

CN8800845

CNIC-00086

SMC-0011

# 中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

浓缩铀的放射毒理学研究



中国核情报中心

China Nuclear Information Centre

CNIC-00086

SMC-0011

## 浓缩铀的放射毒理学研究

朱寿彭 郑斯英 王国林 王崇道 曹根发

(苏州医学院)

中国核情报中心

北京·1987.12

## 摘 要

可溶性浓缩铀 ( $\text{UO}_2\text{F}_2$ ) 无论经单次或多次摄入机体时, 其在体内的蓄积特性均呈选择性滞留于肾脏, 其次是骨, 再则为肝, 而在其余组织中仅含微量。其代谢动态是: 在肾和肝组织部位迅速出现蓄积高峰, 并随观察时间的延长而逐渐降低, 至于在骨中则随观察时间的增长而持续升高。其诱发骨髓细胞染色体畸变效应, 可随摄入体内浓缩铀  $\text{UO}_2\text{F}_2$  的加大而染色体畸变率亦相应增升, 且可在一个细胞中观察到两个畸变发生, 同时细胞分裂指数亦受到明显抑制。而难溶性浓缩铀  $\text{U}_3\text{O}_8$  在胃肠道的滞留过程包括两个不同的滞留半减期, 即快组分为 0.34 天, 较慢组分为 4.05 天。当浓缩铀  $\text{UO}_2\text{F}_2$  沾染完整或损伤皮肤时, 均能穿透入皮肤内, 而完整皮肤内的滞留率仅为 0.16~0.18%, 在损伤皮肤内的滞留程度可相应增升 25~32 倍, 且主要向肾脏和骨髓部位转移。

**关键词** 浓缩铀 匀相液体闪烁法 整体测量装置 染色体畸变

# STUDY ON THE RADIOTOXICOLOGY OF ENRICHED URANIUM

Zhu Shoupeng Zheng Siying Wang Guolin

Wang Chongdao Cao Genfa

(Suzhou Medical College)

## ABSTRACT

Study on the retentive peculiarity of soluble enriched uranium  $UO_2F_2$  were observed after iv once or consecutive ip  $Qd \times 3d$  to Wistar male rats. The dynamic retention of radioactivity in the body showed that enriched uranium  $UO_2F_2$  was chiefly localized in kidney, and then in skeleton and liver. The radioactivity of enriched uranium  $UO_2F_2$  in skeleton rose steadily while the concentration in kidney and liver dropped.

When enriched uranium  $UO_2F_2$  was accumulated in organism, it caused chromosome aberrations on bone marrow cells. Results indicated that the chromosome aberration rates were elevated when the dose of enriched uranium  $UO_2F_2$  was increased, at the same time, the cell division was depressed.

Accumulation of insoluble enriched uranium  $U_3O_8$  in gastrointestinal tract was well described by a two exponential expression. Values of retention estimate for fast component,  $T_1 = 0.34$  d, and for relatively long term component,  $T_2 = 4.05$  d.

The deposition of  $UO_2F_2$  in the intact skin was only 0.16~0.18% of the total contaminated  $UO_2F_2$ . Penetration of the enriched uranium  $UO_2F_2$  was dominantly increased in abraded skin. This value is about 25~32 times as compared with that in intact skin. Retention of the enriched uranium  $UO_2F_2$  through abraded skins was dominantly localized in kidney and skeleton.

## 前 言

作者考虑到在生产环境中,可溶性浓缩铀 $UO_2F_2$ 有可能通过不同途径污染吸收到机体的实际情况<sup>1</sup>,因此,有必要阐明浓缩铀 $UO_2F_2$ 在进入血液后向各主要器官污染积累的代谢过程,以及在沾染完整和损伤皮肤表面时的穿透滞留规律,从而可以揭示其对机体的损伤特点和机理,以便及时地采取必要的医学处理措施。至于难溶性浓缩铀 $U_3O_8$ 经口摄入或由吸入而在呼吸道中沉积时,大部分由于呼吸道纤毛运动可转入胃肠道中<sup>[2]</sup>。虽然浓缩铀 $U_3O_8$ 经胃肠道的吸收率极微<sup>[3]</sup>,但将直接引起对胃肠道的损伤。为此,我们设计用整体测量装置来探讨胃肠道摄入难溶性浓缩铀 $U_3O_8$ 时的消失动态,以期为评价其对胃肠道的危害,提供依据。

## 实验方法和结果

### 一、浓缩铀 $UO_2F_2$ 单次或多次摄入体内的蓄积特性、诱发体细胞染色体畸变及增殖抑制效应

#### 1) $UO_2F_2$ 单次或多次摄入后在体内主要蓄积器官的滞留动态:

实验用 $UO_2F_2$ 的浓度为60mg/ml,其中 $^{235}U$ 丰度为18.9%。单次静脉注入组共选用体重为 $188 \pm 12g$ 的雄性大白鼠24只,剂量为20mg/kg。在注入后立即放入代谢笼中<sup>[4]</sup>,经过不同间隔时间,由颈动脉放血处死。多次腹腔注入组共用 $178 \pm 5g$ 的雄性大白鼠10只,连续3天由腹腔注入浓缩铀量15mg/(kg·d)。注入后亦放入代谢笼中,经过24和96h分别由颈动脉放血处死。随即解剖,取出主要器官组织,各称量100mg,用匀相液体闪烁法<sup>[5]</sup>测定不同样品中浓缩铀的放射性。随后将所得各部位放射性测定的结果,换算成每克组织含放射性与每克组织理论上平均分配量的比值<sup>[6]</sup>,进行统计处理,从而得出 $^{235}U$ 在体内的蓄积动态过程。

当浓缩铀 $UO_2F_2$ 单次静脉注入大白鼠(20mg/kg)后,在6h阶段,即呈选择性蓄积于肾脏,其次为骨骼,再次为肝脏,如图1中所示。而在其余器官组织中仅含微量。至于 $^{235}U$ 在肾脏和肝脏中的蓄积量经摄入后很快达高峰,然后随观察时间的延长而递减。可是骨骼中的蓄积量则随观察时间的延长而增升。

当机体连续3天腹腔注入 $UO_2F_2$ 15mg/(kg·d)后,体内的主要蓄积器官的滞留过程与单次静脉摄入后相似,肾脏为最高,其次为骨骼,肝脏(图2)。肾脏和肝脏滞留高峰在3次注射后24h,随后逐渐降低。骨组织则是随观察时间的延长而有所增升。

#### 2) 浓缩铀 $UO_2F_2$ 摄入机体后诱发骨髓细胞染色体畸变及增殖抑制效应:

选用Wistar纯种雄性大白鼠27只,体重在 $190 \pm 10g$ 。动物分成对照组和两个实验组。所用浓缩铀 $UO_2F_2$ 的浓度亦为60mg/ml,其中 $^{235}U$ 丰度为18.9%。两个实验组由尾静脉注入 $UO_2F_2$ 量分别为20mg/kg和30mg/kg。注入容量均为0.5ml。接受 $UO_2F_2$ 的大白鼠由静脉摄入不同量后24h,由颈动脉放血处死后,迅速取出完整股骨,分离出骨髓细胞作体外培养。即用止血钳紧压挤出骨髓约0.2ml,用无菌操作注入装有5ml量RPMI1640培养液的培养瓶中,放置在37℃培养24h后,加入1%秋水仙素液1滴,使最终浓度达 $1 \times 10^{-6}mol/ml$ 。

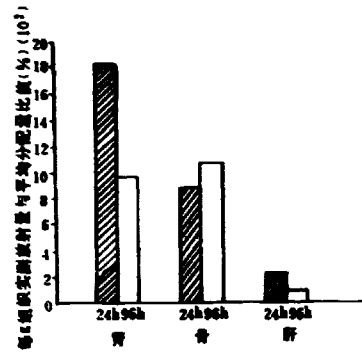
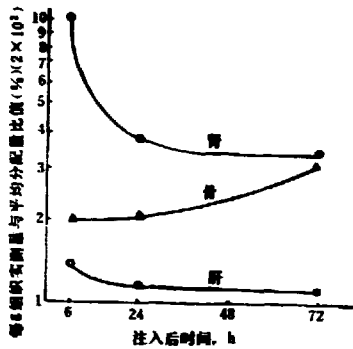


图1 浓缩铀 $UO_2F_2$ 单次静脉注入机体 $20mg/kg$ 后在主要蓄积器官的滞留比较

图2 浓缩铀 $UO_2F_2$  $15mg/(kgd)$ 连续3天腹腔注入后在体内主要蓄积器官的积累比较

继续恒温孵育4~6h,即可取出培养物,用 $1000r/min$ 低速离心5min后弃上清液,在沉淀物中加入预热 $37^{\circ}C$ 的 $0.075mol/l$  KCl液作低渗处理20min,使细胞低渗膨胀。再次低速离心,留沉淀物,用3:1的甲醇冰醋酸混合液5ml,离心,弃上清液,先后固定3次,每次20min。在末次弃上清液时,约留0.5ml,混匀成细胞悬液,作气干法制片。最后用 $pH7.4$ 的磷酸缓冲液作10倍稀释过的Wright液染色10min,即可镜检染色体单体断裂和染色体断裂发生。

骨髓细胞染色体畸变结果和中期分裂指数如表1中所示。可见正常对照组大白鼠的染色体畸变率波动在 $0.55 \pm 0.22\%$ 范围内,而当机体摄入不同剂量的 $UO_2F_2$ 后24小时,即发现骨髓细胞染色体畸变率的显著增升,如当机体摄入 $UO_2F_2$  $20mg/kg$ 时,可诱发骨髓细胞的染色体畸变率的明显增升至 $4.36 \pm 0.49\%$ ;当 $UO_2F_2$ 量增加至 $30mg/kg$ 时,其畸变率即可显著增高达 $5.48 \pm 0.57\%$ 。从浓缩铀 $UO_2F_2$ 诱发骨髓细胞染色体的畸变类型来看,则大都是属于单体型。浓缩铀 $UO_2F_2$ 诱发染色体断裂见图3,诱发骨髓细胞对称性染色单体互换如图4所示。

表1 机体静脉注入不同剂量的浓缩铀 $UO_2F_2$ 后24h,分离骨髓细胞作体外培养\*  
观察染色体畸变发生率和细胞中期分裂指数

| 组别          | 染色体畸变发生率      |                      |             |            |    | 细胞中期分裂指数        |           |             |     |                       |         |
|-------------|---------------|----------------------|-------------|------------|----|-----------------|-----------|-------------|-----|-----------------------|---------|
|             | 观察<br>细胞<br>数 | 中期分裂相                |             | 畸变率<br>(%) | P值 | 计数细<br>胞数       | 中期分<br>裂相 | 分裂指数<br>(%) | P值  |                       |         |
|             |               | 观察<br>染色<br>单体<br>断裂 | 变<br>裂<br>断 |            |    |                 |           |             |     | 数<br>目<br>裂<br>断<br>裂 |         |
| 对照组         | 7             | 1039                 | 4           | 2          | 0  | $0.55 \pm 0.22$ | —         | 14250       | 702 | $4.92 \pm 0.25$       | —       |
| $20mg/kg$ 组 | 10            | 1720                 | 44          | 31         | 0  | $4.36 \pm 0.49$ | $<0.01$   | 12900       | 496 | $3.84 \pm 0.73$       | $<0.05$ |
| $30mg/kg$ 组 | 10            | 1587                 | 43          | 44         | 0  | $5.48 \pm 0.57$ | $<0.01$   | 11700       | 415 | $3.95 \pm 0.82$       | $<0.05$ |

\* 细胞培养时间均为24h



图3 机体摄入浓缩铀 $UO_2F_2$  20mg/kg后24h诱发骨髓细胞染色单体断裂, Wright染色,  $\times 2000$



图4 机体摄入浓缩铀 $UO_2F_2$  30mg/kg后24h诱发骨髓细胞对称性染色单体互换, Wright染色,  $\times 1200$

至于对骨髓细胞中期分裂指数观察的结果见表1, 如对照组大白鼠骨髓细胞的中期分裂指数值为 $4.92 \pm 0.25\%$ , 当机体摄入 $UO_2F_2$  20mg/kg时, 观察到机体此时的骨髓细胞中期分裂指数值即明显下降到 $3.84 \pm 0.73\%$ ; 而随着浓缩铀 $UO_2F_2$  摄入量增至30mg/kg时, 骨髓细胞中期分裂指数值更进一步下降至 $3.35 \pm 0.82\%$ 。同时出现分裂异常的超二倍体细胞如图5中所示。

## 二、浓缩铀 $UO_2F_2$ 沾污皮肤后的穿透和清除过程

实验对象为体重 $185 \pm 15g$ 的雄性大白鼠, 分为完整皮肤组和损伤皮肤组, 每组10只。对完整皮肤组动物, 在临实验前剪去背部皮肤的毛, 其面积为 $9 cm^2$ , 取浓度 $60mg/ml$ 的浓缩铀 $UO_2F_2$  (其中 $^{235}U$ 的含量为 $18.9\%$ ) 溶液 $200\mu l$ , 均匀涂在去毛的皮肤部位。完整皮肤组的动物又分为两个亚组, 各5只, 分别于沾污浓缩铀( $UO_2F_2$ )后1和6h, 用浸渍生理盐水的脱脂棉球擦拭去污。每只动物共擦拭5min, 计用30个棉球, 观察去污效果<sup>[6]</sup>。随后将

大白鼠由颈动脉放血处死, 迅速解剖, 剪下受污染的皮肤, 同时取出肾、肝和股骨等器官组织, 称取这三种器官组织样品各 $100mg$ , 另取抗凝血 $100\mu l$ , 将这些样品分别放到低钾玻璃测

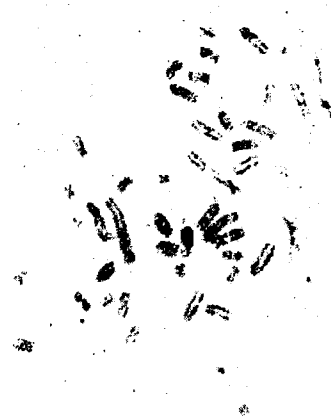


图5 机体摄入浓缩铀 $UO_2F_2$  30mg/kg后24h诱发骨髓细胞中呈现数目异常的超二倍体细胞, Wright染色,  $\times 1200$

量瓶中,按我们报道的方法制成均相透明液<sup>[6]</sup>。用双道液体闪烁计数器测量样品中放射性,用道比法作猝灭校正。

对损伤皮肤组的动物,先去净背部的毛,用砂纸磨擦皮肤,直至有组织液渗出为止<sup>[6]</sup>,受损伤的皮肤面积 $9\text{cm}^2$ 。其后的动物分组,擦拭去污,解剖和制样测量等实验步骤同完整皮肤组。

1).皮肤去污效果 观测了完整和损伤皮肤受可溶性浓缩铀 $\text{UO}_2\text{F}_2$ 沾污后不同时间的皮肤去污效果,结果列于表2。可以看到,完整皮肤受 $\text{UO}_2\text{F}_2$ 沾污后1和6h,用浸渍生理盐水的脱脂棉球反复擦拭,去污有效率可达98%以上;而损伤皮肤受 $\text{UO}_2\text{F}_2$ 沾污后1h,去污有效率为59.0%,6h后仅为46.3%。

表2 完整和损伤皮肤受 $\text{UO}_2\text{F}_2$ 沾污不同时间皮肤内滞留量和皮肤去污效果(%)

| 组别    | 沾污后时间, h | 实验动物数 | 滞留量 $\bar{x}\pm\text{SD}$ | 去污有效率 $\bar{x}\pm\text{SD}$ |
|-------|----------|-------|---------------------------|-----------------------------|
| 完整皮肤组 | 1        | 5     | $1.36\pm 0.53$            | $98.55\pm 10.82$            |
|       | 6        | 5     | $1.55\pm 0.34$            | $98.41\pm 13.54$            |
| 损伤皮肤组 | 1        | 5     | $40.95\pm 9.82$           | $59.03\pm 9.49$             |
|       | 6        | 5     | $53.66\pm 8.04$           | $46.29\pm 10.13$            |

2).皮肤内 $\text{UO}_2\text{F}_2$ 的滞留量 表2中还列出了皮肤内滞留量的测量结果。机体完整皮肤受 $\text{UO}_2\text{F}_2$ 沾污后1和6h,皮肤内滞留量(以沾污总量的百分数表示)为 $1.36\pm 0.53\%$ 和 $1.55\pm 0.34\%$ 。当皮肤受到擦伤后,皮肤内 $\text{UO}_2\text{F}_2$ 的滞留量明显增加;沾污后1h,滞留量达 $40.95\pm 9.82\%$ ,比相应的完整皮肤组高出28倍以上;而且,随着沾污后时间的延长,皮肤内的滞留量增加,如沾污后6h,其滞留量为 $53.66\pm 8.04\%$ 。

3).部分器官组织中 $\text{UO}_2\text{F}_2$ 的含量 实验中取大白鼠的肾脏、肝脏和股骨等器官组织的样品,测量所含放射性强度,从而确定器官中 $\text{UO}_2\text{F}_2$ 含量。表3中所列为器官中 $\text{UO}_2\text{F}_2$ 含量以其占皮肤沾污总量的百分数表示。可见,在所观察的时间内, $\text{UO}_2\text{F}_2$ 由皮肤转移到器官内的量是微小的。

表3 完整和损伤皮肤受 $\text{UO}_2\text{F}_2$ 沾污后不同时间在部分组织器官内的含量(%)

| 组别    | 沾污后时间, h | 实验动物数 | 肾 $\bar{x}\pm\text{SD}$ | 肝 $\bar{x}\pm\text{SD}$ | 骨 $\bar{x}\pm\text{SD}$ | 血 $\bar{x}\pm\text{SD}$ |
|-------|----------|-------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 完整皮肤组 | 1        | 5     | $0.19\pm 0.08$          | $0.18\pm 0.06$          | $0.30\pm 0.09$          | $0.23\pm 0.10$          |
|       | 6        | 5     | $0.18\pm 0.03$          | $0.14\pm 0.10$          | $0.32\pm 0.23$          | $0.18\pm 0.03$          |
| 损伤皮肤组 | 1        | 5     | $0.23\pm 0.09$          | $0.20\pm 0.05$          | $0.35\pm 0.14$          | $0.17\pm 0.13$          |
|       | 6        | 5     | $0.59\pm 0.16$          | $0.18\pm 0.11$          | $0.37\pm 0.19$          | $0.12\pm 0.06$          |

### 三、难溶性浓缩铀 $\text{U}_3\text{O}_8$ 摄入胃肠道时的消失动态

实验研究选用20只体重为 $120\pm 10\text{g}$ 的雄性大白鼠。使用的难溶性浓缩铀 $\text{U}_3\text{O}_8$ 中的 $^{235}\text{U}$ 丰度为20.63%,以5%的白明胶液配制成10%的浓缩铀 $\text{U}_3\text{O}_8$ 混悬液,用特制的灌胃器灌



入。U<sub>2</sub>O<sub>5</sub>的灌胃量：第一组为每鼠100mg，第二组为每鼠200mg。实验大白鼠接受浓缩铀灌胃完毕后，立即放置到整体测量装置中进行对<sup>235</sup>U的低能γ线放射性强度测定<sup>3</sup>。随后放置到能完全分离尿、粪的有机玻璃代谢装置中，每隔24h收集排出尿、粪的总量，进而作放射活度测定，同时重复进行大白鼠的整体测量。

整体测量装置探头部分的结构及仪器的方框图见图6所示。为了提高仪器的探测效率，本装置选用了大直径的光电倍增管和φ100×100的NaI(Tl)闪烁体，并将大白鼠测量室设计在紧靠光电倍增管的光阴极部分，经过FH-1002A主放大器与FH-1006A单道脉冲幅度分析器对大白鼠整体及其尿、粪排泄物中的<sup>235</sup>U的185keV低能γ线进行测定。在打开铅室门后，大白鼠测量室连同实验动物可一并取出，这样可便于测试中更换，如图7所示。测量室的底部密封，以防止动物的排泄物污染铅室。

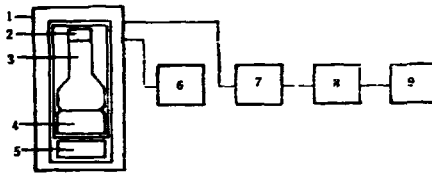


图6 整体测量装置探头部分及仪器方框图

1. 铅室 2. 射线跟随器 3. 光电倍增管GDB-100
4. φ100×100NaI(Tl)晶体 5. 大白鼠测量室
6. FH-1034A高压电源 7. FH-1002A放大器
8. FH-1006A单道脉冲幅度分析器 9. FH-1011A定标器

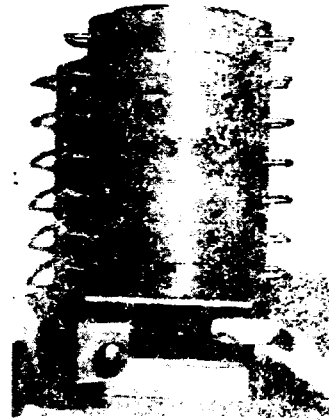


图7 大白鼠整体测量装置图

当浓缩铀U<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 100mg灌胃摄入胃肠道的即刻以及在随后各观察间隔时间内，由整体测量装置所测得的滞留过程相对百分比值的消失动态见图8。我们用最小二乘法配线<sup>7</sup>，求得如下的滞留方程：

$$R(t) = 107.55e^{-\frac{0.609t}{0.34}} + 1.38e^{-\frac{0.609t}{4.05}}$$

$$= 107.55e^{-2.04t} + 1.38e^{-0.17t}$$

可见浓缩铀U<sub>2</sub>O<sub>5</sub>在体内胃肠道的滞留过程包括两个不同的滞留半减期，即快组部分 $T_1 = 0.34d$ ，和较慢组分 $T_2 = 4.05d$ 。

同时，我们又通过大白鼠代谢装置每天按时分别收集实验大白鼠的尿和粪的排除总量，测得经尿排除的放射性活度一直维持在本底水平。至于粪中排除的<sup>235</sup>U低能γ线放射性活度曲线如图9中所示。

关于U<sub>2</sub>O<sub>5</sub>经粪排除的动态规律，亦用最小二乘法配线，求得粪排除方程如下：

$$E(t) = 541.37e^{-\frac{0.609t}{1.93}} + 1.54e^{-\frac{0.609t}{1.97}}$$

$$= 541.37e^{-0.62t} + 1.54e^{-0.29t}$$

可见经粪排的快组分的半排期 $T_1 = 1.33d$ ，而较慢组分的半排期为 $T_2 = 2.97d$ 。

至于第二组经单次灌胃200mg浓缩铀 $U_3O_8$ 每鼠的观察结果，基本上与第一组的结果类同。

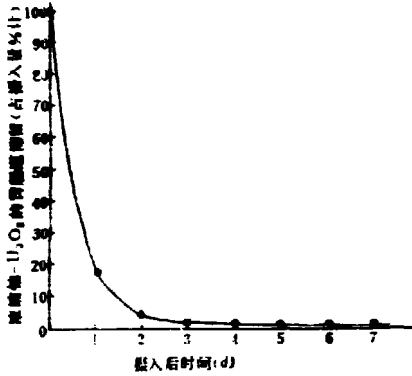


图8 浓缩铀 $U_3O_8$ 灌胃摄入后的胃肠道滞留消失动态

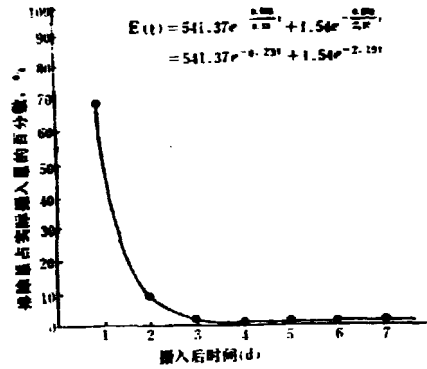


图9 浓缩铀 $U_3O_8$ 灌胃摄入后由粪排除的动态过程

## 讨 论

从放射毒理学角度来看，考虑到放射性物质对机体产生的作用和引起的损伤效应，是与其在体内的蓄积特性密切相关的<sup>[1]</sup>。实验表明，当浓缩铀 $UO_2F_2$ 经单次或多次摄入机体后，其在体内呈现的选择性蓄积特性与天然铀基本上是一致的。

观察发现，当大白鼠摄入浓缩铀 $UO_2F_2$  20mg/kg时，其诱发骨髓细胞染色体畸变率要比对照组高达8倍，此时细胞分裂抑制达20%的量；而当剂量增至30mg/kg时，所引起的骨髓细胞染色体畸变率可比同期对照组显著高达10倍之多，且在一个细胞中观察到有两个畸变发生。这种畸变的不均一性，是与浓缩铀释放的 $\alpha$ 粒子的高LET特性相关联的。同时细胞分裂抑制达35%，且出现分裂异常的超二倍体细胞。可见随着浓缩铀 $UO_2F_2$ 摄入剂量的增大，其诱发骨髓细胞染色体畸变率显著增升的同时，对中期细胞分裂相的抑制也就愈显著。所以从辐射防护角度来考虑，对于从事浓缩铀 $UO_2F_2$ 操作的工作人员来说，应严格控制其摄入人体的可能性。

从实验观察到难溶性浓缩铀 $U_3O_8$ 由胃肠道摄入时所得滞留方程和排除方程的参数来看，都存在着两个不同的滞留组分和排除组分。其中快组分排除量多而迅速，但不能忽视慢组分的滞留和排除部分的存在<sup>[9]</sup>，虽然难溶性浓缩铀 $U_3O_8$ 由胃肠道摄入时吸收极微，只是在胃肠道无关排除地通过了一下，但不能忽视少量浓缩铀在肠粘膜层的绒毛处吸附和结合，从而对肠道引起辐射效应和原浆毒物的局部损伤。

实验观察结果表明,机体的完整皮肤是一个天然的保护屏障,由于表皮角质层的密度很高<sup>[1]</sup>,使浓缩铀 $UO_2F_2$ 转移到体内的份额很小。 $UO_2F_2$ 沾污机体 $9\text{ cm}^2$ 的完整皮肤1和6 h后,皮肤内滞留量仅为沾污总量的1.4%和1.6%。

但是,在机体皮肤仅仅受到擦伤的情况下,皮肤内的滞留量即大为增加。擦伤皮肤沾污 $UO_2F_2$ 后1 h,皮肤内滞留量达41.0%,比相应完整皮肤组要高出28倍多。随着沾污后时间的延长,皮肤内滞留量有所增加。当 $UO_2F_2$ 沾污擦伤皮肤6 h后,皮肤内的滞留量增加到53.7%。因此,从防护来讲,对从事浓缩铀操作的工作人员,当其皮肤受到损伤时,应注意适当控制其作业,防止其自皮肤摄入人体的可能性。

### 参 考 文 献

- [1] 皆川洋二, 原子力工业, 13 (10) : 45~49, 1976
- [2] USAEC, Handbook of Radioactive nuclides, 1st ed., USAEC, Vienna, p.844~852, 1969
- [3] Morrow P et al., Health Physics, 43 (6) : 859~865, 1982
- [4] 朱寿彭等, 核技术, 13 (4) : 47~52, 1980
- [5] 朱寿彭等, 中国药理学报, 3 (3) : 197~200, 1982
- [6] 朱寿彭等, 核防护, (2) 24~28, 1979
- [7] 朱寿彭等, 中国药理学报, 5 (4) : 288~289, 1984
- [8] 朱寿彭, 放射毒理学, 第1版, 第318~318页, 原子能出版社, 北京, 1983
- [9] 朱寿彭等, 核技术, 10 (4) : 55~57, 1987
- [10] McEwan A.C., Health Physics, 23 (5) : 742~745, 1972

# CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT



P.O. Box 2103  
Beijing, China

**China Nuclear Information Centre**