

限定なし

JERG-2-143



耐放射線設計標準

平成20年 9月 3日 制定

宇宙航空研究開発機構

免責条項

ここに含まれる情報は、一般的な情報提供のみを目的としています。JAXA は、かかる情報の正確性、有用性又は適時性を含め、明示又は黙示に何ら保証するものではありません。また、JAXA は、かかる情報の利用に関連する損害について、何ら責任を負いません。

Disclaimer

The information contained herein is for general informational purposes only. JAXA makes no warranty, express or implied, including as to the accuracy, usefulness or timeliness of any information herein. JAXA will not be liable for any losses relating to the use of the information.

発行

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

宇宙航空研究開発機構 安全・信頼性推進部

JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency)

目次

第1章 総則.....	1
1.1 目的.....	1
1.2 適用範囲.....	1
1.3 関連文書.....	1
1.3.1 適用文書.....	1
1.3.2 関連文書.....	1
1.4 用語の定義.....	1
1.4.1 用語の定義.....	1
1.4.2 略語.....	3
1.4.3 単位系.....	4
第2章 標準.....	5
2.1 耐放射線設計の概要.....	5
2.1.1 設計手順.....	5
2.1.2 設計評価の項目.....	7
2.1.3 宇宙放射線以外の影響.....	10
2.2 宇宙放射線環境.....	10
2.2.1 宇宙放射線環境モデル.....	10
2.3 トータルドーズ設計標準.....	11
2.3.1 トータルドーズ予測方法.....	11
2.3.2 トータルドーズ予測モデル.....	12
2.3.3 電子部品の放射線劣化.....	18
2.3.4 材料の放射線劣化.....	21
2.3.5 設計手順.....	25
2.4 太陽電池パネルに対する耐放射線性設計標準.....	28
2.4.1 太陽電池セルの放射線劣化予測法.....	28
2.4.2 太陽電池セルの耐放射線性設計（セル選定）.....	31
2.4.3 放射線遮蔽（パネル構造）.....	32
2.4.4 その他の劣化要因.....	33
2.5 シングルイベント設計標準.....	34

2.5.1	シングルイベント現象の概要.....	34
2.5.2	設計手順	35
2.5.3	シングルイベント発生確率の予測方法	35
2.5.4	電子部品のシングルイベント対策	36
2.5.5	機器としてのシングルイベント対策.....	37
2.6	半導体デバイスの変位損傷に対する設計標準.....	40
2.6.1	概要.....	40
2.6.2	変位損傷の予測手法.....	40
2.6.3	各デバイスの変位損傷に対する耐性.....	42
2.7	宇宙放射線以外の影響	45
2.7.1	原子状酸素への対策.....	45
2.7.2	紫外線への対策.....	46

第1章 総則

1.1 目的

この耐放射線設計標準は、(独)宇宙航空研究機構(以下JAXAと呼ぶ)が開発する宇宙機等の耐放射線設計の基本的な設計要求事項を規定するものである。

1.2 適用範囲

この耐放射線設計標準の規定する範囲は、軌道上で受ける放射線の影響によりデバイス及び材料の劣化又は一時的な誤動作を引き起こすことに対する設計の基本的な条件を示すものであり、宇宙放射線環境、放射線が部品及び材料に及ぼす影響、並びに耐放射線設計手順及び対策について規定する。

1.3 関連文書

1.3.1 適用文書

- (1) ISO15390 Space environment (natural and artificial) - Galactic cosmic ray model
- (2) crème-MC Cosmic Ray Effects on Microelectronics MC
<https://creme.isde.vanderbilt.edu/>
- (3) JERG-2-141 宇宙環境標準

1.3.2 関連文書

- (1) JERG-2-143-HB001 耐放射線設計ハンドブック

1.4 用語の定義

1.4.1 用語の定義

この設計標準で使用する用語の定義を以下に示す。

- (1) 捕捉放射線 (Trapped Radiation Particles)

地磁気に捉われている荷電粒子の総称

- (2) 銀河宇宙線 (Galactic Cosmic Ray)

宇宙空間から飛来する高エネルギーの素粒子で、地球表面に向かってあらゆる方向から飛来する。多くは陽子であるが、それより重い原子核も混入している。

- (3) フラックス (Flux)

任意の点の放射線の強度をフラックス（線束）又は粒子束という。微小平面 $dS(\text{cm}^2)$ を単位面積当たり単位時間に通過するフラックスを平面粒子束という。断面積 dS を持つ球の表面を単位時間当たりに横切る粒子束を球面粒子束という。積分Fluxの単位は、 $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ で表わされる。エネルギー微分Fluxの単位は、 $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{MeV}^{-1}$ で表わされる。方向を含める場合 sr^{-1} (steradian)を追加する。

(4) フルエンス（Fluence）

フラックスの時間積分。宇宙機運用期間の環境を表す場合に使用する。積分フルエンス単位は、 m^{-2} で表わされる。エネルギー積分フルエンス単位は、 $\text{m}^{-2}\text{MeV}^{-1}$ で表わされる。方向を含める場合 sr^{-1} (steradian)を追加する。

(5) 吸収線量（Absorbed Dose）

電離性放射線によって、物質の適当に小さな体積要素に付与されたエネルギーを、その体積要素の質量で割ったもの。通常グレイ（Gray）又はラド（rad）で表す。

(6) 線量（Dose）

放射線の量や吸収エネルギーを表す慣用的用語。吸収線量、照射線量など種々の意味に使われている。

(7) トータルドーズ（Total Dose）

素子又は材料が特定の時点まで受けた吸収線量の総和。

(8) ラド（rad）

吸収線量の単位で、1 rad は $100 \text{ erg/g} = 10^{-2} \text{ J/kg}$ に等しい。

(9) グレイ（Gray：Gy）

吸収線量のSI単位であって、1 グレイは $1 \text{ J/kg} = 100 \text{ rad}$ に等しい。

(10) シングルイベント現象（Single Event Effect）

単一の高エネルギー粒子の効果により、回路素子の誤動作（ソフトエラー）又は永久的損傷（ラッチアップ）等を及ぼす現象をいう。

(11) 制動放射（Bremsstrahlung）

原子核の作用で荷電粒子が減速されるときに生じる電磁放射。

(12) 太陽フレア（Solar Flare）

太陽表面に起こる爆発現象。高エネルギー粒子の発生を伴う。

(13) スペクトラム（Spectrum）

一般には、波長に分解したものをいうが、ここでは、放射線の粒子束密度をエネルギー

ごとに表したものの。

(14) L 値 (L Value)

地球中心から磁力線が地球磁場の赤道面と交差する点までの距離であり、単位はRE (地球半径) が用いられる。

(15) アニール (Anneal)

放射線により劣化した性能が回復する現象をいう。

(16) 線エネルギー付与 (Linear Energy Transfer)

単位長さまたは単位面密度当りに、荷電粒子が失うエネルギー。MeV/ μm やMeV/(g/cm²) 等で表わされる。LETと呼ぶ。

(17) 地磁気効果 (Geomagnetic Effect)

宇宙線が地球磁場の中に入ると、そのエネルギーと入射方向に応じていろいろな軌道を描き、あるものは地球表面に触れずに再び遠ざかっていく現象。

(18) 線量率 (Dose Rate)

単位時間当りの線量

(19) 重イオン

原子番号の大きなイオン粒子でHe以上を一般に言う。

(20) NIEL (Non-Ionizing Energy Loss)

入射粒子の電離によらない損傷。非イオン化エネルギー損失

(21) DDD (Displacement Damage Dose) 法

米国NRLが開発したNIEL値をパラメータとして太陽電池セルの劣化を予測する手法。

(22) RDC (Relative Damage Coefficient) 法

米国JPLが開発したRDCをパラメータとして太陽電池セルの劣化を予測する手法。

1.4.2 略語

この設計標準で使用する略号は以下の通りとする。

(1) NASA: National Aeronautics and Space Administration

(2) JPL: Jet Propulsion Laboratory

(3) NRL: Naval Research Laboratory

(4) MOS: Metal Oxide Semiconductor

(5) crème-MC: Cosmic Ray Effects on Microelectronics MC

- (6) DDD: Displacement Damage Dose
- (7) RDC: Relative Damage Coefficient
- (8) NIEL: Non-Ionizing Energy Loss
- (9) CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastics
- (10) SEU: Single-Event Upset
- (11) SET: Single-Event Transient
- (12) SEL: Single-Event Latch up
- (13) SEB: Single-Event Burnout
- (14) SEGR: Single-Event Gate Rupture
- (15) MCU: Multiple Cell Upset
- (16) MBU: Multiple Bit Upset
- (17) EDAC: Error Detection And Correction
- (18) CTE: Charge Transfer Efficiency
- (19) CTR: Current Transfer Ratio
- (20) MSM: Metal-Semiconductor-Metal

1.4.3 単 位 系

この設計標準で使用する単位系は以下に示す単位を除き、原則としてJIS Z 8203「国際単位 (SI) 及びその使い方」に規定したSI単位とする。

本設計標準で使用	S I 単位
吸収線量 (ラド : rad)	グレイ : Gy (=100 rad)
エネルギー (電子ボルト : eV)	ジュール : J (=1/1.602×10 ⁻¹⁹ eV)

第2章 標 準

2.1 耐放射線設計の概要

放射線が部品、材料に与える損傷は、入射した全放射線の累積効果によるものと、1個の荷電粒子の入射により発生するものとに大別され、前者をトータルドーズ効果、後者をシングルイベント効果と総称する。これら2つの効果について、設計手順及び設計評価の項目を以下に示す。

2.1.1 設 計 手 順

図2.1-1に耐放射線設計手順を示す。

詳細は、2.2項以降で述べるが、以下に概略を示す。

(1) 宇宙放射線環境

宇宙放射線の種類とその影響を表2.1-1に示す。

トータルドーズ効果はフルエンスの多い捕捉放射線、太陽陽子線の影響が支配的で、シングルイベント効果はLETの大きい重イオン及び高エネルギー陽子（物質原子との核反応により重イオンが生成される。）が対象となる。

(2) 放射線損傷の予測

放射線損傷の予測は、図2.1-1に示すように、与えられた宇宙放射線の環境条件の値が宇宙機内部の質量分布により減衰することを考慮した上で、部品、材料が受ける放射線の量を予測し、実験結果と対比することにより行うこと。

トータルドーズ効果は、放射線が物質に入射し、付与したエネルギー量の総和に比例した損傷を与え、半永久的に特性を劣化させ、ついにはその機能を破壊する現象である。

太陽電池セルの劣化は、トータルドーズ効果の一種であるが、特に半導体の結晶中の変位損傷が問題となるので、放射線の量としてトータルドーズではなく、1 MeVの電子に換算した単位面積あたりに入射する個数(等価1MeVフルエンス)を用いるのが一般的である。また、最近では、各エネルギーの電子、陽子とNIEL値を用いて変位損傷を引き起こす能力に変換する、変位損傷線量（DDD）を用いる方法も確立されている。

また、シングルイベント効果は、その発生が重イオンのLETに依存するため、放射線環境をLETの関数として求めておくことが必要となる。また、デバイス及び軌道によってはエネルギーを関数とした陽子のフルエンスが必要になる。光半導体デバイスやバイポーラデバイスは、陽子に起因する変位損傷によって劣化するので、NIEL値を用いた劣化予測を行う。

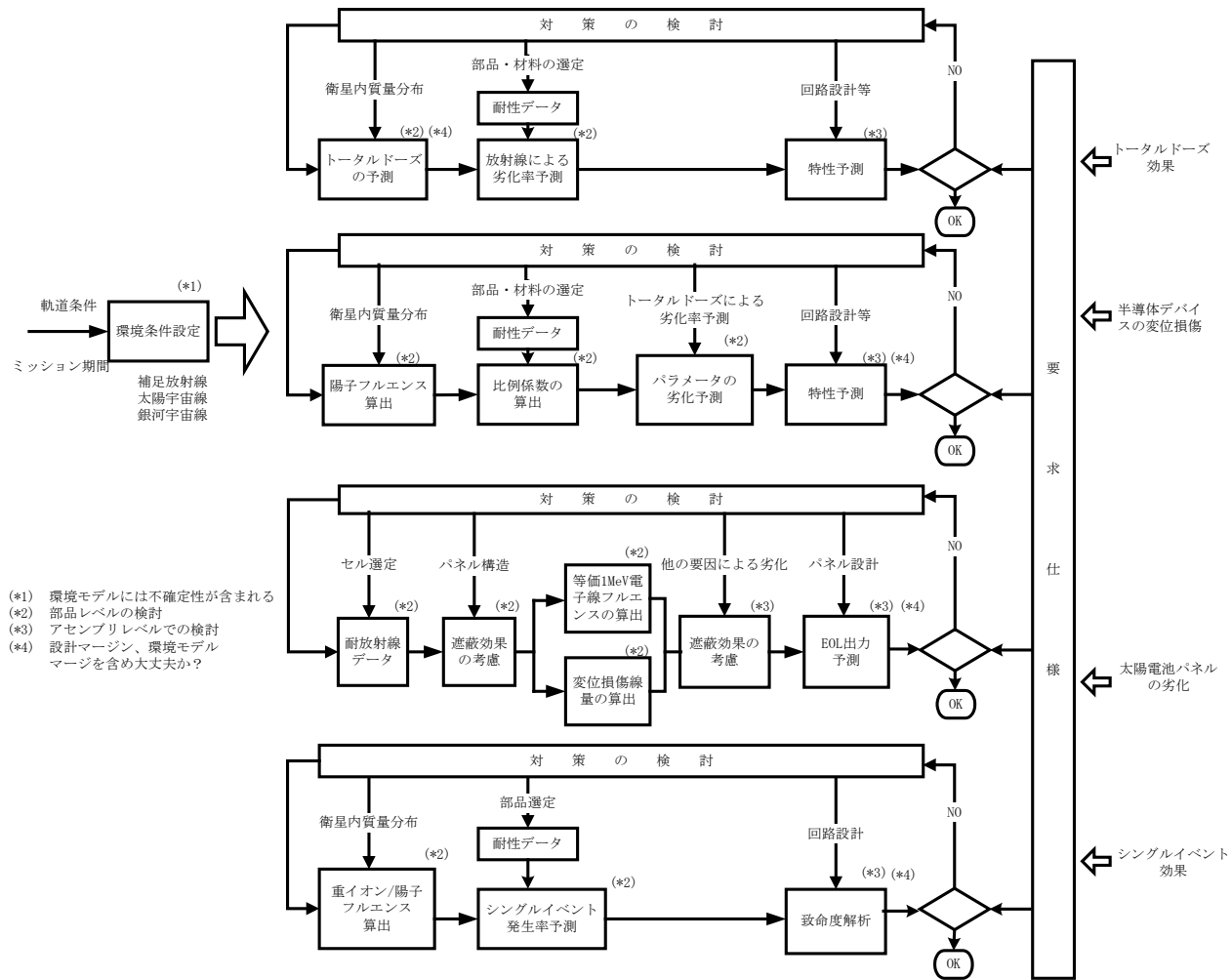


図 2. 1-1 耐放射線設計

(3) 放射線対策

放射線の影響により、特性値が許容範囲を超えると予測される場合には対策が必要となる。この放射線対策には、次の3通りの方法がある。

- ・ 放射線シールドを付加し、宇宙放射線を減衰させる。
- ・ 放射線耐性の強い部品、材料に変更する。
- ・ 放射線による劣化を吸収するために回路または構造上のマージンを持たせる。

そしてこれらの対策の中から、他に与えるインパクトを勘案し、最適なものを選び出す。

(4) 耐放射線設計における留意点

放射線損傷の予測にはかなりの不確実性が含まれているのが現実であり、その結果、高精度で議論することは残念ながら出来ない。したがって、設計に織り込むときには適切なマージンを取っておく必要がある。このマージンを定量的に決めることは難しいが、重要な項目については十分に検討、評価し、確実にかつ効率的な耐放射線設計を行わなければならない。

図2.1-1に示されるように、マージンには宇宙放射線環境モデルの不確実性、デバイスの評価の誤差等がある。これらのマージンについての対応を、個々のプロジェクトとして確立し、プロジェクトの設計基準書等に記載すること。

2.1.2 設計評価の項目

(1) 宇宙放射線環境

宇宙放射線の環境条件を設定する際に用いられる環境モデルは、最大の不確定要素があると考えられる。したがって環境モデルの値に対するマージンは宇宙機設計へのインパクトも含め、耐放射線設計上特に重要なものとなる。

(2) トータルドーズの予測

宇宙機には、多くの異なった物質が複雑に組み合わせられて配置されており、その内部でのトータルドーズを正確に求めることは非常に困難である。通常何らかの簡略化が行なわれていることから、誤差を把握しておく必要がある。

(3) 太陽電池セルの劣化率予測

1 MeV電子換算被曝量をパラメータとして劣化率の予測をする場合、放射線環境をこの被曝量に換算するために用いる係数（相対損傷係数及び10MeV陽子/1MeV電子換算係数）については可能な限り実験結果から導出するなど、不整合のないようにすること。また、変位損傷線量をパラメータとして劣化率の予測をする場合、NIEL値は、適用データシートないし技術資料にてこれらのデータが得られる。

(4) シングルイベントの発生確率予測

シングルイベントの発生率は、環境条件に加えデバイスの感応領域の推定精度に不確定性があることを考慮に入れて設計を行うこと。なお、デバイスレベルで要求を満足できない場合には、機器レベルにおいて対策を講じて満足させること。

(5) 半導体デバイス（太陽電池を除く）の変位損傷による劣化

光半導体デバイスやバイポーラデバイスは、陽子による変位損傷で劣化するため、NIEL値を用いた劣化予測を行う。

特に、光半導体デバイスの放射線効果はデバイスの構造や機能により大きく異なり、かつ個体差も大きいので、それらを十分考慮のうえミッション要求に応じ適切に部品の選定及びマージンの選定を行うこと。

(6) 部品、材料の耐放射線性

部品、材料の耐放射線性は、通常地上での放射線照射試験の結果から得られ、宇宙での状況とは異なった条件となっている。そこで下記に示す項目について両者を比較し、条件の差による耐性の変動を予測しておく必要がある。

- ・ 線 種
- ・ 線 量 率
- ・ 動 作 条 件
- ・ 周囲の環境条件
- ・ 対象となる特性

表 2.1-1 宇宙放射線の種類とその影響

宇宙放射線		トータルド ーズ効果	シングルイ ベント効果
線源	粒子		
捕捉放射線	陽子	○	○
	電子	○	×
太陽宇宙線	陽子	○	○
	電子	△	×
	重イオン/He粒子	×	○
銀河宇宙線	陽子	△	△
	電子	×	×
	重イオン/He粒子	×	○

(注1) ○：影響大 △：影響小 ×：影響なし

2.1.3 宇宙放射線以外の影響

宇宙放射線には定義されないものの、熱制御材料等宇宙空間に直接曝露される材料へ入射し、宇宙機の寿命へ影響を与える宇宙環境の因子として、原子状酸素、紫外線がある。これらの影響についても耐放射線設計の手順を参考に評価を行うこと。

2.2 宇宙放射線環境

2.2.1 宇宙放射線環境モデル

宇宙放射線環境モデルは、JERG-2-141 の9章を参照のこと。

(1) 宇宙放射線環境モデルの不確定性に対するマージン

宇宙放射線環境は現在でも研究中であり、モデルには不確定性が含まれている。

なお、マージンは以下のどちらかの方法で加味すること。

- (a) モデルにマージンを加味する。
- (b) モデルにはマージンを加味せずに評価対象のパラメータを算出する。

その結果を、モデル及び他のマージンも含めて総合的に評価する。

2.3 トータルドーズ設計標準

部品・材料の放射線損傷のうち、一つは、トータルドーズ効果と呼ばれるもので、入射した全放射線の累積によって生じる恒久的損傷である。トータルドーズ効果は、電離損傷と変位損傷に分類できる。放射線の物質中でのエネルギー損失は、電離現象によるものが支配的で、物質が放射線の通過によって吸収したエネルギー量（吸収線量）によって特徴付けられる。この吸収線量という概念を用いると、異なった線源に対する放射線損傷を同一の次元で評価できる。変位損傷の影響を受けやすいものとしては光デバイスやCCD素子、太陽電池セルがあり、特に放射線照射による太陽電池セルの出力低下は、このメカニズムが支配的となる。太陽電池セルの劣化予測について、最近各エネルギーの電子、陽子とNIEL値を用いて変位損傷を引き起こす能力に変換する、変位損傷線量（DDD）を用いる方法も確立されている。詳細は太陽電池セルの放射線劣化予測法の項を参照すること。

2.3.1 トータルドーズ予測方法

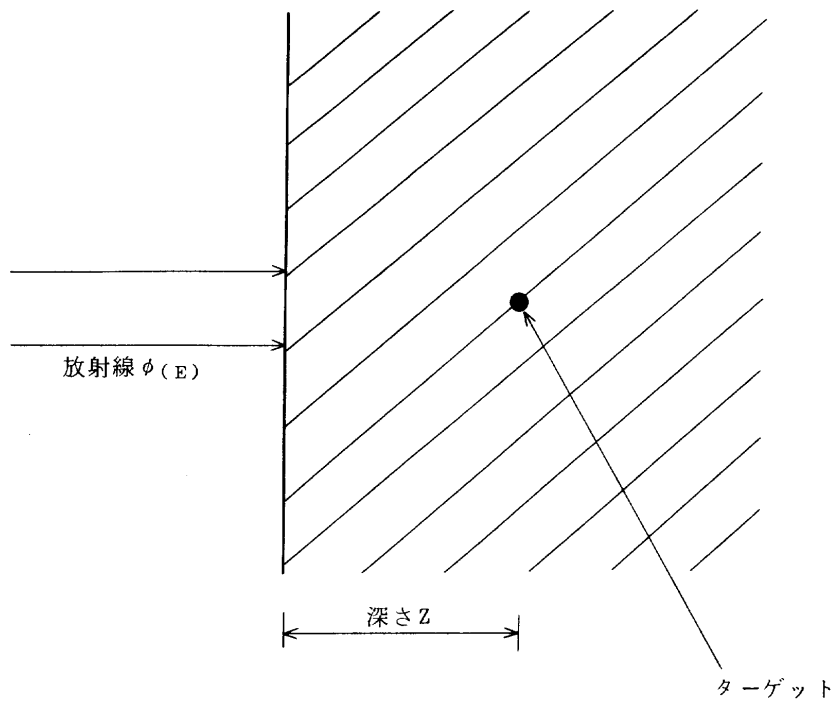
トータルドーズを予測するにあたって考慮しなければならない支配的な放射線は、表2.1-1に示すように捕捉電子、捕捉陽子及び太陽陽子である。これらの放射線が物質内に侵入すると、放射線と物質との相互作用により放射線の持つエネルギーは減衰し、そのエネルギーは、物質内に吸収される。また、電子の場合には、物質との相互作用により制動放射線を発生する。制動放射線は電子に比べ飛程が長いため、遮蔽が厚い場合には支配的となりえる。

トータルドーズの計算は、図2.3-1に示すように、平行入射する放射線に対して計算を実施する。これは、全方向から等方的に入射する放射線に対して均等な厚みの遮蔽を有する場合、即ち、2.3.2項に示す球殻モデルと等価である。

トータルドーズ計算方法の詳細については、放射線吸収量及び制動放射線の発生量は、遮蔽材及びターゲットとなる部品材料の材質により異なる。但し、一般には遮蔽材としてアルミニウムを考慮して計算し、他の材質の遮蔽材についてはその密度から等価アルミニウム厚に換算することで十分である。トータルドーズの計算結果は、一般に遮蔽厚（深さ）と吸収線量の関係、即ち、Dose-Depth Curveとして与えられる。Dose-Depth Curveの例を図2.3-2に示す。

2.3.2 トータルドーズ予測モデル

使用される部品が実際に受ける放射線量を算出するための予測モデルとしては、以下の2つの方法が考えられる。



$\phi(E)$: 入射放射線フルエンス (粒子/cm²)

Z : 深さ (g/cm²)

図 2.3-1 トータルドーズ計算モデル

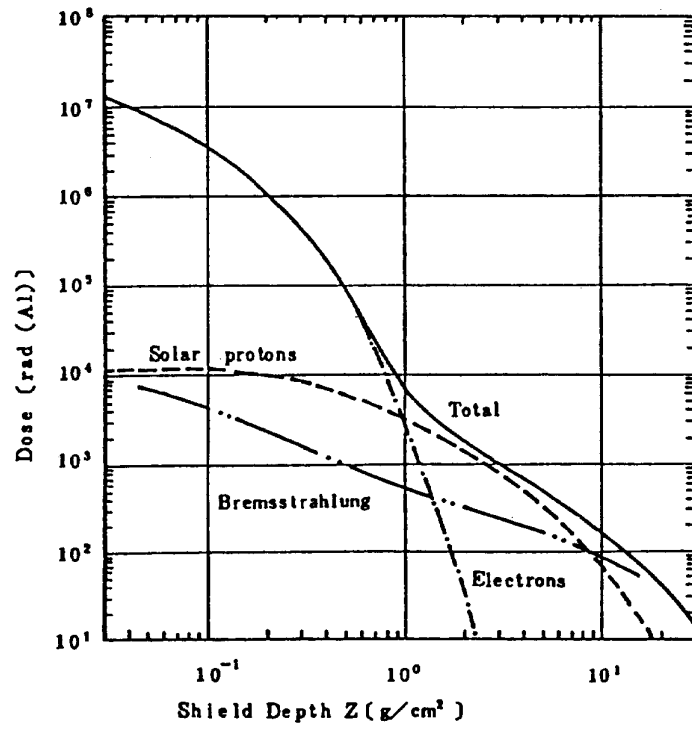


図 2.3-2 Dose-Depth Curve (例)

- ・簡易的方法

この予測モデルは、複雑な遮蔽材の材質及び形状を、球殻あるいは平板等の簡単な形状に仮定して、遮蔽厚とトータルドーズの関係（Dose-Depth Curve）を求め、この関係と面密度に換算した遮蔽厚から直接トータルドーズを求める方法である。

- ・3次元モデル

この予測モデルは、ターゲット（トータルドーズの算出点）から見て、各方向の遮蔽厚分布を求め、この求めた値を用いてトータルドーズを求める方法である。

- (1) 簡易的方法

Dose-Depth Curveを求める場合、遮蔽材の形状は、宇宙用遮蔽効果計算コード SHIELDOSE-IIを使用する関係上、球殻モデル、無限平板モデル及び有限平板モデルの3種類となる。

- (a) 球殻モデル

本モデルは、等方的に入射する放射線に対して均等な厚みの遮蔽材で覆われていると仮定したモデルである。このモデルは遮蔽計算を行う上での最も基本的なモデルであり、2.3.1項に示した計算方法により求められる。但し、実際の遮蔽形状は、むしろ平板に近い場合が多いため、本モデルを用いて求めた放射線量は、大き目になることが多い。

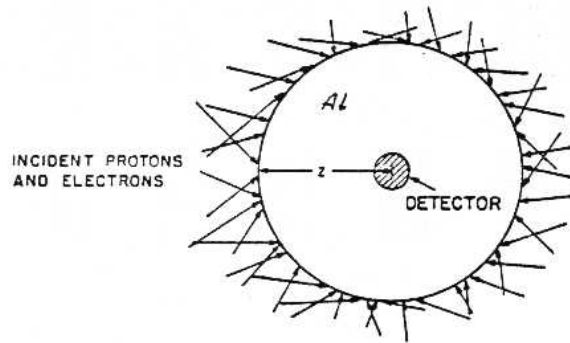
このモデルは、球殻又は半球殻に近い遮蔽形状の場合の遮蔽計算、及び次に示す無限平板モデル及び3次元モデルの基礎データとして用いられる。

- (b) 無限平板モデル

本モデルは、一定の厚みの無限の広さを持った遮蔽材で覆われており、無限平面遮蔽材と反対方向は無限の厚さの遮蔽材があると仮定したモデルである。

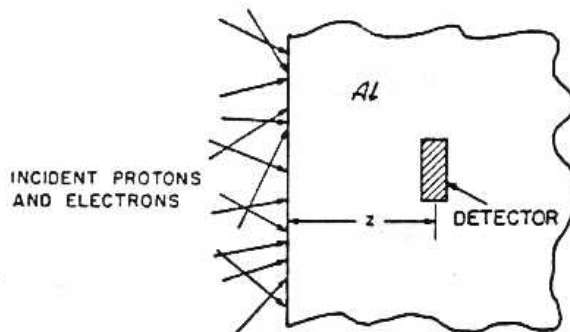
- (c) 有限平板モデル

本モデルは、厚さが有限の遮蔽材で覆われており、無限平面遮蔽材と反対方向は有限の厚さの遮蔽材があると仮定したモデルである（放射線は、平板の片方の面から入射）。



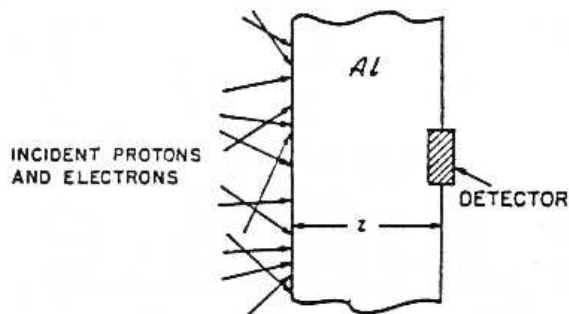
CASE 3. SOLID SPHERE

(1) 球殻モデル



CASE 1. SEMI-INFINITE MEDIUM

(2) 無限平板モデル



CASE 2. FINITE-THICKNESS SLAB

(3) 有限平板モデル

図 2.3-3 モデルの形状

(注) 図は理解を容易にするため模式的に示したものであり、
 実際の計算では後方散乱を考慮する。

実際の搭載機器では、部品から見て一方向は他方に比し十分大きな厚みの遮蔽であることが多い。また、遮蔽材の形状も平板又はそれに近い形状であることが多い。従って簡易的に放射線吸収線量を求める場合には、無限平板モデルが有効である。

(2) 3次元モデル

本モデルは、部品、材料のトータルドーズをより正確に求める場合に用いる。球殻モデル及び無限平板モデルは簡便であるが、宇宙機に使用される部品、材料のトータルドーズは取付け位置等周囲の状況によって変わり、また、実際の遮蔽形状は複雑であり、それらと必ずしも一致しない。従って、より正確なトータルドーズを求めるには、ターゲットを中心として各方向ごとの質量分布を求める必要がある。本モデルは、質量分布を標準の材質の遮断厚に換算した上で、球殻モデルのDose-Depth Curveを用いて各方向の吸収線量を求め、これを全立体角について積分する。計算式を以下に示す。

$$D_T = \frac{1}{4\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} D(t(\theta, \varphi)) \cos\theta \, d\varphi \, d\theta$$

(2.3-2)

ここで

 D_T : ターゲットの吸収線量 $D(x)$: 遮蔽厚を x としたときの球殻モデルでの吸収線量 $t(\theta, \varphi)$: (θ, φ) 方向の遮蔽厚 φ : 経度方向 θ : 緯度方向

宇宙機内質量分布の概念図を図2.3-4に示す。

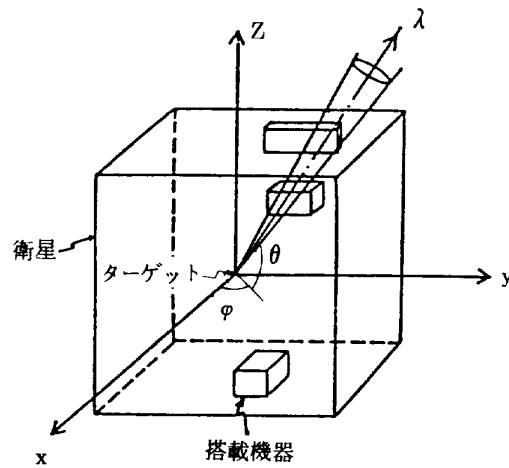


図 2.3-4 宇宙機内質量分布

2.3.3 電子部品の放射線劣化

(1) 半導体電子部品

(a) 放射線劣化の概要

定常的に放射線が照射された場合、シリコン半導体で最も問題になるのは SiO_2 などの絶縁膜に残る正電荷の影響と絶縁膜とシリコン結晶の界面における界面準位の発生である。これらは、バイポーラトランジスタに対しては、電流増幅率の低下、リーク電流の増大という形で表わされる。ICでは、これらのパラメータの変動により回路特性に顕著な変動を示す。トータルドーズに対する各種半導体素子の主要変動パラメータおよびその傾向を表2.3-1に示す。その中でも影響の大きいパラメータを以下に示す。

i) バイポーラトランジスタ

低電流領域の電流増幅率 h_{FE} の低下が最も著しい。

また近年、地上照射試験において、リニアバイポーラ素子のEnhanced Low Dose Rate Sensitivity (ELDRS:低ドーズ率増速劣化)が発見され、50rad/sec以下の線量率では、一部のリニアバイポーラ素子で低線量率での照射試験を行った方がゲインの劣化が大きいことが示されている。

ii) TTL

電流増幅率 h_{FE} の低下に起因して、出力電圧 V_{OL} 、伝搬遅延時間 t_{PHL} の増加が著しい。

iii) CMOS

入力レベル V_{IH} 、 V_{IL} の変動、出力駆動能力 I_{OH} 、 I_{OL} の減少、伝播遅延時間 t_{pd} の増加が著しい。また、内部でのリークのため、静止時電源電流 I_{DD} が増加する。

微細化が進むことでゲート酸化膜の薄膜化が進み、一般的にはトータルドーズ耐性は向上する傾向にある。ただし、数nmオーダの酸化膜では照射により特異的にリークが増大する現象 (Radiation Induced Leakage Current、RILC) も確認されており、注意が必要である。

iv) メモリ素子 (SRAM、DRAM 等)

基本的にCMOSと同様の傾向を示す。特に静止時電源電流 I_{DD} や入力リーク電流 I_{IL} が大きい

な変動が観測されることが多い。

v) FPGA (アンチヒューズタイプ)

入力レベル V_{IH} 、 V_{IL} の変動、出力駆動電圧 V_{OH} 、 V_{OL} の減少、伝播遅延時間 t_{pd} の増加が著しい。また、内部でのリークのため、静止時電源電流 I_{DD} が増加する。

(b) 使用に当たっての注意点

一般的に、電子部品の放射線耐量は、製造プロセス要因、デバイス設計要因、動作条件（バイアス印加の有無等）、照射した放射線の種類やエネルギー及び線量率に強く依存し、しかも製造メーカ、製造ロット等によっても大きく変る場合があるので、回路設計に際しては個々の電子部品の放射線耐量データを十分に把握しておく必要がある。電子部品レベルから予測される回路設計への留意点としては、特性劣化をどの程度まで許容するか、使い方はどうかということを考えて、ディレーティング設計の導入を検討する必要がある。トータルドーズに対する主要変動パラメータについての注意すべき一例を以下に示す。

i) バイポーラトランジスタ

コレクタ電流が小さいときの方が電流増幅率 h_{FE} の変化が大きいため、実際の回路でのコレクタ電流と被曝後最低必要な h_{FE} が両立するように設計する。

ii) TTL

ローレベル出力電圧 V_{OL} の劣化などを考慮し、ファンアウトのディレーティングをとる必要がある。

iii) CMOS、メモリ素子、FPGA

被曝の初期から末期まで、伝搬遅延時間 t_{pd} の変動があっても、信号間の競合等が生ず、機能が正常に保たれるよう注意が必要である。

表 2.3-1 放射線による半導体デバイスの劣化傾向

半導体デバイス	主要変動パラメータ		変動傾向
	項目	記号	
バイポーラ トランジスタ	電流増幅率	h_{FE}	減少
	リーク電流	I_{CEO} I_{CBO}	増大
	飽和電圧	$V_{CE(SAT.)}$	増大
TTL	入力電流	I_{IH} I_{IL}	増減 大少
	出力電圧	V_{OH} V_{OL}	減増 少大
	電源電流	I_{CC}	減少
	伝搬遅延時間	t_{PHL} t_{PLH}	増増 大大
CMOS、 メモリ素子	入力レベル	V_{IH} V_{IL}	変動
	入出力リーク	I_I I_{OZ}	増大
	電源電流	I_{DD}	増大
	駆動能力	I_{OH} I_{OL}	減少
	伝搬遅延時間	t_{pd}	増大
FPGA (アンチフューズ タイプ)	入力レベル	V_{IH} V_{IL}	変動
	電源電流	I_{DD}	増大
	駆動電圧	V_{OH} V_{OL}	減少
	伝搬遅延時間	t_{pd}	増大

2.3.4 材料の放射線劣化

放射線は、ほとんどの材料の機械的、物理的な特性を変化させ一般的に材料の劣化をもたらす。宇宙建造物の構成材料のうち、金属、セラミックは耐放射線性に優れているが、プラスチック、エラストマ等の高分子材料は劣っており、宇宙環境下では、高分子材料は、線量によっては放射線により顕著な影響を受ける。

材料の放射線による影響は、放射線の種類、エネルギー、線量率によって異なる場合があるので、データの評価にあたっては留意する必要がある。

(1) 金 属

金属の放射線劣化を考慮すべきフルエンスの一つの目安として、陽子の場合 10^{17} ～ 10^{19} protons/cm²以上の値が挙げられているが、数十年ミッションの宇宙機のフルエンスであってもそれより数オーダー小さい為、金属の放射線劣化は実際の設計においては、無視してよいと考えられる。

(2) 高分子材料

高分子材料は放射線によって最も強く影響を受ける材料であり、その種類、成分により耐放射線性は大きく異なる。また、同じ線量であっても温度、空気の有無等により、材料の耐放射線性は異なるので（一般に空気中の方が耐放射線性は劣る）、材料の選定データの評価にあたっては注意を要する。材料の放射線照射によって影響を受けるパラメータは、密度、引張強さ、伸び、ヤング率、接着強さ、衝撃強さ、熱伝導性等である。

(a) 熱硬化性樹脂

10^7 rad迄の線量については樹脂単体で使用可能な材料もあるが、 10^7 radを越える場合は、エポキシ等をマトリックスとして炭素繊維、ガラス繊維等で強化した強化プラスチックの採用を考える必要がある。

一般に熱硬化性樹脂をマトリックスとした強化プラスチックは、放射線照射により引張強度、密度、弾性率は増大し、衝撃強さ、伸びは減少する傾向にあるが、機械的特性は、 10^8 rad程度迄はあまり大きく変化しない。但し、 10^8 rad程度を越えると、マトリックスの種類、成分によっては、この特性変化の傾向は変わってくる場合もある。宇宙構造物の材料として採用が拡大されつつあるCFRP（炭素繊維/エポキシ）については、NASAでは、電子線照射試験を行った結果、 10^9 rad迄は充分使用に耐えうると結論づけている。但し、同じエポキシ系CFRPでもマトリックスの成分によって耐放射線性が異なるので、高レベルの線量については、実験等により十分に特性について確認を行う必要がある。

(b) 熱可塑性樹脂

一般的にフッ素を含む熱可塑性樹脂（テフロン等）は、高レベルの線量では引張強度と硬度の低下がおきるため、 5×10^4 rad を越える線量では採用不可能である。他の熱可塑性樹脂は、 10^6 rad 程度迄は安全に使用できると考えられるが、 10^6 rad 以上については、耐放射線性は材料の種類により大きく異なる。

(c) 接 着 剤

構造用として使用される熱硬化性樹脂タイプの接着剤については 5×10^7 rad の線量迄は引張強度の低下は認められず、安全に使用できる。 3×10^8 rad で、わずかに強度が低下するが、これを越える線量については材料の種類、成分によって劣化の程度は大きく異なる。

る。非構造用接着剤として代表的なソーラーセルカバー用シリコン系接着剤については電子線照射の結果 (10^{15} electrons/cm²) 透過率の低下はほとんど無かったとの報告がある。

(d) エラストマ

高分子材料の中ではもっとも放射線により劣化しやすい材料であり、放射線に安定な範囲は $10^5 \sim 5 \times 10^6$ rad 程度迄であり、安定性は種類により異なる。

一般に放射線照射により、伸びは減少し、引張強度は最初向上あるいは低下した後大幅に低下し、圧縮残留歪はほとんどのエラストマにおいて 50~100%増加する。また、ほとんどのエラストマは、放射線照射により硬度が増加する傾向にあるが、ブチルゴム、チオコールゴムは軟らかくなる。エラストマのうち天然ゴム、ウレタンゴム、ネオプレンゴムは、耐放射線性に優れているが、ネオプレンゴムについては、その成分によって大きく耐放射線性が異なるので注意を要する。

(3) セラミック、グラファイト、ガラス

これら材料は、放射線により密度、機械的特性、熱的特性、光学的特性、電気的特性等の物理的特性が影響を受ける。放射線の影響を受ける特性やその程度は、材料の種類や組成及び放射線の種類により異なる。なお、耐放射線性は一般に有機材料に比べて高い。設計にあたって考慮すべき事項を以下に示す。

(a) セラミック

一般にセラミックの物理的特性は、 10^9 rad 以下の電離放射線あるいは、 10^{19} n/cm² 以下の中性子線の照射に対しては明確には変化しない。より多くの照射を受けると密度、弾性係数、熱伝導度、光学的特性、電気的特性等に変化を生じる。ただし、ベリリウム又はホウ素を含む複合体は、熱中性子フルエンスが 10^{17} n/cm² レベルで影響を受ける。

(b) グラファイト

グラファイトは、セラミックに比べると放射線に対していくぶん敏感である。放射線、特に高速中性子線 ($E > 1$ keV) 照射により機械的特性 (寸法、強度、弾性)、熱的特性、電気的特性等に変化を生じる。変化が顕著となるフルエンスレベルは、 10^{19} n/cm² 程度である。

(c) ガラス

ガラスの光学的特性は、 $10^{15} \sim 10^{16} \text{ n/cm}^2$ 以上の中性子線に相当する放射線の照射を受けると変化する。特に、透明度は着色により大きく低下するので注意を要する。光学的特性を除く他の物理的特性の耐放射線性はセラミックと同程度である。

(4) 熱制御コーティング材

熱制御コーティング材の損傷の中で最も影響を受けるものは太陽光吸収率、熱放射率等の光学特性の劣化である。光学特性の劣化は放射線によるものだけでなく、紫外線、高真空の環境によっても影響を受け、特に有機材ベースの熱制御コーティング材では放射線よりも紫外線による影響の方が大きい場合が多い。一般に、金属ベース熱制御コーティング材の放射線耐量は高く、以下無機材ベース、有機材ベースの順に低くなる。紫外線、放射線、高真空環境等の複合作用により、光学特性の劣化のメカニズムは複雑であり、これらの宇宙環境を同時に負荷する様な試験装置を使用しない限り実験室データでの定量的な劣化予測は困難である。

したがって、熱設計においては、宇宙機のフライトデータを使用することが望ましいが、実験室データを使用する場合には充分注意を要する。

2.3.5 設計手順

トータルドーズに対する設計のフローを図2.3-5に示す。

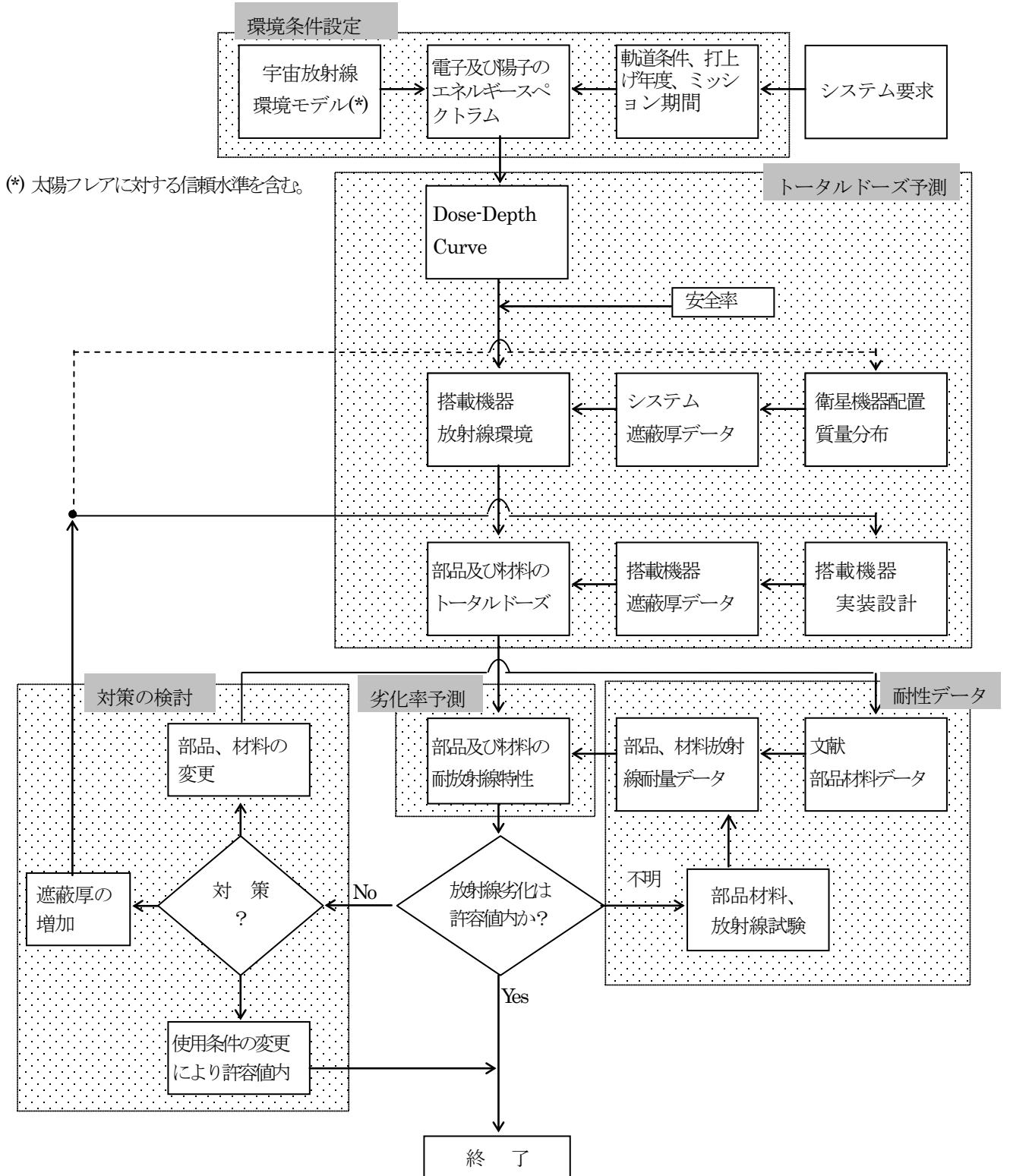


図 2.3-5 トータルドーズに対する設計フロー

(1) 宇宙放射線環境

システム要求として定まる軌道条件、打上げ年度及びミッション期間から電子及び陽子のエネルギースペクトラムを2.2項に基づいて、算定する。

算定したエネルギースペクトラムは、システム仕様書に軌道上の環境条件の一つとして記述する。

(2) トータルドーズ計算

エネルギースペクトラムに基づきDose-Depth Curveを2.3.1項に基づいて算定する。このDose-Depth Curveとシステムの遮蔽データ及び搭載機器の遮蔽データを基に、部品材料での吸収線量を2.3.2項に基づいて求める。通常この作業は、システムレベルでの解析と搭載機器内部での解析とに分けて実施するのが効率的である。

システムレベルでの解析結果は、搭載機器外表面での吸収線量又はシステムでの遮蔽効果と等価な遮蔽厚データとして搭載機器の設計者に提供される。搭載機器では、その実装設計に基づいて2.3.2項により部品、材料でのトータルドーズを計算する。

(3) 電子部品及び材料の耐量との比較

算定したトータルドーズと2.3.3項及び2.3.4項に示されるような部品及び材料の耐放射線特性データを基に使用する部品及び材料の特性の放射線劣化を推定する。この特性劣化が部品及び材料の用途からみて許容値内であれば、その適用は妥当であると判断される。特性劣化が許容値を上回っている場合には(4)項に従い対策をとる必要がある。部品材料の耐放射線特性が不明な場合には、放射線試験の実施による劣化データの取得が必要である。部品及び材料の放射線劣化の許容値は個々の適用条件により異なるため、同じトータルドーズに対して一つの用途で使用可能であったとしても、他の用途では使用不可となる場合がある。

また、部品及び材料の放射線耐量が製造ロットに依存し、かつ、予測されるトータルドーズ及び使用条件から判断してクリティカルである場合には製造ロット毎に放射線試験を実施し、確認を行う必要がある。

(4) 対策

算定したトータルドーズでの部品材料の劣化が許容値を上回っている場合には、次に示すような対策をとる必要がある。

- より放射線劣化の少ない部品材料への変更
- 遮蔽の増加によるトータルドーズの減少
- 使用条件の変更による許容値の緩和

遮蔽の増加が必要な場合は、質量増加を最小とするように考慮しなければならない。システムレベルで遮蔽厚を増加させることは、質量の大幅な増加につながる。

一般に、特定の部品のみが放射線劣化にクリティカルな場合は、部品レベルでのスポットシールドを行う方が、搭載機器全体の遮蔽厚を増加させるより質量増を少なくすることができる。一方、本方法は、軌道条件、搭載位置によってその効果が少ない場合もあることに注意する必要がある。

2.4 太陽電池パネルに対する耐放射線性設計標準

太陽電池セルは、その機能上太陽電池パネルないし宇宙機構体表面に実装される。従って他の半導体デバイスと比較して厳しい放射線環境に曝される。この放射線損傷により太陽電池セルの出力が劣化しパネルの発生電力が低下する。よって、太陽電池パネルの発生電力が宇宙機の要求電力をミッション終了時まで満たすようにするためには、放射線による劣化量を予測し、それをパネル設計に反映（低下分を見込み、適当なマージンをとって初期発生電力を決定）させなければならない。

通常太陽電池パネルは、サブストレートと呼ばれる、アルミハニカムをCFRP織布でサンドイッチし樹脂で固めた構造物、その表面（太陽電池セルを貼り付ける面）に貼られた絶縁用ポリイミド（カプトン）フィルム、太陽電池セル、カバーガラス、ダイオード、電線およびそれらを接着する接着剤で構成され、また必要に応じて裏面に熱制御材である銀蒸着テフロンが貼り付けられることがある。本章は発電に関わる耐放射線性の設計標準を示すので、太陽電池セルおよびカバーガラスについてのみ記述する。

太陽電池パネルにおける出力電力の放射線による劣化では、太陽電池セル以外にカバーガラスやその接着剤における太陽光透過率の放射線劣化（着色）がある。これによる発生電力の低下についてもその量を予測し、パネル設計に反映させなければならない。

2.4.1 太陽電池セルの放射線劣化予測法

現在、太陽電池セルの放射線劣化量を予測する方法として、JPLによる相対損傷係数（RDC）法と、NRLによる変位損傷線量（DDD）法の2種類がある。前者は一般的でこれまでによく使用されているが、予測に必要なパラメータであるRDCを求めるのに多大な地上放射線照射試験を実施しなければならない。後者は比較的新しい方法でまだ適用実績は少ないが、この予測で用いられるNIEL値というパラメータを計算で求めれば、地上放射線照射試験が原理的に3回（任意の2種のエネルギーの電子線と1種のエネルギーの陽子線）で済むという利点を有する。従って、JAXAの宇宙用認定太陽電池セルのように十分な地上放射線試験のデータないしはRDCが既に得られているのであればRDC法、新規な太陽電池セルで地上放射線試験のデータがあまり得られていない、ないしは実施できない場合はDDD法を使用するのが適当である。

いずれの方法を用いる場合でも、まず設計対象の宇宙機のミッション期間中における放射線の被曝量を見積もる。軌道とミッション期間から、JAXAモデル、NASAのAP8、AE8

などの放射線環境コードを使用して、電子線、陽子線について、総被曝量（フルエンス）のエネルギースペクトルを得る。その他の粒子（イオン）は、実際の宇宙空間ではその存在数すなわち衝突数が電子、陽子と比較すると極端に少なく、また入射してもカバーガラス内で停止し太陽電池セルまで到達しないので、通常は劣化要因として考慮しなくてよい。

次に、採用する太陽電池セルの1 MeV電子線および10MeV陽子線による劣化曲線（保存率のフルエンス依存性データ）を入手するか、無い場合は照射試験を実施して得る。ここで保存率（Remaining Factor）とは、放射線被曝前の初期性能値に対する劣化後の性能値の比である。

採用する太陽電池セルの放射線劣化予測には、上記RDC法、DDD法のどちらかを用いること。以下に、この2種の劣化予測法を概説する。劣化予測法の選択に際しては、これを参考にすること。

(1) 相対損傷係数（RDC）法

RDC法の場合、まず採用する太陽電池セルの電子および陽子に対するRDC（遮蔽材なし、放射線一方向入射）、および1MeV電子線による出力劣化曲線を実験ないしデータシートより準備する。一方で、放射線環境コードからミッション期間中の電子、陽子のフルエンスのエネルギー分布を求める。先のRDCは地上放射線試験、すなわち遮蔽材なし、放射線一方向入射の条件で得られたものであるため、これを等方入射、遮蔽材（カバーガラスおよびその接着剤、厚さを考慮）ありの条件で換算する。この換算後のRDCと電子、陽子のフルエンスの粒子エネルギー分布を用いて、電子の場合は1MeV電子線の等価フルエンス、陽子の場合は10MeV陽子線の等価フルエンスを計算し導出する。そして、10MeV陽子/1MeV電子換算係数を用いて等価10MeV陽子線フルエンスを1MeV電子線フルエンスに換算し、先の電子線の等価1MeV電子線フルエンスに加える。こうして、放射線被曝量をすべて等価1MeV電子線フルエンスとして換算する。そして、入手ないし試験で取得した1MeV電子線による劣化曲線において、得られた等価1MeV電子線フルエンスから、太陽電池出力の劣化量（保存率）を得る。これが当該ミッションにおける太陽電池セルの劣化予測量（率）である。予測手順を図2.4-1に示す。

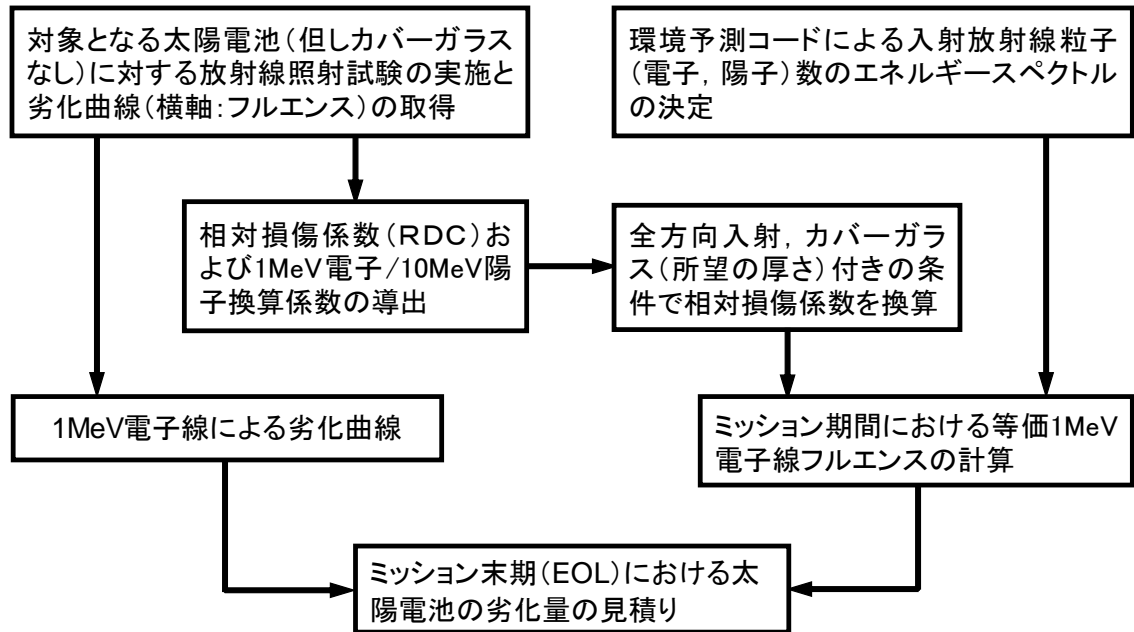


図 2.4-1. 相対損傷係数(RDC)法による太陽電池劣化量の予測手順

(2) 変位損傷線量 (DDD) 法

DDD法の場合、まず採用する太陽電池セルの半導体材料を構成する各元素のNIEL値を文献ないし計算により準備する。一方で、放射線環境コードからミッション期間中の電子、陽子のフルエンスのエネルギー分布を求める。これらの分布は遮蔽材なしの条件であるので、これを遮蔽材(カバーガラスおよびその接着剤、厚さを考慮)の効果を考えて換算する。この換算後の電子、陽子のフルエンスのエネルギー分布と先のNIEL値を用いて、ミッション期間中のDDD値を計算し導出する。一方で、地上放射線照射試験で得られた劣化曲線データの横軸を、電子ないし陽子フルエンスをNIEL値を用いてDDD値に変換して新たな劣化曲線を得る(横軸はDDD値)。この劣化曲線において、得られたミッション期間中のDDD値から、太陽電池出力の劣化量(保存率)を得る。これが当該ミッションにおける太陽電池セルの劣化予測量(率)である。予測手順を図2.4-2に示す。

上記2方法において、得られた太陽電池セルの劣化率がパネル/電源設計から要求される太陽電池セルの劣化率よりも大きい場合、太陽電池セルの変更ないし遮蔽材の増強(カバーガラス厚を増す)が必要である。

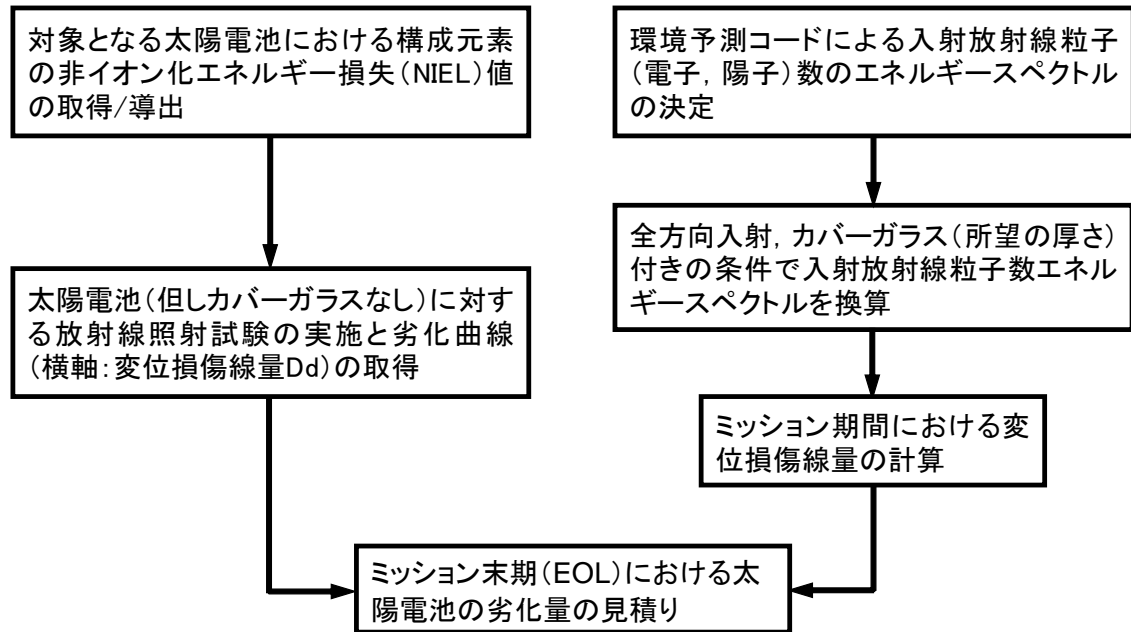


図 2.4-2 変位損傷線量(DDD)法による太陽電池劣化量の予測手順

2.4.2 太陽電池セルの耐放射線性設計 (セル選定)

JAXAにより宇宙用部品として認定された太陽電池セルの種類は、現在基本的に高効率シリコンセルと3接合太陽電池セルの2種類である。その材質と構造により、耐放射線性だけをみれば3接合太陽電池セルの方が優れるが、重量、価格、取扱のしやすさなどはシリコンセルの方が優れる。これらを考慮して太陽電池セルの種類を決定すること。

また、3接合太陽電池セルは耐放射線性に優れるが、積層された構造を持つため、特に陽子線においてそのエネルギーで決定される表面からの侵入長により放射線損傷の大きさが異なってくる。このために、3接合太陽電池セルの放射線劣化は複雑な振舞いを示す。従って、3接合太陽電池セルの採用においては放射線環境と遮蔽材などに対する考慮をすること。

以下に、上記2種の太陽電池の構造設計における放射線劣化対策を概説する。太陽電池セルの種類の選択に際しては、これを参考にすること。

(1) シリコン太陽電池セル

シリコン(Si)は太陽電池における最も重要な物性値である少数キャリア拡散長が他の太陽電池材料と比較して大きく、数 $100\mu\text{m}$ 程度以上である。一方で、放射線損傷によ

り最も大きな影響を受け劣化が大きい物性値も少数キャリア拡散長である。このため、放射線劣化を抑制するために、太陽電池の厚さを50～100 μm として少数キャリア拡散長の低下の影響を表れ難くし、耐放射線性を高めている。この設計により、初期出力がある程度犠牲になっている。

JAXA認定品宇宙用Si太陽電池セル#109型（NRS/BSF型、100 μm ）の、1MeV電子線をフルエンス $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 照射したときの開放電圧（Voc）、短絡電流（Isc）、および最大電力（Pmax）の保存率は、それぞれ約85%、80%、および67%である。

（2）3接合太陽電池セル

3接合太陽電池セルは受光表面側にInGaP、中間にGaAs、裏面側にGeの3種類の太陽電池セル（サブセル）が積層された構造となっており、それぞれトップセル、ミドルセル、ボトムセルと呼ばれる。電気的にはこの3つのセルは直列接続されており、その間にはトンネル接合が挿入されて電流が流れるようになっている。InGaP、GaAsはⅢ－V族化合物半導体材料であり、SiやGeのようなIV族半導体材料よりも一般的に耐放射線性に優れる。特にInGaPは優れた耐放射線性を示し、出力低下が3種のサブセルの中で最も小さい。このため、3接合太陽電池セルではInGaPトップセルをあえて薄くして光吸収すなわち電流出力を少なくし、電流制限セルとなるように設計している（3つのサブセルの直列接続であるため、最も出力電流の小さいサブセルが3接合セルの出力電流を決定する）。この設計により、3接合太陽電池セルの電流出力はきわめて高い耐放射線性を示す。一方電圧出力に関しては、直列接続ゆえ3つのセルの和となるため、特に耐放射線性向上の工夫はされていない。

JAXA認定品宇宙用3接合太陽電池セル#502型（エピウエハA）の、1MeV電子線をフルエンス $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 照射したときの開放電圧（Voc）、短絡電流（Isc）、および最大電力（Pmax）の保存率は、それぞれ約90%、97%、および87%である。

2.4.3 放射線遮蔽（パネル構造）

実際に太陽電池セルを人工衛星の太陽電池パネルサブストレートに実装するときは、放射線損傷による劣化を抑制するために遮蔽材としてのガラス（カバーガラス、通常厚さ50～100 μm 程度）を受光表面側に貼り付ける。このガラスおよびその接着剤（通常厚さ20～30 μm 程度）によって宇宙空間から飛来する放射線、特に陽子のエネルギーが減

衰し、またエネルギーが低いものはガラスないし接着剤の中で止まって太陽電池セル内部まで到達しない。

また、太陽電池セル裏面側は、パネルサブストレートが遮蔽効果を有する。先述したように、典型的なサブストレートの構造はアルミハニカムをCFRP織布でサンドイッチしたもので、セル貼付け面側にはポリイミドフィルムが貼られる。反対側には熱制御材などが貼り付けられる場合もある。これらが放射線に対し遮蔽効果を有する。

劣化予測法の項で述べたように、太陽電池セルの放射線劣化予測ではこれらの遮蔽の効果を考慮しなければならない。遮蔽効果は、遮蔽材の面密度 (g/cm^2) に比例する。

従って、劣化予測計算を行うにあたっては、表面および裏面の遮蔽厚を面密度で求めた上で、RDC法においてはRDCに、DDD法においては軌道上放射線フルエンスに、その遮蔽効果分を考慮した値を用いること。このとき、表面側、裏面側からの放射線入射について別々に遮蔽効果を考慮し、それぞれRDCから等価1 MeV電子フルエンスを、ないしは軌道上フルエンスからDDD値を求め、表面と裏面を合計することにより劣化予測計算を実行すること。

逆に、太陽電池パネルの設計において面積、大きさ、重量などの制約から許容される太陽電池セルの劣化率が決定される場合がある。このときは、カバーガラスなど遮蔽材の厚さをパラメータとして劣化量計算を実施して必要な遮蔽厚を導出し、その厚さの遮蔽材を採用すること。

2.4.4 その他の劣化要因

太陽電池セル受光側に放射線遮蔽材として貼るカバーガラス（硼珪酸系ガラス、表面側にMgFによる反射防止膜コーティングがある場合が多い）、およびカバーガラスを貼るのに用いる接着剤（シリコン系接着剤、代表的にはダウコーニング社製DC93-500）は、放射線やUV光により太陽光透過率が劣化（着色）する可能性がある。従って、この劣化による太陽電池セルの発生電力低下も考慮の対象となる。しかし、現在主に使用されているカバーガラス、接着剤では、通常の放射線、UV光環境（低軌道、静止軌道での5～10年程度のミッション）に対する耐性は十分確保されており、劣化を考慮する必要は通常ない。これ以外の、放射線ないしUV光環境が特に厳しいミッションの場合は、適当な条件下で放射線/UV光照射試験を行って透過率等の劣化を評価し、パネル設計に反映させること。

2.5 シングルイベント設計標準

2.5.1 シングルイベント現象の概要

高エネルギーの陽子、He イオン、重イオン等の荷電粒子が電子部品に入射すると、粒子の軌跡に沿って電離され電子・正孔対が生成される。発生した電荷の一部がデバイス内の回路に流入すると、雑音電流による誤動作や過電流等が発生する。このような現象はたった1個の入射粒子によっても発生し、シングルイベント現象（SEE）と呼ばれる。シングルイベント現象は、デバイスの種類と発生機構の違いからいくつかの種類に分類される。

(1) SEU

SEU はメモリ素子やマイクロプロセッサ等で発生するもので、高エネルギー荷電粒子の入射により発生した電荷がメモリ回路に流れ込んで誤動作を起し、記憶されていた情報が反転する現象である。また、近年の微細構造を有する素子では、1つのイオンの入射により隣り合う複数のセルが反転する現象が見られることがあるが、これをMCUという。MCUという言葉は、1ワード内で複数ビットが反転するMBUとは区別して使用される。

(2) SET

SET は、光半導体デバイスやOP アンプ、コンパレータ等のリニア IC、ロジック回路等で発生する非破壊現象である。入力段に入射した荷電粒子が発生するノイズパルスがラッチ回路に保持され、又は出力段に伝搬することで、回路に誤動作等が発生させる。

(3) SEL

SEL は、主に CMOS 構造のデバイスにおいて発生する。CMOS 構造には寄生的にサイリスタ構造が含まれており、このサイリスタが高エネルギー荷電粒子の入射により発生する雑音電流によりオン状態となり、大電流が流れ続ける現象である。電源をいったん切ってこの寄生サイリスタをオフにしない限り局所的に大電流が流れ続けるため、デバイス内の電極溶断、同一電源系統内の電圧降下による機能障害等が発生する。

(4) SEB

SEB は主にパワーMOSFET で発生する。パワーMOSFET に構造上含まれる寄生トランジスタに高エネルギー荷電粒子が入射することにより、寄生トランジスタがトリガされてデバイスに大電流が流れ焼損する。

(5) SEGR

SEGR はパワーMOSFET で発生する現象で、ゲート酸化膜が破壊する現象である。

この他にも、デバイスの微細化に伴って新たなシングルイベント現象が発見されているが、メカニズム等は完全に解明されておらず、また名称が統一されていないものもある。

2.5.2 設計手順

SEE に対する設計のフローを図 2.5-1 に示す。まず、ミッション要求に応じて軌道条件及びミッション期間が決定され、その条件における重イオン及び陽子のフルエンスを宇宙環境モデルより計算する。一方、システム要求により選定された部品について、放射線耐性のデータを確認し（データがない場合には照射試験を行う）そのデータと重イオン及び要すれば陽子のスペクトラムから、軌道上での SEE 発生率を計算し、機器としての致命度解析を行う。その結果がシステム上許容できない場合には、部品を選定し直すか、機器としての対策を施す。

2.5.3 シングルイベント発生確率の予測方法

宇宙放射線環境の中でシングルイベントに寄与するのは、銀河宇宙線および太陽宇宙線に起因する荷電粒子（陽子と重イオン）、及び地球磁場に捕捉された陽子である。

シングルイベント発生確率の予測には、NRL が開発した crème-MC を用いることができる。対象となる半導体デバイスについて、シングルイベント耐性のデータと宇宙環境及び軌道、シールド厚等の情報をプログラムに入力すると、軌道上における発生率が出力される。重イオンのデータが存在しない場合には、重イオンの照射試験を行い発生断面積-LET 曲線を取得して発生率の算出を行う。ただし、デバイスの LET_{th} が宇宙に存在しうるもっとも重い原子であるウランの最大 LET (119 (MeV/(mg/cm²))) を超えるデバイスについては、シングルイベントが発生しないデバイスとして取り扱うことができる。 LET_{th} は Weibull フィッティングにより実験結果から算出するか、簡易的に飽和反転断面積の 1/100 の反転断面積となる LET とする。また、 $LET_{th} < 10$ (MeV/(mg/cm²)) の場合には、陽子によるシングルイベントの発生率の算出もあわせて行うこと。陽子のデータがない場合には、照射試験により陽子のエネルギーに対する発生断面積のデータを取得し、さらに発生率の算出を行う。

破壊モードのシングルイベントの場合には、発生断面積-LET 曲線を取得するために膨大な供試体数が必要となるため、与えられた LET で発生しないことを確認するだけにとどめざるを得ない場合もある。このような場合には、破壊イベントが発生しなかった最大 LET において 1 回破壊イベントが発生したと仮定して最大発生断面積を計算し、発生率を算出する。

2.5.4 電子部品のシングルイベント対策

部品レベルにおける基本的な対策としては、シングルイベント耐性が大きいもしくは耐性の程度が判明しているデバイスの使用を優先する、耐性が不明のデバイスに対し実際にデバイスの耐性を測定する、等が挙げられる。各シングルイベントで対象となるデバイスを表 2.5-1 に示す。SET については、アナログ IC 全般で発生する可能性があるため、もれなく検討すること。

(1) IC

IC のシングルイベントの実験は世界で数多く実施されており、データが蓄積されている。選定にあたっては、データベース等も参考にしながら情報収集を行い、使用するミッションの要求に照らして適切な判断を行うこと。

SEU については、誤り検出訂正 (EDAC) 回路が有効である。SEL は素子の構造により耐性が大きく異なるが、SOI 構造をもつものは寄生サイリスタが存在しない構造となっているため、SEL が発生しない。かつ、収集電荷も低く抑えられるため、SEU 耐性の向上にも有効である。

オペアンプやコンパレータ等のリニア IC で発生する SET については、デバイスの使用条件によりその影響が大きく異なる。例えば、コンパレータでは入力電圧と基準電圧の差が小さい場合、オペアンプでは増幅度が大きい場合等で SET の影響を受けやすいと言われている。従って、既存の SET データを参照する場合には、そのデータが最悪条件のものであるかを確認すること。また、実際に耐性の評価を行う場合には、最悪条件において行うか、最悪条件の特定が困難な場合には、最低でも実際の使用条件における評価を行う。部品の選定にあたっては、可能な限り SET の影響が小さい使用条件で利用できる部品の選定を検討する。

(2) IC 以外の電子部品

パワーMOSFET は主に電源系のスイッチング素子として使用されるため、SEB、SEGR が発生すると即機能の喪失となる可能性が高く、対策が必要である。できる限りシングルイベント耐性を有するパワーMOSFET を選定することが望ましい。SEB は縦型構造をもつ n チャネル型の MOSFET で発生する。p チャネル型の MOSFET では SEB が発生しないので、アプリケーションによっては p チャネル型を採用するのも一つの方法である。また、SEB は定格電圧に対し十分低い電圧での使用であれば発生しない。SEGR については、p チャネル型、n チャネル型いずれでも発生する可能性がある。SEGR はゲート電圧に逆バイアスを印加すると発生しやすくなることから、運用時大きな逆バイアスが印加されないよう注意すること。パワーMOSFET

の採用にあたっては、シングルイベントに対する安全動作領域（SOA）に照らして、システム要求に応じて適切なディレーティングを設定すること。

バイポーラトランジスタについては、抵抗負荷があればSEBが発生しても負荷により過電流がおさえられ、デバイスの焼損を免れることが多いが、スイッチング用途で使用する場合にはパワーMOSFETと同様の対策が必要である。

2.5.5 機器としてのシングルイベント対策

シングルイベント・フリーの電子部品を採用できれば、機器としての対策は不要である。しかし、要求を満足するSEE耐性をもつ電子部品が存在しない場合には、機器レベルの対策が必要となる。その際、当該機器のミッションや発生率等を、システムの観点で考慮して部品の選定を行う。なお、シングルイベント現象は高エネルギーの粒子により発生するものであるため、シールド厚を大きくすることによる発生率の低下は期待できないことに留意すること。

(a) SEU 対策

- ・ 誤り訂正符号やEDAC回路によりSEUによるエラーの訂正を行う。デバイスの構造上MBUが発生する可能性がある場合には、MBUとならないようにデータビットを複数デバイスに分散させることや複数ビットの誤り訂正が可能な符号を考慮する。
- ・ 冗長系として同一回路を3組以上持ち、出力の多数決を取ることで誤りを防ぐ。
- ・ ウォッチドッグタイマを設ける。これはCPUが暴走した際の対策で、一定時間ごとに特定のアドレスをアクセスしないときにはシステムをリセットする。

(b) SET 対策

- ・ 複数の同一回路を設け、遅延時間の異なる遅延回路を通して信号を与え、多数決を取る。
- ・ 偽パルスを排除するフィルタ回路を設ける。
- ・ SETの影響が小さくなるような回路パラメータとする。
- ・ SEUと同様の対策をとる。

(c) SEL 対策

- ・ 過大電流により IC が破壊することを防ぐために、電流制限回路を設ける。なお、定常時と異常時のしきい値は、当該 IC のトータルドーズによる電源電流の増加も考慮して設定する必要がある。
- ・ 冗長系として同一回路を複数持つ。

(d) SEB 対策

- ・ SEB は使用電圧が定格電圧に近いほど発生確率が上がるので、個々のデバイスの SEB 耐性を考慮に入れてミッション要求に応じ適切なディレーティング値を設定した回路構成とすること。

(e) SEGR 対策

- ・ 個々のデバイスの SEGR 耐性を考慮に入れて、規定された安全動作領域の範囲内でミッション要求に応じ適切なディレーティング値を設定した回路構成とすること。

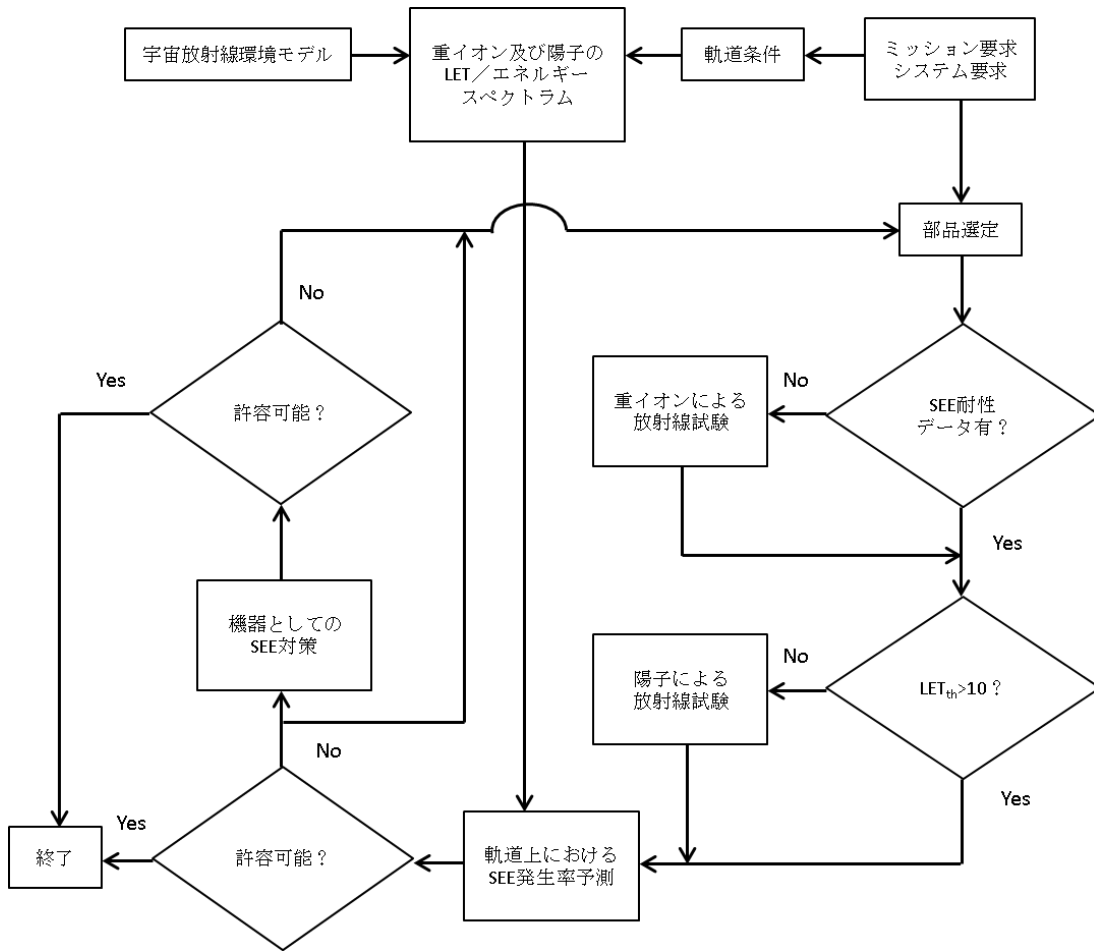


図 2.5-1 シングルイベントに対する設計フロー

表 2.5-1 各シングルイベントで対象となるデバイス

種類	対象となるデバイス
SEU	メモリ素子、マイクロプロセッサ
SET	アナログ IC (コンパレータ、オペアンプ、レギュレータ、ドライバ IC、ADC、DAC 等)、ロジック回路、高速フォトカプラ、高速 MPU、高速メモリ素子等
SEL	CMOS デバイス
SEB	N チャンネルパワー-MOSFET、NPN バイポーラトランジスタ
SEGR	パワー-MOSFET

2.6 半導体デバイスの変位損傷に対する設計標準

2.6.1 概要

電子、陽子、イオン等の粒子が半導体に入射すると、その運動エネルギーの大部分は物質を電離することによって失われる。残りのわずかなエネルギーは、半導体中の原子核を格子内の本来の位置から弾き出し、永久損傷を引き起こす。これは変位損傷 (DDD) と呼ばれ、光半導体デバイス等で特性を劣化させる原因となる。厚いシールドに覆われた半導体デバイスにおいては、電子の変位損傷による劣化はトータルドーズや陽子の変位損傷による劣化よりも小さいため、通常シールドの大変薄い太陽電池を除く半導体デバイスで問題となることはない。宇宙環境には高エネルギーの陽子が豊富に存在しているため、通常半導体デバイスでは陽子による変位損傷が問題となる。変位損傷に対する感受性は、デバイスの使用用途や方法により大きく異なる。(太陽電池の変位損傷による劣化は2.4項を参照することとし、ここでは対象外とする)

半導体中に陽子、イオン等が入射して原子核が弾き出されると、弾き出された原子は格子間原子となり、元の場所には空孔が生成される。この格子間原子と空孔の対は不安定で、大部分は再結合によって損傷を残すことなく元の状態に戻る。しかし、一部分は空孔が格子中を移動して再結合を免れ、半導体中の不純物との結合により安定な欠陥となる。この欠陥準位は半導体のバンドギャップ中に形成され、その準位において電子正孔対生成や、再結合、キャリアの捕獲、補償、及びトンネリング等が発生する。そのため、暗電流の増加、キャリアの減少、逆バイアス時の漏れ電流の増加等影響が現れる。半導体デバイスの特性のうち、少数キャリア寿命及び生成キャリアの寿命はこれらの影響を最も受けやすいため、これらの特性を利用した半導体デバイスは最も変位損傷に対する感受性が大きい。

2.6.2 変位損傷の予測手法

物質に変位損傷を起こすのに使われるエネルギーは、NIEL を用いて表される。半導体デバイスが変位損傷を受けると、デバイスのパラメータが劣化するが、この劣化の度合いと NIEL は比例関係にあることが知られている。従って、まず過去のデータもしくは陽子の照射試験により比例係数 K を求める。次に、実際の陽子環境における NIEL 値を計算し、その値に比例係数 K を乗じることにより、当該デバイスのパラメータの軌道上における劣化度合いを計算することができる。例えば CCD の場合、変位損傷により電荷輸送効率 (CTE) が低下するが、陽子のエネルギーに対する CTE の変化 $\Delta\text{CTE}(E)$ は、比例係数 K を用いて次式で表される。

$$\Delta CTE(E) = K \cdot NIEL(E) \cdot \Phi(E) \quad (2.6-1)$$

ここで、 $\Phi(E)$ は陽子のフルエンスである。従って、軌道上での ΔCTE は次式により計算される。

$$\Delta CTE = K \int_0^{\infty} NIEL(E) \frac{d\Phi(E)}{dE} dE \quad (2.6-2)$$

上記に基づく変位損傷の予測フローを図 2.6-1 に示す。

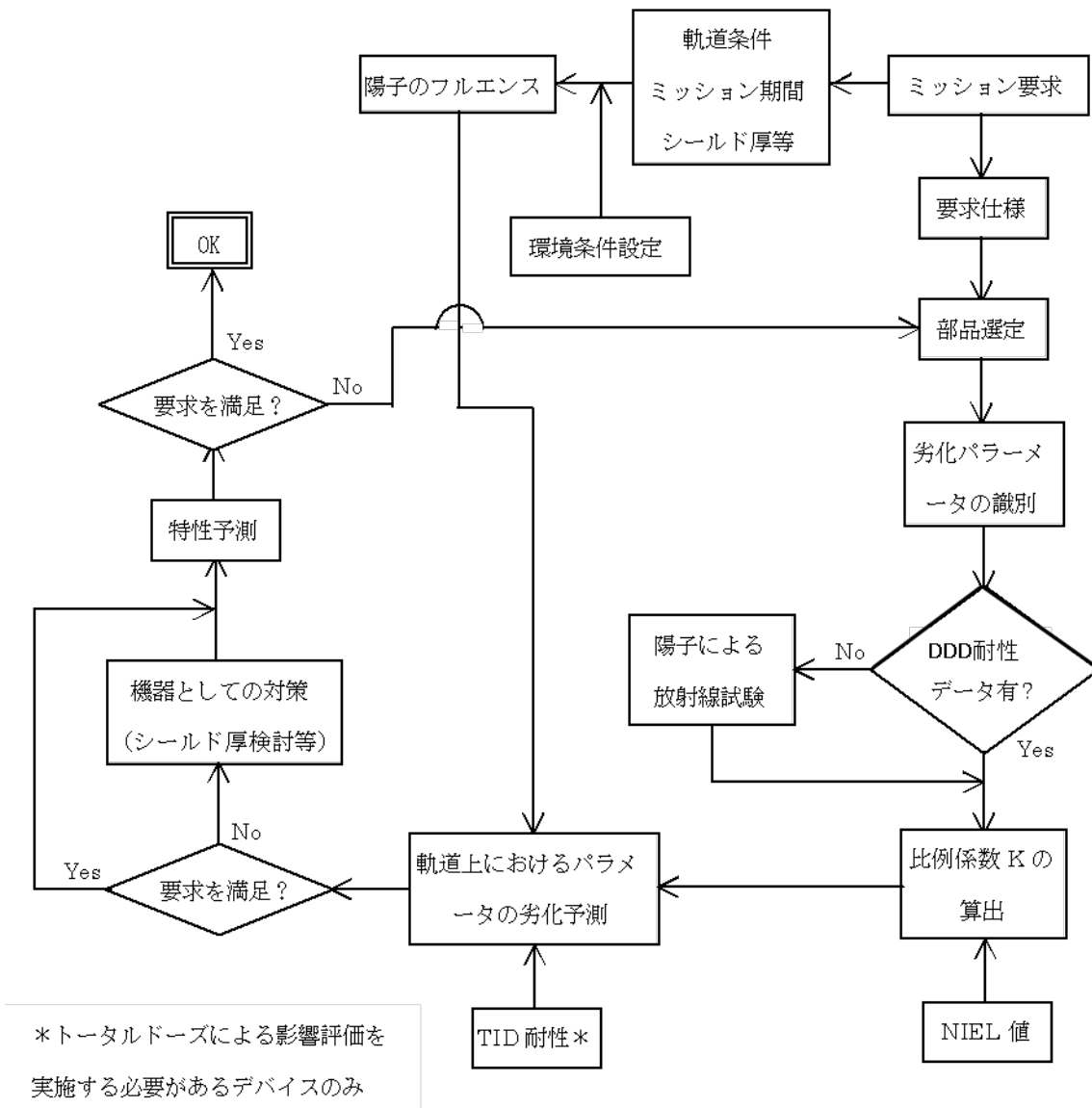


図 2.6-1 軌道上におけるデバイスの変位損傷による劣化予測方法

2.6.3 各デバイスの変位損傷に対する耐性

表 2.6-1 に、変位損傷の影響を受ける半導体デバイスをまとめた。変位損傷の影響が大きいと考えられるデバイスについては、あらかじめ変位損傷に対する耐性の評価及び軌道上における劣化予測を行うこと。また、必要に応じシングルイベントやトータルドーズの影響評価も実施すること。デバイスによってはトータルドーズと変位損傷をあわせた影響評価が必要となる場合がある。一般に、少数キャリア寿命や生成キャリア寿命が特性を支配するデバイスや、特定のパラメータできわめて高性能が要求されるデバイスは変位損傷に対する耐性が低い。

表 2.6-1 変位損傷の影響を受ける半導体デバイス

デバイス	変位損傷の影響	変位損傷に対する耐性
CCD	電荷輸送効率 (CTE) の低下、暗電流の増加	変位損傷の影響を受けやすい リニア CCD は耐性大
受光素子	応答速度の低下 暗電流の増加	用途により耐性は異なる フォトトランジスタは変位損傷の影響を受けやすい MSM フォトダイオードは耐性大
発光素子 (LED、レーザーダイオード)	光出力の低下 電流しきい値の増加 (レーザーダイオード)	変位損傷による影響は比較的小さい LED の方がレーザーダイオードよりもやや耐性が小さい 両性ドープ LED は耐性小
フォトカップラ	電流伝達率 (CTR) の低下	放射線に対するレスポンスは複雑 耐性は目的、用途により大きく異なる フォトダイオードを用いたものが最も耐性大 フォトトランジスタを用いたものはやや耐性小 * 1MHz 以上の高速動作をさせるものは SET について検討が必要
Si バイポーラトランジスタ、リニア IC	利得の低下	横型 pnp トランジスタで耐性小 ヘテロ接合で耐性大

(1) CCD

CCD が変位損傷を受けると、CTE の低下、平均暗電流の増加、個々のピクセルにおける非常に大きな暗電流、出力アンプのノイズの増加、等がみられる。

CCD の最も重要なパラメータは CTE であるが、陽子の照射により形成された欠陥準位に信号電荷が捕獲され、捕獲時のクロックサイクル終了後に放出されることにより、その信号が本来のサイクルの画像ではなく放出されたときのサイクルの画像に現れることになり、画質が低下する。従って、デバイスの読み出し方法やクロック周波数により変位損傷の CTE への影響が決まる。リニア CCD はクロック周波数が 1MHz 以上と速く、信号が欠陥準位に捕獲されることなく伝送されるため、変位損傷の影響を受けづらい。CTE 低下への対応策は現在も研究中であるが、デバイスを冷却してキャリア捕獲を減らすことで CTE の低下を若干緩和することができる。更に対策が必要な場合には厚いシールドを施すことになるが、陽子とシールド物質との衝突によって発生した二次粒子による変位損傷の影響が大きくなる。

暗電流については、平均暗電流と、個々のピクセルに現れる非常に大きな暗電流（スパイク）があるが、ピクセル面積の大きいものを用いることで信号対雑音比 (S/N) を改善することができる。

CCD の変位損傷対策としては、以下の項目が考えられる。トータルドーズの影響を受けやすいデバイスについては、併せてその影響も考慮すること。

- ・ 機器のシールド
- ・ CCD の冷却
- ・ 変位損傷に強いデバイスの選択
- ・ 変位損傷の影響を受けにくい運用条件、信号処理の選択
- ・ ピクセル面積の大きい CCD の使用

(2) 受光素子

受光素子としては、PN 接合フォトダイオード、PIN ダイオードやフォトトランジスタ等があり、変位損傷の影響としては、空乏層で生成されるキャリアによる暗電流の増加、少数キャリア寿命の低下による応答性の劣化などが挙げられる。フォトトランジスタは、その利得が少数キャリアの寿命に大きく影響されるため、変位損傷の影響を受けやすい。一方、MSM フォトダイオードは多数キャリア素子であり、変位損傷への耐性は大きい。いずれのデバイスにしても、その用途により変位損傷への耐性は大きく異なる。

フォトダイオードは種々の用途に特化したものが供給されており、放射線の影響は設計により大きく異なる。また、変位損傷による永久損傷の他に、用途によっては電離による出力電流の一時的な増加の影響を受ける場合がある。

(3) 発光素子

レーザーダイオードは変位損傷の耐性が比較的大きいが、電流しきい値が大きく変化すると出力の低下を招く可能性がある。

LED はレーザーダイオードには劣るものの、変位損傷に対する耐性が大きいものが多い。ただし、大出力用、高速用等、その用途によりその耐性は異なる。例外的に、両性ドープ LED は変位損傷の影響を受けやすいことが知られている。

(4) フォトカプラ

フォトカプラは、LED（光源）、受光素子、及び光カプリング物質から構成されるハイブリッドモジュールで、回路間を電氣的に分離する目的で広く用いられている。フォトカプラの重要なパラメータは電流伝達率（CTR）であり、光検出素子のコレクタ電流の LED 順方向（ドライブ）電流に対する比で表される。フォトカプラには様々な設計があり、また用途も大きく分けてデジタルフォトカプラとリニアフォトカプラがある。フォトカプラの放射線に対するレスポンスは、設計及び用途に大きく依存する。フォトカプラはトータルドーズやシングルイベントによる影響も受ける。1MHz 以上の高速用途のフォトカプラでは変位損傷に加え、SET の影響を考慮する必要がある。LED としては両性ドープ AlGaAs LED が最も変位損傷の影響を受けやすく、かつ以前のフォトカプラよりも現在のフォトカプラの方が耐性が低い傾向にある。

フォトカプラの放射線に対するレスポンスは、以下の理由により複雑なものとなっている。

- (a) ハイブリッドモジュールであるため、放射線耐性の個体差が大きい。
(構成部品の素性を明確にできない)
- (b) 観測される劣化は、トータルドーズと変位損傷を合わせた劣化であり、そのインパクトはフォトカプラの設計や用途に依存する。
- (c) フォトカプラが DC/DC コンバータ等のさらに大きいハイブリッドモジュールの一部である場合には、モジュール内の他のコンポーネントの影響も受ける可能性がある。

フォトカプラの CTR 劣化は主に LED の変位損傷耐性によって決定される。受光素子にフォトト

ランジスタを使用している場合には、光応答性の劣化の影響も受ける。全体としては、フォトダイオードを用いたフォトカプラが最も変位損傷耐性に優れている。

CTR の評価を行う際には、用途に応じた評価を実施すること。デジタルフォトカプラであれば広い波長範囲全体における CTR の評価を実施する必要があるし、リニアフォトカプラであれば、使用する特定の波長範囲における CTR を評価する。

(5) バイポーラトランジスタ

バイポーラトランジスタ単体は比較的変位損傷に対する耐性が大きい、アナログバイポーラ IC は変位損傷を受けやすい。リニア IC の耐性はプロセスやデバイス設計等により大きく異なるが、横型 pnp トランジスタを含むものももっとも変位損傷を受けやすいことが知られているは、横型 pnp トランジスタを低電流で入力部に使用しているものは耐性が低い可能性がある。また、非常に小さい入力オフセットやバイアス電流、低ノイズ等の高性能が要求されるデバイスも変位損傷の影響を受けやすい。一方、SiGe 等のヘテロ接合を持つバイポーラトランジスタは変位損傷に対する耐性が大きい。

2.7 宇宙放射線以外の影響

2.7.1 原子状酸素への対策

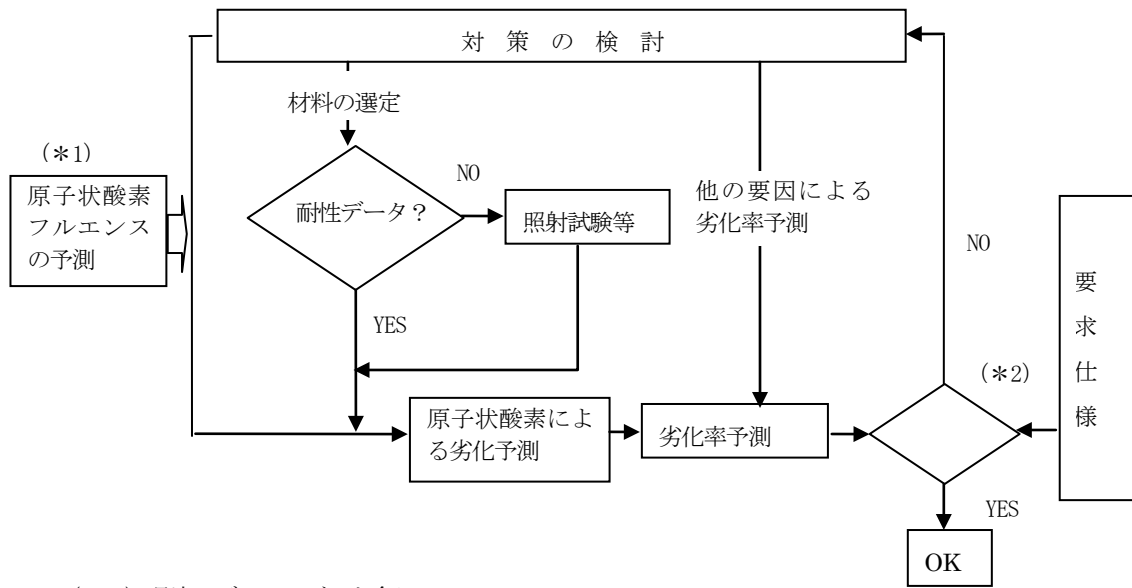
(1) 高度1000km以下を周回又は通過する宇宙機の、特に外表面に使用する材料については耐原子状酸素性を持つものを使用すること。

(2) 直接曝露されない場所であっても開口部等から原子状酸素が侵入する可能性がある場合、原子状酸素と著しく反応する材料の使用を避けること。

(3) やむを得ず使用する場合には、適切なカバー又はコーティングを施すこと。

(4) ミッション毎に原子状酸素のフルエンスを計算、規定し、原子状酸素による劣化がミッション期間に対して許容できるか、既存データを基に予測すること。既存データがない場合は、可能な限り試験等で検証すること。

図2.7-1に原子状酸素への対策に関する設計フローを示す。



(*1) 環境モデルマージンを含む

(*2) 設計マージン、環境モデルマージンを含め大丈夫か?

図2.7-1 原子状酸素への対策に関する設計フロー

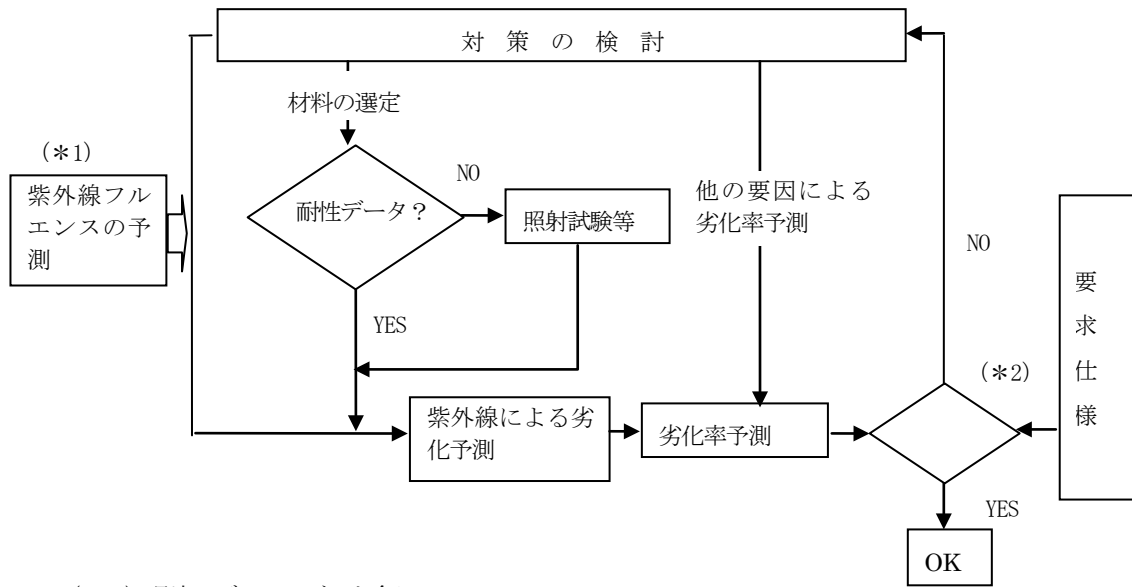
2.7.2 紫外線への対策

(1) 紫外線（波長 400nm 程度以下）に著しく影響のある材料を宇宙空間に直接曝露される箇所へ使用しないこと。

(2) ミッションや使用部位毎に紫外線のフルエンスを計算、規定し、紫外線による劣化がミッション期間に対して許容できるか、既存データを基に予測すること。既存データがない場合は、可能な限り試験等で検証すること。なお、民生用材料の耐紫外線性データは、照射光源の波長領域を確認すること。

(3) 材料の使用箇所によっては反射光や集光の影響を受け、紫外線フルエンスが大きくなることを考慮すること。

図 2.7-2 に紫外線への対策に関する設計フローを示す。



(*1) 環境モデルマージンを含む

(*2) 設計マージン、環境モデルマージンを含め大丈夫か？

図 2.7-2 紫外線への対策に関する設計フロー