

大阪大学強力14MeV中性子工学 実験装置(OKTAVIAN)について

住 田 健 二*

1. はじめに

いわゆる原子炉、核分裂炉では、中性子を媒体として使用し、ウランの核分裂連鎖反応をひきおこしてその時に核エネルギーを放出させる。したがって、核分裂炉の開発途上では、原子炉内で長時間使用する各種材料の試験のために、強力な中性子源としての原子炉が建設されてきた。たとえば、日本でも高中性子束炉である材料試験炉(JMTR)やパルス炉である安全性実証炉(NSRR)が建設されている。なお、これらは実炉(動力炉)より1~2桁高い定常中性子束をつくり出したり、パルス状のピーク出力で事故時の100倍以上もの中性子束を作り出して、いわゆる“加速試験”を行なってきたことに注意しておいていただきたい。

さて、核融合炉開発ではどうだろうか。核融合と中性子はあまり関係がないと思込んでいる人も多いが、それは誤解である。プラズマ磁場とじこめ型のトカマクであろうが、慣性核融合型のレーザーであろうが、核融合実現の手段はどうか、一番早くエネルギー源として使えそうなのは、D-T核反応によるものとされている。そして核融合がおこれば、必ず中性子と α 粒子がとび出してくることが分っている。D-T核反応では、中性子が全体の核融合エネルギーの80%をもらってとび出す。そこで、これを何かに衝突させて、運動エネルギーを熱に変える必要が生じる。この変換が核融合炉でのブランケットの役割であり、高温プラズマやレーザーだけではなく、このブランケットの存在によって我々は始めて核融合エネルギーを熱として利用できることになる。たとえばこれは核分裂炉の場合に核分裂生成物が燃料棒内で衝突

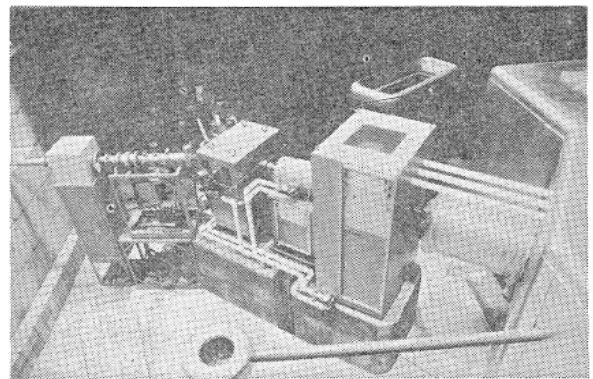


写真1 強力14MeV中性子工学実験装置加速器部全景

して熱発生をおこしていたのと同じ役割とも言えよう。

また、こうも考えられる。ラウン核分裂1回で約196MeVのエネルギーが放出され、この時2.45個の中性子が出るのに対して、D-T核融合反応は核融合1回で17.6MeVのエネルギーと1個の中性子が放出される。大ざっぱにいうと、核融合では同じ出力で4倍の中性子が発生すると考えてよい。おまけに、核分裂のときの放出中性子のエネルギーは平均2MeVであったが、核融合炉では単色の14MeVで、7倍からのエネルギーをもって飛び出してくる。同じ中性子とはいえこれだけエネルギーが違っていると、核分裂炉のため材料損傷研究の成果がそのまま転用や外挿できるものではない。このエネルギー領域に入ると、(n, α) 反応, (n, 2n) 反応その他核分裂炉では無視できた中性子しきい反応の寄与が大きくなる。また材料損傷でも不純物生成効果やHeガス生成/変位損傷比が急に大きくなってくる。したがって、核融合炉材料の開発のためには核融合炉そのものに先立って強力な高エネルギー中性子源が必要であるとの声が次第に高くなってきた。

では、どの程度のものが必要だろうか。例え

*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, 中性子工学

ば INTOR (国際トカマク炉) 計画では、核融合を作り出すプラズマを閉じ込める容器の内壁面の位置での中性子束は、14MeV 中性子で 10^{14} n/cm²/sec. 0.1MeV 以上は 3×10^{14} n/cm²/sec という。この閉じ込め容器取換えまでの積分照射量でいえば $10^{21} \sim 10^{22}$ n/cm² にもなる筈である。当然実用炉ではこれよりさらに大きな値になろう。また、試料の照射特性の寸法依存性を考えると、実験用試料の照射可能な均一中性子束場も 10cm³ 以上は必要という要求がある。仮に、核分裂炉での材料試験炉の場合のように、実用値の 1~2 桁上の量での試験をとると、当分は実現困難である。例えば、後述の米国の FMIT 計画はこれを目標として建設に着手したが、予算約 400 億円とゆう大計画がわざわざいしたのか、レーガン政権の財政縮少の犠牲になって繰のべ延期され気味である。

ここで見方を変えてみよう。確かに、実用試験・工学実験には最終的にそのような高い中性子束が必要である。しかし、吾々は損傷過程の基礎的モデルを調べて、そこから外挿して、研究開発の方向への見通しを得ることも可能である。またその必要性は極めて強い。例えば、2 MeV と 14MeV のエネルギーの違いはどのような効果を持つか。核分裂炉で問題にならなかった (n, α) 反応による He 脆化の問題 1 つをとっても、スケーリング則とか試料の寸法効果があるにせよ、しかるべきシミュレーション実験は不可能ではあるまい。少なくとも手をこまねいてじっとしては、前進できない。

では、さしあたりすぐにも利用できる強力な 14 MeV 中性子源にはどんなものがあるか。

2. 回転ターゲット型強力中性子源の位置づけ

純粋な 14 MeV 中性子源で、ここ当面 4~5 年に我々が利用できる強力なものは、本解説で述べる D-T 核反応利用の回転ターゲット型といわれているものしかない。その後にくるべきものとしては色々な計画があり、前述した FMIT は重陽子を高エネルギーに加速して Li をたたき、(α , n) 反応を利用する計画であった。その他にも、トリチウム・ジェット・ターゲットとか、プラズマ・フォーカス利用その他

の案もあり、筆者などは海外依存でなく、日本独力での計画を推進すべきだと考えているが、とにかくまず独占的な当面の 4~5 年という数字がさらに延びる可能性は強い。

この装置の原理は、加速した D⁺ イオン・ビームで固体表面に吸着させたトリチウムターゲットを衝撃して、D-T 中性子を発生させるものである。これは最も歴史の古い加速器形式の中性子源であり、広く各種の研究に利用されてきている。またその利点は、あまり高い加速電圧を要しない (約 150 KV 以上) 上に、中性子生成量が比較的大きいので、簡単な装置で手軽かつ経済的に中性子を供給しうる点にあった。このため、原子核研究の初期のみならず、ある時期 (1950年~70年代) には中性子実験や医療用、中性子ラジオグラフィなどの他に、放射化分析用中性子源や石油・地下水深査用中性子源にも、かなりの数量のものが世界中で使用されてきた。しかし最近では、トリチウム取扱いに対する設備が次第に大規模なものを要することとなってきて、簡便さという利点が薄れてきた。特に高エネルギーの 14 MeV 中性子を必要とする利用以外の面では他の中性子源に置換される傾向になっている。

3. 技術的問題点

さて、この種の中性子源の中性子生成量を増加させるには、D⁺ イオン・ビーム電流の増加や加速器としての特性の向上によるものと、トリチウム・ターゲットの改良によるものが考えられる。ビーム電流の増強には、イオン源としてアーク放電式のデュオプラズマトロンやデュオピガトロンが採用されており、加速電圧や容量増加には絶縁コアトランスの採用などによって、これらの面では一応所要の特性の単体を手に入れることはさほど難しくないとされている。

一方、トリチウム・ターゲットの開発に対しては、これまで中性子生成量の半減期で 6~7 時間程度の寿命とされてきたものを 1 桁以上大幅に延長させることが強く要望されている。特に材料の照射実験では中性子積分照射量を増加させるためにもこのことは不可欠とされ、100 時間程度のものが望まれているが、現状ではまだ

表1 世界の代表的回転ターゲット型強力14 MeV 中性子源一覧

装置名 所在地	LANCELOT (運転中) フランス ヴァルダック	RTNS-I (運転中) U. S. A. リヴモア	RTNS-II* (1号機運転中 2号機1982予定) U. S. A. リヴモア	IFNS (運転中) カナダ チャークリヴァー	KUCA 併設 (運転中) 日本 京大・炉	FNS (運転中) 日本 原研東海研	OKTAVIAN (運転中) 日本 阪大・工	TTF (運転中, ただし 当面D-D専用) U. S. A. アルバカーキー
加速電圧 (KV)	160	400	370 [400]	300	250	400	300	200
加速粒子	D ⁺	D ⁺	D ⁺	D ⁺	D ⁺	D ⁺	D ⁺ (H ⁺ , He ⁺⁺)	D ⁺
イオン源形式	デュオプラズマトロン	同左	同左	同左	同左	同左	同左	デュオピガトロン
イオン源ビーム電流 (mA)	160	40	150 [400]	40	20	35	50	—
ターゲット流入電流 (mA)	110	25	90 [150]	—	5 (パルス時6.5)	20	20	180
中性子発生部直径 (cm)	5	0.6	1~2 [1]	1.0	2×4	1.5	3	3~7
ターゲット直径 (cm)	34.5	23	23 [50]	6.6	6 (巾2)	23	20	3~7
ターゲット回転速度 (rpm)	1,500	1,100	3,000 [5,000]	1,000	1,100	1,100	800	固 定
発生中性子量 (n/sec)	5×10 ¹²	6×10 ¹²	4×10 ¹³ [10 ¹⁴]	4×10 ¹²	6×10 ¹⁰ (ただしパルス時)	5×10 ¹²	3×10 ¹²	6×10 ¹⁰ (ただしD-D)
ターゲット冷却材	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O
ターゲット寿命 (hr)	3~7	100	70~80 [100]	?	?	100	70~80	75
パルス運転可能性	不可	可 (1.5nsec)	不可	不可	可 (0.3μs)	可 (2nsec)	可 (3nsec)	不可
イオン源出口分析電磁石	なし	あり	あり	あり	あり	あり	あり	なし

* [] 将来目標値

所要の特性が得られていない。しかし、これまでの研究で、ターゲット部の温度上昇によるトリチウム拡散による短寿命化の他に、中性化したDとTの置換が想像以上に多いことを防止するため、イオン源出口での分析電磁石設置や、大面積のT吸着面を回転させつつ、ビーム・スポットを移動させて照射する回転ターゲット、Ti に代えて稀土類ベースを使用してT吸着量を増加させる手法などの工夫がそれぞれ成功している。しかし、通常の市販品では低出力用のものしか入手できない。(日本国内ではトリチウム・ターゲットの生産が事実上不可能であるのみでなく、研究用に試作することさえ不可能な状態にあるため、不十分な海外市販品を輸入して使用するほかない。この現状は極めて遺憾である!!)

ただ現在までの経験では、これらの改善を加えても、この形式でD-T中性子を 10^{13} ヶ/秒以上発生させ、その出力を数百時間も連続保持させることは相当困難な話である。その制約の原因は、あまり加速器側にはなく、主にトリチウム・ターゲットにあるとされてきているので、この面での飛躍的改善がない限りは 10^{14} n/秒の壁を破ることはまず不可能であろう。現在の世界最高の強力14MeV中性子源であり、日米協力による共同利用が今秋からと予定されている、米国・ローレンス・リヴァモア研究所のRTNS-IIにおいても、目下出力増力が計画されているが、その成否を決するのは、所要特性を常に維持しうるトリチウム回転ターゲットの製作であるといわれている。

また、この種の中性子源の計画・設計・建設を体験した関係者の意見として、加速器の調整段階において、加速された大電流ビームの集束状態の計算や、大線量のナノ秒パルス中性子の測定手段などには、技術的な困難さがあり、ある程度は経験と手さぐりによる調整となり勝ちである、また併設のトリチウム回収系による回収率の推定があまり正確でないため、不用意な汚染を防止するには慎重な上にも慎重に高出力化させる必要があることが指摘されているので、 10^{14} n/秒突破にはまだまだ年月が必要であろう。

次に海外および日本国内で運転されている。もしくは運転が予定されている核融合炉研究用強力14MeV中性子源を第1表にまとめて示しておこう。なお、ヨーロッパには同程度の出力の医用照射用14MeV中性子源が数基存在し、米国でも建設が決定したものもあるが、ここでは目的がやや異なるので取扱っていない。

4. オクタビアン設計と建設

阪大・工・原子力工学教室では、丁度25年前の学科設置当初より手造りに近いコックロフト・ワルトン型加速器によるD-T中性子源を所有していた。昭和30年代末には核分裂実験装置付設として、R-F型イオン源と200KV高圧電源、加速 D^+ ビーム電流1.2mA、イオン源とビーム偏向併用方法による0.1 μ 秒パルス運転が可能な国産中性子源が建設され、当時の最新鋭機として主に核分裂炉中性子工学の研究に利用されてきた。したがって、この分野では我が国における最も経験の深い研究グループの一つであると見做されてきたのである。

一方、昭和50年頃から、核融合炉開発に関連して、我が国における同用14MeV中性子源の建設が次第に重要視されるようになり、当面の技術で可能な限り早急にこれを建設しようとの意見が学の内外で高まってきた。そこで大学関係の国内関連研究者の要望を受けて当教室が中心となってその計画を推進することとなり、数年の努力の後に、昭和53年度より3カ年計画建設予算が承認され、教室内の建設委員会が昭和53年7月に発足した。

計画の立案当時は、稼動中の世界最強のD-T中性子源は米国ローレンス・リヴァモア国立研究所(L.L.N.L)のRTNS-Iであって、その最高中性子生成量は 6×10^{12} ヶ/秒(連続運転時平均 3×10^{12} /秒)、パルス巾は3ナノ秒まで可能とされていた。また、同程度の規模のものが米国内に数基と英・仏・加に各1基存在していた。そして、さらに計画進行中のものとして、上記のL.L.N.Lでの中性子生成量 10^{14} ヶ/秒を最終目標としたRTNS-IIの建設が開始されようとしていた。関係者の調査では、中性子工学研究にはRTNS-I程度の機能で十分であるが、核融合炉材料の損傷素過程研究にはやや

表2 オクタビアンの特性

設計目標

- 発生中性子： 3×10^{12} 14MeV 中性子/秒(連続)
- 最短パルス巾： 3×10^{-9} 秒 (3×10^4 中性子/パルス)
- 流入 D⁺ イオン電流：20mA (回転ターゲット位置)

主要構成

- イオン源：デュオプラズマトロン (D⁺ 35mA)
- ビーム質量分析電磁石 (イオン源出口)：45°
- 偏向高圧電源：20KHz 高周波コッククロフト
100~300KV $\pm 0.1\%$, 80mA
- 加速管：12段, 1200mm長
- ビーム振分け電磁石：4000 ガウス (+37.5°, 0°, -30°, -90°)
- Q レンズ：共通1ヶ, パルス系2ヶ
- パルス化系：加速後ビーム偏向：30~50 $\times 10^{-9}$ 秒
ビーム・パンチング 3×10^{-9} 秒, 可変周波数 2MHz~1 KHz
- ビーム集束：連続ビーム直径約30mm, パルスビーム直径約15mm
- トリチウム・回転ターゲット：800 キュリー, 直径200mm, 800~1000回転/分
- トリチウム吸着装置：二段階, ゲッター方式および触媒方式
- 保健物理管理用モニター：トリチウム・モニター (液体シンチレータおよびβ用電離箱)
高速中性子モニター, γ線モニター

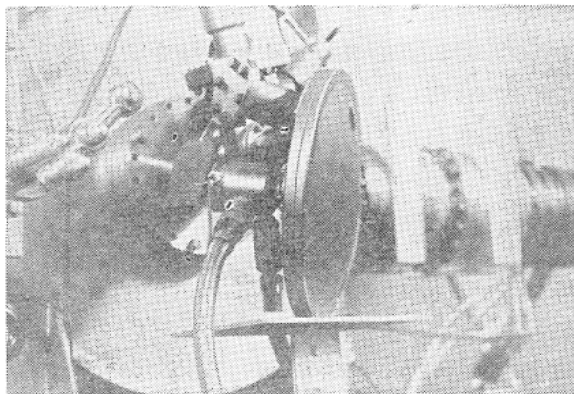


写真2 トリチウム回転ターゲット

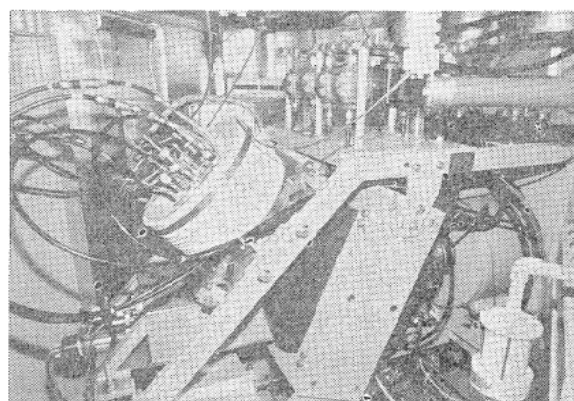


写真3 デュオプラズマトロン・イオン源

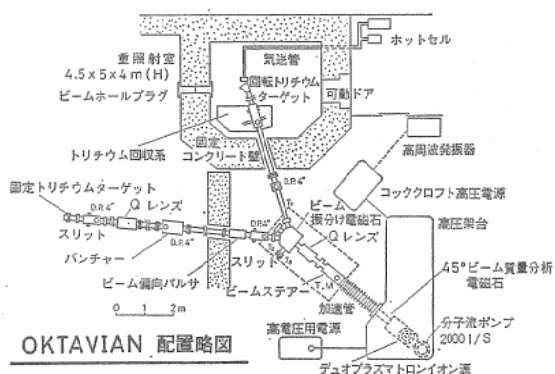


図1 装置の全体配置略図

不満があり,一方RTNS-IIでも材料のミクロな工学的実験にすらなお不十分だとの判断であった。そこで,予算的制約や吾々の経験の適用可能性をも配慮して,表2に示すような主要部分の設計目標値を設定することとしたのである。ビーム加速の形式は経験の多いオープン型のコックロット方式とし,イオン源は大電流での実績からデュオプラズマトロンを選び,特にイオ

ン源出口にビーム粒子分析用電磁石を付すこととした。また重照射用には当然回転ターゲットを採用することにした。(図1参照)

また大学での原子力研究の特徴として,核融合炉に関連した中性子工学,中性子計測,放射線物理,材料放射線損傷,放射化学(誘導放射能関係を含む),トリチウム工学などの広範な分野への利用可能性を考慮して,ビーム・ラインの振分け使用を可能とした。連続ビームによる重照射実験室は嚴重な遮蔽をほどこした5×5×5m程度 of 密室にビーム取り出しプラグを付したものが計画され,パルスビームによる中性子工学実験室は,容積20×20×20m程度の大空間を自由に利用できる構造とした。

既設建屋の構造上の制約から,加速器のための空調は見送らざるをえなかった。これが加速電圧を300KVに選ばざるをえなかった大きな原因となっている。また既存建屋内に200トンあまりのコンクリート遮蔽を持込むための基礎補強工事には,地面下ドリル後に鉄製網を押し

こみ、さらにコンクリートを注入して、所要箇所そのものに鉄筋コンクリート柱を製作してしまうという珍しい工法も使用され、これは学内最初の例とのことであった。

たまたま国内では、その前年度より科学技術庁傘下の日本原子力研究所東海研究所が、核融合炉開発用に同規模の中性子源を建設することになっており、すでに米国より装置全体を一括輸入する方針が決定されていた。阪大の場合は建屋が転用であって空間的制約が大きいこともあって、主製作担当メーカーとの密接な打合せを必要とすることもあり、当時の極端なドル安（1ドル180円程度）状況においても、なお国産化のメリットが大きいと判断し、加速器部は日新ハイヴォルテージ社（京都）との共同設計により、同社から単体としての保証をとりつけたルーズパーツ供給、大学側の責任調整方式による建設に踏切ることとした。ただし大容量イオン源と、大電流ビーム用パルス化系の主要部分については残念ながら国内での経験不足は否めず、特に前者は特殊材料入手の都合上もあって、また加速管は価格安の利点から、いづれも同社と提携関係にある米国 High Voltage Eng. 社（バーリントン、ボストン郊外）から購入することとしたのである。

トリチウム回転ターゲットは数社のものを比較し、主として医療用のものであるが、これまでの製作実績の多い西独ニューケム社（ハーナウ）のものを当面は輸入することとした。またターゲット使用時に予想される加速器内へのトリチウム放出が、外部環境へまで排気されるのを極力低減化するために、ターゲット付近での

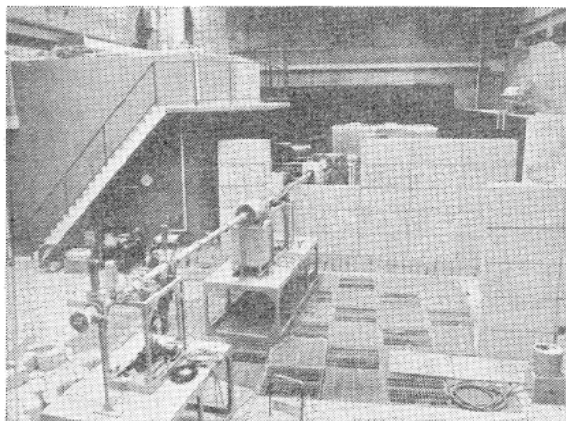


写真4 パルス中性子発生部

ゲッター方式吸着装置と、全真空排気系をまとめた出口での触媒方式による回収系の二段構えの防護措置をとることとし、それぞれ前者を日電アネルバ K. K（東京）と太陽酸素 K. K（東京）が大学と共同設計により後者を受託製作することとなった。またトリチウムモニター系は富士電機 K. K（東京）が担当した。

5. 調整と特性試験

建屋の改造工事が終了した昭和54年初夏から加速器の主要部が次々と搬入され、初期は陽子ビームによって調整を行ない、中性子発生の可能性がある重陽子ビームによる調整に入ったのは、55年春であった。そして、トリチウム・ターゲットによる D-T 中性子の発生は、トリチウム回収系とモニター系の整備をまって55年末頃より開始され、56年3月には特性試験を兼ねてパルス・ビーム系を利用した国内大学関係6研究グループとの第1回共同実験を実施する所まで整備が進んだ。一方、連続ビーム系は回転ターゲットが予定よりおくれで56年3月末に到着し、早速冷却系との現物合せ調整に入った。恐らくこの原稿が活字になる頃には、回転ダミー・ターゲットによる加速器の出力上昇試験が進行しており、57年春には本格的な定格出力運転に入ることになる。

またトリチウム回収系も重水素による回収シミュレーション実験が進んで、今春には学会報告も行なわれた。今後は実際の運転条件での特性試験の蓄積を重ね、慎重に高出力時運転に備えた試験運転状態に入って行く。

このように書いてしまえば、あまり困難はなかったかのように思われてしまうが、現場の担当者達は次のことを痛感している。それは、設計段階で検討され、製作メーカーや建屋設計者と大学関係者の間での第1次設計では対策が講じられながら、予算的制約からカットされた部分でのトラブルが続発したことである。勿論思いがけないトラブルも発生したが、かなり大幅な手直し補強工事を要したものは、ほとんどが上記の予算面からのカットの後始末で、これには全く恐れ入った。『安物買いはかえって高いものにつく』との教訓は、今回の計画の責任者である私の骨身にしみた実感である。

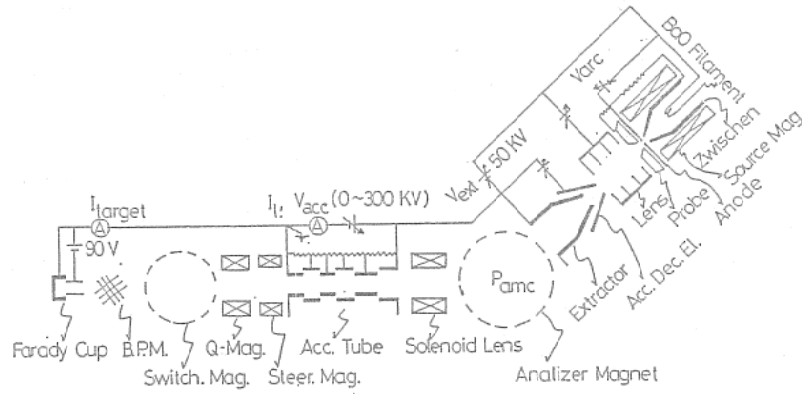


図2 加速器部構成と特性試験回路

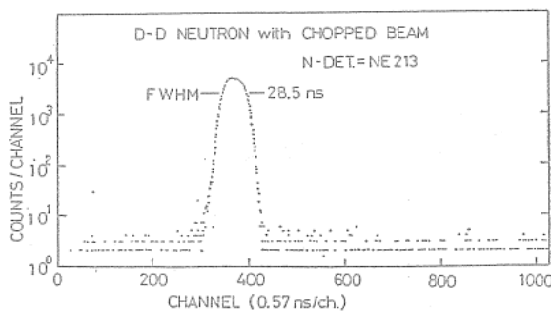


図3 A. チョッパーによるパルス (D-D中性子) 波形

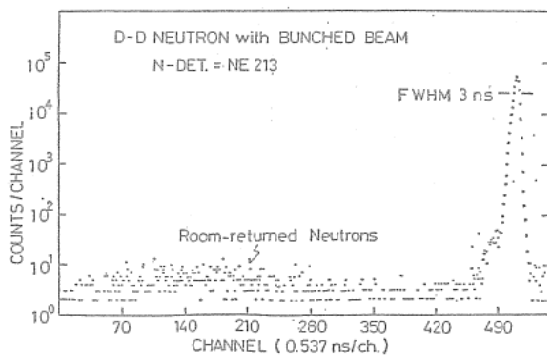


図3 B. バンチしたパルス (D-D中性子測定) 波形

たとえば、加速器排気系の場合を見よう。全面分子流ポンプ化という当初計画は、最後の価格調整で、大部分を通常の拡散・回転ポンプ式に切り替えた。ところが、建設途上で、トリチウム関係規制の強化で、密閉型回転ポンプへの変更を余儀なくされた。次に高圧部に近いポンプへの液体窒素補給のための立入時の安全確保による高圧電圧操作の不便さから、自動補給装置が追加設置された。さらには、当初から危険

されていたイオン源部の分子流ポンプの容量不足が確定的となり、電極間放電の発生を抑圧するための手直しのための増強などと、合計してみれば、いつの間にか当初計画をかなり上回る金額がここへ喰われてしまったのである。

梅雨時の運転だけは諦めるかなどと言っていたが、熱伝導の良い金属部その他の所々に年中結露がおり、乾燥した熱風を吹きつけるという苦肉の策で放電防止をする有様となった。これはいささか予想外のことであったが。

また、これまでの加速器では、ビーム集束に腐心するのが常識であったが、だが、我々の場合は少しばかり様子が異なった。20mAのビームを300KVで加速すれば、流入場所には6KWの発熱が生じるのだから、1mmや2mmφのスポットに集束させると、たとえ多少の冷却をしても、熱伝導の悪いステンレス板などでは、瞬間的に穴があく。幸いにして集束が良くなると、真空度が急劣化して安全装置が働き、高圧加速オフとなるので、貫通孔にはならないが、なるほどビーム溶接という技術もありましたなァーと変な感心をしたこともあった。しかし、これが万一トリチウム・ターゲット相手だと大騒ぎにつながるから、慎重な上にも慎重を重ねる必要がある。理詰めであれば当然のことではあるが、この種の装置では、ついこれまでの癖を出してビーム集束をよくしようと思うな、『ビームは常にある程度は拡げておけ』という指針は、我々にとって全く新しい教訓であった。

こうした新しい方向には、市販されている既

存の高級，かつ華奢なビーム波形観測手段ではどうにもならないことを意味する。したがって我々はビーム調整の前に大急ぎで大電流ビーム観測系の試作を進めなければならなかったのである。

6. 今後の利用計画性

特性試験を兼ねた準備実験は一部すでに開始されているが，当初計画に近い特性によるスケジュール化運転に入りうるまでには，それなりの経験集積を要すると予想される。原子力工学教室としては利用関係の運営組織や諸規定の整備などを進めており，今年度末には建設・調整と出力上昇段階を終了したいと努力中である。

したがって，これまで建設関係者のみに限定されていた利用を，11月以降おそくとも年内には学内運営委員会の調整下において，共同研究方式による学内外の研究者の利用の開始に入る予定である。（原子力工学教室員をその研究グループ内に含み，安全管理についてはその教室員が責任を負いうる実験に限定される。）

また，阪大オクタビアンより中性子出力が約1桁大きい同種加速器の米国 RTNS-II の日米共同利用が本年秋から実施の予定である。これに関連して，国内での準備実験や予備実験にもオクタビアンの利用が予定されており，多彩な研究が進められることになろう。最後に現在実施中の研究題目を二・三紹介してしめくりに代えよう。（装置自体の特性試験や開発研究を除く）

1) 14MeV 中性子輸送現象の研究 (D-T

核融合炉中性子工学および高速炉中性子工学)

- 2) パルス状高線束 14MeV 中性子計測の研究
- 3) 14MeV 中性子による核融合実験用診断・計測系部品の放射損傷の研究
- 4) 核融合炉ブランケット中におけるトリチウム生成，分離回収およびハンドリングの工学的研究
- 5) 14 MeV 中性子による核融合炉第1壁材料損傷素過程の研究
- 6) 軽イオン照射による核融合炉壁材料の表面物性の研究
- 7) 強力14 MeV による核融合炉材放射化に関する研究

参考文献

- 1) 住田健二：「強力14 MeV 中性子源について」（「生産と技術」昭和52年秋号，P19. 1977）.
- 2) 住田健二：「核融合炉開発強力高エネルギー中性子源」（日本原子力学会誌20. 9. P 613, 1978）.
- 3) 伏見康治他：「原学会強力中性子委報告」（日本原子力学会誌23. 1. P 8. 1981）.
- 4) 特性試験報告：住田他：日本原子力学会. 昭和55年年会D. 7, 高橋他, 同分科会, E23(1980) 高橋他, 昭和56年年会, B. 42, 井本他, 同G. 26 (1981).
- 5) K. SUMITA et al: Osaka University 14 MeV Intense Neutron Source for Fusion Studies. (OKTAVIAN PROGRAM). Proceed. 3rd Symps. on Accelerator Science & Tech. 1980. at Osaka Uni. P. 53. (1980).