

点源から放出される放射性雲
からの γ 線照射分布計算図

1970年7月

日本原子力研究所

Japan Atomic Energy Research Institute

日本原子力研究所は、研究成果、調査結果などを JAERI レポートとして、つぎの4種に分けそれぞれの通し番号を付し、不定期に刊行しております。

- | | | |
|---------|--------------------------------|-------------|
| 1. 研究報告 | まとまった研究の成果あるいはその一部における重要な結果の報告 | JAERI 1001- |
| 2. 調査報告 | 施設・展覧・調査の結果などをまとめたもの | JAERI 4001- |
| 3. 年報 | 研究・開発その他の活動状況などの報告 | JAERI 5001- |
| 4. 資料 | 施設の概要や手引きなど | JAERI 6001- |

このうち既刊分については「JAERI レポート一覧」にタイトル・要旨をまとめて掲載し、また新刊レポートは「研究成果要旨集」(隔月刊)で逐次紹介しています。

これらのリスト・研究報告書の入手および複写・翻訳などのご要求は、日本原子力研究所技術情報部(茨城県那珂郡東海村)に申しこんでください。

Japan Atomic Energy Research Institute publishes the nonperiodical reports with the following classification numbers:

1. JAERI 1001- Research reports
2. JAERI 4001- Survey reports and reviews
3. JAERI 5001- Annual reports
4. JAERI 6001- Manuals etc.

Requests for the above publications, and reproduction and translation should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan

点源から放出される放射性雲からの γ 線照射分布計算図

要 旨

原子力施設から放出され、大気中を拡散していく放射性物質（いわゆる放射性雲）からの γ 線被曝を評価するために、われわれはすでに電子計算機による照射量計算方法を開発し、照射量分布について従来不明であったいくつかの特徴を知ることができた。本報では、この計算方法およびこれらの特徴に基づいて、広範囲にわたる照射量分布を求め、実用的な計算図として使用されるようにまとめた。

放射性雲中の核種濃度は一般ガウス型分布に従うと仮定し、拡散パラメータ(σ_y, σ_z)は PASQUILL F. が示した値（英国法）に合うように定式化されている。また線量再生係数としては、GOLDSTEIN H. らの研究結果（ γ 線エネルギー 0.25~3 MeV）に合う経験式を使った。

本報にまとめられた計算図は、種々の放出高（0~200m）に対する風上、風下軸上および横軸方向の照射量分布を大気安定度別に表わしたものの、等照射量分布図、放出高および安定度をパラメータとする最大照射量とその出現地点との関係を示したもの、照射量の γ 線エネルギー依存性を表わしたものなどである。

昭和44年9月

日本原子力研究所 東海研究所 保健物理安全管理部
今井和彦・飯嶋敏哲・角田道生

Graphic Aid in the Assessment of Gamma-Exposure due to a Radioactive Cloud Released from a Point Source

Abstract

In this report, distributions of gamma-exposure due to a radioactive cloud released from a nuclear plant under the normal operation or by accidents are given for practical use, basing on the method developed by the authors using an electronic computer.

An assumption is made that the distribution of nuclide concentration in the cloud is of the generalized Gaussian type, of which the standard deviations, i. e. the so-called cloud-size parameters, are formulated on the basis of F. PASQUILL's graphic data. In addition, empirical formulae derived from the results reported by H. GOLDSTEIN *et al.* are applied for the dose-buildup factor.

The report includes (a) upwind, downwind and crosswind axial exposure distributions under various atmospheric stabilities, taking the release-height as a parameter, (b) isopleths of exposure, (c) relation between the maximum exposure and the maximum point, taking the release-height and the stability as parameters, and (d) the dependence of exposure on the energy of primary photons.

Sept. 1969

Kazuhiko IMAI, Toshinori IJIMA and Michio KAKUTA
Division of Health Physics and Safety, Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute

目 次

1. まえがき	1
2. 計算方法	1
3. 図の説明	2
3.1 風向軸上の分布について (Fig. 1~Fig. 13)	2
3.2 横軸方向の分布について (Fig. 14~Fig. 31)	3
3.3 等照射率線について (Fig. 32~Fig. 37)	3
3.4 最大照射率およびその出現地点について (Fig. 38)	3
3.5 γ 線エネルギーとの関係について (Fig. 39)	3
文献	3
図	5

Contents

1. Introduction	1
2. Basic equation of calculation	1
3. Aspects of exposure distribution	2
3.1 Distribution in upwind and downwind distribution (Fig. 1~13)	2
3.2 Distribution in crosswind direction (Fig. 14~31)	3
3.3 Isopleth (Fig. 32~37)	3
3.4 Change in maximum exposure and distance to maximum point, related to release-height and atmospheric stability (Fig. 38)	3
3.5 Energy-dependence of exposure (Fig. 39)	3
References	3
Figures	5

1. ま え が き

原子力施設から放出され大気中に拡散していく放射性物質（いわゆる放射性雲）による環境中被曝にはいろいろの被曝型があるが、特に呼吸摂取による体内被曝と放射性雲中の γ 線による体外被曝が重視される。前者については、放射性雲の地表付近濃度が当然問題となり、筆者らはすでに、これに役立つような濃度分布計算図を作成した。⁽¹⁾ 本報では、後者の γ 線被曝評価に便利な計算図をまとめる。

放射性雲からの γ 線被曝を評価する場合には、計算が

複雑なため従来からいろいろの近似計算が行なわれてきた。そしてそれらは部分的には役立つものであるが、被曝の全貌を知るためには不十分であり、そのため γ 線被曝の特徴などが長い間明らかにならなかった。この問題を解決するために、筆者らは基本の計算式を単純化することなく、電子計算機を使って被曝量を求める方法を開発し、その結果から従来不明であったいくつかの特徴を示した。⁽²⁾ 本報の計算図は、この開発された方法によって求められたものである。

2. 計 算 方 法

放射性雲の γ 線による地表付近の被曝量（照射率；exposure-rate）を求める基本式は次のとおりである。

$$D(x_0, y_0, 0) = \frac{K_0}{4\pi} \mu_a E \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{B(E, r)}{r^2} e^{-\mu r} e^{-\frac{\lambda}{u} x} \cdot x dy dz dx \quad (1)$$

ただし

- $D(x_0, y_0, 0)$: exposure-rate ($\mu R/hr$)
- K_0 : 放射能から照射率への換算係数

$$K_0 = 2.03 \times 10^9 \left(\frac{\text{dis} \cdot \text{m}^3 \cdot \mu R}{\text{MeV} \cdot \text{Ci} \cdot \text{hr}} \right)$$
- E : γ 線の初期エネルギー (MeV/dis)
- μ : 空気に対する γ 線の線型全吸収係数 (m^{-1})
- μ_a : 空気に対する γ 線の線型真吸収係数 (m^{-1})
- λ : 問題とする核種の物理的壊変定数 (sec^{-1})
- $B(E, r)$: 空気に対する γ 線の線量再生係数
- x_0, y_0 : 被曝点の位置 (m)
- r : 放射性雲中体積要素と被曝点の距離 (m)
- x : 核種の放射性雲中濃度 (Ci/m^3)

基本式(1)を使うさいに、濃度 x と再生係数 $B(E, r)$ の決定が重要な問題である。まず濃度についてはガウス分布を仮定し、次の式を採用した。⁽³⁾

$$x(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi \cdot 3.6 \times 10^3 \mu} \cdot \frac{1}{\sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \left[e^{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}} \right] \quad (2)$$

ただし

- Q : γ 線核種の放出率 (Ci/hr)
- μ : 放出点における平均風速 (m/sec)
- H : 放出高 (m)
- x, y, z : 放出点を原点とする直角座標 (風向を X 軸とする) (m)
- σ_y, σ_z : 濃度分布の標準偏差 (m)

PASQUILL および MEADE は σ_y, σ_z に対応する θ (煙の広がり角)、 h (煙の垂直幅)をグラフで与えているが、⁽³⁾ ⁽⁴⁾ われわれは計算機で自動的に得られるように、 σ_y, σ_z を次式で表わした。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_y &= k\theta_0 x (8 - \log x) ; k = 6.7775 \times 10^{-4} \\ \sigma_z &= \sigma_0 x^{a_0 + a_1 x + a_2 x^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

各定数を TABLE 1 に示す。この式で得られる σ_y は原値と完全に一致し、 σ_z は $\pm 5\%$ 以内で一致している。再生係数 $B(E, r)$ については、 $0.5 \text{ MeV} \leq E \leq 3 \text{ MeV}$ の範囲の γ 線に対して次の実験式を使った。

$$B(E, r) = 1 + \mu(E)r + (\mu r)^2 / 7E^{2.4} \quad (4)$$

$E = 0.255 \text{ MeV}$ のものに対しては、筆者らが求めた次の実験式を使った。($n = \mu r$)

$$\left. \begin{aligned} B(E, r) &= 1 + n + 1.20 n^2 \quad (1 \leq n \leq 8.5) \\ B(E, r) &= 1 - 15.54n + 3.195n^2 \quad (8.5 < n \leq 20) \end{aligned} \right\} \quad (4')$$

TABLE 1 Constants in formulae of σ_y and $\bar{\sigma}_z$

Stability	θ_0	σ_0	a_0	a_1	a_2
A	deg. 50	meter 7.120×10^{-1}	6.140×10^{-1}	3.8900×10^{-4}	0
B	40	2.500×10^{-1}	8.051×10^{-1}	8.8500×10^{-5}	0
C	30	1.260×10^{-1}	8.890×10^{-1}	0	0
D	20	9.468×10^{-2}	8.456×10^{-1}	-6.5880×10^{-6}	1.5109×10^{-10}
E	15	7.746×10^{-2}	8.249×10^{-1}	-9.0724×10^{-6}	2.1761×10^{-10}
F	10	6.620×10^{-2}	7.810×10^{-1}	-9.5838×10^{-6}	2.4273×10^{-10}

これらの実験式で得られる結果は、GOLDSTEIN-WILKINSの結果⁽⁶⁾と、それぞれ 10% (0.255 MeV), 20% (0.5 MeV), 5% (1 MeV), 10% (2 MeV), 40% (3 MeV) 以

内の偏差で一致する。

以上の濃度、再生係数を使い、基本式(1)を数値積分した。(計算方法の詳細については Ref. (2)を参照)

3. 図の説明

基本式から明らかなように、照射率 D と風速 u 、放出率 Q との間には、それぞれ反比例、比例の関係があるので、計算図の作成にあたってはまず $u=1$ m/sec, $Q=1$ Ci/hr とした。したがって Q, u が与えられたときに、本計算図の値に Q/u を掛ければ必要な値が求められる。(なお、放出率の代わりに全放出量 (Ci) が問題になる場合には、計算図から得られるものは照射率の代わりに照射量 (μ R) である。) また拡散中の核種の減衰は考

慮しないことにした ($\lambda=0$)。エネルギーについては、吸収係数 μ_a, μ がエネルギーの関数であるため、単純に比例関係として扱うわけにいかない。したがって $E=1$ MeV の場合で計算図を作成し、さらにエネルギー修正係数を与える図を加える。

使用されている大気安定度は TABLE 2 で定義されるものである。

TABLE 2 Stability categories

Surface windspeed (m/sec)	Insolation (cal/cm ² ·hr)			Heavily overcast Day or night	Night	
	Strong	Moderate	Slight		Thinly overcast, high cloud (10~ 5) or low cloud (7~5)	Cloud (4~0)
	>50	49~25	≤24			
< 2	A	A-B	B	D	—	—
2~3	A-B	B	C	D	E	F
3~4	B	B-C	C	D	D	E
4~6	C	C-D	D	D	D	D
6 <	C	D	D	D	D	D

3.1 風向軸上の分布について (Fig. 1~13)

はじめに、風上方向を含めた放出点近傍範囲 (-200 m $< x < 100$ m) の照射率分布を Fig. 1 に示す。20 m 程度以下の放出高では大気安定度による差が現われているが、その差はわずかであり、全体的にこの範囲では大気条件は無関係とみてよい。

Fig. 2~Fig. 13 に、 $H=200$ m までの各放出高について、風下軸上の照射率分布を安定度別に示す。全図から

理解されるように、濃度分布とは異なり、照射率は徐々に増加して最大値に達する。そしてその範囲では大気安定度はほとんど影響していない。これは、 γ 線の空気中透過距離が雲形の差異を無視できるほど十分長いからである。このような特徴は緊急時環境サーベイの遂行、あるいは環境モニタリング網の設置に関して利点となるであろう。

3.2 横軸方向の分布について (Fig. 14~31)

Fig. 14 ~ Fig. 31 には、風向が直角方向の照射率分布を、A, D, F の3安定度について示している。各図を比較すれば理解されるように、その他の安定度の場合には、A, D, F のうちの近似している安定度のもので代用できるし、あるいは簡単に内挿して値が得られる。

横方向への照射率の減少は、濃度の場合よりゆるやかであり、このことは、年間の被曝量のように積算値を問題とする場合に、被曝点を含む方向の両側方向を通る放射性雲の寄与も考慮すべきことを示唆している。

3.3 等照射率線について

地表付近の等照射率線は Fig. 1 ~ Fig. 31 からいろいろの大気安定度、放出高について、すぐに描くことができるが、ここでは等照射率分布のおおよその傾向を示すこと、または緊急時サーベイ計画をじん速に行なうのに役立つために、安定度 A, D, F の場合の $H=10\text{m}$, 100m について、等照射率線を Fig. 32 ~ Fig. 37 に示す。

3.4 最大照射率およびその出現地点について

原子力施設設置のための事前安全評価、あるいは緊急時における放射性汚染による危険度の判断のために、最高濃度あるいは最高照射率およびその出現地点が常に注目される。この意味から、Fig. 38 に最高照射率と出現地点、安定度、放出高との関係を示す。Ref. (1) p.72 の図との比較から、その様子が濃度の場合と大分異なることがわかる。すなわち、濃度の場合には出現地点が安定度、放出高とともに大きく変化するが、照射率の場合には放出高が 200m になっても、出現地点は放出点からせいぜい 1km の距離にある。したがってわが国の敷地選定条件から考えると、ほとんどの場合最高地点は敷地内あるいは敷地境界付近に現われることになる。また安定度による最高地点の移動も $100\sim 300\text{m}$ 程度と小さく、このことも濃度の場合と異なる。

く、このことも濃度の場合と異なる。

このほか、Ref. (2) で述べているように、最大照射率は放出高の $H^{-1.2}$ にほぼ比例し、この関係は安定度に影響されない。これに対して最高濃度は安定度 A の場合に $H^{-1.8}$ 、安定度 F の場合に $H^{-2.3}$ にそれぞれ比例する。したがって煙突の高さの増加は、濃度の減少に対してほどには照射率の減少に寄与しない。

3.5 γ 線エネルギーとの関係について

各安定度について、いろいろの放出高の場合の照射率を算出し、それぞれを 1MeV のエネルギーの γ 線に対する照射率で規格化して、その結果を比較すると次のことがわかる。

- (a) 照射率のエネルギー依存性は安定度でほとんど変わらない。
- (b) 40m 放出高の場合の照射率を基準にすると、 100m , 0m の場合の値は $\pm 10\%$ 以内の差である。
- (c) エネルギーによる照射率の変化は、被曝点が横軸方向へ離れるほど大きくなる。

これらの傾向は数学的解析からも妥当であることが確認されたので⁽²⁾、Fig. 39 に、被曝点のみをパラメータとするエネルギー修正係数を示す。したがって、 $0.5\sim 3\text{MeV}$ のエネルギー範囲の核種では、 1MeV に対する照射率を求め、Fig. 39 で得られる係数を掛ければよい。

References

- 1) 角田道生, 飯嶋敏哲: 英国法による濃度分布計算図, JAERI-1101 (1966)
- 2) IMAI K., IJIMA T.: Assessment of Gamma-Exposure Due to a Radioactive Cloud Released from a Point Source. to be published *Health Phys.*, 18, 207 (1970)
- 3) PASQUILL F.: *Met. Mag.*, 90, 33 (1961)
- 4) MEADE P. J.: Proc. VI-th Int. Cong. Electronics and Atomic Energy, Rome, p. 315 (1959)
- 5) HOLLAND J. Z.: A/CONF 8/P/572 (1955)
- 6) GOLDSTEIN H., WILKINS J. E., Jr.: NYO-3075 (1954)

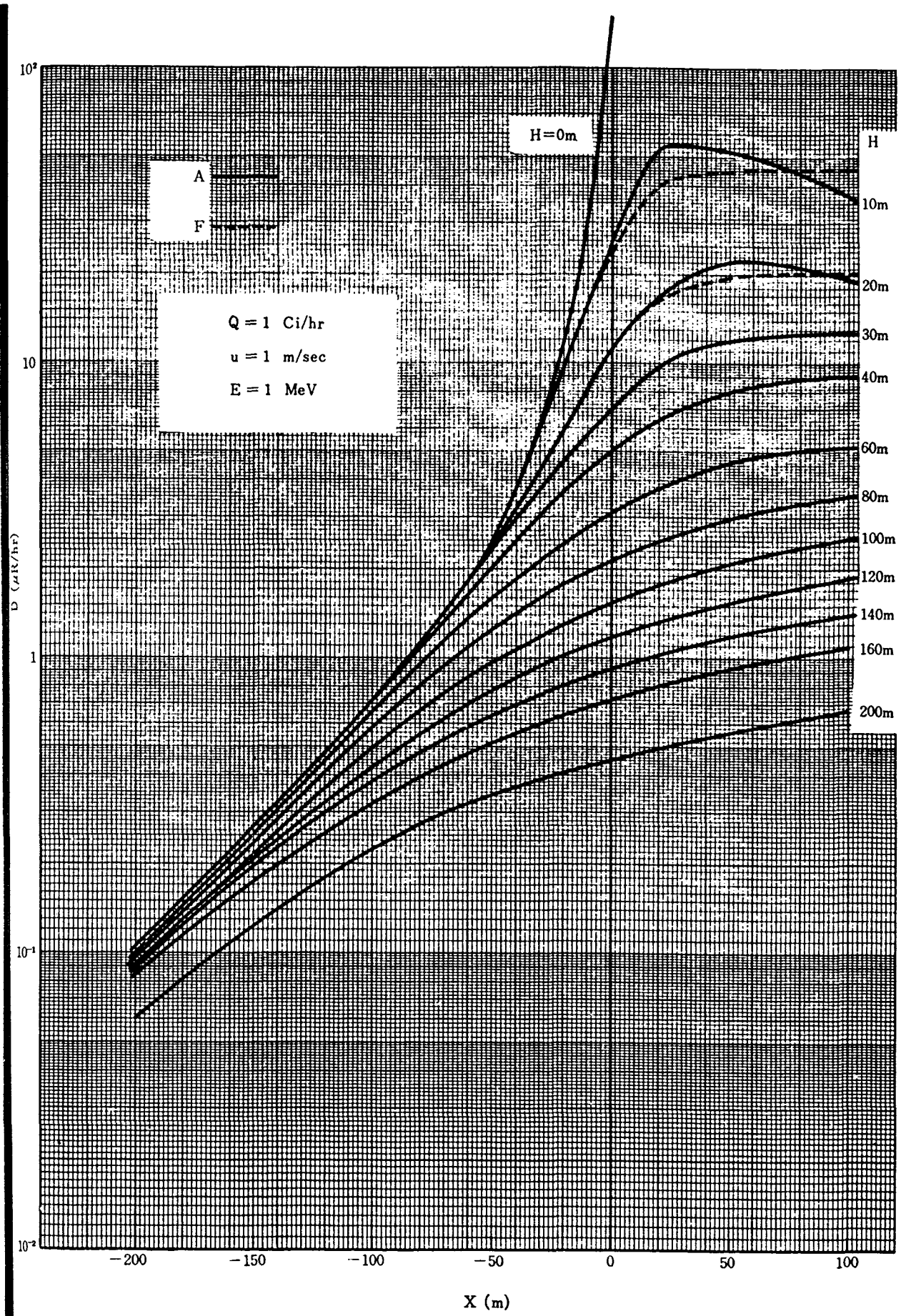


Fig. 1 Distribution in the vicinity of release-point

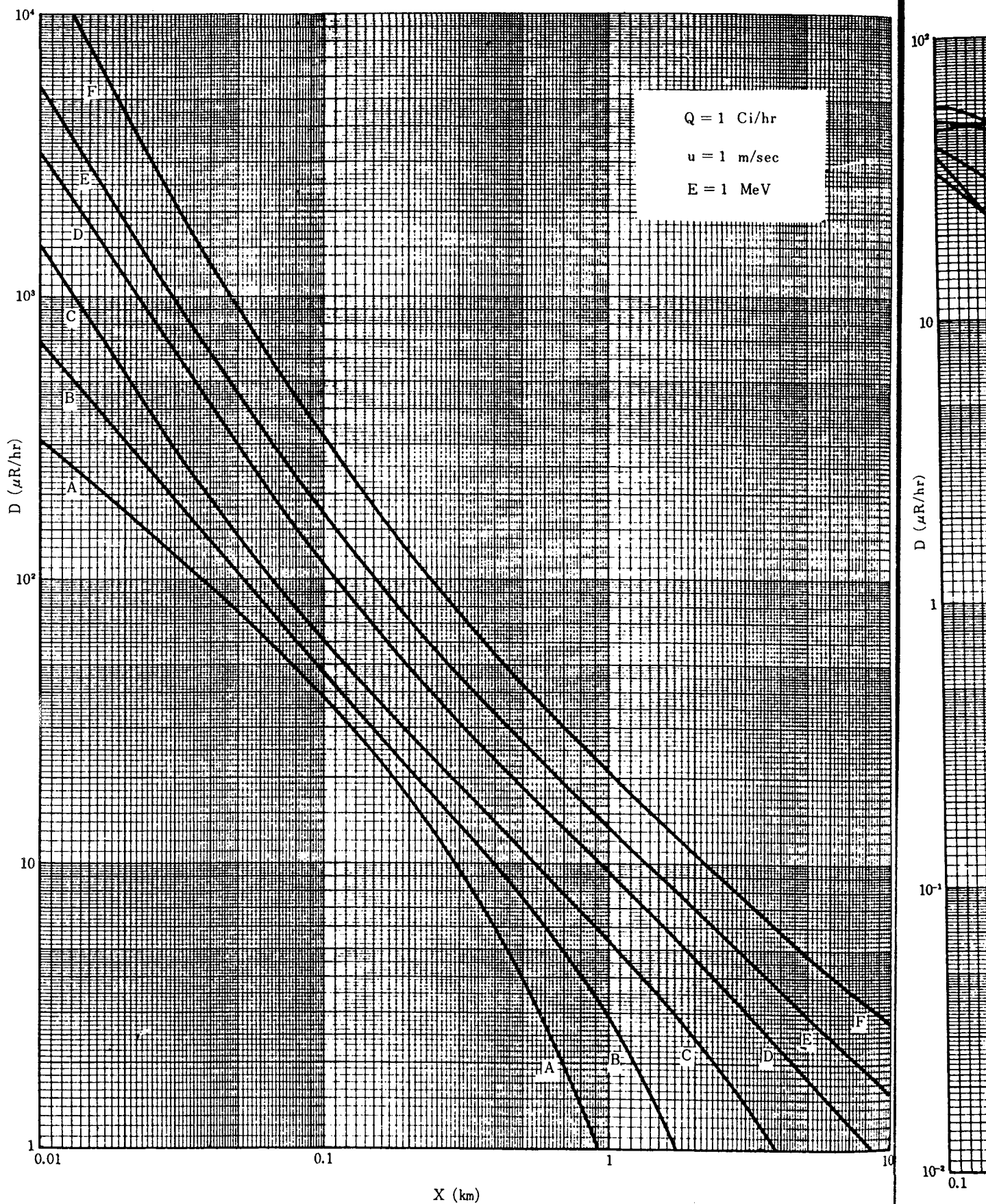


Fig. 2 Distribution on the downwind axis (Release Height 0 m)

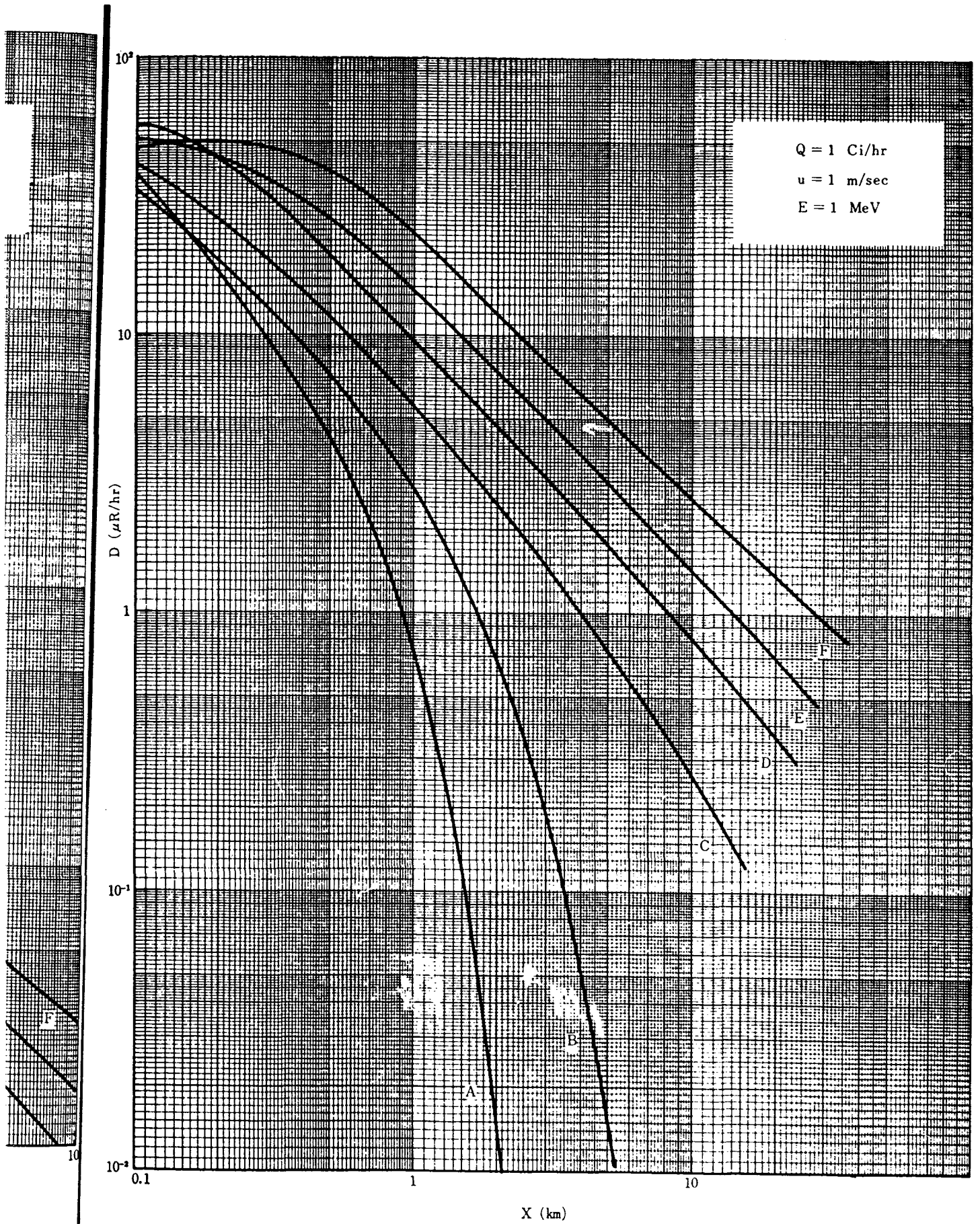


Fig. 3 Distribution on the downwind axis (Release Height 10 m)

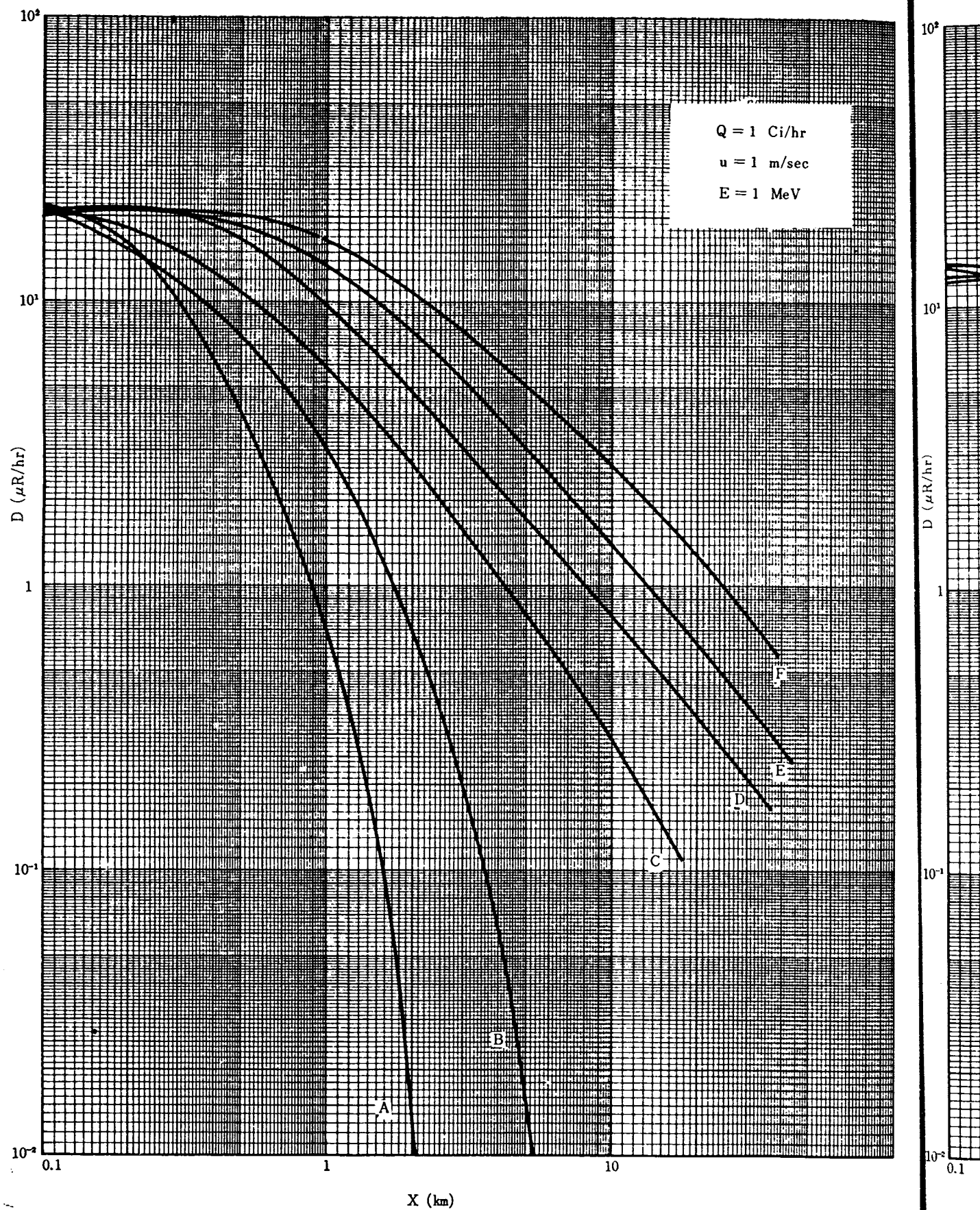


Fig. 4 Distribution on the downwind axis (Release Height 20 m)

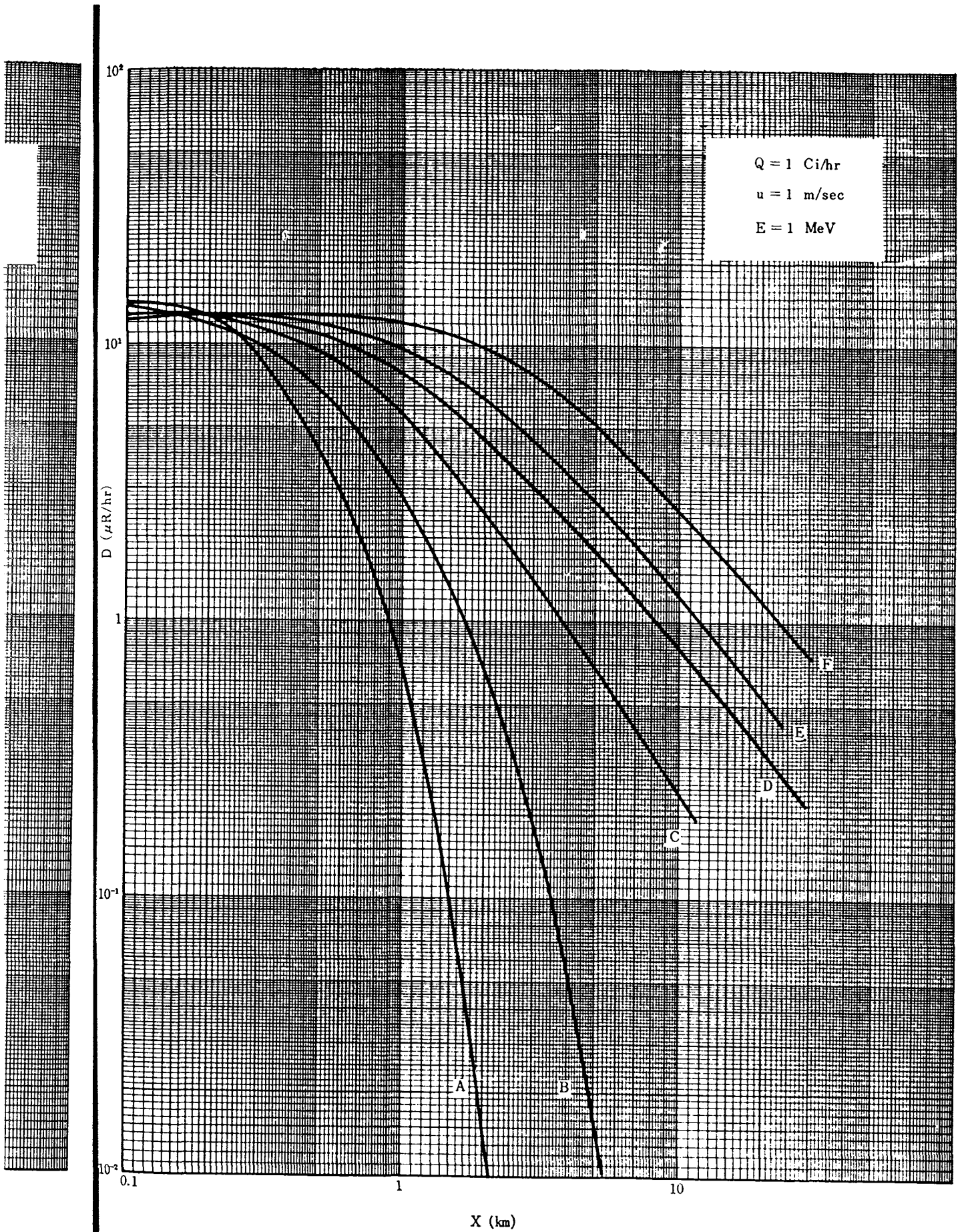


Fig. 5 Distribution on the downwind axis (Release Height 30 m)

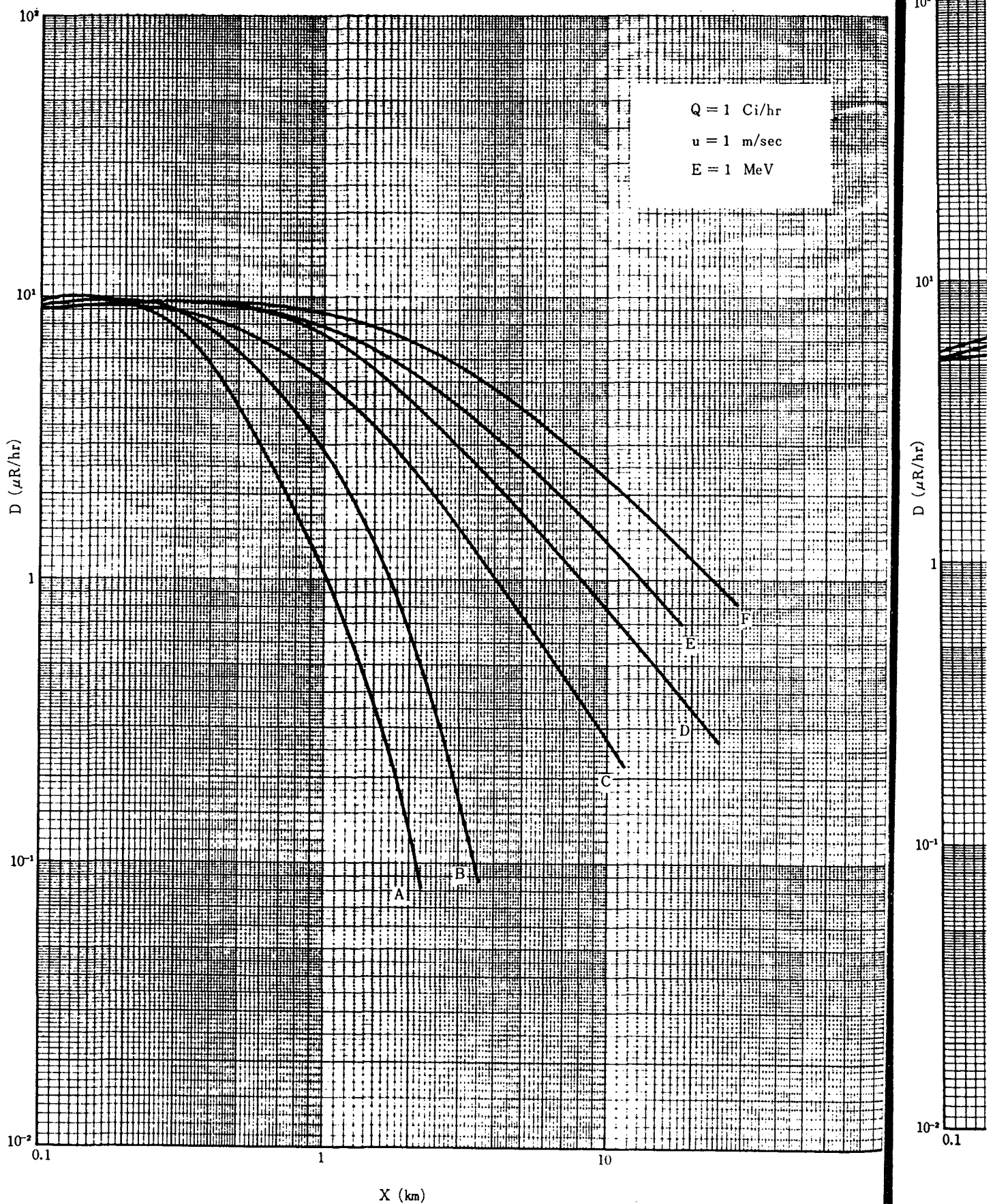


Fig. 6 Distribution on the downwind axis (Release Height 40 m)

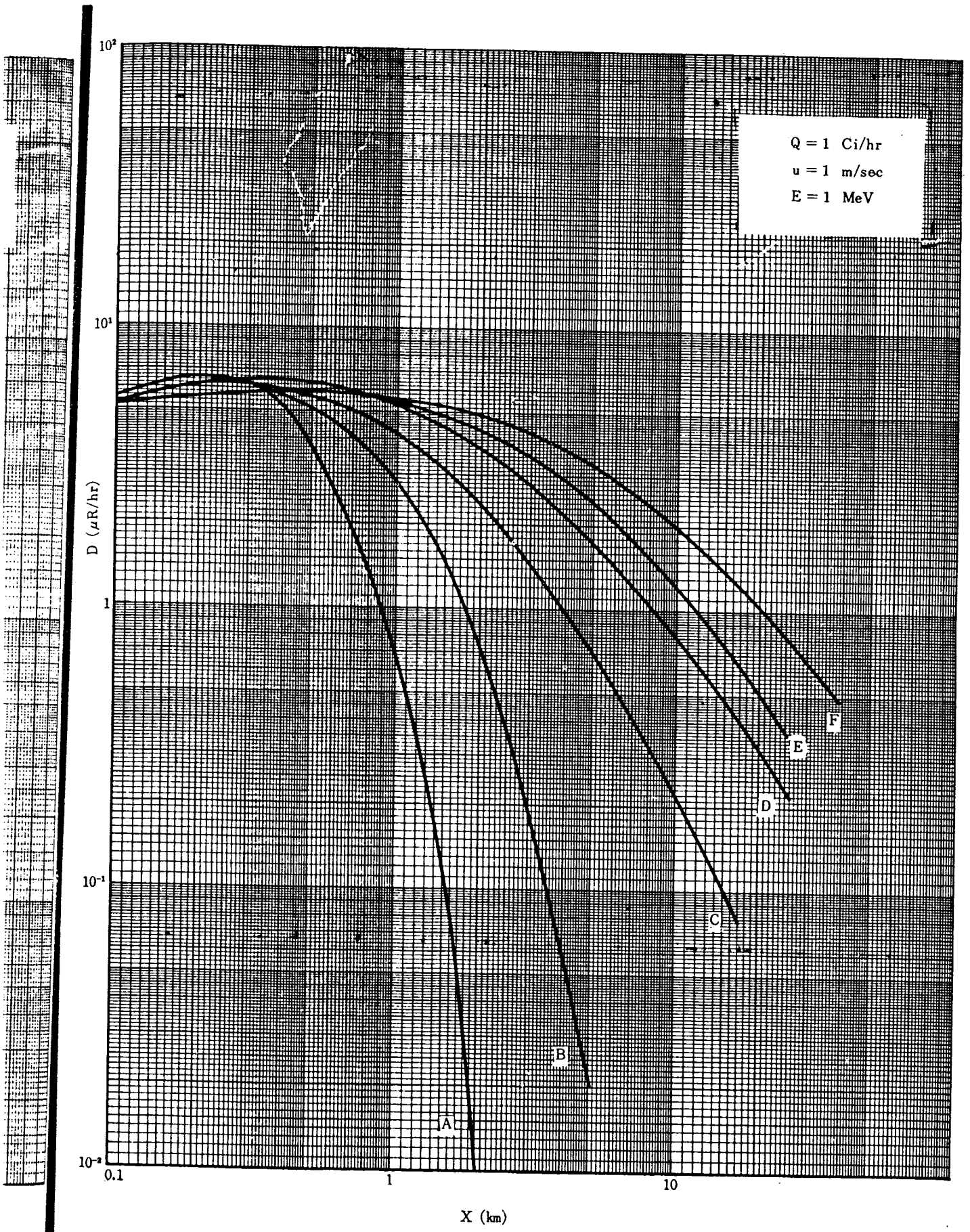


Fig. 7 Distribution on the downwind axis (Release Height 60 m)

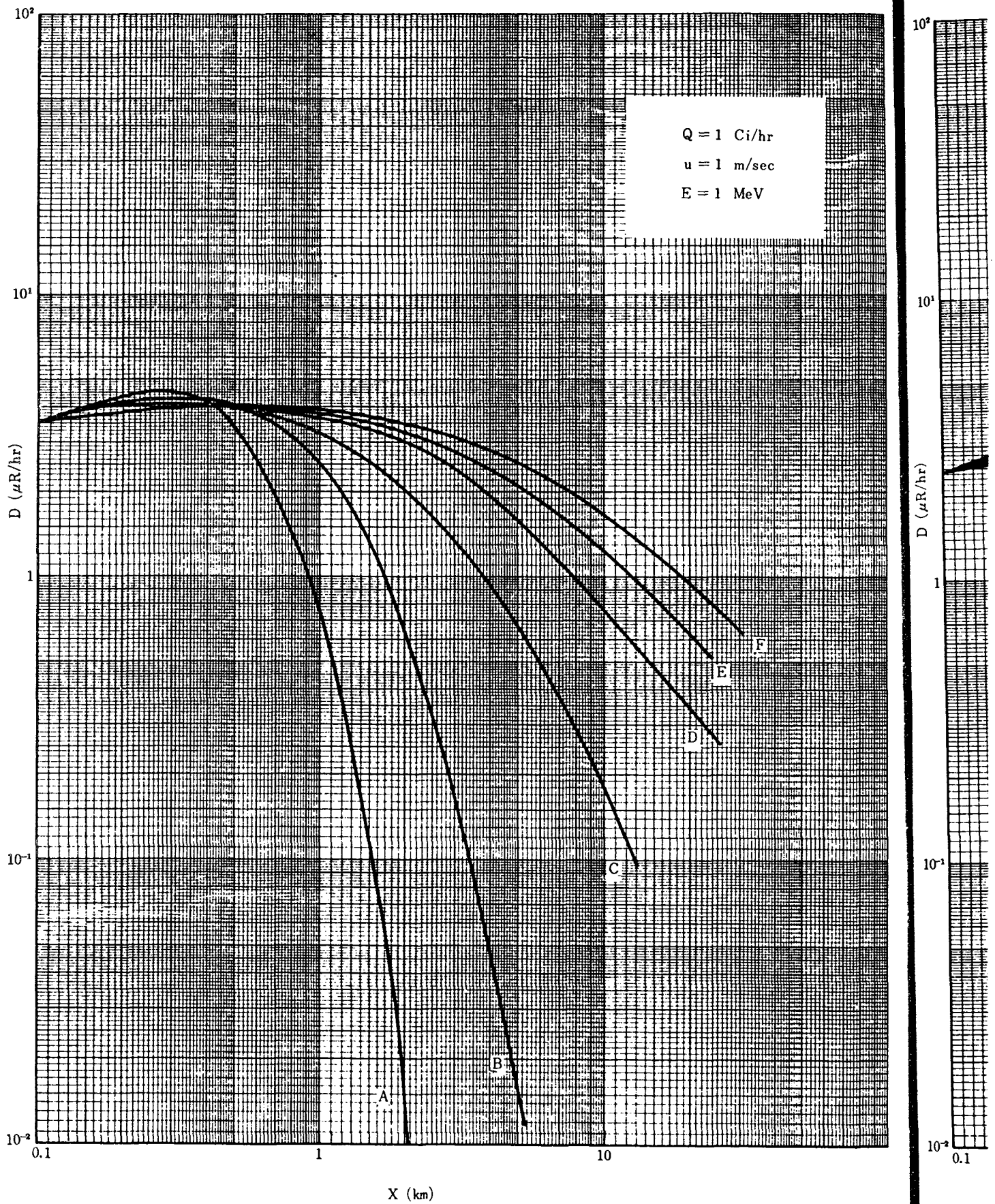


Fig. 8 Distribution on the downwind axis (Release Height 80 m)

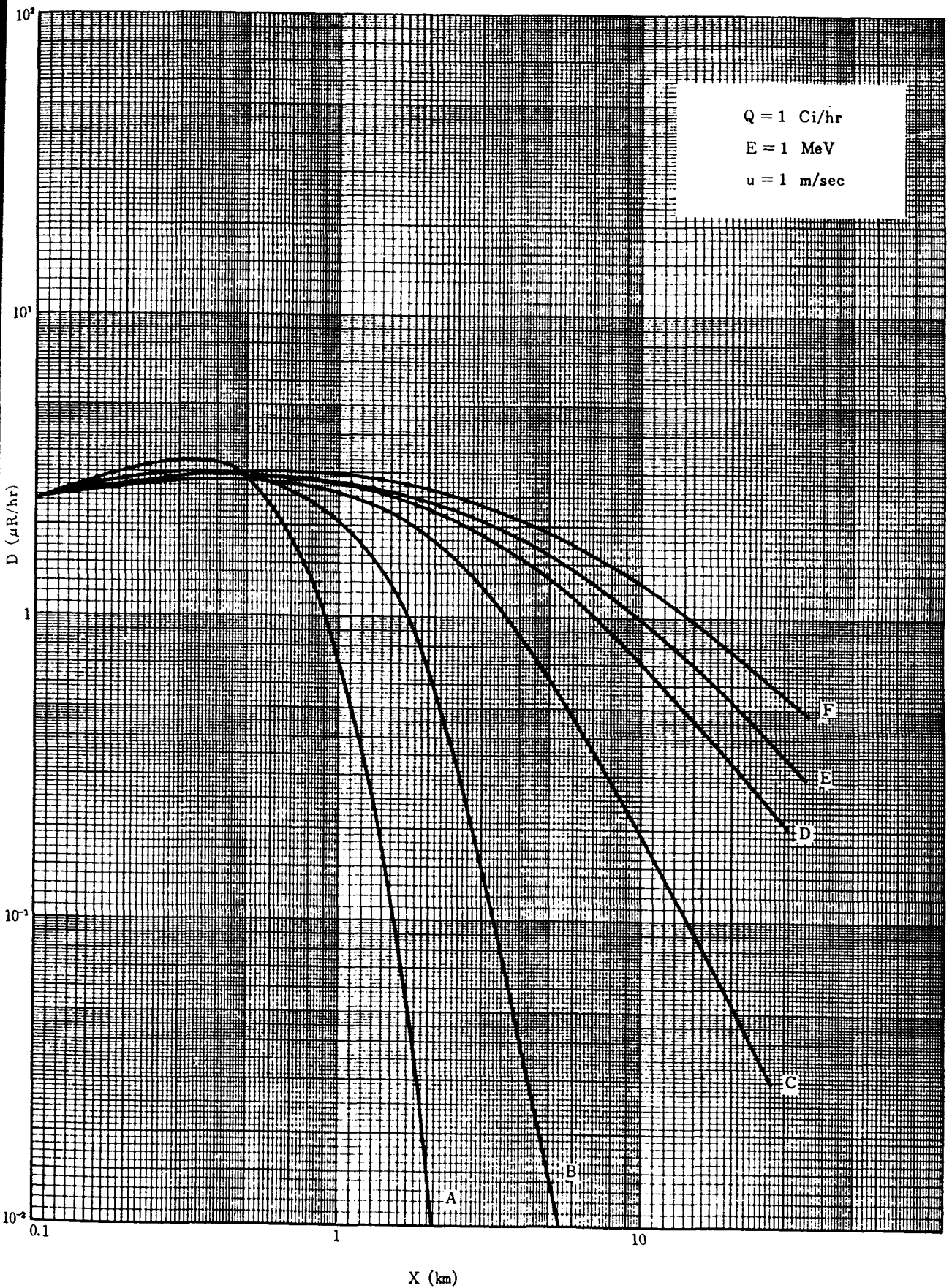


Fig. 9 Distribution on the downwind axis (Release Height 100 m)

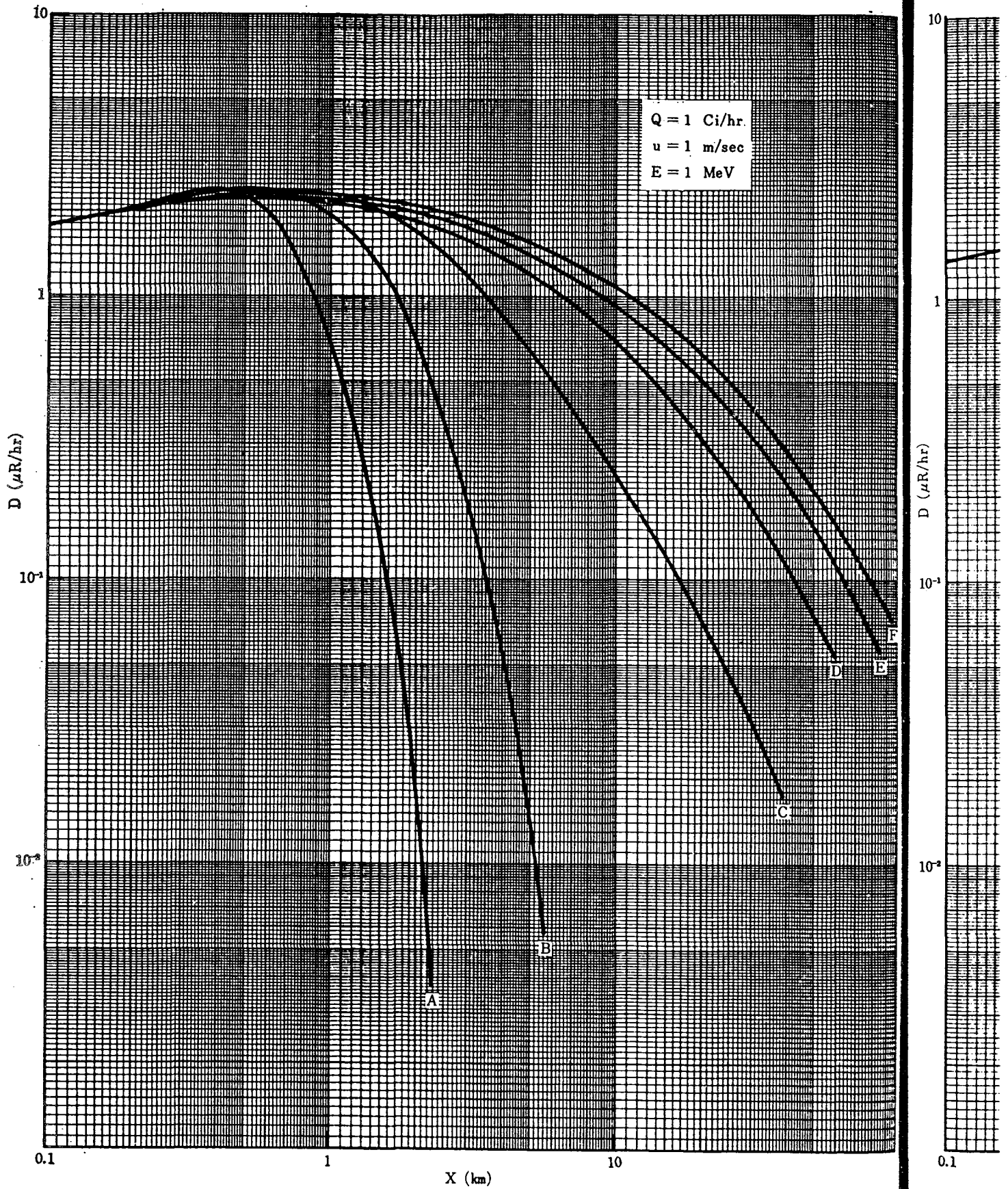


Fig. 10 Distribution on the downwind axis (Release Height 120 m)

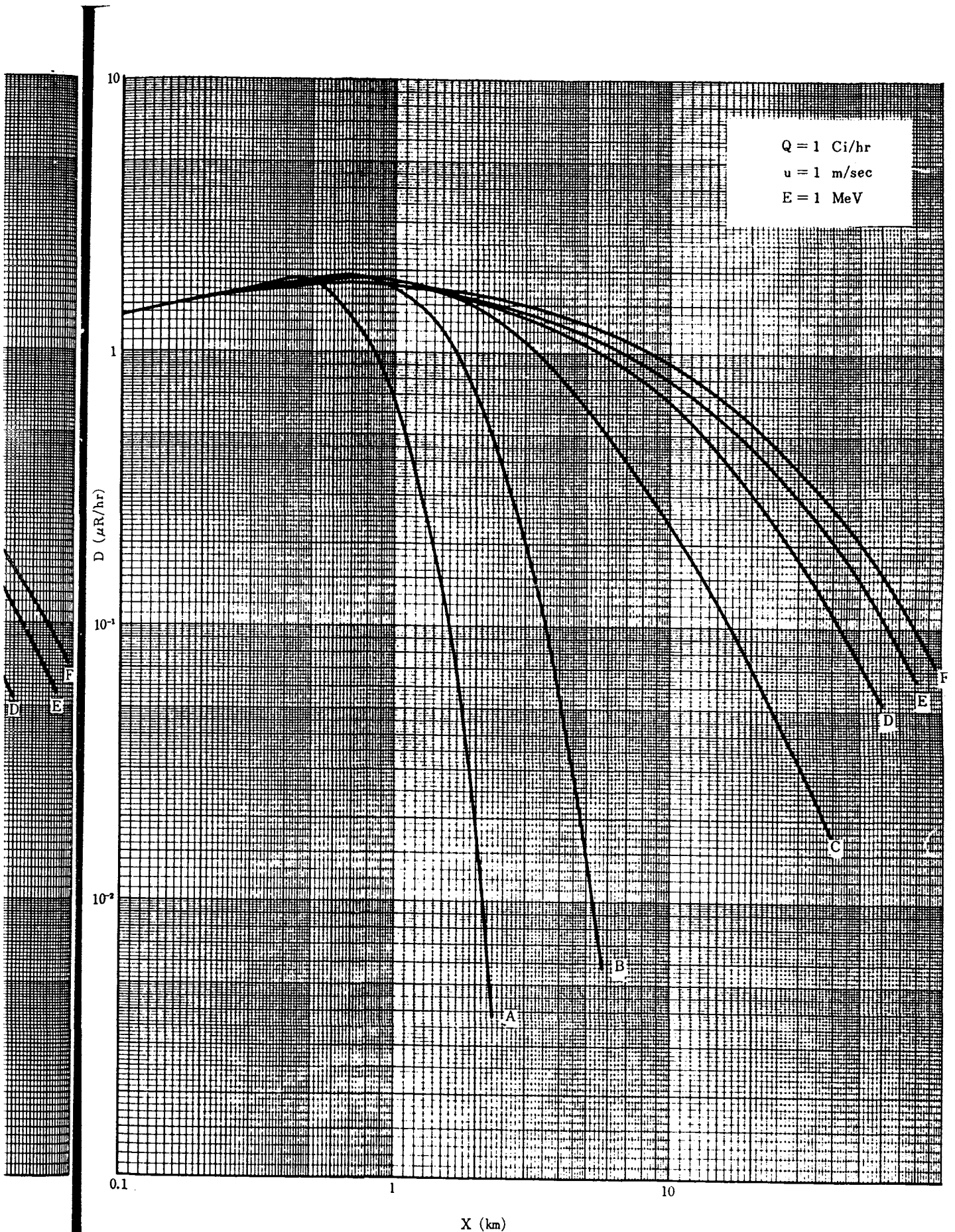


Fig. 11 Distribution on the downwind axis (Release Height 140 m)

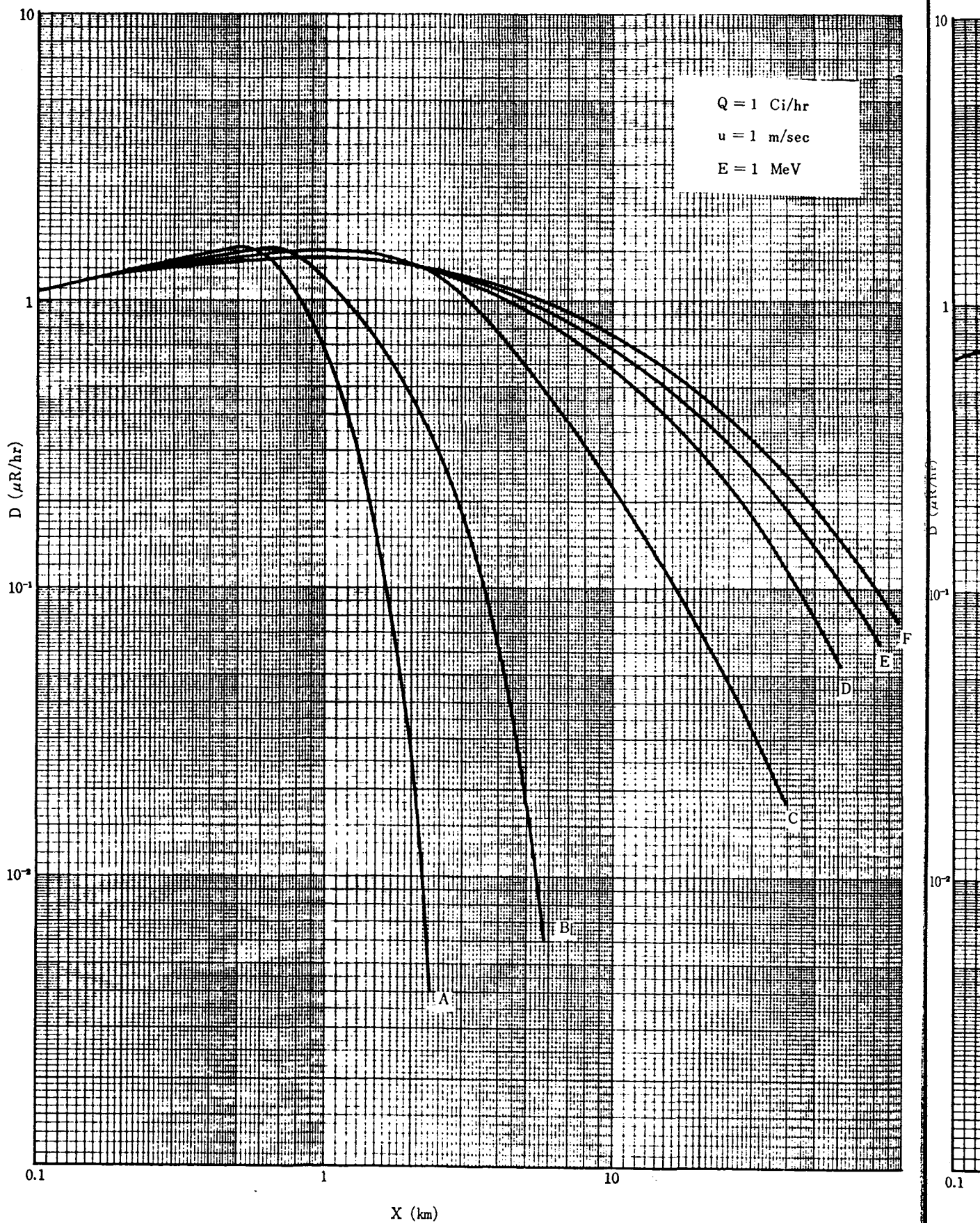


Fig. 12 Distribution on the downwind axis (Release Height 160 m)

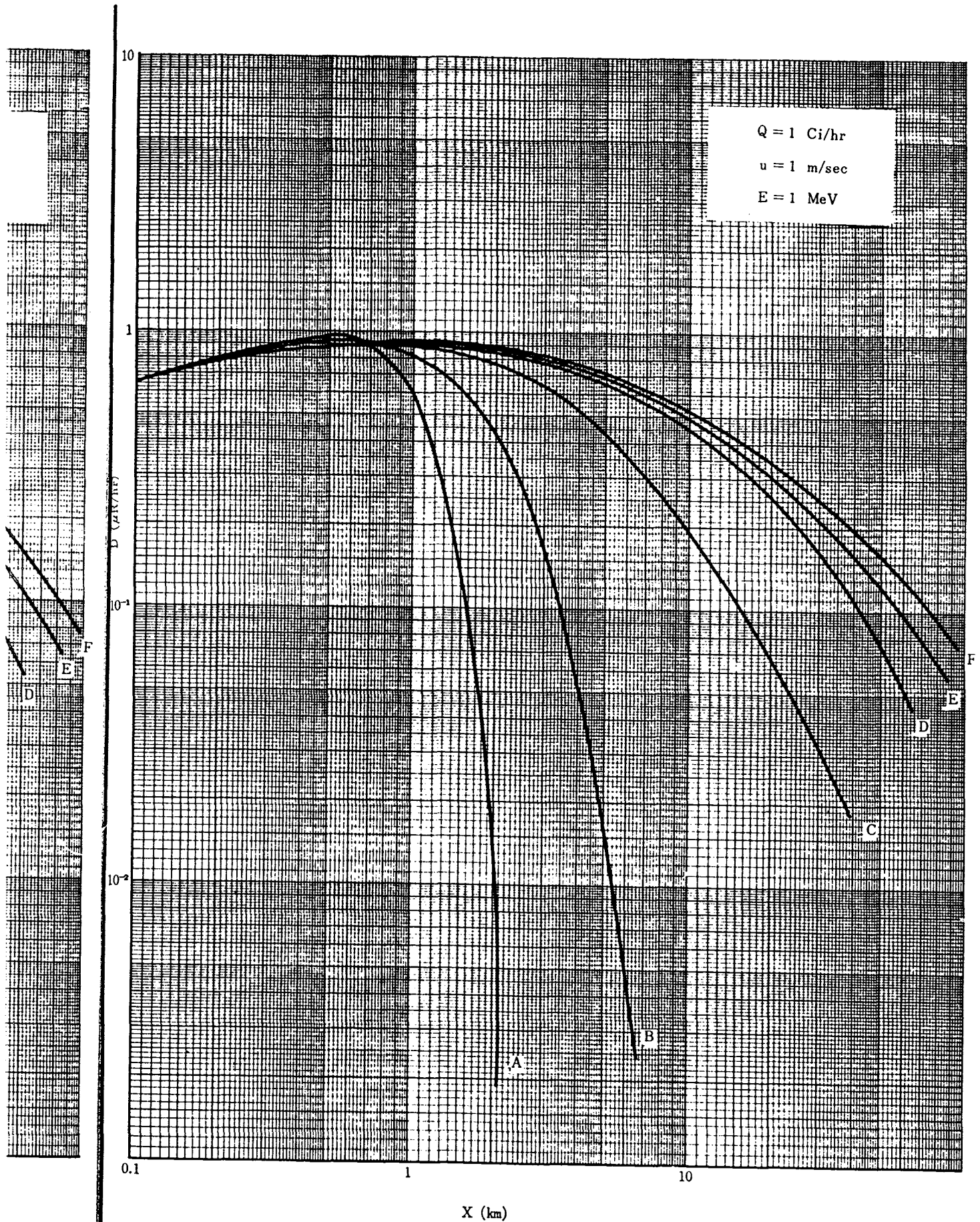


Fig. 13 Distribution on the downwind axis (Release Height 200 m)

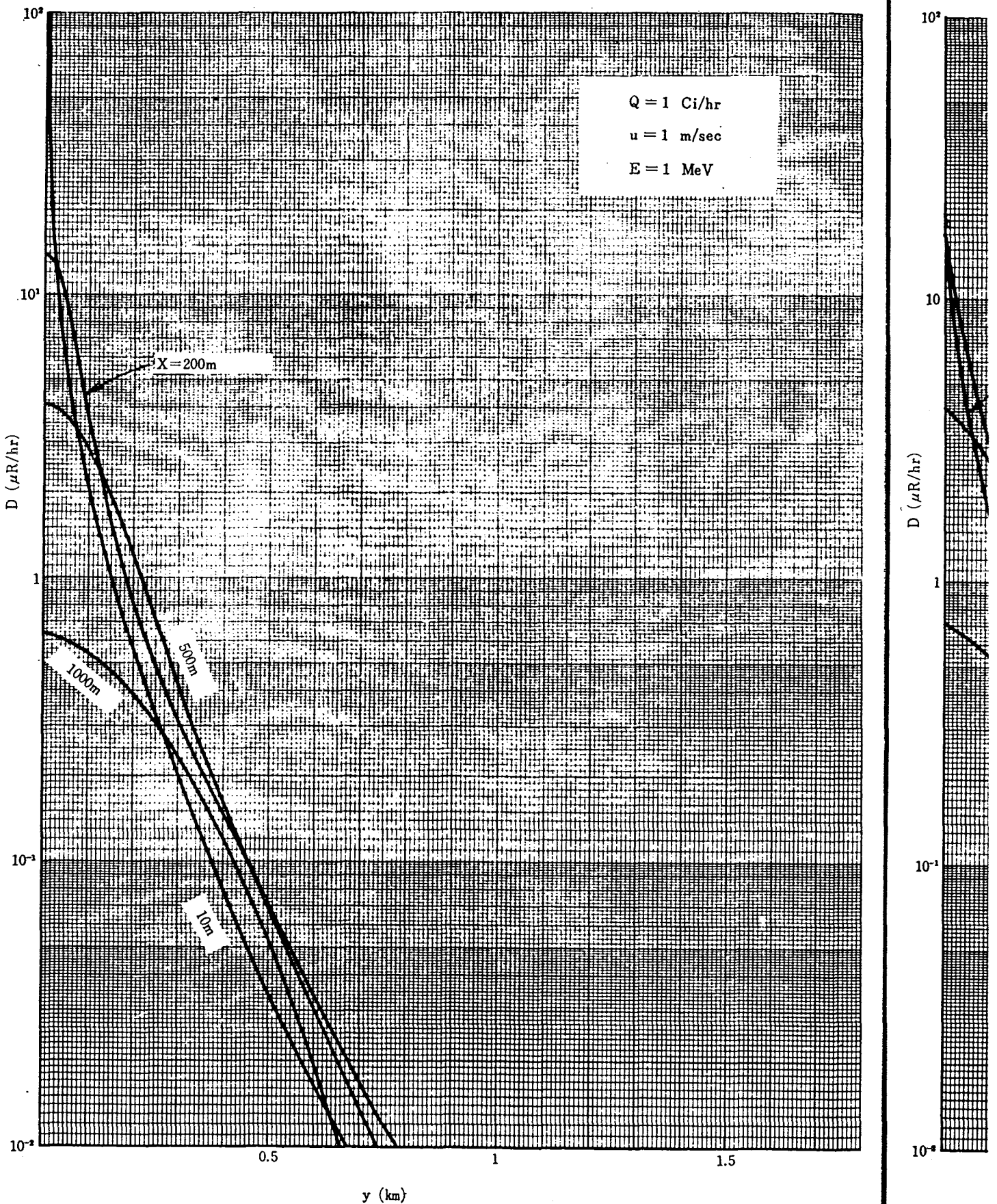


Fig. 14 Distribution on the crosswind axis (Stab. A, $H=0\text{ m}$)

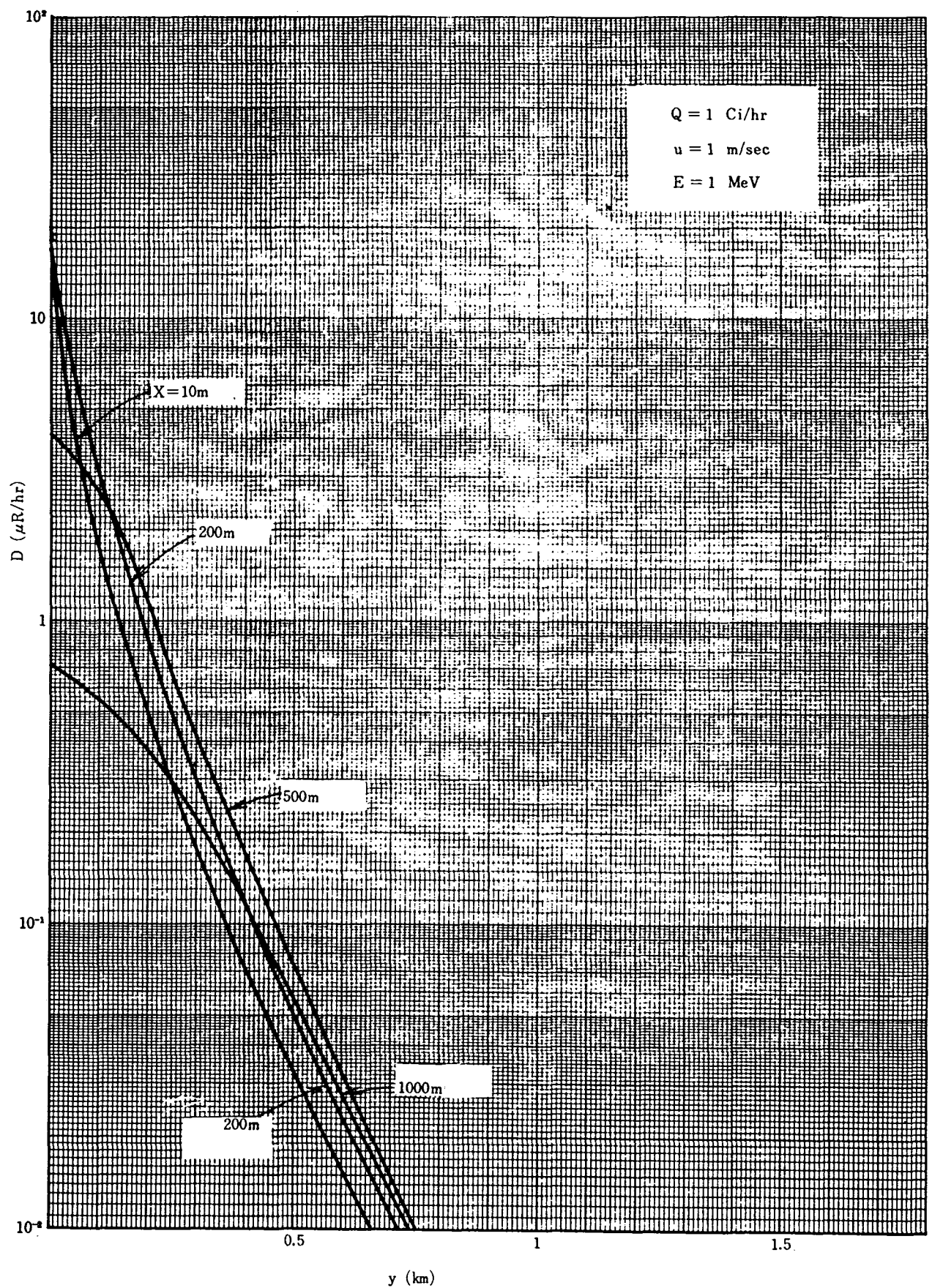


Fig. 15 Distribution on the crosswind axis (Stob. A, $H = 20 \text{ m}$)

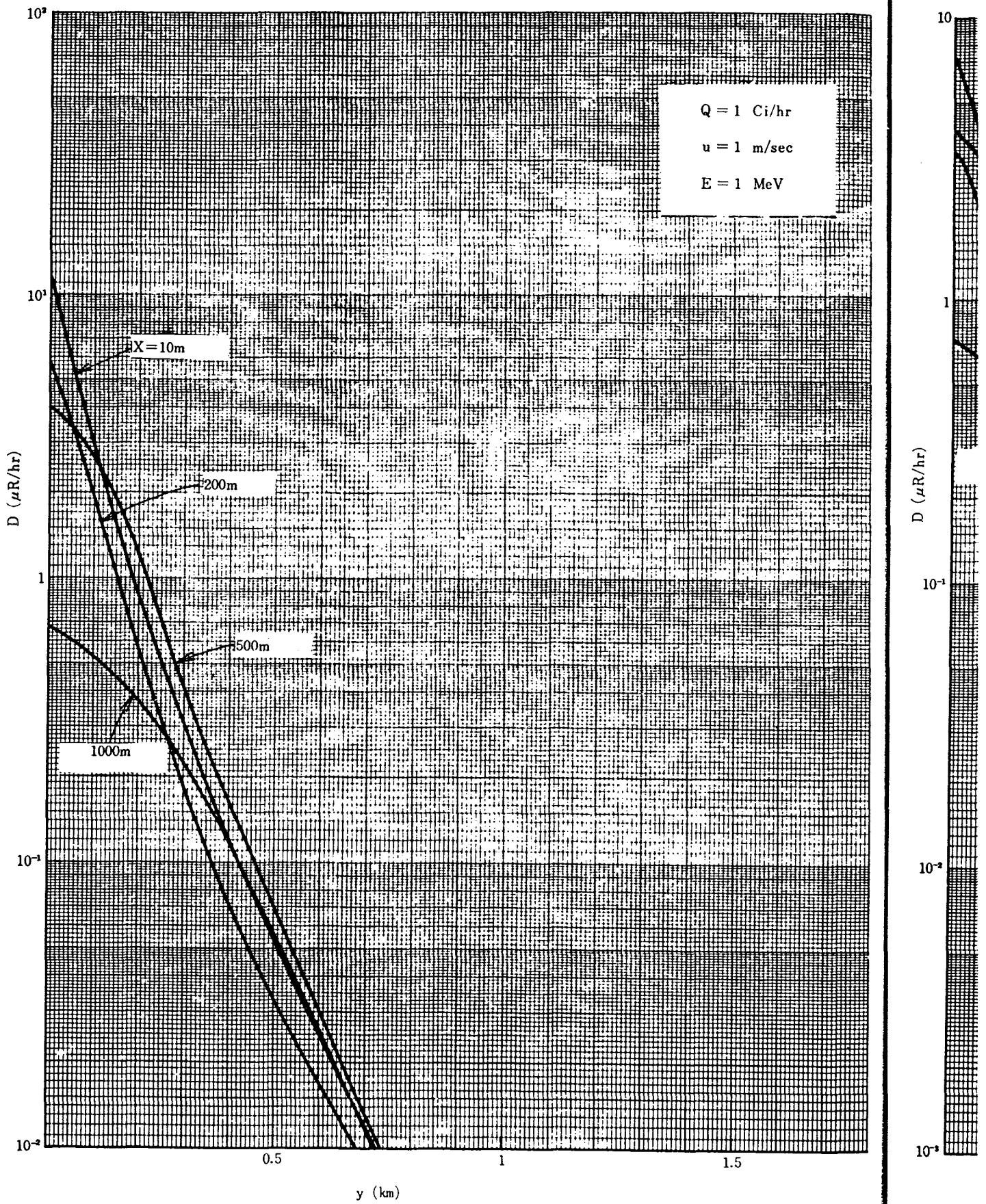


Fig. 16 Distribution on the crosswind axis (Stab. A, H = 40 m)

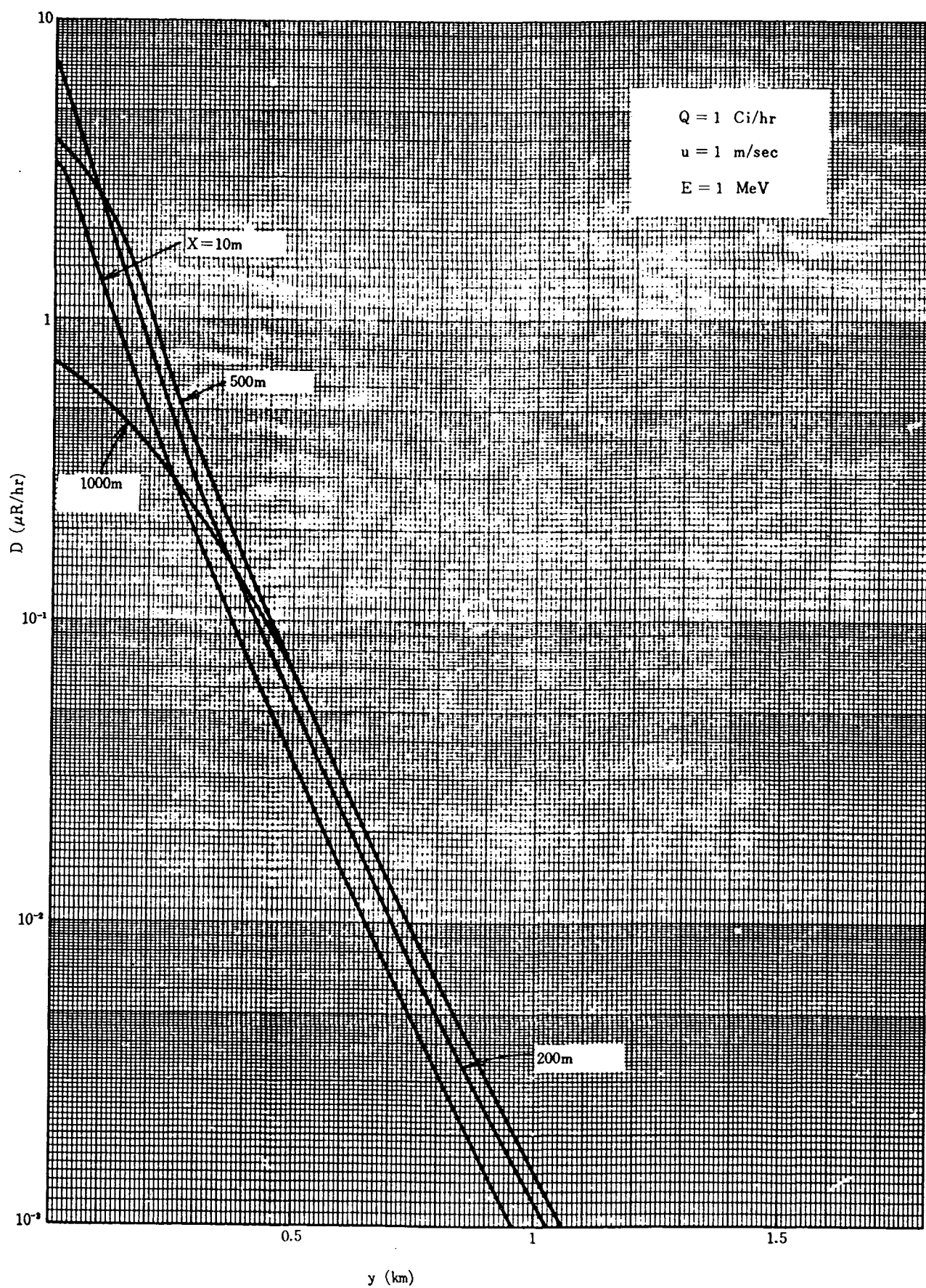


Fig. 17 Distribution on the crosswind axis (Stab. A, H = 60 m)

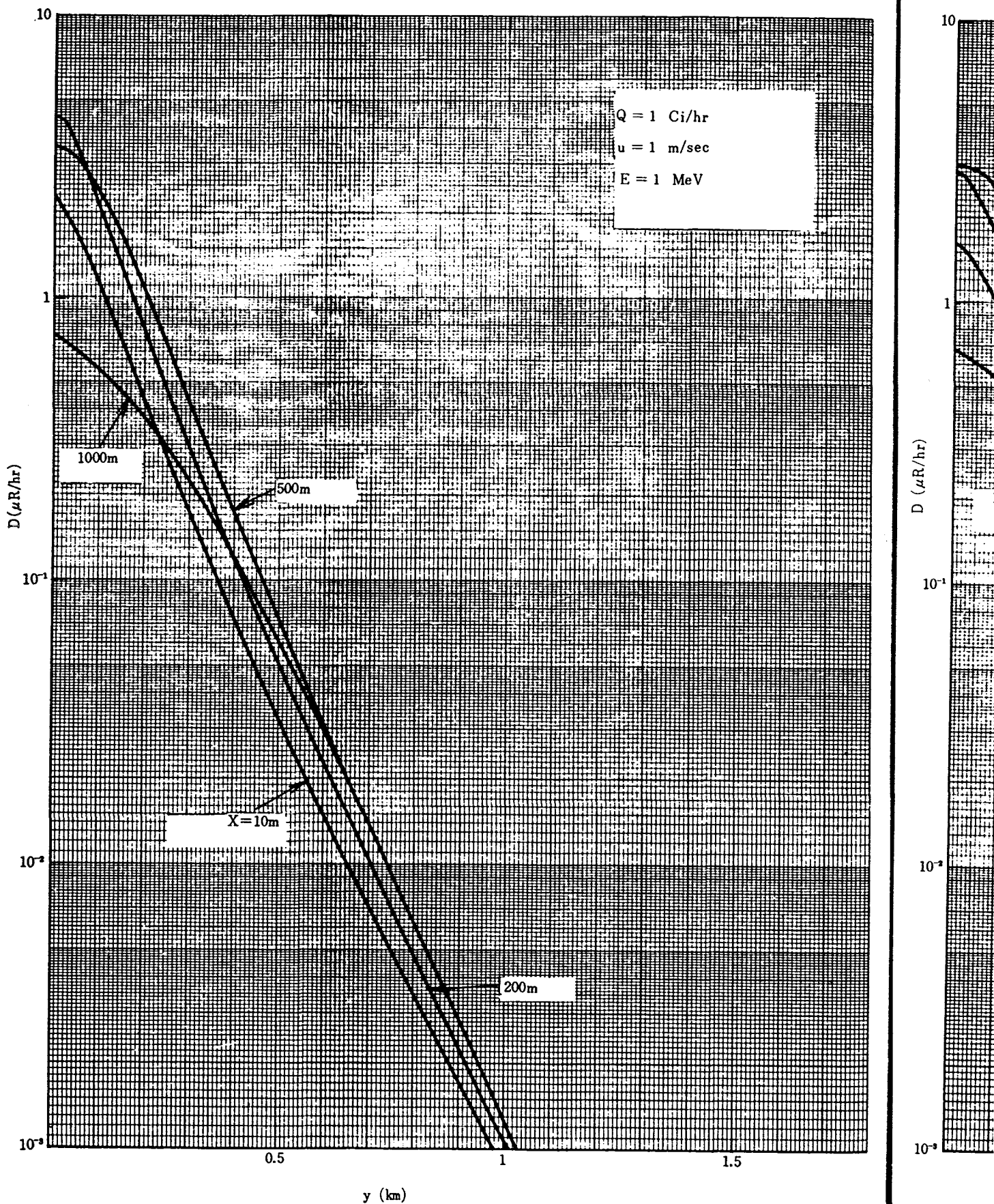


Fig. 18 Distribution on the crosswind axis (Stab. A, H=80 m)

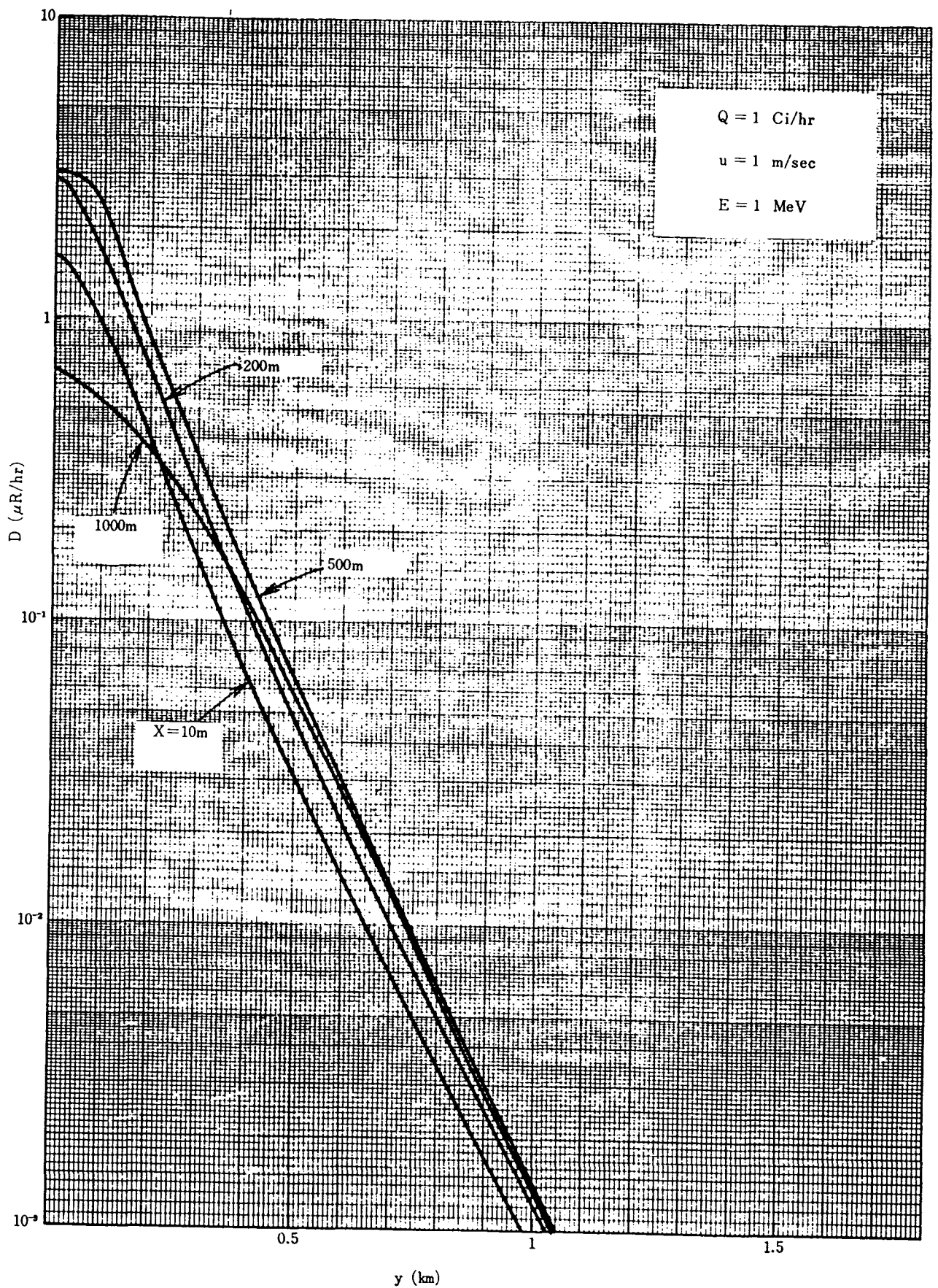


Fig. 19 Distribution on the crosswind axis (Stab. A, H=100 m)

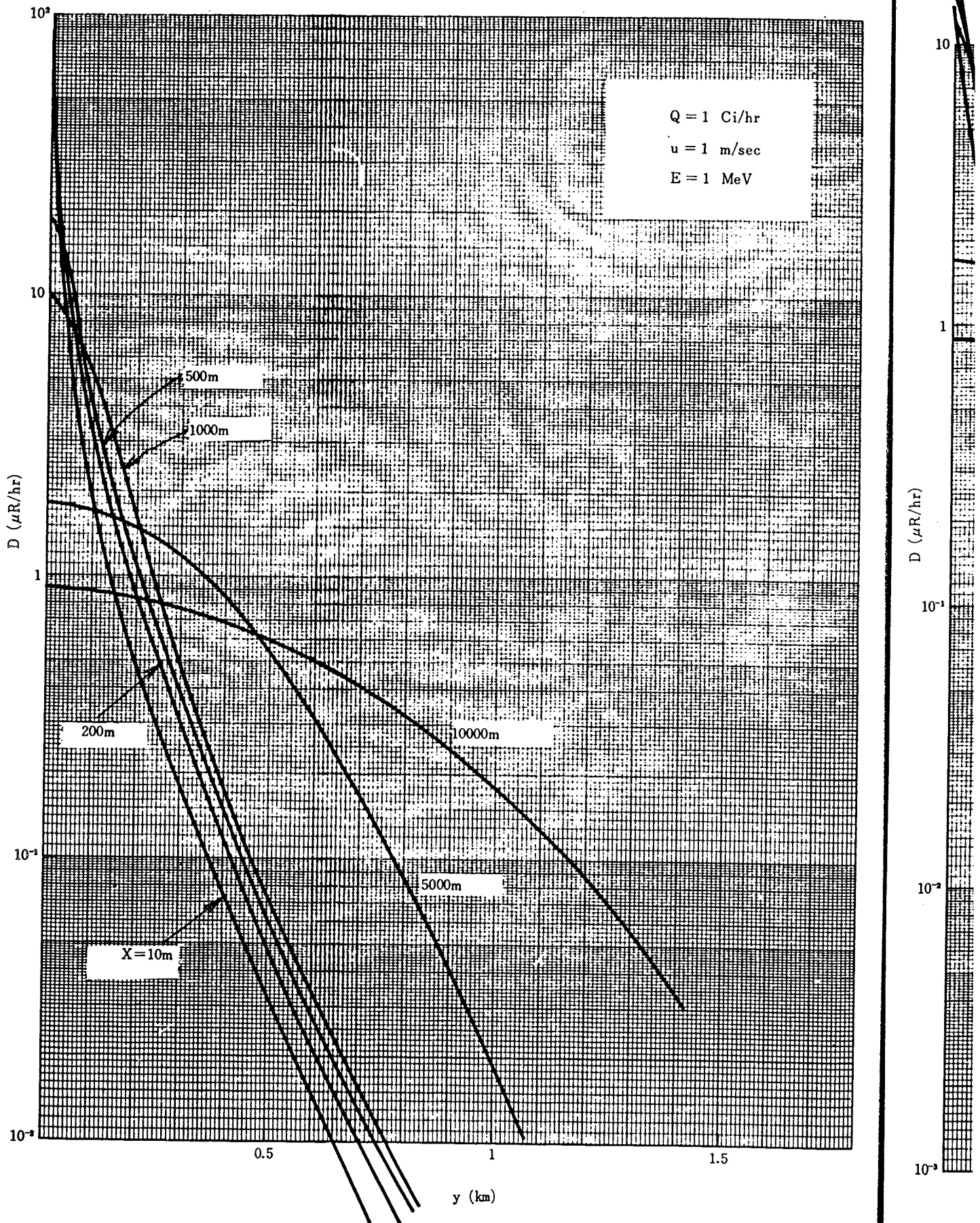


Fig. 20 Distribution on the crosswind axis (Stab. D, H=0 m)

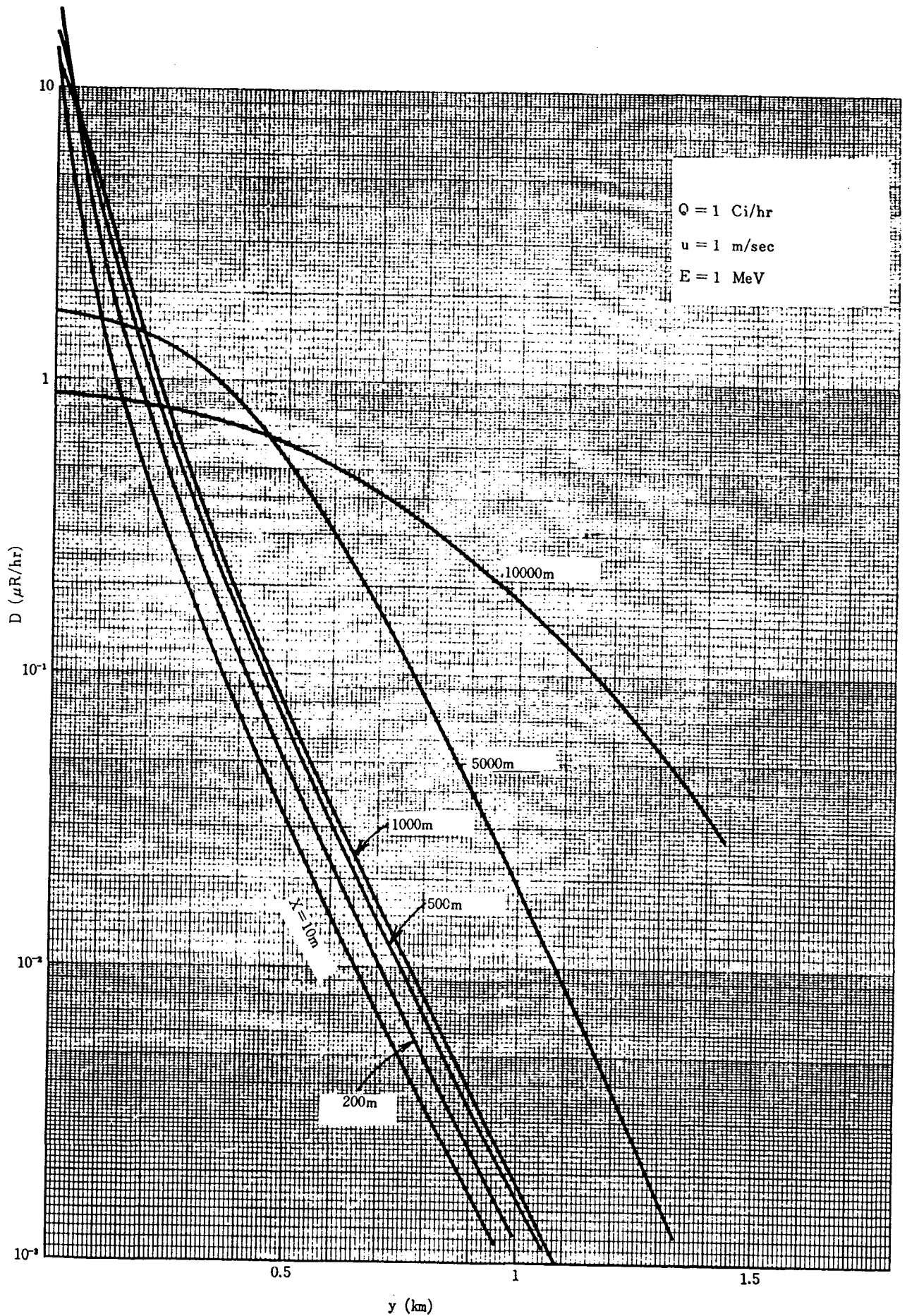


Fig. 21 Distribution on the crosswind axis (Stab. D, H=20 m)

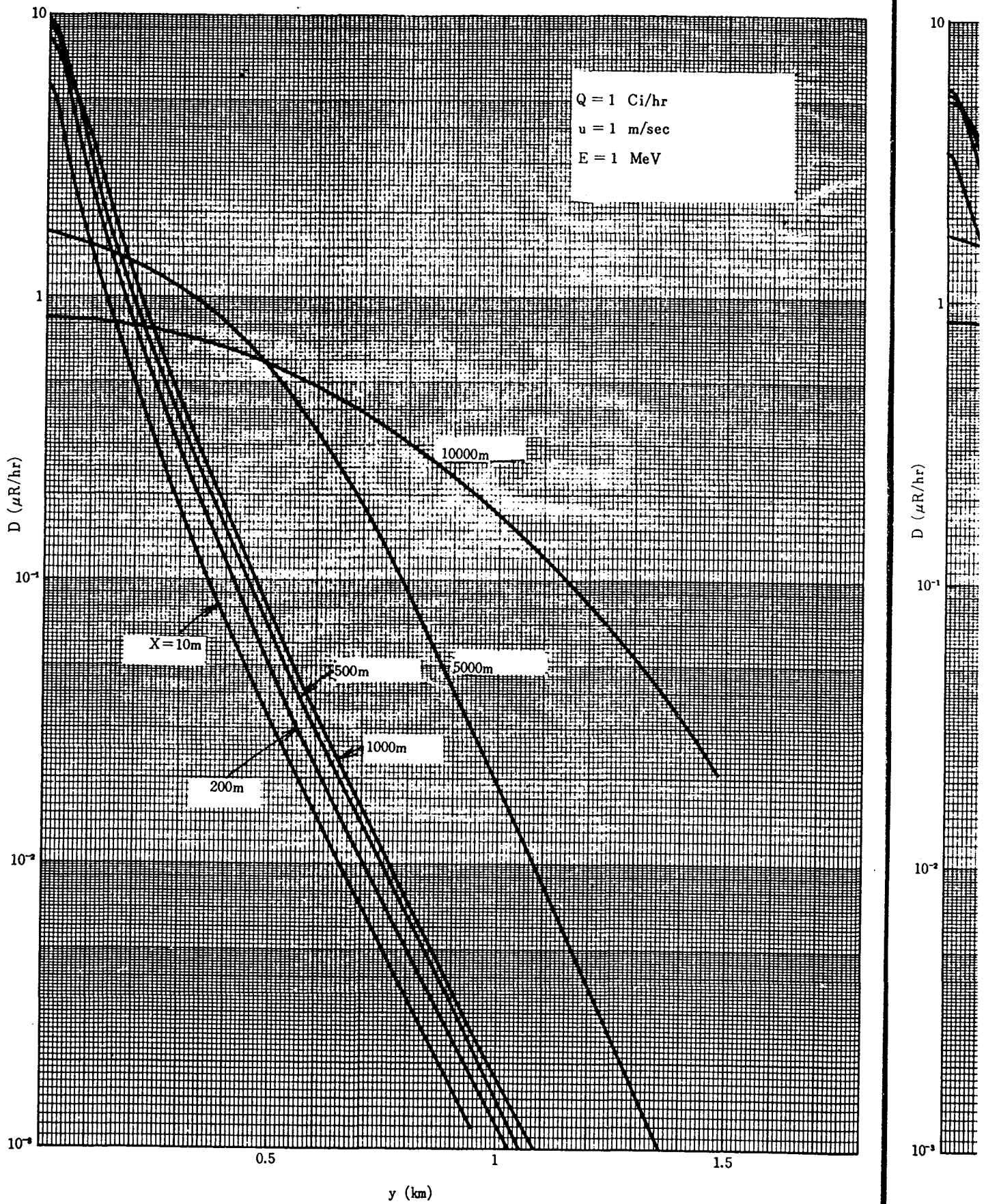


Fig. 22 Distribution on the crosswind axis (Stab. D, H=40 m)

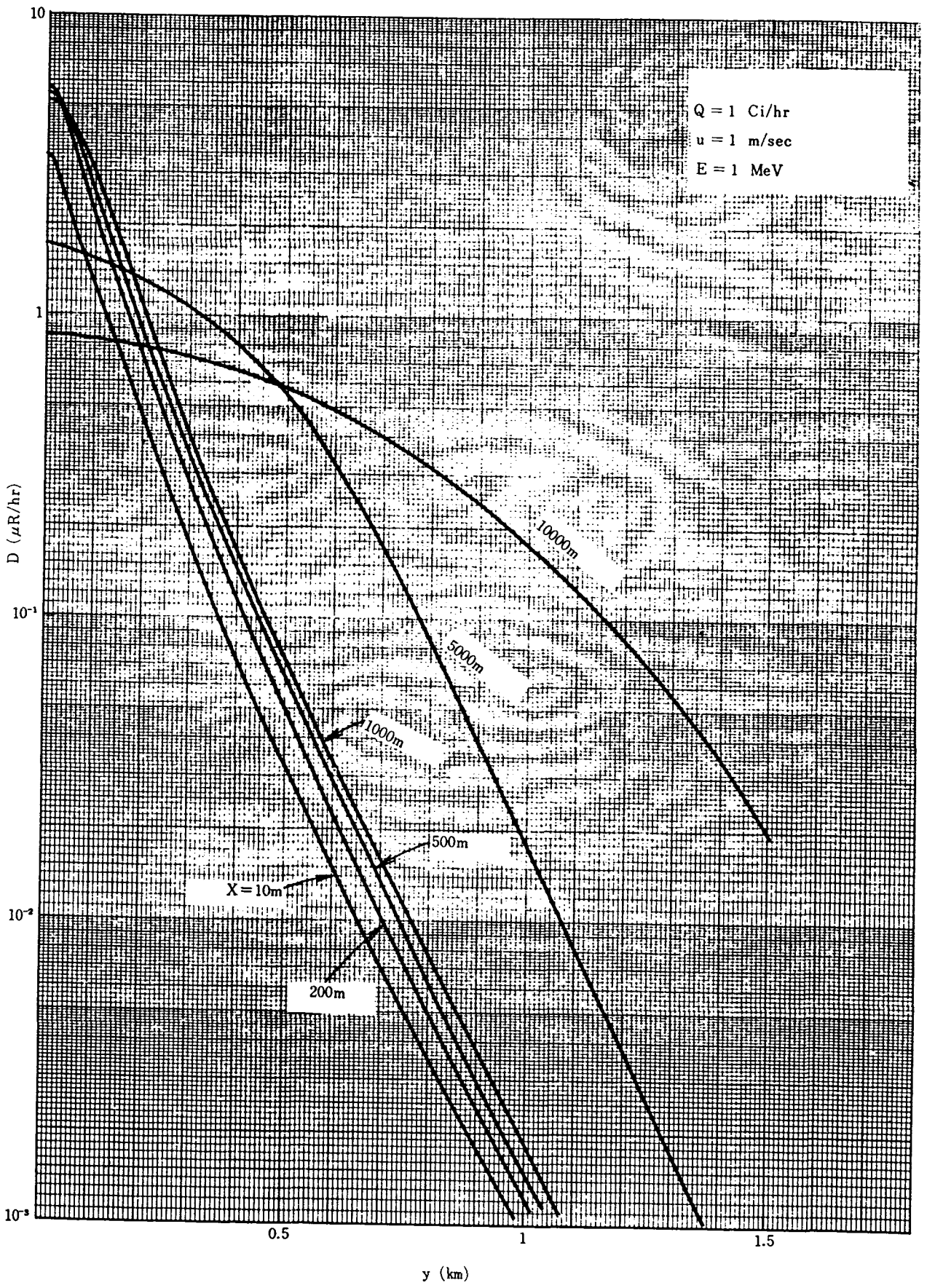


Fig. 23 Distribution on the crosswind axis (Stab. D, H = 60 m)

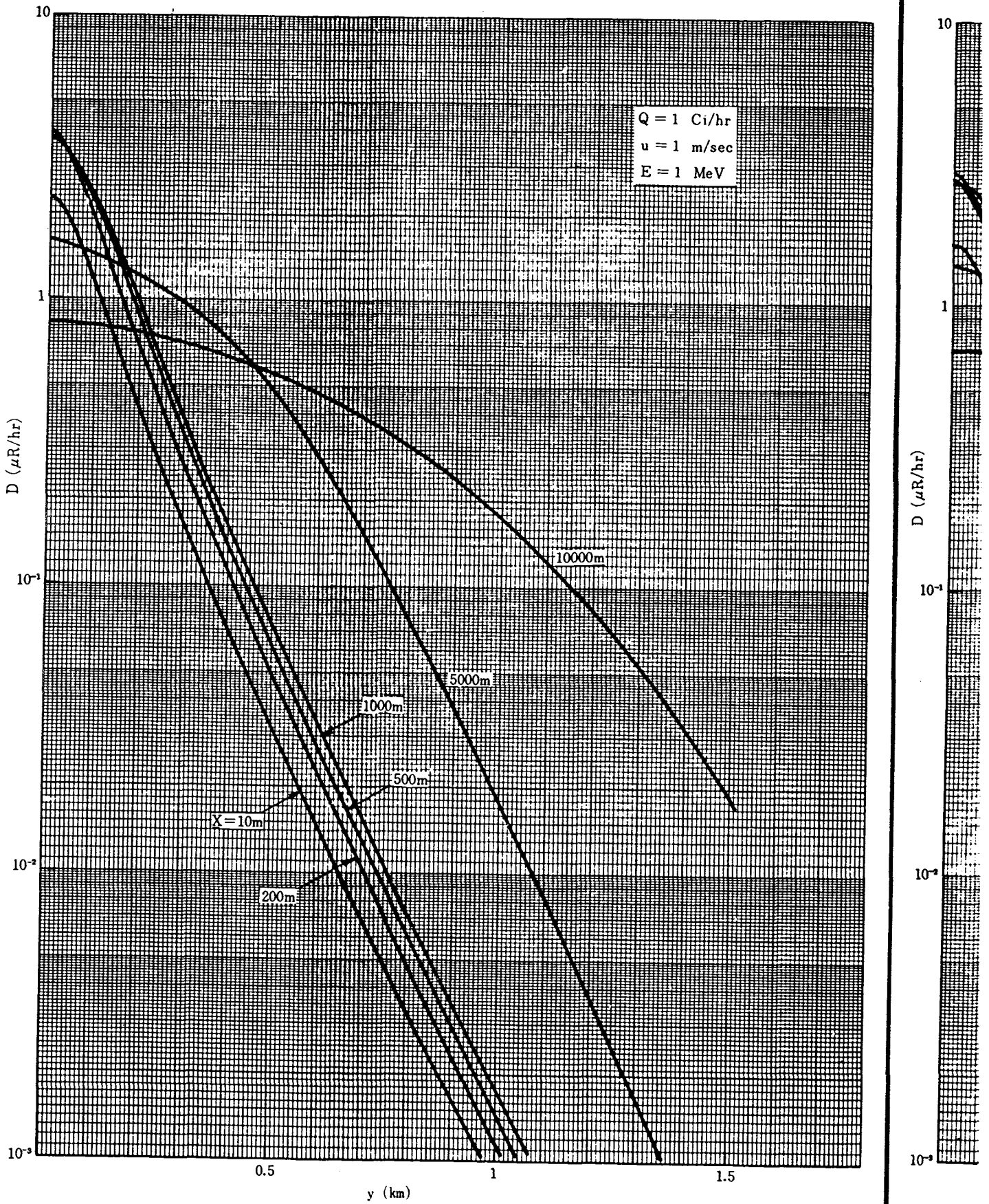


Fig. 24 Distribution on the crosswind axis (Stab. D, H=80 m)

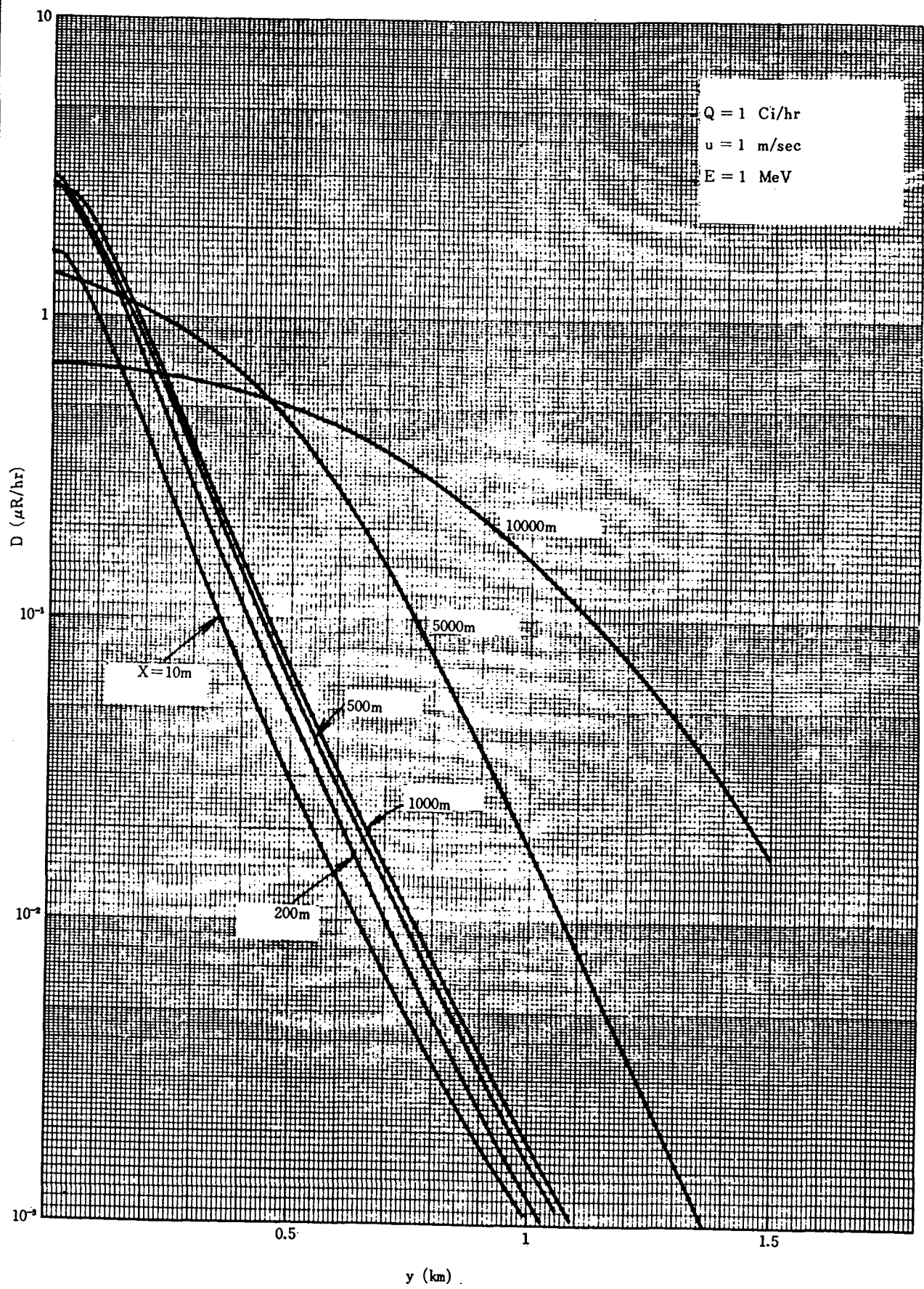


Fig. 25 Distribution on the crosswind axis (Stab. D, H=100 m)

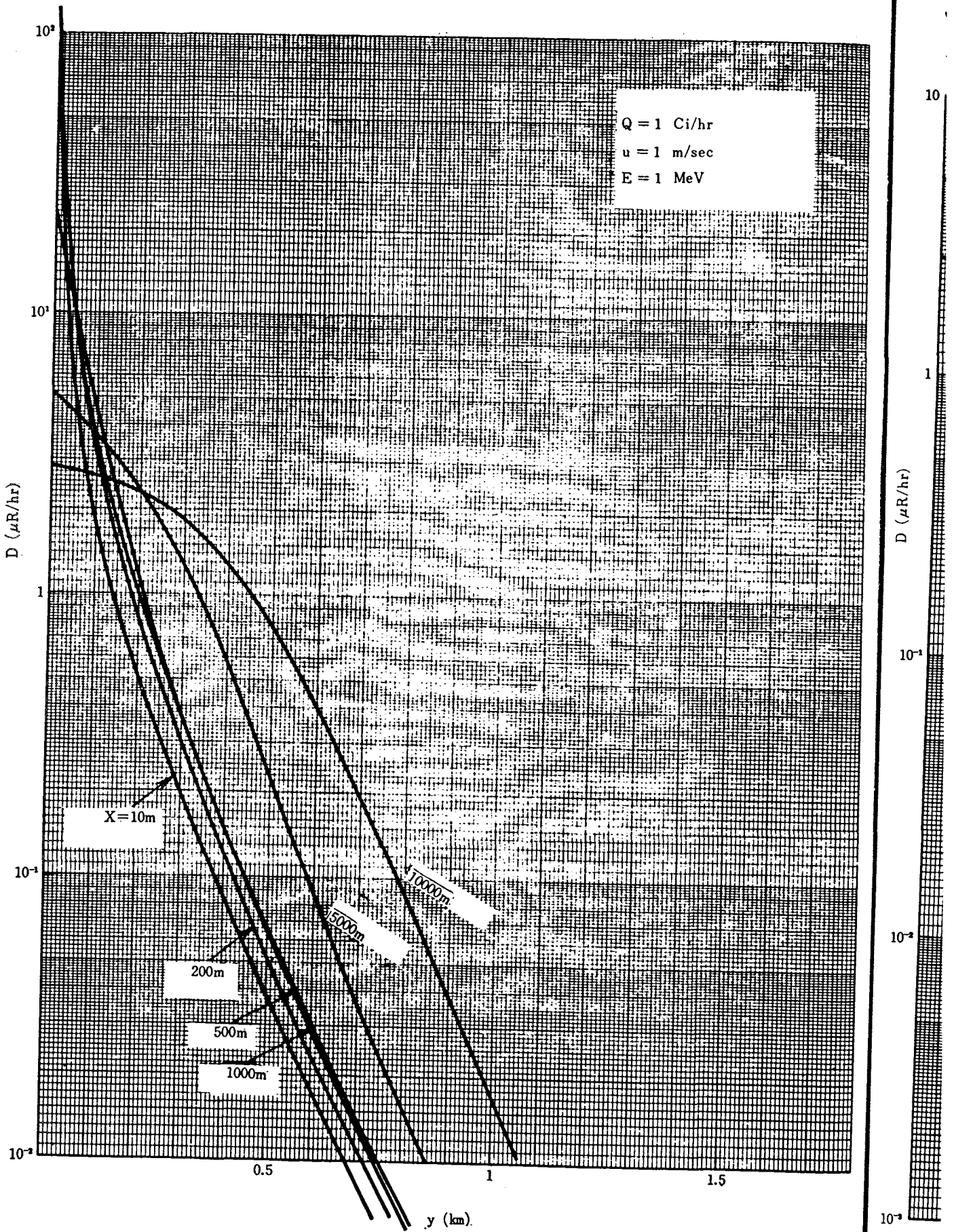


Fig. 26 Distribution on the crosswind axis (Stab. F, H=0 m)

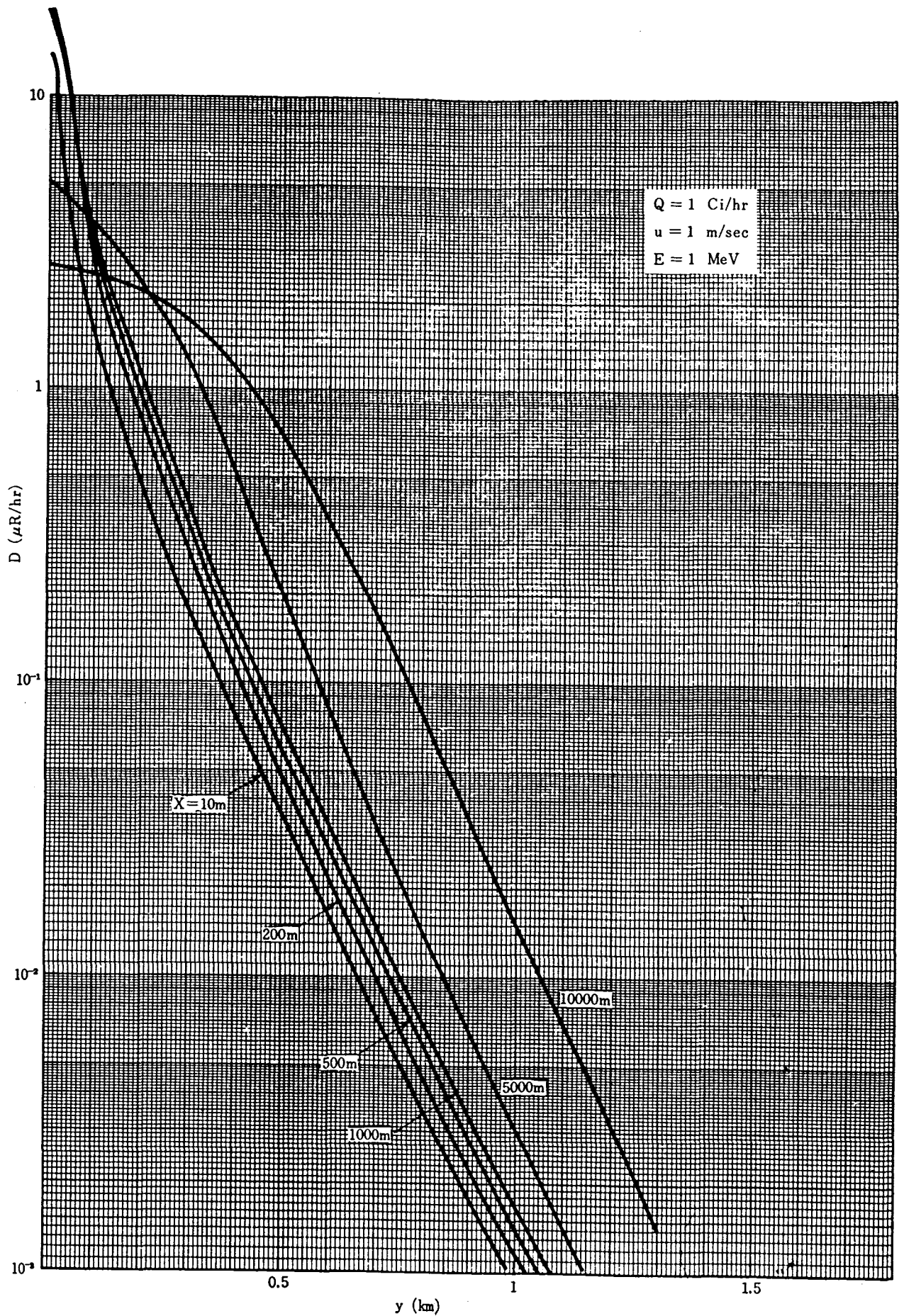


Fig. 27 Distribution on the crosswind axis (Stab. F, H=20 m)

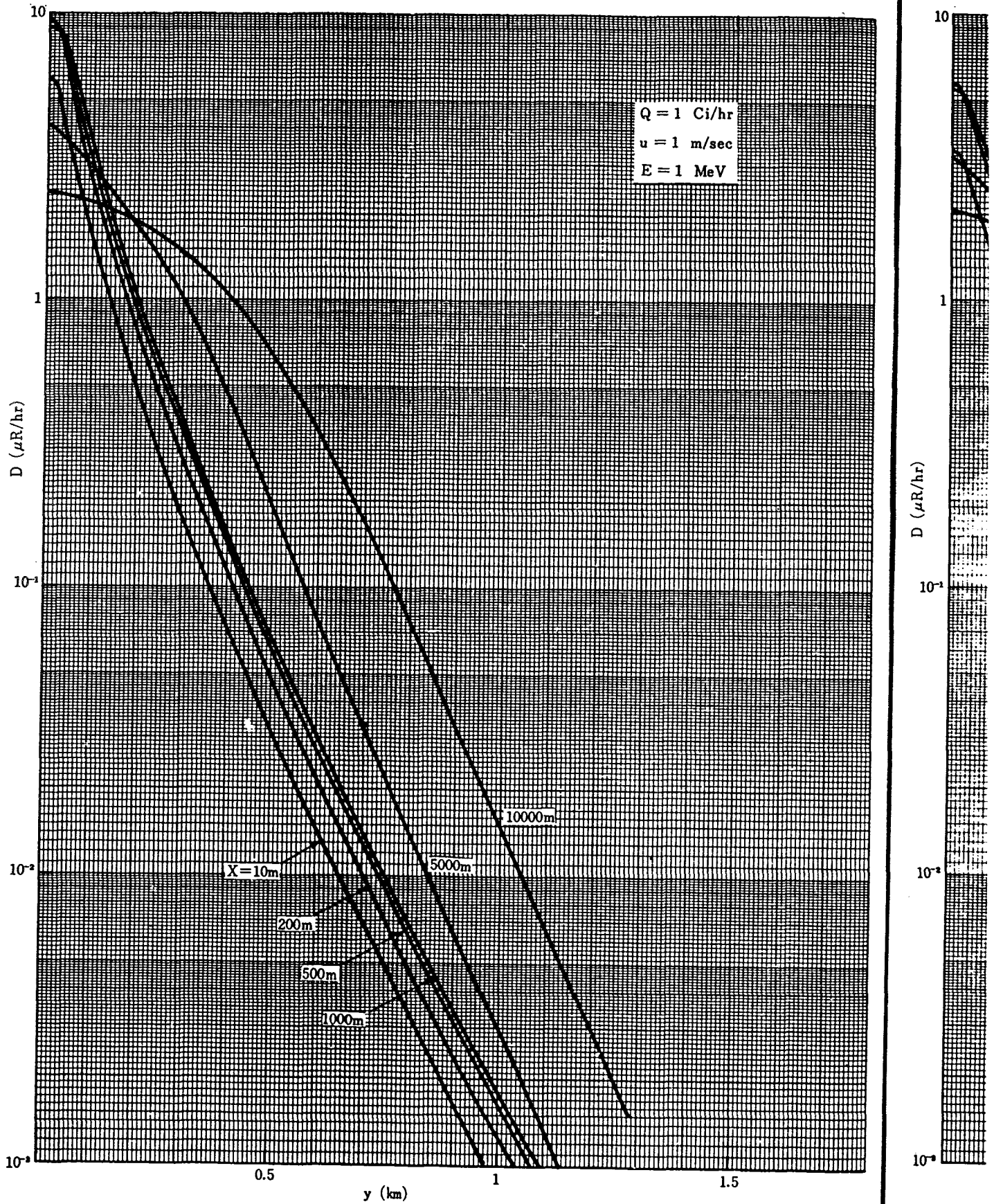


Fig. 28 Distribution on the crosswind axis (Stab. F, H=40 m)

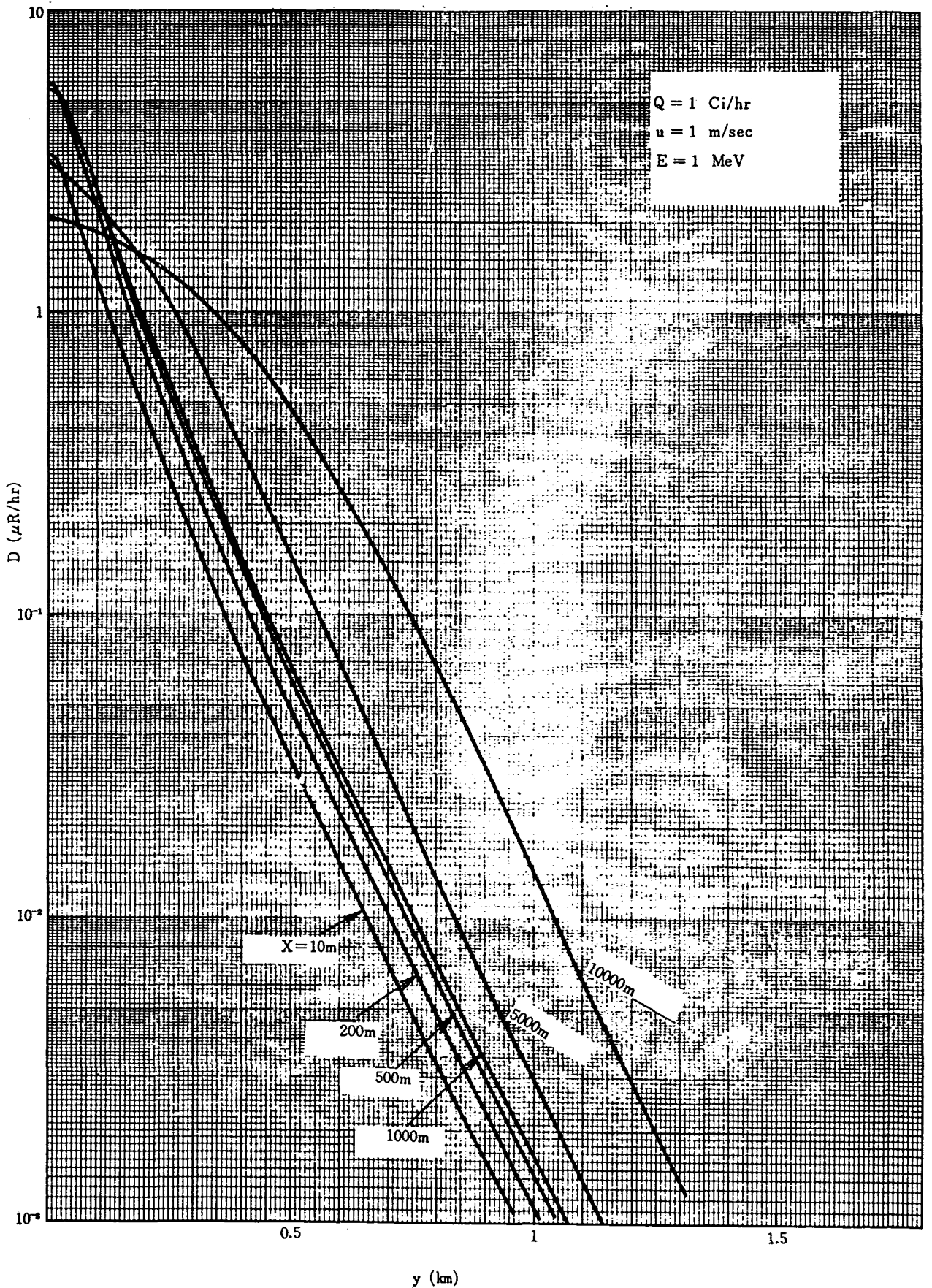


Fig. 29 Distribution on the crosswind axis (Stab. F, H=60 m)

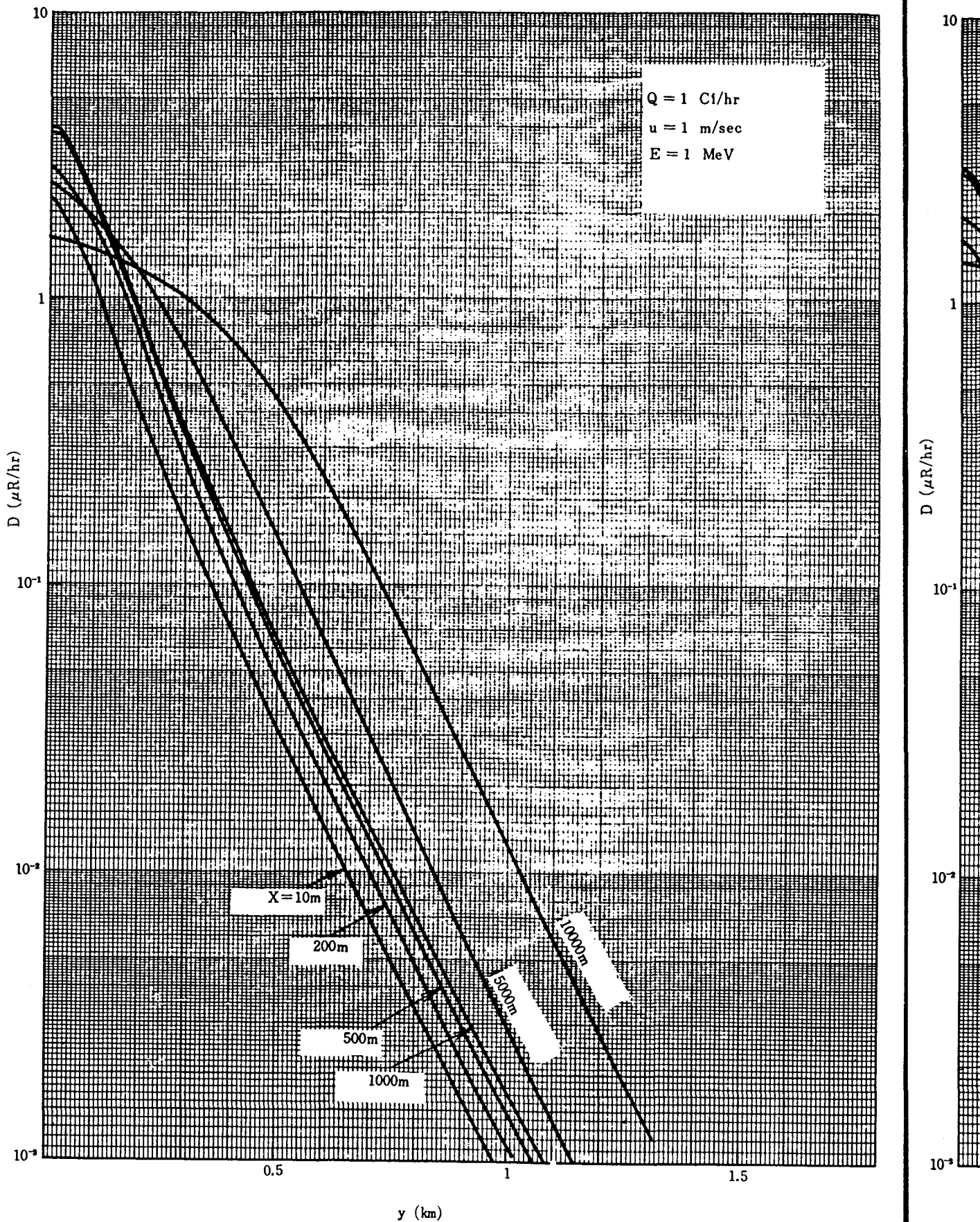


Fig. 30 Distribution on the crosswind axis (Stab. F, H=80 m)

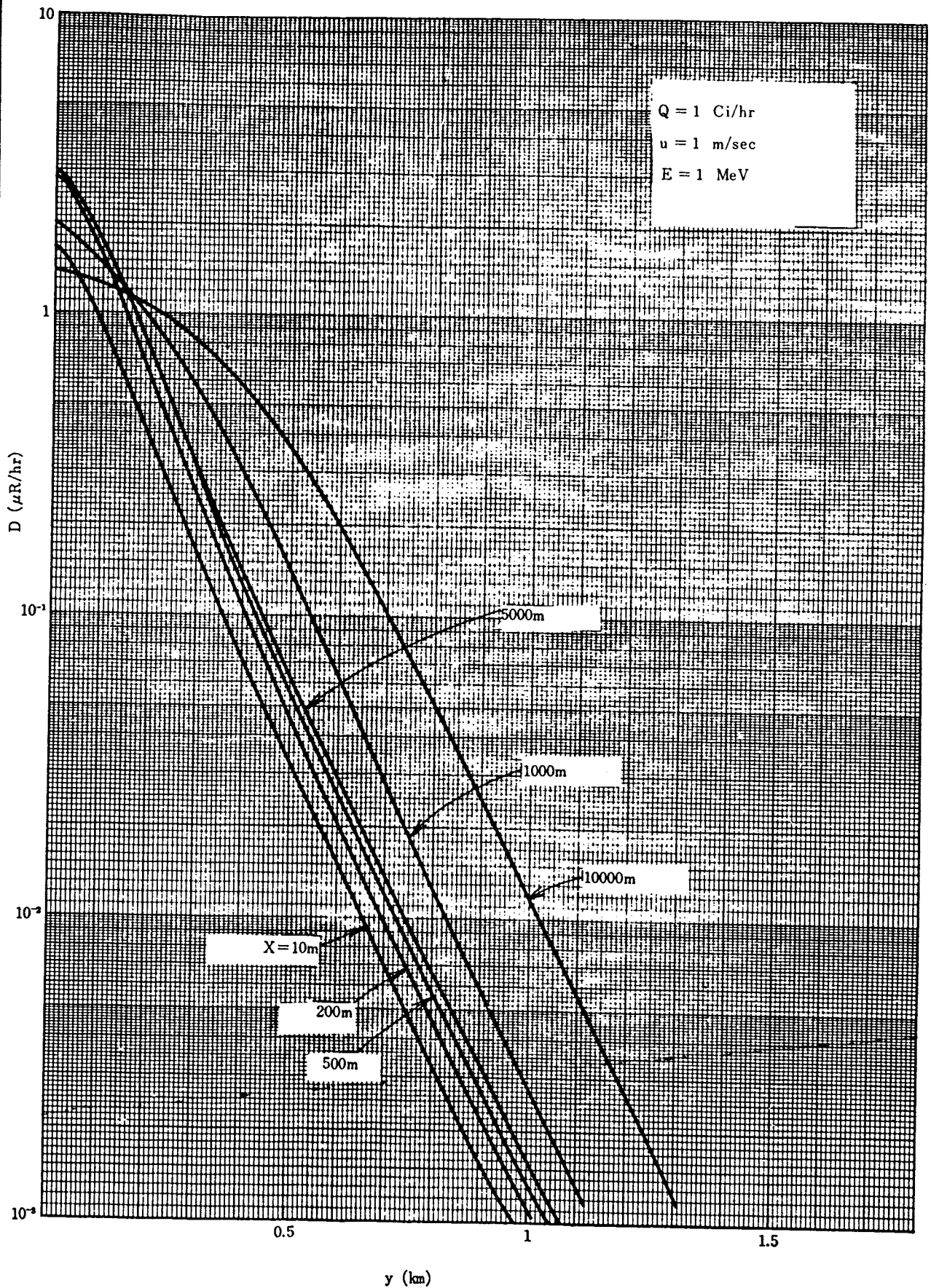


Fig. 31 Distribution on the crosswind axis (Stab. F, H=100 m)

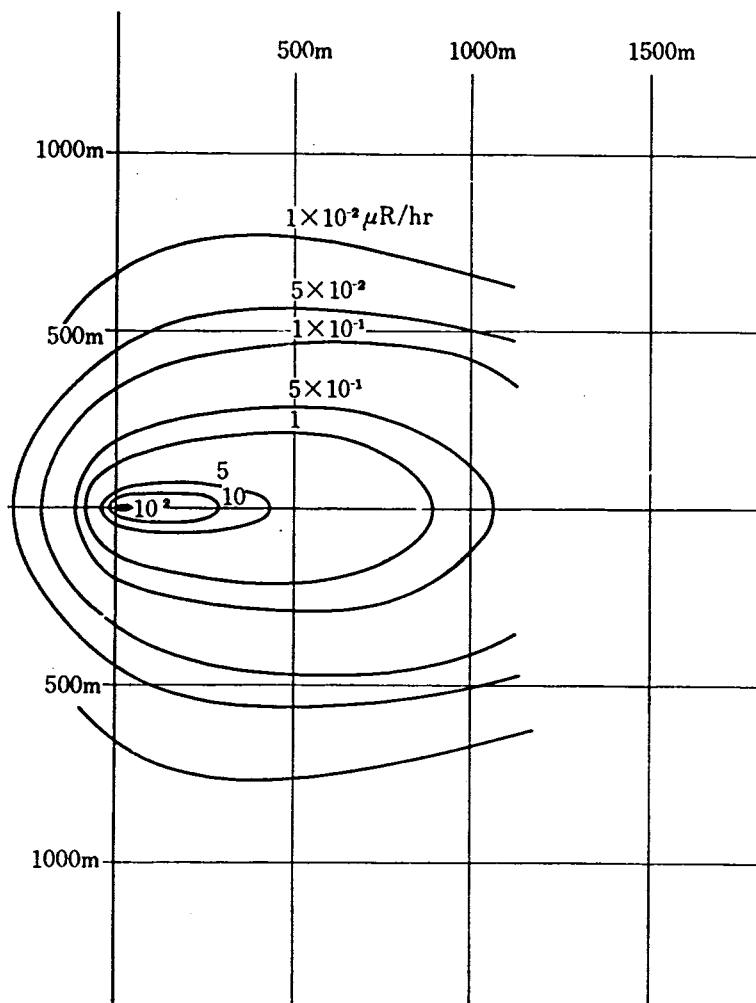


Fig. 32 Isopleth
(Stab. A, Release Height 0 m)

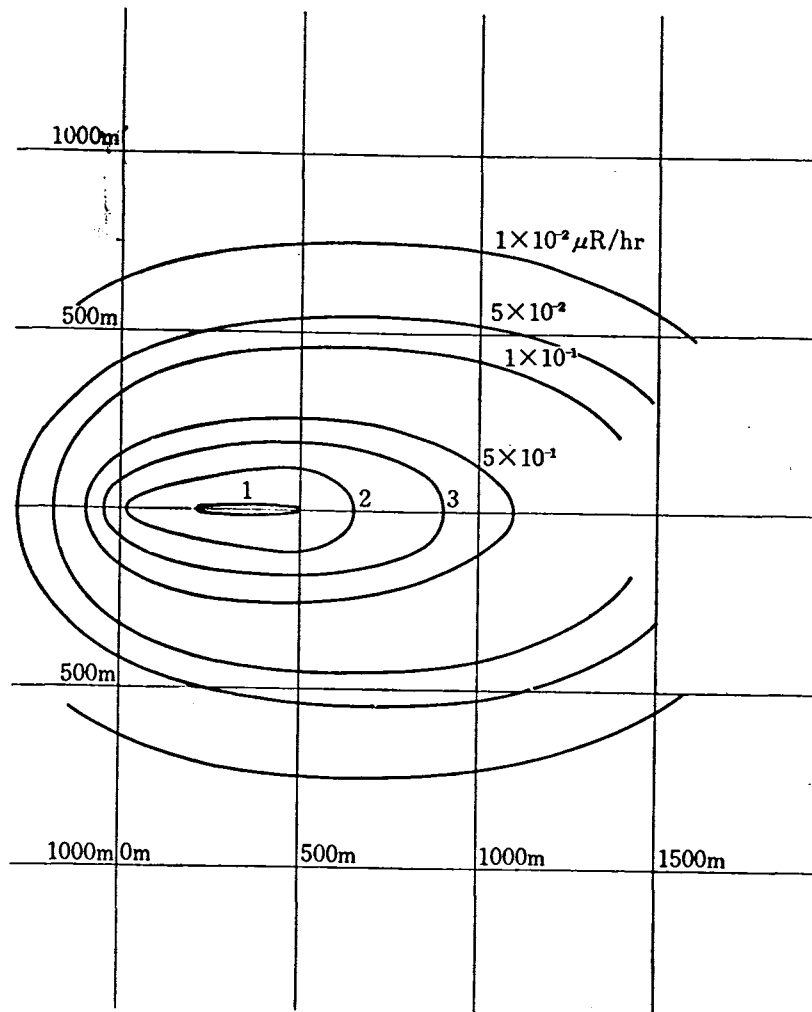


Fig. 33 Isopleth
 (Stab. A, Release Height 100 m)

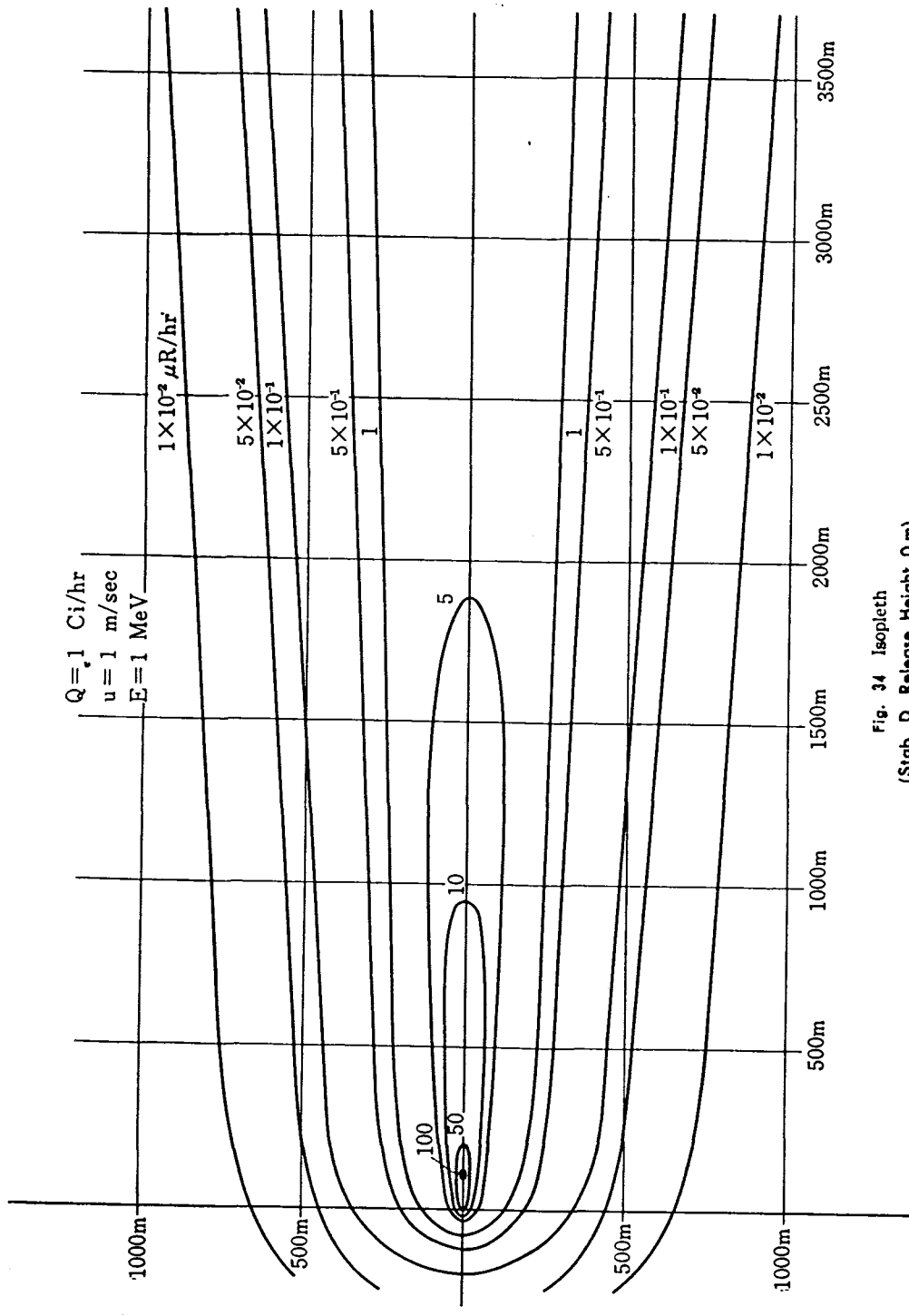


Fig. 34 Isopleth
(Stab. D, Release Height 0 m)

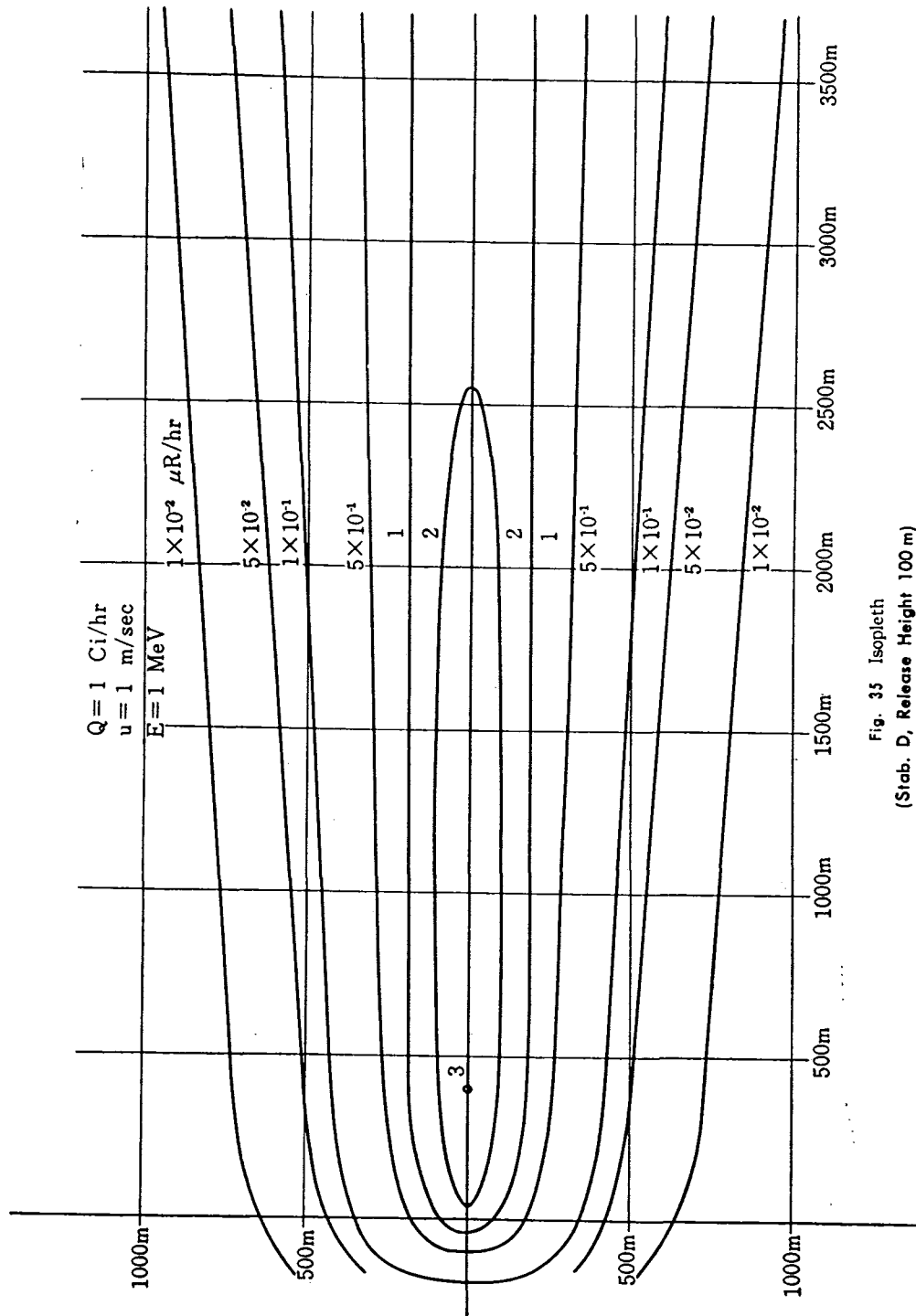


Fig. 35 Isopleth
(Stab. D, Release Height 100 m)

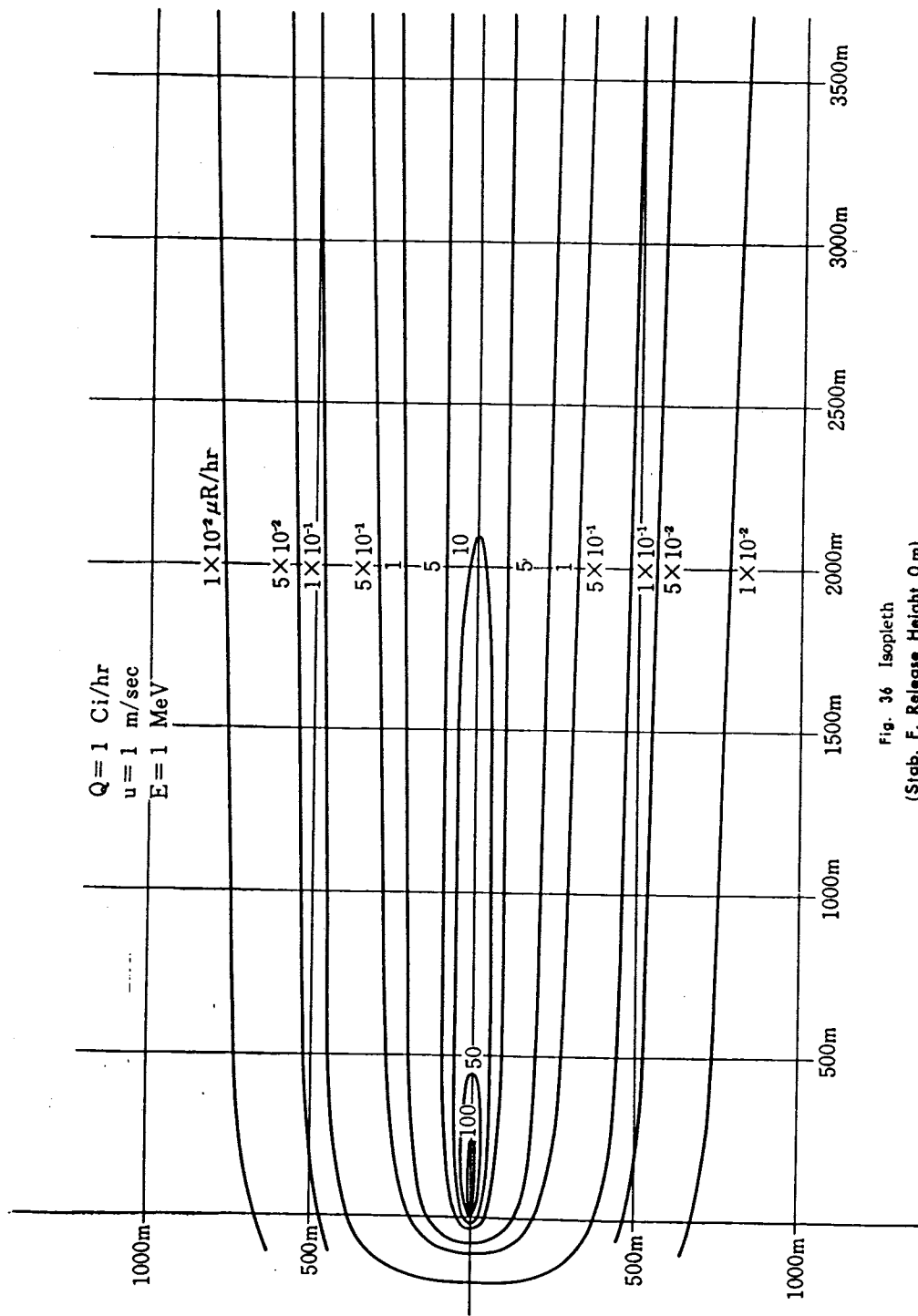


Fig. 36 Isopleth
(Stab. F, Release Height 0 m)

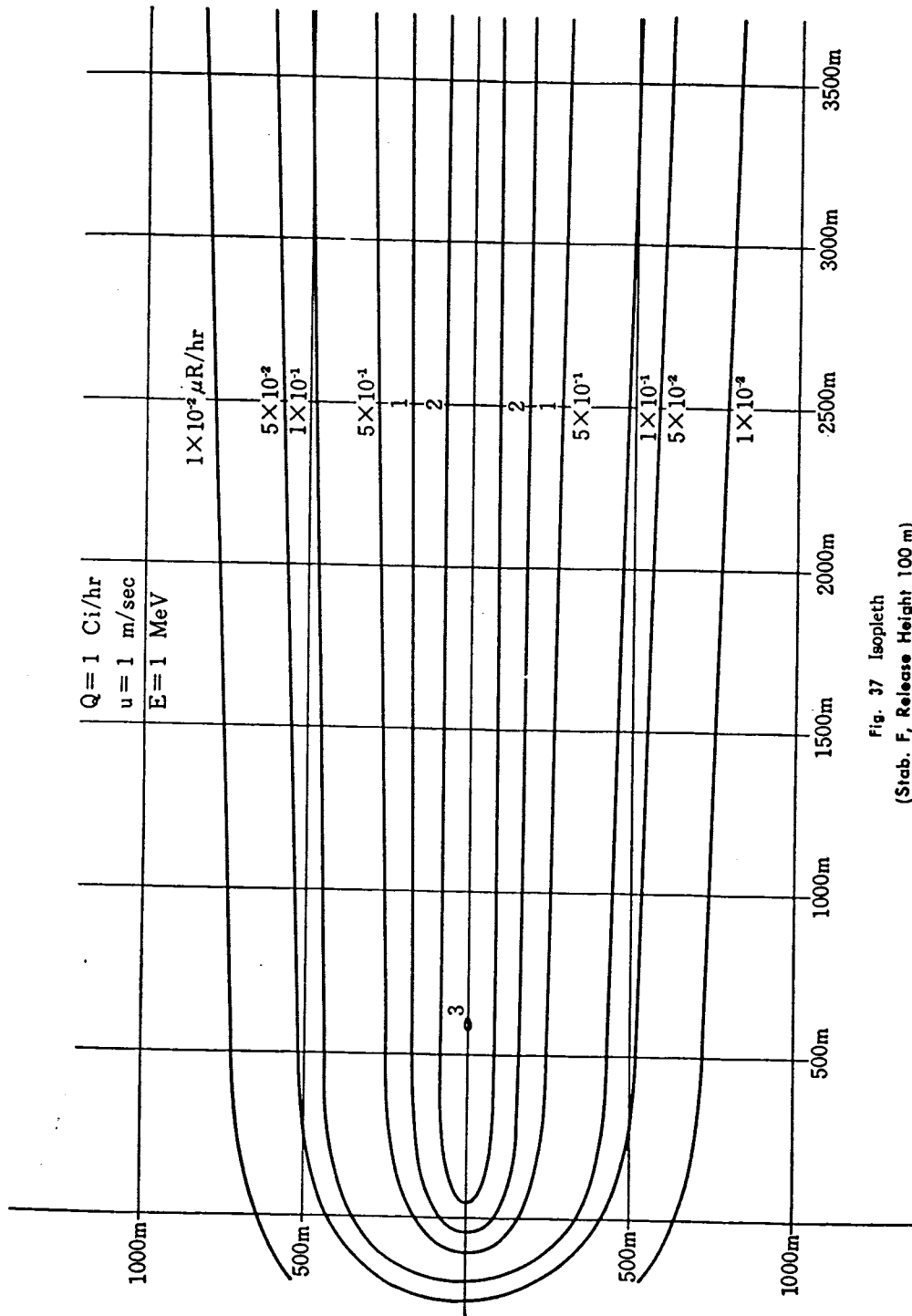


Fig. 37 Isopleth
(Stab. F, Release Height 100 m)

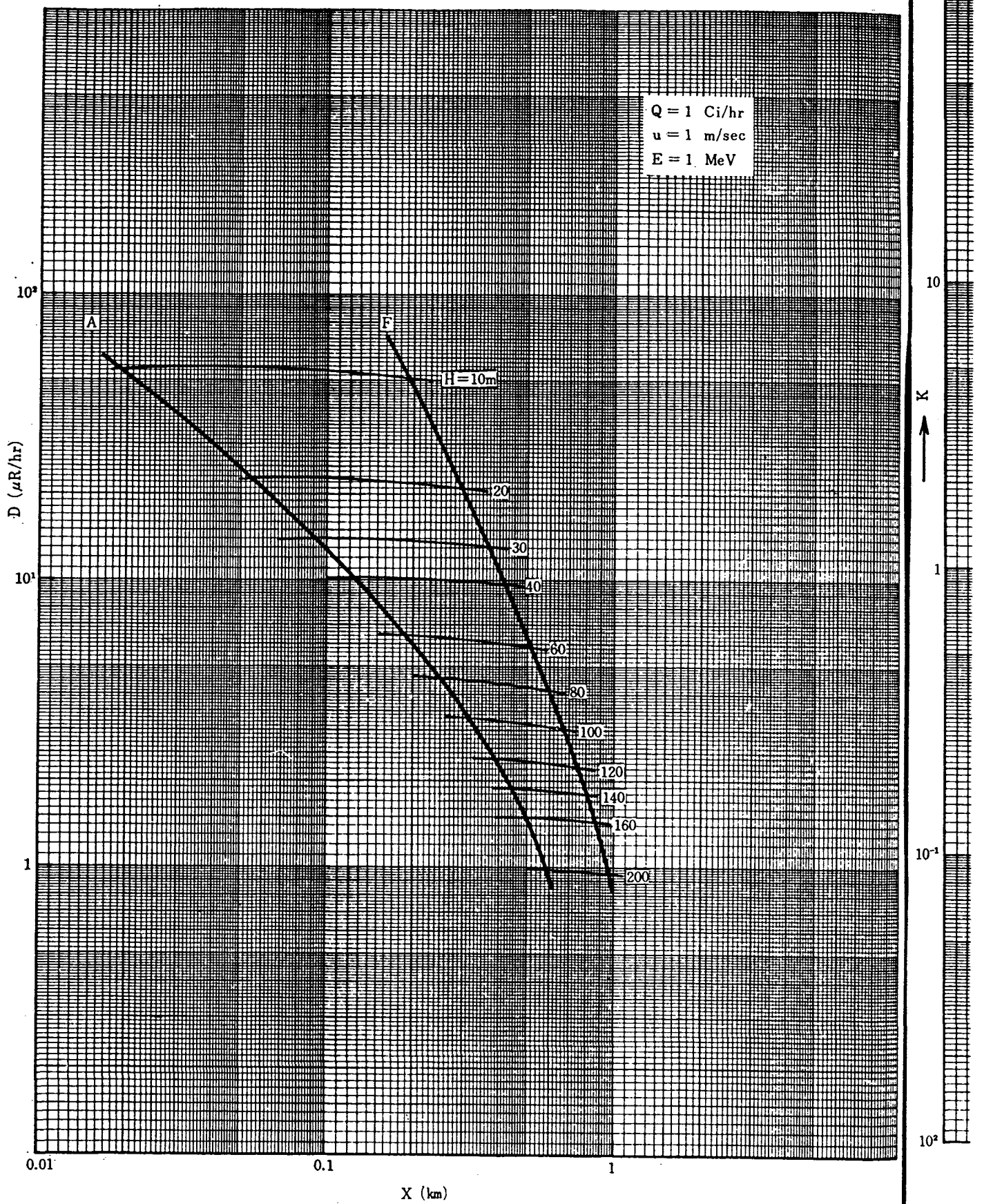
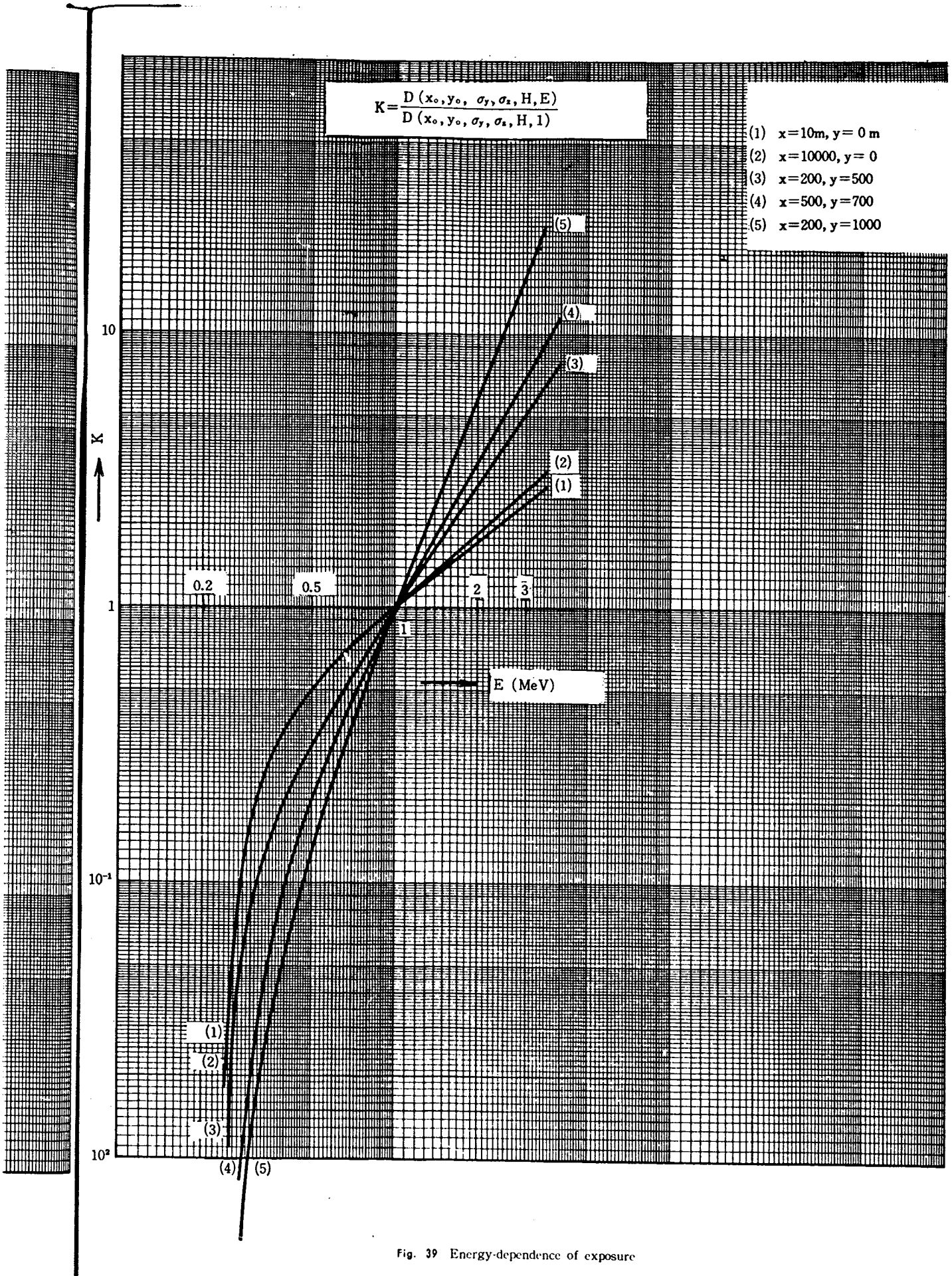


Fig. 38 Relation between the maximum exposure and the maximum point



$$K = \frac{D(x_0, y_0, \sigma_y, \sigma_x, H, E)}{D(x_0, y_0, \sigma_y, \sigma_x, H, 1)}$$

- (1) x=10m, y= 0 m
- (2) x=10000, y= 0
- (3) x=200, y=500
- (4) x=500, y=700
- (5) x=200, y=1000

Fig. 39 Energy-dependence of exposure