

我が国の核データ測定施設の展望と世界情勢 (4)

海外施設における中高エネルギー核データ測定的情勢

九州大学大学院工学研究院

執行 信寛*, 石橋 健二

日本原子力研究所

中島 宏

九州大学大学院総合理工学研究院

渡辺 幸信

*) shigyo@kune2a.nucl.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

日本だけではなく海外の施設において、1990年代までは陽子入射による中性子生成二重微分断面積の測定が盛んに行われてきたが、2000年代以降、中性子入射による反応の測定が増えてきている。本稿では、アメリカ及びヨーロッパにおいて、日本人研究者が関連する実験を中心に中高エネルギーの核データ測定的情勢について概観する。

2. Los Alamos Neutron Science Center

アメリカ、ニューメキシコ州のロスアラモス国立研究所には、中性子を利用した研究を行うための Los Alamos Neutron Science Center (LANSCE) がある。この施設では線形加速器により 800MeV の陽子をタングステンターゲットに入射し、そこから生成される幅広いエネルギーの中性子を利用できるようになっている。LANSCE には、主に高エネルギー中性子を利用するための Weapons Neutron Research (WNR) 施設と低エネルギー中性子照射用の Lujan Neutron Scattering Center がある。

従来、入射エネルギーが 100MeV 以上の領域で (p, xn) 、 (p, xp) 等の反応断面積については測定が行われてきた。しかしながら (n, xp) 断面積に関しては高エネルギーの準単色中性子源の実現が困難であったために、ほとんど測定されてこなかった。そこで九州大学のグループでは、WNR において数十 MeV から数百 MeV までの連続入射エネルギー中性子入射による中性子生成二重微分断面積の測定を進行中である[1]。放出エネルギー 100MeV 以下の中性子に対しては、液体有機シンチレータで直接測定を行い、100MeV 以上の高エネルギー中性子に対しては反跳陽子法を用いている。反跳陽子検出器には NaI(Tl)シンチレータの周囲にプラスチックシンチレータを接着したホスウィッチ構造のシンチレータを採用している。この実験の様子を図 1 に示す。まだ確定値ではないが、断面積の測定結

果を図2に示す。



図1 (n, xn) 断面積測定用の検出器の配置

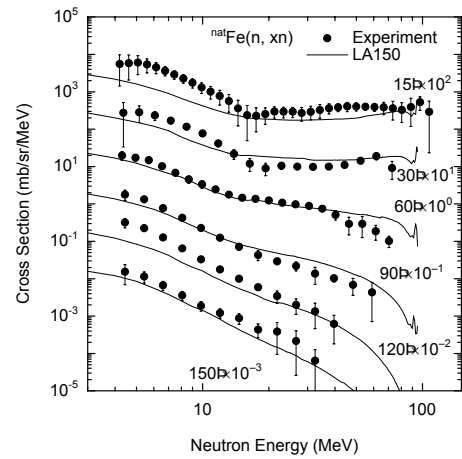


図2 (n, xn)断面積の測定結果

近年、高エネルギー放射線により発生する半導体のソフトエラーの影響に関心が集まっている。WNRにはIrradiation Chips and Electronics (ICE) Houseと呼ばれる半導体を中性子に照射するためのビームラインが用意されている。図3にICE Houseの平面図を示す。ここでは、アメリカを始め各国の半導体メーカーや研究所がソフトエラーのシミュレーションコードの開発に不可欠なSingle Event Upset (SEU) 断面積やソフトエラーの発生率などを調べている。

日本でも日立製作所生産技術研究所や日本電気のグループなどが実験を行っている。日立製作所生産技術研究所はICE Houseで1MeVから800MeVの中性子をさまざまな種類のDRAMに照射し、SEU断面積を測定した[2]。図4にSEUの測定結果を示す。日

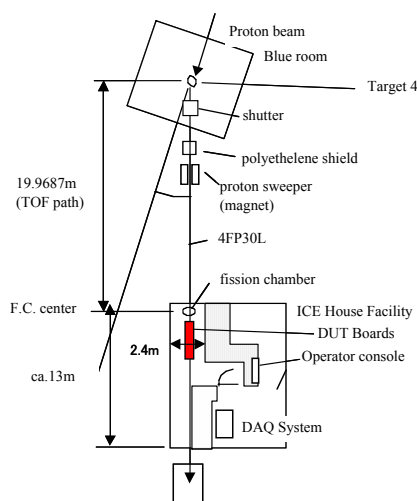


図3 WNR ICE House

日立製作所生産技術研究所、ルネサステクノロジ、エルピーダメモリからの提供

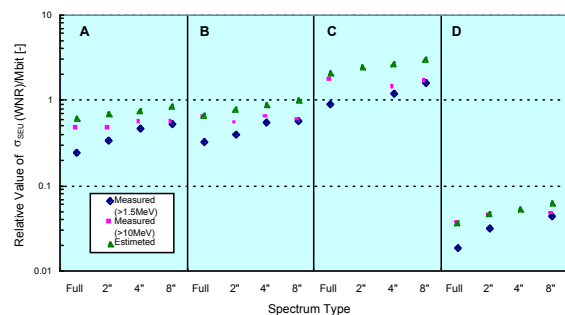


図4 SEU 断面積測定結果

Courtesy NEC/NEC Electronics



図 5 照射試料

Courtesy NEC/NEC Electronics

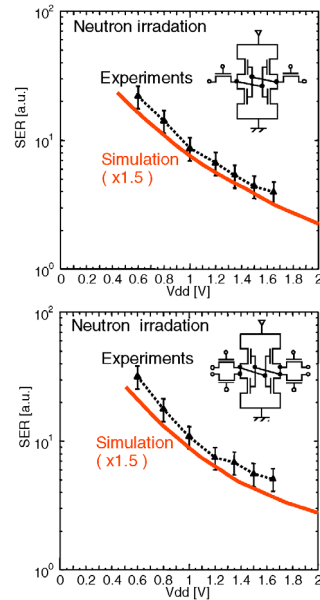
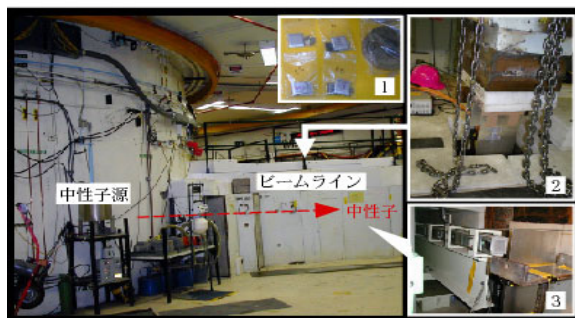


図 6 SER 測定結果

本電気は ICE House において、種々の SRAM を 1MeV から 800MeV の中性子で照射し、その Soft Error Rate (SER) の測定を行った[3,4]。照射試料の写真を図 5 に、この実験で得られた SER の測定結果を図 6 に示す。

Lujan Center においては、日本原子力研究所のグループが遮蔽体内における中性子の減衰率やビームライン内の中性子分布の測定などを行った[5]。この実験では、Lujan Center 内のビームラインに Bi の放射化検出器を設置し、これまでビーム中心から距離の 1 乗に反比例すると考えられてきたビーム強度が、距離の 2 乗に反比例することを実験的に確認した。図 7 に実験の様子を、 $^{209}\text{Bi}(n,4n)$ 反応率の測定結果と MCNPX による計算値を図 8 に示す。またビームライン中にイメージング



- 1 : ビスマス等の照射用試料 (放射化検出器)
- 2 : 試料をプラグに装着し、遮蔽体内に挿入
- 3 : ビームライン内のダクトの高エネルギー中性子強度等を測定

図 7 遮蔽実験の様子

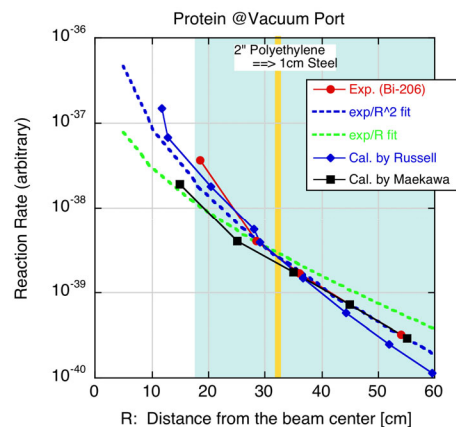


図 8 $^{209}\text{Bi}(n,4n)$ 反応率

プレートを置き、中性子の空間分布を測定したところ、中性子ビームは中性子導管の寸法にコリメートされていることがわかった。この実験から現在のモンテカルロ法による中性子ビームライン遮蔽計算手法の妥当性を確認した。

3. Brookhaven National Laboratory

アメリカ、ニューヨーク州のブルックヘブン国立研究所には、24GeV 陽子加速器の Alternating Gradient Synchrotron (AGS) がある。現在は重イオン衝突型加速器 Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) への入射器としても使用されている。日本原子力研究所のグ

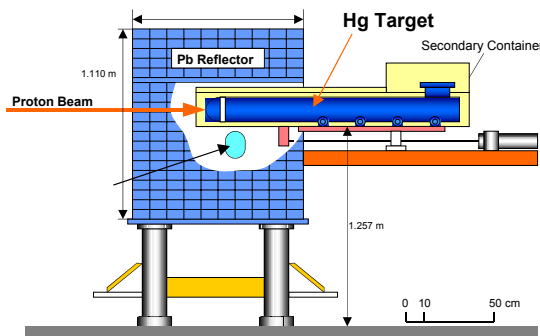


図 9 AGS での実験体系

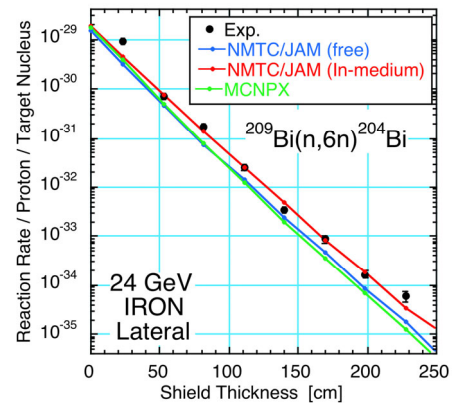


図 10 $^{209}\text{Bi}(n, 6n)$ 反応率

ループはこの施設で水銀ターゲットに対する遮蔽実験を行った[6]。反射体や減速材がある場合の実験体系を図 9 に示す。中性子の測定には Bi による放射化法や電流モード飛行時間法 (c-TOF) を使用した。鉄及びコンクリート遮蔽体における $^{209}\text{Bi}(n,6n)$ 中性子反応率の測定結果の例を NMTC/JAM や MCNPX の計算値とともに図 10 に示す。

4. Uppsala University

スウェーデンのウプサラ大学には、The Svedberg Laboratory (TSL) という研究所があり、 $\text{Li}(p,n)$ 反応により生成される約 200MeV までの準単色中性子を利用できる。この施設の Blue Hall では、ウプサラ大学のグループが中心となって、 (n,n) 弾性散乱断面積の測定[7]や (n, α) 荷電

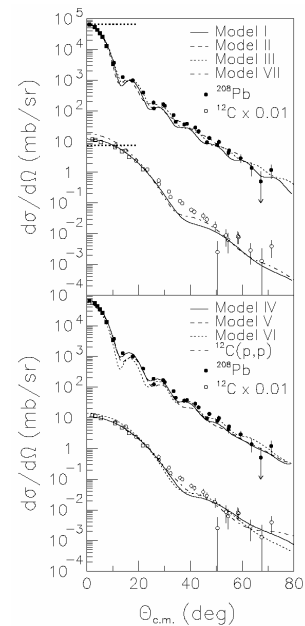


図 11 中性子弾性散乱断面積

粒子生成断面積の測定[8]が行われている。散乱中性子の測定には SCAttered Neucleon Detection AssembLy (SCANDAL) と呼ばれる反跳陽子測定器が使用される。この検出器システムで測定された中性子弾性散乱断面積を図 11 に示す。二次荷電粒子の測定用に MEDLEY がある。これはターゲットに対して 8 方向にカウンターテレスコープを配置した検出器システムである。この装置を利用して測定されたシリコンに対する $(n,\alpha x)$ 二重微分断面積の測定結果を図 12 に示す。

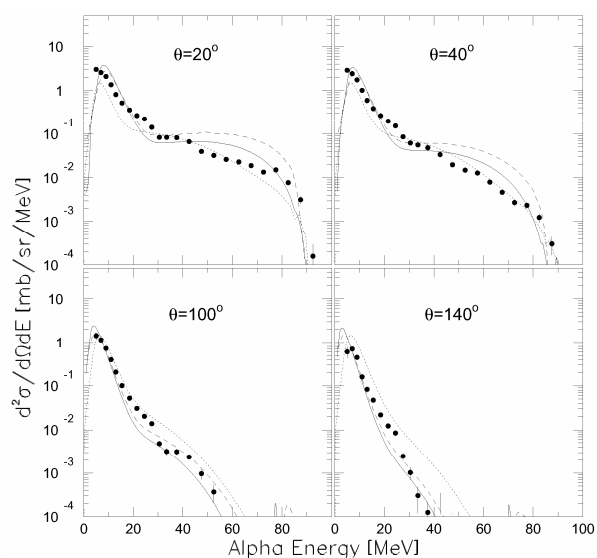


図 12 $\text{Si}(n, \alpha x)$ 断面積

日立製作所生産技術研究所のグループは、この単色中性子源を利用して、半導体のソフトエラー率の測定を行った[9]。一連の測定で 90MeV までのエネルギーでは東北大学の CYRIC で実験を行い、それ以上のエネルギーにおいて TSL で実験を行った。図 13 にさまざまな半導体における SEU 断面積の入射中性子エネルギーに対する変化を示す。

日立製作所生産技術研究所、ルネサステクノロジ、エルピーダメモリからの提供

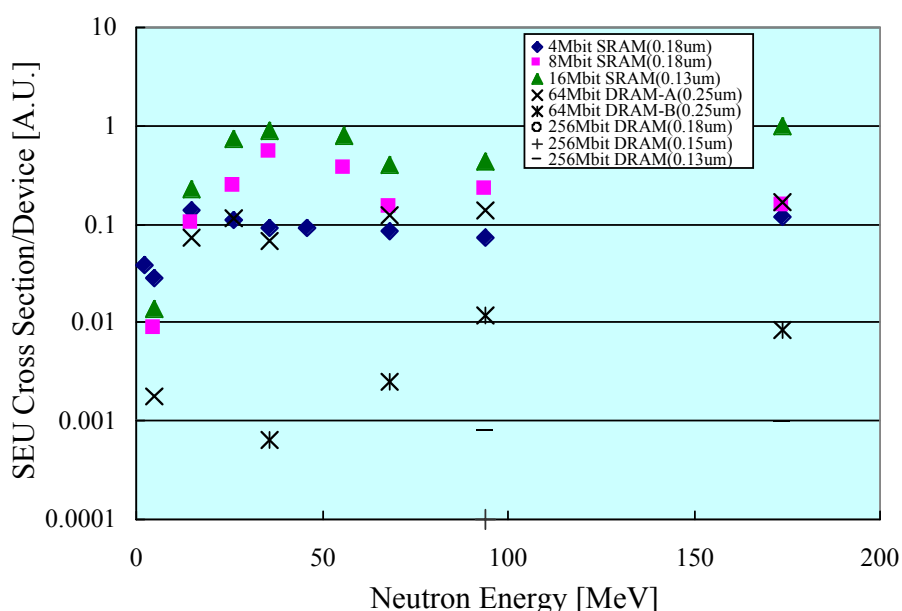


図 13 SEU 断面積の測定結果

5. まとめ

近年は陽子入射反応に変わり、中性子入射反応に関わる核データ測定が多く行われてきている。また日本だけに限ったことではないが、メーカーによる半導体のソフトウェアに関する実験が顕著になってきている。

参考文献

- [1] 石橋健二、他、核データニュース、No.77, 79 (2004).
- [2] Y. Yahagi, *et al.*, LANSCE Activity Report 2003, to be published.
- [3] 矢作保夫、他、第3回半導体の放射線照射効果研究会予稿 (2003).
- [4] T. Fujii, *et al.*, LANSCE Activity Report 2002, (2003).
- [5] M. Hane, *et al.*, IEEE Int. Conf. Simulation of Semiconductor Processes and Devices, Boston, (2003).
- [6] H. Takada, F. Maekawa, private communication.
- [7] H. Nakashima, *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **Suppl. 2**, 1155 (2002).
- [8] J. Klug, *et al.*, *Phys. Rev.*, **C67**, 031601 (2003), and therein.
- [9] U. Tippawan, *et al.*, to be submitted to *Phys. Rev.*, C; nucl-ex/0401017 (2004), and therein.