

# CsI(Tl)シンチレータ応答に対する陽子の核反応損失

林 真照<sup>\*1†</sup>・渡辺 幸信<sup>\*2</sup>・Jan BLOMGREN<sup>\*3</sup>  
Leif NILSSON<sup>\*3</sup>・Angelica ÖHRN<sup>\*3</sup>・Michael ÖSTERLUND<sup>\*3</sup>  
Stephan POMP<sup>\*3</sup>・Alexander PROKOFIEV<sup>\*4</sup>・Vasily SIMUTKIN<sup>\*3</sup>  
Pär-Anders SÖDERSTRÖM<sup>\*3</sup>・Udomrat TIPPAWAN<sup>\*5</sup>

(平成20年1月31日 受理)

## Effect of nuclear interaction loss of protons in the response of CsI(Tl) scintillator

Masateru HAYASHI, Yukinobu WATANABE, Jan BLOMGREN,  
Leif NILSSON, Angelica ÖHRN, Michael ÖSTERLUND,  
Stephan POMP, Alexander PROKOFIEV, Vasily SIMUTKIN,  
Pär-Anders SÖDERSTRÖM and Udomrat TIPPAWAN

†E-mail of corresponding author: [teru@aes.kyushu-u.ac.jp](mailto:teru@aes.kyushu-u.ac.jp)

Nuclear interaction loss of protons in a CsI(Tl) scintillator has been measured at 160 MeV by direct exposure of  $\Delta E$ -E counter telescopes to proton beams delivered to the B beam line in the The Svedberg Laboratory (TSL). The experimental result shows a good agreement with a Monte Carlo calculation using the PHITS code, and the PHITS calculation is validated. The correction for proton loss in the CsI(Tl) response is estimated for proton energies up to 200 MeV on the basis of the PHITS calculation. The present correction method is applied to the data analysis of 175 MeV neutron induced proton production for carbon measured at the MEDLEY facility in TSL.

**Key words:** *CsI(Tl) scintillator, high-energy protons, reaction loss, The Svedberg Laboratory, MEDLEY, PHITS code.*

### 1. 結 言

現在、スウェーデン・ウプサラ大学 The Svedberg Laboratory (TSL) 準単色中性子源施設<sup>1)</sup>にて、175MeV 中性子入射軽イオン生成二重微分断面測定に関する国際共同実験プロジェクトが進行している<sup>2)</sup>。本実験では、複数の検出器を組み合わせたMEDLEY<sup>3)</sup>と呼ばれる生成軽イオンの角度・エネルギー分布測定装置を使用する。軽イオンのエネルギー測定は、本装置に取り付けられたCsI(Tl)シンチレータが担っている。

一般に、CsI(Tl)シンチレータ等の無機シンチレータ検出器を用いて高エネルギー荷電粒子を測定する場合、検出器内での発生する入射粒子と検出器の構成元素との核反応や、荷電粒子の飛程が長くなることによる検

出器外への飛び出しが問題となることが知られており、波高欠損と呼ばれている<sup>4)</sup>。これらの現象が発生した場合、入射粒子のエネルギーの一部が検出器外へ持ち出されるため、本来観測されるべき波高よりも低い波高が観測されてしまう。その結果、単一エネルギーの粒子を測定した場合でも、得られる波高スペクトルは全エネルギー付与によるピークと、波高欠損に起因するテール部分で構成される。この影響を補正し、測定スペクトルから真のスペクトルを求めるためには、検出器の入射粒子に対する応答関数をあらかじめ知っておく必要がある。

そこで、本研究では、高エネルギー陽子に対するCsI(Tl)シンチレータの応答特性を測定し、波高欠損の割合を実験的に求める。同時に粒子・重イオン汎用輸送計算コードPHITS<sup>5)</sup>を用いたシミュレーション結果との比較を行い、計算の妥当性を検証する。さらに、PHITSコードを用いて、広いエネルギー範囲に亘って波高欠損の影響を計算し、補正曲線を求めることを目的としている。

\*1 先端エネルギー理工学専攻

\*2 総合理工学研究院

\*3 Department of Neutron Research, Uppsala University, Sweden

\*4 The Svedberg Laboratory, Uppsala University, Sweden

\*5 Fast Neutron Research Facility, Chiang Mai University, Thailand

## 2. 実験方法

### 2.1 実験装置

実験はTSL・準単色中性子源施設・B-Lineにて行った。Fig.1にビームラインおよび実験装置の断面図を示す。Gustaf Warner サイクロトロンで加速された単色陽子は、陽子ビームとして実験装置を設置しているB-Lineまで導かれる。実験では陽子ビームを直接検出器に入射させるため、ビーム強度を落とす必要がある。そこで、B-Line中に散乱体として厚さ4mmのTa板を置き、入射陽子を散乱させることによりビーム強度を落としている。Taを通過した陽子ビームはビームライン中に置かれた3つのグラファイト製コリメータ (Fig.1: C1-C3) により成形され、ビームラインを抜けた後、空气中を通過し、最終的に検出器直前のグラファイト製コリメータ (Fig.1: C4) で直径4mmに成形され、検出器に入射する。検出器は、陽子ビームの入射位置が検出器の中心、入射角度が検出器の表面に対して垂直になるように設置した。

Fig.2に検出器の断面図を示す。検出器はMEDLEYで使用されているテレスコープ検出器で、 $\Delta E$ 検出器として使用されるシリコン半導体検出器2台 ( $\Delta E_1$ および $\Delta E_2$ ) と、E検出器として使用されるCsI(Tl)シンチレータから構成されている。本実験では、3台のテレスコープ検出器を使用した。 $\Delta E_1$ 検出器は直径23.9 mm、厚さ50~60  $\mu\text{m}$ 、 $\Delta E_2$ 検出器は直径23.9 mm、厚さ400~600  $\mu\text{m}$ のものを使用した。E検出器は直径50 mm、長さ100 mmの円筒形で、終端30 mmは、光出力読み出し用のフォトダイオードに接続するため円錐形である。フォトダイオードは、浜松フォトニクス製のS3204-08を使用した。また、テレスコープ検出器全体はアルミニウム製の円筒形の外装に収められている。

$\Delta E$ - $\Delta E$ -Eテレスコープを用いることにより、入射粒子の種類の見分けと同時にエネルギー測定が可能となる。これにより、Ta板や、グラファイト製コリメータで散乱したことによって生じる入射陽子の低エネルギー成分を除去することが可能である。尚、テレスコープ検出器は、実験室内の蛍光灯などの光によって生じる雑音の影響を除くため、専用の光遮蔽箱の中に設置した。遮蔽箱の入射窓にはアルミニウム製薄膜を使用した。

入射陽子量を測定するために、TFBC検出器<sup>6)</sup>をモニターとして利用し、相対測定を行った。

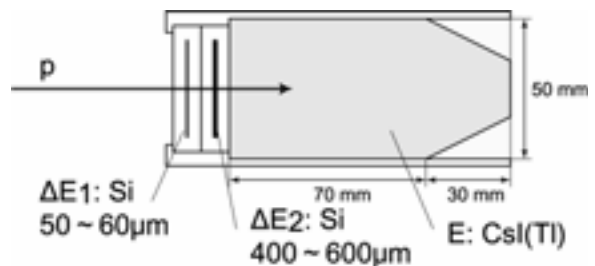


Fig.2 Construction details of  $\Delta E$ - $\Delta E$ -E telescope.  $\Delta E_1$  and  $\Delta E_2$  are 50~60  $\mu\text{m}$  ( $\Delta E_1$ ) and 400~600 $\mu\text{m}$  ( $\Delta E_2$ ) thick Silicon surface barrier semi-conductor detector. E detector is CsI(Tl) scintillator.

### 3. データ解析と実験結果

CsI(Tl)シンチレータに入射する陽子のエネルギーは、以下に述べるように、SRIMコード<sup>7)</sup>で計算した陽子のエネルギー損失データを用いて決定した。Table 1に入射陽子のエネルギー損失の詳細を示す。入射陽子はサイクロトロンにより178.7MeVまで加速され、陽子ビームとなってB-Lineに入射する。それからテレスコープ検出器に入射するまでに、厚さ4 mmのTa板、0.1 mmの鉄製薄膜、4.16 mの空気、16.4  $\mu\text{m}$ のアルミニウム製薄膜を通過する。サイクロトロンで加速直後のエネルギーから、合計したエネルギー損失を減算することで、検出器に入射する直前の、陽子ビームのピークエネルギー159.1 MeVを得た。また、C4コリメータを通過し検出器に入射してくる陽子ビーム量は、TFBC検出器の相対測定の結果から $1 \times 10^2$  [p/s]程度と確認された。

Table 1 Energy losses of incident proton beam.

| Material | Thickness [mm]     | Energy loss [MeV] |
|----------|--------------------|-------------------|
| Ta foil  | 4.0                | 16.7              |
| Fe foil  | 0.1                | 0.4               |
| Air      | $4.16 \times 10^3$ | 2.5               |
| Al foil  | 0.0164             | 0.018             |
| Total    |                    | 19.6              |

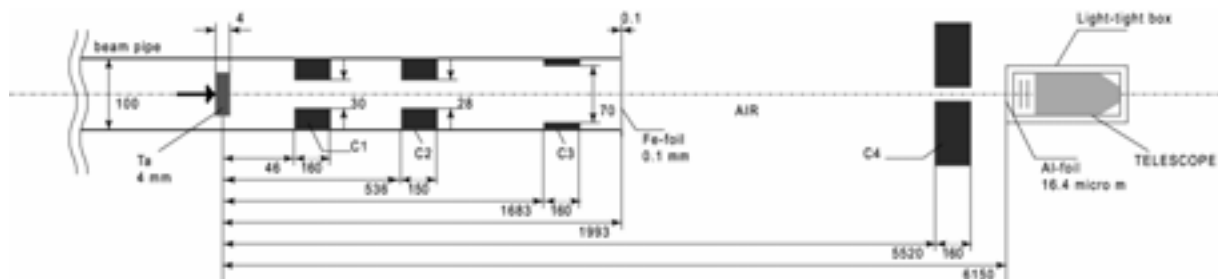


Fig.1 Experimental setup of TSL B-line. Proton beam comes from the left side of figure. C1-C4 shows the graphite collimators, and the length or thickness is given in units of mm.

入射陽子のエネルギーは、2台の $\Delta E$ 検出器を通過する際のエネルギー損失と、E検出器に付与したエネルギーの合計から求まる。検出器のエネルギー較正は参考文献<sup>3, 8, 9)</sup>で報告されているMEDLEY実験における方法を継承した。

Fig.3にエネルギー較正後の $\Delta E_2$ -E の2次元ヒストグラムを示す。黒い実線で示される曲線は、計算で求めたエネルギー損失である。 $\Delta E_2$ の値は入射粒子の $\Delta E_2$ 検出器でのエネルギー損失であり、粒子の種類が同じであれば、エネルギーのみに依存する。Fig.4に示されるように、入射陽子はそのエネルギーごとに、計算結果に沿った1本の帯 (Event group 1) として記録されている。同時に、黒い破線で示される直線に沿ってピークと同じ $\Delta E_2$ の値を持ちながら、低いEの値を持ったイベントの帯 (Event group 2) も確認できる。これらのイベントが、本研究で注目するイベントで、見かけ上低いエネルギーとして記録された波高欠損成分である。

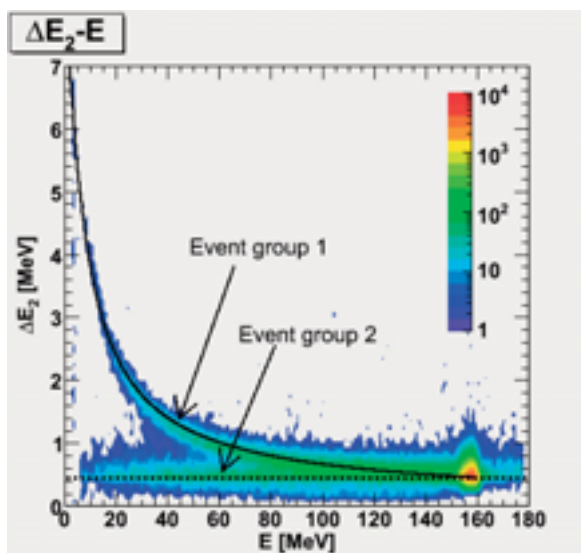


Fig.3 Two-dimensional histogram of  $\Delta E_2$ -E. The solid line shows the calculated energy loss in  $\Delta E_2$  detector. Event group 1 contains the low energy tail of incident protons. Event group 2 contains the reaction losses for incident protons.

Fig.3に示されるように、入射陽子のエネルギーが高くなるに従い、入射陽子成分と波高欠損成分が重なって行くのが確認できる。

Fig.4に $90 \leq E < 100$  MeV領域での $\Delta E_2$ 軸への写像を示す。図中で、 $\Delta E_2$ の測定データに2つのピークが確認できる。0.5 MeV付近に観測されたピークは、波高欠損の影響により低いエネルギーとして観測されたイベントである。また、0.7 MeV付近に観測されたピークは、入射陽子の低エネルギー成分である。ここで、2つのピークを各成分ごとに分離するため、2つのピークの和によってあらわされる関数を用いたフィッティングを行った。

$$y = a_1 f_1 + a_2 f_2 \quad (1)$$

ここで、 $f_1$  および  $f_2$  はピーク関数を示す、ピーク関数にはランダウ分布関数を用いた<sup>10, 11)</sup>。 $a_1$  および  $a_2$  は定数である。Fig.4の実線が、フィッティング結果を示す。また、破線および点線は各ピークの成分を示している。この方法により、波高欠損成分と入射陽子の低エネルギー成分がほぼ重なっている領域においても、両者の分離を行うことができた。また、この方法を全エネルギー領域に亘って行うことで、CsI(Tl)シンチレータの陽子に対する応答関数を得ることができた。

Fig.5に、CsI(Tl)シンチレータの陽子に対する応答関数を示す。横軸が陽子のエネルギー、縦軸がピーク陽子に対する波高欠損成分の比率を示す。応答関数は、実験で使用した3台の検出器から得られた結果の平均により決定した。エネルギー範囲は10~150 MeVまでである。130 MeV以上の領域で応答関数の誤差が大きくなっているが、これは波高欠損成分と、入射陽子成分がほぼ重なっているために、フィッティングにおける誤差が大きくなってしまふことが原因である。

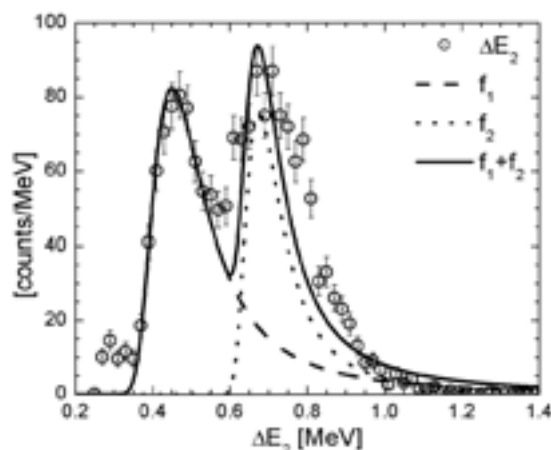


Fig.4 A typical result of double-peak fitting. The proton energy range corresponds to 90 to 100 MeV.

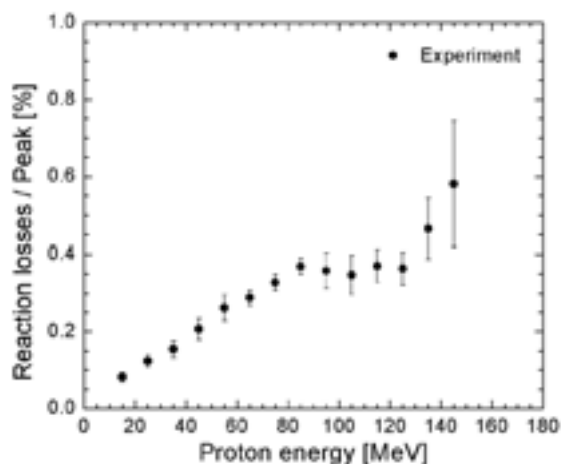


Fig.5 Measured energy distribution of the ratio of reaction loss to peak.

#### 4. PHITS コードによる輸送計算

PHITSコードにおける輸送計算の妥当性を検証するため、まずは実験を模擬した体系でCsI(Tl)シンチレータの陽子に対する応答関数を計算し、実験結果との比較を行った。陽子の入射エネルギーを159MeV、入射陽子ビームの直径を4mmに設定し、ストラグリングを考慮したATIMAオプションを用いて計算を行った。

Fig.6に計算によって得られたCsI(Tl)シンチレータ内での2次元平面の陽子束を示す。図中で、陽子ビームは左側からz軸方向に向かって入射している。z=0の面が、CsI(Tl)シンチレータの入射窓である。シンチレータ内で陽子が広がりながら停止している様子がわかる。また、ほぼ全ての入射陽子が検出器内で全エネルギーを付与し停止しているのが確認できた。

Fig.7に、実験で得られた応答関数とPHITSコードによる計算結果との比較を示す。横軸は陽子エネルギー、縦軸がピークに対する波高欠損成分の割合を示す。図に示されるように、PHITSでの計算結果は実験結果をよく再現できている。

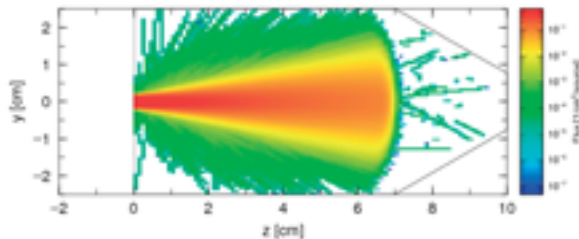


Fig.6 Two-dimensional histogram of calculated proton flux in the CsI(Tl) scintillator. The proton beam is incident from left side to detector along z axis with 4mm diameter.

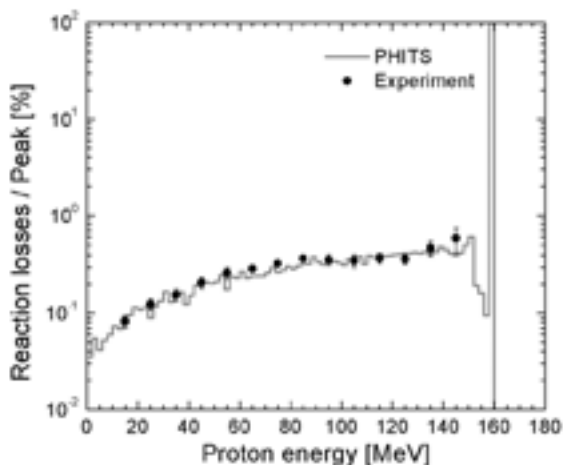


Fig.7 The energy distribution of reaction losses ratio to peak.

次に、入射陽子のエネルギーを変更して計算を行った。計算を行った入射エネルギー点は、25, 50, 75, 100, 125, 150, 175MeVの7点である。Fig.8に計算結果を示す。横軸が陽子の入射エネルギー、縦軸が全入射陽子に対する波高欠損の割合を示す。また、過去Janniによって

行われた調査結果<sup>12)</sup>との比較も行った。Fig.8において実線がJanniによる結果である。これらの波高欠損の割合の比較において、実験で得られた値とPHITSによる計算結果は、Janniの結果と一致している。以上より、PHITSにおける計算は、実験結果をよく再現しており、計算結果の妥当性を確認できた。

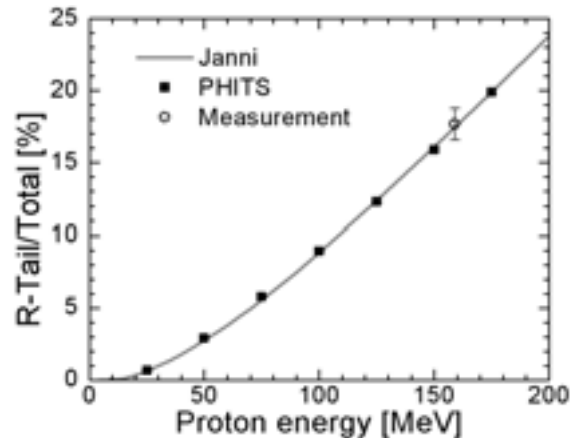


Fig.8 Reaction losses of proton as a function of incident energy. The vertical axis presents the fraction of reaction losses to the number of incident protons.

#### 5. 考察

前節で述べたように、PHITSによる計算結果は、本実験結果を良く再現しており、また、過去の調査結果とも一致していることがわかった。そこで、PHITS計算により、波高欠損の影響を補正するための補正曲線を求めた。その結果をFig.9に示す。横軸が陽子エネルギー、縦軸が補正值である。測定されたピーク収量にFig.9の補正值をかけることで、真のピーク収量を得ることが可能となる。図より、補正は入射エネルギーと共に増加し、200MeVで1.3程度になることがわかった。

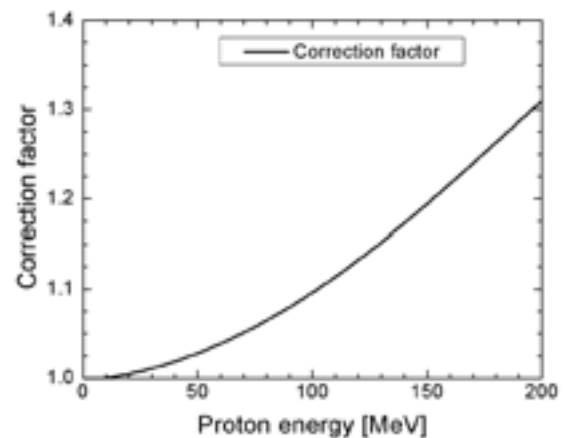


Fig.9 The correction factor of reaction losses of proton as a function of incident energy.

この補正手法を、TSLにて最近行った炭素に対する175MeV中性子誘起軽イオン生成実験のデータ解析に

適用した。Fig.10は、C(n,xp)スペクトルの一例である。白抜きの実験点は、補正前のデータである。これはFig.4においてEvent group 1として示されている成分と同等であり、波高欠損成分は含まれていない。これに、Fig.9で示された補正曲線を乗ずることにより、黒丸で示された実験点となる。尚、比較のためにGNASHコード<sup>13)</sup>による理論計算結果を実線で示している。

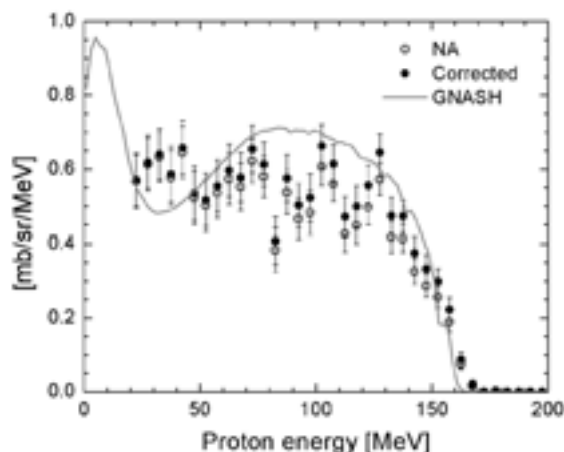


Fig.10 Correction of reaction losses in measured proton spectrum for the C(n,xp) reaction at 175 MeV.

## 6. 結 言

CsI(Tl)シンチレータの160MeV陽子に対する検出効率と応答関数を実験的に得ることができた。また、PHITSコードでの計算から、以下の2つの結果を得た。

1. 実験で得られたピーク検出効率と応答関数を、PHITSコードによる計算で再現できた。
2. 過去に行われた研究成果<sup>12)</sup>と、今回新たに行ったPHITSコードでの計算結果が良い一致を示した。これらの結果から、PHITS計算によりCsI(Tl)内での核反応による陽子損失を精度良く再現できることを見出した。

最終的に、PHITS計算に基づき、200MeVまでの広いエネルギー範囲にわたる陽子波高欠損の割合を求め、補正関数を導出した。炭素に対する175MeV中性子誘起軽イオン生成実験のデータ解析に本補正法を適用し、CsI(Tl)内での陽子損失補正の影響を明らかにした。

## 謝 辞

本研究は平成17年度長期国外留学助成（財団法人九州産業技術センター）および平成19年度笹川科学研究助成（財団法人日本科学協会）により実施したものであり、関係者に深く感謝致します。

## 参 考 文 献

- 1) S. Pomp, A.V. Prokofiev, J. Blomgren, O. Byström, C. Ekström, N. Haag, A. Hildebrand, C. Johansson, O. Jonsson, P. Mermod, L. Nilsson, D. Reistad, N. Olsson, P.-U. Renberg, M. Österlund, U. Tippawan, D. Wessman and V. Ziemann, "The new Uppsala neutron beam facility", in Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Santa Fe, USA, September 26-October 1, edited by R.C. Haight, M.B. Chadwick, T. Kawano and P. Talou (AIP, New York, 2005), p.780-783.
- 2) S. Pomp, J. Blomgren, M. Hayashi, P. Mermod, A. Öhrn, N. Olsson, M. Österlund, A. Prokofiev and U. Tippawan, "Light-ion production and fission studies using the MEDLEY facility at TSL", in Proceedings of International Workshop on Fast Neutron Detectors, Cape Town, South Africa, April 3-6, (2006), PoS (FNDA2006) 001.
- 3) S. Dangtip, A. Atac, B. Bergenwall, J. Blomgren, K. Elmgren, C. Johansson, J. Klug, N. Olsson, G. Alm Carlsson, J. Söderberg, O. Jonsson, L. Nilsson, P.-U. Renberg, P. Nadel-Turonski, C. Le Brun, F.-R. Lecolley, J.-F. Lecolley, C. Varignon, Ph. Eudes, F. Haddad, M. Kerveno, T. Kirchner and C. Lebrun, "A facility for measurements of nuclear cross sections for fast neutron cancer therapy", Nucl. Instr. and Meth. A **320**, (1992) 237-276.
- 4) V. Avdeichikov, A.S. Fomichev, B. Jakobsson, A.M. Rodin and G.M. Ter-Akopian, "Reaction losses of light charged particles in CsI, BGO and GSO scintillators", Nucl. Instr. and Meth. A **437**, (1999) 424-431.
- 5) H. Iwase, K. Niita and T. Nakamura, "Development of General-Purpose Particle and Heavy Ion Transport Monte Carlo Code", J. Nucl. Sci. and Technol. **39**, (2002) 1142-1151.
- 6) V.P. Eismont, A.V. Prokofiev and A.N. Smirnov, "Thin-Film breakdown counters and their applications", Radiat. Meas. **25**, (1995) 151-156.
- 7) J.F. Ziegler, et al., The Stopping and Range of Ion in Solids, Pergamon Press, New York, 1985.
- 8) U. Tippawan, PhD thesis, Graduate School Chiang Mai University, Chiang Mai, May 2004, Thailand.
- 9) D. Horn, G.C. Ball, A. Galindo-Uribarri, E. Hagberg, R.B. Walker, R. Laforest and J. Pouliot, "The mass dependence of CsI(Tl) scintillation response to heavy ions", Nucl. Instr. and Meth. A **320**, (1992) 273-276.
- 10) W.R. Leo, "Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments 2<sup>nd</sup> Revised Edition", Sec. 2, Springer-Verlag, ISBN: 3-540-57280-5.
- 11) ROOT, An Object-Oriented Data Analysis Framework, URL: <http://root.cern.ch/>.
- 12) J.F. Janni, "Proton range-energy tables, 1 keV-10 GeV", Atom. Data and Nucl. Data Tab. **27**, (1982) 147-339.
- 13) P.G. Young, E.D. Arthur, M.B. Chadwick, "Comprehensive nuclear model calculations: Introduction to the theory and use of the GNASH code", Los Alamos National Laboratory Report No. LA-12343-MS, (1992).