

会議のトピックス (III) 

「核融合への応用のための FENDL 放射化断面積
ライブラリの拡張と改良」に関する
IAEA 諮問会合について

日本原子力研究所中性子科学研究センター

核破碎中性子利用研究室

前川 藤夫

fujio@fnshp.tokai.jaeri.go.jp

1. はじめに

FENDL は国際原子力機関 (IAEA) が編纂を行っている核融合のための評価済み断面積ライブラリ (Fusion Evaluated Nuclear Data Library) であり、中性子輸送断面積、放射化断面積、ドシメトリ断面積等のサブファイルで構成されている。第2版である FENDL-2.0 は 1997 年 3 月に公開され、国際熱核融合実験炉 (ITER) の設計をはじめとして世界的に広く使われている。今回の諮問会合では FENDL 放射化断面積ファイル (FENDL/A-2.0) が主な議論の対象であったが、関連が深くかつ他に議論を行う機会のない、ドシメトリーファイル (FENDL/DS-2.0) および崩壊データファイル (FENDL/D-2.0) も本会合の対象とすることとした。本会合の目的は、これらのファイルに関する以下の4項目である。

- (a) データの検証結果及び応用例の紹介
- (b) 今後の改良及び拡張へのニーズの洗い出し
- (c) データ更新手続きの確立
- (d) インターネットアクセス、その他に関する議論

会合は 1999 年 6 月 22 日～24 日の3日間、ロシアのオブニスクで開催された。資料-1 に示したとおり、公式参加者は IAEA、英国、オランダ、ロシア、米国から各1名、それに筆者を加えた合計6名で、他にロシア核データセンターのメンバーを中心とする7名のロシア人オブザーバの参加があった。R. Forrest 氏を議長に、資料-2 に示したアジェンダに従って会合は進められた。

2. データの検証

2.1 原研 FNS 崩壊熱実験

はじめに原研 FNS の 14 MeV 中性子源を用いて行われた崩壊熱測定実験による放射化断面積データの検証結果について、筆者が発表を行った。この実験は 14 MeV 中性子で照射した 32 種の核融合炉関連材料について、冷却時間 1 分～400 日にわたり、全エネルギー吸収スペクトロメータにより崩壊熱を測定したものであり、7 秒から数年の半減期を持った放射性核種を生成する放射化反応断面積の検証が可能である。この実験結果に基づき、FENDL/A-2.0 の約 20 反応に対する断面積データを今後修正すべきであることを報告した。

また Forrest 氏は、同じ崩壊熱実験データを用い、FENDL/A-2.0 の約 130 反応に関するデータの検証結果を報告した。その結果、約 50% のデータは実験値と 10% 以内の範囲で、また約 15% のデータは 20% 以内の範囲で実験値と一致し、断面積データは妥当であることを示した。ただし、実験値と 20% 以上異なる結果を与える断面積データもあったため、FENDL/A-2.0 と多くのデータを共有している European Activation File (EAF-99) の約 30 反応を更新したことが報告された。

さらに筆者は、原研 FNS における新たな放射化積分実験について紹介した。この実験は元素の周期率表のほぼすべての元素について 14 MeV 中性子照射を行い、冷却時間 30 秒から数年にわたり誘導放射能を崩壊熱量として測定し、総合的な放射化実験データベースの構築を目指したものである。特に低放射化材料開発における不純物制御を行うにあたり、様々な不純物元素の放射化断面積を検証するのに必要な実験データベースとなることから、実験の実施が大いに推奨された。

2.2 BR-10 型高速炉による核融合炉材料照射実験

Blokhin 氏は、ロシアにおける BR-10 型高速炉による核融合炉材料照射実験を紹介した。バナジウム合金 (V-Ti-Cr) では、照射後数年の冷却期間をおけば、不純物からの放射能が支配的になることを示した。実際の D-T 燃焼核融合炉では、第一壁表面においてさえも 14 MeV 中性子よりも熱エネルギーから 10 MeV にわたる低エネルギー中性子成分が多く、14 MeV ピークを除けばそのスペクトルは高速炉スペクトルと類似している。このことから、今後この中性子場を用いた照射により低エネルギー中性子による (n,γ) 反応断面積データの検証が進展することが期待される。

2.3 カールスルーエ研究所における放射化積分実験

ドイツ・カールスルーエ研究所の d-Be 中性子源を用いた 2 種の核融合炉材料 (ステンレス鋼-316 および低放射化フェライト鋼 F82H) の放射化積分実験結果について、筆者

が報告を行った。主要誘導放射能を生成する反応断面積は妥当であるが、 $^{58}\text{Ni}(n,t)^{56}\text{Co}$ 、 $^{92}\text{Mo}(n,2n)^{91g}\text{Mo}$ の 2 反応については今後の修正が必要であることを示した。

2.4 クローピン・ラジウム研究所における放射化断面積測定

Filatenkov 氏は、ロシアのクローピン・ラジウム研究所において 13.4 MeV～14.9 MeV のエネルギー範囲における 116 の反応断面積および 16 反応の基底/準安定状態比を測定した結果について報告した。72 反応について実験結果を FENDL/A-2.0 の結果と比較した結果、10 反応について実験値と大きな隔たりがあることを指摘した。

2.5 断面積の系統性の比較

Manokhin 氏は、しきい反応断面積の系統性から FENDL/A-2.0 のデータを分析し、系統性と一致しない断面積データがいくつか存在することを指摘した。

3. FENDL/A-2.0 の応用

3.1 米国における新たな核融合ブランケット概念

米国の Cheng 氏から、蒸気圧と融点が共に低いリチウム/錫合金を液体壁として使用した核融合炉の概念に関する報告があった。これまで実験データや評価値が十分ではない錫 (Sn) に関して、今後実験データの蓄積および評価値の精度向上が必要であることが指摘された。

3.2 DCHAIN-SP コードでの利用

原研では核破砕中性子源施設における核破砕反応に伴う誘導放射能、崩壊熱等の評価のために DCHAIN-SP コードの開発を進めている。このコードは放射化断面積、崩壊データ、崩壊 γ 線スペクトルデータの 3 つのデータライブラリを使用するが、20 MeV 以下の中性子による誘導放射能生成断面積として FENDL/A-2.0 を全面的に採用した例について、筆者が紹介した。

4. 評価活動の現状

4.1 EAF-99

Forrest 氏より、EAF-4.1 を更新して EAF-99 を作成した旨の紹介があった。EAF-99 は 766 の標的核に対する 12,469 反応に対する断面積データを収納しているが、その中の約 1,000 反応のデータが更新された。しきい反応断面積の更新にあたっては、放射化積分実験の結果が積極的に取り入れられた。また、これまであまり重要視されていなかったが核融合炉設計では極めて重要である (n, γ) 反応断面積について、詳細に検討した結果

が Kopecky 氏により報告された。

4.2 RNAL

Herman 氏より、IAEA の核データセクションが編纂を行っている Reference Neutron Activation Library (RNAL) の紹介があった。RNAL はの原子力以外の分野、例えば宇宙応用等までを視野に入れた標準断面積ライブラリであり、256 反応を収納している。1999 年末に公開予定である。

4.3 RRDF-98

Pashchenko 氏から、Russian Reactor Dosimetry File (RRDF-98) の紹介があった。RRDF-98 には 22 反応が収納されており、これらの反応断面積は FENDL/A-2.0 および FENDL/DS-2.0 更新の候補データになりうるとの提案があった。これに対し筆者は、日本でも 67 反応を含む JENDL Dosimetry File (JENDL/D-99) を 1999 年に新たに作成したため、RRDF-98 と同様に更新の候補データになりうることを述べた。

4.4 その他

Zolotarev 氏から、ロシアにおけるガス生成断面積評価の現状の紹介があった。また、ロシアの Ignatyuk 氏は天体物理学で必要な、安定核から遠く離れた不安定核に対する断面積の必要性が指摘し、この分野における中長期的な今後の国際協力の必要性を訴えた。

5. 今後のデータ更新

5.1 FENDL/DS (ドシメトリーファイル)

現在の FENDL/DS-2.0 はおよそ 10 年前に作成された IRDF-90.2 のデータを採用している。そこで 4.3 節で述べたように、RRDF-98 および JENDL/D-99 の断面積データから置換すべきデータの候補を選定する。ロシアの Manokhin 氏が断面積の比較作業、Kocherov 氏がアンフォールディングまで含めた断面積のベンチマーク作業を行い、データの選定を行う。

5.2 FENDL/D (崩壊データファイル)

Forrest 氏が FENDL/D-2.0 と EAF-99 の崩壊データの比較を行う。その結果に基づき、データの更新を行う。

5.3 FENDL/A (放射化断面積ファイル)

以下の断面積データを更新するデータの候補とする。

- (a) FENDL/DS で置き換えられる予定の約 50 反応の断面積。
- (b) 放射化積分実験（原研 FNS 崩壊熱実験およびヨーロッパの 3 実験）の結果に基づき更新された EAF-99 の約 35 反応の断面積。
- (c) Filatenkov 氏により測定された約 15 反応の断面積を FENDL/A-2.0 およびロシアの放射化断面積ファイル ADL-3 と比較し、ADL-3 が優れている場合にはそのデータに置換する。
- (d) Ca から Mo までの元素の(n,np), (n,n α)反応でしきい値が(n,2n)反応よりも低い約 20 反応の断面積について Manokhin 氏が断面積の系統性との比較を行い、置換すべきデータを選定する。
- (e) Manokhin 氏による $^{106}\text{Cd}(n,np)$ および $^{106}\text{Cd}(n,2n)$ 反応に対する新たな評価値。

5.4 今後の日程

データ提供者は 2000 年 3 月までに断面積の比較図を IAEA/NDS に提出する。これらのデータは同年 6 月までに本会合の参加者に送付され、承認の手続きを受ける。そして 2001 年初めに FENDL/A-2.1 として、インターネットおよび CD-ROM を媒体として公開される予定である。

6. おわりに

FENDL/A-2.0 は今後、数年に 1 回の頻度で今回のような諮問会合を開催し、データの更新活動を持続していく予定である。今後の放射化断面積ライブラリの高精度化に対し、下記の事項を推進していくことが推奨された。

- (a) ロシア KRI の微分実験、原研 FNS の積分実験及びロシアの高速炉を用いた実験
- (b) 20 MeV 以上へのデータ拡張の可能性の探求
- (c) FENDL 放射化、ドシメトリー、輸送断面積間のデータの整合性への配慮
- (d) IAEA/核データセクションにおける断面積データ処理能力の可能性探求。

なお、本会合の詳細については IAEA から近日中にレポート (INDC(NDC)-406) が出版される予定であるので、さらに関心のある方はこのレポートを参照されたい。また FENDL-2.0 のデータやドキュメント類は現在、下記のホームページを通じて公開されているので、こちらも併せてご覧頂きたい。

<http://www-nds.iaea.or.at/fendl>



International Atomic Energy Agency

Consultants' Meeting on

**Extension and Improvement of the FENDL Activation Library
for Fusion Applications**

Obninsk, Russia
22 – 24 June 1999

LIST OF PARTICIPANTS

JAPAN

Fujio Maekawa
Intense Neutron Source Laboratory
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun
Ibaraki-ken 319-1195
Tel.: +81-29-282-6075
Fax: +81-29-282-5709
E-mail: fujio@fnshp.tokai.jaeri.go.jp

NETHERLANDS

Jura Kopecky
JUKO Research
Kalmanstraat 4
NL-1817 HX Alkmaar
Tel.: +31-72-5114054
E-mail: juko@wxs.nl

RUSSIA

Anatoly B. Pashchenko
Fiziko-Energeticheskij Institut
Bondarenko Sq. 1
249020 Obninsk, Kaluga Region
Tel.: +7-084-399-8982
Fax: +7-095-883-3112
E-mail: pashchen@ippe.rssi.ru

LOCAL OBSERVERS

A.I. Blokhin
A.V. Ignatyuk
N.T. Kulagin
V.N. Manokhin
K.I. Zolotarev

UNITED KINGDOM

Robin Forrest
Culham Laboratory
UK Atomic Energy Authority
Abingdon, Oxfordshire OX14 3DB
Tel.: +44-123-546-3586
Fax: +44-123-546-3435
E-mail: robin.forrest@ukaea.org.uk

UNITED STATES OF AMERICA

Edward T. Cheng
Suite 203
TSI Research Corp.
225 Stevens Avenue
Solana Beach, CA 92075
Tel.: +1-619-793-3567
Fax: +1-619-793-0569
E-mail: etcheng@cts.com

IAEA

Michal Herman
Nuclear Data Section
Wagramer Strasse 5
A-1400 Vienna
Tel.: +43-1-2600-21713
Fax: +43-1-26007
E-mail: herman@iaeand.iaea.or.at

OBSERVERS

RUSSIA

A.A. Filatenkov
N. Kocherov
V.G. Khlopin Radium Institut
194021 St. Petersburg



International Atomic Energy Agency
Consultants' Meeting on
**Extension and Improvement of the FENDL Activation Library
for Fusion Applications**

Obninsk, Russia
22 – 24 June 1999

AGENDA

Tuesday, 22 June

09:00 – 09:30 Opening Session

- Opening addresses
(Representative of FEI Obninsk; A. Pashchenko, FEI Obninsk;
M. Herman, IAEA Vienna)
- Election of Chairman
- Adoption of Agenda

09:30 – 12:30 Review of recent testing, validation and application of the FENDL/A-2.0

- *F. Maekawa*: Validation of FENDL/A-2.0 library through the FNS decay heat experiment
- *A. Filatenkov*: Comparison of results of systematic cross section measurement with the FENDL/A-2.0 library
- *F. Maekawa*: Validation of FENDL/A-2.0 library through the FZK d-Be neutron irradiation experiment
- *A. Blokhin*: Benchmark testing of FENDL/A-2.0 cross section data on the basis of BR-10 and SNEG-13 integral measurements with vanadium alloys
- *F. Maekawa*: Utilization of FENDL/A-2.0 library in DCHAIN-SP code system for spallation neutronics analyses
- *R. Forrest*: Fusion Decay Power: Validation of FISPACT and FENDL-2.0

12:30 – 14:00 Lunch Break

14:00 – 18:00 New developments and possible improvements of FENDL/A-2.0

- *A. Ignatyuk*: Future development of activation data libraries
- *R. Forrest*: The evolution of the EAF library following FENDL/A-2.0
- *J. Kopecky*: Improvements of (n,g) data in EAF-99
- *M. Herman*: Status of the Reference Neutron Activation Library (former IRDL)
- *V. Manokhin et al.*: Improvement of the threshold reaction cross sections on the basis of current systematics

- *K.I. Zolotarev*: Evaluation He-production cross section data for Zr-90, Zr-91, Zr-92, Zr-94, Zr-96 and Zr-nat
- *V. Manokhin* and *A. Pashchenko*: Evaluation of the Al-27(n,2n)Al-26g reaction cross sections

18:00 – 19:30 Welcome drink

Wednesday, 23 June

08:30 – 12:30 New developments and possible improvements of FENDL/A-2.0

- *E. Cheng*: Recent fusion blanket concepts and activation data needs in the U.S.
- *F. Maekawa*: Status of a new activation experiment at FNS for further improvements of FENDL/A-2.0 library
- *A. Pashchenko*: Candidate replacements to improve FENDL-2 Activation Library
 - Discussion of procedures for updating FENDL/A library
 - Collection of documented neutron spectra for fusion applications

12:30 – 14:00 Lunch Break

14:00 – 17:00 Discussion of updates

17:00 – 18:00 Review of the Web-access tools for FENDL, documentation, and other dissemination issues

19:00 Dinner-Party

Thursday, 24 June

08:30 – 12:30 Drafting of the meeting report

12:30 – 14:00 Lunch Break

14:00 – 16:00 Drafting of the meeting report (continued)

16:00 – 17:00 Concluding Session

- Adoption of the meeting report
- Final discussion

15:00 or 16:00 (if time available) Excursion: Sightseeing near Obninsk