

氚的放射卫生——研究的现状及前景

上野阳里：保健物理17(4)，505~512,1982(日文)

在进一步开展原子能的利用时，氚的问题更加引人注目。作者作为一个医务工作者，从放射卫生的观点来论述本文。

一、氚的卫生学特性

氚为 ^1H 的质量的3倍，同位素之间质量之比再也没有比这更大的了。水分子中氢键的结合力，氚水比氕水更强。氚的同位素效应也必然在生物体内起作用，生物体内H-T交换的频率必然比T-H交换的频率高。

氚是放射性核素，氚放出 β 粒子的平均能量为5.72KeV，最大能量为 $18.589 \pm 0.019\text{KeV}$ ，其平均射程约为 $0.68\mu\text{m}$ 水，沿着整个射程的平均LET约为 $5.5\text{KeV}/\mu\text{mH}_2\text{O}$ 。由于 β 粒子能量非常低，在生物体内具有不均匀照射的放射卫生学意义。

氚可由天然和人工生成，天然生成氚的主要场所是大气层，其主要核反应是大于 4.4MeV 的中子与 ^{14}N 的反应，几乎全在对流层以上生成，整个地球的累积活度估计为 $1.3 \times 10^6\text{TBq}$ ，其中约30%存在于陆地。陆地水中氚的浓度一般比海水中的高。人工氚主要是核爆炸及核工业产生的，其量远远大于天然生成的氚。估计氚的剂量，1980年天然氚为 $10\text{nGy} \cdot \text{a}^{-1}$ ，沉降物为 $50\text{nGy} \cdot \text{a}^{-1}$ ，核能工业为 $9\text{nGy} \cdot \text{a}^{-1}$ ，核武器生产为 $20\text{nGy} \cdot \text{a}^{-1}$ ，共计 $90\text{nGy} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

氚几乎都以水的化学形式存在，这一点在放射卫生学中很重要。这是因为我们生活的环境以及我们自身均保持着大量的各种各样的水，且分布不均匀，频繁转换。关于氚从体内向外界的排放(几乎均为HTO)，已发表了若干数据，其中长者有超过1000天的。

上述氚的特性不仅在生物学方面有意义，在放射卫生学方面氚也是必须注意的核素。

二、以前有关氚的生物学研究

随着氚应用的扩大，同时也开展了对氚的生物效应的研究。最早是从从事原子弹制造的有关人员的防护为目的而开展的。现将早期研究的结果总结如下：

氚气的危险度约为氚水的 10^{-8} ，

氚气存在于空气中时的最大危险来自其转化生成的氚水；

在吸入氚气的肺细胞 $1\mu\text{m}$ 厚度层内的剂量率可达几千 $\text{rem} \cdot \text{S}^{-1}$ ，但并未引起组织学上的变化；

在氚气中辐照10秒钟时全身剂量约为6rem，在10%的氚气中辐照10分钟约为40rem。韧致辐射效应可以忽略；

氚无生物浓缩现象；

进入DNA的氚所产生的效应并不很大，由结合氚引起的吸收剂量约占总剂量的20%。氚对人的生物效应无年龄差别，品质因子为1.0。

上述结果目前尚未肯定。1973年Silini发表了《哺乳动物中氚的放射毒性》的报告。

在氚的放射卫生学研究中，一个重要的课题是品质因子。早先，ICRP2号和6号出版物中给出氚的 β 射线的品质因子为1.7，后来随着研究的深入，1969年ICRP给出为1.0，一直沿用至今。对这个值基本上是一致同意的。

氚气或氚水的分离、屏蔽和污染物的处理也是重要的问题。操作 3.7TBq 以上氚的实验室定为A级，一般生物学实验室不能操作这样大量的氚。但在聚变反应堆附近，不可避免地会泄漏出大量的氚。例如，100MW的聚变反应堆由一回路泄漏的量估计为 $37\text{GBq} \cdot \text{d}^{-1}$ ，当然这不会全部释入环境。因此，与聚变反应堆开发有关的氚的生物学的研究必须在A级生物学实验室中进行。

三、当前有关氚的生物学的研究

现在在日本，氚的生物学的研究与聚变反应堆的开发研究联系在一起，成为其研究体系的一个部分。

(一) 研究体制

当前氚的研究体制充分反映在科研经费的体制上。目前关于氚的生物效应研究的独立机构尚未建立起来。有关氚的放射卫生学的研究，组织了原子能学会氚研究专门委员会，并提出过很好的报告——《氚，它的性质及行为》(1972年)。假如聚变反应堆的制

究提到议事日程上来的话,那末作为它的一个部分,就会涉及氚的生物学研究。下面列出了1981年能源特别研究中有生物学研究小组的题目:

1. 计划研究项目。(1)氚水的食物链与废物处理的研究;(2)氚的生物效应实验装置——特别是氚的去除装置的开发研究;(3)细胞水平的氚效应的研究和含氚物燃烧装置的开发研究;(4)氚对生物体高分子及细胞的分化、增殖的同位素效应和 β 辐射效应。

2. 征募研究项目。(1)关于氚的生物(人体)效应的综合研究;(2)环境氚被生物体的摄入及在体内的动态;(3)氚对DNA的影响;(4)自然界中氚的行为及其效应的评价;(5)氚对遗传效应分子结构的分析及综合评价。

除文部省外,科学技术厅对大量氚的生物效应研究体制准备以日本放射医学综合研究所(NIRS)为中心。以前,日本原子能研究所曾独立而又详细地进行了氚的放射卫生学的研究。

与国外的关系方面,现在日美之间有合作研究核聚变的协议,作为其中的一个部分,1981年召开了关于氚的放射生物和放射卫生的讨论会,并出版了报告书。

根据世界各国一些研究机构有关核聚变的研究活动,IAEA执行了一个关于不同类型生态系统氚行为的五年协调研究计划,于1978年召开了报告讨论会。只要看看这些报告就知道,氚的生物学研究不限于核聚变,作为环境科学的一部分,它占有一定的地位。

(二) 研究内容

当前日本关于氚的生物学的研究,具有如下若干特点。

氚的生物学研究的人员,开始时先是收集资料,具体研究的第一步是研究有关氚生物研究中的安全措施,这是很有意义的。关于氚生物学研究安全问题的总结讨论会于1981年进行,其报告书《关于氚的安全操作标准》已付印。这方面的研究还在继续进行。

根据上述第一步的研究,对氚投与生物(哺乳类、鱼类)的饲养装置、实验结束后的氚污染生物样品的处理装置、测定氚后的有机氚废液的处理设备以及氚的再利用设备等主要问题已经解决,这些报告人全都是生物学、医学工作者,这也可以说是一个特点。

与这些基础研究同时,还利用现有设备开展了下述研究项目。第一类项目是关于氚在生物圈内的动态,其中首先是哺乳类、鱼类、植物等体内氚水动态

的研究,了解氚水的动态变化以及生物体内某个部分的氚向体外转移的快慢情况。氚在生物体之间的转移、体内迁移与对氚污染者的处理有关。此外,母

表1 氚的剂量与RBE

剂量率, Gymin ⁻¹ .	RBE	标准射线	生物学指标
5.0	1.0±0.06	X	蚕豆根, LD ₅₀
1.0	1.22~1.25	γ	CH ₁ B-14, FAF 28细胞, 生存率
0.77	1.0	γ	蚕豆根, 生存率
0.74	1.2~1.5	γ	V79-S171细胞, DNA损伤
0.45	1.1	γ	CHO细胞, LD ₅₀
0.34	1.7~1.9		V79细胞, HTO, 生存率
0.24~2.13	1.17~0.02	X	人, 淋巴球, 染色体异常
0.12	1.0	γ	鼠, 淋巴球减少
0.099	2.8	γ	鼠, 脾重量减少
0.034	2.0	γ	鼠, 淋巴球减少
0.029	2.2	γ	鼠, 胸腺重量减少
0.025	1.52	γ	蚕豆根, 生存率
0.021~0.049	1.32±0.12	Ra	CF ₁ 小鼠脾重量减少
0.021~0.049	1.52±0.15	Ra	CF ₁ 小鼠胸腺重量减少
0.021~0.049	1.64±0.05	γ	CF ₁ 小鼠红血球 ⁵⁹ Fe的摄取
0.021	1.35	γ	鼠, LD _{50/80}
0.013	2.0	γ	HeLas-3细胞, 增殖率
0.013	1.15	X	L5178 y-R细胞, LD ₅₀ , HTO
0.013	1.87	X	L5178 y-R细胞, LD ₅₀ , TTdR
0.013	2.05	X	L5178 y-R细胞, LD ₅₀ , HTO
0.012~0.018	1.72±0.13	γ	CF ₁ 小鼠, LD _{50/80}
0.0044	1.59	γ	DBA2小鼠, 睾丸损伤, TTdR
0.0028	2.45	γ	DBA2小鼠, 睾丸损伤, HTO
0.00057	1.65	γ	小鼠, 卵子, 死亡率
0.00049	1.64	γ	小鼠, 卵子, 死亡率
0.000057	3.0	γ	小鼠, 卵子, 死亡率
0.000049	3.7	X	Wister鼠, 卵子, 死亡率

体、胎儿之间的转移不只是在放射卫生学上，在环境科学上也很重要，其次是氡向典型生态系统的水、植物、哺乳类、鱼类等转移的模式的研究，其主要问题是氡水是否有生物浓缩现象，如何发现体内残留的不均匀性，其意义涉及生物是否具有区分 ^1H 和 ^3H 并选择性地摄取或选择性地排出的能力问题。这种选择性虽然理论上是存在的，但实际并非如此。还有以促排体内氡为目的的研究，作为临床的重要课题将会得到发展。

第二类项目是生物效应的研究。在日本，这方面的研究起步稍迟。与放射卫生有直接关系的哺乳类氡水平的研究开展较晚，这主要是由于没有操作大量氡的设备。现在用原核生物、哺乳类细胞、昆虫进行遗传和细胞学方面的研究。

对研究内容，把国内外的倾向相比较，有如下差别。在日本，没有做量大的现场作业实验及大动物的污染实验，没有用志愿者做的人的实验，也没有处理事故的研究报告。

氡的放射卫生的重要问题是氡的 β 射线的品质因子 Q 。已根据生物实验做了一些 Q 值的估算，均在1.0或1.0~2.0的范围内。RBE值不同于 Q 值，存在与剂量率的依赖关系。作者收集了迄今RBE与剂量率的关系，列于表1，

在日本正在引起人们注意的课题是氡 β 射线的剂量估算，包括对吸收剂量的考虑是否恰当。这一问题不解决就不能评价生物效应。

氡的工程研究方面的重要问题是大量氡气、氡水的分离与密封。1980年召开了〈重氢和氡的分离〉工程研究座谈会，并出版了同名报告书。关于密封问题，尚无这样的报告书。

四、今后氡的放射卫生学问题

氡的生物学研究接受了能源特别研究这一方向较为明确的投资，这是当今它能在世界上占有重要地位的原因，同时也与聚变反应堆的开发这一重大课题有关。研究人员发展方向是各式各样的，不能只限定在某一个方向上。现在一般在征募研究的形式中虽都开展了氡的生物学研究。但如何扶植乃是今后的一个问题。

关于实验方面的研究内容，放射卫生学的重要课题是氡的 β 射线剂量估算、 Q 值的确定以及集体剂量当量的估算。 β 射线剂量估算是后两者的先决条件，但至今仍未得出充分的结论，今后还须加以研究。 Q 值主要是根据放射生物学方面的研究成果确定的。氡生

物效应的研究今后必须大力发展。集体辐射照射量的估算现有四种主要计算方法，即比活度法、NCRP法、AIRDOS-EPA法、核规程委员会(NRC)法，但有必要推导比这些方法更好的计算公式。为了发展这方面的研究，需要许多放射物理、化学、生物学研究人员的协作。

由于设备不完善，至今尚不能开展一次大剂量辐照的研究，辐照源是氡气和氡水。事故可能性在聚变反应堆运行时相对地更大些。还有低剂量率范围内的氡的 β 射线效应的研究，它具有低剂量辐射生物效应这一放射卫生学研究的共同基础，但用氡进行研究时存在着许多污染动物长期饲养的设备问题。这个问题之所以重要，是由于必须了解对位于聚变反应堆或其研究设备周围的人的效应。

第三个问题是本底的估算。虽然已有一些报道，但全国尚无统一的本底估算。需研究低水平氡的测量技术、样品采集和评价方法等。此外，需对现在尚未测量的地方进行测量，这对掌握日本生态系统氡的动态也很重要。

最后，作为氡的放射卫生学，把在核聚变领域中氡对人体的效应限制到最低限度在数量上需加以明确，与此同时要更正确地掌握环境和集体的受照剂量当量。虽然临床的课题很少，但也有关于受照者急救医疗的研究，主要是尽快地尽量多地把氡促排出来。

(强亦忠节译 章仲侯 朱昌寿审校)

文 摘

放射卫生学

043 不同年龄人骨 ^{226}Ra 浓度及其从膳食到人体某些组织的转移因子(Muth H等, Health Phys 44 Suppl(1), 113~121, 1983(英文))

食品是人自然摄入镭的主要来源。地面水来源的饮水只是次要的，矿泉水则可能成为重要贡献者。本文测定了德国大量人骨、胎盘、胎儿、血液、饮水、矿泉水及混合膳食的镭含量及 Ra/Ca 值，并计算了从膳食到这些组织的转移因子。

人体样品采自数个法医学院，食品是Kiel大学医院的混合膳食，水样取自一般饮用水龙头，随机地从当地零售商采购不同种类和来源的矿泉水。水是从水样开始分析，而生物样品从已测过 ^{90}Sr 和 Ca 的沉淀物开始分析。用两种方法测定 ^{226}Ra ：一是用包括2个大