

半導体に対する三つの放射線影響 とその照射試験



小野田忍

独立行政法人 日本原子力研究開発機構

量子ビーム応用研究部門

半導体耐放射線性研究グループ

onoda.shinobu@jaea.go.jp

027-346-9324

発表内容

2

1. 放射線と半導体

1. 放射線環境
2. 半導体に対する3つの放射線影響

2. 原子力機構・高崎量子応用研究所 放射線照射施設の紹介

1. トータルドーズ効果
2. はじき出し損傷効果
3. シングルイベント効果

3. 原子力機構・半導体耐放射線性研究グループの取組み

4. まとめ

半導体を取り巻く放射線環境

3

銀河宇宙線

$p \cdot \alpha \cdot \text{ion}$

捕捉放射線

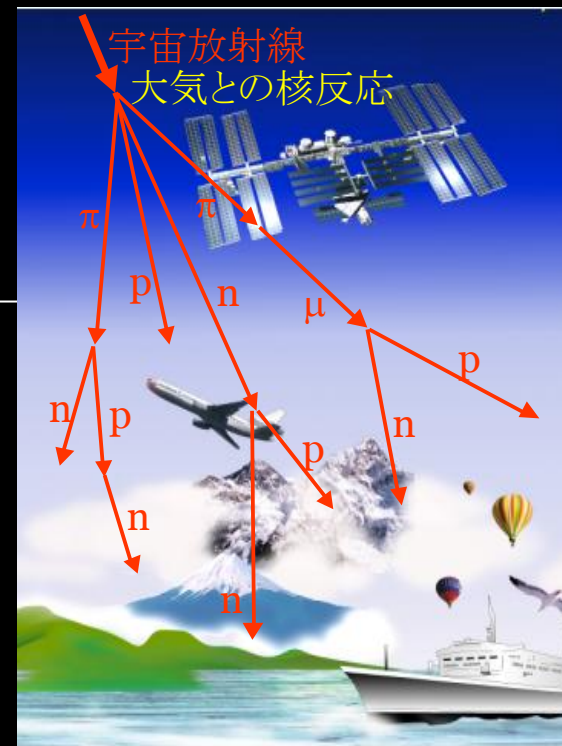
$p \cdot e$

太陽フレア放射線

$p \cdot e \cdot \text{ion}$

半導体素子

- 太陽電池
- ロジック
- メモリ



半導体に対する三つの放射線影響

4

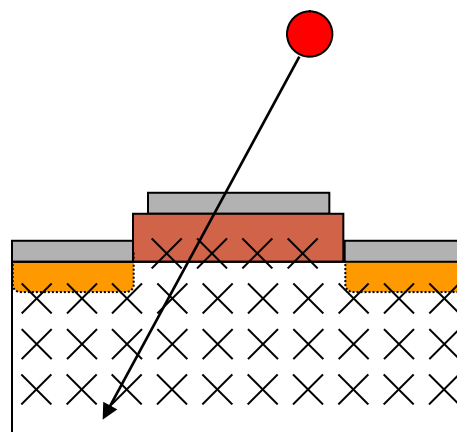
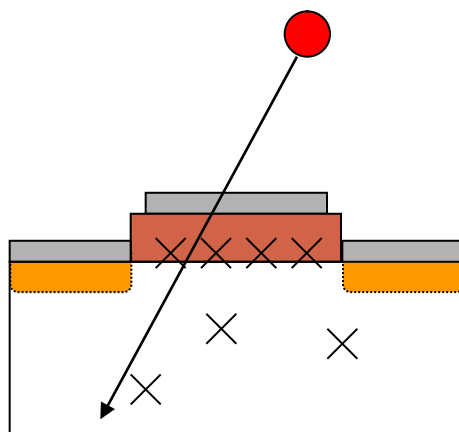
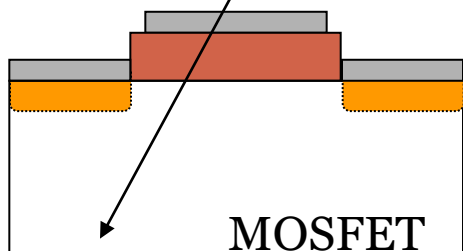
- **トータルドーズ効果 (TID : Total Ionizing Dose Effect)**
 - ✦ **多量の放射線**が入射し、**電離作用**によって引き起こされる。生成された電荷は、固定電荷や界面準位を形成し、半導体素子の諸特性を劣化させる。累積線量効果とも呼ばれる。
- **はじき出し損傷効果 (DDD: Displacement Damage Dose Effect)**
 - ✦ **多量の放射線**が入射し、半導体結晶を構成する原子がその定常位置からはじき出されることによって引き起こされる。はじき出された原子および空格子点は、欠陥準位を形成し、半導体素子の諸特性を劣化させる。バルク損傷 (Bulk Damage)とも呼ばれる。
- **シングルイベント効果 (SEE : Single Event Effect)**
 - ✦ **1個の粒子**が入射し、**電離作用**により高密度の電荷が生成されることにより引き起こされる。生成された電荷が半導体素子中を流れることによって、一時的もしくは定常的な故障が起こる。一般に、荷電粒子のLET (Linear Energy Transfer)が大きいほど、電荷量は多い。

半導体に対する三つの放射線影響

5

- トータルドーズ効果 : 多量のガンマ線等 (酸化膜・電離)
- はじき出し損傷効果 : 多量の電子線等 (半導体結晶・はじき出し)
- シングルイベント効果 : 1個の重粒子 (半導体結晶・電離)

シングルイベント効果
(確率的)
誤動作・破壊



トータルドーズ効果
(kGyオーダー)

はじき出し損傷効果
(MGyオーダー)

運用期間
(照射量)

しきい値電圧のシフト・移動度低下・リーク電流増加

宇宙放射線による半導体影響

6

- 捕捉放射線

- 陽子、電子 (高フラックス)

- 太陽フレア放射線

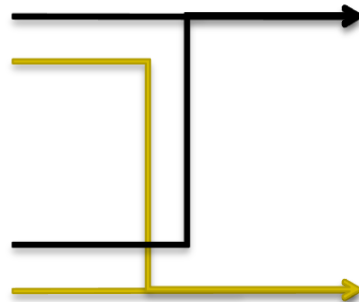
- 陽子、電子 (高フラックス)

- 銀河宇宙線

- GeV以上の高エネルギー重粒子

- 地上中性子線

- 幅広いエネルギースペクトル



遮蔽によりX線・ガンマ線が発生し、ICのTIDを引き起こす。はじき出し断面積が小さいのでDDDは起こり難い。電離能が低いのでSEEは起こらないが、陽子ではSEEが起こることもある。

電子・陽子線が太陽電池のDDDを引き起こす。太陽電池には酸化膜がないので、原理的にTIDは起こらない。電離能が低いのでSEEも起こり難い。

エネルギーが高く遮蔽ができない。フラックスが低いので、TIDもDDDも引き起こさない。ICのSEEを引き起こす。

核反応生成物 (MeV級重粒子) がICのSEEを引き起こす。

LSIの放射線影響：トータルドーズ効果・シングルイベント効果

人工衛星内の線量(静止軌道)とトータルドーズ効果

7

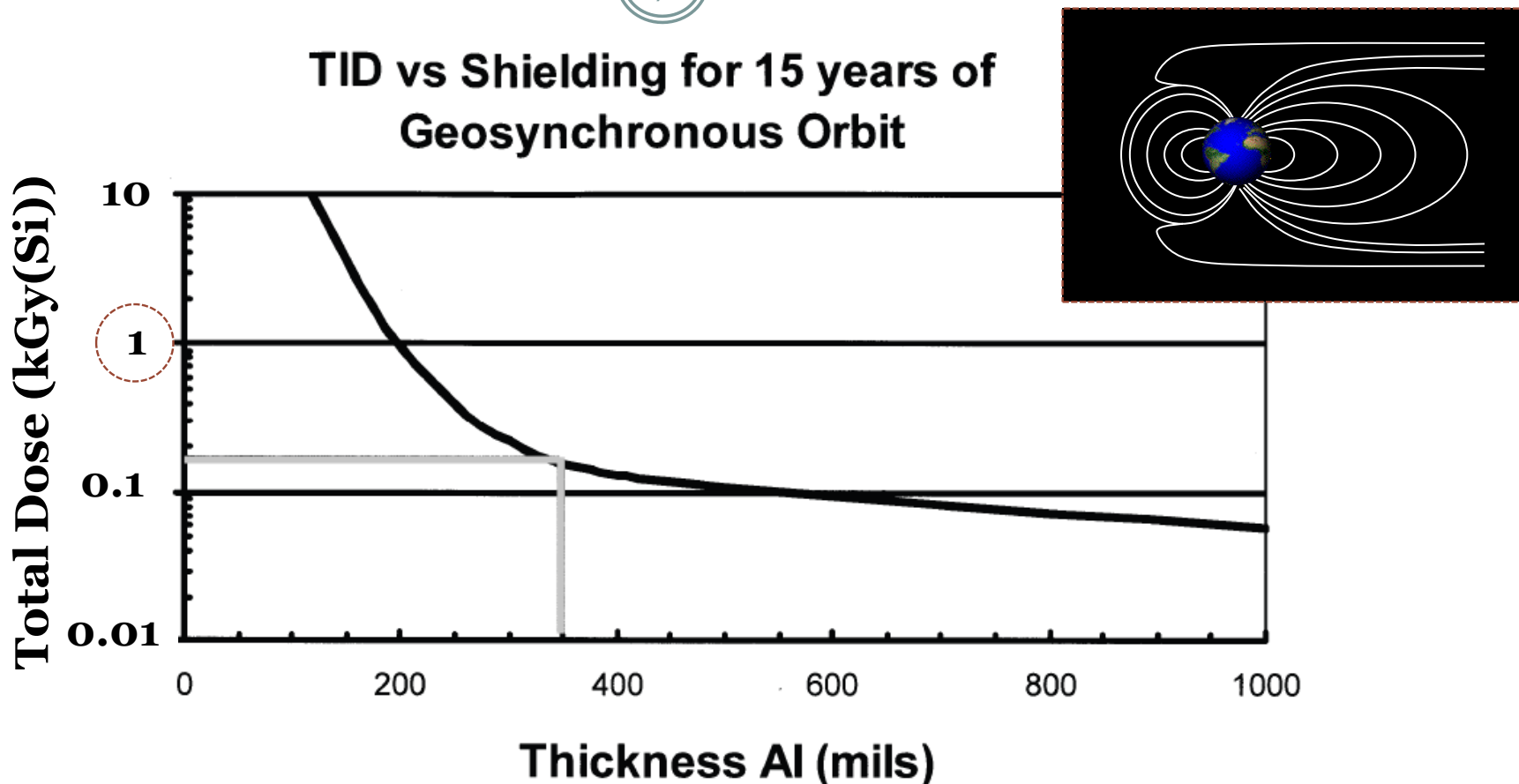


Figure 3. Dose vs. Depth curve for 15-year Geosynchronous Orbit.

1mils = 0.0254mm

IEEE TNS Short course 2009

地上の線量とトータルドーズ効果

8

99%の人が死亡する線量

10Sv ≒ 10Gy

地上(引き上げ後の上限)

250mSv/y ≒ 250mGy/y
(3.75Gy/15year)

地上(世界平均)

2.4mSv/y ≒ 2.4mGy/y
(36mGy/15year)

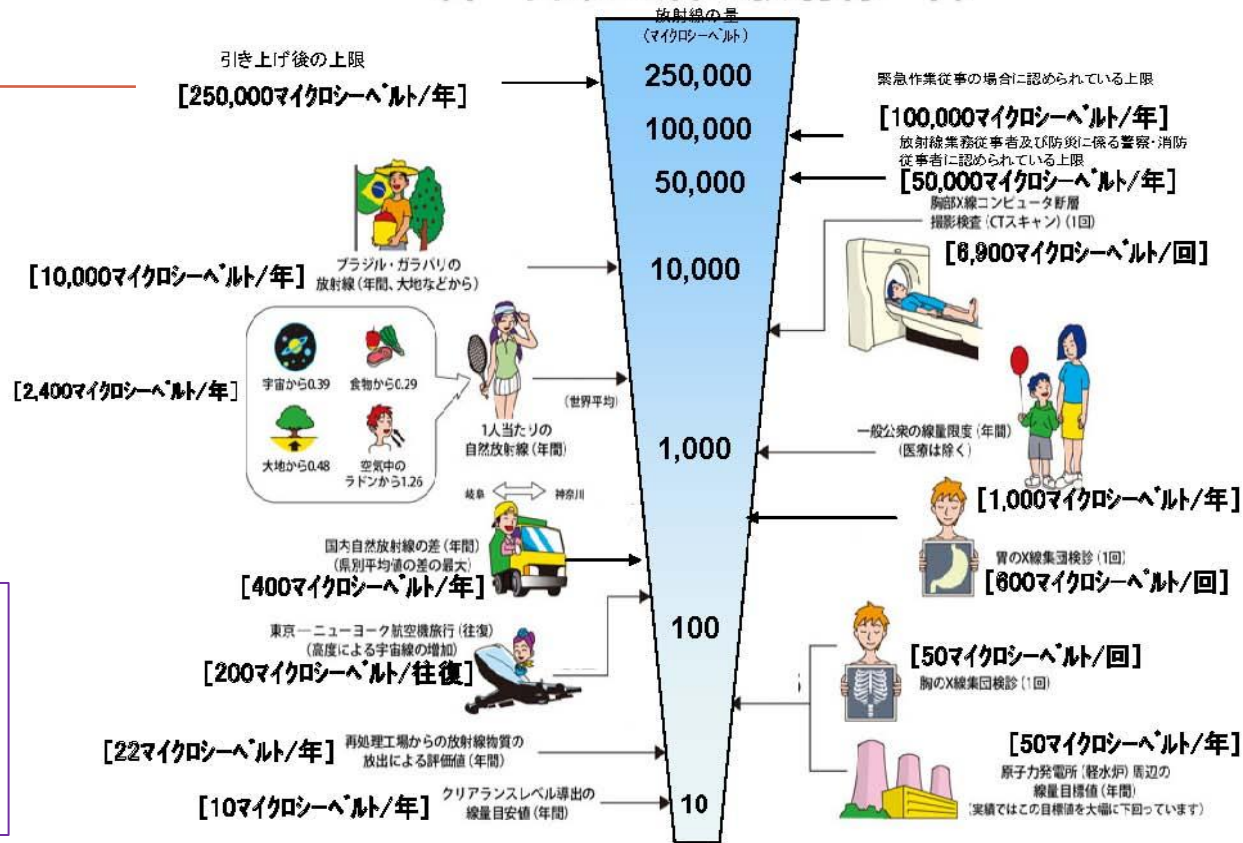
TID耐性

未対策の地上用LSI: 数十Gy~
(福島第一投入のロボット: 100Gy)

対策済の宇宙用LSI: kGy ~

地上は無視できるほど低線量

《 日常生活と放射線 》



※ Sv【シーベルト】=放射線の種類による生物効果の定数(※) × Gy【グレイ】

資源エネルギー庁「原子力2002」をもとに文部科学省において作成

JAEA 高崎量子応用研究所

9



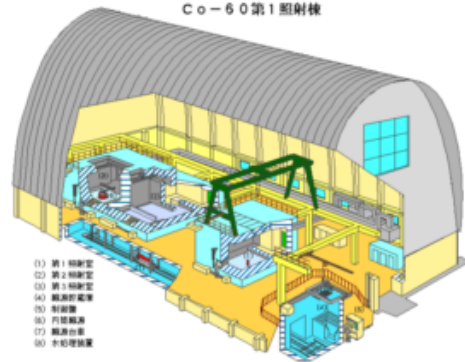
高崎量子応用研究所 群馬県高崎市綿貫町1233

http://www.taka.jaea.go.jp/index_j.html

ガンマ線照射施設

10

Co-60第1照射棟



施設名：第1照射棟
用途：放射線照射利用の研究
貯蔵能力：55.0 PBq
第3照射室線量率：0.1～10 kGy/h

照射室：第1照射室
第2照射室
第3照射室(施設利用として利用可能)
運転開始：昭和39年4月

食品照射ガンマ線照射棟

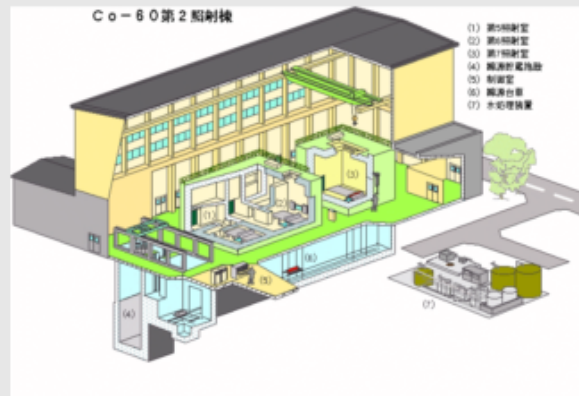


施設名：食品照射棟
用途：放射線照射利用の研究
貯蔵能力：14.8 PBq
第1照射室線量率：0.02～40 Gy/h

照射室：第1照射室(施設利用として利用可能)
第2照射室
運転開始：昭和48年5月

運転スケジュール
月～金曜日：24時間連続照射可能

Co-60第2照射棟



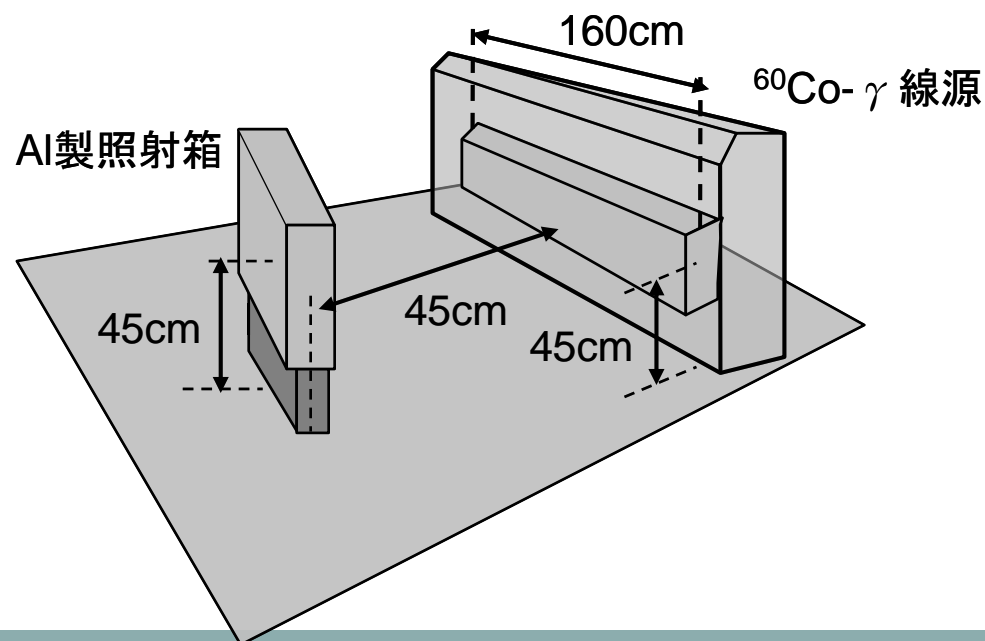
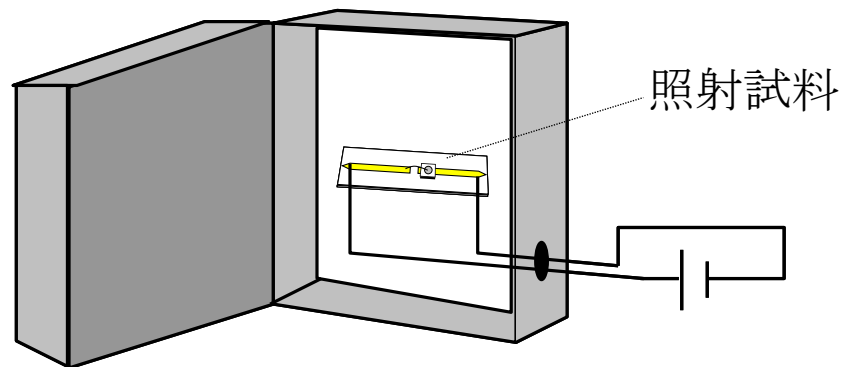
施設名：第2照射棟
用途：放射線照射利用の研究
貯蔵能力：18.5 PBq
第6照射室線量率：1～20 kGy/h

照射室：第5照射室
第6照射室(施設利用として利用可能)
第7照射室
運転開始：昭和45年8月

第6照射室運転スケジュール
月～金曜日：7回の定刻断続照射

トータルドーズ試験 (Co-60 γ -ray or 10keV X-ray)

11



高線量率試験

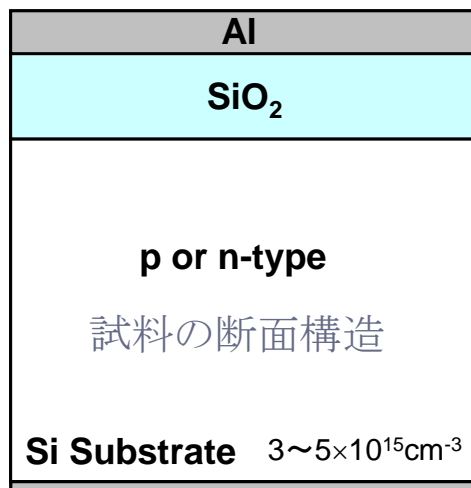
50~300rad/s (MIL-STD-883D等)

低線量率試験

0.01rad/s程度

照射前後の電気特性評価の例

12

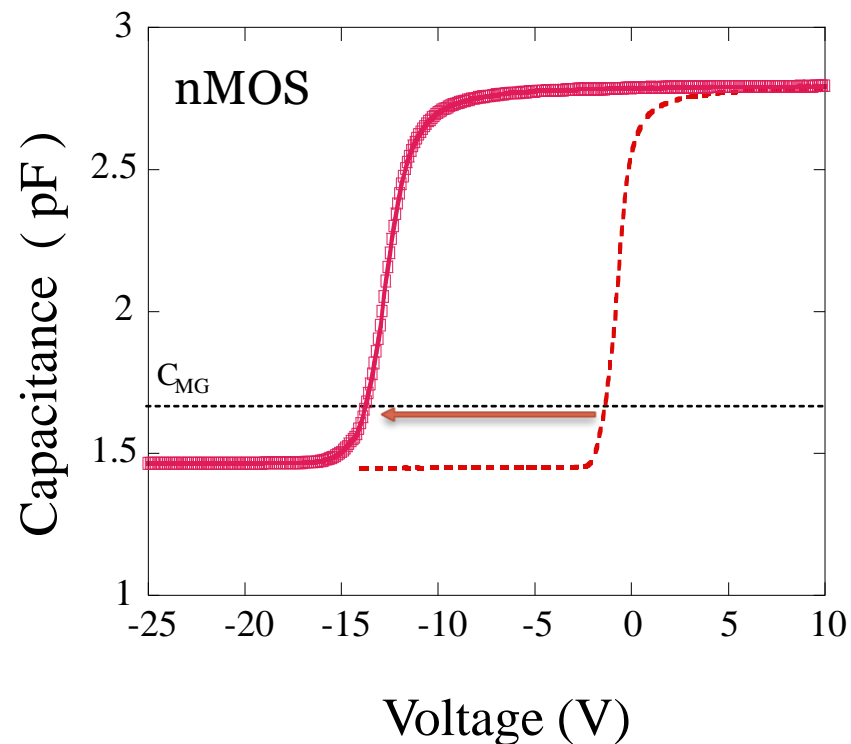


①⁶⁰Co-γ線の照射でTIDを導入

- ・吸収線量率=6.3kGy (SiO₂) /h
- ・照射時間=1時間
- ・全吸収線量=6.3kGy(SiO₂)

②高周波(1MHz)の容量・電圧(CV)特性を測定

- ・固定正電荷密度の評価
- ・界面準位の評価



しきい値電圧のシフト
移動度低下
リーク電流増加

LSIのトータルドーズ効果(例)

13

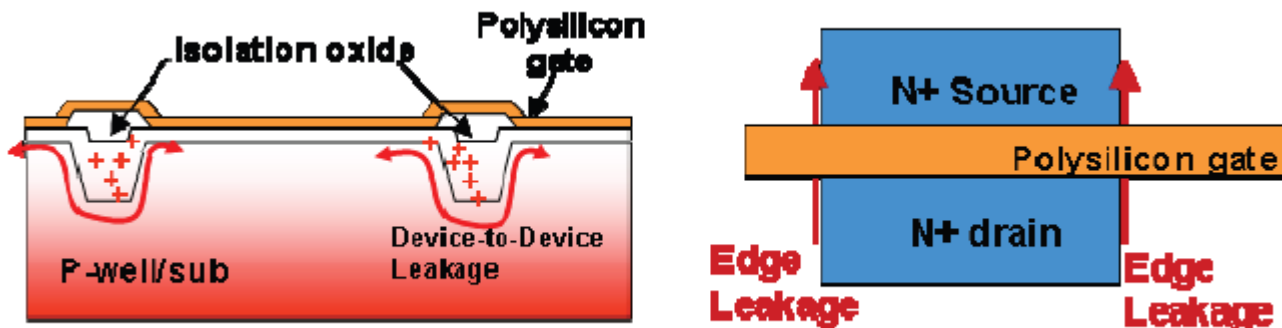


Figure II.A-1. TID induced edge leakage and device-to-device in UDSM devices⁸

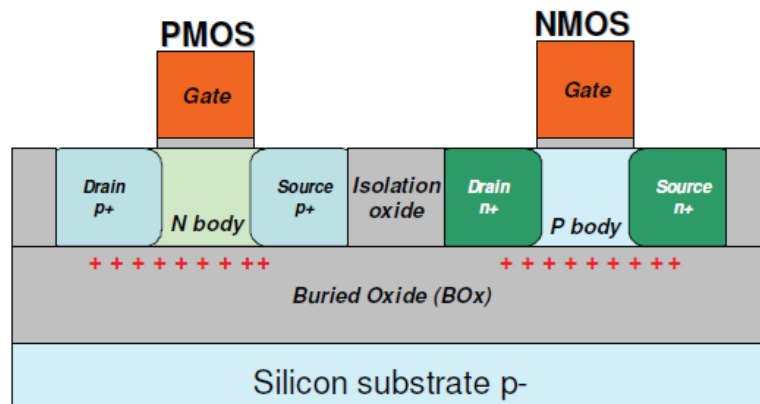


Figure II.A-7. SOI NMOS/PMOS with TID induced trapped charge

IEEE TNS Short course より

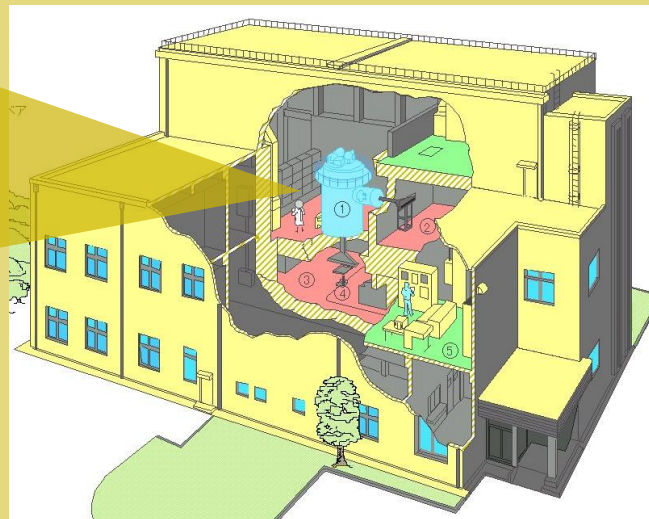
電子線照射施設

14



電子線加速器本体

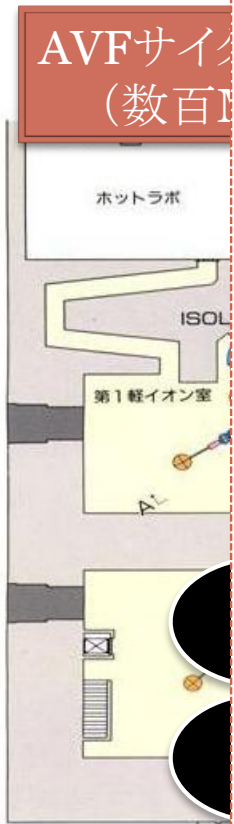
Cockcroft-Walton型
加速エネルギー: 0.5 ~ 2 MeV
電流: 0.1 ~ 30 mA



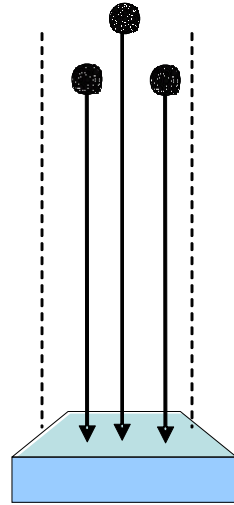
イオン照射施設

15

Takasaki Ion Accelerators for Advanced Radiation Applications



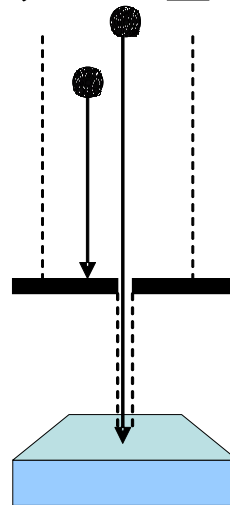
ブロードビーム



HD

最も一般的な照射

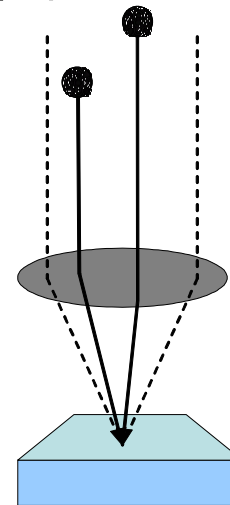
コリメート型ビーム



HE

微小領域を狙い撃ちする

集束型ビーム



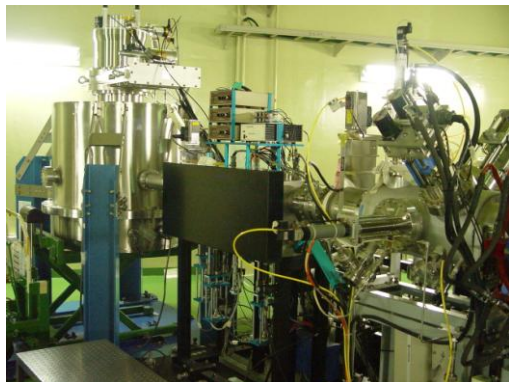
TB

HX

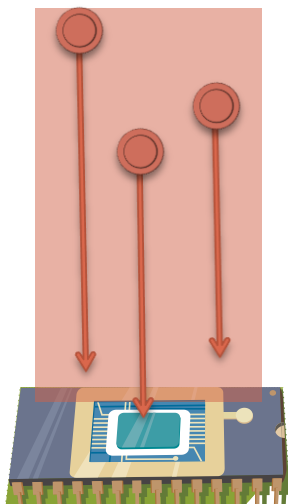


最も一般的なシングルイベント効果試験法

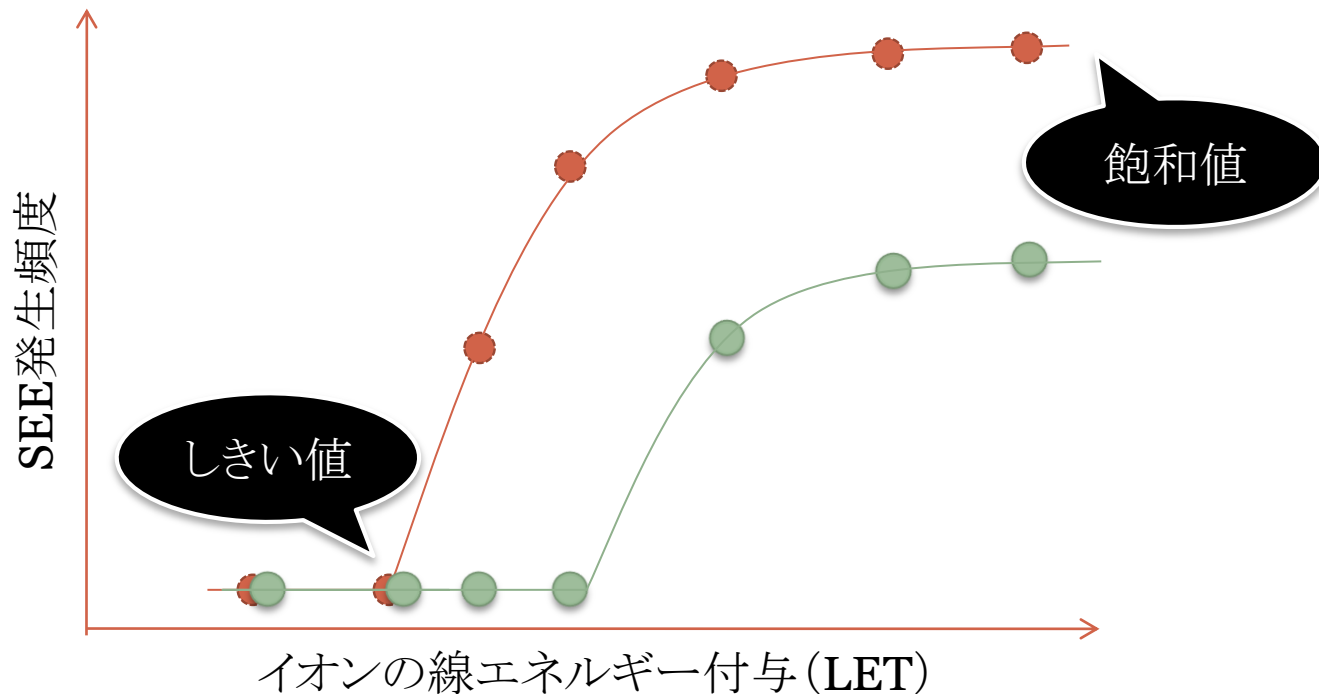
16



ブロードビーム



JAEA・JAXA共同研究



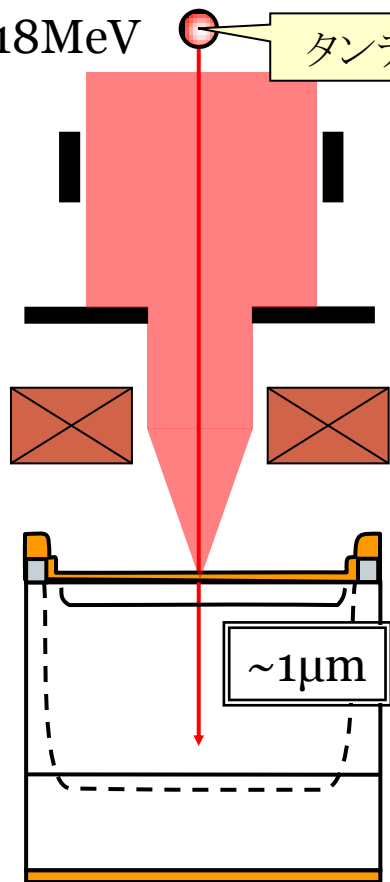
荷電粒子のLETが大きいほど、シングルイベント効果は起こりやすい。

マイクロビームを用いたシングルイベント効果試験法

TB:集束型マイクロビーム

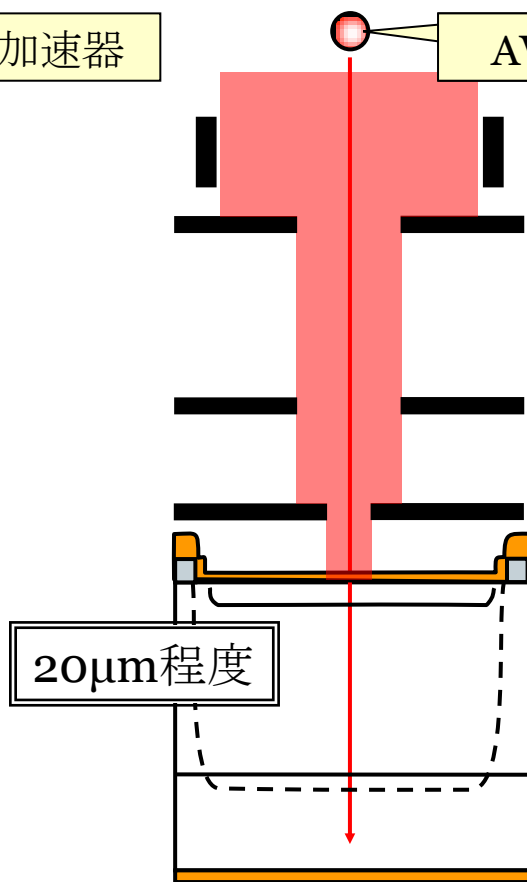
6~18MeV

タンデム加速器



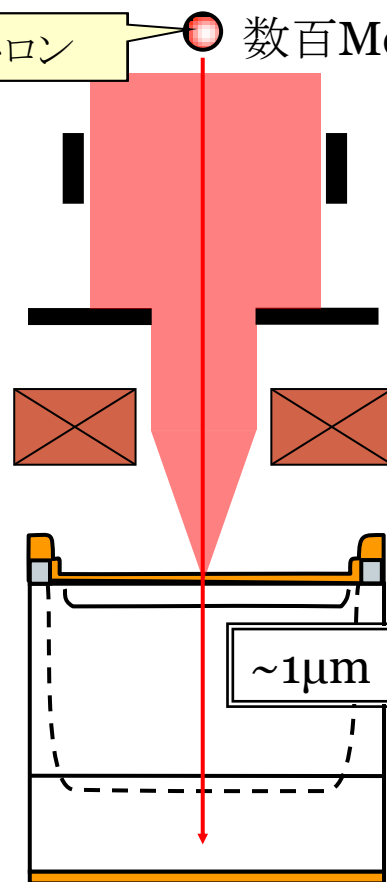
HE:コリメート型ビーム

AVFサイクロトロン



HX:集束型マイクロビーム

数百MeV



TIBIC (Transient Ion Beam Induced Current) システム

原子力機構・半導体耐放射線性研究グループの取組み

18

- 独立行政法人、大学、企業との共同研究

- トータルドーズ効果
- はじき出し損傷効果
- シングルイベント効果

デバイス・回路・システムレベルの放射線耐性強化LSI・太陽電池

γ線・電子線・イオン照射試験

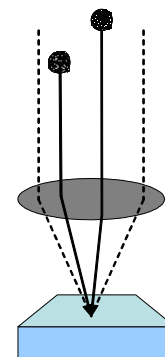
- 炭化ケイ素 (SiC: Silicon Carbide) の照射効果

- 高耐圧、高温動作、省エネルギー
- 高い放射線耐性

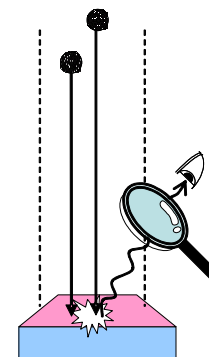
- 照射装置開発

- TIBICシステムの整備・IPEMの開発

集束型ビーム



ブロードビーム



まとめ

19

- 宇宙放射線環境と放射線影響
 - トータルドーズ効果 (LSI)
 - はじき出し損傷効果 (太陽電池)
 - シングルイベント効果 (LSI)

- 照射施設および研究紹介
 - ガンマ線照射施設
 - 電子線照射施設
 - イオン照射施設
 - TIBIC