

表3 本研究班と外部分析機関とのポロニウム測定精度管理

		本研究班 (n = 5)		委託機関	
		Average	SD*	Average	EC**
タバコ葉 (mBq/cigarette)	3R4F	11.4	± 1.5	10.0	± 0.7
	Seven Stars	24.1	± 0.9	22.8	± 1.2
	Marlboro Red	13.0	± 1.4	10.8	± 0.9
主流煙*** (HCI条件 ; mBq/cigarette)	3R4F	1.7	± 0.1	1.6	± 0.1
	Seven Stars	3.8	± 0.2	3.8	± 0.2
	Marlboro Red	2.6	± 0.4	2.1	± 0.1

*SD:standard deviation, **EC:error coefficient

***主流煙の測定結果は、石英フィルターブランクPo-210を含んだ値を表記している

タバコ及びその主流煙中に含まれる
ポロニウム 210 の分析

報告書

平成 25 年 3 月

一般財団法人 九州環境管理協会

1. はじめに

本報告書は、国立保健医療科学院の委託を受けて、一般財団法人九州環境管理協会が、タバコ及びその主流煙の Po-210 分析の結果をとりまとめたものである。

2. 試料一覧

測定試料は、表 1 に示す 6 検体である。

表1 試料一覧

受付No.	試料名
12R1553	3R4FHCL 主流煙
12R1554	セブンスターHCL 主流煙
12R1555	マルボロHCL 主流煙
12R1556	3R4F タバコの葉
12R1557	セブンスター タバコの葉
12R1558	マルボロ タバコの葉

3. 分析方法

酸分解-銀板電着- α 線スペクトロメトリーにて分析、測定を行った。

主流煙試料(フィルター)は送付された全量(3枚/1試料)を、葉は0.5g供試した。トレーサーとしてPo-209標準溶液を18mBq添加し、 HNO_3 と H_2O_2 により加熱分解(フィルターは着色が認められなくなるまで)した。分解乾固物を $\text{HCl}(1+23)$ に溶解、アスコルビン酸を10mg加え、銀板を入れ70~90°Cにて5~6時間加熱攪拌し、銀板上にPoを析出させた。銀板を α 線スペクトロメトリー(Canberra AlphaAnalyst)にて測定し、Po-209とPo-210のピーク面積比からPo-210濃度を求めた。

4. 分析結果

主流煙 Po-210 の分析測定結果を表 2 に、タバコの葉の結果を表 3 に示す。濃度基準日は、Po-210 の分離日（電着日）とした。また濃度誤差は、計数誤差から算出した。

表2 Po-210 分析測定結果（主流煙）

受付 No.	試料名	供試料量	測定時間 (sec)	Po-210濃度 (mBq/試料)	検出下限値 (mBq/試料)	本数/供試量	1本あたり強度 (mBq/cigarette)
12R1553	3R4F HCL 主流煙	全量 (ろ紙3枚)	200,000	9.5±0.6	1.8	6	1.6±0.1
12R1554	セブンスター HCL 主流煙	全量 (ろ紙3枚)	200,000	23.0±1.1	3.3	6	3.8±0.2
12R1555	マルボロ HCL 主流煙	全量 (ろ紙3枚)	200,000	12.3±0.7	2.2	6	2.1±0.1

表3 Po-210 分析測定結果（タバコの葉）

受付 No.	試料名	供試料量 (g)	測定時間 (sec)	Po-210濃度 (mBq/g)	検出下限値 (mBq/g)	葉重量割合 g/1本	1本あたり強度 (mBq/cigarette)
12R1556	3R4F タバコの葉	0.500	200,000	13.5±1.0	3.1	0.740	10.0±0.7
12R1557	セブンスター タバコの葉	0.500	200,000	35.6±1.8	5.4	0.640	22.8±1.2
12R1558	マルボロ タバコの葉	0.500	200,000	17.2±1.5	4.4	0.630	10.8±0.9

[参考]

α 線スペクトロメトリーによる各試料のピーク面積

受付No.	試料名	Po-209領域	Po-210領域
-	操作BL	619	4
12R1553	3R4F HCL 主流煙	776	409
12R1554	セブンスター HCL 主流煙	776	984
12R1555	マルボロ HCL 主流煙	701	480

受付No.	試料名	Po-209領域	Po-210領域
-	操作BL	672	4
12R1556	3R4F タバコの葉	647	243
12R1557	セブンスター タバコの葉	804	791
12R1558	マルボロ タバコの葉	433	207

厚生労働科学研究費補助金（厚生労働科学特別研究事業）
分担研究報告書

タバコのポロニウムの課題に関する文献レビュー

研究分担者 櫻田 尚樹 国立保健医療科学院
研究分担者 稲葉 洋平 国立保健医療科学院
研究分担者 内山 茂久 国立保健医療科学院

研究要旨

本研究においては、タバコ葉及びタバコ主流煙中の有害因子の一つとして含まれる自然放射性核種のポロニウムについて検討を進めるが、ここでは、これまでの測定事例やタバコに含まれるポロニウムに関する研究動向などについて、最近報告された論文をレビューした。

国内外の過去の報告から、Po-210 濃度はタバコ 1 本当たり 8~24 mBq/本 cig（算術平均 14 mBq/本 cig）と示された。今回の測定結果はこれらと合致する範囲であった。またタバコ葉から主流煙への移行比は 0.09~0.49（算術平均 0.18）と報告され、これら報告を元に、1 日 20 本の喫煙を仮定して、線量評価を実施した場合、実効線量として 0.27 mSv/年と評価されていた。

またタバコにポロニウムが含まれる原因は、空気中のラドン-222 およびその娘核種がタバコ葉に附着してその壊変に伴いできたポロニウム-Po-210 を取り込む機会と、リン酸肥料としてウランの豊富な原料を使用し、それらを施肥することにより根から吸収された可能性が比較的早期より指摘されていた。なおこれらの問題にタバコ業界が早くから気づいていたが、内部文書を公開することなく低減対策を取らなかったことなどが報告されていた。

これらに関連して最近各種報告された論文の中から、多くの情報が含まれ今後の対策に有用と思われる論文一つを全訳して本報告書と一緒に掲載した。

A 目的

本研究では、タバコおよびタバコ主流煙に含まれる自然放射性物質のポロニウム - 210 (Po-210) の測定法の開発と評価を目指している。ここではこれらの課題を検討するにあたって理解しておくべき過去の報告について簡単に文献レビューを行い紹介する。

B タバコのポロニウム測定に関する概説

2008年度売上Top20を含む、24銘柄の日本のタバコ葉のポロニウム含有量に関して測定した結

果が2012年にSakodaらにより報告されている¹⁾。なお本論文における測定法は、ガンマ線スペクトロメトリにより実施されている。すなわち、Po-210の分析においては、今回のように化学的に抽出してアルファスペクトロメトリで分析するのが本流ですが、タバコの場合、収穫してからパッケージされるまで約3年ほど経過するため、本報告書・別項にも記載しているウラン系列の中で、Pb-210 とPo-210 が放射性平衡という状況を作る。そのため、Pb-210 が放出する46.5keVの低エネルギーのガンマ線の評価してタバコ葉中の

Pb-210を求め、Po-210の濃度はそれと同等として評価している。本法は簡易であるが、ただし、Pb-210が出すガンマ線は46.5keVと非常にエネルギーが低く、通常放射性セシウムなどを測定しているゲルマニウム半導体検出器ではバックグラウンドの上に重なるため、バックグラウンドが非常に低く、低エネルギー用の測定機器などを準備しないと精度的にも困難なところがある。この論文の中では、表1に示すように諸外国の測定結果もまとめられている。国内のタバコの結果については、表2に示すようにタバコ葉1本当たり2-14mBq(算術平均 8 ± 3 mBq)と、本研究班の値より若干低値であった。このあたりは、測定法の違いが反映されているところも考えられるが、研究班においても多くのタバコブランドについて今後検討が必要と思われる。また、測定結果から被ばく線量評価を行った結果は表3に示されているが、1日20本喫煙をしたと仮定した場合、1年間の実効線量は、Pb-210により $22 \pm 9 \mu\text{Sv}$ 、Po-210より $68 \pm 27 \mu\text{Sv}$ と算出されている(表3)。

岩岡・米原は国内外の論文をレビューし報告している²⁻³⁾。引用論文2)の結果は、原子力安全研究協会においてまとめられた、新版生活環境放射線(国民線量の算定)にまとめられている⁴⁾。その中でPo-210の放射能濃度はタバコ葉1本あたり9.3-23.5mBq(算術平均14mBq)と示され、本研究班のデータもこれらに一致するものであった。また、標準的な喫煙法に基づき主流煙への移行率検討した報告は限られるが、新版生活環境放射線の中ではPo-210の移行率を13%と仮定した場合、1日20本の喫煙により喫煙者の年間線量を計算すると0.051mSvであるとしている。

国連科学委員会UNSCEARレポートでは、消費財及び雑貨からの公衆の線量として、タバコ中のPo-210により推定年間個人実効線量は $10 \mu\text{Sv}$ と評価されている。一方、喫煙者ではPb-210およびPo-210の摂取が顕著に増え、実測された喫煙者の

肺実質組織中のPo-210濃度は、非喫煙者の約3倍であるとまとめられている。

このような中、タバコにポロニウムが含まれる原因は、空気中のラドン-222およびその娘核種がタバコ葉に付着してその壊変に伴いできたポロニウム-Po-210を取り込む機会と、リン酸肥料としてウランの豊富な原料を使用し、それらを施肥することにより根から吸収された可能性が比較的早期より指摘されていた。なおこれらの問題にタバコ業界が早くから気づいていたが、内部文書を公開することなく低減対策を取らなかったことなどが報告されていた⁶⁻⁸⁾。3報のうち2報は日本語の情報も簡単に入手可能であるが、これらのうち、多くの情報が含まれる参考文献6)について、全訳を本報告書別項に掲載した。

なお、タバコの有害物質については、WHOたばこ規制枠組み条約をはじめ、各国でも対応がとられている。アメリカでは、オバマ大統領によって最初に署名された法律であるFamily Smoking Prevention and Tobacco Control Act 2009に基づき、FDAに製品規制に関する一定の権限を付与されている。その中で、Harmful and Potentially Harmful Constituents (HPHCs)としてポロニウムを含む93種をリストし(表6)、製造会社・輸入会社は銘柄あるいはサブ銘柄毎にHPHCの含量をFDAに報告する義務を課し、製品規制を行っている。同リストの中にはポロニウムも含まれている。

C 結論

タバコ煙に含まれるポロニウムの影響を検討するにあたって、最近の報告を中心に測定状況およびポロニウムをめぐる歴史的な対応に関する論文を紹介した。

D 引用文献

1. Sakoda A, Fukao K, Kawabe A, Kataoka T, Hanamoto K, Yamaoka K. Radioactivity of ^{210}Pb in Japanese cigarettes and radiation dose from smoking inhalation. *Radiat Prot Dosimetry*. 2012;150(1):109-13
2. 岩岡 和輝, 米原 英典. 喫煙者の実効線量評価 : タバコに含まれる自然起源放射性核種 *Radioisotopes* 2010; 59(12), 733-739
3. Iwaoka K, Yonehara H. Natural radioactive nuclides in cigarettes and dose estimation for smokers. *J Radioanal Nucl Chem*. 2012; 293: 973-977.
4. 原子力安全研究協会. 新版生活環境放射線 (国民線量の算定) pp166, 2011.
5. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. SOURCES OF IONIZING RADIATION. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly, with scientific annexes. Volume I: Report to the General Assembly, Scientific Annexes A and B.
6. Muggli ME, Ebbert JO, Robertson C, Hurt RD. Waking a sleeping giant: the tobacco industry's response to the polonium-210 issue. *American Journal of Public Health*. 2008; 98:1643-1650 (本報告書に全訳掲載)
7. Rego B. Radioactive smoke. *Sci Am*. 2011; 304(1): 78-81. (日本語訳:B.レゴ タバコに放射性物質 *日経サイエンス* 2011; 4月号:66-70)
8. Karagueuzian HS, White C, Sayre J, Norman A. Cigarette Smoke Radioactivity and Lung Cancer Risk *Nicotine Tob Res*. 2012;14(1):79-90. (日本禁煙学会より、「紙巻タバコ煙の放射能と肺ガンリスク」と題して全訳公開)

E 研究発表

なし

F 知的財産権の出願・登録状況

なし

Table 1. Recent studies of ^{210}Pb and ^{210}Po activities in cigarette tobaccos.

Country	Number of cigarette brands	^{210}Pb (mBq g ⁻¹)		^{210}Po (mBq g ⁻¹)	
		Mean	Range	Mean	Range
			12–3		
Brazil	8	21	0	21	11–27
			21–2		
China	12 (3) ^a	24	6	33	18–29
	9 (2) ^b	–	–	22	17–27
Egypt	10	–	–	17	10–22
Greece	17	14	6–18	–	–
	7	13	4–17	13	7–18
			10–3		
Hungary	29	21	3	22	10–34
Italy	17	–	–	12	7–17
Japan	8	–	–	12	10–15
Pakistan	9	13	7–20	–	–
Poland	14	–	–	13	4–24

^a The number of cigarettes measured was 12 and 3 brands for ^{210}Po and ^{210}Pb , respectively.

^b Two of the nine samples were home-grown tobaccos.

Sakoda A, Fukao K, Kawabe A, Kataoka T, Hanamoto K, Yamaoka K. Radioactivity of ^{210}Pb in Japanese cigarettes and radiation dose from smoking inhalation. *Radiat Prot Dosimetry*. 2012;150(1):109-13 より引用

Table 2. Radioactive concentration of ^{210}Pb and ^{210}Po in Japanese cigarettes.

Sample code	Tar (mg)	Nicotine (mg)	Tobacco weight (g cig. ⁻¹)	^{210}Pb concentration		^{210}Po concentration	
				(mBq g ⁻¹)	(mBq cig. ⁻¹)	(mBq g ⁻¹)	(mBq cig. ⁻¹)
A	14	1.2	0.69±0.02	16 ± 3	11 ± 2	16 ± 3	11 ± 2
B	14	1.2	0.69±0.02	21 ± 3	14 ± 2	21 ± 3	14 ± 2
C	10	0.8	0.63±0.03	17 ± 3	11 ± 2	17 ± 3	11 ± 2
D	7	0.7	0.65±0.01	19 ± 3	12 ± 2	19 ± 3	12 ± 2
E	7	0.7	0.54±0.02	11 ± 4	6 ± 2	11 ± 4	6 ± 2
F	12	0.8	0.64±0.03	9 ± 3	6 ± 2	9 ± 3	6 ± 2
G	10	0.8	0.66±0.02	18 ± 3	12 ± 2	18 ± 3	12 ± 2
H	8	0.7	0.64±0.03	15 ± 3	9 ± 2	15 ± 3	9 ± 2
I	6	0.5	0.62±0.02	11 ± 6	7 ± 4	11 ± 6	7 ± 4
J	3	0.3	0.57±0.01	14 ± 3	8 ± 2	15 ± 4	8 ± 2
K	8	0.7	0.63±0.04	7 ± 3	4 ± 2	7 ± 3	4 ± 2
L	3	0.3	0.56±0.02	13 ± 4	7 ± 2	13 ± 4	7 ± 2
M	1	0.1	0.50±0.00	14 ± 4	7 ± 2	14 ± 4	7 ± 2
N	1	0.1	0.50±0.01	20 ± 4	10 ± 2	20 ± 4	10 ± 2
O	1	0.1	0.60±0.01	15 ± 3	9 ± 2	15 ± 3	9 ± 2
P	6	0.5	0.72±0.02	12 ± 3	9 ± 2	12 ± 3	9 ± 2
Q	5	0.4	0.63±0.01	20 ± 3	13 ± 2	21 ± 3	13 ± 2
R	1	0.1	0.64±0.03	7 ± 3	4 ± 2	7 ± 3	4 ± 2
S	8	0.6	0.60±0.00	4 ± 3	2 ± 2	4 ± 3	2 ± 2
T	12	1.0	0.70±0.02	9 ± 3	6 ± 2	9 ± 3	6 ± 2
U	8	0.6	0.62±0.02	12 ± 3	8 ± 2	13 ± 3	8 ± 2
V	1	0.1	0.66±0.02	6 ± 3	4 ± 2	6 ± 3	4 ± 2
W	1	0.1	0.51±0.03	6 ± 4	3 ± 2	6 ± 4	3 ± 2
X	14	1.1	0.67±0.03	13 ± 3	9 ± 2	13 ± 3	9 ± 2
Mean				13 ± 5	8 ± 3	13 ± 5	8 ± 3
Maximum				21	14	21	14
Minimum				4	2	4	2

Sakoda A, Fukao K, Kawabe A, Kataoka T, Hanamoto K, Yamaoka K. Radioactivity of ^{210}Pb in Japanese cigarettes and radiation dose from smoking inhalation. *Radiat Prot Dosimetry*. 2012;150(1):109-13 より引用

Table 3. Activity intakes and annual committed effective doses from smoking inhalation of ^{210}Pb and ^{210}Po .

Sample code	Activity intake						Effective dose					
	(Bq y ⁻¹)						(μSv y ⁻¹)					
	^{210}Pb			^{210}Po			^{210}Pb			^{210}Po		
A	29	±	5	29	±	5	32	±	6	96	±	17
B	36	±	6	37	±	6	40	±	6	120	±	19
C	28	±	5	28	±	6	30	±	6	92	±	18
D	31	±	5	32	±	5	34	±	6	100	±	18
E	15	±	5	16	±	5	17	±	6	52	±	17
F	14	±	5	15	±	5	16	±	6	48	±	17
G	30	±	5	30	±	6	33	±	6	100	±	18
H	24	±	5	24	±	5	26	±	6	80	±	18
I	18	±	10	18	±	10	19	±	11	59	±	33
J	21	±	5	22	±	5	23	±	6	71	±	17
K	11	±	5	11	±	5	12	±	6	38	±	17
L	18	±	5	19	±	5	20	±	6	62	±	17
M	18	±	5	18	±	5	20	±	6	61	±	17
N	25	±	5	26	±	5	28	±	6	85	±	17
O	23	±	5	23	±	5	25	±	6	76	±	18
P	22	±	5	22	±	5	24	±	6	73	±	18
Q	33	±	5	33	±	5	36	±	6	110	±	18
R	11	±	5	11	±	5	12	±	6	37	±	17
S	6	±	5	6	±	5	6	±	5	19	±	17
T	15	±	5	16	±	5	17	±	6	51	±	17
U	20	±	5	20	±	5	22	±	6	66	±	18
V	11	±	5	11	±	5	12	±	6	36	±	17
W	8	±	5	8	±	5	9	±	5	27	±	16
X	22	±	5	22	±	5	24	±	6	73	±	18
Mean	20	±	8	21	±	8	22	±	9	68	±	27
Maximum	36			37			40			120		
Minimum	6			6			6			19		

Sakoda A, Fukao K, Kawabe A, Kataoka T, Hanamoto K, Yamaoka K. Radioactivity of ^{210}Pb in Japanese cigarettes and radiation dose from smoking inhalation. *Radiat Prot Dosimetry*. 2012;150(1):109-13 より引用

Table 4 紙巻きタバコに含まれるポロニウム210（鉛210）の放射能濃度

(mBq/本)

販売国	ポロニウム210（鉛210）				文献*
	銘柄数	平均値*	最小値	最大値	
日本	8	11.5	10.1	15.0	Takizawaら、1994 ⁵⁾
中国	1	12.5	12.5	12.5	Takizawaら、1994 ⁵⁾
イタリア	17	11.8	6.8	17.5	Desideriら、2007 ⁶⁾
ポーランド	14	13.3	4.2	24.1	Skwarzecら、2001 ²⁾
エジプト	2	16.6			Khaterら、2004 ³⁾
ギリシャ	7	10.5 (10.7)	2.9	13.4	Savidouら、2006 ¹⁾
中国	7	14.6	11.1	18.3	Tokonamiら、2008 ⁷⁾
ハンガリー	29	22.0 (20.9)	10.0	33.5	Kovacsら、2007 ⁸⁾
日本	5	18.8	12.1	27.8	Okabayashiら、1975 ⁹⁾
フィンランド	8	11.0	7.8	14.4	Mussaloら、1985 ¹⁰⁾
アメリカ	2	12.2	11.8	12.6	Rajewskyら、1966 ¹¹⁾
アメリカ	4	15.7	14.4	17.8	Radfordら、1964 ¹²⁾
中国	12	23.5 (21.2)	18.0	29.0	Schayerら、2009 ⁴⁾
アメリカ	3	9.3 (7)	6.0	11.0	Schayerら、2009 ⁴⁾
エジプト	5	15.0	11.3	19.2	Khaterら、2006 ¹³⁾
フィリピン	16	11.7	5.5	16.6	Enriquezら、2008 ¹⁴⁾
日本	16	13.0	10.1	14.5	Enriquezら、2008 ¹⁴⁾
アメリカ	14	11.8	9.2	14.1	Enriquezら、2008 ¹⁴⁾
算術平均値**		14.2			

* : () 内は²¹⁰Pbの放射能濃度

** : 平均値の算術平均

原子力安全研究協会. 新版生活環境放射線（国民線量の算定） pp166, 2011.より引用

* 参考文献

- 1) Savidou, A., Kehagia, K., Eleftheriadis, K., Concentration levels of ²¹⁰Pb and ²¹⁰Po in dry tobacco leaves in Greece, *Journal of Environmental Radioactivity*, 85, 94-102 (2006)
- 2) Skwarzec, B., Ulatowski, I., Struminska, D.I., Borylo, A., Inhalation of ²¹⁰Po and ²¹⁰Pb form cigarette smoking in Poland, *Journal of Environmental Radioactivity*, 57, 221-230 (2001)
- 3) Khater, A.E.M., Polonium-210 budget in cigarettes, *Journal of Environmental Radioactivity*, 71, 33-41 (2004)
- 4) Schayer, S., Nowak, B., Wang, Y., Qu, Q., Cohen, B., ²¹⁰Po and ²¹⁰Pb activity in Chinese cigarettes,

- Health Physics*, 96, 543-549 (2009)
- 5) Takizawa, Y., Zhang, L., Zhao, L., ^{210}Pb and ^{210}Po in Tobacco-with a special focus on estimating the doses of ^{210}Po to man, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 182, 119-125 (1994)
 - 6) Desideri, D., Meli, M.A., Feduzi, L., Roselli, C., ^{210}Po and ^{210}Pb inhalation by cigarette smoking in Italy, *Health Physics*, 92, 58-63 (2007)
 - 7) Tokonami, S., Kovacs, T., Yoshinaga, S., Kobayashi, Y., Ishikawa, T., ^{210}Po and ^{210}Pb inhalation dose by cigarette smoking in Gansu and Yunnan Provinces, China, *Japanese Journal of Health Physics*, 43, 131-134 (2008)
 - 8) Kovacs, T., Somlai, J., Nagy, K., Szeiler, G., ^{210}Po and ^{210}Pb concentration of cigarettes traded in Hungary and their estimated dose contribution due to smoking, *Radiation Measurements*, 42, 1737-1741 (2007)
 - 9) Okabayashi, H., Suzuki-Yamamoto, M., Hongo, S., Watanabe, S., On the evaluation of Po-210 bioassay for uranium mine workers in Japan for the personal exposure index to radon daughter, *Journal of Radiation Research*, 16, 145-151 (1975)
 - 10) Mussalo-Rauhamaa, H., Jaakkola, T., Plutonium-239, ^{240}Pu and ^{210}Po contents of tobacco and cigarette smoke, *Health Physics*, 49, 296-301 (1985)
 - 11) Rajewski, B., Stahlhofen, W., Polonium-210 activity in the lungs of cigarette smokers, *Nature*, 209, 1312-1313 (1966)
 - 12) Radford, E.P., Hunt, V.R., Polonium-210: A volatile radio element in cigarettes, *Science*, 143, 247-249 (1964)
 - 13) Khater, A.E.M., Al-Sewaidan, H.A.I., Polonium-210 cigarette tobacco, *International Journal of Low Radiation*, 3, 224-233 (2006)
 - 14) Enriquez, E.B., Iwaoka, K., Yonehara, H., Polonium 210 in cigarettes and dose estimates in smokers, PNRI 50th Anniversary, Quezon City, December 8-12 (2008)

Reference	Sample	Experimental condition	Transfer factor of ^{210}Po from cigarettes to mainstream smoke		Transfer factor of ^{210}Po from cigarettes to sidestream smoke		Transfer factor of ^{210}Po from cigarettes to ashes		Transfer factor of ^{210}Po from cigarettes to butts		Transfer factor of ^{210}Po from cigarettes to total smoke	
			Average	Range	Average	Range	Average	Range	Average	Range	Average	Range
Carvalho and Oliveira	3	-	0.18	0.05-0.37	0.61	0.49-0.84	-	-	-	-	-	-
Ferri and Baratta	5	54 ml/puff, 3 s/puff, puff/26 s	0.19	0.11-0.31	0.33	0.25-0.41	-	-	-	-	-	-
Ferri and Baratta	4	54 ml/puff, 3 s/puff, puff/26 s	0.20	0.11-0.31	0.33	0.25-0.41	-	-	-	-	-	-
Hill	3	35 ml/puff, 2 s/puff, puff/60 s	0.10	0.07-0.12	0.30	0.28-0.32	0.18	0.16-0.19	0.37	0.34-0.41	0.4	0.37-0.44
Kelley	11	35 ml/puff, 2 s/puff, puff/58 s	0.09	0.07-0.11	-	-	-	-	-	-	-	-
Mussalo-Rauhamaa and Jaakkola	1	35 ml/puff, 2 s/puff, puff/60 s	0.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nikilova and Parfenov	10	-	0.19	0.15-0.23	-	-	-	-	-	-	-	-
Radford and Hunt	4	35 ml/puff, 2-3 s/puff, puff/50 s	0.22	0.18-0.25	0.25	0.21-0.29	0.09	0.07-0.11	0.29	0.24-0.38	0.47	0.43-0.54
Sakanoue et al.	4	35 ml/puff, 2 s/puff, puff/58 s	0.49	0.15-0.98	-	-	-	-	-	-	-	-
Sehayer et al.	2	35 ml/puff, 2 s/puff, puff/30 s	0.13	0.12-0.14	-	-	-	-	-	-	-	-
Takizawa et al.	9	35 ml/puff, 2 s/puff, puff/60 s	0.10	0.07-0.13	0.41	0.29-0.51	0.21	0.16-0.27	0.29	0.21-0.39	0.51	0.38-0.64
Arithmetic mean ^a			0.18		0.37		0.16		0.32		0.46	

^a Arithmetic mean of the average values

Table 5 The transfer factor of ^{210}Po from cigarettes to mainstream smoke, ashes, cigarette butts, sidestream smoke, and total smoke

表5 紙巻タバコから主流煙，副流煙，灰，吸殻（フィルター），全煙への ^{210}Po 移行比

Iwaoka K, Yonehara H. Natural radioactive nuclides in cigarettes and dose estimation for smokers. J Radioanal Nucl Chem. 2012; 293: 973-977.より引用

表6 US-FDA 「たばこ製品の科学的な諮問委員会」 リスト

成分	発がん性	呼吸器	心血管系	生殖または発達	依存性
アセトアルデヒド	○	○			○
アセトアミド	○				
アセトン		○			
アクロレイン		○	○		
アクリルアミド	○				
アクリロニトリル	○	○			
アフラトキシンB1	○				
4-アミノピフェニル	○				
1-アミノナフタレン	○				
2-アミノナフタレン	○				
アンモニア		○			
アナバシン					○
o-アニジジン					
ヒ素	○				
A-α-C(2-アミノ-9H-ピロリド[2,3-b]インドール)	○		○	○	
ベンゾ[a]アントラセン	○		○		
ベンゾ[j]アセアンスリレン	○				
ベンゼン	○		○	○	
ベンゾ[b]フルオランテン	○		○		
ベンゾ[k]フルオランテン	○		○		
ベンゾ[b]フラン	○				
ベンゾ[a]ピレン	○				
ベンゾ[e]フェナンスレン	○				
ベリリウム	○				
1,3-フタジエン	○	○		○	
ガドミウム	○	○		○	
コーヒー酸	○				
一酸化炭素				○	
カテコール	○				
塩素化ダイオキシン/フラン	○			○	
クロム	○	○		○	
クリセチン	○		○		
コバルト	○		○		
クマリン	○	食品では、禁止			
クレゾール(o-, m-及びp-クレゾール)	○	○			
クロトンアルデヒド	○				
シクロペンタ[c,d]ピレン	○				
ジベンゾ[a,h]アントラセン	○				
ジベンゾ[a,e]ピレン	○				
ジベンゾ[a,h]ピレン	○				
ジベンゾ[a,i]ピレン	○				
ジベンゾ[a,j]ピレン	○				
2,6-ジメチルアニリン	○				
カルバミン酸エチル(ウレタン)	○			○	
エチルベンゼン	○				
酸化エチレン	○	○		○	
ホルムアルデヒド	○	○			
フラン	○				
Glu-P-1(2-アミノ-6-メチルピロリド[1,2-a:3,2'-d]イミダゾール)	○				
Glu-P-2(2-アミノピロリド[1,2-a:3,2'-d]イミダゾール)	○				
ヒドラジン	○	○			
シアン化水素	○		○		
インデン[1,2,3-cd]ピレン	○				
IQ(2-アミノ-3-メチルイミダゾール[4,5-f]キノリン)	○				
イソブレン	○				
鉛	○		○	○	
MeA-α-C(2-アミノ-3-メチル-9H-ピロリド[2,3-b]インドール)	○				
水銀	○			○	
メチルエチルケトン	○	○			
5-メチルクリセチン	○				
4-(メチルニトロソアミノ)-1-(3-ピリジル)-1-プタノン(NNK)	○				
ナフタレン	○	○			
ニッケル	○	○			
ニコチン	○			○	○
ニトロベンゼン	○	○		○	
ニトロメタン	○				
2-ニトロプロパン	○				
N-ニトロソエタノールアミン(NDELA)	○				
N-ニトロソジエチルアミン	○				
N-ニトロソジメチルアミン(NDMA)	○				
N-ニトロソメチルエチルアミン	○				
N-ニトロソモルフォリン(NNMOR)	○				
N-ニトロソノルニコチン(NNN)	○				
N-ニトロソピペリジン(NPIP)	○				
N-ニトロソピロリジン(NPYR)	○				
N-ニトロソサルコシン(NSAR)	○				
ノルニコチン					○
フェノール		○	○		
PhIP(2-アミノ-1-メチル-6-フェニルイミダゾ[4,5-b]ピリジン)	○				
ポロニウム210	○				
プロピオンアルデヒド		○	○		
酸化プロピレン		○			
キノリン	○				
セレニウム		○			
スチレン	○				
o-トルイジン	○				
トルエン		○		○	
Trp-P-1(3-アミノ-1,4-ジメチル-5H-ピロリド[4,3-b]インドール)	○				
Trp-P-2(1-メチル-3-アミノ-5H-ピロリド[4,3-b]インドール)	○				
ウラン235	○	○			
ウラン238	○	○			
酢酸ビニル	○	○			
塩化ビニル	○				

厚生労働科学研究費補助金（厚生労働科学特別研究事業）
分担研究報告書

タバコのポロニウムの課題を考えるための放射線・放射能の基礎情報の整理

研究分担者 櫻田 尚樹 国立保健医療科学院
研究分担者 寺田 宙 国立保健医療科学院
研究分担者 山口 一郎 国立保健医療科学院

研究要旨

本研究においては、タバコ葉及びタバコ主流煙中の有害因子の一つとして含まれる自然放射性核種のポロニウムについて検討を進めるが、対象とする放射線・放射能の基礎情報についてまとめるとともに、その防護体系、生体影響メカニズムについて概説した。

我々の日常生活においては、自然放射線由来の被ばくとして、世界平均で年間 2.4 mSv 程度の被ばくがあることがよく知られている。日本の場合、屋内空気中のラドンによる内部被ばくの寄与が諸外国より少なく、その値が、約 1.5 mSv 程度といわれていた。しかし、近年飲食品中のポロニウム-210 による内部被ばくの寄与が見直されるようになり、食品由来の内部被ばくだけで年間約 1 mSv、自然放射線の合計で約 2 mSv と評価されるようになった。

放射線防護の体系としては、国際放射線防護委員会ICRPは、しきい値なし直線モデル：linear no threshold model, LNTモデルをもとに、正当化、最適化、線量限度について示している。一方でLNTモデルについては、放射線防護における考え方を示したものであり、低線量でのリスク予測に使用することは不適切であるとも述べている。そのような中で、低線量率照射された際の生体の、修復・防護のシステムについても概説した。

A 目的

本研究では、タバコおよびタバコ主流煙に含まれる自然放射性物質のポロニウム - 210の測定法の開発と評価を目指している。一方、放射線・放射能に関しては、平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う東日本大震災において引き起こされた東京電力福島第一原子力発電所事故を契機にして色々な情報を耳にする機会が増加したが、それまでは義務教育においても触れられる機会がほとんどなく系統立った情報を得る機会が少なかった。そこで、ここではポロニウムの評価を行うにあたって理解しておくべき

放射線・放射能の基礎情報について文献的なまとめを含めて紹介する。

B 放射線・放射能に関する概説

放射線利用にあたってその防護の必要性は早くから認識され、国際的な基準が作られている。最も基本となるものとして国際放射線防護委員会 (International Commission on Radiological Protection; ICRP)が放射線防護に関する基本的な考え方や、線量限度などの基準値などについて検討し各種勧告を出している。各国はこの勧告や国際原子力機関IAEAの国際基本安全基準BSSなど

をもとに自国の法令を制定し管理にあっている。日本では平成13年4月の法令改正時に、従来のICRP Publication 26 (1977年勧告) からPublication 60(1990年勧告)¹⁾を取り入れ現在に至っている。ICRPではその後、Publication 103(2007年勧告)²⁾が出され、国内でもこれを取り入れた法令改正が審議中である。

一般に放射線という場合電離放射線をさし、この中には電磁波の1種であるX線、 γ 線と、粒子線である電子線、 β 線、陽子線、 α 線、中性子線、重粒子線などがある。また放射能とは、これらの放射線を出して壊変する性質および量的なものとして放射能の強さを表すときや、放射性物質そのものを表す時にも使用されることがあるので注意する必要がある。ここで問題としているポロニウムは、図1に示すようにU-238からの系列を作る天然放射性核種ウラン系列の崩壊していく過程の中で生じる。歴史的にはキューリー夫妻により1898年にウラン鉱石から発見、分離された。

放射線が組織に照射されるとエネルギーを与えるが、単位質量の組織に吸収されるエネルギーを「吸収線量」といい、グレイ [Gy] で現わされる。一方、吸収線量は同じでも、放射線の種類とエネルギーによって生物学効果は異なる。たとえば1 GyのX線、 γ 線の影響に比べ、1 Gyの中性子線や α 線の影響は大きくなる。そこで、すべての種類の放射線の影響を同じ尺度で評価する指標として放射線の線質に応じた係数(放射線加重係数)を臓器の平均吸収線量に乗じて「等価線量」を計算しシーベルト [Sv] という単位で現わす(図2)。この係数は、X線、 γ 線、電子線は1であり、エネルギーにもよるが中性子線なら10あるいは α 線なら20などとなる。従って同じ1Gyの被ばくであってもX線の場合は1 Svであり、 α 線なら20 Svとなる。また被ばくした個体の影響は被ばくした臓器・器官の種類によってもその生物学的影響は異なる。そこで放射線のリスクに関連した線量

概念として「実効線量」が定義され、各臓器の等価線量にその臓器の係数(組織加重係数)を乗じてすべての臓器について合計したものが使用され、単位としてはこれもシーベルト [Sv] が用いられる(図3)。この実効線量を用いれば、放射線の種類や被ばく部位に依存せず、発がんなどのリスクを放射線防護上は見積もることができる。

身の周りの放射線

日ごろ身近な生活の中で被ばくしている自然放射線源からの被ばく線量は世界平均で年間2.4 mSvといわれる。その内訳としては、1) 大地放射線(地球の大地に含まれる放射性物質からの放射線) 0.48 mSv、2) 宇宙線0.39mSv、3) ⁴⁰Kなど自然放射性核種を飲食品を介して経口摂取する内部被ばく0.29mSv、4) ラドン及びその娘核種による内部被ばく1.2 mSvなどに分類される³⁾。ただし大地放射線などは地域差があり、国内でも西日本のほうがやや高く西高東低である。地球規模でみた場合ブラジル、インド、中国などの一部の地域では大地放射線が日本の10倍以上の値を示し1年に10 mSv程度の所もある。国内の自然放射線量は、以前は年間平均1.5 mSv程度といわれていたが、近年飲食品を介して摂取するPo-210の評価値が幅広く公開されるようになり、図4、表1に示すように年平均約2 mSvと評価されている⁴⁾。その背景には魚介類を多く食する日本人においては自然界に元々存在するPo-210、Pb-210の寄与が大きいことが知られるようになり、一昨年、原子力安全研究協会より「生活環境放射線」の値が改訂され、経口摂取する内部被ばく線量合計が年間平均約1 mSvとなることが評価された⁴⁾。ここで注意しなければならない点は、ポロニウムは自然界に太古から存在する自然放射性核種で有り、その寄与に関するデータが最近になって蓄積・公開されるようになって上記の値が改訂されたのであり、東京電力福島第一原子力発電所事故の影響

を受けてこれらの数値が変更されたものではないことは理解しておく必要がある。

一方、人工放射線源からの被ばくは1) 医療被ばく、2) 過去の核実験に伴う放射性降下物、3) 原子力発電に伴う放射線などに分類され、平均被ばく線量としては医療被ばくが大半をしめる(図4)。世界各国での一人当たり一年間の平均は医療水準により大きく異なり0.5~2.0 mSv程度であるが、日本においては医療被ばくは3.87 mSvと評価され、通常の生活の中で我々は年間約6 mSv被ばくしていると評価されている⁴⁾。

放射線の生物影響

放射線による人体への影響は図5のように分類できる。すなわち被ばくした本人に影響が認められる身体的影響 (somatic effects) と、子供をつくる可能性がある年齢の人が生殖腺に被ばくした場合に、被ばくした人の子孫に影響が現れる遺伝的影響 (hereditary effects) の2つに大きく分けられる。身体的影響はその発生時期から早期影響 (early effects) と晩発影響 (late effects) に分けられ、さらに妊娠中の胚・胎児の被ばくによる影響が含まれる。

またこれらに含まれるそれぞれの影響については、放射線防護の観点からICRPでは、1) 確定的影響と、2) 確率的影響の二つにわけて考えている¹⁾。それぞれの影響とその特徴を図5、6に示す。

すなわち確定的影響は、線量・反応関係においてしきい値を持ち、それぞれの症状においてある一定レベルの線量までは影響の発生はないが、しきい線量を越えると発生確率が増加し、重篤度も高くなる。従って防護の目的としては放射線利用にあたって線量をしきい値以下に抑え発生を防止することである。がんと遺伝的影響以外のすべての放射線による身体的影響がここに含まれる。一方、確率的影響はがんと遺伝的影響が含まれる

が、一つの細胞のDNAとの相互作用に起因する現象と考え、しきい値は無いとみなし、線量に応じて発生頻度の増加が認められると考えられている。またがんも遺伝的影響とともに自然発生があり、被ばくにより放射線に特異的なものが新たに発生してくるわけではなく、発生をゼロに抑えることはできない。従って防護の目標は発生を抑制することと考えられている。現実にはこれらの影響は主に広島・長崎の被爆者を対象とした疫学的研究によって検討されてきており⁵⁾、発がんに関しては高線量の被ばくによる発生率の増加からいろいろなモデルを用いて低線量域のリスクを外挿することで評価されている。一方、遺伝的影響に関しては、動物実験等の結果より疑いの無いところであるが、ヒトではまだ疫学的に検出されていない。

早期影響

細胞の放射線感受性は細胞の種類に依存し異なることが知られている。X線が発見されて間もない20世紀初頭にすでにBergonieとTribondeauはラットの精巣にγ線を照射し、放射線の影響は、1) 増殖の活発な細胞ほど、2) 将来の分裂回数が多い細胞ほど、3) 形態および機能的に未分化な細胞ほど、感受性が高いという一般則を見出ししている(ベルゴニー・トリボンドーの法則)。もちろん全てがこの法則に当てはまるものではないが、高線量の放射線被ばくにおける早期影響は、細胞再生系といわれる幹細胞からの分化・分裂を繰り返している臓器(典型的なものとしては造血器、消化器および皮膚など)のダメージに基づくものであり、表2のようにまとめられる。すなわち数Svの被ばくを受けると被ばく後2~6週間をピークに造血障害により感染に対する防御機能が失われるとともに出血傾向を示す。従って、無菌室等にて抗生剤を投与しながら、必要に応じて輸血や、骨髄移植などの造血系幹細胞