

# 炉物理の研究

(第 15 号)

1973年8月

巻頭言	小沢保知	(1)
<b>特集 I 「冷中性子」</b>		
1. 冷中性子発生に関する炉物理のはなし	井上和彦	(2)
2. 冷中性子・超冷中性子の発生について	宇津呂雄彦	(11)
3. 冷中性子の利用	渡辺昇	(18)
<b>特集 II 「第1回トピカルミーティング高速炉物理」所感</b>		
安成弘, 桂木学, 百田光雄, 中島龍三		
柴田俊一, 関谷全, 深井佑造, 東原義治		
岩城利夫, 山室信弘, 古橋晃		
欧米炉物理委員会 (EACRP) 第16回会合の印象	弘田実弥	(32)
ゆらぎの相関の強さと coherence function について	森島信弘	(36)
<b>「炉中性子利用」研究専門委員会講演要旨</b>		
1. 核融合炉における“炉物理”	平岡徹	(41)
2. P型「弥生」計画について	若林宏明	(43)
3. 標準中性子場について	神田啓治	(44)
4. Flex Peaking について	林正俊	(47)
<b>〈在外だより〉</b>		
1. 強中性子源をめぐる最近の動向	木村一治	(49)
2. Oak Ridge だより	玉河元	(52)
3. AB Atomenergi だより	中村尚司	(54)
次回の「炉中性子利用」研究専門委員会の予定		(21)
◇編集後記◇		(61)
炉物理連絡会「会員名簿」		(62)

日本原子力学会  
炉物理連絡会



# 炉物理 研究領域の拡大繁榮を期待する

*Expectation for prolific expansion in the fields of Reactor physics.*

小澤 保知 (北電工)

昨今炉物理でやる事がなくなつたといふ声を要々聞くが、電子及び光子の歴史に比べ、遙かに短い幼年の時期しか経過してはいない中性子に、そんな悲觀的な批評をする事は全く当らない事であり、それは我々自身の夢と意欲の貧困を現わしてゐるに過ぎない。最も成し尽されたとしている Maxwell の電磁場の解析にしても境界値問題としての地味な研究は恒常的に続けられて居り、最近時空問題としての解析に可成りの努力が行なわれてゐる。更に鑑み、幼年期の炉物理はオバオバ水水したを失う苦がないのであつて、一つ手前味噌の事を申させて頂くに核分裂型の炉物理でも高速系に於ける連続複素モードの物理的重要性について、プラズマ物理との関連に於て、私は大変興味を持ち続けて居ります。又 *Linac* の利用の普及に伴い冷中性子の挙動就中物性物理への寄与、将来型の原子炉に対する炉物理、更には *flux peaking*、高速中性子減速、中性子の標準場、医療用等の研究炉の利用技術に伴う炉物理等何時迄にても種切れは考えられませんが、然し臨界性を強調した炉物理としての役割は計算コードも漸く整備の段階にある事等の裏から *Littler* の編集に於ける漸く7才に於いた *Journal of Nuclear Energy* が、明年度から *Howe, Williams* によつて *Annals of Nuclear Science and Engineering* に取替へをし、内容も核燃料及びその *cycle* 及び *cost*, *material processing*, *fission* 及び *fusion* を含めた全系及び要素系の技術的問題、開発、設計及び最適化、核エネルギーの直接変換、核エネルギーの複合型の利用法、立地、安全、環境制御、エネルギー発生利用の総合的 *cost* 等核エネルギーに大なる視点を置き *quality of life* に寄与する如く科学技術、経済、公害防除、公衆の安全、等に関連して総合された型の原子炉の開発に関して寄与する如く意図して編集される趣きであるが、誠に同感であつて、此等の諸問題の大部分に対して、その基本的原則を確立する為には炉物理関係者の寄与が大いに期待される次第であり、事実最も有力な荷い手になり得る事を確信致して居る次第であります。ANS の本年の年会にも *fission-fusion engineer* が原子力工業界に著く浸透して行く可き事が強調されて居る次第であり、我々炉物理関係者にも柔軟性ある研究態度が希まれる次第であります。



# 冷中性子発生に関する炉物理のはなし

北海道大学工学部 井上和考

## § 1. はじめに

冷中性子は原子炉のような実用目的には役立つが、基礎的な研究分野において冷中性子なしではできない多くの研究を可能とし、将来にわたって大きな利益をもたらすものと考えられている。そのためには、冷中性子を多量に発生させることが必要である。高中性子束炉あるいはパルス炉の必要性が強調され、その目的のなかに冷中性子を多量に得ることが挙げられているのはこのためである。

我々炉物理屋にとって、冷中性子はもともとなじみの薄いものである。Bragg切断を有する媒質中の中性子時間減衰や中性子波伝播などに時折り顔を出すのを眺めているに過ぎなかった。冷中性子は原子炉中性子としては主流派ではなく、原子炉の動作に殆んど影響しないのであるから、炉物理屋から相手にされなかったのは無理もないことである。また大分以前から、国外の多くの研究炉では多結晶フィルターとチョッパーを組み合わせたいわゆる *cold neutron facility* が活用されているが、国内の原子炉にはこの型の装置はなしこれは理解に苦しむ現象であるが、我が国の炉物理屋の関心を冷中性子発生の問題にあまり向けなかったもう一つの原因であろう。

原子炉スペクトルの低エネルギー側の裾には、わずかであるが冷中性子が含まれている前記の *cold neutron facility* ではこのわずかな冷中性子を用いるわけであるが、強度が弱いので制約が多い。そこで外国ではかなり以前から、冷減速材によって冷中性子を増加させる研究が行われてきた。二三の研究炉に冷減速材による冷中性子源設備が設置されているが、典型的なものから脱しきれず、どうもまだ満足な状態とはいえない。冷減速材内の中性子の冷却過程は中性子輸送過程であるから、炉物理的観測からのアプローチが強大になされてしかなるべきであったが、この問題を正面から取り上げた炉物理的な仕事はほとんどなかった。

最近では、冷中性子の重要性の認識のたかまりを反映して、冷中性子発生に関する炉物理の仕事がぼっぼっ現れ始めている。冷中性子を多量に発生させたり、あるいはパルス状に発生する冷中性子に所要の時間特性を附与したりするたじいの問題の解決には、中性子輸送や中性子断面積の知識がどうしても必要である。それは広い相場ではないが、これまで進歩発展してきた炉物理の手法の恰好の応用の場である。この小文では、冷減速材による冷中性子発生について最近までの状況を炉物理的観測から概観して、炉物理研究者に冷中性子発生に対する関心を呼び起こす一助としたい。

## § 2. 冷中性子の定義とその用途

通常  $0.005\text{eV}$  以下の低エネルギー中性子を冷中性子と呼ぶ。温度でいうと  $58^\circ\text{K}$  以下の冷たい中性子, de Broglie 波長でいうと  $4\text{ \AA}$  以上の長波長中性子である。この境界の  $0.005\text{eV}$  という値はベリリウムの Bragg 切断エネルギーに関連している。さらにエネルギーが低くなると, 約  $0.0001\text{eV}$  以下のものは超冷中性子 (Ultra-cold neutron) と呼ばれる。超冷中性子も利用価値があり, 面白いものであるが, 本文では冷中性子に話を限ることにする。

大方は御存知だと思うが, 中性子非弾性散乱に関連した IAEA の *proceeding* が何冊もある。これをぱらぱらとめくると前述の *cold neutron facility* を使用した研究が極めて多いことにすぐ気がつく。また, Boutine と Yip の中性子を用いる分子分光のテキストに極めて多くの実験データが引用されているが<sup>1)</sup>, その実験の大半がやはり *cold neutron facility* を使用している。

ベリリウムフィルターとチョッパーを組み合わせた *cold neutron facility* では<sup>2)</sup>, 原子炉スペクトル内に含まれているわずかの冷中性子をフィルターで分離して取り出すわけであるから, 最初の冷中性子が減少こそすれ, 増加することはない, 収率が少ない。貧弱な冷中性子ビームしか得られず, またエネルギー分解能が劣ってくるにもかかわらず, 多くの重要な研究が行なわれ, 冷中性子の重要性が認識されている。冷中性子は種々の分野の研究, たとえばホノンの分散関係, 振動数分布, 分子回転, 液体内の拡散, 液体ヘリウムのホノン・ロトン, あるいは磁性体の研究などによって有効な道具となり, さらにその利用が拓がろうとしている。強い冷中性子源が望まれる所以である。

## § 3. 発生の方法とこれまでの経緯

熱中性子の発生には減速材が不可欠である。これ以外の熱中性子発生の方法は今までには発見されていない。この事実から類推して, おそらく多量な冷中性子発生には冷減速材が不可欠であろう<sup>註)</sup>。したがって問題は, 速中性子を効果的に冷中性子に変換する冷減速材を選び出し, 適切に使用方法を見つけ出すことである。速中性子源が定状的かパル

註) 冷中性子発生については, 留意しておくべきことがある。Bragg 反射による後方散乱と Doppler 効果を組み合わせて, 入射中性子よりはるかに低エネルギーの中性子を発生させることができる。中性子減速熱化が他力本願の玉つきであるのに比べて, 人工的な運動物体で中性子の運動量を吸収する。あるいは, 中性子鏡や中性子導管によって冷中性子をかき集める方法などもある。これらの方法を用いる場合でも, あらかじめ冷中性子を多量に発生させておくことが望ましい。

す的か、すなわち原子炉を使うか加速器を使うかで、若干事情が異なってくる。

冷減速材による冷中性子発生を試みはやくから行なわれている。Butterworth 等は<sup>3)</sup> 1956年に原子炉内に設置する冷中性子源を試みた(BEPO炉)。その後、類似の装置が DIDO 炉<sup>4)</sup>、Mos の BR1 炉、Saclay の EL3 炉、Helsinki の FIR1 炉などに設置された<sup>5,6)</sup>。これら初期のものからおよそ10年経て、進んだ型式のものが高出力研究炉のために計画・設置されている。Jülich の FRJ-2 炉のもの<sup>7)</sup>、Grenoble の French-German 高中性子束炉のための予備実験の装置である<sup>8)</sup>。これらの冷中性子源では、いずれも反射体内に液体水素あるいは重水素の極低温チェンバーを置いて、反射体内熱中性子を冷却して、実験孔から引き出す。

他方、加速器をパルス状中性子源とした冷中性子発生も試みられた。1947年にサイクロトロンを用いて、パラフィンも液体窒素で冷却し、冷中性子を発生させて、これによって水素の中性子断面積を測っている<sup>9)</sup>。その後、1960年に GA の LINAC で極低温の水素、メタン、氷について冷中性子スペクトルの TOF 測定が行なわれた<sup>10)</sup>。京大と北大の LINAC では、液相から固相にわたって、メタン、氷、エタン内の冷中性子スペクトルの TOF 測定により、冷中性子利得が調べられた<sup>11,12)</sup>。また、Kurchatov の LINAC では氷(273°K)について<sup>13)</sup> 阪大と北大ではメタン、水素、氷について時間減衰の測定がなされた<sup>14,15)</sup>。これらは、最新のサイクロトロンの例を除いて、全てパルス状冷中性子源に関連した予備実験に上まっている。

冷減速材の炉物理実験を行なうためには、数立の容積の媒質を極低温まで冷却する必要がある。以前では、このような大量な試料の冷却の低温技術はかなり特殊なものであったが、最近ではかなり大量でも数K程度までの冷却ならば、かなりポピュラーになっている。<sup>註)</sup>

#### § 4. 冷減速材

熱中性子用の減速材としては、大きな減速能と小さな吸収が、よい減速材の条件であった。熱中性子は減速材内でほぼ熱平衡に達すると見做すことができた。中性子が熱平衡に達するのならば、図1に示すように、減速材温度を下げれば下げる程冷中性子は多くなる。ところが、極低温附近まで温度を下げると、中性子はたやすくは熱平衡に達してくれなくなる。

冷減速材でも、大きな減速能と小さな吸収は勿論必要条件であるが、これに加えて、ごく低エネルギーの分子運動が独立な運動モードとして存在することが重要な条件となる。

註) クーラントを使用して冷却することもできるが、温度に制限があり、かえってやりにくい。最近では、10°K で数W程度の容量の小型冷凍機が比較的容易に入手できるが、この種の冷凍機を使用すれば、簡単に15°K程度までの炉物理実験を行なうことができる。

黒鉛やベリリウムのような Debye 温度が高い単原子結晶は冷減速材として期待できない。

冷減速材は、低エネルギー中性子から小さなエネルギーを効果的に奪わねばならない。冷減速材になり得る素質を備えた物質は、水素（または重水素）および含水素化合物である。具体例について考えを進めた方がわかり易い。例えば、軽水を極低温まで冷すとどうなるか。軽水分子の運動は、水分子が一体となった併進、分子のねじれ振動あるいは束縛回転、および分子内振動にわけて考えることができる。

水になると、併進が格子振動に転化する。軽水減速材の熱中性子スペクトル形成の主役の運動モードは併進であった。束縛回転と分子内振動は固有エネルギーが大きいから、減速には寄与するが、熱中性子スペクトル形成の主役ではなかった。温度が下がっても、束縛回転と分子内振動はあまり変化しない。したがって、低温水の中性子冷却の主な機構は併進すなわち格子振動にならざるを得ない。

極低温になると、格子振動は殆んどすべてが基底状態になり、down-scatteringしか起こらなくなるが、低エネルギー中性子に対する格子振動の down-scattering の確率は小さい。他方、中性子エネルギーの低下とともに吸収断面積が増大する。このために、詳細釣合が作用して熱平衡が達成される前に、減速と吸収の競合が起こってしまう。結局、中性子スペクトルは 0.005eV 附近にピークを有するスペクトルとなり、それ以上はいくら温度を下げても中性子はもはや冷却しなくなって、中性子冷却の限界が現れる（図2参照）。

分子が束縛状態にある場合に、温度が低下して分子の独立な運動モードのなかで最小の固有エネルギーを有するモードの状態が殆んど基底状態に落ち込んでしまえば、それよりいくら温度を下げても中性子はもはや冷却しない。大部分の水素化合物は極低温で固体であるから、この原則が適用される。良い冷減速材の条件は、独立な運動モードの固有エネルギーが充分小さい事である。そのモードが格子振動である場合には Debye 温度で考えればよい。図3にメタン、氷、エタン内の冷中性子温度の媒質温度による変化を示す。それぞれ運動モードの特性に応じた冷却の限界が現れているのがわかる。

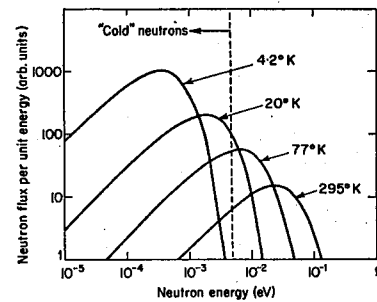


図1. 低温における理想的 Maxwell 分布

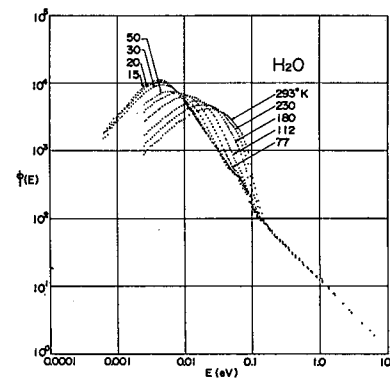


図2. 軽水水内の中性子スペクトル

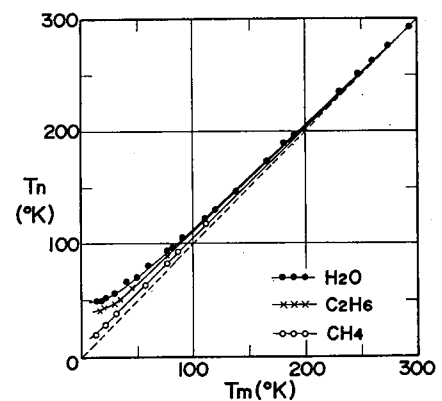


図3. メタン、氷、エタン内の冷中性子温度

極低温において、液体である物質には上記の原則はそのままには適用されない。液体水素がその例である<sup>註</sup>。液体水素の分子回転定数 $B$ はかなり大きく、 $B=0.007\text{eV}$ であるから、回転の第1励起準位のエネルギーは $E(J=1)=0.014\text{eV}$ である。したがって、この準位のBohr因子は非常に小さい。と言うことは、熱平衡にある液体水素は殆んど $J=0$ の基底状態すなわち $J=0$ のパラ水素であるということになる(図4参照)。したがって $E < 0.014\text{eV}$ の低エネルギー中中性子は回転を励起できないから、回転遷移は中性子冷却に殆んど寄与しないことがわかる。さらに、分子内振動の固有エネルギーは、 $0.546\text{eV}$ とかなり大きいから、当然これも中性子冷却には役立つ。結局、液体水素では併進が中性子冷却の主役である。

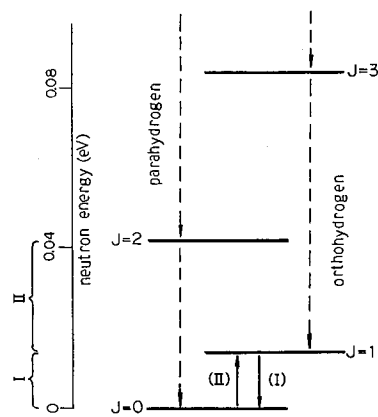


図4. 中性子の衝突による水素分子回転準位の遷移。(I)は $E \geq E_I$ の中中性子のup-scatteringに、(II)は $E \geq E_{II}$ の中中性子のdown-scatteringによる遷移。---→は即時に起こる熱的遷移を表わす。

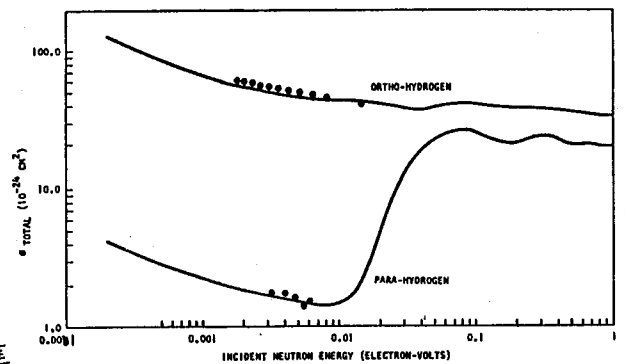


図5. 液体水素の中中性子全断面積

ところが、ここに一つ問題がある。図5に示すように、パラ水素( $J=偶$ 状態)とオルソ水素( $J=奇$ 状態)では低エネルギー中中性子断面積の大きさが2桁近く違って、パラ水素の散乱断面積は著しく小さい。上述のように、熱平衡状態にある液体水素は殆んどパラ水素であるから、結局熱平衡にある液体水素の $E < 0.01\text{eV}$ の低エネルギー中中性子散乱断面積は2~3バーン程度になる。そうなると、折角併進モードで中性子冷却を行なおうとしても、著しく効率が悪く、中性子冷却の目的に沿わない。

ところが、良く知られているように $J$ が偶と奇の間の熱的遷移の緩和時間は非常に長く、数10時間に達する。したがって、常温の水素を急速に冷却すれば、約4分の3オルソ水素を含む非平衡状態の液体水素が得られ、高いオルソ水素濃度をかなり長時間保つことができる。したがって、オルソ水素の散乱断面積は大きいから、オルソ水素分子の併進モード

註 液体重水素もその例に含まれる。液体ヘリウムは断面積は小さ過ぎる。

によって中性子を冷却することができる。液体水素が一応冷減速材として使える理由には、このような事情が存在しているのである。前述のJülichの冷中性子源では、液体水素を循環して常にオルソ濃度を高く保つような工夫がなされている。

液体水素の中性子断面積の特殊性は、このように中性子冷却に役立つだけでなく、熱的遷移の特殊性によってオルソ水素が一応中性子冷却に役立っているわけである。極低温では、分子の運動モードや散乱のスピン相関などの特性が顕著になり、散乱断面積にいろいろな性質が出てくる。それらのものの中から、中性子冷却に役立つものを捜して利用するのも面白い問題であろう。筆者らは現在、液体水素の特性を逆用して、パラ水素を利用する事を試みている。

次に、メタンはおそらく炭化水素のなかで、冷減速材に最も適したものであろう。メタンの固化点は $91^{\circ}\text{K}$ で、かなり高い。それにもかかわらず、冷減速材として極めて優れている(図3, 図6参照)。メタン分子は完全な球形コマ分子であり、回転定数が $0.0006\text{eV}$ と小さく、固相においても回転に対する束縛が弱い。この事は、前記の冷減速材としての条件にかなっており、図3または図6に示すように冷中性子温度は $10^{\circ}\text{K} \sim 15^{\circ}\text{K}$ 程度まで下がり、冷中性子利得も高い。ただし、メタンは極低温では固相であるから、原子炉内の冷減速材としては、 $\gamma$ 線および核加熱の点で向かないであろう。加速器用として、スペクトルの安定性と、使用法の容易さから極めて適していると考えられる。

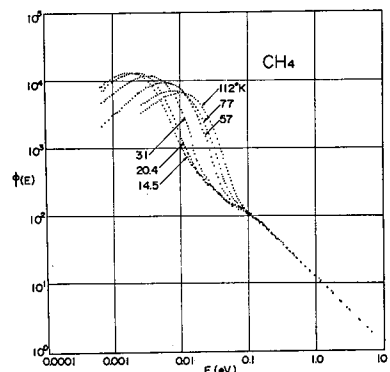


図6. 低温メタン内の中性子スペクトル

冷却の限界の現象の説明に関しては、井上<sup>(6)</sup>および宇津呂<sup>(7)</sup>の仕事がある。しかし今後さらに、液体水素や固体メタン、あるいはその他の含水素物質のみならず、極低温水についてすらも、極低温における分子の運動モードに関する情報を集め、モデルを作り、冷中性子断面積を計算して、炉物理的にさらに詳細な検討を断る必要がある。

## §5. 冷中性子利得

冷減速材による冷中性子の増加は冷中性子利得で表わされる。利得の定義は原子炉の場合と加速器の場合では同一にできない。原子炉の場合には、反射体内に冷減速材を置くので、冷減速材の有無についてそれぞれの冷中性子ビームの強度比をもって利得を定義するのが普通である。加速器ではこの定義を用いることができない。冷減速材が速中性子から熱中性子までの減速材をかかっている

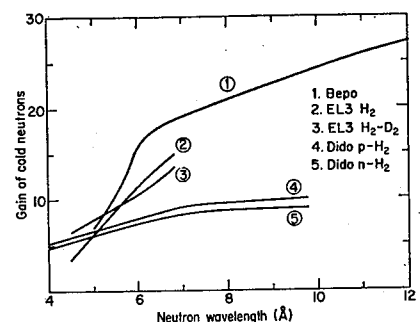


図7. BEPO, EL3, DIDOの冷中性子利得



るからである。井上等は、冷減速材ケエンバーを常温軽水で置換した場合の冷中性子ビームの強度比をもって利得を定義している。

図7に、BEPO, EL3, DIDO の冷中性子源で測った利得を示す<sup>4)</sup>。図8は、Grenobleの液体重水素を使った場合の利得である<sup>8)</sup>。以上は原子炉の例であるが、加速器の場合については、北大で種々の減速材について利得が測られている<sup>12)</sup>。いずれも、中性子波長に依存するが、数倍ないし数10倍に達する利得が得られている。

冷中性子源の優劣の判定を行なうためには、利得の数値だけでは不十分で、冷中性子ビーム強度の絶対値も重要な因子である。ビーム強度の絶対値は、原子炉の出力、構造、冷中性子源ケエンバーの位置、ビームの引き出し距離、引き出しの向きなど色々な因子の影響を受ける。

したがって、その評価も簡単ではなく、炉物理的なモックアップ実験あるいはSn法などによる複雑な炉物理計算が必要になる。

冷中性子利得の問題は、熱中中性子のフラックスピーキングと似た面があるが、冷中中性子の場合には冷却技術と空間的な制約、極低温における中性子断面積と中性子輸送のからみ合いが問題をさらに複雑にする。これまで、非常に進歩している原子炉計算の手法がここで大いに役立つはずである。

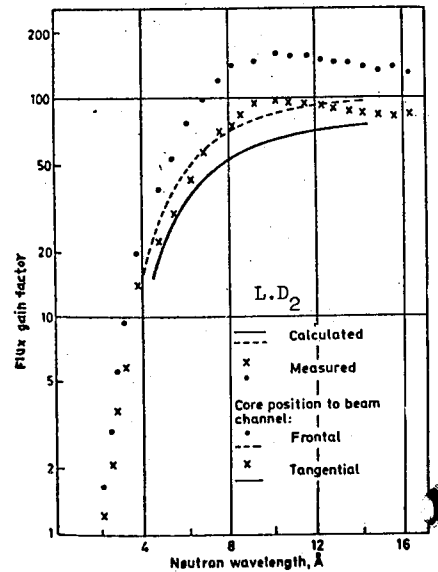


図8. 液体重水素の冷中性子利得

## § 6. 時間特性

原子炉に設置する定常的な冷中性子源では、とにかく利得をあるいはビーム強度をできるだけ大きくすることが先決要務である。時間特性は全く問題にならない。加速器のパルス状冷中性子源では、時間特性が利得と並んで重要になる。冷中性子パルスのパルス中が中性子エネルギー分析の分解能をほとんど支配するからである。定性的には、冷中性子ビーム強度の向上と短パルス化は相反する条件である。

パルス状冷中性子源では、含軽水素物質が冷減速材に用いられるから、約0.1eVまでの中性子減速は、化学結合の詳細にあまり依存しない。このエネルギー附近までの減速時間に $10^6$ 秒のオーダーである。このあと、冷減速材によって冷却して冷中性子密度が急速に立ち上がり、ひきつづいて吸収と漏洩によって比較的ゆるやかに減衰する。このパルス中はおよそ数 $10\mu\text{s}$ から $200\mu\text{s}$ に及ぶ。表面に現れるパルス特性は、このように熱中中性子の場合とあまり大差がない。

冷中中性子を使う散乱実験の飛行距離から考えて、パルス中あるいは平均放出時間を数 $1\mu\text{s}$ 以下に押える必要がある。パルス中を狭くするには、吸収体の添加あるいは冷減速材

レンブリーの縮小による漏洩の増大などを行なえばよいが、同時にビーム強度がたちまち  
 文分の1に落ちてしまう。この相反する条件の両立をはかり、許容し得るパルス中でビー  
 ム強度を最大にする方法あるいは条件を捜さねばならない。

通常の中性子パルス時間減衰の方法で、冷減速材  
 内の冷中性子パルスの減衰を阪大<sup>(14)</sup>と北大<sup>(15)</sup>で測定  
 して、減衰定数の温度による変化を調べている。これは冷中中性子の積分的なパルス減衰であるが、単色  
 パルスの減衰をKurchatorvのLINACで単結晶・TOF法  
 を用いて77°K氷について実験を行なっている<sup>(13)</sup>。図  
 8にその測定結果の一部を示す。また、井上等もLi-  
 7を用いて、極低温のメタンと氷について単色パ  
 ルス減衰の測定を行なっている。

冷減速材の分子運動あるいは冷中中性子断面積の性  
 質が、この問題を左右する。軽水氷については Rei-  
 chardt<sup>(12)</sup>や Tewariと Kothari<sup>(19)</sup>の解析などがあるが  
 冷減速材全般にわたっては、まだ殆んど何もわかっ  
 ていないのが実状である。冷中中性子エネルギー領域  
 における極低温物質の中性子断面積には熱中性子断面積とちがって、かなり特殊な振舞い  
 を示すものがあるから、その利用を考えて見るのも興味のある問題である。

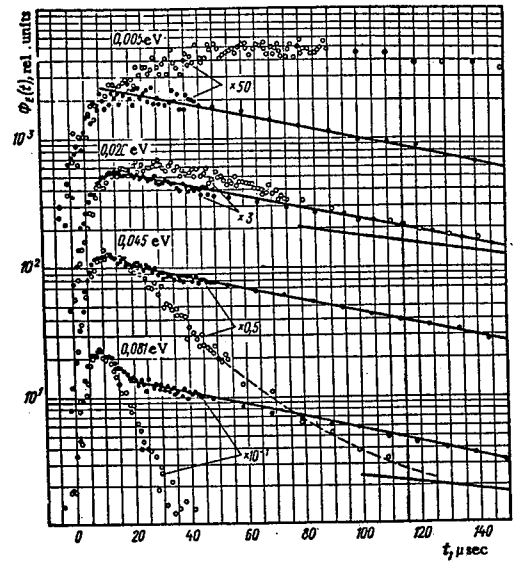


図9. 単色パルス時間減衰の例

## § 7. むすび

以上に紹介したように、冷中中性子の重要性がはやくから認識され、冷中中性子発生はかな  
 り以前から試みられていたにもかかわらず、冷減速材による冷中中性子発生の問題を炉物理  
 立場から正攻法でアプローチした研究は極めて少ない。特に、原子炉内の冷中中性子源に  
 関しては、とにかく冷減速材を炉内に持ち込んで見たという程度の初歩的段階に止まっ  
 ている。その理由としては、以前は冷却技術の克服が最大の関心事であり、また冷却技術の  
 莫で炉物理研究者が親しみにくかったことが挙げられる。ごく最近になって事情は全く変  
 り、だれでも数°Kまでなら極低温を気軽に使えるようになった。また、加速器による冷中  
 性子源の方も予備的研究段階に止まっておき、系統的アプローチは始まったばかりである。  
 今後、この旧くて新しいテーマ、冷減速材による冷中中性子発生の問題として冷減速材内の  
 冷中中性子輸送の研究に炉物理研究者が大いに貢献することを期待する。

## 参考文献

- 1) H. Boutin and S. Yip; *Molecular Spectroscopy With Neutrons*, The M.I.T. Press, (1968).
- 2) H. Palevsky; In "Inelastic Scattering of Neutrons in Solids and Liquids" p265 IAEA, Vienna (1961).
- 3) I. Butterworth et al.; *Phil. Mag.* 2, 217 (1957).
- 4) F. J. Webb; *Reactor Science and Technology* 17, 187 (1963).
- 5) B. Jacrot; *Pile Neutron Research in Physics* IAEA, 393 (1962).
- 6) E. Tunkelo; *Acta Polytechnica Scandinavica, Physics Including Nucleonics Series No.* (Helsinki, 1966).
- 7) C. Dooze et al.; *Cryogenics*, April 1971, 107.
- 8) P. Ageron et al.; *Cryogenics*, February 1969, 42.
- 9) R. B. Sutton et al.; *Phys. Rev.* 72, 1147 (1947).
- 10) A. W. McReynolds and W. L. Whitemore; In "Inelastic Scattering of Neutrons in Solids and Liquids" P.421. IAEA, Vienna (1962).
- 11) K. Inoue et al.; *J. Nucl. Sci. Tech.*, 9 [6], 347 (1972).
- 12) 井上, 他; 北大工研究報告, 印刷中
- 13) S. N. Ishmaev et al.; *Atomnaya Énergiya*, 32, 33 (1972).
- 14) 住田, 他; 日本原子力学会, 46年炉物理分科会A-20
- 15) 齊藤, 他; 日本原子力学会, 48年年会C-26
- 16) K. Inoue; *J. Nucl. Sci. Tech.*, 7, 580 (1970)
- 17) M. Uturo; to be published.
- 18) W. Reichardt; *Proc. Symp. Neutron Thermalization and Reactor Spectra*, SM96/15 (1967).
- 19) S. P. Tewari and L. S. Kothari. *Nucl. Sci. Eng.*, 39, 193 (1970).

# 冷中性子・超冷中性子の発生について

京大 焔

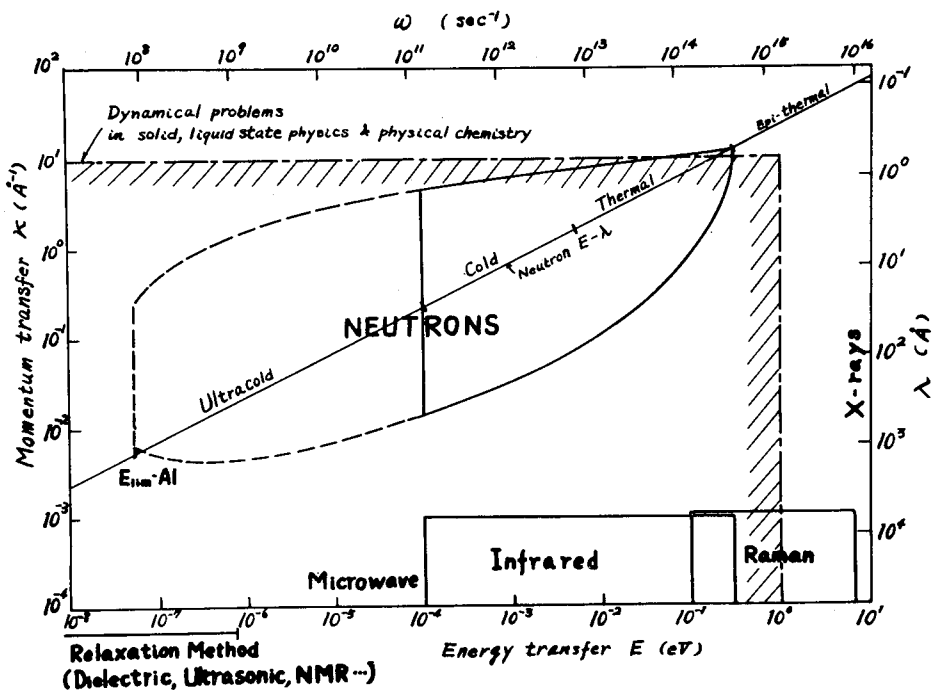
宇津呂 雄彦

1942年の最初の原子炉の成功によって強力な中性子源の利用が可能になって以来、中性子を用いて固体や液体等の物質の性質を調べる研究は年毎に盛んになってきている。その間、数多くの重要な理論的あるいは実験的な仕事が行われ、例えば1954年のVan Hoveによる時空相関に関する著名な論文<sup>(1)</sup>は、それまでX線や電子の散乱に対して用いられていたstaticな原子分布関数が、時間を含むように一般化され、複雑な系による中性子散乱<sup>(2)</sup>一般的に取扱えるようになった。一方実験的には、より精度の高い、あるいはより広範囲な領域におよぶ中性子散乱実験が計画されるようになり、このために中性子のエネルギー変化をより精密に測定することや、より低エネルギーの中性子を多量に発生することが要求されるようになってきた。

第1図は、横軸にエネルギー変化あるいは周波数、縦軸に運動量変化あるいは波長をとって、このような凝集体物理や物理化学の分野において特に興味ある領域と、種々の実験手法が効果的に行なえる領域とを合わせて示したものである。中性子の場合にはこれらの量は次式によりあらわされ、

$$\hbar\omega = E = E_f - E_i = \frac{\hbar^2}{2m} (k_f^2 - k_i^2), \quad \hbar k = \hbar(k_f - k_i)$$

低エネルギー中性子の特長は、そのエネルギーが原子分子の分野におけるエネルギー変化と同程度の大きさであるのみならず、その大きな質量のために、波長が凝集体の原子間距離と同程度であり、その運動量変化や空間構造を精密に求め得ること、またその散乱振中の値が、核種毎スピン状態毎に異なることなどにある。従って、第1図にも見られるごとく、中性子実験は凝集



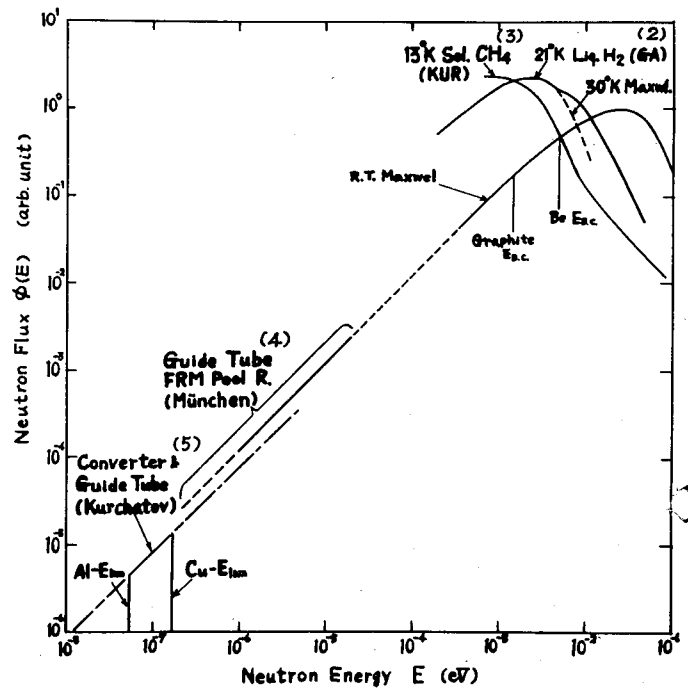
第1図 種々の実験手法により調べられる運動量およびエネルギー変化の領域

体物理の研究手法の中でも独自の領域を占めており、他の光学的手法や緩和法による結果を確かめるのみでなく、他の方法では知りえない知識をも与えてくれるものである。

第1図において、中性子実験により可能と考えられる領域はきわめて広い範囲を占めているが、これまでのような通常程度の精度の、しかも熱中性子を用いた物性実験では、エネルギー変化の比較的大きな現象、あるいは比較的短距離の構造が主として調べられてきた。しかるに、中性子が活用されるべき領域は第1図のごとく更に小さなエネルギー変化あるいは更に小さな運動量変化の領域にまで広がっており、このためより高精度のエネルギー測定あるいはより低エネルギーの中性子の多量発生により、これらの未開拓領域の研究を可能にしようという試みが活発になり出した。

そこで、以下において、これらの内より低エネルギーの中性子を発生しようという試みについて若干の例を見てみることにしたい。第2図には、それらの二、三の例が示されている。図からもわかるごとく、このような冷中性子・超冷中性子発生の考え方は、一応次の三通りに分けることができる。第1は、中性子の減速媒質を恒温に冷却することにより、その中の中性子の分布をより低エネルギー側に下げようという、減速冷却領域であり、

第2図では水素およびメタンによる冷中性子減速の結果が示されている。図からもわかるごとく、この方法は中性子エネルギーとしては  $10^{-2} \sim 10^{-4}$  eV の冷中性子領域において効果的である。第2は、原子炉等の強力な中性子源において発生している中性子の内の低エネルギー成分のみを、ゆるやかにわん曲した中性子導管内の多重反射により分離してとり出そうという、部分反射領域とも呼べるものであり、第2図のFRM炉の結果がその1例である。この方法によるエネルギー領域は、導管のわん曲度等によって色々異なるが、第2図の場合ではそのエネルギーは  $10^4 \sim 10^7$  eV の領域に広がっている。最後は、中性子エネルギー



第2図 冷中性子・超冷中性子発生の実験例

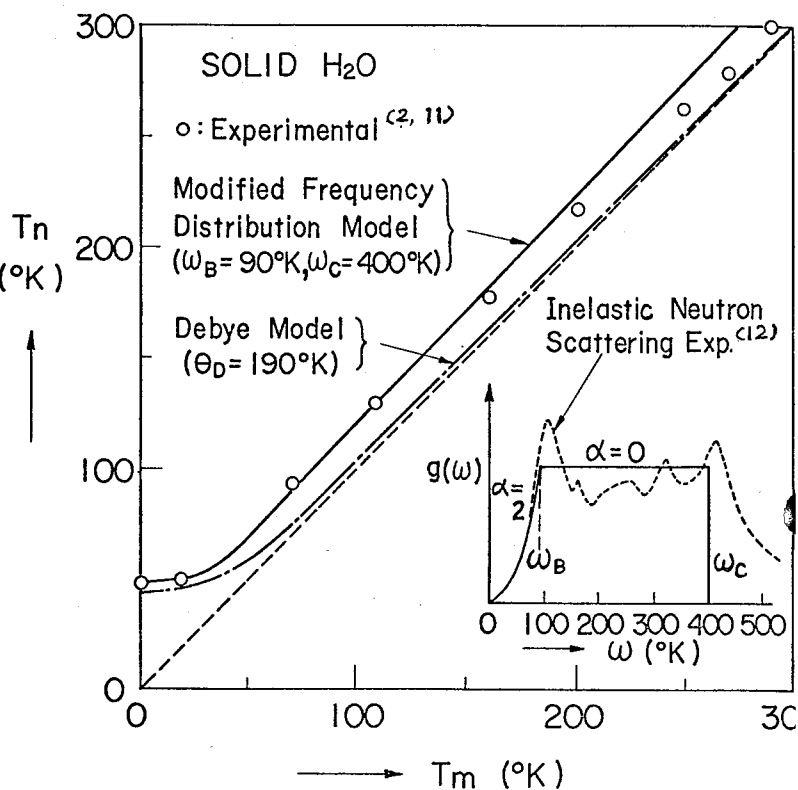
変換器により発生した超低エネルギー中性子を、それが平坦な表面の物質内部に入り得ないことを利用して、極端にわん曲した導管内を拡散させてとり出そうという、いわば全反射領域で、そのエネルギーは垂直入射に対する物質の臨界エネルギー  $E_{lim}$  により規制され、その値は図示したごとく一般に  $10^7 \sim 10^8$  eV 程度の超冷中性子となっている。

さて、まず中性子減速媒質を低温に冷却することにより、冷中性子を多量に発生することについては、1960年代の初めに一連の実験的試みが行なわれた。例えば、McReynoldsやWhittemoreが極低温の軽水、水素、メタン等についてライナックを用いて中性子のエネルギー・スペクトルを測定したり、<sup>(2,6)</sup> Van Dingenenが種々の低温減速材から得られる冷中性子強度を比較したりした。<sup>(7)</sup> これらの実験の結果、冷中性子強度は減速材を冷却することにより確かに数倍ないし数10倍に増えることがわかったが、それと同時に中性子は減速材の温度低下とともにどこまでも冷却されるものではなく、媒質を20°K程度以下にさげるのは必ずしも効果的でないことも明らかとなった。このように、低温減速材による冷中性子発生についていくつかの先駆的な仕事があったにもかかわらず、その結果が直接、前述のごとき凝集体物理を調べるための冷中性子源の作成に活用されるのは割合遅々としていた。

これにはいくつかの理由が考えられるであろうが、前述の実験等はまた限られた知識しか明らかにせず、実際に広範囲に冷減速材が使用されるためには、さらに具体的かつ詳細な研究が必要であったこと、また第1図に暗示された如き冷中性子領域の中性子散乱実験が最近になって本格的に計画されたことなどによるのではないかと考えられる。目下、このような冷減速材を実用化しようという試みや、低温減速材における冷中性子減速の現象を明らかにしようという研究が各所で活発に行なわれつつある。

低温減速材による冷中性子発生において最も関心のある問題は、冷中性子のエネルギー・スペクトルがどのような形になるか、またその中性子強度はどのような媒質が大きくなるかという点であろう。ところで、このようなスペクトルの形状や中性子強度という問題は、従来炉物理において、熱中性子スペクトルその他の分野において研究されてきた問題とよく似ており、従ってその研究手法としても、これまで熱中性子等に対して学んできたやり方が大きく役立つ場合が多いと考えられる。例えば、熱中性子散乱核模型にもとづき、観測される中性子スペクトルの歪みを説明する研究や、中性子パルス実験等におけるエネルギーモード・固有値の特徴を格子振動の振動数分布等の性質から明らかにする手法は、冷中性子減速の研究にも有力な手がかりを与えていると考えられる。しかし冷中性子の問題は、また熱中性子におけると非常に異なった状況をも含んでいる。それは、中性子のエネルギーが下がるにつれて吸収の割合が増大し、一方媒質の温度が下がり中性子エネルギーも下がると非弾性散乱の割合は極度に小さくなるということである。その結果として、中性子は非弾性散乱により媒質とエネルギー的平衡状態になる以前に吸収されて無くなる確率が増大し、そのスペクトルは平衡マックスウェル分布から大きくずれ、かた歪んだものとなる。このようなずれや歪みは当然、媒質の性質に大きく依存することとなり、従って冷中性子スペクトルと減速媒質の特質との関連を追求することは興味ある課題となってくる。例えば、格子振動による冷中性子減速の場合には、その振動数分布の形状が前述のずれの温度変化を支配する重要な要素となることが解析により示される。第3図は、筆者によるそのような解析結果の1例であり、<sup>(8)</sup> そこには熱中性子の分野で従来よく用いられた格子振動の振動数分布を簡単な形で近似する手法が用いられ、実験との間に毎度な一致が得られている。

多くの減速材は極低温において  
は固体であり、従って格子振動が  
中性子減速機構として重要な役割  
を演ずるが、分子性固体のなかには  
極低温においても分子回転もあ  
り、これが重要な減速機構とな  
るものがある。 というのは、もし  
分子回転が低温でも容易に起り  
得るようであれば、その冷中性子  
に対する非弾性散乱断面積は格子  
振動によるものよりも大きく割  
れ、かつそのエネルギーレベルが冷  
中性子と同程度の領域に分布して  
いることにちなためである。特  
に水素を含む分子においては、  
このような回転運動は重要な冷  
中性子減速機構となる可能性が  
ある。 第2図において示した

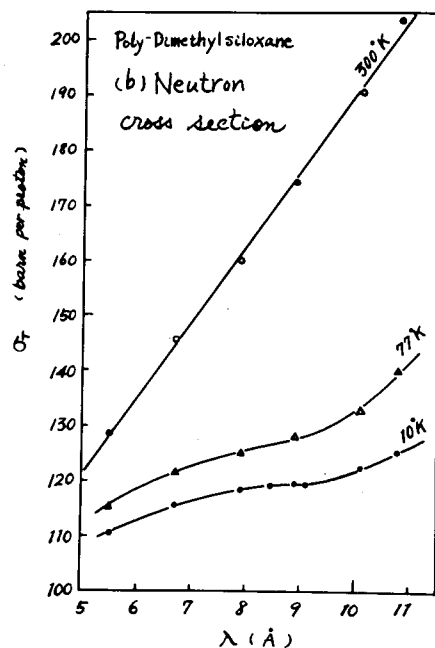
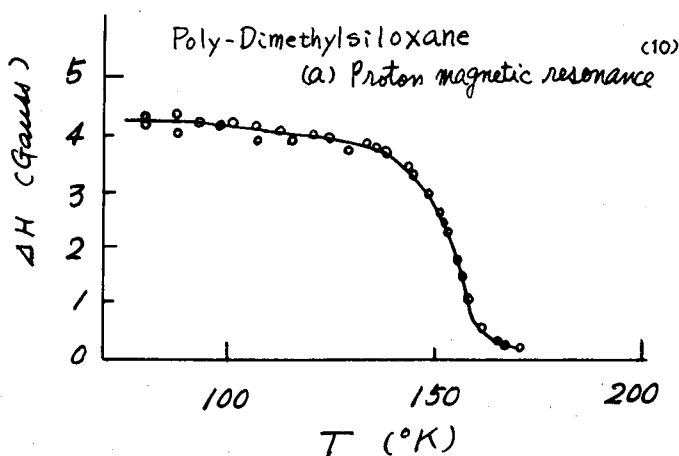


第3図 格子振動の振動数分布に関する二種のモデルに基づく実効  
中性子温度の理論値と軽水の実験結果との比較<sup>(8)</sup>

固体メタンでは 20°K 近くまで  
分子が自由に近い回転をしていると言われており、もし回転に対するものに弱い束縛  
が事実であれば、第2図のスペクトルの形成には回転モードが大きく寄与していると考  
えなければならぬ。 このような回転モードが寄与する冷中性子減速の研究においても、  
従来の熱中性子散乱や熱中性子スペクトルにおける経験は少なからず参考になる。 例之  
ば、分子回転による中性子散乱を近似計算するために Krieger-Nelkin が導いた実効質量  
の考えや、Nelkin による束縛回転に対する近似計算の方法は、軽水以外の物質にお  
ける熱中性子全断面積や軽水中の熱中性子スペクトルの計算等に対して優れた効果を発揮した  
ただしこれらの近似計算は両微分断面積を説明するには簡単すぎるようであった。 従  
って同様に冷中性子減速に対しても、実効中性子温度のような積分的量の解析や、対象とす  
る温度領域によっては、前述のような実効質量の考え方にちとづく近似計算や、束縛回転  
に対する近似的取扱いが、回転モードによる減速に関して簡単かつ有効な手法となる可  
能性がある。<sup>(9)</sup> 一方、冷中性子スペクトルの詳細な形状であるとか、極低温の領域にな  
ると、熱中性子におけると同様に、これらの近似計算法は必ずしも適当ではなくなるであろう。

このような回転モードにおける量子効果が顕著な領域において冷中性子散乱や冷中性子  
減速の現象を正確に理解し、あるいは十分信頼できる結果を得るためには、分子をとりま  
く異方場の様子やそこに於ける回転運動の様子を正確に知る必要がある。 前述の極低温

固体メタンにおける分子回転の様相はまだ十分に解明されていない。固体メタンは実験上や実用上若干の難点もある。回転モード形の冷減速材となり得る物質としては固体メタンの他にメチル基を有する物質などが考えられるが、メチル基を有する冷減速材としては、前述した論理からメチル基の分子内回転に対するまわりからの束縛が弱いもの程、有望であろう。このような分子内回転に対して何らかの束縛の強さは中性子散乱以外の種々の手法でも調べられつゝあり、このような中性子以外の手法で調べたメチル基の内部回転に関する情報と、中性子散乱により調べた結果とを比較することは、実体の解明に少なからず役立つ。そのような比較の一例を第4図に示す。



第4図 メチル基の内部回転に関する実験結果の比較  
(a) 核磁気共鳴吸収の線中の温度変化<sup>(10)</sup>  
(b) 中性子全断面積の温度変化

第4図(a)は Kusumoto, Lawrenson and Gutowsky の Poly-Dimethylsiloxane に関する核磁気共鳴吸収の結果の一例であり、同図(b)は筆者による冷中性子全断面積の測定結果である。 (a)図の結果について彼等は、まず 150°K 近傍における線中の変化は主として  $\text{Si}(\text{CH}_3)_2$  全体の鎖軸に対する回転によるとし、また 100°K あたりのわずかな変化は何らかの形の並進運動であろうとしている。そして、もし  $\text{CH}_3$  基が完全に rigid であれば線中は約 9.5 Gauss となるべきことになり、この物質は液体窒素温度においてもまだ  $\text{CH}_3$  基が  $C_3$  軸のまわりに回転しているとしている。一方(b)図においても、この物質の冷中性子全断面積は確かに温度の低下とともに減少し、非弾性散乱断面積の減少を物語っているが、よく見ると液体窒素温度、さらには 10°K においても、長波長側において  $1/\lambda$  領域の存在を示し、このような極低温においても proton の運動の可能性を暗示している。この運動は、その断面積の様子から考えて、メチル基の内部回転である可能性が高い。

メチル基の運動についてのこのような情報は、この種の物質が冷中性子減速材として役立つ可能性を暗示するものであり、さらに詳細な研究を行なうとともに、この種の極低温物質に中性子をうちこんで冷中性子スペクトルの測定を行なうことは事態の解明に大



さく役立つと考えられる。

以上のように、低温物質による中性子の減速冷却領域においては、従来の中性子熱化や熱中性子スペクトル等の炉物理的知識や手法が参考になると同時に、従来は見られなかった多くの新しい問題があらわれ、また物性物理や物理化学等の他分野との関連もより一層親密になってくると見うけられる。

次に、さらに低エネルギーの領域、すなわち  $10^{-4}$  eV 程度以下の領域の中性子の発生については、まだあまり研究されておらず、外国において若干の実験が見られる程度である。第2図に引用されたものはそれらの1例である。まず、部分反射領域においては、中性子導管を用いて  $10^{-7}$  eV 近くまでの低エネルギーの中性子を選別した実験が Stayerl によって報告されているが、<sup>(4)</sup> この実験は  $10^{13}$  n/cm<sup>2</sup>sec の熱中性子束を有する水泳プール炉に、黒鉛の二次減速材を内蔵した導管を垂直にとりつけて行なわれた。そして飛行時間法によるスペクトル測定の結果、 $10^{-5}$  ~  $10^{-6}$  eV のエネルギー範囲にわたってはほぼ  $E$  に比例する強度の減少が見られたが、 $10^{-6}$  eV 以下ではより急激な強度低下が見られ、彼はこれを主として途中の反射や検出器等における損失に起因するとしている。また、これらの中性子を用いた全断面積測定の結果、金や高純度アルミニウムについては  $1/\text{cm}$  形の全断面積が得られたが、合金や低純度アルミニウム等については  $1/\text{cm}$  からの大ききずれが認められた。

さらに、 $10^{-7}$  ~  $10^{-8}$  eV の範囲における連続的全反射形の実験の結果が Groschev 等によって報告されている。<sup>(5)</sup> これは炉心の近くに挿入したコンバータによって熱中性子を散乱させ、発生した超冷中性子を大きく曲げた導管内で多数回全反射させながら、外部に導き出したもので、そのエネルギー範囲からもわかるごとく、当然その強度は著しく低い。これらの超冷中性子は、重力場においては数メートルの高さまでしか達することができないので、これを用いてそのスペクトルの様子が調べられている。さらに、導管内の強度低下についての初等拡散理論にもとづく解析から、管内の中性子の平均寿命が調べられ、その結果中性子は純粋でかつ理想的な平坦面での反射から予測される寿命よりもかなり早く失われたと言っている。しかしその不一致の原因についてはまだはっきりとしたことはわかっていないようである。

このような実験結果およびそれらの検討からもわかるごとく、 $10^{-4}$  eV 程度以下の超冷中性子を多量に発生することは、単に熱中性子や冷中性子で測定可能な量をより精度よく求めるといふ点において有効であるのみならず、例えばその全断面積の  $1/\text{cm}$  曲線からのずれや、その導管内の寿命や物質表面における作用などから、他の実験手法では得がたい情報を与えるものと考えられる。現在のところこのような超冷中性子の発生強度は微弱であるので、当分は全断面積測定が限度であろうが、それでもそのエネルギーの小さいことと、波長の長いことにもとづいて、凝集体の物性研究にはきわめて貴重な道具となり得る可能性がある。これを実現するためには、超冷中性子をできるだけ強かに発生するための研究が重要な役割を演ずるものと考えられる。

## 参考文献

- (1). L. Van Hove: *Phys. Rev.* 95, 249 (1954).
- (2). A. W. McReynolds, W. L. Whittemore: "Inelastic Scattering of Neutrons on Solids and Liquids", 421 (1961), IAEA.
- (3). K. Inoue, N. Otomo, M. Utsuro, Y. Fujita: *J. Nucl. Sci. Technol.*, 9, [6], 374 (1972).
- (4). A. Steyerl: *Physics Letters*, 29B, 33 (1969).
- (5). L. V. Groshev, V. N. Dorozetsky, A. M. Demidov, Y. N. Panin, V. I. Lushchikov, Y. N. Poketilovsky, A. V. Strelkov, F. L. Shapiro: *ibid.*, 34B, 293 (1971).
- (6). W. L. Whittemore: *Nucl. Sci. Eng.* 18, 182 (1964).
- (7). Van Dingenen: *Nucl. Instrum. Methods*, 16, 116 (1962).
- (8). M. Utsuro: *J. Nucl. Sci. Technol.* 10, [7], 428 (1973).
- (9). 宇津名雄彦: 昭和48年日本原子力学会年会要旨集, C29 (1973).
- (10). H. Kusumoto, I. J. Lawrenson, H. S. Gutowsky: *J. Chem. Phys.*, 32, 724 (1960).
- (11). K. Inoue: *J. Nucl. Sci. Technol.*, 7, [11], 580 (1970).
- (12). H. Prask, H. Boutin, S. Yip: *J. Chem. Phys.*, 48, 3367 (1968).

# 冷中性子の利用

東北大学 核理研 渡辺 昇

熱中性子が凝集系(固体, 液体)のミクロな研究手段として他に掛替のない優れた探索粒子であることは言うまでもないが, その中でも冷中性子( $\sim 5$  meV 以下)は特にユニークな存在で重要である。その理由は第一には他のどのエネルギー領域の中性子よりも単位エネルギー巾当り, あるいは運動量空間での単位体積要素当りの中性子密度を最も大きく出来ること(冷減速材), したがってより高分解能の散乱実験が可能となること, 第二には中性子波長( $\lambda$ )が大きくなるにしたがって種々の方法による中性子の制御が比較的容易となり, 他の手法(X線, 赤外線, 電子線, レーザー, NMR, ノズバウアー等)に比する線源強度のハンディキャップを克服できること等によると思われる。冷中性子のうち特に $\lambda > 20 \text{ \AA}$  ( $E < 10^{-4} \text{ eV}$ )のものは極冷中性子(ultra cold neutron, UCN)と呼ばれ, 後に述べるように中性子自体の研究にも重要な役割を担っている。

さて先ず冷中性子の制御法について眺めてみたい。

## 1) 全反射の利用

全反射の臨界角 $\varphi_{\text{crit}}$ は

$$\varphi_{\text{crit}} = \lambda \left( \frac{b_{\text{min}}}{\lambda^2} \right)^{1/2}$$

例えば $\varphi_{\text{crit}}$ はNiで $b_{\text{min}}/\text{\AA}$ , 偏極化用としてPermandur alloy (50% Co, 50% Fe)を考えると $\varphi_{\text{crit}} = 6.7 \text{ min}/\text{\AA}$ , 偏極効率95%ぐらい。<sup>(11), (12)</sup>

## 2) 非均質磁場の利用 (Stern-Gerlach法)<sup>(11), (12)</sup>

非均質磁場で中中性子は曲けられ, カッナーのスピンの分けられるが, その角度 $\theta$  (min)

$$\theta = \pm 1.265 \times 10^{-7} \frac{H}{\lambda^2}$$

20%として $10^5$  gaussが実現できるとすると,

$$\theta = 1.265 \lambda^2 \text{ (}\text{\AA}^2\text{)}$$

となり, 長波長中中性子に対しては有効。

## 3) 中性子スピンの磁気共鳴<sup>(13)</sup>

スピンの向きが磁場中で歳差運動(Rarmor precession)するのを利用

## 4) ドップラ-シフト<sup>(14)</sup>

## 5) 重力利用<sup>(15), (16)</sup>

以上のうち3)~4)も制御効果は $\lambda$ に比例しており, 冷中性子領域では十分実用的である。

全反射利用はカイド管実用化に象徴され, 中性子強度の距離に対する逆乗則を破ったが, その最大の祖いは偏極化にある。さらに収束管<sup>(14), (17)</sup>, マイクロカイド管, (偏極)<sup>(18)</sup>ソーラースリット<sup>(9)</sup>, 鏡モノクロメータ管があるが, 全反射の非対称性から静電的表面ゲイホール, ポテンシャルが分ることを利用した表面研究への応用や, 人工的ゲイホール層を用いたカイド管の可能性等も検討されている<sup>(11)</sup>。

さてこれらを用いた実験で特記に値するものにA. Heidemann等<sup>(11), (12), (13)</sup>による超高分解能( $\Delta E \sim 10^{-7} \text{ eV}$ )実験がある。カイド管終端にモノクロメータとしてSi完全結晶を置き背面反射(

111 反射)で  $4E \sim 10^7 eV$  級の単色化ビームを得る。ガイド管を折返してくる単色ビームを収束管 ( $E \sim 2meV$  で照度約2倍)を通し試料に入射させる。散乱中性子は同様に完全結晶の大きな凹面鏡で背面反射により検出する。モノクロメータをラウンドスピーカーで振、ドップラーシフトをかけたければメスバウアー法の如く非弾性散乱実験ができる。この方法で  $V_2O_5$  の Zeeman 分裂による hyper fine splitting を中性子で始めて観ることができたが、これは超高分解能で拡散運動等による準弾性散乱を可能にするにとどまらず、メスバウアー法が中性子を用いることにより非常に多くの物質に拡張できるものとしてその意義を非常に高く評価したい。

超高分解能の可能性としてはさらに Rarmor precession の利用が上げられる。前例がメスバウアー法ならこれは NMR の spin echo に対応するが F. Mezei<sup>(17)</sup> の提案している方法は次のようである。偏極化した冷中性子をガイド磁場中をスピンの向きをその方向にそろえて走り、途中で薄い電流シートを置いてシート中だけガイド磁場および進行方向に垂直な磁場を与えるとスピンの向きは歳差運動を始める。一定距離のところにもう一枚電流シートを置いて逆を行なえば特定位相。したがって特定速度の中性子だけがゲートできる。例えば距離を長くして数千ターンの歳差運動させると  $4E \sim 10^{10} eV$  以上の分解能が可能となる。これは NMR 領域の研究が中性子の眼で行なえることを意味しその応用は極めて重要と思われるが、中性子自体の研究でも画期的な成果が期待されている。例えば  $40 \text{ \AA}$  の冷中性子を用い、歳差運動中進行方向に  $1 MV$  の静電場をかけると中性子は中性子電荷によりわずかに加速されるので、その速度変化を上述の感度で検出すれば  $10^{20} e$  ( $e$  は電子電荷) の精度で中性子電荷の測定が可能となるし、またガイド磁場に平行に電場をかけて測れば、 $10^{22} \sim 10^{24} e \cdot cm$  の精度 (これまでの100倍の精度) で中性子の electrical dipole moment ( $\mu_E \sim 10^{23} e \cdot cm$ ) が測れるといわれている。

中性子自身の研究で面白いのは UCN をタンクに閉じ込めて  $\beta$  崩壊に対する中性子寿命  $T_1$  を直接求める実験であろう。UCN のうち特に速さ  $6 m/sec$  以下の中性子は Cu, Be, pyrolytic graphite 等の容器の中では壁に垂直に入射してもほとんどが全反射するので閉じ込めが可能となる。例えば pyrolytic graphite 製のタンク内にシャッターを用いて UCN を飽和させた後シャッターを閉じる。何秒か経過の後シャッターを開いて残存中性子強度を測り、減衰曲線を求めタンク中での UCN の平均寿命  $T_1$  を求める。壁との衝突による吸収等を補正して真の中性子寿命を求めるわけであるが、ソ連の結果は  $T=13 sec$  で理論値の  $1/2$  であった。<sup>(18)</sup> Munich の実験は補獲線によるスファリアスの為成功しなかったそうである。<sup>(19)</sup> この種の実験ではタンクやガイド管の壁の内面の表面状態 (仕上げ、極微量の水蒸気の付着等) により微妙に結果が支配されている。

UCN は極低エネルギー領域 ( $10^7 < E < 10^4 eV$ ) の断面積測定<sup>(15), (16)</sup>、薄膜による波の干渉<sup>(14)</sup>、あるいはこれを利用した散乱振巾の測定、薄膜の厚さの精密測定への応用等にも有用である。

UCN の実験には必ず限界速度 (それ以下の中性子は全反射してとり出せない) の小さいコンバータが必要であるし、取り出しには重力制御も有効、逆に検出器の壁の全反

射等技術的に大いに工夫を要する。

一方冷中性子ビームによる凝集系の研究では、すでに述べた超高分解能実験とあわせて correlation length の極めて大きい現象(例えば  $1000 \text{ \AA}$  以上、通常の中性子回折が約  $10^\circ \text{ \AA}$  以下の correlation を対象としているのに比べ非常に大きい)の研究が重要となろう。糸種超電導体における量子力学的干渉効果などはそのよい例であろう。J. Schelten 等は約  $10 \text{ \AA}$  冷中性子の小角散乱により糸種超電導 Nb に磁場をかけると内部に量子化された磁束の糸をでき、これが  $1000 \text{ \AA}$  程度の周期で三角格子を作ることを実証した。今後冷中性子は生体研究でも重要な手段となるだろう。

冷中性子の、あるいは冷中性子による研究は近年欧州で著しく進みつつある。ILL HFB の冷中性子源、Munich の制御技術開発等に象徴される如く、設備の規模、研究者の層の厚さとも驚異であるが、我国を眺めると残念ながら beam research に使える冷中性子源はほとんどなく、その利用もかなり遅れている。東北リニアックにも冷中性子源設置を計画しているがまだ実現していない。しかし冷中性子利用技術のほとんどが Munich で、やはり冷中性子源のない  $10 \text{ MW}$  スウィミングフル炉のまわりで開発されたことを教訓に、我々も若年の研究を始めた。全反射利用の偏極化について基礎的研究が準備されている。また簡単な冷中性子散乱を行った。冷中性子源がないので常温線源からのビームを大きなフォーカス型に並べた pyrolytic graphite で単色化し、約  $365 \text{ meV}$  のパルス冷中性子で中性子常磁性散乱を行った。図は pyroxene 型の  $\text{MnGeO}_3$  と、これを  $1000^\circ \text{C}$ 、数万気圧で圧縮して得られる Ilmenite 型  $\text{MnGeO}_3$  とについて磁気相互作用の違いによる準弾性散乱巾の変化を見たものである。これより  $\text{Mn}^{2+}$  イオン間に近い最近接磁気相互作用がそれぞれ求められたが Ilmenite では巾の増加が著しく、直接相互作用が大きいことを示している。リニアックでは線源強度はパルスビーク時でも熱中性子束(積分)で約  $10^{12} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$  しかないが、種々実験パラメータを最適化し収束させることにより  $10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$  級の線源( $10 \text{ MW}$  級炉)での結果に比べ遜色なかったことに勇気づけられ、冷中性子による本格的研究をめざしている。

## 文献

- (1) BARKAN, S., et al.: Rev. Sci. Instrum. 39, 101 (1968).
- (2) GOLUB, R., et al.: Nuclear Instrum. Methods 91, 205 (1971).
- (3) MEZEI, F.: Z. phys. 255, 146 (1972).
- (4) BIRR, M., et al.: Nuclear Instrum. Methods 95, 435 (1971).
- (5) GROSHEV, L.V., et al.: Phys. Letters 34B, 293 (1971).
- (6) STEYERL, A.: Phys. Letters 29B, 33 (1969), Nuclear Instrum. Methods 101, 295 (1972).
- (7) CHOUDRY, A., et al.: Nuclear Instrum. Methods 92, 339 (1971).
- (8) ABRAHAMS, K., et al.: Nuclear Instrum. Methods 45, 293 (1966).
- (9) FRIEDMANN, M., et al.: Nuclear Instrum. Methods 86, 55 (1970).
- (10) FIALA, W., et al.: Nuclear Instrum. Methods 107, 33, 37 (1970).

- (11) HANDEL, P. H. : Z. phys. 252, 7 (1972).
- (12) HEIDEMANN, A.: Z. phys. 238, 208 (1970).
- (13) HEIDEMANN, A. et al.: 5th IAEA symp. Neutron Inelastic Scattering, Grenoble (1972) SM 155/G-4.
- (14) STEYERL, A.: private communication.
- (15) STEYERL, A.: Z. phys. 250, 166 (1972).
- (16) STEYERL, A.: Z. phys. 252, 371 (1972).
- (17) SHELLEN, J., et al.: phys. stat. sol(b) 48, 619 (1971).
- (18) SHELLEN, J., et al.: Z. phys. 253, 219 (1972).

## 次回の炉中性子利用研究専門委員会の予定

### 第10回炉中性子利用研究専門委員会プログラム案

- 日時 場所 : 昭和48年9月26日(水)午前10時より、京大原子炉実験所
- 内容 :
- 1. 冷中性子について (北大) 井上和彦委員
  - 2. 冷減速材における中性子パルスの減衰
    - a. 北大における実験 (北大) 秋本正氏
    - b. 阪大における実験 (阪大) 佐田健二委員
    - c. ソ連における実験の紹介 (阪大) 佐田健二委員
  - 昼食
  - 3. 見学 (ライナック、中性子導管等)
  - 4. 冷減速材の炉物理
    - a. 冷中性子スペクトルの形成について (北大) 井上和彦委員
    - b. 原子炉における冷中性子源 (京大炉) 宇津呂雄彦委員
    - c. 加速器による冷中性子源 (北大) 大友詔雄氏 (京大炉) 藤田薫顕氏
    - d. 冷中性子利用関係からのコメント (京大炉) 阿知波紀郎氏
- 以上

## 第1回トピカルミーティング“高速度物理”所感

よ之がき

ミーティング 幹事: 東大 安成弘, 原研 程木学

第1回トピカルミーティング“高速度物理”が6月11日, 12日の2日間原研東海研で開催された。約16名の参加を得て、お件の論文が発表され、第1回目の催しとしては盛況裡に終了した。当日の論文や討論に関しては教文集にまとめられているが、参加しなかった会員にとっては、これだけでトピカルミーティングそのものを再現してみることが不可能であろう。参加者全員に印象を寄稿していただければ最善であろうが、現実には困難でありそれらの印象は参加者からその周囲に伝わり、次第に晶華され、有益な意見として学会にはね返る。てくるものをお願いしたい。ここではミーティングの意義、今後の在り方等を会員各位に考えていただくという趣旨とミーティングの報告という意味で、当日の講演と討論を日会された座長の方々に感想を執筆いただいた。

はじめにミーティングの幹事として、ミーティングの趣旨と反省について簡単に述べておきたい。

トピカルミーティングは昭和46年東大の“やよい”の竣工記念の項提案され、当時の企画委員長柴田俊一教授の御努力によって学会の新規行事として採択された。

学会の行事としての年會、分科會は定着してきており、学会はよく成長したと考えられている。しかし一方で年會、分科會では講演や討論の時間が短かく、討論も実際には少なく、物足りないと感じる会員が多いようである。この原因のひとつは、年會、分科會は包摂する分野が広すぎるため、自然、参加者の関心が薄められるのであろう。また発表論文数に制限がないために、充分の時間を割り当てられない現状である。

そこでテーマをしばって、論文を募集し、その内から論文を選んでセッションにまとめ、そのテーマに関する現状と将来像を明らかにしたレビューを付けて発表論文の理解を容易にし、討論が容易に行われるような下地をづくり、そのテーマに関心がある(関連の研究をしているというべきか)研究者達が参加して討論するような学術的会合を用いてはどうかというのが、トピカルミーティングの趣旨であった。このようにして学術的会合の内容の充実を図ることが、会員の関心を学会に惹くために必要であり、学会にはこのような会合を用く力があるものと考えられた。

この趣旨に沿って、専門委員や幹事は努力したつもりであるが、必ずしも趣旨通り充実していたとは云い難い。各セッションとも善悪は別としてアクセントを付ける必要があったが、平板的な論文の並列になら傾向がある。論文数を少なくするとか、合併させる(内容の判定ではない)とかすべきである。と思うが、各セッションのまとめの責任者(座長ではない)は、そのような強権を奨励するわけには行かなかったようである。

今後はセッション内の論文数を論文を見ない内におらかじめ決めて、その数にもとづいて論文の採択を定めるような手続きを工夫がよいであろう。また論文はできるだけ互いに

競合するようには並べ方がよいと思つた(数々揃えば)。

報文集については厚過ぎるという意見もあるが、幹事としてはおつと厚くてもよいと思つた。拙稿の案でこの程度に留めた。報文集刊行は、参加者にとっては、内容を理解できて質問しやすいものにすることが、発表者に対しては論文発表として扱えるものにすることが、この度の企画された。ミーティングの趣旨からは、報文集に書いてあることは説明し、参加者は前日にでも読んでおくべきだ。同じ内容をもつて一度詳しく講演するよりは、先づきの発表について述べる方が問題提起として面白いと思われたい。またその方が正者が在り方と思つた。(このようルールを完全に適用するのは困難があるかも知れないが。)

また今回のミーティングは第1回であり、強行した傾向がある。たとえは認めざるを得ない。ミーティングの開催が、学会にとって重要であると考えられる。これは、学会と会員の成長の爲であり、やむを得ないことであると思つた。学術的の会合が早くなるのは、会員ひとりひとりの努力の問題であつて、役員や幹事委員だけの責任ではない。その如何にかつかわるべきが公表される。積極的に論文発表をし、新境地を開くという努力が研究員に求められるべきである。これは、日本原子力学会に於けるが、この意味での努力が、学術的行事が実行されたと感じる程度アウトサイダーに於いて、学会が構成されていくべきである。会員は真剣に考えなければならない。

第2回以降に今回の経験が活かされてゆく事を希望して、各発表者の感想を以下に載せることにする。

東北大工・白田光雄

第1日の午前の一コマはミクロの核データであった。先づ最初の講演では原研・五十嵐一氏が「核データの整備・評価」という問題について、これが高速炉の開発において重要な位置を明らかにし、続いてデータの収集に関する国際協力の現状を説明し、シグマ委員会ではこれが行われた評価活動の成果を、同氏が直接に参加したものを中心として概観された。核データの評価に専心してこられた同氏の話には先駆者の身輪というものが感じられた。

第2日の講演は北大・神田幸則氏のU-238の断面積(1keV~20MeV)の評価報告であった。これは、シグマ委員会で行っている重要な核データの評価計画の一部が実現したものである。この仕事の意味は断面積の総合的評価に於いて best values が得られたといふことにとり、その重要性、非線形散乱、核分裂の中性子が実存するためには断面積の測定が容易でないU-238のより重要な核の断面積の評価の問題を具体的に指摘した点である。

第3日の講演は船研・山越新次氏の「鉄の断面積の評価誤差」についての発表であった。これは鉄のデータの現状と問題点を概観したもので、使用可能な核データを変化させることによって生ずるシグマの計算値の変化を実際の計算例によって示し、評価値の誤差(信頼度)に対する必要を論じたものであった。

第4日の講演は京大炉・小林、木村、柴田、原研・五藤、八木の諸氏の「しきい反応断面積



種の測定と評価」と「これを用いた分裂中性子スペクトルの検討」についてであった。これは岡氏<sup>等</sup>が従来行なってこられた一連の測定に二つの大きな改良を行ってエネルギーの関数としての断面積と分裂スペクトルに対する平均断面積とを測定し、その結果にもとづいて分裂中性子スペクトルを検討したものである。結論は近年提唱された硬いスペクトルよりも、古くからのものの方が「妥当では無いか」ということであった。

その後の講演は東工大・山室、山田、京大炉・木村、藤田、中部工大・柳原の諸氏の京大炉IIシミュレーションによる英鳴捕獲断面積の測定についてであった。これは柳原ガンマ線の検出器として中性子に対する感度が低い液体シンチレータ hexafluorobenzene を使用するの方法のもので今後の進展が期待される。

以上講演の内容を概観したがデータの利用の立場にあると思われる方が終始終心に腹筋し討議に参加されたことは従来この種の研究会と比べて著しいことであると感じられた。

法政大学 中島龍三

核データのセッションで報告されたのは、

1. 核データの評価について： 五十嵐信一（原研）
  2. 1 keV から 20 MeV における  $^{238}\text{U}$  の中性子断面積： 神田幸則（北大）
  3. 鉄の高速中性子断面積の評価誤差について： 山越英次（船研）
  4. 中性子による反応断面積の測定と評価、およびこれを用いた核分裂中性子スペクトルの検討： 小林龍平（京大炉）
  5. Pd, Ag, 及び Ho の英鳴領域に於ける中性子捕獲断面積の測定： 小田善美理（東工大）
- である。ミーティングの企画者負合が意識的にこれを選んだのか、それとも偶然にこう行ったのかは知らないが、順着はともかくとして、核物理側に移行して行く過程の断面積を知らねがが無く重大な課題を提供した。という意味では何か面白かったといえる。

その冒頭に、五十嵐氏が核データの評価について総括的評語をした。教文集から引用すると、「測定値は決して「正確な」データには行っていないのであって、そこから「脱核データ」を求めたために「核データの評価」という仕事が必要になる。」と高らかに叫びたいが、「正確な」という言葉に心がかわるのだがそれとも同じとて、ここにおいて徹底的に核データの意義を型通りに述べた。出だしの高言に比べてかなり絞切り型だといふ感じがしなくてもいいが次に挙げていくのが具体的評価の例（何處でもカマれた陳腐評語といわれよう）で、彼自身のいいたいことがよく伝えているのは不可である。

2番目の神田氏の報告は、核物理の側に立って一貫した核データ評価作業の、いわば手前手前を報復したものである。その主眼は、データの収集や加工の測定値に対する議論（通常レビューといっている）をやるのではなくて、断面積の推奨値を決定するプロセスにあるのだと思ふ。この盛りあげ方については、私は全く同感である。冗長にも行かず、さりげなく是れを言ってもいい、折角時間を上手に使った優秀なタレントの報告だが、その

いは、はじめに20分という時間を与え長ミラーの企画者の勘入を著者のべきに  
もしければ。

次の山越氏は、2, 3の詳細が核子- $\gamma$ 対を伴って実際の問題(鉄球の中での中  
性子スペクトル)を計算して、これらの詳細が核子- $\gamma$ 間の違いを覆射した。甲斐  
子との英で若干のカーブと二つがわりのだが、とくに、100 keVから14 MeVぐらいの範  
囲で鉄の微視的断面積の詳細が、ただただその分位というところが誇張彫りにして見せた  
といえる。測定されたデータがいろいろあっていり、実験員が少なければあつた  
とていえる。核理論の計算によって推奨すべき核子- $\gamma$ を決めることの難かし  
を痛感させられた。

4番目と5番目とは、核子- $\gamma$ の測定に関する報告である。小林氏も山田氏もともに、  
この詳細に実験装置や測定技術の話をしたので、物理学会の原子核実験のセッションに  
入っているのでは無いかと、この錯覚におかされた。左のどちらかというのでは勿論行  
核子- $\gamma$ の詳細が所行の場合には実験装置や測定法を知ることが絶対不可決であり、そ  
の、詳細が核子- $\gamma$ を利用する者も核子- $\gamma$ がつかないで発せられるものが未知、と  
大層である。だが、いろいろ報告時間が限られていることだし、私の専門素人も多少の  
ごめんと思われたい。装置や測定法の特長や限界とか、これが核子- $\gamma$ の詳細を利用の  
策にどう影響するか、行どいってとこに重きが置いて貰えたい。という気がし  
ていり。

4番目の小林氏の話は、そのと以前から精力的に続いているという経験をかいて、と  
して系統的誤差を減らすことに重きがつけられているに思ふ。それ、5番目の山田氏の報  
告は、今後核子- $\gamma$ 生成を予告したものと受けとめても可なり。ともあれ私は、ロ  
ーマン時代のフェルミ(入射可能行から中子- $\gamma$ を求めた)とシカゴ大学  
時代のフェルミ(中性子断面積の精度を問題にした)とを、現代の核子- $\gamma$ 測定者に期待  
したい。

## 0

東大炉 - 柴田俊一

「やまゐ」は言うまでもなく、我が国最初の高速炉であり、炉心が実用炉として成る  
最小のもので、スペクトルも非常に硬い。このことから、高速炉物理に関心をもち  
ては無視し得ないものである。

今回の発表は「やまゐ」におけるバルス運転計画に関するものである。炉心の反発度  
を瞬時的に上げのために、Machine gun 式に燃料を打って炉心を通過させ、LINAC による  
中性子打込を同期させる方式が計画されており、着々実現しつつある模様が見  
られた。

中心に行つてこの仕事を推進しておられる若林源明さんに、あつて Machine gun を使  
う発想が何処から、いろいろ前に、私が承知したのが、着実に検討し、準備されたこと、少  
なごの恵い思いを述べた。しかし、真相は、「この炉心構造が回転式の構造物として

行われている。やむを得れば二人行って位しか行かない。しかし、この場合、物件の探し方のバラツキとが、受け止める構造上の問題が多い。」という意味で、私としては、消極的に右足したつもりなので、記憶が薄れていたのは当然である。従って、成程有れば句論、当事者の努力の賜物であること、ほゞきりきりしておき、また、LINACが入っているが、近い将来の成切を念じているのである。

ところで、このように反応度付加と、中性子打ち込みを同期させるくり返し式ペルス運転の高速炉は、次代の研究炉として重視されている。このP型やF型計画は、実験面での基礎研究の殆ど見られるもので、規模はともかくとして、この方向へ重要な第一歩を不可避した意義を評価したい。

阪大・岡谷 全

A7~9の3つの講演はJAERI-Fast-Setの紹介であり、植木氏による「高速炉計算プログラムの歴史と炉足数の開発」と題する講演は原研理論グループにあり存在してきたコード開発の基本的考え方を極めて要領よく問題点をはっきりと示す形で段階的に解説し今後に残された問題も明らかに示したものである。その内容を要約すれば次の通りである。

最初原研で開発された炉足数コードの紹介があり、最近計算機が大型化したけれども設計段階で炉足数のバラツキや最適化を目的に繰返しの計算を行わなければならない点もある。単なる単純な手法が考えられなければならないことよりコードが普及化されるに比べて容易く使い易いコードとしてその重要性も強調された。

次に炉足数作成の計算コードとして各国にどのようなものがあるかを比較検討され英嶋断面種を取り扱いに及び改良段階のラック付でも示されJAERI-Fast-Setのrev領域の重核の英嶋断面種、炭素断面種の改良すべき点が検討された。特に低分解能断面種が実験値と一致するにために特別な方法が考えられそれが強調され有用なpv-239の2値が実験値と比較された。また作成された断面種から炭素断面種を導くための手順と実際には誤差の評価、その改善のために取入れられた改良の方向が示された。炭素英嶋断面種の導出に用いた2ペクトルの種々の計算法が比較され開発された炉足数作成コードの表も示された。

高速炉用炉足数から臨界計算に及びEXPANDA-1の改良と2次元拡散コード、1,2次元SN計算コードとJAERI-Fast-Setの連携、SNに対する補助としてのFRAU-POの50群への改良、FRAU-PO70、2次元拡散コードの6群格子、3角格子に対する開発、ピン燃料の存在2領域6角格子系の非均質効果評価のためのEXPANDA-5の開発、特にこれらがピン燃料制御棒の実験解析に及び平均値補正の評価にも用いられることが示された。さらにこれらコード開発と平行して1969年に行われた炉足数の国際比較のためベニヤマワキストの結果はJAERI-Fast-Setが最も国際水準に達していることを示している。さらにベニヤマワキワキワキワキと示すZPR III, ZEBRA等の実験結果を日とした標準解析模型に示すものとJAERI-Fast-Setを用いたものとをJeffと比較され、1969年に作られた

当時より  $\sigma_c^{238}$  と  $\sigma_f^{235}$ ,  $\sigma_c^{235}$  を修正し現在の SEI (70/6) に至る間の改訂結果が示された。

最後に今後の課題として種分実験結果と核データの測定値からの若干の不整合をいかに解決するかの問題。ドップラー実験解析のための実効的自己遮蔽のとり入れ方を  $P_0^{238}$  のデータを用いた。Naボンド効果の解析のためおりの領域、ストリーミング、非均質のおよぼす効果の高速領域で詳細なためにより核データの精度、エネルギー領域に関する議論、燃焼度解析のための実効コードの重要性、多種分裂生成物をいかに扱うための時間依存の断面積の扱い且つその推定を行うための問題等があげられた。

炉の特性解析のため用いられる多様なコード間データの交換を行う際、間違いを防止するためのコードのモジュラー化の必要性、輸送計算コードの問題点特にグラフカットに中心、反射体の境界附近での解析精度を向上させる必要等が強調された。特にこの若干の非均質効果については次の A8「板状セルの非均質効果の解析 JAERI-Fact-Set 70群定数の適用性」と題する原研菊池康元氏、松本孝氏、高野有機氏の講演にて臨界実験の解析における板状セルの非均質効果による従来の詳細計算が長い計算時間を要し実用的でなかった点を改め JAERI-Fact-Set の 70群群定数を用いた簡易計算を有するための二つの方法について述べられた。これは 2 領域の多群系のための EXPANDA-5 を板状セルに適用するための改良した EXPANDA 5 の計算原理をその適用性について述べたものである。Na 実効の若干の非均質効果の取扱いは当然予想される通り板状セルの異なる領域間の同一核種の距離的減衰を取り入れるのと、それ以外のとで結果に大きな差を生じることが示された。実効断面積による多種分裂源の計算における多群拡散方程式のやり直し計算は必ずしも必要がなく、これが計算時間の大幅な短縮に役立ちることが実証された。

残された JAERI-Fact-Set の問題点のうち一番重要と思われる核データの不足がその種別と種分量へ及ぼす影響については A9「ベネチアグループを基とした JAERI-Fact-Set の改訂」と題する高野有機氏、泉谷川明氏、松本孝氏の講演に詳しく述べられている。U-238, U-235, Pu-239 の半衰期を中心に検討される  $\sigma_f$ ,  $\sigma_c$  は 1 KeV ~ 10.5 MeV の範囲と同様に変動も甚だ結果各断面積の種分データ及びその効果が評価しきれない状況で無視出来ないのであることが示された。さらに最小 2 乗法で修正する  $k_{eff}$  の濃縮比に対する変化の組織的の誤差を修正する必要があることが示されている。  $k_{eff}$  以外の種分量の解析と今後の取上げられたいものと全く異った特性の炉心解析へ適用可能な適用限界の検討が今後に残されている。

日本原子力事業社、K. 深井佑造

トピカルミーティング全体の感想として、初日目のミーティングとしては、比較的おもしろい印象を得た。通常、学会、分科会では、おなじみの各自の専門分野の研究発表にしか出席しないのに、この場合は同じ高速度物理の分野でも、隣り、た少し異質の専門分野の発表に出席し、これによって知識を吸収出来たという事が多かった。これは

いかと思ふ。従つて必ずしも噴向等の討議も、これ程のくは好し。論文、発表者で討議を期許してゐた人達にとつては、その足らぬ感じが受けてゐたのではないかと思ふ。

本来活版の討議は同レターへの研究者が中心として、これらの研究者同士の討議が本場になりかねない結果に陥るかも知れないが、日本の現状ではまだ研究者の層が厚くないために、これを活版の討議を期許するのは、この手前同レターへのミーティングでは不可能ではないかと思ふ。トピカルミーティングは討議中心で済ませたいと思ふ。出席者が9人が関心を抱いたのは高速物理についての少し広いテーマの報告発表あり、討議会ありを許さなければならぬかも知れない。これはこのミーティングを準備した専門委員会の一メンバーとして、やはり勉強不足に陥つたのではないかといふ私の反省である。この反省を基にして次回以降はより興味あるトピカルミーティングの開催を望みたいものである。

阪大の岡谷先生と私が発表者担当した炉定数のセッションでは、オプティミゼーションの高速炉計算と炉定数セットの原研におよぶ開発の紙張的やり取り易いレビューの発表があり、これに続いてJAERI セット関係の種々の問題提起と解決の発表、高速炉の燃焼計算に重要なFP断面積の発表が続いた。

個人的には炉理論の専門家の漸くこれに私として日誌の駒田氏の非均質計算法に携ふの研究は興味深く聞かされた。東大工の山室先生の弾性散乱断面積が中性子スプレッドに与える効果についての発表も特に最近私に関心を抱き、この中性子スプレッドの詳細に関して有益な情報を得たと思ふ。この炉定数の分野では、国際的におこなわれてゐる一つの日本の業績として、FP断面積の詳細作成がある。今後この方向の研究が更に進歩し、盛んに行われることを希望したいものである。

### 勸修 東原 義治

担当したセッションの受けと印象を想ひ出すことに就いておた。

(1) トピカルミーティングの主旨が、発表と討議の時間を充分に確保したものである。各セッションに於けるレビューも含めたりして、この新企画の一番の受け手「高速炉物理」ミーティングの成果は我々として大いに感じることができた。

(2) 「核特性の算定と解析」のセッションでは、レビューも含めて合計9件の発表があり、少くとも半数では、高速炉開発がテーマのプロジェクトとして推し進めていっている我が国の現状から見て、当然期許してよい。その受け手は半数以上は我々だと思ふ。又、内容でも核特性2件、ブランケットの反射率の問題2件、トリウム、ボンド効果3件、プリアクティブ断面積による実験解析1件と我が国現在のトピックスを反映してゐたと思ふ。

(3) プログラムの編成は、この9件を3時間30分の1セッションに組みこむつもりで、発表時間はレビューが25分、その他は20分が2件、15分が6件と大抵5分間の討議時間を用ひされた。しかしながら、実際にはその程度を予想してゐた通り、時間超過が重なるため、2分半を定めたにもかかわらず結局15分に短縮せざるを得なかった。

(4) 今後の運営は多少とも改善されるかと思つて当日個々の発表時間、討議時間を

用されスライド枚数を示しておいた。発表時間については予定時間内におさまったものばかりで、他の他は最高9分超過で平均して3分の超過だった。一方、討論時間の方は0~12分で、平均としてはほぼ5分前後維持されたが、やはり特に興味のあるものは10分程度必要だったことが分った。又討論時間の短かったものには発表時間が超過したために強制的にカットさせられたものもあつたので、やはり発表方法に一工夫必要だったことが痛感させられた。近年、スライドを使った発表が量、順次に向上してきていていられるが、今回もスライドを使用した発表件数は6件だった。しかしながら、15分間の発表に最高20枚ほどのを含まず一般に使用枚数が多かつたという印象がある。これは、それが発表時間超過の原因の一つになっていられると思う。やはり15分の発表に適當な枚数は10枚以下だろう。一方、全くスライドを使用しない場合も逆に発表時間を大きく超過する可能性も多分に含まれていることも事実のようであった。今回のミーティングではかなり詳しい報告集が用意されていたことは併せて考へると、このあたりは発表者の一工夫があるように感ぜられた。

(5) 質疑応答では、やはり原子炉の設計・製作と直接結びついた問題であるだけに、実験値を明確に押さえることの重要性、実験と解析の相関性が今までの特性量に対する理論的解析の究明等について熱心な議論があったと思う。現在、プロジェクトを背景にレベル共通の目標があるだけに、今回のトピカルミーティングの成果が更に発展されるものと期待している。

### 三菱原子力工業(株) 岩城 利夫

昨日午後冒頭の発表は原子炉の炉内における発熱分布を中性子にもとづく部分およびガンマ線加熱部分を考慮して統合的に評価する計算コードの開発に関するものである。この問題はエネルギー上昇が大きく、かつ流量の領域調整を行う。という原子炉、特に高速増殖炉や高温ガス炉等の炉心設計においては重要であり、高速原型炉を対象とした定量的評価はこれまでにも学会等において富士電機、三菱等の技術者によって発表されている。今回の発表はこのような背景に対して炉物理研究者の協力してきわめて有意義であり、また計算に必要な定数作成から発熱計算に至るまで一貫したコード・システムにまとめられ非常に実用的なものである。この研究の今後の発展と高速炉設計等への適用を期待したい。なお、筆者の私見であるが、FCA C-3-B1, B4実験解析におけるグラフィック内での不一致はその大部分が中性子束分布の違いによるもので、これを補正することによりガンマ線量率分布は大いに改善されるものと思われる。

### 東工大・小笠原 弘

「高速炉物理」に関するトピカルミーティングがこの時期に開催されたことは大変適切で、秋の国際シンポジウムとの関連もあろうが、とにかくこの分野のアクティビティの大部分を一筆に集めたことは意義深い。内容は炉物理の中でも基礎的な分野の発表が多かつた。

で、レビューも含めた小編の発表の中、発表者の所属で分類すると原研が12、大学関係が12、その他が12になっていて原研がこの分野で大きな貢献をしていることを改めて感じました。しかし石橋さんと共に私が自命を込めた「スペクトル」のセッションでは1編を除くすべて大学関係者からの発表で、炉物理の中でも最も基本的な物理量と考えられる中性子スペクトルに関する理論的、実験的研究が大学において積み上げられていることを知って心強かった。

中でもレビューとして発表された東大・東大炉グループの、「原子炉材料中の高速中性子スペクトル」の実験は非常に解析は最も組織的、系統的な研究で、その内容はすでに国際的な水準に近いことが感じられました。岡山理大・阪大でおこなわれている近似の良い散乱核を工夫して高速中性子スペクトルを精度よく計算しようとする研究は大学で取り上げるとで恰好なテーマと思われる。また東大炉で行われている同一中性子場のスペクトルを異なる検出器で測定し、異なる計算法で処理した時の差違を検討していることは、実験データの信頼度を増すためにどうしても通らねばならない研究のステップを地道に進んでいることが感じられて、その内容は貴重なものと考えられました。

高速増殖炉開発が進むにつれて、改めて炉物理の基礎研究の重要性と、そしてその緊急度が目立ちはじめた。この二つの矛盾を要求に応じてどう答えるように努めることが私の研究者の役目のように思われる。「まどまどやる事があるわい。」というのが二日間のトピカルミーティングに出席した後ご自分の感想である。終りに舞台裏でこのミーティングの開催のためにいろいろ骨を折られた方々に感謝したい。

東大工 原施 石橋 晃

東京工大の山室先生と共に、最終セッションである第二日の午後「スペクトル」の所を座長を勤めた。席の時間が長すぎて大変なので、山室先生と相談して、主に実験と理論という面に分けて、私は後者に当たるB12Rよりの4編を主に担当させてもらった。

B12Rは東大の西原先生で、例によって平易・巧妙な全般的レビューから始まり、気付けぬうちに御自分の研究の高等なポイント迄導かれていくという話術には全く感心させられた。研究面では、不明確な所はひとつひとつ丹念に調べて行かれる方針のようで、体系中の中性子束空間分布の実測値のDIF-IVとの比較など、皆さん感服して聞かれました。これはプログラムの上では、他のレビューも面白いとは思いますが、レビューは独立講義をこなす方がよかったです。レビューをこなす人が続けば半分以上の時間を自らの発表に使うというのは、どこか自然であるし、当人もやりがいがたつたのではなからうかと思われ。

B13は岡山理大の山村先生の連続的減速の理論である。山村先生は学会誌等でもよく、難しげな文章を羅列され、予題強者で辟易させる方であるが、今回もスライドの独断的交流の場にはりばせぬかと、実はひそかに心配していた。しかし先生は要旨のみを要領良く話されたので、具体的なスペクトル図表などは移されたので、命りもよく殺された思いであった。ただし理論の説明が不足に過ぎたかとも思ったので、やせくどい

既に発表済同をしておいた。(勿論私自身が合らばい所があつたからごめすが。)

B14の船研の竹内先生の講演は、遮蔽のベンチマーク実験の種類、コード計算の結果との比較のお話で、大変弟月のかつたごめすうもごめした。これに、実験体系が多種ある上に、4種類のコード計算と比較され、更に断面積ういグラフィックを変えた時の話などにも及んだため、場合の数が多い、聞く者には整理がつかず、印象も薄かつたのではなうかと思われる。時間をちゃんと割り当てて、総合的レビューをするか、逆に、これしか時間が取れないのなら、例えはひとつのベンチマークの話に絞るべき工夫が必要であらう。

B15の北大の工藤さん(院生でしょうか)の、中性子スペクトルと与える空洞効果の発表は、主に結果のグラフであつたから、内容がビジュアルに依り、大変面白かつたのではなうかと思われる。この種の研究は小規模な研究しかできない大学でも取り上げうる良いテーマであり、これに、次第にその内容がぼんやり見えてきた東京工大の山崎先生の、鉄の弾性散乱除断面積に対する遮蔽因子の理論などは、大学での研究のあり方を示唆する好例であらう。

発表としての報告は以上であるが、既に思ふべき数とをこえてしまつたので、以下に全般的(悪くいえば弥次郎的)感想を、単に個条書きに羅列しておきます。私ほどはらからといふと今回のトピカルミーティングが、やや「強行」されたような印象を感じていて、はじめないものがあるのではなうか、徒ら自然、やや莫は芽くな、こいつと思われするのどそのつかりで。

1. 会場2日目は、化学図書館時代の炉物理分科会を偲ばせ、概ね良いのではなうか、通常の学会発表と大差ないタイトスライドは再考を要する。
2. 講演数を半減し、これを終る毎にコーヒーブレイクをこめて、講演者はその間別室でコーヒーでも飲みながらゆくり質問に答える位にできなうか。
3. 年間の行事が今年でも多過ぎる位なので、年会又は分科会の一部又は翌日の一日をそのままとトピカルミーティングのセッションにするのではできなうか。(分科会は元来年会と趣きが違うといふもよい筈のものが、そのままとトピカルになつてしまつてもよいのではなうか。)
4. 予稿の予稿を10頁近くも書かせる(読ませる)ことは精報公報である。予稿は講演者が何をしゃべらんとするのかが分ればよいもので、1ページでよいと思う。(ついでに分科会と年会と異なりページ書かせ、2000円もの予稿集を買わせるのも感心しないと思っている。)10頁程後にするのなら、前に学芸館でやつて頂いた原子力シンポジウムが、発表当日に確定稿を揃つて来させ、印刷の報文集を出して頂いたように行かばいものかと思ふ。
5. 報文集が印刷論文発表の実績とみせしめるようにするには上記の他、和文誌特集号への寄稿を条件とするとかの方法もあつた。
6. 新しい行事がふえる一方、同じ学会の行事である炉物理夏の学校が、幹事の献身的努力にも拘らず、参加者が入っていない。場合によつてはこれを一本化し、トピカルミーティ



ングを例えばオマー・シップやグリンなどの名称で、商標ででもせよ、それはどうか。(日経連の軽井沢セミナーの如く。)

7. 最後に、これはトピカルミーティングに限らず、一般の口頭発表や講演会についても云えることですが、スライドのために場内を暗くするよりはメモを取りずらくするし、目にも悪いし、どうも感心しません。この技術革新の時代にネフライト映写の出来る装置がどうして開発されるいは普及しないのか不思議に思っています。原子力よりは易しいでしょう以上。

## 欧米炉物理委員会(EACRP)第16回会合の印象

原研 弘田 実弥

EACRP 第16回会合が去る6月4日から8日までANL で開かれました。会合の内容は学会誌の談話室(第5巻8号の予定)に投稿してありますが、紙面の都合で書ききれなかったことをここで補足してみます。

まず、わが国の委員数が2名となったことがフランスやドイツなどにかかなりの波紋を投じました。これまで複数の委員がいたのはイギリスとアメリカだけです。もっともイタリヤはイスプラ研究所を含めると2名です。

EACRP の議題はごくしばらく高速炉物理が中心であり、スウェーデンが高速炉物理から後退したこともあって討論に参加できる国の数はかなり限られています。一方、フランスの原子力発電計画が軽水炉を主体に加速されるなどヨーロッパにおいて軽水炉への関心が高くなっており、とくに北欧諸国は軽水炉の炉物理データの入手を強く希望しています。本家であるアメリカが商用ベースであるため、EACRP にもほとんどデータが流れて来ない現状です。

核断面積に関しては、欧米核データ委員会(EANDC)のstory議長からEACRP のHannun

長にあてた去る3月の手紙において、しきい放射化検出器に対する要求精度の問題が提起されています。これについて今回の会合では簡単な討論しかなされず、この9月にウィーンで開かれるIAEAの顧問会(炉内中性子計測のための断面積)に期待されることになっています。

熱中性子炉物理に関しては、熱中性子領域における $\sigma_{235}$ の捕獲断面積と $\sigma_{235}$ の $\alpha$ の値を変えることが温度係数の計算値と測定値間の矛盾の改善に役立つとイギリスのTyror氏が指摘しています。軽水炉では重水炉あるいは黒鉛炉と比較して温度係数の矛盾が最も大きく、熱中性子炉の温度係数における矛盾の真の原因の解明は今後に残された課題です。又、イギリスは高温ガス炉の炉物理について日本と討論会を開くことを強く希望しています。

高速炉物理に関しては、積分データによって修正されたライブラリーをきっちりした形で現在持っているのはイギリスと日本だというのが今回の会合での認識でした。もっともフランスやイタリアなどもそれぞれ修正を行っており、その成果はこの秋に東京で開かれる高速炉国際会議で発表されるということです。又ナトリウムボイド効果についてもこの会議での発表をベースにして次回の第17回EACRP会合で討論することが予定されています。このように秋の高速炉会議のも一意義は大きいということができます。

EACRPの提案している空間時間動特性ベンチマーク問題は予想に反して今回の会合ではあまり進歩をみませんでした。1次元ベンチマーク問題に解答を提出したのは今回の会合の時点ではカナダ、イタリアおよび日本だけであり、2次元および3次元の高速炉および軽水炉ベンチマーク問題は問題作成が予定より大巾に遅れたためです。

最後に、EACRPにとって興味のある会議や会合の予定表を添付しておきます。

#### EACRP-Planned Meetings of Interest

1973

July 2-6	IAEA Symposium on Fuel and Fuel Elements for	Brussels
July 3-6	The Numerical Solution of Differential Equations (Dr. J. L. Morris, Dept. of Mathematics, Univ. of Dundee, Dundee DD1 4 HN, Scotland)	Dundee
July 10-14	Structural Mechanics in Reactor Technology, 2nd intern. conf. (Prof. Dr.-Ing. Thomas A. Jaeger, Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Unter den Eichen 87, 1 Berlin (West) 45, Germany)	Berlin
August 13-17	Third IAEA Symposium on physics and Chemistry of Fission	Rochester, N.Y.
September 10-12	ANS Topical Meeting on Irradiation Experimentation on Fast Reactors	Jackson Lake Wyo.

October 8-12	IAEA Symposium on Experience from Operating and Fueling of Nuclear Power Plants	Vienna
October 9-11	Reactor Heat Transfer (M. Dalle Donne, Kernforschungszentrum Karlsruhe, INR, Postfach 3640, 75 Karlsruhe 1)	Karlsruhe
October 16-23	Physics of Fast Reactors, symp. (Mr. Isao Uchida, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corp. 9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo)	Tokyo
November 1-3	APS Division of Nuclear Physics (Mr. J. A. Harvey, c/o Oak Ridge National Lab., P. O. Box X, Oak Ridge, Tenn. 37830)	Bloomington Indiana
November 6-9	Engineering Problems of Fusion Research, 5th Symp. (Dr. G. Melese d'Hospital, Gulf General Atomic P. O. Box 608, San Diego, Calif. 92112)	Princeton
November 11-16	ANS National Winter Meeting (Karl P. Cohen, General Electric Company, Nuclear Energy Div., 175 Curtner Ave., San Jose, Calif. 95125)	San Francisco
November 14-16	IEEE Nuclear Science Symposium and IEEE Nuclear Power Systems Symp. (H.W. Van Ness, Lawrence Livermore Lab., Livermore 94550)	San Francisco
<u>1974</u>		
March 11-14	Fast Reactor Power Stations, Intern. conf. (Dr. M. R. Hawkesworth, Dept. of Physics, Univ. of Birmingham, Edgbaston, Birmingham 15 2TT)	London
April 2-4	ANS Conference on Fast Reactor Safety (D. Okrent, 5532 Boelter Hall, UCLA, Los Angeles, Calif. 90024)	Beverly Hills Calif.
April 15-17	Technology of Controlled Nuclear Fusion (Mr. G. R. Hopkins, Gulf General Atomic, P. O. Box 608, San Diego, Calif. 92112)	San Diego
May 8-10	Gas-cooled Reactors: HTGR and GCFBR (Paul R. Kasten, ORNL, P. O. Box Y, Oak Ridge, Tenn. 37830)	Gatlinburg, Tenn.

June 9-12	Nuclear Reactors, Intern. conf. (Mr. J. A. Weller, Gen. Mgr., Canadian Nuclear Assoc., 11 Adelaide St. west, Toronto 105, Ont.)	Montreal
June 23-28	American Nuclear Society, 20th annual (Mr. Robert H. Logue, Philadelphia Electric Co., 1000 Chestnut St., Philadelphia 19105)	Philadelphia
September 22-27	The Economic and Environmental Challenges of Future Energy Requirements: 9th World Energy Conference (Karl Cohen, Chmn., U. S. Papers Committee, General Electric Co., San Jose, Calif. 95114)	Detroit
November 17-21	ANS National Meeting (D. G. Pettengill, ANS)	Washington, D.C.
Jan. 29-Feb. 15	IAEA Workshop on fusion Reactor Design	Calham

# ゆらぎの相関の強さ $\hookrightarrow$ coherence function について

(京大・工・原子核)

森島 信弘

## 1. はじめに

炉雑音解析において、2種類のゆらぎの(例えば、中性子雑音と圧力のゆらぎ<sup>(1)</sup>で  
 るとか、空間での2点間の中性子数のゆらぎ<sup>(2)</sup>などの)相関の強さ<sup>(3)</sup>がしばしば問題に  
 なる。これを定量的に調べる目的で、相互相関スペクトル密度から得られる coherence  
 function  $C(\omega)$  が用いられている。この函数の性質としては  $0 \leq C(\omega) \leq 1$  であること  
 いくつかの文献に示されている。<sup>(3)</sup> ここで、角周波数  $\omega$  のとりうる値に対して、あ  
 りくつかの物理量のゆらぎの組合せに対して、函数  $C(\omega)$  のとり値が1に近づくほど近  
 くに調べることにより、相関の強さを比較的に評価している。<sup>(1)(2)(4)</sup>

ところで最近、ゆらぎの相関と函数  $C(\omega)$  のもつ性質との関連があるため問題に  
 されている。例えば、不等式  $0 \leq C(\omega) \leq 1$  の証明方法への疑問とか<sup>(5)</sup> ゆらぎの相関の大小が  
 函数  $C(\omega)$  の値にどのよりに反映されるのか<sup>(6)</sup> などである。本報文においては、炉雑音  
 解析で従来用いられている random process の formalism<sup>(7)(8)</sup> に基づいて、coherence function  
 がもつ性質を調べてみた。なお参考までに、零出力炉雑音の場合、すなわち一群の中子  
 数と先行核数のゆらぎを例にとりながら議論を進めてゆくことにする。

## 2. 雑音遷行列と coherence function

話を簡単にするために、2つの確率変数で記述される系を考える。この場合、相互  
 相関スペクトル密度  $P_{12}(\omega)$  および2つの自己相関スペクトル密度  $P_{11}(\omega)$ ,  $P_{22}(\omega)$  は一般に次  
 のよりに書くことができる。<sup>(7)</sup>

$$P_{12}(\omega) = \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 G_{1j}(i\omega) G_{2k}(-i\omega) A_{jk} \quad (1)$$

$$P_{11}(\omega) = \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 G_{1j}(i\omega) G_{1k}(-i\omega) A_{jk} > 0 \quad (2)$$

$$P_{22}(\omega) = \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 G_{2j}(i\omega) G_{2k}(-i\omega) A_{jk} > 0 \quad (3)$$

よして、coherence function を次式で定義する。

$$C_{12}(\omega) = \frac{|P_{12}(\omega)|}{\sqrt{P_{11}(\omega)} \sqrt{P_{22}(\omega)}} \geq 0 \quad (4)$$

ここで  $G_{jk}(i\omega)$  は変数  $k$  の driving force に対する変数  $j$  への周波数応答函数である。

[例] 零出力炉雑音の場合、変数1を中性子数に、変数2を先行核数に対応させれば、

$G_{11}(i\omega)$  は伝達函数

$$T(i\omega) = \left\{ i\omega + \frac{-\rho + \beta}{\ell} - \frac{\beta}{\ell} \frac{\lambda}{i\omega + \lambda} \right\}^{-1} \quad (\text{記号はすべて慣用のもの}) \quad (5)$$

に相当し、他の  $G_{jk}(i\omega)$  は次のように与えられる。

$$\begin{vmatrix} G_{11}(i\omega) & G_{12}(i\omega) \\ G_{21}(i\omega) & G_{22}(i\omega) \end{vmatrix} = T(i\omega) \begin{vmatrix} 1 & \frac{\lambda}{i\omega + \lambda} \\ \frac{\beta}{2} \frac{1}{i\omega + \lambda} & (i\omega + \frac{\rho + \beta}{2})(i\omega + \lambda)^{-1} \end{vmatrix} \quad (6)$$

また、白色雑音演行列要素  $A_{jk}$  の具体的な表式は Schottky formula を使用して求めることができる。(8) するわけ

$$A = \sum_{\gamma} R^{(\gamma)} \begin{vmatrix} \langle m_1^2 \rangle & \langle m_1 m_2 \rangle \\ \langle m_1 m_2 \rangle & \langle m_2^2 \rangle \end{vmatrix} \quad (7)$$

ここで、 $R^{(\gamma)}$  は種類  $\gamma$  の random event が起る割合を表し、 $\gamma$  の結果変数 1 および 2 に、正味の量  $k$  として  $\gamma$  の  $m_1$  および  $m_2$  の変化を与えたりする。 $(m_1, m_2)$  の添字  $\gamma$  をつけることは省略した。) この量は統計的に分布することが一般的に考えられ、平均操作  $\langle \rangle$  が与えられている。

[例]  $\gamma=1$  を核分裂反応に対応させるに、次のようにする。

$$R^{(1)} = \nu \sum_i N_i, \quad m_1 = \nu_0 - 1, \quad m_2 = \nu_1, \quad \langle \rangle = \sum_{\nu_0} \sum_{\nu_1} P(\nu_0, \nu_1) \quad (8)$$

### 3. coherence function がもつ性質について

#### 3-1 雑音源演行列要素 $A_{12}$ の coherence function

雑音源演行列の各要素を用いて coherence function を次のように定義する。

$$c_{12}^N = \frac{|A_{12}|}{\sqrt{A_{11}} \sqrt{A_{22}}} \geq 0 \quad (9)$$

ここで要素  $A_{12}$  は (7) 式の定義を用いて、

$$|A_{12}| = \left| \sum_{\gamma} R^{(\gamma)} \langle m_1 m_2 \rangle \right| \quad (10)$$

$$\leq \sum_{\gamma} R^{(\gamma)} |\langle m_1 m_2 \rangle|, \quad (\text{但し } R^{(\gamma)} \geq 0) \quad (11)$$

$$\leq \sum_{\gamma} R^{(\gamma)} \sqrt{\langle m_1^2 m_2^2 \rangle}, \quad (\because \langle m_1 m_2 \rangle \leq \sqrt{\langle m_1^2 m_2^2 \rangle}, \text{ 等号は } m_1 \text{ と } m_2 \text{ の分布が縮退している時}) \quad (12)$$

$$\leq \sum_{\gamma} R^{(\gamma)} \sqrt{\langle m_1^2 \rangle \langle m_2^2 \rangle}, \quad (\because \langle m_1^2 m_2^2 \rangle \leq \langle m_1^2 \rangle \langle m_2^2 \rangle, \text{ 等号は } m_1 \text{ と } m_2 \text{ の分布が独立の時}) \quad (13)$$

$$\leq \sqrt{\sum_{\gamma} R^{(\gamma)} \langle m_1^2 \rangle} \sqrt{\sum_{\gamma} R^{(\gamma)} \langle m_2^2 \rangle} \quad (\text{ユウワルツの不等式を利用}) \quad (14)$$

$$= \sqrt{A_{11}} \sqrt{A_{22}} \quad (15)$$

従って、 $0 \leq c_{12}^N \leq 1$  (16)

以上の結果が 3 次の事柄が言える。 $c_{12}^N$  が最大値 1 あるいは  $\gamma$  の非常に近い値をとるための条件としては、

(1) 数ある random event のなかで、あるものは特に卓越していること。(特定の  $\gamma$  に関する  $R^{(\gamma)} |\langle m_1 m_2 \rangle|$  が他に比べて非常に大きい値をとること。)

(2)  $\gamma$  の event により非常に決まった量が生成されること。

があげられる。これは 2 種類の物理量  $m_1$  と  $m_2$  の同時生成に関して最も強い相関を生じる

原因に相当してゐる。この2つの条件が了解出来る程、亦存わち、複数の random event が効果的に存在してゐるか、ある1つの random event にまつて生じる量が大まかに分布してゐる場合には、 $C_{12}^N$  の値は1より小さくなり、4つの問題にしてゐる相関が弱くなることを意味する。

[例] 零出力炉雑音の場合、 $C_{12}^N$  は次のようになる。

$$C_{12}^N = \frac{|\nu \sum_f N_0 \langle (\nu_0 - 1) \nu_1 \rangle - \lambda C_0|}{\sqrt{\nu \sum_f N_0 \langle (\nu_0 - 1)^2 \rangle + \nu \sum_c N_0 + \lambda C_0 + \beta} \sqrt{\nu \sum_f N_0 \langle \nu_1^2 \rangle + \lambda C_0}} \quad (47)$$

明らかに中性子捕獲(もれも含めて)、源からの中性子生成の2つの event の存在は中性子と先行核の同時生成よりも相関を弱めてゐる。また核分裂反応と先行核崩壊が同時に存在してゐることも相関を弱めてゐる。1つサリに核分裂と先行核崩壊が特に卓越してゐるとすれば、

$$C_{12}^N = \frac{\langle (\nu_0 - 1) \nu_1 \rangle}{\sqrt{\langle (\nu_0 - 1)^2 \rangle} \sqrt{\langle \nu_1^2 \rangle}} \quad (48)$$

$\nu_0$  と  $\nu_1$  の値が分布してゐるとして  $C_{12}^N = 1$  と仮定する。  $\nu_0 - 1 = (\nu - 1)(1 - \beta)$ ,  $\nu_1 = \nu \beta$  とおき  $\bar{\nu} = 2.6$ ,  $\sqrt{\langle (\nu - 1)^2 \rangle} = 5.3$  とすれば  $C_{12}^N = 0.98$  である。

### 3-2. 相互相関スペクトル密度の coherence function

まず、(1)~(3)式で与えられたスペクトル密度を、(7)式の雑音源行列要素を利用して、次のように書き改める。

$$P_{12}(\omega) = \sum_f R^{(f)} \left\{ G_{11}(i\omega) G_{12}(-i\omega) \langle n_1^2 \rangle + G_{11}(i\omega) G_{22}(-i\omega) \langle n_1 n_2 \rangle + G_{12}(i\omega) G_{21}(-i\omega) \langle n_2 n_1 \rangle + G_{12}(i\omega) G_{22}(-i\omega) \langle n_2^2 \rangle \right\} \quad (19)$$

$$= \sum_f R^{(f)} \left\langle G_{11}(i\omega) G_{12}(-i\omega) n_1^2 + G_{11}(i\omega) G_{22}(-i\omega) n_1 n_2 + G_{12}(i\omega) G_{21}(-i\omega) n_2 n_1 + G_{12}(i\omega) G_{22}(-i\omega) n_2^2 \right\rangle \quad (20)$$

( $G_{jk}(i\omega)$  の中には確率変数  $n_1, n_2$  が含まれてゐる。)

$$= \sum_f R^{(f)} \left\langle f^{(f)}(i\omega, n_1, n_2) g^{(f)}(-i\omega, n_1, n_2) \right\rangle \quad (21)$$

$$\text{ここで } f^{(f)}(i\omega, n_1, n_2) = G_{11}(i\omega) n_1 + G_{12}(i\omega) n_2 \quad (22)$$

$$g^{(f)}(i\omega, n_1, n_2) = G_{21}(i\omega) n_1 + G_{22}(i\omega) n_2 \quad (23)$$

全く同様にして、

$$P_{11}(\omega) = \sum_f R^{(f)} \left\langle |f^{(f)}(i\omega, n_1, n_2)|^2 \right\rangle \quad (24)$$

$$P_{22}(\omega) = \sum_f R^{(f)} \left\langle |g^{(f)}(i\omega, n_1, n_2)|^2 \right\rangle \quad (25)$$

よって、相互相関スペクトル密度について、

$$|P_{12}(\omega)| = \left| \sum_f R^{(f)} \left\langle f^{(f)} g^{(f)*} \right\rangle \right| \quad (*は complex conjugate) \quad (26)$$

$$\leq \sum_f R^{(f)} \left\langle |f^{(f)} g^{(f)*}| \right\rangle \quad (\text{但し } R^{(f)} \geq 0) \quad (27)$$

$$\leq \sum_f R^{(f)} \left\langle |f^{(f)}| |g^{(f)*}| \right\rangle \quad (\langle \cdot \rangle \text{は和} \sum_{n_1, n_2} \text{および積分} \int d\tau \text{ を考慮しての平均}) \quad (28)$$

$$\leq \sum_{\nu} R^{(\nu)} \sqrt{\langle |f^{(\nu)}|^2 \rangle} \sqrt{\langle |g^{(\nu)}|^2 \rangle} \quad (\text{Cauchyの不等式を。Appendixを見る}) \quad (29)$$

$$\leq \sqrt{\sum_{\nu} R^{(\nu)} \langle |f^{(\nu)}|^2 \rangle} \sqrt{\sum_{\nu} R^{(\nu)} \langle |g^{(\nu)}|^2 \rangle} \quad (30)$$

$$= \sqrt{P_{11}(\omega)} \sqrt{P_{22}(\omega)} \quad (31)$$

従って、coherence function が 1 となる値の範囲は

$$0 \leq C_{12}(\omega) \leq 1 \quad (32)$$

以上の結果より、2種類のゆらぎの間に生じる相関関数  $C(\omega)$  のとり値について、次のように言うことができる。coherence function  $C(\omega)$  が最大値 1、あるいはそれに十分近い

ととれるための条件は

- (1) 主雑音源がただひとつであること。(すなわち、 $\nu$  についての和のうち、ある  $\mu$  だけの項のみが非常に大きい値をもつ時、(27)式および(30)式は等式に近づく。)
- (2) その主雑音源(random event) により生成された2種類の物理量のうち、一方が他方に較べて非常に大きな影響(周波数応答)を及ぼす時。(すなわち、2つの変数への応答を(22)式と(23)式において、右辺が  $m_1$  のみがあるならば  $m_2$  のみを含む項になる。この結果、(27)式および(30)式は等号で与えられる。)

である。明らかなに、これらの条件は、2種類のゆらぎの間に最も強い相関を生じさせる原因にもなっている。これらの条件が与えられる程、すなわち問題の相関が弱くなる程、函数  $C(\omega)$  のとり値は小さくなる。

(例) 零出力炉雑音の場合、核分裂反応が主雑音源であり、しかもそれに伴って生成される印発中性子数と先行核数との割合は  $\beta$  の程度で非常に大きくなったものになっていることが知られている。これは先にあげた条件(1)および(2)を満たしており、従って、中性子数と先行核数のゆらぎの間の相関は非常に強いと見える。

まとめ

慣用の formalism を用いて coherence function のもと性質を調べた。この函数がとり値の範囲は、 $0 \leq C(\omega) \leq 1$  であり、値の大小は相関の度合いを示している。2種類の物理量の同時生成の問題にするか、あるいは2種類のゆらぎの相関の問題にするかによって、coherence function が 1 となるための条件は異ってくる。もし、雑音の空間依存性を考慮に入れた、ゆらぎの相関の問題にするならば、3-2節の2つの条件の他に次のものが加わってくる。函数  $C(\omega) = 1$  となるためには

- (3) 雑音源の効果が2つの観測点へ同時に伝わること。(相互相関スペクトル密度を求めるために雑音源の空間分布に従って積分を行う必要がある。その際、伝わる距離の差が位相因子となり coherence function に影響を及ぼすようになる。しかし、(27)式で  $f^{(\nu)} g^{(\nu)*}$  が実数になることを意味している。)

実験結果の解析では(零出力炉雑音に限らず)、これらの条件がすべて問題となる。



-参考文献-

- (1) 世古能; 昭和47年炉物理炉工学会分会予稿集D36.
- (2) Seifritz, W. and Albrecht, R. W.: Nukleonik, 11 [3], 143 (1968); 11 [3], 149 (1968).
- (3) 制久保, Bendat, J. S. and Piersol, A. G., "Measurement and Analysis of Random Data", (1966), John Wiley & Sons, Inc., New York; Uhrig, R. E., "Random Noise Techniques in Nuclear Reactor Systems", (1970), The Ronald Press Company, New York; Rao, "Linear Statistical Influence and Its Applications" 等である.
- (4) Batch, M. L., Klickman, A. E.: APDA-NTS-13, (1968); Morishima, N., (to be published in J. Nucl. Sci. Technol., 10 [9], (1973)).
- (5) Saito, K.: J. Nucl. Sci. Technol., 10 [4], 252 (1973).
- (6) 昭和47年炉物理炉工学会分会予稿集D36における質疑応答.
- (7) Lax, M.: Rev. Mod. Phys. 32, 25 (1960); 38 541 (1966).
- (8) Saito, K.: Nucl. Sci. Eng., 28, 453 (1967).

- Appendix -

(28)式と(29)式の関係について記す。

1)  $\bar{f}$ , 平均操作  $\langle \rangle$  を  $\sum_{m_1} \sum_{m_2} P(m_1, m_2)$  とする。(積分形としても同様である。) 次の  $\chi$  についての二次形式を定義する。

$$\sum_{m_1} \sum_{m_2} (|f^{(v)}| + \chi |g^{(v)}|)^2 P(m_1, m_2) = \chi^2 \sum_{m_1} \sum_{m_2} |g^{(v)}|^2 P(m_1, m_2) + 2\chi \sum_{m_1} \sum_{m_2} |f^{(v)}| |g^{(v)}| P(m_1, m_2) + \sum_{m_1} \sum_{m_2} |f^{(v)}|^2 P(m_1, m_2) \geq 0 \quad (A.1)$$

この  $\chi$  についての方程式は, 異なる実根をもつことが有り。従って判別式は,

$$\frac{D}{4} = \left\{ \sum_{m_1} \sum_{m_2} |f^{(v)}| |g^{(v)}| P(m_1, m_2) \right\}^2 - \left\{ \sum_{m_1} \sum_{m_2} |f^{(v)}|^2 P(m_1, m_2) \right\} \left\{ \sum_{m_1} \sum_{m_2} |g^{(v)}|^2 P(m_1, m_2) \right\} \leq 0 \quad (A.2)$$

従って, 求める関係式(シュワルツの不等式)

$$\langle |f^{(v)} g^{(v)}| \rangle^2 \leq \langle |f^{(v)}|^2 \rangle \langle |g^{(v)}|^2 \rangle \quad (A.3)$$

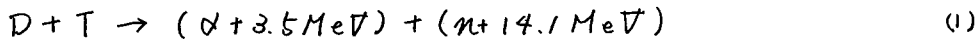
が得られた。なお等号が成立するのは  $|f^{(v)}|$  と  $|g^{(v)}|$  とが比例する場合であるが, 本報文で扱っている問題では, 必ずしも場合は一般的には起らない。(しかしながら,  $|f^{(v)}|$  と  $|g^{(v)}|$  の具体的な函数形が(22)式と(23)式で与えられているため, 次の場合,

$$\left. \begin{aligned} f^{(v)}(i\omega, m_1, m_2) &\simeq G_{1k}(i\omega) m_k \\ g^{(v)}(i\omega, m_1, m_2) &\simeq G_{2k}(i\omega) m_k \end{aligned} \right\} (k=1, 2, 3) \quad (A.4)$$

が考えられる時, (A.3)式は等式となる。これは3-2節の条件(2)に生じる根拠である。

プラズマ閉じ込めの可能性が現実味を帯びて来るに従って, 核融合炉の概念設計がいくつか行われるようになって来た。すでにその全体像については二, 三の解説記事も出ている。この程, 原子力学会の「核融合炉調査」研究専門委員会では, 核融合炉についての調査を行い中間報告書をまとめたので, それを機会に核融合炉の核的側面について述べてみる。

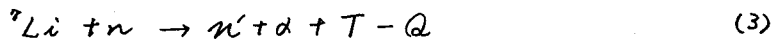
話を, プラズマ閉じ込めの最も容易な D-T 炉に限るとプラズマ中の



反応により発生した 14 MeV 中性子を如何に上手に, そのエネルギーを熱の形でとり出し, 且つ天然には存在しないトリチウムを生産するのに利用するかが核設計のポイントになる。また, ブランケットは超電導マグネットに対する遮蔽の役目も果たさなければならない。まず, トリチウム増殖について述べると, 親物質であるリチウムに中性子をあてるとよく知られている



の反応の他に, 小さい値を持つ



の反応が加ってトリチウムが増殖されることになる。(3)の反応は実効的には 5 MeV 以上の中性子でないと起らないため, 14 MeV 中性子が他の核種によつて減速する前に  ${}^7\text{Li}$  にあてるようにしなければならない。(2)の反応はほぼ  $1/2$  の断面積を有するから 5 MeV 以下の中性子は積極的に減速させればよい。これは遮蔽の点からも望ましい。ブランケット内での発熱分布は(2)の反応が発熱反応であるところから, (2)と(3)の反応率分布の和に近い形の分布となる。発熱にはこの他, 8線による発熱が加わる。プラズマに直接に面したウ1壁には, さらにプラズマからの輻射, 荷電粒子の衝突による加熱が積みま<sup>0</sup>る。他の大きな核設計上の問題は, 超電導マグネットに対する遮蔽である。超電導マグネットの領域での中性子束を, 現在言われているように  $10^8 \sim 10^9 \text{ n/cm}^2\text{-sec}$  に抑えなければならないとすると, 例えばウ1壁で  $5 \text{ MW/m}^2$  の熱負荷を有する炉の場合, ウ1壁における中性子束に比して  $10^6 \sim 10^7$ , 薄まなければならない。これまでの設計例の殆んどは約 2 m の厚さのブランケット領域のうち, 前半の 1 m を親物質および反射体の領域, 後半の約 1 m を遮蔽に費している。核融合炉のコストの 50~60% が超電導マグネットによって占められると推定されていることから, 遮蔽も含めて, このブランケットを如何に薄くするか非常に重要となる。

従来のいわゆる純粋な意味での“炉物理”の面から見た主な特徴は

- 1) 入射中性子のエネルギーが 14 MeV であること。
- 2) 中性子の発生源が対象とする領域の外にあり, 一方向から中性子の入射して来ること。

- 3) 分裂連鎖のような中性子のエネルギーおよびその数のフィードバックの現象がないこと。(Fusion-Fission Hybrid Reactorは別である。)

である。3)の特徴は分裂炉の場合に比べて著しく“炉物理”を面白味のないものにし、これが炉物理屋を余り核融合炉に惹きつけない原因となっている。1)の特徴は分裂炉の場合と比べて、取扱わなければならぬ反応の種類を著しく増加させる。非弾性反応においては、 $(n, n)$ の他に $(n, 2n)$ 、 $(n, p)$ などの断面積が大きくなり、弾性散乱においても前方散乱が著しくなる。従来から5~14 MeVの間の中性子断面積は乏しかったが、この領域の断面積(非弾性散乱のマトリックスも含めて)がトリチウム増殖に大きな影響を与える。Li, Nb, Moなど分裂炉では余りなじみのない核種が対象となることが多いだけに、ここ暫くは断面積のデータの蓄積が最も重要となる。断面積としては中性子断面積のみならず、 $\gamma$ 線断面積、荷電粒子断面積、更に材料の損傷に関係するいわゆる原子断面積も整備されなければならない。さらにこれらの断面積から energy deposit を計算する KERMA FACTOR も整備する必要がある。断面積測定では ANL が素早く Nb について測定を開始したが、そのような態度は見ならわれるべきであろう。

計算法は当然  $S_n$  またはモンテカルロということになる。特に2)の特徴から中性子束の異方性がガソ壁近くでは著しく、最近、非増倍系体系で問題になっている計算と実験との不一致の原因をつきとめなければならない。また、アスペクト比(=トラス半径/プラズマ半径)の小さなトラス炉ではトラスの計算を直接行うには、2次元以上の計算が必要となる。発熱計算、遮蔽計算は分裂炉の場合より一層、精密にならなければならない。

次に、実験の面から見ると1)の特徴が決定的な影響を及ぼす。ブラケット内の数 MeV~14 MeV の中性子のスペクトルを測定する方法は今のところない。 $^6\text{Li}$  を含んだシンケレータが14 MeV 中性子を観測できる唯一の検出器と現在では考えられる。また、トリチウム増殖が実際にブラケットで行われているかどうかを確認するのが炉物理の実験屋の大きな仕事ではあるがこれとでもなかなか容易ではない。その他、体系内での $\gamma$ 線の線量分布、およびそのエネルギースペクトルの測定など、測定技術の開発という点で融合炉は大きな未開拓領域を提供しているように思われる。但し、この領域は高速炉物理において壁に当たっている領域だけに、そう簡単に成果の得られるものではない。

従来の分裂炉における炉物理の知識が核融合炉の開発に不可欠であることは言うまでもないが、炉物理屋が技術を身につけた技術者としてではなく、研究者としてとれだけ核融合炉に興味を持つことができるか、できるとしたらどのような分野においてかということも何かの機会に検討される必要があるだろう。これまで述べて来たことがそのような議論のきっかけの一助になり、現在、炉物理の研究にたずさわっておられる方々の御意見をお聞かせいただければ幸いである。

P 型 「再生」 計画について

東大 若林宏明

東海村にある2kW定常熱出力の小型高速炉「再生」を非定常状態で運転する計画は、5年前、この炉の設計開始とともに始まり、今後、炉の反応度状態を研究臨界状態にして、パルス状出力運転を行う予定であり、これをP型「再生」計画と呼んでいる。本計画の詳細と現状については、第一回高速炉物理トピカルミーティングに報告文集、A6に述べたが、要約として、放射線源としての研究炉の可能性を拡張するため、一般的に、原子炉システムの特徴と安全性の観点より確認していくことがその目的であり、種々のポロネウム-210 (pos1~4, 45, Rポロネウムと呼ぶ) が既に準備され、本年度以降、強力中性子源としてのLINACが建設されることとしている。

原子炉の運転規程は、科学技術庁に提出した「設置承認申請」により抑えられた。現在、①最高熱出力200kW、②正印加反応度0.7%dk以下 ( $\beta_{eff} = 0.725\%$ )、③炉心温度最高400°C、④積算出力0.6MW.S/cycle以下、7.2MW.S/hour以下の炉心温度が50°Cを越えるものは1000回以内という条件になっている。

この5、6月の上記内容に対する科学技術庁の「使用前検査」が行われ、この詳細については現在報告書がまとめられ、秋の今科会、春の年令等で報告の予定であるが主要な結果を列挙する。

- ① pos のうち最大の反応度振動のピークは pos 3 の最大反応度振動は 1.4% dk である。しかし、pos 1-3 の 7-スレは、約3分の反応度振動がとれる。
- ② 最高駆動速度をもつRポロネウム素子の反応度は0.175% dkであり、炉心部通過時間は約100  $\mu$ sec である。
- ③ pos 振動実験の結果、これまでのように電気的、機械的に安全上の問題となる異常はほとんどない。又、可能な全周波数領域においてシステムは安定である。
- ④ 1W出力状態に0.6% dkの反応度をステップ状に投入することにより出力上昇試験を行った。結果は、フィードバック効果は弱く、167.5kWにおいて $\rho = 0$ となった。200kWにするためにはより大きな反応度印加が必要である。

今回の試験をもとに、今後、種々の特性測定を行い、装置の信頼性の確認とともに、「再生」の核熱結合動特性を明らかにして、安全と研究臨界運転を可能ならしめることが、差当りの目標である。

なお、上記報告文集にミスがあるのでこの場を借りて修正します。

P.48. 中程 「... が明確にな、た。又図10にみるごとく... 意味深い。図11参照」 と。

「... が明確にな、た。(図10参照) 又図11にみるごとく... 意味深い。」に。

P.49. 11行 「... 0.34, 0.192, 0.779% dk」 と 「0.156, 0.107, 0.368% dk」 に。

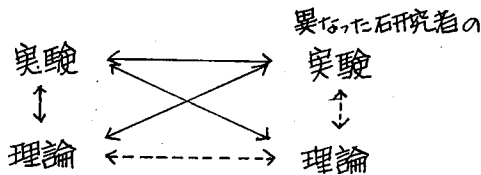
以上、

# 標準中性子場について

京大原子炉実験所 神田 啓治

## 1. はじめに (1,2)

標準中性子場とは、物質と或る特殊な中性子集団（一般的にはエネルギー的に見て）の相互作用をみる時の中性子集団を提供する場で、次のような条件が望ましい。



- (1). 或る特殊なエネルギースペクトルを持つ中性子のみを取り出せる。
- (2). そのスペクトルは既知であること。（測定可能であること）
- (3). そのスペクトルは装置固有のものではなく、一般的、普遍的であること。（実験者によらず再現性のあること）
- (4). そのスペクトルは解析的に表現できること。
- (5). 中性子束の絶対値が既知であること。
- (6). 中性子強度が、大幅に変化できること。
- (7). 中性子の流れの方向が既知であること。（beam が isotropic）
- (8). 目的の反応以外が生じないよう contamination の少ないこと。（他のエネルギーの中性子、ガンマ線など）

古い実験などでは、例えば熱中性子断面積の測定に単に reactor spectrum - Cd-cut などと書いてあるが、原子炉ごとにスペクトルが違われ、Cd-cut off エネルギーも種々の問題があり、決して標準場とは云えないなどの例が多い。

## 2. 標準熱中性子場 (3,4)

熱中性子については、重水熱中性子設備の Maxwell 分布を利用するのがよい。他のものは

- ・黒鉛熱中性子柱——黒鉛の結晶によるスペクトルの凸凹がある。
- ・軽水熱中性子柱——吸収が大きい。水素の高速の断面積に問題がある。
- ・原子炉の反射体——中速中性子が混入している。

しかし、重水も1辺1.5 m程度なければ、純 Maxwell は得られない。例えば、インドで行われた実験は1辺60 cm程度だが、Maxwell 分布とは全く違った形をしている。その点、京大炉の重水設備は、ほぼ、すべての条件を満足しており、45°Cの重水では60°Cの純 Maxwell 分布が得られている。参考までに flux は、標準状態で  $\sim 10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$

である。詳細は文献参照のこと。

### 3. 中速中性子場 (5, 6)

#### 3-1. $1/E$ スペクトル

一般に吸収の少ない媒質中の減速スペクトルは、 $1/E$ になるが、原子炉の反射体内のスペクトルもこれに相当する。従って共鳴積分の測定には殆んどこの reactor spectrum が利用されている。この場合、熱中性子は cd 板で cut されるのが通例である。

#### 3-2. 中速の平衡スペクトル

吸収が強い体系に高速中性子が打込まれると、吸収と減速(及びもれ)のバランスから体系内のスペクトルは

$$\phi(E) \sim \frac{\exp(-\lambda\sqrt{E})}{E}$$

で与えられる。ただし

$$\lambda = \frac{\sqrt{E_0}}{3\delta_s} \int_{E_0}^{\infty} \sigma_a(E) \frac{dE}{E}$$

これは、例えば黒鉛と  $B_4C$  を組み合わせることによって実現可能である。実験的には、南城がこれを実証している。<sup>(6)</sup>  $\lambda$  をかえることによって種々のスペクトルが得られるのが特長である。

### 4. 高速中性子場

#### 4-1. 核分裂スペクトル (7, 8)

核分裂スペクトルは、数多くの測定値があり、解析的表現も幾通りか提案されている。積分データとカウンター等による測定に若干の差が見られるが、<sup>(7)</sup> やはり基準スペクトルとしては一番よい。

熱中性子柱と核分裂板(濃縮ウランの板、ワイヤ、箔など)を組み合わせれば容易に目的のスペクトルが得られる。Room Return の中性子をうまくカットすることが難しい。

解析的表現の例 (Watt 型)

$$N(E) dE \sim \exp(-bE) \sinh \sqrt{cE} dE$$

#### 4-2. $\lambda >$ 減速された高速中性子場

実際の高速炉の理論-実験のチェックのためには、核分裂スペクトルよりも  $\lambda >$  低いエネルギーの中性子場が欲しい。しかしたとえ東大炉のような単純な形状をした炉でも普遍的な中性子場を作り出すことは容易ではない。

そこで、上の 4-1 と 3-2 を組み合わせたいようなスペクトル場を作ることがあちこちで考え始められているようだが、<sup>(7)</sup> 未だ確立していない。例えば、エネルギー、コンバータに  $B_4C$  などをおく方法である。

## 5. その他の話題

### 5-1. フィルターを用いる方法

熱中性子をカットするための Cd フィルターはよく知られているが、その他にも Gd フィルターを用いて、熱中性子を切る中性子場、Be フィルターで *cold neutron* を通過させた場、など断面積のエネルギーによる大、小を利用して、ある程度標準場に近しいものが作られる。

### 5-2. クリスタルモノクロメータ等

あるエネルギーの中性子だけを取り出すという意味からは、クリスタルモノクロメータとか多数チョッパーを組合せる速度選別器 (*velocity selector*) など、或はヴァンデグラークのような加速器も特定のエネルギーの中性子を取り出せるが、ここでいう標準場とは少々考え方が違う。

### 5-3. Hot source と Cold source

最近、結晶の研究者などから要請されている中性子場は、熱中性子に比べて、*hot* とか *cold* という意味である。原子炉の反射体領域に、高温又は低温の媒質をおいて、そこから中性子を取り出すなどの方法が考えられている。

## <参考文献>

- (1) 神田啓治, 「研究炉の中性子線質の問題点」, KURRI-TR-110, pp.25-28 (1973)
- (2)-1 神田啓治, 「KUR 実験照射設備の中性子束とスプレッドの測定」, KURRI-TR-60, (1966)
- 2 K.Kanda et al., "Measurements of Neutron Flux and Spectrum at Irradiation Facilities of Kyoto University Reactor", Annu. Rept. of KURRI, 2, 18 (1969)
- (3) 柴田俊一, 岡本朴, 神田啓治, 「KUR 実験標準熱中性子設備」, KURRI-TR-48 (1967)
- (4) 神田啓治, 「KUR 重水設備による標準熱中性子場について」, KURRI-TR-59, pp. 2-12, (1967)
- (5)-1 井上和秀, 楠城力, 神田啓治, 「中速体系の中性子スペクトルについて」, KURRI-TR-20, (1966)
- 2 K.Inoue, K.Kanda, T.Nanjyo, "On the Spectral Indices on Intermediate Energy Neutron System", J. Nucl. Sci. Technol., 3, 42 (1966)
- (6)-1 楠城力, 「中速領域における中性子スペクトルの研究」, 京大学位論文, (1972)
- 2 楠城力, 「ライナックによる中速中性子スペクトルの測定」, KURRI-TR-59, pp.35-38, (1969)
- (7) 神田啓治, 小林善二, 「中性子エネルギー-2×10<sup>7</sup>-」, KURRI-TR-96, (1972)
- (8)-1 K.Kanda et al., "Measurements of the Averaged Neutron Cross Section of Some Threshold Reactions for Fission Neutrons", Annu. Rept. of KURRI, 4, 94 (1971)
- 2 菅谷浩, 神田啓治, 「核分裂反応による平均 (2×10<sup>7</sup>) 断面積の測定」, KURRI-TR-95 (1972)
- (9) 引田 A.B. Smith, "Fission Neutron Spectra Perspective and Suggestion", IAEA Report (1966)
- (10) 高松博氏私信

# Flux Peaking について

京大原子炉 林 正俊

現在、日本で熱中性子を利用する研究者の間で高熱中性子束炉の建設を望む声が大まくなっている<sup>1)2)</sup>。

原子炉の中性子束密度は、一般に原子炉の出力に比例するから高熱中性子を得るためには、高出力密度の原子炉を作ればよいことになる。しかし熱除去の問題などがあるため原子炉はいくらでも出力密度を上げることはできるといふ訳にはゆかない。それでも燃料と減速をうまく組合せることにより、可成りの熱中性子束が得られることがわかってきている。すなわち、炉心燃料部のスペクトルを硬く (*undermoderated core*) して周辺の減速材領域に炉心から漏れ出た中性子が熱中性子のピーキングを形成する (炉心表面より  $\sim 10$  cm の所) ことを利用する<sup>3)</sup>。このような原子炉の例として HFBR (BNL) がある<sup>4)</sup>。この原子炉では、炉心燃料部の接種方向に熱中性子ビーム孔を設け、高速中性子および線量の比率的に少ない熱中性子を引出して利用している。また、こうした減速材領域を炉心の内部に置いて熱中性子をそこにトラップした型の原子炉として HFIR (ORNL) がある<sup>5)</sup>。こうしたことにより周辺部よりも高い熱中性子束を得ている。しかし、この場合にはその高熱中性子束はビーム実験には向かないもので炉心照射に利用されるだけである。

現在、京都大学原子炉実験所で考えられている 2 分割フラックストラップ型高熱中性子束炉は、上記 2 つの炉心の長所を兼ね備えたもので、通常の炉心を 2 分割し、その 2 つの炉心の間に減速材領域を設けるものである<sup>1)2)6)</sup>。こうすることによって、両側の炉心から漏れてくる中性子は、中央の減速材領域で熱中性子のピーキングを形成する。このピークは炉心周辺部の減速材領域でのピーク値よりも大きくなる<sup>7)</sup>。更に、この熱中性子トラップ領域と視るビーム孔を設けることにより、高速中性子および線量の比率的に少ない良質の熱中性子を得ることが出来る。

## 2 分割炉心設計の問題点

炉心部を完全に 2 分割した炉心は世界に例がないため、このような原子炉を具体化する際には、検討されなければならない問題が多くある。それらを列記すると、

### 1. ピーキング領域

ピーキング領域減速材の選択 ( $H_2O$ ,  $D_2O$ ,  $B_2C$ ,  $C$ )

ピーキング領域の広さ

ピーキング領域を視るビーム孔の大きさ、方向および数

ピーキング領域の熱中性子束、熱外中性子束および高速中性子束

ピーキング領域のから流出する熱中性子束、熱外中性子束および高速中性子束

### 2. 炉心燃料部

*undermoderate* の程度および熱除去

出力ピーキングファクタの制限



燃焼度を大きくするための burnable poison

### 3. 制御の問題

2分割炉心の coupling 特性

制御棒の効果

反応度係数

熱中性子束一定制御などのための計算機制御<sup>9) 10) 11)</sup>

以上のような問題点を検討するために現在建設中の京都大学臨界集合体がある<sup>6) 12)</sup>。この臨界集合体は、2つの固体減速架台と1つの軽水架台と1つの制御系とから成っている。上記の問題点の検討は、軽水減速架台で行なうことが出来る。

### 参考文献

1. 京大原子炉実験所 HFR 専門研究会編「高中性子束炉とその利用」KURRI-TR-93 (1971)
2. 京大原子炉実験所 HFR 専門研究会編「高中性子束炉とその利用(2)」KURRI-TR-110 (1973)
3. S. M. Feinberg et al., 「An Intermediate Reactor for Obtaining High Intensity Neutron Fluxes」 Proc. 2nd UN Conf. Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva (1958)
4. J. M. Hendrie 「The Brookhaven high flux beam research reactor」 Proc. 3rd UN Conf. Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva (1965)
5. T. E. Cole ORNL-CF-60-3-33 (1960) その他
6. 日本原子力学会、炉物理連絡会会報「炉物理の研究」 第14号 p. 26
7. 京大原子炉実験所 HFR 専門研究会、原子炉設計研究会「京都大学高中性子束炉の基本設計」 (1973)
8. M. Hayashi et al., 「Measurement of Neutron Flux Distribution in Flux Trap Core with KUR」 Ann. Rep. Res. Reactor Inst. Kyoto Univ. vol. 5 (1972) 81
9. 神田啓治他編「原子炉の計算機制御短期研究会報告」 KURRI-TR-75 (1970)
10. K. Kanda et al., 「Application and Future Program of On-line Minicomputer for Control of High Flux Research Reactor」 Enlarged Halden Programme Group Meeting on Computer Control, at Loen (1972)
11. 神田啓治他編「第2回原子炉の計算機制御短期研究会報告」 KURRI-TR-109 (1973)
12. 柴田俊一他「京都大学臨界実験装置」 原子力工業 vol. 19 NO. 4 (1973) 40

# 強中性子源をめぐる最近の動向

在アルゴンヌ 木村 一治  
(東北大・名誉教授)

## 1. 緒言

去る1973年3月渡米, Asilomar Conference Ground, Death Valleyなどを経て Argonne に来て, いろいろな事企らんだが, あまりうまく行っていない。Asilomar Conference は原子核が主だったが,  $e$ ,  $\gamma$ 線の応用もあり, 東北大リニアックでの成果がかなり認識してもらえたと思う。私は photo neutron burst を用いた凝集体の研究についてリニアックでの実績を話したら, Summary talk で NBS の Bowman は特に取上げていた。

それから Argonne に来て, 4月末から始まる ZING\* Work shop を待っていたのだが, ZING の完成をまつより, 今出かかっている ZGS の Booster injector の陽子ビームを使ってパルス中性子を出し, それで凝集体構造解析の Mock up exp. をやってみたらと提案した所, ZING 関係者や CP-5 で中性子回折をやっている化学者などみずみずしく賛成したので, それをいわゆる「日米」, 正確には学振と NSF による「日米科学協力事業」の一端として Argonne-東北大の協力でやってみようとしたが, それがうまく軌道に乗らなくて, みんなに迷惑をかけた。更に, 今夏それが実施できることを私だけでなく Argonne の中性子関係者もみな信じていたが, 最近むしろ根の深い政治的問題がからんで来てしまって, その可能性がなくなり, 今は来年を期してみな努力しているところである。

\* ZGS による Intense Neutron Generator の略称

## §2. ZING Work shop

ZING の主な推進者は Michigan 大と併任の J. M. Carpenter 及び D. L. Price (中性子回折) であるが, CP-5 をつこう化学部所属の人たちなどかなり広い支持層がある。目下の Argonne の重宝目標は  $\alpha 1$  が Superconductive Heavy Ion Accelerator で次が ZING で, 前者は試作機はうまく行っているが, 本物をどこにつくるかは未定の由。ZING 計画は ZGS 利用価値増大もねらって 1969 年頃から出発したもののだが, 未だ AEC の Authorize もなく, 今は何とか状況がこんとんとしている。それは止むをえないとしても, Mock up まで潰される理由が分らない。

ZING Work shop 南催費 (約2万ドル) は Argonne の研究担当副所長 M. V. Nevitt が世話して AUA (Argonne Universities Association) からもらって来たもので, Work shop は初めの予定より大規模になり特に外国からの参加者が多くなった。6つのグループに別れ,  $\alpha 1$  が  $\Delta E$  の大きい非弾性散乱,  $\alpha 2$  が  $\Delta E$  の小さい非弾性散乱,  $\alpha 3$  が単結晶,  $\alpha 4$  が均質体 (粉体も),  $\alpha 5$  が放射線損傷研究 (主に核融合炉用),  $\alpha 6$  が「見込

みと向題桌」(要するに設備関係)で私はこれに属していた。この *Proceeding* は私も原稿整理などを手伝っているが近月中にできる予定。各グループで標準的な実験を考へ、数量的に評価したが、オートの  $\Delta E$  の大きい非弾性散乱の場合など、かつて東北大でやり、1971年イスララでの *EUR-JAPAN JOINT MEETING* に出した *Computer Exp.* (Pd 単結晶による中性子非弾性散乱の測定、石川、渡辺、木村)と同様な結果であり、どれも大体我々がかって検討したことと同じである。私が *Plenary session* で力説したこと——パルスは単結晶にも有効である——はオースグループの結論でも大いに強調された。

### §3. MIT リニアックなど。

MIT の *High Duty 400 MeV* 電子リニアックは東北大と同じく核物理が主だが、いろいろなことにも利用されよう。何となく *Stanford* の巨大リニアックのミニチュア版のような感じ。このリニアックを利用して *O.K. Harling* の *LANS* 計画というのを *AEC* に提出している。要するに東北大と同様、パルス中性子で凝集体構造解析を行う(特に液体ヘリウム)ものだからもしリニアックが予定通り  $e^-$  ビームを出せば(100 MW), 東北大よりよほど強力であろう。Harling にいろいろ意見を求められぬが、リニアック本体にさえ中々予算が充分とは言えないのに、*AEC* はこれに金を出すだろうか? もし出すなら、その前に *RPI* のリニアックを閉鎖しないで、こゝでもやれば既有設備がほとんどそのまま使えるし、国家的見地からはよほど有効なのだから。*RPI* リニアックが *AEC* の原子炉部の監督下になっているばかりに近しい中に *Shut down* される。僅かなお金を有効に使う術を知っている研究者に任せないで、巨額の金を注ぎ込みながらお役人というものは、作ったり閉鎖したり、代がしく仕事をしていることを誇示しないと出世しないものらしい。実施不可能な法令を施行してみたり、下民のいやがることを無理に命令したりするのは、秦の始皇帝以来、権力者が権力を保持していることを常に知らせるためであろう。

### §4. NBS と BNL への旅

5月末、*BNL* で強中性子源の将来に関する *Work shop* があり、*NBS* 訪問と共に出席する機会をえた。*NBS* の中性子 *TOF* は立派な設備がほぼ完成していた。ここでは電子散乱など原子核の研究は次々に小さな *Share* となり、当分の間中性子は50%の *Share* を割り当てられるという。中性子断面積の測定は *Oak Ridge* などと重複するものではなく、*Bureau of Standards* としてふさわしい標準校種の絶対測定などを目指す。

*NBS* のリニアックは150 MeVで東北大より2~3年前から発足し、250 MeVに増強しようとしたが今はあきらめているようだ。それでもMITの核物理の連中はNBSまで実験をしに来ているし、やがてRPIの連中もNBSの連中もMITリニアックを使

いに行く日が来るだろう。たとえ旅費が充分あっても他人様の所へ便に行くのは楽じゃない。かつての日本電建じゃないが、小さい下らも楽しい我家で研究している連中は大いに感謝すべきだ。

BNL Meeting は Workshop という名にふさわしくないが、共産圏を除く世界中のEの所から集った桌では注目に値する。各それぞれ自分の歩んできた道の延長を主張するが、中心課題はやはりパルスか定常型かにあり、それをめぐってBNL, ANL, LASLあたりが静かな、しかし、し烈なならみ合いをしている雰囲気が感じられる。それに100 MW, HFIRをかへえたORNLも黙っていない。初日の午後はHFBR見学が予定されていたのが取り止めとなり、今度の主要テーマの一つであるZINGについて閉じることになり、J. Carpenterの話がくり上げたのはよかった。主な源計画としては定常炉でBNLのUC<sub>2</sub>粉末燃料ロケット用原子炉の仕様を和げたもの(熱中性子束 $5 \times 10^{16}$ , 出力30 MW, He冷却, 温度上昇 $4000^\circ F$ ), ORNLのHFIRの延長(200 MWで $7 \times 10^{15}$ , 建設50M\$, 維持4M\$/y, 750 MWなら $2 \times 10^{16}$ 可能であるという), LASLのKING炉(液体燃料パルス炉)などが並んだ。パルスでは印度のパルス炉がとにかく臨界実験装置の写真を見せたばかりの強みはある。日本のLB計画も一応紹介してあったが、最近 $10^{16}$ にspec. upした話をもっと力説すればよかった。LASLのWVR (Weapons Neutron Research) はいつか出来るであろうが我々には無縁の存在である。たとえば、50%のマシントイムは一般に公開されるにしても、 $10^{16}$ を堂々と主張するパルス計画がまだ出て来ないのは残念。

利用者から見た話としては、BNLのMolecular Biology関係者は従来型炉を主張していたのに対し、その他は一般にパルス中性子源に将来を期待する声が多い。Egelstaffの言い方を借用すれば、将来の最も大きな利用者グループであり、かつもっとも進んだ技術を要求すべき生物学者は一般にもっとも保守的で、次に化学者、もっとも単純な物質の構造解析をする物理学者がもっとも強い要求を出す。

パルス中性子源が欲しいという声は多いが、いよいよ何か作るようになったらどうなることか。McGovern! McGovern! と叫びながら、フタをあけて見たら圧倒的にNixonだったというようなことが起るかも知れない。

プログラムにすればAECに出す提案をつくる組織をつくることになっていたが、ORNLのM. WilkinsonとBNLのHastingsが主になってやっているらしい。しかし、それよりAECは強い中性子源の必要性を未だあまり高く評価していないことの方が問題であろう。

Dr. W. Kleyが最近印刷されたEURATOM-JAPAN JOINT MEETING 1971のProceeding 20冊をもって来てくれた。さぞ重かったろう。今私の机の上にこれと、Grenoble Symposium on Inelastic Neutron Scattering, 1972のProceedingが並んでいる。このGrenobleのSymposiumはいろいろな意味でimpressiveだが、その一つとして我が日本からの寄与が一つもなく、参加者も一人も居なかったという事実がもっともimpressive。この状況は大いに気になる。日本がこれから抜け出すには、何か抜

本的な策が必要である。当分 Grenoble 炉に威張られるのは止むをえないとしても、その後をいいただくためには  $10^{16}$  のパルス中性子源を至急発足させる他にない。

(1973. 7. 10)

Oak Ridge だより

(在 ORNL)

玉 河 元  
(名大 工 原子核工学)

3月17日に名古屋を発ち、20日の日航機でアンカレッジ経由アメリカ入りをしました。生来嫌いな語学と引込み思案でどうなるかと心配していましたが、苦すれば通ずる何とかその場その場を切り抜けて早くも4ヵ月経ってしまいました。日常生活の買物等は現物を目の前にしていますし、研究室では数式と図面という万国語を十二分に活用しています。接する人々が皆親切にしてくれるのは有難いです。私はORNLのPhysics divisionのVan de Graaff Lab.に属しています。LabのbossはC. Moakという人で、ここではHeavy Ion Laboratoryを作る構想で大いに張切っています。或る程度軌道に乗っているようですが、例のクソンの引締政策がここにも浸通し、なかなか思うようにはいかなく苦勞しているようです。研究所もなかなか世知辛くなってきた感じが言葉もろくろく通じない小生にも十分に感じとることが出来ます。寄ると触ると経費節減の話とWater Gateの話がさかっているようです。先日も経費節減の為air con.の夏の設定温度を高くし冬の温度を下げる様なことをいっていました。しかし日本の大学の我々にとっては彼等はその辺はよほど恵まれているから大したことはなからうと思うのですが、やはり問題のようです。しかし一般のアメリカ社会は(といてもOak Ridgeの田舎とニューヨークの空港のどく周辺しか見ていませんが)むしろつつましい生活をしているように感じました。この点我々日本人の方が最近は特に淡手になっているように私は思います。

話が横道にそれてしまいましたが、私はVan de Graaff Labの中でion sourceの開発の研究をやっているGroupの中に入っています。Chair's Jonesという人がグループリーダーで、

heavy ion source に主眼を置いて殆ど自由に研究をしています。私が現在引受けているのは micro wave による放電で電子温度を高くすることができるので、この辺からうまい方法が見出すことができるかもしれないという着眼のもとに行っているものです。皆さん御存じの義に ORNL では核融合関係の研究が一つの project として盛んですが、この中に electron resonance heating を利用した INTEREM という装置があります。この装置は mirror coil といわゆる Jost 磁場を作る quadrupole coil を組み合わせて中心に磁場の well を作り、その中に plasma を閉じ込め、又 micro wave の周波数と well の周辺の磁場での electron cyclotron frequency を一致させて加熱を行う装置で、数百ボルト以上で限はおそらく数百 KeV 程度の electron energy を導いています。この装置は核融合の為の研究は大体終り空いているのに目をつけ、この中に Kr, Xe, Kr, 等の重いガスを入れてどの位迄荷電の多いイオンが得られるかをたしかめようとするのが目的です。Xe 等ではおそらく平均荷電が 13 以上も可能ではないかと予想している人もいますが、今迄核融合の為の研究で対象が殆ど水素であつたので、異なる気体を使った時の種々の現象が plasma physics の観測からみても非常に興味のある所と思っています。所で荷電数を計るといっても plasma 自体が非常に強い磁場の中にあり、しかもその磁場が単なる mirror でなく非常に複雑で一寸簡単には頭に画くこともできないようなものですから、如何にしてイオンを引出し、その荷電の分布を知るかもそう簡単な問題ではないものですから果してうまく測定できるか未だ確信はつかめていません。

何をしても日本の貧乏大学と異なつて優秀な engineer, technician がいるものですから工作等はおそらく日本の 4 倍位の speed で出来ますし、又自由に使える計算機がすぐ手元にあるのは全くうらやましく思います。

私の属している division が異なるので原子炉関係のことは全くわかりませんが、これは ORNL の話ではないのですが、先日 TVA の 40 周年記念日に各施設を一般に開放しましたが Oak Ridge から 20 マイル程南西にある Brown Ferry の原子力発電所を原研の能沢さんと NAI のから来ておられる長尾さんと三人で見に行きました。原子炉は三基建造中の中一基は今年中に運転を開始すると言っていました。建物の屋上に一杯に作られた冷却塔が全く壮観でびっくりしてきました。

# AB Atomenergi だより

中村 尚司 (京大 工学部)

## (1) AB Atomenergiについて

(ABというのは、Aktie Bolagetの略で、Limited Companyの意味です)  
2・3年前に比べて少し規模が縮小され、一部はASEA Atomの方に研究が移され、現在約1000人の人が働いています。政府出資50%・ASEA Atom出資50%位と思うのですが、現在だんだん政府出資が減ってASEA Atomからの金が多くなり、そこからのお金をもらうために研究内容がBasicなものからPracticalなものに移っているようです。残念だが仕方ないとのことでそれにともなって秘密の部分が多くなったようで、先日私のいるReactor Physics sectionで全員のseminarが開かれましたが、これはごく少数のスウェーデン人に限られていてからということでは私も参加できませんでした。

こういう上に述べました事態の変化は私の知る限りの判断によりますと、スウェーデンが重水炉の自主開発を打切ってアメリカのBWR, PWRを導入することに踏み切ったことにあると思われます。スウェーデン最初のAgesta炉は現在なお発電と暖房に使われていますが、次のMarviken原子力発電所が失敗したことが重水炉方式をやめたきっかけだと思います。このMarviken炉はかなりuniqueな設計だったようですが、その複雑さのため安全性の問題でうまくいかず現在火力発電になっており、この人はOil Powered Atomic Power Stationとよんでいます。しかし現在このMarviken炉を使って原子炉の安全性についての実験が国際的なプロジェクト(Marviken Project)として行われ、たくさんの炉工学の専門家や学生達がそれに参加しています。内容については専門外なのでよく分かりませんが、アメリカ、ドイツ、スイス、オランダ、デンマークなどの人達と会いました。現在実験が一段落して解析に移っているようです。先日、日本の原子力委員会の井上五郎氏がAB Atomenergiにこられ、このMarviken Projectに関心をよせて帰られたとあとで伺いました。私は井上氏には会っておりません。

現在Swedenでは数多くのAtomic Power Stationが建設又は計画されていますが、それはすべてアメリカからの導入です。Oskarshamn炉が現在動いており、その他にForsmark, Ringhals, Barsebeckなど全部で7基ほど今後建設される予定です。ところで先日テレビで、ノーベル賞をもらったスウェーデンの有名な科学者(名前は忘れましたが)、スウェーデンにあるすべての原子力発電所は一年以内にすべてstopすべきだといったとかで研究所の人達がたいへんだとさわいでいました。それに対しASEA Atomの社長が反論を述べたりしていたようですが、何しろスウェーデン語がさっぱり分らないのでその後どういう結着がついたのか又はつかないのか分かりません。今年9月のスウェーデンの総選挙とからんでなかなかやましいようです。

話を研究所の方にもどりますと、こゝは次の部門に分かれています。

Industrial Project and Market Development

- 1) Program and Market Development
- 2) Uranium Mining Facility
- 3) Enrichment Technique
- 4) Isotope service

Research, Relations with other Organization

- 1) Solid State Physics
- 2) Ordinary Physics (MHD included)
- 3) Neutron Physics
- 4) Nuclear Chemistry
- 5) Documentation

Material and Fuels

- 1) Physical Metallurgy
- 2) Corrosion and Reactor Chemistry
- 3) Fuel Technology
- 4) Hot Laboratory for Fuel Elements
- 5) Material Research Reactor R2

Reactors

- 1) Reactor Physics 私はこの部門におります
- 2) Mechanical Conotruction (Engineering)
- 3) Heat Laboratory
- 4) Reactor Control
- 5) Technical Data Handling (Data Processing)

Safety and Technical Service

- 1) Safety Analysis
- 2) Health and Safety
- 3) Waste Disposal of Activity
- 4) Analytical Chemistry
- 5) Technical Service
- 6) Workshop

Administration

以上です。

さて Reactor Physics Section での仕事内容について少し説明します。ここは Dr. Hellstrand を長として 5 人の人々から (私を除いて) 成っています。以前はもっと多かったです。縮少されたそうです。かなりの人は ASEA Atom などに移り今も ASEA Atom の方でほとんどその仕事を行い、ここには 1 週間に 1 度位しか顔を見せない人かゝる人います。高速炉の Critical Assembly と KRITZ と呼ばれる pressurized zero power reactor とがこの section に属していますが、高速炉の方は資金が打切られて炉は閉鎖されています。高速炉の実験はすべて



めて現在計算だけをしているようですが、その実験をしていた人は Activation Analysis や Neutron Radiography の方に研究内容を変えています。とても残念だが仕方がないとその人は言っていました。高速炉関係の研究では、ヨーロッパではイギリスが一番進んでいるとのその人の言でした。

この部門全体についても実験の比重が下り、研究のうちの75%は計算で25%が実験です。実験に関係している人は少人ほどであると計算専門です。今 KRITZ を使って実験が行なわれています。7月の休みもとらずに連日徹夜で実験が行なわれていますが、計算関係の人は休暇をとって休んでいるのか私の感覚からいって少し不思議に思います。それぞれ仕事の内容がはっきり分れていて手伝うことを余りしないのはやはり大学とちがって会社だという雰囲気を感じさせられます。又時間もきちりしていて朝は8時に始まり、昼休みは11時15分頃から12時、ティータイムは2時半から3時、帰りは4時半とほんとにきちり、皆それを守っているのにも感心しかつ驚いています。又若い人が少なくほとんどの人は私よりずっと年上で40~50才という所だと思われれます。私一人が外国からの留学生で、日本人を迎えたのはこの部門では始めてだといっていました。

今 KRITZ でやっている実験は、種々の炉心構成を作つてこれに中性子をあてて生じる fission product からのガンマ線を  $2^{\circ}\phi \times 2^{\circ}\text{NaI}(\text{Tl})$  シンチレータで測定し、その炉心構成における power distribution を求めるものだそうです。私はこれに関係してないのでよく分かりませんが、これはドイツにある Obrigheim Atomic Power Station からの依頼で7月中に結果を出すことを要求されているので非常に急いでいるのだそうです。ただ使っている測定器(シングルチャンネル、HV、スケーラーなど)が古いのですぐ故障をして実験がなかなか進まないそうです。なせもっと新しいのにしないのかとききましたら、お金がないので買えないという返事でした。又 R<sub>2</sub> Reactor (Material Testing Reactor) を使って thermal neutron を fuel rod に照射しやはり fission  $\gamma$  ray を測定し、それから rod 中の fuel 密度を知つて燃料の均一性をしらべる routine work もしていました。これはアメリカからきた fuel の check だそうです。

計算では炉心格子計算が主です。ここには ENDF/B をもとにしてこれから Group Cross Section を作り、これを炉心計算に用いられるようにしたコード BUXY というのがあります。以前はこの作成のためにかなりの人が努力したようですが今はもうほとんど終わっているようです。又以前 Carlvik が Collision Probability Method で種分型輸送方程式をとり炉心中性子束分布を種々の炉心型について求める仕事をしていましたが、その流れが今も続いています。現在二次元の炉心格子の中性子束分布計算コードを開発する仕事が行なわれて私はその仕事にたずさわっています。Dr. Häggblom という方とい、しよにしております。すでにここには DIXY という Diffusion Eq. による二次元コードと BOCOP という二次元の collision Probability Method によるコードがありますが、BOCOP は point-to-point flux で計算時間が長くかかって実用上使いものにならないし、(正確な点では良いのですが) DIXY は精度の点で問題があります。又 SFINX という手法のコードがあるのですがこれは ASEA Atom が開発したので非公開で使えないということで、私の仕事は Collision Probability の Nodal Method を使って精

それがよくしかも計算時間の早い次元コードを作るというものです。一応 Haggblom が基礎的程式はすでに私がここに来た時には作っておられました。私はまず Collision Probability の勉強から始めて次に Nodal Method を知りさらに彼の式のチェックをしてさらにそれを近似もよくすることを行って、いま、その途中にあります。と同時にその計算コードを作ることも行ない Escape Probability と Transmission Probability の計算コードについては一応完成しました。

遮蔽関係については、ここには、以前別に大きなグループがあり、Dr. Aalto を中心とする遮蔽実験と Dr. Leimdörfer, Dr. Hjärne を中心とする計算とがなされ有名な  $NRN$  (除去拡散) コードなどが作られストリーミング実験などがなされましたが、彼等三人が皆他へうつってしまってそのグループはなくなりそれに関係していた人が人ほどここに移っています。二人の人は今も遮蔽関係の仕事をしていますが、一人は今他へ出向中で一人は研究よりむしろ依頼された遮蔽計算をしているようで Activity は今おちています。彼の話によります。Marviken 炉には遮蔽実験用の他にはない非常に unique な実験孔の計画がなされていて、遮蔽研究者は非常に期待していたのにその炉が火力発電になってしまって実現しなかったりは遮蔽研究にとって非常に不幸なことだといっていました。何でもコンクリート壁に穴をあけて炉心にわずか  $5\text{ cm}$  の深さの所まで接近できる設計になっていたようでコンクリート中の flux 分布や damage,  $\gamma$ -heating についての貴重なデータがえられるはずであったそうです。AEA Atom の方に遮蔽関係の研究グループがありますが私にはよく分かりません。又一人は安全性の問題に関して Safety Committee などにも出ているようですが、それは秘密なので内容が他人に言えないし公表もできない。残念だが仕方がないとのことでした。

AB Atom energy には Instrument の section があり先日それを見せてもらいました。種々の計測回路や fission counter, ionization chamber などを作られ売られています。この計測器は世界的にとても有名だそうです。ここではある室でソニーのトリニオンカラーテレビを display に使って研究をしていました。医学などのトレーサー研究で濃淡の他に色による表示を加えて二次元表示をするのだそうで非常に面白いものだと思います。

ウェーデンには原子力学会に当るものはありません。何故かときいたのですが、一つは秘密が多いことともう一つは研究者の数が少ないことだそうです。大学には原子力工学というのではなく講座としてはストックホルム大学とイエーテボリ (Göteborg) 大学にあるようですが、その研究は原子炉とは余り関係がなく cold neutron とか activation analysis といった分野だそうです。いわゆる原子炉関係の研究はこの Atom energi がほぼ唯一の研究機関であるのは ASEA Atom と National Defense Laboratory にある位のもので、ですからここの人達はアメリカとかドイツとかで発表をしているようです。

### (2) 光核反応国際会議について

はじめにお断わりしておきますがもう三月あまりたってかなり志れたことと、初めての外国経験で英語に慣れていないし、しかも専門がかなり違っていたのでよく分らなかったこととで余りくわしくお伝えできないことお許し下さい。

これは第4回の International Conference on Photonuclear Reactions and Applications で今年3月25日か

ら3月31日までノ週間アメリカ・カリフォルニア州モンテレー市にあるアシロマー会議場で開かれました。参加者は1000人ほどではないかと思われる位大勢の人達で、しかもその範囲が核物理から化学、医学関係者まで含む幅広いものであ、たので驚きました。

会場は白砂青松の海岸に面し、観光地としてアメリカで有名な所であり、保養所として松林の中に点在して建てられた大小の室が会議、食堂、ホテルとして使われ、雰囲気としては絶好の場所でした。出席者達も皆非常にくつろいだ格好で観光気分が盛り上がっていましたが、しかしdiscussionはなかなか熱心に行なわれていましたし、夜も会議がありました。日本からの参加者は私を除くとすべて核物理関係の方ばかりで、東北大の庄田先生、島塚先生、木村先生、原研の更田氏、広島大の方(名前を忘れまして)、理研の方(名前を忘れまして)の計7人(私も入れて)でしたがその他にBNLにおられる高橋氏もきておられていろいろ話をいたしました。

26日はOpening Session でまずgeneralな話をとくに大学院生や非専門の人達のためにさげやりました。大学院生も何人か参加していたようで、これにはDr. Berman(この会議の最高責任者)も開会のあいさつで特に喜んでいろいろと褒められました。このOpening SessionはIntroductory Remarks, Systematic Properties of the Giant Resonance, Total Photon Absorption-Particularly above 30MeV, Collective Models, Microscopic Modelsのちっから成っていましたが、初めてきく内容で英語が早いでよく分かりませんでした。ただ最近光核反応の実験が以前のBremsstrahlungの連続スペクトルの光子を使ったものからpositronをLiHにあててannihilationのγ線を使うものに変わってきたそうです。Bremsstrahlungを使う時はそのスペクトルがきちんとしていることが前提条件としてあり、この誤差がそのまま光核反応の断面積の誤差にまいていましたが、annihilation γ線は単色エネルギーなのでそれがなくなり測定精度がぐんとよくなったことが分かりました。やはりgiant resonanceの所に一番注目しているらしくgiant resonanceの低エネルギー部が理論式とずれていることなど話されていました。又(γ, n)(γ, 2n)反応が中心になっていて(γ, p)反応は断面積が小さく測定がむづかしいので余りデータがないとのことでした。

午後からはparallel sessionに移り、私はこのうちの1つのTechniques and Instrumentation sessionに出ました。Self-Powered Bremsstrahlung DetectorsとHigh-Resolution Spectrometerという招待講演のち一般講演に移りました。最初の頃は100名ほどの聴衆だったのに途中でどんどんと人が入れ変わり減って行って20~30名になってしまい、それからしばらくして私の番になり少しがっかりしました。私はMeasurement of Bremsstrahlung Spectra Produced in Iron, Tungsten and Lead Targets by 15-, 20- and 22-MeV Electrons with Activation Detectorsという講演をしました。ちょうど司会者が東北大の木村先生で時間のことを全然気にかけられませんでしたので、私にとっては非常にありがたかつぶん時間をオーバーしたのですがおかげで言いたいことをすべて言えて安心しました。質問もあってこの研究は非常に将来性のある研究だといわれて大いに元気つけられました。

人が入れかわり立ちかわりなのは日本の原子力学会でも計測の会場はいろんな専門の人の寄せ集まりで、どんどん人が入れかわると全く同じだと思ひ少しおかしくなりました。

も8時から10時頃まで session-があり、女性も含めて秘書など裏方の人達は12時近くまで心に仕事をしているのには全く感心してしまいました。すべて非常によく organize される感じでした。

翌日は疲れはてたため一日会議を休んで近くの Carmel という町のツアーに出かけました。もちろんこの会議が計画したいろいろなツアーのうちの一つです。

27日は午前中は Reaction Near the Particle Threshold の招待講演をききました。(γ, n) (γ, p) 反応の他に (n, γ) 反応についての話しもあり。(γ, n) と (n, γ) の対比が興味深かったのですが残念ながらもう忘却の彼方へ去ってしまいました。午後は Parallel session でこの日から Application の session が始まりききましたが Activation Analysis の話しが多かったと思います。夜は Application の招待講演があり Photodisintegration and Nucleosynthesis in Stars, Nuclear Reactions in Reactors, Pulse Radiolysis, Cancer Therapy with Bremsstrahlung と非常に盛りだくさんでした。原子炉での光核反応については鉄のタンク中に oil を入れてそれを原子炉内に置いた時、oil 中での thermal neutron flux の空気分布が oil 中に Bi を入れた時と入れない時とで入れた時の方が急激な減少を示し、これは  $^{13}C$  の (γ, n) の寄与によるものであるとというような内容の話しでした。

28日はすべて招待講演になり午前中は Photoactivation と Radioisotopes の話し、午後は Photo-nuclear Facilities の話しでした。午後の最初の話しは Survey of Photoneuclear Research Programs and Data Compilations でこれは光核反応のデータ編集のたぶん現在も、とても熱心で進んでいる所であります。NBS の Dr. Fuller が話しをされ、光核反応の断面積のデータがどの核種についてよくなされいるとか、年代順、国別、反応種類別のペーパー数とかの表を示しておられました。次に Microtron についての話しがあり、これは低エネルギーで大電流がとれ安価な利点があり又連続運転もパルス運転もできることを強調されていました。10~20 MeV 位では Linac より電流がとれるし将来はもっと高エネルギーにも使えるだろうということでした。

activation analysis, cancer therapy, non destructive test などいいようですが連続運転できるということであれば Bremsstrahlung や光中性子のスペクトロスコープにも非常に便利ではないかと思いました。現在世界に約10台あり最大のもはソ連の Dubna にある最高30 MeV エネルギー-最大電流100 MA のものだそうです。続いて Future Accelerators for Photoneuclear Studies の話しで重要な点は monochromatic photon をうることと Energy resolution と Duty Cycle だということでした。Duty Cycle をます方法としては

- 1.) Expansion of travelling wave linac technology
- 2.) Application of new wave guide structure
- 3.) Super conductivity linac
- 4.) Recirculation techniques
- 5.) Pulse stretcher storage rings
- 6.) 上記5つの組合せ

が考えられるそうです。最後に Survey of Monochromatic-Photon Capabilities について話しがあり、その方法として

- 1) Nuclear reaction  $\gamma$  rays \_\_\_\_\_ capture  $\gamma$  rays
- 2) Bremsstrahlung  $\gamma$  rays
  - a) Photon monochrometer
  - b) (r,n) 反応の n time of flight を用いる。
  - c) Photon spectrometer
  - d) Bremsstrahlung spectra difference method
- 3) Positron annihilation
- 4) Backscattering of laser beam

などが挙げられました。この日の夜は banquet が少しはなれた Naval Postgraduate School でありました。立派な室で立派な食物にかまされてやや圧倒されました。有名な Weinberg 氏が来られて、Does Nuclear Physics Really Matter? という題で話しをされましたが内容は全く覚えていません。

最後の日は午後から summary session になり、Highlight of the Conference と Application of Photonic Nuclear Reactions について話しがあったあと Panel Discussion on the Photonic Nuclear Future があって終わりました。Application の話で私の興味を引いたのは Photonic nuclear reaction や neutron capture reaction は shielding の研究で重要だという点でこれはまさに我々の研究室が現在やっている又はやろうとしている方向なので非常に心強い思いをしました。こういう国際会議に出て発表をすると、いろいろな人から質問をうけたり別刷をくれといわれたり内容についての説明を求められたり自分の研究を他の人に広く知ってもらえたし、又もちろん他の人の研究について分るし知人がいろいろできるしで本当にいいことだと思ひ、若手がどしどし参加すべきだと思ひました。大学院生もたくさんきていたし、日本からももっとたくさん若い人がくるべきだと思ひました。お金の問題があり大変ですが。

今日はスタンフォード大学のスーパーライナックとガンデムバンデグラフと Super Conductivity Linac の建設現場とを見学しました。この Super Conductivity Linac はすべて手作りでやっているのに感心しました。いい Technician をたくさんかかっているからできることだと思います。加速管を液体ヘリウムに浸しそれに Nb でできた cavity を入れて super conductivity 作るそうで、現在 40 MeV 100 MA まで成功しているそうです。これは連続運転が可能なので応用範囲がぐっと広がると思われます。スーパーライナックはさすがに巨大で crystron が無数に並んでいるのに又驚きました。

## 編集後記

今回の炉物理の研究は「冷中性子」と「ホノ回トピカルミーンティング 高速炉物理」という二大特集を予定しましたところ、充実した内容の原稿が集まり編集者としては誠に喜ばしい気持です。原稿料をお出しするどころか原稿の清書までお願いして出版するこの会誌に、このような優秀な論文や報告が寄せられていることは本当に素晴らしいことと思います。「炉物理」のたくましいいぶきを感じます。

今回もEACRPの報告を弘田実弥博士にお願いしました。

森島信弘氏は新たに京大工学部助手になられた方で、炉雑音に関する理論の新進の学徒です。今回は同氏の寄稿をいただきました。

炉中性子利用研究専門委員会からは、講演要旨を今後寄稿して下さるとのことでしたが、約束どおり、各氏の寄稿を得ました。今後ともお願いしたいものです。他の関連した専門委員会からの同様の御寄稿を待ちます。

在外だよりの欄は、アルゴンヌ研究所の木村一治先生、オークリッジ研究所の玉河元先生、それに北政スエーデンのAB研究所の中村尚司博士からの玉稿を飾ることができました。

この他、動燃事業団の方に「日独高速炉会議」の報告などをお願いしていましたが、未だ開示制限とのことで断念しました。動燃事業団の進めている原子力の開発の重要性は万人の認めるところですが、その活動の多くに開示制限があることは感心しません。原子力基本法第26条を見なおすべきであると思います。

オチ回炉物理夏の学校が8月5日～8日に開催されました。その報告の原稿を待っているのですが、まだ参りませんので次号にします。

次号では「核融合炉の炉物理」の特集をする予定です。「研究室だよりの」も載せたいと思います。原稿締切は11月10日(土)といたします。

(京大炉・木村逸郎)

炉物理連絡会會員名簿(1)

(北大工)	井上和彦	中土井昭三	木村逸郎	石川寛	小林節雄
小川雄一	(東海大福岡校舎)	砂子克彦	小林圭二	一守俊寛	坂田義治
小澤保知	(都立大理)	(久世寛信)	佐藤孝司	葛西木子	東原良夫
成田正邦	(早大理工)	(並木美喜雄)	柴田俊一	金子藤博	宮脇松人
斉藤慶一	(城西大)	中山隆	茶谷浩	五藤頼男	仁紫明
松本高明	(立教大原研)	服部学	中込良宏	後藤康之	野本昭二
(東北大)	(名大工)	(玉河元)	林脩平	菊池岩夫	福田達
木村一治	(阪大工)	伊藤只行	林正俊	小林育郎	望月恵一
梶山一典	(石黒九州男)	加藤敏郎	藤田薫	杉暉夫	湯本三史
中屋重正	(吹田徳雄)	仁科浩二郎	山田修作	田次泰	相原永
本多毅	(往田健二人)	(京大工)	米田憲司	関吉	柳沢義明
三井鞠	(大谷暢夫)	大谷啓祐	(石黒九州男)	田次晴通	(川崎重工)
平川直弘	小林丁政晴	丁政晴	石黒九州男	中川正幸	坂野耿介
(東大工)	西原宏	西原宏	関谷全	中島雅彦	田中義久
安成弘	兵藤知典	兵藤知典	吹田徳雄	西田正雄	田中良佑
清瀬量平	堀江淳之助	堀江淳之助	往田健二人	能沢徹	長渡甲太郎
近藤駿介	森島信弘	森島信弘	高橋亮夫	平岡実	(原電)
下野英俊	(京大工研)	(京大工研)	錦織毅次	平田実	武田充司
関口晃	楠城力	楠城力	宮崎留次郎	弘田悠	立花昭哲
都甲泰正	星野力和	星野力和	山岸留次郎	吉田祥次郎	(住友原子力)
中沢正治	吉川栄和	吉川栄和	(近大)	松浦一	松延志幸
占橋晃	若林二郎	若林二郎	堀部治	坂武彦	(電中研)
若林宏明	(京大炉)	(京大炉)	三木良彦	向山武彦	思地健雄
末宏忠輔	宇津呂雄彦	宇津呂雄彦	水本良彦	森口武彦	(東京電力)
(東工大)	岡本朴	岡本朴	原文雄	安野武彦	北野昭彦
原子炉工研)	小野光一	小野光一	(東大弥生宿舎)	前川洋	(東芝)
相沢乙彦	神田啓治	神田啓治	秋山雅胤	中田宏勝	牧野格次
新井栄一			(九大工)	柏辺輝雄	吉岡律夫
山室信弘			大田正男	(動燃専業団)	(電発)
(東海大工)			片瀬彬	飯島一敬	大塚益比古
石田正次			大沢孝明	岩井誠	平田昭
黒田義輝			(原研)	植田精彰	(原燃工)
阪元重康			飯泉仁		
永瀬慎一郎					

炉物理連絡会会員名簿 (2)

古田 敏郎  
 (三井造船)  
 八谷 雅典  
 (船研)  
 伊藤 功  
 布施 卓嘉  
 (電総研)  
 天野 文雄  
 清水 定明  
 (東京原子力産研)  
 西川 元之  
 (富士電機)  
 中村 久  
 (三菱電機)  
 路次 安隆  
 (三菱原子力)  
 伊豫 徳保  
 岩城 利夫  
 片岡 巖  
 小倉 成美  
 小林 隆俊  
 近藤 達夫  
 沢田 隆  
 中野 靖士  
 中村 邦彦  
 隼田 公彦  
 迎 正弘  
 渡海 親衛  
 (築地 諒)  
 (NAIG)  
 青木 克忠  
 飯島 俊吾  
 亀井 孝信  
 黒沢 文夫  
 小松 一郎

清水 彰直  
 角山 茂章  
 野村 致  
 深井 佑造  
 水田 宏  
 内田 一雄  
 横山 勉  
 (日立)  
 伊藤 新一  
 大西 忠博  
 川合 敏雄  
 栗原 国寿  
 今井 博  
 斎藤 正之  
 小西 俊雄  
 駒田 正興  
 瑞慶覧 篤  
 武田 征一  
 芳賀 暘  
 藤野 充平  
 松岡 謙一  
 山本 正昭  
 和嶋 常隆  
 竹田 鍊三  
~~三田 敏男~~  
 高橋 文信  
 (日立造船)  
 小林 徹二  
 山田 毅  
 (住友電工)  
 川本 忠男  
 福本 良男  
 (関西電力)  
 横手 光洋  
 (北陸電力)

奈賀 靖和  
 (中電)  
 金井 英次  
 (大阪通産局)  
 岩本 靖  
 (住友電機)  
 志村 吉久  
 (三菱重工)  
 三村 泰  
 (吳羽化学)  
 松井 一秋  
 (七社十社中心)  
 角谷 浩享  
 (大成建設)  
 太田 雅啓  
 (木村化工機)  
 豊田 道則  
 (日本揮発油)  
 上野 茂樹  
 (岩田ホールド工業)  
 岡本 毅  
 (日本ニッケル工業)  
 清水 康一  
 (防衛庁)  
 佐久間雄平  
 (大阪市立大)  
 鶴飼 正二  
 (動燃事業団)  
 武井 博明  
 佐々木修一  
 和泉 啓  
 (川口工業高校)  
 森 洋介  
 武田 栄一

九鬼 隆彦  
 (原子力発電  
 訓練センター)  
 小早川 透  
 (原発)  
 大塚 剛宏  
 木下 豊

計 227名



## 炉物理連絡会の概要

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(年額600円、学生会員は500円)を前金で納付する。なお、前金切れと同時に失格する。