ウラン鉱山の放射線衛生調査

井上武一郎* 鏡 光 長** 山田 憲政**
行田 敏行* 鈴木喜志子*

I 緒 言

われわれはさきに、第29回産業医学会、第11回公衆衛生学会、および公衆衛生学雑誌第五巻第3号¹⁾に、核燃料の初期の採鉱および試験的採鉱精錬段階における実状の一端を報告した。

わが国の核燃料物質の開発は、この数年間に飛躍的に進んで、ようやく本格的な採鉱段階に入ろうとしている。今回はこのような段階にあるわが国の核燃料鉱山における危険の評価について検討を加え、報告する。

調査の対象として選んだ人形地区および中津川地区は、鳥取、岡山県境の高原地帯にある。われわれは本年4月および8月の2回にわたって、同地区の二、三の坑道について行なった空気中の Radon、および Radium C' までの半減期の短い壊変生成物の濃度、粉じん、ならびに β 線および γ 線量について、主として論及する。

II 測定方法および測定結果

1) 空気中 Radon 濃度

空気中の Radon 濃度の測定法としては、 α 粒子の電気の効果によって、Pulse 計測を行なう方法と電離電流を測定する方法が、一般に用いられているが、われわれは後者を用い、5 l 容量の電離槽中に坑内の空気を取り、電離槽内の空気中 Radon および平衡にあるその dau-

ghter から放出される粒子によって生じる電離電流を振動容量電位計 Vibrating-Reed-Electrometer で測定し、電離電流の大きさから、予じめ理論的計算によって求めたグラフを用いて、Radon 濃度を求めた。Radon 濃度は、Table 1. に示すように、 $2.8-5.4 \times 10^{-8} \mu\text{c/cc}$ であった。

2) Rn の daughter の測定

米国公衆衛生局の D. H. Huladay²⁾ らは、現場における Rn の daughter の評価方法として、Hand-operated Filter-paper Sampler で、Whatman No.41 Filter-paper または Membranfilter を用いて、14-23 l/min. で空気標本を採取し、sampling後40~90分に Rac 標準で、研究用計器に対して更正し、 α 線について dpm で目盛した Juno 型 Survey meter で α 線を測定し、Figure 1 に示すグラフで、sampling時の α 壊変の値に

Fig.1 Decrease with time of alpha particle emission of radon daughters, Ra A through Ra C', separated from radon and in radioactive equilibrium with each other at time zero, with an initial alpha activity of 100 disintegrations per minute, half due to Ra A and half to Ra C'.

(Huladay, M.A. et al.)²⁾

Table 1 Concentration of Radon in Air ($10^{-8} \mu\text{c/cc}$)

Sampling year	Sampling point	Concentration	Survey instrument	Author
1957	H	271	I. M. Radon meter	Umemoto
"	E	1930	"	"
"	D	340	Vibrating reed electrometer	Inouye et al
1958	H	34.5	"	Tokai Univ
"	D	30.4	"	"
1960	A	2.8	Vibrating reed electrometer	Inouye et al
"	A	5.4	"	"
"	B	4.0	"	"
"	B	4.0	H. S. Radon meter	Fusamura
"	B	10.2	"	Takahashi
"	B	10.8	"	"

* 武蔵工業大学原子力研究所井上研究室(主任：井上武一郎教授)

** 東京慈恵会医科大学公衆衛生学教室昭和35年11月4日受付。特別掲載

Fig.2 Alpha scintillation detector for filter paper samples.

直して, daughter を計算しているが, われわれは電動式低容量ポンプを用い, 集塵効率の高い Asbestos Cellulose Filter (HF 10) を用い, 25 l/min で, 30~60 分 sampling を行ない, Juno の代りに 2 π flow counter で更正した Portable の特殊な α Scintillation Detector (Figure 2) を Portable dectatron scaler につないで標本採取後30分~1時間の α 壊変を測定し, Huladay らのカーブ (Figure 1.)を用いて, sampling 時の α 壊変を求めた。われわれの経験では Huladay らのカーブは測定値とよく一致した²⁾⁴⁾⁶⁾⁷⁾。

D. A. Huladay²⁾ らに従い, sampling 時の Filter-paper 上の壊変の50%を Ra Aによるもの, 50%をRa C' によるものとし, J. H. Hulrey の Data に基き, HF 10 の集塵効率を73%として計算すると,

$$\text{Ra A} : 4 \times 10^{-10} \mu\text{c/cc} \cdots \cdots 0.5 \times 10^{-9} \mu\text{c/cc}$$

$$\text{Ra C'} : \quad \quad \quad //$$

となる。

3) β , γ 線量の測定

mr/hr であらわした線量率の測定はGM管式 survey

Fig.3 Sampling point inside and outside of the uranium mine.

meter を用い, Figure 3 に示した測定地点において坑道中央に立ち, GM管を腰の高さに水平に把持して瞬間線量を測定し, mr/96hr. の蓄積線量の測定は, Figure 3. に示した測定地点において, Film badge を坑内の支柱に96時間正確に連続懸吊して測定した。

測定結果は, Table 2. に示すとおりで 0.05-0.6mr/びよおhr 30mr/96hr. 以下であった。

Table 2 β, γ Dose Rate in Air

		Dose rate(mr/hr)*	Accumulative dose (mr/96hr)**
inside of the mine	A	0.05-0.08	<30
	B	0.05-0.1	<30
	G	0.5-0.6	<30
	I	-	<30
outside of the mine	J	0.035-0.05	-
		-	<30

* GM Survey meter ** Film Badge *** see Fig.3

4) 粉 塵

核燃料鉱山坑内における粉塵量もまた, さく岩, 発破, 積込ピック, ローター積込等, 作業の様態に応じて変動するもので, 房村¹⁾らによる報告があるが, われわれは坑内粉塵の Quality について, 若干の検討を試みた。

(1) 粉塵中の U_3O_8 量

蛍光分析法⁹⁾によると, 粉塵中 U_3O_8 の含有量は 10^{-3} %の order で, 粉塵 1mgあたり 1/100 γ の order であった。空気中の濃度になおすと, $10^{-14} \mu\text{c/cc}$ の order である。

(2) 粒 度

われわれは坑内の沈降粉じんおよび浮游粉じんを水中

に、採取し、集じんした粉じんを懸濁状態より乾燥して、約 20000 倍の倍率で電子顕微鏡写真をとって検索した。

この方法で得られた所見は、電子顕微鏡写真撮影のための処理によって、粉じん粒度に変化を生じるから、空気浮游粉じんの粒度分布をそのままの形で示すものではないが、大体、 $0.01-0.1\mu$ の大きさのものが大部分であった。Figure 4 に坑内空气中浮游粉じん粒子の電子顕

Fig. 4 Dust particles (electron microscopic findings)

微鏡写真を示した。

われわれは浮游粉じんをミヂエット・インピンジャーおよびカスケード・インパクトに、沈降粉じんは水を入れた広口瓶を用いて集めたが、電子顕微鏡写真用の標本はやはりコンサンプラーを用いてとるべきであろう⁷⁾¹¹⁾。

5) 調査時における坑内の保安状況および換気状況
坑内はわが国の金属鉱山としては模範的な保安状態におかれており、通風坑、機械的換気装置も整備をされている。ただし調査時点においては、坑内作業は中止されており送風機は停止され、自然換気の状態

Fig. 5 Air velocity measuring points in a cross section of the mine.

Fig. 6 Anemotherm air meter for mine use.

におかれていた。

坑内気動は Figure 3. に示す場所において、Figure 5. に示すとおり、坑道断面の上・中・下、左・中・右の 9 点を取り、それぞれの点で数度測定をくりかえし、その最小値と最大値を幅で示した。気温および気湿の測定には携帯用 Assmann 通風乾湿計を用い、気動の測定には国産の Anemotherm air meter (Figure 6.) を用いた。測定値は Table 3. に示すとおりであった。

Table 3 Air Movement, Temperature and Humidity in the Mine

***		Air movement (m/sec.)	Humidity (%)	T(°C)inside	T(°C)outside
B	April	0.05-0.24	87	12	12
	August	0.0 -0.15	88	16	25
A	April	0.0 -0.12	87	12	12
	August	0.14-0.34	88	16	25
G	April	0.03-0.14	87	11	12
	August	0.18-0.4	89	23.5	25

*** see Fig. 3

III 考 察

1) 空气中 Rn 濃度

空气中 Rn 濃度は最大許容濃度 $10^{-8}\mu\text{c/cc}$ の数倍の order であった¹²⁾。なお、われわれの測定時点はいずれも、作業休止中で、機械的換気の行なわれていない状態で行なったものであるが、2,3 年前の測定値にくらべると、1 桁乃至 2 桁低い値を示している。これは自然換

気および機械的換気が適切であるためと考えられるが、今後、採掘が進んで坑道が複雑になり、機械的換気が非常に困難な場所で採掘が進められてることが考えられ、その場合、品位の良い鉱床の附近では、空中 Rn 濃度は問題となる程度の濃度に達することが十分考えられるから、坑内空气中 Rn 濃度の観測を定期的に行なう必要があると考える。また空气中 Rn 濃度の低下と最大許容濃度の数値の厳格化に伴って、現場保安用測定器の選択について、再検討する時期にあると考えられる。

10^{-17} の電離電流を測定し得る振動容量電位計が数社から市販されている現状からいえば、測定はやはり今回われわれの用いた方法によるべきであろう。

振動容量電位計は特性が落着くまで数時間を要するという欠点があるが、現在、トランジスター化の傾向があり、全体がトランジスター化されれば、この欠点と同時に小型軽量化という問題も解決する。

10^{-17} A 測定可能なものでは、電離槽の容積はバック・グラウンド程度（東京の研究室内で $2.5 \times 10^{-13} \mu\text{C/cc}$ ）の濃度に対しては 2 l、坑内では 1 l でたりる。電離槽の RaA 等による汚染に対しては、電離槽をコロニウム・スタビライズド・ステンレスで分解し除染しやすいように作らなければならない、相当数の電離槽を用意する必要がある。

2) Rn の daughter

空気中にある RaC' までの daughter の濃度の評価を厳密に行なうことは、きわめて困難な問題である。実用的な方法として、われわれに親元素と子元素が平衡にあるような時期を選び、平衡にあるという仮定をおいて、さきに述べたような方法を用いた。誤差を少なくすむために sampling time は 10 分以内にとどめた方がよく、粗大な α emitter の dust を除くために適当な濾過材またはカスケード・インパクトを前において、最終のステージにアスベスト・セルローズ・フィルターのようなフィルターをおいてとった方がよい。国産の Juno 型 Survey meter は α 線の dpm で目盛りされていないから、そのままではこの目的には用いることができない。むしろ Figure 3. の α Scintillation detector が適当である²⁾³⁾⁷⁾⁸⁾。

3) RaC' までの daughter と平衡にある $10^{-8} \mu\text{C/cc}$ の Rn による肺の組織の受ける線量の見積り²⁾¹³⁾¹⁵⁾¹³⁾¹⁷⁾¹⁸⁾²⁰⁾,

(1) 純粋な ^{222}Rn の濃度 $= 10^{-11} \text{C}/(18^{-8} \mu\text{C/cc})$

(2) 168 時/週 $= 10,080$ 分/週継続被曝

(3) 肺の重量 $= 455 \text{ g}$

(4) 肺の平均空気容量 $= 2750 \text{ cc}$

と仮定して、

A) 肺の受ける平均 RBE 週線量率を計算すると

a) Rn の α 5.486 Mev

RaA の α 5.988

RaC' の α 7.68/19.164 Mev.

b) 肺内 Rn の毎分当りの総壊変数

$$2750 \times 3.7 \times 10^{13} \times 60 \times 10^{-11} = 60.5 \text{ dpm}$$

c) エネルギーを Mev にすると

$$E = 60.5 \times 19.16 = 1167 \text{ Mev}$$

d) 168hr (10,080min.) に 1 g 当りの組織が受ける分は

$$1167 \times 10080 / 455 = 2.59 \times 10^4 \text{ Mev/g}$$

e) g 当りの RBE 週線量になおすと

$$(2.59 \times 10^4) \times 10 / (6.242 \times 10^5) \times 10^3 = 4.15 \times 10^{-3} \text{ rem/week}$$

(β , γ 線は RBE=1 なので negligible と考える)

B) 気管支表層の個々の細胞の受ける週間線量率の計算をすると、

肺内 Rn と Rn daughter による放射線量の分布は一樣でないし、大きい気管支の至層の細胞は最も大量の空気にさらされる。

非常に小さな細胞に対する線量は、空気そのものに対する線量と同じと考えると

a) 1 l 当り毎分当りの Rn 壊変数

$$3.7 \times 10^{13} \times 60 \times 10^{-11} = 22$$

b) α エネルギーは

$$19.6 \times 22 = 425 \text{ Mev}$$

c) 168hr 当りでは

$$425 \times 168 \times 60 = 4.28 \times 10^6 \text{ Mev}$$

d) 38°C の空気 1 l の重さは 1.1387 g

空気 1 g 当りの週間値は

$$4.28 \times 10^6 / 1.1387 = 3.76 \times 10^5$$

e) 週間 RBE 線量になおすと

$$3.76 \times 10^5 \times 10 / 6.246 \times 10^5 \times 10^3 = 0.6 \text{ rem/week}$$

f) 表層細胞に対する線量計算の場合 geometry を 50%をとると、0.3rem/week.

© 40μ までの深さの気管支至面の細胞の受ける週間 RBE 線量率の計算をする。

径 1 cm, 長さ 1 cm で中心部に対する線量に、末端効果の及ばない程度に真直な気管支を考えると、その長さ 1 cm の容積は 0.786 cm^3 内面の面積 3.142 cm^2 と仮定

すると、 $10^{-8}\mu\text{C}/\text{cc}$ の RaC' までの daughter と平衡にある Rn の出す α 線エネルギーは

$$4.28 \times 10^6 \times 0.786 / 10^3 = 3.37 \times 10^3 \text{ Mev}$$

40μ までの深さの組織は比重を 1 とすると

$$3.142 \times 1 \times 4 \times 10^{-3} = 1.257 \times 10^{-2} \text{ g}$$

rem/week になおすと

$$\frac{3.37 \times 10^3 \times 10}{1.257 \times 10^{-2} \times 6.24 \times 10^5 \times 10^3} = 0.0415 \text{ rem/week}$$

4) 空気中 β , γ 線量

空中線量 1 r を組織線量 1 rem に等しいと仮定すると、坑内の β , γ 線量は 1958 年 ICRP 勧告¹²⁾に示された 18 才から一定の週線量率で被曝する場合の、職業的被曝者の生殖腺に対する最大許容線量 0.1 rem/week に対し、1 桁下の線量を示している。これを過去の調査成績と比較すると、坑内線量もまた、1 桁乃至 2 桁低くなっている。しかしながら、品質のよい鉱床のごく近くでは最大許容線量を超えることも十分あり得るから放射線量の探索と個人被曝線量の評価は怠るべきではないと考える。

5) 坑内換気

坑内の空気中のラドンおよび RaC' までの半減期の短い子元素の濃度を最大許容量以下にとどめるためには Tsivoglau¹⁴⁾¹⁶⁾¹⁹⁾²⁰⁾ その他のいうように、機械的換気を行なうことが必要であり、われわれが調査対象として選んだ坑も、ビニール風管を用いて、十分な機械的換気が計画されていた。たまたま、われわれの選んだ調査時点がいずれも作業休止中であり、自然換気の状態にあったため、坑内換気量を実測して、理論的所要風量と比較検討することができなかった。

坑内換気量のための風速、温度勾配、風管内の静圧および全圧の現場用測定機器としては、Anemotherm air meter が好適であり、外国製品より精度がよく、かつ故障の少ない計器が国産されている。坑内における経験から、われわれはさらに堅牢かつ小型軽量の計器 (Figure 6) を製作させて用いている。

IV 結 論

ようやく本格的な採鉱段階に入ろうとしている、わが国の核燃料鉱山について行なった放射線衛生的調査の一端について報告し、ラジウム C' までの半減期の短いラドンの子元素、ラドンおよび β , γ 線量の危険の評価および保安用測定器の選択について考察した。

現段階では危険度も低く、保安状態も好適であるが、本格的な採掘が進められ、坑道が複雑になり、品位の高

い鉱床の附近において、機械的換気が技術的に困難となることも予想されるから、好適な現場保安用測定器の開発と合理的な保安制度の検討および実施を怠ってはならないと考える。

今回は坑内換気について系統的な調査を行なうことができなかったため、データが不足であり、坑内換気について詳細な考察を行なうことはできなかった。

あ と が き

この調査は、日本原子燃料公社当局の御厚意によつて完了することができた。種々便宜を与えられた、日本原子燃料公社三沢理事、開発部員の菊池氏および調査に協力された高橋達海氏はじめ保安係の方々に深謝の意を表する。

またこの調査は東京慈恵会医科大学公衆衛生教室の竹村助教授および東京急行電鉄臨時原子力研究所建設部の酒井技術課長の御援助に負うところが少なくないここに記して、厚く謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 井上武一郎他：日本公衆衛生雑誌 5：3, 昭33
- 2) Huladay, M. A. et al. : U. S. A. E. C. Report AECU-2858, 1954.
- 3) Harris W. B. et al. : U. S. A. E. C. Report NYO-4516, 1951.
- 4) Harley, J. H. : Nucleonics, 11 : 7, 1953.
- 5) Evans, R. D. and Goodman, C. : J. Ind. Hyg. and Toxicol., 22 : 89, 1940.
- 6) Vohra, K. G. : Health Physics, Progress in Nuclear Energy, 1958.
- 7) Harris, W. B. et al. : A. M. A. Arch. Indust. Hyg. and Occup. Med. 7 : 6, 1953.
- 8) Mercer, T. : A. M. A. Indust. Hyg. and Occup. Med., 10 : 5, 1954.
- 9) Voegtlin, C. and Hodge, H. C. : Pharmacology and Toxicology of Uranium Compounds National Nuclear Energy Series, 1949.
- 10) 房村信雄：日本原子燃料公社資料, 昭35.
- 11) Kalmus, E. H. : U. S. A. E. C. Report, 1953.
- 12) Recommendation of the international commission on radiological protection, 1958.
- 13) Cohn, S. H. et al. : A. M. A. Indust. Hyg. and Occup. Med. 7 : 6, 1953.

- 14) Tsivoglau, E. S. et al. : A. M. A. Indust. Hyg. and Occup. Med. 10 ; 5, 1954.
- 15) Torrey, J. D. and Jacoe, B. S. : A. M. A. Arch. Indust. Health, 12 : 4, 1955.
- 16) Miller, S. E. et al. : A. M. A. Arch. Indust. Health, 14 : 1, 1956.
- 17) Tsivoglau, E. C. and Ayer, H. E. : A. M. A. Arch. Indust. Hyg. and Occup. Med., 8 : 125, 1953.
- 18) Tsivoglau, E. C. : A. M. A. Arch. Indust. Health., 14 : 1, 1956.
- 19) Holaday, D. A. : A. M. A. Arch. Indust. Health., 12 : 2, 1955.
- 20) Jammet, H. and Pradel J. : Proceed. of the international conference on the peaceful uses of atomic energy, 13 : 219, 1955.

RADIATION HYGIENE SURVEY IN AN URANIUM MINE

by

Takeichiro INOUE*
Mitsunaga KAGAMI**
Yoshimasa YAMADA**
Yoshio GYOTA*
Kishiko SUZUKI*

For preparation for full-scale mining of uranium in Japan, authors conducted a radiation hygiene survey in uranium mine and discussed the evaluation of health hazard and the selection of radiation hygiene survey instruments.

*Department of Health (Director : Prof. T. INOUE),
Atomic Energy Research Laboratory,
Musashi Institute of Technology.
**Department of Public Health
Tokyo Jikei-kai Medical School.