

第19回中国核爆発実験による強放射能粒子の
Ge(Li) γ 線スペクトロメトリーによる分析
(続 報)

帯 刀 正*
(昭和53年5月31日受理)

Analysis of Hot Particles
from the Nineteenth Chinese Nuclear Test Explosion
by Ge (Li) Gamma-Ray Spectrometry
(Continued Report)

Tadashi TATEWAKI

The gamma ray spectra of the hot particles (highly radioactive fallout particles) due to the nineteenth Chinese nuclear test explosion on September 26, 1976 were obtained by the use of a Ge(Li) detector with high resolution in the shield cave of iron plates and lead bricks, 446 and 600 days after the explosion respectively. Without any chemical processing, many nuclides were identified in the gamma ray spectra. The nuclides of fission products such as ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{106}Ru — ^{106}Rh , ^{125}Sb , ^{141}Ce , ^{144}Ce — ^{144}Pr and ^{155}Eu were identified. ^{54}Mn , ^{57}Co , ^{58}Co and ^{182}Ta as the induced radionuclides were also identified. The ages of the hot particles were estimated by the activity ratios of ^{95}Zr to ^{95}Nb , calculated from the observed emission ratios, R_{b0} , R_{c0} , R_{d0} and R_{e0} , which represent the emission ratios of the gamma rays [^{95}Zr (724keV) + ^{95}Zr (756keV)] / ^{95}Nb (765keV), ^{95}Zr (724keV) / ^{95}Nb (765keV), ^{95}Zr (756keV) / ^{95}Nb (765keV) and ^{95}Zr (724 keV) / [^{95}Zr (756keV) + ^{95}Nb (765keV)], respectively. There was good agreement observed between the actual ages of the hot particles and the ages of those estimated from the emission ratio, R_{b0} , which was given correction of counting efficiencies for the photopeak areas of above-mentioned gamma rays and was independent of the branching ratio of the gamma rays ^{95}Zr (724keV) and ^{95}Zr (756keV). The youngest age of the hot particles estimated by this method was 4 days after the explosion and the oldest was about 440 days.

1 ま え が き

1976年9月26日に行われた第19回中国核爆発実験に由来する強放射能粒子に対し、爆

* 応用物理学教室 教授

発後4日から80日にわたる期間において、Ge(Li)検出器を用い、 γ 線スペクトロメトリーを行ったが、強放射能粒子に含まれる核種の定性分析結果とそのうち主なる核種の γ 放射能減衰特性について前報¹⁾に発表した。その後1年余り経過した時点では上記粒子の放射能強度は著しく減衰し微弱となったので、今回は極めて長時間をかけて測定を行ない、得られた γ 線スペクトルを解析した結果について報告する。

また放射性降下物の核爆発後の経過時間すなわち年令を推定する方法については、真室²⁾らは ^{95}Zr と ^{95}Nb の放射能比による年令推定法として emission ratio ^{95}Zr (724 keV) / ^{95}Nb (765 keV) と ^{95}Zr (756 keV) / ^{95}Nb (765 keV) を用い、藤井³⁾らは emission ratio ^{95}Zr (724 keV) / [^{95}Zr (756 keV) + ^{95}Nb (765 keV)] による方法を発表しているが、前者はこの年令推定法の適用できる範囲として爆発後およそ15日から150日までとしており、揮発性核種のきめて少ない放射性降下物に対しては15日よりかなり少ない年令まで推定できるものとしている。これに対し著者⁴⁾⁵⁾は ^{95}Zr と ^{95}Nb の放射能比による年令推定法の中で emission ratio [^{95}Zr (724 keV) + ^{95}Zr (756 keV)] / ^{95}Nb (765 keV) によるのが、前記 emission ratio を用いた年令推定法に比べ、分岐比の影響を全く受けることなく推定年令値が最も誤差が少ないことを報告した。一般に核爆発後も経過時間が永くなるにつれて、放射性降下物の放射能も次第に減衰し、それとともに ^{95}Zr と ^{95}Nb の放射能比もまた小さくなる。従ってこの小さくなった放射能比の実測値における僅かな誤差も ^{95}Zr - ^{95}Nb 放射能比曲線から放射性降下物の推定年令値に大きな誤差をもたらすことが予想される。そこで上記核種の光電ピークの面積(強度)を正確に測定して精度を上げるためには、長時間の測定が必要となり、その間の測定系の安定化がきわめて重要となる。前回⁴⁾⁵⁾は爆発後13日から67日経過した強放射能粒子に対して年令推定を試み、推定値と実測値がよく一致することを明らかにしたが、今回は適用範囲を広げて爆発後4日および400日以上経過した年令の強放射能粒子に対し、 ^{95}Zr と ^{95}Nb の放射能比による年令推定が可能か否か、またその際の推定年令値の誤差はどれほどになるかを実験的に明らかにする。

2 試 料

前報¹⁾で報告した γ 線スペクトロメトリー用試料 No. 1 と No. 2 はそれぞれ当工学部共通講座建物屋上と著者の自宅(工学部北東8 km)の屋上で採取した強放射能粒子のうちで、比較的放射能の強い粒子を前者は18個、後者は20個を選び、それぞれ1個のステンレス製試料皿にまとめたものであったが、核爆発後約400日以上経過した時点では放射能強度が著しく減衰したので、両試料皿中の放射能粒子を一枚の薄いマイカのプレート上に移し合わせたものを今回の γ 線スペクトロメトリー用試料 No. 3 とした。

3 測 定 装 置

前回と同じく測定装置はORTEC社のガンマⅢ形コンピュータ処理方式の γ 線スペクトロメータを用いた。今回は特に低レベルの微弱な γ 放射能を測定するために、低バックグラウンドにする目的で、Ge(Li)検出器の部分を厚さ5 cmの鉄と厚さ10 cmの鉛でしゃへいした。

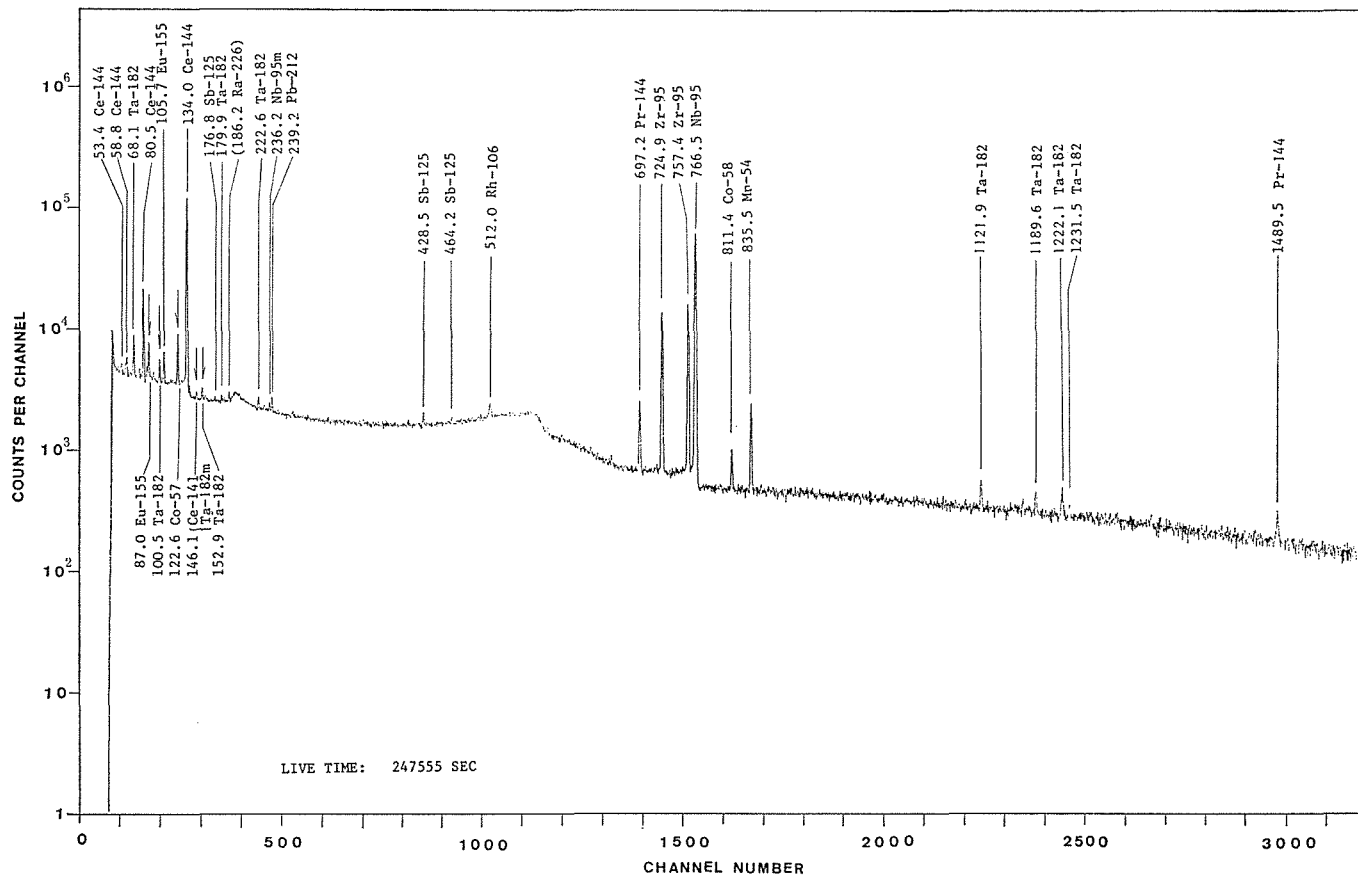


Fig. 1. γ -ray spectrum of hot particles sample No.3 measured from Dec. 13 to Dec. 16, 1977, 443 to 446 days after the 19th Chinese nuclear test explosion on Sept. 26, 1976. [50 keV~1600 keV]

4 測 定

測定は1977年12月13日から16日までと1978年5月18日から19日までの2回、試料 No. 3 について第二精工舎のアプリケーションラボラトリーで行なった。

4.1. γ 線スペクトル

Fig. 1 は試料 No. 3 について核爆発後443日から446日経過した1977年12月13日から同年12月16日にわたり、Live time 247,555 sec (2.865 day) をかけて測定した γ 線スペクトルにして、そのエネルギー範囲は1600 keV までである。Fig. 2 は Fig. 1 のエネルギー範囲40~270 keV の部分を拡大した γ 線スペクトルを示すものである。Fig. 3 は試料 No. 3 を爆発後600日経った1978年5月18日から19日まで Live time 111,560 sec (1.291 day) をかけて測定した γ 線スペクトルで、そのエネルギー範囲は1650 keV までである。また Fig. 4 は Fig. 3 の25~250 keV のエネルギー範囲を拡大した γ 線スペクトルである。Fig. 5 は Ge(Li) 検出器の部分を鉄と鉛でしゃへいした状態で上記測定装置によ

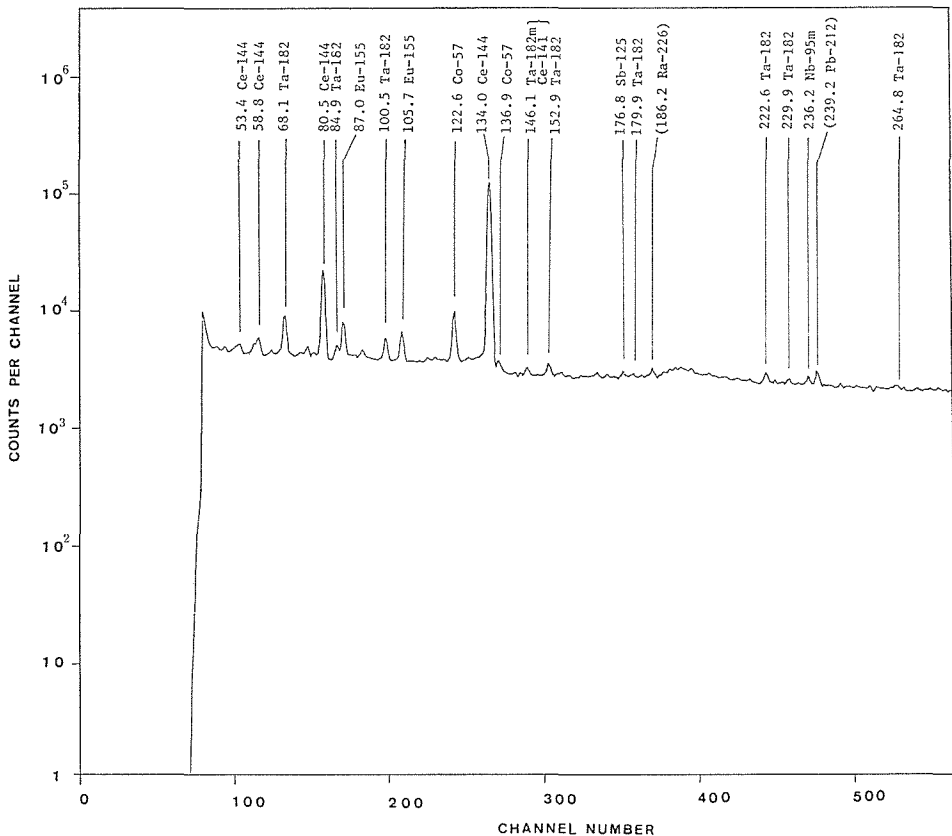
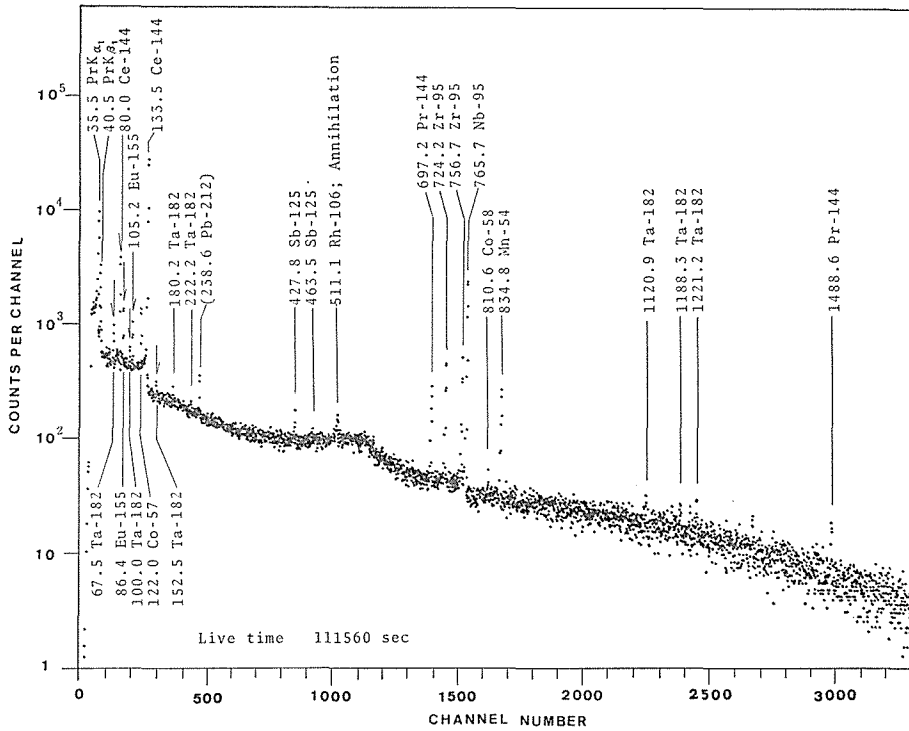
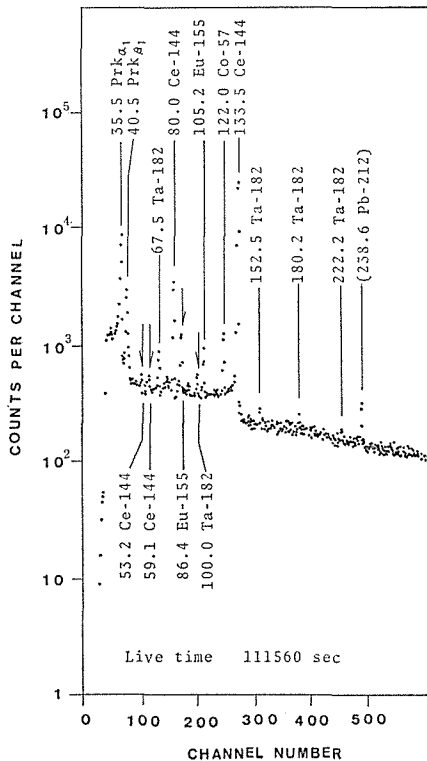


Fig. 2. γ -ray spectrum of hot particles sample No.3 measured from Dec. 13 to Dec. 16, 1977, 443 to 446 days after the 19th Chinese nuclear test explosion on Sept. 26, 1966. [50 keV~270 keV]



↑ Fig. 3. γ -ray spectrum of hot particles sample No.3 measured from May 18 to May 19, 1978, 600 days after the 19th Chinese nuclear test explosion on Sept 26, 1976. [25 keV~1650 keV]



← Fig. 4. γ -ray spectrum of hot particles sample No.3 measured from May 18 to May 19, 1978, 600 days after the 19th Chinese nuclear test explosion on Sept. 26, 1976. [25 keV~300 keV]

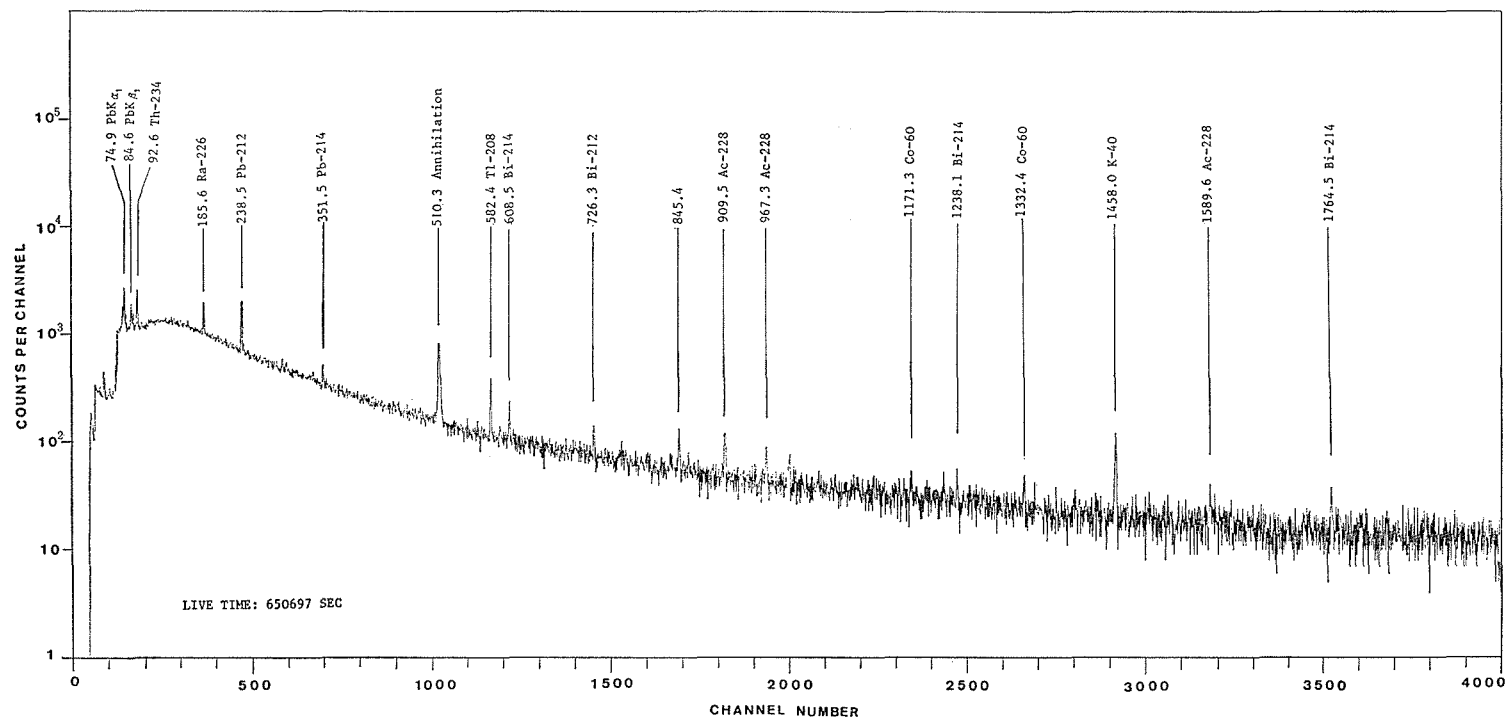


Fig.5. Natural background γ -ray spectrum obtained by the use of the Ge(Li) detector in the shield cave of 5-cm-thick iron plates and 10-cm-thick lead bricks.

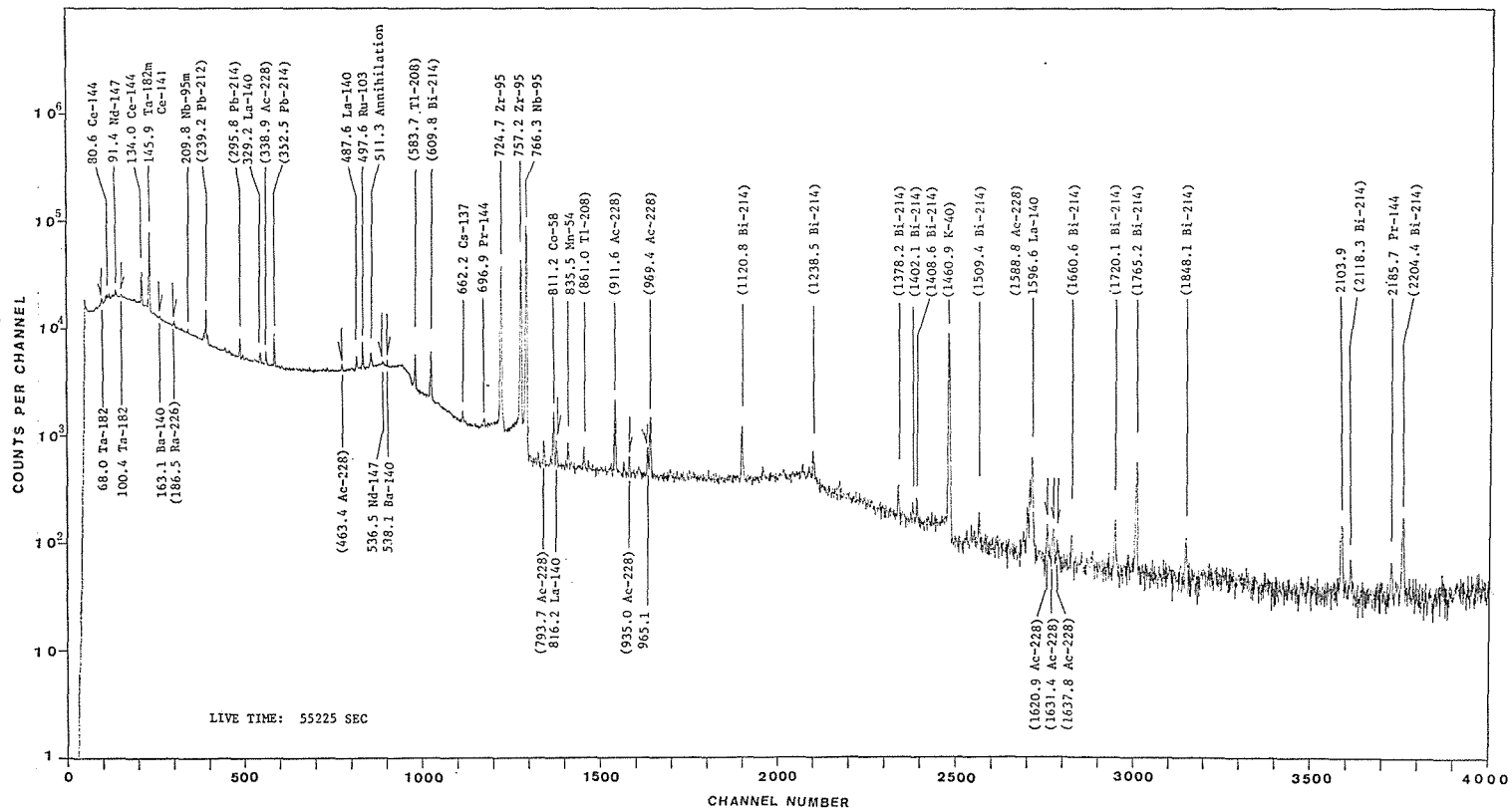


Fig. 6. γ -ray spectrum of hot particles sample No. 2 measured by the use of the Ge(Li) γ detector without the shield cave, on Dec. 15, 1976, 80 days after the 19th Chinese nuclear test explosion on Sept. 26, 1976. [30 keV~2350 keV]

り測定したバックグラウンドスペクトルを示す。なおこのときの Live time は 650, 697 sec (7.531 day) であり、エネルギー範囲は 0~2000 keV である。Fig. 6 は Ge(Li) 検出器をしゃへいせずに核爆発後80日目の1976年12月15日に Live time 55, 225sec (15.34 hour) をかけて測定した試料 No. 2 の γ 線スペクトルにして、前報¹⁾に掲載しなかったが、しゃへい効果および γ 線スペクトルの時間的推移を知るために掲げたものである。

4.2 核種分析

前回¹⁾と同じく Ge(Li) 検出器に対する γ 線エネルギー並びに計数効率用標準線源には、⁵⁷Co (122.1 keV, 136.4 keV), ¹³³Ba (81.0 keV, 276.4 keV, 356.3 keV, 384.1 keV), ¹³⁷Cs (661.6 keV), ⁶⁰Co (1173.2 keV, 1332.5 keV) を使用した。これら標準線源の γ 線スペクトルから最小 2 乗法により、エネルギー校正曲線と計数効率曲線を求めた。すなわち前者は γ 線の光電ピークのエネルギー値 E_i はその光電ピークのチャンネル数 x_i の 2 次曲線として、また後者はエネルギー E_i の光電ピークの計数効率 ε_i の自然対数値が光電ピークのエネルギー値 E_i の自然対数値の 2 次曲線としてあてはめを行なって定めた。しかる後試料中に含まれる核種の光電ピークの正確なエネルギー値とその計数効率を算定した。このほか光電ピークの高さ、面積、強度、面積の相対標準偏差および半値巾をコンピュータにより求め、これらのデータを基に別記文献^{6~11)}を参照して、光電ピークのエネルギー値に対して核種の同定を行なった。

試料 No. 3 を 1977 年 12 月 13~16 日と 1978 年 5 月 18~19 日に測定したものについて、同定された人工放射性核種とその γ 線エネルギー値を Table 1 に示す。Table 1 から核

Table 1. Assigned nuclides from the γ -ray spectra of sample No.3 (No.1+No.2) measured on Dec. 13~16, '77 and May 18~19, '78, respectively.

γ -ray energy (keV)		Assigned Nuclide	γ -ray energy (keV)		Assigned Nuclide
Dec. 13~16, '77	May 18~19, '78		Dec. 13~16, '77	May 18~19, '78	
—	35.5	PrK α_1	236.2	—	^{95m} Nb
—	40.5	PrK β_1	428.5	427.8	¹²⁵ Sb
53.4	53.2	¹⁴⁴ Ce	464.2	463.5	¹²⁵ Sb
58.8	59.1	¹⁴⁴ Ce	512.0	511.1	{ ¹⁰⁶ Rh Annihilation
68.1	67.5	¹⁸² Ta	697.2	697.2	
80.5	80.0	¹⁴⁴ Ce	724.9	724.2	¹⁴⁴ Pr
87.0	86.4	¹⁵⁵ Eu	757.4	756.7	⁹⁵ Zr
100.5	100.0	¹⁸² Ta	766.5	765.7	⁹⁵ Nb
105.7	105.2	¹⁵⁵ Eu	811.4	810.6	⁵⁸ Co
122.6	122.0	⁵⁷ Co	835.5	834.8	⁵⁴ Mn
134.0	133.5	¹⁴⁴ Ce	1121.9	1120.9	¹⁸² Ta
146.1	—	¹⁴¹ Ce, ^{182m} Ta	1189.6	1188.3	¹⁸² Ta
152.9	152.5	¹⁸² Ta	1222.1	1221.2	¹⁸² Ta
176.8	176.4	¹²⁵ Sb	1231.5	—	¹⁸² Ta
179.9	180.2	¹⁸² Ta	1489.5	1488.6	¹⁴⁴ Pr
222.6	222.2	¹⁸² Ta			

Table 2. Main nuclear reactions for the induced radionuclides produced in the nuclear explosion.

Induced Radionuclide	Main Nuclear reaction
^{54}Mn	$^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$, $^{55}\text{Mn}(n, 2n)^{54}\text{Mn}$
^{57}Co	$^{58}\text{Ni}(n, 2n, \beta)^{57}\text{Co}$
^{58}Co	$^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$
^{182}Ta	$^{181}\text{Ta}(n, \gamma)^{182}\text{Ta}$, $^{182}\text{W}(n, \gamma)^{182}\text{Ta}$, $^{182}\text{W}(n, p)^{182}\text{Ta}$
^{182m}Ta	$^{181}\text{Ta}(n, \gamma)^{182m}\text{Ta}$

Table 3. Observed γ -ray energies of photopeaks of assigned nuclides for sample No.3 on dates of measuring.

Nuclide	Half life	γ -ray energy (keV)	Date of Measuring	
			Dec. 13~16, '77 (446d)	May 18~19, '78 (600d)
^{54}Mn	303d	834.8	+	+
^{57}Co	270d	122.0	+	+
^{58}Co	71.3d	810.6	+	+
^{95}Zr	65.3d	724.0 ; 756.7	+ +	+ +
^{95}Nb	35.3d	765.7	+	+
^{95m}Nb	3.75d	236.2	+	-
$^{106}\text{Ru}-^{106}\text{Rh}$	367d-30s	512.0	+	+
^{125}Sb	2.73y	176.8 ; 427.8 ; 463.5	+ + +	+ + +
^{141}Ce	32.5d	146.1	+	-
^{144}Ce	284.2d	*35.5 ; **40.5 ; 53.4 ; 59.1 ; 80.5 ; 133.5	+ +	+ + +
^{144}Pr	17.3m	697.2 ; 1489.5	+ +	+ +
^{155}Eu	1.81y	86.4 ; 105.2	+ +	+ +
^{182}Ta	115d	67.5 ; 100.0 ; 152.5 ; 179.9 ; 222.2 ; 1120.9 ; 1231.5	+ + + + + + +	+ + + + + + -
^{182m}Ta	16.2m	146.1	+	-

* Characteristic X-ray of $\text{PrK}\alpha_1$

** Characteristic X-ray of $\text{PrK}\beta_1$

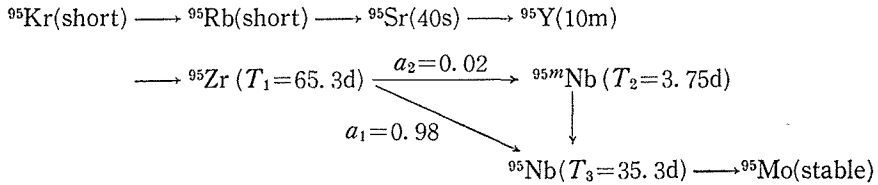
分裂生成核種として ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{95m}Nb , $^{106}\text{Ru}-^{106}\text{Rh}$, ^{125}Sb , ^{141}Ce , $^{144}\text{Ce}-^{144}\text{Pr}$, ^{155}Eu が含まれていることが分り、誘導放射性核種としては、 ^{54}Mn , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{182}Ta が見られる。これら誘導放射性核種は核爆発の際、多量に生成された中性子と核爆弾の構造上の材料との間の核反応の結果生じたものと考えられる。Table 2 にその主なる生成反応をか

かげる. Table 3 は試料 No. 3 に含まれる放射性核種の光電ピークの時間的推移を核種別に示したものである. Table 1 と Table 3 から分るように核爆発後 446 日および 600 日経過した時点において, γ 線スペクトルには定性的な差異は殆ど見られない. 僅かに ^{141}Ce (146.1 keV) と ^{95m}Nb (236.2 keV) および ^{182}Ta (1231.5 keV) が爆発後 446 日の γ 線スペクトルには見られるが爆発後 600 日の γ 線スペクトルでは消えて見られない. これに反し $\text{PrK}\alpha_1$ と $\text{PrK}\beta_1$ の特性 X 線のピークは爆発後 446 日の γ 線スペクトルには見られないが爆発後 600 日の γ 線スペクトルにはよく現われている. これは新たに取換えた $\text{Ge}(\text{Li})$ 検出器の特性によるものかと思われる.

5. 放射性降下物の年令推定

5.1. ^{95}Zr と ^{95m}Nb の放射能比による方法

質量数 95 の崩壊系列は次のとおりである¹²⁾.



^{95}Zr の先行核種の半減期は ^{95}Zr のそれよりはるかに短いので, ^{95}Zr が生成され, 崩壊し始める時刻を核爆発の時刻としても放射性降下物の年令決定にはさしつかえないものとする. いま核爆発の時刻から測った時間 t における ^{95}Zr と ^{95m}Nb の放射能比を R_a とすると,

$$\begin{aligned}
 R_a = & 1 / \left[\frac{T_1}{T_1 - T_3} \left(a_1 + \frac{a_2 T_1}{T_1 - T_2} \right) \right. \\
 & - \frac{a_2 T_1 T_2}{(T_1 - T_2)(T_2 - T_3)} e^{-\ln 2 \cdot (T_1 - T_2)t / T_1 T_2} \\
 & - \frac{T_1}{T_1 - T_3} \left(a_1 + \frac{a_3 T_3}{T_3 - T_2} \right) e^{-\ln 2 \cdot (T_1 - T_3)t / T_1 T_3} \\
 & + \frac{T_1}{T_2 - T_3} (e^{-\ln 2 \cdot t / T_2} - e^{-\ln 2 \cdot t / T_3}) \frac{N_{20}}{N_{10}} \\
 & \left. + \frac{T_1}{T_3} e^{-\ln 2 \cdot (T_1 - T_3)t / T_1 T_3} \frac{N_{30}}{N_{10}} \right] \quad (1)
 \end{aligned}$$

ここに T_1, T_2, T_3 はそれぞれ $^{95}\text{Zr}, ^{95m}\text{Nb}, ^{95}\text{Nb}$ の半減期, a_1, a_2 はそれぞれ $^{95}\text{Zr} \rightarrow ^{95m}\text{Nb}, ^{95}\text{Zr} \rightarrow ^{95}\text{Nb}$ における分岐比にして, N_{10}, N_{20}, N_{30} はそれぞれ $t=0$ における $^{95}\text{Zr}, ^{95m}\text{Nb}, ^{95}\text{Nb}$ の原子数である. $T_1=65.3\text{d}, T_2=3.75\text{d}, T_3=35.3\text{d}, a_1=0.98, a_2=0.02$ とおくと,

$$R_a = 1/[2.17932 + 0.002522e^{-0.17422t} - 2.1818e^{-0.0090211t} + 2.0697(e^{-0.0090211t} - e^{-0.17422t}) \cdot N_{20}/N_{10} + 1.8499e^{-0.0090211t} \cdot N_{30}/N_{10}] \quad (2)$$

核爆発の時刻 $t=0$ のとき $N_{20}=N_{30}=0$ の場合, 任意の時間 t における ^{95}Zr と ^{95}Nb の放射能比を R_{a0} とすると, 式(2)から

$$R_{a0} = 1/[2.17932 + 0.002522e^{-0.17422t} - 2.1818e^{-0.0090211t}] \quad (3)$$

核爆発後 4 日から 1000 日にわたる期間において, 同一の放射能比の値に対応する R_a と R_{a0} による年令の理論的誤差を Table 4 に示す. また Table 5 は瞬間的に行なわれた核分裂の際質量数 95 に属する核分裂生成物の原子数すなわち収率値に関する Weaver¹³⁾ 等

Table 4. Difference between the ages calculated from the formulas of R_a and R_{a0} for the same value of the activity ratio of ^{95}Zr to ^{95}Nb .

$N_{20}/N_{10} + N_{30}/N_{10}$	Difference between ages (days)
0.001	0.1
0.01	1
0.1	10

Table 5. Atom numbers of fission products belonging to mass chain 95 per 10^4 fissions for instantaneous fission.

	U-235 TH	U-235 HE	U-233 TH	U-233 HE	Pu-239 TH	U-239 HE	U-238 HE
Br	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.6785
Kr	40.2162	10.1498	5.2437	-0.	21.5942	2.9986	63.5720
Rb	212.0843	111.1648	117.0820	58.6639	146.2832	88.8392	218.8706
Sr	277.1108	228.1295	284.1989	221.1415	230.8687	230.7380	192.0092
Y	94.4378	120.8313	179.1254	205.7845	96.3280	154.5029	42.1823
Zr	1.8908	13.5331	26.5186	47.5045	4.2790	25.4117	-0.
CHAIN YIELD	625.7403	483.8086	612.1685	533.0944	499.3532	502.4903	517.3127

	U-235 FI	U-233 FI	U-238 FI	Pu-239 FI
Br	-0.	-0.	11.0342	-0.
Kr	40.3640	5.2235	135.5079	18.7808
Rb	212.4956	117.0960	259.4009	125.8819
Sr	277.5660	202.0487	135.5079	199.9898
Y	94.7588	178.1896	11.0342	82.7369
Zr	1.8911	26.3721	-0.	3.6952
CHAIN YIELD	627.0754	608.9298	552.4851	431.0847

The headings represent the nuclear reactions resulting in the product distributions given beneath them TH, HE and FI represent the energies of the bombarding neutrons for U or Pu, thermal, 14 MeV and fission spectrum respectively.

のデータを示すものである。この表から ^{95}Zr までの累積収率値に比べて、 ^{95}Nb と $^{95\text{m}}\text{Nb}$ の独立収率値は極めて小さいことが分るので、ここでは R_a の代わりに R_{a0} を選ぶ、放射能比を実測によって求めるには、 $^{95}\text{Zr}(724 \text{ keV}, 756 \text{ keV})$ の γ 線と $^{95}\text{Nb}(765 \text{ keV})$ と $^{95\text{m}}\text{Nb}(253 \text{ keV})$ の γ 線を測定する必要があるが、 $^{95\text{m}}\text{Nb}(253 \text{ keV})$ の γ 線は弱く測定しにくいので、これは省き、次の4種の emission ratio を考える。すなわち $[\text{}^{95}\text{Zr}(724 \text{ keV}) + \text{}^{95}\text{Zr}(756 \text{ keV})]/\text{}^{95}\text{Nb}(765 \text{ keV})$, $\text{}^{95}\text{Zr}(724 \text{ keV})/\text{}^{95}\text{Nb}(765 \text{ keV})$, $\text{}^{95}\text{Zr}(756 \text{ keV})/\text{}^{95}\text{Nb}(765 \text{ keV})$, $\text{}^{95}\text{Zr}(724 \text{ keV})/[\text{}^{95}\text{Zr}(756 \text{ keV}) + \text{}^{95}\text{Nb}(765 \text{ keV})]$ をそれぞれ R_{b0} , R_{c0} , R_{d0} , R_{e0} とすると、これらは次の理論式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} R_{b0} &= (a_1/a_3)R_{a0}, & R_{c0} &= (a_{11}/a_3)R_{a0} \\ R_{d0} &= (a_{12}/a_3)R_{a0}, & R_{e0} &= a_{11}R_{a0}/(a_{12}R_{a0} + a_3) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここに a_{11} , a_{12} はそれぞれ $^{95}\text{Zr} \rightarrow ^{95}\text{Nb}$ のとき放射する γ 線 $^{95}\text{Zr}(724 \text{ keV})$ と $^{95}\text{Zr}(756 \text{ keV})$ の分岐比である。また $a_1=0.98$, $a_3=0.99$ および $a_{11}=0.98$, $a_3=0.999^{14)}$ としたとき、分岐比 a_{11} , a_{12} をパラメータとして式(3), 式(4)を用い年令 t に対す R_{b0} , R_{c0} , R_{d0} , R_{e0} の理論値を電子計算機で計算し数表にしておくことと便利である。 N_{20} , N_{30} が既知の場合は、式(4)の R_{a0} の代わりに R_a とおいて得られる emission ratio の理論式 R_b , R_c , R_d , R_e を用いればよい。

5.2 測定結果および考察

測定した試料の γ 線スペクトルにおいて、 γ 線 $^{95}\text{Zr}(724 \text{ keV})$, $^{95}\text{Zr}(756 \text{ keV})$, $^{95}\text{Nb}(765 \text{ keV})$ の光電ピークの面積(カウント数)をそれぞれ A_1 , A_2 , A_3 としこれら γ 線の計数効率をそれぞれ ε_1 , ε_2 , ε_3 とすれば、上記4種の emission ratio R_{b0} , R_{c0} , R_{d0} , R_{e0} の実測値はそれぞれ次の実験式により求められる。

$$\left. \begin{aligned} R_{b0} &= \left(\frac{A_1}{\varepsilon_1} + \frac{A_2}{\varepsilon_2} \right) / \frac{A_3}{\varepsilon_3}, & R_{c0} &= \frac{A_1}{\varepsilon_1} / \frac{A_3}{\varepsilon_3} \\ R_{d0} &= \frac{A_2}{\varepsilon_2} / \frac{A_3}{\varepsilon_3}, & R_{e0} &= \frac{A_1}{\varepsilon_1} / \left(\frac{A_2}{\varepsilon_2} + \frac{A_3}{\varepsilon_3} \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

また上記の3本の γ 線のエネルギー値が接近しているので、計数効率をすべて等しいとみたときの4種の emission ratio をそれぞれ R'_{b0} , R'_{c0} , R'_{d0} , R'_{e0} とすると、これら emission ratio は次の如くなる。

$$\left. \begin{aligned} R'_{b0} &= (A_1 + A_2)/A_3, & R'_{c0} &= A_1/A_3 \\ R'_{d0} &= A_2/A_3, & R'_{e0} &= A_1/(A_2 + A_3) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Table 6 の値を用い式(5)または式(6)より求めた各 emission ratio の実測値を Table 7 に示す。これら emission ratio の実測値と式(4)の各式より求めた理論値とをそれぞれ対比して求めた年令値を Table 8 と Table 9 に示す。ここに Table 8 と Table 9 は式(4)によって $a_1=0.98$, $a_3=0.99$ とした場合と $a_1=0.98$, $a_3=0.999$ とした場合に算定された年令推定値を示すものである。試料No. 1 と試料No. 2 によって核爆発後4日から80日

Table 6. Photopeak areas (counts) and counting efficiencies of ^{95}Zr (724keV), ^{95}Zr (756keV) and ^{95}Nb (765keV).

Sample	Measuring date	^{95}Zr (724 keV)		^{95}Zr (756 keV)		^{95}Nb (765 keV)	
		A_1	ϵ_1	A_2	ϵ_2	A_3	ϵ_3
No. 1	Sept. 30, '76	4564	0.007409	3929	0.007086	540	0.007002
No. 1	Oct. 29, '76	55630	0.007203	66357	0.006879	68208	0.006794
No. 2	Dec. 15, '76	115909	0.015467	138502	0.014361	281986	0.014146
No. 3	Dec. 16, '77	45576	0.019163	53470	0.018428	210016	0.018238

Table 7. Measured values of the emission ratios.

Sample Measuring Date	Emission ratio							
	R_{b_0}	R'_{b_0}	R_{c_0}	R'_{c_0}	R_{d_0}	R'_{d_0}	R_{e_0}	R'_{e_0}
No.1 Sept. 30, '76	15.17724	15.72778	7.98756	8.45185	7.18968	7.27593	0.97532	1.02126
Oct. 29, '76	1.73005	1.78845	0.76924	0.81559	0.96078	0.97286	0.39232	0.41341
No.2 Dec. 15, '76	0.85975	0.90221	0.37594	0.41105	0.48381	0.49117	0.25336	0.27565
No.3 Dec. 16, '77	0.45851	0.47161	0.20653	0.21701	0.25197	0.25460	0.16562	0.17297

までの強放射能粒子の年令を推定するのに、 $a_1=0.98$, $a_3=0.99$ の場合と $a_1=0.98$, $a_3=0.999$ の場合を比較して見ても、それぞれの各 emission ratio により算定された対応する年令推定値には余り差異が認められない。これに反し核爆発後 400 日以上経過した時点において算定された試料 No. 3 の対応する年令値には、かなりの差が生じて来る事がわかる。またこれら算定された年令推定値の真値に対する誤差も著しく大なるものがあり、そのバラツキもまた大きい。さらに各 emission ratio に計数効率の補正をほどこした場合としからざる場合について、算定された対応する年令推定値は核爆発後 4 日と 33 日の場合は殆ど差異は認められないが、爆発後 80 日の場合にはかなりの差が認められるものがあり、爆発後 446 日の場合には算定された対応する年令値に著しい差異が現われてくる事がわかる。また emission ratio R_{c_0} , R_{d_0} , R_{e_0} または R'_{c_0} , R'_{d_0} , R'_{e_0} によって強放射能粒子の年令を推定する場合は分岐比の影響を受けて年令推定値にバラツキが生じ、どの emission ratio による年令推定値が最も誤差が少いか真値が未知の場合はその判定がむずかしい。これに反し R_{b_0} または R'_{b_0} による年令推定値はかかる分岐比の影響を受けることがなく誤差が最も少いことがわかる。いま 1976 年 9 月 30 日と 1977 年 12 月 16 日にそれぞれ測定した試料 No. 1 と試料 No. 3 について、emission ratio R_{b_0} と R'_{b_0} による年令推定値を Table 10 に示す。核爆発後 4 日経った時点で放射性降下物の年令を推定するのに emission ratio R_{b_0} でも R'_{b_0} でもまた $a_3=0.99$ としても、 $a_3=0.999$ としても年令推定値には余り差異がなく真値と誤差も少ないが、爆発後 400 日以上を経過した時点では $a_3=0.999$ とし計数効率の補正を行なった emission ratio R_{b_0} によって得られた年令値が最も誤差が少く真値とよく一致していることが分る。なお核爆発後 600 日経った時点において放射性降下物の年令推定を試みたが、算定値は得られなかった。今後機会があれば

Table 8. Ages of the hot particlee samples estimated from the various emission ratios in the case of $a_1=0.98$ and $a_3=0.99$.

Sample Date	Branching ratio a_{11}/a_{12}	Age (days)										
		R_{b_0}	R_{c_0}	R_{d_0}	R_{e_0}	Mean value	R'_{b_0}	R'_{c_0}	R'_{d_0}	R'_{e_0}	Mean value	True value
No. 1 Scpt. 30, '76	0.42/0.56	3.4	2.8	4.1	—	3.43	3.3	2.6	4.1	—	3.33	4.00
	0.43/0.55		2.9	4.1	—	3.47		2.7	4.0	—	3.33	
	0.44/0.54		2.9	4.0	—	3.43		2.8	3.9	—	3.33	
	0.45/0.53		3.0	3.9	—	3.43		2.8	3.9	—	3.33	
	0.46/0.52		3.1	3.8	—	3.43		2.9	3.8	—	3.33	
	Mean value		2.94	3.98	—	3.44		2.76	3.94	—	3.33	
No. 1 Oct. 29, '76	0.42/0.56	33.8	32.1	34.6	29.7	32.55	32.6	30.0	34.1	26.1	30.76	33.00
	0.43/0.55		33.4	34.3	32.5	33.50		31.2	33.8	28.7	31.58	
	0.44/0.54		34.3	33.6	34.9	34.15		32.0	33.1	31.0	32.17	
	0.45/0.53		35.2	32.9	37.5	34.85		32.9	32.4	33.3	32.80	
	0.46/0.52		36.1	32.2	40.0	35.53		33.7	31.7	35.7	33.43	
	Mean value		34.22	33.52	34.92	34.12		31.96	33.02	30.96	32.14	
No. 2 Dec. 15, '76	0.42/0.56	83.3	81.0	85.3	79.0	82.15	77.3	71.2	83.4	65.7	74.40	80.00
	0.43/0.55		83.8	83.1	84.2	83.60		73.6	81.3	70.1	75.58	
	0.44/0.54		86.8	80.8	82.4	83.33		76.1	79.1	74.7	76.80	
	0.45/0.53		89.8	78.7	95.6	86.85		78.6	77.0	79.4	78.08	
	0.46/0.52		92.9	76.6	102.0	88.70		81.1	74.9	84.4	79.43	
	Mean value		86.86	80.90	88.64	84.93		76.12	79.14	74.86	76.86	
No. 3 Dec. 16, '77	0.42/0.56	518.0	317	—	275	370.0	366.0	252	—	223	280.3	446.0
	0.43/0.55		372	—	329	406.3		278	—	252	298.7	
	0.44/0.54		485	555	440	499.5		312	452	393	355.8	
	0.45/0.53		492	409	—	473.0		360	371	357	363.5	
	0.46/0.52		—	348	—	433.0		449	325	530	417.5	
	Mean value		416.5	437.3	348.0			330.2	382.7	331.0		

Table 9. Ages of the hot particles samples estimated from the various emission ratios in the case of $a_1=0.98$ and $a_3=0.999$.

Sample Date	Branching ratio a_{11}/a_{12}	Ages (days)										True value
		R_{b0}	R_{c0}	R_{d0}	R_{e0}	Mean value	R'_{b0}	R'_{c0}	R'_{d0}	R'_{e0}	Mean value	
No. 1 Sept. 30, '76	0.42/0.56	3.4	2.8	4.1	—	3.43	3.3	2.6	4.1	—	3.33	4.00
	0.43/0.55		2.8	4.0	—	3.40		2.7	4.0	—	3.33	
	0.44/0.54		2.9	4.0	—	3.43		2.7	3.9	—	3.30	
	0.45/0.53		3.0	3.9	—	3.43		2.8	3.9	—	3.33	
	0.46/0.52		3.0	3.8	—	3.40		2.9	3.8	—	3.33	
Mean value		2.90	3.96	—	3.42		2.74	3.94	—	3.32		
No. 1 Oct. 29, '76	0.42/0.56	33.5	32.1	34.7	29.7	32.50	32.3	30.0	34.2	26.1	30.65	33.00
	0.43/0.55		33.0	34.0	32.1	33.15		30.9	33.5	28.4	31.28	
	0.44/0.54		33.9	33.2	34.5	33.78		31.7	32.5	30.6	31.78	
	0.45/0.53		34.8	32.5	37.0	34.45		32.5	32.1	32.9	32.45	
	0.46/0.52		35.7	31.8	39.6	35.15		33.4	31.4	35.3	33.10	
Mean value		33.90	33.24	34.58	33.81		31.70	32.74	30.66	31.85		
No. 2 Dec. 15, '76	0.42/0.56	82.3	79.8	85.3	77.8	81.30	76.7	70.4	82.3	64.8	73.55	80.00
	0.43/0.55		82.6	83.1	83.0	82.75		72.6	80.2	69.1	74.65	
	0.44/0.54		85.5	80.9	88.4	84.28		75.0	78.1	73.6	75.85	
	0.45/0.53		87.5	78.7	94.1	85.65		77.5	76.0	78.2	77.10	
	0.46/0.52		91.6	76.6	100.2	87.68		80.1	74.0	83.1	78.48	
Mean value		85.40	80.92	88.70	84.33		75.12	78.12	73.76	75.93		
No. 3 Dec. 16, '77	0.42/0.56	444	302	—	264	336.7	343	244	—	217	268.0	446.0
	0.43/0.55		347	—	312	367.7		267	539	244	348.3	
	0.44/0.54		426	461	397	432.0		297	406	281	331.8	
	0.45/0.53		—	375	—	409.5		338	347	336	341.0	
	0.46/0.52		—	328	—	386.0		403	308	450	376.0	
Mean value		358.3	388.0	324.3			309.8	400.0	305.6			

Table 10. Ages of sample No.1 and sample No.3 estimated from the emission ratios R_{b_0} , R'_{b_0} respectively.

Sample	Measuring date	Age (days)				True value
		R_{b_0}		R'_{b_0}		
		$a_3=0.999$	$a_3=0.99$	$a_3=0.999$	$a_3=0.99$	
No. 1	Sept. 30, '76	3.39	3.42	3.27	3.30	4.00
No. 3	Dec. 16, '77	444	518	343	366	446.0

ば、核爆発による放射性降下物の年令値として150日から50日とびに500日までの範囲を実測によって推定し、本方法の精度と確実性を確かめたい。

6 ま と め

1976年9月26日に行われた第19回中国核爆発実験による強放射能粒子を爆発後443日から446日経過した1977年12月13日から同年12月16日にわたり、また爆発後600日経過した1978年5月18日から同年5月19日にかけて、Ge(Li)検出器による γ 線スペクトロメトリーを行ない、かなり多くの放射性核種を同定することができた。そのうち核分裂生成核種としては比較的長い半減期を有する核種 ^{95}Zr , ^{95}Nb , $^{106}\text{Ru}-^{106}\text{Rh}$, ^{125}Sb , ^{141}Ce $^{144}\text{Ce}-^{144}\text{Pr}$ および ^{155}Eu を同定することができた。また誘導放射性核種としては ^{54}Mn , ^{57}Co ^{58}Co が同定され、さらに新たに ^{182}Ta が検出された。

次に核爆発後4日、30日、80日および446日経過した各時点において、 ^{95}Zr と ^{95}Nb の放射能比による強放射能粒子の年令推定を行なった。そのうち emission ratio R_{e_0} , R_{d_0} , R_{e_0} または R'_{e_0} , R'_{d_0} , R'_{e_0} による年令推定値は分岐比の影響を受けてバラツキがあり、同一の分岐比に対する上記各 emission ratio による年令推定値の間にもバラツキが見られる。これに反し emission ratio R_{b_0} または R'_{b_0} による年令推定値はかかる分岐比の影響を全く受けることがなかった。Ge(Li)検出器をふくめて、使用した γ 線スペクトロメータが極めて高分解能なので、 ^{95}Zr (724keV), ^{95}Zr (756keV) および ^{95}Nb (765keV) に近接した妨害核種の γ 線とは完全に分離されて計測することができ、最も若い年令値として4日を1日以内の誤差で3.4日と推定することができた。核爆発後400日以上経過した放射性降下物の年令を推定する場合は $^{95}\text{Nb} \rightarrow ^{95}\text{Mo}$ の際の756keV遷移のときの分岐比 $a_3=0.999$ とし、計数効率の補正をほどこして得られる emission ratio R_{b_0} を用いれば真値に近い年令推定値を得ることがわかった。

終わりに試料の測定に多大の便宜とご協力を頂いた第二精工舎科学機器部技術課の佐藤康彦氏に対し深甚なる感謝の意を表します。また本研究に対し終始変らざる激励を頂いた本学名誉教授、長野工業高等専門学校長森本弥三八先生に対し、深い感謝の意を表したい。

文 献

- 1) 帯刀 正 : 信州大学工学部紀要第43号11-26 (1977)
- 2) T. Mamuro, Y. Matsuda : J. Rad. Reserch 10, 126-132, (1969)
- 3) I. Fujii, K. Onodera : J. Inorg. Nucl. Chem., 31 (7) 1907 (1969)
- 4) 帯刀 正 : 信州大学工学部紀要第29号 1-17 (1970)
- 5) 帯刀 正 : Radioisotopes, 21 (4) 230-234 (1972)
- 6) H.F. Hunter, N.E. Ballou : Nucleonics, 9, No. 5, C-2 (1951)
- 7) C.E. Crothamel, F. Adams and R. Dams : Applied Gamma-Ray Spectrometry, 2nd edition, Pergamon Press (1970)
- 8) C.M. Lederer, J.M. Hollander, I. Perlman : Table of Isotopes, 6th edition, John Wiley & Sons, Inc. (1967)
- 9) ORTEC's Gamma-ray Library listing by energies with branching ratios and halfives.
- 10) 岡野真治, 森内茂 : 原子力工業, 23(8) 98-104 (1977)
- 11) 五十嵐健治, : 原子力工業 23(8) 118-124 (1977)
- 12) S. Katocoff : Nucleonics, 18, 201 (1960)
- 13) L.E. Weaver, et al : U. S. Naval Radiological Defence Laboratory Technical Report USNRDL-TR-633 (1963)
- 14) S.M. Brahmavar, J.H. Hamilton : Phys. Rev. 187(4) 1490 (1969)

信州大学工学部紀要 第44号 正誤表

標 題 第19回中国核爆発実験による強放射能粒子の Ge(Li) γ 線スペクトロメトリーによる分析(続報)

著 者 帯 刀 正

頁	行	誤	正
24	下より 7 行	$\frac{a_3 T_3}{T_3 - T_2}$	$\frac{a_2 T_3}{T_3 - T_2}$
	下より 6 行	$(e^{-\ln 2 \cdot t / T_2} - e^{-\ln 2 \cdot t / T_3}) \frac{N_{20}}{N_{10}}$	$\{e^{-\ln 2 \cdot (T_1 - T_2) t / T_1 T_2} - e^{-\ln 2 \cdot (T_1 - T_3) t / T_1 T_3}\} \frac{N_{20}}{N_{10}}$