

炉物理の研究

(第 40 号)

1991年 3 月



巻頭言 「炉物理」の定義	藤田薫	1
〈会議報告〉		
1. 第33回NEACRP会合報告	金子義彦, 若林利男	2
2. 「トリウム利用」日印セミナーの報告	木村逸郎	12
3. NEACRP「3次元中性子輸送ベンチマーク」の報告	竹田敏一	17
4. 第6回「原子力におけるソフトウェア開発」研究会	田中俊一, 平野雅司	22
5. 「中性子および光子輸送計算のためのモンテカルロ法」 国際会議の印象	中川正幸	26
〈留学記〉		
1. プロヴァンスの青空	岡嶋成晃	29
2. 留(流?)学記	長壁正樹	34
3. Impressions and Thoughts on the Japanese Research Activities	Imre Pázsit	37
4. Impressions and Expectations of Research in Japan	Robert A. Jameson	41
〈トピックス〉		
1. 超冷中性子の話	宇津呂雄彦	44
2. 高エネルギー加速器開発における遮蔽研究 ——現状と今後の課題	中村尚司	50
3. 原子力船「むつ」の船出	伊勢武治	71
4. 炉物理夏期セミナーの歩み	中込良広, 神田啓治, 木村逸郎	76
〈研究室だより〉		
1. 東大・工学部附属原子力工学研究施設 原子炉本部		78
2. 京大・工学部原子核工学教室 炉物理グループ		79
3. 京大・工学部原子核工学教室 放射線工学・遮蔽グループ		80
4. 京大・工学部原子核工学教室 中性子工学・中性子応用グループ		81
5. 動燃・大洗工学センター プラント工学室		82
6. 動燃・東海事業所 先端技術開発室		83
7. 原研・燃料安全工学部 核燃料施設安全評価研究室		84
8. 原研・原子炉工学部 核融合炉物理研究室		86
☆事務局だより, 編集後記		88
☆平成2年度会計報告		89
☆会員名簿(現 216名)		91



(社)日本原子力学会

炉物理連絡会

巻 頭 言

「炉物理」の定義

京都大学原子炉実験所 藤田 薫 顕

原子力の研究あるいはその基礎研究において大学人はその特質をどのように生かすべきか、などについて議論をしている場合、何度か発言しあつた段階で、互いに見解を同じにするのか異にするのか解らなくなることがあります。その理由に、「原子力の研究」の範囲について、それぞれが異なる考えをもっていることがあります。核分裂エネルギーに関する研究を念頭におく者もあれば、生命の起源における放射線の役目に関する研究までをも「原子力の研究」に入れている者もいるようです。

さて、「炉物理とはどんな学問分野か」について説明の必要なことがあります。学生への説明などは当然ながら、昨今ではカリキュラムの再編成にあたって、あるいは「京大研究炉は炉物理の研究にどう役立つのか」等の問に答えるなどでもあります。このような場合、例えば本誌の裏表紙にある本会の「対象とする専門分野」を逐次説明するようなことになりませんが、それでも「⑨その他の関連分野」について相当の説明を加える必要があります。ちなみに、数年間にわたって本誌の表表紙を見返してみると、固有安全炉、スパレーション中性子、消滅処理、核燃料サイクル、量子工学、中性子利用等々は⑨に分類されそうで、しかも相当な割合を占めています。

「炉物理とは、中性子の集団的挙動にかかわる物理である。」と大塚益比古先生が（多分第1回の原子力総合シンポジウムだったと思います）おっしゃられたのを、当時学生だった私は今も記憶しています。記録しておいたわけではないため、実際におっしゃられたこととは少し違っているかもしれませんが、それ以来私はこれを「炉物理」に対しての定義としてきました。今や私の古典的存在となつていますが、昨今は⑨その他の関連分野を包絡しようとするれば少し修正の必要があると思つています。「炉物理」の簡明な定義に関して、30～40才の2、3の炉物理研究者に聞いてみたことがありましたが、特に意識しない、とのことでした。

「⑨その他の関連分野」を積極的にとりいれた新しい炉物理の定義をお考えつきの方はいませんか。ぜひお教え頂きたいものです。会員の皆様の中には、進展のめまぐるしい専門分野の内容を定義するのは如何かという考えもありましようが、炉物理の今後発展にとって、これまで炉物理研究成果の継承にとって、また特に若い研究者や学生にとって有益であると考えます。

<会議報告 1.>

第33回NEACRP会合報告

日本原子力研究所
金子 義彦
動力炉・核燃料開発事業団
若林 利男

第33回NEACRP会合は、去る10月15日から19日の期間、パリのOECD本部に於いて開催された。

1. Exective Session

Exective Sessionでは、NEAの長期計画の中でのNEACRP(炉物理委員会)の今後の在り方についての議論が中心であり、各委員の意見を取りまとめて、以下の主旨のスタートメントを発表した。

- 1) 各国の原子力開発計画からの要請に基づき、炉物理研究に関しての重要事項について情報交換を行う。
- 2) これからのNEACRPの活動は、炉心核特性解析、炉心設計、解析手法開発、遮蔽、臨界安全、燃料サイクル、核融合ブランケット、制御及び炉特性監視、安全関連特性、将来炉、試験研究炉及び大型加速器施設を含むものとし、当面の活動の重点事項は、新型炉概念の評価、炉特性監視把握及び3次元動特性コード開発等とする。
- 3) NEACRP会合での討論、専門家会議の開催等を通じて、加盟国の炉物理研究進展の寄与を強化する。
- 4) CSNIとの間には、協力すべき境界領域がある。炉物理は、安全解析及び規制上の判断について基礎となる重要な情報を提供するよう努力する。
- 5) NEANDCの核データ評価活動に緊密に協力していくが、一体化は考えない。というのは、両委員会の業務の内容的は、本質的に異なっているからである。

次年度の計画については、10月7日～11日の間、スイスのPSIで会合をもつこととした。また、消滅処理研究の在り方について、スタートメントをまとめようとしている。Technical Sessionの課題としては、新しいトピックスとして別添1に示すように、計算機のアーキテクチャが放射線輸送計算コードへ及ぼす影響を取りあげるほか、継続トピックスとして消滅処理と核融合ブランケットの炉物理等を取りあげることになった。また、ベンチマークとしては、安全性に係る物理として、3次元の動特性計算があがっている。

2. New Topics

2.1 軽水炉におけるプルトニウムサイクルについての課題

論文 A-1047～A-1049(ベルギー)は、VIP計画について述べたものである。この計画はLWRにおけるMOX燃料の利用に関する炉物理・炉工学上の問題の解決について研究炉(VENUS)等の施設を使って実験的根拠を得ようとするものであり、日本のLWRメーカーも参加することになっている。

論文 A-1055(CEA)は、フランスのPWRでのプルトニウム装荷の2年間の経験についてまとめている。

論文 A-1116(ドイツ)は、西独でのPuサイクル研究活動のまとめである。

論文 A-1066(日本)は、燃料の対減速材比を0.3程度に低くした新型のBWRの提案であり、Pu残存率約1.0を達成し得るとしている。

論文 A-1067(日本)は、ATR原型炉におけるMOX燃料の利用についての経験について述べ、外側がMOX、内側がGd₂O₃の燃料体が燃焼度の向上に有効とした。

討論において、Puサイクルの経済的優位性は明確にされなかった。また、議論が廃棄物処理に及ぶことも考えるべきだとされた。

2.2 中性子(炉物理)計算コードを検証する方法に対する要求

論文 A-1056(フランス)と1084(USA)は、中性子物理関係のコードの評価と記録について、コード管理及び標準版の保護の観点から論じている。

論文 A-1085(USA)は、EPRIのLWR安全審査用炉物理解析コードの解析手法をまとめている。

論文 A-1091(USA)は、MHTGRに重要な安全上のパラメータの不確かさとその評価の要求についてまとめている。新しい手法による実験の解析が必要としている。

論文 A-1096(カナダ)は、CANDUのダウルトン発電所における停止系のリフトの許可にあたって遭遇した困難について述べている。この困難さは、リフトに基礎をおいた系を採用することの潜在的な利点を無視してしまった。そして、リフトに依存した安全系の許可を得ようとする時の問題点を浮き彫りにした。

討論では、NEACRPのベンチマーク試験が、炉物理計算コードの評価に役立っているという認識が得られた。

2.3 高速炉の安全性に関する炉物理特性

論文 A-1058(フランス)は、1000MWe級の炉心について、Naボイル係数の低減についてH型炉心、上部ブランケットの省略及び径方向非均質の各ケースについて検討した。

論文 A-1059(フランス)は、モジュールのアイソトープ炉心についてNaボイル反応度低下が可能としたが、結合度の低下による不利益が指摘された。

論文 A-1057(フランス)と A-1068(日本)は、大型LMFBRの特性についての最適化及び窒化物燃料の利点について述べた。

この課題については、今後もトピックスとして捉えることにするが、炉物理特性の傾向についてまとめようということになった。

2.4 炉物理研究が重要な位置を占める新計画

論文 A-1052(スイス)は、CW核破砕中性子源SINQの冷中性子源の設計について述べている。

論文 A-1087(USA)では、ANLが計画している核融合材料試験用の高中性子束施設計画が紹介された。これは、FMITよりずっと費用を削減したものである。

2.5 核データの不確かさに重点を置いた中性子遮蔽

論文 A-1053(スイス)は、ITERの増殖ブランケットの核特性についてのBeの核データの誤差の影響を検討した。トリウム増殖比及び超電導コイルの損傷について、それぞれ7%及び27%の差異が出るとしている。

論文 A-1060(フランス)は、NETのブランケット及び遮蔽パラメータの感度解析をまとめており、鉄の断面積の不確かさから超電導コイルにおいて±25%の高速中性子及びDPAの差異を生ずるとし、核加熱についても同様とした。

論文 A-1069(日本)は、単純形状でのBe及びPbの中性子増倍性能評価のための積分実験を紹介している。

論文 A-1070(日本)は、DT炉のトロイダル線状源のシミュレーション実験について述べている。

論文 A-1071(日本)は、Be円柱での積分実験から、JENDL-3の核データの妥当性を推論した。

論文 A-1101(CEC)は、ANITA計画について紹介している。ここでは、中性子照射後の放射化物のイベントのほかに、熱の発生、摂取のリスク、線量、ガンマ線スペクトルが計算される。

論文 A-1113(ソ連)は、カチャトフ研究所とモスクワの工学・物理研究所が共同で、OTR計画の枠組みの中で進めているブランケット実験について記述している。 ^{238}U を中性子増倍材として、水を減速材として用い、 ^6Li に中性子を吸収させる構成の体系を対象としている。中性子発生量は $5 \times 10^{10} \text{ n/s}$ である。

このセッションでの議論では、核データ上の問題は、かなり解決されたのではないかという意見があった。

3. Carried Over Topics

3.1 高速炉の燃焼に原因する反応度の不確かさの評価

論文 A-1072(日本)は、ZPPRにおけるJupiter計画に基づいて、大型FBR炉心の安全関連パラメータである制御棒価値、 Na^0 反応度、ドップラー効果の予測精度の評価を行った。そして設計上の要請に達していないという結論であった。

やはり、論文 A-1115(日本)では、常陽の燃焼反応度損失の解析を実施し、10%の不確かさはあるものの良い一致を得ている。また、Puの同位体比も10%の精度で良く予測された。

論文 A-1089(USA)は、EBR-IIでの照射解析についてのRCTコードの性能を評価している。RCT法は、ノード法によっている。

3.2 新型黒鉛炉・軽水炉の炉物理

論文 A-1073(日本)は、HTTR炉心での中性子のチャンネルストリーミングについてVHTRC炉心でのパルス中性子実験から、Benoistの非等方拡散係数の使用が必要であることを結論とした。

同じく論文 A-1074(日本)は、VHTRC及びSHEでの反応度温度係数の実験をHTTR設計コードで解析し、実験との比較からHTTRの炉心設計が十分な精度で実施されていることを示した。

論文 A-1050(ソ連)は、PWRとHCLWRの格子についてのポンプマークに対するSPEKTRコードの計算結果について発表したが、核データを含めて精密化が指摘された。

同じく論文 A-1109(ソ連)は、ポンプマークで実施しているウラン炉心でのHCLWRの実験計画について述べている。この実験では、温度が20°Cから240°Cまで変化できる。

IAEAのNuernberg会議のまとめがあり、NEACRPへのコメントとして、

- 転換比についての不一致の減少
- 集合体単位及び全炉心でのBenchmarkの必要性
- 熱水力と結合した動特性解析手法開発

があげられる。

3.3 原子炉及び加速器によるTRUの消滅に関する炉物理・炉工学

核破碎反応によるプルトニウムの長期的な毒性の減少についての解析が、論文 A-1054(スイス)で報告された。10³年から2・10⁷年の期間、毒性はもとのプルトニウムの40~500分の1に減少し得るものとされた。また、核破碎生成物の核種分布の計算値が示されたが、これまでのNMTC-JAERIによる日本側からの計算値とかなり大きな不一致がある。

論文 A-1062(フランス)は、プルトニウムサイクルを1回行った場合の放射性毒性の低減について評価した。

論文 A-1075(日本)は、陽子加速器による消滅処理について、加速器の開発計画、消滅プラントの設計研究、設計コードの積分実験による検証、計算コード開発について報告した。

さらに論文 A-1076(日本)は、FBRで消滅処理を行う場合、均質装荷が合理的であるとした。

論文 A-1112(ソ連)は、TRUの専焼炉について解析し、 C_m が主熱源になるので、これを抽出分離する必要性、ドップラー効果の低下の補償及び β_{eff} を増加させるため、Puを添加することが有効であること等が述べられた。

論文 A-1112(ソ連)は、LMFBRでTRUを消滅させることを想定した場合の核データに対する要求精度をまとめており、²⁴⁰Puの反応度価値実験を実施し、計算と良い一致を得た。この結果は、FCAでの実験と傾向が異なっている。

3.4 3次元の効果に力点を置いた軽水炉・重水炉における局所領域不安定性

論文 A-1077(日本)は、BWRの領域振動についてのTOSDYN-2による解析を実施し、Out of Phase振動の起るシナリオを確定した。もともと出力密度の高いチャンネルが熱水力的に不安定になりやすいが、中性子の結合により、Out of Phase振動が励起される。

論文 A-1078(日本)は、BWRの3次元・核熱結合解析から、Out of Phase振動は炉心外での流れの抵抗が大きい場合炉心流量の総量に変化せず、チャンネル流量の再配分が起ることになるので特定の領域に熱発生についての外乱を加えると核的結合の助けを得て発生する。

これを抑制する効果は中性子の流れによる実効的な β 係数の低減によるとした。また、炉心全体の同位相振動は、炉心外での流れの抵抗が小さい場合に起るという見通しを得た。

論文 A-1107(スウェーデン)は、1989年に経験した出力振動に関係した Ringhals 1での炉雑音実験について、Decay-Ratioの監視が可能とした。

論文 A-1098(カナダ)は、CANDUの軸方向振動について述べ、LOCA時に一様に β が発生することが重要としている。3次元動特性に炉物理が寄与すべきという意見があった。

3.5 燃料の非破壊計量に関する物理的方法

論文 A-1063(フランス)は、燃料集合体の発送前に燃焼度、冷却時間、実効増倍率を測定する手法の開発に関するものである。

一方、論文 A-1079(日本)は、返還廃棄物中の微量の ^{235}U の非破壊測定に関しての β 及び γ の手法で、数 nCi/g の感度に達したことを報告している。

4. Benchmarks

4.1 遮蔽ベンチマーク

1988年のボニマスでの遮蔽国際会議に於いてなされた β - γ 構築の提案が進展している。

論文 A-1093(USA)では、今後の進め方についてまとめている。問題は、今後誰がこのプロジェクトを進めていくかであり、ORNLの Ingersollが候補になっている。個別の問題に入ると、共鳴自己遮蔽効果の評価は課題としては解決済みのように見える。次に、 β - γ での別の提案では、最適な β スキームの決定と非専門家の利用が問題とされている。遮蔽ベンチマークのリーダーが要請されている。

4.2 臨界安全

燃焼による核分裂性物質の減少及びFPの増大を臨界安全評価に組入れる努力が、燃料の濃縮度の増大とともに課題となっている。3次元、軸方向に燃焼度の異なる場合の計算が重要であり、体系の構成の複雑さと自己遮蔽効果をうまく取扱えるようにする必要があるとした。次回に計画をWorking Groupがまとめてくることとなった。

4.3 輸送容器の遮蔽

論文 A-1107(イギリス)は、TN-12実験ベンチマークについての会合について報告している。実験

- 計算の不一致が大きい、測定器の特性も不確定である。

1991年、春に会合をもち、不一致を縮めようとしている。中性子 β - γ の応答関数が問題であり、実験的な対応が必要とする日本の提案が受け入れられている。

4.4 炉雑音解析

1989年のベンチマーク試験は、SMORN-Vの β - γ で、ARE β 化及び異常検出の改良を求めたものであった。15グループのうち8グループが回答を出し、1990年の6月に会合をもって議論をした。IRIで回答を解析中であり、SMORN-VIで報告の予定である。

4.5 高転換軽水炉

Bernnatがまとめた第27 β - γ のBenchmarkは、NEACRP-L-321で公表される。実験 β - γ の提供があれば、第37 β - γ も可能であると考えられるが、かなり困難な見通しである。今一番欲しいのは、温度係数に関するものであるという意見もあった。Benchmarkは一年間休んで、実験上もしくは計算上新事実が現れたら再開することとなった。

4.6 トリチウム生成率測定

論文 A-1080(日本)は、トリチウム生成率測定国際比較について、現状報告を行った。8機関が参加しているが、第1回の照射については5%という目標をはるかに超える差異があった。原因探求のため、ANLからの供給された標準トリチウム水の分析を各機関に依頼したが、不一致は約3%にとどまり、不一致の主たる原因は、 β - γ からトリチウムを抽出してトリチウム水を作る過程にあることがはっきりした。この過程についての改善を行った後、第2回の照射をする提案を行い、了承された。照射は、1991年4~5月の予定である。

4.7 3次元輸送ベンチマーク

論文 A-1081(日本)は、Keffを中心とする3次元ベンチマークの中間報告を行った。3つのXYZ形状と1つのhexagonal-Z形状の問題に対して、19機関からの参加があった。

小型のLWRについては、一致は良い。(ΔKeff~0.5%)。

小型のFBRについては、制御棒効果の不一致がSnとモンテカルロ間にあり、大型のFBRになると、さらにこの不一致は拡大される。1990年10月22日と23日に専門家会議をもつ。

4.8 遅発中性子データ

論文 A-1041は、遅発中性子データの現状についてまとめたものであり、論文 A-1064(フランス)は、MASURCAでの実験ベンチマーク準備について述べ、イタリア(ENEA)、日本(JAERI)及びびり連(Obninsk)その他の参加が予定されている。準備会合が1990年12月に開催されるが、これにFCAの中野室長が参加する。実験は、1992年年頭からの予定である。

4.9 FBRの炉物理量のC/E値の径方向依存

Benchmarkの案が、CEA、ANLから発表された。問題が1990年12月に各国へ配布され、検討された後、次回のNEACRPで成案を得ることになった。日本も参加の意志を表示した。また、JENDL-3の使用が有効であることも付加しておいた。

4.10 集合体内部での燃料ピン出力分布

EdFのWestから提案説明があった。議論の結果、BenchmarkのリダーはKWUのWagnerと相談することとした。粗案は、各参加予定者に配布されコメントを受け、Westのもとに集められて、次回正式提案する。日本からの参加の意志表示を行った。

5. 各国の炉物理研究活動

5.1 米国

米国において炉開発の最高の優先度がおかれているのは、軽水炉産業の再活性化であり、そのため、新しいLWRの建設についての技術、許可取得及び制度上の負担の軽減に努力している。開発努力は、単純化、制御の高度化及び受動的安全性の採用である。中型炉(600 MWe)の設計が進行している。また、EJ型HTGRとALMRの開発が続けられていて、前者は熱電併給炉で、後者はウラン資源の節約、燃料サイクルの低減が特長である。炉物理は、これらの開発を支援するのが主眼とされている。

炉心設計研究では、高速炉の係数低減化であるが、燃焼に伴う反応度swingがトリップワとして問題である。また、金属燃料についての消滅処理も検討された。また、窒化物燃料が良い安全特性を与えることも推察されている。

臨界実験では、ZPPRでIFRの支援実験が実施された。MCNPの計算については、delayed γ 線を取り入れたことと、FFTFでのRIの生産の効率向上に利用された。

手法の開発については、新しいノート法とSn法による輸送計算手法がコード化された。実際的な不規則問題への適用も可能のように見える。3次元のノート法による動特性解析コードが開発中である。また、3次元の熱水力コードも手がつけられた。

遮蔽については、日米協力によるLMRの軸方向遮蔽設計に対する実験及び解析が実施されている。また、EJ型HTGRについての制御棒孔からの中性子ストリーミングが重要視され、実験が計画されている。SP-100の地上工学試験施設の計算が始まっている。

ANS計画では、炉心の最適化が継続された。核データについては、ENDF/B-VIの中でも中性子、光子及び熱中性子散乱則の部分が公表された。

5.2 スイス

1990年の9月に国民投票があり、全核燃料サイクルを段階的に廃止する提案は僅かの差で否決されたが、新しい計画をここ10年凍結する提案は採決された。現在全発電量の40%を賄っている5基の原子力発電所の運転に直接影響はないものの政府予算は非核部門に流れる傾向が強まっている。PSI研究所の核工学部門の主たる努力は既存炉の安全な運転に役立つことと、高いレベルの廃棄物の処分への寄与である。小型の地域暖房用原子炉の開発の如き炉開

発は正当化しにくい状況にある。

炉物理の部門では、PROTEUSでの低濃縮ウランを用いたペブル型高温ガス炉の研究に集中する計画である。1985年から実施してきたHCLWRの第2期実験は、1990年末に終了する。

ペブル炉の実験は、中小型炉の設計と安全審査に係わる不確定さを減少させようというもので、特に水侵入反応度効果、制御棒価値及び反応度と出力分布へのボロンとアルミニウムの効果が中心になる。この実験はIAEAのCRP "Validation of Safety-Related Reactor Physics Calculations for Low Enriched HTGRs"として採択され、ソ連、スイス、ドイツ、日本、中国、USAが参加する。臨界実験は、1991年の夏から開始される。

以上のほか、LWRの過渡解析、SINQの増力計画、TRUの消滅の基礎研究として、核破砕生成物の計算と実験がある。

5.3 スウェーデン

全ての原子力発電所の停止を2010年までに行うとした国民投票が見直されそうである。この2年間で公衆の意見は原子力発電を認める方向に動きつつある。ことしの9月に社会党の大会は、同党によって構成されている政府に対してエネルギー政策の変更を他党と交渉することを要請した。1995/96年に2基の炉を停止するという提案は、議会はCO₂の放出を1988年レベルに抑えるという一年前に定めた事由を実行する上で実際上難しくなっている。

炉物理研究の面では、アルミニウムの生産とリサイクル、それからKRITZ実験データの公開がある。

5.4 ドイツ

670MWe BWR型の Würgassenが停止された。これは、弁の閉じるのが遅いことによる。THTR-300とSNR-300の状況は不変であり、停止している。

カールスルーエ研究所については、²⁴¹Puの断面積評価、ウランとMOX燃料のderay heat計算コードの開発、Puリサイクルに関する研究、核融合炉ブランケット実験解析のためのANTRA 2(2次元輸送)コードの開発及び核廃棄物の長期リスクの低減等の活動がある。

SIEMENS/KWUについては、BWRマルチ用核・水力計算コードの開発、安全因子の評価がある。

IKEについては、BWR・自立対流炉の安定性の解析がある。

5.5 フランス

1989年末の国民議会でこれまでの原子力エネルギー政策が再承認された。エネルギー源外国依存からの独立と環境汚染との闘いが重要という認識がある。また、MELOXプラント(120ton/年のMOX燃料生産)建設が決定された。現在、90万KWと130万KWのPWRがそれぞれ34及び14基稼働している。さらに、130万KW3基が1990年中に運転に入り、5基が建設中である。140万KWのCivauxの発注も1992年には実施されよう。一方、高速炉は、LWRに比較して運転実績が不満足である。PHENIXはアルゴンの泡の炉心通過と考えられるスクラムが1990年の9月にあり、炉は停止されている。SUPER-PHENIXは、炉のアルゴンへの空気の混入により1990年6月に停止されている。再処理に関しては、UP3プラント(800tU/年)が始動している。

CEAの組織変更があった。開発研究部門は原子炉工学、ウラン濃縮、再処理及び技術拡散に分れた。また、基礎研究部門は生物学、物質科学に分離された。安全研究部門は現在議論中である。

炉物理研究については、昨年の継続であり、特に新しい問題の提起はない。運転中の炉の改善と燃焼度の増加が目標になっている。EFRとREP2000に努力が注がれた。

炉心の問題については、熱中性子炉の実験研究についてEOLEによるPWRでのPuリサイクルのための臨界実験と、APPOLLO-IIによる動力炉の解析、積分データバンクの構築がある。次に、熱中性子炉のデータ及び計算手法について、多群構造の改良、APPOLLO-IIの開発、EDFのCOCC/NELLEの開発及び改良炉心設計がある。次に、高速炉の実験研究については、出力炉についてSUPER-PHENIXの実験があるが、計算との一致は良いとしている。MASURCAでの実験は、軸方向非均質のコントラスト期計画が完了した。解析との一致は良く、径方向非均質の場合と矛盾はない。但し、軸方向のブランケットと反射体境界において不一致が残っている。

NEACRP β_{eff} ベンチマーク実験の準備が進んでいる。

データと手法の開発については、SUPER-PHENIXの起動実験に基づいた設計上の不確かさの評価、ECCO及びERANOSの開発が進んでいる。

遮蔽研究については、ヨーロッパ共通のJANUS計画が進行している。鉄・Na系の解析が終了した。

核融合の炉物理については、NETの感度解析がある。

5.6 リ連

炉物理研究は、現用炉及び新型炉の概念研究に主眼がある。新型炉としては、VVER(PWR)、モノリットHTGR、VTRS(溶融塩炉)、LMR、蒸気冷却高速共鳴中性子炉(SWPR)及びTRU消滅炉がある。

炉物理研究の主たる方向としてあげているのは、

- (1) 炉の安全特性のシミュレーションに対する最近の要請に答えるためのコード開発と検証
 - (2) 受動的な安全特性を保証するための新型炉の安全性に係わる炉物理
 - (3) 次世代発電炉の設計研究
 - (4) 苛酷事故に対する既存炉の耐性の改善
- としている。

高速炉物理に関しては、理論的な領域については、Na⁺イオン効果の低減、TRU消滅への高速炉の利用、新型燃料高速炉、小型炉心、核データ BNABファイル、Thの利用、BN-350、BN-600の炉心解析がある。また、転換比が1で β_{eff} 反応度が0になる大型FBRの検討もしている。

実験研究の領域については、BR-10でのRIの生産、BR-1臨界実験装置での炉物理計測機器試験、BFS-1 臨界実験装置でのHCLWR炉心実験、BFS-2での径方向非均質実験、KOBRA臨界実験装置での核データ実験及びKBR-18炉心でのTh実験がある。

これから始めようとする新型炉の炉物理研究に二つがある。いずれもHTGRの球状燃料を用いるものであるが、一つは超臨界軽水を、もう一つは溶融塩を冷却材として用いることになっている。

6. あとがき

NEACRPの今後の活動としては、既存の炉の利用の高度化と共に、新型炉の概念の創出への寄与が中心課題となる。年々、日本が先導的立場を担う事態が展開している。トビックスへの論文の数にしる、合計66件の中、日本が最高で17件(論文リストは別添2に掲載)であり、続いて、フランス14件、リ連8件であり、ベンチマークも主要なものを日本が受け持つことになっている。このような日本の努力は、NEACRP会合でも好感をもって受け入れられ、信頼感を受けつつある。

Proposal for Agenda
Thirty-Fourth Meeting

1. New Topics

- 1.1 Impact of new computer architecture on Radiation transport codes (Vector and/or Parallel computers, Advanced Work Stations, Transputers, etc).
- 1.2 New Application of Neutron Radiography.

2. Topics carried over from previous Meetings

- 2.1 Current issues of Plutonium Recycling in LWRs.
- 2.2 Review of Requirements for the Methods of Validating Neutronics Codes.
- 2.3 Physics Aspects of Fast and other advanced Reactors (Reactivity Feedback Properties, Design Tradeoffs and Safety Implications).
- 2.4 Major Nuclear Non-Reactor Facilities (formerly: New Facilities of Importance for Neutronics and Reactor Physics Research).
- 2.5 Fusion Blanket Shield Performance (formerly Fusion Blanket, etc.).
- 2.6 Physics and Safety Aspects of Transuranium Burning Reactor and Accelerator Performance.
- 2.7 Physics Problems of 3D On-Line Monitoring.

3. Benchmarks and Data Bases

- 3.1 Radiation Shielding Benchmark Data Base.
- 3.2 Criticality Safety: Burnup Credit.
- 3.3 Shielding of Transport Casks.
- 3.4 Noise Analysis.
- 3.5 Measurement of Tritium Production Rates.
- 3.6 Three-Dimensional Transport Benchmark.
- 3.7 Validation of Delayed Neutron Data.
- 3.8 3-D Dynamics for LWR Cores.
- 3.9 Pin Power Distribution within Assemblies.

※ 論文の提出は、炉物理研究委員会原子炉システム専門部会 石黒部会長、
遮蔽専門部会 鈴木部会長、又は核融合炉部会 前川部会長まで。

送付先：☎319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 - 4

日本原子力研究所東海研究所

原子炉工学部

List of Contributed Papers from Japan in the 33rd NEACRP Meeting

- * R. Takeda, M. Aoyama, Y. Ishii, O. Yokomizo, K. Ishii, N. Sadaoka and S. Uchikawa: "Plutonium Generation Boiling Water Reactor Concept"
- * Y. Ohkubo, T. Wakabayashi and Y. Yamashita: "Study on Enhanced Safety Core Characteristics of Nitride Fuel FBR"
- * K. Shirakata and T. Sanda: "Prediction Accuracies of Safety Related Core Design Parameters for FBR"
- * A. Hara and K. Kinjo: "Analysis of JOYO Burnup Characteristics"
- * F. Akino, T. Yamane, H. Takeuchi and Y. Kaneko: "Measurement of Void Reactivity Worth of HTTR Mockup Control Rod Hole in VHTRC-1 Core"
- * I. Murata, K. Yamashita and R. Shindo: "Analysis of Temperature Effect of Reactivity for VHTRC and SHE with Nuclear Design Code System for High Temperature ENgineering Test Reactor(HTTR)"
- * T. Nishida, I. Kanno, H. Takada, T. Takizuka, M. Mizumoto, M. Akabori, Y. Nakahara, Y. Okumura, H. Yasuda and Y. Kaneko: "TRU Transmutation System with Proton Accelerator"
- * M. Ishikawa, M. Yamaoka, T. Wakabayashi and T. Kawakita: "TRU Transmutation in LMFBR(II)"
- * H. Gotoh, M. Haruyama and N. Wakayama: "Development of Non-Destructive Measuring Techniques for Trace Amount Fissile and Fertile Material in Drum-Sized Waste"
- * N. Kawata and T. Wakabayashi: "Utilization of MOX Fuel Assembly Containing Gd₂O₃ in ATR"
- * H. Maekawa, Y. Oyama and K. Kosako: "Benchmark Test of Be Nuclear Data in JENDL-3 Through Analysis of Time-of-Flight and Integral Experiments on Be Assemblies at FNS"
- * Y. Oyama, C. Konno, Y. Ikeda, H. Maekawa, K. Kosako and T. Nakamura: "Phase-IIIA Experiments of the JAERI-USDOE Collaborative Program on Fusion Neutronics"
- * A. Takahashi, K. Yamanaka and K. Sumita: "Integral Experiments to Improve Breeding Ratio"
- * Y. Takigawa, Y. Takeuchi, H. Namba, S. Ebata, S. Kasai and T. Anegawa: "A Study of Regional Oscillation with TOSDYN-2"

- * O. Yokomizo, I. Sumida, T. Anegawa, Y. Yoshimoto and T. Fukahori: "Examination of Nuclear Thermal Hydraulic Oscillation Modes in BWR Core"
- * T. Takeda, H. Ikeda and M. Tamitani: "Summary Report of 3-D Neutron Benchmark Problems"
- * H. Maekawa(Ed.): "International Comparison on Measuring Techniques of Tritium Production Rate for Fusion Neutronics Experiments"

〈会議報告 2.〉

「トリウム利用」日印セミナーの報告

京大工学部原子核工学科 木村 逸郎

1. はじめに

筆者にとっては長い間の夢がかなって、「トリウム利用」に関する日本インド二国間セミナーを開催することができたことは大きな喜びであった。しかもそれがトリウムの利用先進国のインドで開催できたこと、そして我が国から筆者を含めて12名もの出席があったことも意義深かった。この日印セミナーの話が具体的に出たのは筆者が4年前日本学術振興会(学振)の派遣研究者としてインドの原子力施設や大学を訪問したときのことである。その後、1988年に入り Bhabha 原子力研究センター(BARC)の中性子物理研究室長 M. Srinivasan との間で手紙の交換が増加した。丁度その頃、高温超伝導国際会議に来日した当時BARC所長 P. K. Iyenger (現在インド原子力委員長)を名古屋に訪ね、トリウム利用日印セミナーの意義を訴えたりもした。ただし彼とはホテルの部屋にあった仏教の教典の話をしたことが記憶に残っている。1990年には、手紙とそして Fax によって打合せが進み、夏休み明けのころに日程、場所そしてプログラムが順次決まった。実際上は Srinivasan がすべての企画と交渉に当たってくれたような次第で、筆者の方は我が国内での折衝に当たっただけである。結果的には日本原子力学会と Indian Nuclear Society の共催ということになった。先方は原子力委員会と原子力省が全面的に支援していたようであり、我が国では原子力産業会議の後援も頂いた。また筆者は学振とインド国立科学アカデミーの研究者交流計画により派遣された。

2. ウィーン経由インドへの道

「印度への道」という映画があったが、筆者はオーストリアのウィーン経由でインドへ赴いた。当初はまずインドのマドラスへ行き、その後日印セミナー開催地ボンベイに行く予定をしていたところ、10月末になって急に12月3日～5日ウィーンの国際原子力機関(IAEA)本部で「トリウムをベースとした燃料の原子炉への利用」に関する諮問会議が開催されるので出席してはどうかとの指示があり、これに出席することになった。この会議の目的は、(1)核燃料としてのトリウムを利用する上で必要な研究開発に関する調査、(2)トリウムサイクルの技術の現状に関する討論、及び(3)今後研究開発が必要な分野を提示することであった。この会には佛、独、加、印そして日本(筆者)の5名が出席、IAEA、Div. of Nuclear Power, Nuclear Power Technology Development Section が事務局となった。まず出席5カ国のトリウム燃料原子炉研究開発の現状の報告があり、いろいろ議論し、さらに今年3月末までに新しい観点で見直そうということになった。この中では、(1)現在トリウムサイクルになお興味をもたれる動機、(2)トリウム燃料製造と再処理技術の現状の中で何が問題で、その可能な解決の方法は何かということの指摘、(3)Pa-233生成に伴う問題とその原子炉制御への効果に対する解決法などに注意することになっている。一方、IAEA当局は(1)最近公表された二つの評価済み核データ(JENDL-3とENDF/B-VI)におけるトリウム関連核種の核データの比較と相違点の指摘、(2)上記2データから多群定数を作成提供すること、(3)断面積測定とその積分実験に適した量の試料の提供、(4)トリウムサイクルに関

連したベンチマークの収集と指定、(5) Pa-233、U-232及び少量アクチナイド生成を含むベンチマークの調査、(6) 前述の二つの群定数による上記ベンチマークに関する再計算、(7) それら計算の収集と検討、(8) 上記計算結果の討論のための専門家会議の開催、この会議にはより新しい炉型など新概念の原子炉(MSRなど)も含まれること、(9) 熱水力学的データの収集及びトリウム燃料サイクルのための計算手法の開発などを約束した。

今回 IAEA の Division of Nuclear Power が急にトリウム燃料原子炉のことを主題にしてこの会議を開いた真意がどこにあるのかなお把み難いところがあるが、トリウム燃料サイクルについて fresh look をすることになったことだけでも大きな意義があったと考えている。一方 IAEA の宿題の多くはオブザーバとして出席した Nuclear Data Section の S. Ganesan (筆者の知人、印度インディラガンジー原子力センター (IGCAR) 出身) によるところが多く、今後とも彼がリードすることであろう。

以上のようなトリウムに関する IAEA 会議を終え、厳冬のウィーンから印度ボンベイに向かった。

3. トリウム利用日印セミナー

今回の日印セミナーは次のセッションを直列的に進める方式をとった。主にインド側から発表された論文について触れる。(順序を変えたものがあつたが元の順序で述べる)

(1) 開会セッション

Indian Nuclear Society の V. N. Manohar 会長のあいさつ、インド側 Convener の Srinivasan のあいさつ、そしてわが国側 Convener の筆者が原子力学会伊原義徳会長と以前の科学研究費トリウム燃料班代表柴田俊一先生のあいさつを代読した。ここで Iyenger の開会宣言がある筈であつたが、米国出張のため取り止めとなつた。この後、筆者と大石純先生が我が国のトリウム研究の現状を紹介、一方インド側からは BARC 所長 R. Chidambaram がインドにおけるトリウム利用計画の概要について述べた。この後、各方面への謝辞の Vote (順々に述べること)があつた。

(2) Synergetics (エネルギー共働システム)

古川和男、関本博両先生の講演に次いで、上記 Srinivasan と S. Chaturvedi が fusion breeder について発表した。ここでは早期の核融合炉を本格的なエネルギー源としてよりも、中性子源としてとらえ、それにより Th を U-233 に転換し、できた U-233 を高転換比の加圧重水炉 (PHWR) の複数基に供することによってインドのトリウム利用を加速しようというものである。

(3) トリウム燃料原子炉

LMFBRでのトリウム利用について S. M. Lee (IACAR, 1988年京大滞在) の発表があり、竹田敏一先生の講演の後、Balakrishnan 夫妻がそれぞれ重水炉 (HWR) におけるトリウムサイクルについて論じた。前者はその成長シナリオであり、後者は三つのサイクル (SSET, 高転換高燃焼、OTT) を比較し、併せてより近い将来のことについても触れた。最後に A. Kakodkar が Advanced HWR として PHWR と軽水冷却 HWR (seed-blanket 方式採用) などを紹介した。

(4) 燃料の開発 我が国からは三宅正宣先生の発表があり、インド側からは次の論文が発表された。

①軽水炉用トリウム燃料の開発、ゾルゲル法による酸化トリウム燃料製造、②BARCにおけるトリウム燃料製造、③FBTRブランケット用酸化トリウム燃料製造、④Purnima III/Kamini 用 A1-U233板状燃料、⑤マドラス原発用トリウム燃料バンドルの設計と照射、⑥Cirus と Dhruva でのトリウム照射実験
いずれも実績の上に立った迫力のある講演であり、インドの実力が感じられた。

(5) 製錬と燃料化学

山脇道夫、古屋広高両先生の講演があり、インド側からトリウムの製錬に関する V. S. Keni の発表だけしかなかった。これについてインドには非常に多くの技術の蓄積があると考えられるのでもっと多くの発表が欲しかった。

(6) 再処理とアクチナイド廃棄物

我が国からは竹田敏一先生が発表、インド側から照射トリウム再処理の経験と題し G. R. Balasubramanian の詳しい報告があり、次いでU-233の分離、精製及びリサイクルについて A. Ramanujam が講演した。これは Purnima-III と Kamini 用U-233生産の経験談であった。最後に K. Subba Rao がアクチナイド廃棄物について講演し、この中で長寿命アクチナイド核種は、分離した上で硬いスペクトルの原子炉で燃料として燃焼できることを力説した。またTh-232/U-233燃料サイクルは、高次アクチナイド生成が少なく、さらにここで生成するPa-231も原子炉燃料になることを強調していた。

(7) 核データと原子炉物理

我が国から大沢孝明、平川直弘、神田啓治3先生の発表があったのに対し、インドの発表は少なく、IAEAのGanesanの論文をLeeが代読したものとA. N. Nakraによる酸化トリウム燃料重水減速格子の臨界実験解析についての発表だけしかなかった。もともとインドは実験的に核データを求める動きはほとんどなく、評価活動も断片的である。

(8) U-233装荷原子炉実験

インドからU-233硝酸ウラニル溶液による臨界実験(Purnima-II)とA1-U-233燃料による臨界実験(Purnima-III)の発表があった。後者は極く最近臨界になったばかりのホットニュースであり、また世界初のU-233燃料研究炉Kaminiへの第一歩として注目された。我が国からは、KUCAでのTh装荷炉心実験と解析の結果が小林圭二先生から発表された。

(9) 融合炉ブランケット中性子工学

筆者の発表の後、インド側から融合炉ブランケット模擬体系に酸化トリウムを装荷した実験の報告が2件あった。第1はBARCで進められているものであり、もう一つはスイスローザンヌのEPFLと協力して進められている実験と解析である。前者は酸化トリウムの他Be, BeO, C及びPbパイルでも実験し、中性子倍増を求めている。また両方ともThの中性子捕獲で生成したPa-233を測定している点も注目された。

(10) 安全性と放射線防護

我が国からは古川和男先生の発表があり、インドからBARC保健物理部の人トリウムのBiokinetic and Radiation Safety Aspectsという講演をした。これはインドにおいて、トリウムに関連して放射線被ばくを受ける人のbiokinetic研究ならびにmonazite産出地域の人々の被ばくの調査研究の結果の報告であった。なおインドではトロトラストを血管中に注射した事例はないとのことであった。

(11) 総括セッション

Srinivasan と筆者が座長となり、セミナー全体の締めくくりを行った。全体としてインドからは、トリウムの利用を目指した国策に従い、実際にトリウムを燃料に加工し、原子炉で照射し、照射後再処理してU-233を取り出してこれをさらに燃料にまで加工した立派な実績がBARCを中心とした国立研究所の所員から発表されたのに対し、我が国からは大学の研究者が進めてきた基礎研究を中心に大学人が発表した点が対照的であった。その意味で必ずしも噛み合わない点もあったがよく言えば相補的ともいえる。やはりU-233を実際に作り出さないと本格的にトリウムサイクルの研究開発をやっているとは言えないと平川直弘先生が結ばれた。たしかにそうではあるが、大学の研究者としては基礎的なことをしっかりと研究することに意義がありかつ重要なことであろう。最後に大石純先生と筆者がそれぞれ先方への謝辞を述べた。なお今後のこととして、日印両国の研究上の協力の途を採ることとし、例えばベンチマーク的なデータの交換と解析などが提案された。また将来同様のセミナーあるいはより多くの国が参加する会議を日本で開くことについても検討することになった。

4. インド原子力施設の視察

上記日印セミナーでは途中1日をBARCなどの視察にあてた。BARCでは2つの研究炉Cirus(40 MW)とDhruva(100 MW)を見学した。Dhruvaは順調に動いているようであり、中性子散乱などの実験が行われていた。近くメタンによる冷中性子源を設置することであった。その後、Indian Rare Earth社や核燃料関係の施設を見て、最後にPurnima-IIIを訪ね実際にA1-U233板状燃料の入った炉心を見ることができた。また、融合炉ブランケット模擬実験も見せてもらった。

筆者は日印セミナーの後、ニューデリーに行き、デリー大学物理学教室(L. S. Kothari 及び F. Ahmed 両教授ほか)、ネール大学原子核研究センター(15 MV タンデム加速器大学共同利用)、国立物理学研究所(標準、電磁波、材料の研究に重点)、インド国立科学アカデミー(日印交流のインド側機関)を訪問し、講演や討論を行った。さらにその後、南インドマドラスへ飛び、4年ぶりにIGCARを訪れた。ここでも日本のトリウム研究の現状について講演し、S. R. Paranjpe 所長といろいろ懇談した。同所長は金属燃料高速炉に関心があり、日本とも研究の協力ができないかといっていた。次いで炭化物燃料の高速実験炉FBTRを見学したが、この炉はいろいろな事情でなお低出力運転を余儀なくされているようであった。また、ホットラボ地下にあるKamini施設見学、これはPurnima-IIIにある燃料待ちで、他はすべて完成しているので今年に期待したい。

5. インドを垣間見る

悠久の国とか混沌の国とか言われるだけあって、インドは時間と空間、国民の民族宗語言語など多次元にわたり広大かつ複雑であり、外国人が僅か2週間、ホテルに泊まって見聞したところで認識しうることは少ないが、今回結婚後27年ぶりに妻と一緒に旅であったため、前回よりは遙かに多くのことに触れることができた。

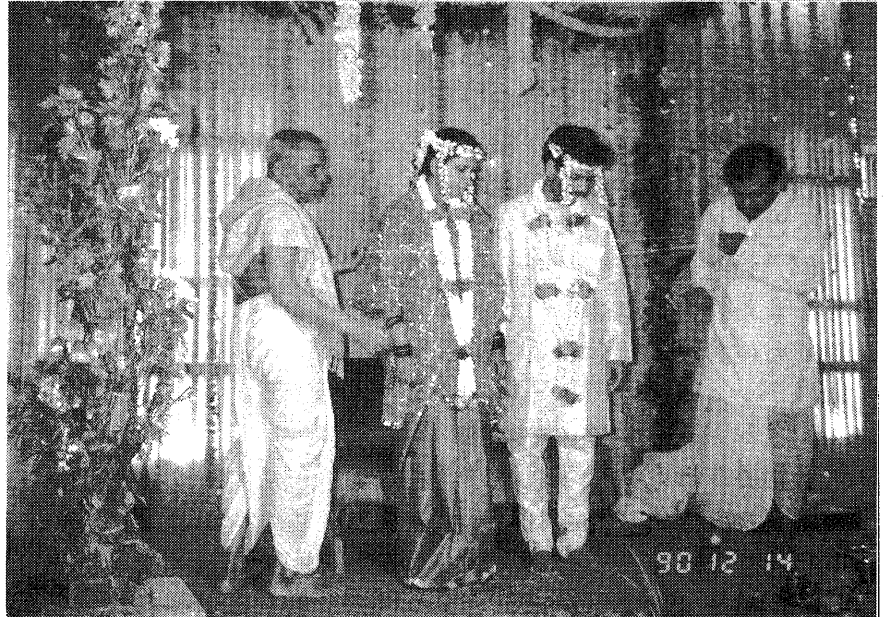
(1) 政治、とくに宗教に絡んで

湾岸危機に伴う石油価格上昇、十万人以上の出稼ぎ労働者帰国などがインド経済を苦しめているようだが、当面の政治不安は北部の聖地に絡むヒンズー教徒と回教徒との対立の

拡大と前首相の辞任の原因になったカースト制度に伴う問題（これも宗教との関係が深い）が中心のようであり、前者による衝突のニュースが連日新聞にのっていた。原子力に対する国民やマスコミの意識について特に聞く機会にはなかったが、Paranjpe 氏によると原子力に対する社会の目は厳しく、原子力は最高カーストのように閉鎖的だという批判があるとのことであった。

(2) 生活に触れて

今回は妻を伴ったこともあり、5回もインド家庭に食事に招かれた。妻はインド女性に香辛料の使い方を習ったり、サリーを買ったり、学校を見学させて頂いたりした。また結婚式にも参列する機会があり、南インド風儀式をつぶさに見た。今でも結婚の多くは同一カースト内で決められるのが殆どで、当日までデートもしないのが普通とか。



南インドヒンズー教による結婚式

(3) いわゆる観光

ボンベイでは主に市内（妻は郊外なども）を見たが、ニューデリーでは市内の名所の外、ピンクシティーといわれる Jaipur を見物した。ピンクとい

(もっとも重要な儀式は、ヒンズー僧（左）とその助手（右）が新郎新婦を糸で何回も巻くことであった。)

うのは壁の色のことなので念のため。上記騒動でタジマハールは行けず。南インドではマドラス市内やマハベリプラムを見物。蛇公園とワニ公園は迫力万点、後者はワニを養殖して世界各地の自然に戻しているとのことワニ銀行とも言う。この他二度のインド舞踊も印象的であった。

6. おわりに

短い期間であったが大変密度の濃いインド出張をすることができた。主研究テーマに関連し得るところが極めて大きかったが、それ以外にも勉強になり考えさせられることの多い旅だった。今後我が国の研究者とくに若い人たちの訪印を勧めたい。最後になるが今回の日印セミナー及び筆者のインド派遣をご支援頂いた方々に深甚の謝意を表します。

〈会議報告 3.〉

NEACRP「3次元中性子輸送ベンチマーク」の報告

阪大 竹田敏一

1990年10月22日(月)、23日(火)の2日間、フランス パリ郊外のサクレーにあるNEAデータバンクにて、1988年阪大から提案したNEACRPの「3次元中性子輸送ベンチマーク」ワーキンググループの会合を持った。

このワーキンググループの目的は阪大から提案した4つの炉心の輸送計算を各機関の計算コードを用いて実行し、その結果を比較検討し、計算法の妥当性及び問題点の指摘をし、さらに3次元輸送計算の精度評価のためのベンチマークを作成するためである。

会議には表1に示すように12機関から16名が参加した。本会議の主旨説明及び参加者の自己紹介の後、モデル1～4の輸送計算についての発表及び議論がされた。さらに、今回の会議の結論及び将来の研究の勧告について話し合った。

図1にモデル1～4の平面図を示す。モデル1～3はそれぞれ小型軽水炉、小型高速炉、大型軸非均質高速炉のXYZモデルで、モデル4は小型高速炉KNK-IIのヘキサ-Zモデルである。

計算手法としてはモンテカルロ、 S_n 、 P_n 、合成法、ノード法等の手法が用いられた。断面積としてはモデル1は2群、モデル2、3、4は4群の群定数が与えられている。

会議中に k_{eff} 、制御棒反応度値について各手法で与えられた結果を比較し、各々の手法の平均値を計算することを決めた。モンテカルロ法では各結果の分散を σ_i^2 とすると、平均値は各結果を $1/\sigma_i^2$ を重みとして平均を取ることにより与えられる。また、 S_n 、 P_n 、その他の手法を用いた場合、用いた計算手法中で最も正確と思える計算結果をリファレンスとして採用した。例えば、 S_n 法では、空間メッシュ、角度分点の採り方により計算誤差が生じるが、最も詳細な計算による解を採用した。

P_n 法についても球面調和関数の次数 n の最大で空間メッシュ数が最大の解を採った。

参加者によっては、 S_n 法、及び P_n 法で $n \rightarrow \infty$ 、空間メッシュ数 $\rightarrow \infty$ に外挿した解を求めている。空間メッシュ幅についてはX、Y、Z各方向ともに有限のメッシュ幅に基づく計算誤差はメッシュ幅の2乗に比例するとして無限メッシュの解を外挿している。計算の収束性についてはモデル1～4とも k_{eff} 、中性子束 ϕ に対し

$$\Delta k_{eff} / k_{eff} < 10^{-5}$$

$$\Delta \phi / \phi < 10^{-4}$$

なる収束条件を採用したが、モデル1のような熱中性子炉体系では収束性をもう1桁厳しくすべきであるという意見がフラマトムのBrunaから出された。

モデル1～4に対する各ケース(制御棒挿入、引抜時)の k_{eff} 及び制御棒反応度値のモンテカルロ法、 S_n 法、 P_n 法、輸送ノード法の平均値を表2に示す。

モデル1の k_{eff} に対する値は、制御棒引抜の場合は S_n 法の平均値はモンテカルロ法平

均値の 1σ からわずかに外れているが、制御棒挿入の場合はモンテカルロ法の平均値と S_8 の平均値はモンテカルロ法の 1σ 内で一致している。制御棒反応度値もモンテカルロ法の 1σ 以内で一致している。

このように S_n 法とモンテカルロ法の一致は良いが、 S_n 法で $n=4$ とするとモンテカルロ法との差はかなりつく。 S_4 法では制御棒引抜時の $k_{\text{eff}}=0.9766\pm 0.0002$ となり S_8 計算と 0.06% 異なりモンテカルロ法との差は 0.12% となってしまう。これは制御棒引抜き後にボイド領域が存在し、角度分点の効果が大きくなるためである。

P_n 法に関しては制御棒引抜時 (制御棒領域 void) の k_{eff} がモンテカルロ法、 S_8 法に比べて小さいので、制御棒反応度値も 13% 減少している。Fletcher は P_n の次数 (n) 効果及びメッシュ効果を調べ、共に大きな効果となることを示した。

小型高速炉のモデル2ではモンテカルロ法の標準偏差はモデル1に比べ半分以下になっており、高速炉体系では熱中性子がいないため精度良く固有値が計算できることがわかる。 k_{eff} に対するモンテカルロ法と S_8 計算との差は 0.0004 程度で小さいが、標準偏差で見ると 2σ 程度の差がある。但し、 σ の値が小さくモンテカルロ法と S_n 計算の結果は良く一致していると言える。表には示していないが S_4 計算の k_{eff} の結果は制御棒引抜、挿入時でそれぞれ 0.9735 、 0.9594 であり、 S_8 計算結果と良く一致していた。

P_n 法では $n=7$ と $n=5$ の結果は良く一致しているが、空間メッシュ効果がある。 P_7 の 5 cm メッシュ、 2.5 cm メッシュ、 0 メッシュ (外挿) と S_n 法の 5 cm メッシュ、 2.5 cm メッシュ、の k_{eff} の値を比較すると、 P_n 法の空間メッシュ幅による誤差は S_n 法に比べ大きいことがわかった。ANL の NTT (ノーダル輸送理論) コードは k_{eff} を $\sim 0.2\%$ 過小評価しているが、制御棒反応度値についてはモンテカルロ法と良く一致している。

次に、大型軸非均質高速炉のモデル3の k_{eff} 及び制御棒反応度値の結果を検討する。モンテカルロ法の標準偏差は小型高速炉 (モデル2) と同程度に小さい。また、制御棒引抜時を除くと、 S_8 計算の結果とよく一致している。制御棒引抜時でもその差は 0.0005 であり、 S_n 法の 1σ 程度である。 S_8 計算の中では Alcouffe の k_{eff} の値が制御棒挿入の場合で小さいため、制御棒反応度値は 2% 程度大きくなっている。 P_7 法の結果はモンテカルロ平均値に比べると 10% 程度低く、空間メッシュ効果が強く残っていると思われる。NTT法、輸送等価断面積を用いた C C R R 法による制御棒反応度値は $1\sim 2\%$ 以内で平均値と一致している。

このように固有値に関しては各計算手法間の一致は良いが領域平均の各エネルギー群ごとの中性子束を見ると、 S_8 法の間的一致は良いがモンテカルロ法ではそのバラツキが大きい。特に、 $9.61\times 10^2\text{ eV}$ 以下の第4群になると制御棒領域の中性子束は平均値から 99% もずれている場合のあることが分かる。この点、 S_n 法ではその一致がよい。このように大型炉の中性子束分布を検討するには S_n 法が優れていることが分かる。

次に、モデル4の k_{eff} と制御棒反応度値について検討する。このモデルは六角体系の小型高速炉であり、今回の4つのモデルの中で、唯一、ヘキサ-Z体系で計算されたモデルである。

まず、モンテカルロ法については、 k_{eff} 、制御棒反応度値共に標準偏差が小さく、安定した結果が得られている。それに対し、 P_7 、 S_8 計算による結果は標準偏差が大きく、特に、 S_8 はモデル1、2、3に比べて、各々の結果にバラツキがあることが分かる。

Fletcher の計算結果によると、通常メッシュ (~5 cm) の P7 計算では、制御棒半挿入と棒全挿入の結果は、モンテカルロ法による結果から大きく外れているが、halfメッシュで計算することで、その結果がモンテカルロ法に近づき、制御棒反応度値もモンテカルロ法の平均値に近づく事が分かった。また、S8法の結果は、モンテカルロ法、Pn法の結果から外れており、制御棒反応度値は~2%減少している。今後、六角-Z体系用の正確なSn法の開発が望まれる。

また、このモデルでは Wagner が輸送ノードによる計算結果を出しており、この手法では、全てのケースにおいて、 k_{eff} はモンテカルロ法よりも小さくなっているが、制御棒反応度値はモンテカルロ法による結果と、良く一致した。

以上の議論及び領域平均の中性子束を比較し、阪大から最終報告書を作成することが決められた。また、今後のベンチマークとして以上の4個のモデル以外に

- ・六角-Zの大型高速炉モデル
- ・小型炉で冷却材の密度を変化させてその反応度値を検討する。
- ・格子内の非均質計算モデル

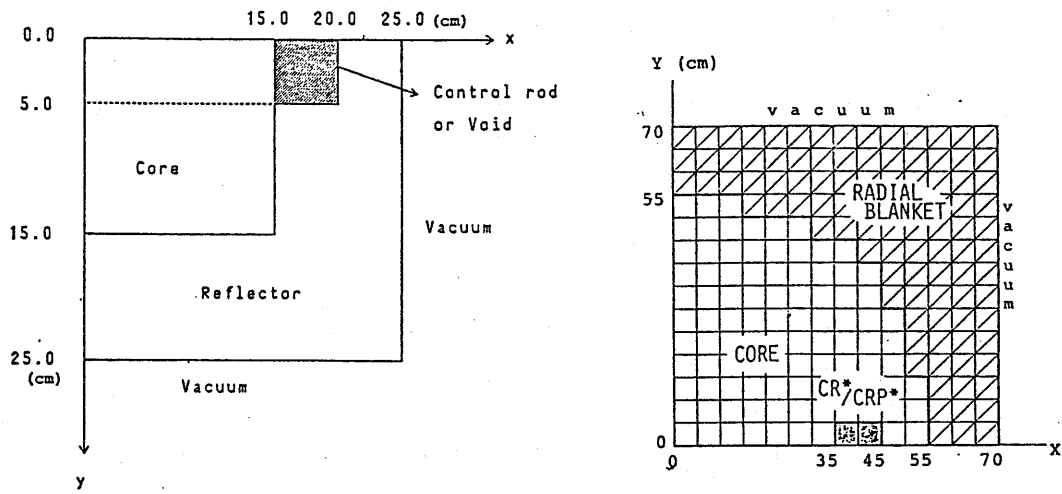
等を考え、今後のベンチマーク研究を続けていくことが決められた。この問題については本ベンチマークとは別にFletcher、Doriath、Bruna が案を考えることが決まった。さらに、本ベンチマークをANSのベンチマークとして採用する方向でAlcouffeが取りまとめることが決められた。

表1 会議参加者と所属機関

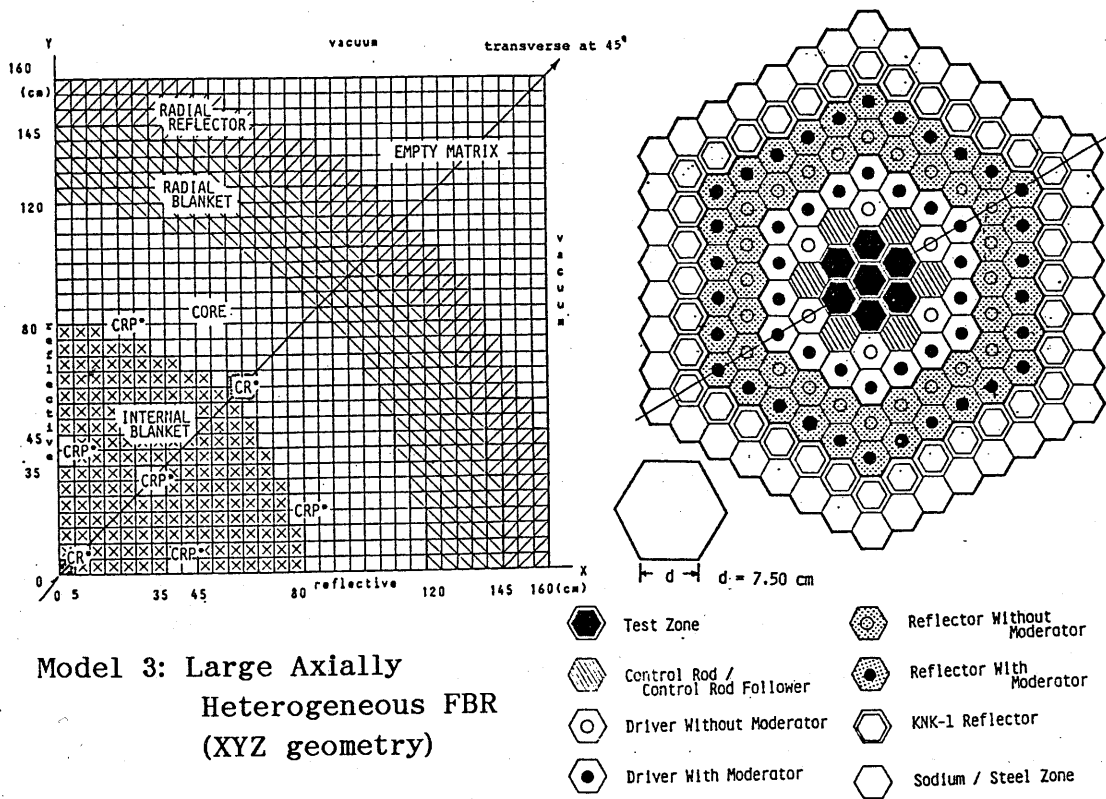
参加者	機関
H. A. Abderrahim	SCK/CEN(ベルギー)
R. Alcouffe	Los Alamos National Labo. (米)
G. Buruna	Framatome(仏)
J. Y. Doriath	CEN/Cadarache(仏)
J. J. Lautard	
J. K. Fletcher	Risley Nuclear Power(英)
P. A. Landeyro	ENEA(伊)
H. W. Rief	ANL(米)
R. W. Schaefer	Kurchatov Institute(ソ連)
I. S. Slesarev	Siemens AG/KWU(独)
山本	動燃
竹田 錦織 池田	阪大
E. Sartori	NEA Secretariat OECD/NEA デンマーク(仏)

表2 各モデルでの実効増倍率及び制御棒反応度値の比較

Model	keff		CR-worth ($\Delta k/kk'$)
	rod out	rod in	
Small LWR Monte-Carlo	0.9778 ± 0.00046	0.9623 ± 0.00048	1.63E-02 $\pm 0.07E-02$
Pn	0.9766 ± 0.00058	0.9630 ± 0.00078	1.45E-02 $\pm 0.22E-02$
Sn	0.9772 ± 0.000068	0.9624 ± 0.000082	1.58E-02 $\pm 0.003E-02$
Small FBR Monte-Carlo	0.9731 ± 0.00020	0.9590 ± 0.00020	1.52E-02 $\pm 0.03E-02$
Pn	0.9794	0.9647	1.56E-02
Sn	0.9734 ± 0.00017	0.9593 ± 0.00018	1.52E-02 $\pm 0.007E-02$
Nodal Transport	0.9714	0.9572	1.54E-02
Large FBR Monte-Carlo	1.0005 ± 0.00020	0.9708 ± 0.00019	3.05E-02 $\pm 0.03E-02$
Pn	1.0040	0.9772	2.74E-02
Sn	1.0005 ± 0.00047	0.9703 ± 0.00045	3.11E-02 $\pm 0.04E-02$
Nodal Transport	0.9996	0.9695	3.10E-02
Small FBR with Hexagonal-Z Monte-Carlo	1.0951 ± 0.00035	0.8799 ± 0.00033	2.23E-01 $\pm 0.005E-01$
Pn	1.0942 ± 0.0015	0.8819 ± 0.0102	2.20E-01 $\pm 0.12E-01$
Sn	1.0887 ± 0.0043	0.8927 ± 0.0109	2.02E-01 $\pm 0.10E-01$
Nodal Transport	1.0889	0.8748	2.25E-01



Model 1: Small LWR (XYZ geometry) Model 2: Small FBR (XYZ geometry)



Model 3: Large Axially Heterogeneous FBR (XYZ geometry)

Model 4: Small FBR (Hexagonal-Z geometry)

図1 ベンチマーク計算モデル

<会議報告 4.>

第6回「原子力におけるソフトウェア開発」研究会

原 研 田中俊一、平野雅司

「原子力コード」、「炉物理」研究委員会の共催による上記研究会が、平成2年10月30日、11月1日に関係者約140名が出席して日本原子力研究所東海研究所で開催された。本研究会は毎年開かれてきたが、前年度は「スーパーコンピュータ国際会議」が開かれたため2年ぶりの開催である。

今回は、将来の原子力開発の動向を反映したトピックスとして「高エネルギー加速器のための放射線輸送コード」と「次世代原子力システムの熱流動解析」、それにソフトウェアの基盤となる「計算機性能」をテーマとした9件の講演を中心に討論が行われた。研究会の報告の詳細はJAEERI-Mレポートとして刊行されているので、ここでは各発表と討論の要旨を簡単に紹介する。

高エネルギー加速器のための放射線輸送コード

高エネルギーの定義には必ずしも決まったものはないが、ここではこれまで原子力分野で扱ってきたエネルギー約15 MeV以上を対象としている。

このセッションでは、はじめに原研の西田雄彦氏が「陽子加速器によるTRU消滅処理シミュレーションコード」と題し、大強度陽子リニャック(1.5 GeV, 約1.0 mA)を利用したTRU消滅処理システムの概念検討や設計で必要とされるソフトウェアの体系を紹介した。中心となるソフトウェアは数10 MeV～数 GeVのエネルギー領域を扱う核破碎・核子輸送コードとこれに接続する数10 MeV以下の中性子輸送コードである。前者としてはNMTC/JAERI-NMTA, HETC, NUCLEUS、後者としてはMORSE-DD, TWOTRAN-IIを使用しているが、核子-核子、核子-原子核反応データを再評価し核破碎反応計算コードの精度を改善すること、消滅処理システム設計のためのコードシステムを開発・整備することが今後の課題であると述べた。本講演に関して核断面積、計算精度等についての討論が活発に行われた。中でも核断面積の考え方について核破碎反応では多数の反応チャンネルが開き、複雑なのでデータという形で断面積を使うのは得策ではないという意見があった。高エネルギー領域での核反応過程の定量的取扱いは重要な研究テーマであり、今後の研究の発展に期待したい。

次に、東大の上菟義朋氏が「大型ハドロン計画と遮蔽設計」と題して、東大原子核研究所が中心となり進めている1 GeV, 400 μ Aの陽子リニャックを中核とした大型ハドロン計画の遮蔽設計を紹介した。この程度のビーム出力を有する陽子加速器になると放射線対策という点だけでも従来の加速器施設の経験だけでは対応できない様々な新しい課題が生じることを指摘し、特に、中性子のエネ

ルギーが高くなると遮蔽体中での減弱距離が大きくなり、ビームダンプの横方向では約10mのコンクリート遮蔽厚が必要となることを紹介した。このため、計算コードの精度が施設の建設費に大きな影響を及ぼすばかりでなく、放射化などの問題も安全対策上の重要課題となることを示した。現在、遮蔽設計にはMoyerモデルに基づく簡易計算法、モンテカルロ計算コードシステムHERMESやDLC-87、DLC-128群定数と組合わせたANISNコードも利用しているが、計算の絶対精度については今後の検討、評価が必要であると述べた。

3番目は高エネルギー物理学研究所の平山英夫氏が「高エネルギー電子・光子カスケード計算コード」と題し、氏自身が開発してきた電磁カスケードモンテカルロ計算コードEGS4を中心に電子・光子輸送計算コードを紹介した。電磁カスケード計算コードは大別するとETRAN (米国NBS) とEGS(米国SLAC) シリーズに分けられ、前者が低エネルギーから高エネルギーへ、後者は高エネルギーから低エネルギー側へと拡張され、現在は電子、陽電子で10keV～数千GeV、光子で1keV～数千GeVを扱うことが可能である。素粒子実験用カロリメータやポジトロンファクトリ用陽電子生成ターゲットの設計、遮蔽体背後での放射線場と線量当量との関係などEGS4コードの幅広い応用も合わせて紹介された。

4番目は広島工業大学の浅井慎氏が「素粒子実験用検出器開発のための放射線輸送コード」と題し、米国ダラス郊外に建設中のSSC (Superconducting Super Collider) で利用する検出器SDC (Solenoidal Detector Collaboration)の設計について紹介した。20 TeVの2個の陽子の衝突で数百個の荷電粒子と中性粒子が生まれ、これを検出する測定器は総チャンネル数が約100万、総重量27,000トン、費用が500M\$と膨大なもので、事前に実験によりテストすることが出来ないため、設計段階での素粒子の輸送現象のシミュレーションが非常に重要であると述べた。SDCの設計では検出器のシミュレーションのために欧州合同原子核研究所(CERN)が中心となって開発したGEANTコード、検出器内で起こるシャワー現象のシミュレーションはドイツ電子シンクロトロン研究所(DESY)が中心となって開発したGHEISHAコードを利用している。

第1日の最後は、米国ORNL研究所RSIC (Radiation Shielding Information Center) 所長Robert Roussin氏の招待講演で「Activities of the Radiation Shielding Information Center and a Report on Codes/Data for High Energy Radiation Transport」と題してRSICの活動を紹介すると同時に、RSICに登録されている高エネルギー放射線輸送のソフトウェアをレビューした。RSICは1962年の設立当初から高エネルギー放射線輸送と深い関わりを持っておりNASAはアポロ計画が終了するまでRSICのスポンサーであった。これまで、RSICには世界中の高エネルギー放射線輸送に係わる主なコード(CCCライブラリ)とデータ(DLCライブラリ)は登録されており、これらはRSICを通して無料でサービスされてきたが、こうしたサービスは良好な国際協力、国際関係により保たれることを強調した。

次世代原子力システムの熱流動解析

第2日は「次世代原子力システムの熱流動解析」として4件、「高精度流動計算と計算機性能」として1件の講演がなされた。全講演とも何らかの形で伝熱流動問題の数値解析/シミュレーションと関連するもので、その内容は広い範囲にわたり、将来の関連ソフトウェアの開発動向を探る上で興味深い内容を含んでいた。

第1番目は原研の西尾敏氏が「核融合装置と必要なプログラム開発」と題して装置の概念設計に必要なシステムコードを中心に、関連するコードを紹介した。システムコードとは、広範囲なパラメータ領域の中から概念設計に踏み出すに値する設計点を見つけだすことを目的として、プラズマおよび各機器の主要なパラメータ間の整合性を保ちながら、装置全体の輪郭を描き出すためのものであるという。この分野では、時期装置の物理設計から工学設計への発展の段階にあり、新たなソフトウェアへの要請が高まっていることが示された。

第2番目は東芝の長坂秀雄氏が「Passive - Safety炉の特質と必要なソフトウェア開発」と題し、米国GE社を中心に各BWRメーカーが国際協力のもとに開発を進めているSBWRの概要、関連する安全解析コードの概要及び解析結果を紹介した。Passive Safety炉は重力や自然力を利用した安全系を採用しているところに特徴がある。そのようなものとして、事故後比較的短期の炉心冷却を行う重力落下式ECCSや長期の崩壊熱除去を行う静的格納容器冷却系(PCCS)等が考えられているという。一方、SBWRは電気出力600MWの沸騰水型軽水炉の自然循環炉であり、炉心部で発生した気泡の浮力が炉心冷却水循環力となっており、炉心冷却用再循環ポンプは削除されている。講演では、SBWRを中心にPassiveな安全系の機能や原理が紹介された他、Passive Safety炉の格納容器の大きさを決定するPCCSについて、冷却方式や冷却場所の異なるPCCSの除去性能を比較した解析結果等が示された。そうした検討結果に基づいてアイソレーションコンデンサーがSBWRで採用されることになったと言うことであった。

第3番目は原研の西尾軍治氏が「再処理システムにおける熱流動解析」と題して、再処理施設の設計基準事象である火災、爆発および臨界時の放射性物質の閉じ込め効果を評価する種々の解析コードの概要及び解析結果を紹介した。その中で、原研で実施された実証試験の概要とその解析結果が示された。一次元流動解析では固体ロケット燃料を5秒間燃焼させた場合の穏やかな爆発における圧力挙動解析結果が、また、二次元解析では溶媒火災を模擬した実験における室内流速、温度分布の解析結果が議論された。良好な一致が得られているとのことであった。

本セッションの最後は東北大学の戸田三朗氏による講演「加速器炉の液体金属ターゲットの熱工学的問題」で、ビームの照射によるポイント状局所加熱によって容器内に誘起される自然対流の問題について、主として基礎的な水シミュレーション実験と数値シミュレーション解析の結果が紹介された。円筒容器内の液体金

属が下面から加熱された場合、レイリー数が低いと右回転渦（初期条件に依存して左回転もある）が生じ、レイリー数の増加に伴って上下2個の渦に分れ、さらに増加すると最初に現れたものと反対回りの渦が生じることが解析で示された。さらに、円筒容器の中心軸状に体積加熱を加えた場合、内外両レイリー数が複雑に作用して、自然対流のパターンは複雑になるということであった。取り扱われた問題は極めて単純な体系でかつ基礎的なものでありながら難解な問題を含む興味深いものであった。

高精度流動計算と計算機性能

航空宇宙技術研究所の三浦甫氏が「航空機空力設計推進のための計算機性能」と題して、計算機の開発に大きな刺激を受けて発展してきた計算機空気力学の応用として宇宙輸送機「HOP」の例についてビデオテープを使って紹介すると共に、将来の航空宇宙機及び航空機の研究開発を強力に推進するための基盤となる計算機性能（処理速度と主記憶容量）について講演した。講演内容を良く理解するためには計算機のハードウェアについての知識が必要とされたものの、計算機空気力学が必要としている計算機の実効処理速度はFACOM VP-400の100倍以上、主記憶容量は近く稼働予定の国産スーパーコンピュータFACOM VP-2000やNEC SX-3の20倍、40GB程度であること、こうしたウルトラスーパーコンピュータ実現へのプロセスについての内容は聴衆の関心をそそるに充分であった。

研究会の最後に炉物理研究委員会の金子委員長が閉会の辞を述べた。研究会の内容をまとめると共に、今後の原子力開発の進展には基礎研究の充実とこれらの成果を取り組んだ技術の体系化としてのソフトウェアによる種々の設計段階でのシミュレーションが不可欠であり、ソフトウェアの重みは今後一層高まるであろうと述べ、本研究会がこうしたことに効果的に寄与することを期待するとまとめて研究会を終了した。

〈会議報告 5.〉

「中性子および光子輸送計算のためのモンテカルロ法」国際会議の印象

日本原子力研究所 中川正幸

上記の国際会議が1990年9月25日～28日に、ハンガリーの首都ブタペストで開催された。この会議の報告を書くようにと云う事になったがその概要は既に学会誌(1991年1月号)に書いたので若干の重複はお許し願うとして肩の凝らない話を中心に述べたいと思う。

会議には予想を越えて約20ヶ国から80名程が参加した。特に参加者の国が片寄らず東欧を初め多くの国からの出席者があった事が印象的であった。会議では基礎理論から各種の応用まで幅広い内容の約50件の論文が次の分類に従って発表された。

1. 分散低減法 2. 特殊技法 3. 並列化およびベクトル化 4. 計算コード
5. 原子炉への応用 6. 固有値問題 7. 深層透過と遮蔽 8. スペクトルアンフォールディングと検出器応答 9. 医療への応用と放射線防護 10. 核融合と加速器。

なお会議の初日は、ハンガリー料理を中心としたレセプションの後、丁度その日から始まるブタペスト音楽祭に招待されオープニングのハンガリー国立交響楽団の演奏を聞く事ができた。曲目はハンガリーが生んだ大作曲家バルトークのものばかりが選ばれていて、民族の誇りとなっていることが分る。組織委員会(ハンガリーにはモンテカルロ法の理論家として高名な方がおられる)の心配りはこの他にも随所にあり和やかでお互いに親近感あふれた会議を持つ事が出来た。

会議の発表より

さて会議で発表された中から幾つかの話題を拾ってみよう。原子炉計算に関しては詳細な非均質形状を考慮した計算が既に実現しており、現在は連続エネルギーコードを中心に機能の拡充、高速化、入出力支援技術の研究が行われている。例えばフランスのコードTRIPOLIでは画像処理を含めて改良が進みつつあるし、ユーザーにとって経験を必要とする分散低減法も、コードが自動的にパラメータを決定できる機能を持たせるための研究に努力が払われている。また固有値計算(k_{eff})において各世代の中性子数を規格化する事から生じるバイアスと分散において相関性によって生じるバイアスについては既に証明されて来たが、前者はある程度のヒストリー/世代を取る事により現実には気にしなくて良い事が改めて示された(例えば500粒子以上でバッチサイズをバッチ数より大きくとるのが無難であろう)。しかし後者については現在広く使われている方法では、有意な大きさとなるので新しい方法の提案も行われた。この固有値計算に伴うバイアスの問題は特に臨界安全等で依然として重要な課題と考えられるので今後も研究する必要がある。

モンテカルロ法の原子炉関係以外の分野にも新しい展開が見られつつある。炉物理を研究している我々が余り知らなかった部分としては医療関係があろうか。加速器が医療に広く実用されるに従い低被曝が強く要求される。このため放射線医療機器の最適設計や精度の高い線量評価が求められ輸送計算をモンテカルロ法で行うことが多くなっている様である。高エネルギー加速器の設計や管理では遮蔽関連の解析がますます重要で複

雑になってきた。特に軽荷電粒子、中間子、中性子、電子、光子を扱う必要がありこれらを同時に計算出来るモンテカルロコードの必要性がでてきた。米国のLLNLではこの種のコードの開発を目指している。またCERN(スイス)、KFA(ユーリッヒ)、DESY(ドイツ)等からも高エネルギー反応で放出される中性子以下の粒子輸送計算のためのコード開発について発表が行われた。今やGeVからthermalまでをカバーする計算が求められる時代と云えようか。

さてモンテカルロ計算で大きなネックとされて来たのが計算時間の問題である。三次元で詳細な輸送計算を行うので時間がかかるのは当然と云えば当然である。しかし高速化によってこの方法の魅力が一層増大する訳であるからこの研究は現在の重要なテーマの一つとなっている。新しい計算機アーキテクチャの登場がこれを可能にしている事は云うまでもない。筆者等はスーパーコンピュータ用のベクトル化コードを開発して1桁速い計算を実現してその成果を発表したが、この方法の問題はプログラムを一から書換える必要がある事であり、そのための労力を考えると躊躇する事になる(我々は多くの方々に使って頂けるものを早期に提供したいと願っている)。ベクトル化に関しては他にも二件の発表があった。ベクトル化と並んで研究されているのが並列演算による高速化である。例えばドイツの発表ではINTELの32台のプロセッサを用いてCRAY2と同程度の速度を達成している。これにはMORSEコードを用いているように既存プログラムの修正で済む利点がある。プロセッサが100台を越えた時にどの程度の効率を保てるかが問題となってくるが並列演算は間違いなく高速化の決め手の一つになると予想される。一方、最近では安価で高性能なワークステーションが普及しつつありモンテカルロ計算も可能となっている。パネル討論ではこれら新しいコンピュータの果す役割についても話合った。最近の新しいハードウェアの登場はユーザーに様々なオプションを提供しているので、どれが良いと云う事でなくうまく使い分けるのが最善であり、これによってより安価で少ない労力で精度の高い解が得られると思う。

しかしこの様に最近のハードの成果を享受できる国はまだ限られた西側諸国のみである。今回は東欧の人達と話す機会が多かったがそのコンピュータ事情についても聞くことができた。ユーゴスラビアの研究者はパソコンもないと云う。東独の人は私が話した日本のスパコンの性能に感嘆した。丁度ドイツ統一を翌週に控えた東西ドイツの研究者達は和気あいあいであった。しかし統一後はどうなるのかとの私の問いに対し東独の原発は厳しい再審査を受けることになると思われるので相当厳しい事も予想される、また自分達の研究予算等がどうなるのか全く見当がつかないと不安を覗かせていた。ソ連のコンピュータ事情も興味ある所であったが余り話したがらず、ただVAXに似たマシンを使っているとの答えだった。チェリノブイリ事故の影響か各原子炉では反応度の再評価が求められていて困っている所もあり、私に計算を頼む人もいて返事に窮してしまった。ソ連ではコンピュータ資源の配分は分野によって相当差があるようだ。しかし近く開く予定のモンテカルロ法の国内会議には数百人参加するだろうとの話には私の方がたまげてしまった。かって私等は数値解析の勉強はソ連の文献で行ったものだが今もこの方面の人的資源は豊富なのかも知れない。

ブタペストの街にて

この辺で少しブタペストの街についても御紹介しよう。とは云っても会議は中心街から少し離れた丘陵地にあるホテルで行われたので十分に観れたわけではない。むしろ街の事は色々と経験された方がおられるのでその方が適任なのですが。ブタペストはウィーンから飛行機で1時間足らず汽車でも4時間程度の西欧に最も近い東欧の街である。この街はドナウ川を挟んで王宮や高級住宅街のあるブタと市街地のペストから構成されている。ドナウ川には近代的な観光船が行来していて高台から見る景色は大変美しい。この地はかつてフン族が支配したことがあるのが国名の起源と聞くが東洋系の顔をした人も少なくない。使われている言葉はマジヤール語で我々はもとより西欧人にも全く理解できない特異なものである。俗人にとってブタペストで有名な物と云えば、パプリカの効いた料理、ワイン、手芸品、Herendの陶器、温泉そして東欧ならどこでもあると聞くヤミ屋等々が入ってくる。私達は会議の半ば頃、河畔にある温泉へ骨休めに行った。この街には多くの温泉があるが我々が行ったのは庶民が気軽に行く所の様であった。入場料は数十円、試みに頼んだマッサージも大同小異である。中には大きな石造りの浴場と温度の違う浴槽、さらにその周囲にやはり温度を変えたサウナがいくつもある。中にはその温度が60度を越えていてとても1分以上は入っておれない部屋もあった。多分それぞれの目的に応じて順番に入っていくのが正解のようである。さてマッサージが大変であった。油汗を流し体をばらばらにされるのではないかと恐れながらこれに耐えた。そのお陰で温泉から出た時は大変爽快で身が軽くなったようでそれまでの疲れがとれてしまったのはさすがである。ここを訪れる機会がある方は一度試みられるとよい。さてワインとなるとTOKAJI (TOKAIではない)産が余りにも有名である。腐貴ブドウを手摘みで取って作ると云うこの名酒は、朝日の輝きと香りを持つ。味は甘口が多いので食後に飲むのが最適である。ブタペストからの飛行機で乗り合わせたフランスの老夫人もバッグにこのワインを入れており、フランスではとてもこの種の物は高くて買えるものではないと語っていた。私が手に入れた'70年代初頭の物で千円程度だったろうか。とある町の居酒屋(スナック?ここが実に殺風景)で飲んだのは大変安い。また様々なサラミソーセージ(これも有名)とパプリカのきいたスープを味わえた。私の最も気に入ったハンガリー料理がこのスープ類である。

さて街の中心へ行ってみると手芸品、衣類、毛皮等様々な物を持って立ち売りしている人達がいる。ここではこの方式の商売は違法なのでお巡りが来るとさっとバッグの中に隠しそ知らぬ顔でおばさん達は編み物を始める。このかけひきが面白くてしばらく見物していた。とは云えこの様な風景はかつて日本の駅周辺で見かけたような気がする。街頭には現地貨幣(単位はフォリントで2円強)との交換を求めて声をかけてくるヤミ屋が横行しているが約2割安といったところである。だが下手をするととんでもない紙幣を掴まされるので注意が必要。外貨では統一を控えたドイツマルクに最も関心が高かった。高級商店で売っている物でも何でも日本に比べればとにかく安い。そのためかホテルの売店で売っている刺しゅう類を殆ど買占めた人もいれば手当たり次第に買物をした先生、かくいう私もそこそこ、かくて日本人出席者のスーツケースはハンガリー製品で満ち溢れる事となった。会場のホテルも清潔で安く、ブタペスト等の東欧で国際会議を開くのは大変魅力的ではないかとの結論に達した。(1991年1月17日記)

<留学記 1.>

プロヴァンスの青空

原研 岡嶋 成晃

平成2年2月から1年間、原子力留学生として、フランスの Cadarache 研究所に滞在しています。

プロヴァンス

幕末から明治にかけて、多くの日本人留学生の玄関だった港町 Marseille から、北へ30km程行くと、Aix-en-Provence に至ります。そこから、北東に約50km行った小さな町 St. Paul-les-Durance のはずれに Cadarache 研究所はあります。この辺りは、Provence (プロヴァンス) 地方と呼ばれています。

プロヴァンスは、…… Provencale (プロヴァンス風) として料理の名前によく見かけます。それは、オリーブ油、ガーリック、トマト、それに香草をふんだんに使った料理を意味します。街中を散歩すると、この料理の香りがレストランから漂ってきます。郊外へ出かけると、風に乗ってガーリック、タイム、バジル等スパイスの香りがしてきます。土産物屋では、これらの香草をつめた匂袋 (ポプリ) が売られていて、独特の匂い (匂いが強すぎて、臭い感じもします) がします。

気候は地中海式気候 (子供の頃に習った社会科を思いだし、気候の特徴はその通りだと実感しました) であり、年間を通して少雨で、空気は乾燥しています。「(プロヴァンスではありませんが、同じ地中海式気候である) モナコでは雨がふらない」と書かれた、モナコで売られているこうもり傘を街で見かけたことがあります。春から夏にかけて、毎日、どこまでも続いているように思える、抜けるような青空が広がっています。おそらく、オランダ生まれのゴッホはこの青空を見て、「広重の描いた日本の空のようだ」と感動したのだらうと思います。夏になると、この青空に憧れて、たくさんの Parisien やフランス北部やヨーロッパ北部 (ドイツ、ベルギー、オランダ等) の人々がバカンスにやって来て、ニース、カンヌ等の Cote d'Azur 地方と同様に大変な賑わいを見せます。特に、パリからマルセイユに抜ける高速道路 A6 は「Autoroute de Soleil (太陽の道路)」と呼ばれ、バカンスシーズンともなれば、レジャー用品を満載した車が一路南へ向かいます。この時期には、空気も大変乾燥していて、山火事が多く発生します。89年には Cadarache 研究所のすぐ傍でもあったそうです。滞在中にも幾度かの山火事のニュースを耳にしました。一度は、夜空を赤く焦がす山火事を数日間自宅のアパートの窓から眺めたこともありました。冬には、数回/月の割合で、Rhône 川に沿って、アルプスから地中海に向かって、強い風 (Mistral) が吹きます (1年中だという人もいます)。時には、風速120km/h以上 (フランスでは、風速を時速で表します) のものがあります。このミストラルが吹く日は、寒いと言われています。

プロヴァンスの名は古代ローマの属州プロヴァンキアに由来しています。このことから判るように、ローマ時代にはプロヴァンス地方は Gallo-Romain 文化

の栄えた地域で、各地に古代ローマ帝国の巨大な遺跡が数多く残存しています。特に、Arles の劇場や闘技場、Nimes の闘技場、Orange の劇場、Gard 川に掛かる水道橋 (Pont du Gard) 等は有名で、観光客が絶えません。

この地方の人々には、ラテンの血が濃厚に流れているためか、開放的で気さくで明るく、「フランスで最も親切」といわれているそうです。私もその通りだとうなずくことが、多々ありました。

プロヴァンス地方には、最近まで独自の文化がありました。その一つに方言 (むしろ独自の言語といった方が適切) があります。「Provençal (プロヴァンス語)」といい、読み、書き、話をして、この地方の人々が歴史を形造ってきたそうです。前世紀あたりまではフランス語よりもずっと適用度が高かったそうです。現在も、お年寄りの中では話しに用いたり、地名を記した道路標識や、カーニバルの口上で用いられたりしています。

これらのプロヴァンス地方の風物を読み込みながら、私のなまりもプロヴァンスそのものなのと歌うシャンソン「J'ai garde l'accent (お国なまり)」があります。その歌は、「それは、ポタージュの中のニンニク、オリーブ油、葡萄棚の葡萄、蟬が鳴くニレの木、ラベンダーよりも青い空の色、蜂蜜色をした農家の壁、ドーデの風車、強い季節風のミストラル……」という風に続きます。また、オペラ「椿姫」で、椿姫への恋に苦しむ青年アルマンに故郷に帰って来いと父親が歌う「プロヴァンスの海と山」も、プロヴァンスの魅力をたっぷりとうたっています。

私が住んでいる Aix-en-Provence は、人口12万人の都市で、一時プロヴァンス公国の首都として栄えたこともあり、また印象派の画家セザンヌの生まれそして愛した町でもあります。近くには、彼が描き続けた山 Ste-Victoire があり、青空の中にその岩肌を浮かび上がらせています。また、この町にはたくさんの泉があり、高速道路の標識には、Ville d'eau (水の街)、Ville d'art (芸術の街) と記されています。

C a d a r a c h e での研修

Cadarache での研修先は、" D E R (Department d'Etudes Reacteurs) / S P R C (Service de Physique des Reacteurs et du Cycle)" で、Cheff は Dr. M. Salvatores です。この Service は次の4つの研究室から成っています。

L C P A (Laboratoire du Cycle et de Physique Appliquee)

核燃料サイクル全般や臨界安全について研究する研究室

L E D C (Laboratoire d'Etudes et de Developpement de Coeurs)

新型炉心の設計研究をする研究室

L E P h (Laboratoire d'Etudes de Physique)

実験解析 (CONRAD計画やEPICURE計画) や解析手法の研究や核データの評価を実施する研究室

L P E X (Laboratoire de Physique Experimentale)

臨界集合体 (MASURCA, EOLE, MINERVE, HARMONY) を用いて実験 (CONRAD計画やEPICURE計画) を実施する研究室

ここで、私は L E P h に属し、J E F - 2 の評価グループと E C C O のグループに加わりました。両グループのメンバーは、Dr. E. Fort, Dr. G. Rimpault,

Mr. J. L. Rowland (Winfrith を定年後、1989年12月から1991年12月まで Cadarache で働いています) と1人のテクニシャンです。その他に、時々 Sacley の Dr. P. Ribon が Cadarache にやってきて、このグループに加わります。

私の担当は、当初は、JEF-2ライブラリーから1968群の断面積セット (ECCOライブラリー) を作成し、セル計算コードECCOを用いて高速炉系のベンチマークを実施することでした。ECCOとは、European Cell Code の略称で、詳細群セル計算コードを狭義には指します。時には、ライブラリーを含めて呼ぶ場合もあります。ECCOは、現在ヨーロッパで実施されているEFR高速炉開発プロジェクトの一部として、開発中のもので、主にイギリスとフランスによって作成されました。

ECCOライブラリーの作成には、以下の4つの主要計算コードを用います。

NJOY/THEMIS
CALENDF

フランスで開発された Table Probability Method に基づく群定数作成コード。特に、共鳴領域の自己遮蔽因子の計算精度は NJOY に比べて高い。

MERGE

イタリアで作成された計算コード。NJOY/THEMIS の計算結果と CALENDF の計算結果を比較し、これらの計算結果を融合して、CRECCOの入力データを作成する。

CRECCO

イギリスで作成された計算コード。MERGE の計算結果を用いて、詳細群 (1968群) 群定数 (ECCOライブラリー) を作成する。

まさに、ECという感じがする計算システムです。この詳細は、1990年4月に開催された Marseille での国際会議 PHYSOR'90 の Proceedings に載っていますので、参照下さい。

ECCOライブラリー作成コードは、JEF-2 の使用を念頭において開発されてきました。これまでは試計算として英国の核データライブラリー FGL5 および JEF-1 に対して、特定の核種 (FGL5 の場合は高速炉の実験解析に必要な核種の一部、JEF-1 では U-238) に使用されただけでした。JEF-2 からの群定数作成は、JEF-2 の公開が1989年12月であることから、今回が初めての試みでした。その上に、フランスにおけるECCOライブラリーの作成は、今回が初めての試みでした。そこで、群定数作成に先駆けて、試計算を実施し、群定数作成過程の計算コードおよび計算結果をチェックし、データ処理に誤りがないことの確認が必要でした。作業が進むにつれて、種々の問題点があることが判明しました。すなわち、現在も開発中の計算コードであるために、開発がすすむにつれて、各国間の相互連絡のミス (寄り合い所帯により作成された計算コードであるため……?) から各計算コード間で取り扱うグローバルな断面積の定義が少しずつ異なっていることです。また、2次中性子エネルギー分布のマトリックス処理がうまくできていないことも分かりました。その結果、これらの計算コード間で定義が一致するように、計算コードを作成した各国に修正を要請しました。修正後、再度、総合的なテストランを実施し、その結果をフィードバックするようにしました。このようにして作業が進んだために、各国の高速炉開発に対

する考え方が作業の進捗度にも反映されました。たとえば、修正を提案すると、イギリスは「修正は実施したいが、修正に必要な予算的措置ができない。」との返答が必ず最初に現れます。この修正に多大な時間を要し、この体験記を書いている今も、断面積やマトリックスデータの詳細なチェックを実施している次第です。

Cadaracheでの生活

さて、Cadaracheでの1日を紹介すると、朝7時過ぎに近くの停留所から通勤バスに乗って、研究所に向かいます。この通勤バスは、Cadaracheが観光バスをチャーターしたもので、Aix-en-Provenceから約20台、その他の町も含めると全部で50台くらいあり、8時前に研究所の正門を通過して、正門脇の駐車場に到着します。その後、バスは研究所内の様々な建物へ行くように行き先が決められています。この駐車場で、バスの乗り換えをします。降車の際に、警備員によるIDチェックを受けます。乗り換えたバスの中は、同じビルに向かう顔見知りの連中で満たされます。ここで、朝の挨拶「Bonjour」が始まります。バスは8時過ぎに出発し、正門から4km離れたビルに到着するのは、8時15分頃になります。居室に到着すると、マイカーで通勤した人々と「Bonjour」を交わし、その後モーニングコーヒーを飲みながら若干のおしゃべりをし、ようやく8時40分位から仕事開始です。

11時半を過ぎると、誰かが昼食に行こうと声を掛けに来ます。いつものお決まりのメンバー(上述のグループを中心に総勢7~8人)が揃うまでに約20分を要し、食堂まで5分程歩いて行きます。食堂では正味の食事時間が30分程度で、30分がおしゃべりの時間で合計1時間です。時々、おしゃべり時間の長いことにいい加減に嫌になることがあります。話題は、株と政治と自動車が大部分です。例えば、1990年2月から3月にかけての東京株式市場の暴落(「兜町(フランス人はカプトショウと発音します)」、「日経」は有名な単語です)、最近では、イラク戦争そしてパリ=ダカールラリーです。私の食事仲間は殆どワインを昼食時には飲みませんが、もちろん、他のテーブルではワインを口にしながら、口角泡を飛ばしている人達もいます。やっと、長い食事時間が終わり、居室に戻るといつも1時を過ぎています。フランス人は食事を大切にしているためなのか、昼食時にジョギングをしている人は殆ど見かけません。

やがて、夕方4時過ぎにはバスがビルの前で待ち、4時15分に正門近くの駐車場に向かいます。そこで、バスを乗り換え、4時30分に研究所の正門を出て行きます。自宅に到着するのが、5時過ぎです。正規の勤務時間は8時から4時半までで、バスがこの時刻を厳守しています。昼休み(食事時間)は35分と定められています。そして、月曜日から金曜日まで毎日働くと、1カ月で丸1日の勤務時間分だけ国の規定に比べて働きすぎることになります。そこで、1カ月に1日だけ自由に休みが採れます。有給休暇の20日と合わせると、1年に32日休みがとれることになります。たいていの方は、子供たちの休みと重なるように取ります。クリスマス休暇、冬休み(2月中旬)、イースターバカンス、秋休み(10月中旬)に各1週間と、夏休みに約3週間が標準の様です。この時期にフアクシミリを送信しても、早急な返信は期待できません。

この様な日常生活が、9月のある日破られたことがありました。それは、Cadarache内の一部の組織(MOX燃料製造に関連する)がCEAから民間企業(COGEN

A) へ引き渡す契約が取り交わされ、その際の労働条件の変更等が問題となったためでした。最初は、入門するバスや乗用車を止めて、乗客全員に対してビラを配るだけでした。この、ビラ配りを実施するだけで、バスの入門は1時間以上も遅れます。交渉がこじれるに連れてストライキへと発展し、研究所への唯一の入口である正門前でストライキが実施されるので、バスは入門できず、正門前でUターンして、戻りました。また、ある日は、定刻通りにやって来たバスは、交通渋滞を避けるために正門前で乗客を降ろし（ロータリーの周囲を50台のバスが連なった場合を想像してみてください）、研究所構外にある別の駐車場で待機しました。乗客は、10時の正門の封鎖解除まで正門前で待たされました。この時、皆はこれに文句を言うでもなく、おしゃべりをしてずっと待ちます。封鎖解除後、正門から職場まで皆ブラブラと歩いていきました。私の職場では、11時過ぎに幾人かがやっと職場に到着し、その後コーヒーブレイクを採りました。やがて、12時が近づくといつもと同様に昼食にいきました。行く途中、昼食の準備ができていだろうか心配しながら……。この日は、職場につくだけで一日が終わった感じでした。

最後になりましたが、フランスからのホットなそして重要な情報として、「今年のワインの出来ばえは最良」ということを聞きましたので、お知らせして筆を置きたいと思えます。

(1月22日記)

<留学記 2.>

留（流？）学記

名古屋大学工学部原子核工学科仁科研究室所属

長壁正樹

幸運にも、昨年（1989年9月から1990年6月まで）私は文部省の奨学金を得てアメリカのミシガン大学の原子核工学科に交換留学生として行く機会を得た。この度、その間の体験について書いてみないかというお誘いを受け、不精な筆を取っている次第である。

ところで、この様に書くと、『たかが一年間行ったからって、なにをエラそうに・・・』と思われる方がいらっしやるかもしれない。そう思われるのも、大変もったいな話である。実際僅かな経験にも関わらず、『アメリカに行ったらしいけど、（アメリカは）どうでしたか？』とか『アメリカ人でどんな？』とか聞かれると困ってしまう。『それは、おまえの観察が足りないからだ。』と言われてしまえば、それまでである。しかし、ここで皆さんにも『果して、我々は身の回りの人のうち、完全に知っているといえる人が何人いるか？』ということを考えて頂きたい。残念ながら、私にはそのような存在が10人といない。この国の人口は約一億人であるから、わたしは日本を僅か約 10^{-5} %の割合で知っているだけである（たとえどんなに顔の広い方であったとしてもせいぜい桁を二つよくすることが出来るぐらいであると思う）。25年間生活してきた日本でこの有様であるから、いわんやたった1年間暮らしたアメリカおや、である。そうかといって、一年間何も違いを感じずに暮らしてきたわけでもなく、やはり、私なりにある程度の事を感じ考えてきた。ただ、皆様には私がこれから述べる事を、上述の事を考慮に入れた上で読んでいって頂きたいと思うのである。

まずは、ミシガン大学について全般的なことを簡単に紹介させて頂く。ミシガン大学はミシガン州のアンアーパー市内に存在する（ミシガン大学の中にアンアーパー市が存在するといった感があるが）。アンアーパー市はヒューロン湖（五大湖の内の一つ）の近くであり、自動車で有名なデトロイトから車で約1時間半ぐらいのところにある。アンアーパー市の住民の大半はミシガン大学と関係があり、そのためかアンアーパー市の治安は大変良いように見えた（少なくとも、私は怖い目には会わなかった）。ミシガン大学で有名なもの

はスポーツではバスケットボールとフットボールで、学業の面では、私が通った原子核工学科の他に、航空学科、船舶学科、電気及び情報学科、化学科等が全米で1、2を争っている。また、ロースクールやビジネススクールなども有名で日本の証券会社に勤められている方々や法務省に勤められている方などが多数いらした。

次に、¹大学そのものについて思いだしてみる。大学の施設およびその使い勝手について言わせて頂くと、日本の大学と雲泥の差があるように見える(名古屋大学を標準的な日本の大学と見ればの話だが)。まず、図書館であるが、大変使い易く、身近なものとして感じられた。例えば、コンピューターによる図書の検索システムを取り上げてみる。まず、その検索用の端末の数が利用者の人数に対して充分にあるので待つことは殆どない。また、その操作方法が単純明快であり、しかもこちらが正しい加減な情報しか持っていない場合でもなんとかお目宛の本を見つけることが出来る。蔵書も大変豊富で必要な本は大抵手に入った(ただし、雑誌は不足であるというご意見を持つ方もいらした)。また図書館の閉館時刻は大変遅く、主要な図書館は殆どが深夜12時頃まであいており、クリスマスや感謝祭などといった特別な日を除いては殆ど休館することもない。おかげで、学期をとおして勉強するのに大変便利であった。これは、授業が終って数時間後に閉館したり、一週間のうちに一度以上休館日のある某大学の図書館と比べると随分違うと思う。次に、大きな違いを感じた施設はコンピュータールームである。基本的に、学生証を持っている人は全て大学が所有するコンピュータールームに入ることが可能である。また、工学部などが所有する特別なコンピューターも簡単な手続きを踏みさえすれば使用することが出来る。これも、研究室に配属された者のみ、もしくは授業で使用する場合だけ大学の計算機を使用することが出来る某大学と比べてえらい違いである。

授業はどうかと言うと、これは当りはずれがあった。しかし、当りとはずれの比率を比べると名古屋大学で受講した授業のうちおもしろいと思ったものは全体の約3割、ミシガン大学ではそれが約7割となり、ミシガン大学の方がよい授業を提供しているように思える。このような差が生じる原因として、『受講する生徒の態度が違う』、『授業を行う教師の熱心さが違う』と『授業のシステムが違う』ということが大きく影響している。よく、『アメリカの大学生

はよく勉強する』ということを目にするが、私の受講したクラスの8割がたの生徒は私の知るところの日本の大学生とあまり差がないように見えた。ただ、単位を取るのが難しい分だけ試験の前に一生懸命に勉強しているだけのようだ。しかし、残りの2割はさすがに違うと言った感があり、彼らは私にとって非常によい刺激となった。ところが、授業を行う教師の熱意が足りないとそのような生徒の数は減り、割合にして約1割ぐらいになった。熱心な生徒と熱心な教師は互いに刺激し合い、その結果授業をおもしろくしているようだ。授業のシステムの違いもかなり大きな原因である。ミシガン大学では、ひとつの教科の授業は普通は週3回、各1時間の割合で行われている。また、宿題が各教科につき毎週出されるので、習ったことを忘れる暇がない。その結果、先生が授業中におっしゃることがよくわかるようになり、授業がおもしろくなる。また、学期の最後の日に、その授業が良い授業であったかどうかを尋ねるアンケートを取り、そのアンケートの結果次第によっては教師の進退が影響されるというシステムがあり、これも大変興味深い(たいていの生徒はそれほど授業を悪く評価しないのでこのシステムは有名無実化しているという噂もあるが、ないよりはましである)。

以上大変勝手気ままなことを、大変乱暴かつ稚拙な文章にて述べさせて頂いた。自らの一年間を振り返ってみると『あわただしかった』の一言に尽きる。よく留学したことが有益であったといった風なことを目にするが、それはそのことを活かして何事かを成した人のいうことであるから、あえてそのことにはふれません。ただ、無駄にしたいくはないとは思っている。

最後に、私がミシガンに滞在している間、丁度同じ時期に滞在なさっていらして、いろいろと私の面倒を見て頂いた岐阜大学工学部共通講座工学基礎科の岸田先生とそのご家族の皆様はこの場を借りてお礼を申し上げます。

 *1 私はミシガン大学での一年間を送るにあたって、授業を受講することを中心とすることに決めた(何故なら、一年間という期間はいろいろなことを行うにはあまりにも短すぎ、何か一つテーマを決めたほうが良いように思えたからである)。それ故、私の持つミシガン大学像は大変偏っていると思います。

<留学記 3.>

Impressions and thoughts on the Japanese research activities

Imre Pázsit
Studsvik Nuclear
Fuel Technology Department
611 82 Nyköping, Sweden

My impressions and reflections are based on a three-months long stay with the Nishina Laboratory of the Nuclear Engng Dept of Nagoya University, including an eight-day long visit to Tohoku University, and numerous short visits to research laboratories and power stations as well as discussions at formal and informal meetings. This one being my first visit to Japan, and also given the relative shortness of time for such an extensive program, my observations are naturally rather incomplete and personal, moreover mixed in character. Anyway, I shall try and cover as much as I can on research activities related to the nuclear industry. Subjects of interest in this report are the organisation and functioning of university research, basic and applied research at research institutes, together with the relationship and interaction between them and the industry and the utilities.

Before starting the actual description, I thought to mention two circumstances which in my view are characteristic for Japan as compared with other countries. The first one is generally valid for all items touched upon below. It is the fact that Japan has one of the worlds broadest program in the nuclear energy field including new, advanced reactor types and fuel materials, with a goal of establishing a full fuel cycle for these. It has mostly advantageous, but also disadvantageous effects on the quality of nuclear research, as will be discussed later. The other characteristics is of a much more limited relevance, and it is the projection onto the everyday level of the professional and technical field of the more general oriental (or just Japanese) way of organizing hierarchy in all sectors of society, based on respect of authority. (How authority is defined or created is another question, whose discussion is outside the scope of this paper). This latter is quite conspicuous to a visitor who had only worked in European countries before.

University research

The above mentioned two factors can be most clearly observed on the way how university research is organized and performed (and from where the author drew most of his experience during his visit). As regards the broadness of the nuclear energy program, its consequences to university research are mostly positive. I was impressed by the large number of university laboratories for reactor physics and nuclear engineering, of which several have fame and high reputation nationwide and internationally. It was interesting to see the weight of the role that universities play (and exercise through their professors) in nuclear issues at both the technical and the public level. Apparently university representants have an influence on decisions in technical and policy issues even at ministry level. It appears that in those decisions, on the whole, the universities are better represented than in many European countries.

The already mentioned, to us Westerners somewhat unusual hierarchical authority structure can be found in miniature even within the individual laboratories. My impressions on this are positive, it helps maintaining a very good standard level of nearly each individual student's education level and expertise. In the U.S. for instance there is much less respect for authority, resulting in a generally much looser system and a much higher spread of student knowledge level. It can be argued with reason that the authority system is beneficial for the large mean but disadvantageous for the talented, for the latter the "loose" system being more inspiring. My opinion is that both systems can be organized adequately and inadequately; the way in which the authority system is organized in Japan at least at the universities it is effective. Besides, it is a general trend in science and engineering (apart from some notable exceptions) that currently there is very little left for the genius to discover and advance is mostly done in a craftsman's style rather than in an artist's.

The technical level of research and education is high at those places which I got into contact with. The level of research is otherwise relatively easy to measure through publications, citations, international exchange programs and so on, thus it does not require a visitor's analysis. The quality of technical education as much as I have seen is also rather high, with an emphasis on group work which was new and interesting to me. There is only one aspect which I thought to mention in some more detail. It is a world phenomenon that although the quality of technical education (i.e. transferring technical knowledge) maintains a good standard level, and the students are educated even for becoming researchers, the quality of teaching the student to explain things well, to express himself clearly, is generally deteriorating. I cannot judge the situation in Japan in general, but I have encountered a special aspect of it when trying to communicate with students and researchers in English. The ability of people for effective communication in English showed a rather large variation, ranging from very high to rather poor quality. This depends on two factors, out of which the language is only one. The other factor is the speaker's ability to think himself or herself into the recipient's position, to find out what he or she understands and how things should be explained such that the recipient understands it. Given the relatively large difference in the way of thinking between Japanese and Westerners, this is an important factor for mutual understanding. The large variation in this ability among the people to whom I talked indicates that the individual level depends on the motivation of the individual persons, rather than being part of the general education system. I think this aspect of the education needs some attention if Japan wants to have a better payoff from international scientific cooperation.

One remark of very minor importance regards the technical quality of certain equipment, such as computers or even telefaxes and the like. Here again a very remarkable unevenness of standards can be noticed, which is strange if one thinks of Japan's world leading position in those electronic equipment. The main frame computer of Nagoya University, at least the one which was most commonly used, appeared to have a rather outdated operating and editor system. Many types of equipment were difficult to handle, even if one disregards the language problem, that is the lack of English instructions: to handle the telefax required a little edu-

cation course from the secretaries. The funny about it is that I am speaking of equipment that is bought from Japan everywhere in the world, but they are sold outside Japan in a more advanced (or easier to handle) version. My Japanese friends in Nyköping agree with this observation. The computer problem is more vital though. To have access to IBM compatible personal computers is nearly a must internationally, and their absence in Japan is peculiar. I know of several European researchers who, during their short or medium long visits to Japan, wanted to work with their software that they had written for IBM PC and who were disappointed not to be able to use them.

Applied research

The broadness of the atomic energy program is felt also in the field of applied research, but here the effects are not exclusively positive. The beneficial effects are manifested in the large number of research institutes, experimental facilities, pursued subjects and the global amount of funds available. This gives an intensive research environment, and one would anticipate that the coexistence of a large number of related research fields leads to a very fruitful exchange of ideas and across-the-boundaries interactions. In other words, the wholeness of the research program should be more productive than the sum of its components. In reality the picture is not as positive and the above described benefit is not fully utilized. My own experience is limited to the particular field in which I am involved in, that is applied diagnostic research. My impression was that applied diagnostic research is done relatively isolated in the different programs, and in new projects it is usually restricted to the known problems of already existing (prototype or demonstration) reactors. A particular example is the fast breeder program, in which diagnostic work is being done for the Joyo reactor, specifically only to this experimental reactor, without an existing concept how the research will continue or the results transferred to later stages of the program for the prototype or demonstration reactor. I call this restricted, because the experience from the light water reactor program has already showed us that it is worth to be prepared to several potential operational failures (that is worth to plan a diagnostic program) in commercial plants well beyond the range of problems that are observed in the experimental reactors.

The explanation for this that I heard from Japanese colleagues is that the broadness of the nuclear energy program may be somewhat over-ambitious. Despite the large total amount of funds, the individual programs often do not get enough financing. This, in turn, leads also to lack of support and effort to coordinate between different programs and utilize the interaction potential between the different programs.

Utilities

The end users of basic and applied nuclear engineering research are the utilities. It is them who contribute to a substantial degree to the financing of applied research, and who can supply, through operational experience and need for improved safety, economy and environmental impact, inspiring problems to be

solved for both basic and applied research. It is a characteristic feature of the Japanese situation that the vendors have a much more dominating standing toward the utilities than in other countries. Because of this and other reasons, technical questions that the utilities might like to solve do not become public or become easily accessible for the universities and other institutes doing basic research (especially if these questions belong to the category "problem" or "trouble"). This has two consequences. First, the vendors dominate the applied research and development work. It is them who have interface to the utilities and their problems. Second, the universities receive much less information on inspiring problems and operational data for the test of their research results than in other countries. The utilisation of university research results is often slow and complicated. A comparison with e.g. Sweden shows striking differences in that utilities are very free in discussing their actual problems and research institutes have relatively easy access to reactor data. For universities it is not a particular problem to get information on current problems of the nuclear power industry.

One part of the explanation for the above situation in Japan may be found in that the three branches of nuclear energy research and industry mentioned above, namely universities, research institutes and the utilities and vendors belong to different higher organizational sectors what regards control and financing. These organizations, namely the Ministry of Education, STA and MITI, respectively, have separate fields of activity and interest, and their work is also loosely coordinated. This results in the above mentioned separation of roles in basic research, applications, and industry.

This analysis of the relation between universities and industry is of course not aimed at classifying it as positive or negative. Basic research needs not only inspiration, but at the same time a certain distance to and independence from applications. This independence is important to maintain flexibility in selecting research subjects and to maintain a good basic research program. In this respect the above situation is beneficial to the Japanese universities as long as their financing does not get strongly dependent on applications.

General

I feel it almost necessary to wind up this short review with a remark of subjective rather than of technical character. During my stay, from my environment I experienced an openness and willingness to co-operate, combined with an extraordinary hospitality and helpfulness. This gives a very good starting point for an effective co-operation, and it helped me and my hosts to make the best of a short technical visit even if the above mentioned communication problems came up here too sometimes.

Acknowledgement

I thank Dr. Keichiro Tsuchihashi of JAERI, editor, for inviting this paper and for his valuable comments and suggestions during the preparation.

<留学記 4.>

Impressions and Expectations of Research in Japan

R. A. Jameson

Accelerator Technology Division
Los Alamos National Laboratory
Los Alamos, New Mexico, USA

It is a privilege to be asked to make some comments about my impressions of research activities in Japan, and what might be expected in the future.

By way of background, I have interacted extensively with Japanese laboratories and industry in the field of particle accelerator technology for about 15 years. My first visit was in 1980, and fortunately, there have been many since. The period from April 1988 - April 1989 was a very high point, when I lived in Tsukuba, Kyoto, Tokyo, and Tokai, and worked with the National Laboratory of High-Energy Physics (KEK), the Accelerator Laboratory of the Kyoto University Institute for Chemical Research, the Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI), and other Japanese institutions on a variety of accelerator-related subjects. Recently, I have been working primarily with JAERI on advanced nuclear energy research projects for using powerful linear accelerators as intense neutron sources, to test and develop materials, to transmute radioactive waste, and to generate commercial power without leaving a waste legacy behind.

I have enjoyed all of these interactions, and the opportunities to get glimpses into many fascinating aspects of Japan far beyond the technical realm. But in no manner do I consider myself an expert, and I also believe it is very hard to make accurate generalizations; thus the reader must allow these remarks to be made from my limited perspective.

A view over the past 20 years starts with relatively little accelerator technology in Japan, and ends with wide recognition that Japan is fully competent in all the required aspects. The KEK complex, culminating in TRISTAN, the neutral beam heating devices for the fusion program, and many

smaller machines demonstrate the capability that has been developed in three important areas: R&D laboratories, universities, and industry. I have been fortunate to know many of the young people now working in this area, and find evidence of good training in their impressive abilities and enthusiasm. They are willing and able to try new things, and it is important that their working environment support this. The same remarks could also be made of many other specialized areas of technology in Japan. The reason for mentioning this building of a very good base is that I believe now is the time to expect the investment to start paying off well for the future, when we need some very innovative approaches to major problems.

Japan is in fact moving strongly to apply accelerators in new ways for society's benefit -- to advanced light sources such as Spring-8 (large scale) or Aurora (compact), intense neutron sources for materials testing (ESNIT project) and nuclear waste transmutation (OMEGA project), B-factory and linear collider studies for high-energy physics at KEK, medical research facilities (HIMAC project), and others. Both the technical and cost effectiveness of these projects depends on new, inventive, and more efficient approaches (an example is the need for much cheaper radiofrequency power sources).

There is something of a view outside Japan that Japanese projects are always "ultra-conservative" and "copied". Perhaps we could agree that this is not unusual anywhere, either when learning, or if sponsor agencies consider learning less important than the short-term view of cost and schedule. Sometimes it is said there is too much attention to detail, and not enough on more global or system issues. Attention to detail always pays off in the end; perhaps more emphasis on overall integration of system aspects is needed. I have seen these tendencies, in my judgement, in projects in Japan -- but not on all -- and have often observed it elsewhere as well. I think each new project must insist on advancing the state of the art in at least a few aspects.

There is a great deal of respect, some awe and even some fear, outside Japan concerning two factors -- the very great attention at present to supporting "R&D" at every level in almost every field of activity, and the ability to engage in well-debated long-range planning, with a long-range view, and with decisions reached. It seems inevitable to me that the payoffs in the future must be large,

both in original and innovative research, and in practical applications. I have seen these factors in most of the projects in Japan with which I am familiar.

There is a danger, however, in the very strength of the long-range planning and decision procedure -- that once a course is set, it appears to be very difficult to change it to accommodate new information or research results. I have repeatedly discussed my concern for this with Japanese colleagues. Most of the projects we are embarking on now will take a long time to complete, and we must retain some flexibility as we learn.

The projects currently under way, mentioned above, offer solutions to important problems, perhaps especially so in the advanced applications for nuclear energy, such as materials R&D, and solving the radioactive waste problem. In this nuclear arena, the skills of other disciplines now need to be combined with the skills of those who achieved the first successful round of providing nuclear power, to achieve solutions for the future. The most attractive transmutation techniques, for example, require much of the expertise of the reactor community even though they are not reactors. It is pleasing to me to see the reactor and accelerator communities, for example, already working closely together in Japan, and one of my expectations is that your example may lead the world to solutions in these areas.

Perhaps, then, if each R&D effort ensures a good balance between all of the various general "factors", it will be able to achieve original and inventive results, and apply them well. I expect there will be much evidence of this from Japan in the future.

<トピックス 1.>

超冷中性子の話

京大炉 宇津呂雄彦

1. はじめに

通常の熱中性子の領域では、中性子の波長は試料中の原子間距離や分子等の大きさと同程度であって、一つ一つの原子核による散乱や散乱波の干渉という話が中心であった。ところで中性子のエネルギーがもっと低いものになり、その波長が原子間隔よりもずっと長くなると、その波動の伝播は原子の集まりの全体的な効果によって支配されるようになる。このような現象についての基本的な解析によれば (Foldy, 1945年や Lax, 1951年)、中性子が物体の表面に入射する際にも光に似て屈折が起こり、しかも波長が非常に長くなると ($\lambda \gtrsim 600 \text{ \AA}$) 多くの物質では中性子の運動エネルギーがその物質の平均的散乱ポテンシャル (原子密度 N と干渉性散乱振幅 b_{coh} の積に比例) より小さくなり、中性子がその中に全く入り得ない「全反射」が起こることが示される。しかしそのような長波長中性子は極端な低エネルギーでありその観測は長らく実行の対象とはならなかった。

1959年に Zel'dovich¹⁾ はこのような超低エネルギー中性子 (「超冷中性子」、Ultra Cold Neutron、略して UCN と呼ぶ) の観察可能性及びそれが金属性容器の中に長時間閉じ込め可能であることを論じた。種々の実験的試みの後、Dubnaにおいて図-1に示す水平型実験装置²⁾により、また引き続いて Munchen では図-2に示す垂直型装置³⁾により、超冷中性子の明確な測定が成功した。いずれも実験の原理は、原子炉炉心近くまで挿入された管の先端に熱中性子を超冷中性子に変換するコンバータを置き、これにより発生した超冷中性子が全反射により管内から出られず、管の他端までやってくるのを特殊な超冷中性子検出器で数えるものである。いずれの装置も管の内面は鏡面に研磨されており (この管を超冷中性子導管という)、かつ管内は高真空に引いて残留ガスによる超冷中性子損失を小さくしている。水平型と垂直型との違いは、後者では中性子が重力に逆らって上昇しなければならないため、管の上端出口で超冷中性子となるものは下端出発点では約10倍のエネルギーを持っていることである。このため、水平型の図-1ではコンバータは当然管内に置かねばならないが、図-2では必ずしもその必要がない。コンバータは、中性子吸収が少なくかつ中性子がコンバータ内から真空中に飛び出す際与えるポテンシャルエネルギーが小さなものとして、アルミニウムや水素化合物が用いられた。

2. 超冷中性子の特質

超冷中性子は通常の熱中性子等に比べて幾多の特異な性質を示す。まず、速度が非常に遅く 10 m/s 程度以下であり、私たちが走っても十分に追い越せるものさえある。熱中性子や冷中性子のエネルギー解析では、数mから数十m飛ばせる飛行時間法がよく用いられるが、超冷中性子では数十cmで十分であり、距離が長すぎると中性子密度が分散してしまう。また、先にも述べたように非常に低いエネルギーであり、多くの物質表面で全反射されるが、これは物質中の原子核の平均的な散乱ポテンシャルよりも低いエネルギーしか持たないからである。さらに滑稽なのは、地球重力場では真上に上がっても1~2mで再び落ちて来ることであり、従って超冷中性子は大きな中性子鏡板の上では蚤のように飛

んでいる。超冷中性子の波長が長いこと及びエネルギーが小さいことから、結晶格子や小分子に比してずっと大きな寸法の構造解析、あるいは超高分解能の中性子スペクトロメトリなどを用いる物性研究に有利に役立つ可能性があり、それらの実験装置には上に述べた全反射や重力効果等の特性が大いに活用されることとなる。

また、中性子はスピンの $1/2$ であり、磁場の中ではこれに平行と反平行の二通りのスピン状態をとり得るが、平行スピンのものは強磁場から反発され、逆に反平行のものは吸引される。数テスラの強磁場の中中性子に対する磁気ポテンシャルの大きさは超冷中性子のエネルギーと同程度である。これを利用して、さきに述べた中性子鏡の代わりに磁場を用いて平行スピンの超冷中性子のみ閉じ込める磁気リングが実現しているほか、静磁場及び交流磁場を用いた中性子の減速装置が可能となる。

このように、物質の平均的な核散乱ポテンシャルにより閉じ込められる超冷中性子は、そのポテンシャルの大きさから 10^{-7} eV のオーダーのエネルギーであるが、一方このポテンシャルが大きい場合をも考えることができる。それは密度 N がずっと大きい場合であって、その例は天体物理の分野にある。知られている宇宙物理の対象では中性子星が自身の重力場に閉じ込められた超冷中性子の凝集体であるとされている。

3. 超冷中性子の発生

現在すでにいろいろな原理に基づく超冷中性子発生装置が開発され、あるいは実際に利用されている。その主なものについて説明する。

1) コンバータと中性子導管

これは既に図-1及び図-2で示したように、最初の超冷中性子観測に用いられた方法である。この実験以後、超冷中性子の収率に影響する諸因子の研究がいくつかの研究所で行われている。最も重要な部分はコンバータであり、理想的にはその温度 T を下げると T^2 に逆比例して強度が増すはずであるが、現実には中性子吸収や非弾性散乱の特性等によって影響される。例えば Golikov はポリエチレン・コンバータを室温から 90 K に冷却した場合の超冷中性子利得として4倍という実測値を得、また Utsuro らは20 K の液体重水素コンバータについて、その中性子散乱特性を精密に考慮した結果約100倍という利得計算値を得た。

中性子導管の内面は高精度 ($\lesssim 100 \text{ \AA}$) に研磨しておく必要があり、図-1の実験では電解研磨及び化学研磨導管について超冷中性子通過効率が測定された。コンバータ・中性子導管方式による現在最強の超冷中性子源はレニングラード原子核研究所の液体水素冷中性子源と垂直導管を組み合わせたものであり、導管出口強度は約 $1,200 \text{ UCN/cm}^2\text{s}$ である。

2) 中性子タービン

蒸気タービンやガスタービンでは高速の気流を回転羽根にあてて動力を取り出す。これと類似の原理で、回転する反射羽根に中性子流をあてて、その流速の方向を羽根に対して反転させると中性子を大幅に減速することができる。ただし中性子流の運動量は、回転車軸の摩擦などにうちかって自分で反射羽根車輪を回すほど大きくはないので、回転は外部から与えてやる必要がある。このような超冷中性子発生装置が中性子タービンである。

実在する中性子タービンの羽根による減速原理をより詳細に示したのが図-3である。

まず (a) は、銅製またはニッケル製の半円筒状羽根を用いた Steyerl のタービン⁴⁾ であり、各々 Munchen の FRM 炉及び Grenoble にある ILL の高中性子束炉において稼働している。(b) は、スーパーミラーという特殊な多層膜鏡からなる三面鏡羽根を用いたスーパーミラータービン⁵⁾ であり、京大原子炉実験所の KUR において液体重水素冷中性子源と組み合わせて稼働している。銅鏡では反射角が約 15° と小さく、速度反転に約 10 回の反射を要したものが、スーパーミラーでは反射角が大きく 3 回の反射で反転している。

(c) は Doppler shifter と名付けられた米国 ANL の装置⁶⁾ で、パルス中性子源に同期して回転する人工雲母羽根のブラッグ反射により超冷中性子を発生するものである。

中性子タービンの特徴は、取り出しが容易でかつ損失の少ない速度の大きな中性子を導いてきて、これを超冷中性子利用場所のすぐそばで減速すること、動作の特性上広い面積の超冷中性子ビームが得られること及び発生効率が高いことであり、例えば液体重水素冷中性子源と組み合わせた ILL のタービンの出力は約 2.6×10^4 UCN/cm²s の強度を幅 20 cm にわたって供給している。このため、1 つのタービンから複数の超冷中性子出力を取り出している。

3) スーパーサーマル・コンバータ

UCN を発生させる他の方法として、超流動状態のヘリウムと約 9 \AA (12 K) に予冷された中性子を反応させる方法がある。量子液体である超流動ヘリウムにはいわゆるフォノンやロトンが発生消滅を繰り返しているが、その運動量-エネルギーの関係は通常の粒子とは異なる曲線となる。 $E = P^2 / 2m_n$ という中性子の運動量-エネルギー曲線 (放物線) とこの曲線が交わる所では、入射する中性子と発生するフォノンとの間に運動量-エネルギーの保存が成立し、この時入射する中性子の運動量-エネルギーはすべてフォノンに移され自らは停止する。交点の近傍でもフォノンを発生した後の中性子のエネルギーは超冷中性子領域に落ち込む。ILL のグループは長さ 3 m の SUS 製の水平型クライオスタットを製作し、これに超流動ヘリウムを貯めて冷中性子線を当てたところ、 0.49 K で ~ 20 UCN/cm³ の密度を容器内で達成したと報告した。わが国でも小型ではあるが同様な研究が高エネルギー物理学研究所で進められている。

4. 超冷中性子の各種解析装置

すでに述べたように、超冷中性子は波長が非常に長く、エネルギーが極めて小さく、さらに全反射などの光学的現象を顕著に示す。従って、超冷中性子のエネルギー解析等はこれらの特性を利用して、従来にない方法で行われる。

1) 飛程集束式重力スペクトロメータ

水平に打ち出された入射中性子はエネルギーに応じて各々の放物線を描くが、これを少し変形して打ち出し角を上向きにとると、その水平到達距離が打ち出しエネルギーと対応関係を持つ。一つのエネルギーについて言えば、この飛程が最長になるのは上向き角が 45° のときであり、これが極値であることからこのとき飛程集束が得られる。放物線のこの性質を利用して Steyerl は飛程集束式超冷中性子スペクトロメータ NESSIE を製作した⁷⁾。これでは入射中性子の単色化及び試料による散乱後のエネルギー解析共に飛程集束を利用し、長大な装置となっている。この装置により、超冷中性子は初めて非弾性散乱実験 (または準弾性散乱実験) という本格的な散乱実験に利用され得る段階となり、17

neV という世界で最高のエネルギー分解能を誇ると共に、応用例として高分子溶液の拡散効果が測られている。この装置を ILL に新設されたタービン式の強力な超冷中性子源と組み合わせて実験を始めている。

2) 落差集束式重力スペクトロメータ

飛程集束式スペクトロメータの難点は、集束効率が低く、中性子強度が低くなることである。そこでこの点をエネルギー分解能をほとんど損なわずに改善する方法として、落差集束式スペクトロメータが Utsuro により提案され⁸⁾、目下その製作組立が行われている。中性子鏡は落差集束の条件を満たすため回転楕円面とは異なる特殊な曲面に沿って配列されている。これにより試料で散乱されたあらゆる方向の中性子がすべてそのエネルギーに応じて検出器上の別々の落差の点に集まり、従って位置感応型検出器を用いることによりエネルギー解析が可能となる。これを先に述べた KUR のスーパーミラータービン式超冷中性子源設備において試験することになっている。

3) 中性子顕微鏡

中性子鏡で凹面鏡を作り、顕微鏡として用いる試みが Steyerl により実験されている。光などの顕微鏡と装置設計上異なる点は重力の作用によって強い色収差が起ること、この色収差を補正する鏡構造が考えられている。中性子顕微鏡の意義は、各種元素毎の中性子散乱振幅の大きさの違いから、電子密度を観測する光学顕微鏡や電子顕微鏡とは異なる情報が得られることである。

5. 世界の動向

先に述べた ILL のタービン式強力超冷中性子源設備においては、すでに明確に超冷中性子は顕著な特徴を持つ強力な科学研究手段として威力を発揮している。従来、熱中性子や冷中性子を用いて精力的に行われてきた高度な基礎物理実験の世界記録のいくつか、超冷中性子を用いることにより、ややドラマチックに塗りかえられつつある。

1) 中性子の崩壊寿命

中性子の β 崩壊の寿命は宇宙論のビッグ・バン理論における原始のヘリウム生成量や宇宙におけるニュートリノの問題にも密接に関連して、非常に重要な物理量である。その値は 1950 年代の約 1100 秒という測定報告から、今日では 900 秒以下にまで低下している。1988 年までは、中性子寿命の測定精度は中性子ビーム法の方が優れており、約 2% の誤差と評価された。(898 ± 16 秒) しかるに、Mampe 達が ILL の超冷中性子を用いたボトル法による最新結果を報告してこの形勢は逆転した⁹⁾。このボトル法は中性子数の絶対測定が不要という原理的強みを有しており、この最新の結果は 887.6 ± 3 秒というものである。論文を検討したところ、誤差評価に若干の系統的誤差を見落としている疑いが残るが、今後はボトル法が優勢であるのは確実と考えられる。

2) 中性子の電気双極子能率 (EDM)

中性子の EDM を追求する実験の動機は、CPT (電荷-空間-時間) の対称性の前提のもとで、K 中間子の崩壊において観測された CP の対称性の破れは T-対称性の破れを伴うことである。中性子の EDM が観測されれば、それはより直接的な T-対称性の破れを意味し、かつ K 中間子に比してずっと長寿命の粒子でそれが確認されることを意味する。この実験も従来、中性子ビーム法により Ramsey の共鳴実験として行われてきており、

その測定限界は 10^{-26} e. cm のオーダーに達してなお有意な EDM は検知されていない。ボトル法はビーム法よりもずっと長い時間にわたって一つの中中性子の共鳴周波数の変化を追跡できる利点を有する。現在 ILL ではボトル法により 5×10^{-26} e. cm の精度に到達している。これらの最近の実験で有意な EDM の値が出たという報告が行われたが、まだ確認されるに至っていない。

6. 将来計画

ILL のような高中性子束炉における超冷中性子実験に対抗して、それより2桁以上小さな平均出力の研究炉でそれを上回る高密度の超冷中性子を生成する構想を KUR で立てている。熱中性子パルス炉を尖頭出力 2000 MW、毎分1パルスの繰り返し(平均出力約 300 kW) で運転し、これに設置した重水素極冷中性子源から得られるパルス状極冷中性子をタービンにより超冷中性子に変換する。発生超冷中性子の尖頭強度は $\sim 6 \times 10^6$ UCN/cm²s と評価され¹⁰⁾、密度ピークの時のみボトルに超冷中性子を注入するよう、シャッター機構を同期させることにより、ILL を上回るボトル内超冷中性子密度が達成されると予想している。

実験の目標としては、現在ビーム法で行われている中性子-反中性子振動の追求が考えられ、ILL 実験結果における振動寿命の可能性の下限 ($\tau_{n\bar{n}} > 10^6$ 秒) の更新 ($\tau_{n\bar{n}} > 10^7$ 秒) が目指せると考えている。

7. おわりに

以上、速度が約 6 m/s 以下の超冷中性子の話を述べてきた。もし、中性子速度がさらに小さく 10 cm/s 以下になれば、水平鏡上の重力場で中性子は波長数ミクロンの定在波(離散的固有状態、あるいは表面にトラップされた状態)を示す可能性がある。このような領域の中性子工学は、本稿の話とはまた異なった段階となるであろう。

参考文献

- 1) Yu. B. Zel'dovich: Sov. Phys. - JETP 9(1959)1389
- 2) V. I. Luschnikov et al.: Sov. Phys. - JETP Lett. 9(1969)23
- 3) A. Steyerl: Phys. Lett. 29B(1969)33 & Nucl. Instrum. Meth. 101(1972)295
- 4) A. Steyerl: Nucl. Instrum. Meth. 125(1975)461
- 5) M. Utsuro et al.: Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A270(1988)456
- 6) T. O. Brun et al.: Phys. Lett. 75A(1980)223
- 7) A. Steyerl et al.: Z. Phys. B50(1983)281
- 8) M. Utsuro, Y. Kawabata: Physica 120B+C(1983)118 & Nucl. Instrum. Meth. 213(1983)557
- 9) W. Mampe et al.: Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A284(1989)111
- 10) 宇津呂雄彦、山口晃: 「冷中性子及び超冷中性子に関する開発と応用」ワークショップ、1991年1月22日(京大炉)

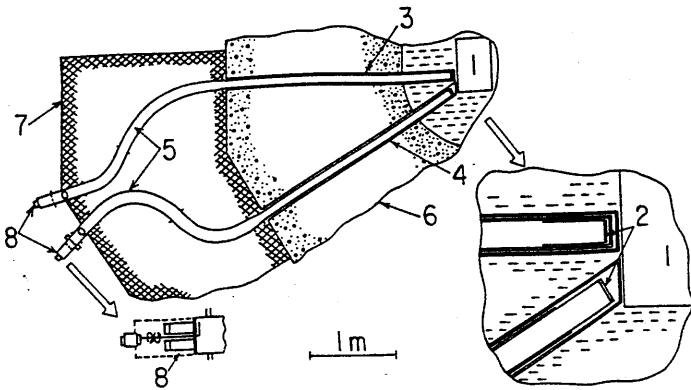


図-1 Dubna 合同原子核研究所の
水平型超冷中性子導管実験配置 1. 炉心, 2. 超冷中性子コンバータ, 3. 化学研磨導管 (9.4 cmφ 銅), 4. 電解研磨導管 (同上), 5. 曲導管部, 6. 生体しゃへい, 7. 補助しゃへい, 8. 超冷中性子検出器

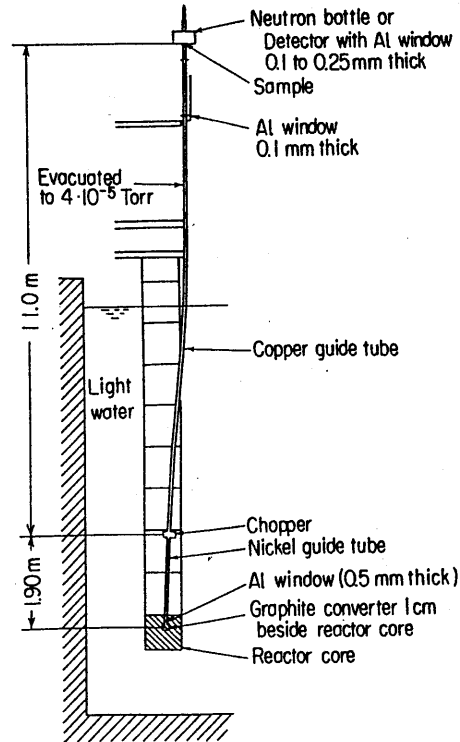


図-2 Munchen 工科大学原子炉の
垂直導管型超冷中性子実験装置

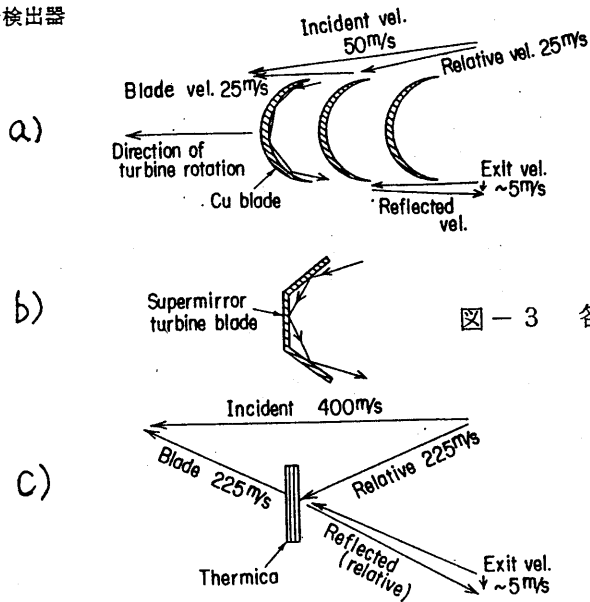
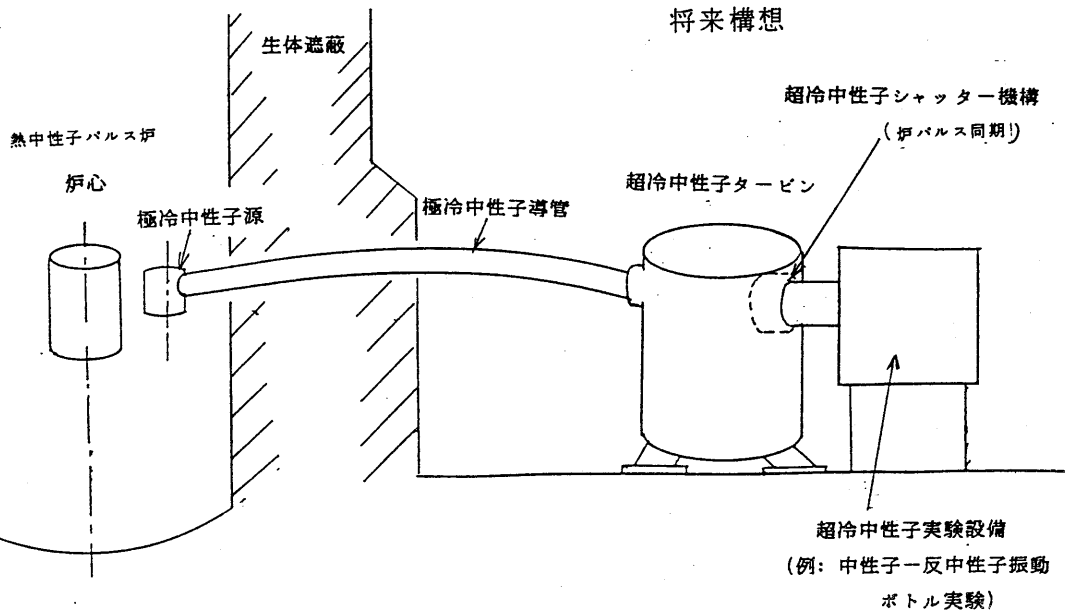


図-3 各種方式の中性子タービン動作原理

図-4 極冷中性子源・超冷中性子実験
将来構想



<トピックス 2.>

高エネルギー加速器開発における遮蔽研究

—— 現状と今後の課題 ——

東北大学リイクトロン・ラジアイソトープセンター 中村 尚 司

1 加速器と放射線発生機構

近年高エネルギー加速器の多方面への利用が進展し、その建設が相ついでいる。加速器のエネルギーが高くなり、ビーム強度が増加するほど、それに伴って放出される2次放射線の量と、1次ビーム及び2次放射線による放射化の量が増大し、これらに対する安全設計が重要な課題となる。

筆者は加速器遮蔽研究に関する報告を以前に書いたが⁽¹⁾、それから10年余りを経て高エネルギー加速器の遮蔽に関する研究の現状と今後の課題について概説する。

加速器は遮蔽という観点から見て、電子加速器と粒子(陽子より重いイオン)加速器に大別され、そのエネルギー範囲は大きく

1) 10 MeV以下 2) 10 MeV~100 MeV 3) 100 MeV~1 GeV 4) 1 GeV以上
に分類される。一般的に高エネルギー加速器という場合はこの内100 MeV以上のものをいう。

電子加速器においては、電磁カスケードにより放出される制動放射線と制動放射線の光核反応により放出される光中性子が遮蔽の対象になる。Fig. 1に典型的な光核反応の断面積を示すが、光子エネルギーが10 MeV~30 MeVでは巨大共鳴、30~150 MeVでは疑似重陽子崩壊、150 MeV以上では π 中間子生成による中性子放出が起こる。

粒子加速器においては、ハドロンカスケードにより放出される中性子が遮蔽の対象となる。この放出は、衝突された原子核の前平衡過程からのカスケード放出と励起状態にある残留核からの蒸発放出との2段階放出で説明される。加速粒子エネルギーが400 MeV近辺を超えると、核内カスケードで放出されたハドロンがさらに他の原子核と衝突してカスケードを引き起こす核外カスケードが無視できなくなり、現象が複雑になる。

加速エネルギーがGeV領域になると、電子加速器でも粒子加速器でも、 π や μ の発生が無視できなくなる。 π^0 は2 γ に直ちに崩壊するのでハドロンカスケードにおいても γ が発生し、電磁カスケードも考慮する必要が生じる。また π^\pm は μ^\pm に崩壊し、 μ^\pm は透過力が大きいので遮蔽上の考慮対象となる。

2 施設の放射線遮蔽設計の概要

これらの加速器施設に対する放射線遮蔽の設計計算は以下に述べる項目について行われる。

(1) ビーム損失量の評価

この評価は加速器設計側で行われるが、その正確な評価は難しい。この値が直接線源評価に関係するので重要である。

(2) 放射線源の評価

高エネルギー加速器の場合は、ビームがターゲットに当たって放出される2次中性子と制動放射線(電子加速器の場合のみ)が最も問題になる。これはビームを完全に吸収する厚さのターゲットからの生成量(Thick Target Yield)で表される。

(3) 遮蔽計算

この計算はビームダンプの計算と建屋壁の計算に大別される。ビームダンプは、そこでビームが100%吸収されて2次放射線が発生し、それがさらに衝突減速を繰り返すもので線源評価と一体になっている場合が多い。建屋壁の計算はサイクロトロン等のように加速器全体を収納する室の壁厚を決める場合と、シンクロトロンやリニアックのように加速器がリング状や直線状でそれを囲むトンネル構造の側壁の厚さを決める場合がある。

(4) 周辺環境放射線の評価

周辺環境中の放射線の線量は直接漏洩放射線とスカイシャイン(場合によってはグラウンドシャイン)放射線によるものの和になる。建屋外壁を透過した壁面上の放射線(中性子とγ線)がスカイシャイン放射線の線源となる。

(5) 迷路及びダクトストリーミング

種々の形状、大きさ及び位置の迷路やダクトに対して計算が必要になる。

(6) 放射化による誘導放射能評価

空気、冷却水、地下水、加速器周辺機器、建屋構造材に対して評価する。

これらの項目に関連する核データについては既に報告したが⁽²⁾、ここでは遮蔽研究に重点を置いて、項目毎に述べるものとする。

3 放射線源の評価

厚いターゲットから放出される2次放射線(中性子、γ線、GeV領域になるとμ)が遮蔽計算の線源となるが、線源としてはエネルギー・角度二重微分生成量(Thick Target Yield) $d^2Y/dE d\Omega$ が必要となる。

Thick Target Yieldは、i)核外カスケードが無視できる約400MeV以下の入射粒子エネルギー及び ii)ターゲット中で生成した2次放射線の自己吸収や散乱が無視できる時には、Thin Target Yield、つまりエネルギー・角度二重微分生成断面積 $d^2\sigma/dE d\Omega$ のエネルギー毎の重ねあわせにより次式のように求められる。

$$\frac{d^2Y}{dE d\Omega}(E, \theta) = N \int_0^T \frac{d^2\sigma}{dE d\Omega}(E_0 - \int_0^t \left(\frac{dE}{dt}\right) dt, \theta) f(t) dt \quad (1)$$

$$f(t) = \exp \left\{ -N \sigma_{\text{none1}} \left(E - \int_0^t \left(\frac{dE}{dt}\right) dt \right) t \right\}$$

dE/dt : 阻止能

σ_{none1} : 入射粒子の弾性外散乱断面積

N : ターゲット核種数

T : ターゲット厚

このためには、 $d^2\sigma/dE d\Omega$ の値が入射粒子エネルギーの関数として与えられていなければならない。

1) ハドロンカスケードの場合

中性子生成量 $d^2\sigma/dE d\Omega$, $d^2Y/dE d\Omega$ に関する実験データについては1965年から1984年までの文献をサーベイしたものが報告されている^(3,4)。その後発表された論文を加えると、陽子に関してはかなり多くの実験データが得られる。しかし、遮蔽計算の線源として必要な中性子エネルギースペクトルを広いエネルギー範囲にわたって、様々な放出角度に対して与えている実験データは数少ない。陽子より重い粒子に対しては実験データは非常に少ないのが現状である。遮蔽計算の線源として直接使用できる $d^2Y/dE d\Omega$ の実験データをTable1にまとめた。

このため一般的には、 $d^2Y/dE d\Omega$ は計算コードを用いて計算により求められる。この計算には核内カスケード・蒸発モデルに基づくモンテカルロコード HETC⁽⁵⁾が最もよく用いられる。中性子生成量 $d^2Y/dE d\Omega$ のHETC計算値が、Fig・2では256MeV陽子のC及びFeターゲット入射による実験値⁽⁶⁾と、Fig・3には710MeV ⁴HeのFeターゲット入射による実験値⁽⁷⁾と比較されている⁽⁸⁾。計算値は実験値に対し、かなりよい一致を示すが、後方の角度では高エネルギー成分を過少評価し、逆に前方では低エネルギー成分を過大評価する傾向を示す。この傾向はターゲットの原子番号が小さい軽核において、又入射粒子がより重い粒子ほど、大きいことが分かる。

入射粒子のエネルギーが100MeV以下になると、Fermiの自由ガスモデルに基づく核内カスケードコードを含むHETC計算値は、核構造の影響を無視しているため $d^2Y/dE d\Omega$ の実験値との一致がもっと悪くなる。Fig・4に52MeV陽子による銅ターゲットからの放出中性子スペクトルの測定値⁽⁹⁾と比較したHETC計算値は前方方向で大きな過大評価を与えている。図には平衡統計核モデルに基づくGNASHコード⁽¹⁰⁾による計算値⁽¹¹⁾も示しているが、このエネルギー領域ではGNASHコードの方がよい一致を与えている。

遮蔽計算にとってより簡便なように、 $d^2Y/dE d\Omega$ を解析式で統一的に表す試みも行われている。中村は中性子スペクトルを蒸発成分と前平衡成分に分けてマクスウェル型の次式のような解析表示を与えた⁽¹²⁾。

$$\frac{d^2Y}{dE d\Omega}(E, \theta) = K \frac{E}{T^2} \exp\left(-\frac{E}{T}\right) + K_1 \frac{E}{T_1^2(\theta)} \exp\left(-\frac{E}{T_1(\theta)}\right) + K_2 \frac{E}{T_2^2(\theta)} \exp\left(-\frac{E}{T_2(\theta)}\right) \quad (2)$$

ここでK, K₁, K₂は規格化定数、Tは蒸発成分の核温度で放出角度にほとんど依存しないが、T₁, T₂は前平衡成分の核温度で角度に依存する。Tは入射粒子のエネルギーの関数としてFig・5に示す⁽⁸⁾が、ターゲット核が軽いほどその値が大きく、入射粒子の種類にはほとんど依存しない。又、T₁(θ)はθにほとんど依存せず7~9MeVの値を取るのに対し、T₂(θ)はθに大きく依存し、前方ほどその値は大きく、10~50MeVの間で変化している。秦はthin targetに対する $d^2\sigma/dE d\Omega$ の解析に用いられる moving source モデルを thick target に対する $d^2Y/dE d\Omega$ の解析表示に適用して

$$\frac{d^2Y}{dE d\Omega}(E, \theta) = C \sqrt{E} \exp\left(-\frac{E + E_0 - 2\sqrt{EE_0} \cos\theta}{KT}\right) \quad (3)$$

(E₀: 入射粒子の核子当りエネルギー)

なる式のパラメータを与えている⁽¹³⁾。この式では $T_1(\theta)$ 、 $T_2(\theta)$ の角度依存性を $\cos\theta$ の形で式の中に取り込んでいるため、パラメータのより少ない解析式となっている。しかしこれらの解析式のパラメータはまだいろいろな入射粒子の種類とエネルギー及びターゲットの種類に対して与えられていないので、一般的に広く利用できるまでに至っていない。 $d^2Y/dE d\Omega$ の実験値の集積と共に今後の重要な研究課題の1つである。

全中性子生成量は $d^2Y/dE d\Omega$ を積分して

$$Y = \int_{4\pi} d\Omega \int_0^{E_0} (d^2Y/dE d\Omega) dE \quad (\text{neutrons/projectile}) \quad (4)$$

により求められる。ここで E_0 は入射粒子エネルギーである。HETC計算値は前方方向では中性子スペクトルを過大評価、後方では過少評価するが、積分すると両者が打消しあって、全中性子生成量 Y の計算値と実験値の一致はより良い。Fig. 6に陽子入射に対する全中性子生成量のこれまでの実験値と計算値をまとめて評価した曲線を示す⁽¹⁴⁾。図より陽子エネルギー800 MeV近辺を境にして低エネルギー側でエネルギー E_p^2 にほぼ比例し、高エネルギー側ではほぼ E_p に比例して、中性子生成量が増加していることが分かる。

その他の入射粒子(d , ^4He など)に対する全中性子生成量 Y としては、Rindi⁽¹⁵⁾、中村等⁽⁸⁾によるものがある。 Y に対する解析表示式として、Clapier等⁽¹⁶⁾が次式を与えている。

$$\left. \begin{aligned} Y(E, Z) &= C(Z) E^{\beta(Z)} \\ C(Z) &= 1.95 \times 10^{-4} Z^{-2.76} \exp(-0.475 \log Z^2) \\ \beta(Z) &= 1.22 \sqrt{Z} \end{aligned} \right\} (5)$$

E (入射粒子の核子当りI値) Z (入射粒子の原子番号)

しかしこの式は最近の実験値と比較すると精度が悪い。

2) 電磁カスケードの場合

制動放射線生成に関する $d^2\sigma/dE d\Omega$ 、 $d^2Y/dE d\Omega$ のデータは多くの実験値($d^2Y/dE d\Omega$ については必ずしも多くないが)があり、理論式も整備されている⁽¹⁷⁾。又電磁カスケードを計算するモンテカルロコードEGS-4⁽¹⁸⁾も広く使用されている。そこでここでは光中性子に関するデータについてのみ述べる。

光中性子は1章に述べたように 1) 巨大共鳴 2) 疑似重陽子崩壊 3) π 中間子生成 の3つの光核反応機構により放出される。1)の巨大共鳴から放出される中性子はマクスウェル型分布を持ち、蒸発中性子のように等方的に放出される。その核温度をFig. 7に電子エネルギーの関数として示した⁽¹⁹⁾が、Fig. 5のイオンの場合と違って、値が0.5~1.5 MeVの間に散在していて明確な傾向が見られない。2)の疑似重陽子崩壊から放出される光中性子に対しては、Swanson⁽¹⁹⁾がFig. 8に示すように実験値をフィットした次式を与えている。

$$\frac{d\sigma}{dE} \approx E^{-\alpha} \quad 5 \text{ MeV} < E < E_0/2 \quad (E_0 \text{ は入射電子エネルギー}) \quad (6)$$

Z = 3 - 16の時	$\alpha = 1.7 - 2.0$
Z = 26 - 50の時	$\alpha = 2.6 - 2.8$
Z = 73 - 83の時	$\alpha = 3.0 - 3.3$
Z = 92	$\alpha = 3.6$

ただし、Zはターゲットの原子番号である。3)の π 中間子に伴い生成される高エネルギー中性子については実験値は極めて少ない。

Jenkinsは光中性子スペクトルの近似解析式として、いくつかの実験値をもとに

$$\frac{dY}{dE} = \frac{K E^{1/2}}{[1 + (\frac{1}{2} E)^{4/3}]^3} \quad (7)$$

なる式を与えている⁽²⁰⁾。(Fig. 9)

またGabrielらは無限厚のCuターゲットに入射した50~400MeVの電子により生成された光中性子生成量をモンテカルロ計算で求め、計算値を解析式にfitした式

$$\frac{d^2Y}{dE d\Omega} = \frac{1}{E_0} \exp \left[\sum_{j=0}^{\infty} a_j (E_0, \theta) \cdot \left(\frac{E}{E_0} \right)^j \right] \quad (8)$$

(E₀:入射電子エネルギー)

を与えている⁽²¹⁾。しかしその精度は実験的に検証されていない。

一方光中性子に対する $d^2Y/dE d\Omega$ を与える計算コードは一般に利用できるものがなかったが、最近MCPHOTOモンテカルロコードが開発された⁽²²⁾。このコードの精度検証を今後進める必要があるが、それには現在データの非常に少ない光中性子スペクトル $d^2Y/dE d\Omega$ の実験値を求めることが必要である。

全光中性子生成量Yについては、Swansonが半無限大のターゲットに電子が入射した時の巨大共鳴中性子の生成量(ターゲット中での中性子吸収は無視)をビームパワー(kW)当りでFig. 10にまとめている⁽²³⁾。生成量は電子エネルギーと共に急増し、100MeV近辺で一定になる。この一定値に対し

$$Y (n \cdot s^{-1} \cdot kW^{-1}) = 1.21 \times 10^{11} Z^{(0.66 \pm 0.05)} \quad (9)$$

(Zはターゲットの原子番号)

を与えている。

4 遮蔽計算

この遮蔽計算は、GeV領域の加速器ではMoyerモデルがその簡単さのために広く用いられている。100MeV以上の中性子弾性外散乱断面積 σ_{neel} が、Fig. 11に示すようにエネルギーによらず一定で最小値を取り、それが幾何学的断面積 $\sigma_G = \pi r_0^2 A^{2/3}$ ($r_0 = 1.3 \times 10^{-13} \text{cm}$)にほぼ等しくなることを反映して、減弱距離 λ が100MeV以上の中性子に対し一定で最大値をとる。このことから100MeV以上の中性子発生の多いGeV領域の加速器では、 λ の大きい100MeV以上の中性子によって減衰が支配され、エネルギー1群の近似が可能になる。

1) 陽子加速器の場合

Fig. 12に示すように、陽子ビームがターゲットでストップして中性子を発生し、それが中性子スペクトルが平衡に達するほど厚い側壁遮蔽体を透過したときの線量当量Hは次式で与えられる。

$$H = J \cdot H_0(E_p) \cdot e^{-b\theta} \cdot e^{-d/\lambda \sin\theta} \cdot \frac{1}{\gamma^2} (S_{\sigma}/h) \quad (10)$$

ここで生成中性子の角度分布 $dY/d\Omega$ が $e^{-b\theta}$ に比例しているという近似 (b : パラメータ) と、全中性子生成量が陽子エネルギー E_p に比例しているという Fig. 6の結果 $H_0(E_p) = K \cdot E_p$ を用いている。又 K は実測値から決定される線源強度定数 ($Sv \cdot m^2 \cdot h^{-1} / (GeV \cdot s^{-1})$)、 λ (m) は 100 MeV 以上の中性子に対する減弱距離で、いくつかの実験値が報告されている^(25, 26)。 J (s^{-1}) は点状のビーム損失を示す。

中性子エネルギーの関数として、線量当量減弱距離 λ の種々の実験値や計算値を Fig. 13に示した。データはかなりばらついているが、中性子エネルギーと共に λ は増加し、100 MeV 以上で一定値に近づいていることが分かる。

Fe 又は Cu ターゲットに陽子を入射し、 90° 方向に放出された中性子の線量当量減弱距離を Fig. 14に示す⁽¹⁴⁾。この λ の値も一定値に近づいていて Fig. 13の一定値にほぼ近い値を示し、Moyerモデルの側壁遮蔽計算に用いられる。しかし λ の値は Fig. 15に示すように実際には中性子の放出角度 θ の関数になるので (10) 式の λ や K は θ の関数となる⁽²⁷⁾。 λ の値は H の値に大きく影響し、遮蔽体の厚さに直接関係するのでその精度が重要であるが、 λ の値はデータ間のばらつきが大きく、しかもデータ数も少ない。このため精度の良い λ の値を整備することは急務である。 GeV 領域以下の加速器では、上記 Moyerモデルは一般的には成り立たない。この場合の設計計算法として確立したものは存在しないが、次の2つの近似計算式が利用できる。

1) Moyerモデルに基づくもの

$$H = J \cdot H_0(E_p) \cdot e^{-b(E_p)\theta} \cdot e^{-d/\lambda(E_p, \theta) \sin\theta} \cdot \frac{1}{\gamma^2} (S_{\sigma}/h) \quad (11)$$

この場合、 b と λ が E_p と θ の関数となって1群の計算はできない。

2) 平山・伴の式⁽²⁵⁾

$$H = J \cdot B_0(E_p) \cdot \Phi \cdot g^{-1} \cdot \frac{1}{\gamma^2} (S_{\sigma}/h) \quad (12)$$

$$\Phi = \sum_{j=1}^3 \phi_j ; \quad \phi_j = \sum_{i=1}^4 S_i B_{ij} e^{-d/\lambda_i}$$

Φ は 20 MeV 以上の中性子束、 $B_0(E_p) = 6.91 / \ln(E_p/0.02)$ で 20 MeV 以上の中性子束と 100 MeV 以下の中性子束の比、 $g = 1.4 \times 10^3 (n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1} / (mSv \cdot h^{-1}))$ で 100 MeV 以下の中性子束の線量当量換算係数、 B_{ij} はモンテカルロコード ARIES⁽²⁸⁾により単色中性子に対して求められた 25-50, 50-100, 100 MeV 以上の各群の中性子ビルドアップ係数、 λ_i は減弱距離、 S_i は実験又は計算により求められる陽子生成中性子 ($sr^{-1} \cdot p^{-1}$) でこれも4群 (20-50 MeV, 50-100 MeV, 100-200 MeV, 200-400 MeV) に分けられ

る。しかし、この両式の精度についてはまだ検証されていない。この他にビームダンプ等のような比較的簡単な形状あるいは複雑な形状を単純化することによって、ANISNなどの輸送計算コードを用いて遮蔽計算を行う場合もある。この計算には中性子群定数が必要であるが、現在利用できる群定数としてはDLC-87⁽²⁹⁾くらいしかない。最近LANLでは新しい群定数を作成している⁽³⁰⁾。

現在著者らはLi(p, n)反応による2.2, 3.3 MeV準単色中性子を用いて鉄及びコンクリート遮蔽体の透過実験を行っている。Fig. 16に2.2, 3.3 MeV単色中性子束のコンクリート中での減衰を遮蔽体の厚さの関数として示した⁽³¹⁾。図にはDLC-87⁽²⁹⁾の全断面積データ σ_{tot} を用いて計算した減衰曲線も示しているが、その計算値は実験値と大きく異なっており、20 MeV以上の中性子エネルギー領域で中性子断面積データの精度が悪いことが分かる。現在データの非常に少ないこれらのエネルギー領域での中性子断面積や群定数の精度よい実測値や計算値の収集が必要である。

2) 電子加速器の場合

電子加速器の遮蔽計算に関しては、伴・平山がまとめている^(25, 32)ので、ここでは略述する。光中性子に対しては次のような式が提案されている。

充分厚いCu又はFeターゲットから、電子ビームに対し90°方向に放出された光中性子の側壁遮蔽中での減衰(Fig. 12参照)は、GeV領域の電子加速器に対してはMoyerモデルで近似される。

$$H = H_0 E_0 \exp(-d/\lambda) / r^2 \quad (Sv/e) \quad (13)$$

E_0 : 入射電子エネルギー (GeV)

線源項 H_0 ($Sv \cdot cm^2 \cdot GeV^{-1}$) や減弱距離 λ (g/cm^2) についてはTeschが実験値や計算値をまとめている⁽³³⁾。Jenkinsは厚いCu又はFeターゲットに対し、ビームラインに平行な側壁コンクリート遮蔽の設計式を与えている⁽²⁰⁾。この式では中性子の成分を3成分に分け、光子の分を含めている。

$$H(\text{total}) = H(\text{photon}) + H(\text{neutron})$$

$$H(\text{neutron}) = H(\text{GR}) + H(\text{MID}) + H(\text{HE})$$

$$= 10^{-13} E_0 \left(\frac{\sin \theta}{a+d} \right)^2 \left[\frac{\exp(-d/\lambda_1 \sin \theta)}{(1-0.72 \cos \theta)^2} + \frac{10}{1-0.75 \cos \theta} \exp\left(-\frac{d}{\lambda_2 \sin \theta}\right) + 3.79 \exp^{0.73} \exp(-d/\lambda_3 \sin \theta) \right] \quad (Sv/e)$$

$$H(\text{photon}) = 10^{-13} E_0 \left(\frac{\sin \theta}{a+d} \right)^2 \left[\frac{133 \exp(-\mu d / \sin \theta)}{(1-0.98 \cos \theta)^{1.2}} + \frac{0.267 \exp(-d/\lambda_1 \sin \theta)}{(1-0.72 \cos \theta)^2} \right] \quad (Sv \cdot GeV^{-1} / e) \quad (14)$$

ここで $\lambda_1 = 120 g/cm^2$ ($\bar{E}_n > 150 MeV$), $\lambda_2 = 55 g/cm^2$ ($\bar{E}_n \sim 50 MeV$), $\lambda_3 = 30 g/cm^2$ ($\bar{E}_n \sim 10 MeV$) であり、 μ はコンプトンミニマム(μ の最小値)を用いればよい。コンクリート以外の λ に対しては、コンクリートの実効質量数を21として近似的に

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= 43.5 A^{1/3} && \text{又は} && 38 A^{0.33} \\ \lambda_2 &= 9.41 A^{0.58} && \text{又は} && 8.9 A^{0.58} \\ \lambda_3 &= 5.13 A^{0.58} && \text{又は} && 4.8 A^{0.58} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

という式を与えている。しかしこれらの式は実験的に検証されていない^(25, 32)。

光子に対してはDinterらは⁽³⁴⁾薄いFeターゲットからの制動放射線に対する遮蔽設計式を与えている。

$$H = 7.2 \times 10^{-7} \cdot J \cdot E_0 \cdot D_T(\theta) \cdot A_T \cdot e^{-\frac{\mu}{\rho} \frac{d\rho}{\sin\theta}} \cdot \frac{1}{\gamma^2} \quad (\text{Sv/h}) \quad (16)$$

ここで $D_T(\theta)$ (ターゲットから発生する光子線量の角度分布), A_T (低エネルギー成分の減衰率), μ (光子の減衰係数) について数値を与えている。 μ はコンプトンミニマムの値にほぼ等しい。最近Dinterらは⁽³⁵⁾ EGS-4 モンテカルロコードを用いて系統的計算を行って0.15~50 GeV電子がCu又はAlターゲットに入射した時の鉛、鉄、コンクリート、土の遮蔽体透過後の光子線量を与える設計式を与えている。この式は上式よりも汎用性が高い。

Swanson⁽¹⁹⁾は厚いターゲットに対し、 0° と 90° 方向の制動放射放出率から次の近似式を与えているが、一般に過大評価を示す。

$$H = 1.6 \times 10^{-9} \cdot J \cdot E_0 \cdot D_0(\theta) \cdot e^{-\frac{\mu}{\rho} \frac{d\rho}{\sin\theta}} \cdot \frac{1}{\gamma^2} \quad (\text{Sv/h}) \quad (17)$$

$D_0(\theta)$ (Gy/h per kW/cm²)

0° 方向 $3 \times 10^9 E_0$ ($E_0 > 20 \text{ MeV}$)

$2 \times 10^{11} E_0^2$ ($E_0 < 20 \text{ MeV}$)

90° 方向 5×10^5 ($E_0 > 100 \text{ MeV}$)

5 スカイシャイン

スカイシャインについては、これまでいくつかの近似解析式が報告されているが、その中で最も最近の2つを紹介する。

1) Stevenson, Thomasの式⁽³⁶⁾

Alsmillerなどは2次元輸送計算コードDOT3.5を用いて、地上15mの位置においた点線源から上向き半球内に放出される中性子の地上の線量分布を求めた⁽³⁷⁾。この計算結果に基づいて、 $1/E$ スペクトルを持ち、上向き開き角 $70^\circ - 80^\circ$ に放出される中性子線源を仮定し

$$H(r) = Q_D \cdot e^{-r/\lambda_n(E_0)} \cdot \frac{1}{r^2} \quad (\text{Sv/source neutron}) \quad (18)$$

なる近似式を導出した。入射中性子エネルギー $1 \sim 400 \text{ MeV}$ に対し $Q_D = 3 \times 10^{-15}$ という値を与えている。 $1/E$ スペクトルの上限値である加速粒子エネルギー E_0 の関数としての減弱距離 λ_n がFig. 17に示されている⁽³⁶⁾。

2) 中村、小佐古、林の式^(38, 39)

アルベド型多群モンテカルロコードMMCR-2を用いて計算したスカイシャイン中性子の線量分布を簡単な解析式に表している。この式では中性子の他に2次 γ 線に対する式も与えられている。

$$\left. \begin{aligned} H_n(r) &= \sum_i \sum_j Q_n(E_i, \theta_j) \cdot e^{-r/\lambda_n(E_i, \theta_j)} \cdot S(E_i, \theta_j) / r \\ H_\gamma(r) &= \sum_i \sum_j Q_\gamma(E_i, \theta_j) \cdot e^{-r/\lambda_\gamma(E_i, \theta_j)} \cdot S(E_i, \theta_j) / r \end{aligned} \right\} (19)$$

$Q_n, Q_\gamma, \lambda_n, \lambda_\gamma$ のパラメータは文献⁽³⁹⁾に与えられており、 S は線源中性子スペクトルであり、建屋外壁表面上のスペクトルとして与えられる。スペクトルが不明の場合は、(18)式と同じように $1/E$ スペクトルを仮定する。

(18)式と(19)式の中性子減弱距離 λ_n の値は互いによく一致している。著者らが示したように^(39,40)、実際の加速器施設におけるスカイシャインの実測値との比較の結果、(19)式は30%程度の安全側の評価を与え、(18)式はそれよりも安全側の評価(2倍以内)を与えることが検証されている。従ってこれらの式は充分遮蔽設計計算に利用できる。

6 迷路及びダクトストリーミング

様々な近似式が提案されているが、その中で高エネルギー加速器施設に適用できる中性子のストリーミングを与える式についていくつか説明する。

1) 中村, 上養の式^(41, 42)

DOT 3.5及びANISNの計算結果と実測値に基づいて導出したもので、照射室内と迷路内の線量分布を与える。照射室内の線量分布は

$$\left. \begin{aligned} H(r) &= K \left(\frac{1}{r^2} + \frac{4}{r^2 + 4S^2 - 2\sqrt{2}rS} \cdot \frac{A'}{A} \right) \\ S &= \sqrt{L_1 L_2} / 2 \end{aligned} \right\} (20)$$

で K は規格化定数、 r は線源からの距離、 L_1, L_2 は室を同体積の円筒に近似した時の直径と高さ、 A は室内全表面積、 A' は観測点から直視できる室の表面積である。

迷路内では、Fig. 18に示すように迷路の最も狭い幅 W の半分 $a = W/2$ の距離だけ迷路入口面から離れた点 S' に仮想点線源をおき、そこからの逆二乗則

$$H(r) = H(a) \cdot \frac{a^2}{r^2} \quad (21)$$

で線量を与える。距離 r は仮想点線源からの距離とする。

2) Tesch の式⁽⁴³⁾

迷路内の線量分布だけを与える。第 n 脚の迷路内で、

$$H(r_n) = H(a) \prod_{i=1}^n f_i(r_i) \quad (22)$$

$H(a)$ は第1脚の入口での線量で、距離 r は迷路入口からの距離をとる。第1脚の迷路が線源を直接見るときは $f_1(r_1) = 2a^2/r_1^2$ であり、直接見ないとき、及び第2脚以降では、

$$f_i(r_i) = \frac{2 [\exp(-r_i/0.45) + 0.022 A_i^{1.3} \exp(-r_i/2.35)]}{1 + 0.022 A_i^{1.3}} \quad (23)$$

となる。ここで A_i は迷路第 i 脚の断面積である。

3) 秦・石川の式⁽⁴⁴⁾

秦によって開発された多重散乱アルベドによる室内分布の式とダクト内分布の式を結合させて、上の2式と違って中性子エネルギースペクトルを求める方法であり、そのスペクトルに線量当量換算係数を乗ずることによって線量当量も得ることができる^(45, 46)。

室内を球形空洞と考えるとその中の多重散乱中性子エネルギースペクトルは

$$\phi = \frac{4\alpha}{1-\alpha} \cdot \frac{Q}{A} \quad (24)$$

で与えられる⁽⁴⁵⁾。Qは線源中性子スペクトル、Aは空洞内表面積、Iは単位マトリックス、 α は入射エネルギーと反射エネルギーのアルベドマトリックスである。線源室からダクト入口に入射する中性子カレントは

$$S_j = \frac{1}{2} [\cos(2\theta_j) - \cos(2\theta_{j+1})] \frac{I}{1-\alpha} \cdot \frac{Q}{A} + S_d \quad (25)$$

で与えられる⁽⁴⁴⁾。 θ_j はダクト入口における線源の角度メッシュ点、Sdは線源からの直接線で

$$S_d = Q \cos(\theta_d) / 4\pi r^2 \quad (26)$$

($\theta_j < \theta_d < \theta_{j+1}$; θ_d は直接線とダクト入射面の法線がなす角)

ダクト内の入射面から距離rの点での中性子スペクトルは

$$\phi(r) = \phi_0(r) + \gamma^2 \alpha_2 \sum_{j=1}^N S_j \phi_j^{(2)}(r) + \gamma^B \alpha_B \sum_{j=1}^N S_j \phi_j^{(B)}(r) \quad (27)$$

で与えられる⁽⁴⁶⁾。この式は又 γ 線のストリーミングに対しても適用できる。 $\phi_0(r)$ は直接線のスペクトル、 γ は係数、 $\phi_j^{(1)}$ はアルベドと線源強度が1の時に、ダクト壁でi回散乱して線源角度メッシュjから放出される中性子スペクトルで、 γ と $\phi_j^{(1)}$ は文献(46)に与えられている。又 α_2 、 α_B は次式で与えられる。

$$\alpha_2 = \alpha(I + \alpha + \alpha^2) \quad , \quad \alpha_B = \alpha^4 / (1 - \alpha) \quad (28)$$

ここに述べた近似式が実際の加速器施設における迷路やダクトに適用してどのくらいの精度を持つかは検討されている^(42, 47)が、まだまだ充分ではなく今後の研究が待たれる。又中性子により発生する2次 γ 線のストリーミングに関する近似解析式についてはまだ報告されたものはない。

7 放射化

放射化のうち最も重要な空中放射能濃度の計算方法についてのみ述べる。

空中放射能濃度R (Bq/cm³)は、加速器を時間t (min) 運転後、次式で与えられる。

$$R = \frac{\lambda}{\lambda + \alpha} N_0 \phi \sigma [1 - \exp\{- (\lambda + \alpha) t\}] \quad (29)$$

ここでN₀は原子密度 (atoms · cm⁻³)、 ϕ は中性子束 (n · cm⁻² · s⁻¹)、 σ は反応断面積

($\text{cm}^2 \cdot \text{atom}^{-1}$)、 λ は壊変定数 (min^{-1})、 α は室内空気排出率 (min^{-1})である。中性子束 ϕ は次の2つの場合について計算される。

1) 熱中性子捕獲 (n, γ) 反応による ^{41}Ar の生成

空中の ^{40}Ar (n, γ) 反応による ^{41}Ar の生成を評価するために、熱中性子束 ϕ_{th} を求める。前述の秦の式(24)を用いてもよいが、もっと簡単な次式が広く用いられている。

$$\phi_{\text{th}} = C \cdot \frac{Q}{A} \quad (30)$$

Q は全中性子生成量 ($\text{n} \cdot \text{s}^{-1}$)、 A は室内全表面積 (cm^2)、 C は定数で1.25という値が与えられている⁽²⁴⁾。しかしこの式の根拠がよく分からないので、著者らは実験と計算の両面から再検討した⁽⁴⁸⁾。その結果、Fig. 19に示すように、(30)式は線源から数m離れると成立するが、 C の値は1.25ではなく、線源中性子のエネルギーにより変化し、その値は2から6の間にある。平均値としては、 $C = 4$ を推奨したい。

2) 高エネルギー中性子による放射化

空中のN, Oの ($n, 2n$) 及び核破砕反応 (n, sp) により ^{13}N , ^{15}O , ^{11}C , ^7Be , ^3H などが生成される。この反応はしきいエネルギーが15~20 MeV以上の中性子によって生じるので、この高エネルギー中性子束は近似的に次式で計算される。

$$\phi = \sum_j Q_{\text{HE}, j} \cdot L_j / V \quad (31)$$

ここで、 $Q_{\text{HE}, j}$ は角度メッシュ j における20 MeV以上の中性子生成量、 L_j は j 方向への中性子の実効飛行距離、 V は室内全体積である。

これらの中性子核反応断面積に関しては、20 MeV以上の中性子エネルギーに対する実験データは限られた反応を除いて極めて乏しい。著者らは現在Li (p, n) 及びBe (p, n) 反応による準単色中性子を用いて10-40 MeVの領域の中性子核反応断面積の測定を行っている^(49, 50)。計算法としてはRudstamらによる半経験式⁽⁵¹⁾や、ALICEコード⁽⁵²⁾、GNASHコードなどが用いられる。しかし、これらの計算値はまだその精度が不十分であり、実験・計算の両面からデータの蓄積が要望されている。

8 今後の研究計画

以上述べたように、高エネルギー加速器の遮蔽設計には、様々なマイクロ及びマクロデータベース——例えば2次中性子生成量 $d^2Y/dE d\Omega$ 、中性子断面積 σ_{nonel} , σ_{tot} , $d^2\sigma/dE d\Omega$ 、中性子減弱距離 λ 、中性子アルベド α 、中性子核反応断面積 $\sigma(n, x)$ などのデータや遮蔽、ストリーミングなどのベンチマークデータ——が必要となる。これらのデータを得るために、原研高崎研究所のAVFサイクロトロンに設置されるLi (p, n) 反応による準単色中性子実験コースを用いて、平成3年度から実験が開始される予定である。

参考文献

- 1) 中村尚司, 平山英夫, 伴秀一: 日本原子力学会誌, 22, 231 (1980)
- 2) 中村尚司: 核データニュース, No. 35, 1, 1990年2月
- 3) T. Nakamura et al.: INS-TS-20, Institute for Nuclear Study, Univ. of Tokyo (1981)
- 4) T. Nakamura et al.: Atomic Data and Nuclear Data Tables, 32, 471 (1985)
- 5) P. Cloth, D. Filges and G. Sterzenbach: Jul-Spez 196, KFA-Julich (1983)
- 6) M. M. Meier et al.: Nucl. Sci. Eng., 104, 339 (1990)
- 7) R. A. Cecil et al.: Phys. Rev. C, 21, 2471 (1980)
- 8) T. Kato and T. Nakamura: Nucl. Instrum. Methods in press; proc. 7th Intern. Conf. Radiation Shielding, Bournemouth, Sept. 12-16 (1988) vol. III p893
- 9) T. Nakamura, M. Yoshida and K. Shin: Nucl. Instrum. Methods, 151, 493 (1978)
- 10) P. G. Young and E. D. Authur, LASL Report, LA-6947 (1977)
- 11) W. B. Wilson et al.: LANL Report, LA-UR-88-2370 (1988)
- 12) T. Nakamura: Nucl. Instrum. Methods, A240, 207 (1985)
- 13) K. Shin: Private communications, unpublished
- 14) K. Tesch: Radiat. Protec. Dosim., 11, 165 (1985)
- 15) A. Rindi: LBL-4212, Lawrence Berkeley Lab. (1975)
- 16) F. Clapier and C. S. Zaidins: Nucl. Instrum. Methods, 217, 489 (1983)
- 17) H. W. Koch and J. W. Motz: Rev. Mod. Phys., 31, 920 (1959)
- 18) W. R. Nelson, H. Hirayama and D. O. Rogers: SLAC-265 Stanford Linear Accelerator Center (1985)
- 19) W. P. Swanson: "Radiological Safety Aspects of the Operation of Electron Linear Accelerators", Technical Report Series No. 188, IAEA, Vienna (1979)
- 20) T. M. Jenkins: Nucl. Instrum. Methods, 159, 265 (1979)
- 21) T. A. Gabriel: ORNL-4442, Oak Ridge National Lab. (1969)
- 22) 岸田則生, 角谷浩享: JAERI-memo 02-291, 日本原子力研究所, 1990年9月
- 23) W. P. Swanson, Health Phys., 35, 353 (1978); ibid., 37, 347 (1979)
- 24) H. W. Patterson and R. H. Thomas: "Accelerator Health Physics", Academic Press (1973)
- 25) 放射線安全技術センター: "高エネルギー加速器施設の安全管理に関する基礎的調査", 昭和61年3月; 高エネルギー加速器科学研究奨励会: "高エネルギー加速器の放射線安全対策シンポジウム", 昭和62年6月
- 26) G. R. Stevenson, L. K. Lin and R. H. Thomas: Health Phys., 43, 13 (1982)
- 27) H. Dinter, K. Tesch and C. Yamaguchi: Nucl. Instrum. Methods, A276, 1 (1989)
- 28) 伴秀一: "高エネルギー陽子シンクロトロンへの遮蔽の研究", 京都大学工学博士学位論文 (1982)
- 29) R. G. Alsmiller, Jr. and J. Barish: ORNL-TM-7818, Oak Ridge Nat'l. Lab. (1981)
- 30) W. B. Wilson: LA-7159-T, Los Alamos Nat'l. Lab. (1978)
- 31) 石川敏夫, 深山幸生, 中村尚司: 現在論文執筆中

- 32) S. Ban and H. Hirayama : KEK Report 89-11, National Laboratory for High Energy Physics (1989)
- 33) K. Tesch : Radiat. Protec. Dosim. 22, 27 (1988)
- 34) H. Dinter and K. Tesch : Nucl. Instrum. Methods, 143, 349 (1977)
- 35) H. Dinter, J. Pang and K. Tesch : Radiat. Protec. Dosim. 25, 107 (1988)
- 36) G. R. Stevenson and R. H. Thomas : Health Phys., 46, 115 (1984)
- 37) R. G. Alsmiller, Jr. et al. : ORNL/TM-7512, Oak Ridge Nat'l Lab. (1980)
- 38) T. Nakamura and T. Kosako : Nucl. Sci. Eng., 77, 168 (1981)
- 39) K. Hayashi and T. Nakamura : Nucl. Sci. Eng., 91, 332 (1985)
- 40) 中村尚司, 林克己 : 日本原子力学会誌, 26, 917 (1984)
- 41) Y. Uwamino et al. : Med. Phys., 13, 374 (1986)
- 42) T. Nakamura and Y. Uwamino : Radioisotopes, 35, 57 (1986)
- 43) K. Tesch : Particle Accel., 12, 169 (1982)
- 44) T. Ishikawa, M. Kumazaki and T. Nakamura : Submitted to J. Nucl. Sci. Technol.
- 45) K. Shin, S. Selvi and T. Hyodo : J. Nucl. Sci. Technol., 23, 949 (1986)
- 46) K. Shin, : J. Nucl. Sci. Technol., 25, 8 (1988)
- 47) J. D. Cossairt et al. : Health Phys., 49, 907 (1985)
- 48) T. Ishikawa, H. Sugita and T. Nakamura ; Health Phys., in press
- 49) T. Nakamura et al. : Phys. Rev. C, in press
- 50) Y. Uwamino et al. : 現在論文執筆中
- 51) G. Rudstam : Z. für Naturforschung 21, 1027 (1966) ; R. Silberberg and C. H. Tsao : Astrophys. J. Suppl. Series No. 220(I), 25, 315, 335 (1973)
- 52) M. Blann and J. Bisplinghoff : LLNL Report UCID-19614 (1982) ; M. Blann : Phys. Rev. C28, 1475 (1983)

Table 1 厚いターゲットによる中性子生成量の実験値の文献

Projectile	Energy (MeV)	Target	Emission Angle (Deg)	Ref.
p	15	${}^7\text{Li}$	0 - 45	NELC 78
	30	C, Fe, Cu, Pb	0 - 135	NAKT 83
	40	Al, Fe, Cu, Ta, SUS	0, 45, 90	BIRC 85
	35, 46	Be	0, 15, 45	WATF 79
	52	C, Fe, Cu, Pb	0 - 75	NAKT 78
	25, 35, 45, 55	Be	0 - 50	JOHS 77
	72	Cu	90 - 150	BROT 83
	113	Be, C, Al, Fe, U	7.5 - 150	MEIM 89
	256	C, Al, Fe, U	30 - 150	MEIM 90
	590	Pb, U, Pb-Bi	30, 90, 150	CIES 80
	740	dep U + Steel	50, 130	MADR 73
740	U	50, 130	VEEL 74	
d	8, 12, 15	${}^7\text{Li}$	0 - 45	NELC 78
	16, 28	Be	0, 15, 45	WATF 79
	33	C, Fe, Cu, Pb	0 - 135	SHIK 84
	16, 33, 50	Be, C, Mo, Cu, Ta, Au	0 - 64	MEUJ 75
${}^3\text{He}$	44	Be	0, 15, 45	WATF 79
	65	C, Fe, Cu, Pb	0 - 135	SHIK 84
α	65	C, Fe, Cu, Pb	0 - 135	SHIK 84
	80	Ta	0, 60, 90	WADW 69
	640, 710	C, H ₂ O, Steel, Pb	0 - 150	CECR 80
${}^6\text{Li}, {}^7\text{Li}$	40	${}^7\text{Li}$, Be, C, Cu	0 - 120	SCHL 87

- BIRC 85 : C. Birattari and A. Salomone, Health Phys., 49, 919 (1985)
BROT 83 : T. A. Broome et al., Health Phys., 44, 487 (1983)
CECR 80 : R. A. Cecil et al., Phys. Rev., C21, 2471 (1980)
CIES 80 : S. Cierjacks et al., Proc. IV ICANS Meeting, KEK (1980)
JOHS 77 : S. W. Johnsen, Med. Phys., 4, 225 (1977)
MADR 73 : R. Madey and F. M. Waterman, Phys. Rev., C8, 2412 (1973)
MEIM 89 : M. M. Meier et al., Nucl. Sci. Eng., 102, 310 (1989)
MEIM 90 : M. M. Meier et al., Nucl. Sci. Eng., 104, 339 (1990)
MEUJ 75 : J. P. Meulders et al., Phys. Med. Biol., 20, 235 (1975)
NAKT 78 : T. Nakamura et al., Nucl. Instrum. Methods, 151, 493 (1978)
NAKT 83 : T. Nakamura et al., Nucl. Sci. Eng., 83, 444 (1983)
NELC 78 : C. E. Nelson et al., Phys. Med. Biol., 23, 39 (1978)
SCHL 87 : L. Schmieder et al., Nucl. Instrum. Methods, A256, 457 (1987)
SHIK 84 : K. Shin et al., Phys. Rev., C29, 1307 (1984)
VEEL 74 : L. R. Veese et al., Nucl. Instrum. Methods, 117, 509 (1974)
WADW 69 : W. W. Wadman III, Nucl. Sci. Eng., 35, 220 (1969)
WATF 79 : F. M. Waterman et al., Med. Phys., 6, 432 (1979)

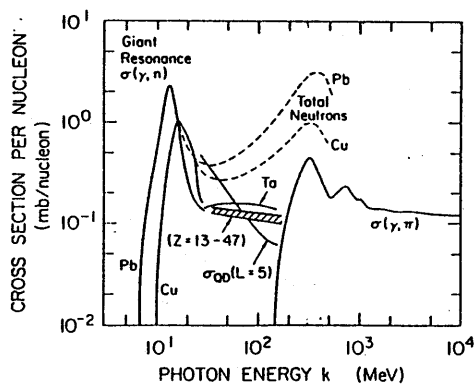


図1 光核反応断面積の励起関数

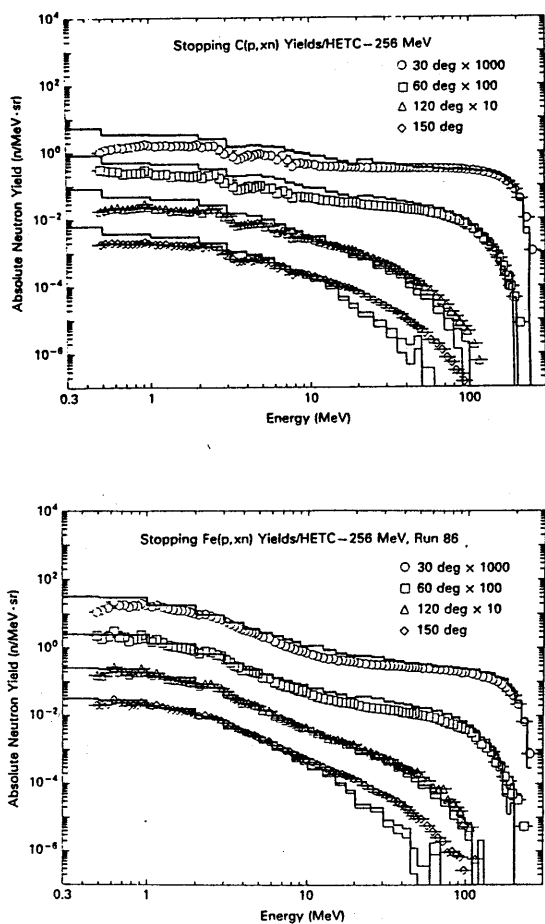


図2 256 MeV 陽子による厚いCおよびFeターゲットからの2次中性子生成量の実験値とHETC計算値との比較(6)

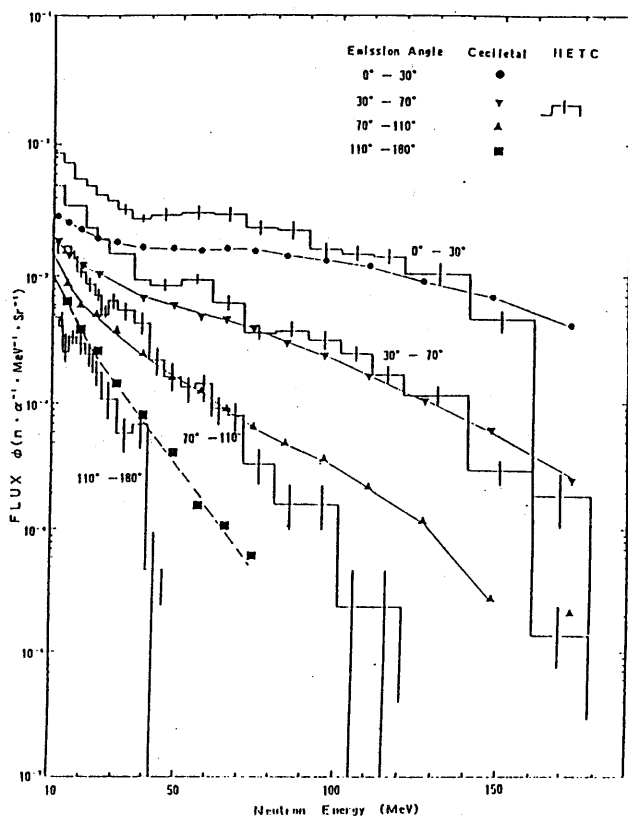


図3 710 MeV He-4イオンによる厚いFeターゲットからの2次中性子生成量の実験値とHETC計算値との比較(8)

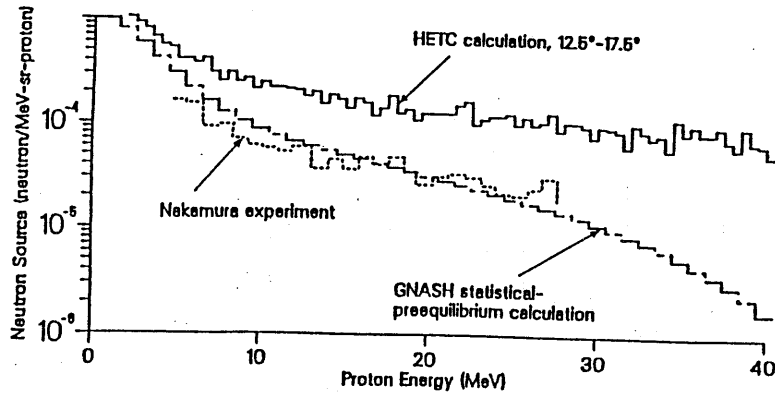


図4 52MeV陽子による厚いCuターゲットからの2次中性子生成量の実験値とHETCおよびGNASH計算値との比較 (1)

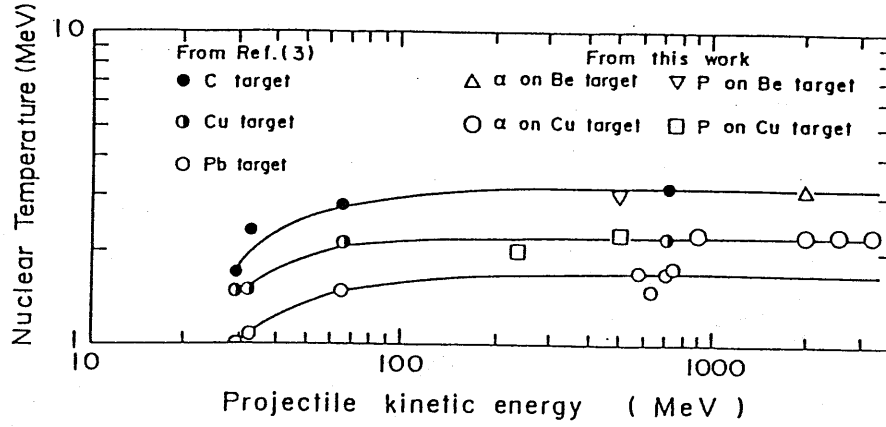
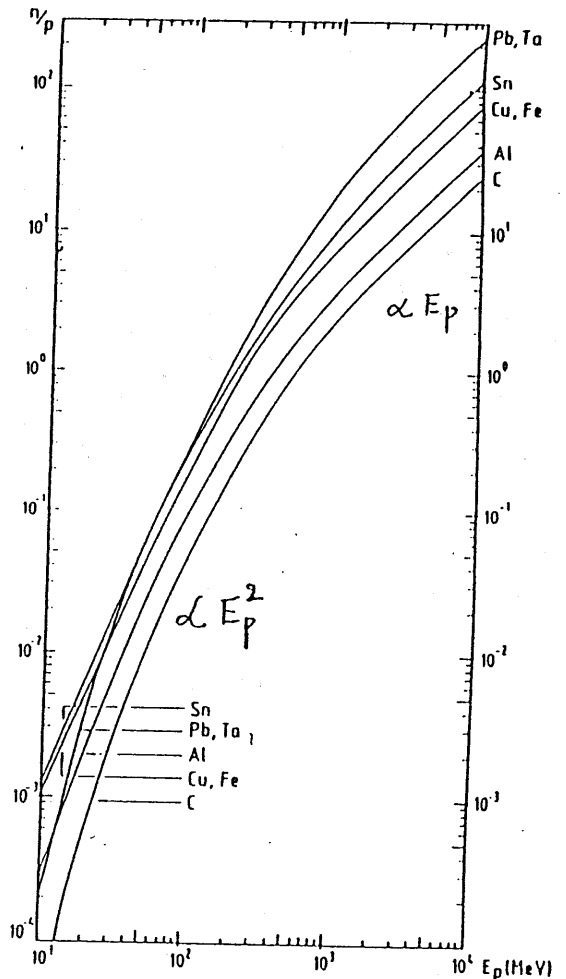


図5 陽子およびHe-4イオンによるターゲット生成蒸発中性子の核温度の入射エネルギー依存性 (8)

図6 陽子による厚いターゲットからの全中性子生成量の入射エネルギー依存性 (14)



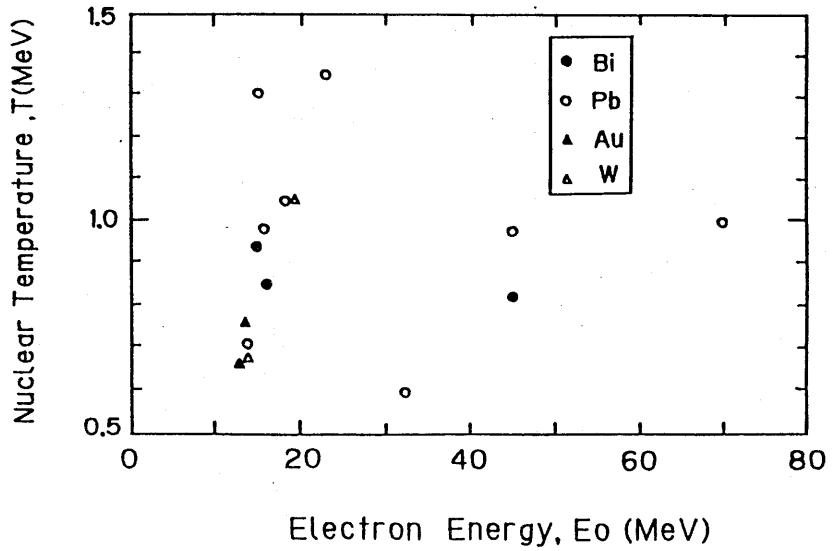


図7 光核反応によるターゲット生成巨大共鳴中中性子の核温度の電子エネルギー依存性 (19)

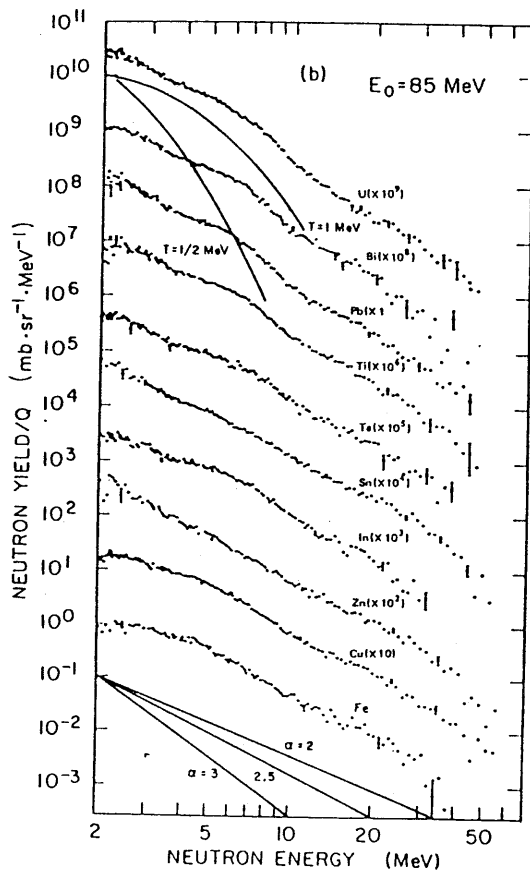


図8 85MeV電子によるターゲット生成光中性子エネルギースペクトルとフィッティング (19)

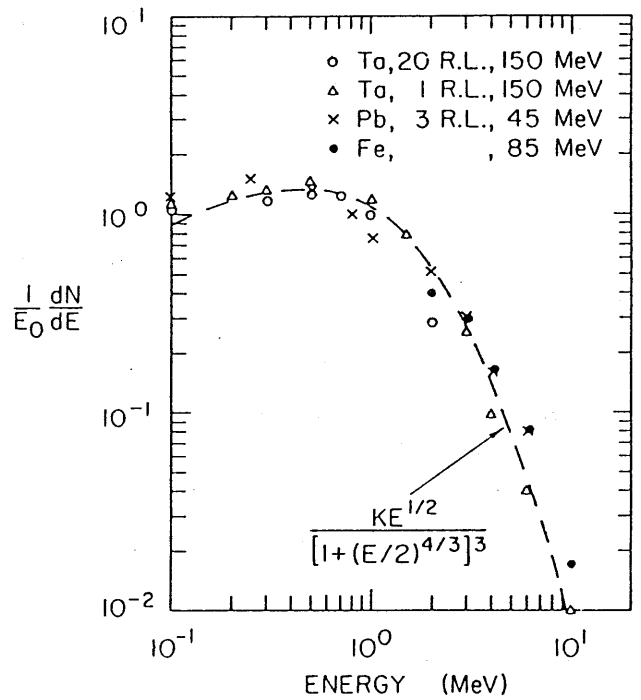


図9 光中性子エネルギースペクトルの解析式フィッティング (20)

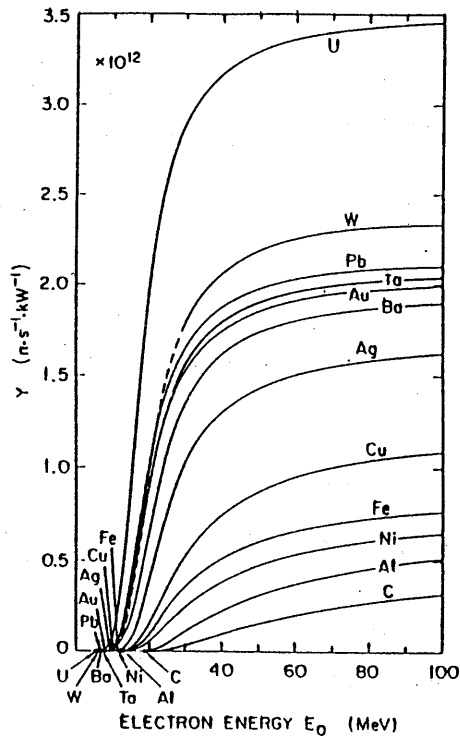


図10 厚いターゲットからの全光中性子生成量の電子エネルギー依存性 (23)

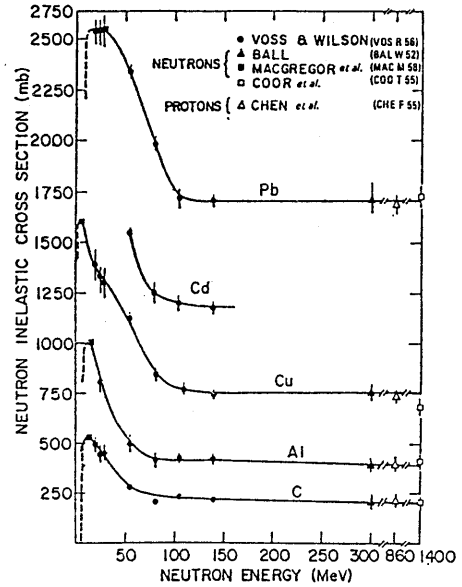


図11 0~1.4 GeV のエネルギーの関数としての中性子の非弾性散乱断面積 (24)

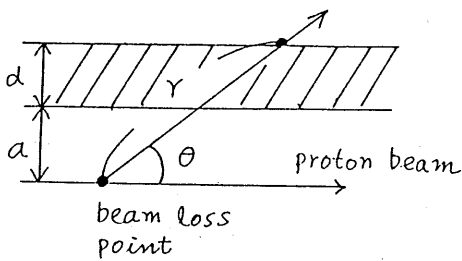


図12 側壁遮蔽のMoyerモデルによる計算のジオメトリ

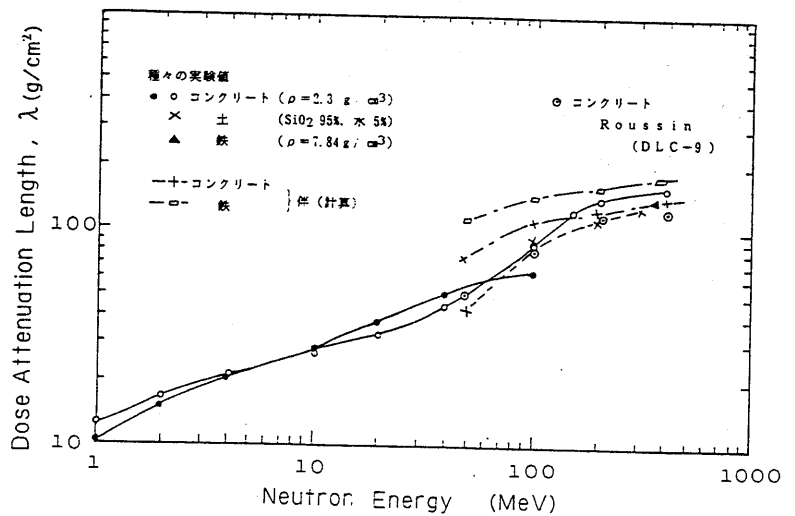


図13 各種物質の線量当量減弱距離の中性子エネルギー依存性

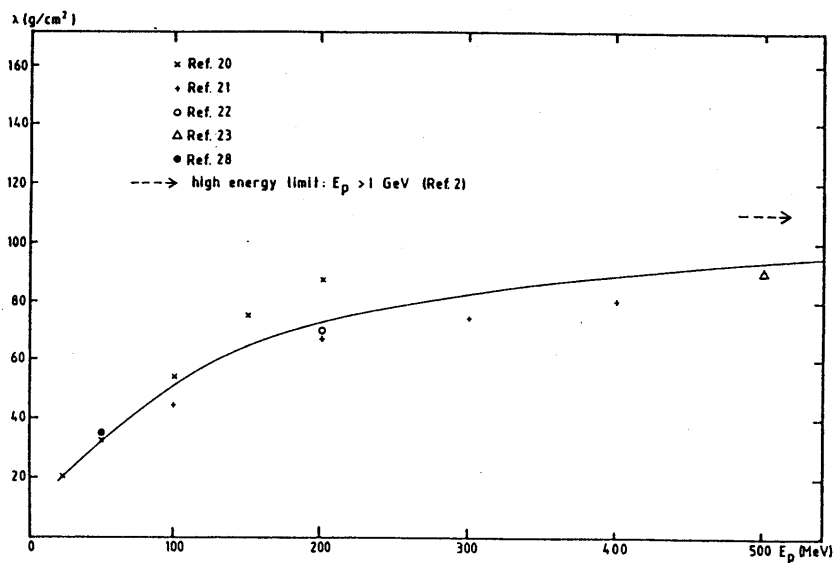


図14 陽子による厚いFe又はCuターゲットから90° 方向放出中性子のコンクリートの線量当量減弱距離の陽子エネルギー依存性 (14)

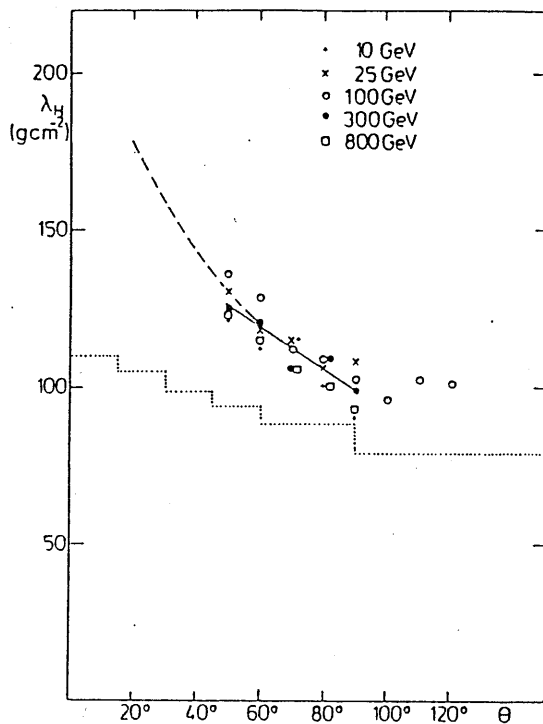


図15 陽子による2次中性子の放出角度に対するコンクリートの線量当量減弱距離の依存性(点線は30GeV陽子に対し、20MeV以上の中性子束の減弱距離、打点線は250MeV陽子に対するもの) (27)

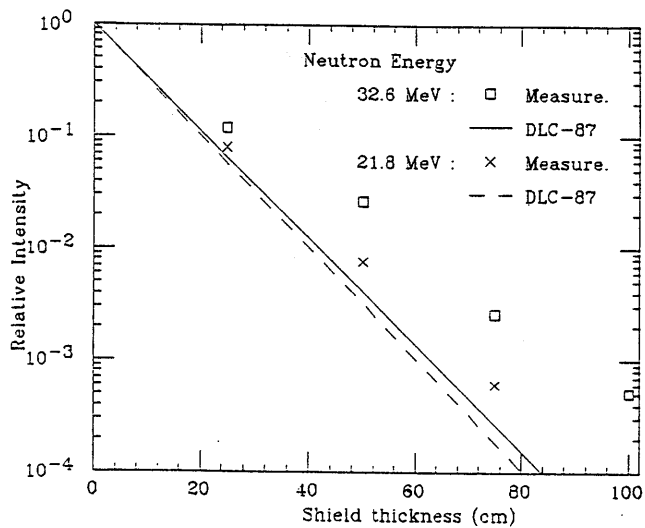


図16 21.8, 32.6 MeV中性子に対するコンクリートの中性子束減衰の実験値とANISN計算値の比較 (31)

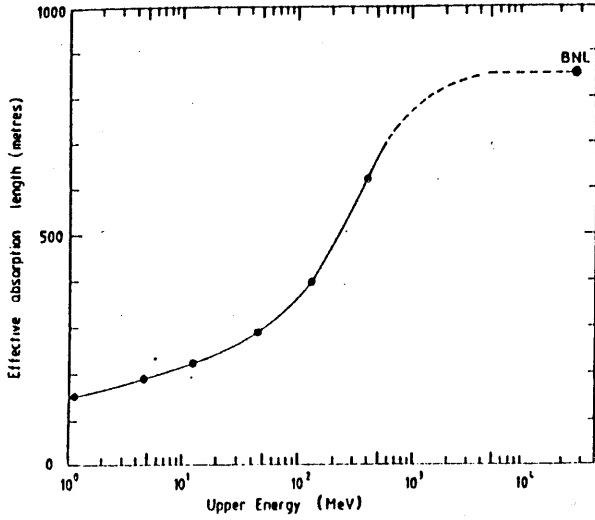


図17 1/Eスペクトルに対する空気の実効
減弱距離の最大中性子エネルギー
(ビームエネルギー) 依存性 (36)

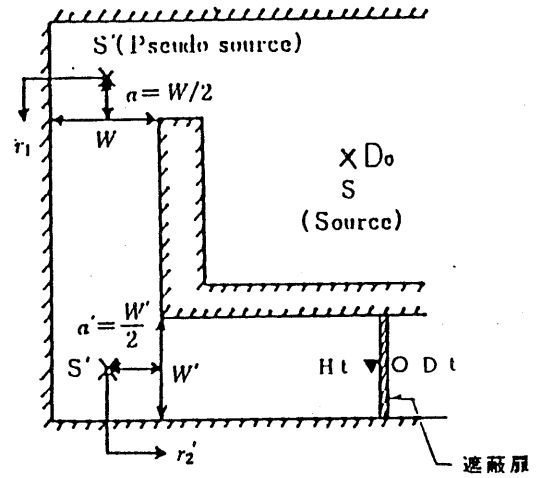


図18 近似計算法による迷路計算のための
ジオメトリ

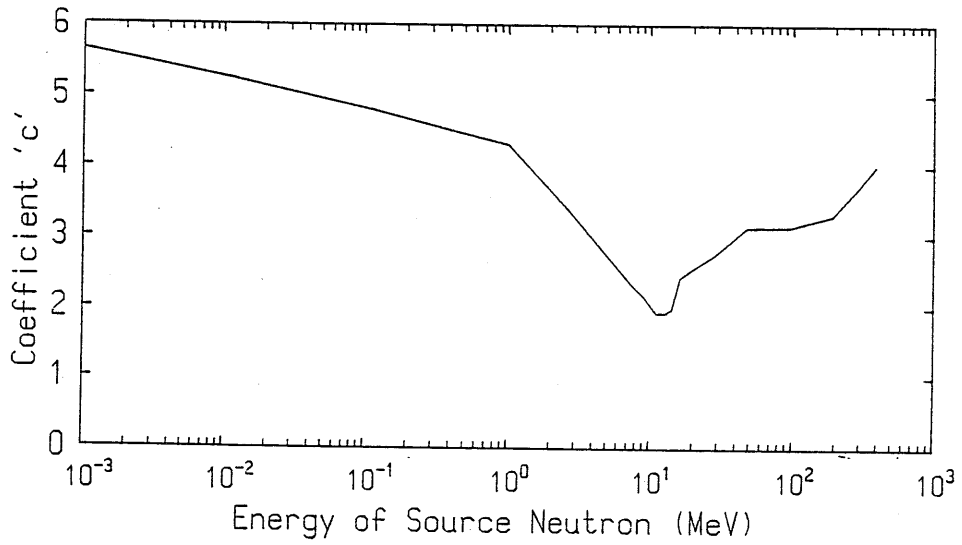


図19 線源中性子エネルギーの関数としての係数C (48)

<トピックス 3.>

原子力船「むつ」の船出

日本原子力研究所 伊勢 武治

1. はじめに

日本地図を広げると本州最北に斧の形をした下北半島が目に入る。慈覚大師が開いた霊場恐山、大町桂月がゴッドファザーの仏が浦、岩魚・カモシカ・日本猿等が生息する溪谷や山々等、風光明媚なところが多い。春から秋の夜に津軽海峡沖に浮かぶイカ釣りの漁り火は幻想的である(今年は雪景色からでも見られる)。人情も厚い。夏は涼しく過ごしやすいが、ペナルティとして冬は地吹雪が吹き荒れる。その津軽海峡太平洋側に関根浜新母港が建設され、この母港で出力上昇試験は放射線洩れ以来16年ぶりに開始された。

2. 原子力船「むつ」の設計

一般配置図を図1に、設計要目値を表1に示す。「むつ」は、全長約130m、総トン数約8240トン、最大速力は原子動力で約31km/hである。船舶としては、原子炉を搭載しているため、耐衝突構造・耐座礁構造(二重底構造)がより強固であるが、このことを除いては通常船舶とあまり変わらない。乗船者数は試験時を通じて96~108名で、その内訳は船員58名、試験員約20~30名、原子炉施設および船舶施設の検査官若干名、プレス関係者1~3名、他である。

原子動力推進システムの原理を図2に示す。原子炉格納容器は内径・高さとも約10mの略球形に近い円筒型である。この狭い格納容器内には加圧水炉であるための機器類、制御棒駆動装置などがコンパクトに配置されている。炉心(熱出力36MW)で発生した高温高圧の一次冷却水(平均温度273.5℃、110kg/cm²)は、加圧器で圧力制御、制御棒で温度制御されながら、一次冷却水ポンプ(MCP)の駆動力によって原子炉容器と蒸気発生器(SG)一次側との間を循環している。蒸気発生器内の二次側では、一次冷却水からの熱伝達によって飽和蒸気(約250℃)が生産され、主機タービンに導かれて船の推進力に利用されるとともに、一部は主発電機および主給水ポンプの駆動力にも利用されて、復水器で蒸気から水(約34℃)に戻され、主給水ポンプで循環され、高圧給水加熱器で適温(160℃)にされ、蒸気発生器内二次側に戻る。さらに一部の蒸気は低圧蒸気発生器を介して暖房、風呂、炊飯等厨房用の熱源にも利用される。

炉心内の燃料配置および下部一次遮蔽内の出力計(中性子検出器)配置を図3に示す。ウラン235濃縮度は3.24%(内側燃料集合体12体)および4.44%(外側燃料集合体20体)で、発電炉より1%程度高い。燃料設計は、船用炉としての負荷変動に対する対策として、線出力密度に余裕を持たせるとともに燃料被覆としてステンレス・ステールを用いている。反応度制御は、負荷変動の際の即応性制御を考慮して、12体の十字型制御棒のみで行なわれる(発電炉と異なり、ケミカル・シムは採用してない)。とくに中央のG1またはG2のグループが炉出力自動制御に使われる。

遮蔽設計は(図4)、遮蔽改修の際、炉容器蓋部遮蔽・上部一次遮蔽・格納容器上部遮蔽・格納容器下部遮蔽・二重底内部遮蔽などに対して、中性子遮蔽対策に重点をおいて改修がなされた。

3. 原子力船「むつ」の出力上昇試験

1990年の3月28日から12月14日まで6回に分けて実施した出力上昇試験および海上試運転の主な項目を表2に示す。船用炉の出力上昇試験は、わが国でも初体験でもあることから、実施に際しては、0%および約20%炉出力(基底負荷)の低出力試験、50%、70%、90%および100%の高出力試験と段階的に炉出力を上げて、そのつど原子炉の性能および安全性を確認した。低出力試験は母港岸壁で、それ以上の高出力試験は本州東方太平洋上において4回の航海に分けて、とくに3次航海と4次航海は海上試運転とともに実施した。洋上と陸上との連絡はインマルサット(国際海事通信衛星)を介して行なった。

初回臨界試験は16年ぶり3月29日に逆増倍法による臨界近接で行なった。制御棒をスワップ操作しながら行なう制御棒等価反応度試験では(図5)、非常によい制御棒価値対称性および3次元核計算(3D)との一致を見た。中性子減衰法によるワンロードスタック炉停止余裕度は $5\% \Delta K/K$ (設計値1%以上)、全制御棒による炉停止余裕度は $12\% \Delta K/K$ (設計値10.9%)、また過剰反応度値は $13.5\% \Delta K/K$ (設計値12.8%)、いずれも余裕ある値であった。減速材温度係数は $-11.3 \sim -55.3$ pcm/°Cおよび出力係数は -9.9 pcm/%炉出力(93%炉出力時; 図6)であった(設計値はいずれも負であること)。

船用炉の主題であるプラント動特性についてのべる。一次冷却水の平均温度基準値(T_{ref})を2°C変化させたときの炉出力制御系動作試験でも(図7)、SG二次側の基準水位(L_{ref})を5%変化させたときのSG給水制御系動作試験でも(図8)、非常によい応答性を示し、また予測解析とよいの一致であった。大きな負荷変動の例として、前後進切換え試験では(急速に負荷を100%から基底負荷まで下げ、50秒保持し、62%まで急速に上昇させる; 主軸回転数フィードバックoff; 図9)、蒸気流量は約2分後に整定し、プラント全体としては約20分後に整定した。これら一連の負荷変動試験の結果から、減速材温度係数に起因する自己制御性が非常に高く、また炉出力制御系(制御棒)の応答性がよいことから、「むつ」は負荷変動追従性が速やかで、かつ安定のある運転ができる炉システムであることが実証できた。船体動揺(ローリング、ピッチング)と原子炉出力(中性子束)との相関をみるための各種パラメータ炉雑音解析の結果では(図10)、炉出力の負荷追従性が顕著なのは低周波領域(A, B)であり、船体動揺は高周波側にあり(C)、相互に分離されている。すなわち船体動揺が原子炉出力に影響を与えにくい設計となっている。

蒸気源の切換え試験では、蒸気負荷を調整しながら補助発電機と主発電機の間で負荷移行を行ない、蒸気源切換え等に伴う操作時間を確認するのであるが、原子炉→補助ボイラーの切換えでは約1.5時間、補助ボイラー→原子炉の切換えでは約1時間であった。

遮蔽設計確認の測定では(表3)、二次遮蔽の外側ではバックグラウンド程度の線量当量率であり、遮蔽改修の成果が十分あった。

4. あとがき

出力上昇試験および海上試運転での航海実績を表4に示す。これらの試験で消費されたU235の消費量はほぼ1kgであった。これで官庁使用前検査が終了したので、実験航海を本年早春から略1年間かけて行なう予定である。なお出力上昇試験の低出力の結果は昨年原子力学会秋の大会で既に発表し、高出力の結果は本年の春の年会で発表する。

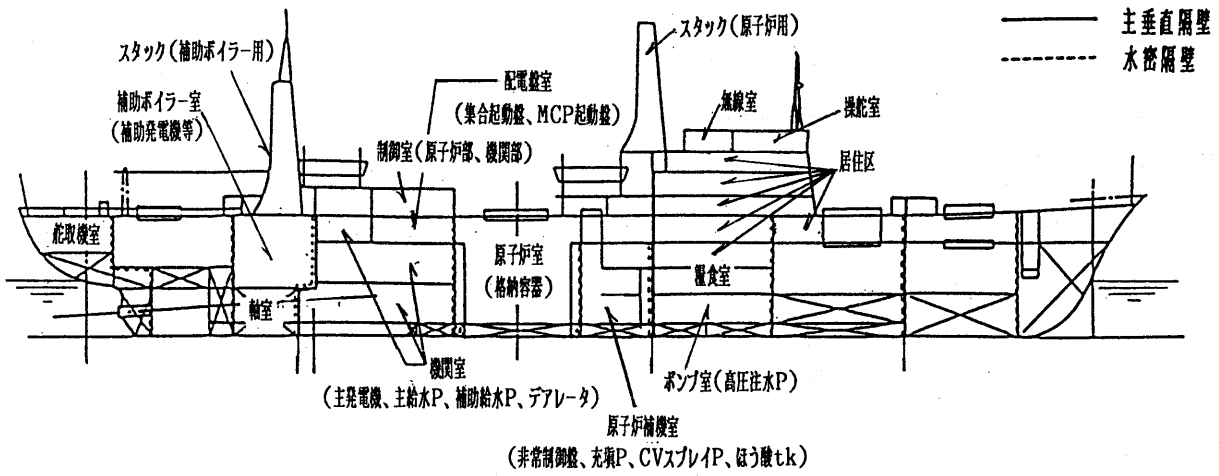


図1 原子力船「むつ」の一般配置図

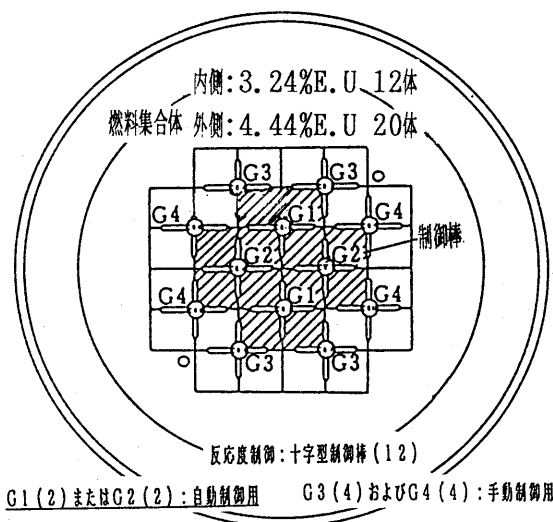


図3 炉心・核計装の配置図

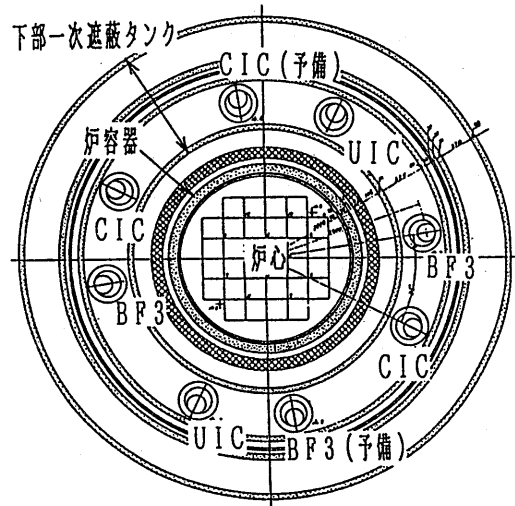


図4 原子炉遮蔽説明図

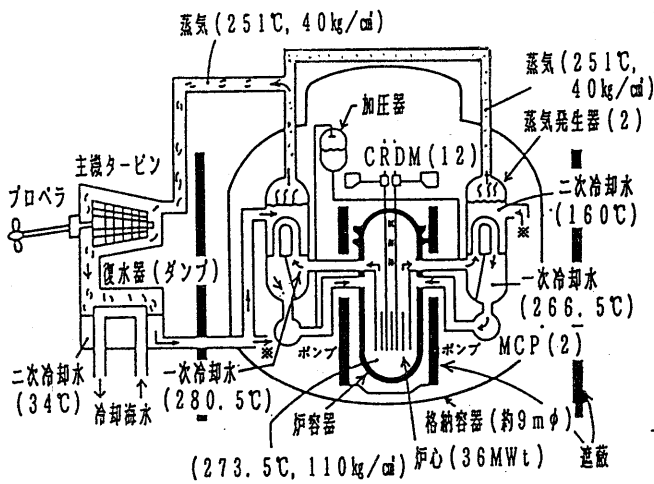
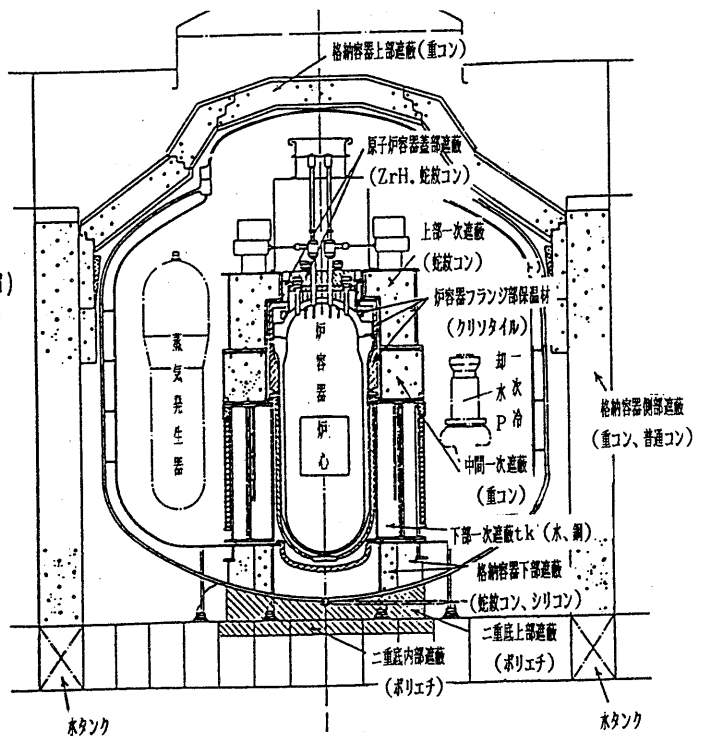


図2 原子動力推進の原理説明図



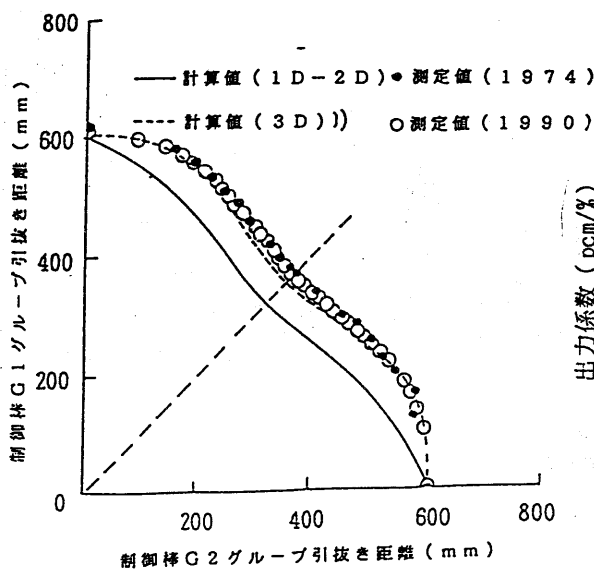


図5 試験結果：制御棒価値の対称性

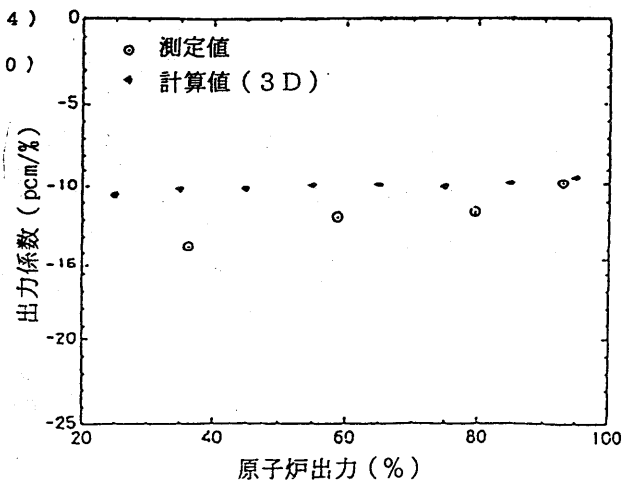


図6 試験結果：出力係数

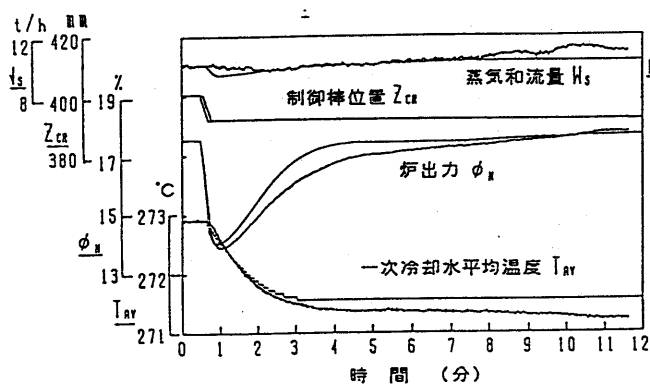


図7 試験結果：炉制御系の応答性 (Trefを-2℃変動させたとき)

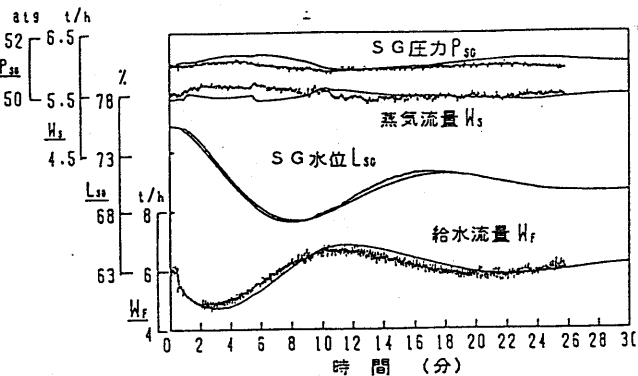


図8 試験結果：蒸気発生器給水制御系の応答性 (Lrefを-5%変動させたとき)

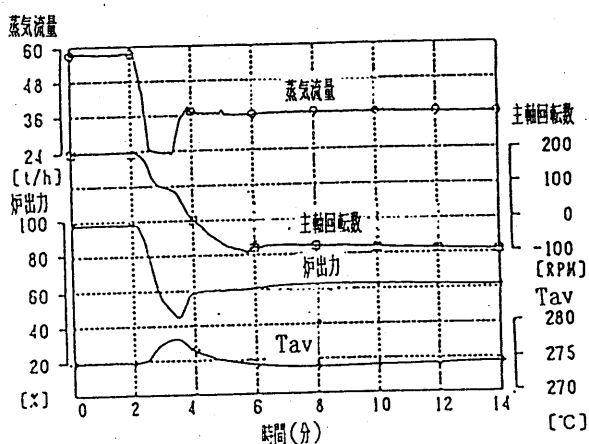


図9 試験結果：前後進切換 (前進100%→後進62%)

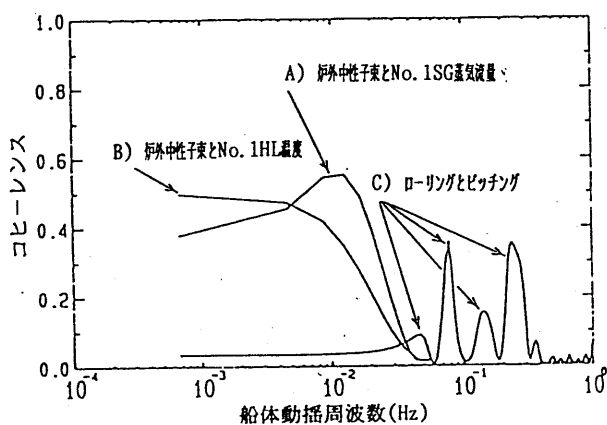


図10 試験結果：船体動揺と検出器とのコヒーレンス

表1 原子力船「むつ」の設計要目値

用途: 原子動力実験船	総トン数: 8241.72t
全長: 130.46m	最大速度: 17.0kt
型幅: 19.00m	補助動力: 10 kt
型深: 13.20m	主機出力: 10000 馬力
炉型: 加圧水型炉	炉容器胴内径: 1.75m
熱出力: 36MWt	全高: 5.49m
一次冷却水温度: 273.5℃	燃料集合体
一次冷却水流量: 1800t/h	12体(内側): 3.24E. U.
一次冷却水圧力: 110kg/cmG	20体(外側): 4.44E. U.
加圧器	燃料棒
内径: 1.092m	112本(11x11-9)/燃料集合体
全内高: 3.270m	UO ₂ 、テイツシュ・パレット
ヒータ: 130kW	パーナブル・ボイズ
安全弁: 135, 138kg/cmG	9本/燃料集合体
逃がし弁: 125kg/cmG	ほう珪酸ガラス

表2 主な出力上昇試験・海上試運転

- a) 出力上昇試験
- ・ 初回臨界試験
 - ・ 核計装オーバーラップ確認試験
 - ・ G3, G4制御棒等価性確認試験
 - ・ 停止余裕度測定
 - ・ 減速材温度係数&圧力係数測定
 - ・ 過剰反応度測定
 - ・ 遮蔽性能確認試験
 - ・ 放射化学試験
- b) 海上試運転
- ・ 速力試験
 - ・ 操舵試験
 - ・ Z操舵試験
 - ・ 低速舵効き試験
 - ・ 主機トリップ試験
 - ・ 原子炉スクラム試験
 - ・ 原子炉自動制御系動作試験
 - ・ SG給水制御系動作試験
 - ・ 負荷変動試験
 - ・ 前後進切換試験
 - ・ 蒸気源切換試験
 - ・ 振動測定
 - ・ 後進試験
 - ・ 旋回試験
 - ・ スパイラル試験
 - ・ 騒音測定試験

表3 上甲板での遮蔽性能確認 (単位: μS/h)

場所	1974年		1990年	
	炉停止時	0.23%(1.4%)	炉停止時	100%
ハッチ	γ 0.1~0.2	0.48	0.005~0.010	0.005
中央部	n 0	15.2	0.003~0.010	0.005
Ra-11	γ 0.2	0.5(2.0)	0.10 ~0.12	0.12

表4 出力上昇試験および海上試運転のまとめ

期間	岸壁試験	一次航海	二次航海	三次航海	四次航海	合計
	3.29	7.10*	9.25	10.29	12.7	
	~4.28	~7.30	~10.9	~11.9	~12.14	
航海時間(h)	---	486	340	268	169	1263
航海距離(km)	---	7600	6900	5300	4100	23900
原子動力(km)	---	5400	5670	4550	3130	18750
炉運転(h)	257	363	216	229	122	1187
全出力換算(h)	16.2	147.5	168	124	86	541.7

* 5.8, 7.3~7.7に行なわれた洋上に出るための準備原子炉運転(炉出力約20%)を含む。

<トピックス 4.>

炉物理夏期セミナーの歩み

京大炉 中込 良広
 神田 啓治
京大工 木村 逸郎

第1回炉物理夏の学校は、今から22年前の昭和44年8月に岐阜県秋神温泉で開校した。以降、今日まで、昭和60年の第17回から「炉物理・夏期セミナー」と名称を変えたものの、毎年色々な場所で開催されてきた。毎回取り上げるテーマも、幹事校が知恵を絞り、基礎的なもの、トピックを主体としたものの他に、この間に原子力界が経験した TMIやチェルノブイリ事故をプログラムに取り入れられたりした。ここでは、これまでのすべての夏期セミナーを網羅し、“傾向と対策(今後の展望)”を論じるつもりではなく、この辺りで一度原点に立ち戻り、現在を見直してみるのも意義があるのではないかと思ひ、主に我々が手がけた初期の頃の出来事を中心として述べることにする。

当時、物理学会では原子核や宇宙線の若手研究者及び院生を中心とした「若手夏の学校」が国内保養地を舞台に開催され、最新の研究や研究体制等について活発な意見交換が行われ、学会に大きな活力を与えていた。これや「核化学夏の学校」に刺激され、炉物理連絡会でも夏の学校のことが話題となり、京大炉が幹事校となった昭和44年に開催を試みるようになった。まず、目的として「炉物理及びこれとの境界領域に関する基礎的な研修を中心とすると共に、最新の情報をも含めて習得し、更にこの分野の研究体制に関する討論や研究グループの紹介等を行うことにより研究者間の連繫を深める」(第1回炉物理夏の学校案内冒頭文)という欲張ったものを掲げ、テーマの選定、講師の依頼、プログラム編成、参加者の勧誘、会計等は木村と神田が、開催場所の選定及び交渉、案内、テキストの準備、当日の段取り及び手配は中込が中心となって行った。我々にとってこの種の企画、実施は初めての経験であり、ほとんどのことが手探りの状態からのスタートであった。第1回だから絶対成功させなければならない、といった気負いがあった反面、初経験だから少々の失敗は許されるだろう、という気楽な一面もあった。

プログラムの作成に当たっては、勉強半分、討論及び遊び半分とした肩の凝らないものとなるよう配慮した。第1回ということで些か総花的な目的としたがために、テーマが「動力炉開発について」、「高速炉について」、「核分裂研究の現状」、「核データについて」等々といった大きな標題になった。内容も必然的にレビュー的なものとなり、それぞれの分野の大御所的存在であった先生方に講師をお願いした。当時は炉物理研究を今後いかに進めていくべきか、といった大きなテーマが研究者間にあり、これを取り上げたのが「炉物理の将来のテーマ」と銘打った討論会で、現在の夏期セミナーでの若手研究者発表会(又は討論会)のはしりとなったものである。夜6時半から始まった討論会では、大塚益比古、古橋 晃両氏を司会役をお願いし9時過ぎまで続き大いに盛り上がった。この討論会で刺激を受けた現在指導的立場にある諸先生方(当時、若手研究者)も多いはずである。開催場所については、人気のない静かな山奥で心身ともリフレッシュし、改めて炉物理を考えてみよう、ということで日本アルプス近辺の温泉に的を絞った。参加者が全国にまた

がるため旅費のことを考え、日本の中央部で開催することにしたものである。長野、岐阜両県庁に紹介をお願いしたところ、沢山の候補地の案内を頂いた。場所、費用を考え、また現地調査をした結果、岐阜県の御岳山中腹の秋神温泉を開催地とした。温泉宿がたった1件のひなびた温泉地で、交通の便は些か悪かったが、我々がイメージしていたとおりの夏の学校開催地であった。現在と当時では物価が違うのであまり比較にならないが、参考までに費用を書くと、宿泊費(1泊3食付き)900円、参加費(テキスト代込み)正会員1,000円、学生会員500円、非会員1,500円であった。当然のことながら、参加費だけでは運営することはできず、関係方面からの援助を頂いた。当時“古橋基金”はなく経費的には苦しいスタートであった。

参加者は第1回のもめずらしさも手伝い、総勢80名を超え、会期の5日間全館借り切りとなった。参加者の約2/3以上が大学院生以外の若手～中堅研究者であった。10名程度を一部屋とした大部屋制で、各部屋に講師の先生方にも入って頂いた。その道の先駆者たちとの合部屋方式はコミュニケーションの観点から大変よかった、との感想を頂いた。開期中日に設けたレクリエーションは、参加者と幹事の休息時間であり、御岳山へ登山する者、宿舎の裏の清流で釣りを楽しむ者、宿舎内をウロウロする者等それぞれの時間を有効に使ったようである。大きな事故もなく無事閉校でき、第2回も行おうという気運がでたことは大成功であった。

以後、毎年幹事校の努力により、各地で夏の学校が開催されてきたが、10年を過ぎて再び京大炉が幹事校となった。今度はもっと若い人達に夏の学校開催の世話を頂き、新風を吹き込んでもらおうと期待していたが、また同メンバー+若手2名といったあまり新鮮味のないスタッフとなってしまった。(この点、再度夏期セミナー開催を担当する幹事校は、同じ経験をするかもしれない。)なんとか第1回とは異なった印象を持ってもらおうと、開催場所として初めて寺院を選び、本堂でお坊さんの話を聞く時間をプログラムに盛り込むことにした。こうして第11回の夏の学校が和歌山県の高野山の寺で開催されたのである。本来下界より数度低いはずの高野山だが、開期中暑い日が続いたため、広い宿坊とはいえ講義と討論で相当参加者は参ったようであった。以後、何回か寺院で夏期セミナーが開催されるようになった。(原子力と宗教について、もっと考えてもいいのかも知れない。)

第1回の炉物理夏の学校開催形式が、以降の夏の学校及び夏期セミナーの形式として引き継がれてきており、また以来絶えることなく毎年開催されてきたことは、初回を担当した者として大変嬉しいことである。回を重ねる毎に、原子力関係学科の学生、院生の増大にともない、内容的には教育的なものに変化してきているようである。このような背景から、名称も「夏の学校」から「夏期セミナー」という今日的な名前に改称され、明日の原子力界を支える若い研究者を育てる場として、また研究者の鋭気を養う機会として定着しており、他の分野でも夏期セミナー開催が続いている。これらのセミナーで新しい知識に触れるとともに研究者間の親睦が深まることは、我が国の原子力界にとって心強いことである。炉物理夏期セミナーの今後の益々の発展を期待するとともに、毎度毎度の幹事校の御苦労に感謝したい。

<研究室だより 1.>

東京大学工学部附属原子力工学研究施設 原子炉本部

当研究室は「新型炉」研究をテーマとして概念設計研究と設計解析手法の開発を行っている。概念設計研究では、過去には医療用原子炉、ナトリウム冷却高速増殖炉、ハイブリッド核融合炉、慣性核融合炉、ミュオン触媒ハイブリッド核融合炉などを検討してきたが、現在は超臨界圧水蒸気冷却高速増殖炉と、超臨界圧軽水炉の概念設計、安全解析を進めている。超臨界圧火力発電技術の利用、経験豊富で安価な水・蒸気技術による経済性の高い高速増殖炉の実現可能性の検討などがねらいである。

設計解析手法としては、核・熱水力・安全解析コードなどがある。核計算手法では、過去には一次元輸送燃焼計算コードBISON、二次中性子のエネルギー分布と角度分布の不確実性も考慮できる感度誤差解析コードシステムSUSD、慣性核融合ペレットの爆縮燃焼計算コードMEDUSA-IB、三次元空間依存動特性計算コードIBISなどを開発した。核計算法については、今後は既にあるものを使うという側面が強くなると考えている。核設計がほとんど計算で行え、実験は精度の確認に必要というところまで発達しているのに比べると、熱水力は実験をやらないと設計ができないなどはるかに遅れている。工学の分野では、熱水力に限らず、マクロな経験式や実験式にもとづいた手法が多いが、これらを計算機シミュレーションで、できる限り置き換えていくことが必要と思われる。当研究室では熱水力計算の基礎となる数値流体力学の分野で、曲面などを持つ複雑な形状の非圧縮性流れを安定かつ高速に計算できるスタガードBFC法をリーマン幾何学にもとづいて開発した。この手法をとり入れた計算コードが市販される計画もあると聞いている。最近話題の静的安全設備と関連して自然循環の解析などにも有効な手法と考えている。

原子炉本部は「弥生」の運転管理の部門でもあるので、この機会に「弥生」の現状を簡単に紹介したい。共同利用テーマでは、ニュートロニクス関係では高速中性子ラジオグラフィ、高速中性子遮蔽、光ファイバー計装系の研究などがおこなわれているが、「弥生」炉心への接近性のよさと、高速中性子源としての特徴を生じた照射のテーマが最近が多い。なかでも、核融合炉ブランケット増殖材料よりのトリチウム回収実験、水化学の基礎研究としての高温水照射、酸化物高温超電導材料の照射効果などに多くのマシントイムが使われており、生物（血液）、半導体、非金属材料の高速中性子照射も行われている。これらの共同利用の世話は原子力工学研究施設の各部門が分担して行っている。なお、「もんじゅ」で使われる予定の検出器の核正照射の依頼が動燃よりあるなど、「弥生」の当初の設置目的の1つである日本の高速増殖炉開発への寄与という役目もなお果たしている。「弥生」は今年が臨界20周年であるが、同じ高速中性子源炉のフランスのHARMONIEが現在は活発に使われていないことを考えると、現在も活発に利用されている「弥生」は汎用高速中性子源炉の名前に恥じない働きをしていると思う。今後も「弥生」の利用の発展と安定安全な運転にも寄与したいと考えているので皆様のご支援をお願いしたい。

教育の面では、上記の共同利用実験へ各大学の院生が参加している。また、東大の原子力工学科の原子炉実習を外国人留学生を含めて実施している。さらに、東北大原子核工学科の学生さんが東海村へ見学旅行に来る機会に「弥生」で原子炉の運転を経験してもらうことも1日だけではあるが行っている。原子炉実習については、私大炉利用の概算要求の計画もあると聞いており、それに悪影響のないようにしたいと考えているが、上記の東北大のような試みも可能であるのでご希望の大学は私あてに問合せ下されれば幸いである。東海村には東大の宿舎もあり学生の負担経費の点でも好都合ではなからうか。時期としては3月上旬が好都合であるが秋も可能である。

(岡 芳明 記)

〈研究室だより 2.〉

京都大学工学部原子核工学教室

炉物理グループ 小林啓祐

今まで、2次元 $x-y$ ¹⁾、 $r-z$ 座標²⁾及び3次元 $x-y-z$ 座標の多群輸送方程式の球面調和関数法による解法について研究してきた。球面調和関数法の式を2階微分方程式の形にして、拡散方程式で使われる通常の差分法で有限差分式を作る時は、各モーメントの境界条件を適切に取り入れようとしても、式の複雑さのために無視せねばならない項があり、断面積が大きく異なるところで誤差が大きくなる不安があった。それで拡散方程式の解法のために考えた有限フーリエ変換を使って $x-y$ 座標で P_L 近似式を解く事を試みたが、その結果通常の方法では無視せざるを得なかった項も取り入れる事が出来、より少ないメッシュ数で正確な解が得られる事が分かった。この結果は学会誌³⁾に書いたように、90年4月にマルセイユで開かれた炉物理国際会議で発表した⁴⁾。

マルセイユ会議の前の週にロンドン大学で有限要素法及び関連した方法についての国際セミナーがあり、そこでは有限フーリエ変換法で2次元 $x-y, r-z$ 、三角メッシュ、3次元 $x-y-z$ 座標等での拡散方程式の解法について今までの研究成果を発表した⁵⁾。球面調和関数法による2及び3次元多群コードはイギリスのFletcherによって差分法または有限要素法を使って最初に作られ、その後ロンドン大学のWilliams, Ackroyd, Woods等、イスラエルのRothenstein等によっても種々のコードが作られているが、そこでFletcher, Woods, Rothenstein等と議論した限りでは彼らのコードでは物質境界の条件が適切に扱われておらず、大きな断面積のギャップがある問題では正しい解が得られていないようである。

その後さらに有限フーリエ変換法を使って、3次元 $x-y-z$ 座標の多群輸送コードを作り⁶⁾、源の項を2次の多項式で近似することにより差分近似を使った場合よりも一層少ないメッシュ数で高い精度が得られる事が分かり、91年春の学会で発表の予定である。

結合炉についてはAvery以来多くの理論が考えられてきたが、多くの場合近似的な理論で、結合係数を解析的に厳密に与える表式は与えられなかった。最近多群拡散及び輸送方程式を使って、結合炉に対する厳密な理論式を導く事に成功し、これを使うと結合係数を厳密に求める事が出来る事が分かった⁷⁾。またこの理論を応用すると、空間依存動特性コードを作成する事が出来る。これ等についても91年春の学会で発表の予定である。

軽水炉の臨界計算で、それぞれの燃料集合体ごとに無限に並んだセルを仮定して均質化した定数を作り、それを使って全体系計算を行う時の誤差を小さくするために、不連続因子を使う方法が考えられている。しかしこの非均質因子は物理的には不自然である。もっと自然な方法で精度良く計算出来る方法がないかを検討し、新しい方法を考案した。この方法を使うと、今までのようなセル計算で均質断面積を求めるという方法を使う必要がなく、炉心に異なる燃料体があってもそれを正確に取り入れる事が出来る。これについても91年春の学会で発表する予定である。

- 1) Kobayashi, K. Ohigawa, Yamagata, H. Ann. nucl. Energy, 13, 663, (1986).
- 2) Yamamoto, A. Kobayashi, K. J. Nucl. Sci. Technol. 26, 563, (1989).
- 3) 小林啓祐、原子力学会誌 Vol.32, No.8 796 (1990).
- 4) Kobayashi, K. Hiyama, N. "Finite Fourier Transformation and its Application to the Solution of Multigroup Transport Equation in $x-y$ Geometry by the Spherical Harmonics Method", International Conference on the Physics of Reactors, Marseille, April 23-27, (1990).
- 5) Kobayashi K. "Application of Finite Fourier Transformation for the Solution of the Diffusion Equation", 3rd International Seminar on Finite Element and Allied Methods in Radiation Transport, Imperial College, London. 19-20 April (1990).
- 6) 小林啓祐、菊池裕彦、筒口拳、1990年年会 B41、1990年秋の大会 D10
- 7) Kobayashi, K. "Rigorous Derivation of Nodal Equations for Coupled Reactors", Ann. nucl. Energy, to be published.

〈研究室だより 3.〉

放射線工学・遮蔽グループ 秦 和夫

当グループに於ける最近の研究活動の概要を紹介させていただきます。当グループでは、放射線と物質との相互作用をベースに、マイクロからマクロまで、エネルギーも上から下まで、なるべく目新しいものを中心に何でも対象にすることにしています。最近は、どちらかと言うと加速器がらみのエネルギーの高い方に重心が移っていますが、研究テーマ自身はなるべく4~5年で変えるように努めています。目下のところは、(1) 軽イオン、重イオンによる二次中性子生成、(2) 高(中?) エネルギー中性子の物理、(3) 放射線損傷素過程、(4) 放射線ストリーミング等遮蔽工学、が主要なテーマです。

以下、各テーマ毎に簡単に研究状況を報告します。

(1) 加速器の工学的応用の研究が最近注目されていますが、各種イオンビームによる中性子の生成は最も基本的なデータにもかかわらずわずかな実験データしかなく、全体像がまだつかめていない状況と言えます。東大核研、阪大RCNP等のサイクロトロンを利用してシステマティックな測定、解析を進めています。又、核内カスケード蒸発モデルの検討他、加速器の制約で実験しにくい高エネルギーについても研究を進めています。

(2) 15MeV以上100MeV以下の中性子は扱いが難しく、統一的な計算を適用しにくいため、断面積の測定からマクロな透過実験まで多くの実験データが必要とされています。阪大RCNP、東北大CYRICのサイクロトロンを用いて数十MeV中性子の計測、全断面積、散乱断面積、 $(n, x\gamma)$ 断面積の測定、マクロな体系の透過実験を進めています。近い将来、原研(高崎研)の単色中性子源コースで、原研、大学、高エ研の共同(代表東北大中村先生)で我々も参加して系統的な実験が開始される予定になっています。

(3) 加速器応用や核融合炉等、過酷な放射線環境下での材料挙動が重要になっています。タンデトロンを使って金属、セラミックス、半導体材料、光学材料等の単結晶に重イオンビームを入射して生成する損傷過程を、Heのイオンチャンネルリングにより調べています。又、平行してはじき出しやアニーリング過程のシミュレーションを行って損傷素過程の研究を行っています。

(4) 従来から数年続いているテーマで、放射線ストリーミングの際、ダクトが斜交する等の一般的な条件下でのストリーミング式の定式化に集中しています。成果は、いずれ一般的な形の使いやすい簡易評価コードとして公開の予定です。

<研究室だより 4.>

中性子工学・中性子応用グループ 木村 逸郎、森島 信弘

中性子源、中性子反応（主として断面積）、融合炉中性子工学、中性子計測、中性子応用、原子炉物理などに関する研究と教育を進めている。

- (1) 中性子源、中性子断面積：核分裂板と ${}^6\text{LiD}$ 核融合板の仕事が一段落しNSEの中性子源特集号に論文を出した。近大炉による標準1/E中性子場の利用は継続している。加速器14MeV中性子源の特性は放射線検出器の問題へと発展している。今年から京大炉グループと協力してライナック鉛中性子スペクトロメータに取り組む予定である。今後は中性子による親物質（トリウムなど）高次アクチナイド核種の転換などの研究にも取り組んでいきたいと考えている。
- (2) 融合炉中性子工学：14MeVの中性子輸送に関連し、京大炉や阪大グループとの協力を進めている。オクタピアンでの実験は一段落した。トリウム利用ハイブリッドを模擬した実験と解析をKUCAを進めており、日印トリウム利用セミナーなどで発表した。
- (3) 中性子計測：Si表面障壁型検出器(SSB)による14MeV中性子計測から発展して、重イオンに対するSSBの応答を調べている。TLDを用いて、KUCAや近大炉の炉内ガンマ線の測定と解析を開始し、第一報を本学会やReactor Dosimetry Symp. に発表した。今後実験と解析の両方をつめて Uhrig の核データ会議に出したい。
- (4) 中性子応用：中性子を利用した半導体中の不純物分布の測定はほぼ一段落した。現在は東大炉や京大炉を用いて、Siに対する中性子照射効果を調べつつある。これに関連し、Siなど半導体材料中における中性子輸送の実験と解析も行った。一方、ヒト血液中のリンパ球の中性子による染色体異常発生に関し、放射生物学グループの実験に中性子工学の立場から協力している。また中性子を用いたレーザー爆縮核融合時のマイクロバルーン飛散状態の解明にも協力し成果を得た。今後とも新しい中性子応用の可能性を探る。
- (5) 液体水素及び液体重水素の冷中性子散乱断面積モデルの開発：冷及び熱中性子エネルギー領域に適用できる微分散乱断面積モデルの開発と群定数化を進めている。今後冷中性子源の核特性解析の入力として用いる予定。
- (6) 炉中性子の空間的結合効果の評価：ノード間の結合計数（静的）を拡散理論より厳密にかつ一般的に導出する方法を開発した。ゆらぎの場合に拡張すること及び結合効果の実験的評価法を考案することが次の課題である。
- (7) ゆらぎ信号の情報解析：ベンチマークテスト解析、多次元自己回帰モデル解析による因果性推定、ゆらぎの計算機シミュレーション等をE-mailによる情報交換を利用しつつ進めている。時差は思考時間に活用している。

〈研究室だより 5.〉

動燃大洗工学センタープラント工学室

動燃大洗工学センターの技術開発部に属しているプラント工学室は、職員11名で主に新型炉(ATR、FBR)の設計研究を行っている。そのうち、炉物理に関する炉心・燃料設計研究(職員5名で実施)について紹介する。

FBRの炉心・燃料設計研究については、プラント工学室内で実施している構造、システム、安全の設計研究と整合性を取りつつ主に以下の内容を実施している。

(1) 大型炉設計研究

大型炉の炉心・燃料設計研究は、炉心の大型化及び高性能化に伴う課題を把握して、「常陽」や「もんじゅ」の設計、日本及び海外における炉物理研究、燃料材料の照射試験を含んだ開発等の成果に基づいて実施している。今まで電気出力で600MWeから1500MWeの範囲で、各種パラメータ(炉心型式、ピン径、炉心高さ等)を基にした広範囲な炉心概念の設計研究を実施してきている。

(2) 新型燃料設計研究

FBR実用化に向けて酸化物燃料開発路線に主力を注ぎつつ、FBR開発のより広範な展開を図る基盤技術開発として、酸化物燃料より高熱伝導度、高密度の特性をもつ新型燃料(金属、窒化物、炭化物)に関する検討をすすめている。新型燃料の特長を活かした炉心を設計するための第1ステップとして、電気出力1000MWeの大型炉に新型燃料を利用した場合の炉心特性、燃料特性、安全性、経済性等について、酸化物燃料炉心との比較検討を行っている。

(3) TRU消滅炉心設計研究

FBRでのTRU消滅処理について、主に電気出力1000MWeの酸化物燃料炉心で検討を行っている。TRU燃料装荷方法をパラメータとして、消滅率、炉心特性、熱特性等について検討を行っている。

(4) その他

中小型炉の設計研究、今まで述べた設計研究に必要な設計手法の開発整備、設計基準の整備・合理化等も行っている。

ATRの炉心設計研究については、ATR実証炉支援としての設計コードの改良・整備、ATR高度化研究としてのATRの各種燃料利用特性の検討等を実施している。

(動燃プラント室 若林)

<研究室だより 6.>

動燃事業団 東海事業所 先端技術開発室
小無健司

1 はじめに

3年前に原子力長期計画の改訂が行われ、基礎基盤技術、先導的技術の重要性が強調された。動燃事業団では、62年度フロンティア研究グループがつけられた。これが、平成元年度より「先端技術開発室」と名前を変えて現在に至っている。研究は総勢22名が研究テーマごとにグループに分かれて、原子力分野に関連の深い先端技術を研究している。現在の主な研究テーマは、①核変換技術開発、②有用金属回収技術開発、③レーザー技術開発、④超電導技術開発である。

2 研究内容

2-1 核変換技術開発

放射性核種を核変換により短寿命核種または安定核種に変換する方法、いわゆる“消滅処理”について研究している。中性子、光子、荷電粒子による核反応を用いた消滅処理方法の特性評価をシミュレーションコードを用いて行っている。また、装置化研究として高中性子束原子炉、大強度CW加速器についても研究している。

2-2 有用金属回収技術開発

再処理工場において発生する不溶解残渣中に含まれる白金属等の有用な金属(Ru, Rh, Pd等)をその特性に応じて回収、分離、精製する方法を研究している。

2-3 レーザー技術開発

銅蒸気レーザー、及び化学レーザーの開発を行うと同時に、レーザー光の原子力分野への利用として光化学分離法、オフガス中の放射性気体廃棄物の分離回収方法等を研究している。

2-4 超電導技術開発

アクチニド超電導体の開発および超電導技術の核燃料サイクルへの適用を研究している。

3 あとがき

まだ、できたばかりの研究室であり、十分な研究環境が整うまでには、あと数年かかると思われる。先端技術開発は息の長い研究であり基礎研究の積み重ねが重要であるとの認識のもとに研究を進めて行きたい。

〈研究室だより 7.〉

日本原子力研究所 燃料安全工学部 核燃料施設安全評価研究室*

当研究室では、核燃料取扱い施設（輸送容器を含む）の安全性を評価する手法について研究している。評価対象及び事象は広範にわたっている。その中には、炉物理の知識が役立つ分野も存在する。さらに、原子炉物理と深く関わっている臨界安全及び遮蔽の分野でも、原子炉よりも取扱う核燃料物質の物理的・化学的形態及び幾何形状・配置が多種・多様であることにより、従来より炉物理に関する知見を深めることができる可能性がある。以下では、当研究室の活動の概要をまず述べる。次に、炉物理研究者に興味のありそうな研究成果の例を2つ記す。

1. 研究室の活動の概要

安全性の度合を測る尺度としてリスクという量が用いられることがある。原子炉の安全性の分野では、「事故事象の起きる確率 × その事象のもたらす被害」として定義されることが多い。このようなリスクが核燃料取扱い施設の安全性を評価する際にも要求されるとの見通しの下に、確率論的リスク評価コードの導入・整備を進めている。この計算コードを用いて、再処理施設の高レベル廃液タンクの冷却材喪失事故を対象に計算を実施した。再処理施設の事故時安全評価を実施する上で必要になる放射性核種の移行データについての調査を行うと共に、物質移行や圧力伝播・熱伝達等を計算するコードを開発している。

原子炉を出た後の核燃料物質を対象とした、いわゆるバックエンドのリスク評価が米国で実施され、関連施設間の輸送に係るリスクが最大であるという結果が得られている。これは輸送の際に、公衆の傍らを通ることが避けえないためである。核燃料物質の閉じ込め系である輸送容器が重要な鍵を握っていることになる。すなわち、交通事故による衝撃あるいは火災に対しても輸送容器の閉じ込め機能が損なわれないことが保証されなければならない。当研究室では、輸送容器の構造及び熱解析を行う計算コードの整備を実施してきた。現在、放射性物質輸送容器の熱・構造解析ハンドブックを作成している。

再処理施設は核燃料物質のデパートである。さまざまな種類・形態の核燃料が取扱われる。しかし、放射性物質を取扱っていることを除けば、通常の化学工場と同じと言って差し支えないであろう。化学工場における典型的な事故は火災と爆発である。これらの事故により公衆に被害が及ばないことが最終的に重要である。再処理施設には原子炉のような格納容器は存在しない。最終的な閉じ込め系としてその代わりに果たすのが、給排気系に設置される高性能エアフィルタ（HEPA）である。たとえ事故がおきても、HEPAが正常に働けば、ここで除染されて公衆の被害は少ない。火災によるHEPAの目詰まりについての試験研究は既に終えている。核燃料を閉じ込めている部屋（セル）の換気系がどの程度の急激燃焼に対して性能を維持できるかについての試験研究を当研究室では現在実施している。

再処理施設などの核燃料取扱い施設において、通常の化学工場で問題になる火災・爆発以外に安全上考慮すべき事故として、放射線漏れと臨界がある。中性子及び γ 線の遮蔽に関しては、計算コード及びデータライブラリの開発・整備を行ってきた。RADHEAT-V4コードシステムを用いて、JENDL-3に基づく遮蔽計算用標準定数ライブラリを作成し、その検証計算を実施した。簡易評価法の開発として、二重層ビルドアップ係数

の検討を続けると共に、ダクトストリーミング解析コード及びスカイシャイン解析コードを整備した。線源評価では、 (α, n) 反応に関するデータを整理し、データベースを作成した。

臨界安全に関しては、「臨界安全ハンドブック」をよりよいものにするための検討作業を続けている。評価対象をモデル化する際に参考となる、燃料の不均一分布、非均質性、燃焼度、複雑形状の問題や反射体の取扱いなどの問題の検討を進めるとともに、想定臨界事故規模の大きさについて検討している。また、より精度の高い計算をめざして、JACSコードシステムを中心とした計算コード及びライブラリの整備も続けている。

2. トピックス

(1) ガンマ線照射による水素発生量の液深依存性¹⁾

硝酸溶液に γ 線を照射すると水素が発生し、水素爆発の原因になりうる。水素発生量の液面高さ依存性について、水素分子の拡散モデルによる計算を行った。モデルでは、水素分子の生成は2つのHラジカルの反応、消滅は水素分子とOHラジカルとの反応で、いずれも場所に依存しないものとしている。計算は測定をよく再現した。

(2) 臨界安全評価上で均質と見なせる燃料粒径²⁾

球状燃料と軽水とからなる立方体セルの3次元無限配列は、燃料粒径がどれほど小さければ反応度的に均質と見なせるか? — このようなことが、粉末燃料を取扱う施設の臨界安全評価では問題となりうる。低濃縮ウラン燃料の微小燃料では、非均質燃料の反応度上昇は共鳴を逃れる確率 p の増大が支配的要因となり、均質と見なせるためには0.1mm程度以下が要求されるとの計算結果が得られた。

3. 謝辞

上に述べた研究室活動の一部は、各種の委員会活動等を通じて全国の炉物理研究者に支えられたものです。この場を借りて、お手伝い頂いた研究者の皆様に感謝致します。

参考文献

- 1) 内藤他、日本原子力学会1990年秋の大会、L37.
- 2) 奥野他、日本原子力学会1991年年会、A17.

(奥野 浩 記)

*1991年1月16日現在の主な専門分野と研究室構成員は以下の通り。

[総括] 内藤倣孝; [事故評価] 野村靖、阿部仁; [輸送容器] 幾島毅; [閉じ込め] 西尾軍治、小池忠雄、高田準一、鈴木元衛、塚本導雄、櫻下浩二; [遮蔽] 片倉純一(核データセンター兼務)、高野誠、坂本幸夫(原子力技術部試験課兼務)、増川史洋; [臨界安全] 小室雄一、奥野浩.

〈研究室だより 8.〉

日本原子力研究所・原子炉工学部 核融合炉物理研究室

核融合炉ブランケットの実験的研究は、FCAに付属したD-T中性子源を用いて、昭和48年秋より世界に先駆けて開始された。その後、本格的な核融合炉中性子工学に係わる研究を推進するため、強力なD-T中性子源FNS (Fusion Neutronics Source: 核融合炉物理用中性子源) の建設が52年度より3ケ年の予算で認められた。本研究室はFNSの建設計画に呼応して、55年6月に発足した。研究員4名で発足した研究室も、徐々に人が増え、一時は研究員8名、兼務2名、外来研究員2名、ドイツからの派遣研究員1名、日米協力による短期派遣研究員1~3名となったが、現在は移動等により研究員は6名となってしまった。

中心装置であるFNSは400keV重陽子加速器で、2つのデュオプラズマトロンイオン源、2本のビームライン、LLNL型回転ターゲット、水冷及び空冷固定ターゲット、並びに、トリチウム除去装置等の関連設備で構成されている。これらの設備は炉物理施設管理室FNS係により運転・保守されている。

研究目的は核融合炉における中性子に起因する諸現象を実験的に研究し、炉設計や開発段階での特性試験に必要な基礎データを供給することであり、大テーマ「核融合炉の炉物理の研究」の下に、次の3つの小テーマで研究がすすめられている。

1. ブランケットベンチマーク実験

核融合炉の核設計で用いられている計算手法(核データ及び計算法)の妥当性を、実験的に検証することを目的としており、単純組成、単純形状の実験体系で各種の炉物理量を測定し、ベンチマークデータを取得するとともにその実験解析を行う。

主な成果の第1は「測定技術の開発及び確立」である。トリチウム生成率の測定では、 Li_2O ペレット及びLiFのTLDを用いた新しい手法を開発した。また、高感度でかつオンラインで測定できるLiガラスシンチレータ及びNE213スペクトロメータを用いた測定法を確立した。各種反応率(核分裂率、放射化率等)に加えて、ガンマ線核発熱率の測定が最近可能となった。中性子飛行時間(TOF)法では真の中性子角度束スペクトルをエネルギー下限50keVまで一度に測定できる技術を確立した。

主な成果の第2は「ベンチマークデータの蓄積」である。実験は各種炉物理量を測定する積分実験とTOF実験の2つに分けられる。既に終了した実験体系は、積分実験では(1) Li_2O 、(2) $\text{Li}_2\text{O}-\text{C}$ 、(3)黒鉛(C)、(4)Beサンドイッチ Li_2O 、(5)ベリリウム(Be)、(6)鉄(Fe)、(7)コンクリートであり、TOF実験では(1) Li_2O 、(2)Li、(3)Be、(4)黒鉛、(5)Fe、(6)Pb、(7)液化窒素、(8)液化酸素である。

以上のベンチマーク実験結果はJENDL-3の公開に至るまでの評価・整備の段階で積極的に寄与したばかりでなく、公開後の積分テストに大きな役割を果たした。また、国際協力ではNEACRPトリチウム測定法国際比較のホスト役を引き受けており、IAEA活動ではベンチマーク計算への参加及び実験データの提供を行った。

2. ブランケット炉工学系実験

本テーマはFNSを用いた日米協力研究の受皿として設けられるもので、核融合炉の核設計精度の確認を主な目的としている。1983-84年のPhase-I実験では、第2と第1ターゲット室の間の壁に設けられた貫通孔に Li_2O 体系を設置し、実験手法の確立を図るとともに、第1壁やBe中性子増倍材のトリチウム生成率に与える効果を測定した。

1985年からはPhase-IIとして、 Li_2CO_3 ブロックによる閉鎖形状で入射スペクトルの模擬し、テスト領域に Li_2O を主体としてブランケット模擬体系を設置した実験を開始した。 Li_2O だけの規準系実験に加えて、Be中性子増倍層、Be反射、Be混合非均質、水冷却配管の各効果を測定する実験を実施した。これらの一連の実験を通し、トリチウム増殖比を局所的には10%以内、全体として5%以内の予測精度で設計できる目途が得られた。この日米協力では両国で独自の方法で測定したトリチウム生成率は互いに良く一致した。原研のNE213スペクトロメータとANLで開発した比例計数管の併用により15MeVから数keVの中性子エネルギースペクトルを測定した。また、位置とともに急激に変化するトリチウム生成率を領域で積分したマクロな量として精度良く測定する手法を開発するなど多くの成果をあげた。

1989年からはPhase-III実験として、入射中性子角度分布を模擬するために新たに開発した線状線源を用い、トロイダル形状を模擬した実験が開始された。1990年10月には2度目の3年間の日米協力の延長を認める協定が調印された。長い日米協力の歴史の中で日本の施設を使用し、日本の主導のもとに推進して成功している数少ない例である。

3. 誘導放射能等の研究

本テーマの目的は核融合炉の開発に必要なDT及びDD中性子に関連した基礎データの拡充にある。13.5~15MeVの中性子放射化断面積を同一手法により系統的な測定を約200反応について終了した。これらのデータをJENDL-3の評価の過程で大いに参考にされたばかりでなく、ドジメトリファイルの整備にも役立てられている。最近、DD中性子を用いた放射化断面積及び長寿命の放射化断面積の測定が開始されている。

誘導放射能ベンチマーク実験として、一連の構造材を対象とした、生成ガンマ線エネルギースペクトルの時間変化を測定し、崩壊熱や線量率分布を計算するコードシステムを評価するデータを取得した。サンプルの温度上昇を直接測定することにより核発熱率を評価する実験手法が確立し、系統的な測定に着手した。

JENDL-3の積分テストがほぼ一段落し、小テーマ「ブランケットベンチマーク実験」は平成2年度で終了し、3年度からは具体的となってきた次期装置に関連し、「次期装置遮蔽の研究」を開始する。これに伴ない、他の小テーマも「核融合炉核特性の研究」、「高エネルギー中性子利用の研究」と名称を変更した研究の枠を広げる予定である。強力な中性子源FNSの出現により、阪大OKTAVIANでの成果と共に、日本の核融合炉中性子工学の研究は常に世界をリードして来た。今後も、この状態を継続するため、FNSの増力・改造を計画している。

(前川 洋 記)

〈事務局だより〉

☆ 第22回炉物理夏期セミナー（サンピア日立）の会計報告

収入 (円)	1,333,030	支出 (円)	1,333,030
参加費	253,000	テキスト印刷費	199,820
正会員 34名×4,000		講師謝礼等(12名)	136,600
学生会員 12名×2,500		会場費	135,487
3名×1,500		懇親会費	208,948
非会員 12名×6,000		宿泊費及び食費	632,079
学生非会員1名×3,000		写真代	8,240
テキスト代	72,000	雑費	7,210
広告料 13社	129,485	来年度繰越金	4,646
懇親会費	178,500		
宿泊費及び食費	581,300		
学会からの補助	100,000		
前年度繰越金	18,487		
利子	258		

開催地が東海村の北隣りに位置するサンピア日立という厚生施設で、有名なりゾートでないため、参加者の数を心配したが、皆様の御協力により予定の50名を越えて67名という参加を頂いた。講師には旅費を支給しない原則とのことで、御迷惑を考慮して主に日立と原研から講師をお願いした。会計は黒字を見る筈が、特別地方消費税とかのホテルなみの税金を見込んでいなかったものを収めたので、収支とんとんとなった。

☆ 次期（平成3年度）の幹事機関は東京工業大学にお願いすることになった。

☆ 平成2年度炉物理連絡会運営委員

委員長	藤田薫顕（京大炉）	副委員長	中沢正治（東大・工）
企画	土橋敬一郎（原研）		中川正幸（原研）
総務	井口哲夫（東大・工）		宇根崎博信（京大炉）
編集	錦織毅夫（阪大・工）		山根義宏（名大・工）

《編集後記》

幹事機関を引受け、夏期セミナーの開催と会報の編集を担当した。改めて会報のバックナンバーを読み直してみると、毎号「核データ・炉物理」合同会合講演要旨が大きなスペースを占めているのが目立った。同じ内容が原研核データセンターによる核データニュースに掲載されて、より早くより多く配付されているので、重複を避けて、ご覧のようにいろいろの記事を盛り込んだ。執筆者の方々には多大の御尽力を頂いたおかげで、会員の皆様には楽しんで読んで頂けると期待している。

（土橋敬一郎 記）

「炉物理連絡会」平成2年度中間収支報告

平成2年4月1日～3年1月31日

(単位: 円)

収 入		備 考
前年度繰越金	1,179,535	(含 古橋基金 255,642円)
会 費	204,000	
セミナーテキスト残部売上	39,750	第17回 2,000円×1冊 第21回 2,000円×4冊 第22回 2,000円×14冊 送料1,750円(38,000円は古橋基金へ)
第22回夏期セミナー残金	4,646	
合 計	1,427,931	

支 出		備 考
会 議 費	15,965	第46回会員総会
通 信 費	53,942	「会報」「ニュース」等, 発送費
「会報」印刷費	151,410	No. 39 250部
「ニュース」印刷費	8,487	No. 13 250部
雑 印 刷 費	5,082	「案内」等印刷、コピー代
第22回夏期セミナー助成金	100,000	
前年度夏期セミナー残金返戻金	18,487	
合 計	353,373	

残高 1,074,558円(含 古橋基金 293,642円)

(古橋基金収支報告)

(昭52.11.1～平3.1.16)

収 入		支 出	
52.11.1 (古橋基金)	500,000	「夏の学校」テキスト補助 (第11, 12回)	450,000
(第13～19回)			
「夏の学校」立替金戻入	273,273	「夏の学校」補助 (第13, 15回)	117,800
「夏期セミナー」テキスト売上	54,000		
第20回夏期セミナーテキスト売上げ	20,500		
第21回 //	31,500	第20回「夏期セミナー」補助	45,831
第22回 //	28,000		
合 計	907,273	合 計	613,631

残高 293,642円

「炉物理夏期セミナー」のお知らせ

以下の要領で第23回炉物理夏期セミナーを開催すべく準備しております。ご意見、ご希望がございましたらお知らせ下さい。

基調テーマ：「放射性廃棄物を無くすこと」及び「安全な原子力エネルギーシステムの構築」に炉物理はどれだけ貢献できるか？

個別大テーマ：1. 消滅処理炉

2. 廃棄物処理まで含めた燃料サイクルと炉型戦略

3. 小型超安全炉

4. 高速炉の安全性

なお各大テーマの後に飛び入りコメントを入れる予定です。

日程：平成3年7月21日(日)～24日(水)：3泊4日

会場：菅記念研修館(河口湖)

連絡・問い合わせ先：東工大・原子炉研(03-3726-1111)

関本(内線：3066)、井頭(内線：3378, 3297)、小原(内線：4170)

「国際専門家会議」のお知らせ

以下の要領で国際専門家会議の開催が準備されております。ご質問、ご希望がございましたらお知らせ下さい。

タイトル：美しい環境を守り安全な生活を保障するための小型原子炉のポテンシャルに関する
国際専門家会議(International Specialist Meeting on Potential of Small Nuclear
Reactors for Future Clean and Safe Energy Sources)

日程：1991年10月23日(水)～25日(金)

場所：東工大・百年記念館

問い合わせ先：東工大・原子炉研：関本(03-3726-1111, 内線3066)

「第47回会員総会」のお知らせ

来る「1991年年会」の折、次の通り第47回会員総会を開催いたしますので、多数ご参加願います。

日時： 3月29日(金) 12:00～13:00

場所： 「1991年年会」A会場 (於：近畿大学21号館)

「炉物理連絡会」会員名簿

(計 216名)
(1991年1月21日現在, ○印は新入会員)

北海道大学 (5名)
秋本 正
小川 雄一
鬼柳 善明
成田 正邦
松本 高明

北海道自動車短大 (1名)
小澤 保知

弘前大 (1名)
葛西 峯夫

東北大 (9名)
石川 敏夫
岩崎 智彦
北村 正晴
楳山 一典
○須山 賢也
○辻本 和文
馬場 平川直弘
本多 毅

埼玉工大 (1名)
関口 晃

東大 (5名)
○井口 哲夫
岡 芳明
小佐古 敏荘
近藤 駿介
中沢 正治

東工大名誉教授 (1名)
武田 栄一

東工大 (6名)
井頭 政之
○小原 日出男
○清水 彰直
○山岬 裕之

東海大 (9名)
安 成弘
石田 正次
清瀬 量平
黒田 義輝
阪元 重康
佐々 敏信
砂子 克彦
永瀬 慎一郎
中土井 昭三

武蔵工大 (4名)
相沢 乙彦

○長尾 美春
松本 哲男
○向井 徹
早大 (1名)
並木 美喜雄

第一工大 (1名)
佐久間 雄平

名大 (10名)
居島 一仁
伊藤 只行
加藤 敏郎
○スダルト
仁科 浩二郎
三澤 毅
本山 聡
安井 肇
山根 義宏
○吉岡 博貴

中部大 (1名)
西原 宏

岐阜大 (1名)
岸田 邦治

京大 (9名)
菊池 裕彦
木村 逸郎
小林 啓祐
小坂 本修一
桜井 良憲
秦 和夫
外池 幸太郎
森島 信弘
山中 章広

京大原研 (1名)
若林 二郎

京大炉 (15名)
市原 千博
宇津呂 雄彦
宇根崎 博信
海老沢 徹治
神田 啓治平
小林 捷平
小林 圭二
古林 圭
代谷 誠治
中込 良広
西原 英晃
林 脩平
林 正俊
藤田 薫司
米田 憲

阪大 (4名)
住田 健二
高橋 亮人
高竹 敏一
錦織 毅夫

近畿大 (7名)
大沢 孝明
小川 喜弘
柴田 俊一
辻 良夫
橋本 憲吾
堀部 治
三木 良太

帝国女子短大 (1名)
堀江 淳之助

神船大 (1名)
中島 雅

吉備国際大 (1名)
関谷 全

九大 (4名)
石橋 健二
神田 幸則
工藤 和彦
中島 秀紀

東和大 (1名)
片瀬 彬

九州帝京短大 (1名)
大田 正男

原研 (43名)
秋濃 藤義
朝岡 卓見
飯島 進雄
石黒 幸雄
伊勢 武治
板垣 正文
伊藤 大郎
大井川 宏之
大杉 俊隆
大部 嶋成晃
岡 成晃
金子 義彦
神野 郁夫
菊池 康之
○久語 輝彦
黒沢 一男
五藤 頼博
後小 藤岩夫
近藤 育朗
桜井 淳

笹本 宣雄
新藤 隆一
杉 暉夫
関 泰泰
高野 秀機
田次 邑吉
田中 俊一
土橋 敬一郎
中川 正幸
中島 宏勝
中野 正文
中原 康明
平岡 徹
前川 洋
松浦 祥次郎
向山 武彦
○村田 貴正
森 野武彦
山根 剛幸
吉田 弘幸

動燃 (4名)
飯島 一敬
白方 敬章
古橋 晃
望月 恵一

原子力委員会 (1名)
大山 彰

原子力安全技術センター (1名)
天野 文雄

船研 (1名)
伊従 功

電総研 (1名)
工藤 勝久

電中研 (1名)
松村 哲夫

原工試 (3名)
駒田 正興
芳賀 暢
平田 昭

エネ総研 (2名)
大塚 益比古
松井 一秋

原子力データセンター (2名)
藤村 統一郎
能沢 正雄

高エネ研 (1名)
山口 誠哉

高輝度光科学研究センター (1名)
中村 知夫

電源開発 (1名)
木下 豊

原電 (3名)
武田 充司
立花 昭
立松 篤

中部電力 (2名)
金井 英次
村田 尚之

東京電力 (3名)
尾野 昌之
渡邊 史紀
巻上 毅司

石川島播磨 (1名)
倉重 哲雄

川崎重工 (1名)
田中 義久

原燃工 (2名)
青木 一彦
川本 忠男

コピュ総合研 (1名)
間庭 正樹

CSK (1名)
田中 健一

清水建設 (1名)
大石 晃嗣

情報数理研 (1名)
磯野 彬

住原工 (1名)
松延 広幸

CRC (1名)
角谷 浩享

東芝 (13名)
青木 克忠
猪野 正典
植田 精
亀井 孝信
黒沢 文夫
小林 康弘

小林 裕司
野本 昭二
平野 靖
深井 佑造
松村 和彦
水田 宏
門田 一雄

東芝プラント建設 (1名)
山中 武

ナサック (1名)
梅田 健太郎

日本原燃サービス (1名)
須田 憲司

日本総合研究所 (1名)
桂木 学

日立 (5名)
大西 忠博
三田 敏男
瑞慶覧 篤
丸山 博見
三木 一克

日立造船 (1名)
山田 毅

BMR運転訓練センター (1名)
野村 孜

富士電機 (1名)
中村 久

MAPI (6名)
大谷 晋司
片岡 巖
駒野 康男
千田 康英
田原 義寿
弘田 実弥

三菱電機 (2名)
後藤 豊一
路次 安憲

ANL (1名)
丁 政晴

その他 (1名)
小机 わかえ

炉物理連絡会の概要

(1968年4月)

(1989年10月 第44回総会 一部改定)

1. **趣旨** 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1回連絡会報として、『炉物理の研究』(B5判オフセット印刷)を編集刊行する。『炉物理の研究』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。(別途に(季刊)『炉物理連絡会ニュース』を年間2回発行)また、春秋に総会を開催し、「炉物理夏期セミナー」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 " 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** 委員長1名・副委員長1名・委員若干名により組織される運営委員会が行う。

(任期1年)

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。