

Étude des Traces de Fission dans le Zircon

— l'Âge, la Répartition et la Concentration en Uranium* —

Par

Jiro NAGAI

(Reçu le 15 Oct., 1968)

Résumé

La répartition des traces de fission fossiles et la concentration en uranium dans le zircon ont été étudiées en microscopie optique après une attaque de l'acide phosphorique. Les âges des roches, granits et gneiss ont été calculés par le rapport entre la densité des traces fossiles et de traces nouvelles induites par l'irradiation aux neutrons thermiques.

Sur les zircons étudiés, les échantillons dans les granits ont donné des âges concordants avec les âges déterminés par les méthodes classiques de la géochronologie. La répartition zonaire ou complexe et la distribution lognormale ont été indiquées.

I Introduction

On sait, depuis les premiers travaux de SILK et BARNES (1959) et PRICE et WALKER (1962) que la fission spontanée se créait à partir d'uranium 238 contenu dans le minéral naturel très lentement avec la constante de fission de $6.85 \cdot 10^{-17}$ par année, et que la plupart des minéraux naturels et substances solides isolantes pouvaient enregistrer les trajectoires des fragments de fission spontanées ou induites d'uranium très sélectivement. Cette trajectoire apparaît sous la forme d'une ligne noire quand on l'observe au microscope électrique. Lorsque le diamètre de la trajectoire augment du temps convenable d'attaque chimique, la trace peut être observée en microscope optique. Nous avons utilisé cette propriété pour essayer de déterminer l'âge de roches par zircons.

La principe de la méthode que nous avons appliqué a déjà été essayée d'ailleurs par FLEISCHER, PRICE et WALKER (1964).

En première lieu l'échantillons sont attaqués par l'acide phosphorique, puis en étant appliqués avec une paire de plaque au haut polymère sont exposés dans un flux de neutrons thermiques, et en dernier lieu les polymères sont révélés par attaque chimique.

La densité ρ_i (n/cm²) des traces nouvelles sur la plaque de polymère de fission

* L'irradiation a été effectuée à KURRJ-TR.

induites par les neutrons thermiques est proportionnelle à la concentration en ^{235}U , par conséquent en ^{238}U dans le minéral et le flux neutrons lents. La densité ρ_s (n/cm^2) des traces de fission fossiles est en fonction de la durée T depuis la cristallisation du minéral, de la concentration en uranium et de sa constante de fission spontanée.

On avait indiqué que l'âge T était donné avec une précision suffisante par l'équation (FLEISCHER, PRICE et WALKER, 1964) :

$$T = \rho_s / \rho_i NI \delta / \lambda \quad (1)$$

où N est la dose de neutrons thermiques, I , le rapport isotopique $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$, σ , la section efficace de fission en ^{235}U , et λ est la constante de fission spontanée de ^{238}U .

PRICE et WALKER (1963) et MAURETTE (1966) ont indiqué qu'il devait être possible de mesurer la concentration en uranium dans un minéral au moyen de la densité ρ_i de nouvelles traces induites par une irradiation du minéral dans un flux de neutrons thermiques, et que si le minéral n'est pas un détecteur des traces, on peut placer au contact d'une surface très propre un détecteur auxiliaire, plastique par exemple polycarbonate, contenant une très faible concentration en uranium et y compter la densité des nouvelles traces induites par l'irradiation neutronique. La concentration en uranium dans une certaine région de zircon est donnée par l'expression (FLEISCHER, PRICE et WALKER, 1964) :

$$C_{238}(\text{ppm}) = 7.8 \cdot 10^6 \rho_i / N I N_a R \quad (2)$$

où R représente la distance de ralentissement mesurée dans le minéral, après laquelle les fragments arrivent au niveau du polymère avec une énergie inférieure ou égale à l'énergie minimum qui est en dessous de laquelle les fragments ne sont plus révélables dans le polymère et I est le rapport entre ^{235}U et ^{238}U , et N_a , la densité atomique de zircon.

On comprend que la petite taille de zircon est un minéral accessoire notablement général dans grand nombre de roches et tuf volcanique, dont les concentrations en uranium sont considérablement élevées, et la stabilité des trajectoires de fission dans le minéral sont suffisamment haute, par conséquent le zircon est un des minéraux le plus favorables pour la détermination de l'âge de roche au moyen de la méthode des traces de fission.

II Technique Expérimentale

De nombreux échantillons de zircons provenant de 6 localités de granit et de gneiss, ont été examinés en vue d'étudier la densité et la répartition des traces fossiles, puis les échantillons à irradier étaient enveloppés entre deux petites plaques de

haut polymère—fabriqué par Teizin et vendu sous le nom de Panlite—et introduits dans un container. Plusieurs échantillons étaient mis à la fois dans le même container et recevaient en principe le même flux de neutrons lents.

A) Extrait des échantillons

Les monocristaux de zircons étaient extraits par traitement ordinaire; c'est à dire, pulvérisation mécanique de roche, concentration à l'eau et à liqueur lourde et préparation magnétique étaient successivement effectuées. Les échantillons sélectionnés finalement sous le microscope binoculaire sont automorphiques, achromatiques et transparents, ayant une épaisseur de 50 à 60 μ et de dimension linéaire supérieure à 100 μ .

B) Attaque par l'acide phosphorique

Les traces de fission sont révélées en plongeant les surfaces du zircon dans H_3PO_4 . A la température de 450 à 500°C, le temps d'attaque était de 1 à 2 minutes. On peut voir les résultats de l'attaque par l'acide des faces des cristaux des zircons sur la planche 13. Il semble que la condition d'attaque chimique soit légèrement variable selon la nature de la roche encaissant le minéral, c'est adire, selon les conditions physico-chimiques de la cristallisation du zircon. Les figures des traces révélées par l'attaque chimique sont photomicrographiées.

Les traces de fission se distinguent facilement des autres imperfections présentes dans le zircon grâce à leur aspect caractéristique quand on les observe au microscope d'assez haut grossissement. Elles pénètrent les surfaces du cristale jusqu'à une certaine profondeur, ce qui implique une mise au point variable sur toute la longueur de la trajectoire révélée par corrosion chimique.

Le haut polymère polycarbonate est attaquée dans la solution de sord hydroxide (6N) à la temperature de 65 à 70°C, 7 à 8 minutes. La longueur myenne des traces de fission dans un haut polymère polycarbonate après avoir été attaqué par l'acid est environ 18 μ , et trois fois plus long que celui dans le zircon. On vois les traces révélées sur Pl. 13, fig. 3.

Les densités des traces sont mesurées sur la surface extérieure du zircon et du haut polymère polycarbonate plaqué sur le minéral. Si les traces sont une profondeur minimum de l'ordre d'un micron, un aspect très caractéristique de l'image de la trace est qu'elle ressemble à une "comète", cet aspect caractéristique est utilise comme critère d'identification.

Les déterminations des densités de traces ont été faites en comptant le nombre de traces par champ du microscope et en les confrontant à ses photomicrographies correspondants. On a évité de compter des traces dans les régions proches des bords ou des fractures du cristal. L'irradiation neutronique des échantillons a été effectuée à KURRI-TR.

III Résultats Expérimentaux

A) Traces fossiles et sa répartition dans le zircon

Notre but principal ici était d'étudier la répartition de traces fossiles à l'échelle microscopique sur les surfaces des monocristaux, et non de mesurer la teneur en uranium moyenne dans le zircon. On sait que la répartition des traces fossiles n'indique pas nécessairement la répartition d'uranium, mais que celle-là doit correspondre à celle-ci puisqu'il n'est arrivé aucune variation à la répartition en uranium ou aucun processus de la disparition des traces au cours des temps géologiques.

Par observation microscopique, des façons de répartition caractéristiques étaient séparées en divisions suivantes:

- i. Répartition homogène
- ii. Répartition hétérogène
- iii. Répartition zonaire
- iv. Répartition complexe

La répartition homogène (Pl. 13, fig. 2) est un type le plus commun, mais c'est qu'elle est réparties d'une façon uniforme superficiellement tout au moins. Dans ce cas on peut simplement calculer la densité de traces fossiles. La répartition hétérogène étant à prendre dans son sens étroit, se présente à la façons de variation graduel ou continue, et c'est relativement rare. Dans ce cas on n'en peut séparer quelques parties ou cela va mal. La répartition zonaire (Pl. 13, fig. 1), se présentant en variation discontinue, correspond à la structure zonaire des minerais. La répartition complexe (Pl. 13, fig. 4, 5 et 6) est réparties à la façons de la variation discontinue. On peut en séparer quelques régions dont les répartitions sont tantôt homogènes, tantôt hétérogènes. En réalité, une attention a été apportée à la répartition éventuellement localisée dans quelques parties. Par exemple, dans les zircons de Hida gniess, nous avons souvent trouvés les cristaux dont les plusieurs parties spéciales de l'ordre quelques dix microns, présentant moins d'une moitié ou d'un tiers du volume du cristal, mais dont la contribution à les densités totaux de traces était notablement supérieur à celle de la reste. La répartition complexe pourrait être encore séparée en subdivisions: Répartition fluidale (Pl. 13, fig. 6), Répartition en filon, Répartition en colonie (Pl. 13, fig. 4) etc..

B) Concentration en uranium

La densité des traces induites ρ_i était mesurée sur le haut polymère plaqué sur chaque cristal en cas de l'irradiation neutronique. La concentration en uranium peut être calculée à l'aide de l'équation (2) (FLEISCHER, PRICE et WALKER, 1964) précédente.

$$C_{238}(\text{ppm}) = 7.8 \cdot 10^6 \rho_i / N N_v / R$$

où $N_p = 9 \cdot 10^{22}$ atoms/cm³, est la densité atomique

R, la distance de ralentissement précédent,

Nous avons décidé une valeur de 6.2μ expérimentalement,

σ , 577 barn

I, 1/140, le rapport isotopique $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$

On obtient numériquement:

$$C_{238}(\text{ppm}) = 3.3 \cdot 10^{10} \rho_i / N \quad (3)$$

pour l'équation (1) on obtient aussi numériquement l'expression suivante (FLEISCHER, PRICE et WALKER, 1964):

$$T = 6.12 \cdot 10^{-8} N \rho_s / \rho_i \quad (4)$$

Les résultats sont représentés sur les figures 1, 2, 3 et 4. On peut voir les histogrammes de distribution de la concentration en uranium, en étant mesurés aux polymères plaqués sur les zircons provenant de divers roches. Ce sont les distributions lognormales.

La figure 1 est l'histogramme représentant la distribution de la concentration en uranium de divers zircons dans le granit de Hiei, Kyoto Préfecture,

La figure 2, dans l'argiles de Fujioka, Aichi Préfecture,

La figure 3, dans la gneiss de Tochibara, Gifu Préfecture,

La figure 4, dans le tuf volcanique d'Osaka Groupe,

Shimakumayama, Osaka Préfecture.

C) Mesures d'âge des zircons

Pour déterminer un âge il suffit de compter les deux sortes de densités des traces avant et après l'irradiation aux neutrons et calculer au moyen de l'équation (1) précédente. Afin de vérifier la proportion linéaire entre les deux espèces des densités, la densité fossile dans un zircon et la densité induite sur le haut polymère, déterminées sur neuf cristaux différents provenant d'un même granit, on a reporté une série de valeurs mesurées sur les zircons de Yasuda granit dans le Tableau 1, où on peut voir un bon résultat en étant raison directe.

Dans le Tableau 2 on peut voir les âges des échantillons des autres granits et gneiss. Dans la 1^{er} colonne du Tableau 2 figurent l'espèce de roches encaissantes et les provenances des zircons utilisés. Dans les 2^e et 3^e colonnes, les nombres de traces fossiles et induites par cm². Tous les échantillons étaient mis à la fois dans la même dose de neutrons de $3.7 \pm 0.2 \cdot 10^{12}/\text{cm}^2 \times 180$ sec. Dans les 5^e et 6^e colonnes on a porté respectivement l'âge mesuré ou la moyenne pondérée des âges des quelques cristaux, et les âges déterminés par les autres méthodes radioactives classiques (Ar: méthode Ar/K, Sr: méthode Sr/Rb).

Table 1. Les âges mesués sur 9 cristaux des zircons dans le granit de Yasuda, Hiroshima Préfecture, se présentant en bons accords.

Numéro du zircon (granit de Yasuda)	Densité, Nombre de traces fossiles par $\text{cm}^2 \times 10^6/\text{cm}^2$	Nombre de traces observées	Densité, Nombre de traces induites par $\text{cm}^2 \times 10^6/\text{cm}^2$	Nombre de traces observées	Âge calculé $\times 10^6$ ans	Concentration en uranium ppm
S14a	11.7	288	5.06	124	94	380
S14b	10.2	201	4.72	93	88	370
S15A	8.47	222	3.66	96	94	280
S15B	12.5	83	5.22	34.5	98	390
S12C	7.86	103	3.60	36.5	90	270
S13A	11.0	288	4.00	104	112	300
S13B	9.46	124	4.60	60	84	340
S13C	12.5	83	5.31	35	96	400
S13D	8.93	117	3.97	52	92	300

Dose de neutrons thermiques, N: $6.7 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ 94.2 $\pm$ 2.6 (moyenne)

Table 2. Les âges mesures sur les zircons dans divers roches, en étant en accords (les granits) ou en désaccords (les gneiss) avec les autres méthodes.

1 Provenances et l'espèce de roche	2 Densité, Nombre de traces fossiles par $\text{cm}^2 \times 10^6/\text{cm}^2$	3 Densité, Nombre de traces fossiles par $\text{cm}^2 \times 10^6/\text{cm}^2$	4 Nombre de traces fossiles totaux observées	5 Âge moyen (Nombre de cristaux) $\times 10^6$ ans	6 Âge par des autres méthodes $\times 10^6$ ans
Granit de Yasuda, Hiroshima Pré.	11.7	5.06	1509	94 (9)	104–111 (Sr)
Granit de Hiei, Kyoto Pré.	17.6	7.96	489	85 (4)	93–99 (Sr)
Argiles de Fujioka, Aichi Pré.	68.7	29.8	220	94 (2)	
Granit de Kasagi, Nara Pré.	10.0	4.50	66	91 (2)	
Gneiss de Senjugahra, I Toyama Pré.	10.9	3.49	252	120 (3)	175–193 (Sr)
II	22.7	6.14	243	150 (1)	
III	17.2	2.80	111	250 (1)	
Gneiss de Tohibara, Gifu Pré.	1.87	0.625	65	120 (2)	

Dose de neutrons thermiques, N : $6.7 \times 10^{14}/\text{cm}^2$.

IV Discussion des Résultats

a) Répartition des traces de fission fossiles

La méthode de traces de fission se prête particulièrement bien à ce genre d'étude, parce qu'on peut poursuivre les répartitions des traces fossiles ou induites en échelle de l'ordre de quelques microns directement sur la structure du cristal. Mais parce que la révélation d'une trace par l'acide est due à une attaque préférentielle tout au long de la trace elle ne pourra être révélée que si la trajectoire traverse une surface exposée à l'action de l'acide. On peut, en général, reconnaître l'origine d'un fragment de fission de son extrémité. Mais il subsiste une indétermination dans l'origine, du fait que les fragments peuvent provenir de la surface ou d'une certaine profondeur, indétermination que l'on peut supposer être l'ordre du parcours moyen de fragments dans le minéral, soit de l'ordre de 5 à 6 μ .

Quant aux plus grand nombre des zircons, la répartition des traces de fission spontanés de l'uranium est distribuée d'une façon très homogène, spécialement pour les zircons dans le granit. Les densités des traces distribuée homogènement présentent des écarts considérables entre chaque cristal diffèrent.

Une attention spéciale a été apportée à la répartition éventuellement hétérogène: la méthode de traces fossiles ou induites utilisée ici est particulièrement adaptée à cette étude qui demande une localisation assez précise de l'origine de fission de l'uranium.

La répartition zonaire paraît dans la région marginale du cristal à la façon de structure zonaire, par exemple, dans un plagioclase, en deux ou trois couches. Cette répartition zonaire semble être fréquente pour les zircons de petite taille dans le granit, par exemple, dans le granit de Hiei.

La répartition complexe, au contraire, est considérée être caractéristique à les zircons dans le gneiss, à titre d'exemple, dans le gneiss à biotite et hornblende de Hida.

Les cristaux de zircons dans le gneiss à biotite et hornblende de Senjugahara (Hida gneiss) se forment souvent selon la configuration allotriomorphique dont les apparences extraordinaires étaient regardés être l'origine sédimentaire dû à corrosion d'eau. D'autre part quelq'un apprécie que cela est dû à la fusion partielle de l'arête du cristal par métamorphisme. Leur répartition des traces fossiles sont notablement hétérogènes dans le pluspart de cas.

On peut considérer que cela est le résultat de la modification secondaire de la distribution d'uranium dans le cristal parce que l'on en apperçoit aussi de semblables dans la répartition des traces induites par l'irradiation aux neutrons thermiques sur le polymère plaqué à le minéral identique. On pourrait expliquer cette répartition complexe de traces fossiles par la concentration partielle de l'uranium dans le

cristal étant bas sur l'hypothèse que l'uranium pourrait être transmis et concentré seulement, partiellement ou avec d'autres éléments constituant dans le cristal de zircon au cours du métamorphisme. On devrait aussi admettre que dans le même cas les trajectoires fossiles qui avait existé avant le phénomène ont disparu parfaitement ou imparfaitement selon la condition physico-chimique des divers cristaux, et commencé de nouveau de se reproduire.

b) Distribution lognormale de l'uranium

La distribution des teneurs en uranium entre cristaux différents du minéral identique dans une roche est un facteur très significatif non seulement pour la géochimie, mais aussi pour la géochronologie elle-même, parce qu'il est nécessaire de connaître la déviation de concentrations propres en uranium des zircons considérés dont la connaissance préliminaire est utile pour assurer la limite d'adaptation de cette méthode et de choisir les échantillons probables pour la roche du certain âge à prévoir.

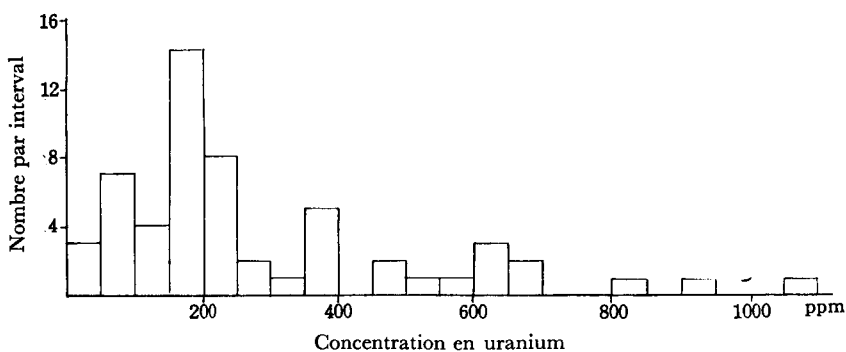


Fig. 1. Distribution de concentration en uranium des zircons dans le granite de Hiei, Kyoto Pré.

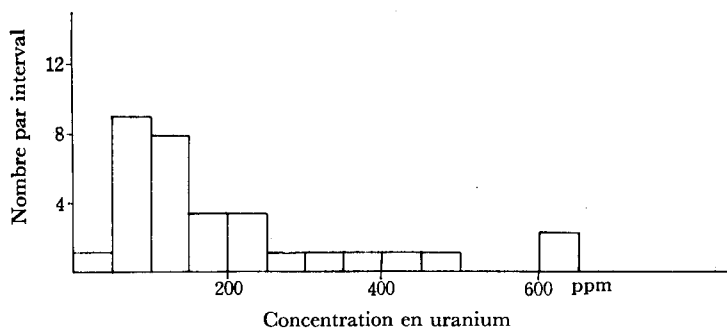


Fig. 2. Distribution de concentration en uranium des zircons dans les argiles de Fujioka, Aichi Pré.

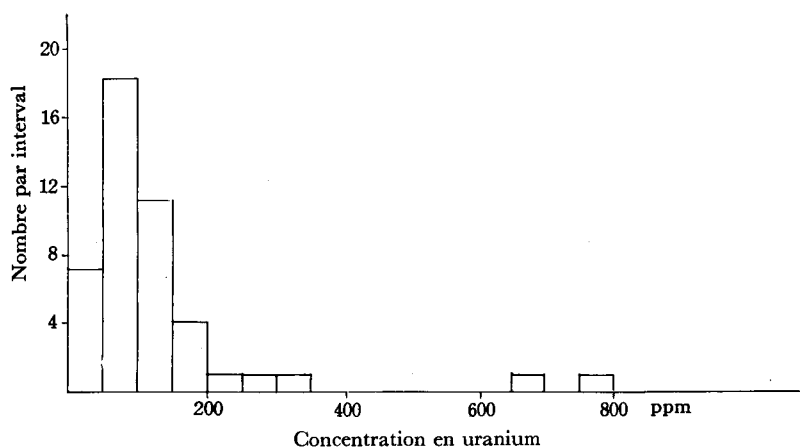


Fig. 3. Distribution de concentration en uranium des zircons dans le gneiss de Tochibara, Gifu Pré.

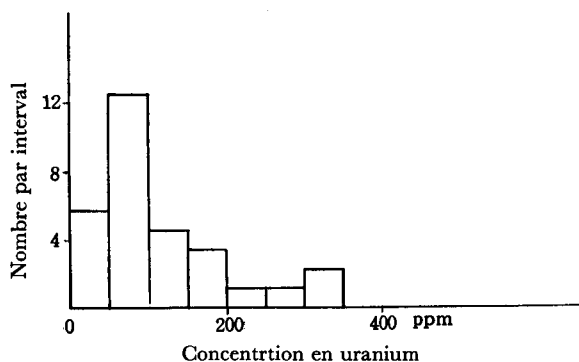


Fig. 4. Distribution de concentration en uranium des zircons dans le tuf volcanique d'Osaka Groupe, Shimakumayama, d'Osaka Pré.

Les histogrammes des fig. 1, 2, 3 et 4 se présentent clairement qu'ils sont distordus à positif et ce ne sont pas les distributions normaux, mais les distributions lognormaux; ainsi dit AHRENS.

Dans la fig. 5 on peut voir une distribution schématique de tous les zircons examinés ici dans les granit et gneiss, se présentant par pourcentage de fréquence par interval, le nombre des observations, 187. Depuis la teneur à peu près zéro jusqu'à quelques mille ppm la concentration en uranium dans les zircons de petite taille des roches montre un grand écart. Alors le moyen arithmétique est 188 ppm le moyen géométrique, 108 ppm, et la déviation standard, 0.39, sauf les 15 observations.

c) Sur la mesure d'âge

Quant on observe un trace de fission induit dans le polymère plaqué sur le zircon, c'est le partie restant de trajectoire qui demeure après avoir été retranché son certains partie à cause de parcourir au commencement dans le minerai à partir de la place fissionnée. C'est à dire que la trace qui est long dans le minéral est d'autant plus court dans le polymère. Les densités des traces dans deux matières sont en principe égaux. Mais ce n'est pas possible de dire qu'il n'y a aucun problème. Lors du comptage de traces l'application du critérium d'identification de trace vraie, un aspect caractéristique qui ressemble à celui d'une "comète" implique que la densité mesurée de traces serait inférieurs à la densité réelle. Mais quand on calcule les deux densités dans le même minerai avant et après l'irradiation neutronique, il n'y a pas d'erreur pratique car elles se compensent l'une l'autre. Alors dans le polymère on pourrait compter des traces ayant deux ou trois microns de longueur qui dans le cas du minéral, devait être pris en omission du comptage des traces étant moins un micron, parce que le trace dans le polymère est trois fois plus longue que celle dans le minéral. S'exprimant en l'autre terme propre, le parcours attaquant dans le minéral n'est plus la distance de ralentissement du fragment de fission mesurée dans le minéral, après laquelle les fragments arrivent au niveau du polymère avec une énergie inférieure ou égale à l'énergie minimum qui est en dessous de laquelle les fragments ne sont plus révélables dans le polymère. Mais l'erreur n'est pas si grande. Une étude antérieure examinant les distributions des longueurs des traces (MAURETTE, PELLAS et WALKER, 1964) a montré que la probabilité d'occurrence des traces très longue ou très court est pratiquement assez petite et donc on peut négliger l'erreur.

On peut voir dans les Tableaux 1 et 2 que les âges que nous avons déterminés par la méthode des traces fossiles sont en bon accord avec les âges mesurés par les autres méthodes dans les cas des granits, mais pour Hida gneiss ce n'est pas la même chose. Les désaccords existent non seulement entre nos résultats et les âges mesurés par les autres méthodes, mais aussi entre nos âges eux-mêmes. Alors pour les zircons dans le gneiss, les échantillons choisis avaient été sélectionnés pour la répartition homogène tout au moins à la région observée du cristal. On peut donc penser à ce jour que les divergences de nos résultats pour les gneiss ne sont pas dues essentiellement à des erreurs dans l'application de la méthode de traces fossiles, mais qu'elles sont dues à la complexité du gneiss.

V Conclusion

La méthode de traces de fission spontanées et induites dans le zircon donne, à quelques exceptions près (des gneiss) un moyen de décider l'âge du minéral ou roche,

et d'observer la répartition et la concentration en uranium assez près de la surface du cristal à l'échelle microscopique. Dans ces cas on peut effectuer l'emploi du haut polymère pour un détecteur auxiliaire, et obtenir de bon résultats, où deux plaques du polymère sont conjoints pour chauffer en envelopant le minéral.

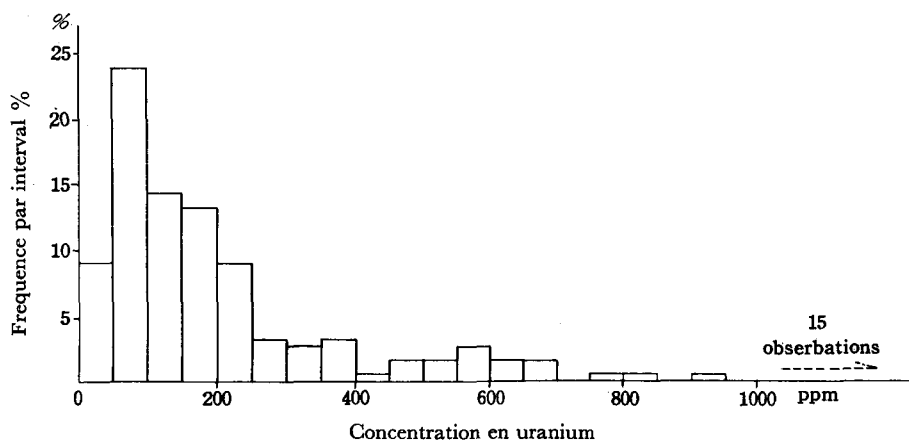


Fig. 5. Distribution lognormale de concentration en uranium des zircons totaux.

Dans les plupart des zircons les traces de fission spontanées sont répartis à la façon homogène, et on peut aussi voir les répartition hétérogène ou zonaire tantôt plus, tantôt moins dans le granit. Il semble que la répartition complexe est caractéristique au gneiss contrairement à ce qui a été observé dans les granits. La distribution de la concentration en uranium entre divers cristaux des zircons est lognormale.

Remerciements.—Nous sommes heureux de pouvoir remercier ici le professeur Z. HATUDA, Directeur des Instituts de Géologie et Minéralogie de l'Université de Kyoto pour la direction qu'il a donné à ce travail. Nous sommes reconnaissants au sous professeur I. HAYASE qui a beaucoup aidé pour l'intérêt constant et actif qu'il nous a manifesté.

Nous remercions également Dr. S. NISHIMURA qui a tant aidé à l'irradiations neutroniques.

Nous sommes aussi reconnaissants aux Professeurs S. ONOGI, K. SHIGEZAWA et Dr. H. HATA, Teijin C^{ie}, pour le prélèvement des hauts polymères

Ce travail a été bénéficié partiellement à l'année 1966 du support financier du Expenditure de Reserch Scientifique du Ministère de l'Education.

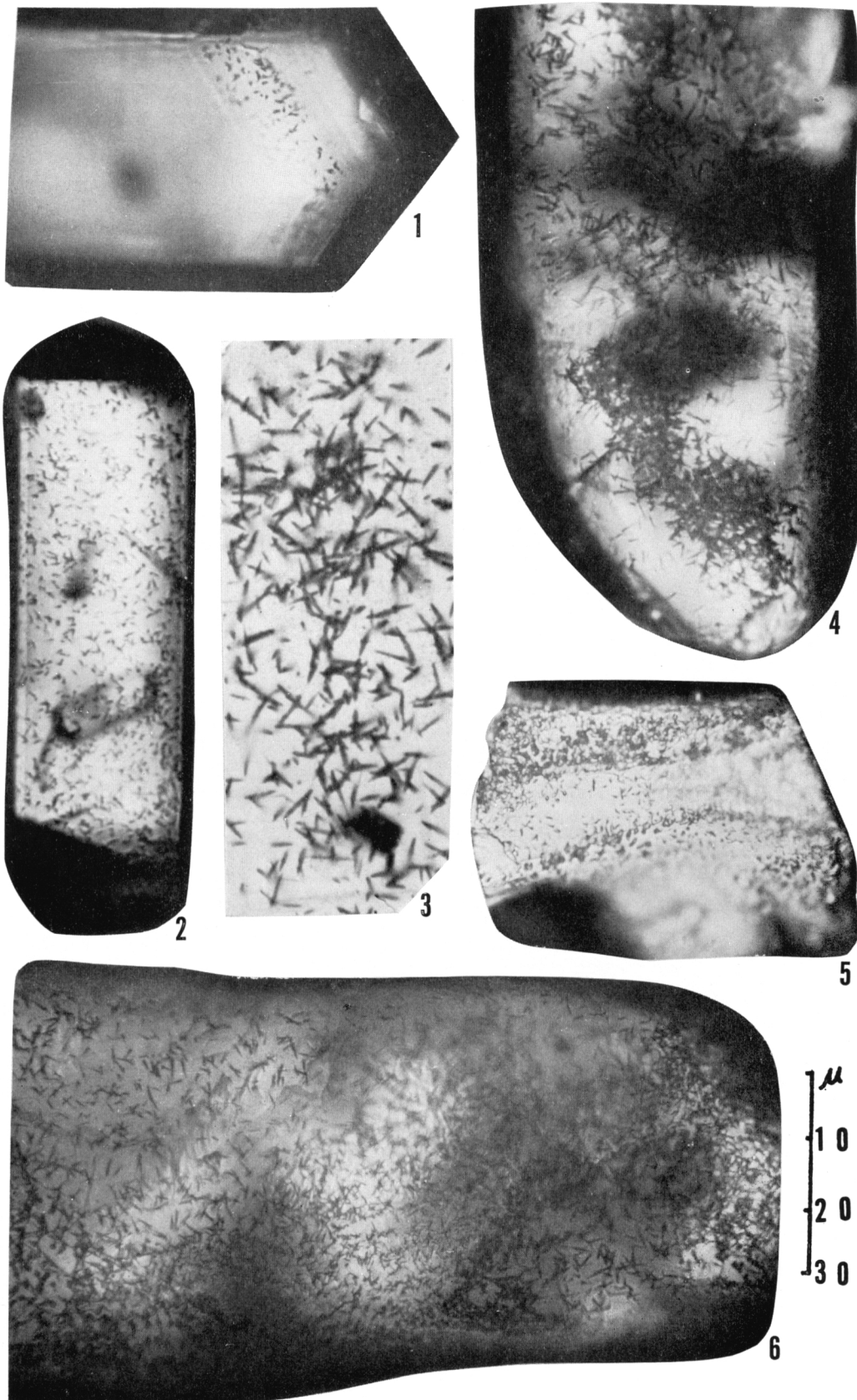
Bibliographie

- AHRENS, L.H. (1954): The Lognormal Distribution of the Elements, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **5**, 49, pp. 205-212.
- ELEISCHER, R.L. and P.B. PRICE (1963): Tracks of Charged Particles in High Polymer, *Science*, **140**, pp. 1221-1222.
- FLEISCHER, R.L., P.B. PRICE et R.M. WALKER (1964): Fission Tracks Ages of Zircons, *J. Geophys. Res.*, **69**, 22, pp. 4885-5888.
- MAURETTE, M., P. PELLAS et R. M. WALKER (1964): Étude des Traces de Fission Fossiles dans le Mica, *Bull. Soc. Franc. Miner. Crist.*, **LXXXVII**, pp. 6-17.
- MAURETTE, M. (1966): Étude des Traces d'Ions Lourds dans les Minéraux Naturels d'Origine Terrestre et Extra-Terrestre, *ibid.*, **LXXXIX**, pp. 41-19.
- PRICE, P.B. and R.M. WALKER (1963): Observation of Fossil Particle Tracks in Solids, *J. Appl. Phys.*, **33**, pp. 3400-3406.
- PRICE, P.B. and R.M. WALKER (1962): Chemical Etching of Charged Particle Tracks in Solids, *ibid.*, **33**, pp. 3407-3412.
- PRICE, P.B. and R.M. WALKER (1963): A Simple Method of Measuring Low Uranium Concentration in Natural Crystals, *Appl. Phys. Letters*, **2**, 23, pp. 23-25.

Explication de Planche 13

Traces de fission spontaées et induites révélées par l'acide phosphorique

- Fig. 1. Répartition zonaire des traces de fission fossiles dans le zircon de granit de Hiei, Kyoto Préfecture, $\times 900$.
- Fig. 2. Répartition homogène des traces de fission fossiles dans le zircon de granit de Yasuda, Hiroshima. Préfecture, $\times 900$.
- Fig. 3. Répartition des traces de fission d'uranium induites par l'irradiation neutronique sur le haut polymère "Panlite" plaqué sur le zircon montré à Fig. 2 gauche, $\times 900$.
- Figs. 4-6. Répartition complexe des traces de fission fossiles dans les zircons de gneiss de Senjughara, Toyama Préfecture. (Hida gneiss)
- Fig. 4. Répartition complexe en colonie, $\times 900$.
- Fig. 5. Répartition compexe en sablier (hour glass structure), $\times 900$.
- Fig. 6. Répartition complexe fluide, $\times 900$.



NAGAI, Étude des Traces de Fission dans le Zircon