

IAEA 協力研究計画 (CRP)

「IRDF (国際原子炉核融合ドシメトリファイル) の検証及び改良」 に関する第 1 回調整会議報告

京都大学原子炉実験所

八島 浩

yashima@rri.kyoto-u.ac.jp

日本原子力研究開発機構

核融合研究開発部門

核融合中性子工学研究 Gr

今野 力

konno.chikara@jaea.go.jp

1. はじめに

2013年7月1日から5日までウィーンのIAEA本部でIAEAのCRP(Coordinated Research Program、協力研究計画)「IRDF(International Reactor Dosimetry and Fusion File、国際原子炉核融合ドシメトリファイル)の検証及び改良」の第1回研究調整会議が開催された。IRDFは、これまでのIRDF-2002(International Reactor Dosimetry File、国際原子炉ドシメトリファイル)をフランス・カダラッシュで建設が進められているITER(International Thermonuclear Experimental Reactor、国際熱核融合実験炉)や計画段階のIFMIF(International Fusion Materials Irradiation Facility、国際核融合材料照射施設)のような核融合関連施設や加速器応用(加速器駆動システムや核破砕中性子源)にも対応できるように、上限エネルギーを20MeVから60MeV(核種によっては150MeVあるいは200MeV)まで拡張するとともに反応数も66から74に増やし、データも改訂したドシメトリファイルである。本CRPの主目的はこのIRDFの妥当性を種々のエネルギーの中性子場で検証し、必要があれば改良を行うことである。

本会議では、最初にIAEA核データセクションのヘッドであるForrest氏からの挨拶、参加者の自己紹介、本CRPの取りまとめであるIAEAのSimakov氏から本CRPの概要説明が行われた後、参加者が施設の紹介も含め自分の提案する研究を発表し、その後どのような様に研究を進めていくかの議論が行われた。参加者はオブザーバー、コンサルタント

も含め、日本 2 名（筆者 2 名）、欧州 8 名、ロシア 3 名、米国 4 名、南アフリカ 1 名、IAEA 5 名の 23 名であった。



参加者集合写真（1 列目、2 列目の左端が筆者）

2. 議論結果

IRDFD データは 10^{-5} eV から 60MeV（あるいは 60MeV 以上）まで幅広いエネルギーにわたるため、IRDFD データの検証には種々のエネルギーの中性子場での実験データが必要になる。そのため、本 CRP の参加者が研究対象としている中性子のエネルギーも原子炉、低エネルギー加速器、核融合、高エネルギー加速器等による中性子というように様々であった。IRDFD データではエネルギーが 60MeV まで拡張されたこともあり、高エネルギー加速器による高エネルギー中性子を用いた検証がメインになると考えていたが、 ^{252}Cf 中性子源による測定、共鳴積分データ等で問題のある IRDFD の反応断面積がまだまだあるようで、この分野を専門とする参加者が多数いたこともあいまって、会議の大半がこの議論に費やされた。以下、検証を行う中性子場毎に、会議で議論された内容について概要を記す（筆者 2 名のうち八島の専門は高エネルギー加速器での実験、今野の専門は核融合中性子工学であるため、これ以外の領域での議論の詳細については、<http://www-nds.iaea.org/IRDFDtest/> から、発表資料、サマリーをダウンロードして参照していただきたい）。

(1) ^{252}Cf Spontaneous Fission Reference Neutron Spectrum

^{252}Cf の中性子場は良くわかっているため、IRDFE データの検証に向いている。 $^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$ 、 $^{92}\text{Mo}(n,p)^{92m}\text{Nb}$ 、 $^{103}\text{Rh}(n,n')^{103m}\text{Rh}$ 、 $^{232}\text{Th}(n,f)$ 反応断面積はこれまでの実験データによる検証で問題が見つかっている。 ^{252}Cf の中性子場で、捕獲断面積、 $^6\text{Li}(n,t)$ 、 $^{10}\text{B}(n,\alpha)$ 、 $^{59}\text{Co}(n,3n)^{57}\text{Co}$ 、 $^{67}\text{Zn}(n,p)^{67}\text{Cu}$ 、 $^{89}\text{Y}(n,2n)^{88}\text{Y}$ 、 $^{115}\text{In}(n,2n)^{114m}\text{In}$ 、 $^{169}\text{Tm}(n,3n)^{167}\text{Tm}$ 、 $^{209}\text{Bi}(n,3n)^{207}\text{Bi}$ 反応の断面積測定は行われていない。このため、ヨーロッパで整備が進められている新たな ^{252}Cf 中性子源を用いてこれらの測定を行う。また、閾エネルギーが高い反応のために、米国で ^{252}Cf 中性子源の高エネルギーテイル (10~14MeV) の測定も試みる。

(2) Thermal cross sections and resonance integrals

本 CRP の前に、マックスウェル平均断面積や共鳴積分データを用いた IRDFE の検証はある程度行われているが、まだいくつか問題があることが指摘されている。Mughabghab の共鳴積分データとの比較は有益ではあるが、IRDFE 検証のためには他の共鳴パラメータデータセットとの比較が必要である。中性子放射化分析で使われる k_0 データベース (詳細は、<http://www.k0naa.org> 参照) は IRDFE の熱中性子断面積、共鳴積分の検証に有効であるので、 k_0 ユーザーズグループとコンタクトを取り、最新の k_0 データベースから導出した値と比較し、熱中性子断面積や共鳴積分データの精度向上を目指す。

(3) Lead slowing down spectrometer experiments

鉛減速スペクトロメータによる実験データは断面積評価に有用である。Grenoble や LANL 等で過去に行われた鉛減速実験データの中で IRDFE 検証に利用できるものが無いか調査を進める。

(4) 14 MeV: Status and Proposed Work

この中性子エネルギー領域での本調整研究計画の公式の主研究者は筆者の一人の今野のみであった。今野は、原子力機構 FNS 施設を用いた IRDFE 検証実験として、1)天然試料を用いた 14MeV 近傍エネルギー中性子による総合的な放射化断面積測定、2) DT 中性子入射グラファイト、酸化リチウム体系内での反応率測定の 2 つの実験を提案した。特に、2)の実験では、DT 中性子だけでなく、グラファイト、酸化リチウム体系内で減速した 14MeV よりも低いエネルギーの中性子による放射化断面積も総合的に評価できるため、他の参加者から非常に有効な実験であるので是非実施すべしとの賛同を得た。オブザーバーとして参加したイタリア、ドイツの研究者から、それぞれイタリア ENEA の DT 中性子源施設 FNG、ドレスデン工科大学の DT 中性子源施設で過去に測定した反応率データを、IRDFE で再解析するという提案があったが、参加者の関心は小さかった。また、遮蔽ベンチマーク実験データ集 SINBAD に入っている DT 中性子入射ベンチマーク実験

も IRDF の検証で使えるのではないかという提案が IAEA からあり、IAEA が中心になって検討することになった。

(5) Measurements in the ^{235}U fission spectrum

実験データはたくさんあるが、C/E の精度は必ずしも良くない。C/E の精度を向上させるために、IRDF-2002 の検証で使われた原子炉施設等での照射場の中性子スペクトルを MCNP で精度よく計算することになり、IRDF-2002 の検証で使われた日本の弥生炉のデータについて、その問い合わせ先を筆者の一人の今野が調べることになった（本稿を読まれた方で問い合わせ先をご存知の方はご一報いただきたくお願いします）。また、CEA の MASURUCA、EOLE、MENERVE 炉の実験データを解析する他に、新たにスロベニアの TRIGA 炉、CEA の CALIBAN 炉において新たな実験を行うことが提案された。LANL では、LANL の臨界装置での古い実験データの再評価が進められており、ICSBEP のデータもレビューしデータの更新が行われる。

(6) Accelerator Neutron Spectra

加速器による中性子照射場を用いて新たな実験データを提供する。期待されるデータは 30keV での MACS (The Maxwellian Averaged Cross Sections)、20~200MeV 領域における(n,xn)反応断面積等である。MACS は宇宙核物理の研究に必要なデータで Li(p,n)反応によるマックスウェル中性子場を用いて(n, γ)反応断面積の測定を行う。実験はイタリア国立核物理学研究所 (INFN) のレニャーロ国立研究所 (LNS) で行われる予定である。(n,xn)反応断面積は反応のしきいエネルギーを利用して高エネルギー中性子場のエネルギースペクトル測定に利用されている。Li(p,n), Be(p,n)準単色中性子場を用いて Au, Bi, Co, Tm, Fe の(n,xn)反応断面積の測定を行う。Li(p,n), Be(p,n)準単色中性子場は目的とするピーク中性子成分だけでなく低エネルギー中性子成分も含まれるので、2 角度による実験を行い低エネルギー中性子成分の寄与を補正しピーク中性子入射による(n,xn)反応断面積を求める。実験は大阪大学核物理研究センター (RCNP)、南アフリカ iThemba laboratory、チェコ科学アカデミー核物理研究所で行われる予定である。

(7) Evaluation and validation of the high threshold dosimetry reactions

20MeV 以上のエネルギー領域における(n,xn)反応断面積について既存のデータ及びこの CRP で得られたデータ(前述の(6)参照)について評価を行い、高エネルギー中性子場の測定に利用できるようにする。TALYS 計算と Bayesian GLUCS フィットを用いて Au 及び Co の(n,2n), (n,3n)反応断面積の評価を行う。

(8) Decay Data

半減期や γ 線の絶対強度といった Decay Data をチェックし最新のものにアップデートする。IRDF 中の 82 核種について Decay Data をまとめる。IRDF で必要となれば核種を追加する。

なお議事録は INDC(NDS)-0639 として出版される予定である。

3. おわりに

CRP の研究調整会議は全 3 回開催される予定で、2 回目は約 1 年半後に開催されそれぞれの中間報告を行い、3 回目は約 3 年後に開催され結果をまとめることになる。筆者の一人の八島は上述の 2.(6)の中の(n,xn)反応断面積測定として、RCNP において p-Li 準単色中性子場（陽子エネルギー 90, 140MeV）を用いて Bi、Co の(n,xn)反応断面積の測定を行い、また、もう一人の筆者の今野は、原子力機構 FNS 施設において、2.(4)に記載した 2 つの実験を行う予定である。良いデータを取得してこの CRP に貢献できればと考えている。

最後に、IAEA の大塚氏には CRP 参加前の手続きから会議中まで大変お世話になりました。この場を借りて御礼申し上げます。



参考 1 : 会議アジェンダ



First Research Coordination Meeting on

“Testing and Improving the International Reactor Dosimetry and Fusion File (IRDF)”

1 - 5 July 2013
IAEA Headquarters, Vienna, Austria

AGENDA

(presentation's time is approximate and includes questions and breaks)

Monday, 1 July 2013

09:00 - 09:30 **Registration**

09:30 - 10:30 **Opening session**

Welcome address - **Robin Forrest**, Section Head (NDS)

Administrative announcements - **Alexander Öchs** (NDS)

Self introductions of Participants - **all**

Election of Chairperson and Rapporteur - **all**

Approval of Agenda - **all**

Objectives of CRP - **Stanislav Simakov** (NDS)

Session 1: Presentations of Research Proposals

10:30 - 11:30 **Konstantin Zolotarev, IPPE** - “New evaluations for $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$, $^{58}\text{Ni}(n,2n)$ and $^{93}\text{Nb}(n,\gamma)^{94}\text{Nb}$ reactions”

11:30 - 12:30 **Vladimir Pronyaev, IPPE** - “High-energy (n,xn) dosimetry reactions”

12:30 - 14:00 *Lunch break*

14:00 - 15:00 **Larry Greenwood, PNNL** - “Integral Testing of IRDF Cross Sections and New STAYSL_PNNL Software Suite”

15:00 - 16:00 **Nikolay Kornilov, Ohio University** - “Standard neutron field for high energy (current status, how to increase an accuracy)”

16:00 - 17:00 **Rudolph Nchodu, iThemba LABS** - “Measurements of neutron cross sections at iThemba LABS”

17:00 - 18:00 **Milan Stefanik, NPI Řež** - “Experimental validation of IRDF cross-sections in quasi-monoenergetic neutron fluxes in 20-35 MeV energy range”

Coffee breaks as needed

Tuesday, 02 July 2013

Session 1: Presentations of Research Proposals

9:00 - 10:00 **Hiroshi Yashima, Kyoto University** - “Activation cross section measurements by high energy neutrons”

- 10:00 - 11:00 **Chikara Konno, JAEA** - "Research plan on IRDFF testing and improving at JAEA/FNS"
- 11:00 - 12:00 **Maurizio Angelone, FNG** - "Feasibility of IRDFF validation by benchmark/mock-up experiments performed at the 14 MeV Frascati Neutron Generator"
- 12:00 - 13:00 **Frank Wissmann, PTB** - "Neutron Metrology at PTB"
- 13:00 - 14:00 *Lunch break*
- 14:00 - 15:00 **Pierfrancesco Mastinu, INFN** - "LENOS and BELINA facilities for measuring Maxwellian averaged cross section"
- 16:00 - 17:00 **Andrej Trkov, JSI** - "Validation of the Dosimetry Cross Sections by Integral Experiments"
- 17:00 - 18:00 **Skip Kahler, LANL** - "LANL Contribution to Testing and Improving the IAEA International Dosimetry Library for Fission and Fusion"
- 17:00 - 18:00 **Patrick Griffin, SNL** - "Use of Neutron Benchmark Fields for the Validation of Dosimetry Cross Sections"

Coffee breaks as needed

Wednesday, 03 July 2013

- 9:00 - 10:00 **Christophe Destouches, Cadarache** - "Proposed CEA contribution to the CRP IRDFF1.0 Experimental Validation"
- 10:00 - 11:00 **Axel Klix, KIT** - "The D-T neutron generator laboratory of TU Dresden"
- 11:00 - 12:00 **Valery Chechev, Radium Institute** - "Problem of improving IRDFF Decay Library: list of radionuclides, status of the available evaluated decay data, needs for new (updated) evaluations."

13:00 - 14:00 *Lunch break*

14:00 - 17:00 **Session 2: Discussion of expected outputs and research coordination**

Coffee breaks as needed

18:00 - **Hospitality event: Visit to "Zur Alten Kaisermühle"**
(<http://www.kaisermuehle.at/>)

Thursday, 04 July 2013

9:00 - 10:00 **Arjan Plompen, IRMM** - "The IRMM contribution to the IRDFF CRP"

09:00 - 12:30 **Session 2: Discussion of expected outputs and research coordination**

12:30 - 14:00 *Lunch break*

14:00 - 18:00 **Session 2: Drafting of the Summary Report of the Meeting**

Coffee breaks as needed

Friday, 05 July 2013

09:00 - 12:30 **Session 2: Review of the Meeting Summary Report**

16:00 **Closing of the Meeting**

参考2：参加者リスト



**First Research Coordination Meeting on
Testing and Improving
the International Reactor Dosimetry and Fusion File (IRDF)
1 – 5 July 2013, Vienna, Austria**

LIST OF PARTICIPANTS

CZECH REPUBLIC	
Mr. Milan STEFANIK	Nuclear Research Institute Řež
FRANCE	
Mr Cristophe DESTOUCHES	CEA – Centre d’etudes nucleaires de Cadarache
GERMANY	
Mr Axel KLIX	Institute for Neutron Physics and Reactor Technology Karlsruhe Institute of Technology
Mr Frank WISSMANN	Physikalisch Technische Bundesanstalt
ITALY	
Mr Maurizio ANGELONE	Division of Fusion, Centro Ricerche Energia-Frascati, ENEA
Mr Pierfrancesco MASTINU	Italian Physical Society, INFN, Laboratorio Nazionale di Legnaro Viale dell’ Universita
JAPAN	
Mr Chikara KONNO	Japan Atomic energy Agency
Mr Hiroshi YASHIMA	Kyoto University, Research Reactor Institute
RUSSIAN FEDERATION	
Mr Valery CHECHEV	Khlopin Radium Institute
SLOVENIA	
Mr Andrej TRKOV	Jožef Stefan Institute
SOUTH AFRICA	
Mr Rudolph NCHODU	iThemba Laboratory for Accelerator-based Sc.

UNITED STATES OF AMERICA	
Mr Lawrence GREENWOOD	Pacific Northwest Laboratory
Mr Albert C. III KAHLER	Los Alamos National Laboratory, Nuclear Physics Group
Mr Nikolay KORNILOV	Ohio University, Department of Physics and Astronomy John E. Edwards Accelerator Laboratory
CONSULTANTS	
Mr Konstantin ZOLOTAREV	Institute for Physics and Power Engineering
Mr Vladimir PRONYAEV	Institute for Physics and Power Engineering
Mr Patrick GRIFFIN	Sandia National Laboratories
INTERNATIONAL ORGANISATION	
Mr. Arjan PLOMPEN	EC-JRC-IRMM
IAEA	
Mr Stanislav SIMAKOV (CRP Officer)	Head of the Nuclear Data Services Unit, Nuclear Data Section Division of Physical and Chemical Sciences
Mr Roberto CAPOTE NOY (CRP alternative Officer)	Head of the Nuclear Data Development Unit, Nuclear Data Section Division of Physical and Chemical Sciences
Mr Robin FORREST	Head of the Nuclear Data Section Division of Physical and Chemical Sciences
Mr Naohiko OTSUKA	Nuclear Data Services Unit, Nuclear Data Section Division of Physical and Chemical Sciences
Ms Valentina SEMKOVA	Nuclear Data Services Unit, Nuclear Data Section Division of Physical and Chemical Sciences