

ディビジョン番号	17
ディビジョン名	資源・エネルギー・地球化学・核化学・放射化学

大項目	3. 核化学・放射化学
中項目	3-1. 核化学・放射化学
小項目	3-1-4. 核反応研究の新展開

概要（200字以内）

核反応の研究は、加速器ができた当時から高エネルギーに加速した陽子等を入射粒子とした実験で行われ、様々な核反応モデルが考案されてきた。これらを計算機に再現する努力がなされているが、現在でも実験値との不一致が大きく、新実験データの提供はこれらの発展に重要である。放射化学の手法による核反応生成核の測定感度は高く、高エネルギー中性子コースなど強度の低いビームを利用した新しい実験データの取得に貢献する。

現状と最前線

中高エネルギーハドロン原子核衝突により起こる核反応は、核子多体系の反応ゆえに波動関数を厳密に解く手法は取れない。近似的なモデルが様々提案されており、コンピュータを用いたモンテカルロのシミュレーションにより再現する努力がなされている。近年では、モンテカルロ粒子輸送コードと呼ばれる核反応間の粒子輸送を組み込んだコードが発達し、多重で起こる核反応の計算が、高強度化が進む加速施設の遮蔽設計等、様々な応用分野で用いられるようになった。近年のコンピュータの性能の向上により、ほとんどの計算コードは核反応をモデルに基づき exclusive に計算する方法を採用している。このような核反応の計算は、モデルが悪ければ多重ゆえにそのずれが増幅し、正確さを欠くことになる。一例として、図1に平山らによる世界の5大コード（FLUKA, MARS, GEANT, PHITS, MCNPX）をはじめとする各種コードを用いて計算した、コンクリートへ1GeVの単色中性子を入射したときの深度に対する線量率[1]を示す。かつて、全ての主要なコードが同じ計算を行い比較されたことはなかった。これは SATIF-8 (Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities) の1プロジェクトとして行われたもので、現在でも計算結果がコード間で桁で違うことが示された。そこでコードの実験的評価が必要となり、様々な条件での評価が行われている[2, 3など]。高エネルギー加速器研究機構では、中性子科学研究施設に500MeV陽子をタングステン標的に衝突させて発生する高エネルギー中性子を0度方向にコリメートしてコンクリート遮蔽体に入射し、中性子の減衰を4mにも渡って調べることが出来る実験コースを建設した。中性子強度が高く、非常に狭いスペースしかない環境下で、放射化学の手法や加速器質量分析による超微量分析により、透過中性子強度の測定に成功した

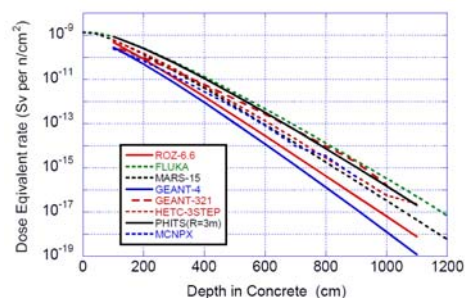


図1 1GeV 中性子入射におけるコンクリート中の深度に対する線量率の計算結果[1]

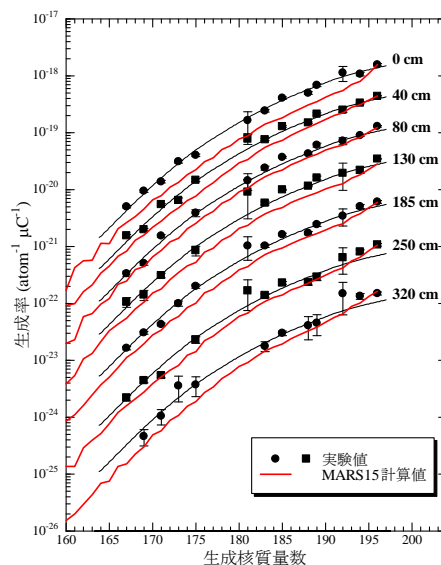


図2 500MeV 高エネルギー中性子コースのコンクリート中に置かれた各深さごとの金標的中の質量生成率分布[4]

[4-8]。図 2 に実験結果の一例を示す。これはコンクリート中に設置した金標的の核破砕生成核の質量生成率分布をプしたもので、生成核の質量数が小さいほどエネルギーが高い粒子が観測されたことになる。赤線は計算コードのひとつである MARS15 コードで計算した結果で、特にエネルギーの高い反応による生成率を約半分と見積もった。これにより MARS15 では 0 度方向に放出される高エネルギー中性子が不足していることが半明したのである。モデルの改良には様々な条件での実験データの蓄積が必要であり、今後、特に実験が不足している中性子核反応を研究する場として、阪大 RCNP 等の単色中性子源がその主力のひとつとなるであろう。

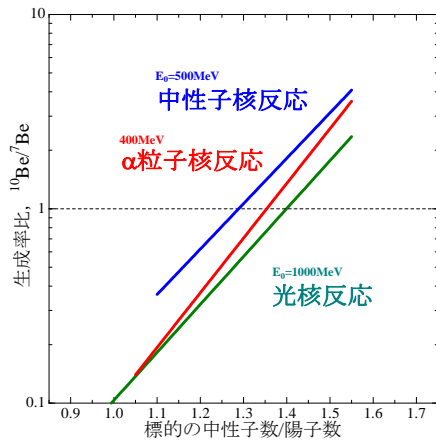


図3 光子、中性子、 α 粒子、陽子誘起核反応におけるベリリウム同位体生成比の標的核の中性子陽子数比に対する変化[16]

また、個々の核反応という観点から見ると、核反応の中で、ベリリウムなどの大きなフラグメントの生成が興味深い。重標的核のハドロンによる高エネルギー核反応において ^7Be や ^{24}Na の様な α 粒子より重く質量数 40 位までの軽核の生成断面積が顕著に高く、その軽核生成に対して 1956 年に R. Wolfgang ら[9]が、大きな核片が放出されることを描像して、「フラグメンテーション」と名付けた。大きな核片を理論的に作り出すことは難しく、様々なモデルが考案されているが、現在もなおフラグメンテーションの反応機構は明確になっていない[10, 11]。フラグメント生成に関する放射化学的手法による系統的な研究は、近年ではドイツの Qaim らにより低エネルギー核反応を中心に行われた[12]。中高エネルギーにおいては著者らが光核反応、中性子核反応、 α 粒子核反応において系統的に調査した[13-16]。計算コードでは、モデルとして原子核が熱平衡に達した後統計的蒸発過程で軽核を生成する計算が組み込まれ、おおよそ、その生成率を再現するの

成功を収めている[17]。しかしながら、図3に示されたように、ほぼ同じ実効エネルギーでも入射粒子により生成フラグメントの同位体比に違いがあることから、入射粒子による影響があるほど早いプロセスでのフラグメント生成が重要であることが推測される。カスケードモデルでは、大きなフラグメントを早いプロセスで作ることが不可能であったが、最近では分子動力学手法による計算が可能になり、早い核反応によるフラグメント生成の計算が可能になった。現在、取得中のフラグメントの角度・エネルギー分布を含めてこのモデルがどれだけ再現性があるかは興味深い。

参考文献 [1] H. Hirayama and Attenuation Length Sub-Working Group in Japan, Proc. SATIF-8, May 22-24, 2006, PAL, Pohang, Korea. [2] H. Matsumura et al., Nucl. Instr. and Meth. B, **256**, 591-598 (2007). [3] Y. Iwamoto et al., Proc. SATIF-8 May 22-24, 2006, PAL, Pohang, Korea. [4] 松村宏ら, 2006 日本放射化学学会年会・第 50 回放射化学討論会 (2006). [5] H. Matsumura et al., Proc. SATIF-8 May 22-24, 2006, PAL, Pohang, Korea. [6] H. Matsumura et al., Radiat. Prot. Dosim., **116**, 1-5 (2005). [7] N. Nakao et al., Radiat. Prot. Dosim., **116**, 553-557 (2005). [8] T. Aze et al., J. Radioanal. Nucl. Chem., in press. [9] R. Wolfgang et al., Phys. Rev., **103**, 394 (1956). [10] W. G. Lynch, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci., **37**, 493 (1987). [11] J. Hüfner, Phys. Rep., **125**, 129 (1985). [12] S. M. Qaim, Radiochim. Acta, **70/71**, 163 (1995). [13] H. Matsumura et al., Nucl. Instr. and Meth. B **223-224**, 807-811 (2004). [14] H. Matsumura et al., Radiochim. Acta, **88**, 313-328 (2000). [15] H. Matsumura et al., Radiochimica Acta, **93**, 497-501 (2005). [16] H. Matsumura et al., Abst. AMS-10, Sep. 12-15, 2005, Berkeley, California, USA. [17] S. Furihata, Nucl. Instr. and Meth. B, **171**, 251-258 (2000).

将来予測と方向性

- ・ 5 年後までに解決・実現が望まれる課題
- ・ 10 年後までに解決・実現が望まれる課題

キーワード

中高エネルギー核反応, 高エネルギー中性子, フラグメンテーション

(執筆者: 松村 宏)