

5. 中高エネルギー・その他

九州大学工学部

石橋 健二

1. はじめに

中高エネルギー領域では、癌治療など生体医学応用（約 200 MeV まで）、消滅処理などを含めた加速器中性子源に関する研究（1～2 GeV まで）、高エネルギーの天文物理（10 GeV まで）への応用などが行われている。また、中高エネルギー領域を中心とした理論のととも、エネルギー領域にはとらわれず核データの応用、ニーズを取り上げる。

2. 高エネルギー核データ

2.1 断面積標準

Condé (Uppsala 大) は 20 MeV 以上での断面積標準について重要性を整理して講演した。第 1 標準として核子核子の np、pp 散乱をあげ、約 1.5 GeV までのデータを紹介した。第 2 標準として、散乱、捕獲・非弾性散乱、荷電粒子生成、核分裂に分類して、それぞれの基準反応を取り上げた。Olsson (Uppsala 大) は、96 MeV および 162 MeV での H(n,n) 散乱の後方微分断面積の実験について述べ、180 度付近で実験値は、パリおよびボンポテンシャルからの計算値より約 10 % 大きな値になることを報告した。

2.2 宇宙線と核データ

Michel (Hannover 大) は、数十 MeV ～ 10 GeV での核種生成断面積研究のレビューを行った。天文物理では、隕石の履歴の研究などのために銀河宇宙線（最大 10 GeV / 核子）などによる核種生成断面積が必要とされる。入射エネルギーが GeV 領域になるとフラグメンテーション反応を考慮した計算コードが有用性であることが示された。同じく天文物理のための核種生成断面積の実験として、Schiekel (Köln 大) は陽子エネルギー 300、400 MeV において加速器質量分析 (AMS) を用いた長寿命核種 ^{10}Be 、 ^{26}Al 、 ^{36}Cl の生成断面積を報告した。Michel (Hannover 大) は、陽子エネルギー 1600 MeV で厚いターゲットによる生成核種の測定結果を報告した。Masarik (LANL) は、高エネルギー輸送コード HETC などを用いて、惑星（火星、月）表面で生じる銀河宇宙線誘起ガンマ線スペクトルを計算した。

2.3 スポレーションターゲット

近年では消滅処理などに関連してスプレージョン反応領域の核データも話題になるが、それにつれてこの領域の核データ研究も増えつつある。石橋（九大）は、陽子エネルギー $0.8 \sim 3$ GeV の (p, xn) 2重微分断面積の実験結果を報告した。C ~ Pb ターゲットについて、実験結果は基本的にカスケード・蒸発モデルの計算値に近いが、3 GeV 程度になるとずれが生じることを示した。Ullman (LANL) は、800 MeV 陽子による W の厚いターゲットの実験について、放射化法による生成核種の測定結果と HETC などによる計算結果と比較した。Alexandrov (KRI) は 660 MeV 陽子によって Al ~ Ag について、放射化法による核種生成断面積の実験を報告した。

3. 理論

3.1 前平衡理論

核データの関心が次第に高いエネルギーに移りつつある状況をうけて、前平衡反応の研究が活発に行われている。実験データの解析などでは、従来の半古典的な前平衡モデルによる GNASH や ALICE などのコードは依然として広く使用されている。しかしながら、理論自体の研究の主流は量子論的多段階反応理論に移行しつつあり、それに関する報告が 10 数件あった。その中でも、FKK (Feshbach-Kerman-Koonin) 理論の定式化に基づく報告が多く 10 件にのぼった。

Chadwick (LLNL) は、FKK 理論の現状と核データ評価への応用の報告を行った。FKK 理論が入射エネルギー $100 \sim 200$ MeV の領域へ適用できることを述べるとともに、Kalbach の角度分布システマティクスにおける角度分布パラメータ a を理論的に説明した。Reffo (ENEA) は、多段階複合過程 (MSC) の取り扱いについて、NVWY 理論とともに、FKK、TUNL 理論を用いて解析し、そのパラメータについて議論した。Kalka (Dresden 工大) は、1 粒子単位密度のコンボリューションから多段階直接反応断面積の表式を導く意欲的な試みを述べた。

FKK 理論に関する報告では、 $10 \sim 30$ MeV の入射エネルギー領域では、Avrigneanu (Oxford 大) による領域依存ハイブリッドモデルとの比較、Demetriou (Oxford 大) による V_0 パラメータの評価、渡辺 (九大) による荷電粒子反応への適用の報告があった。これより高い入射エネルギーへの適用では、Ramstrom (Uppsala 大) による 98 MeV 中性子による実験及び TUNL、FKK 理論による解析、Koning (CEA) による 200 MeV までの解析、Cox (LLNL) 及び Chadwick (LLNL) による 250 MeV までの医療データライブラリーの報告があった。FKK 理論は当初研究の念頭におかれていたエネルギー領域を超えて、これら医療応用の領域での核データ計算にも有効であることが示された。FKK 理論の改良に関しては、Marcinkowski (SINS) の入り口チャンネルの取り扱い方、Zongdi (CIAE) の精密化の方法の報告があった。

従来からの半古典的前平衡モデルでは、Young (LANL)により入射 200 MeV 領域の適用への GNASH の改良の報告があった。パラメータを使用しているためであるが、後方の角度分布の再現は FKK-GNASH よりも良い。Shubin (IPPE) は前平衡過程からのクラスター放出について、岩本・原田の方法を改良した。

3.2 カスケードモデルなど

FKK 理論に関する発表が多い中で、千葉(原研)の量子論的分子運動力学(QMD)による解析は注目を集めた。QMD の手法が発展し、核データの計算に適用できる段階にきた印象であった。QMD では、カスケード、フラグメンテーション、前平衡過程を区別せずに統一的に取り扱うことができ、今後の発展が期待される。Mashnik (JINR) は、カスケード・励起子モデルの計算を示し、GeV 領域への適用、 π 粒子の取り扱いの報告をした。カスケード・励起子・蒸発計算は、カスケード・蒸発計算よりも、実験値を良く再現する。石橋(九大)はカスケード・蒸発モデルによる HETC に励起子モデルのサブルーチンを付加して、HETC の入射エネルギー適用範囲を 20 MeV 程度まで下げる試みを報告した。Konobeev (INPE) は入射エネルギー 100 MeV までで前平衡モデルとカスケードモデルの比較した。Koning (ECN) は加速器消滅処理を念頭におき、断面積計算コードの現状について報告した。

3.3 準位密度、R 行列など

Grimes (Ohio 大)は準位密度について総合的に講演した。実験について γ 線、陽子、中性子の実験を比較し中性子実験の意義を強調するとともに、理論計算の例を紹介した。Cerf (IPN) は重い核に対する微視的計算(モンテカルロ)で殻効果・対効果が容易に考慮できることを報告した。Rohr (IRMM) は実験データに基づいて準位密度表式の検討を行い、超伝導状態の特徴を示すとともに臨界温度以上ではベーテの式が良い近似になることを述べた。Fu (ORNL)は励起子準位密度に対する検討を行った。

R 行列による共鳴領域の断面積解析では、Larson (ORNL)による計算コード SAMMY の改良、Hale (LANL)による ^{15}N に対する共鳴断面積の評価、Lukyanov (Sofia 大)による統計的解析、Hale (LANL)による軽い荷電粒子反応への適用の報告があった。核分裂中性子スペクトルでは、Madland (LANL)はアクチナイド核に対する自発核分裂の平均中性子多重度と即発中性子スペクトルについて、それら相互の関係に注目しロスアラモスモデルにより解析した。

4. 医学応用

4.1 癌治療

癌治療では、すでに陽子（約 200 MeV）や高速中性子（約 70 MeV）の利用が始まっている。生体内での線量分布の評価は従来経験的手法で行われてきたが、最近ではモンテカルロ輸送計算によって詳細に線量分布を特定する方法が浮上してきた。White (LLNL)、Siantar (LLNL) は、癌治療のための全粒子（光子、電子、陽子、中性子、荷電粒子）放射線輸送コード PEREGRINE について報告した。このコードは臨床的に使いやすく作成されており、臓器配置の入力や線量分布の表示が、MRI（磁気共鳴イメージング）を利用した画面で行える。中性子や陽子のペンシルビームによる線量分布の画像表示は説得力があった。このような癌治療の計算のため、前述のような生体元素に対する 2 重微分断面積の計算が行われるとともに、C に対する Slypen (Louvain Catholique 大) の 2 重微分断面積の実験、同じく C に対する渡辺（九大）のカーマファクターの研究が報告された。

4.2 医学診断用 RI 生産

PET（陽電子放出トモグラフィー）用など陽電子を放出する放射性同位元素の製造がさかんになっている。Qaim (FZJ) は PET 用の核種生成 (^{75}Br 、 ^{86}Y 、 $^{94\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{124}I) について講演した。Mirzadeh (ORNL) は、アイソマーの生産は (n, γ) 反応による方法が多いが、 $^{117\text{m}}\text{Sn}$ 、 $^{119\text{m}}\text{Sn}$ 、 $^{195\text{m}}\text{Pt}$ の場合には $(n, n' \gamma)$ 反応の方が断面積が大きくて有利であることを報告した。その他、Hermanne (Brussel 大) による 20 ~ 43 MeV の α 粒子による ^{77}Br 、 ^{76}Br 生産の最適化に関する実験、Tarkanyi (INRHAS) による 10 ~ 18 MeV までの陽子・重陽子を用いた Te ターゲットによる I アイソトープ生成断面積の実験が報告された。

5. 加速器炉、中性子源、施設など

Rubbia (CERN) はエネルギー約 1 GeV、ビーム電流 1 ~ 3 mA の陽子加速器と、 ^{233}U を含む Th 固体燃料を組み合わせた未臨界体系加速器増殖炉の概念設計を報告した。この体系の特徴として、Pu やアクチニド廃棄物の生産が少ないことを強調した。従来からの同種の提案との違いは、加速器としてできるだけサイクロトロンを採用すること、出力 15 MW 程度の小型炉にして多数分散配置することがあげられる。Bowman (LANL) は、Th 熔融塩にアクチニド廃棄物に加えた体系をターゲットとした加速器消滅炉を提案した。Moore (LANL) は奇々核の共鳴核分裂反応を用いるとアクチニド消滅処理率が向上することに注目し、 ^{238}Np 、 ^{242}Am の核分裂断面積を測定した。Michaudon、Lisowski (LANL) は、スポレーション中性子源施設の報告をした。原田（動燃）は電子リニアックを使用した (γ, n) 反応による中性子源について、動燃からの計算結果を示した。Wunstorff (ORNL) は (γ, n) 反応中性子源による実験装置及び実験結果を報告し

た。

6. 宇宙物理

宇宙の原子核合成の研究には、軽い核種を中心とした広範な断面積が必要とされる。井頭（東工大）はペレトロン加速器と大型 NaI 及び Ge 検出器を用いた中性子エネルギー $\text{keV} \sim \text{MeV}$ 領域の (n, γ) 反応の実験を報告した。Beer (KfK) はエネルギー 25 keV での (n, γ) 反応実験の結果を述べた。Smith (ORNL) は宇宙物理研究のため不安定核加速による実験をめざす ORNL の HRIBF を紹介した。Villani (Kentucky 大) は太陽ニュートリノの検出に有望な ^{81}Br 検出器の効率校正を目的として、 $^{81}\text{Br}(p,n)$ 反応の Q 値の精密測定を行った。

7. 核データニーズ、その他応用

核融合炉 ITER に関して、Martin (EURATOM-CEA) は、第一壁の放射化の問題について、 $30 \sim 300 \text{ MeV}$ の (γ, n) に対する核データのニーズを紹介した。Youssef (California 大) は、核データの不確定性に起因する ITER の設計余裕について報告した。核データニーズについて、Westfall (ORNL) により核分裂性物質の臨界安全の問題、Hansen (LLNL) により核兵器解体のための核物質輸送における遮蔽と臨界安全の問題、Haas(WVNS) により廃棄物処理における設計余裕の問題が報告された。また、Bendahane (SAIC) は、荷物などの非侵襲的検査として中性子透過法、 γ 線透過法を説明し、それらの技術の進歩に比較し、利用する核データが満足すべきレベルではないことを指摘した。

Pace (ORNL) は第 2 次大戦の広島、長崎での原爆投下における線量の再評価を報告した。原爆投下後、爆心地付近の線量評価が 40 年間に 3 回行われた。しかし、近年の新しい核データと輸送計算によって、従来の評価値は特に 100 m 以上離れた地点で過小評価であったと述べた。

物理の問題としては、Mitchell (North Carolina 州大) は国際共同研究 TRIPLE のパリティ非保存の実証実験の成果を紹介し、それ関連する核データについては、Corvil (IRMM) がウランの低励起状態のスピン同定を報告した。

8. まとめ

消滅処理や天文物理での応用を念頭においた高エネルギー核反応の研究、FKK 理論などを中心とした量子力学的前平衡理論の報告、医学応用として癌治療・診断用 RI 生産、消滅処理などのスポレーション中性子利用、宇宙物理での原子核合成などが印象に残った。