

第3回 SEE 実験報告

2002.7.10 新井康夫(yasuo.arai@kek.jp)
高エネルギー加速器研究機構

1. 概要

第3回目の SEE 実験を、5月16-18の3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5月14(火)から18日(土)の5日間滞在した。

今回は6月20日に行われる AMT-2 チップの PRR (Production Readiness Review) [1] に向けた、AMT プロセスの耐放射線性 pre-selection の為のデータ収集が主な目的である。又、TGC グループも同時に照射実験を行なったが、こちらは前回の実験のデータ補強と共に、大幅にメンバーが入れ替わったのでその練習の意味合いも含めて実験を行なった。前回より Cu foil を使用した Dosimetry 測定を行なうようにしたが、ビームプロファイルの測定に時間がかかるので、今回は鉛コリメータを利用した測定や、CYRIC 馬場研の Imaging Plate を使った測定を試みた。

実験参加者は、新井、佐々木(KEK)、榎沢、作間(農工大)、一宮(神戸大)、辻(京大)、福永、小松(都立大)であった。このうち佐々木、作間、一宮、辻の4人は初参加である。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 μm 、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、図2)。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。第1回、第2回の実験では陽子エネルギーが50MeVしか利用できなかったが、今回は始めて70MeVの陽子ビームでの照射が行なえた。

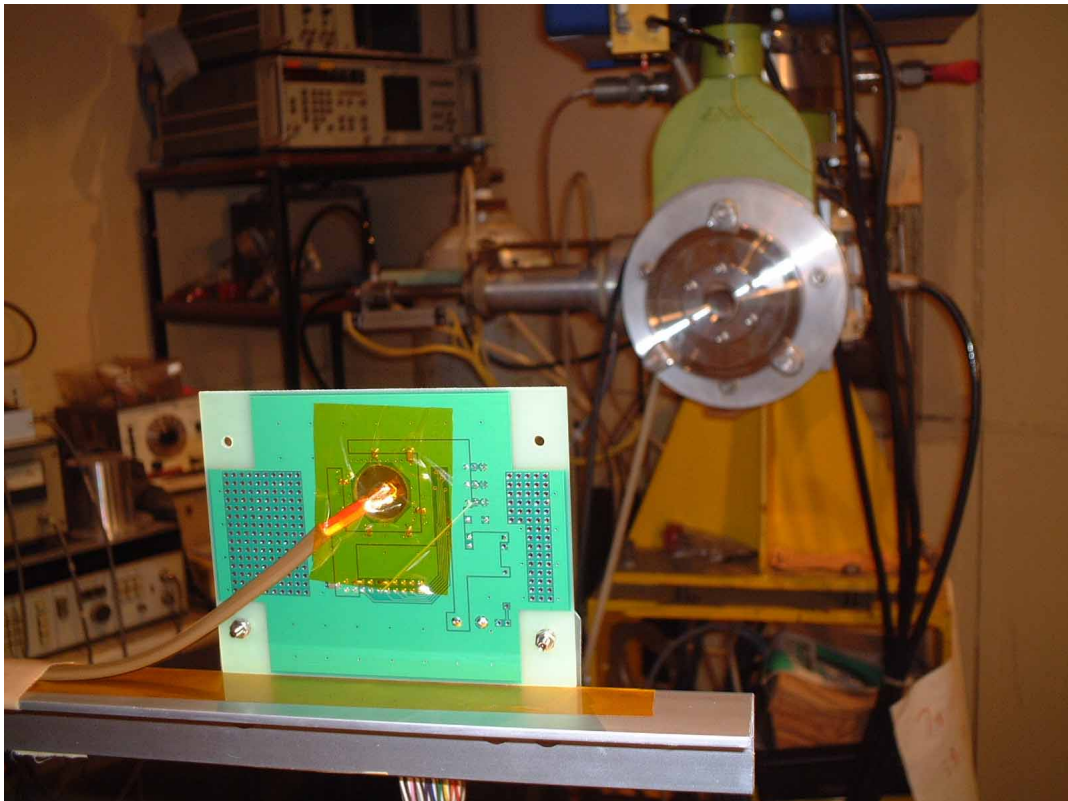


図1. 照射セットアップ(第2ターゲット室、No. 31-2 ビームライン)。
チップ裏面には熱電対 (Cu-コンスタンタン) を貼り付けた。

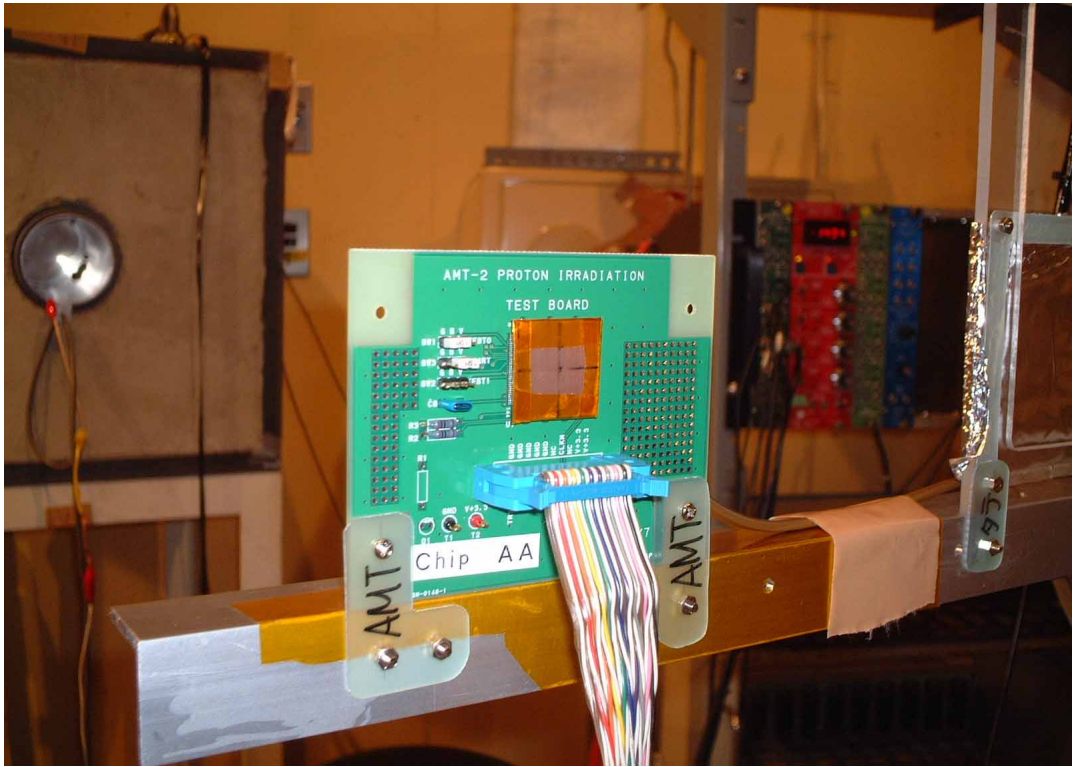


図 2. X-Y ステージに載った AMT 照射ボード。表面には 0.1mm Cu foil が貼り付けてある。

2.1. 測定手順

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 (図 3)。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。

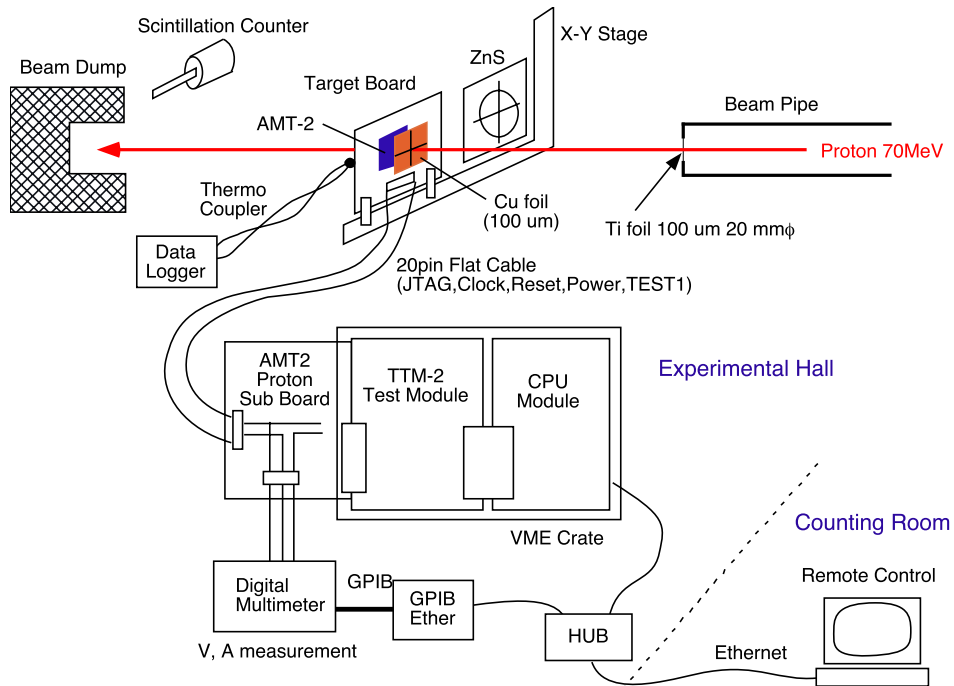


図 3. 測定セットアップ

今回も前回と同じく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が、BIST サイクルの停止位置を 2 ケ所設け (図 4)、メモリー内容が'0'の場合と'1'の場合の 2 通りを調べるようにした。試験の手順を図 5 に示す。

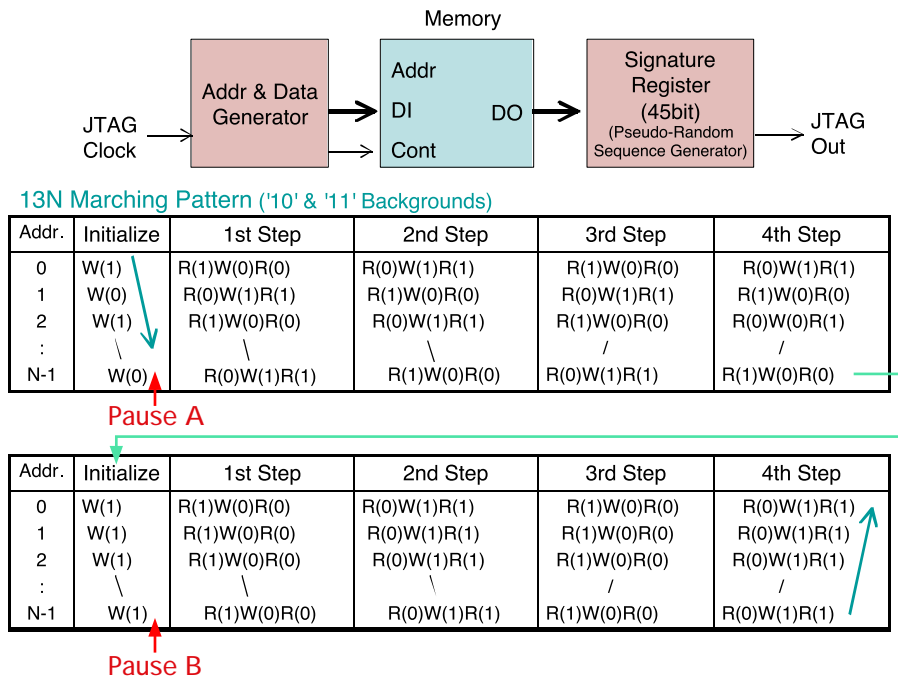


図 4. BIST サイクル。

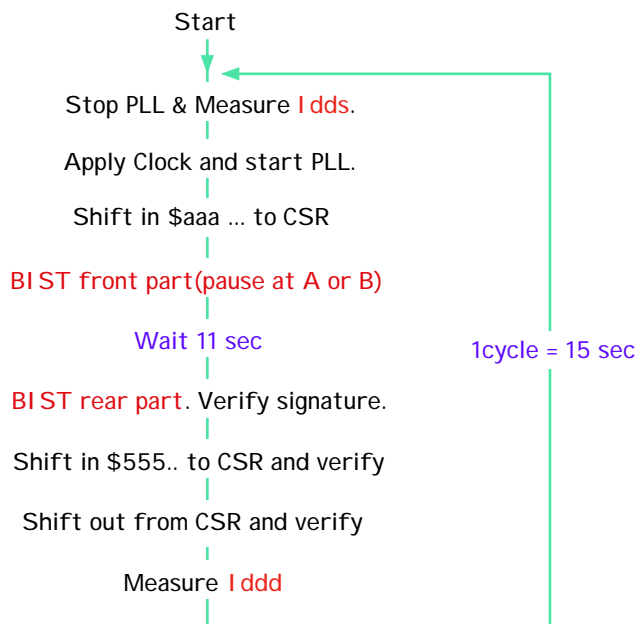


図 5. AMT-2 試験手順。(*: 1 サイクルが 15 秒になるように待ち時間は制御されている。)

2.2. 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 Cu 0.1 mm(99.99+%)である。この foil 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。

各フォイルは 25mm 角に切って照射し、照射後 Ge 検出器によりガンマー線スペクトルの測定を 1000 秒間

行った。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、Laboratory Equipment社のNMCA Win2000というPCソフトを使用した。

その後、フォイルを5.2mmφの穴を開けた厚さ5mmの鉛コリメータを通してGM管で相対強度を測定した(図6)。測定位置は5mm x 5mmのマス目に沿って行なった。当初、各片のアクティビティを計数時間を60秒で行なったが、照射終了からの時間が短かったことにより、始めの方に測定した場所と、後の方に測定した場所とでは崩壊による強度変化の影響が出ていることがわかった。それゆえ、最終日に再度測定し直した。但し、この際は放射線強度がかなり弱くなっていたので、弱いものに対しては測定時間を120秒とした。

又この後、馬場研の富士フィルム社製 Imaging Plate の機械(BAS-5000?, <http://www.fujifilm.co.jp/bio/>)が使用出来ることがわかり、急遽使用させていただき放射線強度分布の測定を行なった。



図 6. GM管でCu foilのガンマー線強度分布を計っているところ。

3. 実験結果

実験経過の概略を表1に示す。ビームは手前のISOLイオン源部に挿入されている10μmのハーバーフォイル(Co 42.5%, Cr 20%, Ni 13%, W 2.8%, Mo 2%, Mn 1.6%, C 0.2%, Be 0.04%)及び50μmのTi foilの影響のためか絞れないので、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(100μm)部でビームサイズを決める格好になっている。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。ZnS上で見たビームのプロファイルを図7に示す。

表 1。実験経過

日	時	内容
5/16	9:00	マシンタイムスタート。ビーム調整。
	15:30~	実験室へのビームトランスポート開始。ZnS でビーム確認。
	15:55	AMT-2 Chip AA 照射 (Ip=2nA @Beam Stopper)
	16:33	照射終了。
	18:37-19:23	HPT0 照射
	19:32-20:34	SLB Chip0 照射
	23:22-01:32	LVDS-0 RX/TX 照射
5/17	2:23-3:09	SLB Chip1 照射
	3:10-3:56	HPT1 照射
	4:37-5:20	SLB Chip2 照射
	5:34-6:15	HPT2 照射
	6:53-8:26	LVDS-1 TX/RX 照射
	9:29	AMT-2 Chip CC 照射 (Ip=2nA @Beam Stopper)
	10:05	照射終了。BIST エラー1 回あり(state A)。
	10:45	AMT-2 Chip DD 照射 (Ip=2nA @Beam Stopper)
	11:21	照射終了。
	12:14	AMT-2 Chip FF 照射 (Ip=2nA @Beam Stopper)
	12:52	照射終了。
	13:52	AMT-2 Chip GG 照射 (Ip=2nA @Beam Stopper)、BIST wait cycle を1つ後ろにずらす。
	14:52	照射終了。
	17:52-18:32	HPT1 照射。Ip=4 nA
	18:38-19:11	SLB Chip3 照射
	20:33-21:49	G-Link Board 0 照射
	22:21-23:11	G-Link Board 1 照射

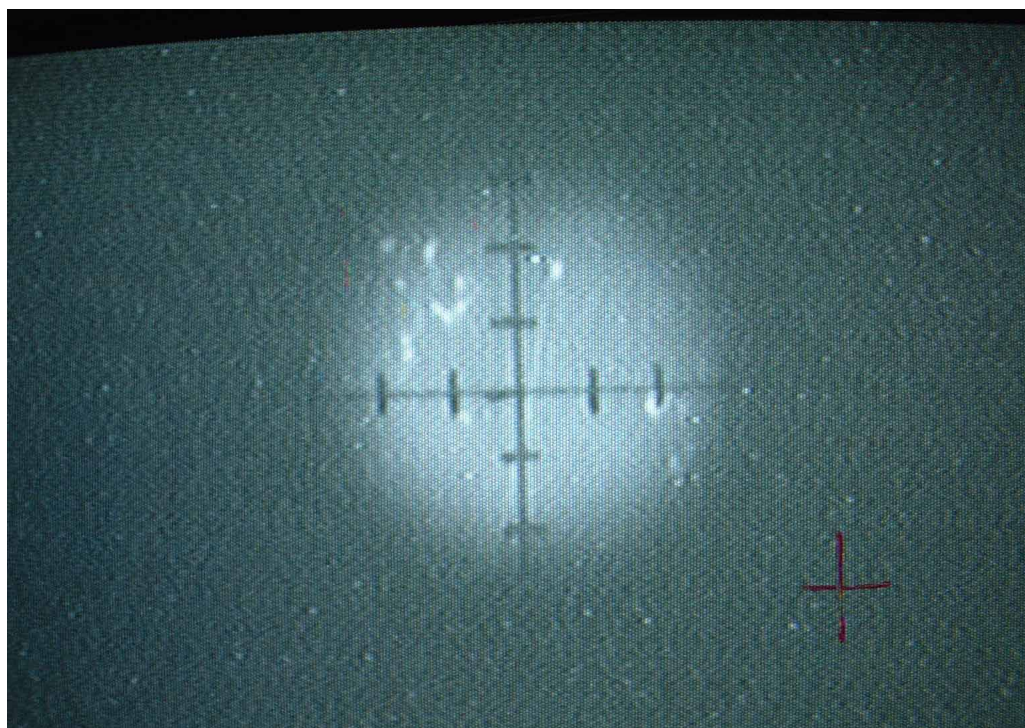


図 7. ZnS で見たビームプロファイル (1 目盛り 5 mm)。

3.1. Dosimetry

3.1.1. Ge 検出器のエネルギー/効率キャリブレーション

今回測定室に置いてあった、 ^{133}Ba 、 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{88}Y を標準線源として使用したが、このうち ^{88}Y は線源の強度が弱かったため使用出来なかった。今回は前回 dead time が大きすぎたという反省から dead time を 10%以下に押さえるように距離を決めた。

Appendix A に natural Cu への 70MeV proton 照射によって生成される主なガンマー線、生成断面積等を示す[2]。照射後の Cu foil のガンマー線スペクトルを図 8に示す。また、標準線源を使用した効率補正のデータを、指数関数でフィットした結果を図 9に示す。

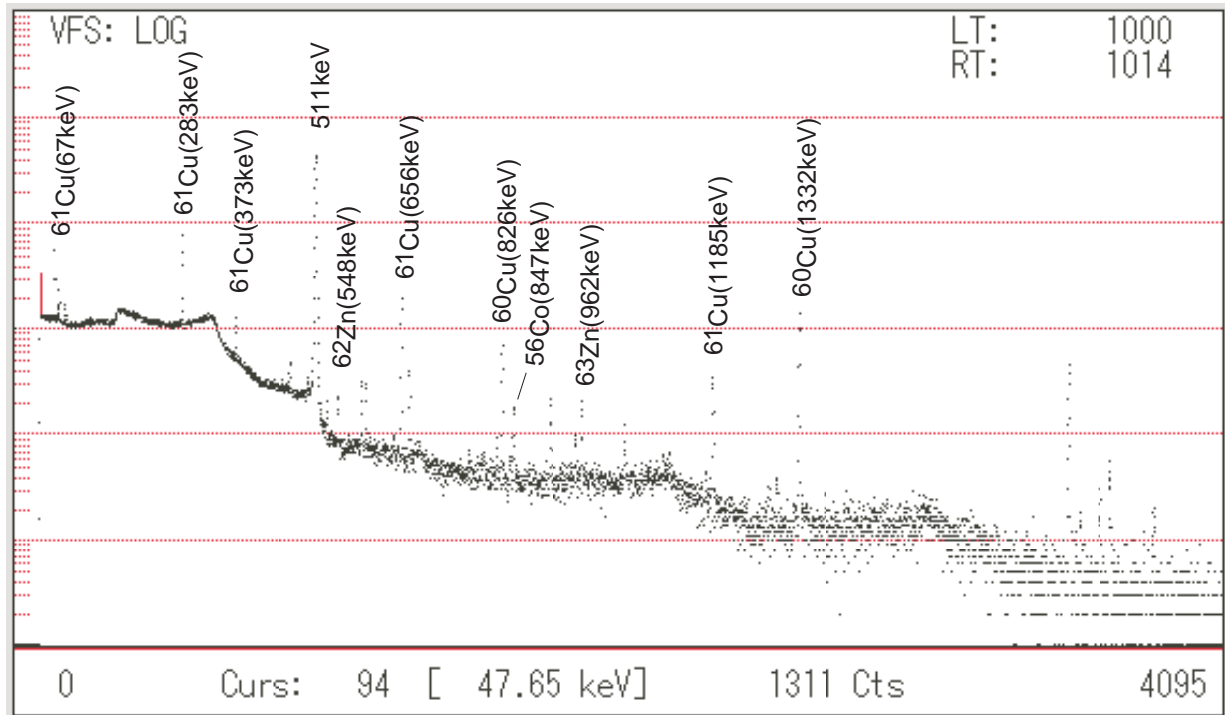


図 8 AMT-2 chip AA の Cu foil からのガンマー線スペクトル。

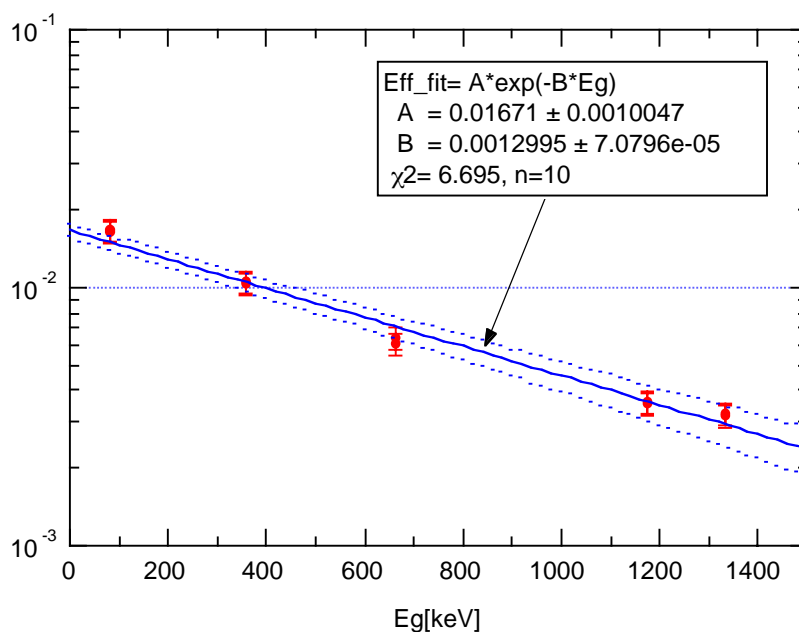
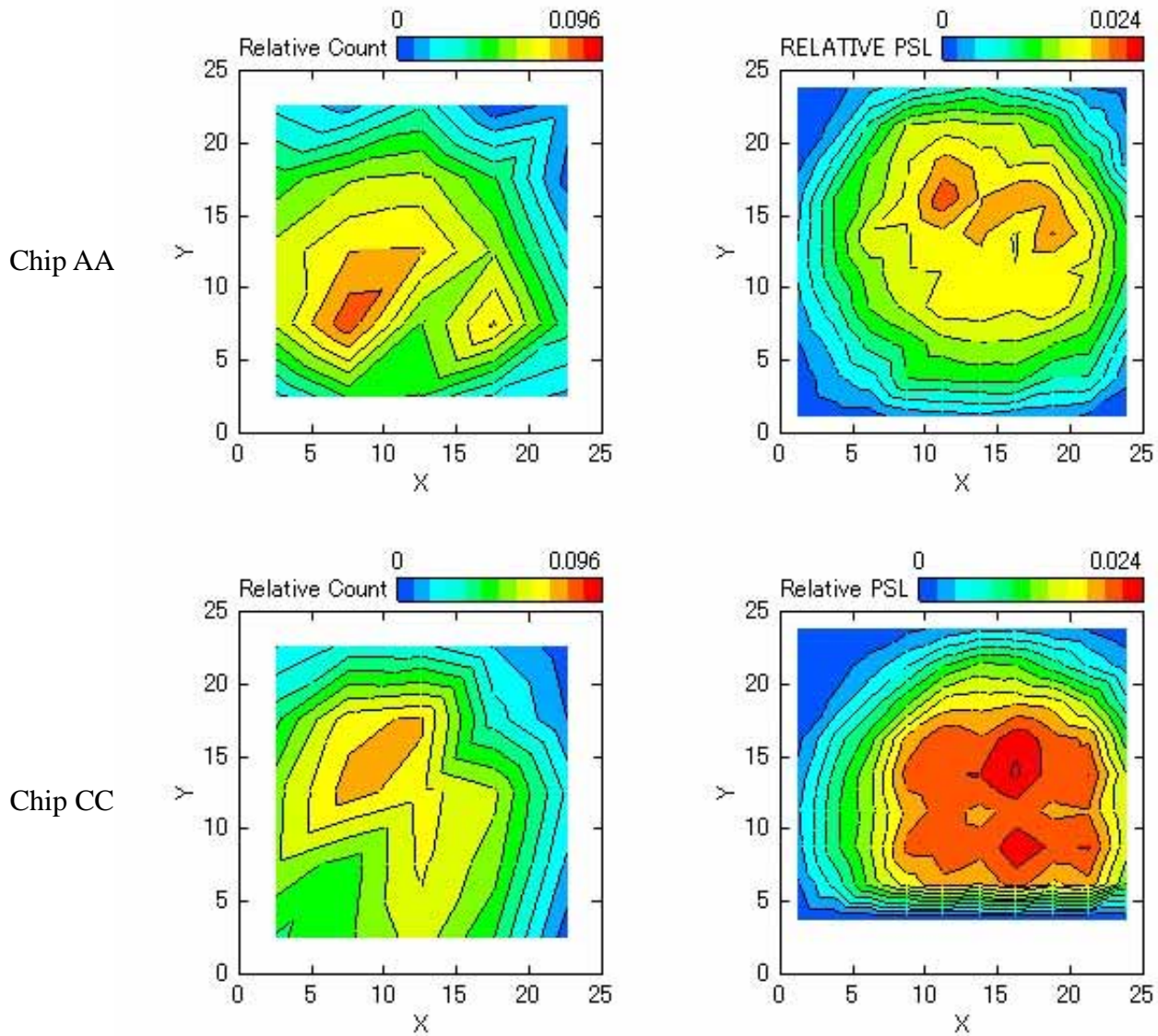


図 9. Ge 検出器の効率補正。

3.1.2. 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 25 点で GM 管で測定した。また、同じフォイルを Imaging Plate を使用しても測定した (図 10)。Imaging Plate で測定した分布は GM 管の物に比べて 180 度回転しているように見えるので、測定のサイに上下を間違えたか、表裏を間違えた可能性がある。AMT-2 のチップ面積は 6 mm 角なので、中央部の小片の値(0.07)を相対強度として使用する。



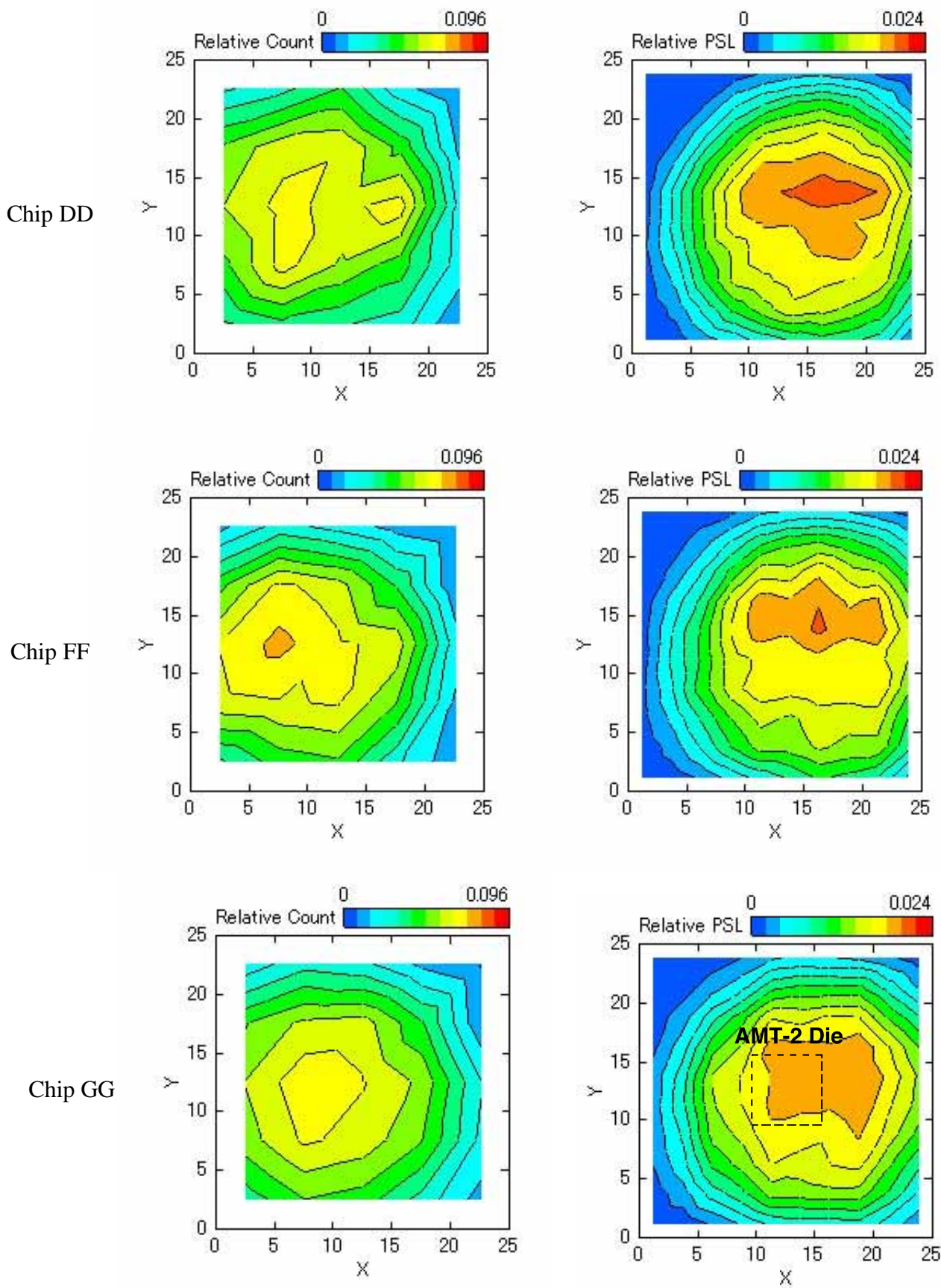


図 10. Cu 0.1 mm 厚のフォイルで測定した AMT-2 照射時のビームプロファイル(左側が GM 管、右側が Imaging Plate で測定したもの)。

3.1.3. 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 ϕ 、ターゲットの原子数を Nt 、有効反応断面積を σ_{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 σ_{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 70MeV 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 ρ 、原子量を A 、アボガドロ数を N_A として

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

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_γ は、測定ガンマー線への分岐比を Br 、検出効率を ϵ として

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

これに(2)式を代入して ϕ を求めると

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

となる。ただしここで求めた陽子フラックス ϕ は 2.5cm 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

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

である。ここで ϵ_r は前節で示した 5mm 角の小片の相対強度である。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図 11 示す。(Br, σ 等の値は Appendix A 参照)。なぜか Chip DD と FF の Fluence が他のものに比べて 5 倍近く大きくなっているのが見える。これはこれらのチップで使用した Cu のガンマー線強度のデータが 5 倍近く強いせいである。

ビームの強度や照射時間は他のものとあまり変わっていないことと、チップのリーク電流も同等であることから、これらのチップもほぼ同じ照射線量を受けていると考えられる。従って、ガンマー線の強度測定が間違っている可能性が高く、考えられる原因としては

- (1) 測定時間を長く取ってしまった、
- (2) フォイルを置く位置を間違えて近くに置いてしまった

の 2 つが考えられるが、(1) はデータに記録されている時間情報により排除される。従って残る可能性は(2)

であるが、5 倍の強度を得るためには距離が半分以下にならなくては行けないので、考えにくいですが、他の原因による説明も不明である。

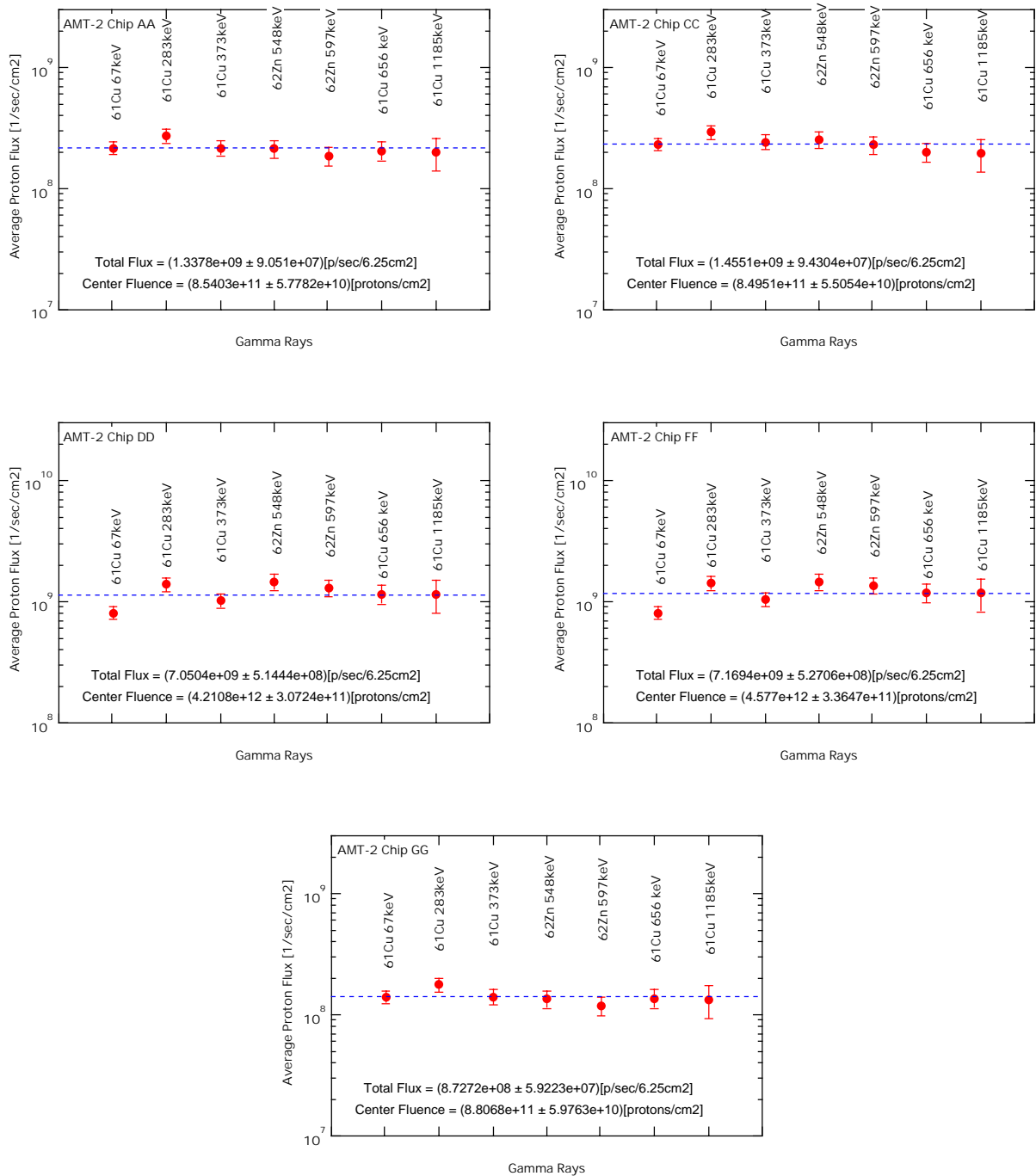


図 11。陽子フラックス

3.1.4. リーク電流と吸収線量

図 12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 200 mA を越え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。また図 14にはビームの ON/OFF と共にチップ温度が変化していく様子を示す。

一方、図 13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参考の為示す。

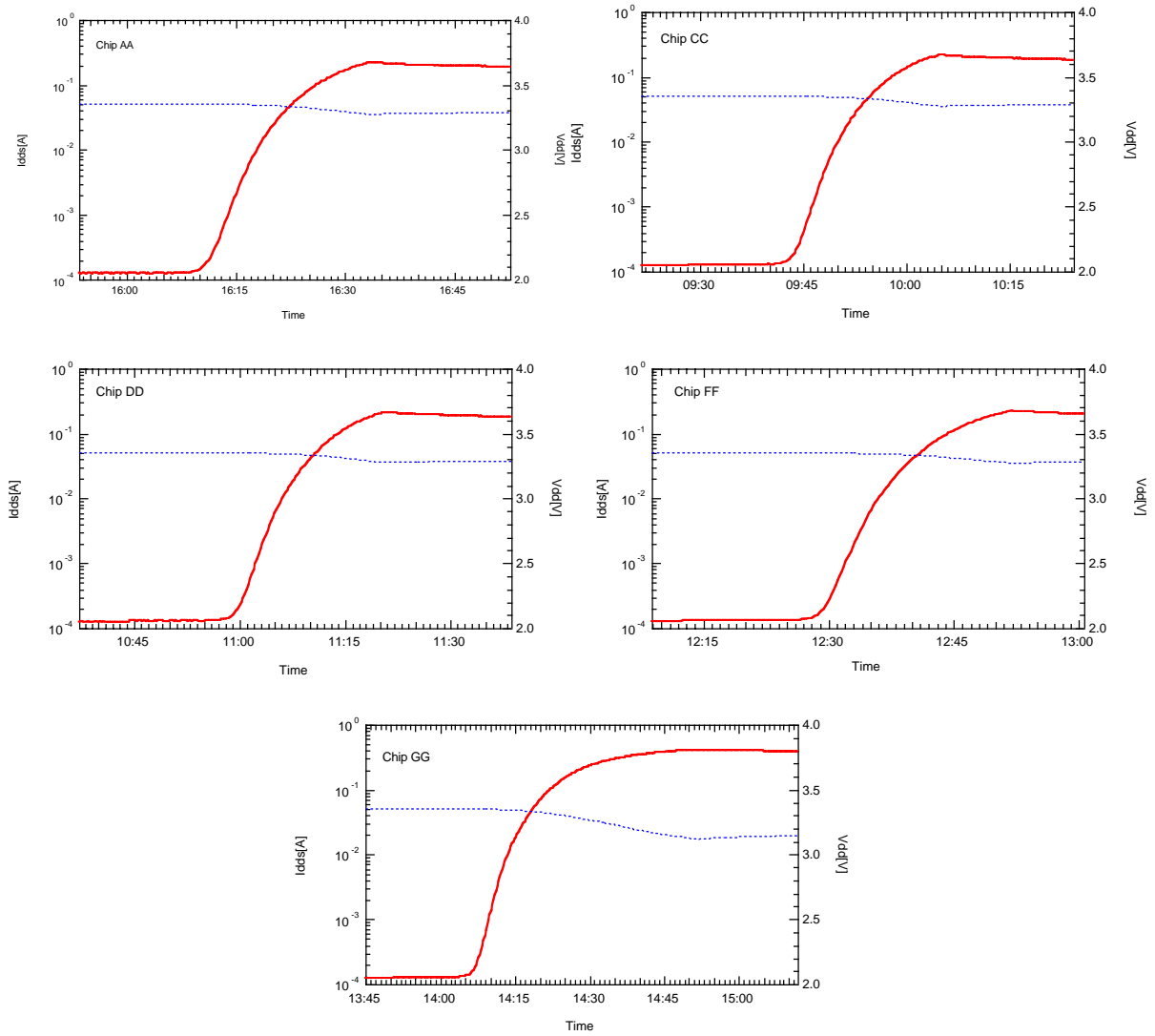


図 12. 陽子ビーム照射時の AMT-2 静的状態の電圧・電流値の変化。

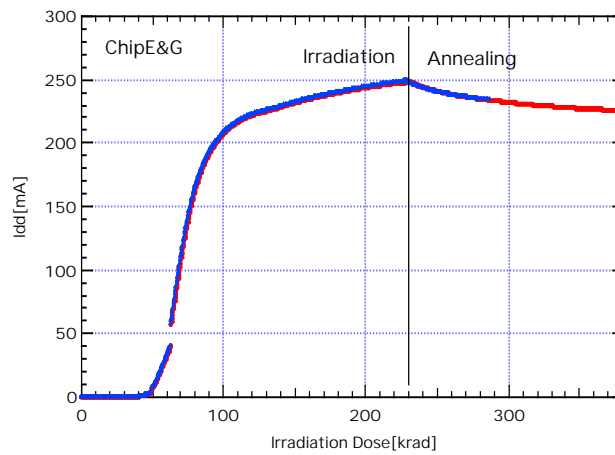


図 13. ガンマー線照射による AMT-2 の静的電流の変化(2001.8)。

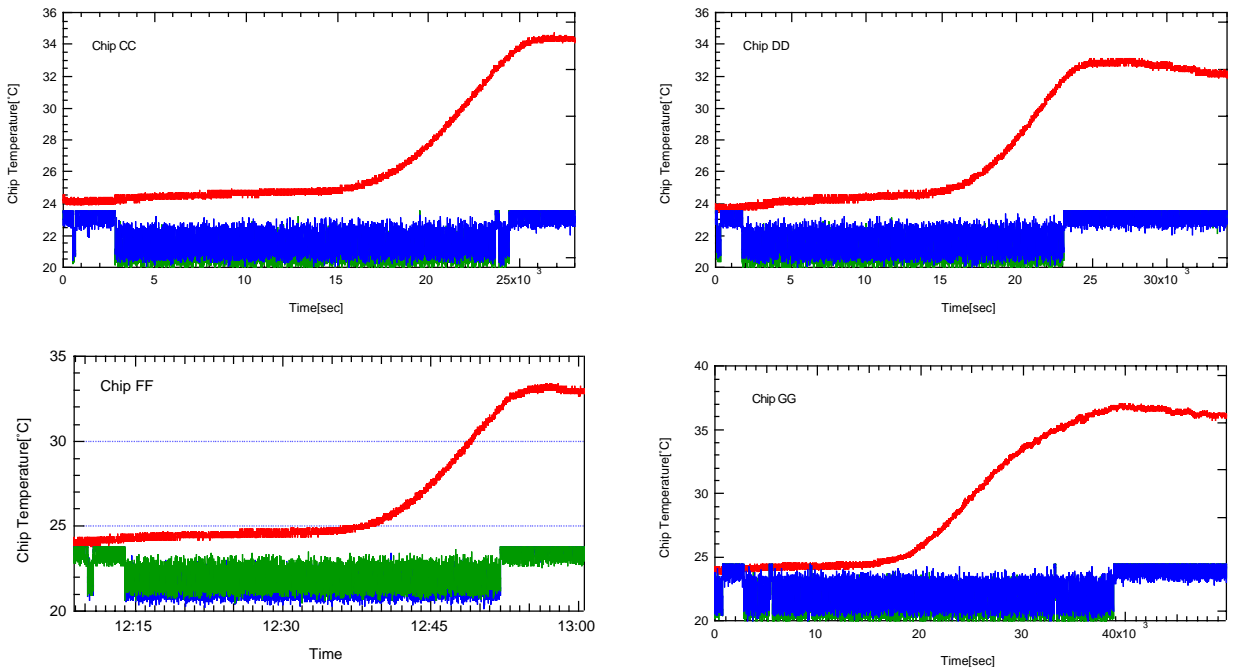


図 14. ビーム N/OFF とチップ温度の変化(Chip AA は未測定)

チップの受けた吸収線量 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、

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

のように求めることができる。以上の結果を表 2にまとめる。

表 2.陽子線量と吸収線量

	Ip @Beam Stopper	Irrad Start	Irrad Stop	Irrad Time (sec)	Ge meas start	Ge meas Stop	Ge meas Time (sec)
AA	~2 nA	5/16 15:55	16:33	2280	5/16 17:33	17:55	1000
CC	~2 nA	5/17 9:29:0	10:03:45	2085	5/17 11:09	-	1000
DD	~2 nA	5/17 10:45:01	11:20:34	2133	5/17 12:21	-	1000
FF	~2 nA	5/17 12:14:00	12:52:00	2280	5/17 13:52	-	1000
GG	~2 nA	5/17 13:52:01	14:52:04	3604	5/17 15:52	-	1000

3.1.5. SEU 断面積

今回は AA - FF の 4チップ中 SEU が観測されたのは Chip CC の BIST エラー 1 回のみであった。SEU のなかった物、1 回有ったものに対して 90% confidence level の上限値を使って SEU 断面積 σ_{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

$$\begin{aligned}
 \sigma_{SEU}(\text{Mem}) &< 2.44 / F / 11360 \text{ (cm}^2\text{/bit)} \quad \text{for 0 SEU} \\
 \sigma_{SEU}(\text{Mem}) &< 4.36 / F / 11360 \text{ (cm}^2\text{/bit)} \quad \text{for 1 SEU} \\
 \sigma_{SEU}(\text{CSR}) &< 2.44 / F / 180 \text{ (cm}^2\text{/bit)}
 \end{aligned}$$

計算結果を表 3にまとめる。ここで Effective Fluence は照射時間のうち SEU の試験に使われた時間が 15 秒サイクルのうち 11 秒間であったことを考慮して計算した実行線量である。

表 3. SEU 断面積

	Proton Fluence (1/cm ²)	Effective Fluence 11/15	Radiation Dose (from Dosimetry)	No. of SEU in Memory	$\sigma_{\text{SEU}}(\text{Mem})$ (cm ² /bit)	No. of SEU in CSR	$\sigma_{\text{SEU}}(\text{CSR})$ (cm ² /bit)
AA	8.5x10 ¹¹	6.2x10 ¹¹	136 krad	0	< 3.5x10 ⁻¹⁶	0	< 2.2x10 ⁻¹⁴
CC	8.5x10 ¹¹	6.2x10 ¹¹	136 krad	1	< 6.2x10 ⁻¹⁶	0	< 2.2x10 ⁻¹⁴
DD	8.5x10 ¹¹	6.2x10 ¹¹	136 krad	0	< 3.5x10 ⁻¹⁶	0	< 2.2x10 ⁻¹⁴
FF	8.5x10 ¹¹	6.2x10 ¹¹	136 krad	0	< 3.5x10 ⁻¹⁶	0	< 2.2x10 ⁻¹⁴
GG	8.8x10 ¹¹	6.5x10 ¹¹	141 krad	0	< 3.3x10 ⁻¹⁶	0	< 2.1x10 ⁻¹⁴
AA-FF		2.5x10 ¹²		1	< 1.5x10 ⁻¹⁶	0	< 5.4x10 ⁻¹⁵

MDT 位置での 20MeV 以上のハドロンの fluence(SRLsee)は 10 年間で、8x10¹⁰ h/cm²/10y なので[1]、Memory 中で SEU の起こる確率は 1.3x10⁻⁵ (1/bit/10year)となる。MDT 全体で 380k ch, 16k chip あるので、240 SEU/MDT/year 以下であり、実際上問題無いレベルと言える。また、制御レジスタ(CSR)に関しても、130 SEU/MDT/year 程度の SEU である。

Soft SEUs の頻度は、

$$\begin{aligned} \text{Soft SEUf} &= (\text{Soft SEUm} / \text{ARL}) \times (\text{SRLsee} / 10^8 \text{ s}) \times \text{SFsim} \\ &= (1 / 2.5 \times 10^{12}) \times (2 \times 10^{10} / 10^8) \times 5 \\ &= 4.0 \times 10^{-10} \text{ [upset/sec/chip]} \end{aligned}$$

MDT で使用される AMT チップの総数 (16,000) を掛けると

$$\text{Soft SEUf} = 6.4 \times 10^{-6} \text{ [upset/sec/MDT]}$$

これは実用上充分小さい値であると見なせる。

また、全てのチップに対して実験中ラッチアップは観測されなかった。

Reference

- [1] Y. Arai, AMT-2 SEE Test Report, June 6, 2002.
 [2] 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	σ (mb) @68.5MeV	$T_{1/2}$	E_γ (keV)	γ Abundance (%)	Comment
62Zn	7.11+-0.60	9.26 h	507.5	14.9	(observed)
			548.4	15.6	observed
			596.7	25.7	observed
63Zn	10.5+-1.4	38.1 m	669.8	8.4	observed
			962.1	6.6	observed
			1412	0.76	observed
65Zn	3.57+-0.30	244.1 d	1115.5	50.75	
60Cu	17.7+-1.7	23.2 m	826.4	21.7	observed
			1332.5	88.0	observed
61Cu	75.5+-6.2	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	53.1+-5.1	12.7 h	1345.8	0.48	observed?
57Ni	1.46+-0.12	1.503 d	127	12.9	observed
			1377.6	77.9	observed
			1757	7	observed?
			1919	14.7	observed
56Co	12.7+-1.0	77.7 d	846.8	99.9	observed?
			1037	14.0	
			1238	67.5	
			1771	15.7	
57Co	33.5+-2.7	271.77 d	122.1	85.5	
			136.5	11.1	
58Co	39.6+-3.2	70.916 d	810.8	99.5	observed?
60Co	9.77+-0.79	5.271 y	1173.2	99.5	
			1332.5	99.98	
59Fe	0.694+-0.067	44.496 d	1099.3	56.5	observed?
			1292	43.5	observed?
54Mn	3.98+-0.32	312.2 d	834.8	99.98	