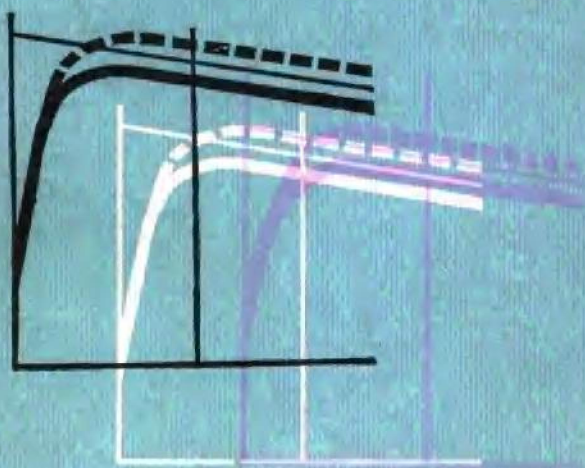


放射性同位素发生器

译文集



原子能出版社

内 容 简 介

本书由三十一篇译文、两篇文献综述和一个附录组成。全书分为五部分，叙述了放射性同位素发生器的原理和某些有关的基本化学问题； ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器、 ^{113}Sn - $^{113\text{m}}\text{In}$ 发生器及其他发生器的研制和生产；由发生器得到的放射性同位素制备各种放射性药物的方法；质量检定问题；以及这些放射性药物在科研和临床中的应用。

本书可供从事放射性同位素和放射性药物科研、生产和质量检定工作的科技人员、核医学工作者和放射性药物药剂师阅读，对高等院校有关专业师生也有一定参考价值。

放射性同位素发生器

(译文集)

孙素元 等译

王世真 校

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

沈阳新华印刷厂印刷

(沈阳兴顺街二段10号)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ ·印张 $14 \frac{9}{16}$ ·字数 381 千字

1981 年12月第一版·1981 年12月第一次印刷

印数 001—1,500·统一书号：15175·247

定价：2.15元

目 录

第一部分 放射性同位素发生器.....	(1)
放射性同位素发生器的原理和应用 (文献综述)	(3)
放射性核素发生器: 在核医学中应用的现状和前景.....	(47)
锝 ^{99m} 的化学.....	(64)
无载体钼的溶液化学.....	(79)
第二部分 ⁹⁹ Mo- ^{99m} Tc 发生器.....	(93)
^{99m} Tc 发生器的新进展.....	(95)
裂变产物 ⁹⁹ Mo- ^{99m} Tc 发生器.....	(121)
四种锝 ^{99m} 标记白蛋白微球方法的比较.....	(127)
电解法标记锝 ^{99m} 放射性药物.....	(139)
PVP——一种实用的硫化锝 ^{99m} 胶体的稳定剂.....	(146)
含 ^{87m} Sr, ^{99m} Tc及 ^{113m} In的肝、肺放射性药物的制备方法	(150)
钴 ⁵⁷ 、钼 ¹¹¹ , 锝 ^{99m} 、汞 ¹⁹⁷ 、铅 ²⁰³ 和铜 ⁶⁷ 标记博莱霉素	(169)
一种新的肺扫描剂 —— ^{99m} Tc(Sn) MAA.....	(180)
肾脏显影用各种 ^{99m} Tc-络合物的比较	(186)
一种新的肾扫描剂 ^{99m} Tc-二巯基丁二酸	(210)
肾脏闪烁照相用锝 ^{99m} -葡糖酸盐络合物	(221)
锝 ^{99m} 标记的焦磷酸盐——一种简单的再现性好的骨扫描剂	(239)
脾显影用锝 ^{99m} 标记红细胞药箱.....	(248)
锝 ^{99m} -吡哆醛亚基谷氨酸盐(^{99m} Tc-Pyridoxylideneglutamate) ——一种新型胆囊显影剂.....	(258)
锝 ^{99m} -纤维蛋白原——一种可能的血栓显影剂	(261)
摄入 ^{99m} Tc标记的博莱霉素后肿瘤的显影	(263)

第三部分 $^{113}\text{Sn}-^{113\text{m}}\text{In}$ 发生器	(281)
$^{113}\text{Sn}-^{113\text{m}}\text{In}$ 放射性同位素发生器系统	(283)
锆对铟 $^{113\text{m}}$ 标记大颗粒白蛋白的影响	(290)
一种快速可靠的 $^{113\text{m}}\text{InCl}_3$ 标记Sn-MAA的方法	(301)
$^{113\text{m}}\text{In}$ 标记的骨扫描剂	(305)
第四部分 其它放射性同位素发生器	(315)
铷 81 -氪 $^{81\text{m}}$ 发生器及其应用 (文献综述)	(317)
放射性碘的剂量学和除 ^{131}I 外其它放射性碘在甲状腺 诊断中的应用	(327)
第五部分 质量检定问题	(355)
放射性药品的质量检定	(357)
放射性药品质量检定的分析方法	(368)
制备放射性药品用的无菌药箱: 质量检定的某些基本问题	(384)
锝 $^{99\text{m}}$ 化合物纯度的色谱检定	(392)
凝胶色谱柱扫描: 锝 $^{99\text{m}}$ 放射性药品的一种鉴别和质量 检定的方法	(414)
$^{99\text{m}}\text{Tc}$ -大颗粒白蛋白的质量检定和检验	(429)
短寿命放射性药品中微生物污染的检定和测定	(441)
第六部分 ^附 附录	(449)
某些放射性同位素发生器体系的部分核性质和衰变纲图	(451)

第一部分

放射性同位素发生器

放射性同位素发生器的原理和应用

(文 献 综 述)

孙 素 元

随着原子能事业的不断发展，放射性同位素在国民经济各个领域包括农业、工业、医学以及科学研究中的应用日趋广泛。放射性同位素及核辐射在医学中的应用，为核医学的发展奠定了基础。目前，核医学已成了医学的一个重要分支。

六十年代初期，放射性同位素发生器临床应用的成功，有力地推动了核医学的发展。“药箱”的出现，又为发生器的临床应用创造了十分有利的条件，从而使放射性同位素发生器成为核医学中一个重要而简便的工具。

本文仅对放射性同位素发生器的发展概况、工作原理、制作方法、主要用途以及今后可能的发展趋势作一概述。

一、放射性同位素发生器及其发展概况

放射性同位素发生器是指可从较长半衰期的母体核素中分离出由它衰变产生的短半衰期子体核素的一种装置。每隔一定时间可从该装置中分离出可供使用的放射性子体核素，犹如从母牛身上挤奶，故放射性同位素发生器又有“母牛”之称。

“母牛”体系使某些短寿命的放射性同位素(子体)能以比较长的实际有效半衰期(母体核素的半衰期)进行运输、贮存，并可多次从该装置中得到医学上很有价值的短半衰期子体放射性核素。

现在，临床上对于体内肿瘤等疾病的放射性显影法诊断，主要采用短半衰期同位素，这不仅是因为接受这种检查的病人所受到的辐射剂量小^[1]和在较短时间内可做重复检查，而且还因为在每次检查中可投入较多量的放射性，从而有可能提高诊断结果的可靠性。

有一些短寿命放射性同位素，可用反应堆、加速器生产，以及由放射性同位素发生器得到。由于它们的半衰期短，所以，用前两种方法生产时只适于在产地附近地区使用，这是一个很大的缺点。放射性同位素发生器（尤其那些母体核素的半衰期较长者），则可以弥补这一不足。

放射性同位素发生器的主要优点

（1）为远离反应堆、加速器的地区使用某些短寿命的放射性同位素提供了方便条件。

（2）从发生器中可经常得到子体放射性核素，因此使用方便、价格便宜。

（3）使用放射性同位素发生器，可以减少医务人员受到的辐射剂量；而且，放射性废水处理问题比较简单。

（4）从发生器获得的子体核素均为无载体，可以减少对人体可能有不良影响的化学杂质引入体内。

一个较满意的医用放射性同位素发生器主要应具备的几个条件

（1）子体核素具有良好的药物学性质，并适于生理功能研究。

（2）子体核素有适当长短的半衰期、辐射类型及辐射能量：

（a）半衰期 在临床检查过程中引入体内的放射性核素的半衰期一般不宜过长，以免在检查结束后，由于不能迅速从体内清除而增加对人体的辐照，从而使受检者受到较大的辐射剂量。过去，多采用半衰期在几小时至几十小时的短寿命核素，这样既便于探测又不致使受检者承受过大的辐射剂量；近年来，探测器（如 γ 照相机）的改进及操作自动化程度的提高，使一些半衰期为分、秒数量级的所谓超短寿命核素在临床中的应用成为可能，并已受到了足够的重视。

(b) 辐射类型 临床使用的扫描仪及 γ 照相机, 均可用来探测 γ 射线及湮灭辐射。因此, 所用的放射性核素应为纯 γ 放射体或以电子俘获方式衰变。其他类型的核辐射如 α 、 β 等, 只能被组织吸收使其受到很大的辐射剂量, 而对诊断却毫无帮助。

(c) 辐射能量 适于临床探测的辐射能量不宜过高或过低。有人曾指出, 适于探测的 γ 射线能量为 100—200keV^[2]。能量过低, 会因组织吸收过多故不易探测; 能量过高则不易防护, 准直也很困难, 所以, 对临床探测均不利。近年来, 由于正电子 γ 照相机的出现, 使正电子湮灭时放出的 511keV 湮灭辐射也成了有利探测的能量之列。

(3) 母体核素容易大量生产, 而且最好可在反应堆中生产, 这样可以降低成本。此外, 母体核素的半衰期应尽可能较长。

(4) 母-子体核素容易分离。放射性同位素发生器中的母子体核素, 一般是一对不同的化学元素。从母体中分离子体的放化分离方法, 必须简便、快速、易行和高产额; 同时, 在反复多次分离的情况下, 必须确保分离出来的子体核素产品具有较高的放射性核纯度、放射化学纯度、较稳定的化学组成以及较高的放射性浓度, 且子体的形式(价态、状态和介质)最好能符合直接应用(口服或注射)的要求。

1920年 Gioacchino Failla 首先提出了世界上第一个可供医用的天然放射性同位素发生器: ^{226}Ra (1620年) $\xrightarrow{\alpha} ^{222}\text{Rn}$ (3.8天) 发生器^[3]; 而第一个人工放射性同位素发生器: ^{132}Te (3.2天) $\xrightarrow{\beta^-, \gamma} ^{132}\text{I}$ (2.3小时), 则是布鲁克海文国家实验所(BNL)于1951年首次研制成功的^[4]。六十年代初、中期, 另外两个重要的医用放射性同位素发生器: ^{99}Mo — $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 和 ^{113}Sn — $^{113\text{m}}\text{In}$ 相继成功地用于临床之后^[5、6、7、8], 使核医学出现了蓬勃发展的新局面。

目前, 临床上应用最广泛的放射性同位素是 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 。 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的核特征(单一的 γ 射线, 不伴有 β 粒子, 半衰期为 6 小时,

142keV 的单色能量等)使它成为相当理想的体内显影用的同位素,很适用于扫描,尤其适用于 γ 照相。它的化合物及络合物几乎可以用于所有脏器及组织的显影(见表1)。在美国, ^{99m}Tc 每年的销售量约占放射性药品总销售量的三分之一以上,例如,在1967年的二千万美元的销售额中,仅 ^{99m}Tc 就占八百万美元以上;在日本,1963年 ^{99m}Tc 的用量约占体内诊断用的同位素的3%,1968年上升到23%,1972年为48%,而到1974年已达70%。

近年来,国外临床应用的放射性同位素在品种和数量上都发生了很大变化,核反应堆生产的长半衰期同位素明显减少,而医用加速器生产的以及从同位素发生器中获得的以 β^+ 、EC、IT等方式衰变的短半衰期同位素的比例大大增加。例如,1965年,日本临床上用得最多的 ^{131}I ,用量占全国体内诊断同位素用药总量的44%,而 ^{99m}Tc 只占10.2%;到1973年, ^{131}I 的用量下降到只占5.6%,而 ^{99m}Tc 的用量却增加到64.3%。

放射性同位素发生器产品制剂的“药箱化”也正在盛行起来。从 ^{99m}Tc 、 ^{113m}In 等发生器得到的同位素,多数是以标记物或其他化合物形式用于临床扫描的。近几年来,这些试剂成批以“药箱”形式供应,深受用户欢迎。这种做法的好处是不但使用方便、配药速度快,而且促进了同位素制剂检查方法的标准化。

“药箱”中的试剂均经过严格的灭菌处理及质量检定,因此可以保证产品质量的可靠性。

用 γ 照相法进行某些生理功能检查时,其影象质量及清晰度的好坏,直接与光子通量有关。为了达到在最小辐射剂量情况下获得最高光子输出的目的,国外正在积极开展超短寿命核素发生器的研制工作。对于许多器官功能的动态研究,特别是脑和心脏等血流的研究,半衰期等于或小于1分钟的同位素较适宜,这样可在数分钟内进行重复试验,而且显影清晰、统计结果较为准确。目前, ^{81m}Kr ($T_{\frac{1}{2}}=13$ 秒), ^{82}Rb ($T_{\frac{1}{2}}=1.3$ 分), ^{128}Cs ($T_{\frac{1}{2}}=3.8$ 分), ^{137m}Ba ($T_{\frac{1}{2}}=2.55$ 分)及 ^{191m}Ir ($T_{\frac{1}{2}}=4.9$ 秒)等发生器已在临床中试用。

发生器本身也在不断改进。近年来，在所谓“第一代发生器”基础上发展起来了“第二代发生器”，其特点是发生器的结构更加合理，不仅操作方便而且可在长时期内无菌操作。有的发生器性能也有很大改进，例如，一些国家用裂变产物⁹⁹Mo制成的^{99m}Tc发生器，代替⁹⁸Mo(n, γ)⁹⁹Mo制成的^{99m}Tc发生器，不仅大大提高了所得^{99m}Tc的放射性浓度，还明显地缩小了发生器的体积(表2)。

“牛奶”(发生器子体产物)供应方式也在改进。为了满足临床对^{99m}Tc的大量需要，有的国家在医院比较集中的大城市建立“牛奶”供应站，即把反应堆辐照过的 MoO₃ 装在某种特制的装置中，然后采用溶剂萃取法(溶剂萃取发生器)或升华法(升华发生器)将^{99m}Tc从母体⁹⁹Mo中分离出来，溶于生理盐水中后，即可直接供临床使用。利用“奶站”这种方法，每次可向用户提供上百居里的^{99m}Tc。近年来，有的国家用铀²³⁵裂变法生产的上百居里的无载体⁹⁹Mo，吸附在三氧化二铝色层柱上做成“大母牛”，然后，由厂家定期“挤奶”，提供用户使用。

随着^{99m}Tc用量的增加，“牛奶”供应站是一种很有前途的供应方式。它不仅可向用户定时供应大量的、立即可用的子体药物，而且还可以减少生产过程中的一些麻烦(例如分装数百条柱子及大量的包装等)。

表 1 部分^{99m}Tc化合物及络合物的用途

受检器官或组织	标记物的化学形式
甲状腺	^{99m} TcO ₄ ⁻
脑	^{99m} TcO ₄ ⁻ , ^{99m} Tc-HSA, ^{99m} Tc-Sn-DTPA, ^{99m} Tc-Sn-柠檬酸
脑池、脊管	^{99m} Tc-菊粉, ^{99m} Tc-HSA, ^{99m} Tc-Tc ₂ S ₇ 胶体
肝	^{99m} Tc ₂ S ₇ 胶体, ^{99m} Tc-植酸钠
阿米巴性肝脓肿	^{99m} Tc-1-羟乙基-2-甲基-5-硝基-咪唑, ^{99m} Tc-植酸盐
肺	^{99m} Tc-HSA微粒, ^{99m} Tc-Sn-MAA, ^{99m} Tc-氢氧化铁聚合物
肾	^{99m} Tc-DTPA, ^{99m} Tc-Sn-DTPA, ^{99m} TcO ₄ ⁻ , ^{99m} Tc-HSA, ^{99m} Tc-葡萄糖酸钙, ^{99m} Tc-青霉素, ^{99m} Tc-酪蛋白肽, ^{99m} Tc-Fe-抗坏血酸

续表

受检器官或组织	标记物的化学形式
脾	^{99m}Tc -R.B.C., ^{99m}Tc -甲二膦酸
心	^{99m}Tc -HSA
骨	^{99m}Tc -Sn-EHDP, ^{99m}Tc -焦磷酸盐, ^{99m}Tc -亚氨基二磷酸盐, ^{99m}Tc -聚磷酸盐
骨髓	$^{99m}\text{Tc}_2\text{S}_7$ 胶体
胆道	^{99m}Tc -青霉胺
胎盘	^{99m}Tc -HSA
淋巴结	^{99m}Tc -Sb-S胶体
涎腺	$^{99m}\text{TcO}_4^-$
胃肠道	$^{99m}\text{TcO}_4^-$
关节	$^{99m}\text{TcO}_4^-$
异位性胃粘膜	$^{99m}\text{TcO}_4^-$
深部静脉血栓	^{99m}Tc -链激酶
肿瘤	^{99m}Tc -博莱霉素, ^{99m}Tc -HSA, ^{99m}Tc -四环素, ^{99m}Tc -Sn-门冬酰胺酶

表 2 两种 ^{99m}Tc 发生器的比较

主要性能指标	(n, γ) ^{99m}Tc 发生器	裂变 ^{99m}Tc 发生器
^{99}Mo 装载量	<2居里	可>100居里
发生器尺寸	内径2厘米, 高4厘米	内径<0.3厘米, 高<1厘米
吸附及洗脱时间	>2小时	<5分钟
^{99m}Tc 淋洗效率	10毫升生理盐水中40-90%	10毫升盐水中>95%
^{99}Mo 漏穿量	约 $10^{-3}\%$	约 $10^{-4}\%$

从理论上讲, 衰变链中的一对母-子体核素均可构成一个发生器体系, Stang 指出大约有150对。Brucer⁽⁹⁾ 指出可能作为医用的约有118对。据已有资料报道⁽¹⁰⁾, 目前已在临床中应用 或正在研究之中的放射性同位素发生器有20余种, 列于表 3 中。表 4 是正在研制的超短寿命核素发生器。

表 3 临床中应用的或正在研制的放射性同位素发生器

衰 母体→子	变 体→衰变产物	链 体→衰变产物	子体主要辐 射的能量 (MeV)	可能用途
临床中已经使用的发生器				
$^{68}\text{Ge} \xrightarrow[275\text{天}]{\text{EC}}$	$^{68}\text{Ga} \xrightarrow[68\text{分钟}]{\beta^+, \text{EC}}$	^{68}Zn	0.511	正电子扫描剂, 骨研究
$^{81}\text{Rb} \xrightarrow[4.5\text{小时}]{\beta^+, \text{EC}}$	$^{81\text{m}}\text{Kr} \xrightarrow[13.5\text{秒}]{\text{IT}}$	^{81}Kr	0.1904	脏器显影, 功能检查和动态研究
$^{87}\text{Y} \xrightarrow[80\text{小时}]{\text{EC}, \gamma}$	$^{87\text{m}}\text{Sr} \xrightarrow[2.8\text{小时}]{\text{IT}}$	^{87}Sr	0.388	骨扫描
$^{90}\text{Sr} \xrightarrow[28\text{年}]{\beta^-}$	$^{90}\text{Y} \xrightarrow[64\text{小时}]{\beta^-}$	^{90}Zr	2.25	治疗
$^{99}\text{Mo} \xrightarrow[67\text{小时}]{\beta^-, \gamma}$	$^{99\text{m}}\text{Tc} \xrightarrow[6\text{小时}]{\text{IT}}$	^{99}Tc	0.142	脑, 甲状腺扫描
$^{113}\text{Sn} \xrightarrow[118\text{天}]{\text{EC}}$	$^{113\text{m}}\text{In} \xrightarrow[1.7\text{小时}]{\text{IT}}$	^{113}In	0.392	扫描剂
$^{132}\text{Te} \xrightarrow[3.2\text{天}]{\beta^-, \gamma}$	$^{132}\text{I} \xrightarrow[2.3\text{小时}]{\beta^-, \gamma}$	^{132}Xe	0.670	甲状腺检查
$^{137}\text{Cs} \xrightarrow[30\text{年}]{\beta^-, \gamma}$	$^{137\text{m}}\text{Ba} \xrightarrow[2.6\text{分}]{\text{IT}}$	^{137}Br	0.662	动态研究
正在研制的发生器				
$^{28}\text{Mg} \xrightarrow[21.3\text{小时}]{\beta^-, \gamma}$	$^{28}\text{Al} \xrightarrow[2.3\text{分}]{\beta^-, \gamma}$	^{28}Si	1.78	示踪研究
$^{38}\text{S} \xrightarrow[2.9\text{小时}]{\beta^-, \gamma}$	$^{38}\text{Cl} \xrightarrow[38\text{分}]{\beta^-, \gamma}$	^{38}Ar	2.15	示踪研究
$^{42}\text{Ar} \xrightarrow[3.5\text{年}]{\beta^-}$	$^{42}\text{K} \xrightarrow[12.4\text{小时}]{\beta^-, \gamma}$	^{42}Ca	1.53	示踪研究
$^{72}\text{Se} \xrightarrow[8.4\text{天}]{\text{EC}, \gamma}$	$^{72}\text{As} \xrightarrow[25\text{小时}]{\text{EC}, \beta^+}$	^{72}Ge	0.853	正电子扫描
$^{82}\text{Sr} \xrightarrow[26\text{天}]{\text{EC}}$	$^{82\text{m}}\text{Rb} \xrightarrow[6.3\text{小时}]{\text{EC}, \beta^+, \text{IT}}$	^{82}Kr		
$^{88}\text{Rb} \xrightarrow[83\text{天}]{\text{EC}, \gamma}$	$^{88\text{m}}\text{Kr} \xrightarrow[1.9\text{小时}]{\text{IT}}$	^{88}Kr	0.032	肾扫描, 血流测定
$^{111}\text{Ag} \xrightarrow[7.5\text{天}]{\beta^-, \gamma}$	$^{111\text{m}}\text{Cd} \xrightarrow[49\text{分}]{\text{IT}}$	^{111}Cd	0.15	扫描剂
$^{115}\text{Cd} \xrightarrow[2.2\text{天}]{\beta^-, \gamma}$	$^{115\text{m}}\text{In} \xrightarrow[4.5\text{小时}]{\text{IT}}$	^{115}In	0.335	扫描剂

续表

衰 母体→子	变 体→衰变产物	子体主要辐 射的能量 (MeV)	可能用途
$^{125}\text{Sb} \xrightarrow[2.7\text{年}]{\text{EC}, \gamma} ^{125\text{m}}\text{Te} \xrightarrow[58\text{天}]{\text{IT}} ^{125}\text{Te}$		0.110	扫描剂
$^{131}\text{Ba} \xrightarrow[11.6\text{天}]{\text{EC}, \gamma} ^{131}\text{Cs} \xrightarrow[9.7\text{天}]{\text{EC}} ^{131}\text{Xe}$		0.029	扫描剂
$^{189}\text{Ir} \xrightarrow[11\text{天}]{\text{EC}, \gamma} ^{189\text{m}}\text{Os} \xrightarrow[5.7\text{小时}]{\text{IT}} ^{189}\text{Os}$		0.030	扫描剂
$^{194}\text{Hg} \xrightarrow[1.3\text{年}]{\text{EC}} ^{194}\text{Au} \xrightarrow[1.7\text{天}]{\text{EC}, \beta^+} ^{194}\text{Pt}$		0.327	扫描剂

表 4 正在研制与临床试用的超短寿命放射性同位素发生器

母体	子体	衰变产物
$^{77}\text{Br} \xrightarrow[57\text{小时}]{\beta^-} ^{77\text{m}}\text{Se} \xrightarrow[17.5\text{秒}]{\text{IT}} ^{77}\text{Se}$		
$^{81}\text{Rb} \xrightarrow[4.7\text{小时}]{\beta^+, \text{EC}} ^{81\text{m}}\text{Kr} \xrightarrow[13\text{秒}]{\text{IT}} ^{81}\text{Kr}$		
$^{82}\text{Sr} \xrightarrow[25\text{天}]{\text{EC}} ^{82}\text{Rb} \xrightarrow[80\text{秒}]{\beta^+} ^{82}\text{Kr}$		
$^{109}\text{Cd} \xrightarrow[453\text{天}]{\beta^-} ^{109\text{m}}\text{Ag} \xrightarrow[39.2\text{秒}]{\text{IT}} ^{109}\text{Ag}$		
$^{137}\text{Cs} \xrightarrow[30\text{年}]{\beta^-} ^{137\text{m}}\text{Ba} \xrightarrow[2.6\text{分}]{\text{IT}} ^{137}\text{Ba}$		
$^{167}\text{Tm} \xrightarrow[9.6\text{天}]{\beta^-} ^{167\text{m}}\text{Er} \xrightarrow[25\text{秒}]{\text{IT}} ^{167}\text{Er}$		
$^{183}\text{Re} \xrightarrow[70\text{天}]{\beta^-} ^{183\text{m}}\text{W} \xrightarrow[5.3\text{秒}]{\text{IT}} ^{183}\text{W}$		
$^{191}\text{Os} \xrightarrow[16\text{天}]{\beta^-} ^{191\text{m}}\text{Ir} \xrightarrow[4.9\text{秒}]{\text{IT}} ^{191}\text{Ir}$		

二、放射性同位素发生器的基本原理

1. 放射性核素的增长和衰变规律

在放射性同位素发生器中，母体核素不断地衰变成子体核

素，母体核素的衰变速率可用下式表示：

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad (1)$$

式中 λ_1 为母体核素的衰变常数， N_1 为 t 时刻母体核素的原子数目。

积分式 (1) 后得到：

$$N_1 = N_1^0 e^{-\lambda_1 t} \quad (2)$$

式中 N_1^0 为时间 $t = 0$ 时母体核素的原子数目。在母-子体核素衰变链中，子体核素的生长速率与母体核素的衰变速率 $\lambda_1 N_1$ 是相同的，同时，子体核素又以 $\lambda_2 N_2$ 速率衰变，所以子体的增长速率为：

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (3)$$

式中下标1、2分别表示母、子体核素。解此式后得到：

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + N_2^0 e^{-\lambda_2 t} \quad (4)$$

N_2^0 是时间为零时子体核素的原子数目。假定 $t = 0$ 时 $N_2^0 = 0$ ，即在纯母体内或刚刚纯化过的母体内子体放射性核素的增长情况，式 (4) 可简化为：

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (5)$$

利用式 (5) 可以计算出经过时间 t 后，子体核素的原子数目 (N_2)。

如果采用放射性强度表示，可用下式计算：

$$A_2 = \lambda_2 N_2 \quad (6)$$

式中 A_2 为子体核素的放射性强度。

(1) 当发生器母-子体体系中，母体的半衰期大于子体的半衰期，亦即 $\lambda_2 > \lambda_1$ 时，经过足够长的时间后，母-子体核素之间就达到放射性平衡。此时式 (5) 中的 $e^{-\lambda_2 t}$ 与 $e^{-\lambda_1 t}$ 相比可忽略不计，则式 (5) 可写成：

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 e^{-\lambda_1 t} \quad (7)$$

由于 $N_1 = N_1^0 e^{-\lambda_1 t}$, 代入式 (7) 后得:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (8)$$

因为 $A_1 = \lambda_1 N_1$, $A_2 = \lambda_2 N_2$, 所以

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (9)$$

或

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \quad (10)$$

式中 T_1 、 T_2 分别为母、子体核素的半衰期。式 (10) 说明, 当 t 足够长, 母、子体核素处于暂时放射性平衡状态之后, 子体放射性及总放射性都以母体的半衰期进行衰减, 子体放射性强度高于母体放射性强度, 子、母体的放射性强度之比为一常数, 其值等于 $\lambda_2/(\lambda_2 - \lambda_1)$ 或 $T_1/(T_1 - T_2)$ 。也就是说, 子体核素的放射性强度为母体的 $\lambda_2/(\lambda_2 - \lambda_1)$ 倍或 $T_1/(T_1 - T_2)$ 倍。例如, 图 1 所表示的当母体核素的半衰期为 5 小时, 子体的半衰期为 0.5 小时, 即属此种情况。

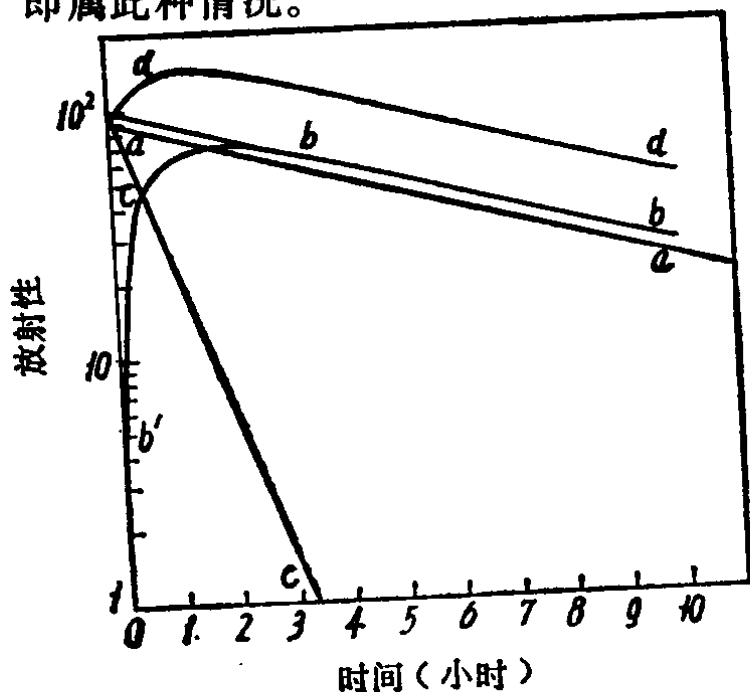


图 1 暂时平衡, 母体 ($T_1 = 5$ 小时) 和子体 ($T_2 = 0.5$ 小时) 的放射性随时间变化图
 曲线aa: 母体的放射性
 曲线bb: 母子体混合物中子体的放射性 (t 足够长后)
 曲线b'bb: 新纯化过的母体内子体放射性的生长
 曲线cc: 新分离出的子体的衰变
 曲线dd: 总放射性 (最初只有纯母体)

从图1可以看出, $\lambda_2 > \lambda_1$ 、 t 足够长, 母、子体之间达到暂时放射性平衡之后, 子体核素的放射性(A_2)大于母体核素的放射性(A_1)。例如 $^{99}\text{Mo}-^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器, 平衡后二者的放射性强度之比(假定 ^{99}Mo 100%蜕变到半衰期为6小时的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$)为:

$$\begin{aligned} \frac{A_{(^{99\text{m}}\text{Tc})}}{A_{(^{99}\text{Mo})}} &= \frac{\lambda_{(^{99\text{m}}\text{Tc})}}{\lambda_{(^{99\text{m}}\text{Tc})} - \lambda_{(^{99}\text{Mo})}} = T_{(^{99}\text{Mo})} \frac{T_{(^{99\text{m}}\text{Tc})}}{T_{(^{99}\text{Mo})} - T_{(^{99\text{m}}\text{Tc})}} \\ &= \frac{66.7}{66.7 - 6.0} \approx 110\%。 \end{aligned}$$

这说明 $^{99}\text{Mo}-^{99\text{m}}\text{Tc}$ 体系达到放射性平衡之后, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的放射性强度为 ^{99}Mo 的110%。但是实际上由于 ^{99}Mo 并不是100%的蜕变成 $^{99\text{m}}\text{Tc}$, 从衰变纲图(参见本书457页)可以看到 ^{99}Mo 仅以80.5%的 β^- 衰变产生 $^{99\text{m}}\text{Tc}$, 所以平衡后 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的放射性应为 ^{99}Mo 的 $110\% \times 80.5\% = 88.6\%$ 。而从发生器中实际得到的放射性强度还应乘以发生器的效率(即 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的收率 $\eta\%$), 即 $88.6\% \times \eta\%$ 。图2是 $^{99}\text{Mo}-^{99\text{m}}\text{Tc}$ 体系达到放射性平衡后, 二者的放射性强度随时间的变化情况。

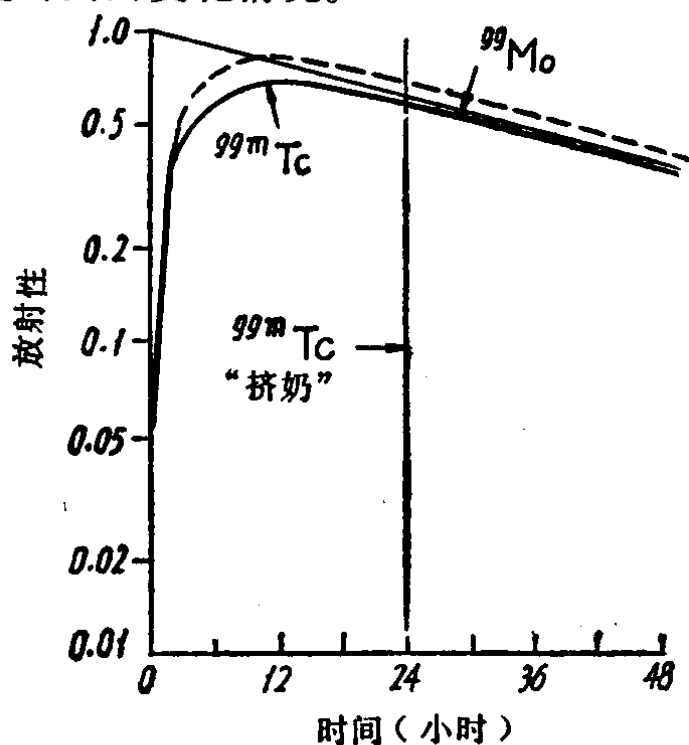


图2 $^{99}\text{Mo}-^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器体系达到放射性平衡后 ^{99}Mo , $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 放射性强度随时间的变化

(2) 当 $\lambda_2 \gg \lambda_1$ 或 $T_1 \gg T_2$ 且 $T_1 \rightarrow \infty$ 时, 母-子体系处于永久平衡状态(图3)。 t 足够大后, 母、子体核素的放射性强