

第二届和平利用原子能国际会议文献

辐射的生物效应与 安全防护

7

中国科学院原子核科学委员会编辑委员会编

科学出版社出版

輻射的生物效应与安全防护 (7)

中国科学院原子核科学委员会編輯委员会編

*

科学出版社出版 (北京朝阳門大街 117 号)

北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

*

1962 年 12 月第 一 版

书号: 2657 字数: 451,000

1962 年 12 月第一次印刷

开本: 787×1092 1/16

(京) 0001—1,100

印张: 18

定价: 2.50 元

目 录

卫 生 和 安 全

P/184	在加拿大原子企业中的保健和安全技术.....	1
P/430	核装置发生事故后估计辐照危险的标准.....	10
P/316	1957年10月温茨凯尔事故后的现场调查.....	19

剂 量 学 和 标 准

P/2087	放射性同位素的辐射测量系统.....	37
P/752	中子通量测量及中子剂量测量用的标准.....	44
P/2014	高强度 γ 射线源和电子源的剂量测定问题.....	48
P/761	带电粒子辐照的绝对剂量测量法.....	55
P/1206	快中子的光谱测量法与剂量测量法.....	64
P/2078	为确定最大允许热中子通量所进行的试验.....	73
P/746	单能中子吸收剂量的分析.....	81

辐 射 生 物 效 应

P/61	骨肿瘤生成与照射剂量的关系.....	86
P/98	染色体和癌的生成。研究辐射作用下生成的白血病.....	94
P/2476	电离辐射对猴子胚胎细胞核作用的细胞遗传效应.....	104

实 验 治 疗 和 恢 复

P/2113	电离辐射的化学防护.....	113
P/765	吸入钷的治疗：病例分析.....	120
P/1239	离子交换剂的使用和消化道放射性沾染的早期治疗.....	127

辐 射 污 染 的 估 计 和 辐 射 危 害 的 控 制

P/220	关于铯 ⁹⁰ 和铯 ¹³⁷ 由人体内的排出.....	132
P/171	利用致辐辐射外部测量法测定铯 ⁹⁰ 和其他 β 辐射体在人体内的含量.....	147
P/759	确定人体内微量钷的灵敏分析方法.....	156
P/1660	印度喀拉拉邦独居石矿区辐射剂量的测定.....	161
P/738	对原子能生产时吸入放射性物质的危险估计.....	165
P/219	加拿大在测量和检查铀矿山和工厂内放射性的经验.....	175
P/760	使用钷时对健康的保护，十四年经验的总结.....	188
P/295	英国原子能管理局斯普林菲尔特工厂内用天然铀制造燃料时工人的放射性防护.....	194
P/333	装在矿物及辐照过的燃料加工厂流程(作业线)上的探测装置.....	203

仪器和污染检定

P/2130	空气受低浓度气溶胶中 α 辐射体污染的测量及分析.....	222
P/1682	低放射性 α 射线计数器及其在测量水、工作面和空气沾污方面的应用.....	231
P/1643	测定氡和钍射气沾污空气的新方法及其应用.....	238
P/329	测量大气中放射性物质的新仪器和新方法.....	246
P/126	空气中放射性气溶胶的连续测量.....	271
P/60	辐射安全仪器使用中的一些特殊问题.....	279

在加拿大原子企业中的保健和安全技术*

貝特勒 科烏培尔 茂 松
內 尔 斯特維尔 素 特**

序 言

本文叙述各种放射危害及其消除的方法：

1. 指明政府怎样实行检查, 怎样制定安全条例;
2. 介绍了組織、定員情况和用来最大地限制射线对人体作用的设备;
3. 提出結果, 并指出放射危害检查設施的价錢, 以及作出有关这一問題若干一般性結論。

法 律 措 施

在加拿大現行的体系中, 地方的保健和安全問題通常由省当局解决, 但是, 涉及全國的問題由国家法律来規定。实际上, 国家保健及社会保障司与省的相应的司之間保持着紧密合作。

1946年根据原子能法令設立的原子能监督局受权检查带有放射性和分裂物質的一切操作。該局对使用这些物質的安全負責。它严格控制放射性物質的分布。如果监督委员会还没有証实某人拥有熟練的人員和用来处理所要求批給的物質的相应设备以及拟定的工作沒有危险, 則不允許該人获得放射性物質。有关这些問題, 监督委员会通常同国家保健和社会保障司商議, 国家保健和社会保障司同样地能同相应的省当局商議。該司成立的临床委员会提出将放射性物質用于診斷和治疗的意見。在发生特殊情况时, 可吸收属“加拿大原子能”公司管轄的加拿大原子能中心共同商議。

迄今行政监督虽然是有效的, 但是, 現在正在研究拟定使用放射性物質时的国家卫生条例的問題。該問題正由有关当局, 包括省保健和劳动司, 进行討論。

1956年原子能监督局成立了技术安全諮詢委员会, 負責拟定反应堆工作安全問題的建議, 这些反应堆准备在加拿大原子能中心所在地以外的地区建筑和使用。

該委员会的常务委員包括有“加拿大原子能”公司、国家保健和社会保障部的检查員和私人企业的工程人員。还吸收与这些問題有关的省和市当局的代表参与該委员会的工作。

“加拿大原子能”公司拟定的条例

为了建立放射性物質工作安全条例法典, “加拿大原子能”公司根据国际辐射防护委

* HEALTH AND SAFETY IN CANADIAN OPERATIONS (第21卷, 第184号报告, 加拿大)。

** G. C. Butler, G. Cowper, C. A. Mawson, J. Neil, C. G. Stewart and G. W. C. Tait (安大略, 恰克河, 加拿大原子能有限公司)。

員會 (ICRP)^[1]最近的建議擬定了條例,并實際上加以實行。

在設計裝置和研究技術操作時要以國際輻射防護委員會建議指出的最大允許劑量率為基礎。

在恰克河,有危險的操作都在三個常務委員會監督下進行。這三個委員會執行如下的職能。

1. 核反應堆使用委員會研究一切有關反應堆工作的問題,包括操縱系統、防護地點的檢查,通風及對裂片由不密封的釋熱元件中漏失的檢查。

2. 臨界質量測定委員會負責管理當容器和建築物內可分裂物質(鈾²³⁹, 鈾²³⁵, 鈾²³³)多於 100 克時的運輸、保存和使用。委員會正在審批一些有關的規程以便防止不可控制的分裂反應所致的爆炸、火災和其它危險。

3. 通風委員會保證所有通風設備符合專門的要求。

第四個機關——中央安全技術委員會——負責調查工作人員由於受到過多內外照射所造成的一切不幸事故。對每一次事故,中央安全技術委員會都要查明原因,明確責任和提出防止類似事件重複發生的建議。

為了便於執行條例,恰克河(Chalk River)原子能中心劃分為內外二區。有裝置的地區劃分為“活性區”——是超過指示劑量的放射性物質工作區,和“非活性區”——其它工作區。作為特殊的預防措施是不許未滿 18 歲的人員在“活性區”工作。為了控制污染的蔓延,嚴格控制由“活性區”搬走設備和材料。一切人員進入設備室都要領取膠片劑量計,膠片劑量計必須隨時隨身攜帶,當進入“活性區”時應拿出檢查。

輻 射 安 全 科

輻射安全科由 3 名專家, 5 名技師, 60 名技術員和 50 名去除污染的工作人員組成。這個科負責對所有實驗組和工作組在有關使用放射性物質的輻射安全條例方面提供諮詢。但是,該組織領導人的直接責任是防止職工受過多照射。因此,輻射安全科是獨立的組織。如果照射過度是由於不執行條例和輻射安全科的意見,則由工人自己負責。輻射安全科除提出意見外,還對工作人員進行劑量檢查,并用防護設備來保證工作人員的安全。

諮詢有時是以作指導的形式進行。為了使職工們熟悉各種放射危害和安全使用放射性物質方法,因此對錄用在活性區工作的人員應立即進行簡明的指導。指導要包括下列問題:放射性及其有害影響、防止內外照射的實際方法。所有工作人員每月參加一次技術安全會議,會上也應進行相應的指導,特別應列舉利用原子能的企业所發生過的不幸事故。對輻射安全科的新工作人員、武裝保衛專門組及非政府組織中的輻射安全科的領導人員應進行較廣泛及較詳盡的指導。

利用全部工作人員攜帶的膠片劑量計對工作人員照射水平進行經常的檢查,每星期離開企业時,膠片劑量計從其攜帶者處收回,并計算每個工作人員受到的照射劑量。輻射安全科定期檢查活性區的所有工作人員是否都隨身帶有膠片劑量計。對國家其它地區的某些實驗室、工廠和礦山的工作人員也實行這樣的檢查。

應用固定劑量探測儀測定輻射級。此外,輻射安全科的劑量人員應用攜帶式儀器進行探測。工作開始前就測定輻射場,并根据這些測量確定允許的工作時間。對那些必須

在具有大輻射級的地区工作的人員，應發給袖珍電離室（筆式劑量儀），完成工作後立即檢查筆式劑量儀的讀數。此外，計算每個工作人員所受的照射積分劑量，以便在其接受的照射劑量接近一星期的最大允許劑量情況下，可以及時地離開高輻射級的工作條件。

輻射安全科供應口罩及防護服作為一項服務工作。曾發表過關於口罩類型及恰克河使用這些口罩的方法的報告^[2]。最近五年完成的研究工作的結果，使我們能制成品保證有效防護放射性物質不進入人體的不透水的塑料服。最近應用輕便價廉的服裝，這種服裝比較方便，使用後便可把它拋棄。

表面放射性沾染的蔓延必須防止，這不僅有利於工作人員的健康，而且也為了使本底保持在相當低的水平，以便有效地使用靈敏的測量儀器。為了四周居民，企業輻射危害的水平也是通過將通風系統排出的空氣進行過濾的方法而降低的。劑量人員應用專門儀器，通過測量輻射場及使用“塗布”方法不斷檢查表面沾染的情況。所有未固定的放射性應從工作的表面除去；直接在表面測量時，剩餘的放射性輻射劑量不應大於 2 毫倫/小時。

在輻射安全科附設有除沾染中心，在那里進行儀器零件、工具、防護服及設備的除沾染工作。除了普通洗滌技術外，使用超聲振動器來清除放射性沾染。設備的比較大的部件在運輸器材除沾染車間進行清洗，此車間里有吊車、供檢查的下水道，大的通風櫥和攜帶式蒸汽噴霧器。對清洗工序的價值進行登記以便決定某種沾染物是否應該去沾染。1957 年曾清洗 65,000 件物品，總價值為 500,000 元，而這些物件的清洗共花費了 60,000 元。

有時整個建築物受到沾染。在這種情況下，除沾染工作由輻射安全科的力量完成。1957 年夏季所進行的 250 立方米建築物的除沾染便是一個很好的例子。在這建築內使用微細粉末狀的金屬鈾和氧化鈾，引起了廣泛的沾染。所有設備都拆下，並在除沾染中心進行清洗。然後所有的表面，包括梁、天花板、管道及通風管道都進行了真空清洗，洗滌和油漆。由於進行了上述工作清洗了整個建築物，花費還不到 400 美元。類似的工作經常由輻射安全科編制內的熟練工作隊來進行。

儀 器

在恰克河輻射劑量測定處所進行的劑量儀器研究是值得提出的。

上面已指出，工人隨身帶的袖珍電離室是在高強度地區工作時使用的。13 年使用這些儀器的經驗證明，這些儀器存在著三個嚴重的缺點：這些儀器得出常常與用膠片劑量計測得的劑量的讀數不相符合；工作人員很難觀察這些儀器的讀數，特別是如果工作人員穿著防護服時更難看出；最後，這些儀器不能在超過最大允許的照射劑量時發出信號。因此，決定儘可能用其它類型的儀器來代替這些儀器。

正大力生產小而輕的个人積分劑量計。个人積分劑量計應增添能預告超過照射水平的裝置。這種儀器應能很好地保護在射線能迅速發生變化的輻射場中工作的工作人員。已制好了試驗樣品，準備進行試驗。在帶有蓋革計數管的新的攜帶式儀器中應用半導體三極真空管就能使這些儀器變得更輕便，更靈巧。新的電路要求的電能很少，因此，可以使用體積小和重量輕的電池。電池很少需要替換。

在用重水作減速劑的 NRX 或 NRU 型反應堆工作若干時期後，其中含的氚超過了每立升 2 居里。因此，在重水從系統漏失的地方，放射性沾染了空氣。因此之故，1957 年

研究了检查空气中含有氚的仪器，并进行了应用。应用这种仪器甚至在空气中含有氚浓度只有 0.5×10^{-5} 微居里/厘米³ 这样低的条件下仍可对氚气体化合物进行不间断的测量和记录。由电离室、放大器、自记器和鼓风机组成的仪器安装在轮上；经过延伸到采样处的长胶管，将空气样品抽到电离室中来。该仪器也能探测出重水漏失。

现在“加拿大原子能”公司正在设计企业最需要的一种闪烁计数器来测定进入人体内的 γ 辐射体。这种装置与其它装置^[3]不同的地方仅在于 100 个波道振幅脉中分析器有由恰克河电子学处设计构造的半导体线路。这种计数器在生物学研究中的应用将在下面探讨。

恰克河企业自 1950 年开始向加拿大各铀矿提供咨询并给以帮助。初步了解铀矿后就可明显地看出，需要有新的采样设备，以便测定矿山空气中氡分裂产物的浓度。电池采样仪的设计研究现已完成，该仪器已交付工业生产。空气检查仪由二个部分组成：空气采样泵（重量 4.5 公斤，外壳体积为 $28 \times 25 \times 9$ 厘米）及闪烁探测仪（重量 3.3 公斤，外壳体积 $23 \times 20 \times 9$ 厘米）。该仪器二个部分可以很容易地在矿山最不易通过的部分插入和抽出。空气通过分子过滤器，然后在采样后 40—90 分钟内，检查分子过滤器的 α 放射性。如果空气中氡的每一种子体衰变产物（Ra A, Ra B, Ra C）的浓度相当于 10^{-10} 居里/升时，10 分钟抽气采得的样品经过一小时后每分钟能得出将近 4000 次读数。

用胶片剂量计检查的结果

恰克河工厂建筑快要竣工的时候， α 和 γ 射线全身照射的最大允许剂量为 300 毫伦/星期。因此，防护设施的建筑设计同时考虑了防止在工作地点形成超过 6 毫伦/小时的辐射场。“加拿大原子能”公司自 1957 年 1 月起已确定一年最大允许照射剂量的新数值——5 伦（平均一星期 100 毫伦）。将来防护设施的设计必须考虑到把辐射场降低到每小时 2 毫伦或不到 2 毫伦。

实行新条例后，可以预料到，很难将职业性照射限制到 100 毫伦/星期。由表 1 看出，所有有关的机构所采取的特别措施一般都能得出良好效果。1956 年到 1957 年期间，每年受到 3—5 伦照射情况发生的次数已有显著地减少。

表 1 个人胶片剂量计的总读数

工作性质或工作地点	1 年受照射的剂量大于 1 伦的人数							
	1956 年				1957 年			
	1—3	3—5	5—10	10—15	1—3	3—5	5—10	10—15
化学工作	22	16	2	—	10	—	—	—
研究和设计工作	28	3	—	—	19	3	1	—
反应堆的工作	62	13	1	—	57	7	—	—
辐射安全科	50	6	—	—	48	1	—	—
技术供应	69	12	—	—	47	—	—	—
工业产品处	4	1	14	10	10	—	13	4
共 计 ¹⁾	235	51	19	10	191	11	14	4

1) 在恰克河工作的 2300 人中其它人员受照射还未到可以测量的程度。

但是，有两个基本问题还没有解决。实行新条例后，少数熟练人员在操作 NRX 反应

堆照射过的棒时，要不受到过多照射是困难的。采取增加使用棒的工作队的人数的办法不能直接解决问题，因为没有经验的人工作较缓慢，受过多照射的危险更大(表1)。由表可知，工业产品处的另一困难是不许工人每年受到的照射超过5伦。为此需要新的和完善的设备，但是，为了不中断生产，这些设备只能逐渐应用起来。

生物学分析的结果

放射性物质可通过吸气、吞咽或皮肤进入人体。通过后两种途径而使放射性物质进入体内的危险可以很容易地通过用自动小吸移管、戴橡皮手套和穿防护服方法来消除。控制放射性物质由呼吸器官进入最为困难，但是，如果在空气可能受放射性物质污染的情况下，特别重视空气剂量检查、工作地点的表面清洁、良好通风和戴口罩，则可以使放射性物质的进入降低到最低限度。当空气的放射性按短半衰期的同位素为100,000蜕变/分/米³，或者按长寿命的放射性物质则为1,000蜕变/分/米³时，必须使用口罩。

生物研究化验室中所进行的尿的分析已证实这些防护措施的效果。在该化验室编制中有受高等教育的专家1名和技术员4名。化验室检查所有怀疑有内照射污染的人员，此外，在有危险的地区进行随时检查。检查的阳性结果确凿的证明，预防措施不够，应该采取补充办法。镭⁹⁰、超铀元素、镭系是最毒的放射性同位素，对这些同位素经常给以特别注意。

在“加拿大原子能”公司的企业中，对排出物内最大允许的放射性同位素数量的计算是根据国际辐射防护委员会提供的资料^[4]和根据下述假定而作出的，即：40年内经常每天进入机体的放射性使体内放射性同位素达到最大允许含量。实际上，放射性物质随尿排出通常是某一种或两种个别的物质偶而进入机体内的结果。由此可见，在许多情况下，体内放射性同位素含量都应该比最大允许限度少得多。现在，体内放射性同位素含量应根据排出曲线(参阅P/220报告)计算。在最好的情况下，这样的估算也只能是近似的。直接测量体内 γ 辐射体的放射性同位素含量，使用现在设计的全身计数器是有可能的。预计，在采用上述全身计数器进行测量以后，就可以重新研究放射性物质在排出物中最高允许量的值。

1955—1957年间生物学分析结果的总数据(表2)指出，1957年阳性指数大大的减少了。这可能是因为如下的几个原因：

- 1) 1957年降低最大允许照射量值后更多地注意了辐射安全问题；
- 2) 对照射过的释热元件的化学处理显著减少；
- 3) 比较有效的使用了“加拿大原子能”公司所设计的良好口罩和防护服。

生物研究化验室曾收集过矿井人员和管理铀加工装置的人员的尿内铀含量的分析结果。这是加拿大唯一的一个将尿铀分析贯彻到实际工作中去的化验室。根据这些分析的结果所作出的结论以及“加拿大原子能”公司工作人员所提出的意见和工作地点的调查可使工作卫生条件得以改善，在P/219报告中叙述了开采铀矿时建议的若干措施。

居民防护

外照射剂量测定科负责研究和检查恰克河企业范围外放射性的蔓延。完成这一工作有专家4名和技术人员8名。其首要任务在于研究放射性废物处理的安全方法。

表 2 生物化学分析的结果

工作性质和工作地点	表示所获得的超过 1 个允许剂量的尿分析 ¹⁾											
	1955 年						1956 年					
	分裂 碎片	Pu, Am	H ³	U	Co ⁶⁰	Ra	分裂 碎片	Pu, Am	H ³	U	Co ⁶⁰	Ra
化学工作 ²⁾	24	1	1	0	0	0	21	1	0	3	0	0
研究工作	14	1	1	0	0	0	10	11	0	1	0	0
反应堆的工作	22	0	12	0	0	0	22	0	0	0	0	0
放射安全科	18	1	0	0	0	0	15	1	0	0	0	0
技术供应	15	0	7	4	0	0	24	1	0	11	0	0
工业产品处	3	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	2
共 计	96	3	21	4	0	1	93	15	0	15	0	2

	1955 年	1956 年	1957 年
发现受沾染者总人数	102	93	36
分析的总数	3444	3447	2620

1) 分裂碎片, 包括钚²³⁹和钚²⁴¹

铀——天然铀

钚——钚系, 包括钚²³⁸, 钚²⁴⁰及钚²⁴²

2) 1957 年工作, 略

处理恰克河的废物所使用的方法已有記載^[5]。凡所含放射性物質低于生产飲水的允許浓度的液体废物抛入俄塔瓦（Ottawa）河。因为有人认为，废物在河內不完全混合，所以将含有放射性物質浓度較高的液体放到大致离河 2 公里远的土質貯藏器內。具有放射性較高的溶液保存在鋼罐內。輕度污染的固体材料不需进行任何包装而埋在地下，污染程度大的材料放在用水泥或瀝青复盖的壕沟內。

無論固定和液体放射性废物都置放在砂質废料場內，砂質废料場建筑在冰砾土上，冰砾土下面是花崗石洼地，平积約 10 平方公里。在这洼地里有二个废物处理区：A 区为液体放射性废物区，B 区则为固体放射性废物区。这两区的水通过沼泽土壤并流入小的珀奇（Perch）湖，并从珀奇湖出来的小河珀奇河流入俄塔瓦河。

表3 A 区液体废物的处理

废物来源	流出液体的类型	年	銻 ⁹⁰ (居里)	鈾 ²³⁹ (克)
事故废物的壕沟	水 ¹⁾	1953	1000	少量
反应堆儲水池 1	水 ²⁾	1953—1956	200	10
反应堆儲水池 2	水 ²⁾	1956	114	10
化学壕沟	盐溶液, pH 5	1956	17	17
来自实验研究工作	2MHNO ₃ ·4MNH ₄ NO ₃	1954—1955	360	少量

1) 1952 年 12 月发生事故后用来冷却 NRX 反应堆的水；

2) 受照射过燃料貯藏室的水。

由 A 区液体废物处理見表 3。这些废物的放射性的改变主要与因事故和实验研究形成的废物有关。1954—1955 年間排出的硝酸盐溶液中的銻⁹⁰，現在可以在距其排出地点 200 米处的 10 米深的地方发现。与 NRX 反应堆排掉的冷却水有关的放射性，在表面的附近就可以发现。1955 年在离壕沟南边 100 米处的沼泽地发现了銻⁹⁰。反应堆废水的壕沟还未被銻⁹⁰ 表面沾染，在离化学壕沟 40 米的地下水中发现指示量的銻⁹⁰。

埋在 B 区的固体废物的总放射性是不能精确测出的。1955 年用含有 420 居里的銻⁹⁰ 和 32 克鈾²³⁹ 的酸性废物制成混凝土块，以后埋在深壕沟里。自 1956 年 8 月起着手试图测定埋在 B 区的废物放射性。1957 年末已测定，該区有銻⁹⁰ 400 居里，鈾²³⁹ 60 克和鈷 1500 居里。所有放射性高的废物現在放在涂有瀝青的坑洼里。B 区放射性物質漏失的唯一情况是在含有大量固体废物（在开始使用涂有瀝青的壕沟前埋的）的壕沟附近的小河里发现的。小河里仅含有銻⁹⁰ + 鈾⁹⁰。

通过对珀奇湖及珀奇河（該湖唯一有名的径流）的检查来测定了整个区的放射性的蔓延。下图表明最近两年来检查的結果。在珀奇河的記錄中，还从未曾有过一次所含放射性物質的量超过生产飲水中放射性物質最大允許浓度 25% 的情况，但是，近来放射性浓度漸有增高的傾向。現在流入俄塔瓦河的总放射性为 1.5 毫居里/天。汇入珀奇湖的小河內放射性物質的浓度还要高得多。流过珀奇湖期間放射性物質浓度減低可能是由于放射性冲淡或固定所致。

裂变碎片移至珀奇湖流域的水层表面能使植物受到一些沾染，因此在这一地区捕到的动物的骨內发现銻⁹⁰ 数量增高。珀奇湖生活的魚的肉內发现有指示剂量的銻¹³⁷，但是，数量很少，以致在流入湖的污水中不能发现銻¹³⁷ 的数量。

实施了检查計劃后查明，鈉¹⁰⁶ 和硫³⁵ 是属移动最快的同位素，其次就是銻⁹⁰；而鈾²³⁹ 移

动非常缓慢。看来, 锶⁹⁰ 在酸性溶液内或在大量水内时, 通过土壤移动较快。这些观察证明, 在这些情况下, 是需要改进处理液体废物的方法。现在正在制订废水处理的规划。

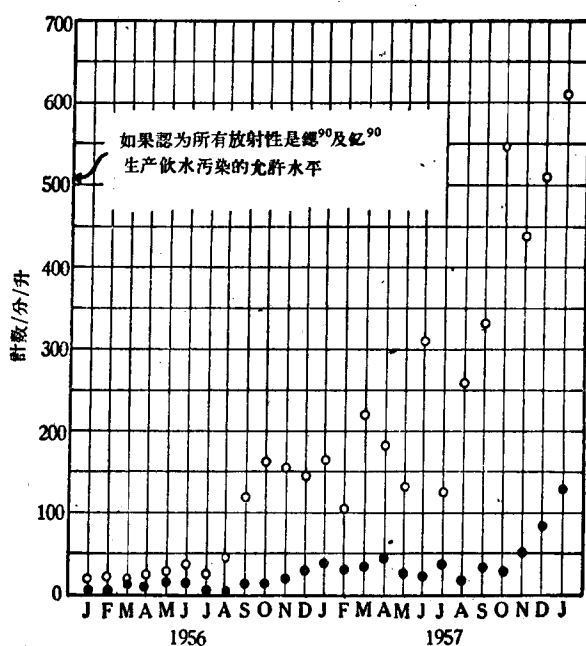


图1 彼尔奇湖水的放射性
○——流入的水; ●——流出的水

结 论

从“加拿大原子能”公司的经验可以作出某些一般性的结论。1957年使用胶片剂量计和生物学分析的方法进行检查的结果表明, 在不使工作人员受到超过每星期100毫生物伦琴当量的情况下, 基本上是可以进行使用大量放射性物质的工作的。13年以前认为这是不可能的。但是, 目前还存在着一些困难, 这些困难应该通过设计和装设更完善的工作器材和剂量测量仪器的方法来加以克服。

尽管一般说来前景颇为乐观, 但是, 在发生事故的情况下, 随时都能发生过多照射。这一般多是由于在正常操作过程中某些不能预见的情况所致。保健和安全技术组织有责任使这些事故次数和范围缩小到最低限度。显然, 需要认真对待这一问题, 需要经常研究工作条例和仪器, 需要对这些条例和仪器进行必要的变革。

根据五年来对放射性废物在土壤中的移动情况的研究和对天然水的研究应得出两个结论: 1. 放射性高的固体废物应放在某种容器内埋起来, 而大量稀释的液体废物不应没有控制地倒在地里; 2. 为了防止土壤的酸性增高, 所有液体废物应该预先进行处理, 然后埋在具有相应的地下水状态的地区。

恰克河辐射检查及与此有关的工作是由10名剂量测定专家和133名非专业人员进行。其中许多人从开始的最初时起就在企业内工作。他们工作消耗的费用占运转费总额的5%, 显然, 如果考虑到在恰克河企业内所进行的操作的复杂性, 那这是完全值得的。

参 考 文 献

- [1] Morgan, K. Z., "Recent Changes in Maximum Permissible Exposure Values", Am. Med. Assoc. Arch. Ind. Health 16: 357—62 (1957).
- [2] Tait, G. W. C. and Byington, T. H., "Respirator Problems in Atomic Energy Practice", Am. Ind. Hyg. Ass. Quart. (in the Press).
- [3] A test performed by wiping the surface with a Small piece of filter paper and Counting the emissions from the paper in a $\beta\gamma$ or an α Counter.
- [4] Marinelli, L. D., "The Use of NaI-Tl Crystal Spectrometry in the Study of γ -Ray Activity in Vivo: A Summary of Developments at the Argonne National Laboratory", Brit. Journ. Radiol. Supp. No. 7: 38—43 (1957).
- [5] "Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", Brit. Journ. Radiol. Supp. No. 6 (1954).
- [6] Mawson, C. A., "Waste Disposal into the Ground", Proc. Int. Conf. on Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva 1955, 9: 676—8, (1956).
- [7] Mawson, C. A., "Report on Waste Disposal System at the Chalk River Plant of Atomic Energy of Canada Limited", report CRB—658, Atomic Energy of Canada Limited Publication AECL—344, (Chalk River, Ontario: July, 1956).

(譯自英文預印本)

核装置发生事故后估计辐照危险的标准*

丘佩尔

科万**

在研究了一个大功率反应堆的事故可能造成的损失时^[1]，我們提出了一些可以用来预计一次特定的假设事故中受到不同程度影响的土地面积和人数的辐照和污染水平。在上届日内瓦和平利用原子能会议中瑪利 (Marley) 和福里 (Fry)^[2] 以及派克 (Parker) 和赫利 (Healy)^[3] 都提出了有关这个题目的論文。然而这些論文都沒有詳細地說到估计的方法，而且关于这个题目还没有实验数据，所以我們觉得值得另作一次探討。

在本文內我們扼要地讲到能引起对人不同程度伤害的污染和辐照水平的估计¹⁾。并概括地报告了我們的估计方法。必須承認，我們的結論只是近似的，因为这种性质的辐照对人的直接作用大部分尚未明确。

需要估计的是可能引起死亡但一定会引起疾病的一个裂变产物云的辐照量；比这更低的辐照量就对人无害了。但是在确定这个更低的量时，也需要做一些工作。我們的计算是根据对个人的伤害；由于缺乏数据，我們不考虑一次照射所可能引起的遗传性后果。此外，因为我們的估计数值只是为了统计上的应用(并且也因为缺乏数据)，我們不考虑受辐照的人有晚期肿瘤发生的可能性。

反应堆事故有二种，其中一种是由于反应堆的裂变产物有一部分释放到空气中(假设已运行 180 天的 500 兆瓦热中子反应堆)；另一种事故是由于燃料熔解以及全部挥发性裂变产物的释放。这二种事故分别称为“裂变产物释放”和“挥发性产物释放”。由于两种事故中释放出来的放射性的成分不同，所以需要分别估计它們的辐照和污染水平。

直接辐照

我們用四个等级来区分放射性云中的辐照后果。表 1 所列为各种等级的生理效应、

表 1 辐照等级和数值

等级		全身 γ 射线, 当量	完全核裂变产物释放, 居里·秒/米 ³	挥发性核裂变产物释放, 居里·秒/米 ³
1	致死性辐照	>450	>400	>350
2	可能致病	450—100	400—90	350—80
3	伤害的可能性不大但可能造成一些损失	100—25	90—10	80—10
4	无伤害也无损失	<25	<10	<10

* Exposure Criteria for Estimating the Consequences of a Catastrophe in a Nuclear Plant (第 18 卷, 第 430 号报告, 美国)。

** J. B. H. Kuper, F. P. Cowan (美国纽约长岛, 埃普頓, 布鲁克海文国家实验室)。

1) 我們的估计结果有一些和瑪利、福里的完全相同, 这只能说是偶合, 因此我們不应该給这些相同的估计数值更高的评价。

可能引起这些效应的急性全身 γ 射线剂量和我们所估计的相应的辐照量。用来表示辐照量的单位为居里·秒/米³,即云的浓度和逗留在云内的时间的乘积。

直接辐照不仅是由于放射性云通过时的全身 β 射线和 γ 射线照射,而且也是由于核变产物的吸入。因此,我们需要考虑如何把几种辐照成分结合起来。这样做时,我们发现用一种称为“事故允许剂量”(Acceptable Emergency Dose)的量最为方便。全身 γ 射线照射或当量的其他辐照类型定为25伦。从本研究的观点看来,我们认为这剂量是可以接受的,因为这剂量或比它更小的剂量不会引起伤害。在援救工作中,需要许可工作人员受到较大的危险成实际伤害,所以事故允许剂量当然要大得多,应用下面各节叙述的方法就可以算出相当于每个主要辐照成分为1居里·秒/米³的事故允许剂量。然后将它们合并起来,定出四个辐照等级的限度。

计算中所假定的核裂变产物混合物是一个运转180天的500兆瓦热中子反应堆所特有的。这种混合物的主要成分如表2所示。需要两种类型事故的辐照标准,一种事故是全部挥发性核裂变产物和1%铯的释放;另一种事故是全部核裂变产物的5%的释放。

表2 核 裂 变 产 物 表

500兆瓦(热)反应堆运行180天,冷却时间24小时	
全部核裂变产物	4.1×10^8 居里
铯 ⁹⁰	3.0×10^8 居里
铯 ⁹⁹	1.7×10^7 居里
铯 ¹⁴⁴	8×10^6 居里
钡 ¹³⁹	3.8×10^8 居里
碘类	5×10^7 居里
惰性气体	3.4×10^7 居里
全部挥发性核裂变产物	8.4×10^7 居里

全身 γ 射线和 β 射线辐照

全身 γ 射线和 β 射线辐射量的计算以沉浸在半无限云的情况为根据。所有的放射性测量是在事故发生以后24小时进行的。因此,在计算相当于1居里·秒/米³的辐照的剂量时,必须对放射性云通过时间(这被假定为发生事故以后二小时)以后的衰变来进行校正。这二小时是一个中间数值,对于邻近的地方来说是太迟了,但对于较远的人口稠密的地方来说是太早了。因为衰变是慢的,所以到达时间不会太多地影响到核裂变产物释放的剂量计算。在挥发性核裂变产物释放时,估计的限度在很大程度上决定于放射性云的到达时间,并且需要更复杂的分析。

在对衰变作校正时,核裂变产物释放的事故可以用 $t^{-0.2}$ 衰变定律。在挥发性核裂变产物释放的事故中,经验证明,在事故发生后的2到500小时内, β 射线或 γ 射线的总能量按 $t^{-0.8}$ 衰变,所以就应用了这一规律。这样的假定当然有相当大的近似性,但是由于在整个研究中有其他大的未定因素,所以我们可以这样做。

在进行上面的计算时,我们不计算地面的反散射,而且用0.7兆电子伏作为核裂变产物的平均 γ 射线能量。这样就可以只用(对无限介质来说)剂量率的一半,该剂量率只要通过立出单位容积中的能量产生和吸收率的方程式,就很容易地计算出。结果发现,在挥

发性核裂变产物释放时 1 居里·秒/米³ 的辐照相当于 0.28 拉特 (0.0112 事故允许剂量) 的全身 γ 射线辐照; 而在核裂变产物释放时, 1 居里·秒/米³ 的辐照相当于 1.26 拉特 (0.0505 个事故允许剂量) 的全身 γ 射线辐照。

由于放射性云在实际上是有限的而不是无限的, 所以用上面的方法就会对云中的剂量估计过高。在另一方面, 当放射性云在附近通过时^[4], 虽然以居里·秒/米³ 所计算的辐照量是零, 但仍会受到一些 γ 射线剂量。这两个相反的因素会互相对消, 因此我们用这种计算 γ 射线剂量的简单方法作为适于这种研究的最近似的算法。

从经过的云来的全身 β 射线辐照比 γ 射线辐照少, 而且因为它主要作用于皮肤, 所以不会显著地影响到事故允许剂量。然而, 应该记住, 当放射性物质沉积在身体上而不立刻洗去时, β 射线剂量可能变成很强的。

肺部 β 射线剂量

在放射性衰变比较慢的情况下, 由于放射性物质沉积在肺泡内而产生的对肺的 β 射线的总剂量将比在云通过时由于吸入污染空气而得到的照射量大得多。这和核武器爆炸后的快得多的衰变 ($\approx t^{-1.2}$) 的情况是截然不同的。

如果平均呼吸率为 220 毫升/秒 (标准人), 而肺存留率为 25%, 则在核裂变产物事故发生后 24 小时, 1 居里·秒/米³ 的辐照所造成的沉积在肺内的放射性为 55 毫居里。在挥发性核裂变产物事故中, 我们假定 40% 的放射性是惰性气体, 所以每个居里·秒/米³ 只有 22 微居里存留在肺中。

假定肺的标准重量为一公斤, 而不计算边缘效应, 则肺部的 β 射线剂量率可以用下列公式(1)计算:

$$d = \frac{1}{100} \frac{(q)(3.7 \times 10^4)(E_{\beta})(1.6 \times 10^{-6})}{1000} = (5.9 \times 10^{-7}) q E_{\beta} \text{ 拉特/秒,} \quad (1)$$

式中 q = 在 24 小时测得的存留在肺内的微居里数,

E_{β} = β 射线的平均能量以兆电子伏计。

用上面指出的适当的衰变定律和上式的乘积求积分就可以算出第一天内 (即从 $t = 2$ 到 $t = 24$ 时) 的肺部剂量。用 $E_{\beta} = 0.4$ 兆电子伏的数值就可以算出在核裂变产物事故时肺部剂量为 1.21 拉特, 而在挥发性核裂变产物事故时肺部剂量为 0.9 拉特。两种事故中衰变校正值的重要性可以在将这些数值与不算衰变而只取公式(1)得出的剂量率的 22 倍而求得的数值相比较时发现。校正的数值要比不校正的各大 1.18 和 2.23 倍。

将肺部剂量换算成相当的急性全身 γ 射线剂量尚没有确实的根据。然而美国辐射防护委员会 NCRP 的建议容许四肢受到比全身容许剂量大 5 倍的照射量。将肺部照射量换算成相当的全身照射量时用 5 来乘似乎是十分保守的。这样, 在核裂变产物事故中 1 居里·秒/米³ 将造成 0.24 伦当量 (0.0096 个事故允许剂量), 而在挥发性核裂变产物事故中造成 0.18 伦当量 (0.0072 个事故允许剂量)。在这样换算时, 因为我们要算急性的辐照当量, 所以只计算头 24 小时受到的肺部剂量。在挥发性裂变产物事故中, 由于放射性物质的衰变和从肺部排出, 以后的剂量是比较不重要的。在核裂变产物事故中, 我们估计第二天的剂量将是第一天剂量的一半, 而第一星期的总剂量约为第一天剂量的三倍。

鐳⁹⁰ 的 骨 剂 量

有一些沉积在肺部的核裂变产物当然会移行到身体其他部分去而产生了其他的剂量成分,在假定的事故中将沉积在骨中 1 微居里的剂量作为 1 个事故允许剂量。如果我们按有效半衰期 2200 天计算,则这数值相当于在以后的 40 年中平均值——0.21 微居里,或允许的的职业性体内蓄积量的 1/5。我们假定吸入的鐳只有 10% 较永久地存留在骨内,所以吸入 10 微居里就相当于事故允许剂量。从鐳⁹⁰ 来说,在核裂变产物事故中,1 居里·秒/米³ 就是 0.016 个事故允许剂量。在挥发性核裂变产物事故中,由于鐳少了 20 倍,所以数值是 0.0008 事故允许剂量。

鐳⁸⁹ 的 骨 剂 量

鐳⁸⁹和鐳⁹⁰两种同位素的相对危害性应与它们的平均质点能量和有效半衰期的乘积成正比。这样算来,比吸入的鐳⁹⁰多 77 倍的鐳⁸⁹,或者说 770 微居里的鐳⁸⁹就相当于 1 个事故允许剂量。假定有 22% 沉积在骨内,则无限期骨内剂量约为 50 伦;对于这种性质的一次事故辐照来说,这似乎是一个合理的限度。在核裂变产物事故中,在 1 居里·秒/米³ 的辐照中吸入的鐳⁸⁹ 将达到 9 微居里 (0.0116 个事故允许剂量);而在挥发性核裂变产物事故中则为 0.45 微居里 (0.00058 个事故允许剂量)。

铯¹⁴⁴, 锆¹⁴⁴

使用同样的推理方法,我们可以说,铯¹⁴⁴ 的事故允许沉积量似乎为鐳⁸⁹ 的 0.12 倍。然而它比较不易转移到骨内;美国标准局 52 号手册载明,只有吸入量的 10% 沉积在骨内;这样,吸入 203 微居里的铯¹⁴⁴ 应该相当于 1 个事故允许剂量。在核裂变产物事故中,1 居里·秒/米³ 的辐照就要吸入 4.3 微居里的铯¹⁴⁴,或 0.21 个事故允许剂量。在挥发性裂变产物事故中铯¹⁴⁴ 可以忽略不计。

钚²³⁹ 的 肺 部 剂 量

在假定的反应堆中,钚²³⁹ 只占总放射性的 0.00093%。用 52 号手册的数据就可以估计相当于 1 居里·秒/米³ 辐照剂量。我们假定钚是不可溶的,这样肺将是危险的器官。由于钚的生物半衰期只有一年,所以将存留在肺内的 0.04 微居里(或职业限量的 5 倍)作为事故允许剂量。在核裂变产物事故中,钚²³⁹ 所提供的剂量很少,1 居里·秒/米³ 只相当于 0.0012 个事故允许剂量。在挥发性核裂变产物事故中钚²³⁹ 是可忽略不计的。

碘类, 甲状腺剂量

在冷却 24 小时以后存在的碘类主要是碘¹³¹, 碘¹³³ 和碘¹³⁵。临界器官是甲状腺,它有较强的抗辐射性。据估计,25,000 到 30,000 拉特的剂量能使 1/6 到 1/2 受照射的人在 6 个月以内因为有足够严重的症状而就医。然而有一些青年期甲状腺恶性肿瘤病例被认为是由于在幼儿期中照射胸腺或增殖腺使甲状腺受到 200 伦左右的剂量而引起的。虽然在 1930 到 1940 年之间有许多儿童受到这样的照射,但是这种病例是极少见的。将事故允许剂量定为可能引起症状的最低剂量的 1/10,即 2000 拉特似乎是合理的,虽然这个剂量