

炉物理の研究

(第 26 号)

1978年12月

<特別寄稿>

加速器による核燃料再生 高橋 博 1

<特集> 中性子工学

1. 加速器中性子源減速機アセンブリーの中性子工業 井上 和彦 7
2. 各国におけるパルス強中性子源研究開発の状況 渡辺 昇 11
3. 強力14 MeV 中性子源と中性子工学 住田 健二 13

<解説>

レーザー核融合実験における計測 向山 武彦 15

<夏の学校のメモ>

1. 有限要素法 朝岡 卓見 22
2. 「モンテカルロ法」の解説 竹内 清 23
3. 積分的測定データの解析法 中沢 正治 25

<炉中性子工学研究専門委員会講演要旨>

1. 結合炉における中性子雑音の空間依存性について 森島 信弘 26
2. パイロオキシレータによる重水反射体つき結合炉の
空間依存動特性実験 松田, 山田, 飯田, 住田, 林, 小林(圭), 代谷, 神田 28
3. 2点炉パルス応答の2種の標示法 村田尚之, 山根義宏, 仁科浩二郎 30

<研究報告>

重水濃度測定への中性子減速熱化の応用 和田 延夫 33

原子炉の医学への応用 神田 啓治 34

<現状報告>

高速実験炉「常陽」の炉心性能試験 山本 寿 36

KUCA 実験の経過について 小林 圭二 37

大学における原子炉学生実験の現状 三木良太, 神田啓治, 岡芳明, 成田正邦 39

<海外調査報告>

ニューメキシコ大学より愛をこめて 若林 宏明 43

<研究室だより>

(東工大) 山室・北沢研究室, (名大) 玉河研究室, (阪大) 住田研究室,
(東大炉) 原子炉設計工学部門, (原研) 炉物理実験研究室, (京大炉) 原子炉部門,
原子炉核特性部門, 原子炉設備部門

◇ 「炉物理連絡会第22回報告」◇ 52

◇ 編集後記 ◇ 54

<炉物理連絡会会員名簿> 55

日本原子力学会

炉物理連絡会

◀ 特別寄稿 ▶ 加速器による核燃料再生

ブルックヘブン国立研究所 高橋博

この秋日本に帰国した折北大の井上教授より Brookhaven National Lab. で行なっている Linear Accelerator Reactor^{(1)~(3)}の裏話について何か書いて欲しいという注文があったので、一昨年来 Non-Proliferation Alternative System Assessment Program (NASAP) の一環として研究して来た事を炉物理を中心にして書きたいと思う。

核拡散防止問題に関係してこの二年間 International Fuel Cycle Assessment (INFCE) が世界の原子力界を騒がせているが、核燃料再処理からのプルトニウム生産を必要とする高速増殖炉に代わり、しかもウラン・トリウム資源の有効利用になる原子炉システムを考えると、最近とみにその効率を増してきた加速器の技術を使って核燃料の増殖をしようという所謂 Linear Accelerator Reactor の研究が行なわれた。

この炉は最近の原子力学会誌での原研・塚田物理部長の解説⁽⁴⁾(註)にもあるように新しい考えではなく、古く1950年初期に E. O. Lawrence を中心にして考えられたもの (MAT 計画) である。その計画は重陽子を 500 MeV 迄加速し、それをウランに照射し放出される中性子をウランに吸収させて Pu を作るという事で、320 mA の電流を推定している。一昨年来 BNL で計画している Linear Accelerator Fuel Regenerator の説明を DOE (Department of Energy) から勧められて、加速器の大御所 Panosky をスタンフォード大学 SLAC (彼は電子高エネルギー線型加速器の所長) に訪問した。Panosky は MTA 計画の加速器を担当し、その当時の計算メモなど色々見せてもらったが、この計画には色々面白い人々が参加していた模様である。今我々は陽子をウランなど重い核に衝突させた時、どれほど中性子が発生するか計算しているが、同じ種類の計算をカリフォルニア工科大学の学長を現任国防長官をしている H. Brown がしていた。多分彼が大学を出た頃の頃と思われるが、メモは現在核計算で推定しているものに近い値を出している。ウラン・ターゲットの方では、最近まで Electric Power Research Institute (EPRI) の所長をし色々エネルギー問題で提言している Chancy Starr が参画していた。

現在では核燃料増殖には高速炉という概念が定着しているようであるが、原子力事始めのその当時には色々な構想があった。巨大技術の開発には、技術以外にその時の社会制度上から来る制約が多分に物を言う。一度方向づけられるとその転換は難しい。原子力技術は慣性の大きいものだけに始めに色々その方向を検討したいものである。

さて加速器炉に戻ってまず加速器であるが、これは核物理・素粒子物理の基礎研究のために、国威の発揚もあって大型の高エネルギーの加速器がこの30年間開発されてきた。交互に傾斜を持った磁場により粒子を長距離集中化させることが出来るようになり大型化に

(註) この解説に一昨年行なわれた BNL での Informal Meeting の論文が紹介されているので並説をお勧めする。



進んだ。円型・線型の種々の加速器がその目的に応じて開発されてきたが、数100ミリアンペアの大電流を加速するとなると、線型加速器が一番適している。Los Alamosの所謂中間子工場もエネルギー800MeV, 最高電流20mA, duty factor 12%の陽子線型加速器を使っている。BNLで計画し、Hanfordに持って行かれた核融合炉材の照射実験に計画されている重陽子リチウムストリッピング反応を用いた高強度中性子源の加速器も35MeVの重陽子線型加速器を計画している。これは電流100mA, duty factor 100%, 即ち連続運転である。これ迄加速器は物理の実験用に供されていたため加速器の効率はそれ程考えられなかったが、30GeV~400GeVと高エネルギーになって来るに従いその電力代だけでも数百万ドルになり、効率が真剣に考えられるようになって来た。現在多くの加速器屋の一致した意見では、電気からビームへの効率は50%に行く事はそう難しくはなく、ソ連で開発したジャイラコーン⁽⁵⁾では効率は70%~80%迄行くだろうと推定している。このように加速器の技術は30年前と違い確立した技術であり、今後その応用は多方面に広がると思われる。

一方ウランなどの重い核種のターゲットの方は、如何にして多くの中性子を一個の陽子から発生する事が出来るかが問題となる。1GeV~3GeVの高エネルギーの陽子・重陽子を用いる理由は、エネルギーが低いとエネルギーの大部分が原子のイオン化などに取られ、核との反応が小さくなってしまふためであり、1GeV以上では反応はほぼ核反応になり、中性子発生率の効率が良くなるためである。エネルギーが3GeV以上になると中間子の発生に伴って中性子の発生が減るとも考えられている。1GeV~3GeVのエネルギー範囲では、中性子の発生量は陽子エネルギーにほぼ比例している。重陽子は陽子に較べて1GeVのエネルギーでは2.3割かた中性子の発生量が多い。ただ、重い核を加速するにはより低い周波数の電磁場が必要になり加速器が大きくなり価格の面で得とは言えない。(トリチウム加速では中性子の発生量が重陽子より一層多くなる。)我々の計画ではこの点からMTAの計画と違って陽子を用いる事にしている。またその加速器技術も重陽子より難しくなく電流も多くとれる。

さて、一個の高エネルギーの陽子から何個の中性子が発生するかは古くBNLのコスモトロン(3GeV陽子シンクロトロン, 現在は解体)を使って色々な大きさのターゲットを用いて実験したデータがある。第1図にはそのデータが示されている。図に見るように重い核ほど中性子発生量は大きく、ウランは1GeVで10個で鉛の20個の2倍になっている。これはウランの場合には、高エネルギーで生まれた中性子がさらに核分裂反応を起こす事に起因している。

高エネルギーの陽子は核の中に入射された時、主としてスパレーション反応で核の

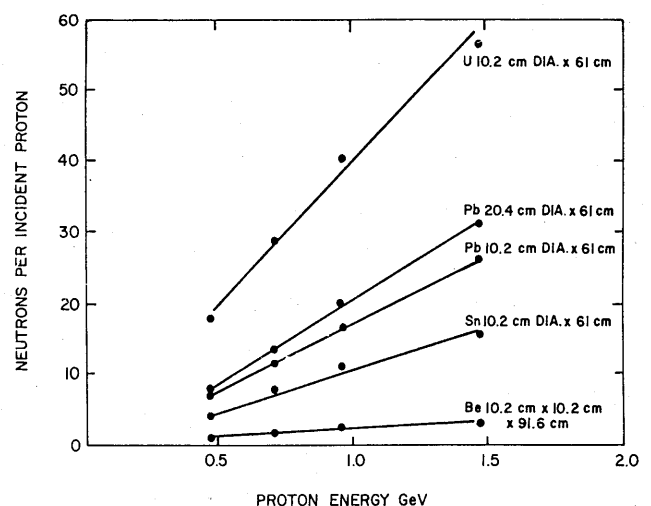


Fig.1 EXPERIMENT YIELD OF NEUTRONS BY BOMBARDMENT OF A HEAVY METAL TARGET WITH HIGH ENERGY PROTONS

中の核子をはじき飛ばす。陽子は中性子より更にクーロン壁を越さねばならぬので飛び出すにくい。高エネルギーを得たものは出ていく。束縛エネルギーの壁およびクーロン壁を越えられなかった核子は、やがて夫々エネルギーを分け与え所謂複合核になり蒸発反応で飛び出る。これらの過程が所謂 intranuclearカスケード反応であり、核から出た高エネルギーの核子は、また核と反応して同じ様な反応を次々と起こす。これを internuclearカスケードと言う。これによって中性子の発生量がターゲットのサイズに依存する。

これらの反応過程をモンテカルロ法で計算するコード NMTC⁽⁶⁾ (Nuclear Meson Transport Code), (ORNL), VEGAS + ISOBAR⁽⁷⁾ (BNL) は、米国およびソ連⁽⁸⁾で開発された。VEGAS + ISOBAR は intranuclearカスケードのみを計算し、internuclearカスケードは計算しないので、我々はその両者を計算する NMTC を用いて実験を解析し、概念設計の計算にも用いた。VEGAS + ISOBAR を開発した核化学の人の実験では、30 GeV ほどの高いエネルギーの陽子がウランなどの核と衝突した時でも、核分裂反応は核反応の半分ほどある事を示しており、これらの反応を無視して計算は出来ないが、中性子発生量の計算では核分裂反応をスパレーションで置換えてもそれ程の違いはない。

これらカスケードの反応のみで低エネルギーの核反応を計算するのは無理であるので、15 MeV 迄の反応を以上のモデルで計算し、それ以下のエネルギーの中性子輸送は、原子炉設計で用いられている計算コード ANISN, TWOTRAN を、核データは ENDF/B から核融合炉用に作られた DLC-2 データを用いて計算を行なった。そのフロー・ダイアグラムが、第 2 図に示されている。

最近ソ連のウラン・ブロックの実験結果が Atomnaya Energiya^(9,10) に発表されたので早速その解析を行なったが、我々の結果⁽¹¹⁾は実験より 20% ほど中性子発生量が少なく計算され、以下で述べる我々の設計もこの計算によっているため、設計値は保守的になっている。

さて、最後にこれら線型加速器とターゲットを組み合わせた線型加速器炉であるがこの炉型として三つが考えられる。一番目は未臨界の炉を外から加速器で作られた中性子を用いて運転する Linear Accelerator Driver Reactor である。これは夫々の炉が加速器を備えねばならず、また power 分布を平坦にするには特に工夫がいるなど難しい点が多い。二番目は核燃料を生産する炉 Linear Accelerator Fuel Producer で作られた中性子を fertile material に吸収させ、fissil material にし、燃料を再処理によ

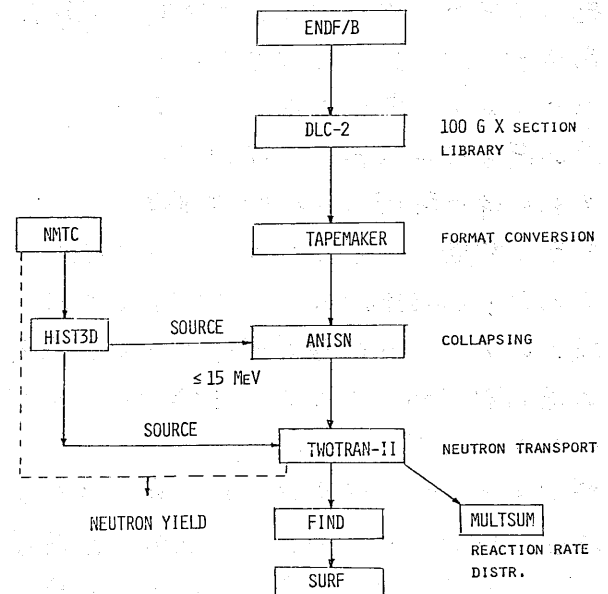


Figure 2 NEUTRONICS PART OF BNL CODE SYSTEM FOR LAR'S

て取り出し、他の炉で燃焼させようとするもので、分裂生成物は再処理で取除かれ燃料体を再生加工するので照射損傷の問題も回避出来るし、しかも高速炉と違って核物質の生産も初期核燃料が無くて出来、未臨界で運転できるので、安全性の問題がはるかに楽になるなど特色が多い。ただ、核拡散防止には再処理を伴う欠点があり、我々NASAPの範囲内で仕事をしているものにとっては、その他を選ばなければならない。その三番目が使用された燃料棒の中で核燃料を生産し、再処理を省く方式の Linear Accelerator Fuel Regenerator である。即ち、加速器で作られた中性子で使った燃料棒を照射して燃料棒内にある fertile material (例えば U^{238} , Th^{232}) を fissile material (Pu^{239} , U^{233}) に代え、それをまた原子炉で燃焼させようというものである。

第3図、第4図にはBNLで検討した概念設計が示されている。1.5 GeVに加速された陽子は、磁場によって縦に扁平され、ターゲット上部よりジェット状に噴射された液体鉛ビスマスに照射される。発生した高速の中性子は、その回りを囲んだ燃料体内の U^{238} に吸収させ Pu 燃料を生産する。燃料体としては、米国で主要な炉である軽水炉燃料を考え、燃料アセンブリを CANDU 型圧力管同様 Zr の圧力管の中に挿入し、重水、蒸気ヘリウムで熱冷却する方式を採った。

液体鉛ビスマスをターゲットとして用いたのは、これによって加速器の真空系とターゲットの燃料の高圧系の間には設けるべき窓を除くためである。高エネルギー、高電流の陽子ビームが窓を照射した時それに伴う熱除去、放射線損傷は大きな問題で、ガルフアトミック(GA)の大河氏にも加速器炉について話をした時に指摘された。この問題を避けるために蒸気圧の低い液体鉛ビスマスに直接ビームをぶつける事にした。

鉛ビスマスでは中性子の発生量がウランの場合の1/2になって面白くないが、高濃度のウランを溶融する塩⁽¹²⁾があればより望ましい。軽い核の塩が多量にあると、図にある通り中性子の発生量は小さくなってしまふ。また、中性子が一様に発生するように

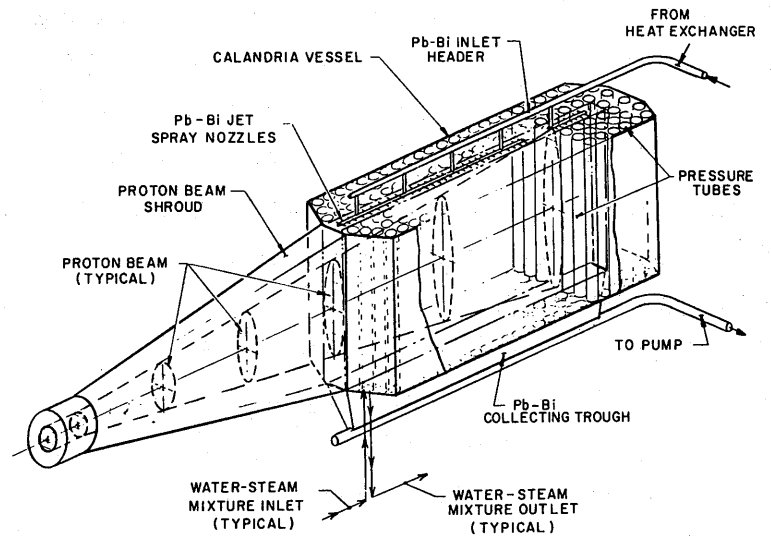


Fig.3 PWR TYPE TARGET ASSEMBLY

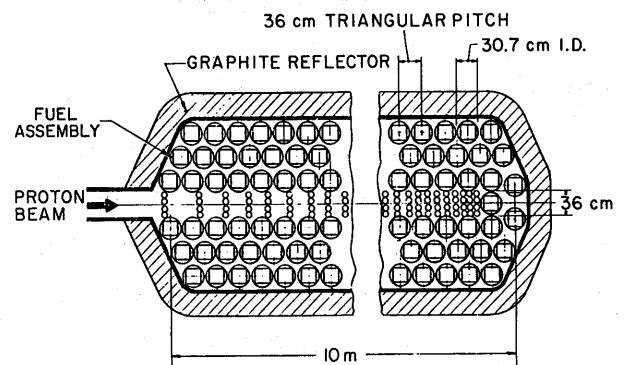


Fig.4 PWR TYPE TARGET ASSEMBLY CROSS SECTION

鉛ビスマスは第4図にあるように分布させてある。

図に示した系について、先程のNMTC、TWO TRANらのコードシステムを用いて核設計計算を行なったが、1.5 GeV 300 mA (=450 MW)の陽子ビームを使った場合、この炉の稼働率を80%として、1年に約1 tonのPuが生産される。現在1 GWeの軽水炉を運転する場合、1年に燃料の消費は conversion ratio が軽水炉では小さいため割に多く約330 kgである。このため、作られたPuを軽水炉燃料に利用した時 GWe 発電所の3台分を賄う事が出来る。また最近のウエスティング(WH)の実験によると、軽水炉燃料を60,000 MWD/ton 燃焼が可能であるとのデータを得たので、次の核燃料のシナリオを書いた。

まず、①ウラン(現在の軽水炉3.2%濃縮の代わりに)を2%まで濃縮し、それで軽水炉燃料を加工し、②LAFRで3.2%等価濃縮まで照射し、③軽水炉で30,000 MWD/tonまで燃焼し、④またLAFRに戻して燃料を増殖させ、⑤軽水炉でもう一度30,000 MWD/tonまで燃やして、⑥使用済み燃料貯蔵地に保管する。

こうする事によって、再処理無しにウランの資源を3.6倍活用する事ができる。実際にこのシナリオ通りに行くかは、バーン・アップコード(FPRI-CELL)⁽¹³⁾で計算する事によって核分裂生成物が蓄積しても、核的に充分これだけの燃焼量を得ることが出来る事がわかった⁽¹⁴⁾。一つ問題になるのは、Zr被覆管が放射線損傷に実際に耐えるかどうかであるが、核融合炉で用いている計算方式での評価では耐えると計算されているが、これはこれからの実験で解決すべき問題であろう。若し核分裂生成物がAIROXなどの方法により取除かれ被覆管を換えることが出来、上の二回以上のサイクルが出来れば、高速炉同様ウラン資源を100%活用する事が可能である。我々は上のシナリオに基づくコスト計算をし、1978年度のドル価格で軽水炉の43.6ミル*/KWHに対し約35%高い58.3ミル/KWHの値を出している。この計算では450 MWの加速器の価格をこれまでの建設した経験より500 M\$と評価し、また加速器を運転する電力の一部450 MWを外から買って来る事を仮定している。これらのコスト評価は利子などの違いで変わってくるが、軽水炉との相対値としては意味があり、それ程高価格ではない。

我々の設計は米国の軽水炉技術を延長して行くために、軽水炉燃料アセンブリーを照射する事を考えたが、軽水炉の conversion ratio は約0.6と非常に悪い。CANDU型炉のようにそれが0.9に近い炉では、1 tonのPuで約12台のCANDUの燃料を供給できる。またU-Pu系の代わりにTh-U²³³系に行くならば、CANDU炉では conversion ratio は更に良くなり、より多くのCANDU炉の燃料を供給する事が出来る。この点からカナダでは加速器炉について1940年代後半から関心を持ち、W.B. Lewisが推称者となり予算要求に何度か持ち出されたが、カナダの他の研究計画を押し潰すという事で日の目を見ないでいる。カナダで計画のあったIntense Neutron Generator(ING)の計画もその一環であった。Th-U²³³系を用いたサイクルは熱中性子炉で特に有効であり、軽水増殖炉の研究も行なわれているが、問題になるのは始めどうしてU²³³を得るかという事であり、この点加速器によるU²³³の増殖は特に期待されている。

* 1ミル = 1\$ / 1000

この様に中性子源を原子炉以外にもとめて核燃料を生産する方法が盛んに論じられる様になって来た。加速器以外としては核融合炉からの中性子も考えられるが、核融合はまだ break even に達せず、物理的な壁を突き破ってもまだ技術的な壁を突き破るのはかなり先の事になり、今日考えられているエネルギー問題の解決には程遠い。その点加速器の技術はここにあり、またターゲットの技術はこれまでの我々が開発して来た原子炉の技術であり、これを一本の導管で結びつけるだけの問題であり、核融合ハイブリッドを待つ事はなく、すぐ実験できる技術である。その他加速器を用いた核分裂生成物、アクチノイドの焼却などその利用は多方面に渡るが、紙数が超過するのでまたの機会にこれらについては述べる事にしたい。

参考文献

- 1) M. Steinberg Edit.; Proc. Inform. Meeting Accelerator Breeding. BNL, Jan.(1977).
- 2) Dept.Nucl.Energy, BNL; "Linear Accelerator Reactors", Year End Report, FY-1977, BNL #50766(1978).
- 3) P. Grand & H. Konts Edit.; "Conceptual Design & Economic Analysis of a Light Water Fuel Regenerator", BNL#50838,UC-80,TID-4500.
- 4) 塚田甲子男;「加速器による核燃料増殖」日本原子力学会誌, 20[8], 533(1978).
- 5) R.F. Taschek; "Accelerator Breeding of Fissile Material", Internat. Conf. Neutron Physics Nuclear Data for Reactors and other Applied Purposes, Harwell, England, Sep.(1978).
- 6) W. Coleman & T. Armstrong; "The Nuclear-Meson Transport Code NMTC", ORNL-4606(1970).
- 7) K. Chen et al.; Phys. Rev., 166, 949(1968).
- 8) V.S. Baraschikov; JINR-R2-7694(1974).
- 9) R.G. Vasil'kov et al.; Atomnaya Energiya, 44, 329(1978).
- 10) V.S. Baraschikov & V.D. Toneev; Atomnaya Energiya, 35, 163(1973).
- 11) Y. Nakahara & H. Takahashi; "Analysis of Neutron Yield Produced by High-Energy Proton", Trans.A.N.S., 30, 739(1978).
- 12) 古川和男 他;「溶融塩加速器炉構造について」原子力学会年会要旨集 B-54 (1978).
- 13) B. Zolotar & W. Eich; "Advanced Recycle Methodology Program", EPRI-SR-2, July(1974).
- 14) H. Takahashi, H. Konts et al.; "Analysis of the Nonprocessing Two Cycle Scenario for LWR Fuel Regenerated by Linear Accelerator Reactor", Trans.A.N.S., 30, 345(1978).

〈特集〉

加速器中性子源減速材アセンブリーの中性子工学

北大 井上 和彦

中性子散乱実験のための加速器中性子源の研究開発や建設が国内国外で華やかになるうとしていいる。加速器で発生させた平均エネルギー約1 MeVの速中性子を減速熱化させて、パルス状低エネルギー中性子を発生させるための減速材アセンブリーについては、検討されているが⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾、必ずしもこれで充分であるとはええない。最適設計を行なうためには、中性子ビーム強度、中性子エネルギースペクトル、パルス時間特性、ターゲットなど炉物理的手法を駆使して研究するべきことが多くある。これまで電子LINAC冷中性子源の研究開発を行ないながら、このことを痛感していたので、問題点について若干述べてみたいと思う。これは炉物理に密接に関連しているが、原子炉の問題ではない。しかし、中性子発生と中性子輸送の範疇に入り、炉物理研究者が扱うのが最も効果的で、興味をもてる問題である。加速器中性子源減速材アセンブリーの中性子工学的問題と呼ぶのが適切である。以下では、3つの事柄について問題点を列挙し、アプローチの参考例として筆者の研究室におけるデータを併せて示す。

I. 中性子ビーム強度

とにかく、何としてでも中性子ビーム強度を大きくすることである。加速器線源を作ろうとする人々は、皆そう考えている。しかし、与えられた条件のもとで最大強度を得るためにはどうすべきであるかを断言できる know-how をはっきりと持っている人は殆んど居無い。あるのは散発的なデータだけである。下記のスペクトルやパルスの形についても事情は同様である。

〈アセンブリーの形状と寸法〉

含水素減速材については、厚さ5cmが最適であることは良く知られている。この点については確立しているが⁽¹⁾⁽⁵⁾、その他のことはあまりはっきりしない。例えば、線源の中性子放出面の面積に関しては、原子炉では 10cm^2 が、加速器線源では 100cm^2 が引用されることがあるが、放出面面積は散乱試料位置における中性子ビーム強度を大きく左右する因子である。寸法と形状はビーム強度と複雑に関係し、他の条件も併せて考慮しなければならない。どの因子が強度にどのように影響するかを系統的・定量的に調べる必要がある。

〈ターゲットとアセンブリーの位置関係〉

これは、ビーム強度に対して何割もの、と

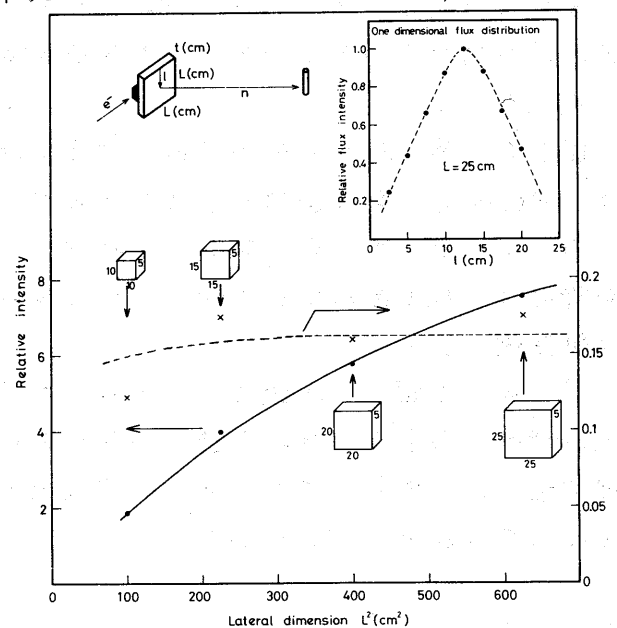


図1. 中性子放出面面積と散乱試料位置におけるビーム強度の関係。アセンブリーの厚さは5cmである。内挿図は放出面上のビーム強度分布を示す。

きには何倍もの変動を及ぼす因子である。しかし、感じて扱っているのが実状である。さらに、ターゲット自体の研究も極めて重要である。材質の影響についてはかなり良くわかっている。しかし、ターゲットの大きさ、冷却方法、取扱い方法などまで考慮した検討が必要である。

〈減速材〉

含水素減速材が使われる。加速器線源では他に替るものは考えられない。点に近い速中性子線源に対して、減速と熱化を小さな体積内ではたさなければならぬからである。水が用いられることが多いが、冷中性子源では他の減速材が使われる。ホット中性子源については研究を待たねばならない。原子炉のように加熱黒鉛というわけにはいきまい。ジルコニウムハイドライドなどが有望である。

〈速中性子反射体〉

ビーム強度が数倍になるという話がしばしば出るが、はっきりしない。効果があることは事実である。2ないし3倍は確実に増加するが、数倍ないし10倍というのは、どのようになればよいのかはよくわかっていない。初めの条件をきっちり押えておくことが大切である。上記のターゲットとアセンブリーの位置関係とも、またアセンブリーの形状・寸法とも密接に関連している。これは、エネルギー・空間・時間依存の減速の問題であり、最近の計算機なら扱える問題で、大変面白そうである。

〈測定例-1〉

図1に、減速材放出面の中中性子強度を調べた結果の1例を示す。5cm厚で25cm角位までは、中心部分の単位面積当り強度はあまり変化せず、また横方向に同じ空間分布をしている。したがって、散乱試料に入射するビーム強度が面積に比例して増加するから、事情が許せば、放出面が広い方が明らかに有利である。

〈測定例-2〉

図2に、黒鉛または酸化ベリリウムを速中性子反射体としたときの、熱中性子ビーム強度の増加の様子を示す。減速材は厚さ5cmの常温の水である。測定したアセンブリーの形状寸法では、黒鉛で丁度2倍に、酸化ベリリウムで丁度3倍になる。水を反射体としたのでは1.5倍がせいぜいである。

II. エネルギースペクトル

2Å附近の中中性子が必要なら熱中性子源、5Å以上が必要なら冷中性子源、1Å以下ならばホット中性子源ということになる。飛行時間法による低エネルギー中性子スペクトル

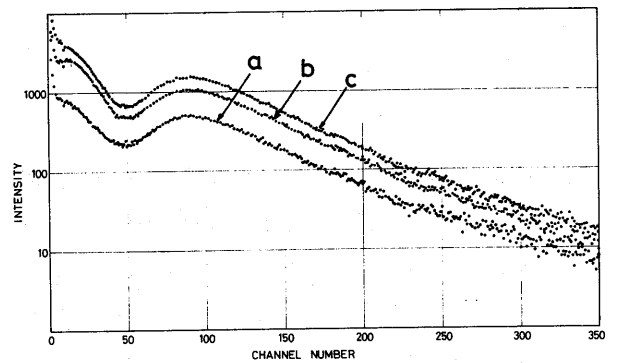


図2. 反射体によるビーム強度の増加。

aは $10 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$ の裸の水アセンブリーのスペクトルで、bとcは黒鉛および酸化ベリリウム反射体をつけた場合である。

の測定は周知のように多くの人々によって行なわれている。勿論これらは大変有用であるが、中性子源を意識したものは極めて少ない。改めて中性子源のための条件を考慮して、系統的な測定を行なうことが望ましい。

〈冷中性子〉

20°Kの固体メタンはパルス線源にとって、最も有効な冷減速材である。ただしγ線加熱や核加熱あるいは放射線損傷が少ない場合についての結論である。これらの放射線効果が著しく大きい場合については結論は出ていない。今後これは特に重要な問題となる。

10 Å以上の長波長冷中性子あるいは超冷中性子をパルス線源で発生させる方法も、これからの研究課題である。

冷中性子スペクトルについては、冷減速材の冷却機構の研究も不十分であり、実験も低温の取扱いにくさのためにデータが極めて少ない。冷中性子スペクトルのToF測定を行なうためには、20°K附近については小型冷凍機を使用すると簡便であるが、液体ヘリウムを使う手もある。いずれにしても、低温デュワーベッセルの技術が必要である。

〈ホット中性子〉

加速器中性子源では、ホット中性子に関しては原子炉より優位な立場にある。それは、減速と熱化が同一減速材領域で行なわれるからである。さらに収量を上げるためには加熱減速材を考えることになるが、加熱黒鉛についてはToFスペクトルの測定が行なわれている。しかし、黒鉛では強度とパルス特性に問題があるように思う。ジルコニウムハイドライドについてToF測定データはあるが、加熱した場合について測定する必要がある。この場合には水素の拡散が高温で起こる

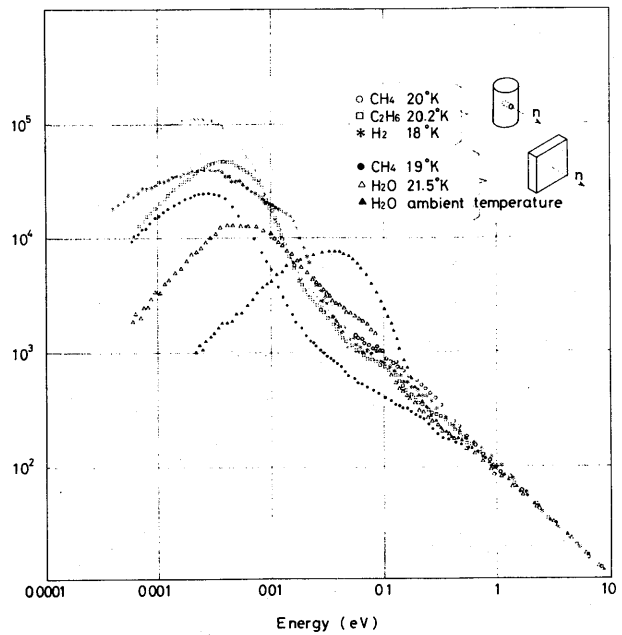


図3. 各種の冷減速材よりの中性子ビームスペクトルを示す。1/e分布で規格化してある。

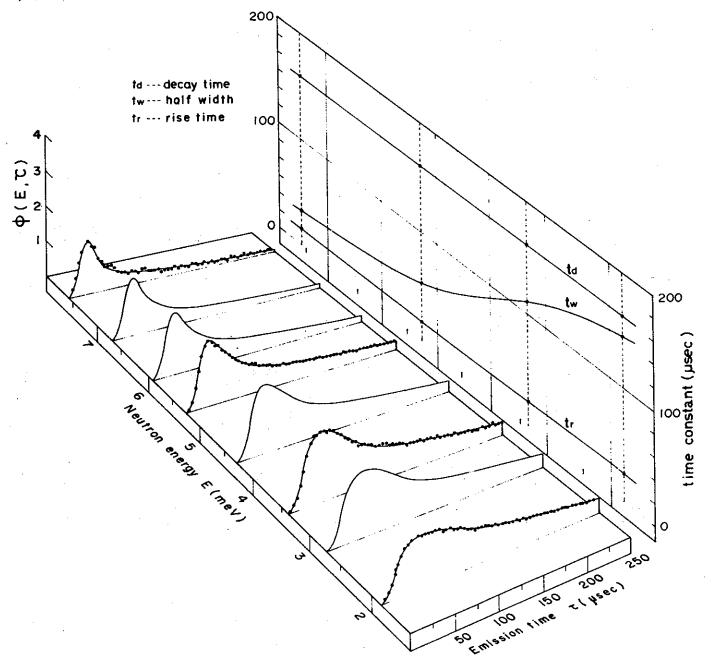


図4. 20°Kメタンよりの中性子パルスのエネルギー-時間スペクトル。飛行時間法と結晶スファクトメータを組合せて測ったもので、カーブは合成近似係数表のサンプリング例である。

から注意が必要である。

〈測定例-3〉

図3は、種々の冷減速材の冷中性子スペクトルの測定例である。減速材の条件で、減速スペクトルと低エネルギー成分の比がかなり変化する。理論的にも実験的にも研究の余地が大きい。図からわかるように、冷減速材によってスペクトルの形状にそれぞれ特徴があり、何故そうなるかについては突っ込んだ研究は殆んどない。

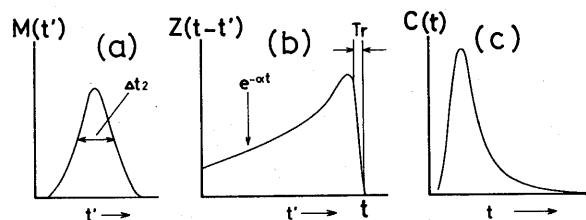


図5. 分解能向上の原理。

(a)は分解能函数、(b)は入射中性子スペクトルであり、(c)は総合分解能函数である。(c)の立上がりは(b)の右側立上がりだけが影響するから、結局(a)だけで支配されることになる。

$$C(t) = \text{const.} \int Z(t-t')M(t')dt'$$

II. パルス時間スペクトル

減速材から放出される低エネルギー中性子パルスの時間特性については、散乱実験の側から詳細なデータの入手が望まれているが、炉物理のパルス実験の大きな成果があるにもかかわらず、その間の連絡が不備なように思う。その理由の一つとして、前者ではパルスの立上りを含めた情報が必要であるのに対して、後者では漸近スペクトルに関心が集まっていたためであると考えられる。パルスの立上り附近を含めた詳しい測定はあまり簡単ではないが、現在では充分実行可能である。TOF法にチョッパーを利用する方法と結晶モノクロメータを利用する方法の2つのアプローチがある。前述の速中性子反射体の問題とも関連して、理論屋にとって手応えのあるテーマである。

〈測定例-4〉

図4は、20°K 固体メタン内の中性子のエネルギーと時間スペクトルの測定結果である。パルスの立上り時間 t_r 、減衰時間 t_d 、半値幅 t_w が示してある。パルス線源を用いた散乱実験では、この種の詳細なデータが必要である。

〈分解能向上と強度向上の両立の例〉

中性子パルスの半値幅が分解能を左右する場合に、パルス幅を狭くしようとするとビーム強度が通常は激減する。準弾性散乱では、これを解決する方法がある。 $t_r < t_w < t_d$ の性質を利用して、図5のように立上がり側で解析すれば、強度の増強も分解能の向上も両立させることができる。これはパルス特性の利用である。

以上のような研究を行なうためには、いずれにせよ飛行時間法が必要であるから、電子LINACを用いなければならない。炉物理研究に使用できるLINACは、現在では国内に手頃なものが何台もあるので、興味を持っていただくことを切望する次第である。

(1) D. H. Day, R. N. Sinclair; Nucl. Instr. Meth., 72(1969)237.

参考文献 (2) J. M. Carpenter; ibid., 145(1977)91.

(3) O. K. Harling; ibid., 119(1974)217.

昭和53年度科研報告書

(4) 石川義和; 高エネルギー中性子源(KENS)の建設とそれによる中性子散乱

(5) T. Asaoka; J. Nucl. Energy, 9B18(1964)665.

各国におけるパルス強中性子源研究開発の状況

東北大 核理研

渡辺 昇

パルス中性子源の重要な一つに固体、液体、生体等いわゆる凝集体の研究に供せられるものがある。熱・熱外あるいは冷中性子はその波長がこれら物質を構成する原子あるいは分子間距離にほぼ等しく、かつエネルギーが格子振動等のエネルギーに非常に近いため、中性子回折・散乱により物質系のミクロな構造や運動を詳しく調べることができる。X線・赤外線等の電磁波や電子線が空間的相関か時間的相関のいづれかしか見れないのに対し、中性子線は時間空間相関（たとえばスピンのみだれが結晶中をどのように伝わって行くか）を調べることができる極めてユニークな探査粒子である。そのため各国に研究用のビーム炉が建設され、幾多の成果を上げてきたが、研究の進展とともによりビーム強度の高い中性子源が必要とされるようになった。世界最大級のビーム炉で得られる $1 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ の熱中性子束を凌駕することは技術的にも経済的にも極めて困難で、平均出力はそれほど高くないパルス中性子源が将来の中性子源として考えられるようになった。パルス中性子源で、どのように中性子回折・散乱が行なえるかは文献(1)を参照されたい。結論をいうと、パルス中性子源は、そのピーク中性子束に等しい定常炉とほぼ同じくらい有用である。

パルス中性子源にはパルス炉と加速器と2つの流れがある。前者はソ連のIBR-1にはじまる繰返し型高速パルス炉で、核燃料または反射体の一部を回転体で動かしてパルスの反応度を加え、半値幅約 $100 \mu\text{sec}$ の速中性子バーストを得る。後者は東北大、ハーヴェル、レンセラ一等で始められた電子ライナックによるもので、数10 MeV以上のパルス状電子ビームを重金属ターゲットに当て、(e, n)反応により速中性子パルスを得る。熱中性子パルスは炉心またはターゲット近傍に置かれた含水素減速材より得られるが、シャープなパルスを得るためには、パルス速中性子源のパルス幅は減速材自身のパルス幅と同程度以下でなければならぬ。パルス炉は比較的输出(中性子発生数)が得易いがパルス幅に難点があり、熱外中性子領域では著しく不利である(図1参照)。一方電子ライナックでは、鋭いパルスは容易に得られるが、ある程度以上の出力を得ることは極めて困難である。いずれにせよこのようなパルス中性子源で得られるピーク中性子束は熱中性子束換算でせいぜい $10^{12 \sim 13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ であつた。しかし液体の構造(東北大、ハーヴェル)、熱外中性子散乱(レンセラ)、冷中性子散乱(北大)の研究等特定の分野では、パルス中性子源の特徴を生かした利用法により、オ1級の定常炉を凌駕する成果を得られている。

パルス炉はその後も出力を増し、IBR-2の臨界を見るに至つた。一方、パルス炉と電子ライナックの長所を組合せた加速器付パルス炉も考えられ、現在我が国が計画しているのもこ

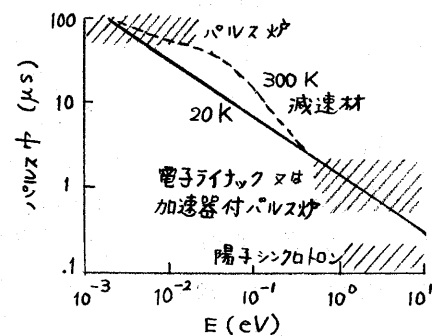


図1. 各種パルス中性子源と減速材のパルス幅の比較

の型である。これはパルス炉の炉心中央近傍にターゲットを置き、パルス反応度に同期して打込まれる電子ビームによる中性子を即発未臨界増倍する。

その後さらに性能の高いパルス中性子源の検討が進み、中エネルギー(0.5~1 GeV)陽子加速器が登場した。中性子源の性能は、まず中性子発生密度である。技術的限界が熱除去にある時には、より明るい線源を得るには、より発熱の小さい核反応に依らなければならぬ。表1はその比較で、電子ライナックビーム(e, γ, xn)よりは核分裂(パルス炉)が、さらにそれより中エネルギー陽子による核破砕反応が有利であることがわかる。最近、大出力の中エネルギー陽子加速器が建設可能となり、この種のパルス中性子源が脚

表1. 各種核反応に対する発熱、中性子流量の比較

| 核反応 | ターゲット発熱 (MeV/mg) | 単位ビーム出力当りの中性子流量 (n _s /kW) |
|---|------------------|--------------------------------------|
| T(d, n) ⁴ He | 2500 | 9.3 × 10 ¹¹ |
| Li(e, γ, xn) | ~1500 | 4 × 10 ¹² |
| Li(d, n) | ~1200 | 3 × 10 ¹² |
| fission | 200 | |
| U(p, xn, f) (E _p ~ 0.8 GeV) | 55 | 2.4 × 10 ¹⁴ |
| B ₁₀ (p, xn) (E _p ~ 0.8 GeV) | 23 | 1 × 10 ¹⁴ |

光をみびるに至った。パルス炉を第1世代と呼ぶならば、加速器付パルス炉は1.5世代、陽子加速器は2世代といえよう。パルス状の大電流中エネルギー陽子ビームを得るには、数10 MeVの陽子ライナックと数100 MeVの陽子シンクロトロンを組合せるか(表2 KEK, SNS, IPNS), 数100 MeV陽子ライナック(パルス幅数100 μsec以上)とこれをパルス化するためのストレージリング(加速しないシンクロトロン)が最も可能性がある。SNSやIPNSでは、高エネルギーの12 GeV陽子シンクロトロンと同じくらい半至のリングにマイナス陽子イオンを入射させ、ストリッパで電子をばきとってからシンクロトロン加速することにより、従来の約100倍のビーム強度をもくろんでいるが、ストリッパの寿命、高い繰返し(50~60 pps)に耐えられる磁石、加速のための大出力のRF電流(FM)等にある程度の開発研究は必要とされている。

表2. 各種パルス中性子源の比較(2)

| | 加速エネルギー (MeV) | 平均電流 (μA) | 繰返し (PPS) | ビーム出力 (kW) | 平均中 (μs) | 中性子流量 (n _s /sec) | 備考 |
|------------------|---------------|-----------|-----------|---------------|----------|-----------------------------|---------------|
| <u>電子ライナック</u> | | | | | | | |
| 東北大(日本) | 250 | 75* | 300(100) | 15 | 2.5 | 3(1) × 10 ¹³ | 既存 |
| New Harwell(英) | 136 | | 300 | 90 | 5 | 2 × 10 ¹⁴ | 建設中 |
| <u>陽子ライナック</u> | | | | | | | |
| WNR(ロスアラモス, 米) | 800 | 20 | 120 | | 10 | 1.8 × 10 ¹⁵ | 既存 |
| <u>陽子シンクロトロン</u> | | | | | | | |
| KEK(日本) | 500 | 2(1.5)* | 20(15) | 1 | .06 | 2.4(1.8) × 10 ¹⁴ | 加速器既存 他建設中 |
| SNS(ラサキナ, 英) | 800 | 212 | 50 | 170 | .2 | 4 × 10 ¹⁶ | 建設中 |
| IPNS-I(アルゴンヌ, 米) | 500 | 24 | 30 | 12 | .06 | 3 × 10 ¹⁵ | 建設中 |
| IPNS-II(") | 800 | 480 | 60 | 384 | .2 | 9.6 × 10 ¹⁶ | 計画 |
| <u>パルス炉</u> | | | | | | | |
| IBR-2(ソ連) | | | 5~50 | (炉出力) 4000 | ~100 | 1.75 × 10 ¹⁷ | 建設中 |
| <u>加速器付パルス炉</u> | | | | | | | |
| JLB(日本) | (E.L.) 750 | 100 | 200 | (炉出力) 2000 | ~3 | ~8 × 10 ¹⁶ | 計画 |

*は達成値, 他は総て設計値

これにより 1×10^{16} n/cm².secが達成できると考えられている。

文献

- (1) 石川義和, 渡辺昇: 「パルス中性子源による中性子散乱」, 日本物理学会誌, 28, (1973) 461.
- (2) 渡辺昇: 「加速器による強力パルス中性子源の現状と可能性について」, 強力パルス中性子源研究報告(東北大学施設) (1978) P-6.

強力 14 MeV 中性子源と中性子工学

阪大・工・原子力

佐田 健二

1. 強力中性子源建設への努力

この数年来、核融合炉開発との関連で、強力 14 MeV 中性子源の必要性が認識されるようになってきた。関係者としては前々から声をからして説いてきたことではあるが、とにかく予算面で中規模のものが原研と阪大に各一基ずつ設置されることに確定し、さらに本格的なスケールのものでどうするかについても原子力学会に専門委員会が設置され、調査活動が開始されている。筆者はこれまで核分裂炉やライナックなどの強中性子源とも、また小型コックロフト型加速器による D-T 中性子源とも永らく付き合ってきた関係で、なんとなくいつの間にか上記の二つの仕事に深くかゝり合った形である。しかし、種々の会合に出席してみても感じることは、強力中性子源に対する各分野の人々の考え方の差の大ききであった。汎用性を求めることは、同時に特色の少ない使い勝手の悪い装置を意味するのだが、利用者が何時どのような目的でどのような実験を実施するのか方針を出してこないとなれば、中性子源開発側で想定するより仕方がない面も出てくる。原子炉の場合は炉の設計と利用の両側に中性子工学の専門家がいたので、橋渡し役を頼めたのだが、今回は困ったことに加速器工学の専門家で、かつ利用者という人はまず出てきそうにない。といって、利用者が身を出して大型加速器を建設できるかどうか、すこし荷が重すぎるように。日本の場合、中規模の強力 14 MeV 中性子源の建設の世話役はニヶ所共に中性子工学畑の人間が引受けているが、これは、たまたま一番うるさい利用者であると共に、これまで小型 14 MeV 中性子源の建設・管理への経験があったからである。大規模のものまで中性子工学畑の人間が身が出るのは出しゃばりすぎかわしれない。しかし、誰かが身を出して使い易い強力中性子を供給してくれるのを待っているという消極的態度ではいけないと思っている。中性子工学屋はソフトにさえ強ければ良いとの先入観は捨てにい。

2. D-T 核融合炉ブランチセット中性子工学

このテーマについては、すでにこの「炉物理の研究」才 21 号に関泰氏が大変よくまとまった解説を寄稿しておられるので、詳細はそれを参考にした。ここには、核分裂炉の（ためのもの）と比較して、要約すると、次のような点に特徴がある。i) 10 MeV 以上の荷電粒子生成核反応が多く、核変換を考慮しなければならない上に、非弾性散乱も多い。ii) 対象とするエネルギー範囲は高速炉のそれを越えるか超え、14 MeV から熱領域までに拡がり、それぞれの部分に重要性がある。たとえば熱領域などは考えられそうだが、 ^3T による ^3T の生成では無視できない。また空間的な非均質もかなり著しい。iii) 核分裂炉と異なり、プラズマ部から流入してくる中性子はいわゆる漏洩中性子であり、方向性に対する十分な配慮が必要となる。iv) γ 線による発熱もまた利用対象と考えられるし、才 1 壁では中性子による発熱の数倍との予想もある。

核分裂炉中性子工学の知識や体験からこれらの問題を解決しようとして、既存のデータやコードで計算をし、また実験技術でその妥当性を検討しようとするのにちまちま壁にぶつかってしまう。まず自明なのは、i)核データの不足である。特に角度依存に関するデータは決定的に不足している。私共のさ、やかな経験でも ENDF-BIV ではどうにもならないエネルギー領域、つまり2~14 MeV のブランクは各核種共にひどい。ほにして明春頃入手できるオV版ではどうなっているのか、伝えられる所ではあまり期待できないというが……。ii)一方、計算手法の方も、遮蔽計算用のコードの転用ではやはりどうにもならない。高右の ANISN でも、比較的簡単な実験データの解析に手こずることが出てきている。群定数の縮約コードでも非弾性散乱の異方性を導入して扱えるものは少ない。

これらの問題点を実験的に取り上げる場合、微分断面積の測定的重要性は万人の認める所。特に角度依存の測定とすれば、所要エネルギー範囲をカバーしうる強力中性子源やその測定系の必要性は自明である。た、私見とのバさせてもらえば、微分断面積の測定には、ある程度の基本的実験パターンがあり、エネルギー領域が広がったり、核反応の種類が増えたりからといって、そのパターンの本質は核分裂炉のときと共通性がありそうに思うのだが如何なものだろうか。それに比して、適切な中間積分量での、核データやコードの検討に占める積分実験の重要性はより大きくなってくるのではあるまいか。なにしろ核分裂炉では「臨界」というすばらしい特異点があり、中性子増倍と微分量との大きなつながりをしてくれたが、今度はそれが無い。いわゆるパラメータ段階でのつき合せて、部分的にそれぞれと手く理論と実験がつながったとしても、統一的方向づけはどこで押えるのかと今から心配になってくる。ましてパルス状に運転を反復することからスタートしそうだという核融合炉の中性子工学で、熱発生分布やトリチウム生成を柱にどのような体系を組立て、いくのか？ 微分実験も大切だが、これらの大きな見通しをつかむための積分実験——核分裂炉物理での指数実験やパルス中性子減衰実験は増倍係数と結びついていて——を考えてみるべきだと思う。

そのためには、中規模の14 MeV 強力中性子源が一番手頃だというのが私見のポイントである。本当は小型でもよい、た、いかに何分高エネルギー領域では断面積が小さく、中性子測定は大変だから、やはり中性子強度はかなり大きくあってほしい。しかし、微分断面積の測定用ほどの精度は不要だから、まず今回の二基の中性子源の程度で、かなりの仕事はできよう。原研の装置は炉設計にできるだけ直結したデータを出される方向で仕事を進められると聞いているので、私達の所は、できるだけ上記のようなことを意識して研究を進めたいと思っている。高速炉物理でさえ、まだ体系化していないのに生意気だと叱られそうだが、当面の必要性に応じた実験データの収集と同じ位、いや大学ではそれ以上に核融合炉中性子工学として普遍性と指導性のある *discipline* の確立が大切だろう。そうではないと、た、てさえもとりの悪いこの分野は、本当にバラバラの断片の集積になってしまって、エネルギー・バランスとか最適化なんて高級な話に永久にたどりつけないだろうと考える。

なお、14 MeV 中性子による医療用照射のための基礎実験もその応用として解決できる筈である。

〈解説〉

レーザー核融合実験における計測

原研

原子炉工学部

向山 武彦

はじめに

核融合装置の性能は、プラズマ温度 T と閉じ込め性能 nt (n : プラズマ密度, t : 閉じ込め時間) で表わされる。磁気閉じ込め方式では、密度を大きくするのは困難であり、コロン条件を満足させるために、閉じ込め時間を長くする努力がなされている。一方、慣性閉じ込め方式(ICF)では、閉じ込め時間を長くすることは困難であり、密度を増加(圧縮)させることが必要になり、ICF実用炉ではDTを固体密度($4.5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$)の $10^3 \sim 10^4$ 倍に圧縮することが考えられている。この場合、圧縮されたDT小球の直径は数 $10 \mu\text{m}$ 、閉じ込め時間で \sim 数 10 psec となろう。このようなパラメータ空間の実験には、空間分解能 μm 、時間分解能 psec の新しい計測技術が必要になる。その他のICF計測の特長は複雑な現象に対する数多い情報を短時間に処理するため、イメージ計測が重要な手段である。最近のICFにおける実験と理論の進歩は著しい。米国では1984年には科学的ブレーク・イーブン(燃料小球に入射するエネルギーと核融合反応エネルギーが等しい状態)を達成しようとして計画している。ソ連では高エネルギー電子線(REB)により80年代早々に科学的ブレーク・イーブンを達成しようとしている。米国リバモア研究所(LLNL)では最近 $10 \text{ kJ}/26 \text{ TW}$ 出力の"Shiva"レーザー(Nd: ガラス, 波長 $1.06 \mu\text{m}$)を完成させ、5月に $8 \times 10^9 \text{ neutrons/shot}$ を得ている。LASLでは $10 \text{ kJ}/21 \text{ TW}$ の"Helios"レーザー(CO_2 , 波長 $10.6 \mu\text{m}$)を完成させ、新しい局面に入ってきた。ICFにおいては実験と理論・計算との結びつきは非常に強く、互に相手の成果を取り入れて目覚ましい速さで進歩している。本稿では、この進歩を支えている計測技術について述べる。また、ICFの物理について簡単に述べ、理解の一助にしたい。Fig. 1にロチェスター大学が建設中のレーザー・システム"オメガガン" (Nd: ガラス, 24ビーム, $5 \text{ kJ}/12 \text{ TW}$ 後に $10 \text{ kJ}/30 \text{ TW}$ にupgradeする)を示した。Fig. 2に現在実験に使われている典型的なターゲットを示した。左の図は縫い針との比較である。ターゲット直径は $100 \mu\text{m}$ である。

慣性閉じ込め方式の物理⁽¹⁾

ガラス小球にDTガスを封入したペレットを用いた実験の電子密度、温度分布について計算の一例をFig. 3に示し、この図をもとに説明を進める。

① Nd: ガラス・レーザーからの波長 $1.06 \mu\text{m}$ のレーザー光の照射によりターゲットのガラス殻の表面はプラズマとなる。② レーザー光線(振動数 ω_0)は臨

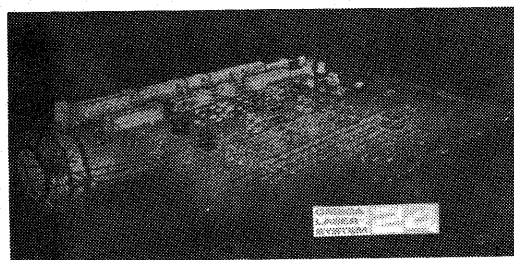


Fig. 1 Nd: Glass Laser of Univ. of Rochester

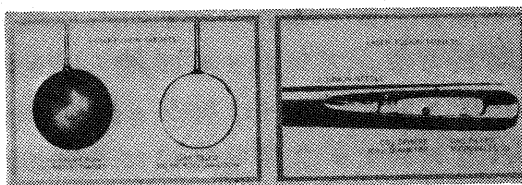


Fig. 2 Laser Fusion Target

界密度 (電子プラズマ振動数 ω_{pe} が ω_0 と等しくなる密度 $1.06 \mu\text{m}$ の波長に対しては $n_c = 10^{21} \text{cm}^{-3}$) までプラズマ中を伝播し, この点で反射される。エネルギーはコロナ領域 ($n \leq n_c$) で吸収され, 電子温度 T_e は 10^7K となる。③ 吸収されたエネルギーは臨界密度面を通過して電子により内部に輸送される。④ エネルギーの供給を受けたガラス殻の表面はプラズマを外向きに噴出し, この反作用により残りのガラス殻は内側に駆動され, 内部のガスは圧縮される。プラズマの外側へと内側への動きを分ける面は削磨面 (ablation surface) と呼ばれる。⑤ 圧縮された DT の中心部で核融合開始条件が満足されると, 融合反応が開始 (点火) され, 燃焼領域は α 粒子により外向きに広がって行き, ⑥ プラズマの飛散により燃焼は終熄する。即ち, 吸入-圧縮-点火-排気という 4 サイクル内燃エンジンと同じ作動原理である。

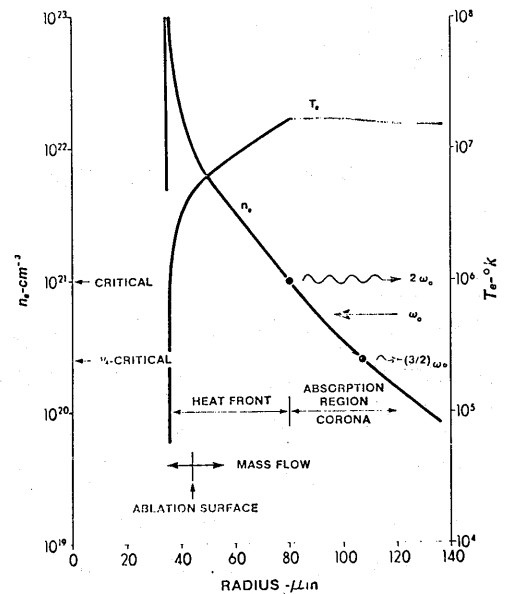


Fig. 3 Typical Electron Density and Temperature Profiles

高いエネルギー利得を得るには, 物理的にはレーザーエネルギーの効率のよい吸収, 効率のよいエネルギー輸送と等エントロピー的な圧縮が重要になってくる。工学的には電気エネルギーからレーザーエネルギーへの変換効率のよいレーザーの開発, 放射線として放出される反応生成エネルギーの効率良い回収 (構造材の放射損傷の保護を含めて) が要求される。

プラズマによるレーザーエネルギーの吸収はレーザー-プラズマ相互作用の物理として精力的な研究が行われてきたが, 未だ不明の点が多い。逆制動放射, 共鳴吸収, パラメトリック不安定性およびイオン密度揺動が主要な吸収機構と考えられる。逆制動放射は電子とイオンの衝突による吸収機構であり, 電子が高温になれば衝突は起らなくなり吸収効率は悪くなる。このためガラス小球を使った実験 (レーザー強度 $10^{13} \sim 10^{16} \text{W/cm}^2$) では, この機構による吸収率は数%以下でほとんど無視されてきた。しかしターゲットに高いZの物質 (Auなど) を用いると, 逆制動放射だけで50%もの吸収率 (Au平板, 10^{15}W/cm^2) になることが最近示された。他の吸収機構では発生する高エネルギー電子の発生がないという利点がある。長い平均自由行程を持つ電子は燃料部分を圧縮以前に予熱してしまい, 効率良い圧縮という点から望ましくない。共鳴吸収はレーザー光の偏光と入射角に依存する吸収機構である。x方向に密度勾配を持つ2次元プラズマに, x-y平面内でz軸に斜めに入射したレーザー光がこの平面内に電場成分を持っている (P-偏光波) と, 電子プラズマ波が励起され, プラズマが加熱される。入射角が 20° 位で, 平板ターゲットを $10^{15} \text{W/cm}^2 \sim 10^{16} \text{W/cm}^2$ の強度で照射した時, 50%の吸収が生ずることが実験的にも理論的にも確かめられている。

パラメトリック不安定性は波動と波動の非線形相互作用に属し, 吸収に役立つのは, 振動2流不安定性とパラメトリック崩壊不安定性である。古典吸収と呼ばれる逆制動放射では説明出来ない高い吸収率が実験で示され, 異常吸収と名づけられたのはこの不安定性に

よる吸収である。

入射光と電子プラズマ波、イオン波の間で振動数整合条件が満足されると、入射光が電子プラズマ波とイオン波を励起することにより、そのエネルギーをランダウ減衰を介してプラズマに移行する。振動数整合条件を満足させるのは密度分布の限られた範囲であり、密度分布の変化に影響を受けやすく、余り効率の良い吸収機構ではないと言われるようになってきた。

広い密度分布領域にわたる効率の良い吸収機構としてイオン密度揺動による入射光の減衰が提唱された。レーザーのエネルギー束は、プラズマ内部に向う電子による熱エネルギー束 Q に変換される。電気的中性を保つために低速の電子がレーザーの方向に向う。この電子流はイオン音波を励起し、この波もレーザーに向う。レーザー光は低密度領域でイオン密度の揺動により、イオンとの衝突頻度が増加し効率よく吸収されるというものである。

吸収されたエネルギーのプラズマ中での輸送は、熱平衡にある電子による熱伝導と高速電子による輸送が主なものである。電子の衝突長が密度勾配の特性長に比して短ければ、電子は速やかに熱平衡に達し、エネルギー輸送は拡散型となる。高速電子の衝突長が特性長に比べて長くなれば、エネルギー輸送は "free-streaming" となる。電子熱伝導は実際には古典 (Spitzer) 熱伝導係数の $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{100}$ 程度となる。レーザー加熱による電子熱量束は非常に大きいため、温度勾配は急になり、勾配の特性長が電子平均自由行程より短くなり、熱伝導法則が適用出来なくなるのが理由の一つであり、その他に、局部的磁場発生により電子の運動が制退されるか、または電荷分離による力が電子を引きもどすという理論も提唱されている。

削磨面まで輸送されたエネルギーにより、この面で急激にプラズマが外向きに膨脹し、このロケット作用により、内側の物質は圧縮される。効率よく圧縮が行われるためには、被圧縮部が低温であることが必要で、フェルミ縮退している時、圧縮に要するエネルギーは最少となる。

計測技術^{(2),(3)}

いままで述べてきた諸過程を観測するために、計測すべき範囲を Table 1 に示した。計測されるべき対象は、中性子、 α 粒子、X 線、イオン、電子、レーザー光線の入射光、反射光および高調波などである。レーザーシステムについての計測はここではふれない。次に各測定対象について、測定量、測定手段等について述べる。

| | |
|-------|--|
| 密度 | $10^{16} \sim 10^{26} \text{ cm}^{-3}$ |
| 温度 | 1 eV \sim 50 KeV |
| エネルギー | 1 eV \sim 14 MeV |
| 空間 | 1 $\mu\text{m} \sim$ 1 cm |
| 時間 | 1 psec \sim 1 μsec |

i) 中性子計測 : 中性子発生量とエネルギー・スペクトルが測定され、発生エネルギーとイオン温度が求められる。中性子発生は 1 nsec 以下の短時間に行われるため、発生量の測定には特別の配慮が必要である。また散乱中性子に対する考慮も必要である。速い応答の検出器ではプラスチックシンチレーターが用いられ、NE111 と PMT は XP2020 の組合せがその一例である。放射化反応のうち DT 中性子に対しては、 $^{63}\text{Cu}(n, 2n)^{62}\text{Cu} \rightarrow ^{62}\text{Ni} + \beta^+$ 反応の消滅 γ -線の同時計数法による測定、 $^{208}\text{Pb}(n, 2n)^{207\text{m}}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}(n, n')^{207\text{m}}\text{Pb}$ 反応の γ -線の測定などが使われる。前者は 10.9 MeV、後者は 1.6 MeV の閾値を持ち、散乱

中性子の影響は受けない。銀放射化カウンターは銀箔で包んだGM管をパラフィン・ブロックに入れて計数効率を上げる。散乱中性子の影響を受けるが外をCd板で包むことにより、その影響を10%位におさえることが出来る。減速材の中心に検出器を置いたとき、1nsec以下の時間中の中性子バーストでも、中性子が検出器に到達する時間は、減速過程におけるバラツキのため μsec の差が出る。中性子発生量が少い場合には、 ^3He または BF_3 カウンターを用いこの差により個々の反応を測定することも出来る。発生量が高い場合には2mm位の厚さの ^6Li ガラス・シンチレーターを減速材で包み、数msecの間に 10^5 ヶのパルスを測定した例もある。イオン温度を中性子測定により求めるには、エネルギー別に中性子発生量を測定し、発生量の比をとる方法と、中性子エネルギー・スペクトル(線スペクトル)を測定する方法がある。DT燃料の場合、DT中性子、DD中性子の発生量をそれぞれ Y_{DT} 、 Y_{DD} とすると、 $Y_{DT}/Y_{DD} = \frac{n_D n_T \langle \sigma v \rangle_{DT}}{\frac{1}{2} n_D^2 \langle \sigma v \rangle_{DD}} = R \cdot \frac{\langle \sigma v \rangle_{DT}}{\langle \sigma v \rangle_{DD}}$ となる。ここで n_D 、 n_T はDおよびTの密度、 $\langle \sigma v \rangle$ はマックスウェル分布で平均した反応率である。 $\langle \sigma v \rangle_{DT}/\langle \sigma v \rangle_{DD}$ は温度の関数であるから、密度比Rがわかればイオン温度が求められる。実際には、 $\langle \sigma v \rangle_{DT}/\langle \sigma v \rangle_{DD}$ は温度依存性がそれほど大きくないので、 D_2 ガスに ^3He を混入し、DDプロトンとD- ^3He プロトンの発生量の比を測定し、 $(\sigma v)_{D(D,P)^3\text{He}}/(\sigma v)_{^3\text{He}(D,P)^4\text{He}}$ の強い温度依存性からイオン温度を求めた方が精度良い測定ができる。エネルギー・スペクトル測定は主に飛行時間法が用いられる。点状源から1nsec以内に中性子が放出されるから理想的なTOF測定が行える。DおよびTのエネルギー分布がMaxwellianである時、発生する中性子のエネルギーも広がりを持ち、ガウス分布となる。この半値中を ΔE (keV)とすると、イオン温度 θ_i (keV)との関係はDT中性子について、 $\Delta E = 177\sqrt{\theta_i}$ となる。エネルギーEの中性子の距離Dの飛行時間を t とすると $\Delta E/E = 2\Delta t/t$ となり、 Δt を計測系の分解能とすると、エネルギー分解能 ΔE をよくするためには飛行時間、従って飛行距離Dを大きくしなければならない。Dを大きくすると検出器に入ってくる中性子は $1/D^2$ に比例して減り、統計誤差が大きくなる。即ち一定の中性子発生量に対しては、エネルギー分解能と統計誤差を考慮して最適な飛行距離が決まる。米国のリバモア研究所(LLI)では時間分解能3.5nsecの計測系を用い、 $\sim 10^9$ n/shotの中性子発生量に対し、飛行距離は45mである。Figs. 4, 5にこの装置と測定例を示した。最近完成した"Shiva"(10KJ/26TW)

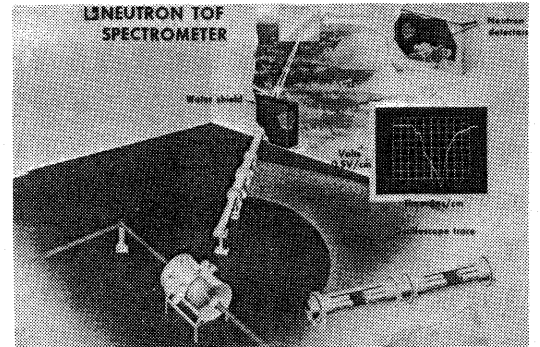


Fig. 4 Neutron TOF at LLL

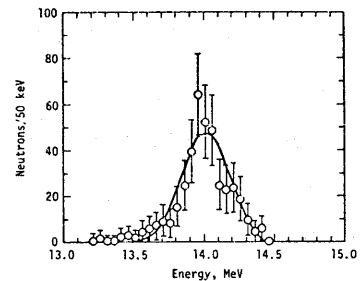


FIG. 5. Example of an unfolded D-T neutron-energy spectrum for one detector channel. The discrete points represent the unfolded data for the neutron trace shown in Fig. 1. The solid curve is a Gaussian fit with a width of 390 keV.

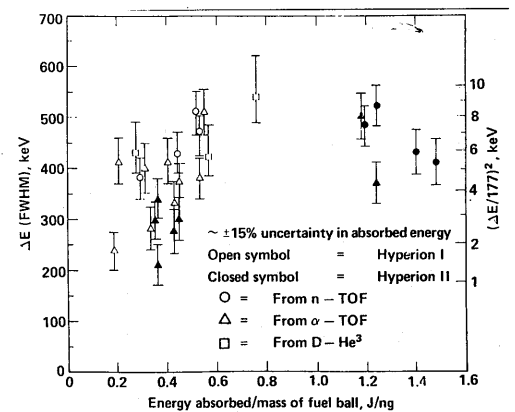


Fig. 6 Neutron and α TOF Spectra Versus Total Specific Absorbed Energy

しては、エネルギー分解能と統計誤差を考慮して最適な飛行距離が決まる。米国のリバモア研究所(LLI)では時間分解能3.5nsecの計測系を用い、 $\sim 10^9$ n/shotの中性子発生量に対し、飛行距離は45mである。Figs. 4, 5にこの装置と測定例を示した。最近完成した"Shiva"(10KJ/26TW)

では、飛行距離は125mである。LLLにおけるイオン温度を中性子TOF法、 $D_2\text{-}^3\text{He}$ 法および後述の α -粒子TOF法で測定した結果をFig. 6に示す。

ii) α -粒子計測：発生量、エネルギー・スペクトルの測定および、 α -粒子放射源イメージ測定などが行われる。ベリリウム箔で包まれたトラック・ディテクターを用い、軌跡の直径からエネルギーを、軌跡の個数から発生量を求めることが出来る。またTOF法によりエネルギー・スペクトルを測定出来る。中性子TOF法では飛行管の途中にAl箔などを入れて、検出器にイオン(Si, O, Cなど)やレーザーの反射光などが入らないようにすることが出来るが、 α -粒子を測定するには、磁石により行路を曲げて α -粒子だけが検出器に入るようにする。(中性子計測の項で述べたプロトンの測定にも磁石を用いて、測定したいエネルギーのプロトンだけが検出器に入るようにする)。 α -粒子TOF法の特長は測定系の時間分解能が中性子のそれと同じ場合、同じエネルギー分解能を得るには中性子TOF法の飛行距離の $1/16$ でよいことにある。欠点は、DTの圧縮率が大きくなった時、 α -粒子がプラズマ中で衝突してしまい、正しいエネルギー・スペクトルが得られないことである。 α -粒子放射源の空間分布を測定することにより、 α -粒子が熱核融合反応生成物であることの確認、X線測定結果と組合せて、熱核融合反応が圧縮された燃料部で起っていることの確認をすることが出来る。測定法はピン・ホールカメラを用いるものと、Zone-plate-coded imaging法(ZPCI法)とがあり、いずれも空間分解能10 μm 位である。LLLではcoded apertureとしてフレネル帯板(Fresnel-Zone plate)を用いている。5 μm 厚の金箔を用い直径2.5mmの円板に100枚の同心円状のゾーンを作る(最少ゾーン中は5.3 μm)、 α -粒子源の像はフレネル帯板を通し影絵(shadowgraph; coded image)としてフィルム上に記録され、像はホログラフィーと同じ過程により再現される。結果の一例をFig. 7に示す。左の図で円板の中央部がZone plateである。

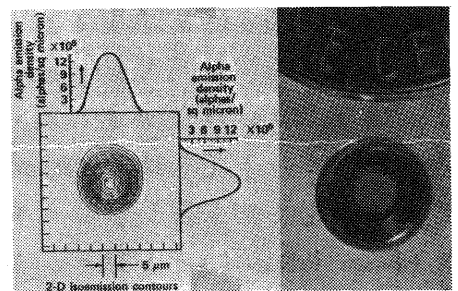


Fig. 7 α -particle Intensity Contours of Compressed Core by ZPCI

iii) X線計測：X線計測は、プラズマ診断の最も有力な手段である。レーザー核融合では温度は100eV~50KeV程度であるから、放出されるのは軟X線から硬X線にわたる。測定量は、エネルギー、スペクトル、X線源空間分布およびX線源時間分布である。エネルギー測定は、PINダイオードやシンチレーション・カウンターを用いて行われる。100eVから100KeV程度の広いエネルギー領域のスペクトル測定は、PINダイオードやシンチレーション・カウンターとK端吸収フィルターの組合せ(数KeV~100KeV)、および各種結晶による分光測定(200eV~数KeV)により行われる。結晶を用いた分光測定では、DTガスを封入しているガラス殻中のSi, OおよびCaからの線スペクトルが測定される。DTガスの中にNeを混入するか、Neのみを封入した場合には、Neイオンの線スペクトルの広がりから、プラズマ密度 ρ 、密度と圧縮された中心部の半径Rの積 ρR ($n\tau$ に相当する)が測定される。前者はシュタルク効果による広がり、後者はNeイオンによるX線の再吸収による広がりを利用するものである。シュタルク効果はミクロな電場の強さ、即ちイオン密度に比例する。X線の再吸収は、X線(線スペクトル)に対するプラズマの不透明さ(optical depth)に依存し不透明さは ρR の関数である(中性子が体系内で1回も衝突せずに体系外に出てくる確率が体系の ρR の関数になるのと同じ)。電子温度は線スペクトルの放射強度の比から求められる。ロッチェスター大学では4ビームNd:ガラスレーザーを用

いて、直径 $\sim 80\mu\text{m}$ のガラス小球(壁厚 $0.6\sim 1\mu\text{m}$)にNeを $2\sim 56\text{atm}$ 封入したターゲットを $100\sim 160\text{GW}$ (パルス中 $40\sim 80\text{psec}$)で照射して、Neの線スペクトル測定を行い、密度 $0.25\sim 0.5\text{g}/\text{cm}^3$ $\rho R = 2\sim 6 \times 10^4\text{g}/\text{cm}^2$; $T_i \approx T_e = 300\text{eV}$ を得ている。 ρ の値はレーザー出力やNeのガス圧に殆んど依存しないが、 ρR はガス圧と共に増加する。

X線空間分布の測定にはピンホールカメラとX線マイクロスコップおよび粒子計測で述べたフレネルゾーンプレートカメラが用いられる。ピンホールの直径は $5\mu\text{m}$ 程度で、各種フィルターにより、測定エネルギー領域を選択する。分解能はピンホールの大きさ程度である。構造が簡単で、校正もデータ解析も簡単であるが、分解能を良くするためには、ピンホールをターゲットに近づけなければならず(1cm 位)、高いレーザー出力での実験では、ピンホールやフィルターが、膨脹プラズマにより破壊されてしまう。X線マイクロスコップも種々あるが、最も分解能のよいものは、Wolterタイプ・マイクロスコップである。これは放物面鏡と楕円面鏡を組合わせたもので、計算では 0.5mm の視野に対し、分解能は $1\mu\text{m}$ より良くなる。このためには面の精度 250\AA 、面のスムーズさ 50\AA が要求される。LLLでは精度 250\AA は達成したが、研磨が完全でなく、現在分解能は $3\mu\text{m}$ である。マイクロスコップは軟X線($\sim 6\text{keV}$ 以下)の測定に適すが、 $\sim 7\text{keV}$ 以上のX線の測定にはゾーンプレートカメラが適す。

X線の時間変化を測定することにより、ターゲットのエネルギー吸収から圧縮の過程を時間的に追うことができる。この測定にはストリークカメラ(流しカメラ)が主に用いられる。Be箔に蒸着させたAuを光陰極とし、スリット(巾は数 $10\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$)を通過したX線が、Au陰極で光電子をたたき出し、この光電子が偏向板により偏向され、増感管(image intensifier)を経て、フィルム上にX線源の1次元の像の時間変化が記録される。現在では、 1keV 以上のX線が測定でき、時間分解能は $10\sim 15\text{psec}$ である。 1keV 以下が測定出来る光陰極、2次元像の時間変化を測定するカメラが開発されている。ストリークカメラの測定例(ロチェスター大学)をFig. 8に示した。ストリークカメラの前面にピンホールを設けることにより、X線源の空間的、時間的変化を測定することが出来る。LLLにおける測定例をFig. 9に示す。上の図はピンホールカメラ、下の図はピンホールストリークカメラの測定結果を計算機で処理し、密度の等高線を示してある。下図の点線はガラス殻とDTガスの境界面の動きを示す。

イオン(この場合、DやTのイオンでなく、ターゲット構造材のイオン)や電子測定、光学測定についても述べなければならないが、紙数の関係から割愛する。ただしプラズマの密度空間分布の測定に、最近大きな進歩があったので述べる。これは、ホログラフ干渉法により測定されたレーザー発振器からのパルス(波長 $1.06\mu\text{m}$)の一部をKDPおよびADP結晶に導き振動数を4倍に変換(波長は 2660\AA)し、その後、このパルスを2分割し、一方をターゲットのプラズマ中を透過させた後、他方

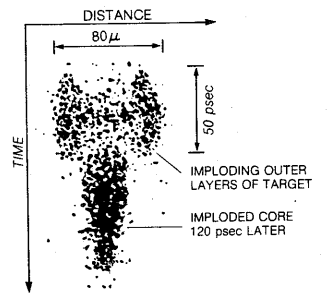


Fig. 8 X-ray Streak Camera Result at U. of R.

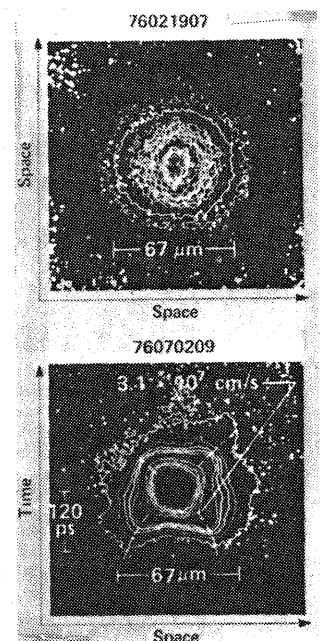


Fig. 9 X-ray Measurement by Pinhole & Pinhole-Streak Camera at LLL

直接にフィルム面上に導き、両者の干渉縞をフィルム上に記録し、密度分布を測定するものである。

LLLにおける測定結果をFig. 10に示す。レーザー光線の光の圧力で臨界密度近辺 (10^{21} cm^{-3}) で、勾配が急になっていることが初めて示された。密度分布がこの様な修正を受けると、レーザー光の吸収も修正を受けることになる。最後に計測の分解能の現状をTable 2に示す。Table 3に、LLLにおける測定結果と計算("LASNEX"コードによる)結果を示した。

レーザー核融合研究の今後：1977年から78年にかけて10KJ級のレーザー装置が完成し、実験も新局面に入る。従来は100 psec程度の短いレーザーパルスにより、急激にエネルギーを注入し、ターゲットのガラス殻が爆発的に飛散するときの内側への動きによりDTを圧縮する方式、即ち爆縮(exploding pusher mode)実験が主体であった。この方式では入射強度が 10^{16} W/cm^2 程度の大きなもので、高エネルギーイオンや電子が発生し、DTを圧縮に先立って予熱してしまい、効率のよい圧縮が行われない。これから、n secの比較的長いパルスにより、エネルギー注入をゆっくり行い、ターゲットも多層構造にし、高いZの層による高エネルギー電子の遮蔽機能を持たせ、断熱圧縮を行う実験が主体になるものと思われる。10KJ級のレーザーを用いてDT個体密度の ~ 200 倍の圧縮を達成し、次いで100KJ級のレーザーにより1985年までに科学的ブレーク・イーブン(ターゲット入射エネルギー=融合反応エネルギー)を達成しようというのが米国の開発計画である。ソ連ではNd:ガラス・レーザー("Kalmar", 200J)により D_2 ガスを $6 \sim 8 \text{ g/cm}^3$ (固体密度の50倍!) に圧縮している。パルス中は2.5 nsecである。(5) 10KJレーザーは建設中、80TWの電子線装置を1982年までに建設し、ターゲット吸収エネルギーの100倍の核融合エネルギー放出を計画している。阪大においてレーザー、電子線による実験が行われている。Nd:ガラス・レーザー(2KJ/100psec)により D_2 ガスを200倍に圧縮(体積で)することに成功した。(6) 20KJレーザーを1981年中に完成させる。10KJ CO_2 レーザーは建設中である。

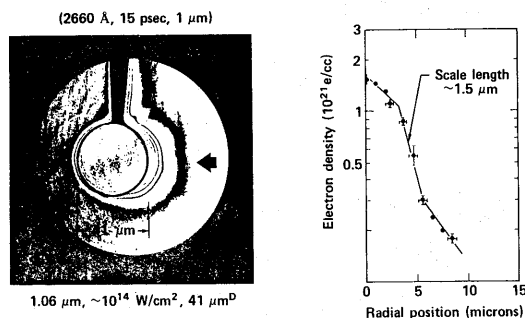


Fig. 10 Density Profile Steepening Measured by Holographic Interferogram at LLL

Table 2 Status of Diagnostics at LLL

| |
|--|
| $\Delta t = 6 \text{ psec}$ (infra-red) |
| $= 15 \text{ psec}$ (x-ray) |
| $\Delta x = 1 \text{ micrometer}$ (infra-red, visible, ultra violet; time integrated) |
| $\approx 3 \text{ micrometer}$ (x-ray; time integrated) |
| $= 6 \text{ micrometer}$ (x-ray; 15 psec time resolution) |
| $= 50 \text{ micrometer}$ (120 psec, full frame) |
| $= 10 \text{ micrometer}$ (α particles, ions) |
| $100 \text{ eV} \leq h\nu \leq 100 \text{ keV}$ (time integrated) |
| $1 \text{ keV} \leq h\nu \leq 20 \text{ keV}$ (15 psec time resolution) |
| $10^{16} \text{ cm}^{-3} \leq n_e \leq 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ ($\approx 15 \text{ psec}$ exposures) |
| $\Delta(h\nu) = 1 \text{ eV}$ at 1 keV |
| $\Delta E \approx 100 \text{ keV}$ for 14 meV neutrons, 3.5 meV alphas |

Table 3 Summary of Experiments and Simulations

| Fusion Parameter | Instrument | Accuracy Resolution | Measured | Lasnex |
|--------------------|--|-------------------------|--|--|
| Neutron yield | { Cu activation Scint. PMT | 15% 20% | $1-2 \times 10^9$ | 2×10^9 |
| Alpha energy | Alpha TOF | 1% | 3.3 MeV | 3.3 MeV |
| Ion temperature | { Alpha TOF Neutron TOF | 20% | 6-10 keV | 8 keV |
| Implosion velocity | Streaked x-ray Pinhole camera | { 6 micrometer 15 ps | $3 \times 10^7 \text{ cm/sec}$ | $3 \times 10^7 \text{ cm/sec}$ |
| Density | { X-ray microscope X-ray spectrometer | 4 micrometer 1 eV | 0.1 g/cm ³ 0.5-1 g/cm ³ | 0.1-0.2 g/cm ² 0.5-1.5 g/cm ³ |
| Absorbed energy | Calorimeter | 10% | Up to 50% | Up to 50% |

参考文献

- (1) Brueckner, K., et al; Rev. Mod. Phys. 46 325 (1974), 山中・原子力学会「核融合研究の進歩」P73 (1976) など
- (2) UCRL-50021-75 (1976), 同 50021-76 (1978)
- (3) Bristow, T., et al; IAEA-CN-37-B-4
- (4) Attwod, D., et al; Phys. Rev. Letts. 40, 184 (1978)
- (5) Basov, N., paper in "Nuclear Energy and Alternatives" eds. Permutter A., et al (Ballinger, 1978)
- (6) Azechi, H. et al; IAEA CN-37-M-4

原 研

朝 岡 卓 見

有限要素法は、1955年頃、複雑な連続構造物の応力解析のために考え出され、非常に有効な数値解法として発展してきた¹⁾。ここでは連続構造物は、有限の大きさの独立した要素からできている系におきかえられるので、ほとんど任意の精度で不規則な幾何形状を近似することができる。変位の場合は、各要素ごとに、要素内の節点の変位で一義的に決められる。従って、連続体全体の変位の場合は、それぞれの要素内では連続な、すなわち部分的に連続な多数の変位の場合によって構成される。そして節点での平衡条件は、仮定された変形のパターンによって、ポテンシャル・エネルギーを最小にすることにより得られる。古典的なRitzの方法では、一組の関数で連続体内のすべての変位の場合を表現しているが、この点のみが有限要素法では異なる。この方法は正確に収束し、要素をだんだん小さくしていくと、任意の精度で、真の変位分布を表現することができ、従って任意の精度で応力を求めることができる。

この有限要素法の炉物理分野への応用は、1970年頃から始まり²⁾、中性子拡散方程式あるいは輸送方程式の数値解法として発展してきている³⁾⁴⁾。従来の有限差分法と比較し、複雑な幾何形状も、適当な形の空間要素を用いることにより精度良く表現できること、及び各要素内で未知関数と、望まれる任意の次数の区間多項式で近似するので、高精度の解法であることが特長である。高次近似であるということは、要素内にとられる節点の設定を、かなり粗くできることと連がる。また明確な数学的基礎を持っているので、信頼度の高い手法となっている。

いま T を、境界条件も含めた線形の微積分作用素とし、 $T\phi(r) = Q(r)$ を有限要素法で解くことを考える。まず各要素上で、近似解として、 $\phi(r)$ と同じ境界条件を満足する多項式 $u_i(r)$ を使い、 $\hat{\phi}(r) = \sum_{i=1}^M a_i u_i(r)$ とする。そしてRitzの方法より一般的なGalerkin法を用い、係数 a_i を、 $i=1 \sim M$ に対し $(T\hat{\phi}, u_i) = (Q, u_i)$ を満足するよう求めるのである。この際 u_i は、各要素上で定義するので区間多項式と呼ばれているが、この区間多項式の使用が、実用上種々の利点をもたらしている。すなわち、局地的に急激な変化も表現しやすいし、種々の境界条件も入れやすく、また展開係数 a_i を節点の関数値などと直接対応させることもできる。

以上のよりに、炉物理分野への有限要素法の応用は、まだ10年たらずしかされていなく、計算コードも、二次元 S_N 輸送計算用のTRIPLERが公開されているのみである⁵⁾。最近よくやく三次元拡散計算用FEM-BABELなども開発されており⁶⁾、今後、非線形境界値問題や非線形方程式の解法、さらに時間依存問題の解法として発展が期待される。

1) Zienkiewicz, Cheung: "The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics". 2) Ohnishi: CONF-710302, 2, 73.
3) Kang, Hansen: Nucl. Sci. Eng., 51, 456. 4) Fujimura et al.: J. Nucl. Sci. Technol.: 14, 541. 5) Reed et al.: LA-5728-MS
6) Lee et al.: JAERI 1256

船舶技研

竹内 清

モンテカルロ法は実際の物理過程を計算機で模擬する方法で、実験に対して思考実験と云われる。思考実験の利便は実際の問題をできるだけ理想化できる長にある。しかし、実際の実験に較べて線源の強さが非常に弱い欠点がある。と云うのは例えは炉心で毎秒 10^{14} 個の中子が発生する問題を計算する場合でもモンテカルロ計算ではせいぜい $10^4 \sim 10^5$ 個の中子の計算に終わらざるを得ない。これは計算時間が最大の制限条件で今1個の中子の飛跡を追跡し終るのに（これをヒストリーと云う）1秒の計算時間を要するとすればこれ以上の個数の中子のヒストリーを追跡することは不可能であろう。対照的に小規模な問題を対象とすれば（例えば検出器のレスポンスの計算）、0.01秒/ヒストリー程度であればかなり良い精度の計算値が得られる。モンテカルロ計算の精度はすなわち測定値の精度と同じでカウント数が多いほど精度が良く、逆に悪い精度の測定値は少ないカウント数の個数である。したがってこの統計誤差を改善するために、しかもヒストリー数を増やせまいで実施したために数多くの計算技法（これをバリエーションと云う）が考案され使用されている。これは本質的に検出器に到達する粒子を何らかの方法（これをバイヤスと云う）で増加させることである。

次に簡単にモンテカルロ計算法を記す。モンテカルロ計算では放射線源から1個1個放射線が発生させて個々の放射線をランダムサンプリングによって追跡することであり、最終的に測定位置に到達した放射線を計数することである。放射線の発生方法、どこまで進んだら原子核（ガンマ線の場合は電子）と衝突するか、衝突したら吸収されるかあるいは散乱されるか、散乱の場合はエネルギーの減少はどのくらいでどの方向に散乱されるか、乱教を発生させようか決めることとなる。これを状態変数で記述すると、放射線は位置、方向およびエネルギーの3種類の変数で決まる状態 $S(\vec{r}, \vec{\Omega}, E)$ によって記述できるが、最初の線源から発生した状態を S_0 とすれば、 S_0 から S_1, S_2, \dots, S_n と次々に乱教発生により決めて行くこととなる。そして S_i は1つ前の状態 S_{i-1} のみから決定できるので $\psi(S_i/S_{i-1})$ という確率分布関数が考えられる。したがって、モンテカルロ計算は $\psi(S_1/S_0), \psi(S_2/S_1), \dots$ と計算することである。乱教は各電子計算機用に作製されている擬似乱教発生ルーチンで発生させることができる。乱教はこの場合0と1との間に一様に分布する数であり、擬似というのは非常に長い周期で両心同じ乱教が発生するのでこのように云う。

また体積線源から放射線が発生する仕方と考えると、体積線源全体を1と理想化して体積内のどこで発生するかと乱教によって決める。発生する粒子のエネルギーについても、例えば核分裂線源であれば核分裂スパートルは全体で1個に理想化されているからやはり乱教を発生させてどのエネルギーの中子が発生したかと決定できる。すなわち、

$F(E)$ を核分裂スペクトルとすれば、いま乱数 r_1 が発生したとして $r_1 = \int_{E_1}^{\infty} F(E) dE$ とする E_1 のエネルギーの中核子が発生する。次にどの方向に飛んで行くかは等方線源であればどの方向も同じ確率で発生できるので、方向に極角 θ と方位角 ϕ で表わすと極角の余弦 $\cos \theta = \mu$ とおいて、乱数 r_2, r_3 を発生させると $\mu = 2r_2 - 1, \phi = 2\pi r_3$ と決まる。次に発生した粒子が衝突するまでに進む距離を決める。いまエネルギー E_1 の粒子が $(X, X+dX)$ で1回の衝突を起す確率は $\Sigma_t(E_1)$ と全断面積とすれば

$f(x) dx = \Sigma_t(E_1) \cdot \exp\{-\Sigma_t(E_1)x\} dx$ であり、この $f(x)$ を確率密度関数という。そこで乱数 r_4 ($0 < r_4 < 1.0$) を発生させると

$r_4 = \int_0^x \Sigma_t(E_1) \cdot \exp\{-\Sigma_t(E_1)x\} dx = \exp\{-\Sigma_t(E_1)x\}$ から x の位置は $x = (-1/\Sigma_t(E_1)) \cdot \ln r_4$ と求められる。もし粒子の前の位置が \bar{x}' で方向が $\bar{\omega}'$ であったとすれば新しい位置は $\bar{x} = \bar{x}' + x\bar{\omega}'$ と決められる。次の段階は衝突が散乱であるかどうかであり、これは各粒子に重み W を与えておいて衝突する毎に $W = W' \cdot \Sigma_s/\Sigma_t$ と小さくするようにしておけば吸収の場合のヒストリー終了をまぬかれる。これは途中のヒストリーを終了すると計算時間だけかかかって効果的である点を改善するための便法である。さて散乱後の新しいエネルギーと方向を決めなければならぬ。いま $f(\bar{x}, E' \rightarrow E)$ を E' から E へのエネルギー変化を起す確率とすると、これは $f(\bar{x}, E' \rightarrow E) = \Sigma_s(\bar{x}, E' \rightarrow E) / \Sigma_s(\bar{x}, E')$ と求まる。そこで乱数 r_5 を発生させると $r_5 = \int_E^{E'} f(\bar{x}, E' \rightarrow E) dE$ の関係からこの新しいエネルギーが決まる。MORSE²⁾ コードのように多群モンテカルロコードの場合エネルギーは連続でなく群を表わす。したがって $f(E' \rightarrow E) = f^{g \rightarrow g+k}$ ($= f(E_g \rightarrow E_{g+k})$) と書くことにする。そして $r_5 \leq f^{g \rightarrow g}$ の場合は自群散乱となり $k=1$ の場合は

$$\sum_{l=0}^{k-1} f^{g \rightarrow g+l} < r_5 \leq \sum_{l=0}^k f^{g \rightarrow g+l}$$

のようであるならば E_{g+k} 群への散乱と決められる。新しいエネルギーが決まれば

新しい方向はエネルギーの変化と散乱角との間に取捨する関係式から散乱角が決める。中核子の場合は A を核の質量数とすれば散乱角 Θ とエネルギー変化との関係式は

$\cos \Theta = \frac{1}{2} (A+1) \sqrt{\frac{E}{E'}} - \frac{1}{2} (A-1) \sqrt{\frac{E'}{E}}$ であり、ガマ線の場合は $\cos \Theta = 1 + X - \lambda$ である。 λ はコンプトン波長 $\lambda = 0.511/E$ (MeV) である。散乱角が決まれば古い方向 (θ, ϕ') と新しい方向 (θ, ϕ) の関係式 (これを球面三角の公式) から (θ, ϕ) が求められる。MORSE コードのように有限項のルジャンドル多項式展開近似を使用する場合は微分断面積を展開近似し、例えば P_3 展開近似の場合、散乱角は $n = (L+1)/2$ で今 P_3 であるから $L=3$ と入れて $n=2$ の方向がコードの中で選ばれその散乱角への散乱され割合がコードの中で計算される。

先に述べた少々の発生粒で精度のよい答えを得るために使用する技法としてよく使われるのが、Importance Sampling 技法で特に有名な技法が Russian Roulette 法と Splitting 法であり、また path stretching 法である。また最近には検出器側から線源側へ計算をすすめる adjoint Monte Carlo 法も開発されている。

- 1) W.R. Kimmel (Ed.) ; Radiation Shielding, TR 40 (1966) 2) M.B. Emmett ; The MORSE Monte Carlo Radiation Transport Code System, ORNL-4972 (1975) 3) J.S. Tang et al ; NSE 64, 837 (1977)

東大工・原子工学研究施設

中沢正治

NE-213液体シンチレータから放射化物質の中性子スロウトロキータ、或いはNaI(Tl)シンチレータによるガンマ線測定などの放射線計測値としての積分的データは、次の形に表わされる。

$$D(n) \pm \Delta D(n) = \int_0^{\infty} \{ \sigma_n(E) \pm \Delta \sigma_n(E) \} \phi(E) dE, \quad n=1, N \quad \text{--- ①}$$

ここで測定値及びその誤差、 $\sigma_n(E)$ は反応断面積或いは応答関数、分解能関数と呼ばれる既知の量であり、 $\Delta \sigma_n(E)$ はその誤差である。従って、この物理量 $D(n)$ 、 $\sigma_n(E)$ 、 $\phi(E)$ は可測の非負量であり、この条件下で $\phi(E)$ 或いは $\int_0^{\infty} W(E) \phi(E) dE$ ($W(E)$ はWindow-function又は重み関数)を評価するというのが、この扱う問題である。従って、統計的平均としてのスロウトロキータは連続曲線と仮定した場合でも、現実的なスロウトロキータは、本来可測で離散的(Discrete)である。理論的には $\int W \phi dE$ の形の量を求めたいと、誤差評価が2点又は3点には注意を要する。誤差自身も $\Delta D(n) \cdot \Delta D(m)$ 或いは $\Delta \sigma_n(E_1) \cdot \Delta \sigma_m(E_2)$ の形の共分散性又は $\Delta D(n) = h \cdot D(n) + A \cdot D(n)$ の形の系統誤差及び偶然誤差を念頭に有る必要がある。現在、多くのデータ処理プログラムが用いられてきているが、問題と仮定のほかにアルゴリズムを使用しただけという点では、むしろ求めた結果の信頼性、誤差範囲はどうかという点にあると考えられるべきである。

解が一義的に求まるのは $W(E) = \sum_{n=1}^N C_n \sigma_n(E)$ と表わされる場合のみであり、この場合 $I = \int W \phi dE = \sum_{n=1}^N C_n \cdot D(n)$ として求められる。このケース以外は一義解は存在せず、或る範囲として解が求められる。簡便な方法としては、開箱の矩形分布近似法(Hughesの方法)、共鳴線のδ関数近似法、スロウトロキータの小数log表示法などがあり、又、物理的仮定でスロウトロキータを一切使用しない"線形計画法"なども利用し得る。現在、最も利用されるのは、推定スロウトロキータを初期値として与える中間的仮方法であり、これは統計的推測に依る最尤法と呼ばれており手法は同一である。重みをつけた、使用しなかったアルゴリズム、誤差評価の有無及びその方法などは若干の相違はあるが、以下の方法は原理的には同等と見做し得る。SPECTRA法(及びその改良版RFSP-JUL)、Crystall-Ball法、STAY'SL法、UFOコード(東大・岡本氏)、J法(筆者)、FERDO法(従って、SAND-IIコードもほぼ同等である)が物理量が可測で正であることとlogarithmをとることにより導入した。多くの使用例は、これらの手法の結果が、若干の凸凹等を除き、ほぼ同じ結果を与えることを示している。但し、誤差解析及び物理量の非負性を正確に与え入れた方法は、現在確立してはいない。

従って、数値計算上は、①式を多群化した $D(n) = \sum_{g=1}^G \sigma_{ng} \phi_g$, $n=1, N$ の形として扱う。この時の平均断面積 σ_{ng} には、平均化に伴う誤差が違ってくる点に、今迄考慮されていないことに注意が必要である。 $G \leq N$ とすれば一義解が求まることは必ず矛盾を伴うことになる。又、反応率、断面積などの誤差が結果に及ぼす影響は大変大きい。これを減少せしめるには、標準中性子場を用いた較正の採用がよい。当日は与えられた問題から $T =$

京大工

森島 信弘

1. 従来の研究と本研究の概要.

中性子雑音解析による結合炉動特性の研究は Hendrickson and Murphy (1968) および Albrecht and Seifritz (1968) の仕事以来最近まで数多く発表されている。研究目的は結合係数の大きさや結合による遅延時間の推定にあるが、運転中の原子炉においてこれらの情報を採取するゆえにも含まれている。中性子雑音(中性子数密度の時間変動)の測定は、通常、炉心(燃料領域)近くの反射体中に2つの検出器を置いて行われており、解析は相互相関スペクトル密度(CPSD)を求めて進められている。原子炉折点周波数位置での低周波数領域では、実験結果は空間基本モード近似による理論解析の結果とより一致を呈し、 β/ρ の値の決定に利用されている。ところで、最近注目されているのはより高い周波数領域における CPSD のふるまいであり、特に、ある周波数を境として CPSD の符号が正から負に転じるふるまい(Sink Frequency Behavior)に興味を集中している。実際に、ARKにおける two slab core loadingの結果を図2に示す。現在までのところ、SFBが結合効果によるものかどうかは十分に解明されておらず、一つの検討課題となっている。

本研究では Argonaut 型原子炉を解析モデルとして、SFBが炉心の形状(two slab core or ring core)と検出器の位置(炉心からの距離)に強く依存していることを示したものである。中性子波伝播理論で用いられた考え方を利用して、炉心で生成された中性子が反射体を回り検出器に到達する過程が記述されており、特に、中性子が炉心から2つの検出器に伝わるのに要する時間の違いに注目して CPSD が求められた。なお、ARKでの測定結果との比較を行い、本解析の妥当性を確かめられた。

2. Argonaut型原子炉モデルによる解析

解析モデルを図1に示す。黒鉛無限媒質に環状の雑音源(核分裂反応に起因した中性子源)が分布しているものとし、角度 θ_1, θ_2 の値を変えこれにより炉心の形状効果を検討した。数値解析は ring core ($\theta_1 = \theta_2 = 90^\circ$) と two slab core ($\theta_1 = 45^\circ, \theta_2 = 75^\circ$) について行った。簡単のため、炉心の形状は左右対称とし、検出器は中心Oより等距離に置かれているものとした。

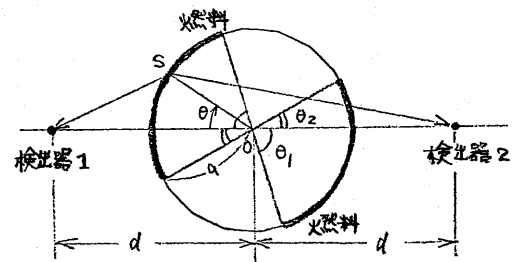


図1. 結合炉モデル

2つの検出器で測定される信号に対する CPSD と自己相関スペクトル密度(APS)は次の方法で求めた。燃料内での中性子数密度のゆらぎを $M_c(r, i\omega)$ とすれば、検出器 j ($j=1, 2$) において観測されるゆらぎ $M(r_j, i\omega)$ は次式で表わせる。

$$M(r_j, i\omega) = \int_{\text{core}} dV' G(r_j \leftarrow V', -i\omega) M_c(V', i\omega) \quad (1)$$

ここで、 $G(v_j \leftarrow v', -i\omega)$ は点 v' において 1 個の中性子が投入された時の点 v_j での周波数応答である。炉雑音スペクトル密度は次式で定義され、(1)式を代入すると、

$$P_{jk}(\omega) = \langle n(v_j, i\omega) n(v_k, -i\omega) \rangle \quad (j, k=1, 2) \quad (2)$$

$$= \int_{\text{core}} dv' \int_{\text{core}} dv'' G(v_j \leftarrow v', -i\omega) G(v_k \leftarrow v'', i\omega) P_0(v', v'', \omega)$$

$P_0(v', v'', \omega)$ は炉心での炉雑音スペクトル密度であり次式で定義される。

$$P_0(v', v'', \omega) = \langle n_c(v', i\omega) n_c(v'', -i\omega) \rangle \quad (3)$$

なお、実験結果との比較には coherence function $\text{Coh}(\omega)$ を用いた。

$$\text{Coh}(\omega) = P_{12}(\omega) / \sqrt{P_{11}(\omega) P_{22}(\omega)} \quad (4)$$

本解析では、周波数応答関数 $G(v_j \leftarrow v', -i\omega)$ について次の関数形を用いた。

$$G(v_j \leftarrow v', i\omega) = (L^2 / 2\pi \tau |v - v_j|) \exp[-(Yd_a - ik\omega)(v - v_j)] \quad (5)$$

$$d_a = L 2^{\frac{1}{2}} \{1 + \sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}\}^{\frac{1}{2}} : \text{attenuation length} \quad (6)$$

$$k\omega = L^{-1} 2^{\frac{1}{2}} \{-1 + \sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}\}^{\frac{1}{2}} : \text{wave number} \quad (7)$$

$$P_0(v', v'', \omega) = \{d^2 / (\omega^2 + d^2)\} \delta(v' - v'') \quad (v' \text{ は 線状分布}) \quad (8)$$

CPSP $P_{12}(\omega)$ と APSD $P_{11}(\omega)$ ($= P_{22}(\omega)$) は (5)~(8) 式を (4) 式に代入し、体積積分を角度 $\mu (= \cos\theta)$ に関する積分で表わし、若干の近似を行って解析的結果が求められるが、この計算内容は省略する。数値解析結果を two-slab core loading の場合について図 2 に示す。計算に用いたパラメータの値は次の通りである。

- 半径 $a = 30.0 \text{ cm}$
- 距離 $d = 57.5 \text{ cm}$
- 中性子寿命 $\tau = 0.0122 \text{ sec}$
- 拡散距離 $L = 51.1 \text{ cm}$
- 折角周波数 $d = 35.0 \text{ rad/sec}$

実験値との一致は ring core の場合についても良く本解析の妥当性が確認された。

今後の課題としては、結合効果に関する情報などのより実験(測定)方法で求めようとする必要があり、KUAC での実験は(炉心内に検出器を配置)この方向での一つの試みと思われる。

- (1) N.S.F. 31 215
- (2) Nukleonik II 143; II 149
- (3) 竹内章, 核炉工学(1976).

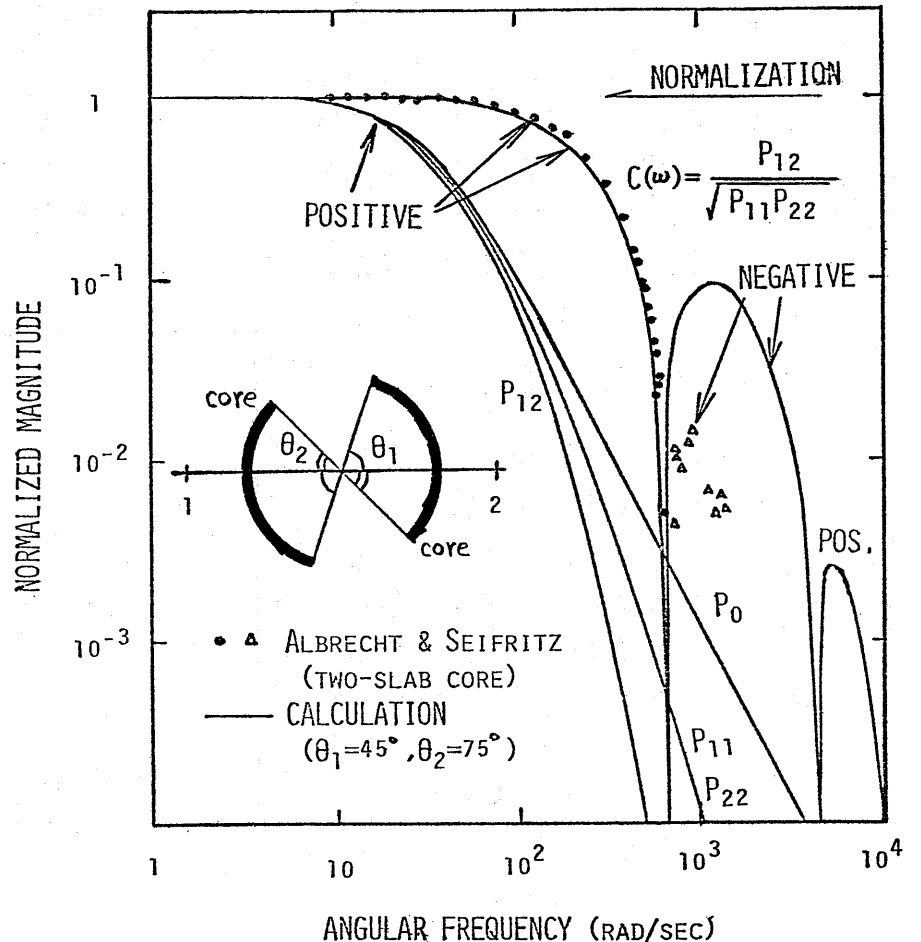


図 2. sink frequency behavior in a Argonaut reactor.

パルソシレータによる重水反射体つき結合炉の空間依存動特性実験

阪大工

阪大：松田、山田、飯田、注田
京大：林、小林、代谷、神田

【はじめに】

この報告は'78, 2月9日及び16日の両日において、KUCAの重水反射体つき結合炉体系で行ったパルソシレータによる空間依存動特性実験の結果である。

【実験】

今回の実験は特に空間依存性に着目し、測定器を炉心内に3点、重水反射体内に3点、計6点を同時に挿入して行った。Fig. 1にPOS及び測定点の位置を示す。POS及び検出器の縦方向の中心はすべて炉心の縦方向の中心面上にくるように配置されている。

Fig. 2はPOSの回転子角度依存反応度である。POSは1回転することにより4周期の反応度変化をおこなうことができる。又回転子角度は、シャフトエンコーダによりデジタル化されているので精度よく測定することができる。測定の結果、4周期分の反応度変化は殆んど等価とみなせ、その誤差はPeak-to-peak反応度の1%以内であった。1周期分の反応度変化は基本周波数成分を用いて次のように近似できた。

$$\rho = 0.5135 \times 10^{-3} \sin(4\alpha + \frac{212.9}{4}) + \bar{\rho}$$

生データは、POS 1回転ごとに同期させ、統計誤差を無視できる様に、Peak-to-peakのカウント数が3000を越えるように重ねあわせた。又、各点各周波数における測定開始時と終了時の電流を測定し、その1/2を測定時の平均電流とした。データは、フーリエ級数展開し、基本周波数成分のみをとり、GAIN, PHASEを求め、それぞれを規格化し、POS入力変化に対するGAINとPHASEとした。

【結果と考察】

Fig. 3, Fig. 4にGAIN特性、PHASE特性を示す。先に述べたように、

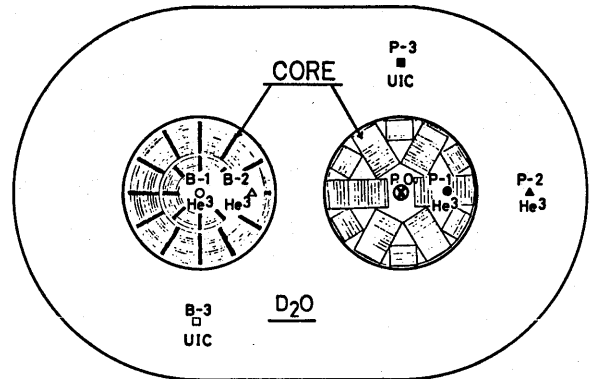


Fig. 1 DETECTOR POSITIONS

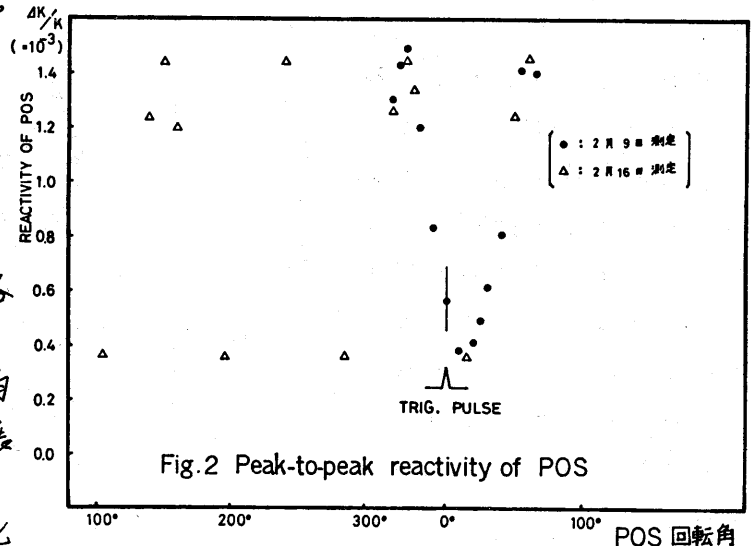


Fig. 2 Peak-to-peak reactivity of POS

統計による誤差は殆んど無視でき、平均電流や周波数測定に若干の誤差を含んでいるが、GAINについては数%以内である。PHASEではこれ以下である。図から明らかなように、10Hz以降から空間依存性が顕著になっている。又このGAIN特性のグラフは、測定点での定常fluxの値で規格化してあるため、各測定点間の相対的な比較は出来ていない。しかし、定常flux値が大体等しく、各炉心を代表しているであろうP-1, B-2の2点を比較すると、GAINカーブのフラットな部分でのGAIN比は約1dbであり、この事より炉心間の結合はかなり強いものであると結論できる。

[解析手法]

空間依存の伝達関数を求めるという問題は、拡散方程式を線型化することにより、周波数領域での中性子源付きのfluxを求める問題に帰着せしめる事が出来る⁽¹⁾。

実験体系は複雑なため、対称炉心を考え、まず、両炉心の中心に同じ絶対値、同じ位相の吸収断面積変化入力が加わった時の伝達関数を $G^+(r, s)$ 、同じ絶対値、180°位相の異なる入力が加わった時の伝達関数を $G^-(r, s)$ とすると、一方の炉心のみに入力が加わった時の伝達関数の g は、

$$g(r, s) = (G^+ + G^-) / 2 \quad \text{又は} \quad g(r, s) = (G^+ - G^-) / 2$$

により与えられる。この方法では扱う原子炉の領域は $1/4$ で済むので、計算には1炉心しか用いる必要がなく、計算対象として2炉心を用いる時よりも精度良く、又記憶容量も少なく済む。又、 G^+ , G^- を1炉心領域で積分することにより、2点炉近以ていう所の結合係数の周波数依存性も計算できる可能性がある。

[参考図書] 若林二郎 '近代原子工業'

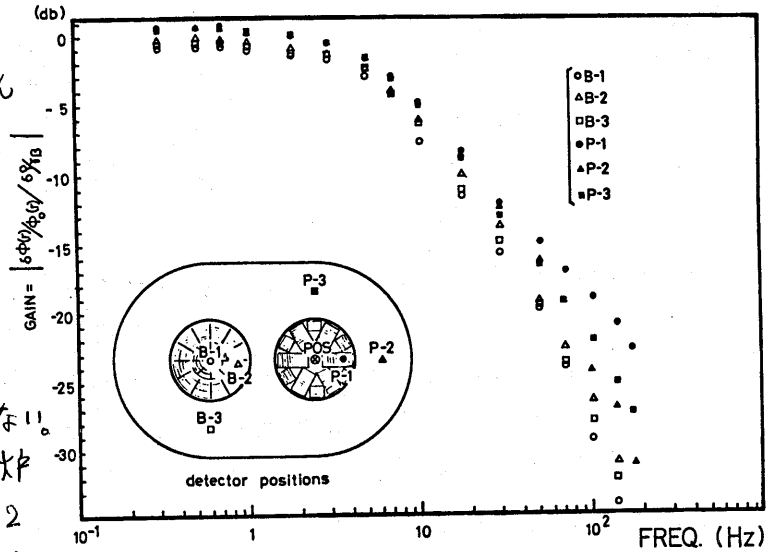


Fig. 3 GAIN-FREQ. RESPONSE

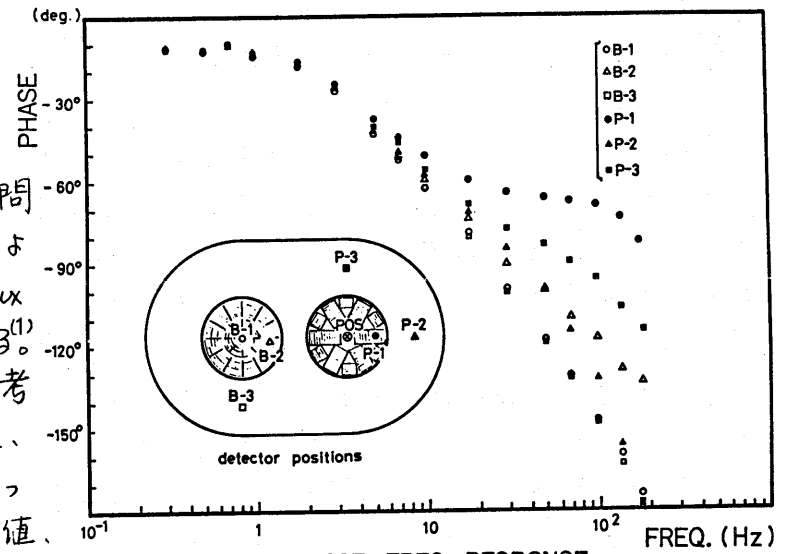


Fig. 4 PHASE-FREQ. RESPONSE

名大 工 村田尚之, 山根義宏, 仁科浩二郎

結合炉体系のパルス応答に振動が現われる可能性のあることが言われていた。特に川合^①は2炉心間の中性子伝播の考え方から、古橋^②は1群2点炉動特性方程式の時間固有値が複素数になる可能性があるという立場からそれぞれ振動の可能性を指摘している。しかしその2つの考え方は1つの物理現象を異なる表現方法で表わしただけなのか、あるいはそれ以上の違いがあるのかはわかっていなかった。ところが以下に示す方法によればその2つの表現は同じ物理現象を表わしていることが示されるし振動の現われない十分条件も求まる。またパルス応答を計算する際に必要な結合炉の動特性パラメータの値を1次元1群応答関数法^③で計算した結果も示す。

[1] 解析 1群2点炉動特性方程式は

$$dP_1(t)/dt = -\lambda_1 P_1(t) + b_1 \int_0^t P_2(t-\tau) f(\tau) d\tau \dots (1), \quad dP_2(t)/dt = -\lambda_2 P_2(t) + b_2 \int_0^t P_1(t-\tau) f(\tau) d\tau \dots (2) \quad \text{である。}$$

$P_1(t), P_2(t)$ は打ち込んだ中性子パルスに対するそれぞれの炉心における即発中性子の応答を、 λ_i, b_i は各炉心の即発中性子平均寿命 l_{pi} , 結合係数 Δ_i , 体系全体の反応度 ρ , 遅発中性子生成割合 β を使って $\lambda_i = (\Delta_i + \beta - \rho) / l_{pi}$, $b_i = \Delta_i / l_{pi}$ と表わされる。また $f(\tau)$ は τ の分布を与える。I の炉心に中性子パルスを打ち込んだという初期条件 $P_1(0) = N_0, P_2(0) = 0$ を考慮に入れて (1) (2) より P_1, P_2 のラプラス変換形 $\tilde{P}_1(s), \tilde{P}_2(s)$ を求めると

$$\tilde{P}_1(s) = N_0 (s + \lambda_2) / \{(s + \lambda_1)(s + \lambda_2) - b_1 b_2 \tilde{f}(s)\} \dots (3), \quad \tilde{P}_2(s) = N_0 b_2 \tilde{f}(s) / \{(s + \lambda_1)(s + \lambda_2) - b_1 b_2 \tilde{f}(s)\} \dots (4) \quad \text{となる。}$$

ところが (3) (4) は無限等比級数にも展開でき

$$\tilde{P}_1(s) = N_0 \sum_{k=0}^{\infty} \left\{ (b_1 b_2)^k \tilde{f}(s)^{k+1} / \{(s + \lambda_1)^{k+1} (s + \lambda_2)^{k+1}\} \right\} \dots (5), \quad \tilde{P}_2(s) = N_0 \sum_{k=0}^{\infty} \left\{ (b_1 b_2)^k \tilde{f}(s)^{2k+1} / \{(s + \lambda_1)^{k+1} (s + \lambda_2)^{k+1}\} \right\} \dots (6) \quad \text{このように2種類の表現が得られる。}$$

$f(\tau) = \delta(\tau - \tau_0)$ つまり $\tilde{f}(s) = e^{-\tau_0 s}$ のときの対称炉心の解を以下に示す。
《(3) (4) から得られる解》 対称炉心の場合の (3) (4) の極を与える方程式 $s + \lambda - b e^{-\tau_0 s} = 0$ の解を $s = -\omega_0, -(p_k \pm i q_k)$, $s + \lambda + b e^{-\tau_0 s} = 0$ の解を $s = -\omega_1, -\omega_2, -(u_k \pm i v_k)$ とする。ただし実根 $-\omega_0$ は必ず存在するが $-\omega_1, -\omega_2$ は存在しない場合もある。複素根 $-(p_k \pm i q_k), -(u_k \pm i v_k)$ は無限個存在する。また $\omega_1, \omega_2, p_k, u_k$ は正である。

$$G(t) = N_0 \left[\frac{e^{-\omega_0 t}}{1 + (q - \omega_0) \tau_0} + 2 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\{1 + (q - p_k) \tau_0\} \cos q_k \tau_0 t + p_k \tau_0 \sin q_k \tau_0 t}{\{1 + (q - p_k) \tau_0\}^2 + q_k^2 \tau_0^2} \cdot e^{-p_k t} \right] \dots (7)$$

$$H(t) = N_0 \left[\frac{e^{-\omega_1 t}}{1 + (q - \omega_1) \tau_0} + \frac{e^{-\omega_2 t}}{1 + (q - \omega_2) \tau_0} + 2 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\{1 + (q - u_k) \tau_0\} \cos v_k \tau_0 t + v_k \tau_0 \sin v_k \tau_0 t}{\{1 + (q - u_k) \tau_0\}^2 + v_k^2 \tau_0^2} \cdot e^{-u_k t} \right] \dots (8)$$

とすると $P_1(t) = G(t) + H(t) \dots (9), P_2(t) = G(t) - H(t) \dots (10)$ と表わされる。

《(5) (6) から得られる解》

$$2n\tau_0 \leq t < 2(n+1)\tau_0 \quad \text{のとき} \quad P_1(t) = N_0 \sum_{k=0}^{2n} b^{2k} (t - 2k\tau_0)^{2k} e^{-\lambda(t - 2k\tau_0)} / (2k)! \dots (11)$$

$$(2n+1)\tau_0 \leq t < (2n+3)\tau_0 \quad \text{のとき} \quad P_2(t) = N_0 \sum_{k=0}^{2n+1} b^{2k+1} \{t - (2k+1)\tau_0\}^{2k+1} e^{-\lambda\{t - (2k+1)\tau_0\}} / (2k+1)! \dots (12)$$

(9) (10) は即発中性子の減衰を2つの炉心についての対称および反対称な時間モードの重ね合

わせたものであり, (11)(12)は級数の一般項 $e^m(t-m\tau_0)^m e^{-a(t-m\tau_0)}/m!$ がギャップを m 回伝播した中性子による寄与を表わすことから, 中性子が2つの炉心の間を伝播するという観点からとらえた式であることがわかる。8月22日の炉中性子工学季のときには(9)(10)はモード法, (11)(12)はロード法であると発表したが京大の森島氏より2点炉方程式から出発した以上両方共ロード法であるという指摘をいただいた。そこで秋の分科会では前者を減衰モード法, 後者を伝播法という名前にして発表した。以下この呼び方を使うことにする。解の計算例をFig.1, Fig.2に示す。

[2] 振動の出ない十分条件 (11)式で $n=1$ とした式 $g(t) = N_0 e^{-at} + \frac{N_0}{2} (t-2\tau_0)^2 e^{-a(t-2\tau_0)} \dots (13)$ が単調減少ならば振動は現われないと考えられる。したがって振動の出ない十分条件は $g'(t) \leq 0 \dots (14)$ である。これより $e^{a\tau_0} \leq \sqrt{2} a \dots (15)$ を得る。Fig.3は l_p の値を変えた時の(15)を満たす Δ, τ_0 の範囲を示す。おのおのの曲線の左側の領域が振動の出ない領域である。グラフ上のO, X, Δ 印はそれぞれKUCAC35G10(H₂O), C35G15(D₂O), Argonautの臨界時炉心パラメータを書き込んだものである。これらはいずれも対応する曲線より左側にあるので振動は現われぬ。

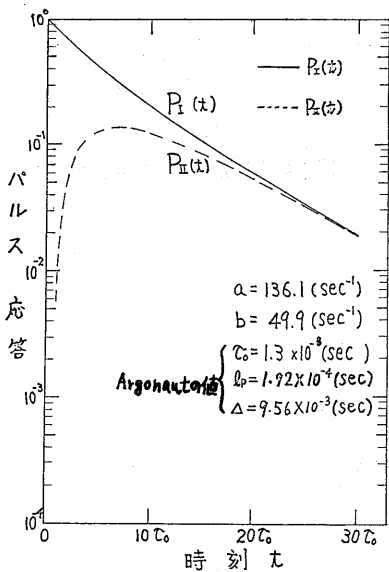


Fig. 1

振動の出ないパルス応答の例

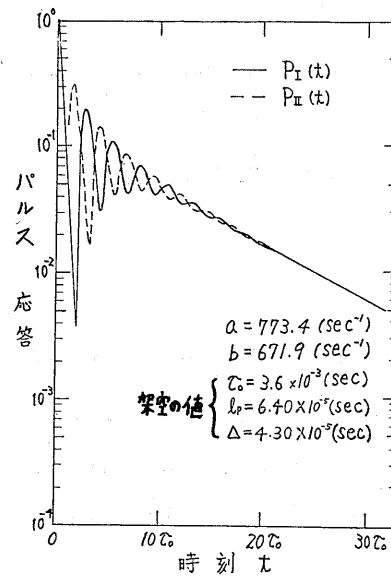


Fig. 2

振動の出るパルス応答の例

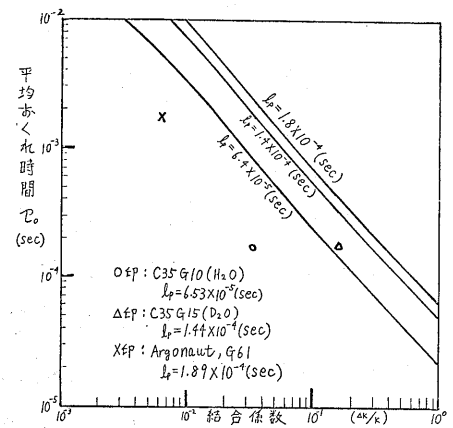


Fig. 3

振動の出ない十分条件

[3] 非対称パラメータの計算

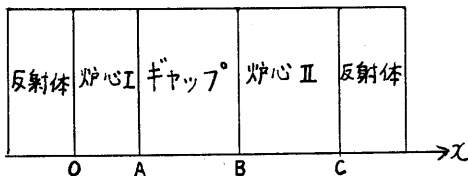


Fig. 4 体系図

1次元1群応答関数法^③によると l_{p1}, Δ_1, τ_0 は

$$l_{p1} = l_0 - 4v l_0 [\tilde{f}_0^-(0) \tilde{f}_0^+(0) \tilde{G}_{r1}^-(0) + \tilde{f}_0^+(A) \tilde{f}_0^-(A) \tilde{G}_{r3}^-(0)] / C_I \dots (16)$$

$$l_{p2} = l_0 - 4v l_0 [\tilde{f}_0^-(B) \tilde{f}_0^+(B) \tilde{G}_{r3}^-(0) + \tilde{f}_0^+(C) \tilde{f}_0^-(C) \tilde{G}_{r5}^-(0)] / C_{II} \dots (17)$$

$$\Delta_1 = 4v l_0 \tilde{f}_0^-(B) \tilde{f}_0^+(A) \tilde{G}_{gt}^-(0) / C_I \dots (18)$$

$$\Delta_2 = 4v l_0 \tilde{f}_0^+(A) \tilde{f}_0^-(B) \tilde{G}_{gt}^-(0) / C_{II} \dots (19)$$

$$\tau_0 = -\tilde{G}_{gt}^-(0) / \tilde{G}_{gt}^-(0) \dots (20) \quad \text{と表わされる。}$$

Fig5, Fig6にKUCAC35(H₂O)炉心の群定数を用いて計算した結果を示す。これらはいずれもIの炉心の大きさを固定して体系全体を臨界に保ちながらギャップ幅を変えた場合のグラフである。この2つのグラフより, Core IIの方がCore Iよりも大きいとき $l_{p1} > l_{p2}, \Delta_1 > \Delta_2$ であると

いえる。また結合係数 Δ_i がFig.6のようなふるまいを示すのは、ギャップ幅が大きくなるにつれてCore IIが単独の臨界量にほぼ等しくなるために、II \rightarrow Iの寄与は大きくなるとは思われるがI \rightarrow IIの寄与は減るからである。最後にこれらのパラメータの値を用いて計算した非対称炉心体系のパルス応答の計算例をFig.7に示す。

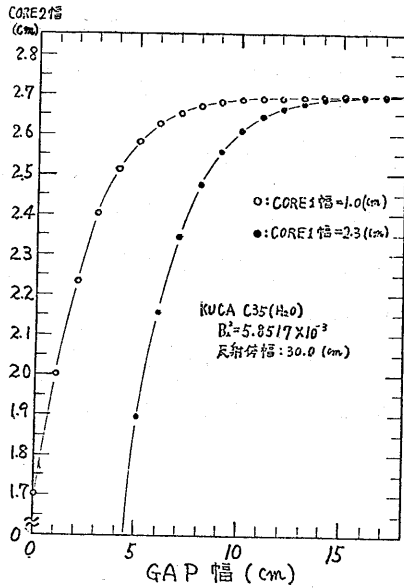


Fig. 5
ギャップ幅対 CORE II 幅

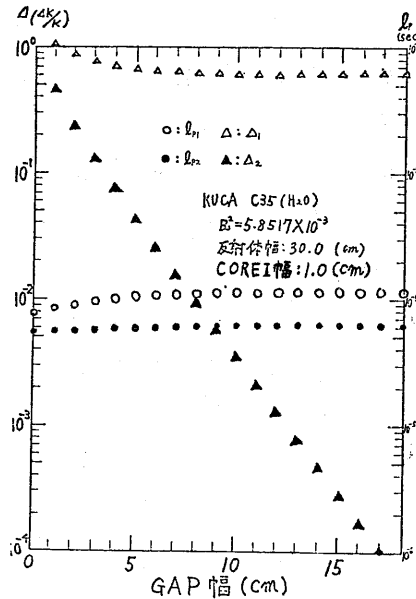


Fig. 6
ギャップ幅対 Δ, β

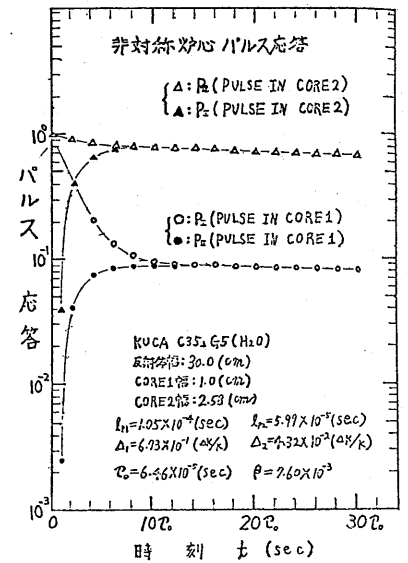


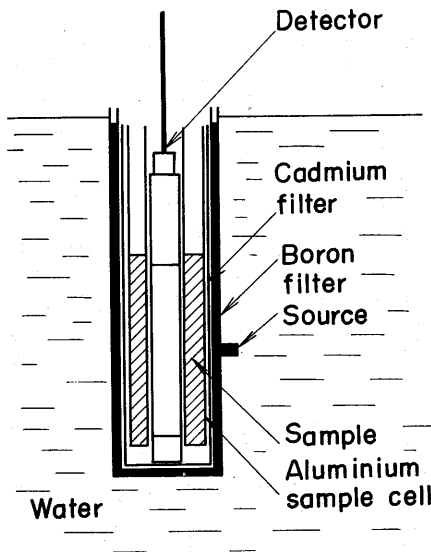
Fig. 7
非対称炉心パルス応答

[4] 参考文献

- ① 川合敏雄氏私信 (1977年3月)
- ② 古橋 晃 京大臨界集合体専研資料 (1977.2.7) および
京大臨界集合体協力メモ (1977.5.20)
- ③ Shinkawa, M., Y. Yamane, K. Nishina and H. Tamagawa,
Nucl. Sci & Eng. : 67 19-33 (1978)

日本原子力研究所
アイソトープ事業部
利用開発室

和田延夫

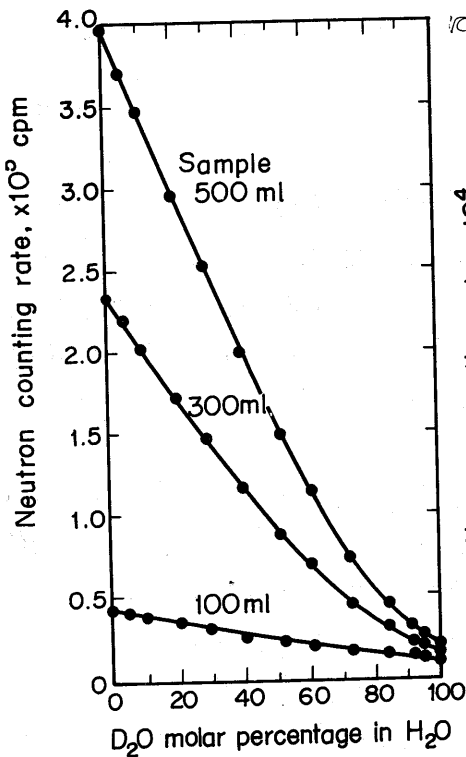


中性子の熱化に基づく重水濃度測定法について検討した。水減速材の中央に同位体中性子源を置き、線源近傍にホウ素及びカドミウムの二重のフィルターで低速中性子を遮蔽した円筒状の空間を設ける。この空間内に BF_3 比例計数管とこれを取り囲む環状の試料セルを配置する。セルに重水試料を入れると、フィルターを透過して試料に入射する中速中性子は、試料中の水素原子核との衝突により効率よく減速されて熱化する。重水濃度が高くなると試料の減速能が低下するので、検出器の熱中性子計数率は重水濃度が高くなるほど減少する。従って、熱中性子計数率は重水濃度の尺度となる。1.6 μg の ^{252}Cf 中性子源を用い、試料量を 500 ml、計数時間を 2~10 分とすると、0~100 mol% の広い濃度範囲にわたって、およそ ± 0.02 mol% の精度で測定できる。本法は簡単で精度も高く、非破壊的であり、実験室またはオンラインでの重水濃度測定

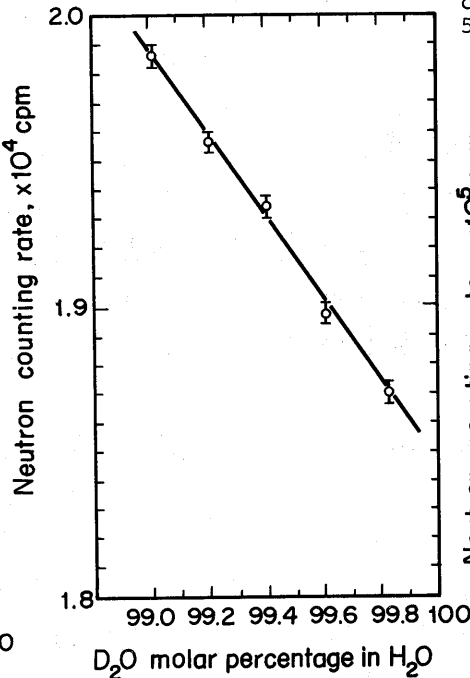
Apparatus for measuring heavy water concentration by neutron thermalization method

に利用できる。

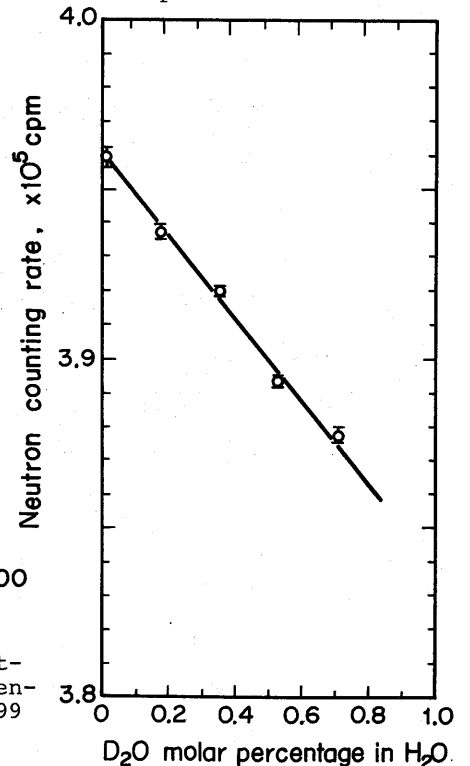
Relation between neutron counting rate and heavy water concentration below 1 mol % for 500 ml sample



Relation between neutron counting rate and heavy water concentration in the region beyond 99 mol % for 100, 300 and 500 ml samples



Relation between neutron counting rate and heavy water concentration in the region beyond 99 mol % for 500 ml sample



原子炉の医学への応用

京大原子炉実験所 神田啓治

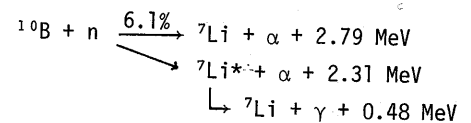
1. はじめに

原子炉から多量に出る中性子は、物理・化学実験のような主に原子・分子レベルの反応だけでなく、細胞核とか細胞レベルの大きい個体との反応を考える生物・医学にも広く使われる。最近では、陽子とか中間子の利用研究も始められたが、原子カバンにいる者としては、何と云っても中性子、それも原子炉から発生するものは扱い慣れているし、特性がよく分っているので使いやすい。中性子をガン患者の治療に使おうとする試みは、30年位前から米国で始められたが、何れも失敗に終り、何と最近になってやっと日本で開花したというのが現状である。今では逆に米国が日本からの技術導入を考えて日米共同研究を申し入れて来ている。

日本で成功した主な理由は、①¹⁰Bを含む化合物合成が可能となったこと、②ガンマ線の混入を少くした中性子場と中性子コリメータの開発 ③優秀な医師とその協カグループの形成などがあげられる。ここではこのうち、炉物理の一応用として行なわれた②について少し詳しく述べるとして、①と③についても少し説明しておく。

まず中性子捕獲療法の原理は、右図の通りで、患者に¹⁰B化合物を投入後、一定時間正常細胞で腫瘍の間で濃度差があることを利用し、中性子を当てると腫瘍だけが、(n, α)反応のα粒子とLi粒子によって選択的に破壊されることにある。そこで1つのカギは腫瘍にだけ選択的に集まり、かつ毒性のない化合物を開発することにあつた。米国の化合物は、血液中には¹⁰Bが混入し、正常細胞も合わせて破壊されていたらしい。また、③については、帝京大・富中坦教授等の優秀な医師に加えて文部省科学研究費などのサポートによって、東京と関西地区に2つの大きな研究グループが作られ、全国的研究組織が広範囲の研究分野から研究を続けている点が掲げられる。

中性子捕獲療法の原理



2. 医療用中性子場

まず中性子捕獲療法から話を始めたい。上図にある通り反応に関与するのは主に(n, α)であるが、¹⁰Bの吸収断面積が大きいことから、犯人(ガン)が殺してくれとばかりに標的を大きくしているところへ、散弾をバラバラと打つという感じで、腫瘍のみをやってしまう。ところが、中性子はコリメートすることが簡単だから、腫瘍の周辺だけに打ち込むことが容易であり、かつ¹⁰Bが入っていない正常細胞に与える影響は殆んどない。それに比べて、原子炉からの中性子線中に混入しているγ線は、狭い場所でもコリメートするのは原理的に難しく、腫瘍周囲の正常細胞を破壊するのみならず全身被曝の原因にもなる。従って原子炉から中性子のみを取り出す工夫が必要である。

ビスマス散乱体を用いて、炉心から発生する1次γ線を取り除く方法をIAEAの国際会議で1975年に発表し、現在は京大炉(KUR)の他、武工大炉及び米國MIT炉に採用されている。これは、中性子吸収及び散乱断面積、ガンマ線については物質の密度の違いを利用して、ビスマス散乱体から高純度の中性子のみを取り出すことができる。γ線混入比は理論的に得られる最高値の0.5%で、3つの原子炉共同値を得ている。それまでの通常の設備は、混入比10~100%、医療用と云われるものでも5%程度だった。これなんか正に炉物理の簡単な応用問題と云える。

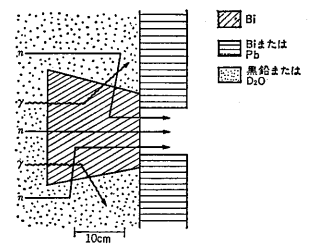


図 ビスマス散乱体による熱中性子とγ線の分離の概念図(1)

次に、中性子コリメータの流束について話してみたい。米國で治療がスタートした頃は、何とカドミウム板をコリメータに使っていた。Cdは吸収断面積も大きいが多量の捕獲γ線を発生する。右図でも分かるように、rem換算してみると、吸収した中性子よりも発生するγ線の方が多量であり、選択性という点からは大変不利である。その次に考えられた硼素板もCdに比べるとやや有利とは云えやはり相当量のγ線を発生する。そこで、捕獲γ線を発生しない⁶Liに着目して、LiFを裸のまま使えるよう考えたのが、LiFタイルである(2)

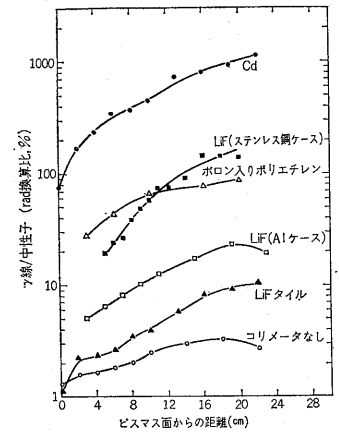


図 コリメータ物質によるγ線/中性子の比(2)

これだと狭いスペースでも十分中性子を絞ることができる。現在はタイルの他にフレキシブルシートとか、γ線と中性子をTLDで分離測定するケースなどもLiFを使って開発している。

3. 炉物理関係者としての今後の課題

武工大炉が医療用に改造後、脳腫瘍だけですでに25例の治療を行なっている。しかし、中性子捕獲療法は他の放射線治療に比べて、選択性と完治という点では特に秀でている方法であり、今後は多くのがんに応用されるものと思われる。すでに皮膚がんをはじめいくつかのがんには動物実験を重ねられている。

1つ炉物理的改良点と云えば、深部のがんを治すために(今はピンポン球とかのボイドを用いているが)中性子寿命の若い中速中性子を使うようにするとか、又中性子束の体内分布を簡単に評価する手法を確立するとか仕事が残されている。

さらに、放射線と生体の相互作用についても、医学・生物学者とアプローチと我々の方法には相当差違があり、すでに幾つかの仕事をしてきたが、今後若くはまだ我々の分野からやった方が有利な問題が多く見つかりそうだ。

参考文献(日本原子力学会誌に発表したもののみ。欧文のものは著者に申し出下されば送ります。)

- (1) 神田啓治: 医療用中性子場の開発, 日本原子力学会誌, 17, 582 (1975)
- (2) 神田啓治: 中性子遮蔽用LiFタイルとシート, 日本原子力学会誌, 20, 37 (1978)
- (3) 木村逸郎・神田啓治: 標準中性子スペクトル場, 日本原子力学会誌, 20, 301 (1978)

〈現状報告〉

高速実験炉「常陽」の炉心性能試験

動燃. 高速実験炉部

山本 寿

高速実験炉「常陽」は、我国の高速増殖炉開発の一環として建設され、昨年4月臨界に達した。その後、約6ヶ月にわたって低出力で炉心性能に関する試験が実施され、今年4月より出力上昇試験を開始し、7月に第1期出力である50 MW出力運転に成功した。以後も試運転が続けられていたが、9月29日付で原子力安全局より合格証が交付され、10月下旬より定格出力運転に入った。

「常陽」は炉型としてはループ型のナトリウム冷却高速炉で、ループ数は2、各ループは一次系および二次系より成り、最終段は空気冷却器により大気中に放熱される。炉心は燃料とブランケットの二領域で、燃料は17.7%のプルトニウムと23%濃縮のウランの混合酸化物ペレットをまた、ブランケットは0.2%の劣化ウランの酸化物ペレットをステンレス被覆管に密封したものである。制御棒は6体（安全棒4、調整棒2）でいずれも9%の濃縮ボロンを用いている。

「常陽」の臨界近接は15ステップにわけて行われたが、ナトリウム温度約200°Cで燃料集合体64本（予測は61±5）で臨界に達した。低出力で行われた主要な試験としては、制御棒特性、等温係数、燃料価値、出力分布、ナトリウムボイド効果、遮蔽特性等である。制御棒価値については正炉周期法、未臨界法、Rod drop (Extrapolation, inverse kinetics) を用いて比較した。未臨界法、Rod drop法については、制御棒、中性子源、中性子検出器の各位置に依存する空間依存性が見られた。正炉周期法での測定結果は設計計算値ときわめてよい一致を示し、相対する制御棒肉の干渉効果（約6%）も測定値は計算値とよく一致した。等温係数、燃料価値（燃料-ブランケット置換反応度）も測定値は設計計算値とよく一致しているが、燃料またはブランケットとナトリウムとの置換反応度は計算が約30% Over estimateしている。ナトリウムボイド効果（チャンネルボイド）も計算が数十% Over estimateしていたが、最近の解析では10%前後の一致まで改善されている。出力分布、遮蔽特性についてはとくに大きな不一致は見られなかった。

「常陽」の出力上昇試験は定格出力までを約15%、30%、50%、80%、100%の5段階にわけて行ったが、試験はきわめて順調であった。炉心性能については、出力係数、燃焼係数が測定された。出力係数は5 MW毎に制御棒位置から求められ、全体として計算とよく一致しているが、出力とともにほぼ直線的に絶対値が増大している。燃焼係数は設計値と良く一致しているが、運転開始直後、数日間は反応度変化率がやや大きく、これは $^{238}\text{U}(n, \gamma) \rightarrow ^{239}\text{Np} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$ の半減期2.35 dによる効果と考えられる。

「常陽」は現在定格出力運転に入っており、運転性能はきわめて安定している。なお「常陽」53年度内は50 MW運転した後、54年度には75 MWへの出力上昇を予定している。

KUCA 実験の経過について

京大炉

小林 圭二

京大炉の臨界集合体 (KUCA) は、初臨界以来 4 年余りになった。その間、スタッフ一同、他の業務との兼務に悩まされながらも、ほとんど休みなく実験を続けてきた。これには、北大、東北大、東大、武工大、立教大、東工大、東海大、名大、京大、阪大、近大、神船大、九大の協力が大きい。ここには経過を項目だけ簡単に報告する。なお、実験結果や検討に関する報告は別の機会にゆずる。

今日までの 4 年間は、実験の目的によっておおよそ五つの時期に分けられる。

(1)、使用前検査を兼ねた A、B、C 各架台の初期特性試験 (49 年 8 月 ~ 12 月)

A 架台ではポリエチレンを減速材とする A $3\frac{3}{8}$ " P 36 E U (3) 炉心、B 架台では黒鉛を減速材とする B 3" C 14 E U (25) 炉心、C 架台では燃料板ピッチの異なる (すなわち H/U 比の異なる) 軽水減速の 3 炉心、C 45 G O、C 35 G O、C 30 G O 炉心について臨界実験及び基本的特性実験を行なった。

(2)、軽水減速炉心の基礎実験 (50 年 1 月 ~ 50 年 9 月)

C 架台において、初期特性試験を行なった 3 炉心の更に詳細な特性測定、燃料板ピッチを 3.5 ミリに固定しておき軽水ギャップをもつ 2 分割炉心 (ギャップ中 $7 \sim 14$ cm) の特性測定を行なった。この期間の実験は、C 架台における各種実験手法の確立を目的としたものである。中でも、水位調節による反応度測定の可能性について精力的に調査が行なわれたが、結局、板状燃料での毛細管現象の壁を破ることができなかった。

(3)、2 号炉のための予備実験 (50 年 9 月 ~ 51 年 2 月)

2 分割炉心のギャップ部のみを重水に置換した炉心 (ギャップ中 $10 \sim 20$ cm)、重水反射体つき単一炉心、中央に木アイランドを持つ炉心をそれぞれ作り、その特性を測定した。これらの炉心は、2 号炉の炉心概念設計上重要な問題を調べるために作られたものである。

(4)、2 号炉模擬炉心実験 (51 年 2 月 ~)

楕円柱の重水反射体容器中に、丁度目玉の形に 2 個の円柱孔を設け、その円柱孔内に軽水減速の 2 分割炉心を作った。当初、各炉心は C 架台標準の板状燃料を各炉心に放射状に配し、臨界量、制御棒ワース、質量係数、温度係数等を測定したが、この形状では 2 号炉設計の上で制御棒ワース及び余剰反応度に限界があることが判明し、52 年 11 月より 1 号の炉心の同心円状に弯曲した燃料板を配したバームクーヘン型炉心に変更した。臨界量、模擬制御棒ワース、温度係数、中性子束分布など、現在ほぼ調べ終った。なお、中濃縮燃料に関する実験の開始は、まだ先になるだろう。

(5)、トリウムを含む固体減速炉心の実験 (52 年 10 月 ~)

初期特性試験時の経験から、固体架台での実験は経験ある炉心から出発して少しずつ

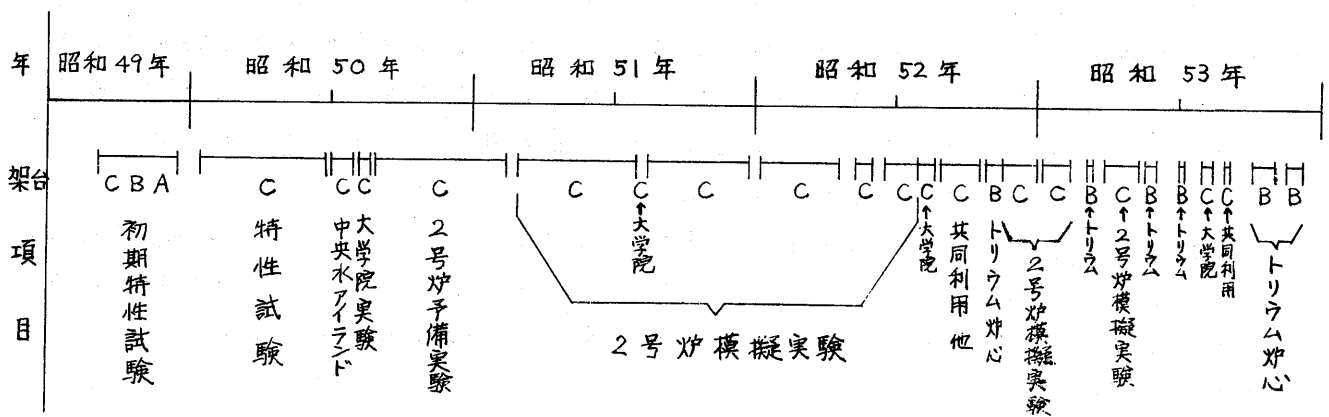
変更を加えた炉心を作るといふ慎重な手順がふられた。将来の、ドライバ一型中速テストゾーンフミ炉心までの予備的段階として4段階の炉心が組まれ、固体架台の特質、材料(特にポリエチレン)の性質、トリウム金属の断面積等が調べられている。現在は、黒鉛中のトリウム濃度をパラメータとして反応度測定、中性子束分布測定などを行なっている。

以上、各大学の協力による実験の流れの他に、パイロオシレータを用いた軽水2分割炉心(名大)及び重水2分割炉心(阪大)の動特性実験が共同利用として行なわれ、その成果は学会等で報告されている。

毎年夏期には、全国の原子力関係大学院生(修士1年)を対象とする学生実験を行なっており、今年で4年目を迎えた。これまでに北大、東北大、東工大、東海大、名大、阪大、神船大及び九大から毎年約40名の参加があった。実験及びレポート作成のかなりハードなスケジュールにも拘らず、希望者は毎年増え続け、定員増をのぞむ声も強い。

学内の学生に対しては、ルーチンとして毎年原子核工学科の学生実験を引受ける他、大学院実験も1テーマ分担している。さらにこうした合間をぬって修士論文のための実験(炉雑音及びファインマンード)も行なわれた。

このようにKUCAは、これまで順調に動いてきた。ただ、専従実験者の不足が、現在最大の悩みである。



KUCAにおけるこれまでの実験の流れ

大学における原子炉学生実験の現状

(レポート) 近畿大 三木良太 京大炉 神田啓治
東大炉 岡 芳明 北大工 成田正邦

「炉物理や炉工学について多少なりとも知識をつんできたが紙の上の計算などでは、原子炉の実体をうまくつかめないでいた。・・・」

「原子力工学科の学生でありながら、実際に原子炉を見るのは初めて、そして燃料集合体にさわったのも、もちろん初めて、やっと実感として原子炉を知った・・・」

「原子炉は、本当に生きてゐると感じた。・・・」

「明けても暮れてもプラズマに関する論文と実験装置に接しているわけだが、こんなとき、自分の専門外の実験を試してみたいと思うのは私だけではないはずだ……」

「激しい競争率のくじ引きに勝つ抜いて、共同実験に参加させてもらった。・・・」

<53年度 京大炉 KUCA 大学実験感想より>

昭和50年度から始められた京大臨界集合体実験装置(KUCA)での大学院合同実験は、初年度は、東北大、東工大、東海大、名大、阪大の5大学で、51年度からさらに北大、九大、本年度から神戸商船大も加わって、すでに4年間続けられた。これに至る経過は、本誌20号8頁に神田がまとめてある。本レポートでは、KUCAの実験のその後もあわせて、さらに東大跡生炉、近畿大UTRでの学生実験の内容と現状をまとめたものである。京大の学生については、大学院実験とほとんど同じ内容のものがKUCAで行われている。近畿大学では、原子炉工学科設置当初の37年度から前年臨界になったUTR(熱出力1W、当初0.1W)で、4年次に必修科目として原子炉実験が始められ、全カリキュラム中でも比較的大きな比重がかけられて来た。東大では、従来は武蔵工大炉をかりて原子炉実習を行っていたが、高速中性子源炉「跡生」が出来てからは、7月初旬より2週間、原子力工学科4年(必修)と東大以外から大学院へ入った院生(選抜)で実施している。その後53年度から3年次へ移行している。

各大学での原子炉実験の目的は、ほぼ同じで現実の原子炉の運転特性を身をもって経験することである。このためにいずれも保安教育、点検業務が事前に含まれ、主な実験テーマは反応度の測定になっている。以下いくつかの実について述べておこう。

テーマと内容

KUCA 大学院合同実験

- (1). 臨界実験 臨界計算(事前レポート)、燃料板増加に伴う逆計数率法による臨界近接。
- (2). 制御棒較正 ペリオド法、ロード・ドロップ法。
- (3). 中性子相関実験 (51~53年) Feynman- α 法による減衰定数 α , ρ/β , 炉出力の決定。
- (4). パルス中性子による反応度測定 (50年)

(5). 熱中性子束分布の測定 箔検出法による中性子束分布, Cd比

東大炉生炉

- (1). 原子炉運転, 実験実習, 運転操作(起動, 臨界, 出力変更, 自動運転, 炉停止, 安全系の理解)
 - (2). 炉特性測定 ペリオド法, 落下法による制御棒校正, パイルオウシレータによる伝達関数測定
 - (3). 計測 A Fission counter, BF₃, He-3 Counterの特性測定, パラフィンによる中性子遮蔽実験
 - (4). 計測 B 放射化箔による中性子空間分布の測定, (Ge(Li)で測定可)
- (参考) (49年度) (0)原子炉周辺のモニタリング, (1)原子炉運転と制御棒校正, 中性子ゆらぎの観測 (2)核分裂計数管による炉内中性子分布, スペクトル測定, (3)高分子の炉内照射, (4)半導体の照射損傷, (5)放射化法での中性子束分布, 核分裂率.

近大 UTR

- (1). 原子炉運転実習, 放射線管理, サーベイ実習.
 - (2). 制御棒算価反応度と余剰反応度の測定 正ペリオド法, 落下法.
 - (3). 熱中性子束絶対測定と熱中性子相対分布, カドミウムの測定
 - (4). 速中性子束絶対測定と相対分布
 - (5). 遅発中性子半減期の測定
 - (6). 統計的重み(インポートランス), 吸収反応度と ϕ^2 の比を求め
- (参考) 当初は臨界近接実験も行ったが, 学生増と熱出力増(0.1W→1W)で燃料放射能レベルが上がり中止した。

3つの学生実験テーマで負付くことは、近大が時間的余裕の中で、多くの実験を行う、ということ。制御棒校正のための反応度測定と中性子束測定はいずれの実験にも入っている。臨界炉の感じを捕える実験は、KUCAは臨界集合体の特徴を生かして臨界近接、東大炉と近大炉は運転実習という形でなされている。この3つを除いて2=1の炉物理実験はとなると、KUCAのFeynman- α , パルス中性子実験、東大炉のパイルオウシレータによる伝達関数、近大炉の統計的重みと遅発中性子の測定である。

実験を行う学生と時期 表1

| | KUCA | 東大炉生炉 | 近大 UTR |
|-------------|--------------------------------------|--|---|
| 学生の学年と実施時期 | 大学院修士 毎年7月, 1週間×2回 | 3年次 毎年7月頃 1週間×2回 | 4年次 通年 毎週1回 火曜日6時間 |
| 1グループの人数と編成 | 各大学の混合5人で 1グループで4テーマ | 2×1グループで4テーマ (1週に8グループあるので、4グループは次の実験の組に入って実験方法を理解する) | 約20名で毎週1回 |
| 担当教官 | 各参加大学の教官 KUCAの教官 | 長谷川 駿一助教授(兼任) 原子力工学教官 原子力工学研究施設教官 | 三木良太教授他 各教官 |
| テキスト | 京都大学臨界集合体実験 装置大学院テキスト (KUCA発行) | 原子炉実習指導書 (東大工、原子工学科) | 講義による。(参考書、原子炉 物理実験(コト社), 原子炉 (共立出版), ANL-6990) |

学生実験実施の1例 KUCA 大学院実験の場合

本誌をこれから実験に参加予定の院生も読むことを考慮して、KUCA 大学院実験を1例としてその内容を説明しよう。KUCA の実験は各大学5名以内（阪大のみ10名以内）の院生（主にMC1年）を各大学で選考する。（このために感想にある激しい競争率の大学や年度もある。）各大学ではこの実験と事前、事後のレポートを考慮して所属大学の単位を2単位相当与えるよう配慮されている。毎年4月頃に出席する学生が決まると教官側とKUCA 側は打合せを開いて本年のテーマその他を決める。学生はこの実験に参加するためには放射線取扱者として各大学の健康管理を受けていなければならぬ。KUCA からその年使用するテキストが送られて来て実験以前にテキストの熟読と臨界計算、制御棒校正の事前レポートが要求される。熊取町のKUCAにおける実験のスケジュールは、次の表のようである。

表2 表 KUCA 大学院合同実験のスケジュール

| 時刻 | 9:00 | 10:00 | 12:00 | 13:30 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 | 18:00 | 19:00 | 20:00 | 21:00 | 23:00 | 24:00 |
|-----|-------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 月曜日 | | | | 登壇説明 | 見学 | 保安教育 | | | | | 顔合せコンパ | | | |
| 火曜日 | 講義I | 実験I (臨界実験) | | | | | レポート | | | | | | | |
| 水曜日 | 講義II | 実験II (制御棒校正) | | | | | <クレーション・野球?> レポート | | | | | | | |
| 木曜日 | 講義III | 実験III (中性子平衡実験) | | | | | レポート | | | | | | | |
| 金曜日 | 講義IV | 実験IV (中性子束分布測定) | | | | | レポート | | | | | | | |
| 土曜日 | レポート | | | | | レポート | | | | | | | | |

(注) いずれの日にも所長講話がある。

実験に先立つ講義では、保安教育はKUCA 側で行い、各実験はあらかじめ決められた各大学の担当教官が行う。炉の運転前後の実験はKUCA の監督の下に教官と各グループが交互に行っている。各グループの組み分けは各大学の混成チーム5人1組で種々のデータ集積と整理を行いレポートは各自が提出する。今までの例によると実験初日の臨界実験あたりは手ぶらで元気があまる日、4日目ではかなりの疲労がめだつて来る。これはレポート書きに追われることによる。このようにして土曜の午後までにレポート4通を提出して終了する。学生の実験はこれで終了するが教官の方は自分の担当したレポートを全部読み訂正講評、採点を行ってKUCA を経由して各学生へ返却される。このようにして、他大学の教官の採点をもとにして単位認定を行うことは、このKUCA の実験が始めての試みであり、現在のところ成功しているように見える。副産物の〈交流〉は単に学生同志だけでなく、他大学の教官と学生、大学間の教官同志が、いつもの委員会や研究会とは違った教育というものを仲介にしてつなげて来ているようである。

学生の反応

KUCA の大学院実験では、学生に終了時の感想文を書かせている。そのほんの一言を冒頭に示したが、実際の子供炉の運転経験がいかに大きいかは、東大炉、近大炉でも全く同じであった。この大学院実験の場合には圧倒的多数がハードスケジュールをこなしてレポートを考えて書く暇がないとの感想である。しかし、終わってみるとどれだけ充実した経験であ

ったかということも付け加えている。後輩への伝言としては、事前にテキストを理解しておくべきこと、現在直接関係のない人が参加すべきだとも述べている。

教官の反省・感想・問題点の指摘など

教官側の問題点の指摘や反省も数多くある。例えば東大での4年次から3年次への実験時期移行は、「4年の夏休み前では原子力の講義のほとんど聞き終わった後であり、もっと早い時期に学生が原子炉を体験した方がより講義の理解の上でよい」という反省からである。原子炉を管理する立場の教官からは「自分の研究で原子炉を使うのとは異なり、学生の管理やスケジュールの消化などに気を使わねばならないこと、テーマを担当できる教官の数が少ないため、担当者は原子炉実習期間には、ほとんどかかりまりの必要がある。しかしそれだけの意義はある。」(東大炉) のことは近大炉もKUCAでも同じであろう。原子炉を自由に学生実験に使える近大炉でも「(1)原子炉は規制法の適用を受けるため、定期検査や許認可の手続きに時間を要し、カリキュラムの消化に支障を来たす場合が少なくない。このためしばしば休暇中に集中実験を余儀なくされる。(2)学生定員が80名と多いため、1組20名で充分行きとどいた実験ができない。炉物理、炉工学の学生にもう少し実験回数をふやす方が好ましく、検討したが実施上難しい。(3)実験設備の不足、老朽化」などなやみも多い。

このような原子炉をもつ大学に対して、持っている大学は、一応大学院段階ではあるが、多数の大学が一堂に会しての初めての試みで、各大学内で単位を与えるという方式で解決したように見える。また教官個人個人にして見れば日頃、自分の学生としか接しない他大学の学生を指導し討論し、他大学の先生の良さを知ることがあることも事実である。しかし、問題は現状では人数制限があって自由に参加できない。本当に大学院まで原子炉実験を延ばしてよいのか、などの基本的問題がある。少し細かくなると現在やっている大学院実験の具体的な点でも、いくつかの反省がある。52年CA実験後、中2回担当教官の反省会メモ(名大仁科助教授宛)がある。この中の項目を拾ってみると、「(1)学生の負担、現在ではデータ処理に精一杯でテキストの検討の余裕が少ないのではないが、(2)テキスト、厳密な定量的補正が先行して最低限の把握に欠けているが、(3)運転、現在参加の学生には原則的には運転させていない。自分で運転した緊張感、感激が欠けていないが、」などがある。一方この考えに対して、大学院実験であるから、ただ運転した、臨界にはなっていないで良いのだろうか。もちろんそれも大切だろうが学生が新しさを発見できる実験も一つぐらいあったらよいだろう。ハードスケジュールも自分の能力を短時間に出して自分の能力を自覚することも大切な訓練ではないか、という意見もある。消化不良の点は事前事後の指導という点の重要性を我々に示しているようである。

将来への展望という意味で、学科全員の参加、学部あまは低学年への移行などが大切であると思われる。最近、近大炉では大阪大学が窓口になって全国共同利用の実現に向けて関係者の努力がなされている。これが実現すれば地理的に近い国立大学の学部学生の実験受け入れも可能になる見通しである。同じように他の私大炉や既存炉の活用も大学学生実験の一つの活路かも知れない。

<海外調査報告>

ニューメキシコ大学より - 愛をこめて

東京大学工学部

若林宏明

アメリカ合衆国ニューメキシコ州アルバカーキ市にある州立ニューメキシコ大学の
客員教授になってより一年余りになる。ここは、緯度で、5千フィートという高地のせ
いで、湿度が低く、暑い夏も快適であり、冬の雪もめったに降らず、降っても午後には溶ける。
陽射が強いので、外に出る時は、サングラスが欠かせない。服装は一般に略式で、男性
は、ジーンズにジョージアーツと呼ばれる長靴、トルコ石のネクタイ等が代表的である。
ここには、市内に、サンディア研究所、車で2時間北に行くと、ロスアラモス研
究所、4時間南に行くと、ホワイトサニズミサイルレンジ等の原子力関係の施
設があり、兵器の改良、生体、エレクトロニクスに対する放射線効果と耐性及び遮蔽等の
軍事研究開発と共に、エネルギー開発の研究を行っている。最近、後者のついでには、太
陽、風力、地熱といふ、代替エネルギーの比重を増してあり、原子力中心とは必ずしも
言えない。35年に及ぶロスアラモス研の成果について、所長、副所長が刷新を述べ
ていることは、原子力開発の開始に成功したことで、他はむしろ余力にすぎたものであ
るということである。とはいえ、最近では、LAMFと呼ばれるメソ子工場-中性子施設を運
転したり、レーザー核融合の開発をやっていることも、よく知られている。サンディア研
究所では、放射線効果の研究と共に、燃料サイクルに伴う工学的安全性を比較的マクロな観
点より研究している。たとえば、高速炉心の溶融が起ると、液体金属のコークリートの
反応、冷却がどのような過程で起るかといふこともあつた。これは、一般的にバースト
エンジニアリングと呼ばれる。そこには、その過程についても、最近、燃料及び、設計を
変更して、ACRR (Annular Core Research Reactor) と呼ばれる炉による燃料挙
動の研究、ネバダ州にある核開発研究所で、爆発装置よりの強力中性子パルス源による、
セミスーパール炉心の溶融実験、ペリオド変化等比較的想定に近い状況で行う計画などが
ある。さらに、e⁻α核融合、200 mA 200 kV d-大医療用中性子源の開発も行な
っている。ニューメキシコ大学化学工学原子力工学科では、高速炉安全性 (Fragmentation,
UO₂-EOS (状態方程式)), U採選、テイル処理に伴う環境、南方、テキサス州境にあ
るカールスバット近郊の放射性廃棄物処分計画 (WIPP = Waste Isolation Pilot Plan) の
環境、国際的視野における、ニューメキシコ州、核燃料サイクルセクターの検討、臨界安
全性に関する研究、慣性閉じ込め核融合の研究等が進んでいる。原子力は大学院より始まり
、教育の基本は、基礎知識 (Basic) と最近の情勢や市民運動を含む一般知識 (Breadth)
に置かれている。専大に比べると70歳くらいは小さく、大卒の進路方は、種類は異な
る。20歳、21歳に集中している。つまり、構成という考えは無い。学生も、数年前迄の
日本とは異なり、平均的に20才中10才、一寸例外かもしれないが、56才、70才、2トニ
物理、修士で退役軍人の方が小生のコースをとっている。したがって、一般的に社会経験

一方、基礎科学の分野、これには、高エネルギー物理学の分野において、半国はソ連との間に科学者の交際を行っており、フェルミラキやロスマン元スへの訪問も行なわれてい
る。その他、中核子学や加速器、研究用原子炉も、ソ連や近隣国に輸出している状況も
あり、互いの必要のあかまりにおいての協力関係は見事といえ他は無い。このことは
遠くまで押し寄せるエネルギーの逼迫の状況の下において、力ある国々が、互に、独り善
がりな捨て、いふかは府専せあり、一日でも延び延びの努力をしまけねばならぬ時が来
ること予知しているに過ぎない。

このよき半国の姿勢は、先行きとていふべきではなから、むしろ、不文字や、国際政治
の専門家がみよ、こゝ自然であり、小文のよき、しほさく時計を止めた旧い日本人の
偏見であるかもしれない。

いふかにせよ、半国は様々の街い、太平洋には日本、中国と、大西洋には、ヨーロ
ッパ、ソ連との間に、協力関係を築き出すことである。その中にあり、地位を
保ち、エネルギー供給と関係する日本は、むしろ厳しいところであるかもしれ
ない。これには、Uの供給も、2000年を境に、厳しい状況となり、これに可成りあつて
も、高価なものとさう。濃縮のプーシエにも同様である。HTGRに懸念があつ
ても、20%以上の高濃縮プーシエは入手困難である。それ以下のプーシエ経済設計が可成り
せうか。又、Puの核分裂物廃棄物の危険性より再処理をせよとも遅らせの国際政策は
即リサイクルを基本とする日本の原子力政策と相入らねばならぬ。つまり、原子力エ
ネルギーにはあつた隷属関係の立場に置かれる可能性がある。

この長に肉いて、環太平洋会議に出席して最近日本を訪問した、ロスマン元ス人の R. Keppin
博士は、東京大学総長、向野隆博士が、極めて困難な状況の中にあつて、日本が、世界の
原子力開発にあつた重要な役割を果すことであるといふ文章のスピーチを演じて、強い
感銘を受けたといふ。

つまり、十分世界を納得させるロジックを保持しつつ、燃料サイクルの企画に力こ
の自主開発が必要であるが、それではあつた経済力が保てなくてはならない。若し一途に
ではあつた技術的には可能であることである。小文には、これに燃料サイクルは重要なし
も別世紀は核分裂エネルギー不可成りと思はれる。そのことは、よめて、とつくり腰を
落して、核物産、炉物産、燃料サイクルの問題にとり組み、権力にふまわし、力を
つける方向が望ましい。

私の尊敬するあつた日本人教授が、原子力の仕事は頭の良い人でも出来るが、ノーベ
ル賞級の科学的業績はそうはいかないと述べてくれたことがある。私もそうであつて欲しい
と思ふ。よせよ、各パートはこれに概念的に単純であつても、安全確保と経済性を確保
しながら、核燃料サイクルを満足に運転するには、ふつうのいふで頭の良い方は勿論、頭
の良い方でも安心して参加できる前提がなければ、原子力エネルギーが真に役立つ
ことは出来ないであろう。

(完)

<研究室だより>

東京工業大学 原子炉工学研究所 原子炉物理部門 山室・北沢研究室

本会報23号に研究室だよりを報告してから約1年半に存りますが、この間も以前報告したペレット加速器の調整に明け暮れました。本研究室は現在、山室教授、北沢助教授、助手2名、技官1名、秘書1名、博士1年1名、修士2年5名、1年4名、学部4年3名の計19名から構成され、大きく次の3グループに分かれています。

① Neutron Capture ($E_n=3\sim 80$ keVの捕獲断面積の精密測定)

② Fast Neutron ($E_n=1\sim 14$ MeVの (n,γ) , (n,α) , $(n,\alpha\gamma)$ 断面積の計算と測定+etc)

③ Neutronics (核融合炉ブランケットにおける中性子スペクトルの計算と測定)

①のグループは京大炉LINACを用いた実験をここ数年続けており、現在転換期にさしかかり、今後この領域の捕獲 γ 線スペクトルの測定を計画している。②のグループはペレットの調整に全力を向けており、現在実験は予備的なもののみで計算が主である。③のグループは実験としては、平板体系に14 MeV中性子を打ち込んだ際の透過中性子スペクトルを測定しており、計算では多群化に伴う非等方性を考慮した中性子輸送計算を行っている。

(発表論文)

N.Yamamuro et al; Measurement of Neutron Capture Cross Sections with an Fe-filtered Beam
Jour. Nucl. Sci. Technol., 15, (1978) 637

N.Yamamuro et al; Neutron Capture Cross Sections of ^{93}Nb , ^{127}I , ^{133}Cs , ^{165}Ho , ^{181}Ta and ^{238}U
from 3 to 80 keV A Contributed paper to Inter. Conf. on Neutron Physics and Nuclear Data for Reactors and other Applied Purposes
Harwell U.K., 1978

H.Kitazawa et al; Direct and Collective Captures of Energetic Neutrons by Ellipsoidally Deformed Nuclei Nucl. Phys. A307(1978)1-21

H.Sekimoto ; A Direct Technique for Unfolding Neutron Spectra from Activation Data
Nucl. Sci. Eng. (to be published)

(学会口頭発表)

関本 「放射化法による測定から中性子スペクトルを求める新しいUnfolding法の開発
Ⅱ」 昭和52年秋の分科会C7

井頭他 「Ge-NaIコンプトン除去検出器系の遮蔽材の研究」 同C20

山室他 「3~80 keVにおける中性子捕獲断面積の測定」 同D7

小林他 「高速中性子による γ 線生成断面積の計算, (Ⅲ)」 同D17

江本他 「CAMACを用いた小型データ処理システムの開発」 昭和53年年会B20

山根他 「多群化に伴う非等方性を考慮した中性子輸送計算」 昭和53年秋の分科会D4

小林他 「 γ 線生成断面積の計算に用いる γ 線強度関数の検討」 同D30

(井頭政之記)

例年の4年生歓迎実習がスペクトルグループの指導により、D-T中性子のLi球体系からの1回散乱による漏れスペクトルの計算が行われ、Li漏れスペクトルの各peakの解釈に大いに役立ち、4年生自身にとっても計算機を使った初めての仕事であり、また卒論をまとめる上でもよい経験であったと考えている。48年以來続けられている3グループによる活動も年月を重ね、各グループとも大いに成果をあげている。

I重イオン源研究グループ〔玉河教授、大森助手、寺浦(M2)、笠井(M2)、島田(4年)〕マイクロ波ECR (electron cyclotron resonance)を応用した実用的重イオン源の開発を引き続き行っている。key pointはマイクロ波電力注入方式と依気圧における放電の維持にある。また、平行して高電子温度プラズマ中のイオンの価電分布の計算を一般的立場から行ない興味ある成果を得ている。

II中性子スペクトルグループ〔伊藤助手、三橋(M2)、岩田(M1)、沢田周(M1)〕今年も原研高速炉物理研究室との協力によるLi球体系角度依存中性子スペクトルの測定を行ないシンプレックス法によるゲイン変動の補正を含めて解析が行われ、結果がでつつある。また、使用シンチレータNE-213のresponseをおさえるための5S、実験と計算を比較するために新しいモンテカルロコードで5Rへのtryが行われ、結果がでつつある。

III WAVE, KUCAグループ〔仁科助教授、山根教務員、若松技官、村田(M1)、石川(4年)、井上(4年)、沢田龍(4年)、吉井(4年)〕減速材応答関数法による結合炉動特性の理論的取扱いとKUCAでの共同実験との比較、検討が行われている。また、結合炉のパルス実験、Thを含む炉の炉物理等、このグループにとって新しい方向への活動もあり、また、群定数を評価する仕事もかなり進んでいる。

〔発表論文〕

- 1) M. Shinkawa, Y. Yamane, K. Nishina, and H. Tamagawa, "Theoretical Analysis of Coupled-Core Reactors with the Method of the Moderator Region Response Function" Nucl. Sci. Eng., 67, 19-33(1978)
- 2) 田中教馬, 山根義宏, 仁科浩一郎, 玉河元, 代谷誠治, 神田啓治, 「2分割炉の動特性パラメータ測定-KUCA-パルスシレータ実験」炉物理の研究, 25号 P.14 (1978年5月)
- 3) 伊藤只行, 前川洋, 関泰, 草野謙一, 中岡弘, 村田和哉, 小倉克規, 三橋信司, 代谷三津雄 「リシム体系の高速中性子スペクトルの測定」炉物理の研究 23号 P3 (1977年6月)
- 4) S. Itoh, Y. Seki, and H. Maekawa "Measurements and Calculations of Fast Neutron Spectra in a Graphite-Reflected Lithium Assembly" Proc. 3d. Aris Topical Meeting on the Tech. of Controlled Nucl. Fusion (Santa Fe, 1978)

〔口頭発表〕

昭和52年学会秋の分科会

- D46 山根他, 「結合炉の動特性解析(Ⅱ) - 2群減速材応答関数法による動特性方程式の導出」
- D48 若松他, 「応答関数法による反射体付内筒炉のバルルス減速定数の計算, 2群理論」

昭和53年度春の年会

- B47 (原研)前川洋, 関泰 (名大) 伊藤只行, 「黒鉛反射体付Li球体系中の角度依存中性子スペクトルの測定, (Ⅱ), モンテカルロ法による解析」
- B67 田中他, 「2分割型炉の動特性パラメータ導出-KUCAパルスシレータ実験」

昭和53年学会秋の分科会

- C31 村田他 「2次元パルス応答の2次元の表示法 - 振動解の検討」

(文責 三橋 信司)

大阪大学工学部 原子力工学教室 住田研究室

この一年は変化の多い年であった。かねてより申請中の強力14 MeV中性子工学実験装置が予算化されたこと、高橋亮人助教授の西独カールスルーエ研究所への留学が実現したこと、飯田敏行助手の新任、また研究室としてはじめて秘書の西野雅世さんを迎えたこと等である。そのせいかわか春の年会の口頭発表5件が秋の分科会で1件に激減してOB達を嘆かせた。54年春年会は何件になるか、予御期待とゆうところである。なお、上記の強力14 MeV中性子工学実験装置の中心となる中規模の強力D-T中性子源については、建設に到るまでの調査報告と住田が原学会誌¹⁾に寄稿しており、また装置自体は本連絡会誌次号にや、詳しい報告²⁾が掲載予定されているので、ここでは省略したい。

核融合炉中性子工学実験の関係では、上記の建設着手までに実験データを取り集めるべく大量な昨今であるが、今年も天然Li、黒鉛、鉄などの核融合炉ブランケット材についてD-T中性子源による板状体系の角依存放出中性子スペクトルの測定を進めると共に、計算システムの改善につとめた。³⁾また反応率空間分布、時間減衰、中速領域でのスペクトルなどの諸量の測定と解析にも着手して、上記中規模中性子源の利用開始に備えている。

強力バルス中性子計測に関しても、これまでの一連のエレクトロニクス関係の研究成果も報告⁴⁾にまとめ、科研、試験研究費を受け電流電離箱の速度答化に着手し、目下バウクヒットによる基礎実験中である。また原研よりの受託研究として、中性子ホドスコープ用コリメータの設計基礎データの検討実験や⁵⁾による医療用照射の研究なども併行して進められている。

制御ケルブは一般的な制御理論の原子炉への応用を中心として、^①結合炉の空間依存動特性 ^②炉雑音解析 ^③最適制御を取り上げている。この種の研究はとくに抽象論に偏りよってキレいごとに終始し勝ちなので、^①では京大高中性子束炉の2分割炉心構造を取り上げ、理論面から2長結合炉の安定性と制御を研究して、実験面ではKUCAでの重水反射体つき2分割炉の空間依存動特性伝達函数測定の数値計算を行なった。⁶⁾ ^②では、パターン認識のインバートロンの手法やインフォーマーション、ダイバーゲンズの炉診断への応用を試みると共に燃料および吸収体のランダム配置によって生じる反応の研究を行なっている。^③の分野では、出力変更時の炉内熱応力に着目した最適化の理論解析を進めた。また原子力産業による環境汚染へ客観時評価のための評価関数と環境汚染の先行指標に関する研究なども行なわれている。⁷⁾

- 1) 住田：原学会誌²⁰ 巻⁹号、P.613 ('78) 2) 住田：炉物理の研究²⁷号、('79) 予定、
3) TAKAHASHI, A et al, J. Nucl. Sci. & Tech, Vol 15, NO.2 ('79) 予定、 4) IIDA, T et al Nucl. Instrum. & Meth, Vol 152, P.559 ('78). 5) IIDA et al IEEE Trans, on Instrum. & Measur. Vol IM-27, NO.3, P.220 ('78) 6) 山田：原学会誌²⁰ 巻¹²号、結合炉動特性(解説) IV. ('78)および 松田他、原学会53年秋分科会³⁰, 7) 山田：科研特定研究「環境汚染の検知と制御」報告書(IV) P.282 ('78)

原子炉設計工学部門の最近の活動

東京大学工学部附属
原子炉工学研究施設

安成弘, 岡芳明, 秋山雅胤, 橋倉宏行

我々の研究室で最近行っている研究は以下の通りである。

1. 高速中性子遮蔽の研究

「弥生」炉を使、鉄とトリウムとの遮蔽バンク実験を実施してきたが、現在その解析を行っている。鉄の自己遮蔽因子が解析結果に大きな影響を与えることが明らかになった。この研究は OECD/NEA による国際協力研究の一環で NEA の会議等で成果を発表してきた。又、キャビティとダクトのストリーミングに関する実験と解析も行っている。

2. 高速核分裂による崩壊熱の測定

「弥生」炉でウラン、プルトニウム、トリウムの箔を照射し、その γ 線、 β 線を NaI, ポラスケックシンチで測定することにより崩壊熱を測定している。まず γ 線の長冷却時間の測定を行った。現在 β 線の測定を行っている。又、「弥生」の β 運転位置のグレージングホールに取りはずし可能な気送管を設置し、短冷却時間の測定を行えるようにした。これを使って実験をはじめつつある。実験結果を原研・田坂氏のコードによる計算結果と比較し、検討をすすめている。

3. 医療用原子炉の開発研究

「弥生」の熱中性子柱に設けた熱外中性子照射設備はほぼ完成し、犬による動物実験も行った。「弥生」の出力が低いので、炉心のなるべく近くに照射場を作る必要がある。中性子/ガンマ線比は充分ではないが、現在の境界条件の下では一応最適化されていると考えている。

医療用原子炉として最適のものを開発するために研究を行っている。TRIGA-ACPR の中央孔より照射ビームをとり出す方式について計算を行っている。計算を確認するための実験データを KUCA と NSRR にて得つつある。又、医者も含めた科研費の研究班を組織して、原子炉による医療用照射の研究を推進している。

4. その他

トリウム冷却高速炉の非均質炉心の研究、トリウム利用高速炉の研究等を行っている。

又、原子炉など研究施設の運営、利用、管理の面にも施設全体の職員数が多くなっているので、かなりの時間を割いている。安は主任教授として、「弥生」、ライブック等多くの設備をかかえる研究施設全体の管理運営業務を、岡は原子炉主任技術者として、「弥生」の保安監督業務を、秋山は「弥生」の利用等で主任を補佐する主任室の主要メンバーとしての業務を行っている。

又、研究室には、現在 D₁ 1名 (フランスからの留学生)、M₂ 2名、M₁ 2名、の大学院生と 1名の研究生がおり、職員とともに研究を進めている。

(岡芳明記)

半均質炉の開発、ATR炉の研究、そして現在の多目的高温ガス炉の開発と変りながらも熱中性子炉の開発研究を続けているが、伝統的な炉物理の手法を用いて問題点の解明に努力している。

まずSHEでは多目的高温ガス炉の模擬炉心を組み、臨界質量、出力分布、制御棒の反応度効果、炉雑音法による動特性パラメータ等の測定を実施して来た。現在炉心中心の1本の燃料棒部分を700°Cまで昇温させるドップラー効果測定装置を取付け、まずオ1ステップとして黒鉛棒を昇温して減速材の温度係数を測定した。炉心への熱の減れは少なくて良い実験結果が得られそうである。被覆燃料粒子からなる1本の燃料棒の製作を終り、これを昇温装置に挿入して燃料棒の温度係数を測定する予定である。

ガス炉開発のもう1つの研究課題である可燃性毒物棒の反応度効果の測定を実施するため、B₄C粒子をイギリスから取り寄せ、加工して可燃性毒物棒を数多く製作した。これらは模擬炉心に挿入して実験する予定である。

これ等一連の実験が完了すれば、現在のSHE燃料棒の実験は一応終り次の被覆粒子燃料を用いた炉心実験に移行する計画を立てている。

計算関係では、核分裂生成物に関する数多くの核データを集積し、核分裂生成物の生成消滅を正確に計算するのみならず、崩壊熱を計算するコード群を作成した。また衝突確率法を応用した格子系の核計算コードシステムLAMPが一応完成している。これは広い範囲の熱中性子炉格子を対象として核計算を精密に実行するものであり、計算に必要な核データ処理コードを含むものである。このシステムの中には多目的高温ガス炉の燃料ブロック及び制御棒ブロックを解析するコードが組込まれている。(後藤記)

京都大学 原子炉実験所

- 原子炉部門
- 原子炉設備部門
- 原子炉核特性部門

当所における炉物理関係の研究室だよりとしては、原子炉部門についてすでに昨年6月及び12月の当会報に、それぞれ木村先生及び藤田先生が紹介しておられるので、ここではその後の出来事及び前報ではふれられなかった方面について紹介することにする。たゞスペースの関係で論文紹介等の余地はなく、ごくあらすじのみを存することをお許し願いたい。本年当初より実験所においてはいくつかの部門増設(振替を含む)が行われ、これに伴い研究グループの形勢や活動のパターンがより多様となり、部門にまたがる研究活動も少なくない。今年1月に増設されたなかで炉物理と関連するのは原子炉核特性部門(木

村邊郎教授)であり、さらに7月には同部門に神田啓治助教授が昇任配属された。両先生とも従来同様、ライナックや臨界集合体等による炉物理関係の研究指導にあたっておられる。

実験所における炉物理関係の研究としては、この他に原子炉設備部門(岡本朴教授)のメンバーと共に低速中性子の実験に関する研究があり、最近の活動としては、高中性子束炉用冷中性子源の予備実験を行うための水素液化実験装置(科研費)が動き出したこと(岡本朴、河合武、杉本正明、宇津呂雄彦他)、多層膜を用いたスーパーミラーの研究が成果をあげたこと(海老沢徹、阿知波紀郎他)、宇津呂が海外出張(グルノーブル及びミュンヘン)より帰国し、ライナック等を用いて超冷中性子に関する実験が開始されたこと(宇津呂、榎村清也)等がある。(記 宇津呂雄彦)

二号炉(KUHF R)に関しては、去る10月2日、設置申請に対する承認が下りた。現在、原子炉容器と炉室関係の設計及び工事認可申請のための作業にはいっており、遮蔽計算(代谷誠治他)などが急ピッチで行われている。同時に中濃縮炉心の核設計も進んでおり(林正俊他)、神田啓治助教授が日米間を往復して相互調整に当たっている。

一方、臨界集合体(KUCA)では、二号炉模擬制御棒反応度実験を行なった後、固体減速炉この実験にはいり、トリウムを含む炉心の臨界実験、特性測定を行っている。また、懸案であったPNSもようやく完成し、11月15日~16日に使用前検査を受けた。

ライナック関係の活動は中性子スペクトル・断面積・冷中性子などで、流れは従来とおりである。トリア中のスペクトル測定に林脩平氏がRPIに出かけており、年末に成果をもつて帰朝の予定である。なお、山本修二氏が二ヶ月程応援に行って先日帰国した。ライナック本体が相当老朽化してきたので、部分的に漸次更新する必要が生じてきた。今年度はRfドライバーとインジェクターを新調する。(記 小林圭二)

京都大学原子炉実験所 原子炉設備部門

原子炉設備部門は、いわゆる「チヨッパグループ」(岡本朴教授他)と「中性子回折グループ」(澁谷巖助教授他)とに分かれています。比較的炉物理に関連の深いチヨッパグループの近況について簡単に御紹介致します。現在、チヨッパグループが京大炉において管理している実験設備の主なものは、中性子速度選択器、中性子導管およびファーストチヨッパであり、これらの実験設備を用いて中性子の小角散乱、液体の散乱、多層膜の反射特性、 (n, γ) などの実験が共同利用を含めて行なわれております。また現在計画されている二号炉(高中性子束炉)に設備される各種中性子導管、集束型中性子速度選択器、集束型中性子チヨッパの製作および設置場所を決めるための各種計算および実験も行い兼ねの検討を終えようとしている段階です。さらに、二号炉には冷中性子源が計画されており、これに関しても他部門の人達と共に科研費を申請し52年度から「高中性子束炉冷中性子源の研究」(一般A)という課題で液体水素の低温槽を製作し、目下その諸特性を実験により研究中であります。

(山田修作記)

炉物理連絡会第22回総会報告

日時: 昭和53年10月9日 12:10~13:30

場所: 神戸商船大学 (原子力学会秋の分科会D会場)

第22回本連絡会は約30名の出席で標記の場所で開催された。議題および内容の概要は次の通りである。

1. 事務局報告

a) 会計報告 昭和53年9月15日現在の連絡会の収支が報告された。

| 収 入 | | 支 出 | | |
|----------|---------|-------|--------|----------------|
| 前年度繰越金 | 265,943 | 会報印刷代 | 65,000 | 25号, 37頁, 200部 |
| 会 費 | 38,000 | 通 信 費 | 15,670 | 会報発送分 |
| 寄附金(古橋氏) | 2,000 | コピー代 | 600 | |
| | 305,943 | | 81,270 | (残額) 224,673 |

別に寄附金(古橋氏)として500,000円あります。

b) 炉物理夏の学校報告 7/30~8/2 北海道大滝村 大滝セミナーハウスで開催され、勉強テーマは「炉物理におけるコンピュータ計算法」とトピックス「将来の動力炉としてのトリウム系炉など」で、参加者は67名(学生29名、会社・研究所21名、大学教職員17名)であった。(会計報告は別紙で配布説明した)

c) 連絡会誌 25号は6月に発行、26号は12月に予定されており、内容は「炉中性子工学」研究専門委員会の発表要旨他2・3の解説・海外活動報告等予定されている。

d) その他 学会誌20周年記念号の原子力教育の報告に本会の夏の学校について書くことが報告された。

2. 審議事項

a) 次期当番校 本年度の北海道大学から1回目の京都大学原子炉実験所へ戻って続けることに決定し、木村教授(京大炉)から引受ける旨の挨拶があった。

b) 寄附金の使途について 古橋晃氏よりの寄附金の使途について、平川幹事(東大)より幹事のいくつかの案が出され、それについて検討を行なった。その結果、色々の

意見があり、幹事の案を示して全会員にアンケートし順位をつけて、次の総会において実行案を決定することにした。(その中に、大学院生に連絡会誌を無料で配り、学生会員を増してはという意見もあり、これは寄附金を使わなくてもできるので、26号で実施してみることにした。)

3. 各種委員会報告

a) 企画委員会 (中村委員)

3回開催され、山村教授(東大)が委員長になった。秋の分科会にフィルムセッションを設けた。17回原子力総会シンポジウムのテーマなどについて説明があった。

b) 編集委員会 (金子委員)

和文誌の企画記事について12月号までの分について説明があり、来年1月号には創立20周年記念号になる。2月以降の企画記事に空きがあるので、何かあったら連絡下さいとのことであった。

c) 炉中中性子工学研究専門委員会 (仁科委員)

8月「結合炉の動特性」を行なった。11月「加速器による中性子実験」1月「熱・冷中性子スペクトル」(時期不定)「大学における未臨界実験装置」の予定が述べられた。

d) KUCA大学院実験 (神田啓治氏)

神戸商船大学を含め、(7/14~7/22)前半20名、後半20名で行なわれた。

e) 炉物理研究特別専門委員会 (弘田委員)

21回NEACRP会合が11月6日~10日原研東海であり、そのリストが本分科会の別の会合で配布され、その内容の説明がなされた。

○ 入会者 (1978.4.1.~12.15.)

| 氏名 | 所属 |
|--------|------------|
| 小佐古 敏荘 | 東京大・原子核研究所 |
| 竹内 清 | 船舶技研原子力船部 |

○ 退会者 (1978.4.1.~12.15.)

| 氏名 | 所属 |
|-------|---------|
| 古田 敏郎 | 原子燃料工業 |
| 近藤 達夫 | 三菱原子力工業 |
| 恩地 健雄 | 電力中央研究所 |
| 文塚 剛宏 | 電源開発 |

編集後記

北大で担当する2冊目の「炉物理の研究」をお届け致します。本号は炉中性子工学研究専門委員会が1回しか開かれませんでしたので、多くの方に寄稿をお願い致しましたところ皆沢山の原稿を寄っていただき即座で読みがりのあき号になりました。寄稿者に深く感謝致します。BNLの高橋博代には、加速器による燃料再生について、米国の研究現状や裏話などをお願い致しました。高橋氏は原研の研究室長、東工大教授を経て現在BNLで活躍中です。同じく米国の状況ですが、ロチェスター大学で、慣性閉じ込め核融合の中性子計測を担当して、先般帰国した原研の向山武彦氏にも、興味ある報告をいただきました。先号で日本に新しく設置された中性子源について特集しましたが、本号では中性子源の利用に重きを置いて、北大の井上和彦氏、東北大・渡辺昇氏、阪大・住田健二氏に書いていただきました。KUCAの実験の状況、高速実験炉「常陽」の最近の様子も皆様に伝えてできると思われます。新しい炉物理手続の応用として「重水濃度測定」と「医学利用」も動燃の和田延夫氏と京大炉の神田啓治氏の寄稿があります。

東大の若林宏明氏が米国アルバカーキにあるニューメキシコ大学の客員教授として1年に立ちました。2年の予定と聞いていますので中間報告というふうなものをお願いしました。ロマンチックな先生の人柄がよくでていいると思えます。さらに本号は先般の神戸商船大での連絡会総会で、会員と院生にひろげるに、本連絡会誌と面配、たらどうかという案ができました。それでさっそく本号とその目的に使うことにして、そのような内容のものも、もり込んでみました。一つは本年好評であった炉物理夏の学校のテーマ勉強の中で、これはと思われるものを1口で説明して欲しいと講師の先生方にお頼して書いてもらいました。夏の学校メモです。もう一つは全国の院生が参加するKUCAの大学院実験を中心に、大学での原子炉学生実験の現状といたるものを、東大炉と近大炉の協力を得て書いてみました。近大炉も他大学の学部学生に開放したという計画もあり、学生に限らず読んでいただくと有難いと思えます。その他、研究室により、炉中性子工学委員会の報告は恒例の通りです。

来年は本連絡会の当番校は振り出しへ戻って、京大炉の担当になります。最後に今年の夏の学校のリフレクションの号を1枚載せたり、オフセットでどの程度でるかわかりませんが変化しただけに注目して下さい。(北大工 成田正邦記)

(追記) 会員各位には、古橋晃氏の寄附金と解意義に使うためのアンケートがはさまっています。多数の方の意見をぜひお寄せ下さい。



「炉物理連絡会」会員名簿 (◎は幹事) (1978年12月15日現在)

| | | | | |
|--------|---------|---------|---------|--------|
| (北大・工) | (東海大・工) | 木村 逸郎 | 桂木 学 | 吉川 栄和 |
| 秋本 正 | 石田 正次 | 小林 捷平 | 金子 義彦 | (原子力安全 |
| ◎井上 和彦 | 黒田 義輝 | 小林 圭二 | 菊池 康之 | 委員会) |
| 大友 詔雄 | 阪元 重康 | 古林 徹 | 五藤 博 | 吹田 徳雄 |
| 小川 雄一 | 砂子 克彦 | 佐藤 孝司 | 後藤 頼男 | (原子力局) |
| 小沢 保知 | 永瀬慎一郎 | 柴田 俊一 | 小林 岩夫 | 天野 文雄 |
| ◎斎藤 慶一 | 中土井昭三 | 代谷 誠治 | 近藤 育朗 | (原船団) |
| ◎成田 正邦 | (都立大・理) | 中込 良広 | 杉 暉夫 | 板垣 正文 |
| 松本 高明 | 久世 寛信 | 林 脩平 | 関 泰 | (船舶技研) |
| (弘前大) | (武蔵工大) | 林 正俊 | 田次 邑吉 | 伊従 功 |
| 葛西 峯夫 | 相沢 乙彦 | 藤田 薫顕 | 中川 正幸 | 竹内 清 |
| (東北大) | (早大・理工) | 山田 修作 | 中田 宏勝 | 布施 卓嘉 |
| 木村 一治 | 並木美喜雄 | 米田 憲司 | 中野 正文 | (電総研) |
| 梶山 一典 | (名大・工) | (阪大・工) | 中原 康明 | 工藤 勝久 |
| ◎平川 直弘 | 加藤 敏郎 | 住田 健二 | 能沢 正雄 | 清水 定明 |
| 本多 毅 | 玉河 元 | 関谷 全 | 平岡 徹 | (防衛庁) |
| 百田 光雄 | ◎仁科浩二郎 | 高橋 亮人 | 弘田 実弥 | 佐久間雄平 |
| (東大) | 山根 義宏 | 錦織 毅夫 | 古田 悠 | (原電) |
| 秋山 雅胤 | (岐阜大) | (大阪市立大) | 前川 洋 | 武田 充司 |
| 安 成弘 | 岸田 邦治 | 鷓飼 正二 | 松浦祥次郎 | 立花 昭 |
| 清瀬 量平 | (京大・工) | (近大) | 向山 武彦 | 西川 元之 |
| 小佐古敏荘 | 小林 啓祐 | 堀部 治 | 安野 武彦 | (電源開発) |
| 近藤 駿介 | 秦 和夫 | 三木 良太 | (動燃事業団) | 大塚益比古 |
| 坂田 薫 | 西原 英晃 | 水本 良彦 | 飯島 一敬 | 平田 昭 |
| 関口 晃 | 西原 宏 | (神戸商船大) | 大谷 暢夫 | (東電) |
| 中沢 正治 | 兵藤 和典 | 中島 雅 | 大山 彰 | 北野 昭彦 |
| 都甲 泰正 | 堀江淳之助 | (九大・工) | 三田 敏男 | (中部電) |
| 森 洋介 | 森島 信弘 | 大沢 孝明 | 瑞慶覧 篤 | 金井 英次 |
| 若林 宏明 | (京大・原研) | 大田 正男 | 中村 邦彦 | (NAIG) |
| (東工大) | 星野 力 | 片瀬 彬 | 野本 昭二 | 青木 克忠 |
| 井頭 政之 | 若林 二郎 | 工藤 和彦 | ◎古橋 晃 | 飯島 俊吾 |
| 北沢日出男 | (京大炉) | (原研) | 宮脇 良夫 | 植田 精 |
| 関本 博 | 宇津呂雄彦 | 朝岡 卓見 | 村松 精 | 亀井 孝信 |
| 武田 栄一 | 海老沢 徹 | 石川 寛 | 望月 恵一 | 黒沢 文夫 |
| 山室 信弘 | ◎神田 啓治 | 伊勢 武治 | 湯本 鏝三 | 小松 一郎 |

| | | | | |
|-------|----------|---------|---------|--------|
| 角山 茂章 | (MAPI) | (木村化工機) | (CRC) | (日立造船) |
| 野村 孜 | 片岡 巖 | 豊田 道則 | 角谷 浩享 | 小林 徹二 |
| 水田 宏 | 小林 隆俊 | (京大炉研G) | (GA) | 山田 毅 |
| 門田 一雄 | 渡海 親衛 | 石黒九州男 | 山岸留次郎 | (富士電機) |
| (日立) | (朝日船舶工業) | (呉羽化学) | (東芝) | 中村 久 |
| 大西 忠博 | 多田 茂夫 | 松井 一秋 | 深井 佑造 | (三井造船) |
| 金沢 信博 | (石川島播磨) | (原燃工) | (東洋エンジ) | 八谷 雅典 |
| 小林 節雄 | 倉重 哲雄 | 川本 忠男 | 木邨 祐二 | (三菱電機) |
| 駒田 正興 | (核管センタ) | (住友原子力) | (日揮) | 路次 安憲 |
| 斉藤 正之 | 宮坂 駿一 | 松延 広幸 | 上野 茂樹 | |
| 武田 征一 | (川崎重工) | (住友重機) | (JNF) | |
| 松岡 謙一 | 田中 義久 | 三井 靱 | 清水 康一 | |
| 三木 一克 | 田中 良侖 | | | |

(計179名)

炉物理連絡会の概要

(1968年4月)

1. 趣意 原子力研究の最近の進歩は誠に目ざましいものがあり、本学会の責任もますます大きくなってきた。また、とくに原子力研究においては、諸外国との交流がきわめて重要なものとなってきた。このような情勢に対処するためには、まず、国内における研究者間の十分な情報交換や連絡・調整が大切である。この点については、従来わが国の原子力研究体制の進展があまりに急であったため、必ずしも適当な現状にあるとはいえない。かねて炉物理関係研究者の間において、約2年前より4回にわたる“炉物理研究国内体制のインフォーマルミーティング”を初め、いろいろの機会をとらえて、意見の交換が重ねられた結果、本学会内に常置的な組織を設け、その活動を通じてこれらの問題を解決して行くべきであるという方針により、この連絡会が設置された。

2. 事業 国内における炉物理研究者間の相互連絡、調整の役割りを果たすため、年間約6回連絡会報として、『炉物理』（B5判オフセット印刷20～30頁）を編集刊行する。『炉物理』はオリジナルペーパーの前段階としての報告・発表・検出器・試験装置など研究に関する情報交換、研究を進める上で必要な各種の意見発表および討論等を活発に行う

ためのもので、さらに、関連するニュースをも含ませ、また諸外国からのインフォメーションも伝わるように努める。また、春秋に総会を開催し、討論会・夏の学校なども計画して、学会行事として実施する。

3. 対象 対象とする専門分野の範囲は、つぎのとおり。

- ① 原子力の基礎としての核物理
- ② “ ” 中性子物理
- ③ 原子炉理論
- ④ “ ” 実験
- ⑤ “ ” 核計算 (Burnup Physics を含む)
- ⑥ “ ” 動特性
- ⑦ 原子炉遮蔽
- ⑧ 関連する計測
- ⑨ その他の関連分野

(たとえば、エネルギー変換の基礎反応)

4. 運営 理事1名のほか、企画・編集両委員より各2～3名および加入会員より選出した幹事若干名により運営する。

5. 連絡会員 本連絡会に加入する本会会員は、氏名・専門分野・所属・連絡先を明記して書面で事務局へ申込み、連絡会費を前金で納付する。なお、前金切れと同時に失格する。