



JAEA-Technology

2005-004



JP0650153

J-PARC 残留応力解析用パルス中性子回析装置の ラジアルコリメータの設計

The Design of the Radial Collimator
for Residual Stress Analysis Diffractometer at J-PARC

鳥居 周輝 盛合 敦

Shuki TORII and Atsushi MORIAI

量子ビーム応用研究部門
パルス中性子装置開発研究グループ

Pulsed Neutron Instruments R&D Group
Quantum Beam Science Directorate

February 2006

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に刊行している研究開発報告書です。
本レポートの全部または一部を複写・複製・転載する場合は下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

This report was issued subject to the copyright of Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about the copyright and reproduction should be addressed to :

Intellectual Resources Section,
Intellectual Resources Department
2-4, Shirakata-shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, JAPAN
Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

©日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency, 2006

J-PARC 残留応力解析用パルス中性子回折装置のラジアルコリメータの設計

日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門中性子産業利用技術研究ユニット

鳥居 周輝^{*}・盛合 敦

(2005年11月11日受理)

大強度陽子加速器計画の MLF 物質・生命科学実験施設に設置される残留応力解析用パルス中性子回折装置用のラジアルコリメータの設計^{1,2)}を行っている。このラジアルコリメータは測定試料内のゲージサイズを規定するために用いる機器である。本装置では、1 mm ~ 10 mm の範囲で数種類 (1, 3, 5 mm, etc...) のゲージサイズを規定できるコリメータを製作予定である。コリメータ設計に際し、規定するゲージサイズの誤差に正規分布を適用することで、ゲージサイズとラジアルコリメータの設計パラメータとの関係性を表現する数式を作成した。現在までに、この関係式を用いた幾何学的計算を終了し、正規分布の半値全幅が 1 mm に最適化された設計パラメータを求め、試作機の設計・製作を行っている。また、McStas³⁾を用いたモンテカルロ・シミュレーションによって、各ゲージサイズにおける設計パラメータの検証を行った。

**The Design of the Radial Collimator
for Residual Stress Analysis Diffractometer at J-PARC**

Shuki TORII^{*} and Atsushi MORIAI

Neutron Technology R&D Center
Quantum Beam Science Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received November 11, 2005)

Radial collimator is a device in order to define gauge sizes in neutron diffractometer. Design of the collimator for residual stress analysis diffractometer at J-PARC is being progressed, which can define several kinds (1, 3, 5 mm, etc...) of gauge sizes with a range from 1 mm to 10 mm. An equation was established to express a relation with gauge sizes and geometrical design parameters of collimator by applying the normal distribution to an error of measured gauge size. Currently, this geometric calculation with several sets was finished, and the design parameters, in which FWHM (full width at half maximum) of normal distribution was optimized to 1 mm, was obtained. In addition, by the Monte Carlo simulation with McStas, a design parameters in each gauge size have been validated.

Keywords: Neutron Diffractometer, Residual Stress Analysis, Pulsed Neutron Source, TOF Method,
Radial Collimator, Mcstas, J-PARC

* Post-Doctoral Fellow

目次

1 はじめに	1
2 J-PARC 残留応力解析用パルス中性子回折装置	1
3 ゲージサイズの規定方法 -角度分散型とエネルギー分散型-	2
4 ラジアルコリメータ設計におけるパラメータ	2
5 ゲージサイズへの正規分布の適用	3
5.1 設計パラメータの導出	3
5.2 正規分布について	6
6 McStas によるモンテカルロ・シミュレーション	7
6.1 シミュレーションの対象モデル	7
6.2 シミュレーション結果について	7
7 まとめ	8
謝辞	8
参考文献	9

Contents

1 Introduction	1
2 Residual stress analysis diffractometer at J-PARC	1
3 A defining of gauge size - angular dispersion type and energy dispersion type -	2
4 Parameters in a radial collimator design	2
5 Application of normal distribution to gauge size	3
5.1 Derivation of design parameters	3
5.2 Normal distribution	6
6 Monte Carlo simulation by McStas	7
6.1 Model for simulation	7
6.2 Simulation result	7
7 Summary	8
Acknowledgments	8
References	9

This is a blank page.

1. はじめに

残留応力解析用パルス中性子回折装置において、ラジアルコリメータはゲージサイズを規定するために必須の機器である。ラジアルコリメータを用いることで、材料中の微小部位ごとの測定が可能になり、応力やひずみ・集合組織などを精度よくマッピングして求めることができる。一般にパルス中性子回折装置は、試料からの散乱中性子を効率的に収集するため、試料を取り囲むように検出器エリアの立体角を大きく設けている。広い検出器エリアの全てのエレメントで、同一のゲージサイズのみを観測するには、試料と検出器の間に放射状に広がるラジアルコリメータを設置し、散乱中性子の発散角を抑え、ゲージサイズ以外の部位からの散乱中性子を制限する必要がある。通常、ラジアルコリメータを必要とする中性子回折装置は、マグネットや冷凍機など試料周辺機器からの散乱中性子を制限するために使用されるが、ほとんどの場合、試料の周りに数 cm 程の空間があり、コリメータ設計の条件はそれほど厳しくない。しかし、残留応力解析装置で使われるようなゲージサイズを規定するためのラジアルコリメータは、試料中のある微小部位のみを観測する必要があり、数 mm といったゲージサイズに対応するコリメータ設計の条件は、当然厳しくなる。

2. J-PARC 残留応力解析用パルス中性子回折装置

中性子残留応力解析は、中性子の持つ強い透過能を利用し、物質内部の情報を容易に取り出すことが可能であり、原子炉・飛行機・タービン・エンジン・化学プロセスの配管・自動車など多岐の分野で脚光を浴びている。世界各地の中性子散乱施設でも構造物の安全性向上のため、中性子残留応力解析が本格的に取り組まれ、装置の設置は急ピッチで始まっている。

大強度陽子加速器計画の MLF (Materials and Life science Facility) 物質・生命科学実験施設には、特性の異なる 3 つの減速材から 23 本の中性子ビームラインが取り出され、それぞれのビームラインの特性を生かした中性子分光器の建設が計画されている。その 1 つに残留応力解析用パルス中性子回折装置がある。本装置は、わが国最初のパルス中性子源に設置される残留応力解析専用の装置であり、完成時期がほぼ同じである米国 SNS (Spallation Neutron Source) 計画の VULCAN⁴⁾ とともに、既に稼動している英国 ISIS の ENGIN-X^{5,6)}、米国 LANL (Los Alamos National Laboratory) の SMARTS⁷⁾に次ぐ装置となる。想定している装置の性能は、1 mm³ ゲージサイズの 3 次元ひずみ測定を、10 分から 1 時間程度の極めて短時間で可能にし、そのひずみ精度は 10⁻⁴ ~ 10⁻⁵ を目指している。この性能を実現するために、モンテカルロ・シミュレーションを用いた装置パラメータの最適化が行われている。Fig. 1 に本装置の 3D イメージ図を、Table 1 に簡単な性能を示した。

本研究において設計されるラジアルコリメータは、この残留応力解析用パルス中性子回折装置の主要機器であり、本装置の稼働時までに試作機によるテスト実験を終え、実機サイズのコリメータの作製を目指している。

3. ゲージサイズの規定方法 一角度分散型とエネルギー分散型-

中性子残留応力解析装置には、使用する中性子源によって大きく二つの測定手法が存在する。一つは、原子炉中性子源を用いる角度分散型^{8,9)}、もう一方は加速器を使用したパルス中性子源を用いるエネルギー分散型である。角度分散型は、一般の実験室系 X 線回折装置のように散乱角 2θ をスキャンすることで面間隔 d の情報を得る。これに対し、エネルギー分散型では、散乱された中性子のエネルギーを、中性子が検出器に到達するまでの時間としてスキャンする TOF (Time-of-Flight) 法が用いられる。この測定方法の違いから、それぞれゲージサイズの規定方法は異なっている。Fig. 2 に二つの測定手法におけるゲージサイズ規定方法の概念図を示した。一般的な角度分散型の装置では、検出器が散乱角 2θ をスキャンするように移動する。こうした装置の場合、入射ビーム側と散乱ビーム側にゲージサイズに対応したスリットが設置され、測定試料内部のゲージサイズ以外をマスキングする。また、ビームの発散を抑えるため、入射スリットの上流と散乱スリットの下流にソーラコリメータを設置し、ビームの平行度を向上させている。一方、エネルギー分散型の装置の場合、広い検出器エリアが設けられているので、単純なスリットによるマスキングではその効果は得られない。そこで、散乱ビーム側に、放射状に広がる複数のブレードから構成されたラジアルコリメータを設置する。このコリメータを導入することで、全ての検出器エリアにおいて同一部位のゲージサイズの観測が可能になる。

4. ラジアルコリメータ設計におけるパラメータ

ラジアルコリメータ設計において、ブレードの開口角・ブレードの長さ・試料-コリメータ間距離など様々な設計パラメータが必要になってくる。これらのパラメータは、同時に装置自身のパラメータ（検出器幅、試料-検出器間距離など）と密接な関係があり、装置ごとに最適化する必要がある。

Fig. 3 に、基本となるラジアルコリメータの設計パラメータを示した。ここでは、単純化のために、ブレードの厚みは無視し、一对のブレードに関して考えることにする。したがって、ここで示されるゲージサイズは、一つの検出器から一对のブレードを通して見ることのできる仮のゲージサイズを示す。当然、複数の検出器や隣り合うブレード対を通る中性子の影響を考慮すれば、真のゲージサイズはより大きなものとなる。一般にラジアルコリメータの設計パラメータは、

l_1 : 試料-ラジアルコリメータ間距離

l_2 : ラジアルコリメータのブレード長

s_1, s_2 : ブレード間隔（入口、出口）

α : ブレード開口角

で示される。また、仮のゲージサイズ W_g 、検出器幅 W_d 、試料-検出器間距離 L_2 、幾何学的に見込んでしまうゲージサイズおよび検出器幅の最大値を W_{gmax}, W_{dmax} で示した。理想的には、 $W_g = W_{gmax}$ 、

$W_d = W_{d\max}$ を満たす設計パラメータが望ましい。しかし、この条件を実現させるには、ラジアルコリメータのブレードを検出器に密着させなければならず、試料-検出器間距離 L_2 が大きい場合、工業的にブレードの製作が難しくなる。そこで、我々は、仮のゲージサイズ W_g と幾何学的な最大値 $W_{g\max}$ の間に統計学的な関連性を持たせ、両ゲージサイズの間に裕度を持たせることにした。この関連性を適用することで、ゲージサイズと設計パラメータ間の関係を数式化することに成功し、決定すべきパラメータ数を低減させるに至った。

5. ゲージサイズへの正規分布の適用

統計学において、標準偏差 σ である正規分布の平均値 $\pm 2\sigma$ の範囲は 95% 信頼区間と呼ばれ、株取引などにおける統計学的情報として使用されている。また、工業生産においては、 $\pm 3\sigma$ 法が用いられ、製品の誤差は標準偏差の 3 倍である 99.7% 区間に収まるような統計的品質管理が行われている。本ラジアルコリメータの設計においては、 W_g と $W_{g\max}$ の間の差を抑えるため、95% 信頼区間を適用することにした。

我々のラジアルコリメータ設計においては、 W_g と $W_{g\max}$ の間に以下の条件を適用した。

1) 試料からの散乱中性子が、散乱角に関して正規分布をとると仮定し、仮のゲージサイズ W_g は、幾何学的な最大値 $W_{g\max}$ を 95% 信頼区間 $\pm 2\sigma$ とした場合の半値全幅 FWHM とする。

また、散乱中性子の発散と検出器幅との整合性を取るため、ブレード開口角 α に関しては、以下の条件を適用した。

2) ブレード開口角 α は、試料中心 o からみた検出器幅の立体角とする。

5.1 設計パラメータの導出

ラジアルコリメータ設計において、既知として与えられるパラメータは、 W_d ：検出器幅、 W_g ：仮のゲージサイズ、 L_2 ：試料-検出器間距離である。また、コリメータ長さ l_2 は任意の設定パラメータとした。こうして、コリメータ設計に必要なパラメータ (l_1, s_1, s_2) を、4 変数 (W_d, W_g, L_2, l_2) の関数として導出していく。

まず Fig. 3 より、

$$\frac{s_1}{l_M} = \frac{s_2}{l_2 - l_M}$$

l_M について整理すると

$$l_M = \frac{s_1}{s_1 + s_2} l_2 \quad (1)$$

また W_{gmax} に関して、

$$\begin{aligned}\frac{W_{\text{gmax}}}{l_1 + l_M} &= \frac{s_2}{l_2 - l_M} \\ \therefore W_{\text{gmax}} &= \frac{l_1 + l_M}{l_2 - l_M} s_2\end{aligned}\quad (2)$$

(1)式を(2)式に代入することにより、

$$\begin{aligned}W_{\text{gmax}} &= \frac{(s_1 + s_2)l_1 + s_1 l_2}{l_2} \\ &= \frac{(l_1 + l_2)s_1 + l_1 s_2}{l_2}\end{aligned}\quad (3)$$

コリメータブレードの開口角は $\alpha = \text{一定}$ としているので $W_d / L_2 = R = \text{一定}$ である。したがって s_1, s_2 に関して、

$$\begin{aligned}R &= \frac{W_d}{L_2} = \frac{s_1}{l_1} = \frac{s_2}{l_1 + l_2} \\ \therefore s_1 &= Rl_1 \\ \therefore s_2 &= R(l_1 + l_2)\end{aligned}\quad (4)$$

(4)式を(3)式に代入することで、

$$\begin{aligned}W_{\text{gmax}} &= \frac{(l_1 + l_2)Rl_1 + l_1 R(l_1 + l_2)}{l_2} \\ \therefore l_1(l_1 + l_2) &= \frac{W_{\text{gmax}}l_2}{2R} \\ \therefore l_1^2 + l_1 l_2 - \frac{W_{\text{gmax}}l_2}{2R} &= 0\end{aligned}\quad (5)$$

これは、 l_1 に対する二次式であるので、

$$\begin{aligned}l_1 &= \frac{-l_2 \pm \sqrt{l_2^2 + 4 \frac{W_{\text{gmax}}l_2}{2R}}}{2} \\ &= \frac{-l_2 \pm \sqrt{l_2^2 + \frac{2}{R}W_{\text{gmax}}l_2}}{2}\end{aligned}$$

$l_1 > 0$ であるので、

$$l_1 = \frac{\sqrt{l_2^2 + \frac{2}{R} W_{g\max} l_2 - l_2}}{2} \quad (6)$$

$W_{g\max}$ は半値全幅 FWHM が W_g となるような正規分布の 95% 信頼区間 ($\pm 2\sigma$) という条件であるので、この関係を適応すると、

$$\text{FWHM} = W_g = 2\sigma\sqrt{2\ln 2} = \frac{W_{g\max}}{2}\sqrt{2\ln 2}$$

$$\therefore W_{g\max} = \frac{2}{\sqrt{2\ln 2}} \text{FWHM} \quad (7)$$

(6)式と(7)式および(4)式を用いることで、任意の l_2 に関して、 l_1 、 s_1 、 s_2 が求まる。

5.2 正規分布について

正規分布は(8)式で現される。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (8)$$

$f(x)$ の最大値は $x=\mu$ の時で、

$$f(\mu) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}$$

したがって、半値全幅 FWHM は、

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{1}{2\sqrt{2\pi\sigma^2}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \\ \therefore \frac{1}{2} &= \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \\ \therefore \ln\left\{\frac{1}{2}\right\} &= -\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \\ \therefore 2\sigma^2 \ln\left\{\frac{1}{2}\right\} &= -(x-\mu)^2 \\ \therefore (x-\mu)^2 &= -2\sigma^2 \ln\left\{\frac{1}{2}\right\} = -2\sigma^2(-\ln 2) = 2\sigma^2 \ln 2 \\ \therefore x-\mu &= \pm\sqrt{2\sigma^2 \ln 2} = \pm\sigma\sqrt{2\ln 2} \\ \therefore x &= \mu \pm \sigma\sqrt{2\ln 2} \\ \text{FWHM} &= 2\sigma\sqrt{2\ln 2} \end{aligned} \quad (9)$$

となる。

一般に、 $\mu=0$ 、 $\sigma=1$ の場合を標準正規分布と呼び、(10)式のように表記される (Fig. 4 参照)。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{x^2}{2}\right\} \quad (10)$$

このとき、平均値 ($x=0$) を中心として $x=\pm 1\sigma$ の範囲には 68.26%、 $\pm 2\sigma$ には 95.44%、 $\pm 3\sigma$ には 99.74% の確率分布を示す。

6. McStas によるモンテカルロ・シミュレーション

6.1 シミュレーションの対象モデル

前節の関係式から、FWHM = 1 mm, 3 mm, 5 mm のラジアルコリメータの設計パラメータを導出した。なお、現在の J-PARC 残留応力解析装置の設計に合わせるため、試料-検出器間距離 $L_2 = 2 \text{ m}$ 、検出器幅 $W_d = 3 \text{ mm}$ とした。また、ブレードの長さ l_2 は、250 mm ~ 450 mm の間で変化させた。これらの計算結果を Table 2 に示す。この結果から、前節の関係式に従ったコリメータ設計を行うと、FWHM = 1 mm 設定の測定では、試料-コリメータ間は 300 mm 程度の空間を確保できることが分かる。通常、測定には散乱角 $2\theta = \pm 90^\circ$ の 2 つの検出器バンクを用いるので、試料空間としては、最大で約 600 mm まで確保できることになる。

ここで、Table 2 に示された設計パラメータを用いてラジアルコリメータ・コンポーネントを作成し、McStas によるモンテカルロ・シミュレーションを行った。J-PARC 残留応力解析用パルス中性子回折装置の装置シミュレーションには McStas を用いており、ここで作成したコンポーネントは、そのまま実験装置シミュレーションに組み込むことができる。ただし、本シミュレーションでは、ラジアルコリメータの性能評価に特化しており、ゲージサイズに相当した線源を試料位置 o に置き、ラジアルコリメータの後に置かれた 2 次元検出器で中性子強度を検出するという単純な実験配置で計算を行った。Fig. 5 にコンポーネントの配置図を示す。2 次元検出器の大きさは、200 cm × 200 cm であり 100 ch × 100 ch の位置分解能を持たせた。線源のコンポーネントは、高さをゲージサイズ (FWHM) に対応させ、線源幅を適当な範囲で変化させ、その幅に対する 2 次元検出器の平均強度の依存性を解析した。例えば、FWHM = 1 mm 設定のコリメータの場合は、線源の高さを 1 mm に固定し、幅を 0.25 mm ~ 5 mm と変化させた。

6.2 シミュレーション結果について

Fig. 6 ~ Fig. 20 にシミュレーションで得られた 2 次元検出器の強度分布を示す。一連のイメージは、FWHM 設定ごとにカラースケールの範囲を一定にしている。また、強度分布を定量的に表現するため、それぞれの強度分布に対して 2 次元ガウスフィッティングを行い、その結果を等高線で示した。これらの図から、線源の幅が増加するにつれ、強度が増していく様子がうかがえる。また、どの設定においても FWHM の倍程度の線源幅になると、強度の増減や強度分布の差異は見られなくなった。次に、線源の幅に対して 2 次元検出器の平均強度をプロットすると Fig. 21 ~ Fig. 23 のようになった。各プロットに対し、sigmoid 曲線を用いたフィッティングを行い、その最大値をまとめると Table 3 のようになった。これらの結果からは、ブレードの長さによる依存性は見られなかった。これは、シミュレーションに用いたコリメータコンポーネントが、ブレードの厚みを考慮していないことに起因する。実際のコリメータでは、ブレードに有限の厚みがあるため、ブレード長による依存性が生じる。コリメータの透過実験などにおいて、シミュレーション

ン結果との定量的な比較が必要となるため、このブレードの厚みは、今後シミュレーションへ導入すべき重要なパラメータである。

Fig. 21 ~ Fig. 23 のプロットから、各 FWHM 設定値の倍の線源幅になると、平均強度は変化しなくなることが分かる。つまり、このラジアルコリメータは、FWHM の倍の範囲まで試料を見込んでいる設計だと見える。FWHM と $W_{g\max}$ の関係性は(7)式によって与えられているが、実際に見込んでしまっている真のゲージサイズを $W_{g\text{TRUE}}$ とすると、

$$W_{g\text{TRUE}} = 2\text{FWHM} \quad \therefore \text{FWHM} = \frac{1}{2}W_{g\text{TRUE}} \quad (11)$$

この補正式を追加することで、真のゲージサイズ $W_{g\text{TRUE}}$ と設計パラメータ間の関連性の数式化が完成する。(7)式に(11)式を代入して FWHM を消去すると、

$$W_{g\max} = \frac{1}{\sqrt{2\ln 2}} W_{g\text{TRUE}} \quad (7)^*$$

こうして、(6)式と(7)*式および(4)式を用いることで、ゲージサイズ $W_{g\text{TRUE}}$ を決めるに、任意の l_2 に関して、ラジアルコリメータ設計パラメータ l_1, s_1, s_2 を求めることができる。

7. まとめ

大強度陽子加速器計画の MLF 物質・生命科学実験施設に設置される残留応力解析用パルス中性子回折装置用のラジアルコリメータの設計を行った。本研究では、ゲージサイズに正規分布を適応することで、ゲージサイズと設計パラメータの関係性を数式化することに成功した。また、この関係式を用いてラジアルコリメータの設計パラメータを導出し、モンテカルロ・シミュレーションにより性能評価を行った。現在、FWHM = 1 mm の設計パラメータを用いた試作機を製作中であり、今後はシミュレーション結果と実測値との比較を行い、作成した関係式の実験的検証を行う予定である。

謝辞

研究全般にわたりご指導くださいました新井正敏中性子装置開発研究グループリーダーに厚く御礼申し上げます。また、本稿をまとめるにあたり、細部にわたり御指導・御助言くださいました中性子装置開発研究グループの皆様に心から感謝いたします。

参考文献

- 1) D.-Q. Wang, X.-L. Wang, J. L. Robertson and C. R. Hubbard : *J. Appl. Cryst.*, 33, 334-337 (2000).
- 2) P. J. Withers, M. W. Johnson, J. S. Wright : *Physica B*, 292, 273-285 (2000).
- 3) K. Lefmann, K. Nielsen : *Neutron News*, 10, 20 (1999).
- 4) X.-L. Wang and W.-T. Lee : *Proc. ICANS-XV*, Vol.I, 513-524 (2001).
- 5) J. A. Dann, M. R. Daymond, L. Edwards, J. A. James and J. R. Santisteban : *Physica B: Condensed Matter*, 350, Issues1-3, Supplement1, E511-E514 (2004).
- 6) J. A. Dann, M. R. Daymond, J. A. James, J. R. Santisteban, L. Edwards : *Proc. ICANS-XVI*, Düsseldorf-Neuss, Germany, (2003).
- 7) M.A.M. Bourke, D.C. Dunand, E. Ustundag : *Appl. Phys. A*, 74, Supplement1, s1707-s1709 (2002).
- 8) Y. Tsuchiya, N. Minakawa, Y. Morii, T. Kato, H. Nakajima, K. Hamada, I. Watanabe, K. Ishio, T. Abe and H. Tsuji : *Physica B: Condensed Matter*, 241-243, 1264-1266 (1997).
- 9) 林眞琴, 大城戸忍, 皆川宣明, 森井幸生 : *材料*, 47, 420 (1998).

Table 1: Specification of residual stress analysis diffractometer.

Repetition	25 Hz
Moderator	Liq-H ₂ decoupled/poisoned
Moderator-Sample L_1	~40 m
Sample-Detector L_2	2 m
Guide tube	20 mm x 20 mm / 3Qc
d-range	0.05 nm < d < 0.5 nm
Resolution $\Delta d / d$	< 0.2% 2θ = 90°
Detector	Scintilator pixel size : 3 mm

Table 2: Design parameters of radial collimator.

 W_d (detector width) = 3 mm. L_2 = 2 m. Refer to Fig. 3 for various parameters.

			Blade length l_2 [mm]				
			250	300	350	400	450
1	l_1	271.458	288.594	303.331	316.223	327.650	
		0.40719	0.43289	0.45500	0.47433	0.49147	
		0.78219	0.88289	0.98000	1.07433	1.16647	
	s_1	538.540	579.447	615.664	648.208	677.782	
		0.80781	0.86917	0.92350	0.97231	1.01667	
		1.18281	1.31917	1.44850	1.57231	1.69167	
3	l_1	725.525	783.714	835.693	882.788	925.916	
		1.08829	1.17557	1.25354	1.32418	1.38887	
		1.46329	1.62557	1.77854	1.92418	2.06387	
	s_1						
5	l_1						
	s_1						

Table 3: An analysis result of intensity distribution.

Values are obtained by Sigmoid-curve fitting in Fig. 21 ~ Fig. 23.

			Blade length l_2 [mm]				
			250	300	350	400	450
1	max_value [a.u.]	297350	296870	297260	298120	296030	
		27900	27900	27800	27500	28000	
3	max_value [a.u.]	2676600	2679000	2674400	2674400	2676700	
		253000	252000	250000	252000	252000	
5	max_value [a.u.]	7438400	7431300	7434500	7427000	7431800	
		686000	699000	684000	681000	692000	
	max_value_err						

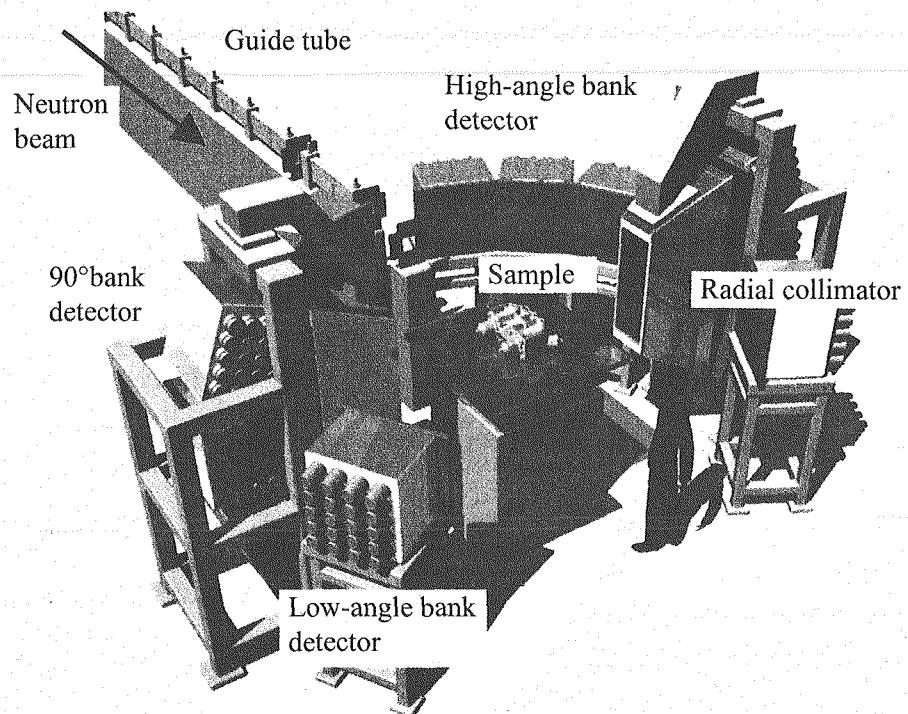


Fig. 1: 3D View of residual stress analysis diffractometer

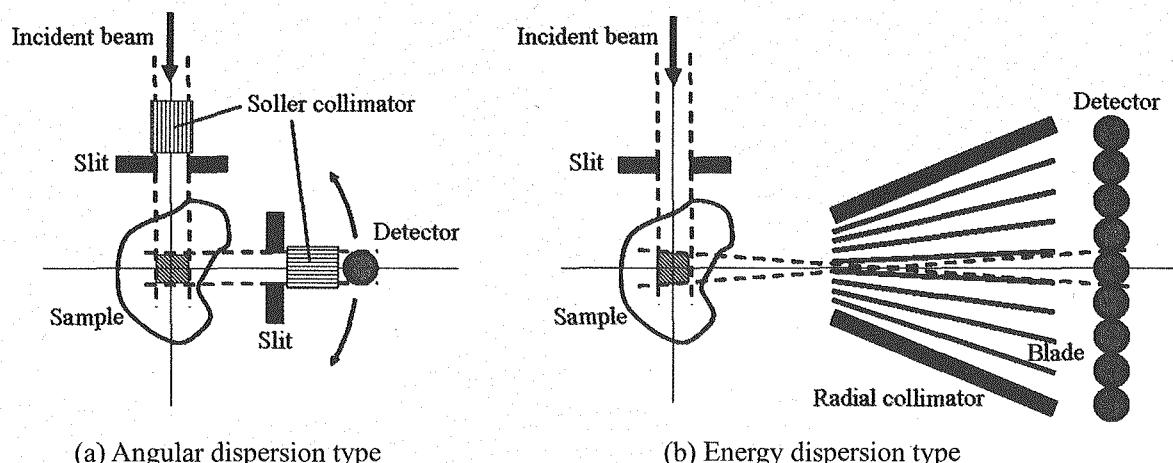
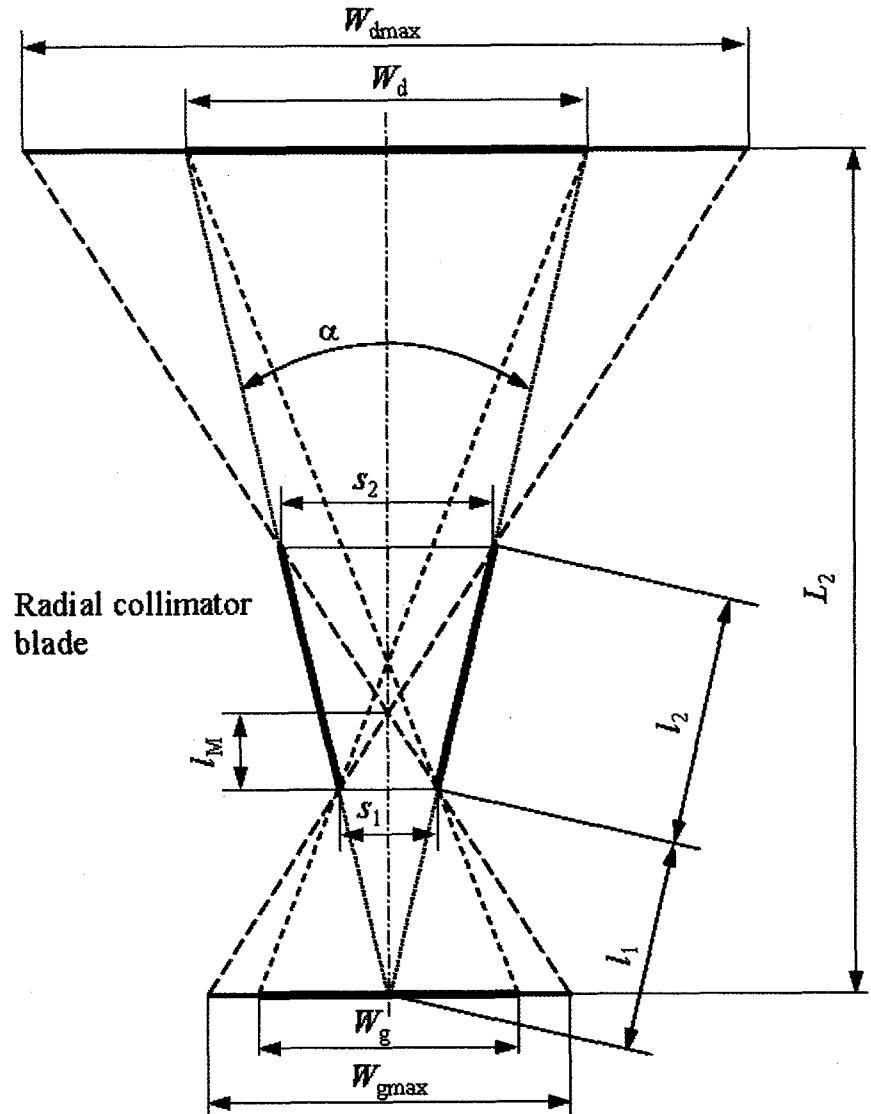


Fig. 2: Definition of gauge sizes in each measurement system.



W_g : temporary gauge width

W_d : detector width

$W_{g\max}$: optical maximum of gauge width

$W_{d\max}$: optical maximum of detector width

L_2 : sample-detector path length

l_1 : sample-collimator path length

l_2 : collimator length

s_1 : collimator blade interval at the entrance

s_2 : collimator blade interval at the exit

α : detector width solid angle

Fig. 3: Parameters of radial collimator.

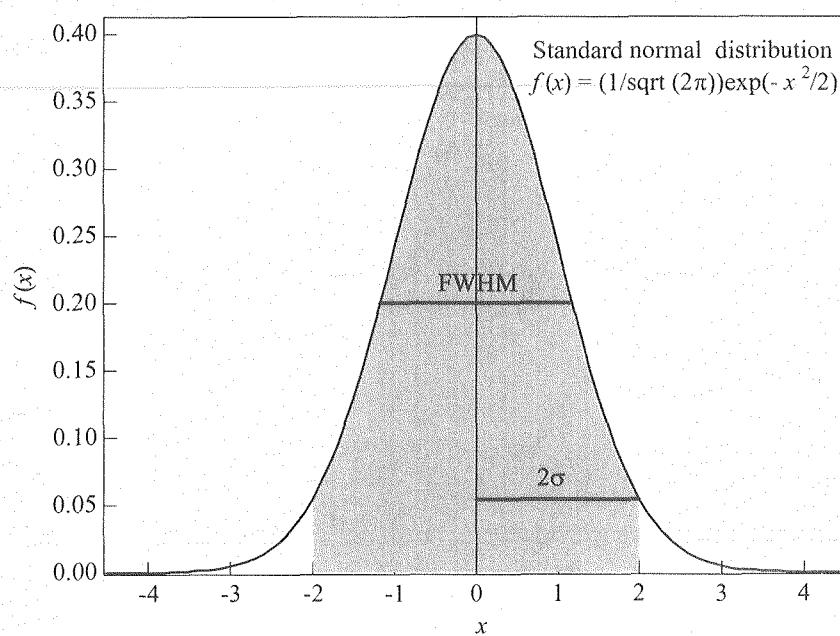


Fig. 4: A standard normal distribution. The gray zone is 95% confidence interval.

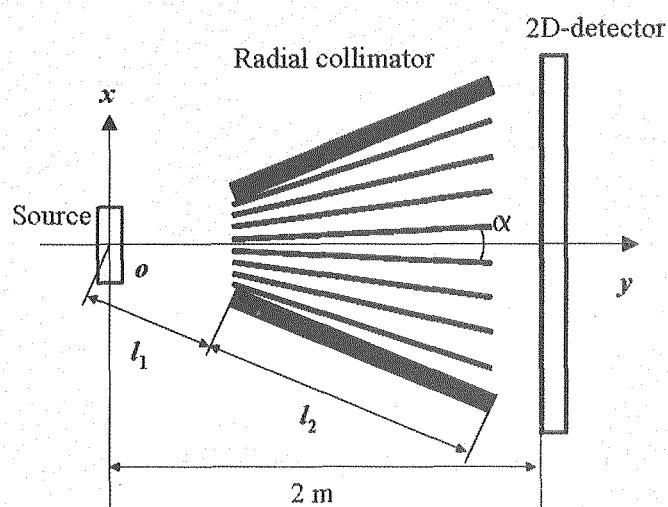


Fig. 5: Simulation layout of radial collimator.

Source height : gauge size, Source width : arbitrary parameter,

Radial collimator's parameters : Refer to Table 2 and

2D-detector size : 200 cm × 200 cm (100 ch × 100 ch).

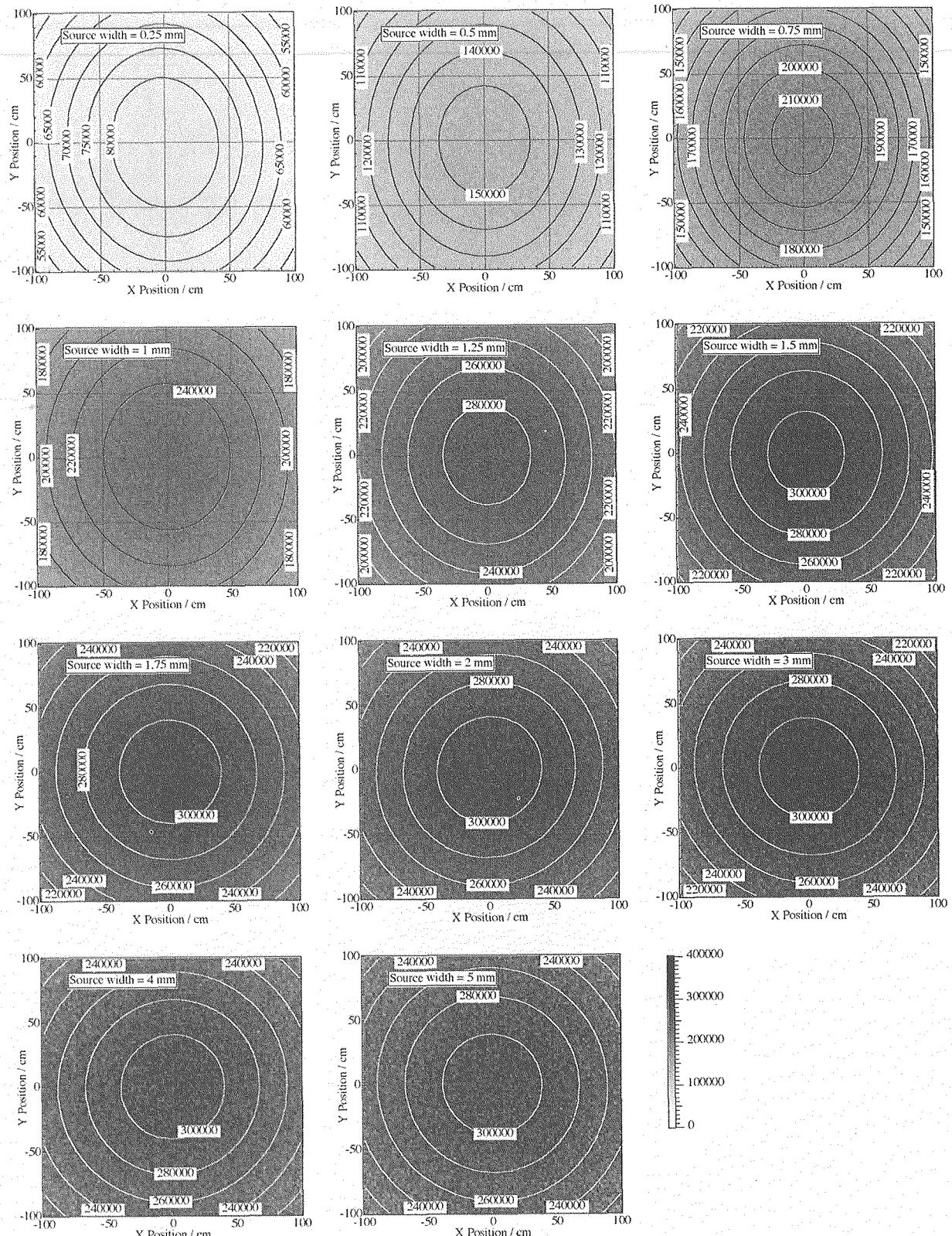


Fig. 6: Simulated 2D-detector images in the case of FWHM = 1 mm, blade length = 250 mm, and source width = 0.25 mm ~ 5 mm.

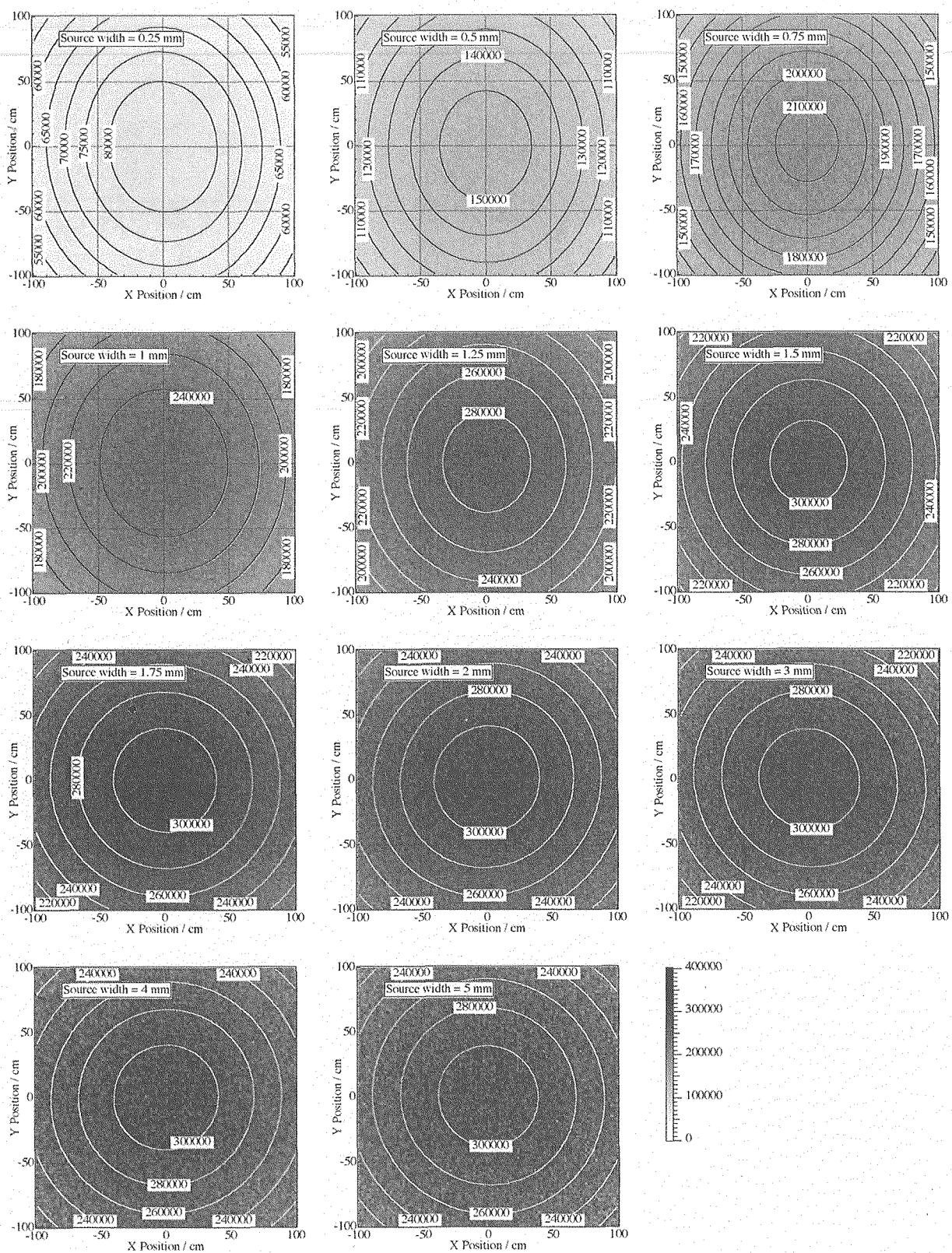


Fig. 7: Simulated 2D-detector images in the case of FWHM = 1 mm, blade length = 300 mm, and source width = 0.25 mm ~ 5 mm.

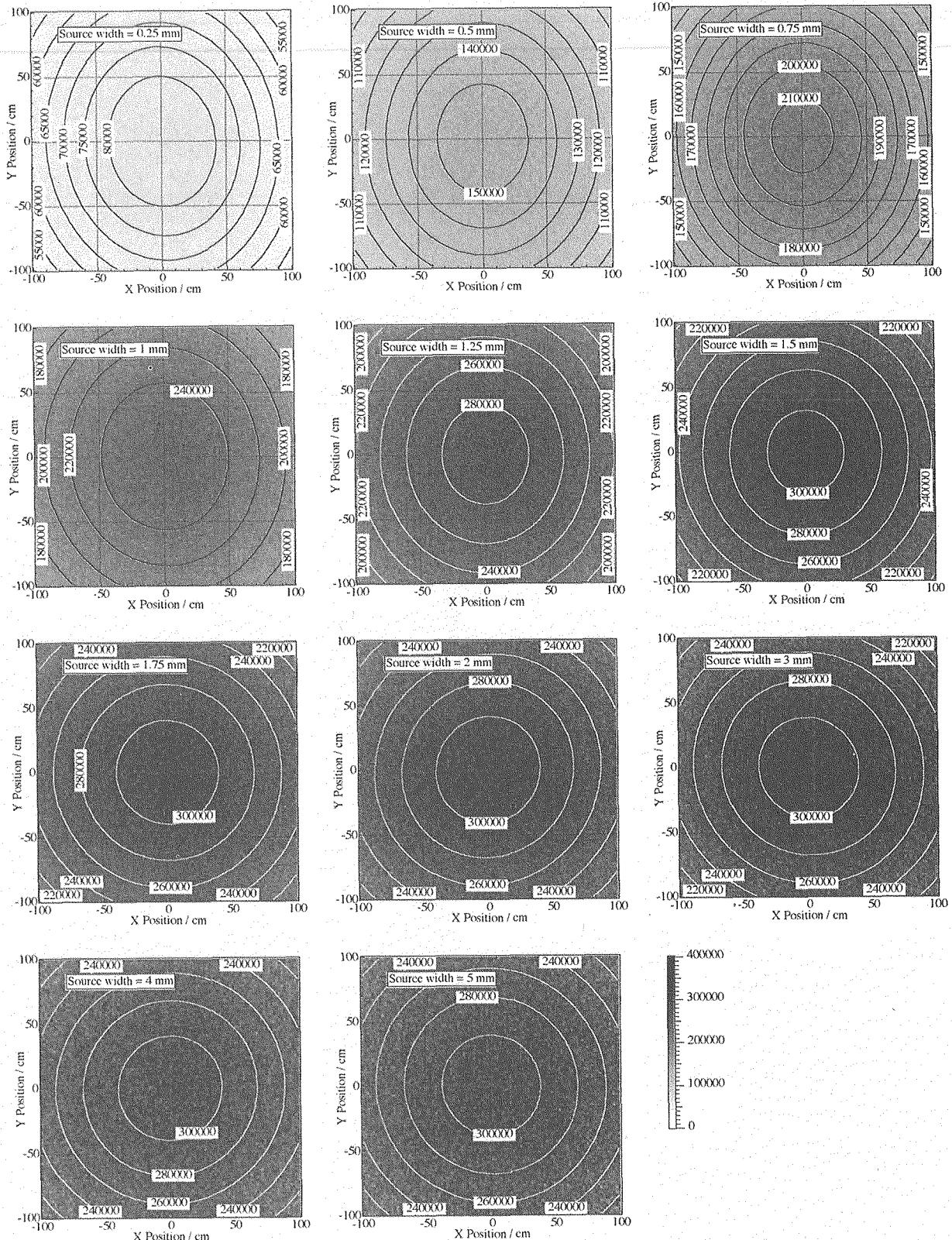


Fig. 8: Simulated 2D-detector images in the case of FWHM = 1 mm, blade length = 350 mm, and source width = 0.25 mm ~ 5 mm.

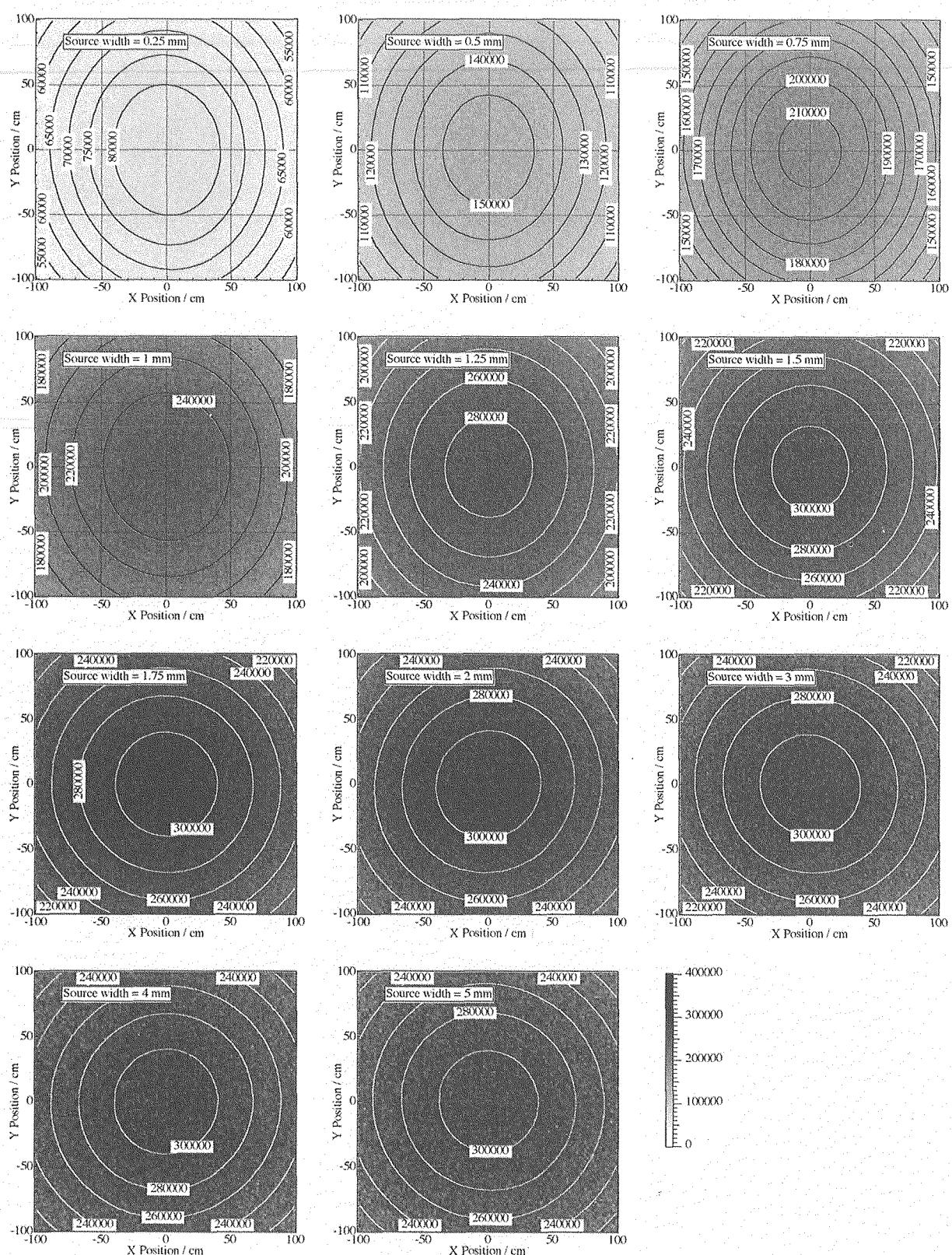


Fig. 9: Simulated 2D-detector images in the case of FWHM = 1 mm, blade length = 400 mm, and source width = 0.25 mm ~ 5 mm.

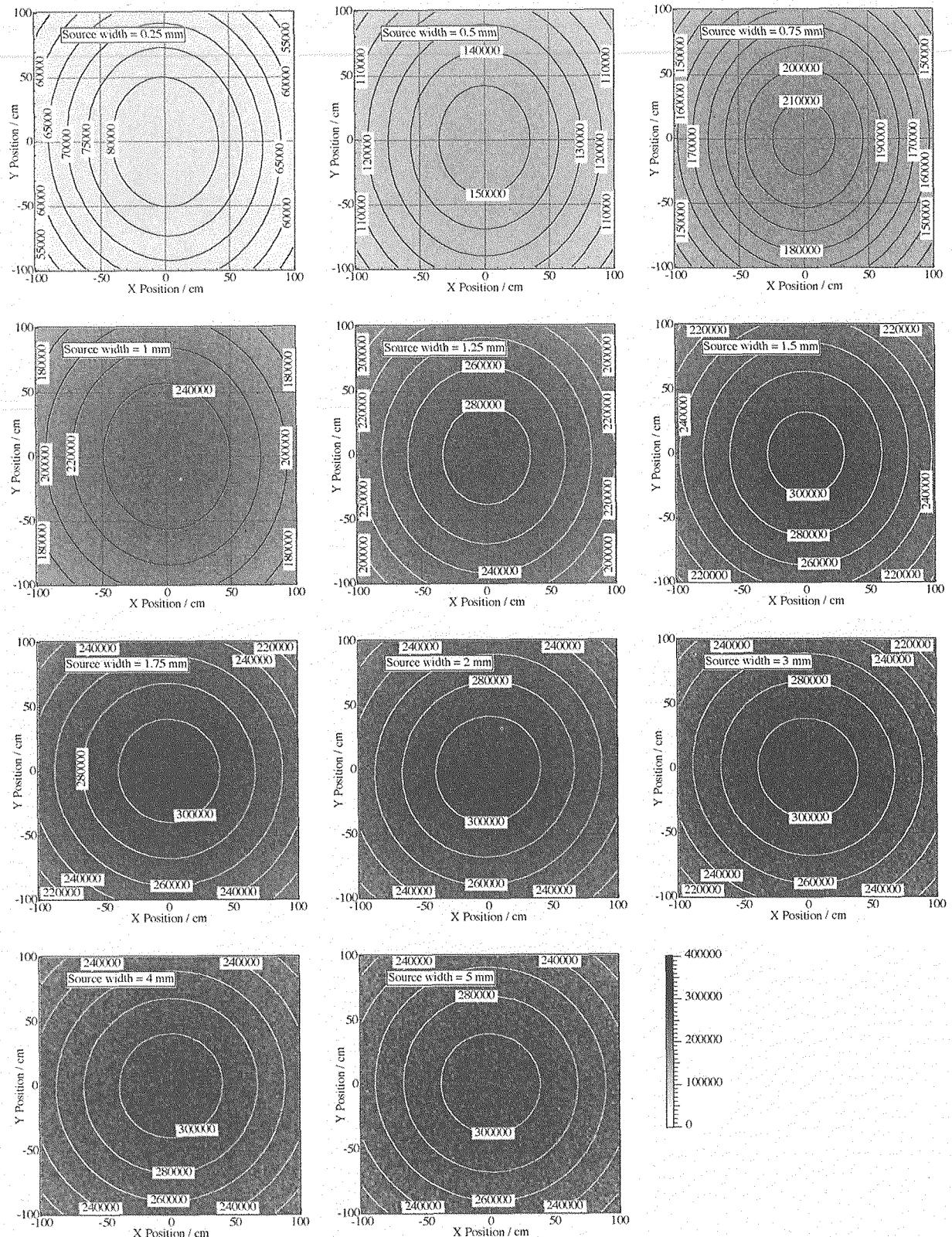


Fig. 10: Simulated 2D-detector images in the case of FWHM = 1 mm, blade length = 450 mm, and source width = 0.25 mm ~ 5 mm.

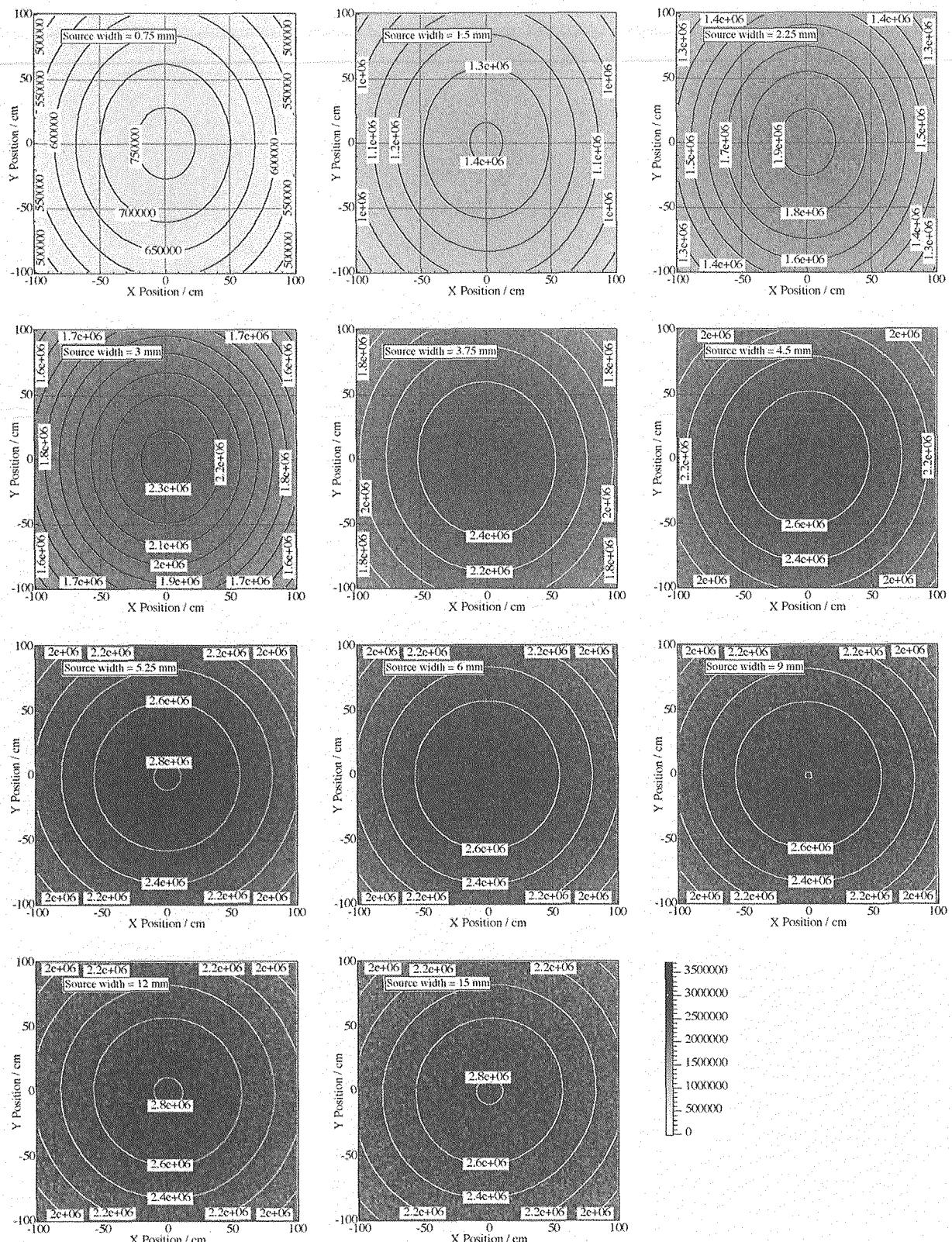


Fig. 11: Simulated 2D-detector images in the case of FWHM = 3 mm, blade length = 250 mm, and source width = 0.75 mm ~ 15 mm.

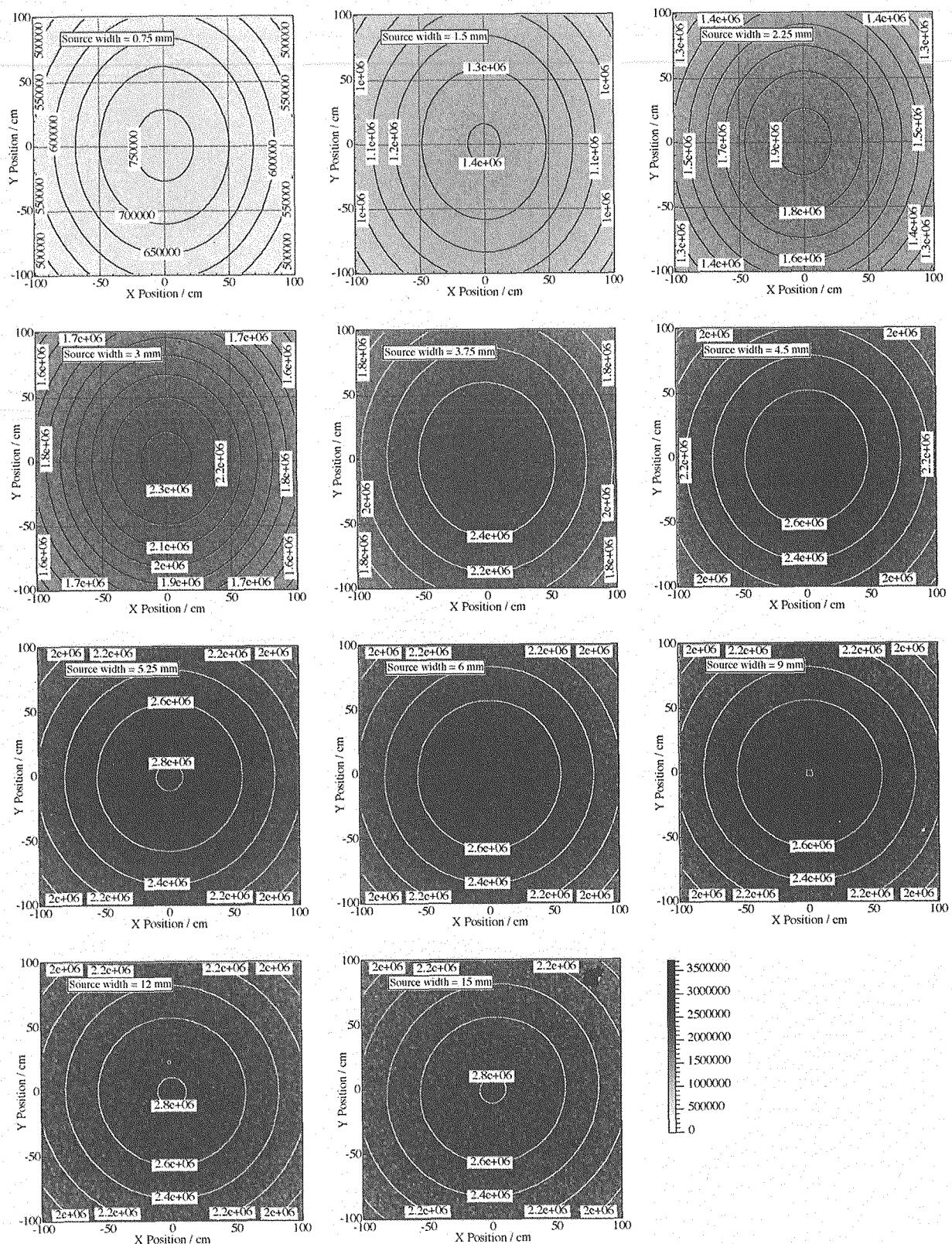


Fig. 12: Simulated 2D-detector images in the case of FWHM = 3 mm, blade length = 300 mm, and source width = 0.75 mm ~ 15 mm.

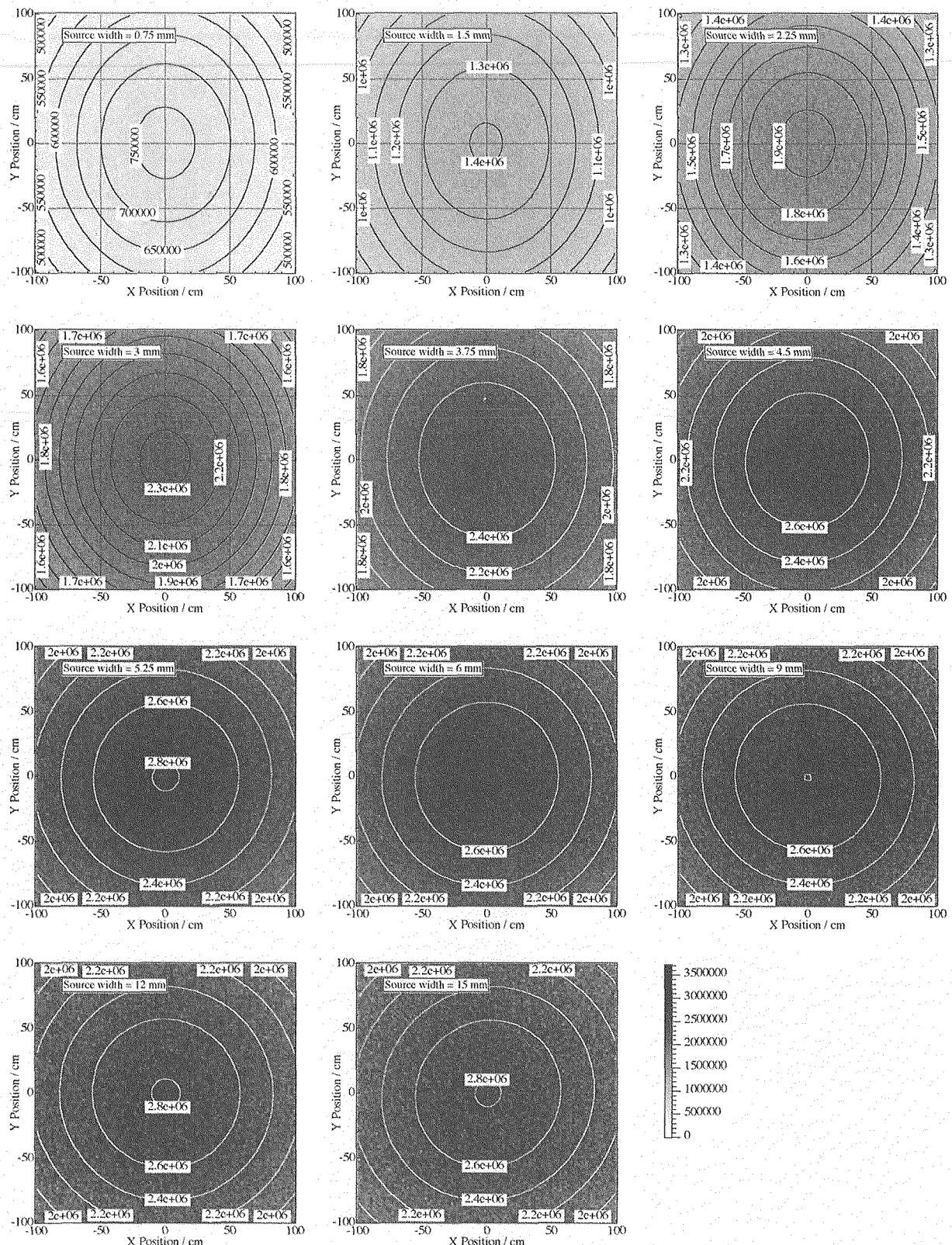


Fig. 13: Simulated 2D-detector images in the case of FWHM = 3 mm, blade length = 350 mm, and source width = 0.75 mm ~ 15 mm.

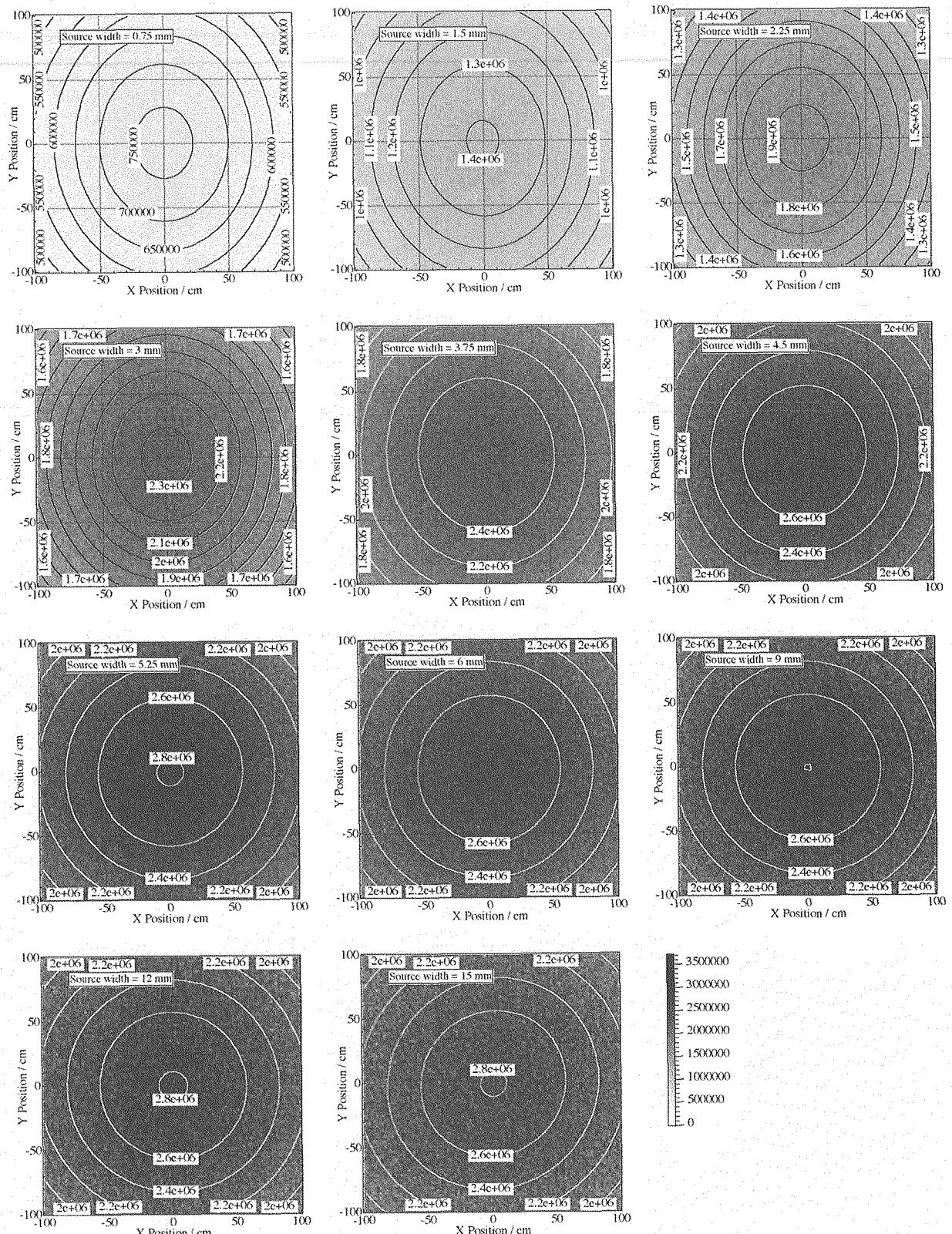


Fig. 14: Simulated 2D-detector images in the case of FWHM = 3 mm, blade length = 400 mm, and source width = 0.75 mm ~ 15 mm.

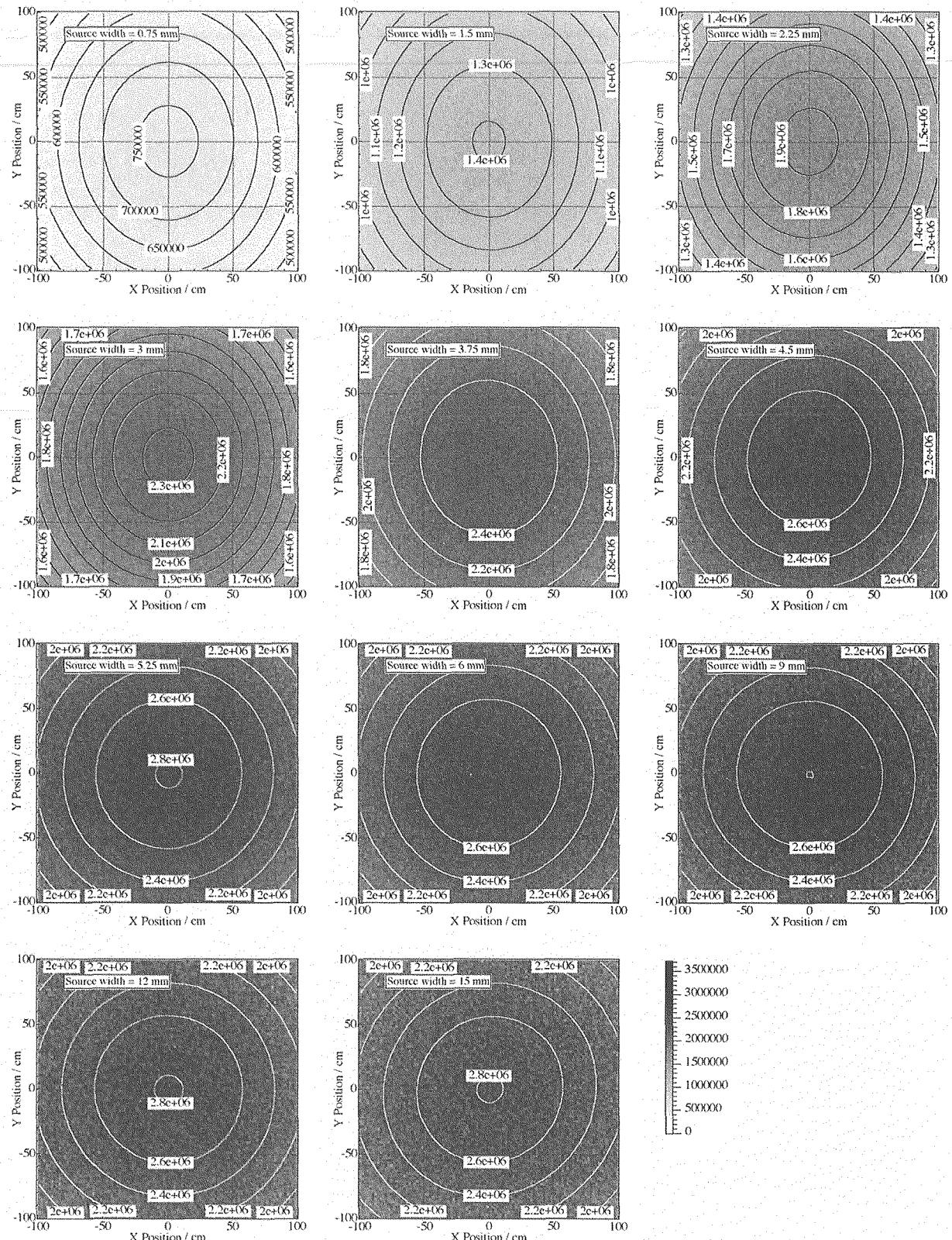


Fig. 15: Simulated 2D-detector images in the case of FWHM = 3 mm, blade length = 450 mm, and source width = 0.75 mm ~ 15 mm.

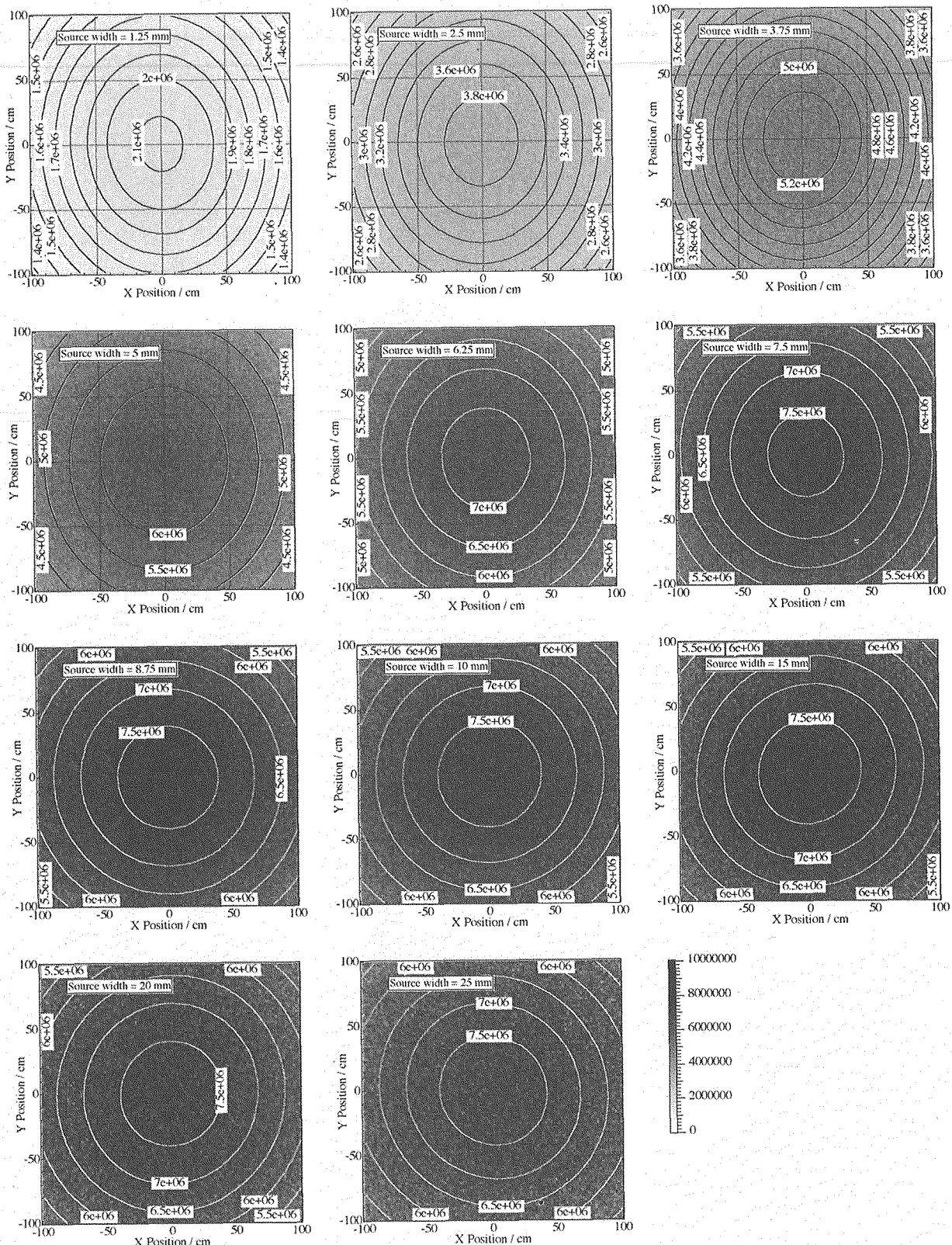


Fig. 16: Simulated 2D-detector images in the case of FWHM = 5 mm, blade length = 250 mm, and source width = 1.25 mm ~ 25 mm.

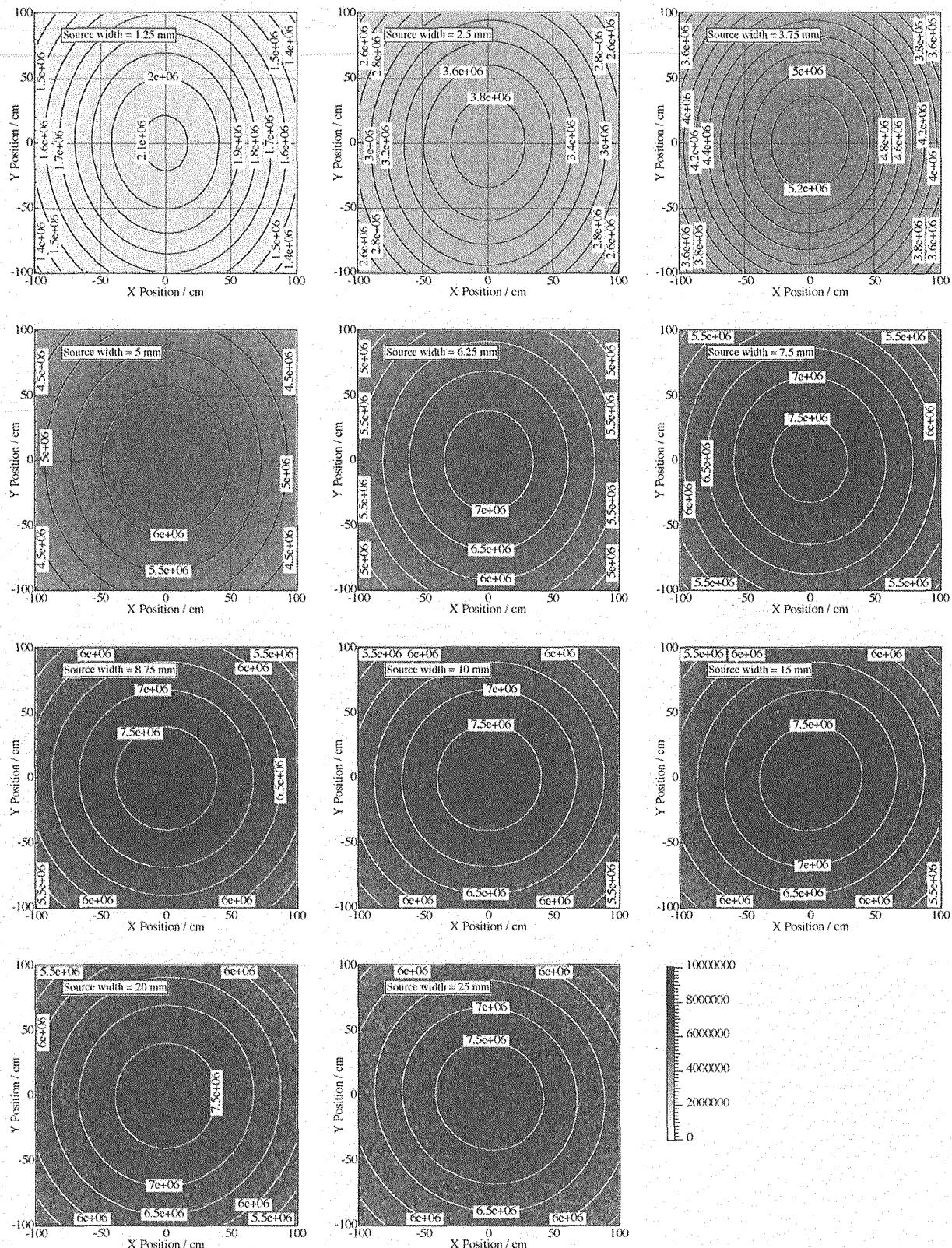


Fig. 17: Simulated 2D-detector images in the case of FWHM = 5 mm, blade length = 300 mm, and source width = 1.25 mm ~ 25 mm.

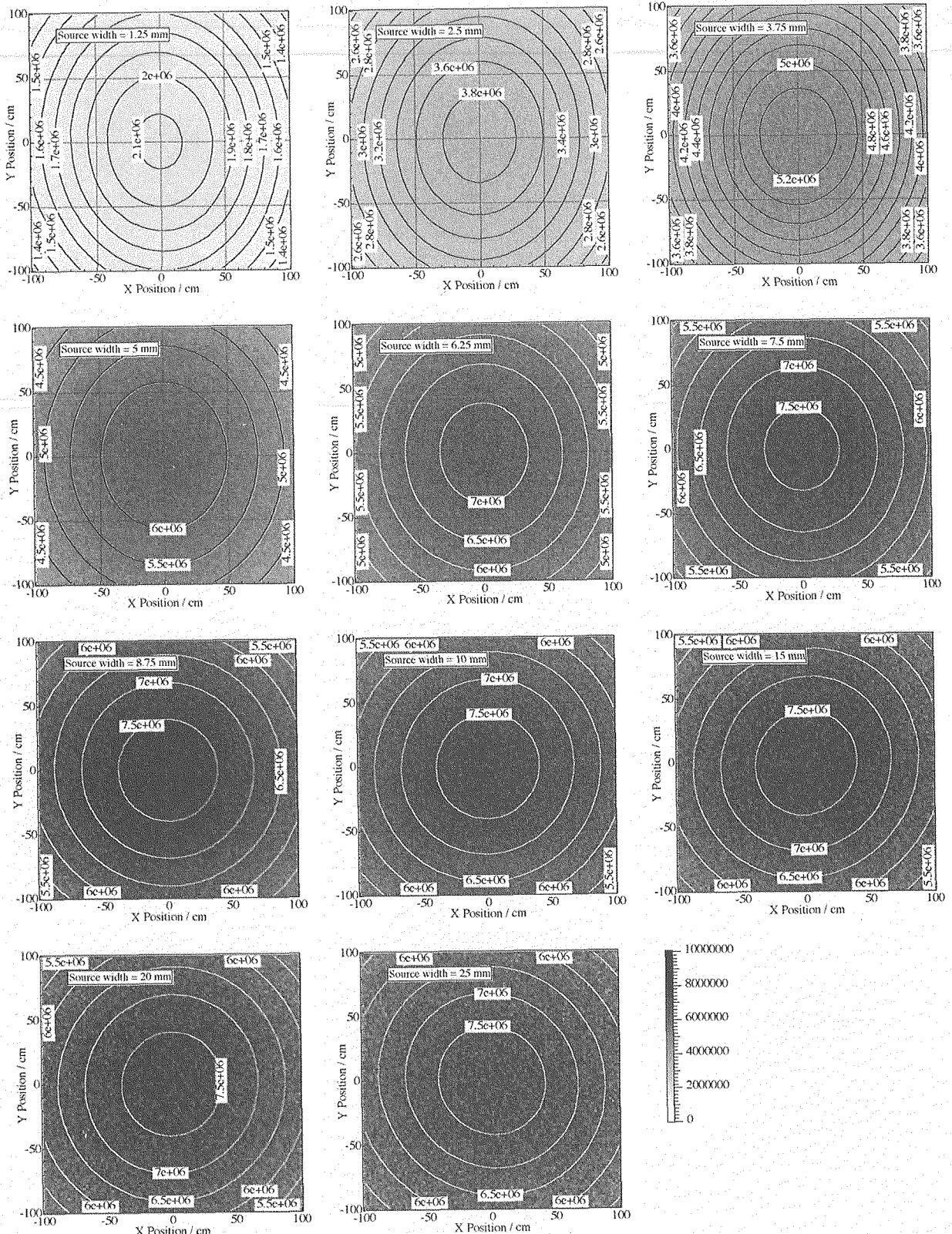


Fig. 18: Simulated 2D-detector images in the case of FWHM = 5 mm, blade length = 350 mm, and source width = 1.25 mm ~ 25 mm.

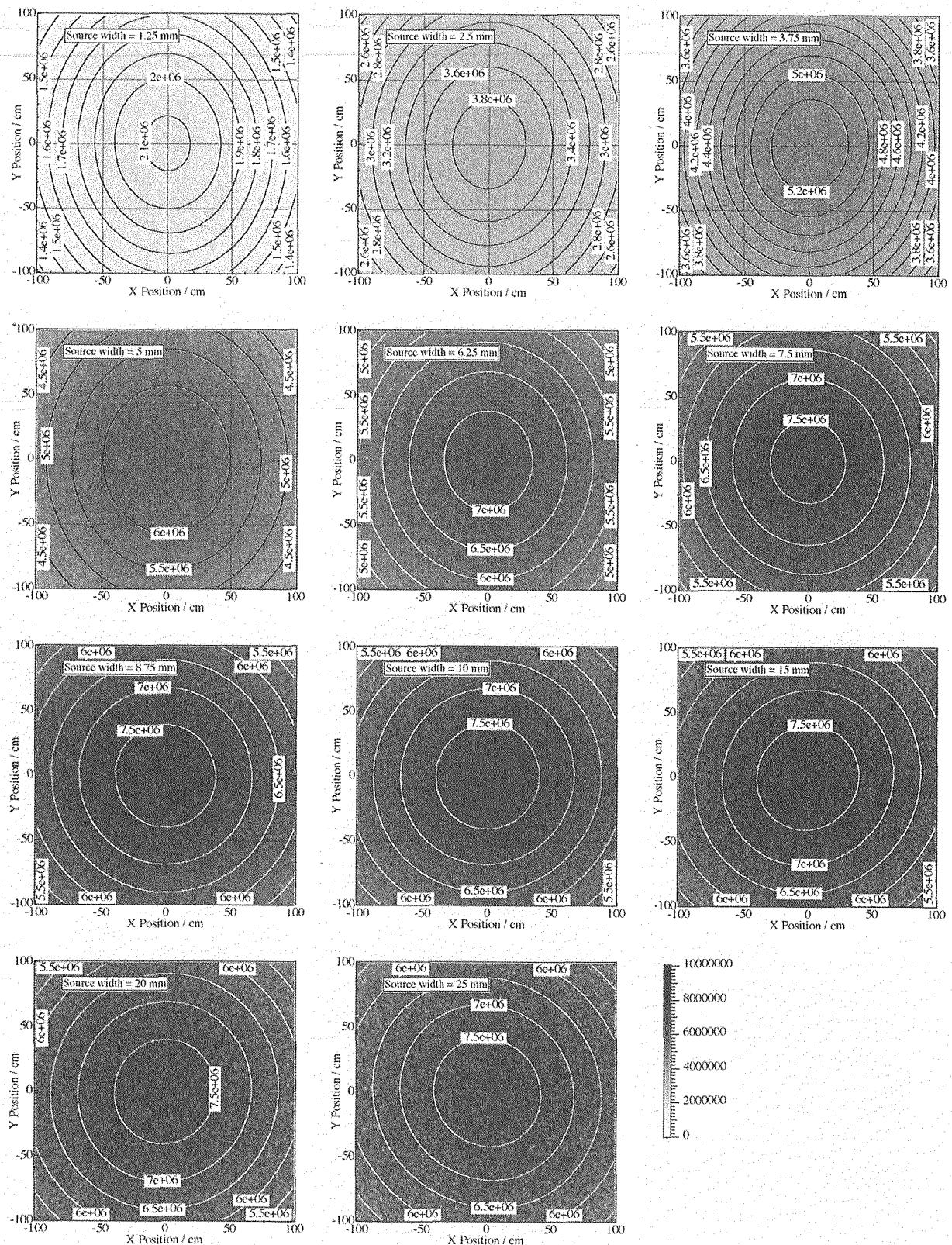


Fig. 19: Simulated 2D-detector images in the case of FWHM = 5 mm, blade length = 400 mm, and source width = 1.25 mm ~ 25 mm.

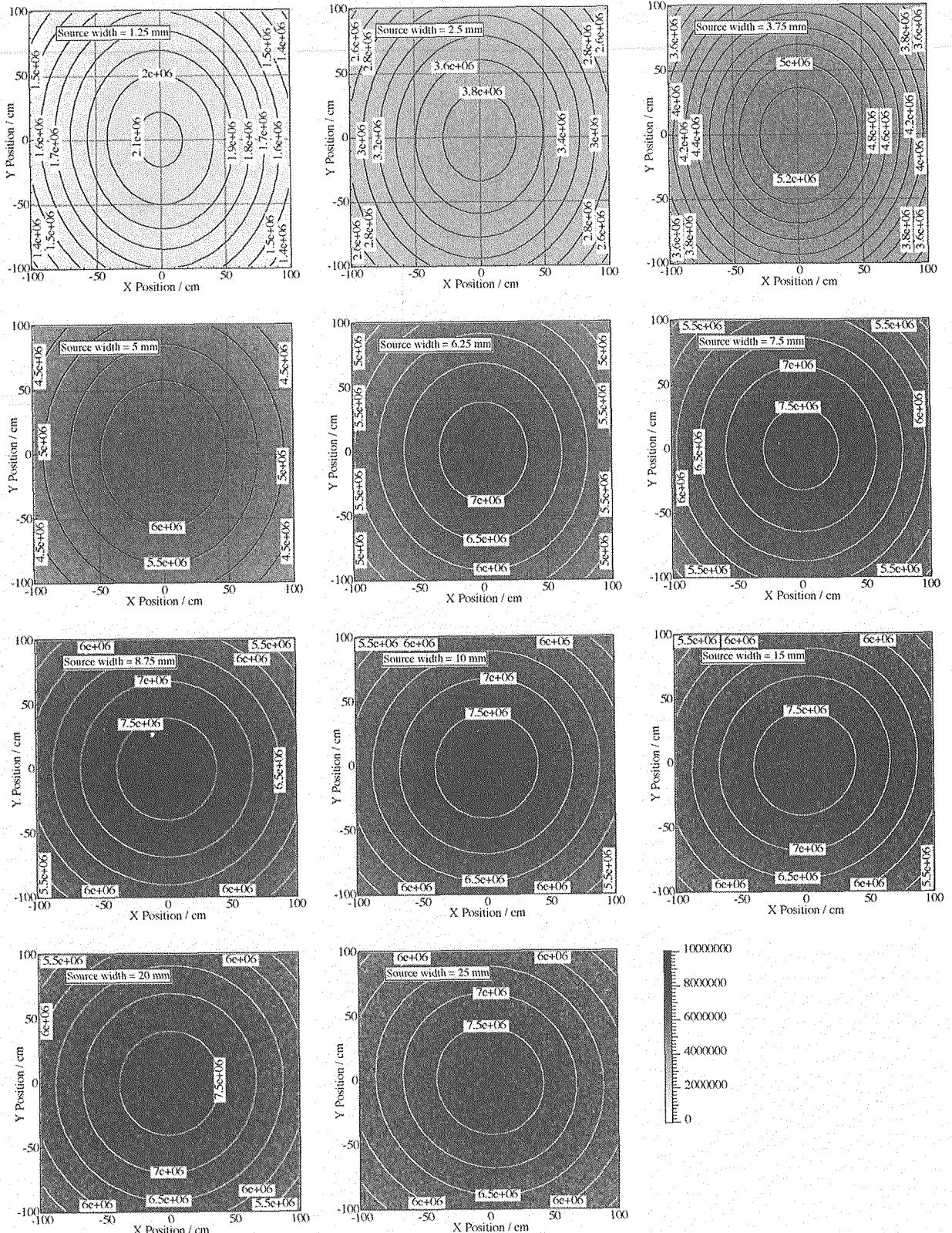


Fig. 20: Simulated 2D-detector images in the case of FWHM = 5 mm, blade length = 450 mm, and source width = 1.25 mm ~ 25 mm.

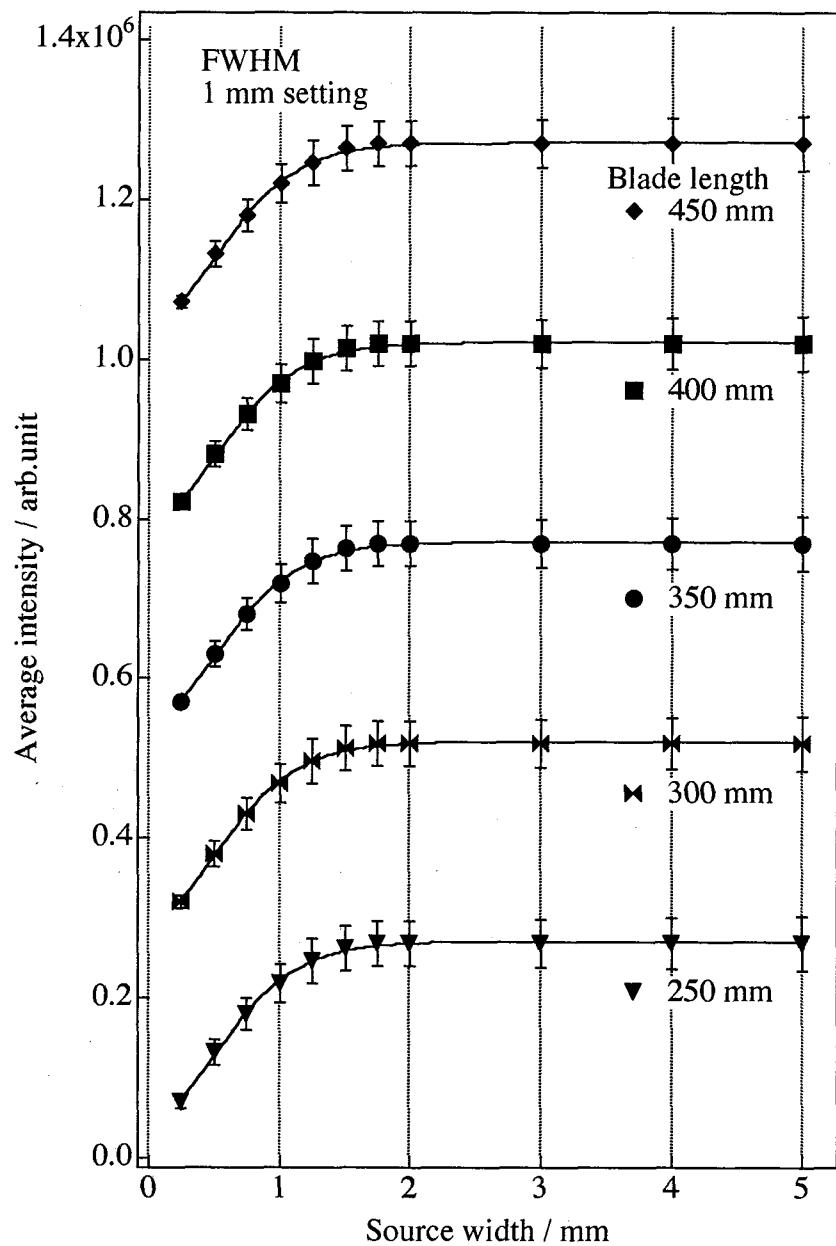


Fig. 21: Intensity distribution by source width in FWHM = 1 mm setting.
 These intensities are average intensity of 2D-detector.
 Error bars indicate the standard deviation which was calculated by average intensity.

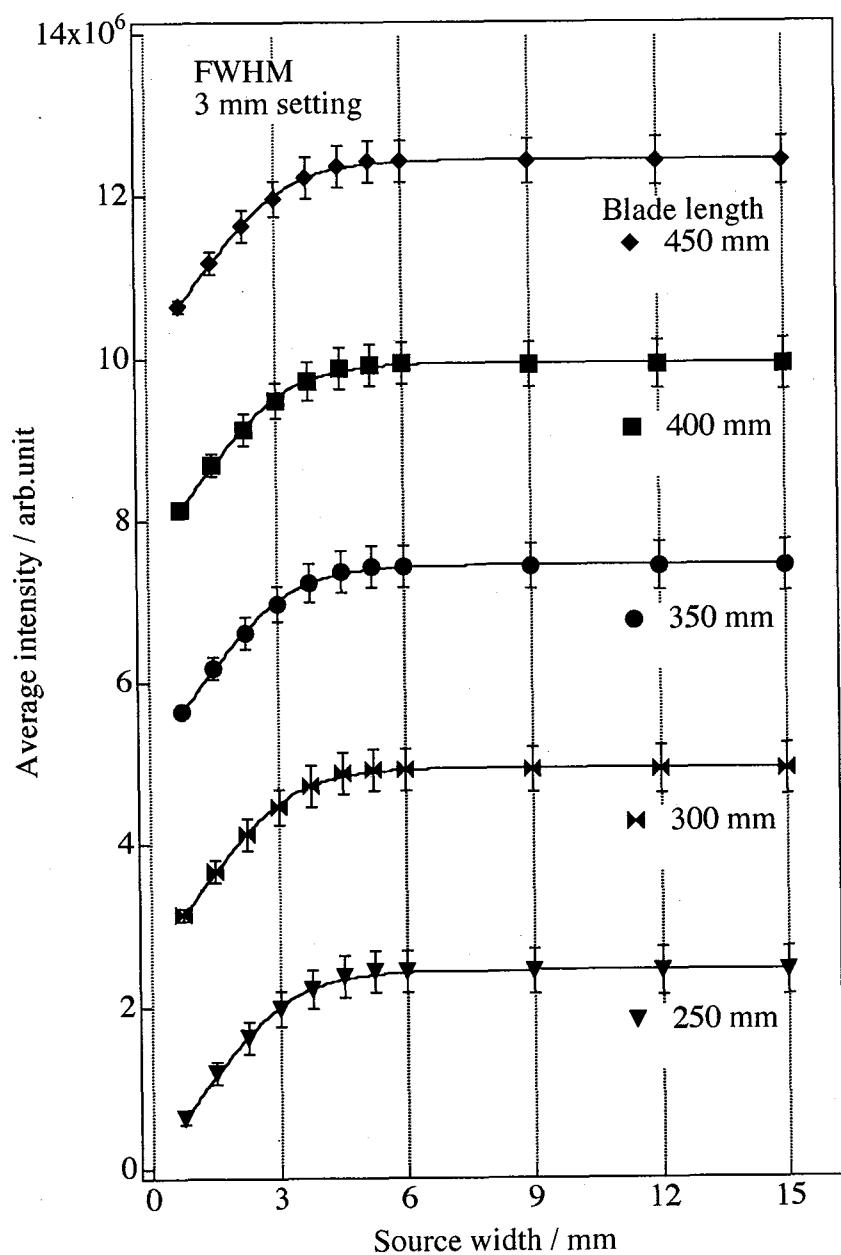


Fig. 22: Intensity distribution by source width in FWHM = 3 mm setting.

These intensities are average intensity of 2D-detector.

Error bars indicate the standard deviation which was calculated by average intensity.

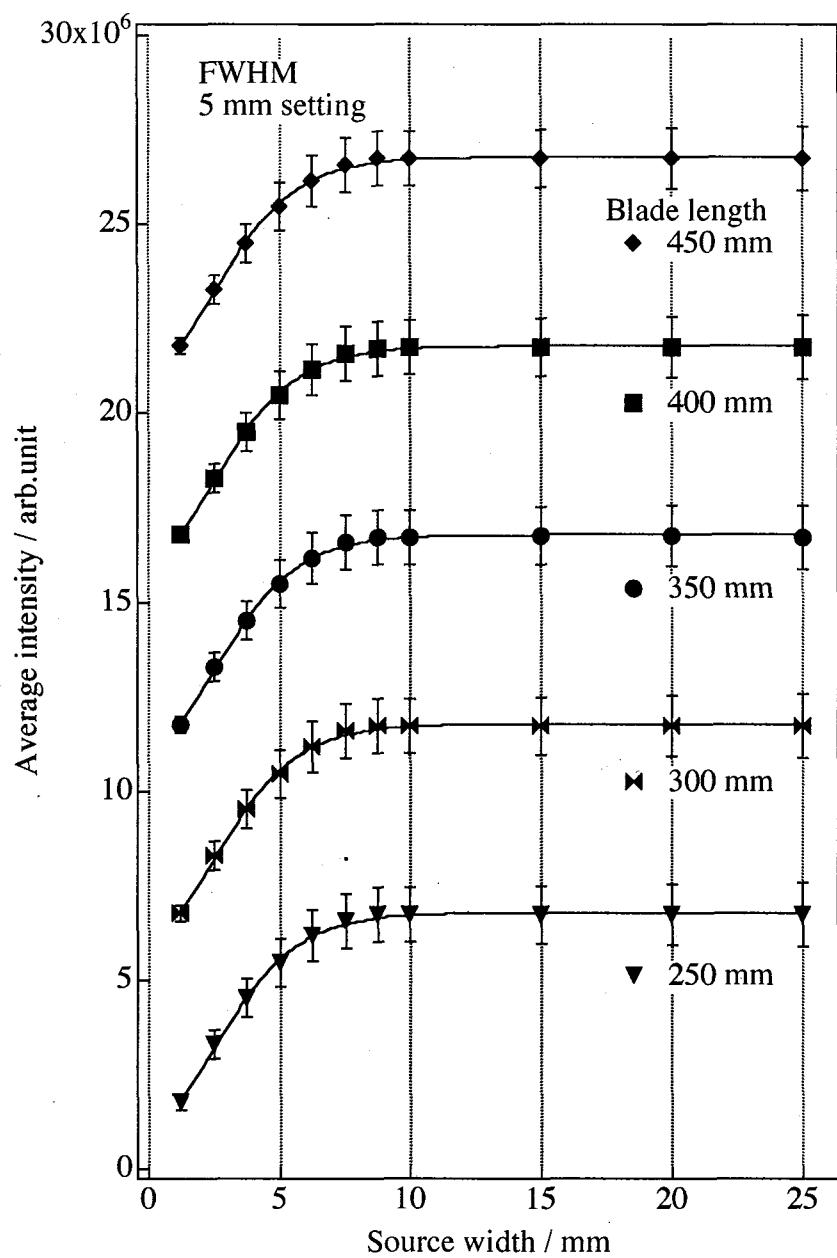


Fig. 23: Intensity distribution by source width in FWHM = 5 mm setting.
 These intensities are average intensity of 2D-detector.
 Error bars indicate the standard deviation which was calculated by average intensity.