

話 題 (Ⅲ)

原研リニアック 33 年の航跡

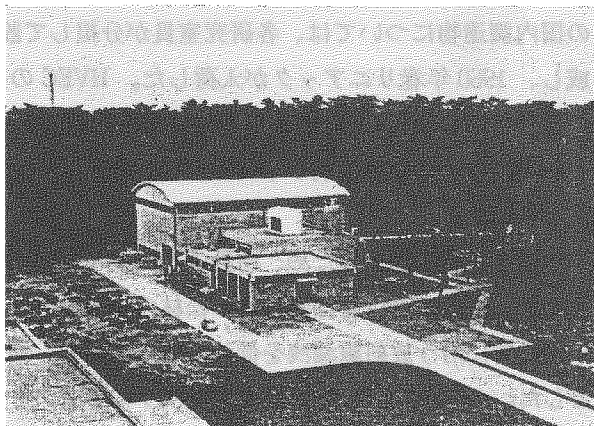
— 中性子実験を通して —

日本原子力研究所原子炉工学部

大久保 牧夫

1. はじめに

中性子核データの測定の一翼を担っていた原研リニアックが 1993 年末に閉鎖、1994 年 3 月までに解体撤去された。原研の初代リニアックは原研創立間もない 1957 年に放射線化学および原子核研究の目的でアメリカに発注され、1960 年末に完成した。建家は JRR-1 とコバルト照射室の間の松林の中にある (第 1 図)。電子エネルギーは 20 MeV、当時の日本国内では最新鋭の性能であった。初代リニアックはパルス中性子源として飛行時間法による低速中性子断面積の測定研究、制動放射線による放射性核種の生成とその核構造の研究、共同利用等に多大な貢献をした。その後、リニアックの老朽化、出力不足のため増力計画が検討された。増力予算が認可された 1970 年から増力改修工事が始まり、室員総出で設計・製作を行い 1972 年に増力 120 MeV リニアックが完成した。中性子断面積の測定、短寿命核種の研究が本格的に進められた。それとともにリニアックの性能の向上に努め、最終的には世界的にも遜色のない大電流ビームが得られたのが特徴であり、また加速最高エネルギーは 195 MeV に達した。中性子断面積の研究は高速増殖炉の開発に必要なウランや核分裂生成物核種の測定を中心に 1987 年まで続いた。1987 年頃、先端的研究テーマが取り入れられ、中性子の実験に従事した研究者も各分野に移動した。その結果、自由電子レーザー、大型放射光、陽電子研究等のため新たなグループが生まれ、リ



第 1 図 リニアック建屋全景 (1962 年)

リアックには小型電子蓄積リング(JSR)はじめ、種々な装置が付け加わった。

しかし運転員の減少と経年劣化、及び建家を陽子加速器組立ホールとする計画のため、原研リアックは1993年9月をもって運転を終了し、33年間の歴史を閉じることが決定した。その間リアックはエレクトロニクスで制御出来る強力放射線源として、原子炉が中心の原研の中で特異な存在として原子力開発に貢献した。リアックの建設や運転利用等で蓄積された技術は、大型放射光用リアックや自由電子レーザー用超電導リアックの製作、大強度陽子リアックの建設やエネルギー選択型中性子源用加速器の設計に活用されており、原子力分野への加速器利用の原動力となっている。

原研リアックの33年に亘る研究活動の総括として、私を含む4人で「原研リアック33年史(建設・研究の興隆・終焉)」なる冊子をJAERI-Mレポートとして刊行した(1994年1月)[1]。筆者は初代リアック時代から中性子飛行時間法による断面積測定に携わったので、中性子核データ測定を中心に、リアックの33年の活動の概要を述べたい。従って記述は当然公平さを欠くのであるがご容赦願いたい。

2. 初代20MeVリアック [2]

初代の20 MeV リアックは原研創立間もない1957年9月、放射線化学研究用としてアメリカ、High Voltage Engineering Co. (HVEC) に発注された。最高加速エネルギーは、当時の嵯峨根副理事長の示唆により、電子線照射以外に原子核実験にも使用できるように20 MeV とされた。1960年当時、リアックの国産技術は未熟で加速エネルギーが数 MeV 程度であった。マイクロ波分光学の平川浩正氏(のち東大教授、重力波研究、故人)がリアック建設室のリーダーとして東大からスカウトされ、1959年にリアックの研究のためにスタンフォード大学へ派遣された。当建設室では受け入れ準備として、リアック建家、遮蔽ブロック、ビーム輸送系真空ダクト、偏向収束電磁石等の国内調達物については、各研究室員が分担して設計し製作した。1959年に建家が完成し、1960年春リアックが入荷した。HVECの技術者 Ervin.D.Gant の下に室員総出で据付け調整を行い、1960年12月に完成式を行った。1961年1月から各種特性測定と利用のための実験を行い、1961年4月から中性子実験、 γ 線実験および照射利用に供せられた。

中性子断面積測定のため、中性子ターゲットから南方に向けて中性子飛行管3本を設置した。中央の飛行管は建家外の松林の中の50 m 中性子測定室まで達していた。中性子飛行管に沿う放射線漏洩を低減するのが難しく、結果として周辺の松林を立入禁止区域とした。1961年から1969年まで初代リアックを用いて、飛行時間法による中性子断面積の測定、光核反応によるベータ γ 核分光、照射利用など多くの研究が行

われた。

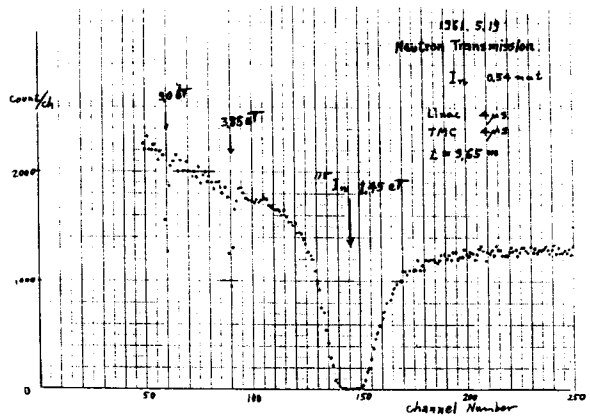
当時の研究室員は、平川浩正、河原崎雄紀、作田孝、田村務、井上堅司、大久保牧夫、浅見明(のち高エネルギー研教授)、栗田庸幸、金子記一、黒柳登喜大(のち九大教授)、信坂幸夫、益子勝夫、中島豊、秋山信義、高橋興起の諸氏であり、また日本電気の宮崎清俊氏が非常勤で室長を務められた。リニアックの運転は運転グループ(益子、信坂、秋山、熊原肇)が担当し、主なる研究は飛行時間法による中性子断面積の測定研究(浅見、河原崎、大久保、中島、栗田、作田、高橋)、および放射性核種の生成による原子核構造の研究(黒柳、田村、金子)であった。所内外から照射依頼、共同実験も数多くあった。1961年に平川氏が東大に戻られ、1962年に竹腰秀邦氏(のち京大教授)がリニアック管理室長に就任された。1964年に更田豊治郎氏(のち原研副理事長)が中性子グループに入り、また鹿園直基(のち原研理事)、松本純一郎、荏司時雄の諸氏がリニアックでの研究に参加した。1968年に黒柳氏が九大に転出し、1969年に水本元治、桜井淳の両氏が配属になった。また1968年から研究室名はリニアック管理室から核物理第2研究室に改称された。1960年代、原研核物理第1研究室ではバンデグラフの高速中性子実験、また原子炉ではクリスタル・モノクロメータやチョッパによる中性子実験が行われていた。百田光雄氏が物理部長として在任しておられた。

3. 初代リニアックを用いた中性子飛行時間法の実験

1961年春から初代リニアックを用いて、中性子飛行時間法の実験、放射性核種の研究、共同利用による照射実験等が開始された。以下中性子飛行時間法の実験の概要である。

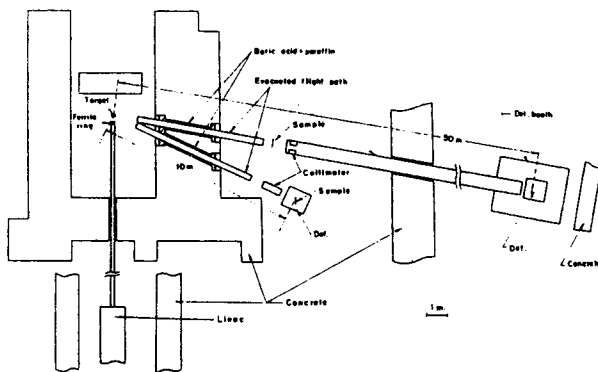
中性子断面積データは、1960年当時BNL-325などに集積されていたが、まだ測定データは量質共に不足していた。国内でも核データ収集評価グループの揺籃期であった。リニアックのパルス中性子飛行時間法(TOF)は、エネルギーをeV領域からMeV領域まで広範囲に一挙に測定することが可能で、また精度、効率もよいので、高速炉のための核データ測定はリニアックの独断場に近かった。中性子測定の準備を進め、1961年に中性子飛行時間分析装置を組立てた。パルス中性子は水冷の鉛に電子ビームを当てることにより発生させる。中性子飛行距離は当初10 mであった。途中の飛行路は30 cm径のアルミニウム・パイプの飛行管を設け、排気した。中性子検出器は当初BF₃カウンターであり、時間分析器は当時最新のトランジスター化されたTMC-256チャンネル、最小チャンネル幅125 nsのものを用いた。データ出力は紙テープに印字したもので、実験毎にグラフ用紙に256点を鉛筆でプロットしたものである。試行錯誤を繰り返した後、1961年春に10 m飛行管でインジウム箔の1.4eVの中性子共鳴の透過率

の妥当な値を得たのが日本最初の飛行時間法による中性子共鳴単位の測定となった(第2図)。ここで開発した方式がその後の検出器/シールドの基本になった。中性子シールドは石油缶でパラフィンを溶かし、ホーサンとこねて成形した。当時の電子回路は真空管式の増幅器、シングル・チャンネル・アナライザー等であったが、電子回路の不安定性があり、正確な透過率データを得るのは苦勞であ



第2図 最初の透過率測定 In 1.4 eV (1961年)

った。Inのほか、Au、Ag、W、Pd、等の透過率を測定した。不思議であるが1961年頃の我々のTOF実験はほとんど論文になっていない。外国の論文を読み過ぎ落差を強く感じていたためかもしれない。当時は、Columbia、BNL、RPI、NBS、Harwell、Saclay、ORNLなどから、高分解能の核データが続々発表されていた。1962年2月に50 m中性子測定室が南側の林間に完成した(第3図)。直径60 cmのアルミ飛行管のなかを30 cm x 30 cmの中性子束が通る。1963年から65年にかけて種々の機器が揃って測定が本格化した。1964年からLi6ガラス・シンチレータが稼働し、従来のBF₃カウンタより検出効率が高く、データ収集の能率が向上した。また1965年よりTMC-4096チャンネル時間分析器が導入され、それと結合した自動試料交換器を使用し自動測定が可能となった。また電子回路のトランジスター化により、信頼性が向上した。1964年にORNL、RPIでTOFの修行を積まれた更田氏が中性子グループに



第3図 初代リニアック中性子飛行時間測定装置

入られてからデータ処理はコンピュータを使った方式に一変し、世界の流れに追いつく契機になった。測定データを磁気テープに記録し、計算センタの大型計算機(IBM-7044)で処理するようになった。また試料厚さと吸収曲線の面積、形状から、共鳴パラメータを得る計算プログラムがORNLから導入され、共鳴解析が進められた。パンチ・カ

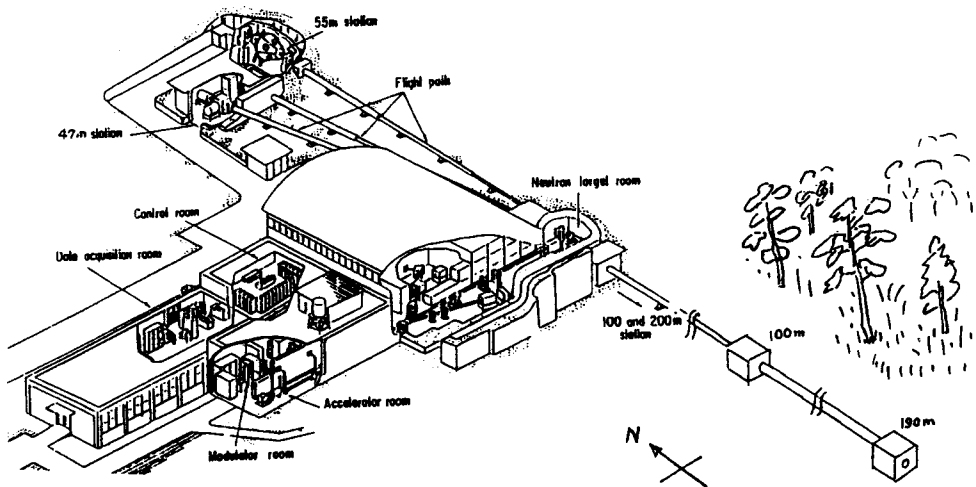
ード入力であった。最初に共鳴パラメータの解析をしたのは、Co-59 の 132 eV にある大きい共鳴である。透過率の共鳴吸収面積から共鳴パラメータを得た。Co のほか共鳴解析を行ったものは Cd、Sb、Re 等であった。透過率測定のほか、中性子共鳴捕獲ガンマ線スペクトルの NaI シンチレータによる測定が行われた。

1960 年代後半になると初代リニアックの出力不足及び老朽化が目立ってきた。初代リニアックは 1969 年 2 月まで使用された。初代リニアックは、次期の増力リニアックのプロトタイプ機としての役割を果たした。

4. 増力120MeVリニアック [3]

初代リニアック完成後、リニアック技術はめざましく進歩した。1966 年にはスタンフォード大学の 20 GeV のリニアック (SLAC) が完成したのをはじめ、世界各国の原子力関係の研究所では新鋭リニアックを建設し中性子物理研究を精力的に進めた。これらは初代リニアックの 10 ~ 100 倍の中性子を発生した。初代リニアックでは数 10 eV 以下の中性子全断面積の測定が限界で、核データとして必要な部分断面積 (散乱、捕獲、分裂) の測定は困難であった。中性子共鳴は、また、原子核の高い励起状態のカオス的性質を詳細に分析できる優れた方法なので、より高分解能データが求められた。このためリニアックはパルス幅の狭い、尖頭値の高い、パルス繰りの速い電子ビームを発生する必要があった。

1970 年から 71 年にかけて、本体関係 3 億円、建家関係 0.75 億円の増力予算が認められた。しかし通常の一括発注では、中性子実験を世界的水準で行う性能を持つリニアックは予算の枠を超えていた。そこで設計と製作は研究室の責任で行うという方針で各機器



第 4 図 原研 120 MeV リニアック鳥瞰図

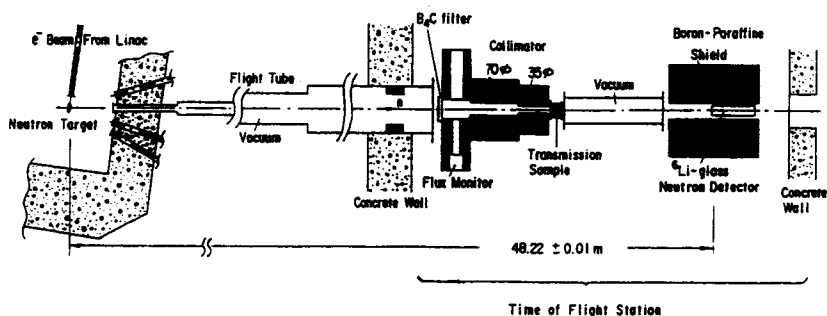
を分割発注した。このような方式は、原研では極めて異例なことであったが、竹腰室長以下研究室の全員がこの仕事を分担して対処した。室員の協力と努力の末、1972年4月からリニアックの総合試験を行い同年6月に150 MeV、250 mAの電子ビームを得ることに成功した。リニアックの完成に前後して、中性子発生用ターゲット、5本の中性子飛行管、データ処理用計算機(16 kw)、RI 製造用ターゲットおよび気送管装置等の実験設備も完成した。全体の鳥瞰図を第4図に示す。

増力リニアックは1972年から21年間稼働し、中性子断面積の測定が主要な使用目的であったが、短寿命核種の研究、炉体系の中性子スペクトル、飛行時間法による中性子回折、中性子導管の開発に利用された。1986年ごろから中性子測定がスローダウンし、代わりに自由電子レーザーの実験、電子蓄積リング、低速陽電子ビーム実験、中性子共鳴ラジオグラフィなど多彩な研究が進められた。これらと平行してリニアック本来の性能向上や、利用者側のニーズに合わせた種々の技術開発が進められた。これらは大電力バンチャ、マイクロ波窓、バリウム含浸クライストロン・カソード、600 PPS への改造、短パルス電子銃、新型加速管等の開発である。原研リニアックは偶然ではあるが周波数特性の異なる加速管を組み合わせたため、大電流ビーム加速が可能であった。

5. 増力リニアックを用いた中性子断面積の測定

リニアック増力の主目的は高速炉設計のための基礎データとしての中性子断面積を測定し収集することであった。中性子断面積測定は1972年から1987年まで15年に亘り、増力当初は更田、浅見、大久保、中島、水本が当たったが、後期には大久保、中島、水本の3名が従事し、この間のリニアックのマシントイムの大半(1961年～1991年では65%)を使用した。軽い核からウランまでの広範囲の天然試料のほか、濃縮安定同位体の借用試料について中性子断面積を精度良く測定し、国際核データ測定活動に於けるJAERI LINACの地位を確かなものにした。

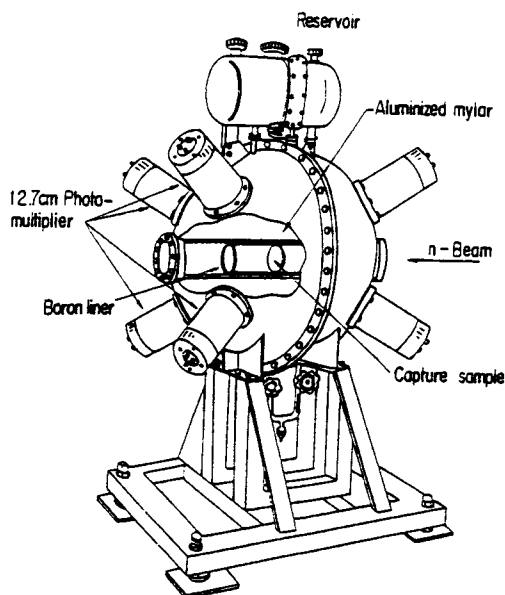
中性子全断面積測定のため200 m中性子飛行管・測定室(実距離190 m)を南方の松林の中に建設した。200 m測定室では中性子ビームは50 cm × 50 cmの太さ、中性子検出器はLi6ガラスシンチレータを束ねて使用した。40 m測定室では散乱断面積のほか全断面積を測定した(第5図)。中性子捕獲断面積測定のため大型液体シンチレータ・タンク(3900 l)を製作し55 m測定室に据付けた。1982年に500 lの新型タンクに更新された(第6図)。データ収集に新たにTOSBAC USC-3計算機(16 kw)、またデータ処理専用の富士通U-200計算機(16 kw)が加わった。実験データのプロット、また磁気テープに記録し計算センタの大型計算機での処理や断面積の導出、共鳴解析等を行った。これらデータ処理系を有効に動かすため、数々のハードウェアおよびソフトウ



第5図 中性子測定室における機器の配置

エアの開発が河原崎、荘司をはじめ室員の手で精力的に続けられた。リニアックでは各飛行管ごとに独立した測定系を形成しているため、同時に数系統の実験が可能であり、一つの試料の測定に費やす時間は数ヶ月ということが多々あった。第1表に各核種について測定された量、エネルギー範囲、共鳴の数、s波強度関数を示す。ここで解析した共鳴の数は論文になっているもので計2千数百本に及ぶ。

天然ウランについては約180本の共鳴の解析を行い、強度関数、平均準位間隔を得た。これは核データの分野に於ける日本製データ・セットとして採用された。核分裂生成物（FP）の中性子断面積、特に共鳴パラメータや keV 領域の捕獲断面積は1970年代当時はデータの精度は十分でなく、既存のデータ間の食い違いも顕著であった。原研リニアックでは、1976年からほぼ10年にわたり ORNL から借用した濃縮安定同位元素試料を用いて FP 核種の断面積データの精度向上に努めた（1976年から1988年までに30核種を借用し測定した）。原研で得られたデータは世界における FP 断面積の代表的なデータとして利用されている。またアイソトープごとに得られた中性子強度関数や平均共鳴幅、レベル密度等の系統的性質が明かとなり、測定の大変なデータの予測や評価核データファイルの作成にも貢献している。このほか、鉄フィルタード・ビ



第6図 500 L 液体シンチレータ捕獲ガンマ線検出器

ームを用いた全断面積の高精度の測定、中性子共鳴領域での多重散乱の測定とモンテカルロ・シミュレーションの比較、またマイクロな立場での中性子減速の測定など、多彩な測定・解析を行った。測定データの例として第7図にAg-107、Ag-109、Gd-155、Gd-157のkeV領域の平均中性子捕獲断面積を、第8図にCe-140、Ce-142の共鳴領域の中性子全断面積を示す。第1表に原研リニアックで測定した核種、量、エネルギー範囲、共鳴数、強度関数を示す。

6. おわりに

1972年の増力改修の後15年、核物理第2研究室中性子グループはリニアックの大半のマシントイムを費やし中性子測定を続けた。1986年に原子力長期計画の改訂があり、自由電子レーザーやシンクロトロン放射光の研究を進めるについて科技厅・企画室から打診があった。幾多の議論の末、当研究室は1987年から自由電子レーザーの研究に取り組むことになり、研究者が移動した。この時期に、このほか大型放射光、陽子リニアック、ESNITなどの計画が立ち上がった。リニアック建家には電子蓄積リング(JSR)、陽電子研究施設、入射用リニアック試験装置など持ち込まれ、新分野の研究が始まった。1991年3月に当研究室の中性子核物理のテーマを終了し、高速中性子測定は核データセンターに移行した。1993年3月に物理部は解体し、替わりに先端基礎研究センターが発足し、リニアックは原子炉工学部に移管された。放射能消滅を目指す陽子リニアックのための技術開発加速器(BTA)の組立場所として、リニアック建家を使用する所内の方針が定まり、リニアックは1993年9月に停止、一部を残して1994年4月に解体撤去作業が終了した。かくして上記の多采な研究を支えた原研リニアックの33年の歴史は閉じられた。

世界のあちこちで核データ測定に活躍した施設の閉鎖の話を聞く。それぞれ事情があるだろうが、栄枯盛衰、植物に例えれば花を咲かせて古株は枯れるのに似ている。古株の周りに新芽が出ていれば慶賀すべきことである。この30年間、中性子核データ活動は国際協力により測定、評価、データバンク構築など輝かしい歴史を築き、成熟したといえる。

私は比較的自由的な立場で、測定可能であり人のやらない核種を測定した。若くして携わった人達も停年に近い。リニアック運転・技術開発の親方的存在であった益子勝夫氏も1993年9月に停年、リニアック一代男と云うべき。白熱した議論を戦わせた研究者も年と共に他分野に移ったり消えたり、私自身も1987年から自由電子レーザー研究に身を置いている。

最後に中性子共鳴の面白さについて書き残しておきたい。中性子共鳴は複合核の高い

励起状態でありスピン・パリティ以外の量子数は保存されないであろう、との憶測が支配していた。隣合う共鳴間隔の分布は Wigner 分布に従う以外にスペクトルに規則性がある筈がないと考えられていた。中性子共鳴実験を進めながら、共鳴の配列に規則性が埋もれているらしい事実を見つけ、井出野一実氏と研究した。中性子共鳴は量子カオスの様だが部分結晶のような規則構造が埋まっているのである。中性子共鳴間隔のフーリエ周期分析をすると、核種を問わず 11 eV の整数倍または簡単な有理数倍が頻繁に現れる。これは GOE とは全く異質なものであり、単純な取扱いでは見失われる性質のものである。多くの実験事実が GOE と合うのは見掛け上の問題ではあるまいか。

私は規則構造に魅せられ青木が原に迷い込んだ様なもので、出られなくなって 20 数年を経た。面白いのである。原子・分子のスペクトロスコピーの歴史をみると、100 年以上前バルマー系列が発見(1885 年)されるまで、スペクトル線はほぼランダムに分布していると思われていた。また 50 年前には分子のバンド・スペクトルは全く手が付けられなかったが、現在はそれらを通して原子・分子は手に取るように理解されている。中性子共鳴も将来そうなるであろう。原子核のあらゆる詳細な情報を読み出す事が出来るかも。原研リニアック・核データ研究という大きな株の陰の下草のような研究であったが、中性子共鳴の規則構造は新しい量子科学の芽を含んでいると私は思っている。中性子共鳴の規則性の解読は暗号解読にも似て根気と才気と運の要る、しかも一生棒に振るかもしれないロマンに満ちた仕事である。基礎研究の醍醐味、興味ある人は微細共鳴の森の中に迷い込んで見ませんか？

参考文献

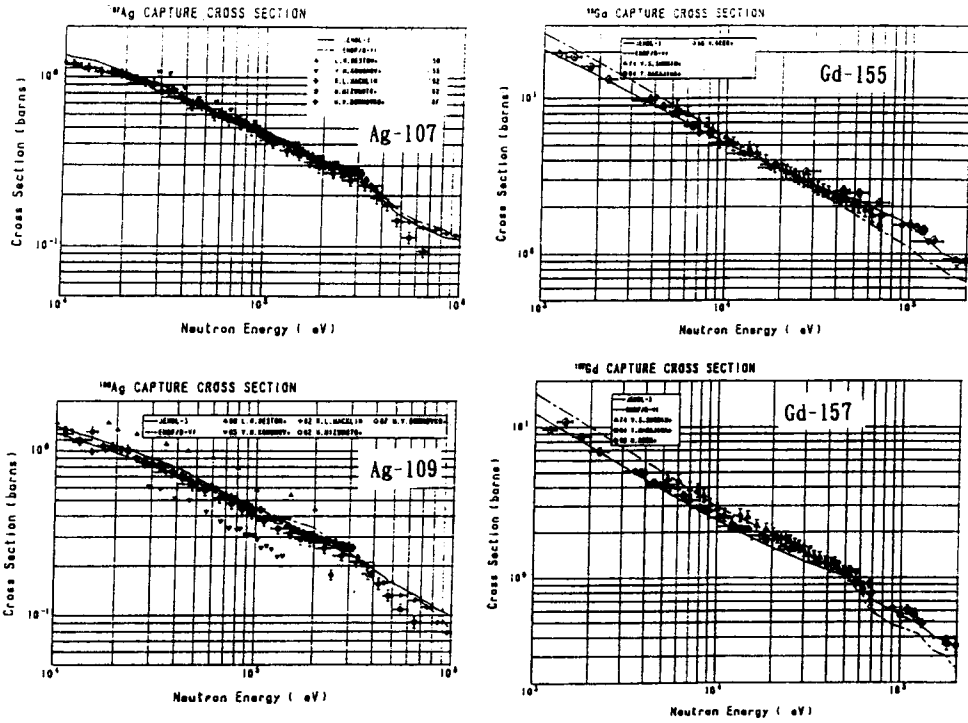
- [1] 大久保、水本、中島、益子(編) : JAERI-M 93-250 (1994)
- [2] 平川(編) : JAERI 6014 (1964)
- [3] 竹腰(編) : JAERI 1238 (1975)

第1表

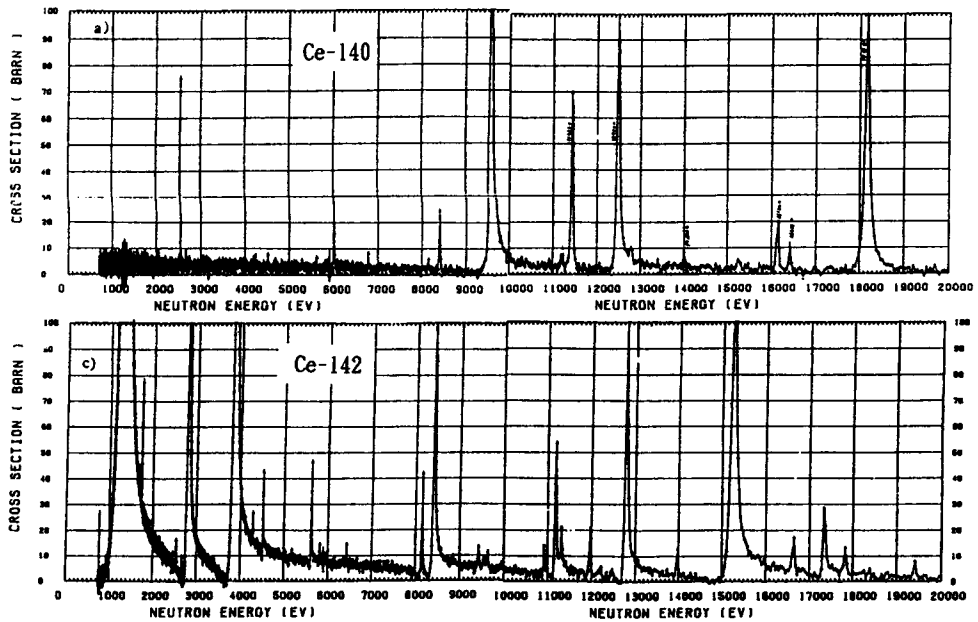
原研リニアックで測定・解析した核データ

核種	断面積		共鳴パラメータ	
	全断面積* σ_t	捕獲断面積* σ_c	共鳴数*(エネルギー領域) N	s波強度関数 $s_0 \times 10^{-4}$
O-16	1~930 keV			
Al-27	1~930 keV			
Ga-nat	0.1~90 keV		54 (0.1~10 keV)	1.2±0.2
Ge-nat	0.1~100 keV			
Br-79			156 (0~10 keV)	1.27±0.14
Br-81			100 (0~15 keV)	0.86±0.14
Rb-85			138 (0~18.5keV)	0.94±0.11
Rb-87			30 (0~48.5keV)	1.15±0.3
Ag-107		3~700 keV	76 (7keV)	0.43±0.05
Ag-109		3~700 keV	69 (7keV)	0.45±0.05
Sn-122			21 (30keV)	0.30±0.12
Sb-121	0.4~11 keV		188 (~5.3keV)	0.24±0.03
Sb-123	0.1~11 keV		202 (~5.3keV)	0.25±0.03
Cs-133			190 (~5.9keV)	
Ba-135		4~300 keV	50 (0.4~4.6keV)	1.33±0.22
Ba-137			38 (0.4~15 keV)	0.51±0.12
Ba-138			12 (0.6~63 keV)	
La-139			21 (2.5keV)	
Ce-140	0.7~180 keV		25 (50keV)	1.6±0.5
Ce-142	0.7~180 keV		50 (50keV)	2.7±0.6
Nd-143		5~100 keV		
Nd-145		5~100 keV		
Nd-146		5~400 keV		
Nd-148		5~400 keV		
Sm-147		3~300 keV	212 (2 keV)	4.8±0.5
Sm-149		3~300 keV	156 (0.52 keV)	4.6±0.6
Eu-151		3~100 keV		
Eu-153		3~100 keV		
Gd-155		1~230 keV		
Gd-157		1~230 keV		
Tb-159	0.05~10 keV		209 (1.2 keV)	1.55±0.15
Ta-181			600 (3.6 keV)	1.68
W-183	0.04~8.5 keV		64 (1.1 keV)	1.24±0.22
U-nat			180 (4.7 keV)	1.13±0.13

* 国際的なデータ・ベース (EXFOR) に収録



第7図 keV領域の平均中性子捕獲断面積 (Ag-107、Ag-109、Gd-155、Gd-157)



第8図 共鳴領域の中性子全断面積 (Ce-140、Ce-142)