

光合成研究での ^{14}C 利用と教育や管理業務



都筑 幹夫

Tsuzuki Mikio

1. 自己紹介

放射性物質は自然界にも、また人が作り出すこともできます。「私の RI 歴書」を書いてくれと頼まれた時、その場で気楽に引き受けてしまいました。ラジオアイソトープ (RI) は長年の付き合いなので、何かは書けるだろうと高をくくっていたからです。実際にあとから考えてみると書くのは意外に簡単でないことが見えてきた次第です。研究者として実験での利用と施設管理や日本アイソトープ協会の委員として間接的な形での仕事とに分けられるかなと考えるようになりました。読者の方々に何か良いこと、何か役に立つことを書きたいと思うのですが、これはという知恵もなく、上の2つの視点で進めてみるようにします。

まずは筆者の履歴 (RI 歴?) でしょうか。1975 年から大学院に入り、宮地重遠先生、東大の応用微生物研究所 (応微研) の先生を指導教官として研究を始めました。専門は光合成炭素代謝。植物が好きでこの道に入り、中でも光合成のしくみの不思議さにひかれて、理学部植物学教室そして応微研というルートを選んだわけです。当時は、光合成を含めて生命科学すべての領域で理解が深まり、新しい知識が次々と加えられていました。筆者自身、人の意見も聞かずに好きなことを選んできた次第です。実学と虚学というようなとらえ方が次第になくなっていく時でした。自らの性質からか虚学とされる理学部を選ぶ結果になりました。ビジネスの世界にいた家族からすればズレていると思われても仕方がなかったと思います。

2. 大学から大学院時代の学び

学生時代に愛読書を読むようにと勧められましたが、文章というものに興味のあまりない筆者にとっては、愛読書と言えるものはほとんどありませんでした。その中で自然に熱心に読んだのが『キュリー夫人伝』(エーヴ・キュリー著、白水社) でした。ポーランド生まれの女性マリー・キュリー (Maria Salomea Sklodowska-Curie, 1867-1934) の若い頃やパリのソルボンヌ大学で学んだ時のことを彼女の娘がまとめた伝記物です。質素にかつ熱心に勉強した姿が、とても印象的に述べられています。ピエール・キュリーと結婚し、未知の化学物質ラジウム (Ra)¹ を取り出したのは、放射性物質を理解するようになった最初の頃でした。更に、新しい元素が明らかになり、出身地ポーランドの名をとってポロニウムという名がついたこと等とても印象深く記憶しています。今の学生が質素に基礎の勉学に励む等この豊かな社会では考えにくくなっているかと思います。アルバイトによるお金稼ぎが必要になってしまった社会を少し見直して、また、人工知能や情報通信の盛んな今こそ、基礎的な勉学が必要なのではないかと思っています。当時筆者は、放射線についてレントゲン撮影のことと原爆の被害のことくらいしか知識はありませんでしたが、その結果が今日多大な影響を引き起こす価値あるものとも、また、自らの研

1 Ra を単離し新元素として発表したのは 1898 年ですが、その後、数トンもの瀝青ウラン鉱 (pitchblend) の残渣から化学処理により、原子量まで決定しました (放射能研究の初期の歴史、清水榮著、丸善)。

究の元になったことも、後になって思うところがあります。高校の頃から、理系の中でも社会から離れた気味の科学に興味を持ち、歩んできた若者にとって、彼女の生涯を知ったことが、心に強く響いたのかもしれない。

生命科学は現在も日ごとに進んでいる学問ですが、その中で植物は農業との関係で強く興味を持たれていました。“光合成”は植物の葉で行われている重要な生理現象です。水分解による酸素発生と、そこでできた ATP や NADPH を利用して CO₂ を固定する炭素代謝に分けることができます。前者はチラコイドと呼ばれる生体膜に存在し電子伝達反応が行われるのに対し、後者はストロマ（原核生物のシアノバクテリアでは細胞質）の液体の中での複数の酵素反応と考えていいと思います。後者のしくみが明確になったのが、カルビン（M. Calvin）氏とベンソン（A.A. Benson）氏による ¹⁴C を用いた研究です。実験を行ったのがベンソン氏（写真 1）だったことから、この炭素代謝はカルビン-ベンソン回路と呼ばれています。ノーベル賞をカルビン氏一人でもらったので、「カルビン回路」という人もいますが、当時の事情を知っている人からは、二人の名前を挙げるのが当然というところです。

さて、自分の研究となるとどの生物を用いて進めようかということが重要になります。植物の葉がいいか微細藻類がいいか。研究目的が炭素の動きを丁寧に調べることになりましたので、研究材料は微細藻類としました。実験の時間がかかって何回かサンプリングしても生物材料という視点では、培養液なら安定しているからというのが根本の理由でした。

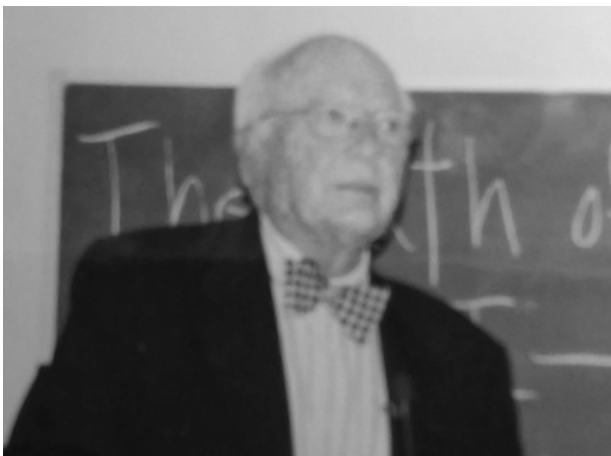


写真 1 ベンソン氏が日本で講演した時の写真

これこそ純粋な科学の思考なのかもしれません。微細藻類の中でも緑藻のクロレラにするか、シアノバクテリアにするかの選択はありましたが、まずは研究室での動きにしたがってクロレラで調べることにしました。

今は、大学を定年退職しましたので、RI の実験から離れて微細藻類の CO₂ 固定法開発に目を向けています。それは、化石燃料の代わりになりうるのか、どの程度利用が可能なのか、そのためには何が問題なのかを明らかにすることと思っています。微細藻類は既に食品添加や化粧品に利用されていますが、社会が期待している十分な量の CO₂ 削減の技術はまだ出来上がっていません。これまでに得られた様々な数値をもとにして、実用化の方向決めに急いでいるところです。いろいろな形で民間企業の方々のお手伝いもいただきましたが、この分野は大学の真理探究と民間企業の利益追求との違いが明確になり、環境問題解決の難しさを実感したところです。これ以上は RI から離れてしまいますので止めることにします。

3. 光合成研究における ¹⁴C の利用

RI 実験は、東京大学アイソトープ総合センターで開始しました。指導教官の宮地重遠先生がおられたことと、研究の設備がそろっていたからです。当時は各学部や研究所にそれぞれ管理区域が設けられていましたが、RI 総合センターはそのまとめ役でもあり、物理、化学、生物学の研究者が多く出入りしていました。

3.1 微細藻類の無機炭素濃縮機構

微細藻類やシアノバクテリアは、生育時の CO₂ 濃度条件により、光合成効率が変化することが明らかになり、クロレラ（パラクロレラ）等の微細藻類ではカーボニックアンヒドラーゼ（carbonic anhydrase, CA）が関係していることも見出されました。この研究はアメリカ、ドイツ、そして、日本の世界 3 か所の競争で進められましたが、生物の種による違いもあり、データの積上げそのものが重要な実験でした。今ではまとめて“CO₂ 濃縮機構”として知られています。

光合成は“CO₂ が細胞に取り込まれる”と考えて

いましたが、酵素にとっては CO_2 と HCO_3^- は別もので、光合成の中心的な働きをする RuBP カルボキシラーゼ / オキシゲナーゼは CO_2 を基質とし、C4 光合成で最初に働く PEP カルボキシラーゼは HCO_3^- と反応します。クロレラは C3 植物ですが、更に、通常の空気 (CO_2 が約 0.04%) で生育した細胞と、約 2% で生育した細胞で、 CO_2 に対する親和性が異なっています。原因は、低 CO_2 条件では CA が発現し、細胞内への炭素を取り込みやすくしているからです。 CO_2 と HCO_3^- は液中の pH によって量が大きく異なりますので、それを利用して ^{14}C の CO_2 や HCO_3^- を解析しました。反応液の pH だけでなく、 ^{12}C の CO_2 や HCO_3^- が関係しますので実験のポイントをつかむまでは注意が必要でした。

3.2 多くの生命科学研究からの視点

筆者の研究を伝えることから、更に広く見てみると、多くの研究領域の方々にとって RI は真理探究のための道具に過ぎないということが明らかかと思えます。放射線量の測定器があればデータが得られますので、便利な手法と言うこともできます。分子生物学の本には、例えば遺伝情報が核酸なのかタンパク質なのかすら分からなかった頃に ^3H で核酸と決められ、細胞からの物質放出に関してもタンパク質であることが明らかになった等、今の科学のもととなることに RI が重要であったことが述べられています。生命科学の基礎情報が RI によって得られてきたことを改めて理解していただければと思います。そこでは、RI は道具として使われたわけで、実験を行う時に放射性が明確であることが重要でした。原子そのものより化合物がポイントだったと言ってもいいのかもしれませんが。

また、カルビン-ベンソン回路ではペーパークロマトグラフィによる化合物の分離と β 線の測定器が使われましたが、今日では、様々なクロマトグラフィや質量分析器等の解析技術、測定機器の発達により、RI 以外の化合物も利用されるようになってきています。また、タンパク質や比較的分子量の高い物質分析がされていますので、研究の目標が RI から離れてきたかと思えます。以前は遺伝子の塩基配列決定にも RI が使用されていましたが、今日 RI を利用する研究者は少なくなっています。管理区域でしか利用できないというのも理由の 1 つなのかと思いま

す。生命科学でも放射線影響のように RI や放射線そのものが重要な研究領域もありますので、領域の違いが左右するところです。新たな生命現象や生態現象、新たな研究機器等が期待されているのかもしれませんが。

一方、基礎研究と違って、PET 利用や放射性医薬品等、医療、そして、家畜やペット等動物での診断や治療では、利用目的が広がり、更に必要とする人の数も多くなっていくと思います。

4. 放射線管理, 教育等の業務

自らの立場が変わるにつれて実験する機会は減り、教育、管理関係の仕事が増えていきました。また、利用者にとっても管理区域は必須で、誰かがしなければならぬのも事実です。筆者が所属していた応微研では、管理をされていた先生が定年を迎えられるということで、主任者試験を受けることになりました。試験の難しさは、来日中の外国人を放り出してまで受験勉強していたことを思い出します。実際の管理業務は担当して下さった方がいたので、たいへん助かりました。更に、ご褒美で外国へ行くチャンスを得ることができたのは、多くの方々のご理解があつてのことに違いありません。

今と将来の RI 利用は、関連する方々や社会の方々の安全を守っていかなければなりませんので、管理等では放射線の種類や状況、半減期等基礎的なことをもとに判断していくことになります。少ないとはいえ自然の中にも存在し、宇宙からも飛んできています。物理学・化学・生物学等すべての基礎学問の領域から診療や治療等生命に関係するまで、基礎から応用の広い分野が関係しています。

4.1 大学教育における RI 教育

東大での RI 利用と管理を経験し、海外そして応微研で研究を続けた後、水島昭二先生にご一緒して東京薬科大学の生命科学部という新しい学部に移りました。同大学では薬学部単独で既に管理区域で教育研究がなされており、生命科学部の研究室も利用させてもらうことになりました。生命科学部の学生に対する講義では、放射性物質の性質から製造、その利用に至るまでの広い視点と、第 1 種放射線取扱主任者試験に合格する人を作るようにという視点で

講義を行いました。放射線や RI の自然科学や測定、法令、更に人への影響も含めました。自らの主任者試験を思い出しながら自らも学ぶことが多かったと思います。薬学部での RI 教育は、放射性医薬品の利用には欠かせないことですので、今後も維持することが必須と思っています。

4.2 日本アイソトープ協会での委員

大学院以来、宮地重遠先生に勧められて協会会員となり、農学生物学部会に加わってきました。ライフサイエンス部会となり、唐木英明先生の後を継いで部会長を務めさせていただきました。その中で、食品の放射線照射による殺菌とその社会の理解を得ることの難しさや、馬や犬猫等の動物診療に関わる PET 利用、植物体内での放射性物質のイメージング等研究の発展と社会の理解や法令との関わり等印象に残るものでした。特に、下限数量以下の非密封 RI 取扱いに関するルール作りは、これまでの RI 利用法の考え方を変化させるものとして極めて重要でした。

これまでは、RI はどんなに少量でも使用したものは永遠に RI という考え方でした。そのため、以前は放射される線源と半減期によって核種が分類されていて、廃棄もすべて管理されていました。いまは、下限数量以下の規定により、規制値以下であれば放射性物質として扱わないようになりました。核種によってはその半減期を考慮して、また管理の形態も工夫して、社会の納得できる形で教育や研究に活用できれば素晴らしいところです。

しかし、下限数量以下であっても、試料をいくつか一緒にしてしまうと下限を超えてしまうようになりますので、廃棄の際には過去の状況も確認することが必要です。合計が下限数量を超えれば、正式に RI となることを認識しなければなりませんので、取扱い説明のルールでは、下限数量以下のものでも“RI”の名前を付けることとなりました。

放射線教育入門テキストも協会としてライフサイエンス分野編と医学・臨床分野編が作成されました。

図や写真の多い冊子ですので、講義や社会の方々へ有効利用できると思います。

2011 年の東日本大震災は大きな被害となりました。特に原子力発電所の事故に対しては避難された方々、環境汚染を心配な方々等、たいへん気の毒な思いをおかけしたと思います。また、多くの研究関係諸氏が影響に関する情報を得るために活動され、多くの情報が論文に出されています。大学の研究者は関連する領域の専門誌にその結果を発表しますが、こうした論文は広がりますが、10 年も経てば研究者自身次の世代に移っていきます。発表の時点では、最先端の研究として関心を持たれても、時がたてば過去のものとして次第に忘れられてしまいます。国等でまとめたものはありますが、学会誌に報告された多数の情報はまとめられているのかどうか気がかりなところです。

また、ライフサイエンス部会の先生方には、高校生教育の実施をされた方もありました。若い人たちが広くそして正しい知識を持つチャンスをこれまで以上に広げられればと思うところです。RI は自然科学の多方面に関係していますので、原理や製造から廃棄まで、そして、社会の人々の安全まで幅広く学ぶ機会を作ればと願うところです。

現在、各事業所で管理区域を維持しづらくなってきていると思います。国か自治体等の公的機関で共通の放射線施設が必須になると思われますので、大学や企業の方々が必要に応じて利用できる施設の拡充が重要になるかもしれません。

最後に、RI は研究においては素晴らしい道具でもあり危険なものでもあります。人の身体を考えれば、放射性医薬品として極めて重要なものでもあります。人は今後 RI をうまく使い、うまく生かしていくことで人類の宝にしてほしいと願っております。これまで筆者自身たいへん多くの方々にお世話になりましたこと、この場をお借りして心よりお礼申し上げます。

(東京薬科大学名誉教授)