

JAERI-M
94-071

サイクロトロンにおけるビーム走査法を
用いた均一照射システム

1994年3月

上松 敬・奥村 進・荒川 和夫

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1994

編集兼発行	日本原子力研究所
印刷	日立高速印刷株式会社

サイクロトロンにおけるビーム走査法を用いた均一照射システム

日本原子力研究所高崎研究所放射線高度利用推進室

上松 敬・奥村 進・荒川 和夫

(1994年3月16日受理)

原研AVFサイクロトロンには、イオンビームを大面積に照射するためのスキャナが設置されている。CTAフィルム線量計を用いて得られたイオンビームの二次元フルエンス分布は、必ずしも均一ではなかった。これは、ビームスキャナ電磁石の励磁電源の出力波形の歪みに起因するものであり、良い均一度を得るためのビームスキャンニング条件、すなわちイオン種、エネルギー、ビーム形状とスキャンニング幅の関係が限られていることがわかってきた。

そこで、コンピュータを用いたビームスキャンニングのシミュレータを開発し、シミュレーションされたフルエンス分布と、実測分布データとの比較を行った。その結果、シミュレーションと実測データの両者は良く一致し、シミュレータにより、良い均一度を得るためのビームスキャンニング条件を明らかにした。

これらの結果に基づき、スキャナ電源の改造を行い、均一度の良いフルエンス分布が得られるようになった。

Uniform Irradiation System Using Beam
Scanning Method for Cyclotron

Takashi AGEMATSU, Susumu OKUMURA and Kazuo ARAKAWA

Department of Advanced Radiation Technology
Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Watanuki-cho, Takasaki-shi, Gunma-ken

(Received March 16, 1994)

JAERI AVF-cyclotron is equipped with an ion beam scanner for large area irradiation. The two-dimensional fluence distribution of ion beam obtained using cellulose triacetate film dosimeter was not uniform. This is resulted from the distortion of excitation current for electromagnet of the scanner. So, the beam scanning condition, i.e., the relation between the ion species, the beam profile and the scanning width, was extremely limited to make a good uniformity.

We have developed a beam scanning simulator to get fluence distributions by calculation and then compared the simulated distributions with the measured ones. It was revealed that the both of them are in good agreement and the beam scanning condition to get good uniformity was led by using this simulator.

On the basis of these results, the power supply of scanner was improved. A good uniformity of beam distribution was available.

Keywords : Scanner, Scanning, Fluence Distribution, Cyclotron, Ion Beam,
Cellulose Triacetate Film Dosimeter

目 次

1. はじめに	1
2. ビームスキャナ特性	3
2.1 装置の概要	3
2.2 フルエンス分布測定方法	4
2.3 フルエンス分布	4
2.4 電源の出力波形	5
3. シミュレータ	6
3.1 基本式	6
3.2 シミュレーションと測定データの比較	7
3.3 ビームスキャニングの限界	8
4. 電源の改造	9
4.1 改造方法	9
4.2 改造後のフルエンス分布	10
5. まとめ	11
謝辞	11
参考文献	12
付録 スキャニング波形データ一覧	34

Contents

1. Introduction	1
2. Beam Scanner	3
2.1 Outline of Beam Scanner	3
2.2 Measurement Method of Fluence Distribution	4
2.3 Distribution of Fluence	4
2.4 Wave Profile of Power Supply	5
3. Simulator	6
3.1 Basic Formula	6
3.2 Comparison of Simulation with Experiment	7
3.3 Limit of Beam Scanning	8
4. Improvement of Power Supply	9
4.1 Concept of Improvement	9
4.2 Fluence Distribution After Improvement	10
5. Summary	11
Acknowledgement	11
References	12
Appendix Data of Scanning Wave Profile	34

1. はじめに

原研のAVFサイクロトロン（以下サイクロトロンという）では、宇宙用・核融合炉材料の耐環境性の評価、バイオ技術の開発および新規機能材料の創製などに関する研究開発のために、高エネルギーイオンビームを広い面積に均一に照射することが要請されている。

高エネルギーのイオンを広い面積に均一に照射する技術は、主として医学分野で陽子や中性子などを用いた粒子線治療用に開発されてきている。これまで開発されてきた技術は、(1)電磁石による発散法、(2)散乱体法、(3)ビーム走査法および(4)照射試料を機械的に走査する方法に大別される。

(1)電磁石による発散法(Defocus Method)は最も簡便な方法であるが、ビームを広い面積に均一にすることが難しく、また、再現性がないという問題がある。(2)散乱体法¹⁾では、均一照射野を実現するために、2つの散乱フォイルと閉塞リング(Occluding ring)を組み合わせたシステムが開発²⁾されているが、散乱体中でのイオンエネルギーの損失が無視できず、有効飛程が短縮される。特に多価重イオンの場合は、この影響が大きく問題がある。(3)ビーム走査法には、ウォブラー法(Wobbler Method)^{3,4)}、線型走査法(Linear Scanning Method)⁵⁾とスポット走査法(Spot Scanning Method)^{6,7)}があり、特殊な方法として磁石首振法(Magnet Sweeping Method)⁸⁾がある。ウォブラー法は、2台の電磁石を位相差90°の正弦波電流で励磁してX方向とY方向にビームを走査し、散乱体法を組み合わせることにより、円形の均一照射野を実現する方法であるが、ビーム形状と照射野の大きさの関係を十分に考慮しなければ均一照射野を実現できない。線型走査法は、2台の電磁石を用いて三角波電流等で励磁し、X方向とY方向にビームをラスタ走査する方法で、大面積照射に適している。スポット走査法は、スポット的にビームを走査して大面積を照射するもので、ビーム強度の変動を監視しながら偏向電磁石の励磁電源を計算機制御して均一度を向上させたものである。磁石首振り法は、短い距離(ビームライン)で広い照射野を得ようとするときに有利であるが、電磁石に可動機構が必要である。(4)照射試料を機械的に走査する方法は、照射できる試料の種類、試料移動速度に限界が多く、機械的な故障の問題がある。

原研サイクロトロンに要請されるイオン電流強度は、人体治療の場合と比較にならないほど大きい。このため散乱体法や機械的では、発熱や放射化が問題となり、ビーム走査法が適している。その中でも線形走査法は、ビームの走査範囲を自由に選択でき、ビーム形状を考慮せずに均一照射を実現できることから、線型走査法を採用した。

高エネルギーイオンビームで、かつ電流強度の強い軽イオンから重イオンまですべての粒子を広い面積で、その二次元フルエンス分布を測定できる測定器は、見あたらない。そこで、本研究では、高空間分解能で高精度な測定分析ができるフィルム線量計の一種である三酢酸セルロース(Cellulose Triacetate:CTA)フィルム線量計を用い、最大100×100mm²の大きさまで、種々のビームスキニング条件(イオン種、エネルギー、ビーム形状、スキニング幅)において測定を行った。その結果、広い面積を照射したときの不均一を生じる原因は、ビームを走査する電磁石の三角波電流電源波形の出力歪であることを明らかにした。

CTA線量計では、フルエンス分布をその場測定ができず、線量計の取り出しや解析が必要

な上に、線量計自身の放射化が問題となり、フルエンス分布の測定結果は、翌日でなければ出ないため、サイクロトロンビームスキヤニング条件の調整には事実上使用できない。このため、スキヤナの性能と、良い均一度を得るためのビームスキヤニング条件をオフラインで詳細に解析できるように、計算機を用いたビームスキヤニングのシミュレータを開発した。これにより、均一度を得るためのビームスキヤニング条件を、照射実験の事前に知ることができる。

本報告では、スキヤナ特性、シミュレーションの結果およびスキヤナ電源の改造について述べる。

2. ビームスキャナ特性

2.1 装置の概要

サイクロトロン施設には、図2.1に示すビームラインが配置されており、LD、HYおよびLXコースに各1式、合計3式のスキャナが設置されている。スキャナは、2台の三角波電流源と積層電磁石で垂直および水平方向にビームを偏向し、試料面に二次元にビームをスキャンニングする方式である。その概念図を図2.2に、スキャナの主要諸元を表2.1に、スキャナ偏向電磁石の主要諸元を表2.2に、スキャナ電源の主要諸元を表2.3に示す。水平方向照射ラインの配置とスキャナ偏向電磁石は図2.3、図2.4に示した通りであり、垂直方向照射ラインの配置とスキャナ偏向電磁石を図2.5、図2.6に示す。スキャナ電源盤の外観を図2.7に示す。

偏向磁場、掃引ピッチなどに関する関係式は、次のようになる。

< 偏向磁場 B_s [kG] >

偏向電磁石とターゲットの位置関係を図2.8に示す。偏向磁場は次式で与えられる。

$$B_s = \frac{B\rho \cdot \theta}{l} \quad (2.1)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\delta}{d} \right) \quad (2.2)$$

$B\rho$: 偏向するビームの磁気剛性 [kG·m]

θ : 偏向角度 [rad]

δ : ビームの掃引の半幅 [m]

d : ドリフト長 [m]

l : ポール長 [m]

< ビームの磁気剛性 $B\rho$ [kG·m] >

非相対論領域では2.3式を、相対論領域(ここでは粒子がプロトンの場合)では2.4式を使用する。

$$B\rho = 1.44 \frac{\sqrt{M \cdot E}}{Q} \quad (2.3)$$

$$B\rho = \frac{10^7}{Q \cdot c} \sqrt{E^2 + 2 \cdot E_0 \cdot E} \quad (2.4)$$

M : 粒子の質量数

E : 粒子のエネルギー [MeV]

Q : 粒子のチャージ数

c : 光速 3×10^8 [m/sec]

E_0 : 粒子の静止質量 [MeV]

(ここでは粒子がプロトンの場合のみ考慮するので、 $E_0 = 938$)

< 電源出力と発生偏向磁場 B_s >

各電磁石の励磁特性を測定した結果、発生する偏向磁場 B_s [kG]の一般式は、次に示される。ただし、 I_p は三角波出力電流のピーク値であり、 B_{sp} は発生磁場のピーク値である。

$$B_{sp} = k \cdot I_p \quad (2.5)$$

各電源の係数 k と三角波出力電流 I_p の範囲を表 2.1 に示す。

< 掃引時間と掃引ピッチ >

X軸、Y軸の両方向は、異なる周波数の三角波電流で偏向電磁石を励磁し、ビームを掃引している。照射面の1回の掃引時間 τ [s]は、X軸、Y軸どちらかの低い周波数に依存する。その低い周波数を f [Hz]とすると掃引時間 τ [s]は次式で与えられる。

$$\tau = \frac{1}{2 \cdot f} \quad (2.6)$$

掃引ピッチ p [mm]は、掃引時間 τ [s]とビームの掃引幅 $2 \cdot d$ [mm]に依存し、次式で与えられる。ここで、 f_{50} はX軸、Y軸どちらかの周波数で高い方の周波数 (= 50 Hz)。ターゲット上でのビームの掃引軌跡と掃引ピッチの関係を図 2.9 に示す。

$$p = \frac{2 \cdot d}{2 \cdot f_{50} \cdot \tau} \quad (2.7)$$

2.2 フルエンス分布測定方法

電流強度の強い高エネルギーイオンビームのフルエンス分布測定には、三酢酸セルロース (CTA) フィルム線量計⁹⁾を用いた。CTAは、積分型の線量計としてその空間分解能が充分であり、イオンビームの線量測定への応用が試みられている¹⁰⁾。他のフィルム線量計としては、ラジオクロミック線量計 (RCD) や GAF クロミック線量計¹¹⁾がある。これらフィルム線量計は高分子フィルムに染料を含有あるいは塗布したものであり、RCDは取扱いが不便なうえ、フィルムの厚さや染料の分布等に不均一があり、精度良く分布を測定するには向かない。また、GAFはイオンビームでの応用実績が少なく、データが不足している。これに対してCTAは、厚さが非常に均一なために分布を精度良く測定できる。なお、CTAは各種イオンビームについて、吸収線量の絶対値を評価するためのデータが充実していないので、ここでは、相対的なフルエンス分布を評価するにとどめた。

2.3 フルエンス分布

これまで、イオン種、エネルギー、ビームコース、ビーム形状およびスキャン幅を種々に変えた条件で、イオンビームをCTA線量計に照射し、二次元フルエンス分布を走査型分光光度計を用いて測定してきた。これまでに測定したフルエンス分布データのうち、スキャン分布とビーム形状が明かなデータについて、そのビーム条件を表2.4に示す。データ解析の結果、各スキャナとも、スキャンされたビームの分布は、50 Hzで掃引されている方向の両端に大きなピークを持ち、かつ中央部にも小さなピークを持つことが明らかになった。0.5, 1.0, 2.5, あるいは5.0 Hzで掃引している他方向については、特にきわだった分布の不均一性はない。測定された代表的な分布を図2.10に示す。ビーム条件は、HYコース ${}^4\text{He}^{2+}$ 50 MeV 0.1 e μA 252秒照射である。スキャン電流は、X方向が41 A, Y方向が55 Aである。

実際の照射実験では、均一度を得るために、50 Hzで掃引されている方向について、必要なスキャン幅よりもオーバースキャンし、両端の大きなピークをビームスリットで切り、均一度の良い範囲のみを使用している。このようにして行った照射実験の代表的なフルエンス均一度解析結果を図2.11に示す。この時のビーム条件は、HYコース ${}^4\text{He}^{2+}$ 50 MeV 0.1 e μA 1283秒照射、スキャン電流はX方向が93 A, Y方向が122 Aであり、ビームスリットにより上下左右方向にビームを切っている。解析の結果、 $50 \times 50 \text{ m}^2$ の範囲で均一度が+19%, -9%となった。

2.4 電源の出力波形

スキャンビームの分布が50 Hz掃引方向に対し(図2.10のY軸方向)不均一性を持つ原因を調べるために、スキャナ電源の出力波形を測定した。代表的な出力波形を図2.12に示す。三角波端部と中央部分にわずかな歪みが認められる。端部の歪は、電磁石の逆起電力によるものであり、中央の歪は電源回路の極性切換えによるものと考えられる。スキャンビームの分布の不均一性は、スキャナ電源の出力波形の歪みにより、その発生磁場により決まるビームの位置でのビームの滞留時間が長く、あるいは短くなり、その結果、フルエンス分布の濃い、あるいは薄い部分が生じているものと判断される。

3. シミュレータ

スキャンされたビームのフルエンス分布は、必ずしも図2.10のY軸方向に見られるような悪いものではなく、スポットビームの形状を50Hz掃引方向に大きくすることにより、中央部および両端のピークを無くすことができる。しかし、スキャナ電源の出力値によってその波形が変わるので、均一なフルエンス分布を得る条件、すなわち、スキャン幅とビーム形状の組み合わせを実験的に見つけることは容易ではない。

そこで、計算機によるビームスキャンのシミュレータを作成し、詳細なデータ解析が行えるようにした。本シミュレータの考え方、範囲を次に示す。

- シミュレーションの精度は、スキャンされたビーム分布が実測データと概略一致し、ビームスキャン条件が決定できる程度とする。
- LD, HY, LXコースのスキャナごとに電源の特性が違うので、各スキャナごとにシミュレーションを行う。
- 入力は、ビームコース、イオン種、エネルギー、ビーム形状、スキャン幅とする。
- 照射サンプルの位置(ターゲット位置)は標準位置とする。
- 出力は、二次元ビーム分布を図形として出力する。データファイルとしては出力しない。
- スキャン磁場は、三角波電流源の電流出力に比例するとする。スキャン磁場の測定は行わない。分布実測データをもとに補正を行う。
- 三角波電流源の電流出力の計測は、デジタルオシロスコープ(DOS)を用い、DOSでアベレージング処理を行う。
- 三角波電源の出力電流波形は、何点か計測データをデータファイルとして持ち、シミュレーションでは、その近似値を使用する。その都度、測定することはしない。
- 0.5, 1.0, 2.5, 5.0 Hzの掃引は、波形を完全な三角波として取り扱う。
- 線量への換算は行わない。フルエンスの相対値として処理する。
- 基本的に、入力するビーム形状はガウス分布とする。実測分布データは対応させない。
- X, Y波形のリサージュ波形は、考慮しない。

3.1 基本式

< 入射粒子数 >

tを時間、xをビームの位置とすると、任意の位置における入射粒子数Fは、ビーム滞留時間 $|dt/dx|$ に比例する。図3.1参照。

$$F = k \left| \frac{dt}{dx} \right| \quad (k \text{ は定数}) \quad (3.1)$$

< ビーム形状 >

入射ビームのフルエンス分布をガウス分布としたとき、ビームのセンター位置がx。とすると、

分布 $f(x)$ は、次式に示される。図 3.2 参照。

$$f(x) = \exp \left[- \frac{(x - x_c)^2}{2 \cdot \sigma_x^2} \right] \quad (3.2)$$

< スキャニングによるビーム分布 >

スキャニングされたビームにより、 x_i に入射する粒子数は、3.1式、3.2式より次の式で示される。ここで、 $x_{xj=1}$ 、 $x_{xj=m}$ はスキャニング幅である。図 3.3 参照。

$$F_x(x_{xi}) = k \cdot \sum_{xj=1}^m \left| \frac{dt_{xj}}{dx_{xj}} \right| \cdot \Delta x_{xi} \cdot \exp \left[- \frac{(x_{xi} - x_{xj})^2}{2 \cdot \sigma_x^2} \right] \quad (k \text{ は定数}) \quad (3.3)$$

$$F_y(y_{yi}) = k \cdot \sum_{yj=1}^m \left| \frac{dt_{yj}}{dy_{yj}} \right| \cdot \Delta y_{yi} \cdot \exp \left[- \frac{(y_{yi} - y_{yj})^2}{2 \cdot \sigma_y^2} \right] \quad (k \text{ は定数}) \quad (3.4)$$

< 2次元データ > XとY方向の分布は、比例配分されるとする。すなわち、3.3式、3.4式より、2次元に展開する。任意座標 (x_{xi}, y_{yi}) における入射粒子数は次の式に示される。

$$F_{xy}(x_{xi}, y_{yi}) = F_x(x_{xi}) \cdot F_y(y_{yi}) \quad (3.5)$$

3.2 シミュレーションと測定データの比較

本シミュレータを用いて得られたシミュレーション結果が、測定した分布に一致するかを調べた。実測データは、前述の表 2.4 に示したものである。シミュレーションと分布測定データを比較した結果、ビームのスキャニングされる振れ幅が、スキャナ偏向電磁石の電流と磁場の測定結果から計算した振れ幅に対して、LDでは約1.2倍、HYでは約1.4倍に振れていることが明らかとなった。この原因は、磁場測定に誤差があると考えるが、実用上問題とならないので追求せず、2.5式に示される発生磁場に単に補正係数を乗じることとした。

HYコースについての代表的な比較データを図 3.4、図 3.5 に示す。図 3.4 はシミュレーション結果であり、図 3.5 は実験データである。この時のビーム条件は、 ${}^4\text{He}^{2+}$ 50 MeV 0.1 eμA 252秒照射、スキャニング電流は、X方向が41A、Y方向が55Aである。図 3.4 左下部にスキャニングビーム分布図を、右下部に入射ビーム形状の分布図を示す。図の右上部にスキャニングビーム分布とスキャニングされていないビームの分布のX方向、Y方向の断面図を、左上部にスキャニング波形および微分波形を示す。実測データ(図 3.5)の左下部はスキャニングビーム分布図であり、右下部はビーム形状の分布図である。上部にスキャニングビーム分布のX方向、Y方向の断面図を示す。

LDコースについての代表的な比較データを示す。この時のビーム条件は、 H^+ 45 MeV, $1 e \mu A$ 197秒照射, スキャニング電流はX方向が44 A, Y方向が54 Aである。図3.6にシミュレーション結果を, 図3.7に実測データを示す。

これらの比較から, シミュレーション結果と実測データとは, 良い一致を示すことが明らかとなった。

なお, LXコースについては, 当面そのユーザーがいないことと, マシンタイムを充分に取れないことから, 実験データが得られていない。

3.3 ビームスキャニングの限界

サイクロトロンユーザーから, LDポートにおいて $100 \times 100 \text{ mm}^2$ のエリアを均一照射する要求があり, 検討を行った。その結果, スキャナ電源の出力性能の許容する範囲で, 2つの方法が考えられた。ひとつは, ビームをオーバースキャニングすることにより, 両端のピークを避けて照射する方法である。この方法では, 実測データからも, シミュレーションからも, 中央部分に小さなピークが生じて, 目標の均一度を達成できないことが判明した。もうひとつの方法は, シミュレーションにより, 均一照射が可能なビーム形状, スキャニング幅を検討し, その条件で照射を行う方法である。ビーム形状を変えた場合のスキャニングビームの分布のシミュレーション結果を図3.8(a), (b), (c)に示す。実測の入射ビーム形状をガウス分布にフィッティングしてシミュレーションした結果を図3.9に示し, 最適条件で照射を行った実測データを図3.10に示す。この時のビーム条件は, LDコース, H^+ 10 MeV, $10 e n A$, スキャニング電流は, X方向が55 A, Y方向が51 A, ビーム形状をガウス分布にフィッティングさせると, X方向が40 mm ($2\sigma_x$), Y方向が3 mm ($2\sigma_y$)である。実測データは, ビームのオーバースキャニングされた部分がカットされているために, 分布の全体像を見ることができないが, シミュレーション通りの結果が得られた。

ここで問題になるのは, スキャナ電源の出力性能の許容する範囲で, スキャニングできる幅が限られてしまうこともあるが, 致命的なのは, ビーム形状にもよるが $100 \times 100 \text{ mm}^2$ 以上にオーバースキャニングすることにより, ビームラインのダクトおよび診断機器等にイオンビームが衝突し, 放射化, あるいは発熱等により, 機器の損傷を招くことである。この実験においては, 例外処置としてビーム電流, 照射時間を制限し, 測定に必要なフルエンスが少なく済むRCDフィルム線量計を用いて実験を行った。このようなオーバースキャニング条件では, 定常的な照射運転を行うことができない。

以上の理由により, スキャナ電源が現在のままであるならば, 均一度を得るための条件は限られており, 電源の改造が望まれることがわかった。

4. 電源の改造

均一度の良いスキャンニングビーム分布が得られない原因は、スキャナ電源の50Hz三角波の出力波形の歪みによることが明きらかとなった。これを改善するためには電源を改造することが必要となり、特にユーザーから要求のあるLDコースのスキャナ電源のX軸電源の改造をはじめに実施した。既設のスキャナ電源・BSLDのX軸部を改造し、出力電流波形のゼロ付近および頂点付近の非直線性を改善した(図4.1参照)。方法は、現在の回路方式である極性切り替えおよび逆起電圧回生方式を交流アンプ方式に変更し、出力波形のすべての位置で電流を制御できるようにして直線性を改善した。

4.1 改造方法

< ゼロ電流付近の非直線歪の改善 >

現在のBSLDのX軸部(50Hz)の電源方式は、制御回路からの三角波半波整流波形を、出力部にブリッジに組んだトランジスタスイッチによる極性切り替え回路で、三角波交流とする方式である。このために、ゼロ電流前後で、この極性切り替え時に電流が約100 μ 秒間途切れてしまい、非直線歪が生じている。これらを回避するために、出力回路を交流アンプを用いた方式(SEPP方式:シングルエンドプッシュプル方式)とし、直接三角波交流を出力するように改造する。改造前の回路を図4.2に、改造後の回路を図4.3に示す。

この回路は、出力電流が正から負に変化する時は、正電流制御用FET(Q1)(FET:フィールドエフェクトトランジスタ)の内部抵抗が徐々に大きくなって行き、出力電流がゼロとなる。この時にQ1の内部抵抗を無限大(OFF)とはせず、ある一定の電流を正電流制御用FET(Q1)から負電流制御用FET(Q2)に流し続けるように制御し、さらに、Q2の内部抵抗を徐々に小さくして負電流を流すように動作させる。負から正に変化するときは、この逆の動作となる。出力ゼロのときに、Q1からQ2に流す電流をバイアス電流と言い、これにより、正負の制御素子(FET)Q1, Q2が同時にOFFとなることが無く、電流の途切れも無くなる。また、電流制御素子(FET)自体のゼロ電流付近での非直線性も、バイアス電流を流すことで影響がなくなる。これらのことにより、出力のゼロ電流付近での非直線歪を生じないように改造した。

< 三角波頂点付近の電流へこみの改善 >

現在のX軸部の三角波出力方式では、電流立ち下げ時に負荷コイルの逆起電圧を回生し、この電流を制御し三角波としているが、コイル内部の交流抵抗(渦電流損)が大きいため、この逆起電力が正常な三角波を形成するのに不足し、この分が電流のへこみとなっていた。この問題も、出力回路をSEPP方式とすることにより、負荷コイルの逆起電圧を用いずに、電流立ち下げ時も電源側からの電力で出力電流を流すことができるため、負荷の影響を受けずに正確な三角波を出力することができた。

4.2 改造後のフルエンス分布

B S L DのX軸電源・改造後の出力波形を図4.4に示す。歪みの少ない三角波となり、良い均一度が実現できるようになり、オーバースキャンニングの必要もなくなった。改造後の測定データを図4.5に、シミュレーション結果を図4.6に示す。同じ条件での改造前のシミュレーション結果を図4.7に示す。この時のビーム条件は、LDコース、 $^{40}\text{Ar}^{+8}$ 175 MeV, 60 enA 128秒照射、スキャンニング電流はX方向が77 A, Y方向が97 Aである。

5. まとめ

これまでは、高エネルギーイオンを大面積に照射したときのフルエンス分布を、一つの測定手段で、軽イオンから重イオンまで精度良く測定できる方法が見あたらなかった。本研究では、CTAフィルム線量計を用いて $100 \times 100 \text{ mm}^2$ のような大面積を H^+ 45 MeV, H^+ 10 MeV, ${}^4\text{He}^{2+}$ 50 MeV, ${}^{40}\text{Ar}^{8+}$ 175 MeVのイオン種を用いてフルエンス分布を測定した。CTAフィルム線量計で ${}^{40}\text{Ar}^{8+}$ の多価重イオンも精度良く測定できることを確認できた。

サイクロトロンに設置したビームスキャナを用い、大面積をイオン照射したときのフルエンス分布をCTA線量計で測定した結果、均一度が良くないことが判明した。このスキャナを用いて、可能な限り均一度を向上させるためには、ビームスキャン幅を試料よりも大きく（オーバースキャン）し、比較的均一度の良い部分を利用することとした。しかし、この場合は、ビームの損失が大きく、かつ不要な部分を放射化させるという異なった問題を生じた。

一方、CTA線量計には、その場測定できないという問題があり、フルエンス分布の均一度は、照射実験後の測定結果を待たねばならなかった。そのため、ビームスキャン条件（イオン種、エネルギー、ビーム形状、ビームスキャン幅）は、経験的に決める以外に方法がなく、実験者が希望するフルエンス分布の均一度が得られているか否かは、明きらかでなかった。そこでビームスキャンのシミュレータを開発し、オフラインでビームスキャン条件と均一度の関係を模擬することとした。このシミュレータの開発により、フルエンス分布の均一度とビームスキャン条件を事前に評価・予測することが可能となった。

既設ビームスキャナを用いてビームフルエンス分布が均一となる原因を明きらかにするために、スキャナ電磁石電源の50 Hz三角波の出力波形を測定し、シミュレータによるフルエンス分布を模擬した。その結果、三角波の歪によることが明きらかとなり、実験結果とも良く一致した。三角波に歪が存在すると、その歪の部分において、ビーム滞留時間が変わり、それにより不均一になることが分かった。そこでLDコースのスキャナ電源の改造を行い、フルエンス分布の均一度はを飛躍的に向上した。他の2式（HY, LXコース）の電源についても、将来改造する予定である。

謝辞

本研究にあたって、データ測定に協力し、スキャナおよびシミュレータについて議論してくださったイオン加速器管理課・貴家恒男課長、サイクロトロン係・中村義輝氏、奈良孝幸氏、石堀郁夫氏、横田渉氏、福田光宏氏に感謝の意を表す。データ・情報を交換してくださったサイクロトロンユーザーの森田洋右氏、工藤久明氏、菊池正博氏に感謝の意を表す。サイクロトロン係の運転およびデータ測定・解析に協力してくださった居城悟氏、望月誠互氏および運転員みなさんに感謝の意を表す。電源の改造および相談に乗っていただいた(株)工藤電機の寿田一男氏に感謝の意を表す。

5. まとめ

これまでは、高エネルギーイオンを大面積に照射したときのフルエンス分布を、一つの測定手段で、軽イオンから重イオンまで精度良く測定できる方法が見あたらなかった。本研究では、CTAフィルム線量計を用いて $100 \times 100 \text{ mm}^2$ のような大面積を H^+ 45 MeV, H^+ 10 MeV, ${}^4\text{He}^{2+}$ 50 MeV, ${}^{40}\text{Ar}^{8+}$ 175 MeVのイオン種を用いてフルエンス分布を測定した。CTAフィルム線量計で ${}^{40}\text{Ar}^{8+}$ の多価重イオンも精度良く測定できることを確認できた。

サイクロトロンに設置したビームスキャナを用い、大面積をイオン照射したときのフルエンス分布をCTA線量計で測定した結果、均一度が良くないことが判明した。このスキャナを用いて、可能な限り均一度を向上させるためには、ビームスキャン幅を試料よりも大きく（オーバースキャン）し、比較的均一度の良い部分を利用することとした。しかし、この場合は、ビームの損失が大きく、かつ不要な部分を放射化させるという異なった問題を生じた。

一方、CTA線量計には、その場測定できないという問題があり、フルエンス分布の均一度は、照射実験後の測定結果を待たねばならなかった。そのため、ビームスキャン条件（イオン種、エネルギー、ビーム形状、ビームスキャン幅）は、経験的に決める以外に方法がなく、実験者が希望するフルエンス分布の均一度が得られているか否かは、明きらかでなかった。そこでビームスキャンのシミュレータを開発し、オフラインでビームスキャン条件と均一度の関係を模擬することとした。このシミュレータの開発により、フルエンス分布の均一度とビームスキャン条件を事前に評価・予測することが可能となった。

既設ビームスキャナを用いてビームフルエンス分布が均一となる原因を明きらかにするために、スキャナ電磁石電源の50 Hz三角波の出力波形を測定し、シミュレータによるフルエンス分布を模擬した。その結果、三角波の歪によることが明きらかとなり、実験結果とも良く一致した。三角波に歪が存在すると、その歪の部分において、ビーム滞留時間が変わり、それにより不均一になることが分かった。そこでLDコースのスキャナ電源の改造を行い、フルエンス分布の均一度はを飛躍的に向上した。他の2式（HY, LXコース）の電源についても、将来改造する予定である。

謝辞

本研究にあたって、データ測定に協力し、スキャナおよびシミュレータについて議論してくださったイオン加速器管理課・貴家恒男課長、サイクロトロン係・中村義輝氏、奈良孝幸氏、石堀郁夫氏、横田渉氏、福田光宏氏に感謝の意を表す。データ・情報を交換してくださったサイクロトロンユーザーの森田洋右氏、工藤久明氏、菊池正博氏に感謝の意を表す。サイクロトロンの運転およびデータ測定・解析に協力してくださった居城悟氏、望月誠互氏および運転員の方々に感謝の意を表す。電源の改造および相談に乗っていただいた(株)工藤電機の寿田一男氏に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) A.M.Koehler, R.J.Schneider, and J.M.Sisterson, *Med. Phys.*: 4, 297-301 (1977).
- 2) K.Crowe, L.Kanstein, J.Lyman, and F.Yeater: LBL Report No.4235 (1975).
- 3) W.T.Chu, S.B.Curtis, J.Llacer, T.R.Renner, and R.W.Sorensen: *IEEE Trans. Nucl. Sci.*: NS-32 (5), 3321-3323 (1985).
- 4) W.Chu, M.McEvoy, M.Nyman, T.Renner, B.Gonzales, R.P.Singh, and R.Stradner, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*: NS-32 (5), 3324-3326 (1985).
- 5) B.Larsson: *Brit. J. Radiol.*, 34, 143-151 (1961).
- 6) T.Kanai, K.Kawachi, H.Kumamoto, H.Ogawa, T.Yamada, H.Matsuzawa, and T.Inada: *Med. Phys.*, 7, 365-369 (1980).
- 7) 河内清光, 金井達明, 松沢秀夫, 中村讓, 稲田哲雄: *日本医学放射線学会雑誌*, 42 (5), 467-475 (1982).
- 8) B.Larsson, and S.Graffman: *Proc. of a medical workshop on accelerators for charged-particle beam therapy at Fermi, NAL on July 24-25*, 7-39 (1985).
- 9) 田中隆一, 三友昭市, 須永博美, 松田光司, 田村直幸: *JAERI-M* 82-033 (1982).
- 10) 須永博美, 上松敬, 田中隆一, 吉田健三, 河野功: *RADIOISOTOPES*, 37, 84-87 (1988).
- 11) R.D.H.Chu, G.VanDyk, D.F.Lewis, K.P.J.O'Hara, B.W.Buckland, and F.Dinelle: *Radiat. Phys. Chem.*, 35, 767-773 (1990).

表 2.1 スキャナ 主要諸元

	LD1ポート		HY1ポート		LX1ポート	
	X軸	Y軸	X軸	Y軸	X軸	Y軸
照射方向	水平方向		垂直方向		垂直方向	
有効照射範囲*1 (標準)	20×20mm ~ 100×100mm		20×20mm ~ 50×50mm		10×10mm ~ 20×20mm	
掃引周波数(三角波)	50Hz	0.5/1.0 /2.5/5Hz	0.5/1.0 /2.5/5Hz	50Hz	50Hz	0.5/1.0 /2.5/5Hz
ポール長	0.6m	0.6m	0.3m	0.3m	0.3m	0.3m
ドリフト長	3.967m	3.167m	2.560m	3.060m	2.0585m	1.5585m
面走査時間	1.0/0.5/0.2/0.1秒		1.0/0.5/0.2/0.1秒		1.0/0.5/0.2/0.1秒	
最大掃引ピッチ*2	1/2/5/10mm		0.5/1/2.5/5mm		0.1/0.2/0.5/1mm	
最大偏向角*3	0.72°	0.90°	0.56°	0.47°	0.28°	0.37°
k 値 [G/A]	2.646	2.709	3.889	3.950	4.027	4.057
電流源最小出力(4%)	± 6.9A _P	± 8.2A _P	± 7.0A _P	± 5.9A _P	± 3.7A _P	± 4.8A _P
電流源最大出力(105%)	± 171A _P	± 216A _P	± 180A _P	± 151A _P	± 92A _P	± 122A _P

注) X, Y軸は, ビームの上流からターゲット面を見て, 横方向をX, 縦方向をYとする。

*1 : 電源および電磁石の性能によってのみ規定される範囲ではなく, ビーム光学, ビームダクト中に存在する障害物等によっても規定される。

*2 : ビームセンターの掃引範囲が有効照射範囲の最大とした場合の掃引ピッチ。

*3 : ビームセンターの掃引範囲が有効照射範囲の最大とした場合の偏向角。

表 2.2 スキャナ偏向電磁石 主要諸元

	LDコース		HYコース		LXコース	
	X軸	Y軸	X軸	Y軸	X軸	Y軸
電磁石設置場所	第3軽イオン室		第2重イオン室		第2軽イオン室	
定格周波数(三角波)	50Hz	0.5/1.0 /2.5/5Hz	0.5/1.0 /2.5/5Hz	50Hz	50Hz	0.5/1.0 /2.5/5Hz
トリム起磁力	6740AT	8460AT	10540AT	8800AT	5200AT	6880AT
定格起磁力	7420AT	9310AT	11600AT	9680AT	5720AT	7560AT
ターン数	104	104	156	156	156	156
インダクタンス	26.7mH	26.7mH	30.1mH	30.1mH	30.1mH	30.1mH
電圧降下 RI+L・dI/dt	390V	54V	50V	380V	220V	33V
定格電流・電圧	71A 390V	90A 54V	74A 50V	62A 380	37A 220V	49A 33V
冷却	自然空冷	自然空冷	自然空冷	自然空冷	自然空冷	自然空冷

表 2.3 スキャナ電源 主要諸元

	LDコース		HYコース		LXコース	
	X軸	Y軸	X軸	Y軸	X軸	Y軸
電源設置場所	第3軽イオン室		第1重イオン室		第1軽イオン室	
電源の名称	BSLD_X	BSLD_Y	BSHY_Y	BSHY_X	BSLX_X	BSLX_Y
電源周波数	50Hz	0.5/1.0 /2.5/5Hz	0.5/1.0 /2.5/5Hz	50Hz	50Hz	0.5/1.0 /2.5/5Hz
負荷コイルのインダクタンス	26.7mH	26.7mH	30.1mH	30.1mH	30.1mH	30.1mH
定格電流・電圧	79A 425V	99A 60V	69A 416V	82A 55V	41A 245V	54A 36V
受電	AC200V50Hz3相37kVA		AC200V50Hz3相31kVA		AC200V50Hz3相13kVA	
冷却	水冷 50ℓ/min		水冷 40ℓ/min		水冷 30ℓ/min	

表 2.4 スキャニングビームの分布測定データ 一覧

ポート	粒子	エネルギー	スキャン%	スポットサイズ 2 σ_x * 2 σ_y	データファイル名 ・ スキャン	データファイル名 スポット	備考
HY1	$^4\text{He}^{2+}$	50MeV	24*30%	4.5 * 6.0mm	F930118_A	HE50SPOT2L	○
"	"	"	54*85%	"	HY1_17_f3	HY1_13_f3	×
"	"	"	24*38%	5.5 * 2.0mm	HY1_20_f3	"	○
LD1	H ⁺	10MeV	34*25%	40.0 * 6.0mm	R39AS2	C39NS1	×
LD1	H ⁺	45MeV	20*20%	7.0 * 6.0mm	LD1_11_f3	LD1_10_f3	○
"	"	"	65*65%	"	LD1_08_f3	"	×
"	"	"	26*27%	8.0 * 5.0mm	LD1_03_f3	LD1_02_f3	○
"	"	"	65*65%	"	LD1_02_f3	"	×
"	"	"	74*74%	"	LD1_07_f3	"	×
LD1	$^4\text{He}^{2+}$	20MeV	17*17%	2.5 * 1.2mm	F930713_24	F930713_21	○
"	"	"	"	6.0 * 3.0mm	F930713_34	F930713_32	○
"	"	"	"	3.0 * 8.0mm	F930713_14	F930713_12	○
LD1	$^{40}\text{Ar}^{8+}$	175MeV	18*18%	5.5 * 2.5mm	H6021612	H6021611	○
"	"	"	29*29%	"	H6021613	"	○
"	"	"	47*47%	"	H6021614	"	○
"	"	"	18*18%	16.0 * 8.0mm	H6021622	H6021621	○
"	"	"	29*29%	"	H6021623	"	○
"	"	"	47*47%	"	H6021624	"	○

注) この表はスポットビーム分布データのはっきりしたスキャニングビームの分布測定データの一覧である。備考の○印はスキャニングビームの全体像が測定されたデータで、×印はビームスリットによりビームが切り取られていて全体像を見ることのできないデータである。

* : スキャン%とは、各スキャナ電源の出力%であり、最大出力電流を105%とした時のパーセント値で示す。

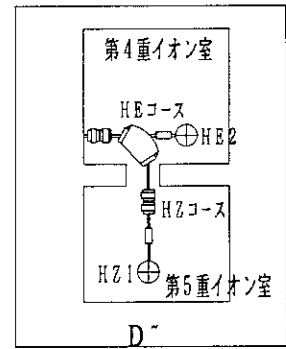
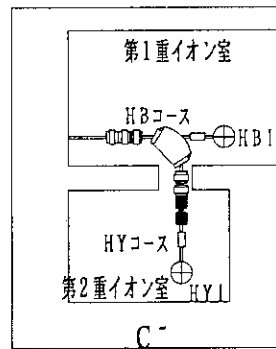
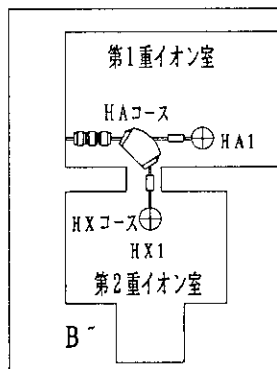
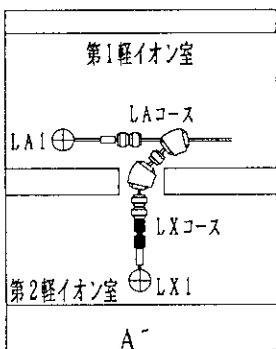
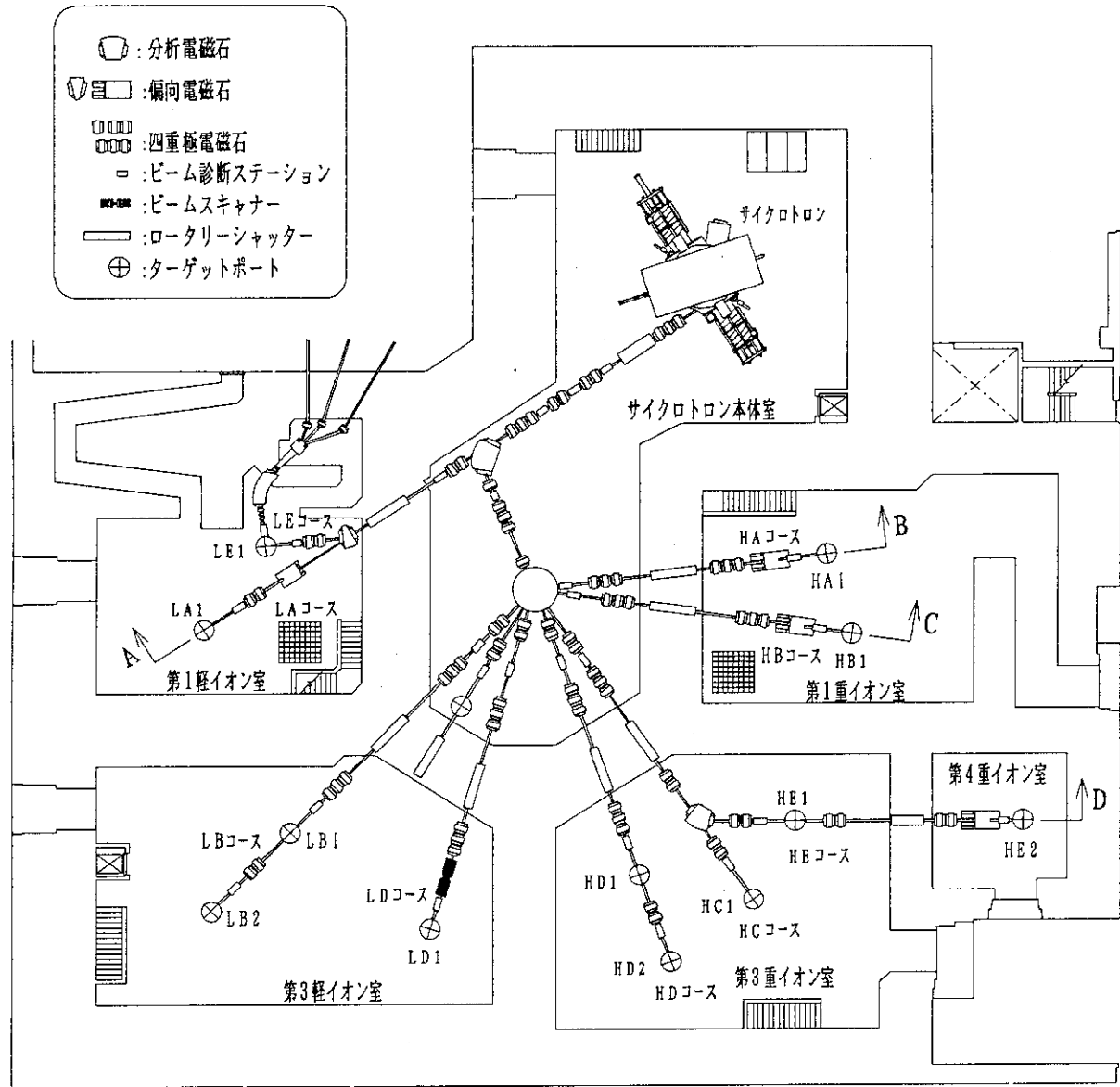


図 2.1 サイクロトロンのビームラインとビームスキャナの位置

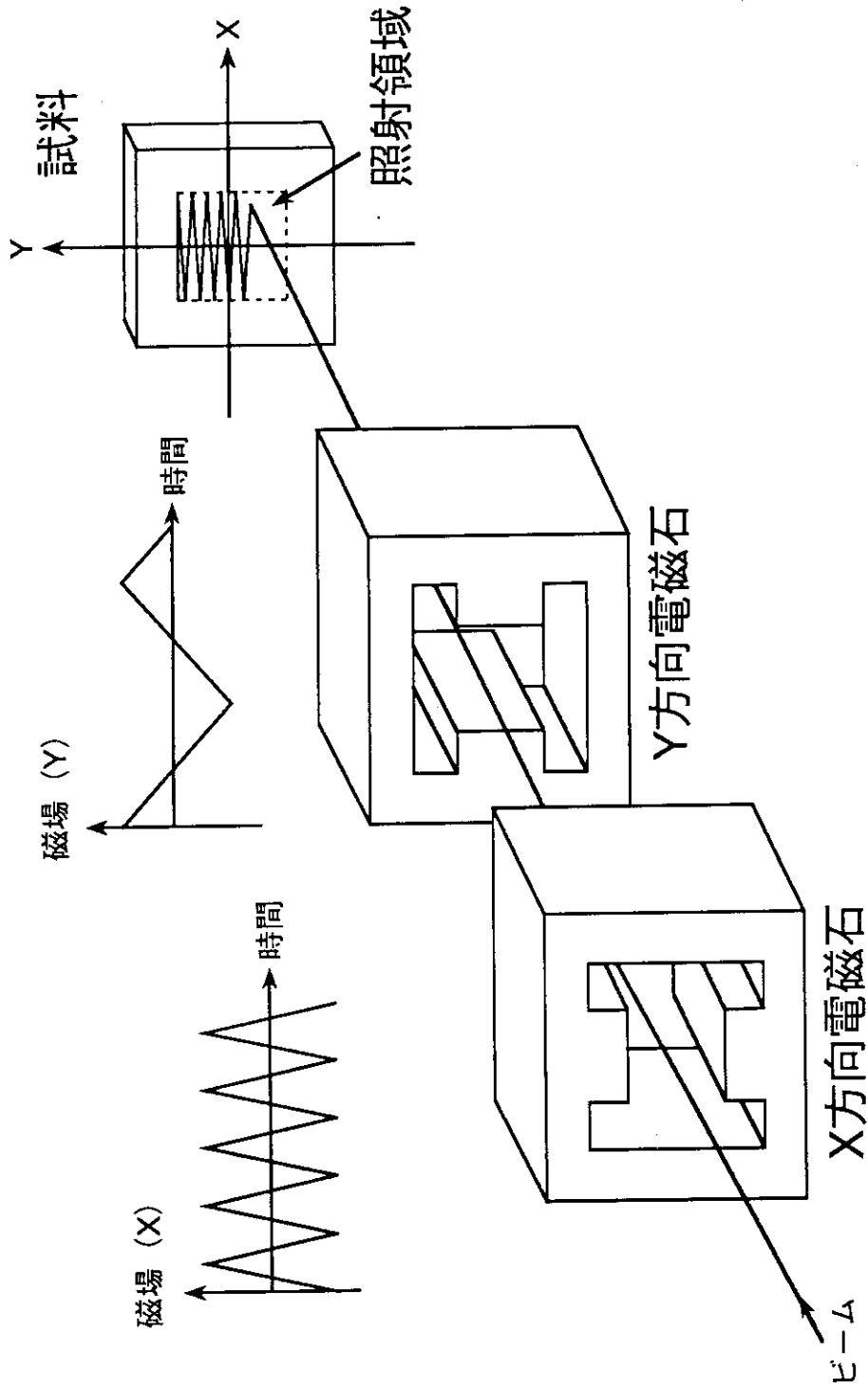


図 2.2 スキャン方式 (概念図)

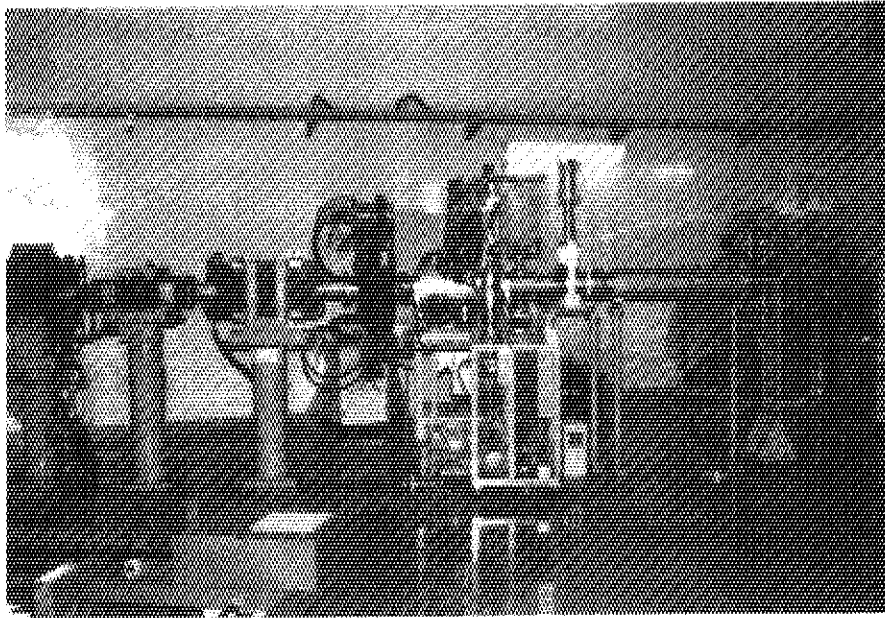


図 2.3 水平方向照射ライン配置 (LDコース)

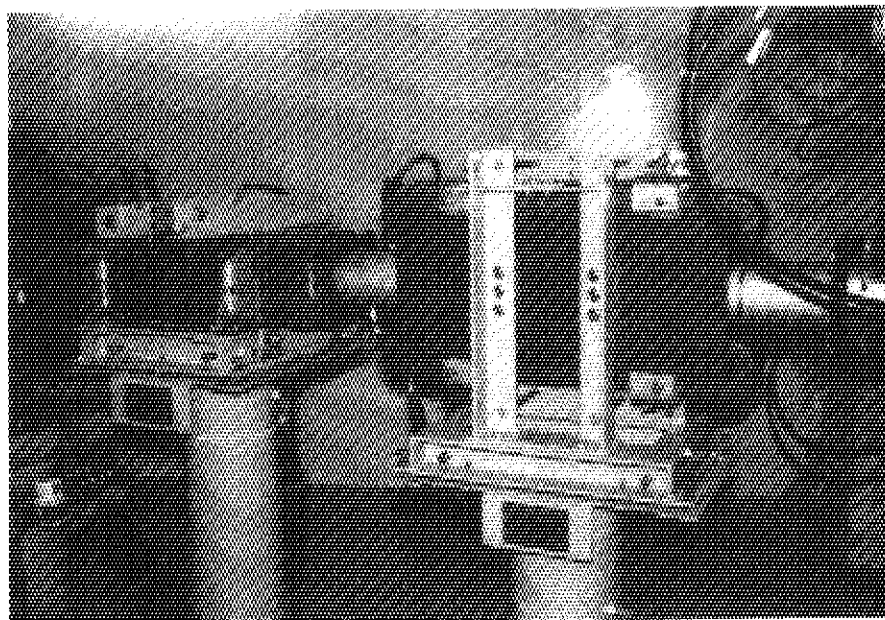


図 2.4 水平方向照射ライン
スキャナ偏向電磁石 (LDコース)

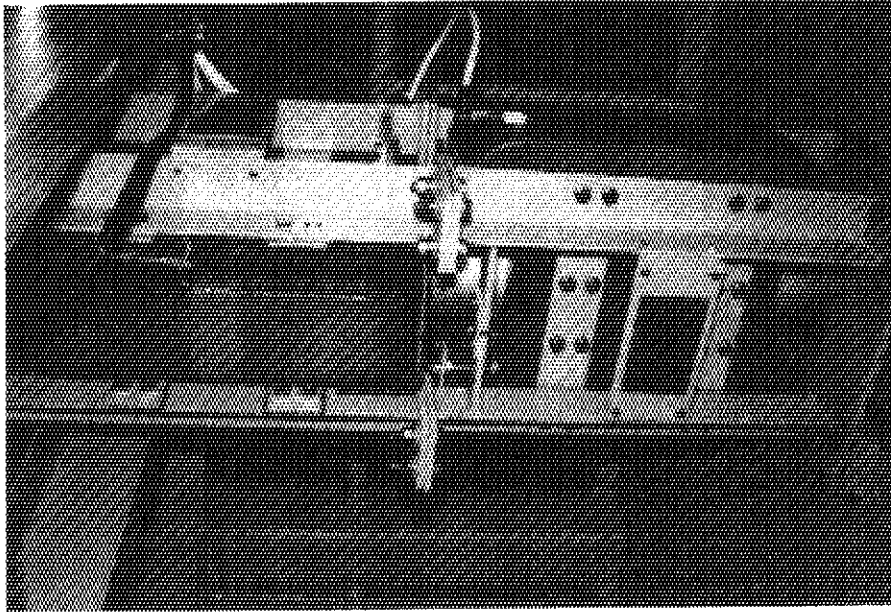


図 2.6 垂直方向照射ライン
スキヤナ偏向電磁石 (HYコース)

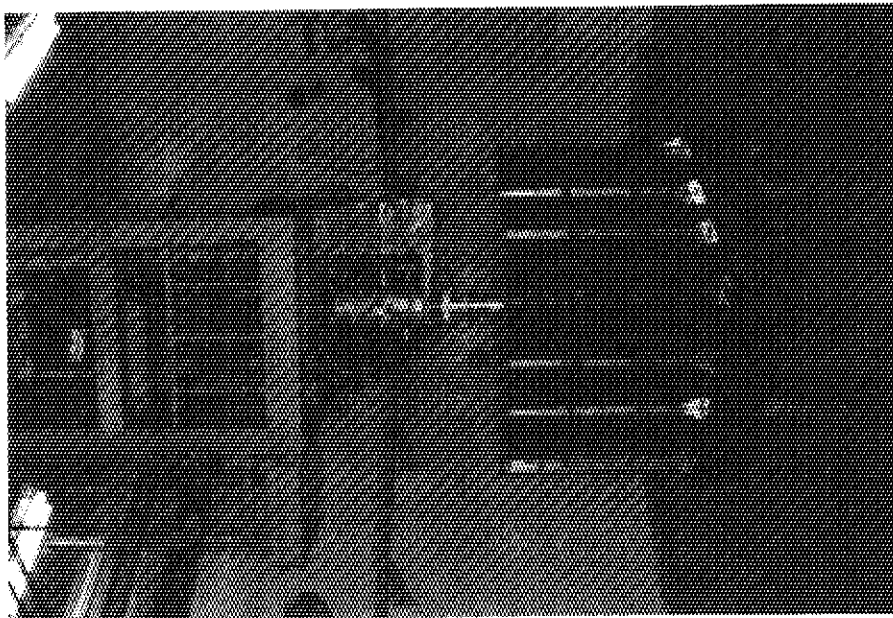


図 2.5 垂直方向照射ライン配置 (LXコース)

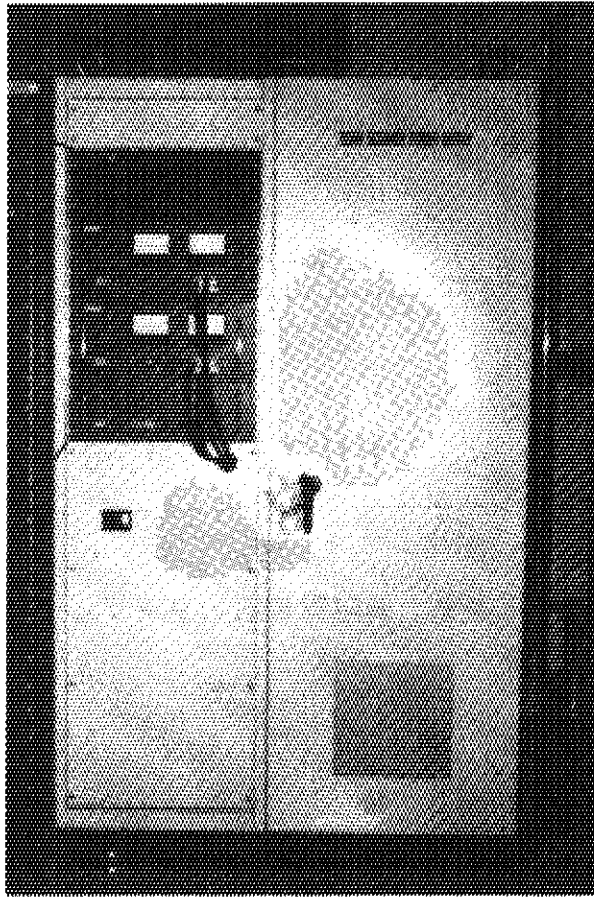


図 2.7 ビームスキャナ電源盤 (Lxコース用)

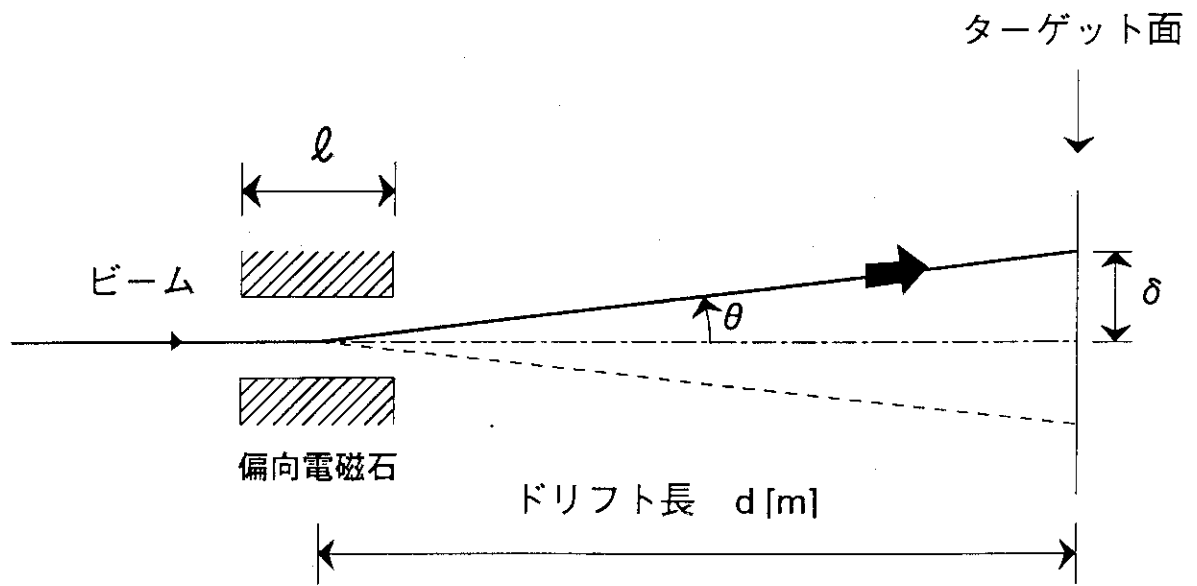


図 2.8 スキャナ偏向電磁石とターゲットの位置関係

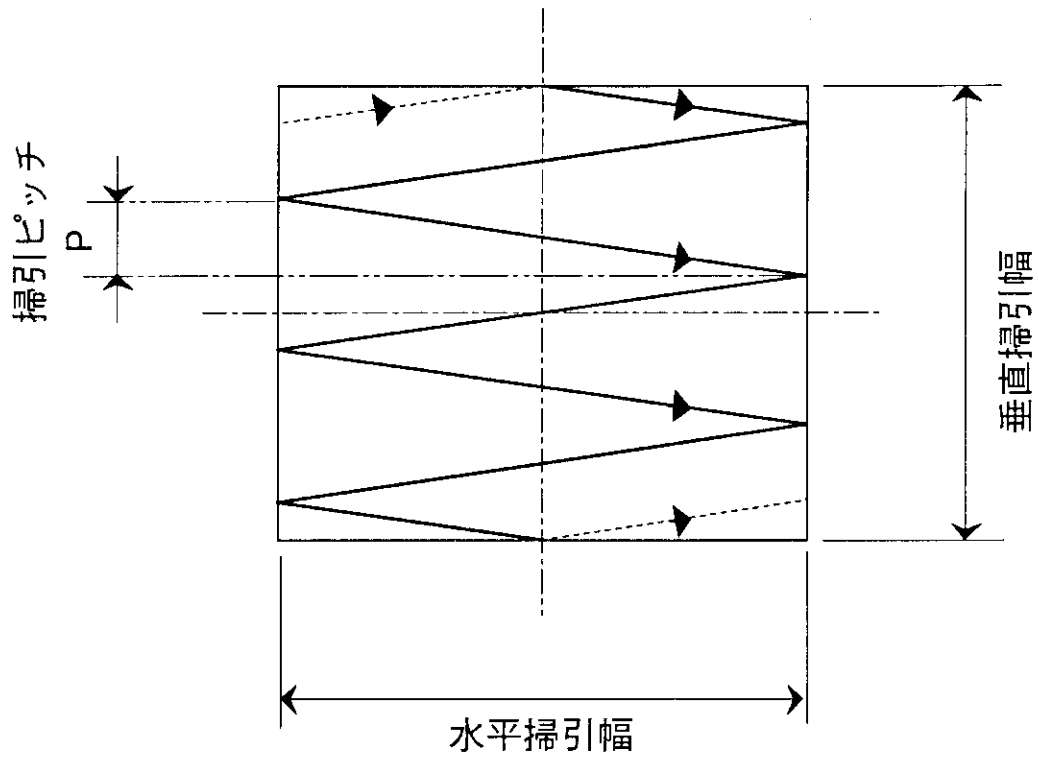


図 2.9 ビームの掃引軌跡と掃引ピッチ

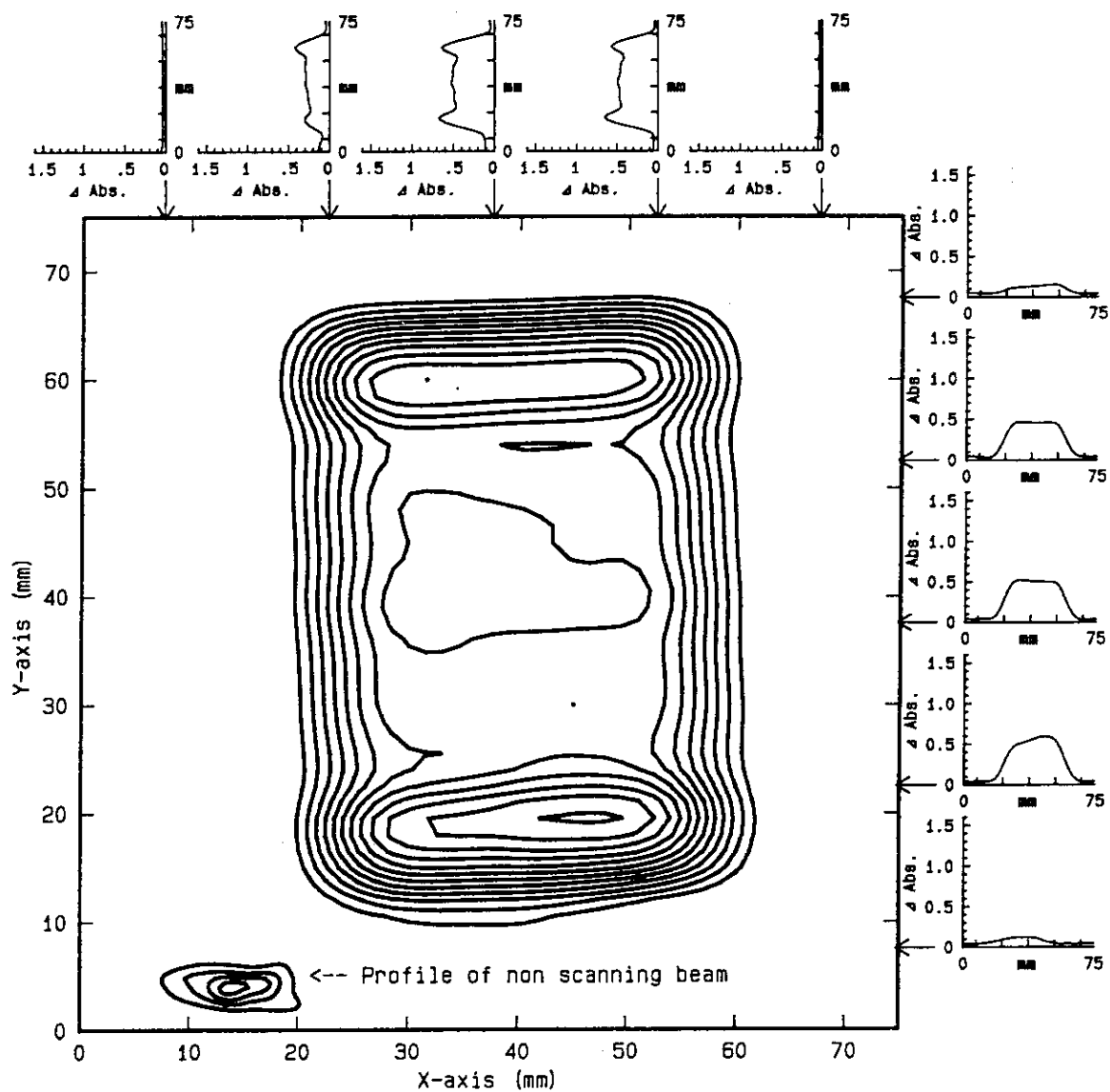


図 2.10 代表的なスキャニングビームの分布

HYコース ${}^4\text{He}^{2+}$ 50 MeV 0.1 e μA

41 × 55 A (24 × 38%) スキャニング 252 秒照射

照射試料: CTAフィルム線量計 (FTR-125)

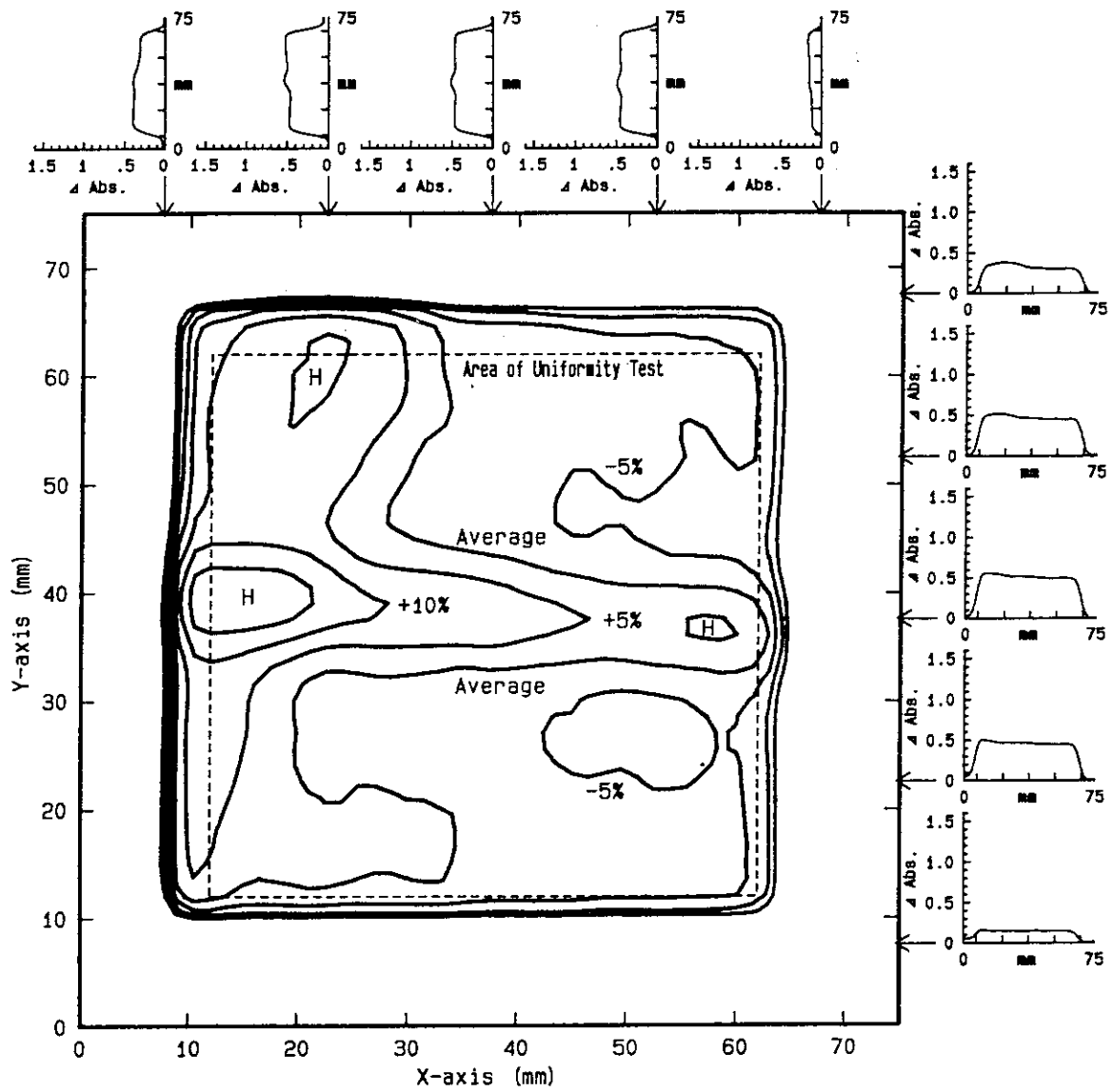


図 2.11 代表的なフルエンス均一度解析結果

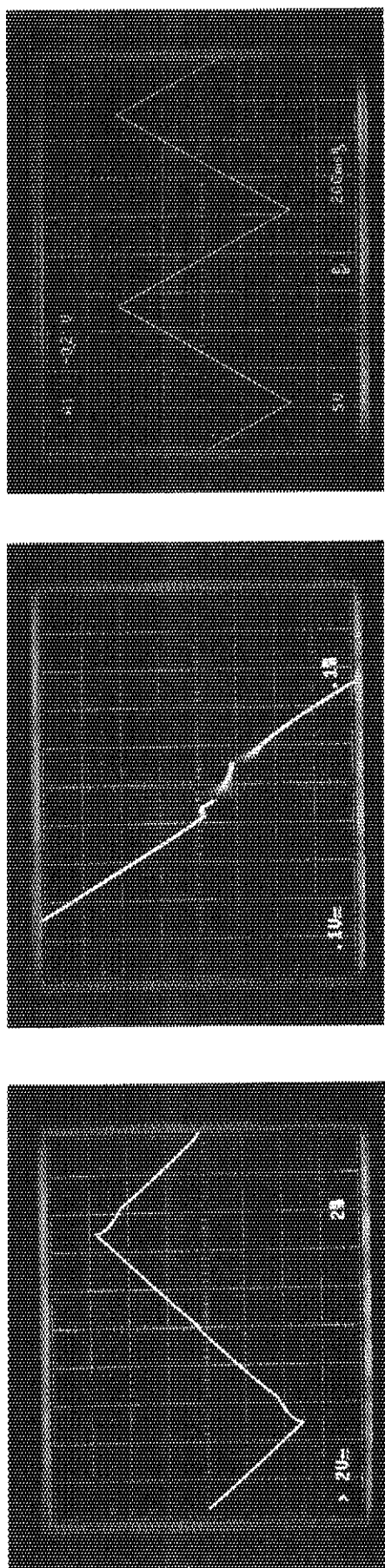
HYコース ${}^4\text{He}^{2+}$ 50 MeV 0.1 e μA

93 × 122 A (54 × 85%) スキャンング 1283 秒照射

照射試料: CTAフィルム線量計 (FTR-125)

均一度解析結果: +19% -9%

(上下左右がビームスリットで切り取られている)



(a) 歪みのある波形(50 Hz) (b) 極性切換え部分を拡大(50 Hz) (c) 歪みのない波形(50 Hz 以外)

図 2.12 代表的なスキャナ電源・出力波形

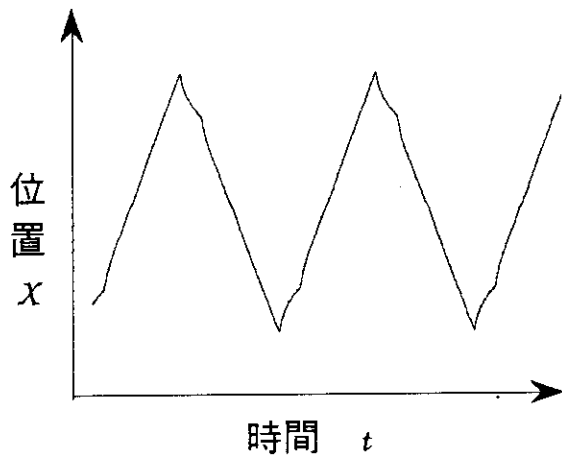


図 3.1 スキャニング波形

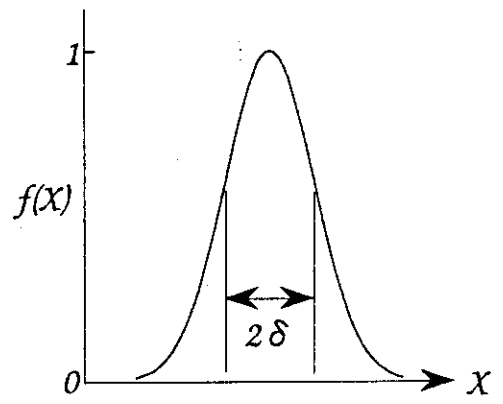


図 3.2 ビームスポットの分布

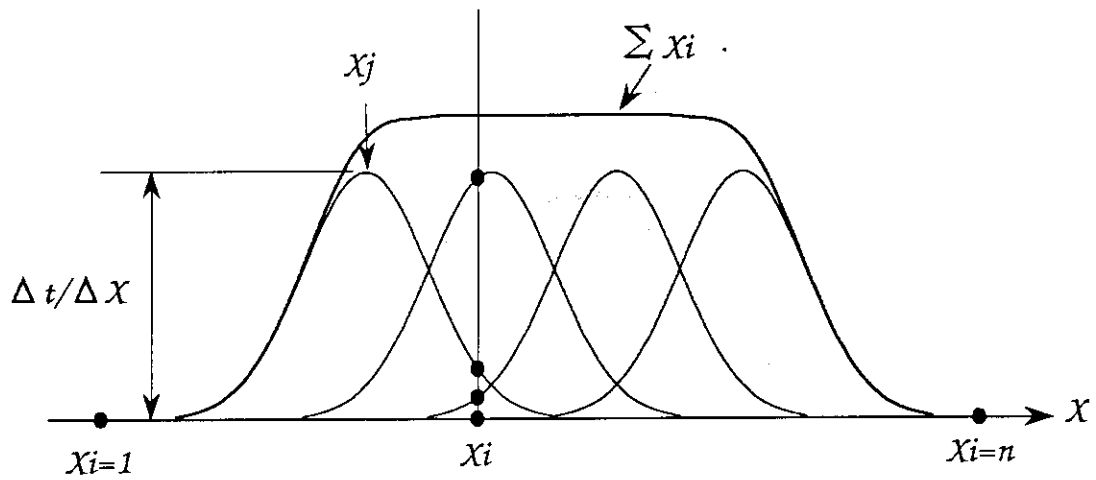
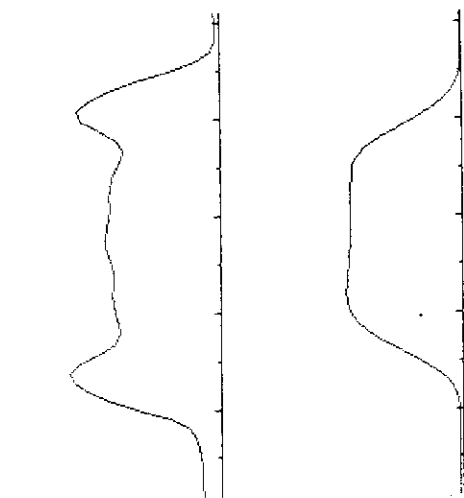


図 3.3 スキャニングによるビーム分布 (入射粒子数の積算)

File: HY_20.f3 Scan(n) 75 Marker(nal) 1.5
 S.G. : .105 M : 51



JREB1 AWF-Cyclotron Ion Beam Scanning Simulator
 Version: 1.00 by T.Agetatsu(JAERI3272) last edit # 93.08.03

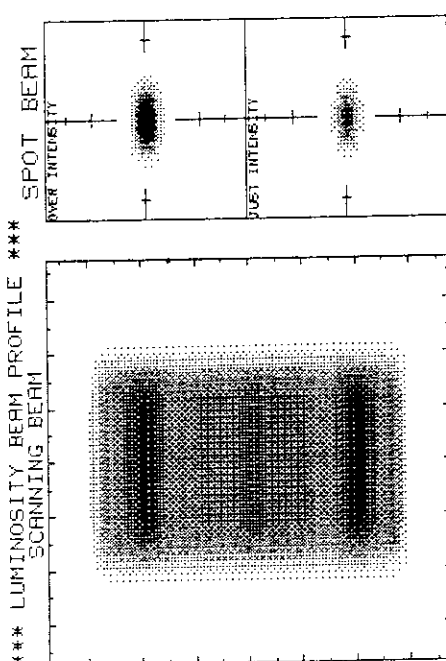
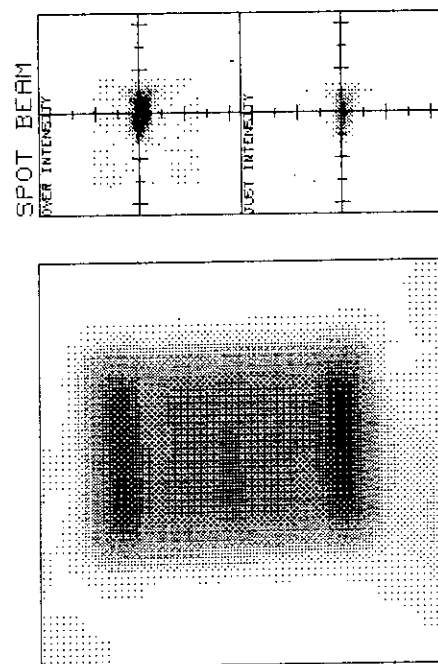
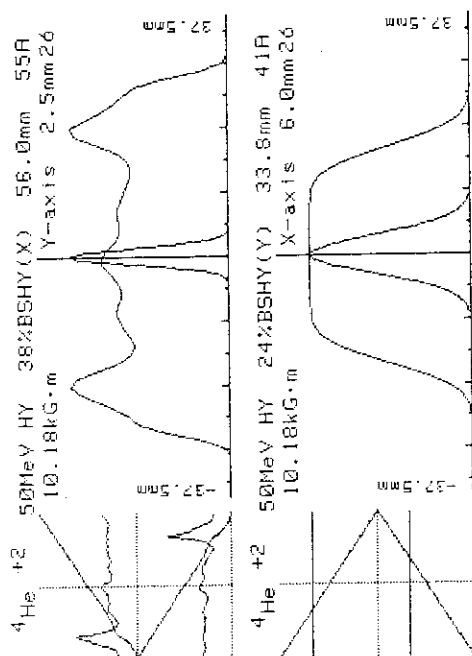


図 3.5 HYコース・実測データ

図 3.4 HYコース・シミュレーション

File : LD_03.f3 ScanLen: 120 Marker: 2
 S.E. : .087 N : 61

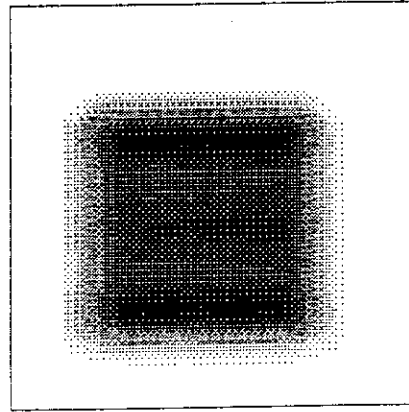
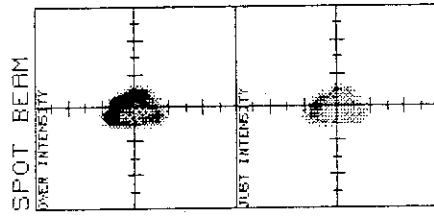
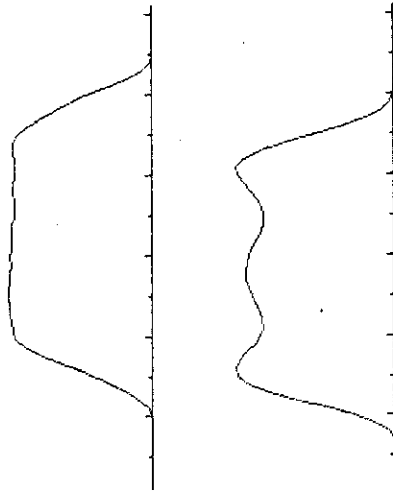


図 3.7 LDコース・実測データ

JREI AVF-Cyclotron Ion Beam Scanning Simulator
 Version: 1.00 by T.Agetatsu(JAERI3272) last edit 8/31/88.03

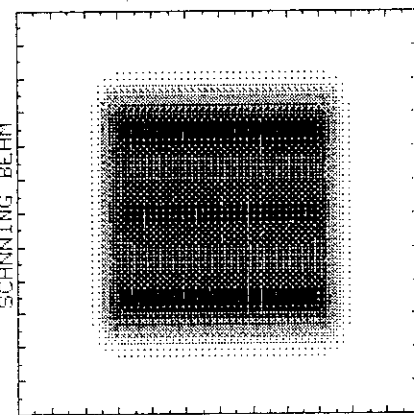
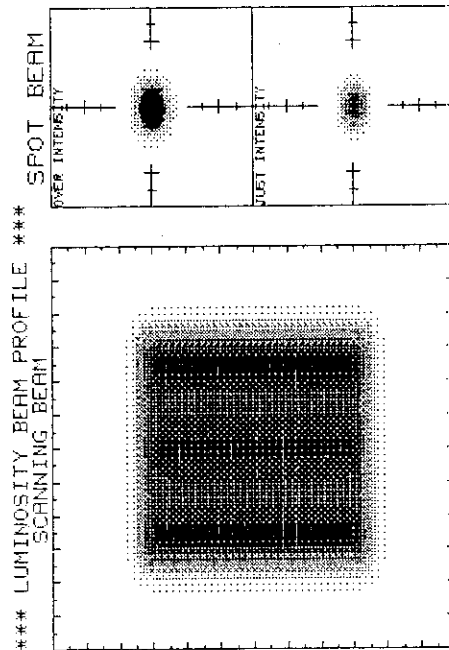
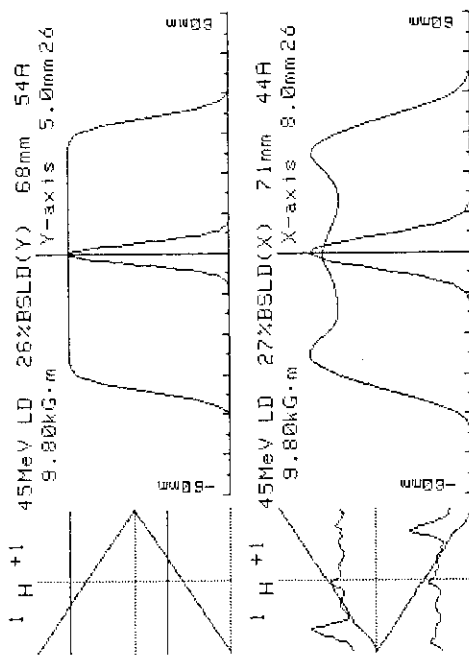
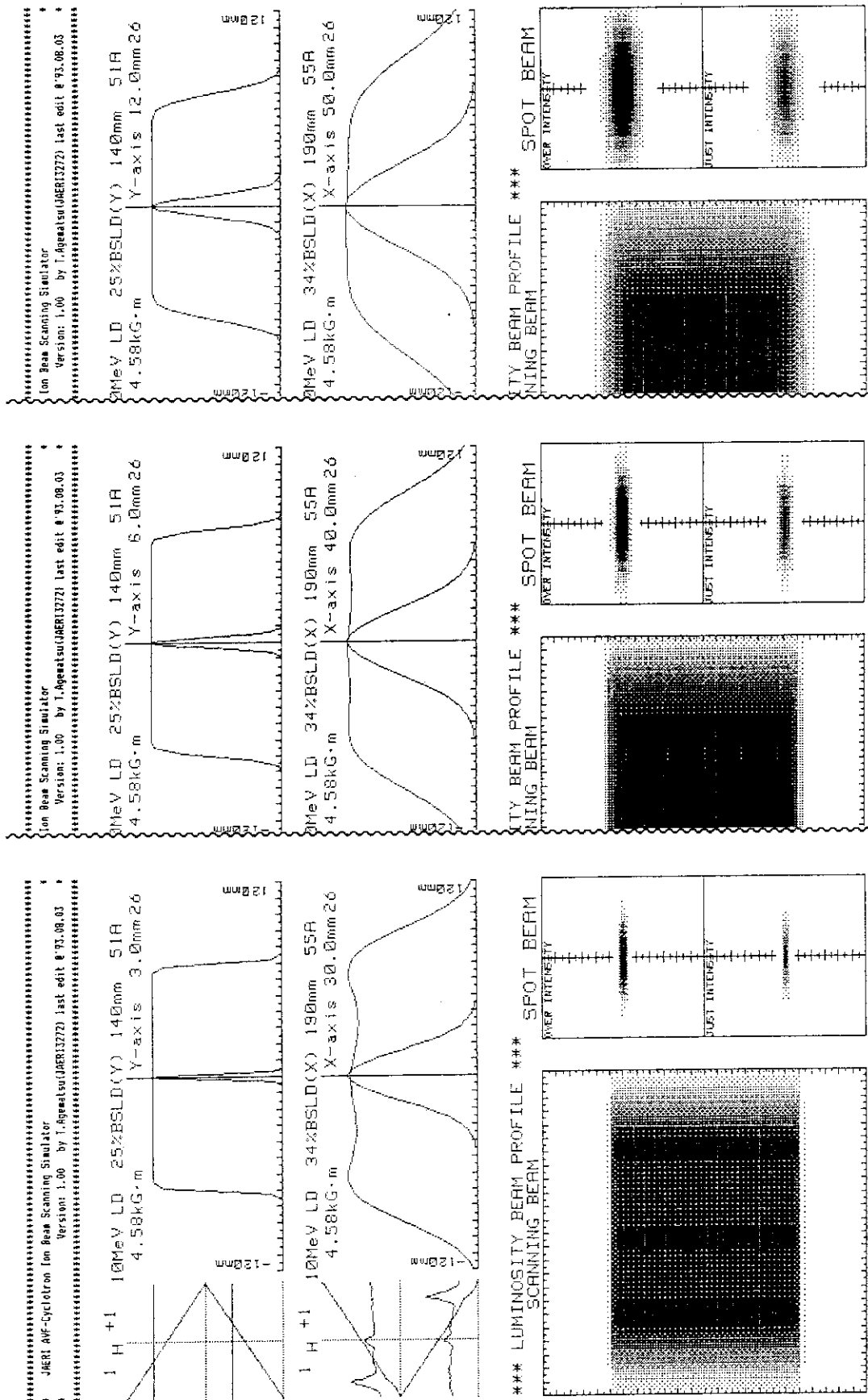


図 3.6 LDコース・シミュレーション



(a) $2\sigma_x:30\text{mm } 2\sigma_y:3\text{mm}$ (b) $2\sigma_x:40\text{mm } 2\sigma_y:6\text{mm}$ (c) $2\sigma_x:50\text{mm } 2\sigma_y:12\text{mm}$

図 3.8 LDコース・シミュレーション (均一度を得るためのビームスキヤニング条件)

 JAERI AVF-Cyclotron Ion Beam Scanning Simulator
 Version: 1.00 by T. Ageton (JAERI3272) last edit # 93.08.03 #

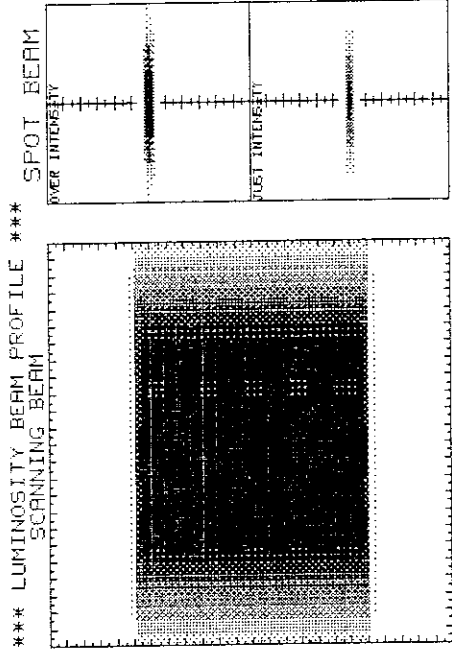
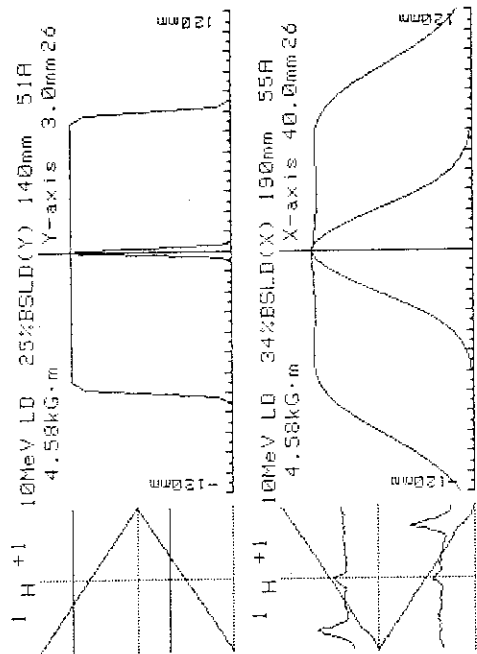


図 3.9 LDコース・シミュレーション
 (実測スポットサイズを入力として)

 File : R39652 Scan[00] 120 Marker[00] 2
 B.G. : .014 N : 61

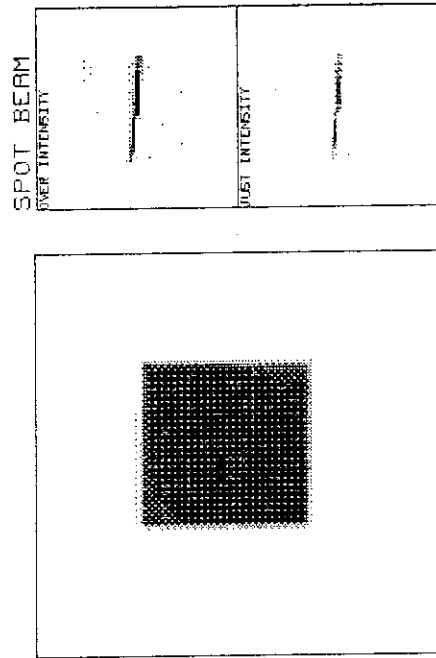
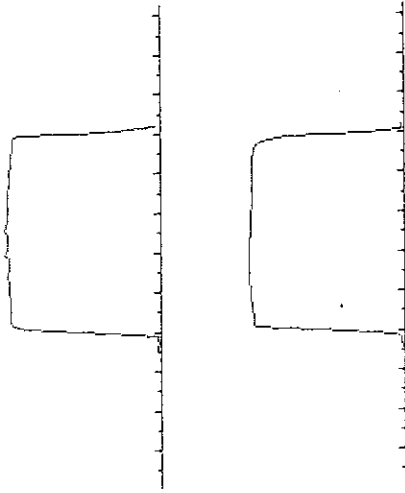


図 3.10 LDコース・実測データ

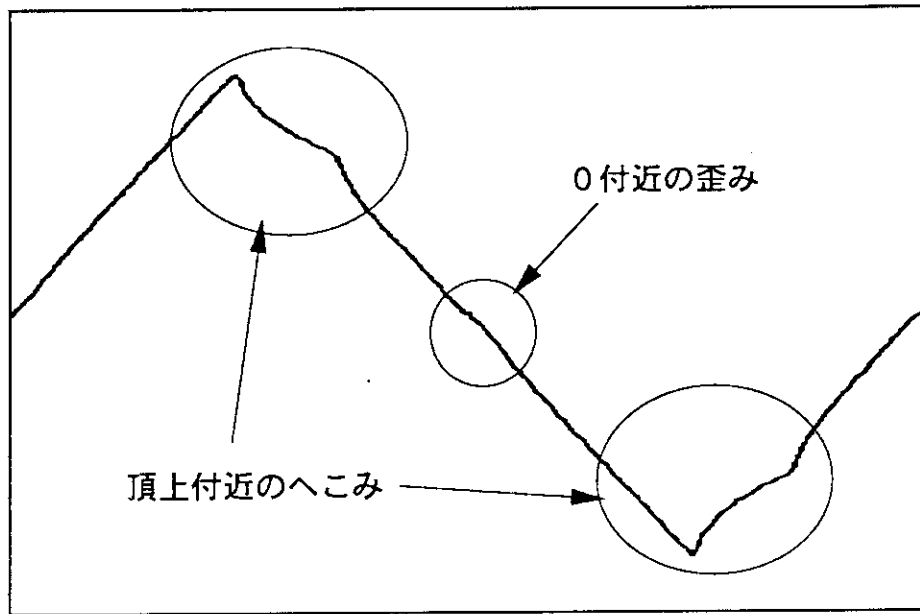


図 4.1 BSLD-X 電源 改造前の出力波形

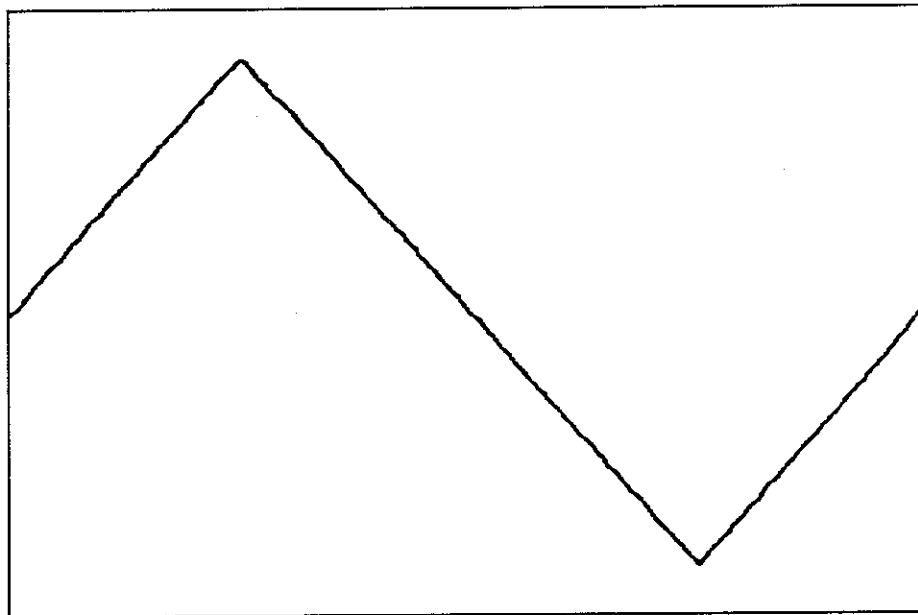


図 4.4 BSLD-X 電源 改造後の出力波形

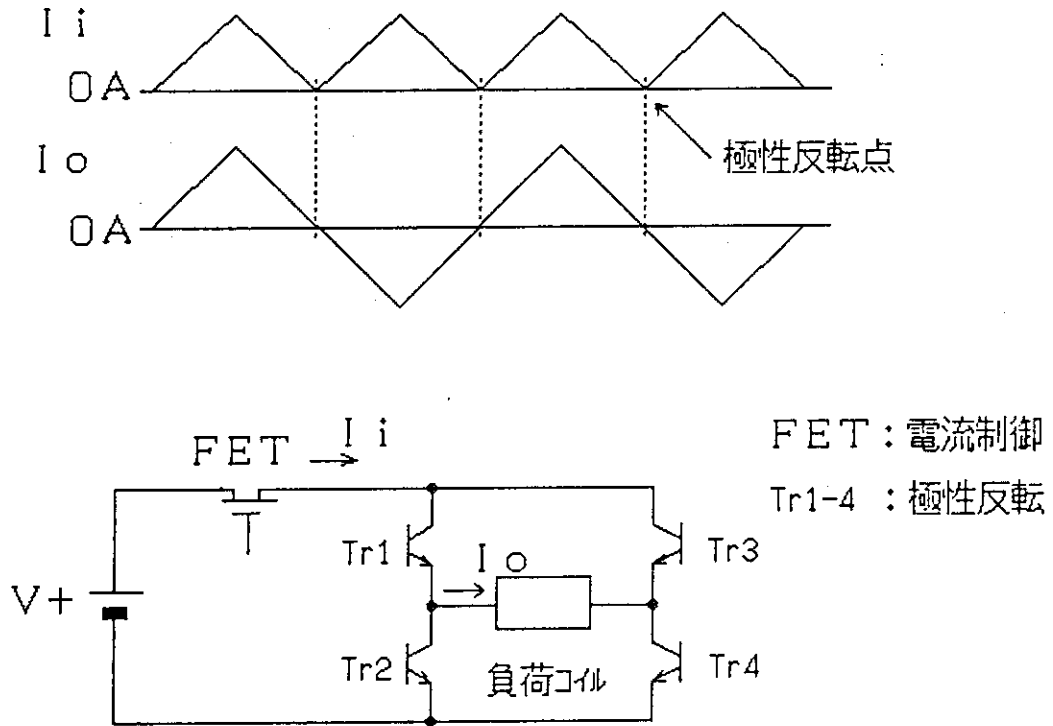


図 4.2 回路内部の電流波形と逆起電圧回生方式 (改造前)

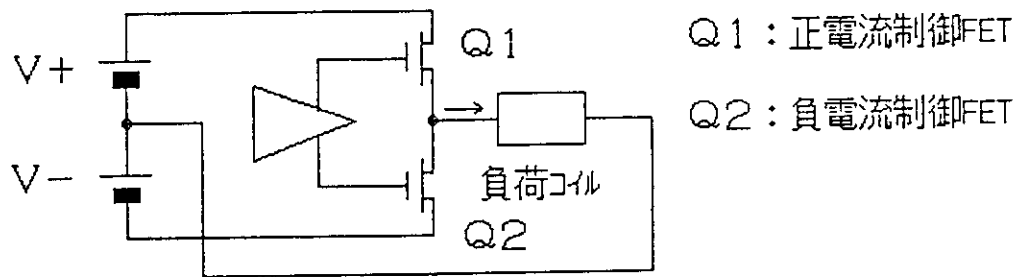


図 4.3 交流アンプ (SEPP) 方式 (改造後)

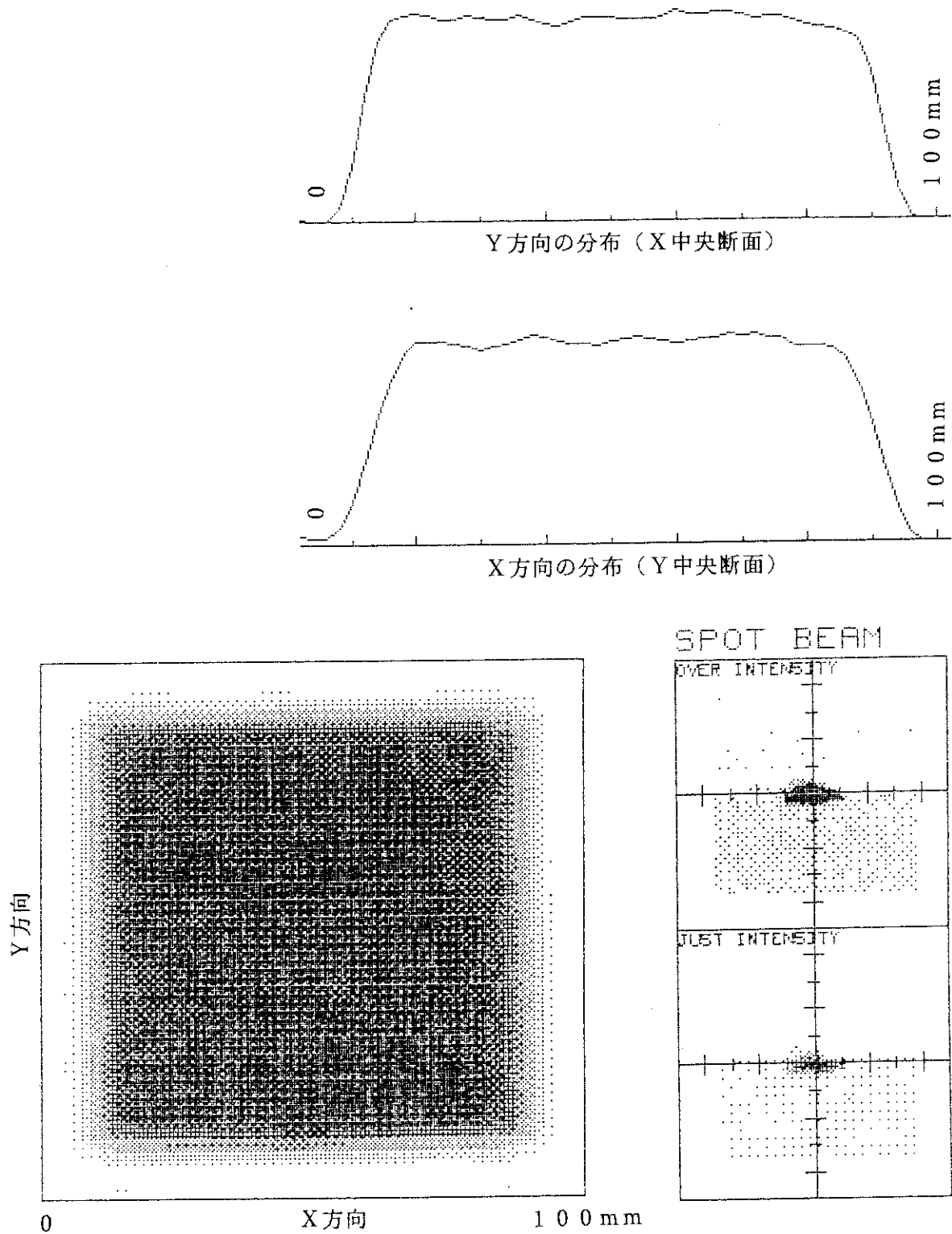
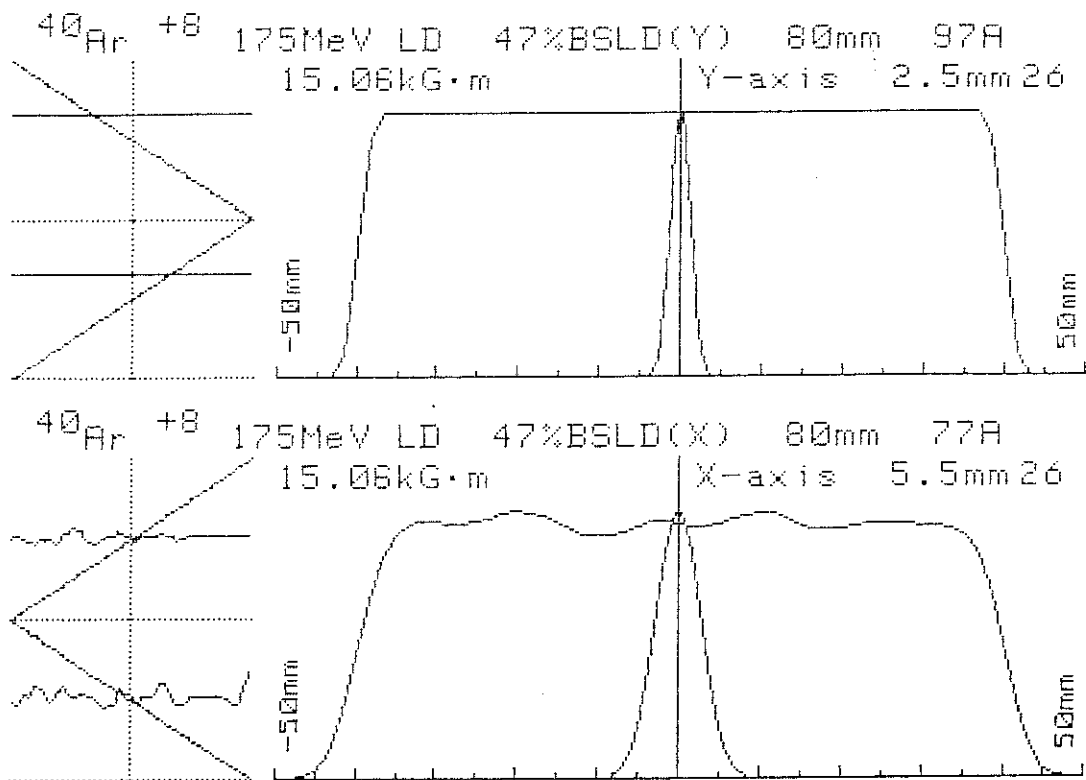
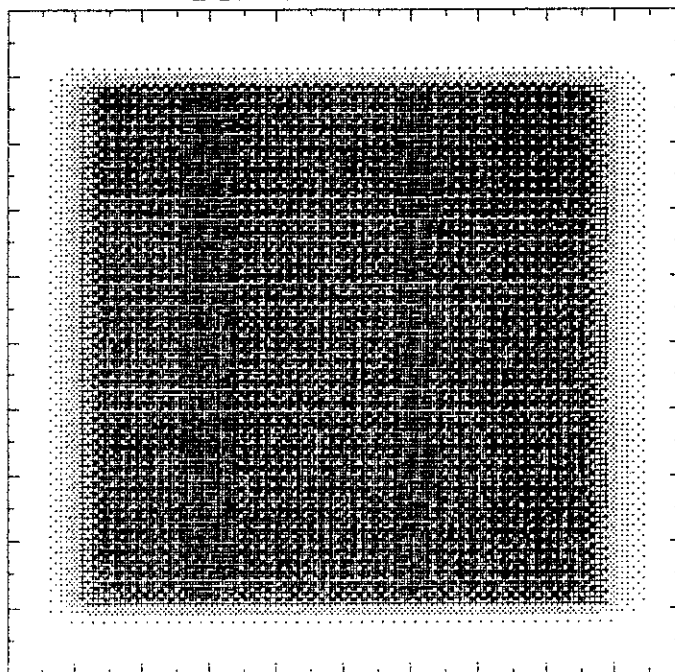


図 4.5 LDコース・実測データ (BSLD-X電源改造後)



*** LUMINOSITY BEAM PROFILE ***
 SCANNING BEAM



SPOT BEAM

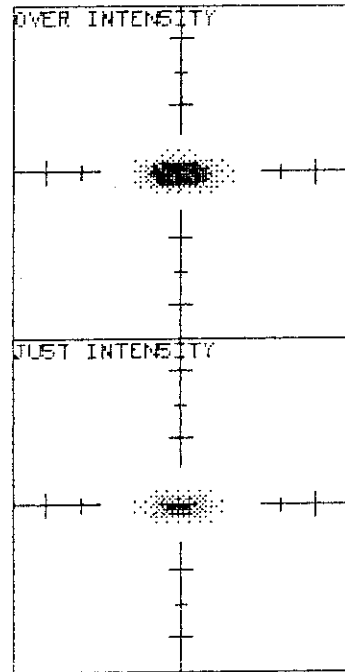
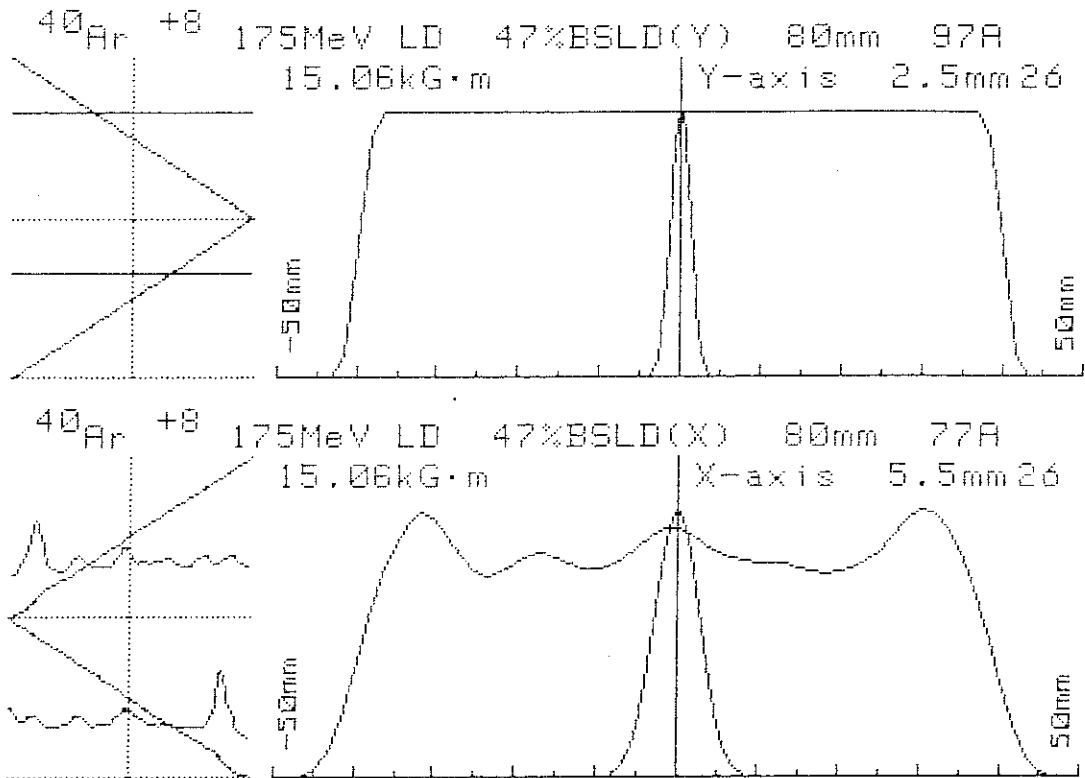
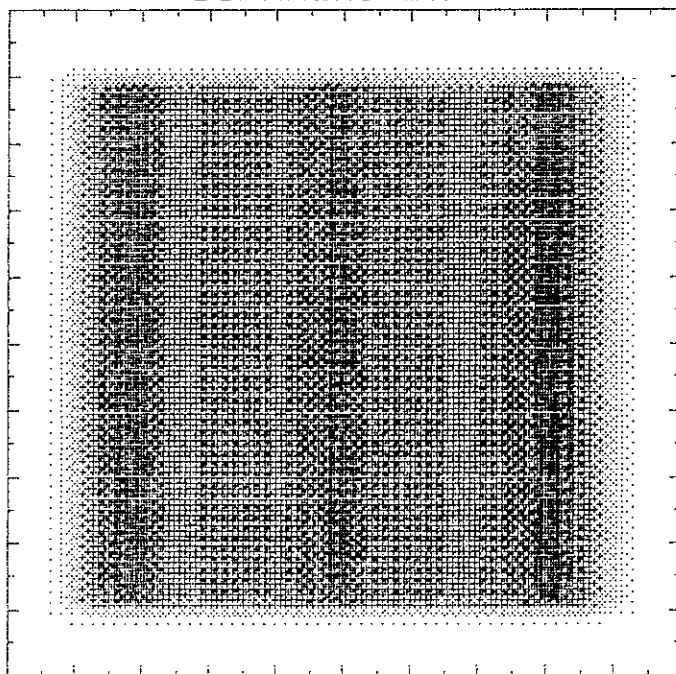


図 4.6 LDコース・シミュレーション (BSLD-X電源改造後)



*** LUMINOSITY BEAM PROFILE ***
 SCANNING BEAM



SPOT BEAM

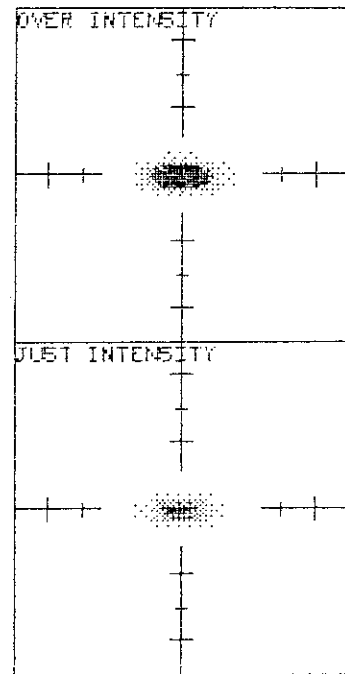


図 4.7 LDコース・シミュレーション (BSLD-X電源改造前)

付録 スキャンニング波形データ一覧

シミュレータで用いているスキャンニング波形データは、出力のパーセントで10%ごとにデータを測定し、計算においては、近接している波形データを使用している。なお、50 Hzを除く他の周波数については、完全三角波として取り扱う。以下に示す各電源ごとの各出力における出力電流波形の一覧図を示す。それぞれの図の左側はスキャンニング波形の1周期分をプロットし、右側はスキャンニングされたビームの位置における滞留時間を示している。

- 図 A L D (BSLD_X) X 軸 / 50 Hz (改造前)
- 図 B L D (BSLD_Y) Y 軸 / 0.5 Hz
- 図 C L D (BSLD_Y) Y 軸 / 1.0 Hz
- 図 D L D (BSLD_Y) Y 軸 / 2.5 Hz
- 図 E L D (BSLD_Y) Y 軸 / 5.0 Hz
- 図 F H Y (BSHY_X) Y 軸 / 50 Hz
- 図 G H Y (BSHY_Y) X 軸 / 0.5 Hz
- 図 H H Y (BSHY_Y) X 軸 / 1.0 Hz
- 図 I H Y (BSHY_Y) X 軸 / 2.5 Hz
- 図 J H Y (BSHY_Y) X 軸 / 5.0 Hz
- 図 K L X (BSLX_X) X 軸 / 50 Hz
- 図 L L X (BSLX_Y) Y 軸 / 0.5 Hz
- 図 M L X (BSLX_Y) Y 軸 / 1.0 Hz
- 図 N L X (BSLX_Y) Y 軸 / 2.5 Hz
- 図 O L X (BSLX_Y) Y 軸 / 5.0 Hz
- 図 P L D (BSLD_X) X 軸 / 50 Hz (改造後)

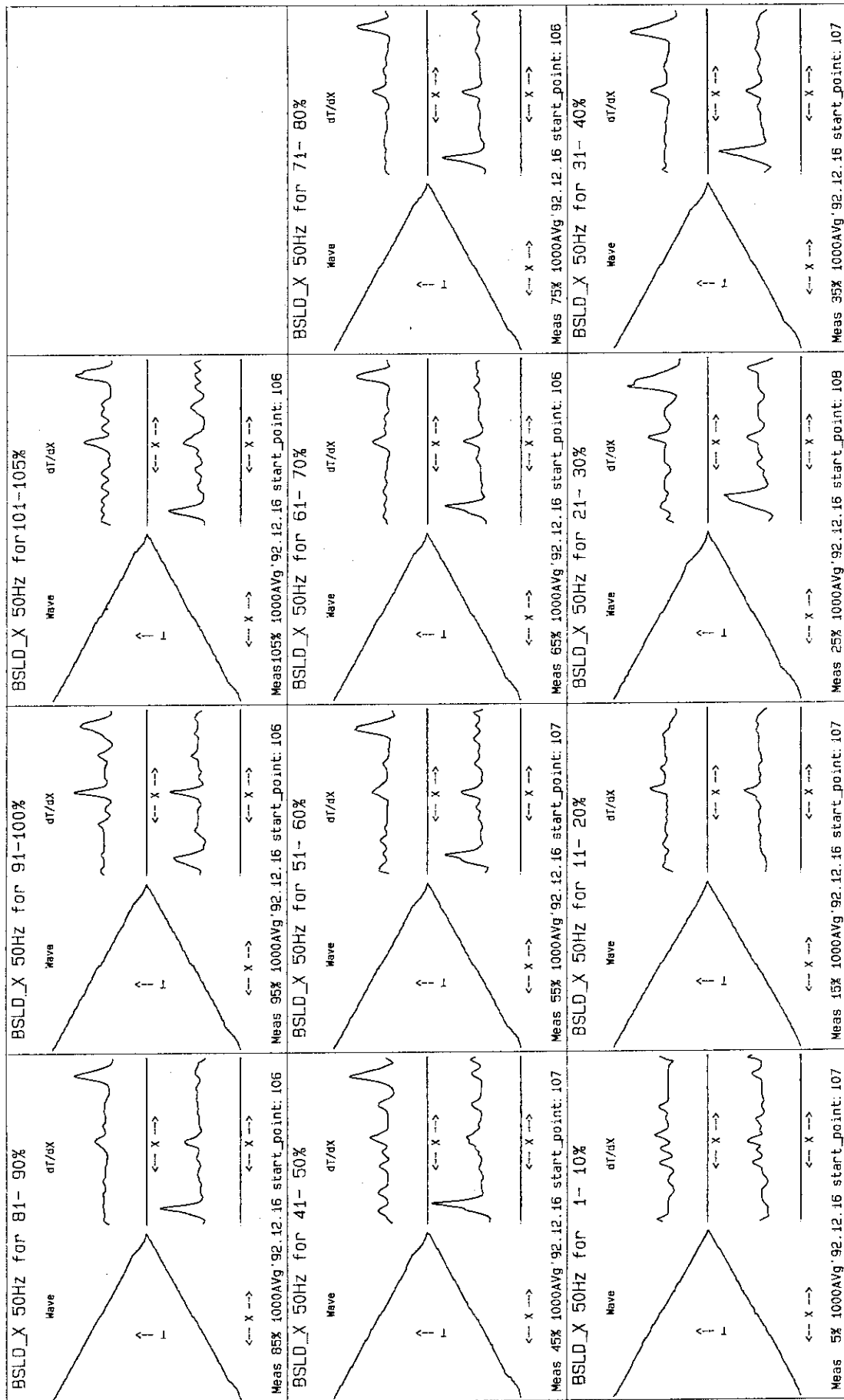


図 A スキヤナ電源 三角波電流出力 および 微分波形 LD-X軸 (BSLD_X) 50Hz 電源 (改造前)

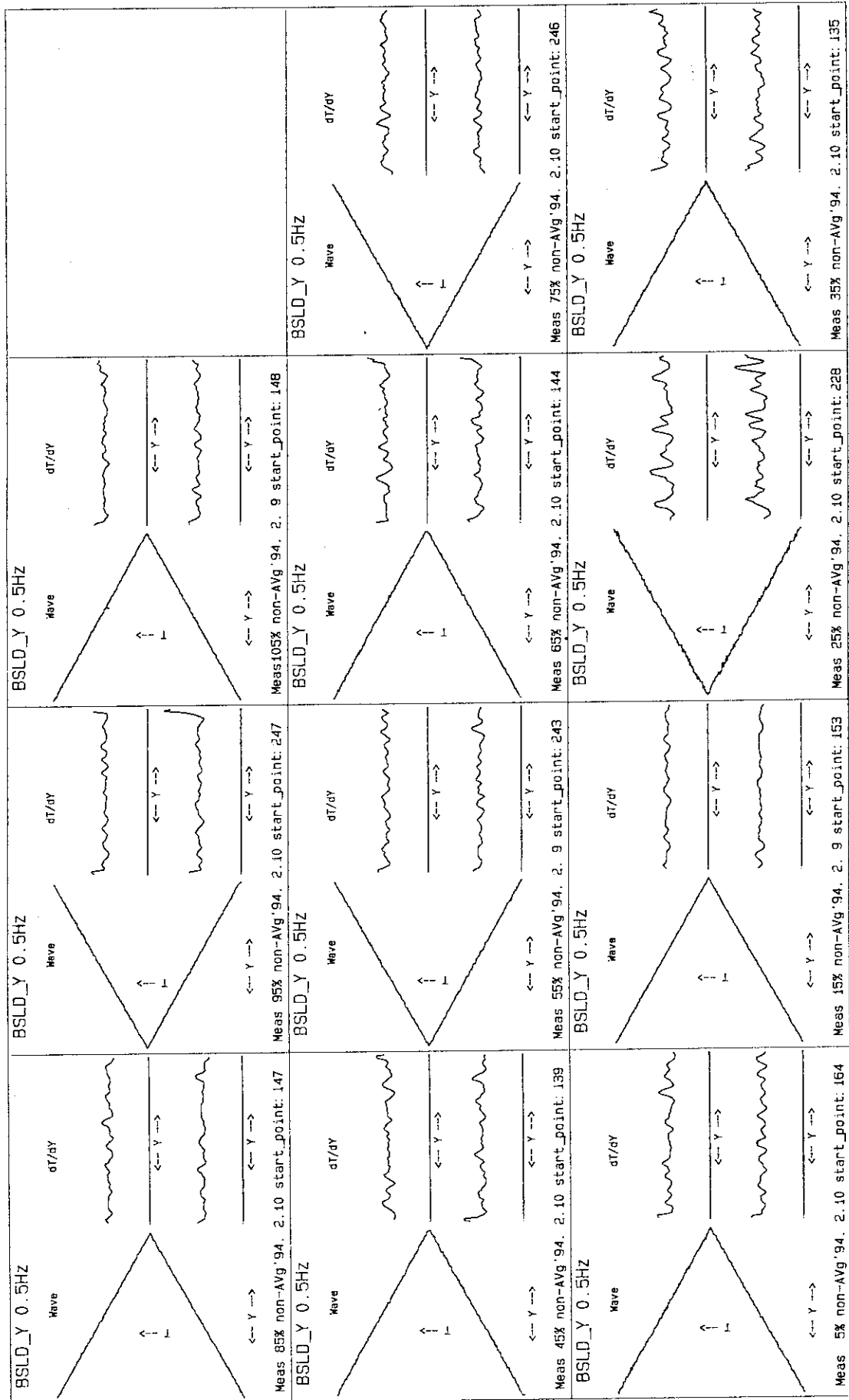


図 B スキヤナ電源 三角波電流出力 および 微分波形 LD-Y軸 (BSLD_Y) 0.5 Hz 電源

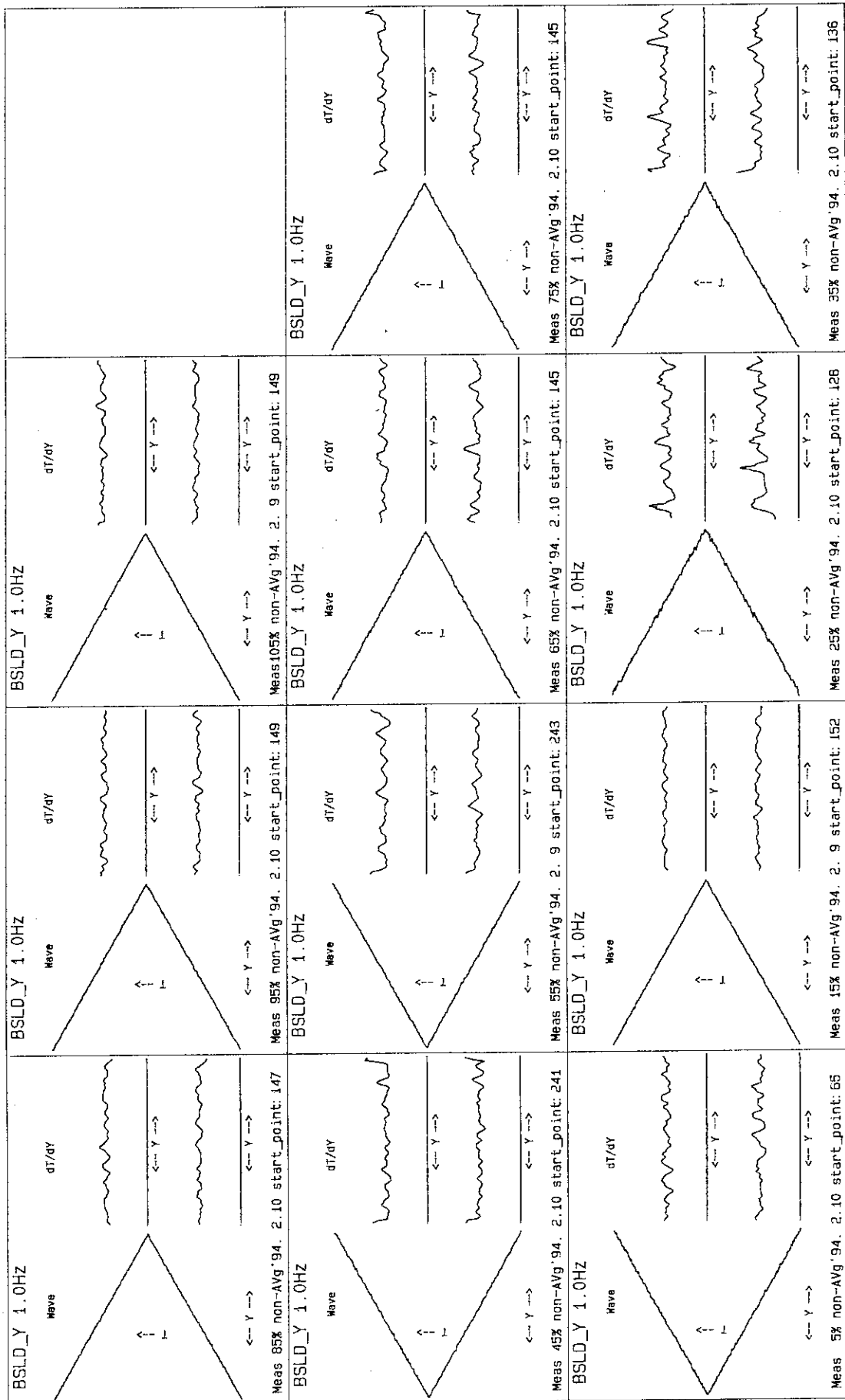


図 C スキヤナ電源三角波電流出力および微分波形 LD-Y軸 (BSLD_Y) 1 Hz 電源

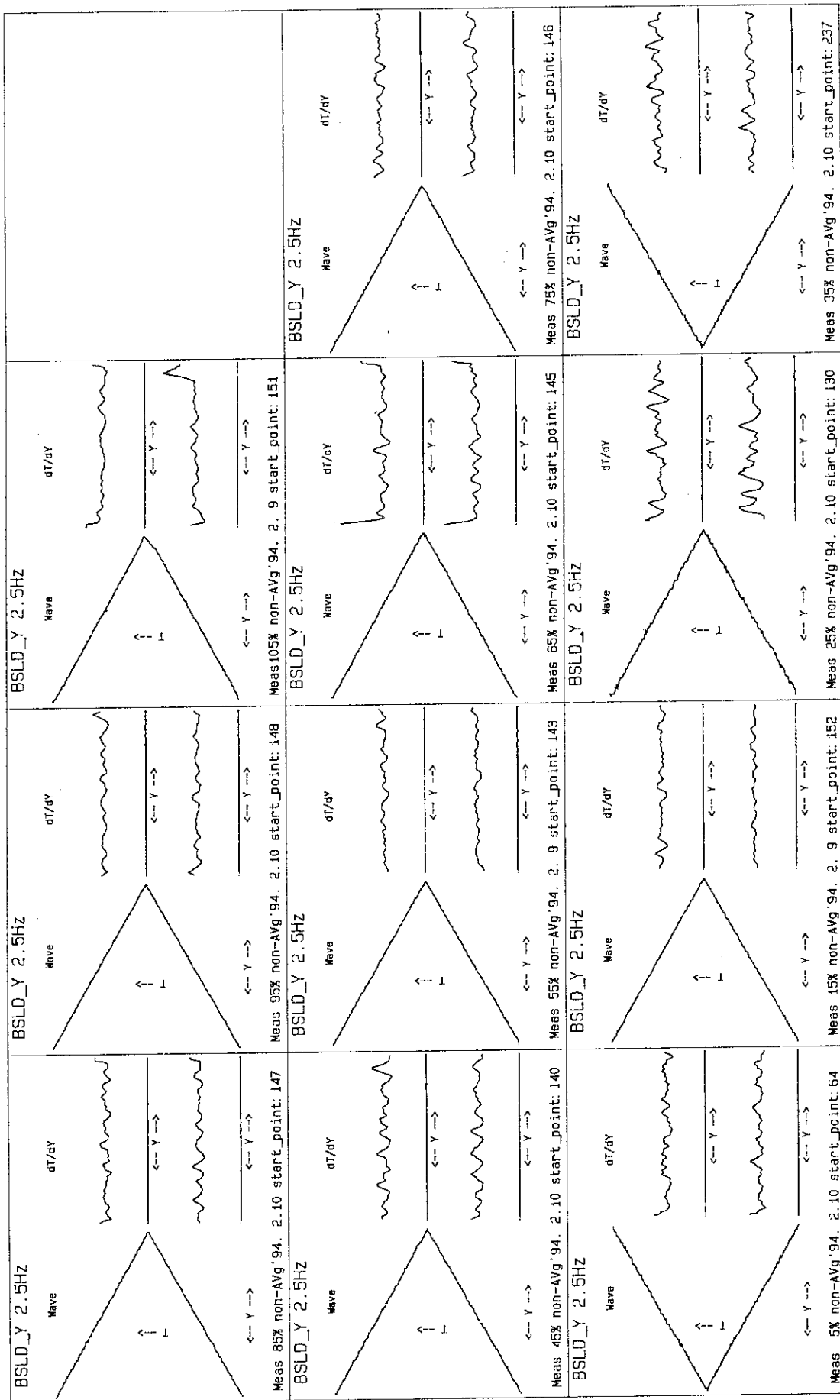


図 D スキヤナ電源 三角波電流出力 および 微分波形 LD-Y軸 (BSLD_Y) 2.5 Hz 電源

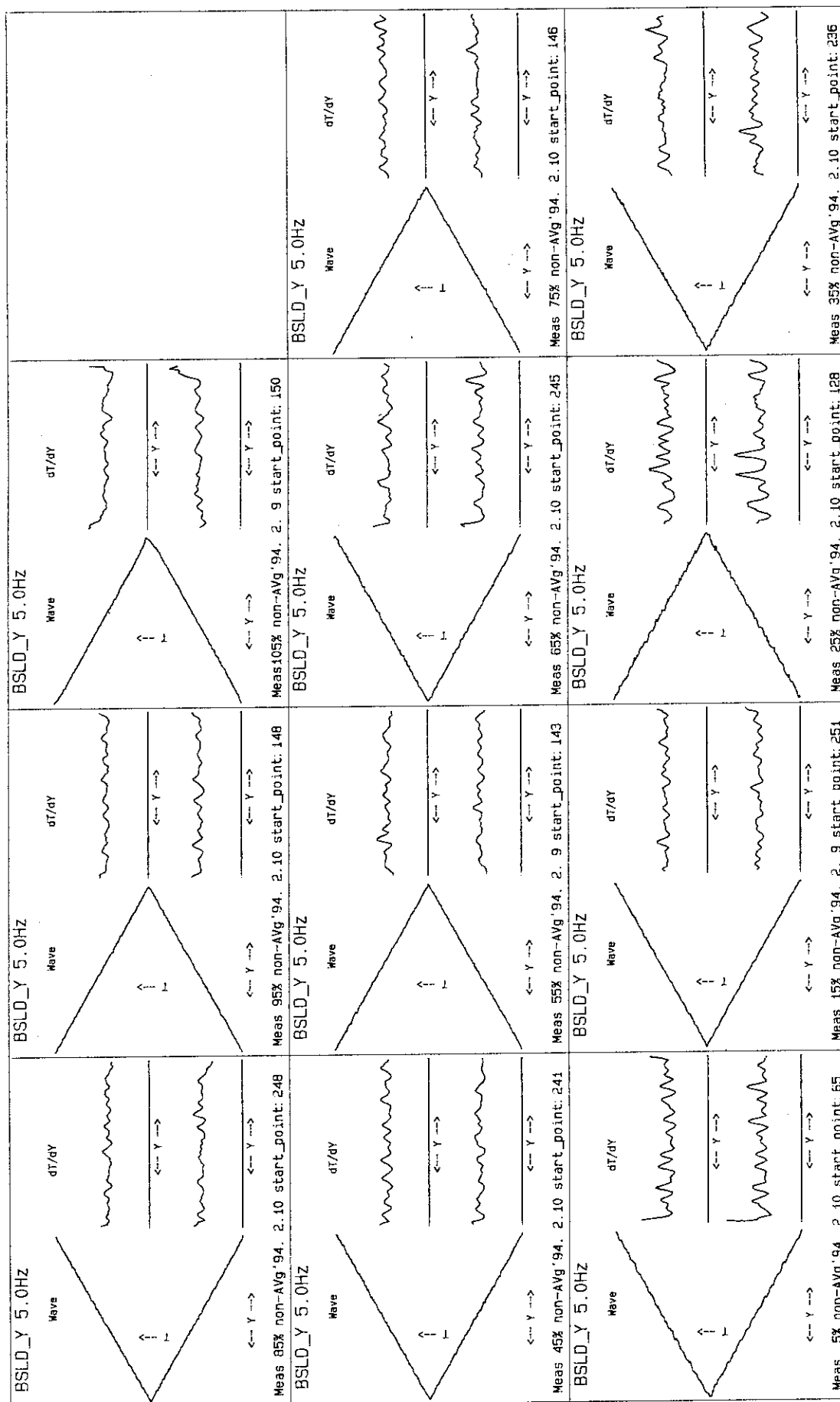


図 E スキヤナ電源 三角波電流出力 および 微分波形 LD-Y軸 (BSLD_Y) 5 H z 電源

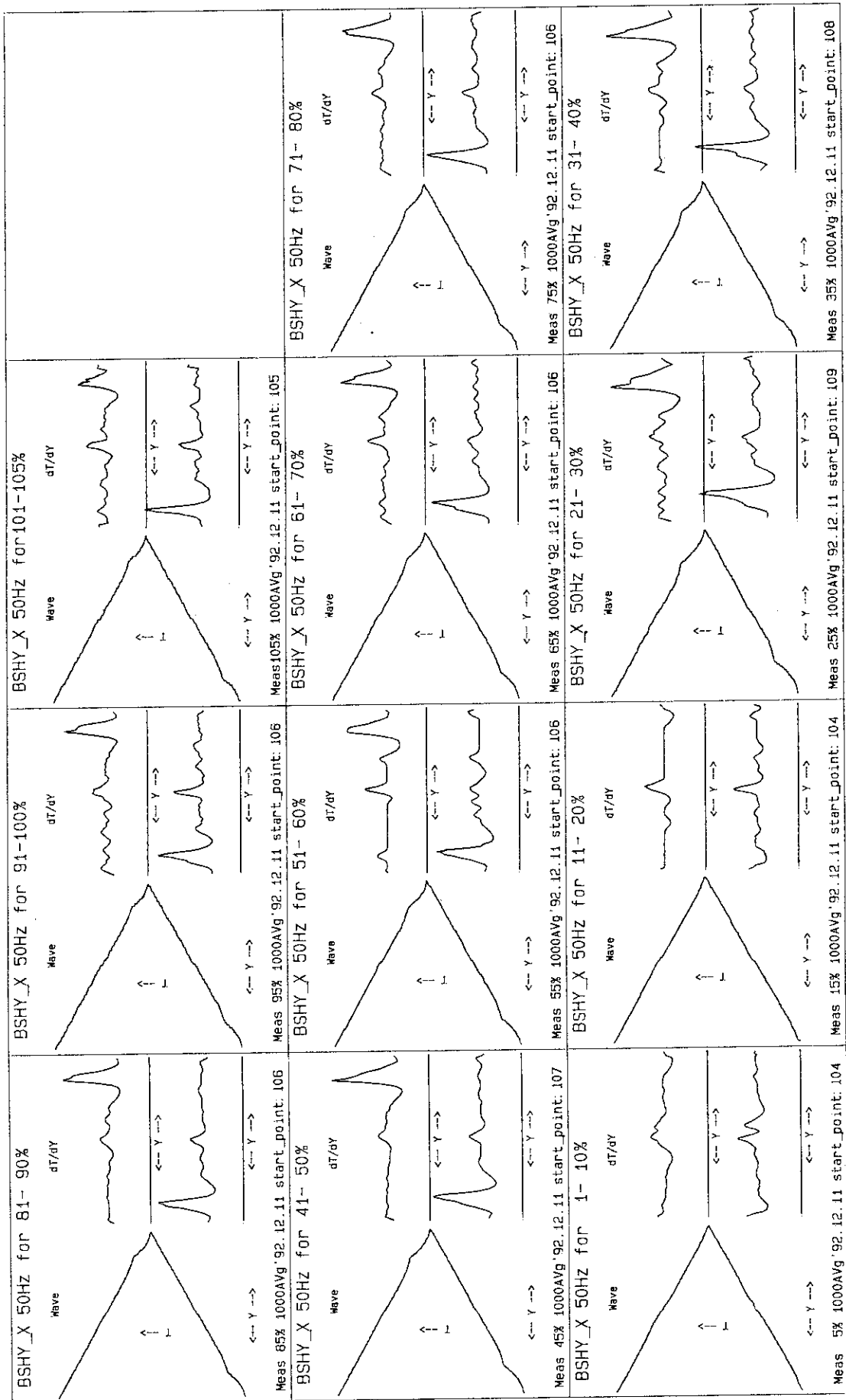


図 F スキャナ電源 三角波電流出力 および 微分波形

H Y 軸 (B S H Y _ X) 5 0 H z 電源

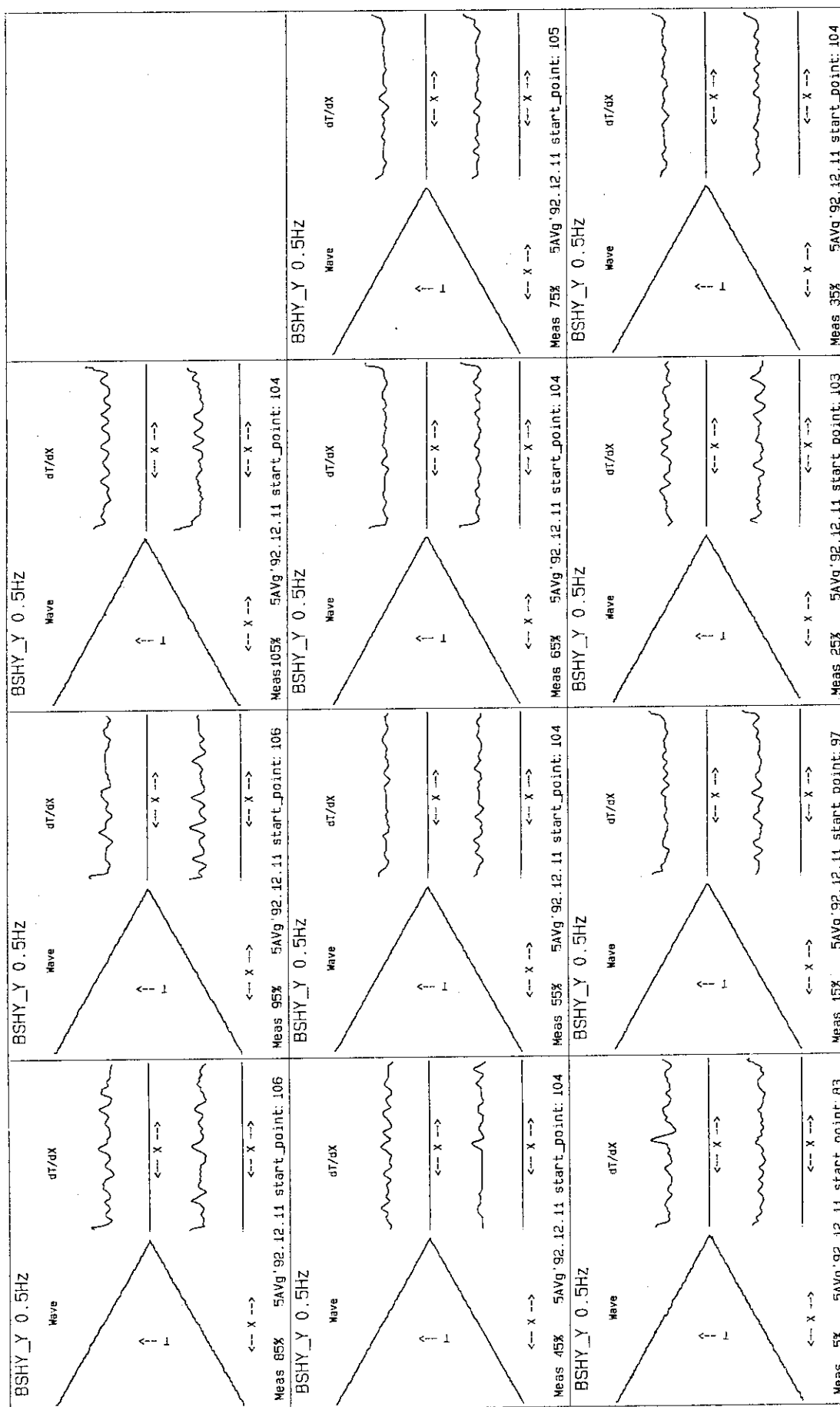


図 G スキヤナ電源 三角波電流出力 および 微分波形 HY-X軸 (BSHY_Y) 0.5 Hz 電源

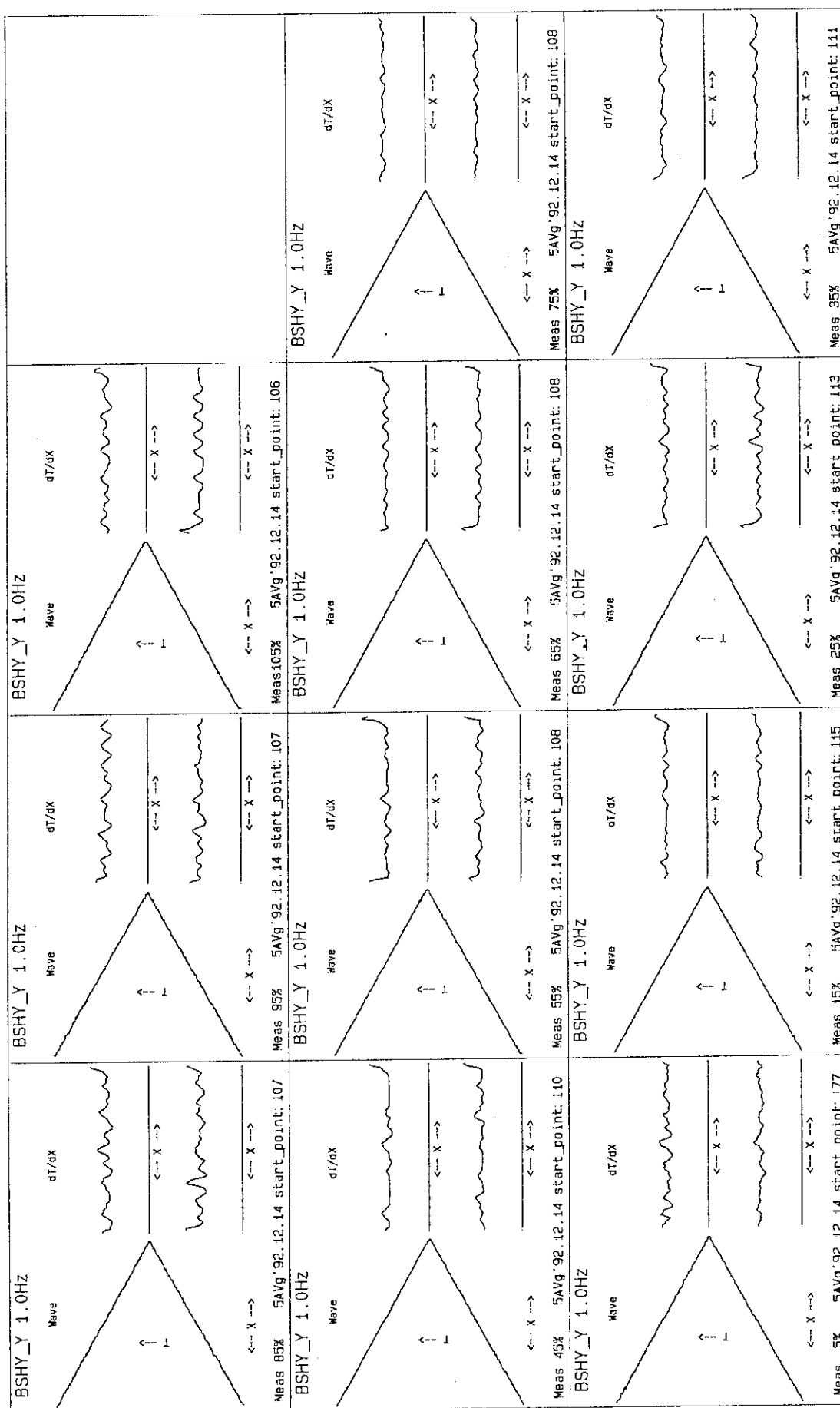


図 H スキヤナ電源 三角波電流出力および微分波形 HY-X軸 (BSHY_Y) 1 Hz 電源

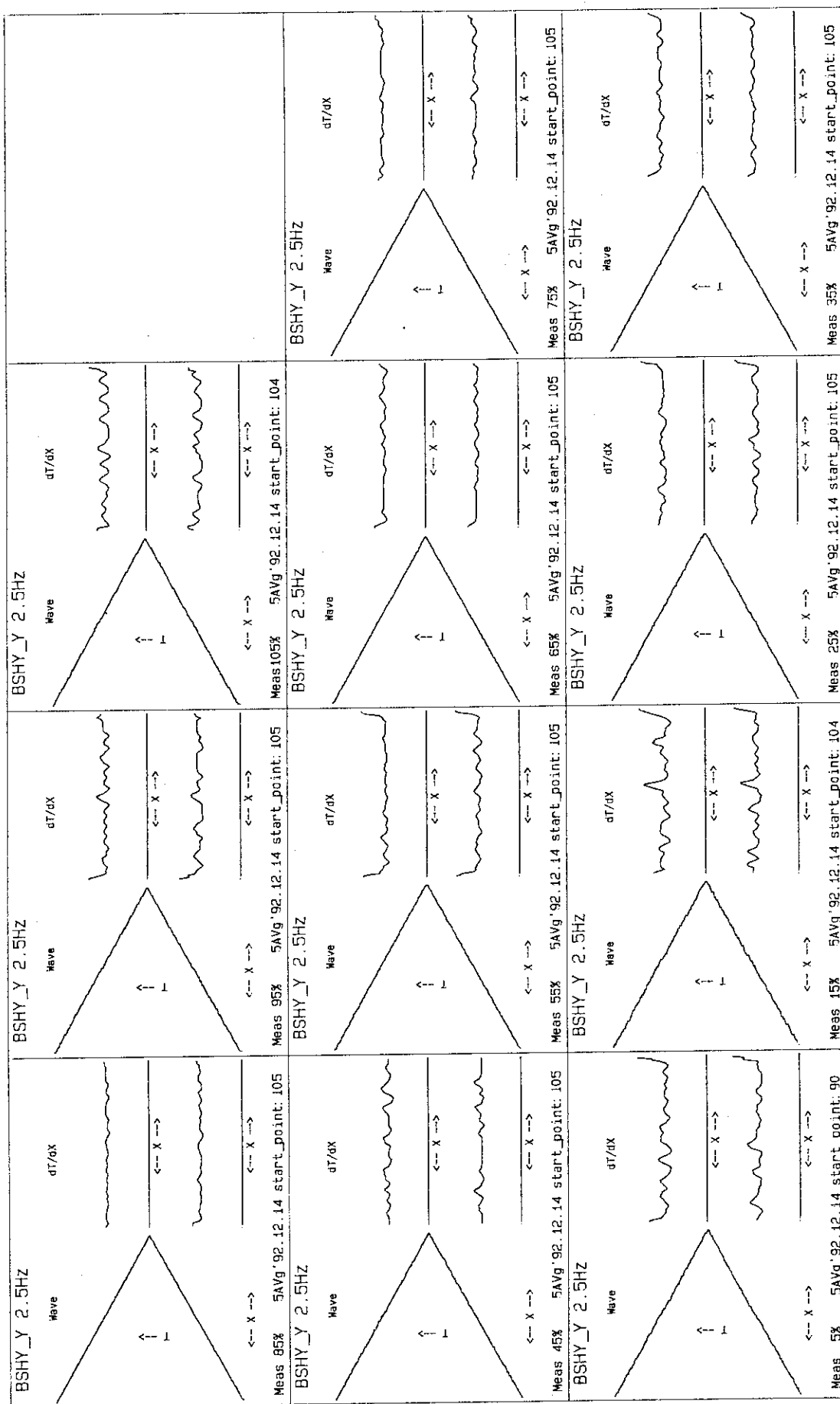


図 1 スキャナ電源 三角波電流出力 および 微分波形 HY-X軸 (BSHY_Y) 2.5Hz 電源

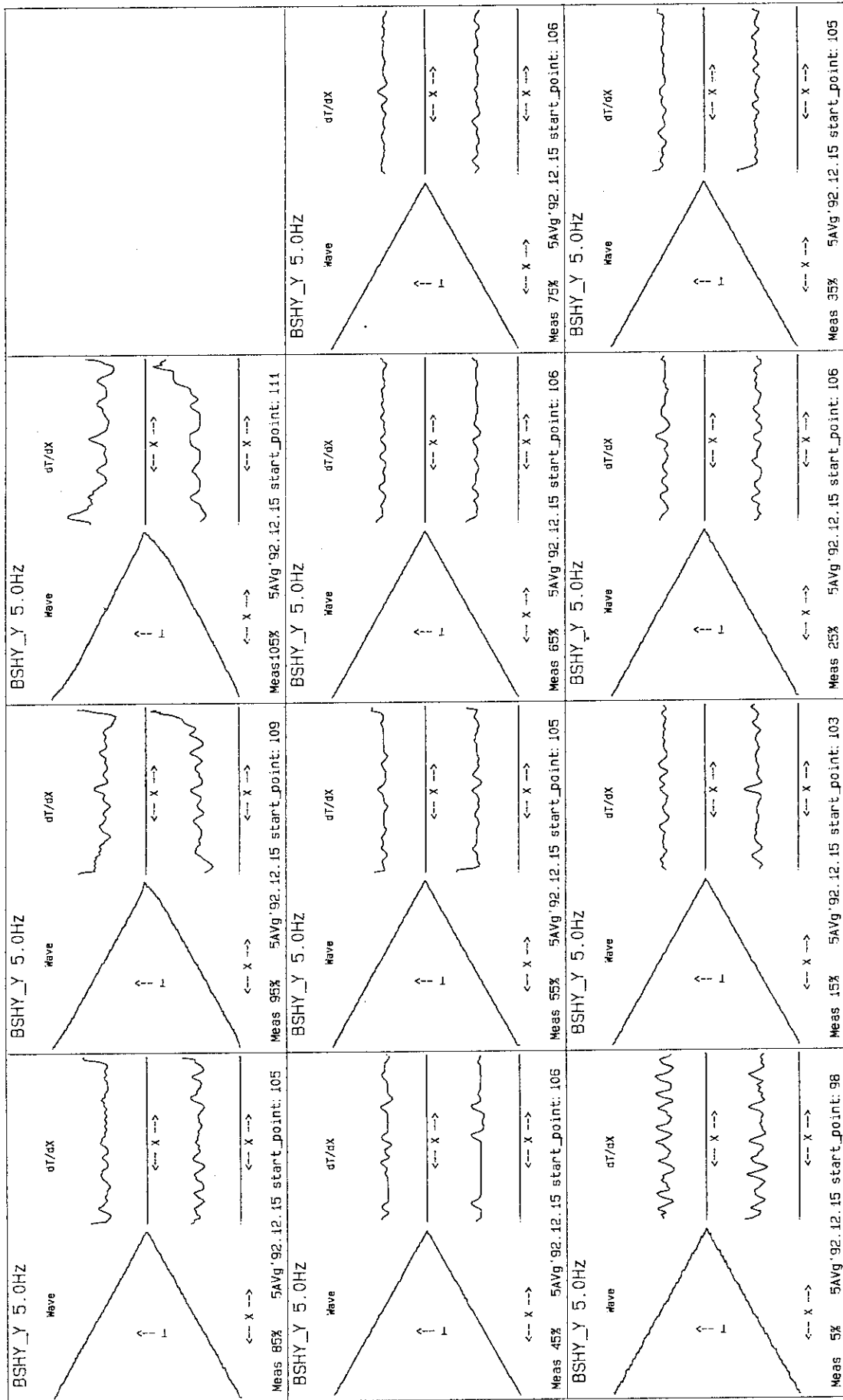


図 J スキヤナ電源 三角波電流出力 および 微分波形 HY-X軸 (BSHY_Y) 5 Hz 電源

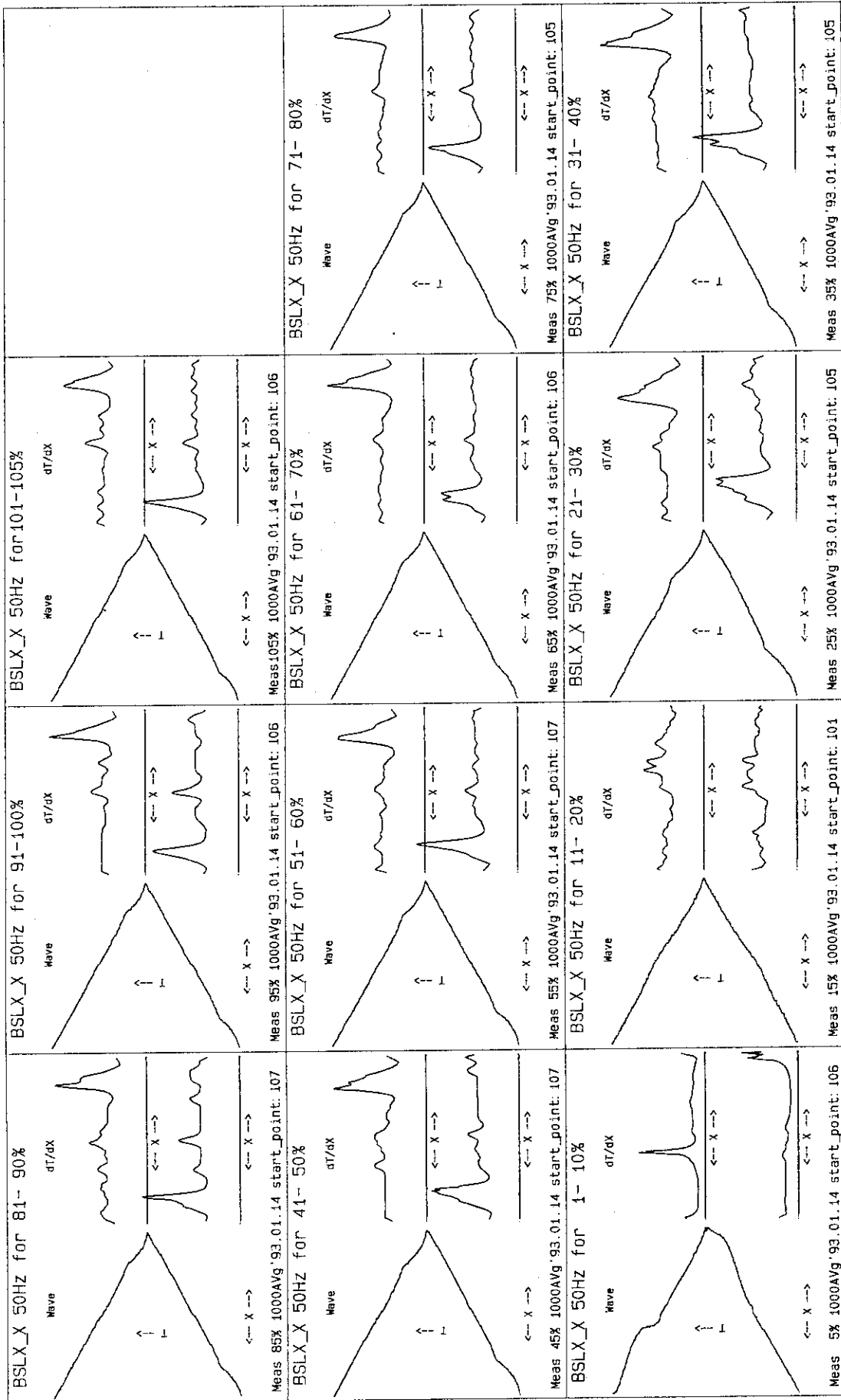


図 K スキャナ電源 三角波電流出力 および 微分波形 L X-X 軸 (BSLX_X) 50Hz 電源 (改造前)

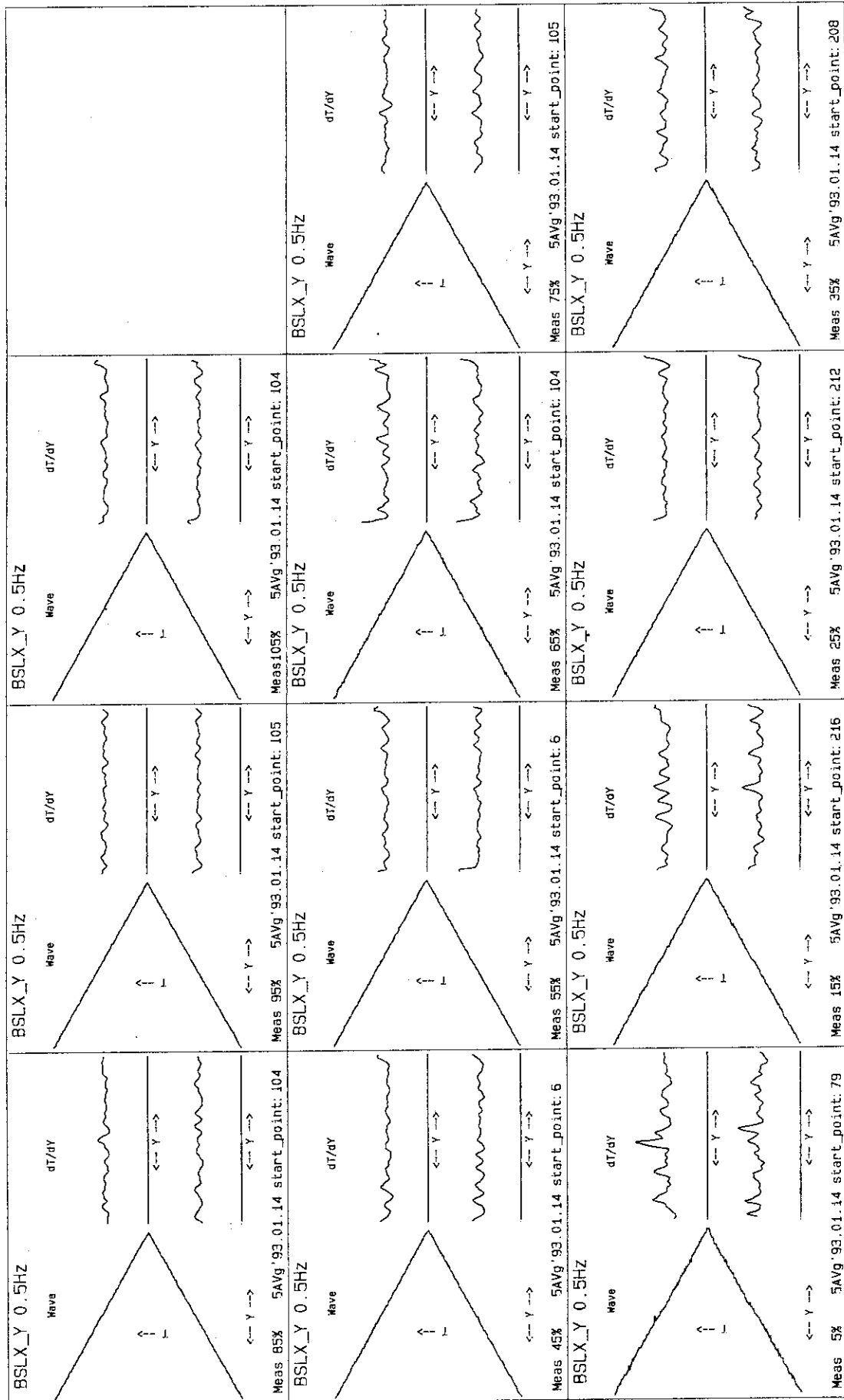


図 L スキャナ電源 三角波電流出力 および 微分波形 LX-Y 軸 (BSLX_Y) 0.5 Hz 電源

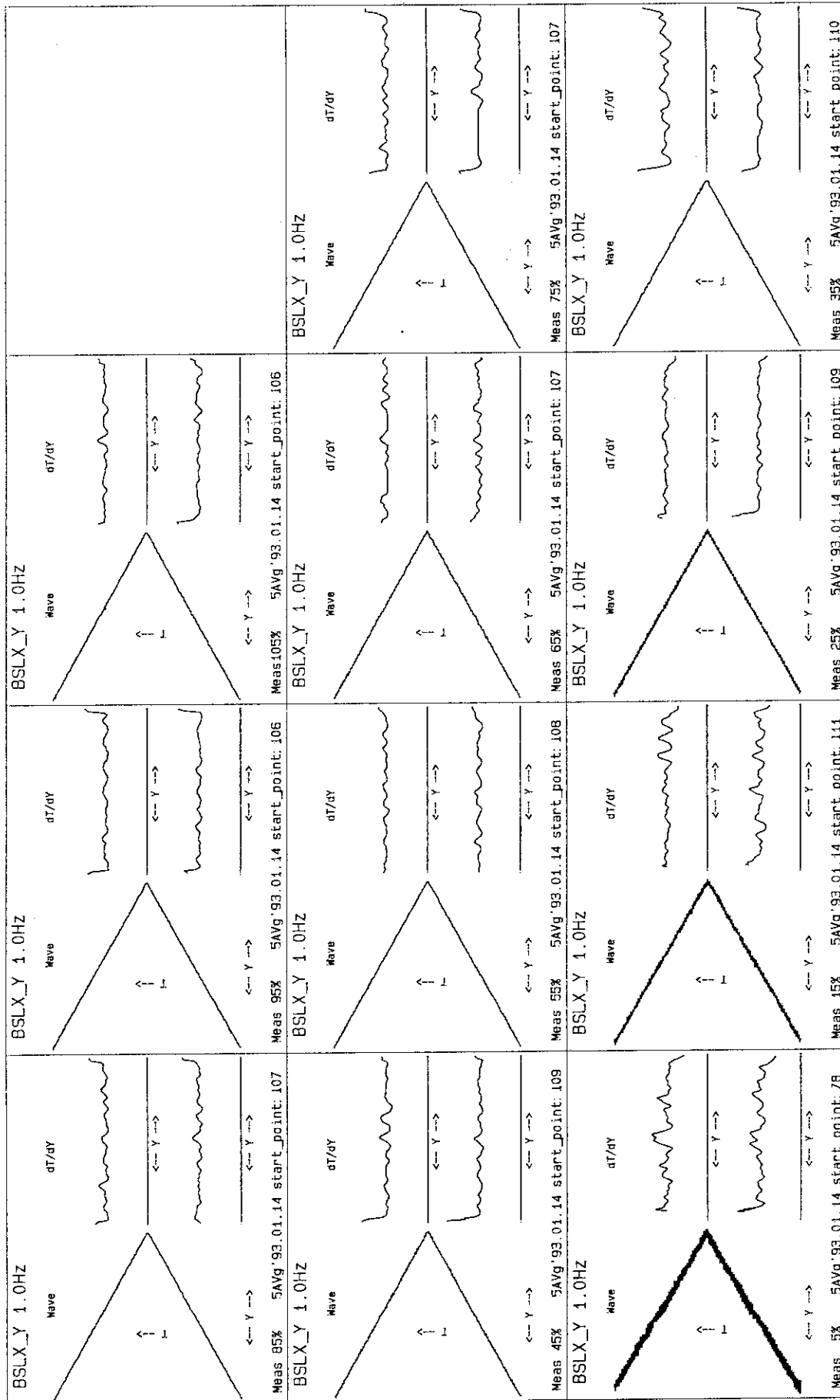


図 M スキヤナ電源 三角波電流出力 および 微分波形 L X-Y軸 (BSLX_Y) 1 H z 電源

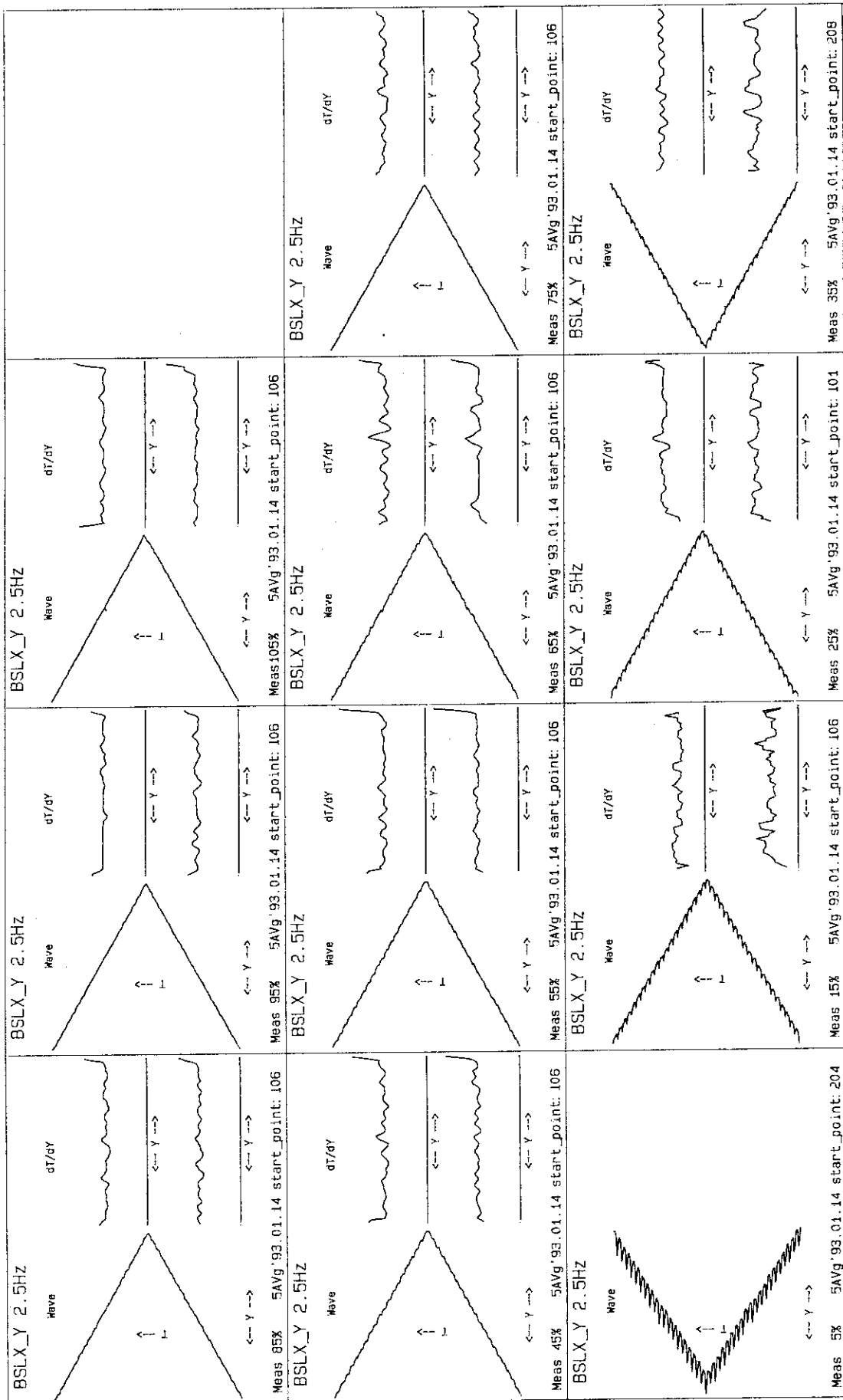


図 N スキヤナ電源 三角波電流出力 および微分波形 L X-Y軸 (BSLX_Y) 2.5 Hz 電源

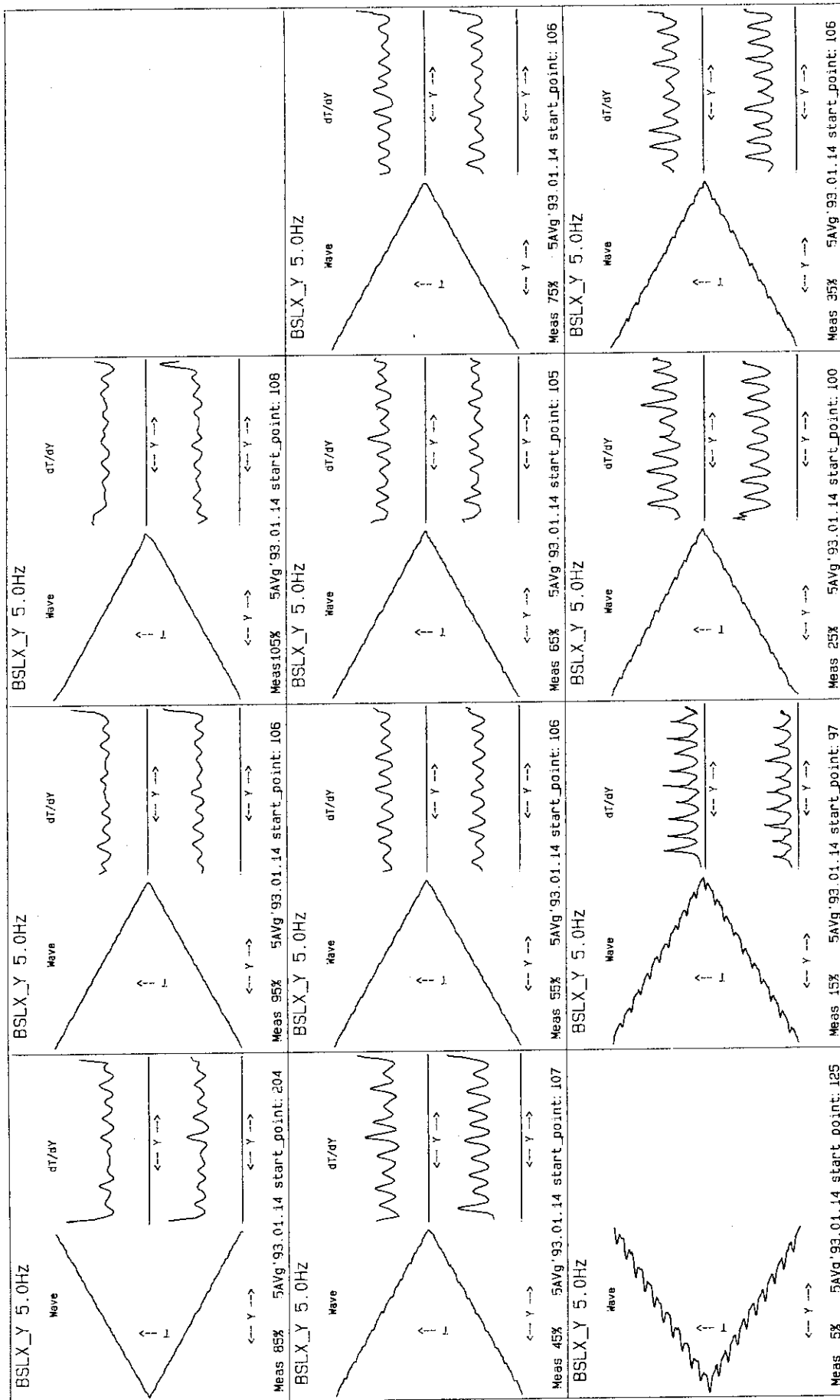


図 0 スキャナ電源 三角波電流出力 および 微分波形 LX-Y 軸 (BSLX_Y) 5 Hz 電源

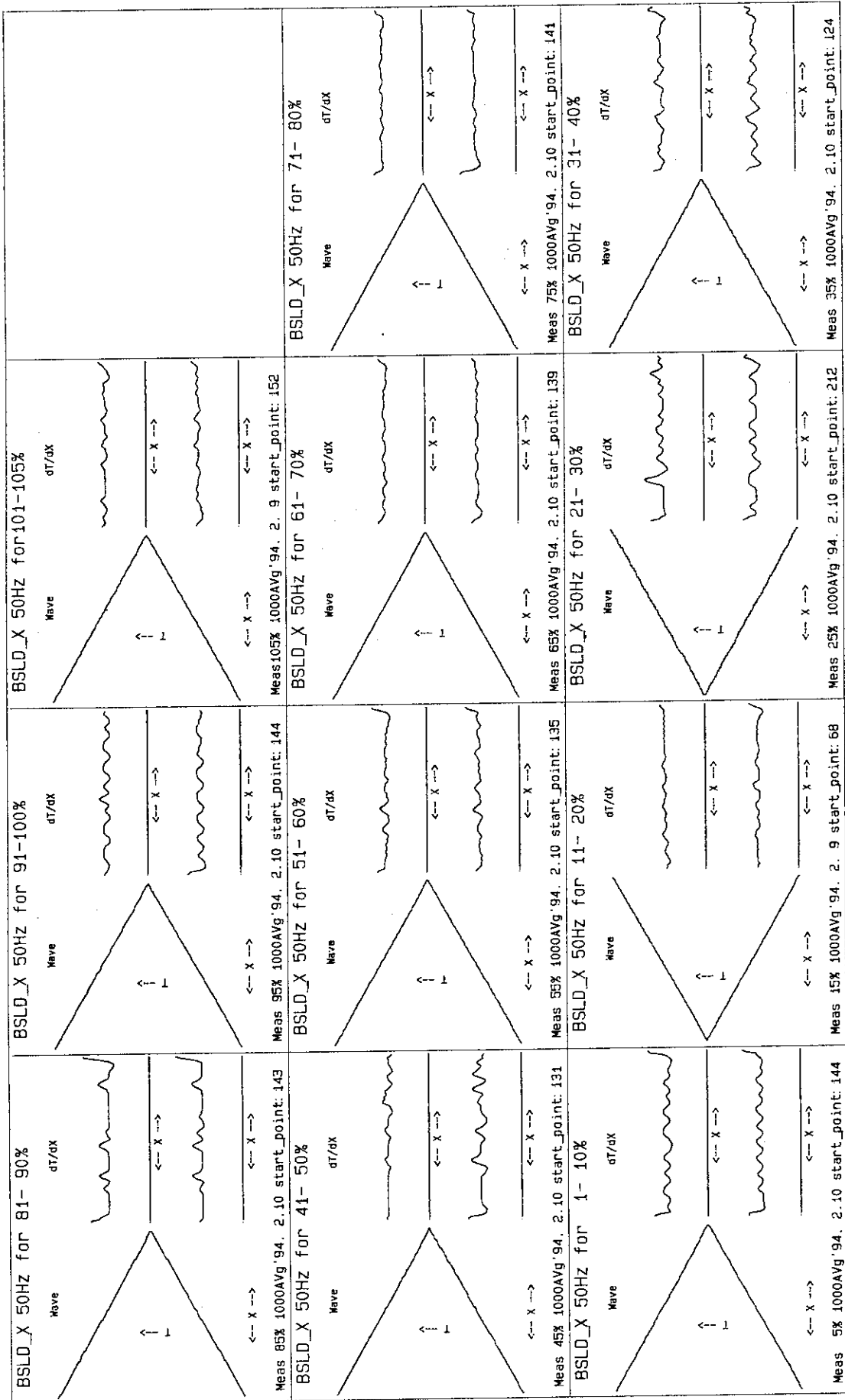


図 P スキヤナ電源 三角波電流出力 および微分波形 LD-X軸 (BSLD_X) 50Hz 電源 (改造後)