

半導体メモリーのソフトエラーシミュレーション用 原子核反応データベース

九大総理工 渡辺 幸信、池内 丈人、孫 偉 力

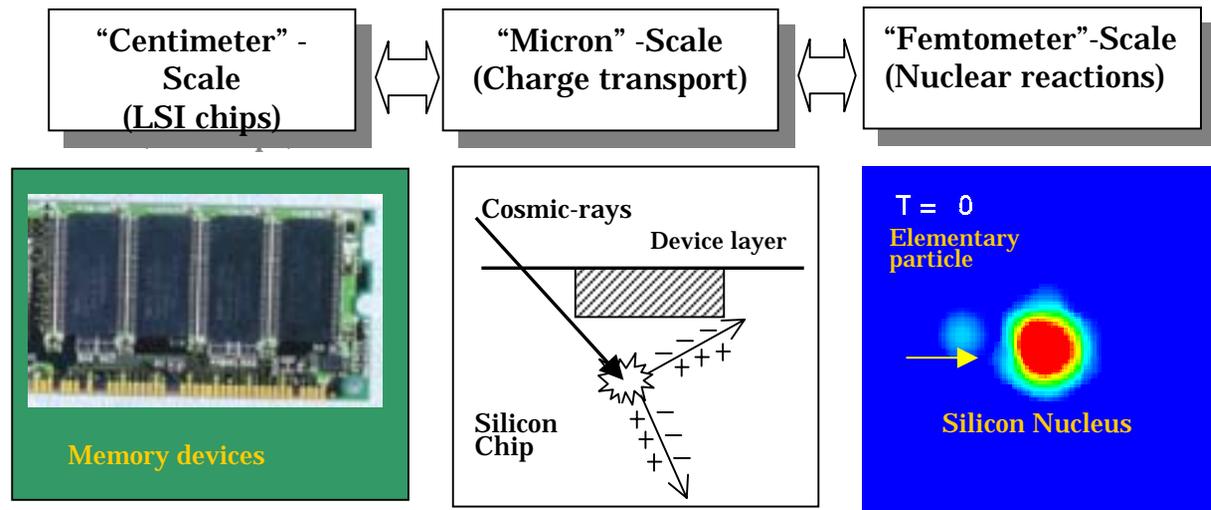
Email: watanabe@aes.kyushu-u.ac.jp

1. 序 - 背景と研究目的 -
2. 核反応データベース構築(LA150 + QMD計算)
3. BGR法によるシングルイベントアップセット断面積計算
4. 計算結果と議論(BGR法と3Dシミュレーション)
5. まとめと今後の課題

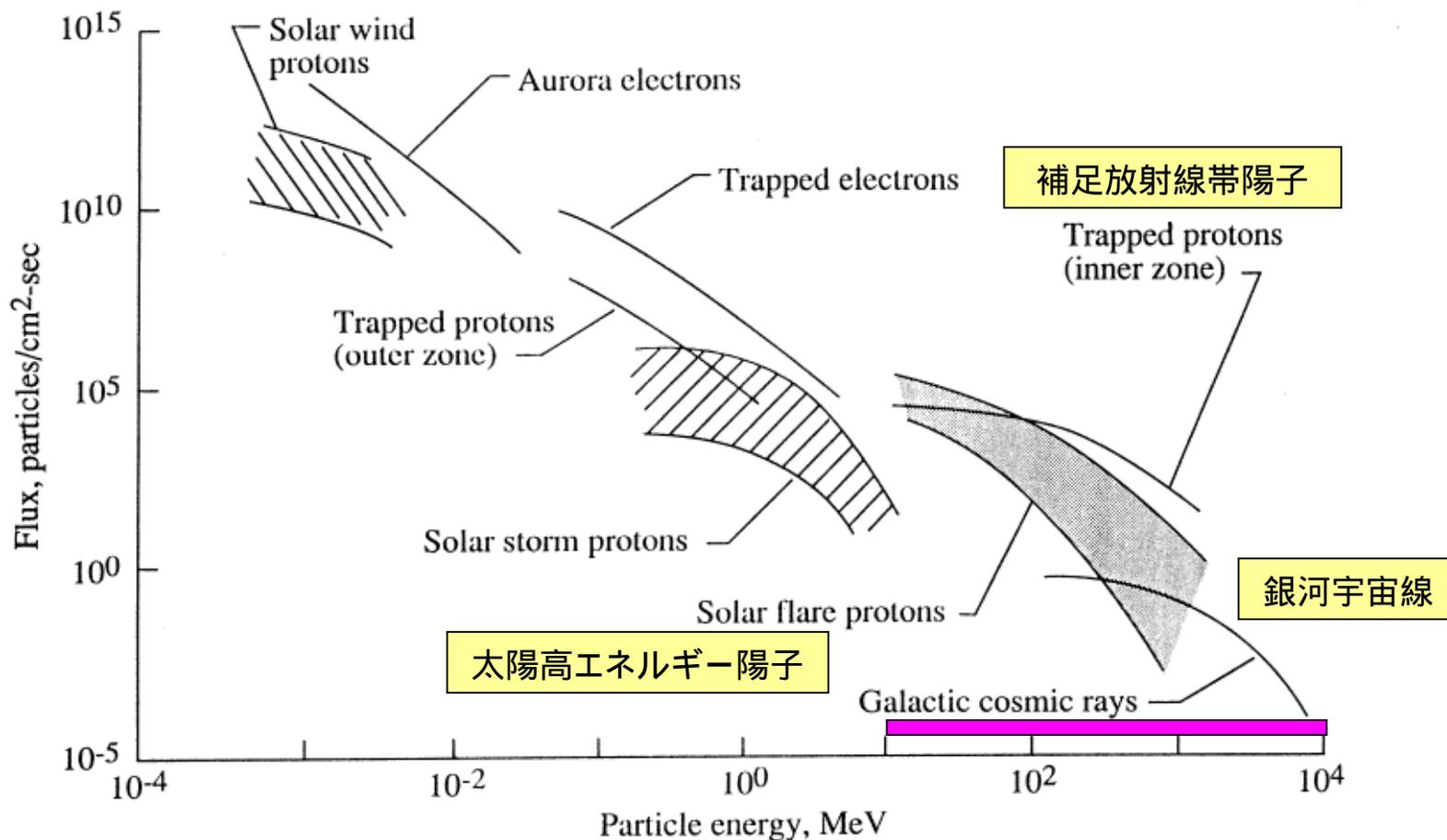
序： 研究背景

- 中間エネルギー領域の核子入射核反応の知識・情報
原子核物理以外の理工学分野への応用
- 半導体デバイス分野： 宇宙、航空機、原子力、加速器施設で使用
半導体メモリ素子の放射線損傷問題
“シングルイベントアップセット(SEU)”
(電離作用で発生した電荷によるメモリ情報の反転)

地上レベルでの宇宙線中性子起因のソフトウェア
“次世代半導体デバイススケーリングの新たな障壁”



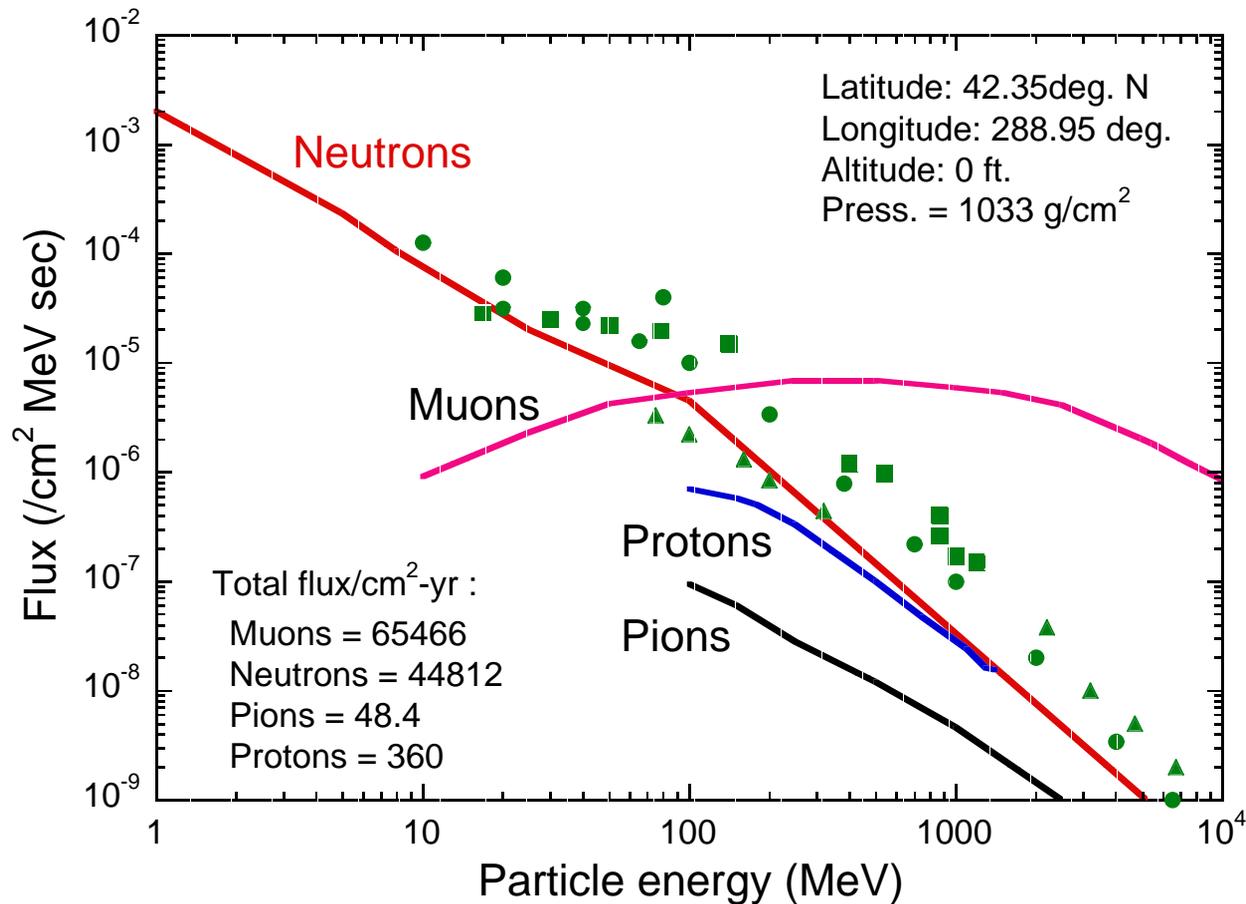
宇宙における放射線環境



Ref.) K. Oishi, "Issues in space radiation shielding for lunar base", JAERI-Conf95-016 (1995), p.125

地上における宇宙線環境

Sea-level cosmic rays@New York



本研究の目的

● 素過程である原子核反応の断面積データ

主に、 $p+^{28}\text{Si}$ や $n+^{28}\text{Si}$ (あるいは、 $+^{28}\text{Si}$)

実験・理論計算に基づく「核データ評価」

データベース化

^{28}Si (92.23%)

^{29}Si (4.67%)

^{30}Si (3.1%)

● ソフトエラー率の計算手法の開発

デバイス内発生電荷の輸送計算

(1) **Burst Generation Rate (BGR) 法**に基づく簡易計算法

(2) 3Dデバイスシミュレータを使った計算

JENDL High Energy File Project

- **JENDL = Japanese Evaluated Nuclear Data Library** (データベース)
原研・核データセンターでメンテナンス
汎用版JENDL-3.2 : 中性子(20MeV以下)、340核種
- シグマ委員会(125名)・高エネルギー核データ評価WG(20名): 産官学連携
- 対象核種: 優先度1(42核種)、優先度2(41核種)、優先度3(40核種)
- エネルギー: 20MeV ~ 3GeV
(KEK・原研大強度加速器計画の3 GeVリングの設計)
- データベースに入る断面積: 中性子入射と陽子入射

- ・全断面積、弾性散乱断面積、全反応断面積
- ・粒子生成DDX(中性子、陽子、重陽子、トリトン、He-3, 粒子, パイオン)
- ・核種生成断面積
- ・核分裂断面積

JENDL高エネルギーファイル格納予定核種一覧

1st priority	^1H , ^{12}C , ^{14}N , ^{16}O , ^{23}Na , ^{27}Al , $^{50,52,53,54}\text{Cr}$, $^{54,56,57,58}\text{Fe}$, $^{58,60,61,62,64}\text{Ni}$, $^{63,65}\text{Cu}$, ^{181}Ta , $^{180,182,183,184,186}\text{W}$, ^{197}Au , $^{196,198,199,200,201,202,204}\text{Hg}$, $^{204,206,207,208}\text{Pb}$, ^{209}Bi , $^{235,238}\text{U}$
2nd priority	^9Be , $^{24,25,26}\text{Mg}$, $^{28,29,30}\text{Si}$, $^{39,41}\text{K}$, $^{40,42,43,44,46,48}\text{Ca}$, $^{46,47,48,49,50}\text{Ti}$, ^{51}V , ^{55}Mn , ^{59}Co , $^{90,91,92,94,96}\text{Zr}$, ^{93}Nb , $^{92,94,95,96,97,98,100}\text{Mo}$, $^{238,239,240,241,242}\text{Pu}$
3rd priority	^2H , $^{6,7}\text{Li}$, $^{10,11}\text{B}$, ^{13}C , ^{19}F , $^{35,37}\text{Cl}$, $^{35,38,40}\text{Ar}$, ^{50}V , $^{64,66,67,68,70}\text{Zn}$, $^{69,71}\text{Ga}$, $^{70,72,73,74,76}\text{Ge}$, ^{75}As , ^{89}Y , ^{232}Th , $^{233,234,236}\text{U}$, ^{237}Np , $^{241,242,242\text{m},243}\text{Am}$, $^{243,244,245,246}\text{Cm}$

 担当核種

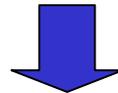
核反応データベース構築

- ソフトエラーシミュレーションに必要なSiの核反応断面積データの現状

入射エネルギー 10 MeV ~ 2 GeV

反跳2次イオンのエネルギー・角度分布 : **直接測定データは皆無**
弾性・非弾性散乱や軽イオン生成、RI生成の収量測定:

陽子入射は比較的データあり、しかし、中性子入射は少ない。



中間エネルギー領域のデータベース構築では
理論計算に頼らざるを得ない状況

- 本研究

1) 20 ~ 150 MeV

LA150ファイル@LANL

GNASHコード

前平衡(excitonモデル) +
統計(Hauser-Feshbach)計算

2) 150 MeV以上

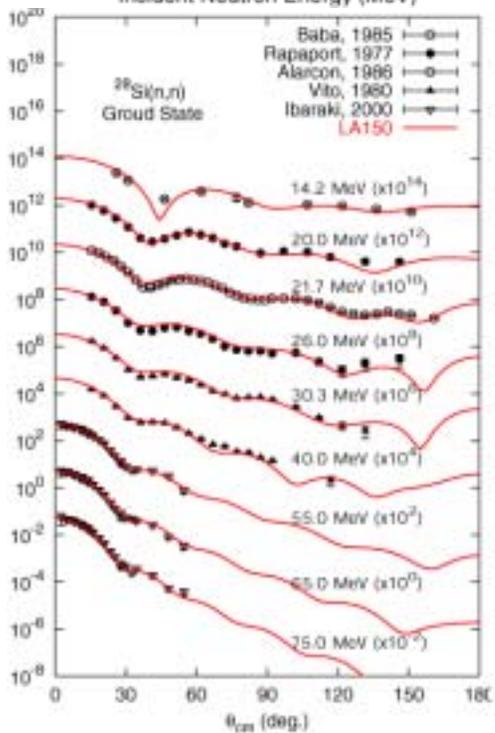
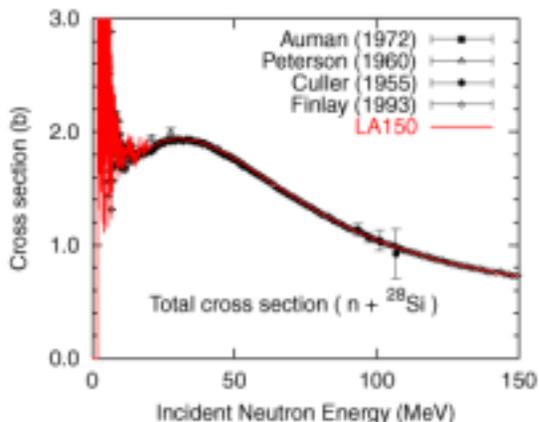
QMD + 統計崩壊モデル計算

JQMDコード (Niita@JAERI)

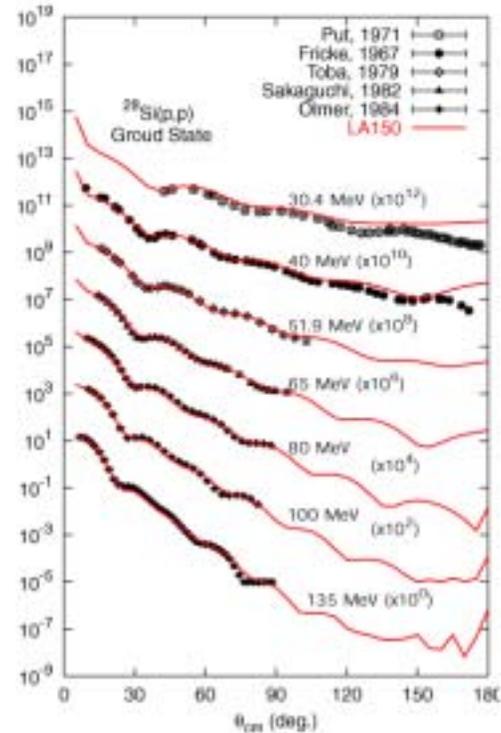
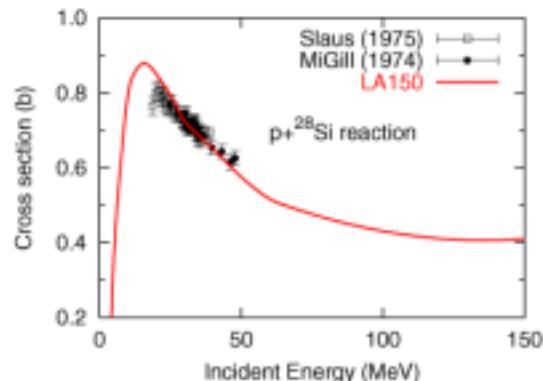
微分断面積： LA150と実験値との比較(1)

Coupled-
Channels
光学模型
計算
($0^+ - 2^+ - 4^+$)

Neutron

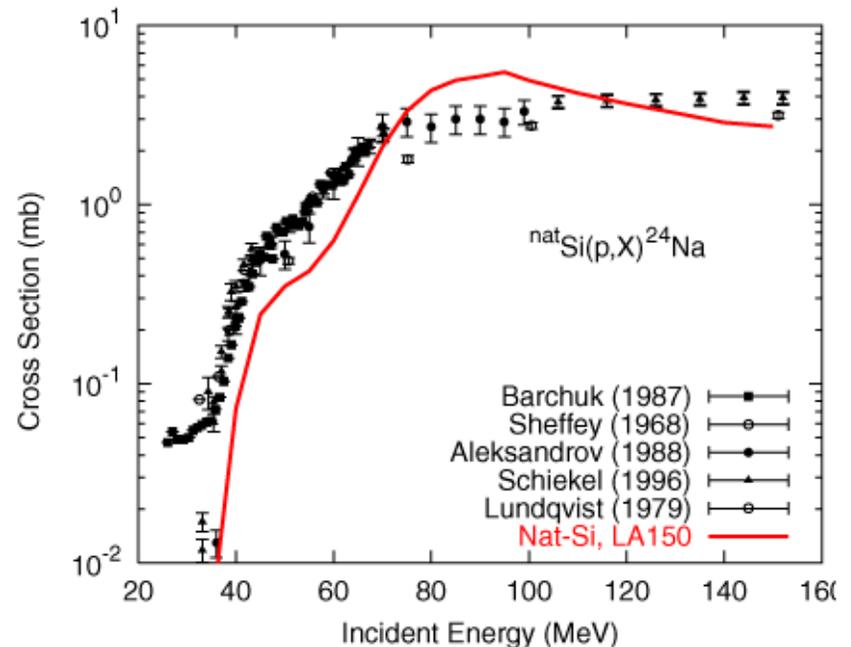
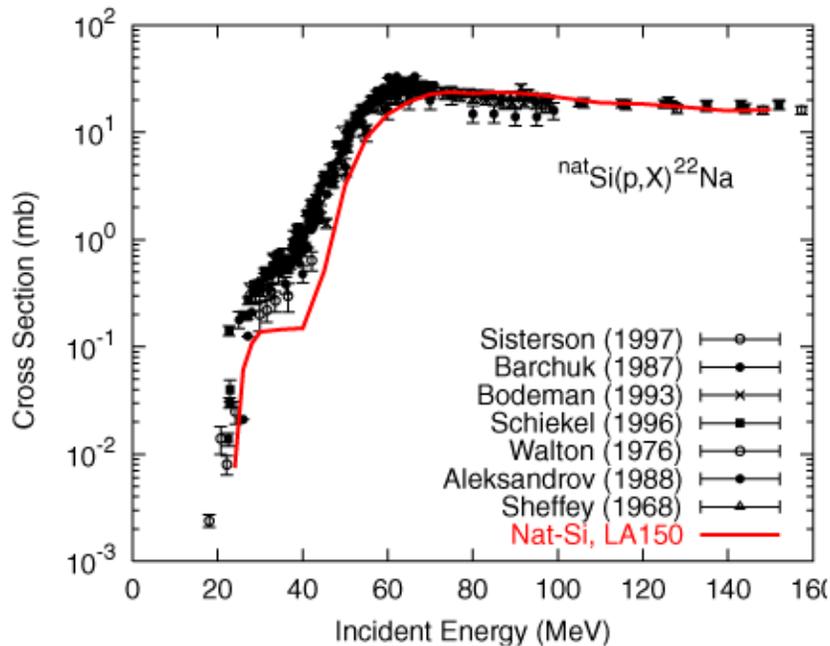


Proton



微分断面積： LA150と実験値との比較 (2)

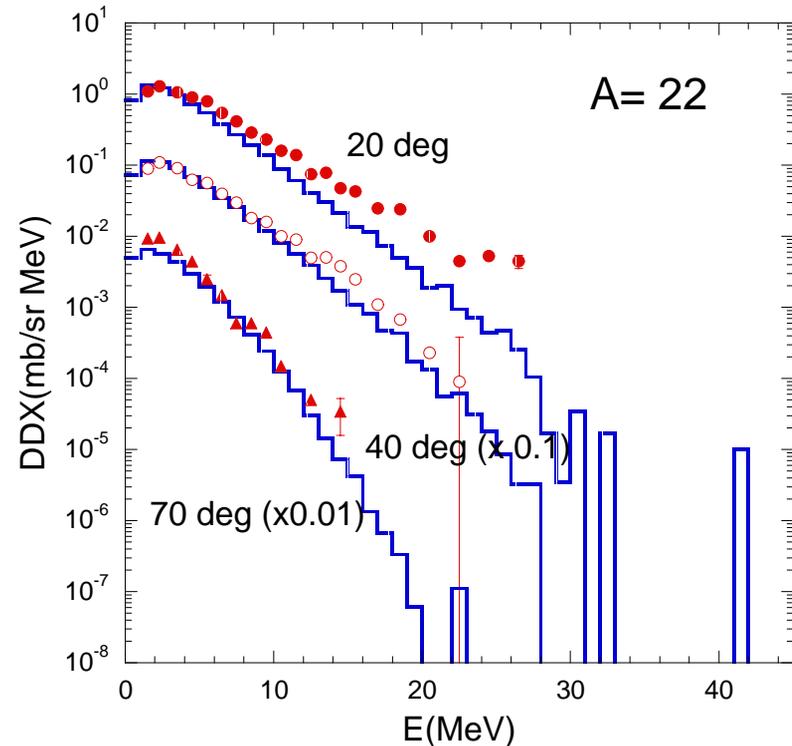
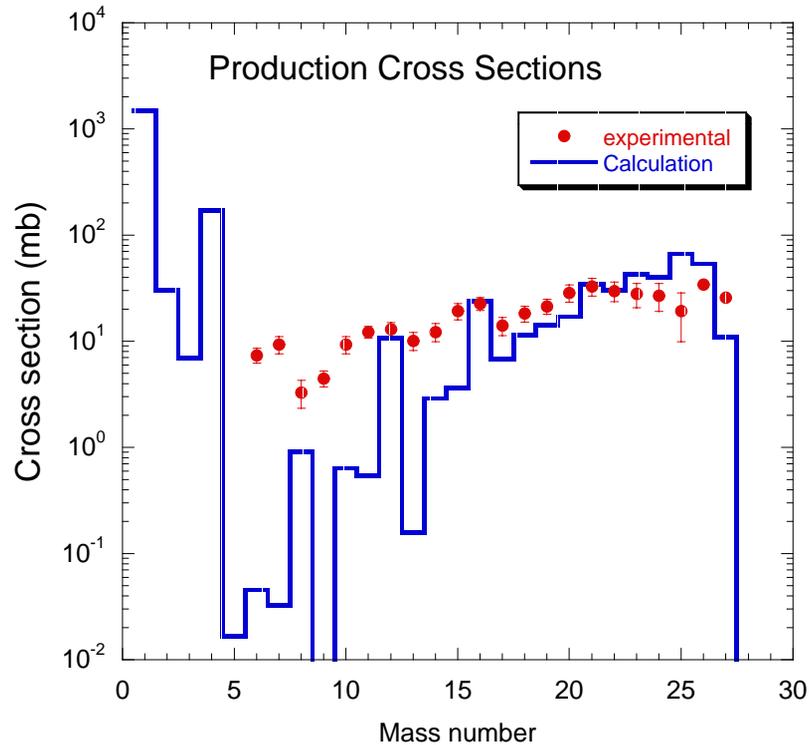
2次イオン生成断面積の励起関数



微分断面積： JQMD計算結果の例

● 180MeV p + ^{27}Al 反応 @ IUCF

Ref.: K. Kwiatkowski et al. PRL 50, 1648 (1983)



BGR法に基づくSEU断面積計算

生じた電荷がある**臨界電荷** Q_c を越える場合には、SEUが発生すると仮定し、核反応断面積に基づいてその発生確率（**Burst Generation Rate: BGR**）を計算（第0近似の取扱）

シングルイベントアップセット(SEU)断面積

有感体積 V 、電荷収集率 C のメモリチップに対する1ビット当たりのSEU断面積：

$$\sigma_{\text{SEU}}(E_{\text{in}}) = V \cdot C \cdot \text{BGR}(E_{\text{in}}, Q_c, d)$$

$$\text{BGR}(E_{\text{in}}, Q_c, d) = N_{\text{Si}} \sum_i \iint_{E_r(Q_c)}^{E_{\text{max}}(d)} \left(\frac{d^2\sigma}{dE d\Omega} \right)^{(i)} dE d\Omega$$

シリコンの数密度

核反応データ

Q_c 以上の電荷付与を与えるエネルギー領域で積分
 d ：実効的な有感長さ（パラメータ）

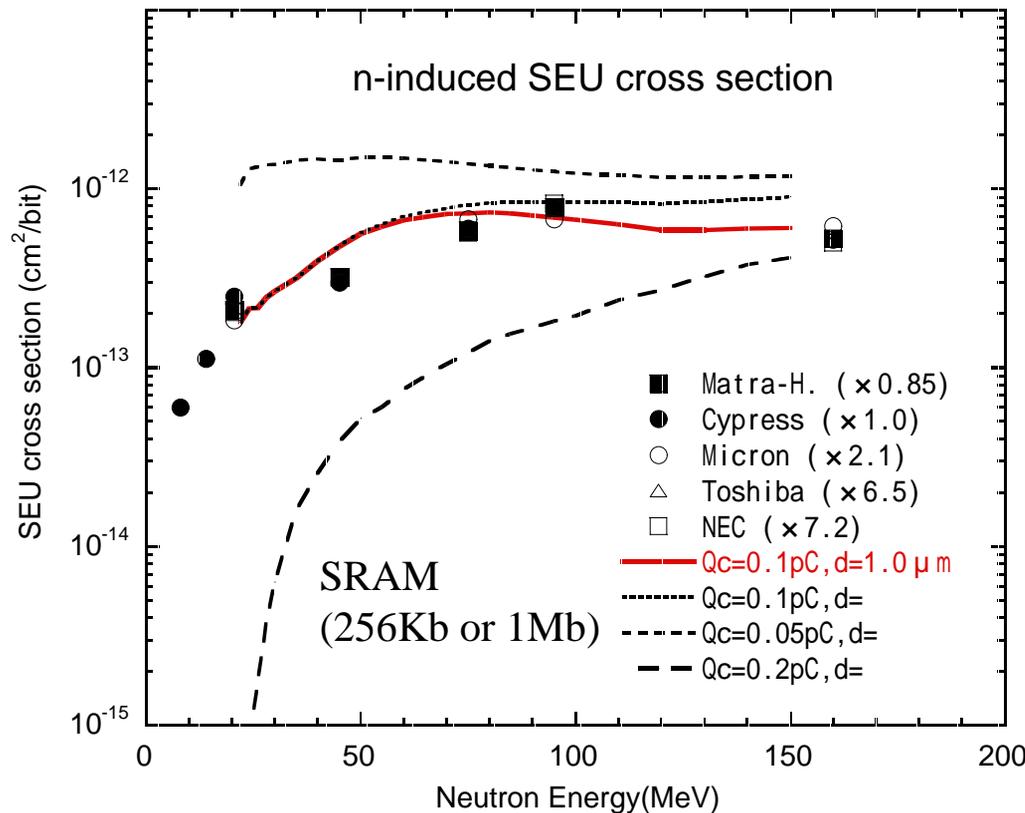
シリコン中で
電子-空孔対生成
= 3.65eV@300K

中性子誘起SEU断面積： 計算値と実験値

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

Free parameters

規格化因子



断面積データ

LA150(LANL)

20 – 150 MeV



前平衡模型 +
Hauser-Feshbach計算

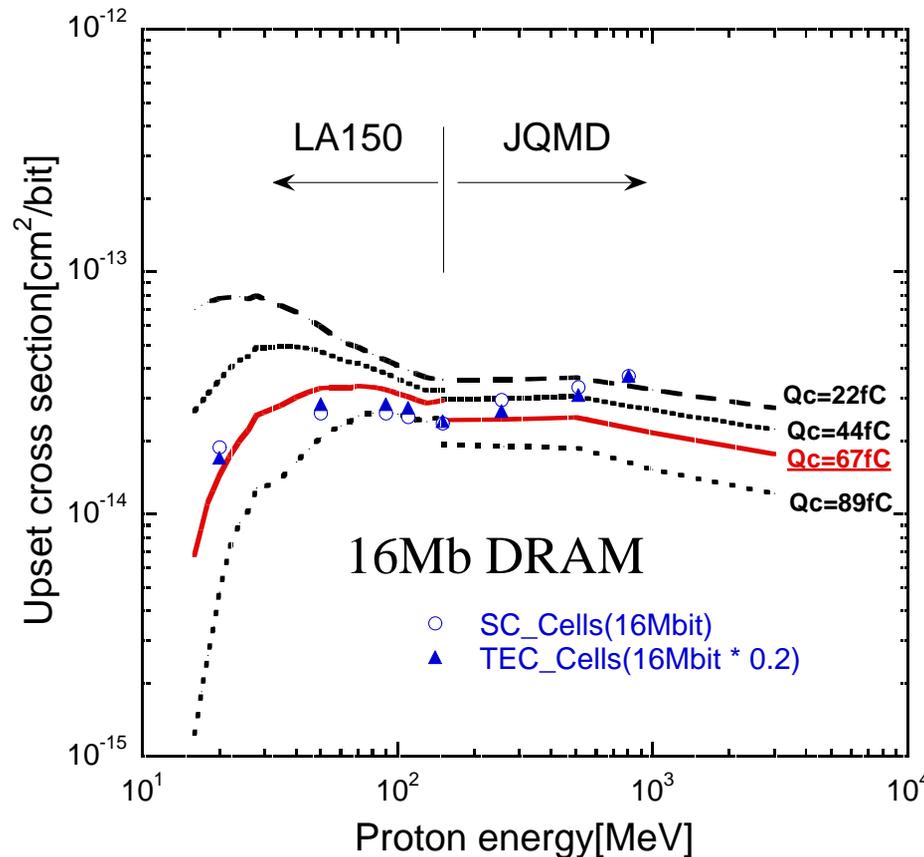
Exp.: K. Johansson et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 45, 2519 (1998).

陽子誘起SEU断面積： 計算値と実験値

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

Free parameters

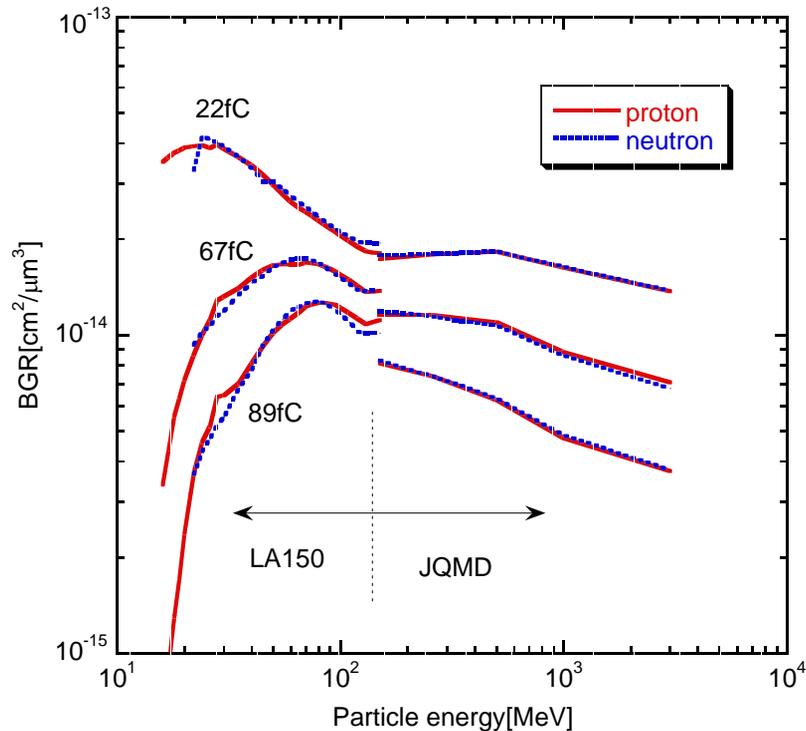
$$d = 1.5 \mu m$$



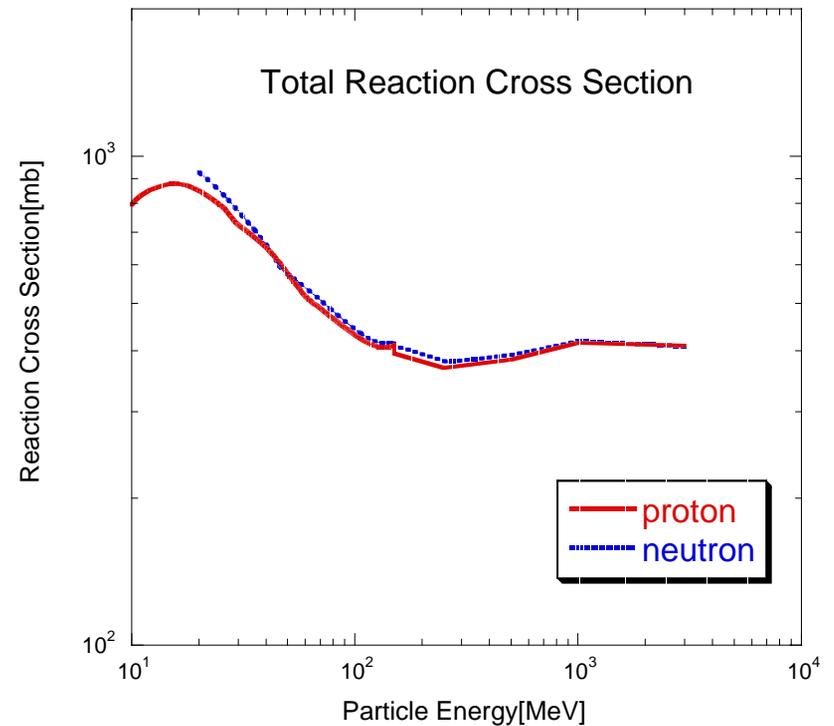
Exp.: J. F. Ziegler et al., IEEE J. Solid State Circuits 33, 246 (1998).

陽子入射と中性子入射との比較

● BGR関数の比較



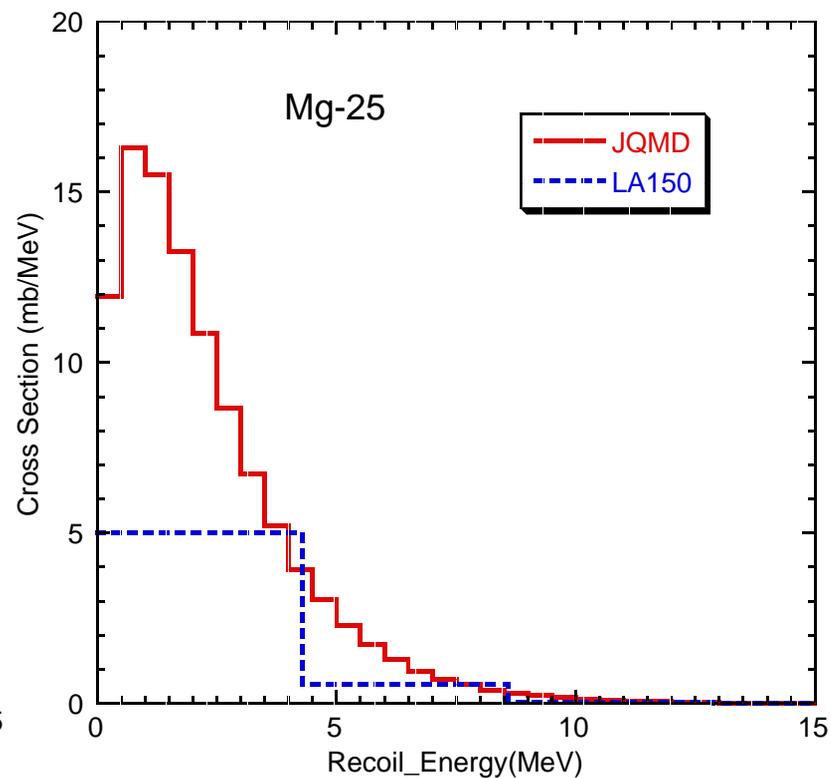
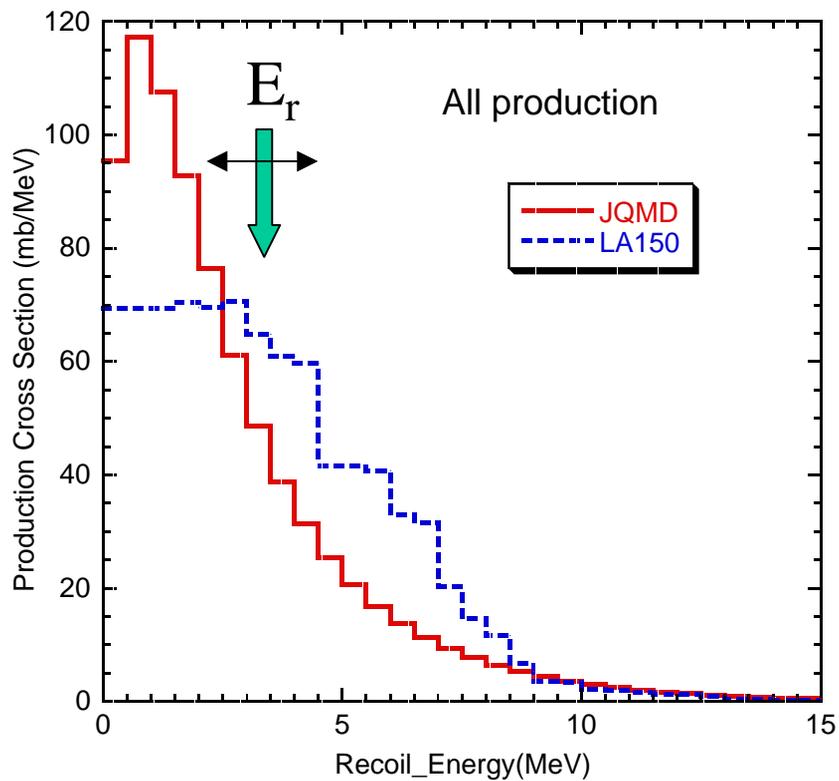
● 全反応断面積の比較



20MeV以上では、中性子入射と陽子入射でBGR関数に差異はあまり見られない。
(全反応断面積に見られる差も小さい。)

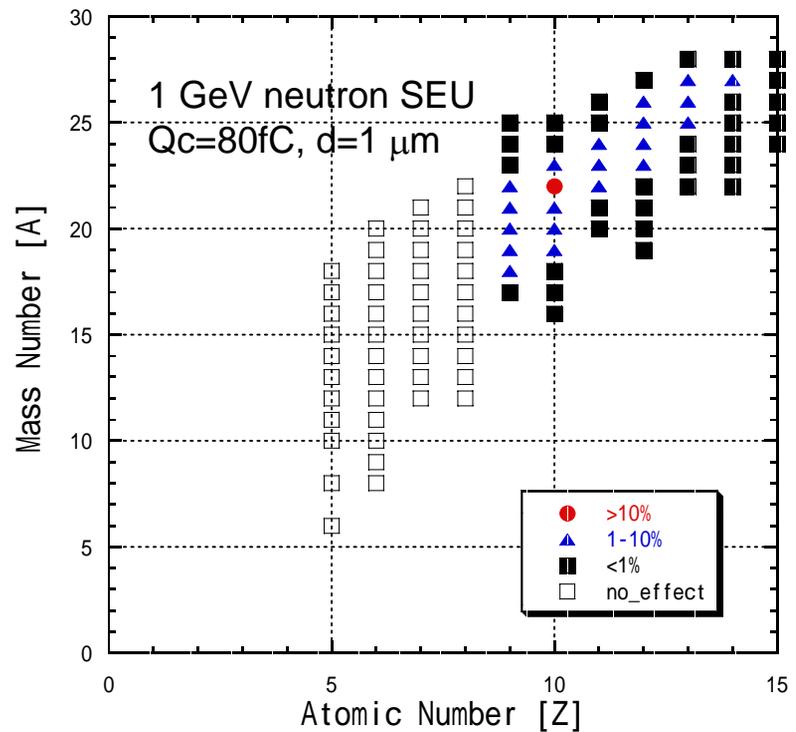
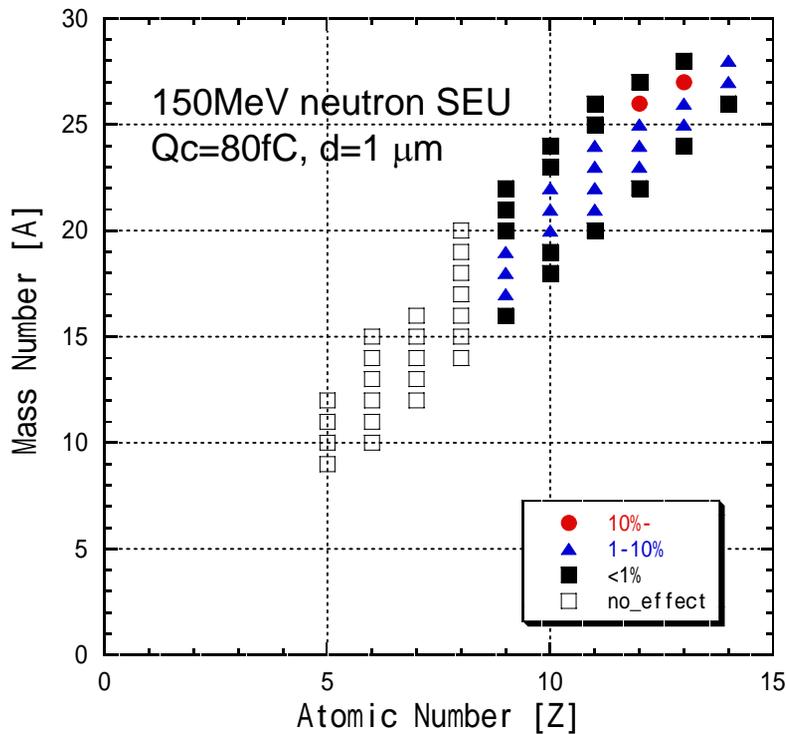
LA150 vs JQMD

● 150 MeVでの反跳イオンエネルギー分布の比較



SEUに寄与する2次イオン種分布

中性子入射の場合の1例

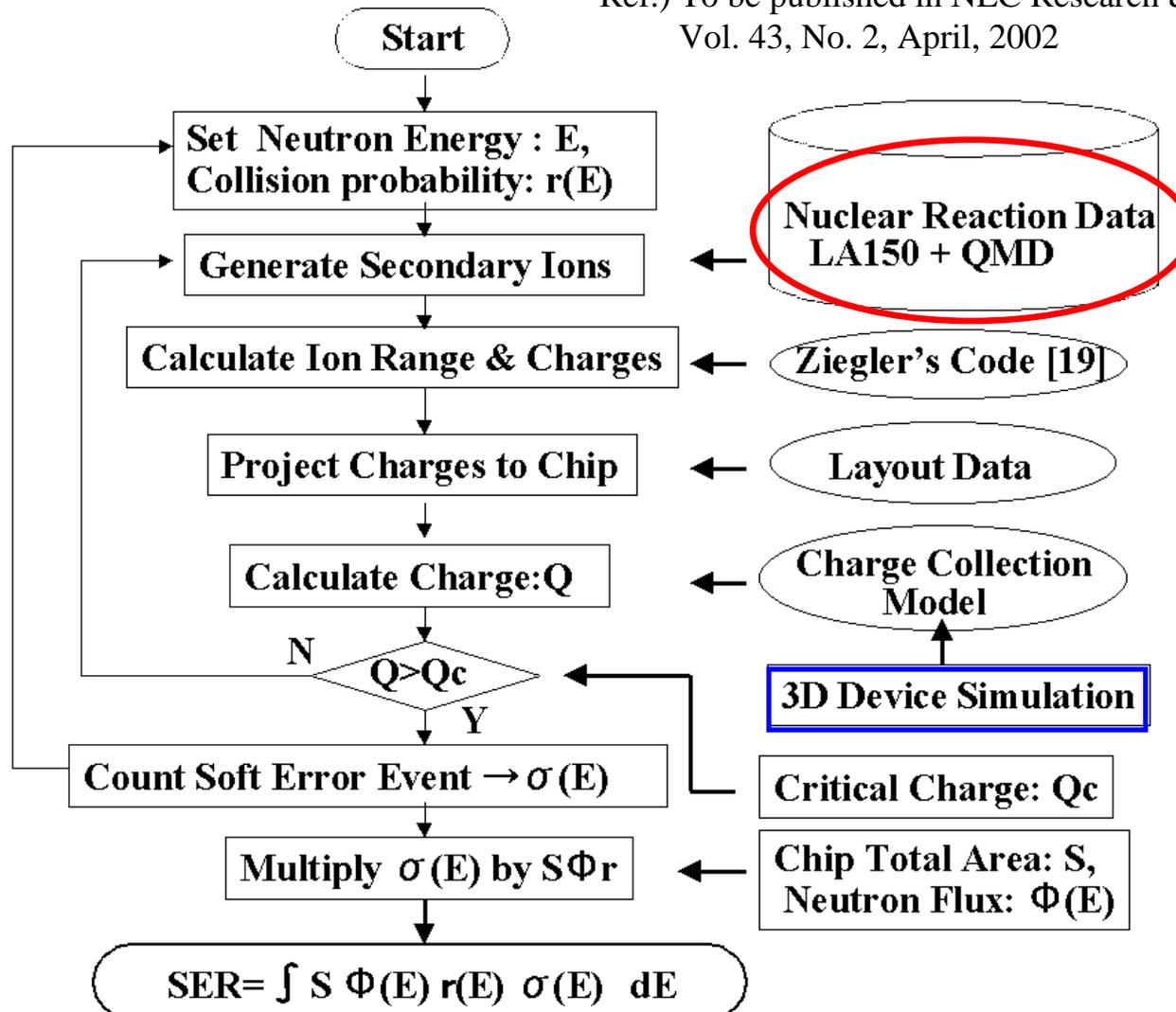


- Mg, Alなどの高LET核種の寄与が大きい。
- 入射エネルギーが高くなると、広い範囲の生成核種が関与してくる。

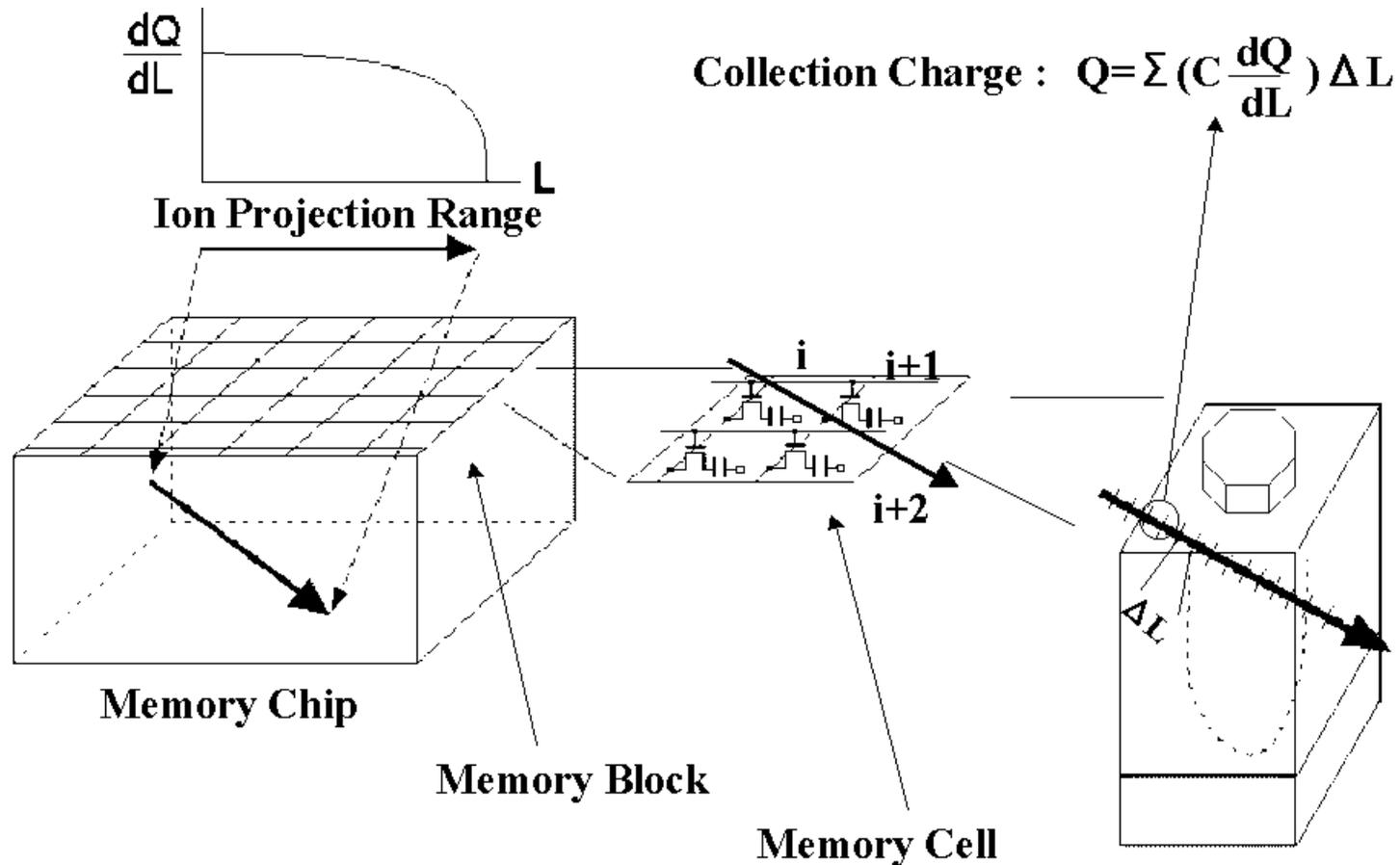
ソフトウェアシミュレータ (1)

NECシリコンシステム研との共同研究: 地上レベルの宇宙線中性子によるソフトウェア

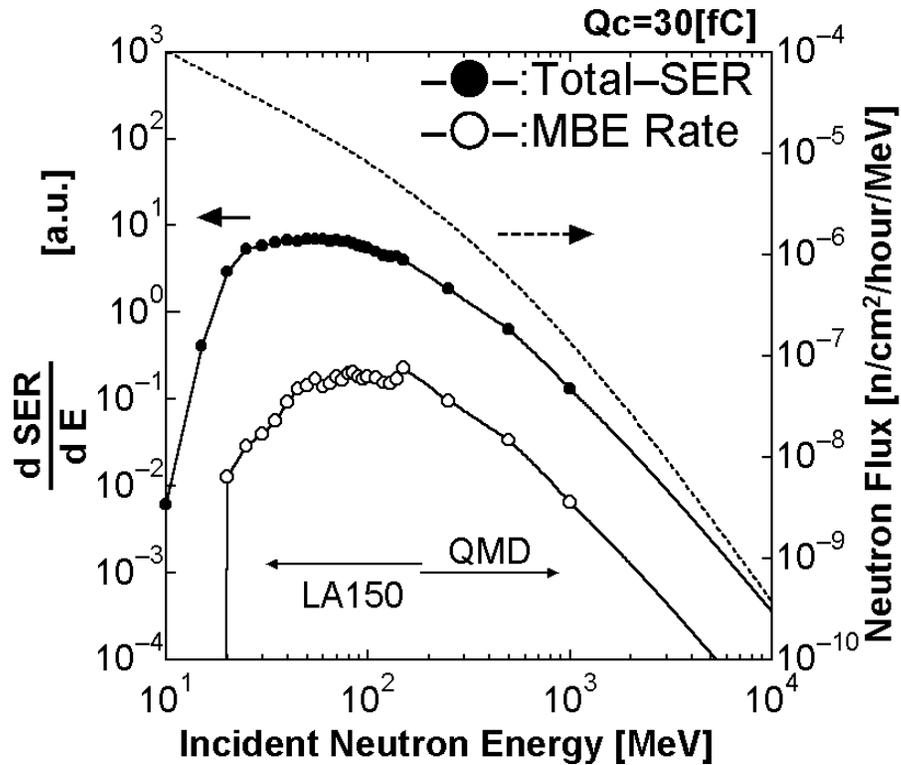
Ref.) To be published in NEC Research & Development,
Vol. 43, No. 2, April, 2002



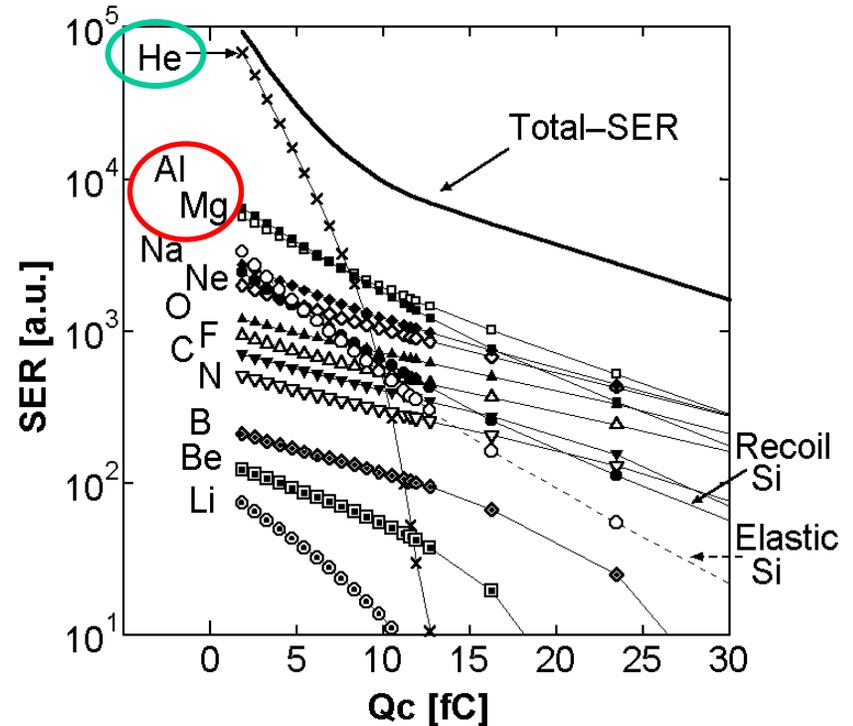
ソフトウェアシミュレータ (2)



ソフトウェアシミュレータ：結果



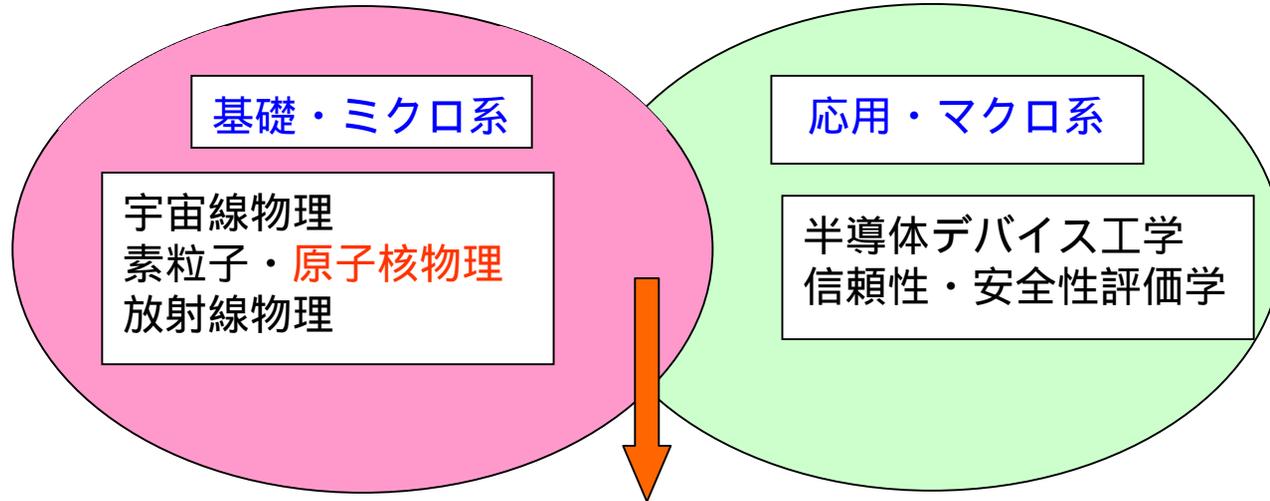
注) 20MeV未満はelastic recoilのみ考慮



● Qcが小さくなると、低LETのHeの寄与が現れてくる。

まとめと今後の課題(1)

半導体メモリのソフトエラー研究の位置付け



環境共生型社会・高度情報化社会における
「宇宙線・素粒子・原子核物理」と「電子デバイス工学」との新しい融合領域

ソフトエラー物理現象の解明とシミュレーションの予測精度向上

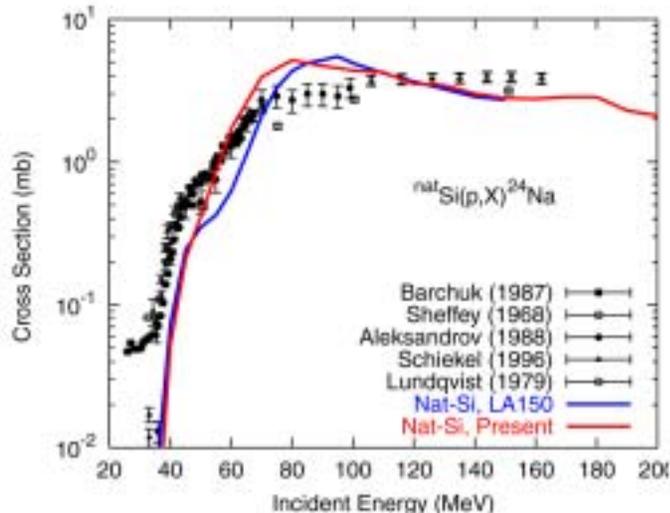
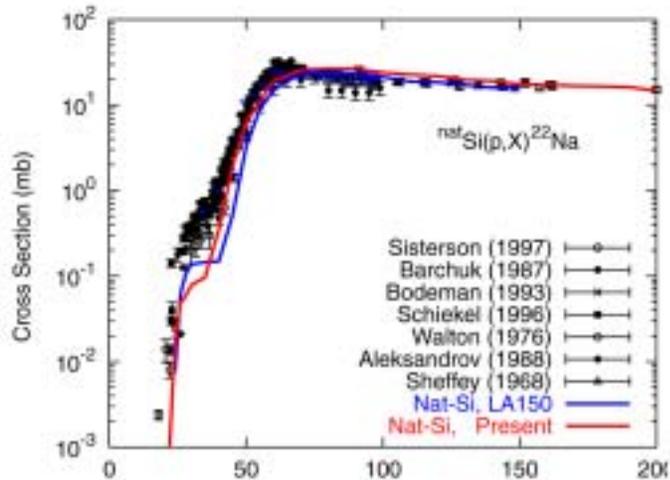
素過程として中間エネルギー核子入射核反応が鍵

核反応断面積のデータベース化 (1 MeV ~ 3GeV)

核反応データベースの改良

LA150

CC及び統計模型による
新しい計算

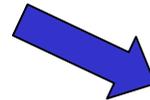
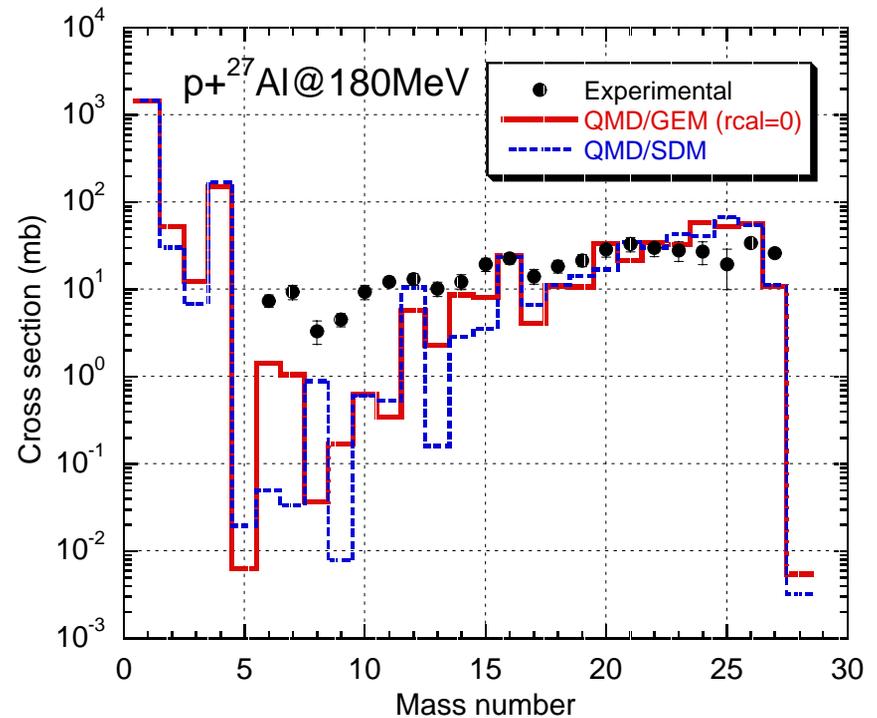


JQMD

統計模型計算部の改良

GEM [Generalized Evaporation Model]

(S. Furihata, NIM B171, 251 (2000))



JENDL High-Energy File

まとめと今後の課題(2)

- 半導体メモリーのソフトエラーシミュレーションでは、
生成2次イオンのエネルギースペクトルが重要

例えば、加速器駆動炉開発の基礎データとしても不可欠

- ・ 入射窓材の損傷評価
- ・ 核発熱評価
- ・ 被曝線量評価
- ・ etc

提案

2次生成イオン収量・運動量分布測定実験：
反応逆運動学 $^1\text{H}(^{28}\text{Si},\text{X})$

