

# 高エネルギー物理実験用 半導体センサの損傷とその対策

半導体素子の放射線損傷入門

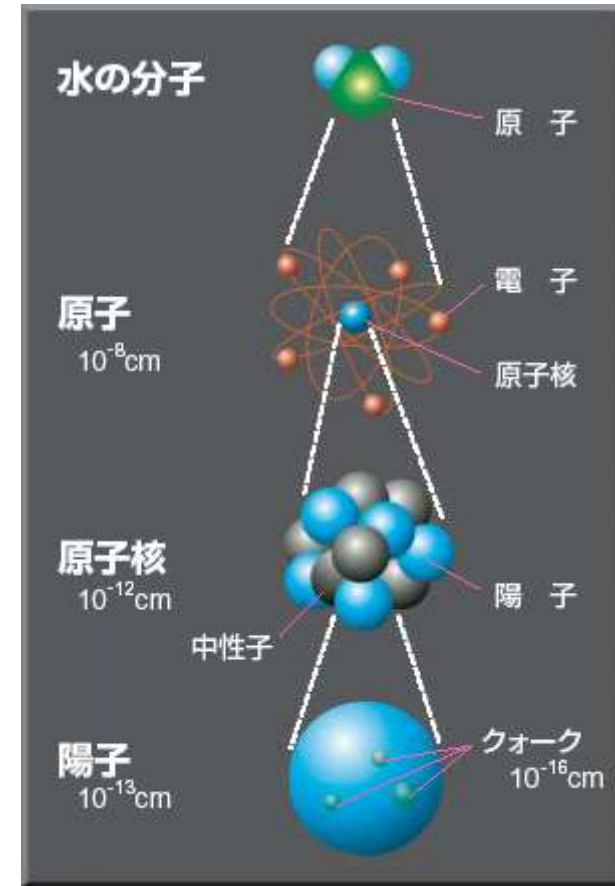
池田 博一  
宇宙航空研究開発機構  
宇宙科学研究本部

# 高エネルギー物理学

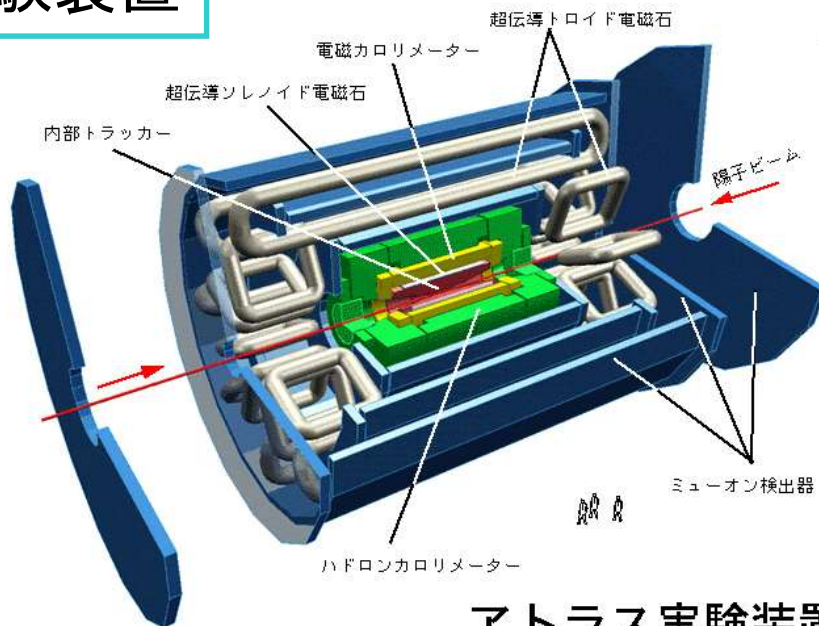
高エネルギー物理学は、自然界を支配する、根源的物質形態、およびそれらの相互作用を研究する学問である。

高エネルギー物理学では、より微細な距離スケールを探求するため陽子や電子をより高いエネルギーに加速して、その衝突に伴う反応を探求する。

| 物質粒子 |                          |                             |                          | 力を伝える粒子                             |  |
|------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------------------|--|
|      | 第1世代                     | 第2世代                        | 第3世代                     |                                     |  |
| レプトン | $\nu_e$<br>eニュートリノ       | $\nu_\mu$<br>μニュートリノ        | $\nu_\tau$<br>τニュートリノ    | 強い力<br>グルーオン $g$                    |  |
|      | $e$<br>電子                | $\mu$<br>ミュオン               | $\tau$<br>タウ             | 電磁力<br>光子 $\gamma$                  |  |
| クォーク | $u$<br>アップ<br>$d$<br>ダウン | $c$<br>チャーム<br>$s$<br>ストレンジ | $t$<br>トップ<br>$b$<br>ボトム | 弱い力<br>$W^+$ $W^-$ $Z$<br>Wボソン Zボソン |  |
|      | 質量を与える粒子<br>(未発見)        |                             |                          | ヒッグス粒子 $H$                          |  |



# 実験装置

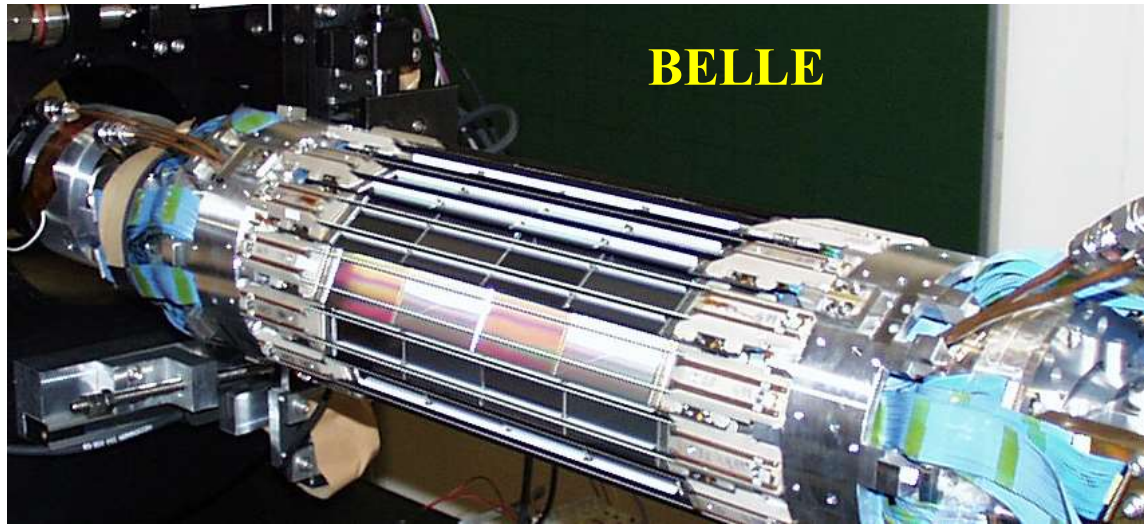


アトラス実験装置

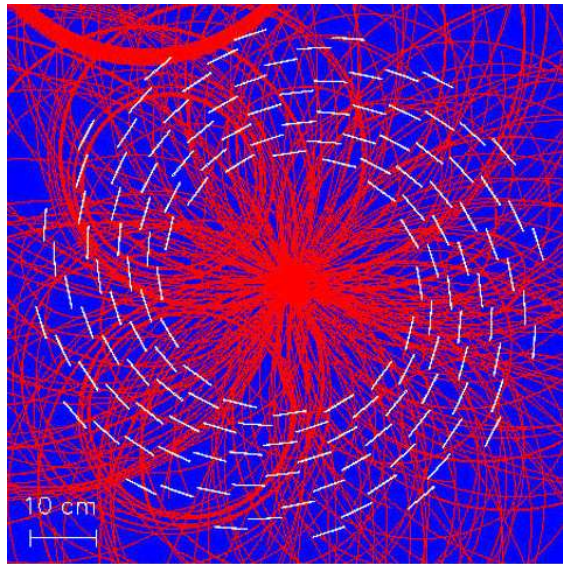


- 目的: 世界最高のエネルギー領域で、ヒッグス粒子(質量の起源)や超対称性粒子などの未知の粒子を発見し、物質の究極の内部構造を探索すること。
- LHC加速器: 陽子ビームエネルギーは7兆電子ボルト(7 TeV)の衝突型加速器。加速器は既存のLEPTンネル(周長27 km, 地下 50-100 m)に設置する。磁場強さが 8.36 テスラの超伝導電磁石を約 1300 台配置する。総建設費 約 3,500 億円。
- 予定: 2007年に加速器建設を完成し、物理実験を始める。

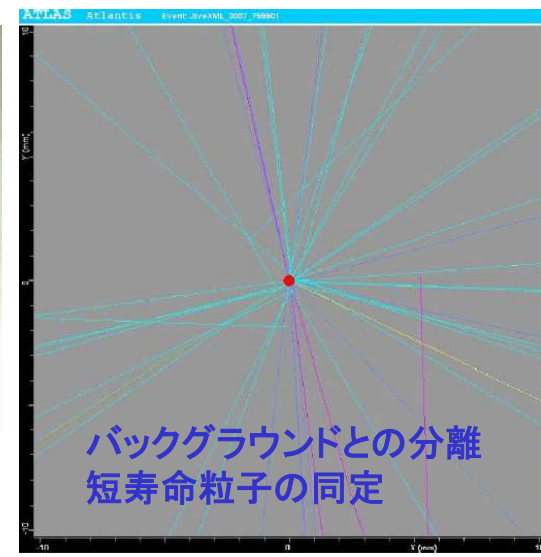
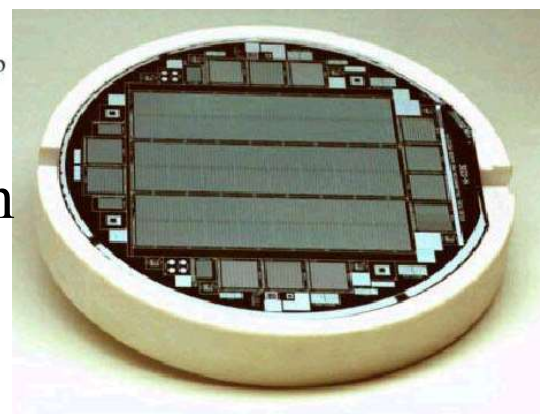
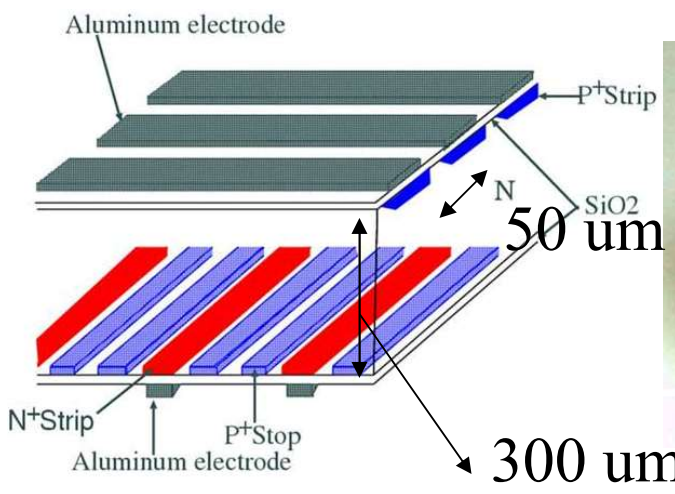
# バーテックス検出器



# LHC/ATLAS



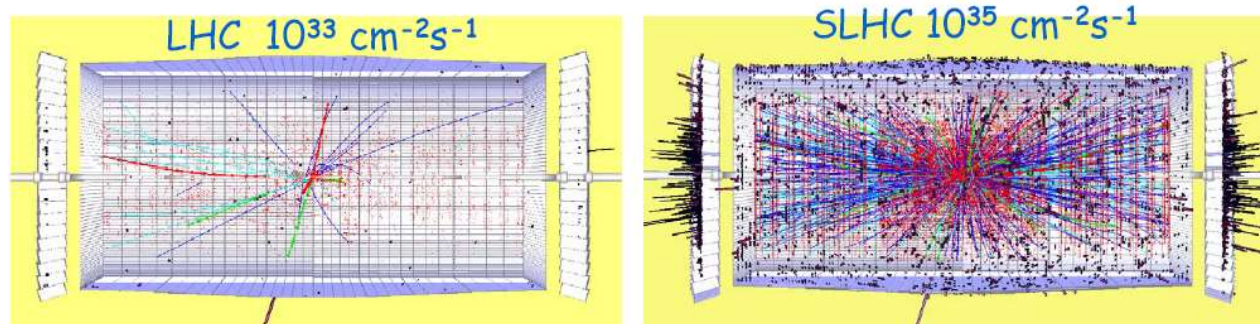
←→ 10cm



第12回高温エレクトロニクス研究会、  
2006年3月10日@ISAS

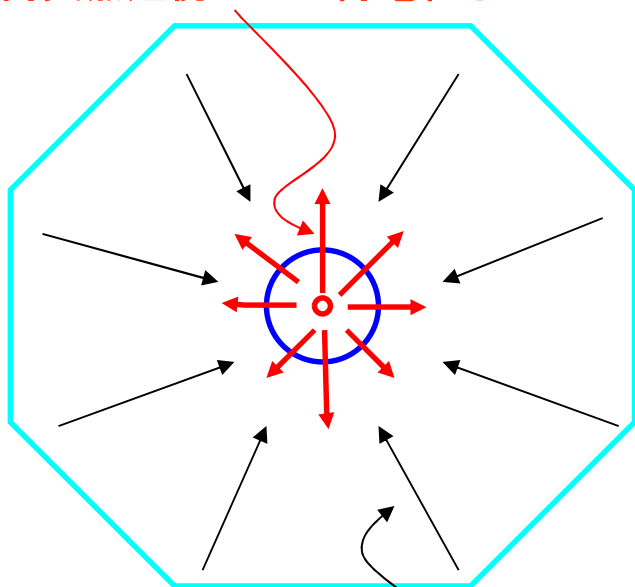
H→ZZ→eeμμ m(higgs)=300 GeV all tracks with  $p_T < 1$  GeV removed

## 放射線環境



加速器を用いた素粒子物理の測定器では、衝突点近傍のセンサーは、過酷な放射線環境にさらされる。

### 衝突点近傍からの荷電粒子



荷電粒子は、衝突点からの寄与が支配的であり10 Mradのオーダーに達す(LHC)。

吸収線量:  $D = dE/dm$   
単位: J/kg または グレイ(Gy) 特別単位に rad

検出器の外壁を構成するカロリメータからの中性子のフラックスは、 $10^{14}/\text{cm}^2$  に達する(LHC)。

### カロリメータの発生する中性子

## 放射線の線種

### 1) 荷電粒子

アルファ線 ( $\alpha$ 線)

ベータ線 ( $\beta$ 線): 低エネルギー

電子線 (陽電子線): 高エネルギー

陽子線 (反陽子線)

重荷電粒子線 (原子核)

中性子線

中間子線

$\mu$ 粒子

### 2) 電磁放射

ガンマ線 ( $\gamma$ 線)

エックス線 (X線)

発生源:

1) アイソトープ

2) 加速器

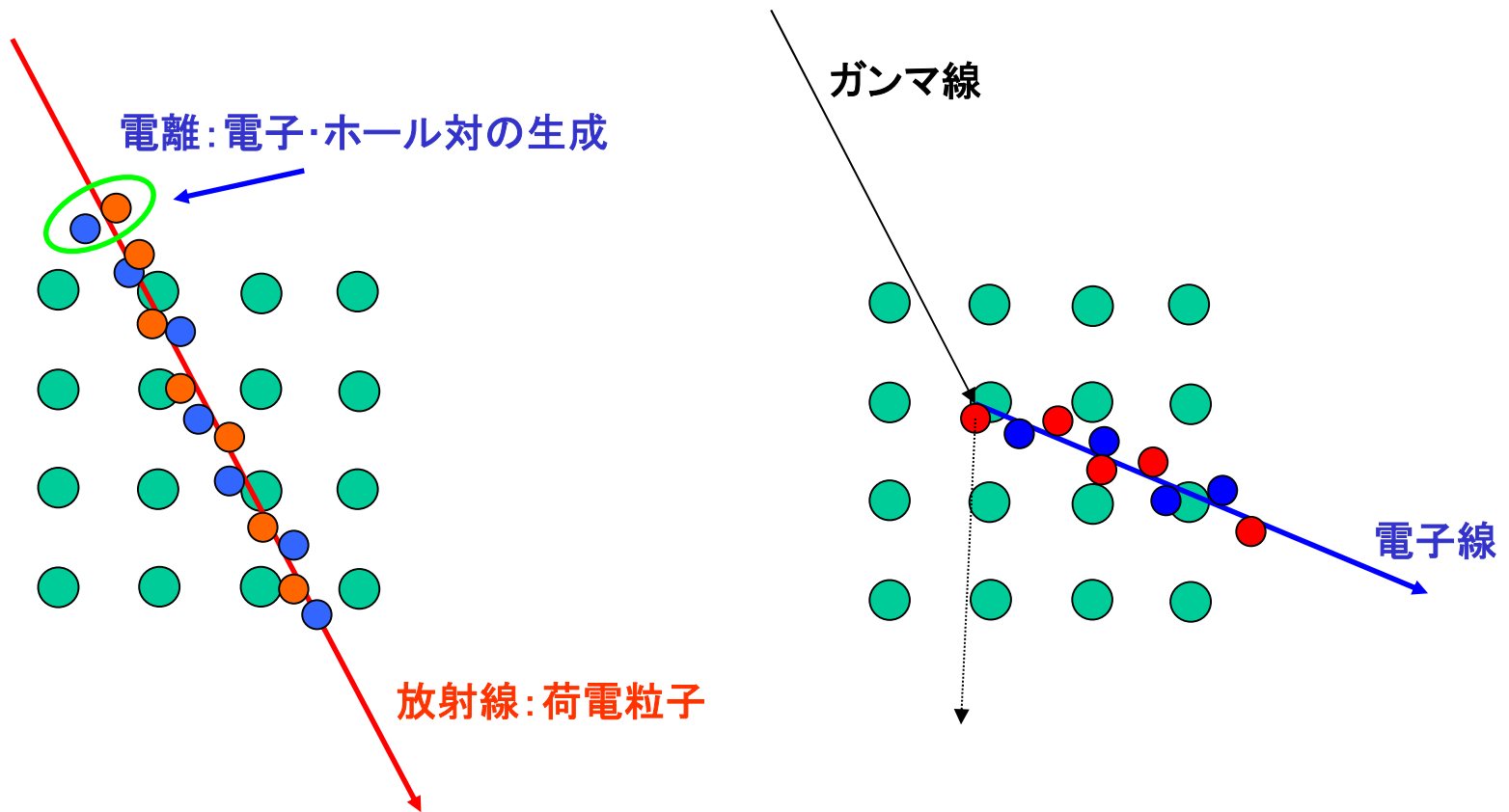
3) 放射光

4) 原子炉

5) 宇宙線

# 物質との相互作用

原子核のまわりの軌道電子との相互作用では

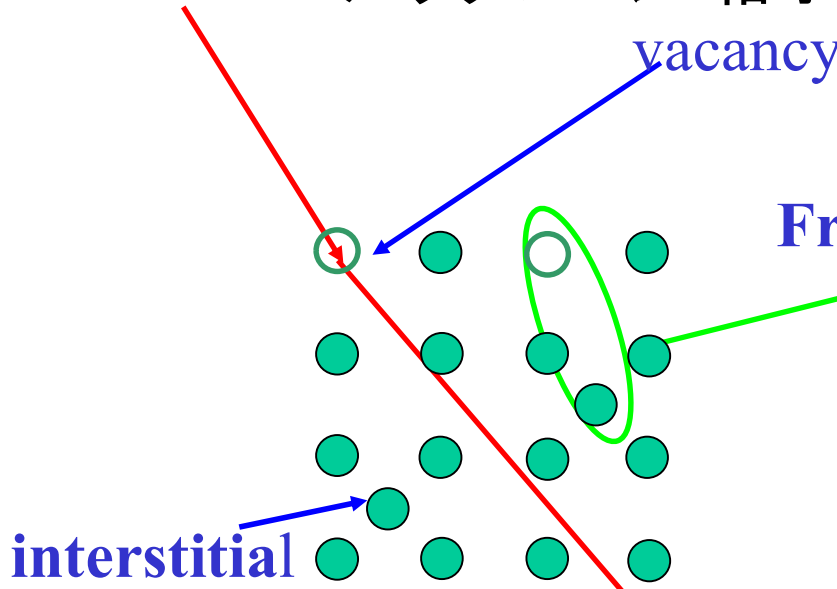


結晶格子は、破壊されない。  
放射線の検出手段として用いられる。  
3.6 eV/pair for silicon

# バルクの損傷

Primary knock-on atom  
 $E_B=25 \text{ eV}$

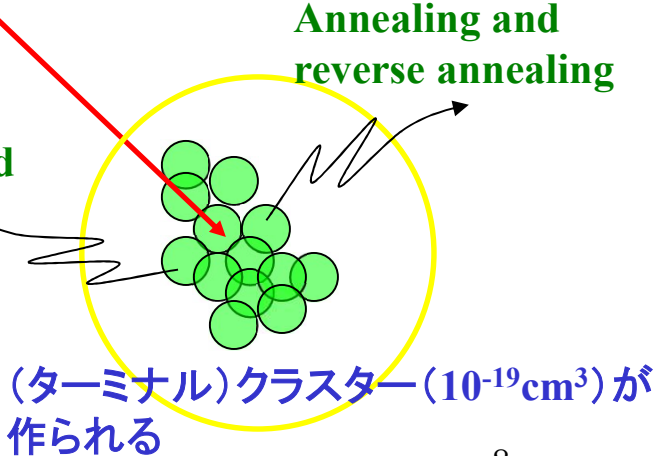
バルクダメージ: 格子点にあるSi(PKA)が格子間に移動



cf. 電子や光子(1 MeV)では、  
離散的な欠陥が作られるのだが、  
より重い粒子線では

$T > 2 \text{ keV}$  (反跳シリコン)

Migrations and interactions of defects take place

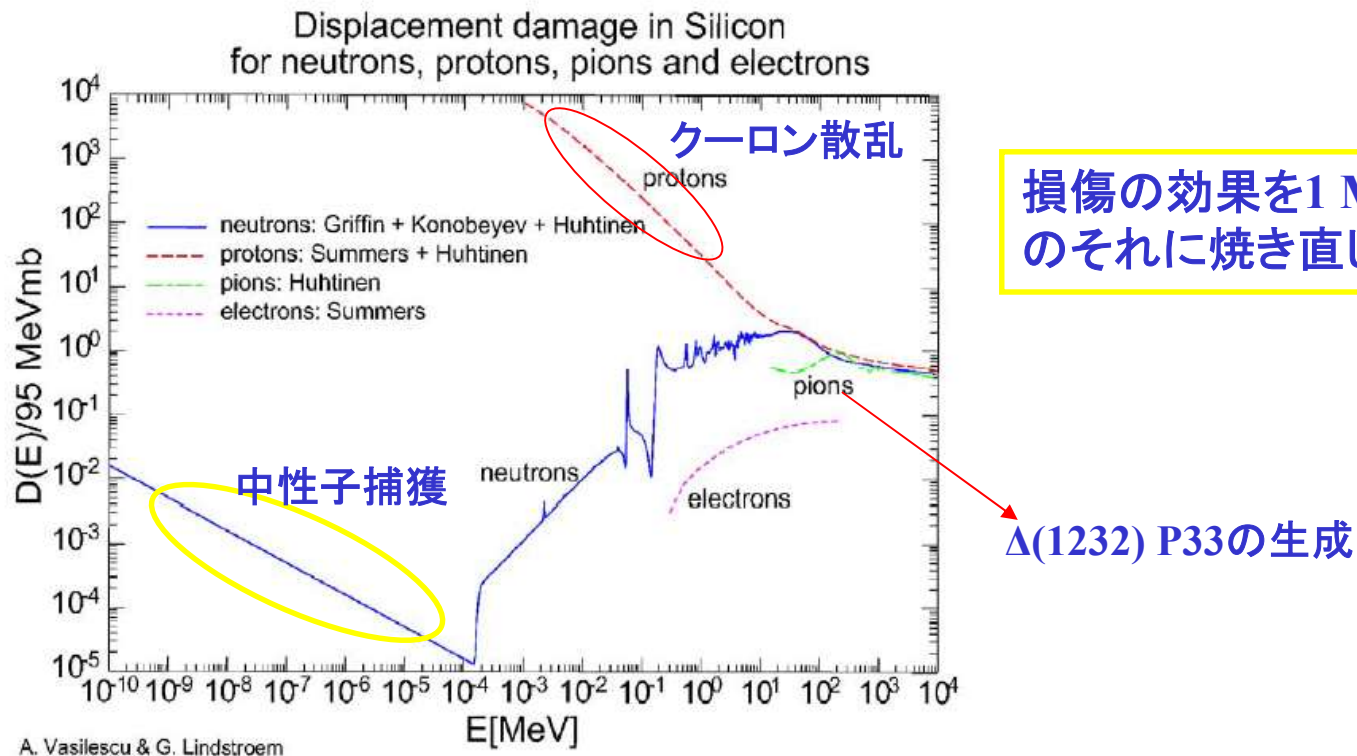


不安定な欠陥により  
Annealing (損傷効果の治癒)  
Reverse annealing (後発的損傷の進展)  
といった現象が生じる。



# NIEL: non-ionizing energy loss

NIEL仮説: バルクダメージ(の効果)は非電離性のエネルギー損失による。  
そうすると放射線の種類に依存した対応表が必要である。



損傷の効果を1 MeVの中性子のそれに焼き直したもの。

Figure 6.1 Displacement damage in Silicon for various particles and energy range (figure taken from ref. 81)

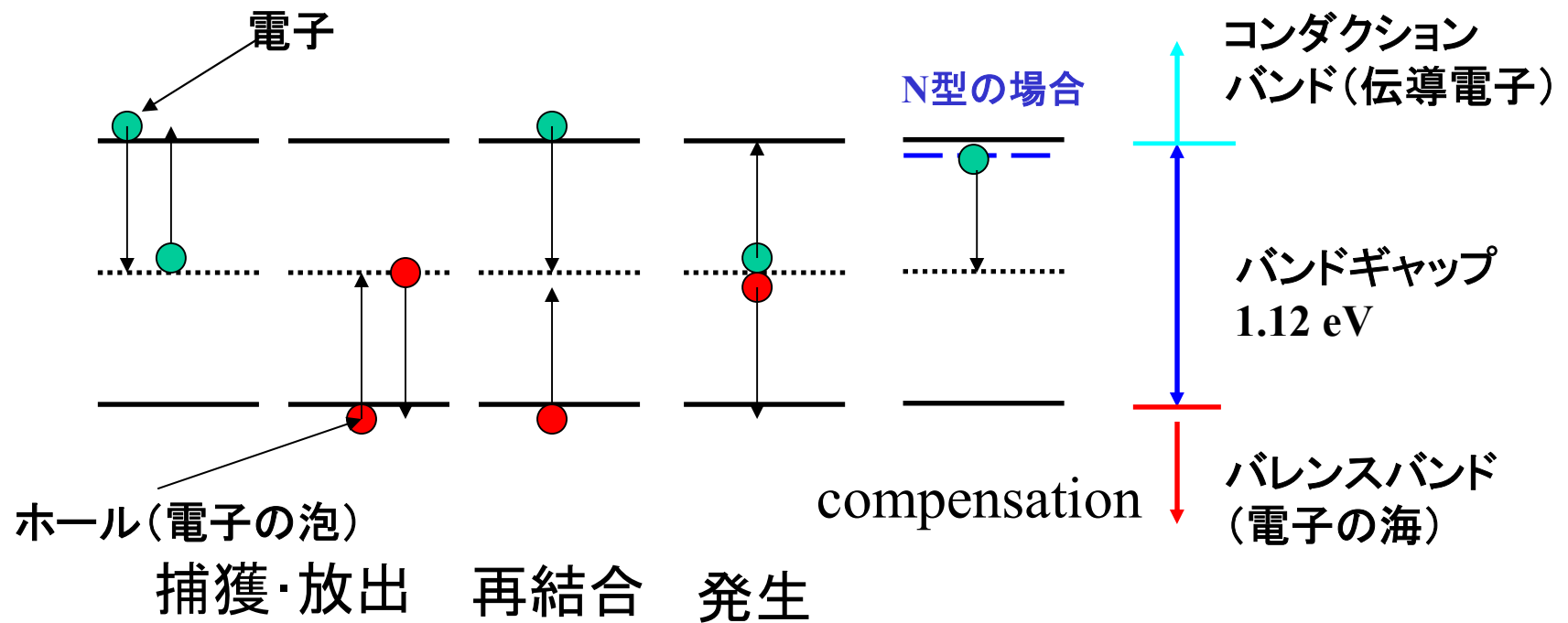
# 深いエネルギー準位の形成

ex. defect impurity complex

再結合中心： 間接再結合の仲介をする準位

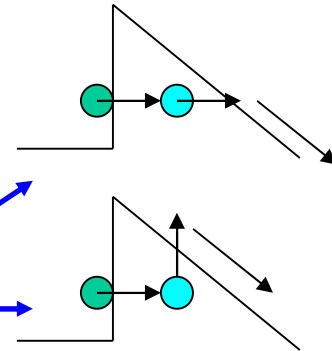
捕獲中心： 再結合を仲介せず，キャリアの捕獲・放出をする準位

発生中心： 電子や正孔の発生に寄与する準位



## バルクダメージの効果(問題点)

- 1) 漏れ電流の増大 (generation-recombination)  
(defect assisted tunneling)  
(Frenkel-Poole emission)



ショット雑音の増大(ex.放射線検出器におけるエネルギー分解能の劣化)

- 2) キャリヤーライフタイムの減少 (carrier killer)

利得の減少(ex. BJTにおける $H_{fe}$ の減少: Messenger-Spratt equation)

- 3) キャリヤートラッピング・デトラッピング (shallow level)

信号の遅延(ex. CCDにおけるtransfer inefficiencyの増大)

- 4) 不純物濃度の実効的減少 (compensation)

バルク抵抗の増大(ex. BJTにおけるコレクタ抵抗の増大)

- 5) キャリヤーモビリティの減少 (scattering center)

- 6) タイプ変換 (n形半導体 → p形半導体)

## 漏れ電流の増大

製造方法や不純物濃度に依存しないという特徴がある。  
 Divacancy (E4,DLTS)?  
 フラックスのモニターに使うことができる。

$$\Phi_{eq} = \kappa \Phi_{tot}$$

体積

$$I = \alpha \Phi_{eq} V$$

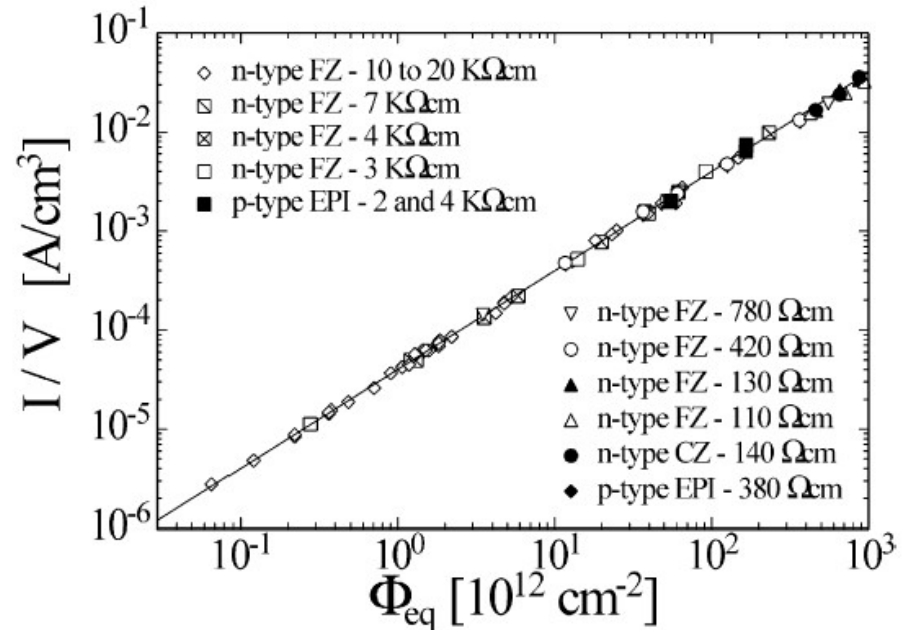


Fig. 3. Fluence dependence of leakage current for silicon detectors produced by various process technologies from different silicon materials [16].

$$\alpha_{80/60} = 4.0 \times 10^{-17} \text{ A cm}^{-1} \pm 5\%. \quad \text{20度での値に換算}$$

## 漏れ電流の増大に対する対策

高エネルギー物理の検出器では

① フロントエンド回路の高速化 ( $T_M$ を20-30 nsに設定)

ショット雑音  $i_n^2 = 2qI_L$   $\longrightarrow$   $V_n^2 = \beta_1 T_M i_n^2 + \beta_2 C_D^2 / T_M$

しかし、これだけでは検出器容量による雑音が増大してしまう

② 検出器のピクセル化

- a) チャンネル当りの漏電流の減少
- b) チャンネルごとの検出器容量の減少
- c) 他の観点: 飛跡の弁別能力の向上、物質量の低減による多重散乱の抑制

S/Nの改善

さらに

③ より低温でのオペレーションにより漏れ電流を低減するようになっている(eg.  $-10^\circ\text{C}$ )。 漏れ電流の温度依存性、 $\exp(-qV_a/kT)$ に着目

# 不純物濃度の実効的減少

Nタイプのシリコンは $19[\text{cm}]N_D$ 程度のフラックスでPタイプに移行する。

Shallow acceptor、donor removalは、マイナー(DLTS)。Deep-level acceptor state:  $V_2O$  (divacancy-oxygen complex)?

$$|N_{\text{eff}}| = \frac{2\epsilon\epsilon_0 V_{\text{depl}}}{q_0 d^2}$$

検出器を空乏化するための電圧がフラックスによって変化のみならず、ジャンクションの位置が反対側の電極へ移動するといった現象が発生する。

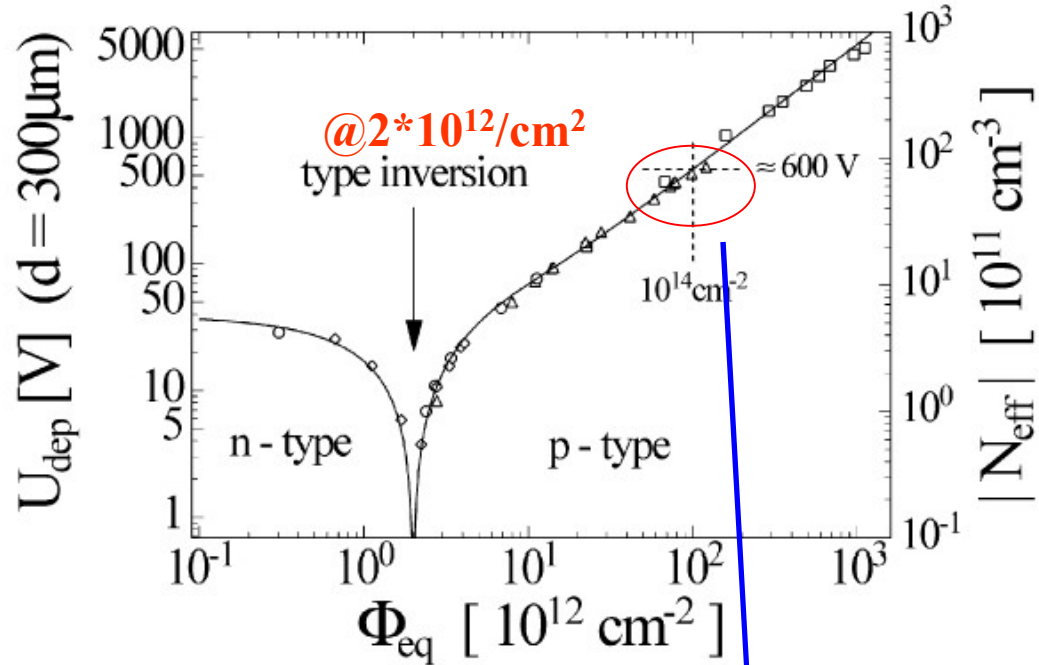
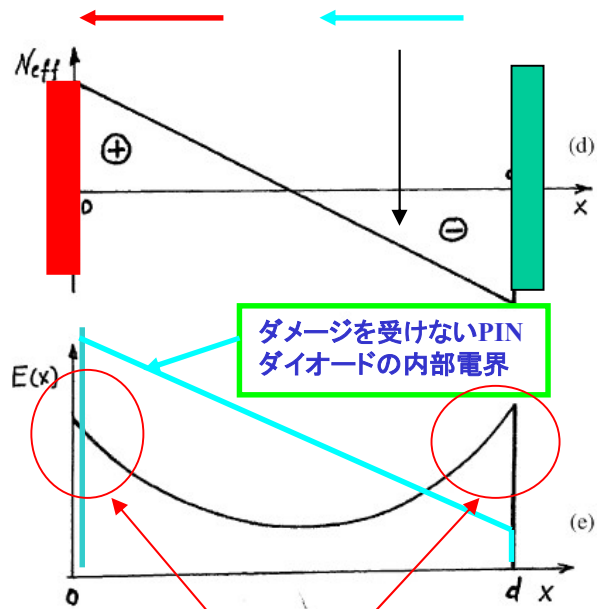


Fig. 4. Change in the bulk material as measured immediately after irradiation [20].

空乏層を確保するため、またモビリティーの減少を補うため、高いバイアス電圧が必要となる。<sup>14</sup>

# Double junction

Hole current      Electron current



P+電極に近い方は、Deep-levelが負に帯電しにくい。その結果電場が両側で高くなる。

**p+n<sub>p</sub>n<sub>p</sub>? double junction!**

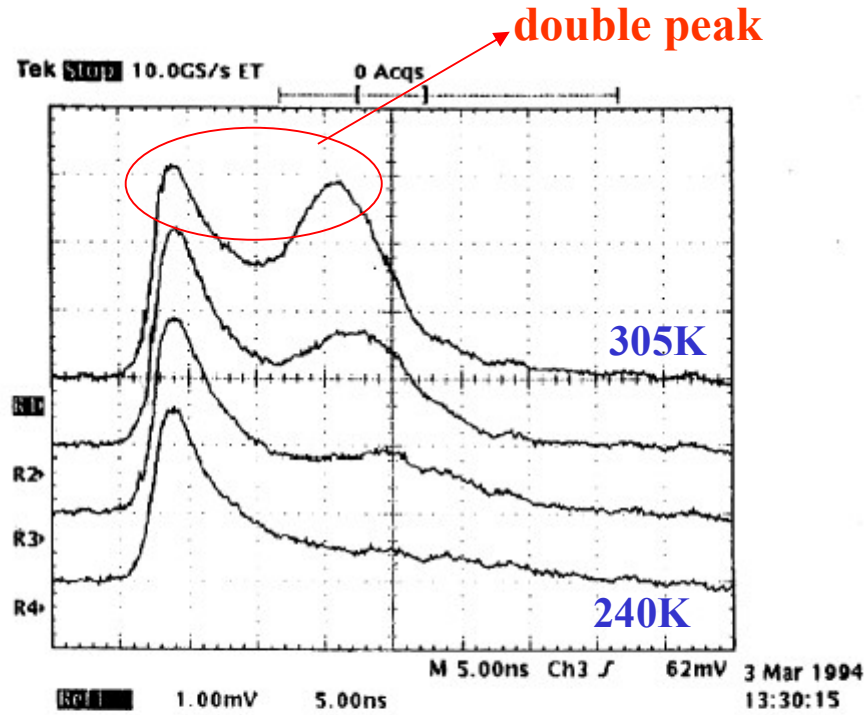


Fig. 3. Current pulse response at different temperatures as measured in Ref. [2] for a neutron irradiated detector to a fluence of  $\Phi_n = 3.29 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ : R1—305 K, R2—280 K, R3—260 K, R4—240 K. The reverse bias is 550 V. The charge is injected at the n<sup>+</sup> side, which is a high field side after space charge sign inversion.

## Reverse annealing

- 1)  $10^{13} \text{ cm}^{-2}$  の中性子を照射するとn-typeからp-typeに変化する (type inversion)。
- 2) 室温に放置すると、数日間は実効的な不純物濃度が減少するが (annealing)
- 3) その後、増加に転じて、これは数ヶ月に渡る (reverse annealing)。

V(delayed)+VO $\rightarrow$ V<sub>2</sub>O  
の反応がビルドアップ  
している？

検出器はリバースアニーリング  
を防止するため常時-10~0°Cの  
環境で運用、保存されている。

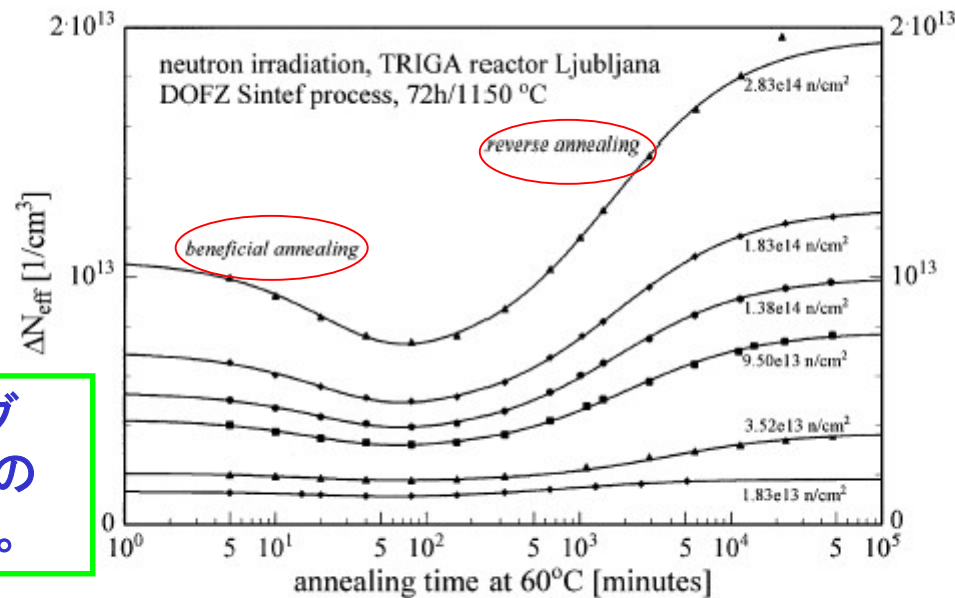


Fig. 7. Systematic analysis of annealing data. Change of effective doping concentration  $\Delta N_{\text{eff}}$  during isothermal annealing at 60°C of oxygen enriched silicon detectors irradiated with different neutron fluences.



## Defect engineering

酸素を拡散したFZシリコンはバルクダメージの効果がより緩やかである。

$V_2O$ の生成が $V+O \rightarrow VO$ の反応によって抑制される？

もっとも最近の技術では、pタイプ(ボロンドープ)のCz-Si(酸素含有量が多い)ものから出発して、Thermal-donor generationという手法によりnタイプに変換したものが試されている。 $10^{14}$ の中性子束に対しても、ほとんど実効的不純物濃度の変動がないことが報告されている。[NIM, J.Harkonen et al., in press]

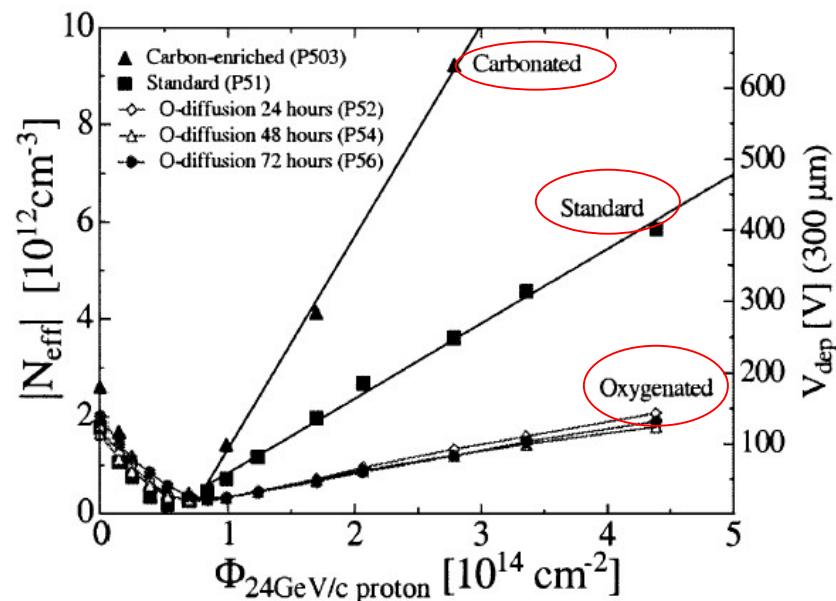
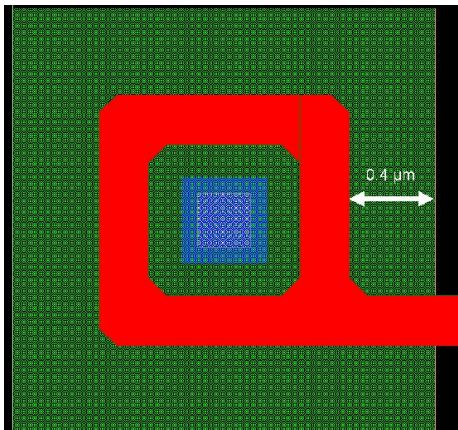


Fig. 9. Influence of carbon and oxygen enrichment to changes of the effective doping concentration after proton irradiation.

## 集積回路(MOS)における放射線損傷

主として酸化膜及び界面のダメージ

- 1) スレッショルド電圧の変動
  - nMOSのスレッショルドは低く
  - pMOSのスレッショルドは高く
- 2) オフリークの増大
  - ゲート端部の効果
- 3) トランスコンダクタンスの減少
- 4) 熱雑音の増大
- 5) 1/f雑音の増大
- 6) SOIではBOXの損傷が問題となりうる



端部のないトランジスタ:  
Enclosed structureの採用  
によってゲート端部での  
オフリークの発生を抑制

第12回高温エレクトロニクス研究会、  
2006年3月10日@ISAS

ゲート酸化膜の  
厚さの二乗に比例

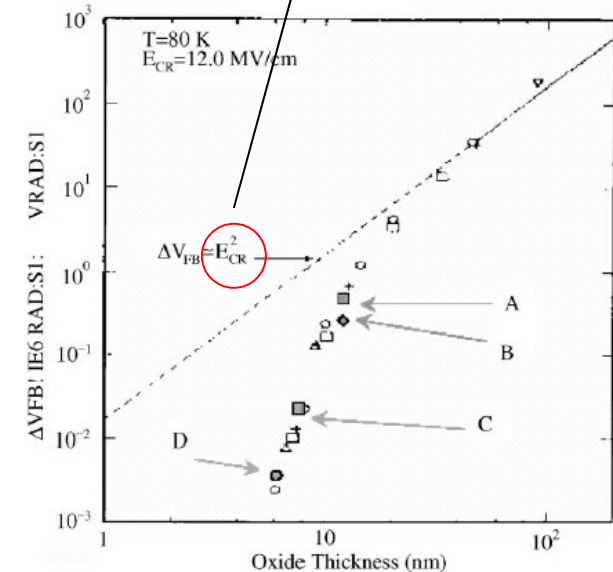


Fig. 1. Flatband voltage shift of MOS capacitors at different gate oxide thicknesses for 1 Mrad (SiO<sub>2</sub>) irradiation taken from Ref. [4]. The square points are threshold voltage shifts measured on transistors from different CMOS processes.

サブミクロンCMOSでは  
スレッショルド電圧の変動  
は、急激に減少する。

cf.  $t_{ox}=7.5$  nm  
for 0.35 μm CMOS 18

## シングルイベント効果(SEE)

1) SEGR: ゲート酸化膜でのアバランシェブレイクダウン

サブミクロンCMOSでは耐性が向上している。

2) SEL: 寄生サイリスタの起動

epiウェハの利用、ガードリングと基板コンタクトの強化  
SOIプロセスの採用

3) SEU: 低容量ノードへの電荷の注入による論理レベルの反転

サブミクロンCMOSでは一般に耐性が減少  
回路方式(ex. 多数決論理、DICEラッチ等)による回避

4) SET: 過渡的スパイクの発生による誤動作の誘発

サブミクロンSOI-CMOSでは一般に耐性が減少  
Twin-gate構造、時定数の導入等によるスパイク発生の抑制

## まとめ

高エネルギー物理学では、LHCへ向けての測定器建設のために組織的に放射線損傷およびその回避策が研究された。

その結果、シリコンを用いた検出器では、 $10^{13-14}/\text{cm}^2$ の中性子束相当の環境下においても実用に耐えるものが可能となった。

さらに、フロントエンドの集積回路においても商用のサブミクロンバルクCMOSでありながら10Mradの環境に耐えうるものとなっている。

高エネルギー物理ではトータルドーズ効果に主眼をおいた開発研究が行われている一方、宇宙科学では、シングルイベント効果に対する研究が進んでいる。これらの成果を統合することより放射線耐性が多面的に向上していくものと考えられる。

以上

## 吸収線量の単位

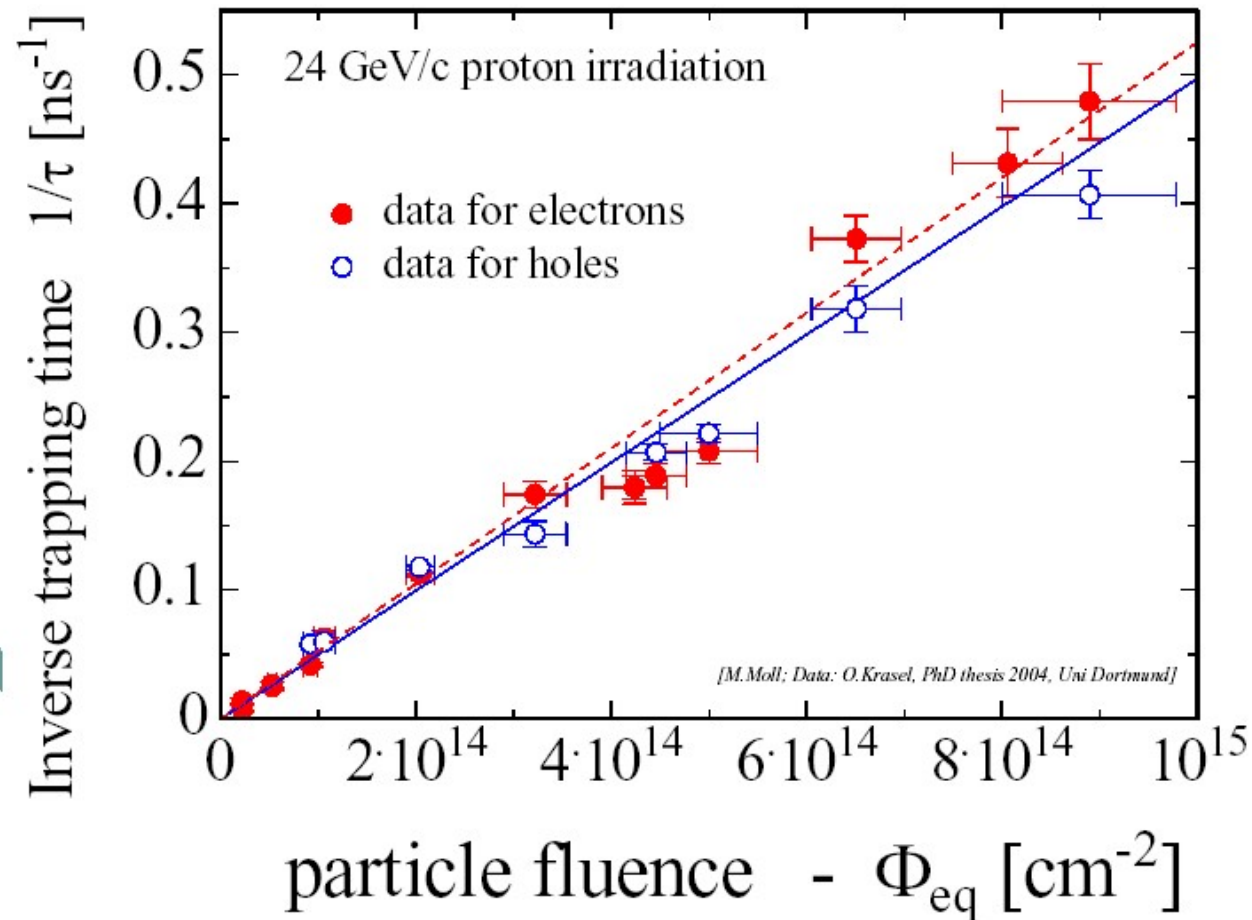
**吸収線量:  $D=dE/dm$**

**単位: J/kgまたはグレイ(Gy)、特別単位にrad**

Dは単位質量mの体積内の物質に、電離放射線によって付与されたエネルギーdEをdmで除した商である。dEは、たいていの場合、原子または分子の電離および励起に費やされたエネルギーである。放射線が物質に照射され、相互作用を行った時、そのエネルギーがどれだけ物質に吸収されたかを示す値。1グレイとは物質1kgあたり1ジュールのエネルギー吸収を生じる時の吸収線量。放射線の種類と吸収される物質に関係なく使用される。

旧単位のrad(ラド)との関係は、 $1\text{Gy}=1\text{J/kg}=100\text{rad}$

# キャリアライフタイムの減少



## NIELの適用限界(1)

低エネルギー領域(電子)では、損傷とNIELの線形性は維持されない？

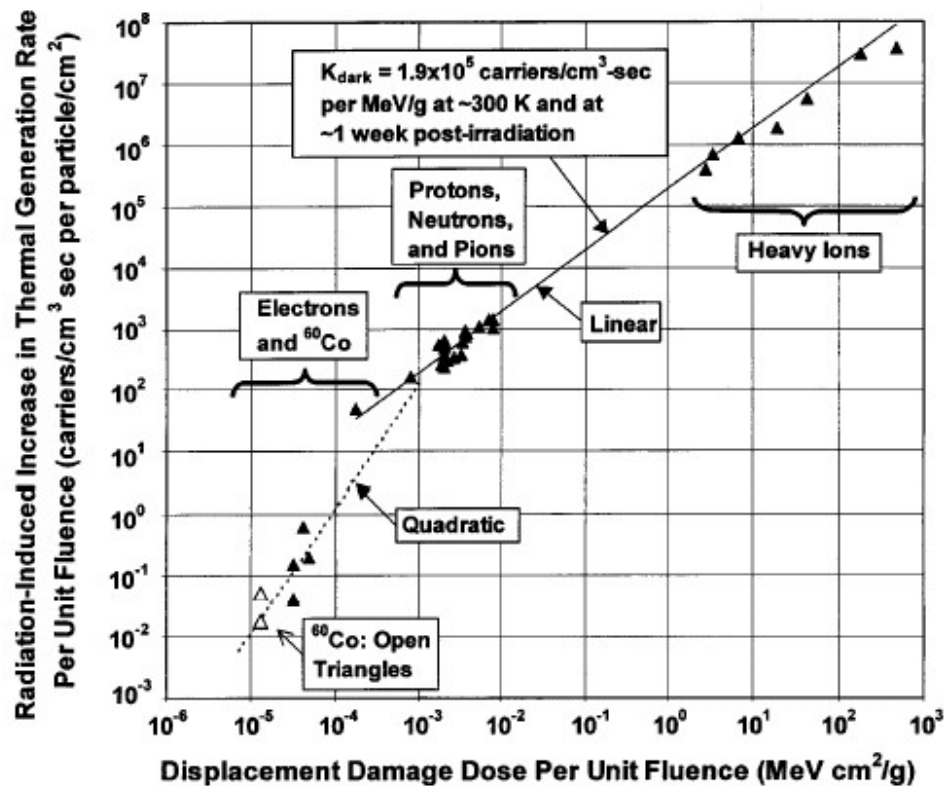


Fig. 4. Radiation-induced increase in thermal generation rate per unit fluence (equals the product of  $K_{\text{dark}}$  and NIEL) versus the displacement damage dose deposited per unit fluence (equals NIEL). Data points are based on information presented in Table I.



## NIELの適用限界(2)

### p-n puzzle

Proton: 24 GeV/c (CERN)  
Pion: 192 MeV (PSI)  
Neutron: 0.1-10 MeV (JSI,  
Ljubljana)

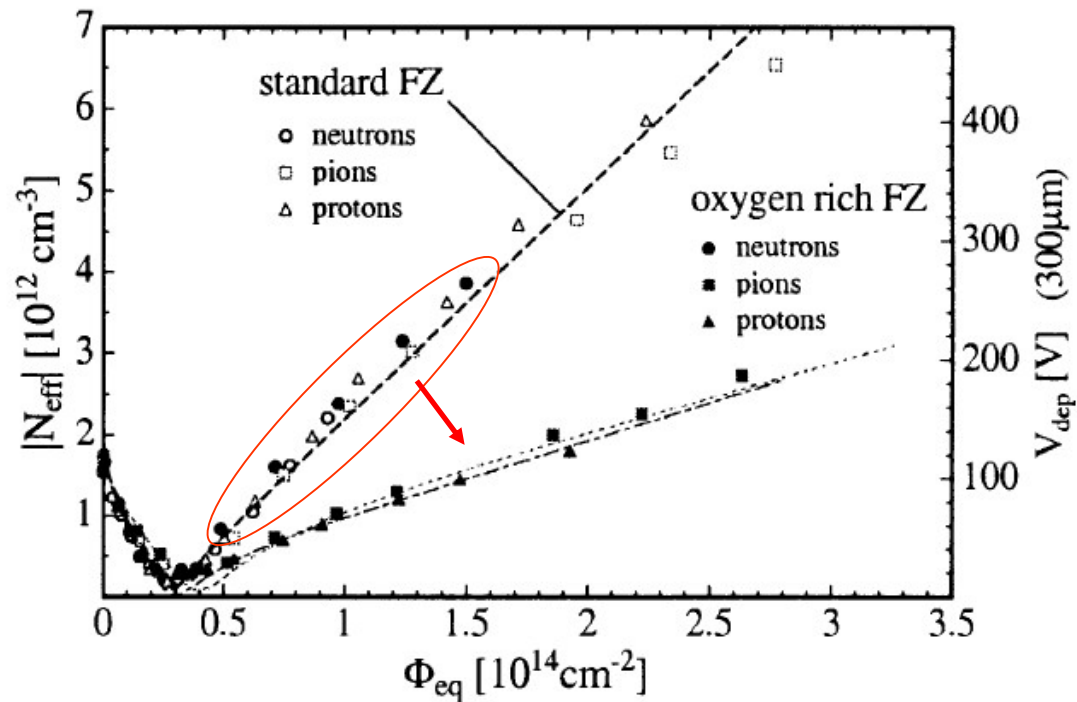


Fig. 10. Particle dependence of radiation damage for standard and oxygenated silicon detectors.

# 半導体検出器の模式図

