

LSIの放射線ソフトエラーの評価

Outline

Introduction

ソフトエラー発生メカニズム

各種フィールド試験結果

原子炉での熱中性子照射実験結果

RCNPへの期待

Summary

ソニー株式会社

小林 一、臼木 秀樹、白石 謙、土屋 博男

大阪大学

永井 泰樹、高久 圭二

京都大学

義家 敏正

Introduction

ソフトウェア研究の背景

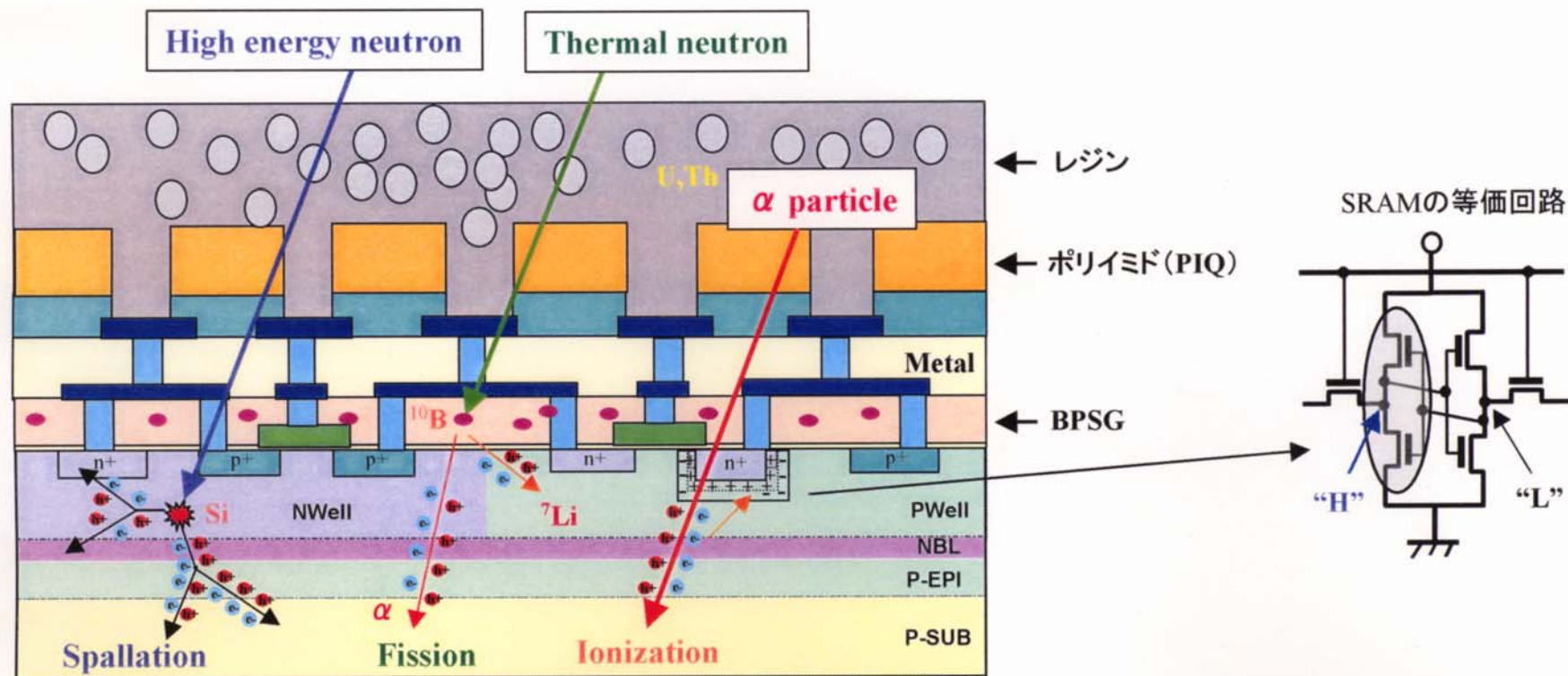
- 1960年代 人工衛星、航空機で電子機器のソフトウェアが問題となる
- 1978 地上でも、デバイス中のU、Thからの α 線によるソフトウェアが問題となる
- 1993 地上でも、宇宙線起因ソフトウェアが起きることがわかった
- 現在 ソフトエラーは、LSIの微細化を妨げる大きな問題となりつつある

ソフトウェア研究の目的

- ・実使用環境におけるデバイスのソフトウェア率 (Soft Error Rate : SER) を求める
- ・ソフトウェアのメカニズムを解明する
- ・新デバイスのSER予測を行えるようにする
- ・SERを低減する対策を施す

ソフトウェア発生メカニズム

- ・荷電粒子がシリコン中を通過すると、その飛跡に沿って正孔-電子対が生成される
- ・電荷はデバイス内をドリフト/拡散して、一部がストレージセルに到達する
- ・到達した電荷が論理を反転させるだけの臨界電荷量を超えるとソフトウェアエラーが起きる



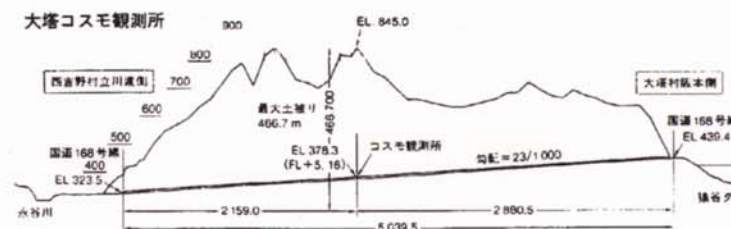
種々のLSIの中で、SRAMが最も臨界電荷量が小さくソフトウェアに弱い
熱中性子、高エネルギー中性子、 α 線によるSERを独立に求めたい

ソフトウェアの試験方法

フィールド試験



～1000個のデバイスを数1000時間動作
平地、高地、地下の各種ロケーションで実施

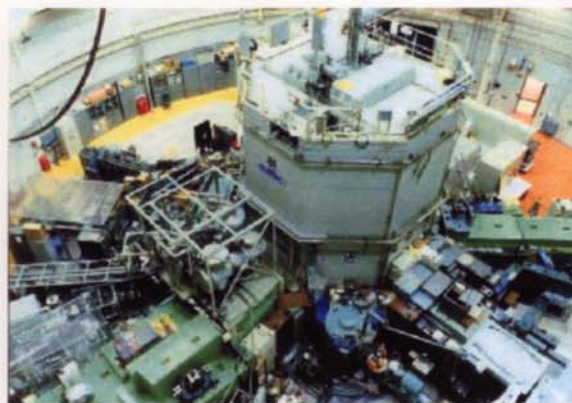


宇宙線遮蔽試験
(大阪大学大塔コスモ観測所)

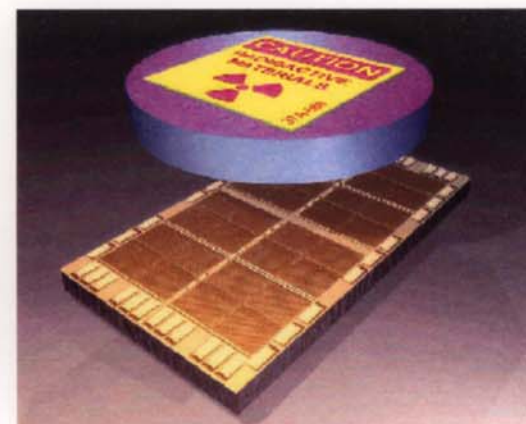
加速試験



高エネルギー中性子照射実験
(大阪大学核物理研究センター)



熱中性子照射実験
(京都大学原子炉実験所)



α 線照射試験
(ex. ^{241}Am)

フィールド試験概要

フィールド試験場の概要

種類	場所	高度 (m)	緯度	経度	Rc (GV)	コンクリート (cm)	中性子量
平地	大分	0 (1.00)	33N	131E	12.8 (0.58)	44 (0.60)	0.35
	横浜	0 (1.00)	35N	140E	11.9 (0.61)	0 (1.00)	0.61
	New York*	0 (1.00)	41N	286E	1.9 (1.00)	0 (1.00)	1.00
高地	California	2000 (4.76)	39N	300E	2.7 (0.98)	0 (1.00)	4.66
地下	大塔	- 476 (0)	-	-	-	-	0

中性子量の補正

高度依存性

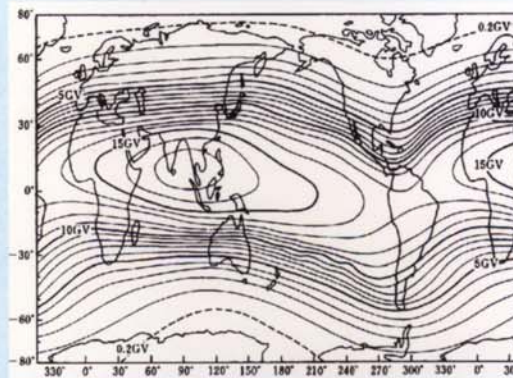
$$NF/NF_{NY} = \exp(-(A-A_{NY})/L)$$

NF: 中性子量

A: 大気圧

L: 大気中の中性子の減衰距離
=148g/cm²

地磁気による宇宙線の遮蔽



Cut-off rigidityの分布

建物のコンクリート

$$NF/NF_0 = \exp(-D/L)$$

NF: 中性子量

D: コンクリートの厚さ

L: コンクリート中の中性子の減衰距離
=216g/cm²

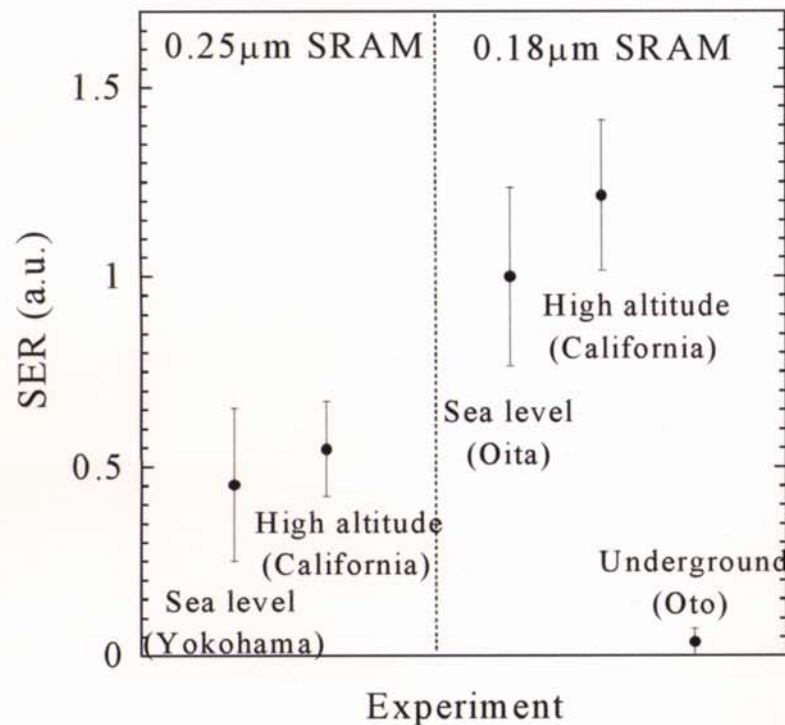
デバイス概要

フィールド試験でテストしたSRAMデバイスの概要

Name	0.25 μ m 標準	0.18 μ m 標準	0.18 μ m PIQ なし
Rule	0.25 μ m	0.18 μ m	←
Bit	8M	8M	←
Vddi	2.8V	1.7V	←
Chip size	10.89mm x 14.71mm	8.97mm x 13.27mm	←
Cell size	2.30 μ m x 3.49 μ m	1.94 μ m x 2.84 μ m	←
Effective cell size	0.673cm ²	0.462cm ²	←
PIQ	with	with	without

フィールド試験のまとめ

デザインルール、ロケーションの比較



Device	Location	デバイス数	測定時間 (hour)	SER (a.u.)
0.18 μm 標準	平地(大分)	1318	3048	1.00 (Norm.)
	高地(California)	864	1182	1.21
	地下(大塔)	528	1972	< 0.07
0.25 μm 標準	平地(横浜)	1008	1416	0.45
	高地(California)	972	1205.5	0.54

- ・0.18 μm デバイスは0.25 μm デバイスの2倍のソフトエラー率
- ・α線起因ソフトエラーは予想以上に少ない
- ・高度、地磁気、コンクリートに対する中性子量の補正方法は妥当

α 線SERとポリイミド膜

Device	Location	デバイス数	測定時間 (hour)	SER (a.u.)
0.18 μ m 標準	地下(大塔)	528	1972	< 0.07
0.18 μ m PIQ なし	地下(大塔)	527	4194	0.04

ポリイミドなしでも α 線SERは全体の1/20以下である

大塔コスモ観測所の実験で初めて明らかとなった

熱中性子シールド実験

BNシート

直径数 μm のBN粒子をシリコンゴムで固めたもの

BN含有量 72 wt%

密度 1.7 g/cm^3

^{10}B 存在比 19.9 %

熱中性子の平均自由行程 0.45 mm

熱中性子遮蔽効果は原子炉実験で実証済



BNシートを用いた熱中性子シールド実験
(California)

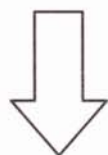
Device	Location	熱中性子 シールド	デバイス数	測定時間 (hour)	SER (a.u.)
0.18 μm 標準	高地 (California)	without	252	2778	0.84
		BN sheet 4mm	252	2778	0.21

熱中性子SERと高エネルギー中性子SERの比が明らかになった

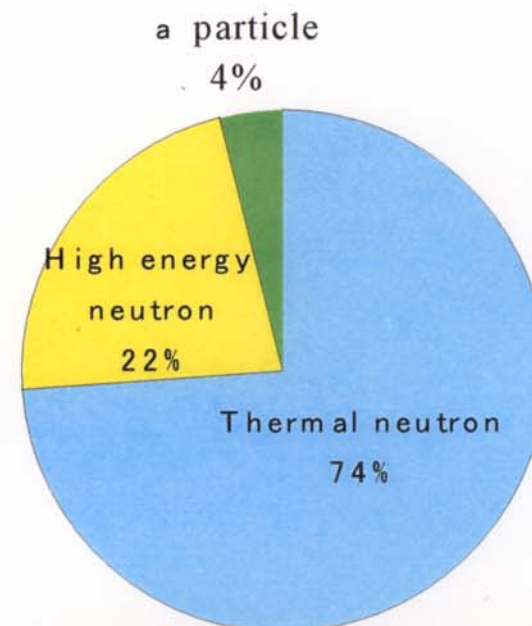
熱中性子、高エネルギー中性子、 α 線によるSERの比率

これまでのフィールド試験のまとめ

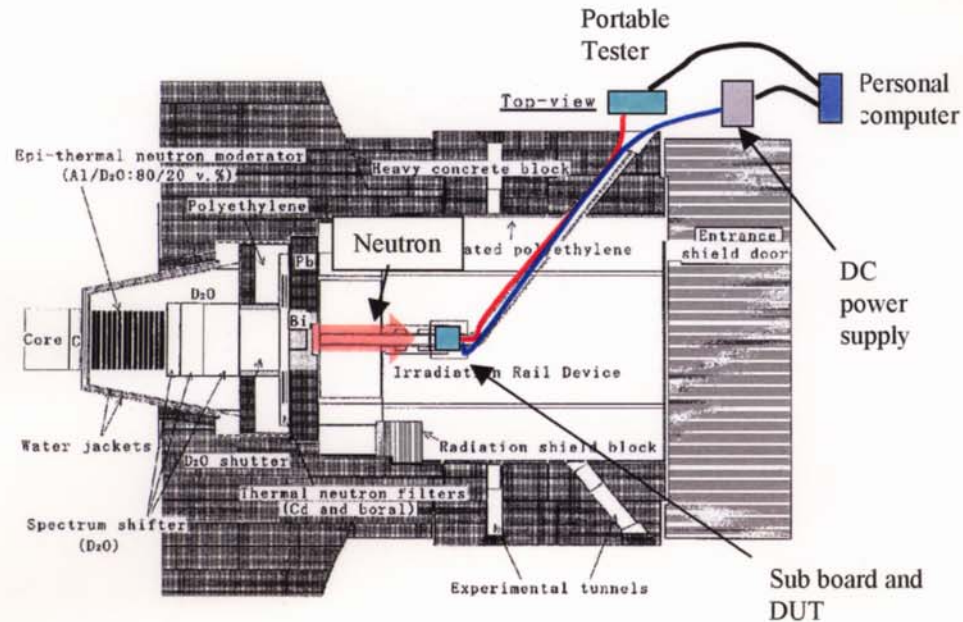
実験	関係する放射線	SER (a.u.)
熱中性子シールドなし	α 線 + 高エネルギー中性子 + 熱中性子	= 0.84
熱中性子シールドあり	α 線 + 高エネルギー中性子	= 0.22
宇宙線遮蔽(大塔)	α 線	= 0.04



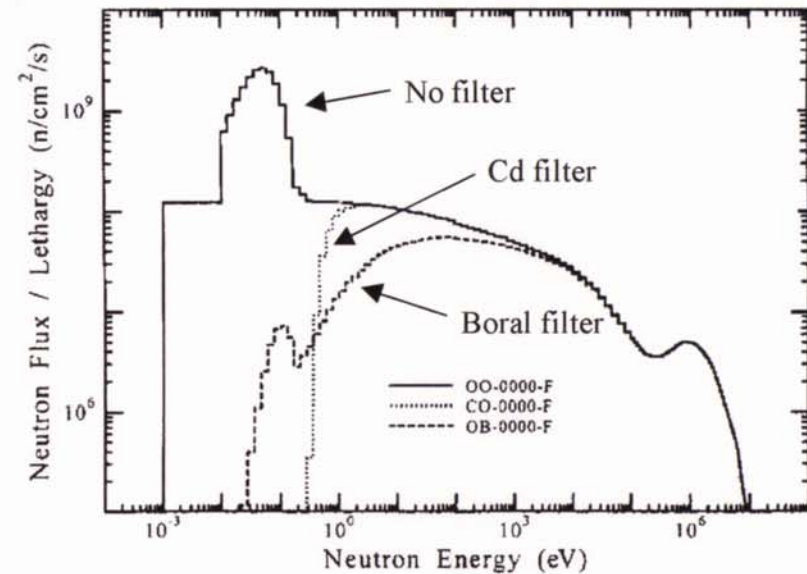
熱中性子	= 0.62 (74%)
高エネルギー中性子	= 0.18 (22%)
α 線	= 0.04 (4%)



熱中性子照射実験



京都大学原子炉実験所
重水中性子照射設備(D₂O)

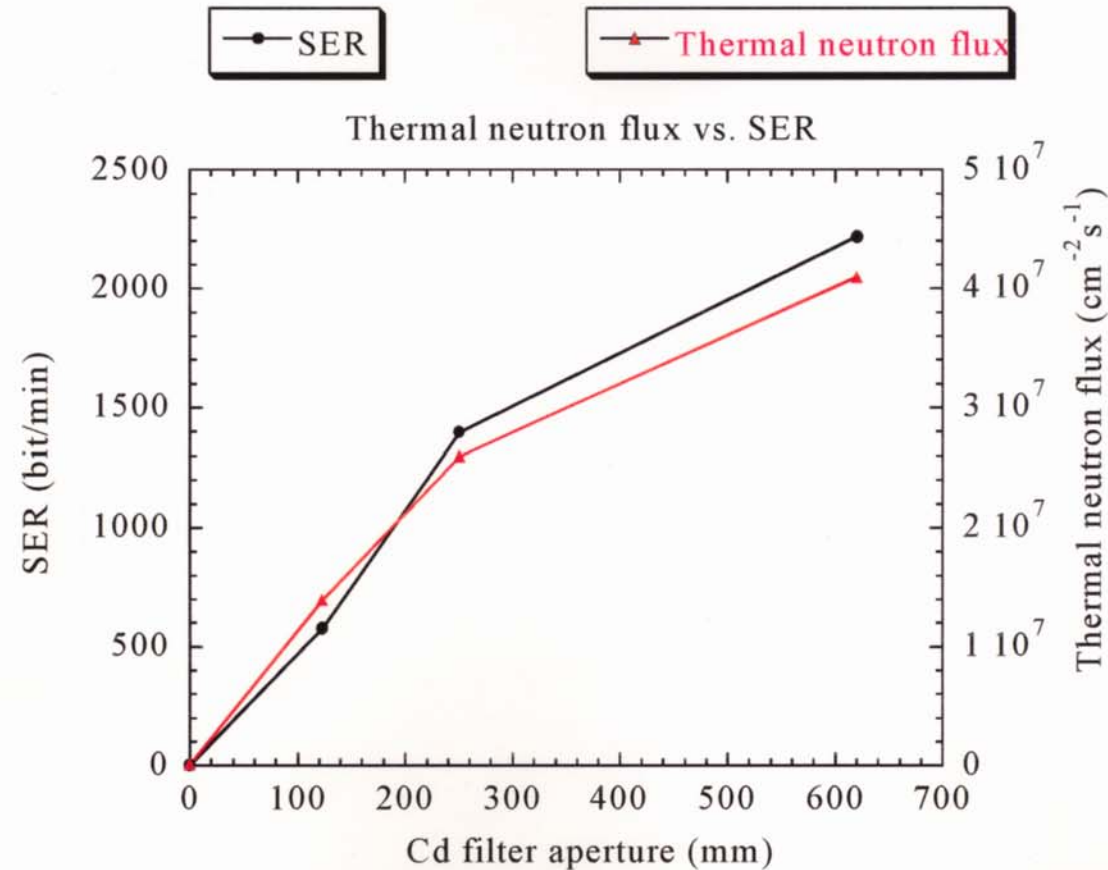


中性子エネルギースペクトル

実験内容

- ・熱中性子フラックスとSERの関係
- ・BNシートの熱中性子遮蔽効果
- ・BPSGなしデバイスのSER

熱中性子照射実験結果(1)

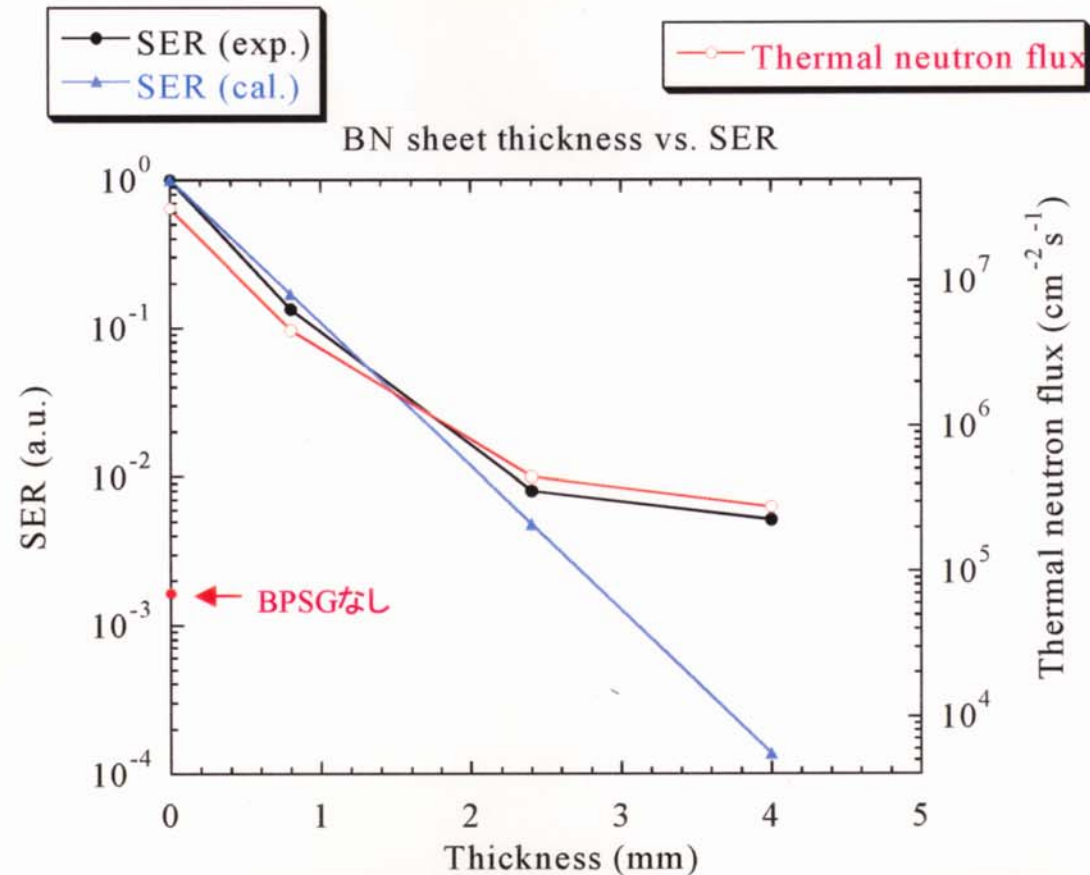


熱中性子フラックスとSERの関係

加速係数 $\sim 10^{10}$ の優れた加速試験

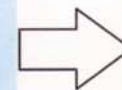
熱中性子SERはフィールド試験と20%の精度で一致した

熱中性子照射実験結果(2)



BNシートの厚さとSER、熱中性子フラックスの関係

BNシートでSERを1/200以下にできる
BPSGなしデバイスでSERを1/600にできる



熱中性子ソフトエラーは
ほぼ回避できる

残るは高エネルギー中性子

熱中性子の対策、加速試験方法は確立された
今後は高エネルギー中性子の加速試験方法を確立したい

現在の業界標準はLos Alamos のWNR

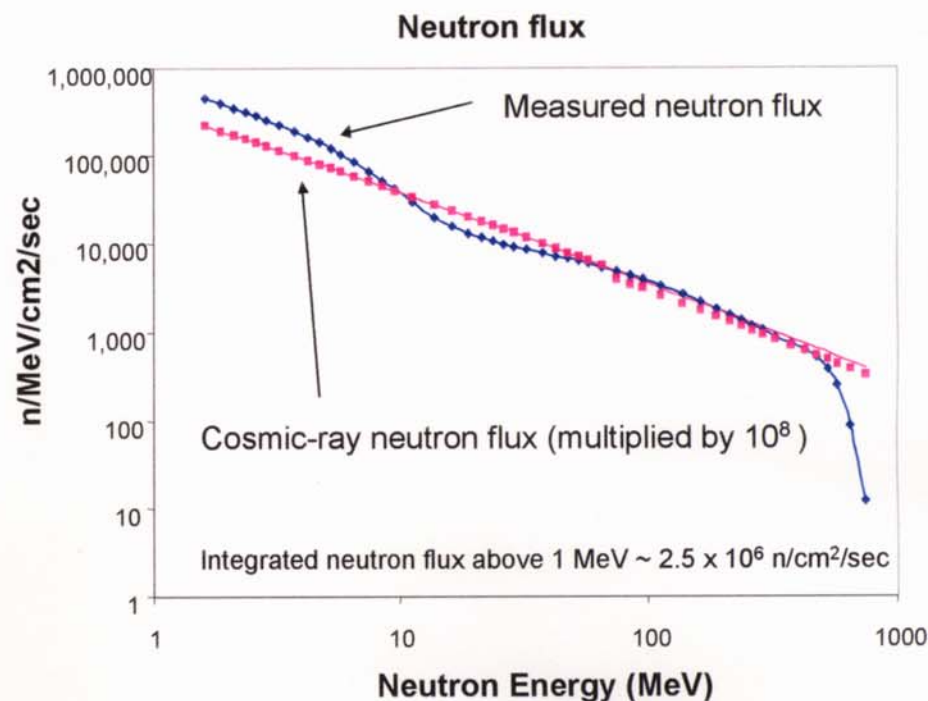
(JEDECの標準化案で推奨されている)

利点：地上と同様の中性子エネルギースペクトル

フラックスは 10^8 倍

欠点：ビームタイムの制限

国内でも同等の施設をもち、
利用できる環境がほしい



LANL (WNR) の中性子スペクトル



RCNPのspallation target開発に期待

Summary

- ・0.18 μm デバイスは0.25 μm デバイスの2倍のSER
- ・SERを要因ごとに分離して求めた
熱中性子 74%、高エネルギー中性子 22%、 α 線 4%
- ・ α 線起因ソフトウェアは予想以上に少ない
SER全体の1/20以下である
- ・熱中性子SERについて、フィールド試験と原子炉実験は20%の精度で一致した
- ・BNシートでシールドするか、BPSG膜を用いないことで、
熱中性子ソフトウェアはほぼ回避できる
- ・高エネルギー中性子に対する加速試験方法の確立が急務
RCNPのspallation target開発に期待