

中高エネルギー陽子による核破砕片の系統測定に関する研究

(受託者)大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構

(研究代表者)佐波俊哉 共通基盤研究施設 放射線科学センター

(研究開発期間)平成21年度～22年度

1. 研究開発の背景とねらい

近年、加速器からの中高エネルギー（数10から数100 MeV）の粒子線は、医学、工学の分野において広く利用されてきている。医学分野での代表例は炭素線や陽子線を用いたがん治療であり、治療法の開発のために照射量とがん細胞消滅率の関係や、適切な照射量を計算し、これを制御・実現する方法などについて、生物学、医学、加速器学の立場から研究が進められている。このような中高エネルギー粒子線の応用の基礎となるデータの一つに中高エネルギー粒子と標的核との相互作用がある。この相互作用の一つである核破砕反応では入射粒子が標的核を破砕し、中性子や陽子などとともに核破砕片が放出される。核破砕片は他の軽粒子に比べ線エネルギー付与が格段に大きく、数マイクロメートルという細胞サイズに大きなエネルギーを付与するので、照射影響の評価のために重要である。しかし、核破砕片の放出を完全に記述するモデルとパラメータは存在せず、特に応用上重要な炭素、窒素、酸素などの軽元素については不確定性が大きい。従って、実験による系統的な実測データにより、核破砕片生成の、入射エネルギー、標的核種、放出エネルギー、放出角度、などの依存性を明らかにすることが有用である。

本事業では中高エネルギー陽子による核破砕片の高効率測定法の開発と系統測定を行った。広いエネルギー領域において良好な粒子弁別性能を有するブラッグカーブ検出器に改良を加え、ビーム実験を行い、ターゲット核種、核破砕片の種類、放出エネルギー、角度ごとの系統的なデータを得た。測定データと計算コードの結果を比較し、核破砕片放出モデルの検証を行った。

2. 研究開発成果

本事業は平成21年7月から平成23年3月までの1年9ヶ月の事業期間で進められた。研究開発の成果を以下にまとめる。

- ・高効率核破砕片検出器の作成を行った。検出器は4台作成され、4角度同時測定に供された。これによりビームタイムの大幅な節約をしつつ、多くのターゲットについて測定値を得ることができた。この検出器は、飛程・エネルギー相関を用いた粒子弁別、突き抜け粒子エネルギー補正による可測定域の拡充の工夫に加え、3x3のウィンドウフレーム型サブミクロン入射窓を備え、核破砕片を広いエネルギー領域で効率的に測定できるという特徴を備えている。

- ・放射線医学総合研究所及び大阪大学核物理研究センターでのビームライン整備を行った。核破砕片検出器を設置し、ビーム実験を行うための散乱チェンバー、真空機器、ビーム計測機器などを整備した(図1)。本事業で新規に実験立ち

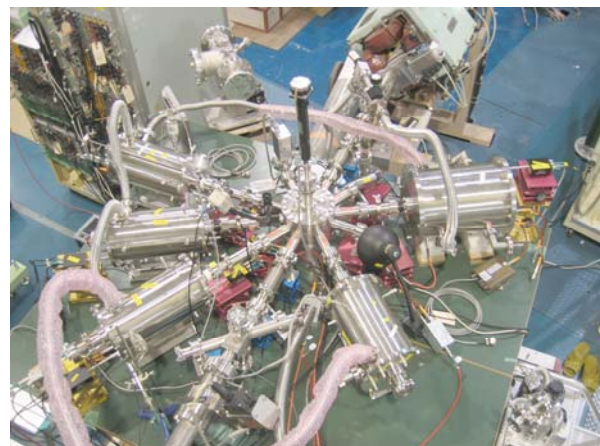


図1 大阪大学核物理研究センターにおける実験セットアップ

上げた大阪大学核物理研究センターでは、新設ビームコースの整備と機器調整を行い、ビーム実験を遂行することができた。

- ・酸素及び窒素からの生成核破砕片を測定するために、酸化アルミニウム、窒化アルミニウムをタンタル箔上に蒸着したターゲットを作成し、別途測定したアルミニウム、タンタルの測定値を差し引くことにより断面積値を得る手法を実現した。これまで実験データの得られていなかった、酸素、窒素に対する中高エネルギー領域での核破砕片生成データを得た。

- ・ $Z=6$ から 29 のターゲットに対して、40MeV から 300MeV までの入射エネルギー、30 度から 120° までの角度範囲において核破砕片生成データを得ることに成功した(図 2)。このデータを用いることにより、理論モデルや照射影響の評価を進めることができる。このような軽元素ターゲットを含む広い範囲での系統的なデータ取得に成功したのは初めてのことである。

- ・3 つの異なる核内カスケードモデルを用いた理論計算を行い、実験データの再現性を確認した。核内カスケードコードの違いが蒸発過程に与えるエネルギーを変化させ、核破砕片放出の再現性を左右することが明らかになった。これまでのモデルでは再現できない成分が核種毎、エネルギー毎に明らかになった。

- ・実験データを 4 つのパラメータからなる系統式でフィッティングして数値を与えることを可能とした。実験点を内挿し角度微分断面積を得ることができた。得られた角度微分断面積を計算結果と比較し、積分値における再現性の確認も可能とした。

- ・実験データの結果、計算コードとの比較を関連学会、専門家によるシンポジウム、核データ国際会議、投稿論文において発表した。論文発表に基づき、国際実験データベース(EXFOR)への収録が開始された。

3. 今後の展望

本事業で得られた成果は本プログラム終了後も、関連学会、研究会、国際学会に発表されており、逐次論文化が進められている。本事業により、核破砕片生成の系統的な実験データが得られ、この実験値と計算値の比較から、理論計算モデルの不備が明らかになった。今後は核破砕片生成過程を記述する理論モデルの構築と実装、そしてそのモデルを用いた照射効果の推定が焦点になってくると考えられる。

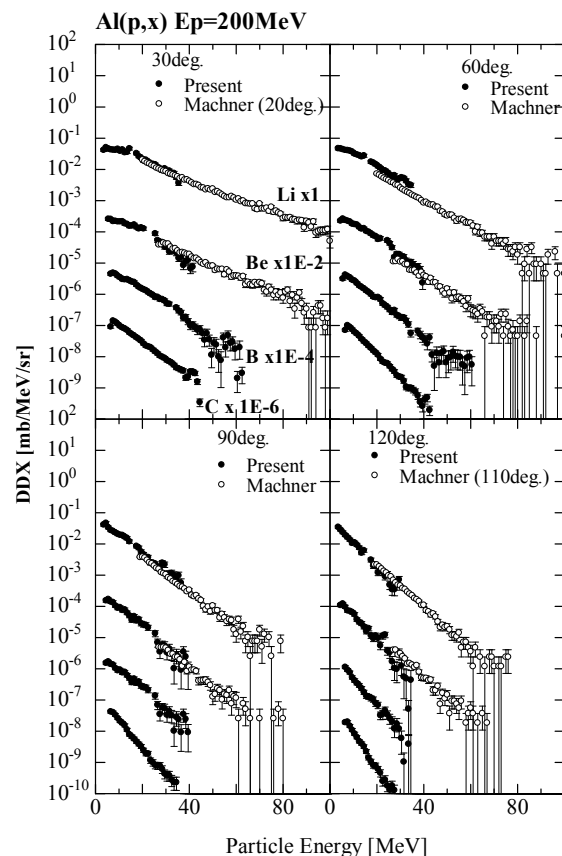


図2 200MeV陽子がアルミニウムに入射し生成した核破砕片(Li, Be, B, C)の測定結果。黒丸は本事業、白丸は他グループの結果。本事業の結果は、これまで測定できていない、収量の多い低エネルギー部分と、BやCなどの比較的重い核破砕片を与えている。