

追 悼

森永晴彦先生を偲んで：今日に息づく森永流原子核研究

石原正泰^{*}

理化学研究所・仁科加速器研究センター

東京大学教授を経てミュンヘン工科大学教授を長らく務められた森永晴彦先生が昨年5月2日に95歳で逝去されました。その生涯は、持ち前の渾身の才気と鋭利な感性を閃かせつつ真理と正義を追求して止まなかった激しくも華麗な営みでした。世を魅了する斬新な着想を次々と打ち出して、勃興期・成長期の原子核研究の発展に並々ならぬ貢献を果たした一方で、後年には原子力や放射能とのより健全な共生を目指して、様々な方策を提唱されました。



森永先生の本格的な研究生生活は東京大学（東大）理学部卒業後の1946年から科学研究嘱託として属した同大の嵯峨根研究室時代に始まります。当時は、理化学研究所（理研）や大阪大学（阪大）のサイクロトロンが占領軍により海中投棄された悲劇に象徴されるように、日本における原子核研究の一切が禁止された時代でした。その中であって、若い学徒であった先生は、同分野の将来の再建に備えて、加速器の開発研究にひたむきな情熱を注がれました。

その間に指導にあたられた嵯峨根亮吉教授 [1]（長岡半太郎博士の五男）は、世に中性子が発見され、またサイクロトロンが発明された1932年の前年に、若年にして、理研仁科研究室の最初の研究室員に抜擢されて以来、創成期の原子核研究における日本のリーダーの一人として大活躍された方です。1933年からは理研併任のまま東大に転出して研究室を主宰し、森永先生を始め、坂井光夫（元原子核研究所所長）、久武和夫（元東京工業大学教授）、磯矢彰（元九州大学教授）、野上耀三（元東大教授）など、次世代を担った諸先生方を輩出させております。森永先生の生涯に亘る営みを辿るとき、研究主題の選択や国際人としての振る舞い、更には科学者の社会関与の在り方などに付き、嵯峨根博士の強い影響が随所に認められます。上記の加速器開発研究も嵯峨根博士の進言により実施したものでしたが、そこからは、IH型線型加速器の発明が生まれました [2]。なお、そのころ先生は、セクター・サイクロトロンのアイデアも発表されております。

然るに、当時の森永先生の心を最も強く突き動かしていたのは、勃興期にあった核分光学への挑戦でした。先生は、そうした心境に至った由来を、物理学会50周年記念に書かれた「原子核

^{*} 東京大学名誉教授、理化学研究所名誉研究員

分光学の展開—私の来た道」[3]において、自ら語っておりますが、其処で引用されている嵯峨根博士の講義の一節からは、当時の学術状況が窺い知れます；「 α 線や γ 線が線スペクトルをもっていることからして、核にも原子や分子のような構造があることは期待されるが、原子や分子を結びつけている Coulomb 力に比べて、核の中の陽子と中性子を結びつけている核力はずっと複雑で、しかもその精しい性質は未だわかっていないから、 α 線や γ 線のエネルギー・スペクトルから得られる核の励起準位のスペクトルがわかって、それを解釈することは困難であろう」というものです。当時の多くの若手研究者にあつては、こうした困難を乗り越えて、励起準位の成り立ちの仕組みを解明し、それから核力の実態を探るのが、大きな夢であり、聖なる使命だと認識されていたようです。

やがてこの夢に繋がる大きな転機が訪れます。1951年に至り GARIOA 基金による米国への留学が実現したのです。最初に滞在した Iowa 州立大学以来、Purdue 大学、Lund 大学と続いた一連の海外生活により、最先端の原子核研究に親しむ機会を得た森永先生は、水を得た魚の様に新しい着想を育んでゆきます。当時は、将に、原子核構造研究の勃興期で、実験を通じて少しずつ明らかになってきた原子核の励起準位を如何に解釈すべきかが焦点となっております。確かに、その頃までには、基本的な理論の枠組みとして、液滴模型、 α 模型、殻模型、さらには集団運動模型などが提唱されておりました。しかし、それらを用いて現実の原子核の励起状態を説明する処方に関しては、殆ど未開拓だったのが実情です。こうした暗中模索の時代に、森永先生の幾つかの論文が光明を照らします。その一例は、Purdue 大時代の 1956年に発表した、 α 粒子の串刺し状態の予言 [4]で、後々、日本の理論研究者のお家芸として大発展を遂げることになった α 模型研究に先鞭をつけるものになりました。実際、後にクラスター研究の指針となった所謂池田ダイアグラムも、この串刺し状態の予言に触発されて池田清美博士が提唱したものでした。

Purdue 大の滞在期間は、わずか1年半程度でしたが、森永先生にとっては大変豊饒な時代で、上記以外にも数多くの成果を挙げられました。なかでも秀逸なのは、 ^{42}Sc のベータ崩壊の寿命を的確に予言した論文 [5]や、光核反応において、 (γ, p) チャンネルの断面積が (γ, n) チャンネルに比べて優勢になる仕組みを解明した仕事 [6]です。これらは何れも、アイソスピン保存則の効果が具現する事象の典型例を、世に先駆けて明示したものでした。

1957年に至り、森永先生は原子核研究が解禁された日本に帰国して東北大学の助教授に就任します。後に初代東北大電子リニアックを建設する一方、中性子線回折法の開発にも先鞭をつけられた木村元治教授の招聘によるものでした。その頃、国内では東大原子核研究所（核研）のサイクロトロン、原子力研究所（原研）の研究用原子炉 JRR-1、および、東北大のベータトロンが稼働を始めたばかりでしたが、先生は海外滞在時代に育んだ様々な着想を更に発展すべく、これらの施設を駆使して実験を展開します。

早々に実施したのは、殻模型を多価核子系に適用する際の基盤になった実験で、二重閉殻の ^{40}Ca や ^{48}Ca の外側に、それぞれ2個の中性子(n)と陽子(p)が付いた、 ^{42}Ca と ^{50}Ti の励起準位のエネルギーとスピン・パリティを確定しようとするものでした。殻模型に拠れば、これら二つの核の低励起領域には、それぞれ、 $(f_{7/2}(n))^2$ および $(f_{7/2}(p))^2$ から構成される $0^+ - 2^+ - 4^+ - 6^+$ のスピン・パリティ状態が出現すると予想されますが、それらの励起エネルギーからは、2核子間の有効相互作用に関する有為な知見が得られる筈です。実際、この研究からは、久しく混迷し

ていた2バレンス粒子系の励起準位の配列が確定し、その後の殻模型展開の礎となりました。

実はこの実験の構想は **Purdue** 時代から温めてきたもので、それに至る経緯には興味深いエピソードがありました。発端は、先行して報告されていた、インディアナ大学グループによる ^{42}Ca の励起準位に関する実験結果にありました。そのデータから演繹された2体の有効相互作用を適用した ^{43}Ca のエネルギー準位の理論予測が、米国の理論研究者により行われて、世の喝采を浴びておりましたが、この結果に対して、森永先生は疑念を抱きます。同時期に **Purdue** 大で実施した ^{50}Sc のベータ崩壊実験から得られていた、未公表の ^{50}Ti のエネルギー準位とインディアナ大に抛り報告された ^{42}Ca の準位との間に相似性が乏しかったからです。そこで、帰国後に早速、 ^{42}Ca の準位構造の検証 [7] に取り組みます。JRR-1 で ^{42}K を作りその β 崩壊様式を調べたものです。決め手になったのは、カスケード γ 線の角相関を測定したことで、前出の論文では $J^\pi=4^+$ とされた、第2励起順位のスピン・パリティが実は $J^\pi=0^+$ であることが判明致しました。

程なくして、 ^{50}Ti に関する再実験 [8] にも取り組みます。1961-2年にアムステルダム原子核研究所 (IKO) に一年ほど滞在していた間に、**Napoli** に出向して実施したものでしたが、得られた結果は、**Purdue** 大時代の結果をよく再現するとともに、 ^{42}Ca の新しいデータとも整合性が取れたものでした。かくして2重閉殻コア $(f_{7/2})^2$ 系における $0^+-2^+-4^+-6^+$ の準位配列に関するパズルに決着がつかしました。

一般に、一つのテーマを突き詰めてゆくと、派生的に新たな着想や課題に出会うものです。実際、森永先生は、上記の問題に取り組んでいる過程で、 ^{42}Ca のみならず、 ^{41}Ca の準位配列に対する既存の解釈にも疑念を抱くに至ります。2重閉殻の ^{40}Ca に一つの中性子がついた ^{41}Ca 核の準位配列は、殻模型の基本となる単粒子状態の励起エネルギーを指し示すものだけに、ここに誤りがあるては一大事です。この問題を調べるに当たり、森永先生が採った処方、新たな実験に頼らず、既存の核データを比較して、その間の整合性を見極めることでした。その結果、見出したのは、中性子放射捕獲反応、 (n, γ) 、のデータに見られる特異性です。当時の通念によれば、同反応は、中性子を捕獲して一旦複合核が形成されたのち、それがあらためて γ 崩壊するという2段階過程に拠っていると考えられておりました。その場合、 γ 転移は統計的に起こるため、崩壊先は様々な終状態に分散する筈です。しかし、現実の $^{40}\text{Ca}(n, \gamma)^{41}\text{Ca}$ のデータを眺めると、転移強度の大部分は2つの終状態に集中していることが認められたのです。実はこうした特長は、当時忘れかけていた直接過程による中性子放射捕獲に特有なもので、S波の入射中性子がE1放射を介して直接に $2p_{1/2}$ と $2p_{3/2}$ の二つの単粒子状態に捕獲されたと考えると辻褃が合います。森永先生は当時としては貴重なアナログ計算機を原研から借用して理論計算を実施し、この仮説の正当性を確認します [9]。この新解釈により、 $2p_{1/2}$ および $2p_{3/2}$ 状態の励起エネルギーが、それぞれ、3.95 MeV と 1.95 MeV であることが確定しましたが、前者は従来の認識より遥かに高エネルギー側に位置するものでした。

森永先生は、実験をしないで重大発見に至ったこの仕事が大いにご自慢で、私達学生にもしばしばその経緯を語ってくれました。そのころに京大基研では湯川所長主宰の研究会がしばしば行われておりました。先生はそのいずれかの折に、この仕事を御前講演する機会を得たそうですが、その際に、同席されていた **Weisskopf** 教授から絶賛されたのが、殊のほか嬉しかったようです。中性子放射捕獲反応に関わるこの話は私にとっても極めて印象的で、30年ほど後に、RI ビームで中性子ハロー核の研究をする際のヒントになりました。

新同位元素の探索も、先生がこの頃に精力的に取り組んだ課題でした。初期の研究は既に Purdue 時代に着手し、 $^{42,50}\text{Sc}$ 、 ^{40}Cl 、 ^{74}Ga などの新同位元素発見 [5,10] に成功しておりましたが、帰国後は更に拍車が掛かり、前記の東北大ベータトロンや原研 JRR-1 から得られる量子ビームの特長を生かして、大車輪で探査実験が進められました。新同位体の生成に利用された主要な反応は、東北大施設では (γ, p) 反応であり、また、原研施設に於いては高速中性子線に拠る (n, p) 反応でしたので、得られた新同位元素の大半は中性子過剰核でした。因みに、光反応に用いられた γ 線は加速された電子を重金属に照射して得られる **Bremsstrahlung** です。かくして、4、5年の内に発見された核種の数約 30 種に及びました。反跳核分析器などを介したオンライン粒子同定法が誕生する以前の時代にあつて、核反応の巧みな選択を武器にして、それに簡便な化学分離法を組み合わせるだけで、斯くも多数の新同位体の発見に成功しえたのは驚異的です。核データを熟知し、個々の原子核や反応過程の特長に通暁していた森永先生ならではの所産と云えます。

ちなみに、当時の核研サイクロトロンは日本で唯一の先端的荷電粒子加速器であり、さらに共同利用方式を採っていたために、利用希望者が殺到し、ビームタイムを臨機応変に運用する自由度は皆目残っておりませんでした。森永先生はこうしたビームタイムの硬直性を嫌って、核研施設をあまり利用しませんでした。新規な研究を開拓したり一挙に発展させたりする際に求められるダイナミックな研究展開が阻害されることを厭った故でした。

新同位体探査のキャンペーンは 1960 年に先生が東大に移ってから暫く続きましたが、そのしんがりとなったのは ^{72}Zn [11] と ^{50}Ca [12] の探索で、それらを同定する手立てとして、それぞれの崩壊様式が決定されました。この研究は、当時大学院生になりたての私と志田嘉次郎氏が修士論文のために手掛けたものです。私が担当した ^{72}Zn は中性子過剰度が極めて高い原子核ですが、当時では珍しい (γ, α) 反応を用いることにより生成可能になったものです。原研に新設された 20 MeV 電子リニアックから得られる高エネルギー **Bremsstrahlung** により、実効的 Q 値が高い (γ, α) 反応の断面積が有為な大きさにまで増大することを利用したもので、森永先生の東北大時代の同志で、当時原研のリニアック部に転任されていた黒柳登喜大博士を頼って実施されました。非濃縮の Ge を標的にした高エネルギー γ 線照射においては (γ, n) 、 $(\gamma, 2n)$ 、 (γ, p) などの反応により Ge や Ga の多様な不安定同位体が生成されますので、それらよりも断面積が数桁小さな (γ, α) 反応の生成核を測定するにあたっては、事前に Zn 同位体を抽出するための分離操作が必要になります。そのために、当時利用できた唯一の手段は化学分離で、同実験ではイオン交換樹脂によるクロマトグラフィーと溶媒抽出法が用いられました。当時のベータ・ガンマ分光実験ではこうした化学分離法の習得こそが実験成功の要諦であり、そのため、原研や核研では核化学研究部を併設して、核物理研究者と核化学研究者の緊密な研究協力を可能にしておりました。ところで、この実験には、当時の最先端であった、トランジスター化した計数装置も用いられました。TMC 社製の 256 Channel Pulse Height Analyzer です。これが森永研の飛び道具として大活躍致しました。

一方、志田氏が手がけた ^{50}Ca の生成には $^{48}\text{Ca}(t, p)^{50}\text{Ca}$ 反応が使われました。その頃、東芝 NAIG 研究所の Van de Graff 施設では世界でも珍しくトリトン加速に取り組んでおりました。かつて東北大時代に先生の同志であった千葉廉博士や若手の鹿取謙二博士が関わっていたプロジェクトです。 ^{50}Ca の生成に用いられたのは、このビームでした。トリトンビームによる反応過程の中で極めて優勢である (t, p) 反応は、一挙に 2 個の中性子を付与できるため、高純度の中性子

過剰核を生成する上で、抜群に有用な反応です。森永先生が、後年、トリトン専用加速器の建設に熱中したのも、他の反応では生成が困難な ^{28}Mg や ^{42}Ar などの有用な放射性同位体 (RI) が (t, p) 反応を用いれば極めて効率よく生産できる故でした。

数々ある功績の内、森永先生の名声を不朽のものとしたのは、1963年になされた、重イオン・インビーム γ 線分光法の発明です [13]。(α 粒子を含む)重イオンビームを標的核に照射して合成される高スピン・高励起の複合核が冷却時に放出する γ 線カスケードをビーム照射中に観測するこの実験法は、たちまち一世を風靡して、原子核の集団運動や回転状態に関わる高スピン原子核研究に大発展を齎しました。Bohr と Mottelson のノーベル賞受賞にも一方ならぬ貢献を果たす一方、今日に至るも超変形原子核や超高速回転原子核の研究に威力を発揮しております。

今となつては陳腐に思われがちなこの実験法ですが、その成功が最初に伝えられた時の衝撃は大変なものでした。かくも簡便な方法により、かくも豊饒な情報が得られる核分光法が存在しようとは想像すらされていなかったからです。それまでの核分光法の主流であった β - γ 分光法は β 崩壊に伴うガンマ線を観測するものですが、これは化学分離操作を要する煩瑣な手法である上に、その際に観測される状態は、各親核のスピン・パリティにより規定されるもので、系統性が乏しいものでした。

もちろん、当時においても、核反応に伴い発生する γ 線を測定するインビーム分光の事例は存在しました。しかしそれらに用いられて反応は、専ら、低エネルギー非弾性散乱や、極低エネルギー領域での中性子や陽子の捕獲反応であったため、励起されるのは低スピンの状態に限られておりました。さらに、利用頻度が高かった捕獲反応では、 γ 崩壊が統計的に起こるため、観測される状態は、選択性に欠けた、雑多なものでした。

こうした状況下で、森永先生が追及したのは高スピン状態に対する分光法で、その道具立てとして着目したのは、当時としては馴染みの薄かった重イオン融合反応でした。もちろん、2つの原子核の融合により形成される複合核状態が数10ユニットにも及ぶ角運動量 (I) を内包している可能性は、関与し得る入射波についての考察により容易に予想されるものであり、また、アイソマー・レシオの測定などからも支持されていた事柄でした。しかし、肝心なのは分光法としての有効性で、複合状態から自然放出される γ 線を観測するだけで、果たして、高スピン状態に関する有為な情報が引き出せるかが問われることになります。

この可能性について、世の大勢は絶望的と考えていたようですが、その理由として考えられるのは次の2点です：その一つは、複合核の崩壊は所詮統計的な過程なので、基底状態に至る γ カスケードの道筋は、 (n, γ) 反応などの場合と同様に、多岐に分散してしまい、特定の道筋に集中するとは考えにくいというものです。もう一つの懸念は当時使われていた γ 線検出器がNaI(Tl)であったことに由来するものです。その頃のビーム輸送の整備水準のもとでは、インビーム中の実験室内は散乱した熱中性子 (n_{th}) が充満しているのが常態で、その中におかれたNaI(Tl)は、 $I(n_{th}, \gamma)$ 反応により内部発生する強烈な背景 γ 線により無能化される危険性を孕んでおりました。

これらの懸念に対して、森永先生は的確な回答を見出します。まずは、高スピン複合核の崩壊における γ カスケードの流れに関しては、上流と下流で様式が異なるべきことに気づかれます。即ち、上流では、中性子放出後に形成される2次複合核群が、 (n, γ) 反応の場合と同様に、統計

的に γ 崩壊を起こすのが道理ですが、その過程ではE1を主体とする γ 転移が起こり、4, 5本の γ 線放出を経て、同過程で到達しえる最低エネルギー準位に到達します。ここで留意すべきは、こうした統計的 γ 線カスケードにより散逸されるネット・スピンの量は無視できるほど小さいことです。したがって上流カスケードの到達点は所謂イラスト状態 (yrast 状態; 各スピンに関して励起エネルギーが最低の状態) に結着することになります。

他方、その後にかかる下流カスケードは、もはや統計的な過程ではなく、イラスト状態に沿った流れになります。当初の複合核状態が擁していた角運動量の大部分はこの過程で散逸されることになります。例えば、大半の偶々核に於いては、4重極型の集団運動状態のバンド (例えば回転バンド) がイラスト状態を形成するため、下流カスケードは $I \rightarrow (I-2)$ 型の E2 転移の連なりとして観測されることになります。

実際、室内中性子を極力減らしたうえで (α, xn) 反応下の γ 線を観測した処、Dy などの変形核において、基底状態の回転バンドが高スピンの準位に至るまで見事に同定されました。アムステルダムにある IKO のサイクロトロンを用いて実施された実験での成果です。従来の偏見を打ち砕く“コロンブスの卵”的一幕となりました。

核図表の広い領域や同位体の長い連鎖に亘って、一律に適用できるインビーム γ 線分光の手法は、核構造の系統的な特性や異変を探るのに抜群の威力を発揮します。そのため、今日では、高スピン状態の研究に資する森永流の分光法に限らず、様々な研究テーマに応じたインビーム γ 線分光の手法が開発され、それぞれの分野で重用されております。興味深いのは、それらの開発者が何れも日本人であることで、我々後輩に森永先生が残したインパクトの強さが伺われます。

そうした流れに先鞭をつけたのは、山崎敏光博士によるインビーム γ 線 PAD (Perturbed Angular Distribution) 法の開発でした。これは、重イオン融合反応から生成されるイラスト状態が高度のスピン整列を起こしているため、そこから放出される γ 線の方向分布がビーム軸に対して大きな非一様度を示す事を利用するもので、準安定な励起状態 (アイソマー) の g factor の決定に格段の威力を発揮しました。典型的な適用例であるマイクロ秒やサブマイクロ秒領域の寿命を持つ高スピンアイソマーに対しては、放出 γ 線強度の時間変化をサイクロトロンのビームパルス間の時間帯に測定する方式が採られました。反応残留核が停留するターゲットを磁場中に配置して、アイソマーのスピンに Larmor Precession を起こさせ、それに応じて変動する γ 線強度の時間分布を測定することにより、当該アイソマーの g factor を決定するものです。山崎博士はこの方式により、 ^{210}Po の 11^- アイソマー状態の g factor を決定し、核内陽子の軌道運動磁気モーメント (g (l) 因子) が実効的に増大していることを見出しました [14]。1970年に理研の 160 cm サイクロトロンを用いて行われた実験によるものです。これは 1951年に宮沢弘成先生が理論的に予言していたパイオン交換電流効果と一致するもので、これを契機に「原子核中の中間子効果」は原子核と素粒子を結ぶ重要なキーワードとなりました。この発見により山崎博士は仁科賞を授与されております。

近年になって開発されたインビーム γ 線分光法の代表例としては、RI ビームによる不安定核研究に用いられる逆運動学直接反応分光法と、 π やKなどの中間子ビームを用いたハイパー核研究用の分光法の二つが挙げられます。これらは、それぞれ、理研リングサイクロトロン施設と KEK ハドロン施設において開発されたものですが、いずれも、当該研究分野発展の起爆剤となりました。

この内、前者の RI ビーム (RIB) γ 線分光法 [15] は、1990 年代当初に、私が主導して開発したのですが、その後、瞬く間に世界に広がり、全世界における RIB 物理研究の大流行を牽引する役割を果たしました。当時、私たちのグループは、世界で最初の本格的な RIB 生成装置 RIPS を完成させて、未開拓であった RIB による不安定核研究に挑戦中でしたが、この方法の導入により、広大な領域にわたる中性子過剰核に対する、系統的な核構造研究の方途が開かれ、RIB 物理研究に画期がもたらされました。この方法は逆運動学や中高エネルギー入射ビームに由来する利便性にも恵まれ、今日に至るも、RIB 研究の中核的な実験法として活躍を続けております。

この分光法の当初の成功をもたらしたのは、プローブ反応としてクーロン励起反応を用いたことでした [16]。それにより、偶々不安定核の 2^+ 状態の励起エネルギーと転移強度を同時に決定することが可能になり、原子核の変形性の変遷を調べる手立てが得られたからです。

クーロン励起反応の利用に際して肝要なのは、核力の寄与を無視できるような実験条件を確保することですが、それに対する伝統的な処方箋は、クーロン障壁よりも十分低いエネルギー領域で実験を実施することでした。それに抗して、我々の実験は敢えて中高エネルギーのままの RIB を用いたのですが、成功した秘訣は、逆運動学のターゲットとして、原子番号 (Z) の大きな Pb を用いたことにありました。核力の寄与を弱めるのではなく、電磁相互作用の方を圧倒的に強めたのです。これもまさにコロンブスの卵的な着想と云えます。

この方法を用いて、中性子過剰核における魔法数変遷の系統性を明らかにした功績により、本林透博士と櫻井博儀博士が仁科賞を受賞されました。全原子核に対して不変の定数と思われていた魔法数が、中性子が著しく過剰な領域では、一定の規則性を持って変転することを示したものです。

他方、ハイパー核研究におけるインビーム γ 線分光法は田村裕和博士の主導により、1990年代の終盤に開発されました。(π, K) 反応などに伴う γ 線を高分解能で測定することによりハイパー核励起状態の準位構造の決定が可能となりました [17]。これにより、ハイパー核研究が一挙に進展し、ハイペロンと核子とのスピン相互作用やハイペロンの混入に対する原子核の応答などが明らかにされました。この功績により田村博士も仁科賞を受賞されました。

かくしてインビーム γ 線分光は、仁科賞を生み出す打ち出の小槌の態を呈しております。一般に、インビーム γ 線分光法は、比較的簡便な手法でありながら、エネルギー分解能の高さや電磁相互作用由来の明快な選択則などに起因して、得られる物理情報が質、量ともに極めて豊饒です。高い物理的生産性を生み出す所以です。

因みに、森永流インビーム γ 線分光法による高スピン状態の研究は、その後、欧米における大発展を尻目に、ご本尊の地である日本ではあまり発展しませんでした。その理由の一つは然るべき重イオン加速器が払底していたことですが、それにも増してこたえたのは Ge 検出器の普及に後れを取ったことでした。高スピン状態の研究では γ 線多重度が極めて高いスペクトラムの解析が求められるため、エネルギー分解能の高い Ge 検出器の獲得が死命を制します。

しかし近年に至って、この分野にも復活の兆しが見られます。井手口栄治博士などによる超変形状態の研究の進展がその好例です。ただし、その種の超高スピン状態の研究にとっての命綱は、相変わらず Ge 検出器です。同分野で最先端の研究を展開するためには、米国と欧州でそれぞれ建設中の GRETA や AGATA の様な、最新鋭のトラッキング型 Ge 検出器アレイの確保が肝要で

す。青井考博士などによる同型器開発計画の進展が望まれます。

森永先生の様々な着想を辿った際に気付くのは、原子核の多様性に対する強い敬意と愛着です。実際、森永先生は、個々の原子核や核反応過程に固有な特性に広く通暁しており、それらを絶妙に組み合わせたり、或いは、適材適所に利用することにより、無二の効果を引き出すことに腐心されました。原子核は多様性に富んだ物理系ですが、そうした多様さを積極的に活かそうとした姿勢に、秀でた原子核物理屋の本領が感じ取れます。私が学生時代に実験課題に関して拙いアイデアを申し出た際などに「君の話はダイナミズムに欠けていて面白くない」としばしば虚仮にされました。その頃には真意が掴めませんでした。今思えば、原子核研究者にとって、上記の様な心がけこそが肝要であることを論そうとされていたように思われます。

森永先生と大学時代の同級生で、無二の親友でもあられる武田暁先生が、最近「森永晴彦氏との交友記録」と題する回顧録を執筆されましたが、その一節に以下に引用する文章があります。これは、まさに、上記の様な森永流研究精神の本質を喝破されたものです；「(我々が学生時代の)物理教室には寺田寅彦先生の研究の流れを受け継ぐ平田先生がおられ、我々もその名講義を通して身近な現象を物理的観点で調べる研究の必要性や、古典物理学の重要性を改めて感じていた。平田さんの講義では割れ目の理論等が語られたのを覚えている。寺田先生は古典物理学の広い知見を用いて地震・火山等の研究もされただけでなく、相対性理論や量子力学等の近代物理学にも関心を持たれ精通しておられたが、森永さんは平田先生の講義等を通して寺田流の幅広い物理学から新たなアイデアを求める研究精神を学んだように見えた。彼が後にエネルギー問題や放射線を身近に感じさせる本を書かれたり、あるいは社会行動を記述したパーキンソンの法則の訳本を出されたりしたのは、寺田流物理学への彼の関心の大きさを示しているように思われる」

実際、そうした精神から生み出された森永先生のアイデアには奇抜性や斬新性に富んだものが多く、コロンブスの卵的な提案にも事欠きません。その典型例は、前出の重イオン・インビームγ線分光法の発明ですが、 ^{41}Ca 分光に関連して直接過程中中性子放射捕獲反応の特異な効用に思い至ったのもこうした姿勢の産物と思われま

す。当該の直接過程においては、複合核過程とは異なり、始状態と終状態が E1 転移を通じて直接結びつくため、明確な選択則が発動され、特定の条件に適った始状態と終状態の組み合わせに限って、大きな断面積が発現するのが特長となります。 $^{40}\text{Ca}(n, \gamma)^{41}\text{Ca}$ の場合には、始状態に相当する低エネルギーの入射中性子の波動関数は S 波を主成分とするものですので、終状態が P 波の単粒子成分に富んでいる場合に限って、強い放射捕獲が起こることになります。

一方、連続状態の P 波成分は遠心ポテンシャルにより標的核のコア領域への侵入が抑制されるため、束縛 S 状態との間の E1 転移は、通常の場合には抑圧されております。ところが、後者が弱束縛の中性子ハロー状態である場合に限っては、この転移は強大に転じます。同状態の波動関数はコアの外延部に広く浸みだしているためです。

実はこの特性は中性子ハロー核の研究で威力を発揮することになります。中性子放射捕獲反応の逆過程に相当するクーロン分解中性子放出反応においては、標的核がハロー状態にある場合に限って巨大な断面積が発現するからです。1990 年代初頭に RI ビームに拠る中性子ハロー研究を始めるに当たり、私は生涯で一度だけ頂いた大型科研費により、中性子測定用のホドスコープを製作いたしました。それは、こうしたクーロン分解反応を観測してハロー核の特性を調べたか

ったからです [15]。そのうち、この方式を駆使してハロー原子核の研究を進めてきた、中村隆司博士のグループは、2 中性子ハロー核の典型である ${}^6\text{Li}$ の外延部に di-neutron 的なクラスターが形成 [18] される事実や、中性子過剰に起因する変形核の異常発生に伴って、P 波のハロー核 [19] が Mg 同位体近傍に於いて多発することを見出しております。良きプローブ反応がもたらした福音と云えそうです。

森永先生の奇抜で巧妙な着想の事例は枚挙の暇がありません。例えば、重水素の光分解反応、 $d(\gamma, n)p$ を閾値弁別法の手立てとして用いたのもその好例です [20]。校正源として御馴染みの ${}^{60}\text{Co}$ のベータ崩壊では、娘核 ${}^{60}\text{Ni}$ における $4^+ \rightarrow 2^+$ (1.172 MeV) と $2^+ \rightarrow 0^+$ (1.333 MeV) の E2 カスケード転移が顕著にみられますが、微弱ながらも $4^+ \rightarrow 0^+$ (2.505 MeV) の E4 転移も可能です。この圧倒的に弱い転移の強度を測定するために考え出したのが件の閾値法です。ベッセルに収納された重水素を、原研にある 10,000 キュリーの ${}^{60}\text{Co}$ 線源からの γ 線で照射したのですが、 $4^+ \rightarrow 0^+$ 転移のエネルギーのみが、重水素光分解の Q 値 (2.225 MeV) を超えていることに着目して、同光分解の収量を測定することにより、その転移強度が決定されました。光分解収量の測定も巧妙な放射化分析法によるもので、重水ベッセルの周囲に巻かれた Dy 試料に放出中性子を吸収させ、その生成核である ${}^{165}\text{Dy}$ からの γ 線をオフラインで検出するものでした。この結果、同転移の分岐比が 4×10^{-7} 程度であることが判明しましたが、これは、当該 E4 転移が集団性により増強されていることを示唆するものです。

さらに、森永先生は 3 重中性子 (3n) の存在を調べる実験にも取り組んでおります [21]。方法は、これまた放射化分析法によるものでした。分厚い LiF 標的を高速中性子場に置き、 ${}^7\text{Li}(n, {}^3n)$ 反応で生成した 3n を、さらに背後に置かれた酸化バリウム資料に打ち込んで、 ${}^{138}\text{Ba}({}^3n, n){}^{140}\text{Ba}$ 反応を起こさしめ、得られた ${}^{140}\text{Ba}$ の娘核である、 ${}^{140}\text{La}$ からの特性 γ 線を観測することにより、 3n の有無を調べようとしたものです。その結果は、生成反応断面積の上限値しか判明しませんでした。核反応の放出粒子を直接検出する手立てが整っていなかった時代にあって、残留核の γ 線分光のみに頼って、3 重中性子の同定を図った点に凄みを覚えます。なお、この実験は、のちに素粒子論研究者に転じた藤川和男氏が修士時代に手掛けたものです。

1968 年に至ると森永先生は、次なる発展を新任の山崎敏光助教授に託して、ミュンヘン工科大学に転出されます。その頃ミュンヘン工科大ではノーベル賞受賞者のメスバウワーを同大学に迎え入れたのを契機にして、施設やスタッフの陣容を一新して世界最先端の研究機関に変身を遂げつつありました。そのために全世界から新進気鋭の研究者が集められましたが、そこで真っ先に白羽の矢が立ったのが 森永先生でした。人選に当たった J. Hans D. Jensen 教授 (殻模型でノーベル賞授賞) から直々の指名を受けて、大いに名誉に感じ、この招聘に応じたものと思われま

す。これにより、東大森永研の短い歴史も終りを告げました。数少ない学生の内、志田嘉次郎氏と私は、数年前に修士課程を修了した後、それぞれ、フロリダ大学大学院と東大原子核研究所の助手に転出しておりました。そのあとに順次入学した野村亨氏と藤川和男氏も修士課程修了後は、それぞれ、マックスプランク研究所とプリンストン大学に転学いたしました。最後まで残ったのは、博士課程に進学していたカルメン・ヒル、関口弘喜の両氏と修士課程在学中の浅野祐三、西山樟生、古山浩子の各氏でした。一方、最初の助手であった高橋嘉右博士は BNL、東北大を経て KEK に、2 代目助手の宮野和政博士は新潟大学に移り、さらに、最後の助手だった大沼甫博士も

ANLに移って、全ては消滅致しました。なお、ミュンヘン工科大学に開設された森永研究室には、初期の時代に、志田嘉次郎博士が助手として、また、今里純氏が博士課程の大学院生として在席されております。

ミュンヘンに移られた以降の森永先生の活躍振りについては、遠隔地であったこともあり詳らかではありませんが、研究のスタイルに変化がみられ、それ以前の自由、奔放な営みに代わって、新天地が擁する加速器施設の発展や社会貢献に関わる活動が増えて行ったように見受けられました。実際、当時のミュンヘン工科大では、原子核研究の大躍進を図るため、次世代重イオン加速器の華と目された、エンペラー型タンデムを導入しておりました。しかし、この加速器は所定のエネルギーが出せない食わせ物で、森永先生をはじめとするスタッフは、それに対する解決策を必死に探し求める破目になりました。結局、加速方式をペレトロン方式に転換することにより、最悪の事態を脱しましたが、それだけでは十分ではありませんでした。1970年代の重イオン物理の展開は目まぐるしく、加速器の常なる高エネルギー化が求められたからです。そこで、いよいよ、森永先生の本領が発揮されることとなります。

この対策として先生が提案したのは、タンデム加速器の後段に、IH型リニアックを配してビーム・エネルギーのブーストを図る計画でした。当時IH型リニアックは実用化に至って居りませんでした。若き日に同型加速器の原理を発明した森永先生にとっては、同器が当該目的に適っていることは明々白々でした。実際、この計画は見事に成功し、安定性や経済性に優れ、運転も極めて容易な施設が実現致しました [22]。これらの特性は何れもIH型リニアックの加速効率（シャントインピーダンス）が際立って高いことに由来するものです。同型加速器のこうした特性は、ミュンヘン工科大での成功を契機に世界的に認知されるに至り、実用化の波が一挙に広がりました。今日では、世界の様々な加速器施設で様々な用途に用いられ、その版図は拡大の一途を辿っております。

ミュンヘンに移って以来の森永先生は、原子核関連の応用分野に対する関心もますます高めていった様に思われます。その一つは、有益なRIを製造する取り組みです。数多のRIがある中で、 ^{28}Mg と ^{42}Ar に特段の関心を示したのが独特で、どちらも通常の方法では生成し難いものですが、 (t, p) 反応を用いれば、極めて効率よく生産できるのが共通しております。

このうち ^{28}Mg は、他の不安定Mg同位体がいずれも短寿命である中で唯一中庸な寿命（21時間）を持っているRIですので、Mgが生命体の中で重要な役割を果たす元素であるだけに、安定供給が可能になれば、その利用が大いに期待されるものです。一方、 ^{42}Ar は、 ^{42}K の親核で、長寿命（33年）の同RIを製造して置けば、随時且つ任意の場所で ^{42}K をミルキングして利用できる特典が得られます。カリウムは、生体の新陳代謝や生命活動を司る重要なアルカリ金属で、 ^{42}K は同元素にとってのかけがえのないRIですが、とかく寿命（12.36時間）の短さ故に利用上の障害も生じがちです。ミルキング方式を用いれば、こうした弱点が解消できるのが先生のご自慢でした。

^{42}Ar はこのような便宜性に加えて、取扱い上の安全性が高いのも特長です。Arが化学的に不活性であり、また気体状の元素であるため、たとえ逃がしても、何かに取り込まれることなく、直ぐ拡散してしまうからです。先生はこうした安全度の高さに着目して、同RIを教育用、教材用

に利用することを推奨しております。有害無益な核アレルギーを排除するには、放射能に慣れ親しんでその実態を知るに如かずですが、そうした啓蒙活動が安全かつ簡便に出来るためにはこの RI が打ってつけだからです。 ^{42}Ar と簡便な放射線測定器のセットを普及させて、測定器を使いこなせる人達を増やしておけば、万一の場合にも被害を最小限に食い止めることが出来るだろうとの考えです。これは自著「放射能を考える－危険とその克服」[23]などで繰り返し発せられた提言です。

1990 年頃になると、森永先生はこれらの有用 RI を生産するための専用トリトン加速器の建設に情熱を傾けるようになります。小論「トリトン加速による RI の製造」[24]で示された構想です。この構想に夢中になったのは、もちろん、 (t, p) 反応の効用を熟知されているからですが、それに加えて、他ならぬ IH 型リニアックこそがこの目的にとっての最適の加速器と考えられるからでした。一般に RI 製造に頻繁に用いられるのはサイクロトロンですが、 e/m が小さいトリトンの加速に関してはリニアックの方が有利であり、さらに大電流化を図る上でも、同器に分があります。一方、リニアックの最大の問題点は電力消費が大きすぎる点にあります。それはあくまでも通常の加速方式に拠る場合であって、加速効率の良い IH 型を用いれば、その弱点も一挙に解消できるのが絶妙な点です。

先生は 1991 年にミュンヘン工科大学を退任されたあとも長きにわたり、この構想の実現に奔走されました。それは、IH 型リニアックの専門家である服部俊幸博士やルーマニアの IFA 研究所などの協力を得て進められたものですが、目指す施設の実現には至りませんでした。この提案を受け入れてくれる研究機関が見いだせなかったからです。いつの日か陽の目を見るのを祈るばかりです。

1990 年代には、原子力利用における安全性に関しても強い警鐘を鳴らすようになりました。その主張は「原子炉を眠らせ、太陽を呼び覚ませ」と題する著書 [25]からも読み取れます。原子力発電を本来的には有用のものと認めながらも、それは厭くまでも、安全性の確保を科学技術上の課題として真摯且つ誠実に取り組む倫理が確立していることが前提であり、それが疎かになりがちな土壌においては、安全性が保証されている自然エネルギーに転換すべきと云うものです。福島の大惨劇に 10 有余年遡っての指摘でした。

以上の例に見る様に、原子核応用分野への高い関心は、先生が終生抱き続けてきたもので、科学の研究からもたらされた成果は、最後には社会に役立ってこそ意味があり、それを実現して行くのも研究者の務めだという信念に基づくものでした。

更に、晩年に至ると、平和に対する祈念も一段と強められました。戦中と終戦後の暗黒時代に青年期を送られた先生は、その時代の悲惨さや残酷さに対比して、その後の長き平和の時代の有り難さを身に沁みて痛感されておりました。不安定さを増しつつある今日の世界にあって、二度と戦争に巻き込まれないように渾身の努力を払うべきことを、若者に向かって訴えておりました。傘寿の折の遺言です。

先生の生き様は生涯を通じてかくもひたむきにして、晴朗でした。謹んでご冥福をお祈り致します。

森永晴彦先生は 1922 年東京生まれ。1946 年東大物理卒。同教室科学研究嘱託、助手から 1951 年 Iowa 州立大学に留学、1952 年から 1954 年まで同大助教授、1954 年から 1956 年まで Purdue 大学研究員、1956 年から 1957 年までスウェーデン Lund 大学研究員、1957 年から 1960 年まで東北大助教授、1960 年東大助教授、教授を経て 1968 年より Muenchen 工科大学正教授、1991 年退任。1971 年仁科記念賞受賞、1985 年 Lund 大学名誉学位。

参考文献

- 1) 嗟峨根遼吉記念文集、日刊工業新聞社 (1981).
- 2) H. Morinaga: J. Phys. Soc. Japan **6**, (1951) 210.
- 3) 森永晴彦、物理学会誌 51 巻、11 号、(1996) 795.
- 4) H. Morinaga: Phys. Rev. **101**, (1956) 254.
- 5) H. Morinaga: Phys. Rev. **100**, (1955) 431.
- 6) H. Morinaga: Phys. Rev. **97**, (1955) 444.
- 7) H. Morinaga et al.: Phys. Rev. **114**, (1959) 1146.
- 8) G. Chilosi et al.: Nuovo Cimento **27**, (1963) 86.
- 9) H. Morinaga et al.: Prog. Theo. Phys. **23**, (1960) 161.
- 10) H. Morinaga: Phys. Rev. **103**, (1956) 504.
- 11) M. Ishihara: J. Phys. Soc. Japan **18**, (1963) 1111.
- 12) Y. Shida et al.: Phys. Lett. **13**, (1964) 59.
- 13) H. Morinaga and P. C. Gugelot: Nucl. Phys. **46**, (1963) 210.
- 14) T. Yamazaki et al.: Phys. Rev. Lett. **25**, (1970) 547.
- 15) M. Ishihara: Nucl. Phys. **A583**, (1995) 747; **A588**, (1995) 49c.
- 16) T. Motobayashi et al.: Phys. Lett. **B346**, (1995) 9.
- 17) H. Tamura et al.: Phys. Rev. Lett. **84**, (2000) 5963.
- 18) T. Nakamura et al.: Phys Rev. Lett. **96**, (2006) 252502.
- 19) T. Nakamura et al.: Phys. Rev. Lett. **112**, (2014) 142501.
- 20) H. Morinaga et al.: J. Phys. Soc. Japan **14**, (1959) 1460.
- 21) K. Fujikawa et al.: Nucl. Phys. **A115**, (1968) 1.
- 22) E. Nolte et al.: Nucl. Instr. Meth. **158**, (1979) 311.
- 23) 森永晴彦著、ブルーバックス(B-568)、講談社 (1984).
- 24) 森永晴彦、日本原子力学会誌 28 巻、1 号、(1986) 49.
- 25) 森永晴彦著、草思社(1997) .