

265610



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



374
—
277;3
1

中国科学院原子核科学委员会编辑委员会编辑
科学出版社出版

目 录

P/394	废液与废气中放射性成分的自动流线分析器.....	(1)
P/897	辐射诱发的小家鼠的遗传损伤.....	(8)
P/1551	美国反应堆运转和反应堆安全方面的经验	(15)
P/1652	220 kVp X射线与 14.1 MeV 快中子在低温下诱发紫鸭跖草染色体畸变的相 对生物学效率	(29)
P/1987	关于处理U-233燃料的防护卫生物理学	(39)
P/2248	在电离辐射作用下生物脂的原初反应	(44)
P/2315	在电离辐射作用后神经系统中发生的变化	(48)

废液与废气中放射性成分的 自动流綫分析器[†]

L. C. 席文狄曼 (Schwendiman)*

H. G. 里克 (Rieck)* R. A. 哈維 (Harvey)*

引 言

为了安全处理液态和气态的放射性废物,就需要不断检查存在于废流中的同位素的种类和数量。为了有效地控制和检查在废流中的废物,就需要经常取样分析。使存在要按照同位素的放射性危害来确定正确的数量,就要求进行分析。自动流綫废流检查器容許迅速而正确地得到放在附近的同位素的种类和数量,而且大大地减少了人工操作。下面将簡短地描述三种器械。它們是为了检查放射性废流而設計制造的。

总的 β 检查器

总的 β 检查器已經发展得能够在給定的時間内自动地选出液体废流样品,然后测量样品的 β 輻射率。它能够用于均匀地或可变地、間断地流动的废流。改变探测器以后,也能测量 α 或 γ 放射性。

样品在盘内制备,这些盘子是把鋁带压成中心凹入的形状而成的。在样品吸移并烘干之后,就送到正比流动計数器(proportional flow counter)的窗下記数。

检查器的机构(见图1和图2)由四个主要部分组成:制造盘的压模机、吸移机和烘干机、計数器以及带的传动装置。

整个仪器高15吋、长36吋、寬13吋,約重150磅。鋁带厚0.002吋、寬3吋,从儲备輪上拉出以接受和传递样品。压模机形成一个直径1½吋、深0.080吋的盘,同时吸移机从废流环路中吸移3毫升样品注入前一次压成的盘内。一个热源装在鋁带下面,在前一个样品計数期間把样品烘干。鋁带通过計数管下面时,就量到了样品的 β 輻射率。

盘子是由二級印模形成的,这印模是由偏心軸(scotch yoke)驅動的,第一級使鋁带停止不动,同时第二級就在带上压出一个盘来。吸移机是活塞型的,这种类型使样品流的环路通过吸移机,除了吸移过程外,样品流一直流过吸移机,吸移机也是由偏心的軸驅動的。吸移机的精

* 汉福实验室工作委员会,汉福原子能器械生产委员会通用电气公司,里茲兰,华盛顿。

† “第二屆和平利用原子能国际會議文献”编号 A/CONF. 15/P/394, 美国,原文为英文。

010222
 确度是 $\pm 3\%$ (有99%可靠性)。用一个200瓦的铅笔型电炉放在吸移机下面来完成样品的蒸发。带的传动是由一个直径为1.28吋(周长4吋)、位于上端的旋转滚轴和一个弹簧托着的辅助底滚轴咬住带一起运动而实现的。

由連到主軸的鏈条和齒輪把動力傳到機械部件，這主軸每轉一周，就制備一個樣品，依靠一個特殊的弓形機件(即一個切掉幾個齒的齒輪)在有齒齒輪部分運動時間內完成帶的傳動。

測量 β 輻射率的正比流動計數器用2吋厚的鉛殼罩起來。流動計數器採用具有大氣壓強的甲烷或丙烷蒸氣。從計數器出來的訊號經過核型182 X定標器(Nuclear Model 182 X scaler)放大後，輸入1500-B型計數率計(General Radio Type 1500-B)。計數率是用愛斯脫林-安格

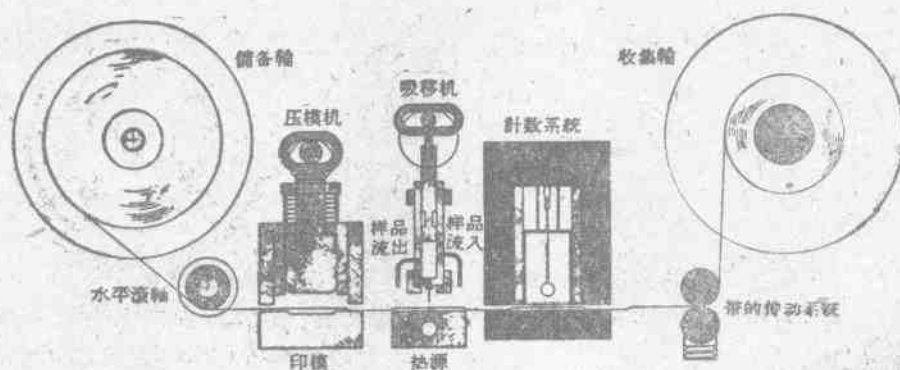


图1 总的 β 量的检查器的草图

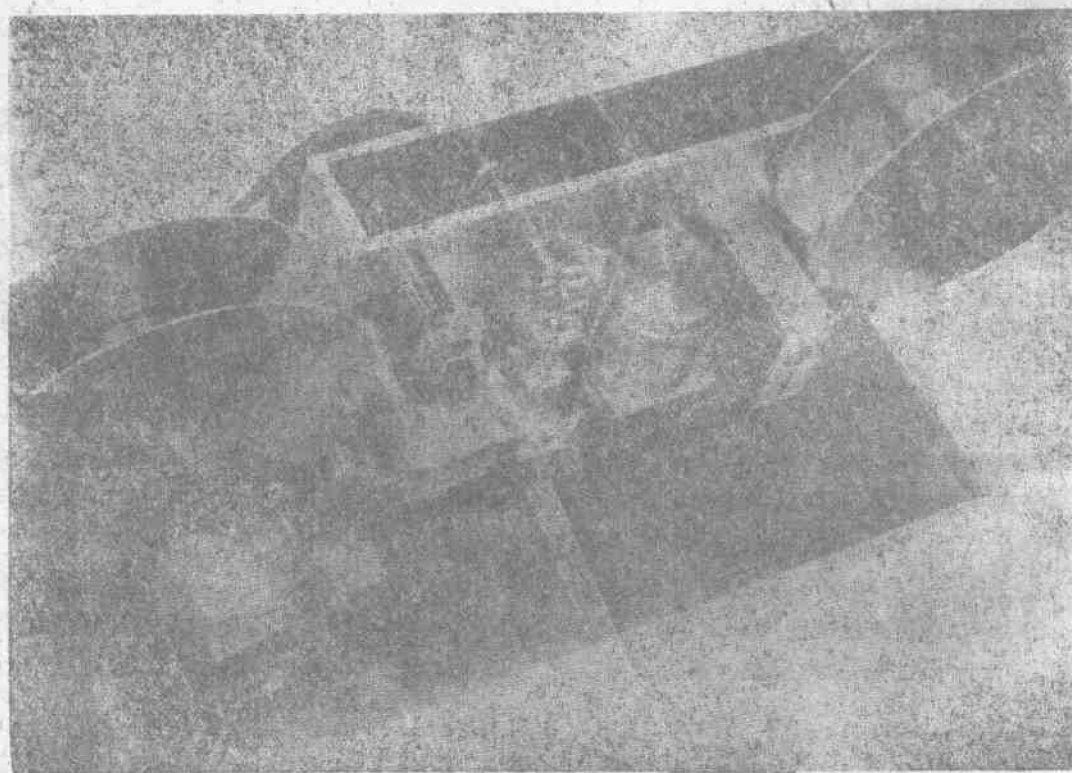


图2 总的 β 量的检查器机械部件

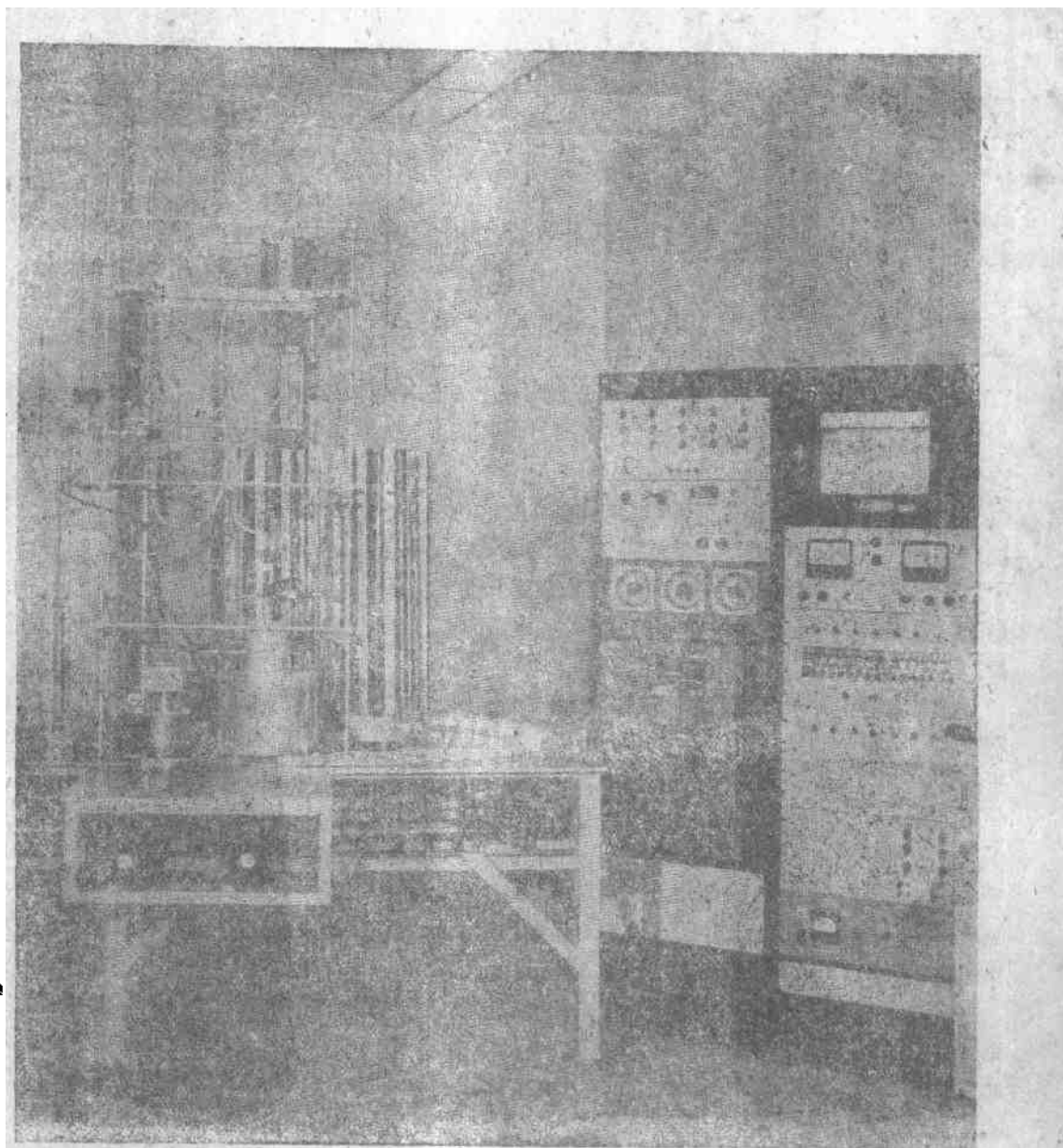


图3 自动分析检查器

斯记录式毫安表记录的。计数的时间和变化循环是由一个廿分钟微变计时计控制的。计数器的效率象平常方法一样确定，发现对于在废流中的 β 源的效率是0.24。本底的范围是每分钟23次到65次。

自动废流分析器

第二种比较复杂的器械是自动分析检查器，它能记录在反应堆内流出来的冷却剂中的总的 β 辐射浓度和七种主要同位素的浓度。这七种同位素约占辐射影响的放射性物质的80%。器械的照片见图3。

表1 索引了这七种同位素，它们的核的性质和浓度范围。

表1 反应堆内流出来的主要的同位素和其性質

同 位 素	半 寿 命	主要的 γ 能量(兆电子伏)	主要的 β 能量(兆电子伏)
As ⁷⁶	26.8小时	0.55, 1.20	3.0, 2.49
Np ²³⁹	2.33 天	0.105	0.44, 0.31
Cu ⁶⁴	12.8小时		$\beta+0.66$, $\beta-0.57$
Na ²⁴	15.0小时	1.37, 2.75	1.39
Mn ⁵⁶	2.58小时	0.82, 1.77, 2.06	2.81, 1.04
P ³²	14.5 天	—	1.7
Si ³¹	2.62小时	—	1.47

样品经过蒸发而不作其它处理时, Na²⁴、Mn⁵⁶ 和 Np²³⁹的 γ 辐射就能测量。测量是用一块3吋 NaI 晶体和杜蒙-6363 光电倍增管连上綫性放大器和一个五道脉冲分析器来进行的。测量 Np²³⁹是在样品准备好后24小时进行的,也就是说等样品的本底在光电峯区域内减低后,从 Cu⁶⁴衰变产生的正电子经过质湮后,得到的0.5兆电子伏 γ 光子可以用二块 NaI 晶体符合方法探测到,这两块晶体一块放在样品上面,另一块放在样品下面。然后再用脉冲分析器。

干扰 As⁷⁶的閃爍譜的一些同位素可以通过一个正离子交换树脂筒把它们分离出来。把从烘干筒里取出的样品放在一个 NaI 晶体計数器下面,这个計数器只接受 As⁷⁶的光电峯的脉冲数。

干扰 P³²和 Si³¹的 β 测量的一些其他源可以通过一个正离子交换床分离开,然后流过硫化铜和用弱金雞納硷处理过的錳酸床除掉 As⁷⁶和 W¹⁸⁷。再吸移流出的样品、烘干后放到甲烷正比計数器下进行計数和记录。最初的計数是属于 P³²和 Si³¹的,经过24小时后計数就只属于 P³²的,因为 Si³¹已經衰变成很弱了(參看圖4图解)。

在三个站,样品被注入(25立方厘米或其倍数)到0.01吋厚的鋁杯,杯的直径为2吋、高为3/4吋。每一个站都装备有一个蒸发罩、一个辐射热源、一个儲备样品杯的仓库和一个挪动样品的机械。儲藏仓库中的鋁杯可供一个星期之用。挪动样品杯的机械首先触动仓库的释放鋁杯的机构,然后把放出的杯子送到样品供应站,当样品准备好了它又把杯子送到計数系統去。

另外三个輔助的杯子挪动器是用来把样品杯从 γ 探测器送到 β 探测器、从 β 探测器送到衰变軌道或当要继续計数时从衰变軌道到 γ 探测器。每一个挪动器的工作都由偏心軸带动,而偏心軸是由1/15馬力 Bodine 馬达牵引。挪动器的工作是按照一个总程序安排系統来調节的。

工作的步骤如下(見圖4)。样品被注入,烘干,然后由挪动器把杯子从样品站送到 γ 探测器。在計数期間,总程序安排系統触动了脉冲分析器的相应的道,于是順序地对样品中的 Na²⁴、Mn⁵⁶和 Cu⁶⁴进行分析。另一个挪动器把样品从 γ 挪到 β 探测器,以进行样品的总 β 放射量的测量。再有一个挪动器把杯子送入衰变軌道,经过24小时后杯子到达 γ 探测器的另一端附近,再由挪动器把杯子送到 γ 探测器,則計数是属于 Np²³⁹的了。这样計数完后,样品盘就被取去。

用交换树脂(Dowex-50)处理过的样品由挪动器把它由样品制备站送到 γ 探测器。在 As⁷⁶测量完之后,杯子就被取出。

用 Dowex-50、硫化铜和錳酸处理过的样品,是已經去掉了一些干扰的 β 源的。把它送到 β 探测器。在这里就能測量到 P³²和 Si³¹的总的 β 放射量。然后挪动器把样品送入衰变軌道,

經 24 小时后,它就到达另一端。那时推动器把样品通过 γ 探测器送到 β 探测器,在这里测量就是 P^{22} 的总的 β 放射量。量完后样品杯就被移出。

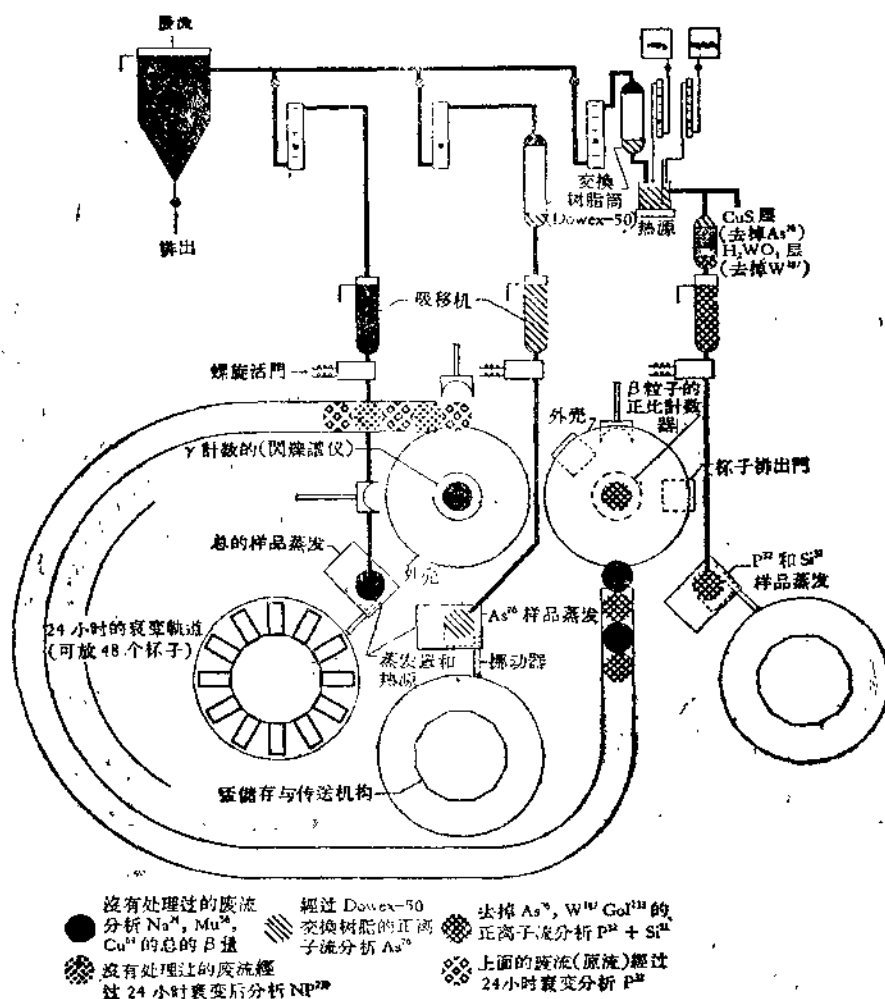


图 4 自动分析仪器的测量过程的图表

顺序和循环是这样安排的,当循环到计数部分时,一个样品盘在 γ 计数位置,另一个在 β 计数位置,其中每一个样品都有它特定的计数时间间隔,在计数完之后,推动器又把顺序中下一个样品送入计数器。

现在的环路允许在每小时完成一次样品的 7 种同位素和总的 β 粒子辐射率的测定。 P^{22} 和 Np^{239} 是无关紧要的。

虽然最初 Mn^{54} , Np^{239} , Na^{24} 和 As^{76} 从计数率计中获得的是模拟的(analog)输出,但是整个数据都用数字法(digital information)记录在 Streeter-Amet 印刷纸上。用一简单的从模拟到数字(analog-digital)的转换器,使产生的脉冲数等于总量程为 50 毫伏的电压表记录器的读数的百分数。对于其它同位素还要用定标器。

废气的分析计数器

已经制成一个用以测量废气流中的主要成分 Ru^{103} 、 $\text{Ru}^{106}-\text{Rh}^{106}$ 和 I^{131} 的检查系统。这些元素很容易以气体或固体形式存在着，因此就需要有能保存气态或固态中任一态的样品收集器。可能沾染空气的样品首先通过不断运动的过滤带，然后通过一个有 0.2 N NaOH 不断流过的筒。用合适的探测器来测量和记录出现在过滤板上和滤洗液内的同位素。

表 2 给出为设计探测器所需要的同位素的核性质。主要能量用黑体字排出。

表 2

元 素	半 寿 命	γ 能 量	β 能量的最大值
Ru^{106}	1.0 年	没有	0.039
$\text{Rh}^{106}(\text{Ru}^{106} \text{ 蜕变产物})$	30 秒	0.512, 0.524, 0.87 1.04, 1.55, 2.41	3.53, 3.11 2.44, 2.0
Ru^{103}	40 天	0.498	0.217, 0.68
I^{131}	8.05 天	0.030, 0.284 0.364, 0.637, 0.722	0.250, 0.335 0.608, 0.815

已制成的探测系统利用二个 β 粒子探测器(薄萘晶体)和两个 γ 光子探测器(NaI 晶体)以及相连的电子线路。探测器供给的讯号和存在于气流中的同位素成正比。情况如下。

过滤带通过探测 β 粒子的萘晶体下面,这晶体被包了一层外壳,使得只有很大能量的 Rh^{106} 的 β 粒子才能被测量到。同样,通过滤洗液的小盒有一薄的不锈钢的窗面对着萘晶体,也只允许从 Rh^{106} 出来的高能 β 粒子到达探测器。从滤洗液的探测器出来的脉冲和从过滤带的探测器出来的脉冲组合输入将要描述的积分计算器、computer-integrator)内。

所有其它测量都是 γ 能量分析测量。一块直径 1½ 吋、高 1 吋的 NaI 晶体粘在 6292 光电倍增管上面面向过滤板,另一个同样的探测器面向滤液盒。从 Ru^{103} 和 I^{131} 出来的脉冲经过放大输入到二道能量分析,一道取在 Ru^{103} 的光电峰的中心 0.498 兆电子伏处,另一道取在 I^{131} 的光电峰中心 0.364 兆电子伏处。在 0.498 兆电子伏这道内的讯号是由 Rh^{106} 的 0.51 兆电子伏和 I^{131} 的 0.364 兆电子伏的高能部分产生的。同样地,在 0.364 兆电子伏这道内的讯号还包含 Ru^{103} 和 Rh^{106} 的康普顿吸收产生的。

想确定每种同位素浓度的多少,就要求解一组同时发生的方程。这些方程的解答如下:

$$x_{\text{Ru}^{103}} = Ay_{\text{Ru}^{103}} - By_{\text{I}^{131}} - Cy_{\text{Rh}^{106}}, \quad (1)$$

$$x_{\text{I}^{131}} = Dy_{\text{I}^{131}} - Ey_{\text{Ru}^{103}} - Fy_{\text{Rh}^{106}} \quad (2)$$

$$x_{\text{Rh}^{106}} = Gy_{\text{Rh}^{106}}, \quad (3)$$

其中 x 为下角号所表示的同位素的量或浓度, y 为下角号所表示的同位素的那道甄别器内的讯号, $A-G$ = 实验确定的系数。

要描述的模拟积分计算器实现了由方程(1),(2)和(3)表示的计算及求和,产生的输出讯号和样品中存在的同位素成正比。

所要求的线路元件以方块图示于图 5。从 β 和 γ 探测器出来的脉冲经过阴极输出放大器进入线性放大器。从 β 探测器的放大器出来的脉冲经过阴极输出放大器加到一个单向振荡器。从 γ 探测器出来被放大后的脉冲通过二道脉冲分析器,脉冲分析器就给出输出脉冲数值也就是方程(1)和(2)中的 $y_{\text{Ru}^{103}}$ 和 $y_{\text{I}^{131}}$ 。一个输出的单向振荡器产生一定的形状和振幅的脉

冲,振幅是由脉冲分析器的脉冲高度确定的。

于是,形成的脉冲加到每一道定位线路。这个线路保证了在沒有脉冲时沒有残余的电压输出,而且它还提供了正的和負的一等幅的脉冲输出,这个输出又成为每个同位素的积分計算器的輸入。

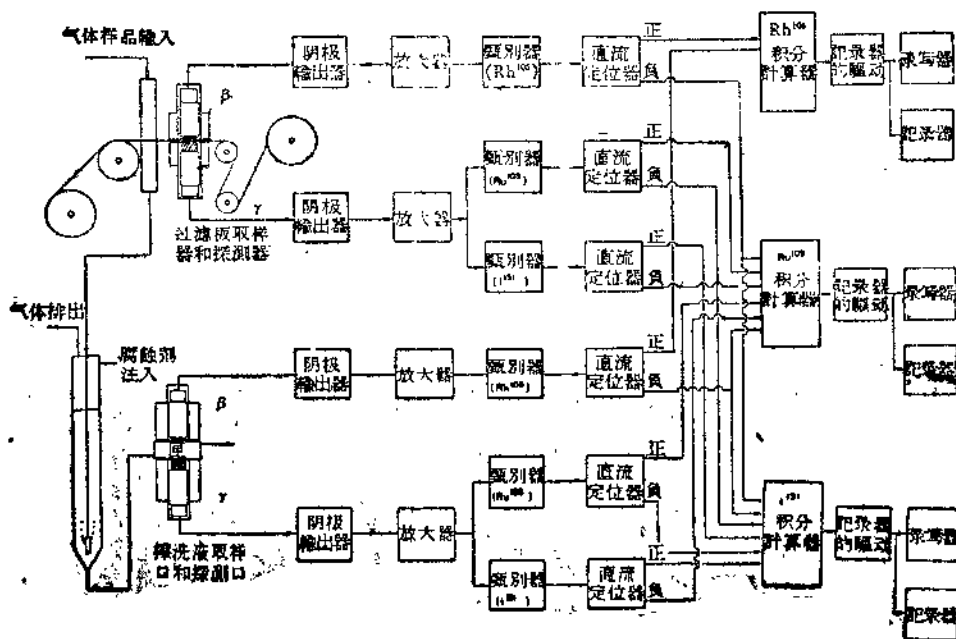


图5 废气的分析計算器的草图和块图

每个积分計算器是由一个 10^6 倍直流放大器和一个带一个 Brown 转变器的斩波稳定 (shopper-stabilized) 部分組成的。放大器是用一个 Philbrick GAP/R K2W 构成的。一个 0.5 微法拉用来供給积分所要求的电容回饋。每一个輸入脉冲都引起电容器的电量的一定值的变化,因为这些直流放大器的输出电压和輸入脉冲数成正比。某个同位素的光电峯所确定的那道定位线路所产生的正脉冲加到这个正脉冲的积分器。而其他同位素的光电峯所确定的那道定位线路所产生的負脉冲也加到这个同位素的积分器。在适当减少脉冲数,使成为方程的系数,并选择比例因子之后,积分器中正負脉冲数的和就代表了电容器上电量的变化。

积分器的输出加到 12AU7 管的栅极,这管的行为好象是一个有选择性的单向振荡器。当积分器的输出增加时,电压上升,则单向振荡器就工作产生一脉冲,这脉冲又触动记录器的驱动线路。

记录器的驱动系统由一个闸流管 2D21 組成。当积分器的正脉冲加到栅极时,它就变成通路。当板极电压降到电离电压之下时,它重新又不通。这充电电流通过和管并联的电容触动了和电容串联的记录器和录写线圈。

机械记录器是 Sodco 五位数字型,它有一个 48 伏的計数线圈,还有 95 伏的复原线圈。录写器是一个 Esterline-Angus 五枝笔的录写器。脉冲使得笔偏离静止位置时就在坐标记录紙上画出“星号”。

(南开大学物理系原子核物理專門化教研組譯校)

輻射誘發的小家鼠的遺傳損傷†

魯塞爾 (W. L. Russel)* 魯塞爾 (L. B. Russel)*

引 言

在我們實驗室為解決遺傳性輻射損傷問題曾用兩種不同的途徑進行過大規模的試驗。第一個途徑是特定位點法(specific locus method),即精確地測定某一基因位點(gene loci)樣本的突變率。這個方法適合於比較之用,例如小家鼠和果蠅比較,照射後經過不同時間間隔後的突變率的比較,確定突變率和劑量之間的關係,雌性和雄性的突變率的比較等等。第二個途徑是測定受照射動物的後代羣體中全部突變所造成的生物學效應。這樣就有可能用試驗來測定全部損傷。而這以少數基因的資料是不能精確地計算的。本文總結了用這兩個途徑所得到的部分比較重要的新成果。除了有關受照射的雄鼠的資料之外,還第一次得到了有關受照射的雌鼠的大量資料。由於在以雌小家鼠做放射遺傳試驗時所遇到的一些特殊問題,和為了方便起見,將在敘述了有關雄鼠的結果之後,單獨敘述有關受照射雌鼠的所得的結果。

特定位點的突變率的研究

在這些研究中,使受過照射的雄鼠在其暫時不育期之後與有七個常見染色體的隱性可見基因(autosomal recessive visibles)是同型的雌鼠交配。然後檢驗其後代在七個位點上所發生的突變。所發現的誘發突變是那些發生在精原細胞時期的突變,這時期對輻射的遺傳效應危險來說,是一個重要的時期^[1,2]。試驗過程已在另一處有詳細的敘述^[3]。

平均突變率:在以前所發表的文章中^[3,4]已指出,我們研究的首要目的是確定小家鼠每個位點確實的誘發突變率。我們希望這些不尋常的資料也會提供有意義的和迫切需要的、對果蠅和哺乳動物的研究的參考。在過去的一個試驗中,以600倫琴的X射線照射雄鼠,照射時間約為7分鐘,結果表明小家鼠的輻射誘發突變率比果蠅要高得多^[3,5]。

這個包括突變的遺傳試驗的實驗已經完成。表1的結果表明,現有的大量數據確實突變率是高的。

表1 用急性X射線在精原細胞期中誘發的特殊位點的突變

劑量(倫琴)	照射部位	後代的數目	在七個位點突變的數目	每十萬個精子中每個位點的平均突變數
0	—	106408	6	0.81
600	全身	119326	111	13.29

* 在美國原子能委員會所屬錫化鈣聯合公司主持的橡樹嶺國立實驗室工作。

† “第二屆和平利用原子能國際會議文獻”編號 A/CONF. 15/P/897, 美國, 原文為英文。

剂量曲线的形状。高的突变率发现后，就很清楚地看到可以采用特定定位点法来确定剂量曲线的形状，或者，至少可以粗略地用试验来判明一下突变率和剂量是否有直线相关。曾经预料，在精原细胞时期受照射后所出现的突变与剂量有直线相关，因为这些突变主要是基因点突变，而没有大的染色体畸变。着手进行了一个试验，用1000伦琴X射线局部照射雄鼠大约占身体三分之一的后半身。结果立即表明其突变率要比根据0伦琴和600伦琴的突变率用直线外插法(linear extrapolation)所预计的为低^[6]。这个试验也已经完成，其最后结果(表2)说明与直

表2 急性X射线所诱发的精原细胞中特定定位点的突变

剂量(伦琴)	照射部位	后代数目	在七个位点的突变数目	在每十万个精子中每个位点的平均突变数
0	——	33972	2	0.84
1000	身体后部 1/3	31815	23	10.33

线关系有很大的出入。已经提出的那个见解可能已是这方面最正确的见解了^[6]，即各个精原细胞的辐射敏感性是不一致的，同时，最后招致细胞死亡的那种损伤敏感性又和突变敏感性成正比。这样，在用较高的剂量时，较多的敏感的精原细胞就会被杀死，而活下来的抵抗力较强的细胞的突变率就比较低了。总之，很可能在600伦琴时已可以使精原细胞的数量有相当大的减少，所以在这个剂量下的突变率已经稍微被压低。这样，在用较低剂量时所得到的突变率可以变得比在600伦琴和0伦琴的突变率之间用直线内插法(linear interpolation)计算出来的还要高。从对人类的危险性的角度来看，证实一下这种可能性的试验是很重要的。因此开始了一个采用300伦琴X射线急性剂量的试验，同时扩大了实验室的设备，以便可以测定受强度小的γ辐射照射的小家鼠的突变率。在用300伦琴X射线的试验中得到的突变率列在表3中，由

表3 急性X射线所诱发的精原细胞中特定定位点的突变

剂量(伦琴)	照射部位	后代数目	在七个位点的突变数目	在每十万个精子中每个位点的平均突变数
0	——	42833	1	0.33
300	身体后部 1/3	20959	12	8.18
300	全身	19449	13	9.55
300	(总计)	40408	25	8.85

于用1000伦琴的试验和用600伦琴的试验不一样，以局部照射代替了全身照射，所以在用300伦琴的试验中将雄鼠平均地分为两组，分别用两种方法照射。如表3所示，在试验的两个组中所得到的结果没有明显的不同。总突变率，和用600伦琴的试验中得到的，一样，与在剂量为0伦琴和1000伦琴时所得到的突变率之间所联直线相距甚远，但它与在0伦琴到600伦琴间所作直线相距不甚远。可是表示300伦琴的突变率的点比在0伦琴和600伦琴的突变率之间直线内插还要高，这一点还是值得注意的。这样，有一些迹象表明，在剂量较低时，突变率可以比根据直线性的假定用600伦琴突变率计算出来的还要高。

用慢性γ和急性X射线照射之间的比较：从事于研究在慢性γ照射下的突变率的原因之一是希望在低强度的辐射下被杀的精原细胞会少些，而且妨害这些细胞正常的有丝分裂周期的机会也会少些。如果这样，那末上面假设的在用高而急性的剂量时能压低突变率的因素之一将被消除，或者至少使它变得不太重要。总之，由于现在在配子形成过程中不同细胞时期辐

射敏感性的差异已完全被证实^[7,8],在将来人们日常可能遇到的照射条件比在采用一次大剂量急性X射线照射的试验中的情况要适合得多,这一点是很重要的。

表4 γ 射线连续照射所诱发的精原细胞中特定位点的突变

剂量(伦琴)	强度(伦琴/週)	后代数目	在七个位点的突变数目	在每十万个结合子中每个位点的平均突变数
0	——	66107	6	1.30
100	12	18973	4	3.01
600	Ca. 100	10446	1	1.37
1000	Ca. 100	12937	6	6.63

表4所列的初步结果是,在用 Cs^{137} 射源的 γ 辐射以两种不同强度和三种累积总剂量长期照射过的雄鼠后代中所获得的特定位点的突变数。虽然变异的数目并不大,但数据已经足以说明某些明显的事实:图1表示上述结果与用急性X射线照射所得结果的比较。在600伦琴时已可清楚地看到,以100伦琴/週 γ 射线照射所发生的突变率比用急性X射线所得到的要低得多。在所得的结果中有一点是出乎意料的,即本来在想象中,强度低时由于被杀死或受其他损伤的精原细胞较少,因此将得到较高的突变率,可是结果却正相反。而且,虽然 γ 射线的生物学效应常常比X射线低,可是在600伦琴时突变率之间的差异要比这因素可能造成的还要大。

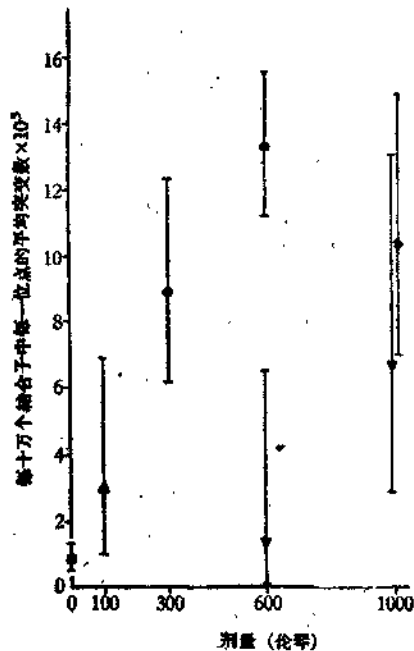


图1 小鼠七个特定位点的突变率

- X射线, 80 伦琴/分钟
- ▲ γ 射线, 12 伦琴/週
- ▼ γ 射线, 100 伦琴/週
- 全部对照的总计

一个可能的解释是:慢性辐射由于某些原因在精原细胞中引起的突变的确较少。目前,另一个假设似乎更有说服力,即强度为100伦琴/週的慢性照射在精原细胞中引起比用急性X射线照射时更大的死亡或损伤;于是,在总剂量为600伦琴时,就和用1000伦琴的急性X射线的剂量时一样,所得到的低突变率是不真实的。乍一想,从通常所观察到的慢性照射引起的组织损伤要小得多的情况看来,这似乎是一个不可能被证实的假设,但是,有一些报导证明在这种情况下睾丸是不正常的。此外,在我们的试验中,雄鼠在受100伦琴/週的连续照射后,其暂时不孕期开始和持续的时间表明睾丸的损伤与受急性照射后所造成的一样,甚至可能更大。这样,很可能这种强度的慢性照射在突变率的曲线上一处下降,和在急性照射中在600伦琴和1000伦琴之间所存在的相似,而且这个下降是在总累积剂量较低处。根据这个解释可以预料,在剂量非常大时,急性照射和慢性照射的突变率之间差异较小,在剂量为1000伦琴时就有这现象。我们也可以预料,在剂量或强度很低,足以避免对精原细胞的可测知的杀害或其他损伤作用时,每一伦琴的突变率较高。用强度大约为12伦琴/週的100伦琴 γ 射线剂量照射所得的资料还不能给这个问题作出最后的解答。但是目前这一估计在这种照射剂量水平下的突变率的论点倾向于支持上述假设。

总之,由于这个假设现在看起来有说服力,因此,根据在所用的强度下剂量为 600 伦琴时观察得到的结果就假设慢性照射一般比急性照射作用小,显然是不谨慎的。在低强度的慢性照射下,每个伦琴的突变率仍有可能真的比 300 伦琴和 600 伦琴急性照射时更高。

但是,数据中已经包含的一些证据,再次证明在低剂量时每个伦琴的突变率似乎并不比在 300 伦琴时所测的高出很多。用强度为 12 伦琴/週的 100 伦琴照射后所得到的突变率的可靠上界限小于在 0 伦琴和 300 伦琴急性照射的突变之间以直线内插法估计的突变率的一半。当然,并没有排斥这种可能性,即甚至 12 伦琴/週也可以使睾丸受相当严重的损伤,结果压低了所观察到的突变率。我们希望,在我们实验室中由奥克堡(Oakberg)博士所进行的慢性照射对睾丸损伤的研究将有助于这些问题的解决。

现有的结果也表明应慎重地解释包括睾丸慢性照射在内的其他遗传试验报告中的数据。在某些报告中所用的强度或剂量可能很高,结果对突变率或遗传损伤便评价过低。

群体中的遗传损伤

在我们几个试验中所累积的证据证明,对群体的可测知的明显有害效应,可以由诱发突变的显性效应引起。在特定位点的研究中,在饲养了三週的大批动物中曾经观察到这种效应。在这试验中,由每窝仔鼠的平均个数来衡量到达这年龄的存活数,受过照射的雄鼠的后代的存活率比对照要低。必须强调的是,这些数据得自在精原细胞受照射的配子,所以,并不包含由于在精原细胞以后各期受照射后所观察到的大量染色体畸变所引起的高度显性致死率。存活率的减少在用 600 伦琴 X 射线的最初的试验中和以后用 1000 伦琴的试验中都曾经记载。用 300 伦琴的试验中在设计时特别注意如何测知这一特殊效应,根据这试验的结果似乎已可对这种损伤作最准确的预测。已经报导过一个初步的估计^[2]。表 5 中最近的资料证实了每窝仔鼠数减少百分之三到四的最初估计。虽然,每窝仔鼠数是一个受许多因素影响的非常不稳定的性状,但这个试验中仔鼠的窝数显然已足以清楚地证明辐射的这一遗传效应。例如,甚至将用 300 伦琴的试验中的数据按时间上连续的不同时期归到一起分为十组,在十个组中受过照射的每窝仔鼠平均个数也都比对照为少。

已经报导过,受过中子照射的雄小鼠的后代的生命缩短了^[9]。几个采用 X 和 γ 辐照的类似的试验还没有结束。现在,其中的两个试验在一起已完全可以表明受过照射的动物的后代要比对照的死得早些,但是,发现其效应比起中子试验中所得到的效应要小些。这一点已预料到了,因为在设计中子试验时就想使其效应达到最大限度。

关于受过照射的雄鼠后代中雌鼠的生殖力的试验也没有结束,但是从已经完成的部分看来,已可看出其有害效应。

这里所讨论的结果只是群体受有害突变的显性效应损伤的一些证据。其他各种结果,虽然还只是初步的,但基本上与上述结果一致。

表 5 在由受 X 射线照射过的精原细胞发育成的后代中计算每窝仔鼠数所得到的年龄为三周的存活个数

剂量(伦琴)	后代数目	窝数	每窝仔鼠平均数
0	37042	6422	5.768
300	35241	6350	5.550

辐射对雌性动物的遗传效应

过去,关于辐射对哺乳动物雌性个体的遗传效应的报导,大大落后于对雄性个体的研究。

为了预测人的遗传辐射损伤,这方面的资料显然是重要的,可补自雄性个体上所获得的结果的不足。用雌性动物做试验的另一意义是可为阐明受照射时配子发生时期所引起的遗传效应的类型的影响问题打下基础。在成年雄鼠中,配子发生的各个时期都有。在成年雌鼠中则相反,没有卵原细胞^[10],也没有与精细胞或精子相当的单元期。也就是说,只有从初级卵母细胞到次级卵母细胞这一系列细胞,且由于成熟分裂中期-I只发生在排卵之前,时间很短暂,所以大部分生殖细胞是初级卵母细胞,可能处在核网期(dictyate stage)。因此关于雌性动物的放射遗传效应研究假定了一个特有的情况,即它们涉及到的是一个特有的配子发生时期,其所有产物在雄性动物中都不能复现。而且,在精母细胞中还没有观察到核网状态(dictyate state)。

为了便于对突变的性质作出评价,也为了便于判明在雌性动物几个有限的配子发生时期中,是否在各时期有任何辐射效应敏感性方面的显著差别,我们研究了两种类型的染色体变异,即显性致死及易位。

在显性致死试验中,首先需要克服一些在用哺乳类雌性动物做研究工作时不可避免的异发现象,例如照射可能会影响有效的生殖细胞的成熟与排出。在判断时也有困难,即在胎生动物中,效应究竟是带有遗传性质的还是由母体环境(maternal environment)所引起的。许多试验表明^[11],用活的胚胎/黄体这一比例可精确地测定在雌性动物中所产生的显性致死,而根据每窝仔鼠个数则不能。

显性致死产生率在受精前约8小时的时期(即在处于或接近于成熟分裂的中期-I时)比在(初级卵母细胞)较早的各个时期要高得多^[12]。在卵母细胞中要引起50%的显性致死,约需要700伦琴,其效应的大小与对精子的效应没有什么不同,但在成熟分裂中期-I用70伦琴即可引起相同的显性致死率。在上述两种情况下其显性致死率都得到确实的证实,死亡是在受精后(大多数是在两个细胞时期之后)发生的。约有全部最后死亡的60%在第一次卵裂(first cleavage)后已可以从剧烈的核畸变中看出。

为了测定被诱发的易位的频率,对受过照射的雌鼠所生的雄鼠的生殖能力进行了研究^[13]。这些雄仔鼠是在(初级卵母细胞)受照射后经过1½至34½天的不同间隔怀孕所生的。在受过400伦琴照射的雌鼠所生的319只雄仔鼠中只发现有一个遗传的部分不育的典型例子,这说明受照射的卵母细胞的易位频率比在精子受照射时所产生的要低得多。除了0.3%的部分不育外,由受过照射的母鼠所生的雄仔鼠中2%是完全不育的,1%虽然交配频繁但所产的窝数很少,此外约有2%,其所生每窝仔鼠数略有减少。另一种效应——性欲不振(poor libido)——的发生率也低,而且可能不比对照组更高。

为了有可能用雌性动物进行一些规模较大的遗传效应的研究工作(特别是在采用特定位点法时),必须首先克服以往干扰这些试验的一个困难,即甚至用剂量相当低的急性照射也引起永久不孕。同一剂量分多次照射的试验^[14]指出,表现在雌性生殖力上的辐射效应随分次的增多而减少;在最近的试验中采用连续的γ射线照射,用四种剂量率水平和四个不同的累积总剂量,证实了剂量率越低则不孕期开始越晚^[15]。这样,剂量率为100伦琴/周的400伦琴累积剂量,甚至剂量率为50伦琴/周的500伦琴累积剂量都适于使每一雌鼠产生足够数量的子代来做特定位点试验。这样,雄体与雌体的突变率,至少在某种照射水平上,已有可能进行比较。

把受照射雌鼠的显性致死试验和对能育性的研究结果与受照射卵巢组织学的研究工作联系起来^[16],提供了大量关于雌性动物体内发生遗传改变的细胞群的类型的数据。例如;如目前在特定位点的试验中那样,以100伦琴/周的剂量率连续照射,大部分剂量积累在均匀一致

的核网期的卵母細胞羣中(甚至在自輻射場移出后立即交配,在排卵前的最后8小时内所受剂量不会多于5伦琴)。由于在成年的卵巢没有卵原細胞,且卵母細胞是不进行有絲分裂的,因此任何被輻射所破坏的卵母細胞是不能补偿的。由于这一事实以及細胞羣的明显均一性,似乎无法清楚地了解在雄鼠中明显表现出那种突变率表面上降低的机制(見上)。因此,在雌体中所测得的突变率可能是“真正的”突变率。在一个正在进行的試驗中,累积剂量为300伦琴,在13115个后代中只发现一个突变。相反,以300伦琴急性X射线照射精原細胞后,在40408个后代中发现有25个突变。由此可见,在雌体内的突变率远較在雄体内的低。

輻射对人的遗传性的危险的測定

这一报告中的观点在測定輻射对人的遗传性的危险时具有特别重要的意义。現将其总结如下。

1. 从突变率与剂量之間的关系与直綫性不符合的性质看来,在根据小家鼠的突变率来推测对人类的危险时,似乎以采用所得到的最高突变率,即在用300伦琴X射线的試驗中所得到的突变率比較合理。在这个試驗中,每一位点每一伦琴的誘发率为 28×10^{-8} 。

2. 在剂量及强度較低时每一伦琴的突变率較高的可能性仍未消失。無論如何,在一个試驗中用剂量率为12伦琴/週的100伦琴 γ 射线进行照射,其初步結果給这一論点提供了一些証明。所得突变率90%可靠的上界限表明,在这一剂量及强度水平,其真实突变率大概沒有在0伦琴与300伦琴的突变率間用內插法所求得突变率的两倍大。

3. 根据用剂量率为100伦琴/週的600伦琴 γ 射线照射后所得的突变率低,就假設慢性照射一般較急性照射的效应低,这是不慎重的。这一突变率之所以低,如同在1000伦琴 γ 射线的試驗中所得的突变率那样,可能是由于敏感的精原細胞受破坏及睪丸中其他损伤的結果。

4. 表现在受照射小家鼠第一代子代的成活率上的有害效应在几个試驗中都已发现。大部分可測知的輻射誘发突变的总遗传损伤可归入显性效应中。

5. 在受照射的雌鼠后代中所得的易位率低,說明这一类型的遗传效应并不十分危险。

6. 在受300伦琴 γ 射线慢性照射的雌鼠后代中所得的特定位点突变率低,很有可能这一发现也适用于人的卵巢。

(林浩然、曾淑云譯,曾淑云校,杜若南審)

参 考 文 献

- [1] Russell, W. L., Genetic Effects of Radiation in Mammals, In, Radiation Biology, Vol. I, edited by A. Hollaender. McGraw-Hill Book Co., Inc., New York (1954), pp. 825—859.
- [2] Russell, W. L., Genetic Effects of Radiation in Mice and their Bearing on the Estimation of Human Hazards, In, Peaceful Uses of Atomic Energy, Proc. Internatl. Conf., Geneva, August 1955, Vol. II, United Nations, New York (1956), pp. 382—383.
- [3] Russell, W. L., X-Ray-Induced Mutations in Mice, Cold Spring Harbor Symposia Quant. Biol., 16: 327—336 (1951).
- [4] Russell, W. L., Mammalian Radiation Genetics, In Symposium on Radiobiology (Oberlin 1950), edited by J. J. Nickson. John Wiley & Sons, Inc., New York (1952), pp. 427—440.
- [5] Russell, W. L., Comparison of X-Ray-Induced Mutation Rates in Drosophila and Mice, Am. Naturalist, 90, Suppl.: 69—80 (1956).
- [6] Russell, W. L., Lack of Linearity between Mutation Rate and Dose for X-Ray-Induced Mutations in Mice, Genetics, 41: 658—659 (1956).
- [7] Oakberg, E. F., Sensitivity and Time of Degeneration of Spermatogenic Cells Irradiated in Various Stages of Maturation in the Mouse, Radiation Research, 2: 369—391 (1955).

- [8] Oakberg, E. F., Gamma-Ray Sensitivity of Spermatogonia of the Mouse, *J. Exptl. Zool.*, 134: 343—356 (1957).
- [9] Russell, W. L., Shortening of Life in the Offspring of Male Mice Exposed to Neutron Radiation from an Atomic Bomb, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S.*, 43: 324—329 (1957).
- [10] Oakberg, E. F., The Effect of X Rays on the Mouse Ovary, Abstract for Tenth International Congress of Genetics, Montreal, Canada, August 20—27, 1958.
- [11] Russell, L. B., and W. L. Russell, The Sensitivity of Different Stages in Oogenesis to the Radiation Induction of Dominant Lethals and Other Changes in the Mouse, in *Progress in Radiobiology*, edited by J. S. Mitchell, B. E. Holmes, and C. L. Smith. Oliver and Boyd, Ltd., Edinburgh (1956), pp. 187—192.
- [12] Russell, L. B., and R. J. Spear, Relation between Dominant Lethal Incidence and Stage in Oogenesis Irradiated, *Radiation Research*, 3: 342—343 (1955).
- [13] Russell, L. B., and L. Wickham, The Incidence of Disturbed Fertility among Male Mice Conceived at Various Intervals after Irradiation of the Mother, *Genetics*, 42: 392 (1957).
- [14] Russell, L. B., and M. K. Freeman, Comparison of the Effects of Acute and Fractionated Irradiation on Fertility of the Female Mouse, *Anat. Rec.*, 128: 615—616 (1957).
- [15] Russell, L. B., and M. K. Freeman, The Influence of Dose-Rate on the Sterilizing Effect of Radiation in Female Mice, Abstract for International Congress of Radiation Research, Burlington, Vermont, August 10—16, 1958.

美国反应堆运转和反应堆安全方面的经验†

羅吉斯·麥卡洛夫 (C. Rogers McCullough)*

I. 引言

自从 1955 年第一次和平利用原子能国际会议以来,在和平应用原子能方面已经有了很大的进展。本文是来总结与反应堆安全有关的反应堆运转和设计方面的进展的。在美国,按常规运转的反应堆完全没有伤害人员,不管是操纵人员或居民,而实验或试验性反应堆只造成了几乎可以忽略的损害,这些经历仍然是颇值得骄傲和思考的。

因为反应堆的安全是防止伤人和损害,我们能够骄傲,但也确信,现有经历比我们有权预期的要好。我们很怀疑我们的技巧和细心是否充分到足以防止一切事故的程度,因此,我们必须对那些即使在我们的最大努力下仍肯定会发生的事故做准备。在其他国家,我们的同事们没有我们这样幸运,而这就更加强了我们自己的信念,即在这方面我们不能期待做得完善。

本文将研究有关反应堆安全各方面的問題,将讨论地址、反应堆设计、反应堆特性、控制和安全系统、组织和规程、外防护和保护居民的紧急措施等问题。

II. 地址的选择

A. 低功率反应堆

如果反应堆是为了教学和作各种实验用的,那么,显然有理由把它放在教室或实验室附近。如果实验所处理的放射性很低,而且反应堆的功率也很小或设计得特别安全,那么只要加了起码的限制,就不存在地址问题。

但如果大学或工业实验室的企图很大,并希望用一个功率为 100 千瓦,1 兆瓦甚至 10 兆瓦的研究堆,那么地址问题必须考虑。在 100 千瓦(热)功率下,长期运转(比如 180 天)所产生的裂变产物对居民的安全和健康是个威胁,如果裂变产物中相当一部分跑出去的话。因此,如果反应堆的所有者希望把它安置在便于于实验室的地点并放在城市中心,那么,就必须考虑专门的外容器预防。防卫研究所(The Armour Institute)在芝加哥市中心有一个水均匀反应堆,

* 美国原子能委员会所属反应堆安全咨询委员会主席。

† “第二届和平利用原子能国际会议文献”编号 A/CONF. 15/P/1551, 美国,原文为英文。