

核爆発実験による強放射能粒子の β 放射能の減衰特性について

帯 刀 正*
(昭和47年10月31日受理)

1. ま え が き

先に森本、佐藤とともに筆者はアメリカ、ソ連、および英国の核爆発実験に由来する長野地方の雨、雪の放射能の減衰¹⁾について報告した。最近は第7回中国核爆発実験による強放射能粒子の γ 線スペクトルと Fractionation Effect²⁾(核種組成の偏り効果)について発表した。今回は1966年5月9日、1966年12月28日および1967年12月24日に行なわれた第3回、第5回および第7回中国核爆発実験に際し、長野地方で採取した個々の強放射能粒子の全 β 放射能の経日的変化を測定し、その減衰特性曲線の特性を表わす勾配 α の値が個々の強放射能粒子によって著しく異なること、また各回の核爆発実験によって α の値の分布が異なること、および採取した第3回、第5回および第7回の中国核爆発実験に由来する個々の強放射能粒子の β 放射能をそれぞれ合成した場合、その合成減衰特性曲線はそれぞれどのようになるかを明らかにする。

2. 試料および測定

2.1 試 料

強放射能粒子の試料の採取は、主として本工学部土木工学科建物屋上と筆者の自宅(工学部の北東6km)に設けた採集台で行なった。屋上の鉄板屋根とコンクリート床および採集台上のトタン板の表面をG-Mサーベイメータで走査し、カウント数の異常に高い強放射能点を検出し、その地点にセロテープの細片を当てて、これに強放射能粒子を付着させて採取した。次に強放射能粒子の付着したセロテープの細片をサーベイメータを頼りに

表 1

核 爆 発 実 験	試 料		
	個数	採 取 期 間	採 取 場 所
第3回中国核爆発実験(66/5/9)	11	66/5/11~66/5/17	土木工学科建物屋上
第5回中国核爆発実験(66/12/28)	52	66/12/30~67/1/4	土木工学科建物屋上
第7回中国核爆発実験(67/12/24)	40	67/12/26~67/12/30	土木工学科建物屋上および自宅

* 応用物理学教室 助教授

出来るだけ細かに分割し、最後に残った強放射能を示す微細片をステンレス試料皿の中心部に貼り着けて試料とした。これら採取した試料については表1に示す。

2.1 測 定

強放射能粒子の β 放射能の測定には、計数装置としてトランジスタ式GM用10進法スケーラー (TDC-1形) およびトランジスタ式スーパーケーラー (TDC-6形) を使用し、端窓形GM管としては Aloka GM-2504A (マイカ窓厚 1.5mg/cm²) および Aloka GM-LB-2504 (マイカ窓厚 1.6mg/cm²) でいずれも日本無線医理学研究所製である。

測定値には計数損失とバックグラウンドの補正およびマイカと空気の吸収補正をほどこした。またGM管と試料との相対的位置を同一条件に保ったので、幾何学的効率による補正と後方散乱による補正はしなかった。

次に第3回、第5回および第7回中国核爆発実験の直後採取した試料のうちで、放射能の高いものを表2にかかげる。ここに試料 HP-III-1 とは第3回中国核爆発実験のときの強放射能粒子 No.1 を表わし、HP-V-6、HP-VII-2 はそれぞれ第5回、第7回のときの強放射能粒子 No.6 と No.2 を示す。表1と表2から、長野地方に降下した強放射能粒子は第5回のときは放射能が比較的弱いものが多かったのに対し、第7回のときは放射能の強いものが多かった。第3回はその中間の放射能の強さを示している。また採取した各試料の全 β 放射能の減衰を調べるために、

表 2

試 料	測 定 日 時	計数率[cpm]
HP-III-1	1966, 5, 11	38,470
HP-V-6	1966, 12, 30	5,167
HP-VII-2	1967, 12, 26	133,660

第3回中国核爆発実験による強放射能粒子11個については1966年5月11日から同年8月20日まで測定を行ない、第5回中国核爆発実験による強放射能粒子のうち48個については1966年12月30

日から1967年3月10日まで、第7回中国核爆発実験に由来する強放射能粒子のうち35個については1967年12月26日から1968年10月18日まで測定を継続した。

3. 測定結果および考察

核分裂生成物の放射能減衰については理論的にも実験的にも種々研究³⁾⁴⁾ されており、その全 β 放射能の減衰は次式で示されるものとされている。

$$I = Ct^{-\alpha} \quad (1)$$

ここに I は核分裂を起してから t 時間後の β 放射能の強さ、 α 、 C は定数にして、人により α の値として、いろいろの値が与えられている。また α の値は起爆時が未知な場合、起爆時すなわち $t=0$ のとり方によっても異なって来る。いま式(1)の両辺の対数をとれば

$$\log I = \log C - \alpha \log t \quad (2)$$

核爆発後の経過時間(日数) t の対数を横軸に β 放射能の強さ I の対数を縦軸にとり、両対数方眼紙に $I-t$ グラフをえがけば、グラフは直線となる。第3回、第5回および第7回中国核爆発実験の際の採取試料のうちで、おもなもの全 β 放射能減衰曲線を図1、図2、図3に示す。強放射能粒子の全 β 放射能減衰曲線のパターンとしては、試料 HP-III-

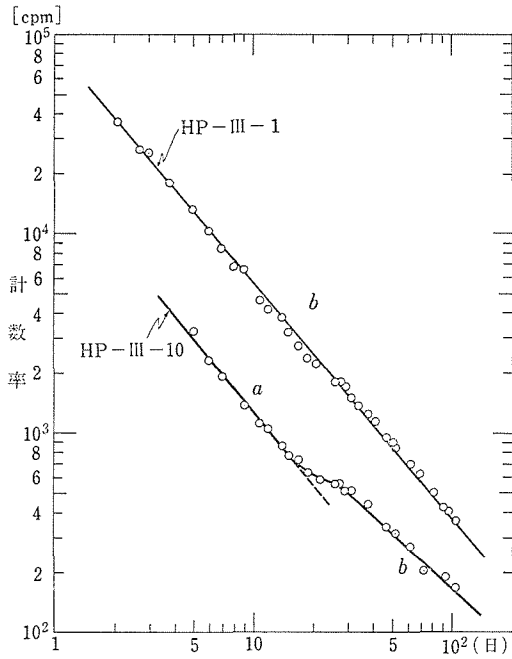


図 1

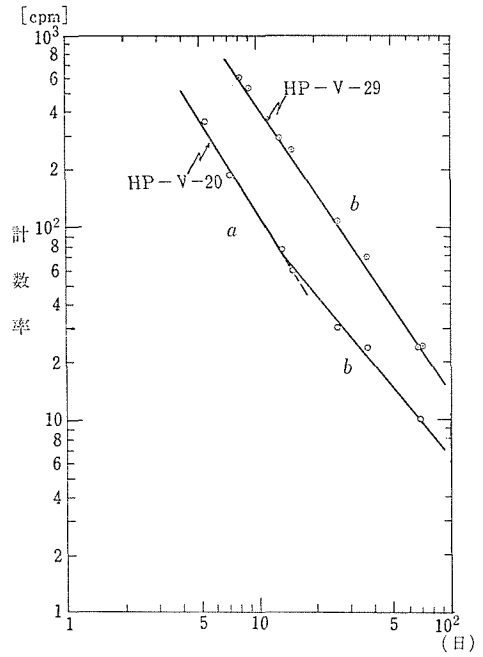


図 2

表 3 $\alpha_a, \alpha_b, \alpha_c$ の度数分布表

階 級	第 3 回中国核爆発実験			第 5 回中国核爆発実験			第 7 回中国核爆発実験		
	α_a	α_b	α_c	α_a	α_b	α_c	α_a	α_b	α_c
0.75~0.85					1			1	
0.85~0.95								2	
0.95~1.05		3			1			8	
1.05~1.15		3			7			18	
1.15~1.25		4			5			5	
1.25~1.35	3	1			10		1	1	2
1.35~1.45	2				5		7		1
1.45~1.55					5		11		2
1.55~1.65				3			6		1
1.65~1.75				1			2		3
1.75~1.85				3			2		2
1.85~1.95				1			1		1
1.95~2.05				2			1		

1 や試料 HP-V-29 の減衰曲線のごとく測定期間を通じ 1 本の直線 b で示されるものと試料 HP-VII-7 の減衰曲線のように途中 1 個所で折れ曲がった 2 本の直線部分 a, b からなるものおよび試料 HP-VII-10 の減衰曲線のように途中 2 個所で折れ曲がった 3 本の直

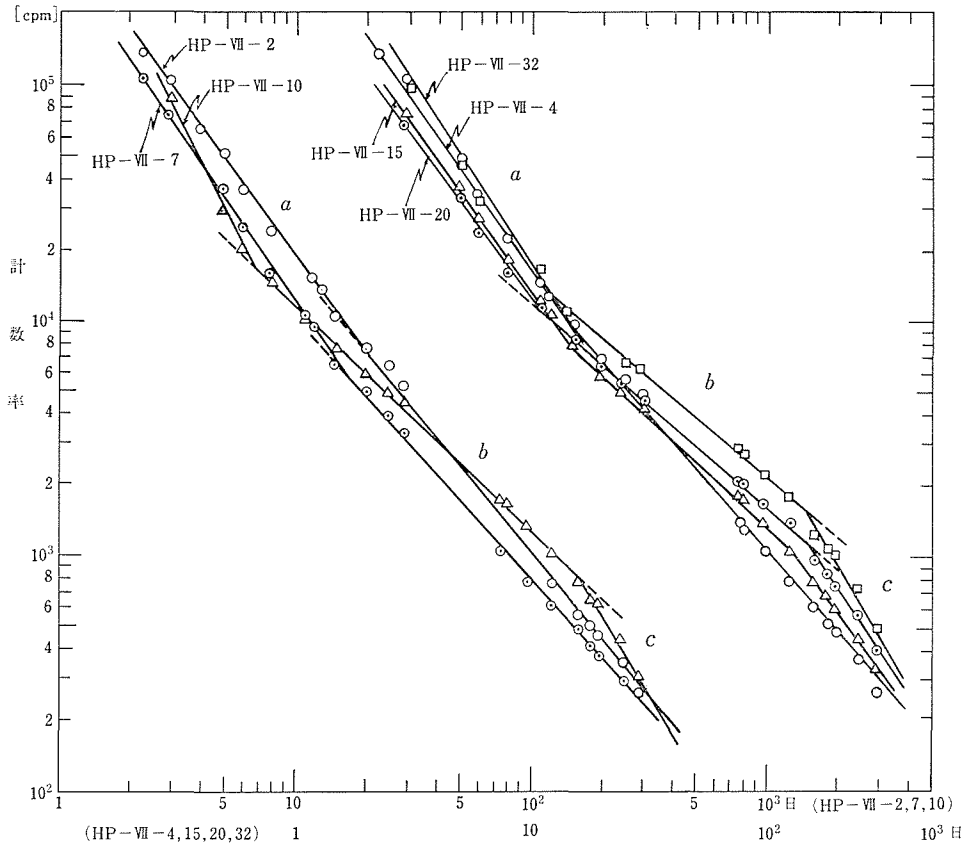
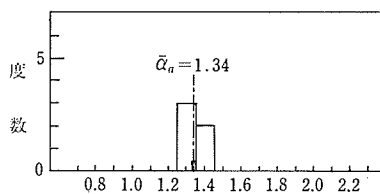
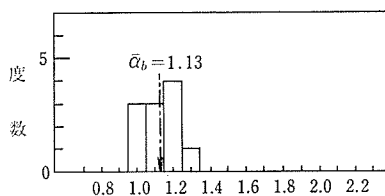
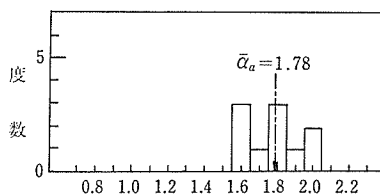
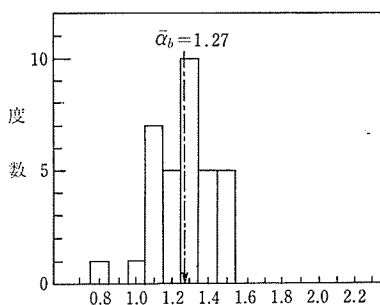
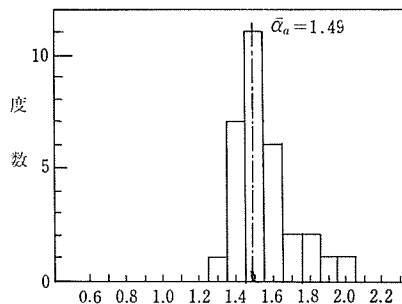
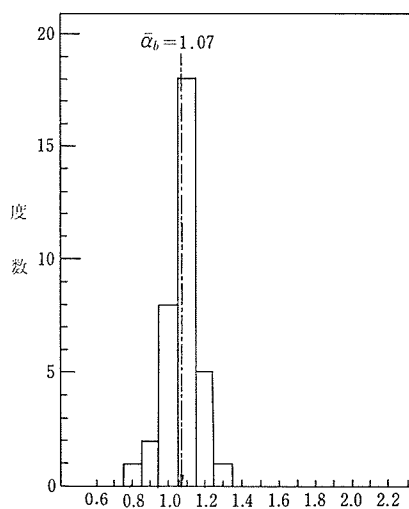
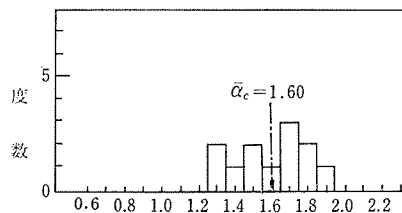


図 3

線部分 a , b , c からなるものがある. いま全 β 放射能減衰曲線のうち直線部分 a , b , c の減衰特性を示す勾配 α の値をそれぞれ α_a , α_b , α_c とし, これらの値を電子計算機を用い, 最小二乗法によって計算した. これら α_a , α_b , α_c の計算値のヒストグラムをそれぞれ図 4-1, 図 4-2, 図 5-1, 図 5-2, および図 6-1, 図 6-2, 図 6-3 に示す. 表 3 と α_a , α_b , α_c の度数分布を示すヒストグラムから分るように α_a の値は第 3 回のときは 1.3~1.4 の範囲に, 第 5 回のときは 1.6~2.0 の範囲に分布し, 第 7 回のときは 1.5 をピークとして 1.3~2.0 の範囲で, 1.5 の右側にいく分多く分布している. 次に α_b の値は第 3 回のときは 1.0~1.3 の範囲で平均的に分布しており, 第 5 回のときは 1.3 をピークとして 0.8~1.5 の範囲で 1.3 の左側にやや多く分布している. 第 7 回のときは 1.1 をピークとして 0.8~1.3 の範囲においてほぼ左右対称的な正規分布をなしている. α_c は第 7 回のときだけ観察されその値は 1.3~1.9 の範囲で平均的に分布をしているのが見られる.

強放射能粒子の全 β 放射能減衰曲線の始めにおける急勾配の直線部分 a は, 誘導放射性核種 ^{239}Np や ^{237}U による β 放射能の寄与がほとんど大部分を占め, 残りを核分裂生成混合物の β 放射能が寄与している部分である. 直線部分 a に続く直線部分 b および c は, 核

図 4-1 $\bar{\alpha}_a$ (III)図 4-2 $\bar{\alpha}_b$ (III)図 5-1 $\bar{\alpha}_a$ (V)図 5-2 $\bar{\alpha}_b$ (V)図 6-1 $\bar{\alpha}_a$ (VII)図 6-2 $\bar{\alpha}_b$ (VII)図 6-3 $\bar{\alpha}_c$ (VII)

爆発によって生じた核分裂生成混合物の β 放射能に基づく部分である。誘導放射性核種 ^{239}Np と ^{237}U の半減期はそれぞれ2.3日と6.75日で比較的短いので、 ^{239}Np は爆発後約20日、 ^{237}U は爆発後約40日位経つと β 減衰曲線の**b**と**c**の部分における全 β 放射能に対するおのおのの寄与はほとんど無視できるようになる。また核分裂生成混合物も時間の経過とともに崩壊の速い核種は早く消滅して行き、そのときどきの核分裂生成混合物の全 β 放射能に対して各成分核種の占める寄与の割合も次々に変化し、全体として減衰して行く。

既報²⁾のごとく強放射能粒子は Fractionation 効果によりその核種組成は定性的にも定

量的にもおのおの異なることがわかっているので、個々の強放射能粒子の示す全 β 放射能減衰曲線も、その組成核種により当然異なることが予想される。

第3回中国核爆発実験のときは採取試料が少かったので、余りははっきりした特徴はつかめないが、 β 放射能減衰曲線のうち直線部分 a 、 b の勾配の平均値としてはそれぞれ $\bar{\alpha}_a = 1.34$ 、 $\bar{\alpha}_b = 1.13$ を得る。また第5回、第7回中国核爆発実験のときは、採取した強放射能粒子の試料の数も比較的多いので、かなりはっきりした特徴が現われている。すなわち第5回のときの β 放射能減衰曲線の直線部分 a 、 b の勾配の平均値はそれぞれ $\bar{\alpha}_a = 1.78$ 、 $\bar{\alpha}_b = 1.27$ である。なかでも第7回のときはきわめて顕著な特徴を示している。すなわち β 放射能減衰曲線の始めの直線部分 a の勾配 α_a は1.5をピークとした正規分布に近い分布を示し、その平均値 $\bar{\alpha}_a = 1.49$ である。次に直線部分 b の勾配 α_b は1.1を中心にきわめてシャープなピークをなし、ほぼ左右対称的な正規分布を示しており、その平均値は $\alpha_b = 1.07 \approx 1.1$ である。また直線部分 c の勾配 α_c の平均値は $\bar{\alpha}_c = 1.60$ である。D. Paffrath⁵⁾らは最近 G. R. Crocker⁶⁾らの詳細な計算結果に基づいて、核分裂中性子による ^{235}U の核分裂の場合の核分裂生成混合物の全 β 放射能減衰曲線は $t^{-1.1}$ (7~100日)に従うことを発表しているが、これは第7回中国核爆発実験に際し筆者の得た α_b の平均値 $\bar{\alpha}_b$ の値と完全によく一致するものである。

次に β 放射能減衰曲線のうち直線部分 a と b および b と c の屈曲点が爆発後幾日目に現われるかを調べ、その分布をそれぞれ表4と表5に示す。表4より a と b との屈曲点は大体8日~20日の範囲に分布し、第3回中国核爆発実験のときは試料の数が少く、10日~12日と18日~20日の範囲にしか見られなかったが、第5回のときは10日~16日の範囲のものも多く、第7回のときは8日~10日の範囲のものが最も多く、10日~12日がこれに次ぎ14日~16日が次に多かった。また表5より直線部分 b と c との屈曲点は爆発後150日から230日に分布しており200日あたりが最も多かった。

次に、第3回、第5回および第7回中国核爆発実験に由来する個々の強放射能粒子の示す β 放射能値を加え、各回毎に合成し、全体としてどのような減衰特性を示すかを調べて見る。いま第3回、第5回および第7回中国核爆発実験の際の強放射能粒子群をそれぞれHP-III-G(11)、HP-V-G(48)およびHP-VII-G-A(7)、HP-VII-G-B(29)とする。ここに()内は強放射能粒子の個数を表わし、HP-VII-G-A(7)は既報²⁾の γ 線試料No.2と同一で、その構成はHP-VII-2, 4, 7, 10, 15, 20, 32よりなる。またHP-VII-G-B(29)は

表 4

核爆発後経過日数	第3回中国核爆発実験	第5回中国核爆発実験	第7回中国核爆発実験
8 ~ 10		1	13
10 ~ 12	2	5	9
12 ~ 14		4	2
14 ~ 16		4	5
16 ~ 18		1	2
18 ~ 20	3		1

表 5

核爆発後経過日数	第7回中国核爆発実験
150	1
180	2
190	1
200	8
230	1

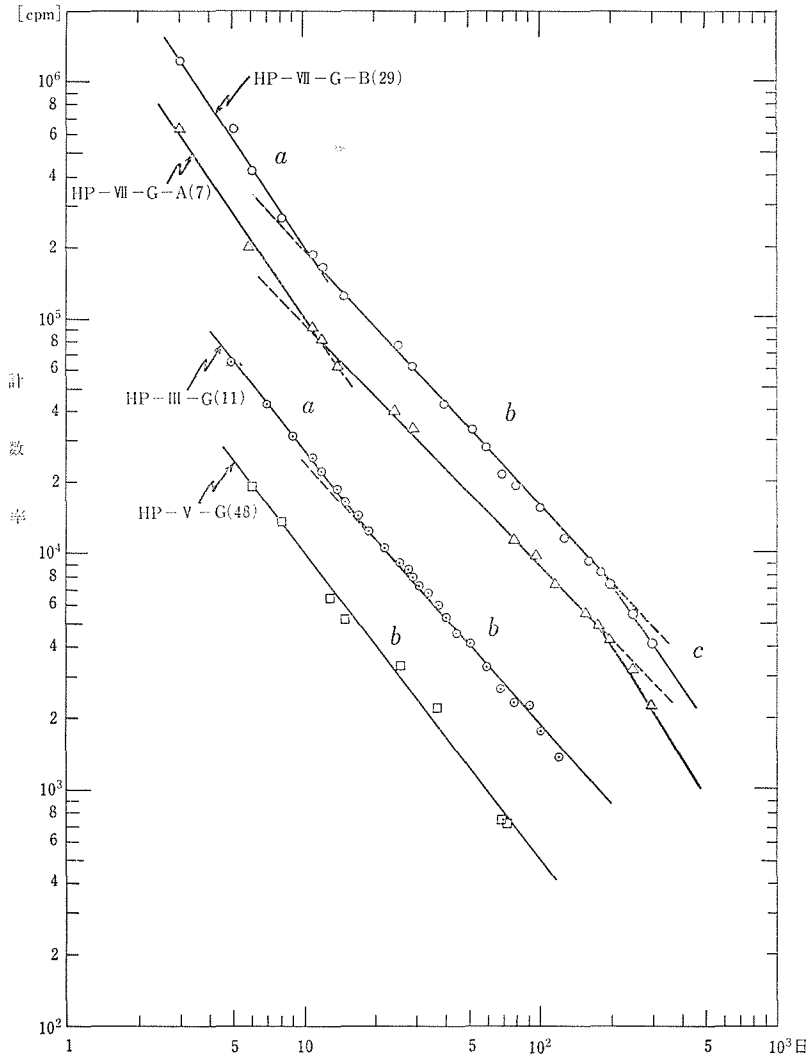


図 7

HP-VII-1~37のうち上記7個とHP-VII-18の試料を除いた29個の強放射能粒子よりなるものである。測定時をそろえた個々の強放射能粒子のβ放射能測定値から合成した全β放射能減衰曲線を求め、これを図7に示す。またこれら強放射能粒子群の減衰曲線の勾配 α_a 、 α_b 、 α_c を算定しこれを表6に、およびHP-VII-G-B(7)の各構成粒子の勾配 α_a 、 α_b 、 α_c を表7に示す。図3と図7および表6と表7から、個々の強放射能粒子の全β放射能減衰曲線の減衰特性を表わす α_a 、 α_b 、 α_c が個々の強放射能粒子についてそれぞれ異なること、およびこれら個々の強放射能粒子のβ放射能を合成した場合、全体として平均的にどのようなようになるか明らかにされた。HP-VII-G-A(7)の勾配 α_a 、 α_b 、 α_c の各値およびHP-

表 6

勾 配	第3回中国核爆発実験	第5回中国核爆発実験	第7回中国核爆発実験		
	HP-III-G(7)	HP-V-G(48)	HP-VII-G-A(7)	HP-VII-G-B(29)	α の平均値
α_a	1.29		1.46	1.48	$\bar{\alpha}_a = 1.49$
α_b	1.14	1.31	1.04	1.10	$\bar{\alpha}_b = 1.07$
α_c			1.66	1.47	$\bar{\alpha}_c = 1.60$

表 7

強放射能粒子 試 料	勾 配		
	α_a	α_b	α_c
HP-VII- 2	1.36	1.32	
HP-VII- 4	1.41	1.09	
HP-VII- 7	1.43	1.14	
HP-VII-10	1.95	0.93	1.46
HP-VII-15	1.44	1.20	1.83
HP-VII-20	1.73	1.02	1.55
HP-VII-32	1.63	0.90	1.79

表 8

$f_{89,95}$	α_b (20日~100日)
20	1.28
8	1.23
4	1.22
2	1.16
1	1.10
0.5	1.02
0.2	0.92
0.1	0.83

VII-G-B(29)の勾配 α_a , α_b の各値は、ヒストグラムより求めた各勾配の平均値 $\bar{\alpha}_a$, $\bar{\alpha}_b$, $\bar{\alpha}_c$ の値とそれぞれよく一致しているが、HP-VII-G-B(29)の α_c の値は平均値 $\bar{\alpha}_c$ より小さい。

また図3と表7からわかるように、HP-VII-G-A(7)の勾配 α_a , α_b , α_c は各構成試料により異なる。例えば α_a の試料ごとの差異に関しては β 放射能減衰曲線の直線部分 a の放射能値のほとんど大部分を占める誘導放射性核種 ^{239}Np と ^{237}U の含有量が試料ごとにそれぞれ異なることを暗示している。このことは筆者が既に報告²⁾したように、相対 γ 放射能比 $^{239}\text{Np}/[^{95}\text{Zr} + ^{95}\text{Nb}]$ を測ることにより ^{239}Np の量が個々の強放射能粒子により著しく異なることを指摘したことと一致する。

また β 放射能減衰曲線の直線部分 b と c は、 b の初期部分を除き、誘導放射性核種 ^{239}Np と ^{237}U の寄与をほとんど無視しても差支えない核分裂生成物による放射能に基づく部分にして、勾配 α_b , α_c が各試料により異なることは核分裂生成物の構成核種およびその組成が fractionation を受けていることを示している。

なお W. Peters と D. Paffrath⁷⁾ の行なった ^{235}U の核分裂中性子による fractionation を受けた核分裂生成物の β 放射能減衰曲線に関するデータから求めた α_b の理論値を表8に示す。この表における $f_{89,95}$ は $^{95}\text{Zr} + ^{95}\text{Nb}$ に対する ^{89}Sr の fractionation factor にして、他の核分裂生成核種の fractionation factor とともにその筆頭代表値である。この際 fractionate していない核分裂生成物における全放射能の1%以上の寄与をなす核種の半減期と fractionation factor を表9⁸⁾に示す。表8における α_b の理論値と第3回、第5回および第7回中国核爆発実験に由来する強放射能粒子群に対し、合成された β 放射能

表 9

核 種	半 減 期	$f_{89,95}$							
		0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	4.0	8.0	20.0
Sr-89	53.6 d	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	4.0	8.0	20.0
Sr-90	28 y	0.12	0.23	0.53	1.0	1.9	3.5	6.5	15.0
Y-90	64.8 h	0.12	0.23	0.53	1.0	1.9	3.5	6.5	15.0
Y-91	50 m	0.28	0.41	0.68	1.0	1.6	2.1	3.1	5.2
Zr-95	65 d	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Nb-95	35 d	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Mo-99	67 h	0.52	0.63	0.82	1.0	1.2	1.5	1.8	2.4
Tc-99m	6.0 h	0.52	0.63	0.82	1.0	1.2	1.5	1.8	2.4
Ru-103	40 d	0.18	0.30	0.59	1.0	1.7	2.8	4.7	9.5
Rh-103m	57 m	0.18	0.30	0.59	1.0	1.7	2.8	4.7	9.5
Rh-105	35.9 h	0.18	0.30	0.59	1.0	1.7	2.8	4.7	9.5
Ru-106	1.0 y	0.28	0.41	0.68	1.0	1.5	2.1	3.1	5.2
Rh-106	30 s	0.28	0.41	0.68	1.0	1.5	2.1	3.1	5.2
Sb-125	2.78 y	0.16	0.28	0.58	1.0	1.7	3.0	5.1	10.5
I-131	8.05 d	0.16	0.28	0.58	1.0	1.7	3.0	5.1	10.5
Te-132	78 h	0.16	0.28	0.58	1.0	1.7	3.0	5.1	10.5
I-132	2.3 h	0.16	0.28	0.58	1.0	1.7	3.0	5.1	10.5
Xe-133	5.27 d	0.15	0.26	0.56	1.0	1.8	3.1	5.6	12.0
Cs-137	29.8 y	0.12	0.23	0.53	1.0	1.9	3.5	6.5	15.0
Ba-137m	2.6 m	0.12	0.23	0.53	1.0	1.9	3.5	6.5	15.0
Ba-140	12.8 d	0.25	0.37	0.65	1.0	1.5	2.3	3.5	6.2
La-140	40.2 h	0.25	0.37	0.65	1.0	1.5	2.3	3.5	6.2
Ce-141	32.5 d	0.37	0.50	0.74	1.0	1.3	1.8	2.4	3.6
Ce-143	33.4 h	0.76	0.83	0.92	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4
Pr-143	13.6 d	0.76	0.83	0.92	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4
Ce-144	277 d	0.66	0.74	0.88	1.0	1.1	1.3	1.5	1.7
Pr-144	17.3 m	0.66	0.74	0.88	1.0	1.1	1.3	1.5	1.7
Nd-147	11.1 d	0.60	0.70	0.86	1.0	1.2	1.4	1.6	1.9
Pm-147	2.67 y	0.60	0.70	0.86	1.0	1.2	1.4	1.6	1.9
Pm-149	53.1 h	0.56	0.67	0.84	1.0	1.2	1.4	1.7	2.1

減衰曲線の α_b の算定値とを比較して見ると、第3回と第7回るときは、その値が fractionation factor $f_{89,95} = 1$ の場合の α_b の値 1.10 より余り偏差がない。しかし第5回るときは $\alpha_b = 1.31$ であり、1.10 に対しかかなりの偏差を示している。従って第5回るときは全体として見てもかなり fractionation を受けていることになる。

なお合成された β 放射能減衰曲線の直線部分 a と b との屈曲点は HP-V-G は核爆発後 20日であり、HP-VII-G-A と HP-VII-G-B ではそれぞれ12日と11日であり、また b と c との屈曲点はそれぞれ180日と200日であった。

4. む す び

第3回, 第5回および第7回中国核爆発実験による個々の強放射能粒子の全 β 放射能を測定し, その減衰特性曲線を求めた. また各回の中国核爆発実験における強放射能粒子群の成分 β 放射能を加算して, 合成減衰特性曲線を求めた. さらに β 放射能減衰特性を支配する勾配 α の値を最小二乗法によって算定し, 各回の核爆発実験による個々の強放射能粒子および強放射能粒子群の β 放射能の減衰特性を明らかにした.

終りに本研究の測定に際し協力を頂いた本学教養部高野昭助教授および測定と計算に助力された金子浩昌技官に感謝の意を表します.

文 献

- 1) 森本彌三八, 帯刀 正, 佐藤泰子: 信州大学工学部紀要第7号 73-90 (1957).
- 2) 帯刀 正: 信州大学工学部紀要第31号 23-32 (1971).
- 3) K. Way and E. P. Wigner: Phys. Rev., **73**, 11 (1949).
- 4) H. F. Hunter and N. E. Ballou: Nucleonics, **9**, No.5, C-2 (1951).
- 5) D. Paffrath und W. Peters: Staub-Reinhalt. Luft, **28**, Nr. 8, 7-15 (1968).
- 6) G. R. Crocker and T. Turner: USNRDL-TR-1009 (1965).
- 7) W. Peters und D. Paffrath: Deutsche Luft und Raumfahrt FB 69-39 (1969).
- 8) D. Paffrath und W. Peters: Staub-Reinhalt Luft, **28** Nr.8, 309 (1968).

Summary

The Decay Characteristics of Beta-Activity of the Hot Particles Due to the Nuclear Test Explosions

Tadashi TATEWAKI

(Institute of Physics, Faculty of Engineering)

The measurements of the gross beta-activity were made for the hot particles (highly radioactive fallout particles) due to the third, the fifth and the seventh Chinese nuclear test explosion. The rate of beta-decay of the hot particles was investigated on the assumption that its rate was given by the equation $I = Ct^{-\alpha}$ based on the Way-Wigner equation. The characteristic decay curves of beta-activity of the individual hot particles were shown as straight lines on logarithmic graph paper with the measured values of the elapsed time t after the nuclear test explosion and the corresponding beta-activity I as co-ordinates, and those of the groups of the individual hot ones due to each of the Chinese nuclear test explosions mentioned above were also shown similarly as straight lines with the values of t and the corresponding total amount of beta-activity I of the individual hot particles. The values of index α represented the slopes of the characteristic decay curves shown as straight lines were calculated by the method of least squares, and the distributions of values of α were also obtained. The decay characteristics of beta-activity of the hot particles due to the third, the fifth and the seventh Chinese nuclear test explosions were made clear respectively.