総 説

〔26〕 パイル・ドシメトリー

早 川 宗 八 郎*

In-Pile Dosimetry

By Sôhachiro HAYAKAWA

This article reviews methods and procedures available for measuring dose and dose rate of neutrons, γ -rays and other nuclear radiations in nuclear reactors. The importance of in-pile dosimetry has hitherto been emphasized in radiation chemistry and biology, as well as in radiation damage research. Nevertheless it has not so far appeared hopeful to find an ideal method satisfying all the conditions demanded of in-pile dosimetry. The author and his coworkers propose some convenient procedures that should enable dosimetric measurements to be compared and discussed internationally as well as within one country.

I. パイル・ドシメトリーの意義

研究用原子炉の利用分野は、アイソトープの生産・核物理・固体物理・放射化学・放射線化学・放射線生物学など基礎応用両面にまたがる極めて広い分野を包含しているが、原子炉による放射効果による定量的知見を得ようとするとき、つねに問題となるのは試料が受けた線量の正確な決定である。 ^{60}Co γ 線照射施設・材料試験炉・化学原子炉⁽¹⁾でも当然同様の問題がある。原子炉による放射線は、エネルギー分布の広い中性子、 γ 線、それに種々の反跳2次粒子がまじりあって、複雑な組成をもっている。その上、原子炉内部における放射線強度の組成と量の空間的・時間的変化、原子炉の型式によるちがいが、それに加えて試料の性質・形状による放射線の遮蔽・減衰効果などが関連して、炉内で照射した試料の線量の正確な測定は不可能に近い。こうした理由のため、異なった原子炉で異なった照射条件で照射した試料の照射効果の相互比較は定性的範囲を出ない場合が多い。

通常、放射線化学や放射線生物学などの分野では、吸収された全線量が問題となり、また放射線損傷の研究では、高速または中間域速度の中性子の衝撃による原子の再配列が問題となるため、中性子エネルギー殊に高エネルギー域における正確なスペクトルが必要と

なってくる。しかしながら、吸収線量の正確な測定、中性子スペクトルの広い領域における測定など、すべて未解決の問題であって、今後の研究にかかっている。

原子炉による照射は、はじめは照射された試料の核的諸性質を問題とする段階にあったが、その分野より固体物理、固体化学の知見を必要とする分野に拡大され、原子炉が放射線損傷・放射線化学の研究に有力な武器として用いられている現在、統一されたパイル・ドシメトリー(In-pile Dosimetry, 原子炉内放射線量測定)の確立は、各研究所で異なった照射条件下で得られた測定結果の相互比較のための基本的課題である。

パイル・ドシメトリーの問題は国際的にもとりあげられ、ドシメトリーを主題にした会議⁽²⁾、研究用原子炉の利用を論じた会議⁽³⁾などで活発に討論され、その結果これら国際会議はパイル・ドシメトリーを議題とした専門家のパネル・ディスカッション⁽⁴⁾が開かれ、その現状の分析と将来の方向がとりあげられている。わが国における研究組織としては、日本原子力研究所高崎研究所の放射線化学研究委員会化学用原子炉分科会(主査大島恵一 東大教授)のワーキング・グループとして原子炉内線量研究会が1964年より調査研究を進めている。筆者もその一員として討論に加わったが、本稿もその研究会に依存したものである。

* 東京工業大学(Tokyo Institute of Technology)

II. パイル・ドシメトリーの問題点

1. 線量概念の問題点

線量測定の目的は電離放射線の物理的・化学的または生物的作用の原因となる初期的物理過程を定量的に決定することである。照射によりひき起される基本的物理変化として、物質による放射線エネルギーの吸収が考えられ、これが線量の定義になっている。しかし、電離放射線の物質へのエネルギー付与は、熱エネルギーの場合のように空間的に一様に分布されるのではなく、微視的な局在化した空間分布をもって行なわれる。すなわち、物質を構成する原子、分子と高速荷電粒子(γ 線や中性子のときは2次荷電粒子)との個々の非弾性衝突によって行なわれる。励起衝突・電離衝突の断面積は粒子の電荷・速度などによって著しく変化する。したがって、荷電粒子の通過によって作り出される励起分子・イオンなどの空間分布は、荷電粒子の種類・エネルギーによって異なる。この空間分布の状態は初期過程につづいて起る化学的過程・生物学的過程に大きな影響を与える。そのため放射線作用の開始の基礎になる現象の大きさを表すには、物質の単位質量が吸収した放射線エネルギー量(rad 数)と同時にエネルギー吸収の空間分布を言い添える必要がある。現在のところ普通この空間分布を表すのに LET (linear energy transfer)が使われている。すなわち、問題の物質が放射線から D erg/g の線量を受けとり、そのエネルギーは L keV/ μ の LET で与えられたということができれば、線量測定の役割を一応果たすことができたと考えられる。

LET の概念は、10数年来広く用いられ、飛跡密度効果の解釈などに非常に役立ったが、元来励起や電離などの量子的な不連続性の事象の集りである。放射線エネルギー付与を $-(dE/dx)$ のような連続的な平均量で置き換えるために生ずる不合理が、近年多くの研究者により指摘されるようになった。

物質の微小な部分に着目すると、同一種、同一エネルギーの放射線がそれを透過する際でも、飛跡ごとに付与されるエネルギー量は同一でなく、ある値の現われる確率がわかるだけである。統計的現象であって、これには“ゆらぎ”が問題となり、この“ゆらぎ”はまた着目する体積素片(test volume)の大きさにより変わる。つぎに、電離衝突により生じた高速の2次電子は親飛跡に分枝を作る(δ 線)。このような放射線エネルギーの付与形態の特質を考慮して、従来の巨視的な線量の定義の代わりに、問題としている放射線作用の起

る急所となっている分子的(または遊離基拡散程度の)素片をとり、このようなスケールで線量を定義する試みが行なわれてきた。Rossi らの提唱する ‘event size deposition’ ($Y=E/d$; E : Energy deposited per individual passage, d : Diameter of test sphere)⁽⁵⁾、織田らの提唱する TEIT (transferred energy per individual track)⁽⁶⁾などがその例である。

以上は、荷電粒子により作られる励起分子の種類、イオンの種類およびその比率が近似的に見て、荷電粒子の種類やエネルギーにあまり依存しないという事実に基づくものである。しかしながら、もしある種の作用がある種の放射線によって特性的に起るというようなことがあれば事情は変わってくる。中性子または重荷電粒子の照射の場合には、事実このようなことを考慮しなければなるまい。たとえば、中性子の共鳴捕獲とか反跳効果、核変換効果などは当然問題となろう。このような点まで考慮して線量の意味を考えると、着目する放射線作用に関与する初期過程の認識と線量概念とは切り離せないもので、線量の定義そのものも放射線作用の研究の進歩とともに内容が深められて行くものであろう。

「炉内線量測定」といったテーマの根本には、線量自体に対してもこういう問題を抱えていることを強調しておかなければならない。しかし、現状ではこの議論をさしおいて、まず、便宜的な方法の確立という線に主題があると見なしてよいであろう。

2. 線量測定法の問題点

パイル・ドシメトリーに課せられている条件の主なものを以下に示すが、これらはすべて完全には解決されてはいないし、また問題によってはきわめて困難なものもあろう。これらの条件は、大部分今後の研究にまたねばならないものであり、それらがパイル・ドシメトリーの問題点でもある。

- (1) 対象とする被照射試料となるべく同じ条件で原子炉内に設置できること 炉内の諸状況とくに中性子分布を著しく歪めるような検出器では、被照射試料とは異なった条件になる。検出器の大きさ、材料など配慮する要があり、また、試料との相互関係によっても変わってくる。
- (2) 混合放射線の分離測定 きわめて広いエネルギー領域にわたる多種の放射線によって照射を受けるが、それぞれの効果の大きさは異なる。もちろん精細なスペクトル測定を時間的空間に追尾すれば問題はないが、これはただ繁多というよりむしろ至難というべきである。せめて速中性子・熱中

性 γ 線の3種についての線量測定が望まれる。なお吸収エネルギーで表示する以外、各種放射線の線量単位をどう画一化するか、が基礎的問題として存在する。

- (3) 核分裂片による効果に対する分裂片線量(吸収エネルギー)の測定 原子炉化学や原子炉材料の研究進展に伴って、分裂片による化学反応や固体損傷が興味を持たれてきており、その基礎データとして分裂片線量の測定が要望される。
- (4) きわめて高い線量率下での測定ができること 通常の線量検出器には線量率依存性がある。とくに高線量率で確実に利用しうるか、また高線量による放射線損傷放射化などによる時間的安定性はどこまで期待できるか、が問題となる。
- (5) その他炉内条件に耐え、長時間測定に適した安定性を有すること 材料の物性が安定であることは、場合によっては放射線化学反応の測定とは相反することがある。また、とくに高温下で気体電離型検出器の安定性などの問題がある。
- (6) 操作はなるべく簡便で、得られた結果の意味が明確であること 微視的な意味はともかく巨視的には何を測定したものであるか、わかりやすく、かつ他の原因による誤差が少ないことが望ましい。

上記の諸条件を満足する方法があれば、放射線効果の議論もきわめて明確になり、線量測定の国際的提携も安易である。現在、この方面の研究者がもっとも腐心するのは、その満足な方法へいかに近づきうるかである。それにはまず、数種の方法の比較、代表的標準物質の選択およびそれらの測定による比較、あるいはその後結果を検討して、近似的ではあるが普遍的で簡便な測定法の確立などが考えられよう。

Ⅱ. パイル・ドシメトリーの方法

線量測定の方法は大別して、つぎの2種が考えられる。

- (1) 線量率または中性子束密度の連続測定(熱量計・電離箱・ガスループ・自己出力型検出器など)
- (2) 速中性子・熱中性子などの束密度の時間積分測定(放射化法または核分裂検出器)

ここでは、パイル・ドシメトリーとして採用されている方法および開発中の方法について概要を紹介する。

1. 放射化法⁽²⁾

(1) 速中性子の

通常用いられる³¹P, ²⁷Al, ³²S, ⁵⁹Ni, ⁵⁴Fe, ⁶³Cuなどのうち、パイル・ドシメトリー用としては半減期の短い

前3者は不適である。しかし、⁵⁸Ni(n, p)⁵⁸Co(71 d)は⁵⁸Coが熱中性子で burn-up するので 10^{14} n/cm²·sec以上の熱中性子束密度では、半減期と burn up が同程度になり測定に支障を起す。⁵⁴Feは濃縮が不十分であると、⁵⁸Feの熱中性子放射化によって生ずる⁵⁸Feの放射能と区別する問題が生ずる。

⁶³Cu(n, α)⁶⁰Co (半減期 5.24 y)

は、しきい値が高いことを除けばもっとも有効である。最近では⁴⁶Ti(n, p)⁴⁶Scも有望視されており、burn-up や熱中性子放射化の問題などもないが、断面積の知識がまだ完全ではない。また、²³⁸U, ²³²Th, ²³⁷Np, ²⁴¹Amの(n, f)反応も利用できる。アメリカでは²³⁸Uと全エネルギー中性子に感ずる²³⁹Puの相対的放射化に基づく方法を提案している⁽³⁾。

(2) 熱外中性子

現在のところ良好な方法は発見されていない。通常用いられるCd比法には、中性子束の低下と1/E分布を仮定する点に難点がある。Cd比法と共鳴吸収による放射化のモニタリングを併用する法が考えられるが、例は少ない。パイル・ドシメトリー用の放射化としては

¹⁸⁷Au 共鳴エネルギー 4.9 eV

生成物の半減期 64.8 hr

⁵⁹Co 共鳴エネルギー 132 eV

生成物の半減期 5.24 y

が用いられよう。短時間の照射であれば、異なるエネルギー特性をもつ2種の同時放射化を利用することができる。Au-Cu, Ag-Co, Na-Pなどが考えられる⁽⁴⁾。

便利な計算方法として McElary のものは1つの代表である⁽⁵⁾。いろいろなスペクトルに対する実効断面積を表にまとめたものであるが、それによって多数の共鳴吸収による放射化を比較し、実験値ともっとも合うスペクトルを見出すことができる。

(3) 熱中性子

長時間高い中性子束の中で通常用いられる反応は

⁵⁸Co(n, γ)⁶⁰Co

であって、 10^{20} n/cm²·sec 以下の中性子束であれば burn-up の補正は必要としない。純金属で用いるのがよいが、放射化を制限する必要があるときは Al-Co 合金を用いることができる⁽¹¹⁾。カナダでは NRX 原子炉において、Co による中性子束測定が詳細に行なわれた⁽¹²⁾。

短時間の照射であれば、Au, Dy, In, Coなどが用いられる。とくに霧出力の炉内のように弱い中性子束の測定には In, Dy がよい。

開発中の方法として、Maxwell 分布の温度測定を $1/v$ 検出器と熱中性子域に共鳴吸収をもつ検出器を組み合わせて行なう方法がある。たとえば、 ^{197}Au – ^{175}Lu の組合せなどが考えられる。また、短い半減期の放射化(Rh, Si, V など)でも生成物の β -emitter を利用して連続測定を可能にする自己出力型検出器(selfpower detector, 後出 III, 5.)が研究されている。

2. 熱量計⁽¹³⁾

(1) 発熱の計算

発熱の原因は、① γ 線、② 速中性子の散乱($10\sim 0.1$ MeV)、③ 核反応および放射化物質の生成である。③は熱中性子・熱外中性子によって起されるが、熱量計による測定は原子炉内では $10^{-8}\sim 10\text{ W}\cdot\text{g}^{-1}$ ($10^{16}\sim 10^{20}$ eV/g·sec, $10^2\sim 10^6$ rad/sec) に応ずる必要があり、この程度の発熱が測定の対象となる。

γ 線に対するエネルギー吸収率(eV/g·sec):

$$\epsilon_\gamma = \int I(E) \mu(E) E dE \quad (1)$$

I : γ 線束 ($\text{n}/\text{cm}^2\cdot\text{sec}$), E : γ 線エネルギー (eV)

μ : 質量エネルギー吸収係数 (cm^2/g)

中性子の弾性散乱によるエネルギー吸収率:

$$\epsilon_n = \frac{N}{A} \frac{2A}{(A+1)^2} \int \Phi(E) \sigma_s(E) E dE \quad (2)$$

Φ : 中性子束 ($\text{n}/\text{cm}^2\cdot\text{sec}$)

E : 中性子エネルギー (eV)

σ_s : 散乱断面積 (cm^2)

N : 質量数 A の原子の単位質量中の数 (n/g)

多くの場合 $\Phi(E) = \lambda/E$ が仮定されて、

$$\epsilon_n \propto \frac{1}{(A+1)^2} \int_0^{2\text{MeV}} \sigma_s(E) dE \quad (3)$$

によって計算される。各原子についての数値計算は代表的な場合について多くなされている⁽¹⁴⁾。任意物質の γ 線および中性子エネルギー吸収をいくつかの標準物質中の吸収を基準にして計算することができる。

(2) 測定の原理と実際

熱容量 C の物体に放射線・中性子が照射したため生ずる熱量 dQ は、一部は物体の温度上昇 dT と外部への輻射または伝導による散逸になる。物体の温度を T , 外部の温度を T_0 とすれば、

$$dQ = CdT + \kappa(T - T_0) dt \quad (4)$$

κ は熱伝達の係数で、 $\kappa(T - T_0)$ は外部への散逸を意味する。2 種の測定法がある。

測定法 I 断熱法(adiabatic method): $\kappa \approx 0$, すなわち断熱条件のもとでは、 $dQ = CdT$ となり、これを積分して $\Delta Q = CAT$ 。外筒と試料とが等温度を保つように外筒の温度を追尾制御して、試料の温度上昇 ΔT

から ΔQ を求める。

測定法 II 等温法(isothermal method): κ が有限でも T_0 を一定として定常状態を $dT/dt = 0$ とれば、

$$T - T_0 = (1/\kappa) (dQ/dt) = q/\kappa \quad (5)$$

となり、温度上昇は発熱の rate q に比例する。前述の吸収率とはつぎの近似的関係で結ばれている。

$$q = \sum_i m_i (\epsilon_{\gamma i} + \epsilon_{n i}) \quad (6)$$

m_i : i 成分の試料中の含量(g), $\epsilon_{\gamma i}$, $\epsilon_{n i}$: それぞれ i 成分の γ 線および中性子のエネルギー吸収率。

測定法 I は弱い線量率でも積分値が得られるが、断熱操作が充分でないと誤差は大きくなる。測定法 II は定常に近い時間変化のあまり大きくない強い線量率に用いられる。いずれも $\pm 5\%$ の誤差以内の測定は必ずしも容易でない。

測定の 1 例を第 1 表に示す。BEPO における断熱法による測定結果である⁽¹⁵⁾。速中性子および γ 線による寄与は計算から得た値で、実験と計算との一致は約 5% である。その他、断熱法による実験⁽¹⁶⁾、等温法による実験⁽¹⁷⁾とも数篇の報告がある。また、2 種の物

第 1 表 熱量計によるデータと解析(BEPO)⁽¹⁵⁾

物 質	吸収エネルギー (eVg ⁻¹ /n·cm ⁻² ×10 ⁻⁴)			
	測定値	速中性子の寄与	γ 線の寄与	核反応の寄与
H	28.7	25.9 (90%)	2.83 (10%)	
C	7.30	5.8 (80)	1.40 (20)	
(C ₂ H ₂) _n	5.62	3.99 (70)	1.63 (30)	
H ₂ O	4.68	3.09 (66)	1.59 (34)	
D ₂ O	2.86	1.43 (50)	1.43 (50)	
Be	2.02	0.76 (37)	1.26 (63)	
BeO	1.91	0.53 (28)	1.38 (72)	
C	1.77	0.34 (19)	1.43 (81)	
O	1.77	0.34 (19)	1.43 (81)	
Al	2.36	0.40 (22)	1.41 (78)	0.55
SiO ₂	1.91	0.36 (20)	1.45 (80)	0.10
S	2.04	0.40 (21)	1.47 (79)	0.17
Fe	2.20		1.40 (100)	0.89
Zr	1.68	0.15 (10)	1.40 (90)	0.13
Pb	1.64		1.71 (100)	
Bi	1.73		1.73 (100)	

質の発熱の差を伝導法で測定する方法もあり、きわめて強い線量率の場合などに適用できる⁽¹⁸⁾。

3. 電離箱

パイル・ドシメトリ用電離箱に要求される条件は、①サイズの小さいこと、②原子炉内で長時間使用に耐えること、である。とくに②については、絶縁体など電気材料の特性の劣化に注意を要する。

空洞電離の原理に従えば、媒体のエネルギー吸収率 (eV/g) を ϵ_M とし、その中に空洞を考え、気体の gram あたりのイオンの生成数を J_0 とすれば、

$$\epsilon_M = J_0 W (\rho_M / \rho_0) \quad (7)$$

W : イオン対生成に要する吸収エネルギー, ρ : 放射線阻止能(単位質量あたりの dE/dx)。 $\rho_M \div \rho_0$, すなわち媒体と気体の原子構成が同じであれば

$$\epsilon_M = J_0 W \quad (8)$$

(1) 電離電流と吸収エネルギーとの関係

γ 線と速中性子(反跳粒子による電離)と双方の効果を空洞電離の理論を用いれば、 γ 線と中性子双方に対して $\rho_M = \rho_0$ を仮定して

$$\epsilon_M = \epsilon_{M\gamma} + \epsilon_{Mn} = J_{0\gamma} W_\gamma + J_{0n} W_n \quad (9)$$

となる。 $\epsilon_{M\gamma}$, ϵ_{Mn} の比率を半経験的に物質ごとにきめておけば、電離電流 $J = J_{0\gamma} + J_{0n}$ から ϵ_M がきめられる。この際、① W_γ , W_n がそれぞれ γ 線、中性子のエネルギーに対して一定であるか(LET 効果), ②極端に高い線量率の下で電離イオンの捕集はどうなるか(再結合損失効果), が問題となる。再結合による損失については種々の理論があるが⁽¹⁹⁾, 10^7r/hr の γ 線が 1 気圧の空气中で電離した場合でも、80% くらいまで捕集できるといわれている。

電離へのエネルギー寄与の配分として、たとえば、つぎのような経験的結果とその応用が提唱されている⁽²⁰⁾。黒鉛を基準により、 γ 線・速中性子からの寄与をそれぞれ A, B とし、同じ条件下の照射で他の物質についての係数がきめられる。($\epsilon_{0\gamma} = A$, $\epsilon_{0n} = B$)

黒鉛 C	$A+B$
ポリエチレン (C_2H_4) _n	$1.143A + 9.11B$
ポリスチレン (C_8H_8) _n	$1.075A + 5.38B$
ベリリウム Be	$0.888A + 1.95B$

しかし、全く同じ物質 ($\rho_M = \rho_0$) で電離箱を構成することはできないので、原子構成の似た物質で代用するほかはない。現在考えられている組合せとしては、

壁材料	気体
黒鉛(C)	炭酸ガス(CO_2)
ポリエチレン(CH_2)	エチレン(CH_2)
ポリスチレン(CH)	アセチレン(CH)

感度としては、 $10^{-8} \sim 10^{-9} \text{A/mW} \cdot \text{g}^{-1}$ の程度のものが設計されている。黒鉛壁電離箱では 10^3mW/g の吸収線量率まで用いられ、 500°C でも使用可能である。

(2) 黒鉛壁電離箱

カナダの NRX で用いられたこの型の電離箱について述べる⁽²¹⁾。炭酸ガスを封入した黒鉛の電離箱は石英管の中に封入されている。校正は ^{60}Co 線源を用い、約 0.75mW/g の線量率の下で硫酸第一鉄線量計と比較測定された。その結果は 5% 以内で一致した。飽和電流の測定は Boag の方法が用いられた。

この電離箱は 0.5W/g の線量率で $10^{14} \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ の熱中性子束の下で繰返し $10 \sim 20 \text{min}$ 照射されたが、較正值は変化せず、ケーブルや電離箱への損傷も認められなかった。黒鉛のエネルギー吸収率は 67mW/g と算出されたが、熱量計による同時測定では 72.3mW/g で、電離箱による値が低いのは、反跳した炭素イオン・酸素イオンに対する W 値も γ 線や 2 次電子に対するものと同じと仮定したこと起因すると思われる。

4. 化学線量計

原子炉用化学線量計の条件としては、①放射化され難いこと、② 10^6rad の吸収線量が測定し得ること、③照射中の温度上昇によって収率が変化しないこと、④ 10^5rad/sec 程度の領域まで収率が線量率によって変化しないこと、⑤ LET の広い範囲に対して収率が変化しないこと、が考えられる。これらを比較的満足するものとして、Fricke 線量計やシュウ酸水溶液などが研究されている。

(1) シュウ酸水溶液線量計⁽²²⁾

この線量計の特色は、市販の薬品を用いればとくに精製の必要がなく、光によって反応せず放射化されない。また、線量領域 $1.6 \sim 160 \text{Mrad}$, 線量率 10^{10}rad/sec , 80°C 以下では G 値は変化しない。

線量はシュウ酸の分解量(濃度変化 ΔC)から求められるが、これが 30% 以上では関係は複雑で、30% 以下では $-\Delta C = 6.08 (\pm 4\%) \times 10^{18} \text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4/\text{g/MWh}$, また $G(-\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4)_{\text{plis}} = 4.39 \pm 10\%$ がユーゴの RA 10 MW 研究炉(2%濃縮ウラン重水炉)において得られている。

$$G(-\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4)_{\text{plis}} = f_\gamma G_\gamma + f_n G_n \quad (10)$$

係数 f は熱量計測定などで決定され、 G_γ として ^{60}Co による照射実験値 $G_\gamma = 4.90 \pm 1.5\%$ を用いれば、 $G_n =$ (実質的には反跳陽子による G 値)の値として 3.3 が得られる。

(2) シクロヘキサン線量計⁽²³⁾

シクロヘキサンの放射線照射の H_2 発生の収率は LET 依存性が小さく、有効 $G(\text{H}_2)$ は速中性子と γ 線

の比率がどう変わっても、原子炉放射線に対して約5%以内で不変とみなされる。

シクロヘキサン試料(2~8 m³)は真空中で凍結排気してガス抜きし、石英カプセルに封入して照射される。 $G(H_2)$ の線量依存性を炉内で200および2,000 mW/gの場合について調べ、 ^{60}Co 線源の1 mW/gの場合と比較した。シクロヘキサンへのエネルギー付与は $1 \times 10^{20} eV/g$ の線量のとき $G(H_2)=5.2$ を用いると、熱量計による測定とよく一致した。

(3) 酸化チタン線量計⁽²³⁾

アメリカで研究開発されつつある化学線量計で、 N_2O_2 の分解が照射量に比例して起り、その分解生成物の $N_2:O_2:NO_2=1.0:0.14:0.48$ の比率が照射量に依存しない特性が利用されている。これは γ 線でも混合放射線に対しても、吸収線量 $10^6 \sim 10^{10} \text{ erg/g-carbon}$ の範囲で用いられ、温度依存性($-19^\circ \sim 120^\circ C$)が小さく、圧力にも依存しないことが報告されている。

5. 自己出力型中性子検出器(self-powered neutron detector)

中性子による放射化生成物が β -emitterであるとき、この β 線放出による電流を測定する小型の検出器で、動力炉内の中性子束分布の測定にも用いうる。また、原理的には放射化法なので、絶対測定にも適している利点がある。

検出器の電極の一方を放射化されて β 線を射出する導電物質で作り(エミッタと呼ぶ)、これを同軸ケーブルの芯線につなぐ。他の電極(コレクタと呼ばれる)は同軸ケーブルの外筒のアース線につなぐ。射出された β 線は両電極間の絶縁物を通してコレクタに到達し電流として観測される。この電流は、コレクタが β 線を射出しない物質であれば、エミッタの中性子吸収量に比例する。効率は β 線のエネルギー、絶縁物の厚さ、エミッタの厚さや電極の幾何学的構造によってきまる。

(1) 自己出力型の特徴

計数管方式の炉内中性子束のモニタとしては、小形のホウ素計数管、核分裂計数管、中性子熱電対や半導体検出器があるが、これらに比較しこの検出器の特徴というべき点を列挙すると、つぎのようになる。

- 構造が簡単で堅牢、かつ小形化が容易で安価なこと。
- 外部電源が不要で、計数管のような電流飽和がおきない。
- 高速中性子束の測定も可能である。中速中性子に対しても同様である。
- 温度の変動による影響を受けない。温度の上

限は絶縁抵抗が電流測定装置の入力抵抗と同程度になる温度できまる。

- 幾何学的構造が簡単にきめやすく、また再生しやすいので、測定の比較が容易である。
- 放射化箱と同様の原理を用いているので、測定結果から中性子束を直接に求めることができる。また使用しうる物質の選択範囲が広い。ただ絶対測定も可能であるが、補正すべき項は多くなる。

しかし、一般に放射化によって生じた β -emitterの特定数が長いので、これで応答性が制限され、炉制御用には適切でない。

(2) 自己出力型検出器の実例(Rh, V検出器)

エミッタ、コレクタ、絶縁物の材料として期待される物質と諸定数を第2表に示す⁽²¹⁾。半減期が数minのものはとくに実用的であろう。 ^{51}V と ^{103}Rh を用いた検出器が、カナダではすでにAECLの炉内中性子束のmappingなどに広く使用され始めたので、これを紹介しておこう⁽²⁵⁾。マグネシアがつまった共軸ケーブルの芯線の端を約30 mmだけバナジウムまたはロジウムで置きかえて作られている。ロジウムは半減期42 secの ^{104}Rh を、バナジウムは3.8 minの ^{52}V を生ずる。MgO絶縁の検出器は $360^\circ C$ に達する温度で $10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ の高い中性子束の中で1年以上も使用されている。代表的なRh検出器(長さ30 mm, 外径1.2 mm)は $10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$ の熱中性子束中で $0.3 \mu A$ の出力を生ずる。応答時間は約1 minである。

6. 放射線損傷を利用する線量計

ここに述べるものは、ほとんどがまだ開発研究中、あるいはさらにその前駆段階にあるものなので、方法を列記し紹介するにとどめる。主として、速中性子による損傷を測定するものを(n)、核分裂片・核反応による反跳粒子・重荷電粒子で起る現象にもとづくものを(c)、 γ 線やX線に感度の高いものを(γ)と記載しておく。

- 雲母のetch track(c)⁽²⁶⁾ アメリカのISPC(Irradiation Standard Procedure Committee)が進めている簡便安価な中性子検出器で、雲母に分裂片がつくるetch trackを計数する。
- 鋼のnil ductility 温度変化(n)⁽²⁷⁾ Rossiが放射線損傷単位線量(radiation damage unit)の導入に利用した現象で、分裂中性子の平均効果が現われる。
- 電気伝導度の変化(n)⁽²⁸⁾ タングステンのような金属もゲルマニウムのような半導体も用いられ

第2表 自己出力型検出器の材料⁽²⁶⁾

コレクター	絶 縁 物	エ ミ ッ タ					
		原 子	断面積 (barn)	最低共鳴 エネルギー (eV)	捕獲生成物 半 減 期	β スペクトル 端点 (MeV)	パルサントー レート(10^{13} n/ cm ² /sec 束)
マグネシウム	ポリスチレン(70°C)	²⁷ Al	0.241		2.30min	2.87	0.0076%/g
アルミニウム	ポリエチレン(100°C)	⁵¹ V	4.5		3.76min	2.6	0.012%/mon
ニ ッ ケ ル	ポリプロピレン(140°C)	¹⁰³ Rh	149	1.26	4.4min→42sec (8 %)(92%)	2.44	0.39%/mon.
チ タ ン	マイラー(160°C)	¹¹⁵ In	191	1.46	54.2min 13sec (81%)(19%)	1.03, 3.29	0.50%/mon.
ジルカロイ	テフロン(250°C)	$\left\{ \begin{array}{l} ^{109}\text{Ag} \\ ^{107}\text{Ag} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 78 \\ 31 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 5.20 \\ 16.5 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 24.2\text{sec} \\ 2.3\text{min} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 2.87 \\ 1.56 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 0.23\%/mon. \\ 0.081\%/mon. \end{array} \right.$
インコネル	テフロン(250°C)	⁵³ Mn	13.2	337	2.58hr	2.86	0.035%/mon.
ステンレス鋼	BeO } MgO }	²⁸⁸ U	2.71	6.68	2.35min	1.21	0.007%/mon.
	Al ₂ O ₃ } SiO ₂ }	²⁸⁵ U	582 (核分裂)	0.273	(分裂生成物)	(複 雑)	1.8%/mon.

る。Ge は損傷により acceptor の密度が高くなるので、n-型 Ge の電導度の照射による低下を線量測定に利用する。

(4) 石英の密度変化(n) これに伴って X-cut 結晶の周波数共鳴値が変化するので、感度よく検出する方法もある。

(5) 着色および脱色(γ)⁽²⁹⁾ 着色を利用することが多いが、無機結晶ではアルカリ・ハライド、Mg(PO₃)₂ など、無機ガラス(リン酸ガラス、シリカガラス)、高分子物質(PVC、ポリエチレンなど)が用いられる。脱色にはアゾ色素などを入れたプラスチックが多い。線量にして $10^2 \sim 10^{10}$ r の範囲に有効である。

(6) 螢光の発輝(n, γ)⁽³⁰⁾ シンチレータのように放射線の照射で発光するものと、銀付活リン酸ガラスのように照射によって紫外線励起発光を示すようになるものとある。(5)、(6)ともに annealing されるので注意を要する。

(7) 熱ルミネセンス(thermoluminescence)(γ)⁽³¹⁾ 無機・有機・生体物質などきわめて多くのものが放射線熱ルミネセンスを示すが、線量計として用いられるのは、常温以上に発光する深いトラップのある CaF₂(Mn)、CaSO₄(Mn)などに限られる。

7. 線量計算と照射単位

放射線化学や損傷の測定をする場合、実験では照射条件の違いや試料の相違や原子炉の多様の種類によって得られた実験結果を比較したいが、そのとき共通の、または比較できる照射単位の設定が望まれる。ここでは、例として Hanford で速中性子照射を測定す

るのに採用した方法と照射単位について述べる。

(1) スペクトル計算

放射化モニタのエネルギー範囲について、実効断面積を得るのにスペクトルが必要となる⁽³²⁾。実効断面積はつぎのように定義される。 $\phi(E)$ は中性子束分布、 $\sigma(E)$ は放射化断面積、 E_t は中性子エネルギーのしきい値である。

$$\sigma_{\text{eff}} = \frac{\int_0^{10\text{MeV}} \phi(E) \sigma(E) dE}{\int_{E_t}^{16\text{MeV}} \phi(E) dE} \quad (11)$$

ほとんどの threshold monitor は 3 MeV 以上の中性子で放射化されるが、計算では 1 MeV かそれ以下までかなりの寄与をする。

(2) コード選択

GNU-II (拡散理論; 中性子散乱はその下のエネルギーグループだけに減速)、HFN (拡散理論; 散乱はすべてのエネルギーグループに減速)、GE-HAPO-S-X (輸送理論; 中性子流および散乱の空間異方性を考慮) の 3 種のコードでスペクトル計算を行なっている。HFN は GNU-II にくらべ、黒鉛減速系における放射線損傷に重要な 3 MeV 付近の flux depression が現われる。S-X は境界付近の計算と軽水減速系の計算に有利である。コードの比較を $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}(E > 0.18 \text{ MeV})$ についての計算で行なった結果、GUN-II と HFN との差は 25%、HFN と S-X との差は 3% であった。以後 S-X が用いられている。

(3) 炉内モニタ

複雑な geometry では、2次元のコードを用いる必要がある。GETR と ETR の Ni と Fe モニタに対する

σ_{eff} の計算値が示され、実験から得た照射量は Ni と Fe でよく一致した。しかし、他の炉ではあまり一致しなかったが、それは、Fe の放射化断面積が不確かなためであるといっている。

(4) 中性子照射単位

放射線損傷の実験に対する中性子照射単位として、gross displacement production に比例するような積分中性子束(あるエネルギー E_L 以上をとる)を提案している⁽³³⁾。 E_L は

$$D(E_L) = \frac{\int_0^\infty N(E) \sigma_s(E) \phi(E) dE}{\int_{E_L}^\infty \phi(E) dE} \quad (12)$$

の値が、代表的な数種のスペクトルに対してほとんど一定であるように選ばれる。 $N(E)$ はエネルギー E の中性子によって作られる displacement の数、 $\sigma_s(E)$ は弾性散乱断面積である。 $N(E)$ を Kinchin の方法⁽³⁴⁾で計算し、分裂スペクトル、ETR スペクトルおよび黒鉛炉のスペクトルについて Fe の $D(E_L)$ を求めた結果、 $E_L = 0.4 \text{ MeV}$ が得られた。 $N(E)$ の計算法を変えても E_L は 10% 以内で定まる。したがって Fe の場合、 $\phi(E \geq 0.4 \text{ MeV})$ が中性子照射単位となる。この単位の採用が推奨されるためには、多くの実験的背景を必要としよう。

IV. 方法の検討と今後の方針

1. 線量測定法の総括的検討

(1) 原子炉の特性

放射化の実験ははじめ諸種の線量測定法は、それ自体ではそう困難なことではない。原子炉内での照射実験を行なった場合の線量としてどう取り扱うかが問題である。その難点の一部は、放射線の場の時間的空間的変動に起因している。

空間的変動は 3 つの要因、すなわち、①分布の勾配、②遮蔽効果、③depression による。①は主として原子炉に、②、③は測定系によって影響される。

時間的変動はつぎの要因、すなわち、①制御装置、②出力による放射化の増大、③燃料の burn-up と分裂生成物による poisoning が主なものと考えられる。

空間的変動による誤差を減らすためには、①炉内の照射試料と同じ場所に、②同じ遮蔽効果と depression を示す検出器を設置することができれば満足である。

また時間的変動を処理するには、①線量率または束密度の連続測定(熱量計、電離箱、自己出力検出器などを用いる)、②放射化または分裂箔を用いての速中性子および熱中性子束密度の時間積分、の両方につき 2

種の方法を併用して誤差を減小させるようにする。

(2) エネルギー付与過程

照射された物質へのエネルギー付与は、原子炉内では主としてつぎの 4 種の過程による。① γ 線の吸収(しかし炉内の γ 線のエネルギー分布はまだよくわかっていない)、②速中性子の散乱(10~0.1 MeV のエネルギー範囲が問題である、この範囲のスペクトルは計算によるしかないが、約 2 MeV 以上ならば threshold detector で検討しよう)、③核反応((n, p) , (n, n) , (n, f) , (n, γ) など)による即発粒子・即発 γ 線の吸収、④核反応生成物の放射線の吸収(③、④は速中性子よりむしろ熱中性子や熱外中性子によって起る)。

注目する原子炉内線量に伴う現象が、これらのいずれに依存するかはきわめて本質的である。線量測定法もこの観点から考慮されねばならない。エネルギー付与の rate は通常 10^{-3} ~ 10 W/g である。

(3) 照射条件の定義

放射線の質と量がきめられれば問題はない。質は種類とスペクトルで定義できる。量に対しては、①炉内のある場所での中性子、 γ 線などの束(あるいは流れ)を定義するか、②被照射物質に関して吸収線量(エネルギー)または吸収線量率を定義するか、の 2 種がある。被照射物質として何か標準物質を選んで、これを基準とすることもできる。その場合、その物質だけによってきまり、形・大きさに影響されないよう選ぶことが望ましい。

2. IAEA パネルの結論⁽⁴⁾

はじめ(I-1)に述べたように、パイル・ドシメトリの重要性にもとづいて 1964 年 6 月 IAEA の主催で各国からの少数の研究者によって、非公式なパネル討論が行なわれた。その結論の報告の中で、IAEA および各研究者へつぎのような要請を示唆している。

(1) IAEA への要請

- a. 中性子束測定 一般に放射化検出器が用いられるので、IAEA で実際上の知識を与えるハンドブックを作成し、つぎのような事項を盛り込んでほしい。①最純度の放射化物質の供給源のリスト、②対象とする核種の計数方法の技術の報告、③中性子束測定の各操作の技術的報告。

放射線損傷の分野では、keV の領域の中性子が問題となるので、その測定法の開発を促進してほしい。

Ni は速中性子用に広く用いられているので、 ^{58}Co と $^{59}\text{Co(m)}$ の burn-up の推定に必要な、熱および熱外中性子に対する正確な断面積の測定

を推進してほしい。

- b. 線量測定 まず、原子炉内の線量測定法と応用に関するハンドブックを編集してほしい。つぎに照射条件の定義のために用いられる2種の標準物質をきめてほしい。それは純粋な物質が得られ、種々の方法に適用できることが条件で、1種は黒鉛で他の1種は速中性子散乱の著しい低原子番号物質を選ぶのがよい。

標準物質に対する標準測定法としては、熱量計・電離箱・化学線量計のいずれか、または組合せがよい。

- c. 標準化 IAEA はパイル・ドシメトリーに関連する同位体の製造と配布について、世界中の各研究所の協力を懇請してほしい。その結果を総合し、つぎの段階として、標準検出器に対しての仕様(大きさ・放射能・精度など)を確立してほしい。協力研究所として Euratom, フランス, ソビエト, アメリカ, イギリス, カナダ, 西ドイツの各1を挙げ、IAEA 研究所(Seibersdorf)を加えている。

- d. 装置と方法の相互比較 異なった原子炉での装置や操作の間の相互比較がなされる必要がある。そのためには高い断面積の物質の大きい負荷のない原子炉が適している。このような炉は原子力開発中の国に多く見出される。threshold detectorの場合は、相互比較は分裂スペクトルに近いスペクトル(転換炉や水減速炉の燃料プレートの間など)で数種の検出器の同時照射をすればよい。

- e. 中性子および γ 線スペクトルのカタログ 照射施設中の中性子スペクトルを知ることは重要で、現在の種々の型の原子炉についての情報を集録するよう要請している。とくに①スペクトルの計算結果(用いたコードと断面積)、②測定法と測定結果(なお計算値との比較)に関する情報がほしい。 γ 線スペクトルの計算あるいは測定値のカタログができればなお幸いである。

- f. シンポジウムの開催 IAEAの肝入りでパイル・ドシメトリーと炉スペクトルに関する会議を1965年末か1966年に開いてほしい。(予算の都合で1967年に延期された模様である。)

- g. 術語 ICRUと協力して、この分野での術語、定義、単位について討議することが望まれる。

(2) 個々の研究者への要請

まず、実際の照射物質の吸収エネルギーの直接測定は積極的に行なってほしい。そして照射条件(燃料要素の配置、炉の負荷など)の正確な知識は必ず記録す

る。中性子束測定については、もっと完全な知識が得られるにつれて再解析される必要が起る。最低の要求として①標的核1gあたりの飽和放射能の測定値についてのoriginal dataを記録しておく、②計算に用いた断面積(たとえば共鳴積分断面積、平均核分裂中性子断面積、有効中性子断面積)の値と出典、③Cd比測定の際はCd被覆の型の大きさの記載とカットオフエネルギーの用いた値を記しておくことが勧められている。

2. 原研高崎研の炉内線量測定研究会の結論⁽⁸⁵⁾

研究会での約2年の討論を通じて、放射線化学・医学・生物学また放射線損傷の研究の基礎として、炉内線量測定の重要性と問題点を確認し、中間的結論として、今後のわが国での研究の方針を示唆している。

(1) 測定法の開発と規格化

- a. 中性子束測定 速中性子、熱中性子の2種あるいはこれに熱外中性子の3種に分類し、放射化法と自己出力型検出器の規格化を進める。とくに自己出力型検出器は連続モニタリングに適するので、この方法の開発に力をそそぐ。

- b. 吸収線量測定 効果を中性子と γ 線による寄与に分類し、それぞれの効果を異にする物質を標準試料に選択する。

標準試料物質としてつぎの3群のうちそれぞれ1つずつを選ぶことをきめたい。Ⅰ. ポリエチレン、ポリスチレン(水素化合物)、Ⅱ. 黒鉛、Ⅲ. 鉛、ビスマス(重金属)。測定法として熱量計および電離箱が適当と思われる。なお、これに放射線化学用のモニタとしてLET効果の少ない使用簡便な化学線量計の開発も意味あるものと思われる。

(2) 照射条件の規格化

実際の原子炉内の中性子・ γ 線のスペクトル・分布についての精細な知識があれば、これに越したことはないが、一般に全く不十分である。標準物質による吸収線量測定は中性子と γ 線の寄与を配分することができる。さらに、中性子束測定によって中性子スペクトルの概要を知ることができ、これと計算とにより吸収線量を各中性子領域に配分することができる。この方法を規格化しておけば、異なった原子炉で異なった条件下の放射線効果も比較できることになり、当初の目的をある程度果たすことができる。

- (3) パイル・ドシメトリーに関する国内の組織化をすすめる、国際協力体制を確立する必要がある。

日本原子力研究所の放射線化学研究委員会の原子炉内線量測定研究会(主査 東大 大島恵一 教授)のメンバ

一の方々に深謝の意を表します。

(1966年 5月9日 受理)

— 参 考 文 献 —

- (1) M. STEINBERG: *Advan. Nucl. Sci. Technol.*, **1**, 248 (1962); 大島恵一, 内藤奎爾: 化学工業, **12**, 247 (1964); 早川宗八郎: 機械誌, **68**, 800 (1965).
- (2) *Symposium in Selected Topics on Dosimetry*, Vienna (1960); Proceedings published by IAEA., (1960); *Symposium on Neutron Dosimetry*, Harwell 1963; Proceedings published by IAEA., Vol. I, II, (1963).
- (3) *Symposium on Utilization of Research Reactors*, Vienna 1960, Proceedings published by IAEA, *Tech. Rept.*, Series No.17.
- (4) *Panel on In-pile-Dosimetry*, Vienna 1964, (IAEA), *IAEA Tech. Rept Ser. No. 46* (1965).
- (5) H.H. ROSSI: *Radiation Res.*, **10**, 522 (1959); *ibid.*, **10**, 532 (1959); *ibid.*, **15**, 431 (1961).
- (6) N. ODA: *Isotopes Radiations*, **4**, 221 (1961); *Bull. Tokyo Inst. Technol.*, No.54, 137 (1963); 放射線物理研究, **1**, 91 (1962).
- (7) H. LISKIEN, A. PAULSEN: "Compilation of Cross Section for Some Neutron Induced Threshold Reaction", Euratom, CRNM, GEEL, Nov. 1961: 文献 (2).
- (8) A.D. KANTZ: *J. Appl. Phys.*, **34**, 1944 (1963).
- (9) R.E. HART, C.B. BIGHAM, F.C. MILLER: *AECL Rept. CRDC-1083*, (Apr. 1962).
- (10) W.N. McELARY: *Nucleonics*, **20**, 58 (1962).
- (11) T.A. EASTWOOD, et al.: *Nucl. Sci. Eng.*, **13**, 385 (1962); *Can. J. Phys.*, **41**, 1263 (1963); **43**, 205 (1965).
- (12) R.E. JERVIS: *AECL Rept.*, CRDC-730, (Sept. 1957); I.E. BOCK, A.W. BOYD: *ibid.*, 1058, (Mar. 1962); A.W. BOYD, H.W.J. CONNOR, J.J. PIERONI: "Dosimetry and Flux Measurements in the NRX Reactor", *IAEA Panel on In-pile Dosimetry*, July 1964.
- (13) S.R. GUNN: *Nucl. Instr. Method*, **29**, 1 (1964).
- (14) R. FOX: *Nucl. Sci. Eng.*, **6**, 33 (1959); D.M. RICHARDSON, A.O. ALLEN, J.N. BOYLE: *A/ Conf.*, 8/P/154, (1955); D.J. DYNE, W. THURSTON: *CRC-696*, (1957).
- (15) A.R. ANDERSON, J.K. LINACRE: "Selected Topics in Radiation Dosimetry", Vienna, IAEA, (1961).
- (16) A.R. ANDERSON, R.J. WAITE: *J. Sci. Instr.*, **33**, 46 (1956); E.A. MASON, et al.: *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **6**, 416 (1963); S. GENNA, R.G. JAEGER, J. NAGL: *At. Energy Rev.*, **1** [4], 239 (1963); R.L. OTLAT, D.R. LEWIS: *AERE-M-1210*.
- (17) S.R. GUNN: *UCRL-7489*, *UCRL-7490*; R. WEIZ: *Nucleonik*, **6**, 28 (1964); J. DE GOER, et al.: *CER-R-2217*, 2443 (1962); F. AVELA, et al.: *Bull. Inform. Sci. Technol.*, No. 82, 7 (1964).
- (18) S.R. GUNN: *UCRL-7488*; E.S. CHAMBERS: *Rev. Sci. Instr.*, **35**, 95 (1964).
- (19) J.W. BOAG: *Radiation Res.*, **1**, 323 (1954); H.H. ROSSI, W. ROSENZWEIG: *ibid.*, **2**, 417 (1954); *Radiology*, **64**, 404 (1955).
- (20) A.W. BOYD: *Panel on In-Pile Dosimetry*, IAEA, *PL-121/2* (1964).
- (21) A.W. BOYD, H.W.J. CONNER, J.J. PIERONI: *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **6**, 404 (1963).
- (22) I. DRAGANIC: *Nucleonics*, **21** [3], 33 (1963); E.F. CONNOLLY, L.H. GEVANTMAN: *AD-428607* (1963).
- (23) R.E. SIMPSON: *Health Phys.*, **8**, 143 (1962); D.A. FLORY: *Nucleonics*, **21**, 50 (1963).
- (24) R. HOSEMANN, H.F. WARRIKHOFF: *Kerntechnik*, **5**, 114 (1963); *Nucleonics*, **22** [3], 51 (1964); W. BUNCH: *WH-1804*, (1964); *HW-84609*, (1965).
- (25) J.W. HILBORN: *Nucleonics*, **22** [2], 69 (1964).
- (26) P.B. PRICE, R.M. WALKER: *J. Appl. Phys.*, **33**, 3400 (1962).
- (27) L.E. STEELE, J.R. HANETHORNE: "Materials and Fuels for High Temperature Nuclear Energy Application", p. 336, (1963), J. Wiley; H.H. ROSSI: *Radiation Res.*, Suppl., **2**, 290 (1960).
- (28) J. ALEKSANDROWICZ, M. BARTENBACH: "IAEA Selected Topics in Radiation Dosimetry", p. 639, (1960).
- (29) A. SCHARMANN: *ibid.*, p. 511; I. KÜGLER: *Atomkernenergie*, **4**, 23, 67 (1959).
- (30) S. KONDO: *Health Phys.*, **4**, 21 (1960); W.T. THORNTON, J.A. AUXIER: *ORNL-1912*; R. YOKOTA, E. SAKAI: "IAEA Selected Topics in Radiation Dosimetry", p. 497 (1960).
- (31) G. BONFIGLIOLI: *Phys. Rev.*, **114**, 951 (1959); J.H. SCHULMAN, et al.: *J. Appl. Phys.*, **24**, 306 (1960); B. BJÄRGAD: *Rev. Sci. Instr.*, **33**, 1129 (1962); L.G. AUGENSTINE, et al.: *Radiation Res.*, Suppl. **2**, 19 (1960).
- (32) R.E. DAHL, H.H. YOSHIKAWA: *Nucl. Sci. Eng.*, **17**, 398 (1963).
- (33) R.E. DAHL, H.H. YOSHIKAWA: *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **7** (1964).
- (34) G.H. KINCHIN, R.S. PEASE: *Rept. Prog. Phys.*, **18**, 1 (1955).
- (35) 原子炉内線量測定研究会報告: "パイル・ドシメトリー(方法と研究現状の概要)", (1966), 原研高崎研.