MR Maintenance Reliability 保守信頼度	✓ 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"> <tr> <th>MR class</th> <th>事象発生率</th> </tr> <tr> <td>X</td> <td>キャリアとベンダで決定</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>< 2,000 FIT</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>< 10,000 FIT</td> </tr> </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																
 SR Service Reliability サービス信頼度	✓ 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"> <tr> <th>SR class</th> <th colspan="2">事象発生率</th> </tr> <tr> <td></td> <th>MR Occurrence rate (FIT)</th> <th>MTT (hours)</th> </tr> <tr> <td>X</td> <td>キャリアとベンダで決定</td> <td>キャリアとベンダで決定</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>< 2,000 FIT</td> <td>< 200</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>< 10,000 FIT</td> <td>< 1,000</td> </tr> </table>	SR class	事象発生率			MR Occurrence rate (FIT)	MTT (hours)	X	キャリアとベンダで決定	キャリアとベンダで決定	A	< 2,000 FIT	< 200	B	< 10,000 FIT	< 1,000
SR class	事象発生率																
	MR Occurrence rate (FIT)	MTT (hours)															
X	キャリアとベンダで決定	キャリアとベンダで決定															
A	< 2,000 FIT	< 200															
B	< 10,000 FIT	< 1,000															
 AR Alert Function Reliability 警報信頼度	✓ 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"> <tr> <th>AR class</th> <th>自然界換算時間</th> </tr> <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> </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ない装置/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

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。このように、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、装置警報がない状態で、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。このよう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. 今後の展望

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、活発な議論をしていただいたTTC通信装置のソフトウェアに関する標準化Adhoc委員の皆様にご感謝いたします。

(2018年3月8日 ITU-T研究会より)

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