



## 原子力機構人形峠環境技術センターと三朝ラドン効果研究

石 森 有<sup>1)</sup>

(平成 26 年 11 月 25 日受付, 平成 26 年 12 月 10 日受理)

### Current Status of the Projects of JAEA Ningyo-toge and Investigation of Properties of Radon Hot Springs in Misasa

Yuu ISHIMORI<sup>1)</sup>

#### Abstract

This paper shows radon measurement techniques of Ningyo-toge Environmental Engineering Center of Japan Atomic Energy Agency (JAEA Ningyo-toge), and gives an outline of a collaborative study by Okayama University and JAEA on properties of radon hot springs in Misasa. JAEA Ningyo-toge performs studies on environmental behavior of radon in water and in air in/around uranium mine sites. The calibration techniques for radon measurements at JAEA Ningyo-toge and the radon concentrations in water around Ningyo-toge are illustrated. Based on these radon related techniques, a test facility was developed to expose small animals to radon, and measurement and evaluation methods were also developed to understand the biokinetics of inhaled radon. The inhibitory effects of radon on oxidative damage were observed in model mice with reactive-oxygen- or free radical-related diseases which are applicable to radon hot springs.

Key words : uranium mine, radon test facility, radon concentration in water, Misasa hot springs, radon effect

#### 要 旨

本稿は日本原子力研究開発機構人形峠環境技術センター（以下、センター）のラドン測定技術について紹介し、岡山大学と共同で実施している三朝ラドン効果研究について概説する。センターは、ウラン鉱山とその周辺の水中及び大気中のラドンの環境挙動に関する研究を実施している。センターのラドン測定に係る校正技術と人形峠周辺の水中ラドン濃度を示した。これらのラドン関連技術を基盤として、小動物をラドンに曝露するための試験設備を開発し、吸入

<sup>1)</sup>(独)日本原子力研究開発機構人形峠環境技術センター 〒708-0698 岡山県苫田郡鏡野町上齋原 1550.

<sup>1)</sup>Ningyo-toge Environmental Engineering Center, Japan Atomic Energy Agency, 1550 Kamisaibara, Kagamino-cho, Tomata-gun, Okayama 708-0698, Japan. E-mail ishimori.yuu@jaea.go.jp, TEL 0868-44-2211, FAX 0868-44-2566.

ラドンの体内動態を把握する測定・評価手法を開発した。ラドン温泉の適応症とされる活性酸素関連疾患のモデルマウスで、ラドン吸入による酸化障害の抑制効果を確認した。

キーワード：ウラン鉱山、ラドン試験設備、水中ラドン濃度、三朝温泉、ラドン効果

## 1. はじめに

鳥取・岡山県境に位置する人形峠は、1955年11月12日に日本で初めてウラン鉱床の露頭が発見された我が国の原子力発祥の地であり、また、我が国が世界で唯一原子爆弾の非保有国でありながらウラン濃縮を認められるきっかけとなったウラン濃縮関連施設がある、原子力の平和利用の世界的な象徴として意義深い地域である。日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）人形峠環境技術センター（以下、センター）では、探鉱、採鉱に係る資源技術開発（1955年～1998年）、鉱石等から取り出したウランを六フッ化ウランにする製錬・転換技術開発（1964年～1999年）、ウラン235の比率を高める濃縮技術開発（1978年～2001年）、いわゆる核燃料サイクルの上流側に係る技術開発に取り組んだ。これらは所期の目標を達成し、現在は、鉱山跡措置を含め、技術開発で使用した施設の廃止措置と廃棄物の処理、クリアランスに係る技術開発を進めている。原子炉や再処理施設等とは異なり、天然核種濃度のレベルを考慮して実施しなくてはならない特殊性があり、関連技術の開発を進めながら、意欲的に取り組みを進めている。環境監視分野では、特に、鉱山跡地周辺でのラドンの挙動影響評価に関する研究を実施してきたが、近年、地域への貢献も視野にラドン温泉の効果に係る研究（三朝ラドン効果研究）も実施している。本稿ではセンターのラドン測定技術について紹介し、三朝ラドン効果研究について概説する。なお、放射能泉のうちラドン222を含有する温泉を対象としていることを明らかにするため、「ラドン温泉」という用語を使用する。

## 2. 人形峠環境技術センターのラドン測定技術

原子力機構では、センターの所有する鉱山跡地や周辺環境の監視の一環で、水中や大気中のラドン濃度測定を実施している。一次標準は値付けされたラジウム溶液であり、これを用いて二次標準であるガス封入型電離箱法を校正している。

水中のラドン濃度測定については、3つの方法を標準法としている。一つは、減圧したキュリーびんに試料を採取し、その後、バブリングによりラドンをガス封入型電離箱に封入して測定する手法で、校正方法との類似性が高い。原子力機構ではトレーサビリティの観点から本法の位置づけは高いが、キュリーびんの構造が繊細で野外での試料採取には必ずしも適していない。より簡便な手法として、液体シンチレーションカウンタによる直接法と抽出法を採用している。直接法では、あらかじめトルエンシンチレータを20mL入れた100mLのテフロン製バイアルびんに、底の方からシリンジによって採取した試料を80mL入れて密栓し、液体シンチレーションカウンタで計数する。抽出法は、現在は従来ほど使用していない。2009年度から2013年度に人形峠周辺で採水した試料中のラドン濃度測定結果を表1-1、表1-2に示す。また採水地点の関係図を図1に示す。河川水は0.2～6.3Bq/Lで全体的に低い傾向がある。飲料水は0.5～269.3Bq/Lで、水道水は全体的に低めの傾向があり、井戸水や湧水を利用しているところで100Bq/Lを超えるところがある。坑水は18.1～858.8Bq/Lで、井戸水や温泉水と同程度であるが、降雨や地下水位の影響を受け、濃度変動が大きい傾向がある。

大気中のラドン濃度測定については、ラドン標準校正チェンバ（図2左）を国内で初めて開発し、測定手法の標準化に係る活動を先駆的に実施してきた。天然土壌をラドン源としてラドン標準校正

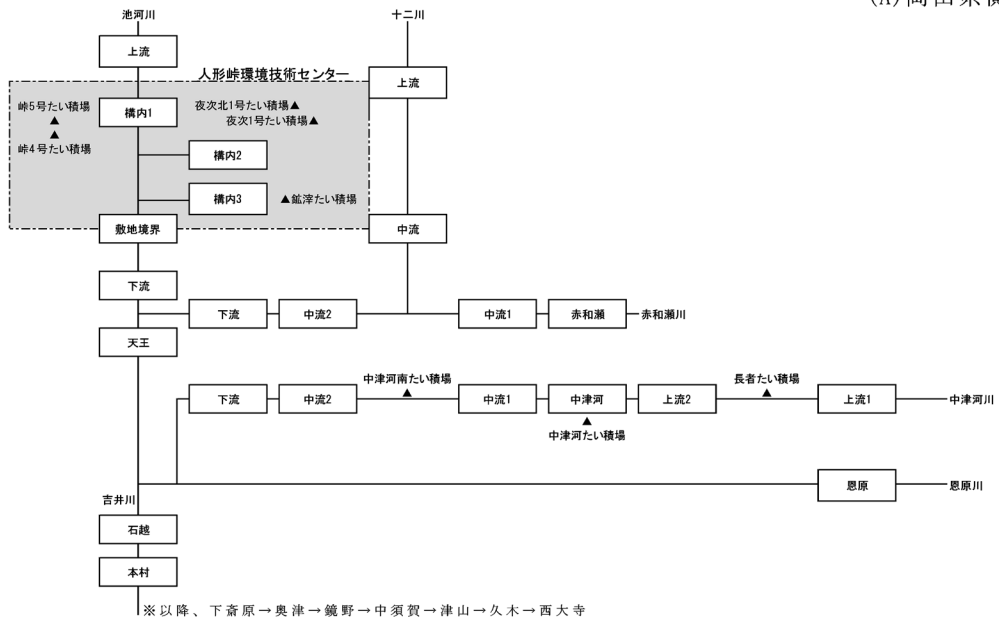
表 1-1 人形峠周辺の水中ラドン濃度 (河川水)

項目	測定地点	水中ラドン濃度 Bq/L	データ 数
河川水	岡山県		
	吉井川		
	池河川		
	上流	0.5 ± 0.2	30
	構内1	0.5 ± 0.2	20
	構内2	2.2 ± 0.7	30
	構内3	4.0 ± 1.1	55
	敷地境界	1.5 ± 2.6	66
	下流	0.7 ± 0.4	10
	十二川		
	上流	1.5 ± 0.3	10
	中流	1.7 ± 0.3	10
	赤和瀬川		
	上流	1.3 ± 0.5	10
	中流1	1.1 ± 0.1	11
	中流2	0.2 ± 0.1	10
	下流	0.3 ± 0.1	10
	天王	1.8 ± 1.3	10
	中津河川		
	上流1	0.5 ± 0.3	20
上流2	2.8 ± 2.8	10	
中津河	0.6 ± 0.2	20	
中流1	1.7 ± 0.5	20	
中流2	0.3 ± 0.1	20	
下流	0.2 ± 0.1	9	
鳥取県			
鳥取川			
恩原	0.7 ± 0.1	10	
石鏡	0.8 ± 0.3	10	
木村	1.3 ± 0.5	10	
下斎原	0.7 ± 0.3	10	
奥津	0.9 ± 0.3	10	
鏡野	0.6 ± 0.2	10	
中須賀	0.9 ± 0.4	10	
津山	0.8 ± 1.0	10	
久木	0.3 ± 0.1	10	
西大寺	0.3 ± 0.1	10	
西川上	0.3 ± 0.1	10	
兵庫県			
千種川	0.3 ± 0.1	10	
小赤松	0.3 ± 0.1	10	
鳥取県			
天神川			
加谷川			
水地山	0.8 ± 0.6	20	
穴鴨	0.8 ± 0.3	10	
岡谷川			
中流	0.4 ± 0.1	5	
丹戸	2.7 ± 0.8	10	
小瀬川	0.8 ± 0.3	20	
三穂川	3.2 ± 1.1	10	
天神川	1.1 ± 0.3	10	
若宮	1.3 ± 0.2	15	
岡谷	1.3 ± 0.3	15	
広瀬川	1.3 ± 0.3	15	
岩倉川	2.8 ± 1.2	52	
赤谷	1.1 ± 0.4	20	
東郷川			
東郷川上流	3.5 ± 0.9	32	
宇坪谷川	1.7 ± 0.6	20	
中流	1.6 ± 0.3	20	
方面	6.3 ± 0.8	20	
方面川			
麻畑	0.4 ± 0.1	20	
川上川	2.4 ± 1.2	20	
東郷川			
東郷川中流	1.6 ± 1.3	20	

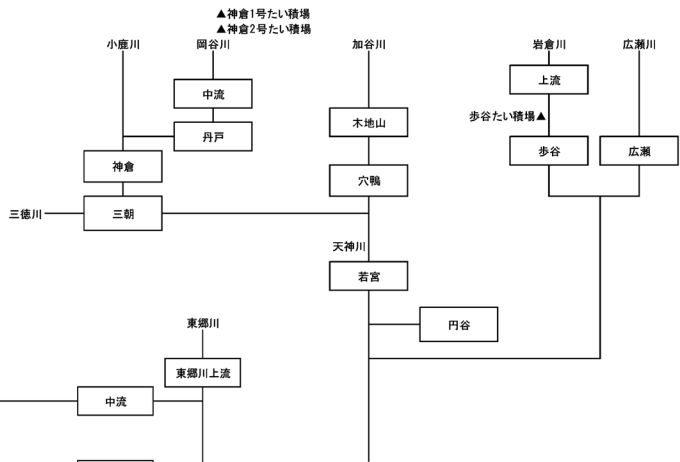
表 1-2 人形峠周辺の水中ラドン濃度 (坑水, 飲料水, 温泉水)

項目	測定地点	水中ラドン濃度 Bq/L	データ 数
坑水	岡山県		
	鉢落たい積場	98.9 ± 75.3	60
	人形峠5号坑	50.5 ± 7.3	20
	中津河南坑	18.1 ± 5.0	20
	中津河坑	63.6 ± 4.4	40
	鳥取県		
	神倉1号坑	278.7 ± 27.7	15
	神倉2号坑	282.0 ± 8.6	15
	方面下1号坑	858.8 ± 400.3	28
	麻畑1号坑	104.5 ± 23.4	21
	麻畑2号坑	266.3 ± 122.1	19
	麻畑3号坑	108.6 ± 131.9	20
	赤谷坑	90.5 ± 11.3	20
	岡山県		
	中津河地区1(井戸水)	59.1 ± 6.4	20
中津河地区2(水道水)	0.5 ± 0.3	20	
中津河地区3(井戸水)	192.6 ± 11.0	19	
赤和瀬地区(井戸水)	39.2 ± 13.8	10	
天王地区(水道水)	0.8 ± 0.8	10	
本村地区(水道水)	0.7 ± 0.7	10	
鳥取県			
神倉地区(水道水)	1.1 ± 0.3	15	
穴鴨地区(水道水)	21.5 ± 3.1	10	
方面地区(水道水)	20.0 ± 6.5	15	
川上地区(水道水)	19.0 ± 8.7	15	
麻畑地区(井戸水)	32.1 ± 4.6	15	
倉吉地区(水道水)	5.9 ± 1.4	10	
広瀬地区(湧水)	269.3 ± 18.7	15	
赤谷地区(湧水)	115.4 ± 134.4	15	
赤谷地区(水道水)	22.4 ± 1.2	15	
温泉水			
鳥取県三朝温泉			
1号泉(三朝町)	770	1	
4号泉(三朝町)	522.7 ± 24.9	118	
5号泉(三朝町)	160	1	
6号泉(三朝町)	320	1	
新1号泉(三朝町)	310	1	
温泉スタンプド	270	1	
株湯(飲泉)	190	1	
熱気浴室(三朝医療センター)	766	1	
飲泉室(三朝医療センター)	496	1	
足湯(温泉街)	537	1	

(A) 岡山県側



(B) 鳥取県側 (天神川水系)



(C) 鳥取県側 (東郷川水系)

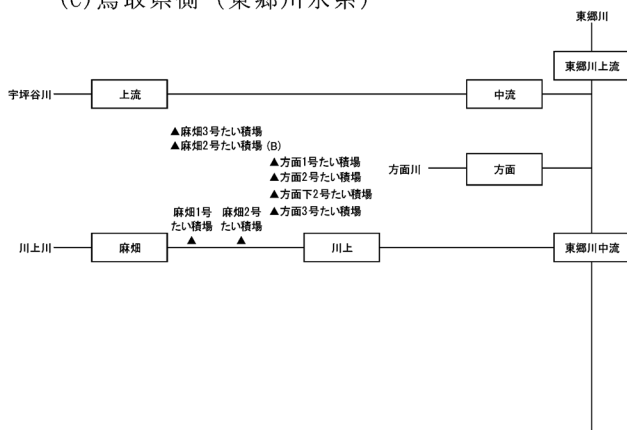


図 1 河川水の採水地点の関係図



図 2 ラドン標準校正チェンバ (左) とラドン吸入試験設備 (右)

表 2 測定器の校正チェンバと動物の吸入試験設備の特徴

項目	標準校正チェンバ (8 m <sup>3</sup> の容積)	吸入試験設備 (14 L×30 ケース=0.42 m <sup>3</sup> の容積)
曝露対象	測定器	マウスなど (呼吸)
ラドン供給方法	瞬間的供給 (静的試験)	連続供給 (動的試験)
評価式	$S_{Rn} = C_{Ra} \times Q \times E$ $S_{Rn}: \text{ラドンの供給量 } Bq$ $C_{Ra}: \text{ラドン源のラジウム濃度 } Bq/g$ $Q: \text{ラドン源の量 } g$ $E: \text{散逸割合 } \sim 0.2 (\text{土壌})$	$SR_{Rn} = \lambda \times P = \lambda \times C_{Ra} \times Q \times E$ $SR_{Rn}: \text{ラドンの供給率 } Bq/s$ $\lambda: \text{ラドンの壊変定数 } 2.1 \times 10^{-6} \text{ } 1/s$ $P: \text{ラドンの発生量 } \text{個}/s$ $C_{Ra}: \text{ラドン源のラジウム濃度 } Bq/g$ $Q: \text{ラドン源の量 } g$ $E: \text{散逸割合 } \sim 0.2 (\text{土壌})$
ラドン源	天然土壌 (約 20 kg)	天然土壌 (約 200 kg)
ラドンの必要濃度	数千 Bq/m <sup>3</sup> (3000 Bq/m <sup>3</sup> )	数千 Ba/m <sup>3</sup> (BG~4000 Ba/m <sup>3</sup> ) ※5 ケース毎の段階的濃度
トロンの影響	初期のみ考慮	常に考慮

チェンバ内に供給し、ガス封入型電離箱法により標準的なラドン場として値付けし、様々な測定機器の校正や性能評価に係る試験を実施している。このようなラドンの測定、取扱い技術が、三朝ラドン効果研究に係る動物試験施設 (図 2 右) の開発の基盤となった。大規模な小動物のラドン吸入試験を目的とした設備としては、国内で初めての開発である。ラドン校正チェンバでは曝露対象が測定器であるため、密閉系での試験が可能であるが、動物試験では新鮮な空気を供給し続ける必要があるため、表 2 の評価式で明らかのように、ラドン供給量は 10<sup>6</sup> のオーダーで差がある。この結果、吸入試験設備ではラドン校正チェンバと同程度の濃度で試験するために、ラドン源を増やして供給量を増やしたり、供給先となるチェンバの容積を小さくして濃度を高めたりする工夫が必要となる。

吸入試験設備の評価式は開放系のラドン供給に対して応用でき、例えば、高々数kgのラドン源では、人工ラドン温泉を作ることが困難であることが明白に評価できる。

### 3. 三朝ラドン効果研究

三朝温泉（鳥取県）や欧州のいくつかの地域では、高められたラドン環境を利用して、疾病の症状緩和や治療が行われている。適応症は気管支喘息など呼吸器疾患、関節リウマチ、変形性関節症など疼痛性疾患、慢性膀胱炎、消化性潰瘍、胃腸炎など消化器疾患、高血圧、動脈硬化、糖尿病など生活習慣病など、活性酸素関連の疾患が多いことが特徴である。このことから、ラドンの効果については、抗酸化機能の亢進など、低線量 X 線や $\gamma$ 線で確認された現象と類似の現象が関連している可能性が示唆される。ラドンが体内へ侵入する経路は、吸入（呼吸）、経口（飲水）、経皮（皮膚吸収）の3通りが考えられるが、最も有効な経路については特定されていない。通常、理学、作業、薬物などの療法と併用され、また、ラドン自体の効果ではなく、ラドンが高くなる環境（たとえば高温多湿にするため気密性を高くした結果、ラドン濃度も高くなった空間など）を利用している事例も多い。

岡山大学と原子力機構は、低線量放射線域でのラドン吸入に起因する影響効果に係る共同研究を2007年度から実施している。国立大学として唯一温泉療法に取り組む機関である岡山大学病院三朝医療センターは臨床的な知見に基づく研究課題設定を、低線量 X 線などによる生体応答に係る動物実験の経験がありラドンに係る試験も実施していた岡山大学大学院保健学研究所は研究管理および生体応答評価を、ラドン測定・評価、制御技術がある原子力機構はラドン吸入試験設備の開発、ラドン濃度の制御、ラドンの体内挙動・線量評価をそれぞれ分担している。ラドン吸入に係る研究テーマは大別すれば2つである。

①ラドン温泉の適応症とされる活性酸素関連疾患のモデルマウスなどで、主にラドン吸入による生体応答を確認し、その結果を解析評価することで、ラドン温泉の効果の機構解明を進める。岡山大学が主に分担し、これまでに以下の成果を得ている。

- ・ラドンによる諸臓器の抗酸化機能の変化を知るうえで最も基本的な条件となる、ラドン濃度と吸入時間の関係について網羅的に検討した。
- ・ラドン吸入に臓器中の抗酸化機能を亢進する効果を確認したことから、症状緩和が期待できる酸化障害への効果について疾患モデルマウスによる検討を行い、肝臓などでのアルコール等誘導酸化障害やI型糖尿病に対する抑制効果を確認した。
- ・疾患モデルマウスの肝障害抑制効果について、ラドン吸入でビタミンCやE投与と同様の抗酸化効果があることがわかった。

②吸入ラドンによる生体応答を定量的に議論し、また、リスクと比較して議論するため、吸入ラドンの体内動態について把握し、各臓器・組織での吸収線量と関連付けて評価する方法について検討する。原子力機構が主に分担し、これまでに以下の成果を得ている。

- ・吸入ラドンの体内動態を測定により実験的に把握し、諸臓器・組織へのラドンの分配について検討した。
- ・吸入ラドンによる生体応答をリスクと比較して定量的に議論するため、ラドンの体内動態モデルを構築し、諸臓器・組織の吸収線量の評価方法について検討した。

詳細については石森ら（2013）、ビタミンCやEとの比較についてはKataoka *et al.* (2012)を参照いただきたい。このほか飲泉の効果や周辺環境の影響について確認する試験も実施している。

#### 4. おわりに

現在センターが進めている事業は長期にわたるものであり、これを円滑に進め、鉱山の跡措置を含め日本の原子力施設の廃止措置技術開発に貢献していくためには、地域との相互理解がこれまで以上に重要である。地域社会の一員としてともに歩むセンターを目指し、技術成果による地域への貢献も念頭に事業を進めていきたいと考えている。

#### 引用文献

- 石森 有, 迫田晃弘, 田中裕史, 光延文裕, 山岡聖典, 片岡隆浩, 大和恵子, 西山祐一 (2013): 極微量ウラン影響効果試験 (共同研究). JAEA-Research 2013-005.
- Kataoka T., Nishiyama Y., Yamato K., Teraoka J., Morii Y., Sakoda A., Ishimori Y., Taguchi T., Yamaoka K. (2012): Comparative study on the inhibitory effects of antioxidant vitamins and radon on carbon tetrachloride-induced hepatopathy. *J. Radiat. Res.*, **53**, 830-839.