

2. 実験関係

東北大学工学部原子核工学科

馬場 護

1. 概要

この節では、中間エネルギーを除く実験関係のトピックスについて概要を述べる。

今回の会議では、"Experiment"のセッションが新しく設けられ、実験関係は"Standard & Facility"、"Fission & Fusion"、"Application"の4セッションに分類された。"Experiment"のセッションは、一般的な実験手法を狙いとしたものと思われるが、種々のトピックスが混在することになった。それはともかくとして、実験関係の論文を手法または対象によって分類してみると表1ようになる。なお、これはアブストラクトから拾ったものなので、旧ソ連の論文などキャンセルされたものも含んでいる。

実験関係の合計は約120件であり、会議全体の発表件数(約280)に対してほぼ40%である。このうち日本からの発表は14件(大学9、原研5)と前回Juelichに比べると少ないがほぼ12%の比率を占める。日本から招待講演が3件、招待ポスターが2件採択されており、日本の貢献度の高まりを示すものといえよう。しかし、最後の円卓会議でも指摘された如く、会議に占める実験の割合は従来に比して確実に減少しており、日本の貢献度を喜んではばかりもいられない面がある。これについては後に触れたい。なお、日本からの招待講演は、阪大高橋氏「日本の大学における核融合データの測定」、原研池田氏「マイクロカロリメトリによる核発熱測定」、東工大井頭氏「核変換、天体物理のための(n, γ)データの測定」である。

さて、表1を見ると、実験の中でも共鳴、核分裂、捕獲、散乱、崩壊熱といった原子力に直接関連する伝統的な発表が減少し、応用などへのシフトの傾向が読み取れる。中性子共鳴・透過の実験にはパリティ非保存の検証、中性子電荷半径の決定など基礎物理分野への応用が4件ほど含まれており、新しい方向性を示すものと言えよう。また、いわゆる"exotic"な不安定核種をターゲットまたはビームとして用いる実験が、消滅処理や天体核物理に関連して数件発表されたことも、新しい動きといえる。この手法は原子核物理では大きな潮流となっており、核データ分野でも今後重要な課題になるように思われる。

2. トピックス

表1の分類に添って、印象に残った発表を独断的になるが紹介する。

標準関係では、Wasson(NIST)とCondé(Uppsala)がそれぞれ20 MeVまで、1 GeVまでの標準断面積のニーズと現状を報告した。今後中高エネルギーデータ整備のために種

々の標準データが必要となるが、n-p 散乱データが最も基本となる。これに関連して Olsson(Uppsala) が報告した 100 ~ 160 MeV での n-p 散乱のきれいなデータが印象的である。新しく Uppsala に設置された AVF サイクロトロン中性子源によるもので、他にも (n,xp)、(n,f) などの実験を行っており医学用データにも関心を持っているとのことである。また、Carlson(NIST) は消滅、ドシメトリで重要な ^{237}Np 核分裂断面積の 1 MeV までの測定を報告し、京大炉の結果とほぼ一致することを述べた。こうした“し

表 1 実験関係の分野と発表件数（中間エネルギーを除く）

分野	件数(日本)	備考
標準	6	
中性子データ		
共鳴/全断面積	14 (1)	高分解能、パリティ非保存、中性子電荷半径
捕獲	3 (1)	高分解能、パリティ非保存
核分裂	11 (1)	超ウラン元素、不安定核
崩壊熱/発熱	7 (1)	核発熱直接測定
散乱/DDX	11 (1)	7 ~ 13 MeV 領域
γ 線生成	5	$E_n < \text{約 } 200 \text{ MeV}$
放射化/ドシメトリ	9 (5)	7 ~ 13 MeV、 >14 MeV 領域
荷電粒子生成	10 (2)	(n,x α)DDX、 > 14 MeV
応用	15	天体核物理、医学、非破壊検査、RI
施設/装置	16	
ベンチマーク	4 (2)	核融合
ガンマ線データ	3	
荷電粒子データ	6	RI 製造、ビーム分析
計	120 (14)	

きい”核分裂核種については、低エネルギー部分で評価値に大きな問題のあることが、 ^{241}Am についても京大炉から報告されている。強力中性子源と実験技術の進歩によるものであろう。 $^{10}\text{B}(n, \alpha \gamma)$ について、NIST/ORNLの新しい測定が報告された。

共鳴パラメータ、全断面積に関して、構造材、B同位体などについての報告があったが、目につくのはエネルギー分解能の向上であり、Geelライナックでは、3.8 psec/mの分解能が達成され、Feの非分離領域でもかなりのFluctuationが観測されている。また、Geelではバンデグラフを用いて、数100 keVから19 MeVまでの高分解能測定を行ない、 ^{232}Th のMeV領域でENDF/B-Vと有意な差のあることを報告している。これらの高分解能測定は、構造材の自己遮蔽効果などを解明する手掛かりになると期待される。捕獲断面積についても、Geelから高分解能測定が ^{58}Ni について報告された。

上述したように、低エネルギー領域における ^{232}Th 、 ^{238}U など捕獲ガンマ線、Transmissionを用いたパリティ非保存の検証実験がGeel、LANLで行なわれている。これらの実験は共鳴スピンの決定にも貢献している。中性子の基礎物理における有用性はMichaudonによっても強調された。

核分裂断面積に関しては、 ^{247}Cm 、 ^{250}Cf 、 $^{254}\text{Es}(276\text{d})$ についてLANLのLANSCEを用いた高分解能データが得られ、 ^{250}Cf について新しい共鳴が見だされた。 ^{247}Cm の共鳴を用いることによって、消滅効率を上げることができるとのことである。Geelから、0.3 ~ 5.5 MeV中性子に対する ^{237}Np の核分裂片エネルギー、質量、角度分布の測定結果が示された。長時間の実験と想像されるが、得られる情報は核分裂の物理に関して極めて有効であろう。

核分裂に関して圧巻なのは、M.S.Mooreらによる不安定核の核分裂断面積測定であろう。 $^{238}\text{Np}(2.11\text{d})$ 、 $^{242}\text{Am}(16\text{h})$ など、奇・奇核の大きな(共鳴)核分裂断面積を用いて高次アクチニドの消滅を速める、およびTh-Uサイクルで $^{232}\text{Pa}(1.3\text{d})$ を燃焼させて ^{232}U 含有量の少ない ^{233}U を生成することを狙った実験である。まず、イオン加速器を用いて $^{238}\text{U}(d,2n)^{238}\text{Np}$ 、 $^{232}\text{Th}(d,2n)^{232}\text{Pa}$ 反応によって ^{238}Np 、 ^{232}Pa を生成し、それを化学分離して核分裂試料に加工し、核分裂断面積をLANSCEの高中性子束場で測定するというものである。 ^{236}Np についてのテスト実験では10 ng程度の試料で測定が可能で、 ^{232}Pa についてのデータも得られたという。米国の底力と強力中性子源の威力を改めて思い知らされる実験である。

崩壊熱・核発熱については、ILLを用いた崩壊データ(Studvik)、Lowell大学の崩壊熱測定、原研池田氏による核発熱直接測定の実験の報告があった。池田氏らの手法は、非核的測定手法の新しい応用手法として教訓的である。

中性子散乱の中で依然として問題のある $^{238}\text{U}(n,n')$ について、Geel、ORNLからフ

フィルタービーム法を用いた数 10 keV 領域での予備的報告があった。これについてはロシアの Obninsk からの報告も予定されていたが、キャンセルとなったのは丁寧な実験だけに残念である。横道に逸れるが、会議中開かれた、 $^{238}\text{U}(n,n')$ についての NEA ICL(Interlaboratory Collaboration) での九大河野氏のまとめによると、少なくとも断面積に関する限り、実験値はかなり収束し JENDL-3 の新しい評価値も近づいてきたとのことで、事情は大分改善されてきている。Lowell 大では、 $^{239}\text{Pu}(n,n')$ の測定も行なっているが、700 keV での測定結果は、ENDF/B-V とそれほど違わない。他の核種については 10 MeV 近傍での (n,n') (PTB)、10 MeV (中国原子能研)、11.5 MeV (東北大) での DDX 測定の報告があり、いわゆる 7~14 MeV の "missing" 領域での実験結果が得られ始めている。IRK から 14 MeV での DDX を真空中においたサンプルで測定する装置が発表された。

放射化に関しても、"missing" 領域 (PTB/IRK)、15~20 MeV (東北大) など 14 MeV 以外でのデータが得られており、14 MeV についても短半減期核種 (原研) に実験が拡大されている。

ガンマ線生成断面積の測定を 200 MeV 近くまで拡張した報告が、IRK、LANL からなされた。ともに LANL の WNR を用いたものである。

荷電粒子生成に関して、 $(n,x\alpha)$ の直接測定の結果が多数報告された。これは IAEA によって組織された (n,α) に関する CRP (Coordinated Research Program) に負うところが大きい。構造材核種の $(n,x\alpha)$ DDX が Obninsk、Geel、東北大、LANL から報告され、断面積がかなり明らかになってきた。前 3 者は MeV ~ 14 MeV の単色中性子による測定であり、LANL の測定は WNR の連続中性子源を用い数 MeV から 30 MeV までの領域をカバーしている。検出器応答を拡大する工夫を施しているが、強力中性子源の威力を示したものといえる。ヘリウム集積法を用いた ^{58}Ni 、10 MeV のデータが LANL から報告されたが、DDX 測定との一致は余りよくない。

応用に関する報告は、天体核物理、核変換、RI 製造、医学など実に多彩であった。中でも東工大の高感度 (n,γ) 測定装置、LANL での放射性核種ターゲット、ORNL の RI ビーム装置 (HRIBF) 計画は特に印象的であった。後 2 者は主として天体核物理を目的としたものであるが、LANL では (n,p) 、 (n,α) 以外に (n,γ) も測定可能となり、核種によっては数 10 g の試料があれば十分という。 $^{81}\text{Br}(p,n)$ ニュートリノ検出反応の報告 (Kentucky 大) もあった。秘匿爆発物などの検知に関する報告 (SAIC) も興味をひいた。 $(n,x\gamma)$ による γ 線を TOF によって測定し位置も同定しようとするもので、軽核のガンマ線生成と中性子透過率のデータが重要となる。中性子透過法を用いる案も提案されたが、これらの方法は中性子を用いた非破壊検査手法として種々の応用が可能と考えられる。

施設や実験装置に関しても多彩な報告があった。RPIのガンマ線多重検出装置やLAMPFの紹介の他、ロシアから強力中性子源、偏極解析装置、重イオン核分裂実験装置など興味ある話題がポスター発表で予定されていたが、論文は入手していない。ロシアからは、この他にもArzamasなど従来なじみの少ない機関から数件エントリされた。

ベンチマーク実験がニュートロニクスや核発熱に関して原研FNS、ロシアObninsk、インドBhabha、中国SWINPCから報告された。FNSなどでの積分実験は核データ整備に重要な寄与をなしてきたが、今回こうしたベンチマーク実験の報告が少なかった気がする。

ガンマ線、荷電粒子入射反応についての報告は、表1に見られるように多くはない。核融合炉での高エネルギー迷走電子による放射化評価のために、光反応データ整備が要請された。荷電粒子入射反応データは主としてRI製造を目的としたものであるが、イオンビームを利用した分析のための $B(p,x)$ の測定もあった。

3. 雑感

以下、私的な感想である。今回の会議では、実験分野の減少という明るくない問題があったにせよ、新しいタイプの実験、高中性子束を生かした高分解能、高感度な実験、新しい実験手法など、今後につながる報告に触れることができた。日本からも、それぞれ特長を持った実験の報告がなされたと思う。

会議中、最も印象的だったのはLANLのWNR、LANSCEの強力中性子ビームを用いた多彩な実験である。米国での核データ活動が凋落している中で、上に述べたような先端的な実験が種々報告された。LANLでの実験は米国内に限らず、広く国際的規模で行なわれており、それらの論文は膨大な数にのぼると思われる。低エネルギーから数100 MeVにまで亘っての実験が可能である上、極く少量のサンプルと比較的簡単な実験装置(?)で測定が可能なの驚異的ですからある。強力な中性子束の威力と言えよう。

それにひきかえ、米国における他の機関からの論文はLowell大学を除けば非常に少なく、実験の減少の大きな要因となっている。ANL、BNL、LLNLなどの研究所やRPI、TUNL、Ohio、Kentucky大学などかつて隆盛を誇った機関からの論文は極く少数であった。ホストのORNLですら実験関係は僅かに数件に過ぎず、米国の論文の殆どはLANLとLowell大学によるものである。欧州においても同様で、KfKの天体核物理関係を除けば、伝統的核データ活動はGeel、Juelich、PTBなどに限られている。内容的にはさすがに高度なものであるが。

欧米の減少に対して旧ソ連諸国からはかなりの登録があり、内容的にも興味あるもの

が多かったが、キャンセルが相次いだようで、毎度のこととは言え残念である。ロシアは多数の施設と人材を擁しており、核データ分野でのポテンシャルは非常に高い。今回の不参加は主として経済事情によるものと思われるので、会議参加に対する経済的な援助が可能であればと考えさせられた。

今後、実験のアクティビティを再興するには、政策的な裏付けはもちろん必要であるが、応用など新しいデータニーズに積極的に対応することが重要と思われる。ニーズは次第に多方面に広がっている結果、従来の手法ではカバーしきれない場合が多くなるであろう。例えば、消滅処理や天体核物理についても、安定核のみの測定では限度があり、また中高エネルギーでは多数の反応チャンネルを全てカバーすることも困難である。しかし、実験の必要性が減少した訳ではなく、キーとなる実験データは依然として不可欠と思う。こうした新しいニーズに対応した実験手法の開拓が、今後は要請されることになろう。この場合にも、基本となるのはやはり強力な中性子ビームである。WNR、LANSCEなどの威力は上に述べたとおりであり、国内においてもその実現が望まれるところである。それとともに、高度な測定装置の開発が不可欠であり、この努力は従来型データの精度を向上させる上でも有意義と思われる。併せて、欧米、ロシアなどとの協力の方策も不可決と思われる。