

医用放射性同位素的生产和应用

庄友祥 蔡敦九 赵志祥

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘 要 叙述了医用放射性同位素的选择标准和类型, 编纂了 30MeV 以下质子强流加速器上可生产的医用放射性同位素和所需的核数据, 并同已生产的堆照医用放射性同位素进行了比较.

关键词 加速器 反应堆 医用放射性同位素 核数据

1 引 言

放射性同位素在医学上主要用于诊断研究和治疗两个方面, 这正是现代医学应用的主要领域. 原子核反应堆和粒子加速器都可以用来生产放射性同位素, 前者是利用中子核反应(主要生产丰中子同位素), 后者是利用带电粒子核反应(主要生产缺中子同位素), 它们相互配合和补充.

在核反应堆中, 放射性同位素的产生一般包括一个或几个下述过程: (n, γ) 、 (n, p) 、 (n, α) 和 (n, F) 等. 从加速器射出的带电粒子束的应用, 在另一方面提供了生产缺中子放射性同位素的良好条件, 而其中正电子(β^+)发射的同位素在生物医学诊断和治疗上大有作为, 特别对癌变等局域“病灶”的诊断和治疗效果更佳.

一种放射性同位素能否被应用于核医学, 其核心取决于它是否满足一定的标准要求. 这些标准与该放射性同位素(尤其是用它标记的生物分子化合物)的物理、化学和生物化学性质有关. 现在放射性同位素药物的选择和应用中遵循着五项指导原则: (1)最小的辐射剂量, (2)合适的射线和高分辨的显示, (3)高放射性比度, (4)对器官的专一性, (5)可获得性.

前两个考虑涉及放射性同位素的物理性质和所用辐射探测系统的特性. 辐射 γ 射线能量为 60~300keV 的短寿命同位素是倍受

青睐的. 如果一种同位素发射一种占优势的或单一能量的 γ 射线, 它就有很大的优点, 因为利用它可实现单能光子辐射计算机层析成像 (Single Photon Emission Computed Tomography, 简称 SPECT). 同样, 短半衰期的 β^+ 辐射体也有重要意义, 因为三维高分辨扫描可通过正电子辐射层析成像 (Positron Emission Tomography, 简称 PET) 得到. 如果某些放射性同位素发射 α 粒子、或高能 β^- 粒子、或欧歇电子, 那么它们就具有治疗作用.

放射性比度和器官专一性是选作代谢研究的放射性药物的主要标准. 关于放射性同位素的功能, 简单地说, 就是允许药物体外探测. 由于现代诊断核医学的最大部分涉及代谢研究而不是单纯的成像, 所以主要选择那些能与生物分子生成良好共价键的放射性同位素.

一种放射性同位素能否被推广使用, 其可用性是一个重要的因素. 许多短寿命放射性同位素只在邻近生产地点(反应堆或加速器)才是可利用的. 一种短寿命的子核可周期性地从一种长寿命的母核像从母牛挤出奶那样提取出来, 这种设备称为发生器系统. 各种不同用途的发生器业已成功地被制作并应用. 反应堆和加速器均可生产在这种系统中所使用的母核放射性.

新的 Cyclon-30 回旋加速器将在国内一些单位建成并投入运行, 主要设计指标: 质子

能量15~30MeV,束流强度350~500 μ A,能散度(1~2)%.它将在放射性同位素、中子源和活化分析等方面的研究、生产及高科技开发,以及有关单位增产创收中发挥巨大的作用.因此,中国核数据中心编纂了能量30MeV以下质子强流加速器可生产的医用放射性同位素和所需要的核数据,供有关单位使用,把核数据服务从核工程和科研等方面进一步扩展到民品生产领域.

2 医用放射性同位素

基于上述各种考虑,已经发现的加速器可生产的医用放射性同位素总数约50种.它们主要应用在:(1)官能断层显像(PET: ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{18}F 、 ^{30}P 、 ^{75}Br ,SPECT: $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{123}I);(2)心肌灌注断层成像(PET: ^{38}K 、 ^{43}K 、 ^{82}Rb 、 ^{201}Tl);(3)红血球细胞存活率,血值检查(^{51}Cr);(4)血液研究(^{52}Fe);肿瘤定位(^{67}Ga 、 ^{111}In);(5)脑栓塞断层显像(^{68}Ga);(6)各种放射性药物治疗(^{77}Kr 、 ^{125}I 、 ^{131}I 、 ^{211}At 等);(7)大脑皮层血液流动断层显像(PET: ^{77}Kr 、 ^{133}Xe);(8)肺部灌注换气检查($^{81\text{m}}\text{Kr}$ 、 ^{133}Xe);(9)肾功能检查(^{97}Ru);(10)放射免疫分析(^{125}I);(11)甲状腺功能诊断(^{131}I);(12)血管淋巴管显像($^{195\text{m}}\text{Au}$).

通常,可把这些放射性同位素试验性地分成7类:(1)“有机的”短寿命 β^+ 辐射体(^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{18}F 等);(2)卤素(^{18}F 、 75 、 ^{77}Br 、 ^{123}I 等);(3)稀有气体(^{77}Kr 、 ^{133}Xe 等);(4)发生器系统(^{68}Ge - ^{68}Ga 、 ^{82}Sr - ^{82}Rb 、 ^{90}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 等);(5)碱和碱类金属(^{38}K 、 ^{82}Rb 、 ^{201}Tl 等);(6)“无机的”放射性核(^{52}Fe 、 ^{67}Ga 等);(7)治疗的放射性核(^{77}Br 、 ^{125}I 、 ^{211}At 等).

从核物理方面看,在Cyclon-30质子回旋加速器上可生产的通常使用的医用放射性同位素共48种: ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{18}F 、 ^{28}Mg 、 ^{30}P 、 ^{38}S 、 $^{34\text{m}}\text{Cl}$ 、 ^{47}Ca 、 ^{44}Sc 、 ^{45}Ti 、 ^{51}Cr 、 ^{51}Mn 、 $^{52\text{m}}\text{Mn}$ 、 ^{55}Co 、 ^{57}Co 、 ^{57}Ni 、 ^{62}Cu 、 ^{67}Cu 、 ^{66}Ga 、 ^{67}Ga 、 ^{68}Ga 、 ^{73}Se 、 ^{75}Se 、 ^{75}Br 、 ^{77}Br 、 ^{77}Kr 、 ^{79}Kr 、 $^{87\text{m}}\text{Sr}$ 、 $^{89\text{g,m}}\text{Zr}$ 、

$^{95\text{g,m}}\text{Tc}$ 、 $^{96\text{g,m}}\text{Tc}$ 、 $^{101\text{m}}\text{Rh}$ 、 $^{107\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{111}In 、 $^{113\text{m}}\text{In}$ 、 ^{118}Sb 、 ^{123}I 、 ^{124}I 、 ^{125}Xe 、 $^{127\text{g,m}}\text{Xe}$ 、 $^{169\text{g,m}}\text{Yb}$ 、 ^{178}Ta 、 ^{186}Re 、 ^{201}Tl 、 ^{203}Pb 、 ^{205}Bi 和 ^{206}Bi .

现在,全世界约50%的加速器用于医学诊断和治疗,所生产的放射性同位素80%以上用于医学.1975年以后,国际医学界已经普遍使用带电脑 γ 射线照相机,正电子照相机也用于医学研究.因此,短寿命正电子或单能光子发射体(缺中子放射性同位素)的生产就成了临床诊断和治疗的迫切需要,例如, ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 和 ^{18}F ,而反应堆已不能胜任这项工作.还有许多有重大医用价值的核素只能用加速器生产,如 ^{52}Fe 、 ^{57}Co 、 67 、 ^{68}Ga 、 ^{81}Kr 、 ^{81}Rb 、 ^{111}In 、 ^{123}I 、 ^{123}Xe 、 ^{201}Tl 和 ^{204}Bi 等.

目前,中国原子能科学研究院利用核反应堆辐照已生产57种医用放射性同位素,它们是: ^{24}Na 、 ^{32}P 、 ^{35}S 、 ^{42}K 、 ^{45}Ca 、 ^{46}Sc 、 ^{51}Cr 、 ^{59}Fe 、 ^{60}Co 、 ^{64}Cu 、 ^{65}Zn 、 ^{71}Ge 、 ^{72}Ga 、 ^{75}Se 、 ^{76}As 、 ^{82}Br 、 ^{86}Rb 、 ^{85}Sr 、 ^{89}Sr 、 ^{90}Y 、 ^{95}Zr 、 ^{99}Mo 、 ^{103}Pd 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{113}Sn 、 ^{114}In 、 ^{115}Cd 、 ^{112}Sb 、 ^{124}Sb 、 ^{131}Ba 、 ^{133}Ba 、 ^{134}Cs 、 ^{140}La 、 ^{141}Ce 、 ^{142}Pr 、 ^{147}Nd 、 ^{154}Eu 、 ^{153}Gd 、 ^{159}Gd 、 ^{154}Dy 、 ^{153}Sm 、 ^{168}Tb 、 ^{169}Er 、 ^{169}Yb 、 ^{175}Yb 、 ^{170}Tm 、 ^{175}Hf 、 ^{181}Hf 、 ^{177}Lu 、 ^{182}Ta 、 ^{186}Re 、 ^{185}W 、 ^{187}W 、 ^{192}Ir 、 ^{197}Pt 、 ^{198}Au 及 ^{204}Tl .

比较一下可以看出,在加速器辐照生产的48种和反应堆辐照生产的57种医用放射性同位素中,除了 ^{51}Cr 和 ^{186}Re 两种放射性同位素都能用加速器和反应堆生产之外,其它的都只能或者用加速器或者用反应堆辐照产生.所以说,加速器和反应堆所生产的同位素是互相补充和配合的,谁也代替不了对方.如果Cyclon-30回旋加速器辐照放射性同位素的生产搞上去了,那么其应用价值、效能和效益等也将明显增加.因为该加速器属于节能型的,用电成本相对较低;且流强大,很适合于辐照生产.如果在Cyclon-30附近增设计算机断层扫描(CT)诊断中心等,则可充分发挥其生产的短寿命医用放射性同位素的作用,将为医学临床诊断和治疗作出更大的贡献,从而收到良好的社会效益和经济效益.

3 所需核数据的编纂

利用 Cyclon-30 回旋加速器生产医学上重要的放射性同位素, 所需要的核数据可分成两类: 衰变数据(半衰期和各类衰变型式及分支比)和带电粒子核反应截面数据(包括厚靶产额). 衰变数据在决定一种放射性同位素是否适合于医学应用中起首要作用, 核反应截面数据则在有关所期望的放射性同位素的生产及其数量的控制等方面具有重要意义.

3.1 核反应激发函数和厚靶产额

核反应截面随入射粒子能量的变化关系称为激发函数. 利用它可以估算所要产生的放射性同位素的厚靶产额, 确定辐照生产的最佳入射能区(例如, 产额最大, 放射性杂质干扰最小).

然而, 计算的同位素产额只是通过一给定的核反应过程所能预期的极大产额, 实际的产额总是低于理论值, 这一差别随着积分束流和靶厚的增大而增大. 究其原因大概是入射束流的非均匀性、辐射损伤效应和靶中有效的高功率密度引起的产物泄漏等; 如果使用液体或气体靶, 产物泄漏会愈加厉害. 因此必须强调, 由激发函数计算的同位素产额决不能外推到高束流的生产条件.

3.2 最佳辐照能区和最佳产额靶系统

要想使所期望的产物达到极大值并使放射性杂质趋于极小值, 辐照能区的精心选择在优化生产方法中至关重要. 鉴于产生的非同位素杂质可用化学分离除去, 而同位素杂质却是难于控制的. 这样的放射性杂质具有双重的影响: 第一, 它们造成闪烁扫描图像差的分辨率, 有碍于诊断; 第二, 给病人增加不必要的辐射剂量. 如果长寿命杂质的量太高, 就可能危及所使用的短寿命放射性同位素的全部优点. 降低杂质的水平可用浓缩的同位素做靶材料, 更重要地, 应精心选好入射粒子在靶中有效的能量范围来加以抑制. 后者需要各种竞争反应的激发函数的准确知识.

利用浓缩到 96.5% 的 ^{76}Se 的 $(p, 2n)$ 反应

产生 ^{75}Br ($T_{1/2} = 1.61\text{h}$) 为核数据重要性提供一个典型的例子. $^{76}\text{Se}(p, xn)$ 反应的激发函数如图 1 所示. 从图可看出, 由于 $^{76}\text{Se}(p, n)^{76}\text{Br}$ 和 $^{76}\text{Se}(p, 2n)^{75}\text{Br}$ 反应之间的竞争, 从 ^{75}Br 中完全清除 ^{76}Br 是不可能的, 即使 ^{76}Se 浓缩到 100%. 但通过精心的考虑, 在回旋加速器上对 ^{75}Br 产物的最佳能区是 $E_p = 24 \sim 21.5\text{MeV}$, 即入射质子能量应选择为 24MeV , 并且 Se 靶的厚度应当使其能量降低到仅为 21.5MeV . 这样, ^{76}Br 杂质的水平在这一能区可望降低到约占 2%.

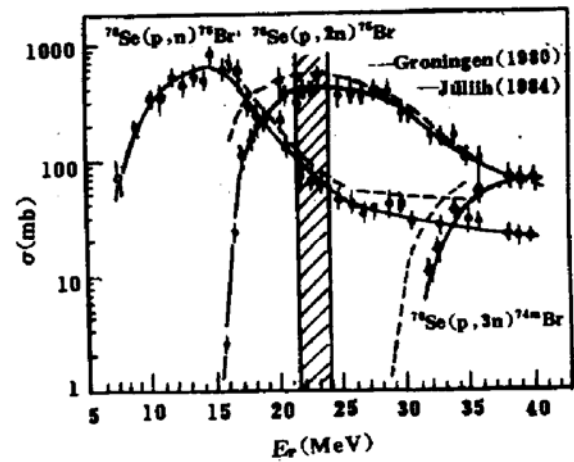


图 1 $^{76}\text{Se}(p, xn)$ 反应的激发函数

应当指出, 在低的入射能区, 打开的反应道数目一般很少; 但随着入射能量的增加, 一些竞争反应便出现了. 如果高能核反应被用于生产的话, 杂质问题就变得严重了.

3.3 生产过程

一种放射性同位素可以通过几个或更多核反应过程形成, 因此所有反应的截面数据都是需要的. 然而, 对于大规模生产来说, 并不是每一个核反应都是合适的. 在生产过程中, 除了截面数据外, 诸如可利用的入射能量, 制靶的难易, 耐受高束流量的能力以及随后的化学过程处理等条件都应考虑.

这里有一个代表性的事例是关于较广泛应用的 ^{123}I 的生产. 它虽然可由约 25 个核反应过程产生, 但研究表明, 获得主要应用的是三种反应, 即 (1) $^{124}\text{Te}(p, 2n)^{123}\text{I}$, (2) $^{127}\text{I}(p, 5n)$

$^{123}\text{Xe}-^{123}\text{I}$ 和 (3) $^{124}\text{Xe}(p, x)^{123}\text{Xe}-^{123}\text{I}$. 对于 (1), $E_p = 23 \sim 25\text{MeV}$, $\sigma = 1000 \sim 1300\text{mb}$; 对于 (2), $E_p = 54 \sim 57\text{MeV}$, $\sigma = 500 \sim 400\text{mb}$; 对于 (3), $E_p = 23 \sim 30\text{MeV}$, $\sigma = 210 \sim 200\text{mb}$. 因为 Cyclon-30 最高质子能量为 30MeV , 所以过程 (1) 和 (3) 才是它可利用的核反应.

能量 30MeV 以下质子加速器上可生产的放射性同位素和核反应选自 INDC(NDS)-209/GZ(1988) 和有关的报告.

半衰期和衰变型式及分支比数据取于放射性同位素表 (1986) 和核衰变数据手册

(1990). Q 值来自期刊“核数据表”(Nuclear Data Tables). 极大截面值 (σ_{\max}) 和相应的入射质子能量 ($E\sigma_{\max}$) 和实验测量的能量范围以及厚靶产额等来源于 EXFOR 实验数据库. 由于篇幅有限, 这些数据连同参考文献不可能逐一列出, 有兴趣者可来函索取.

应当指出的是, 在同位素生产过程中核数据的作用是重要的, 但不应过分地强调, 靶的问题、在辐照期间形成的核素的化学特性及产物的放射性比度等项工作的恰当处置往往需要付出更大的努力.

Production and Application of Medical Radioisotopes

Zhuang Youxiang Cai Dunjiu Zhao Zhixiang

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Abstract The choice criteria and categories for medical radioisotopes are described. The medical radioisotopes produced at intense proton accelerator with the energy below 30MeV and the related nuclear data are compiled, and a comparison with the reactor irradiated medical radioisotopes is given.

Key Words accelerator reactor medical radioisotopes nuclear data

(上接第49页)

本产品应用于酒泉钢铁公司烧结厂精矿车间, 自1984年12月以来运行良好, 性能稳定, 采用静态标定方法, 精度1.0%.

核子皮带秤具有性能稳定、精度高、维护

量小、安装简便、适应恶劣环境等许多优点, 可广泛应用于很多行业进行自动计量和控制, 优化管理, 节约能源, 提高产品质量和劳动生产率, 具有综合的社会效益.

LY-1 Nucleon Belt Gauge

Ye Kejiang Lei Chundi Li Xinshi Liu Zhaoyan

(Modern Physics Department of Lanzhou University, Lanzhou 730000)

Abstract The recent technical situations of nucleon belt gauge at home and abroad are contrasted completely in this paper, and the characteristics and technical level of a new nucleon belt gauge are given. A better method of data calculations is proposed.

Key Words nucleon belt gauge whole thermostat array G-M tube detector nonlinear external abruption