

GeV領域の陽子入射中性子生成 二重微分断面積測定の現状

九州大学大学院工学研究科エネルギー量子工学専攻

石橋 健二

e-mail: kisibasi@nucl.kyushu-u.ac.jp

執行 信寛

e-mail: shigyo@kune2a.nucl.kyushu-u.ac.jp

日本原子力研究所中性子科学研究センター

明午 伸一郎

e-mail: meigo@linac.tokai.jaeri.go.jp

はじめに

近年、世界的に加速器駆動未臨界炉や加速器による強力中性子源施設構想が話題になっており、研究開発が活発になってきている。これらは、エネルギーGeV領域の粒子が原子核に入射して起こる核破碎反応からの多数の中性子を使用する施設である。加速器駆動未臨界炉の代表的な利用には、原子炉で生成される長寿命放射性廃棄物を短寿命核種へ核変換する消滅処理(1,2)や、トリウムなど熱核分裂性親物質の効率的な燃焼(3)が挙げられる。日本では、日本原子力研究所の中性子科学研究センターで1.5GeV陽子による強力中性子源や消滅処理システムの研究が進められている。これらの施設の設計にはGeV領域を含む高エネルギー粒子を取り扱う輸送コードが使用されることになるが、工学的にはこれらの設計計算における核破碎反応の中性子生成断面積の精度の検証が必要とされる。

陽子入射による中性子生成断面積測定は、1980年代の中頃に米国Los Alamos国立研究所(LANL)で入射エネルギー800MeVによる測定(4)が行われた。また、ほぼ同時期にスイスのPaul Scherrer研究所(当時はSIN)では585 MeVの陽子入射による実験(5)が行われたが、これら初期の実験では、放出中性子のエネルギー領域によっては実験値と計算値に1桁以上の不一致が見られる状態であった。しかし、最近の工学的なニーズの高まりに応じ、その後10年の間にエネルギーGeV領域の陽子入射中性子生成二重微分断面積について精力的な研究がさなれ、信頼性の高いデータが得られるようになった。

それによって、GeV領域における高エネルギー粒子輸送コードの精度に問題点があることも明らかになりつつある(6)。本稿では、実験データを中心に、米国LANLのグループ(7, 8)、九州大学・日本原子力研究所・高エネルギー加速器研究機構(KEK)など日本のグループ(9, 10)、フランスSATURNE国立研究所のグループ(11, 12)のそれぞれの陽子入射中性子生成二重微分断面積の測定実験について照会する。

各グループの実験

各グループが行った高エネルギー陽子入射中性子実験の概要を表1に示す。入射陽子のエネルギーについては、3つのグループとも0.8 GeVで実験を行っている。これは、最初に実験を行ったLANLの線形加速器の陽子エネルギーが0.8GeVであることに起因している。LANLではこの他に113 MeV、256MeV、597 MeVでも実験が行われている。九州大学を中心としたグループは高エネルギー加速器研究機構(KEK)(実験当時は高エネルギー物理学研究所)の二次陽子ビームを使用し、0.8 GeV、1.5 GeV及び3.0 GeVで実験を行った。SATURNEでは0.8 GeV、1.2 GeV及び1.6 GeVの入射エネルギーで測定が行われた。SATURNEのグループは、入射粒子として陽子の他に重陽子でも実験を行った。ターゲットはLANLの実験ではBeからUまでの7核種、KEKではCからPbまでの6核種、SATURNEではAlからThまでの6核種となっている。3つのグループとも軽い核種から重い核種まで幅広いターゲットを対象としている。また全てのグループで比較的軽い核種としてAl、代表的な構造材料としてFe、重い核種として核破碎ターゲットの候補の1つであるPbを選択している。中性子の測定角度は、LANLの実験は7.5° から150° までの5方向、KEKでは15° から150° までの6方向、SATURNEでは0° から160° までである。遮蔽設計などにおいて0° 方向の中性子放出データの重要さが指摘されており、現状の粒子輸送コードでは0° 方向の計算精度が問題になっている。このような背景から、最も最近の実験であるSATURNEでは、0° 方向の測定がなされており、今後コードの改良などに繋がると期待される。

次に測定装置のセットアップについて簡単に説明する。3つのグループとも、飛行時間(TOF)法による中性子測定を行っている。LANLの実験は、LANL Meson Facility (LA MPF)のWeapon Nuclear Research (WNR) facilityで行われた(7, 8)。WNRの陽子ビームはTOF用のマイクロパルスの時間構造を持っており、この時間構造によりTOF法の時間基準信号が得られる。図1に検出器の配置図を示す。入射ビームの平均電流が250nAと強力であるため、長い飛行距離での測定が可能であり、ターゲットから中性子検出器までの飛行距離が30 mから60 mと長いのが特徴である。ターゲットの周囲は遮蔽用に直径10 m、厚さ0.4 mのコンクリートで囲まれており、検出器方向に直径約10 cmの穴が開けられている。飛行距離が長いために、一般には低エネルギー中性子に対してバ

バックグラウンド事象の影響が大きくなるが、この穴がコリメータの役割を果たしておりバックグラウンド事象の低減に寄与している。中性子検出器には直径10.5 cmから25.4 cm、厚さ5.1 cmから20.3 cmのBC501及びNE213液体有機シンチレータが使用されている。測定に用いられた検出器の種類を表2に示す。異なる大きさの検出器を用いているのは、角度により異なった飛行距離となっており、その計数率の差を小さくする目的がある。

九州大学を中心としたグループは、KEKの12 GeV陽子シンクロトロンでの π^2 ビームラインで測定を行った(9, 10)。このビームラインは2次粒子のビームラインであり、シンクロトロンの主リング中の内部標的ターゲットから生成される広いエネルギー範囲の2次粒子の中から、電磁石によって粒子の運動量を選別できるようになっている。しかし2次粒子を使用するため、ビーム強度はfA程度であり非常に弱い。シンクロトロン加速器であるためTOF法の時間基準信号を加速器から取得できず、ビームライン上のシンチレータからの信号を時間基準とした。この実験での検出器の配置を図2に示す。このビームラインでは陽子の他に π^+ 中間子も混在してくるため、S01、S02、P01、P02の4台による入射ビームのTOFで、陽子と π^+ 中間子を弁別している。中性子検出器には、低エネルギー用(1~3 MeV)として直径5 cm×長さ5 cm、高エネルギー用(3 MeV以上)として直径12.7 cm×長さ12.7 cmの2種類の大きさのNE213液体有機シンチレータが使用された。低エネルギー用検出器に対しては0.6 mから0.9 m、高エネルギー用検出器に対しては1.0 mから1.5 mの飛行距離としている。この測定ではLANLの場合と比べ飛行距離が短い、シンチレータからの時間基準信号を使用しているため時間基準の時間分解能が0.3ns程度と非常に良く、そのため飛行距離が短さの割には高エネルギー部分まで測定ができています。また飛行距離が短いためターゲット周囲には遮蔽体やコリメータを設置せずとも、バックグラウンド事象の影響を取り除いた測定が可能となった。

SATURNEの実験(11, 12)での検出器の配置を図3に示す。この実験はPhase 1、Phase 2の二期に分けて行われた。Phase 1では 0° 方向の中性子のエネルギー分布が測定され、Phase 2では角度分布の測定とともに厚いターゲットでの中性子のエネルギー分布が測定された。Phase 1とPhase 2では実験手法自体は同じであるが、エネルギー200MeV以上の高エネルギー中性子に対しては液体水素ラディエータによる反跳陽子スペクトロメータ法が使用され、400MeV以下の低エネルギー中性子についてはTOF法が用いられた。図3は、Phase 2の場合の検出器配置である。ターゲットの周囲には遮蔽用の重コンクリート壁が設置されている。この壁には 0° 方向に加え、 10° から 160° の間に 15° 間隔で測定用の穴が空いている。200 MeV以上のエネルギーではTOF法ではエネルギー分解能が低下するので、反跳陽子スペクトロメータを用いて中性子のエネルギーを測

定する方法が採用された。反挑陽子スペクトロメータは 0° から 85° まで動かすことが可能である。入射ビームはターゲットの前方のWとPb製のビームストップで曲げられる。中性子検出器には直径12.7 cm、長さ17.8 cmのNE213が用いられた。SATURNEの加速器はシンクロトロンでありTOF法用の時間基準信号が得られないため、1.5 MeVから400 MeVまでの中性子のTOF測定では、標的の前のプラスチックシンチレータからの信号が時間基準とされた。

測定結果

3つグループによるほぼ同じ条件の測定結果を図4に示す。同図は、入射エネルギー0.8 GeV、ターゲットPbの場合の中性子生成二重微分断面積である。×印はLANL、○印はKEK、▲印はSATURNEでの測定値であり、実線は核内カスケード・蒸発模型計算コードの一つであるHETC-KFA2(14)の計算結果(10)である。SATURNEの実験は測定角度が他のグループと異なっているが、この図ではSATURNEの実験では、 25° 、 55° 、 130° 、 160° の測定値を示している。中性子のエネルギーが20 MeVから200 MeVの領域において、中性子生成断面積はSATURNE、LANL、KEKの順で大きくなっていく傾向がある。30MeVから100 MeVの範囲ではKEKとLANLの測定値がほぼ一致しているのに対し、SATURNEの測定値は最大で約30 %小さな値となっている。これは、実験データから断面積を求める際のターゲット厚さ等の補正の仕方が各機関によって異なるためであると考えられる。また、HETCによる計算結果は、 30° 、 60° 方向ではLANLの測定値と良く一致しているが、KEKのデータを幾分過小評価し、SATURNEのデータについてはかなり過大評価していると言える。一方 120° 、 150° 方向では、HETCによる計算結果はSATURNEの測定値と良く一致しているが、LANLとKEKの測定値自体は相互によく一致している。各グループの実験データの差は検出器の測定効率の評価の違いなどにも原因しているが、実験条件、データ解析方法を精査していく必要がある。

次にSATURNEの実験での1.2 GeV陽子入射における 0° 方向の中性子生成二重微分断面積の結果を図5に示す。この図で●印は測定値、実線はHETC-Bruyères-Châtelによる計算値(15)である。この図から全体的に測定値の方が計算値より小さな値となっていることがわかる。特に入射エネルギーに近い500 MeV以上の中性子エネルギー領域においてファクターで3程度異なっている。本来、核内カスケード模型計算で 0° 方向の実験値を再現することは困難であるが、特にHETCでは原子核のポテンシャルによる核子の偏向を考慮されていないことも原因していると考えられる。

工学的応用として重要な中性子の生成断面積の他に、KEKの実験では液体シンチレータのデータから、アンフォールディングによって γ 線生成二重微分断面積が得られた(15)。図6は1.5 GeV陽子をFeターゲットに入射したときの線生成二重微分断面積の測

定結果である。測定値を●印、HETC-KFA2による計算結果(16)を実線で示している。一方、参考量として、 π^0 の崩壊による γ 線生成断面積の計算値を×印、 π^0 崩壊 γ 線の寄与の推定値を破線で表している。同実験で使用された液体シンチレータは密度が低いいため、20MeV以上のデータを正しく断面積になっていないが、この領域はほぼ π^0 崩壊 γ 線の影響と考えられる。 γ 線のエネルギーが1 MeVから10 MeVの領域では、実験値と計算値は良い一致を示している。HETC-KFA2は核破碎終了後の励起状態からの γ 線放出しか考慮していないため、これ以上のエネルギー領域では π^0 崩壊 γ 線を除いて計算をすることができない。10MeVから20MeV領域で不一致はあるものの、HETC-KFA2の γ 線生成断面積計算はおおむね良好であることが明らかになった。

おわりに

長寿命放射性廃棄物の加速器駆動型消滅処理施設などの実現にGeV領域の中性子生成二重微分断面積データが必要となっており、近年、米国、日本、フランスの3つのグループによって測定が行われた。800 MeV陽子入射の場合、3つグループのデータ間には、最大約30 %の違いが見られる。核内カスケード・蒸発模型計算コードの一つであるHETCの計算結果を比較すると角度によって一致の度合いが異なる結果となった。今後の課題として、シミュレーションコードの一層の改良が求められてくる。

参考文献

- (1) Nakahara, Y., and Nishida, T: Nuclear Data for Science and Technology, Jülich, 1991, p.23 (1992).
- (2) Bowman, C.D., et al.: Nucl. Instr. and Meth., A320, 336 (1992).
- (3) Rubbia, C., et al.: IAEA-TECDOC-985, 187 (1997).
- (4) Howe, S.D., et al.: LANL-85-3360 (1985)
- (5) Cierjacks, S., et al.: Phys. Rev., C36, 1976 (1987).
- (6) Blann, M., et al.: International code intercomparison for intermediate energy nuclear data, OECD/NEA (1994).
- (7) Stamer, S., et al.: Phys. Rev., C47, 1647 (1993).
- (8) Amian, W., et al.: Nucl. Sci. Eng., 112, 78 (1992).
- (9) Nakamoto, T., et al.: J. Nucl. Sci. Technol., 32, 827 (1995).
- (10) Ishibashi, K., et al.: J. Nucl. Sci. Technol., 34, 529 (1997).
- (11) Leray, S., et al.: Conference Proceedings Vol. 59 Nuclear Data for Science and Technology, Reffo, G., et al. Eds., SIF, Bologna, 1426 (1997).
- (12) Patin, Y., et al.: Proceedings of International Conference on Future Nuclear

- Systems, Yokohama, 789 (1997).
- (13) Meier, M.M., et al.: Nucl. Sci. Eng., 110, 289 (1992).
- (14) Cloth, P., et al.: KFA-Report, JI-2203 (1988).
- (15) Bersillon, O., et al.: 2nd Int. Conf. on Accelerator Driven Transmutation Technologies Klamer, Sweden, (3-7 June 1996).
- (16) Iga, K., et al.: J. Nucl. Sci. Technol., 35, 329 (1998).

表1 各機関の実験の概要

| 機関 | Los Alamos国立研究所 | 九州大学等 | SATURNE国立研究所 |
|--------------|--|----------------------|-----------------------|
| 入射エネルギー(GeV) | 0.8 | 0.8, 1.5, 3.0 | 0.8, 1.2, 1.6 |
| ターゲット | Be, C, BeO, Al, Fe, Pb, ²³⁸ U | C, Al, Fe, In, W, Pb | Al, Fe, Zr, W, Pb, Th |
| 測定角度(度) | 30 - 150 | 15 - 150 | 0 - 160 |
| 参考文献 | (7, 8) | (9, 10) | (11, 12) |

表2 Los Alamos国立研究所での実験で使用された検出器

| | | | | | |
|-------------------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|
| 角度(度) | 7.5 | 30 | 60 | 120 | 150 |
| 飛行距離(m) | 50 | 30 | 59 | 23 | 31 |
| 検出器の種類 | BC501 | NE213 | BC501 | BC501 | BC501 |
| 検出器の直径(cm)×長さ(cm) | 25.4×5.1 | 10.2×10.2 | 30.5×20.3 | 25.4×5.1 | 30.5×20.3 |

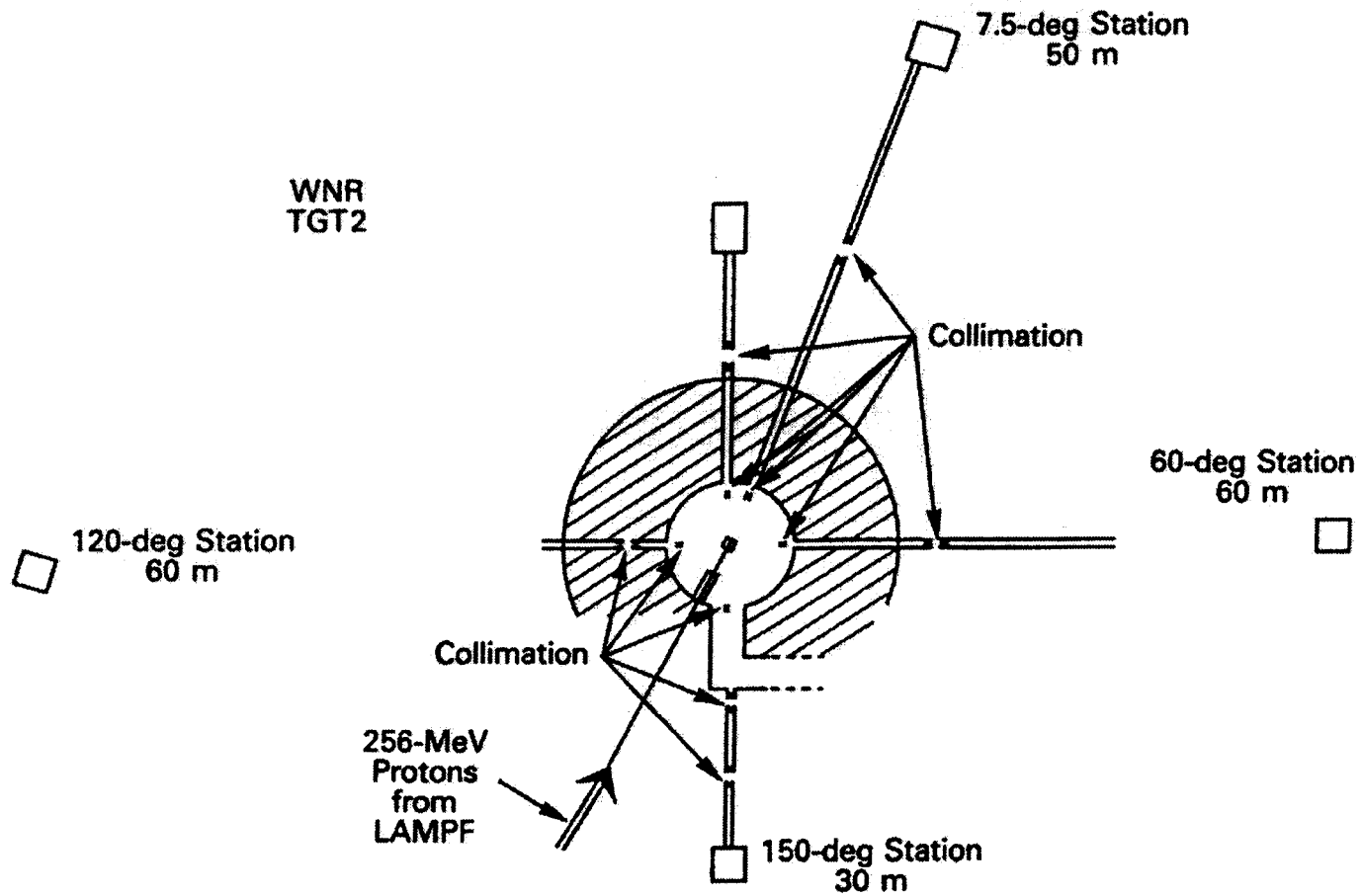


図1 Los Alamos国立研究所の実験における検出器等の配置図(13)。

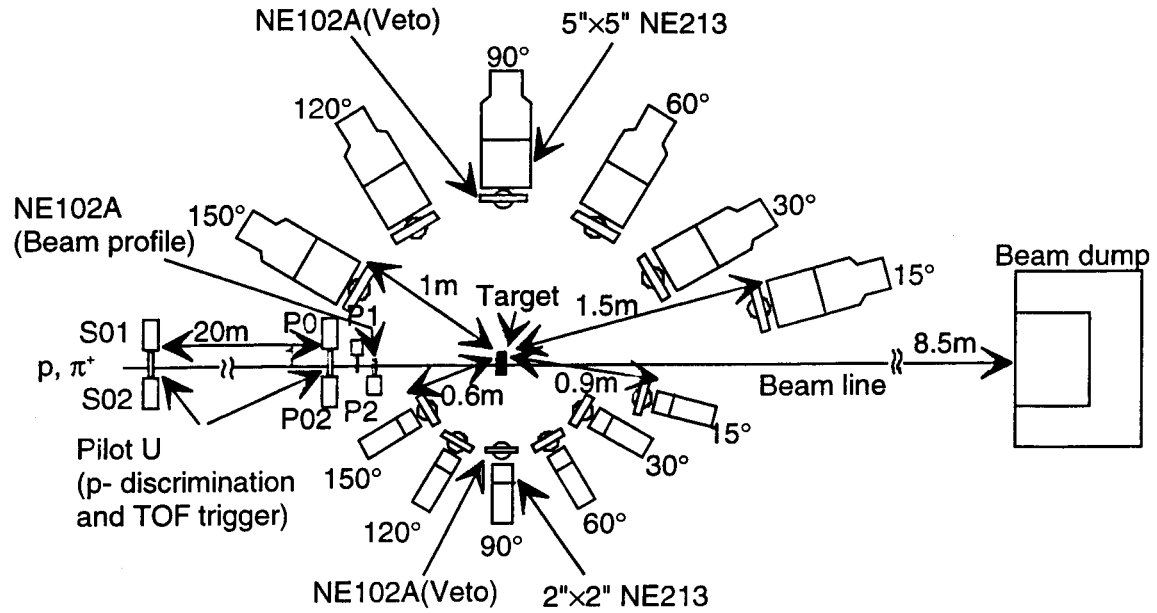


図2 高エネルギー物理学研究所の実験における検出器等の配置図(9)。

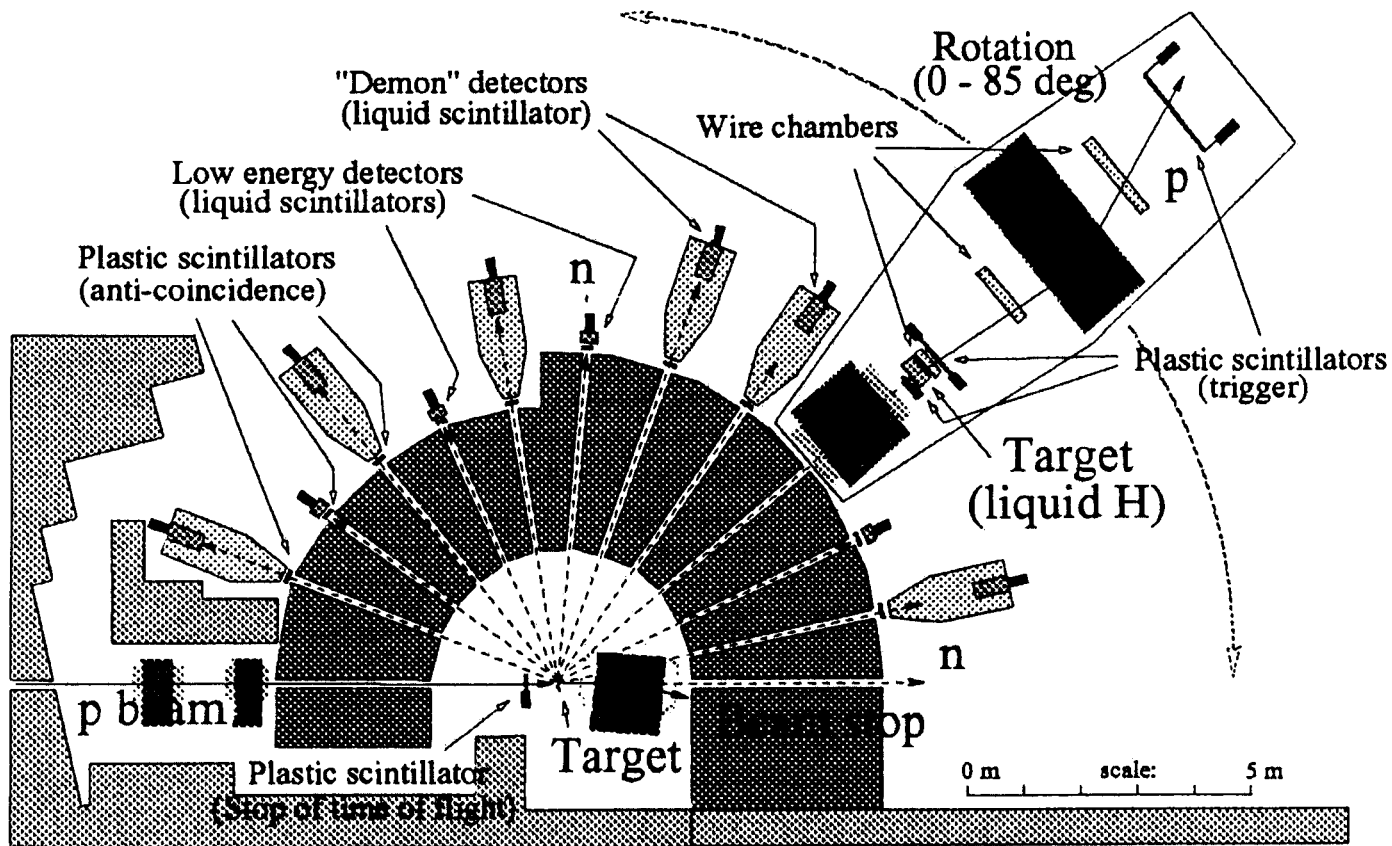


図3 SATURNE国立研究所の実験における検出器等の配置図(11)。

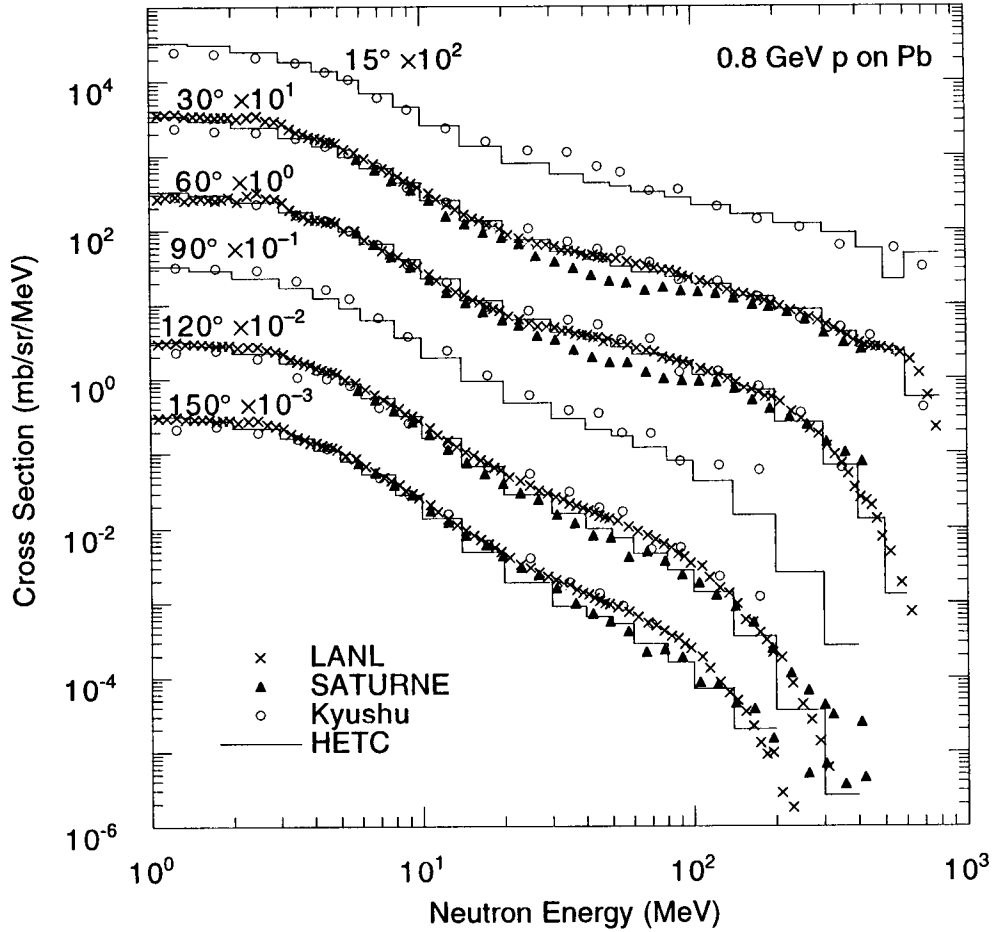


図4 0.8 GeV陽子をPbターゲットに入射したときの中性子生成二重微分断面積。×、○、▲はそれぞれLANL、KEK、SATURNEの実験による測定値、実線はHETC-KFA2による計算結果を表す。SATURNEの実験の測定角度は、図中の表記とすこし違い、25°、55°、130°、160°である。

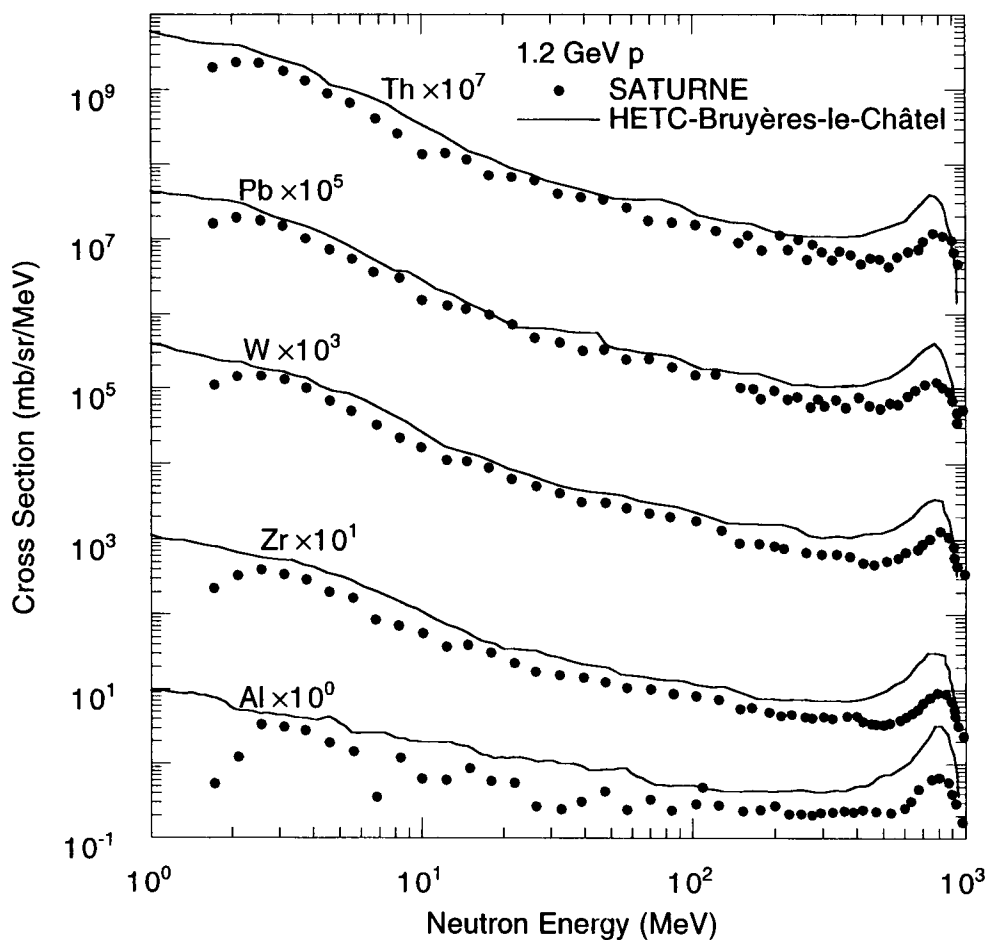


図5 1.2 GeV陽子をThからAlまでのターゲットに入射したときの 0° 方向の中性子生成二重微分断面積。●はSATURNEによる測定値、実線はHETC-Bruyères-Châtelによる計算結果を示す。

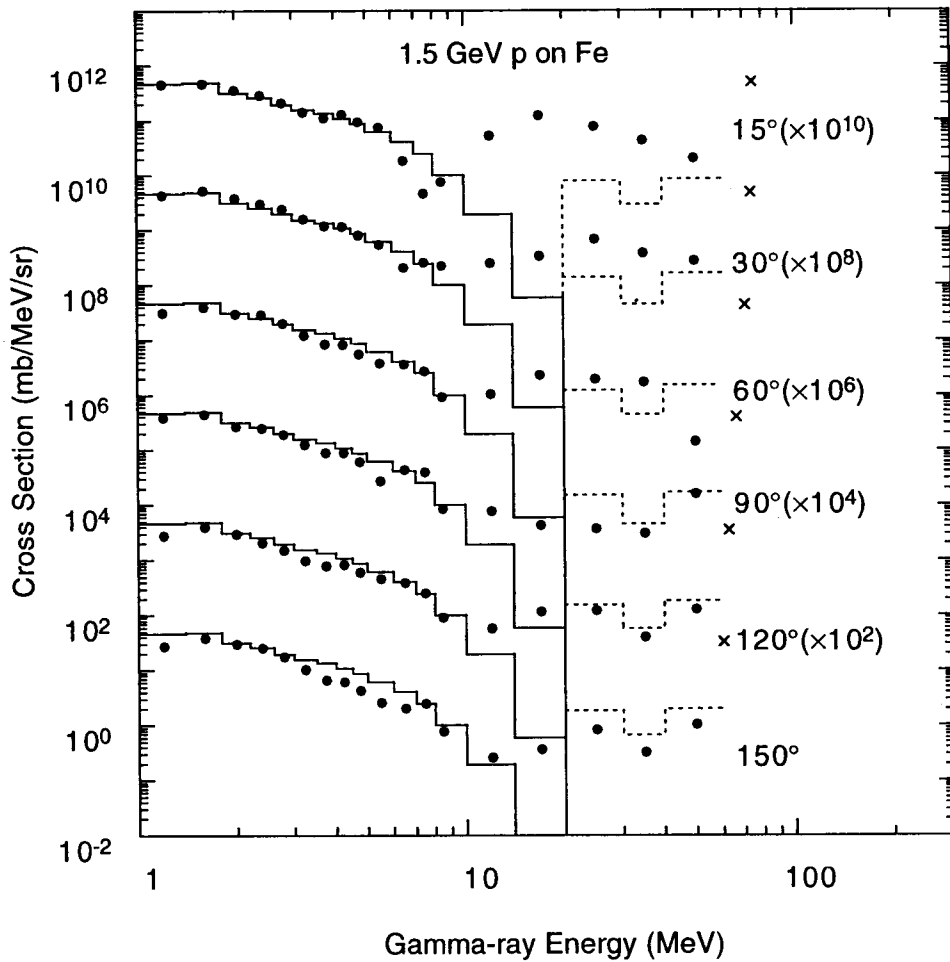


図6 1.5 GeV陽子によるFeターゲットからの γ 線生成二重微分断面積。●は実験値、実線はHETCによる計算結果、×は π^0 の崩壊による γ 線生成断面積の計算値、破線は π^0 崩壊 γ 線の寄与の計算値を表す。