



「強力 14MeV 中性子源」について

住 田 健 二*

1. はじめに

わが国におけるエネルギー事情の深刻化につれて、将来のエネルギー源開発が大きな課題となってきた。特にその中でも、核エネルギーの利用が占める位置は非常に大きい。現在からそう遠くない将来でのエネルギー危機を回避するためには核分裂エネルギーが役立つが、それを使い切った後には核融合時の放出エネルギーに頼らざるを得まい。

このごく当然と思われてきた見通しに対して、最近になって色々な疑問が投げかけられているのも事実である。エネルギー生産技術としての完成度といった面での前者への批判や、まだ可能性の確認段階において、後者へあまりにも巨額の投資を行なうことでの不安表明など、今日は確かに一つの反省期に入りつつあるといえる。

しかし、我田引水的になるが、こうした批判の声が高まれば高まるほど、核エネルギー利用技術面での研究には、より慎重に、より基礎的にといった傾向が強化される。そして、大学や研究所での汎用性のある基本的大型研究装置の比重が高まってくるように思える。大型プラントの建設に着手する前に、必要な基礎データを収集し、適確な見通しを得ようとするれば、どうしてもさけることのできない段階がある。こうした大型研究装置自体の開発である。原子力発電所の建設に先立って、多数の研究用原子炉や大型加速器が建設されたのは、その一例といえよう。原子力発電所の数や発電容量において、米・ソについて世界第3、第4位を西独と競いながら、加速器や研究炉数においては、英、仏などにすら格段の差をつけられているのが日

本的現実とすれば、核融合ではこの失敗を繰返すまいというのが関係者の声である。

さて、核融合と一口にいってしまっても、種々の実現方法が考えられる。私共の阪大のキャンパス内だけでも、超高温プラズマによるもの、レーザーによるもの等、大型の装置が活躍している。しかし、技術的容易さの点から、まずD-T核反応（重水素と三重水素の核反応）による核融合炉の実現が可能視されているので、これについて、核分裂炉の場合と比較しながら説明を進めよう。

2. なぜ強力 14MeV 中性子源が必要か

中性子1ケがウラン-235の原子核を核分裂させたときに放出されるエネルギーは、約200 MeV ($\approx 3 \times 10^{11}$ ワット・秒)である。それではこのエネルギーがどう熱エネルギーに変化するのだろうか。核分裂によって生じたウランの半分位の重さの核分裂の破片2ケと、新しく生れた中性子2~3ケ、これが、この核分裂エネルギーの主要な荷手^にというわけである。後者の運動エネルギーは平均2 MeV ($\approx 2 \times 10^7$ m/秒)位で、 γ 線その他の形で放出されるのも僅かだから、ほとんどは核分裂生成物がとび出す時の運動エネルギーになり、これが核燃料内の物質構造に撃突して、温度上昇をひきおこす。いわゆる熱スパイクとよばれる現象である。賢明な読者は原子炉核燃料で何故照射時損傷が不可避の大問題になっているか理解していただけたらろう。

D-T核反応の場合に発生するエネルギーは1回当たり約18MeVで、これが α 粒子1ケと中性子1ケに与えられる。前者には3.5MeV、後者には全体の約80%におよぶ14MeV (5×10^7 m/秒)である。 α 粒子は荷電粒子であるため飛程が非常に短いので、発生場所近傍に止まってしまう。中性子は名の如く電気的中性で

* 住田健二 (Kenji SUMITA), 大阪大学, 工学部, 原子力工学科, 教授, 工学博士, 原子炉工学

ある故に、大きな飛程を持つ。そこで核融合発生部を取囲むブランケット部へとびこませ、ここで運動エネルギーを消費させ熱として回収するように炉を設計する。現在の設計ではここで、中性子の減速、吸収を行なわせて、その運動エネルギーを熱エネルギーに変換すると共に、核反応を利用したTの生成を考えている（このTの再生産の意義は大きい）。

核分裂炉では中性子数の生成・消滅のバランスが連鎖反応維持の条件であり、熱エネルギー放出はオープン・ループの出力と考えてよかった。しかし、核融合炉では、投入されたエネルギーと生産されるエネルギーのバランスが連鎖反応を維持する。一見 D-T 反応の連鎖に入っていたように見えるのだが、実は放出エネルギーの80%を荷って飛び出してくる 14MeV 中性子の取扱い方如何で成否が決まってしまうのである。

いいかえれば、D-T 核融合の実現には高温

プラズマその他種々の手段があるけれど、核融合エネルギーの熱エネルギーとしての利用の段階では、「14MeV 中性子」という一つのかなめを通らざるをえないということである。核融合中性子工学 (Fusion Neutronics) の名の下に進められている研究が、こうした 14MeV 中性子の研究を中心としているのはごく自然である。

さて、我々の研究領域の中でも、中性子を発生できる装置は決して少くはない。その中でも、強力な大線源といえるのは原子炉とライナックであるが、残念なことに、これらはいずれも平均約 2 MeV 程度の中性子発生源であって、かなり広がった発生エネルギー分布中にも 14 MeV の中性子はほとんど含まれていない。一方、小型のコックロフト型やヴァン・デ・グラーフ型加速器で、D-T 反応そのものをおこし、その 14MeV 中性子の発生を種々の実験に使っているのは事実だが、如何にも発生量が少な

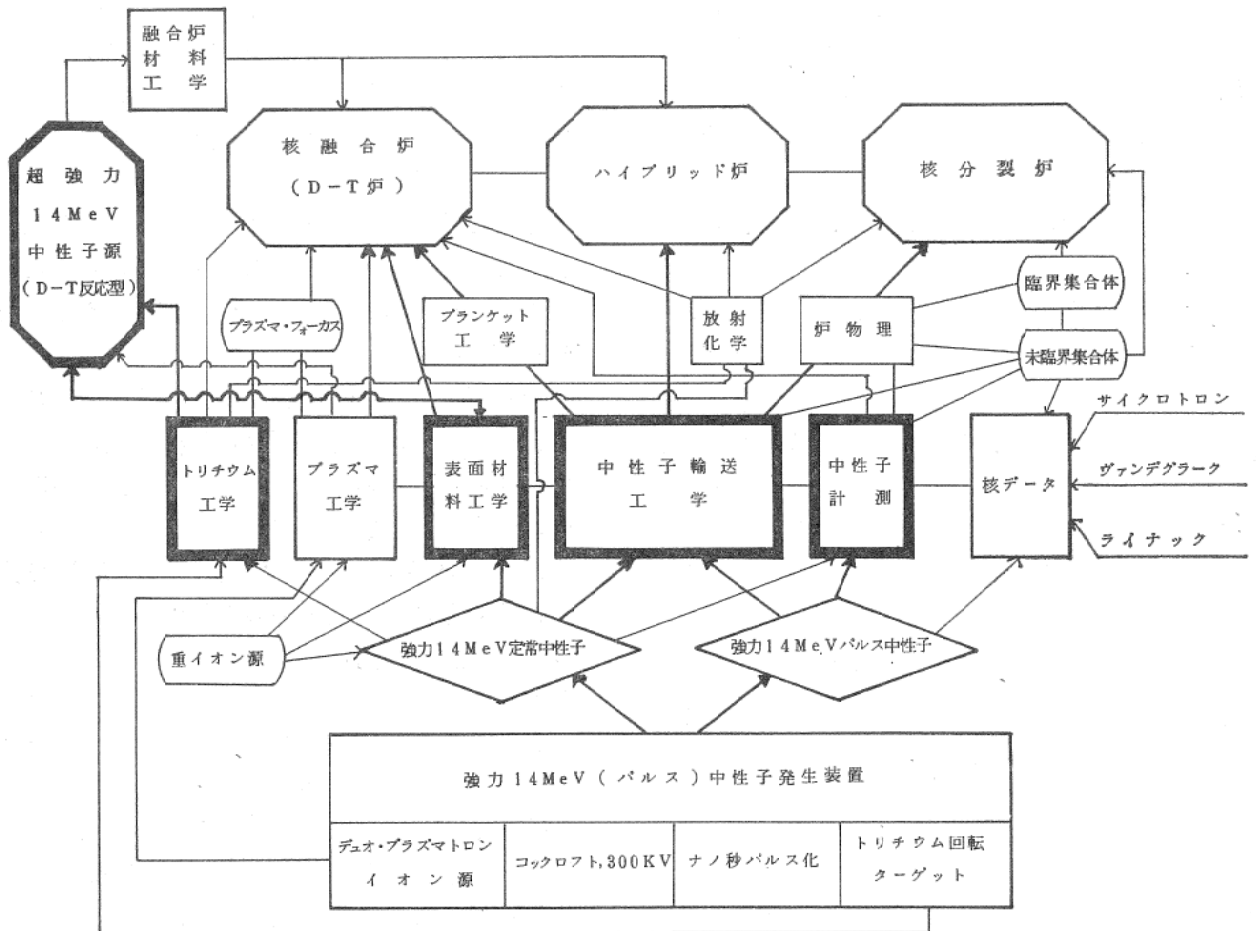


図1 出力 10^{12} ヶ中性子/秒程度(阪大・工の計画と同規模)の強力14MeV 中性子源による研究と原子力エネルギー開発との関係。

い。核物理とか放射化学の実験が目的であれば、あるいは現在の装置(10^{10} ヶ中性子/秒を発生)でもがまんでできるかと思われるが、工学的な実験には不十分なことが多い。なにしろ、炉設計のための研究なので、集団として中性子の振舞いとか、材料劣化など、つまり積分的実験の対象を取扱うには、非常に大きな発生量が必要なのである。それに具合の悪いことに、中性子測定技術の面から言ってもエネルギーの高い中性子ほど検出効率が悪くなる。核分裂炉の研究に有力であった程度の現有 D-T 中性子発生装置では、まさしくゴマメのハギシリということになってしまう。

ただ 2 MeV 以下のデータは、現在までにも高速炉の研究などで集められており、現象の本質が同じならば外挿できないのかとの疑問は誰しも持たれる所であろう。しかし、答えは残念ながら否である。話を中性子工学に限っても 2 MeV 以下では、問題にならなかったような反応、たとえば角度依存性の強い非弾性散乱 ($n, 2n$) 反応の発生、二次 γ 線カスケードなど見通しすらつけ難い面がある。材料工学面でも、ノック・オンによる原子変位のみならず、核変換過程を含むものが問題になる、また Li^6 , Li^7 によるトリチウム生成技術はどうしても大線量源でないと取扱えない等々、問題は予想以上に多い。

近年になって核融合プラズマ工学などの進展によって、核融合炉の設計研究が開始されると、直ちにこうした研究テーマが重要課題として意識された。そして、そのための主要研究装置の一つに強力な 14 MeV 中性子発生装置をとの声が強くなったのである。すでに海外ではかなりの国で中性子発生量 10^{12} ヶ/秒程度の強力 14 MeV 中性子発生装置が数基づつ建設済で、目下 10^{14} を目標としたいいくつかの計画が検討されつつある。関係者の努力にもかかわらず、目下は 10^{10} 程度に止まっている日本のこの面での立遅れは否めない。図 1 に 10^{12} 程度のものでどのような研究に役立つかを示しておこう。

3. 回転ターゲット型強力 14MeV 中性子源
現在稼動中の 14MeV 中性子源の大部分は、 D^+ イオンを加速して、固体状の T ターゲット

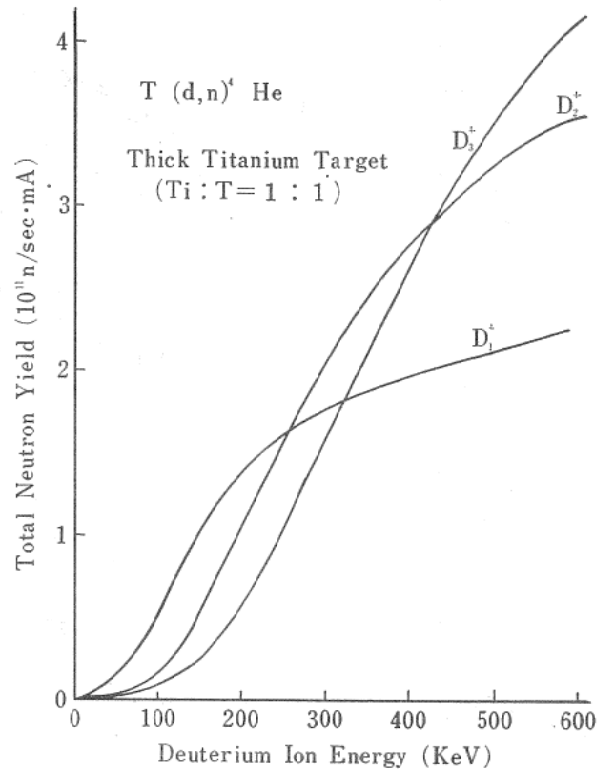


図2 D-T反応による14MeV 中性子生成率と入射Dエネルギーの関係

に衝突させ、D-T 反応による 14MeV 中性子の発生を利用している (図 2 参照)。この方式は比較的簡単な加速方式 (たとえばコックロフト・ワルトン型) を組合せて、経済的に中性子発生ができるのが大きな利点とされている。中性子生成量の増加は、一つには強力な D^+ イオン源の開発によって可能となる。一昔前からよく使用されてきた高周波発振 (R. F) 型ではイオン・ビーム電流出力 1~2 mA が限度とされているが、デュオプラズマトロンを採用によって 5~10 mA 程度のイオン・ビームがさほどの困難もなく利用できるようになった。わが国では、京大原子炉実験所の臨界集合体併設のもので、中性子生成用としてはこの形式の最強のもので、4.6 mA の記録を示している。また強力な中性子発生の実験に入っていないが、完成すれば 10^{11} 程度に近づく筈である。

イオン源そのものではさらに強力な型が開発され、20 mA~30 mA のものまでが市販されている。わが国でも高エネルギー研の陽子加速器の最初の入力用に、この種の強イオン源が使用されている。にもかかわらず、小型加速器での

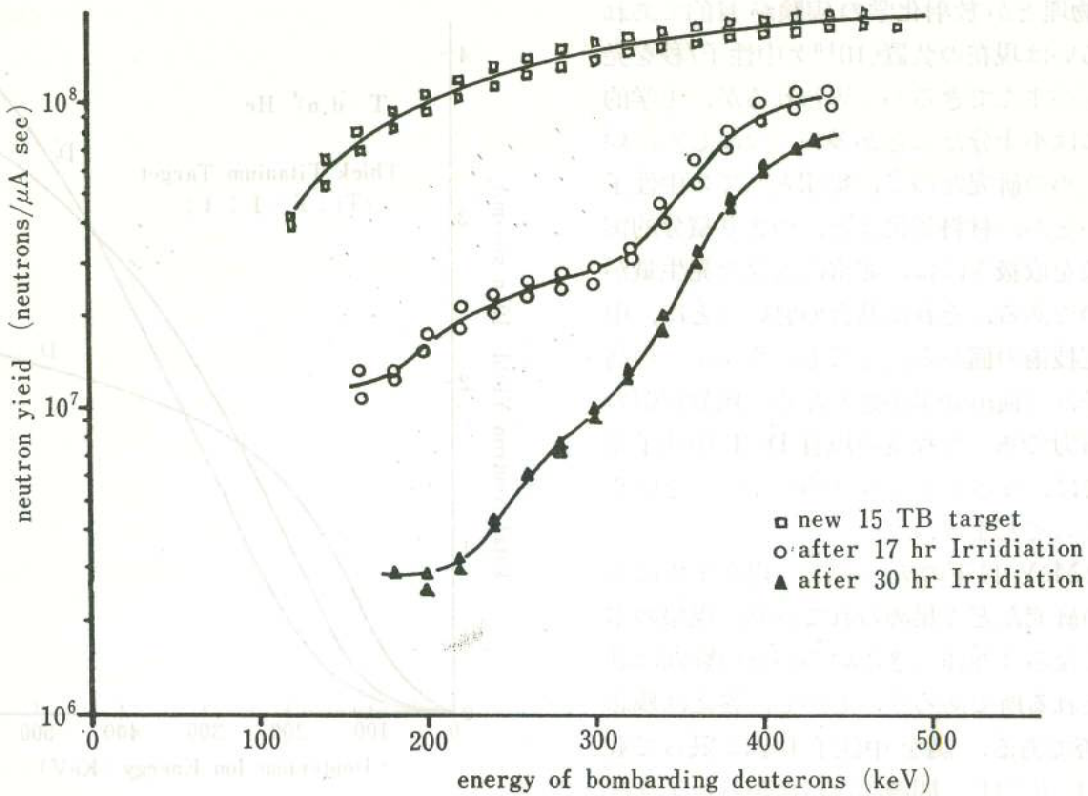


図3 固体Tターゲットの寿命の1例

中性子生成に採用できなかったのは、Tターゲット側の冷却の問題が制約となっていたのである。通常のTターゲットは銅板の上にTiメッキを行ない、これにTガスを吸着させて製造されている。加速器ターゲットとしての利用時には銅板の裏側から水冷する。ビーム流入によって異常温度上昇が生じるとTガスが放出され、寿命の極端な短縮と共に環境汚染の原因となってしまう(図3参照)。したがってこの冷却能力による制約が、当面は技術ネックである。現在の所、特別に液体金属を使ったフランスの例もあるが、ほとんどの強力源が採用しているのが回転ターゲットとよばれている方式である。これはビーム流入部分をターゲットの回転によって移動させることで冷却効果をかせる方式であり、図4のような首振り型、スパイラル型、ドラム型など各種の工夫がなされている。わが国では文部省科学研究費による準備研究がスタートし、京大炉が輸入ターゲットを所有しているが、まだ実際の使用はされていない。

海外では米国ローレンス・リバモア研究所の

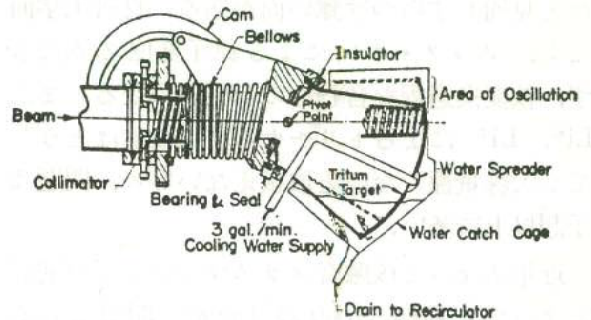


図4 米国ローレンス・リバモア研究所の回転ターゲットの構造

RTNS-1 (ビーム電流 22mA, 中性子発生量 6×10^{12} ケ/sec) など米・英・仏・独・加各国で稼動中のものがある。さらに上記研究所は RTNS-2 として、400mA, 10^{14} ケ/sec という計画も進めており、今年中の完成予定と伝えられている。また日本原子力研究所は昭和53年度内完成を目標に、この形式で 20mA, 5×10^{12} ケ/sec の強力 14MeV 中性子源建設に着手しており、阪大工学部でもやはり同規模で、より多目的のものを計画、予算申請中である。ただ、この程度の規模の線源では中性子輸送現象や、

炉材料表面物性の研究には十分であるが、いわゆる材料試験用としては中性子生成量 10^{14} ケ/sec 以上の連続発生が要求される。これに対しては、まだ確定的なものではないが、次の二つの構想がこれに答えうるだろうとされている。

4. ガス・ジェット型強力14MeV 中性子源

回転方式によっても、大電流ビームの流入にはとうてい冷却能力が不十分であるとなると、抜本的な発想の転換が必要である。固体ターゲットの液冷を捨てて、ガス・ターゲットを考えると通常ガスのままの循環ではとうてい熱除去不能である。そこで、超音速ジェットによってガスを噴出させ、この体積膨張による冷却能力を利用することにする。DとTでは、前者の方が容易に入手できるので、冷却ガスターゲット材をDに選び、Tイオンの加速を行ない、Dガスの噴出口へ加速されたTイオン・ビームを集束させるのである(図5参照)。米国ロスアラモス研の計画では環状デュオプラズマトロンによって作り出した1AのTビームを270KeVに加速し、マッハ6の流速でDガスを放出、 $\frac{1}{2}$ MWの熱除去を行なう予定で、 10^{15} ケ/secの14MeV中性子生成を目標としている。この計画は1980年完成をめざして、日本を含むOECD5ヶ国の国際協力の下にスタート済である。またTとDが混合した放出ガスからの進続的なTガスの回収など、関連する技術的問題も同時に開発される予定でもある。一方、材料分野の研究者は、このターゲット部分の材料として適当なものが見出せたら、核融合自体の材料の問題もめどがつくだろうと指摘している。したがって、今後の開発研究の結果が重要な変更をもたらす可能性も否めない。わが国としては、原研が窓口となって研究者の派遣

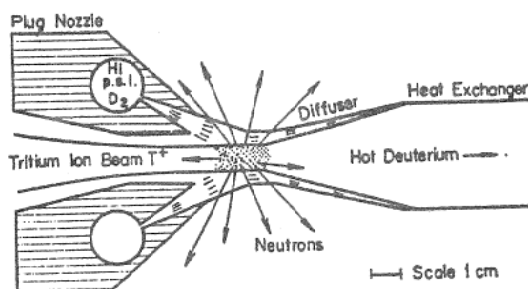


図5 米国ロスアラモス研究所のガス・ジェット型強力14MeV 中性子源の基本構成

を行なうなど協力体制をとっているが、建設費の分担はしていない。

5. Li-D 型強力14MeV 中性子源

これまでの話は、D-T反応を使って、エネルギーの揃った14MeV 中性子源を放出させることを考えているが、単色であることにこだわらなければ、D-Li反応によって、14MeV 附近にピークを持つ高エネルギー中性子源を作ることが可能である。約30MeVに加速したDでLiを衝撃すると、約14MeVの中性子が放出されるのである。ただこの場合、生成される中性子のエネルギーは随分広がっている(図6参照)が、この点は中性子生成量の多いことで我慢する外ない。また反応が前方散乱特性を持っていることから、利用時にはその特性を使い重照射用の場をつくりうる。

ここでも再びターゲット熱除去は大きな問題となるが、現在米国のブルックヘヴン研究所とオークリッジ研究所の両者が独立に出した提案では、ライナックによってDを加速し、液体Liの高速循環ターゲットへ衝突させるという構造が発表されている(図7参照)。前者の計画の例では、Dビーム100~200mA、加速電圧30.1MeV、Liターゲットは $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 、厚さ1.5~2cm、6m/s程度の流量で3MWの除熱、700°C程度の温度と推算されている。この中、ライナックの方は技術的にそう大きな困難はないだろうといわれているので、この場合もやは

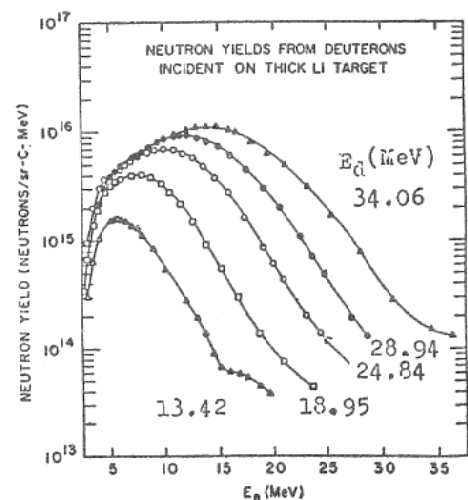


図6 D-Li 反応による中性子生成量。エネルギー分布と入射Dのエネルギーとの関係

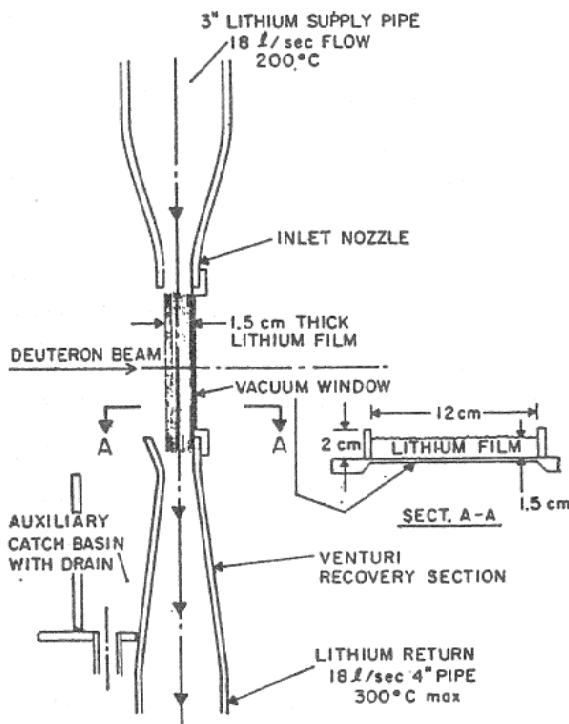


図7 米国ブルックヘヴン研究所の計画における液体 Li ターゲットの構造

り問題は Li の流体ターゲットの成否による方が大きく、また材料損傷の限界が出てくる。

6. プラズマ発生装置型強力 14MeV 中性子源

ミラー、テータ・ピンチ、トカマクのような磁場閉込め型のプラズマ発生装置は、たしかにそれ自体 14MeV 中性子を発生することができるので、将来はこの方式による強力 14MeV 中性子源が可能である。しかし、もしそれが今日直ちに建設可能な位ならば、核融合炉のプラズマ部分はすでに完成している筈であるから、当面の役には立たない。

プラズマ発生装置型のものでは、まずプラズマ・フォーカス方式のものが現実性を帯びた計画といえよう。これはパルス状（1秒に1パルス程度）にしか出力を発生できないという欠点はあるが、小規模の装置で実現でき、すでに阪大でもレーザー研究センターで D-D 反応による 2 MeV 中性子発生に成功している。ただ、この方法でも、中性子生成量と投入エネルギーの関係などの比例性を工学的に確める必要があるが、西独のユーリッヒ研究所の計画例では、

10¹⁷ヶ/1 パルス程度のもので可能性ありとされている。

7. パルス中性子源としての可能性

これまでの中性子源利用においても、中性子をパルス状に発生させて、種々の実験を行なう形式のものが少なからずあった。あの複雑な原子炉までパルス運転を行なって、強力なパルス状ビーム源として利用する実験が増えてきている。特に中性子工学、凝集体物理、放射化学などでの輝かしい成功例からの類推でも 14MeV 中性子源へも同種の要求が生じよう。この点については、加速器の形式をとっている場合は、加速前後の荷電粒子をパルス化する方法で、比較的容易にパルス化が可能となり、ターゲット冷却の負担が軽減される。ただし、非常に狭いパルス巾、たとえば数ナノ秒の話となると、大電流ビームのバンチングによるパルス化が必要となり、これまでの一般の核物理用加速器での経験がそのままでは通用しない。空間電荷効果が無視しうるような方式の開発が必要になってくる。現在進められている各所の計画では、材料実験を主目標とした超強力な線源（4.5節）ではパルス運転は考えられていないが D-T 反応型のもは全てといて良い位、パルス運転が含まれている。また前述のようにプラズマ・フォーカス方式では、パルス運転しかない。

強力 14 MeV 中性子源の開発には、発生装置自体の開発と共にトリチウム (T) の回収、モニター技術や 14 MeV 中性子の遮蔽技術の確立が必要である。しかし、これらの技術は D-T 核融合炉開発には不可欠のものとして、すでに相当の努力が重ねられているので、ここではあえて説明しなかった。

主要参考文献（入手容易なもののみ紹介しておく）

- 1) 塚田甲子男：日本原子力学会誌，第18巻9号，p. 548～553 (1976)
- 2) 住田健二，前川 洋，白形弘文，神田幸則：日本原子力学会，炉物理連絡会誌「炉物理の研究」第23号，p. 23～31 (1977)
- 3) 阪大・工・原子力工学教室編「強力 14MeV 中性子工学実験装置」パンフレット (1977)
- 4) "High-Energy High-Intense Neutron Source" 特集. Nuclear Instrument & Methods Vol.145 No. 1 (1977. Aug)