核断面積および技術に関するワシントン会議

山室信弘*, 梶山一典**, 浅見明**

(1975年 6月16日 受理)

Washington Conference on Nuclear Cross Sections and Technology

By Nobuhiro YAMAMURO, Kazusuke SUGIYAMA and Akira ASAMI

The conference on "Nuclear Cross Sections and Technology", Washington, 3 to 7 March 1975, is briefly reported, with particular reference to the aspect of cross-section measurements. More than 200 papers were presented to the Conference, attended by about 350 participants, one quarter of whom came from abroad.

The major subjects of the Conference included microscopic cross section measurements and applications of cross section data to reactor engineering. In respect of the first-mentioned subject, sessions were held on such subjects as instruments and techniques, cross sections and flux standards, evaluation and calculation of cross sections, cross section measurements on fissionable and non-fissionable isotopes. A brief account is also given on the last-mentioned subject of reactor engineering applications.

KEYWORDS: *conferences, cross sections, Washington, measuring methods, uses, measuring instruments*

I. ま え が き

1966年の第1回開催以来ワシントン会議の名で親しまれてきた Conference on Neutron Cross Sections and Technology は、今回 Nuclear Cross Sections and Technology とその名称を改めて核データの広い分野への応用を意図したものとなったが、発表された研究報告は中性子関係のものが多く会議の内容に大きな変化はなかった。会議は Opening Session と Summary Session を除けば2会場で進められ、3月3日～7日の5日間、休みなく組まれた講演は招待講演を含めて200を超え、参加人員は約350人そのうち1/4が外国人と発表された。なお主催者は次のとおり。

主催者：アメリカ原子力学会、同物理学会、物理学・
応用物理学国際連会(IUPAP), N.B.S.,
アメリカ原子力委員会

(東工大・山室信弘)

する基礎的なもの(I), もう1つは断面積の応用に関するもの(II), とみることができる。各セッションの主題と論文数をあげる。

記 号	主 題	論文数
(I) BB)	装置と技術	23
CA)		
DB)	断面積と粒子束測定	17
EA)		
EB)	非分裂核種断面積の評価と計算	16
GB)	分裂核の断面積測定	25
HB)		
IB)	非分裂核の断面積測定	55
(II) AA)		
BA)	核分裂原子炉	9
CB)	ベンチマークと	
IA)	センシティブィー	14
DA)	アクチナイドの取扱い	7
FA)	炉物理, 輸送とセンシティブィー	23
FB)	核データの色々な応用	16
HA)	核融合	15

II. 会議の主なセッションと論文数

会議では2つのセッションがほぼ平行して行われた。この2つは大別すると、1つは断面積の測定に関

* 東京工業大学原子炉工学研究所(Res. Lab. Nucl. Reactor, Tokyo Inst. of Technol.)

** 東北大学工学部(Faculty of Eng., Tohoku Univ.)

** 日本原子力研究所(Japan At. Energy Res. Inst.)

専門分野の関係で、筆者らの出席したのは主に(1)のセッションの方である。また、会議では論文コピーは配布されず、個人的にいくつか入手した程度である。以下に各セッションを紹介するが、自然(I)に偏り、また資料が不十分であったり、誌面の都合で重要なもので紹介できないものもあるがご了承いただきたい。なお、各論文の概要はすべて *Bulletin of the American Physical Society*, February 1975, に掲載されている。(原研・浅見 明)

Ⅲ. 標準断面積と核データの応用

1. 標準断面積と核データの評価

“Cross Sections and Flux Standards”のセッションでの invited talk は、熱中性子エネルギーに対する分裂核同位元素の核パラメータ(σ , α , ν , $g\gamma$)の評価について B.R. Leonard の話があった後、1965, 1969年に引き続いてIAEAで行われた ^{235}U , ^{239}Pu の 2,200 m/sec および 20°C Maxwellian 中性子に対する上記核パラメータの最善値を作る第3回作業の結果が Lemmel により報告された。それによると1969年のものよりかなり良いものとなって、一部 ENDF/B-IV に入れられているが、いくつかの点(Uの σ_T , η , ^{239}Pu の半減期など)についてまだ問題があることを指摘していた。絶対中性子束の決定法に関して、これまでの会議では survey talk が行われていたが、今回は Carlson(NBS)が最近の断面積測定における中性子束測定の2,3の例を挙げたのみであった。これは今回の会議が“Neutron Cross Sections—”ではなく“Nuclear Cross Sections—”となったせい、あるいは1972年末に Neutron Standard Reference Data of the IAEA Panel* が行われ、かなり議論されたためであろう。投稿論文として Cierjacks ら(Karlsruhe)による 1~30 MeV の中性子領域で中性子束絶対測定に用いる検出器の報告があった。これはポリプロピレンのラジエータと 85%Ar+15%N₂ ガス・シンチレーションカウンタの組合せで、検出感度は 1~6 MeV に対して $1\sim3\times10^{-4}$, 5~30 MeV に対して $2\sim4\times10^{-4}$, 測定精度は 5% とのことであるが、エネルギー応答の平坦さはあまり良いとはいえないようであった。これは TOF 測定用に用いるそうで、その時間応答が速く、また γ 線に不感である点を強調していた。中性子束測定のための標準断面積としての $^6\text{Li}(n, \alpha)$, $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ の測定結果の報告が 2,3 あったが、特に画期的なものがあったとは思われない。後で Carlson から個人的に聞いたところによると、最近 BIPM の Huynh が中心

になって、NBS や Geel で中性子束絶対測定に関して研究所間の相互比較プログラムが計画され、昨74年秋そのための打合せ会が開かれ、75年から実施する段階になった由で、日本からは電総研(寺西氏)がこれに参加することになるということであった。このような研究所間の比較のプロジェクトは、 ^{238}U の核分裂の絶対率および捕獲率の測定について、すでに Karlsruhe, Petten, Mol, NBS の間でなされているようで、この結果の一部が報告された。最近、R-matrix による断面積の解析が盛んに行われるようになってきたが、 ^7Li および ^{11}B 系に対しての結果が Hale(LA-SL)により報告された。これは $^6\text{Li}(n, \alpha)$ および $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ 反応断面積が中性子標準として用いられることが多いが約 80 keV 以上で $1/V$ からズレてくるので、1 MeV ぐらいまでの断面積値を理論的にも確定しようとの意図でなされたとのことである。解析に用いられたデータは、 ^6Li : $\sigma_T(n, n)$, (n, α) , $^4\text{He}(t, t)$ および微分断面積、 ^{10}B : $\sigma_T(n, n)$, (n, α_0) , (n, α_1) さらに $^7\text{Li}(\alpha, \alpha_0)$, (α, α_1) および微分断面積であったが、理論計算の結果と比較すべき実験値の精度が良くないことを強調していた。これと並行して行われた“Non-fissionable Materials of the Cross Section of the Evaluation および Calculation”のセッションでは 16 の論文が読まれ、日本からは五十嵐ら(原研)の“Fission Product Nuclear Data of the Evaluation”(浅見代読)と、山本ら(東北大・工)の“Fission Parameters of the Statistical Estimation”が発表された。KEDAK の最近の version KEDAK-3 の報告があったが、 ^{238}U の σ_{1n} の値が 1~8 MeV のあたりで version 2 とかなり違っており、これによって積分実験および KFK-INR の K_{eff} の値を説明するのにかなり改善されたようであった。

2. 核データの応用、核融合およびベンチマークテスト

“Various Application of Nuclear Data”のセッションでは Los Alamos の meson factory LAMPF accelerator が中性子遮蔽の実験値と計算値の比較のために、また医学利用の RI 製造に用いられている報告があり、筆者には興味のあるものであった。800 MeV 陽子を U ターゲットに衝撃して発生する中性子は、伴う γ 線強度が比較的低い点の有利さが強調されていた。このセッションでの招待論文は医学利用におけるものが主であった。

* Proc. Panel on Neutron Standard Reference Data (1974, IAEA, Vienna)

今回の会議では“Fusion”のセッションが設けられ、まず核融合炉設計に伴う核データの必要性に関して、Steiner が核融合炉燃料サイクル、トリチウム増殖パフォーマンス、核熱、照射損傷効果、誘導放射能、放射線遮蔽およびハイブリッド概念について詳しく報告した。燃料としては $D+T$ のみしか取り上げられなかったが、この反応でさえ数〜数100 keV の領域での断面積の十分な評価セットがないことを指摘した。トリチウム増殖に関して最近考えられている材料 Li , Li_2BeF_4 , LiF , Li_2O , Li_2C_2 , $LiAl$ および $Li_2Al_2O_4$ を取り上げ、cross section sensitivity についての計算結果から ${}^7Li(n, \alpha n')T$ および $Be(n, 2n)$ の断面積と2次中性子のエネルギー分布について、より精度の高い測定を要望した。核熱に関しては、ブランケット材料およびマグネット材料における1〜20 MeV での捕獲および非弾性による2次 γ 線のデータを要求した。炉構成物質の照射損傷に関して、中性子誘導原子転位変換の果たす役割を重視し、核分裂炉EBR-II 炉心と核融合炉の第1壁における中性子束および中性子エネルギーを比較し、両者とも約0.3 MeV以上のものが60%を占め、核融合炉ではその25%が10 MeV 以上であることからこの中性子領域での (n, α) , (n, p) 反応の断面積の評価が必要であることを述べた。ハイブリッド炉の設計においては、アクチナイドにおける14 MeV中性子による核反応、特に非弾性事象からの2次中性子のエネルギー・スペクトルを測定することが要請された。最後にアメリカにおける1980〜1985年の試験炉および1985〜1995年の実験動力炉の計画を遂行してゆくためには、CTR 材料試験のための強中性子源の開発と実現を強く望んだ。次いでGardnerがLivermoreで行なっている ${}^{40}Ca(n, \alpha)$, $Nb(n, \alpha)$, $(n, n\alpha)$, ${}^{181}Ta(n, x\gamma)$, ${}^{197}Au(n, \gamma)$, ${}^{27}Al(n, 2n)$ の励起関数の理論計算の結果を報告した。あまり印象に残っていないのは言葉のせいかもしれない。JülichのQaimは、 $(n, 2n)$, (n, p) , (n, α) 断面積についてのBödy, Csikai, Borman, Levkavskiiのcompilationsについて紹介し、Jülichで行なった放射化学法を用いた放射化法による (n, p) , (n, α) の膨大なデータを報告、これらの多くのデータについて非対称パラメータ $(N-Z)/A$ と $\sigma(n, 2n)$ および $\sigma(n, n'\gamma)$ の相関の系統性の結果を示すとともに、よりデータを増すために、現在以上に強い中性子源を得ることを望んでいた。

“Fusion Reactor”のセッションでは15篇の論文があり、CTR断面積のセンシティブティ解析に関するもの(2篇)は特に注目を引くとはいえない難いように思われ

た。McNallyは彼の従来の仕事の延長として $T+d$, $D+d$ 以外のCTR燃料反応として可能性のある数10の反応を示し、それらの反応についての詳しい実験が行われることを望んでいた。彼の示した反応があまりに数が多くてメモをとる暇もなかった。 $p+{}^6Li$, $d+{}^6Li$ および $p+{}^9Be$, $p+{}^{11}B$ についてのデータを要請していたが、 $d+{}^6Li$ についてはElwynら(ANL)が $E_d=0.2\sim0.9$ MeVについて調べており個人的には興味のあるものであった。

“Benchmarks and Sensitivities”のセッションではまずWeisbinがORNLにおける断面積センシティブティと不確定性解析コード(FORSS)を半径1,990 mの空気の球(中心に点線源)とその外側に平坦な応答の検出器を配置した系に適用した話があった。ENDF/B-IVを用いた結果では、データの不確定性による検出器における不確定性は21.2%、多群の変換行列のプロセスからは約6%の違いが生ずるとのことであった。ついで、CSEWGによってなされた熱中性子炉、高速炉、遮蔽、dosimetry および核分裂生成物についてのベンチマーク実験の結果がBohn(ANL)により報告された。熱中性子炉については、 ${}^{235}U$ の均質溶液(水素との原子比1,000〜2,000で変えた)球体について行われ、ENDF/B-IIIを用いた k_{eff} の結果は0.2〜0.3低く出たが、version IVを用いてと改善された。(Pu-U) O_2 系においてはZPR6-7, ZPPR-2, SEFORに対してETOX/IDX, MC²-1, MC²-2についてENDF/B-III およびIVを用いて行われている。遮蔽ベンチマークの例としてはORNLの“broomstick” typeのもので、長い小径のサンプルをコリメートされた中性子ビーム中において透過スペクトルをNE-213で測定し、全断面積の最小値の精度がチェックされた。鉄についての結果はENDF/B-IIIでは約10%高く、-IVでは約4%高く出るとのことであった。2次 γ 線についての結果も報告された。

そのほかの講演で筆者が聞き歩いたのは、装置と技術 $(n, n'\gamma)$ および γ 線生成に関するものであるが、誌面の都合で割愛させて頂く。(東北大・相山一典)

IV. 測定技術と断面積

1. 装置と技術

このセッションの論文を分類してみると、断面積測定装置の全般的な報告が最も多く(7編)、中性子検出器に関するもの(3)、新しい検出器や技法(3)、検出効率(2)、その他(2)となる。

装置の全般的報告のうち、主なものとしては、まず

Duke, TUNL の装置がある。これは Cyclo-Graaff と呼ぶ加速器で、6~15 MeV のエネルギー領域の散乱断面積を数 mb/st まで $\leq 5\%$ で測定することができる。California 大学と Los Alamos が共同で建設した装置は、Isochronous Cyclotron の陽子、重陽子ビームを使って、10~60 MeV の単色中性子ビームを得るものである。とくに、中性子による荷電粒子生成反応の研究を目指している。エネルギーがもっと低い領域では、原子炉の中性子に対し共鳴散乱体と共鳴吸収体とをうまく組み合わせることによって、高エネルギー中性子成分のバック・グラウンドと γ 線成分の非常に少ない単色の中性子ビームを得る方法が NBS により報告され注目された(V-1. 参照)。

中性子検出器あるいは新技法に関するものでは、まず大きな円筒状の NE 110 のシンチレータに適当な入射窓から中性子を入れ、250 keV ~ 1 MeV の範囲で 95% 以上の効率を持つ NBS の中性子検出器が発表された。同じく NBS の研究に、RCA 8850 シリーズの光電子増倍管の after-pulsing がある。非常に大きな信号の後に起るもので、これを抑えるのにカソードの窓の外側に金網を張り、光のフラッシュの間カソードより 300 V 高いパルスを実に網にかけて after-pulsing を十分に防いだ。検出効率に関するものでは、Harwell, NBS 共同で行われた 10~30 MeV の領域で付随粒子法により絶対効率を求めるものがある。以上いずれも中性子断面積に関するものであるが、これ以外では、電総研で行われたもので、光中性子断面積の系統的な誤差が NBS-P2 という制動輻射ビーム・モニタの較正と関係があることが指摘された。

さて、とくに興味ある例を2つもう少し詳しく述べる。最初は J.W.T. Dabbs ら(ORNL)による「短寿命 α -放射体の核分裂断面積測定」(BB7)である。 α -放射体の核分裂片の検出に電離箱を用いる場合には、サンプルを塗布した平板電極に垂直に出る α 粒子と、電極に沿って平行に出る核分裂片は信号の大きさがあまり変わらず、核分裂片検出の S/N 比を低下させている。そこで、電極を平板とせず球面の一部のように彎曲させる。こうすると電極に平行に放出される核分裂片も、やがて電極から離れるため大きな信号が得られ、S/N 比が格段に改良されることが示された。もう1つの例は、R.C. Block ら(RPI)による「レンセラ・大強度中性子スペクトロメータ」(BB10)である。これは、以前から知られていた鉛減速中性子スペクトロメータに中性子源として Linac を用いたもので、鉛は 1.8 m^2 で中心に中性子ターゲットがあり、鉛の中だが

端の方に ^{238}U の電離箱を置いて核分裂片を測定した。 (γ, n) 反応によって発生した中性子は鉛との衝突で少しずつ減速される。エネルギーの相対的拡りは $\Delta E/E \sim 0.3$ とほぼ一定値を保ち、平均エネルギー E は $E(\text{keV}) = 183 / (0.3 + t(\mu\text{sec}))^2$ で与えられる。検出器が中性子源に近いこと、および全中性子がエネルギーのある値を一度はとるという事実のため、通常の TOF スペクトロメータに比べて強度が非常に大きい。例えば、5 m 飛行管での通常の測定法に比べて $\sim 10^4$ 倍にも達する。それで、この装置は非常に小さい断面積の測定に適するわけで、 ^{238}U の準しきい値の核分裂断面積を測定した。

2. 分裂核種の断面積の測定

このセッションの概略を第1表にまとめた。表中で、例えば (n, f) は $\sigma(n, f)$ 断面積、 J は共鳴準位スピン、 $n(E)$ は核分裂中性子エネルギー・スペクトル、 $\text{delay } n(E)$ は遅発中性子スペクトルである。 (n, f) で ratio とあるのは $^{235}\text{U}(n, f)$ に対する比である。エネルギー領域を示す数字の右肩の文字で、k は keV、M は MeV を、文字がなにもないものは単に eV である。Res は共鳴領域、Th は Thermal で、Na-Be は中性子源として Na-Be を使用しているものである。なお、同一の論文で複数の核種を測定しているものは、別々に書いてあるので2度以上に数えられている。この表からわかるように、核種としては ^{235}U が一番多く、 ^{238}U がこれに次いでいる。断面積はやはり (n, f) が圧倒的に多い。そして測定エネルギー領域が非常に広がっていることが注目される。数 10 keV あるいは数 100 keV から数 10 MeV にまで達するものも少なくない。このほか核種としては $^{241}, ^{242}\text{Pu}$ などが測定されているのが注目される。

次に、主なものをいくつか拾ってみる。 $^{235}\text{U}(n, f)$ では、Livermore で電離箱を用いて 1 keV ~ 1 MeV で測定したものと 0.8 ~ 20 MeV での測定がある。中性子束測定に注意が払われ、前者では ^6Li ガラス・シンチレータ、後者ではポリエチレン・ラジエータを用いた。 $^{233}, ^{234}, ^{236}, ^{238}\text{U}(n, f)$ の $^{235}\text{U}(n, f)$ に対する比の測定も同じく Livermore でなされ、1 ~ 100 keV から 30 MeV まで一挙に測定したものである。 $^{239}\text{Pu}(n, f)$ は、Harwell で 1 keV ~ 1 MeV の範囲で核分裂中性子を検出して測定した。とくに中性子束の測定に注意して2通りの方法をとっている。準しきい値核分裂に関連するものでは、ORNL の $^{240}\text{Pu}(n, f)$ の 500 eV ~ 10 keV の高分解能測定と、Geel の $^{238}\text{U}(n, f)$ についての測定があり、それぞれ微細な共鳴準位の解析を行

第 1 表 分裂核種測定の種類

核種と測定量	論文数	エネルギー領域	核種と測定量	論文数	エネルギー領域
$^{233}\text{U}(n, f)$ ratio	1	$0.001^{\text{M}} \sim 30^{\text{M}}$	$^{238}\text{U}(n, f)$ ratio	2	$0.001^{\text{M}} \sim 30^{\text{M}}, 0.6^{\text{M}} \sim 22^{\text{M}}$
" η	2	0.025, Th	" (n, γ)	2	$20^{\text{k}} \sim 550^{\text{k}}$
$^{234}\text{U}(n, f)$ ratio	1	$0.1^{\text{M}} \sim 30^{\text{M}}$	" $n(E)$	1	$0.1^{\text{M}}, 0.5^{\text{M}}, 2^{\text{M}}$
$^{235}\text{U}(n, f)$	5	$1^{\text{k}} \sim 1^{\text{M}}, \text{Res.}, \leq 200^{\text{k}},$ Na~Be $0.8^{\text{M}} \sim 20^{\text{M}}$	" delay $n(E)$	1	
" α	1	$0.15^{\text{k}} \sim 30^{\text{k}}$	^{238}Pu decay const.	1	
" η	2	0.025, Th	$^{239}\text{Pu}(n, f)$	1	$0.001^{\text{M}} \sim 1^{\text{M}}$
" J	1	≤ 150	" $n(E)$	1	$0.1^{\text{M}}, 0.5^{\text{M}}, 2^{\text{M}}$
" $n(E)$	2	$(0.1^{\text{M}}, 0.5^{\text{M}}, 2^{\text{M}}), 0.5^{\text{M}}$	$^{240}\text{Pu}(n, f)$	1	$0.5^{\text{k}} \sim 10^{\text{k}}$
" ν	1	$0.2 \sim 1.4^{\text{M}}$	$^{241}\text{Pu}(n, f)$	1	Th~50
$^{236}\text{U}(n, f)$ ratio	1	$0.1^{\text{M}} \sim 30^{\text{M}}$	$^{242}\text{Pu}(n, \gamma)$	1	$5^{\text{k}} \sim 70^{\text{k}}$
$^{238}\text{U}(n, f)$	1	Sub threshold			

なっている。中間構造(intermediate structure)に関するものでは、Geel で 200 keV までの $^{235}\text{U}(n, f)$ の断面積を測定してこれに種々の統計テストを施した結果、中間構造が存在すると結論している。ついでに、 $^{238}\text{U}(n, \gamma)$ 断面積では ORNL で同様な検討を行なっている(7-1. 参照)。 ^{235}U 共鳴準位パラメータに関して重要な論文が発表された。Los Alamos と ORNL の共同研究で、入射中性子と標的核を共に偏極させて核分裂を観測しスピンを決定した。150 eV までの共鳴準位スピンを求め、さらに核分裂幅などの種々の物理量とスピンとの関係を調べている。共鳴準位に関連して興味のある研究は Columbia によるもので、核分裂片エネルギーを固体検出器で測定し、 J の対称軸への写影 K を良い量子数と仮定して共鳴準位 (J, K) の決定を試みている。以上のものと少し異なるが興味のある測定が東北大でなされた。 ^{238}U の光核分裂の後の遅発中性子スペクトルを TOF で測定したもので、新しいいくつかのピークを報告している。

おわりに、2 つほどやや詳しく紹介する。Coates ら (Harwell) による「 $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ 核分裂断面積比の測定」(GB7) で測定の動機は、最近の積分実験によると $^{238}\text{U}(n, f)$ が評価値よりも $\sim 10\%$ 大きいのではないかと示唆されることをあげている。Cyclotron で TOF を用いて 600 keV から 22 MeV までガス・シンチレーション箱を用いて注意深く測定した。結果は $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ の評価値と大体において良い一致を見た。したがって積分実験結果は未解決である。Corvi ら (Geel) による「低エネルギー γ 線測定による ^{235}U の捕獲/核分裂比」(GB16) では、低エネルギーの捕獲 γ 線 (642 keV) と核分裂 γ 線 (352.3 と 1, 279.8 keV) とを観測し、その比からそれぞれの断面積の比すなわち α を求めた。新しい方法

なので、これまでのデータとの比較が興味深い。相対測定であるが、結果はこれまでの値と比べて数 keV 領域ではかなりの差がありそうである。

3. 非分裂核の断面積測定—全断面積

論文の数が他の項目の 2 倍以上になっていることからわかるように、会議の中心となる分野である。これを全断面積に関するものと、捕獲および散乱断面積に関するものとに分け、ここでは主に全断面積の測定について紹介する。

測定された核種は $^{236}, ^{238}\text{U}$, ^{226}Ra , ^{209}Bi , $^{54}, ^{56}\text{Fe}$, ^{56}Fe , ^{36}Ar であるが、このほか Columbia の中性子スペクトロメータによる 1968 年以降の数多くの同位元素に関する測定のとめも報告された。ほとんど共鳴領域の測定であるが、鉄に関してはエネルギーは 500 keV にまで及んでいる。 ^{238}U の測定は Mol と Geel の共同研究であり、300 eV から 1.8 keV まで He ガス・シンチレータを使って全断面積を測定した。このほか捕獲、散乱断面積も測定し、97 個の準位のパラメータを求めた。原研で行われた ^{238}U の透過率測定と共鳴パラメータの決定は、既存データに重要な不一致がありこの問題を解明するためのもので、バック・グラウンドの決定に特別の考慮が払われ、また、サンプルを低温に冷却している。ORNL では、 $^{54}, ^{56}\text{Fe}$ の高分解能測定を ~ 500 keV まで行い、 R -マトリックスと Harvey-Atta コードを併用して解析して多くの p 波準位を調べている。

最後にもう 1 つ紹介する。これは全断面積ではなく捕獲 γ 線を測定したものであるが、 p 波強度関数に関するもので注目される。Corvi ら (Geel) の「 ^{238}U 共鳴の p 波決定」(HB3) である。

従来の p 波強度関数は、平均断面積の解析から得ら

れたものが、個々の p 波共鳴準位から得られたものの約2倍になってしまうという大きな不一致があった。そこで p 波決定に捕獲 γ 線を利用する。 ^{239}U の低エネルギー準位へは s 波共鳴準位からは $M1$ 遷移となるが、 p 波共鳴からは $E1$ 遷移であることに注目する。共鳴準位ごとに、4.3 MeV 以上の γ 線強度の全体の γ 線(1.5 MeV 以上)強度に対する比を R として、 $g \Gamma_n / \sqrt{E_n}$ の関数(g : スピン因子, Γ_n : 中性子幅, E_n : 中性子エネルギー)としてプロットする。そうすると大きな R を持つ準位は、ほとんど p 波共鳴であることがわかる。これにさらに統計的考察を行なって得られた p 波強度関数は、これまでの、個々の準位から求めたものの約2倍となり、平均断面積から得られるものと良く一致した。(原研・浅見 明)

V. 捕獲および散乱断面積, 原子炉物理

1. 中性子の捕獲反応

概していえば、ここ2, 3年中性子断面積などを測定する目的で新しい装置が設置された例は世界的に見て非常に少ない。それだけに、各地の研究所は手持ちの装置の有効な利用と改善に取り組み、測定の手法などに新しい工夫を加えようとしている。この新しい実験技術についての紹介は NBS の Bowman の招待講演でまとめられていたが、その中で最近の研究を用いられた中性子源で分類すると、白色中性子源の使用が減少しはじめているのにひきかえ、単色中性子源の使用が再び増加しているということに興味を引かれた。事実中性子源についての発表の中でこの種のものが見受けられたが、例えば NBS の原子炉からの中性子線を Mn あるいは Ti の散乱体で散乱させ、これに Sc フィルタを置いて 2 keV のビームを、Al(35cm)と Fe(30cm)のフィルタを置いて 25 keV のビームを得ている。後者の場合、25 keV のバンドに含まれる中性子は全中性子の99%で、その強度は $5 \times 10^5 n/\text{cm}^2\text{-sec}$ であるという。BNL にも同様の装置があり、1, 2, 24 keV の単色中性子による捕獲 γ 線のスペクトルが測定され、24 keV では p 波の中性子の捕獲の寄与が大きいことを指摘する実験と、このビームを用いた ^{238}U , ^{197}Au , ^{127}I などの放射化断面積の測定が行われたものがある。この時中性子束は $^{10}\text{B}(n, \alpha\gamma)$ による γ 線の測定で定めており、これは東工大・京大炉グループの共同研究で、今回この会議に発表した 24 keV における捕獲断面積の測定と同様の規格化をしており、それらの結果を比較することは意味があろう。われわれの場合は LINAC で作った白色ビームを15cmの鉄フィ

ルタを通して作った 24 keV 単色ビームで、中性子束についてもほとんど同じものと考えられる。

第2表 24 KeV における中性子断面積

	平均エネルギー (keV)	断面積 (b)	^{238}U	^{197}Au	^{127}I
BNL	24.5 放射化		$.538 \pm .022$	$.630 \pm .006$	.740
東工大・京大炉	23.7 捕獲		$.50 \pm (7\%)$	$.68 \pm (5\%)$	$.76 \pm (5\%)$

ついでに中性子源について記せば、Michigan 大では Na-D 光中性子源を製作しており、RPI では強い中性子源として鉛減速スペクトロメータを見直していることなどがある。また ^{252}Cf の自発核分裂中性子を用いる核分裂断面積(NBS)や、しきい値のある断面積の測定(Phys. Tech. Bund.)がある。中性子束の定量が容易であるところから、これらの中性子源が用いられるものと思われる。いずれにしても、単色ビームや放射性中性子源による断面積の絶対測定と、白色ビームによる相対測定とが組み合わせられて精度のよい断面積が決定されてゆくのであるが、そのために絶対測定値の精度を上げるための努力が現在も多くの場所で行われていることがわかる。

さて、中性子捕獲断面積の測定の対象となる主な核種は第1に U や Pu などであり、第2に核分裂生成核種である。また核融合炉も含めて炉の構造材が対象になる。 ^{238}U については20~550 keV の測定を Au の捕獲断面積で規格化したもの(Karlsruhe)があり、 ^{242}Pu の5~70 keVの測定(RPI)では同じ核種の共鳴準位についての吸収および透過データから規格化しており、自発核分裂で生ずる γ 線と分離するため high-low bias 法が用いられている。また ^{240}Pu の実験(Karlsruhe)でも高い γ 線バック・グラウンドがあるので、1 nsec のビーム幅のパルスを用いる TOF 法で SN 比の向上をはかっている。核分裂生成核種として RPI で20 eV~90 keV における ^{151}Eu , ^{153}Eu , ^{109}Pd , ^{109}Rh が4~8%の統計誤差で測定されており、INEL では Coupled Fast Reactivity Measurement Facility を用いて高速炉スペクトルでの積分的な放射化断面積の測定も行われている。ANL の Pönitz は Co から ^{238}U に至る9種の核種について0.03~4.0 MeV で捕獲断面積の測定をし、統計モデルおよび γ 線カスケードモデルを用いた計算値と比較している。測定値は Au の断面積に規格化している。

^{235}U の捕獲分裂比の測定は Geel で、 ^{239}Pu については ORNL で、それぞれ測定方法に工夫が加えられて実行されている。Geel では Ge(Li)検出器を用い

$^{236}\text{U}^*$ の γ 崩壊の際生ずる 642 keV の γ 線強度を捕獲のイールドとし、核分裂生成核から放出される 352 または 1,280 keV γ 線強度を分裂イールドとしてその比を求めており、ORNL では捕獲 γ 線の検出と分裂片または分裂中性子を検出するために、2 種類の異なる検出器の組合せを作ってそれぞれ結果を求めて比較検討を行なっている。

ORNL で行われている高分解能実験からは 2 つの結果が発表されている。1 つは ^{40}Ca , ^{48}Ti など閉殻付近の核の捕獲断面積の測定から共鳴幅が求められ、またそれらの共鳴からの γ 線スペクトルが Ge(Li) 検出器で測定され、これらの総合された結果を説明するために Valence model ばかりでなく core の励起をも考えねばならぬことを示唆している。他の 1 つは ^{238}U に対する非分離共鳴領域での捕獲断面積の値が統計的な変動よりも大きな変動の様相を示すことを確かめ、捕獲反応における中間構造の存在を結論している。このほか中性子捕獲後の核の γ 線崩壊についての研究では、7~70 keV 中性子捕獲後の γ 線を Ge(Li) で測定して部分放射幅を決める試みや(Karlsruhe), 11 MeV 中性子による $^{208}\text{Pb}(n, \gamma)$ 反応の γ 線スペクトルをやはり Ge(Li) で測定し、core の励起の過程を調べている(LASL)ものなどがある。

2. 中性子の散乱と γ 線の生成

数 MeV 中性子の核による散乱の実験は相変わらず各地で続けられている。それらをまとめると第 3 表のようになる。ほとんどの実験は TOF 法を用い角分布を測定して微分断面積を求めているものであり、タンデム型加速器を用いて従来データの乏しい 8~15 MeV の測定を行なっている例の多いのが注目される。

以上のほか、6~15 MeV の中性子エネルギー領域で大型液体シンチレータで直接放出中性子を測かることによって、 ^{56}Fe から ^{238}U に至る 18 種の核種や元素の $(n, 2n)$ および $(n, 3n)$ 反応の断面積を測定し、従来の放射化法による結果と比較しているもの(Bruyeres-le-châtel)や、 $^{12}\text{C}(n, 2n)$ については 23~34 MeV, $^{238}\text{U}(n, 2n)$ については 13~18 MeV のエネルギー範囲で励起関数を放射化法で測定し、他のデータと比較したり計算の試みを行なったりしているもの(Univ. Hamburg)がある。Yale Univ. の LINAC による光中性子を C で散乱させ、この散乱中性子の偏極度を測定し、さらにこの偏極中性子を ^4He , ^6Li , ^9Be , ^{16}O などの反応に用いている例も特徴のある研究である。

原子核によって中性子が非弾性散乱し、あるいは捕獲された後に生ずる全 γ 線生成量を問題とする γ 線生成断面積についての測定は、 γ 線による物質内の生成熱の評価および γ 線遮蔽等の問題で必要なことから、最近非常に多くの実験と解析の仕事を見受けるが、今

第 3 表 中性子弾性・非弾性散乱の実験

研究場所	核種	中性子エネルギー (MeV)	内 容
Duke Univ., TUNL	^{12}C	9~15	弾性, 非弾性散乱断面積
Bruyeres-la-châtel (France)	^{12}C	8.0~14.5	弾性, 非弾性散乱断面積
ORNL	$^{12}\text{C} \sim ^{238}\text{U}$ (26 核種)	4~8.5	弾性, 非弾性散乱断面積 5 年間の summary report
Univ. S.W.L.	^{14}N , ^{16}O	5.0~9.3	弾性, 非弾性散乱断面積
Bose Inst. (India)	S	14.8	弾性散乱断面積 Constant angle scatterer 法
LASL	^{56}Fe	8.5~14.2	非弾性散乱断面積 0.845 MeV γ 線を測定
AEO (Iran)	As~Pb (7 核種)	7.0	弾性散乱断面積
Bruyeres-le-châtel (France)	$^{76, 78, 80, 82}\text{Se}$	6.0, 8.0	非弾性散乱は、同位体によって変化が少ないが弾性散乱は isospin 項の影響で相異が見出される
Bruyeres-le-châtel (France)	Se, Ge	2.0~4.1	エネルギーレベルと崩壊系列
AEB (South Africa)	^{103}Rh		弾性散乱および 40 keV 以上の 14 単位の励起断面積
Chalk River N.L. (Canada)	^{115}In	0.335~14.74	$^{115}\text{In}^m$ の励起関数
Bruyeres-le-châtel (France)	$^{148, 150, 152, 154}\text{Sm}$	7.0	弾性散乱における変形核の効果
Lowell Univ.	^{238}U	0.9~2.7	弾性散乱, 45 keV, 148 keV 単位非弾性散乱 45 keV の断面積が ENDF/IV の 2~2.5 倍
ANL	^{238}U	2.5	45 keV(2+), 148 keV(6+), 308 keV(6+) 単位非弾性散乱
BRL	^{238}U	7~14	小角散乱断面積 2.5° および 15°

回も ORNL を中心として IRT, LASL, Karlsruhe などの測定が報告された。その中で ORNL の発表は過去 3 年間の研究をとりまとめたもので、すでに Li から Pb に至る 19 種の元素に対してエネルギー 0.7~20 MeV の中性子が入射した際に生ずる γ 線スペクトルを 0.3~10.5 MeV にわたり測定し、それぞれのエネルギーに対応する γ 線生成断面積を求めている。まず必要なほとんどの元素に関して over-all なデータは揃ったといっても過言ではなからう。しかし LASL の 14.2 MeV 中性子に焦点を合わせて γ 線放出の角分布を含めた測定、Karlsruhe および Bettis Atomic Power Lab. の構造材である Cr, Ni, Zr などの中性子非弾性散乱後の γ 線の測定、さらに ORNL で F の非弾性散乱後の低エネルギー γ 線(110, 197 keV)や $^{19}\text{F}(n, p)^{19}\text{O}$ からの 96 keV γ 線など低エネルギー γ 線の生成に関する研究など、個々の元素に対する詳細な実験は今後も多く進められてゆくだろう。従来の ORNL での実験では、大きな NaI シンチレータが Ge(Li) 検出器と併用されていたが、最近の実験ではもっぱら Ge(Li) 検出器が用いられるようになっており、データの精密さが要求されていることがわかる。

3. 原子炉物理

炉物理関係では、軽水炉、崩壊熱の計算、高速炉の安全性解析等の立場からの核データの need についての招待講演およびベンチマーク実験と核データの不確定性の評価などに関する招待講演があったほか、ベンチマークと感度および輸送と感度という 2 つのセッションで研究発表が行われた。そのうちベンチマークと感度のセッションで、京大炉で行われた鉄とステンレス鋼の群定数の決定に関する研究を代理発表した京大炉の神田啓治氏からは次のような感想が寄せられている。「主に積分法の測定と計算を比較して組定数と多群計算法を検討することを目的とした研究が発表された。その対象は遮蔽材料(4 篇)、線量評価(2 篇)、核分裂生成物(2 篇)などである。どちらかといえば断面積測定を中心とするこの会議では主流でないので、同時に開かれている招待講演に参加者が片寄り約 60 名が出席していた。しかし講演者が一方的に話すというより、参加者が不確定性の評価、感度などかなり細かい問題にまで意見を述べ合い、日本でいう“身内の会議”的雰囲気であった。討論に充分時間がとってあったせいもある。」

この会議で主流であるはずの断面積測定のセッションでは、講演の数が多く討論の時間もなかつて、せつせと 10 分講演をすませていった状況は誠に皮肉なこ

とだったことになる。

(東工大・山室信弘)

Ⅶ. あとがき

大変大きな忙しい会議であった。プログラムの編成にはいろいろ苦心があったと思うが、このような大きな会議になると関連テーマの発表があちこち散らばっているものが多く見受けられたのはやむをえないことなのだろうか。また 2 会場に分かれているため、どうしても聞くことのできない講演が少なくなかった。少し規模が大きくなり過ぎている感がする。

今回のワシントン会議には日本から 7 篇の研究発表と 5 名の参加者があった。以前に比べればやや増したとはいえ、全く少ない数と思われる。今後はこのような国際会議に日本の若い研究者がもっと多数参加できる方法はないものかと考えている。

今回の会議は、当初の予定では reviewer による講演が主になると聞いていたが、実際には招待論文に加えて投稿論文もいくつかの会場で並行して読まれることになったので、興味のある話を追って動き回ったり、時間的に間に合わずいくつかの話が聞けなかったりであった。座長の判断で、あるものは数分でまとめることが要求されていたし、また逆に充分な時間をとって議論が行われたことをみて、座長の権限の強さに少なからず驚かされた。また主催者の意図した「断面積の測定者とそれを利用する技術者との間の情報の交換」がどこまで達せられたか疑問であろう。わが国からの出席者をみても使う側からの出席は皆無であった。Summary session で Havens もいっていたほどではないにしても ORNL からの論文が極端に多かったのは驚きであった。そのほか Karlsruhe の Kppler グループの精力的な仕事も印象に残っている。

核断面積に関する原子炉工学からの要請は、WRE-NDA (World Request List for Nuclear Data Measurements) などに見られるように、現在の測定技術ではまだ満たされないものも多いが、各国で精力的に断面積の研究が行われ、測定技術も着実に進歩している。とくに今回会議に出席してこの感を強くした。ただ日本からの出席者数はほかの国と比べてずっと少なく、この点今後改善して欲しいものである。

本稿の執筆に当っては、3 人の著者の間で大まかな分担をきめただけで、あとは各自の自由に任された。とりまとめは浅見が行なったが、章の配列を考慮した程度に過ぎないので、いくつか重複するなど記述の不統一もあるがご了承ください。

(東工大・山室信弘、東北大・相山一典、原研・浅見 明)