

# 加速器中性子源を用いたソフトウェア試験における電子機器の放射化特性解析 RADIOACTIVATION CHARACTERISTICS ANALYSIS OF ELECTRONIC EQUIPMENTS IN SOFT ERROR TEST USING ACCELERATOR-DRIVEN NEUTRON SOURCES

青柳健一<sup>A)</sup>, 森弘樹<sup>A)</sup>, 岩下秀徳<sup>#,A)</sup>, 船津玄太郎<sup>A)</sup>, 行田克俊<sup>A)</sup>,  
佐藤博隆<sup>B)</sup>, 加美山隆<sup>B)</sup>, 古坂道弘<sup>B)</sup>, 鬼柳善明<sup>C)</sup>

Kenichi Aoyagi<sup>A)</sup>, Hiroki Mori<sup>A)</sup>, Hidenori Iwashita<sup>#,A)</sup>, Gentaro Funatsu<sup>A)</sup>, Katsutoshi Koda<sup>A)</sup>,  
Hirotaka Sato<sup>B)</sup>, Takashi Kamiyama<sup>B)</sup>, Michihiro Furusaka<sup>B)</sup>, Yoshiaki Kiyonagi<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Nippon Telegraph and Telephone Corporation

<sup>B)</sup> Hokkaido University

<sup>C)</sup> Nagoya University

## Abstract

In this study, in the soft error test of the electronic equipment, the evaluation of the activation characteristic to determine the cooling time to enable the EUT to be taken out was conducted by simulation. We modeled electronic equipment and irradiated neutrons under low energy and high energy conditions. It was found that more radioactive isotopes contributing to the cooling time are generated under high energy condition and attention is required for irradiation amount of neutron under high energy condition.

## 1. はじめに

近年、半導体の高集積化に伴い電子機器におけるソフトウェアの発生リスクが増加している。ソフトウェアは主に宇宙線が大气と衝突することにより発生する中性子線の影響による半導体メモリのビット情報が反転する事象で、電子機器の誤動作を誘発する可能性がある。

今後、ますます顕在化が予想されるソフトウェアに対する電子機器の信頼性を向上させるため、開発段階においてソフトウェア発生時の障害処理を事前確認する手段が必要である。従来、半導体レベルでは、自然界におけるソフトウェア発生率を高精度に見積もるため、数百 MeV までの高エネルギーの中性子を照射するソフトウェア試験が主流であったが、近年、システムレベルでのソフトウェア試験を実施するため、柔軟な試験が可能な、数十 MeV 程度までの比較的低エネルギーの中性子を照射する小型加速器中性子源の産業利用が開始されている[1]。

システムレベルのソフトウェア試験では、開発中の電子機器を試験終了後、短時間で試験サイトから持ち出し、修正・再試験を実施する必要があり、ソフトウェア発生数に対して放射化を極力抑えた試験方式が要求される。

そのため、本研究では、高エネルギー加速器(～数百 MeV)と、低エネルギー加速器(数十 MeV)における、ソフトウェア発生数、放射化特性、および冷却時間の関係を解明することを目的とし、本報告では、両者の加速器の放射化特性の解析結果について報告する。

## 2. 放射化特性の評価方法

### 2.1 評価の概要

ソフトウェア試験では、Figure 1 に示すように、加速器によって加速された粒子を金属ターゲットに衝突させることで中性子を生成させ、試験対象の電子機器(EUT)へ

自然界と比較して数百万～数億倍の中性子を照射することで、短時間でソフトウェアを発生させることができる。ソフトウェア試験においても EUT は放射性同位体を生成(放射化)するが、半減期の長い放射性同位体を生成した場合、試験サイトから EUT を持ち出すまでに長い冷却時間を要することになり、電子機器の開発において課題となる。

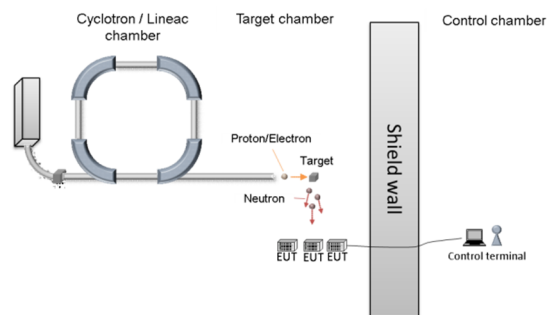


Figure 1: Soft error testing system.

生成する放射性同位体の種類と生成量は中性子の総数・エネルギーと EUT を構成する元素の組み合わせによって決定される。そこで、本研究では一般的に電子機器に使用される素材や部品から EUT をモデル化し、モデル化した電子機器に対し、中性子照射時の放射化特性をシミュレーションによって評価した。評価に際しては中性子のエネルギーに着目し、低エネルギーの中性子を照射した場合と高エネルギーの中性子を照射した場合で放射化特性にどのような違いが見られるかを評価した。

### 2.2 電子機器のモデル化

一般的な電子機器は、プリント基板上に機能を実現するための回路が実装されたパッケージと、パッケージを

保護するための筐体フレームによって構成される。電子機器に使用される筐体フレームの種類としては、鉄等を主成分とする合金が用いられることが多い。また、パッケージは、樹脂製のプリント基板上に、シリコンを母材とする半導体デバイス、熱伝導性金属を用いた放熱材、導電性の高い金属による配線・メッキが実装されている。ソフトウェア試験では半導体デバイスそのものではなく、半導体デバイスを実装したパッケージの状態や、パッケージを筐体フレームに搭載した状態で実施する機会が多い。そのため、放射化の影響は、電子機器に使用される素材全体を考慮する必要があり、特に放射化の影響を受けやすい物質については、冷却時間に注意する必要がある。

本評価に用いる電子機器をモデル化し、その組成を Table 1 に示す。筐体フレームとしては汎用の合金であるステンレス(SUS304)を用い、パッケージとしては、ガラスエポキシによるプリント基板上に複数の電子回路部品を搭載した場合の元素質量比を算出した。なお、プリント基板には難燃剤として臭素化合物を添加している。

Table 1: Composition of EUT Model

Unit	Materials	External size	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Number of pieces	Element composition	
Frame of chassis	Stainless (SUS304)	45cm × 43cm × 62cm	7.93	1	Fe 35.0% Ni 4.7% Cr 9.7% C 0.04% Si 0.5%	
Package	assembly of electronic elements below			12	C 23.9% H 2.2% O 8.5% Si 4.1% Ca 0.8% Al 0.5% B 0.2% Mg 0.2% Na 0.03% K 0.03% Cu 4.9% Br 1.3% Sn 0.6% Mo 3.9%	
elements on a package	Printed board	Grass epoxy board and halogen compounds for resistance to heat	36cm × 34cm × 0.3cm	1.70	1	-
	Memory device	Silicon	1cm × 2cm × 0.1cm	5.0	20	
	Processor device	Silicon	2cm × 2cm × 0.2cm	5.0	3	
	Electronic device	Heatsink (Cu-Mo alloy)	4cm × 4cm × 0.2cm	9.81	3	
		Switch, Connector (Bronze parts)	0.2cm × 0.2cm × 0.2cm	8.70	100	
	Wiring and platings on boards	Solder	Cu 35μm thickness Sn 10μm thickness	8.96 7.3	1	

### 2.3 中性子の照射条件

本研究ではシミュレーションを用いて、2種類のエネルギー条件にて EUT へ中性子を照射する。なお、中性子の輸送計算には PHITS ver. 2.88[2]を用い、生成される放射性同位体から放出されるγ線量は DCHAIN-SP (引用: DCHAIN-SP) により計算した。低エネルギー加速器として 18 MeV 陽子加速器を、高エネルギー加速器として、The Los Alamos Neutron Science Center (LANSCE) のビームライン FP30R/ICE II[3]を参照する。本加速器中性子源は数百 MeV の高エネルギーの中性子成分を有し、かつその中性子スペクトルは自然界の中性子スペクトルと近似しており、半導体単体のソフトウェア発生率の評価に用いられてきた実績がある。

2つの照射条件のエネルギーに着目して分析するに当たり、ソフトウェアの発生確率が2つの条件で一致するように中性子の照射量を規格化した。規格化後の低エネルギー条件、及び高エネルギー条件でのサンプルに照射される中性子束を Figure 2 に示す。

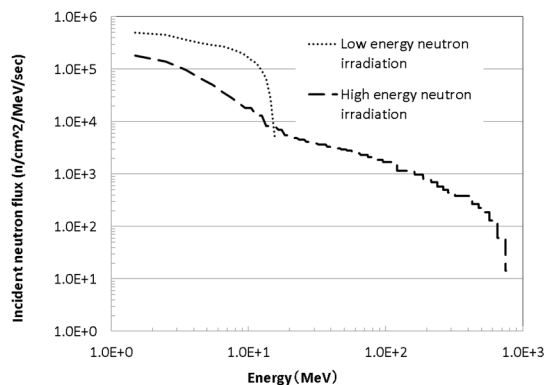


Figure 2: Neutron spectrum from low energy and high energy accelerator-driven neutron sources.

## 3. 結果と考察

### 3.1 中性子エネルギーと放射化特性

シミュレーションの結果を Figure 3 に示す。なお、中性子照射後のγ線量は照射する中性子のフルエンスによって変わるため、低エネルギー条件における中性子照射直後のγ線量を1として規格化し、減少の傾向を低エネルギー条件、及び高エネルギー条件にて比較した。

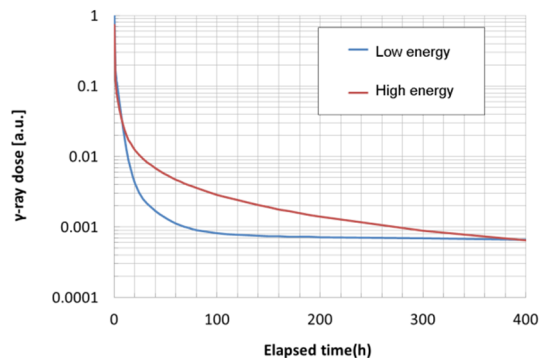


Figure 3: Radioactivation characteristics of electronic equipment model using low energy and high energy accelerator-driven neutron sources.

最初の10時間程度までは、低エネルギー条件(小型加速器)、高エネルギー条件(LANSCE)ともにほぼ同等の速度で減衰するが、その後も低エネルギー条件ではほぼ同じ割合で減衰するのに対し、高エネルギー条件では減衰の速度は緩やかになる。放射線量の絶対値は前述の通り中性子のフルエンスによって異なるが、持ち出し可能となる基準が照射直後の1%以下とする場合、その冷却時間は低エネルギー条件では14時間、高エネルギー条件では24時間となる。さらに持ち出し基準を0.1%まで引き下げると、冷却時間は低エネルギー条件の64時間に対し、高エネルギー条件では280時間にもなる。

### 3.2 冷却時間に寄与する放射性同位体の生成

高エネルギー条件において、冷却時間への寄与の大きい放射性同位体を特定するため、個々の放射性同位体の $\gamma$ 線量についてシミュレーションにより計算した。個々の放射性同位体の $\gamma$ 線量の時間変化を Figure 4 に示す。絶対量については、サンプルである電子機器モデル全体の照射直後の $\gamma$ 線量を 1 として規格化を行っている。

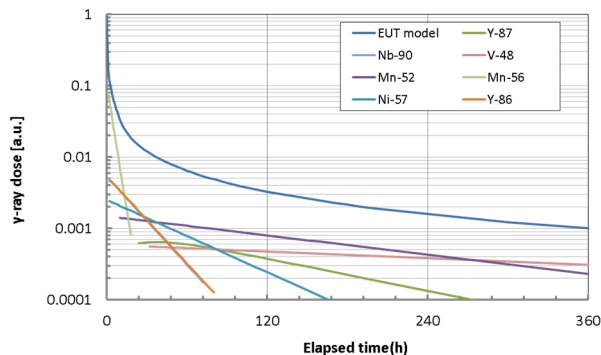


Figure 4: Radioactivation characteristics of each radioisotope element in electronic equipment model using high energy accelerator-driven neutron sources.

特に、低エネルギー条件との差分である 10~300 時間程度において支配的な放射性同位体に注目すると、Y-87、Ni-57、Mn-52 と低エネルギー条件ではほぼ生成していない元素が多く生成し、サンプル全体の放射化特性に寄与している。これは、サンプルに入射する中性子のエネルギーが大きくなることにより、核反応の断面積が大きくなる元素であるためである。これらの生成元元素はフレーム筐体中使用されるステンレスやパッケージ上に実装されるヒートシンクに一般的に含まれており、高エネルギー条件にてソフトエラー試験を実施し、かつ冷却時間をできるだけ短時間にしたい場合は、中性子の照射量に注意を要する。

## 4. まとめ

本研究では、電子機器のソフトエラー試験において、EUT の持ち出し可能となるための冷却時間を決定する放射化特性について、シミュレーションによる評価を行った。電子機器をモデル化し、低エネルギー条件、及び高エネルギー条件にて中性子の照射を行ったところ、高エネルギー条件では冷却時間に寄与する放射性同位体がより多く生成し、高エネルギー条件では中性子の照射量に注意を要することが分かった。

## 参考文献

[1] H. Iwashita, H. Sato, H. Arai, T. Kotanigawa, K. Kino, T. Kamiyama, F. Hiraga, K. Koda, M. Furusaka and Y.

Kiyanagi, "Accelerated Tests of Soft Errors in Network Systems Using a Compact Accelerator-Driven Neutron Source", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol 64, pp.689-696, 2017.

[2] T. Sato, K. Niita, N. Matsuda, S. Hashimoto, Y. Iwamoto, S. Noda, T. Ogawa, H. Iwase, H. Nakashima, T. Fukahori, K. Okumura, T. Kai, S. Chiba, T. Furuta and L. Sihver, Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52, J. Nucl. Sci. Technol. 50:9, 913-923 (2013).  
[3] JEDEC STANDARD JESD89A "Measurement and Reporting of Alpha Particle and Terrestrial Cosmic Ray-Induced Soft Errors in Semiconductor Devices".