

文章编号: 1007-4627(2007)03-0247-06

产生医用放射性核素核数据的测量、理论计算与评价(续)*

王书暖, 李春晟

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 简要介绍产生治疗放射性核素(利用反应堆、加速器或衰变而产生的 26 个核素、61 种不同反应途径)核数据的测量、理论计算与评价的新进展。这些核素是: 已广泛用于临床的 ^{32}P , ^{89}Sr , ^{90}Y , ^{103}Pd , ^{125}I , ^{131}I , ^{137}Cs , ^{153}Sm , ^{186}Re , ^{188}Re , ^{192}Ir 和具有很大潜在使用可能性的 ^{64}Cu , ^{67}Cu , ^{67}Ga , ^{86}Y , ^{105}Rh , ^{111}In , $^{114\text{m}}\text{In}$, ^{124}I , ^{125}I (新), ^{149}Pm , ^{166}Ho , ^{169}Yb , ^{177}Lu , ^{211}At , ^{213}Bi , ^{225}Ac 。61 种不同反应途径中有 6 种新的反应途径。为提高核医学应用的安全性和有效性, 对现有核数据进行评价与适当能区的理论计算是十分必要的。

关键词: 医用同位素; 核数据; 测量; 评价; 计算

中图分类号: O571 **文献标识码:** A

1 引言

癌症的治疗已成为世界范围内主要的医学和经济问题。这是因为这一疾病在世界范围内不断地增加, 同时也就增加了对癌症治疗所需要的放射性核素的需求。这使得拥有能够生产用于诊治目的回旋加速器和其他加速器的成员国近年来不断增加, 反应堆也一直广泛用于许多不同领域包括核医学的放射性核素的生产。这些需求在于 2002 年结束的“医用放射性同位素生产: 诊断放射性同位素和监测反应的带电粒子截面数据库”的 IAEA CRP(Coordinated Research Project)中也一再被强调(其发表的资料文献为 IAEA-TECDOC-1211)。新的“产生治疗放射性核素核数据”的 CRP 始于 2003 年, 其首次研究协调会(RCM)在 2003 年 6 月 25—27 日于维也纳的 IAEA 总部举行, 技术性讨论和总结发表于文献 INDC(NDS)-444。其第 2 次 RCM 在 2004 年 11 月 15—19 日于维也纳的 IAEA 总部举行, 评估了 CRP 前两年所完成的工作, 其中扩展和覆盖了大量有兴趣新的核反应途径。技术性讨论和 CRP 的工作总结、计划等发表于文献 INDC(NDS)-465。其进展在文献[1]“产生医用放射性核素核数据的测量、理论计算与评价”中作了介绍。这里将要介绍的“产生医用放射性核素核数据的测量、理论计算与评价”(续)是 CRP 的第 3 次也是最后 1 次的

RCM(2006 年 5 月 29 日—6 月 2 日于维也纳的 IAEA 总部举行)的相关新进展^[2]。会议上 IAEA-NDS 负责人 A. L. Nichols 再次强调了治疗应用方面重要核数据库的形成和发展意义, 强调了不管产生这些用于诊治的放射性核素的核数据或有或无、或好或不好, 我们都应该明确这样的事实, 即这些同位素已经被生产和用于核医学处理多年了。该 CRP 的意义在于改善和提高核数据质量, 使核医学同位素生产更加有效并提高其纯度和质量。正在使用或已被提出在治疗中应用的放射性同位素已具有相当显著的数量。因此, 只有产生这些诊治用放射性核素核数据的完善和精度的提高, 以及其衰变数据的完善和精度的提高, 才能大大地提高核医学应用的安全性和有效性。

本文对已广泛使用于临床和具有很大潜在使用可能性的、利用反应、加速器或衰变而产生的 26 个核素、61 种不同产生途径核素截面数据库的正确性和测试工作的最新进展进行简要综述。

2 广泛用于临床的放射性核素(11 个放射性核素 24 种不同产生途径)

(1) ^{32}P : 用反应堆、以 $^{31}\text{P}(n, \gamma)$ 反应途径产生。

热能区各数据库数据较一致并与推荐的

* 收稿日期: 2007-11-30; 修改日期: 2007-01-29

作者简介: 王书暖(1942—), 女(汉族), 山东烟台人, 研究员, 从事核反应理论及核数据计算研究; E-mail: wsn@ciae.ac.cn

Mughabghab 值一致。低能区和中间能区 JENDL-3.3 数据为好,但在高能区由于 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)均不好。因此,共振参数使用 JENDL-3.3 评价数据,高能区采用 TALYS 程序^[3]的理论计算结果,该理论计算值与实验值相符。以前是 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) ^{32}P : 用反应堆或加速器、以 $^{32}\text{S}(n, p)$ 反应途径产生。

$^{32}\text{S}(n, p)$ 反应数据选自 EXFOR 数据库并进行了分析。不同的理论计算结果之间差异较大。因此推荐使用 IRDF-2002(International Reactor Dosimetry File)的评价结果。14 MeV d(Be)谱的积分测量给出的计算值与实验值的比为 1.1。

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

$^{89}\text{Y}(n, p)$ 反应数据选自 EXFOR 数据库并进行了分析。EMPIRE^[4]和 STAPRE^[4]程序计算结果差别不大,因此两者计算结果中的任意一个均可被推荐使用。14 MeV d(Be)谱的积分测量给出的计算值与实验值的比为 1.1。

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

共振区的实验测量情况很好。仅在 1 MeV 能点附近有一个老的实验测量结果。TALYS 和 EMPIRE 程序的计算结果及形状均不一致。由于 TALYS 的计算结果与 14 MeV 能点附近系统学结果相符更好,因此推荐使用 TALYS 的计算结果。共振区以上、能支持理论计算的实验测量是需要的。以前用的是 JENDL-3.3 评价数据。

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

推荐使用 Obninsk(Zolotarev) 2005 年新的评价更新计量库 IRDF-2002 的结果。

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

推荐使用 JENDL-3.3 评价数据,但裂变平均的积分值差别近 20%,这一问题尚待解决。

(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。

有关叙述见文献[1],这样的实验链产额测量

也已完成。

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

使用 JENDL-3.3 评价数据,但对某些共振参数做了适当调整。 ^{102}Pd 的丰度仅大约为 1%,因此浓缩材料也许是需要的。仍需开展减少与共振积分测量数据不一致方面的工作。

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

EXFOR 数据较多,对所有的数据均进行了分析并已选定。认为 X 射线计数是可靠的而 γ 射线计数是不可靠的,相应的测量工作正在继续进行。对 2002 年 Sudar 所选定的新的数据点要进行拟合。弱的 357 keV 的 γ 射线强度需要精确的确定。 (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,也应给出数据的编纂和评价。

(10) ^{103}Pd : 用加速器、以 $^{103}\text{Rh}(d, 2n)$ 反应途径产生^[1]。

这方面的数据处理、拟合和模型的理论计算正在进行。

(11) ^{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。

TALYS 和 EMPIRE 程序的计算结果在 PEQ(预平衡)区域很好一致,共振区采用 JENDL-3.3 评价数据,但稍有调整。 ^{125}I 广泛用于短距离治疗和放射性免疫测定。 $^{125}\text{I}(n, \gamma)$ 反应截面也需要进行评价。

(12) ^{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。

分析了其衰变纲图。存在两个反应道,应考虑亚稳态的存在。多数数据库仅给出了总截面。结合修改的 JENDL-3.3 文档 2 的评价数据和 TALYS 程序的最佳计算(计算中考虑到包括能量相关衰变分支比信息的实验数据)完成了一个新的评价。14 MeV 附近阈反应数据的影响应核实。Te 是变形核,形变的影响同样也应核实。

(13) ^{131}I : 用反应堆、以 $^{235}\text{U}(n, f)$ 反应途径产生^[1]。

它是极其清楚的裂变产物核之一,其产额也是很好测量了的。

(14) ^{137}Cs : 用反应堆、以 $^{235}\text{U}(n, f)$ 反应途径

产生。

^{137}Cs 用于短距离放射性治疗,也是极其清楚的裂变产物核之一,其产额也是很好测量的了。

(15) ^{153}Sm :用反应堆、以 $^{152}\text{Sm}(n, \gamma)$ 反应途径产生。

利用EMPIRE和TALYS程序的理论计算结果一致。检查了ENDF/B-VII和BROND-2.2的评价并给出了推荐。

(16) ^{153}Sm :用反应堆和加速器、以 $^{153}\text{Eu}(n, p)$ 反应途径产生。

$^{153}\text{Eu}(n, p)$ 是一个新的产生 ^{153}Sm 的反应途径。已分析了 $^{153}\text{Eu}(n, p)^{153}\text{Sm}$ 反应并进行了模型的理论计算。推荐使用STAPRE程序的计算。14 MeV d(Be)谱的积分测量给出的计算值与实验值的比为1.15。

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

分析了现有的评价数据,说明了热和共振积分结果在评价与实验测量上一致。该核素有一个寿命很长的同质异能态,热能区同质异能态的截面数据可在Karlsruhe出版的核素图上看到。

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

已完成了EMPIRE和GNASH^[4]程序的计算,仍需开展一些更为干净的测量工作。

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

已完成了测量工作,可以采用数据的拟合。在高于20 MeV区域,EMPIRE程序的计算结果太低,这可能与直接或预平衡反应机制描述的不充分有关。高Z核素破裂的重要性或许可以解释峰处的高估。

(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。

这一反应途径是无载体产生 ^{188}Re 的重要反应道。首次俘获反应已被评价并用微分和积分测量确认其正确性。第2个反应基于理论计算。在热能点上 $^{187}\text{W}(n, \gamma)$ 截面值为70 b,10%的不确定性对生产为目的而言是可以接受的。

(21) ^{188}Re :用反应堆、以 $^{187}\text{Re}(n, \gamma)$ 反应途径产生^[1]。

在推荐之前,应完成与ENDF/B-VII的比较。

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

^{192}Ir 有3个同质异能态,关于第2个同质异能态的自旋和能量仍有问题,有关衰变纲图进一步的实验测量是需要的。高能区的TALYS程序的理论计算已完成。

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

激发函数测量已完成。模型理论计算也已完成。已完成了与反应堆和回旋加速器生产的比较并指出:反应堆途径产生在产额和纯度上具有明显优势。仍需开展同质异能态衰变分支比的测量工作和其它的相关测量工作。

(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。激发函数测量已完成。模型理论计算也已完成。可采用数据的拟合。(d, 2n)反应截面的最大值比(p, n)反应大4倍。

3 很少常规临床使用、但却具有很大潜在使用价值和可能性的放射性核素(16个放射性核素、37种不同产生途径)

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

^{64}Cu 是最为重要的治疗医用放射性核素之一。它可集治疗和正电子发射断层摄影术于一体。新的评价衰变纲图数据应修改为:38.4%为 β^- ,17.8%为 β^+ ,43.8%为电子俘获,0.54%为1346 keV的 γ 射线。这一反应途径一直只是被偶尔使用。高通量反应堆可给出合理的具体活度。

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

实验数据的筛选已完成。Levkovskii的数据由于过高而没有被采用,其它所有数据均被提高7%来以记入正电子分支数据的变化。数据的拟合工作已经完成。理论计算与实验数据合理一致。

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

仅有一组实验数据(Zweit et al., 1991)。相同

作者还做了厚靶产额测量,但与从激发函数计算的产额却不一致。利用 EAF-2003 进一步的分析是必要的,并且也应开展理论计算及与实验数据的比较。

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

已完成了实验数据的筛选和编纂。2006 年 Zolotarev 完成了一个新的评价以更新 IRDF-2002。但再次评价是必需的,特别对 5—12 MeV 能区。谱平均积分实验数据在 10% 以内保持一致。14 MeV d(Be)源的测量值给出的计算值与实验值的比高达 6%。

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

对 Hilger 的数据加大了 7%, 根据新的衰变数据修订了 Groppi 和 Tarkanyi 的数据。文献中 Hilger 的 $^{66}\text{Zn}(d, \alpha)^{64}\text{Cu}$ 的实验数据应以天然 Zn 的实验数据归一, 但因为只有一组 $^{64}\text{Zn}(d, 2p)$ 的实验数据, 只需要在高于 10 MeV 以上做此归一。没有选用 Hilger 的天然 Zn 8 MeV 以下的实验数据。仍需要实验数据的拟合, 12 MeV 附近的积分测量会是有用的。已经考虑了 ^{67}Cu 杂质的水平, 但需计算其活度比。

(6) ^{64}Cu : 用加速器、以 $^{68}\text{Zn}(p, x)$ 反应途径产生。

$^{68}\text{Zn}(p, x)$ 是一个新的产生 ^{64}Cu 的反应途径。共有 3 组数据, 全要根据新的衰变数据而修正。ALICE-IPPE^[4] 程序计算结果与实验值一致。由于 ^{67}Cu 杂质的同时存在, 生产的能量不应高于 40 MeV。

(7) ^{67}Cu : 用反应堆、以 $^{67}\text{Zn}(n, p)$ 反应途径产生。

有许多实验数据有误, 实验数据的筛选和编纂已完成。由于具有正的反应能 Q 值, 因此在热能区就有实验数据。EAF-20051/E 应包含在内。

(8) ^{67}Cu : 用加速器、以 $^{68}\text{Zn}(p, 2p)$ 反应途径产生。

介绍见文献[1]。考虑了通过 $^{68}\text{Zn}(p, \alpha n)$ 和 $^{68}\text{Zn}(p, 2p3n)$ 反应途径产生杂质 ^{64}Cu 的影响, 需要进行杂质产额比的计算。数据的理论计算已完成, 但与实验数据的符合并不好。

(9) ^{67}Cu : 用加速器、以 $^{70}\text{Zn}(p, \alpha)$ 反应途径产

生。

采用了实验数据拟合的结果。

(10) ^{67}Ga : 用加速器、以 $^{68}\text{Zn}(p, 2n)$, $^{67}\text{Zn}(p, n)$ 反应途径产生。

数据评价工作已完成。

(11) ^{86}Y : 用加速器、以 $^{86}\text{Sr}(p, n)$ 反应途径产生。

这是一个新的用于剂量学定量计算中的产生正电子发射体 ^{86}Y 的重要反应途径。共有两组实验数据, 数据的拟合是需要的, 已计算了同质异能态的截面, 相关核数据的评价工作正在进行。

(12) ^{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。

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和可能性。衰变纲图数据是好的, 不可分辨共振区采用 JENDL 的结果, 之上能区采用与实验值相符很好的 TALYS 程序计算结果。

(13) ^{111}In : 用加速器、以 $^{111}\text{Cd}(p, n)$, $^{112}\text{Cd}(p, 2n)$ 反应途径产生。

数据评价工作已完成。

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

Debrecen 小组提供了新数据和数据的编纂, EMPIRE 和 GNASH 程序的理论计算结果与实验值一致。数据评价工作已完成。

(15) ^{114m}In : 用加速器、以 $^{116}\text{Cd}(p, 3n)$ 反应途径产生。

Debrecen 小组提供了新数据和数据的编纂, 实验数据是好的, EMPIRE 和 GNASH 程序的理论计算结果与实验值一致。数据评价工作已完成。

(16) ^{114m}In : 用加速器、以 $^{114}\text{Cd}(d, 2n)$ 反应途径产生。

Debrecen 小组提供了新数据和数据的编纂, EMPIRE 和 GNASH 程序的理论截面值高于实验值。对产额的计算建议使用数据的拟合值。

(17) ^{114m}In : 用反应堆、以 $^{113}\text{In}(n, \gamma)$ 反应途径产生。

这是一个新的产生 ^{114m}In 的反应途径, 需要新的数据评价。衰变分支比数据需要归一 ($m/(m+g)$, m 为同质异能态, g 为基态) 到能量相关的实验数据上。

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

核数据的评价与推荐已完成。正电子衰变分支比已确认为 $(0.22 \pm 1)\%$ 。

(19) ^{124}I : 用加速器、以 $^{124}\text{Te}(d, 2n)$ 反应途径产生^[1]。

(20) ^{124}I : 用加速器、以 $^{125}\text{Te}(p, 2n)$ 反应途径产生。

有关叙述见文献[1], 但需要考虑 ^{125}I 杂质的产生及厚靶产额比的计算。数据以 ALICE, GNASH, EMPIRE 程序的理论计算为主。

(21) ^{125}I : 用加速器、以 $^{124}\text{Te}(d, n)$ 反应途径产生。

这是一个新的产生 ^{125}I 的反应途径, 需要新的数据评价。这一反应途径相比于 $(d, 2n)$ 反应 ^{124}I 中的杂质水平的考虑而言是重要的。数据的编纂已完成, 评价工作正在进行。

(22) ^{125}I : 用加速器、以 $^{125}\text{Te}(p, n)$ 反应途径产生。

这是一个新的产生 ^{125}I 的反应途径, 需要新的数据评价。这一反应途径相比于 $(d, 2n)$ 反应 ^{124}I 中的杂质水平的考虑而言是重要的。数据的编纂已完成, 评价工作正在进行。

(23) ^{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。

在做完了 JENDL-3.3 和 ENDF/B-VII 评价结果的对比之后才能给出推荐使用的数据。

(24) ^{166}Ho : 用反应堆、以 $^{165}\text{Ho}(n, \gamma)$ 反应途径产生。

用 TALYS 和 EMPIRE 程序的理论计算已完成, 并将与低能区数据结合。已计算了长寿命同质异能态的截面。 $(m/(m+g))$ 比为 0.07, 在 1 MeV 以上增至 0.3。EXFOR22612003 数据需要修改。

(25) ^{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。

1 MeV 区域 ^{164}Dy 数据有矛盾, 对 Fawcett 的数据也要检查。 $^{165}\text{Dy}(n, \gamma)$ 反应道数据是现成的。

(26) ^{169}Yb : 用反应堆、以 $^{168}\text{Yb}(n, \gamma)$ 反应途径产生。

俘获截面数据与 Mughabghab 的最新推荐很好一致。

(27) ^{169}Yb : 用加速器、以 $^{169}\text{Tm}(p, n)$ 反应途

径产生。

数据评价工作已完成。理论计算结果与实验值相符。可采用拟合的数据。

(28) ^{169}Yb : 用加速器、以 $^{169}\text{Tm}(d, 2n)$ 反应途径产生。

这是一个新的产生 ^{177}Lu 的反应途径, 需要新的数据评价。Julich 与 Debrecen 于 2006 年合作完成了实验数据的测量。数据评价工作已完成。理论计算结果与实验值不符, 相差可至 2 倍。因此至 20 MeV 采用了拟合的数据。 $^{169}\text{Tm}(d, 2n)$ 反应途径产生 ^{169}Yb 的产额将大大高于 $^{169}\text{Tm}(p, n)$ 反应途径。

(29) ^{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。

现有的数据已被评估, 但其反应率相对而言是低的。

(30) ^{177}Lu : 用加速器、以 $^{176}\text{Yb}(d, x)^{177}\text{Lu}$ 反应途径产生。

这是一个新的产生 ^{177}Lu 的反应途径, 需要新的数据评价。Brussels 完成了一个新的数据测量, 对 (d, p) 和 (d, n) 反应道的数据应进行分析和拟合。应进行独立的和累计的产额计算。

(31) ^{177}Lu : 用反应堆、以 $^{176}\text{Lu}(n, \gamma)$ 反应途径产生^[1]。

(32) ^{211}At : 用加速器、以 $^{209}\text{Bi}(\alpha, 2n)$ 反应途径产生。

Debrecen 新的测量数据与以前的(1949-2001年)老的数据一致性相当好。这一核素是极其需求的, 但其生产和化学处理是困难的。 $(\alpha, 3n)$ 反应的截面实验数据已编纂, 至 40 MeV 的数据拟合也已完成。这一反应从杂质产生的水平而言是重要的。在 Ispra 29 MeV 的 $(\alpha, 2n)$ 反应的积分测量已完成, 这给出了与评价数据很好一致的结果。

(33) ^{213}Bi : 以 ^{225}Ac 衰变途径产生。

衰变数据推荐使用 JEFF-3.1。

(34) ^{225}Ac : 用加速器、以 $^{226}\text{Ra}(p, 2n)$ 反应途径产生。

2005 年有一套新的实验测量数据。ALICE-IPPE 程序的理论计算结果与这套新的实验测量数据很好一致, 因此推荐使用理论计算的结果。

(35) ^{225}Ac : 用反应堆、或以 $^{233}\text{U} \rightarrow ^{229}\text{Th}$ 衰变途径产生。

衰变数据推荐使用 JEFF-3.1。尽管问题复杂

但考虑提出使用高通量反应堆生产²²⁹Th 是值得考虑的。需要开展更多这方面的工作。

4 TALYS 程序简介

本文介绍的数个核反应统计理论模型计算程序详见参考文献[4]。现简要介绍前面提到的 TALYS 程序^[3]，这是由 A. J. Koning, S. Hilaire, M. Duijvestijn 共同合作研制的核模型新的计算机软件程序。入射粒子可为 n, p, d, t, ³He, α 和 γ。TALYS 程序的基本特点为：核反应机制包括直接、复合核和预平衡反应机制(包括裂变道)，适用的能量范围为 1 keV—200 MeV，靶核质量数为 12 < A < 339，用 ECIS-97^[5] 进行光学模型和耦合道光学模型的计算，可计算总截面、分截面、能谱、角分布、双微分截面和反冲核的双微分截面、分立能级和连续态 γ 产额截面、剩余核产额激发函数(包括同质异能截面)，可给出单举反应道截面(例如(n, 2np))、能谱和反冲。计算中核反应模型所需要的所有核模型参数均取自 RIPL-2 库^[6]。复合核两体反应中考虑了多种宽度涨落修正，高能区考虑了多次复合核的粒

子发射。程序采用了多种唯象和微观的能级密度计算，采用了多种模型计算裂变截面、裂变碎片和产额，并考虑了可能的多次预平衡发射过程。

参考文献 (References):

- [1] Wang Shunuan, Li Chansheng. Nuclear Physics Review, 2006, **23**(1): 78(in Chinese).
(王书暖, 李春晟. 原子核物理评论, 2006, **23**(1): 78.)
- [2] Sublet J Ch, Capote Noy R. IAEA INDC(NDS)-0501.
- [3] Koning A J Hilaire S, Duijvestijn M. NRG(Nuclear Research and Consultancy Group, 1755 ZG Petten, the Netherlands) Report, 21297/04. 62741/P FAI/AK/AK.
- [4] Wang Shunuan. Nuclear Physics Review, 2001, **18**(3): 181 (in Chinese).
(王书暖. 原子核物理评论, 2001, **18**(3): 181.)
- [5] Raynal J. Notes on ECIS94, CAE saclay Report No. CEA-N-2772, 1994.
- [6] Handbook for Calculations of Nuclear Reaction Data; Reference Input Parameter Library, <http://WWW-nds.iaea.or.at/RIPL-2/>.

Nuclear Data for Production of Therapeutic Radionuclides(Continued)^{*}

WANG Shu-nuan¹⁾, LI Chun-sheng

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

Abstract: The nuclear data measurements and preliminary evaluation as well as theoretical calculation for established and emerging 26 radio-nuclides produced in 61 ways by using reactor, accelerator or decay are briefly introduced. The measured data evaluation and theoretical calculation in some energy range are very important in order to keep the safety and validity in medical therapeutic applications. The 11 established radio-nuclides are ³²P, ⁸⁹Sr, ⁹⁰Y, ¹⁰³Pd, ¹²⁵I, ¹³¹I, ¹³⁷Cs, ¹⁵³Sm, ¹⁸⁶Re, ¹⁸⁸Re, ¹⁹²Ir and the 16 emerging radio-nuclides are ⁶⁴Cu, ⁶⁷Cu, ⁶⁷Ga, ⁸⁶Y, ¹⁰⁵Rh, ¹¹¹In, ^{114m}In, ¹²⁴I, ¹²⁵I(new), ¹⁴⁹Pm, ¹⁶⁶Ho, ¹⁶⁹Yb, ¹⁷⁷Lu, ²¹¹At, ²¹³Bi, ²²⁵Ac.

Key words: therapeutic radionuclide production; nuclear data; evaluation; calculation

* Received date: 30 Nov. 2006; Revised date: 29 Jan. 2007

1) E-mail: wsn@ciae.ac.cn