

地 热 能 源 开 发 利 用 的 放 射 卫 生 问 题

中国医学科学院放射医学研究所 诸洪达 卢正福综述

卫生部工业卫生实验所 朱昌寿审

发展能源是当今世界各国普遍重视的问题。除了常规能源如煤和石油外,许多国家正在大力发展核动力并注意开发其他新能源,地热能就是其中的一种。近二十年来,地热研究及其开发利用都有了很大的进展,而且展现出广阔的前景。

我国地热资源蕴藏丰富,广泛分布有中、低温地下热水。地热能源开发是我国“七五”期间重点科研攻关项目。可以预期,我国地热资源的开发利用前景将是十分令人鼓舞的。本文着重对地热资源开发利用过程中可能存在的放射卫生问题,作一简要介绍,并对今后开展这方面必要的放射卫生研究,提出一些建议。

一、地热资源分布概况

地热能是蕴藏在地球内部、主要来自放射性元素衰变所生成的热量的一种巨大自然能源。它通过火山爆发、温泉、间歇喷泉及岩石的热传导等方式向地表传送。一般按其温度高低,分为高温地热资源(150°C 以上)、中温地热资源($100\sim 150^{\circ}\text{C}$)和低温地热资源($20\sim 100^{\circ}\text{C}$)。

目前已知地球上仍处在活动状态的火山有820个,其中大约有80%分布在环太平洋地区。至于温泉,迄今由于没有一个统一的统计方法而尚无确切统计数字,但已知的至少有上万处。例如,日本全国有1000多处,泉眼20000多个。冰岛、捷克、匈牙利、阿联等国都拥有上千个温泉或热泉。苏联 40°C 以上的温泉有150处, $60\sim 90^{\circ}\text{C}$ 有40处,接近或达到沸点的有40余处^[1]。

我国目前已发现水温在 25°C 以上的热水点2600多处,半数以上的温泉集中分布在西藏、云南、台湾、广东和福建等省,其次是辽宁、山东、江西、湖南、湖北、四川等省。高温地热资源主要分布在西藏、云南西部及台湾等地;低温地热资源主要分布在东南沿海和滇、川地热带。东南沿海地热带是我国低温温泉最为密集的地带,达500多处。其中广东省250处以上,福建省150多处。

二、地热资源的开发利用

地热资源的利用包括发电和直接利用两个方面。高温地热资源以发电为主,中、低温地热资源则以直接利用为主。

1. 地热发电

目前世界上以地热能作为一次能源生产电力的国家有10多个,1983年总发电量已达319万千瓦。其中美国占1/3以上,达128.37万千瓦,居世界首位。意大利是世界上第一个利用地热发电的国家,1983年其地热发电量为45.7万千瓦,居世界第三位,地热发电年平均发电量约25亿度,占全国发电量1.7%。菲律宾拥有大量的高温地热田,地热发电的发展速度非常迅速。10年前该国仅有一座3000千瓦的小型地热电站,而到1983年6月,已跃居世界第二位,地热发电量达59.35万千瓦^[1]。

我国至1981年止,全国(包括台湾省)只有试验电站七座,总装机容量9000千瓦。最近,拉萨西郊堆龙德庆县玛区高压地热田的试验井已开钻,预期单井发电能力为8000千瓦。

2. 地热直接利用

目前,国内外直接利用地热的领域非常广泛,几乎包括工、农、林、牧、副、渔业以及医疗、卫生和旅游事业。在工业上的利用主要是在轻纺工业及化学工业;在农、林、牧、渔、副业上的利用则主要是用于建造地热温室,培育品种,育秧育苗,种植蔬菜、瓜果、花木,灌溉农田,养鱼,孵化及饲养家禽等。

利用地热采暖近年来发展很快。例如,地处寒带的冰岛,全国有70%以上的人口利用地热采暖,其首都雷克雅未克市已全部“地热化”。预计法国到1990年将有40~50万户利用地热采暖,每年将节省石油100万吨。我国北京、天津等地的一些工厂、机关、医院、宾馆及招待所等,也已不同程度地利用地热采暖。

地热温泉用于“浴疗”(balneology)已有数百年的历史。用于浴疗的医用矿水中氡的含量超过某一水平(如在奥地利为370 Bq/L,我国为111 Bq/L)时则称为“氡浴”。这样的氡泉在世界上有数百个,有些已发展成规模很大的防治中心,例如奥地利的Badgastein氡泉,每年前去住宿的旅游者达110万人,进行热浴100万人次^[2]。希腊约有750个温泉,其中接待氡浴者最多的有17个,约占全部氡浴人数的75%^[3]。日本目前已利用的温泉有13700个,温泉旅馆10000多所,每年前往洗温泉澡者达1亿多人次^[1]。苏联国家卫生系统每天开出的氡浴处方25000次。近来在莫斯科还安装了自动化设备,每天生产9000个 3.7×10^5 Bq的 ^{222}Rn 源,以供大规模氡浴使用^[2]。我国有温泉疗养院100多所,其中有一些(如北京小汤山、广东从化和重庆南温泉等)还建立了矿泉水理疗机构。

除利用温泉疗养治病外,人们还很重视对饮用矿泉水的开发,尤其在欧洲,矿泉水饮用更为盛行,标出氡含量成为质优指标之一。

苏联1950~1967年瓶装矿泉水几乎增长了7倍,1967年的产量为8.5亿瓶,1976年超过12亿瓶,成为世界上瓶装矿泉水出口量最多的国家^[1]。现在,日本也以喝矿泉水为时尚,估计1987年日本矿泉水市场销售额比1986年约增加80%。我国最近在广西发现7处饮用矿泉水,其中有6处是温泉,1处是氡泉。专家们已建议予以开发。

三、可能存在的放射卫生问题

如上所述,地下热水的利用大有作为,特别是地下热水的直接利用更受到广泛重视。然而,所供给的热源主要来自地壳中放射性元素衰变生成的热,不可避免地会将岩石和地下水中的天然放射性物质带入人类环境。在某些情况下,人们为治疗目的人为地加入氡,更增加公众的“技术性升高的天然辐照”。因此,近年来国外在大力发展地热发电和直接利用的同时,也注意它可能带来的辐射危害的问题,特别是氡的危害问题。

氡及其子体是正常地区世界人口所受天然放射性内照射的最主要的贡献者,约占内照射有效剂量当量的60%。联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)在其1982年和1986年报告书中给予相当的重视^[4、5]。

长期以来,人们逐步认识到氡及其子体对人的危害性,但只是到了1924年才第一次明确氡是肺癌的主要原因。又经过40多年的时间,才弄清楚美国、捷克铀矿工肺癌死亡的原因正是由于 ^{222}Rn 及其子体所引起。因此,至今氡的问题仍然是辐射防护的中心课题。尽管尚无氡和氡及其子体公众效应的流行病学调查资料,但大气中氡及其子体对人有有害的效应可通过外推铀矿工辐照所获资料来估计。

1. 地热发电释出的氡气

从全球范围来看,地热发电并不是氡的重要来源,但在局部地区则有可能。据报道^[6],美国1978年地热发电 ^{222}Rn 释出量为

$2.1 \times 10^{13} \text{Bq}$, 大于燃煤发电厂, 也远远大于天然气和油井的贡献。Gagnan R 等人〔7〕曾对意大利 Larderello 和 Monte Amiata 地区的三个地热电站(装机容量分别为 40 万千瓦、1.5 万千瓦和 3 000 千瓦)进行地热流出物中氡的测定, 估计氡年释出量分别为 $111 \times 10^{12} \text{Bq}$ 、 $7.0 \times 10^{12} \text{Bq}$ 和 $1.5 \times 10^{12} \text{Bq}$ 。这表明, 每生产单位电能平均氡大气释放量约为 $400 \times 10^{12} \text{Bq}/100$ 万千瓦, 比燃煤电厂标化释出高 3~4 个数量级。假定氡与其短寿命衰变产物的平衡因子为 0.6, 地热发电厂周围的人口密度为 100 人/公里², 吸入每单位活度的有效剂量当量为 $1.3 \times 10^{-8} \text{Sv/Bq}$, 室内外浓度相等, 则每生产单位能量相应的集体有效剂量当量负担约为 6 人·Sv/100 万千瓦·年。每年世界范围地热发电所致集体有效剂量当量负担约为 10 人·Sv〔4〕。

2. 农、渔、副业地热直接利用的放射卫生问题

由于地热直接利用比地热发电涉及的范围广, 接触的人数多, 向大气中敞开的面积大, 故其存在的放射卫生问题也较多。

地下热水直接用于种植蔬菜、鲜花、灌溉农田、养鱼, 其所含的少量放射性物质不会转移到动、植物机体内, 转移程度如何, 可否食用, 这些都是人们所关心的问题。1981 年, 作者曾受国家水产总局委托, 对某富 ^{226}Ra 温泉水中生长的水生食用生物和某些用温泉水灌溉的农产品的 ^{226}Ra 、 ^{210}Pb 和 ^{210}Po 含量及其分布和转移进行调查, 同时还测定了 ^{226}Ra 、 ^{210}Pb 和 ^{210}Po 在该泉水、稻田和菜地土壤等环境介质中的浓度〔8〕。调查结果表明, 该温泉水 ^{222}Rn 浓度小于 74Bq/L , ^{226}Ra 、 ^{210}Pb 和 ^{210}Po 浓度分别为 2.1Bq/L 、 $8.14 \times 10^{-3} \text{Bq/L}$ 和 $7.03 \times 10^{-4} \text{Bq/L}$; 利用温泉水饲养的鱼、鸭及其生下的鸭蛋, 灌溉农田、菜地生长的水稻和蔬菜, ^{226}Ra 的含量和某些蔬菜 ^{210}Po 的含量, 均高于国内外报道的一般水平。作者还对这三种核素的转

移系数及其与钙含量的关系进行了研究〔8〕。研究结果表明, 鱼塘水中 ^{226}Ra 、 ^{210}Pb 和 ^{210}Po 向螺蛳肉的转移系数(TF)比向鱼肉者高得多。 ^{226}Ra 和 ^{210}Pb 分布与介质钙浓度有关。 ^{226}Ra 在骨壳、鳞与鳍中浓度比肉中高。TF 值以 ^{210}Po 最大, ^{210}Pb 次之, ^{226}Ra 最小。 ^{226}Ra 经根向稻米的 TF 比向蔬菜的低。由土壤到蔬菜可食部分的 TF 值以 ^{210}Pb 最大, ^{210}Po 次之, ^{226}Ra 最小。由土壤向鸭蛋内容物的 TF 值以 ^{226}Ra 最大, ^{210}Po 次之, ^{210}Pb 最小。

3. 瓶装矿泉水的 ^{222}Rn 和 ^{226}Ra

矿泉水含多种微量元素, 如 Mn、Cu、Zn、As 等, 是一种优质饮料。如饮用 CO_2 泉水会给人以爽快感, 饮硫酸钠及镁泉水可促进大便通畅, 因此近年来深受消费者的欢迎。但由于它来自地层深处, 未经加工而直接瓶装出售, 人们对其所含 Ra、Rn 及其子体颇为重视。瓶装矿泉水 ^{226}Ra 和 ^{228}Ra 的含量受多种因素制约, 如矿泉水流经地层的地质结构、母体核素的地质化学、矿泉水源的水 pH 或矿泉水瓶装前的处理情况及矿泉水井的相对深度等。欧洲国家瓶装矿泉水 ^{226}Ra 浓度可高达 1.8Bq/L 〔6〕。McCurdy, DE 等人〔9〕曾对 11 种美国瓶装水和 11 种从欧洲(西德、法国、意大利、瑞士和瑞典)进口的瓶装水 ^{226}Ra 和 ^{228}Ra 浓度进行测定, 发现美国的瓶装水一般都比欧洲的低。其中法国的两种瓶装矿泉水 ^{226}Ra 和 ^{228}Ra 浓度最高, 分别为 0.50 和 0.47Bq/L 。 ^{226}Ra 和 ^{228}Ra 来自不同天然放射系(^{238}U 和 ^{232}Th 系), 这两种 Ra 同位素及其母体元素的地球化学和溶解性完全不同, 它们的含量不存在相关。

食入富 Rn 水对人体所致的辐射剂量来自 Rn 及其子体, 它大部分的剂量是对胃的。水中氡对人所致的剂量一部分来自食入, 另一部分来自吸入。对于 Rn 浓度为 $1 \times 10^3 \text{Bq/L}$ 的水所致年有效剂量当量, 当食入时为 0.5mSv , 吸入时为 6mSv 〔4〕。

4. 氡浴中氡及其子体的致癌危险性

世界上很多地方都将含有很高水平的 ^{222}Rn 水和空气用于治疗各种疾病。在这些治疗设施中,不仅病人由于吸入 Rn 及其衰变产物而受到辐射照射,而且工作人员和当地居民也受到照射。目前研究得最多的是奥地利的Badgastein氡泉^[10]。该泉位于阿尔卑斯山脉的中部,城内共有19个热泉(温度达 48°C),每日供水量超过500万升。从井口喷出的水收集于蓄水池,然后送到遍布全镇的120家旅馆和治疗中心。水的 ^{222}Rn 平均浓度为 $1.48 \times 10^3 \text{Bq/L}$,每天约有 $6 \times 10^9 \text{Bq}$ (每年为 $2 \times 10^{12} \text{Bq}$)的 Rn 扩散到该地区的大气,造成该镇中部室内年平均 Rn 浓度约为 0.37Bq/L (约 0.06WL),城四周约为 0.12Bq/L (约 0.02WL)。1951年又将一个旧金矿辟为天然的吸入治疗设施(空间容积 22000m^3 ,称为“热廊”)。病人和陪同医务人员以及维修工人进入该设施内时受到平均大气氡浓度为 $1.1 \times 10^3 \text{Bq/L}$ (约 22WL)的照射。当地居民和这些设施的工作人员的

年照射量分别为 $0.17 \sim 2.7 \text{WLM}$ 和 $0.67 \sim 40 \text{WLM}$ (见表)。在所有器官组织中,分支细支气管和细分支细支气管因吸入 Rn 衰变产物接受的剂量最高,因此表中同时列出对分支细支气管和细分支细支气管基底细胞产生的平均剂量。

要想对某个氡矿泉的癌症发生率进行统计分析,困难很多。这是因为病人在氡疗过程中在矿泉治疗场所逗留时间不长,在这些场所工作的人员变动很大,而且真正接受很高剂量的人数不会很多。目前唯一可利用的资料是美国和捷克铀矿工肺癌发生率的流行病学调查资料。但是,铀矿山的环境与矿泉环境有很大不同,空气中除含有 ^{222}Rn 及子体外,还存在尘埃、柴油机废气、烟雾及其他影响因素。而且矿工干的是重体力活,其每分钟呼吸容量比坐办公室的人大得多。因此,这些调查结果未必适用于矿泉环境,根据这些调查资料来推导氡泉的危险度值可能会高估实际的危险度。基于这种情况,奥地利Badgastein氡泉考虑采用竞争危险度

表 Badgastein氡泉氡子体年照射量范围值、支气管基底细胞剂量及成人肺癌危险度因子 r_1 ^[10]

人 群 组	人 口 数 (大 约)	照 射 量 (WLM/年)	支 气 管 剂 量 (mSv/年)	成 人 危 险 度 因 子 r_1 : 每年照射量/ 10^5
Badgastein居民(城 郊)	5500	$0.17 \sim 0.60$	$5 \sim 20$	$3 \sim 27$
Badgastein居民(城 中 心)	800	$0.67 \sim 2.70$	$20 \sim 80$	$13 \sim 122$
浴室服务员	150	$1.00 \sim 5.00$	$30 \sim 150$	$20 \sim 225$
“热廊”管理人员	30	$0.67 \sim 6.70$	$20 \sim 200$	$13 \sim 302$
“热廊”医师, 检查员	10	$1.80 \sim 12$	$90 \sim 580$	$36 \sim 540$
“热廊”矿工, 火车司机	10	$30 \sim 40$	$1200 \sim 1600$	$600 \sim 1800$

(Competing risk)和相关协变(relative covariant)的方法对资料进行分析^[10],包括癌的年龄依赖、温泉工作人员变动、吸烟习惯、不同工种以及因来往车辆增加而引起的空气污染等。在未获得这些资料之前,许多作者^[2、10]仍采用UNSCEAR 1977年报告的吸入 Rn 子体诱发肺癌的危险度因子值($r_1 = 20 \sim 45 \times 10^{-5} / \text{WLM/年}$)来代表这类照射危险度因子的最大值。

Uzunov^[2]根据上述UNSCEAR给出的危险度因子值,对保加利亚Momin Prohod矿泉各类人员的危险度因子进行了计算,结果如下:

儿童病人:到该矿泉接受治疗的儿童是患脊髓灰白质炎或其他肢体神经性疾病的患者。一般病人在疗养院逗留数月,有的甚至达数年之久。吸入含有 $\sim 0.4 \text{WL}$ 的空气,每日吸入时间1小时,年吸入时间310天,结果

得出年照射量为0.7WLM。考虑到10岁儿童的剂量年龄依赖(因子 $f_a=2$)和对癌症诱发的敏感性增加(因子 $f_s=8$),结果得出每 10^5 儿童在一年的治疗期的危险度因子(r_t)值为200~500。

吸入治疗:病人吸入含10WL的空气,每天吸入15分钟,每年15天,通常持续3年,总照射时间约12个小时,3年总照射量达0.7WLM。对于成人,这意味3年治疗的总危险度值为12~31,儿童为200~500($f_a=2$, $f_s=8$)。

浴室服务员:这类工作人员每年在治疗室内大约逗留400小时(平均值0.4WL),在浴室附近的房间逗留200小时(0.2WL),在治疗中心的起居室和工作室逗留5100小时(0.06WL),其余时间在户外或其他地方(0.005~0.02WL),年总照射量为6WLM,危险度因子为120~270。

Pohl-Rüling J等人对Badgastein氡泉各类人员的危险度因子(r_t)计算值见表。

四、几点看法和建议

1. 国外七十年代已开始重视地热利用过程中的放射卫生问题的研究,但我国尚未正式全面有计划地开展。零星报道大多是含量水平调查,生态研究很少,对其剂量和危险度估算和评价尚未见报道。因此有必要尽快着手组织这方面研究,重点是进行有关建立地热能源开发和利用的放射卫生标准制订及相应的防护措施的研究。

2. 氡被开发利用于“浴疗”已有悠久历史,但至今尚无任何国际组织的建议书系统地论述氡浴对患者的潜在危险。因此有必要对全国温泉水的放射性及其他主要水质理化指标有计划地进行全面或重点调查。重点调查的核素可包括 ^{222}Rn 、 ^{226}Ra 、 ^{228}Ra 、 ^{210}Pb 、 ^{210}Po 和 ^{220}Rn 等。对不同行业、不同部门利用地热的场所进行典型的放射卫生和辐射剂量学调查及生态学研究,为制订地热

利用中有关含有各种放射性水平的地热流体的适用范围、劳动场所和医用浴泉水及瓶装矿泉水的放射卫生标准提供科学依据。并开展“浴疗”和矿泉水的综合卫生评价的研究。

3. 为了集中攻关,放射部门应参加地热开发利用研究项目,但重点应解决氡的代价-利益分析,如:阐明氡对浴疗治疗是否必要和正当等。Uzunov等人^[2]1981年在其“氡泉氡子体照射的致癌危险性”一文中曾指出:“正如浴疗学家所声称的那样,浴疗对人具有明显的肯定疗效,这是没有问题的,但是氡是否属必要而正当的组分看来是值得怀疑的。考虑到世界范围在努力减少人类有意的电离辐射照射,对如此巨大的人群组,在很大程度上,甚至不加控制地受到一个已知为最强致癌物质,即大气 α 辐射的氡衰变产物的照射,看来是一个明显的时代错误。”辐射诱发肺癌是没有阈值的,因此,了解空气中短寿命氡衰变产物的“净”效应是非常有价值的。由于氡浴治疗正成为传统理疗的常用方法,因而应该对它的危险/利益比进行评估,这就需要进行更多的临床研究,以了解保持其他参数不变,在存在氡或不存在氡的情况下氡的生物效应。当然,有关氡泉的医学研究项目最好由国际机构,如国际放射防护委员会(ICRP)、世界卫生组织(WHO)和国际原子能机构(IAEA)等发起和组织协调。

参 考 文 献

1. 黄尚瑶等:火山·温泉·地热能 1986年,第一版,地质出版社
2. Uzunov I et al; Health Phys 1981, 41: 807~813
3. Danali S et al.; Health Phys 1986, 50 (4): 509~513
4. UNSCEAR Report 1982
5. UNSCEAR Report 1986
6. Travis CC et al; Nuclear Safety 1979;: 20

(6):722

7. Gragnani R et al, in Natural Radiation Environment (KG Uohra et al eds) 1982, p415~421, Wiley Eastern Lid, New Delhi

8. 诸洪达等: 中国环境科学 1987, 7(6):71~75

9. McCurdy DE et al, Health Phys 1980, 40(2):250~253

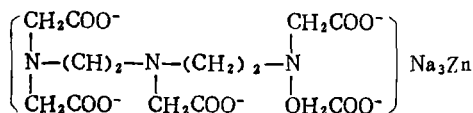
10. Pohle-Ruling J et al, in Natural Radiation Environment (KG Uohra et al eds) 1982, p108~113, Wiley Eastern Lid, New Delhi

新促排灵(Zn-DTPA)对超铀、超钷和稀土核素的促排效果及其应用

上海市放射医学研究所 沈彬源 阮天明 综述 吴德昌* 朱寿彭**审

新促排灵[Zn-DTPA(zinc trisodium diethylenetriaminepentaacetate)]是络合剂二乙三胺五醋酸锌三钠盐的商品名。自六十年代后期,人们对Zn-DTPA越来越重视,迄今所进行的动物实验结果亦颇令人鼓舞[1~4],目前国内外均已开始试用于人体[5~6]。由于它的毒性明显低于Ca-DTPA,延迟用药时的效果至少不亚于Ca-DUPA[8,4],因此Zn-DTPA已成为当前促排研究的重要动向之一[1,2]。

Zn-DTPA的化学结构式为:



Zn-DTPA属于络合剂类药物,在体内能选择性地与沉积的放射性核素如镧(^{140}La)、铈(^{144}Ce)、钷(^{147}Pm)、镅(^{241}Am)和钷(^{239}Pu)的阳离子形成稳定的可溶性络合物,很快地经肾脏排出体外,从而减少了体内放射性物质的沉积量。

Zn-DTPA的促排效果

动物实验结果表明,Zn-DTPA对超铀、超钷和稀土等多种核素有显著的促排作

用[2~6],而且其促排效果与核素的种类、不同种系的动物、不同的靶器官、不同的给药途径与给药方式以及不同的给药时间等因素有关。

1. 对不同核素的促排效果——Zn-DTPA对 ^{239}Pu 、 ^{241}Am 、 ^{252}Cf 、 ^{242}Cm 、 ^{144}Ce 、 ^{147}Pm 和 ^{169}Yb 等都有显著的促排作用,但对不同核素的促排效果不一样。例如它对 ^{241}Am 的促排效果优于 ^{239}Pu [2]。

2. 对不同种系动物的促排效果——Volf等[2]用田鼠和大白鼠进行Zn-DTPA对柠檬酸钷和柠檬酸钷去污效果的比较实验发现,它对大鼠的促排效果优于田鼠。

3. 对不同靶器官的促排效果——Zn-DTPA对肝脏中核素的促排效果优于对骨骼中的核素[2]。

4. 不同给药途径与给药方式的促排效果——对骨中 ^{241}Am 的促排,静脉注入优于腹腔注入,但对肝中 ^{241}Am 的促排则无此差别[2];对气管注入的 ^{144}Ce 在肺中沉积量的降低,吸入给药的效果较肌肉注入的效果好[7]。植入体内的Zn-DTPA脂质体,其释放速度可以控制,试用于动物体内 ^{241}Am 的促排,收到了很好的效果[2]。一般认为,