

## 第2回 SEE 実験報告

2002.2.4 新井康夫(yasuo.arai@kek.jp)  
高エネルギー加速器研究機構  
(Rel 1.1)

### 1. 概要

2001年8月に行った第1回目のSEE実験に引き続き、第2回目の実験を、12月19、20の2日間東北大サイクロトロンRIセンター(CYRIC)で行った。仙台には、実験準備と後片づけのため12月17(月)から21日(金)の5日間滞在した。

今回は新たに金属フォイルを放射化しビーム強度を求める Dosimetry や、シンチレーションファイバーによるビームプロファイル測定、X-Y ステージを使用したターゲット位置の遠隔操作等の新しい技術を取り入れた。また、照射チップも AMT-2 の他 TGC グループの G-Link, LVDS, CPLD(Altera & Xilinx)と多種に渡った。

実験参加者は、新井の他、棚沢(農工大)、蓮子、中村、松本(東大 ICEPP)、石田、小松(都立大)であった。実験概要及びTGC関係の照射チップの結果は中村、石田の修士論文に詳しく記されると思う。また、シンチファイバーの結果は松本が報告する予定である。ここでは主に私が関連した実験装置とAMT-2の結果について記しておく。

### 2. 実験セットアップ

基本的な照射方法は前回の実験と同様で、陽子ビームを厚さ 100 $\mu\text{m}$ 、直径 20mm のチタンフォイルを通して空気中に導き出し、チップに照射した(図1)。チップの後ろにはファラデーカップを内蔵したビームダンプがある。

当初 70MeV での陽子ビーム照射を予定していたが、前週にサイクロトロン本体内で水漏れ事故があり、高いエネルギーでの運転ができなくなった為、残念ながら前回と同じ 50MeV での運転となってしまった。



図1. 照射セットアップ(第2ターゲット室、No. 31-2 ビームライン)

## 2.1. X-Y ステージ

今回新たに THK(株)社製の X-Y ステージを購入し(図 2)、ターゲットやビームモニターの位置を遠隔操作できるようにした。これにより、照射の度に実験室に入り取り換える手間がはぶけ、効率が上がった(人の被曝量も減らせる)。

アクチュエータは KL-3006A-050(水平方向、ストローク 50cm)と KL-3006A-020B(垂直方向、ストローク 20cm、ブレーキ付き)の 2 種をブラケットで繋げて使用した。当初、ステップモータの方が AC サーボモータよりも放射線に対して強いのではないかという話があったが、種類が少なく値段も高いので普及している AC サーボモータ方式にした。但し、故障した際に容易にモータが交換出来るタイプのものを選んだ。

X-Y ステージの制御は、専用コントローラ(LXT-2-100L-100LB)に Windows PC の RS232C ラインを繋いで制御した。使用したソフトエウエアーは THK より購入したものである。この PC はさらに VPN(Virtual Private Network)により制御室より遠隔操作した。遠隔制御は富士実験室で試験していた際は問題無かったが、現場ではネットワークの具合が悪かったせいかプログラムのハングアップ等が時々起こり苦労した。

X-Y ステージには照射チップの他、ZnS を塗ったアルミフォイル、シンチレーションファイバーによるビームプロファイルモニターを設置した。

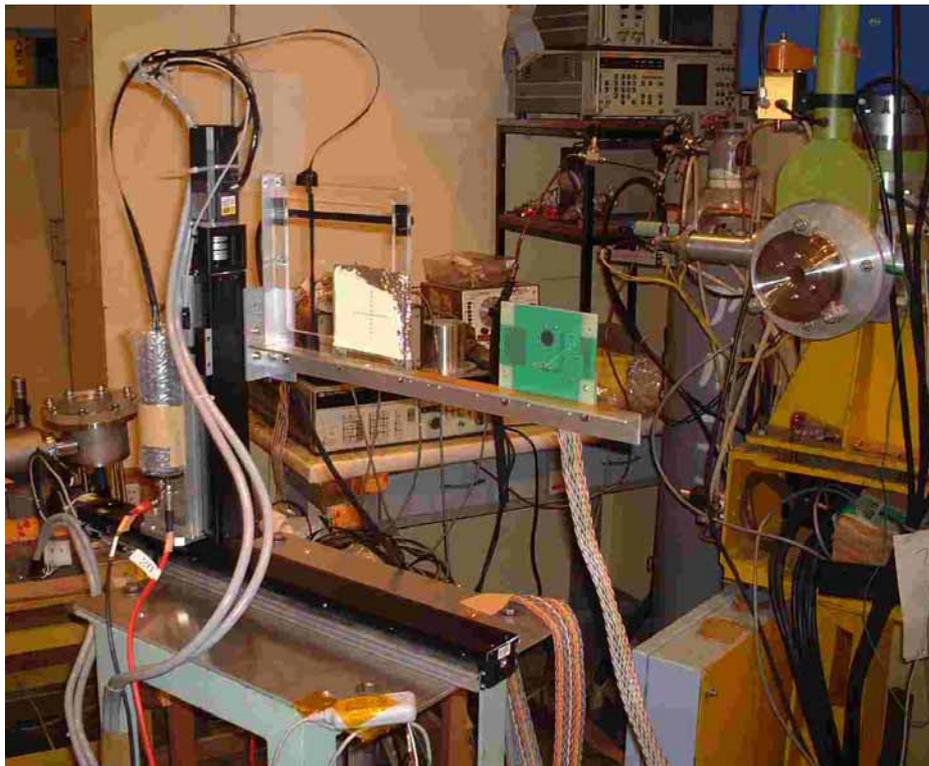


図 2. X-Y ステージ。左側の黒い十字がシンチファイバー、その右下が ZnS、さらにその右に照射ボードを載せた。右端の丸いのがビームパイプの終端。

## 2.2. AMT-2 照射ボード

AMT-2 の照射ボードは前回と同じもので、20 芯のフラットケーブルを繋ぎ、電源、クロック、リセット信号、そして JTAG の信号を供給した。このフラットケーブルの他端は、VME クレート内の TTM-2 (TMC Test Module 2)に刺されたアダプターボードに繋がる。信号の制御は VME 上の Windows NT コンピュータから行われた。このコンピュータはさらに VNC により、制御室のコンピュータからコントロー

ルした。チップへの電源の電圧・電流はデジタル・マルチメータで測定し、GP-IB - Ethernet を経由して、同じ VME 上のコンピュータにより測定を行った。

前回の実験ではビーム停止中に内部メモリーに値を書き込み、90 秒間ビームを照射し(この間電源は供給したが、クロック、リングオシレーターは停止)、再びビームを止めた後にメモリーを読み出し確認するという動作を繰り返した。今回は連続的にビームを照射したまま、内部回路の試験を行った。試験の手順を図 3に示す。

SEU としては図 3-(4)の時間の中にメモリー及び CSR の内容に変化がないかを調べる。又今回は静的電流(Idds)の他、動的電流(Idd)も測定した。その他細かい改良では有るが、電流値の増加とともに電圧が低下する影響を軽減するために、電源線の太さの増加、ヒューズの削除、電圧の読み取り位置をよりチップの近くにする等の改良を行った。

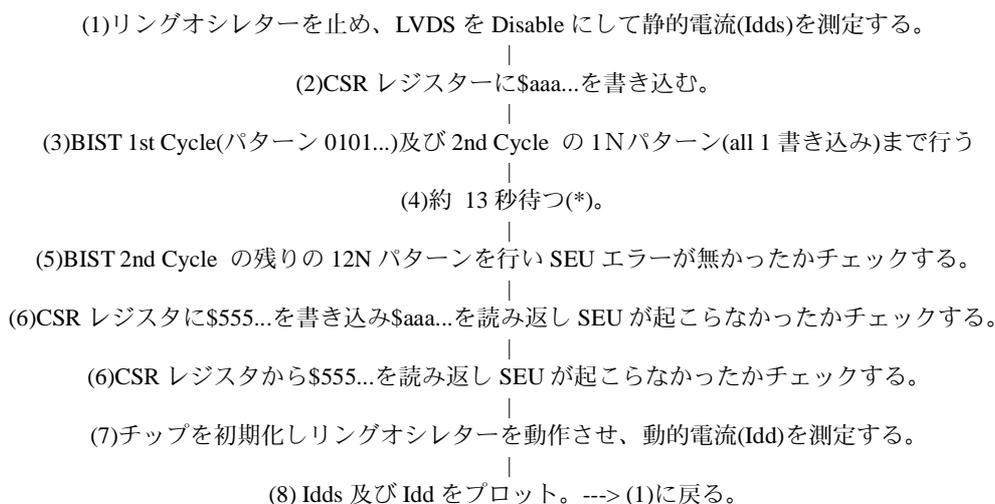


図 3. AMT-2 試験手順。( \*: 1 サイクルが 15 秒になるように待ち時間は制御されている。 )

### 2.3. Dosimetry

陽子照射量を定量的に押さえるために、金属フォイルを使用した Dosimetry を行った。用意した金属フォイルは Al 0.1 mm(99.99+%), Al 0.5 mm(99.9%), Cu 0.1 mm(99.99+%), Cu 0.25 m(99.9%)m の 4 種類である。

各フォイルは 25mm 角に切って照射し、照射後 Ge 検出器(EURISYS 社、67mmφ x 56.1mm、191.9 cc)によりガンマー線スペクトルの測定を 5 分間行った。その後、フォイルを 5mm 角の 25 個の小片に切り、各片のアクティビティを GM 計数管により 60 秒間測定した。

最初にこの 4 種類のフォイルを 10 分間ずつ照射し、生成核からのガンマ線を観測した。この結果、以降の照射では、Cu 0.1mm を使用することにした。Cu 0.1mm の不純物成分は Ag 10, Cu <1, Fe 3, Mg < 1, Mn <1, Ni 3, Pb 2, Sn 1 (ppm)である。

データ収集及びピーク面積、位置の計算には東北大馬場研究室からお借りした、EG&G ORTEC 社の Maestro-32 という PC ソフトを使用した。

### 3. 実験結果

実験の主な経過を表 1 に示す。今回はビームトランスポートに少しトラブルが有り、実験開始が遅れてしまった。また、なぜかビームが絞れず、太いビームのままビームパイプの終端部に輸送し、20mmφ の Ti フォイル部でビームサイズを決める格好になった。この為、直前のビームストッパーでの電流値に比べ、ターゲット位置での電流値は大幅に減少している。

表 1。実験経過

日	時	内容
12/19	9:00	マシンタイムスタート。ビーム調整。
	15:20	実験室へのビームトランスポート開始。ビーム通らず。
	19:05	ビームシャッターが閉まっていたことがわかり、ビームようやく通るが絞れず。
	19:20	ZnS でビーム確認。
	19:47	シンチファイバーで信号確認。
	21:20	Dosimetry 用ターゲット(Cu0.25, Al0.5, Cu0.1, Al0.1) 10 分ずつ照射。
	22:11	シンチファイバー-X, Y スキャン
12/20	1:11	AMT-2 Chip J 照射 (Ip=1nA @Beam Stopper)
	3:20	AMT-2 Chip K 照射 (Ip=2nA @Beam Stopper)
	5:40	Xilinx XC95288XL(hpt_ic0) 照射
	7:07	Xilinx XC95288XL(hpt_ic1) 照射
	9:28	AMT Chip A 照射 (Ip=2nA @Beam Stopper)
	12:00	G-Link (Tx, Rx, OE/EO) 照射
	15:20	LVDS (Tx, Rx)照射
	17:55	Xilinx XC95288XL(chip 3) 照射
	19:05	Altera #3 照射
	19:35	Altera #2 照射
	19:47	シンチファイバー-X, Y スキャン
	20:15	実験終了

### 3.1. Dosimetry

#### 3.1.1. Ge 検出器のエネルギーキャリブレーション

今回測定室に置いてあった、 $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{22}\text{Na}$  を標準線源として使用したが、のうち  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$  のデータは、線源の強度が弱かったため 5 分間の測定ではピークカウント数が少なすぎたので使用できなかった。一方、 $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  のスペクトルは強度が強すぎたためか(デッドタイム 43~53%) ピークの幅が通常の 2 倍から 6 倍程度に広がってしまっている。唯一使用できたのは  $^{22}\text{Na}$  の 1275keV ピークであった。(次回からは強度に応じて測定時間、位置を調整すべき。)

この為、標準線源を使用したエネルギーキャリブレーションはあきらめ、ターゲットとした Cu からのガンマ線を使用してエネルギーキャリブレーションを行った。Appendix A に natural Cu への 50MeV proton 照射によって生成される主なガンマ線、生成断面積等を示す[1]。

照射後すぐの Cu 0.25 mm と 1 日半後に測定した Cu 0.1 mm のガンマ線スペクトルを図 4 に示す。主なガンマ線はすべて特定することが出来た。Cu0.25 mm のガンマ線で行ったエネルギーキャリブレーションの結果を図 5 に示す。直線に良くフィットしている。

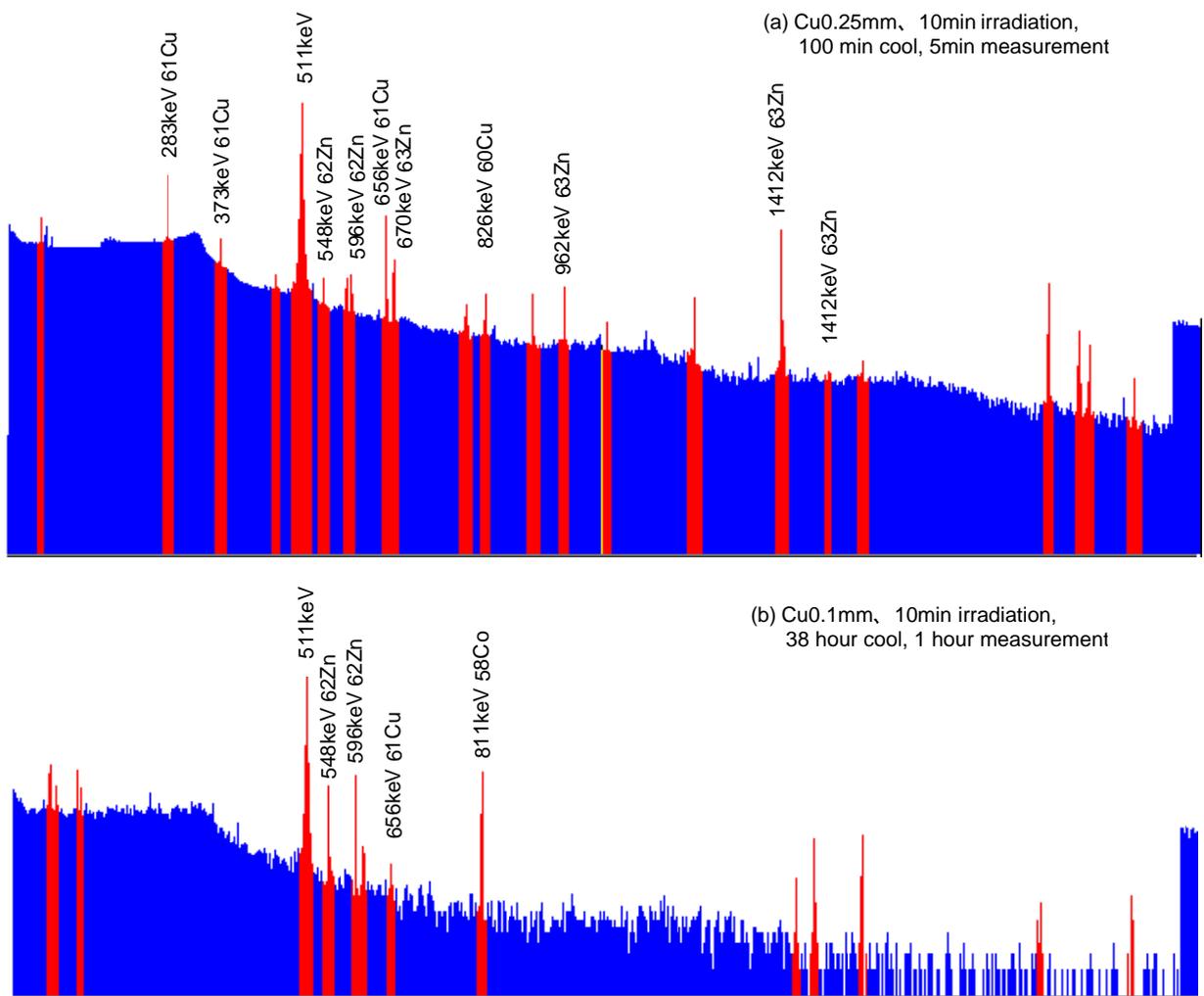


図 4. Cu フォイルのガンマー線スペクトル。(a) 照射後 100 分後の Cu 0.25 mm, (2)38 時間後の Cu 0.1mm。

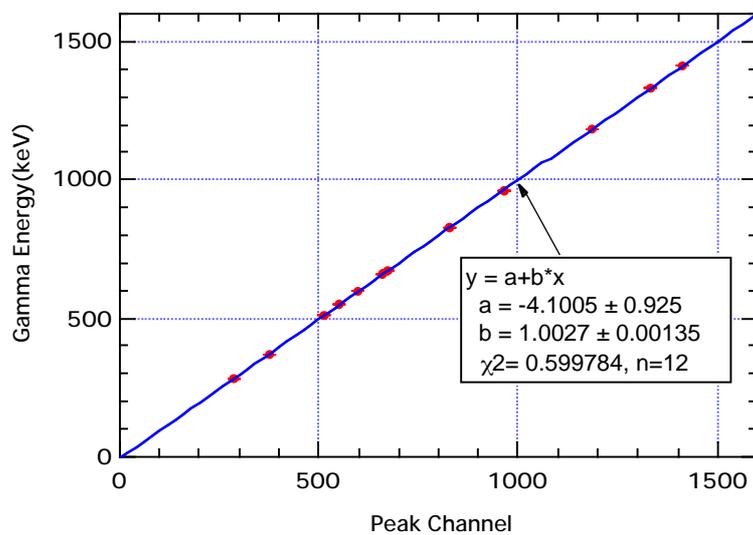


図 5. Ge 検出器のエネルギーキャリブレーション。

### 3.1.2. Ge 検出器の効率補正

前章で述べたように標準線源を使用した測定はピークの幅が広く位置もずれていたためエネルギーキャリブレーションには使用しなかったが、効率補正に使用するには大きな問題はないと考えこのデータを使用した。指数関数でフィットした結果を図 6に示す。

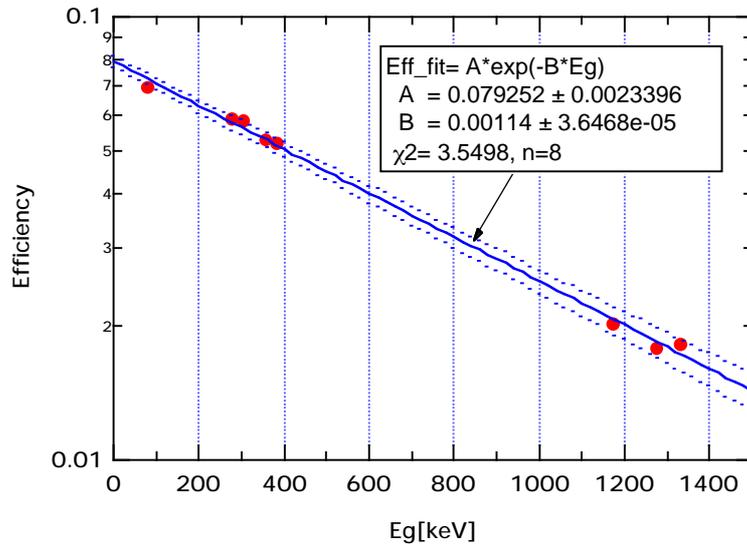


図 6. Ge 検出器の効率補正。

### 3.1.3. ビームプロファイル

チップ表面に貼り付けた Cu 0.1mm 厚のフォイルを 5 x 5 個の 5mm 角の小片にして GM 管で測定した。各小片は重さを精密秤で測定し、強度の補正を行った。相対強度の分布の結果を図 7 に示す。AMT-2 のチップ面積は 6 mm 角なので、中央部の小片の値を相対強度として使用する (Chip J = 0.065, Chip K = 0.068, Chip A = 0.060)。

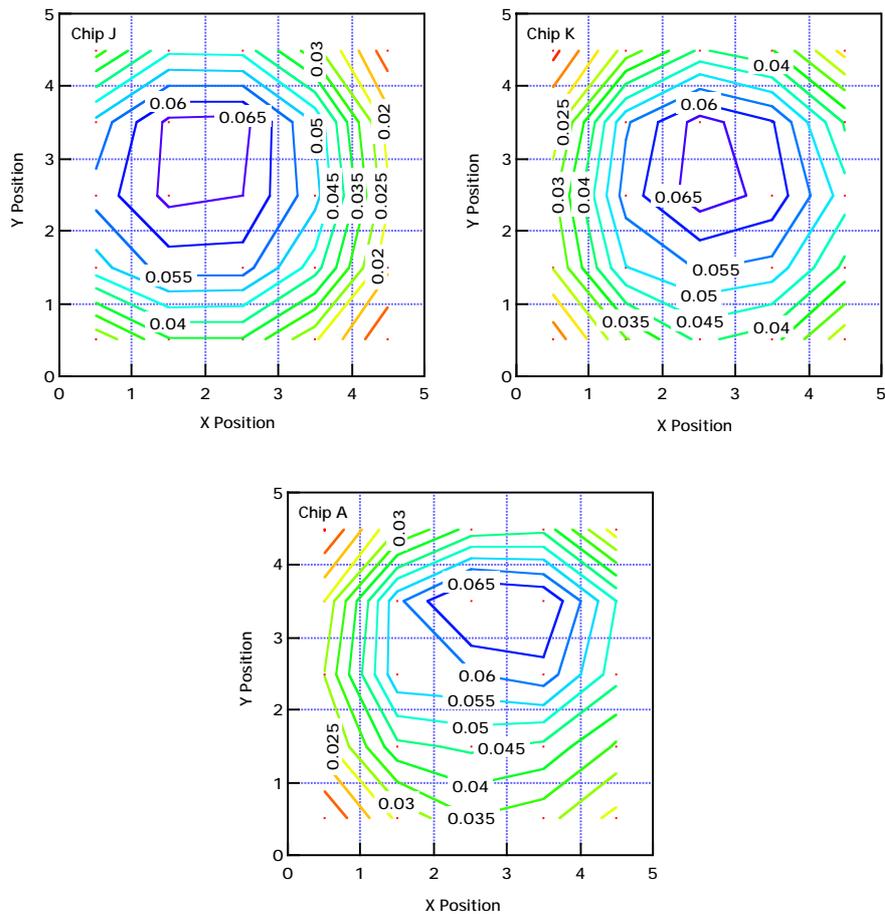


図 7. AMT-2 照射時のビームプロファイル(Cu 0.1 mm 厚のフォイルを 5 x 5 個の 5mm 角の小片にして GM 管で測定)。等高線の値は全体を 1 としたときの小片の相対強度。

### 3.1.4. 陽子フラックスの推定

ここでは実験結果から陽子フラックスの値を計算する。

生成核の個数を  $N$ 、入射粒子束を  $\phi$ 、ターゲットの原子数を  $Nt$ 、有効反応断面積を  $\sigma_{eff}$ 、壊変定数を  $\lambda (= \ln 2 / T_{1/2})$  とすると、目的とする核の生成速度 ( $dN/dt$ ) は以下のように表される。

$$\frac{dN}{dt} = \phi \cdot \sigma_{eff} \cdot Nt - \lambda \cdot N \quad \text{--- (1)}$$

ここで、有効反応断面積  $\sigma_{eff}$  とは、陽子との直接反応で生成される断面積と、他の核種 (precursor) から目的とする核への崩壊によって生成される断面積とを足したものである。今回は 50 MeV とエネルギーがそれほど高くないので、precursor は無視できると思われる。(1) 式を積分すると次のようになる。

$$N = \frac{\phi \cdot \sigma_{eff} \cdot Nt}{\lambda} (1 - \exp(-\lambda \cdot Tr)) \quad \text{--- (2)}$$

$Tr$  は照射時間である。 $Nt$  は、ターゲットの厚さを  $t (= 100 \mu\text{m})$ 、面積を  $S (= 2.5 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm})$ 、密度を  $\rho$ 、原子量を  $A$ 、アボガドロ数を  $N_A$  として

$$\begin{aligned} Nt &= t \times S \times \rho \times N_A / A \quad \text{--- (3)} \\ &= 0.01 \text{ (cm)} \times 6.25 \text{ (cm}^2) \times 8.93 \text{ (g/cm}^3) \times 6e23 / 63.5 \text{ (g)} = 5.27 \times 10^{21} \text{ (個)} \end{aligned}$$

である。照射終了時刻を  $t=0$  として、時刻  $t$  にこの核から放出される放射能の強さ  $B(t)$  は

$$B(t) = \lambda N(t) = \lambda N \exp(-\lambda t) \text{ (Bq)} \quad \text{--- (4)}$$

で表される。よって照射後  $T_m$  時間後より  $T_c$  時間測定を行った際に得られるガンマー線の数  $C_\gamma$  は、測定ガンマー線への分岐比を  $Br$ 、検出効率を  $\varepsilon$  として

$$\begin{aligned} C_\gamma &= Br \cdot \varepsilon \int_{T_m}^{T_m+T_c} B(t) dt \\ &= Br \cdot \varepsilon \cdot N \cdot (\exp(-\lambda \cdot T_m) - \exp(-\lambda \cdot (T_m + T_c))) \end{aligned} \quad \text{--- (5)}$$

これに(2)式を代入して  $\phi$  を求めると

$$\phi = \frac{C_\gamma \cdot \lambda}{\varepsilon \cdot Br \cdot \sigma_{eff} \cdot Nt (1 - \exp(-\lambda \cdot Tr)) \cdot (\exp(-\lambda \cdot T_m) - \exp(-\lambda (T_m + T_c)))}$$

となる。ただしここで求めた陽子フラックス  $\phi$  は 2.5 cm 角のターゲットに一様にビームが照射されたと仮定した時の値である。実際にチップの die 付近での陽子フルーエンス  $F$  は

$$F = \phi \times Tr \times 2.5^2 \times \varepsilon_r / 0.5^2 \quad \text{(protons/cm}^2)$$

である。ここで  $\varepsilon_r$  は前節で示した 5 mm 角の小片の相対強度である。図 8 にいくつかのガンマー線ピークに対し、上の式から求めた AMT-2 チップ照射時の陽子フラックスを示す。(Br,  $\sigma$  等の値は Appendix A 参照)。

### 3.1.5. リーク電流と吸収線量

図 9 に AMT-2 チップの静的消費電力が陽子照射により増加していく様子を示す。図中左端が照射を開始した時刻で、電流値が約 240 mA に達した時点で照射を中止した。その後は電流値がアニーリングにより少しずつ減少していく様子が見られる。前にも述べたように、ビームストッパーでの電流値が Chip J で約 1 nA であったのに対し、Chip K, A では約 2 nA にしたので照射時間が約半分になっている。

一方、図 10 に昨年 8 月に行ったガンマー線照射時の電流値の変化を示す。静的電流の増加が Si を通過する放射線による Ionization で引き起こされていると考え、図 9、図 10 を対応させることにより、吸収線量を見積もることが出来る。

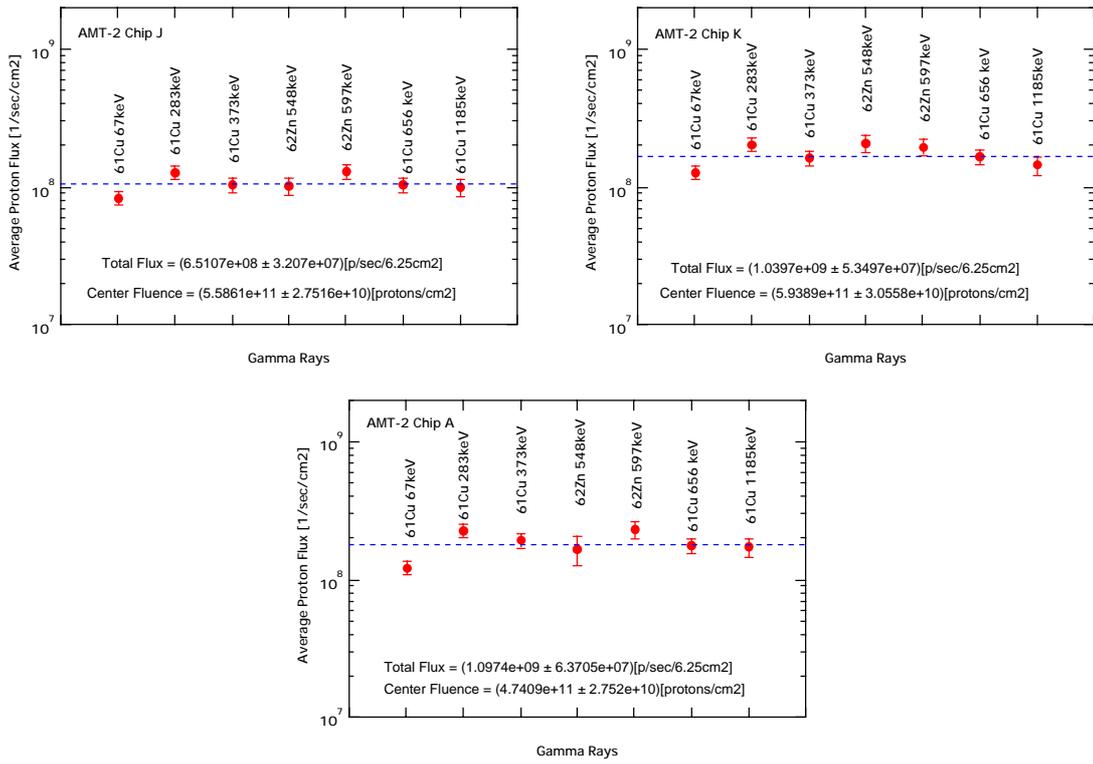


図 8。陽子フラックス

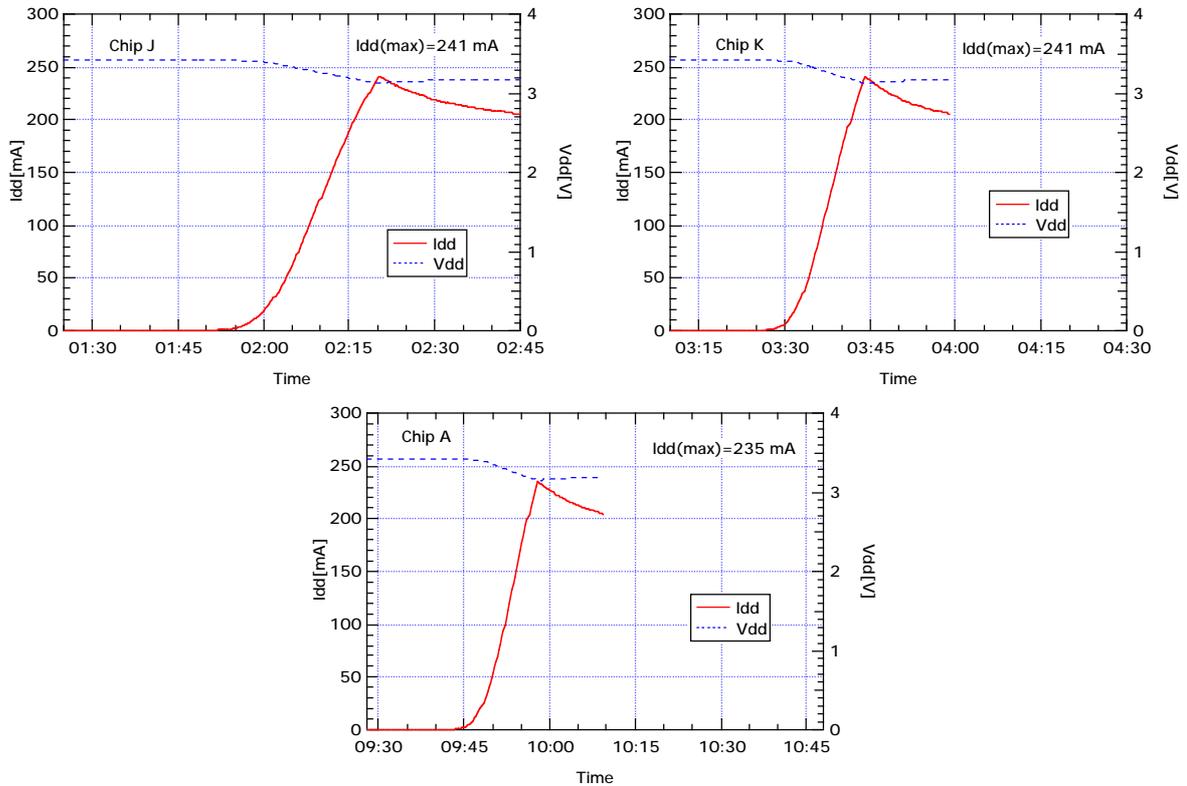


図 9。陽子ビーム照射時の AMT-2 静的状態の電圧・電流値の変化。

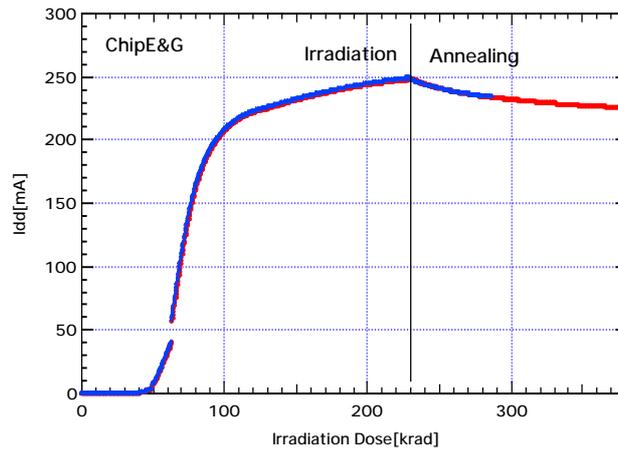


図 10. ガンマー線照射による AMT-2 の静的電流の変化(2001.8)。

また、吸収線量 X は陽子ビームのエネルギー損失とフルーエンス F から、

$$\begin{aligned}
 X &= dE/dx \times F \\
 &= 1.6E-5 \text{ (erg/(g/cm}^2\text{))} \times F \quad \text{(erg/g)} \\
 &= 1.6E-7 \times F \quad \text{(rad)}
 \end{aligned}$$

のように求めることもできる。以上の結果を表 2 にまとめる。Dosimetry から求めた値と、Leak Current から求めた値が約 2 倍違ってしまっている。原因のひとつは図 10 からわかるように 200 mA を越えたところでは Dose に対する Idd の依存性が緩やかで、この領域では誤差が大きい点が上げられる。また、図 9 ではまだ電流値の飽和が見られていないので、まだ 100 krad 以下であるとも考えることも出来る。

表 2. 陽子線量と吸収線量

	Ip @Beam Stopper	Irradiation Time	Proton Fluence (1/cm <sup>2</sup> )	Radiation Dose (from Dosimetry)	Radiation Dose (from Leak Current)
Chip J	~1 nA	55 min	5.6x10 <sup>11</sup>	90 krad	180 krad
Chip K	~2 nA	35 min	5.9x10 <sup>11</sup>	94 krad	180 krad
Chip A	~2 nA	30 min	4.7x10 <sup>11</sup>	75 krad	160 krad

### 3.1.6. SEU 断面積

今回は 3 チップとも 1 回も SEU が観測されなかったので 90% confidence level の上限値 2.44 を使って SEU 断面積  $\sigma_{SEU}$  の上限値を求める。AMT-2 のメモリーのビット数は 11,360 bit , CSR は 180 bit なので

$$\begin{aligned}
 \sigma_{SEU}(\text{Mem}) &< 2.44 / F / 11360 \quad \text{(cm}^2\text{/bit)} \\
 \sigma_{SEU}(\text{CSR}) &< 2.44 / F / 180 \quad \text{(cm}^2\text{/bit)}
 \end{aligned}$$

計算結果を表 3 にまとめる。

表 3. SEU 断面積

	Proton Fluence (1/cm <sup>2</sup> )	No. of SEU in Memory	$\sigma_{SEU}(\text{Mem})$ (cm <sup>2</sup> /bit)	No. of SEU in CSR	$\sigma_{SEU}(\text{CSR})$ (cm <sup>2</sup> /bit)
Chip J	5.6x10 <sup>11</sup>	0	< 3.8x10 <sup>-16</sup>	0	< 2.4x10 <sup>-14</sup>
Chip K	5.9x10 <sup>11</sup>	0	< 3.6 x10 <sup>-16</sup>	0	< 2.3x10 <sup>-14</sup>
Chip A	4.7x10 <sup>11</sup>	0	< 4.6 x10 <sup>-16</sup>	0	< 2.9x10 <sup>-14</sup>
Total	1.6x10 <sup>12</sup>	0	< 1.3 x10 <sup>-16</sup>	0	< 8.5x10 <sup>-15</sup>

### 3 チップ合わせた値は

$$\sigma_{\text{SEU}}(\text{Mem}) < 1.3 \times 10^{-16} \quad (\text{cm}^2/\text{bit})$$

$$\sigma_{\text{SEU}}(\text{CSR}) < 8.5 \times 10^{-15} \quad (\text{cm}^2/\text{bit})$$

である。ちなみに昨年 8 月の実験で得られた値は

$$\sigma_{\text{SEU}}(\text{Mem}) < 2.7 \times 10^{-16} \quad (\text{cm}^2/\text{bit}),$$

$$\sigma_{\text{SEU}}(\text{CSR}) < 5.6 \times 10^{-15} \quad (\text{cm}^2/\text{bit})$$

であった。

MDT 位置での 20MeV 以上のハドロンの fluence は 10 年間で、 $\sim 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  なので、Memory 中で SEU の起こる確率は  $10^{-6}$  (1/bit/10year)以下となる。MDT 全体では 20 SEU/MDT/year であり、實際上問題無いレベルと言える。また、制御レジスター(CSR)に関しても、25 SEU/MDT/year 程度の SEU である。

### 4. まとめと今後の課題

今回は始めて Dosimetry を陽子線量測定に取り入れた。その有効性はビームプロファイルがわかるなどの点で非常に大きいことがわかった。一方今回は Ge 検出器の校正の際、標準線源の強度が強すぎたり弱すぎたりで、今後修正すべき点もいくつかあった。

X-Y ステージは非常に有用であるが、制御方法をもっと安定化する必要がある。

今回の実験では AMT では一度も SEU が起こらなかったもので、SEU 断面積の値はさらに下がった。ただ、一度も起こらないと測定方法に関して心配が出てくるもので、測定方法の再確認とチップ数を増やしての再実験が必要であろう。また、吸収線量の値が Dosimetry からと Leak Current から求めた値とで 2 倍違ってしまった点も気になる。

### 5. Reference

[1] S. J. Mills, G. F. Steyn and F. M. Nortier, "Experimental and Theoretical Excitation Functions of Radionuclides Produced in Proton Bombardment of Copper up to 200 MeV", Appl. Radiat. Isot. Vol. 43, No. 8, pp. 1019-1030, 1992.

Appendix A:  $^{nat}\text{Cu}(p,x)$  Gamma Candidates

Nuclide	$\sigma$ (mb) @48MeV	$T_{1/2}$	$E_\gamma$ (keV)	$\gamma$ Abundance (%)	Comment
62Zn	12.15+-0.99	9.26 h	507.5	14.9	(observed)
			548.4	15.6	observed
			596.7	25.7	observed
63Zn	22.0+-2.4	38.1 m	669.8	8.4	observed
			962.1	6.6	observed
			1412	0.76	observed
65Zn	4.81+-0.40	244.1 d	1115.5	50.75	
60Cu	21.7+-1.9	23.2 m	826.4	21.7	observed
			1332.5	88.0	observed
61Cu	104.2+-8.7	3.408 h	67	6.5	
			283.0	12.5	observed
			372.9	2.2	observed
			656.0	11.1	observed
			1185	4.6	observed
64Cu	47.6+-5.2	12.7 h	1345.8	0.48	observed
57Ni	1.06+-0.10	1.503 d	127	12.9	observed
			1377.6	77.9	observed
			1757	7	observed
			1919	14.7	observed
56Co	0.170+-0.022	77.7 d	846.8	99.9	
			1037	14.0	
			1238	67.5	
			1771	15.7	
57Co	36.8+-3.0	271.77 d	122.1	85.5	
			136.5	11.1	
58Co	43.3+-3.5	70.916 d	810.8	99.5	observed
60Co	8.17+-0.66	5.271 y	1173.2	99.5	
			1332.5	99.98	
59Fe	0.09+-0.012	44.496 d	1099.3	56.5	
			1292	43.5	
54Mn	0.720+-0.069	312.2 d	834.8	99.98	