

JT-K130

通信装置の中性子照射試験法

Neutron irradiation test methods for
telecommunication equipment

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.....	6
5. 慣例.....	7
6. 中性子照射試験の利点と目的.....	7
7. 加速器中性子源を用いた通信装置に対する中性子照射試験システムの概要.....	7
7.1 中性子照射試験設備の構成.....	7
7.2 ターゲット組立構成への要求事項.....	8
7.3 加速器中性子源への要求事項.....	10
7.4 不要な照射の除去.....	11
7.5 複数EUTへの中性子同時照射.....	13
7.6 照射範囲.....	14
7.7 中性子束均一化.....	14
7.8 その他の注意点.....	15
8. 試験系.....	15
8.1 試験系の概要.....	15
8.2 構成.....	15
8.3 制御端末.....	16
8.4 EUTの位置決め.....	16
8.5 制御端末とAEの設置.....	16
8.6 信号測定装置.....	16
9. EUT動作と試験手順.....	16
9.1 EUT動作.....	16
9.2 試験手順.....	17
9.3 試験報告書.....	19
付録I：中性子フルエンス計算法.....	21
参考文献.....	22

<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.130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2月21日	制定 (ITU-T K.130 (1/2018) 準拠)
第2版	2022年5月19日	制定 (ITU-T K.130 (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

6. 標準作成部門

伝送網・電磁環境専門委員会

要約

本標準で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中性子照射試験手法について述べる。はじめに、通信装置に対する加速器中性子源を用いたソフトウェア試験の目的について述べる。次に、ソフトウェア試験の概要と加速器中性子源の動作原理について述べた後、加速器中性子源と試験場への要求条件を定義する。次に、試験系、動作条件、通信装置のエラー監視や試験手順を含む試験条件を定義する。最後に、照射する中性子束や信頼性評価時の故障数の条件など、詳細な試験方法を決定するための注意事項についても具体的に述べる。

キーワード

照射試験、中性子、ソフトウェア

まえがき

高集積化・微細化された半導体デバイスが利用された通信装置においては、信頼度基準に適合するためにソフトウェア対策の検討が必須である。しかし、ソフトウェアは通信装置では数年～数十年に1回と非常に稀にしか発生しない事象のため、通常的环境では信頼性を確認できず、故障削減対策の効果の検証や信頼度基準への適合性の確認が困難である。そこで、加速器中性子源を用いて自然環境の数百万倍～数千万倍の高エネルギー中性子線を照射して試験することが必要である。これにより短時間でソフトウェアを発生させることが可能になり、信頼度基準への適合性や対策の有効性が検証できるようになる。

しかし、中性子線照射により通信装置のソフトウェアに関する信頼性を評価するためには、照射設備、中性子線の照射強度、試験対象装置の試験系、試験時の動作チェック方法などを適切に決定する必要がある。

本標準は、通信装置のソフトウェア試験に関し、中性子照射試験の概要および加速器中性子源、試験場、試験系、試験手順に対する要求条件について述べている。

1. 適用

本標準は、ソフトウェア対策の有効性を試験するための加速器中性子源を使用した試験方法の指針を示す。また、装置の信頼度要求への適合性を確認するための中性子源、試験場、試験系や試験手順等の試験条件の要求条件も示す。この標準はキャリア通信ネットワークを構成する通信装置で、キャリアサイトに設置されるコア系（リンク／ノード）装置やアクセス系装置に適用する。

2. 引用規格

[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-K131 (2/2019), 通信装置のソフトウェア対策設計法

[TR-KSup.11] TTC技術レポート TR-KSup.11 (2/2019), JT-K131補足資料-FPGAのためのソフトウェア対策

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

なし

3.2 本標準で定義する用語

3.2.1 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。

3.2.2 中性子束 : Neutron flux

単位時間当たりに単位面積を通過する中性子数

3.2.3 中性子フルエンス : Neutron fluence

単位面積当たりの中性子数

4. 略語と頭字語

本標準では次の略語を使用する。

AE	Associate Equipment	対向装置
AR	Alert Function Reliability	警報機能信頼度
EUT	Equipment Under Test	試験対象装置
MR	Maintenance Reliability	保守信頼度
SR	Service Reliability	サービス信頼度

5. 慣例

なし

6. 中性子照射試験の利点と目的

ソフトエラー原因は外来の高エネルギー中性子と半導体デバイスの IC パッケージに含まれる放射性物質に由来する α 線がある。半導体デバイスでのソフトエラー発生率は、その原因すなわち 2 種類の粒子線に依存するが、装置に対しては同様の現象及び影響として現れる。

また、通信装置においてはソフトエラー発生後の故障モードおよび対策効果は粒子線の種類によらず同等である。 α 線は固体材料への透過力が低いため、 α 線にさらすために半導体デバイスのモールド樹脂をはがしてチップ表面を露出させる必要があり、 α 線を使用して試験することは難しい。このため、通信装置の信頼性試験は試験中に強度を容易に制御可能な中性子を使用することを推奨する。

中性子には、高エネルギー中性子と熱中性子があり、どちらもソフトエラーの発生要因となる。中性子の種類によって発生するソフトエラーの発生確率の違いは、デバイス種別、世代によって異なる。しかしながら、宇宙線起因中性子は高エネルギー中性子が大部分でありかつ、熱中性子はコンクリートなどの局舎の壁で遮蔽されることから、熱中性子が実際の運用環境でのソフトエラー発生要因となる割合は少ないと考えられる。さらに、どちらの中性子で発生したソフトエラーもシステム動作への影響は同じであることから本標準では高エネルギー中性子を用いて試験を行うこととし、熱中性子による中性子照射試験についての必要性については今後の検討とする。

加速器中性子源を用いた中性子照射試験は下記を確認することを目的とする。

- ・ソフトエラー信頼度基準への適合性
- ・ソフトエラー検出／訂正機能の正常性
- ・ソフトエラー発生時の警報、イベント通知機能の妥当性
- ・ソフトエラーによる故障発生時の機能（冗長切替制御、パッケージ初期設定機能等）の正常性

7. 加速器中性子源を用いた通信装置に対する中性子照射試験システムの概要

7.1 中性子照射試験設備の構成

加速器を用いることでソフトエラーの原因となる中性子束を生成し、ソフトエラーを短時間で発生させることができる。中性子照射試験が可能な粒子加速器施設は、図 7.1 に示すようにサイクロトロン／リニアック室、ターゲット室、中性子照射室（分離されていない施設もあり）、加速器制御室で構成される。サイクロトロン／リニアック室、ターゲット室、中性子照射室は放射線管理区域となる。中性子束は、サイクロトロン／リニアック室の加速器によって加速された陽子／電子をターゲット室内のターゲットに照射し、核反応により発生させる。ターゲットから生成された中性子ビームを同室内の直接試験対象装置（EUT）に照射するか、遮蔽壁にある中性子飛行管を通して隣接の中性子照射室へ導き EUT に照射する。

遮蔽され安全な加速器制御室に設置した制御端末から EUT でのソフトエラーの発生状態を確認する。

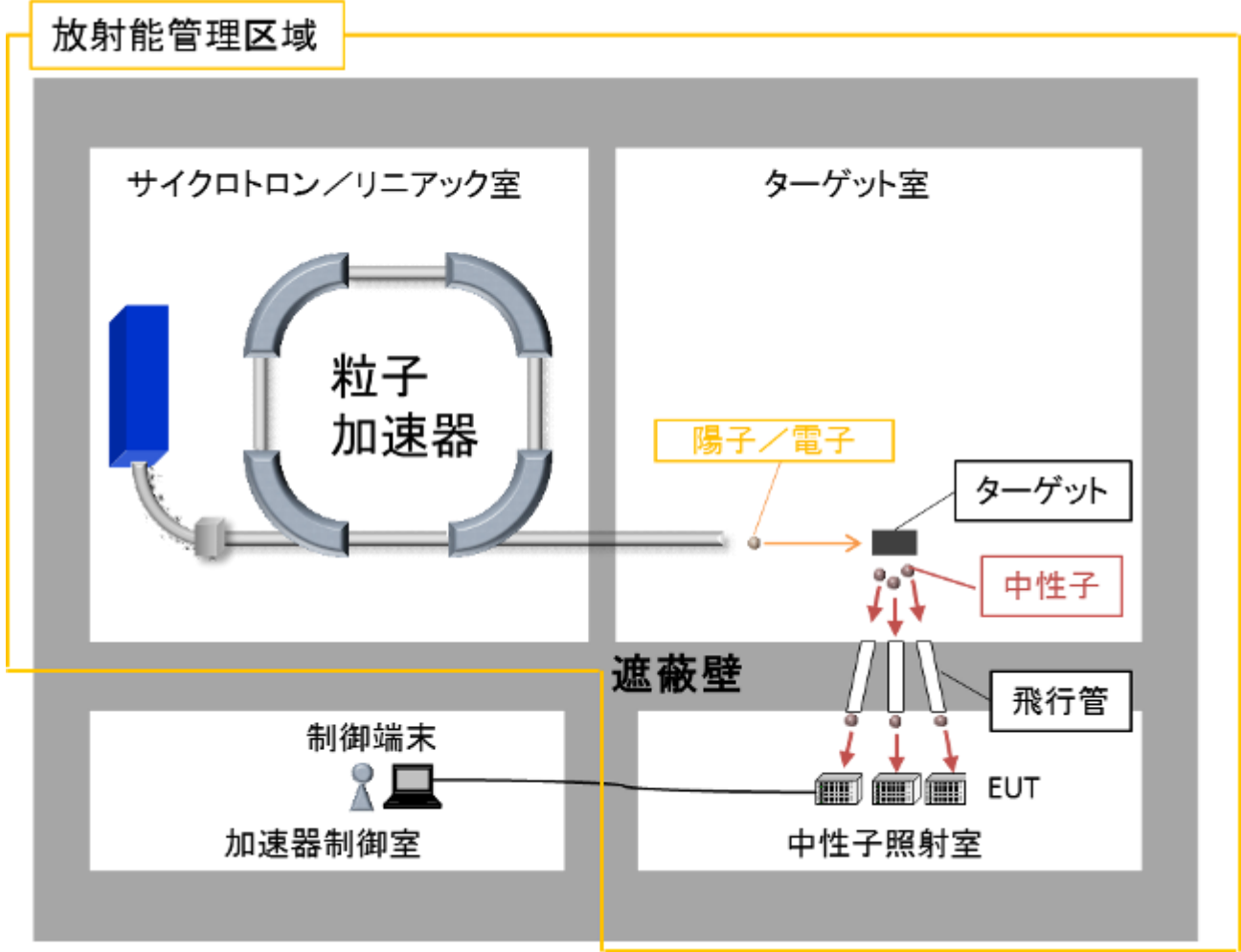


図 7.1 加速器中性子源を用いた中性子照射試験設備

7.2 ターゲット組立構成への要求事項

加速器により加速された陽子もしくは電子がターゲットに照射されると、それぞれに対応した核反応を経て高エネルギー中性子が発生する。陽子の場合、核反応により高エネルギー中性子が直接発生するが、電子の場合は、重金属であるターゲットの静電場と反応しγ線がまず生成され、γ線とターゲットとの光核反応により高エネルギー中性子が発生する。

多くの施設では、図 7.2 に示すようにモデレータ(水素を多く含む物質)を設置して高エネルギー中性子のエネルギーを下げ、熱中性子を生成しており、熱中性子による物質研究や中性子透過像撮影に利用されることが多い。

他の用途のためにモデレータが取り付けられている加速器を利用して中性子照射試験を行う場合には、図 7.3 に示すようにモデレータを取り外し、ターゲットから発生した高エネルギー中性子を減速させずに直接 EUT に照射する。

また、ターゲットの周りに鉛などの反射材を配置することで、EUT 方向以外に発生した中性子を反射させ EUT への中性子束を増やす方法もある。

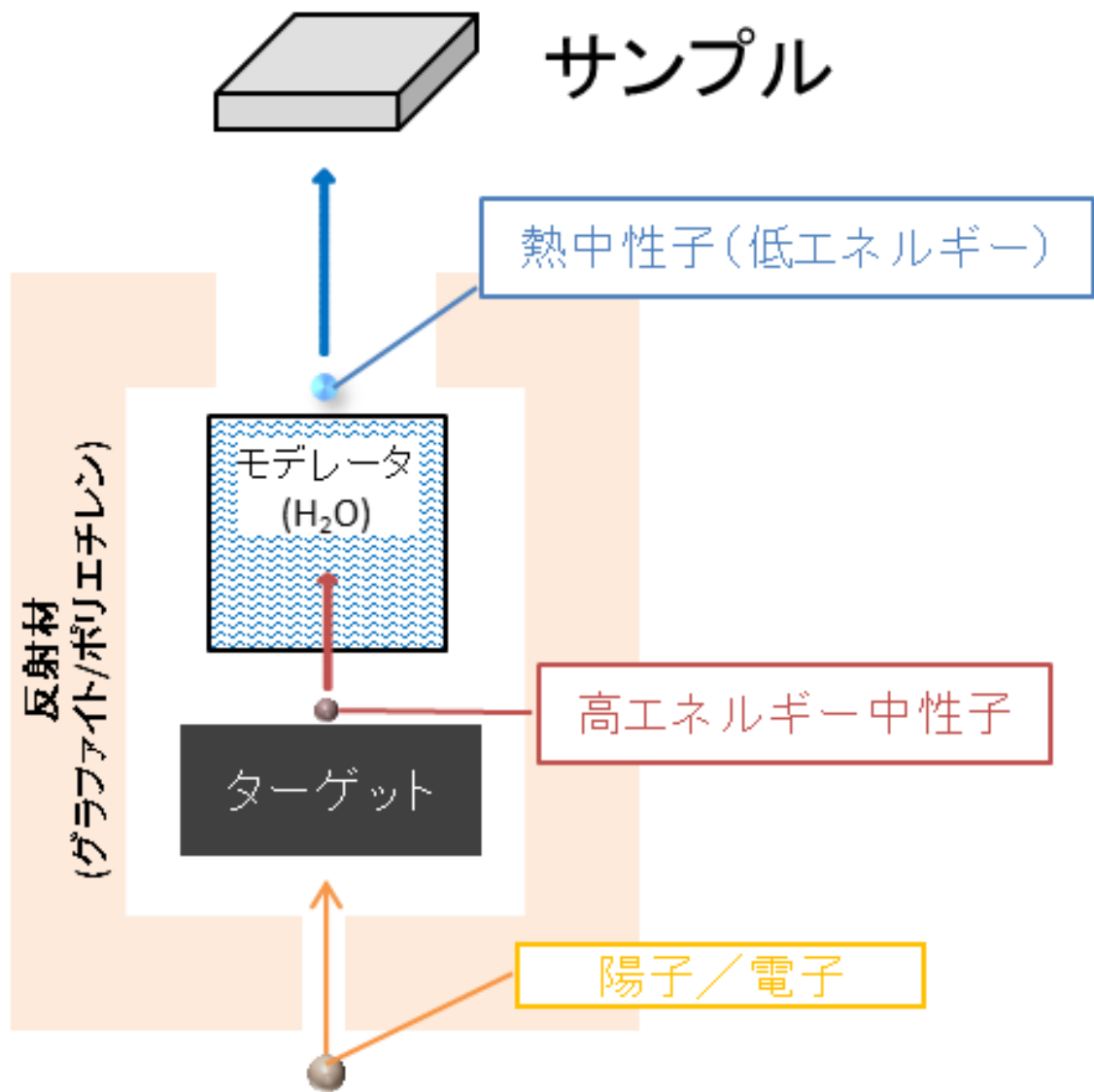


図 7.2 熱中性子用ターゲット組立構成

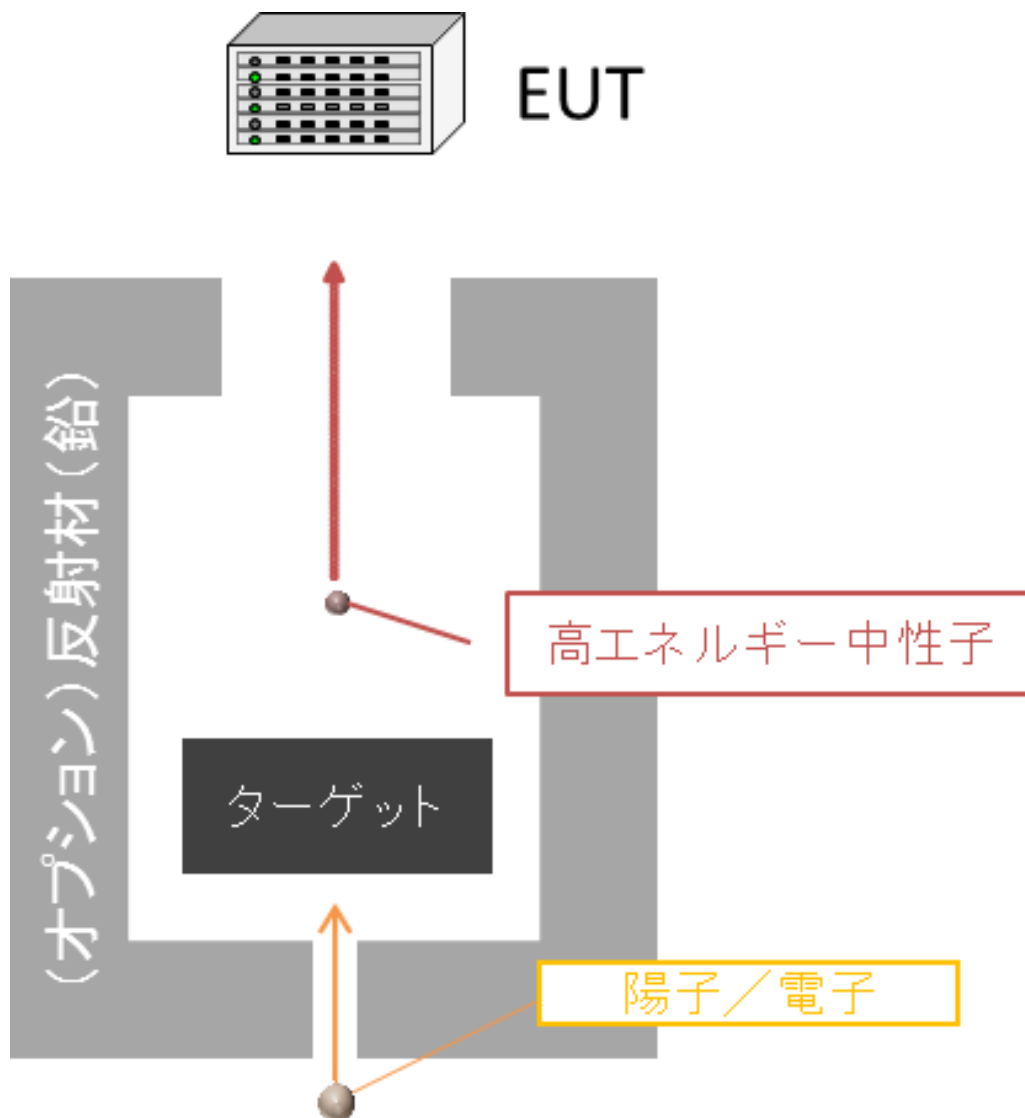


図 7.3 高エネルギー中性子用ターゲット組立構成

7.3 加速器中性子源への要求事項

ソフトウェアは、高エネルギー中性子と半導体中のシリコン原子核との核反応によって発生する。自然環境におけるシリコン安定同位体の組成比は ^{28}Si が 92.23%、 ^{29}Si が 4.67%、 ^{30}Si が 3.1% である。各シリコン同位体と中性子との核反応とその閾値エネルギー（核反応を発生させるのに必要な最小エネルギー）を表 7.1 に示す。 ^{28}Si が組成の大半を占めているため、ある程度のソフトウェアを発生させるためには約 4MeV 以上のエネルギーが必要である。

自然界の中性子は、銀河から飛来する超高エネルギー粒子によって生成されるため、数 TeV までにも及ぶ超高エネルギー中性子が含まれる。そのため、自然界のエラー率を高精度に再現するためには、高エネルギー中性子を発生させることが可能な非常に大規模な加速器が必要となる。しかし、このような加速器施設は数や利用時間が限られかつ照射範囲やビーム強度の可変範囲が狭い。一方で、地上のキャリアサイトに設置される通信装置からみれば 4~10MeV の中性子によるソフトウェアもそれ以上の高エネルギー中性子によるソフトウェアもほぼ同等の事象（メモリのビット反転）として観測される。なお、非常に低い確率で高エネルギー中性子により永久故障となる事象もあるが、通信装置としては非常にまれな特異事象であるため、そのような故障は中性子照射試験の対象から除外する。

以上の理由から、通信システムの中性子照射試験においては自然界のエラー率を十分な精度で再現させることができ、ソフトウェア対策の妥当性の確認やソフトウェア信頼度基準への適合性評価が可能な、4～10MeV程度の中性子エネルギーを発生させることができる比較的小型の加速器施設の利用を推奨する。中性子照射試験に用いる加速器施設を選定するにあたっては加速器施設が公開している中性子エネルギースペクトルを入手するか、加速器中性子源の構成から中性子エネルギースペクトルを算出し、ソフトウェアを発生させるのに十分なエネルギーの中性子の照射が可能なことを確認する。図 7.4 に加速器施設の中性子エネルギースペクトルを示す。

表 7.1 シリコン (Si) - 中性子反応とその反応の閾値エネルギー

Si - 中性子反応	閾値エネルギー
$^{28}\text{Si} + n \rightarrow ^{28}\text{Al} + p$	3.999[MeV]
$^{28}\text{Si} + n \rightarrow ^{25}\text{Mg} + \alpha$	2.749[MeV]
$^{29}\text{Si} + n \rightarrow ^{29}\text{Al} + p$	3.009[MeV]
$^{29}\text{Si} + n \rightarrow ^{26}\text{Mg} + \alpha$	35[KeV]
$^{30}\text{Si} + n \rightarrow ^{30}\text{Al} + p$	8.040[MeV]
$^{30}\text{Si} + n \rightarrow ^{27}\text{Mg} + \alpha$	4.341[MeV]

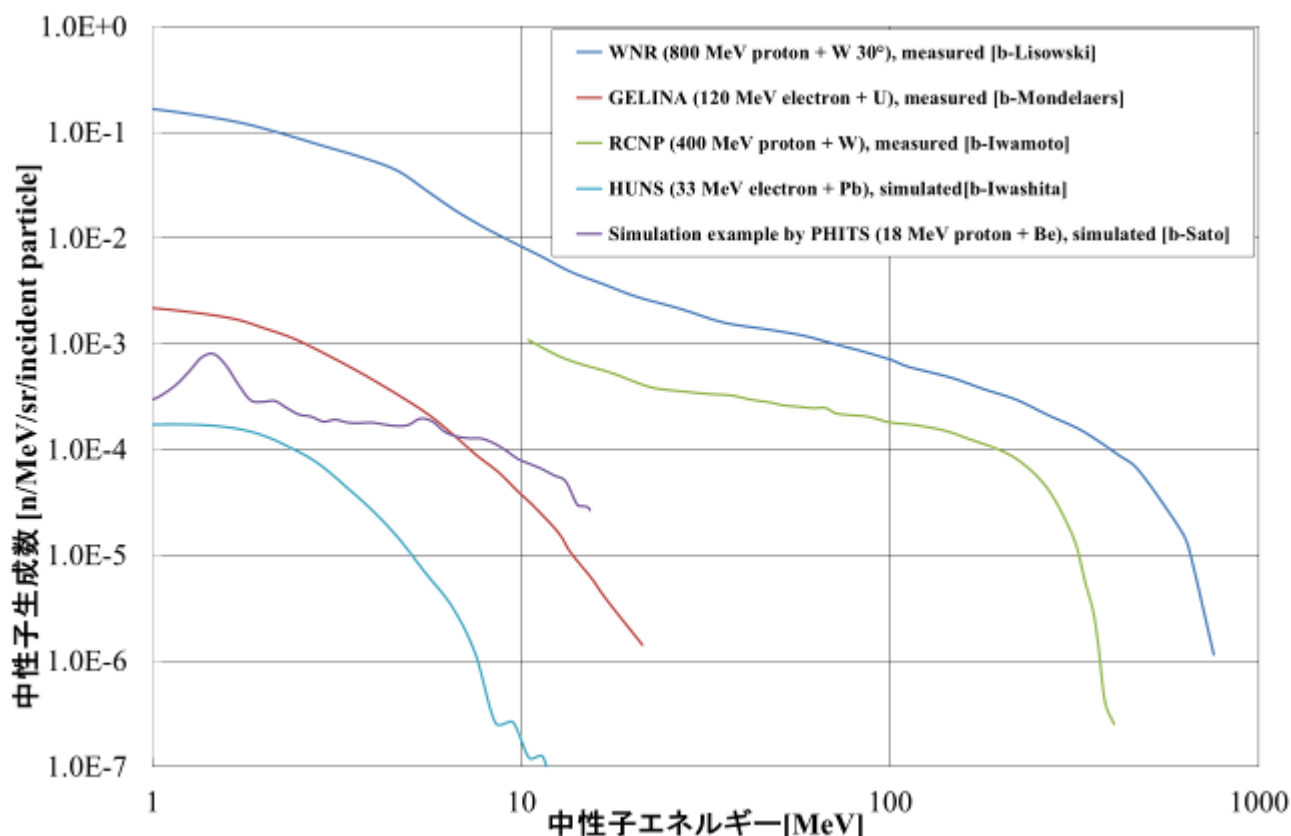


図 7.4 加速器施設の中性子エネルギースペクトル

7.4 不要な照射の除去

中性子照射試験ではソフトウェアの主因である高エネルギー中性子のみを照射し、熱中性子や永久故障に引き起こす可能性のあるγ線の不要な照射は遮蔽によって除去する必要がある。また、試験実現性向上の観点

から中性子照射エリアは中性子照射室の放射化を低減するために適切な遮蔽によりターゲット室と分離することが望ましい。

本節では、EUT や照射場外への不要な照射を除去するために要求される遮蔽に関し主要な課題について述べる。

7.4.1 熱中性子の遮蔽

熱中性子の照射を減じるために、図 7.5 に示すように熱中性子は効率よく遮蔽するが高エネルギー中性子には影響が少ないカドミウムもしくはホウ素の遮蔽材を用い、熱中性子が EUT に照射されないように遮蔽を施す。

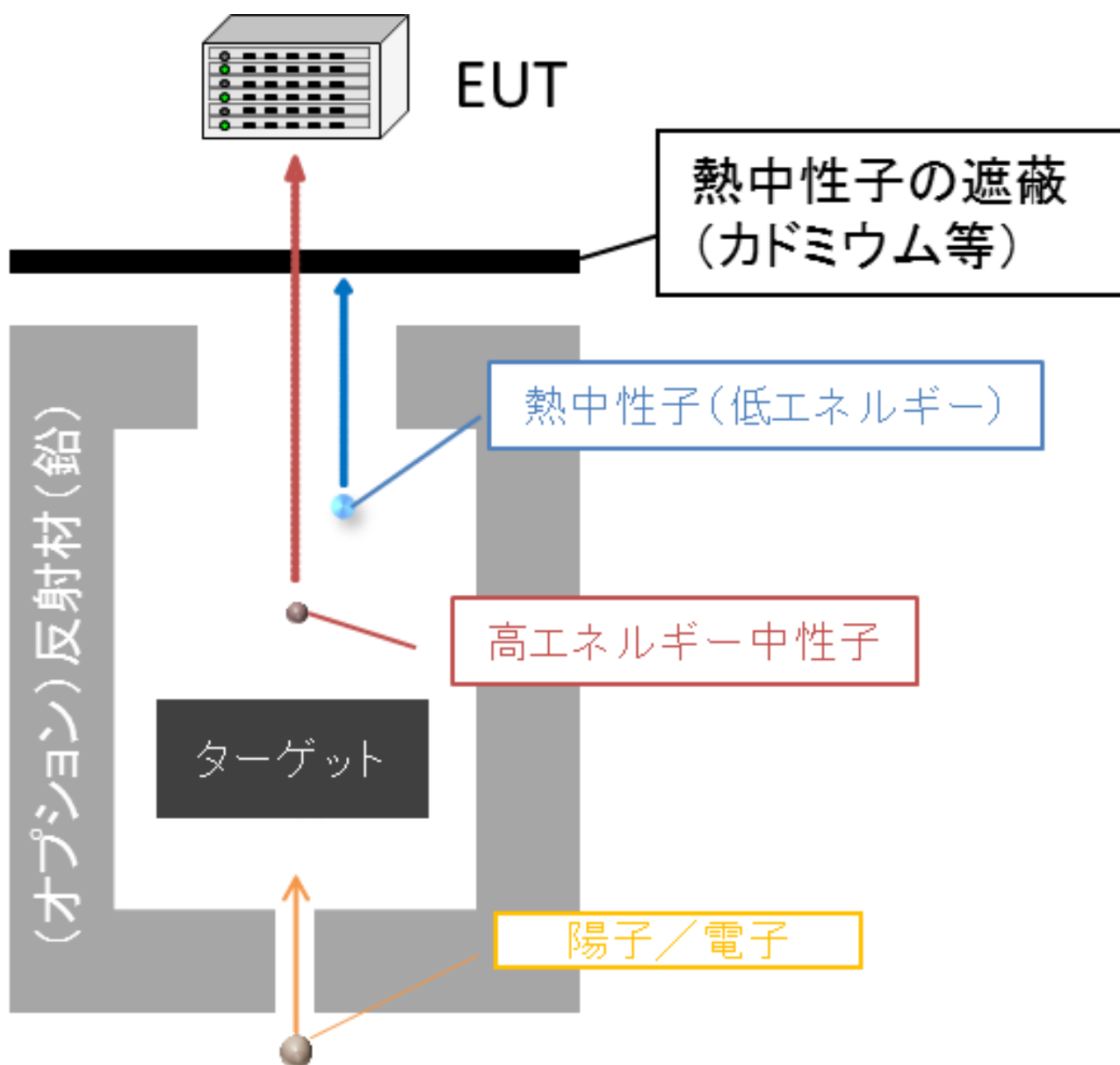


図 7.5 熱中性子の遮蔽

7.4.2 γ 線の遮蔽

電子加速器で中性子を発生させる場合は、ターゲットから大量の γ 線が発生する(10Gy 以上[b-Eid])。 γ 線は半導体を物理的に破壊するため、 γ 線を遮蔽し、高エネルギー中性子を透過しやすい鉛ブロックを設置する。陽子加速器を使用する場合は、 γ 線はほとんど発生しないので γ 線遮蔽は不要である。

7.4.3 ターゲット室と中性子照射室の分離

ターゲットへの陽子や電子の照射を停止した後も、ターゲットや周囲の構造物および空気が放射化しているため、直ぐに近づくことができない。一方、通信装置の中性子照射試験の際は遠隔で確認できない故障状況を確認したり、装置を手動でリセットしたり、パッケージの入れ替えを行うため等で中性子照射室に立ち入る必要が頻繁に発生することがある。

このため、ターゲット室と中性子照射室は分離して適切な遮蔽がされていることが望ましい。中性子照射室を分離できない場合には、EUT 以外への中性子数が少なくなるようにターゲットの周囲に適切な遮へい材を設置することが望ましい。

7.5 複数 EUT への中性子同時照射

試験効率化のため、通信装置複数台同時に照射できることが望ましい。図 7.6 に示すように 1 つのターゲットから放出された複数の中性子ビームの前に複数台置くことで同時に試験することができる。

中性子ビームラインは 3 ライン以上あることが望ましい。また、複数ビームラインがある場合は、各ビームラインを独立で制御できることが望ましい。独立で制御する方法として、ビームラインにシャッターを設置する方法、または遠隔制御のリフトを用いて EUT を上下させる方法がある。EUT をリフトに搭載して試験する場合は、リフトの昇降精度を確認する必要がある。

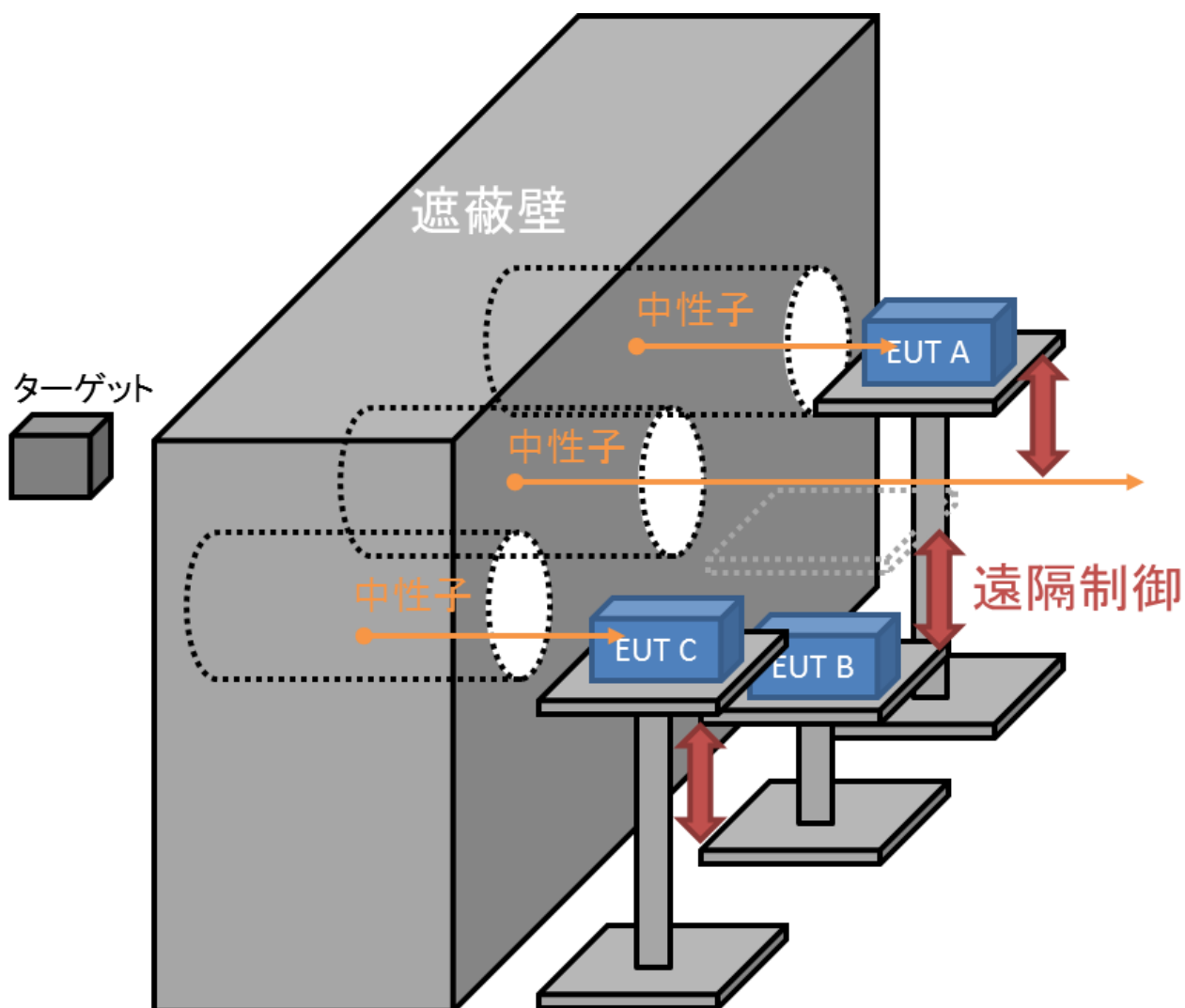


図 7.6 遠隔制御リフトを用いた複数 EUT への同時照射例

7.6 照射範囲

照射範囲が狭い場合、EUT への照射位置を変えて照射が必要な範囲をスキャンする必要があり試験時間が長くなる。このため、照射範囲は EUT 全体をカバーしていることが望ましい。つまり、EUT 内の半導体デバイス全てに同時に中性子ビームを照射し、ソフトエラーを発生させることで試験の効率化を図ることができる。

通常の通信装置は 19 インチラックに搭載可能なように設計されていることや最近のユニットの高さを考慮すると、照射範囲は横幅および高さが 45cm 程度以上であることが望ましい。

7.7 中性子束均一化

中性子はターゲットから等方的に放出されるため、距離の二乗に反比例して中性子束が減衰する。図 7.7 にターゲットからの距離と中性子束の関係を示す(中性子束はターゲットから 1m の位置での値で正規化している)。ターゲットから近い方がフラックスを大きくできるが、距離による減衰も大きく、例えば離隔 1m から 20cm 離隔が大きくなっただけで 30% フラックスが減少する。

EUT の奥行きを 30cm 程度とし、減衰による装置内のフラックスの誤差を 20% 以下とするためには、EUT の位置はターゲットから 3m 以上離れていることを推奨する。EUT の位置を 3m 以上離せない場合は、EUT 内での中性子束の違いが大きすぎるので、EUT 内の各デバイスの位置の中性子束を注意深く計算して、信頼性見積もりへの補正が必要である。

中性子束は EUT 筐体内の場所によって違いが生じるため、信頼性評価のために使用する中性子束の決定方法とその特徴を表 7.2 に示す。方法 1 では、筐体の中で最も小さい中性子束の値で信頼性を評価する。通常は EUT 筐体内でターゲットから最も遠い半導体部品に照射される中性子束が最低値となる。中性子によりソフトエラーを発生しない部品が明確にわかっている場合には、最低の中性子束の値を決める場合にその部品のところは無視できる。

方法 2 または方法 3 を適用すると、方法 1 よりも信頼性を正確に評価でき、自然環境に近い現実的な値を得ることができる。適用した評価方法を試験成績書に記載する。

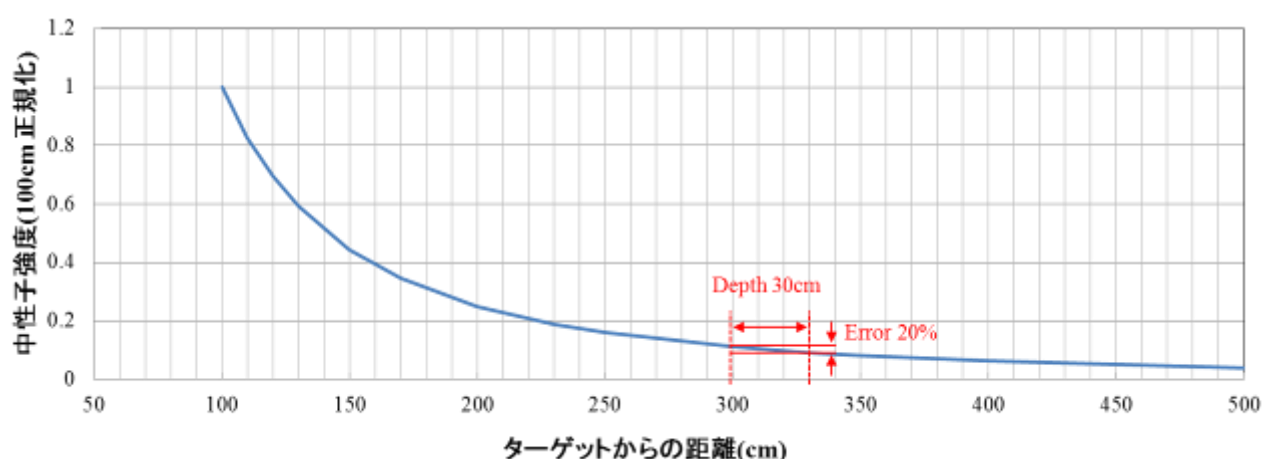


図 7.7 ターゲットからの距離に対する中性子強度

表 7.2 EUT 内の中性子束の違いを考慮した試験方法

種別	評価方法	特徴
方法 1	EUT 筐体内の部品位置で最低の中性子束を用いて評価する。	安全側の評価となる。耐力に余裕がない装置では、試験に合格しない場合もある。
方法 2	デバイス毎に照射位置の中性子束とそのデバイ	最も正確な評価が可能であるが、どのデバイ

	スに起因する故障数を用いて評価する。	スでのエラーが故障の原因になったかを明確にする必要がある。このため、評価手順が複雑になるとともに、故障分析と信頼性評価に時間を要する。
方法3	前面からの中性子照射時間と後面からの照射時間が同じになるように、EUTの前面後面をひっくり返して試験を実施し、筐体内の中性子束の中間値を用いて信頼性を評価する。	計算が簡単で、方法1よりも正確な評価が可能である。また、AR評価が最短時間で可能である。

7.8 その他の注意点

(1)EUTの電源

通信装置を動作させるため、中性子照射室には電源が必要となる。通信装置を動作させるのに十分な電源容量を保有することが必要である。

例えば、近年の高性能通信装置は中性子照射室に 8000W 以上の電力が必要である。さらに、測定機や制御端末用の電源として、加速器制御室に 1500W 程度の電力が必要である。

(2) 中性子照射室の床スペース

EUT を中性子照射室の照射位置に設置するため、中性子照射室にはラック等を設置できるスペースが必要となる。また、DC 電源装置や対向装置 (AE) を置くスペースとして 80cm×80cm 程度必要である。

8. 試験系

8.1 試験系の概要

試験系は EUT、EUT の監視制御用端末、AE で構成される。

EUT はすべての機能を網羅的に確認するために搭載可能なすべてのパッケージを搭載した状態で中性子照射室に設置される。EUT の監視制御用端末は加速器制御室から EUT に接続し、通常の運用で使用される全ての機能が行える必要がある。AE には EUT に通常接続される装置、クライアント信号を発生させ信号の正常性を確認する信号測定器や運用環境を再現するための機器を設置する。AE は試験の対象外であることから中性子照射室の外に設置されることが望ましいがケーブルや電源の制限で中性子照射室内に設置する場合はコンクリートブロック等で中性子を遮蔽することが必要である。

8.2 構成

この試験の目的は EUT の典型的な構成と使用方法に従って、EUT の信頼性を評価するものである。EUT 全体の試験時間を短縮するために、EUT の性能に重大な影響を及ぼさなければ、典型的な構成から変更しても良い。

EUT にはすべての機能を網羅的に確認できるように全種類のパッケージを搭載することが望ましい。パッケージ搭載数は運用状態に依存する。しかし、パッケージの種類が多く、全ての種類のパッケージを一度に搭載できない場合には、一部ずつ搭載することも可能である。この場合、搭載するパッケージを変更して複数回試験を行い全てのパッケージの試験を行う。また、物理サイズが大きい、もしくは照射範囲が狭くパッケージ全体に一度に照射できない場合には、EUT の一部ずつ照射することも可能である。この場合には、中性子ビームを照射する場所を変えながら、順次試験を行うことで全体を網羅する。

大きなシステム(複数のユニットで構成されるシステム等)では照射しないユニットやパッケージは中性子照射室にいたまま試験しても良いし、照射しない部分を加速器制御室に置いて試験することもできる。これらの方法の選択は、分離した装置間のインターフェースの信号送受が中性子照射室と加速器制御室の間で正

常に行えるかどうかで判断する。

EUT がシステムの一部であったり、AE に接続できる場合には、ソフトウェアに関する全ての種類の信頼性基準への適合性を試験するために必要なシステムや AE を接続する。

各パッケージの搭載数や中性子照射室と加速器制御室を含めた EUT の構成や AE の種類や数は、エラー状態が伝搬して影響が広がる範囲や運用条件を考慮して構成する。

8.3 制御端末

中性子照射試験における制御端末は、EUT からのすべての警報や通知の受信、試験中の EUT 状態の確認、制御機能の実行、遠隔からの故障復旧機能等の通常運用時に使われるすべての機能があることが必要である。これらの機能はソフトウェア試験の対象となるので、可能な限り実運用時の動作から変化が無いようにする必要があるのである。

8.4 EUT の位置決め

EUT は支持台やラックに搭載して、EUT の目的の場所に所用の中性子束が照射されるように位置を調節する。EUT を搭載するラックは中性子が遮蔽・反射されないような材質を選定する。また、EUT 周辺を覆う壁や扉がないことが望ましい。

8.5 制御端末と AE の設置

AE や制御端末はソフトウェア試験の対象ではなく、正常動作が保証されている必要がある。そのため、加速器制御室に設置することを推奨する。加速器制御室に設置することが困難な場合は、中性子線から遠く離れた位置とする、コンクリートブロックで遮蔽するなどして、中性子束が十分弱くそれらの機器が誤動作しない場所に置くことが望ましい。

8.6 信号測定装置

照射試験中の動作正常性を確認するため、伝送信号試験器のような測定器によりクライアント信号の正常性確認が必要である。また、信頼性が信号ポートに依存する可能性があることから、搭載されている全ポートのクライアント信号を測定することが必要である。

9. EUT 動作と試験手順

9.1 EUT 動作

通信装置の機能に合わせて、クライアント信号導通および制御・運用機能の観点から下記の要件を満たす必要がある。

クライアント信号導通の観点

- 入力トラフィックは試験系で構築可能な最大負荷
- 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
- データパターンは疑似ランダムパターンを推奨
- パケットロス、パケットエラー、ビットエラー等のクライアント信号エラー状態の監視が可能
- EUT からの全ての通知(警報、ワーニング、イベント等)を常に監視が可能

制御・運用機能の観点(装置に実装されている機能への要求)

- 冗長化構成部の切替制御の実施
- 試験機能を実施（パス導通試験、ループバック試験等）
- CPUリセットとパッケージリセットによる起動、（立ち上げ）機能の実施
- ファームウェア更新の実施（上記起動（立ち上げ）機能により、ソフトウェア耐力の観点からは確認可能と判断できる場合は実施しなくてもよい）

ソフトウェア試験ではサービス信頼度（SR）、保守信頼度（MR）、警報機能信頼度（AR）の全ての信頼度評価のためのデータを漏れなく取得する必要がある。試験時間を短縮するための測定方法の組み合わせは、EUTの正常動作と信頼度評価に影響を与えない限り適用可能である。

9.2 試験手順

中性子照射試験手順を下記に示す。また、ソフトウェア試験のフローチャートを図9.1(a)(b)に示す。

1. 制御端末をEUTに接続し、EUT状態やEUTからの通知を監視可能にする。
2. EUTにクライアント信号を通し、クライアント信号の導通を監視可能にする。
3. EUTの状態、EUTからの通知、クライアント信号の監視を開始する。中性子ビームを発生し、中性子発生時刻を記録する。

異常（警報やクライアント信号エラー検出等）が発生した場合、発生した事象が自律復旧出来るかどうかで以降の手順が異なる。

a. 自律復旧が出来る場合

4a-1 ソフトエラーが発生した部位、クライアント信号断時間、回復方法、EUTからの通知メッセージおよびAEで検出したエラーを記録する。(注1)(注2)

4b. 自律復旧が出来ない場合

4b-1. 中性子ビームの照射を止め、ビームを止めた時刻を記録する。

4b-2. ソフトエラーが発生した部位、クライアント信号断時間、EUTからの通知メッセージおよびAEで検出したエラー内容を記録する。(注3)

4b-3. 遠隔リセット、装置再立ち上げ等を行い、EUTを正常な状態に回復し、回復方法を記録する。

4b-4. 中性子ビームを発生し、中性子発生時刻を記録する。

中性子ビームの累計照射時間がARの信頼度基準への適合性の確認に必要な照射時間の25%、50%、75%、100%になるまで、手順4を繰り返す。

5. 中性子ビームを止め、ビームを止めた時刻を記録する。
6. 中性子ビームを停止かつクライアント信号を導通させた状態で、制御・運用機能を実行する。
7. 異常（故障検出、クライアント信号エラー、制御失敗等の検出）が発生した場合、ソフトウェアが発生した部位、クライアント信号断時間、回復方法、EUTからの通知メッセージおよびAEで検出したエラーを記録する。(注3)
8. 9.1節で定義した全ての制御・運用機能を確認するまで手順7を繰り返す。

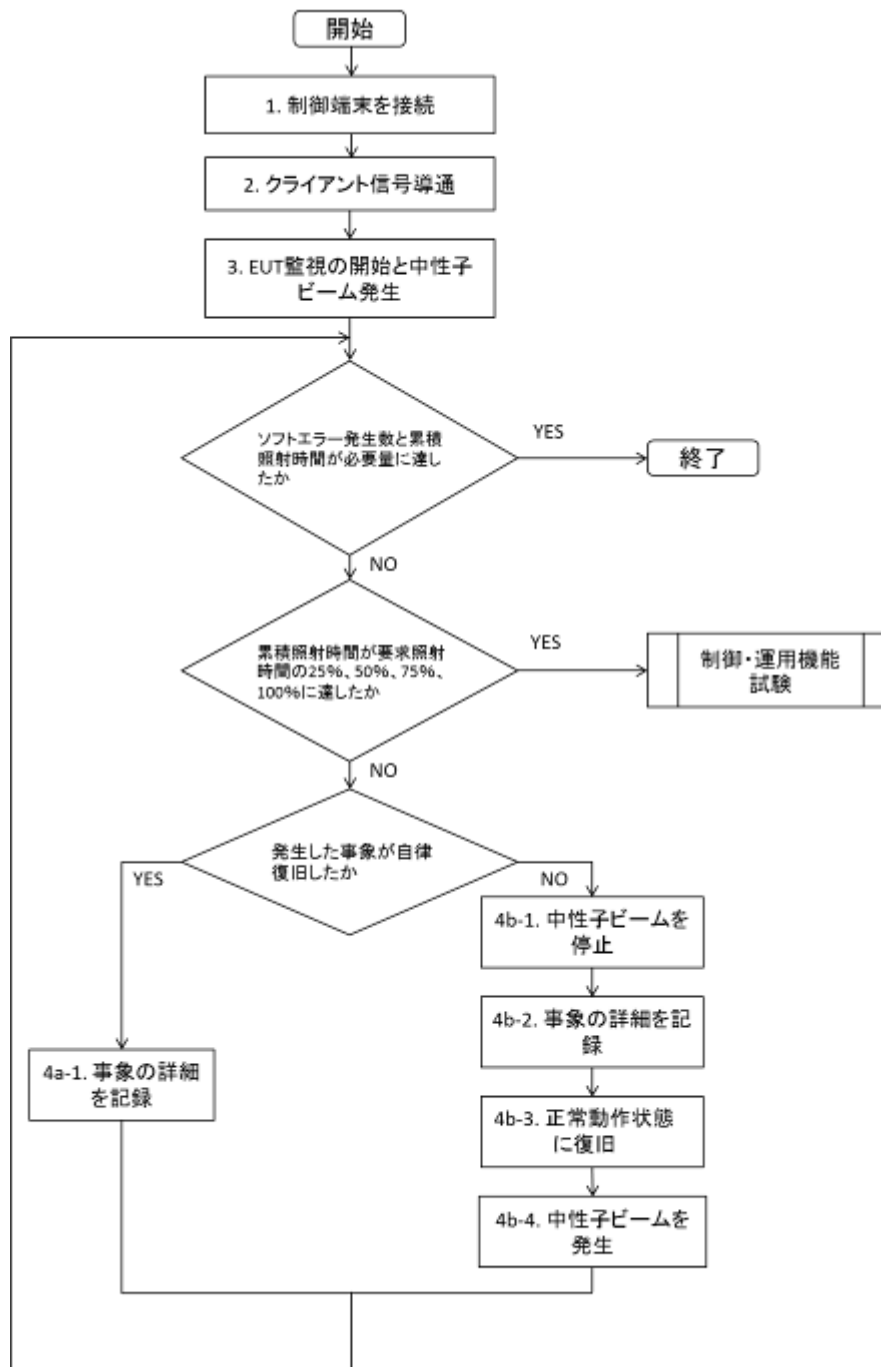
全ての機能を確認したら、手順3に戻り累計照射時間がARの信頼度規定への適合性の確認に必要な総照射時間となるまで手順3-8を繰り返す。

(注1) 試験目的が自律復旧を含めたソフトウェア対策設計の妥当性の確認もしくは詳細なソフトウェア事象の解析の場合、ビームを停止し、装置ログを取得する。

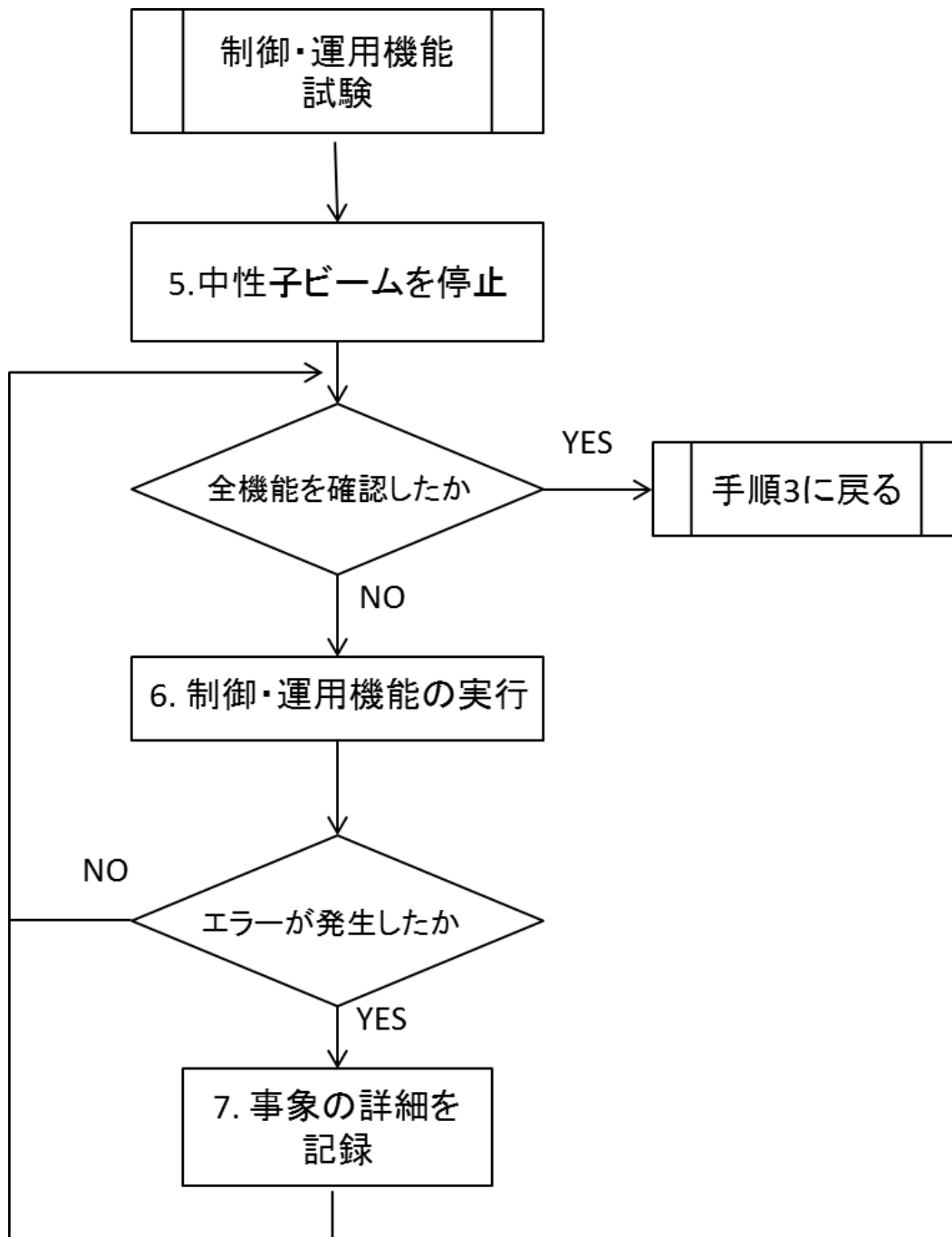
(注2) 中性子ビームの照射を継続した場合、自律復旧中にソフトウェアが再度発生する可能性がある。し

かし、実運用状態では自律復旧中にソフトウェアが発生することは確率的にありえないため、自律復旧中に発生したソフトウェアは試験結果から除外する。また、自律復旧に長時間必要な場合、中性子ビームを止めてもよい。

(注3) 制御・運用機能の試験の目的は各機能を実施した際にソフトウェアが顕在化し異常が発生することがないかを確認することである。そのため、制御・運用機能の試験は中性子の照射は止めた状態で行う。また、装置全体のリセットを伴う機能を実施すると装置に内在しているソフトウェアが回復するため、該当の機能の確認は最後に行う。



(a)



(b)

図 9.1 中性子照射試験のフローチャート

9.3 試験報告書

信頼度基準（AR/SR/MR）を満足するかどうかの判断のためには、試験報告書には以下の項目を記録する必要がある。

1. EUT の構成
2. 中性子エネルギースペクトル
3. 照射範囲
4. 照射中性子フルエンス（中性子エネルギースペクトル、総電荷量、ターゲットからの距離等から算出）
5. 照射試験中に発生したエラーの詳細（3種類の信頼度基準を評価するための情報）

照射試験中のエラーの詳細は、クライアント信号断時間、回復までの時間、自動的に回復したかどうか、

故障発生時の故障検出と警報の発出、ビーム開始時間、ビーム停止時間等を含む。

また、試験結果を設計に反映するために、装置に蓄積されたログを、装置リセットなどで喪失しないように、適切な時点で取得して適切な場所に保存することを推奨する。

付録 I : 中性子フルエンス計算法

ソフトウェアに対する信頼度基準を評価するためには試験時間中に EUT に照射された中性子フルエンスと中性子フルエンスエネルギースペクトルが必要となる。

ここでは中性子フルエンスエネルギースペクトルの算出方法について述べる。

1. 照射試験中の総照射時間 $T_{\text{irradiation}}$ もしくは総電荷量 Q を入手する。

電流値(単位時間当たりの加速粒子数)が変更できる加速器の場合は、総電荷量を入手する。

電流値が変更できない加速器の場合は総照射時間、もしくは総電荷量を入手する。

2. 照射位置での加速器の中性子束エネルギースペクトル(Neutron flux energy spectrum) $\Phi_A(E_n)$ を入手。

中性子束エネルギースペクトルは単位時間や単位電流、加速粒子当たり単位面積を通過する各エネルギーの中性子数を表す。

電流値(単位時間当たりの加速粒子数)が変更できる加速器の場合は、単位電流、もしくは加速粒子当たりの中性子束エネルギースペクトルを入手する。

電流値が変更できない加速器の場合は、単位時間、単位電流、加速粒子当たりのいずれかの中性子束エネルギースペクトルを入手する。

3. 1, 2 で入手した情報から中性子フルエンス H を以下の式で算出する。

a. 総電荷量と単位電流当たりの中性子束エネルギースペクトルから算出する場合

$$H(E_n) = \frac{Q}{A} \times \Phi_A(E_n) \quad A: \text{unit current value}$$

b. 総電荷量と加速粒子当たりの中性子束エネルギースペクトルから算出する場合

$$H(E_n) = \frac{Q}{q} \times \Phi_A(E_n) \quad q: \text{elementary charge } 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

3. 総照射時間と単位時間当たりの中性子束エネルギースペクトルから算出する場合

$$H(E_n) = T_{\text{irradiation}} \times \Phi_A(E_n)$$

参考文献

- [b-Eid] Eid, E.-S., *et al.* (2001), Design and characterization of ionizing radiation-tolerant CMOS APS image sensors up to 30 Mrd (Si) total dose. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 48.6: 1796-1806.
- [b-Iwamoto] Iwamoto, Yosuke, *et al.* (2011), Evaluation of the white neutron beam spectrum for single-event effects testing at the RCNP cyclotron facility. *Nuclear Technology*, 173.2: 210-217.
- [b-Iwashita] Iwashita, Hidenori, *et al.* (2017), Accelerated Tests of Soft Errors in Network Systems Using a Compact Accelerator-Driven Neutron Source. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 64.1: 689-696.
- [b-Lisowski] P. Lisowski *et al.* (1990), The Los Alamos National Laboratory Spallation Neutron Sources *Nucl. Sci. Eng.* v. 106, p. 208.
- [b-Mondelaers] Mondelaers, W., and P. Schillebeeckx (2006), GELINA, a neutron time-of-flight facility for high-resolution neutron data measurements. *Notiziario neutroni e luce di sincrotrone* 11.2: 19-25.
- [b-Sato] Sato, Tatsuhiko, *et al.* (2013), Particle and heavy ion transport code system, PHITS, version 2.52. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 50.9: 913-923.