

資料紹介(II)

世界最大にして最新の放射化断面積ライブラリー

The European Activation File: EAF-99 cross section library (UKAEA FUS 408)

(財) 高度情報科学技術研究機構

中島 豊

nakajima@cracker.tokai.jaeri.go.jp

放射化断面積ライブラリーEAF は核融合研究のために中性子による放射性生成物の生成量を計算するのに必要とされる断面積データを収録したライブラリーである。ここでは上記資料⁽¹⁾ の紹介というよりもむしろ上記資料を基に EAF-99 の紹介を主にして稿を進めることにする。

放射化断面積ライブラリーには不安定核の基底状態と個々のアイソマー状態を生成する断面積が別々に与えられている。それゆえ放射化断面積ライブラリーに収録されている断面積は汎用ライブラリー（例えば JENDL-3.2）に収録されている断面積と同じ部分と異なる部分とがある。生成核の基底状態が不安定で、かつアイソマー状態を持たないときは同一の断面積が収録されているが、アイソマー状態が存在するときは、両者は異なる。従って ENDF フォーマットでは汎用ライブラリーの断面積データは MF=3 に放射化断面積は MF=10 に収納することになっている。MF=3 では同一の反応に対しては一つの断面積しか収納出来ないが、MF=10 では反応の終状態を指定して同一の反応の断面積が何個でも収納出来るようにしてあるからである。但し EAF-99 ではこれとは異なる収納方法が採られている。

核融合用放射化断面積ライブラリーでは多数の不安定核の断面積が収録されている。これは天体での元素生成の r-process と同様に核融合実用炉では中性子束がべらぼうに高いので中性子反応で生成された不安定な反応生成核が崩壊しないうちに核反応が起こるからである。これらの断面積の評価は一朝一夕に出来るものではない。このレポートを読むとそのことが良く判る。EAF-99 には H から Fm までの 98 元素（短半減期の At と Fr を除く）、基底状態、第一と第二アイソマーを含む 766 の標的核にたいする 20MeV 以下で 10^{-8} b より大きい断面積を持つ反応が 10^{-5} eV ~ 20 MeV に対して全て収録されている。安定核を生成する反応は放射化断面積ではないが核変換断面積として EAF-99 に収録されている。またフォーマットも上述したように ENDF フォーマットとは異なり、第一アイソマーを生成する反応は $MT'=MT+300$ 、第二アイソマーを生成する反応は $MT''=MT+600$ として MF=3 に収納されている。大抵の既成の処理コードで処理できる

と思われるので、この変更はたいした障害にはならないと思われる。収録されているデータは 12,468 反応に上る。データ量は 118MB である。

このレポートには EAF-99 を作成するために用いられたデータソース、断面積計算コード、系統式、データ処理、妥当性の検証等が述べられている。また CD-ROM が付属しており、このレポートの text と EAF-99 含んでいる。Introduction に続いて Historical survey がある。それによると EAF は英国で 1980 年以前にはじめられた核融合のための放射化断面積ライブラリーに起源があることが判る。1980 年代の始めに ECN Petten(Netherlands)との協力が始まり、1985 年 Mann 達による放射化断面積ライブラリー-REAC の作成により大幅に反応数が増加した。ECN, UKAEA, Hanford の 3 極の協力により REAC のデータが取り入れられた。その後数々の追加・改善が加えられ現在のライブラリーが出来上がったことが判る。

SYMPAL-96²⁾と称するハンドリングツールがあり、評価済核データライブラリーや断面積計算値から EAF ライブラリーへの組み込みが容易に行えるようになっている。SYMPAL-96 は Master Data File と Master Parameter File を利用する。Master Data File には各種のデータベースから取り込んだ断面積データが収納されており、Master Parameter File には断面積の系統式、共鳴積分、断面積の実験値と誤差係数、分岐比の実験値及び経験による推定値、Q 値等が収納されている。

Table 1 Origin of data in EAF-99.

Data Source	Number of reactions
JEF-2.2	2058
EEF-2.4	482
ENDF/B-VI	57
JENDL-3.1,-3.2,-3.2/A	278
ADL-3-3/I	8398
JAERI	48
その他	1147
Total	12468

データソースは Table 1 に示すように多種多様であるが、最大のソースは ADL-3-3/I (ロシア核データセンター、Obninsk) である。但しその大部分は不安定核の断面積で計算値であると思われる。(本レポートでの ADL-3-3/I の取扱いも Calculations となっている。) JEF と EEF は西ヨーロッパで編集されたライブラリーであることを考えると JENDL はそれなりに健闘していると言える。(JAERI は何を指すか不明であるが日本の contribution であることは確かである。また JEF のスポンサーは NEA/DATA BANK であるから財政的には 2058 の 1/4 は日本の contribution であるとも言える。)

前 version EAF-97.1(January, 1998)以降次のような改良・改善がされた。(n, γ) 反応

断面積に関しては比較的新しい計算コードNGAMMA³⁾に基づく9核種の再評価と多数の核種に対して1/v領域でのC/E値に基づく再規格化を行い、Mengoni達⁴⁾の理論に基づく新しい評価値を採用(Be-10,C-14)した。EAF-99にはRa-211からFm-257にわたる98核種をターゲット核種とするデータを収納したアクチニドサブファイルがあり、これらのデータの大幅な修正と他のライブラリーのデータの採用により主な反応のデータを大きく改善した。実験値及び系統式による断面積と分岐比(基底状態とアイソマー状態を生成する断面積比)の再規格化はEAF-99全体にわたって2,401反応になり、前平衡過程断面積の追加(66)、EXFORデータによるエネルギー依存再規格化(26)、励起関数の部分的な修正(79)、内挿ルールの変更(353)、Q値と閾値の修正(1297)を合わせると4,989となり、全データの40%にのぼり、EAF-99は単なる評価値の寄せ集めではないことが判る。

EAF-99の妥当性の検討はEXFORデータや他の評価値との比較(外部検証)とSYMPAL-96内部にある実験データや系統式との無謬性を確かめる内部検証とを行っている。EAF-97全体の10%弱に当たる1,063反応のデータについてEXFORデータとの比較を行い、667反応は実験値との一致は良好でそのままEAF-99に採用した。96反応は修正を行って採用し、102反応は再規格化では修正が行えないのでそのまま採用したが将来修正する候補データとし、誤差を大きめに見積もっている。残りの198反応は"Revisions - proposed"となっているが、何も記述がなくどのような処理をしたのか不明である。EAFとしては初めて積分データの実験値との比較を行った。実験データとしてはFNSを始めとする5箇所のD-T中性子源及びその類似のスペクトルの中性子場で得られたものを用いた。これら各種のテストにより重要な反応の修正を行った。その例がグラフで示されている。14.5 MeV, 30 keV, 0.0253 eVでの(n, γ)反応、14.5 MeV, 0.0253 eVでの全反応、0.0253 eVでの(n, f)反応に対するC/E値の分布図が示されている。共鳴による影響がある30 keVでの(n, γ)反応のデータを除いて一致は大変よい。しかしこれらの比較は(n, γ)反応のthermal energyでは58%、30 keVでは31%、14.5 MeVでは6%、全ての反応の14.5 MeVでは11%に過ぎず、EAF-99のデータの16%が実験データと比較されていることに注意する必要がある。共鳴積分データによる検証も行われ大部分は満足のいくものであったが食い違いの大きい場合の断面積の修正はEAF-99では行わず将来の課題として残された。

系統式との比較による検証も行われ14.5 MeVでのC/S値(C:ライブラリーの値、S:系統式の値)が全反応及びそれぞれの反応に対して図示されている。66%のデータが比較され、ほぼ満足すべき状況であるが、(n, n' α)及び(n, n'p)反応では10倍以上の不一致がかなりある。これらはマイナーな反応であるのでこの不一致はそれほど問題ではない。実験データより広い範囲で比較が行われたことはそれだけ意義があるが、系統式にはそれなりの問題もある。

EAF-99には誤差ファイル（共分散ファイルではない）があり、相対誤差の自乗がファイルに収納されている。閾反応では 14 MeV で 572 反応について実験を基にした誤差データ情報があり、他のエネルギーで誤差情報がない場合は $\Delta \sigma = 3 \Delta \sigma_{\text{exp}}$ とし ENDF-6 フォーマットの MF=33 に 1 群データとして収納されている。(n, γ) と (n, f) 反応に対しては 3 群データとして同様に収納されている。実験データの無い場合は系統式や計算から推定した。誤差ファイルのフォーマットは Appendix 1 に示されている。

データフォーマットが Pointwise data 及び Groupwise data に対して説明されており、例がそれぞれ Appendix 2 と Appendix 3 に示されている。Pointwise data のフォーマットは ENDF とは若干違うので注意が必要である。Groupwise data のフォーマットについては筆者は知識を持ち合わせていないので特に変わったフォーマットが用いられているかどうか不明である。いずれにしろデータを利用するときは本レポートを参照して欲しい。

最後に結論が述べて有り、Appendix 1 ~ Appendix 4 がある。Appendix 1 ~ Appendix 3 は既に説明した。Appendix 4 には Index of EAF-99 reactions がこのレポートの半分の紙幅を費やして示されている。

参考文献

- 1) J-Ch. Sublet, J. Kopecky and R.A. Forrest, "The European Activation File: EAF-99 cross section library", *UKAEA FUS 408* (1998).
- 2) J.A. Simpson, J-Ch. Sublet and D. Nierop, "SYMPAL: User guide", *UKAEA FUS 356* (1997).
J.A. Simpson and J-Ch. Sublet, "SYMPAL: Utilities guide", *UKAEA FUS 357* (1997).
- 3) Shi Xiangjun, J. Kopecky and H. Gruppelaar, "Description of NGAMMA code and user manual", *ECN-BFA-FUS-90-05* (1990):
- 4) A. Mengoni, T. Otsuka and M. Ishihara, "Direct radiative capture of p-wave neutrons", *Phys. Rev.*, **C52**, 2334 (1995).