

文章编号: 1007-4627(2001)03-0192-05

# 国际评价中子核数据库

刘廷进

(中国核数据中心、中国原子能科学研究院、北京 102314)

**摘要:** 介绍了当今世界上五大评价中子数据库, 即美国的 ENDF/B-6、日本的 JENDL-3.2、欧洲的 JEF-2.2、中国的 CENDL-2.1 及俄罗斯的 BROND-2 的现况, 以及国际评价中子数据库的发展趋势和用户如何获得与使用这些数据。

**关键词:** 中子数据; 核数据库; ENDF/B-6; JENDL-3.2; CENDL-2.1

**中图分类号:** O571.53 **文献标识码:** A

## 1 引言

为实际应用的需要, 如研制核武器、建造核反应堆和研究核聚变等, 从 60 年代开始, 一些国家就建立自己的评价中子核数据库, 且以美国为首, 互相保密, 互相竞争. 自 90 年代前后, 随着美国 ENDF/B-6 的公开, 各国的评价中子核数据也相继公开, 开始了国际合作. 但是, 出于各自的应用目的, 仍然保留发展自己的评价中子核数据库, 而没有一个像实验中子数据库 (EXFOR) 那样的国际上统一的评价中子数据库. 现今, 世界上主要有 5 个评价中子数据库<sup>[1]</sup>: 美国的 ENDF/B、日本的 JENDL、欧洲的 JEF、中国的 CENDL 和俄罗斯的 BROND. 本文所介绍的“国际评价中子核数据库”, 就是指这 5 个数据库. 值得注意的是, 中国的评价核数据库 CENDL 也是国际公认的世界五大评价中子核数据库之一.

现今, 核数据的国际合作已经有了很大发展, 有了固定的模式和成熟的经验. 核数据评价的国际

合作主要通过两种渠道进行协调组织. 一是国际原子能机构的国际核数据委员会, 定期研究国际核数据的发展, 确定核数据的发展项目, 由国际原子能机构的核数据科 (NDS) 通过组织协调研究项目 (CRP) 予以实现. 另一种渠道是欧共体核能局 (NEA) 组织的国际评价合作工作组 (简称 NEA WPEC). 工作组根据需要, 设立若干由各国有领域感兴趣的专家参加的工作组 (Subgroup)<sup>[2]</sup>. 对评价中需要解决的重要问题进行专门研究. CRP 和 Subgroup 的研究内容, 在很大程度上可认为是当今世界上核数据评价领域的重要课题和发展趋向.

## 2 世界主要评价中子核数据库的发展和现况

五大评价中子数据库都在不断更新再版、不断增加核素、增加数据文档 (类型) 和提高精度. 表 1 给出了各库包含的核素和文档情况, 图 1 给出了各库更新再版的情况.

表 1 当今世界主要评价中子数据库概况

库 版	完成时间 (发行时间)	库含核素数目 <sup>1)</sup>				
		总数	文档 1-5	文档 6	文档 12-15	文档 31-33
ENDF/B-6(美国)	1990 (1990 1991)	319	319	18	70	34
JENDL-3(日本)	1989 (1989)	340	340	0	59	0
JEF-2(欧洲)	1987 (1990)	314	314	0	48	(30 6) <sup>2)</sup>
CENDL-2.1(中国)	1991 (1991)	67	67	18	22	7
BROND-2(俄罗斯)	1990 (1992)	121	121	0	21	0

1) 文档 1-5, 中子反应数据; 文档 6, 双微分截面; 文档 12-15,  $\gamma$  产生数据; 文档 31-33, 协方差数据.

2) 重要的裂变核、结构材料和反应堆冷却剂.

收稿日期: 2001-03-08; 修改日期: 2001-07-25

作者简介: 刘廷进(1938-), 男(汉族), 山东莱州人, 研究员, 从事中子物理研究和核数据评价及建库工作.

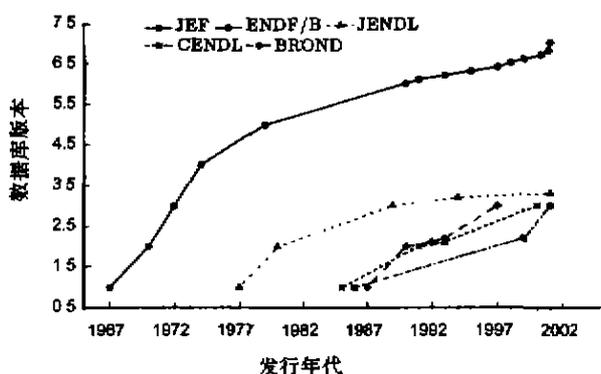


图1 主要评价核数据库的发展

### 2.1 ENDF/B-6和 ENDF/B-7<sup>[3]</sup>

美国自1990年发行 ENDF/B-6以来, 每两年更新一次, 至1997年发行 ENDF/B-6.4, 此后每一年更新一次, 至1999年发行 ENDF/B-6.6, 2000年甚至一年更新二次, 美国现在已经决定在未来3—5年内, 建立 ENDF/B-7, 该版将包含新的标准, 运用新的格式, 将能量向高能延伸(例如150 MeV)。

### 2.2 JENDL-3.2和 JENDL-3.3<sup>[4]</sup>

JENDL-3.2 完成发行于1994年6月, 此后在使用和宏观检验过程中发现了一些问题, 于1997年4月开始对其进行改进, 建立改进版 JENDL-3.3, 该版将于2001年完成发行, 较之 JENDL-3.2, JENDL-3.3将有下列特点和改进: (1)增加协方差文档, 包括主要的钢系核、结构材料和冷却剂核素; (2)“同位素评价政策”, 强调给出同位素数据, JENDL-3.2“天然元素政策”强调给出天然元素数据; (3)增加新的核素, 如Er(可燃毒物)等; (4)增加聚变用核素的 $\gamma$ 产生数据; (5)更新数据, 如U和Pu同位素的共振参数及阈反应截面, 结构材料的共振参数、 $\gamma$ 产生数据、中子发射谱等约30几个核素。

### 2.3 JEF-2.2和 JEFF-3<sup>[5]</sup>

欧共体的JEF库有两部分, 通用库JEF和聚变堆用库EFF, 从1996年开始了它们的最新版本JEF-2.2和EFF-4, 二者已于1999年完成并提供使用, 与此同时, NEA决定于1997年将二者合并, 建立JEFF-3库, 此库将于2001年完成, JEFF-3是综合库, 是多用途的, 特别是对裂变堆、核废物处理、加速器驱动系统和聚变, 较之JEF-2.2, JEFF-3有下列特点和发展: (1)改进的数据质量保证体系;

(2)主要同位素能量延伸至150 MeV; (3)重点在协方差数据; (4)考虑到JEF-2.2基准检验结果; (5)采用欧洲活化库(EAF)的最新版本。

### 2.4 CENDL-2.1和 CENDL-3<sup>[6]</sup>

中国的CENDL-2.1于1991年完成发行, 它包含了代表当时先进水平的双微分截面和协方差文档, 说明我们在评价方法、评价技术和评价手段上具有相当的水平, 但核素比较少, 很难满足实用的需要, 我们从1996年开始建立CENDL-3, 并于2000年底完成, CENDL-3有下列特点和改进: (1)核素增加至200个, 其中包括裂变产物核91个, 所有这些核的数据都是新评价和计算的; (2)增加结构材料核同位素的数据, 与天然元素数据同时给出, 天然元素数据与其同位素数据之间满足物理上的自洽关系; (3)明显改进的部分是轻核的双微分截面数据; (4)更新改进了重要裂变核素, 如 $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ 等的数据; (5)与宏观检验紧密结合。

### 2.5 BROND-2.2和 BROND-3<sup>[7]</sup>

俄罗斯(前苏联)的BROND-2.2于1993年底完成, 此后作了一些评价改进, 特别是钢系核素数据, 但看不出国内的统一安排和计划, 大多是国际合作(ISTC)项目, 大约在1997年, 他们提出了建立BROND-3, 但至今没有具体的计划和时间表, 无从知道所包含的内容和完成时间。

## 3 国际评价中子核数据库的发展趋势和特点

综合各国评价核数据库的发展和现况, 分析国际原子能机构正在进行的CRP和NEA Subgroup项目<sup>[6]</sup>, 可以看出当前国际评价核数据库的发展趋势和特点。

### 3.1 协方差数据

协方差数据对核数据的实际应用很重要, 如评价设计的精度、群常数的调整等, 然而由于协方差数据评价的困难性, 虽然在80年代就已经开始, 但至今各库的协方差数据还很不完全, 如表1所示, 除ENDF/B-6中有部分协方差数据外, 其他库中只有很少的或根本就没有协方差数据, 将于2001年完成的日本的JENDL-3.3<sup>[4]</sup>和欧洲的JEFF-3<sup>[5]</sup>的重要改进之一均是增加重要核素的协方差数据, 日本几

乎已完成了这方面的工作。为了适应这种需要, NEA WPEC 正在组织一个工作组<sup>[9]</sup>, 其工作内容包包括准备协方差数据, 产生群常数的协方差, 用协方差数据调整群截面和收集研究用户反馈意见。工作组的目标是发展协方差评价方法、研究协方差文档处理中的问题, 完成用协方差数据对核数据的调整。该工作将从2001年开始, 约2003年结束。国内用户已提出了对协方差数据需要, 是“十五”期间核数据评价的重要任务之一。

### 3.2 标准数据

众所周知, ENDF/B-6中的标准数据(H,  $^3\text{He}$ ,  $^6\text{Li}$ ,  $^{10}\text{B}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{197}\text{Au}$ ,  $^{235}\text{U}$ )是国际公认通用的, 是核数据测量、评价的基础。但这些数据是1987年评价的, 距今已经13年了, 这期间有了许多新的重要测量数据, 原有的标准已过时, 需要综合全面地重新评价。为此, NEA WPEC 已经建立了一个工作组<sup>[10]</sup>, 其工作内容包括实验数据的收集评价, 建立实验测量数据库,  $R$  矩阵计算( $^6\text{Li}$ ,  $^{10}\text{B}$ )及推广的最小二乘同时评价。将要评价的截面包括  $\text{H}(n, n)$ ,  $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ ,  $^{10}\text{B}(n, \alpha_1)$ ,  $\text{Au}(n, \gamma)$ ,  $^{235}\text{U}(n, f)$  和  $^{238}\text{U}(n, f)$  等反应( $^3\text{He}(n, p)$ 及  $\text{C}(n, n)$ 新的实验数据很少, 不包括在内)。实验数据的收集已在进行, 有许多新完成的数据, 但有些还在进行, 评价至少要3—4年才能完成。与此同时, IAEA 正在着手建立一个 CRP<sup>[1]</sup>, 解决轻核标准的协方差问题。ENDF/B-6 标准数据的评价, 特别  $R$  矩阵的计算给出的误差太小, 因而, 美国评价工作组标准分委员会给出了一组扩大了误差, 其数值是假定利用现代最好的技术进行标准截面的测量, 将有约2/3的结果落在所给的误差范围内, 这只是一个假设, 只是一个半定量的估计。CRP 的任务是比对  $R$  矩阵的计算, 研究误差的传递, 严格地、定量地给出轻核标准截面的协方差矩阵。CRP 将于2002年开始, 要3—4年才能完成。

### 3.3 中高能数据

由于加速器驱动系统(ADS)的需要, 近几年来中高能数据有了很大发展, 许多国家都建立了专用中高能数据库, 如美国的 LA150、欧洲的 NRG/CEA, 日本的 JENDL/HE、俄罗斯的 IPPE/FZK、IPPE/KTH。这些库的共同特点是:  $n$  和  $p$  入射, 上限到150(50) MeV, 下限为20 MeV(20 MeV 以

下利用已有的数据), ENDF/B-6格式。在此基础上 NEA WPEC 先后成立了两个工作组<sup>[11]</sup>, 第一个是“中能核数据的评价”, 研究了中能核数据评价计算方法, 收集、编纂形成中能核数据库, 并进行了检查。第二个是“中能评价核数据库的处理和检验”, 用 NJOY 把评价库的微观数据处理成 MCNP 工作库, 并用 MCNPX 进行计算, 与日本的宏观测量数据(68 MeV 中子打到不同厚度的 Fe 及其它材料的板上, 探测不同位置的泄漏谱)进行比较。结果表明 LA150, NRG/CEA(ECN/BRC)均与实验符合得很好(图2)。图中纵坐标单位中的  $L_e$ (勒)是对数能量损失(在慢化过程中, 中子起始能量和中子能量的自然对数比)。

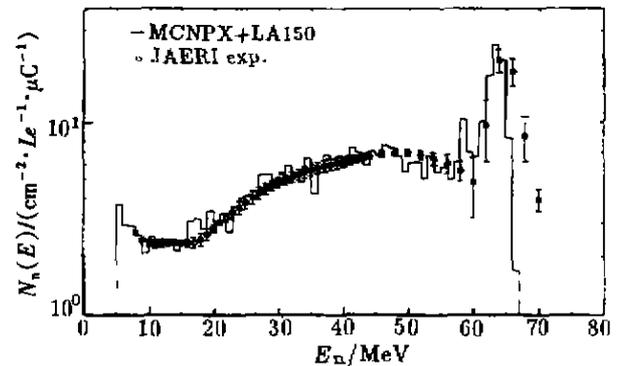


图2 中能核数据的检验(68 MeV 中子, 40 cmFe, MCNPX + LA150)<sup>[11]</sup>

### 3.4 专用库

为了满足某一领域的特殊需要, 在发展通用库的同时, 以通用库作基础, 同时补充、改进一些特殊需要的数据, 建立各种专用数据库, 如日本 JENDL<sup>[4]</sup> 的聚变数据库 JFF96(1998年发行, 下同)、钢系核数据库(2001)、剂量数据库 JENDL-D99(1999)、活化截面数据库 JENDL-A96(1996)、高能数据库(2000)、KERMA 因子数据库(2000)、光核反应数据库(2000), 及欧洲 JEF<sup>[5]</sup> 的聚变数据库 EFF2.4(1999)、高能数据库(2001/2002)、衰变数据库(2001/2002)、裂变产额库(2001/2002)等。

### 3.5 模型理论计算程序和输入参数

为了建立评价核数据库, 相应地发展了核数据模型理论计算程序及输入参数库, 如美国的 GNASH, TNG, MCGNASH, 欧洲的 JALYS, 日本的 DSD 等。在此基础上, NEA WPEC 曾组织了

核模型程序比对、检验工作组, 并且于1999年又建立了一个核模型程序<sup>[12]</sup>工作组, 其目标在于研究建立一个国际上通用的、功能强的、模块化的核反应模型程序, 用于核数据评价和理论研究。这个程序将类似于群常数加工制作程序 NJOY。该组已经取得了不少进展。与此同时, IAEA 还组织了核模型计算输入参数库(RIPL)的 CRP<sup>[6]</sup>, 现在第一阶段已经完成, 建立了国际的 RIPL, 正在进行第二阶段, 对其进行检验和改进, 产生一个检验过的国际标准模型计算输入参数库, 发展相应的计算程序与与国际通用核模型计算程序的接口程序。该 CRP 从1998年开始, 预计2001年结束。上述 NEA WPEC 核模型工作组和 IAEA 标准模型计算输入参数库的 CRP 的工作完成以后, 可望国际上将有

一个通用的核模型计算程序和国际标准的核模型计算输入参数库。

### 3.6 网上在线检索服务和光盘<sup>[6]</sup>

最近几年, 国际核数据库在技术上最重要的发展是网上在线检索服务, IAEA 核数据科统计数字充分说明了这一点(表2)。可以看出, 1999年, 在线检索已占总数的94%。离线检索, 包括文件资料的出版物、数据软盘、磁带及光盘等, 虽然略有增加, 但仅占不足6%。在线检索包括 Telnet 和 Web, 后者增加的尤为迅速。现在5个评价中子数据库及其有关资料均可从网上直接检索(CENDL-2.1和 BROND-2可由 NDS 的网址检索)。

为了解决拉丁美洲地区上网检索速度慢, 提高

表2 IAEA/NDS 核数据检索、存取按年统计

介质类型	年				
	1995	1996	1997	1998	1999
离线检索 <sup>1)</sup>	1 556	786	1 846	1 995	2 290
在线检索(网络传输)	4 462	5 688	7 350	2 700	2 180
在线检索(网页) <sup>2)</sup>			40	4 964	9 070
网页查看下载 <sup>3)</sup>			40	18 474	26 195

1) 包括出版物、数据软盘、数据光盘等; 2) 包括 ENDF, EXFOR, CINDA, NUDAT 等;

3) 包括中子热俘获截面、程序、快报、报告、FENDL, IRDF90-NMF90, MIRD 等。

核数据服务的质量, IAEA/NDS 已经在巴西建立了一个 NDS 的镜像站点(Mirror Site 或 Mirror Library), 现已正常运转。NDS 正在考虑在亚洲建立类似的站点, 中国在这方面有许多有利条件, 正在争取, 如能成功, 将对我们的计算机条件、数据库管理和在线检索均会有很大改善。

国际核数据在技术上发展的另一个重要特点是以光盘提供数据。现在一些重要数据, 例如美国的 ENDF/B-6、日本的 JENDL-3.2、中国的 CENDL-2.1、国际聚变核数据库 FENDL-2.0、国际实验中子数据库 EXFOR 和国际中子数据计算机索引 CINDA 等, 均可以光盘(CD-Rom)提供, 并带有相应的检索程序, 在微机上使用起来很方便。

## 4 国际评价中子核数据库的使用

原则上, 国际评价中子核数据库的数据可以不受限制地免费从网上检索取用。按照国际正式协议, 世界上4个核数据中心(美国的 NNDC、欧洲的

NDB、俄罗斯的 JDC 和 IAEA 的 NDS)分别负责美国和加拿大、西欧和日本、独联体、东欧和其他发展中国家核数据的收集和服务。我们属于 IAEA/NDS, 因而可以更多地、更方便地从 NDS 检索或索取所需的数据。

中国核数据中心已经与世界上其它数据中心, 如美国的 NNDC、日本的 NDC、俄罗斯的 JDC、欧洲的 NDB, 特别是 IAEA 的 NDS 建立了联系和合作, 互相交换信息、数据和资料, 参加有关的国际会议和合作。上述5个评价中子核数据库的数据均在数据中心的评价核数据库中, 原则上免费为国内用户提供服务, 根据用户的需要进行检索, 以 E-mail、软盘、光盘、打印等多种形式提供。

若现有数据不能满足需要, 如数据库中无, 需要进行新的评价, 或已有的数据需要加工处理(如由共振参数处理成点截面, 由微观数据制作成群常数等)或相关的计算等, 可向中心提出任务, 由中心进行安排。提出任务的渠道有两种, 一是通过上级主管部门, 作为任务下达; 二是双边订立合同。

## 参 考 文 献:

- [1] Lemmel Hans. Index of Nuclear Data Libraries available from the IAEA Nuclear Data Section[Z]. IAEA-NDS-7 Rev. 97/12, 1997. 12.
- [2] Nordborg Claes. NEA/SEN/NSC/WPEC(98)[C]. Report on 11th Meeting of the Working Party on International Nuclear Data Evaluation, Co-operation, BNL USA, April 19-21, 1999.
- [3] Dunford Charles. Cross Section Evaluation Working Group Highlights[C]. Report on 12th Meeting of the Working Party on International Nuclear Data Evaluation Co-operation, JARERI, Tokai, Japan, June 20-21, 2000.
- [4] Hasegawa Akira. Present Status of JENDL Project[C]. Report on 12th Meeting of the Working Party on International Nuclear Data Evaluation Co-operation, JARERI, Tokai, Japan, June 20-21, 2000.
- [5] Jacquemin Robert. The Status of the JEFF-3 Project[C]. Report on 12th Meeting of the Working Party on International Nuclear Data Evaluation Co-operation, JARERI, Tokai, Japan, June 20-21, 2000.
- [6] Liu Tingjin. Present status of CENDL-3[C]. Report on 12th Meeting of the Working Party on International Nuclear Data Evaluation Co-operation, JARERI, Tokai, Japan, June 20-21, 2000.
- [7] Ignatyuk Anatoly. Progress on BROND[C]. Report on 11th Meeting of the Working Party on International Nuclear Data Evaluation, Co-operation, BNL, USA, April 19-21, 1999.
- [8] Muir Doug. Report of the IAEA Nuclear Data Section to the International Nuclear Data Committee for the Period January-December 1999[Z]. INDC(NDS)-414, 2000.4.
- [9] Kawano Toshihiko. WPEC Subgroup Proposal[C]. Report on 12th Meeting of the Working Party on International Nuclear Data Evaluation Co-operation, JARERI, Tokai, Japan, June 20-21, 2000.
- [10] Carlson Alland. Status Report of Subgroup 7 to NEANSC WPEC[C]. Report on 12th Meeting of the Working Party on International Nuclear Data Evaluation Co-operation, JARERI, Tokai, Japan, June 20-21, 2000.
- [11] Koning Arjan. Processing and Validation of Intermediate Energy Evaluated Data Files[C]. Report on 12th Meeting of the Working Party on International Nuclear Data Evaluation Co-operation, JARERI, Tokai, Japan, June 20-21, 2000.
- [12] Chadwick Marck, Koning Arjin. Status Report for NEA/WPEC Nuclear Model Code Activity[C]. Report on 12th Meeting of the Working Party on International Nuclear Data Evaluation Co-operation, JARERI, Tokai, Japan, June 20-21, 2000.

## International Evaluated Neutron Nuclear Data Libraries

LIU Ting-jin

(China Nuclear Data Center, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract:** The present status of the five major evaluated neutron nuclear data libraries in the world, i. e. ENDF/B-6(America), JENDL-3.2(Japan), JEF-2.2(Europe), CENDL-2.1(China), BROND-2(Russia) are introduced. The developing trend of the international neutron evaluated nuclear data library is discussed. How to get and use these data for the domestic users is also presented.

**Key words:** neutron data; nuclear data library; ENDF/B-6; JENDL-3.2; CENDL-2.1