

# 半導体メモリーのシングルイベント アップセットに関する研究 — 核データ・核物理屋の視点から —

九州大学大学院総合理工学研究院

渡辺 幸信

watanabe@aees.kyushu-u.ac.jp

## 1. 背景

過酷な宇宙線環境に曝される人工衛星ばかりでなく、地上や航空機内においても、半導体メモリーデバイスの高集積・微細化に伴い、宇宙線によって誘起される誤動作（ソフトエラー）の発生が懸念されている。図 1 に示すように、地上における宇宙線の内、主にソフトエラーに関与するのは熱領域から GeV 領域までの広範なエネルギー分布をもった中性子である。<sup>1)</sup> この宇宙線中性子が、 $0.1\mu\text{m}$  以下の最小加工寸法に達する次世代半導体デバイスのスケージングの新たな障壁となりうるということが指摘され、近年、半導体業界を中心に宇宙線中性子誘起ソフトエラーの研究に関心が高まっている。<sup>2,3,4)</sup>

ソフトエラー発生機構の素過程の第 1 段階は、宇宙線中性子と素子構成主要元素であるシリコンとの核反応である。図 2 に示すように、ソフトエラーは、核反応により放出された荷電粒子・反跳イオンが素子内で電子正孔対を生成し、これらの発生電荷によってメモリーの情報（論理）が反転する現象（シングルイベントアップセット：以下、SEU）に起因すると説明されている。

本報告では、宇宙線中性子誘起ソフトエラー現象を解析するために、核データ・核物理屋の立場で取り組んでいる著者等の最近の研究成果<sup>5,6,7)</sup>を紹介しつつ、ソフトエラー研究の現状について解説する。

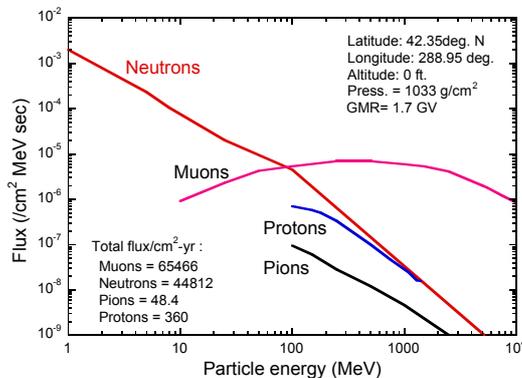


図 1 地上における宇宙線の強度分布（計算）<sup>1)</sup>

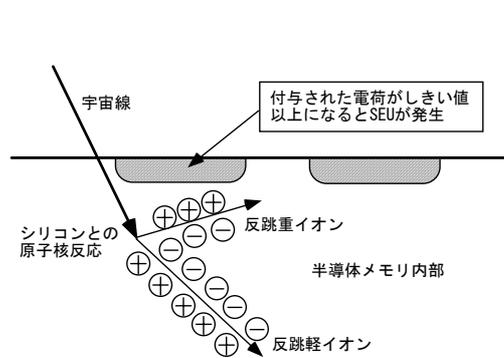


図 2 ソフトエラー発生の模式図

## 2. 中性子誘起ソフトエラー率の評価方法の概要

メモリーデバイス実機を使った実験による評価方法の概要について述べる。1つは、地上の特定の場所でメモリーデバイスを動作させ、エラー率を求めるフィールド試験がある。宇宙線中性子束はかなり小さい（例えば、10 MeV 以上の中性子の総フラックス：12 個/cm<sup>2</sup>・hr 程度@東京）ので、十分な統計精度を上げるためには、多くのデバイス（1000 個単位）と長期の実験期間が必要となる。次に、加速器中性子源からのビームを利用した2種類の加速試験がある。1つは、実際の宇宙線中性子スペクトルを模擬した連続中性子場を作り、そこでデバイスを照射して試験を行う方法で、代表的な試験施設として、LANL (USA) の WNR に専用ビームラインがある。もう1つは、<sup>7</sup>Li(p,n)反応等を利用した準単色中性子源を使って、SEU 断面積の入射エネルギー依存性を測定し、宇宙線中性子スペクトルの評価値を folding して、地上におけるソフトエラー率を評価する方法である。代表的な施設として、Uppsala の Svedberg 研究所（20～160MeV）等がある。

これら実験的アプローチ以外に、現象をモデル化し、数値計算によりソフトエラー率を評価する方法がある。この手法について、以下に、筆者等の最近の研究<sup>5,6,7)</sup>を紹介しながら解説する。

## 3. 計算によるソフトエラー率の評価

ソフトエラー率を予測し、その対策を講じていくために、解析用シミュレーション計算コードの開発が不可欠である。図2の模式図からわかるように、ソフトエラー現象を理解する上で必要な物理過程は次の4つから構成される：

- (1) 地表における宇宙線中性子エネルギースペクトル（宇宙線物理）
- (2) デバイス中の中性子と原子核との核的相互作用（原子核物理）
- (3) 核反応により生成されたイオンによる電子・正孔対の生成（放射線物理）
- (4) デバイス内のドリフト・拡散による電荷輸送過程（デバイス物理）

以下、筆者等の研究に使ったそれぞれの物理過程のモデリング並びにソフトエラー率の評価法（BGR 簡易計算法とモンテカルロ法）について説明する。

### 3.1 宇宙線2次中性子のエネルギースペクトル

この分野の研究では広く使われている Ziegler の経験式<sup>1)</sup>（通称 IBM モデル）を使用する。そのエネルギースペクトルを図3に示す。中性子束は、緯度や高度に依存する。この結果は New York における総中性子束 20 個/cm<sup>2</sup>・hr に規格化されている。国内の評価では、東京での値（12 個/cm<sup>2</sup>・hr）を使う。また、中性子束は太陽周期（11 年）によっても約 30%変化し、活動期には減少、休止期には増加する。建物の遮蔽の効果にも注意する必要があるが、本研究では太陽活動も含め、これらの効果は考慮していない。

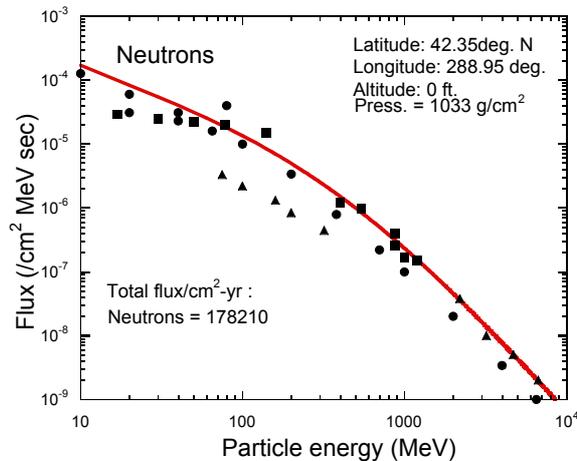


図3 IBMモデルの計算結果と測定値との比較 (New York での値に規格化)

### 3.2 核反応データベース

ソフトウェア率の定量評価では、GeV 領域までの中性子とシリコンはじめメモリー素子構成元素との反応断面積データが不可欠となる。核反応で生じた反跳イオンや荷電粒子の二重微分断面積 (DDX) データ (反跳イオンに対しては、いわゆる PKA スペクトルに相当する量) が必要である。半導体メモリー構成の主成分はシリコンであるが、それ以外に、酸化層内の酸素や微量構成元素として、B, N, P, Ti, As, Ta, Cu などのデータも要求されている。本研究では、第1段階として、Si の主要同位体である  $^{28}\text{Si}$  に対する 2MeV ~ 3GeV 領域の断面積データベースを作成した。<sup>5,6)</sup>

$n+^{28}\text{Si}$  反応に対する反跳イオンの DDX 実験データは皆無の状況にあり、理論計算に基づく断面積評価となる。まず、2MeV~20MeV 領域は、JENDL-3.3<sup>8)</sup> を使用した。ただし、反跳イオン DDX は格納されていないので、中性子や軽イオン放出データから二体運動学を使って実験室系での反跳イオン DDX を作成した。その詳細は文献<sup>6)</sup> に報告している。次に、20MeV~150MeV 領域は、LA150 ライブラリを使用した。LA150 には、全反跳イオンの生成断面積と実験室系で等方角分布のエネルギースペクトルが与えられている。150MeV 以上については、仁井田等によって開発された QMD+統計崩壊モデル計算コード<sup>9)</sup> を利用して DDX データを作成した。統計崩壊の計算部には、オリジナルの統計崩壊モデル (SDM) 以外に、降旗による GEM コード<sup>10)</sup> を使用した計算も行った。

使用した断面積データと比較できる実験データは殆ど皆無なので、陽子入射反応に対する比較結果を図4と5に示す。図4は  $p+\text{Si}$  反応における  $^{22}\text{Na}$  及び  $^{24}\text{Na}$  生成断面積の実験データを LA150 の陽子データと比較したものである。励起関数のエネルギー依存性を概ね再現しているが、60MeV 以下では2倍ほど過小評価を示している。図5は 150MeV  $p+^{27}\text{Al}$  反応に対する生成イオンの質量数分布と  $A=22$  イオンの DDX データの実験値<sup>11)</sup> と QMD+SDM 計算結果との比較である。  $A=5\sim 15$  の領域で過小評価を示しているが、

A=22 イオンの DDX は前方角の高エネルギー部を除き良い一致が得られている。

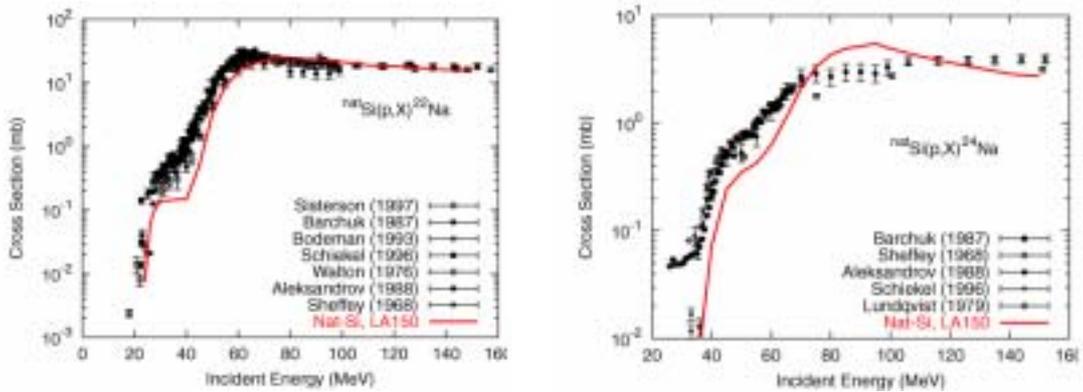


図 4 p+Si 反応における  $^{22}\text{Na}$  及び  $^{24}\text{Na}$  生成断面積

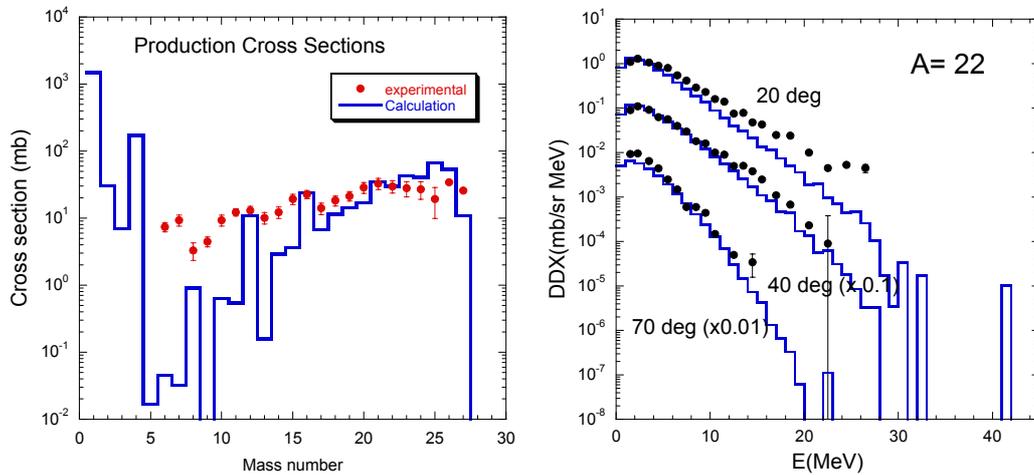


図 5 150MeV p+ $^{27}\text{Al}$  反応に対する生成イオンの質量数分布と A=22 イオンの DDX

### 3.3 電子正孔対の生成 (初期電荷空間分布計算)

広く使われている Ziegler の SRIM コード<sup>11)</sup>を利用して、全生成イオンの Si 中での飛程や阻止能のデータベースを作成する。このデータベースを以下の計算に使用する。尚、阻止能には、電子阻止能 (原子分子の励起・イオン化) と核阻止能 (原子核とのラザフォード散乱) があるが、電子正孔対生成の計算には前者を使用する。

### 3.4 SEU 断面積の計算

#### 3.4.1 Burst Generation 法

Burst Generation 法<sup>11)</sup>は、発生電荷の輸送計算を厳密に行わず、核反応断面積から Burst Generation Rate (BGR) という巨視的断面積に相当する物理量を計算し、素子の有感体積  $V$  と電荷収集効率  $C$  をパラメータとして SEU 断面積を導出する簡易計算法である。BGR は、1 回の核反応によって、ある有感体積内に臨界エネルギー  $E_c$  以上のエネルギーを付与

する荷電粒子やイオンが発生する確率と定義できる。 $E_c$  は SEU が発生する臨界電荷量  $Q_c$  と  $E_c$  (MeV) = 22.5  $Q_c$  (pC) の関係がある。本モデルでは、ある有感体積内に生成された全電荷がキャパシター部へすべて流れ込むと仮定して、電荷輸送計算をしない。

筆者ら<sup>5,6)</sup>は、デバイスの有感有効深さ  $d$  を 1 つのパラメータを導入して、BGR 関数の計算を行った。その結果、BGR 関数は次のように定義される。

$$BGR(E_n, Q_c, d) = \sum_i BGR(E_n, Q_c, d, A_i, Z_i) = N_{Si} \sum_i \int_{E_{\min}^{(i)}(d)}^{E_{\max}^{(i)}(d)} \left( \frac{d^2 \sigma}{dE d\Omega} \right)^{(i)} d\Omega dE \quad (1)$$

ここで、 $i$  は反応生成物（イオンと荷電粒子）の種類、 $N_{Si}$  はシリコン原子数密度、非積分関数  $(d^2 \sigma / dE d\Omega)^{(i)}$  は、反応生成物  $i$  の二重微分断面積である。エネルギー積分の上・下限  $E_{\max}^{(i)}(d)$  と  $E_{\min}^{(i)}(d)$  は、有感深さ  $d$  内に  $E_c$  以上のエネルギーを付与する最大・最小運動エネルギーに対応し、前節で述べた飛程や阻止能のデータベースに基づいて計算する。

(1) 式の BGR 関数を使うと、SEU 断面積は次式で記述される。

$$\sigma_{SEU}(E_n) = V \cdot C \cdot BGR(E_n, Q_c, d) \quad (2)$$

ここで、有感体積  $V$  と電荷収集効率  $C$  の積は、実験値を再現するように決定される規格化パラメータとなる。最終的な SEU 発生率は、宇宙線中性子束  $\phi(E_n)$  を使って、次式で計算できる。

$$SEU \text{ rate} = \int \sigma_{SEU}(E_n) \phi(E_n) dE_n \quad (3)$$

### 3.4.2 モンテカルロ計算法

BGR 法は、実験データの簡易解析には適用できるが、計算式内にデバイスの空間情報を含んでいないために、核反応発生位置やイオントラックの空間分布に依存した電荷収集率等を厳密に考慮できない。そこで、実際の素子をモデル化した 3 次元計算体系を構築し、その中で各物理過程をモンテカルロ法で模擬して、ソフトエラー率を計算する手法と計算コード<sup>3,7,14)</sup>が開発されている。1 例として、以下に、文献<sup>7)</sup>の方法について簡潔に述べる。

図 6 に示すような実際の素子を模擬した計算体系に置いて、核反応で生成した 2 次イオンにより生成された初期電荷がデバイス内をドリフト・拡散輸送され、臨界電荷量  $Q_c$  以上の電荷がキャパシターへ流入する確率をモンテカルロ法で求め、ソフトエラー率を算出する方法である。核反応によるイベント発生には、先に述べた筆者等が構築した核反応データベースを使用し、初期電荷空間分布の計算には SRIM コードを使用する。発生電荷の輸送計算には、デバイス設計に使われている 3D デバイスシミュレータを使用する。但し、イベント毎にデバイスシミュレータを動作するアルゴリズムは計算時間がかかるので、デバイスシミュレータを使った事前計算に基づいて電荷収集簡易モデル（詳

細は文献<sup>7)</sup>に譲る)を構築する。図中の数式のCがこのモデルで計算される電荷収集率に相当し、イオントラックの各ビン毎の初期電荷がキャパシターに収集され、その総量Qが算出される。素子内の任意の空間にモンテカルロ法で発生させた核反応のイベント毎に、このQを導出し、 $Q_c$ を超えているイベント数を求め、SEU断面積を計算する。尚、図6に示すように、計算体系内に多数のメモリセルを配置することで、マルチビットエラー(MBE)発生についてもシミュレーション可能である。

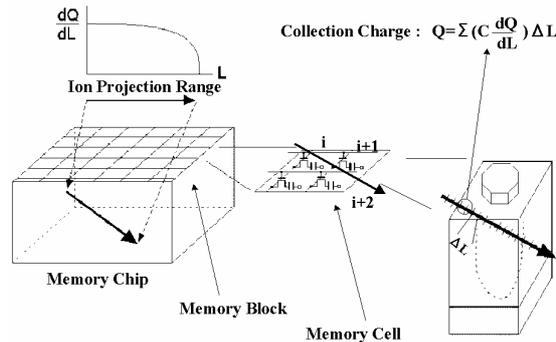


図6 ソフトエラー計算体系と電荷収集の模式図(文献<sup>7)</sup>より転載)

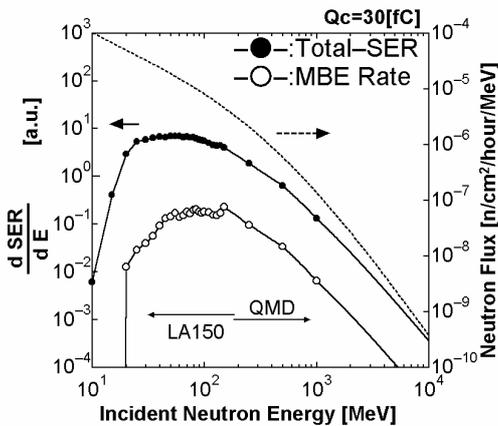


図7 全ソフトエラー及びMBE率の中性子エネルギー依存性(文献<sup>7)</sup>より転載)

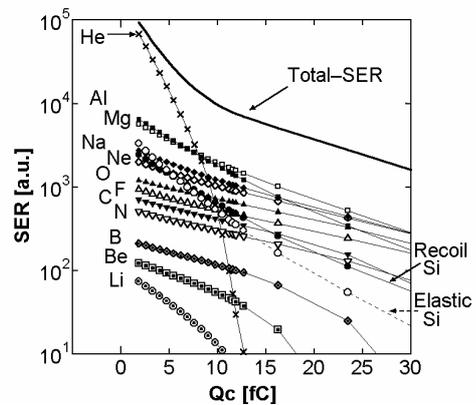


図8 ソフトエラーの2次イオン種依存性及び $Q_c$ 依存性(文献<sup>7)</sup>より転載)

#### 4. 結果と議論

##### (1) モンテカルロシミュレーション計算結果

DRAM に対するソフトエラーのモンテカルロシミュレーションを行った結果の1例を図7に示す。臨界電荷量  $Q_c = 30 \text{ fC}$  の場合である。但し、 $20 \text{ MeV}$  以下の核反応データベースが完備される以前の計算のため、 $20 \text{ MeV}$  以下では弾性散乱による反跳核  $^{28}\text{Si}$  しか考慮されていない。破線は IBM モデルによる中性子束分布である。黒丸は(3)式の非積分関数

で、全エネルギー領域で積分したものがソフトエラー率となる。白丸は MBE 率を表し、全ソフトエラーの約 4% 含まれる。 $Q_c$  を変化させた計算から、 $Q_c$  が小さくなると MBE の割合が増加してくることが見出された。<sup>7)</sup>

次に、全ソフトエラーに占める各 2 次イオン種の寄与とその  $Q_c$  依存性を調べた結果を図 8 に示す。素子の細線化が進むにつれ、 $Q_c$  は小さくなる。図 8 から、 $Q_c$  が大きいと、電荷の大きな Al や Mg などの重イオンの影響が支配的であるが、 $Q_c=10\text{fC}$  以下では、阻止能の小さな  $\alpha$  粒子が大きな影響を与えうることが予想される。 $\alpha$  生成断面積は、重イオン生成に比べ大きいので、 $\alpha$  粒子の影響が現れるとソフトエラー率も急激に大きくなる様子がわかる。

## (2) BGR 法を使った解析結果

BGR 法を使った SEU 断面積の計算結果と SRAM の実験結果<sup>15)</sup>との比較を図 9 に示す。実験データは Cypress 製の素子に規格化している。実験値の興味深い傾向は、素子形状や集積度に依らず、類似した入射エネルギー依存性を示す点である。この傾向を再現できるように、BGR 関数のパラメータである臨界電荷量  $Q_c$  を  $53\text{fC}$  (付与エネルギーで  $E_c=1.2\text{MeV}$  に相当) と有感厚さ  $d$  を  $1\mu\text{m}$  とした。絶対値は有感体積  $V$  と電荷収集効率  $C$  の積を調整して決めた。全エネルギー領域に亘り、概ね良い一致を示している。

次に、 $20\text{MeV}$  以下の領域と  $20\text{MeV}$  以上に分けて、2 次イオン種依存性を調査した結果を図 10 と 11 に示す。低入射エネルギー領域では、 $(n,\alpha)$  反応の反跳核  $^{25}\text{Mg}$  の寄与が支配的で、 $20\text{MeV}$  近傍で Mg と Si 同位体が主要な 2 次イオン種となっている。さらにエネルギーが高くなると、弾性・非弾性散乱は前方ピーク性が強くなり、反跳核  $^{28}\text{Si}$  への平均

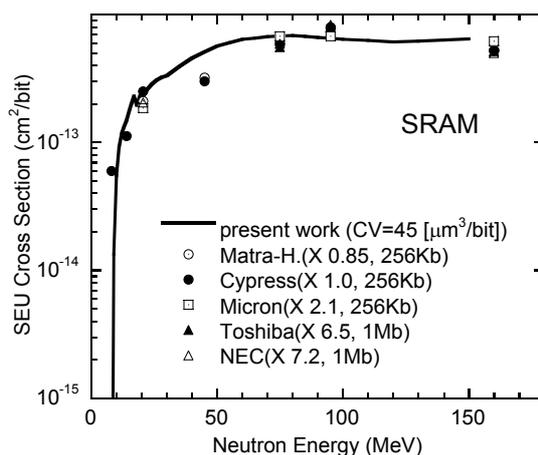


図 9 SRAM に対する SEU 断面積の計算値 ( $Q_c=53\text{fC}$ ) と実験値との比較

移行運動エネルギーが小さくなるために、SEU に与える影響は小さくなることが理解できる。一方、図 11 から、入射エネルギーの増加とともに、軽いイオン種の影響が効いて

くる様子がわかる。

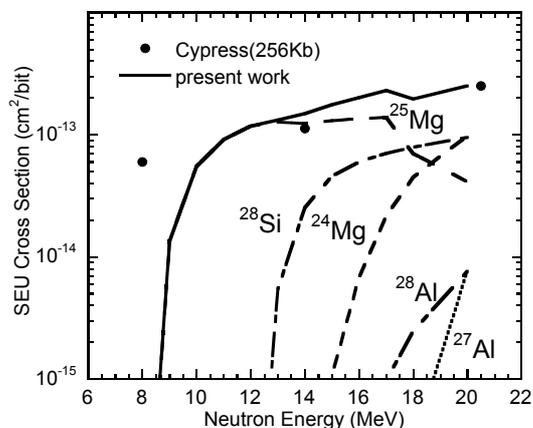


図 10 20MeV 以下の SEU 断面積の  
2 次イオン種依存性

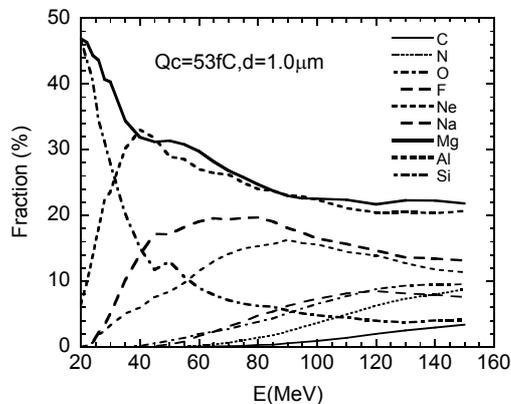


図 11 20MeV 以上の SEU 断面積の  
2 次イオン種依存性 (相対値)

さらに、臨界電荷量  $Q_c$  が小さくなった場合の宇宙線中性子感度を調べた結果を図 12 と 13 に示す。図 12 から、 $Q_c$  が小さくなるにつれて、低エネルギー領域での BGR 関数が大きくなるのがわかる。図 13 は IBM モデルによる中性子束 (図 3) を使って計算した (3)式右辺の非積分関数で、中性子感度を知る指標になる。 $Q_c$  が小さくなる次世代の素子では、20MeV 以下の低エネルギー中性子による寄与の増加が予想される。

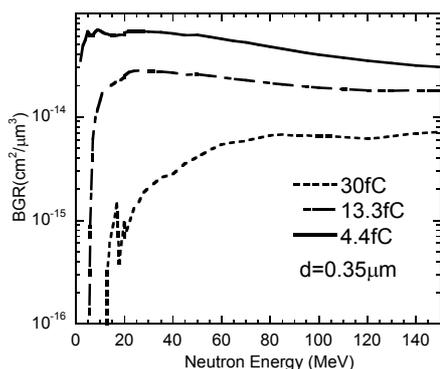


図 12 有感厚さ  $d=0.35\mu\text{m}$  に対する BGR  
関数の臨界電荷量  $Q_c$  依存性

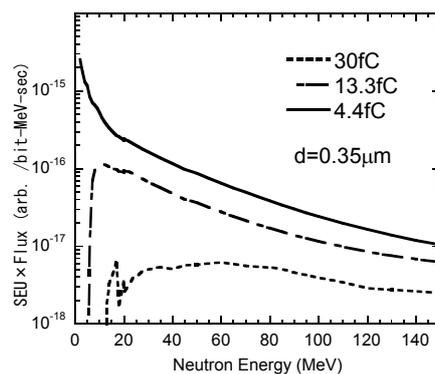


図 13 IBM モデルによる中性子束に対す  
る SEU 中性子感度の  $Q_c$  依存性

#### 4. まとめと展望

以上、著者等の最近の研究成果を紹介しながら、核データ・核物理屋の視点に重心を置いた宇宙線誘起ソフトエラー研究の現状について概説した。紙面の都合で最近の研究動向を広く網羅できなかったが、その点は、総論記事である文献<sup>2,3,4,16)</sup>を参考にして頂きたい。

宇宙線誘起ソフトエラーの問題は、半導体デバイス技術開発の新たな課題として注目されており、核データ・放射線物理・放射線輸送計算などの原子核工学分野で得られてきた成果や技術が、IT 基盤社会の安全性確保に応用できる境界領域の研究分野である。すでに国内でも、産学連携の形で、本テーマに対する本格的な取り組みがいくつか進められている。以下、今後ソフトエラー率評価の予測精度向上に不可欠な重点的研究・開発項目を要点のみ簡潔にまとめておく。

- 加速器試験施設の整備（専用の連続中性子場や単色中性子場の開発）
- 宇宙線中性子（環境中性子）束の評価：建屋内外でのモニタリング（定点観測、環境依存性）
- 核反応データベースの充実と標準化：必要な核データ測定（特に、反跳核のエネルギー・角度分布）とデータベースの精度検証
- ナノスケールでのエネルギー付与及び電荷輸送現象のモデル化

核反応データベースに関しては、シグマ委員会高エネルギー核データ評価 WG（著者もメンバーの1人）内で、JENDL High-Energy File 用の断面積評価作業が精力的に進められている。<sup>17)</sup> 反跳核の DDX に関するデータも追加していくことで、核データコミュニティとして、ソフトエラー評価用核反応データベースの標準化に貢献できるものと考えている。

最後に一言。昨今、様々な分野でナノテクノロジーに注目が集まっている。宇宙線中性子誘起ソフトエラーのように、ナノテクの技術開発がさらに進むにつれて宇宙線起因の様々な問題が出てくる可能性ありそうである。ヒトも含め、生物は DNA 損傷の自動修復機能を獲得し、地球環境レベルの放射線場に適応してきた。ナノ人工物にもなんらかの対策が今後必要になってくる時代が来るのかもしれない。宇宙線中性子誘起ソフトエラー研究が、核データとナノテクを結びつける1つの接点となって、今後、“面白い”方向に研究が広がっていくことを期待している。

## 謝 辞

共同研究を通じて、宇宙線中性子誘起ソフトウェアに関する情報提供並びに有益なご議論を頂戴した NEC シリコンシステム研究所の川上幸也氏、羽根正巳氏に感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) J.F. Ziegler, IBM J. Res. Develop., **40**, No.1, 19 (1996).
- 2) 伊部英史、他、応用物理 第 70 巻第 11 号, p.1308 (2001).
- 3) 戸坂義春、佐藤成生、“2 次宇宙線の中性子が引き起こすソフトウェア” 超 LSI 技術 24 (西澤編、工業調査会、2000)、p.67 .
- 4) J.F. Ziegler et al., IBM J. Res. Develop., **40**, No.1 (1996).
- 5) T. Ikeuchi, Y. Watanabe et al., J. of Nucl. Sci. and Technol., Suppl. **2**, 1380 (2002).
- 6) Y. Tukamoto, Y. Watanabe, H. Nakashima, to be published in Proc. of the 2002 Nuclear Data Symposium, Nov. 21-22, 2002, JAERI, Japan.
- 7) Y. Kawakami, Y. Yamamoto, K. Tanaka, M. Hana, Y. Watanabe, NEC Res. and Develop., **43**, 146 (2002).
- 8) K. Shibata et al., J. of Nucl. Sci. and Technol. **39**, 1125 (2002).
- 9) K. Niita et al., JQMD code, JAERI-Data/Code 99-042 (1999).
- 10) S. Furihata, Nucl. Inst. Method in Phys. Res. B **171**, 251 (2000); S. Furihata and T. Nakamura, J. Nucl. Sci. and Technol. Suppl. **2**, 758 (2002).
- 11) K. Kwiatkowski et al., Phys. Rev. Lett. **50**, 1648 (1983).
- 12) J.F. Ziegler, SRIM code (2000);  
<http://www.research.ibm.com/ionbeams/SRIM/SRIMLEGL.HTM>
- 13) J.F. Ziegler and W. Lanford, Science **206**, 776 (1979).
- 14) P.C. Murley and G.R. Srinivasan, IBM J. Res. Develop., **40**, No.1, 109 (1996).
- 15) K. Johansson et al., IEEE Nucl. Sci. **45**, 2519 (1998).
- 16) 福田昭, NIKKEI ELECTRONICS, No.667 (1996), p. 107 ; *ibid.*, No.672 (1996), p.145.
- 17) T. Fukahori, Y. Watanabe, N. Yoshizawa et al., J. of Nucl. Sci. and Technol., Suppl. **2**, 25 (2002).