

文章编号: 1007-4627(2006)01-0078-06

产生医用放射性核素核数据的测量、理论计算与评价

王书暖, 李春晟

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 简要介绍已广泛用于临床的³²P, ⁸⁹Sr, ⁹⁰Y, ¹⁰³Pd, ¹²⁵I, ¹³¹I, ¹³⁷Cs, ¹⁵³Sm, ¹⁸⁶Re, ¹⁸⁸Re, ¹⁹²Ir 和具有很大潜在使用可能性的⁶⁴Cu, ⁶⁷Cu, ⁶⁷Ga, ⁸⁶Y, ¹⁰⁵Rh, ¹¹¹In, ^{114m}In, ¹²⁴I, ¹⁴⁹Pm, ¹⁶⁶Ho, ¹⁶⁹Yb, ¹⁷⁷Lu, ²¹¹At, ²¹³Bi, ²²⁵Ac 26 个放射性核素利用反应堆或加速器或衰变的 55 种不同途径产生的核数据的测量、理论计算及数据可靠性的初步评价, 以改善其在诊断和治疗医用中的安全性、有效性和科学性。

关键词: 医用同位素; 核数据; 测量; 评价

中图分类号: O571 **文献标识码:** A

随着科学和技术的进步、经济的发展, 微观核数据的需求领域、能区范围在不断扩大, 精度要求也在不断提高。除了现代核装置和核电方面裂变反应堆技术以外的许多其它核应用领域也有着日益增长的经济意义的复杂核数据需求。这里介绍在产生核医学诊治方面放射性核素核数据的需求、相关核数据测量、评价、计算等方面的情况。其中包括已广泛用于临床的³²P, ⁸⁹Sr, ⁹⁰Y, ¹⁰³Pd, ¹²⁵I, ¹³¹I, ¹³⁷Cs, ¹⁵³Sm, ¹⁸⁶Re, ¹⁸⁸Re, ¹⁹²Ir(除了¹³⁷Cs 和¹⁸⁸Re 以外, 中国原子能科学研究院均有产品)和很少常规使用、但却具有很大潜在使用价值和可能性的⁶⁴Cu, ⁶⁷Cu, ⁶⁷Ga, ⁸⁶Y, ¹⁰⁵Rh, ¹¹¹In, ^{114m}In, ¹²⁴I, ¹⁴⁹Pm, ¹⁶⁶Ho, ¹⁶⁹Yb, ¹⁷⁷Lu, ²¹¹At, ²¹³Bi, ²²⁵Ac(中国原子能科学研究院已有⁶⁴Cu, ⁶⁷Ga, ¹¹¹In, ^{114m}In, ¹⁶⁹Yb, ¹⁷⁷Lu 产品)26 个放射性核素利用反应堆或加速器或衰变的 55 种不同途径产生的核数据的测量、评价和理论计算的基本情况。国际原子能机构(IAEA)已组织这方面的国际合作研究项目并仍在继续, 并强调了产生这些核素的核数据和这些核素衰变数据质量的提高将会大大改善诊治医用放射性核素应用的安全性、有效性和科学性。这里介绍这方面国际合作研究项目的近期进展^[1]。我们国内也应开展这方面相关核数据的实验测量、理论计算及评价和建库的系统工作, 以满足产生诊断和治疗医

用放射性核素核数据和这些核素衰变数据的需求。

(一)已广泛用于临床的 11 个核素 24 种产生途径的核数据的测量、理论计算及数据可靠性的初步评价情况简介:

(1) ³²P: 用反应堆、以³¹P(n, γ)反应途径产生。

³²P 的 $T_{1/2}$ 为 14.3 d, 发射 β^- 的最大能量为 1.7 MeV。热能区各数据库数据较一致, 低能区和中能区 JENDL-3.3 数据为好, 但在高能区 JENDL-3.3 无论在符合 14 MeV 实验数据上还是在系统性趋势上(0.433 mb)均不如 ENDF/B-VI。因此, 1 MeV 以下推荐使用 JENDL-3.3 评价数据, 高于 1 MeV 推荐使用 ENDF/B-VI 评价数据。

(2) ³²P: 用反应堆或加速器、以³²S(n, p)反应途径产生。

尽管³²S(n, p)反应数据在 IRDF-90(International Reactor Dosimetry File)中存在, 但仍需对其有矛盾的数据进行研究。JENDL 剂量文档看似好的, 并且是较新的评价, 但 BME-NTI-251/2001 指出文档 3 和文档 33 在低能极限的数据一致性上有问题(一个是 0.92 MeV, 另一个是 1.5 MeV), 并且文档 33 是取自早已过时的 IRDF-85 剂量文档。使用 ENDF/B-VI 或 JENDL/D-99 可能是一种选择。

收稿日期: 2005-09-05; 修改日期: 2005-12-22

作者简介: 王书暖(1942-), 女(汉族), 山东烟台人, 研究员, 从事核反应理论研究及核数据理论计算;

E-mail: wsn@iris.ciae.ac.cn

(3) ^{89}Sr : 用反应堆或加速器、以 $^{89}\text{Y}(n, p)$ 反应途径产生。

^{89}Sr 的 $T_{1/2}$ 为 50.5 d, 发射 β^- 的最大能量为 1.5 MeV, 是一个纯的 β 放射体, 有着大量的医学应用。Dmitrovgrad(俄罗斯)的高通量反应堆利用 $^{89}\text{Y}(n, p)$ 反应途径产生 ^{89}Sr 非常成功。已有新的 6—12 MeV $^{89}\text{Y}(n, p)$ 反应实验数据(Julich), 但还没有被收集到 EXFOR。

(4) ^{89}Sr : 用反应堆、以 $^{88}\text{Sr}(n, \gamma)$ 反应途径产生。

JENDL-3.3 评价数据与实验测量数据符合最好, 并且高能段 JENDL-3.3 结果也是可以接受的。但高能段直接、半直接辐射俘获效应应加以考虑。

(5) ^{90}Y : 用反应堆、以 $^{90}\text{Zr}(n, p)$ 反应途径产生。

^{90}Y 的 $T_{1/2}$ 为 2.7 d, 发射 β^- 的最大能量为 2.3 MeV。Geel 实验室有新的亚稳态的实验数据。能量高于 10 MeV 时 $n, np+pn+d$ 反应道应该考虑。

(6) ^{90}Y : 用反应堆、以 $^{89}\text{Y}(n, \gamma)$ 反应途径产生。

有直接辐射俘获效应的测量数据, JEFF-3.0/A 评价和 TNG 理论计算程序(后面将简要介绍)计算为好。

(7) ^{90}Y : 用反应堆、以 $^{235}\text{U}(n, f)^{90}\text{Sr} \rightarrow ^{90}\text{Y}$ 反应途径产生。

这是一个通用的实际产生 ^{90}Y 同位素途径。已完成累计和独立产额的分析。 ^{89}Sr 产额数据也同样需要, 因为其具有 50 d 的半寿命, 并且总是以杂质存在于原料之中。

(8) ^{103}Pd : 用反应堆、以 $^{102}\text{Pd}(n, \gamma)$ 反应途径产生。

^{103}Pd 的 $T_{1/2}$ 为 17.0 d, 发射俄歇电子和 X 射线。这一反应是重要的高浓缩靶材料常用的生产医用放射性核素的反应途径。评价数据主要依据理论模型的计算给出。JEFF-3.0/A 使用的是单能级共振公式, 与较好的 ENDF/B-VI 热截面很好一致。JEFF-3.0/A SRA 以实验共振积分测量值 10.0 ± 2.0 b 重新调整了数据。

(9) ^{103}Pd : 用加速器、以 $^{103}\text{Rh}(p, n)$ 反应途径产生。

EXFOR 数据较多, STAPRE 理论模型程序(后面将简要介绍)用于评价计算。(p, pn)反应道

导致杂质 ^{102}Rh 半寿命分别为 2.9 a 和 207 d 的同质异能态的存在, 已有测量数据, 也应给出评价。近年来美国至少已建 20 台回旋加速器用这一反应途径生产医用 ^{103}Pd 同位素。

(10) ^{103}Pd : 用加速器、以 $^{103}\text{Rh}(d, 2n)$ 反应途径产生。

仅有一组实验数据, 但 X 射线数据很好, 并且可以拟合。有厚靶产额数据。d 核入射引起反应的产额是质子入射引起反应产额的两倍, 因此用这一反应途径产生 ^{103}Pd 更为有效, 但必须同时考虑导致产生两个同质异能态出现的(d, p2n)杂质反应。

(11) ^{103}Pd : 可用 $^{104}\text{Pd}(\gamma, n)$ 反应途径产生。这是 KAERI 的评价结果, 可考虑选用^[2]。

(12) ^{125}I : 用反应堆、以 $^{124}\text{Xe}(n, \gamma)^{125}\text{Xe} \rightarrow ^{125}\text{I}$ 反应途径产生。

^{125}I 的 $T_{1/2}$ 为 60.0 d, 发射俄歇电子。 ^{125}I 和 ^{131}I 是用反应堆产生 I 的两个最为重要的同位素。只有 JEFF-3.0/A 包括了直接 γ 贡献。有一个共振积分测量值为 $(3\ 600.0 \pm 700)$ b。 ^{125}I 的辐射俘获截面需要进一步研究, 且高能端需要模型的理论计算。

(13) ^{131}I : 用反应堆、以 $^{130}\text{Te}(n, \gamma)^{131}\text{Te} \rightarrow ^{131}\text{I}$ 反应途径产生。

^{131}I 的 $T_{1/2}$ 为 8.0 d, 发射 β^- 的最大能量为 0.6 MeV。存在两个反应道, 应考虑亚稳态的存在。共振区的拟合较为困难。EXFOR-obninsk 1968 Dovbenko 40006003 给出的数据单位应为 mb, 而非 b。正在进行相应的数据评价工作。

(14) ^{131}I : 用反应堆、以 $^{235}\text{U}(n, f)$ 反应途径产生。

这是世界范围广泛使用的、最为重要的治疗用放射性核素之一。应开展其数据的测量工作, 近期将会有新的结果。

(15) ^{137}Cs : 用反应堆、以 $^{235}\text{U}(n, f)$ 反应途径产生。

^{137}Cs 的 $T_{1/2}$ 为 30.97 a, 发射 β^- 的最大能量为 0.5 MeV。 ^{137}Cs 为 γ 和 β 放射体。用于短距离放射性治疗。应该测量浅部治疗用的产额数据, 近期将会有结果。

(16) ^{153}Sm : 用反应堆、以 $^{152}\text{Sm}(n, \gamma)$ 反应途径产生。

^{153}Sm 的 $T_{1/2}$ 为 1.9 d, 发射 β^- 的最大能量为 0.8 MeV, 是一个应该被显著强调其医学应用的核

素。EXFOR 22612005 和 68005005 数据单位应是 mb, 而非 b。利用 EMPIRE 程序(后面将简要介绍)进行理论计算。可采用 ENDF/B-VI 或 JENDL-3.3 不可分辨共振区以内的数据。

(17) ^{186}Re : 用反应堆、以 $^{185}\text{Re}(n, \gamma)$ 反应途径产生。

^{186}Re 的 $T_{1/2}$ 为 3.7 d, 发射 β^- 的最大能量为 1.1 MeV。近期将会有新的评价数据。

(18) ^{186}Re : 用加速器、以 $^{186}\text{W}(p, n)$ 反应途径产生。

^{186}Re 是一个应该被显著强调其各种医学应用的核素。已有 3 组较老的实验数据, 其中一组数据需要修正。需要包括同质异能态的理论计算及数据评价, 近期将会有新的数据评价工作完成。

(19) ^{186}Re : 用加速器、以 $^{186}\text{W}(d, 2n)$ 反应途径产生。

共有 5 组实验数据, 需要包括同质异能态的理论计算及数据评价, 近期将会有新的数据评价工作完成。

(20) ^{188}Re : 用反应堆、以 $^{186}\text{W}(n, \gamma) \rightarrow ^{187}\text{W}(n, \gamma) \rightarrow ^{188}\text{Re}$ 反应途径产生。

^{188}Re 的 $T_{1/2}$ 为 17.0 h, 发射 β^- 的最大能量为 2.0 MeV。有美国橡树岭国家实验室的 ^{187}W 的积分测量数据。 $^{186}\text{W}(n, \gamma)$ 数据的可靠性已用微分和积分测量测试过, $^{187}\text{W}(n, \gamma)$ 数据采用理论计算结果。

(21) ^{188}Re : 用反应堆、以 $^{187}\text{Re}(n, \gamma)$ 反应途径产生。

ENDF/B-VI 包括协方差数据, 不同的测量数据、热截面和共振积分均有较好的一致性, 其数据可被选用。

(22) ^{192}Ir : 用反应堆、以 $^{191}\text{Ir}(n, \gamma)$ 反应途径产生。

^{192}Ir 的 $T_{1/2}$ 为 73.8 d, 发射 β^- 的最大能量为 0.7 MeV。ENDF/B-VI 有评价数据, 有 3 个同质异能态, 需要进一步开展相应的工作。

(23) ^{192}Ir : 用加速器、以 $^{192}\text{Os}(p, n)^{192}\text{Ir}$ 反应途径产生。

Julich 测量了激发函数。EMPIRE 计算了全部同质异能态的贡献, 其结果与实验数据符合较好。数据评价工作即将完成。

(24) ^{192}Ir : 用加速器、以 $^{192}\text{Os}(d, 2n)^{192}\text{Ir}$ 反应

途径产生。

这是一种新的产生 ^{192}Ir 的反应途径。文献中没有任何数据存在。将开展新的实验测量、理论计算和评价工作。

(二) 很少常规使用、但却具有很大潜在使用价值的 15 个核素、31 种产生途径的核数据的测量、理论计算及数据可靠性的初步评价情况简介:

(1) ^{64}Cu : 用反应堆、以 $^{63}\text{Cu}(n, \gamma)$ 反应途径产生。

^{64}Cu 的 $T_{1/2}$ 为 12.7 h, 发射 β^- 的最大能量为 0.6 MeV, 发射 β^+ 的最大能量为 0.7 MeV, 是最为重要的治疗医用放射性核素之一。它集治疗和正电子发射的 X 射线断层摄影术于一体。衰变数据应修改为: 38% β^- , 17.4% β^+ , 44.6% 电子俘获。清除实际存在评价文档是必要的。衰变数据应重新评估, 尤其弱 1 346 keV γ 峰强度值应重新评估。

(2) ^{64}Cu : 用加速器、以 $^{64}\text{Ni}(p, n)$ 反应途径产生。

这一产生途径在美国国家健康研究所和其它单位已有广泛使用, 但在欧盟却仍处于计划阶段, 尽管这一产生途径首先是由 Julich 建议的。已有几组实验数据, 但有两组并没有被收集在 EXFOR 中。反应阈值应为 2.5 MeV。EXFOR-Nemashkalo 83-A0112 数据单位表示有误, μb 应改为 mb。核数据的评价工作正在进行, 采用 ALICE-IPPE 程序(后面将简要介绍)进行了理论计算。

(3) ^{64}Cu : 用加速器、以 $^{64}\text{Ni}(d, 2n)$ 反应途径产生。

有一组实验数据(Zweit et al, 1991)。为测试其截面的可靠性进行了厚靶产额计算。采用 ALICE 和 EMPIRE 理论计算, 对其结果应进行分析和对比。数据的评价工作正在进行。如能找到合适的靶样品, 将进行厚靶产额的实验测量(Julich)。

(4) ^{64}Cu : 用反应堆、以 $^{64}\text{Zn}(n, p)$ 反应途径产生。

有激发曲线实验数据, 已计算了平均谱值, 并与其积分实验数据进行了比较。

(5) ^{64}Cu : 用加速器、以 $\text{Zn}(d, x)$ 反应途径产生。

这是具有很大潜在使用价值和可能性的重要放射性核素之一。文献中有 $\text{Zn}(d, \alpha)^{64}\text{Cu}$ 的实验数据, 但很老(Williams, 1963)。Milan 和 Debrecen

有能区很宽的新实验数据, Julich 有直到 14 MeV, 天然 Zn 的新实验数据。数据需要进行筛选, 能量较高时(>25 MeV) ^{67}Cu 是可能产生的一种杂质。Julich 有高浓缩 $^{66}\text{Zn}(d, \alpha)$ 化学分离实验数据, 可以用来评价直到 14 MeV, 天然 Zn 的新实验数据。

(6) ^{67}Cu : 用反应堆、以 $^{67}\text{Zn}(n, p)$ 反应途径产生。

^{67}Cu 的 $T_{1/2}$ 为 2.6 d, 发射 β^- 的最大能量为 0.6 MeV。有激发曲线实验数据, 已计算了平均谱值, 并与其积分实验数据进行了比较。Julich 有实验数据, 但却没有被收集在 EXFOR 中。

(7) ^{67}Cu : 用加速器、以 $^{68}\text{Zn}(p, 2p)$ 反应途径产生。

有直到 200 MeV 的 6 组实验数据, 其中一组是天然 Zn 的实验数据。Levkovskii 的测量数据需下修 20%, McGee 实验数据已用 IAEA 监测数据修正。另有两组实验数据因误差大于 25% 而没有被使用。在以上工作基础上给出了实验数据的拟合。应该考虑以 $^{68}\text{Zn}(p, \alpha n)$ 和 $^{68}\text{Zn}(p, 2p3n)$ 反应途径产生杂质的影响。需要 EMPIRE 进行 (p, 2p) 的理论计算。

相关的理论计算结果表明: 对厚靶而言, 中子引起的 $^{68}\text{Zn}(n, d)^{67}\text{Cu}$ 和 $^{68}\text{Zn}(n, np)^{67}\text{Cu}$ 可能也会是产生 ^{67}Cu 的重要反应途径之一。

(8) ^{67}Cu : 用加速器、以 $^{70}\text{Zn}(p, \alpha)$ 反应途径产生。

直到 30 MeV 有 2 组实验数据, 一组是 Julich 的, 另一组是 Levkovskii $^{70}\text{Zn}(p, X)^{67}\text{Cu}$ 反应道的。ALICE-IPPE 用于理论计算并得到了较为满意的结果。

(9) ^{67}Ga : 用加速器、以 $^{68}\text{Zn}(p, 2n)$, $^{67}\text{Zn}(p, n)$ 反应途径产生。

^{67}Ga 的 $T_{1/2}$ 为 3.2 d, 是俄歇电子发射体。产生这一核素的反应途径用于诊断目的核数据的评价早已完成, ^{67}Ga 也已成功用于核成像技术 SPECT 中。作为几乎是纯的俄歇电子发射体, 且又具有 3.2 d 理想的半寿命, ^{67}Ga 也是一个非常有兴趣用于新陈代谢治疗方面的核素。

(10) ^{86}Y : 用加速器、以 $^{86}\text{Sr}(p, n)$ 反应途径产生。

^{86}Y 的 $T_{1/2}$ 为 14.74 h, 是 β^+ 发射体。这是一个新的产生正电子发射体 ^{86}Y 的重要反应途径, 将用

于剂量学的定量计算中。相关核数据的评价工作正在进行。

(11) ^{105}Rh : 用反应堆、以 $^{104}\text{Ru}(n, \gamma)^{105}\text{Ru} \rightarrow ^{105}\text{Rh}$ 反应途径产生。

^{105}Rh 的 $T_{1/2}$ 为 35.4 h; 是 β^- 发射体。这是一个产生 β^- 发射体 ^{105}Rh 新的重要反应途径, 极具兴趣并极具潜在使用价值。相关核数据的评价工作正在进行。

(12) ^{111}In : 用加速器、以 $^{111}\text{Cd}(p, n)$, $^{112}\text{Cd}(p, 2n)$ 反应途径产生。

^{111}In 的 $T_{1/2}$ 为 2.8 d, 是俄歇电子发射体。产生这一核素反应途径用于诊断目的核数据的评价早已完成, 也已成功用于核成像技术 SPECT 中。作为几乎是纯的俄歇电子发射体且又具有 2.8 d 理想的半寿命, 也是一个非常有兴趣用于新陈代谢治疗方面的核素。

(13) ^{114m}In : 用加速器、以 $^{114}\text{Cd}(p, n)$ 反应途径产生。

^{114m}In 的 $T_{1/2}$ 为 2.8 d, 是俄歇电子发射体。已完成浓缩金属靶激发函数和天然靶相关核数据的测量, 拟合和评价工作正在进行。

(14) ^{114m}In : 用加速器、 $^{116}\text{Cd}(p, 3n)$ 反应途径产生。

这是一个可以用 30 MeV 回旋加速器完成的反应道, 特别适合于低掠射角、浓缩薄靶情况。在 Debrecen 和 Cape Town 已测量了天然 Cd 这一反应的激发函数, 并用浓缩的 $^{114}\text{Cd}(p, n)$ 反应数据进行了修正。数据的拟合工作正在进行。

(15) ^{114m}In : 用加速器、以 $^{114}\text{Cd}(d, 2n)$ 反应途径产生。

Debrecen 测量了这一反应的激发函数(浓缩 ^{114}Cd), 新近也测量了天然 Cd 的这一反应的激发函数, 需要用 EMPIRE 程序进行理论计算。

(16) ^{124}I : 用加速器、以 $^{124}\text{Te}(p, n)$ 反应途径产生。

^{124}I 的 $T_{1/2}$ 为 4.2 d, 发射 β^+ 的最大能量为 2.1 MeV, 是最为重要的潜在用于治疗的核素之一, 它集治疗和正电子发射的 X 射线断层摄影术为一体。这是产生 ^{124}I 的最佳反应途径。核数据的评价与推荐已完成。正电子衰变分支比应为 $(0.22 \pm 1)\%$ 。

(17) ^{124}I : 用加速器、以 $^{124}\text{Te}(d, 2n)$ 反应途径产生。

共有两组原始反应截面的测量数据(Julich, Brookhaven),但 Brookhaven 的数据因有误而被重新修正(这一结果还没有被录入 EXFOR)。现在的两组反应截面的测量数据均好,可用于数据的拟合。由于 ^{125}I 杂质, $^{124}\text{Te}(d, n)$ 反应道应加以考虑。

(18) ^{124}I : 用加速器、以 $^{125}\text{Te}(p, 2n)$ 反应途径产生。

仅有 2001 年新测量的浓缩靶实验数据。从其产额数据而言,这似乎是产生 ^{124}I 的最佳反应途径,但需要考虑 ^{125}I 杂质的产生。

(19) ^{149}Pm : 用反应堆、以 $^{148}\text{Nd}(n, \gamma)^{149}\text{Nd} \rightarrow ^{149}\text{Pm}$ 反应途径产生。

^{149}Pm 的 $T_{1/2}$ 为 2.12 d, 是 β^- 发射体。这是一个具有极大兴趣、利用稀土元素产生 ^{149}Pm β^- 发射体新的反应途径。应开展相应的实验测量和理论计算及数据评价工作。

(20) ^{166}Ho : 用反应堆、以 $^{165}\text{Ho}(n, \gamma)$ 反应途径产生。

^{166}Ho 的 $T_{1/2}$ 为 26.8 h, 发射 β^- 的最大能量为 1.9 MeV。ENDF/B-VI 和 JEF-2.2 有评价数据,并且在低能区数据的一致性较好,但高能区数据的差别较大。应该考虑同质异能态的存在。一些 EXFOR 数据需要重新调正。

(21) ^{166}Ho : 用反应堆、以 $^{164}\text{Dy}(n, \gamma) \rightarrow ^{165}\text{Dy}(n, \gamma) \rightarrow ^{166}\text{Dy} \rightarrow ^{166}\text{Ho}$ 反应途径产生。

对现有的评价数据应进行分析。

(22) ^{169}Yb : 用反应堆、以 $^{168}\text{Yb}(n, \gamma)$ 反应途径产生。

^{169}Yb 的 $T_{1/2}$ 为 32.0 d, 是俄歇电子发射体。这是一个具有极大兴趣、产生 ^{169}Yb 俄歇电子发射体的反应途径。总截面数据很好,但衰变分支比数据需要修正。

(23) ^{169}Yb : 用加速器、以 $^{169}\text{Tm}(p, n)$ 反应途径产生。

Julich 与 Debrecen 合作于 2004 年在不同的回旋加速器上完成了激发函数的测量,其结果是一致的。数据分析工作正在进行。

(24) ^{177}Lu : 用反应堆、以 $^{176}\text{Yb}(n, \gamma)^{177}\text{Yb} \rightarrow ^{177}\text{Lu}$ 反应途径产生。

^{177}Lu 的 $T_{1/2}$ 为 6.7 d, 发射 β^- 的最大能量为 0.5 MeV。这是一个产生 β^- 发射体的反应途径。用

于减缓治疗(相对于空隙液体凝胶注入灌输治疗而言)。在法国生产的这一同位素主要用于欧洲,在 Missouri 生产的这一同位素主要用于美国。对现有的实验数据已评价,但仍需做更多的工作,特别是关于衰变分支比的数据。

(25) ^{177}Lu : 用反应堆、以 $^{176}\text{Lu}(n, \gamma)$ 反应途径产生。

该数据已评价。

(26) ^{211}At : 用加速器、以 $^{209}\text{Bi}(\alpha, 2n)$ 反应途径产生。

^{211}At 的 $T_{1/2}$ 为 7.2 h, 发射 α 的最大能量为 5.9 MeV。这是一个产生显著量 α 发射体的反应途径。包括 Debrecen 新的测量数据在内的数据的评价分析已经完成,并得到了可以接受的一致性。正在进行 ALICE-IPPE 程序的理论计算。 $^{209}\text{Bi}(\alpha, X)^{210}\text{Po}$ 累积和 $^{209}\text{Bi}(\alpha, 3n)^{210}\text{At}$ 杂质反应的数据也已测量,EMPIRE 程序的理论计算与实验值符合较好。

(27) ^{213}Bi : 以 ^{225}Ac 衰变途径产生。

^{213}Bi 的 $T_{1/2}$ 为 45.6 min, 发射 α 的最大能量为 8.4 MeV。这是 ^{233}U 核燃料循环废物中存在的重要核素之一,可用化学方法回收。由 ^{225}Ac 发射 3 个 α 衰变的过程产生(100%, 99.99%, 99.98%)。MIRD(Medical Internal Radiation Dose)和 ENDF 已有评价数据,但仍需 IAEA 的核衰变数据方面的帮助。

(28) ^{225}Ac : 用加速器、以 $^{226}\text{Ra}(p, 2n)$ 反应途径产生。

^{225}Ac 的 $T_{1/2}$ 为 10.0d, 发射 α 的最大能量为 5.8 MeV。这是一个很难进行实验测量的反应道。仅有 Karlsruhe-Ispra 一组实验测量数据。已完成 ALICE-IPPE 程序的理论计算,但是 16 MeV 能量点上 ALICE-IPPE 程序理论计算值为 450 mb, 与实验测量数据 ~ 600 mb 差别较大,而 EMPIRE 程序理论计算值与实验测量值相符。因此对理论计算的结果需进一步分析和比较。

(29) ^{225}Ac : 用反应堆、或以 $^{233}\text{U} \rightarrow ^{229}\text{Th}$ 衰变途径产生。

这是 ^{233}U 核燃料循环中存在的重要核素之一。MIRD 和 ENDF 已有评价数据,ND-2004 Santa Fe 文献中 Mirzadeh(Oak ridge)提出需要用高通量反应堆生产 ^{229}Th 。需要开展更多的这方面的工作。

在上面介绍的产生诊断和治疗医用放射性核素

核数据评价计算中已提到数个核反应统计理论模型计算程序,如 ALICE, EMPIRE-II, TNG 和 STAPRE 等。我们知道,核理论,特别是核反应理论在实际应用中的一个重要领域就是在核科学和技术应用中需要的微观核数据的理论计算与评价。因为它可以给出有理论基础的、合理的现有实验核数据的内插和外推,可以给出最为经济、成套的重要核数据。众所周知,核数据的实验测量是昂贵的,并且有时也是不可能实现的(对短寿命核素而言)。

因此,依据现存实验核数据来进行模型理论计算的内插、外推,从而给出核科学和技术应用中需要的全能区成套微观核数据是极其廉价和适用的。为满足发展中的核数据需求以及这里具体介绍的产生诊断和治疗医用放射性核素核数据评价计算的需求,物理模型的理论计算是十分必要和有意义的。一些相关核数据评价计算标准程序的介绍(包括 ALICE, EMPIRE-II, TNG, STAPRE 等)详见参考文献 [3]。

参 考 文 献:

- [1] Sublet J Ch, Capote Noy R. IAEA-INDC(International Nuclear Data Committee)(NDS)-465. Nuclear Data for Production of Therapeutic Radionuclides-Summary Report of Second Research Coordination Meeting. IAEA, Vienna, Austria, 15--19 Nov. 2004.
- [2] <http://www-nds.iaea.org/photonuclear/recommended/pd104-kaeri.dat>.
- [3] 王书暖. 原子核物理评论, 2001, 18(3): 181.

Nuclear Data for Production of Therapeutic Radionuclides

WANG Shu-nuan, LI Chun-sheng

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: The nuclear data measurements and preliminary evaluation as well as calculation for established and emerging 26 radionuclides produced in 55 ways by using reactor or accelerator or decay are briefly introduced in order to keep the safety and validity in medical therapeutic applications. The 11 established radionuclides are ^{32}P , ^{89}Sr , ^{90}Y , ^{103}Pd , ^{125}I , ^{131}I , ^{137}Cs , ^{153}Sm , ^{186}Re , ^{188}Re , ^{192}Ir and the 15 emerging radionuclides are ^{64}Cu , ^{67}Cu , ^{67}Ga , ^{86}Y , ^{105}Rh , ^{111}In , $^{114\text{m}}\text{In}$, ^{124}I , ^{149}Pm , ^{166}Ho , ^{169}Yb , ^{177}Lu , ^{211}At , ^{213}Bi , ^{225}Ac .

Key words: therapeutic radionuclide production; nuclear data; evaluation