

2002年4月4日

大阪大学 核物理研究センター 研究会

「中間エネルギーイオンビームによる物理」

半導体の耐放射線性評価の現状と将来展望

日本原子力研究所高崎研究所

伊藤久義

内容

- 宇宙放射線環境
- 半導体と放射線の相互作用
- 加速器を用いた耐放射線性評価
 - 太陽電池の放射線劣化
 - メモリ回路のソフトエラー
- マイクロビームを利用した
エラー発生過程の解明
- 高耐放射線性半導体の開発

宇宙放射線環境

高度
(単位: km)

放射線
(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

36,000 km

静止衛星

(マイクロシーベルト/時)
1,000~200,000 $\mu\text{Sv/h}$

500 km

宇宙ステーション

200 ~ 300 $\mu\text{Sv/h}$

20 km

13 $\mu\text{Sv/h}$

12 km

5 $\mu\text{Sv/h}$

4 km

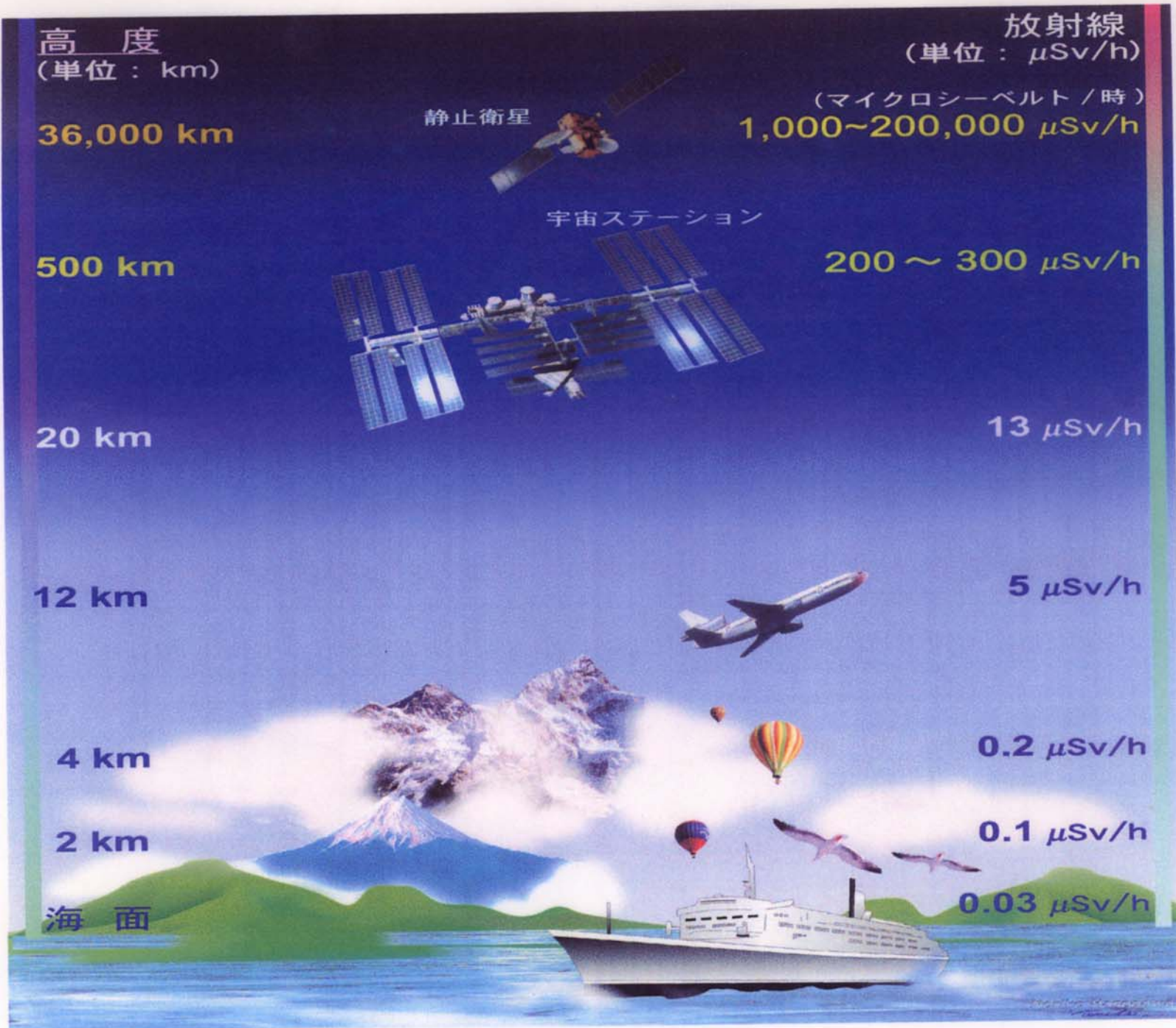
0.2 $\mu\text{Sv/h}$

2 km

0.1 $\mu\text{Sv/h}$

海面

0.03 $\mu\text{Sv/h}$



Artist Rendition of Solar Wind

Created by K. Endo

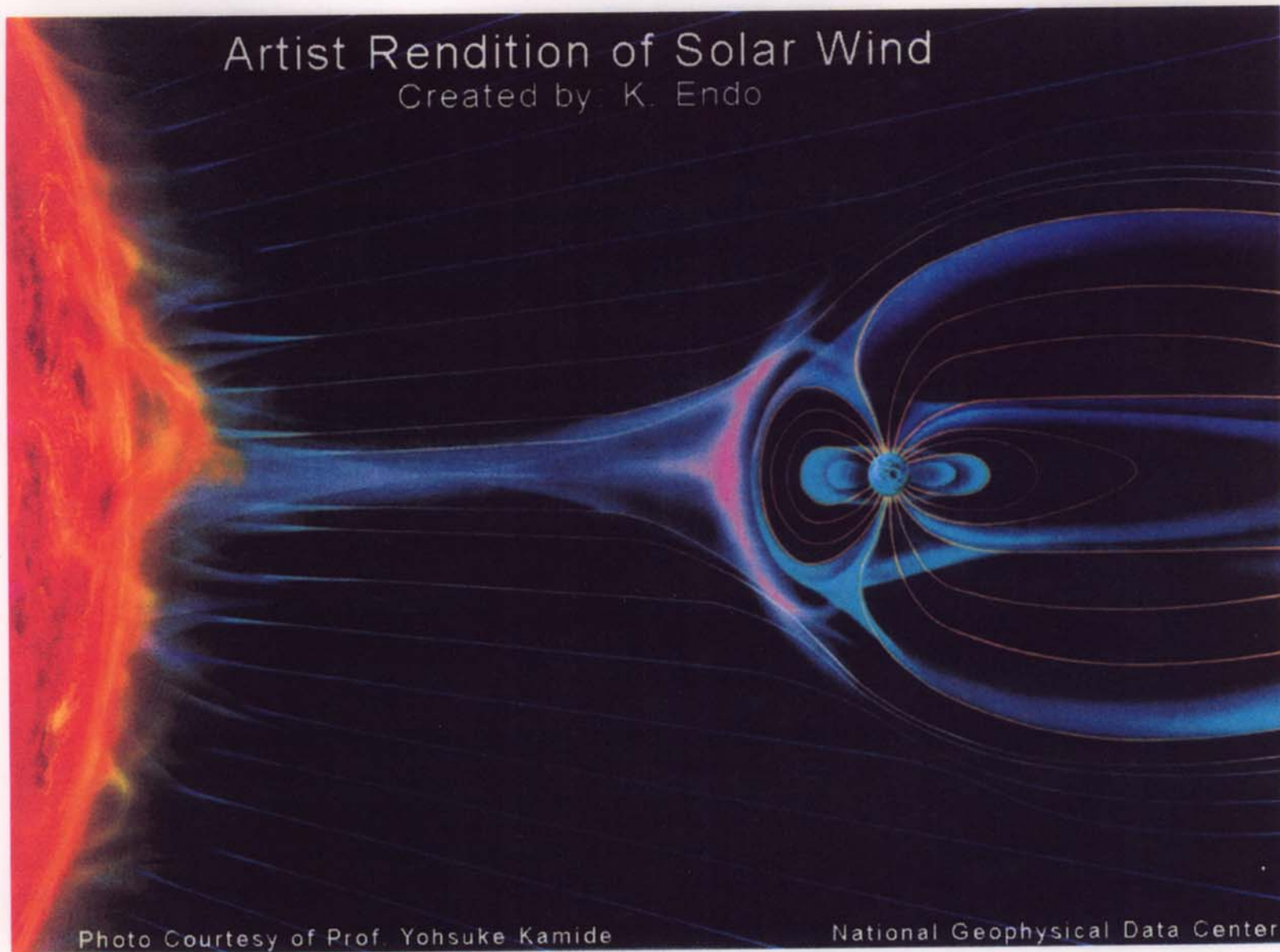


Photo Courtesy of Prof. Yohsuke Kamide

National Geophysical Data Center

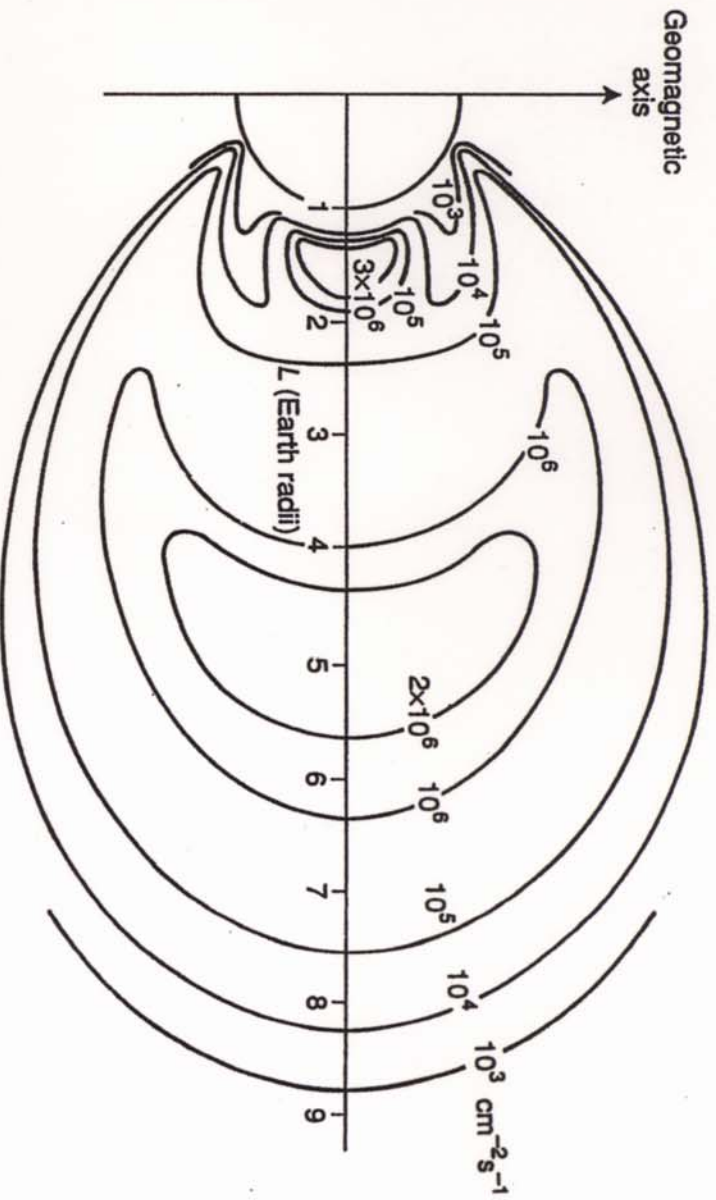


FIG. 2.2 Trapped-electron radiation belts (Daly 1989). Cross-section in the plane of the Earth's magnetic axis plotting contours of equal electron flux of energy above 1 MeV; the radius of the Earth is 6371 km.

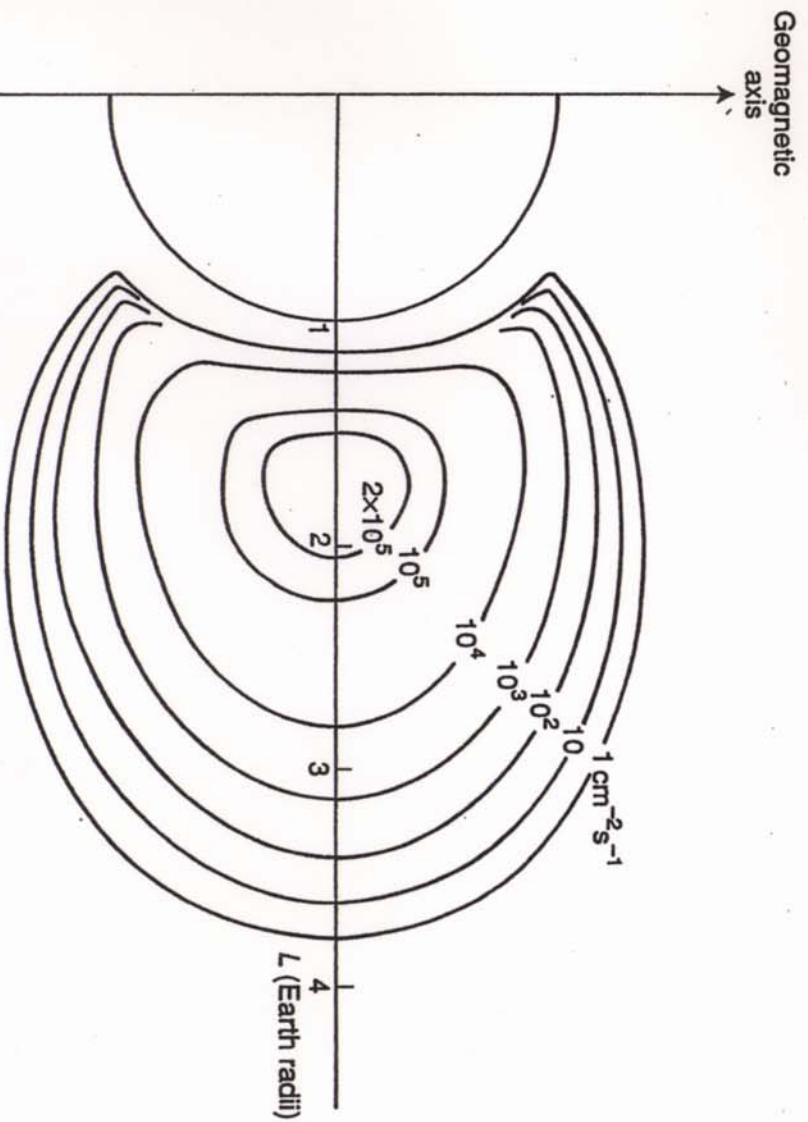


FIG. 2.3 Trapped-proton radiation belts (Daly 1989). Cross-section in the plane of the Earth's magnetic axis plotting contours of equal proton flux of energy above 10 MeV; the radius of the Earth is 6371 km.

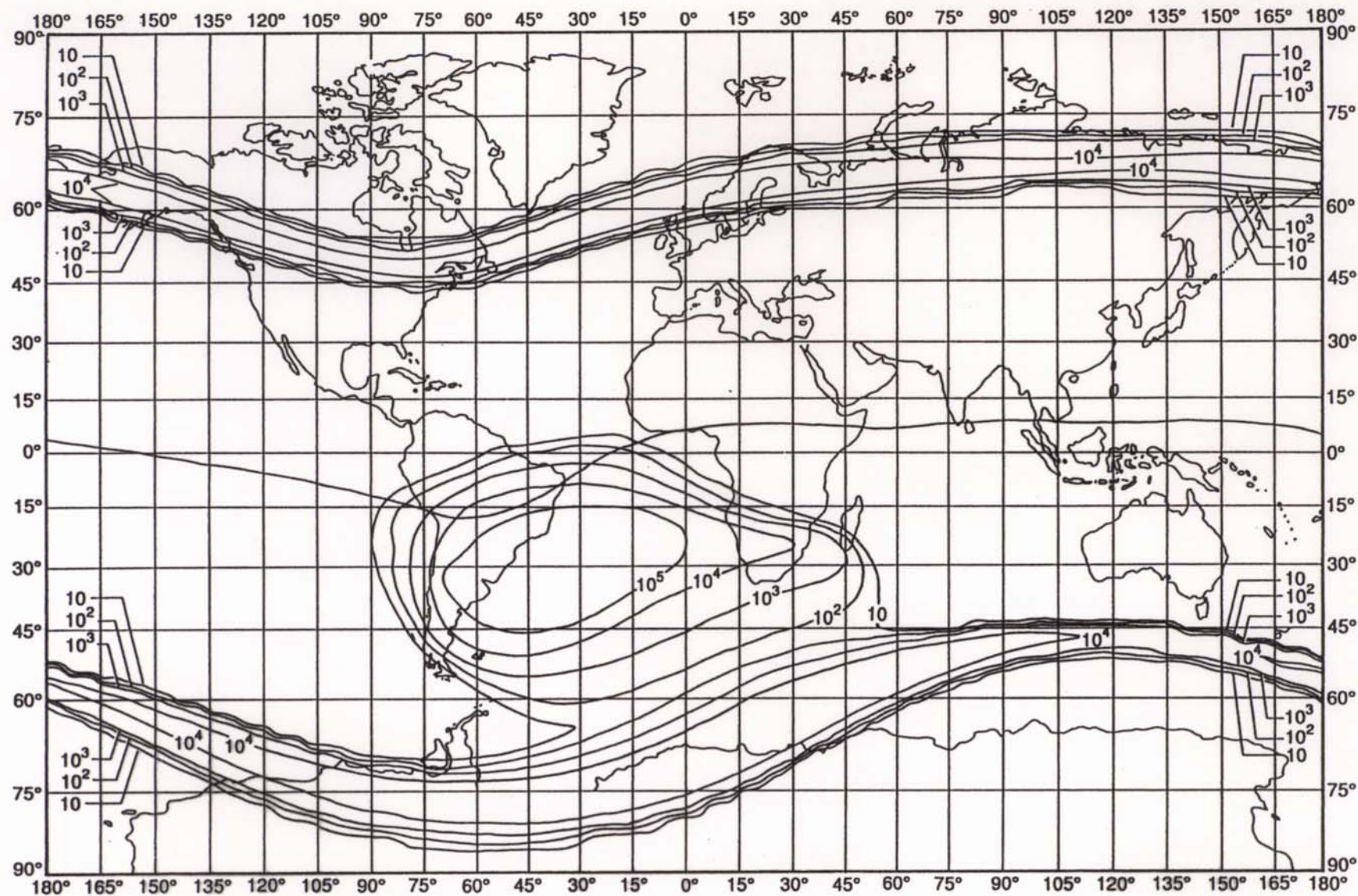


FIG. 2.5 Contours of electron fluxes at >1 MeV, at altitude 500 km, showing 'polar horns' and the 'South Atlantic anomaly' (Stassinopoulos, 1970, © 1970 IEEE. Reprinted with permission).

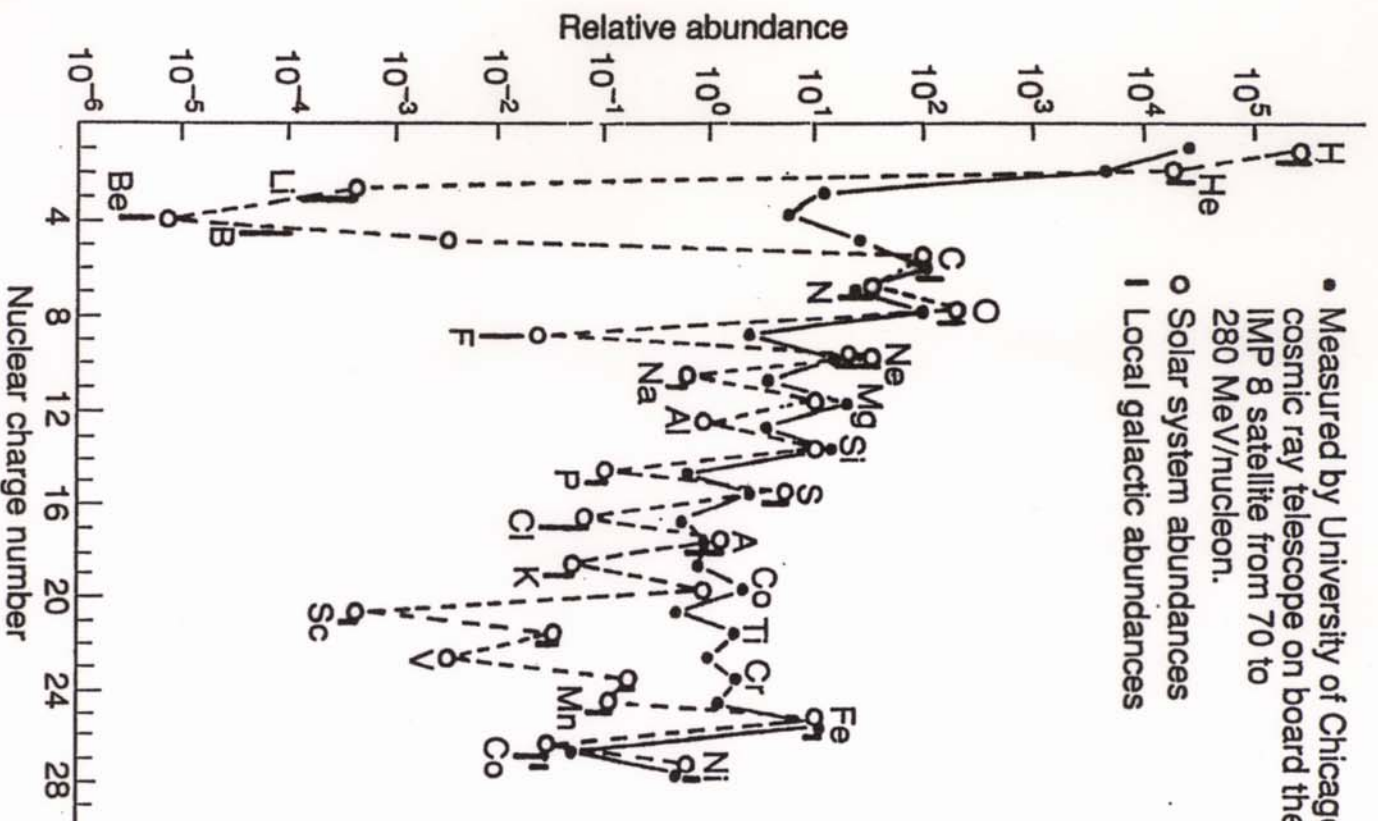


FIG. 2.6 Elemental abundance in galactic cosmic rays compared with solar system abundance (J. Adams 1981).

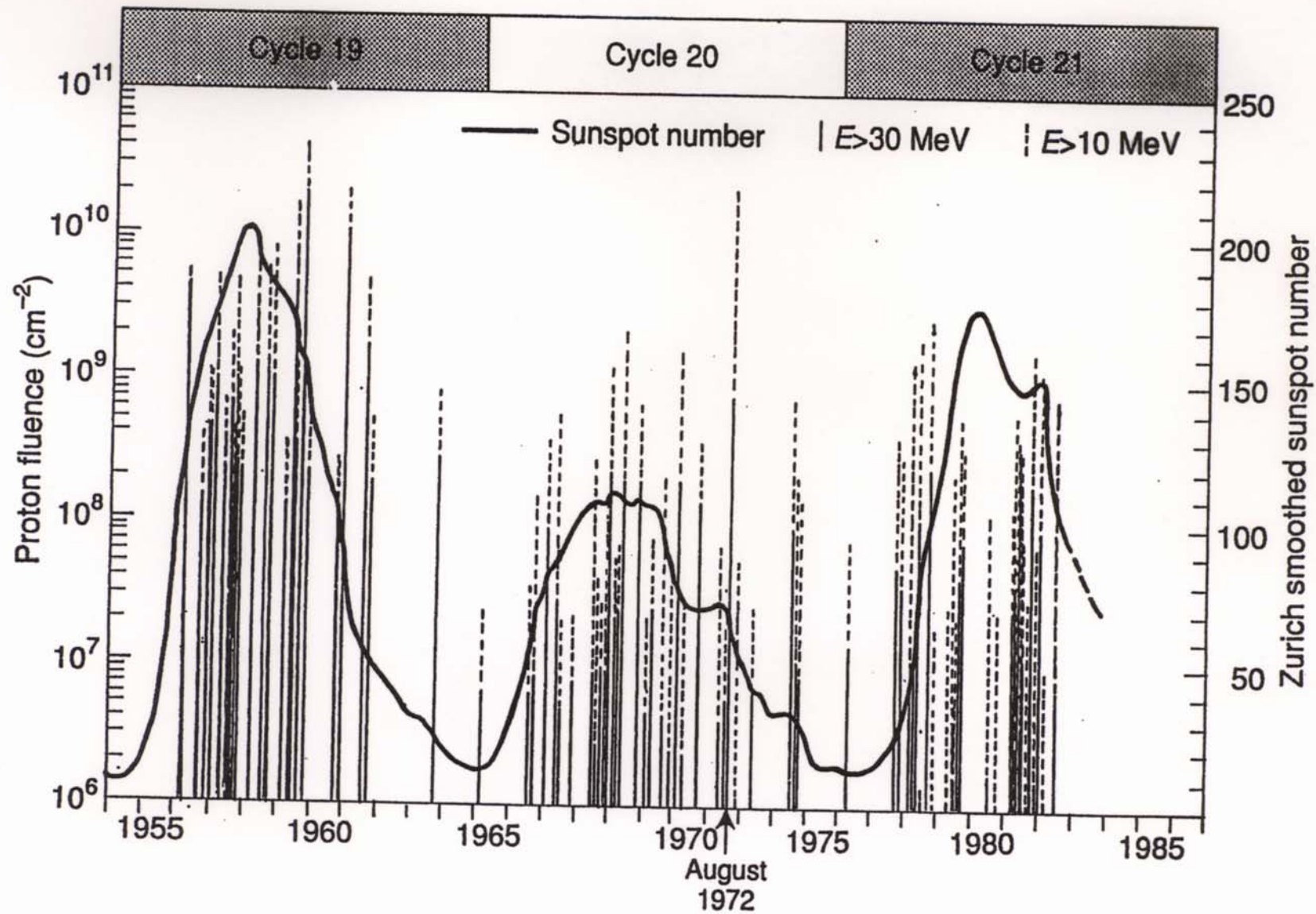
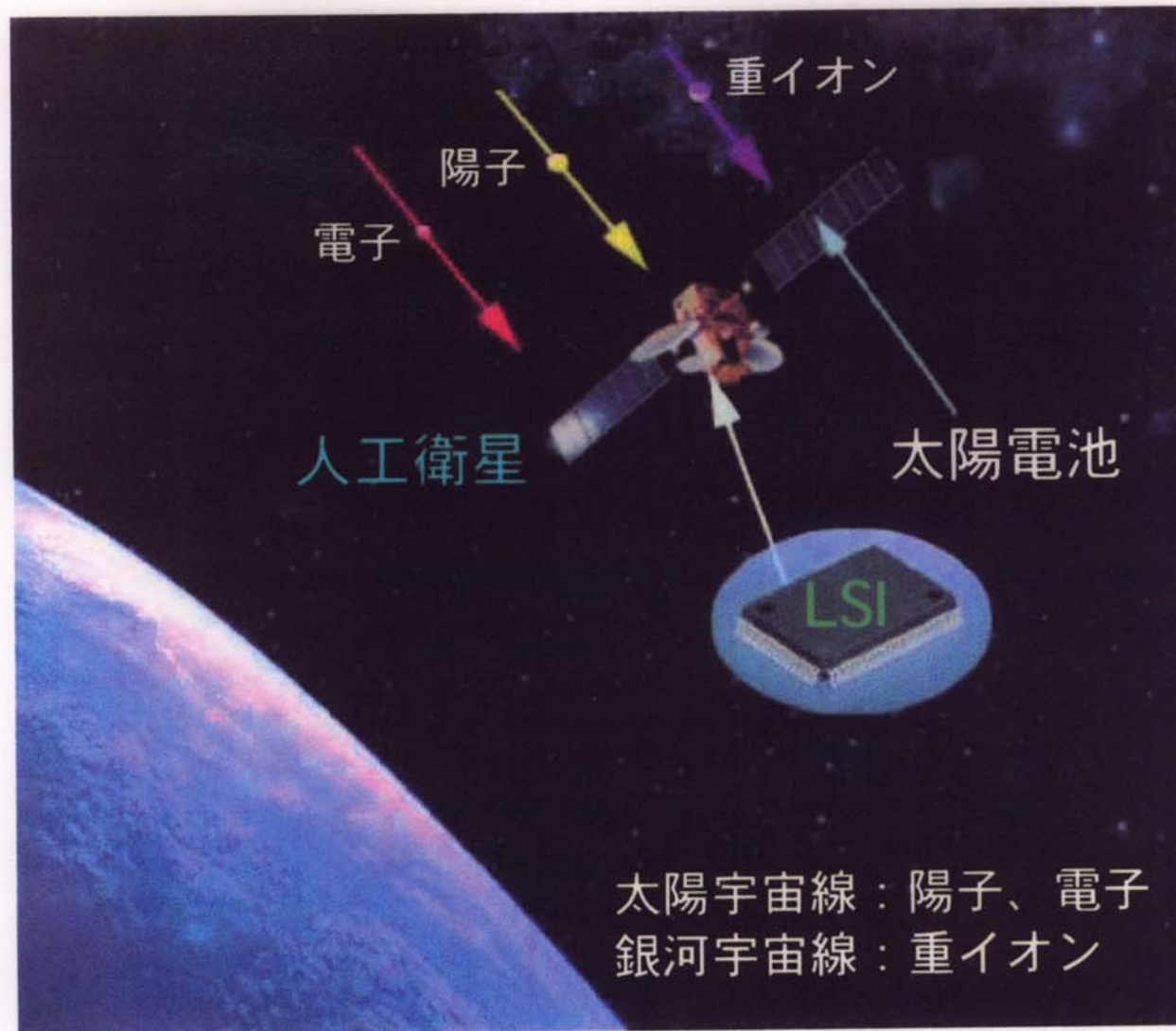


FIG. 2.9 Occurrence of large solar flare fluences (vertical lines) during solar cycles 19, 20, and 21, superimposed on the curve of sunspot numbers. The anomalous size of the August 1972 event is apparent (Goswami et al. 1988).

半導体と放射線の相互作用

宇宙：放射線環境



人工衛星

- ・ 気象観測
- ・ 衛星通信
- ・ 位置計測
- ・ 資源探査

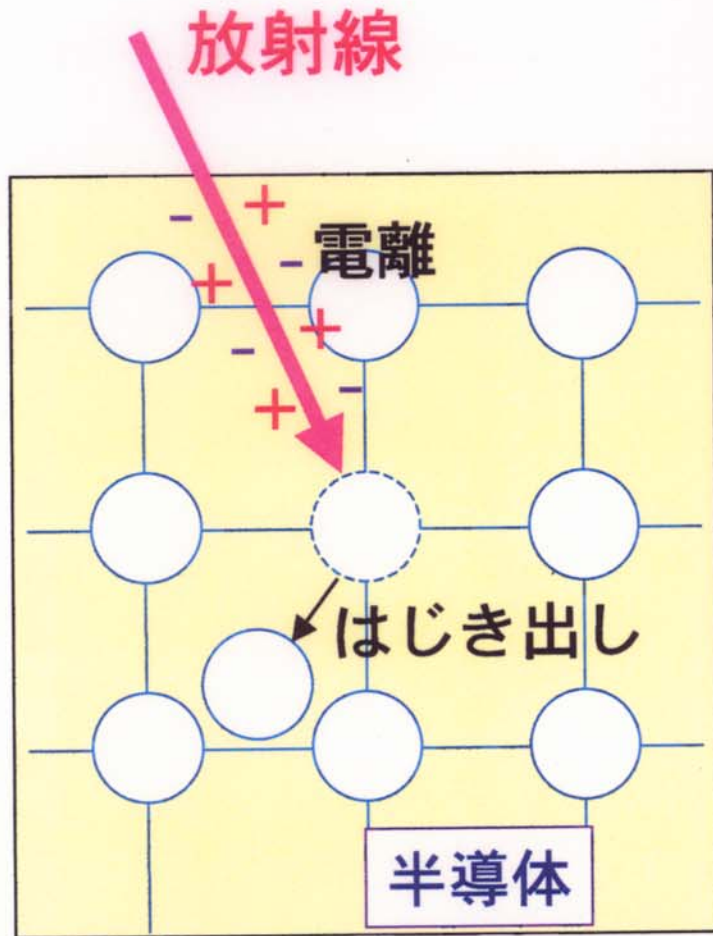
半導体

- ・ 太陽電池
- ・ 集積回路 (LSI)

国際宇宙ステーション



半導体の放射線効果



電離

余分な電気の発生・移動

はじき出し

損傷・格子欠陥の発生

- ・ 太陽電池：出力低下
- ・ L S I ：誤動作



- ・ 宇宙で使う半導体の選択
- ・ 長寿命化

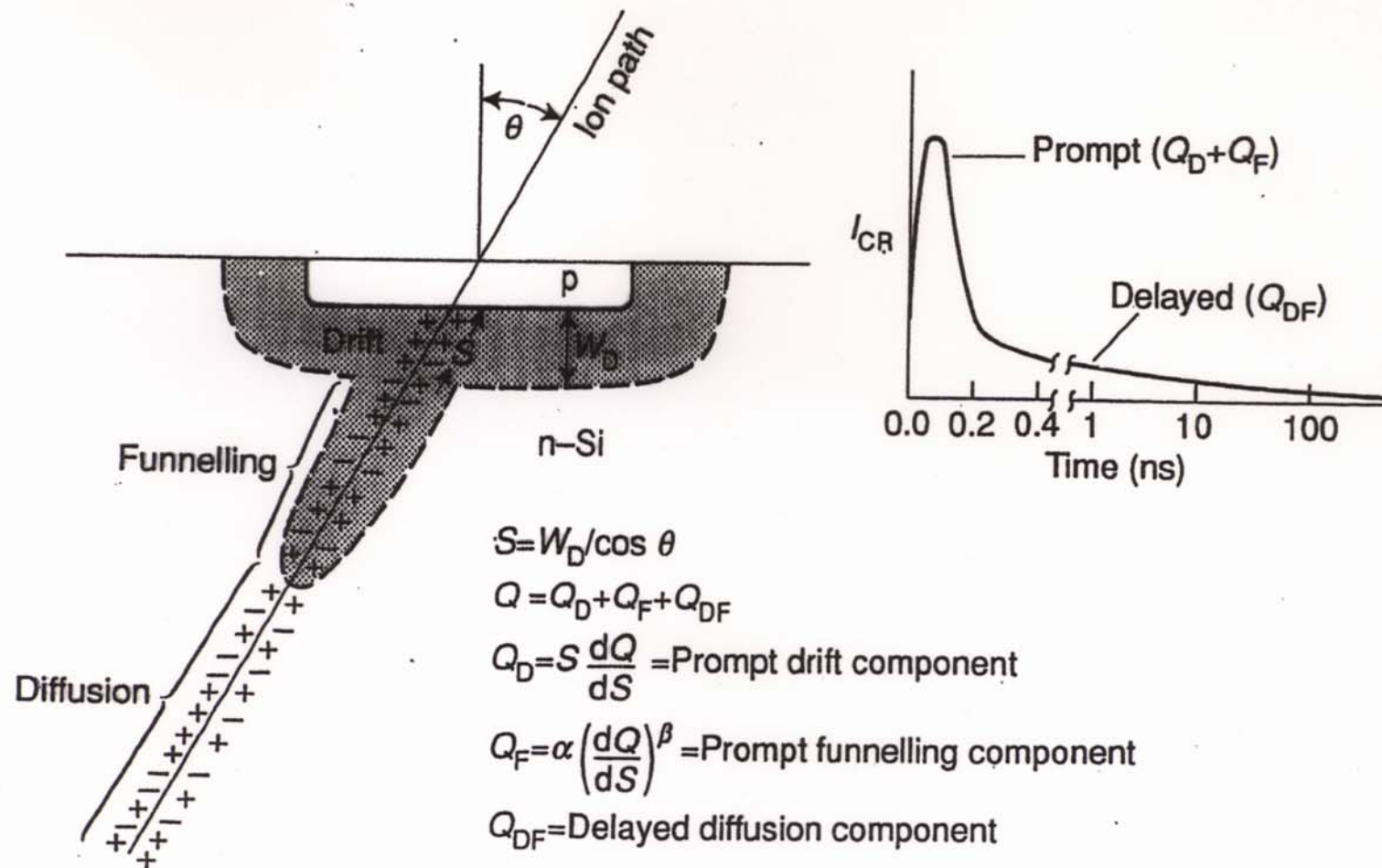


FIG. 3.15 Current pulse in a p-n junction from a single-ion event: cross section and time curve (after Pickel 1983. Reprinted by permission).

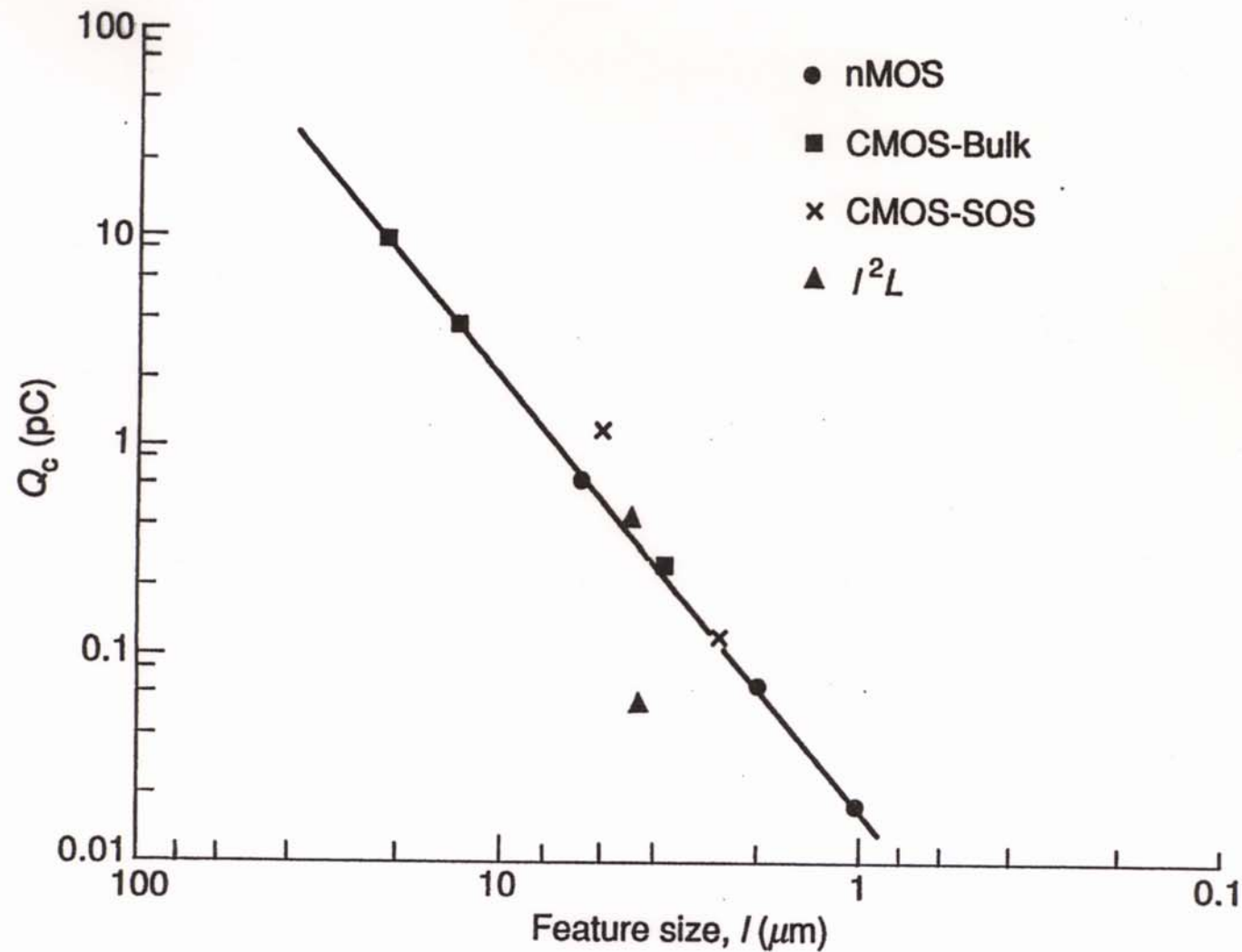


FIG. 3.17 Technology trend in SEU: critical charge (Q_c) as a function of feature size for various technologies (after Burke 1985. Reprinted by permission).

高エネルギー粒子による半導体素子のシングルイベント現象

(1) 生成された電子・正孔対による擬似信号による誤動作

SEU (Single Event Upset) : 記憶情報の反転 (デジタルメモリ)

SET (Single Event Transient) : リニア回路入力段飽和によって生じる異常出力

(2) 生成された電子・正孔対による電流が別のメカニズムを引起して生じる現象

SEL (Single Event Latch-up) : 寄生サイリスタをオンさせて生ずる電源端子間短絡 (CMOS)

SEB (Single Event Burnout) : 雪崩増倍による電源端子間短絡 (power MOSFET, BJT)

BASEU (Bipolar Action SEU) : 寄生トランジスタによるキャリア注入によるSEU (SOS)

(3) 誘電体中で生成された電子・正孔対による雪崩降伏

SEGR (Single Event Gate Rupture) : ゲート誘電体の焼損 (power MOSFET)

SEDR (Single Event Dielectric Rupture) : アンチヒューズ等の誘電体の焼損

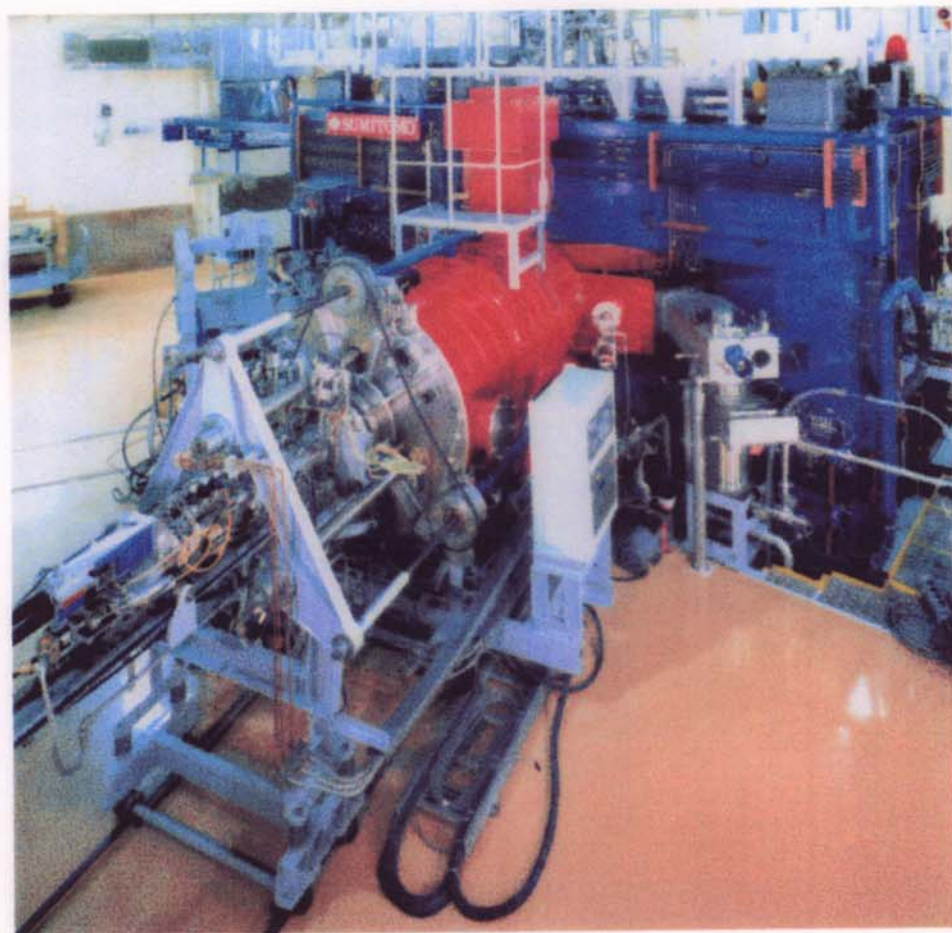
(4) 誘電体中で生成された電子・正孔対によるトータルドーズ効果

SHE (Single Hard Error) : 微小領域のトータルドーズ効果による機能不良

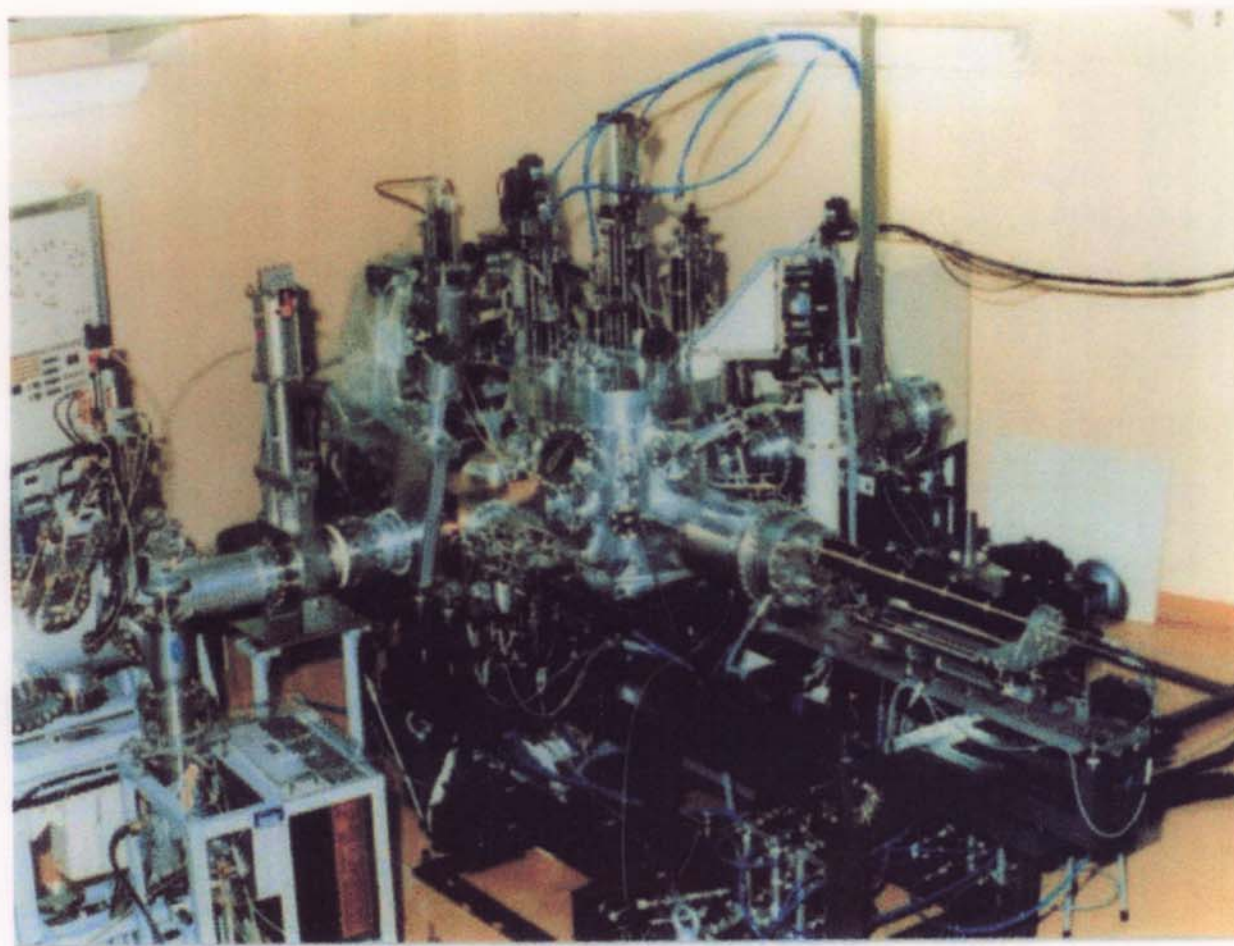
(5) 入射粒子による変位損傷に起因する特性劣化

SEBD (Single Event Bulk Damage) : 微小欠陥による暗電流の増加 (CCD)

加速器を用いた耐放射線性評価
太陽電池の放射線劣化

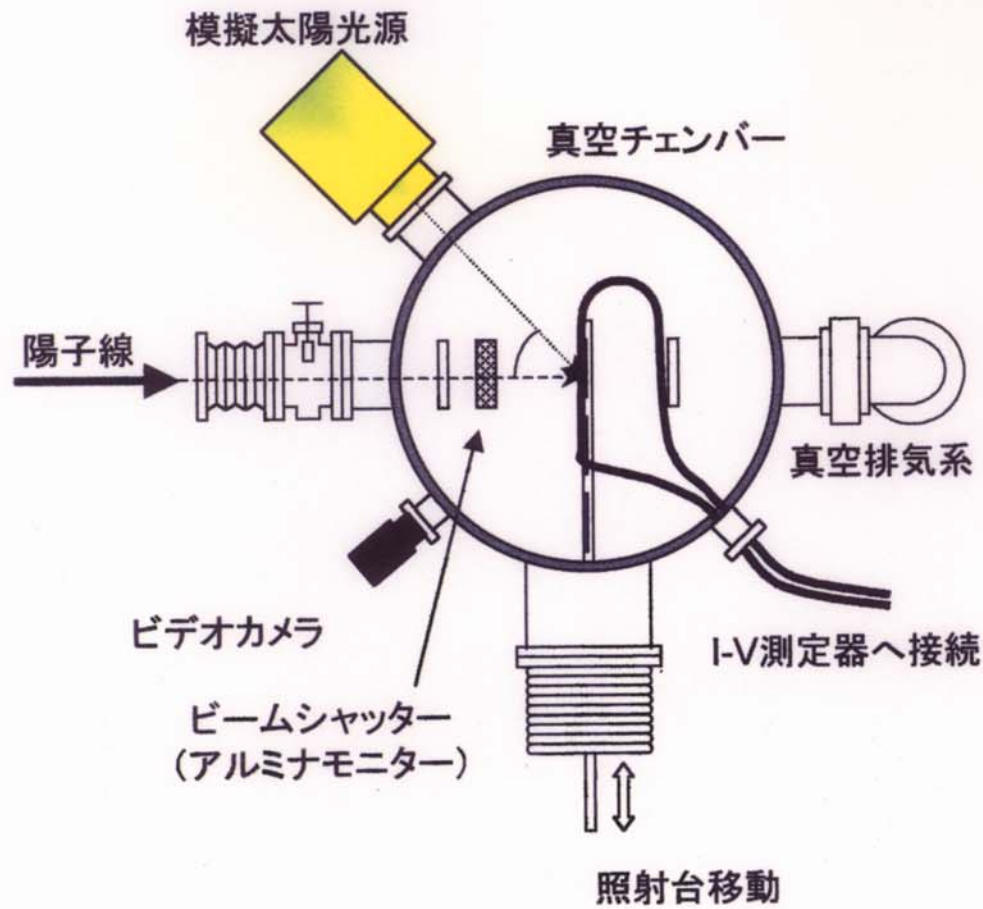


AVFサイクロトロン

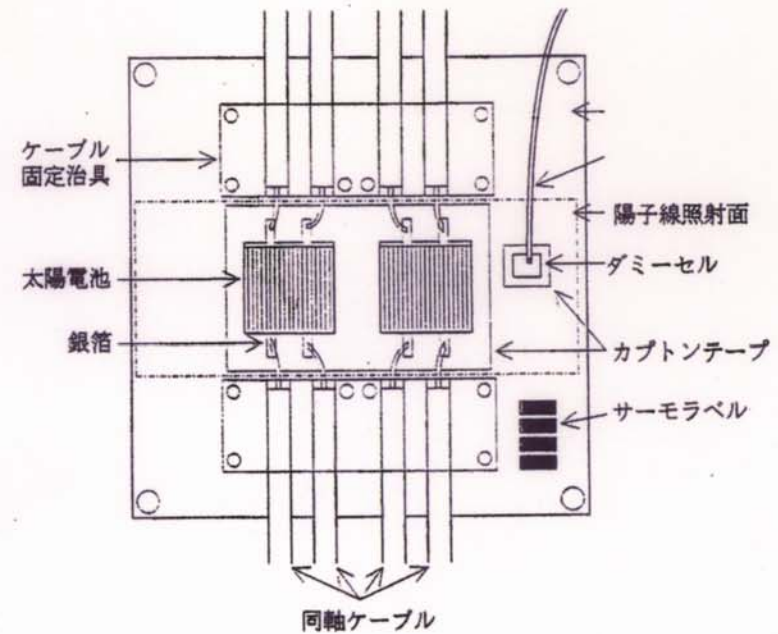


プロトン照射下半導体試験装置

太陽電池照射チェンバー及び試料ホルダー

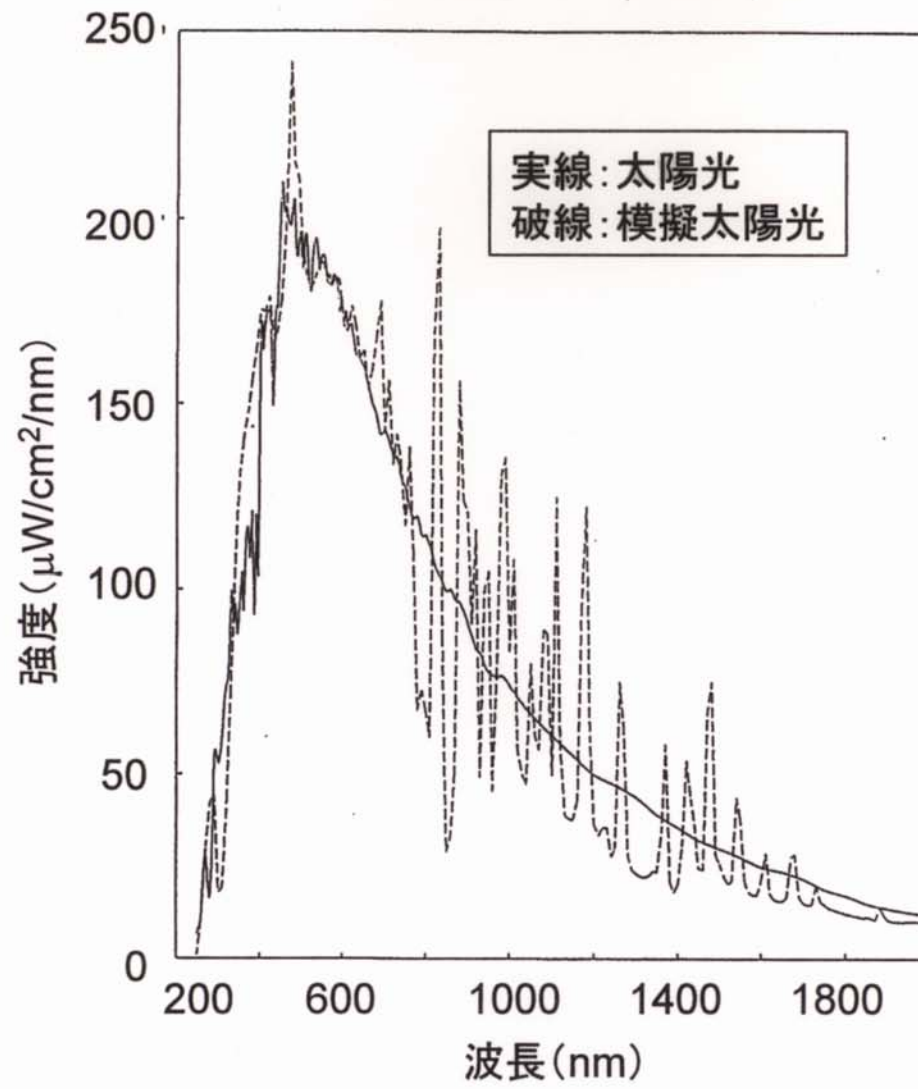


太陽電池照射チェンバー

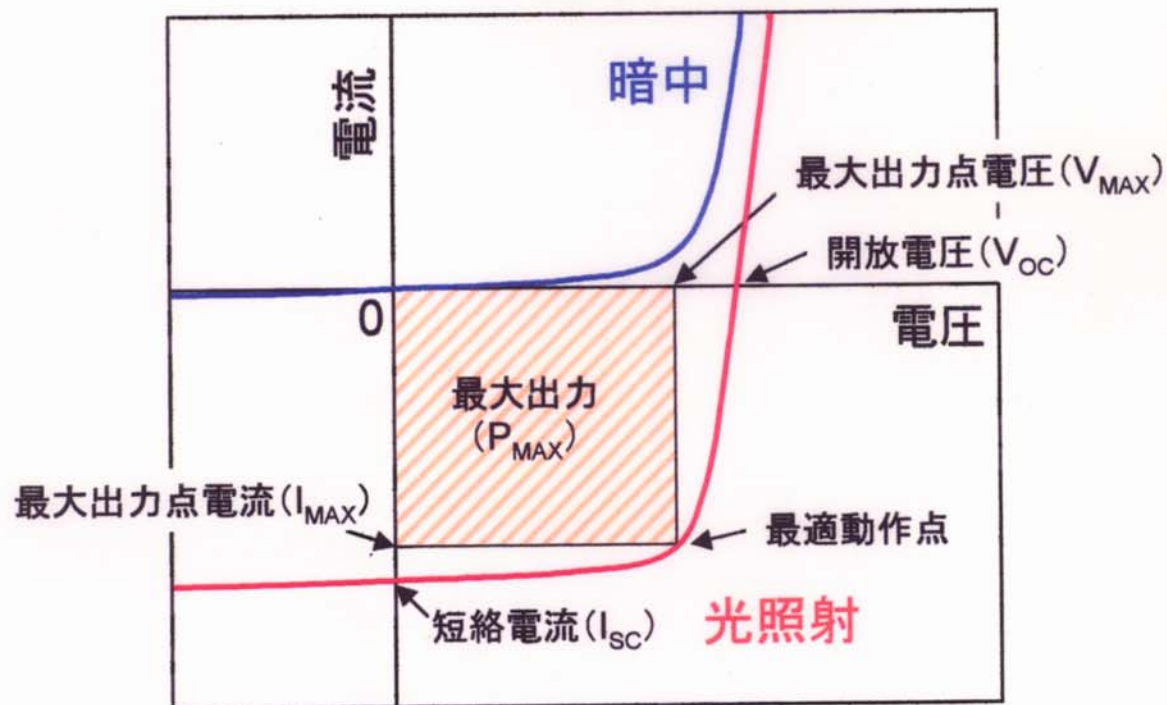


試料ホルダー

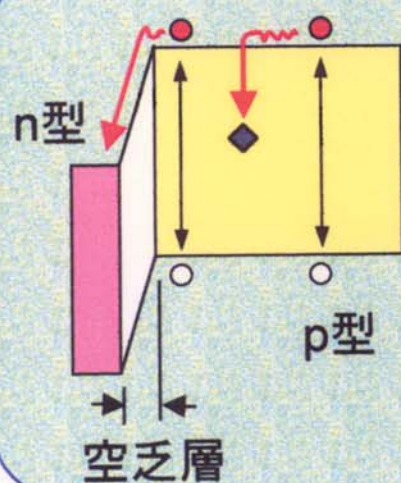
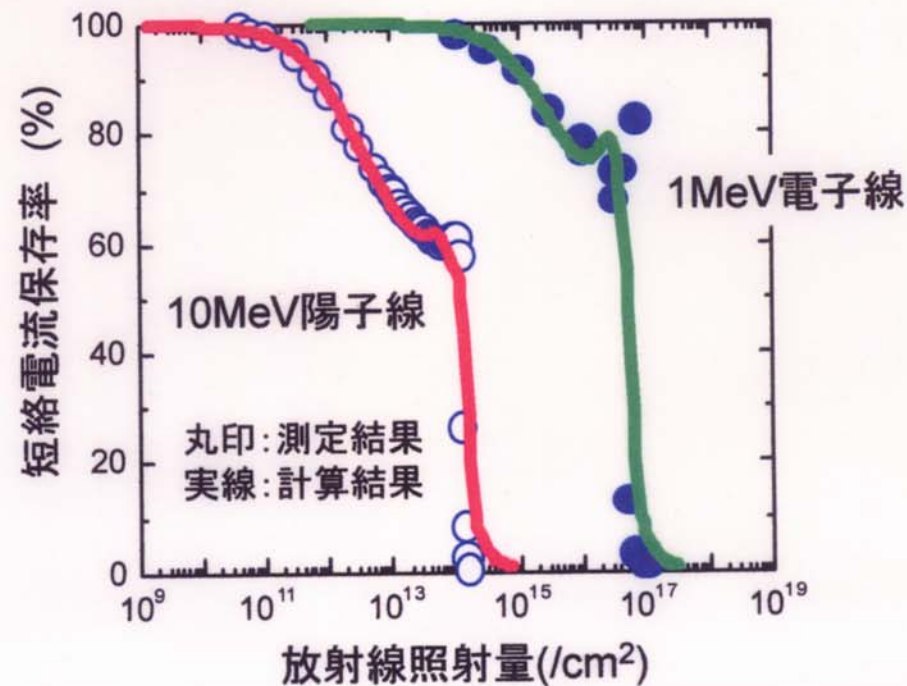
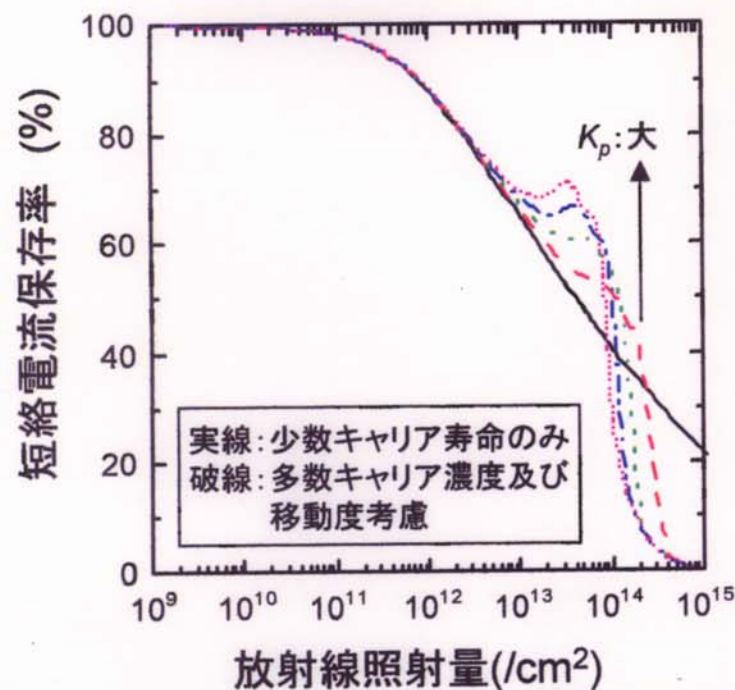
AM0スペクトル



太陽電池の電流－電圧特性



放射線照射によるSi太陽電池出力の変化の解析

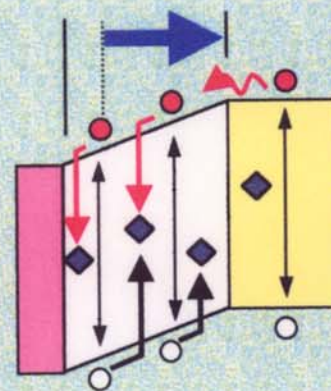


$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + K_\tau \Phi$$

K_τ : 損傷係数
 Φ : 照射量

単調
減少

+



$$p = p_0 - K_p \Phi$$

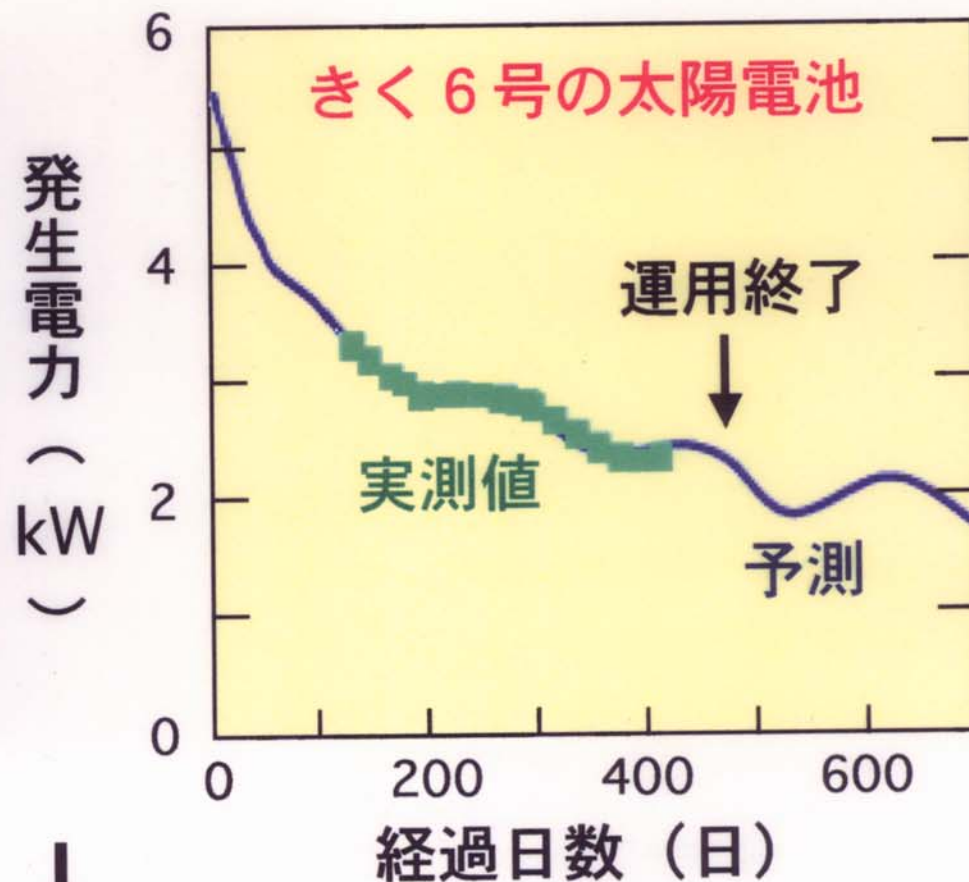
K_p : キャリア濃度減少率

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_0} + K_\mu \Phi$$

K_μ : 損傷係数

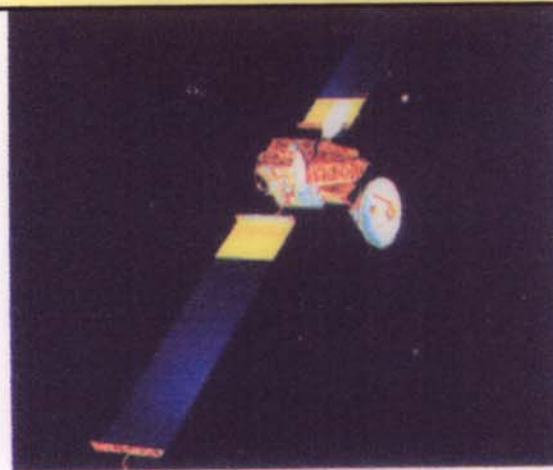
急落

衛星搭載太陽電池の耐久性評価

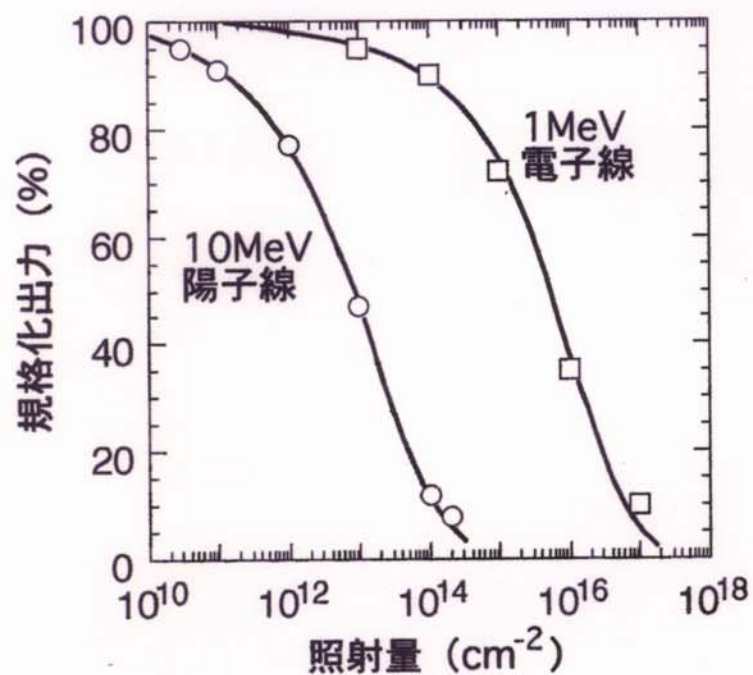


実衛星の運用策定に貢献

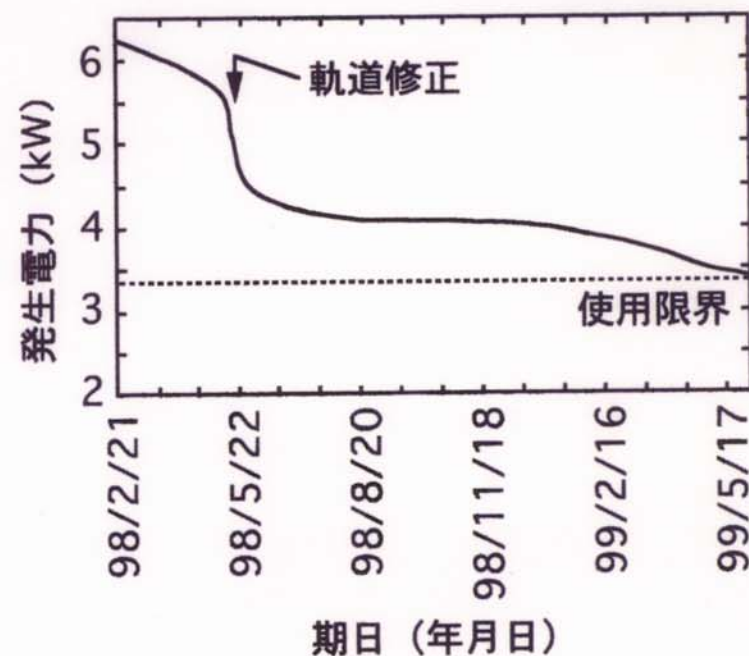
「かけはし」のGaAs太陽電池の耐久性評価



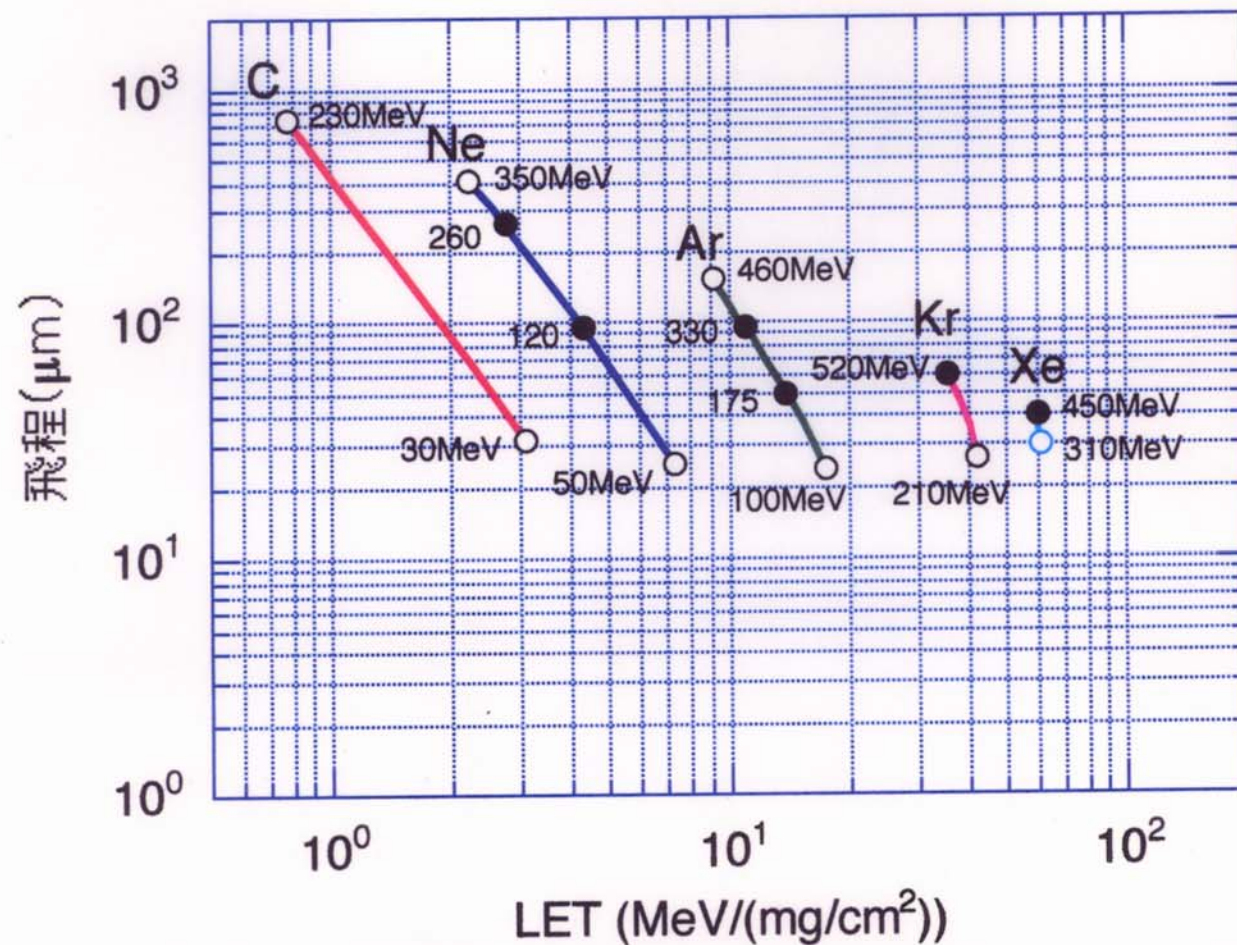
GaAs太陽電池の照射試験結果



「かけはし」搭載電池の発生電力予測



加速器を用いた耐放射線性評価 メモリ回路のソフトエラー

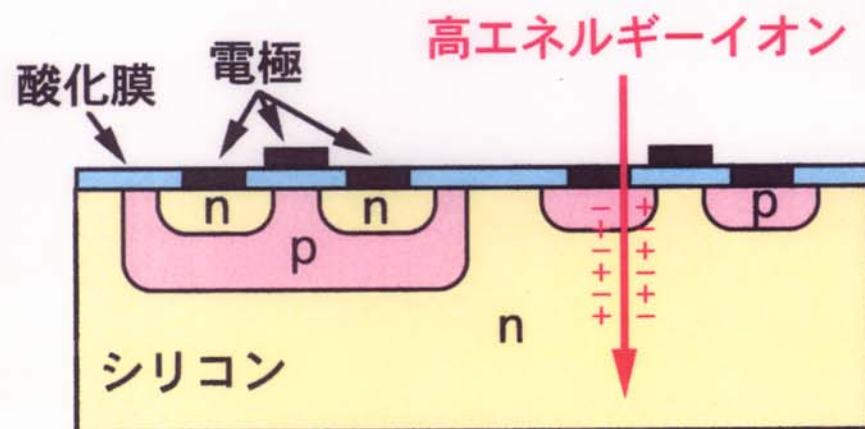


AVFサイクロトロンにより加速される重粒子のシリコン中でのLET及び飛程パラメータは加速エネルギーで、○印は各重粒子の最小及び最大エネルギーに対応する。●印は実際の試験条件に対応する。

宇宙用半導体素子のシングリイベント効果の評価

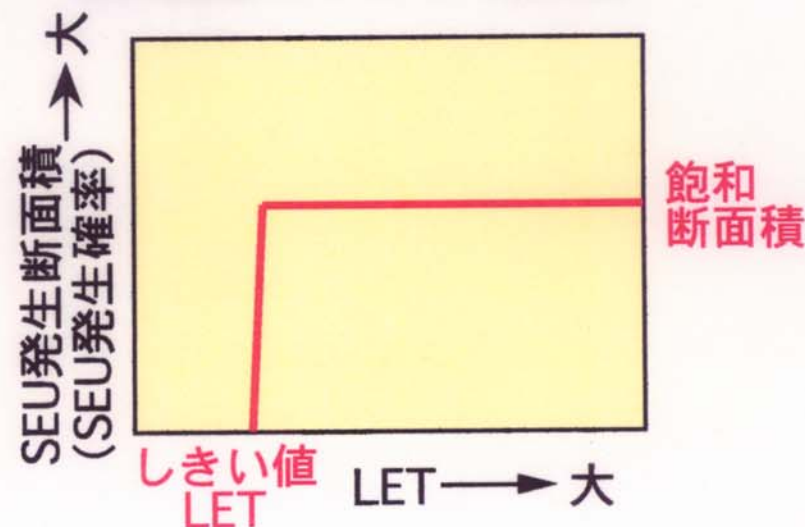
シングリイベント現象とその評価方法

シングリイベントアップセット (SEU)



半導体素子

SEU発生確率のLET依存性



SEU耐性の評価

SEU発生確率のLET依存性の取得



しきい値LETと飽和断面積の決定

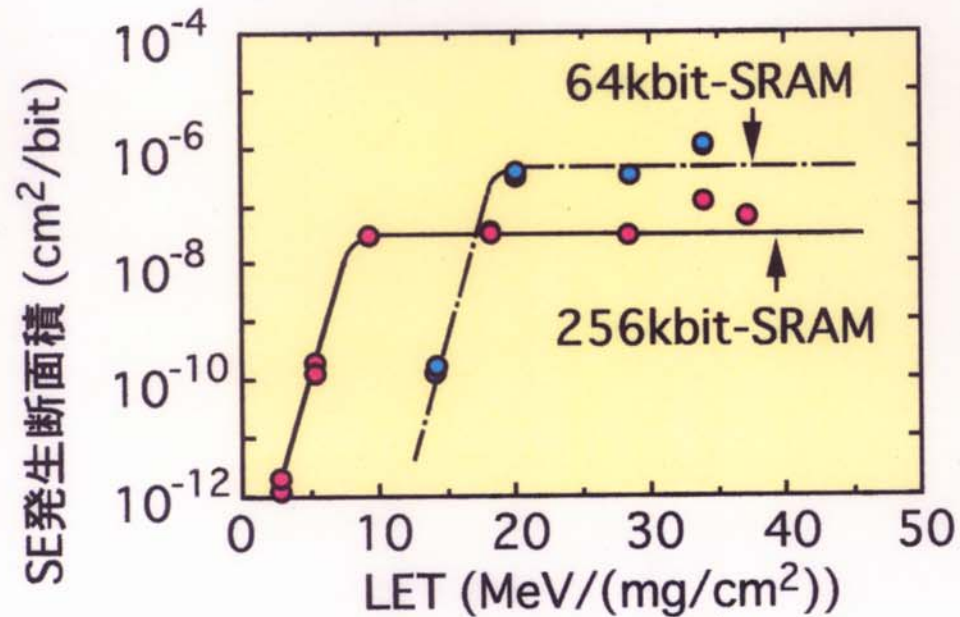


実環境でのSEU発生確率の予測

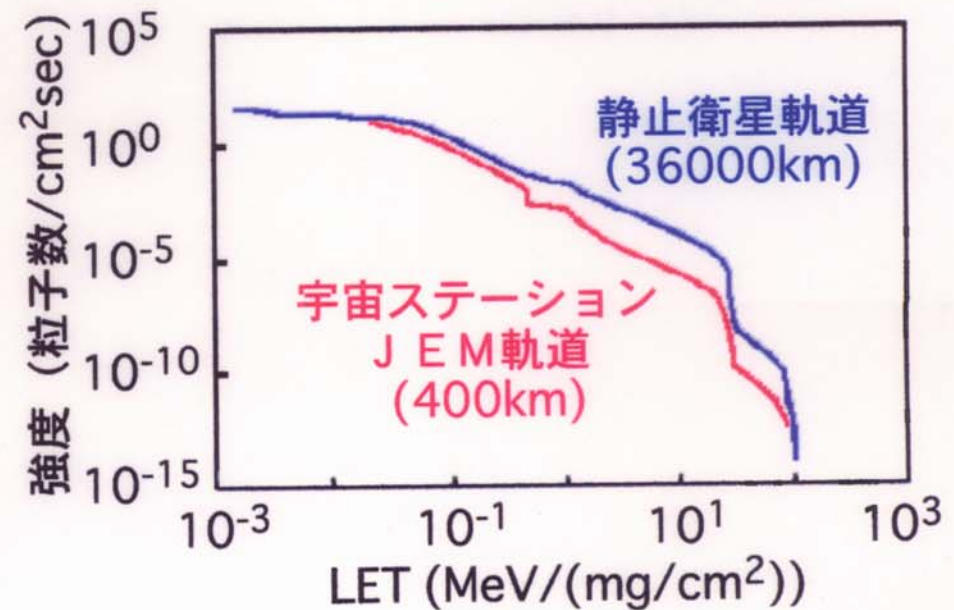
宇宙放射線環境

実環境でのSE発生予測

宇宙用メモリ素子SRAMの 試験結果



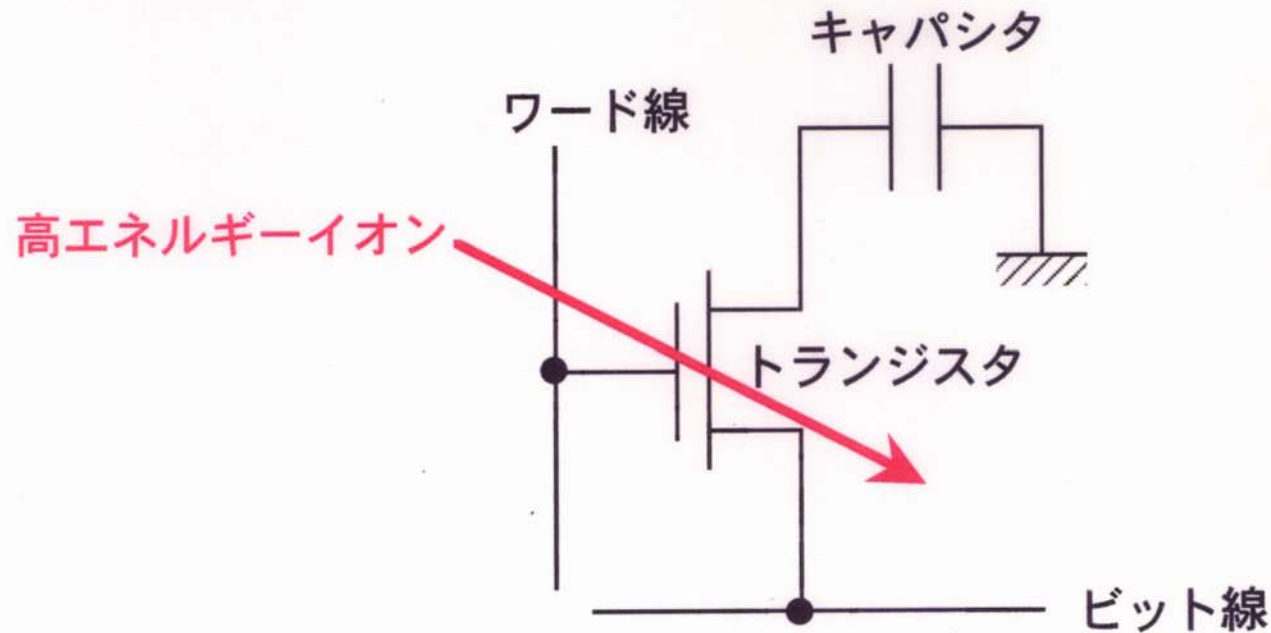
宇宙放射線環境



メモリ素子	しきい値 LET ($\text{MeV}/\text{mg}/\text{cm}^2$)	飽和 断面積 (cm^2)	ビットエラー率 (upsets/(bit·day))	
			JEM軌道 400km	静止軌道 36000km
256kbit SRAM	6.4	3.2×10^{-8}	8.6×10^{-8}	7.6×10^{-7}
64kbit SRAM	17	3.9×10^{-7}	7.1×10^{-9}	8.5×10^{-8}

試験対象：DRAM

最新の超高集積メモリ：16Mbit DRAM、64Mbit DRAM



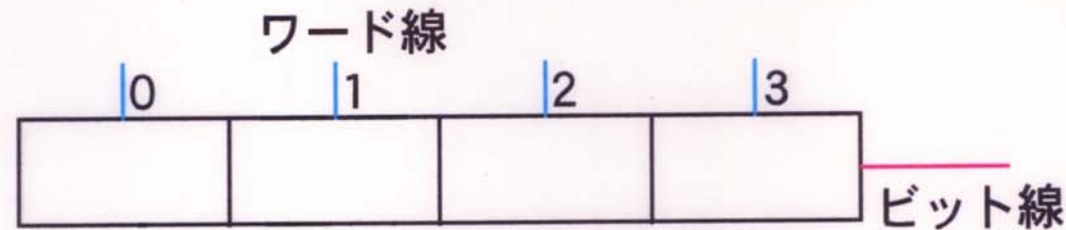
DRAMセル回路

メモリ内容はキャパシタの電荷蓄積状態で決定される

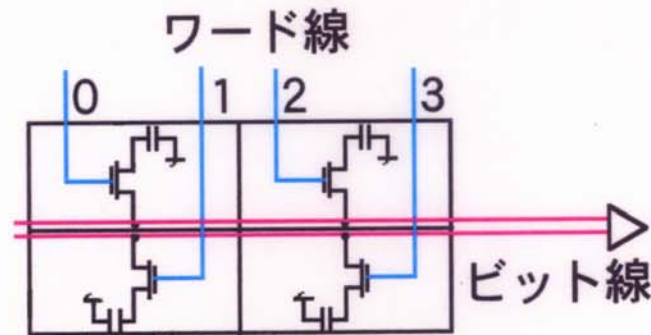
DRAMでのメモリ反転（アップセット）：

セルに蓄積された電荷の放出（放電）

16Mbit DRAMのセル配置



論理的セル配置



セルサイズ：
 $2.48\mu\text{m} \times 1.24\mu\text{m}$

物理的セル配置

電荷蓄積状態と1、0の対応はセルに依存
半数は1、残り半数は0に対応する設計



セル毎に電荷蓄積状態を制御可能
反転セルの幾何学的パターンが取得可能

重イオン照射によるメモリ反転パターン

全セル：充電状態

入射角度

垂直

ワード線方向に
60度傾斜

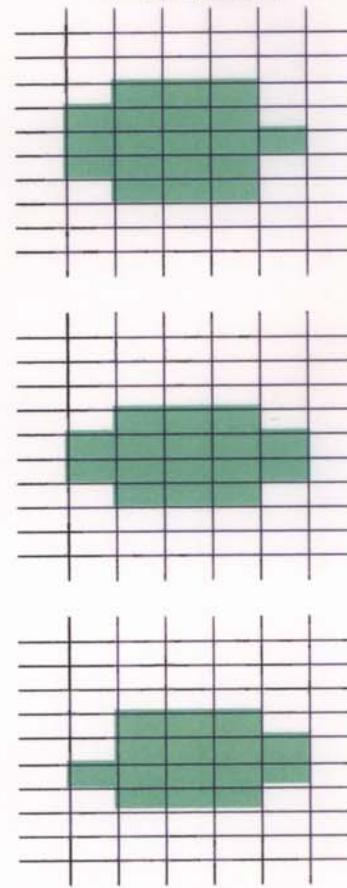
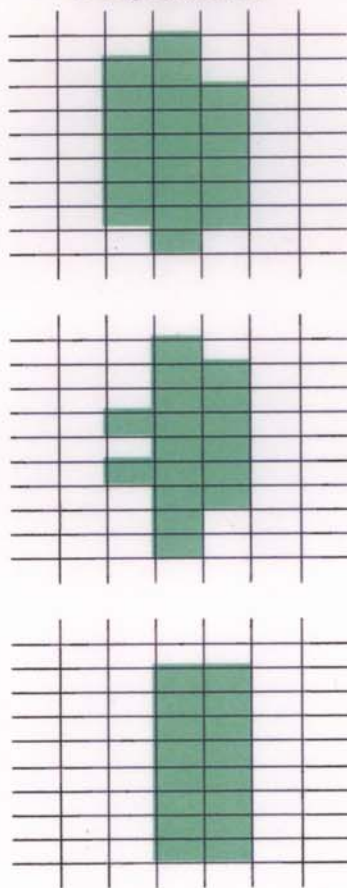
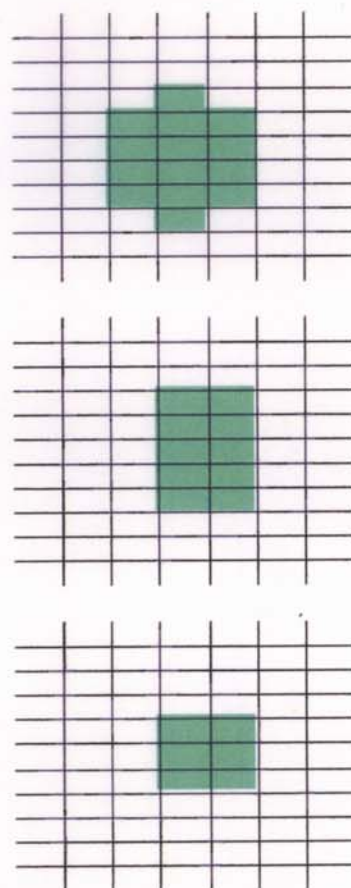
ビット線方向に
60度傾斜

LET (MeV/mg/cm²)

60

37

27



1 個のイオンで隣接した複数のセルが反転

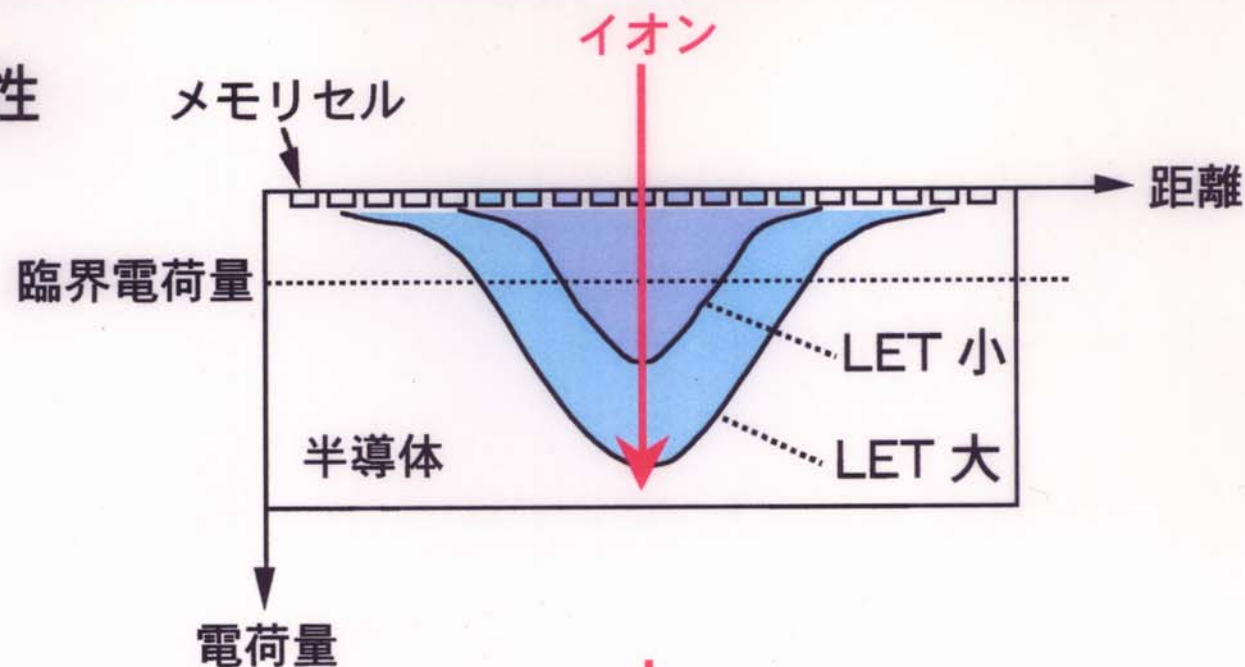
=マルチプルビットアップセット (MBU)

LET大：反転領域拡大

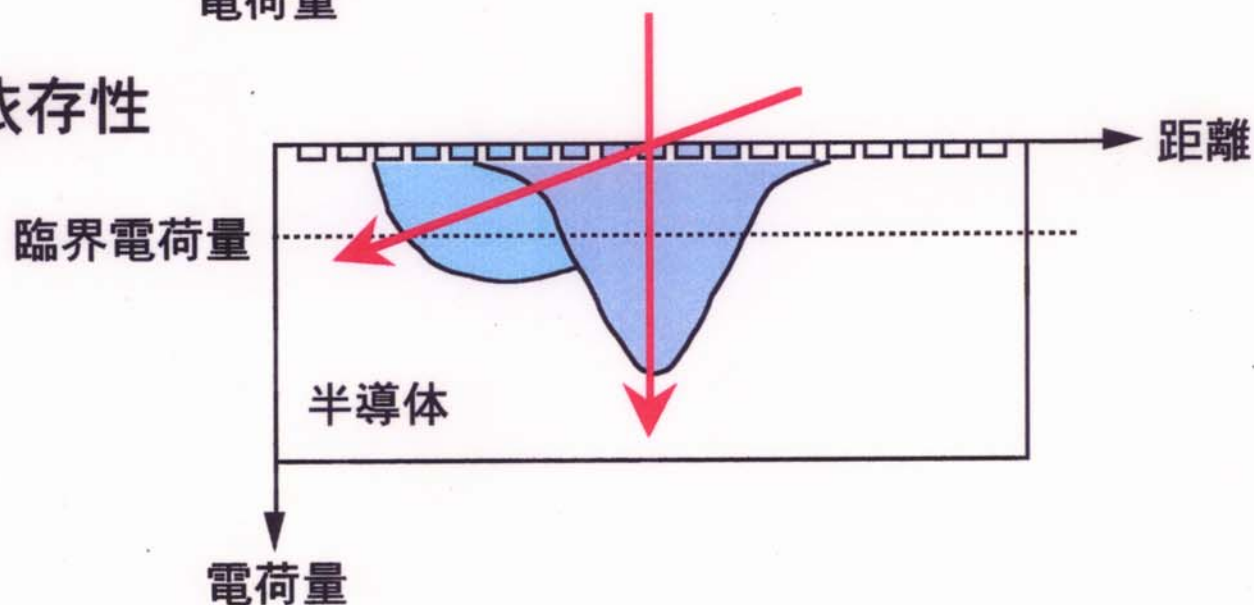
入射角度大：入射方向に反転領域拡大

MBUのLET依存性と入射方向依存性

LET依存性



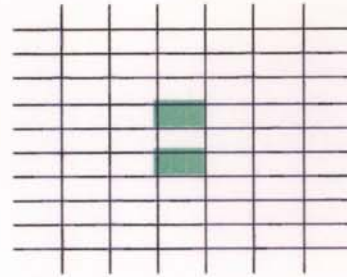
入射角度依存性



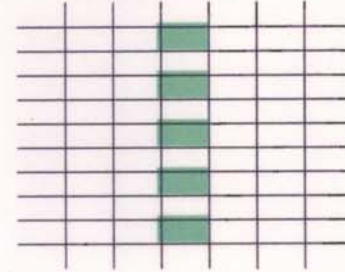
放電状態セルの反転

全セル：放電状態

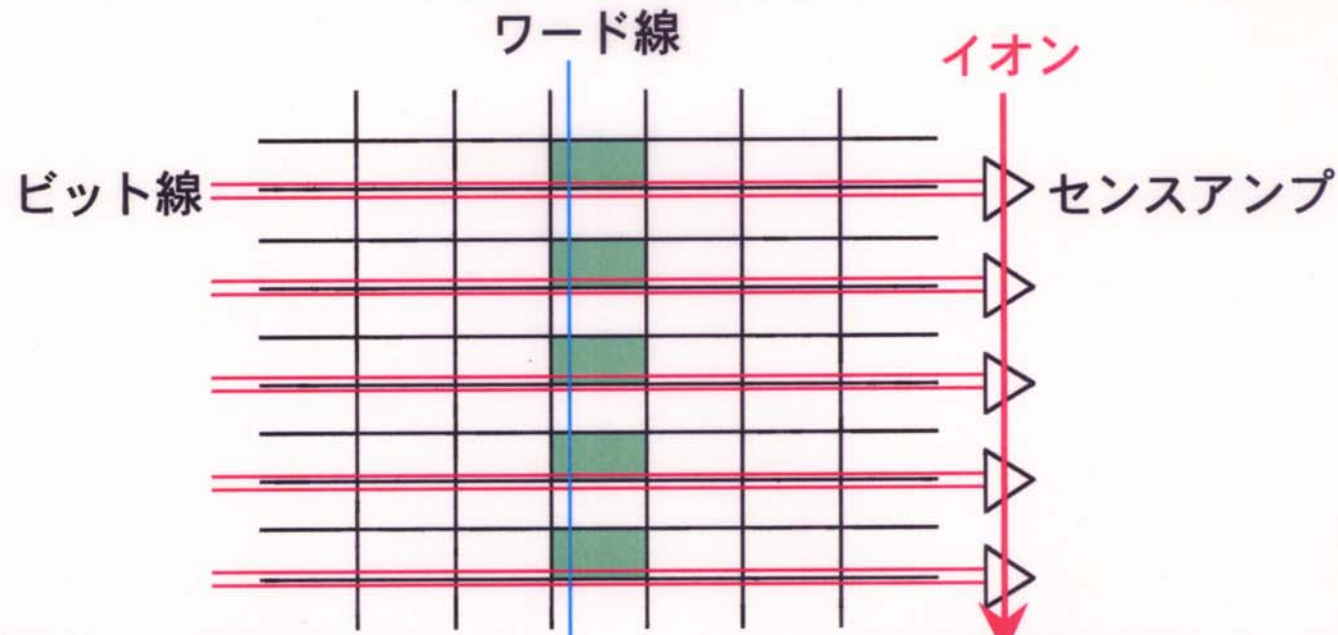
垂直



ワード線方向に
60度傾斜

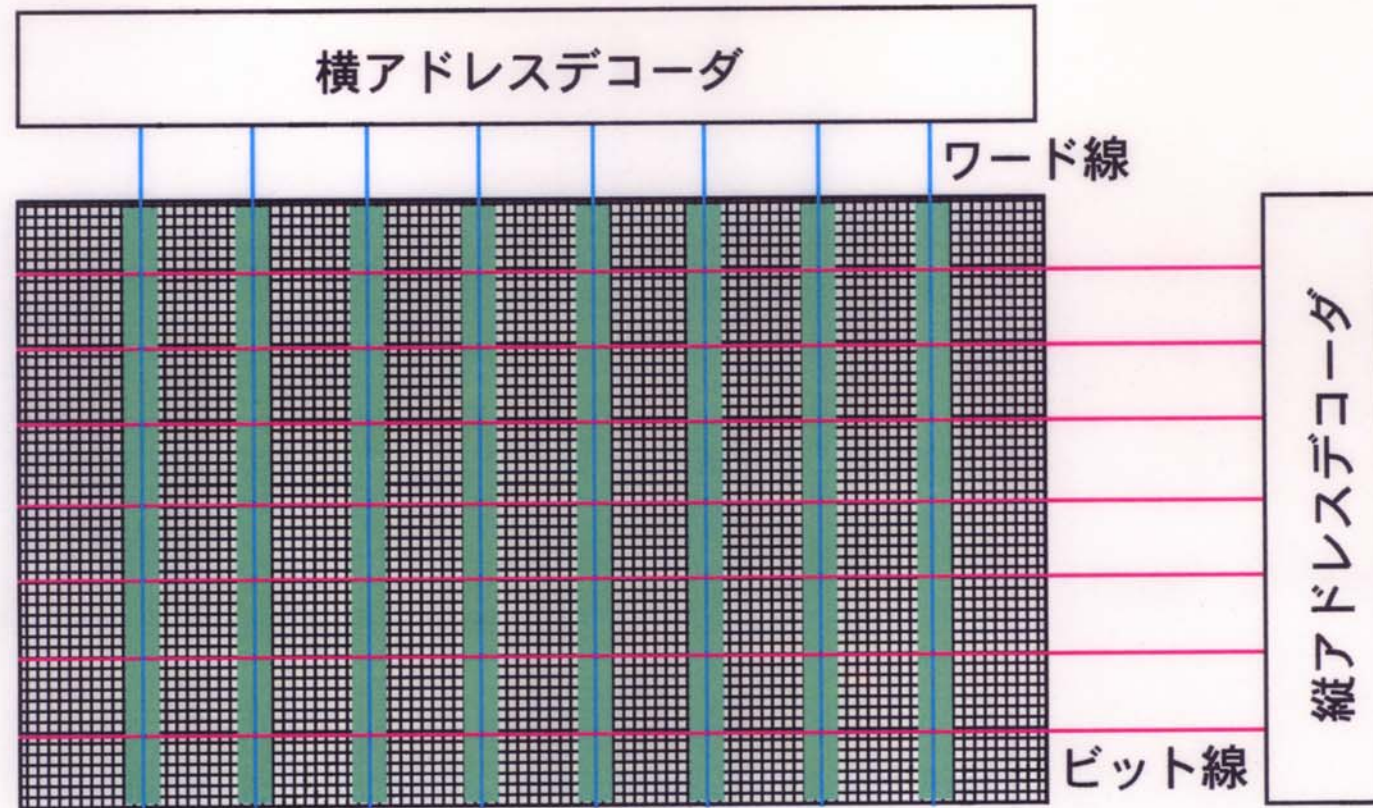


同一ワード線上のセルにMBU発生



原因：周辺回路（センスアンプ）の異常動作

大規模MBUの発生

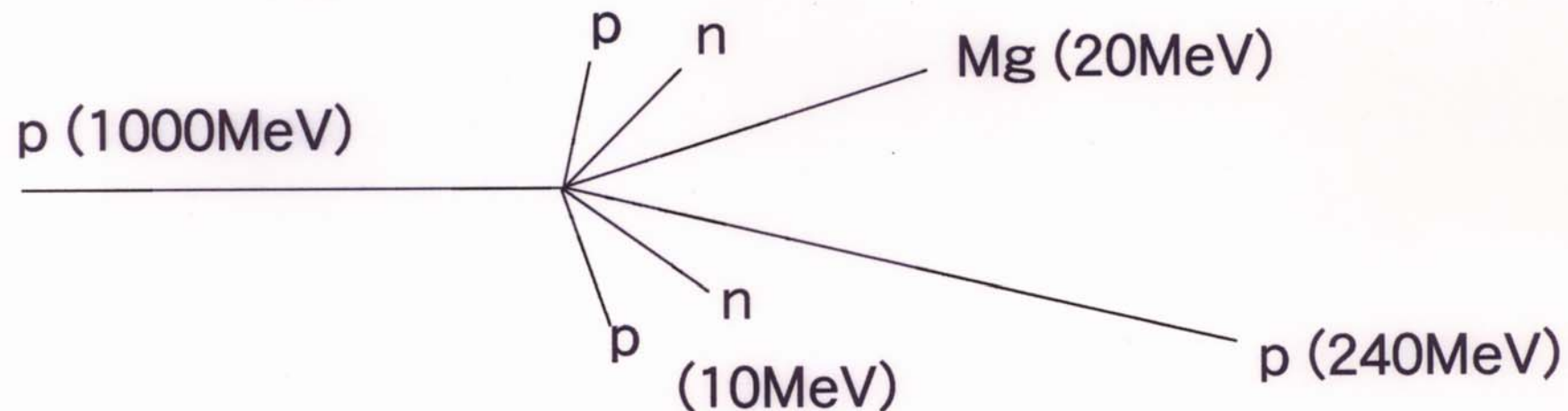
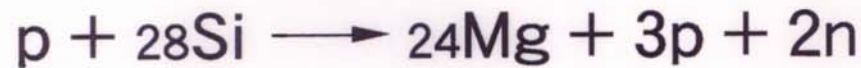


複数のワード線上のセル（1000個以上）が同時に反転

原因：周辺回路（アドレスデコーダ）の異常動作

プロトンによるメモリ反転

プロトン・シリコン核反応による二次粒子の放出



メモリセルの微細化 → 反転しきい値LET：小

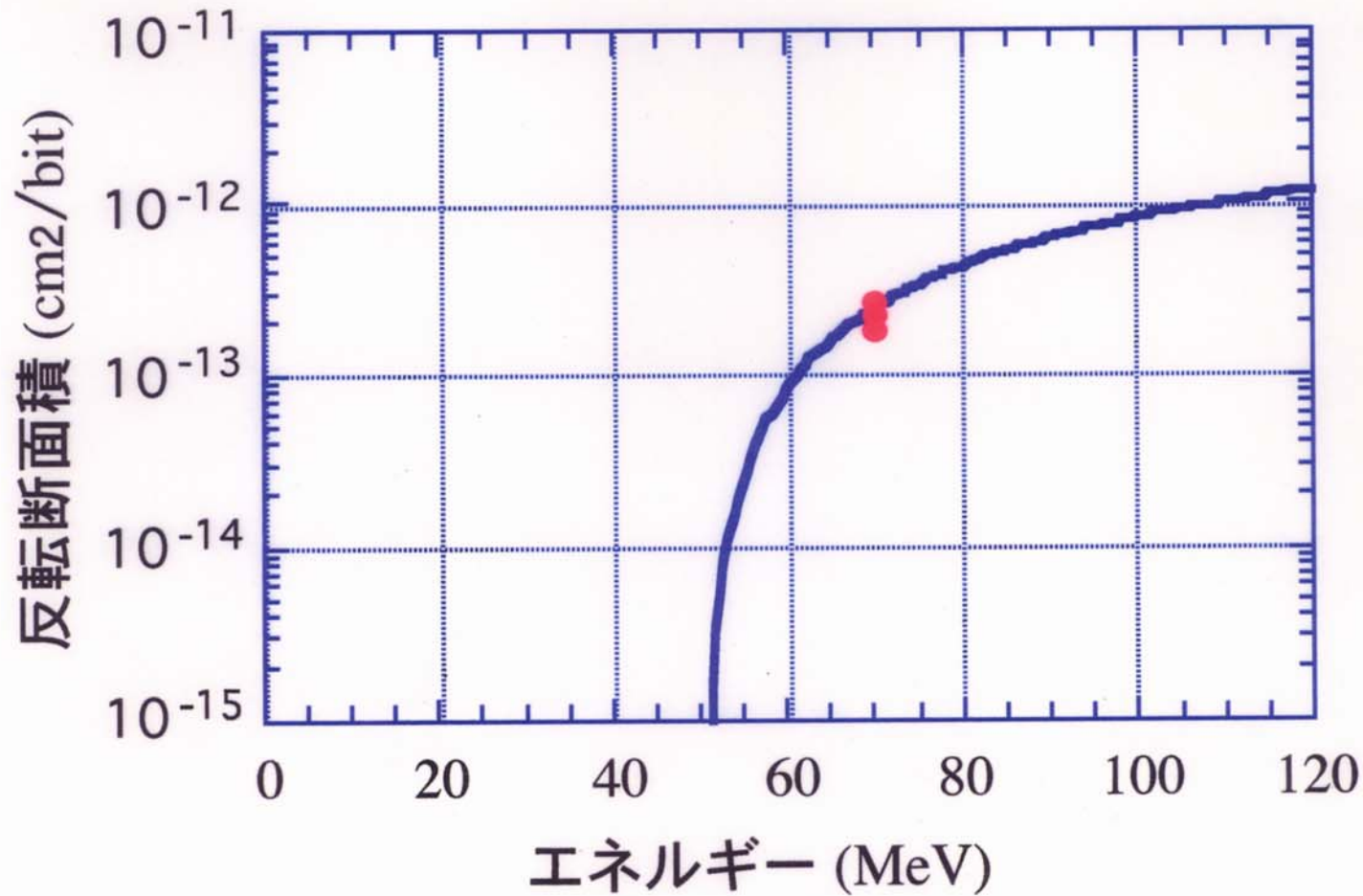
16Mbit DRAM：メモリ反転のしきい値LET = 4 MeV/mg/cm²

20MeV MgのLET = 10 MeV/mg/cm² > しきい値LET



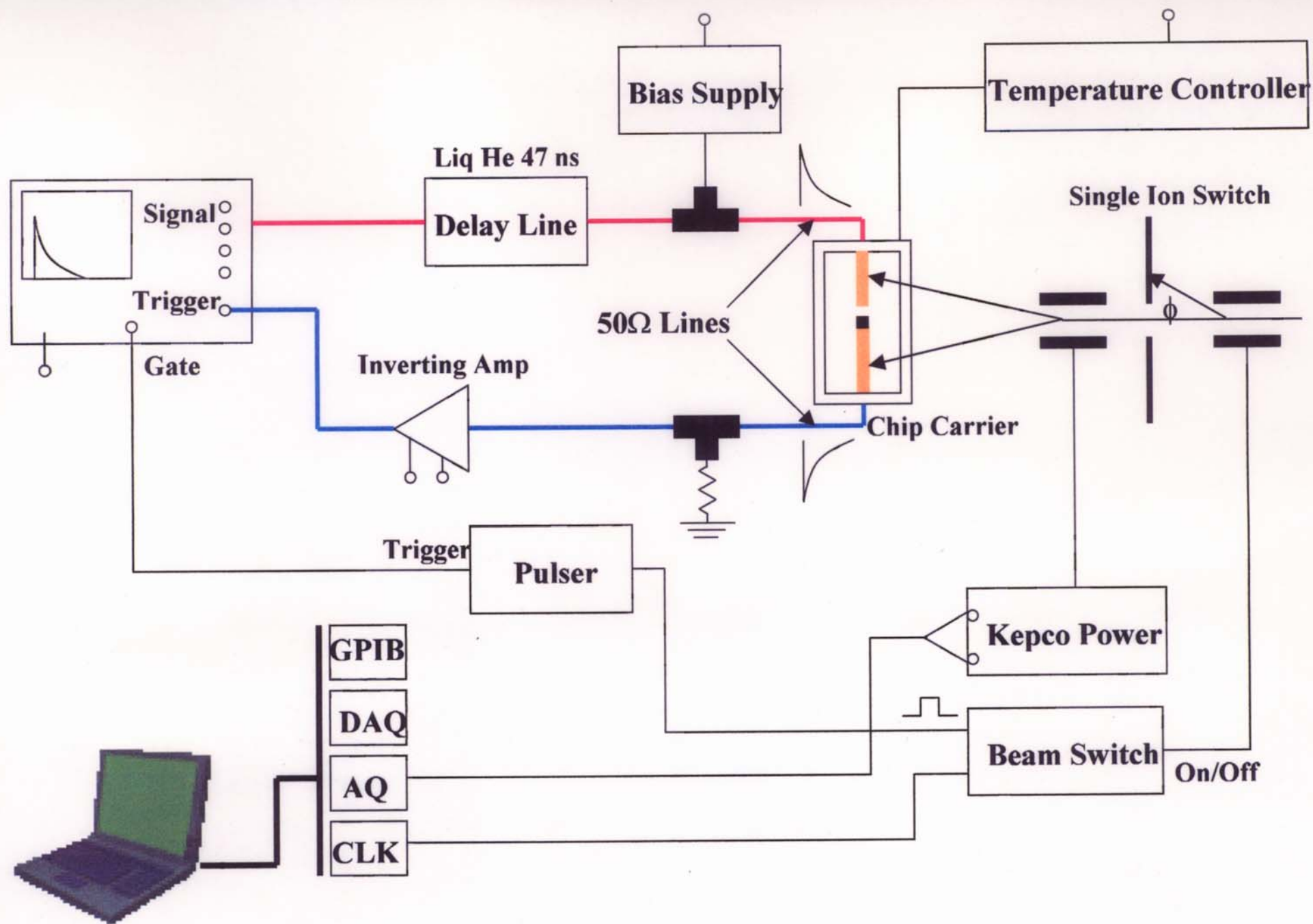
超高集積回路で大きな問題となる

プロトン誘起メモリ反転



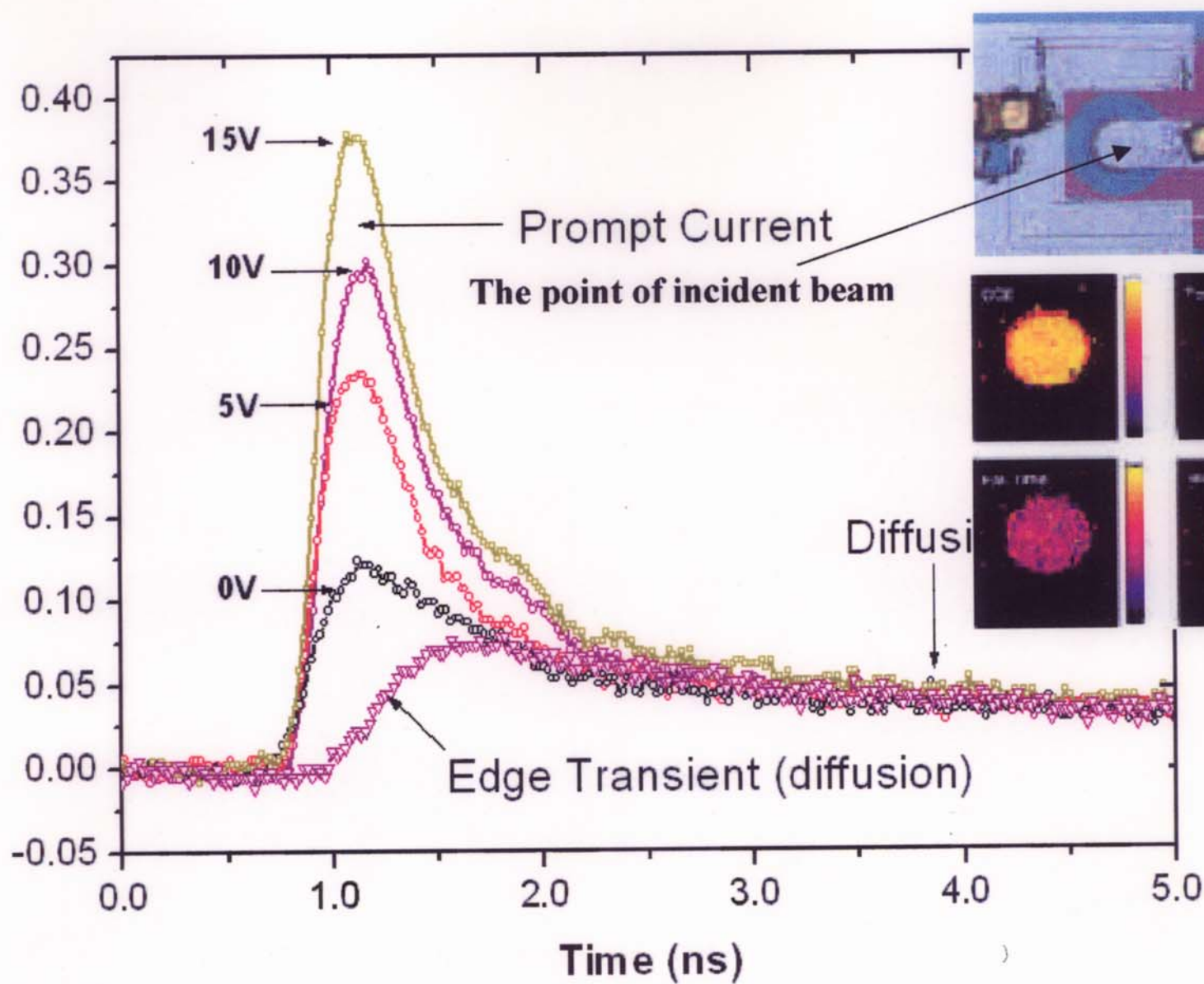
プロトンによるメモリ反転を確認

マイクロビームを利用した エラー発生過程の解明

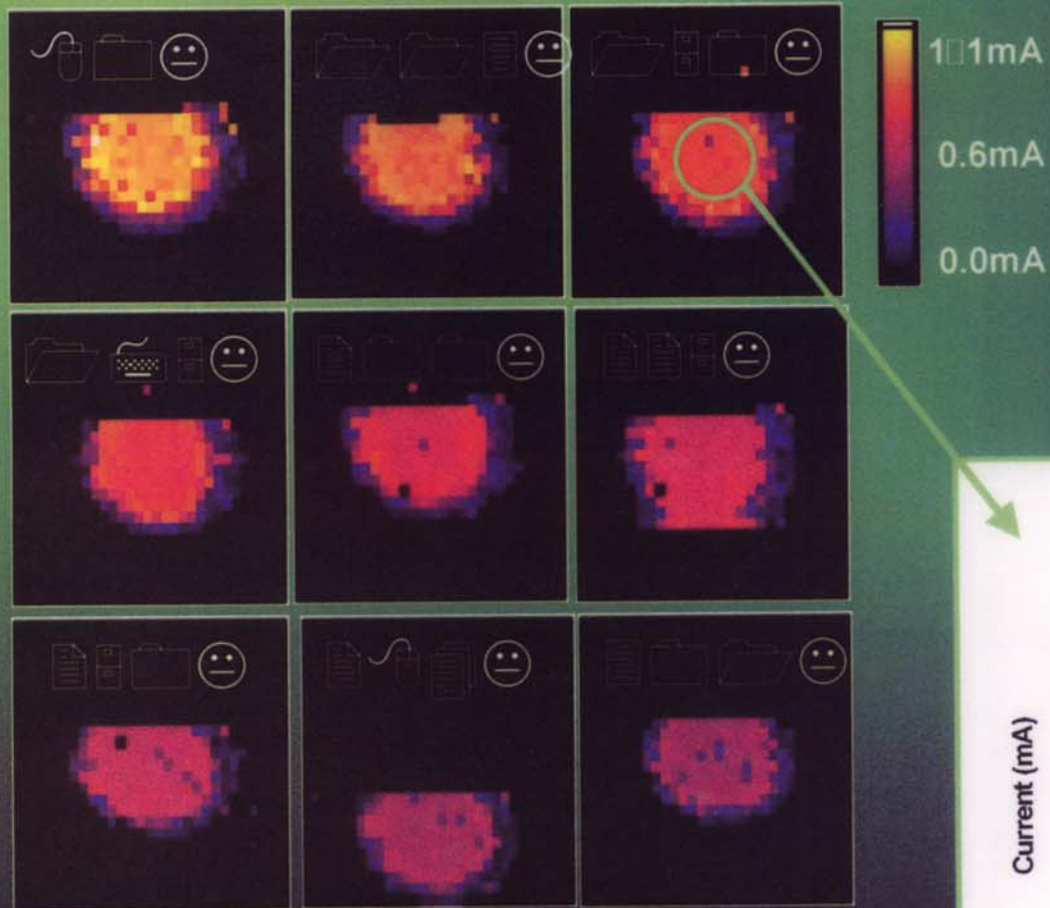


シングルイオンヒットシステムを用いた測定系(40GHz)

Signal Amplitude (V)



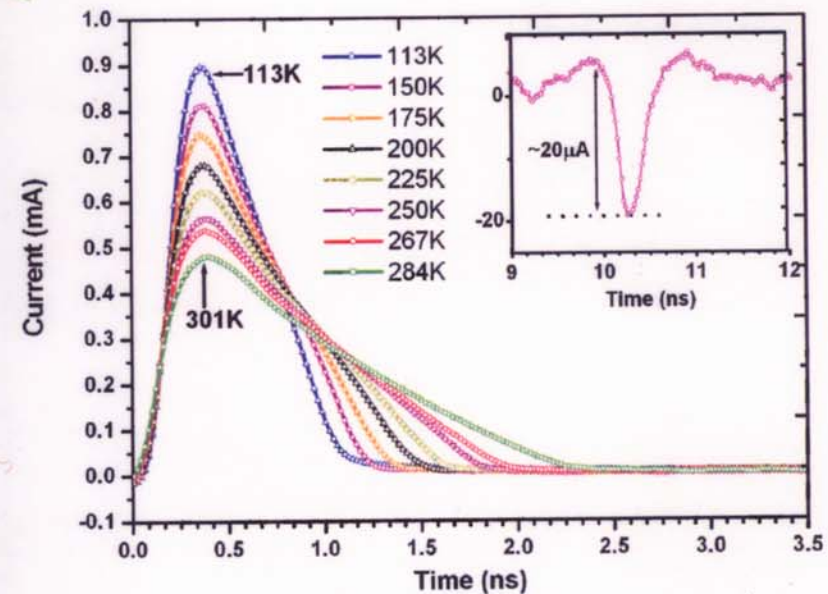
TIBIC 15MeV O Data Collected on $1e14 \text{ cm}^{-3}$ Si Epilayer Devices



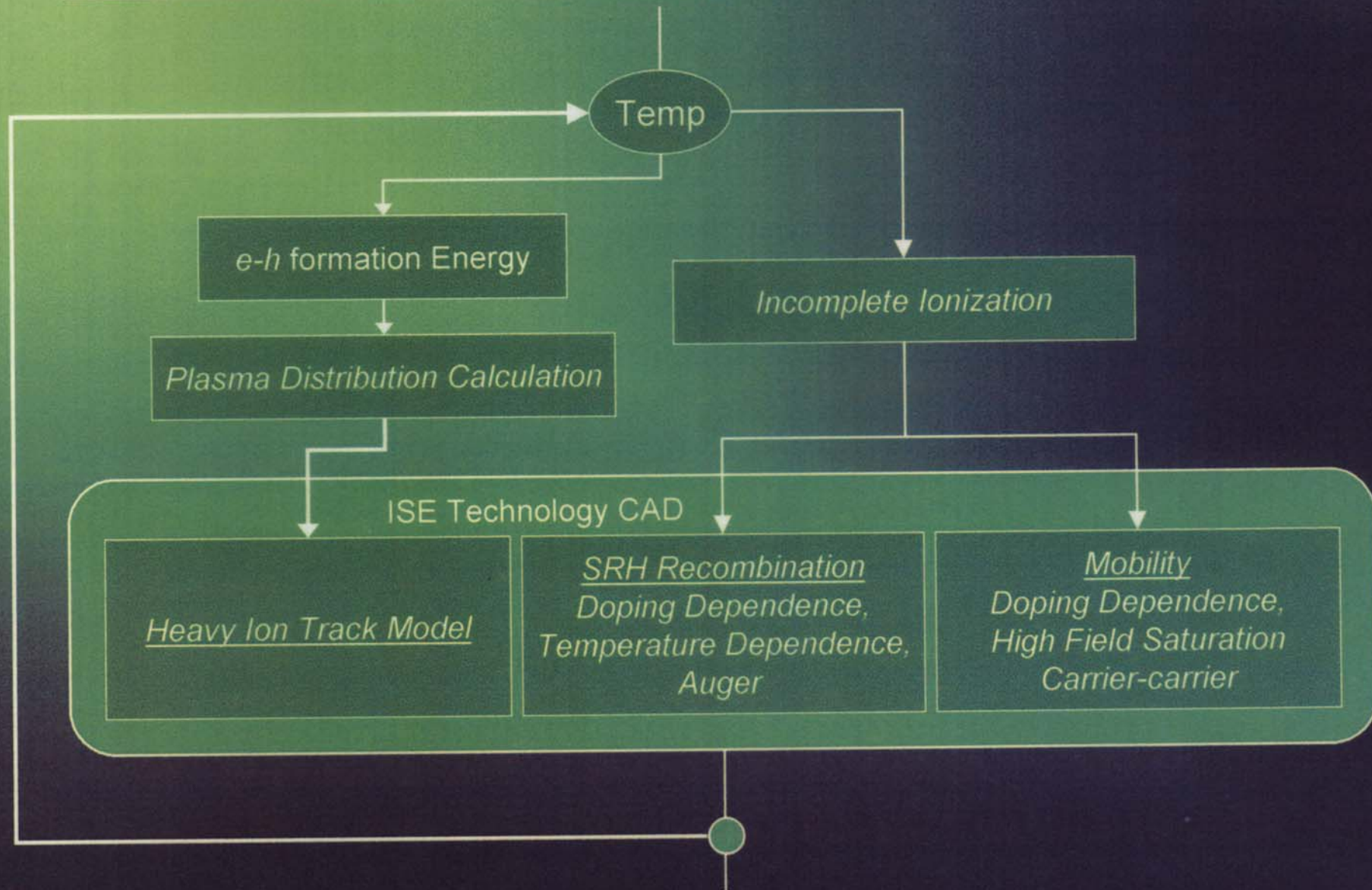
- Imaging allows higher Signal-Noise ratios by averaging the current transient over central region.

- Critical for accurate comparison with TCAD (central strike).

- Edge region exhibits higher current and a rapid diffusive falloff.

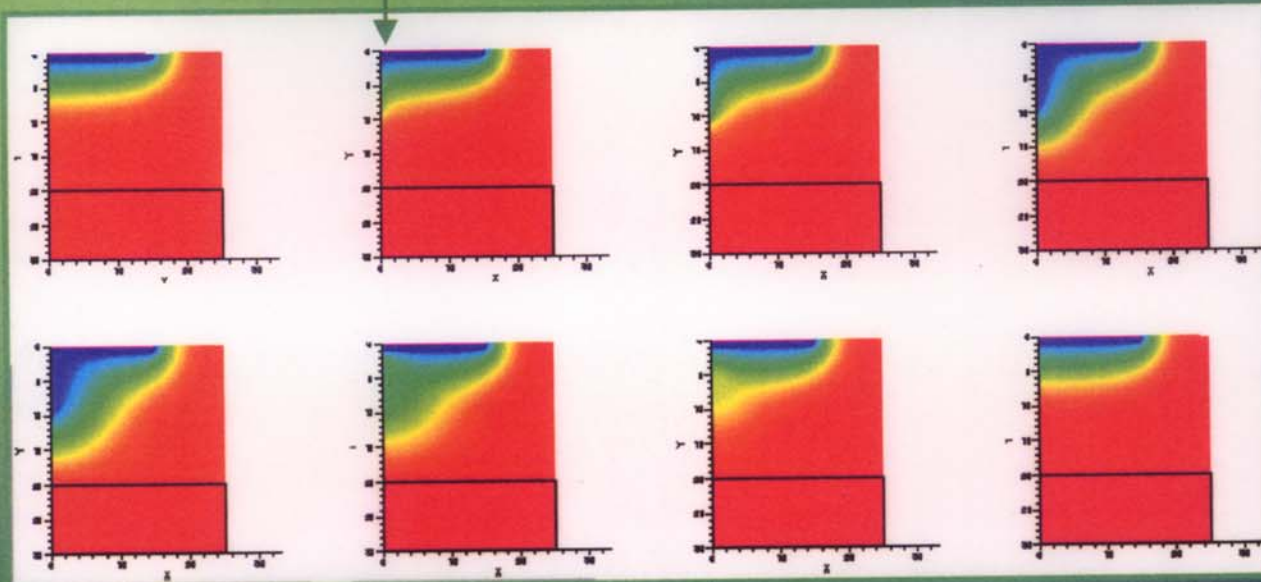


ISE TCAD Simulation Methodology:

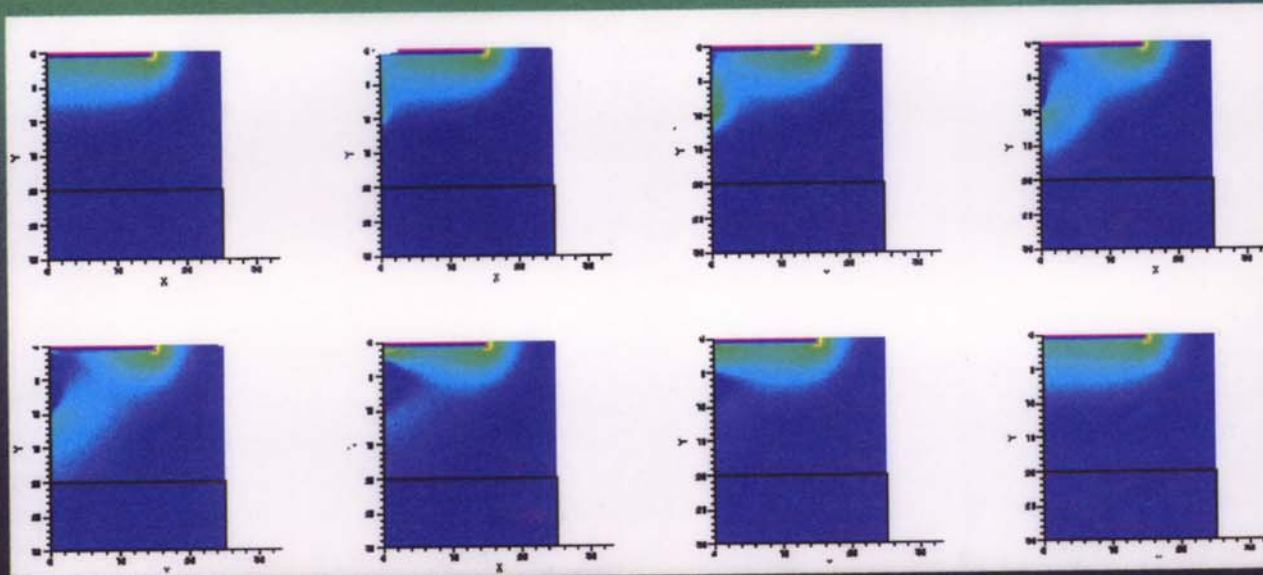


Ion strike

TCAD Data @ 180K

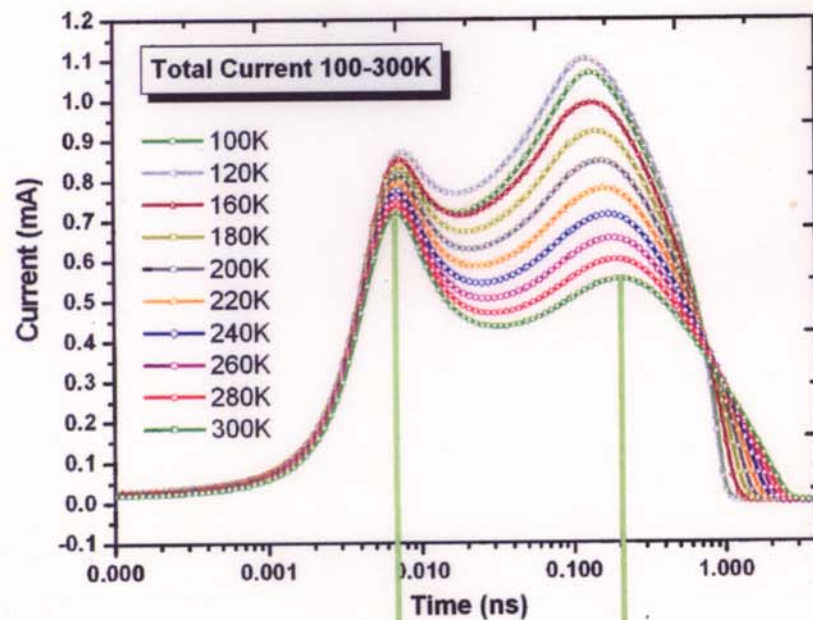


← Electrostatic Potential (V)



← Electric Field (V/m)

ISE TCAD Simulation Results for $1e14\text{cm}^{-3}$ Device

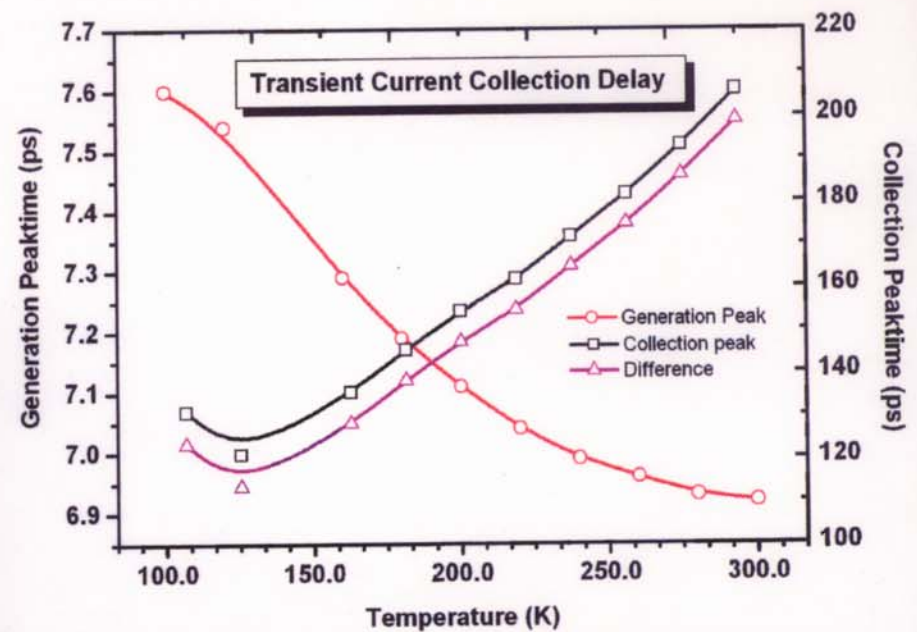


generation

Plasma screening delay

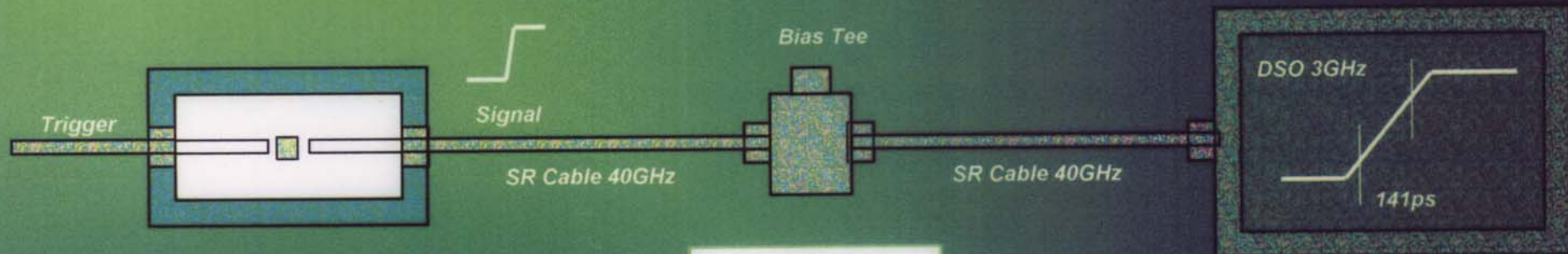
Reducing T increases acoustic mobility

$$i(t) = -eN\mu'E_0[e^{-\mu'E't} - e^{-\beta t}]$$



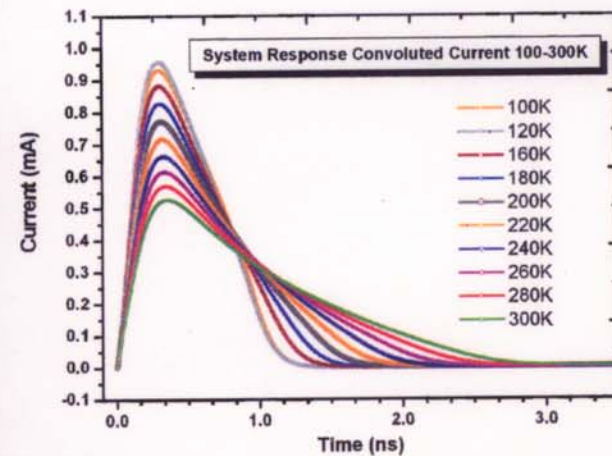
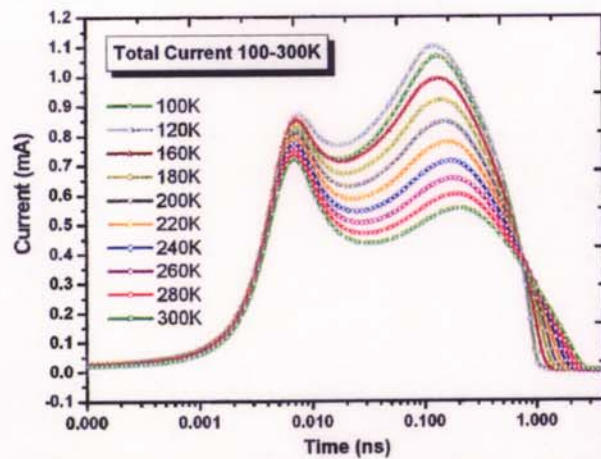
Convolution with System Response:

- To compare simulation with experiment we must convolute the simulated transient with the system response.



$$i'(t_0) = \int_{-\infty}^{\infty} i(t) \otimes g(t)$$

$$g(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2}}$$



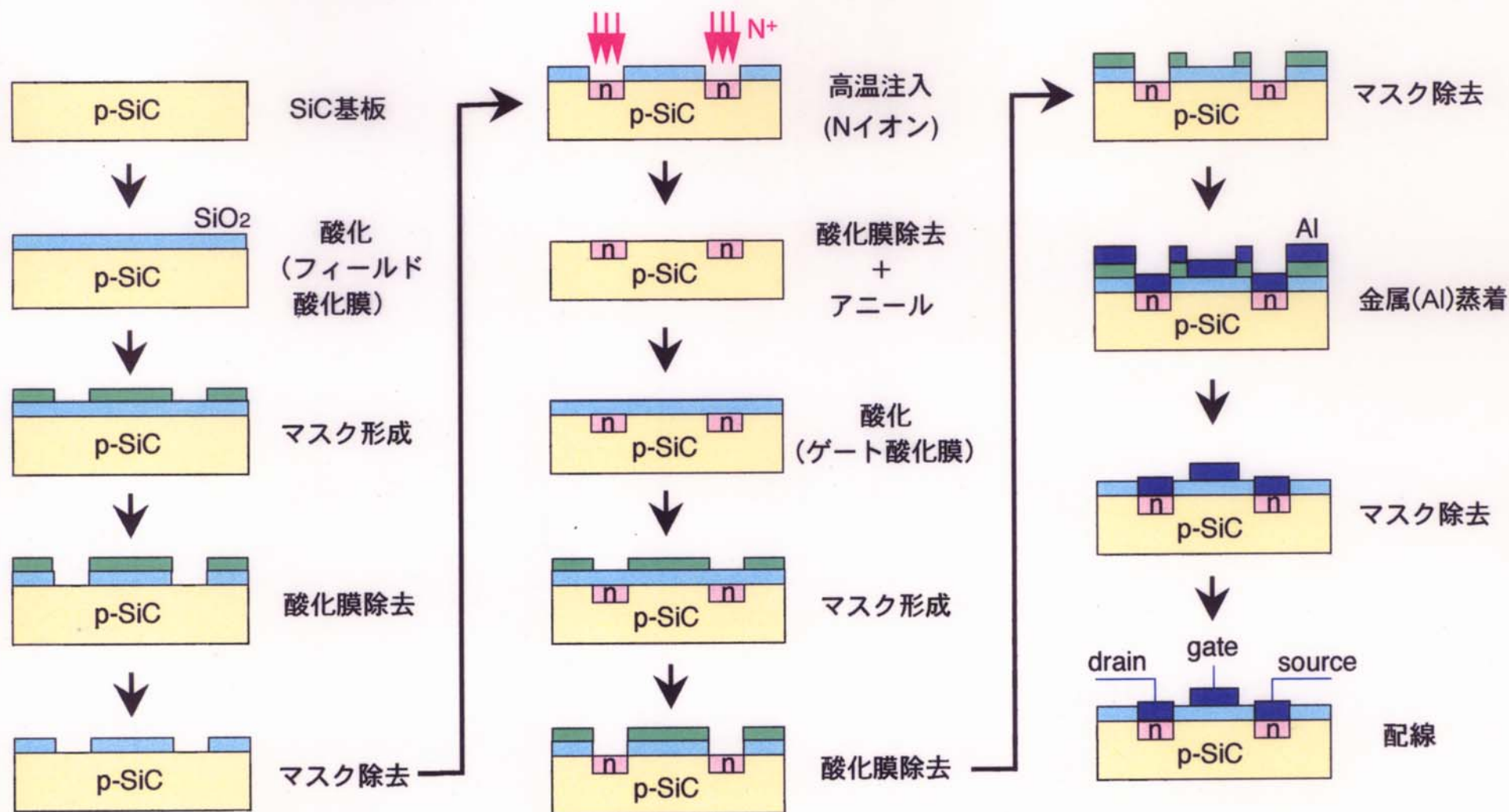
高耐放射線性半導体の開発

炭化ケイ素(SiC)半導体素子

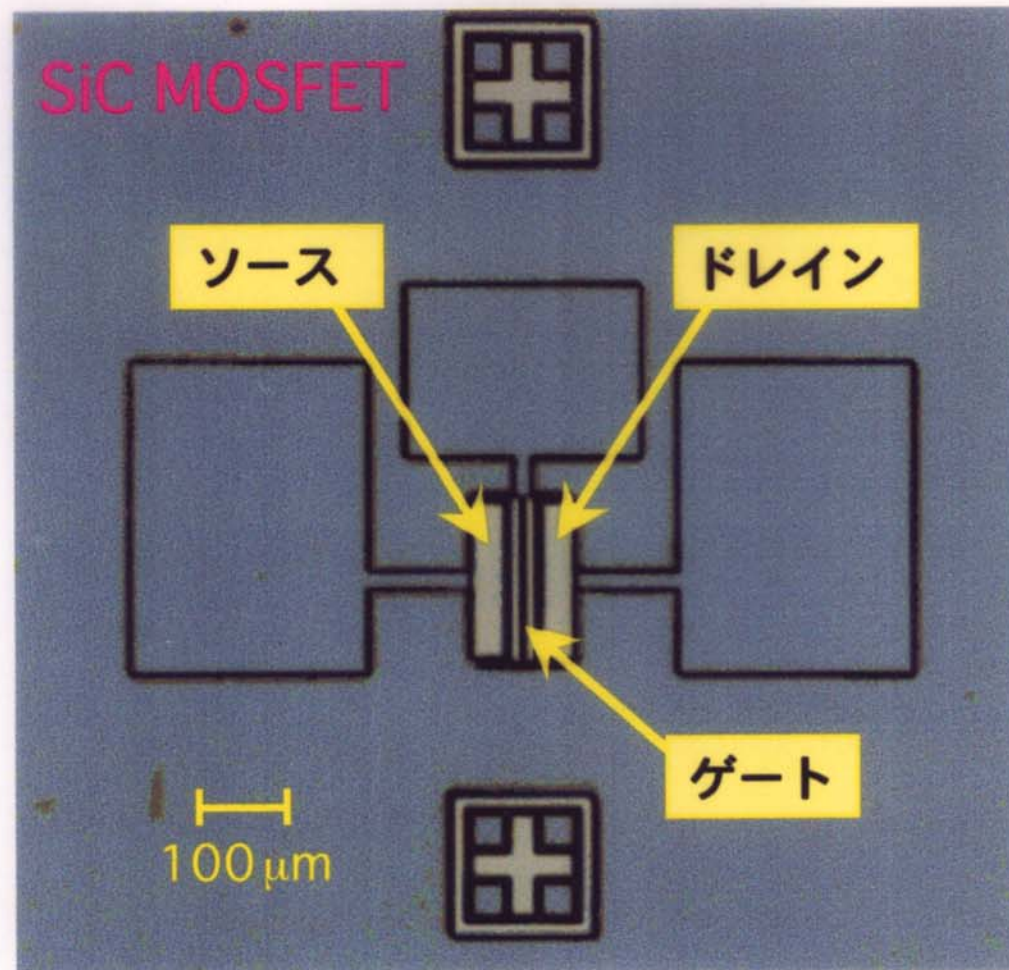
SiC半導体

- | | | |
|------------------|---|---------|
| (1)広い禁制帯幅 | → | 耐放射線性素子 |
| (2)低原子番号元素間の強い結合 | | |
| (3)熱的・化学的に極めて安定 | → | 耐熱素子 |
| (4)高い電子飽和ドリフト速度 | → | 高周波素子 |
| (5)大きな絶縁破壊電界 | → | パワー素子 |
| (6)p・n両伝導型制御可能 | → | pn接合 |
| (7)安定な酸化膜形成可能 | → | MOS構造 |

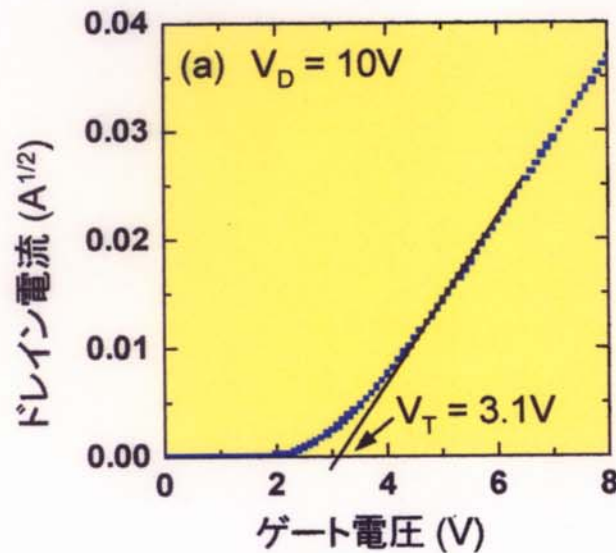
SiC MOSFETの製作プロセス



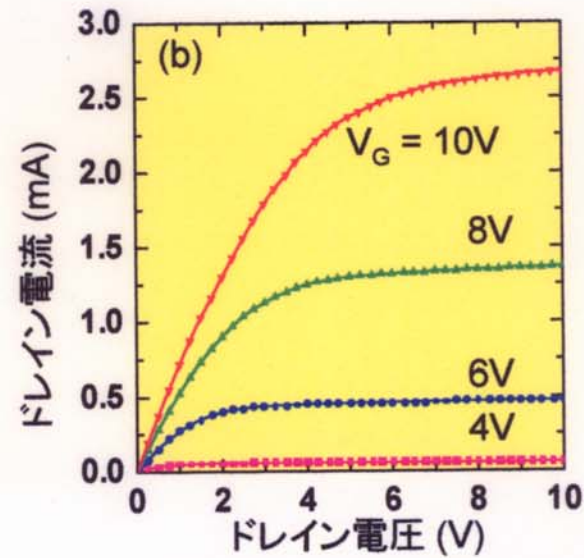
試作したSiC-MOSFETの写真



SiC MOSFETの電流－電圧特性



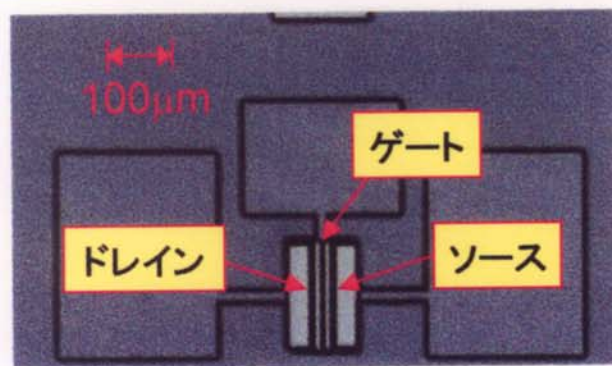
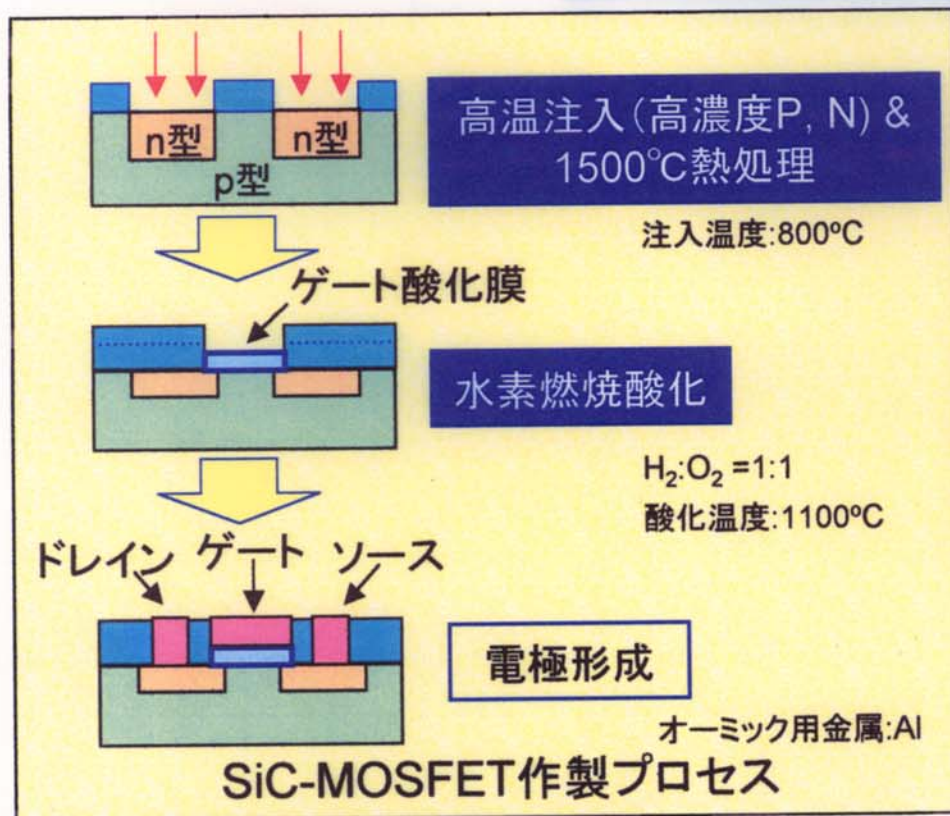
(a)ドレイン電流－ゲート電圧特性



(b)ドレイン電流－ドレイン電圧特性

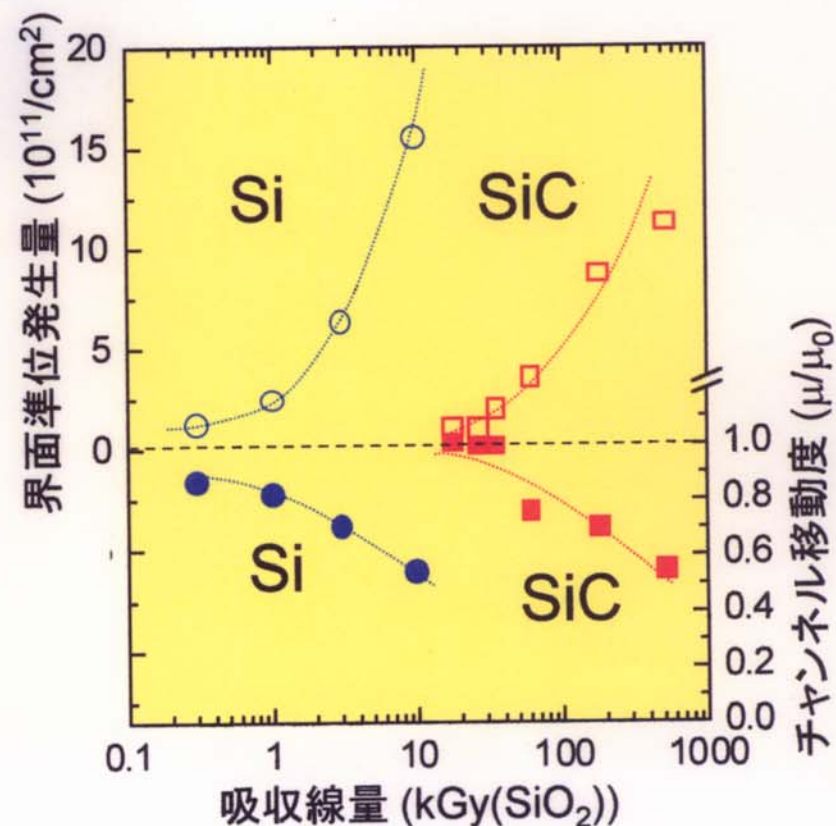
- しきい値電圧 V_T : 3.1V
- チャンネル移動度: $52 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

耐放射線デバイスSiC-FET



SiC-MOSFETの顕微鏡写真

ゲート長 x 幅:
10μm x 200μm
チャンネル移動度:
52 cm²/Vs



SiC-及びSi-MOSFETのガンマ線照射効果

Siに比べ約100倍の耐放射線性

今後の展開

宇宙で使う半導体に放射線を活用

- ・ 新素材・高効率太陽電池の耐久性を診断
- ・ 高性能超 L S I の信頼性を評価
- ・ S i C - L S I の宇宙適用性を立証



人工衛星の長寿命化と信頼性確保
我が国の宇宙開発に貢献



高度情報化社会に寄与

