

SII#10a R-T 測定 & X 線パルス取得実験 with SSA Amp. (TMU 2001 年 10 月中旬)

広池 哲平

2001 年 11 月 9 日

概要

セイコーインスツルメンツの素子 #10a(吸収体無し)を組み込み R-T 曲線を得た。超伝導転移温度は 290 mK とこれまでの素子に比べて高めではあるが、転移幅が狭く、 $\alpha \sim 2000$ と高い値を示した。今回の X 線照射実験では、吸収体を接着せずにカリメータを通し、直接 TES に照射させた。吸収体が無いことから、X 線パルスの rise time は早くなることが予想され、それによりパルスハイトが大きくなることが期待される。また、S/N が良くなることでベースラインの揺らぎは相対的に小さくなり、エネルギー分解能の向上が期待された通り、今までの記録を上回る成果を挙げることに成功した。熱浴温度 130 mK に於いて、エネルギー分解能が 60 eV、ベースラインの揺らぎは 20 eV と改善された。より低温にて動作可能である、転移温度 100 mK タイプの素子の完成が待たれる。

1 SII#10a

1.1 特徴

カリメータ素子 #SII 10a は、type C に分類される素子で、TES の膜圧は Ti50/Au60 となっており、サイズは 0.5 mm × 0.5 mm である。Ni 配線が重なっている部分があるため、実効的な TES の大きさは 0.35 mm × 0.5 mm である。写真とサイズを図 1 に示す¹。

type	size [mm × mm]	e.g.
A	1.0 × 1.0	-
B	0.5 × 0.5	SII 6
C	0.35 × 0.5	SII 7,9,10

表 1: SII カリメータを形状で分離

膜圧 [Å] Ti/Au	e.g.
40/120	SII 6,7,9
50/60	SII 10

表 2: SII カリメータを膜圧で分離

1.2 熱容量

SII#10a の各部サイズとその熱容量の見積もりを表 3 に示す。ただし、Membrane(SiNx) については Si として計算しており、Nb 配線については微小であるので寄与は小さいとし無視している。

¹この分類されたタイプごとの詳細なサイズについては、このレポートの一番最後に 藤本さんの作成した size.pdf を張り付けているので、それを参照。

Parameter	Membrane	Ti	Au
縦 [mm]	1.4	0.5	0.5
横 [mm]	0.6	0.5	0.5
厚さ [nm]	10^3	50	60
格子比熱 C_s [J/cm ³ /K]	$6.03 \times 10^{-7} \times T^3$	$2.47 \times 10^{-6} \times T^3$	$4.23 \times 10^{-5} \times T^3$
電子比熱 C_e [J/cm ³ /K] (超伝導時)	0	$3.15 \times 10^{-4} \times T$ $1.12 \times \exp(-604.8/T)$	$6.74 \times 10^{-5} \times T$
熱容量 [J/K] (Ti 常伝導時)	$4.27 \times 10^{-13} \times T^3$	$3.09 \times 10^{-14} \times T^3$ $(+3.94 \times 10^{-12} \times T)$	$6.35 \times 10^{-13} \times T^3$ $+1.01 \times 10^{-12} \times T$

表 3: SII #10a の各部サイズと熱容量

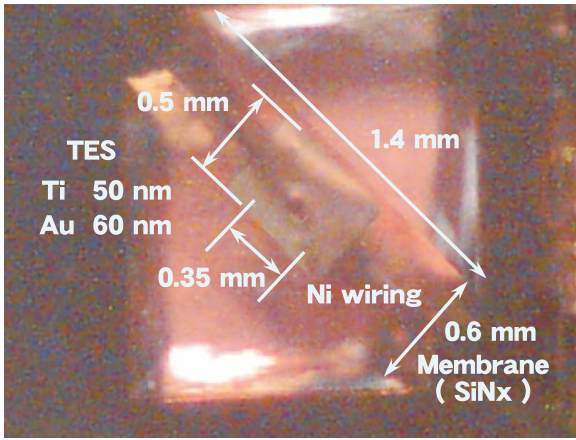


図 1: SII #10a 顕微鏡写真

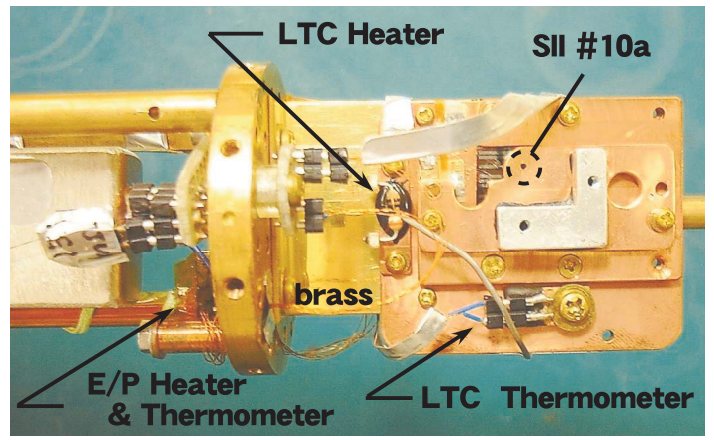


図 2: $R-T$ 測定時セットアップ

2 R-T 特性

2.1 測定結果

9月中旬、都立大にて希釈冷凍機に組み込み $R-T$ 特性を調べた。組み込みの様子を図2に示す。測定レンジを、 $20 \Omega-20 \mu V$ 、 $20 \Omega-60 \mu V$ 、 $2 \Omega-20 \mu V$ 、 $200 \Omega-20 \mu V$ 、の4通りで測定したところ、この素子は転移幅が以上に狭い為、有意な測定が可能だったのは $20 \Omega-20 \mu V$ 、 $200 \Omega-20 \mu V$ 、のレンジのみであった。結果を図3に示す。

$R-T$ 曲線を『Femri 分布関数 \times 一次関数 + オフセット』として、抵抗値を温度の関数として表す。

$$R = \frac{1}{e^{b(a-T)} + 1} \left(\frac{T}{c} + d \right) + e \quad (1)$$

この関数を $R-T$ Curve にフィットさせて得られたパラメータを表4に示す。また、各種パラメータを表5にまとめて示す。 a は TES の超伝導転移温度 T_c を表しており、 e はオフセット抵抗を表している。測定結果よりある測定点と、その前後の温度での測定値の、合計3点を通る2次曲線を求めてやり、その真ん中の測定点での接線の傾き dR/dT を求め、

$$\alpha \equiv \frac{d \ln R}{d \ln T} = \frac{T}{R} \frac{dR}{dT} \quad (2)$$

として α をそれぞれの測定点で求めた。 $R-T$ プロットと合わせて図5に示す。横軸は LTC 温度 (mK)、縦軸は TES の抵抗値 (mK) と α (無次元量) を重ねて示している。点線は $R-T$ 曲線を『Femri 分布関数 \times 一次関数 + オフセット』としてフィットしたものであり、実線はその式を上の式に代入し α を求めたものである。

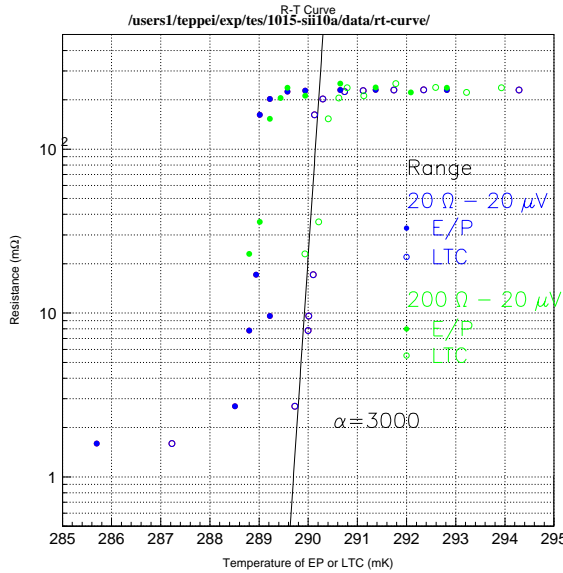


図 3: SII #10a $R - T$ Curve

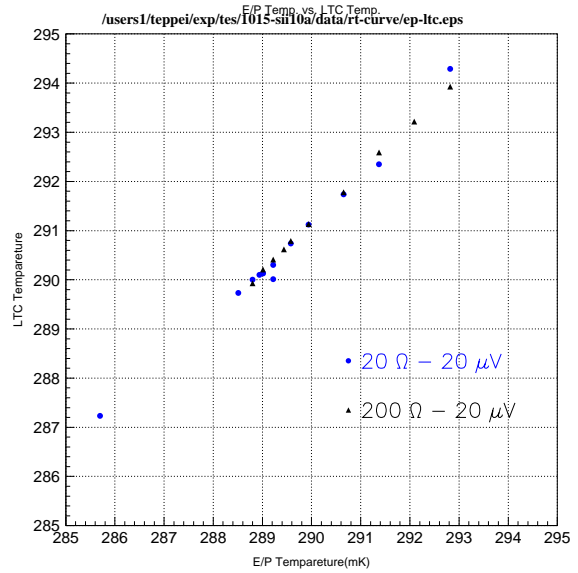


図 4: E/P と LTC の温度相関図

測定レンジ	20 Ω-20 μV
a	290.12
b	133.23
c	0.2303
d	1049.5
e	6.6999

表 4: フィットさせた際のパラメータ

素子の名称	SII #10a
吸収体	無し
残留抵抗 R_0 [mΩ]	230
オフセット抵抗 [mΩ]	7
転移温度 T_c [mΩ]	290
転移幅 ΔT_c [mΩ]	~ 0.3

表 5: $R - T$ 特性パラメータ

2.2 熱容量

超伝導転移をする Ti について熱容量を考える。電子比熱の寄与は、抵抗値を担っている部分が有していると考え、電子比熱による熱容量は表 3 中の値と残留抵抗 ($R_0 = 230$ [mΩ]) を用いて、

$$C_{electron} = 3.94 \times 10^{12} \frac{R_{TES}}{230 \times 10^{-3}} [J/K] \quad (3)$$

として表せる。これを用いて横軸に温度、縦軸に熱容量を示したのが図 6 である。これより、X 線エネルギー E を吸収した際の温度上昇 ΔT を求める。動作温度を T_{min} とした際には、

$$E = \int_{T_{min}}^{T_{min} + \Delta T} C(T) dT \quad (4)$$

と書ける。動作温度 290.109 mK とした際に Mn K α (5.9 keV) を吸収したとすると、カロリメータの温度上昇 $\Delta T \sim 0.01$ [mK] である。図 7 はその積分範囲を示している。

2.3 考察

この素子の $R - T$ 特性からわかる特徴としては、今までの SII 素子と比べて、

- 残留抵抗が大きい。
- 超伝導転移温度が高めである。

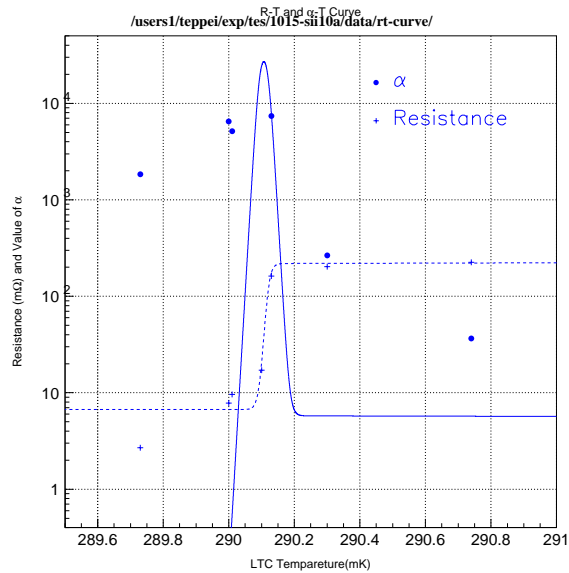


図 5: $R - T$ Curve & Value of α

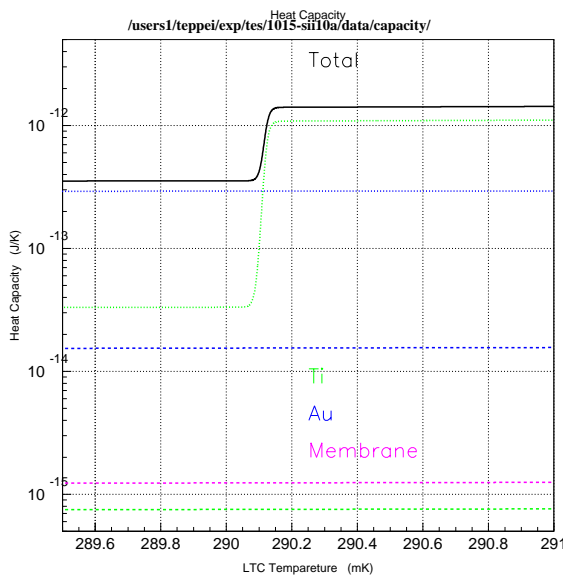


図 6: 熱容量の温度依存性

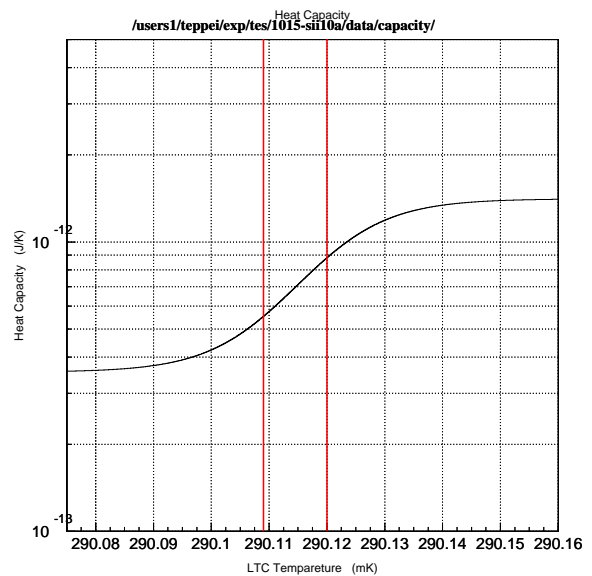


図 7: 動作点とカロリメータの反応

- 超伝導転移幅が小さい。 α が大きい。

などが挙げられる。残留抵抗が大きいという点については、C type (TES が小さい) の中でも膜圧が薄い為抵抗値が高いということで理解できる。

しかし、他の転移温度・転移幅などの要因については簡単には理解ができない。考えられる可能性をいくつか挙げてみる。

まずは転移温度について、Ti50/Au60 としたことで予想される転移温度は、図 8 を見る限りでは ~ 200 mK となるが、測定からは 290 mK という少し高め値が得られた。 $R - T$ Curve が鋭い Edge を持つことから、合金的な振舞はしていないことがわかる。SII での最近の製膜の際、不純物 (Cu・インジウム In) が含まれるようになってきた²こ

²しかし最新の情報によると、SII にて元素分析を行った結果、不純物の存在は優位には現れなかった。

とから考えると、Ti の転移温度 0.39 K に対し In は 3.4 K であり、その影響があったために予想よりも大きい転移温度になったと考えられる。次に転移幅について考えてみる。不純物が含まれている可能性が高いにもかかわらず、 $R - T$ Curve が鋭いのはなぜだろうか。膜圧を薄くしたことで、製膜にかかる時間が少なくなり、メンブレンにかかるテンションが少なくなり、理想的な結晶構造を形成することができたということの説明ができないだろうか。または、不純物の混合が良い方向に働き転移幅を小さくしたのかもしれない。しかしながら SII の製膜装置の Ti ターゲットを新しいものに変更後、同じ素子を作ってみないとなんとも言えないのが現状である。

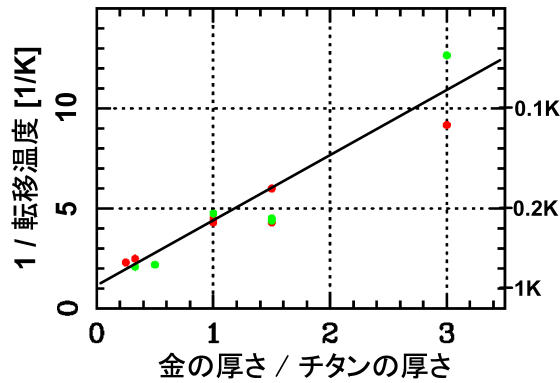


図 8: 転移温度と膜圧の関係

3 X線照射実験

10月中旬 X線照射実験を行った。今回は SII より 0.2 ϕ サファイアコリメータを借りて Fe55 線源からの X線をコリメートするセットアップになっている。

3.1 ETF・Pluse Height・Noise Property

熱浴温度 (E/P の温度) 240 mK、130 mK に於いて input 電圧を減少させながら、Tektronix Ocsilloscope にて DC レベルの変化をみた。パルスハイトは、YOKOGAWA Ocsilloscope にて測り、ノイズは FFT Analyzer を用いてフラットとなる部分の値を読んだ。測定器のグランド周りの模式図を図 9 に示す。

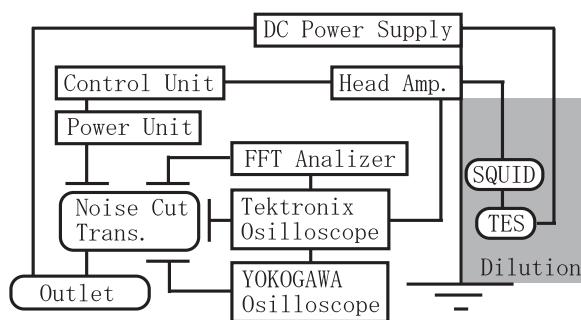


図 9: グランド周りの模式図

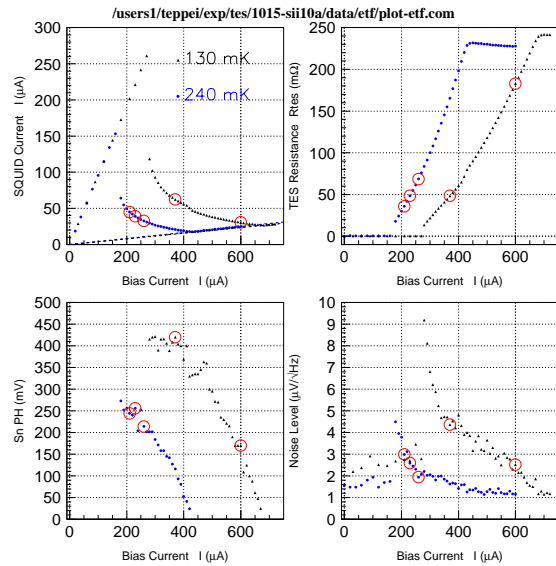


図 10: バイアス依存性

熱浴温度を 240 mK、130 mK の両方について横軸をバイアス電流とし、縦軸には SQUID に流れ込む電流 (TES を流れる電流)・TES の抵抗・パルスハイト・ノイズレベルをそれぞれ表したのが図 10 である。ノイズに関して横軸に TES の抵抗値を取ったものが図 11 であり、それを横軸を対数にとったものが図 12 である。温度によって抵抗依存性も異なり、なかなか原因の特定はできなそうである。

丸印は X線照射実験を行った動作点を示している。図 13 は縦軸に S/N (パルスハイトをノイズレベルで割ったもの)を表している。

また、横軸には同じようにバイアス電流を、縦軸に TES の発熱量を表したのが図 14 である。TES の発熱量と低温熱源との熱平衡状態が動作点となるわけだが、より安定に動作させるためには、この図のプラトー域で使用するのが良いと思われる。

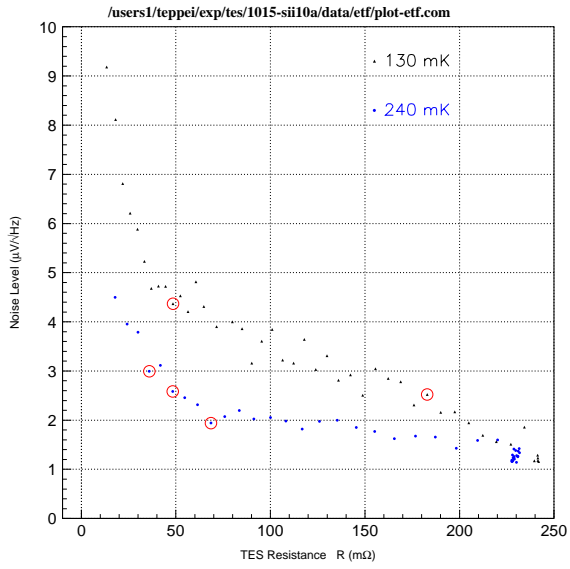


図 11: TES Resistance (Linear) vs. Noise Level

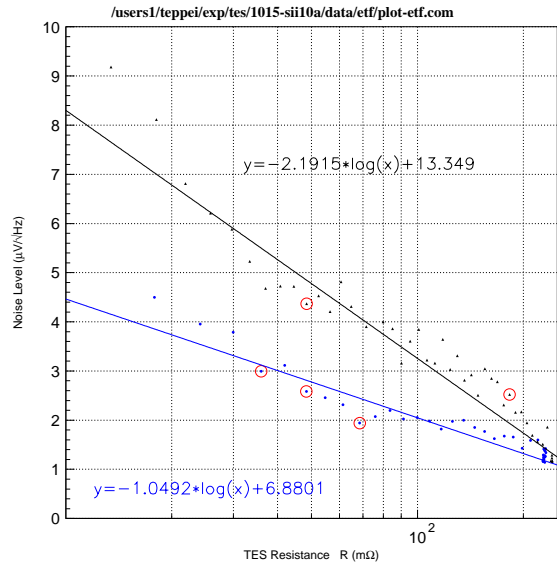


図 12: TES Resistance (Log.) vs. Noise Level

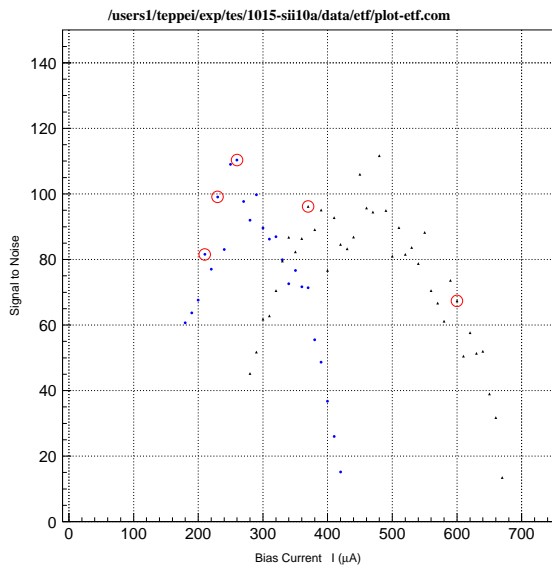


図 13: Signal to Noise

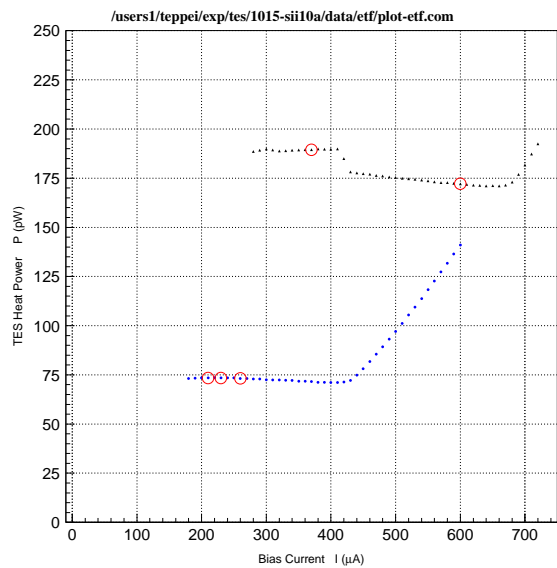


図 14: TESの発熱量

3.2 X線照射実験

YOKOGAWA Oscilloscope を用いてデータを取得した。熱浴の温度を 240 mK、130 mK の 2 つのケースで、それぞれ S/N の良いところを動作点とさせて X 線パルスデータを取得した。それぞれの動作点に於いて、X 線パルスイベントを AC と DC とで 2 チャンネル同時に 170 カウントで 1 セットとし、6 セットづつデータを取得した。ノイズについては、1 チャンネルのみとし 500 kHz のフィルターをかけて、Record Length 10k として 340 カウントを 1 セットとし 3 セット取得した。また、ノイズに関しては、熱浴温度 240 mK バイアス電流 260 μA の点と、熱浴温度 130 mK バイアス電流 370 μA の点については、それぞれ 50 kHz、5 kHz のフィルターにて各々 Record Length を下げてデータの取得を行った。

動作点のパラメータを表 6 に示す。温度に関しては、動作点の抵抗値は求めることができたので、前にでてきた $R - T$ Curve をフィットした式を用いて求めている。

熱浴温度 [mK]	240			130	
バイアス電流 [μA]	210	230	260	370	600
TES 抵抗 [$\text{m}\Omega$]	33.2	44.5	63.2	44.7	169
動作点温度 [mK]	290.105	290.109	290.112	290.109	290.129

表 6: X 線照射実験 動作点パラメータ

3.3 熱浴温度 240 mK

3.3.1 バイアス電流 210 μA

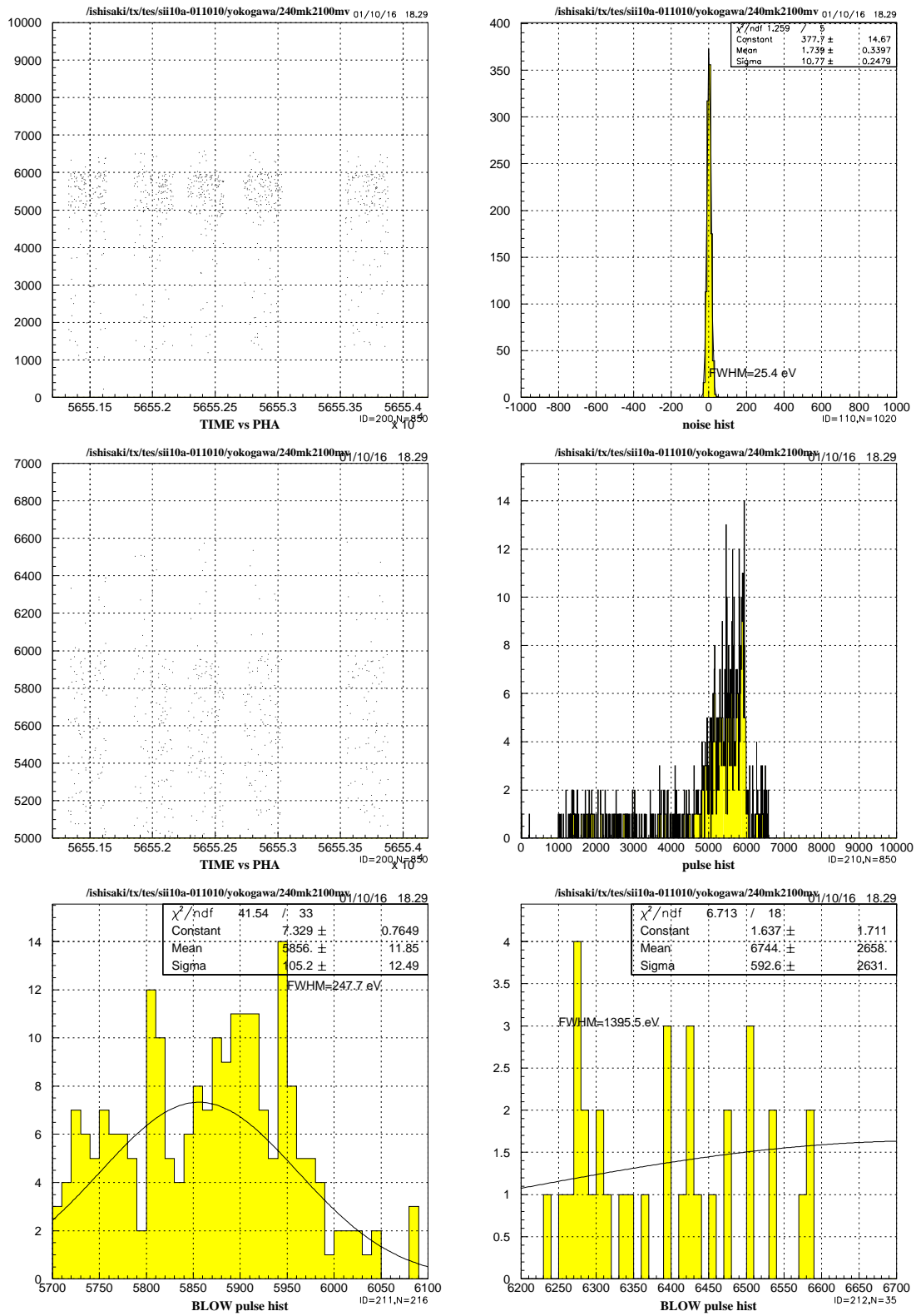


図 15: 熱浴温度 240 mK バイアス電流 210 μA

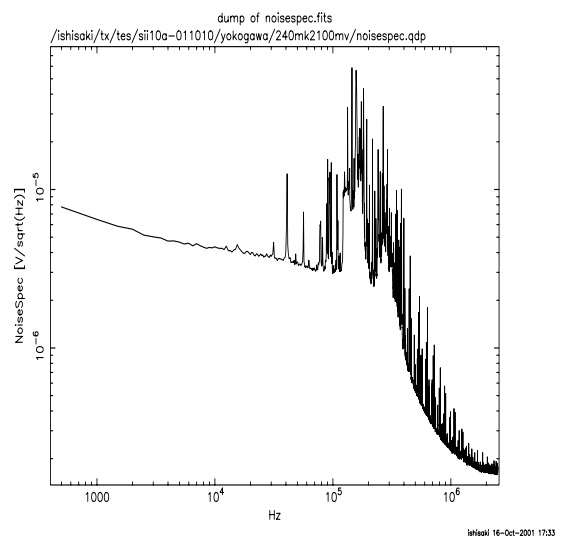
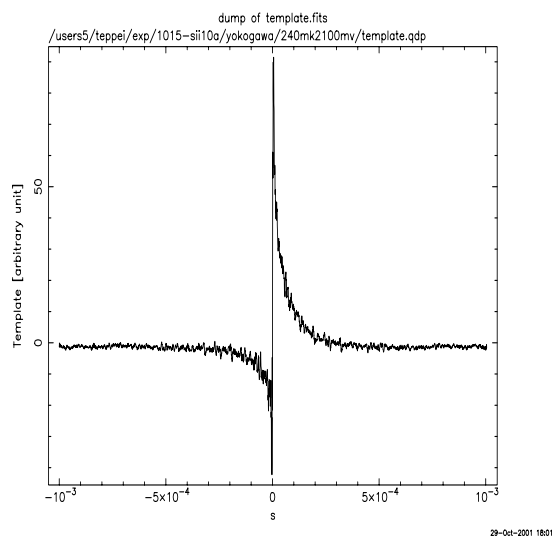
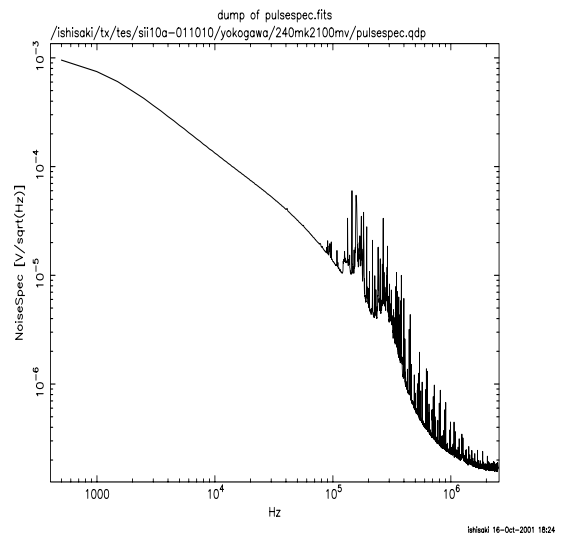
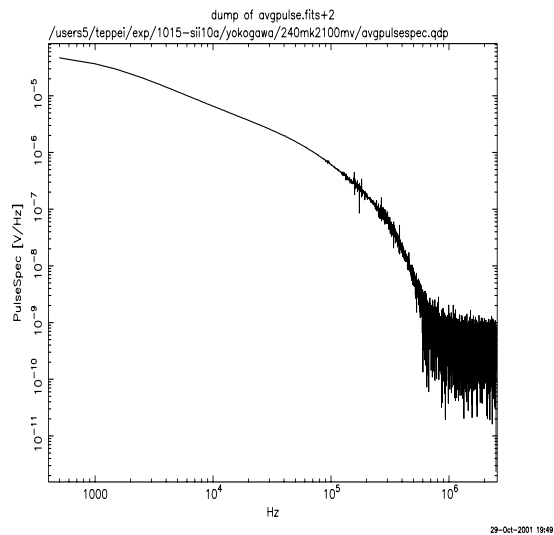
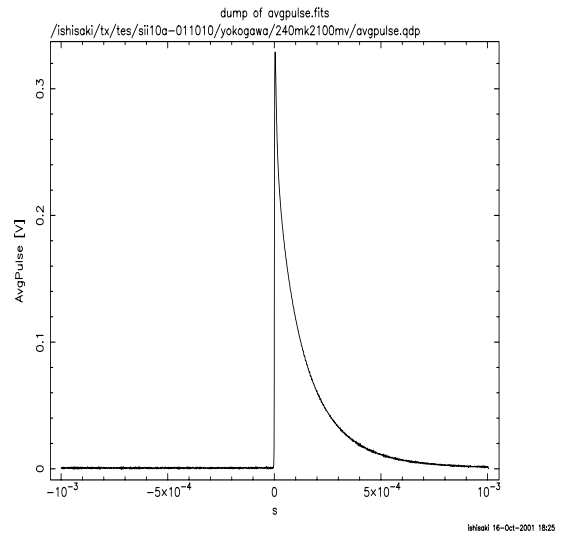
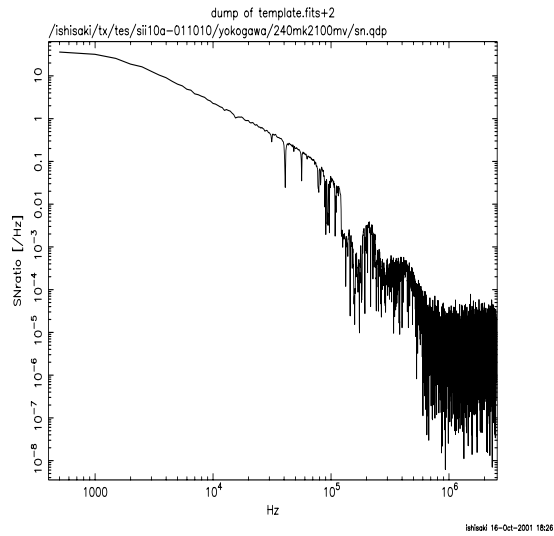


図 16: 熱浴温度 240 mK バイアス電流 210 μ A

3.3.2 バイアス電流 230 μA

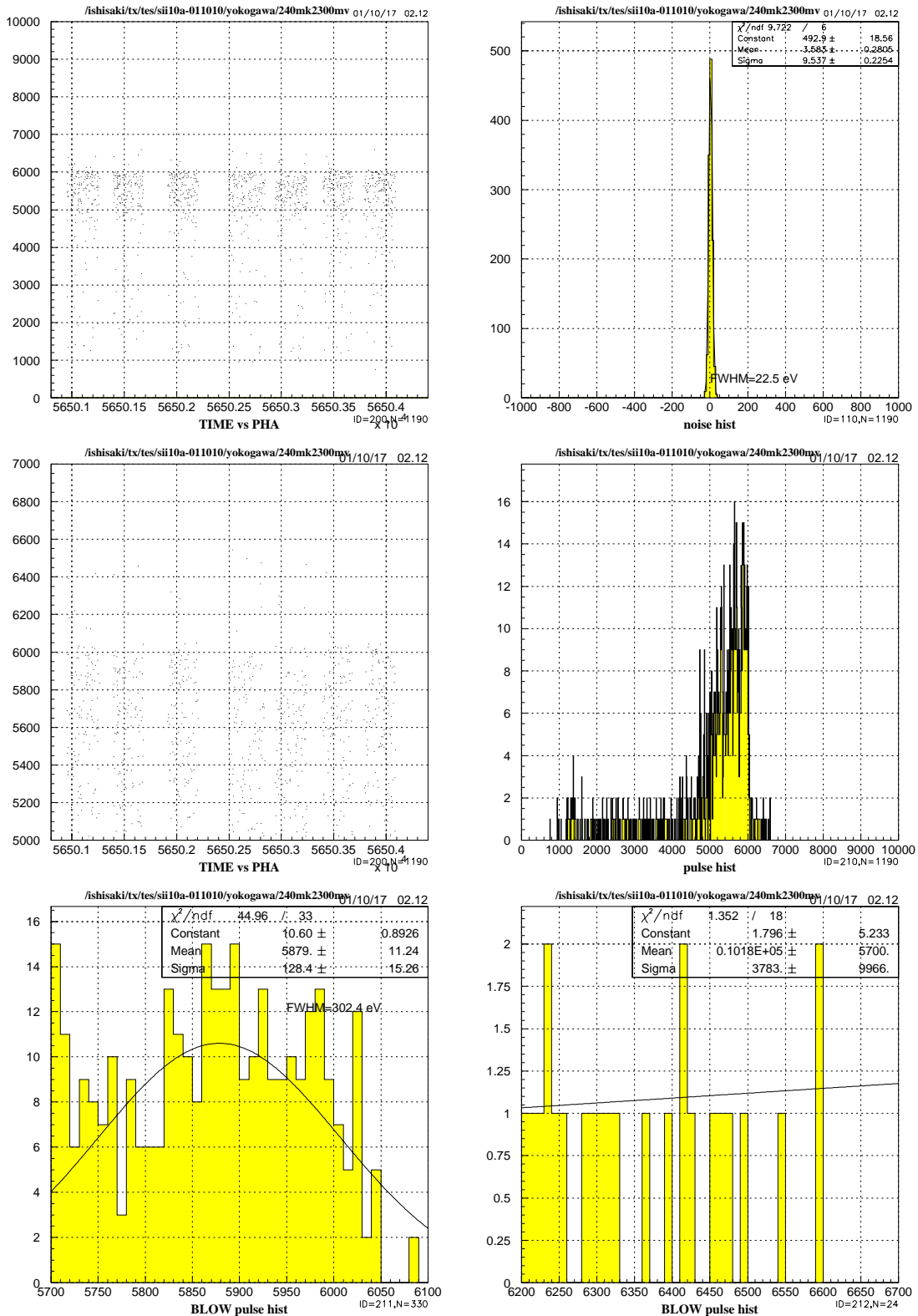


図 17: 熱浴温度 240 mK バイアス電流 230 μA

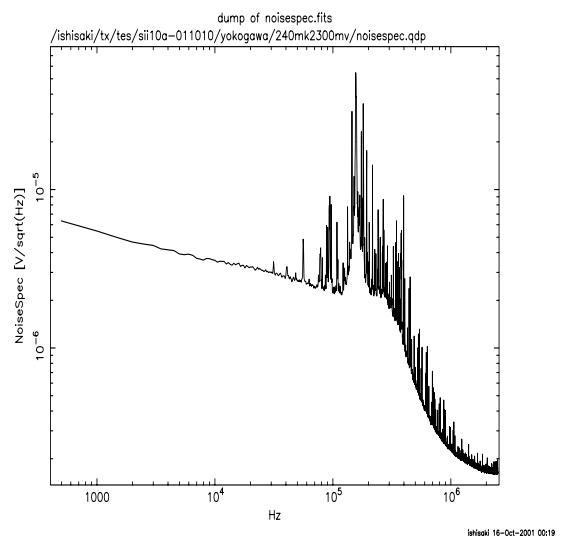
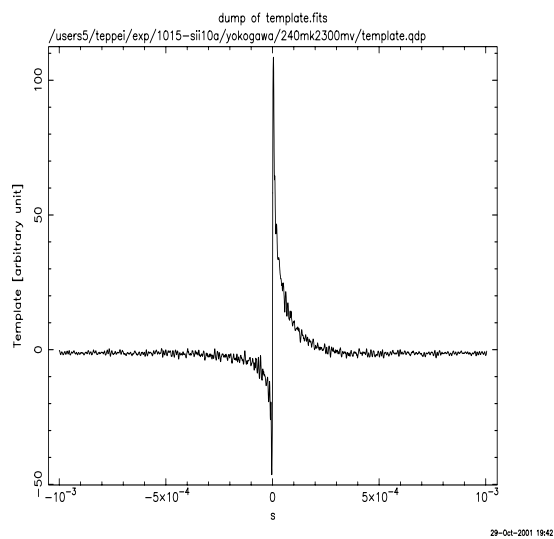
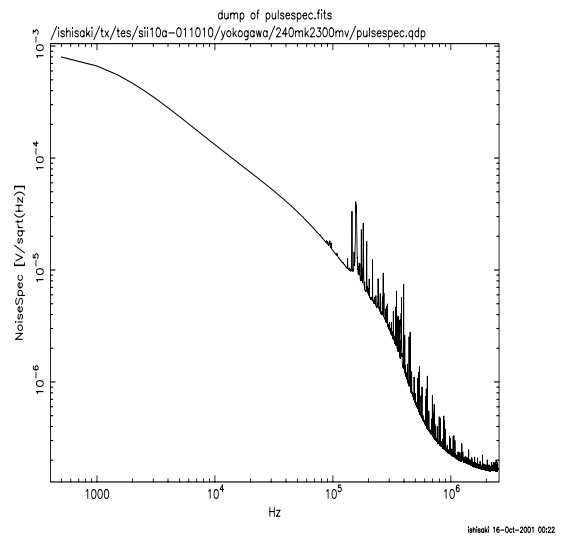
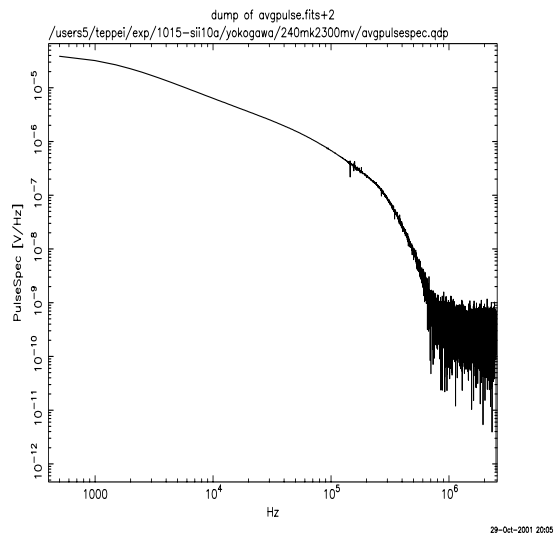
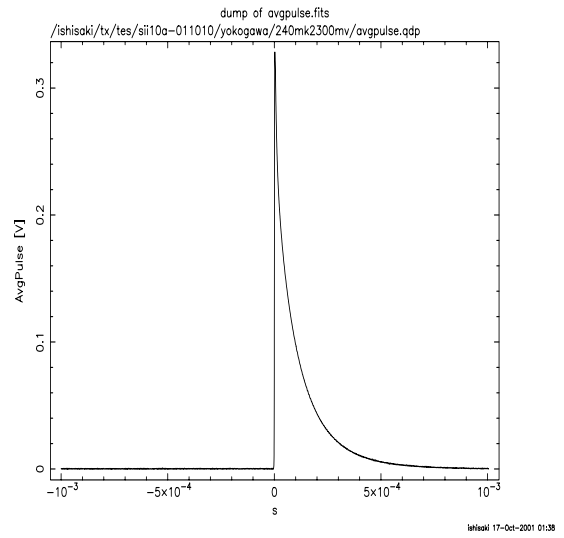
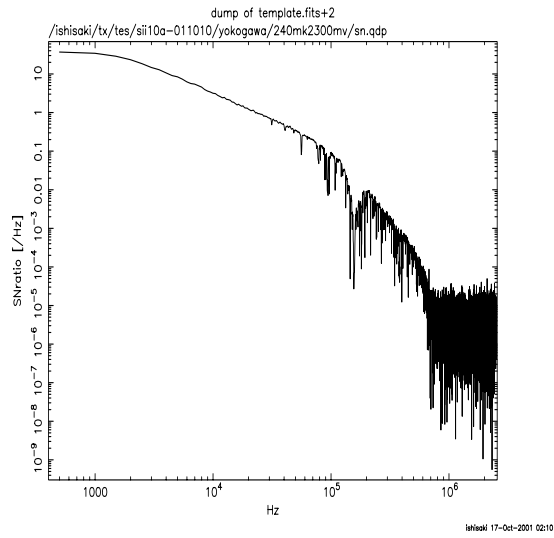


図 18: 熱浴温度 240 mK バイアス電流 230 μ A

図 19: 熱浴温度 240 mK バイアス電流 230 μA の I/V の面積

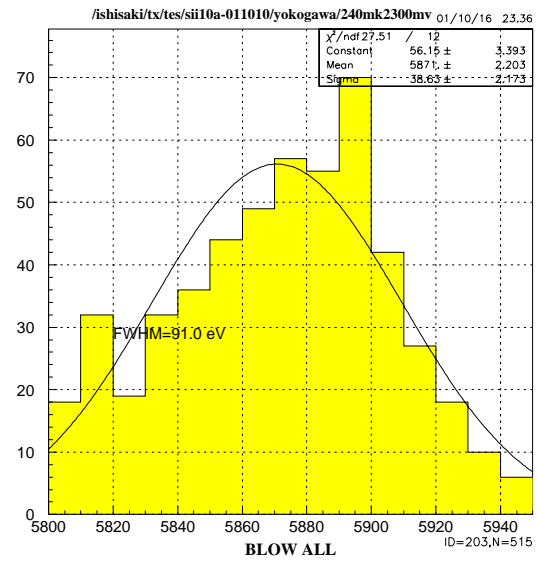
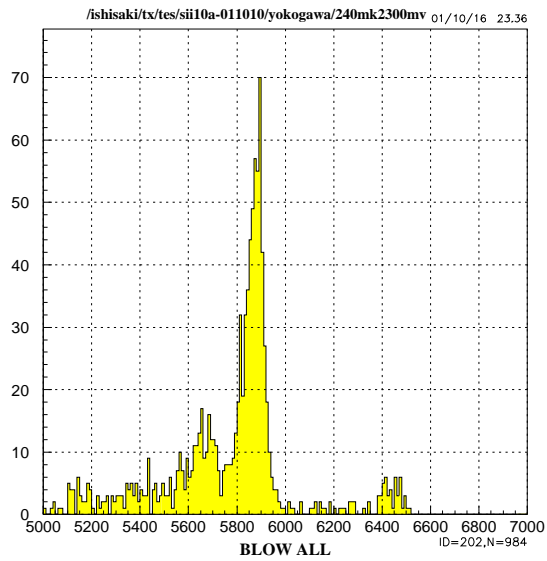
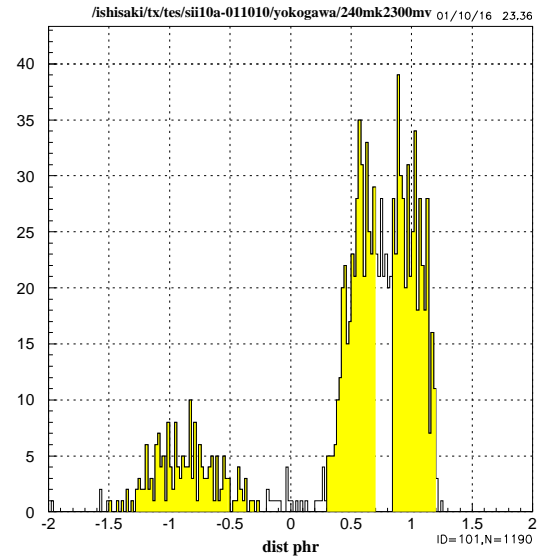
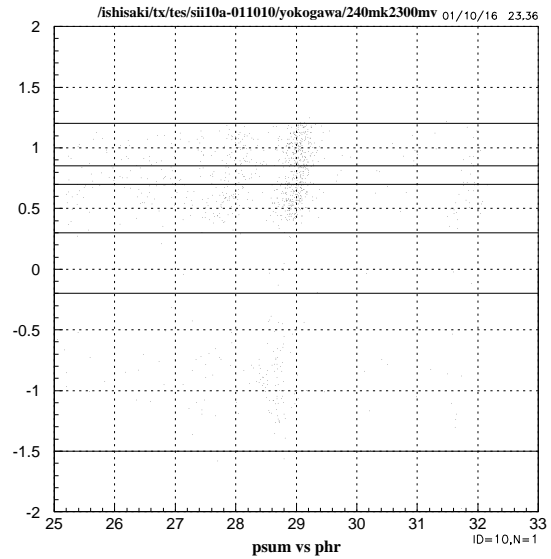
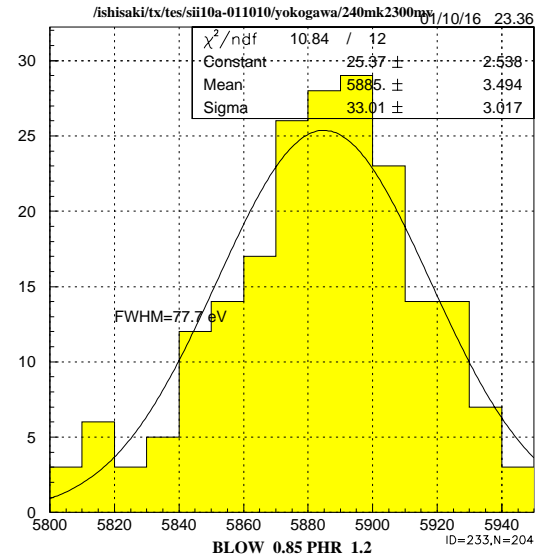
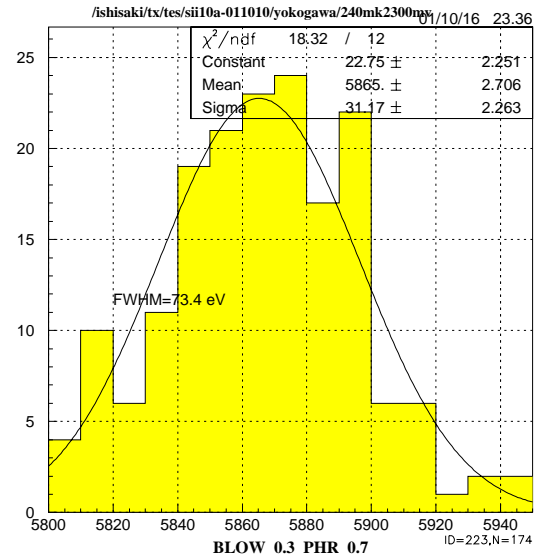
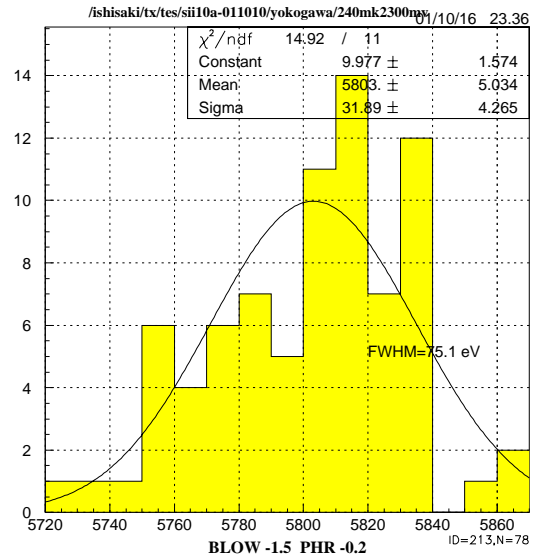
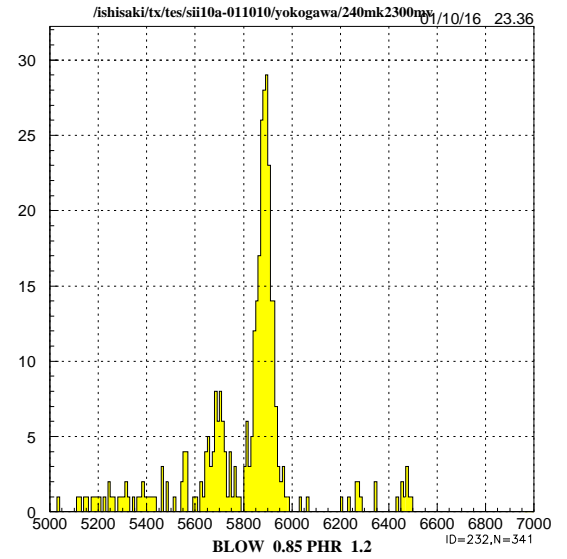
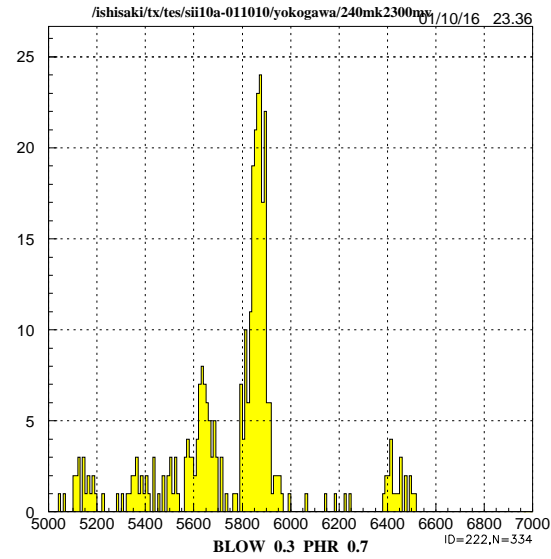
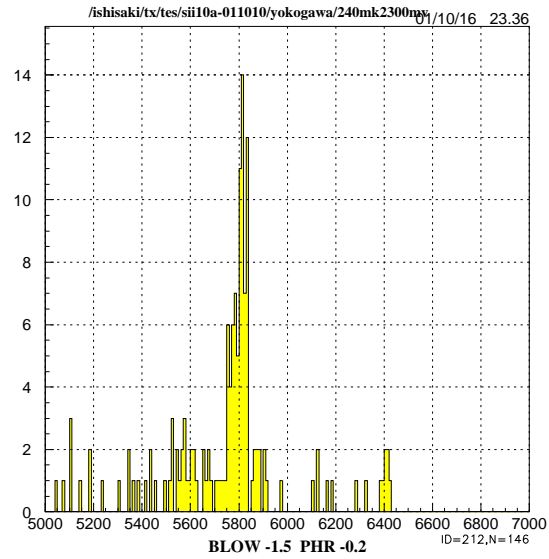


図 20: 熱浴温度 240 mK バイアス電流 230 μ A / μ L の面積



3.3.3 バイアス電流 260 μA

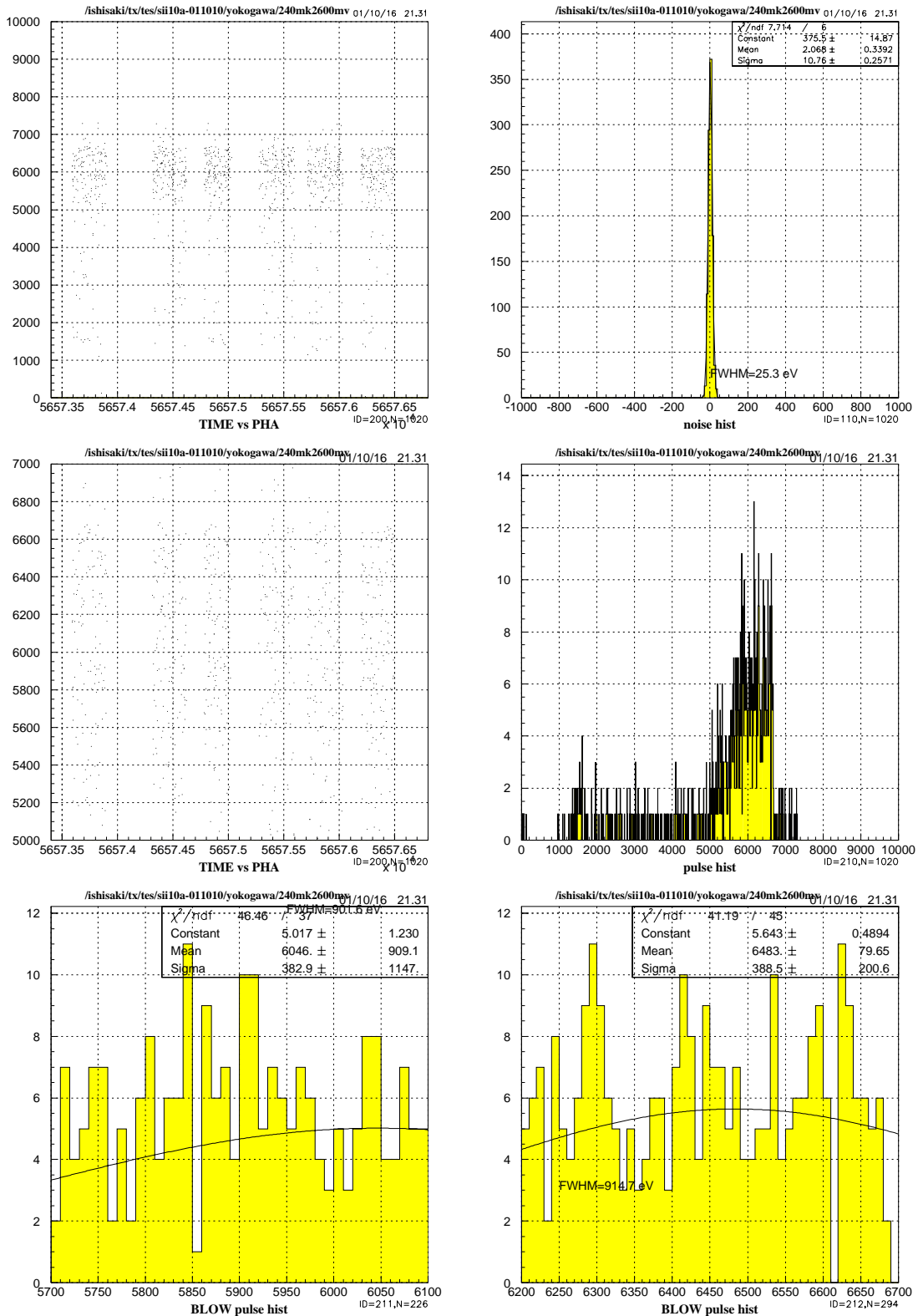


図 21: 熱浴温度 240 mK バイアス電流 260 μA

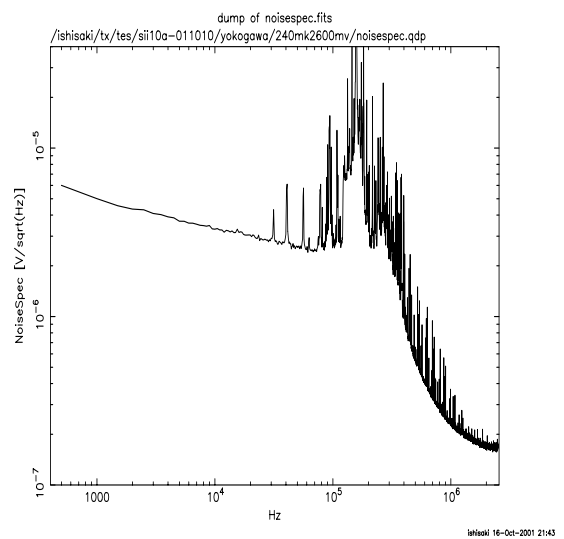
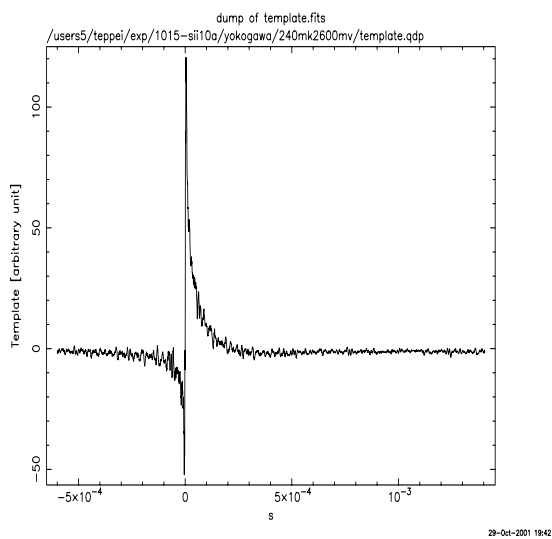
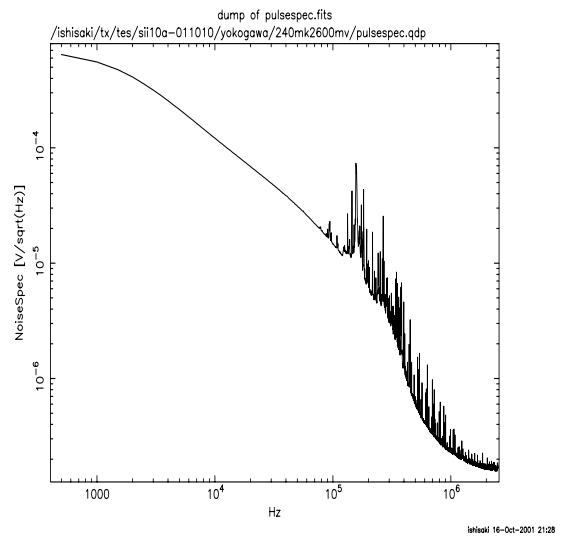
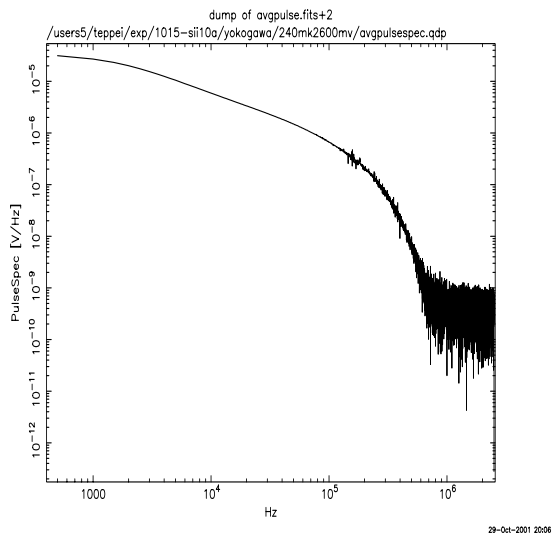
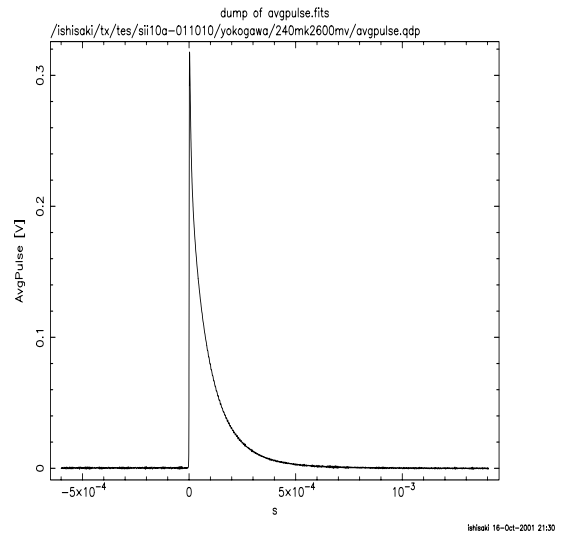
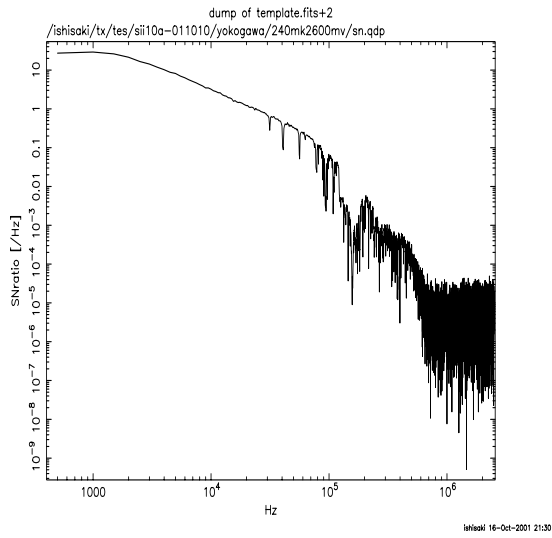


図 22: 熱浴温度 240 mK バイアス電流 260 μ A

3.4 熱浴温度 130 mK

3.4.1 バイアス電流 370 μA

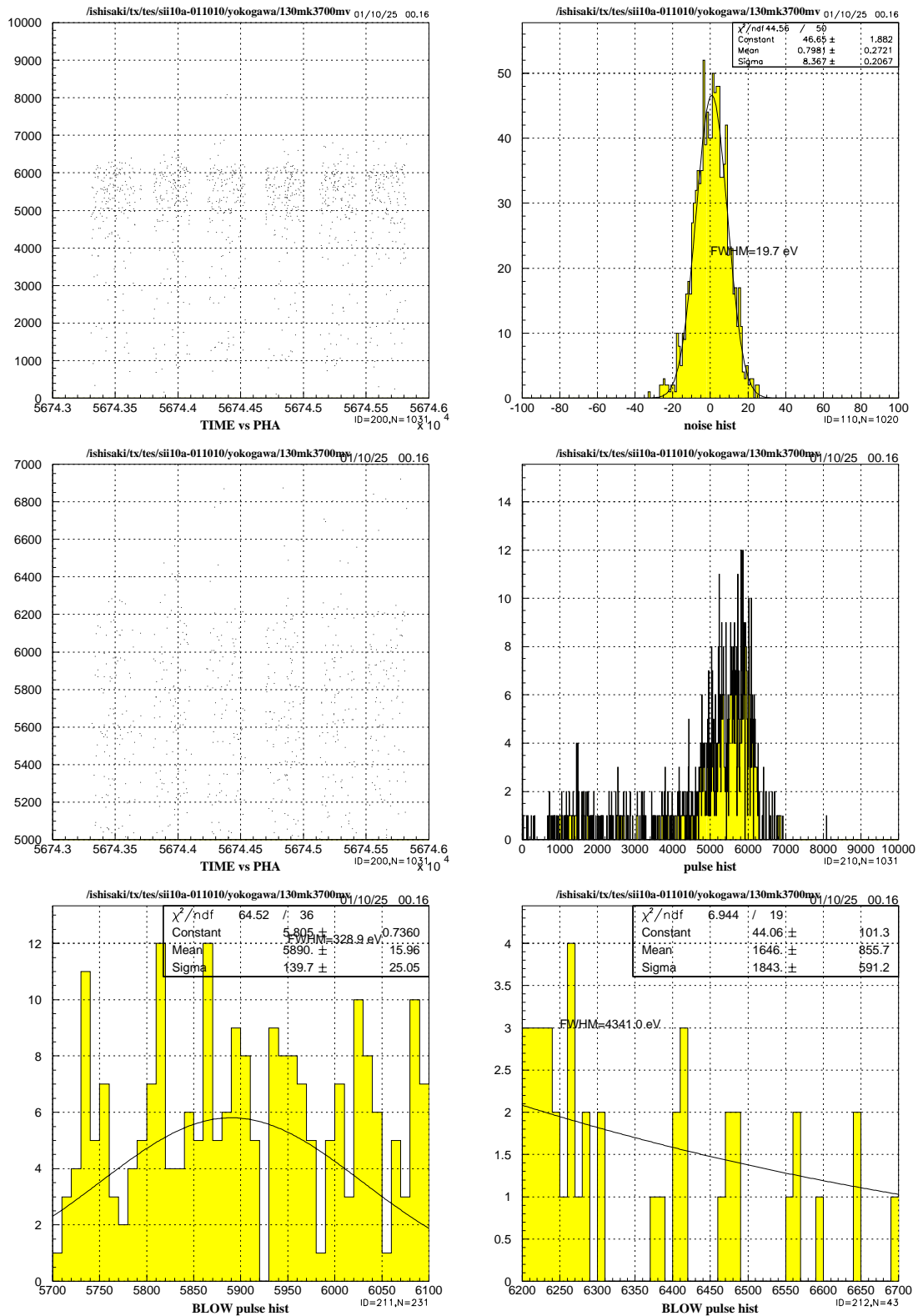


図 23: 熱浴温度 130 mK バイアス電流 370 μA

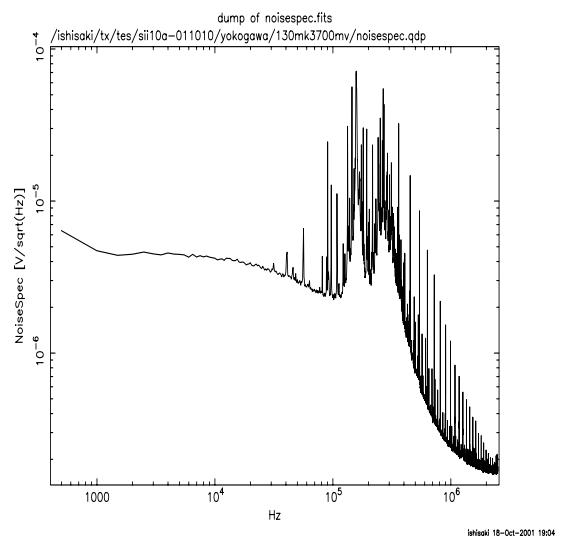
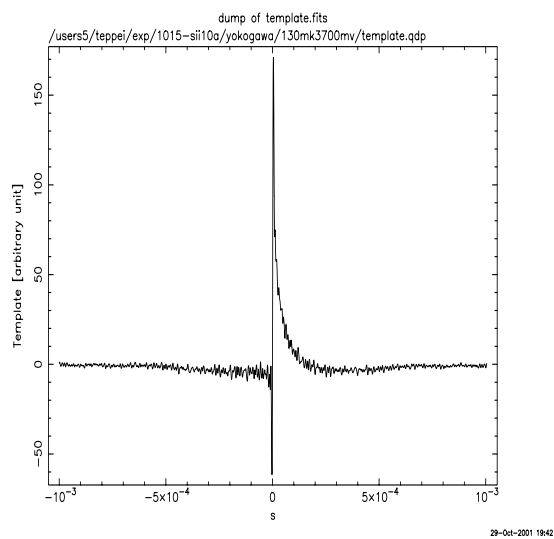
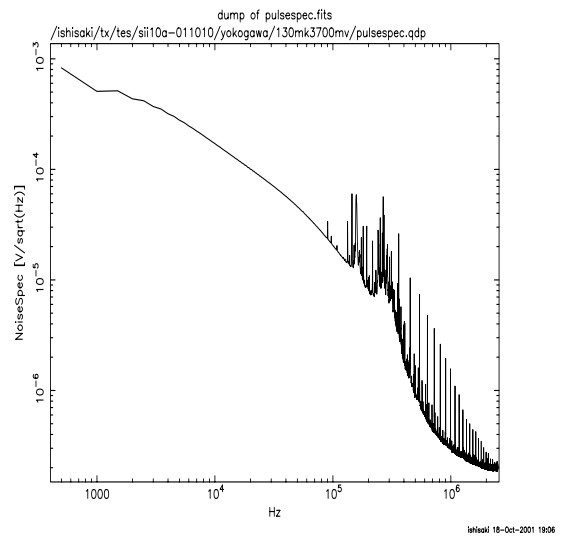
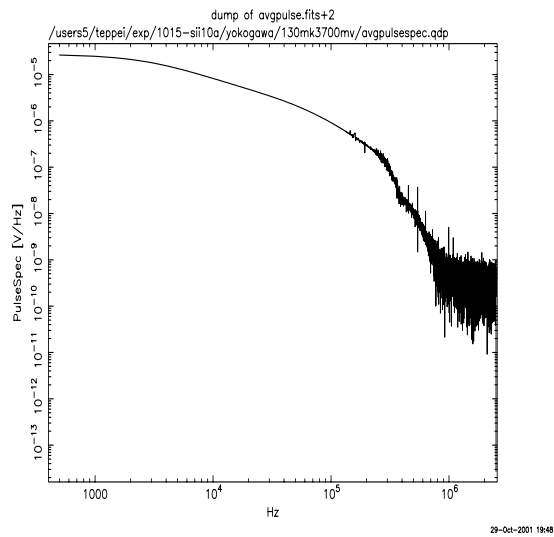
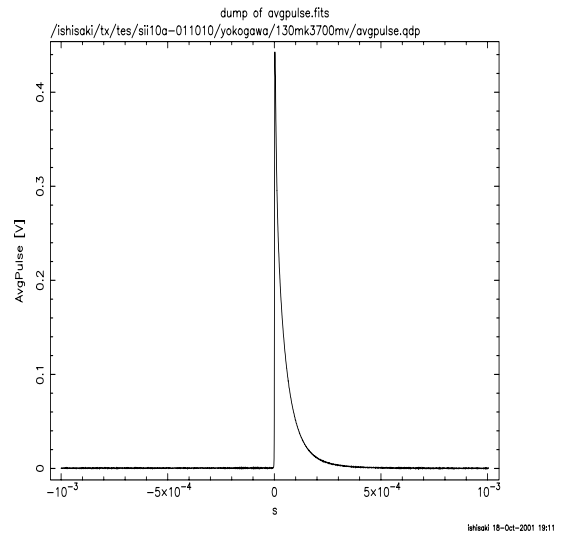
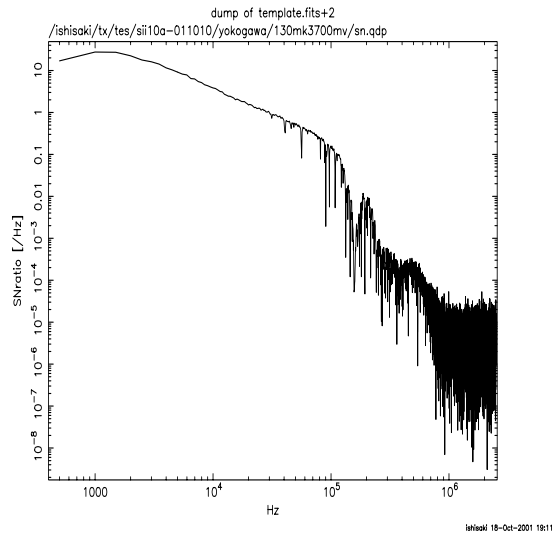


図 24: 熱浴温度 130 mK バイアス電流 370 μ A

図 25: 熱浴温度 130 mK バイアス電流 370 μA の電流-電圧特性

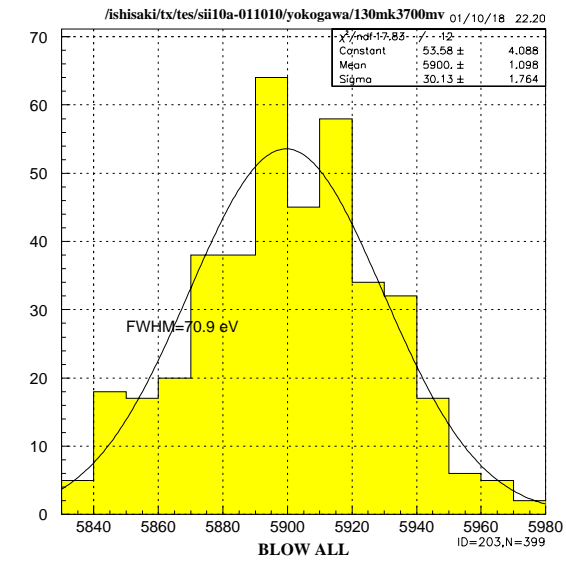
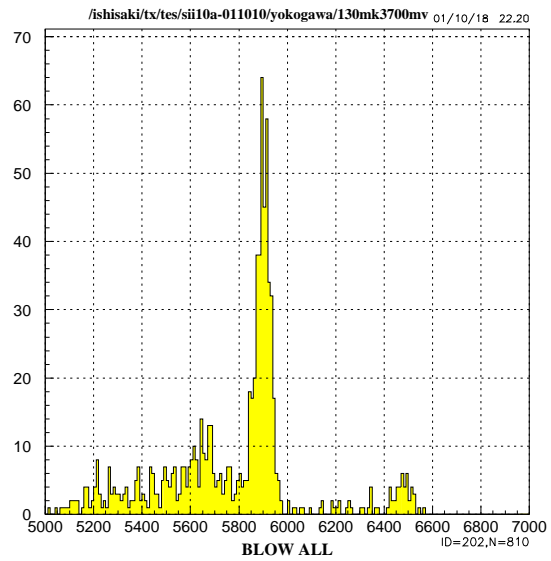
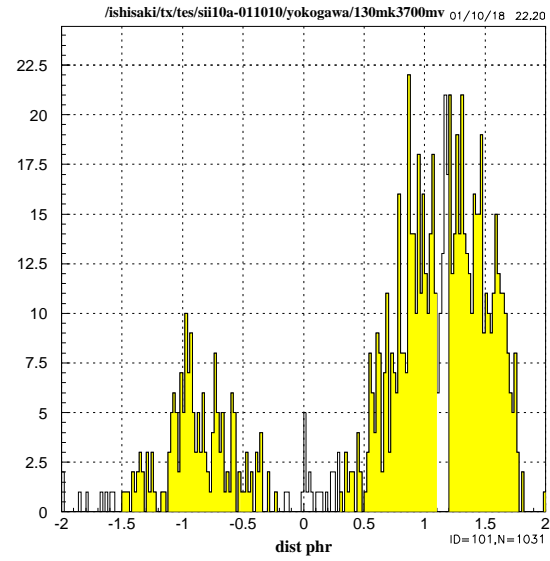
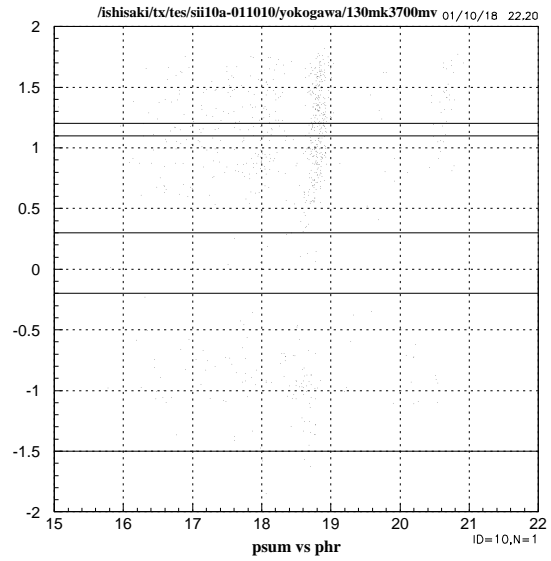
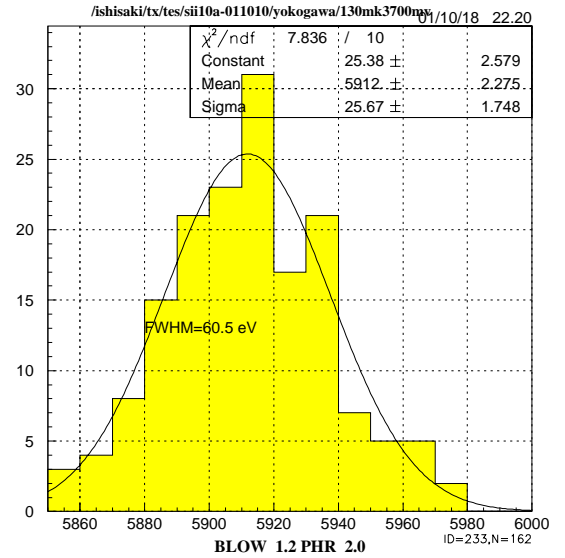
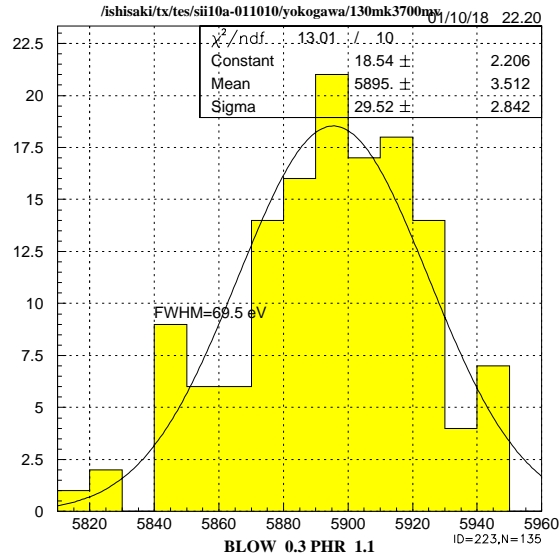
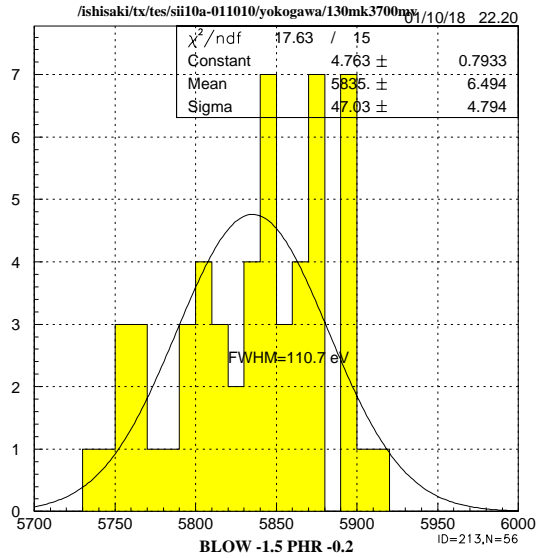
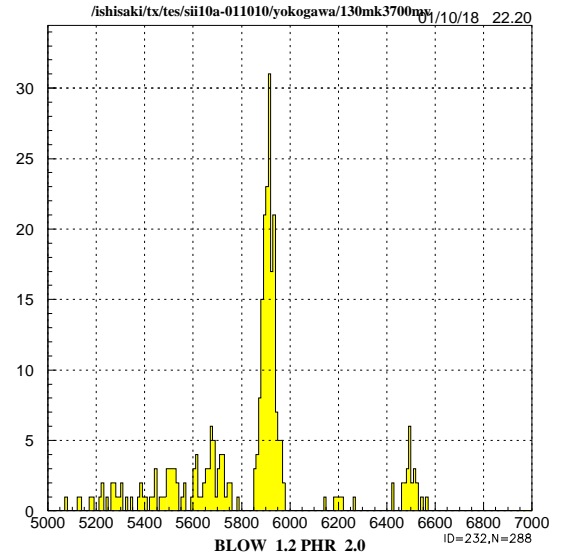
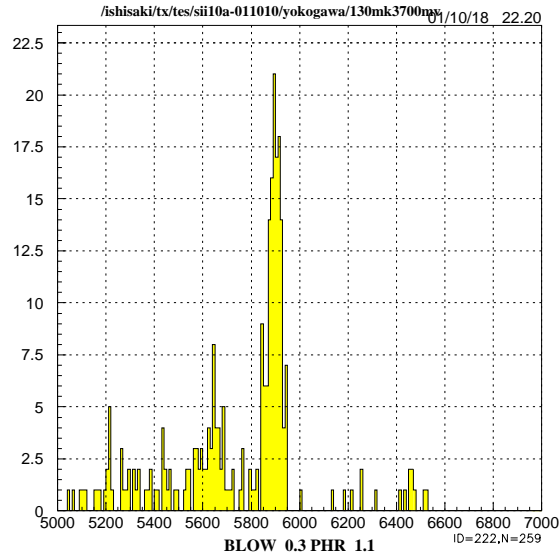
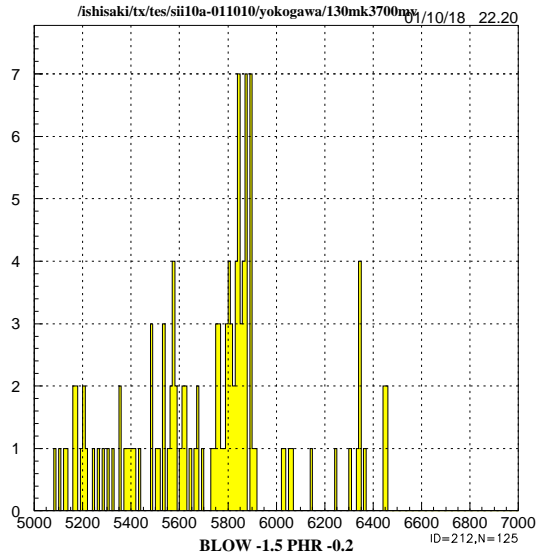


図 26: 熱浴温度 130 mK バイアス電流 370 μ A I_{L} の面積



3.4.2 バイアス電流 600 μA

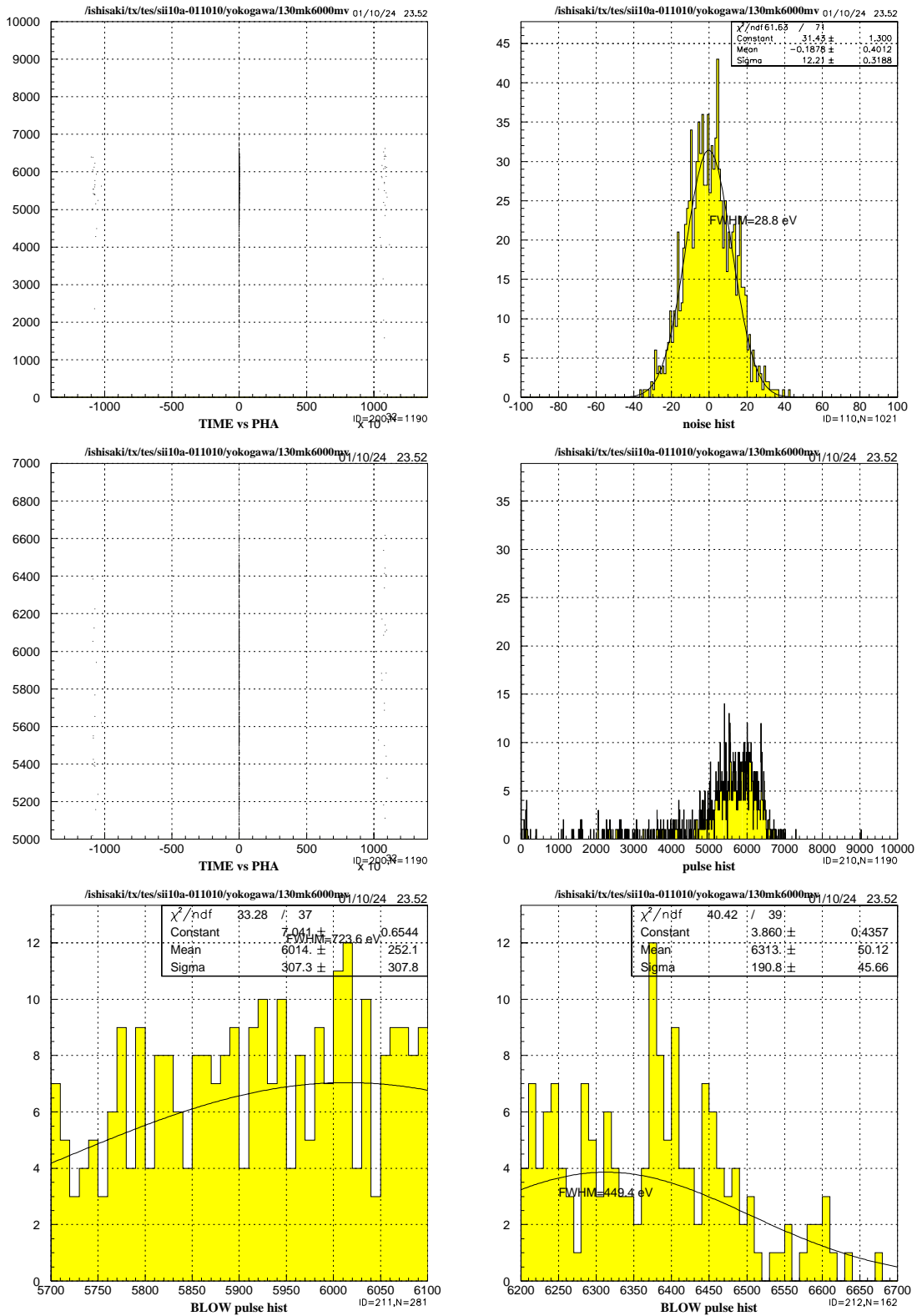


図 27: 熱浴温度 130 mK バイアス電流 600 μA

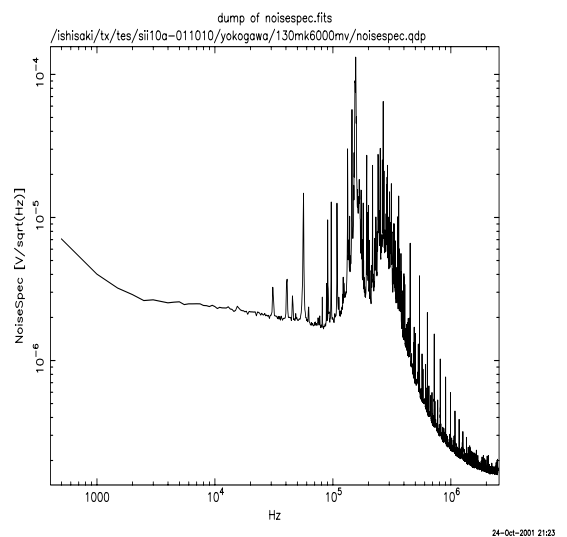
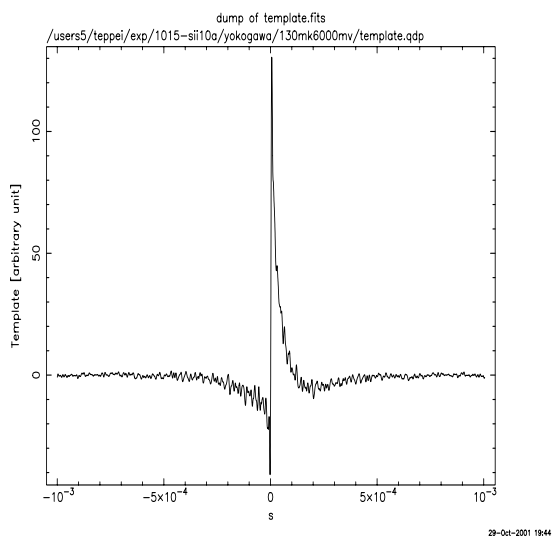
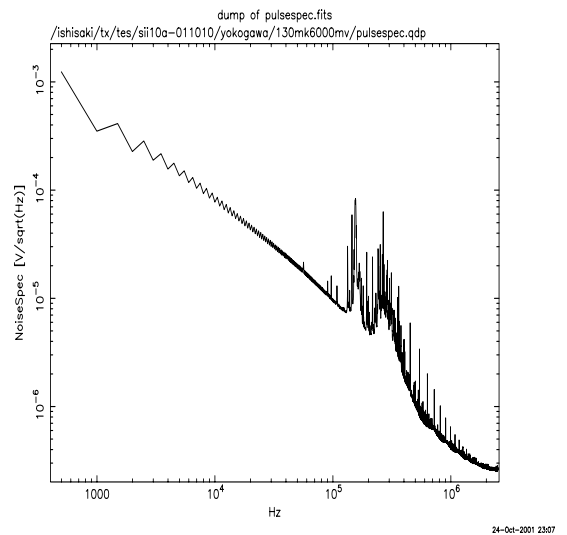
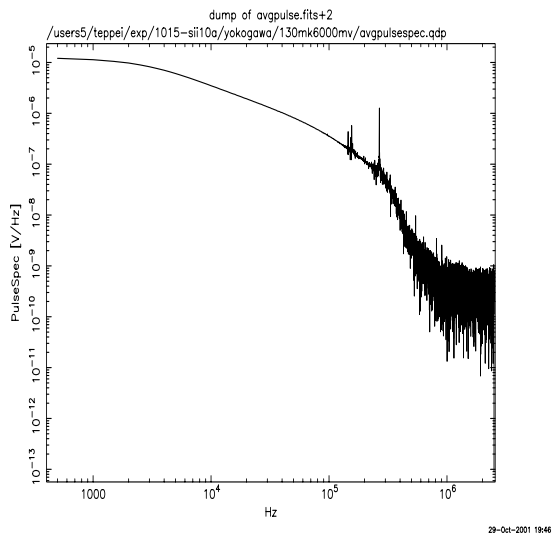
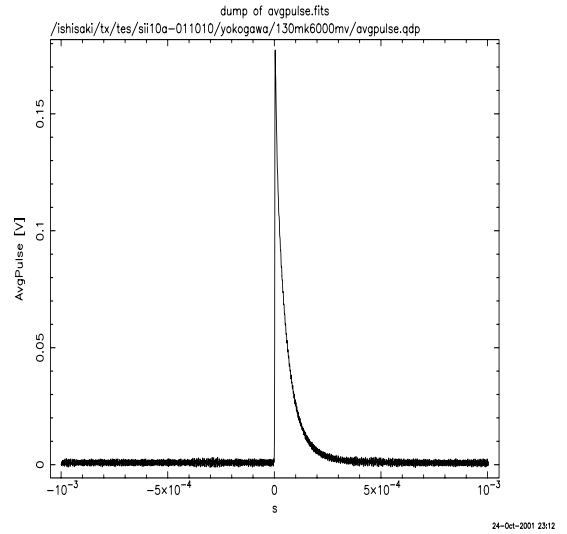
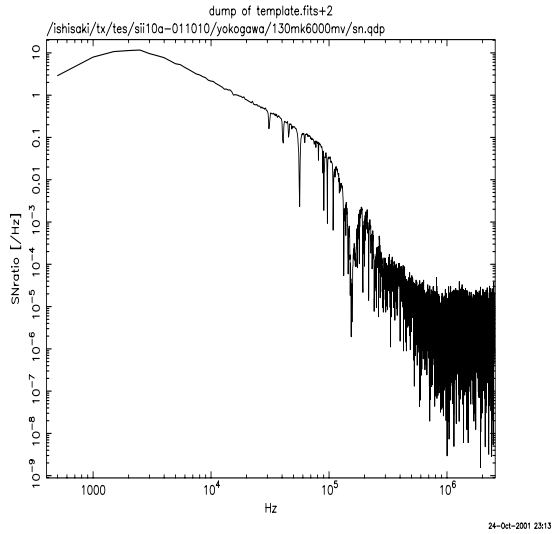
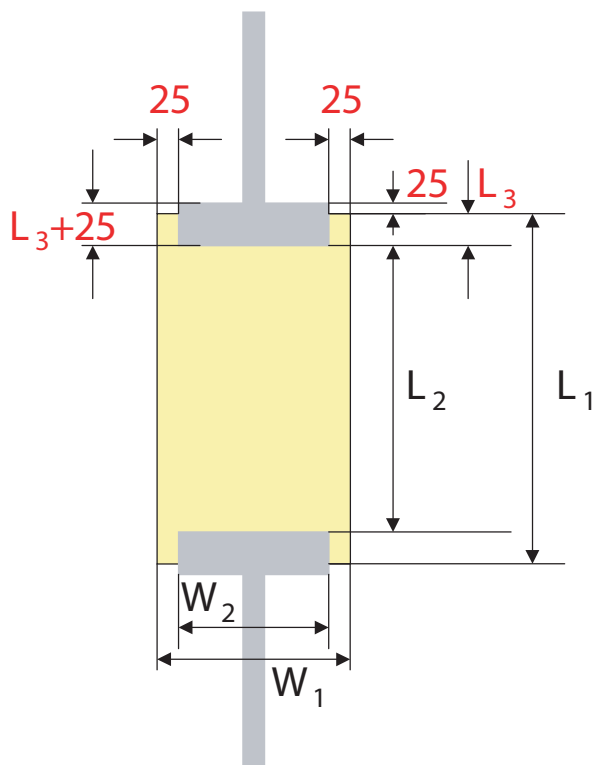


図 28: 熱浴温度 130 mK バイアス電流 600 μ A



Dimension (μm)			
	TES A	TES B	TES C
L_1	1250	750	650
L_2	950	450	380
L_3	150	150	135
W_1	500	500	500
W_2	450	450	450

Figure of TES A,B and C