

私のRI 歴書

放射線つくって測り，知りつかう

織原 彦之丞

Orihara Hikonojo

(東北大学，東北工業大学名誉教授)



はじめに

私は45年近く放射線とラジオアイソトープ(RI)の研究・教育に携わってきました。原子核が放出する核エネルギーの解放と実用化は20世紀の一大事業でした。核兵器の使用は風化させてはならない歴史の事実で，その保有は人類の負の遺産として残り，その廃絶は引き続き今世紀の課題となっています。一方，原子炉は中性子源として放射性薬剤の製造等に不可欠のものであり，原子力発電はエネルギー供給源の重要な一翼を担ってきました。また，加速器利用による核エネルギーの利用は，加速器技術の発展に支えられその利用の進捗は目覚ましく，放射線発生器として日夜，産業，医療・医学に使われています。しかし，原子核が関わる核エネルギーについては社会の科学的な理解も十分ではなく，私たち核物理研究者の深く憂慮するところであり，また，その責任を重く感じています。社会的には，地球規模でのエネルギーや環境問題として核エネルギーの問題が捉えられていますが，私たちにとっては，未知への遭遇という人類共通のロマンを含むものです。さらにはほかの学問分野の助けとなるデータの蓄積も我々の責務であり，原子力発電炉から出る高レベル放射性廃棄物と言われるものを山の山に変えるのも我々の仕事と心得ています。放射線を測る研究，放射線の源となる原子核の研究

を進め，簡便で皆が納得する検出技術の開発を含め，これらによって人類の福祉に資することが私たちの願いです。

福島第一原子力発電所事故から3年が経過した今でも放射能で汚染された冷却水の処理・処分の見通しも立たない現状を見るにつけ，東日本大震災に伴って発生した事故における水素爆発も，多分に“原発に対する頑な世論”が一因となったと考えられます。いかに難しくても，また何十年掛かろうとも人の心を揺さぶるような教育によって，社会の皆さんが核エネルギーに対し合理的・科学的判断ができるような社会を築く努力が求められるものと思います。私自身のささやかな喜びは，この3年間いろいろな年代の皆さんに放射線・放射能について多大な関心を持っていただき，放射線・放射能が震災復興の妨げにならないようにと願う，私の話を聞いてもらうことができたことです。講演会の回数は30数回に及び，参加された人の数は全体で1,500人を超えます。

このたび本稿で，私の放射線・RIに関わる研究教育を中心に紹介させていただくに当たり，1) サイクロトロン等の荷電粒子加速器，2) 中性子飛行時間分析装置， γ 線並びに β 線分光器，3) 原子核のスピン・アイソスピン型新しい励起様式，4) 陽電子断層撮影装置開発などについて述べ，最後に開発中の β 線検出器について現状を報告いたします。

1) 静電加速器, サイクロトロン等の荷電粒子加速器……<放射線をつくる, 使う>

私の加速器との付き合いは, 昭和 38 年片平丁キャンパスに原子核研究に供されるために建設された, 5MV ヴァンデグラフ型静電加速器 (VdG) から始まります。当時, 森田右教授が九州大学から赴任され, 今日の意義も大きな PIXE という微量元素分析を VdG で始められました。更に, 東北大学理学部が青葉山に移転するのに伴い, AVF サイクロトロンを主力装置とするサイクロトロン RI センター (CYRIC) が 1977 年に設立され, 世界に先駆け加速器多目的利用を始める計画に参加することになりました。1980 年代初頭から 20 世紀一杯, K=50 MeV 680 型 AVF サイクロトロンは核物理学から核医学まで, その理念通り研究教育に役立ち“多目的利用のサイクロトロンラジオアイソトープセンター”の名が世に行き渡りました。

大略 20 年に及ぶサイクロトロン多目的共同利用の後, それまでの研究教育成果に基づき, 主力加速器並びに周辺研究装置が更新されて, K=110 MeV, 930 型サイクロトロンが 2000 年に導入されました。この世界最大規模の AVF サイクロトロンで目指したところは, 100 MeV-陽子ビームや数百 MeV-重イオンビームに加え, ~mA の大強度陽子, 重陽子ビームによって生成される中性子ビームの利用でした。このための加速器が, 世界でも珍しい陰・陽イオンビームの加速・取り出しが可能なサイクロトロンです (図 1, 2)。

熱中性子束をはじめ中性子ビームの利用が広がっても, 現状で原子炉が新たに建設される社会環境ではないため加速器中性子の利用を考えました。大きな柱として考えたのは, 数百 μA の陰イオンビームによって, 毎秒 10^9 個/cm² の熱中性子を得て行うホウ素熱中性子捕獲がん治療 (BNCT) の研究です。また, 中性子利用の昨今の社会的要請に ^{99m}Tc の供給があります。実際には親核の ⁹⁹Mo を作るため ¹⁰⁰Mo(n, 2n)⁹⁹Mo 反応が考えられます。この反応は, 中



図 1 CYRIC K=110 MeV 930 型 AVF サイクロトロン

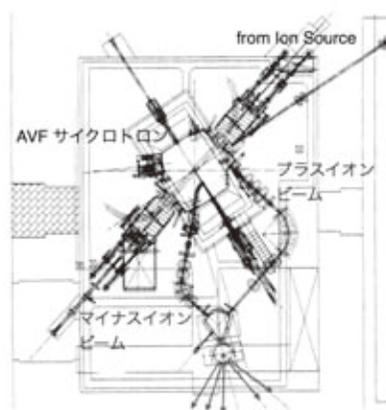


図 2 プラス, マイナスビームが加速, ビーム引き出しが可能な AVF サイクロトロンの平面図

性子ビーム^{しきい}閾値が~9 MeV で, JENDL によると $E_n = \sim 20$ MeV まで 1 バーン程度の一定の断面積を持ちます。東北大学の K=110 MeV, 930 型サイクロトロンによる 25 MeV-大強度重陽子ビームで (d, n) 反応によって十分な高エネルギー, 大強度の中性子ビームが得られるものと考えられます。

また, 理学部の加速器施設の青葉山移転に際し加速エネルギーの下限が 2.5 MeV であることに気を良くし, ビーム輸送に細心の注意をして 1980 年代初頭に世界で初めてサイクロトロンで PIXE 分析に成功し, 優秀な人材が多く育ちました。同じ頃, 1990 年代のはじめ, 日本アイソトープ協会では, 当時常務理事でもあった鈴木進先生を中心に滝沢研究所仁科記念サイ

クロトロンセンターの建設を進めていました。先生から「織原さん、PET 薬剤製造用の 8 MeV の重陽子ビームが加速される AVF サイクロトロンで PIXE ができませんか？」という話がありました。CYRIC でも陽子 (H^+) の後に重陽子を加速する際に D^+ ビームと間違えて、残留水素ガスによる H_2^+ ビームを加速することがありました。このことにヒントを得て、「8 MeV の D^+ ビームの加速条件に対し水素ガスを流し磁場を少々強くして加速し、 H_2^+ ビームを引き出し、薄膜金属フォイルを通して 4 MeV の 2 個の陽子ビームを得ればよいのでは」と答えて、NMCC で PIXE が始まった次第です。今では、世界に羽ばたく NMCC サイクロトロンといっても過言ではないと思います。岩手医科大学サイクロトロンセンターとの合作ですが、“自身で世界第一級の研究をして共同利用ユーザーをも世界一級に”という共同利用研究施設の役割の理念を引き継いでおられ、敬意を表したいと思います。

2) 高速中性子飛行時間測定装置による中性子高分解能測定……<放射線を測る>

高検出効率、高エネルギー（運動量）分解能の分析装置を持つことは、原子核の実験的研究のためには不可欠です。さらに γ 線や荷電粒子のほか、中性子を対象とした検出器の開発・建設は、加速器と同様に原子核研究者の永遠の課題です。1970 年代後半の CYRIC 建設当時は、Ge 半導体検出器による γ 線高分解能分光の精密化が飛躍的に進み、また磁気分析器の高分解能化が進展して、核構造並びに核反応機構の解明が進んで原子核物理学が一段と輝きを増したところでした。

東北大学ではこのような状況で中性子の精密分光を目指し、高速中性子飛行時間分析装置の建設を始め、荷電交換 (p, n) 反応による精密核分光研究のため、中性子の飛行距離を 45 m の長さとし、この飛行距離を保ちながら入射陽子ビームの方向と検出中性子の方向の間の角度を

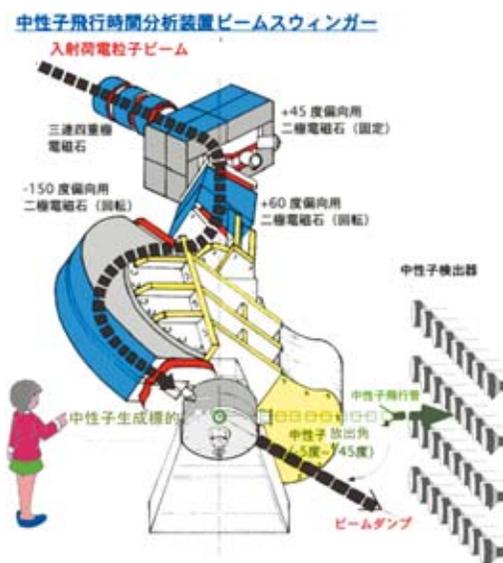


図3 ビームスウィンガーシステム
-5° から 145° まで可変。中性子検出器は実際には飛行管路を通り中性子生成標的から 45 m の地点に設置されている

変えて運動量移行量を変化させて核反応の微分断面積を測定できる装置を作りました (図3)。

“ビームスウィンガー”と言われるこの装置¹⁾は、米国コロラド大学とオハイオ大学で建設され、CYRIC が 3 番目です。ジャーナルに公表されたのは参考文献 1) の我々の装置が最初と思いますが、この装置は放射線治療の世界ではガントリーといわれ世界で何十台も作られています。

3) (p, n) 反応によるスピン・アイソスピン型の原子核の新しい励起様式の研究……<放射線の源の原子核を知る>

飛行時間測定法 (TOF) による中性子のエネルギー測定においては、ビームパルスの時間幅が一番のキーポイントですが、680 型並びに 930 型双方の AVF サイクロトロンとも加速周波数が高く、また、ビーム引き出しも容易にシングルターン引き出しが達成できて、ビームパルスの時間分解能を ~ 1 ナノ秒程度にすること

ができ、高分解能の核反応生成中性子のエネルギースペクトルが測定されました(図4)。

(p, n) 反応を研究する Scientific Motivation は何でしょうか? 自然の一階層をなす原子核において、その構成要素の中性子-陽子からなる高々 200 数十個の核子多体系の中で起きることで、原子核にしか存在しない固有の現象は何か、また結晶のような多体系や、素粒子のような二体系などと同じことが原子核にもあるかどうか、私もここから始めました。中性子が陽子に変わるようなことはほかでは起きません。陽子が中性子に変わることは素粒子の世界でも起きません。しかし、RIの世界では実に気軽に β^+ ・ β^- 崩壊が起きて、原子核の中では陽子⇄中性子の変化が容易に起きています。

(p, n) 反応は中性子を陽子に変える β^- 崩壊に対応し、アイソスピンの z 成分が 1 変化しますので $\Delta T=1$ となり、更に核子スピンの反転すれば $\Delta S=1$ となり、相互作用として、スピン・アイソスピン型となります。 β 崩壊と異なる点は、運動量移行を伴い相互作用の空間情報が得られることです。以下のようなトピックスがあり、各々について最先端の研究成果をあげることができました。

3)-1 Gamow-Teller 型遷移^{2,3)}

β 崩壊におけるガモフテラー遷移に対応する $\Delta J^\pi=1^+$ 遷移を (p, n) 反応において観測しました。⁵⁴Fe 核を標的とした研究で、 $T_<$ と $T_>$ 状態

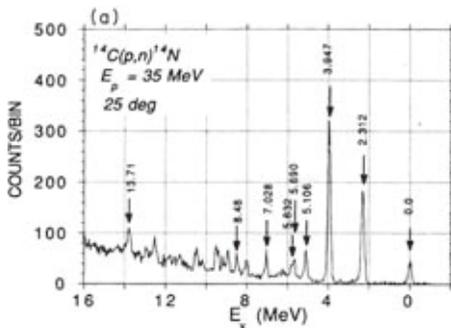


図4 $E_p=35$ MeV における $^{14}\text{C}(p,n)^{14}\text{N}$ 反応の中性子エネルギースペクトル

への観測は世界初演でした。国際プロジェクト“GALLEX 太陽ニュートリノ観測実験”に関係する ^{71}Ga のニュートリノ吸収断面積に関する報告もしています。

3)-2 原子核の伸びきったスピン状態への遷移⁴⁾

この状態は必然的にスピン反転で生成され、生成されるときには大きな角運動量が移行され、また遷移に関わる要素が限られて物理量が直截的に導出できるという利点があり、スピン・アイソスピン励起の研究の格好の対象となりました。

3)-3 $\Delta J^\pi=0^-$ 遷移⁵⁾

この遷移で移行されるスピン・パリティは 0^- であり、 π 中間子の固有のそれと一致しているため、 π 中間子の役割を明らかにする重要な反応とされ、運動量移行が伴う核反応でこの遷移を研究する分野では、我々が世界をリードしています。

3)-4 荷電スピン混合の観測⁶⁾

$T_>$ の IAS と励起エネルギーが近い近傍の $T_<$ 状態との混合の結果生ずる IAS の分岐や、準位中の生成を観測し、原子核における荷電スピン混合の証拠を明らかにしました。特に、²⁰⁸Pb (p, n) 反応で励起される IAS からの陽子放出崩壊測定の実験の成功はほかの追従を許さないものとなっています。

結びにかえて<原発事故による ⁹⁰Sr 汚染検査用 β - γ 弁別型 β 線検出器の開発>

東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所事故に関わる食品の放射能汚染について、¹³⁴,¹³⁷Cs に関する国の基準が 2012 年 4 月 1 日に出され、 γ 線の測定は学校給食の食材については宮城県でも整然と行われています。

しかし、内部被ばくが取り沙汰される食品の ⁹⁰Sr 汚染についての不安が生産者側でも消費者側でも払拭されず、100 Bq/kg の極低レベル β -放出核汚染物を検査可能な信頼できる測定シス

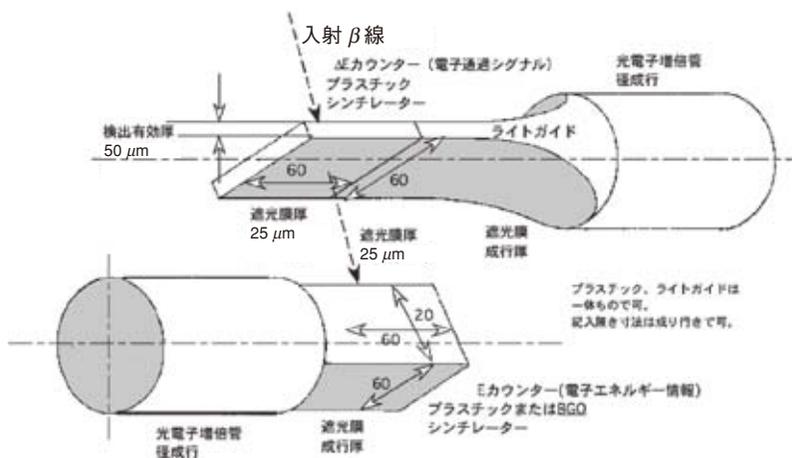


図5 β-γ 弁別型 β線検出原理図

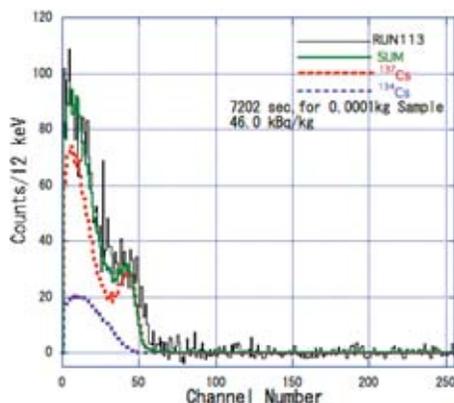


図6 March 11, 2014 現在の東日本の土壌 0.0001 kg を対象とした β線測定の結果

テムの開発が緊急課題になっています。幸い平成 25～平成 27 の科研費基盤研究 [B] (代表：織原彦之丞，課題番号：25287045) で予算が認められ大急ぎで開発中です。

図5にβ-γ弁別型β線検出器の原理を示します。β線は膨大な数のγ線と共存し、わずか数mmの紙でも通過できないか細い存在です。まずγ線と区別するため、50 μm程度のプラスチックを通します。β線の通過によって光信号が発生しますが、γ線では発光しません。β線の

光信号をゲート信号としてデータ収集を行えばβ-γ弁別ができます。なお、被測定試料における自己吸収を防ぐため試料は1g以下とします。

図6は東北地方全般に分布する～400 Bq/kgの^{134,137}Cs汚染土壌0.0005 kgを今般開発したβ線検出システムで4日間測定した結果です。図中の緑点は¹³⁴Cs、赤点は¹³⁷Csのγ線測定結果から求めたもので、青点は⁹⁰Sr

の計算値です。試料が微量ですから、^{134,137}Cs-γ線測定には“戦艦陸奥の鉄遮蔽箱”が威力を発揮しました。全体のβ線カウントより^{134,137}Csからのβ線を引いたものが⁹⁰Srからのβ線ということになります。これから検出器の立体角を一桁上げ、モバイル化を目指します。

ごく一部の方々の名前を挙げさせていただきましたが、私の教育研究を支えてくださいました外国の方々を含め、全ての皆様に深甚の感謝の念を捧げます。

参考文献

- 1) Orihara, H. and Murakami, T., *Nuclear Instruments and Methods*, **188**, 15-23 (1981)
- 2) Orihara, H., *et al.*, *Physical Review Letters*, **47**, 301-304 (1981)
- 3) Orihara, H., *et al.*, *Physical Review Letters*, **51**, 1328-1331 (1983)
- 4) H. Orihara, *et al.*, *Physical Review Letters*, **48**, 469-472 (1982)
- 5) Orihara, H., *et al.*, *Physical Review Letters*, **49**, 1318-1321 (1982)
- 6) Orihara, H., *et al.*, *Physical Review Letters*, **81**, 3607-3610 (1998)