

NEANDC/NEACRP Specialist Meeting on Neutron  
Data of Structural Materials for Fast Reactors

の報告

動 燃 大 竹 巖  
原 研 浅 見 哲 夫

会議は1977年12月5日～8日の4日間、ベルギーのゲールにあるCentral Bureau for Nuclear Measurementsで開催された。この会議には私共2人がシグマ委員会の推薦により出席し、最近完成した日本独自の評価済データファイルJENDL-1に関する発表を行い、討議に参加した。大竹がJENDL-1の構造材核種データについてのベンチマークテストの結果を、浅見がJENDL-1のCr, Fe, Niの中性子データについて報告した。以下の文は、両人が重複しないように分担して執筆したのをまとめたものであるが、調整する時間がなかったので担当箇所を明示して並べるにとどめた。したがって重複・欠如もあると思うがご寛恕をお願いする。

1. 会議の概要(浅見)

同名の第1回の会合が1973年に西独のカルスルーエ研究所で開かれ、出席者はヨーロッパ諸国からだけで日本からは論文のみで出席はなかった。今回は米国、オーストラリア、日本を加え、11カ国および3機関(ユラトム, IAEA, OECD)から約40名の専門家が出席した。日本人としては我々2人の他にNAIGからカルスルーエへ留学中の吉田正氏, IAEAのNDSの岡本浩一氏が参加した。

会議の目的は、高速炉の構造材として重要なCr, Fe, Ni等に関する高速中性子データの最近の測定や評価の結果、これらの積分実験やベンチマーク・テストの結果の発表を行い、これらの結果を核物理、核データ、炉物理の観点から討議して問題点を洗いとともに、将来への研究へのrecommendationを作成することであった。とくに、核データとしては中性子捕獲、 $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$ ,  $(n, n')$  反応がとり挙げられた。対象核種は上記のもの以外にTi, Moに関するものもいくつかあった。また、核融合炉の構造材の観点から論じているものもあった。発表された論文は30数件で、第1表にそのリストおよびパラレル・セッションの概要を示した。

会議のchairmanはカルスルーエのFröhner氏で、おおよそ次のような次第で論文発表、討議が進められた。

第1日：論文発表・討論（セッションIA, IB, IC）

第2日：論文発表・討論（セッションIIA, IIB）

第3日及び第4日の午前：パラレル・セッションでの討議および recommendation の作成

第4日の午後：パラレル・セッション毎グループの recommendation の全体討議,  
chairman の conclusion remark

パラレル・セッションは、Aグループ（積分実験及びベンチマーク実験）に大竹が、Bグループ（微分データ：capture, scattering transmission）に浅見が参加した。Cグループでは  $(n, \alpha)$ ,  $(n, p)$ ,  $(n, n')$  などの threshold reaction についての微分データが討議された。

第 1 表

PRESENTED PAPERS AND PARALLEL SESSIONS

SESSION IA

Chairman : I. Otake

Needs of nuclear data of structural materials for fast reactors.

A. Filip, J.P. Trapp, D. Calamand, L. Costa, J.P. Chaudat, presented by  
M. Hammer (CEA Cadarache)

Integral experiments on structural materials carried out in the frame of  
CEA/CNEN cooperation.

V. Benzi (CNEN Bologna)

Measurements and calculations of integral capture cross-sections of  
structural materials in fast reactor spectra.

S. Seth, G. Brunson, K. Gnür, M. Jermann, C. McCombie, R. Richmond,  
U. Schmocker. (Swiss Federal Institute, Würenlingen)

Tests of some FD5 activation cross-sections by Zebra irradiations.

M.I. Murphy, D.W. Sweet, W.H. Taylor.

Paper presented by A.T.D. Butland (UKAEA Winfrith)

Semi-integral structural material transmission experiment at the BRI reactor.

Gerard S. De Leeuw (CEN/SCK Mol)

Benchmark tests of JENDL-1 for structural materials.

I. Otake (INC Tokyo)

第1表(続き)

SESSION IB

Chairman : E. Fort

Structural material data evaluation for JENDF-1.

T. Asami, Y. Kikuchi, T. Nakagawa, S. Igarasi (JAERI, Tokai-Mura)

Evaluation of keV resonance data for Cr, Fe, Ni.

F. Fröhner (KfK, Karlsruhe)

Comments about resonance parameters of Fe below 650 keV :  
old evaluations, and recent experimental data.

P. Ribon (CEA Saclay)

Evaluation of natural molybdenum between 5 keV and 5 MeV.

E. Fort (CEA Cadarache)

Evaluations and adjustment of radiative capture cross sections of  
natural Mo and the stable Mo isotopes.

H. Gruppelaar, J.W.M. Dekker (ECN Petten)

Evaluation of the capture cross section of natural Ti from  $10^{-5}$  eV to  
 $20 \cdot 10^6$  eV.

G. Simon, O. Bersillon, G. Mosinski, C. Philis, J. Trochon, N. Verges  
(CEA Bruyères-le-Châtel)

Evaluation of the (n,p) cross sections of natural Ti and its isotopes  
from thresholds to 20 MeV.

O. Bersillon, C. Philis. Paper presented by G. Simon (CEA Bruyères-le-  
Châtel).

第1表(続き)

SESSION IC

Chairman S.M. Qaim

Status report about some activation, hydrogen and helium producing cross sections of structural materials.

A. Paulsen (CBNM Geel)

Importance and status of (n,a)-cross sections for a reliable prediction of radiation damage in stainless steel.

B. Goel (Kfk Karlsruhe)

Experimental studies of (n,xp), (n,xd) and (n,xa) cross sections, angular distributions and spectra with a magnetic quadrupole spectrometer.

R.C. Haight and S.M. Grimes (LLL, Livermore)

Measurement and systematics of fast neutron induced hydrogen and helium producing reaction cross sections of FRT-related structural materials.

S.M. Qaim, G. Stöcklin (KFA Jülich)

SESSION IIA

Chairman F.G. Perey

Mechanisms for radiative capture in medium-mass nuclei.

J.E. Lynn (AERE Harwell)

Energy-averaged cross sections of fast-reactor structural materials.

A.B. Smith, R. McKnight and D. Smith (ANL)

s-wave resonance parameters in the structural materials.

B.J. Allen and A.R. de L. Musgrove (AAEC, Lucas Heights)

Neutron sensitivity of capture gamma ray detectors.

B.J. Allen, A.R. de L. Musgrove (AAEC, Lucas Heights) R.L. Macklin (ORNL) and R.R. Winters (Denison University)

第1表 (続き)

Neutron capture cross section of  $^{57}\text{Fe}$

B.J. Allen, A.R. de L. Musgrove (AAEC, Lucas Heights) R. Taylor  
(James Cook University) and R.L. Macklin (ORNL)

A complete set of experiments for Fe and their analysis.

F.G. Perey (ORNL).

Capture cross section measurements on natural Fe and Ni.

D.G. Gayther, M.C. Moxon, B.W. Thomas, B. Thom (AERE Harwell)

Structural material transmission measurements on the Harwell synchro-  
cyclotron.

G.D. James, D.B. Syme, P.H. Bowen, A.D. Gadd, and I.L. Watkins  
(AERE Harwell)

First results on capture, scattering and transmission cross sections of  
separated Fe isotopes obtained at GELINA.

F. Corvi, G. Rohr, H. Weigmann (CBNM Geel)

F. Poortmans, L. Mewissen, E. Cornelis (SCK/CEN Mol)

SESSION II B

Chairman J.E. Lynn

s-wave resonances and doorway states in  $^{56}\text{Fe}$  below 800 keV.

S. Cierjacks, I. Chouky (KfK Karlsruhe)

Capture and total cross section measurements on  $^{58}\text{Fe}$  below 325 keV.

Ly Di Hong, H. Beer, F. Käppeler (KfK Karlsruhe)

第1表(続き)

Refit : A least square fitting program for the resonance analysis of neutron transmission data.

M.C. Moxon, (AERE Harwell)

Capture cross section measurements on the separated isotopes of Ti.

B. Thom, D.B. Gayther, M.C. Moxon (AERE Harwell)

Resonance analysis of neutron transmission measurements on natural iron samples.

M.C. Moxon, J.B. Brisland (AERE Harwell)

Resonance analysis of Ni transmission data.

D.B. Syme, P.H. Bowen (AERE Harwell)

Resonance parameters, capture  $\gamma$ -rays and reaction mechanism in  $^{98,100}\text{Mo} + n$ .

H. Weigmann (CBNM Geel)

Coherent optical and statistical model calculations of neutron cross sections for Mo isotopes.

Ch. Lagrange (Bruyères-le-Châtel)

Parallel sessions of the Working Groups

A. : Integral and benchmark experiments.

Chairman: V. Benzi, local secretary: E. Wattecamp

B. : Differential data: capture, scattering and transmission.

Chairman: G.D. James, local secretary: F. Corvi.

C. : Differential data: (n, $\alpha$ ); (n,p); (n,n')

Chairman: A.B. Smith, local secretary: A. Paulsen

## 2. 会議の内容（大竹）

以下に順を追って会議の内容について述べる。

### (1) 積分実験およびベンチマーク実験と解析

このセッションは小生が座長をつとめた。まずフランスより「構造材核データの必要性」と題してCARNAVAL N（フランスの高速炉定数）の積分データによる構造材核断面積の調整作業の話および核データに対する要求精度の話があった。CARNAVAL Nの調整作業ではCr, Niへの自己遮蔽因子の導入, RB2およびZEBRA 8C, 9の積分実験の利用, SUPER PHENIX 相当の大型炉（均質および非均質炉心）の感度解析等が行なわれている。CARNAVAL IIIおよびIVの作成および感度解析より、結論として構造材核データに対する精度として次の様な要求を明示している。すなわち、Fe, Cr, Niの捕獲断面積については、それぞれ±5%, 12%, 8%, 非弾性および弾性散乱断面積については、それぞれ±5%, 15%, 15%, MnとMoの捕獲断面積については±10%の要求精度である。また遮蔽については、SUSの断面積の感度が高く、Feはこの値の65%程度を占めている。断面積に対する要求精度は放射線損傷については10~30%, ナトリウム放射化については30~50%としている。

続いてBenzi教授により、CEA/CNENの協力によって行なわれた積分実験の話があった。これはボローニアにあるRB-2熱および高速中性子結合装置での反応度および反応率の測定の話で試料はFe, Cr, Ni, SUS, Ti, Mn, Mo等を使用している。測定結果は、CARNAVAL-IIIおよびENDF/B-Vを用いた計算値と比較しているが、反応度ではCARNAVAL-IIIが系統的に低い値を示し、ENDF/B-Vは良く一致している。反応率すなわち捕獲率についてはCARNAVAL-IIIのTi, Mn, Moが過大評価、ENDF/B-VはMoが過大評価であるが、他は実測値との一致が良い結果を得ている。

次に、「高速炉スペクトルにおける構造材捕獲断面積の積分測定および解析」と題して、スイス（Federal Institute for Reactor Research）よりガス冷却高速炉を模擬した臨界実験装置PROTEUSに、Fe, SUS棒を相当数挿入してLMFBRの中性子スペクトルに近似させた炉心に於る実験を解析した話があった。解析はFGL-5（英国の炉定数）とENDF/B-Vとで行なわれているが、 $k_{\infty}$ ではFGL-5が過大評価、ENDF/B-Vが過小評価（4~9%  $\Delta k$ ）、捕獲反応率ではFGL-5の実測値との一致はSUS, Fe共に良いがENDF/B-Vは45%も過大評価の傾向があった。中性子スペクトルの測定値についても、ENDF/B-VよりFGL-5の方が一致が良かった。これ等の結果は先のボロ



ーニアの結果と首尾一貫して、このデータの解釈については後の討論でもかなりもめた。

英国からの発表はZEBRA集合体14におけるNa, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Mo, Ta等放射化測定値とFD-5の断面積による計算値による比較の話であった。放射化は炉心ZEBRA-14/1で5日間の日中連続運転で行なわれた。実測値と計算値との比較は $^{239}\text{Pu}$ および $^{238}\text{U}$ 核分裂反応との比で行なわれたが、 $^{55}\text{Mn}(n, 2n)^{54}\text{Mn}$ を除き、全て±30%の範囲で一致した。

モル研究所からは、BR-1の黒鉛サーマル・コラム内で行なわれたFe中の中性子透過実験と中性子スペクトルの測定に関する話があった。この実験はサーマル・コラム内の空孔に天然ウランのドライバ層を外側に、鉄の層を内側に持つ球型の物体を挿入し、鉄を透過して来る中性子スペクトルを球体の中央で測定するものである。この測定結果はKEDAKのold version等で解析されていたが、鉄の断面積評価にもっと利用すべきであるとの意見も出ていた。

小生が発表した論文は、JENDL-1を使ってCr, Fe, Ni等を積分ベンチマーク集合体で測定されているサンプル反応度を解析して比較した結果および同様にJENDL-1を使って京大炉にて行なわれた中性子透過実験を解析した結果を述べたものである。JENDL-1の核データの素性については幾つかの質問があった。

## (2) 核データの評価

西独からは、Cr, Fe, NiについてのKEDAKの新しい評価について報告があった。この新しいデータとKEDAK-3との差はかなり大きい。大型炉で1%  $\Delta k/k$ もの大きな反応度の差が表われると云うことであった。Feの共鳴パラメータの評価については、スピン指定が行なわれていないレベルは、p又はd波とし、これをレベル統計に基づいてモンテ・カルロ法で選択している。新しく評価したFeデータを用いてZEBRA-8Hおよび8Cのドブラー係数および反応度の計算をしている。

Feの共鳴パラメータ評価の話はRibon(フランス)からもあった。彼は自己遮蔽因子が平均捕獲断面積と同様に重要であり、d波の自己遮蔽因子への寄与が最も重要であることを指摘した。異なる共鳴データ・セットによる自己遮蔽因子間の差は系統的に10~20%ずれること、および $^{56}\text{Fe}$ の共鳴レベルについて統計的に発生させたエネルギー、中性子巾(650KeVまで81レベル; 既知, 125レベル; 仮定)を用いてレベル・パラメータを作成していること等も示した。

他にMoデータの評価の話がフランス、オランダよりあったが、いずれもENDF/B-IV

データを参照し改善したものであった。

(3) しきい反応データ

高速炉構造材の $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$  反応は、放射線損傷、ガス生成および誘導放射能を推定する観点から、高速炉設計にとっては重要なデータである。このセッションでは、これ等のデータの現状および系統性の評価について種々の報告があった。特にSmith (米国ANL) からは、構造材核種についてのしきい反応および中性子散乱データの現状と、高速炉核設計からの要求情報(彼はWRENDAを参考にしていた)との対比を行なった結果について話があったが、結論としては1 MeV以上の核データについては現状の測定値で何ら問題がないということであった。また、Crの $(n, p)$ データはまだ不充分であること、 $(n, \alpha)$ データは構造材中の主要な核種についても要求精度を充てていないことなども指摘していた。

(4) 共鳴データ測定

Cr, Fe, Ni, Ti, Mo等のアイソトープについて、中性子透過および捕獲反応の測定、共鳴パラメータの解析などが報告された。米国ORNLとオーストラリアのORELAを用いての中性子捕獲に関する一連の共同実験、ハーウェル45 MeV線型加速器およびシンクロサイクロトロンによる測定、西独カールスルーエの3 MeVバン・デ・グラフおよびシンクロサイクロトロンによる測定等が発表された。この内特にORELAのFeの共鳴領域の断面積測定の話は、データも豊富で、この核種に対するこの領域での核データは精度共に完了の域にまで達したかの様な感じをいだかせ印象的であった。他にLynn (英国ハーウェル)によるgiant dipole reaction, valence nucleonモデル等中性子捕獲反応に関する理論の紹介があった。この話では、valence nucleonモデルを用いてレベル密度を導出しCameron-Gilbertの半経験式と一致することが示された。これに対して捕獲断面積は統計モデルで良く記述出来るのに何故この様なVNモデルを持ち込なのかとか、VN成分がどの程度の割合で入っているのか等の質問があった。

(5) パラレル・セッションA

前述した様に、このセッションは3グループに分れての討論であったが、小生はAの「積分およびベンチマーク実験」グループに参加した。Aグループでは皆が共通に用いたENDF/B-Nによる解析結果が首尾一貫していないこと、炉心設計側からの核データに対する要求精度が各国間で一致しないこと等で討論に暇どり、結論の勧告書は発表間ぎわによりやくまとまると云った体であった。(日本に帰りしばらくしてからスイスより彼等の計算はまちがっていたのでデータを破棄してほしい旨の手紙がとどいた。)

まとまった結論としては、積分実験より ENDF/B-N を標準データとすれば、Cr, Fe, Ni の中央反応度係数および Fe の中性子捕獲率が過大評価であること、また天然 Mo 核および Mo 安定同位核の全てに対して ENDF/B-N, KEDAK-3, FGL-5, JENDL-1 の捕獲断面積が 15~20% 過大評価であることなどが云えることを指摘した。

核データに対する要求精度としては英国、フランス、西独の3ヶ国が合意して NEACRP へ提出したものがあつた。英国はこの案を提案して来たが、フランスは当時合意したにもかかわらず、この場では同意せず、当時  $1\sigma$  であつた値は現在全て  $3\sigma$  であると主張した。従つて要求精度についても、まとまった勧告は出来ず、個々の主張の羅列に終つた。今後この様な会議に出席する際には、要求精度に対する日本からの主張も持つていって、議論に入る必要性を感じた。

また中性子透過に対するベンチマーク実験 PFR 等の現在運転中の高速炉を用いての捕獲率測定等が行なわれることを望む声が多く、この要望も勧告書に盛られた。ドブラーについては Benzi も気になつたらしく、会議が終つた後バスの中で、もっと強い要請があるなら勧告を書き換るのでコメントを手紙にでも書いて送つてほしいと云つて来た。

(6) パラレル・セッション B (浅見)

このグループには本会議の出席者の約半数の 20 余名が参加した。その大半が中性子共鳴の実験物理屋であつたため、議論は中性子共鳴の測定と解析上の問題点を中心であつた。その議論の結果が勧告にまとめられたが、次にその主なものを挙げる。

- (a) 核データの評価に測定誤差の検討が重要になっているので実験者は実験誤差の値とその性質を明示すること。
- (b) 測定した中性子捕獲率を理論からの予測値と比較する必要がある。3 s の size resonance 領域での質量依存性を調べること。
- (c)  $\gamma$  線検出器における散乱中性子の感度の評価が中性子捕獲の測定で重要な誤差の源となっているので、新しい検出器ではこれをできるだけ小さくするように努めること、この感度は実験によつて決め、モンテ・カルロ法の計算で確認すること。
- (d) 中性子共鳴パラメータは、解析に用いる計算コードによつて異なる可能性があるため、D. B. Gayther 氏 (ハーウェル) の Fe についての中性子捕獲データを用いて各自のコードのベンチマーク・テストを行うこと。
- (e)  $^{56}\text{Fe}$  の 27 keV 共鳴パラメータにある異常を解決すること。
- (f) 天然の Mo および Mo アイソトープについての中性子捕獲・透過度のデータが不足してい

るので改善すること。

(g) 実験者と評価者とも次のエネルギー・バンドでの中性子捕獲断面積の平均値を引用すること。(1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 8.0)  $\times 10^n$  eV

また  $^{56}\text{Fe}$  の 1.15 keV 中性子共鳴パラメータについて詳細な議論が行なわれた。これまでの測定データを列挙してその差異について討議がなされたが、このような馴染み深い共鳴にもまだ問題があることを知り、改めて測定のむづかしさを感じた。

米国の代表から近く公開される ENDF/B-V では、中性子共鳴パラメータが Adler-Adler 形式で整理されていると紹介があったところ、多くの出席者から反論があり、データ・ファイルでは単一レベルの Breit-Wigner 形式がよいとする意見が多かった。

### 3. 会議の印象(大竹)

最後にこの会合についての印象を述べておく。高速炉構造材の核データについて、各国がかなり熱心に測定、解析をやり始めたことはこの会議でも感じたが、ひるがえって考えれば、重い核の問題からようやく軽中重核の問題へと核種も変わり、核データに対する要求精度も一段ときびきびかっていることが背景にある。核データに対する要求も、偏狭な範囲からその応用面を考慮して拡大化した範囲から発生し始めている。

この会合では炉物理家はアウト・サイダーでないのかと懸念したが、会合の最後に Froehner によって、この様な炉物理と核データの専門家の接点となる会合が今後も引続いて行なわれることを望むとの意見が述べられた様に、会合中では各所に両者の意見交換があった。今後は、炉物理家も意を強くしてこの様な会合に積極的に出席していただきたい。

JENDL-1 については、この会合でもしばしば名前だけは引用され (F.P 核種はデータも利用されてはいたが) 知られ始めて来た様に思うが内容の評価については無論これからであろう。ENDF/B-N 等は一般に良く利用されているため、この会合でもしばしば槍玉にあげられていた。ORNL の F.Perey は、この種のデータ・ファイルは (KEDAK, UKNDL, JENDL もそうであろうが) 出来てから次の version が出る迄に通常 2~3 年かかり、わるいと分かっていてもどうしようも無いと苦しまぎれの弁明をしていた。

外国人 (特に肌の白い人達) を親切にもてなすのは日本人だけかと思ったが、CBNM では、パーティーへの招待、夜のアントワープの町見物、毎昼近くの国際小学校 (ユーラトムで働いている人達の子が通っている) の食堂でたべた豪華な昼食、セント? の聖誕日かで F.Perey 扮する聖人の突然の出現の演出とクッキー支給等手を変え品を変えて我々をもてなしてくれた。これ等も会合と共になつかしき思い出である。